

出國報告（出國類別：開會）

## 美國電業自由化發展研討會議 及智慧電網實務交流

服務機關：經濟部能源局

姓名職稱：林全能局長

詹文宏科長

派赴國家：美國加州

出國期間：2016年3月20日至3月28日

報告日期：2016年5月24日



行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：美國電業自由化發展研討會議及智慧電網實務交流出國報告

頁數 41 含附件：是否

出國計畫主辦機關聯絡人/電話

經濟部能源局/詹文宏/ (02) 27757762

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

林全能/經濟部能源局/局長/ (02) 27757600

詹文宏/經濟部能源局/電力組科長/ (02) 27757762

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他

出國期間：105年3月20日至3月28日

報告期間：105年5月24日

出國地區：美國加州

分類號/關鍵詞：電業自由化、電力市場改革、智慧電網、再生能源、儲能、CAISO、CEC、EPRI、PG&E、SMUD

## 摘 要

美國加州近年來在能源方面的發展相當快速，包括電力市場改革、智慧電網發展、能源效率及再生能源推動等，皆有許多前瞻性的規劃與相關政策公布，也成為許多國家或地區學習與仿效的對象。

此行主要聚焦在加州電力市場發展（電業自由化）、再生能源及智慧電網推廣等面向，拜訪單位包括相關政府部門（加州能源委員會 CEC）、電力市場與系統操作者（CAISO）、電力公司（PG&E、SMUD）、學研界（EPRI、LBNL）、產業界（Tesla Motor、GOOGLE）及用戶代表（Stanford University）等，從各面向深入瞭解加州能源改革之進展及其影響。

在訪談中充分瞭解目前加州電力市場之發展，已從早期強調開放競爭朝向低碳電力快速邁進。在低碳電力的趨勢下，電力市場面臨與過去截然不同的問題，諸如從集中式朝向分散式發展、電網所需要的彈性需求遠高於過往、因太陽光電與風力發電大量增加產生白天電力過剩的現象、用戶端的角色日益增加等。這些目前加州面臨的問題，我國不久後也極可能會出現，因此，對於相關現象的早日釐清與規劃，將有助於我國電力市場長期穩健的邁進。



# 目 錄

摘 要.....	i
壹、目的.....	1
貳、行程安排與規劃.....	2
參、過程與紀要.....	4
肆、心得與建議.....	40
伍、附件	
一、California’s Clean Energy Push	
二、California’s Renewable Energy Policies	
三、Integrating High Penetration Renewable Energy into the CAISO Market	
四、Overview of the California Independent System Operator	



## 壹、目的

美國加州近年來在能源方面的發展相當快速，包括電力市場改革、智慧電網發展、能源效率及再生能源推動等，皆有許多前瞻性的規劃與相關政策公布，也成為許多國家或地區學習與仿效的對象。

此行主要聚焦在加州電力市場發展（電業自由化）、再生能源及智慧電網推廣等面向，拜訪單位包括相關政府部門（加州能源委員會 CEC）、電力市場與系統操作者（CAISO）、電力公司（PG&E、SMUD）、學研界（EPRI、LBNL）、產業界（Tesla Motor、GOOGLE）及用戶代表（Stanford University）等，從各面向深入瞭解加州能源改革之進展及其影響。

## 貳、行程安排與規劃

本次行程共計一週，依據前述的訪談目的，共安排以下單位進行訪談：

日期	參訪單位
105/3/21(星期一)	<p><b>EPRI (Electric Power Research Institute)</b> 訪談主題：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 電業自由化推動經驗與時程步驟</li> <li>● 發展智慧電網提升再生能源併網容量之關鍵因素探討</li> </ul>
105/3/22(星期二)	<p><b>1.LBNL(Lawrence Berkeley National Lab)</b> 訪談主題：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 針對 LBNL 目前的四大發展主軸進行交流及討論，作為建立後續研發技術合作平台的評估。</li> <li>● 新能源技術的開發及合作討論</li> </ul> <p><b>2. Google</b> 訪談主題：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 了解 Google 在臺灣發展對電力供應及能源政策的需求及建議</li> <li>● 針對再生能源、能源效率、AMI 與智慧電網技術、綠電相關政策及鼓勵措施進行意見交流</li> </ul> <p><b>3. Tesla Motor</b> 訪談主題：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 電動車發展技術</li> <li>● 電池技術合作</li> <li>● 家用儲能系統技術</li> </ul>
105/3/23(星期三)	<p><b>Stanford University , Central Energy Facility</b> 訪談主題：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 史丹佛大學能源系統創新計畫 (Stanford Energy System Innovations , SESI) 內容及成果</li> </ul>
105/3/24(星期四)	<p><b>1.PG&amp;E Test Field</b> 訪談主題：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 電業在推動智慧電網發展所扮演的角色及成本效益分析結果</li> <li>● 了解 PG&amp;E 自行開發試驗平台及未來發展項目</li> </ul> <p><b>2. SMUD(Sacramento Municipal Utility District)</b></p>

日期	參訪單位
	訪談主題： <ul style="list-style-type: none"> <li>● 電業推動智慧電網之效益以及用戶溝通的作法</li> </ul>
105/3/25(星期五)	<b>1. CEC(California Energy Commission)</b> 訪談主題： <ul style="list-style-type: none"> <li>● 加州政府再生能源政策推動現況與未來發展</li> <li>● 了解電業自由化、再生能源併網規劃</li> </ul> <b>2. CAISO (California Independent System Operator)</b> 訪談主題： <ul style="list-style-type: none"> <li>● 加州地區電力自由化在電力調度可能會遇到的問題 以及如何有效的管理</li> </ul>

## 參、過程與紀要

依前述考察安排進行各單位拜訪，並就考察過程與紀要說明如下：

### 一、EPRI (Electric Power Research Institute)

EPRI 為非營利機構，成立於 1972 年，其目的為協助電業與用戶面對電力系統的挑戰，包含可靠度、效率、可用性、安全性及環境衝擊等議題。EPRI 的成員涵蓋美國 90% 的電業及其他 35 個國家的成員，研究主軸包含環境、發電、核能、電力傳輸與使用、前瞻技術等面向。

此次拜訪之 Mr. Victor Niemeyer 為 EPRI 能源環境分析部門的資深技術主管 (Senior Technical Executive)，目前負責溫室氣體減量選項計畫 (Greenhouse Gas Reduction Options Program)。Niemeyer 為訪問團介紹 EPRI 在智慧電網領域的研究計畫，也說明在環境衝擊下對電業發展的影響。

為了研究如何大量導入分散式能源，EPRI 提出智慧電網示範倡議 (Smart Grid Demonstration Initiative)，參與單位包含澳大利亞、加拿大、法國、愛爾蘭、日本及美國的 24 個電力公司，EPRI 著重在成本效益分析、OpenADR 在分散式能源的應用、用戶端需量反應介面整合、智慧變流器之標準以及使用情境分析的方法等主題。

智慧電網示範倡議的計畫中有多項議題值得我國參考，例如：降壓供電對節能與電力品質的影響、整合再生能源或儲能的配電系統管理、由智慧電表資訊觀察使用者行為…等。美國幾個電力公司曾進行降低供電電壓的測試，例如 Ameren Illinois 在 4 條饋線上以 LTC (load tap changing) 變壓器調降電壓 2% 或 4%，其節能成效與季節及地區特性相關，若以功率節約量與電壓調降量的比例作為比較參數，稱為 CVRF (Conservation Voltage Reduction Factor)，在城市地區，夏季的 CVRF 為 0.78，表示電壓調降 1% 時大約節能 0.78%，秋季則為 1.24；郊區的節能量相對較低，夏季的 CVRF 為 0.77，秋季為 0.55。2012 年 SMUD (Sacramento Municipal Utility District) 在兩個 69kV/12kV 變電站共 6 條饋線上進行了降壓供電的測試，2% 的降壓供電時，其中一個變電站的供電功率降低 2.5%；而另一座降

低 1%。2013 年擴大到 14 個變電站的測試顯示 CVRF 平均值約為 0.6，週間與週末沒有明顯差異。Georgia Power 則對其降壓供電測試案例的電力品質進行分析，降壓供電期間的電壓仍然符合規範，總諧波失真(Total Harmonic Distortion, THD)、功率因數(Power Factor)、閃爍(Flicker)等參數也都符合電力品質規範。

美國政府對再生能源導入訂定積極目標，夏威夷州政府甚至要求 2030 年潔淨能源占比達 70%，因此夏威夷電力公司(Hawaiian Electric Company)與茂宜電力(Maui Electric)合作發展電網管理技術，在茂宜島評估儲能系統併接至 12.47kV 配電系統所造成的衝擊，包含饋線潮流、開關運作、孤島運轉、接地故障過電壓、電力諧波…等項。儲能系統分別為 500kV/576kWh 鉛酸電池與 500kW/153kWh 鋰電池，以 OneLiner 及 PSCAD/EMTDC 進行時域及頻域分析的結果顯示：如果儲能系統維持固定的充放電速率，在電壓穩定性、線路熱容量、短路電流、系統保護與電力品質等方面不致對配電網路造成重大影響。由於，儲能系統本身缺乏有效的接地系統，因此存在過電壓的風險，於 480V 側安裝接地變壓器可提供額外的保護，而僅在傍晚放電而在日間充電亦可降低其風險。變流器的規格建議採用 IEEE 1547 及 HECO/ MECO，除了符合 IEEE 1547 原有的過電壓 10 週期跳脫要求之外，建議加入電壓超過特定值則立即跳脫的要求，以避免過電壓造成的損壞。另外基於安全考量，在孤島事件發生時，變流器須在 2 秒內停機，相關測試方法則依循 UL 1741 規範。

為了正確評估政策制定造成的環境衝擊，EPRI 發展出結合電力估算與總體經濟的 US-REGEN (U.S. Regional Economy, Greenhouse Gas, and Energy)模型，電力估算模組由底層的電源供應及輸電網路需求評估達成供需平衡所需的開發計畫，並將區域之間交換電力所需的線路容量與線損列入考量，以反應真實情況；總體經濟模組則採用 Arrow-Debreu 一般經濟模型(general equilibrium framework)描述整體經濟隨時間的發展情況，兩個模組疊代計算以求得收斂結果，使經濟層面的影響得以納入電力政策的衝擊分析。運用此一模型可分析不同能源配比、導入期程、電價策略、基礎設施更新、能源價格以及經濟參數所造成的影響，對政策制定提出更為量化的明確建議。

Mr. Niemeyer 與訪問團就雙方電力系統概況、再生能源發展規劃與智慧電網技術發展廣泛交換意見，並樂意保持互動聯繫。

## 二、LBNL(Lawrence Berkeley National Lab)

LBNL 為隸屬於美國能源部的國家實驗室，其座落於加州大學伯克萊分校的中心校園內，該實驗室現由美國能源部委託加州大學代為管理。目前 LBNL 約有 3,232 人，在 2014 年經費為 7 億 8 千 5 百萬美元，為相當具有規模的國家實驗室。

當天參訪由 LBNL 之 Charles A. Goldman 以” Modernization Initiative & the Future of the Electric Utility Industry” 為題目進行簡報，Charles A. Goldman 為 LBNL 之電力市場和政策小組 (EMP) 之首席研究員。EMP 進行定量分析，研究規範電力公司的商業模式，包含創新的稅率設計、清潔能源技術的採用、電網現代化和增值服務。此模式是以五個相關領域：能源效率 (EE)、可再生能源 (RE)、客戶採用的技術、需量反應 (DR) 與智慧電網及零售稅率設計為基礎發展而得。EMP 藉由量化需求面和分散式能源之財務影響，提供另一種受規範的電力公司商業模式 (regulated utility business model) 之技術援助。

美國電力系統的可靠性對於國家的經濟活力和社會的福祉至關重要。目前，電力系統的可靠性受到質疑，隨著基礎設施的年限和新的營運挑戰的出現，包括間歇性的可再生能源發電的整合，LBNL 國家實驗室專注於創建下一代電網的可靠性增強技術、制度和辦法。

Charles A. Goldman 認為電網應至少具備穩定供電、affordable、clean electricity to consumer、climate adaption resilient 等特質。因此對於電力公用事業之基本 R&D 方向應包含：

1. Institutional support for regulatory
2. Device and Integrated System
3. Sensing and Measurement
4. System Operation and Control
5. Planning and Design Tools

## 6. Security and Resilience

規範機構和政策制定者考慮潔淨能源的公共政策，以滿足環境和其他政策目標。但有以下問題產生：

1. 潔淨能源的公共政策目標和服務成本規範的錯位(misalignment)
2. 公用事業關心盈利的侵蝕，失去了未來的收益機會
3. 客戶有興趣獲得參與計劃的好處和關注稅率增加

Goldman 認為解決的方向為：

1. 以定量分析來評估分散式能源影響的方向和大小
2. 進行關鍵驅動因素的敏感性分析
3. 考慮緩解方法的功效(如稅率設計 rate design、股東激勵 shareholder incentives)

Goldman 介紹使用 LBNL FINDER 模型可以量化能源效率(EE)對電力公司股東及其納稅人的財務影響。LBNL FINDER 模式可以評估參與者和非參與法案的影響，針對客戶類別（例如，住宅和非住宅）設計不同的稅率及量化分散式能源在配電系統投資之詳細影響。

從 PV 降低成本方面，分析了加州西南(SW)及東北(NE)電力公用事業之差異，電業間的降低成本的差異是由於他們不同的成本結構：即，SW 電業擁有電廠但 NE 電業則透過採購外購電力以滿足所有的發電需求。LBNL 採用了一些包含延遲發電、投資、油價及向外購電之成本進行了敏感度分析，發現：

1. PV 降低電力收入，主要是因客戶銷售和需求，比其降低電力之成本為多 (PV 降低之收入大於其降低之成本)；
2. 電廠股東經歷收入流失和損失收入的機會，導致降低了 ROE 和盈利；
3. 納稅人的經歷平均零售價格上升，但這些影響通常比股東的影響不明顯。

為了減輕對 PV 的影響，LBNL 也探索監管和費率釐定相關措施的功​​效和潛在的權衡。減輕的行動方案借鏡節能計劃的措施。為了說明之故，簡報中的減輕分析集中於 10% 以下的 PV 軌跡的影響。

Douglas R. Black 屬於 Grid Integration Group，針對 “Microsynchrophasers and Demonstration Program at the LBNL Campus 進行簡報。Black 提到了應用在微電網上之 micro-PMU 測量之控制技術。micro-PMU 是一個新的工具，由 LBNL 的 Power Standards Laboratory 所開發，為客戶提供即時可見度和配電線路之深度分析。它是利用帶有 GPS 接收器的 PQube 電力品質記錄儀，測量高度精確的時間標記和同步相量測。micro-PMU 每秒可產生 120 個幅值和相角的樣品。micro-PMU 準確性可較傳統 PMU 提升百倍。此一透過數據驅動的方法來監測和控制微電網中的分散資產之 micro-PMU 已成功部署在通過 ARPA-E 計畫微型同步相配電系統的 20 多個地點，LBNL 將引導 micro-PMU 部署。同時，非常廣泛的應用已在進行研究，包括：

1. 事件偵測和鑑定：識別干擾，如電壓暫降的識別或反向潮流，提供通知和診斷的起源；
2. 模型驗證和規劃支持：電路模型和實測量數據的協調；
3. 相位鑑別：利用相位角和時間序列相關性以確認 ABC 標籤；
4. 負載的動態行為特徵，分散式發電和系統的相互作用；
5. 狀態評估：整合  $\mu$  PMU 測量與 SCADA 系統及負載資料，在一個快速非線性方法以估計在無監測儀器點之狀態變數；
6. 電路拓樸偵測：藉由分析時間序列的向量量測資訊，藉以辨識電路拓樸的改變，例如：線路開關的啟閉；
7. 故障位置：使用高精度的相量測儀，評估儀器與故障位置之間的距離；
8. 分散式資源的控制。

Black 另外也提到 FLEXLAB，是世界上首次之試驗台，可以評估主要建築系統的能量效率，作為一個整合系統，在真實世界的條件下，利益相關者可以單獨評估建物能源效率技術或提前於建設計畫或改造施行前，因時間之關係並未深入說明。

Black 另外也提到 Vehicle-Grid (V2G)整合之價值，LBNL 執行 LA Air Force Base (LA AFB) V2G project，目的為：

1. 管理 42 車輛 PEV 車隊調度和充電
2. 保證足夠的電量，以滿足移動需求
3. 電動汽車充電下的成本最小化的時間表
4. 優化參與電網服務市場以創造收入
5. 確定 PEV 車隊的成本差距可以縮小的程度

Black 提到 V2G 的軟體技術也獲得 R&D 100 之獎項。

### 三、Google

Google 創立近 17 年，從搜索引擎開始，並逐漸衍生出多類型網路相關業務，且於收購 Nest 後，涉足智能家居服務相關主題。Google 雖未直接發展能源技術，但已投資上千億新台幣於再生能源領域，尤其著重太陽能與風能投資。Google 總部建築物符合 LEED 綠能建築規範，並裝設 1.9MW 太陽光電系統，Google 於南加州投資全球最大 ISEGS 太陽能發電廠，發電量約可供應 14 萬個家庭使用，相當於 30%美國太陽能發電總量。

參訪當天係由 Google 全球能源政策與策略部門之(Global Energy Policy and Strategy) Marsden Hanna 負責接待，當天主要就 Google 在台灣設置資料中心所需電能議題進行討論。由於台灣擬以具成本效益之方式，在避免增加納稅人與用電戶負擔的條件下，擴大國內再生能源規模。鑒此，Google 提出「再生能源採購」方案，提供我國參考。在這個「再生能源採購」方案的設計下，工商用戶可直接向特定新建之再生能源電廠採購具體的能源與環境屬性（environmental attributes）。此種購買方式，將其成本與效益附加於上述用戶之電費支出，有助於促進台灣再生能源的發展。

現行「綠電認購試辦計畫」係供消費者「認購」再生能源，進而達到消費者自願性補貼再生能源發展基金之目的。惟現行試辦計畫並未將特定再生能源電廠之經濟效果，與終端用戶之電費支出產生直接連結。此外，也未導入再生能源量測與驗證機制，以確實計算用電戶「綠色」能源足跡。然而，前兩項機制對於工商用戶採用再生能源，具有決定性的影響，也是「再生能源採購」方案不同之處。

Google 所提之再生能源採購機制目標如下：

- 透過消費者需求，促進台灣再生能源產業成長
- 建立市場導向承購機制（market-based offtake mechanism），將再生能源成本與效益附加於參與此項計畫之消費者，並避免增加納稅人或其他用電戶之負擔
- 提供工商用戶直接購買經量測與驗證之再生能源，以供電力需求

為將特定再生能源電廠之經濟效益反映至用戶電費支出，Google 建議以下方式擇一採行：

架構一：用戶直接向新建之再生能源電廠採購再生能源

- 承購用戶與再生能源電廠具直接財務關係，前者直接採購後者所產之能源與環境屬性；
- 台電透過其輸配電系統將電能提供承購用戶，並向承購用戶收取轉供之費用；
- 台電另向承購用戶收取「平衡能源」(balancing energy) 之費用，用於間歇性再生能源電廠未產生電力時，確保全時段穩定供電。

架構二：台電代收轉付模式

- 台電與用戶所選定之再生能源電廠簽訂契約，代用戶購買電能與環境屬性 (environmental attributes)
- 台電以每千度(MWh)為計算基礎將能源成本與環境屬性(environmental attributes)轉嫁該用戶
- 另以適用之再生能源費率計算用戶電費，確保用戶支出同時包含標準零售費率與再生能源之附加成本

另有關再生能源量測與驗證(M&V)機制方面，Google 建議：

- 計畫參與者應採國際認可之量測與驗證機制，以追蹤試辦計畫所產生之每千度(MWh)再生能源
- 如此可避免重複計算，使參與試辦計畫之用戶確保其所承購之能源確實為再生能源

針對 Google 所提建議，參訪團認為在現行電業法台電公司擁有全台之電業專營權下，用戶僅能向台電公司購電，因此，用戶直接向再生能源電廠採購再生能源，在現行電業法下並不可行；且用戶直接向新建之再生能源電廠採購再生能

源，並透過台電公司轉供，係屬於未來電業自由化之規劃方向，建議待修法後即可採用此一模式。

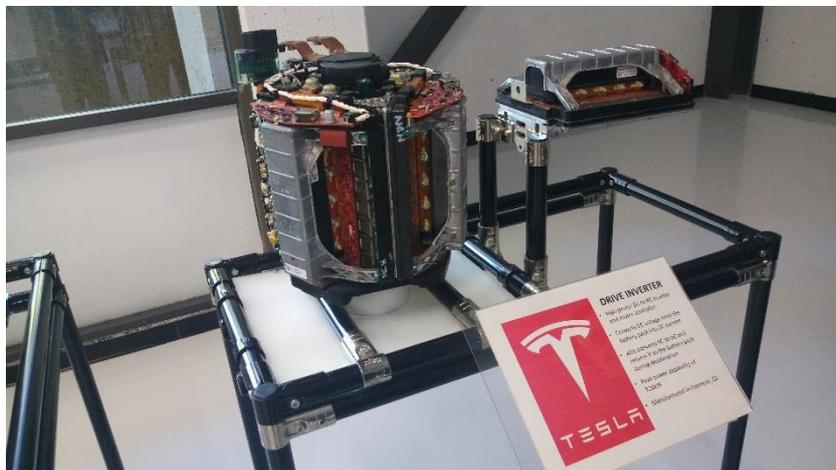
另就方案二部分，台電公司現行電費計收方式，係依據不同用戶類型(表燈、低壓電力、高壓及特高壓電力)，擬定電價表送主管機關核定後公告，以 Google 公司而言係以高壓及特高壓電力電價計收，尚無法就 Google 公司提供特殊的電費計收方式。

#### 四、Tesla Motor

3 月 23 日拜訪 Tesla，由在 Tesla 工作之台灣人游振彥先生負責導覽，在展示間可以看到 TESLA 汽車的重要次系統，包含底盤、INVERTER、照片 1 為 TESLA 汽車之底盤展示：



照片 1 為 TESLA 汽車之底盤



照片 2 為 TESLA 之 DRIVE INVERTER:

DRIVE INVERTER 包含：

- 1.大功率直流到交流的變頻器和電機控制器；
- 2.將電池組的 DC 電壓轉換成交流電流；

3.減速過程中可轉換 AC 到 DC 並將其返回電池組；

4.峰值功率能力 320kW。



照片 3 Tesla 充電器

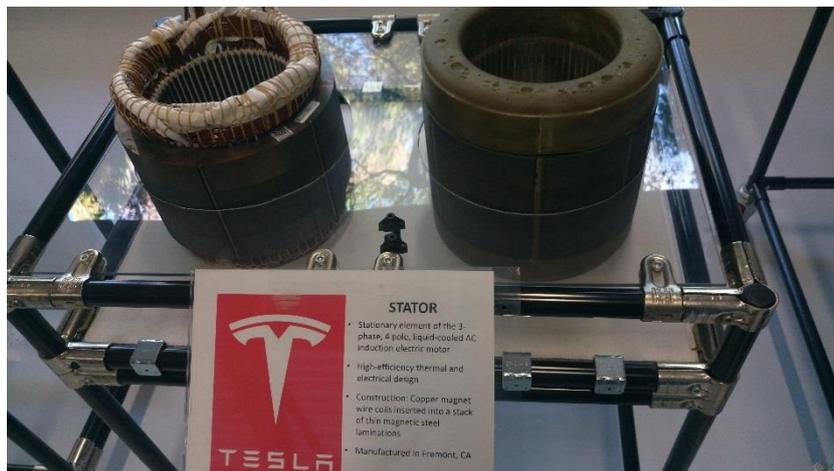
Tesla 之充電器：

1.可以把充電站的 AC 轉成 DC 電力儲存在電池組中；

2.Tesla 的家用充電器有兩部分：接頭 + 轉換器。第一部分是固定安裝在家裡的接頭，使用交流 240V，汲取 40A 或 80A，第二部分是安裝在車上的轉換器，主要是一組 DC 轉 AC 的轉換器。如果接頭可汲取 40A，大約是 10kW，每小時可跑 29 英哩，亦可以購買較大的接頭（原廠稱為 dual charger），汲取 80A 則充電一小時可跑 58 英哩。

3.TESLA 增壓器由充電器堆疊組成，可提供高達 120 瓩電力給汽車；

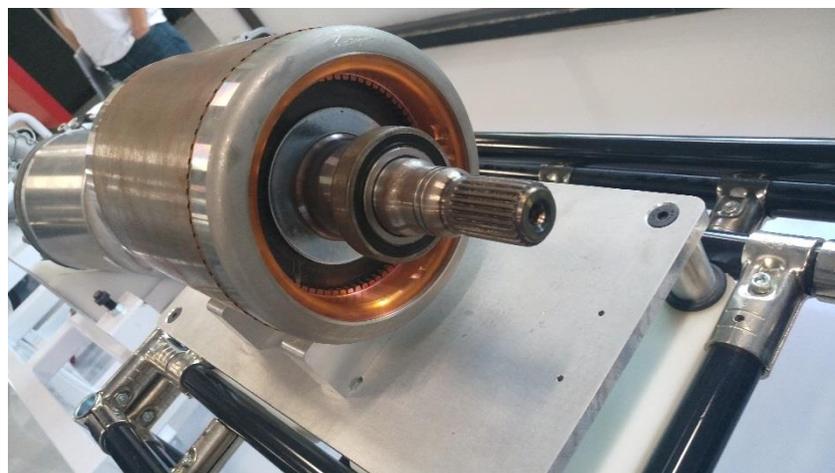
4.在短短的 20 分鐘內增壓器可提供一半的充電，在策略上佈署讓車主從充電站開到充電站間有最小的停站。



照片 4 Tesla 之定子

Tesla 之定子為：

- 1.3 相，4 極以液體冷卻之交流感應電動機的固定元件
- 2.高效率熱能及電力設計
- 3.構造為銅漆包線圈插入薄磁鋼層壓堆層



照片 5 Tesla 之轉子

Tesla 之轉子為：

- 1.3 相，4 極以液體冷卻之交流感應電動機的旋轉元件
- 2.從零轉速提供高達扭矩 600 N-m
- 3.16,000 rpm 最大軸旋轉速度

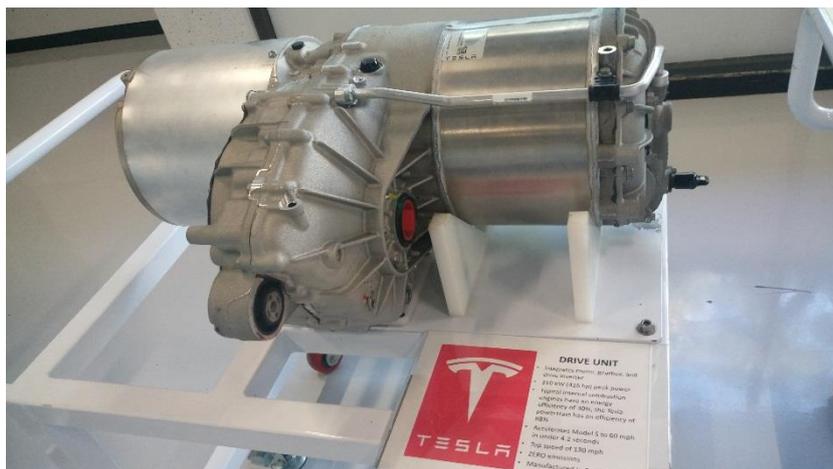
#### 4.不使用稀土金屬



照片 6 Tesla 齒輪箱

Tesla 之齒輪箱為：

- 1.單速，固定齒輪，開放式差速器橋
- 2.9.37:1 之減速比
- 3.3 軸承 4 齒輪型式



照片 6 Tesla 傳動單元

Tesla 之傳動單元為：

- 1.整合電機，齒輪箱和變頻驅動器
- 2.310kW 峰值功率
- 3.典型內燃機具有 30%的能量效率，特斯拉之傳動鏈具有 88%的能量效率
- 4.Model S 車款由零加速至 60mph 低於 4.2 秒
- 5.最高速可達 130mph

## 五、Stanford University，Central Energy Facility

史丹佛大學能源系統創新計畫（Stanford Energy System Innovations，SESI）係由史丹佛大學斥資 4 億 3 千 8 百萬美元所興建的校園能源轉換系統，在 2015 年 4 月完成後，新的熱回收系統相較既有的汽電共生系統效率提升 52%，且已超額完成加州政府所設定的 33% 強制性再生能源配比義務。另 SESI 也立即讓史丹佛大學的溫室氣體排放降低 50%，並節省 18% 的飲用水供應，更重要的事，在未來的 35 年間，將使史丹佛大學節省 3 億美元。本次參訪係由 Prof. Stagner（the Executive Director of Department of Sustainability and Energy Management）負責接待，並就史丹佛大學的 Central Energy Facility 進行詳細的介紹。

整個 SESI 的核心在於熱能回收，透過校園內冷卻系統的廢熱回收，以製造熱水作為校園內熱水供應系統之主要來源，目前冷卻系統所產生的廢熱大約有 70% 會被重新回收使用。整個 SESI 中主要包括下列幾項工程：

- 以熱回收系統為特色的中央能源設施；
- 拆除既有的汽電共生系統；
- 裝設 20 哩長的熱水配送管道；
- 將 155 棟建築之連結由蒸氣轉換為熱水系統；
- 新的校園高壓變電所。

圖 1 為 SESI 能源設施 3D 示意圖。

SESI Central Energy Facility 3D Process Schematic

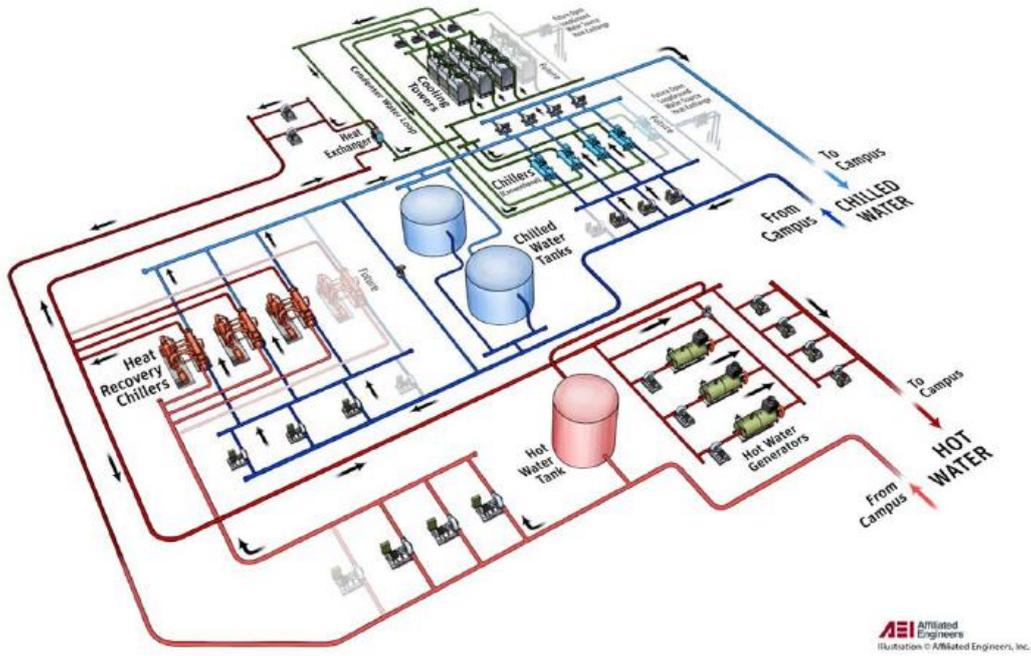


圖 1 SESI 能源設施 3D 示意圖

SESI 包含許多來自北美與歐洲有關區域能源系統之關鍵技術，同時藉由新的軟體與服務功能的開發，提升整體能源與經濟效益。在有關提升能源效率部分，SESI 主要的能源效率提升效益來自於大量的廢熱利用，透過由熱水取代蒸氣的方式，降低配送系統的熱損耗。

## SESI Heat Recovery with Hot Water System Energy Schematic

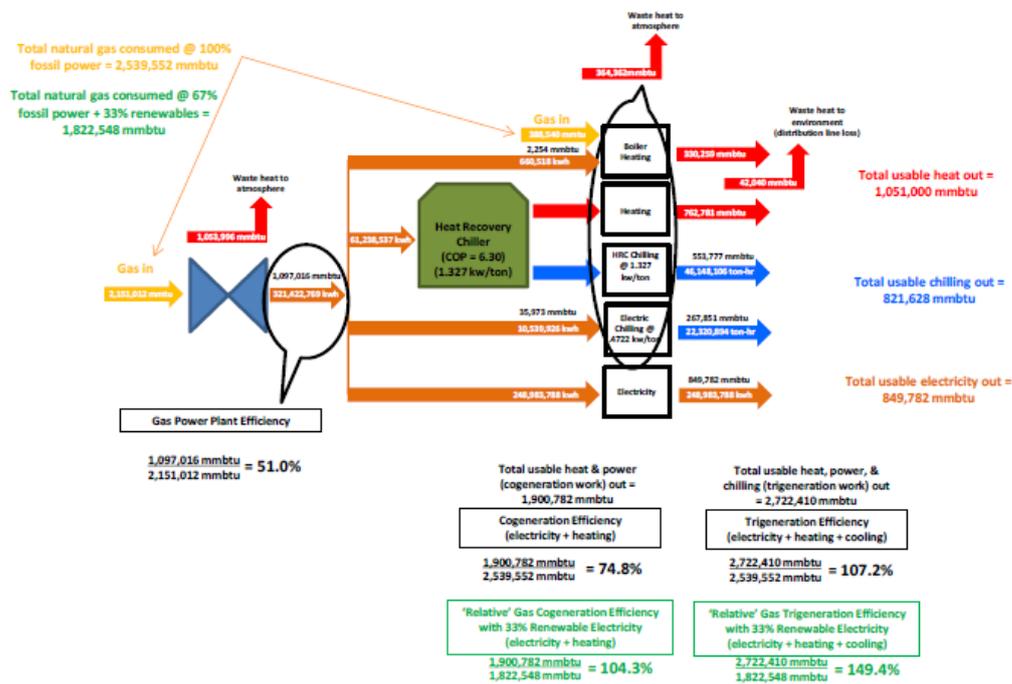


圖 2 Sesi 熱回收系統示意圖

整體而言，SESI 主要創新與效益來自下列幾項：

- 使校園能源需求減半
  - 熱回收系統
  - 冷能儲存由冰轉換為冷水
  - 熱配送系統由蒸氣轉換為熱水及增加熱能儲存
  - 減少 50% 的能源需求，相當於減少 50% 的溫室氣體排放
  - 在能源生產方面減少 70% 的用水量，相當於使整個校園減少 15% 的用水量
- 由汽電共生轉換為再生能源發電
  - 增加 53% 的再生能源發電，相當於減少 25% 的溫室氣體排放
  - 超過州政府要求的 33% 再生能源配比義務

- 簽訂長期太陽光電合約
- 保留未來引進新發電技術之彈性
- 先進能源系統之模組、設計以及運轉
- 在 2 年半之內完成整個校園的能源轉換工作

## 六、PG&E Test Field

PG&E 為加州三大綜合公用事業之一，服務區域位於加州中北部，在加州電業自由化過程售出大部分的發電廠，僅保留 6.8GW 的發電容量，目前的營業項目以輸配電與售電為主，輸電線路長度約為 18,600 英哩，配電線路長度約為 120,000 英哩，擁有 550 萬電力用戶與 400 萬瓦斯用戶，受加州電力管制機構 CPUC (California Public Utility Commission) 監督。

此行參訪 San Ramon Technology Center，該中心的組織定位類似台電的綜合研究所，具備高壓/大電流設備測試能量，進行智慧電表、儲能系統、輸配電控制、太陽光電變流器…等項目的測試研究。為了配合測試重電設備測試及輸變電控制技術研究，該中心以 230kV 高壓線路供電，重電設備的測試能力為 400kV/60,000Amp。



圖 3 重電設備測試實驗室外觀及內部

加州政府在法規中納入提高能源效率、設置再生能源與儲能系統，為了建立技術應用的規範準則，並協助產業界進行產品測試驗證，San Ramon 研究中心建立測試家電設備效率的恆溫恆溼室與量測系統、太陽光電變流器及儲能裝置的效能測試系統與測試方法。1MW 以下的太陽光電變流器常在該中心進行測試，州政府要求 PG&E 於 2020 年之前安裝 500MW 的儲能系統，不同類型的儲能也在該中心分別測試中。

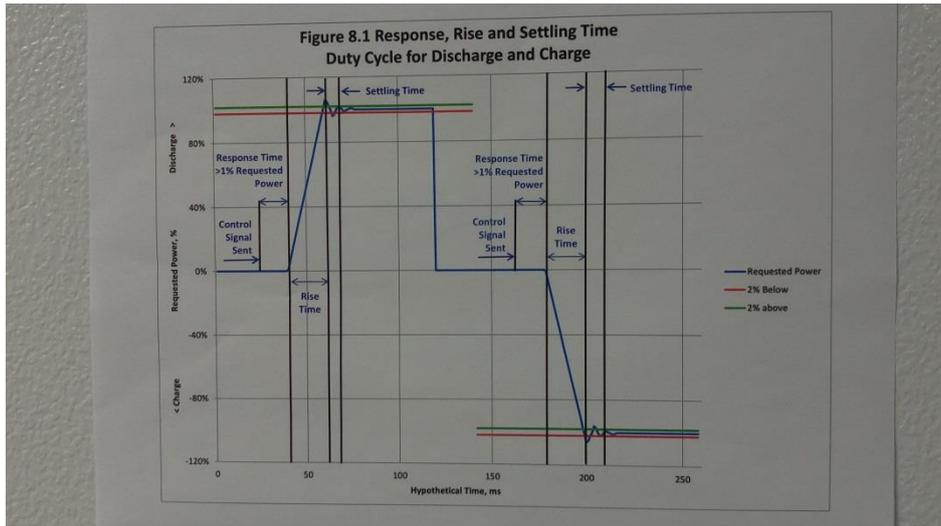


圖 4 儲能系統測試要求

配電自動化系統控制是 San Ramon 研究中心的研究重點之一，為了促成再生能源(特別是太陽光電)在配電系統的導入，Volt-VAR Optimization (VVO)為近年重要主題，運用可調壓的配電變壓器(LTC transformer)、饋線上的調壓器、電容等裝置、感測器與軟體系統，能夠適當的控制饋線電壓分布，使再生能源與負載變化對饋線電壓的影響始終維持在可接受範圍，甚至進行節能調壓控制(Conservation Voltage Reduction, CVR)，在尖峰時段達成 1~2% 節能控制。



圖 5 配電設備與系統控制技術測試場域

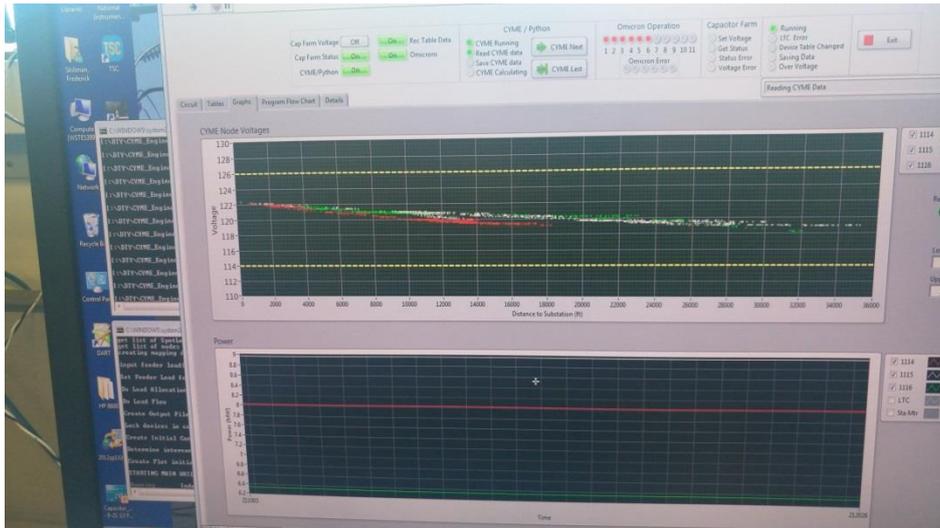


圖 6 饋線電壓監控軟體介面

PG&E 已完成智慧電表系統布建，其經驗可供我國參考，PG&E 的電表與通訊模組測試亦在 San Ramon 進行。PG&E 早期布建智慧電表時採用 PLC 通訊，初期的通訊效能可滿足需求，但是電表數擴增到 50 萬戶時，PG&E 發現系統難以繼續擴充，最後決定更換通訊技術，將已安裝的 PLC 電表全數收回。

目前 PG&E 智慧電表採用 Silver Spring Networks 的通訊系統，通訊模組(NIC, Network Interface Card)上有兩個通訊單元：一個使用 2.4GHz 頻段(ZigBee)，作為電表向用戶傳送資料的介面；另一個使用 900MHz 頻段，作為電表向電力公司傳送資料的介面。

Silver Spring Networks 的通訊模組支援 IPv6，因此 mesh 網路運作相當順利，使得單一集中器能夠收集更多電表的資料。通訊堆疊設計的最大通訊轉接數(hop count)是 16，在 PG&E 實測中，只要 hop count 不超過 9 就可以保持順暢的通訊，在資料流率(data throughput)的效能測試中，hop count 1 與 9 的差異大約僅 5~10%，當負載資料大小(payload size)為 100 bytes 時，下行(down-link)資料流率約為 13 kbps，上行(up-link)資料流率約為 15 kbps；負載資料大小(payload size)為 1400 bytes 時，下行資料流率約為 30 kbps，上行資料流率約為 33 kbps，但是該測試並未說明其網路規模。運用電表之間的 mesh 網路，Silver Spring Networks 宣稱一個集中器最多可以收集 3500 具電表的資料，而 PG&E 採用動態 mesh 網路，使得一個集中器最多收集到 9000 具電表的資料。集中器與 NIC 之間的直線通訊距離約為 3

英哩，而電表(NIC)之間的直線通訊距離約為 0.25 英哩。集中器的上行通訊介面包含手機網路以及一個乙太網路埠。

對於住宅用戶，PG&E 的電表資料蒐集間隔為 1 小時；對大用戶則為 15 分鐘，電表每隔 4 小時向資料中心傳送一次資料。該集中器也用於收集輸配電線路感測器以及太陽光電智慧變流器的資訊。PG&E 大約花了 5 年的時間完成 550 萬具智慧電表布建，目前運行相當順利。San Ramon 研究人員表示：PG&E 採購 NIC 的單價為 35 美元，若採購數量較少時，NIC 單價可能高達 100 美元。

NIC 的 NAN 網路可採用 902~922MHz 或 2400~2483.5MHz (皆為公用頻段)，理論資料率為 6.25kbps~2.4Mbps，展頻技術為 FHSS，最大輸出功率為 1W；HAN 網路採用 2400~2483.5MHz 頻段，套用 ZigBee Smart Energy Profile 1.1，輸出功率為 10~200mW。

由 Silver Spring Networks 的網站得知 NIC 對電表的介面選擇包含 ANSI C12.18/19 與 DLMS-COSEM，採用標準應用層協定對於電表與通訊模組的互運性有很大的幫助。



圖 7 San Ramon 研究中心測試中的智慧電表



圖 8 PG&E 智慧電表系統所使用的通訊集中器



圖 9 PG&E 的智慧變流器直接利用智慧電表的通訊系統

## 七、SMUD(Sacramento Municipal Utility District)

SMUD 為加州第二大之市營非營利公用事業，轄區內人口數目前計有 146 萬人，年營收約為 14.7 億美元；系統尖峰負載約為 3.3GW（下午六點），員工數約為 2,600 人。

SMUD 在過去推動 Smart Sacramento Project，其中包括裝設 AMI、推動配電自動化、電動車充電站、時間電價、需量反應方案等，以下茲分別說明之。

### （一）通訊基礎設施

在 SMUD 區域內無線網路之布建可提供智慧電表、用戶裝置及配電自動化設備之雙向通訊功能；電表資料管理及分析平台之建置也使得 AMI 資料可以擷取至其他商業系統中。整個系統之建置可提升配電系統運轉效能，並提高整體網路系統之可靠度。

### （二）智慧電表基礎設施

在 SMUD 區域內裝設約 620,000 個智慧電表，並提供自動讀表功能，提高帳單之準確性，同時也提高停電管理之能力，並強化竊電之偵測。整個 AMI 資料並有助於負載預測及設備投資規劃。

### （三）時間電價計畫

在 SMUD 區域內提供之費率方案包括時間電價、緊急尖峰定價（critical peak pricing）以及時間電價結合緊急尖峰定價等方案。選定之用戶可選擇參與新費率方案，或選擇停留在原電費方案之中。新費率方案推行的目的在於瞭解方案對用戶負載之影響、用戶接受度及方案之成本效益等，透過新費率方案之實施，可使用戶有更多機會管理其電能使用，並降低整體尖峰負載。

### （四）用戶電能管理計畫

本計畫之主要目的在於透過網路平台與工具，提供用戶更多資訊以及進行能源管理之機會。SMUD 在住宅及小型商業用戶中共裝設近 10,000 個家用區域網

路設備，提供用戶可更便利管理其電能使用之機會；此外，該計畫亦提供能源管理控制系統，使用戶具有參與自動需量反應計畫之能量。

#### （五）直接負載控制設備

SMUD 於區域內推動可通訊恆溫器及負載控制設備，可使用戶於系統尖峰時進行負載削減或負載移轉。參加的用戶允許 SMUD 在特定尖峰時間控制其用電設備，同時提供相當的回饋予用戶。

#### （六）配電自動化系統

SMUD 於區域內的 171 配電迴路中裝設相關之配電自動化設備，可自動進行解聯與卸載。SMUD 已經有效降低停電之頻率與時間，並有效的調度相關修復人員。

#### （七）配電系統能源效率改善

透過電容控制器以及能源管理系統進行綜合電壓控制，並進而提升配電系統能源效率。電容器可提升功率因素控制以及電力品質，同時配電能力也將因配電系統線損降低而獲得改善。

#### （八）插電式電動和混合動力電動汽車充電站

SMUD 已經在 20 所學院以及 60 個社區停車場，設置插電式電動和混合動力電動汽車充電站。在充電站中並裝設讀表及監控系統，以評估其效能以及對配電系統的衝擊。

## 八、CEC(California Energy Commission)

加州能源委員會主要負責有關加州之能源政策與規劃。CEC 七大核心主軸包含：

- Forecasting future energy needs (能源需求預測)
- Promoting energy efficiency and conservation by setting the state's appliance and building energy efficiency standards (設定家電及建築能效標準，進行效率及節能推廣)
- Supporting energy research that advances energy science and technology through research, development and demonstration projects (能源技術研發)
- Developing renewable energy resources (再生能源發展)
- Advancing alternative and renewable transportation fuels and technologies (發展運輸替代能源技術)
- Certifying thermal power plants 50 megawatts and larger (50MW 以上火力電廠認證)
- Planning for and directing state response to energy emergencies (緊急能源調度及規劃)

參訪當天係由加州能源委員會官員介紹加州再生能源及潔淨能源相關政策推動作為，以下茲分別說明之。

### (一) 加州再生能源政策

依據 AB32 法案，加州在 2020 年之前，溫室氣體排放應回到 1990 年之水準，在 2050 年之前應低於 1990 年排放水準之 20%。為達到前述目標，加州政府乃大力推動再生能源發展，依據加州政府目前規定，在 2020 年之前，再生能源占比要達到 33%，2024 年前要達到 40%，2027 年之前要達到 45%，而最後到 2030 年再生能源占比要達到 50%。此外，在 2016 年之前，應新增 3000MW 的太陽光

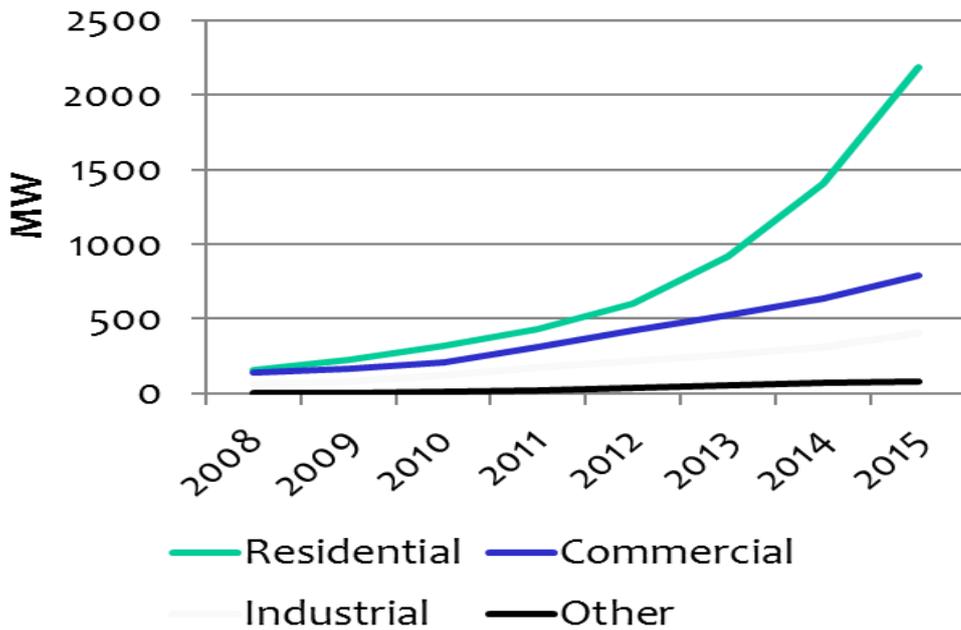
電發電系統；在 2020 年之前要有 8000MW 的大規模再生能源系統以及 12000MW 的小規模再生能源發電系統。

在前述的各項目標之下，加州政府也同步推出多項方案：

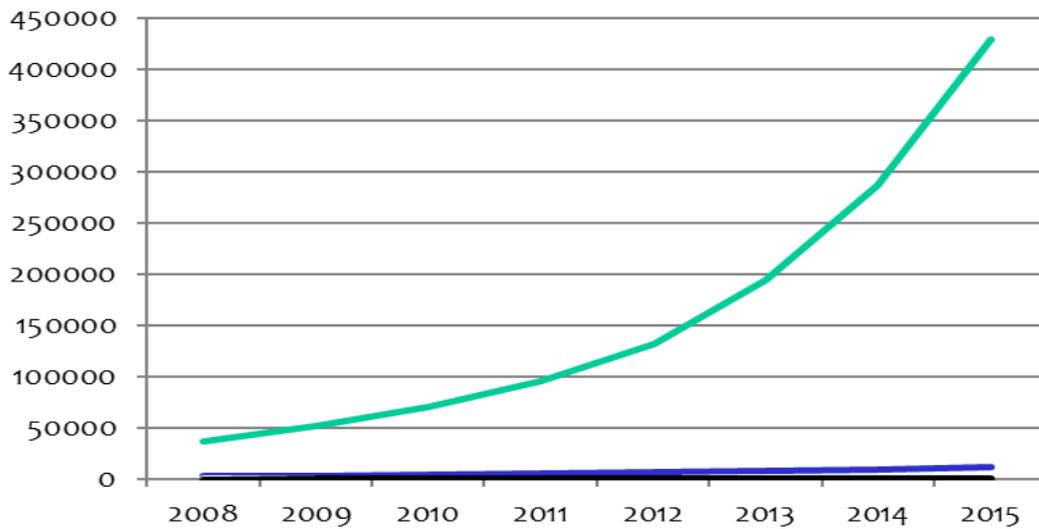
- 沙漠地區再生能源保留計畫 (Desert Renewable Energy Conservation Plan)：選定適合再生能源發展地區，在 DRECP 地區保留 22.5 百萬英畝作為發展再生能源之用。
- 再生能源輸電倡議 (Renewable Energy Transmission Initiative)：檢討加州輸電力統規劃，以納入偏僻地區之再生能源資源。
- 新建住宅太陽光電計畫 (New Solar Homes Partnership)：編列 4 億美元補貼新建住宅裝設太陽光電系統，目標為 360MW。
- 再生能源配比標準 (Renewable Portfolio Standard)：在 2020 年之前，零售電力中有 33% 必須來自再生能源；到 2030 年提升到 50%。
- 淨能源計量 (Net Energy Metering)：當用戶將所發電力饋回電網系統時，電力公司支付給用戶的報酬與電力零售價格相同，並可在該月份電費中直接做抵銷。加州的一個 NEM 週期 (True-Up) 為 12 個月，在週期間，用戶使用電網電力 (del) 與饋回電網的電力 (rec) 可相互抵消。

截至 2015 年底，總共有超過 440,000 用戶申請 NEM，總計裝置容量將近 3,450MW；其中住宅用戶之戶數佔比為 97%，裝置容量佔比則為 63%；商業用戶之戶數佔比約為 3%，裝置容量佔比則為 23%，工業及其他類型用戶申請戶數佔比則不到 1%。

## Cumulative Interconnected MW

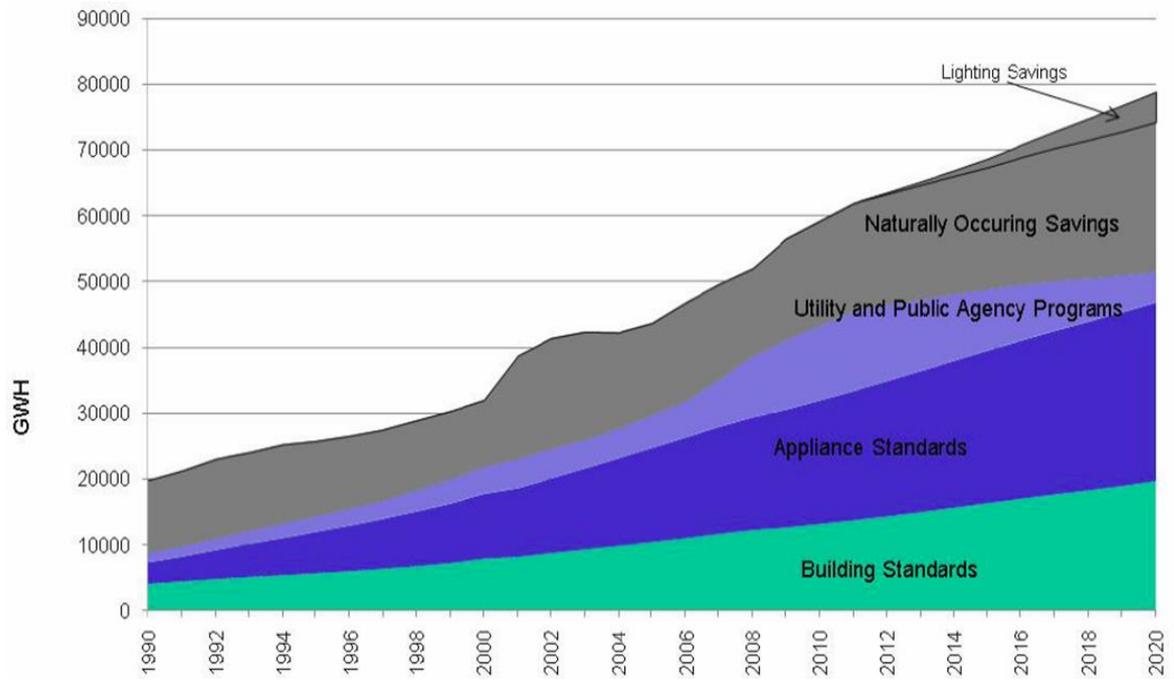


## Cumulative # of Interconnections



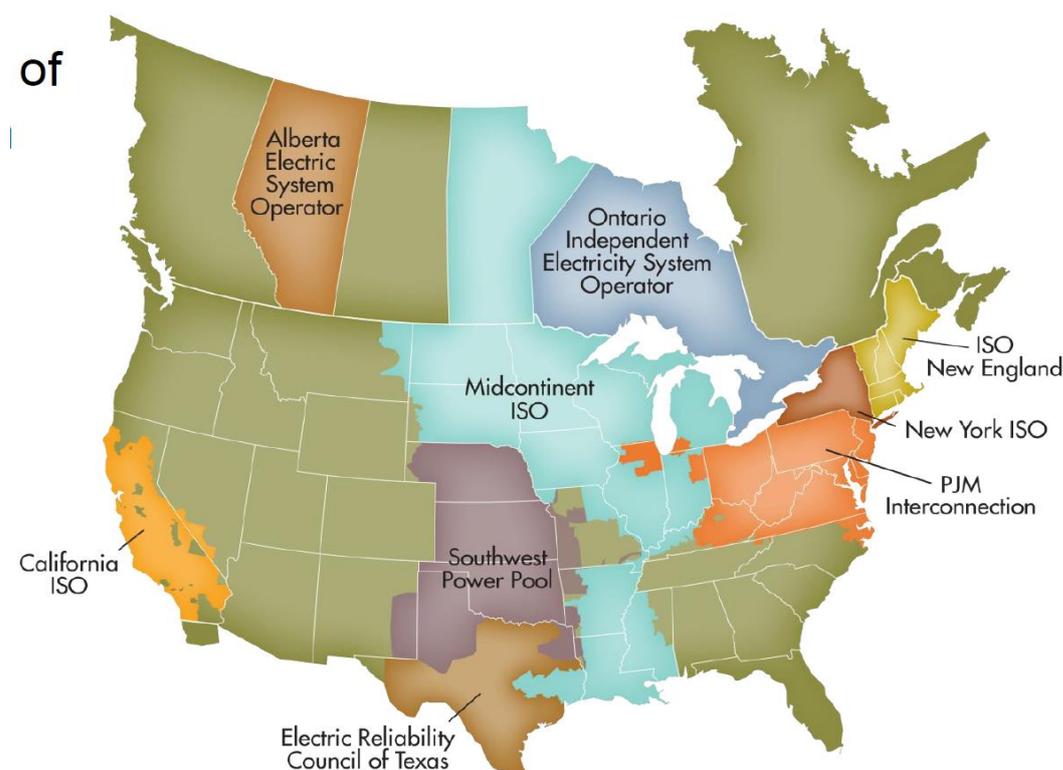
另加州在 2015 年通過 SB350 法案，除要求在 2030 年之前能源效率加倍提升外，並計畫在 2030 年之前將再生能源占比提高至 50%。下圖為美國各州推動再生能源配比政策之情況，目前共有 29 州推行再生能源配比計畫，其中加州所設定的配比目標相對而言屬於較為積極的地區。





## 九、CAISO (California Independent System Operator)

CAISO (California Independent System Operator)主要係負責加州地區高壓輸電網路之運作，並負責管理躉售電力市場及提供電力系統之可靠度規劃等相關工作。CAISO 為北美九大獨立系統操作者之一，在美國有三分之二以上的地區都屬於 ISO 負責區域。

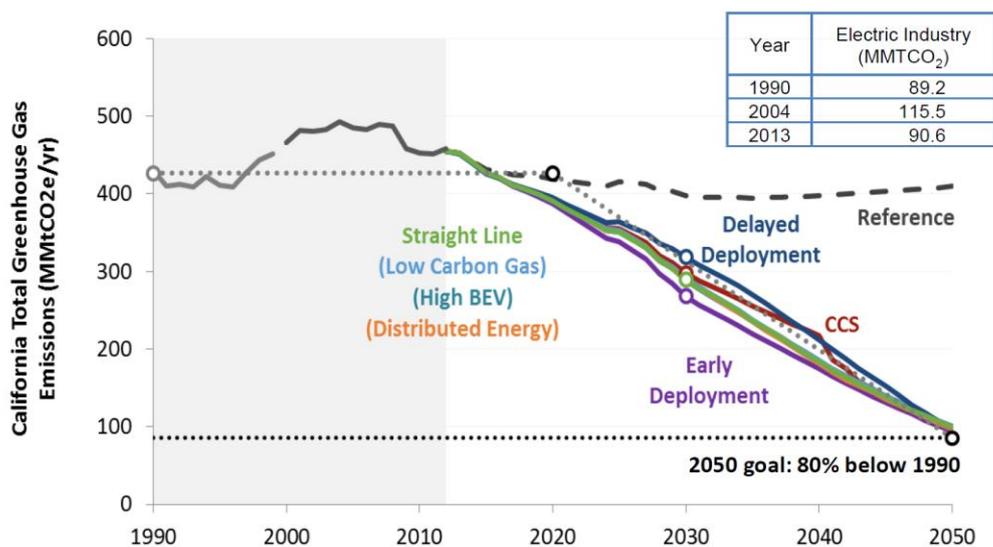


CAISO 為獨立之非營利組織，目前區域內之發電裝置容量為 66,000 MW，系統歷史尖峰為 50,270 MW (July 24, 2006)，輸電迴路長度約為 26,014 英哩。

CAISO 的三個主要功能在於躉售市場、維持系統可靠度及基礎設施規劃。在市場部分，主要包含二個日前市場（Integrated Forward Market、Residual Unit Commitment）及三個即時市場（Hour-Ahead Scheduling Process、Real-Time Unit Commitment、Real-Time Dispatches）。

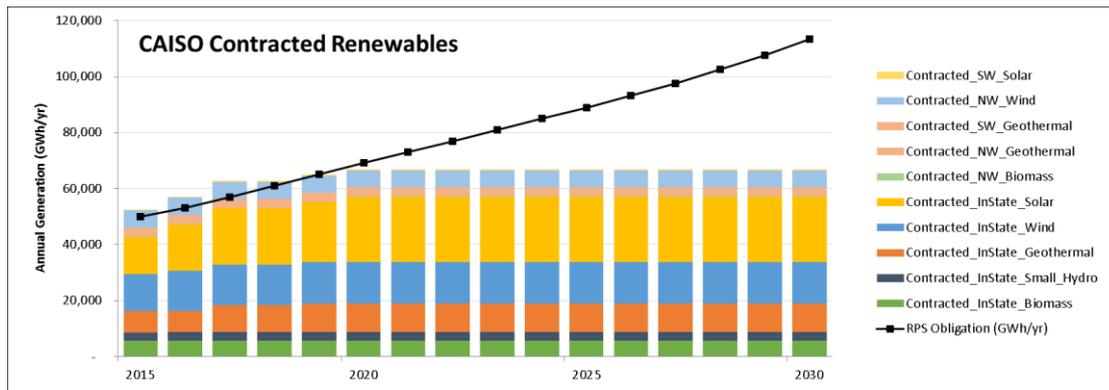
目前加州主要面臨高再生能源佔比下，如何將再生能源整合之問題，以下茲就目前的發展進行介紹。

由於加州預計在 2020 年之前，溫室氣體排放應回到 1990 年之水準，在 2050 年之前應較 1990 年排放水準降低 80%，透過下圖的模擬可明確的看出，在 2020 年之後，溫室氣體排放係呈現直線下降的趨勢，這表示必須搭配多項減碳政策，特別是再生能源的發展。

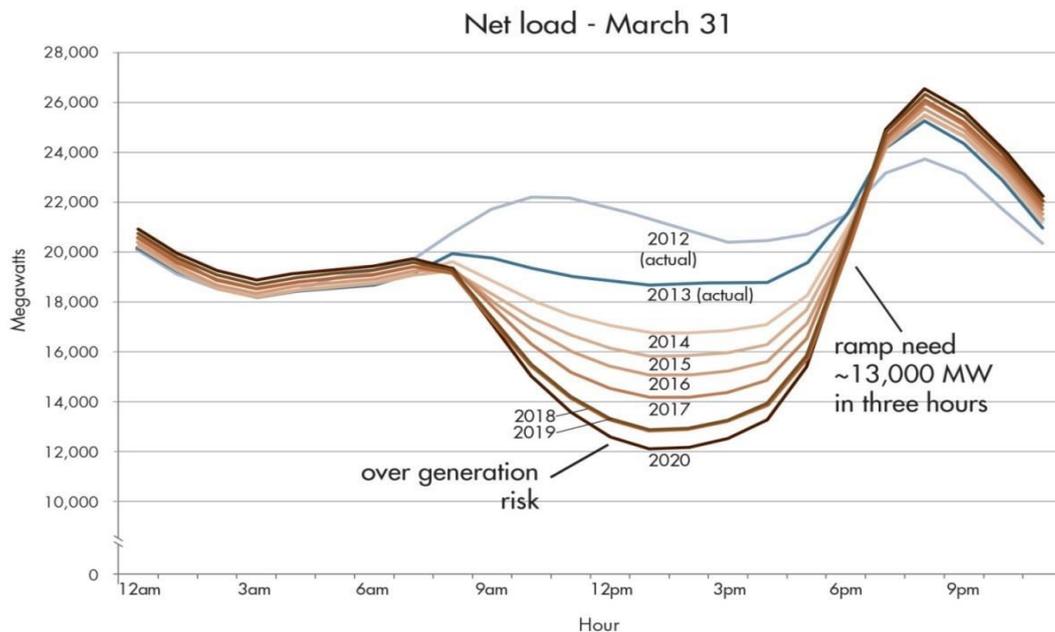


由於加州訂有再生能源配比義務，售電業者必須保證其售電量中之一定比例來自於再生能源發電，因此售電業者必須與再生能源發電業者簽訂購電合約，並在 CAISO 之電能市場中以低價投標，以確保能符合其再生能源配比義務。

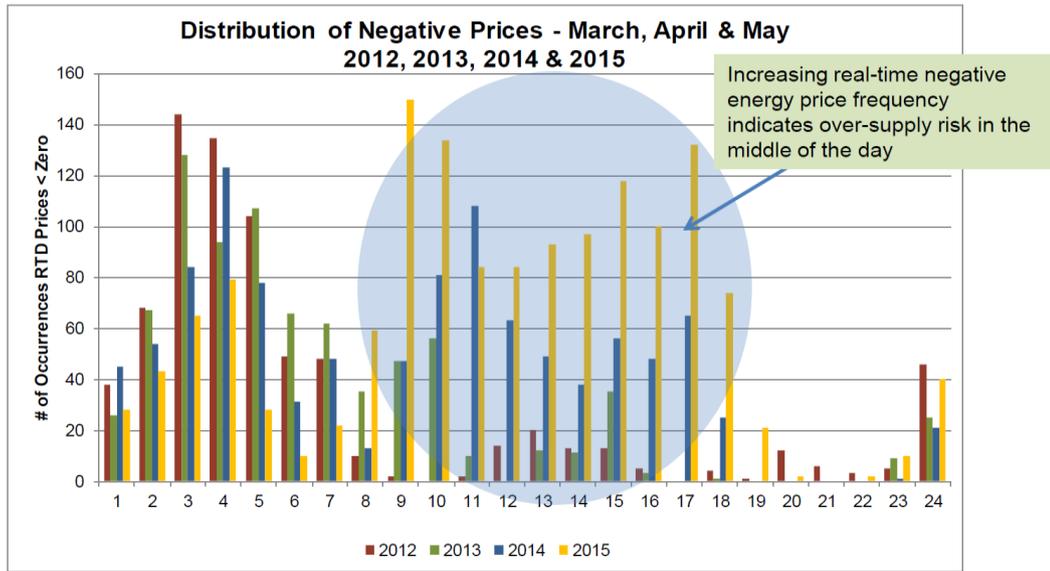
從下圖可以看出，由於到 2030 年再生能源配比義務提高到 50%，為達到該義務所需之再生能源發電量快速增加，以目前簽約之再生能源數量仍遠低於 2030 年之目標，換言之，在未來將有大量再生能源發電將投入 CAISO 之電能市場中。預計到 2030 年將有 14.6GW 的分散式太陽光電力系統。



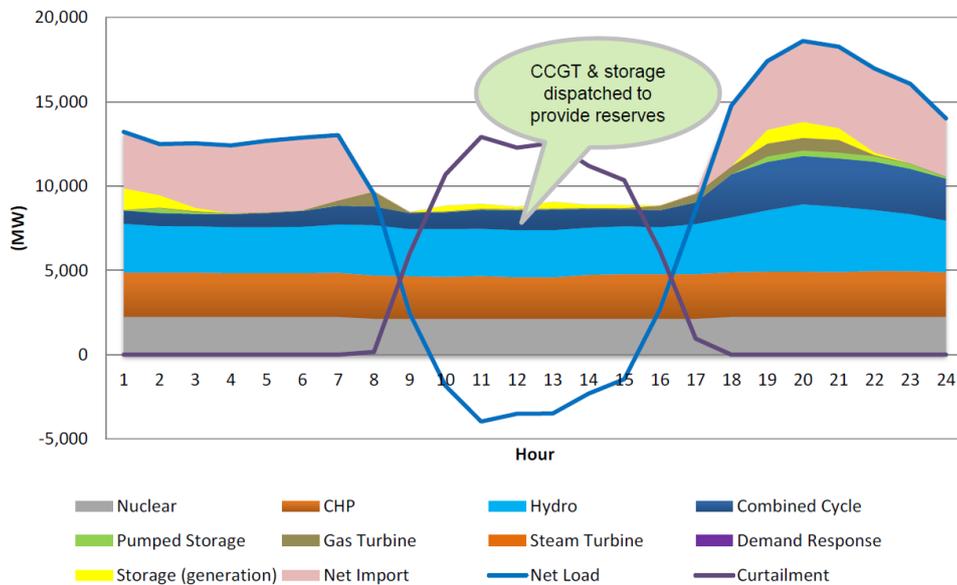
下圖為 CAISO 著名的鴨子曲線，由於再生能源將陸續併入電網中，扣除風力及太陽光電後之淨負載將持續降低，且在系統必須維持固定容量之強制運行機組（must run），將導致在從 2020 年之後出現過多電源之風險。



且由於供給過剩問題持續增加，在電力系統中出現負電價之頻率將逐漸提高，從下圖可以發現，由於太陽光電系統快速增加，2014 年、2015 年開始在白天出現負電價之頻率大幅增加。



另根據 CAISO 之模擬，在 2024 年白天時段之淨負載甚至為負值，此時除進行電源削減之外，也必須搭配儲能設備來協助維持電力系統之平衡。



而為了使再生能源可整合進電力系統中，CAISO 目前提出下列各種解決方案，包括推動時間電價、需量反應方案、儲能系統等。

Category	Integration Solution	Findings
Net benefits even without renewable	<ul style="list-style-type: none"> <li>Regional coordination</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>More efficient dispatch and reduced renewable curtailment</li> </ul>
Low cost solutions with potentially large benefits	<ul style="list-style-type: none"> <li>Time of use retail rates</li> <li>Sub-hourly renewable dispatch</li> <li>Renewable portfolio diversity</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Shifts energy consumption toward daylight hours</li> <li>Allows system to operate with fewer thermal resources during over-supply events</li> <li>Avoids curtailment by spreading renewable production over more hours of the year</li> </ul>
Costs and benefits should be evaluated on specific project or program basis	<ul style="list-style-type: none"> <li>Flexible loads and advanced DR</li> <li>Additional storage</li> <li>Gas retrofits</li> <li>New flexible gas resources</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Shifts energy consumption toward hours with over-supply, but cost and potential are unknown</li> <li>Reduces curtailment but requires significant investment</li> <li>Makes existing resources more flexible at a low cost</li> <li>Provides limited dispatch flexibility at a high cost</li> </ul>
Valuable, though not as much for integration	<ul style="list-style-type: none"> <li>Energy efficiency</li> <li>Conventional demand response</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Provides significant cost and GHG savings but may not reduce curtailment</li> <li>Provides cost savings but does not significantly reduce curtailment</li> </ul>

Solutions with the highest identified renewable integration value



## 肆、心得與建議

本次加州能源參訪主要集中在電力市場改革、智慧電網發展以及再生能源推動等方面，針對各單位訪談結果，茲提出以下幾項心得與建議：

- EPRI 所發展的政策評估工具 US-REGEN 是一個由下而上的工具，不但考量經濟的影響，也考量電網模型中輸電線路的瓶頸，貼近實際情況，所呈現的結果更具備量化參考價值。
- 我國太陽光電系統多數併接於配電線路，未來大量太陽光電導入時，饋線電力品質與系統穩定性將面臨嚴苛的考驗，因此，VVO 或類似的研究對於我國電力系統的發展相當重要。我國配電變壓器的電壓調節多為機械開關，其控制不易自動化，而主變壓器下的所有饋線接受相同的調節，因此無法兼顧不同饋線的操作狀況與調節需求。饋線電壓調節裝置、饋線之間的實虛功橋接以及系統即時分析控制等技術有助於我國電網未來的穩定運作，也是電機資訊產業發展的新機會。
- PG&E 的智慧電表系統已完成布建，由於台灣的系統需求與用戶環境不同，該公司所選擇的通訊技術未必適合我國，惟該公司的經驗有三點值得我國借鏡。一是通訊系統的選擇必須謹慎，以免造成大規模回收智慧電表的窘境，如何在中小規模的測試中評估大規模布建時的通訊系統效能是重要課題，而長距離無線(如手機通訊)、RF mesh、RF 星狀網路、PLC…等技術的特性並不相同，異質技術的效能評比測試環境仍待建立。二是對用戶的通訊介面，綜觀各國智慧電表建置，早期的智慧電表只考慮與資料中心之間的雙向通訊，僅少數測試案包含家庭能源顯示器(In Home Display, IHD)，即電表須建立對家庭的通訊介面。近年來，法國、日本的智慧電表規範均要求智慧電表必須建立第二個通訊介面，以便將耗能資料傳送給用戶，法國的智慧電表甚至具備負載直接控制的能力。PG&E 的智慧電表也包含對用戶通訊的介面，使其智慧電表系統應用更具彈性。三是通訊模組與電表之間的介面規格，日本採用的是 DLMS/COSEM，PG&E 採用的是 ANCI C12.22，採用標準應用層協定

作為通訊模組與電表主控制板的介面，可使電表成為通用裝置，與通訊系統之選擇無關，可降低電力公司日後的維運成本。

- 電力市場改革推動必須注意推動方式以及成本效益，一般而言，越複雜的市場設計所需投入的成本越高，且需要有豐富的操作運轉經驗。對我國而言，未來在推動電力市場改革時，宜以循序漸進方式推動，除可於過程中學習更多經驗之外，並可避免因設計不良產生嚴重之衝擊。
- 大規模再生能源併網時將衍生許多過去不曾發生的問題。以加州而言，隨著再生能源推動速度的加快，在未來幾年間對於電力系統將產生許多風險，特別是在白天時期將出現電力過剩的問題，此與早期電力系統於白天面臨電力短缺之現象截然不同。我國應持續關注未來發展趨勢，及早蒐集相關解決因應之道。
- 因應再生能源大量發展，如何強化系統的應變彈性已成為加州的當務之急，包括電動車及儲能電池的運用、需量反應方案的發展、輸配電系統的智慧化趨勢等，我國亦應持續關注相關發展。