

出國報告(出國類別：考察)

赴日本青山大學研討銅銦鎵硒太陽電池技術發展與趨勢出國報告

服務機關：國防部軍備局中山科學研究院

姓名職稱：聘用技士 吳政翰

派赴國家：日本

出國時間：100.05.23~100.05.27

報告日期：100.06.23

國防部軍備局中山科學研究院出國報告建議事項處理表

報告名稱	赴日本青山大學研討銅銦鎵硒太陽電池技術發展與趨勢出國報告		
出國單位	第五研究所	出國人員級職/姓名	聘用技士 / 吳政翰
公差地點	日本	出/返國日期	<u>100.05.23</u> / <u>100.05.27</u>
建議事項	<ol style="list-style-type: none"> 1. 逐年建置新製程及新材料的太陽電池設備，像是解離蒸鍍分子團的系統、製備高載子移動率的透明導電膜濺鍍設備及 R2R 機構的真空製程設備。 2. 籌建太陽能電池相關之電性及物性分析設備，打造世界級認證的太陽電池分析實驗室，像是 I-V 分析、C-V 量測、聚光型的 I-V 量測系統、QE 系統、ICP 分析等專屬太陽能分析設備。 3. 建議未來本院新增建物能架設太陽電池發電系統，提供本院建物所需部分用電，不僅達到開源更具減碳效果，且在建築美觀及技術推廣上更具說服力。 4. 與國際著名實驗室建立良好的合作關係，在這個團隊合作的時代，能夠有經驗老道的研究單位給予技術上的指導，不僅可減少許多 Try & Error 的時間，更能儘速切入未來趨勢及發展重點。 		
處理意見	<ol style="list-style-type: none"> 1. 向經濟部申請新一期的建案-例如：R2R 可撓式吸收層或上下電極層製備技術，籌購具有未來發展潛力的關鍵技術設備，或利用院內現有能量進行設備改裝。 2. 利用院內固定資產投資進行分析能量籌建，並積極培訓認證工作，協助國內業者之產品達到國外認證標準。特別優先籌建 I-V 分析、C-V 量測、QE 系統等重要的太陽能分析設備。 3. 未來在建物上可與國內現有太陽能模組廠商共同合作，建置約 3~5KW 的小型太陽能發電系統，像是院內周遭的草皮或頂樓的屋頂都是架設小型發電系統的位置，宣示本院在綠能產業推動的決心。 4. 邀請國外著名的太陽電池研究人員來院參觀及演講，並與其請教技術瓶頸之處及未來發展趨勢，更期望能建立良好的合作關係。 		

國防部軍備局中山科學研究院
100年度出國報告審查表

出國單位	第五研究所	出國人員 級職姓名	聘用技士 吳政翰
單 位	審 查 意 見		簽 章
一級單位	本院在未來計畫將納入新製程設備籌購及改裝規劃，朝向關鍵製程技術進行開發，在分析設備上也已提出固定資產投資，推動實驗室認證。在未來新建物的建物上會考慮綠建築的設計。綠能產業及相關技術性的演講會經常性的舉辦。		
計 品 會			
保 防 安 全 處			
企 劃 處			
批			示

國外公差人員出國報告主官（管）審查意見表

針對吳員赴日參訪之建議事項，本院已在未來計畫當中納入新製程設備籌購及改裝規劃，朝向關鍵製程技術進行開發，不僅能滿足計畫需求提供國內廠商自主技術，亦能追上國外現今正欲發展中的技術。另外，在分析設備上也鼓勵各功能單位申請固定資產投資，建立認證實驗室。現今本院也規劃朝向綠能產業進行發展，因此，在新建物上考慮架設綠建築的設計也是推動方向之一。本院經常性的邀請國內外著名學者來院進行技術性演講及觀摩，往往能引發同仁之間的共鳴以及與學者的討論激發創意，未來有關於綠能產業的演講仍舊會經常性的舉辦。

出國報告審核表

出國報告名稱：赴日本青山大學研討銅銦鎵硒太陽電池技術發展與趨勢出國報告			
出國人姓名（2人以上，以1人為代表）		職稱	服務單位
吳政翰		聘用技士	國防部軍備局中山科學研究院
出國類別	<input checked="" type="checkbox"/> 考察 <input type="checkbox"/> 進修 <input type="checkbox"/> 研究 <input type="checkbox"/> 實習 <input type="checkbox"/> 其他 _____（例如國際會議、國際比賽、業務接洽等）		
出國期間：100年05月23日至100年05月27日		報告繳交日期：100年06月23日	
計 畫 主 辦 機 關 審 核 意 見	<input type="checkbox"/> 1.依限繳交出國報告 <input type="checkbox"/> 2.格式完整 <input checked="" type="checkbox"/> 3.無抄襲相關出國報告 <input type="checkbox"/> 4.內容充實完備 <input type="checkbox"/> 5.建議具參考價值 <input type="checkbox"/> 6.送本機關參考或研辦 <input type="checkbox"/> 7.送上級機關參考 <input type="checkbox"/> 8.退回補正，原因： <input type="checkbox"/> 不符原核定出國計畫 <input type="checkbox"/> 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容 <input type="checkbox"/> 內容空洞簡略或未涵蓋規定要項 <input type="checkbox"/> 抄襲相關出國報告之全部或部分內容 <input type="checkbox"/> 電子檔案未依格式辦理 <input type="checkbox"/> 未於資訊網登錄提要資料及傳送出國報告電子檔 <input type="checkbox"/> 9.本報告除上傳至出國報告資訊網外，將採行之公開發表： <input type="checkbox"/> 辦理本機關出國報告座談會（說明會），與同仁進行知識分享。 <input type="checkbox"/> 於本機關業務會報提出報告 <input type="checkbox"/> 其他 _____ <input type="checkbox"/> 10.其他處理意見及方式： 報告內容不涉機敏，資訊可公開。		
審核人	出國人員	初審（業管主管）	機關首長或其授權人員

說明：

- 一、各機關可依需要自行增列審核項目內容，出國報告審核完畢本表請自行保存。
- 二、審核作業應儘速完成，以不影響出國人員上傳出國報告至「政府出版資料回應網公務出國報告專區」為原則。

報 告 資 料 頁

1.報告編號： CSIPW-100Z-D0001	2.出國類別： 考察	3.完成日期： 100.06.23	4.總頁數： 27
5.報告名稱：赴日本青山大學研討銅銦鎵硒太陽電池技術發展與趨勢 出國報告			
6.核准 文號	人令文號 部令文號	100.05.19 國人管理字第 1000006608 號 100.05.17 國備科產字第 1000006782 號	
7.經 費		新台幣：60,165 元	
8.出(返)國日期		100.05.23 至 100.05.27	
9.公 差 地 點		日本	
10.公 差 機 構		青山大學-中田實夫 CIGS 太陽電池實驗室	
11.附 記			

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：赴日本青山大學研討銅銦鎵硒太陽電池技術發展與趨勢出國報告

頁數 27 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

國防部軍備局中山科學研究院/吳政翰/357258

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

吳政翰/國防部中山科學研究院/第五研究所/技士/357258

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他

出國期間：

出國地區：日本

100.05.23~100.05.27

報告日期：

100.06.23

分類號/目

關鍵詞：

銅銦鎵硒太陽電池、Roll to Roll 可撓式太陽電池、四元共蒸鍍、雷射促進鍍膜

內容摘要：(二百至三百字)

參觀青山大學實驗室及可撓式基板表面處理技術與可撓式 CIGS 太陽電池技術。現場觀摩及研討各項鍍膜層製備方法及關鍵技術，包含基板選取、下電雙層 Mo 製備、CIGS 原料選擇及蒸鍍源設計、三階段共蒸鍍法製備 CIGS 及 R2R 搭配 LAD 方式進行可撓式 PI 膜之 CIGS 太陽電池製作、真空法製備無鎘化合物緩衝層、高載子移動率的新光窗層技術開發及量測分析技術等，製作太陽電池種類包含有玻璃基板型的太陽電池效率可達-17~18%、Ti 型可撓式太陽電池-轉換效率可達 18.8%、PI 型的可撓式太陽電池-轉換效率可達 14~15.7%並具有 4 套製作 CIGS 吸收層的 MBE 系統及 6 套進行其他膜層製備的設備，與其他分析檢測設備共 43 項之多。

目 次

壹、目的.....	(9)
貳、過程.....	(9)
參、心得.....	(22)
肆、建議事項.....	(26)
附 件.....	(無)

日本青山大學之銅銦鎳硒太陽電池技術發展與趨勢

壹、目的

98年7月本所邀請到一位日本青山大學銅銦鎳硒(CIGS)教父之稱的中田教授，來院進行CIGS演講，當時演講來聆聽的同仁十分踴躍，因為同仁都欲了解CIGS四元化合物屬於什麼樣的太陽電池，且為何中田教授會被稱為CIGS教父，早在當時中田教授在CIGS研究早已具有世界級水準，除了轉換效率達到16%以上，更將應用觸角擴展至PI及金屬基板，就是所謂的可撓式太陽電池，顯現出其對太陽電池獨特眼光。因此，職當時以未純熟的日文與中田教授詢問：「能否至其日本的實驗室進行參訪?」，中田教授則是一口答應，造就了職赴日參訪的行程。

職出訪期間為100/5/23~100/5/27，參訪的工作內容有四點：

- 1.參觀青山大學實驗室及可撓式基板表面處理技術與可撓式CIGS太陽電池技術。
- 2.現場觀摩及研討各項鍍膜層製備方法及關鍵技術，包含基板選取、基板表面處理、下電雙層Mo製備、CIGS原料及蒸鍍源設計、共蒸鍍CIGS、緩衝層、光窗層及封裝切割技術等。
- 3.研討本院現有CIGS製程技術與設備及提升轉換效率之方法要點。
- 4.研討未來本院後續發展無鎘化物及加鈉製程所需的鍍膜技術與設備。

貳、過程

日本是個重視環境的國家，因此，對於太陽能源這樣的建設，早已行之有年，職於日本鄉鎮街道上就常遇見太陽能板的架設，像是路旁的路燈所加裝的太陽能板，將白天所轉換之電能儲存作為提供其夜間照明，或是屋頂上加裝太陽能板提供部分家庭用電，更能將高價電力賣回給電廠，顯示出日本在光能源的推廣及建設成果。(如圖一所示)



圖一、矽基形太陽能電池路燈

青山大學坐落於日本東京都的涉谷區，學校十分優雅，共具有 12 個理工科系及 5 個商學系。而中田教授之實驗室則位於青山大學之先進尖端材料大樓。(如圖二、三所示)



圖二、三-青山大學之先進尖端材料大樓

至中田教授之實驗室後，簡單地以日文與教授寒暄，並向中田教授說明參訪目的後，中田教授隨即帶領職參觀其實驗室及製作 CIGS 太陽電池設備。中田教授實驗室共有五大間，分散在不同樓層，其中兩間屬一般無塵實驗室，主要以 CIGS 製程及量測檢驗為主；另外三間則屬超貴重儀器實驗室，包含新進製程設備與共同檢測設備。

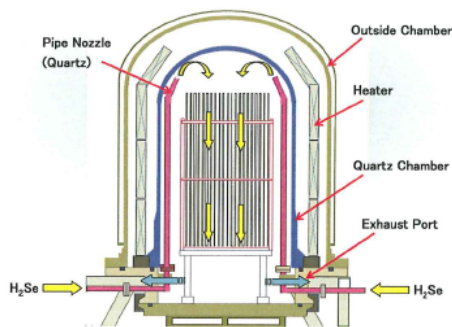
隨即在實驗室外，職觀察到幾項CIGS的模組樣品，便向教授詢問其產品，教授說明此為日本著名的幾家廠商所委託送測之展品，包含日本昭和電工(Showa Shell-後來稱為 Solar-Frontier太陽能公司(預計 2011 下半年於日本宮崎縣開始進行 900MW的生產測試)。早期該公司是以CuGa/In濺鍍製程搭配H₂Se氣體硒化技術，進行CIGS吸收層製備，該圖之產品為

85W，尺寸大小約 60cm x 120cm，約有 40~50 條切割，元件轉換效率約為 11~12%，採鋁框封裝(如圖四所示)。教授也向職表示該公司製程設備十分良好，且其效率及穩定性亦達量產水平，預計未來幾年在量產效率上將會有重大突破，而據職所了解該公司早期採氣體硒化技術，具有劇毒性且硒化製程時間長-約 6~8hr(其硒化設備採高壓H₂Se硒化)如圖五、六所示，這幾年便開始著手開發RTP硒化技術與無鎘緩衝層，宣稱產品效率已>13%。



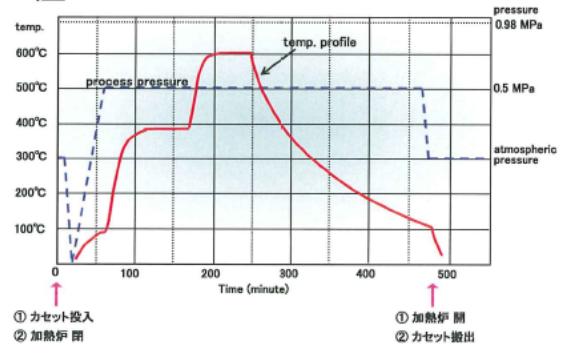
圖四、Showa Shell 的 CIGS 太陽電池模組(85W、60cm x 120cm)

1、裝置構造 加熱炉



圖五、早期 Showa Shell 的硒化爐設計

2、生産プロセス



圖六、Showa Shell 的硒化流程

另外，亦有一塊太陽能板引起職之興趣，就是Honda公司的CIGS太陽電池產品，尺寸大小約為 65cm x 125cm，觀察其產品應為 3 片小模組組成的CIGS太陽能片，每片小模組大約為 370mm x 470mm，也是採用濺鍍加上H₂Se的硒化製程，效率約為 10~11%，目前成本約為\$6 美金/W，因此，大部分僅銷售日本國內，主要特色也是採用無鎘化物的InS作為緩衝層，顯示日本廠家對於鎘污染的議題十分重視，而教授就是協助該公司開發無鎘化物的緩衝層，包含 InS、ZnS、ZnS(O、OH)等，轉換效率達 13~14.1%。



圖七、Honda 的 CIGS 太陽電池模組(65cm x 125cm)

隨後，中田教授引薦一位博士研究生-小林大造，由他帶領進行實驗室介紹及未來幾天行程的解說及研究討論。該名學生向職介紹實驗室規模，目前中田教授的實驗研究生共有 24 位(碩博士生)，CIGS 製程及檢驗相關的設備更高達 43 項之多。往後的幾日便是在實驗室向其請教關於 CIGS 太陽電池的研究。

中田教授主要製作CIGS的製程方式，乃以四元共蒸鍍搭配較高真空度的MBE系統完成吸收層的製作，而手法則採用三階段的共蒸鍍(如圖八所示)。一開始將基板維持在 350°C，進行CGS的化合，控制其Cu/In+Ga=1；而後停Cu之K-cell蒸鍍源，改以In+Ga進行蒸鍍使其比例調整至Cu/In+Ga=0.2，之後便停In+Ga 之蒸鍍；再次開啓Cu之蒸鍍源，且將基板溫度升至 550°C，將Cu/In+Ga比例調整至 1，最後停Cu蒸鍍源且開啓In+Ga，將整體Cu/In+Ga比例控制在 0.95~0.8 之間。這樣的控制方式，優點在於可以達到較佳的CIGS結晶結構。在第一階段屬In-rich組織，其CIGS結晶較小，但平整度佳，且可避免高溫脫膜現象。第二階段屬Cu-rich組織，其CIGS結晶結構會大幅成長。而最後In-rich主要則是考量到後續搭配的緩衝層，因CBD的製程方式對於表面的高低起伏有相當大的影響，高低起伏越大緩衝層覆蓋的效果就越差，容易造成元件的P-N介面會有抵消或消失等情形。而在三階段的過程中，中田教授也進行過詳細的研究。初始層CGS於低溫堆疊會產生較小的顆粒結構，當膜層產生In-rich結構時，CIGS的相尚未有變化，仍屬於蒸鍍源的分子態。當溫度升至 550°C，形成Cu-rich時候，CIGS的結構組織開始有明顯的成相，此時的晶粒組織大(Grain Size)、結晶介面也多(Grain Boundary)，但表面起伏也大。因

此藉由第三階段的In-rich，調整至表面平整且單一結晶結構的CIGS相。而這樣的太陽電池，目前已達 V_{oc} -645mV、 J_{sc} -36.8mA/cm²、FF-0.76、 η -18.1%的世界級水準。



圖八、三階段共蒸鍍法製備 CIGS 吸收層及元件結構分析圖

而中田教授實驗室製作 CIGS 的方式與各方幾乎大同小異，採用玻璃基板，以 DC-濺鍍製備 Mo 下電極層-亮銀色的柱狀型結構(如圖九所示)，在進行上述所說的三階段 CIGS 共蒸鍍法，就會形成灰色的 CIGS 吸收層(如圖十所示)，隨即披覆一層 CBD 的 CdS(鵝黃色)與 ZnS(淡黃色)(如圖十一所示)，膜層顏色則會因為堆疊的關係，由灰色轉變為墨綠色及深墨綠色，之後則以 RF 濺鍍 ZnO 及 DC-濺鍍 AZO 完成光窗層(如圖十二所示)，此時 CIGS 元件則會因為光線幾乎被完全吸收，形成黑色面，最後在將 Al 電極以蒸鍍法佈置於元件上，作為元件的上電極，將電子導出(如圖十三所示)。



含鈉玻璃



圖九-Mo 下電極層



圖十-CIGS 吸收層



圖十一-CdS 與 ZnS 緩衝層



圖十二-ZnO 與 AZO 光窗層



圖十三-Al 上電極層與元件剖面結構圖

以下則是職針對其研究室設備及製程方式進行說明，但有些設備牽涉與廠商保密協定的

問題，故無法有具體實體說明，僅能以文字敘述：

下電極層-Mo 採用的是 Cluster System 的設計(如圖十四所示)，搭配 Mo 靶-DC 源、ZnO 靶-RF 源、AZO 靶-DC 源，均為四吋靶，可進行 10cm x 10cm 之元件鍍膜，而 Mo 膜層是採用雙層結構製作(低功率高壓、高功率低壓)，系統價格約為新台幣 4000~5000 萬。



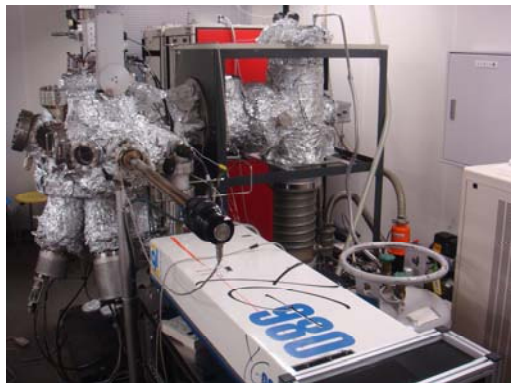
圖十四-Cluster System 的濺鍍設備

吸收層-CIGS則是上述談到的四元共蒸鍍，而特別之處在於，中田教授共有 4 套製作CIGS 系列的蒸鍍設備。其中有 3 套製作CIGS吸收層，差別在於雷射激發活化的系統設計，1 套為 CIGS共蒸鍍系統，1 套為CIGS共蒸鍍+Nd:YAG雷射，1 套則是R2R機構設計+CIGS共蒸鍍製程+Excimer雷射。最後 1 套則是朝向開發新材料的CAS(CuAlSe_2)或AIT(AgInTe_2)系統。其中R2R 設備與新材料設備，因受限於NEDO(日本能源局)及日本廠商的關係無法照相說明。

一般共蒸鍍系統則是由 Cu、In、Ga、Se 四支 K-cell 的蒸鍍源，將分別裝有 Cu、In、Ga、Se 顆粒或粉末的物料進行加熱，使其超過熔點產生揮發蒸氣，並藉由流量閥控制氣氛多寡，控制 Cu、In、Ga、Se 組成比例，以期獲得最佳的 CIGS 結晶結構。而其實驗室的蒸鍍系統選擇超高真空的 MBE 系統進行鍍膜，在較高的真空下可避免雜質粒子的污染。因此，在許多的研究報告中，都能看到其實驗室的 CIGS 結晶顆粒都能達到 $2\sim 3\ \mu\text{m}$ ，而這套單純共蒸鍍設備就須耗費 3000 萬台幣。

而近年來中田教授，主要朝向共蒸鍍法製作CIGS吸收層(如圖十五所示)。為提升其轉換效率及解決共蒸鍍不足部份，教授針對蒸鍍源所蒸鍍出的分子團，採用雷射進行活化裂解，使團聚氣體分子在未附著基板前，就能形成更小且活性更高的氣體小分子，以利後續的CIGS 結晶化合(如圖十六所示)。舉例來說， Se_8 經過雷射活化後，就更容易形成 Se_4 或 Se_2 。這套雷射設備由法國進口，雷射源採用Nd-YAG雷射，雷射波長有 1064nm、532nm、248nm等三種不同

波段，價值約 1500 萬台幣。這套雷射活化技術，近年來世界各地研究單位都不斷地採購這樣的設備，開發像是電漿硒化、原子層磊晶-ALD、離子活化等技術(本院正朝向該方向發展)，目的都爲了獲得高轉換效率的太陽電池。



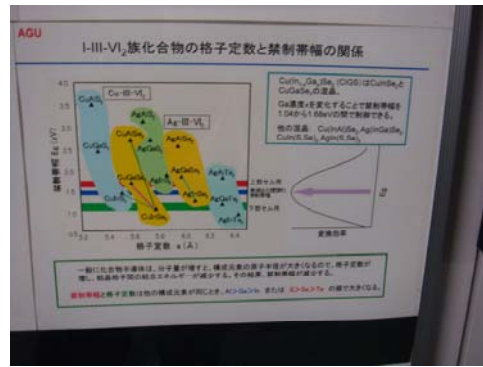
圖十五-MBE 四元共蒸鍍設備



圖十六-Nd-YAG 雷射設備

而令職訝異的一套 CIGS 製程設備，則是以 R2R 機構設計+CIGS 共蒸鍍製程+Excimer 雷射系統，集多項技術於一機的設計。R2R 的設計可搭配 PI 膜基板，進行可撓式 CIGS 太陽電池開發，基板幅寬可達 10cm、長度則達 200m。而 CIGS 共蒸鍍+Excimer 雷射，則是能將製程溫度控制在 450°C 以下，使得 PI 基板不會因受熱而損壞；其選用的 PI 膜也是屬於耐高溫的 Upleix(烏貝克公司)。這套設備所製作的可撓式 CIGS 太陽電池元件目前效率已高達 18.1%，但因保密協定關係，不能進行拍照攝影。據中田教授所說，該設備爲日本能源局(NEDO)全數資助，造價約 1.5 億新台幣，且製程前後段可搭配民間廠商-烏貝克公司一同協助完成，包含 Mo、ZnS、ZnO、AZO 的 R2R 濺鍍製程，顯示出日本公司與研究單位的合作十分密切。

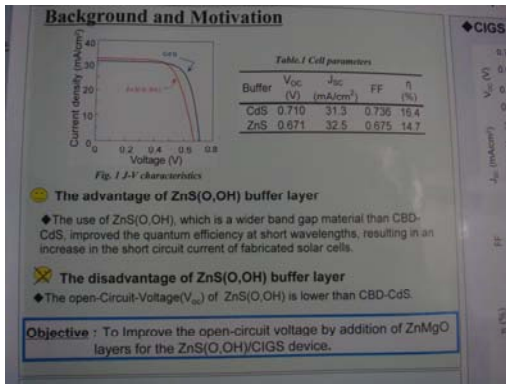
最後 1 套則是朝向開發新材料的CAS(CuAlSe_2)或AIT(AgInTe_2)，此蒸鍍設備獨立原因在於 CIGS 之設備具有專屬性，爲避免污染，機台獨立是最佳選擇。而選擇CAS或AIT的原因就是希望能吸收更多的光波段，將Eg-3.0~1.0eV光頻譜都能吸收。因黃銅礦晶體的能帶與元素的大小有密切的關係，正如圖十七所示，當原子晶格越小，其化合鍵結能量就會越強，因此，Eg能障就會越高，Ex： $\text{Al}>\text{Ga}>\text{In}$ 、 $\text{S}>\text{Se}>\text{Te}$ ，提升太陽電池的光轉換效率。但中田教授也表示目前這些材料，效率都未如預期，主要原因在於結晶性不佳，導致漏電等問題。



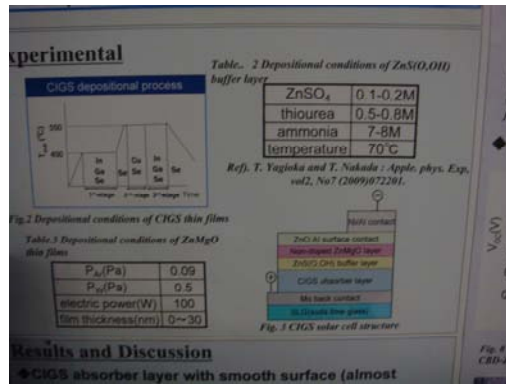
圖十七、黃銅礦結構其原子晶格常數與能帶的關係圖

緩衝層一般分為濕式法與真空鍍膜法，濕式法就是俗稱 CBD 法，像是 CdS、ZnS、InS、ZnS(O、OH)等材料，選擇 CBD 的製程優點在於製備容易、表面披覆佳、效率較高；真空法則有許多選擇，在中田教授實驗室包含以 RF 濺鍍進行 ZnS 緩衝層材料製備及 ALD 堆疊 ZnS(Se)等，主要目的就是希望能建置全真空製程 CIGS 太陽電池，減少製程離線所耗費的時間及提高製程一致性。更希望藉由鍍膜方式，改善部分材料效能不足的狀況及解決量產時大面積均勻性不足問題。

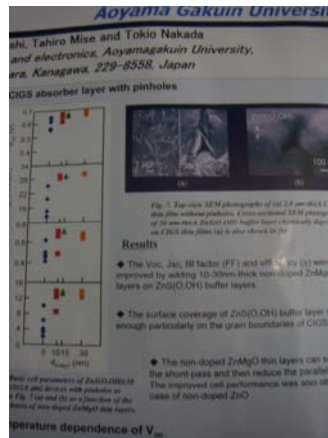
舉例來說，為解決CdS鏽污染的問題，近年來大家都朝向以CBD的ZnS(O、OH)作為開發。雖然ZnS(O、OH)的Jsc比CdS來的高，但其Voc卻比CdS來得低許多，因此，透過真空法的RF製備Mg_xZn_{1-x}O，就能有效提升ZnS(O、OH)/CIGS元件的Voc(如圖十八所示)。製備ZnS(O、OH)緩衝層的條件：ZnSO₄-0.1~0.2M、硫酸-0.5~0.8M、氨水-7~8M(鹼性溶液)、製程溫度 70°C；Mg_xZn_{1-x}O則是以RF進行濺鍍，工作壓力Pw-0.5Pa、工作電壓-100W、膜厚 10~30nm(如圖十九所示)。而從其結果分析，當ZnS(O、OH)-30nm未能完全覆蓋CIGS的粗糙表面，容易形成Pin-Hole造成Voc降低的主要原因(如圖二十所示)。因此，藉由真空法的RF製備Mg_xZn_{1-x}O，就能有效降低Pin-Hole產生且減少與下一層的ZnO有Lattice Mismatch的問題。



圖十八、MgZnO 的發展動機

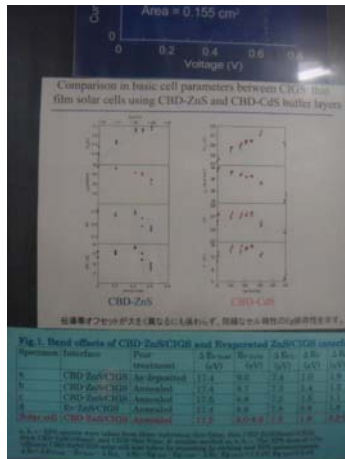


圖十九、CIGS/ZnS(O、OH)/MgZnO 的製作方式



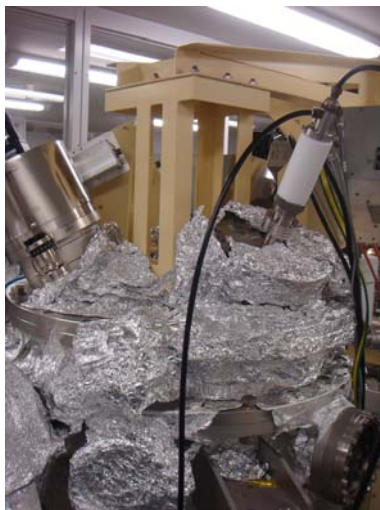
圖二十、MgZnO 的改善成效

此外，由於日本對於環境污染的材料特別重視，中田教授也做了許多 ZnS 與 CdS 的比較，包含以 CBD-ZnS 與 CBD-CdS 差異進行探討及研究，從圖二十一當中可以看出，當 $0.2 < Ga/In + Ga < 0.3$ ，ZnS 的 FF 比 CdS 差，因此，整體效率也會顯得比較不佳。另外，教授也對 CBD-ZnS/CIGS 的介面進行了各種不同的熱處理條件物理研究，顯示出該研究室對於學理探討的重視。



圖二十一、CBD 之 ZnS 與 CdS 比較

光窗層目的是將太陽電池中的電子傳導至導線上，而在中田教授的實驗室當中，光窗層選用的材料是DC濺鍍為主的AZO(2wt% Al添加至ZnO)及RF濺鍍-ZnO結構。ZnO作為CdS-AZO之間的緩衝層，可減少彼此之間的結晶錯位(Lattice Mismatch)，增加縱向極電效果提升Voc；AZO除了將電子導至電極上，更需考量其穿透性，使太陽光在不損耗的情況下，達到完全穿透至吸收層產生電子電洞對。一般規格至少須超過 85%光穿透度、 $5 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ ，才能達到其效果，設備請參照圖十四所示。另外，教授亦向職介紹其新發展的高載子移動率的TCO設備，藉由DC靶與RF靶的共鍍方式，創造出類似Al添加至ZnO形成AZO導電膜或B添加至ZnO形成BZO等(如圖二十二所示)，自行調配載子濃度。據教授所說，目前已能開發出 $>100 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ，一般AZO僅能達到 $30 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 左右，大幅提升導電效果，且對於光穿透性也能維持在 92%以上。設備價格約在 2000 萬台幣。

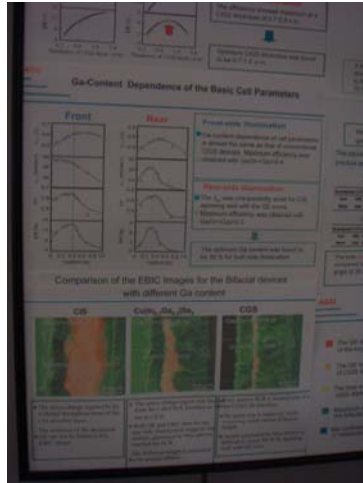


圖二十二、高載子移動率的 DC+RF 鍍膜設備

分析測試方面-中田教授的研究室中，具備有各種分析太陽電池的設備，可分為實驗室自有設備及共有設備等。自有設備包含小型的機械切割設備，可針對 10cm x 10cm以下的太陽電池進行機械劃線，個別分割成小面積的太陽電池元件。微觀檢測及I-V量測系統，微觀檢測可藉由顯微鏡，針對元件上的有效面積進行準確量測，因劃線過程及導線遮罩面積在國際發表期刊照光面積都會受到嚴苛考驗，顯示出該實驗室對於研究數據的嚴謹度；而I-V設備則是在一個黑色箱內，進行不照光的暗電流與照光後的光電流量測，在不照光的條件下施與電壓觀察暗電流的變化可獲知元件二極體效應，而在照光的條件下則能觀察太陽電池在 25°C、1.5AM

下其光電流變化，進而計算出太陽電池的轉換效能， $\eta = V_{oc} \times J_{sc} \times FF / 1000 \text{ W/m}^2$ 。QE-量子效率分析儀則可了解那一段的光波長為太陽電池轉換來源，當光波長對量子效率的圖形涵蓋面積越大，顯示元件對於光的吸收率越佳，其I-V轉換效率也會隨之提升。另外，Hall-Measurement(霍爾量測設備)則是對於CIGS吸收層調控有極大的幫助，可量測吸收層的電阻值、載子濃度、載子遷移率、P-N型態。聚光型的I-V量測設備，可提供 100 倍太陽光聚焦在太陽電池上，檢測CIGS太陽電池元件經聚光後其光電流變化為何，此研究特別用於衛星系統及大型能源發電廠，利用CIGS具有抵抗外太空輻射及長時間高溫下不易劣化之優點，可減少大面積鋪設缺點。目前該設備屬日本廠商贊助，並能進行 8 吋以下的試片測試。

而在共同分析實驗室中，就與本院的加工測試組及國內的國科會貴儀中心雷同，可提供全國使用。包含低掠角的 XRD-X 光繞射分析儀進行 CIGS 結晶結構分析，一般 CIGS 共有三根主要波峰，分別為(112)、(220)、(312)。SEM-掃描式電子顯微鏡則可進行 CIGS 元件表面及剖面的形貌觀察，搭配 EDS 則可針對元素含量進行定性半定量分析。ICP-AES 感應耦合電漿原子發射光譜分析儀則是針對 CIGS 成份比例進行定量分析，一般 CIGS 主要成份控制在 Cu-23.5~27%、In-16~18%、Ga-7.5~9.5%、Se-49~51%。XPS- X 光光電子能譜分析儀則是可針對 CIGS 元件各層進行元素鍵結狀態及元素縱深分析。FIB-聚焦示離子束切割機，可直接進行 CIGS 試片薄區切割及取樣，減少製作 TEM 試片耗費時程。HR-TEM 高解析度之穿透式電子顯微鏡，觀察試片微區結構及晶體排列及 CIGS/CdS 等界面觀察。空乏區測試分析儀-SCM 與 EBIC 圖形主要是給予電容量測電流密度分佈，判斷出 CIGS 與緩衝層之間的空乏區大小，舉例來說，CIGS 當中的 Ga 濃度添加就會對空乏區有明顯的影響(如圖二十三所示)。當 Ga 的含量增加時，其 EBIC 當中呈現黃色的區塊會變窄，顯示出即使相同的 CIGS 膜層厚度，CIGS 與 CdS 之間的空乏區會因 Ga 的添加而變窄。



圖二十三、Ga 添加量對於空乏區的影響

這些設備能量顯示出該實驗室除了具備有光電特性分析-了解元件的物理特性，並藉由微觀分析儀器推斷材料及介面缺陷。

最後，中田教授帶職至其大樓之頂樓，進行CIGS太陽電池發電系統。該系統是由Showa Shell所提供，共有 $8 \times 16=128$ 片組成(如圖二十四所示)，每片具有 40W的發電效果、約有五十顆小元件、 $V_{oc}=28V$ 、 $I_{sc}=2.3A$ (如圖二十五所示)，屬於玻璃式CIGS太陽電池模組，主要用於架設屋頂或較大的公開場地，可提供該棟建築物部分用電。這套系統最大可提供 5.28KW，因當日為陰天，其發電量僅有 0.46KW(如圖二十六所示)。但這套系統從 2003 年架設至今，減少 CO_2 排放量已達到 15.3 噸，至少已經達到 2~3 座足球場的樹木面積，顯示再生能源及環保能源的重要性的確是不容忽視的。



圖二十四、與中田教授合照及
CIGS 太陽電池發電系統



圖二十五、CIGS 發電系統模組規格



圖二十六、CIGS 太陽電池系統發電量觀測板

叁、心得與交流討論

回到教授辦公室，職向教授詢問未來 CIGS 太陽電池的發展上有何新趨勢及方向，教授則是客氣地向職說明，像其實驗室正在發展的可撓式 CIGS 太陽電池及兩面受光的太陽電池等。

所謂的兩面受光太陽電池，顧名思義就是兩面都可以接受太陽光的照射而吸收，增加 CIGS 太陽電池的轉換效率。為達到兩面透光，將原先的底層鉬電極層換成透明導電膜，這樣的太陽電池因吸光量增加，發電量也會增加，屬於耗費成本最低，卻能有效提升發電量的設計。而這樣的應用特別在冬天的雪地，更能發揮效果，一方面接受太陽光的直射，另一方面藉由太陽光照射至雪地上所反射的太陽光吸收能量。

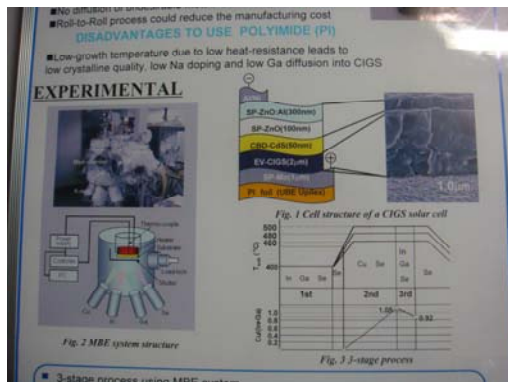


圖二十七、兩面受光型太陽電池結構設計



圖二十八、兩面受光型太陽電池應用

可撓式太陽電池元件開發，也是目前本院開發的目標。中田教授曾經分別製作過Ti和430SS-可撓式金屬基板的元件及PI-可撓式塑性基板，在Ti金屬基材方面其CIGS製程仍以三階段的四元共蒸鍍為主，並以無Cd的ZnS作為緩衝層，有效的區域內的轉換效率可高達 18.8%。而 430SS則是先以RTP進行SiO₂氧化處理，於基板鍍製SiO₂層，再進行Mo及CIGS製作。目前中田教授因國內計畫需求大力發展低溫製程的PI塑性可撓式太陽電池，主要採用LAD-雷射促進鍍膜方式降低基板製程溫度，及三階段四元共蒸鍍作為搭配獲得CIGS吸收層。PI膜在製程上有幾項優點 1.無有害的雜質滲透至CIGS吸收層造成劣化元件效能 2.可用於R2R製程有效降低成本 3.輕易達到可撓效果，然而在缺點上 1.需使用較低製程溫度導致結晶品質不佳 2.Na與Ga也因溫度不足擴散效果差。因此，採用LAD技術可補強這樣的缺點，藉由雷射將蒸鍍源分子裂解成更小的分子團，活化及增加反應面積，使得CIGS化合更容易完成。而這樣的方式可將製程溫度由 550°C 降低至 450~500°C，而轉換效率也能維持在 14~15.7%。

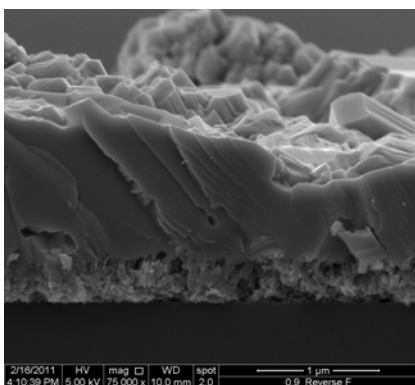


圖二十九、PI 塑性基板太陽電池結果與設計

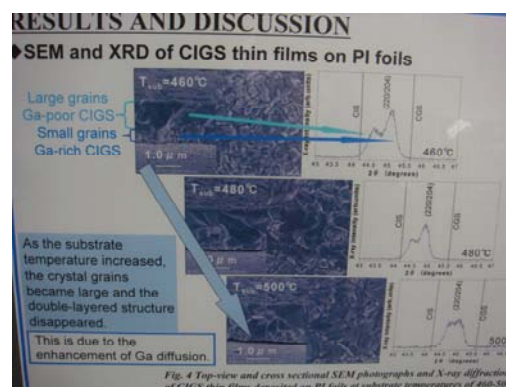


圖三十、雷射促進鍍膜製程技術

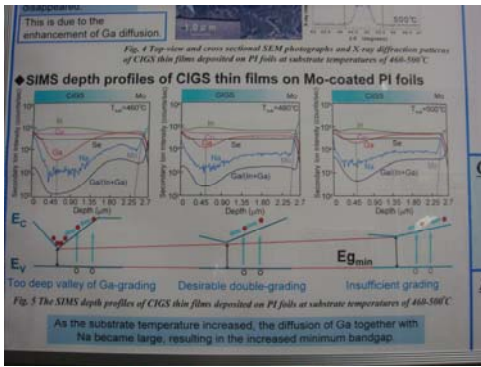
此外，職亦向教授請教研發過程中所遇到的困難，像本院採用濺鍍RTP硒化進行CIGS吸收層製備，就常會發生In/CuGa硒化後，底層與上層有結構不同的現象；底層Ga含量較高呈現出顆粒狀組織，上層含Ga量較少呈現大晶粒的CIS結構(如圖三十一所示)。經與中田教授討論，推測原因可能包含 1.製程溫度不足導致Ga擴散效果不佳 2.無堆疊Mo層，因MoSe₂可提升CIGS結晶效果。中田教授以三種不同製程溫度向職說明其差異(如圖三十二所示)，當製程溫度為 460°C時，CIGS會分成兩相，上層也是晶粒較大呈現缺Ga含量，下層則是小晶粒呈現富Ga含量；而當溫度增加至 500°C之後，就會穩定呈現出單一相，這都是由於高溫促進Ga的擴散效果。而從SIMS的縱深分析(如圖三十三所示)，更能明顯看出 460°C的Ga含量濃度有很大的差異。中田教授更以物理的觀點向職說明，當Ga濃度差異過大時，E_g也會有很大的變異，而這樣的濃度梯度較不利於光電子轉換；反過來說，當Ga濃度差異較小時，雖然其最小E_g會比前者來得大，但當光波能量一旦超過最小E_g，就會完全被吸收轉換成電子電洞對。從量子效應來看，460°C的CIGS其光吸收波長涵蓋也較廣(如圖三十四所示)，因此，J_{sc}也會相較於 480°C、500°C高；然而低溫的因素加上E_g較小，使得其V_{oc}無法增加，最終在I-V曲線當中，則是以 480°C擁有最高的轉換效能，其V_{oc}-605 mV、J_{sc}-35.1 mA/cm²、FF-0.741、 η_{total} -15.7%(如圖三十五所示)。



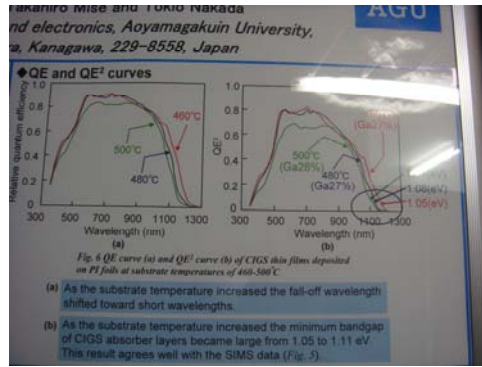
圖三十一、CIGS 分層結構現象



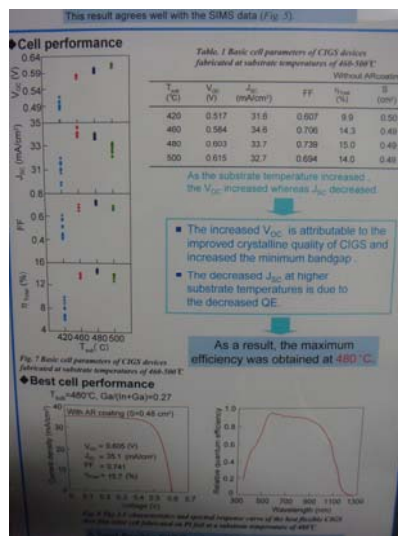
圖三十二、硒化溫度對 CIGS-XRD 的影響



圖三十三、以 SIMS 進行不同
 硒化溫度的縱深分析

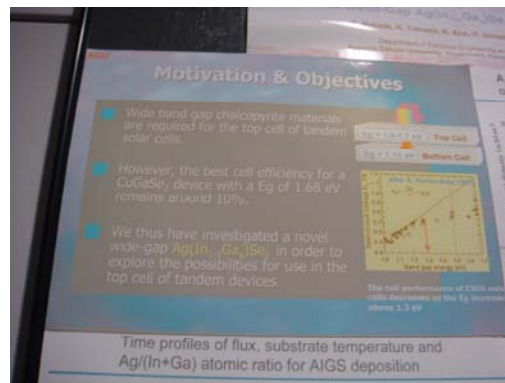
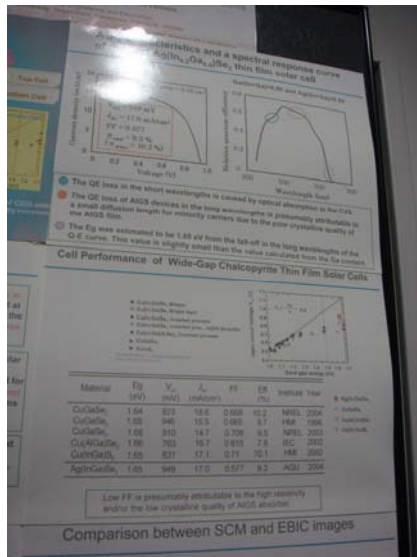


圖三十四、不同硒化溫度的 QE 測試



圖三十五、不同硒化溫度的 CIGS 元件 I-V 量測結果

最後，教授與我提到一項未來值得注意的新材料及技術，就是Ag及Al元素的添加，像是以Ag(InGa)Se₂的太陽電池，其Voc相當高可達 949 mV(因其Eg-1.65 eV)，Jsc則是受限於結晶結構都為碎小結晶及電阻阻抗(如圖三十六所示)，以致轉換效率不佳。若能藉由像CIGS三階段共蒸鍍的製程改善，就相當有機會可以突破 20%的轉換效率，且這樣的太陽電池不但具有高轉換效率的潛力外，也可搭配較低Eg的CIGS太陽電池結合成串接式的太陽電池(Tandem Cell)(如圖三十七所示)。



圖三十六、Ag(InGa)Se₂新型太陽電池 圖三十七、Ag(InGa)Se₂新型太陽電池優勢

中田教授的實驗室的确是世界一流的 CIGS 太陽電池研究單位，無論其製程設備及分析儀器數量上，投資人力及資源都比國內所有法人及學界加總起來有過之而無不及，記得職離開之際，教授拋出一個令職印象深刻的問題，「台灣投資在 CIGS 技術上的經費大約多少」，職感到不好意思地說：「約略 1~2 億台幣」，教授則幽默表達不知道台幣與日幣匯率，教授向職說明：「近來韓國與中國大陸在 CIGS 太陽電池發展速度十分的快，投資金額也數倍提高，未來一定會有重大突破與新訊息，值得密切注意。」

的確，CIGS 太陽電池製程十分冗長，每一個道次花費的金額都不小，非一朝一夕就可建立完成，中田教授具備有 43 項之多的設備，也是經由 23 個年頭所籌建起來的，顯示的成果也是累積在長年累月的經驗及技術當中，未來，仍有許多值得突破之處，考驗也不會隨之而減少，但經驗的分享確是最大的助力，職向教授請求未來若有需要解惑之處，也會請教授不吝指導，期望雙方能建立一個合作關係，一同開創 CIGS 太陽電池的時代。

肆、建議事項

職赴日參訪中田教授之 CIGS 太陽電池實驗室，有幾點值得院內作為未來精進之目標：

1. 逐年建置新製程及新材料的 CIGS 太陽電池設備，像是解離蒸鍍分子團的系統、製備高載子移動率的透明導電膜濺鍍設備及 R2R 機構的真空 CIGS 製程設備。

2. 籌建太陽能電池相關之電性及物性分析設備，打造世界級認證的太陽能電池分析實驗室，像是 I-V 分析、C-V 量測、聚光型的 I-V 量測系統、QE 系統、ICP 分析等專屬太陽能分析設備。
3. 於本所建置 CIGS 太陽能電池發電系統，提供本所建物所需部分用電，不僅能達到開源更能有減碳的效果，在建築美觀及技術推廣上更具說服力。
4. 與國際著名實驗室建立良好的合作關係，在這個團隊合作的時代，能夠有經驗老道的研究單位給予技術上的指導，不僅可減少許多 Try & Error 的時間，更能儘速切入未來趨勢及發展重點。