

屋根全面太陽光発電システムを設けた 省エネルギー住宅の環境評価

Environmental Evaluation of Low Energy House with its Roof Totally
Covered by Photo Voltaic Modules

太田 勇 *¹
Isamu OHTA

長野 克則 *²
Katsunori NAGANO

Abstract

Annual energy consumption of highly insulated and passively designed house with high-performance air conditioners, hot water supply system, cooking heater, and lighting system can be reduced than annual energy generated by the roof-integrated photo voltaic system. Annual energy balance, defined as the difference between energy consumption and energy production in the house, is evaluated with several simulation methods. Actual energy data of 15 houses are shown. Life cycle analysis is also performed to evaluate the environmental load and cost effect. Calculation results show that initially required energy increase can be recovered within 1.3 to 1.4 years. Although photo voltaic system facing north generates small amount of electricity, low energy house with photo voltaic system covering not only south side but also north side of the roof has advantage in life cycle cost mainly because of reduction of maintenance cost.

キーワード：省エネルギー住宅、太陽光発電システム、環境評価、実態調査

Key Words : Low energy house, Photo Voltaic system, Environmental evaluation, Actual result investigation

はじめに

太陽光発電システムが一般の住宅用として開発されてすでに10年以上経過した。自然エネルギー利用による発電は、CO₂排出削減に寄与すると期待され、国の補助制度が平成6年に始まり、平成16年度末までの累計で223,932棟の住宅に太陽光発電システムが設置されている¹⁾。国内の総発電容量は79.5 kWになり、これに伴うCO₂の排出削減効果は29万 ton-CO₂/年になるが、温室効果ガス総排出量の0.02%、家庭部門だけに限っても0.17%に過ぎない。

一方で住宅のエネルギー消費に伴うCO₂排出は増え続けており、2004年の段階で1990年比30.0%増加している。京都議定書で日本が締結した温暖化ガス6%減を実現するためには、住宅の一層の省エネルギー化が必要である。

住宅の省エネルギーに寄与する設備として太陽光発電システムを自宅に設置している居住者は、コンポストや雨水利用設備なども合わせて設置するケースが多く見られ²⁾、太陽光発電は環境

問題に対する意識の向上にも寄与すると考えられることから³⁾、設備としての省エネルギー性以上の効果も期待できるが、エネルギーコストの低減を期待する割合もまた高く、住宅性能の総合的な設計が重要となる。

住宅の断熱性を高め、冬季の日射取得性と夏季の日射遮蔽性、通風性などに配慮することで暖冷房負荷を抑え、効率のよい空調・給湯・厨房機器を組み合わせることでエネルギー消費を削減し、それでも必要となるエネルギーは屋根全面に葺いた太陽光発電システムによる電力で賄うことで、年間の消費と発電の収支をゼロにすることを目指して設計される全電化住宅がある（以下ゼロ・エネルギー仕様住宅、ゼロ・エネルギー仕様⁴⁾）。ゼロ・エネルギー仕様住宅は、一般的な住宅と比べてエネルギー消費量が少ないが、夜間や雨天時など、住宅の消費量が太陽光発電の発電量を上回る場合には系統から電力を購入し、逆に太陽光発電の発電量が住宅の消費量を上回る場合には余剰電力を系統に逆潮することで発電電力を最大限活用し、年間のエネルギー収支をゼロにすることができる。

本報では、単なる実験棟ではなく、多くの販売実績のあるゼロ・エネルギー仕様住宅の、省エネルギー効果と環境影響について報告する。

*1 (株)ミサワホーム総合研究所研究員
(〒168-8533 東京都杉並区高井戸西1-1-19)
e-mail: Isamu_Ohta@home.misawa.co.jp

*2 北海道大学大学院助教授
(原稿受付：2006年1月24日)

1. ゼロ・エネルギー仕様住宅の概要

エネルギーの使用の合理化に関する法律に基づく省エネルギー地域区分Ⅳ地域に建設される住宅プランの一例を Fig. 1 に示す。延床面積 156 m² の総二階の住宅は、入隅、出隅を極力排した計画とすることで熱損失が少なくなるように配慮されている。

玄関ドアを除く全開口部 (32.2 m²) の、59.6 % (19.2 m²) を南面に配置することで冬季の日射取得量を増やし、軒の出と

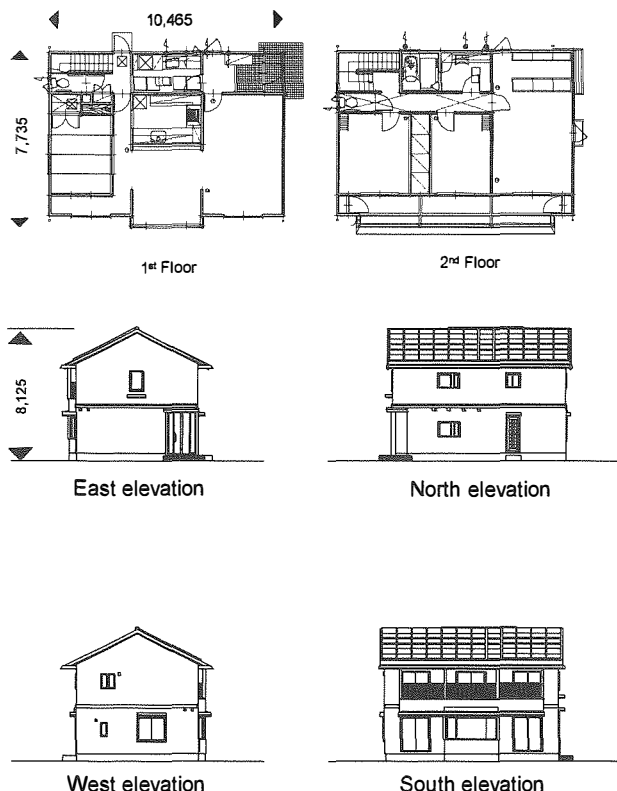


Fig. 1 Calculated Zero Energy House

Table 1 Insulation specifications

	Base spec.	Zero energy spec.
Ceiling	RW40 kg/m ³ 200 mm (GW16 kg/m ³ 200 mm)	RW40 kg/m ³ 200 mm (GW16 kg/m ³ 200 mm)
Wall	GW8 kg/m ³ 75 mm (GW16 kg/m ³ 100 mm)	GW16 kg/m ³ 75 mm (GW16 kg/m ³ 100 mm)
Floor	GW8 kg/m ³ 75 mm (GW16 kg/m ³ 100 mm)	GW16 kg/m ³ 75 mm (GW16 kg/m ³ 100 mm)
Window	Aluminum-plastic sash double glazed window (Plastic sash Low-E double glazed window with Argon gas)	Aluminum-plastic sash Low-E double glazed window (Plastic sash Low-E double glazed window with Argon gas)
Vent.	Heat exchange type duct system (Heat exchange coefficient 70 %)	Heat exchange type duct system (Heat exchange coefficient 70 %)

GW : Glass wool RW : Rock wool Parenthesized contents are for Hokkaido

Table 2 Specifications of household equipments

	Base spec.	Zero Energy spec.
Heating	Room air conditioner Seasonal COP = 3.5 (Thermal storage heater)	System air conditioner Seasonal COP = 3.07 (Thermal storage heater)
Cooling	Room air conditioner Seasonal COP = 2.5 (Seasonal COP = 2.5)	System air conditioner Seasonal COP = 3.27 (Seasonal COP = 3.53)
Hot water supply	Gas water heater Thermal efficiency 80 %	Heat pump system Annual COP = 2.28 (Annual COP = 1.11)
Cooking	Gas range Thermal efficiency 40 %	Induction heater Thermal efficiency 80 %
Lighting	—	Fluorescence light

Note : Parenthesized contents are for Hokkaido

Table 3 Specification of PV system

	Base spec.	Zero energy spec.
Spec.	—	Building materialized module (Polycrystalline silicon) Cell efficiency 15 % Module efficiency 10 % South 5.0 kW (Peak power) North 5.0 kW (Peak power)

バルコニーの出により夏季の日射負荷を抑えている。東西面の開口面積は小さくすることで夏季の冷房負荷の増大を防いでいる。主要な開口については防犯上の配慮と共に日射遮蔽効果を高める観点からシャッターを設けている。Ⅳ地域における各部の断熱仕様は Table 1 の通りであり、ゼロ・エネルギー仕様はⅡ地域の次世代省エネルギー基準を上回るものである。用途ごとの設備機器は Table 2 の通りである。屋根全面に葺いた太陽光発電システムは Table 3 の通りである。比較のため、一般的な仕様として、地域の次世代省エネルギー基準レベルとなる「基準仕様」も合わせて表記している。

基準仕様におけるルームエアコンは居住者の選択に委ねられるため、期間 COP (SCOP) はカタログ値などを参考に著者が仮定した値を設定した。ゼロ・エネルギー仕様のシステムエアコンは、空気熱源であるため、寒冷地では電気蓄熱暖房器具と併用される。ゼロ・エネルギー仕様の給湯は、代替フロン仕様のヒートポンプ給湯システムである。CO₂ 冷媒ヒートポンプ給湯システムについては別途検討し、後述する。

住宅用太陽光発電システムは、受光量の多い屋根面に設置することが一般的であり、屋根置き型と屋根建材型に大別される。屋根置き型は、屋根材を一旦葺いてからシステムを留めつけるのが特徴であり、屋根材との納まりを設計する必要性が比較的小さいが、屋根の防水性など長期耐久性に及ぼす影響が懸念される。

一方、Fig. 2に示すゼロ・エネルギー仕様の太陽光発電システムは、屋根建材型のシステムとして開発されたものである。屋根建材型太陽光発電システムの施工は、まず屋根の野地板に一次防水処理を施した後、太陽光発電モジュールの取り付けと排水経路を兼ねたアルミレールを屋根の流れ方向に平行に敷設する。次に、一般の屋根瓦の施工と同様に、下方のモジュールの端部に上方のモジュールの端部を重ねるようにしながらアルミレールに留めつけることで施工が終了する。アルミレールを用いることで、モジュールと屋根の野地板の間にクリアランスが生じ、モジュール裏面の配線処理を可能にしている。また、モジュールの左右端部から廻り込む雨水はアルミレール上面を流れるため、野地板が雨水で濡れることがない。一般の屋根を葺いた上に、改めて架台を組んでモジュールを取り付ける方法と比べ、施工手間が少ないだけでなく、防水層が守られるので耐久性も高い。

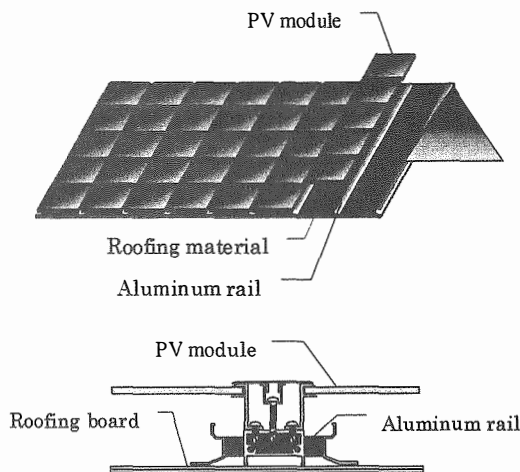


Fig. 2 Cross section of a building materialized PV module

2. ゼロ・エネルギー仕様住宅のエネルギー収支評価

2.1 年間二次エネルギー収支シミュレーション

ゼロ・エネルギー仕様住宅の年間二次エネルギー収支を、以下に示す用途別のエネルギー消費量シミュレーションと太陽光発電量シミュレーションにより予測した。

暖冷房エネルギーは、熱負荷計算ソフト SMASH を用いた暖冷房負荷値と、使用する暖冷房機器の期間 COP をもとに算出した。暖冷房負荷計算の際のスケジュールは、2000 年版 NHK 国民生活時間調査結果をもとに在室パターンを作成し、就寝時も含めた在室時空調とした。暖房及び冷房の設定温度はそれぞれ 22℃ と 26℃ とした。各室とも一人でも在室すれば空調するものとして設定し、休日と平日に差を設けていない。なお、北海道の暖房は終日 22℃ 設定とした。給湯エネルギーは、家庭用エネルギー統計年報⁹⁾のデータから負荷を導いた上で、使用する機器の効率に基づいた消費量を算出した。厨房エネルギーについても同様である。照明その他コンセント電力は、家庭用エネルギー統計年報のデータをエネルギー消費量の値として用いた。屋根に設置した太陽光発電システムの発電量は、地域の日射量

データとモジュールの変換効率から算出しており、その際、積雪による日射量低減、モジュール面の汚れ、温度上昇による効率低下、インバータでの損失などを考慮している。空調、給湯、厨房、照明その他コンセント電力の各消費量を月別に計算し、太陽光発電による月別発電量を差し引くことで年間エネルギー収支とした。用途ごとの計算方法を Table 4 にまとめる。なお、このシミュレーション手法は、ゼロ・エネルギー仕様住宅の年間エネルギー収支を評価する手法として、(財) 建築環境・省エネルギー機構の「ゼロ・エネルギー評価」を受けたものである。

ゼロ・エネルギー仕様住宅の札幌、東京、鹿児島における年間二次エネルギー収支計算結果を Fig. 3 に示す。消費量を＋、発電量を－として表示している。参考として基準仕様での計算結果も合わせて示す。Table 1、2 に示す通り、基準仕様は各地域の次世代省エネルギー基準を満足する住宅に標準的な設備機器を組み合わせたものである。

Table 4 Calculation methods for energy consumption and electricity generation by PV system

	Calculation method
Air conditioning	Air conditioning load simulation software (SMASH) and seasonal COP
Hot water supply・Cooking・Lighting and others	Statistical data ⁹⁾ and equipment efficiencies for each usage
PV generation	Parameter analysis method ⁹⁾

Table 5 Heating and cooling schedule

東京・鹿児島

(暖房)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
LDK	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
子供部屋	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
寝室	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
(冷房)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
LDK	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
子供部屋	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
寝室	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26

札幌

(暖房)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
LDK	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
子供部屋	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
寝室	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
(冷房)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
LDK	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
子供部屋	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
寝室	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26

☐ 非空調時間

☐ 空調時間 (枠内は空調設定温度 (℃))

□: 非空調時間 □: 空調時間 (枠内は空調設定温度(℃))

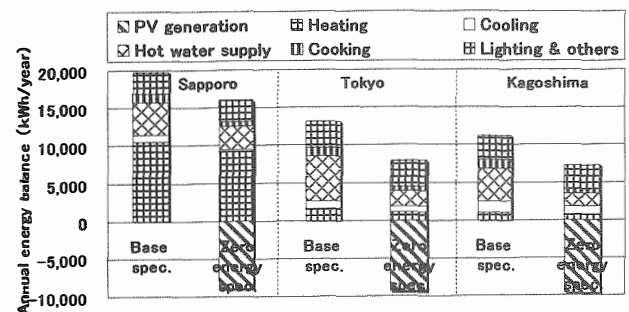


Fig. 3 Comparison of annual energy balances

計算の結果、ゼロ・エネルギー仕様の消費量は、札幌で 15,982 kWh/年、東京で 7,907 kWh/年、鹿児島で 7,266 kWh/年であり、基準仕様と比較してそれぞれ 19% (札幌)、40% (東京)、35% (鹿児島) の削減となっている。一方、それぞれの地域における発電量は、8,960 kWh/年 (北海道)、9,369 kWh/年 (東京)、9,713 kWh/年 (鹿児島) である。その結果、年間の発電量と消費量の比 (エネルギー収支割合) は 56% (北海道) 118% (東京)、134% (鹿児島) となり、東京と鹿児島においては消費量を上回る発電量が期待できる。

2.2 住宅の方位に伴う暖冷房エネルギー評価

住宅の暖冷房負荷が方位に大きな影響を受けることは明らかである。Fig. 4 は、Fig. 1 に示した住宅の東京における方位別暖冷房負荷である。基本設計段階で、Fig. 1 の South Elevation を南面に向けて冬の日射取得と夏の日射遮蔽を意図していたことから、建物を真南に向けた場合の暖冷房負荷合計が最小となっている。暖房負荷は建物の方位を振るに従って増加し、最大 44% 増となる。冷房負荷も建物の方位を振るに従って一旦増加するが、北に向かうに従い低下する。結果として 150° (北北西) に向けた場合の暖冷房負荷合計が 25% 増で最大となる。

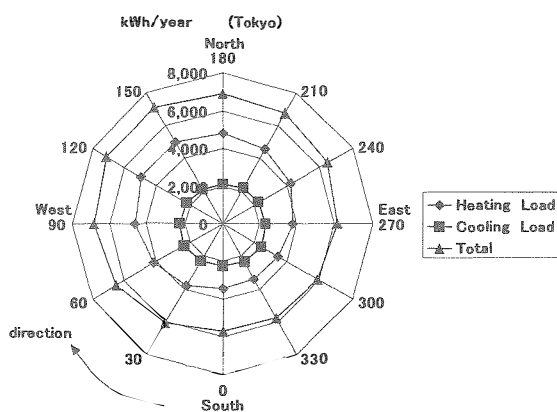


Fig. 4 Heating and cooling load of Zero Energy House

2.3 住宅の方位に伴う発電量評価

年間のエネルギー消費量を上回る発電量を確保するためには、南面だけでなく北面も含めた設置面積が必要であるが、方位によって期待できる発電量は大きく異なる。Fig. 5 は東京における屋根面積当たりの年間発電量を方位別に計算した結果である。真南を 0° とし、30° ごとの結果を表示している。勾配屋根では南面に設置した場合の発電量が最も多く、北面 (180°) に設置した場合が最も少ない。屋根勾配がきつくなるほどこの傾向は顕著であり、1/1 勾配 (45° 勾配) の場合には北面の発電量は南面の約半分となる。このことから、一般には太陽光発電システムを南面以外に設置することは避けられており、敷地条件によっては住宅のプランニングに制約を受けるか、システムの設置面積が制限される。発電量を最大化するためには屋根勾配を 23° ~ 26° 程度に設定することが一般化しているが⁸⁾、屋根方位が

東～北～西の場合には勾配を緩くするほうが良いことがわかる。

Fig. 6 は、切妻屋根の両面を太陽光発電モジュールで葺いた場合の屋根面積当たりの発電量を表したものである。図中の方位は切妻屋根の一方が面する方位である。Fig. 5 の結果と異なり、切妻屋根の方位により発電量が影響される割合は少ない。太陽光発電モジュールを屋根建材として捉え、住宅の方位や屋根の方位とは関係なく全面に葺くことになるが、この場合、住宅の方位が変わっても屋根面積当たりの発電量に与える影響は少ないことになる。また、屋根勾配は緩いほど屋根面積当たりの発電量は多い。

住宅の平面プランを固定とした場合、屋根の勾配をきつくするほど屋根面積は大きくなり、結果として発電容量が大きくなる。一方、前述の通り、屋根全面に太陽光発電モジュールを葺く場合には勾配が緩いほど面積当たりの発電量は大きくなる。そこで、屋根の水平投影面積当たりの発電量を勾配ごとに試算した結果を Fig. 7 に示す。Fig. 5、Fig. 6 の結果と異なり、勾配がきつくなるほど年間発電量は大きくなる。勾配をきつくすることによる面積増加の効果が、発電効率の低下を上回っていることを意味する。住宅方位に対する発電量の依存性はこの場合も小さい。

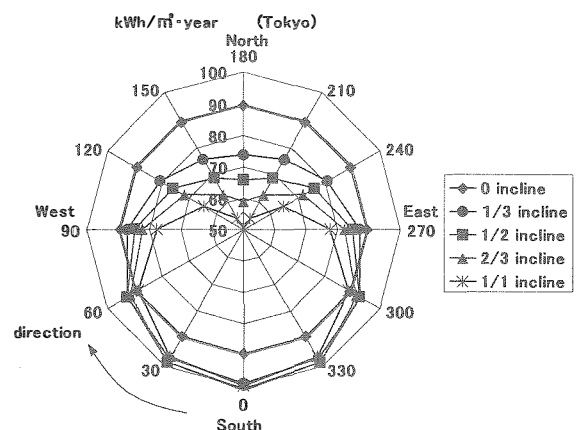


Fig. 5 Annual generation rate per unit module area of PV system

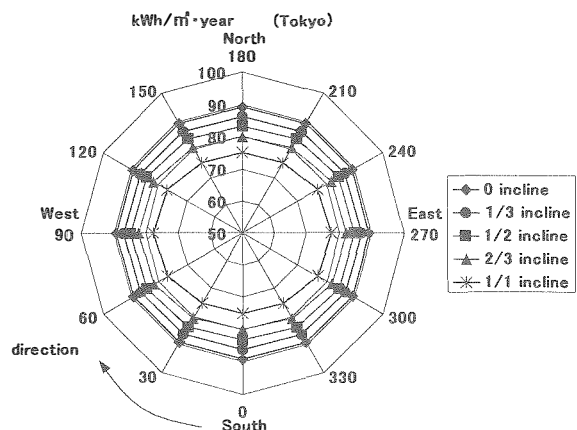


Fig. 6 Average annual generation rate per unit module area of PV system covering both side of a gable roof

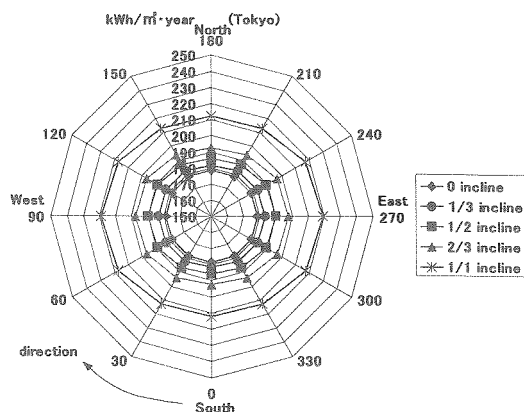


Fig. 7 Average annual generation rate per unit horizontal projection area of PV system covering both side of the roof

以上のように、屋根の片面にのみ太陽光発電システムを設置する場合の発電量は、暖冷房負荷同様、住宅の方位による影響を受けるが、屋根全面太陽光発電システムの総発電量は、住宅の方位に影響を受けずに一定量が期待できることが明らかとなった。

3. ゼロ・エネルギー仕様住宅の実態調査

3.1 年間エネルギー収支とコスト収支

前述のシミュレーションは、用途別エネルギー消費の統計データと空調エネルギー消費及び太陽光発電量の計算に基づくものであるが、実態を把握するため、ゼロ・エネルギー仕様住宅のアンケート調査を行った。アンケートは、調査に承諾を頂いた60家族に送付し、有効回答は15件であった。調査期間は平成11年9月～平成12年8月である。アンケートの内容は、(1)月別の発電量、(2)月別の買電量(昼、夜)、(3)月別の売電量、の実績値である。有効回答の割合が少ないのは、月ごとのデータ全てに回答頂き、かつ、不整合のないもののみを有効としたためである。有効回答データの住宅は、いずれも省エネルギー区分IV地域に属している。各住宅のプランは、必ずしもFig. 1に示した例と同じではなく、延べ床面積も異なり、調査した住宅の平均延床面積は200㎡であった。いずれの住宅も屋根全面太陽光発電システムを設けた全電化住宅であるが、給湯は電気温水器を採用している場合とヒートポンプ給湯システム(代替フロン仕様)を採用している場合がある。

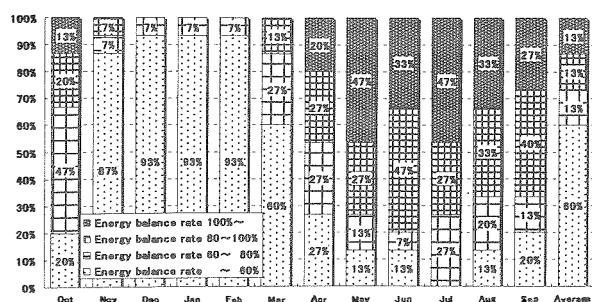


Fig. 8 Monthly distribution of energy balance rate

Fig. 8に月別エネルギー収支率の分布を示す。エネルギー収支率は、エネルギー消費量に対する太陽光発電量の割合を表す。11月から3月にかけて、エネルギー収支率が60%以下となる住宅が半数を超えている。暖房エネルギーが増し、太陽光発電量が減ることが主な要因である。一方、4月から10月にかけてはエネルギー収支率が改善し、100%以上となる住宅も多くなる。Fig. 9は邸別の年間エネルギー収支とエネルギー収支率である。夜間電力使用量の平均値は6,544 kWh/年(標準偏差2,281 kWh/年)、昼間電力使用量の平均値は5,654 kWh/年(標準偏差1,799 kWh/年)、太陽光発電量の平均値は7,523 kWh/年(標準偏差776 kWh/年)であり、エネルギー収支率を左右するのは発電量よりも消費量であることが分かる。集計した15件の住宅の中で、給湯にヒートポンプ給湯を使用している住宅はG、N、Oの3件である。残りの12件は電気温水器を使用していた。ヒートポンプ給湯を使用することで電力消費(特に深夜電力消費)が少なくなり、エネルギー収支率に寄与している。Gの住宅は深夜電力の使用量が少なくなっているものの、昼間の電力使用量が多いためにエネルギー収支率が100%を下回った。先に2.で示したゼロ・エネルギー仕様住宅のエネルギー収支はいずれの地域もヒートポンプ給湯を前提としていたが、実態調査においても、エネルギー収支率が100%を超えた住宅はヒートポンプ給湯を採用している住宅であった。

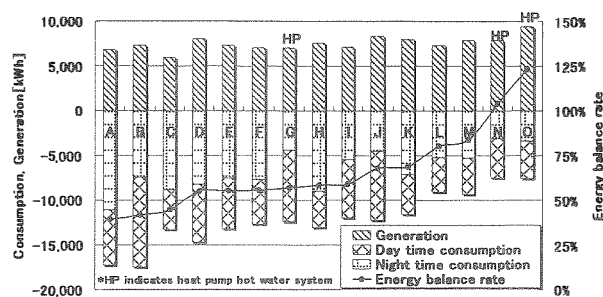


Fig. 9 Annual energy balance of each house

Fig. 10に邸別の売電による収入と電力消費による支出の収支(エネルギーコスト収支)を示す。エネルギーコスト収支には電力の基本料金も含めている。なお、各住宅の建設地は異なるため、電力単価、基本料金は必ずしも同じではない。集計の結果、エネルギー収支率とエネルギーコスト収支は必ずしも比例関係がなく、エネルギー収支率が100%を超えていなくても、エネルギーコスト収支はプラスになっている住宅(F、H、K、L、M)もある。コストの安い深夜電力の消費割合が多く、コストの高い昼間の電力の消費割合が少ない住宅のエネルギーコスト収支が良い結果となっている。一方で、ヒートポンプ給湯を使用しても、昼間の電力使用量の多い住宅(G)ではコスト収支がマイナスとなった。エネルギー収支シミュレーションの結果と実測結果に乖離があるのは、エネルギー収支シミュレーションが平均的な生活パターンに基づくものであるのに対して、実

際の生活パターンは居住者によって大きく異なることが原因と考えられる。なお、今回調査した 15 棟のエネルギーコスト収支は、平均で+709 円/年となり収入が支出を上回っていた。

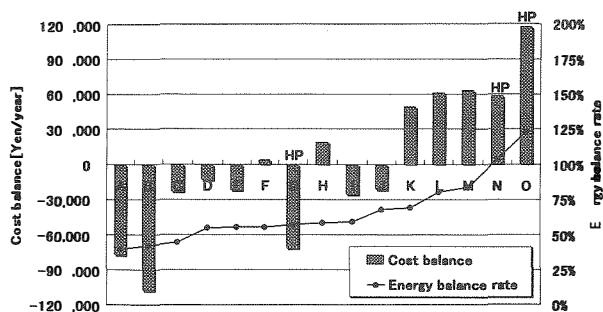


Fig. 10 Annual energy cost balance of each house

3.2 運用時の CO₂ 排出削減効果

系統から独立した自給自足型の住宅であれば、運用時の CO₂ 排出に伴う環境負荷がゼロであることは明らかである。一方、ゼロ・エネルギー仕様住宅は、系統と連系し、太陽光発電量が十分でない時間帯には電力を購入しているため、環境に負荷を与えていることになる。逆に、太陽光発電量が住宅内の電力負荷を上回る時間帯には系統に逆潮流しており、CO₂ 排出のない電力を系統に供給することで環境負荷削減につながる。

さらにこの住宅の場合には、夜間電力を利用した給湯設備を使用しているため、負荷平準化に伴う CO₂ 排出削減につながる。電力会社が夜間に供給する電力の CO₂ 排出原単位が日中に供給する電力の CO₂ 排出原単位よりも小さいことがその理由である。

住宅の省エネルギー化、太陽光発電、電力消費の夜間移行などによる総合的な環境負荷削減効果を明らかにするため、以下の指標を定義する⁹⁾。

$$\text{CO}_2 \text{ 還元率} = \frac{\text{逆潮流電力の CO}_2 \text{ 換算量(kg-CO}_2\text{)}}{\text{購入電力の CO}_2 \text{ 換算量(kg-CO}_2\text{)}} \quad \cdots(1)$$

$$= \frac{\rho_d \times Q}{\rho_d \times W_d + \rho_n \times W_n} \quad \cdots(2)$$

ρ_d : 昼間の発電に伴う CO₂ 排出原単位 (= 0.35 kg-CO₂/kWh)

ρ_n : 夜間の発電に伴う CO₂ 排出原単位 (= 0.28 kg-CO₂/kWh)

W_d : 昼間の購入電力量(kWh)

W_n : 夜間の購入電力量(kWh)

Q : 逆潮流電力量(kWh)

購入電力が環境に与えた負荷に対し、太陽光発電の余剰電力として系統に逆潮流した電力が削減しうる環境負荷を CO₂ 還元率として表している。昼間と夜間の CO₂ 排出原単位は東京電力の値を使用した¹⁰⁾。

Fig. 11 に CO₂ 還元率とエネルギー収支率の関係を示す。エネルギー収支率が比較的低い住宅は CO₂ 還元率も低い値となっている。また、エネルギー収支率と CO₂ 還元率の差は小さい。一方、エネルギー収支率が 70 % 以上と比較的高い住宅は、太陽光発電の余剰電力に伴う売電量が多くなるため、CO₂ 還元率も高い値となっている。エネルギー収支率が 100 % を超える住宅ではその傾向がさらに顕著に現れており、エネルギー収支率以上に CO₂ 排出削減の効果が高いことを表している。

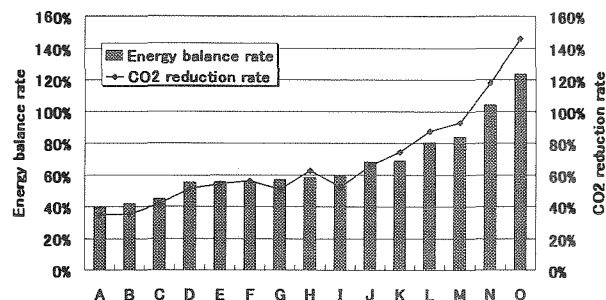


Fig. 11 CO₂ reduction rate and energy balance rate

4. 屋根全面太陽光発電システムのライフサイクル評価

4.1 ライフサイクルコスト (LCC) 評価

太陽光発電システムを住宅に用いた際のコスト評価は、これまで多くの例が見られるが⁹⁾、発電効率の小さい方位も含めた屋根全面太陽光発電システムのライフサイクルコスト(システムの製造から維持、廃棄に至るまでにかかるコスト)についてはこれまで明らかではなかった。そこで今回、住宅の屋根を、①一般の彩色スレート屋根材で葺く場合、②片面のみ太陽光発電モジュールで葺いて、他方を彩色スレート屋根材で葺く場合、③両面(全面)を太陽光発電モジュールで葺く場合、④発電機能のないガラスモジュールで葺く場合、の四つをそれぞれ想定し、屋根としてのライフサイクルコスト比較を行った。いずれも住宅の建設当初に屋根を施工し、費用は金利 2.5 % 元利金等 35 年返済によるローンを組むものと仮定した。一般の彩色スレート屋根材で葺いた場合、10 年に一度塗り替え、20 年に一度葺き替えるものと仮定した。塗り替え、葺き替えコストには足場代が含まれている。太陽光発電システムを用いた場合、パワーコンディショナーを 20 年に一度交換するとともに、50 年に一度モジュールの葺き替えを行うものとした。太陽光発電モジュールの発電効率は一年で 0.5 % 低下するものとした。つまり 50 年で発電効率が 25 % 低下することを想定している。売電によるコストメリットは 25 円/kWh とした。片面に太陽光発電を設ける場合には、それぞれの面に葺き替えやパワーコンディショナー交換のコストが発生する。葺き替えやパワーコンディショナー交換の費用はローン返済とはせず、一括支払いと仮定した。太陽光発電システムを 50 年後に交換する際の部材コストは当初の部材コストと同等と仮定し、別途足場設置と施工コストがかかるものとした。Fig. 12 に試算結果を示す。

一般屋根材の場合、当初のローン負担は小さいが、発電によるコストメリットがなく、また塗り替えと葺き替えによるコスト負担により 100 年で 700 万円以上の支出となる。次に片面のみ太陽光発電システムとした場合、太陽光発電によるコストメリットはあるが、一般屋根材のメンテナンスコストが加わるため、ライフサイクルコストでは全面を一般屋根材で葺いた場合と大きな差がない。一方、全面太陽光発電システムとした場合、当初のローン負担が大きくても発電によるコストメリットも大きく、屋根としてのメンテナンスコストが小さいことから、建設当初から一般屋根と比較してコストメリットがある。特にローン負担の終わる 35 年以降は大きなコストメリットが生まれ、48 年でライフサイクルコストはゼロになる。50 年で太陽光発電モジュールの葺き替えによるローン負担が再度発生するが、返済の終わる 85 年（ローン期間は初回同様に 35 年）以降はライフサイクルコストが再び減少し、100 年でゼロとなる。

全面太陽光発電システムのコストメリットが、メンテナンスコストの低減効果によるものとの見方もできるため、発電機能のないガラスモジュールで屋根を葺いた場合（④）も試算した。塗り替えの必要がなく、葺き替え頻度も少ないガラスモジュールはメンテナンスコストの負担こそないものの、初期コストに伴うローン負担が大きく、LCC では一般屋根材とほとんど変わらない結果となった。

屋根全面に太陽光発電システムを設置する場合、発電量の少ない屋根面にも設置することになり、コストメリットが小さくなると考えられてきた。しかし、本計算においては、発電量の低下によるデメリットよりも、屋根のメンテナンスコストを低減するメリットが大きく、結果としてコスト負担が最も小さくなる結果が得られた。

4.2 ライフサイクルエネルギー（LCE）収支評価

二次エネルギー消費を削減し、太陽光発電システムの発電により年間のエネルギー収支をゼロにすることはランニングコストの低減や電力のピークカットなどに効果があることは間違いないが、そのために多大な製造エネルギーを消費するのであれば、環境負荷の観点からはデメリットにもなりかねない。そこで、一般の住宅を建設する場合と、その住宅をゼロ・エネルギー仕様住宅とする場合の環境影響についてライフサイクルエネルギー（住宅の建設から維持、廃棄に至るまでに消費されるエネルギー）の観点から検討を行った。

LCE は、材料生産、部材製造、施工、使用、改修、廃棄の各段階のものを算出した。材料生産、部材製造に関わるものは建築 LCA プログラムである BEAT（（独）建築研究所提供）を用いて算出しているが、各部の詳細な違いまでは反映できないため、基準仕様とゼロ・エネルギー仕様とで異なる部材や設備に関しては使用材料の積み上げ式により算出した。積み上げ式で計算する際の原単位は BEAT で用いている原単位を使用している¹¹⁾。

住宅使用時のエネルギーは用途ごとに算出し、換算係数(1 kWh

= 9,830 kJ)を用いて一次エネルギーに換算した値を用いる¹²⁾。太陽光発電システムによる発電量は前述のパラメータ分析法により算出している。改修、廃棄時のエネルギーは BEAT を用いて計算しており、基準仕様とゼロ・エネルギー仕様とでは構造や使用材料の差が少ないため同等であると仮定した。計算の概要とフローを Table 6 に示す。

基準仕様とゼロ・エネルギー仕様とで異なるのは、屋根材、エアコン、給湯器、厨房設備、断熱材、開口部の 6 部材である。基準仕様の住宅とゼロ・エネルギー仕様住宅の平面・立面計画は同じとした。Fig. 13 に、LCE の計算結果を示す。平成 8 年の建設白書¹³⁾によれば、住宅のライフサイクルは 26 年となっているが、現時点で建設されるものは耐久性が高まっている¹⁴⁾ことから、LCE 計算の際のライフサイクルを 50 年と仮定した。いずれの建設地でも LCE は 100 万 kWh 以上となるが、その 60 %以上が運用時のものである。部材製造及び施工時のものは 30 %前後である。改修、廃棄時のエネルギー消費が全体に占める割合は小さい。先に示したように、二次エネルギー段階ではゼロ・エネルギー仕様とすることによるエネルギー消費削減効果は顕著であるが、一次エネルギー換算した場合には差が小さくなっている。これは、二次エネルギー効率の良い設備機器を使っているにも関わらず、電力の一次エネルギー消費が大きいためである。一方で、太陽光発電による一次エネルギー削減効果も大きいため、札幌では LCE の 43 %、東京で 74 %、鹿児島では 81 %を削減する効果がある。

Table 5 Conditions for calculation of LCC

	① Slate tile roof	② PV module roof +Slate tile roof	③ PV module roof	④ Glass module roof
0 yr	・ Slate tile ・ Construction	・ Slate tile, PV system ・ Construction	・ PV system ・ Construction	・ Glass module system ・ Construction
10 yrs	・ Repaint	・ Repaint		
20 yrs	・ Retile	・ Power conditioner ・ Retile	・ Power conditioner	
30 yrs	・ Repaint	・ Repaint		
35 yrs	・ Loan complete	・ Loan complete	・ Loan complete	・ Loan complete
40 yrs	・ Retile	・ Power conditioner ・ Retile	・ Power conditioner	
50 yrs	・ Repaint	・ PV system (loan) ・ Repaint	・ PV system (loan)	・ Retile (Loan)
60 yrs	・ Retile	・ Power conditioner ・ Retile	・ Power conditioner	
70 yrs	・ Repaint	・ Repaint		
80 yrs	・ Retile	・ Power conditioner ・ Retile	・ Power conditioner	
85 yrs		・ Loan complete	・ Loan complete	・ Loan complete
90 yrs	・ Repaint	・ Repaint		

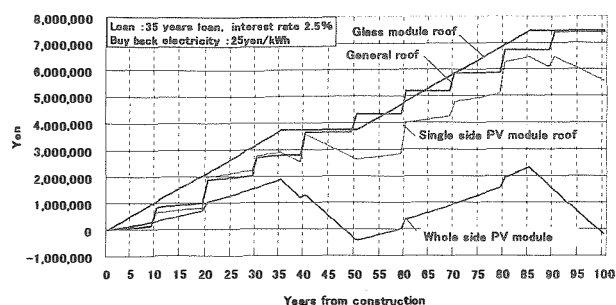


Fig. 12 Comparison of life cycle cost among several roof specifications

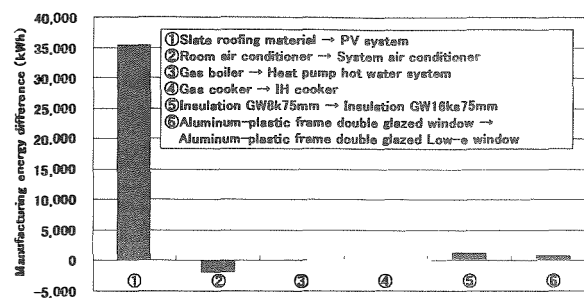


Fig. 14 Differences of manufacturing energy for each part

Table 6 Calculation chart of LCE

材料生産 ・部材製造	数量計算 ・LCE計算ソフト「BEAT」により、基準仕様での「材料生産」「部材製造」エネルギー算出。 差分計算 ・基準仕様とゼロエネルギー仕様の異なる部位・設備のみ、双方の「材料生産」「部材製造」エネルギーを詳細に積み上げ方式で計算。差分がゼロエネルギー仕様にするために要するエネルギー。
施工時	数量計算 ・LCE計算ソフト「BEAT」により、「施工」エネルギー算出。基準仕様とゼロエネルギー仕様は同等と仮定。
使用時	暖冷房計算 ・SMASHにより空調負荷計算。機器COP、一次エネルギー換算係数を用いて一次エネルギーを算出。 給湯・給湯計算 ・家庭用エネルギー統計年報をもとに「用途別エネルギー消費」を算出。 機器COP、一次エネルギー換算係数を用いて一次エネルギーを算出。 照明他計算 ・家庭用エネルギー統計年報をもとに「用途別エネルギー消費」を算出。 一次エネルギー換算係数を用いて一次エネルギーを算出。 PV発電計算 ・パラメータ分析法により月別発電量を算出。 一次エネルギー換算係数を用いて一次エネルギーを算出。
改修時 ・廃棄時	数量計算 ・LCE計算ソフト「BEAT」により、「改修」「廃棄」エネルギー算出。基準仕様とゼロエネルギー仕様は同等と仮定。

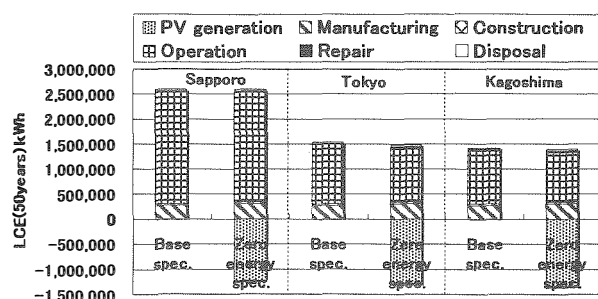


Fig. 13 Comparisons of LCE between conventional house and Zero Energy house

材料生産・部材製造時の基準仕様とゼロ・エネルギー仕様の一次エネルギーの差は積み上げ計算の結果 36,030 kWh となった。ゼロ・エネルギー仕様は基準仕様と比べて 12%増加した計算になる。内訳を Fig. 14 に示す。屋根を一般のスレート屋根材から太陽光発電システムに変えることによる差が全体の差分の 98%を占め、その他は-5%~4%と小さい。スレート屋根材がセメントを主体とした製品であるのに対し、太陽光発電モジュールは製造エネルギーの大きいアルミやガラスを主体とした製品であることと、パワーコンディショナー等の附属設備が必要となることとなる要因である。

以上は住宅のライフサイクルを 50 年と仮定した場合の結果であるが、築年数と LCE 収支の関係を Fig. 15 に示す。築後 3 年までの収支に関しては図中に拡大している。基準仕様の住宅を

ゼロ・エネルギー仕様にするためには、材料生産、部材製造、施工段階の一次エネルギー量が 12%増加するが、使用段階の一次エネルギー削減効果と太陽光発電によって 1.3~1.4 年で増加分を回収できる。断熱仕様や設備仕様を高めた上で太陽光発電システムを導入することは、LCE を削減する上で非常に効果が高いことを示している。Fig. 15 に示す通り、鹿児島では住宅のライフサイクルエネルギー収支が 50 年でゼロになる。他の建設地でも、住宅性能を一層高めることで、LCE 収支をゼロにできると考えられる。

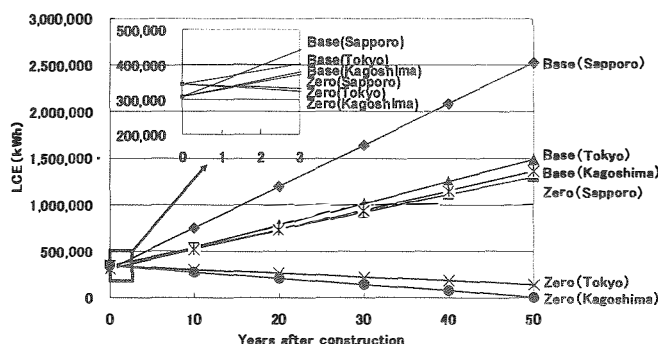


Fig. 15 LCE of Zero Energy Houses located in Sapporo, Tokyo and Kagoshima

これまで試算と調査を行ったゼロ・エネルギー仕様住宅の給湯は、代替フロン仕様のヒートポンプ給湯システム (COP=2.28) または電気温水器のものであった。しかし、最近の CO₂ ヒートポンプ給湯システムでは期間 COP が 3.0 を越すものも実用化されてきている。そこで、ゼロ・エネルギー仕様において、給湯システムを期間 COP が 3.0 のものに置き換えた場合について再計算を行った。Fig. 16 にその結果を示す。給湯の COP 向上に伴い LCE は小さくなるが、大きな削減効果は得られず、ライフサイクルを 50 年と仮定した場合に LCE=0 となり得るのはやはり鹿児島のみであった。このことは、単一の機器の改良のみで住宅の LCE を改善することは難しいことを示しているが、今後、暖冷房や給湯はもちろんのこと、厨房、照明設備もより高効率なものに改善し、自然エネルギーや排熱回収の一層の活用によって、札幌においても 50 年間で LCE を 0 とすることが可能であると考えている。

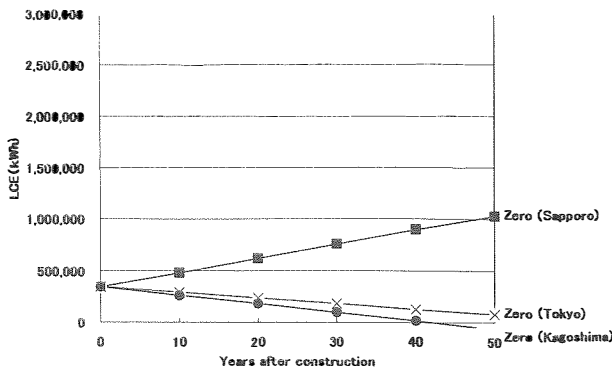


Fig. 16 LCE of Zero Energy Houses located in Sapporo, Tokyo and Kagoshima after introducing hot water supply system with seasonal COP=3.0

まとめ

断熱性能を高め、プランニングの工夫により暖冷房負荷を削減し、空調・給湯・厨房に機器効率の高い設備を使用することで、屋根全面に設けた太陽光発電システムによる年間発電量が、その住宅の想定年間エネルギー消費量を上回るように設計することが可能である。設計は、用途別のエネルギー消費シミュレーションと太陽光発電量シミュレーションに基づくものであるが、入居後の実態調査により、その実現性を確認した。このような住宅では、年間のエネルギー支出よりも売電による収入が上回ることも確認された。

屋根全面太陽光発電システムは、発電上不利と考えられている北面にも設置するが、ライフサイクルコストでは一般スレート屋根や片面のみの太陽光発電システムよりも低くなることが明らかとなった。これは、発電によるメリットに加えて屋根としてのメンテナンスコストが低減されるためである。太陽光発電システムはインシヤルコストが高いことから、一般には片面のみに設置することが多いが、片面設置の場合でもライフサイクルコストのメリットを高めるには、一般屋根部分のメンテナンス時期を太陽光発電システム部分と合わせることで施工コストを低減するなどの工夫が必要であろう。

本論文のゼロ・エネルギー仕様住宅は、系統連系された太陽光発電システムを有し、夜間電力を利用した貯湯が可能な全電化住宅である。CO₂ 排出原単位の小さい夜間電力を利用してお湯を作ることで、CO₂ 排出原単位の大きい日中は太陽光発電の余剰電力（逆潮電力）が多くなる。購入電力による CO₂ 排出量に対する逆潮電力による CO₂ 削減量の比を CO₂ 還元率と定義して集計した結果、エネルギー収支率の高い住宅では、エネルギー収支率以上に CO₂ 還元率が高く、環境負荷削減効果が高いことが明らかとなった。

ライフサイクルエネルギー（LCE）評価を行った結果、ゼロ・エネルギー仕様とするための一次エネルギー増加分は、省エネルギーと太陽光発電の効果により 1.3～1.4 年で回収できる計算となった。地域によっては 50 年程度で LCE 収支もゼロになると計算される。

今後、一層の省エネルギー化と自然エネルギー利用により、あらゆる地域で LCE 収支をゼロにする住宅を実現したいと考えている。

参考文献

- 1) 新エネルギー財団、太陽光発電システム導入促進事業集計結果、(2005)
- 2) 森教子・千田美保・森山正和、住宅用太陽光発電システムに関する実態調査結果とその考察、日本建築学会近畿支部研究報告集(2000)、345-346
- 3) 奥宮正哉・鄭鎮玄・原田昌幸・久野寛、居住者の環境問題への意識が省エネルギー・環境負荷低減へ及ぼす影響についての検討、日本建築学会東海支部研究報告、(2000)、425-426
- 4) 新エネルギー財団、住宅用太陽光発電システムアンケート調査解析報告書、(2004)
- 5) 太田勇・井田浩文・坂井則和、ゼロ・エネルギー住宅の実態調査、日本建築学会学術講演会梗概集、(2001)、523-524、東京
- 6) 住環境計画研究所、家庭用エネルギー統計年報、(2004)
- 7) 太陽光発電技術研究組合、太陽光発電システム設計ガイドブック、(1994)、オーム社、東京
- 8) 長能里佳・武田仁・入口泰尚、環境共生住宅の性能評価 その4 太陽光発電システムのシミュレーション、日本建築学会学術講演会梗概集、(1998)、501-502、九州
- 9) 太田勇・坂井則和・栗原潤一・井田浩文・飯島雅人、ゼロ・エネルギー住宅の CO₂ 排出削減効果、日本建築学会学術講演会梗概集、(2002)、607-608、金沢
- 10) 東京電力(株)、環境行動レポート 2001、(2001)
- 11) 財団法人国土開発技術研究センター、省資源・省エネルギー型国土建設技術の開発報告書、(1994)
- 12) エネルギー使用の合理化に関する法律施行規則、(2003)
- 13) 国土交通省、平成 8 年建設白書、(1996)
- 14) (財) ベターリビング、CHS Project Report CHS Mission of Betterment CHS Standing Rule、東京
- 15) 栗原潤一・太田勇・岡建雄、太陽光発電を組み込んだ省エネルギー実例調査と環境評価に関する研究、日本建築学会技術報告集第 20 号、(2004)、383-386