

出國報告（出國類別：開會）

參加美國電力研究院（EPRI）2024年 夏季研討會並順道拜訪電力研究部門

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：鍾年勉 綜合研究所所長

黃 鐘 綜合研究所地質資深研究專員

呂天桂 系統規劃處幹線規劃組主管

蔡佳林 電源開發處火力電源組主管

派赴國家/地區：美國

出國期間：113年8月10日至113年8月17日

報告日期：113年10月4日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：

參加美國電力研究院（EPRI）2024 年夏季研討會並順道拜訪電力研究部門

頁數 52 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：

台灣電力公司/人力資源處/翁玉靜/(02)2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

鍾年勉/台灣電力公司/綜合研究所/所長/(02)2360-1001

黃 鐘/台灣電力公司/綜合研究所/地質資深研究專員/(02)2360-1174

呂天桂/台灣電力公司/系統規劃處/幹線規劃組主管/(02)2366-6913

蔡佳林/台灣電力公司/電源開發處/火力電源組主管/(02)2366-6866

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 開會 6 其他

出國期間：113 年 8 月 10 日 至 113 年 8 月 17 日

派赴國家/地區：美國/科羅拉多州韋爾、北卡羅萊納州夏洛特

報告日期：113 年 10 月 11 日

關鍵詞：美國電力研究院（EPRI）、能源轉型、電網韌性、低碳能源

內容摘要：(二百至三百字)

- (一) 美國電力研究院（EPRI）為世界知名之電力研究機構，提供各會員電業領域的研究成果。EPRI 每年定期舉辦夏季研討會，邀請特定對象之電力機構最高階主管，藉由參加本屆夏季研討會，與各國電業高階主管交換相關營運經驗，以推動本公司相關營運政策。
- (二) 為參與研討電力產業面臨之挑戰與因應策略，本公司由綜合研究所鍾所長年勉率團參加 EPRI 2024 年 8 月 10 至 13 日於科羅拉多州多韋爾舉辦之 2024 夏季研討會，會議主題為「縮減技術差距」。
- (三) 本公司與 EPRI 之低碳資源倡議（LCRI）目前共同推動能源樞紐等計畫，因此於 14-15 日順道至夏洛特辦公室參訪，與該院輸配電研發團隊、LCRI 以及發電技術研發團隊交換意見，同時亦參訪該院輸配電實驗室。

本文電子檔已傳至公務出國報告資訊網

(<https://report.nat.gov.tw/reportwork>)

目錄

一、 出國任務與行程	2
二、 EPRI 夏季研討會.....	3
三、 參訪美國 EPRI 夏洛特辦公室	29
四、 心得與建議.....	50

一、出國任務與行程

- (一) 美國電力研究院 (Electric Power Research Institute, EPRI) 為世界知名之電力研究機構，提供各會員電業領域的研究成果。EPRI 每年定期舉辦夏季研討會，邀請特定對象之電力機構最高階主管，藉由參加本屆 EPRI 夏季研討會，可與各國電業高階主管交換相關營運經驗，並探討如何透過互聯的智能技術達成企業快速轉型，以推動本公司相關營運政策。
- (二) 為參與研討電力產業面臨之挑戰與因應策略，本公司由綜合研究所所鍾所長年勉率團參加 EPRI 2024 年 8 月 10 至 12 日於科羅拉多州韋爾 Grand Hyatt Hotel 舉辦的 2024 夏季研討會，會議主題為「縮減技術差距」(Shrinking Technology Gaps)。同時，本代表團並與 EPRI 主管電網與能源系統整合事業副總 Daniel Brooks 先生會面，就本公司電網穩定研發方向與未來合作規劃進行意見交流。
- (三) 配合政府 2050 淨零減排目標，本公司今年起參加 EPRI 之低碳資源倡議 (Low-Carbon Resources Initiative, LCRI)，並就能源樞紐 (Energy Hub)、淨零策略、以及碳捕集與封存等技術進行落實於本公司之規劃進行研究，因此，於 8 月 13 至 14 日前往 EPRI 夏洛特辦公室，討論本公司的執行現況與交換意見，並與 LCRI 團隊討論能源樞紐計畫之推動進度事宜；另與輸電、配電和資訊科技 (TDI) 部門團隊會面，交流輸電及變電系統資產管理及運維等議題，同時亦與 EPRI 的發電研發部門就數位孿生 (Digital twin) 研發方向進行意見交流。

表 1-1 出國行程簡述

日期	行程內容
8 月 10 日 (六)	從台灣前往丹佛 (桃園-舊金山-丹佛)
8 月 11 日 (日)	EPRI 夏季研討會 第 1 天
8 月 12 日 (一)	EPRI 夏季研討會 第 2 天
8 月 13 日 (二)	EPRI 夏季研討會 第 3 天 (丹佛-夏洛特)
8 月 14 日 (三)	參訪 EPRI 夏洛特辦公室
8 月 15 日 (四)	參訪 EPRI 夏洛特辦公室 (夏洛特-舊金山)
8 月 16~17 日 (五~六)	(舊金山-台北)

二、EPRI 夏季研討會

會議緣由

從 2022 年至今，電力業者面臨的挑戰與過去截然不同。第一個挑戰是 AI 技術發展進入了目前的新局面，這是過去數十年來從未見過的事情，因網際網路發展至第三波變化（第一波是社交媒體、第二波是雲端計算）導致資料中心產業的興起，使得網路產業在預期之外的用電量大增。另一個挑戰是因為再生能源（尤其是太陽光電）的裝置容量呈現大幅度的增長，未來鴨子曲線將變成懸崖曲線，若假設現行電力系統的硬體設備技術發展趨勢不變，加上近年極端氣候，既有的電網硬體與調度手段要如何應付未來的電力需求？

為因應此巨變，EPRI 建議電力公司以智慧化方式快速擴展電網靈活性，及加速發展可調度的低碳能源技術（如長時儲能、地熱、氫能、CCS 及先進核能），並將其規模化。本次夏季研討會共分為七個主題，包括新的負載需求和潛在的電網解決方案、電網新策略、規劃與設計明日電網、藉由技術與設計最大化電網容量、法規支援電力發展路徑、清潔能源轉型中核能如何加速部署、低碳能源供應與技術發展，本報告將針對不同議題目標以及重點進行說明。



圖 1-1 代表團與 EPRI CEO Arshad Mansoor 合照

表 1-2 EPRI 2024 Summer Seminar 議程

Day 1	Sunday, August 11
6:00–8:00 p.m.	Welcome Reception: Zermatt Ballroom
Day 2	Monday, August 12
8:30–8:45 a.m.	Setting the Stage Arshad Mansoor, President and CEO, EPRI
SESSION 1	Data Centers: New Load Demand and Potential Grid Solutions Globally, the electric energy consumption of data centers is approximately 2% of total electricity usage today, but it is expected to expand by as much as 3x by 2030. Innovative opportunities exist to integrate grid and data center power resources, transforming data centers into sustainable grid resources to enhance reliability, resilience, and affordability for all electric consumers. In this session, learn about the challenges and potential solutions from stakeholders engaged in all facets of data center development, operation, and services.
8:45–9:40 a.m.	Staying Ahead of the Load-Growth Curve: The Rise of Data Centers Moderator: Rob Chapman, Senior Vice President, Energy Delivery and Customer Solutions, EPRI Panelists: Maria Pope, President and CEO, Portland General Electric Chris Crosby, CEO, Compass Datacenters Will Conkling, Head of Data Center Energy, Americas and EMEA, Google
SESSION 2	Introducing Flexible Supply and Ownership: New Approaches for the Grid Virtual power plants can improve flexibility from distributed energy and load resources as part of the reliable and resilient grid underpinning a net-zero energy system. This session will examine how to improve the visibility of distributed resources, standardize technical and business aspects of utility-aggregator interfaces, and improve integration into energy system planning and operations.
9:40–9:55 a.m.	Technology Perspective: Integrating Behind-the-Meter Assets Devrim Celal, CEO, KrakenFlex
9:55–10:40 a.m.	Improving Load Flexibility: The Impact of Virtual Power Plants Moderator: Patricia Poppe, CEO, PG&E Corp. Panelists: Jen Downing, Engagement Officer, Loan Programs Office, DOE Allan Schurr, Chief Commercial Officer, Enchanted Rock Jill Anderson, Executive Vice President and COO, Southern California Edison
10:40–11:10 a.m. BREAK	
SESSION 3	Meeting Electric Demand Growth: Planning and Designing Tomorrow's Grid Rapidly evolving the grid to support growing demand, increasing renewable generation, and integrating more distributed resources will require innovative methods and technologies. This session will explore planning, design, and technology deployment approaches to optimize new investments, enhance resilience, and improve flexibility from emerging resources.
11:10–11:15 a.m.	Chauncey Chat: Sprinting Into the Energy Transition: Tools and Techniques to Use Today Anna Lafoyiannis Deputy Program Manager, EPRI
11:15–12:00 p.m.	Transforming the Grid to Optimize Investment and Improve Flexibility Moderator: Daniel Brooks, Vice President, Integrated Grid and Energy Systems, EPRI Panelists: Alice Jackson, Senior Vice President, System Strategy and Chief Planning Officer, Xcel Steven Powell, President and CEO, Southern California Edison Robert Schwartz, President and CEO, Anterix
12:00–1:00 p.m. LUNCH	

SESSION 4	<p>Maximizing Grid Capacity Through Technology and Design</p> <p>To meet unprecedented demand growth, adopting innovative technologies such as Dynamic Line Ratings and Advanced Power Flow Controllers is required in the short term to increase the capacity of existing transmission assets while planning new transmission construction in parallel. Learn from leaders who are deploying these technologies as they discuss implementation, accelerating deployment, the gaps that may need to be closed to deploy more broadly, and how these technologies potentially increase the capacity of new assets.</p>
1:00–2:00 p.m.	<p>Accelerating the Timeline for Moving from Pilots to Full-Scale Deployment Moderator: Andrew Phillips, Vice President, Transmission and Distribution Infrastructure, EPRI</p> <p>Panelists: David Wright, Chief Engineer, National Grid Jørgen Festervoll, CEO, Heimdall Power Joanna Lohkamp, CEO, Smart Wires, Inc. Julia Selker, Executive Director, WATT Coalition</p>
SESSION 5	<p>Regulatory Innovation: Supporting the Pace of Change</p> <p>By embracing regulatory innovation, we can empower first movers, stimulate investment, and create a balanced energy transition that prioritizes affordability, reliability, and resilience for all consumers. In this session, we will delve into the transformative regulatory frameworks shaping the future of our energy systems.</p>
2:00–2:15 p.m.	<p>Technology Perspective: Reaching 24/7 Carbon-Free Energy by 2030 Caroline Golin, Global Head of Energy Market Development and Innovation, Google</p>
2:15–3:00 p.m.	<p>Enabling First Movers While Ensuring Affordability, Reliability, and Resiliency for All Moderator: Morgan Scott, Director Climate READi and Sustainability, EPRI</p> <p>Panelists: Katherine L. Peretick, Commissioner, Michigan Public Service Commission Megan Gilman, Commissioner, Colorado Public Utilities Commission Joseph Sullivan, Commissioner, Minnesota Public Utilities Commission</p>
3:00–3:30 p.m. BREAK	
3:30–3:35 p.m.	<p>Chauncey Chat: Dispatching Renewable Energy from Super-Hot Rocks Ron Schoff Director of Renewable Energy and Enabling Technologies, EPRI</p>
3:35–4:00 p.m.	<p>Mountainside Chat: Reflecting on the CCS Roundtable</p> <p>As energy companies examine business models supporting carbon capture and storage (CCS) in power generation, decarbonization pathways are converging and incentives are reaching an all-time high. Before the start of Summer Seminar, a group of industry leaders participated in candid conversations on actionable steps to enable CCS deployment in the U.S. This session will shed light on key insights from the roundtable.</p> <p>Neva Espinoza, Vice President, Energy Supply and Low-Carbon Resources, EPRI Gregg Milbrandt, Vice President, Energy Transition and Asset Management, SaskPower Mark Berry, Senior Vice President, Research, Environment, and Sustainability, Southern Company</p>
4:00–4:10 p.m.	<p>Closing Reflection</p> <p>Casey Herman, Senior Partner, Utilities and Sustainable Energy, PwC and Chair, EPRI Advisory Council Rob Chapman, Senior Vice President, Energy Delivery and Customer Solutions, EPRI</p>
6:00–8:00 p.m.	<p>Reception: Gore Zen Garden</p>
Day 3	<p>Tuesday, August 13</p>

8:30–8:35 a.m.	Welcome and a Look Ahead Arshad Mansoor, President and CEO, EPRI
SESSION 6	The Future of New Nuclear: The Role of Nuclear in the Clean Energy Transition and How to Accelerate Deployment Nuclear power has reliably served customers as a carbon-free resource for more than half a century. As nuclear operators take steps to extend the life of existing assets, promising advanced reactor technologies are coming into focus. This session will explore the current state of nuclear energy, first movers' paths to success, accelerating the deployment of advanced nuclear to meet demand growth, and reducing risks and costs through broad commercialization.
8:35–8:55 a.m.	Mountainside Chat: Lessons Learned from Plant Vogtle and the Next Large NPP Chris Womack, Chairman, President, and CEO, Southern Company Maria Korsnick, President and CEO, Nuclear Energy Institute
8:55–9:00 a.m.	Chauncey Chat: Is Fusion Energy Still 20 Years Away? Andrew Sowder Senior Technical Executive, Fusion Energy, EPRI
9:00–9:45 a.m.	The Realities of Timeline and Costs for First Movers in Advanced Nuclear Moderator: Steve Chengelis, Senior Director, Future Nuclear Technology, EPRI Panelists: Sandra Dykxhoorn, Vice President, New Nuclear Growth, Ontario Power Generation Joseph Dominguez, President and CEO, Constellation Energy Group Sama Bilbao y León, Director General, World Nuclear Association P. Todd Noe, Director of Nuclear & Energy Innovation, Microsoft
9:50–10:20 a.m. BREAK	
SESSION 7	Shrinking the White Space: Deployment of Low-Carbon Energy Supply Technology Solutions The journey to a net-zero energy economy is a complex one, requiring both innovation and collaboration as well as processes to learn from each other's experiences. As the electric sector stands on the brink of a significant shift, the timing and scale of new technology deployment depends on factors such as siting, permitting, construction, and operations. In this session, learn how some of the first movers in carbon capture and sequestration, hydrogen, and long-duration energy storage are tackling these challenges to deploy first-of-a-kind projects.
10:20–11:05 a.m.	Reducing Transition Risk: Closing Knowledge Gaps Through Technology Demonstrations Moderator: Jeffery Preece, Director, Research & Development, Net Zero Resources, EPRI Panelists: Paul Lau, CEO and General Manager, SMUD Kai Guo, Head of Market Development and Origination, MHI Hydrogen Infrastructure Raja Sundararajan, Executive Vice President, Strategy and Customer Solutions, Alliant Energy
CLOSING PLENARY	Building and operating the energy system of the future requires bold vision, unparalleled collaboration, and unwavering commitment to innovation. Early adopters will play a pivotal role in accelerating solutions by demonstrating and deploying emerging technologies at the core of the energy transformation. This session will close EPRI's Summer Seminar by leveraging insights gleaned from prior speakers while weaving in the regulatory, financial, and market-transformation aspects that are critical to enabling innovation and "first movers" as the power sector changes how the world makes, moves, and uses energy.
11:05–11:55 a.m.	Empowering Energy Pioneers: Accelerating Tomorrow's Solutions Moderator: Vincent Sorgi, President and CEO, PPL and Chair, EPRI Board of Directors Panelists: Tricia Pridemore, Commissioner, Georgia Public Service Commission Manu Asthana, President and CEO, PJM Interconnection Jim Burke, President and CEO, Vistra Jay Horine, Managing Director, Head of North America IB Client Coverage and Co-Head of Energy, Power, Renewables, and Mining, JP Morgan Jeff Lyash, President and CEO, Tennessee Valley Authority
11:55–12:00 p.m.	Closing Remarks Arshad Mansoor, President and CEO, EPRI

(一)開場：縮減技術差距

1. EPRI CEO Arshad Mansoor 博士在開場演講中強調了政策與產業需求在實現清潔能源多樣化的方面有關鍵作用（圖 2-1）過去一年中，從美國「降低通膨法案（Inflation Reduction Act, IRA）」的實施到人工智慧（AI）的突破性發展，都暗示著能源領域將有巨大的變革。Mansoor 博士特別強調了 AI 對電力需求的影響（圖 2-2），AI 不再僅僅是識別圖像或分析數據的工具，而是朝著創造能夠推理的數位擬真大腦方向發展。這將導致資料中心的電力需求大幅增加，且增長規模難以預測。超大規模雲服務商已經意識到投資不足的風險，因此 AI 的算力競賽正迅速轉變為提供足夠電力予 AI 資料中心的競賽，但用電量的成長速率或是投資金額的確切數字，目前仍在計算之中。



圖 2-1 EPRI CEO Arshad Mansoor 博士

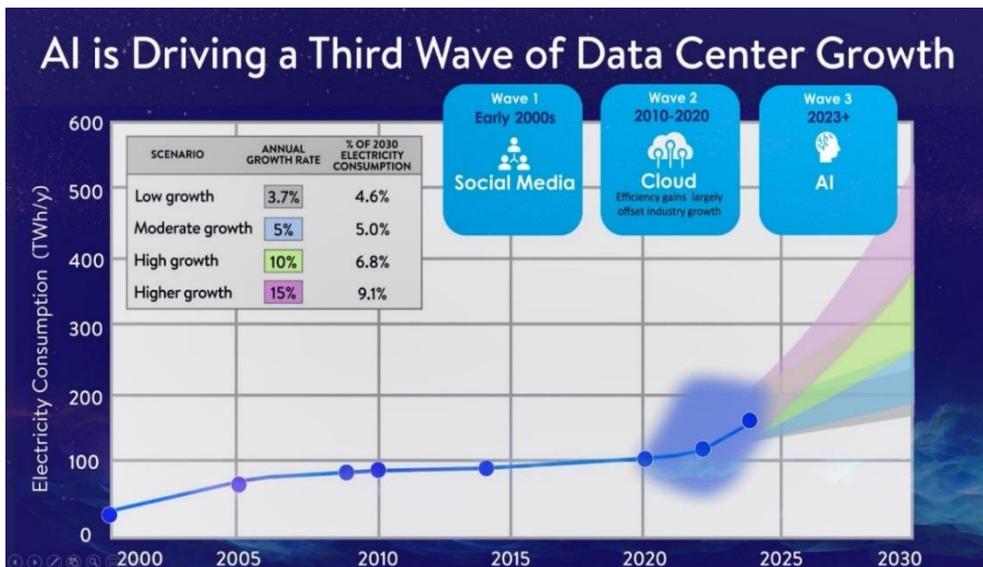


圖 2-2 EPRI 預估至 2030 年時的 AI 資料中心用電量需求

2. 與此同時，能源系統正在經歷前所未有的轉變。傳統的「鴨子曲線」已演變成更難以應對的「峽谷曲線」(圖 2-3)，需要大量的電力儲能(如電池或抽蓄發電廠)或能源轉換設備(如熱儲能、化學儲能、機械儲能、或電解產氫)來平衡可再生能源的波動性。此外，氣候變遷帶來的極端天氣事件對電網的韌性提出了更高的要求，而這些挑戰都將成為未來電業所面臨的課題。Mansoor 博士也提出，依照過去經驗，電力業者在導入新技術的過程中(如大型燃煤發電廠)，往往在部屬了第 10 個機組或是設施後，才可掌握此一新技術，故電力業者必須加速推動前瞻綠能、低碳技術，因為有了第 1 個實際推動的計畫後，其他計畫才容易接續推動，而達到 10 個計畫推動完成後，電力業者才可真正掌握其關鍵技術。



圖 2-3 EPRI 認為鴨子曲線已無法代表目前高光電滲透率的情境，取而代之的是峽谷曲線

3. Mansoor 博士於演講中強調了 AI 用電量增加對電力系統帶來的挑戰，同時也提出了應對能源轉型和實現淨零減碳目標的策略。他認為透過提高電網靈活性以及推動技術創新和公私合作，電力業者、用戶與政府監管單位可以共同塑造一個清潔、多樣化的能源未來。

4. 演講內容重點

(1) AI 用電量增加與能源轉型的挑戰

- AI 資料中心用電量激增：新型 AI 資料中心與傳統資料中心不同，其運算能力需求將帶來前所未有的電力負荷增長。
- 多重因素驅動電力需求：永續航空燃料（Sustainable Aviation Fuel, SAF）生產、晶片製造、光電設備生產等新興產業也將推動電力需求上漲。
- 電網現代化迫在眉睫：傳統電網在面臨氣候變化和能源轉型等情境，需加速進行更新與現代化，以做好面臨巨大挑戰的準備。

(2) 淨零減碳目標下的能源供應策略

- 淨零情境下的能源來源需多樣化：天然氣、風能、太陽能、電池儲能、小模組核能反應爐，甚至煤炭都將在短期內發揮作用，但仍需藉由新科技減少使用風險以及降低碳排。
- 既有電廠延役：在電網可靠性面臨挑戰或用電需求高的地區，可能需要針對既有舊電廠進行延役。
- 設備供應鏈挑戰：能源轉型將帶來前所未有的供應鏈壓力，不管是發電設備或是電網設備，均需要提前規劃和應對，如設備規格標準化等以加速採購流程，並減少供應鏈壓力（圖 2-4）。



圖 2-4 EPRI 建議因電網迅速擴張造成供應鏈壓力的解決方案（延長設備使用年限、供應商多元化、設備使用最佳化、與供應商溝通、設備規格標準化）

(3) 靈活性和創新：能源未來的關鍵

- 提高電網靈活性：需發展更有彈性的負載管理、輸電線路升級、電網運維技術創新等科技，以提高電網利用率與調度彈性。
- 公私合作推動創新：鼓勵公私合作，系統性地推動 10 個新機組或是設備的落地，同時在所有新科技的引進，都要依據從「第 1 個」到「第 n 個」的部署精神。
- 電力經濟精進評估：建立更精準的能源經濟評估體系，充分展現電網靈活性、容量和輔助服務的價值。

(4) 最後呼籲：共同塑造清潔能源未來

- 積極參與：鼓勵各方積極參與，共同為清潔能源未來貢獻力量。
- 合作共贏：透過公私合作、技術創新和政策支持，實現清潔、多樣化的能源目標，促進全球繁榮。

(二)資料中心：新負載需求及潛在電網解決方案 (SESSION 1)

本座談由 EPRI Energy Delivery and Customer Solutions 資深副總 Rob Chapman 先生主持，並邀請 Portland General Electric 總裁兼首席執行長 Maria Pope、Compass Datacenters 女士、首席執行長 Chris Crosby 先生、及 Google 資料中心能源主管 Will Conkling 先生參與討論 (圖 2-5)。

1. 議題重要性

當今全球資料中心的用電量約佔全球用電量的 2%，而到 2030 年資料中心用電量預估將擴增為原來的 3 倍。未來需要將電網與資料中心電力資源整合，並將資料中心轉型為永續電網資源，以強化對於所有電力用戶之系統可靠度、韌性及可負擔性。本次座談主要探討資料中心發展、運轉及服務等利害關係人學習到其挑戰及潛在解方。

2. 座談會重點摘要

- (1) 未來資料中心帶來的用電成長會驅使我們更快、更經濟地進行能源轉型，並促使我們建造幾十年來沒有新建的基礎設施，包含輸電線路及新變電所。當我們看到這一新的用電成長時，資料中心新建需求正在挑戰並促使我們以不同的方式思考，而不僅與客戶以不同的方式進行合作。
- (2) Google 在全球使用大量電力，到 2023 年，我們消耗的電力約為 25TWh。在過去 10 年左右的時間裡，我們平均每年用電持續增長。Google 傾向於自建、自營運資料中心，並一直致力於尋找新地點、尋找能源、尋找商業動力。
- (3) 資料中心公司必須與監管機構和電力公司更深入地合作，找到可持續成長的方式。其可視為三個主要方面的鼓勵措施，包含對綠色能源、零碳能源和再生能源提供鼓勵措施，並增加裝置容量。同時，激勵產業間的構通與互動，並幫助電力公司推動新建計畫，並融入附近民眾與社區。
- (4) 雖然資料中的運算效率大幅進步，但可能無法抵消因資料中心擴增而更多電力的需求。電力公司需要靈活地向資料中心送電，且資料中心也必須從監管、財務角度、可靠性及電力特性等角度來規劃電力採購方案，並運用資料中心現場已有的備用發電設備 (如柴油發電機或燃料電池等)，同時納入地方與中央層級的排放等法規。最後需找到更多潔淨發電電源，並將能源投入而有更好發展，以期讓資料中心能夠成為支援區域電網需求的靈活資源。

(5) Google 不僅要應對所需管理的資料中心負載增長，且期望用電能達到 24-7 採用零碳能源，即在其消耗能源的每一個小時中，該能源都與來自無碳能源，並且期望於 2030 年達到 80% 的目標，並透過再生能源如地熱、水力等技術達到零碳。像 Google 或其他公司類似的公司從電力公司購買 100% 清潔能源，這 100% 使我們能夠更快地前進，並正於 2030 年之前達到 80% 的目標，或者到 2040 年達到淨零。



圖 2-5 SESSION 1 小組成員 (由左至右): Chris Crosby, Will Conkling, Maria Pope and Rob Chapman

(三)引入彈性的電力供應及所有權：電網規劃的新方案 (SESSION 2)

本座談由 PG&E Corp 執行長 Patricia Poppe 女士主持，並邀請美國能源部貸款計畫辦公室官員 Jennifer Downing 女士、Enchanted Rock 公司執行長 Allan Schurr 先生及 Southern California Edison 公司執行副總兼營運長 Jill Anderson 女士參與討論 (圖 2-6)。

1. 議題重要性

虛擬電廠 (Virtual Power Plant, VPP) 可以提高分散式能源和負載資源的靈活性，作為支持淨零能源系統成為可靠且有彈性之電網的一部分。本次座談主要探討如何提高分散式資源的曝光度，標準化用戶群代表介面的技術和業務，以及改善與能源系統規劃和營運的整合。

2. 座談會重點摘要

- (1) 從現在到 2030 年，每年電網新增每年新增 4-6GW 分散式彈性需求。透過電池儲能、電動車，可為電網增加彈性資源。
- (2) SCE (Southern California Edison) 已經在 VPP 領域開展了一段時間的工作，在需量反應 (Demand Response, DR) 方面擁有豐富的經驗。但目前每一個月，SCE 退出 DR 的用戶以及故障待修的太陽能 and 儲能設施數量都是原來的兩倍，主要為修復程序複雜及客戶失去信心，因此必須竭力讓所有不同的利害關係人清楚 DR 真正的價值。
- (3) 微電網運轉需要更多彈性及可調度性的電力資源，甚至來自用戶端 DR 之可調度容量取代部分電源發電。Enchanted Rock 公司在微電網技術上的設計是針對具有備用電源的可靠性測試網路而建構的，且有冗餘架構的設計，使獲得很多容錯設計的能力。
- (4) SCE 公司對未來 2030 或 2045 年在用電負載需求方面將更加彈性，並且不讓基礎設施超載，並且確保擁有不同類型的 VPP 或其他需求響應計劃的經驗。在擴展大規模運用方面，例如加州經歷了有史以來第一次連續八天的高溫緊急情況，但該期間內電網運轉並無警報，主要受益於運用電池儲能。
- (5) 電力公司與 DR 用戶群代表間的介面的應要更加標準化，以利 DR 的執行，包含用

戶群代表可處理用戶向電力公司申請的資訊，及電力公司可向 DR 用戶群代表發送需要執行 DR 的量，且處理向參與 DR 的用戶支付的費用。

- (6) 電力公司應確保與正在與客戶交談的提供者合作，並與監管機構合作，以了解這些計畫的哪些要素需要改變，以便能夠成功地確保其彈性和重要性。



圖 2-6 SESSION 2 小組成員（由左至右）：Jill Anderson, Allan Schurr, Jennifer Downing and Patricia Poppe

(四)滿足電力需求成長：規劃設計未來的電網 (SESSION 3)

本次座談由 EPRI 電網與能源系統整合事業副總 Daniel Brooks 先生主持，並邀請 Xcel 公司系統戰略高級副總裁兼首席規劃長 Alice Jackson 女士、Southern California Edison 公司總裁暨執行長 Steven Powell 先生及 Anterix 公司總裁暨執行長 Robert Schwartz 先生參與討論 (圖 2-7)。

1. 議題重要性

為因應不斷增長的用電需求，需快速發展電網，並增加再生能源，及整合更多分散式電力資源，而這些行動都需要創新的方法和技術。本次座談主要探討規劃、設計及技術運用方式，以優化新投資，增強系統韌性，及提高新興電力資源之靈活性，以實現去碳化、可靠性、韌性、可負擔性和公平性等所有目標。

2. 座談會重點摘要

- (1) 電網作為連接一切的核心部分，承載著所有電力減碳及能源經濟減碳路徑模型。所有可信的路徑都表明，電力業必須成為去碳化經濟的基礎。如果不是電力業，減碳路徑過程將會更漫長、成本更高。因此，電力業必須成為減碳的基礎。
- (2) 今天美國電力供應佔所有能源的 20%，隨著未來的發展，這個比例將增加到 40%到 60%，對電力生產、輸送和使用方式將發生重大變革。從電網系統的視角，需要應對服務需求的變化，尤其面對人工智慧及資料中心需求，這些因素大幅增加了電氣化需求，進而改變了電網服務方式，同時也需考慮到氣候、實體和網絡威脅的情境。
- (3) Xcel 公司於一年半前在優化未來的基礎設施規劃方面，進行了一次非常大的變革，將所有原本屬於輸電、配電、能源供應和氣體排放的規劃功能整合進了一個統一的規劃部門。讓各部門定期在同一張桌子上討論問題，而不是單純地把問題交給一個部門來解決。這種方式使得對話更加順暢，我們能夠更快地解決問題。
- (4) 電力基礎設施的採用標準化，制定一個統一的規範至關重要，例如遇到高壓變壓器設備供應鏈的挑戰，若規格能統一，且電力公司之間可以共享，這會讓整個州都受益，並希望能將這一模式推廣到全國。
- (5) 隨著人工智慧、本土化生產和電力需求增長，大規模電氣化的推進，負載需求將

會增加，皆需要確保做出正確的投資決策，避免不必要的成本增加，以支持電網的發展。確保在用電需求較高的區域進行大規模建設，而在用電需求不確定的區域則採取更多的增量投資。

(6) 面對當今 AI 需求和負載增長的問題，涉及到數據的品質、完整性和安全性，這些都將在未來遍布整個網絡中的各種設備上。我們可以將這些數據匯集到一個更大、更具可讀性的資料庫中，以便進行更及時的分析和決策。所以應考慮如何利用機器學習和 AI 來處理更大的資料庫，從而實現更高效的分析，這將會讓我們的系統變得更加高效。要做到這一點，首先需要加強通訊，並且迅速進行數據整合與協調。

(7) 為進行系統整合，電網端需要能從發電、輸電、變電所到配電、客戶的全方位規劃工具，也需要控制系統來管理現有的大量設備，而現有工具也無法勝任這項工作，這還需要很長一段時間來改善。另外也需加強在通訊和政策層面上的整合。



圖 2-7 SESSION 3 小組成員 (由左至右): Robert Schwartz, Steven Powell, Alice Jackson and Daniel Brooks

(五)透過技術和設計最大化電網容量 (SESSION 4)

本次座談由 EPRI 輸配電基礎設施副總裁 Andrew Phillips 先生主持，並邀請 National Grid 首席工程師 David Wright 先生、Heimdall Power 公司執行長 Jorgen Festervoll 先生、Smart Wire, Inc 公司執行長 Joanna Lohkamp 女士及 WATT Coalition 執行董事 Julia Selker 女士參與討論 (圖 2-8)。

1. 議題重要性

為了滿足前所未有的用電需求成長，需要在短期內採用動態輸電線容量技術和先進潮流控制器等創新技術來增加現有輸電資產的容量，同時規劃新的輸電建設。向正在運用這些技術的領導者學習有關實施、加速運用、更廣泛運用可能需要彌補的技術差距，以及這些技術如何潛在地提高新輸電資產的容量。

2. 座談會重點摘要

- (1) 動態輸電線容量技術 (Dynamic Line Rating, DLR) 在過去 30 年裡不斷發展，在此期間，該技術已經在全球各大洲進行了測試、試點和商業化部屬運用。在過去不到十年的時間裡，該技術已經在 17 個國家的 40 位不同客戶中部署。這是一項經過驗證的商業化技術，已準備好進行大規模推廣。
- (2) 動態輸電線容量技術得以大規模運用，主要歸因於系統面臨用電增長和能源轉型的雙重挑戰，動態線路評級技術的進步，包括通信技術的提升、產品質量的提高及使用無人機進行安裝的能力；另外則為成本降低。
- (3) 動態輸電線容量技術常被許多 CEO 和 CFO 視為一個戰略工具，因為有太多計畫需要最大化資金效益。而動態輸電線容量技術有這樣的潛力。例如，使用動態輸電線容量技術來確定某條線路上只有半英里的電線需要更換，亦即不需要更換整條線路。
- (4) 在過去動態輸電線容量技術部屬運用的挑戰多集中於監管和技術層面，而當今更多的則是如何使用這些技術，因此需要理解如何在營運和規劃中標準化這項技術的應用。
- (5) 將新技術整合到電力系統中是非常困難的，尤其是讓投資者與工程師們將其視為實際可行的解決方案。因此在電力公司組織中需要有人扮演領導及推動者的角色，

推動採用新技術的進程，不是等待所有問題都解決才採取行動，而是在實際操作中解決問題。

- (6) 對於電力公司採用新技術，需要研究制定出完善的工作標準，以加快運用新技術的過程。
- (7) 面對未來動態輸電線容量技術，傳感器部署數量也大幅增加，從小規模計畫轉向全面系統部署，對技術供應商的生產、品質及無人機操作等都是重大挑戰，將造成市場上供應不足，這種需求將是全球性的。
- (8) 在運轉方面，加入動態輸電線容量技術和先進潮流控制器後，因該技術已建立自動化調度算法等系統，已經能夠處理這些變量，故對操作應不會變得過於複雜，而增加負擔。對操作員來說，最主要的挑戰在於心態上的轉變。
- (9) 對於新技術的供應商來說，除努力推動各種新技術的整合外，應該與系統運營商密切合作，並促使他們思考如何將這些技術作為工具來提高工作效率，進一步促進去碳化，控制平衡成本。這種思維方式的轉變非常重要。另外，亦需要推動新技術採用的標準化，讓規格變得簡單，並確保所有人都能以標準方式購買標準產品，這樣才能有效促進技術的發展和應用。



圖 2-8 SESSION 4 小組成員 (由左至右): Julia Selker, Joanna Lohkamp, Jorgen Festervoll, David Wright and Andrew Phillips

(六)監管創新：支持變革步伐 (SESSION 5)

本次座談由 EPRI 環境與永續部門主任 Morgan Scott 女士主持，邀請密西根州公共事業管理委員會 (Public Service Commission, PSC) 委員 Katherine Peretick 女士、科羅拉多州公共事業管理委員會委員 Megan Gilman 女士、與明尼蘇達州公共事業管理委員會委員 Joseph Sullivan 先生參與討論 (圖 2-9)。

1. 議題內容：

透過監管創新，我們可以賦能先驅者、刺激投資，並創造平衡的環境具優先考慮所有消費者的負擔能力、可靠性和彈性的能源轉型。本次座談深入研究塑造我們能源系統未來的變革性監管框架。

2. 座談會重點摘要：

- (1) 探索監管機構如何更好地賦予先行者權力、刺激投資，不僅跟上技術進步的步伐，而且加速技術進步。但同時，它必須保持平衡，擁有一個清潔、安全、可靠、負擔得起、公平的環境以及彈性。
- (2) Megan Gilman 女士認為，我們需要對正在優化未來電網的解決方案充滿興趣和懷疑，以確保我們能夠運用最新、最先進且經過審查的技術，實現未來的能源系統與所有相關政策目標。同時我們需要優化運轉以及維修的過程，這樣就可以確保支付的費用不會超過達成結果所需的費用。
- (3) 密西根州在委員會的網站上發布了所有試行計畫內容，並開放試行計畫以及它們的調查結果和計畫成果。因此，如果有另一個電力公司正在考慮進行特定的試行計畫，他們可以在網站上搜尋，並與該電力公司交流以了解成果。
- (4) Katherine Peretick 女士表示，電力公司在執行試行計畫的框架內，每年花費數百萬美元，進行能源效率創新所需的基礎研究。我們最近將其擴展到電氣化和 DR，使它可以被納入我們的電力計劃中，在這個框架之下，對於創新的電力計畫，可以將這些研究擴大規模。
- (5) Joseph Sullivan 先生表示，明尼蘇達州推出的試行計劃執行的方是，為電力公司先提供了提交計劃執行規劃報告，委員會會在 90 天內完成審核；基本上，如果電力公司在一年中的任何時間向委員會提交試行計劃，它不需要連接到實際費率規

劃，也不需要連接到任何與委員會監管的项目有關，它可以在一年中的任何一天提交，且失敗是可以接受的。

- (6) 作為監管機構，委員會的職責是保護公眾利益，因為電力公司是壟斷企業，營運機制的設計就傾向於追逐利潤；另外委員會也關注這些創新措施的持久性及公平性，確保它們不僅在短期內有效，也能長期運作，並且不會對未來的發展造成負面影響。



圖 2-9 SESSION 5 小組成員 (由左至右): Joseph Sullivan, Megan Gilman, Katherine Peretick and Morgan Scott

(七)反思 CCS 圓桌會議

本次座談是由 EPRi 能源供應與低碳資源副總 Neva Espinoza 女士主持，邀請加拿大 SaskPower 能源轉型與資產管理副總 Gregg Milbrandt 先生、南方電力公司能源供應研究與顧客服務副總 Mark Berry 先生參與討論（圖 2-10）。

1. 議題內容：

目前能源公司正在進行研究，以支持電力業碳捕集與封存（CCS）能以正常商業模式發電，脫碳途徑亦正在趨同，政府的補助與激勵措施也達到了歷史最高水準。在本次夏季研討會開始前，一群產業領袖基於可行的步驟為先決條件，以促進 CCS 在美國的部署為前提進行務實的對話，本次座談即闡明該圓桌會議的主要內容。

2. 座談會重點摘要：

- (1) Gregg Milbrandt 先生表示 Boundary Dam CCS 計畫成本如此高昂的部分原因，是它的設備都是客制建造的，並沒有真正的標準化模式，如果有一個標準設計，並可應用於每個地方的火力發電廠，那麼電力公司可以選擇在成本更低的國家進行製造，然後再將設備運輸到火力發電廠的地點。所以標準化、製造和供應鏈對 CCS 應用於火力發電的推廣十分重要。
- (2) 另外 Gregg Milbrandt 先生亦表示靈活性設計是重要的概念，碳捕集的能耗量不一定是最重要的考量，碳捕集設備的富溶劑儲存容量可能更重要。他們設計系統在低負載下滿載運行，然後使用了發電廠大量的熱能以獲取二氧化碳脫附的能量。這個概念是配合發電廠低負載下而設計的，而這只是處理特定靈活性問題的一種不錯的解決方案。
- (3) Mark Berry 先生表示，南方電力公司從 Petra Nova CCS 計畫得到經驗是，如何從試行計畫推廣到電廠落實且控制預算是十分重要的事情。目前是否會殼牌石油的 CANSOLV 二氧化碳捕集技術應用在該公司未來的前導試驗計畫，仍是未知。
- (4) Mark Berry 先生亦表示，目前碳捕集有不同的技術，未來將希望可以應用在不同的天然氣復循環機組等方式來實現淨零排放。但落實這些計畫需要全面的標準構建，而電力公司或是化工公司在未來可能有很多機會。
- (5) 商業化專案必須有合理的成本，當企業家來到會議桌前，他們關注的是預算、工

資和政府稅收抵免，而這些是為了降低風險而必須考量的。如果要讓 CCS 成為未來電力公司的一個選項，那我們就要讓所有想要推動計畫的人聚集在一起，找出降低風險的方法，並尋求風險分攤之道。

- (6) 對於大眾的持續教育也非常重要，如果要推動 CCS 技術應用在發電業，我們需要讓更多人了解這個技術；同時，資訊透明度也是一個挑戰，當我們把所有利害關係人聚在一起，才有機會推動技術向前發展。

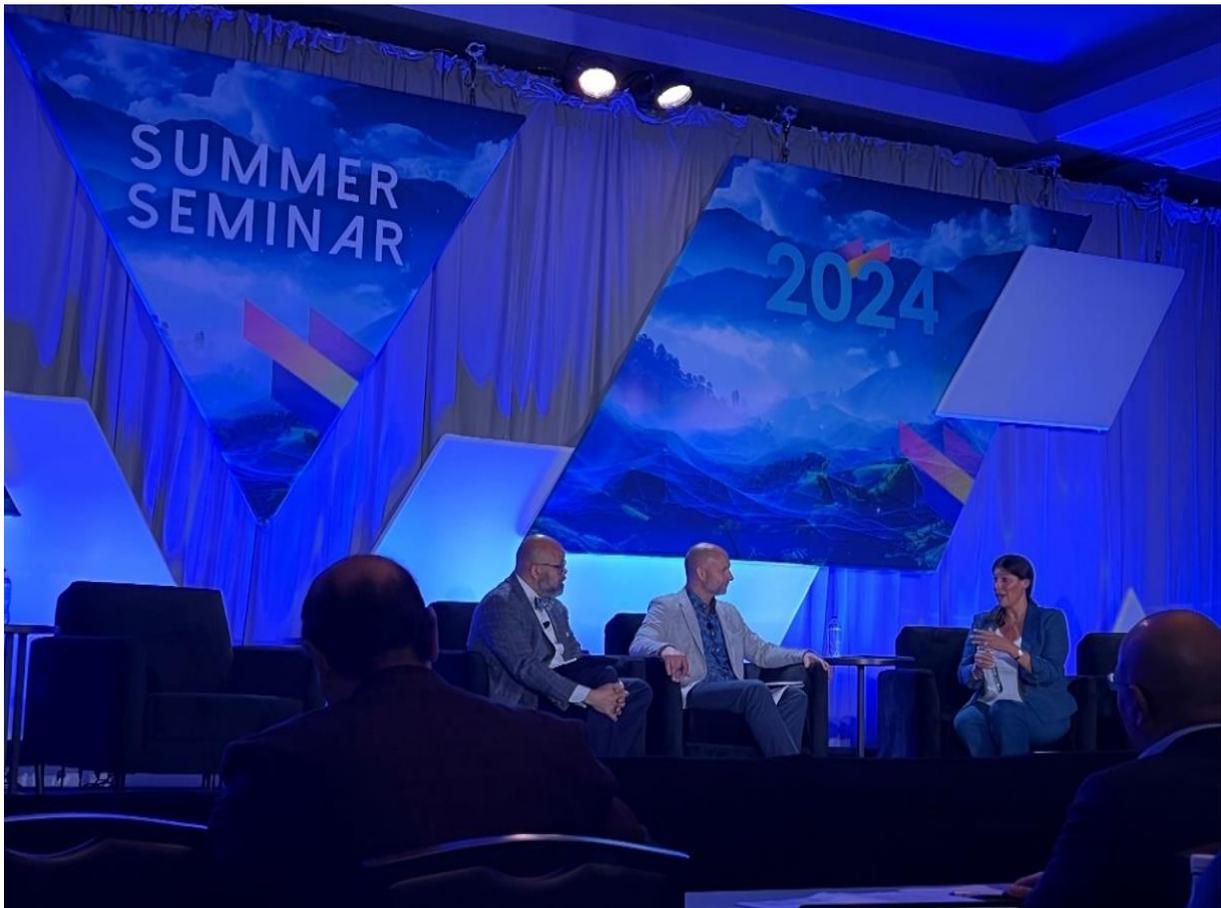


圖 2-10 與談人員由左至右：Mark Berry, Gregg Milbrandt and Neva Espinoza

(八)清潔能源轉型中核能如何加速部署 (SESSION 6)

本次座談由 EPRi 新興核能技術資深主任 Steve Chengelis 先生主持，並邀請加拿大安大略電力公司副總 Sandra Dykxhoorn 女士、星座能源公司執行長兼總經理 Joseph Dominguez 先生、世界核能協會總幹事 Sama Bilbao y León 女士、與微軟核能與能源創新主任 P. Todd Noe 先生參與討論 (圖 2-11)。

1. 議題內容：

半個多世紀以來，核電一直作為一種無碳資源可靠地為客戶服務。作為核能營運公司採取措施延長現有資產的使用壽命，並將焦點放在期望實現先進反應器技術的到來。本次座談將探討核能的現況、先行者的成功之路、加速部署先進核能以滿足需求成長，並透過以下方式降低風險和成本廣泛的商業化。

2. 座談會重點摘要：

- (1) 展望未來，我們將依靠全新的技術來建立一個新的能源系統，這個系統需要保持可靠性、韌性、經濟性，同時也要低碳，幫助我們實現淨零能源經濟。
- (2) Sama Bilbao y León 女士表示，最近幾年核能在全球範圍內得到了顯著的重視，25 個國家雄心勃勃地表示希望擴大全球核能容量。199 個國家首次將核能列為需要加速發展的能源之一，以達到各種能源標準。這意味著世界各地對核能的認可度大幅提升；各國都在延長現有核電機組的壽命，甚至考慮重新啟動早期關閉的設施。
- (3) 目前歐洲有 16 個國家成立了歐洲核能聯盟，他們正在非常積極地推動核能發展。而這個聯盟其實就是將能源政策轉化為產業政策。而歐盟委員會現在也成立了所謂的小型模組化反應爐 (SMR) 工業聯盟，他們實際上正在嘗試採取實際行動，以創建在歐洲部署這些反應器的架構和能力。
- (4) Sandra Dykxhoorn 女士表示 Pickering 核電廠 B 區之 5-8 號核能機組更新計劃完成後，可至少再運行 30 年，對要是應對未來數十年電力需求成長並持續邁向 2040 淨零碳排目標。
- (5) 因為翻新計畫的成功，安大略電力公司決定開始研究 SMR，該計畫預計耗資 128 億美元，對加拿大的核能發電設施進行翻新。

- (6) Joseph Dominguez 先生表示，市場上對 SMR 的需求非常高。如果能夠讓 SMR 具備與燃氣發電廠相同的建設條件，那麼核能將會成為未來能源重要的一部分。它不是唯一的解決方案，但將會是多種解決方案中的一部分。
- (7) P. Todd Noe 先生表示微軟會考慮支持核能發電產業，同時願意為這些無碳機組支付更多費用，因此，微軟不僅與電力公司進行了許多接觸，還與發電機組製造商進行了接觸，了解他們的需求，了解他們如何更快地進入市場，以及微軟如何為供應鏈提供幫助。
- (8) 座談會的與會人士均認為，SMR 的關鍵在於標準化和設計，其次是建設模組化。對於大型核電計畫，現場建設非常複雜，一旦在計畫中遇到問題，就可能引發一系列困難。核能產業仍需要學習如何從燃氣發電產業的經驗中獲得啟示，將模組化建設引入現場，這樣可以減少現場的建設量，從而節省成本並降低運營成本。



圖 2-11 SESSION 6 小組成員 (由左至右): P. Todd Noe, Sama Bilbao y León, Joseph Dominguez, Sandra Dykxhoorn and Steve Chengelis

(九) 低碳能源供應與技術發展 (SESSION 7)

本次座談由 LCRI 研發部門主任 Jeffery Preece 先生主持，並邀請 SMUD 執行長 Paul Lau 先生、杜克能源公司財務執行副總 Brian Savoy 先生及 Alliant Energy 策略與顧客服務執行副總 Raja Sundararajan 先生參與討論。

1. 議題內容：

實現淨零能源經濟的旅程是一個複雜的過程，需要創新和協作作為互相學習經驗的過程。由於電力產業正處於重大變革的邊緣轉變，新技術部署的時間和規模取決於選址、許可取得、建設和運維。在本次座談中，討論了一些碳捕集領域的先行者如何進行封存、氫和長期能源儲存領域的先行者如何應對這些挑戰等。

2. 座談會重點摘要：

- (1) SMUD 是美國加州沙加緬度附近區域一家完全垂直整合的電力公司，尖峰負載約為 2,300MW，擁有 5 個燃氣電廠和水力、風能與地熱發電廠。
- (2) Paul Lau 先生表示 SMUD 未來將擴大現有無碳能源技術的使用，如風能、太陽能、水力、生質能、地熱能、電池儲存和 DR 等，雖然這些經過驗證的無碳技術並不能完全實現 2030 年減碳目標，但它們可以幫助實現約 90% 的目標；目前研究放在 CCS、氫、長壽命電池等。
- (3) Raja Sundararajan 先生表示 Alliant Energy 電力公司、威斯康辛州電力和照明公司、麥迪遜天然氣和電力公司、以及威斯康辛州公用事業服務公司已請求威斯康辛州公用事業管理委員會批准在威斯康辛州波蒂奇附近建造一個高達 20MW 的二氧化碳儲能系統，可充電 5 小時、放電 10 小時。
- (4) 前述示範計畫 (Energy Dome) 旨在利用於餘電較多時，將二氧化碳從氣態壓縮為液態進行儲存 (充電)。當需要能量時，系統將液態二氧化碳轉換回氣體，並推動小型渦輪機以做為發電之用。這種高效能、零排放、封閉循環儲能系統可為威斯康辛州約 2 萬個家庭供電。
- (5) Brian Savoy 先生表示，杜克能源公司的用戶數約為 1,000 萬戶，其中約 850 萬為電力用戶，150 萬為天然氣用戶。主要用戶分布於美國東南部和中西部，主要為北卡羅來納州和南卡羅來納州。杜克能源公司的能源轉型目標與美國許多電業類

似，預計於 2030 年實現 50% 的零碳發電，到 2050 年實現淨零碳排。

- (6) 杜克能源宣布計劃在佛羅里達州 DeBary 發電廠內的現有光電場安裝電解槽，並產生綠氫，同時將發電廠內四台 GE 公司 7E 燃氣機組中的一台升級為專燒氫機組，以便進行氫氣生產和使用整合實驗。

(十)結語-加速明日解決之道

本次會議由賓州電力公司執行長兼 EPRI 董事 Vincent Sorgi 先生，並邀請喬治亞州公用事業管理委員會委員 Tricia Pridemore 女士、PJM 電網公司執行長兼總經理 Manu Asthana 先生、Vistra 執行長兼總經理 Jim Burke 先生、摩根大通公司能源、再生能源與礦業總監 Jay Horine 先生與田納西河谷管理局執行長兼總經理 Jeff Lyash 先生參與討論（圖 2-12）。

1. 議題內容：

建立和營運未來的能源系統需要大膽的願景、無與倫比的協作和堅定不移地創新。前期應用者將在加速解決方案方面發揮關鍵作用，利用示範和落地應用作為能源轉型的推動手段。本次座談透過利用整合之前演講者的見解，同時會同電力監管單位、金融和市場轉型、以及創新推動者等單位，討論電力產業如何改變了世界製造、交通運輸和終端能源使用的方式。

2. 座談會重點摘要：

- (1) Tricia Pridemore 女士表示，喬治亞電力公司 Vogtle 核能電廠 4 號機組以及 2023 年夏天開始營運的 3 號機組，是全美幾十年來建造的首批核反應爐。兩座新反應爐成本超過 300 億美元，足足是一開始預估的逾 2 倍。
- (2) Vogtle 核能電廠經歷一段困難的時期，當時每 6 個月就要進行一次工期審查，並對外透明化公開內容，才可確保工程持續進行。
- (3) Vogtle 核能電廠開始營運後，將使該州電網更可靠並具備彈性，近期喬治亞電力公司將再提交 7,100MW 新增裝置容量，幫助地區吸引 AI 資料中心。
- (4) Jeff Lyash 先生表示，田納西河谷管理局是美國最大的電力業者之一，該局計劃投資 15 億美元用於能源效率和 DR，以減少未來幾年的總能源需求，並在其系統中增加 10GW 的太陽能發電與 6,000MW 天然氣，並在 2035 年之前淘汰所有燃煤發電廠。該局的電力供應將以核電廠作為基本負載運行，能源配比為 45%核能、35%天然氣、20%再生能源，同時未來亦考慮以 SMR 其做為電網脫碳計畫的一部分。
- (5) Jim Burke 先生表示，Vistra 營運約 41,000MW 的裝置容量，包含總容量超過 6,400MW 的核能發電機組。該公司將在德州繼續開發大量的風能和太陽能發電，且

過去 6 年淘汰了 10GW 的燃煤機組，但為了電力系統安全，Vistra 宣布計劃在德州西部、中部和北部增加多達 2,000MW 的燃氣機組。

- (6) Manu Asthana 先生表示，PJM 提供了涵蓋美東 14 州電網的服務，近來為了脫碳，新增潔淨能源，及受到氣候異常造成電網損傷的影響，使得用戶大量抱怨與流失，因此他認為電網可靠是運維的重點。
- (7) Jay Horine 先生表示，目前能源意識已提高許多，過去 Google、微軟、及不同工業與企業參與能源議題方式並不像今天這樣；另金融界的情況與以前有根本的不同，已經進入了私募股權基礎建設領域。此外，新技術的引進還是應由發電公司和電力公司主導，並由他們建造和管理這些新的發電機組，而這些技術的引進都該有相對應的電費支付。



圖 2-12 與談人員由左至右：Jim Burke, Jay Horine, Jeff Lyash, Manu Asthana, Tricia Pridemore and Vincent Sorgi

三、參訪美國 EPRI 夏洛特辦公室

EPRI 夏洛特辦公室設有配電自動化、地下電纜測試、材料化學實驗室、太陽能模擬器、先進發電區和高溫機械測試區等。本次拜訪對象為輸配電 (Transmission and Substations)、發電 (Generation) 以及低碳資源倡議 (Low-Carbon Resources Initiative) 研究團隊，除進行意見交流外，亦討論未來可能合作方向。

(一) 與輸電、配電及資訊科技部門交流

本次前往夏洛特 EPRI，與輸電、配電和資訊科技 (TDI) 部門團隊交流，內容包含運用數據資料、工具及方法改善輸配電資產管理，輸變電資產可靠度、韌性、運轉、維護、延壽及安全性，資通訊科技用於電網現代化及數位轉型，機器人應用等。

本場交流由 EPRI 輸變電部門協理 (Director) Drew McGuire 先生開頭簡介 EPRI 輸配電研究諮詢架構 (Advisory Structure)，包含合作研究費用、國際參與情況、每年研究成果產出、辦理研討會議等實績，並介紹實驗室及實驗場域 (圖 3-1)；再分別由架空輸電專案經理 Rachel Moore 女士、地下電纜專案經理 Tom Zhao 先生及資產管理專案經理 Bhavin Desai 先生就各計畫領域之研究計畫進行說明及交流。說明結果摘述如下：

1. 夏洛特 EPRI 輸配電研究團隊主要研究輸配電資產及設備之管理及系統功能，研究團隊專精於電力系統設備的研究，並解決產業界及公司無法解決的問題，並可因應產業界新的需求，啟動新的研究計畫。
2. 2023 年 EPRI 合作研究費用高於 3,000 萬美金，合作研究參與比例以美國為最大宗，而國際參與比例仍在成長，研究成果產出超過 150 份報告、應用軟體及參考材料，辦理超過 60 場研討會議等。
3. EPRI 的獨特之處在於擁有致力於解決電力業界實務問題的實驗室，包含位於北卡羅來納州 Charlotte、麻薩諸塞州 Lenox 及田納西州 Knoxville 等地，其中在麻州 Lenox 擁有大型的輸配電實驗場域。該實驗場域主要功能包含輸變電設備老化衰退及故障評估、新興輸變電設備效能評估、發展設備檢測技術、新興設備之檢測及監測技術評估及進階公用事業實務設計等。



圖 3-1 EPRI 輸變電部門協理 Drew McGuire 簡介輸配電研究諮詢架構

4. 本次交流有關輸電設備部分，依序分別由各研究計畫領域的專案經理說明下列四項主題及各主題計畫之詳細分類如下：

主題一（架空輸電專案經理 Rachel Moore）：架空輸電

- (1) 架空輸電團隊關注設備於各階段所需面對的問題，包含要從規劃、工程執行、運轉、維護到除役等階段。另也關注提升整體電力系統的安全性及可靠性，並使其具有成本效益，及提高系統容量。
- (2) 架空輸電團隊執行 16 項專案計畫 (Projects)，可歸納為 7 個工作小組 (Task Forces)，每項專案計畫可再細分大約 4~8 個研究工作。前述 7 個工作小組包含設備檢修、評估及維護，線路設計，雷擊及接地，活線作業，絕緣礙子，輸電容量增加，及高壓直流輸電 (HVDC) 等。
- (3) 架空輸電團隊出版 9 本參考技術書籍 (Reference Books)，內容皆為架空輸電之基礎研究，依不同顏色書皮做分類，包含紅書 (200kV 以上交流輸電)、橙書 (輸電導體及結構運動)、黃書 (架空輸電設備檢修、評估及維護)、藍書 (115-400kV 線路衝擊設計)、黃綠書 (高壓直流輸電)、黃褐書 (活線作業)、灰書 (架空輸電線雷擊及接地)、紫羅蘭書 (絕緣礙子)、白金書 (提升電力潮流) 等；變電所及地

下電纜主題計畫亦有類似系列的參考技術書籍；另外架空輸電團隊開發 12 套應用軟體，其中包含雷擊對電力系統影響、接地網安裝、地層內鐵塔基礎及大氣對金屬之腐蝕現象、基礎結構之動力學強度及振動監測等分析之套件。

- (4) 有關架空輸電線路遭受鹽霧害導致礙子洩漏電流問題，架空輸電團隊表示因該問題相當常見，目前正在成立研究團隊，且目前已在全世界已有許多線路礙子裝設洩漏電流感測器，即時監測礙子洩漏電流情況，並透過電郵自動發送警告訊息等作為。

主題二（地下電纜專案經理 Tom Zhao）：地下電纜

- (1) 地下電纜專案主要專注於協助電業解決地下電纜設計、施工、安裝、運轉、維護等問題，其中包含押出型電介質(Extruded Dielectric)及纏繞型電介質(Laminar Dielectric) 電纜系統及其相關組件。本專案已有開發相關工具及方法以更有效地設計及運轉電纜系統，並獲得電纜設備之狀態及預期壽命，及收集最新地下電纜技術之情報（圖 3-2）。
- (2) 地下電纜團隊執行 5 項專案計畫，包含地下電纜設計、施工、額定容量、運轉及維護，押出型電介質電纜系統，纏繞型電介質電纜系統，地下電纜傳輸之原理及實務，交、直流海底電纜系統等。

主題三（變電所專案經理 Erika Willis 女士未出席，僅撥放投影片）：變電所

- (3) 依 EPRI 提供資料，本專案主要專注於研究改善變電所維護、檢查及評估之工具、技術及方法。變電所團隊執行 10 項專案計畫，且本專案由 EPRI 多間實驗室所支持，包含位於麻州 Lenox 研究站之 138kV 測試系統。



圖 3-2 EPRU 地下電纜專案經理 Tom Zhao 簡介地下電纜研究諮詢架構

主題四：資產管理分析（資產管理專案經理 Bhavin Desai）

- (1) 資產管理分析專案主要專注於開發資產管理知識推動（Asset Knowledge Enablers）及管理工具，能使電業有更好的資產管理決策。
- (2) 電業在營運過程中，各項資產及設備皆會產生大量數據資料，資產管理分析所關注的問題在於如何使用這些數據資料，採用適當的分析技術，及開發管理資產生命週期所需之可用知識。
- (3) 資產管理分析專案研究所關注的範圍包含架空輸電、變電所、地下電纜輸電等相關資產設備，並著眼於資產生命週期的所有不同階段，並嘗試以數據指標的型式產生有用之管理知識。
- (4) 本資產管理分析專案研究有三項特色，使本專案與其他電力研究單位的資產管理分析專案有所區別。第一，目前全球共有 54 家電業資助本專案，且本專案研究皆使用真實設備的實績資料，能推進本專案研究的發展；第二，本研究團隊中的人員在設備長期運轉方面具有豐富的經驗；第三，本研究團隊中的人員專精於利用資料分析、統計及不同領域 AI 運用（如文字、影像及氣象資料等分析）。基於以上獨特的優勢，本團隊能有效解決實務問題，並產生有意義的研究成果，提供電

業做出可執行且有用的決策。

(5) 資產管理分析團隊執行 4 項專案計畫，包含資產管理原理及實務、變電所資產分析、架空輸電資產分析及地下電纜輸電資產分析。每項專案計畫皆包含多個研究工作 (Research Tasks) 及技術轉移活動 (Technology Transfer Activities)。

- 在資產管理原理及實務部分，亦有出版指引手冊，包含指引電業關注執行資產管理方面的能力，及確保執行資產管理計畫所需要的程序，確保資料收集及資料模型建立的品質，及使用資料模型所需可量的事項等；另外也提供電業實際運用分析技術並決策的實例。
- 在變電所資產分析部分，研究如何運用專家系統 (Expert Systems)、AI 及新興資料分析技術，改善電力變壓器、斷路器…等相關所內設備資產管理；及分析運維風險及所需要採的行動 (如裝設線上監測裝置、提供資料擷取頻率及對設備進行高強度測試等)；並開發各樣資產設備維護所需之資料處理及分類軟體 (如電力變壓器專家系統軟體、斷路器更換排序軟體等)。預計 2025 年，將開發斷路器氣體洩漏之預測分析技術及使用即時時間序列資料產生斷路器運轉實績資料。
- 在架空輸電及地下電纜資產分析部分，藉由設備巡檢的歷史及維護資料，並透過資料分析模型技術，以確保線路設備的狀態。

(6) 資產管理分析技術應用方面，列舉一些案例說明，如可應用於變壓器預期壽命的預估、斷路器檢修及更換策略 (降低維護成本) 等 (圖 3-3)。

5. 最後，EPRI 輸配電研究團隊簡介有別於使用 SF₆ 氣體的斷路器，目前研究團隊正在研究 SF₆ 氣體的替代方案 (Fluoronitrile Mixtures, 氟腈混合氣體)。目前於麻州 Lenox 實驗場域正在進行新技術方案，包含於斷路器內使用真空 (Vacuum)、CO₂ + O₂ 氣體及氟腈混合氣體等實驗。在電壓層級限制方面，真空方式僅能承受 145kV，CO₂ + O₂ 氣體能承受達 420kV，氟腈混合氣體僅能承受 145kV。目前美國加州已規定將於 2025 年應汰除 SF₆ 氣體的斷路器，且紐約州也正考慮跟進。



圖 3-3 EPRI 資產管理專案經理 Bhavin Desai 簡介資產管理分析技術

(二)與發電部門交流-人工智慧導入發電氣渦輪機發展 (視訊)

EPRI Gas Turbine R&D 目前正著手發展人工智慧學習數位孿生系統 (Digital twin) 並應用於氣渦輪機，提昇機調度優化與運維預測工具，利用獲取機組相關數據，用人工智慧和機器學習技術建立了一個模組，以幫助了解感測器是否有故障，或者訊號是否是代表真正的異常行為，及應該予以注意並採取行動。例如，利用即時性的監視與診斷 (M&D) 資料與性能表現，來提昇機組效率、可靠性與安全性，達到降低運維成本與縮減停機檢測的時間。EPRI 的氣渦輪機專家 Bobby Noble 先生利用視訊簡報 EPRI Digital twin 近期研發與發展 (圖 3-4)，重點簡述如下：

1. 旨在為電力公司或發電機組運維團隊提供改進的能力，這些功能過去一直屬於原始設備製造商和第三方服務提供者的專家領域。目的是支援以下監測和診斷領域：
 - (1) 與現有的 M&D 工具整合，並針對發電廠性能預測和趨勢分析，例如容量和發電規劃的日、周和月性能預測。
 - (2) 運行狀況監控和故障診斷，通過 Digital twin 模型啟用的額外運行狀況評分和虛擬檢測來支持資產管理。
 - (3) 監測和預測基本和部分負載性能，因許多燃氣機組監測工具已被簡化為僅在滿負載條件下工作，為了提高所收集數據的利用率，還應考慮部分負載條件。
 - (4) 運轉中斷和修理後對機組的影響，包括瞭解和量化性能改進結果，或運轉中斷和修理後，機組狀態低於預期表現的潛在原因之假設能力。
2. 與傳統的效能預測和機組健康管理系統相比，Digital twin 驅動的系統具有顯著的優勢，在預測方面，Digital twin 可以準確預測未來的性能，性能預測對於預測電力市場中要競標的能源量體十分有用；另一個用途是更新物理模型，以便在執行大規模硬體升級後準確預測單元的未來性能，使電力公司能夠根據實際數據準確計算升級的投資回報率。
3. EPRI 在 Digital twin 應用於電力產業的方向是全面的，因為它們可以應用於各種診斷、預測和假設問題。示範案例包括使用 Digital twin 來確定停電後性能問題的原因，以及設備退化和故障條件的預期影響，估計元件的剩餘使用壽命，最後並可比較零件維修和升級對於機組表現造成的影響，對操作方式進行改進，以期達到設備使用最佳化的目的。

4. 此外，還考慮了未來使用的靈活性，包括對蒸汽渦輪機和復循環機組的熱回收鍋爐進行建模、瞬態與動態模擬、以及對大型燃氣渦輪機組和航改式燃氣渦輪機進行建模。EPRI 針對不同款式燃氣輪機建立 Digital twin，已完成 GE 公司的 7FA、7EA 和 6B frame 的模型建立和測試，而未來 EPRI 表示該技術可以建立任何燃氣機組的 Digital twin。
5. 迄今為止，EPRI 燃氣渦輪機 Digital twin 已應用於多個實際應用，包括預測性能、跟蹤和跟蹤由壓縮機結垢引起的性能下降、創建用於現場性能監控和預測的機組級 Digital twin，以及性能表徵以識別停機和維修對性能的影響。目前已有案例如下：
 - (1) Chevron 公司應用在氣渦輪機定期維護的管理，解決壓縮機清洗儀錶問題。
 - (2) Vistra 公司則用於優化氣渦輪機的調度，並監測到跳機後出力損失與壓縮機結垢問題。
6. EPRI 於網站建立了一些 Digital twin 模型，會員可以在其中進行自己的分析，共同開發一些內容，這對於進行燃氣渦輪機的操作和長期活動至關重要。就是讓所有這些變得更加自動化，就像 Digital twin 自動校準工具一樣，會員可以進去自己做所有的事情，開始有更多的自主活動。

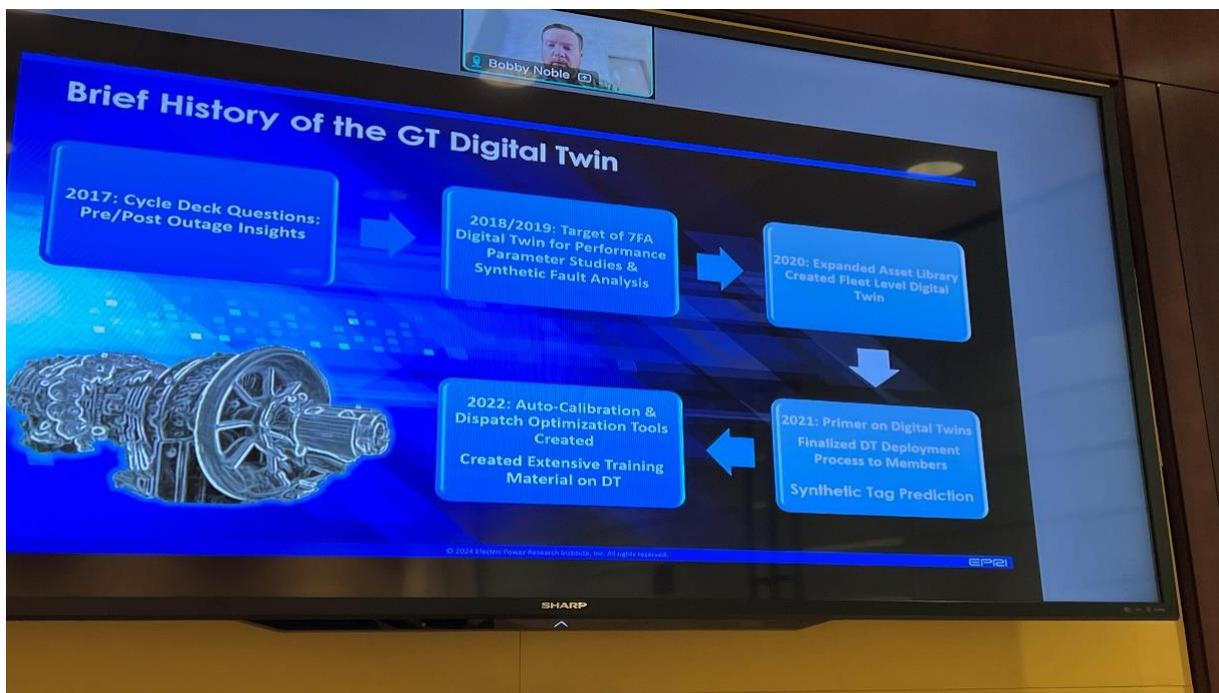


圖 3-4 EPRI 燃氣渦輪機 Digital twin 研發歷程

(三)EPRI 低碳資源倡議 (Low-Carbon Resources Initiative, LCRI) 簡介

本公司自 113 年起，加入 EPRI LCRI 後，即開始與該院進行全面合作，進行能源輸紐 (Energy Hub)、淨零策略、以及 CCS 的研究，藉由引進外部觀點，協助公司能源轉型推動策略規劃，以期達成淨零碳排之目的。

1. LCRI 自 112 年起開始運作，成立宗旨是推動經濟許可範圍內的產業去碳化，方法是透過各種清潔能源技術的推展，在 139 (2050) 年前實現淨零排放。該倡議以最終能源使用者為中心做規劃，發展去碳化、永續發展和能源彈性應用等技術。LCRI 主要價值為：強化利害關係人參與、開發資源以提供參與者策略資訊、引導淨零科技進步、擴展知識庫等。而這個知識庫的內容包含跨領域整合性文件、技術現狀報告、技術分析和評估、技術經濟分析工具和計算模型、案例研究、最佳執行實務和指南、以及規範和技術建議標準制定等。
2. 就運作模式而言，LCRI 是一個協作平台，並透過集體研究、開發和示範來加速低碳技術的技術推動。LCRI 定期舉行會議和研討會，讓會員分享研究成果、討論行業趨勢並制定戰略計畫。LCRI 也會透過線上資料庫分享和更新報告等方式，向會員公布研究成果，以期達成結合參與會員加速技術開發和落地應用之目的，研究內容可分為八個領域，分別為電解技術、低碳發電、終端使用、運輸與儲存、可再生燃料、碳氫化合物、能源系統整合、以及環境安全等，而在這些領域中，除能源系統整合環境安全及以外，其他六個領域內的研究計畫為 24 項，以下為各研究計畫的大略簡述：

(1) 電解技術

- 質子交換膜電解槽 (Proton Exchange Membrane, PEM) 示範計畫性能測試、氫氣專燒機組尾氣連續監測系統 (Continuous Emission Monitoring Systems, CEMS) 相容性評估
- 陰離子交換膜電解槽 (Anion Exchange Membrane, AEM)、儲氫技術和燃料電池、評估電力轉氫氣再轉電力 (Power to Gas to Power, P2G2P) 系統性能
- 整和氫能與微電網示範計畫，內含 PEM 電解槽、儲氫設備和微型氣渦輪發電機
- 電解槽運作替代水源示範計畫

- 整合鹼性電解槽 (Alkaline Electrolysis, AE) 內含儲氫設備、氫氣專燒機組、和以及氫燃料電池系統之示範計畫

(2) 低碳發電

- 燃氣渦輪機熱段組件的長期測試
- 氫內燃引擎發電機示範計畫
- 可再生柴油內燃引擎發電機示範計畫

(3) 終端使用

- 適合資料中心的先導性零碳彈性備用電力系統
- 提高 CCS 與廢熱回收的效率、以及開發鋁熔爐富氧燃燒技術
- 建立介於內布拉斯加州和愛荷華州的 80 號州際公路 (I-80) 的重型氫燃料車輛廊道
- 整合電動車、氫能車至氫能微電網
- 整合綠氫生產、儲存、以及用於氫能車的示範計畫
- 低碳燃料在食品加工產業的應用

(4) 運輸與儲存

- 在奧勒岡州利用地下砂岩層內的既有天然氣儲氣窖做為地下儲氫示範場域
- 驗證既有管線再利用做為輸氫管線的缺陷容忍度
- 評估伊利諾州地下砂岩深部鹽水層做為氫氣儲氣窖之可行性
- 巴爾的摩天然氣與電力公司 Spring Gardens 混氫設施的系統設計、安全和測試計畫審查

(5) 可再生燃料

- 回收天然氣輸送壓縮站內燃機引擎尾氣廢熱發電生產低碳氫氣，並製作為合成甲烷後再以既有管線運輸評估

- 整合氫能樞紐與合成氣體 (E-GAS) 生產規劃
- 發電設備 (燃氣機組與鍋爐) 使用生質酒精 (Bio-Ethanol) 和合成甲醇 (E-Methanol) 以及長期儲存評估

(6) 碳氫化合物

- 去碳燃氫 (Methane Pyrolysis) 示範設施建置
- 二氧化碳壓縮站中內燃機引擎增加碳捕集設備可行性評估
- 國家碳捕集中心碳整合管理規劃

3. LCRI 的會員組成爲電力公司、天然氣公司、設備製造商、石油公司、和 EPC 公司等，截至 113 年 8 月，LCRI 已有 57 個會員公司，資金規模達到 1.4 億美元。除會員之外，LCRI 亦成立數個委員會做爲倡議的治理與監督之用，分別爲：

- (1) 執行委員會 (Executive Council, EC)：負責 LCRI 最上層的治理和監督。
- (2) 技術顧問委員會 (Technical Advisory Group, TAG)：向執行委員會匯報，負責提供技術範疇和執行方面的專業知識、策略指導和技術意見。
- (3) 技術子委員會 (Technical Subcommittees, TSC)：向技術顧問委員會匯報，每個技術子委員會都負責一個特定的研究領域，例如電解製氫、氫燃料電池、CCS 等，並定期向技術顧問委員會報告研究進度。

(四) 台電與 EPRI 未來對能源樞紐共同合作

本公司加入 EPRI LCRI 後，除獲得上述最新技術資訊、並與 EPRI 專家進行意見交流外，對於能源樞紐、淨零策略、以及 CCS 研究部分則有更深入的合作。本次參訪主要討論內容為能源樞紐之規劃合作內容，能源樞紐是一種整合多種能源生產、轉換、儲存和消費的設施，旨在優化能源管理，並促進再生能源的使用。以下將從能源樞紐的定義、類型、效益、案例以及本公司與 EPRI 未來對能源樞紐共同合作的研究方向等方面進行說明：

(1) 能源樞紐定義：

- 能源樞紐整合了各種能源技術，例如再生能源發電（風能、太陽能）、傳統能源發電（天然氣、氫能）、儲能系統（化學電池、儲氫）等，並透過智慧管理系統進行協調運作，以滿足不同時間和地點的能源需求

(2) 能源樞紐類型：

- 依據能源供應類型：能源樞紐可以以單一能源或多種能源供應為主，例如以氫能為主的氫能樞紐，或是結合太陽能、風能、氫能生產和儲存的潔淨能源樞紐。
- 依據規模大小：能源樞紐的規模可大可小，從區域型的能源供應中心到社區型的微電網系統皆屬於能源樞紐的範疇。
- 依據功能導向：能源樞紐可以側重於能源供應，例如整合離岸風電和氫能生產，為鄰近地區提供能源；也可以側重於滿足特定需求，例如結合太陽能、氫能生產和儲存，以供應工業生產所需。

(3) 能源樞紐建置效益

- 經濟效益：
 - ✓ 降低能源成本
 - ✓ 提升能源使用效率
 - ✓ 創造就業機會
 - ✓ 促進能源技術創新
- 環境效益：
 - ✓ 減少碳排放，實現環境永續
- 社會效益：

- ✓ 提高能源安全
- ✓ 改善生活品質
- ✓ 促進在地居民參與和支持

因未來再生能源占比增加，電網之設計與運轉將有別於目前形式，因此導入能源樞紐概念，使未來電網營運的方法增加新的選項，即成為與 EPRI 合作的主要目標。目前規劃以既有火力發電廠為中心，整合附近之再生能源並考慮週遭電網容量，做為區域性的能源樞紐，除電能之外，能源樞紐亦可整合熱能、氫氣能等其他能源或物質流，達到效益提高、降低碳排之目的，其概念如圖 3-5 所示。

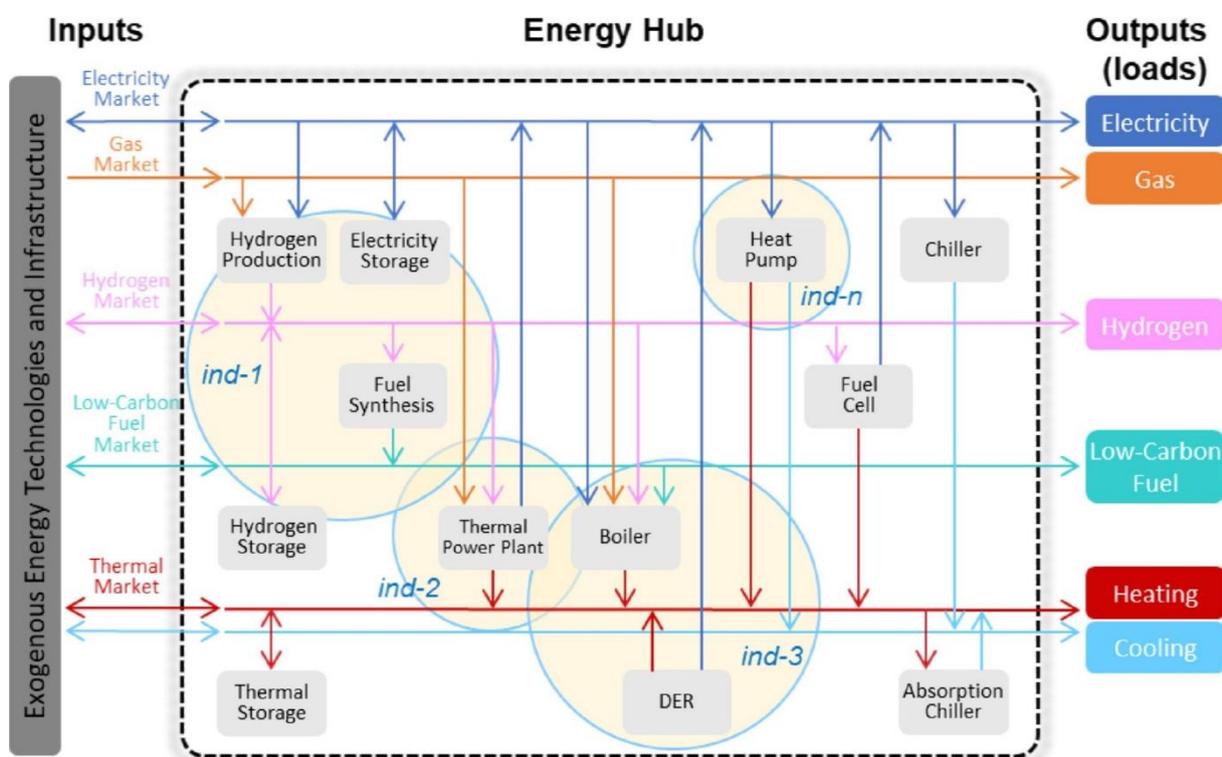


圖 3-5 能源流向圖：能源樞紐概念示意圖

將既有火力發電廠改造為能源樞紐是一個複雜的過程，需要考量多方面的因素，以下為各種不同能源樞紐的改造概念：

(1) 氫能樞紐

- 將火力發電廠轉型為以氫能做為能量傳輸載體為主的能源中心，利用既有的基礎設施生產、儲存和使用氫能。
- 可選擇將火力發電廠現有機組改造為燃氫機組，或是新建燃氫機組。

- 綠氫生產：可利用再生能源發電（如風力、太陽能）進行電解水制氫，做為綠氫的生產。
- 氫能應用：除了發電之外，氫能還可以用於工業生產、交通運輸等領域，實現能源的多元化利用。
- 此類樞紐規劃需關注的問題包含：燃氫機組的配置、氫氣燃燒時數設定、綠氫生產技術的發展趨勢、氫能儲運設備需求、適合實施氫能發電的電廠選擇及時間點等。

(2) CCS 樞紐

- 將火力發電廠轉型為 CCS 樞紐，捕集發電過程中產生的二氧化碳，並進行封存或再利用。
- 可將現有火力發電廠改建為燃燒天然氣的複循環發電廠，並逐步提高氫氣混燒比例，同時進行碳捕集。
- 此類樞紐規劃需注意的議題包含：廠內機組現況、廠內用電、廠內用水、廠內水處理量能、以及剩餘土地空間是否合適做為碳捕集廠之用地等，廠區附近地質狀況是否合適做為碳封存用地，若廠區附近地質狀況不適合做為碳封存用地，則使用管線或是船運、陸運進輸送二氧化碳至合適封存地點是否可行。

(3) 清潔能源樞紐

- 將火力發電廠轉型為結合多種再生能源發電和儲能的清潔能源中心。
- 可在電廠場址新建太陽能、風力發電等再生能源設施，並配置儲能系統。
- 此類樞紐規劃需注意的議題包含：廠區地理環境是否合適新增再生能源發電機組，廠區內剩餘土地空間是否合適設置儲能系統等。

(4) 汽電共生樞紐

- 利用火力發電廠的餘熱，為周邊工業用戶供應熱能，提高能源利用效率。
- 可考慮與工業用戶進行合作，利用工業生產過程中的餘熱，進一步提升能源使用效率。

- 此類樞紐規劃需注意的議題包含：廠區週遭工業用戶對於熱能之需求是否與電廠輸出之熱能相符，建置廠區輸出熱能之管線至附近工業用戶是否可行。

(5) 混合型樞紐

- 結合以上兩種或多種模式，例如結合太陽能發電和氫能生產，或是結合氫能生產和碳捕集技術。
- 根據當地的資源現況和能源需求，選擇最適合的技術組合。

在評估既有火力發電廠合適改造為上述任一形式的能源樞紐過程中，如同興建各式發電廠前相同，也需要進行可行性評估，以下為 EPRI 建議能源樞紐可行性評估計畫需考量的共通性項目：

(1) 選址評估

- 需要考慮當地的能源需求、資源適足性、環境影響、社會接受度等因素，選擇合適的火力發電廠進行改造。

(2) 技術選擇與整合

- 需要根據電廠的具體情況，選擇合適的氫能技術、碳捕集技術、再生能源技術和儲能技術，並進行有效的整合。

(3) 儲能容量規劃

- 需要根據電網需求、再生能源發電特性和氫能生產特性，制定合理的儲能容量規劃方案。

(4) 電網整合

- 需要考慮能源樞紐對電網的影響，確保能源樞紐的穩定運行，並促進再生能源的使用。

(5) 經濟可行性

- 需要評估能源樞紐的投資成本、運營成本、收益情況等，確保計畫的經濟可行性。

(6) 環境和社會影響

- 需要評估能源樞紐對環境和社會的影響，制定相應的措施，減輕負面影響，促進可持續發展。

將既有火力發電廠改造為能源樞紐是推動能源轉型的重要途徑，可以有效提升能源效率、減少碳排放、促進再生能源發展。本公司將根據現況與未來需求，藉由 EPRI 的協助，選擇合適的改造方向和技術路線，打造具有台灣特色的能源樞紐，因此在與 EPRI 的互動交流中，亦討論到本公司未來進行能源樞紐規劃的方向(圖 3-6)，而 EPRI 則提出配合台灣現況，建議考量的細項內容如下：

(1) 能源樞紐的選址評估

選址評估是能源樞紐規劃的關鍵步驟，直接影響到經濟效益、環境影響和社會接受度。選址時，應綜合考慮以下因素：

- 能源資源
 - ✓ 評估當地可獲得的再生能源資源，例如太陽能、風能、水力、地熱等。
 - ✓ 分析現有電網條件，例如輸電線路容量、距離、可靠性等。
 - ✓ 評估其他能源資源，例如天然氣、氫氣等。
- 工業用戶需求
 - ✓ 分析周邊工業用戶的能源需求類型、規模、時間分佈等，評估能源樞紐的供應能力。
 - ✓ 考慮與工業用戶建立能源共用機制，例如餘熱回收利用、電力需求側管理等。
- 土地資源
 - ✓ 評估土地面積、地形地貌、土地利用規劃等因素，確保建設用地的可獲得性和合理性。
- 環境影響
 - ✓ 進行環境影響評估，分析能源樞紐建設和運營對大氣圈、水圈、地圈、生態圈等方面的影響。
 - ✓ 選擇環境影響較小的區域，並採取有效的環保措施。
- 社會影響：
 - ✓ 評估能源樞紐建設對當地居民的影響，例如就業機會、經濟發展、交通運輸等。
 - ✓ 加強與在地居民的溝通，爭取民眾的支持。
- 政策法規：
 - ✓ 瞭解國家和地方政府的相關政策法規，例如能源發展規劃、土地利用規劃、環境保護法規等。

- ✓ 確保能源樞紐的建設符合相關法規要求。

(2) 能源樞紐的技術選擇和整合

能源樞紐需要整合多種能源技術，才能實現能源的優化配置和高效利用。技術選擇和整合應遵循以下原則：

➤ 需求導向

根據當地能源需求特點，選擇適合的能源技術組合，例如以電力需求為主的區域，可重點發展太陽能、風能等發電技術；以熱能需求為主的區域，可重點發展汽電共生、熱泵等技術。

➤ 資源優勢

充分利用當地可獲得的能源資源，例如台灣中南部地區可優先使用太陽能發電，台灣中部地區可優先使用風力發電。

➤ 技術成熟度

選擇技術成熟、運行可靠、經濟效益較好的能源技術，降低投資風險和運營成本。

➤ 系統協調

確保各項技術之間的協調運行，例如：

- ✓ 電能系統：包括發電、輸電、配電、儲能等環節的協調。
- ✓ 熱能系統：包括熱源、熱網、熱用戶等環節的協調。
- ✓ 氫能系統：包括氫氣的生產、儲存、運輸、利用等環節的協調。

(3) 智慧化控制

利用資通訊科技和系統控制技術，例如 AI、大數據、雲端計算等，實現能源樞紐的智慧化管理，提高能源利用效率，降低運營成本。

(4) 能源樞紐的儲能容量規劃

儲能是能源樞紐的重要組成部分，可以幫助解決再生能源的間歇性和波動性問題，提高能源系統的可靠性和穩定性。儲能容量規劃需要考慮以下因素：

➤ 再生能源比例

再生能源在系統的占比越高，對儲能的需求就越大。

➤ 負載特性

負載的峰谷差越大，對儲能的需求也越大。

➤ 儲能技術特性

不同的儲能技術具有不同的特性，例如儲能容量、充放電速度、使用壽命、成本等。需要根據具體需求選擇合適的儲能技術組合。

- ✓ 電池儲能：適合短期、快速響應的儲能需求。
- ✓ 抽蓄水力儲能：適合大規模、長時間的儲能需求。
- ✓ 氫能儲能：適合跨季節、長時間的儲能需求。
- ✓ 其他儲能技術：例如壓縮空氣儲能、飛輪儲能等。
- ✓ 經濟效益：需要綜合考慮儲能系統的建設成本、運營成本和效益，選擇最具經濟效益的儲能方案。

(5) 能源樞紐對電網整合再生能源的影響

能源樞紐可以提高電網整合再生能源的能力，但也需要考慮以下影響：

➤ 電網穩定性

大規模再生能源併網會對系統的頻率、電壓等指標造成衝擊，需要採取措施保障電網的穩定運行，例如：

- ✓ 加強電網削峰填谷能力：建設抽蓄水力發電廠、尖載燃氣電廠等。
- ✓ 發展 VPP：整合分散式能源、儲能系統、可控負載等資源。
- ✓ 推廣 DR：引導用戶調整用電行為，減少對電網的衝擊。

➤ 電網投資

是否需要對電網進行升級改造，例如擴建輸電線路、建設智慧化控制系統等，以適應再生能源的併網。

➤ 電網調度運行

再生能源的不確定性會增加電網調度的難度，因此需要開發新的調度策略和技術，例如：

- ✓ 提高再生能源預測精度：利用先進氣象預報、機器學習等技術，提高再生能源發電量的預測精度。
- ✓ 優化調度策略：開發考慮再生能源特性的調度策略，例如前一日、抑或當日滾動預測和優化。

➤ 建設智慧化調度系統

利用 AI、大數據等技術，提高電網調度的效率和可靠性。

(6) 綠氫生產成本的降低和預測

綠氫是指利用再生能源電力電解水生產的氫氣，具有零碳排放的優點，被視為未

來重要的清潔能源載體。降低綠氫生產成本是推廣綠氫應用的關鍵，同時也是規劃能源樞紐的重要計畫，以下為綠氫相關的考量計畫：

➤ 電解槽成本

電解槽是綠氫生產的核心設備，研發高效、低成本的電解槽技術是降低綠氫生產成本的關鍵，例如：

- ✓ 提高電解槽的效率：降低單位氫氣生產所需的電耗。
- ✓ 採用低成本材料：例如非貴金屬催化劑、新型電解質膜等。

➤ 再生能源電力成本

綠氫生產需要消耗大量的電力，降低可再生能源電力成本是降低綠氫生產成本的另一個關鍵，例如：

- ✓ 推廣可再生能源的應用：提高可再生能源發電的規模效益，降低發電成本。
- ✓ 利用低價的再生能源：例如於冬季晴天中午運用多餘的風電、光電，降低綠氫生產的電力成本。

➤ 政策補助評估

政府的政策支持可以有效促進綠氫產業的發展，降低綠氫生產成本，例如：

- ✓ 綠氫產業發展規劃：若政府明確制定綠氫產業的發展目標、重點任務和政策措施，則綠氫的生產成本可能降低。
- ✓ 提供財政補貼：例如對綠氫生產企業提供投資補貼、電價補貼等。

(7) 綠氫生產和火力發電的優化

綠氫生產和火力發電可以相互協調，提高能源利用效率，減少碳排放，以下是此機制的考量計畫：

➤ 綠氫混燒

將綠氫混入天然氣中，在現有的火力發電廠中進行混燒發電，可以降低火力發電的碳排放，例如：

- ✓ 逐步提高綠氫混燒比例：根據技術發展和經濟性，逐步提高綠氫在天然氣中的混燒比例。
- ✓ 改造現有燃氣機組：對現有燃氣機組進行改造，使其能夠適應更高的綠氫混燒比例。

➤ 綠氫儲能

利用綠氫作為儲能介質，將再生能源產生的電力儲存起來，並於電力高需求期釋出，可以提高電力系統的可靠性和調度彈性。

➤ CCS

因混氫發電的尾氣仍有二氧化碳，因此若將混氫機組排放的二氧化碳捕集並封存到地層中，則可把火力發電的碳排降低至零排碳的程度。

(8) 能源樞紐與 CCS 的整合

CCS 技術可以捕獲火力發電以及工業製程尾氣中的二氧化碳，將其運輸到合適的地點進行封存，是實現淨零碳排的重要手段。能源樞紐可以與 CCS 技術整合，構建低碳能源系統，以下是整合 CCS 至能源樞紐中所需要的考量事項：

- 火力發電廠機組的 CCS 改造：對現有火力發電廠機組進行 CCS 改造，使之可捕集尾氣中的二氧化碳，以大幅減少碳排放。
- 二氧化碳的運輸和封存：能源樞紐可以作為二氧化碳的運輸和封存樞紐，例如建設二氧化碳管路，將捕集到的二氧化碳輸送到附近的地層中進行封存。
- 工業區的 CCS 整合：對於化工、水泥、鋼鐵等碳排放密集型工業，可以建設碳捕集設施，捕集工業生產過程排放的二氧化碳，並將其與火力發電廠捕集之二氧化碳共同輸送至封存場域進行封存。
- 二氧化碳的資源化利用：探索二氧化碳的資源化利用途徑，例如將二氧化碳轉化為化工產品、建築材料等，可以提高 CCS 技術的經濟效益。

能源樞紐是一個複雜的系統工程，同時也是未來能源系統發展的重要趨勢，它能有效整合再生能源、提高能源效率、減少碳排放，並促進本公司能源轉型與淨零排放技術的發展。本次與 EPRI 人員交流時，該院表示未來與本公司規劃能源樞紐概念設計過程中，將密切與本公司人員溝通，並隨時提出相關需求以利計畫之進行。本公司亦表示後續計畫進行期間，將與 EPRI 專家滾動檢討能源樞紐規劃內容，以期順利完成本合作案。能源樞紐的研究和規劃屬於本公司邁向 2050 淨零碳排的要項之一，未來將持續推動與 EPRI 的合作，以期順利協助既有的火力發電廠進行轉型。



圖 3-6 本公司代表團與 EPRI LCRI 團隊討論能源樞紐相關議題

四、心得與建議

本次出國行程安排相當密集緊湊，第一站參加 EPRI 夏季研討會，主題係以電業領袖的觀點，研析未來 AI 產業帶動資料中心之用電求及系統彈性資源的方案，並加速佈署電力業 CCS 及先進核能，以在用電增加趨勢下，仍能實現電力系統可靠及淨零排放。第二站前往 EPRI 夏洛特辦公室參訪，與 EPRI 輸電、配電和資訊科技 (TDI) 及發電部門等團隊交流，並與 LCRI 重要研究人員討論本公司研究計畫之合作近況。另外，在此特別感謝 EPRI 亞洲區總經理連天干博士 (Dr. T.G. Lian) 在研討會議及參訪夏洛特辦公室期間，所需之往返交通等相關事務安排，皆全程大力協助，讓本團一行四人在美國這幾天的行程圓滿順利。

(一) 夏季研討會心得

1. 這次參加美國 EPRI 夏季研討會對本團年輕成員來說是一個非常寶貴的經驗，能在研討會場合及歡迎宴會上有機會接觸到來自各電力公司、機構等專家和業界領袖，不僅擴展了專業知識，也對未來能源發展趨勢有了更深刻的理解。
2. 研討會涵蓋了多個與電力用電需求、發電、輸配電相關的主題，尤其是資料中心用電需求之增加趨勢、彈性電力資源引入、未來電網規劃投資及輸電新技術運用、政府監管創新，及電力 CCS 及先進核能佈署等議題。多位講者包含高階經理人及專家分享了最新的研究趨勢、電業內管理技術創新等實務及歷程，這些內容對於在工作中應對未來電力能源轉型挑戰提供了寶貴的見解。
3. 本次研討會期間亦與 EPRI 主管電網與能源系統整合事業副總 Daniel Brooks 先生會面(圖 4-1 左上), Brooks 先生對本公司電網穩定研發方向與未來合作規劃建議如下:
 - (1) 台灣電網屬獨立系統，未來可能會發生如英國一樣，雖整體電力系統頻率穩定，但各區域電網(如英格蘭、蘇格蘭等)卻有電力頻率不穩定相關問題。EPRI 目前已有軟體可以篩選與識別問題發生點，可作為台電未來建制區域電網能源輸紐的參考。
 - (2) 有關 AI 產業用電成長的評估，EPRI 的作法是先向這些業者詢問後，由各資料中心提供服務內容，以及該中心採用的演算法等，進而得出可能電力負載需求實際的量。經由此方式，可避免只依據業者單方面提出需求總量而錯估實際用電量，減少電力設備過度投資浪費。
 - (3) 因 EPRI 及台電目前在 LCRI 議題有 3 項案子進行合作研究，Mr. Brooks 建議未

來這 3 項計畫成果可整合 EPRI 與台電合作的其他研究案，以達成最大綜效，呈現進展成果，有利公司高層決策訂定；另可結合微電網與低碳能源的概念，並建議納入未來合作方案討論。

(4) Brooks 先生亦表示，配合 EPRI LCRI 每年向公司進行兩次進度報告的期程，明年希望前來台灣與公司高階主管會面，商討關於電網與能源系統整合相關事宜。

4. 此次研討會特別受益於諸多想法，如資料中心雖增加電力系統供電負擔，但亦能搭配佈署成為支援區域電網需求的靈活資源；及電力基礎設施的設標準化，制定統一的規範至關重要，以因應可能的供應鏈挑戰；及公用電業採用新技術（如動態輸電線容量等新技術），需要研究制定出完善的工作標準，以加快運用新技術的過程。另外，政府監管機構應研討如何更好地賦予先行者權力、刺激投資，不僅跟上技術進步的步伐，而且加速技術進步，並使國家能源擁有一個清潔、安全、可靠、負擔得起、公平的環境及彈性。因此，可以結合本地情況進行改進和創新，這是此次研討會帶來的最大啟發。

(二)EPRI 夏洛特辦公室與實驗室參訪交流心得

1. 本次參訪 EPRI 夏洛特辦公室與輸電、配電和資訊科技 (TDI) 及發電部門團隊交流，並與 LCRI 團隊討論的合作近況。在與 TDI 研究團隊交流部分，本團已更深入了解該輸配電部門近年及未來研究概況及研究諮詢架構，未來將與 EPRI 進行進一步交流，並將朝向把 EPRI TDI 相關知識資料庫引入公司，讓同仁可自由查詢方向前進。本次交流已進一步了解 EPRI 輸配電研究部門的諮詢架構與機制，並可對應至本公司在輸配電資產設備運轉維護所遇到的實際問題，如輸電線路因鹽霧害造成碍子洩漏電流及如何透過分析設備數據來增進資產管理決策等。
2. 在與發電交流部分，了解到 Digital twin 應用於燃氣渦輪機運維的方法，作為提升機調度優化與運維預測工具，利用從機組設備獲取之運行數據，運用機器學習技術建立模組，以幫助了解感測器及機組運行狀況監控和故障診斷，並給予最為合適關注及採取行動，並兼顧投資回報率。
3. 這次參訪 EPRI 位於夏洛特的辦公室與不同領域專家交流，是一次非常有價值的經歷。我們了解到，通過先進的傳感器和數據分析技術，實現對發輸配電設備的實時監測和管理，對於提高整體電力系統的穩定性和可靠性至關重要。EPRI 的研究成果和技術創新為我們提供了寶貴的參考，期待將這些經驗應用到台灣的電力系統優化中。



夏季研討會與 Daniel Brooks 等人交流



夏季研討會歡迎晚宴



EPRI 夏洛特辦公室與 LCRI 團隊交流



EPRI 夏洛特辦公室

圖 4-1 EPRI 夏季研討會與夏洛特辦公室參訪照片