



# 太陽光電與建築的結合應用與發展

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

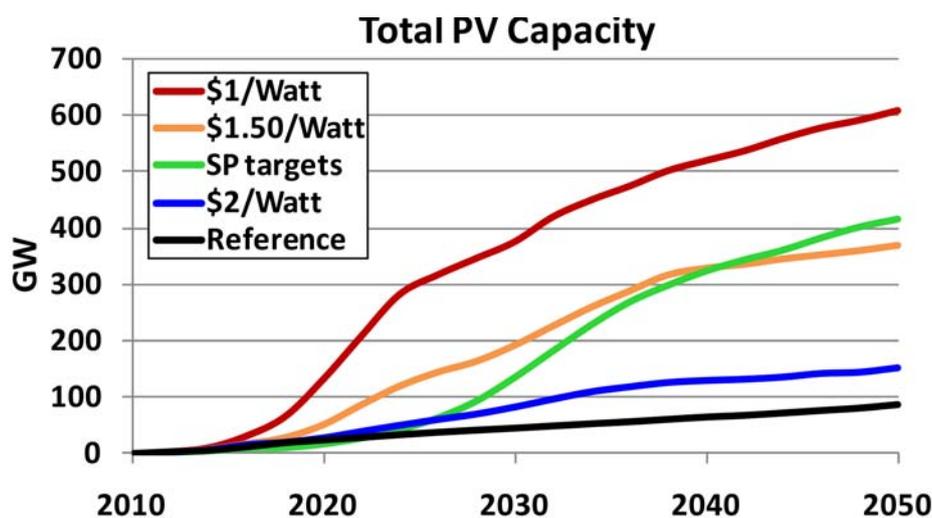
建材一體型太陽光電(BIPV)一直是太陽光電產業的應用焦點，尤其是經歷了2011年的價格大幅滑落影響之後，PV 模組產品出海口已成大家期望能振興市場的關鍵。其中，對於BIPV更寄予厚望，但事實上真的會是如此嗎？在3-5年短期內，要看到BIPV有影響力可能並不容易。本文將針對BIPV的技術優劣特性、客觀環境面的障礙、未來的發展趨勢等重點，做一整體的介紹，分析國外的發展應用現況，期能提供大眾與建築業者，對於BIPV有更深一層的認識，進而開發具不同氣候地區規格、多功能、安全、可靠、環保、美觀的太陽光電建築產品，推廣普及與大量應用的商機，將會蓄勢待發。

**關鍵字：**太陽光電(Photovoltaics, PV)、建材一體型太陽光電(Building Integrated Photovoltaics, BIPV)、系統周邊(BOS)、PV 屋瓦(PV Single)

## 一、前言

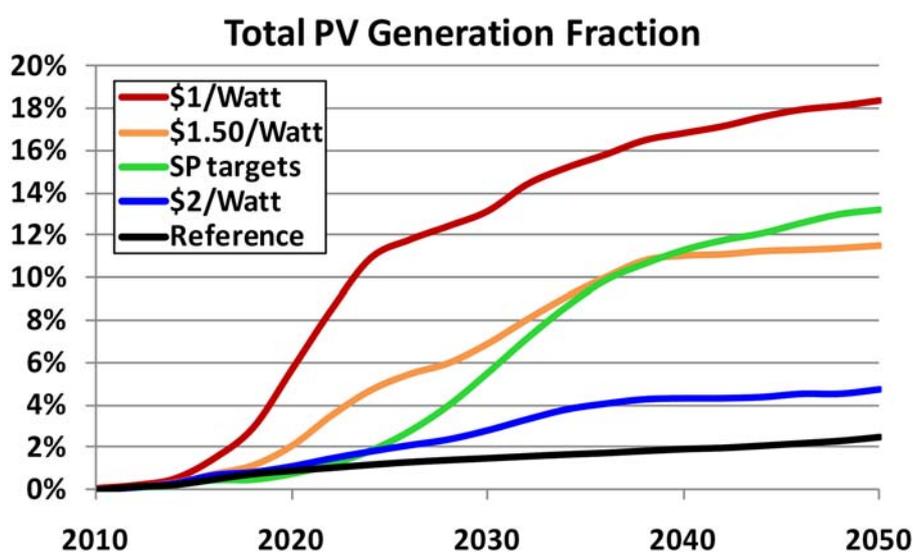
全世界第一個矽晶太陽電池在1954年就做出來了，迄今已經過了超過半個世紀，到2011年全球的安裝容量達到26 GWp。由以往的太陽光電市場規模發展趨勢觀之，未來的1-3年內如果沒有政府的策略性補助計畫的話，PV產業將出現許多的整合、併購案，甚至是倒閉關廠的情況發生。美國DOE的專案研究報告顯示，PV系統價格若能達到每瓦1.0美元的話，則安裝的規模將不可限量，如圖一之至2050年的太陽光電系統價格與安裝容量預估<sup>[1]</sup>所示。預計2020年約有130 GWp的安裝量，2030年約有360 GWp的安裝量，2040年約有510 GWp的安裝量，到2050年將超過600 GWp的安裝量。但是PV系統價格若一直維持在每瓦2.0美元的話，到2050年的安裝量也僅有150 GWp左右，其與每瓦1.0美元的差距高達4倍之多。如果以PV系統價格若是達到每瓦1.0美元的話，如圖二所示2050年PV發電將佔全球發電總量的18%以上；而PV系統價格若一直維持在每瓦2.0美元時，發電量僅佔到5%。由此可見，PV系統價格對未來的PV產業發展有多麼重大的影響。

歐洲太陽光電產業協會 (EPIA) 報導 2011 年全球新太陽光電安裝容量上升 67%，達到近 28 GWp，其中歐洲約佔 21 GWp (2010 年為 13.3 GWp，同比增長 57%)，而義大利和德國的安裝量又佔歐洲的 60%。依據 EPIA 統計資料顯示，全球太陽光電累計安裝容量 2011 年突破 67 GWp，而 2010 年時為 39.7 GWp，年增率高達 68.77%。年輸出電能約 800 億千瓦時，足夠供應 2,000 萬個家庭使用。截至 2011 年底，在歐洲太陽光電累計安裝總量已超過 50 GWp，每年可生產約 600 億度(kWh，千瓦時)電力。



資料來源：The SunShot Program, DOE, USA, The Dollar a Watt Team, 2011. <sup>[1]</sup>

圖一、至 2050 年的太陽光電系統價格與安裝容量預估



資料來源：The SunShot Program, DOE, USA, The Dollar a Watt Team, 2011. <sup>[1]</sup>

圖二、至 2050 年的太陽光電系統價格與佔全球發電總量比例預估

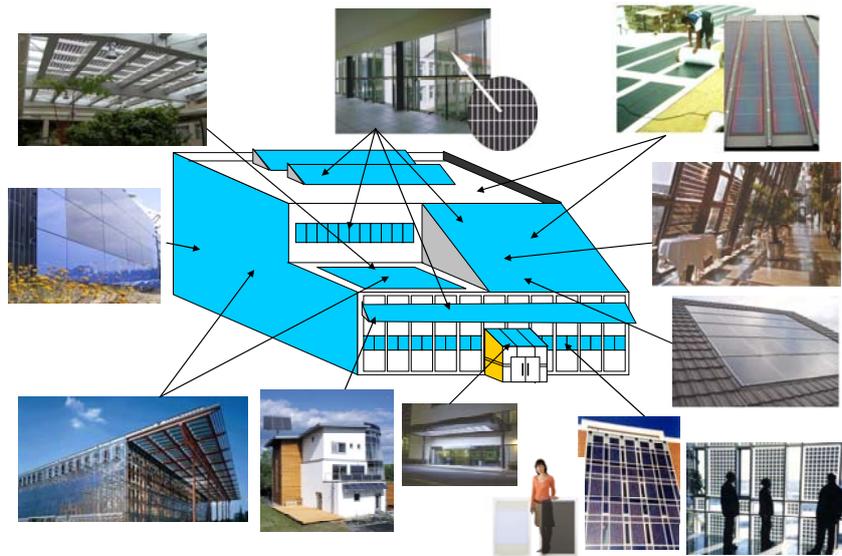
假若由另一個情境觀之，政府的補助完全取消時，太陽光電發電（考量平準化價格，LCOE）是否有機會達到每度電(kWh) 5 - 6 美分的價格？這是一個太陽能產業專家都很難精準預測的難題，要挑戰 PV 模組效率提昇、製造成本降低、使用壽命延長等，對於 BIPV 的相對難度更高。因為建築本身對太陽光電的安裝就是頗為艱鉅的工程，許多業主與建築師在新蓋的建築物上，除了太陽光電基本的功能要求外，美觀與獨特性都是關鍵所在，因此 BIPV 的產品屬於量小樣多，並不適合以大量製造方式來降低製造成本，所以與其他的地面上太陽光電系統相比較，其成本可能要高出一倍以上，如此一來 BIPV 的市場推廣就更為困難。

## 二、建材一體型太陽光電應用

簡單言之，建材一體型太陽光電(BIPV, Building Integrated Photovoltaics)是把太陽光電發電系統與建築物整合在一起，使該建築物具有直接利用陽光發電的功能。太陽光電建材一體化，即是把太陽光電模組做為建築物迎光面的一部分（或是將太陽光電模組做為建築材料，安裝在建築物的迎光面上），使該建築物具有直接利用陽光發電的功能，並且其外觀結構及電氣安裝上，都必須符合建築法規的要求。

太陽光電應用在房屋(BIPV)的設計，例如屋頂、牆幕、窗簷、屋檐等，依建築物的設計太陽光電可以安裝如圖三與圖四所展示的實際案例。另就光線是否需要穿透到建築物內，而可以選擇不透光、部份透光等型式的模組。太陽電池不僅僅有標準的深藍色，也可以設計製造成不同的顏色，圖五為各種不同顏色的單晶矽、多晶矽太陽電池。由於建築物設計時有部份結構具有曲面幅度，因此，BIPV 也必須製造成可撓式(如圖六所示)。當然有曲面幅度的建築物以矽晶太陽光電模組設計，不必使用薄膜可撓式模組，圖八是原德國北部 Shell Solar 公司的太陽電池工廠外觀與內部結構，其 BIPV 即使用矽晶太陽電池。

TPVIA



圖三、太陽光電應用在房屋(BIPV)的設計，例如屋頂、牆幕、窗檐、屋檐等



資料來源：Hamid Batoul, BIPV: New Products Development, Schuco, 31- Jan., 2008. <sup>[2]</sup>

圖四、BIPV 應用在屋頂、牆幕、窗檐、屋檐等實例



資料來源：Dieter Geyer, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW), Baden-Württemberg. International Workshop on BIPV, 30<sup>th</sup> October 2008. [3]

圖五、各種不同顏色的單晶矽太陽電池與薄膜模組



資料來源：Uni-Solar, <http://www.uni-solar.com/> [24]

圖六、美國 Uni-Solar 公司的非晶矽可撓式薄膜模組與安裝的 BIPV 應用



資料來源：原德國 Shell Solar 公司的太陽電池工廠外觀與內部結構 [5]

圖七、有曲面幅度的建築物以矽晶太陽光電模組設計，可以不用薄膜可撓式模組

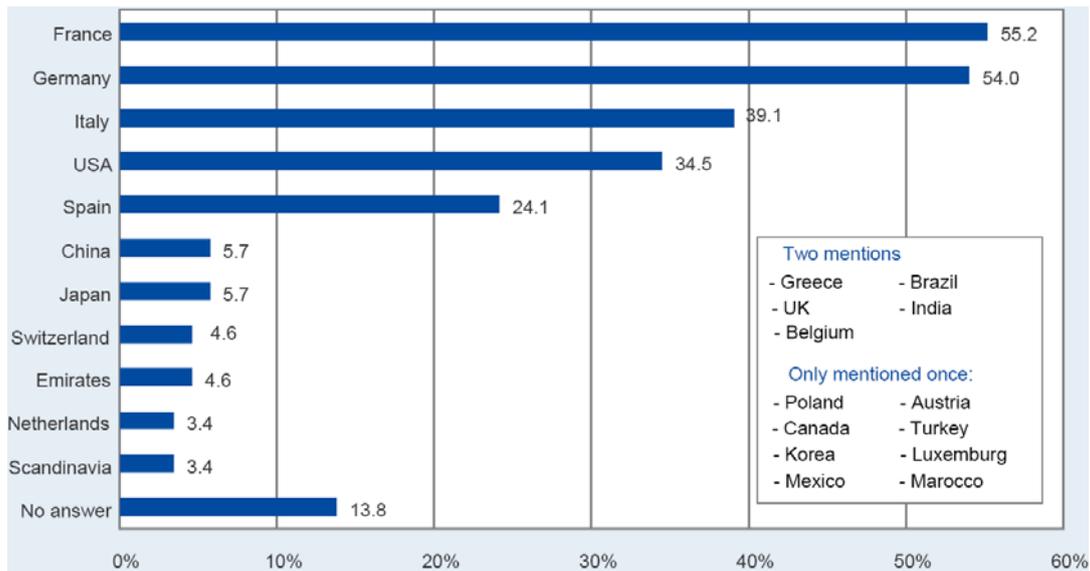
BIPV 的主要優點在於可提供建築物適量的輔助電力，尤其在新建築設計時便可以將太陽光電整合在建築上(如圖四的實例所示)，毋需再浪費其他的土地或空間，屋頂以太陽光電模組取代傳統的屋瓦，亦可以節省材料的支出；而發電廠就在自己的房屋上，減少輸送電力的傳輸耗損。就建築物本身的設計可以因為太陽光電模組的特殊設計，而具有獨特的藝術或美觀圖案，顯現建築的創新與前瞻性；當然亦有減少二氧化碳排放的環保效果。在未來的 PV 的製造與安裝成本大幅降低之後，社會大眾也有機會降低家庭電費的支出等等，不要過度依賴進口石化原料，降低我國對石油、煤炭、天然氣供應、能源安全自主的要求，這絕對是政府與產業界期盼可以早日實現的夢想。

### 三、建材一體型太陽光電市場規模

市調公司 BBC 在 2011 年 11 月發表的研究報告顯示，2010 年全球 BIPV 市場預估約有 1,201 MWp 安裝容量，到 2015 年時，年複合平均成長率(CAGR)為 56%，成長至 11,392 MWp (研究報告：Building-Integrated Photovoltaics (BIPV): Technologies and Global Markets)。另外，NanoMarkets 研究單位在 2011 年 7 月亦宣稱，到 2016 年 BIPV 的市場規模可達 110 億美元，但安裝容量比 BBC 的研究在 2015 年 11.39 GWp 少了相當多，僅有 3.6 GWp 的市場安裝容量。EuPD Research 2010 調查分析全球 BIPV 市場具有重要發展性發展國家報告如圖八，這是市場調查詢問的結果，卻也顯見歐洲的法國、德國、義大利領先其他國家，對於 BIPV 的認同度比較高，其國民所得高，民眾也不僅要求具環保的 PV 發電設備，建築的美觀也會比較在乎。美國、西班牙緊追其後，比例也相當高；此外，中國、日本、瑞士與阿拉伯聯合大公國(UAE)等國對於 BIPV 的重視度雖然遠低於歐美，但其發展潛力亦不可忽視。

在目前的全球競爭壓力下，PV 製造廠家必須具有低成本量產的製造能力，才有機會存活。但是要在 BIPV 的市場勝出的話，其安裝成本仍需要與當地區的經濟、建築結構、景觀等因素取得平衡，成本仍然是最大的考量重點。輕量化、彈性、顏色、圖案、尺寸、形狀、足夠高的光電轉換效率等，都是未來引起民眾投注目光的關鍵。

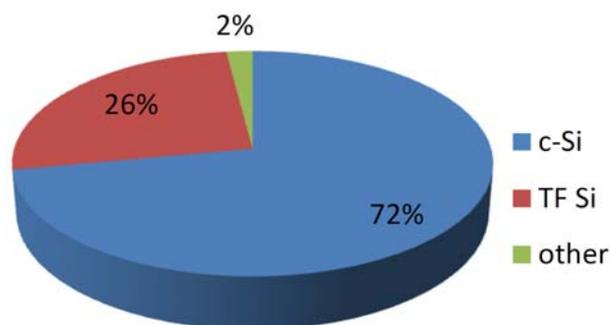
TPVIA



資料來源：EuPD Research 2010, Madrid 23/06/2010. [6]

圖八、全球 BIPV 市場具有重要發展性發展國家的調查分析

非晶矽薄膜太陽光電業者經常強調其可以彎曲的基板材質，是矽晶太陽光電模組所難以替代的優點，因此一般都認為其在 BIPV 的應用將是最大利基之一，但是基於 PV 系統的安裝必須整體考量發電量，與房屋可以安裝太陽光電的面積，因此之前的 BIPV 市場並非是薄膜太陽光電的天下，圖九為 2011 年統計在 BIPV 應用上，不同太陽電池技術的市場，薄膜太陽光電佔有 26% 的市場，而矽晶太陽光電模組卻佔有 72% 的市場，預計 5-10 年內仍然是以矽晶太陽光電的佔有率最高，但是薄膜技術的突破有機會在未來逐漸提高佔用率。



資料來源：NanoMarkets, EPIA Analysis, 2011 年 [7]

圖九、不同太陽電池技術在 BIPV 應用上的市場佔有率

#### 四、建材一體型太陽光電設計準則

BIPV 在建築上必須具有隔絕熱、防水、隔音(達到 25 分貝是可能的)、結構安全、美觀、電磁屏障、抗風壓、地震等功能，當然選擇安裝的地區陽光充沛、

不遮蔭、可以透光、顏色等等都是重要的設計因素。過去的許多設計案例甚至長達30年以上，目前系統仍然可以發電，如此多的經驗告訴設計者如何選擇模組產品，品牌與價格高低當然是選購產品的參考指標，但自從2005年太陽光電製造廠大量投資後，產品的耐候性、可靠度、耐久性測試是非常重要的依據，目前並無一個可以完全確認可靠的標準。太陽光電的設計更牽涉到發電成本與回收效益等經濟性問題，因此，未來的BIPV並不是如一般民眾安裝太陽能熱水器一樣的簡單，尤其是在安裝之後的維護(Maintainability)，其困難度遠高於一般地面型的太陽光電系統，因為業主很難偵測有系統的問題或故障，也幾乎無法自行更換或維修，系統安裝商的保固保證與能夠長期持續營運是最大的挑戰。

BIPV的發展潛力在太陽能建築上的經驗法則如表一所示，問題的關鍵是必須考量該地區是否適合太陽能建築，適合太陽能建築的面積僅約一半左右，至於牆面的PV的發電潛力則更有限。表二則列舉出中西歐BIPV的發展潛力在屋頂與牆面上的面積。其中住宅建築物可以利用的面積比較多的是屋頂的部份，牆面的安裝在高緯度國家尚稱可以，但在台灣尤其夏季發電效益將非常不好。

表一、BIPV 的發展潛力在太陽能建築上的規則

| BIPV 的發展潛力在太陽能建築上的經驗法則 |                     |   |                    |
|------------------------|---------------------|---|--------------------|
|                        | 屋頂                  |   | 牆面                 |
| 樓地板面積                  | 1 m <sup>2</sup>    | ← BIPV 發展潛力的相對基準點 →                           | 1 m <sup>2</sup>   |
| 全部面積                   | 1.2 m <sup>2</sup>  | “建築物全部面積/樓地板面積”的比值                            | 1.5 m <sup>2</sup> |
|                        | 60%                 | 適合建築太陽光電的比例，考量結構、歷史、遮蔭，以及故意破壞公物(或文化、藝術)的行為等因素 | 20%                |
| 建築適合的地區                | 0.72 m <sup>2</sup> | “適合建築面積/樓地板面積”的比值                             | 0.3 m <sup>2</sup> |
|                        | 55%                 | 適合建築太陽光電的比例，考量充足的日照量                          | 50%                |
| 適合太陽能建築的地區             | 0.4 m <sup>2</sup>  | “適合太陽能建築面積/樓地板面積”的比值 (利用因子)                   | 0.15m <sup>2</sup> |

資料來源：Report IEA - PVPS T7-4 (Summary): 2002<sup>[8]</sup>

表二、中西歐 BIPV 的發展潛力在屋頂與牆面上的面積

| 中西歐 BIPV 的發展潛力在屋頂與牆面上的面積  |                 |                          |
|---------------------------|-----------------|--------------------------|
| 屋頂                        | 各類建築物           | 牆面                       |
| 9 m <sup>2</sup>          | 住宅建築物           | 3.5 m <sup>2</sup>       |
| 3 m <sup>2</sup>          | 農業建築物           | 0.5 m <sup>2</sup>       |
| 2.5 m <sup>2</sup>        | 工業建築物           | 1 m <sup>2</sup>         |
| 2.5 m <sup>2</sup>        | 商業建築物           | 1 m <sup>2</sup>         |
| 1.5 m <sup>2</sup>        | 其他建築物           | 0.5 m <sup>2</sup>       |
| <b>18.5 m<sup>2</sup></b> | <b>所有的建築物總和</b> | <b>6.5 m<sup>2</sup></b> |

資料來源：Report IEA - PVPS T7-4 (Summary): 2002<sup>[8]</sup>

表三為 PV 在建築上需符合國際電工標準重要項目，由應用產品的 PV 模組、PV 電力調節器(PV Inverters)、市電介面與 PV 系統等，考量到設計認證、性能、電磁相容、PV 發電的品質及安全，都有相對應的國際標準，但目前有些項目仍缺乏，有些則仍正在開發中，因此在此部份還要投入相當多的時間與努力，才能有國際認可的檢測標準。

表三、PV 在建築上需符合國際電工標準重要項目一覽表

| 應用產品                     | 項目        | 標準                        |
|--------------------------|-----------|---------------------------|
| PV 模組                    | 設計認證與型態許可 | IEC 61215 (矽晶模組)          |
|                          |           | IEC 61646 (薄膜模組)          |
|                          | 性能        | IEC 60904 (性能測試，標準測試條件)   |
|                          |           | IEC 61853 (能量與電力等級，正在開發中) |
|                          | 安全        | UL 1703 (美國)              |
| TÜV Safety Class II (德國) |           |                           |
| IEC 61730 (正在開發中)        |           |                           |
| PV 電力調節器                 | 性能        | IEC 61683 (效率測試)          |
|                          |           | UL 1741 (美國)              |
|                          | 安全        | IEC 61209 (正在開發中)         |
|                          |           | 電磁相容                      |
| 市電介面                     | 電力品質及安全   | IEC 61727 (新版正在開發中)       |
|                          |           | 地方法規                      |
| PV 系統                    | 安全        | IEC 60364-7-712           |
|                          |           | 地方法規                      |

資料來源：Prog. Photovolt: Res. Appl. 2004; 12:409-414.<sup>[9]</sup>

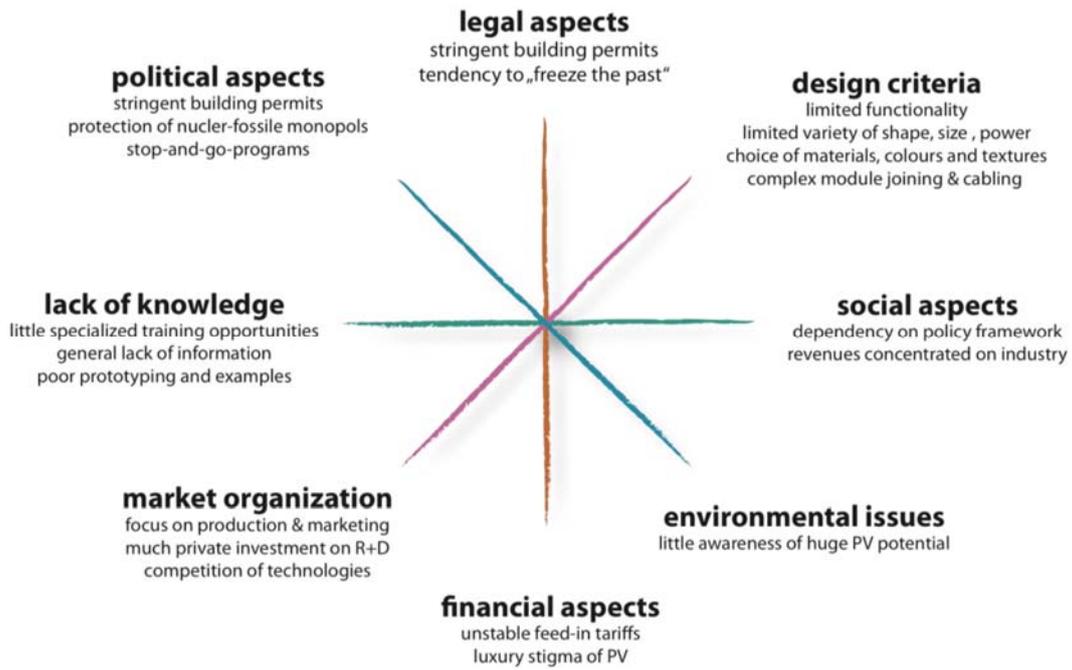
## 五、建材一體型太陽光電障礙與解決方案

眾所周知 BIPV 的發展其實是存在許多的障礙，特別是在標準化的服務、材料規範等問題仍待克服，此外，外掛式的建築應用太陽光電系統(Building Applied PV, BAPV)，也有強大的競爭壓力。以下列出其中比較關鍵的問題所在：

1. 初期投資成本較高：雖然 PV 系統的發電成本比市電高相當多，但是其操作的成本卻頗低，這是與石化原料或核能發電相比較的結果。
2. 市場相關的障礙：再生能源的技術尚未達到成熟階段，市場切入與技術資源的資訊流通仍相當不足。
3. 市場上對於 PV 系統設計、應用的模式仍不夠廣泛。
4. 市場上缺乏系統相關的標準。
5. 具資格的系統設計與安裝者不足，因此增加設計與安裝的成本。
6. 石化燃料發電對環境的影響成本，例如全球氣候暖化、空氣污染的成本，並未列入市電的成本結構中。
7. PV 發電併網(Grid Connection)的整合仍缺乏一致性的標準。

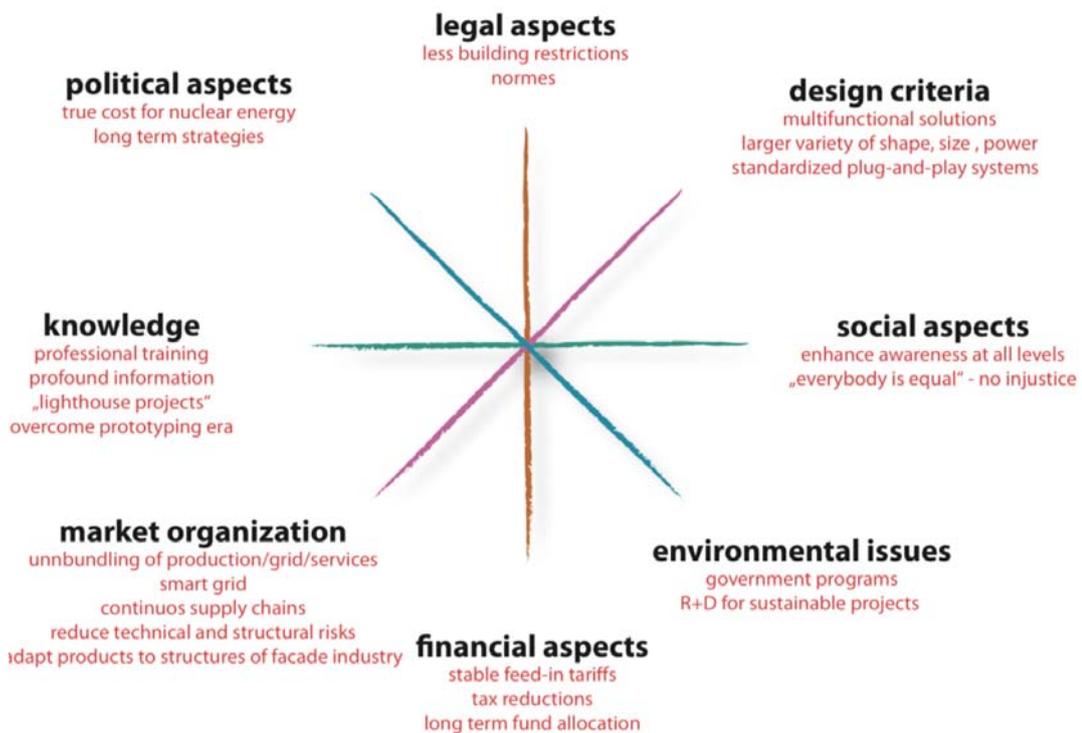
BIPV 的發展現在正處於十字路口的困境；是否就高度專業的技術、外觀設計利基優勢一路緩步前進？或是 PV 產業與建築業密切結合，將兩個產業架橋媒合，尤其是後者必須建立產業標準、創新思維與金錢投資，但相對的，其發展機會對兩大產業而言，也將會是比較名副其實的。

圖十與圖十一為瑞士 Solventure Solar Energy Systems 公司針對目前所遇到 BIPV 發展的障礙與解決對策方案，歐洲各國在 PV 的發展狀況有極大的差異，德國是已經投入非常多的資源在太陽光電的製造與應用技術開發，所以其市場的需求與其他歐洲國家也相當不同。德國現在必須面對降低「饋入市電」補助降低的市場挑戰，裝置在屋頂的 PV 系統是促使德國市場成長的動力，但是系統的規模會朝向大型化，其價格的挑戰就比以往高。過去德國的系統整合商(System Integrators)大都是由規模不大的屋頂型 PV 系統業整合而擴大，要切入國際市場得考慮風險管理的能力。



資料來源：Reto P. Miloni, Solventure Solar Energy Systems GmbH, Switzerland, Madrid,  
23rd June, 2010. <sup>[10]</sup>

圖十、BIPV 應用上的各種障礙



資料來源：Reto P. Miloni, Solventure Solar Energy Systems GmbH, Switzerland, Madrid,  
23rd June, 2010. [10]

圖十一、BIPV 應用上各種障礙的對應策略

提供給政府與產業的決策者參考，這是未來的機會，當然其發展過程中必有諸多挑戰，如何面對這些問題，而可以在短期內克服，相信大家都不知道，台灣的 BIPV 發展能否如歐洲般的發達？這是值得深思的。而在如義大利、西班牙、法國市場逐漸擴大的國家，推廣的作法也不一樣，在義大利較小 PV 系統有穩定的機會成長，大型系統成長高峰期已漸漸過去；至於新興的歐洲市場，如南歐、中歐與東歐國家，其規模不大，有些國家的饋電入網的補助方案尚未確定，因此並不會在短期內有多大的成長。

未來 BIPV 的模組目標價格要降低到 <\$2/Wp，必須發展配合”十億峰瓦 (GWp)”潛力的商業模式，整合 PV 到屋頂的產品，焦點是降低系統周邊(Balance of System, BOS)產品的製造成本，因此有必要與屋頂的建造商形成策略性伙伴關係，並與電力電子的供應商整合，其整合的 PV 屋頂系統必須驗證具有降低屋頂的溫度可能性，另外，產品的可靠度與使用壽命的延長，在安裝上必須更容易且更快速，這些都是未來不能避免的關鍵挑戰，如此 BIPV 不是僅具美觀與發電的功能而已，將更進一步成為市電同價時代來臨的主流產品。

## 六、結語

台灣太陽光電產業的主力是矽晶太陽電池生產，但是在 PV 系統應用端的需求卻仍不足，這是需要政府全力協助，才能有辦法解決的。未來在建築物上的應用如何做才是健康？台灣建築業的能量規模如何引導至太陽光電建築的應用？另外，我國能源、電力的長期、安全與自主供應等等，都是必須由經濟部與台電公司優先考量的，特別是要審慎擬定未來 10-20 年的長期能源與電力品質穩定與價格改善方案，我國的經濟發展才有機會持續進步。台灣太陽光電產業已經具有良好的基礎與成果，政府的有效率規劃與建設，正可以加速促進產業提昇，並可造福地球萬物啊！

## 七、參考資料

1. The SunShot Program, DOE, USA, The Dollar a Watt Team, 2011.
2. Hamid Batoul, BIPV: New Products Development, Schuco, 31- Jan., 2008.
3. Dieter Geyer, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW), Baden-Württemberg, International Workshop on BIPV, 30<sup>th</sup> October 2008.
4. 美國 Uni-Solar 公司資料，網站 <http://www.uni-solar.com/>
5. 原德國 Shell Solar 公司的太陽電池製造工廠，林江財拍攝，2005 年

6. EuPD Research 2010, Madrid 23/06/2010.
7. Solar Energy and Buildings: Roadmapping, Building Integrated Solar Cross Border Event, 16<sup>th</sup> November 2011.
8. Report IEA - PVPS T7-4 (Summary): 2002
9. Prog. Photovolt: Res. Appl. 2004; 12:409-414.
10. Reto P. Miloni, Solventure Solar Energy Systems GmbH, Switzerland, Madrid, 23<sup>rd</sup> June, 2010.
11. 其他參考的 BIPV Websites:
  - <http://www.pv-performance.org>
  - <http://www.pvsunrise.eu>
  - [http://www.bipv.ch/base\\_e.asp](http://www.bipv.ch/base_e.asp)
  - <http://www.iea-pvps.org/>
  - [http://www2.epia.org/04Media/pictures\\_new.asp?page=6&search =Search&order=](http://www2.epia.org/04Media/pictures_new.asp?page=6&search =Search&order=)

*TPVIA*