



探討太陽光電系統的耐候性與可靠度

Investigation of Weather Durability and Reliability of PV Systems

林江財

現任：台灣熱泵協會理事長、工研院綠能與環境研究所顧問

學歷：美國加州大學柏克萊分校(University of California at Berkeley) 材料博士

專長：精密陶瓷、太陽光電、複合材料

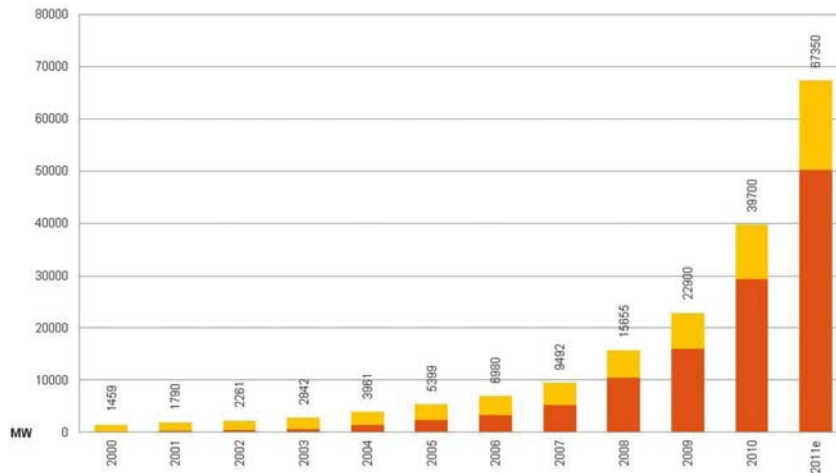
摘要

全球 PV 系統至 2011 年止的累計安裝量已達到 67.35 GWp (1 GWp = 10 億峰瓦)，未來 3 年內能否將系統安裝業者必須面對的耐久性與可靠度等關鍵問題加以突破，是太陽光電產業發展上的轉捩點。在現在太陽光電生產量遠超過市場需求的狀況下，必須加速整合建立國際通用的可靠度與耐候性檢測規範與標準，並可以準確地預測 PV 系統在有效使用年限(未來能夠超過 30 年以上)的真實發電成本，此乃目前國際尚缺乏的技術發展重要項目，是值得對太陽光電產業發展有所期待的產學專家共同關注的課題。

一、太陽光電市場規模估計

德國的購電優惠補助(Feed-in-Tariff, FIT)太陽光電系統的發電政策，是推動太陽光電系統安裝容量大量成長的關鍵，尤其在家庭住宅屋頂安裝太陽光電系統已經達到相當的成效，另外，在大型太陽光電發電場(PV Power Plant)的建置更是蓬勃發展。太陽光電在過去的重要資金來源是銀行的融資借貸，亦即所謂的銀行可貼現性(Bankability)，德國政府、金融機構、產業到目前的直接投資，已超過數千億歐元，造成政策檢討的聲浪不斷，此次 2012 年德國政策急調降 FIT，投資者沒想到如此的反應時間完全不足，將大幅減弱搶裝效應；往後由於改為每月下調，價格與 FIT 就不容易貼近，從而導致項目投資商利潤空間過大的現象也不再發生，這應該是當初德國政府設計 FIT 時期望的結果，也是太陽光電產業長期發展比較健康的做法。如圖一所示，全球統計至 2011 年為止的累計 PV 系統安裝量已達到 67.35 GWp，圖二則將 2011 年全球前 15 大太陽光電系統新裝置容量與累計安裝規模列表；至於 2011 年全球前 10 大太陽光電系統安裝國家的比例分佈則如圖三所示，合計約佔全世界 90% 的市場。

TPVIA



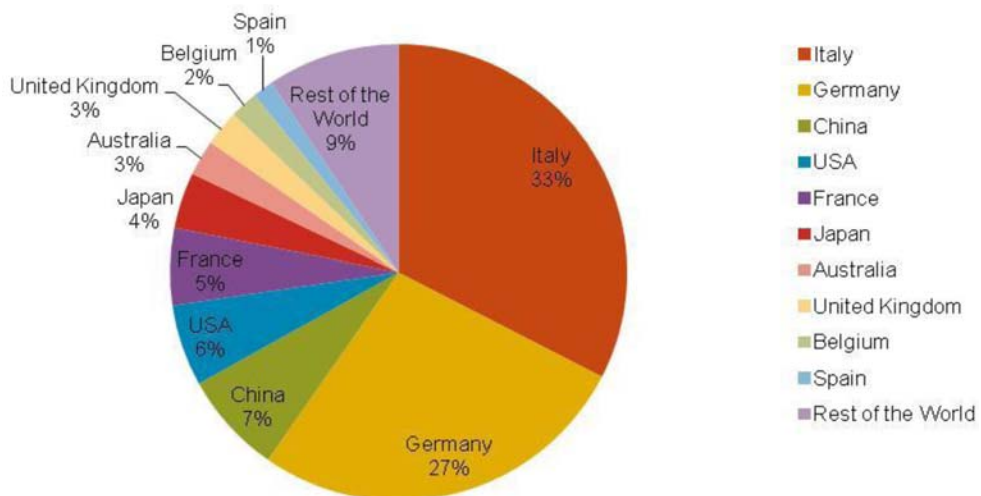
資料來源：Market Report 2011, EPIA, February 2012. ^[1]

圖一、2000 年至 2011 年全球太陽光電系統累計安裝容量

Country	2011 Newly connected capacity (MW)	2011 Cumulative installed capacity (MW)
1 Italy	9,000	12,500
2 Germany	7,500	24,700
3 China	2,000	2,900
4 USA	1,600	4,200
5 France	1,500	2,500
6 Japan	1,100	4,700
7 Australia	700	1,200
8 United Kingdom	700	750
9 Belgium	550	1,500
10 Spain	400	4,200
11 Greece	350	550
Slovakia	350	500
13 Canada	300	500
India	300	450
15 Ukraine	140	140
Rest of the World	1,160	6,060
Total	27,650	67,350

資料來源：Market Report 2011, EPIA, February 2012. ^[1]

圖二、2011 年全球前 15 大太陽光電系統新裝置容量與累計安裝規模



資料來源：Market Report 2011, EPIA, February 2012. ^[1]

圖三、2011 年全球前 10 大太陽光電系統安裝國家佔全世界 90% 的市場

2011 年模組價格的下降將使德國今年的市場規模約達 5 GWp，而義大利 2012 年 FIT 下調後仍較德國高約 20%，預計義大利市場全年亦降至 5 GWp；美國市場也估計在 3 GWp；法國、日本、澳大利亞、英國、比利時、西班牙、希臘等七個國家，大部分均有補貼下調的政策，這是由於 2011 年模組價格大跌的關係。除了法國設置上限、西班牙暫停補貼會造成兩國需求的縮減外，其餘五國 2012 年的太陽光電系統需求將保持正常增速。另外，中國全年預計約可達到 4 GWp，但中國大陸國務院總理溫家寶最近的談話「制止太陽能、風電等產業盲目擴張」，更令市場再起波瀾，綜觀 2012 年全球 PV 整體市場規模應該是不會比 2011 年多所增加。

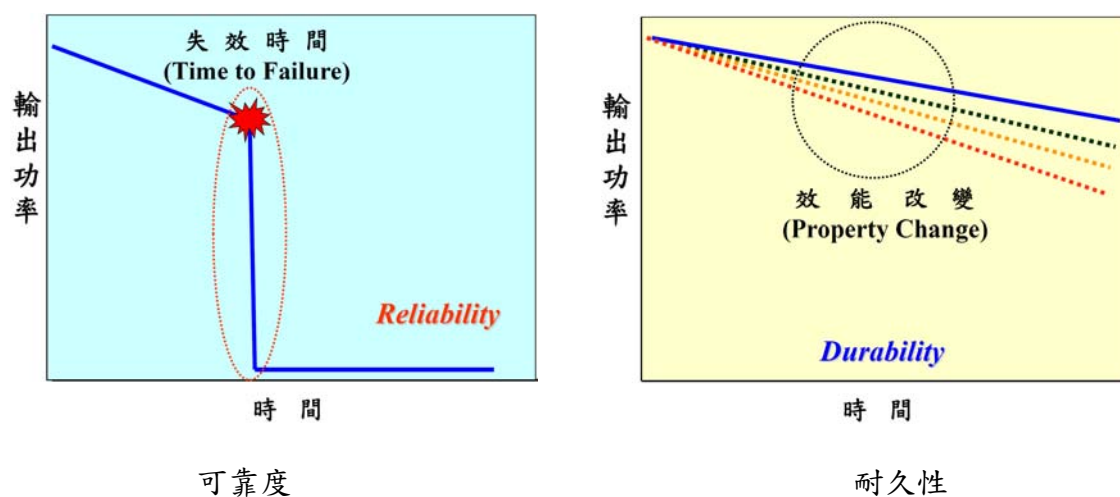
歐盟強力主導到 2020 年太陽光電發電佔傳統用電的 20%，而 2011 年日本 311 福島的核電廠損毀危機之後，日本民眾對於再生能源的期望更增加了。但是一般的民眾對於太陽光電的認知仍然相當有限，大家很可能知道台灣有不錯的太陽光電產業，至於若要安裝 PV 系統的話，對於系統、模組的選擇卻是所知有限；因此，經常會提出的問題是，PV 系統是否可能在幾年之內回收？如何維護保養系統等問題。台灣的電價在全球排名第四低價，以及 PV 系統的安裝價格至少新台幣 8 - 10 萬元/千瓦，如果沒有政府的優惠收購電價補助，安裝 PV 系統至少要 10 年以上的時間才能回收。電價四年未調，燃煤與天然氣等進口燃料價格卻節節高升，經濟部研議今年電價分二階段調漲，五月初預計先漲二角，十月一日夏季電價結束，民生用電再上漲二角，對一般民眾的影響不無影響。如果未來 1-2 年國際油價長期持續停留在每桶 110 美元以上時，天然氣/瓦斯的價格仍會往上調高；全球與我國的民眾對於太陽光電的裝置意願，就一定會隨之提高。屆時我國的 PV 產業是否已經準備好了？能否提供快速有效率的系統設計與安裝解決方案？對於模組、電力調節器(Inverter)等產品價格與品質好壞的分辨，是否有足夠的專業技術能力以確保 PV 系統的發電成本與時俱降，並且可以在世界上競爭？這都是現階段 PV 產業迫切面臨的挑戰。台灣的 PV 產業著重於矽晶片、太陽電池的生產製造，而在矽晶模組端的規模與能量都相當的缺乏，高效率的太陽電池當然值得大家關切，但模組的品質與使用壽命長短，更是攸關 PV 系統發電成本的高低，因為也不要忘記模組製造商提出的保固期至少是 25-30 年(目前如此)，但如果使用不到 10 年或 15 年就發生故障、停機或損壞，當面臨維修或必須更換模組的時刻，製造業者是否有方法或標準，可以驗證其產品效能與壽命，能否達到客戶的要求呢？

全球模組產品供過於求，所以 PV 系統安裝價格會再往下調降，此外，系統業者為了保障其利益，除了保固期年限要求製造者加長之外，對於產品將有更多的選擇，以及更嚴格的品質要求；致使一般想安裝太陽光電系統的民眾，會更加謹慎選用有品牌或更有安全、性能優越的 PV 模組、系統周邊(BOS)，對於系統設計/安裝施工的品質也會要求

發電量可以更多，模組的有效使用壽命甚至於必須超過 30 年以上。所以，長期耐候性與可靠度的問題，也因此而受到更高的關注。對整體太陽光電產業的發展而言，建立全球性完善的材料、零組件、次系統、系統層級的檢測標準與制度，就顯得刻不容緩。

二、耐候性與可靠度的定義

對於可靠度與耐久性的定義如圖四所示，可靠度是達到破壞時的時間(Time to Failure)之後，其性能表現(如輸出功率)即大幅降低變成失效(圖四左)；而耐久性是指某些性質的改變隨著時間，而逐漸下降(圖四右)。耐久性的測試項目主要在於物理、化學或外觀特徵性質的變化，隨著時間或應力的作用，其性質的變化，以至於喪失其特性，其與可靠度的不同處是相當明顯。太陽光電(PV)發電系統的數計是否具有銀行可貼現性(Bankability)與可靠度有關聯，關鍵則取決於其 PV 模組的耐久性，而模組的耐久性則是由使用的材料所控制，慎選材料將是真正區隔長期輸出功率差異化的重點。亦即其長期(>25 年以上)的發電量逐年劣化現象是否足夠低，模組的可靠度對於供應商的銷售成本相當重要，模組製造商得將模組的保障服務成本，預存在銷售費用上，但其基本假設是在可預測的破壞速率；可是保固的成本很難追蹤，所以模組廠的獲利將會被嚴重侵蝕。然而因為目前的破壞速率變動非常大，也就是 PV 發電系統的發電成本，必須能夠低於傳統發電，才有競爭與大量普及的機會。



資料來源：Kurt P. Scott, Atlas Material Testing Technology LLC, “Weather Durability of PV Modules; Developing a Common Language for Talking about PV Reliability,” PV Module Reliability Workshop, Golden, Colorado, February 18–19, 2010.

圖四、可靠度與耐久性的比較^[2]

太陽光電的耐候性與可靠度主要仍著眼於 PV 模組，尤其是矽晶太陽光電模組在德國與日本，都被實際應用證實使用年限可以超過 25 年^[2]，但是近幾年來新增的廠家如雨後春筍般，市場的需求也是一波波的成長，目前對於模組的產品驗證(Certification)以 IEC

61215、IEC 61730、UL 1703 為關鍵，但廠家一旦取得模組驗證(Certificate)之後，卻無法保證其長期耐候性、可靠度、使用壽命等問題；國際驗證實驗室也不見得確實知道製造廠商是否變更設計、材料或製程條件，因此大廠的品牌卻不見得與品質成比例時，消費者應該如何選擇，確實是一大難題。

三、耐候性與可靠度的測試

太陽光電產品或系統的可靠度與耐候性測試方法的建立，大都是以經驗(或觀察)為依據，尤其是過去已知的太陽光電劣化知識為基礎，配合基本的耐候測試方法，有些則是由其他產業的經驗，或是補充/強化 IEC 的測試方法。常用的太陽光電的可靠度測試有下列數項：破壞速率(Failure Rates)；累計的破壞 Cumulative Failures)；零組件的生命週期(Component Lifetimes)；產品的生命週期預估(Estimates of Product Lifetimes)。

一般的太陽光電品質與安全測試與所需時間如下：

1. 濕熱(Damp Heat) – 42 天
2. 熱循環 200 (Thermal Cycles) – 34 ~ 50 天
3. 紫外線/熱循環 (UV/TC) – 35 ~ 40 天
4. 戶外曝曬(Outdoor Exposure) – 30 ~ 40 天
5. 機械負荷(Mechanical Load) – 2 ~ 4 天
6. 冰雹衝擊(Ice Ball Impact) – 1 ~ 2 天
7. 熱斑(Hot-Spot Protection) – 14 ~ 21 天
8. 中間的各項測試(Intermediate Tests) – I-V 曲線量測、耐高電壓等

其他的加速試驗如下：

1. 濕熱加上高電壓測試 - 薄膜的腐蝕
2. 延長標準測試：如 2,000 小時濕熱測試或 500 次熱循環
3. 濕熱加上熱循環測試
4. 較大的冰球衝擊測試
5. 較高的機械荷重 > 2,400 Pa
6. 在荷重下加每天 24 小時光線吸收

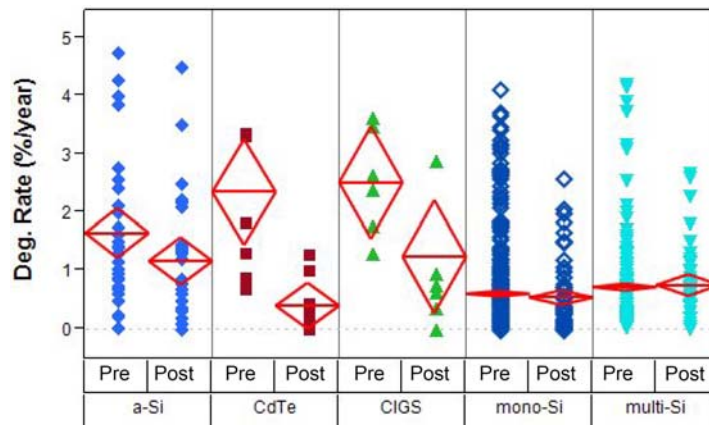
常用的太陽光電的耐候性測試有下列數項：

1. 溫度循環(Temperature Cycling)
2. 熱震測試(Thermal Shock)
3. 冷凍/解凍循環測試(Freeze/Thaw Cycling Altitude Testing)
4. 濕度測試(Humidity Testing)

5. 溫度/濕度循環測試(Temperature/Humidity Cycling)
6. 陽光輻射測試(Solar Radiation Testing)
7. 雨水測試(Rain Testing)
8. 浸泡測試(Immersion Testing)
9. 冰凍/凍雨測試 Icing/Freezing Rain Testing)
10. 菌類測試(Fungus Testing)
11. 鹽霧測試(Salt Fog Testing)
12. 沙塵測試(Sand and Dust Testing)
13. 振動測試(Vibration)
14. 其他可適用的測試方法

太陽光電系統業更應該要求製造與檢測分析者，必須要建立完善的檢測標準與制度。PV 模組的耐久性其實就是耐氣候的能力，系統必須有烈日照射才能發電；但氣候的變化卻高深莫測，所以要在陽光下長期曝曬冗長的時間，才能得到有用的結果。目前在可靠度的測試有許多的挑戰存在：1.長達 25 年的保固期——模組製造公司如何保證 25 年的壽命？2.實際測試的條件未能明確定義——保固必須泛指相同型式模組在不同的氣候條件都適用；3.戶外的氣候條件嚴苛且多變；4.使用的材料已經接近極限——如何加速材料的影響效應；5.有限的加速因子(*Acceleration Factors*) 雖有些少數因子可用，但仍得依賴長期的測試結果，而冗長的過程是產品切入市場的障礙；6.累積的效應，正向的反饋迴路——欲決定所有測試中的交互作用是項挑戰。PV 系統發電歷程中都會有劣化的問題，而劣化速率(*Degradation Rate*)變化的不確定性與季節、量測時間的長短有關，這會嚴重影響 PV 系統的保固期(*Warranty*)風險，發電效能的重要參考指標。在 2000 年之後非晶矽薄膜、CdTe 與 CIGS 的劣化速率已經有明顯改善，但單/多晶矽模組則無多大差異(如圖四^[2]的結果顯示)。如果模組的劣化速率太高，可能導致於系統明顯發電降低會很快，將提高平準化發電成本(LCOE)，這當然不是系統設計廠商與民眾所樂見的。

太陽光電的可靠度測試項目主要有破損速率、累計破壞、零組件的生命週期(直到破壞的時間或破壞間隔的時間)、估計產品的壽命。一般都需要產品統計相當多量的數據。量測的方法也需要有一致性與標準，其數據才能比較分析，目前在此一領域國際上仍存有諸多的問題：例如：1.需發展出具共識的標準；2.冗長的時間與煩瑣的過程；3.良好的可靠度測試需要相當長期的投資；4.需要測試設計與數據結果分析的專業知識；5.結果是否為妥協的數值等等。



Pre: Installed before year 2000, Post: Installed after year 2000

資料來源：Dirk Jordan, “Methods for Analysis of Outdoor Performance Data,” NREL, PV Module Reliability Workshop, Golden, Colorado, February 16, 2011. [3]

圖五、各種不同太陽光電模組的劣化速率比較

四、各類太陽光電產品的耐候性與可靠度測試

以下將以 7 個段落就矽晶、非晶矽(a-Si)薄膜、碲化鎘(CdTe)薄膜、銅銦鎳硒(CIGS)薄膜、有機、聚光型太陽光電常見的破損模式加以匯整[4]。

1.0 矽晶

- 1.1 太陽電池破裂 (串焊製程或應變等等)
- 1.2 焊接點或導線界面破壞 (串聯阻抗增加)
- 1.3 腐蝕或分層導致黏著性降低
- 1.4 ISC值逐漸下降
- 1.5 焊帶、接線疲勞
- 1.6 接線盒破損 (焊接不良、飛弧等等)
- 1.7 母線(Busbars)黏著性能劣化、電氣接點不佳
- 1.8 無鋁框模組玻璃邊緣破損 (安裝、處理時造成)
- 1.9 光引發電池衰減
- 1.10 玻璃對封裝材的性能影響
- 1.11 正面端表面髒污
- 1.12 玻璃-玻璃封裝的機械破壞
- 1.13 一般性的問題 [見7.0]

2.0 非晶矽(a-Si)薄膜

- 2.1 SnO₂:F導電層的電化學腐蝕

TPVIA

- 2.2 初期的光照衰減劣化
- 2.3 退火的不穩定性
- 2.4 一般性的問題 [見7.0]

3.0 碲化鎘(CdTe)薄膜

- 3.1 電池層的不完善-背面電極的穩定性
- 3.2 電池層的不完善-夾層間的黏著的穩定性與分層、SnO₂:F導電層的电化學腐蝕
- 3.3 填充因子的耗損(串聯電阻提高/再結合)
- 3.4 母線(Busbars)黏著性能劣化、電氣接點不佳
- 3.5 劃線因應力而產生熱斑
- 3.6 旁路二極體問題、熱斑、應力產生的不均勻點
- 3.7 一般性的問題 [見7.0]

4.0 銅銦鎳硒(CIGS)薄膜

- 4.1 電池層的不完善-接觸點的穩定性
- 4.2 電池層的不完善-夾層間的黏著的穩定性
- 4.3 填充因子的耗損(串聯電阻提高/再結合)
- 4.4 母線(Busbars)破損、機械與電氣接點不佳
- 4.5 透明導電層對濕氣的敏感度高
- 4.6 封裝被濕氣入侵而破損
- 4.7 電池間的接點問題(個別電池)
- 4.8 透明導電層對濕氣的敏感度高，必須通過濕熱測試(非屋瓦應用)
- 4.8 劃線因應力而產生熱斑
- 4.9 旁路二極體問題、熱斑、應力產生的不均勻點
- 4.10 邊緣分流
- 4.11 一般性的問題 [見7.0]

5.0 有機太陽光電(Organic PV, OPV)

- 5.1 層裂
- 5.2 光解不安定性
- 5.3 濕氣引發的劣化
- 5.4 封裝被濕氣入侵而破損
- 5.5 氧氣引發的劣化
- 5.6 施子(Donors)與受子(Acceptors)的熱安定性不佳
- 5.7 一般性的問題 [見7.0]

6.0 聚光型(CPV)

- 6.1 解聚(Depolymerization)、形成氣泡、矽膠封裝材長期在高溫與熱循環發生黃化
- 6.2 內部光學元件抗反射層被弄髒與層裂
- 6.3 熱失控(Thermal Runaway)造成電池的損壞
- 6.4 光學元件的效率耗損
- 6.5 接線盒內導線的焊接不良造成飛弧
- 6.6 光照度不均勻的問題
- 6.7 缺陷遷移問題(特別是電池晶格的不匹配)
- 6.8 銀導線與接點的擴散與腐蝕問題
- 6.9 高電流引發的電遷移(Electromigration)
- 6.10 電力調節器的可靠度(容忍電流快速變化的能力)
- 6.11 模組熱疲勞、材料、電池接點、電池附著/黏著破壞
- 6.12 追日機械元件操作上的不完善(高聚光系統)
- 6.13 AlInP含鋁量高，容易氧化
- 6.14 一般性的問題 [見7.0]

7.0 一般性的技術問題

- 7.1 腐蝕導致於接地的耗損
- 7.2 快速連接器的可靠度
- 7.3 絕緣不當導致於接地的耗損
- 7.4 層裂(Delamination)
- 7.5 玻璃破裂
- 7.6 旁路二極體損壞
- 7.7 電力調節器的可靠度
- 7.8 濕氣侵入(Moisture Ingress)

五、結語

太陽光電產業的發展繫於其系統的性能、價格與可靠度，提高 PV 系統應用端的需求，短期內仍然需要政府政策引導協助，才能有辦法突破技術與成本上的挑戰。台灣目前的太陽光電產業偏重在太陽電池的製造上，對於模組與系統產品的可靠度與耐候性的投入都嚴重不足，因為模組與系統周邊都必須承受陽光照射高溫與不同氣候區域的高溫度變化，因此我國在可靠度與耐候性的研究必須快速導入，並且與國際標準測試單位的合作，更需要加速進行，否則產業的發展必將受到極大的限制。政府、研發單位與製造

供應商的投資必須是長期的，因為如果模組的使用壽命要提高到 30 年以上，沒有充分的經費支持與足夠長時間的量測，是不可能看到成效的。

參考資料

1. Market Report 2011, EPIA, February 2012.
2. Kurt P. Scott, Atlas Material Testing Technology LLC, “Weather Durability of PV Modules; Developing a Common Language for Talking about PV Reliability,” PV Module Reliability Workshop, Denver West Marriott, Golden, Colorado, February 18–19, 2010.
3. Muneyoshi Yamatani, Kyocera Corporation, Business Developments and Reliability Efforts of Kyocera Solar Modules, 2nd International PV Module QA Forum in Tokyo, Dec. 8, 2011.
4. Nick Bosco, “Reliability Concerns Associated with PV Technologies,” National Renewable Energy Laboratory, DOE, USA, 2010.
http://www.nrel.gov/pv/performance_reliability/pdfs/failure_references.pdf .
5. Dirk Jordan, “Methods for Analysis of Outdoor Performance Data,” NREL, PV Module Reliability Workshop, Golden, Colorado, February 16, 2011.
6. Sarah Kurtz, John Wohlgemuth, Tony Sample, Masaaki Yamamichi, James Amano, Peter Hacke, Michael Kempe, Michio Kondo, Takuya Doi, and Kenji Otani, Ensuring Quality of PV Modules, Presented at the 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC 37), Seattle, Washington, June 19-24, 2011.
7. T. McMahon, G. Jorgensen, R. Hulstrom, “Module 30 Year Life: What Does it Mean and Is It Predictable/Achievable?” National Renewable Energy Laboratory, Reliability Physics Symposium, 2008 (IRPS 2008); IEEE Inter., April 27, 2008-May 1, 2008, pp.: 172–177.
8. U.S. Department of Energy, Accelerated Aging Testing and Reliability in Photovoltaics Workshop II, Summary Report, April 1 & 2, 2008.
9. J. Wohlgemuth, “Reliability of PV Systems, Reliability of Photovoltaic Cells, Modules, Components and Systems,” edited by Neelkanth G. Dhere, Proc. of SPIE ,Vol. 7048, 704802-1, (2008).
10. Sarah Kurtz, “Reliability Concerns Associated with PV Technologies,”
www.nrel.gov/pv/performance_reliability/pdfs/failure_references.pdf

TPVIA