

Module Level Power Electronics (MLPE) の 利点と最近の動向

Advantages and current topics of Module Level Power Electronics (MLPE)

稲葉道彦*

1. はじめに

太陽光発電は一般に安全な発電設備で過度な保守が不要とされているが、経年劣化や周囲の状況変化によりいくつかのリスクを内在している。その多くは設置に関する機械的なリスクであるが、太陽電池モジュールという多数の直流機器を取り扱っている点で電氣的なリスクも発生する。これを回避するために米国では National Electric Code (NEC) でいくつかの設置基準が規定されているが、日本には同様な規程はないのが現状である。次にそのリスクと NEC の基準を記載し、その解決策を考えてみる。

2. 内在リスク

2.1 低圧直流領域のリスク

設備の第一のリスクとしては、発電量低下が挙げられ、これは主に周囲の構造物がつくる影の影響とモジュール自体のばらつきにより発生する。モジュールに周囲の影が映った場合はその部分の発電量が低下し、直列につながれたモジュールは一部の部分電流値低下により総発電量が低減されてしまう。これは理想的な I-V カーブが通常はダイオードと同じカーブを描くのにに対し、影発生の場合は二段以上の階段状のカーブを呈することから、Maximum Power Point Tracking (MPPT) 動作で最大出力点を見失ってしまうことによる。現在では期待発電量を計算する標準的なツールである PVsyst (商品名) でも Shading を評価する項目があるほど深刻な問題である。加えてモジュールにはばらつきの問題があり、これが生じる要因は以下のようなものがある。

- ・経年の発電量劣化 (0.7%/年程度) のばらつきによる、ストリング内 (間) でのばらつき。
- ・モジュールの新品交換によるストリング内 (間)

でのばらつき。

- ・表面汚濁、ホットスポットなどによるばらつき。
- ・リユース/リサイクル品を利用した時の特性のばらつき。

その他モジュールに使用した部材の劣化などが項目としてあげられる。その多くが見過ごされがちなものであるが、10年以上の発電量に積算した場合には多大な損失となる。

一方、電氣的安全性と消火時安全性の確保としてのリスクがあり、NEC 規程 1) が導入された経緯もこちらのリスクに起因している。国内でも直流システムに内在する火災リスクと安全性については過去から記載されており詳細は他文献に譲るが⁽²⁻⁵⁾、昨今では設置台数が増えるに従いよく管理されていない危険なシステムも散見されるようになり、従来の安全対策では限界が感じられるようになった。また、国内では台風や水害によりモジュールが架台から脱落し、飛ばされたり流されたりするケースが続出し、日中で常時発電している状態の危険な破損モジュールが散在していることもある。これに対し 2015 年に経済産業省が⁽⁶⁾、特に水没したモジュールに関して「水没した太陽電池発電設備による感電防止についてのお願い (周知)」と題し以下の警告を発している。「台風 18 号等の影響により栃木県、茨城県、宮城県で浸水が発生しています。太陽電池発電設備は、浸水・破損をした場合であっても光があたれば発電をする事が可能です。このため、破損箇所等に触れた場合、感電をするおそれがあります。復旧作業中の感電を防ぐため、下記の作業上の注意点を関係自治体、関係団体へ周知しました (以下省略)」。さらに深刻なのは、モジュールが搭載された家屋の日中の消火活動で、消防士の行動に制限が加

* 東芝エネルギーシステムズ株式会社

わる。消防研究技術資料第81号（平成26年3月）によれば太陽光発電システムと消防活動における安全対策として、6m以上の距離を取り噴霧放水、手袋、長靴、ゴーグル、太陽電池のブルーシート保護（消防研究センターの報告参照）が課せられている⁽⁷⁾。しかし、緊急時の消火活動でモジュールの有無を確認できずに出動するケースも有り、その危険性が懸念されている。

2.2 海外の規程

火災の原因となりうるアーク放電は太陽光発電システム内のアレイ構成において、並列したセル間、グラウンドと配線、配線間、コネクタ内部、ジャンクションボックス内で起こる可能性がある。システム外部からのもらい火による発火だけでなく、太陽光発電システムに危険性を内在していることは業界内で知られ始めている。米国ではこの点に着目し、特に消防士保護の観点からシステム設計やその施工においていくつかの安全策がとられている。まず、米国防火協会（NFPA：National Fire Protection Association）が発行する米国電気工事基準NFPA70、別名NEC（National Electrical Code）への適合が必要となり、その中では次のことが規程されている⁽¹⁾。

- ・ NEC 2014 Section 690.12 Rapid Shutdown of PV Systems on Buildings：

太陽光モジュールから3m以内で太陽光モジュールの出力を高速で遮断できる機構の要求（NEC 2017 Section 690.12では1.5m以内に規制化される）。

- ・ NEC 2014 Section 690.11 DC Arc-Fault Circuit Protection：

直流電圧が80Vdc以上のPVシステムにおけるDCアーク対策（AFCI Arc-Fault Circuit Interrupter）の要求。

上記のラピッドシャットダウンの規程制定は2008年の2州から始まり、2017年には数州を残し、ほぼ全州で取り入れられている。また、シャットダウン条件こそ違おうがドイツにもVDE-AR-E 2100-712の規程がある⁽⁸⁾。

次に技術的視点ではシステムの安定性を確保する目的から、カリフォルニアエネルギー委員会（CEC California Energy Commission）による系統連系規程Rule 21が決められている。これは、周波数や電圧変動時の運転継続機能（FRT）、レート出力制御、力率一定機能等に通信機能を持った高機能なインバータ以外は、電力系統への連系が将来制限されることを示している。これらのリスクやIoTに関

する技術促進策は後段のMLPEの市場拡大に一躍買ったことは明らかであろう。

2.3 国内の対応

前述の米国規程に対し産業技術総合研究所が2015年に「太陽光発電の直流電気安全のための手引きと技術情報（第1版）」の報告書を発行し⁽²⁾、ここでは海外製品を例に挙げ、消防活動の感電を保護するため適切な遮断を推奨している。

表1は米国、ドイツ、日本の遮断に関する同書の記述を整理・簡略化したものである。米国やドイツに比べ、国内の規程では遮断に関する数値制限が少ないことがわかり、ラベルやトリガの規定もない。同時に同報告書では感電の危険性を提示し、モジュール単位の切り離しを推奨している。さらに、アーク発生電圧や消防活動時の無電圧化方法、感電の考え方は今後議論が必要なためACモジュールは「紹介」とされており、2015年時点においては国内でのACモジュール製品がないことも記載されている。また、同題名の第2版が発行されているが、ここにも「紹介」とされておりラピッドシャットダウンへの対策の難しさが記されている⁽³⁾。このように直流の安全性については従来から課題提示されており、最近では業界誌や太陽光発電組合での実験も行われて始めた。

しかしながら、国内では規程類にACモジュールなどの項目がほとんどないこと、国産の小規模パワーコンディショナの販売体制が出来上がっていること、現時点で施工品質が比較的維持されていること、代表的な商品であるModule Level Power Electronics（以後MLPEと表記）はその歴史も浅く汎用品に比べてやや高価なことなどから、その利点が十分理解されているとは言えない。実際にはNEPマイクロインバータ社以外の商品を国内で見ることがなく、いくつかの会社が新商品を出したが爆発的に売れたということはない。

表1 安全性に関する産業技術総合研究所の報告（米、独、日の比較）

項目	米国	ドイツ	日本
適応範囲	建物隣接または建物上	建物隣接または建物上	規定する必要あり
遮断区間	アレイから3m以内、内部から1.5m以内等	規定無し（定性的にはPCS/アレイ間）	区間を決める必要あり
遮断後のシステム電圧とエネルギー	30V以下 240VA	120V以下 350mJ未満	電安法で45V以下 記載なし
遮断後電圧までの時間	10秒	規定無し	3-20分の待ち時間 （注意書き）の例有
測定位置	規定あり	規定あり	規定無し
トリガ	規定無し（通常はボタン）	ボタンまたは系統無電圧	規定無し
ラベル	ラベル仕様と取り付け場所規定あり	ラベル、配置図で規定	規定無し

https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/service/PV_Electrical_Safety/AIST2015/Technical_Information_on_PV_Electrical_Safety/AIST2015.pdfの資料の一部を基に簡略化の加工

3. MLPE の技術・商品化動向

第2項で紹介したリスクを低減させる方法の一つとしてMLPE利用が挙げられる。MLPEを使えば同時あるいはわずかな時間遅れで複数の事故が起こった場合でも、自動遮断により人体との直接接触を防ぐことができるからである。MLPEにはDC/AC変換をモジュールごとに行うマイクロインバータ（以下 Micro Integrated Converter と呼称されることもあるためMICと記載する。）とDC/DC変換のみをモジュール単位で行うオプティマイザに実質二分される。両者ともに電力変換と同時に通信機能、制御機能を個別に持っており、システムとしてはモバイル機器と連動していることも有り、見かけ上モジュール個別の動作状態を確認できる。また両者ともNECの規格がある米国で盛んに販売されており、前者の代表としてEnphase社、後者の代表としてSolaredge社やTigo社のものが挙げられる。同じオプティマイザでもパワーコンディショナとのセットで機能を発揮する、モジュールのジャンクションボックスを置き換えるなどの設計思想はそれぞれ異なる。また、モジュールレベルをストリングレベルまで制御単位を拡張したものがString Level Power Electronics (SLPE)で、米国Ampt社や日本でも住友電工の商品などが代表であろう。

MLPE業界ではかつてPower One, Enecsys, Solarbridgeなどベンチャー企業を含む多くの会社が開発を進めていたが、結果として上記の会社が生き残ったことになる。Enphase社以外の各社の製品については本誌の別な記事を参照していただくとして^(9,10), Enphase社の製品と特長を簡単に述べる⁽¹¹⁾。彼らの主力品はIQ8という名称のMICで、高密度のASIC利用、高速デジタル処理、双方向インバータ、系統連系時と解放時の自動切り替えなどが特徴である。さらに、アンサンブルシステムといい、自社の蓄電池を併用して、系統接続と分離が選択できる。蓄電池容量は3kWh～10kWh程度で、制御はCloudとエッジ制御ボックスで行う。ひとつ前の機種であるIQ7は、SunPower社、パナソニック社のモジュールにも利用されており、ACモジュールとして米国で販売されているようである。またLG社は独自にMICを開発した。

現在米国の住宅用パワーコンディショナの約80%はこのMLPEで占められており、将来は90%まで上昇するとの話もある。4年前には60%のMLPEシェアであったため、驚異的な伸長である。MLPE

の出荷量が多くなるにつれて単価も下がり、システム設計の自由度が増し、BOSコストも低減したことなどから、これはNEC規格や発電量の向上以外のメリットが評価された結果と思われる。次にMICを題材にとり、その設計や試験法の特徴などについて解説する。

4. マイクロインバータ (MIC) の試作

MLPEの代表格であるMICでは国産として東芝で開発したものの諸般の事情により販売に至っていない。しかし、設計と試験法のノウハウは健在であり、これを通してそのポイントを紹介したい。

4.1 設計方法

MICを設計する際には、その特別な規格がない以上日本で太陽光発電用のパワーコンディショナと同等の機能を持つ必要がある。日本の会社の設計方針は主として回路や部品を重視し部品単位で信頼性の基準を置き、コストやIoT機能を重視する現在のEnphaseのものとは異なると思われる。たとえば、東芝MICの場合は、東芝独自の高效率変換技術A-SRBTM (Advanced Synchronous Reverse Blockingの略)の半導体チップセットを使用し⁽¹¹⁾、国内系統連系やJET規格を遵守したうえでラピッドシャットダウンに適応させている。部品としては電解コンデンサを使用せずフィルムコンデンサを用いている。またNEDOの委託事業で太陽誘電やポニー電機がPVTECを通して開発したものは、アクティブバッファ方式で高信頼性確保し、保護回路は分離されている。コンデンサにはセラミックコンデンサを使い、こちらでも部品単位で寿命を予測している。

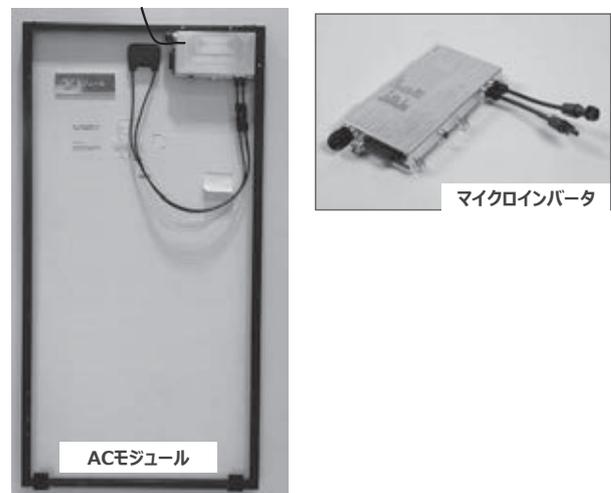


図1 東芝マイクロインバータ/ACモジュール(裏面)(東芝での2015年開発当時)

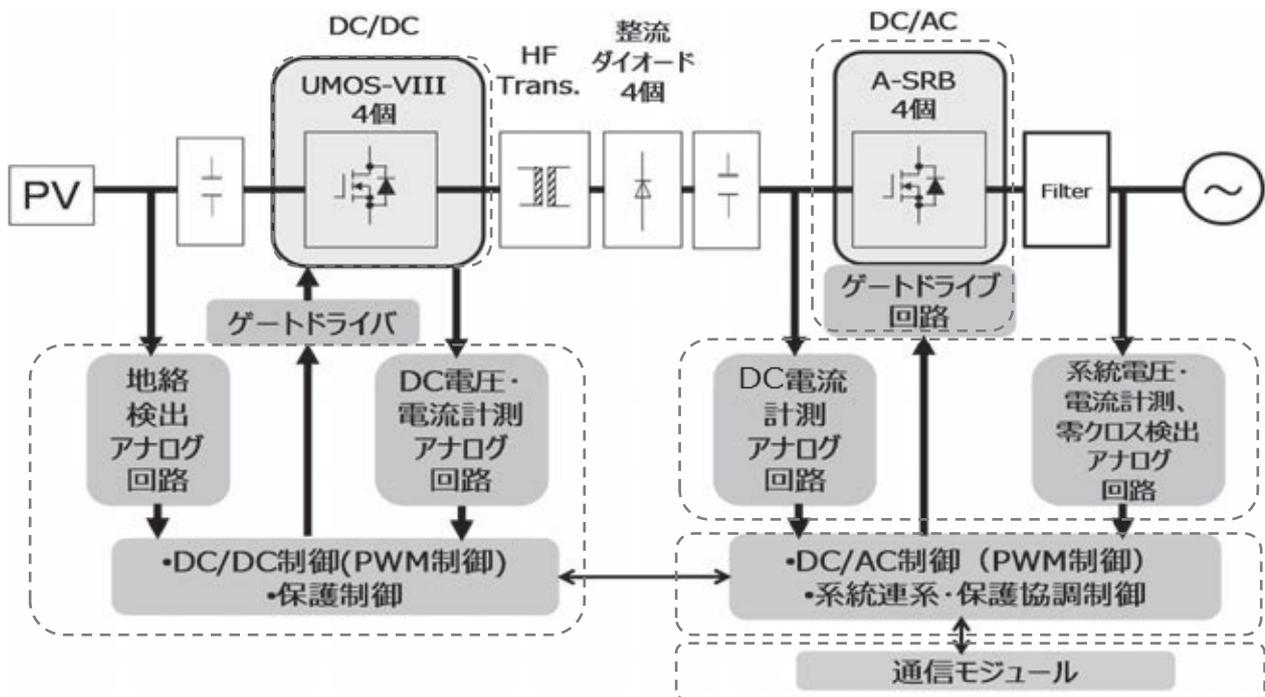


図2 東芝マイクロインバータの半導体ブロック図

図1に東芝製 AC モジュールの試作品，図2に開発した半導体のブロック図を示した⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。図のように，MICの多くはモジュールの裏面に設置されることが多く，通常パワーコンディショナ以上の過酷な条件にさらされるため，のちに示すような多くの試験が必要になる。ジャンクションボックスからの DC 出力は MIC につながれ AC に変換される構造で，図中の MIC の黒色凸部の内側には 920MHz の無線通信 LSI が内蔵されている。これは将来の HEMS 機器やスマートメータとの連携を目指したものである。開発当初の東芝製試作品は筐体がアルミ製でできていたが，現在市販品は軽量化も図られ，Enphase 社の製品ではモジュールのバックシートにつけられる軽量なものも米国で販売されている。図中のブロック図では複数の半導体で DC/DC 部 DC/AC 部が構成され，DC/AC 部は東芝オリジナルの A-SRB 回路を使っている。A-SRB では，オン抵抗の小さいスーパージャンクション構造の MOSFET (SJ-MOSFET) を使用しつつ，欠点であるスイッチング損失問題を解消している⁽¹²⁾。半導体構成はアナデジ混成チップ回路で東芝の得意とする構成にしており，A-SRB 以外は汎用半導体比率を高め受動部品比率を下げている。設計は国内規程にすべてに準拠しており，設計指針に沿った PCB 設計や筐体保護，耐水処理，紫外線などの対処も行っている。

電気的な設計以外には機械的な設計も重要で，図

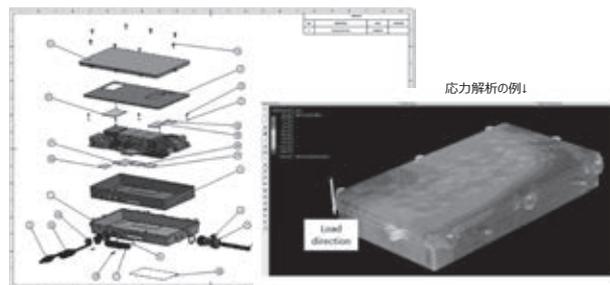


図3 東芝マイクロインバータの設計図面例と応力解析例

3に MIC の積層概略図と応力解析結果例を示した。応力は筐体内部からの熱発生による応力と外部のモジュールのフレーム変形からの機械的応力をうけ，その解析が重要となり，この図は一点に応力がかかった時に全般に及ぼす応力分布をシミュレートしたものである。これ以外にも筐体内の温度分布（装置内リミッタの動作保護）とモジュール背面の気流解析（温風の逃げ出し）などを実施した。特に小型変圧器部の温度上昇から半導体の劣化や制御回路動作への影響について配慮した。耐水性評価では封止部分からの水分流入を防止するリングを挿入した。万一水分流入した時にそなえ，側面には回路を置いていない。PCB 表面は通常レジンで全体封止しているものが多いが，本機では軽量化の視点からいくつかの施策を試し，防湿ラップを数種類評価して最適なラップ材料とコーティング条件を選択した。さらに耐候性試験後にはんだ付けしたチップ部品の断面観察を行い，接合面に剥がれがないことも確認し

た。

4.2 試験方法

MIC についての試験は、MIC 本体と AC モジュールの性能に関する評価がある。

MIC 本体の試験項目の一部を表2に示した。この表からわかるように、モジュール (PV Panel) とパワーコンディショナ (PCS) では要求されていない試験に MIC は合格する必要がある。特に通電時や高温、熱衝撃時の試験は過酷で、モジュールとはほぼ同等の試験結果が要求される。試験の多くは IEC, MIL, NEMA など規定されたもので、複合的な特性が求められる。これ以外に AC ケーブル被覆の耐候性試験を実施し、スーパーキセノンランプを用いた紫外線照射試験を行い、試験片の劣化を評価して問題ない材料を選んだ。試験の一例として米国で行った HALT (High Accelerated Life Test)



試験はHALT (High Accelerated Life Test)
左が試験装置全体。右はチャンバー内部に設置したMIC

図4 東芝マイクロインバータの耐環境試験風景

／高加速寿命試験の写真を図4に示す。これは、要求仕様を超える急速な温度変化と自由度振動を製品に与え、製品の限界点を洗い出し、製品のロバスト性を見極めるものでモジュール背面に設置されることを想定した過酷な試験の一つである。

次に大阪ガス殿で実施していただいたフィールドでの実験結果を示す。本実験は東芝内での建物上の試験でいずれも最適解が見いだされた後の野立て試験で、一般のパワーコンディショナと比較したものである。評価用モジュールと比較用のパワーコンディショナ (DC 入力 は 4 回路) はいずれもパナソニック製で、評価当時で住宅用として販売されていた最新のものである。図5は評価用モジュールの全景、裏面に設置された MIC を写したものである。日陰を作った実験では日射量計をアスファルトやコンクリート上に置き、故意に影を作って測定器の日射量を測定しその標準化を行って通常のパワーコンディショナと比較した。その結果影が発生しない状況では差が少ないものの、影発生時には発電量の差異がみられ MIC の優位性が示された。ここでは結果をわかりやすくするために、透過率 29% のメッシュシートで太陽電池モジュールの一部を全て覆い、発電量への影響を比較確認したものを図6に示す。図はその結果で、1/4あるいは3/4をシートで覆った場合いずれのケースでも MIC 使用時の発電量が比較例より大きかった。PVTEC でも組合で開発した MIC を使い、模擬電柱を立てて同様に発電量評価をしたところ 10% 以上の発電量向上を MIC のケースで見出している⁽¹⁵⁾。

表2 信頼性試験の実施内容例 (一部. MIC : マイクロインバータ)

No.	試験項目	備考	MIC	PV Panel	PV-PCS
1	はんだ接合面信頼性試験	温度サイクル試験(No.3よりも早い周期)を1000cycle実施し、基板の半田の接合面を確認します。	○	×	×
2	パワー温度サイクル試験	通電状態で温度サイクル試験を実施。通電する入力もサイクルさせます。部品内部の発熱による熱膨張、ICであればボンディングワイアの熱収縮による劣化を確認できます。	○	×	×
3	温度サイクル試験	非通電状態での温度サイクル試験。熱膨張率の違う部品と基板間の歪みによる不良の発生の有無を確認します	○	○	○
4	熱衝撃試験	通常の温度サイクルよりかなり早いサイクルで製品に熱衝撃を加える。サイクル数は1000サイクルを想定。	○	×	×
5	高加速寿命試験	製品に強いストレスをかけ続けて壊れるまで試験する。短期間で製品の弱点を調査できる。	○	×	×
6	熱プロファイル試験	定格、仕様周囲温度にて動作させ温度状態を確認。安全な温度制限および高温集中部を作らないことを目的とする	○	×	×
7	高温高温試験	モジュールで実施する試験(JIS規格)と同様。	○	○	×
8	高温動作寿命試験	電気的メカニズムと熱的メカニズムの両面から、長期的な動作ストレスに対するデバイスの耐性を調べる。高温(85℃)の状態にて1000h連続通電。	○	×	×
9	高温動作バイアス試験	100%定格運転をした状態で、温度サイクルを実施する。(200cycle)	○	×	×
10	結露凍結試験	高温及び高温度のの後に、温度が0℃以下に低下した場合の耐久性を調べる。	○	○	×
11	加速劣化試験	アレニウスモデルを適用し、加速劣化試験における温度設定(環境温度)を求める。設計寿命25年+マージン5年で30年。稼働時間、重みづけは住宅用PCSと同様	○	×	○

評価パネル風景



マイクロインバータ

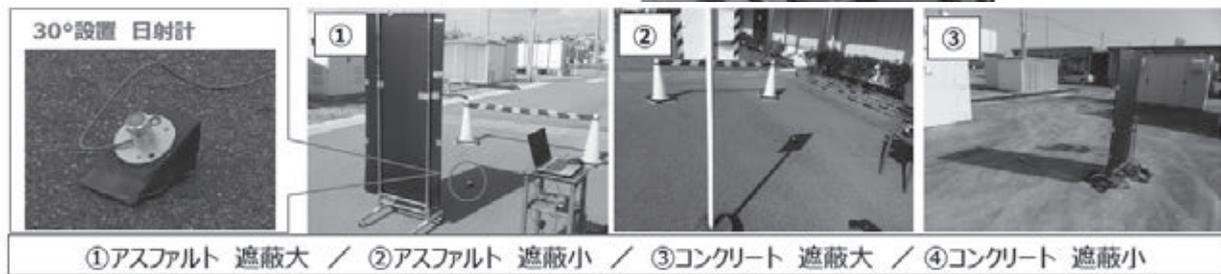
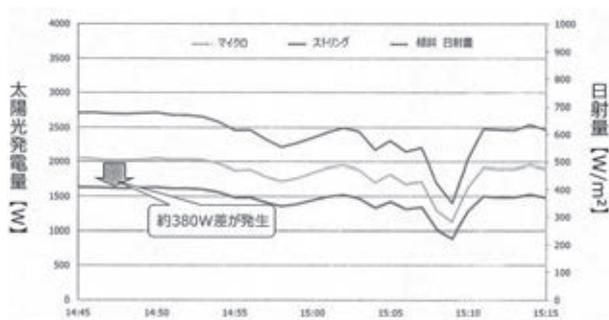
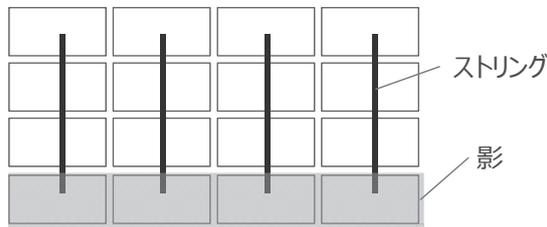


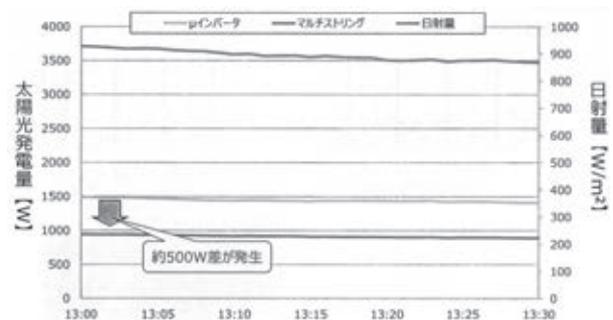
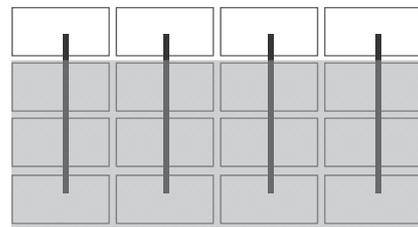
図5 大阪ガス殿での発電実験場所

ケース1：1/4に影をかけた場合



約30%の発電量UP

ケース2：3/4に影をかけた場合



約50%の発電量UP

Panasonic HITモジュール（72セル）で実験

※透過率29%のメッシュシートで網掛けの太陽電池モジュールを全て覆い、影響を確認

図6 発電量のフィールド試験結果（大阪ガス殿にて網掛け実験）

5. おわりに：国内での進展

国内では系統連系規程やJET 認証という試験基準や規程があり、新デバイスがその地位を占めるに

は克服すべき点が多い。東芝も2015年10月にJET 認証の申し込みを行い、実際に証明書が発行されたのは2018年8月であるが（MICとしては国内初）、そのころに至っては自社製造を断念し、他社との提

携により技術移転を進めていた。もちろん開発側の技術力不足という点もあるが、MIC という新しいデバイスの試験方法が確立していないことや現行のストリングインバータの試験仕様を流用したことなどが時間のかかった一因でもある。しかし系統連系規程 (JEAC9701) は AC モジュールとして 2015 年 9 月の改定済みで、内線規程 (JEAC8001) も改定案が承認され、2017 年には発行 (3595 節 AC モジュールを用いた系統連系型小出力太陽光発電設備の施設) され、IEC でも規程化検討中とのことを考えると JET 認証の影響度は大きい^(16, 17)。

太陽光発電においては広範囲に「建物と共存する時代」を迎えている。建物と同等なレベルで「長期に安定的で安全な電源」として電力ネットワークに信頼されることが望まれる。さらに建物周囲の変化、リユースモジュール利用、感電の回避、増設の容易さなどに柔軟に対応できるシステムが今後必要になる。もし、日本がまだモジュールで勝負するなら、MLPE や AC モジュールなどの新興デバイスをトレンドとしてとらえることはどうかと考える次第である。

6. 謝辞

本実験評価や試作を行うにあたり、大阪ガス殿、FLEX 社殿のご担当にご協力いただいたことに感謝する。また、開発に当たり弊社新井本武士氏、松本博明氏をはじめ開発チーム各位に感謝する。

7. 参考文献

- 1) 多くの解説があるが例えば <https://www.purepower.com/blog/2017-nec-690.12-rapid-shutdown-important-changes> (2020)
- 2) 産業技術総合研究所ホームページより https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/service/PV_Electrical_Safety/Technical_Information_on_PV_Electrical_Safety (AIST2015) v2.pdf (2020)
- 3) 産業技術総合研究所ホームページより https://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/service/PV_Electrical_Safety/Technical_Information_on_PV_Electrical_Safety2 (AIST2019) .pdf (2020)
- 4) 田村裕之, エネルギー・資源, 359-363 (2015), (社) エネルギー・資源学会, 東京
- 5) 大関崇, エネルギー・資源, 377-381 (2015), (社) エネルギー・資源学会, 東京
- 6) 経済産業省ホームページより https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/oshirase/2018/07/300709.html (2020)

- 7) 消防研究センターホームページより http://nrfid.fdma.go.jp/publication/gijutsushiryoy/gijutsushiryoy_81_120/files/shiryoy_no83.pdf (2020)
- 8) <https://www.vde-verlag.de/standards/0100168/vde-ar-e-2100-712-anwendungsregel-2013-05.html> (2020)
- 9) 天野啓史, 本誌
- 10) 永沢健, 本誌
- 11) Enphase 社のホームページより <https://enphase.com/en-us/ensemble-technology-enphase-installers> (2020)
- 12) 餅川宏, 津田純一, 児山裕史, 東芝レビュー, 67 (1), 26-29 (2012)
- 13) 稲葉道彦, 松本博明, 新井本武士, 電気と工事, 58 (8), 45-52 (2017)
- 14) 稲葉道彦, 松本博明, 新井本武士, 電気技術者, 17 (11), 21-27 (2017)
- 15) 小池直希, 2019 年度 NEDO 新エネルギー成果報告会発表資料, P1-02 (2019), 新エネルギー・産業技術総合機構
- 16) 系統連系規程 JEAC 9701-2016 [2015 年追補版 (その 1)], (財) 日本電気協会系統連系専門部会
- 17) 内線規程 JEAC 8001-2016 [2017 年追補版] (財) 日本電気協会需要設備専門部会

著者紹介

稲葉道彦 (イナバミチヒコ)



現職：東芝エネルギーシステムズ株式会社 グリッド・アグリゲーション事業部 技術エキスパート

Michihiko INABA

Technology Expert, Grid Aggregation Div., Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation

略歴：1980 年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年 4 月東京芝浦電気総合研究所 (現東芝研究開発センター) に入社。電子部品材料や環境部品・システムの研究開発や技術企画に従事する。2009 年より太陽光発電システム事業に従事し現在に至る。工学博士。