

行動太陽光電測試實驗室

On-site Testing Laboratory for Photovoltaic Module

吳尚銹、吳登峻、李思賢、彭成瑜

Shang-Ya Wu, Teng-Chun Wu, Si-Xian Li, Cheng-Yu Peng

太陽光電測試實驗室為符合 TAF ISO/IEC 17025:2017 認證項目，本論文將工研院量測中心的室內測試實驗室能量，擴展至移動式設施之非固定地點服務，檢測戶外太陽光電案場的太陽光電模組產品，建立行動測試實驗室的遊測技術，在太陽光電案場提供模組產品之現地檢測服務，其中戶外行動測試實驗室期許符合測試領域遊測技術規範 (TAF CNLA T20)。遊測技術具有高機動性，行動測試實驗室朝向符合三項 IEC 61215:2021 檢測項目 (4.1 目視檢查、4.2 最大功率測定、4.3 絕緣測試) 及二項影像檢測服務 (IEC 62446-3 紅外線熱影像測試之作業程序、IEC 60904 電致發光測試之作業程序)，遊測技術主要運用於案場的抽樣行為，提供竣工驗收、例行檢查、風災與估價盤點用途，行動太陽光電測試實驗室直接在案場檢測，有省去工人拆卸、減少搬運損失、降低運送成本之優勢。遊測技術包含方法的選用、查證及確證，論文將針對室內測試實驗室與戶外遊測技術做技術指引，包含設備或操作流程、方法或設施要求的環境條件、試驗件或校正件的處理，促使行動太陽光電測試實驗室成為國內首見的遊測移動式設施。

The Center for Measurement Standards of ITRI is going to expand the indoor testing laboratory to on-site testing service of non-fixed location of mobile facilities according to accreditation photovoltaic program for testing laboratory of TAF ISO/IEC 17025:2017. The mobile laboratory with on-site testing is developed to the inspections of photovoltaic module product in the outdoor field. The service will approach the on-site testing with 3-items IEC 61215:2021 of 4.1-4.3 (TAF CNLA T20) and 2-items image-detection services with the standard testing procedures of thermographic inspection of IEC 62446-3 and electroluminescence inspection of IEC 60904-13. The on-site testing with high mobility can be implemented by sampling check, check on delivery, routine inspection and valuation inventory purposes. The On-site inspection has the benefits of saving workers from disassembly, reducing handling losses, and decreasing transportation costs. The technical comparison between outdoor on-site testing and indoor testing laboratory represents the operation and guideline for method selection, verification and validation, including the operating procedures of equipment, the environmental conditions of testing and the handling of test pieces and calibration pieces. The on-site photovoltaic testing laboratory with high mobility is becoming the first mobile testing facility in Taiwan.

一、太陽光電測試介紹

行動測試實驗室適用於當案場在建置完成與例行性檢查中有檢測模組的需求時，我們可接受申請提供至案場的實地檢測⁽¹⁻²⁾；目前在臺灣的太陽光電案場中，檢測太陽光電模組是否損壞的方式主要有兩種，分別為戶外量測與將模組拆下送至測試實驗室進行量測；戶外量測時必須考慮到天氣因素，假如天氣狀況不佳，則無法進行量測；後者則須承擔模組在拆解與運送途中所發生的損壞風險。

藉由室內實驗室所擁有的檢測能量，提升至通過 TAF ISO/IEC 17025:2017 遊測項目，運用於行動實驗室，使行動實驗室具有三項符合 IEC 61215:2021 檢測項目 (4.1 目視檢查、4.2 最大功率測定、4.3 絕緣測試)⁽³⁾ 及二項影像檢測服務 (IEC 62446-3 紅外線熱影像測試之作業程序⁽⁴⁾、IEC 60904 電致發光測試之作業程序⁽⁵⁾) (如圖 1)。

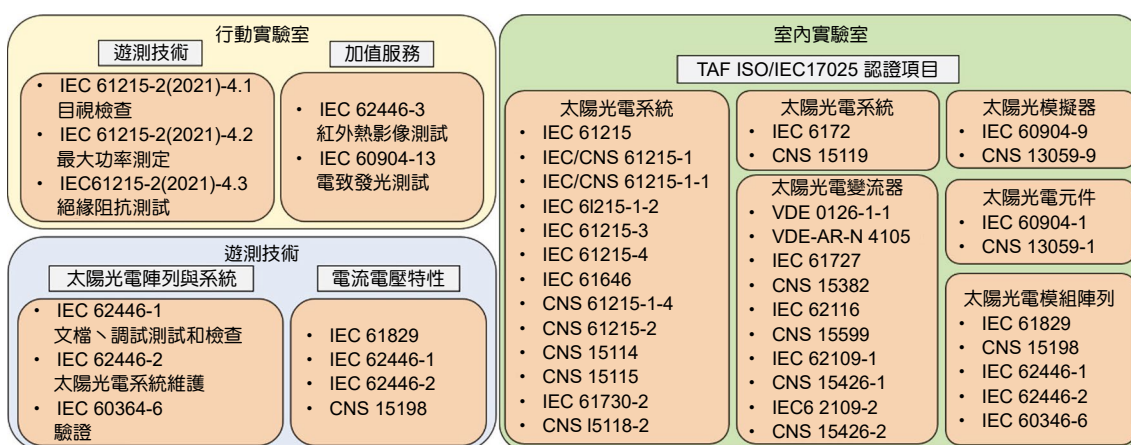


圖 1. 行動實驗室與室內實驗室檢測能量。

所以綜觀上述兩點，我們研發了行動太陽光電測試實驗室，藉由高機動性的優勢，能夠有效的降低運送模組電池片時產生隱裂的風險。

行動測試實驗室與傳統的量測方法比較之下 (如圖 2)，具有以下幾點優勢：

1. 尺寸通用：適用於市面上的模組尺寸
行動測試實驗室可量測最大尺寸 200 cm × 100 cm 之太陽光電模組，最小可量測 2 cm × 2 cm 之太陽電池。
2. 降低風險：降低運送使模組產生隱裂的風險
一般在運送時雖然會包裝，但在運送中的人工搬運以及震動，可能會產生隱裂的狀況。
3. 節省成本：節省包裝及運輸的費用與時間
如果將模組拆下並送往測試實驗室，則需負擔包裝與運費的成本，另外還有運送與檢測的時間，這些繁瑣的事項將會影響案場建置工程的延宕。
4. 提升可靠性：提供定點測試 (與實驗室相同 3A+ 品質)
使用與實驗室相同的量測設備與測試環境，使行動測試實驗室與實室內實驗室所量測之品質一致。
5. 提升機動性：全台現場測試之機動性
將檢測設備架設於貨車內，能夠提供高機動性，到全台各地進行量測，有效的減少時間成本。

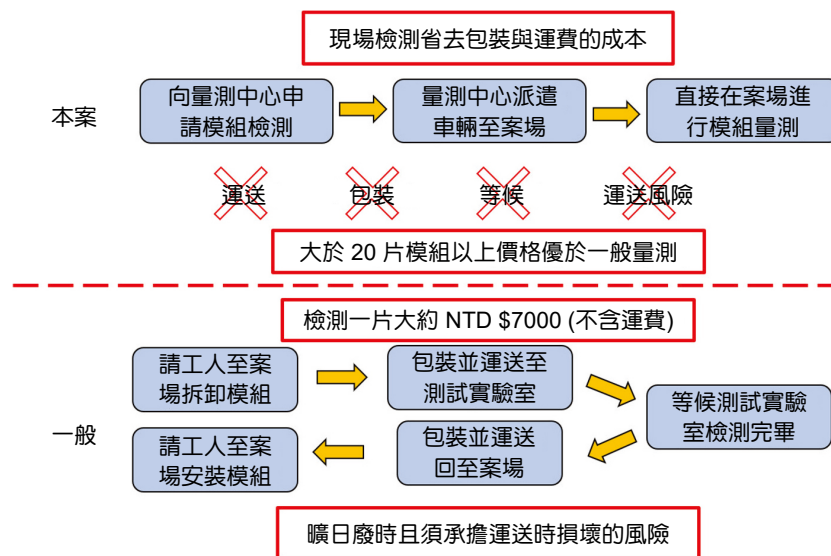


圖 2. 一般的檢測方法與本案之比較。

行動測試實驗室內共有五項遊測項目 (如表 1)，分別為目視檢查、最大功率測定、絕緣測試、紅外線熱影像測試與電致發光測試，所有遊測項目可檢測的樣品最大尺寸為 200 cm × 100 cm；而目視檢查的項目主要為在 1000 Lux 之照度下檢測模組是否有缺陷、隱裂、斷裂等，先做初步的檢測⁽⁶⁾；最大功率測定為在電池溫度 $25 \pm 2^\circ\text{C}$ 與輻照度 1000 W/m^2 的環境下檢測模組的 I-V Curve、 W_p 、 I_{sc} 、 V_{oc} ，可與模組出廠證明比對，檢查是否符合規格⁽⁷⁻⁹⁾；絕緣測試為在 1000 V 加上兩倍最大系統電壓下檢測模組是否有絕緣擊穿與表面破裂現象等，避免模組產生漏電；紅外熱影像測試為在模組大於 600 W/m^2 條件下，檢查熱斑與模組溫度是否異常，能夠快速地找出有問題的模組⁽¹⁰⁻¹²⁾；電致發光測試為供給模組電壓，檢查模組是否有隱裂、高電壓誘發衰減 (PID)、破片等，可更進一步的檢查模組的缺陷⁽¹³⁻¹⁴⁾。

表 1. 遊測項目與測試標準。

標準	IEC 61215-2-4.1 (2021 版本)	IEC 61215-2-4.2 (2021 版本)	IEC 61215-2-4.3 (2021 版本)	IEC 62446-3	IEC 60904-3
遊測項目	目視檢查	最大功率測定	絕緣測試	紅外線熱影像測試	電致發光測試
樣品最大尺寸	200 cm × 100 cm				
試驗條件	在 1000 Lux 之照度下做檢查	電池溫度： $25 \pm 20^\circ\text{C}$ 輻照度： 1000 W/m^2 。	1000V 加上兩倍最大系統電壓	模組需大於 600 W/m^2	供給模組最大系統電壓
檢測事項	<ul style="list-style-type: none"> 破裂、不規整或外表面損傷 電池破片 電池相互接觸或與邊框相接觸 封裝材料失效 	<ul style="list-style-type: none"> 電壓—電流曲線 (I-V Curve) 峰值功率 (W_p) 短路電流 (I_{sc}) 開路電壓 (V_{oc}) 	<ul style="list-style-type: none"> 無絕緣擊穿 (Dielectric breakdown) 無表面破裂現象 絕緣電阻不小於 $40 \text{ M}\Omega$ (模組面積大於 0.1 m^2) 絕緣電阻不小於 $400 \text{ M}\Omega$ (模組面積小於 0.1 m^2) 	<ul style="list-style-type: none"> 模組熱斑 模組熱異常 	<ul style="list-style-type: none"> 隱裂、不規整或外表面損傷 高電壓誘發衰減 (PID) 電池破片
試驗設備	目視	Simulator	High Voltage Power Supply	紅外線熱影像儀	NIR-camera

目前行動太陽光電遊測實驗室較廣為人知的有日本的 Chemitox 與西班牙的 Enertis Solar⁽¹⁵⁾，而與本案的行動測試實驗室互相比較下來，本案的檢測系統符合 IEC 61215 的三項測試以及兩項附加測試且具有高機動性，能夠有效率地為案場檢測模組。

二、行動測試實驗的檢測功能與優勢

行動測試實驗室所具備的遊測項目預計於 2021 下半年通過 TAF 認證，通過後即可開始為各地案場服務，未來服務項目主要分為四大項，分別為 (1) 模組陣列快速抽驗系統：可檢查模組是否有熱斑與熱異常，可事先做初步的檢測；(2) 模組最大功率測試：可檢測模組的 I-V Curve、Wp、Isc 與 Voc，與模組廠所提供的規格作比對是否產生衰減；(3) 模組缺陷檢測系統：可檢查電池是否能正常發電；(4) 安規檢測系統：檢查模組是否有絕緣擊穿與表面破裂現象，預防漏電發生。若經過檢測後，可獲得具有 TAF 認證的工研院檢測報告，檢測時將會實施以下事項 (如圖 3)：



圖 3. 行動太陽光電測試實驗室檢測事項。

1. 模組目視檢查：依據 IEC 61215-2 (2021 版本)- 4.1 章節的作業程序檢視模組缺陷。檢測時在不低於 1000 Lux 的光照下仔細檢查每個模組的情況、破裂或損傷，並記錄或拍攝缺陷位置，當天氣處於陰天時，會另架設光源與光度計達到 1000 Lux，來符合規範再進行量測。
因太陽光電模組的生產製程中，可能出現裂痕或破片等缺陷，所以先以人工目視方式，針對模組進行外觀檢查 (如圖 4)，例如：模組表面是否裂開、彎曲、不規整或損傷，電池是否互聯線與接頭鬆脫、電池封裝後有無氣泡等，揪出影響模組性能的任何可能情況。



圖 4. (圖左) 模組固定支架；(圖右) 目視檢查示意圖。

2. 模組最大功率測定：依據 IEC 61215- 2 (2021 版本)- 4.2 章節的作業程序查核模組在標準條件下的發電功率

檢測時將模組架設於與目視檢查同組支架上，並垂直於光源，並須使用 Class CAA 或更高等級的太陽光模擬器，而 PV Reference Device 與測試元件相同太陽電池技術，在一特定的輻照度和溫度條件下確定模組的 I-V 特性，電池溫度介於 $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ，輻照度 1000 W/m^2 ；車內設有 3A+ 級的太陽光模擬器，能模擬接近真實的太陽光源，具有光譜的匹配度、穩定度與均勻度等，用來測出該模組最大發電功率。實驗查核時，會備有進行前後查核的參考太陽光電模組，且行動測試實驗室所量測的數值會與室內測試實驗室一致⁽¹⁶⁾。

室內測試實驗室與行動測試實驗室的實驗方式差異為空間運用，因要將太陽光模擬器放置於車上，光源的長度是一大問題，所以為了達到模擬光源需要7公尺的需求，將車廂設計可延展的機構。

此平台將模組太陽光模擬器光路進行二次光學設計，使太陽光模擬器能夠安裝於貨車上，使用車型為 IVECO New Daily 3.5 噸小型貨車，因進行太陽光電模組功率測試時，需與模擬光源距離 7 公尺，所以透過可延展的車箱機構達到 3A+ 等級評價；車內則做好封閉與消光處理，透過封閉式的車廂使環境光無法穿透至車廂，再將車廂內塗上消光的油漆，將雜散光降到最低，使電致發光測試時不受環境光干擾，模組試驗期間會進行溫度 $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 與光源 $\pm 1\%/m^2$ 等環境控制，取得 ISO 17025 測試實驗室的國際認證，測試結果的可靠性比照常規實驗室。

3A+ 等級所需進行的量測分別為光譜符合度、光輻射不均勻度及光輻射不穩定度，光譜符合度須介於 0.875 – 1.125 之間；光輻射不均勻度須低於 1%；光輻射不穩定度需低於 1%；太陽光模擬器的光頻譜應符合所示的百分比，規範中也有訂定誤差範圍，依照誤差值評定太陽光模擬器的等級 (如表 2)。

表 2. IEC 60904-9 太陽光模擬器分級標準。

級別	光譜符合度	光輻射不均勻度	光輻射不穩定度
A+	0.875 – 1.125	1%	1%
A	0.75 – 1.25	2%	2%

光譜符合度：符合 IEC 60904-9 中 AM1.5 光譜在波長 300–1200 nm 的能量分布比例。

太陽光譜為太陽發射的電磁輻射在大氣頂上，且隨波長的分布，會隨著時間、大氣層厚度、雲層厚度等因素，影響太陽光頻譜分布與強度，一般常見的矽晶太陽能電池，其有效的吸收頻譜在 300–1200 nm，在此波長範圍外的太陽光無法使電池生電流發電，因此 IEC 60904-9 規範中，將 AM1.5G 的太陽光光譜能量設在波長 300–1200 nm 區間，並由太陽光模擬器所實驗出的光頻譜範圍 (如表 3)。

表 3. 太陽光模擬器光頻譜範圍。

Wavelength (nm)	Irradiance (W/m ²) Solar simulator	Energy distribution (%)		Coincidence
		AM 1.5 G	Solar simulator	
300–470	125.17	14.55	16.61	0.88
470–561	141.19	16.41	16.74	0.98
561–657	144.75	16.82	16.67	1.01
657–772	149.46	17.37	16.63	1.04
772–919	143.89	16.72	16.66	1.00
919–1200	155.88	18.12	16.69	1.09

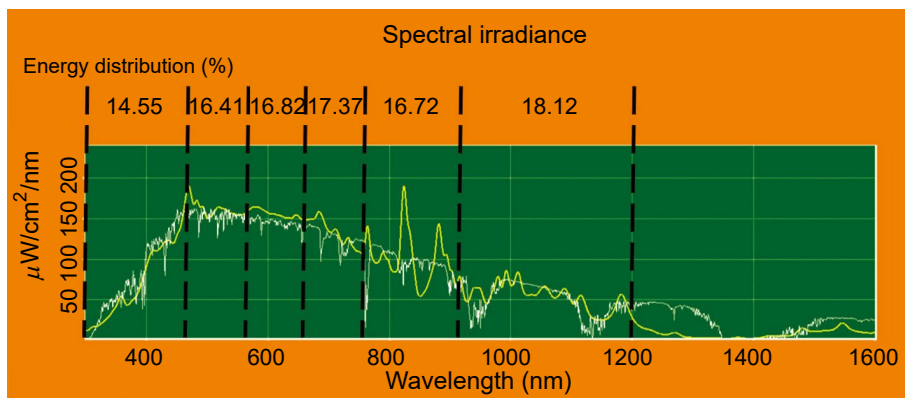


圖 5. 光譜符合度示意圖。

光輻射不均勻度 (non-uniformity)：在指定測試區域的輻照度應達到一定的均勻性。

太陽光模擬器在照射平面上的不均勻度 (如圖 6)，可利用偵測器偵測照度值，例如標準太陽能電池量測照射面上的輻射照度分布後，透過平面上的最大照度值 (max irradiance) 與最小照度值 (min irradiance) 計算不均勻度的比例，其計算公式如下：

$$Non - uniformity(\%) = \frac{[Max Irradiance - Min Irradiance]}{[Max Irradiance + Min Irradiance]} \times 100\%$$

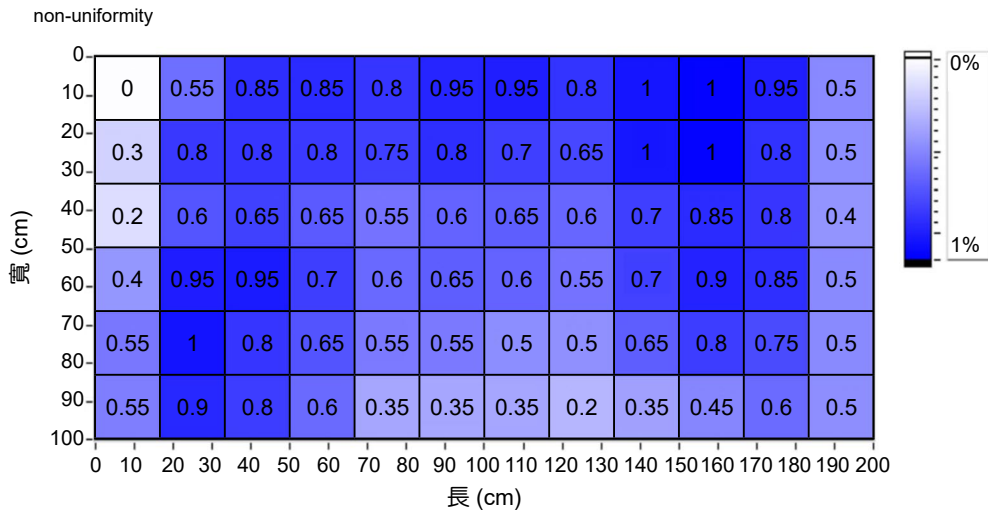


圖 6. 光輻射不均勻度示意圖。

光輻射不穩定度 (instability)：太陽光模擬器輸出光束長時間保持穩定的光照度，以確保太陽能電池效率測試之準確性。

穩定度指標為要求太陽光模擬器輸出光束長時間保持穩定的光照度，以確保太陽能電池效率測試之準確性，透過平面上的最大照度值 (max irradiance) 與最小照度值 (min irradiance) 計算光輻射不穩定度的比例，其計算公式如下：

$$Instability(\%) = \frac{[Max\ Irradiance - Min\ Irradiance]}{[Max\ Irradiance + Min\ Irradiance]} \times 100\%$$

此平台所使用之太陽光模擬器設備為 3A+ 級閃光脈衝式太陽光模擬器 (flash pulse of simulator)，可達到與實驗室相同可靠的測試品質，數據抓取的時間介於 2-12 ms 之間 (如圖 7)，可看出在這區間的光輻射是較穩定的；因使用的太陽光模擬器為短脈衝 (short pulse)，所以我們搭配 multi pulse 模擬出長脈衝 (long pulse)。

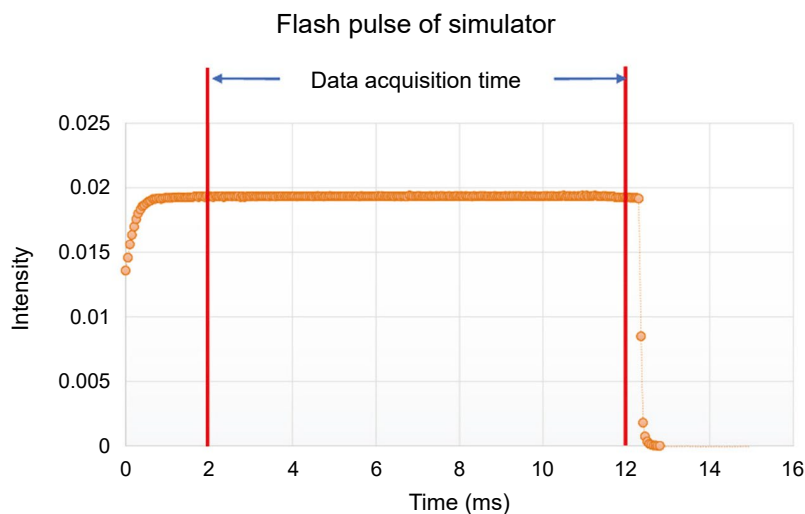


圖 7. 光輻射不穩定度示意圖。

二次光學設計：因本案所使用的太陽光模擬器由塔式改為平躺式 (如圖 8)，所需的空間無法放置於車上，但為了將太陽光模擬器放置於車廂內且不影響效能，所以使用二次光學來解決光路 (暗房) 中雜散光的問題；此平台藉由二次光學設計將太陽光模擬器的光源能夠打在太陽光電模組上 (如圖 9)，使其能夠架設於小型貨車⁽¹⁷⁾。

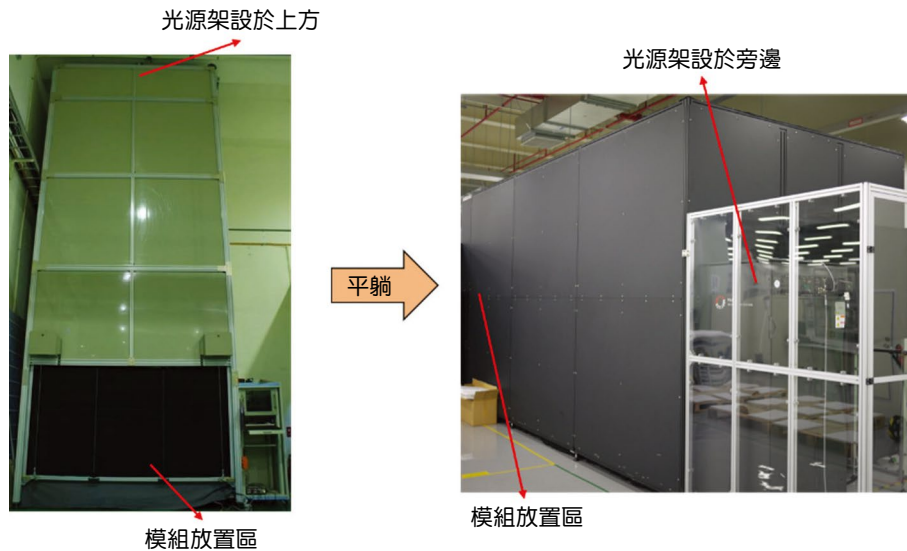


圖 8. (圖左) 室內測試實驗室使用塔式太陽光模擬器；(圖右) 行動測試實驗室使用平躺式太陽光模擬器。

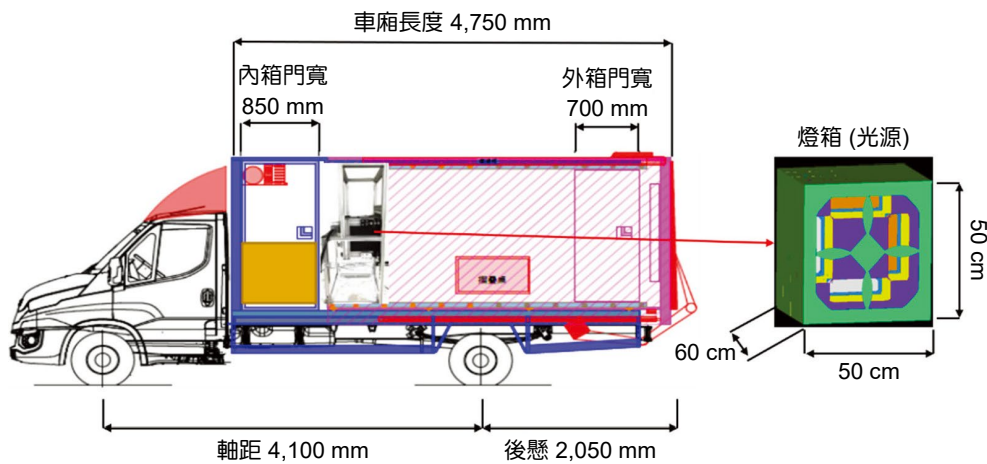


圖 9. 太陽光模擬器架設於貨車內示意圖。

二次光學設計主要是對於光路做優化設計，對大面積投光和泛光照明配光需求尤為迫切，所有的光源皆具有其特定的配光型態，因此燈具的二次光學設計會決定燈源在照射面上有效範圍內的均勻度及光輻射輸出效率；本系統之照明光學單元為燈組以光學機構將短電弧氙燈光輸出予以準直，使輻射照度可達 1000 W/m^2 以上的標準。

車廂的空間可剛好將燈箱固定於前方，此平台特別設計可延展的車廂機構 (如圖 10)，延展車廂後可達 $7,650 \text{ mm}$ ，可量測最大尺寸的模組為 $200 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$ 。

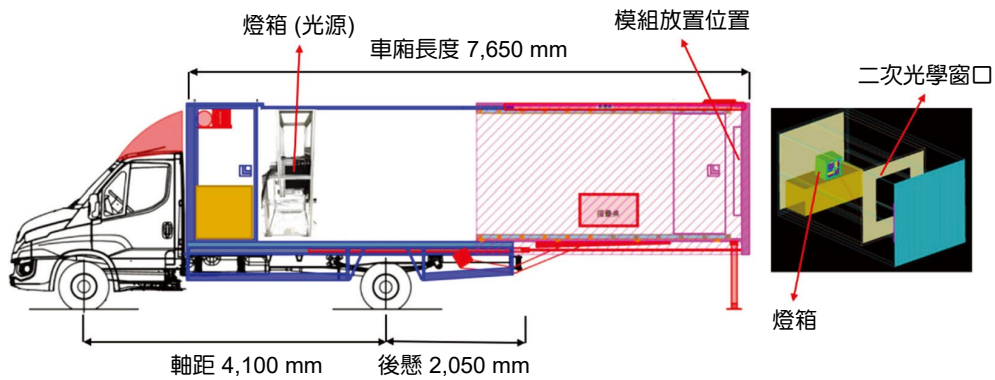


圖 10. 可延展的車廂機構與二次光學示意圖。

進行最大功率測定時藉由燈源的閃光觸發照射於太陽光電模組上，並以變電阻的方式做檢測，電池溫度需監控於 $25 \pm 2^\circ\text{C}$ ，量測結果須與監測電池片相匹配 (如圖 11)。

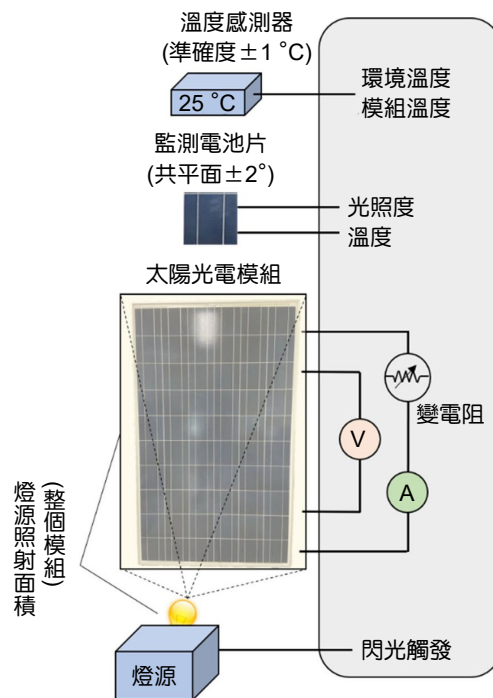


圖 11. 最大功率測定示意圖。

3. 模組 (乾) 絕緣阻抗測試：依據 IEC 61215- 2 (2021 版本)- 4.3 章節的作業程序測試模組絕緣性是否合格

檢測時將模組的短接輸出端子連接到直流電源的正極具有電流限制的絕緣測試儀，再將模組裸露的金屬部分連接到測試儀的負極端子。需在周圍大氣的環境溫度下進行，且相對濕度不超過 75%。實驗查核時，會準備 $400\text{ M}\Omega$ 的標準電阻進行量測，測試設備是否合格 (如圖 12)。

行動測試實驗室使用與室內測試實驗室相同的設備與步驟，所以兩者之間的差異不大，並不會影響檢測結果。

這項是為了測試太陽光電模組的絕緣特性，以避免發電時人員碰觸模組，因絕緣性不佳而遭到電擊的安全性檢查，將儀器接在太陽光電模組，用 500—1,000 V 直流電壓作檢測，絕緣電阻必須達到標準，或無絕緣擊穿與表面破裂現象。



圖 12. 絕緣阻抗測試示意圖。

4. 紅外熱影像測試：依據 IEC 62446-3 的作業程序進行快速抽檢

本中心的檢測人員具有遙控無人機操作證術科證照，可由檢測人員完成所有紅外熱影像測試。

因紅外熱影像測試需在太陽光下執行，所以室內測試實驗室僅於執行 IEC 61215-4.9 熱斑耐久試驗時使用紅外熱像儀，在行動測試實驗室則使用無人機搭載紅外線攝影機進行案場模組陣列熱異常的快篩檢測。

紅外熱影像測試是用紅外攝影機擷取物體所發出的近紅外光，然後由近紅外光強度可以計算出每個位置的溫度，因此紅外熱影像測試主要就是檢查是否有溫度異常的現象，由溫度異常的狀態也可以推估各種太陽光電系統的缺陷 (如圖 13)。

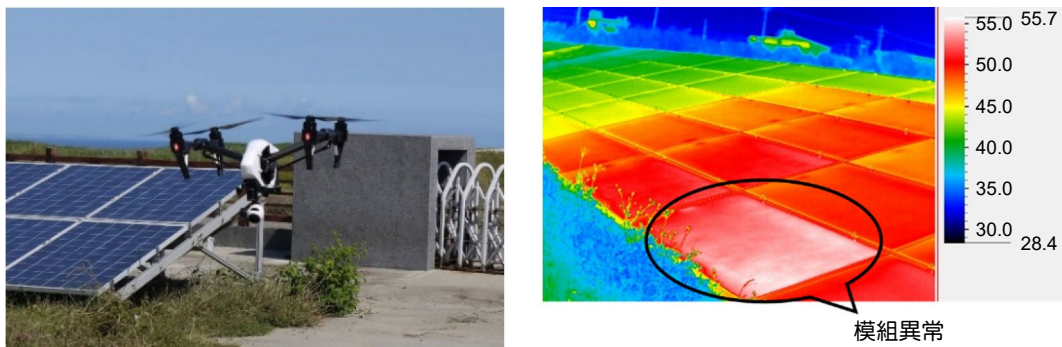


圖 13. (圖左) 無人機搭載紅外熱影像儀；(圖右) 紅外熱影像畫面。

5. 模組電致發光 (EL) 測試：依據 IEC 60904-13 的作業程序檢查模組隱裂、破片與缺陷

行動測試實驗室因距離夠遠，所以拍攝電致發光時採用 80 mm 的長鏡頭，並與模組距離 5.5 公尺進行拍攝，可避免因近距離而使用廣角鏡頭，導致畫面邊緣產生扭曲的問題。

太陽光電模組生產或搬運過程中若出現隱裂，光憑肉眼是很難檢查出來的，電致發光測試

為灌入電流，檢測內部自發的近紅外光，可確保模組有沒有得到內傷，儀器透過模組散發之近紅外線光取得清楚影像，任何瑕疵透過螢幕一目了然 (如圖 14)。

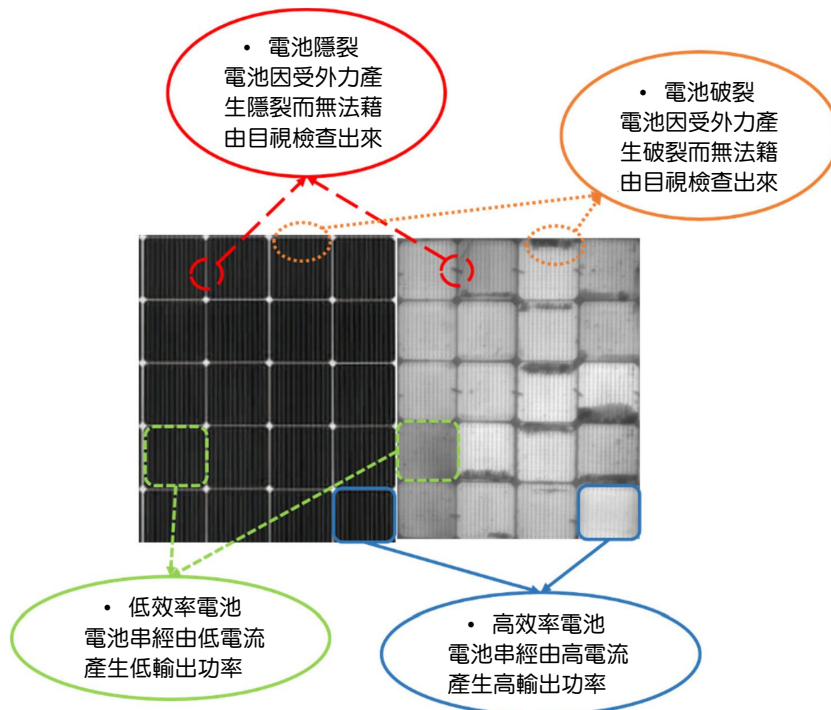


圖 14. 模組 EL 瑕疵檢測與分析。

進行模組電致發光測試時採用定電壓的方式做檢測，拍攝時透過 80 mm 長鏡頭，並與太陽光電模組距離 5.5 m (如圖 15)。

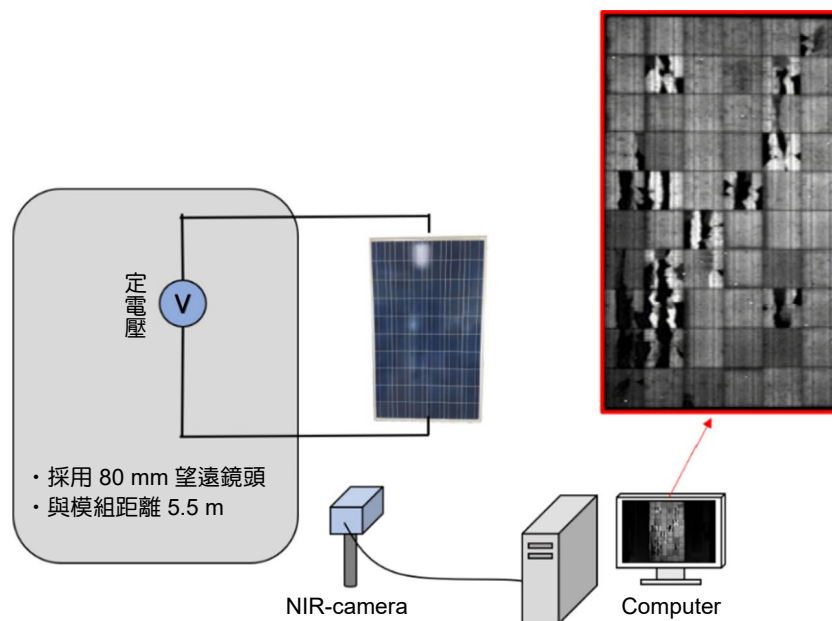


圖 15. 電致發光檢測系統示意圖。

三、行動測試實驗的技術差異說明

將三個平台做比較後可以發現，日本在各項評比之下，較為劣勢，主因為在環境溫度控制中採用開放式空間，較難維持溫度；而車輛日本選擇 7.5 噸的大貨車，駕駛人需要另外考取大貨車執照，且迴轉半徑較大導致機動性差；在陽光模擬器中，平台式雖然量測速度快，但卻需常常做校正，不利於放置車上；儀器的防水保護中，因西班牙燈箱採用外推式且儀器裸露在車外，有進水的風險，與本案和日本使用固定於車廂內的方式有所不同；在技術差異性中，西班牙為 EL 架設於車頂以斜向照射太陽光電模組，與本案 EL 與燈箱設計成一體式有所差異 (如表 4)。

表 4. 各國行動測試平台與本案之比較。

技術差異	日本 Chemitox	西班牙 Enertis solar	本案行動實驗室
溫度條件控制	25±2 °C	25±2 °C	25±2 °C
空間利用率	固定式車廂	可延展車廂	可延展車廂
機械自動化布建	延展前：	約 4,200 mm	4,750 mm
	延展後：	約 7,500 mm	7,650 mm
貨車噸數	7.5 噸	3.5 噸	3.5 噸
需要的駕照 (機動性)	大貨車	小貨車	小貨車
延展機構的穩定性	一體式 (無延展車廂)	延展車廂 (無支撐架)	延展車廂 (有支撐架)
可服務項目	3 項 • 最大功率測定 • 紅外熱影像測試 • 電致發光測試	5 項 • 目視檢查 • 最大功率測定 • 絕緣測試 • 紅外熱影像測試 • 電致發光測試	5 項 • 目視檢查 • 最大功率測定 • 絕緣測試 • 紅外熱影像測試 • 電致發光測試
技術差異性	燈箱垂直照射	EL 斜向照射 (架設於車頂) 燈箱垂直照射	EL 與燈箱垂直照射 (一體整合設計)
最大量測面積 (cm ²)	200 × 100	200 × 200	200 × 100
紅外熱影像	無人機	手持式	無人機
太陽光模擬器	平台式	投射式	投射式
光路機構	全部設備在內車廂 (平台式需常校正)	燈箱掛載在外車廂 (可能會傾斜)	燈箱掛載在內車廂 (穩定)
儀器保護 (燈箱)	車廂內	外露於車廂外	車廂內
環境溫度控制 (25°C)	溫控時間長 (開放式空間)	溫控時間短 (小型窗口)	溫控時間短 (小型窗口)
太陽光模擬器等級	3A	3A+	3A+

四、結論

行動測試實驗室主要運用於案場的檢測，提供竣工驗收、年度檢查、風災財損與系統鑑價盤點用途，具有三項檢測與兩項影像檢測服務，其中三項檢測符合 IEC 61215:2021 檢測

項目 (4.1 目視檢查、4.2 最大功率測定、4.3 絕緣測試)及二項影像檢測服務 (IEC 62446-3 紅外線熱影像測試之作業程序、IEC 60904 電致發光測試之作業程序)，透過高機動性的小貨車，可在案場進行現地檢測，藉此能夠讓太陽光電案場快速地檢測太陽光電模組，先以目視做初步的檢查，觀察模組是否有隱裂、破片、不規整或外表面損傷等異常；透過 3A+ 級太陽光模擬器做最大功率測試，可立即的了解模組是否有功率衰退的現象；模組電致發光測試可清楚地知道模組的哪個位置有缺陷須立即處理，有效率的找出問題點；絕緣測試可知道絕緣電阻是否達到標準，或有無絕緣擊穿與表面破裂現象，達到合格的安規。

行動測試實驗室的特點為可延展的車廂，藉由可延展的機構達到模擬光源距離 7 公尺之要求，能夠測量的模組最小尺寸 2 cm × 2cm 之太陽電池，最大可量測尺寸 200 cm × 100 cm 之太陽光電模組，包含了市面上大部分的太陽能電池與模組。

使用此平台能夠有效率的進行模組量測，與一般的檢測方法相比，可省去模組運送的時間與運送途中發生人員搬運碰撞與路面震動損傷的風險，減少時間與金錢成本，在未來將會是案場檢測模組的最佳利器。

誌謝

本研究工作承蒙能源局資助，謹此致謝。

參考文獻

1. Imad Zyout and Abdulrohman Qatawneh, "Detection of PV Solar Panel Surface Defects using Transfer Learning of the Deep Convolutional Neural Networks", *Advances in Science and Engineering Technology International (ASET)*, Feb 4-9 (2020).
2. Sunil Rao, Andreas Spanias, Cihan Tepedelenlioglu, "Solar Array Fault Detection using Neural Networks", *IEEE International Conference on Industrial Cyber Physical Systems (ICPS)*, May 6-9 (2019).
3. IEC 61215-1:2021, Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval - Part 1: Test requirements
4. IEC 62446-2:2020, Photovoltaic (PV) systems - Requirements for testing, documentation and maintenance - Part 2: Grid connected systems - Maintenance of PV systems.
5. IEC 60904:2020 SER, Photovoltaic devices - ALL PARTS.
6. Fu Zhuang, et al., "Solar cell crack inspection by image processing", *Proceedings of 2004 International Conference on the Business of Electronic Product Reliability and Liability (IEEE Cat. No.04EX809)*, April 30 (2004).
7. Guthi Prakash, S Pradeepa, "Design and Modeling of MPPT for Solar Based Power Source", *4th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)*, Feb 7-9, (2018).
8. Bhasuthkar Niharika, and T S B Sudarshan, "Maximum power point tracking controller for solar powered mUAV", *IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI)*, Sept 21-22, (2017).
9. Mehmet Bodur and Muammer Ermis, "Maximum power point tracking for low power photovoltaic solar panels", *7th Mediterranean Electrotechnical Conference*, IEEE, April 12-14,(1994).
10. Shifeng Denga, et al., "Research on hot spot risk for high-efficiency solar module, Energy Procedia", *SNEC 11th International Photovoltaic Power Generation Conference & Exhibition*, April 20-21,(2017).
11. Gastón Cesar Saez de Arregui, Miguel Plano, Sonia Concarí, *Número Extra: Selección de Trabajos Presentados a REF*, **24**, (2015).
12. Jhon Jairo Vega Díaz, Michiel Vlamincx, Dionysios Lefkaditis, Sergio Alejandro Orjuela Vargas, Hiep Luong, *MDPI*, **20** (21), 6219 (2020).
13. John M. Raguse, James R. Sit, *Journal of Photovoltaics*, **5** (4), 1175 (2015).
14. Muhammad Rameez Ur Rahman, Haiyong Chen, *IEEE Access*, **8**, 40547 (2020).

15. Jorge Coello, Leonardo Pérez, Francisco Domínguez, Miguel Navarrete, *Energy Procedia*, **57**, 89 (2014).
16. IEC 61730-1:2016, Photovoltaic (PV) module safety qualification - Part 1: Requirements for construction.
17. 吳登峻, 李思賢, 吳鴻森, “穩態太陽光模擬測試系統”, *AOIEA* 自動光學檢測設備聯盟, (2018)。

作者簡介

吳尚鏗先生為國立勤益科技大學電子工程系碩士生，現任於工業技術研究院量測技術發展中心兼任研究助理。

Shang-Ya Wu is currently a M.S. student in Department of Electronic Engineering at National Chin Yi University of Technology and a part-time research assistant at Center for Measurement Standards of Industrial Technology Research Institute.

吳登峻先生為國立交通大學科技管理碩士，現任工業技術研究院量測技術發展中心正工程師兼組長。

Teng-Chun Wu received his M.S. from National Chiao Tung University. He is currently a division director at Center for Measurement Standards of Industrial Technology Research Institute.

李思賢先生為國立高雄第一科技大學光學系統設計碩士，現任工業技術研究院量測技術發展中心資深工程師。

Si-Xian Li received his M.S. from National Kaohsiung First University of Science and Technology. He is currently a senior engineer at Center for Measurement Standards of Industrial Technology Research Institute.

彭成渝先生為國立臺北科技大學機電科技博士，現任國立勤益科技大學電子工程系助理教授。

Cheng-Yu Peng received his Ph.D. in Graduate Institute of Mechanical and Electrical Engineering from National Taipei University of Technology. He is currently an assistant professor in Department of Electronic Engineering, National Chin Yi University of Technology.