

行政院所屬各機關出國報告  
(出國類別：開會)

「參加第六屆世界太陽光電研討會(WCPEC-6)」

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：曹昭陽研究專員

出國地點：日本京都

出國期間：103年11月22日至11月28日

報告日期：104年1月19日



## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：「參加第六屆世界太陽光電研討會(WCPEC-6)」

頁數 38 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台電人資處/陳德隆/02-23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

曹昭陽/台灣電力公司/綜合研究所/研究專員/(02) 8078-2260

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：103 年 11 月 22 日至 11 月 28 日 出國地區：日本

報告日期：104 年 01 月 19 日

分類號/目

關鍵詞：太陽光電、太陽電池、發電效能、日射量、預測

內容摘要：(二百至三百字)

本次出國主要任務是參加「第六屆世界太陽光電研討會(WCPEC-6)」，該研討會議為每四年一度太陽光電領域的盛事，由國際上太陽光電領域最重要的三大研討會-亞太太陽光電研討會(Asia/Pacific PVSEC)、美國電機電子工程學會太陽光電專家研討會(IEEE PVSC)以及歐洲太陽光電研討會(European PVSEC)聯合舉辦，有來自全球各地先進太陽能研發機構及知名製造廠等專家學者發表最新研究成果，與會人員合計 1250 人，藉此機會可和相關領域專家進行面對面交流，並且可以了解太陽電池產業發展趨勢、最新技術及太陽光電系統發電性能與老劣化議題，太陽光電發電預測技術發展現況。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://report.nat.gov.tw/reportwork>)

# 目 錄

出國報告書審核表 .....	I
出國報告書提要 .....	II
目錄 .....	III
一、出國緣由、行程及主要任務 .....	1
二、參加第6屆 WCPEC 國際研討會概況.....	3
(一)輔導教程.....	7
(二)太陽光電與再生能源未來展望.....	9
(三)太陽能電池技術重大進展 .....	14
I. HIT 太陽能電池.....	14
II. Perovskite 太陽能電池.....	18
(四)太陽光電發電預測技術.....	21
(五)模組老劣化與故障診斷技術以及系統運轉維護.....	35
三、心得與建議.....	38

## 一、 出國緣由、行程及主要任務

### 出國緣由：

隨著政府「陽光屋頂百萬座」計畫的推動，我國太陽光電系統裝置容量迅速成長，預計在 2030 年達到 6.2GWp 的目標，未來太陽光電出力對電網的挹注將不容小覷。然而，太陽光電之出力隨著陽光強弱而變化，這種間歇性發電將對電力系統造成機組排成與調度上的挑戰，為解決此問題，綜合研究所正投入太陽光電發電預測系統之研發。此外，太陽光電系統發電性能受模組以及系統老劣化影響甚鉅，因此本所亦投入模組老劣化測試技術以及系統運轉維護與故障診斷技術研發。

2014 年 11 月 23-27 日在日本舉辦之”第六屆世界太陽光電研討會 (the 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-6))”，為每四年舉辦一次，由國際上太陽光電領域最重要的三大研討會-亞太太陽光電研討會 (Asia/Pacific PVSEC (PVSEC-24))、美國電機電子工程學會太陽光電專家研討會 (IEEE PVSC) 以及歐洲太陽光電研討會 (European PVSEC) 聯合舉辦。本次研討會主題涵蓋 9 大領域，分別是 1. 未來技術所採用之新概念與新材料 2. 矽薄膜太陽能電池 3. 複合半導體薄膜太陽能電池 4. 矽晶太陽能電池 5. 聚光型、三五族與太空用太陽電池 6. 有機、染料敏化、鈣鈦礦太陽能電池 7. 特性測量與模組可靠度 8. 太陽光電系統、模組以外組件以及與電網之整合 9. 太陽光電系統配置與產業、市場和政策。因此，本所乃遴派負責執行太陽光電發電預測與系統老劣化測試技術相關計畫人員前往參加此次國際太陽光電研討會議，以了解國際上各類太陽電池技術與光電系統之發展現況與未來趨勢，除了可有利於本公司後續相關研究計劃的規劃與推動外，亦可提供相關業務上的參考。

本次出國案件係應用 103 年度出國計劃第 152 號，出國核定書為 EE103170 號，電人字第 1038097803 號函。

## 出國行程及主要任務：

本次出國期間自 103 年 11 月 22 日至 11 月 28 日，任務為參加「第六屆世界太陽光電研討會(WCPEC-6)」，行程及工作內容概要說明於表一：

項次	起始日	迄止日	地點	前往機構	工作內容概況
1	1031122	1031122			往程(台北→大阪→京都)
2	1031123	1031127	日本 京都	京都國際會議中心 (Kyoto International Conference Center)	參加「第六屆世界太陽光電研討會(WCPEC-6)」
3	1031128	1031128			返程(京都→大阪→台北)

表一、行程及工作內容概要表

## 二、參加第六屆世界太陽光電研討會(WCPEC-6)概況

第六屆世界太陽光電研討會(WCPEC-6)由 WCPEC 組織委員會主辦，是 the 24th Asia/Pacific PVSEC (PVSEC-24), the 41st IEEE PVSC and the 30th European PVSEC 聯合舉辦的國際太陽光電研討會，大會主席為 Makoto Konagai (TokyoTech, 日本)，EU-PVSEC 副主席為 A. Jäger-Waldau (EC JRC, 義大利)以及 IEEE PVSC 副主席為 B.J. Stanbery (Heliovolt, 美國)。會議場地選擇在日本京都國際會議中心(Kyoto International Conference Center)舉辦，這也是著名的京都議定書 17 年前簽署的同一棟建築物，會議期間為 2014 年 11 月 23 日至 27 日。比較特殊的是本次大會特地在第一天下午安排了輔導教程(tutorial)，涵蓋五個主題，邀請專家進行講解，如表二所示。

Topic		Instructor
<b>A: Crystalline Silicon Solar Cells</b>	(1)A-1 : Crystalline Silicon Solar Cells - 1	<b>Prof. Kyotaro Nakamura</b> , Meiji University, Japan
	(2)A-2 : Crystalline Silicon Solar Cells - 2	<b>Dr. Kentaro Kutsukake</b> Physics of Crystal Defects Laboratory, Institute for Materials Research, Tohoku University, Japan
<b>B: Thin Film Silicon Solar Cells</b>	(3)B-1 : Fundamentals of Quantum Dot Solar Cells	<b>Prof. Dr. Takashi Tayagaki</b> Institute for Chemical Research, Kyoto University, Japan
	(4)B-2 : Thin Film Silicon Solar Cells - 2	<b>Dr. Makoto Tanaka</b> Panasonic Corporation, Japan
<b>C: Compound Semiconductor Solar Cells</b>	(5)C-1 : Compound Semiconductor Solar Cells - 1	<b>Prof. Takashi Minemoto</b> College of Science and Engineering, Ritsumeikan University, Japan
	(6) C-2 : Compound Semiconductor Solar Cells - 2	<b>Dr. Hajime Shibata</b> National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Japan
<b>D : Organic, Dye Sensitized and Perovskite</b>	(7) D-1: Dye Solar Technology; towards market introduction and new mesoscopic concepts	<b>Dr. Andreas Hinsch</b> Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Federal Republic Germany

<b>Solar Cells</b>	(8) D-2 : Perovskite Solar Cells	<b>Prof. Dr. Seigo Ito</b> Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, Graduate School of Engineering, University of Hyogo, Japan
<b>E : Photovoltaic Systems</b>	(9) E-1 : Photovoltaic System Characterization and Integration Tutorial	<b>Dr. Joshua S. Stein,</b> Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM USA
	(10) E-2 ; Photovoltaic Systems: Landscape Design Issues	<b>Dr. arch. Alessandra Scognamiglio,</b> ENEA (Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development) Photovoltaic Technologies Area, Portici Research Centre, Portici (NA), Republic of Italy

表二、輔導教程(tutorial)，涵蓋五個主題，由專家進行講解。

在研討會的部分則區分為：大會專題演講、分組論文發表及海報展示等三個部份。本屆世界太陽光電研討會與會人員計有1250位，來自於50個國家，而在京都國際會議中心也同時舉辦太陽光電展覽會。在接下來的四天研討會議中，進行分組論文發表及交流，如表三所示，共46個sessions分佈於下列九大議題：

1. 未來技術所採用之新概念與新材料(New Concepts and New Materials for Future Technologies)、
2. 矽薄膜太陽能電池(Thin Film Silicon Based Photovoltaics)
3. 複合半導體薄膜太陽能電池(Thin Film Compound Semiconductor Based PV)
4. 矽晶太陽能電池(Wafer-Based Crystalline Silicon)
5. 聚光型、三五族與太空用太陽電池(Concentrator Photovoltaics, III-V and Space PV Technologies)
6. 有機、染料敏化、鈣鈦礦太陽能電池(Organic, Dye Sensitized and Perovskite Solar Cells)
7. 特性測量與模組可靠度(Characterization and Modules Reliability)



8. 太陽光電系統、模組以外組件以及與電網之整合 (Systems, BOS components and Grid Integration)

9. 太陽光電系統配置與產業、市場和政策 (PV Deployment; Industry, Market and Policy)

Area	sessions
Area 1: New Concepts and New Materials for Future Technologies	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Crystalline Silicon Solar Cells; Past, Present and Future 1</li> <li>2. Crystalline Silicon Solar Cells: Past, Present and Future 2</li> <li>3. Intermediate Band Solar Cells</li> <li>4. Light Management Concepts and Emerging Technology</li> <li>5. QD and QW Solar Cells</li> </ol>
Area 2: Thin Film Silicon Based Photovoltaics	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Silicon Heterojunction Solar Cells</li> <li>2. Industrial Technologies</li> <li>3. High-efficiency Devices</li> <li>4. Light Management I</li> <li>5. Light Management II</li> </ol>
Area 3: Thin Film Compound Semiconductor Based PV	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. CIGS 1</li> <li>2. CIGS: Characterization</li> <li>3. CZTS &amp; CTS</li> <li>4. CIGS : Module</li> <li>5. CZTS: Characterization</li> </ol>
Area 4: Wafer-Based Crystalline Silicon	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. c-Si PV: Simulation</li> <li>2. c-Si PV: Cell 1</li> <li>3. c-Si PV: Electrode</li> <li>4. c-Si PV: Passivation</li> <li>5. c-Si PV: Cell 2</li> </ol>
Area 5: Concentrator Photovoltaics, III-V and Space PV Technologies	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Space Solar Cells</li> </ol>

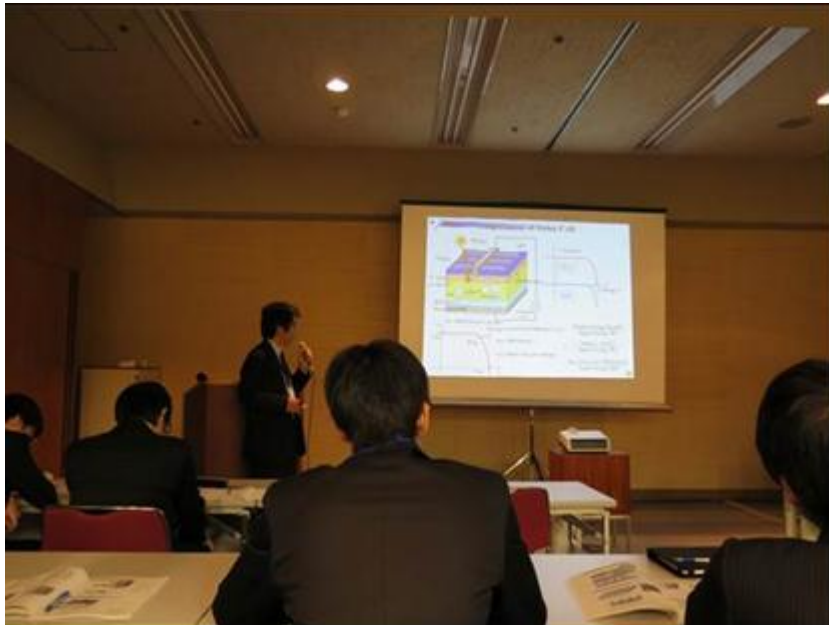
	<ol style="list-style-type: none"> <li>2. Multijunction Cells</li> <li>3. Next Generation Concentrator Photovoltaic (NGCPV)</li> <li>4. Quantum Effect</li> <li>5. CPV</li> </ol>
Area 6: Organic, Dye Sensitized and Perovskite Solar Cells	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Hybrid Solar Cells 2</li> <li>2. Dye Sensitized and Organic Photovoltaic Cells</li> <li>3. Organic Photovoltaic Cells</li> </ol>
Area 7: Characterization and Modules Reliability	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Rump Session upon PV Quality Assurance</li> <li>2. PV Module Characterization 1</li> <li>3. PV Module Components</li> <li>4. PV Module Characterization 2</li> <li>5. PV Module Qualification Test &amp; PID</li> <li>6. PV Performance Characterization</li> <li>7. PVQAT 1</li> <li>8. PVQAT 2</li> </ol>
Area 8: Systems, BOS components and Grid Integration	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Outdoor Performance</li> <li>2. Design and Operation</li> <li>3. Energy Rating</li> <li>4. Forecast of Power Generation</li> <li>5. Grid Integration</li> </ol>
Area 9: PV Deployment; Industry, Market and Policy	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Environmental &amp; Economic Aspects of PV</li> <li>2. National Program &amp; R&amp;D</li> <li>3. PV in Energy System</li> </ol>

表三、九大議題分組論文發表，共 46 個 sessions

### (一) 輔導教程(tutorial)

由於目前矽晶太陽能電池全球市場占比達 90% 以上，是最重要的太陽能電池技術，所以筆者選擇參加由日本明治大學特任教授 **Kyotaro Nakamura** 主講的 Crystalline Silicon Solar Cells – 1，如圖一所示，內容包含如下：

1. 基本太陽光電原理與方法 (Basic Photovoltaic Principles and Methods)
2. 傳統矽晶太陽能電池 (Conventional Crystalline Si Solar Cell)
3. 下一世矽晶太陽能電池的開發 (Development of Next Generation Crystalline Si Solar Cell)
4. 總結 (Summary)

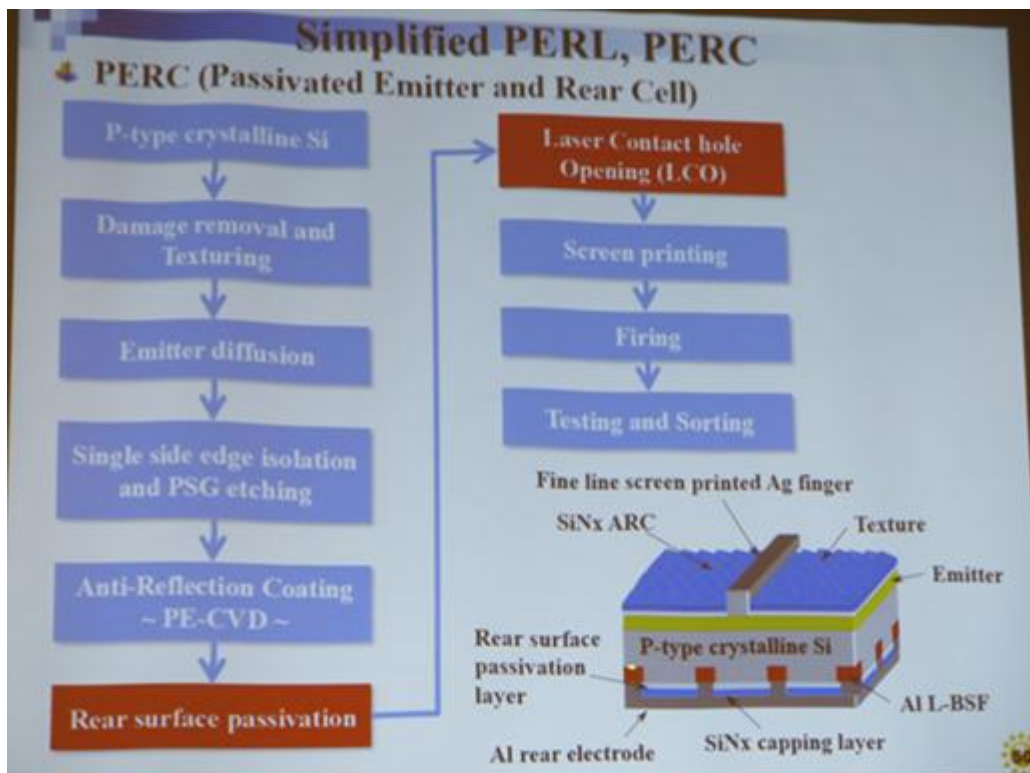


圖一、明治大學特任教授 **Kyotaro Nakamura** 主講 Crystalline Silicon Solar Cells – 1

講者首先回顧太陽能電池基本原理與製作方法，並認為傳統基於 p 型基板的矽晶太陽能電池，單晶矽電池效率為 18.5~19% 而多晶矽電池效率 17~17.5%，要突破 20% 光電轉換效率非常困難，因此必須採用下一世代的電池設計與製作方法才有可能進一步提高效率。在下一世代的電池當中最受矚目的為：

1. 鈍化射極背電池 (Passivated Emitter Rear Cell, PERC): 這種電池結構與設計源自 1980 年代澳洲新南威爾斯大學，BP-Solar 的 Saturn 太陽

能電池與 Suntech 的 Pluto 太陽能電池技術也是源自於此。這種電池與傳統電池最大的差異在於傳統電池背面全面網版印刷鍍上一層鋁，當加熱後鋁原子擴散進入矽產生 p+層，同時達到背電場（Back Surface Field）的效果和做為背電極。此方法製成簡單，但是這種大面積鋁與矽直接接觸導致介面處極高的複合速率，導致電池開路電壓受限。PERC 則是在電池背表面先鍍上鈍化層和一層氮化矽，再利用雷射局部開孔，再鍍上鋁以大幅降低金屬與半導體界面複合，製程如圖二所示。

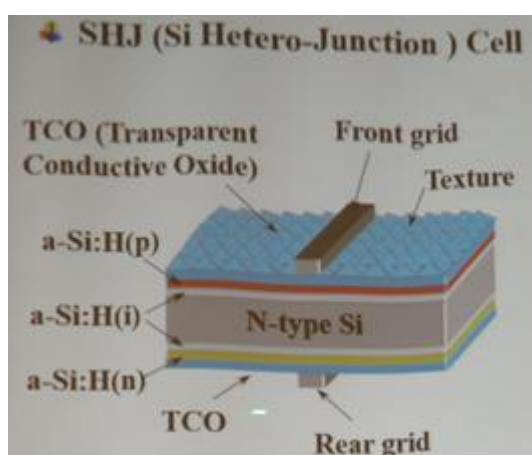


圖二、鈍化射極背電池(PERC)製程。Source: 明治大學 Nakamura 教授 WCPEC-6 投影片。

2. 基於 n 型基板的矽晶太陽能電池: 事實上 1954 年美國貝爾實驗室開發出世界上第一顆單晶矽太陽能電池時採用的基本便是 n 型基板。隨後幾年內太空用途主要採矽基太陽能電池，研究人員發現宇宙射線 (cosmic rays) 對 p 型基板比對 n 型基板造成的效能衰退來得不明顯，因此幾十年來 p 型基板主宰了矽基太陽能電池的市場。然而，矽基太陽能電池在太空上的應用早已被三五族太陽能電池所取代。研究人員發現 p 型基板中摻雜的硼與氧雜質結合會對少

數載子壽命造成不良影響。因此，許多高效率太陽電池都改採 n 型矽基材進行製程研究，在理論上更易提高能量轉換效率。

3.矽基異質接面電池: 這種電池結構稱為本質薄層異質接面 (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer, HIT) 源自 1990 年代初期的 Sanyo 公司。主要特色包括(1)採用絕佳品質的非晶矽薄膜鈍化 n 型矽基板表面，達到非常高的開路電壓(2)不需要高溫擴散製程，製程溫度低於攝氏 200 度(3)雙面對稱結構(4)優異的溫度係數。HIT 電池的結構，如圖三所示。



圖三、本質薄層異質接面電池結構 ( Heterojunction with Intrinsic Thin-layer, HIT )。Source: 明治大學 Nakamura 教授 WCPEC-6 投影片。

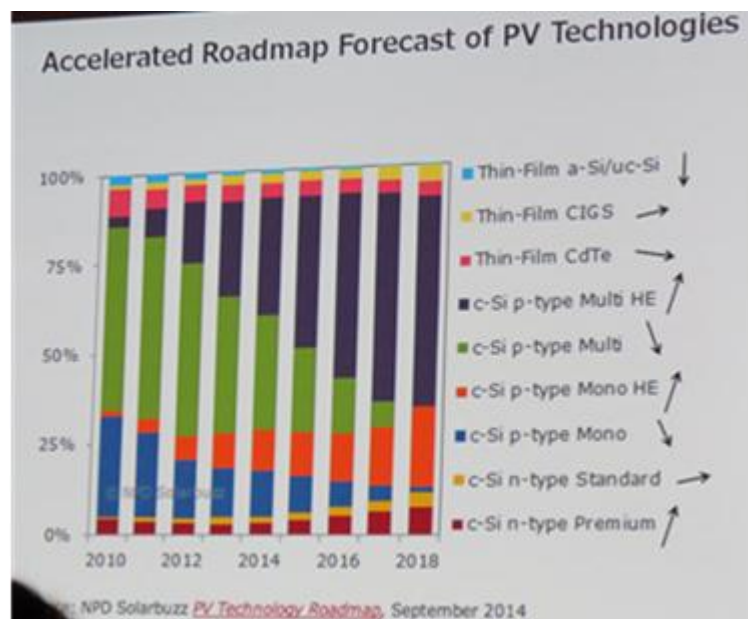
## (二) 太陽光電與再生能源未來展望

本次研討會大會每天早上均邀請相關領域重量級人物進行專題演講，其中有關太陽光電與再生能源未來展望的部分，分別以開幕時的兩位專題演講者的報告內容最具代表性。

主題	基於下一代製造技術的太陽電池之未來(The Future of PV based on Next-Generation Fabs)
講者:	Eicke R. Weber, Fraunhofer Institute for Solar Systems (ISE)

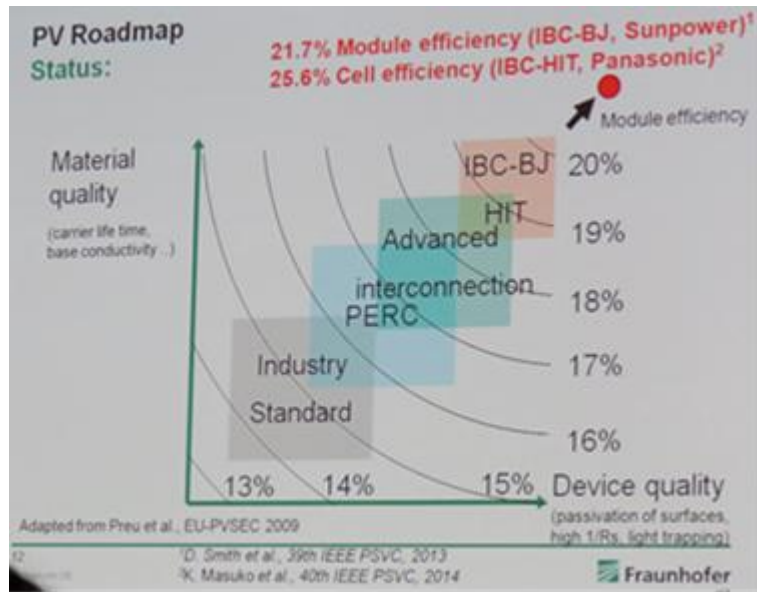
Prof. Dr. Eicke R. Weber 是位於德國弗萊堡著名的太陽能研究所的負責人，限於篇幅在此摘要重點如下：

(1) 太陽能電池技術演進將加速，路線預測如圖四所示。a-Si/uc-Si 薄膜電池將快速從市場上消失，碲化鎘(CdTe)薄膜電池市場占有率逐漸降低而 CIGS 薄膜電池則逐漸擴張版圖。在矽晶電池方面，採用 p-type 晶圓之傳統電池結構者，無論是單晶或多晶都將逐漸被採用新技術者取代，例如 PERC 技術，採用 n-type 晶圓之新世代電池將逐漸佔有一席之地，特別是豪華級(premium)的電池例如 HIT，與明治大學特任教授 Kyotaro Nakamura 的看法一致。



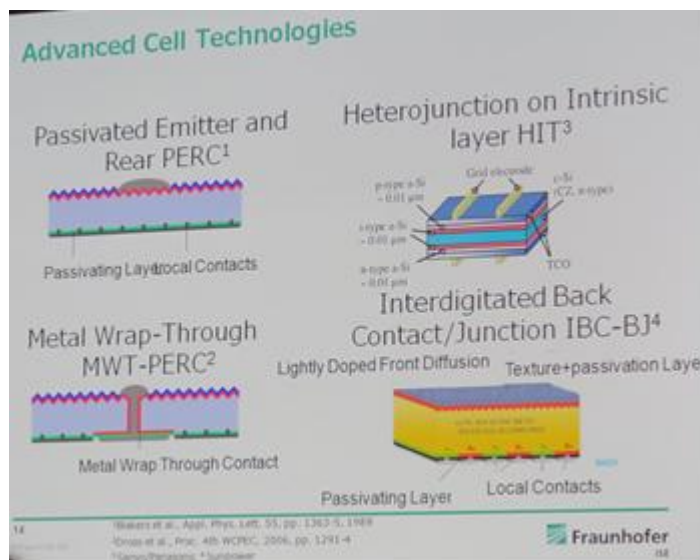
圖四、加速前進的太陽能電池技術演進路線之預測。Source:德國 ISE Weber 教授 WCPEC-6 投影片。

(2) 太陽能電池技術演進將同時朝向高材料品質和高元件品質前進，如圖五所示。



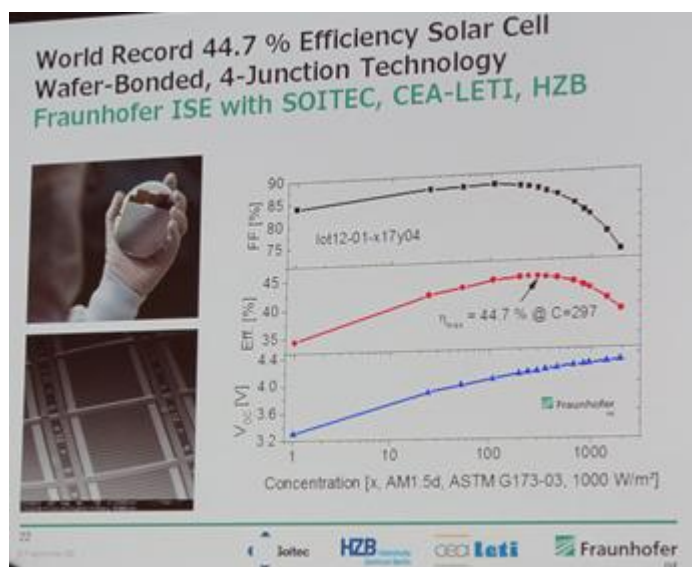
圖五、太陽能電池技術演進路線狀態。Source: 德國 ISE Weber 教授 WCPEC-6 投影片。

(3)當今全球四種先進的矽基太陽能電池結構，包含鈍化射極背電池 (Passivated Emitter Rear Cell, PERC)，金屬貫穿式之鈍化射極背電池 (Metal Wrap-Trough MWT-PERC)，含本質薄層異質界面 (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer, HIT)，交指背接觸電極太陽能電池，如圖六所示。



圖六、四種先進的矽基太陽能電池結構。Source:德國 ISE Weber 教授 WCPEC-6 投影片。

(4)ISE 於今年六月份發表的四接面太陽能電池 (GaInP/GaAs//GaInAsP/GaInAs)，在聚光 297 倍下光電轉效率達 44.7% 創此類型電池轉換效率之世界記錄，如圖七所示。惟聚光型電池成本仍遠高於矽晶太陽能電池，因此在地面型應用上，市場佔有率甚低，所以 Weber 教授的圖四中也予以忽略。



圖七、聚光 297 倍下光電轉效率達 44.7% 創此類型電池轉換效率之世界記錄。Source:德國 ISEWeber 教授 WCPEC-6 投影片。

主題	全球再生能源的未來展望 (Global Renewable Energy Outlook)
講者:	Dr. Paolo Frankl, Head Renewable Energy Division, International Energy Agency (IEA)

Dr. Paolo Frankl 是國際能源總署(IEA)再生能源部門的負責人，其演講重點包括(1)能源改革是需要的，IEA 預測 2050 年再生能源在全球發電占比將由目前的 20%，成長到 65~79%，如圖八所示。(2)大量太陽光電高占比下，需要更具彈性的電網才能因應，包括電網本身、傳統發電機組、儲能以及需求端都必須更具彈性，如圖九所示。



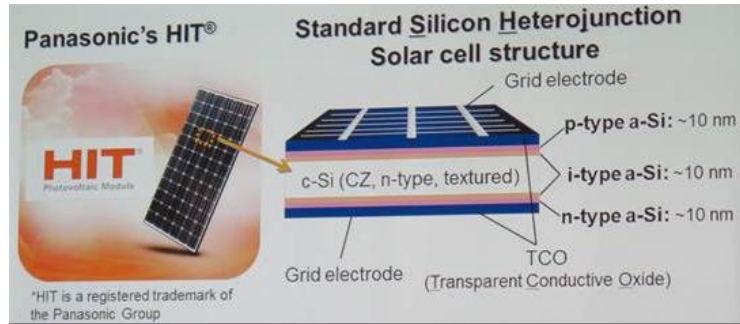


### （三）太陽能電池技術重大進展

2014 年有關全球太陽光電技術中最受矚目的事，一是 Panasonic 的 HIT 矽晶太陽能電池光電轉換效率達 25.6%，打破澳洲新南威爾斯大學自 1999 年以來保持的 25% 世界紀錄。二是鈣鈦礦（perovskite）太陽能電池，一種新型太陽能電池，太陽能電池轉換效率的快速提升。相關論文在本研討會發表非常多，限於篇幅，謹此重點摘要如下：

#### 1. 具本質薄層的異質界面（Heterojunction with Intrinsic Thin-layer, HIT）太陽能電池

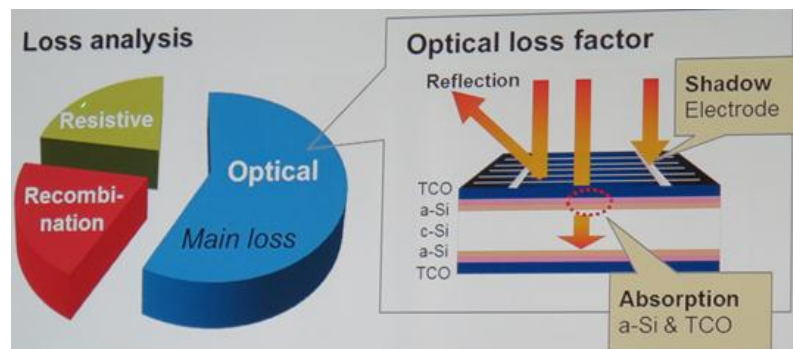
歷史：HIT 太陽電池是 Yukinori Kuwano 博士任職日本 SANYO 公司在 1990 年發明的異質界面太陽能電池。Kuwano 博士目前任職日本 PVTEC，此次應大會邀請發表專題演講，題目是 HIT 的歷史與太陽光電發電的前景（The history of HIT and future prospects of photovoltaic power generation），他在英國但丁大學 Spear 教授於 1970 年代初期發明氫化非晶矽（amorphous Si:H）材料後，自 1973 年石油危機時即投入非晶矽在薄膜太陽能電池應用之研發工作，在 1970 年後期非晶矽薄膜太陽電池已問世，1980 年已應用在電子計算機和電子手錶的電源供應上。值得一提的是 Kuwano 博士也是日本第一位將太陽光電裝置在住宅屋頂者，1992 年日本第一套太陽光電系統便是安裝在 Kuwano 博士家，由於從來不曾有太陽光電饋入電網的經驗，他花費很多心力和電力公司協調溝通，終於建立併網型太陽光電系統，截至 2014 年此系統已生產 36.87MWh。由於一般非晶矽太陽能電池的光電轉換效率偏低，為了提高效率，Kuwano 博士在低於攝氏 200 度的低溫製程下，將 p-type 和本質非晶矽薄膜以及 n-type 和本質非晶矽薄膜以化學氣相沉積的方式鍍在 n-type 單晶矽基板上，在 1990 年獲得 14.53% 轉換效率，引起全球太陽電池研究領域的重視。後來 SANYO 將 HIT 技術賣給 Panasonic，在 2014 年標準的電池效率達到 24.7%，電池結構如圖十所示。



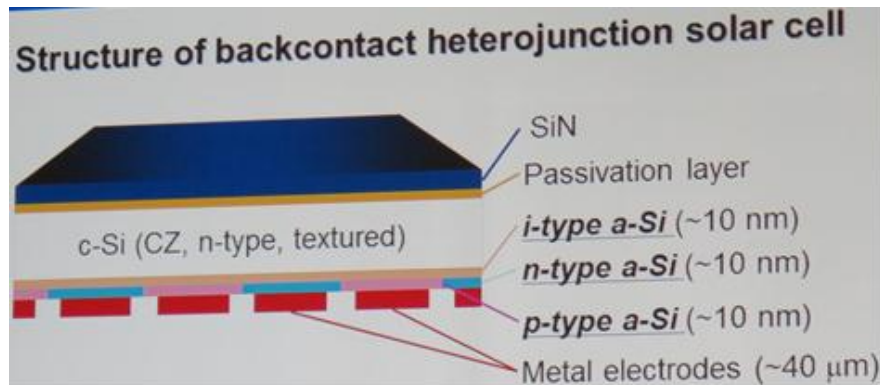
圖十、HIT 在 2014 年的標準電池效率結構。Source:日本 PVTEC Kuwano 博士 WCPEC-6 投影片。

特色：(a) a-Si:H 產生絕佳的鈍化效果，n-type 單晶矽表面複合速率可降低至低於 10 cm/s，同時產生 PN junction。N 型 high low junction 藉由電場的效應產生鈍化效果。(b)上述鈍化效果使得 HIT 電池具有極高的開路電壓。(c)<攝氏 200 度的低製程溫度(註：一般矽晶太陽電池磷摻雜時採用的固態擴散製程往往高達攝氏 1000 度)。

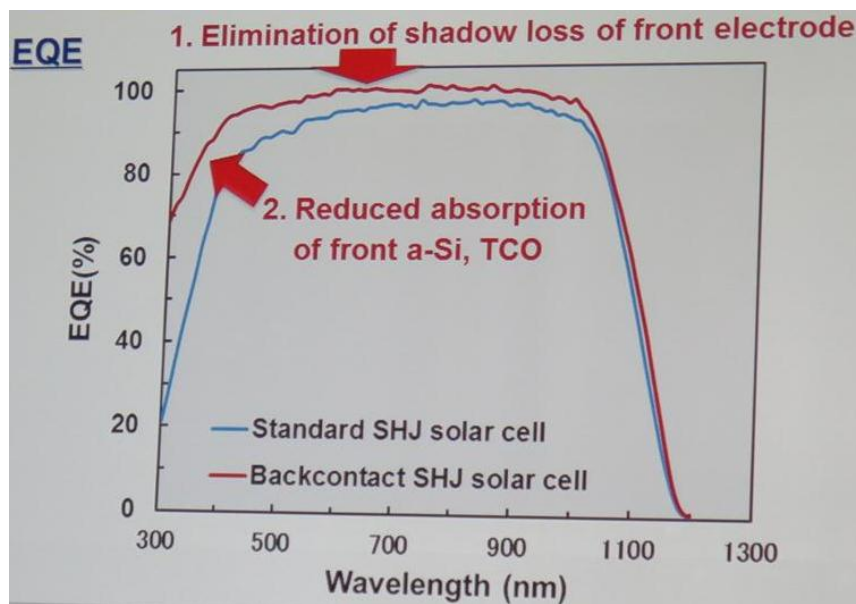
改善與世界紀錄：為了進一步提高電池轉換效率，研究人員分析標準 24.7%效率電池一半以上光電轉換損失來自於光學損失，主要是照光面的光反射和電極遮蔭，以及照光面 a-Si 和 TCO 吸收部分入射光所造成，如圖十一所示。因此，改善方向是採用如 SunPower 公司的背電極概念，也就是將正負電極都做在背面，如此一來就不需要受光面的電極、TCO 和 a-Si，並且加上一層 SiN 抗反射層，結構如圖十二所示。圖十三為改善前和改善後的外部量子效率比較，在波長<450nm 波段的增加主要是因為排除了 a-Si 和 TCO 的光吸收，而全波段的增加主要是因為去除了電極遮蔭，如圖所示。



圖十一、標準 24.7%效率電池一半以上光電轉換損失來自於光學損失。Source:日本 PVTEC Kuwano 博士 WCPEC-6 投影片。



圖十二、將正負電極都做在背面的電池結構，如此一來就不需要受光面的電極、TCO 和 a-Si，並且加上一層 SiN 抗反射層。Source: 日本 PVTEC Kuwano 博士 WCPEC-6 投影片。



圖十三、改善前（標準型）和改善後（背電極型）的外部量子效率比較，在波長<450nm 波段的增加主要是因為排除了 a-Si 和 TCO 的光吸收，而全波段的增加主要是因為去除了電極遮蔭。Source: 日本 PVTEC Kuwano 博士 WCPEC-6 投影片。

**R&D**

### Cell parameters

Year	2013	2014		
Structure	Standard	Backcontact		
Area	101.8 cm <sup>2</sup>	143.7 cm <sup>2</sup>		
Thickness	98 μm	150 μm		
Jsc	39.5 mA/cm <sup>2</sup>	<b>41.8 mA/cm<sup>2</sup></b>	↑	5.8%
Voc	0.750 V	0.740 V	↓	1.3%
F.F.	83.2%	82.7%	↓	0.6%
Eff	24.7%	<b>25.6%</b>	↑	3.6%

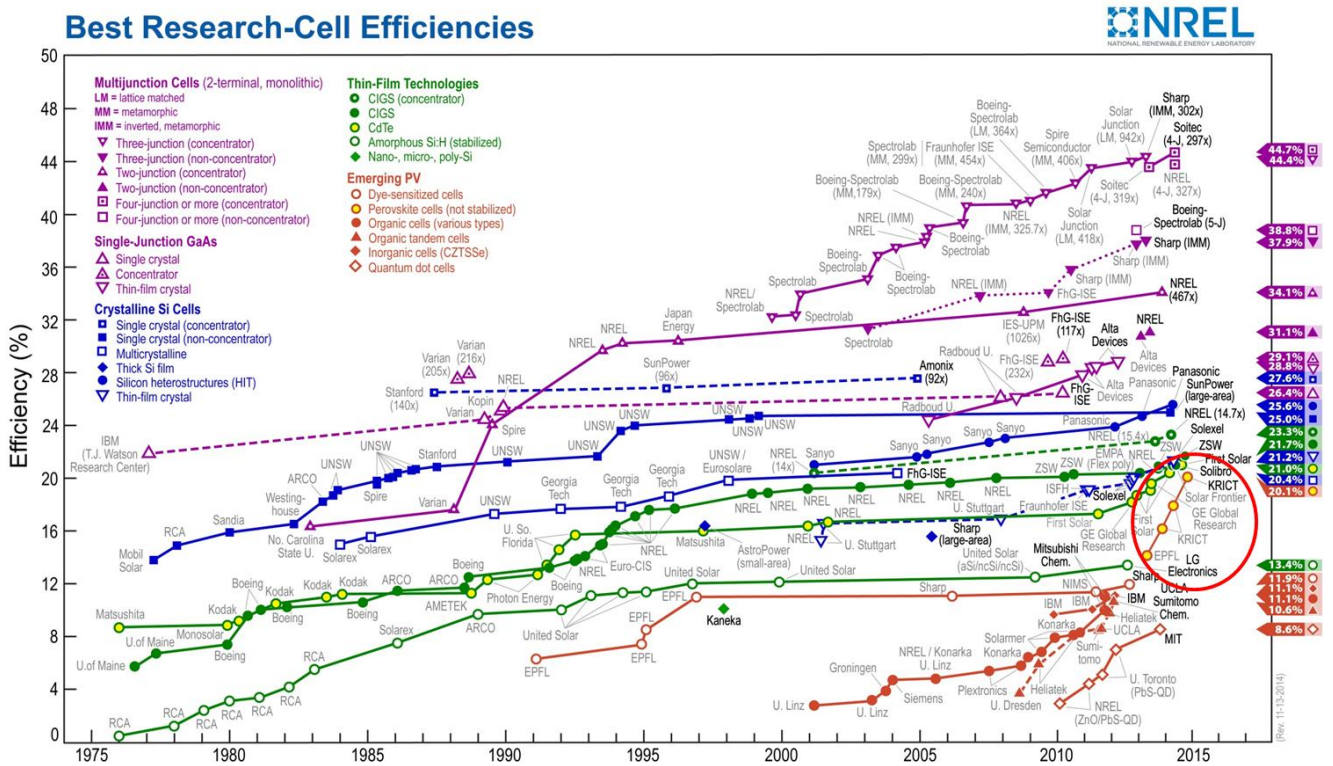
**1. Increase of Jsc to 41.8 mA/cm<sup>2</sup> (+5.8%)**  
**2. High Voc of 0.740 V and F.F. of 82.7%**  
**3. New world record efficiency of 25.6%**

New World Record

圖十四、標準型和背電極型 HIT 太陽能電池的電池參數比較，從表中可以看出效率的提升主要是來自前述光損失的改善所提高的光電流。Source: 日本 PVTEC Kuwano 博士 WCPEC-6 投影片。

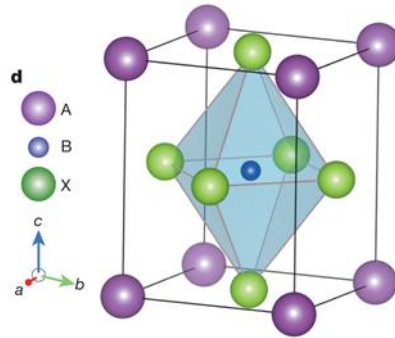
## 2. 鈣鈦礦 (perovskite) 太陽能電池

鈣鈦礦太陽能電池是一種新型太陽能電池，光電轉換效率從 2009 年的 3.8% 快速提升至 2014 年的 20.1%，傲視所有其他各種太陽能電池，被著名的 Science 和 Nature 期刊選為 2013 年十大科技突破，為最具發展潛力的太陽能電池技術之一，因此吸引全球太陽電池研發者爭相投入此一領域。圖十五為美國國家再生能源實驗室在 2014 年 11 月更新的各種太陽能電池之世界紀錄轉換效率演變，圖中右下方紅線黃圈之曲線便是鈣鈦礦太陽能電池在 2013 年至 2014 年 11 月間的轉換效率演變。



圖十五、美國國家再生能源實驗室提供的各種太陽能電池之世界紀錄轉換效率演變。

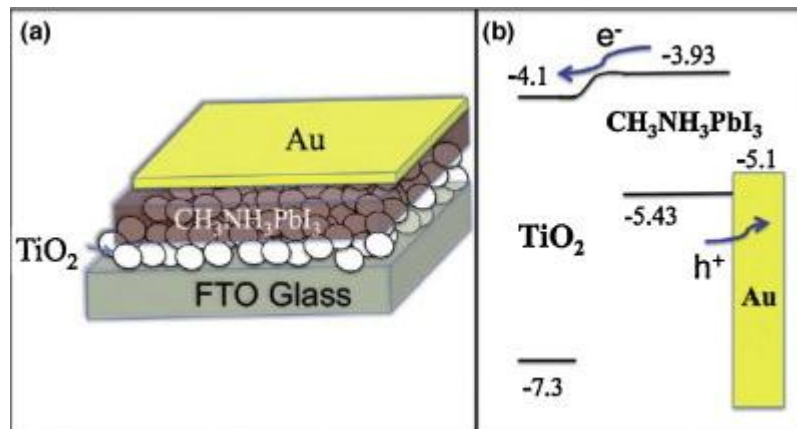
鈣鈦礦在 19 世紀被發現，以俄國礦物學家 L.A. Perovski 的姓命名，英文名 perovskite，主要成分是鈦酸鈣 ( $\text{CaTiO}_3$ )，鈣鈦礦的結構形式為  $\text{ABX}_3$ ，其中 A 代表有機陽離子，B 代表無機陽離子，X 則為小於 A 的鹵素陰離子。B 陽離子和 X 陰離子組成一個八面體，A 陽離子則位於立方體的 8 個角落，晶體結構如圖十六所示。需注意的是，目前一般所稱的鈣鈦礦電池（全稱：鈣鈦礦型甲基銨鉛 (Pb) 的三鹵化物薄膜太陽能電池）是指與鈣鈦礦晶體結構相似的化合物，而不是用  $\text{CaTiO}_3$  礦石材料製成的。



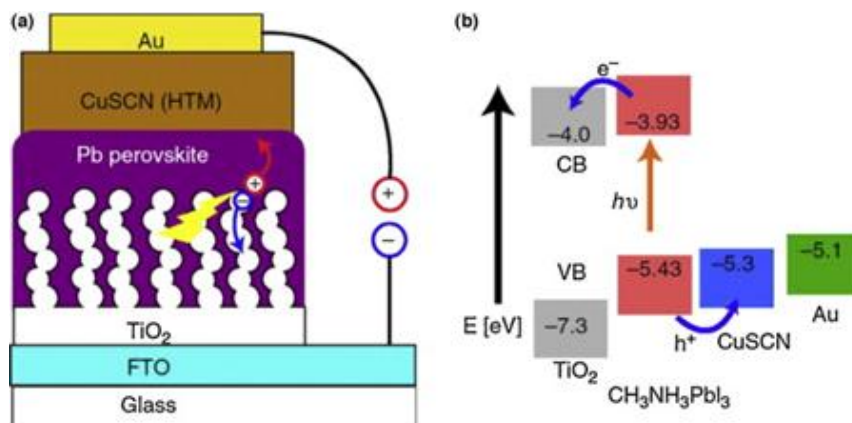
圖十六、鈣鈦礦的晶體結構

Source: M Liu *et al. Nature* **000**, 1-4 (2013) doi:10.1038/nature12509

電池結構：隨著研究能量的投入和技術的不斷進步，鈣鈦礦太陽能電池的結構也從最初在染料敏化電池中的奈米點表面吸附概念，逐漸演變成平面型的 pin 異質接面概念，圖十七和圖十八分別是兩種鈣鈦礦電池結構。

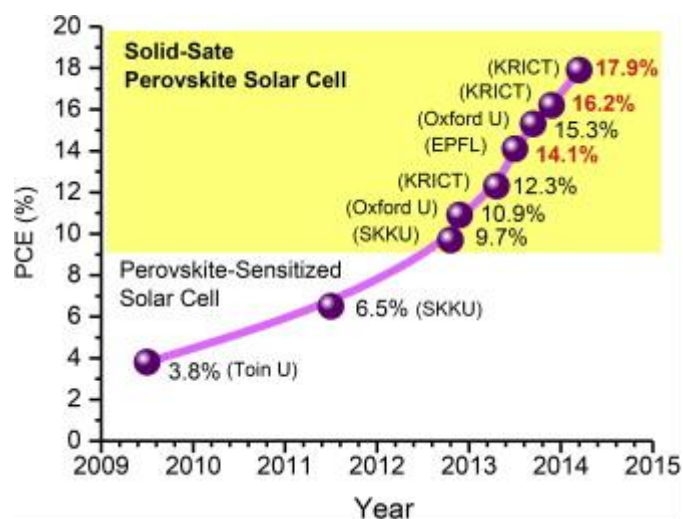


圖十七、(a)具有 *p*-type  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  和 *n*-type  $\text{TiO}_2$  的鈣鈦礦太陽能電池 *pn* 接面結構圖 (b)顯示介於  $\text{TiO}_2$  和  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  間之空乏層的能階圖。Source: materialtoday doi:10.1016/j.mattod. 2014.07.007



圖十八、基於無機  $\text{CuSCN}$  HTM(hole transporting material) 的  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  鈣鈦礦太陽能電池(a)結構圖(b)能階圖。Source: materialtoday doi:10.1016/j.mattod. 2014.07.007

里程碑：鈣鈦礦太陽能電池源於染料敏化太陽能電池，2009 年日本橫濱大學 Miyasaka 等研究人員以一層薄的鈣鈦礦 ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$  ( $X = \text{Br}$  or  $\text{I}$ )) 當作吸光層應用於染料敏化太陽能電池上，開啟了鈣鈦礦太陽能電池的研究，當時轉換效率為 3-4%。2011 年，韓國成均館大學 Park 教授研究團隊將鈣鈦礦塗佈條件優化，並以  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  取代，效率提升到 6.5%。基於液體的鈣鈦礦太陽能電池因為穩定度的議題並未受到太多重視，例如鈣鈦礦可能在液態電解質溶解。2012 年，韓國 Park 團隊以固態導電材料取代先前的液態電解質，效率提升至~10%。之後兩年內，英國、加拿大、美國個研究團隊陸續發表突破性的成果，截至 2014 年 6 月美國國家能源實驗室認證的最高轉換效率（未穩定）為韓國化學技術研究所（Korean Research Institute of Chemical Technology, KRICT）的 17.9%，如圖十九所示。



圖十九、自 2009 年起鈣鈦礦太陽能電池的光電轉換效率演進。Source: materialtoday doi:10.1016/j.mattod. 2014.07.007

特色與挑戰：鈣鈦礦太陽能電池的優點為製程容易、可大面積化，材料具有高吸光係數、高能隙，所以可製作高 Voc 的太陽能電池。雖然鈣鈦礦太陽能電池轉換效率進步快速，然而目前這種太陽能電池在高相對濕度環境中並不穩定；此外，鈣鈦礦材料中的鉛對環境具有潛在污染性。考量未來商品化，鈣鈦礦太陽能電池在環保和光學特性穩定度上必須加以保證，因此必須開發新的封裝技術以及抗濕氣和具備光穩定度的材料；此外，如何以其他元素取代鉛也是熱門研究議題。（Source: materialtoday doi:10.1016/j.mattod. 2014.07.007）



#### (四) 太陽光電發電預測技術

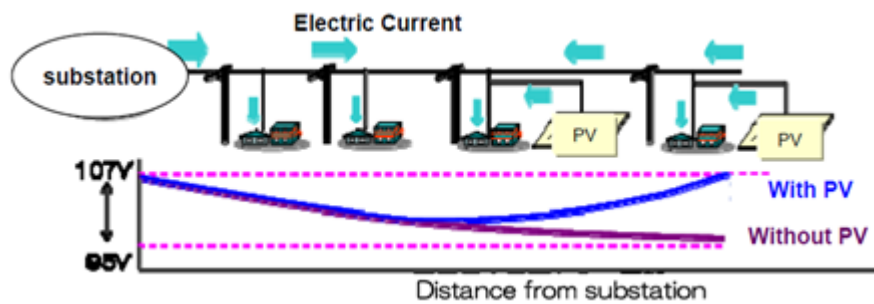
##### 1. 背景介紹

由於日本能源主要依賴進口，在 2011 年發生 311 事件後大量引入太陽光電，然而大量再生能源滲透入電網將對電力系造成衝擊，電力公司也面臨諸多挑戰，因此大會特地邀請東京電力公司工程研發部的副總經理 Shuichi Ashidate 博士進行簡報，題目是”再生能源整合進電力系統-日本各國家型計劃 (Renewable Energy Integration to Power Systems-National Projects in Japan)”。以下針對其簡報當中有關太陽光電的部分摘要敘述如下：

##### 2. 太陽光電在日本大量匯入電網的議題

截至 2013 年止整個日本太陽光電裝置容量為 13.21GWp，其中以九州的 2.72GWp 占全國 16.6% 最高。大量太陽光電匯入電網造成以下議題：

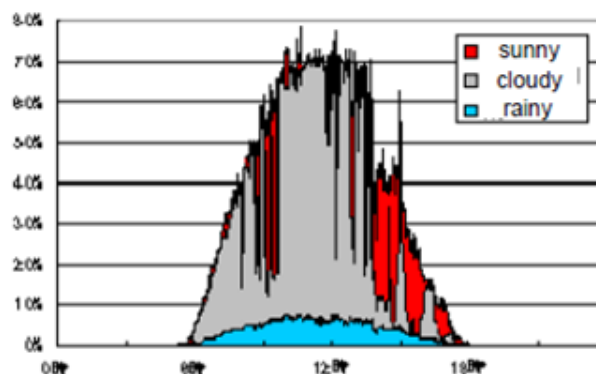
(1) 電壓分佈 (profile) 議題：電力潮流自太陽光電站流入配電電網，導致配電電網末端過電壓，如圖二十所示。



圖二十、電力潮流自太陽光電站流入配電電網，導致配電電網末端電壓過高。

Source: 東京電力公司 Shuichi Ashidate 博士 WCPEC-6 投影片。

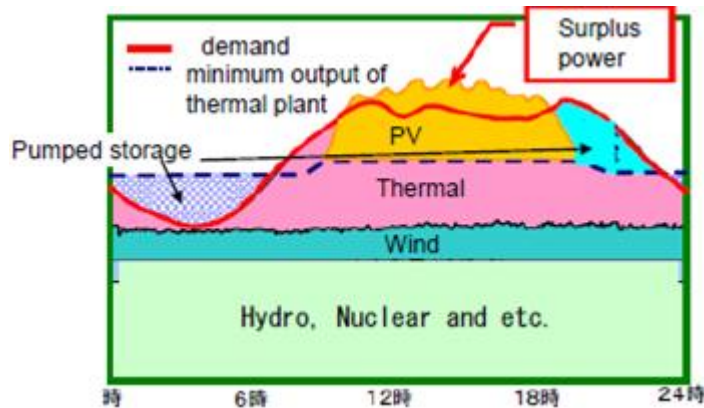
(2) 電力系統穩定度議題：太陽光電站輸出電力的波動以及系統平衡能力的降低，導致電力系統頻率的波動，如圖二十一所示。



圖二十一、太陽光電站輸出電力在不同天候條件下的波動情形。Source: 東京電力公司 Shuichi Ashidate 博士 WCPEC-6 投影片。

### (3) 過剩電力的議題

大量太陽光電匯入電網，導致在接近正午時段出現電力過剩，必須設法儲電以維持電力系統供需平衡，如圖二十二所示。



圖二十二、大量太陽光電匯入電網，導致在接近正午時段出現電力過剩，必須設法儲電以維持電力系統供需平衡。Source: 東京電力公司 Shuichi Ashidate 博士 WCPEC-6 投影片

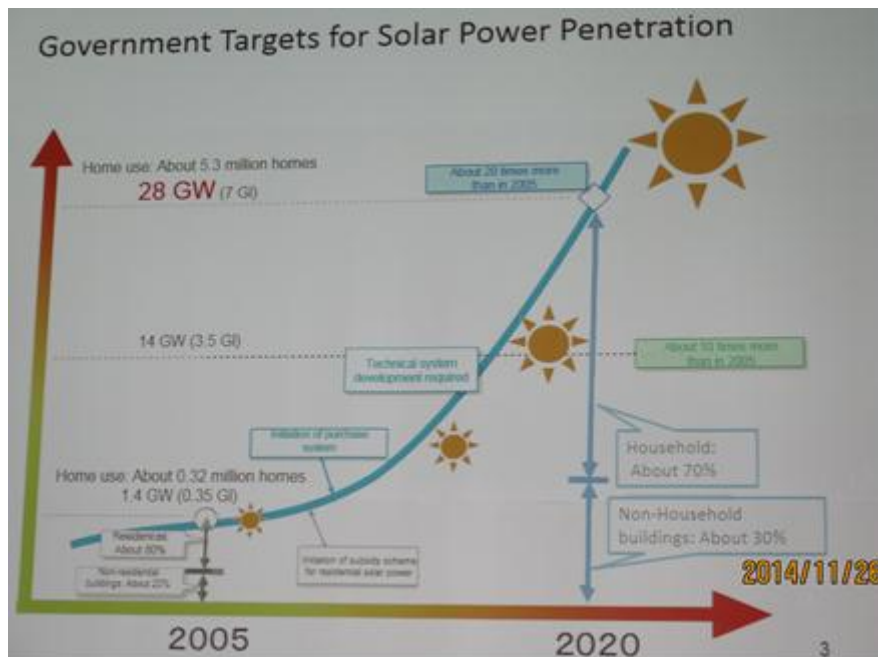
### 3. 日本在太陽光電發電預測技術之進展

在本次研討會中，東京大學 Kazuhiko Ogimoto 教授應邀簡報，介紹了日本在太陽光電發電預測技術之進展(Progress of PV Forecast Technology in Japan)，與研討會其他相關資料整理並重點摘要如下：

根據日本政府經產省所設定的目標，日本太陽光電裝置容量的目標將從 2005 年的 1.4GW 提高為 2020 年的 28GW，如圖二十三所示。在國家型太陽光電發電預測計畫包含兩大主軸計畫，一是經產省（The ministry of economy, trade and industry, METI）的示範計畫，二是日本新能源產業的技術綜合開發機構（The New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO）的研究發展計畫。前者執行期程為 2011 年~2013 年，主要聚焦在電力系統運轉所需要的當天日射量/發電量預測；後者執行期程為 2010 年~2014 年，主要著眼於未來的應用，包括一般 NWP 模型的加強以及分散型能源管理之其他應用。

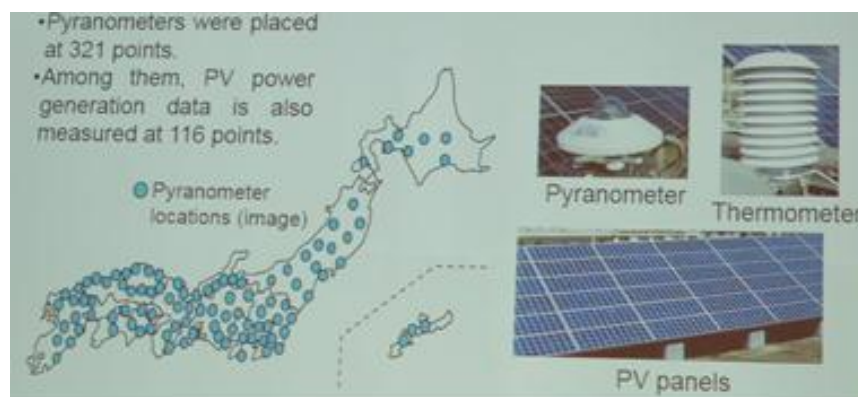
### 4. 日本經濟產業省（METI）示範計畫

為了因應大量再生能源（主要是風力與太陽光電）匯入電網造成的議題，日本經濟產業省（METI）擬定了六大示範計畫，其中與太陽光電直接相關的是自 2009 年開始進行的計畫一大量新能源導入下的電力穩定計畫以及自 2011 年開始進行的計畫四太陽光電發電預測與估計技術。



圖二十三、日本政府經產省所設定的太陽光電裝置容量目標，將從 2005 年的 1.4GW 提高為 2020 年的 28GW。Source: 東京大學 Kazuhiko Ogimoto 教授 WCPEC-6 投影片。

計畫一大量新能源導入下的電力穩定計畫又稱為 PV300，此計畫由日本 10 家電力公司共同參與，進行了大規模太陽光電滲透入電力系統的準備工作。為了分析太陽光電發電的變動，日射計和溫度計安裝在日本各地以觀測並記錄日射量和溫度，如圖二十四所示。

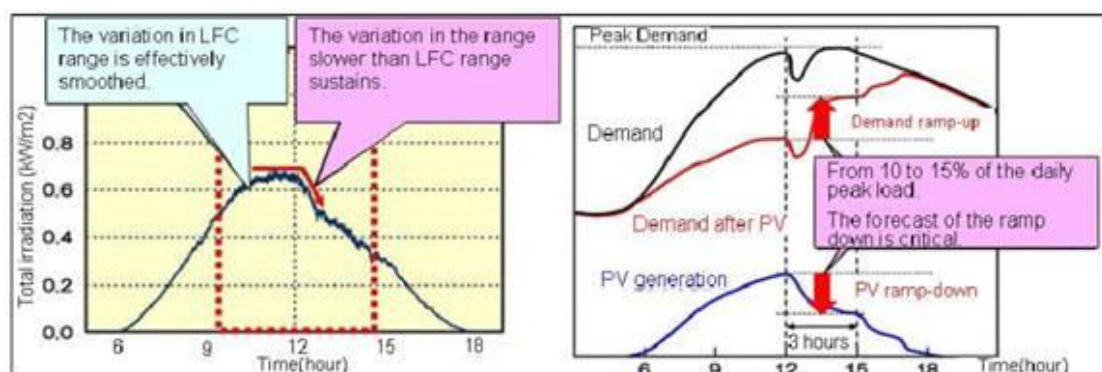


圖二十四、日射計和溫度計安裝在日本各地以觀測並記錄日射量和溫度。日射計總共安裝在 321 處，其中 116 處同時測量了太陽光電發電量。Source: 東京大學 Kazuhiko Ogimoto 教授 WCPEC-6 投影片。

這些時間同步的觀測站每隔 10 秒鐘取樣一次。主要工作是(1)收集日射量與太陽光電站發電量，前者資料由安裝於全國 321 處的日射計(pyranometer)取得，後者資料則是從當中 116 處的太陽光電站取得，因為環境溫度也是影響太陽光電發電量的重要因素，這些測站同時也安裝了溫度計，資料的收集目前仍持續進行中以支持進行中的相關計畫。(2)分析自 2009 年起上述 321 處日射功率的波動特性，各區域大型太陽光電發電的波動係藉由一太陽光電發電的波動模型進行分析，為了有利於整個電力系統供給與需求平衡的控制，太陽光電發電的波動分析區分為短期與長期兩大類，短期波動指的是指的是 20 分鐘以內的小波動，著眼在負載頻率控制(LFC)；長期波動指的是期間長於 20 分鐘的波動，著眼於經濟負載調度控制(economical load dispatching control)，分析的結果在 2012 年 3 月由日本電氣事業連合會(FEPC)發佈。

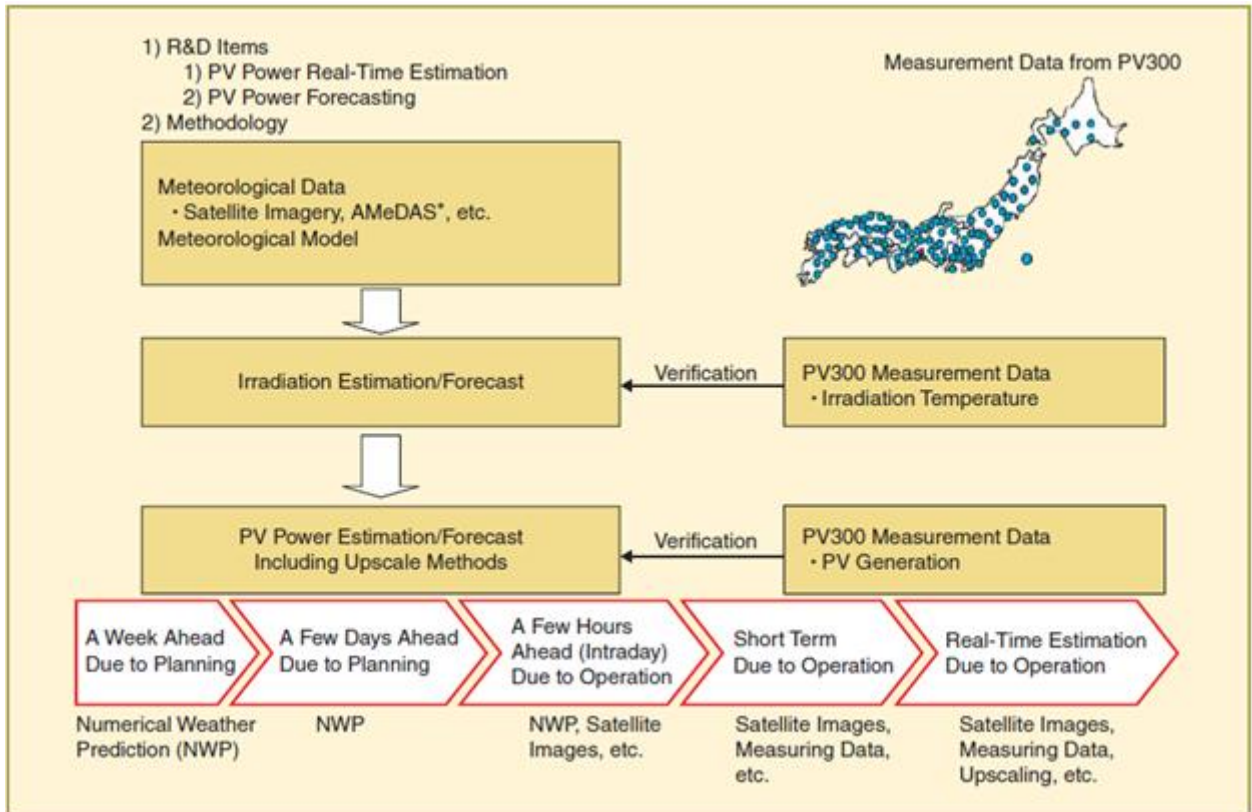
資料分析的結果指出了大量太陽光電電力注入電網造成衝擊的幾個特點，包括：

- (1) 雖然單一太陽光電站輸出電力隨著天候條件變化而在極短時間內可能有劇烈的波動，然而就廣大的電力系統而言，分散於各地的太陽光電站的加總發電量因為平滑效應(smoothing effects)降低了負載頻率控制時間範圍內的發電量變動，而超過負載頻率控制時間範圍者則仍存在著變動，如圖二十五(a)所示。
- (2) 各個太陽光電站發電量加總起來的上升(ramp up)與下降(ramp down)，對整個電力系統的用電需求影響甚大。因此，預測每天尖峰用電時段太陽光電站發電量的下降是很重要的，如圖二十五(b)所示。
- (3) 繼續收集並分析資料是必要的，以便了解太陽光電占比增加的影響，以及太陽光電發電在短期和長期的波動。



圖二十五、大量太陽光電電力注入電網造成衝擊，(a)太陽光電發電量的變動分析(b)太陽光電站發電量的上升/下降對用電需求的影響。Source: 東京電力公司 Shuichi Ashidate 博士 WCPEC-6 投影片。

計畫四太陽光電發電預測與估計技術，由日本 10 家電力公司和 7 所大學或研究機構共同參與。此計畫的工作內容涵蓋三大部分，包括(1)日射量估算與預測技術的開發，(2)太陽光電發電量估算技術的開發，(3)日射量的分析。METI 太陽光電發電預測技術示範計畫架構如圖二十六所示。



圖二十六、METI 太陽光電發電預測技術示範計畫。\*表自動化氣象資料擷取系統。Source: Japans Solar Power Program and Prospects for te New Power System, K. Ogimoto et al. IEEE Power and Energy Magazine March/April 2013.

**METI 計畫假定的運轉排程 (operation schedule) :** METI 計畫的主要特色就是日本 10 大電力公司的全部參與，以及聚焦在電力系統運轉所需要的日射量/發電量預測。假定之運轉排程，包含當天到六天前的發電規劃以及太陽光電發電量預測與估算，如圖二十七所示。



圖二十七、METI 計畫假定之運轉排程，包含當天到六天前的發電規劃以及太陽光電發電量預測與估算。Source: 東京大學 Kazuhiko Ogimoto 教授 WCPEC-6 投影片。

**METI 計畫的預測規格 (specification of forecast)**：基於前述的假定運轉排程，METI 計畫訂定了 5 種預測類型，其中 2 種屬強制性而 3 種屬於任選性質，如表四所示。

預測類型		發佈時間	預報期間	時間解析度	數值
強制性	隔天	早上 11:00	24 小時	30 分鐘	30 分鐘平均值
	當天	早上 5:00	24 小時	30 分鐘	30 分鐘平均值
任選	領前一週	早上 11:00	7 天	30 分鐘	30 分鐘平均值
	領前數小時	每 1 小時或每半小時	6 小時	30 分鐘	30 分鐘平均值
	領前數分鐘	每 10 分鐘	60 分鐘	10 分鐘	30 分鐘平均值

表四、METI 計畫所訂定的 5 種預測類型與規格

在本研討會中日本氣象協會(Japan Weather Association, JWA)以口頭簡報方式發表了在日射量估算與預測技術的開發上的研究成果;東京大學 Kazuhiko Ogimoto 教授應邀以口頭簡報方式介紹了日本在太陽光電發電預測技術之進展，此外 ITOCHU 公司和東京大學也共同以海報展示方式發表了太陽光電發電預測技術的研發成果；日本電力中央研究所(Central Research Institute of Electric Power Industry, CRIEPI)則是以海報展示方式發表了在日射量的分析上的研究成果。

## 日射量估算與預測技術的開發

為了因應日本太陽光電裝置容量快速成長對電力系統造成的衝擊，日本政府經產省（METI）進行了國家型示範計畫，當中一個便是”太陽光電發電預測技術示範計畫（計畫時程：2011~2013）”。參與此計畫的機構包括全日本 10 家電力公司以及 7 個研究機構和大學。在參與計畫的機構中，日本氣象協會（JWA）利用 METI 另一個稱為”PV300”的計畫所建置的 321 個觀測點所取得的日射量資料進行研究，在本次研討會中並由 Naoto Yoshida 先生簡報方式發表論文，題目是太陽光電發電預測所需之日射量（solar radiation）估算與預測方法的開發。重點摘要如下：

### 1. 日本氣象協會開發的方法

#### (1) 日射量估算方法的開發

利用各種不同類型的資料，建立日射量估算方法。資料類型包含衛星雲圖、氣象資料以及從 PV300 取得的日射量量測資料。

#### (2) 日射量預測方法的開發

建立日射量預測方法，預測領前時間為 10 分鐘至 1 週，為不同預測領前時間開發不同的預測方法。

以上估算與預測方法的解析度為 1km，範圍涵蓋整個日本。

### 2. 如何評估準確度

以名古屋市（20kmX20km）為例，估算和預測資料是將此區域 400 個網格資料（mesh）進行平均，而觀測資料則是將位於此區域中的各觀測點資料加以平均。採用的資料是日本當地時間 6:00~18:00 以及日出至日落之時間。誤差計算方法採用 RMSE（root mean square error）。本研究對大阪（20kmX20km、40kmX40km）、名古屋（10kmX10km、20kmX20km、40kmX40km）以及橫濱（10kmX10km）分別進行不同區域規模的準確度評估。

### 3. 日射量的估算

區域日射量係採用紅外線與可見光衛星雲圖進行估算，並利用地面觀測資料以日本氣象協會原創的”Curvature Minimize Algorithm”進行修正。在一年或三年期間估算的準確度 RMSE 為 10-15W/m<sup>2</sup>，不同區域準確度差異並不大，均< 5W/m<sup>2</sup>，如表五所示。準確度已利用地面觀測資料修正過。

區域	地區	RMSE (W/m <sup>2</sup> )			
		2010/11-2011/10	2011/11-2012/10	2012/11-2013/10	2010/11-2013/10
10kmX10km	名古屋	15	16	13	15
	橫濱	13	12	12	13
20kmX20km	名古屋	13	14	12	13
	大阪	10	12	10	11
40kmX40km	名古屋	15	15	13	14
	大阪	12	13	11	12

表五、不同區域在一年或三年期間估算的準確度 RMSE。

在本計畫中有關日射量估算待解決的問題如下：

- (1)本計畫估算的準確度已經有所改善，但是更進一步的改善仍有必要。
- (2)為了保持高準確度，需要大量地面觀測站以觀測日射量，然而大量觀測站的建置成本昂貴。
- (3)完成一次估算的時間需要耗時 30-40 分鐘。

2014 年 10 月 7 日發射的日本氣象衛星「向日葵 8 號」(Himawari-8) 計畫於 2015 年開始運作，預期衛星觀測準確度將會提高，衛星雲圖解析度也會提高，其中紅外線的部分將由 4km 的解析度提高到 1km，而觀測頻率也將從原來的 30 分鐘一次提高到 2.5 分鐘一次。新衛星觀測到的資料將用來估算日射量。

#### 4. 日射量的預測

在日射量的預測方法上，依考慮的領前時間長短有所不同，如表六所示。

預測領前時間	採用的方法
一天	(1)採用數值氣象預測模型 (Numerical Weather Forecast Model)，在此為原創的”SYNFOS(based on WRF model)”。 (2)採用模型輸出統計 (Model Output Statistics) 方法以改善準確度以及降解析度的尺度。主要是採用模型的日射量和雲量輸出，此外利用 PV300 觀測資料獲得 MOS 的關係係數。
1-6 小時	根據前幾個小時衛星雲圖估算的日射量，採用”移動預測模型(Movement Prediction model)”。
10-60 分鐘	採用自回歸移動平均模型 (Autoregressive Integrated Moving Average, ARIMA)，從過去時間序列資料預測不久之後的日射量。

表六、依考慮的領前時間長短有所不同，在日射量預測採用的方法。



預測準確度，以領前時間一天為例，全年平均 RMSE 為 100-120 W/m<sup>2</sup>，而 40km 平方區域的準確度高於 10km 平方區域，有可能是由”區域平滑效應 (Area Smoothing Effect) 所造成，如表七所示。逐月分析資料，發現六月份的準確度最差，這是因為這段期間是雨季，氣象預測在這個月較其他月份來得困難。

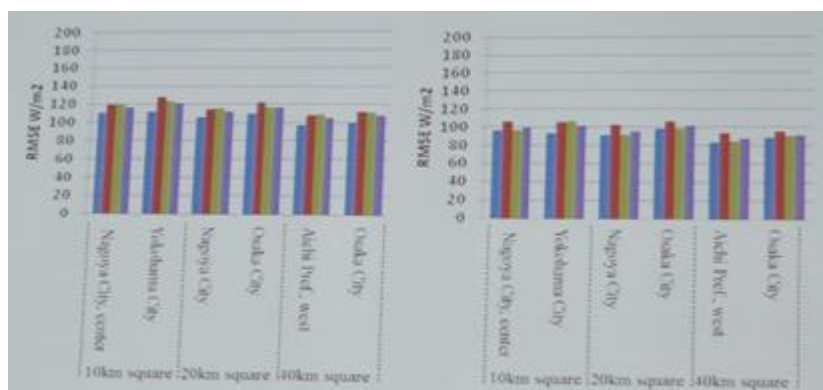
區域	地區	RMSE (W/m <sup>2</sup> )			
		2010/11-2011/10	2011/11-2012/10	2012/11-2013/10	2010/11-2013/10
10kmX10km	名古屋	111	119	119	116
	橫濱	112	128	123	121
20kmX20km	名古屋	106	115	115	112
	大阪	110	122	117	116
40kmX40km	名古屋	97	108	109	105
	大阪	100	112	110	107

表七、預測準確度，以領前時間一天為例，全年平均 RMSE 為 100-120 W/m<sup>2</sup>，而 40km 平方區域的準確度高於 10km 平方區域。

在本計畫中有關日射量預測待解決的問題如下：

- (1)本計畫預測的準確度已經改善到 100-120 W/m<sup>2</sup>，但是更進一步的改善仍有必要，以符合電力系統運轉應用的需求。
- (2)在短期間內有些狀況下預測與觀測誤差頗大，因此預測方法必須持續改進。
- (3)由於預測誤差是無法避免的，”預測可靠度”將是電力系統運轉應用有用的資訊，未來將開發計算此預測可靠度的方法。

**METI 計畫的成果：**典型的預測結果以隔天 (day-ahead) 和當天 (intraday) 的 RMSE 表示，針對日本氣象協會 (JWA) 提供的六個不同地區和不同區域範圍的試驗區域進行的預測準確度評估。RMSE 的計算時間涵蓋 4 年 (2010.11~2013.10)，領前一天 (day-ahead) 和一天內 (intraday) 的 RMSE 幾乎都分別低於  $120\text{W}/\text{m}^2$  和  $100\text{W}/\text{m}^2$ ，如圖二十八所示。



圖二十八、涵蓋 4 年 (2010.11~2013.10) 的 RMSE 計算，領前一天 (day-ahead) 和一天內 (intraday) 的 RMSE 幾乎都分別低於  $120\text{W}/\text{m}^2$  和  $100\text{W}/\text{m}^2$ 。Source: 東京大學 Kazuhiko Ogimoto 教授 WCPEC-6 投影片。

## 日射量的分析(CRIEPI)

在本次研討會中，日電力中央研究所(CRIEPI)的 Akira Usami 博士以海報展示方式發表了在日射量分析方面的研究成果，題目是”基於日射量之新的天氣型態分類 (A New Weather Classification Based on Solar Irradiation)”，海報如圖二十九所示，重點摘要如下：

隨著併網型太陽光電系統的大量安裝，準確預測太陽光電系統發電量對電力公司而言變得十分重要。太陽光強度在短期間內的變動已被認為是準確預測太陽光電系統發電量的一大阻礙，而適當的天氣型態分類可以使日射量在空間和時間上的特性獲得更多的了解，這是因為日射量強烈受到天空狀況的影響。然而，目前的天氣型態分類大多強調降雨量和雲層覆蓋，而不是日射量的變動。因此，進行基於日射量之新的天氣型態分類研究實有必要。

本研究係針對日本境內的兩個地點，群馬縣(Gunma Prefecture)的赤城(Akagi)和千葉縣(Chiba Prefecture)的我孫子市(Abiko)，之日射量觀測值進行分析，前者自 2011 年 4 月起而後者自 2009 年 11 月起開始觀測，資料包括直達日射(beam irradiation)和全天空日射(global irradiation)，區間為每分鐘一筆。研究結果發現天氣型態可以分成四種模式，晴空指數(clearness index)的機率分率可以由這四種模式的線性重疊(linear superposition)而成，同時可探討了從初始模式演變成其他模式的時間分布情形。

# A NEW WEATHER CLASSIFICATION BASED ON SOLAR IRRADIANCE VARIABILITY

Akira Usami

Central Research Institute of Electric Power Industry

Recent progress of installation of grid-connected photovoltaic (PV) systems makes accurate prediction of their areal power yields more important for utility grid stability. The short-term variability of solar resource is perceived as a roadblock to the accurate PV power prediction. A suitable weather classification permits us to gain a better understanding of temporal and spatial properties of solar irradiance because these strongly depend on sky conditions; however, present weather classifications put too much emphasis on rainfall and cloud cover, rather than the solar irradiance variability. Thus, a weather classification in terms of the solar irradiance variability is highly required. In this paper, we have analyzed solar irradiance data of two observation sites for several years. A new weather classification based on the solar irradiance variability was presented, along with its characterization.

## Observation

Location: Two Sites in Japan

Akagi at Gunma Pref. and Abiko at Chiba Pref.

Term: Akagi → from April 2011

Abiko → from November 2009

Data: Beam Irradiance and Global Irradiance

1 minute interval at solar elevations  $> \sin^{-1}(0.10)$

## Results and Discussion

### Clearness Index Probability Distribution

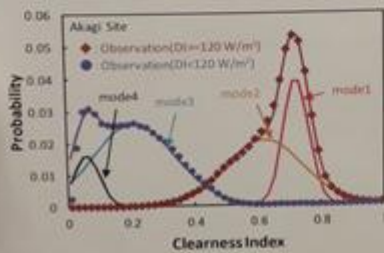


Fig. Probability distributions of clearness indices. DI stands for the direct irradiance.

These results clearly indicate that the probability functions are represented by a linear superposition of four normal distributions (denoted modes 1-4).

### Classification

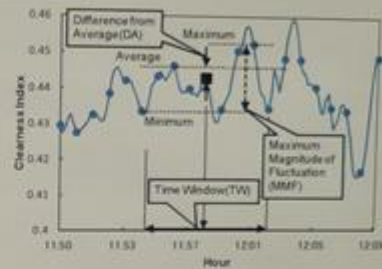


Fig. Mode classification parameters

Table I. Parameter values

Mode	Clearness Index <sup>1</sup>		TW [min]	Beam Irradiance [W/m <sup>2</sup> ]
	MMF	DA		
1	$\leq 0.08$	$\leq 0.02$	7(half)	$120 \leq$
2	Other Than Above			
3	Other Than Below		30(half)	Other Than Above
4	$\leq 0.09$	$\leq 0.04$		

<sup>1</sup>: Modes 1 and 4 meet both the conditions.

### Intrahour Evolution of Each Modal Exchange

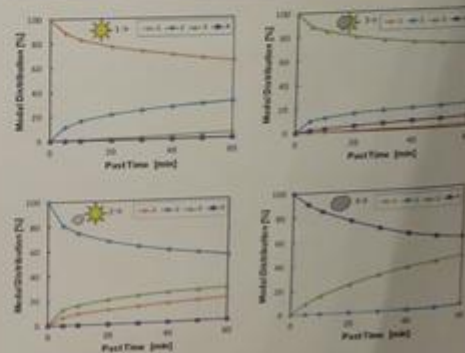


Fig. Temporal evolution of modal distributions from an initial mode.

The inset numbers represent the modes. Initial modes are shown by the insets of the illustrations and their right numbers. These are examples of the Akagi site for a year and a half.

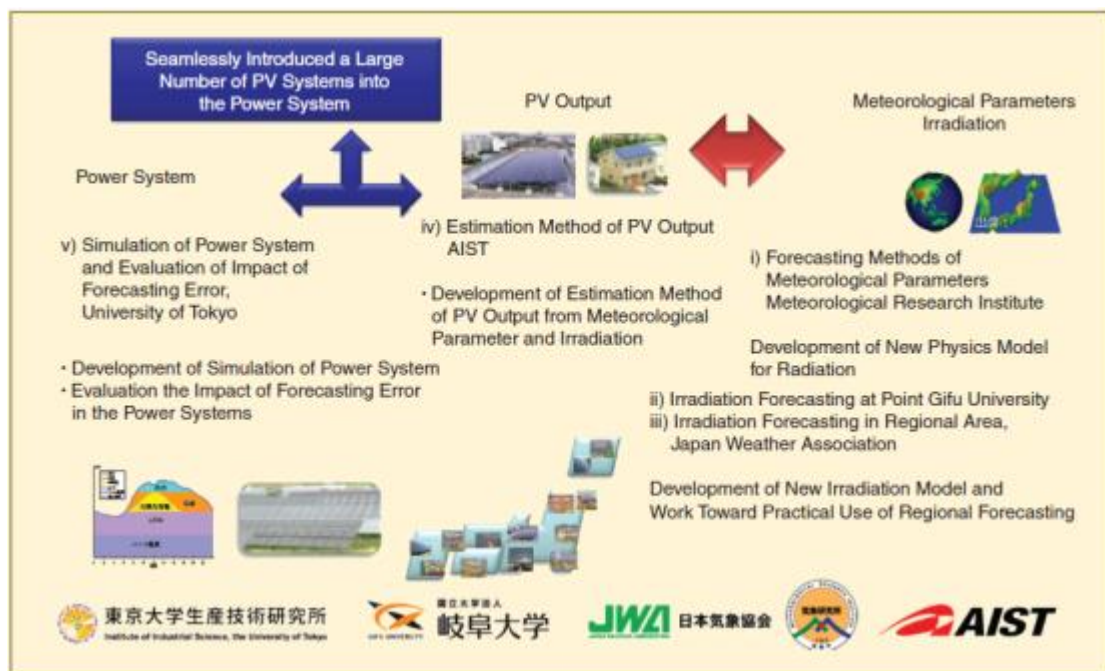
2014/11/26

CRIEPI  
Central Research Institute of Electric Power Industry

圖二十九、CRIEPI 展示的基於日射量之新的天氣型態分類研究成果海報。

## NEDO 的研究發展計畫

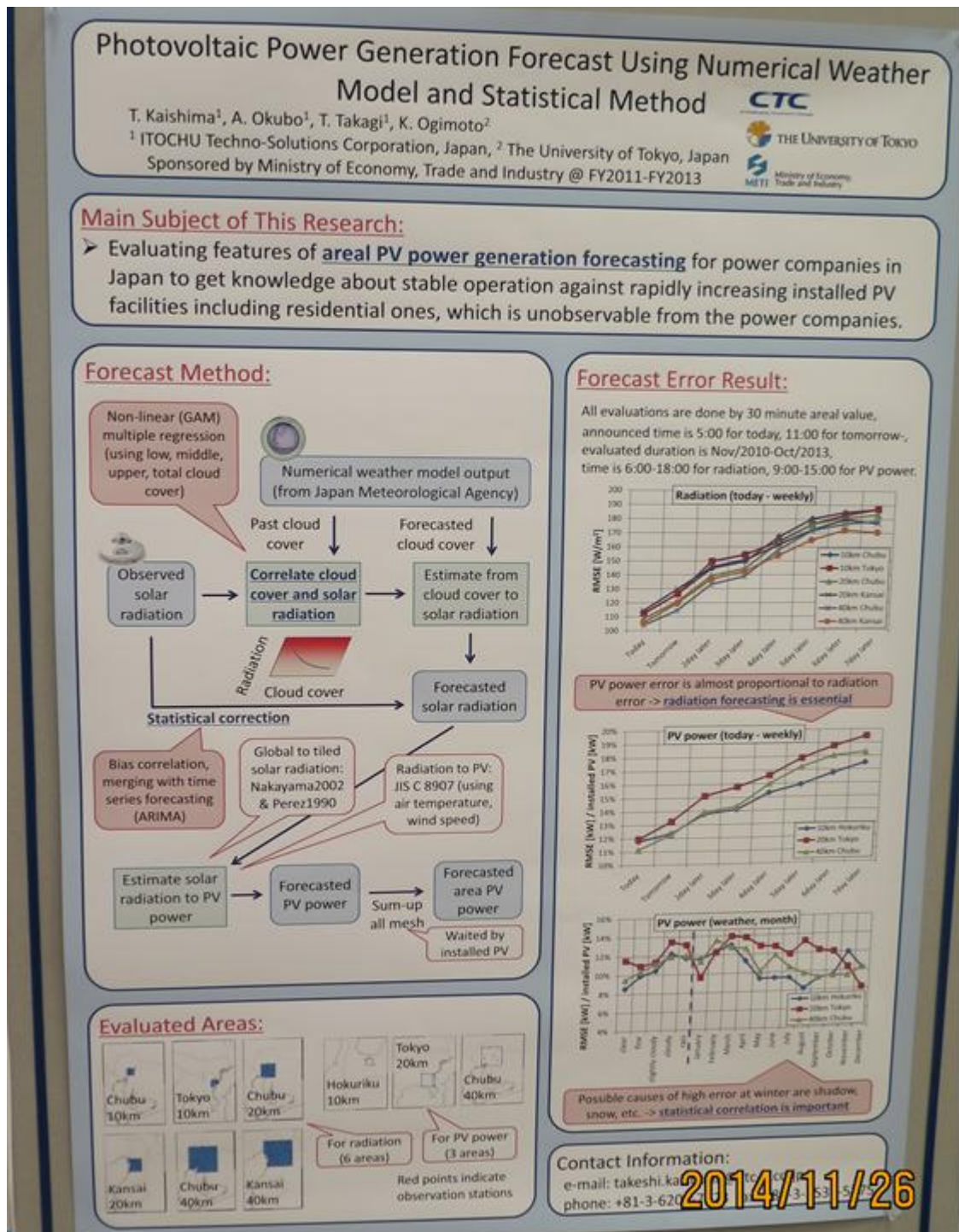
由 NEDO 推動的太陽光電發電技術研究計畫稱為未來高效能太陽光電發電系統的研究與開發計畫，計畫成員包含率屬於日本氣象廳的氣象研究所（Meteorological Research Institute, MRI）、獨立機構日本氣象協會（JWA）、東京大學、岐阜大學以及國家級研究機構產業技術綜合研究所（The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, AIST），計畫架構與成員如圖三十所示。MRI 和 JWA 提供日射量預測，以及分別為電力系統提供氣象相關變數的一般和專用的數值預測模型（NWP）。岐阜大學採用專用的數值預測模型。AIST 將日射量預報資料轉換成發電量預測資料。另一方面，東京大學則是利用機組排程（Unit Commitment）和基於其他四組研究夥伴提供的預測資訊進行模擬，以評估所開發的發電預測方法，並且評估所開發的預測系統在佈署後預測效能對機組排程的影響。



圖三十、NEDO 太陽光電發電預測研究發展計畫。Source: Japans Solar Power Program and Prospects for te New Power System, K. Ogimoto et al. IEEE Power and Energy Magazine March/April 2013。

## 採用數值預報模型和統計方法的太陽光電發電預測

在本次研討會中，ITOCHU 公司和東京大學共同以海報展示方式發表了在太陽光電發電預測技術方面的研究成果，題目是”採用數值預報模型和統計方法的太陽光電發電預測（Photovoltaic Power Generation Forecast using Numerical Weather Model and Statistical Method）”，海報如圖三十一所示。



圖三十一、採用數值預報模型和統計方法的太陽光電發電預測海報展示。

## (五) 模組老劣化與故障診斷技術以及系統運轉維護

隨著全球太陽光電系統裝置容量持續大幅度的成長，太陽光電系統的性能已成為重要議題。太陽光電系統發電性能受模組以及系統老劣化影響甚鉅，因此模組老劣化測試技術與故障診斷技術以及系統運轉維護日益重要。一般而言太陽電池模組的工作壽命主要是由封裝的耐久性決定的。太陽能模組在 20-30 年預期壽命之後，就會以不同的形式衰退或者失效。長期的性能研究指出，典型的性能損耗範圍在每年在 1-2% 之間。根據一般文獻，各種可能的衰退原因包括：

1. **表面汙損**—隨著表面灰塵的積累會逐漸降低模組的性能。模組的玻璃表面藉由風雨的沖刷實現自我清潔，而將這些損失保持在 10% 以下。然而在台灣，由於灰塵中可能夾帶汽、機車與工業廢氣而含油漬，不易藉由風雨自我沖刷，因此一般是採用人工定期刷洗。
2. **模組中電池光電轉換效率的衰退可能的原因包括：**
  - 電勢誘發衰減效應 (Potential Induced Degradation, PID)，也就是當太陽能模組長期與接地電位存在高的負電位差，所引發的發電效能衰減。一般認為PID在高電位差、熱和潮濕等三個條件同時成立時容易發生。
  - 由於金屬接觸附著力的降低或者腐蝕引起 $R_s$ 變大
  - 由於金屬遷移透過p-n接面導致 $R_{sh}$ 減小
  - 抗反射塗層的老化
  - 電池中活躍的p型材料硼形成硼氧化合物而造成衰退。
3. **封裝材料變色引起的光學老化：**暴露於紫外線、溫度或濕氣會造成泛黃；或由於來自模組邊緣的密封、架設或終端盒等部分的外來物質的擴散，會發生局部的發黃現象，這類光學老化均可導致性能逐漸下降。
4. **電池短路**—短路容易在電池互連的地方出現，較常見於薄膜電池。在薄膜電池中頂電極和背電極距離較近，由於電池材料腐蝕或損壞的區域而導致的短路機率較矽晶太陽能電池更大。
  - **電池斷路**—這是個比較常見的故障。電池可能因為熱應力、冰雹或碎石或者裝配過程中造成的“隱性裂痕”破裂而導致斷路。
5. **寄生串聯電阻增大和互連電路的斷路**—隨著錫鉛合金的老化，焊接處會變脆且會破裂分離成錫和鉛的碎片，因此寄生串聯電阻會隨歲月而逐漸增大。此外，由循環熱應力和風力負荷引起的疲勞，也可能導致互連電路的

斷路故障。

6· **模組的斷路**—斷路故障和老化的影響也會在模組結構中出現，最典型的是在匯流排接線和接線盒中發生。

7· **模組電路短路**—雖然所有模組在出售前都會經過測試，然而風化所致的絕緣老化，繼而導致剝離、破裂和電化學腐蝕都可能引起模組短路。

8· **模組玻璃破損**—受光面部玻璃損壞的可能原因有人為蓄意破壞、熱應力、安裝操作不當、風或者冰雹的影響。

9· **模組剝離**—這在早期的模組中是比較普遍的一個故障，但是現在已不構成主要問題。問題一般是由於較低的焊點強度，潮濕和光熱老化等環境問題，或者因為受熱和潮濕產生的膨脹不等而引起的。這個在比較熱和潮濕的氣候裏比較常見。當濕氣經過封裝材料時，太陽光和熱誘發化學反應而導致剝離。

10· **熱點故障**—不匹配的、破裂的或者被遮蔭的電池可能會導致熱點故障。

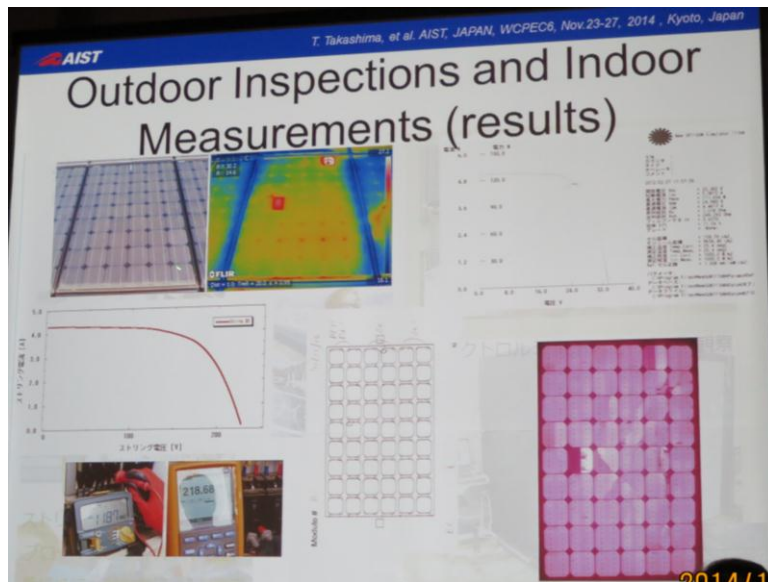
11· **旁通二極體故障**—用於防止熱點故障問題的旁通二極體，本身也可能產生故障，通常是由於過熱或規格不符造成的。

本次研討會有關模組老劣化與故障診斷技術以及系統運轉維護議題的論文為數眾多，最具代表性的當屬日本國家級研究機構 AIST 應大會邀請發表的”逾 5000 片太陽光電模組運轉 10 年後的效能與失效分析-從 AIST 百萬瓦太陽能城獲得的教訓” (Performance and Failure Analysis of over 5,000 PV Modules after 10-year Operation -Lessons Learned from AIST "Mega-Solar town")。AIST 耗費 2.5 年針對 2004 年 AIST 裝設的 MW 級(包含 5082 片模組)太陽光電城進行每片模組包括室外和室內的測量室外測量項目包含(1)外觀目測檢查與紅外線檢測(IR observation) (2)內部接線檢查和旁通二極體(BPR)檢查；室內測量項目則包含(1)模組 I-V 特性量測(2)電激發光影像量測(EL imaging)，如圖三十二所示。室外測量與室內測量結果如圖三十三所示。





圖三十二、室外測量與室內測量項目。Source: AIST WCPEC-6 投影片。



圖三十三、室外測量與室內測量結果。Source: AIST WCPEC-6 投影片。

上述室外與室內測量與檢測結果，經分析與統計後歸納如下：

1. 評估後發現 10 年下來模組平均最大輸出功率下降 6~14%，最大輸出功率低於額定容量 81% 者共計 155 片模組。
2. 模組表面蝸牛紋對最大輸出功率並無明顯影響。
3. 未發現明顯證據證明的電勢誘發衰減效應 (PID) 引起的最大輸出功率衰退。
4. 旁通二極體故障者共計 922 片模組，造成熱點效應，部分造成背板局部燒損或玻璃破裂。
5. 玻璃破裂者共計 11 片模組。
6. 互連電路部正常者共計 391 片模組。

## 五、心得與建議

1. 國際能源總署(IEA)預測2050年再生能源在全球發電占比將由目前的20%成長到65~79%，為了因應大量再生能源發電占比，特別是風力發電與太陽光電隨天候條件波動，包括電網本身、傳統發電機組、儲能以及需求端都必須更具彈性，此一發展趨勢已十分明確，本公司宜及早準備因應措施。
2. 隨著太陽光電系統裝置容量的大幅成長，全球在系統應用端的研究分量逐漸加重，太陽光電對電網的衝擊以及太陽光電系統與電網之整合也深受矚目，本次太陽光電研討會大會特地為太陽光電發電預測開了一個session，足見日本對此一技術發展之重視。藉著參加此研討會可以有機會和許多日本從事此一領域研究者，包括電力公司、CRIEPI等研究機構和大學研究人員討教並交換意見，對本公司即將開始投入的太陽光電發電預測技術研發工作助益甚大。
3. 日本經產省PV300計畫在日本各地裝設321台日射計和溫度計用以觀測日射量和環境溫度，本公司目前裝設在澎湖、台灣本島的水平日射計只有26台且未配備溫度計，尚未符合太陽光電發電預測的需求，然而安裝大量日射計和溫度計所費不貲，有必要整合本所現有各太陽光電試驗站以及本公司太陽光電站目前配備的日射計和溫度計資源。此外，由於中央氣象局或和工研院綠能所於全台各地裝設有一定數量的日射計和溫度計，建議未來與其進行資料交換/共享。
4. 為了因應大量太陽光電對電網造成的衝擊，日本經產省(METI)除了推動PV300計畫外，也積極推動”太陽光電發電預測技術示範計畫”，參與的機構包括全日本10大電力公司以及包括日本氣象協會和東京大學的7個研究機構和大學。此外，NEDO也投入經費推動太陽光電發電預測技術的研究，參與機構包含日本氣象廳所屬的氣象研究所、獨立機構日本氣象協會以及AIST、東京大學和岐阜大學。從投入的時間和資源規模可以看得出來日本對此技術開發的重視。相較之下，我國太陽光電發電預測技術之開發主要見諸於智慧電網框架，僅責成台電公司開發再生能源發電預測技術，由於氣象研究並非台電公司現有業務，在欠缺相關專長人才的狀況下，未來在日射量預測技術的研究上，建議尋求與中央氣象局或國內外氣象機構的合作。
5. 本次研討會中發表的有關模組老劣化與故障診斷技術以及系統運轉維護相關論文匯集來自世界各國的經驗和技術，值得本公司和國內太陽光電業者參考。