技術資料

市販太陽電池モジュールによる Potential Induced Degradation 試験の系統比較

Systematic comparison of potential induced degradation tests among commercial photovoltaic modules

増田　幸治[*1] Kohji MASUDA
加藤　宏[*2] Hiroshi KATO
内田　泰徳[*3] Yasunori UCHIDA
芝田　克明[*4] Katsuaki SHIBATA
河合　信次[*5] Shinji KAWAI
福元　豊[*6] Yutaka FUKUMOTO
玉井　富士夫[*7] Fujio TAMAI
土井　卓也[*8] Takuya DOI
増田　淳[*9] Atsushi MASUDA
近藤　道雄[*10] Michio KONDO

Abstract

Commercial photovoltaic modules were tested using two different methods for potential induced degradation (PID), which were called a chamber method and a water film method. In the chamber method, 5 out of 15 modules failed. On the other hand, in the water film method, 3 out of 6 modules failed. Some modules showed different behavior in degradation between these two methods. It is implied that difference among results is due to path of leakage current depending on the structure and component materials of modules. From a viewpoint of certification test, we believe that the chamber method is suitable due to reproducibility and safety.

キーワード：PID、チャンバー、水張り、認証試験
Key Words: Potential Induced Degradation (PID), Chamber, Water film, Certification test

1．　緒言

クリーンで持続可能なエネルギー源である太陽光エネルギーを利用した発電設備は、各国のエネルギー政策のグリーン化とそれを支える助成政策を背景にして世界中に広まっている。日本では補助金助成対象となる太陽電池モジュール（以下モジュール）は JET 認証相当の認証を得ていることが要求される。認証試験の要求項目は国際規格である IEC 61215, 61646, 61730-1, 61730-2 に規定されている。この認証試験は初期スクリーニングとして一定の役割を果たしていると考えられており、認証を受けて市場に出回っているモジュールは実使用において急激な出力低下や安全性の損失がないように設計されている。

近年太陽光発電においては主たる用途がメガソーラーなどの発電事業用途に転換され始めている。そこでは住宅用よりもさらに長期の信頼性が重視されており、従来の IEC 規格では 20 年を超える寿命を十分担保することができず、新しい規格改定の議論が始まっている。またこれまで日本では高い対地電圧での運転事例がほとんどなかった。これは直流側電圧が 450 V 以下で設計される住宅用太陽光発電システムが主体に普及したことと、750 V 超とした場合は高圧設備（6000 V 級）の設計が要求されることが理由と考えられる。しかし太陽光発電事業が本格化するにつれて今後高い対地電圧の運転事例が増えると予想される。メガソーラーのようにモジュールが大規模システムの一部分となる場合に、これまで知られていなかった不具合の発生が報告されている。そのひとつが Potential Induced Degradation (PID) [1,2]で、高いシステム電

*1 （一財）電気安全環境研究所研究事業センター研究員 （〒230-0004 横浜市鶴見区元宮 1-12-28）
e-mail: masuda_k@jet.or.jp
*2 （一財）電気安全環境研究所研究事業センターグループマネージャー
*3 （一財）電気安全環境研究所研究事業センター担当部長
*4 （一財）電気安全環境研究所理事兼研究事業センター所長
*5 佐賀県工業技術センター材料環境部特別研究員
*6 佐賀県工業技術センター材料環境部長
*7 佐賀県工業技術センター副所長
*8 （独）産業技術総合研究所太陽光発電工学研究センター主任研究員
*9 （独）産業技術総合研究所太陽光発電工学研究センター連携研究体長
*10（独）産業技術総合研究所太陽光発電工学研究センター長

（原稿受付：2012 年 11 月 13 日）

圧がモジュールにかかったときに急激な出力低下を示す現象である。PID 現象の解決は大規模太陽光発電にとって喫緊の課題である。

PID 現象のメカニズムはまだ不明な点が多いが、モジュールのフレームとセル間の漏れ電流が出力低下に関係していることが報告されている[2,3]。PID 現象を再現する試験方法は数種類知られている。本報告では高温高湿試験槽を用いる試験法[4]をチャンバー法、水を受光面に張る試験法[5]を水張り法と呼ぶこととする。これら 2 つの方法においても様々な試験条件のバリエーションが存在し、その妥当性が議論されている。水張り法はガラス全面からガラスを通して漏れ電流が流れる。そのため漏れ電流の大きさが通常屋外で起こるものと比較して大きすぎる可能性が大きな論点となっている。一方チャンバー法に比べて非常に簡便に行えるという利便性もある。

そこで、本報告では日本国内外の市販モジュールに対してチャンバー法と水張り法、二種類の試験を行った結果を比較する。試験によってモジュールに生じた出力変化から、再現性が求められる認証試験として適した PID 試験方法の条件を議論した。

2. 実験

2011 年から 2012 年にかけて日本国内外の市場に流通していた住居用途もしくは産業用途のモジュールを 15 種類購入した。各モジュールのタイプを表 1 にまとめる。mc-Si は多結晶シリコンモジュール、sc-Si は単結晶シリコンモジュール、thin film はアモルファスシリコンを主体とした薄膜モジュールを表す。

表 1　市販モジュールのタイプ

Module	Type	Module	Type
A	mc-Si	I	mc-Si
B	mc-Si	J	mc-Si
C	mc-Si	K	mc-Si
D	Thin film	L	Thin film
E	mc-Si	M	mc-Si
F	sc-Si	N	mc-Si
G	mc-Si	O	mc-Si
H	sc-Si		

チャンバー法は 2012 年 11 月時点で IEC 62804 として審議中の規格案を基に以下の条件で試験を行った。高温高湿試験槽に投入したモジュールに対してモジュールメーカ指定の許容システム電圧をフレームと充電部の間にかけ、60°C、85%RH で 96 時間継続した。フレーム側をプラス極とし、充電部としてモジュールのプラス・マイナス両出力ラインを結線した側をマイナス極とした。試験終了後 8 時間以内に出力を測定し、試験前後での出力変化を比較した。この試験では試験数は各モジュール種類で 2 枚ずつとし、試験体とは別にコントロールモジュールを用意した。試験前後での試験体の出力値をその都度測定したコントロールモジュールの出力値で割って相対化した。

水張り法は以下のように試験を行った。空調によって室温を制御した部屋内で受光面が上方を向くように設置したモジュールの受光面に水を張ったのち、水の蒸発を防ぐために樹脂フィルムで受光面を覆った。この状態でモジュールのフレームと充電部間にモジュールメーカ指定の許容システム電圧をかけ、室温を 25°C として 168 時間継続した。結線はチャンバー法と同様とした。試験終了後 4 時間以内に出力を測定し、試験前後での出力変化を比較した。ただしこの試験では A、B、C、E、F、G の 6 種類のモジュールに対して試験を行った。また試験数は各種類で 3 枚とし、各試験体の試験前の出力値で試験後の出力値を割って相対化した。

3. 結果

図 1 にチャンバー法での PID 試験後の出力を示す。各モジュールの出力値はコントロールモジュールの出力値に対して相対化している。図中の破線は IEC 62804 の要求項目である試験後出力低下許容レベル(95%)を示す。各データの下の数字は試験体の識別番号を示す。また各モジュール記号の下に IEC 62804 の合否基準を適用したときの判定結果を示す。図 1 から C、F、J の 3 種類のモジュールで顕著な出力低下が確認できた。B、G は比較的出力低下は小さかったが、IEC 62804 による判定では不合格であった。

次に顕著な出力低下が見られた C、F、J で最も出力の低下した試験体についての IV 曲線の変化を図 2 に示す。実線は試験前、破線は試験後の IV 曲線をそれぞれ示す。a)は試験体 C2、b)は F1、c)は J2 をそれぞれ示す。これまでの報告では、PID による出力低下は主として開放電圧(V_{OC})の低下によるものであり、その原因はシャントリークにあるとされてきた。C、F、J いずれもシャントリーク

→V_{OC} 低下→短絡電流(I_{SC})低下の順に劣化が進行しているように見える。

体で比較的顕著な出力低下が見られた。B は 3 つの試験体で結果のばらつきが大きいが、試験としては不合格と判

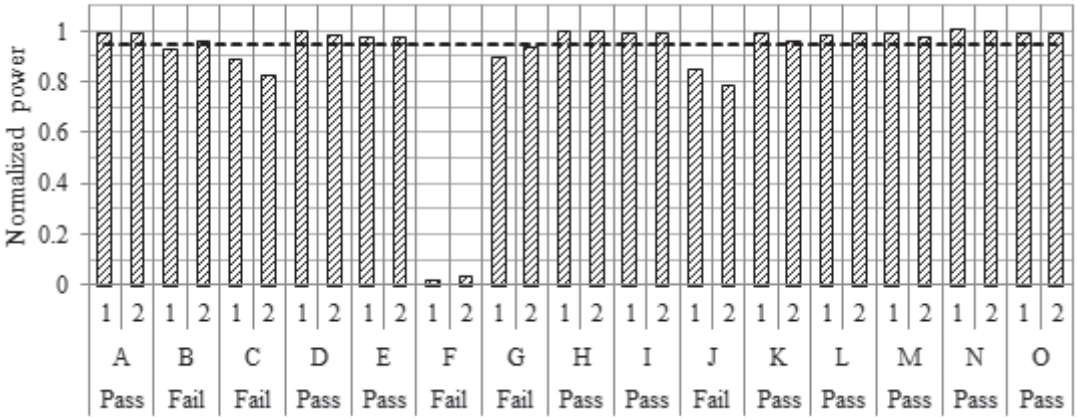

図 1　チャンバー法での試験後出力

次に水張り法での PID 試験前後の出力変化を図 3 に示す。各モジュールの出力値は試験前の出力値に対して相対化している。図中の破線は 95%の位置を示す。各データの下の数字は試験体の識別番号を示す。また試験後で 5%以上の劣化がないことを合否基準にしたときの判定結果を各モジュール記号の下に示す。図のように C、F のモジュールで顕著な出力低下が発生した。B では 1 つの試験

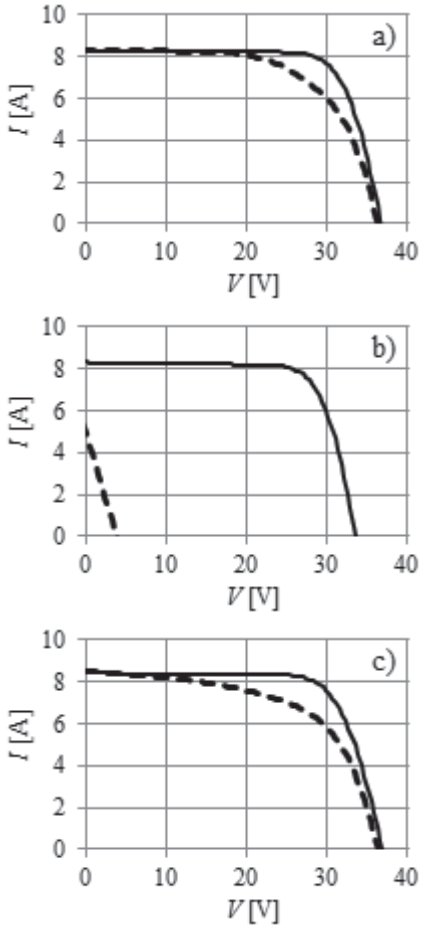

図 2　チャンバー法での試験前後の IV 曲線比較

定すべきと考えた。

次に B、C、F のうち特に出力が低下した試験体についての試験前後の IV 曲線の変化を図 4 に示す。実線は試験前、破線は試験後の IV 曲線をそれぞれ示す。a)は試験体 B1、b)は C1、c)は F3 をそれぞれ示す。B ではフィルファクター(FF)が低下しただけであったが、C、F では FF だけでなく I_{SC}、V_{OC} の低下も確認できた。これらは程度の差こそあれ、定性的にはチャンバー法と同じ劣化過程をたどっていると考えられる。

PID 現象による劣化では、試験後の時間経過とともに劣化が回復することが報告されている[2]。これを確認するために、チャンバー法でほとんど低下を示さなかった A、やや出力低下傾向が見られた B、出力低下を示した C の 3 種類のモジュールについて試験後しばらく室温で静置してから出力測定した。出力を経過時間に対してプロットした結果を図 5 に示す。a)は A、b)は B、c)は C の出力変化をそれぞれ示す。試験終了時点を 0 として、室温に放置した時間に対する出力の変化をプロットした。この結果、電圧印加を終了したあと約 1 日間では回復傾向をほ

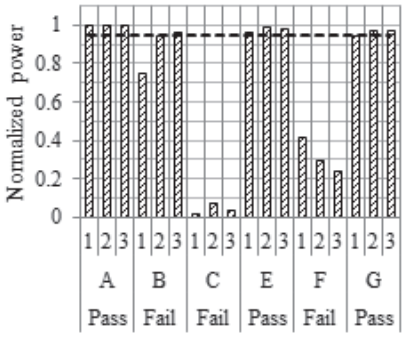

図 3　水張り法での試験後出力

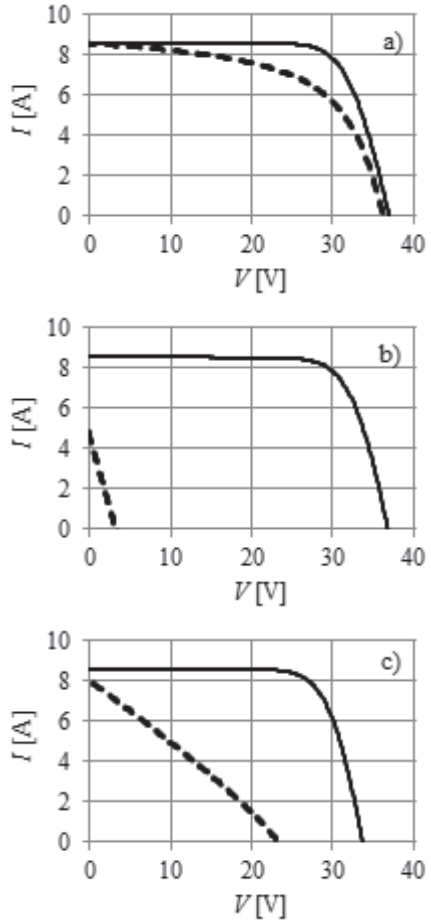

図 4　水張り法での試験前後の IV 曲線比較

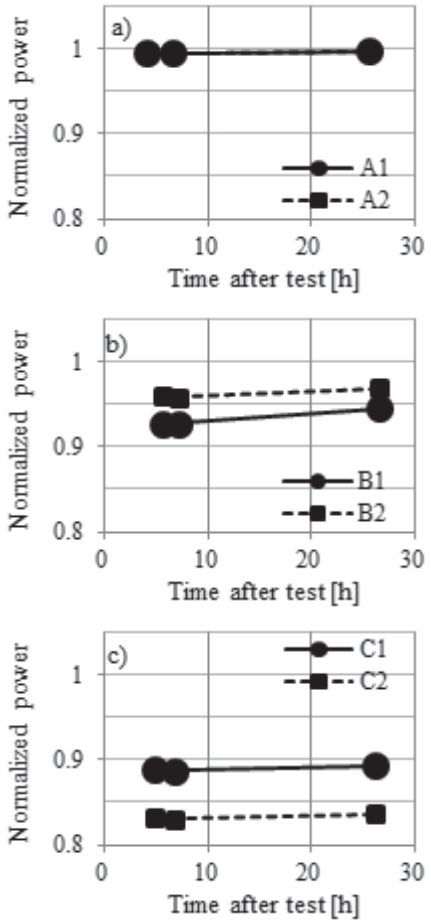

図 5　チャンバー法試験後の出力の時間変化

とんど確認できなかった。

4．考察

図 1 と図 3 から、いくつかのモジュールで 2 つの試験方法の結果は異なる傾向を示した。これらの結果を比較するために、各モジュールの試験後出力の平均を取り、横軸に水張り法により得られた値、縦軸にチャンバー法により得られた値をプロットした図を図 6 に示す。破線は両試験法に完全に相関がある場合を示す。PID 現象による出力劣化傾向は 4 種類に分類することができた。すなわち、(1) A および E のように、両試験法でほぼ劣化を示さないモジュール、(2) B および G のように、少なくとも一方の試験法でやや劣化傾向の見られるモジュール、(3) C のように、特に水張り法でほぼ完全に発電能力を消失しているモジュール、(4) 逆に F のように、特にチャンバー法でほぼ完全に発電能力を消失しているモジュール、である。試験結果ではチャンバー法の方が劣化度合いが大きいモジュールも存在することが明らかとなり、必ずしも前述のように水張り法は過剰負荷であるとの説の通りとは言えない結果が得られた。これらの劣化傾向の違いにどのような劣化メカニズムが関与しているかは不明であるが、試験方法の差異により劣化状態が異なること、および試験方法を組み合わせることでモジュールの劣化傾向の分類が可能と考えられる点は、PID 現象による劣化メカニズムを検討していくうえで重要な知見となると考えられる。

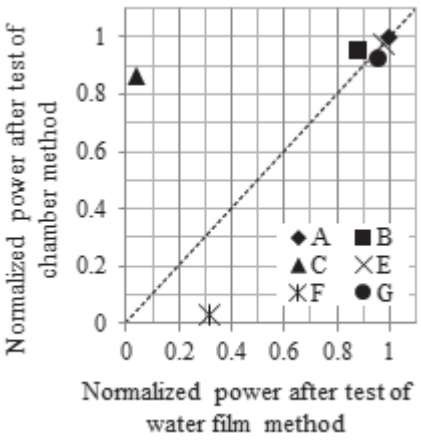

図 6　チャンバー法と水張り法の試験後出力比較

水張り法は受光面のガラスが常に水に触れている状態であり、受光面ガラスの導電性は湿度によって増加する[3]ため、セルとフレーム間の漏れ電流を加速する条件としては水張り法は最も厳しい条件である。漏れ電流の経路としては封止材やガラス内面を介してフレームから面方向に流れる経路と、ガラスを垂直に厚さ方向に通過する経路が考えられる。水張り法は後者が支配的な経路となる。一方チャンバー法ではモジュールの封止材の材質や構造によっては面方向の経路がむしろ支配的になる場合もあると考えられる。両者の試験結果の違いは支配的な漏れ電流経路の違いによって起こっている可能性がある。

チャンバー法と水張り法で結果が異なる場合の要因は以下のようにまとめられる。

- 受光面ガラスの導電率の湿度依存性
- 受光面以外の漏れ電流経路

これらの相関は試験の再現性のために重要な点となる。またモジュールの構造や用いられているガラス、封止材の材質によってどちらがより厳しい試験条件になるかというのも様々な製品に対して精査する必要があろう。

試験法として両者を比較した場合、水張り法はモジュール温度や湿度を一定条件で制御することが困難である。また試験員の感電の危険など安全性の問題もある。チャンバー法はこれらの問題はないために有利と考えられる[4]。本報告での水張り法を環境試験槽内で行うことができれば上記の点は解決できるものの、受光面を上に向ける必要があるために、環境試験槽内で多数のモジュールを一度に試験することは困難である。チャンバー法では環境試験槽内に多数のモジュールを収納して同時に試験を行うことができることから、試験結果のばらつきを低減できることが期待できる。将来認証試験に PID 試験を追加する場合には、再現性の観点からチャンバー法の方が望ましいと言える。

残された課題は屋外での劣化現象と明確な相関があるかという点である。これもまた設置環境によって変わる可能性があり現時点ではどちらの試験法が良いかということを議論することは難しい。しかしながら試験条件の制御性や再現性を考えるとチャンバー法がより優れた方法と言える。水張り法はその簡便性から一時的なスクリーニングにはより適した方法であろう。

５．まとめ

15 種類の市販モジュールを用いてチャンバー法と水張り法の 2 つの PID 試験を行った。チャンバー法では 15 種類中 5 種類のモジュールで出力低下が見られた。一方、水張り法では 6 種類中 3 種類のモジュールで出力低下が見られた。これらの試験法の結果から、いずれの試験法でも出力低下しないもの、少なくとも一方の試験法でやや出力低下を示すもの、いずれかの試験法で特に顕著に出力低下を示すものに分類できた。これらの相違はモジュールのフレームとセル間の漏れ電流の経路が試験法で異なるためと考えられる。将来認証試験に PID 試験を追加する場合には、チャンバー法の方が望ましいと言える。

謝辞

本研究は平成 23, 24 年度経済産業省アジア基準認証推進事業補助金によって行われた。また本研究は太陽光発電技術研究組合(PVTEC)、佐賀県工業技術センター、独立行政法人産業技術総合研究所(AIST)、一般財団法人電気安全環境研究所(JET)の共同研究である。

また、執筆にあたってエスペック株式会社棚橋紀悟博士にご協力いただいた。ここに謝意を表す。

参考文献

(1) P. Hacke, K. Terwilliger, S. Glick, D. Trudell, N. Bosco, S. Johnston and S. Kurtz, Test-to-Failure of Crystalline Silicon Modules, 35th IEEE PVSC (2010–6), 244–250, Honolulu, Hawaii.

(2) S. Pingel, O. Frank, M. Winkler, S. Daryan, T. Geipel, H. Hoehne and J. Berghold, Potential Induced Degradation of solar cells and panels, 35th IEEE PVSC (2010–6), 2817–2822, Honolulu, Hawaii.

(3) P. Hacke, M. Kempe, K. Terwilliger, S. Glick, N. Call, S. Johnston, S. Kurtz, I. Bennett and M. Kloos, Characterization of Multicrystalline Silicon Modules with System Bias Voltage Applied in Damp Heat, 25th EUPVSEC and Exhibition / 5th WCPEC (2010–9), 3760–3765, Valencia, Spain.

(4) P. Hacke, K. Terwilliger, R. Smith, S. Glick, J. Pankow, M. Kempe, S. Kurtz, I. Bennett and M. Kloos, SYSTEM VOLTAGE POTENTIAL-INDUCED DEGRADATION MECHANISMS IN PV MODULES AND METHODS FOR TEST, 37th IEEE PVSC (2011–6), 19–24, Seattle, Washington.

(5) S. Koch, C. Seidel, P. Grunow, S. Krauter and M. Schoppa, POLARIZATION EFFECTS AND TESTS FOR CRYSTALLINE SILICON CELLS, 26th EUPVSEC and Exhibition, (2011–9), 1726–1731, Hamburg, Germany.