ソーラー・デカスロン・ヨーロッパ2012 へ向けたゼロエネルギー住宅の開発と施工

DEVELOPMENT AND CONSTRUCTION OF NET-ZERO-ENERGY HOUSE FOR SOLAR DECATHLON EUROPE 2012

田島翔太 — * 1 大野暁彦 — * 2
花里真道 — * 3 森 千里 — * 4
鈴木弘樹 — * 5 川瀬貴晴 — * 6

Shota TAJIMA — * 1 Akihiko ONO — * 2
Masamichi HANAZATO — * 3 Chisato MORI — * 4
Hiroki SUZUKI — * 5 Takaharu KAWASE — * 6

キーワード：
省エネルギー, 太陽光住宅, 設計プロセス, ソーラー・デカスロン, 室内空気質

Keywords:
Energy saving, Solar housing, Design process, Solar Decathlon, Indoor air quality

Chiba University has participated the international solar housing competition called Solar Decathlon Europe 2012. This paper reports the design process and construction result of the proposal called Omotenashi House. Chiba University has been designing a net-zero-energy and food self-sufficient model since 2011 including insulation system, landscape, structural planning, PV system, natural and artificial lightings, and active and passive systems. Finally Omotenashi House has been exported to and reassembled in Spain in 12 days, and measured its high energy efficiency and electrical balance with low VOC emissions.

1. はじめに

「ソーラー・デカスロン」は、世界の大学を対象に、太陽光を利用したゼロエネルギー住宅^{注1)}を産学協同で開発・施工し、性能やデザイン性など10項目を総合的に審査する国際大会である。同大会は、アメリカ合衆国エネルギー省が中心となり、太陽光発電システムの技術開発と普及活動を主な目的として、2002年に全米の大学を対象に始められた。これまでアメリカで5回、ヨーロッパで2回の開催歴があり、世界21の国と地域から129チーム・156大学^{注2)}と延べ17,000人以上の学生が参加している^{注3)}。千葉大学は、2012年9月にスペイン・マドリッド中心部の特設会場 Villa Solar（以下、ソーラー村）で開催された「ソーラー・デカスロン・ヨーロッパ2012（以下、SDE大会）」に我が国の大学として初めて唯一参加をし、食と健康に配慮したゼロエネルギー住宅「おもてなしハウス（以下、O.H.）」を発表した。

我が国では、栗原ら¹⁾が太陽光発電システムを取り入れた住宅10棟を調査し、年間のエネルギー自給が10棟平均で6割に留まっていることを明らかにした。太陽光発電システムを用いたゼロエネルギー住宅の実現可能性に向けた研究では、濱田ら²⁾が実験住宅における実測やシミュレーションでエネルギー収支等の評価を行った。また、住宅形態や世帯構成による居住者行動の違いに着目した鳴海ら³⁾は、自然エネルギーのパッシブ利用によるエネルギー消費の削減効果を明らかにし、それらに標準的な太陽光発電システムを導入することによってゼロエネルギー住宅の達成が可能であることを示した。このように、住宅における太陽光発電システムの導入やゼロエネルギー住宅の実現に向けた研究が多方面で進められている。

一方、本論で扱うO.H.は、以下の目的と特徴を持つ。

- (1) **ゼロエネルギー住宅**: シミュレーションによってエネルギー自給を達成し、かつ、実際に施工と実測を行い、SDE大会の審査に則った相対的な評価を行っている。
- (2) **食の自給**: ランドスケープの計画と植物工場の導入により、エネルギーだけでなく食の自給を目指している。
- (3) **健康な室内環境**: 化学物質の発生を極力抑えた設計と実測により、居住者の健康に配慮した室内環境を提供している。
- (4) **将来的な輸出品目としての可能性**: 国内製品を組み合わせた上で輸出をし、海外で短期間の施工を可能にしている。

このように、国際的な枠組みでゼロエネルギー住宅の開発を競う「ソーラー・デカスロン」に対して我が国の技術を結集し発表した事例は今回が初めてであり、本論はこれまでの研究とは異なる知見を提供するものである。

2. O.H.の概要

O.H.は、千葉大学大学院工学研究科を中心とした領域横断のチームで、産学協同で開発に取り組んだゼロエネルギー住宅である（写真1）。建物は、17m四方の敷地に建つ延床面積65m²、建築面積150m²の平屋で、二人家族の生活を想定し、居間、台所、寝室、シャワー室、便所（設置のみ）、機械室で構成される（図1）。日本の環境技術と伝統の融合を目指し、ゼロエネルギー住宅としての性能を確保しながら、切妻屋根や縁側、畳等の伝統的な空間構成や素材を積極的に用いている。環境や健康に配慮した住宅が人や自然を迎え入れるという意味と、人や自然に対する日本人の価値観を表す言葉とし

¹⁾ 千葉大学大学院工学研究科 博士後期課程
(〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)
²⁾ 千葉大学大学院園芸学研究所 博士後期課程
³⁾ 千葉大学予防医学センター 特任助教
⁴⁾ 千葉大学大学院医学研究院 教授
⁵⁾ 千葉大学大学院工学研究科 准教授
⁶⁾ 千葉大学大学院工学研究科 教授

¹⁾ Graduate School of Engineering, Chiba Univ.

²⁾ Graduate School of Horticulture, Chiba Univ.

³⁾ Research Associate, Center for Preventive Medical Science, Chiba Univ.

⁴⁾ Prof., Graduate School of Medicine, Chiba Univ.

⁵⁾ Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, Chiba Univ.

⁶⁾ Prof., Graduate School of Engineering, Chiba Univ.

て「おもてなし」を選び、「おもてなしハウス (Omotenashi House)」と名付けた。O.H.の開発と施工には、表1に示す学部・研究科・センターから延べ83名の学生が参加をした。最終的に65の企業・団体から協賛を集め、O.H.の開発、輸送、施工、発表に伴う学生の渡航費など、総予算8,000万円のおよそ半分を外部からの資材提供と資金提供で賄った。

O.H.の開発と建設は、図2に示すプロセスで進められた。本論では、前半に図2のステップ①～⑥に該当する発電量や室内環境等のシミュレーションと千葉大学構内に施工した試作棟（以下、O.H.試作棟）を取り上げ、後半にステップ⑦～⑩に該当するO.H.の輸出とソーラー村での施工、SDE大会におけるO.H.の実測結果を述べる。

3. O.H.の設計と開発

3.1 建築計画（図2ステップ①～⑥）

O.H.の建築計画は、SDE大会の規定であるルールブック^{注4)}に沿って進められた。また、建築計画の過程は、英語の図面や説明書として7回に分けてSDE大会の主催事務局へ報告する義務があった。

ゼロエネルギー住宅の設計では、建築計画の進捗に合わせて環境負荷や環境品質の度合いをチェックする必要がある⁴⁾、省エネルギー建築の設計手法であるIntegrated Design Process (IDP)⁵⁾や、設計プロセスに従った建築物の総合的な評価手法であるCASBEE⁶⁾等を参考としてO.H.の開発に取り入れた。実際に、建築計画、ランドスケープ計画、太陽光発電システム計画、アクティブシステム計画の学生は、それぞれの専門領域を超えたコミュニケーションを取る必要があり、同じ机上で検討した内容は繰り返しルールブックと照らし合わせた。また、それぞれの分野で扱われている用語や英単語を互いに学習した。ほかにも、O.H.の開発目標となる設計コンセプトを早い時期に決定し、SDE大会まで継続的に用いることで、提案の一貫性とチーム内の意識統一を図った。

このような体制のもと、ゼロエネルギー住宅の達成に向けて建築計画の基本としたのは、断熱性能を高め、冷暖房負荷を抑えることであった。一方、室内は、開口部を大きく取ることで縁側と連続した開放的な空間を目指した。そこで、押出法ポリスチレンフォームの中央を切り欠き、熱伝導率0.006W/mKの真空断熱材を複数重ねて組み込んだ複合断熱材を新たに製作した。熱貫流率は、真空断熱材部分と押出法ポリスチレンフォーム部分で分けて計算を行い、壁面が0.117～0.184W/m²K、床面が0.119～0.377 W/m²Kとなった。天井は、複合断熱材に高性能グラスウールを加えることで熱貫流率を0.160～0.293 W/m²Kとした。O.H.の壁面の57%を占める開口部は特に熱損失が大きいため、南面中央のはめ殺し窓にLow-E複層ガラス、残りの窓はすべて真空Low-E複層ガラスを採用し、かつ、室内側にはグラスウール吸音ボードを接着した遮音引戸を閉じることで断熱性を確保した。これらの取組みの結果、O.H.の熱損失係数は1.494 W/m²Kとなり、開放的な室内環境でありながら国内寒冷地（I地域4等級）の基準値1.600W/m²Kを下回ることができた（表2）。

複合断熱材は、断熱性能を確保しながら壁厚を薄くすることを可能としたが、O.H.試作棟の施工では不慣れな作業により内部の真空断熱材を破損する事例がみられた。O.H.試作棟の解体後にすべての複合断熱材の破損状況を調べ、再製作を行うことで対処したが、施工上の取扱いに課題が出た。

写真1 竣工したO.H.の外観

図1 平面配置図

表1 プロジェクト参加学生の所属と役割

所属	チーム内での主な役割	人数(名)
工学部・工学研究科	建築・設備・電気・施工計画、施工	62
教育学部、文学部、法経学部	広報活動、出前授業、施工	10
園芸学部・園芸学研究科	ランドスケープ計画、施工	7
看護学研究科	施工時の健康・安全管理	2
理学研究科	電気計画、施工	1
予防医学センター	室内空気質計画	1
計		83

図2 プロジェクトフロー

表2 各部位の熱損失量とO.H.の熱損失係数

	部位	K (W/m ² *K)	A (m ²)	KA (W/K)
壁	真空断熱材部分	0.117	25.482	2.981
	ポリスチレンフォーム部分	0.184	10.509	1.934
床	真空断熱材部分	0.119	43.750	5.206
	ポリスチレンフォーム部分	0.377	18.750	7.069
天井	真空断熱材部分	0.160	47.314	7.570
	ポリスチレンフォーム部分	0.293	15.185	4.449
ガラス	真空Low-Eガラス	0.469	38.230	17.930
	Low-E複層ガラス	0.651	4.200	2.734
サッシ		0.919	4.714	4.332
換気				39.169
総熱量損失 (W/K)				93.375
延床面積 (m ²)				62.500
熱損失係数 (W/m ² *K)				1.494

3.2 ランドスケープ計画（図2ステップ②～⑤）

一次選考では、千葉大学環境健康フィールド科学センターによる植物工場⁷⁾の技術を基礎とした食の自給を提案した。その後、東日本大震災が発生し、国民の食の安全に対する不安が拡大したことで⁸⁾、この提案はより意味を持つものとなった。

O.H.のランドスケープは、限られた敷地面積を有効に活用するため、東西南北それぞれの庭を一体化させた連続庭を計画した。連続庭では、屋根に降った雨が壁面緑化を伝い、ハーブガーデンの東庭、竹垣のある北庭、果樹園とため池のある西庭をめぐりながら、南庭の水田へと至る流れを形成している（図3）。ここに植栽される植物は、食べられたり、燃料となるもので構成し、「エディブル・ガーデン」として食の自給に向けた生活の基盤とした。南庭の34.5m²の水田は、主食となる米を栽培するほか、夏場の南からの風を冷やしながら室内へと取り込む。北側の高さ2m・幅17mの竹垣は、防風林として冬の北風が入り込むのを防ぐ。スロープの手すり際にはハーブを植栽し、「香り」のおもてなしを行った。また、風鈴や鹿威しを用いた風や水による「音」のおもてなしも取り入れた。「エディブル・ガーデン」は、建築計画と並行して設計することで、縁側を介して室内と密接に関わる空間となった。SDE大会では、多くの見学者がゆっくりとO.H.に滞在し、緑との触れ合いを楽しんでいた。

キッチンにはLED照明を用いた人工光型植物工場を設置した。人工光型植物工場は、自動化された水耕栽培によって、農薬を用いずに品質が一定な野菜を育てることができる⁹⁾。O.H.では、植物工場を家電として組み込み、年間総消費電力量の計算に加えている。

3.3 構造・施工計画（図2ステップ②～⑥）

O.H.は、学内、ソーラー村、SDE大会後の再展示の三度の施工が計画されていた。それぞれ組立と解体を行い、間口寸法や重量に制限のある陸路や海路で運搬する必要があることから、O.H.は軽量鉄骨系組立構造を採用した。基礎は、SDE大会の規定に合わせて仮設基礎としたが、地盤の凹凸の予測が困難であり、現場で高さ調整が可能となるように設計した。

O.H.試作棟の施工は、学生の施工訓練と室内環境の性能実験を兼ねて、千葉大学構内で実施された。施工中は、各工程にかかる時間を記録し、それぞれの工程を担当した学生が手順書を作成して、ソーラー村で参照するための施工マニュアルとして製本した。施工時間の短縮へ向けた取組みとして、内壁や仕上げをパネル化したほか、母屋と野地板の一体化を行った。また、危険の伴う高所作業を減らすために、小屋組を予め地上で組み立ててからクレーンで軸組に設置する実験等を行った。

これらの実践で得られたデータを元に、ソーラー村での工程表がつくられた。短期間の施工では、一工程の遅れが他工程へ影響するだけでなく、安全上のリスクを生むことが考えられたため、工程表の作成はおおよそ半年をかけて慎重に行われた。

3.4 太陽光発電システム計画（図2ステップ①～⑦）

O.H.の電力供給源となる太陽電池モジュールは、現地の強い日差しで高温となった際に発電効率の低下が懸念されたため、アモルファスと多結晶薄膜の特徴を併せ持った薄膜シリコンハイブリット型とした。また、瓦と一体となった屋根材一体型とすることで、O.H.の寄せ棟の形状を損なうことなく、屋根の防水性や耐久性を兼ね備えた太陽電池モジュールとした¹⁰⁾。

図3 連続庭を表したダイアグラム

図4 O.H.の系統連携図

SDE大会の規定では、インバータの容量は効率を加味した出力が10kW以下でなければならなかった。そこで、O.H.試作棟で太陽電池モジュールの実測を行ったところ、実質の発電量は公称最大出力の約6割と判明したため、SDE大会での最大設置容量は16.67kWと考えられた。一方、この容量では発電が最大となった際にインバータの容量を超えてしまう恐れがあり、最終的な容量は11.50kWに決定した。インバータは各々2個のMPPT制御機能を有し、東西南北面でそれぞれ独立したMPPT制御を行うことで、O.H.は太陽電池アレイ毎の発電電力のばらつきに左右されずに最大電力を取得できた。

O.H.試作棟では、出力が単相3線AC100/200Vの日本製パワーコンディショナを用いたが、SDE大会ではソーラー村の系統に合わせて単相2線AC230Vのイタリア製を使用した。O.H.の家電は省エネ性能に優れた日本製を採用し、図4の系統連携図が示すように、変圧器を用いて室内利用電源電圧の一括降圧を行った。変圧器は、インバータの容量10kWに対応し、効率95%で、産業用変圧器を住宅用に仕様変更したものである。メインブレーカは200V/75A（最大遮断電流10kA）で、負荷として200Vまたは100V系統を混合して使用し、IHを除く各分岐のブレーカは20Aと設定した。それぞれの分岐ブレーカには電力測定モジュールが備わっており、HEMSにより機械室のパソコンで常時使用電力を監視したほか、室内にはタッチパネルによって居住者が室内外の温度を確認できるようにした。

蓄電池は、住宅用の無停電電源として開発された容量2.5kWhのリチウムイオン電池を採用した。無停電電源は電力の流れが単方向となるため、負荷を稼働させる最小限の容量として5kWh（蓄電池2台）とした。蓄電池により夜間でも極力系統から電力を使用することなく、ピークシフトを用いたエネルギーマネジメントを行った。

3.5 照明計画（図2ステップ②～⑤）

SDE 大会では、自然光か人工照明を用いて、測定用に指定した机上で 500lux 以上の照度を得る必要がある。そこで、IES Virtual Environment を用いたシミュレーションを行い、0.H.の照度分布を算出しながら設計を進めた。図5は0.H.のマドリードでの午前6時、正午、午後6時の自然光による室内の照度分布のシミュレーション結果である。底の大きく出た0.H.の形状では朝6時と夜6時で全体的に必要な照度が得られず、人工照明で補うことにした。

照明方式は、LED 照明と特殊フッ素樹脂フィルムを用いた透過式の光天井とした。光天井は、照明器具の映り込みによる失敗が生じやすいため、光源を反射する下地の状態や、面となる樹脂フィルムと光源との距離を実験によって検討した¹¹⁾。実験では、下地をベニヤ、白塗り、アルミホイルのいずれかとし、樹脂フィルムに対して光源となる LED 照明を 0°、30°、60°、90° と傾斜させ、最適な組み合わせを検討した。実験の結果、下地を白塗り、LED 照明の角度を 0° として光天井を表現することになった。

3.6 アクティブシステム計画（図2ステップ②～⑤）

SDE 大会では、室内環境を室温、湿度、二酸化炭素濃度等の測定で評価する。特に室温は、23℃～25℃の範囲で維持する必要がある、測定時間も長い（詳しくは 4.3 を参照）。空調は、冷暖房の切り替えや運転操作が容易なことから、ヒートポンプパッケージ空調方式を用いたが、屋内機は天井埋込カセット型と壁掛型で検討を行った¹²⁾。検討には、熱負荷エネルギー計算ソフトの New HAPS/ACLD と CFD 解析ソフトの Phoenix のを用いた。天井埋込カセット型は、吹出口が光天井に隠れるため、吹出口の直下を羽板とする案と、ペリメーターゾーンに隙間を入れる案を検討した。ドメイン内の初期温度を冷房時 30℃、暖房時 15℃に設定しシミュレーションを行った結果、いずれも室内の上下で 10℃近い温度差が発生した。そこで、壁掛型を室内中央の間仕切り壁に居間用と寝室用に設置して再検討した。ドメイン内の初期温度は天井埋込カセット型と同様とし、反復回数 50、非定常解析で 120 秒毎、600 秒の立ち上がりを解析した。屋内機の吹出口は暖房時が下向き、冷房時は水平とした。CFD 解析結果で、冷房時はほぼ均一に快適な温度が保たれることが分かった。暖房時は、室内の上下で若干の温度差がみられた（図6）。これらの結果から、0.H.の空調は壁掛型とし、暖房時にはサーキュレータを利用することで均一な室内環境を保つことにした。

また、給湯は0.H.南側の縁側に設置した平板型集熱器を用いた自然冷媒ヒートポンプ給湯器とすることで、晴天時にはほぼゼロエネルギーで賄うことにした。

3.7 パッシブシステム計画（図2ステップ③～⑤）

0.H.の室内環境はアクティブシステムによって達成されるが、近年の「ソーラー・デカスロン」に出展された住宅にはエネルギー消費を抑えるために相変化物質（Phase Change Material）が数多く取り入れられており、実際に室内の温熱環境の安定や熱負荷の軽減に効果を発揮している¹³⁾。ソーラー村の気候は昼夜の温度差が激しい地中海性気候であることから、相変化物質の効果が見込まれた。0.H.では、0.9㎡の座面に融点 25℃で相変化する潜熱蓄熱材を敷き詰めた蓄熱移動量を 2 台製作し、1 台あたりの潜熱蓄熱量を 30kJ/kg と見込んだ。蓄熱移動量は夜間に0.H.の縁側で冷熱を蓄え、日中は室内へ移動して冷房の補助として活用する計画とした。

図5 0.H.のシミュレーションによる照度分布図

図6 壁掛型の暖房時のCFD解析結果（平面及び断面、600秒後）

表3 設備ごとの年間総消費電力量の試算

(KWh)	空調	換気	給湯	照明	家電	合計
年間総消費電力量	2,692.4	284.4	116.8	1,389.6	2,848.1	7,331.4

図7 月ごとの発電量と消費電力量の試算

また、蓄熱移動量は冷房負荷の削減のためのパッシブな装置としてだけでなく、量の新しい利用方法として提案した。

3.8 年間エネルギーバランスの算出（図2ステップ⑤）

これまでの検討から、0.H.の空調、換気、給湯、照明、家電における年間総消費電力量は7,331kWhと試算した（表3）。一方、年間の総発電量は15,161kWhで、0.H.の年間を通したエネルギー自給率は207%となり、ゼロエネルギー住宅を実現した。図7は月ごとの発電量と消費電力量の試算であるが、発電量の少ない冬季のエネルギー収支に課題がみられるため、今後、暖房負荷の削減に向けた検討を進めなければならない。

3.9 室内空気質計画（図2ステップ①～⑤）

エネルギー効率を高めるためには気密性能の向上は欠かせない。しかし、現代の気密性向上による室内空気質の悪化はシックハウス症候群などの原因の一因とされている。主な原因は建築材料や家具などから発生する揮発性有機化合物（以下、VOC）とされている。O.H.では、健康な住環境を実現するために、基本設計から千葉大学予防医学センターと協力し、室内VOC濃度の低減を目標とした計画内容を検討した。同センターはこれまでに室内化学物質濃度を低減した空間や街づくりを研究する「ケミレスタウン・プロジェクト」を実施してきた¹⁴⁾。

近年、未規制の化学物質を含めた総揮発性有機化合物（TVOC）濃度で室内空気質を評価する方法が重視されている。これまでの研究¹⁵⁾より、室内TVOC濃度を予測し計画支援をおこなうツールを使用し、材料選定に役立てた。具体的には、VOCの発生が多いと考えられる天然木質系の材料の使用を避け、構造を鉄骨、床材を再生木デッキとした。また、再生木デッキは金物を通したビス止め施工とし接着剤を使用せず、ステンレス製のキッチンを採用し、VOCの発生を極力抑えた。

気中VOC測定は、O.H.試作棟の竣工直前、竣工直後、竣工約2週間後の3度実施した。測定方法は厚生労働省が定める標準的測定方法とし、1時間のアクティブサンプリングとした。同定・定量分析はアルデヒド類16物質を含む81物質について行った。測定の結果を表4に示す。TVOC濃度は竣工直後と竣工約2週間後にかけて約400～500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ と厚生労働省の暫定目標400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ をやや超過したもの、過去の研究から竣工直後の濃度としては十分に評価できると考えられた¹⁶⁾。また、O.H.では室内と縁側が一体となったライフスタイルを提案している。開口部の開放が促進され、室内TVOC濃度の低減に寄与することも意図している。

4. O.H.の輸出・施工とSDE大会

4.1 輸出（図2ステップ⑦～⑧）

O.H.は、破損のあったものを除き、O.H.試作棟で使用した部材を再利用した。部材は、O.H.試作棟の解体後に国内の倉庫で検品、梱包し、ソーラー村近郊の倉庫（以下、スペイン倉庫）まで海上輸送した。ボルト・ナット等の細かいものを除いたO.H.の総部材数は13,730点にのぼったため、主要な部材には部材名、固有番号、傷み特性、工程、スペイン倉庫からソーラー村までのトラック番号を記入したタグシートを貼付け、できる限り工程順にまとめて梱包することで混乱を防いだ。また、太陽光発電システム等の精密機器は、湿気や外気から保護するバリア梱包とした。

梱包後の総個数は122箱、総重量は54,812kg、総容積は349.571 m^3 となり、これらを国際海上コンテナ輸送で最も一般的に使用されている40フィートコンテナに積載した。40フィートコンテナの積載可能容量は標準規格で67.3 m^3 であり¹⁷⁾、計算上は6本に積載することになるが、実際は11本となった。積載効率が悪くなったのは、費用の問題から上積み可能な梱包を見送ったためである。

また、国内の製品を輸出するには、経済産業省の定める安全保障貿易管理のリスト規制と照合しなければならなかった。精密機器においてはメーカーに輸出許可の可否を判定するためのパラメーターシートの作成を依頼したが、作成には長くて2ヶ月程度を要した。

表4 O.H.試作棟でのVOC濃度結果

	測定日	TVOC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			室内平均室温 ($^{\circ}\text{C}$)
		室内	外気	室内-外気	
測定①	3/10	1,290	21	1,269	11.9
測定②	3/20	446	51	395	13.9
測定③	4/7	547	8.1	539	17.4

図8 O.H.の居間と寝室の室温測定結果と外気温

図9 O.H.と上位チームのエネルギーバランスの比較

また、植物は検疫上、輸出できないため、SDE大会の1年前と2ヶ月前に、現地で調査と買い付けを行った。

梱包と手続きの済んだ部材は2012年6月から順次輸出し、40日前後でスペイン倉庫へ到着した。輸送中における部材の損傷はなく、税関での問題も発生しなかった。また、往路の陸上及び海上輸送での二酸化炭素排出量は87.5tであった^{注5)}。

4.2 ソーラー村での施工（図2ステップ⑨）

SDE大会では、ソーラー村での施工は12日以内と定められていたため、千葉大学は33名の学生を現地に派遣し、協力企業と合同で、5時から25時を3チームに分けて実施した。ソーラー村への部材の搬入は、朝と夕の1日2回とし、スペイン倉庫で待機している学生が施工の進捗状況聞きながら指示出しを行った。O.H.の施工は、墨出しから仮設基礎の設置、躯体の組立て、内外装、給排水設備、太陽光発電システム、電気配線、家電の設置、系統連携接続、ランドスケープ、清掃に至るまで実施し、規定の時間内に終わらせることができた。

施工現場の安全・健康管理や食事の手配は、看護学研究科の学生が担当した。施工に参加した学生は、看護学研究科の学生が独自に開発した健康管理シートを用いて、ストレスや体調を定期的に自己評価することで、怪我や病気の予防に努めた。

4.3 SDE 大会における実測結果 (図 2 ステップ⑩)

消費電力量や室内環境の測定は、SDE 大会期間中の 9 月 17～28 日に行われ、0. H. の開発で重視した室温の測定は、平日 8 時～16 時と毎日 20 時～翌朝 6 時まで (金曜日のみ 22 時～) 実施された。図 8 は、測定期間中の 0. H. の 1 時間ごとの室温と外気温との関係を表したものである。測定期間の前半は外気温の昼夜の変動が大きく^{注 6)}、室温の維持にも影響が出たが、測定期間全体の平均室温は 24. 36℃となった。また、熱力学サイクルを用いた空調を使用できないパッシブ期間 (9 月 23 日 23:00～26 日 6:00) においても、0. H. は概ね 23℃～25℃で室温を維持することができた。

次に、0. H. と上位住宅の Canopia (フランス、総合 1 位)、Patio 2. 12 (スペイン、同 2 位、エネルギーバランス 1 位)、SML SYSTEM (スペイン、エネルギーバランス 2 位)、Med In Italy (イタリア、総合 3 位、エネルギーバランス 3 位)、Prispa (ルーマニア、エネルギーバランス 4 位) とのエネルギーバランスの比較を図 9 に示す。0. H. の 12 日間の総発電量は 347. 728kWh、総消費電力量は 224. 323kWh で、総余剰電力量は 123. 405kWh となり、SDE 大会でエネルギーの自立の基準となる 10kWh/日を達成した。しかし、他住宅と比べて総発電量に対する総消費電力量が多く、0. H. の総消費量原単位 (室温調整を行った床面積に対する総電力消費量の割合) は 4. 578kWh/m² と最も高かった。その結果、相対的にエネルギーバランスが悪い評価となった。今後はパッシブシステムの導入にも力を入れることで、より消費電力量の少ないゼロエネルギー住宅を目指したい。

5. まとめ

本論で扱った 0. H. の開発と施工の成果を以下にまとめる。

- (1) 断熱性、発電量、消費電力量等の検討を行い、シミュレーション結果と開発目標を照らし合わせることによって、年間のエネルギー自給率 207%のゼロエネルギー住宅の開発を達成した。また、SDE 大会での実測で、室内環境を維持しながら 1 日あたり 10kWh の余剰電力が得られることを実証した。
- (2) 東西南北を連続させた「エディブル・ガーデン」や植物工場の導入により、食の自給を目指した生活の基盤を設計した。また、香りや音等の五感で楽しませるおもてなし空間を創出した。
- (3) 予防医学センターと共同で、VOC の発生の少ない建材の選定や、室内と縁側が一体となった開放的なライフスタイルを提案した。また、0. H. 試作棟で気中 VOC 測定を実施し、低 VOC 濃度の室内環境を明らかにした。
- (4) 梱包や手続きの課題を乗り越え、国産のゼロエネルギー住宅の輸出を成功させた。SDE 大会では、12 日間で 0. H. の施工を完了した。これらの経験から、より安価で効率的な海上輸送の仕組みを整えることで、将来的に商品としてのゼロエネルギー住宅の輸出が実現する可能性を示唆した。

謝辞

本プロジェクトで長期に渡りご指導くださった先生方、本プロジェクトに多大なご支援を戴いた協賛企業・団体・個人の皆様、後援省庁および自治体、そしてチームの学生たちに、謝意を表します。

注

- 注 1) 本論では、年間の総発電量が総消費電力量を上回る住宅をゼロエネルギー住宅と定義する。
- 注 2) ソーラー・デカスロンウェブサイト <http://www.solardecathlon.gov/> より筆者集計。
- 注 3) アメリカ合衆国エネルギー省ウェブサイト <http://energy.gov/articles/solar-decathlon-turns-ten> より。
- 注 4) 正式名称は SOLAR DECATHLON EUROPE 2012 RULES V. 1. 0～5. 0。非公開。
- 注 5) 海上輸送の CO₂ 原単位 39 g-CO₂/t*km、コンテナ重量を含めた総貨物量 96. 612t、航路移動距離 21, 390. 6km、陸上輸送の CO₂ 原単位 173 g-CO₂/t*km、日本国内移動距離 59. 5km、スペイン国内移動距離 355km として計算。
- 注 6) 外気温はスペイン気象庁 (AEMET) <http://www.aemet.es/en/portada> より。

参考文献

- 1) 桑原潤一、太田勇、岡建雄：太陽光住宅を組み込んだ省エネルギー住宅の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、pp. 383-386, 2004. 12
- 2) 濱田靖弘、落藤澄、長野克則、中村真人、横山真太郎、長坂茂由之：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立型住宅に関する研究 第 1 報-建築・設備計画および実験住宅の建設、空気調査・衛生工学会論文集、No. 73, pp. 105-115, 1999. 4
- 3) 鳴海大典、植本孝広、下田吉之、村上周三：住宅における省エネルギー対策評価とネットゼロエネルギー達成可能性の検討、日本建築学会環境系論文集、第 76 巻、第 666 号、pp. 665-672, 2011. 8
- 4) 日本建築学会編：地球環境建築のすすめ、彰国社、2007
- 5) Jouri Kanters, Miljana Horvat : The design process known as IDP: a discussion, Energy Procedia, No. 30, pp. 1153-1162, 2012
- 6) 一般社団法人日本サステナブル建築協会編：CASBEE 戸建-新築 評価マニュアル (2010 年版)、財団法人建築環境・省エネルギー機構、2010
- 7) 後藤英司、丸尾達：植物工場技術の研究・開発および実証・養育・展示拠点 (3) 千葉大学、植物環境工学、24(2), pp. 97-103, 2012
- 8) 内閣府：“「食育に関する意識調査」結果について<要約>”，入手先<<http://www8.cao.go.jp/syokuiku/more/research/h24/pdf/g.pdf>>，(参照 2012. 12)
- 9) 古在豊樹：人工光型植物工場-世界に広がる日本の農業革命-，オーム社，2012
- 10) 竹生修己：太陽光発電システムの設計と施工 (改定 4 版)，オーム社，2011
- 11) 日本建築学会編：光と色の環境デザイン，オーム社，2001
- 12) 「建築の設備」入門編集委員会編：「建築の設備」入門 空調・給排水衛生・防災・省エネルギー 新訂版，彰国社，2009
- 13) Edwin Rodriguez-Ubinas, Letzai Ruiz-Valero, Sergio Vega, Javier Neila : Applications of Phase Change Material in highly energy-efficient houses, Energy and Buildings, No. 50, pp. 49-62, 2012
- 14) 戸高恵美子，森千里：環境改善型予防医学の実践-ケミレスタウン・プロジェクト (AYUMI “ケミレス” 環境医学-化学物質を削減した社会づくり)，医学のあゆみ，228(7), pp. 749-753, 2009
- 15) 花里真道，鈴木弘樹，栗生明，森千里：住空間における総揮発性有機化合物濃度の予測と計画支援ツールの開発，日本建築学会環境系論文集，第 78 巻，第 683 号，2013. 1
- 16) 斎藤育江，大貫文，戸高恵美子，中岡宏子，森千里，保坂三継，小縣昭夫：近年の室内空気汚染問題について：未規制物質による健康リスク，日本リスク研究学会誌，21(2), pp. 91-100, 2011. 9
- 17) 石原伸志，合田浩之：コンテナ物流の理論と実際-日本のコンテナ輸送の史的展開-，成山堂書店，2010

[2013 年 2 月 20 日原稿受理 2013 年 7 月 3 日採用決定]