

BIPVモジュールおよびシステムの国際標準化に向けた建築的技術的課題

The technical and architectural issues toward establishment of international standardization for BIPV (Building Integrated Photovoltaics) module and systems as façade engineering field.

石井 久史 *1

1. 序

ZEB (Zero Energy Building) は、建物規模や建物周辺環境および運用方法など様々な要因により実現可能性が変わる。しかし、ZEBに向けた取組みは、消費エネルギーの削減がコストメリットに繋がるのと同時に地球環境にとっても有意義である。オンサイトで再生可能エネルギーを創出し、それを上手に運用消費することができれば、直接的なエネルギーゼロバランスにも貢献できる。このような取組みは、世界中で進められているはずだが、それでもZEB実現に必要なBIPV (Building Integrated Photovoltaics : 建材一体型太陽光発電設備) の姿を街中ではあまり見掛けない。そもそもBIPV市場は、どの程度存在するのか。わが国におけるBIPVの導入ポテンシャル量は、既報¹⁾によれば2030年ストック需要予測で約49 GW (東南2面に外壁面積50%設置、屋根面積の50%設置の場合) もあり、その年間発電量は92,434 GWh /a (設置可能面積3.44億m²) に達する。これは、国内総発電量の約8.9% (2016年度) に相当し、BIPVが相当のポテンシャルを有していることがわかる。このポテンシャルを活かすには、BIPVを適用し易くするための国際規格やガイドラインの整備、適用実現性を高めるための研究開発や技術開発、そして、適用にドライブを掛ける意味での諸制度 (インセンティブを促す) の導入が重要である。これらの活動は当然時間を要するが、この時間がBIPV市場を醸成していく上で必要だとも感じている。2014年に閣議決定されたZEBのロードマップでは、リファレンスから消費エネルギー半減でZEB ready、その後、再生可能エネルギーの積み増し等でNearly ZEB、そして、最終的にはNet ZEBへと誘う戦略である (図-1)。これは、短期間でZEBを実現するのではなく、長期的視

野に立ってZEB実現に向き合うということの表れである。

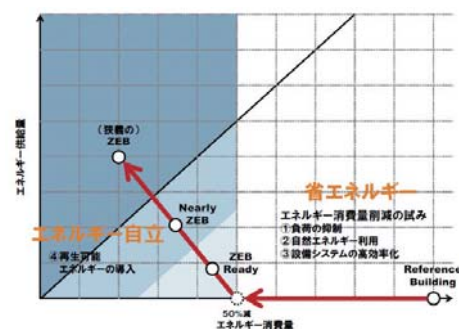


図-1 ZEB実現に向けた進め方概要²⁾

一方、ZEBへのプライオリティは、設備の高効率化や運用方法が挙げられるが、建築の基礎を掌る良質な外皮も重要である。建築外皮性能が低ければ、どんなに高効率な機器を配置し運用しても、図-2に示すように必要なエネルギーが外皮から「ダダ漏れ」であり、また、不必要なエネルギーが外皮から「ダダ入り」である。そのため、設備の負荷が増加してしまうことが考えられる。

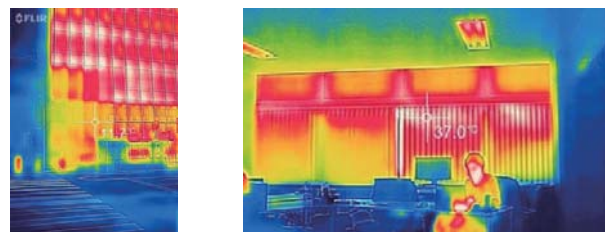


図-2 ファサードの熱損失(左)と熱負荷(右)状況

つまり、建築外皮は竣工後に容易な更新が難しいため、予め性能を確保しておく方が良い。そのため、外皮性能を表すU値 (断熱性) やG値 (日射熱取得率) は、重要な指標となる。そこに発電機能が付与されれば、機能

*1 ISHII Hisashi : 株式会社LIXIL Technology Research本部 先端コア技術研究所 主任研究員 博士 (工学)

集積度は一段と増し、外皮の価値を高められる。既往の研究では、発電や日射遮蔽以外にも光電効果がG値を向上させるとの報告^{3)~6)}もあり(図-3)、建築外部環境への顕熱負荷低減にも役立つ。このようにBIPVの活用は大きな利益をもたらすが、現状では技術的に未整備な状態にある。それは、専門領域が建築と電気と跨るためであり、互いの性能や能力に関する認識・理解が不足している点にある。それらを解消していくには、BIPVに関して国際レベルでの標準化が必要であり、その取組みを現在、「経済産業省BIPVモジュールおよびシステムの国際標準化に向けた事業」をベースにIEC(International Electrotechnical Commission) TC82 PT63092で実施している。そこで、本報では、BIPVを導入する際に必要な技術的課題等に関して、現時点で著者が把握し、考えていることについて概要を説明したい。

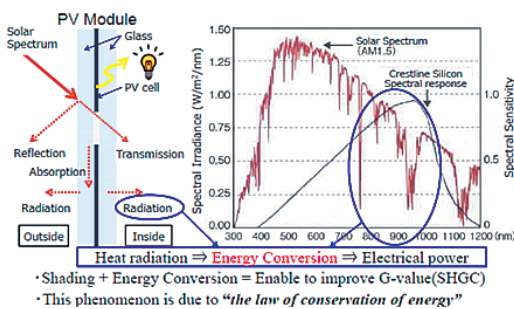


図-3 発電時にG値の性能が向上するメカニズム^{5),6)}

2. BIPVの定義

BIPVの国際標準化を行っていく上で、最初の技術的課題に定義がある。通常、国際規格では、スコープで定義付けや対象とする範囲などを明確にするため、ここでは、BIPVを語る上で、今一度定義について整理する。BIPVの定義に関する議論は、IEA(International Energy Agency) Task15やBIPVの国際標準化を進めるIEC PT 63092でも行われてきたが、現時点では不確定なため、わが国に馴染みやすい形で定義付けを行いたい。

BIPVを一言で表せば、建材一体型太陽光発電設備となるが、そこでイメージするのは写真-1のような戸建住宅用屋根設置型太陽光発電設備（以下：戸建住宅用屋根設置型PV）であろう。しかし、BIPVという言葉になった瞬間から何故かコマーシャルビルディング(写真-2)など非住宅かつ非木造建築物への適用を連想させられる。その理由は、恐らく“ビルディング”というカタカナ英語にある。わが国では、「住宅」と「ビル」というように本来は両者とも“Building”であるにも拘らず、建物用途による使い分けをしてきた。そのため、「住宅」と「ビル」、「木造」と「非木造」のように用途や工

種に照らし合せ、実務上の線引きがなされている。この棲み分けは、業界に十分浸透しているが、本質的にはBIPVという比較的新しい用語について、改めて再定義した方が良いと考えている。



写真-1 建材一体型太陽光発電設備のイメージ⁷⁾

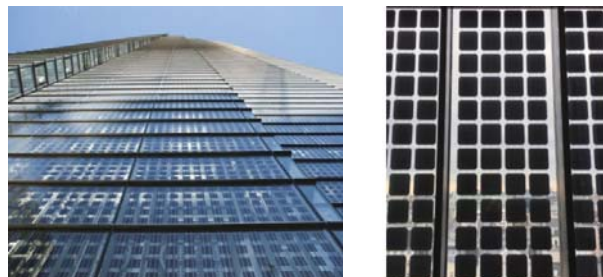


写真-2 BIPVのイメージ

そこで、グローバルではBIPVがどう捉えられているのかを紹介する。欧州諸国では、BIPVの取扱い方について、比較的大らかで寛容的である。具体的には、BIPVとBAPV(Building Attached Photovoltaics: 添付型・据置型太陽光発電設備)が同種として扱われることがあり、道路遮音壁(Noise Barrier)PVも“Building”とは無縁でありながら、BIPVの派生PVシステムとして国際会議などでは括られていることもある。ただ、遮音壁一体型PVシステムがBIPVに分類されると何かと混乱を招くので、ここでは、明確に除外しておく。

欧州規格であるEN 50583-1⁸⁾では、表-1のように設置カテゴリ別にその特徴が示されている。ここでは、本質的に建材と太陽光発電設備が一体と成しているか否かにフォーカスしている。そのため、わが国のように用途や工種による使い分けはなされておらず、ルーバーやバルコニーおよび手摺などもBIPVにカテゴライズされている。そういうところが本規格の特徴でもある。また、構成部材についても、ダブルガラス(合わせガラス)モジュールのような透過性のある部材だけでなく、多様な部材が対象と解釈できる。すなわち、建築外皮を覆う機能材と一体化している太陽光発電設備であれば、いかなる構造、構法および用途であっても一貫してBIPVと呼称するという主張が本表からは読み取れる。

表-1 EN 50583におけるBIPVの定義⁸⁾

カテゴリー	カテゴリーの要件解説
A	傾斜面屋根一体型で建物内からアクセス不可 PV モジュールは、大きなガラス片が落下するのを防ぐため、下部にバリアを設け 0° ～75° の角度で建物の外皮に取付けられるタイプ。
B	傾斜面屋根一体型で建物内からアクセス可能 PV モジュールは、0° ～75° の角度で建物の外皮に取付けられるタイプ。
C	垂直面に取付けられ、建物内からアクセス不可 PV モジュールは、大きなガラス片の落下を防止するため後部バリアを使用し、75° ～90° の角度範囲で建物外皮に取付けられるタイプ。
D	垂直面に取付けられ、建物内からアクセス可能 PV モジュールは、75° ～90° の角度範囲で建物外皮に取付けられるタイプ。
E	建物内から外部統合、アクセス可能または不可 PVモジュールは建物に取付けられ、その外皮(例えばバルコニー、手摺、シャッター、日よけ、ルーバーなど)の外側に追加の機能層を形成する。

しかし、EN 50583の定義では、BIPVとBAPVとの境界が不明瞭となる。建材は様々な用途や役割を持っており、下地材から装飾材、性能を満たす建材に至るまでその種類や役割は多岐に渡る。そこで、建材視点だけでなく、建築との一体性として捉えてみる。建築として成立する上で建材の役割を明確にすれば、BIPVは、その適用部位から建築外皮の要求性能にフォーカスする方が自然である。一般に建築外皮に求められる性能は、耐風圧性、気密性、水密性、断熱性、日射遮蔽性および層間変位追従性など多様であるが、建築が存在し得る最低限の外皮性能とすれば、原則風雨に耐えられる性能に絞られる。もちろん、断熱性なども重要であるが、無ければ建築として成立しない訳ではない。そのため、断熱性は外皮性能として二次的位置付けとなる。ここでフォーカスすべきは風雨に対する性能なので、風圧力への安全性確保として耐風圧性、風雨による圧力差から浸水を防ぐための気密性や水密性となる。これらを業界では三性能と呼ぶ。この性能を保持した建材がPVモジュール機能を有し、それらの不可分性が満たされたならば、それはBIPVと定義できる。したがって、ここでは、所定の外皮性能と発電性能を有し、建材として統合したPVモジュールおよびPVシステムをBIPVと定義する。この定義でBIPVとBAPVを比較すると、BIPVは“Integrate”することで、BAPVは“Attach”することであるので、建築外皮の性能ライン（図-4）で確認すれば、統合されたものとそうでないものとは明確に区別できる。例えば、EN 50583（表-1）に示すカテゴリー Eは、バルコ

ニーや手摺が対象だが、それらが建築外皮の三性能に影響を及ぼすことはない。そのため、BAPVに分類される。同様にカテゴリー A、Cの下部バリアや裏面レイヤに存在する建材が性能ラインとして機能するのならば、PVモジュールが“Attach”されただけとなるので、BAPVと判別できる。

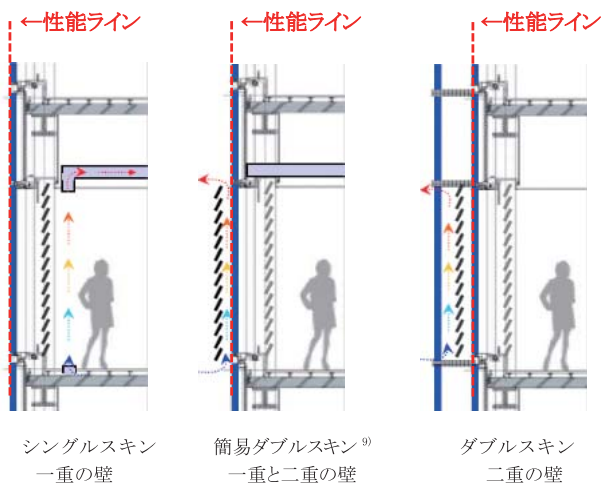


図-4 外壁の性能ライン⁹⁾

3. BIPV モジュールの進化

BIPVは、単に発電性能を得るだけではなく、建築におけるデザイン性への対応や建築外皮に要求される性能に寄り添う形で進化し続けている。既に先行している欧州諸国では、研究機関や企業がデザイン性の高いPVモジュールを提供し始めている。



写真-3 大板PVモジュール



写真-4 プリントッドPV技術



写真-5 カラードPVサンプル



図-5 従来のPVモジュール

欧州諸国では、建築で要求される大板サイズへの対応例（写真-3）やプリントドPVモジュール（写真-4）および多様なカラーに対応できるカラードPVモジュール（写真-6）など豊富なアプリケーションを市場に投入している。ここだけで比較すれば、BIPVモジュールは型式認証を受けている従来PVモジュール（図-5）とは大きな違いがあることが理解できる。BIPVモジュールやシステムは大きく進化した、単に発電効率の向上だけを目指す方向から建築に採用してもらえるためのデザイン性や多様性への対応にシフトしてきていることが伺える。

4. BIPVの適用状況

BIPVを採用するに当たり、BIPVが建築においてどの位置付けに該当し、どのような規制を受けるのかを明らかにしておく必要がある。前述からもわかるように、BIPVモジュールは建材と一体化しているため、原則、建築の規制を受けるが、発電機能も有することで電気安全性などの項目にも確認を要する。しかしながら、現状、両者を包含する規格がなく、今後、その整備が急がれる。

ここでは、建築におけるBIPVの導入プロセスについて、戸建住宅の屋根に設置されるPVシステムと商業ビルディングの外皮に採用されるBIPVシステムとを例に、両者の違いについて説明する。

住宅屋根に載せられるPVシステム（図-5）は、そのほとんどが型式認証されたPVモジュールを採用するため、WH寸法、ガラス厚や構成、セル枚数・種類、セルの大きさ・厚さ（結晶系なら5inchや6inch）、インコネやタブ線およびジャンクションボックスなどの使用材料が予め定められている。そもそも、なぜ認証が必要なのかだが、それは、第三者機関により認証試験基準への適合性が証明されることで、消費者が安心して購入・使用できるようにするためである。言い換えれば、製造者や製品供給者が安全な製品を確実に提供する、画一仕様により品質の安定性やコストの低減などに繋げるためであり、それは、最終的に利用者へのマージンとして皆が利益を享受する。この認証されたPVモジュールを戸建住宅やビルの屋根に計画するのは、建築設計者の役割である。建築設計者は、得たいエネルギー量とコストなどの関係から検討を行う。つまり、そこにファサードエンジニアやPV技術者による設計上のエンジニアリングという職能は、ほぼ介在しない。設置枚数に即した定格出力や年間発電予測などは必要となるが、それらはエンジニアの手を煩わすことなく簡単なシミュレーションで処理できる。それが型式認証されたPVモジュールのメリッ

トの一つである。その代わり、写真-3～5に示したような独創性のあるデザインや技術的独自性を得ることは難しくなる。

一方、ビルの外皮や屋根に設置するBIPVはデザイン性、設置高さ、設置部位、地域および用途地域などによって、BIPVモジュールのあり方が大きく変わる。BIPVは、建築のデザインを具現化するためにモジュールのセル枚数、配置パターンおよびピッチなどは図-6に示すように多種多様となる。性能面でも同様に地域や設置高さ、設置部位によって風圧力が異なるため、ガラス厚や構成は適用高さや適用部位により変わることが一般的である（図-7）。つまり、型式認証を受けたPVモジュールでは、きめ細かな対処ができず、オーバースペックによる無駄が生じ、商業ビルディングのような建築外皮への採用には不向きである。また、BIPVは、EN 50583（表-1）のカテゴリーB、Dに該当するので、発電能力のみならず、熱性能や視覚などの効果・影響も受ける。そのため、より建築環境工学的アプローチが必要となり、型式認証された従来PVモジュールには無かったエンジニアリングたる職能が求められてくる。このように従来PVとBIPVシステムの導入プロセスには、明確な違いが存在する。

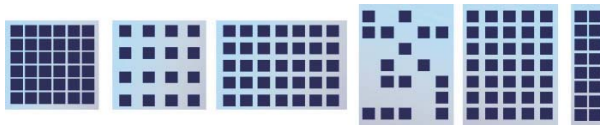


図-6 多様なBIPVモジュール例⁶⁾

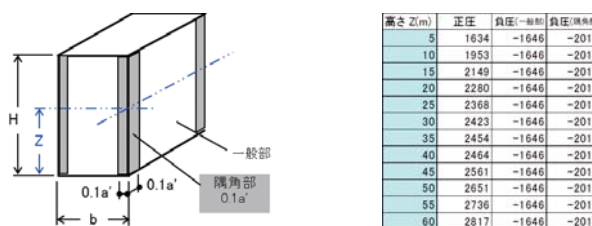


図-7 建物に作用する風荷重による風圧力の高さ部位別の違い例

そこで、商業ビルディングなどの建築外皮に適用されてきたBIPVは、実務上どのように対応されてきたのかを紐解いてみる。BIPVモジュールに限ると、認証を取得しているものは皆無であろうから、既存の建築、材料および電気分野における法規制、規格（ISO、IEC、JIS）、ガイドライン、標準仕様書などを駆使し、安全、かつ要求事項に合致するように専ら建築設計者、施工者、ファサードコントラクターおよびPV関連業種らが協議し、要求性能を整理して自主的な検証を実施している。つまり、認証が取れていないので、認証で担保されるような要求事項については、独自の試験項目を設

定し、関係者らの責任で対応してきたのである。このような検討がプロジェクトごとになされることは良いことであるが、建築、材料および電気に跨るBIPVシステムをもう少しうまく統合し調和できれば、部分的に簡素化が図れ、各業態がBIPVシステムと向き合うことが有意義になるのではないかと考えている。その動きの一つが国際規格化による活動である。型式認証された従来モジュールとBIPVモジュールとの違いを規格という枠組みの中で如何にして補完し合い、建築としての自由度を尊重させられるかがBIPVの規格化にとっては鍵となる。

5. BIPVに関連する国際規格等

BIPVの適用が今後増えることを鑑みれば、BIPVに関係する規格は、安全で良質な製品およびシステムを供給する上で重要となる。そこで、本章では、PVにおいてモジュールや試験方法などに関する国際規格および重要な地域規格、過去に提案されたBIPVに関する国際規格案等を纏めて表-2に示し、それらの概要を説明する。

IEC 61215¹⁰⁾ は、地上設置型のPVモジュールに対して設計適格性確認と型式認証を行う上で第1部では試験要件、第2部では試験手順について規定したものであり、PVモジュール規格としては、基礎的な役割を果たしている。IEC 61215-1は、PVセルの種類ごとにIEC 61215-1-1 c-Si、1-2 CdTe、1-3 a-Siとmicro c-Si、1-4 CISとCIGSの4種で運用されている。IEC 61215では、適格性を確認したモジュールの実際の期待寿命は、モジュールの設計や環境および運転される条件に影響を受けるため、モジュールの電気的および温度的特性を決定し、かつモジュールが一般的な屋外の気候に長期間さらされても耐え得ることを確認することが目的である。したがって、戸建住宅の屋根などに適用されるPVモジュールもこれに準じて確認している。また、ここでの項目は、BIPVに準用できる可能性もあるため、建築外皮特有の鉛直設置におけるグレアや発電特性などの課題^{1), 22)}も抽出しながら整備を進める必要がある。

IEC 61730¹¹⁾ は、PVモジュール安全認定について第1部で構造の要求事項、第2部で試験の要求事項が規定されている。この規格では、安全な電気的および機械的動作を提供するためのPVモジュールの基本構造要件が示されている。具体的には、機械的および環境的ストレスによる感電、火災の危険および人的傷害防止を評価するための項目が提供されている。BIPVは建築外皮に適用するため、人がBIPVモジュールに直接触れることもあり、この部分の評価項目も参考にして検討すべきである。

表-2 BIPVに関係する規格および規格案等一覧

規格番号	規格タイトル等
IEC 61215-1 Ed.1 (2016) IEC 61215-2 Ed.1 (2016)	Terrestrial photovoltaic modules – design qualification and type approval Part 1: Test requirements, Part 2: Test procedures 地上設置太陽電池モジュールの設計適格性確認と型式認証 第1部：試験要件、第2部：試験手順
IEC 61730-1 Ed.1 (2016) IEC 61730-2 Ed.1 (2016)	Photovoltaic module safety qualification Part 1: Requirements for construction, Part 2: Requirements for testing 光電池モジュール安全認定 第1部：構造の要求事項 第2部：試験の要求事項
IEC 60904-9	Photovoltaic devices—Part 9: Solar simulator performance requirements 太陽電池(PV)デバイス 第9部：ソーラーシミュレータの性能要件
IEC 61853	Photovoltaic module performance testing and energy rating 太陽電池モジュール性能試験および発電量定格
IEC 60721	Classification of environmental conditions appearing in nature 環境条件の分類 自然に現れる環境条件
IEC 62915 (TS)	Photovoltaic (PV) modules - Retesting for type approval, design and safety qualification 太陽電池モジュール・型式認証、設計および安全性認定のための再試験。
旧 IEC 62890 (廃案)	Photovoltaic modules for building curtain wall applications 過去に提案されたCW用途の太陽電池モジュール
旧 IEC 63092 (廃案)	Photovoltaics (PV) on roof 過去に提案された屋根用太陽電池
IEC 63092-1 IEC 63092-2 (CD)	Photovoltaics in buildings Part 1: Building integrated photovoltaic modules Part 2: Building integrated photovoltaic systems 建築用太陽電池 第一部:建材一体型モジュール 建築用太陽電池 第一部:建材一体型システム 現在、IECにて検討中の国際規格案
ISO 19467	Thermal performance of windows and doors — Determination of solar heat gain coefficient using solar simulator 窓やドアの熱性能・ソーラーシミュレータを用いた日射熱取得率の決定
ISO 18178 (TS)	Glass in building - Laminated solar photovoltaic glass for use in buildings 建築用ガラス・建築用ガラス太陽電池
EN 50583-1 EN 50583-2	Photovoltaics in buildings Part 1: BIPV modules Photovoltaics in buildings Part 1: BIPV systems 建築用太陽電池第一部：PVモジュール 建築用太陽電池第二部：PVシステム

既に廃案となっている旧IEC 62890や旧IEC 63092は、前者がカーテンウォール（以下CW）に組込むPVモジュールおよびシステム、後者が屋根に組込むPVモジュールおよびPVシステムを対象としたものである。これらは、外壁材や屋根材として機能することを目的とした規格案であったため、試験項目に電気領域はほぼ無く、

従来CWや屋根材の試験項目を中心にテストシーケンスが示されていただけで、内容は些か不十分であった。

IEC 60904-9¹²⁾ は、平面・非集光形の発電を目的とする地上用結晶系太陽電池セルおよび地上用結晶系太陽電池モジュールの出力測定に用いる結晶系太陽電池測定用ソーラーシミュレータを規定している。ソーラーシミュレータは、電気的性能の他に建築外皮性能に関する熱的性能を加味した試験方法について、IEC PT 63092で検討を行っており、重要な規格の一つと捉えている。現在、波長範囲を300-1200nmに拡張しIECで審議中である。

IEC 61853¹³⁾ は、4部で構成されている。第1部では定格電力(Wh)の観点からPVモジュールの性能を評価するための要件が記載されている。第2部では放射照度、周囲温度、風速からモジュール温度を決定するテスト手順や入射角効果の測定方法および分光感度が示されている。また、第4部ではエネルギー定格値の計算に使用される標準参照気候プロファイルについて記されており、第3部では1部、2部および4部のデータを使用してPVモジュールのエネルギー定格値を計算する方法について解説している。

IEC 60721¹⁴⁾ は、気温湿度で気候の分類を表わしており、製品テストや適用する際の適切な温湿度を選択する資料として使用される(南極と標高5000m以上を除く)。この規格は、試験やシミュレーションなどに活用される。

IEC TS 62915¹⁵⁾ は、いわゆるリテスティングに関する規格であり、形式変更、または変更予定の地上用PVモジュールの型式認証を維持するために必要な項目を規定している。材料選択、構成、製造過程の変更は、製品の電気的性能、信頼性および安全性に影響を与えるため、BIPVの安全性確保には関連する規格となるが、BIPVの特性上、自由度を妨げない様な内容にする必要がある。また、ガラス製造側では、BIPVモジュールの型式認証において、そこから外れるものに対してリテスティングする項目を規格として議論されている様であるが、その進捗状況は定かではない。仮にISOの建築用ガラスでBIPVのリテスティング要件を規定するのであれば、単にガラスだけに特化するのではなく、電気的要件(IEC TS 62915)や建築的要件も踏まえ、BIPV規格に相応しく、形態の自由度との整合性を図る必要があるだろう。

ISO 19467¹⁶⁾ は、窓およびドアの日射熱取得率を測定する方法を指定したものであり、窓やドアに適用される。非垂直窓やカーテンウォール(CW)については、本規格に含まれていないがInformativeとして窓用BIPVが含まれている。日射熱取得率試験(SHGC: Solar Heat

Gain Coefficient)は、BIPVにとって重要な指標となり得るため、試験方法や試験条件など他の規格との調和が重要となる。また、この規格ではIEC 60904-9とのスペクトルの範囲やその合致度などにおいても調和が必要となるが、窓としてのBIPVと建築外皮(CW構法)としてのBIPVとの違いも含め、引続き調整を図っていく必要がある。

ISO/TS 18178¹⁷⁾ は、外観・耐久性・安全性への要件、試験方法および建築物に使用するダブルガラスモジュールに対して規定している。ISO/TS 18178は建材一体型太陽光発電(BIPV)に適用され、添付型据置型太陽光発電設備(BAPV)も参照できる。このTSは、原則電気的性能に関する項目を含んでおらず、建築材料に特化しているため、IEC規格と組合せて再構築する必要がある。

EN 50583⁸⁾ は、建築用太陽電池の欧州規格であり、モジュールとシステムに関して規定している。建築および電気製品としてのEU指令に加えて設置形態ごとに、機械的安定性や火災時安全性などの要求事項が設定されている。材料としてはガラス、ポリマー、金属製シート等も広く対象としている。欧州のローカル規格ではあるが、必要項目は参考にして国際規格化に活用していく。

BIPVに関連する規格は、建築、建材、材料、電気の分野に跨るため、整理統合するには非常に複雑に映り分かり難い。そこで、各規格の特性から全容を図-8に示す。図中の横軸は設置部位別によるカテゴリーであり、縦軸は規格の対象領域等を示す。図-8では、合わせガラスにフォーカスしたISO/TS 18178、PVモジュールとシステムを中心に纏めたEN 50583に対して、廃案となっている旧IEC 63092と旧IEC 62890を整理し、新生IEC 63092-1,-2 (Photovoltaics in buildings Part 1 BIPV modules, Part 2 BIPV systems)¹⁸⁾として提案しており、この規格案の示す領域と他規格との関係性が理解できる。現在、BIPVとしての成立要件をハーモナイズしながら、IEC TC82のPT 63092にて検討を進めている。

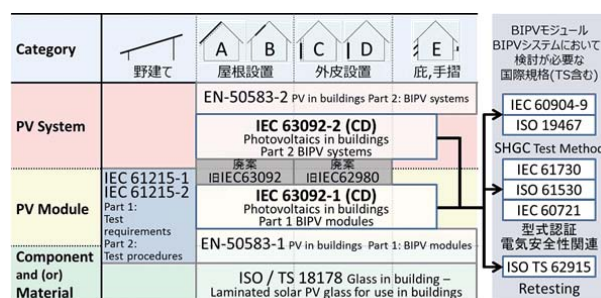


図-8 BIPVの国際規格化に向けた各規格および規格案の整理

6. 建築的技術的課題

BIPV国際標準化に向けての技術的課題を以下の表の網掛け部に示す。また、表中の網掛け無し部は、現時点では国際規格には大きく関係してこないが、一般的に懸念される事項を建築的視点から示している。ここでは、BIPVモジュールおよびシステムの国際標準化委員会建築分科会やIEC TC82のPT 63092内で検討が進められている内容について、開示できる範囲で電気領域を尊重した建築側の視点として私見を交え説明したい。

表-3 BIPVモジュール規格化に向けた課題と建築的課題

性能・項目	概要
断熱性能 U 値	現時点では、従来の計測方法を踏襲することで十分であると考え。U 値はセル配置や枚数に関わらず、従来ガラスと同等の性能となる ^{3)~6)} 。
日射熱取得率 G 値	BIPVにおけるG 値は発電状態での計測が現実的であり、既往の研究では性能が向上することが明らかとなっている ^{3)~6)} 。したがって、BIPVの新たな試験方法として提案する必要がある。
光源スペクトル による違い	IECの発電性能における光源スペクトルの適用領域は400~1100nmであり、日射熱取得率は300~2500nmである。この違いを技術的かつ扱い易さも踏まえて調整していく必要がある。
代表サンプル サイズ	多様なBIPVモジュールに対応するには、試験項目のクリティカルな部分を抽出し、最適な代表サンプルサイズを規定する必要がある。
リテスティング	代表サンプルサイズと同様にプロジェクト内だけでも異なるモジュールがあるため、建築の自由度を損なうことなく、計算などを併用し代用できるような仕組みを検討する必要がある。
防耐火性能	電気的エラーや近隣及び内部からの火災に対し遮炎性が必要。既往の研究 ^{20), 21)} では、従来ガラスと同様に扱えることが明らかとなっている。
鉛直面における 発電性能	BIPVは鉛直面に設置されるため、周辺環境の影響として影や反射が生じ、発電性能や周辺へのグレアによる影響等配慮が必要となる ^{1), 22)} 。
耐久性能	BIPVは従来PVモジュールよりも建材として長期間使用されるため、長きに渡り電気安全性が維持できるような試験項目が必要となる。

以下に代表的項目について、研究成果を交え説明する。

・断熱性能 (U 値)

断熱性能は、窓としての規定とガラスとしての規定の2種類があり、計算法と測定法が示されている。代表的なのは窓の性能としてISO 10077とISO 12567であり、ガラスとしてはISO 10291~10293がある。断熱性能試験は、アクティブな状態（発電状態）での測定が困難であることから、現時点では、従来の測定方法を踏襲することで十分であると考え。BIPVは、PVセルの配置が複雑（図-6）なこともあるため、断熱性能に対して懸念される方もいるが、現実的には、PVモジュールと従来ガラスの板厚、構成、インターレイヤの種類と厚さなどが同じで

あれば、大きな差は無いことが報告されている^{3)~6), 19)}。参考までに既往の研究より説明する。図-9は試験条件、図-10に結果を示す。U値試験は、JIS A 4710に従い実施した。透明ガラス（開口率100%：セル無し）とPVモジュールの開口率が異なる20、30、40%およびPVセル間距離が広く開口率30%のタイプをガラス構成、種類ごとに比較したが、大きな差が無いことが明らかとなった。すなわち、BIPVモジュールは、通常ガラスと同じU値を採用でき、外皮性能であるPAL*の算定などに大いに役立つ。

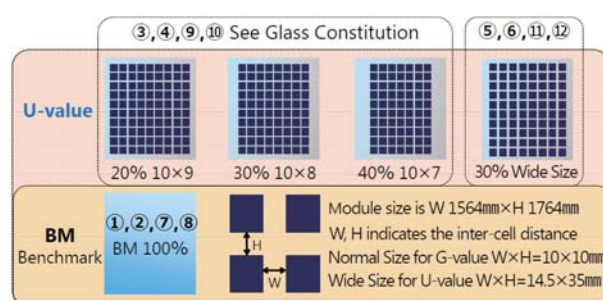


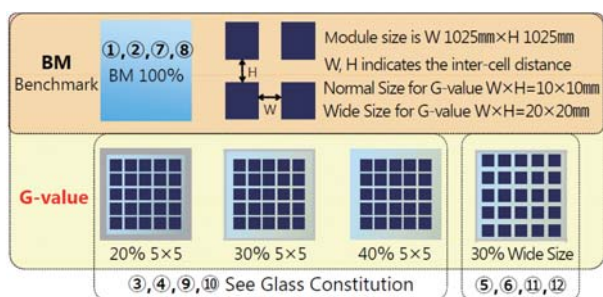
図-9 通常ガラスとBIPVモジュールのU値試験条件^{3)~6), 19)}

Glass Types	Laminated	IGU	Low-E coated IGU
Aperture Ratio (%)	Not Low-E (W/m ² ·K)	Not Low-E (W/m ² ·K)	Summer ver. (W/m ² ·K)
100	BM ① 5.12	② 3.11	⑦ 2.26
20	BIPV ③ 5.09	④ 3.15	⑨ 2.28
30	BIPV ③ 5.08	④ 2.96	⑨ 2.30
40	BIPV ③ 5.14	④ 2.99	⑨ 2.33
30 Wide	BIPV ⑤ 5.08	⑥ 3.06	⑪ 2.29
			Winter ver. (W/m ² ·K)
			⑧ 2.37
			⑩ 2.31
			⑫ 2.33
			⑬ 2.27

図-10 通常ガラスとBIPVモジュールのU値の結果^{3)~6), 19)}

・日射熱取得率 (G 値)

日射熱取得率 (SHGC) の測定は、BIPVモジュールでも窓と同様に電気回路的に開放で測定していたが、現実的には閉鎖（発電状態）で測定の方が実状を再現できるため、現在、閉回路での試験方法を提案している。BIPVモジュールのG値は、閉回路に電気負荷装置を接続した状態で測定すると、仮説の通り、従来のG値（開放状態）測定値よりも向上することが証明されている^{3)~6), 19)}。参考までに図-12にG値試験結果を示す。図中、Openは開放、Closedは閉鎖状態を表す。結果から、開放と比較して閉鎖は低い値となっていることがわかる。このメカニズムは、図-3に示す通り、近赤外線に感度のある半導体セルを採用した場合、光電効果により近赤外線が電力に変換されるため、PVセルで吸収された光が熱に変換され、室内側への再放射エネルギーが減少する点にある。

図-11 通常ガラスとBIPVモジュールのG値試験条件^{3)~6), 19)}

Aperture Ratio (%)	Glass Types	Circuit Condition	Laminated		IGU		Low-E Coated IGU			
			-		(not Low-E)		Summer ver.		Winter ver.	
			G-value	Ratio	G-value	Ratio	G-value	Ratio	G-value	Ratio
100	BM	-	① 0.77	1.00	② 0.70	1.00	⑦ 0.55	1.00	⑧ 0.66	1.00
20	BIPV	Open	③ 0.40	0.52	④ 0.26	0.37	⑨ 0.20	0.37	⑩ 0.22	0.34
		Closed	③ 0.38	0.49	④ 0.24	0.34	⑨ 0.19	0.35	⑩ 0.22	0.34
30	BIPV	Open	③ 0.44	0.57	④ 0.29	0.41	⑨ 0.23	0.42	⑩ 0.26	0.39
		Closed	③ 0.43	0.56	④ 0.26	0.37	⑨ 0.22	0.40	⑩ 0.25	0.38
40	BIPV	Open	③ 0.46	0.60	④ 0.29	0.41	⑨ 0.25	0.45	⑩ 0.26	0.39
		Closed	③ 0.43	0.56	④ 0.27	0.35	⑨ 0.24	0.44	⑩ 0.25	0.38
30 Wide	BIPV	Open	⑤ 0.43	0.56	⑥ 0.33	0.47	⑪ 0.24	0.44	⑫ 0.26	0.39
		Closed	⑤ 0.42	0.55	⑥ 0.31	0.44	⑪ 0.23	0.42	⑫ 0.25	0.38

図-12 通常ガラスとBIPVモジュールのG値の結果^{3)~6), 19)}

・光源スペクトルによる違い

発電出力測定に用いられるIEC 60904-9の光源スペクトルは、適用領域が400-1100nmであるのに対し、ISO 19467の日射熱取得率によるスペクトル適用領域が300-2500nmであり乖離している。これは、計測目的が異なるので当然である。PVモジュールの計測では、短波長赤外線領域に感度のあるPVセルが無いため1100nm以降の測定が必要無く、建築側では短波長赤外線領域である2500nmまでが熱的性能に影響してくることがその理由である。しかしながら、最近では、従来よりも長波長側に感度のあるPVセルが開発され、将来的にさらに開発される可能性もあるため、1200 nmクラスまで検討されている（前述）。また、ISOでは、波長範囲300-2500nmの相対スペクトル強度は、1100-1700nmで14.1%、1700-2500nmが4.8%であることから、BIPVにおける光源の実現性や一般化および汎用性も踏まえ、BIPVの日射熱取得率試験に向けた波長範囲の調整が課題の一つである。

・代表サンプルサイズ

代表サンプルは、型式認証取得に必要な評価試験において、試験設備に試験体サイズが制限される場合やWHサイズにバリエーションがある場合など適用される全種類の製品に対し、実製品と同等もしくは条件が厳しくなる仕様やサイズを代表サンプルとして用いることで、実製品より小さい試験体でも認証評価試験サンプルとして

認められることをいう。すなわち、実大サイズ試験体や全種類での試験実施を省略できる代表したサンプルサイズのことである。ここでの課題は、主にIEC 61215とISO / TS 18178とで代表サンプルサイズが異なる点にある。IECでは、原則的に実大モジュールを採用するが、試験装置に入らない場合、同様のコンポーネントを持ち、評価への影響が少なくなる代表サンプルサイズが規定されている。一方、ISOでは、各試験項目に対して試験体サイズが定められており、その種類は多様である。また、小さなサンプルサイズで良い項目と実大サンプルを要求する項目がISOには混在するが、試験装置では対応できない大きな試験体への説明が記されていない。まずは、このような違いから調整していく必要がある。

BIPVモジュールは、従来の認証取得PVモジュールと異なり、プロジェクトに適用されるWHサイズ（写真-3）、ガラス厚やガラス構成が異なるため、試験設備に合致しないことが多い。また、プロジェクト内でもサイズ違いや構成違いが生じることも頻繁にある。そのため、多様なBIPVモジュールに対応するには、電気的建築的試験項目のクリティカルな部分を抽出し、最適な代表サンプルサイズを規定する必要がある。当てはまらないものは、例えば、別途計算なども含めた手法も組み合わせで共通の項目を構築していく必要があると考えている。

・リテストング

リテストングは、型式認証取得したBIPVモジュールにおいて、認証取得後にWHサイズや板厚、材料など仕様変更が生じた場合、その変更度合いに応じて必要項目に対する評価試験を再度実施しなければならないことをいう。一定条件の下、リテストングが免除された試験項目は、仕様変更において一部の再試験が不要となる。

BIPVモジュールは、前述の通り、従来の認証取得PVモジュールとは異なり、各プロジェクトもしくはプロジェクト内でもBIPVモジュールのサイズ、板厚、セル配置およびガラス構成などが異なることが多い。そのため、型式認証されたBIPVモジュールは、リテストングが必要となり様々な負担が想定される。そこで、最小限の確認で代用できる項目の絞り込みや計算（シミュレーション）による確認なども一つの方策であろう。仮にリテストングによる試験項目が電気と建材で同じであったとしても、各々の評価ポイントが異なるため、判断基準が合致しない場合もある。その際、細心の注意が必要であり、これらを踏まえ、BIPV特有の自由度を阻害することが無い様にBIPVモジュールのリテストングについて、その要否も踏まえ議論が必要である。

・防耐火性能

BIPVの懸念事の一つである防耐火性能については、各国または各リージョンで建築外皮の防耐火性能における独自の基準を設けられていることが多いと聞く。そのため、インターナショナルレベルでの規格化には不向きとの意見もある。しかしながら、防耐火性能の要求事項は各国でほぼ同じであり、共通の関心ごととなっている。したがって、規格化に向けた検証が必要ではないかと考えている。特に最近では、住宅屋根に設置する従来PVモジュールによる火災問題が指摘されており、防耐火問題に限っては、モジュールとして型式認証を受けているから安心ということだけでは解決できていない。それは、BIPVが建築と融合して、システムとして最終的な性能評価が定まることに起因するからである。そのため、防耐火に対しては、建築的視点から捉えるべき課題である。

BIPVの火災時性状については、既往の研究^{20),21)}にて報告されている。ここでは、その一例を紹介する。BIPVにおける火災リスクとしては、主に以下の3つがある。

- ①BIPVモジュールまたは関連周辺機器の電気的エラーによる発火。
- ②近隣建物からBIPVモジュールが火炎に曝され、建築外皮で火災が拡大するもしくはモジュールを貫通する。
- ③内部火災によりBIPVモジュールを貫通し上階延焼などを引き起こす恐れ。

これらを検証するために、BIPVモジュールを電気的負荷装置に接続した状態で防耐火試験を実施した。試験結果から、結晶系シリコンを用いたBIPVモジュールでは、仮説通り、通常ガラスと同仕様（ガラス板厚、中間膜種類や膜厚など）であれば、概ね同等の性能が保てることを証明した。試験時の様子を写真-6に示す。試験では、合わせガラスの一部が剥離落下し、非加熱面側への噴出火炎は若干生じたが、従来ガラスと同様の結果であった。



写真-6 BIPVモジュールにおける発電状態での防耐火試験^{20), 21)}

・鉛直面における発電性能

BIPVは鉛直面に設置されることが多いため、周辺環境の影響として影や反射が生じ、発電性能や周辺へのグレアによる影響など配慮が必要となる。特に発電性能の評価に関しては、IEC 60904、IEC 61853を活用しながら、BIPVモジュールおよびシステムにおける性能評価を構築する必要がある。鉛直設置PVモジュールの発電量は、従来の屋外設置型PVモジュールとは異なる評価が必要である。例えば、低入射角時の表面反射効果に対する評価法や反射光によるグレアの評価および周辺環境からの増分反射光などである²²⁾。

・耐久性能

BIPVは建材として用いられるため、要求される耐久性は従来PVモジュールと比較して遥かに長いことが想定される。しかし、現状では、耐久性に関わる項目の多くは、IEC 61215等地上設置型PVモジュールから引用されているため、BIPVに合致しているとは言い難い。そこで、BIPVの要求性能に合致した試験条件や新たな試験項目が求められる。また、原則として、建材と同等の耐久性をPVの電気的な部分に求めるのは厳しいため、発電部分やその周辺にエラーや不具合が生じた場合には、速やかにその部位を回避するか遮断するなどして、電気的安全性が確保されるべきと考える。そういった項目もシステムとしては必要となるだろう。

・耐用性能

BIPVは、建築と電気の側面があるため、その耐久性やエラー頻度に関しては、どうしても相いれない部分が出てしまう。また、BIPVは、建築外皮に設置されるため、一度エラーが生じると、メンテナンスや修理交換のために足場を組むなど大掛かりな対応が必要となる。このような課題を解決するには、例えば、室内側に設置するなどの方法が考えられる。具体的には、既存の外皮を構成するガラス面に室内側から透明封止材でカバーされたPVモジュールを貼付ける、ダブルガラスモジュールを室内側に設置する²³⁾（写真-7）およびブラインド型PVモジュール²⁴⁾（写真-8）などが挙げられる。



写真-7 室内吊下げ式PV²³⁾



写真-8 ブラインド型PV²⁴⁾

これらは、BIPVモジュールのメンテナンス性に対する問題を考慮すれば、一つの解決策として有効な手立てである。しかしながら、発電性能や室内設置による漏電や感電への懸念、電気的エラーによる発火およびガラスの熱割れなどの懸念事項も今後は整備していく必要があり、現在検討を進めている項目の一つである。

7. 規格の制定に向けて

現時点ではBIPVモジュールおよびシステムに関する国際規格は存在しないが、地上設置型PVモジュールを対象としたIEC 61215の認証制度やIEC 61730の電気安全性に関わる試験等に合致する項目を活用しながら、過去に提案された規格案をハーモナイズし、国際レベルで要求される基礎的評価項目の構築を現在行っている。その一方で、BIPVの特長と言えるデザイン性に基づいた自由度にどう対処するかは、建築にとって非常に重要な部分である。したがって、代表サンプルやリテスティングに関する項目は、BIPVの規格化に向けて要否も踏まえ、しっかりと調整が必要となる。さらに評価方法では、鉛直面の発電量や日射熱取得率による新たな試験方法の提案などを通じて、BIPVの適用し易さを目指しており、ZEB化を後押しできるようにしたいと考えている。

8. 結

本報では、BIPVを導入する際に必要な建築的技術的課題について、経済産業省BIPVモジュールおよびシステムに関する国際標準化事業やIEC TC82 PT 63092などの活動を通じて得た知見を基に、現時点で著者が把握し考えていることをまとめ報告した。BIPVは、建築外皮性能を有しながら発電性能も有するため、今までにない課題を多く抱えているが、それらが解決されれば、建築のファサードとしての価値集積度は高められ、施主、建築設計者、建築施工者、ファサードコントラクター、PVメーカー、素材メーカーなど全てのプレーヤーにとって有意義となるはずである。

今後は、BIPVが安全にかつ扱い易くなることを目指し、わが国におけるBIPVの研究開発や技術開発および実プロジェクトへの適用が盛んに行われ、この国際標準化活動が関係業界にとって良い方向に活かされていくことを期待する。

謝辞

本報は、著者が委員および建築分科会長を務める経済産業省建材一体型太陽光発電（BIPV）モジュール・システムに関する国際標準化事業およびIEC PT 63092において議論した内容が一部含まれている。本報執筆にあたり承諾頂いた国立研究開発法人産業技術総合研究所の近藤道雄氏をはじめ、本委員会の中島昭彦委員長、同委員会建築分科会および太陽光発電技術研究組合の関係諸兄に深く感謝致します。

【参考文献】

- 1) 清家剛, 西川省吾, 石井久史 他: 高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発動向調査等 BIPV (建材一体型太陽光発電) に関する検討, 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2016.9
- 2) 経済産業省資源エネルギー庁省エネルギー対策課: ZEBロードマップ検討委員会とりまとめ (案), 2015.12
- 3) 石井久史, 斎藤正文, 近藤道雄 他: ガラスファサードに適用される BIPV の熱性能評価 その1 単結晶シリコンモジュールにおける断熱性能と日射熱取得率, 日本建築学会, 2016 年度大会 (九州), 2016.8
- 4) 近藤道雄, 石井久史, 斎藤正文 他: ガラスファサードに適用される BIPV の熱性能評価 その2 Low-E ガラスを用いた単結晶シリコンモジュールにおける断熱性能と日射熱取得率, 日本建築学会, 2017 年度大会 (中国), 2017.8
- 5) Hisashi ISHII: Evaluation of Thermal Properties for BIPV in Glass Facade, EU PVSEC 2017 in Amsterdam Netherland, 2017.9.
- 6) Hisashi ISHII: Evaluation of Thermal Properties for BIPV in Glass Facade Part 2 Experimental Results of Thermal Transmittance and Solar Heat Gain Coefficient for Crystal Silicon PV Module according to ISO standard, EU PVSEC 2018 in Brussels Belgium, 2018.9
- 7) 大野二郎, 石井久史 他: BIPV って何? 太陽を纏う建築, 太陽エネルギーデザイン研究会, 2015.7
- 8) EN 50583: Photovoltaics in buildings Part 1: BIPV modules, Part 2: BIPV systems, Jan.2016
- 9) 石井久史: ガラスファサードの形態と構成方法についてー環境的側面と構造的側面からー, GBRC, Vol.36 No.1, pp.12-23, 2011.1
- 10) IEC 61215: Terrestrial photovoltaic modules - design qualification and type approval Part 1: Test requirements, Part 2: Test procedures, 2016
- 11) IEC 61730: Photovoltaic module safety qualification Part 1: Requirements for construction, Part 2: Requirements for testing, 2016
- 12) IEC 60904-9: Photovoltaic devices - Part 9: Solar simulator performance requirements, 2007
- 13) IEC 61853: Photovoltaic module performance testing and energy rating, 2011
- 14) IEC 60721: Classification of environmental conditions,

Part 2-1 : Environmental conditions appearing in nature - Temperature and humidity, 2013

- 15) IEC TS 62915 : Photovoltaic (PV) modules - Retesting for type approval, design and safety qualification, 2018
- 16) ISO 19467 : Thermal performance of windows and doors - Determination of solar heat gain coefficient using solar simulator, 2017
- 17) ISO / TS 18178 : Glass in building - Laminated solar photovoltaic glass for use in buildings, 2018
- 18) IEC 63092 (CD) : Photovoltaics in buildings Part 1 : Building integrated photovoltaic modules, Part 2 : Building integrated photovoltaic systems, 2018
- 19) Hisashi ISHII : Evaluation of Thermal Properties for BIPV in Glass Facade, Advanced Building Skin 2017 in Bern Switzerland, 2017.10
- 20) Hisashi ISHII, et.al : Experimental Study on BIPV Module of Closed Circuit Situation Exposed to Fire, Grand Renewable Energy World Conference 2018 in Yokohama Japan, 2018.6
- 21) Hisashi ISHII : Experimental Study on BIPV Module during Power Generation Exposed to Fire, EU PVSEC 2018 Brussels Belgium
- 22) M.Ritzen, S.Boddaert, F.Frontini, H.Ishii, K.Kapsis, S.Inoue, H.R.Wilson et.al : IEA PVPS TASK15 Report Compilation and Analysis of User Needs for BIPV and its Functions, IEA PVPS, 2019.2
- 23) AGC : アトジュール (仮称) カタログ, 2019
- 24) 石井久史 : ブラインド型 BIPV の研究開発, 日本建築学会, 2017 年度大会 (中国), 2017.8

【執筆者】



*1 石井 久史
(ISHII Hisashi)