

## 自然エネルギー複合利用住宅のエネルギー消費実態と ZEH 実現への課題

ENERGY CONSUMPTION OF HOUSES UTILIZING NATURAL ENERGY  
AND THE ISSUES INVOLVED IN REALIZING ZEH

小野寺 宏子\*, 須永 修通\*\*, 熊倉 永子\*\*\*, 中野 郁也\*\*\*\*, 盧 炫 佑\*\*\*\*\*

*Hiroko ONODERA, Nobuyuki SUNAGA, Eiko KUMAKURA,  
Ikuya NAKANO and Hyunwoo ROH*

In recent years, Japan and the rest of the world have been aspiring for the development of net zero energy housing (ZEH) to reduce greenhouse gas emissions. In this study, the actual energy consumption of high thermal performance houses with solar and natural energy utilization systems is clarified. These houses have small energy consumption (energy costs) and a comfortable living environment. In comparison to the design value of primary energy consumption, which is used for the ZEH assessment criterion in Japan, the actual measurement value is 17% lower than the design value. In order to achieve ZEH using a 3 kW photovoltaic power generation system, whose implementation is feasible on popular house types, the improvement in the building's thermal insulation and solar shading performance as well as the utilization of solar heating and hot-water systems is also needed.

**Keywords :** ZEH, Houses utilizing natural energy, Energy consumption, Design primary energy consumption

ZEH, 自然エネルギー利用住宅, エネルギー消費量, 設計一次エネルギー消費量,

## 1. はじめに

日本政府は、2030年度の温室効果ガス削減目標を2013年度比26%減としており、大幅な環境負荷低減が必要となっている。住宅については、2020年までに標準的な新築住宅で、また、2030年までに新築住宅の平均でZEH（ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス）の実現を目指す<sup>1)</sup>としている。しかし、ZEHは一般的な住宅と比較して建設費用が高くなるなどの理由から、まだ普及しているとは言い難い。ZEHの条件とも言える高断熱住宅の効果については、エネルギー消費量、温熱環境、間接的便益やその効果などの研究<sup>2)</sup>があり、2020年には新築住宅の省エネ基準適合が義務化されることから、高断熱化は進むと考えられる。しかし、現行の省エネ基準を満たすだけではZEHの実現には至らない。ZEHを実現させるためには、消費エネルギー以上の創エネルギーが必要となる。太陽光発電(PV)を搭載した高性能住宅について、川上らによる研究<sup>3)</sup>では平均5.9kWのPVを搭載した42棟の対象住宅のうち7棟(17%)がその他家電等の消費電力を含むZEHとなったことを報告している。消費量を上回る大容量のPVを搭載することができればZEHとすることは可能だが、都市部では大きな屋根面積を確保することが困難な場合も多い。住宅用太陽光発電システムの設置容量分布<sup>4)</sup>をみると、単価低減と効率

向上の影響が従来よりも大きめのシステムを導入する件数が増えており平均値は増加傾向にあるものの、容量帯別の設置件数を見ると新築住宅では3.0kW以上3.5kW未満の件数がとびぬけて多い。(2011年度データで新築の33%、2.5-3.0は9%、3.5-4.0は13%。)特に首都圏では設置件数は多いものの平均設備容量は小さい傾向にあり、ZEHを普及させるためには3kW程度の発電容量でZEHを実現することが求められる。その場合、何が必要なかを明らかにする必要がある。PVの他に太陽熱を利用した住宅のエネルギー消費実態として、塙らにより高効率給湯器を使用すれば3.8kWのPVでZEHとなる可能性がある実証住宅の例が報告されている<sup>5)</sup>が、実際に居住している自然エネルギーを複合的に利用した住宅を対象としたエネルギー消費実態の研究例はまだ少ない。

一方、政府が掲げるZEHの認定条件とされるZEHロードマップ検討委員会のZEH基準<sup>6)7)</sup>では、設計一次エネルギー消費量が判断の基準となる。設計一次エネルギー消費量と実際に居住した際のエネルギー消費量の比較は、高山らによる省エネ基準適合住宅についての報告がある<sup>8)9)</sup>が、まだ少なく、自然エネルギー利用を含めた住宅の研究例は見られない。

そこで本研究では、東京都都市整備局の長寿命環境配慮住宅モデ

\* 首都大学東京都市環境科学研究科建築学域 特任研究員

\*\* 首都大学東京都市環境科学研究科建築学域 教授・工博

\*\*\* 首都大学東京都市環境科学研究科建築学域 助教・工博

\*\*\*\* 独立行政法人都市再生機構 工修  
(当時 首都大学東京 博士前期課程学生)

\*\*\*\*\* OMソーラー(株) 取締役・技術部長・工博

Researcher, Dept. of Architecture, Tokyo Metropolitan University

Prof., Dept. of Architecture, Tokyo Metropolitan University, Dr.Eng.

Assist. Prof., Dept. of Architecture, Tokyo Metropolitan University, Dr.Eng.

Urban Renaissance Agency, M.Eng.

Director, R&amp;D Department, OM Solar Inc., Ph.D.

ル事業<sup>10)11)</sup>により建てられた高性能住宅を対象に、実際に居住した際のエネルギー消費量、CO<sub>2</sub>排出量、温熱環境等のデータなどから高断熱高气密かつ自然エネルギー複合利用の設備を備えた住宅におけるエネルギー消費実態を明らかにする。また、設計一次エネルギー消費量と実際のエネルギー消費量の比較を行い、それらのデータを含めてZEH実現への課題について検討する。なお、本報で示した結果の一部は、委託事業報告書<sup>10)11)</sup>、国際会議SBE16 Sydney<sup>12)</sup>および日本建築学会大会学術講演梗概集<sup>13)14)</sup>にて既に発表したものであるが、自給率や光熱水費、満足度等を合わせて報告する。また、経済産業省ZEHロードマップ検討委員会のZEH基準では住宅性能を評価するため、その他家電等の消費量を含まない空調・給湯・換気・照明設備のエネルギー消費量(以降、家電なしと表記)を対象としたネットゼロエネルギーをZEHと定義しているが、最終的にはその他家電等の消費量を含む総エネルギー消費量(以降、家電ありと表記)でのネットゼロエネルギーを達成することが望ましいため、本論文ではZEH(家電なし)とZEH(家電あり)の両方について検討する。

## 2. 調査概要

### 2.1 調査対象邸

2013年に東京西部に建てられた調査対象邸の外観とシステム図をFig.1、平面図をFig.2、概要をTable1に示す。対象邸は次世代省エネ基準を満たす2階建て戸建て住宅で、PVの他、太陽熱によって発電パネルおよび集熱面下で温められた空気を利用する太陽熱暖房・給湯システムを持ち、また、外気温度や設定室温によって夏季には屋根面の排熱や夜間の外気取入れを行うなど、自然エネルギーを複合利用する住宅である。全邸に平均2.97(2.69-3.13)kWの太陽光発電システム、空気集熱式太陽熱床暖房・給湯システム、HEMSを搭載している。平面プランはA、B1、B2、Cの4タイプあるが、延床面積は102.7~104.3㎡とほぼ同じである。B2タイプのみ、リビングが2階にある。16棟のうち、普段居住していない邸およびデータが十分に得られなかった邸を除いた12邸を対象とした。

### 2.2 調査内容

Table2に調査内容の概要を示す。エネルギー消費量については電気、ガス、水道の検針票データおよび灯油消費量の自己申告値を取得するとともに、HEMSを用いて15分ごとの太陽光発電量、売買電量、回路別使用電力量を測定した。室内温湿度については、全邸3ヶ所(居間、寝室、2Fホール等)にメモリー付温湿度計を設置し、15分間隔で測定した。また全邸に対し、入居2か月後および、2013年9月~2015年10月の間に、事前、冬、春、夏、事後の5回、住まい方や省エネ意識に関するアンケートを実施した。

## 3. 調査対象邸の建物性能

### 3.1 対象邸の設計一次エネルギー消費量

対象邸(12邸)は、Table1に示したように、延床面積102.7~104.3㎡のほぼ同様の建物仕様である。Table3に、対象邸と同じ仕様のモデルハウス(Aタイプ、人が居住していないため対象邸とはなっていない)について算出した、設計一次エネルギー消費量を示す。これは、国立研究開発法人建築研究所(協力:国土交通省国土技術政策総合研究所)が公開している「エネルギー消費性能計算プログラム(住宅版)Ver.2.1.1」<sup>15)</sup>を使用して算出した数値<sup>注1)</sup>であり、空気

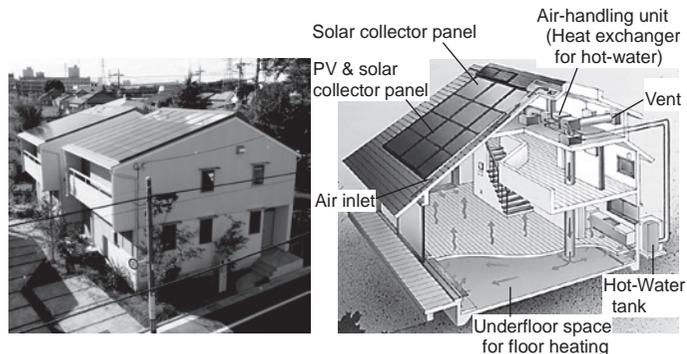


Fig.1 Target house appearance & system chart



Fig.2 Plan view (Type B1)

Table1 Outline of the houses

Establish (completion)	2013
Structure	Wooden skeleton/infill structure, 2 stories
Number of residents	Average 3.4 (2-5)
Air-conditioning system	Air-type solar floor heating system + Room air conditioner + Kerosene heater (1house), etc.
Hot-water system	Air-type solar water heating system + Gas water heater (Latent heat recovery-type) Hot-water tank: 300L
Total floor area	Average 103.9 m <sup>2</sup> (Type A,B1,B2: 104.3 m <sup>2</sup> , Type C:102.7 m <sup>2</sup> )
Heat loss coefficient	Q : Average 1.87 (1.85-1.88) W/m <sup>2</sup> K U <sub>A</sub> : 0.53 W/m <sup>2</sup> K (Type A)
Solar gain coefficient in summer	μ : Average 0.047 (0.043-0.052) η <sub>A</sub> : 2.1 (Type A)
Solar collector area	Average 10.5 (9.1-11.7) m <sup>2</sup>
PV capacity	Average 2.97 (2.69-3.13) kW
PV power generation efficiency	module: 12.8% (Cell 18.6%) / Single crystal silicon PV
Window specification	Low-e pair glass + plastic combined aluminum sash
Heat insulation material	Roof: phenol foam 90mm Wall: high-performance glass-wool 105mm Floor: phenol foam 60mm (Foundation: 90mm)

Table2 Content of the survey

Measurement period	2013.10~2015.9
Account record	Energy purchase amount and utility costs (Electricity, Gas, Kerosene, Water)
HEMS data	Electricity consumption, collected heat, system movement, etc.
Measuring instrument	Indoor temperature and humidity (Living room, bed room and 1F or 2F hall)
Advance questionnaire	Family structure, previous house, interest ,etc.
Questionnaire about how to live	Energy saving consciousness, used equipment, thermal comfort, energy saving behavior, etc.

集熱式太陽熱床暖房・給湯システムによる省エネ効果は考慮していない。なお、モデルハウスのUA値は0.53W/m<sup>2</sup>K、冷房期のηA値は2.1であり、平成28年の省エネ基準を満たしている。

モデルハウスの建物性能をZEHロードマップ検討委員会のZEH基準<sup>6)7)</sup>に照らし合わせると、

① 強化外皮基準：

UA値 0.53 < ZEH基準 0.6 < 省エネ基準 0.87 W/m<sup>2</sup>K

ηA値 2.1 < ZEH基準=省エネ基準 2.8

② 再生可能エネルギーを除き、基準一次エネルギー消費量から

20%以上削減(家電なし)：40.2/61.1=0.66より約34%削減

③ 再生可能エネルギーを導入：導入している

④ 再生可能エネルギーを加えて、基準一次エネルギー消費量から

100%以上の一次エネルギー消費量削減(家電なし)：

(40.2-27.2)/61.1=0.21より約79%削減

となった。④の基準は満たしていないものの75%以上の削減となっていることから、「Nearly ZEH」に該当する性能といえる。

### 3.2 室内温熱環境と満足度

Fig. 3に、12邸分のデータがそろっている2014年夏と2015年冬それぞれ2か月間のリビングの温度データを邸別に示す。不在時や就寝時を含む平均室温が夏は約26~28℃、冬は約18~20℃となっており、どの邸も良好な室内環境であることがわかる。B2タイプはリビングが2階にあるため、夏の最高室温が他邸より高くなっている。

また、Fig. 4に2014年4月から2015年3月の12邸の月別平均室温を室別に示す。エアコン等で冷暖房をしているリビングと階段ホール等非冷暖房室の温度差は、8月に0.9℃、1月に1.8℃であり、室間温度差はとても小さいことがわかる。

これらのことから、対象邸は建物全体を快適な温度に保つことができ、健康・安全性も高い住宅だということがわかる。

Fig. 5に、2015年10月に実施した事後アンケートにおける、2年目季節ごとの室内温熱環境に対する満足度を示す。どの季節も満足度がとても高く、夏の1邸を除き不快側の回答をした邸は無かった。夏に不満と回答をした1邸は2階にリビングがある邸であった。高断熱高気密住宅では、室内に熱が入ってしまうと抜けにくいので、夏季には日射遮蔽や熱だまりの排気等を意識して生活をした上で、適度なエアコン利用が必要だと考えられる。

以上より、対象邸は温熱環境性能の優れた住宅であるといえる。

## 4. 調査対象邸のエネルギー消費実態

### 4.1 エネルギー消費量

Fig. 6に、長期間 HEMS のデータが得られた対象邸8邸の平均エネルギー消費量と一般的な関東の戸建住宅(以降、一般邸と表記する。)のエネルギー消費量参考値を示す。対象邸の電力消費量はHEMSの電力消費量積算値を使用しており、太陽光発電自家消費分を含む。ガス消費量は、検針データより消費量を日割りにして月別に集計した値、灯油消費量は居住者の申告値を用いている。エネルギー消費量は一般邸の消費量と比較するため、二次エネルギーで示している。比較対象とした一般邸のデータには、経済産業省「平成24年度民生用エネルギー調査結果」<sup>16)</sup>より戸建住宅(関東地方)の電気・ガス・灯油使用量を用いた。既報<sup>14)</sup>において、エネルギー消費量は住まい方により邸差があることが明らかになっているが、本報では住宅性

Table3 Design primary energy

		Design primary energy [GJ]	Standard primary energy [GJ]
Primary energy consumption	Heating, air conditioning, ventilation, hot water supply, lighting	40.2	61.1
	Other (house electric appliances etc.)	20.5	20.5
	Reduction by solar power generation etc.	-12.2	
	Total	48.5	81.6
Reference value	Solar power generation	27.2	
	Selling power	15.0	

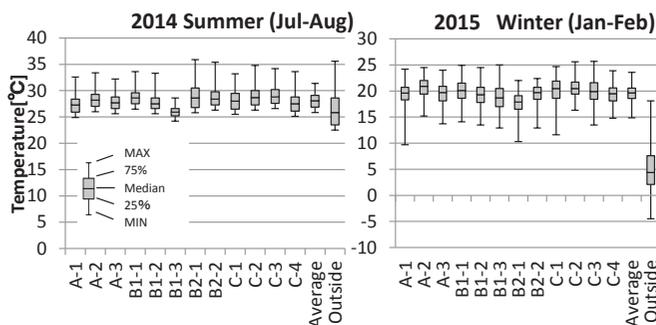


Fig.3 Room temperature (Left: summer, Right: winter)<sup>12)</sup>

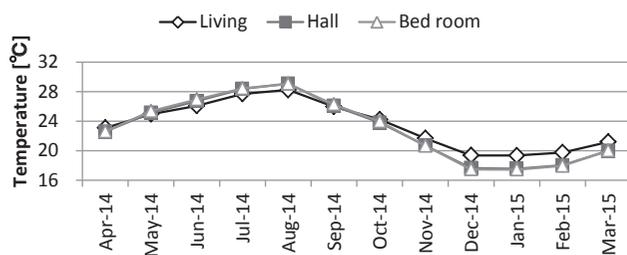


Fig.4 Temperature difference of each room

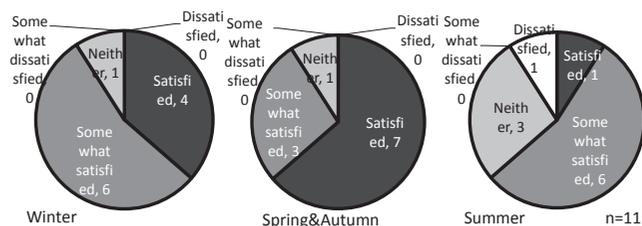


Fig.5 Satisfaction level of indoor thermal environment

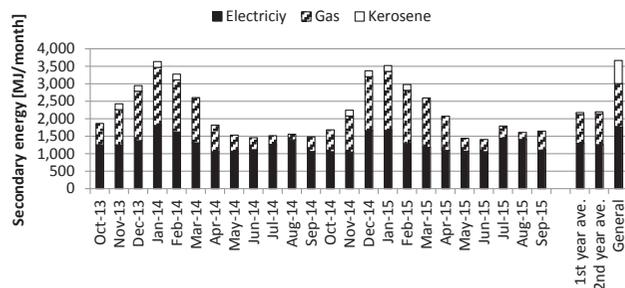


Fig.6 Energy consumption(Measurement values)

能に着目するため、主に平均値を用いて解析を行う。特に邸差の大きい自給率や集熱量については5章にて邸別データの解析も行う。

図より、対象邸のエネルギー消費量（自家消費分を含む）は一般邸の60%程度と少ない。また、一般的には夏季に見られるエネルギー消費の増加が見られず、特に夏季のガス消費量が少ない。これは太陽熱給湯の効果と考えられる。邸別のエネルギー消費量では、住まい方により多い邸と少ない邸で3倍程度の差があったが、多い邸でも一般邸の85%程度であり、建物性能によってエネルギー消費量を大幅に抑えられたと考えられる。

また、1年目（2013年10月～2014年9月）と2年目（2014年10月～2015年9月）を比較すると、2年目の冬は暖房の電力消費量が減り、夏は猛暑のため冷房の消費量が増えるなど多少の増減はあったものの、年間のエネルギー消費量平均値を見ると1年目は2,175MJ/month、2年目は2,195MJ/monthと差は小さい。2年目の方がデータ取得数が12邸と多いため、これ以降は2年目のデータを用いて解析を行う。

#### 4.2 光熱水費

Fig. 7に、対象邸12邸の2年目平均エネルギー消費量を、一般邸と比較するため二次エネルギー量で示す。対象邸のエネルギー消費量には、検針票のデータを用いており、電力には太陽光発電の自家消費分を含まない。また、Fig. 8に12邸が2年目に実際に支払った光熱水費の平均を一般邸と比較して示す。一般邸の光熱費は、Fig. 7に示した消費量をもとに2014年10月時点の料金<sup>注2)</sup>にて試算した推定値である。一般邸の水道代は、東京都水道局「平成24年度生活用水等実態調査」より3人世帯の使用水量を用いて算出した。

Fig. 7より、対象邸の購入エネルギー量は一般邸の約50%であることがわかる。Fig. 8より対象邸の月当たり光熱水費の合計は、一般邸と比較すると1万1千円ほど安い。また、売電代として入ってきた金額を差し引いた正味の光熱水費は約8千円であり、一般邸の推定値と比べると月当たり約1万8千円、年間にするると約22万3千円ほど安いことがわかる。ZEHとするためには、高断熱化やPV設置など建物や設備のインシヤルコストがかかるため、ランニングコストとのバランスを考えなくてはならない。LCCO<sub>2</sub>などの研究もされているが、居住者にとってはCO<sub>2</sub>排出量やエネルギー消費量よりも光熱水費の方が省エネの効果を判断しやすい<sup>10)</sup>と考えられるため、高性能住宅ではランニングコストが大幅に削減できることを、このような具体的な数値で示すことができれば、ZEH普及につながると考えられる。

#### 4.3 CO<sub>2</sub>削減量

Fig. 7に示した、2年目エネルギー消費量をもとに算出した年間のCO<sub>2</sub>排出量をFig. 9に、算出に使用した実排出係数をTable4に示す。太陽光発電売電分をマイナスのCO<sub>2</sub>排出量とすると、対象邸のCO<sub>2</sub>排出量は一般邸と比較して76%減となった。このことから、高性能邸における温室効果ガス削減効果が大いことは明らかである。

### 5. 太陽エネルギー利用について

#### 5.1 対象邸の太陽光発電

Fig. 10に、対象邸2年目のエネルギー消費量、発電量、及び太陽光発電による自給率を示す。対象邸は間取りが違うA、B1、B2、Cの4つのタイプがあるため、タイプ別に番号をふった。電気のエネルギー消費量及び発電量には、HEMSデータより自家消費量を含む電

力量を、ガス消費量には検針票データより消費量を日割りにして月別に集計した値を、灯油消費量は居住者の申告値を用いて、二次エネルギー量で示した。図より、エネルギー消費量および自給率は邸により大きく差がある事がわかる。2人暮らしで給湯使用が少ない邸(B1-1)や、ペットを飼っているためエアコン使用が多くなりがちな邸(B1-3、C-2)、家電機器が多くパソコンをつけっぱなしにすることが多い邸(C-2)などは、住まい方による影響が大いと考えられる。しかし、対象邸の中で一番エネルギー消費量が多い邸でも一般邸の平均値に比べると消費量は約85%であった。住宅性能が良いと、エネルギー消費量が多くなりがちな住まい方をする邸においても一般邸の平均値よりエネルギー消費量が少なくなることが確認できた。

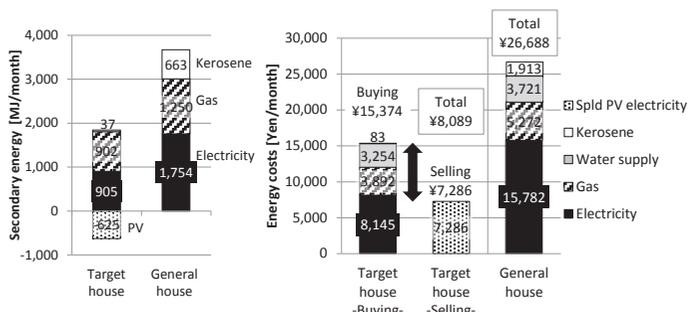


Fig.7 Energy consumption (Excluding self consumption) Fig.8 Energy costs<sup>11)</sup>

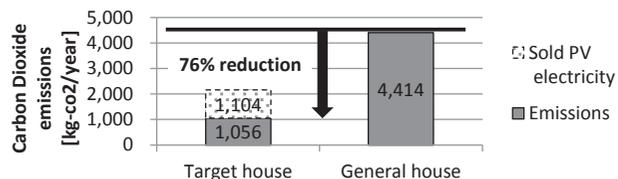


Fig.9 Carbon dioxide emissions (Ave. of 12houses)<sup>11)</sup>

Table4 Actual emission factor

	Actual emission factor	
Electricity	0.53 kg-CO <sub>2</sub> /kWh	Tokyo Electric Power Company, H25 year number
City Gas	2.21 kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> N	Tokyo Gas
LP Gas	0.059 kg-CO <sub>2</sub> /MJ	Propane gas 70wt%, Butane gas 30wt%
Kerosene	2.489 kg-CO <sub>2</sub> /L	From materials of Ministry of the Environment

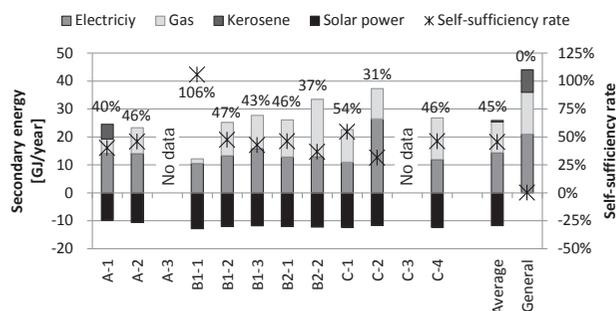


Fig.10 Secondary energy consumption and self-sufficiency rate

対象邸の平均値では総エネルギー消費量（家電あり）が一般邸の59%であり、PVによる自給率（二次エネルギー換算）は45%であった。（一次エネルギーで算出すると、自給率は63%となる。）ZEH（家電あり）を達成するには、平均であと14GJ/yearの省エネが必要となる。より一層の断熱強化や、創エネの拡大とともに、家電機器の高効率化、居住者の省エネ行動等、暮らし方の検討も必要となる。

## 5.2 対象邸の太陽熱利用

Fig. 11 に冬季(2015年1月)、夏季(2015年8月)の空気集熱式太陽熱床暖房給湯システムの邸別集熱量を示す。屋根面にて集熱した熱は、季節モードおよび設定室温によって床暖房または給湯(貯湯槽は300L)に使用される。冬季には太陽熱を暖房に使用する邸が多いが、暖房の設定温度を低めに設定している邸では、給湯にも使用されている。夏季モードでは、集熱した熱は給湯のみに使用され、余った熱はそのまま排気される(屋根面の排熱になる)。B1-3およびB2-2の2邸については、センサーの不具合があったため、集熱量が少なかった。夏季の集熱量は邸ごとにばらつきが見られたが、集熱量が少なかった邸の貯湯槽の温度が高かったことが確認できており、使用量に対して十分集熱されていたことがわかった。夏季アンケートにおいて「ガス給湯器はほとんど使用していない」というような記述もいくつか見られ、太陽熱による給湯の省エネ効果は高いと考えられる。また既報<sup>13)</sup>において、冬季に補助暖房を使用せず空気集熱式床暖房のみを運転した場合、日中の室内温度が20℃程度に保たれたこと、太陽熱暖房の集熱量が多いと1階のエアコン電力消費量が抑えられる傾向があることなどが明らかになっている。このように太陽熱暖房給湯システムが冬季には暖房の、夏季には給湯の省エネに貢献していることは明らかであり、太陽熱利用はZEH計画時に取り入れるべき省エネ手法と考えられる。特に、日本の家庭部門における用途別エネルギーは給湯が一番多く全国平均で27.8%(2014年度のデータ<sup>17)</sup>)を占めていることから、太陽熱により給湯のエネルギー消費量を直接減らせることの意義は大きいと言える。

## 5.3 太陽エネルギー利用の満足度

Fig. 12 に、対象邸12邸が入居2か月後アンケートにおいて、購入前に関心のあった項目と入居後に実際に住んでみて良いと思った項目についての回答結果を示す。入居後には「太陽光発電」と「太陽熱による暖房、給湯」を良かった項目として挙げた邸が多く、満足度が高い設備だということがわかる。特に「太陽熱による暖房、給湯」は光熱費が安くなるだけでなく、「晴れた日は暖房機器を使用しなくても暖かい」「給湯器を使用しなくてもお湯が使える」「冬でも水が冷たくない」など、太陽熱利用による快適性を実感できることが満足につながっていると考えられる。また、「エネルギーの見える化」についても、購入前より入居後に良いと回答した邸が増えている。ZEHには、このように居住者が設置して良かったと思前向きに省エネに取り組める設備の導入を推奨したい。

## 6. 設計一次エネルギー消費量との比較

### 6.1 設計値と実測値の比較

対象邸12邸の自家消費量を含む総エネルギー消費量（家電あり）を一次エネルギー消費量に換算し、基準一次エネルギーおよび設計一次エネルギー（Table3）と比較してFig. 13に示す。総エネルギー消費量（家電あり）は、設計一次エネルギーが60.7GJ/yearである

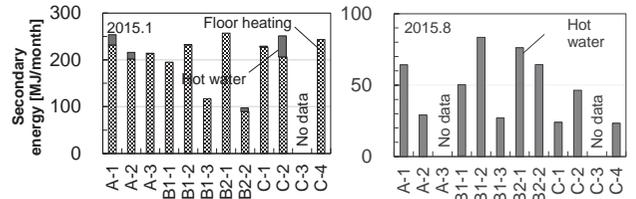


Fig. 11 Solar heat collection amount (Left:winter, Right:summer)<sup>12)</sup>

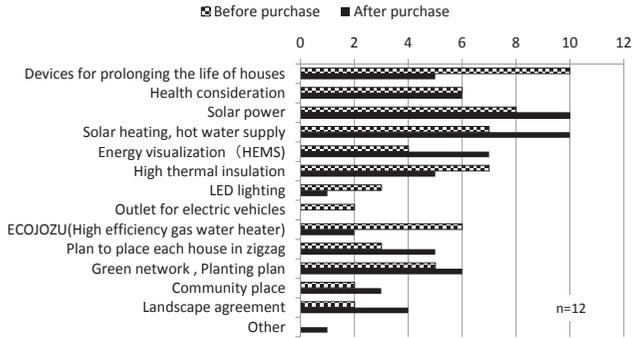


Fig. 12 Items that seem to be good (Questionnaire)

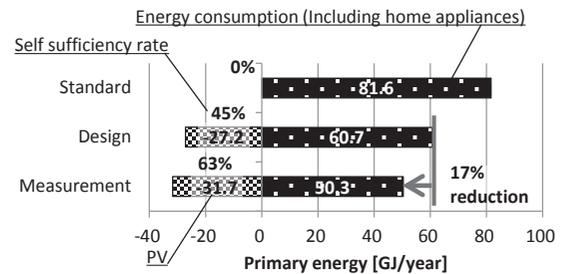


Fig. 13 Energy consumption (Including home appliances)

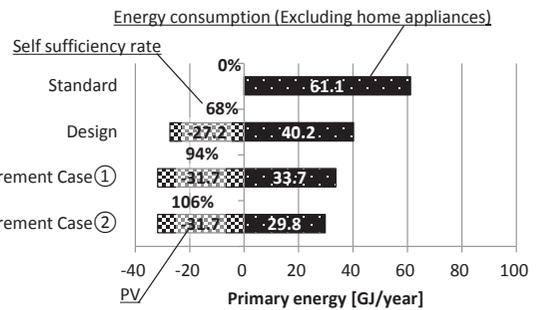


Fig. 14 Energy consumption (Excluding home appliances)

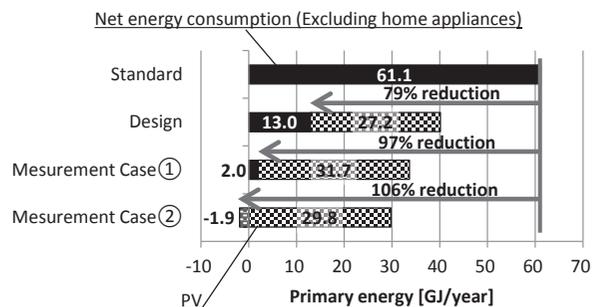


Fig. 15 Net energy consumption

のに対し、対象邸の実測値は50.3 GJ/yearであり、設計値より実測値の方が約17%少なかった。対象邸居住者の省エネ意識が高いことにもよるが、空気集熱式太陽熱床暖房給湯システムを使用していることによるエネルギー消費量削減効果も大きいと考えられる。設計一次エネルギーの算出には太陽熱利用による省エネ効果が考慮されていない<sup>注1)</sup>ため、実測値との差が生じたと考えられる。

太陽光発電量は、設計一次エネルギーが27.2 GJ/yearだったのに対し、対象邸は31.7 GJ/yearであり、設計値より実測値の方が約17%多かった。また、総エネルギー消費量(家電あり)に対する太陽光発電の自給率(家電あり)は、設計値で45%、実測値で63%であった。

これらより、自然エネルギー複合利用住宅に実際に居住した際のエネルギー消費量は、設計一次エネルギーを下回り、自給率も高くなる可能性があるといえる。今後、より多様な自然エネルギー利用までを計算の対象とすることが可能となれば、それらの省エネ手法の普及が進み、ZEHとなる住宅が増加すると考えられる。

## 6.2 ZEH 基準による比較

対象邸のエネルギー消費量(家電なし)を基準および設計一次エネルギー(Table3)と比較してFig.14に示す。また、ZEHロードマップ検討委員会のZEH基準に合わせ、エネルギー消費量(家電なし)から太陽光発電量を差し引いた正味のエネルギー消費量を算出し、Fig.15に示す。対象邸のその他家電等のみの消費電力量は測定できていないため、ここでは、その他家電等の消費電力量について、ケース①設計一次エネルギーと同様の割合、総エネルギー消費量の33%(16.6 GJ/year)と仮定した場合、ケース②設計一次エネルギーと同様の消費量20.5 GJ/yearと仮定した場合、の2パターンで算出した。Fig.14より、エネルギー消費量(家電なし)に対する太陽光発電の自給率(家電なし)は、設計値で68%、実測値のケース①で94%、ケース②で106%であり、実測値ではほぼゼロエネルギー(家電なし)を達成できていたといえる。また、Fig.15に示すように、太陽光発電量を差し引いた正味の年間エネルギー消費量(家電なし)は、設計値が13.0 GJ/year、実測値ケース①は2.0 GJ/year、ケース②は-1.9 GJ/yearとなった。正味の年間エネルギー消費量(家電なし)は、基準値の61.1 GJ/yearに対して、設計値で79%の削減、実測値ケース①で97%、ケース②で103%の削減となった。実測値ではほぼZEHとなっていたが、対象邸がZEH基準においてZEH(家電なし)と認定されるためには、設計値であと13.0 GJ/yearの削減が必要である。

ZEH実現のためには、まず屋根や窓の断熱強化等、更なる省エネが重要となるが、太陽熱利用などの手法も効果的と考えられるため、より多様な自然エネルギー利用による省エネ手法の普及が望まれる。

## 7. まとめ

本研究では、高气密高断熱かつ自然エネルギー複合利用設備を備えた住宅のエネルギー消費実態を明らかにした。また、ZEHの判断基準となる設計一次エネルギー消費量との比較も行い、ZEH実現への課題を検討した。以下に得られた主な知見を示す。

### 1) 対象邸の建物性能及びエネルギー消費実態について

・対象邸は、ZEHロードマップ検討委員会のZEH基準において、Nearly ZEH(家電なし)に位置づけられる建物性能を有している。

- ・室内環境は良好で、暖房室と非暖房室の室内温度平均値の温度差は、夏に0.9℃、冬に1.8℃と小さく、快適性、健康・安全性も高い住宅である。
  - ・対象邸の総エネルギー消費量(家電あり)は一般的な関東戸建住宅<sup>16)</sup>の約60%、購入エネルギー量は約50%であった。
  - ・対象邸の光熱水費を一般的な戸建住宅の推定値と比べると、月当たり約1万8千円、年間にすると約22万3千円程度安い。ランニングコスト削減の具体的な数値を示すことは、ZEH普及につながると考えられる。
  - ・エネルギー消費によるCO<sub>2</sub>排出量は、一般的な関東戸建住宅<sup>16)</sup>と比較して76%削減できており、温室効果ガス削減の効果は大きい。
  - ・平均2.97kWのPVによる総エネルギー消費量(家電あり)に対する自給率(一次エネルギー換算)は63%であった。エネルギー消費量(家電なし)に対しては、ケース①(その他家電等を総エネルギー消費量の33%と仮定した場合)で94%、ケース②(その他家電等を20.5 GJと仮定した場合)で106%と推定され、実際の対象邸ではほぼゼロエネルギー(家電なし)を達成できているといえる。
  - ・ゼロエネルギー(家電あり)とするためには、より一層の断熱強化等、省エネ・創エネの拡大とともに、家電機器の高効率化、居住者の省エネ行動等、暮らし方の検討も必要となる。
  - ・アンケートより、太陽光発電、太陽熱利用はともに、入居前よりも入居後に良かった項目として挙げた邸が多く、実際に使用してみて満足度が高くなる設備であることがわかった。日本ではエネルギー消費量に占める給湯の割合が高いことから、太陽熱利用の給湯設備はZEHに取り入れるべき手法と言える。
- ### 2) 設計一次エネルギー消費量との比較から
- ・対象邸のエネルギー消費量実測値(家電あり)は、設計一次エネルギー消費量(家電あり)に対して17%少なかった。住まい方などによる影響もあるが、現在の計算方法では、空気集熱式太陽熱床暖房給湯システムによる削減効果が考慮されないため、大きな差が生じたと考えられる。様々な省エネ手法を設計一次エネルギー算出の際に評価することが可能になれば、それらの省エネ手法さらにはZEHの普及につながると考えられる。
  - ・ZEH基準により、エネルギー消費量(家電なし)から太陽光発電分を差し引いた正味のエネルギー消費量(家電なし)を算出すると、基準値(家電なし)に対して、設計値では79%減だが、実測値ケース①は97%減、ケース②は103%減、つまりほぼZEH達成といえる。

以上より、自然エネルギー複合利用設備を備えた対象邸はNearly ZEH(家電なし)に位置づけられるが、実際のエネルギー消費量は設計値より少なく、快適かつ光熱水費が少ない住宅であることが確認できた。総エネルギー消費量(家電あり)に対する自給率は63%だが、エネルギー消費量(家電なし)に対してはほぼ100%自給できていたことがわかった。都市部の住宅にも設置可能と思われる3kW程度のPVでZEH(家電あり)とするためには、断熱強化とともに太陽熱利用が必要と考えられ、太陽光発電と太陽熱利用の併用方法のバランスについて検討する必要がある。また、創エネ拡大や家電機器の高効率化、住まい手による省エネ行動の促進も重要となる。

## 謝辞

本研究の一部は東京都都市整備局「長寿命環境配慮住宅モデル事業」の一環として実施いたしました。実測・アンケートにご協力いただいた居住者のみなさま、東京都都市整備局、相羽建設株式会社、野沢正光建築工房、OMソーラー株式会社の方々に厚く感謝申し上げます。

## 注

- 注1) 冷暖房は主たる居室のみとし、ルームエアコン(区分い)を使用。給湯はガス潜熱回収型給湯器を使用。平成28年の省エネ基準一次エネルギー消費量算定方法において空気集熱式太陽熱床暖房給湯システムは評価の対象となっていないため、対象邸の設計一次エネルギー消費量算出には、このシステムによる省エネルギーを考慮していない。
- 注2) 東京電力、東京ガスの2014年10月分の料金、灯油は石油情報センター小売店頭価格2014年10月の価格106.0円/Lを使用して算出した。なお、都市ガスとLPガスの消費量を合わせてガス消費量とした。

## 参考文献

- 1) Energy Innovation Strategy, The Ministry of Economy, Trade and Industry, 2016.4.18  
エネルギー革新戦略, 経済産業省, 2016.4.18
- 2) Ikaga T, et al.: Evaluation of Investment in Residential Thermal Insulation Considering Non-energy Benefits Delivered by Health, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 76, No. 666, pp. 735-740, 2011.8  
伊香賀俊治, ほか5名: 健康維持がもたらす間接的便益(NEB)を考慮した住宅断熱の投資評価, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 76, No. 666, pp. 735-740, 2011.8
- 3) Kawakami Y, Sunaga N, et al.: Study on the Energy-Saving Behavior in Home Part 2. Examination of characteristic and reduction potential of the energy consumption, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering-II, pp. 589-590, 2014  
川上祐司, 須永修通, 小野寺宏子, ほか3名: 住宅における省エネルギー行動に関する研究2. エネルギー消費の特性と削減ポテンシャルの検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-II, pp. 589-590, 2014
- 4) Survey on the spread of solar power generation system etc. (Commissioned survey by Agency for Natural Resources and Energy), RTS Corporation, 2013.2  
H24年度 新エネルギー等導入促進基礎調査 太陽光発電システム等の普及動向に関する調査(経済産業省資源エネルギー庁委託調査), 株式会社資源総合システム, 2013.2
- 5) Hanawa F, Morikawa T: Development and Performance Evaluation of Natural Energy Utilizing House (Part 2) Energy saving/creating ability and dwelling ability of well-insulated and air-tight house with an air circulation type simple solar heat utilizing system and a photovoltaic power generation system, Solar energy Vol. 37, No. 2, pp. 31-39, 2011.3.  
埴 藤徳, 森川 岳: 自然エネルギー利用住宅の開発と性能評価(その2) 簡易型空気循環式太陽熱利用システムと太陽光発電システムを備えた高気密・高断熱住宅の省/創エネルギー性能と居住性能, 太陽エネルギー-Vol. 37, No. 2, pp. 31-39, 2011.3.
- 6) Definition of ZEH and future measures proposed by the ZEH Roadmap Examination Committee, Agency for Natural Resources and Energy, Ministry of Economy, Trade and Industry, 2015.12  
ZEH普及に向けて~これからの施策展開~ZEHロードマップ検討委員会におけるZEHの定義・今後の施策など, 経済産業省 資源エネルギー庁 省エネルギー対策課, 2015.12
- 7) Summary of ZEH Roadmap Examination Committee, Agency for Natural Resources and Energy, Ministry of Economy, Trade and Industry, 2015.12  
ZEHロードマップ検討委員会 とりまとめ, 経済産業省 資源エネルギー庁 省エネルギー対策課, 2015.12

- 8) Takayama A, et al.: Primary Energy Consumption in Homes that Comply with Energy Efficiency Standards Part 1 Survey Methods and Results Related to Primary Energy Consumption, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering-II, pp. 1353-1354, 2015  
高山 あずさ, ほか6名: 省エネルギー基準適合住宅における一次エネルギー消費の実態 その1 調査方法と一次エネルギー消費の実態, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-II, pp. 1353-1354, 2015
- 9) Takayama A, et al.: Primary Energy Consumption in Homes that Comply with Energy Efficiency Standards Part 3 Primary Energy Consumption in Cold Region and Hot-Humid Region, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering-II, pp. 1229-1230, 2016  
高山 あずさ, ほか6名: 省エネルギー基準適合住宅における一次エネルギー消費の実態 その3 寒冷地と蒸暑地における一次エネルギー消費の実態, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-II, pp. 1229-1230, 2016
- 10) Survey research report on energy saving・CO2 reduction effect on lifespan environment conscious housing model project commissioned by the Bureau of Urban development Tokyo Metropolitan Government, Sunaga laboratory Dept. of Architecture Tokyo Metropolitan University, 2016.9  
東京都都市整備局委託事業 長寿命環境配慮住宅モデル事業に係る省エネルギー・省CO2削減効果に関する調査研究報告書, 首都大学東京 都市環境科学研究科 建築学域 須永研究室, 2016.9
- 11) Abstract of Survey research report  
[http://www.toshiseibi.metro.tokyo.jp/juutaku\\_seisaku/eco.html](http://www.toshiseibi.metro.tokyo.jp/juutaku_seisaku/eco.html) (accessed 2017.6.10)  
光熱費が安い快適なエコ住宅を目指そう —長寿命環境配慮住宅モデル事業報告書の概要—, 東京都都市整備局(2017.6.10参照)
- 12) Sunaga N, Onodera H, Kumakura E, Nakano I and Roh H: Solar Town Fucha - Plan and Performance -, International High-Performance Built Environment Conference - A Sustainable Built Environment Conference 2016 Series (SBE16 Sydney)-, Procedia Engineering, Volume 180, pp1433-1442, 2017
- 13) Nakano I, Sunaga N, et al.: Energy consumption of solar house with many functions in West Tokyo, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering-II, pp. 505-506, 2015  
中野郁也, 須永修通, 熊倉永子, 小野寺宏子, 盧炫佑: 東京西部に建つ多機能ソーラーハウスにおけるエネルギー消費実態, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-II, pp. 505-506, 2015
- 14) Onodera H, Sunaga N, et al.: Energy consumption and living style of solar house with many functions, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering-II, pp. 525-526, 2016  
小野寺宏子, 須永修通, 熊倉永子, 中野郁也, 盧炫佑: 多機能ソーラーハウスにおけるエネルギー消費量と住まい方, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-II, pp. 525-526, 2016
- 15) Energy consumption performance calculation program (Housing version) Ver. 2.1.1, Building Research Institute  
<http://house.app.lowenergy.jp/> (accessed 2017.1.19)  
エネルギー消費性能計算プログラム(住宅版)Ver. 2.1.1, 国立研究開発法人建築研究所 (2017.1.19参照)
- 16) FY2012 Energy Survey Results (Commissioned survey by Agency for Natural Resources and Energy), Mitsubishi Research Institute, Inc., p. 39 Fig. 2-1, 2013.3  
資源・エネルギー庁委託調査「平成24年度民生用エネルギー調査結果」, 株式会社三菱総合研究所, p. 39 図2-1, 2013.3
- 17) Outline of the FY2015 Annual Report on Energy (Energy White Paper 2016), Agency for Natural Resources and Energy, 2016.5  
平成27年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書2016), 資源エネルギー庁, 2016.5

# ENERGY CONSUMPTION OF HOUSES UTILIZING NATURAL ENERGY AND THE ISSUES INVOLVED IN REALIZING ZEH

*Hiroko ONODERA* \*, *Nobuyuki SUNAGA* \*\*, *Eiko KUMAKURA* \*\*\*,  
*Ikuya NAKANO* \*\*\*\* and *Hyunwoo ROH* \*\*\*\*\*

\* Researcher, Dept. of Architecture, Tokyo Metropolitan University

\*\* Prof., Dept. of Architecture, Tokyo Metropolitan University, Dr.Eng.

\*\*\* Assist. Prof., Dept. of Architecture, Tokyo Metropolitan University, Dr.Eng.

\*\*\*\* Urban Renaissance Agency, M.Eng.

\*\*\*\*\* Director, R&D Department, OM Solar Inc., Ph.D.

In recent years, Japan and the rest of the world have been aspiring for the development of net zero energy housing (ZEH) to reduce greenhouse gas emissions. Toward that end, it is required that the conditions necessary to achieve ZEH are clarified with regard to electricity generation using a 3-kW photovoltaic (PV) system; because the implementation of PV systems is feasible on popular house types in the crowded Japanese cities. In this study, we examined the actual energy consumption, carbon dioxide emissions, and thermal environment of high thermal performance houses with solar and natural energy utilization systems. Additionally, we compared actual measurement values to the design values of primary energy consumption that is used for the ZEH assessment criterion in Japan. The issues involved in achieving ZEH are also discussed.

The major findings of this study are as follows:

- The examined houses exhibit “nearly ZEH” performance according to Japan’s ZEH assessment criterion.
- The total energy consumption of the examined houses amounts to approximately 60% of an ordinary house’s total energy consumption; purchased energy amounts to approximately 50% of an ordinary house’s purchased energy.
- The examined houses’ reduction rate of CO<sub>2</sub> emissions amounts to over 75% reduction. Thus, it was observed that greenhouse gas emissions are greatly reduced.
- The energy costs of examined houses are lesser by approximately ¥223,000 per year (¥18,000 per month) compared to the energy costs of ordinary houses. Demonstrating the cost efficiency of energy-efficient housing contributes to the spread of ZEH.
- After accounting for domestic use including home appliances, the energy produced from solar power using a PV system with a capacity of approximately 3 kW, results to approximately 63% of energy self-sufficiency. To achieve ZEH (including their home appliances), additional energy-saving measures are required, such as improving thermal insulation, switching to high-efficiency appliances, and residents choosing more energy-efficient life-styles. Additionally, energy producing measures such as solar heating and hot-water systems should also be considered.
- Energy self-sufficiency with regard to total energy consumption excluding home appliances was calculated at 94% (or 106%), assuming that the home appliance use accounts for 33% of total energy consumption (or 20.5 GJ per year), which is similar to the design value of primary energy consumption. This means that the examined houses are almost achieved ZEH (excluding their home appliances).
- The actual measurement value of total energy consumption for the examined houses is approximately 83% of the primary energy consumption design value. This difference results from the non-consideration of the contribution of solar heating and hot-water system toward the design value. If the calculation method of primary energy consumption considers various additional energy-saving measures, the popularity of energy-saving measures as well as the popularity of ZEH can increase.

(2017年4月10日原稿受理, 2017年9月7日採用決定)