

オフグリッド型の太陽光発電外装システムの開発

三 谷 一 房 小 関 由 明
 矢 部 周 子 古 城 雄 一
 (大阪本店建築事業部)

Development of Solar Off-Grid System for Building Facades

Hitofusa Mitani Yoshiaki Ozeki
 Chikako Yabe Yuichi Kojo

Abstract

In recent years, expectations for renewable energy have grown; in particular, photovoltaic generation systems have spread quickly for various types of buildings. In order to facilitate the usage of the generated power, a solar off-grid system for building facades has been developed. The building-integrated photovoltaic system is mounted on a curtain wall and directly supplies solar energy to motors for our unique ventilation system and a rolling screen. The energy-saving performance of the perimeter zone is improved without the use of a commercial power supply.

概 要

近年、再生可能エネルギーへの期待は極めて大きく、特に太陽光発電は様々な建物において急速に普及している。屋上だけでなく建物外装面での太陽光発電に対する関心も非常に高まっているが、意匠性を加味した太陽電池の導入コストは非常に高く、発電効率も低下する。そこで発電量の多寡を目的とするよりもむしろ、発電電力の使い方の提案が重要と考えた。本開発では、外装カーテンウォールと一体化した太陽電池による発電電力を、商用電力に連系せず、独自開発の換気システム等に直接利用するオフグリッド型の太陽光発電外装システムに取り組み、技術研究所施設に実適用した。

1. はじめに

東日本大震災を契機にエネルギー需給がひっ迫する中、エネルギー消費の削減が一層求められている。そのため以前にもまして、CO₂排出量削減や省エネルギー・創エネルギーに対する社会的意識が高まっている。新たに改正省エネルギー基準¹⁾が整備されるなど、低炭素化社会の実現に向け、再生可能エネルギーへの期待は極めて大きく、特に太陽光発電は、戸建住宅だけでなく一般事務所ビルなどあらゆる用途の建物において、急速に普及しつつあると言えよう。

建築分野において現在、一般に普及している太陽光発電は、量産汎用形の太陽電池を建物屋上や屋根に設置し、効率的な発電を期待するものである。一方で昨今は、主としてCSR(企業の社会的責任)に配慮した訴求力の観点から、建物の外装面における太陽光発電に対しても関心が高まっている。

しかしながら建物外装に太陽光発電を設置する場合、意匠性を加味した太陽電池の導入コストは非常に高く、また壁面では年間日射量も低下するため発電効率も低くならざるを得ない。したがってCSRの観点を除けば、これまでのように発電量を主目的とした考え方を踏襲して、建物外装に太陽光発電を設置したのでは、十分な導入効果(導入に対する動機付け)が得られにくいと考えた。た

だし将来、太陽電池のコストが下がったり、外装面での発電効率の向上が見込まれたりすれば、建物外装における太陽光発電が普及する可能性は十分にある。

このようなことから本開発では、発電量の多寡を目的とするよりもむしろ、発電電力の使い方の提案がより重要と考えた。具体的には、建物外装と一体化した太陽電池による発電電力を、直接、外装まわりの負荷(例えば換気システムやロールスクリーンのモータ駆動等)に利用するオフグリッド型(独立型)の太陽光発電外装システム(以下、本システムと言う)の開発に取り組んだ。

本報告では、各方面へのヒアリング調査結果および本システムと建物一体型太陽電池の概要について述べるとともに、大林組技術研究所施設(オープンラボ2)での適用事例について報告する。

2. 本システムの概要

2.1 発電電力の利用方法の提案

一部の特殊な事例(蓄電池を備え、停電時に特定の負荷に電力を供給)を除き、建築分野における太陽光発電では、発電電力の利用方法に関する提案に極めて乏しい。そこで本システムの開発にあたり、発電電力の直接利用方法として、ペリメーターゾーンの日射対策技術とパッケージ化する着想を得た。すなわち、省エネルギー性と快適

性に配慮した外装システムを実現するための手段として、外装の太陽光発電による発電電力を利用することを提案した。

従来、快適な屋内環境を実現する上でペリメーターゾーンの熱処理は非常に重要であるため、エアフローウィンドウなど様々な方式が適用されている。しかしながらこれらは窓面から回収した熱を空調機で処理することが多く、そのためのエネルギーを必要とする。そこで本システムでは、別途開発した「インターロック式換気システム」²⁾を採用することとした。このシステムは、夏期、窓面で取得した熱を窓上部の熱だまり用ドラム型チャンパーに滞留させ、チャンパーの回転(屋内側開口を閉じて屋外側開口を開くインターロック制御)により屋外に排熱するもので、回収熱処理にエネルギーを必要としない。さらに中間期の全開モードおよび冬期の全閉モードも可能であるため、年間を通じて適切な換気が行える。

このシステムが必要とするモータおよび窓面の日射を屋内側で遮蔽するのに必要なロールスクリーンのモータを駆動させるための電力として、商用電力ではなく、外装の太陽電池による発電電力を直接利用することを試みた。本システムの考え方をFig. 1に示す。

2.2 オフグリッド型システムの提案

2.2.1 太陽光発電システムの種類

太陽電池は光が当たった時に発電するが、蓄電機能は持っていない。そのため太陽光発電は天候に左右される不安定な電力で、夜間など太陽光が無い時には発電しない。そこで安定的に電力を得るための方式として、一般的に2つの仕組みが考えられる。

1つは系統連系(grid-connected)型といい、既存の電力網である商用電力と連系し、補完を受けることで、電力の安定性を得るものである。この系統連系型の進展によって、逆潮流(電力網に向かう電力の流れ)、すなわち売電が可能な仕組みも確立した。

もう1つは商用電力と連系せず、蓄電池によって補完し、自家消費のみを目的とする独立型である。本システムでは、既存の電力網との対比を明確にするため、独立(stand-alone)型とは呼ばず、オフグリッド(off-grid)型と呼ぶこととした。

太陽光発電は当初、自家消費のためのオフグリッド型として開発された経緯がある。しかし系統連系型の進展に伴い、戸建住宅における余剰電力の売電制度も確立し、国によって順次、「系統連系技術要件ガイドライン」も整備された³⁾。現状、安価で大容量の汎用的な蓄電池技術が未達であるため、建築分野で一般的な太陽光発電システムは、全てこの系統連系型によるものである。

2.2.2 オフグリッド型による提案

(1) 系統連系型の課題 系統連系型には、パワーコンディショナが不可欠である。これを介して電力需要側は、電力供給源を意識せずに設備機器等を使用することができる。しかし、パワーコンディショナは、基本的には商用電力により動作するため、商用電力が途絶えると発電電力が得られない。東日本大震災時、多くの避難所に太陽光発電システムが備わっていたが、停電によって発電できなかったと言われている。また系統連系型では、既存の電力網に支障を及ぼさないよう、ガイドラインを遵守し、事前協議、書類手続き、立会検査などの煩雑さが伴う。補助金申請には、JET(電気安全環境研究所)の認証を受けた機器類であることが求められる場合が多い。そのため安全性や保証の兼ね合いから、太陽電池の種類をはじめとして太陽光発電システムの機器類を自由に選定したり、システム設計したりすることに制約がある。他方、オフグリッド型では、電力会社との事前協議等が不要(50kW未満)で、システム上の制約等が少ないため、小規模であれば、計画・実施が簡易で、太陽電池や関連機器類もある程度、自由に選択できる。

(2) オフグリッド型システムの概要 一般的な系統連系型システムをFig. 2に示す。パワーコンディショナ

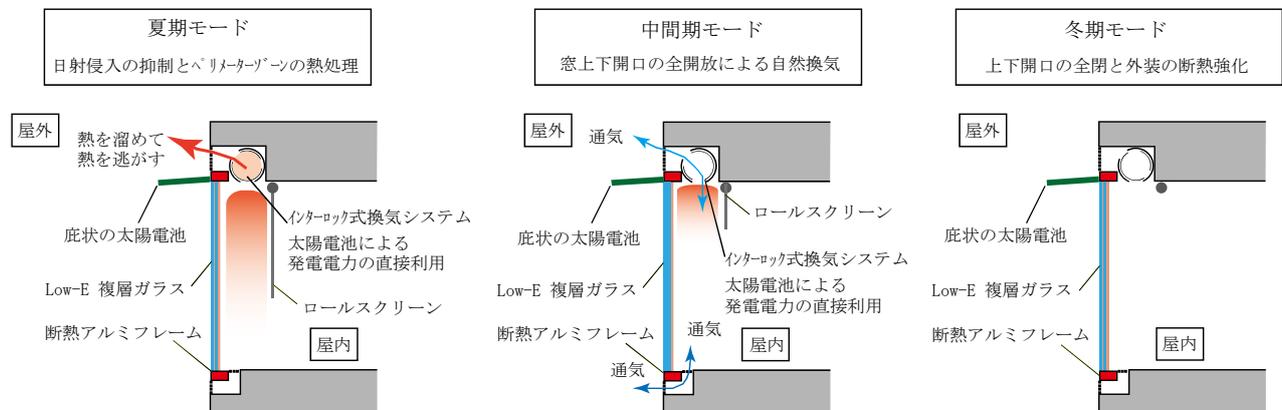


Fig. 1 本システムの考え方
Concept of the Building Integrated Photovoltaic System for Building Facade

には、太陽電池で発電した直流電流を交流電流に変換するインバータ機能および適正電圧や周波数の維持など電力品質を一定に保つ機能がある。既製のパワーコンディショナは系統連系専用の装置として品質が担保されているため、この入力側に蓄電池を組み込むことはできない。すなわち既製の系統連系型のシステムをベースにオフグリッド型システムを構築することは合理的ではない。

そこでFig. 3に示すように、本システムのオフグリッド型では、市販の充電コントローラと蓄電池とインバータを組み合わせた構成とした。すなわち、太陽電池による発電電力を充電コントローラで制御しながら蓄電池に充電し、充電した直流電流を交流電流に変換するインバータを介して負荷に利用する。この充電コントローラとインバータは、蓄電池の電力で動作する。なお負荷側が直接、直流電流を必要とする場合は、インバータではなく、安定的な直流電流を得るためにコンバータを用いればよい。オフグリッド型では、電力需給のバランスを考慮してシステム設計や機器選定する必要があるが、系統連系型に比べて制約は少ない。

オフグリッド型の太陽光発電システムは、東日本大震災以降、にわかに着目され始めた。しかしながら建築分野での事例を調査したところ、仮設照明設備としては応用されていたが、本設の設備として、本格的に利用した事例は見当たらなかった。建築分野以外では、公園の照明設備や鉄塔の航空障害灯設備で適用されている事例があった。

なお近年、蓄電ユニット単体や戸建住宅用に特化した蓄電池付の系統連系型のシステムが提供されているが、蓄電池の主たる利用方法は、予め充電された電力を非常時に使用するというものである。

3. 太陽電池の選定と耐久性に関する検証

3.1 建物一体形太陽電池の種類と選定

3.1.1 建物一体形太陽電池の種類 本システムで対象とする太陽電池は、建物屋上で金属製架台に設置される量産汎用形の太陽電池ではなく、設計・施工上の自由度を兼ね備え、特注対応も可能な太陽電池である。このような太陽電池を量産汎用形の太陽電池と区別して特に、建物一体形太陽電池 (Building Integrated Photovoltaic ; BIPV) と言う。

建物一体形太陽電池に分類される太陽電池の種類をTable 1に整理する。一般に太陽電池は、最小単位であるセルの種類によって、大きくシリコン系、化合物系および有機系に分類されるが、建物一体形太陽電池として、安定的に製造・供給が可能な太陽電池は、現在のところ、シリコン系のみである。

3.1.2 建物一体形太陽電池の選定 シリコン系には結晶系と薄膜系があり、さらに結晶系には、単結晶と多結晶の2種類がある。単結晶の方が歴史と実績が長く、セルの発電効率も優位である。一般に多結晶は単結晶より

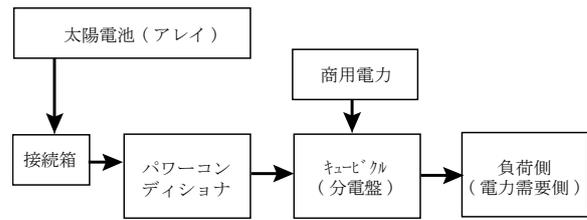


Fig. 2 系統連系型 Grid-connected Photovoltaic System

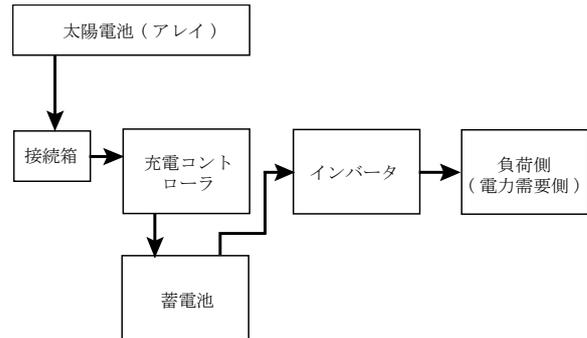


Fig. 3 オフグリッド型 Off-grid Photovoltaic System

も安価であることが特長であったが、近年はコスト的な優位性も薄れてきている。単結晶の寸法は、これまでの5インチ角から、多結晶と同じく6インチ角が主流となりつつあるため、発電性の面でも、さらに優位になっている。

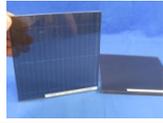
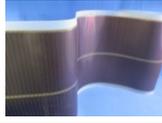
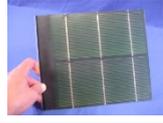
結晶系による建物一体形太陽電池は、基本的には建築用合わせガラスの技術を応用して製造できるため、形状・寸法やガラスの厚さ・種類にも外装設計上の自由度がある。セル配列やセル間の間隔も、ある程度の調整が可能である。これに対し薄膜系は、結晶系とは全く異なる意匠性が特長であるが、製造設備上、太陽電池の寸法・形状が1~2種類に限定されるため、太陽電池の寸法に合わせた外装設計をしなければならない。発電効率は結晶系に比べ低い。また薄膜系は、フロート板ガラスを基板としてシリコンの薄膜を形成し、裏面側には強度の高い熱処理ガラスで合わせ加工することができるが、フロート板ガラス側の熱割れの可能性は拭えない。

以上のことから現状、建物一体形太陽電池として最も汎用的に選定できるのは、単結晶シリコンによる合わせガラスタイプの太陽電池であると判断される。

3.2 耐久性に関する性能検証

3.2.1 目的 合わせガラスのような加工ガラスは、コスト上の理由から、国内製だけでなく海外製も多く使用されている。したがって海外製の量産汎用形の太陽電池も一般化しつつある現在、単結晶シリコンによる合わせガラスタイプの建物一体形太陽電池についても、今後、国内製と海外製の区別なく使用されるようになることも考えられる。そこで本検証では、国内製と海外製の小型太陽電池試験体を作製し、性能評価の一環として耐久性

Table 1 建物一体形太陽電池の種類
Types of Building Integrated Photovoltaic(BIPV)

建物一体形太陽電池の種類	シリコン系				化合物系	有機系
	結晶系		薄膜系 (アモルファス系)		CIGS系	有機薄膜系
	単結晶	多結晶	シースルー型 合わせガラス	シート状		
形態	ライトスルー型合わせガラス		シースルー型 合わせガラス	シート状	シート状	フィルム状
発電面	片面発電(両面発電セルも可)		片面発電		片面発電	片面発電
外観						
特長	<ul style="list-style-type: none"> 最も一般的な建物一体形太陽電池で実績も多い。 建築用合わせガラスと同様に扱える。 セルの配列等は、ある程度の自由度がある。 		<ul style="list-style-type: none"> シースルー性がある。 建築用合わせガラスと同様に扱える。 	<ul style="list-style-type: none"> フレキシブル性が高い。 軽量なので、建物側への荷重上の負荷が小さい。 	<ul style="list-style-type: none"> フレキシブル性が高い。 軽量なので、建物側への荷重上の負荷が小さい。 	<ul style="list-style-type: none"> フレキシブル性が高い。 軽量なので、建物側への荷重上の負荷が小さい。
留意点	<ul style="list-style-type: none"> 製造可能な最大寸法の制約がある。 複層ガラスも製造可能である。 影による発電効率の低下の影響が大きいとされる。 		<ul style="list-style-type: none"> 寸法が限定される。 シースルー性を高めるほど発電性が低下する。 	<ul style="list-style-type: none"> 単独ではなく、金属系・コンクリート系・シート系などの下地材に取り付ける。 窓ガラス面には取り付けられない。 	<ul style="list-style-type: none"> 単独ではなく、金属系・コンクリート系・シート系などの下地材に取り付ける。 窓ガラス面には取り付けられない。 	<ul style="list-style-type: none"> 単独ではなく、金属系・コンクリート系・シート系などの下地材に取り付ける。
変換効率*	~20%	~15%	~9%		~14%	~5%

*有機薄膜系を除き、「NEDO 再生可能エネルギー技術白書(2013.12)」より引用

に関する性能を検討することとした。

3.2.2 耐久性に関する試験項目の選定 合わせガラスは2枚の板ガラスの間に中間膜を挟み込み、全面接着して製造する。太陽電池では、2枚の中間膜の間にセルを挟み込んで製造する。そのため試験項目の選定にあたっては、JIS R 3205:2005(合わせガラス)とJIS C 8917:1998(結晶系太陽光モジュールの環境試験方法及び耐久性試験方法)の両方に規定される耐久性試験を参考にした。後者では、温度と湿度に係る複数の試験が規定されているが、ここでは温湿度およびその繰返し下降・上昇の影響を含んだ総合的な試験である温湿度サイクル試験を選定することとした。

3.2.3 試験体の概要 太陽電池試験体(2種類)の形状寸法をFig. 4に示す。試験体A(海外工場製)、B(国内工場製)ともに、単結晶シリコン(寸法:125mm×125mm, 厚さ:0.2mm)を用いた合わせガラスタイプである。試験体Aでは表面の高透過強化ガラスと裏面の強化ガラスがセルを挟みPVB(ポリビニルブチラール樹脂)中間膜で全面接着されている。試験体Bでは表裏面の高透過強化ガラスが両面発電のセルを挟みEVA(エチレン酢酸ビニル共重合樹脂)中間膜で全面接着されている。試験体個数は各2体とした。なお国内工場製ではEVA中間膜による製品のみがあり、一方、海外工場製では、EVA中間膜とPVB中間膜の両方による製品がある。

3.2.4 試験項目および試験方法

(1) 耐熱性試験および耐湿性試験 JIS R 3205:2005(合わせガラス)に準じた。まず各試験体を温度100℃(+0℃, -3℃)の恒温槽に入れ、2時間保持した後に取り出し、中間膜の状態、および中間膜とガラスやセルとの界面の状態を目視観察した。次いで同じ試験体を温度50±2℃, 相対湿度95±4%の恒温恒湿槽に入れ、2週間

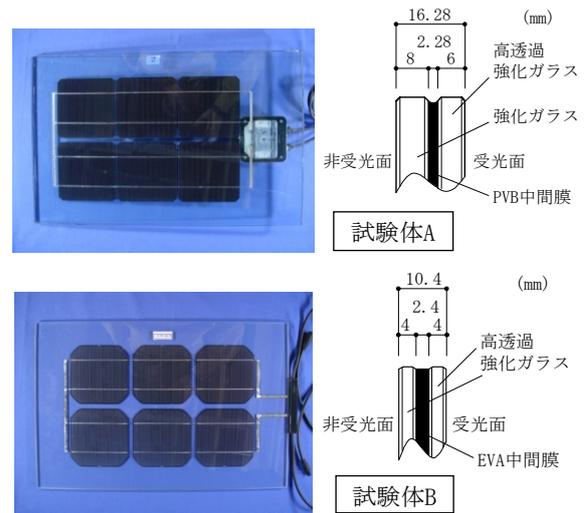


Fig. 4 試験体の形状寸法
Size of the Specimens

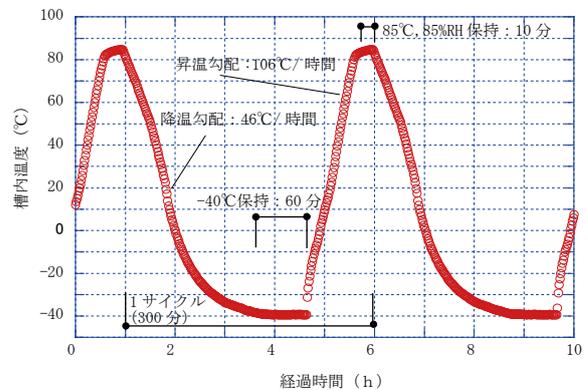


Fig. 5 温湿度サイクル試験における槽内温度履歴(抜粋)
Monitoring of the Temperature in the Chamber

保持した後に取り出し、中間膜の状態、および中間膜とガラスやセルとの界面の状態を目視観察した。

(2) 温湿度サイクル試験 JIS C 8917:1998(結晶系太陽光モジュールの環境試験方法及び耐久性試験方法)に準じた。すなわち(1)の試験後、同じ試験体に対し、温度 $85\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $85\pm 5\%$ で10分保持、および $-40\pm 3^{\circ}\text{C}$ で1時間保持を1サイクルとする温湿度サイクル試験を行った。その温度履歴の抜粋をFig. 5に示す。当該JISでは10サイクルと規定されているが、ここでは20サイクルまで行った。試験後、試験体の外観を目視観察するとともに、JIS C 8918:2005(結晶系太陽電池モジュール)に準じ電気的特性を測定した。

3.2.5 試験結果 槽内の状況をPhoto 1に示す。耐熱性試験および耐湿性試験終了後、各試験体を目視観察した結果、いずれも、剥離、気泡、白濁等の異常は全く認められなかった。

しかしながら温湿度サイクル試験10サイクル終了後、各試験体を目視観察したところ、試験体Aでは全く変化は認められなかったが、試験体Bではガラスエッジ近傍四周のEVA中間膜に薄い白濁が認められた。20サイクル終了後も試験体Aでは全く変化は認められなかったが、試験体Bでは白濁部分がさらに顕著に認められた(Photo 2)。1週間程度、試験体Bを室内に静置しておいたところ白濁は徐々に薄くなり、ほとんど認められなくなった。この白濁はガラスエッジ近傍に限って認められたことから、湿気の影響によるものであると推察された。一般にEVA中間膜はPVB中間膜よりも耐湿性に優れると言われるが、EVA中間膜であっても湿気の影響を防ぐために、ガラスエッジの保護が必要であると言える。

白濁が見られた試験体Bについては、温湿度サイクル試験後、出力特性の測定を行った。Table 2に示すとおり、試験後において出力特性の低下は認められなかったことから、この白濁は出力特性に影響を及ぼすものではないことが確認できた。

4. 適用事例

4.1 適用の概要

大林組技術研究所施設(オープンラボ2)の外装では、ユニットガラスカーテンウォールと一体化した庇状の太陽電池(単結晶シリコンによる合わせガラスタイプ)を用いた。その発電電力を、建物内の送電網に連系することなく、直接、外装の換気システムおよびロールスクリーンのモータの駆動に利用するオフグリッド型の太陽光発電外装システムを適用した。カーテンウォールの外観をPhoto 3に示す。太陽電池を庇状に配することによって、開口部からの眺望性の確保にも配慮している。またオフグリッド型の太陽光発電制御盤をPhoto 4に、換気システムとロールスクリーンの状況をPhoto 5に示す。

なお庇状の合わせガラスタイプの太陽電池は、耐風圧性および耐震性上の耐力に配慮し、ブラケット金物を介



Photo 1 槽内の状況 Specimens in the Chamber Photo 2 白濁の状況 Turbidity of the Specime

Table 2 出力特性の結果
The Results of Measuring Output Power

試験体 mark	面	温湿度サイクル試験前			温湿度サイクル試験後		
		開放電圧 Voc (V)	短絡電流 Isc (A)	最大出力 Pmax (W)	開放電圧 Voc (V)	短絡電流 Isc (A)	最大出力 Pmax (W)
B-1	表	3.601	4.690	11.741	3.746	4.676	12.137
	裏	3.559	3.630	9.207	3.702	3.480	9.432
B-2	表	3.608	4.837	11.882	3.726	4.587	12.037
	裏	3.519	3.823	9.265	3.722	3.636	9.773

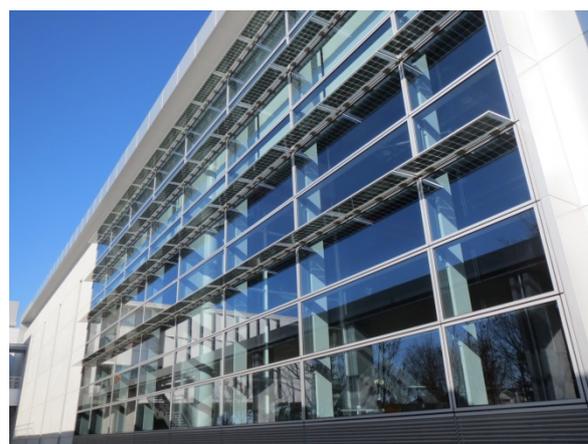


Photo 3 庇状の太陽電池とカーテンウォール
Photovoltaic as Eaves and Curtain Wall

してカーテンウォールのアルミフレーム(無目の上枠)に取り付けられている。

4.2 回路の構成

採用した単結晶シリコンによる合わせガラスタイプの太陽電池は、全体で定格5.4kW(60パネル)であり、これを5回路(定格1080W×5回路)に分け、各回路の発電電力を、充電コントローラ(MPPT方式, max. 60A, 最大入力電圧150V)で制御しながら、鉛蓄電池(ディープサイクルバッテリー, 12V×2直列: 24V系, 108Ah)に充電し、インバータ(max. 1500W)を介して交流電気に変換し、負荷側のモータの駆動電力として供給している。

5回路のうち4回路については、1回路あたり、インター

ロック式換気システム用モータ2台(150W×2台)、窓上部開口用モータ2台(400W×2台)、窓下部開口用モータ4台(50W×4台)に電力を配分している。残りの1回路は、ロールスクリーン用モータ8台(240W×8台)に電力を配分している。

実際の運用では、これらのモータが一度に稼働するのではない。換気システムについては、夏期、中間期、冬期の3つのモードに分け、それぞれ所定の運転スケジュールに基づいて稼働するよう制御されている。ロールスクリーンについても、モータ8台が一斉に動作するのではなく、2台ずつ順番に稼働するよう制御されている。

なお蓄電池を使用したオフグリッド型の太陽光発電システムでは、系統連系型のように、常に太陽電池の最大能力が引き出せるように出力調整されているわけではなく、蓄電池と負荷側の需要に合わせて(例えば、過充電にならないように)、太陽電池の発電が制御されている。

5. おわりに

本開発では、発電量の多寡よりもむしろ、発電電力の使い方の提案が重要と考えた。そこで建物外装カーテンウォールと一体化した太陽電池による発電電力を、建物内の電力網に連系することなく、直接、外装まわりの換気システムやロールスクリーンのモータ駆動に利用するオフグリッド型の太陽光発電外装システムの開発に取り組み、大林組技術研究所施設に実適用した。今後もさらなる提案に努める所存である。

参考文献

- 1) 国土交通省ホームページ：改正省エネルギー法関連情報（住宅・建築物関係），
http://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/build/jutakukentiku_house_tk4_000005.html，2014.4
- 2) 諏訪，他：インターロック式ペリメーター換気シス



Photo 4 オフグリッド型の太陽光発電制御盤
Control Unit of the Solar Off-grid System



Photo 5 インターロック式換気システム
とロールスクリーン
Interlocking Ventilation System and Rolling Screen

- 3) 資源エネルギー庁：電力品質確保に係る系統連系技術要件ガイドライン，2013.5