太陽電池における熱膨張率のマネジメント

棚 橋 紀 悟^a, 増 田 淳^a

^a(国研)産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター(〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第2)

Issues and Solutions Concerned in the Coefficient of Thermal Expansion on Photovoltaic Modules

Tadanori TANAHASHI^a and Atsushi MASUDA^a

^aResearch Center for Photovoltaics, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology(AIST)(Central 2, 1-1-1, Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568)

Keywords : Photovoltaic Module, Thermal Cycling Test, Outdoor Environment

1. はじめに

太陽光発電システムは、2014年末までに全世界で約177 GW(合計設備容量:規定条件下での発電能力の合計)導入されており、世界全体の電力需要の1%超を供給している¹⁾。また、2015年は57 GWの新規導入が速報されており²⁾、太陽光発電による電力供給は、地球温暖化対策などを目的に、先進国・新興国を問わず今後も拡大するものと見込まれている(2019年末時点で最大:540 GW程度の導入量への到達が予想されている[現導入量の約3倍]³⁾)。このようにエネルギーインフラの一翼を担う可能性を持ち始めた太陽光発電においては、当然のこととして長期の安定した稼働が求められる。このため、屋外設置という厳しい環境条件においても、十分な長期信頼性を確保するための様々な研究開発が行われている。本稿では、現在導入されている太陽電池モジュール(太陽電池パネルと同意)のうち90%以上を占める結晶シリコン系太陽電池モジュール(以下、c-Si PVモジュールと略記)について⁴⁾、屋外設置環境における温度変化と熱膨張率を主題に概説する。

2. c-Si PV モジュールの構造

住居の屋根への小規模設置や大型発電施設(メガソーラー)での大量設置を問わず、c-Si PVモジュールは、一般的に約16 cm四方の結晶シリコン太陽電池セル(以下、c-Si PVセルと略記)を直列接続(大型モジュールでは60~72セル直列)することで最大200~300 W程度の発電出力を得る構成となっている。現在利用されているc-Si PVセルは、その発電をpn接合平面での光起電力に依っているため、表面(マイナス極)および裏面(プラス極)が一様な平面電極となっている。c-Si PVセル表面では、発電に必要な受光を阻害せず、かつ効率的な集電を可能とする(銀を主成分とする)極細線電極と、これらの集電パスをまとめた(バスバーと呼ばれる)表面電極が設置されている。また、c-Si PVセル裏面には、一様にアルミニウムで覆った集電層と、これらの接続ラインである(銀

図1 c-Si PVモジュールの配線概要(a)と断面構成(b)。断面構成は、インタコネクターリボンをハンダ付けした部分の層構成を示す。CTE(熱膨張係数)は、文献13)より引用した。

を主成分とする)裏面電極が設けられている。このような構造のc-Si PVセルの直列接続を行うためには、表面と隣接するc-Si PVセルの裏面を互いに接続する配線を行う必要があり、インタコネクターリボンと呼ばれる銅を芯材としてハンダ被覆を行った細線が用いられている(図1-a)。このインタコネクターリボンは、表面・裏面の各電極にハンダ接合されることで、電気的・機械的なコンタクトを保っている。図1-bに、このハンダ接合部の断面概要を、各構成部材の熱膨張率(線熱膨張係数)とともに示した。c-Si PVセルの基板となるシリコンとハンダおよび銅などの熱膨張率の大きな違いが、昼夜の温度変化などにより界面のハンダ接合などに悪影響を与える可能性は大きいものと容易に推察できる。

3. c-Si PV モジュールが設置される屋外環境(温度環境を中心に)

高温になるに従い低下するc-Si PVモジュールの発電特性変化を把握するためや、温度変化にともなう上記のような不具合発生を検討するために、気温・風速・日射量などの気象データや設置方式(屋根設置・開放ラック設置)などから、屋

外設置された c-Si PV モジュールの温度を推定する取組みが進んでいる⁵⁾。たとえば、砂漠地域で屋根設置した場合は、(屋根との間に熱気がこもるため)最高温度は 100℃を超えることが推定されているとともに(開放ラック設置の場合でも 90℃以上)、温暖地域でも屋根設置の場合は 90℃付近まで最高温度が達すると考えられている。一方、寒冷地域だけでなく温暖地域においても、最低温度が 0℃を下回することは(日本の気象環境からも)容易に想像できる。様々な気象条件を持つ地域への太陽光発電システムの設置を前提とした場合には、このような非常に大きい温度差が c-Si PV モジュールに負荷される場合をあらかじめ想定しておく必要がある。

よりミクロな温度環境変化として、温度差は小さいが急激な温度変化が頻繁に生じる雲の影の通過が考えられる。夏期の晴天・日中に、雲の影が通りかかると急激に温度が変化(低下・上昇)する状況は、多くの方が経験されたことがあるだろう。日射量は、限定された一定地域においても刻一刻と異なるため、このような急激で頻繁な温度変化の影響を定量的に一般化して捉えることは困難であるが、c-Si PV モジュールに負荷される温度ストレスとして影響しているという認識は必要である。

4. 温度変化により c-Si PV モジュールが受けるストレス

c-Si PV モジュールが 100 K 程度の温度変化を受けた場合の構造変化については、Digital Image Correlation (DIC) 法を用いた詳細な解析が行われてきた⁶⁾。この結果、 $-60^{\circ}\text{C} \sim +60^{\circ}\text{C}$ の温度変化(温度差: 120 K)においては、約 2.5% の歪み(セル間距離変化)が確認されている⁷⁾。なお、c-Si PV セルを封入している高分子封止材(多くは、エチレン・酢酸ビニル共重合樹脂[EVA]を使用)は、ガラス転移点が 0℃以下の低温域にあるため、低温域では c-Si PV セルの移動を拘束し、歪み量が温度に対して線形的に推移をしないことも明らかにされている(低温域では、部材の熱膨張率の違いによって生じる応力変化を封止材中のセル移動で回避できない)。また、インタコネクターリボンの c-Si PV セルへのハンダ接合(200℃以上)や、EVA を用いた c-Si PV セルの封止(130℃程度)は高温で行われるため、その温度への曝露(常温への温度低下履歴を含む)に由来する応力がセル全体や接合部分に内在している点にも注意が必要である。

5. 温度変化ストレスによる不具合発生

c-Si PV モジュールでは、部材の熱膨張率の違いに起因して、温度変化ストレスにより様々な不具合が発生する場合がある。一般化できるほどの統計的調査結果は公表されていないが、ある報告では、調査した c-Si PV モジュールの 2% を超える不具合も示されている(ハンダ接合不良などの製造工程に起因する不具合も含む)⁸⁾。具体的には、セル・インタコネクター界面に存在するハンダ層が割断されている場合が多い模様である^{9)~11)}。なお、このようなハンダ接合部の異常だけでなく、c-Si PV セル表面の銀極細線電極の破断(場合によりセルクラックの発生)や、インタコネクターリボンの破断なども起こる可能性がある¹²⁾。このような不具合は、屋外でのエレクトロルミネッセンス(EL)検査やサーモグラフィー検査が、

最近になって比較的容易に実施できるようになったこともあり、発見される可能性が高まってきている。この EL 検査などでは、単一 c-Si PV セル内の複数のバスバーのうち、ハンダ接合の不具合が生じたバスバーからの集電低下(および他のバスバーへの電流集中による温度上昇)が確認できる。また、国内各社から、電気特性測定を利用したモジュール内集電異常・配線異常に関する検出器も発売されている。

6. 温度変化ストレスに起因する不具合の防止策

c-Si PV セルを使う以上、シリコンセルの熱膨張率を変更することは出来ない。このため、セル周辺部材の変更などにより温度変化ストレスに起因する応力負荷(変化)を避ける方法などが防止策として考案・利用されている。

たとえば、インタコネクターリボンの芯材には、比較的耐力の小さい銅などを用いることが行われている。これは、小さな歪みで芯材の降伏状態を作り出し、大きな歪みが負荷されても芯材の応力変化が小幅になる点を利用している。また、熱膨張率の小さいインバーを芯材として利用することも行われている。

ハンダに代わる接合部材については、その接合温度を低下させることで接合時に発生する内在性の熱応力を抑制し、その後の温度ストレスによる応力増大へのマージンを大きくするために、樹脂材料と金属フィラーを組み合わせた導電性樹脂フィルムや同ペーストの利用検討が進められている。これにより、セルクラックの発生や、セルの反りを防止できるといわれている(セルに反りがある場合、直列接続や封止する際に反りが一定量に抑え込まれるため、その際に応力が内在化する)。

部材の変更だけでなく、その形状や接合箇所を工夫している場合もある。具体的には、表面および裏面電極へのインタコネクターリボンのハンダ接合は、c-Si PV セル長のほぼ全長に渡って行われるが、これを飛び石状にスポット接合することでインタコネクターリボンとセル間の熱膨張率の違いから発生する応力変化を緩和することが行われている。また、インタコネクターリボン内で、温度変化ストレスにより応力が最も大きく負荷される部位は、c-Si PV セル端部の上面(あるいは下面)の屈曲部であるため¹³⁾、リボンのこの部位をあらかじめ屈曲させておき、その形態で接合することでリボン内に新たに負荷される応力を減少させる方法もとられている。

c-Si PV セルを使う以上、シリコンセルの熱膨張率を変更することは出来ないが、バックコンタクト型セル構造として電極を裏面に集めることはできる。特に n 型シリコンを主体とした高効率型 c-Si PV セルではバックコンタクト型が長年利用されてきている。電極を裏面に集積することで、上記のインタコネクターリボン屈曲の問題は回避でき、かつ細線を用いない平面パターンによるセル直列化も可能となり、局部への応力集中によるインタコネクターリボン破断などの問題からは解放されるだろう。

7. 温度変化ストレスに起因する不具合の試験・評価方法

c-Si PV モジュールが持つ温度変化ストレス耐性や、上記したような温度変化ストレスに起因する不具合防止策の有効

性を試験・評価する方法についても、近年大きな進捗が報告されている。これまで、1970年代後半から1980年代初頭に米国：NASAを中心として検討された試験・評価方法が、改訂を経ながらもc-Si PVモジュールの設計適格性確認試験・型式認証要求事項として利用されてきた(IEC 61215)^{14),15)}。温度変化ストレス耐性としては、供試c-Si PVモジュールを-40℃と+85℃に繰り返し曝露する温度サイクル試験(200サイクル)において、発電出力低下を招かない設計・製造が必須条件とされてきており、この試験・評価に合格することで5年～10年の初期故障を排除できるとされてきた。

しかし、世界各国で再生可能エネルギーの固定価格買取制度が導入され、買取の全期間(20年など)に渡り発電量の安定性を担保可能な品質保証が求められる現状に対応して、c-Si PVモジュールが設置される屋外環境も考慮した新しい試験規格が検討されている¹⁶⁾。詳細は未定な部分も多いが、温度サイクル試験のサイクル数延長を基本に議論が進むものと考えられる。

このような試験・評価の現況において、試験・評価の長期化にともなう新製品開発サイクルの遅延や製造コスト増大を防止することを目的として、よりの確に温度変化ストレスに起因する不具合を導き出し、かつ素早く検出する試験・評価方法が検討されている。具体的な試験方法として、小型電子部品のハンダ接合不具合などを早期に誘導可能な高速温度サイクル試験(熱衝撃試験)のc-Si PVモジュールへの適用可能性が検討されており、これまでの検討結果では約2,000～3,000回の昇温・降温サイクル(-40℃/+85℃)を繰り返すことで、不具合発生の前兆が捉えられている^{17),18)}。この前兆は、c-Si PVモジュールの温度サイクル試験実施中に、継続的にACインピーダンスレベル(V_{ac}/I_{ac})あるいはACインピーダンススペクトル(数Hz～数100KHz)を測定し、それらのシグナルの変化として確認されている。興味深いことに、このようにして捉えたシグナル変化の初期では、温度サイクル中の温度遷移状態においてのみスパイク状変化が観測され、温度定常期には変化が確認できない状態が続く。また、この時期のACインピーダンススペクトル解析から、シグナル変化はキャパシタンス成分の極めて大きな増大(電気的コンタクトの消失を意味)を反映していることが分かってきている。加えて、この状態の供試c-Si PVモジュールのACインピーダンス・発電特性などを室温において測定すると、初期状態との変化はほとんど見出されない。これらから、高速温度サイクル試験(熱衝撃試験)による加速と、試験中の電気的シグナルの連続評価により、温度サイクル試験を一定期間実施した後の室温における評価では捉えられなかった(温度変化ストレスにより発生する)不具合を、効果的に把握することが可能となったものと考えられる。

これに加えて、インタコネクターリボンの破断を短期間で試験・評価できるDynamic Mechanical Load試験法や¹⁹⁾、温度サイクル試験に光照射ストレスを加えて昇温を加速する高速試験法などが²⁰⁾、c-Si PVモジュールの長期間屋外稼働において発生する温度変化ストレスに起因した不具合を想定した加速試験法として提案されている。

8. おわりに

c-Si PVモジュールのコモディティ商品化にともない、エネルギーインフラともいえる太陽光発電システムの長期信頼性を確保したうえで、さらに製造コストを削減する努力が、関連する業界では続いていると推察している。そのような努力を支える試験・評価などの周辺技術の開発・整備を推進していくことも、安全で安心な太陽光発電システムの普及・拡大に寄与し、長期的には地球温暖化防止に貢献できるものと考えている。

(Received January 20, 2016)

文 献

- 1) Trends 2015 in Photovoltaic Applications (International Energy Agency, 2015).
- 2) B. Beetz ; "2015: 57 GW of solar PV installed, clean energy investment hits highest ever levels," PV Magazine, Jan. 14, 2016.
- 3) Global Market Outlook for Solar Power 2015-2019 (Solar Power Europe, 2015).
- 4) SEMI ITRPV Working Group ; International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV): 2015 (Semiconductor Equipment and Materials International, 2015).
- 5) S. Kurtz, K. Whitfield, G. Tamizhmani, M. Koehl, D. Miller, J. Joyce, J. Wohlgemuth, N. Bosco, M. Kempe, T. Zgonena ; *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, **19**, 954 (2011).
- 6) U. Eitner, M. Köntges, R. Brendel ; *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **94**, 1346 (2010).
- 7) R. Meier, F. Kraemer, S. Wiese, K.-J. Wolter, J. Bagdahn ; *Proc. 35th IEEE Photovoltaic Spec. Conf.*, 2010, p. 1283 (2010).
- 8) D. DeGraaff, R. Lacerda, Z. Campeau, Z. Xie ; presented at 1st International PV Module Quality Assurance Forum, 2011.
- 9) D. L. King, M. A. Quintana, J. A. Kratochvil, D. E. Ellibee, B. R. Hansen ; *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, **8**, 241 (2000).
- 10) J.-S. Jeong, N. Park, C. Han ; *Microelectron. Reliab.*, **52**, 2326, (2012).
- 11) S. Sakamoto, T. Kobayashi, S. Nonomura ; *Jpn. J. Appl. Phys.*, **51**, 10NF03, (2012).
- 12) Review of Failures of PV Modules (International Energy Agency, 2014).
- 13) F. Kraemer, S. Wiese ; *Microelectron. Reliab.*, **55**, 716 (2015).
- 14) C. R. Osterwald, T. J. McMahon ; *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, **17**, 11, (2009).
- 15) Crystalline Silicon Terrestrial Photovoltaic PV Modules—Design Qualification and Type Approval. IEC 61215: 2005 (International Electrotechnical Commission, 2005).
- 16) J. H. Wohlgemuth ; presented at SPIE Optics + Photonics Plenary Presentations, 2014.
- 17) Y. Aoki, M. Okamoto, A. Masuda, T. Doi, T. Tanahashi ; *Jpn. J. Appl. Phys.*, **51**, 10NF13, (2012).
- 18) T. Tanahashi, S. Suzuki, N. Sakamoto, A. Mito, K. Shirasawa, H. Takato ; presented at 2015 PV Module Reliability Workshop, 2015.
- 19) N. Bosco, T. Silverman, J. Wohlgemuth, S. R. Kurtz, M. Inoue, K. Sakurai, T. Shioda, H. Zenkoh, K. Hirota, M. Miyashita, T. Tanahashi, S. Suzuki, Y. Chen, P. J. Verlinden ; *Proc. 29th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib.*, p. 2484 (2014).
- 20) M. Fujimori, T. Kohno, Y. Tsuno, K. Morita ; *Proc. 31st Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib.*, p. 1911 (2015).