

出國報告（出國類別：開會）

## 因應氣候政策之能源系統規劃 研討會

服務機關：台灣電力公司綜合研究所

姓名職稱：楊宗霖 企劃控制專員

派赴國家/地區：美國/洛杉磯

出國期間：113年9月14日至113年9月20日

報告日期：113年11月18日



## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：

因應氣候政策之能源系統規劃研討會

頁數 33 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

楊宗霖/台灣電力公司/綜研所企劃控制專員/(02)2360-1252

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9月14日至113年9月20日

派赴國家/地區：美國/洛杉磯

報告日期：113年11月18日

關鍵詞：能源系統(Energy Systems)、氣候分析(Climate Analysis)、整合資源規劃模型(Integrated Resource Planning model, IRP model)、脫碳化(Decarbonization)

內容摘要：

美國電力研究院(Electric Power Research Institute, EPRI)2024年於美國洛杉磯舉辦能源輸送與用戶解決方案(Energy Delivery & Customer Solutions, ED&CS)研討會，本次出訪主要參與能源系統與氣候分析(Energy Systems and Climate Analysis, ESCA)議題討論，相關內容包含：一、能源系統與氣候分析；二、美國減碳趨勢；三、電力部門淨零轉型；四、氣候風險與政策。

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

# 目錄

一、出訪目的及行程紀要.....	1
二、會議內容.....	3
(一) 能源系統與氣候分析.....	3
(二) 美國減碳趨勢.....	5
(三) 電力部門淨零轉型.....	11
(四) 氣候風險與政策.....	20
三、心得建議.....	23

## 一、出訪目的及行程紀要

配合政府 2050 淨零排放路徑及策略規劃，本公司有必要了解國際電業如何因應氣候政策要求，建構高再生能源占比、低碳排放之能源系統。同時，借鏡國際電業發展經驗，通盤考量穩定供電、能源技術研發、經濟成本效益、環保限制，逐步規劃我國能源系統轉型路徑。

本次出訪參加美國電力研究院(Electric Power Research Institute, EPRI) 能源輸送與用戶解決方案(Energy Delivery & Customer Solutions, ED&CS) 研討會，主要參與能源系統與氣候分析(Energy Systems and Climate Analysis, ESCA)議題討論。從電氣化與環境永續的角度，蒐集研討會之相關成果，了解未來能源系統整合資源規劃方向；蒐集 EPRI 能源系統與氣候政策分析成果，探討 REGEN 電力經濟模型於我國 2050 淨零排放議題之分析應用，以務實計算各類能源配置及碳排放量，作為公司未來電網投資及財務規劃之參考。

ED&CS 顧問委員會(Advisory Councils)審查其各自與 EPRI 合作研發計劃的執行進度，識別需要解決的新問題，並優先考慮未來研究計劃，以滿足產業、決策者和社會的需求。同時，各項 EPRI 計劃/領域的顧問委員會議，也是各產業交流資訊和經驗的絕佳機會，共同找出有助於企業成功的資訊和技術。計劃/領域顧問委員會將審查過去一年的研究成果，精進本年度的活動，並規劃未來的研究計劃組合。本公司作為 EPRI 會員，有權利受邀參加每年舉行兩次的顧問委員會議，針對明年度 EPRI 的研究議題

進行投票，選擇對本公司重要的研究議題，提高其研究的優先序位。

表 1 出國行程表

日期	地點	拜訪機構	工作內容
113/09/14	往程	-	-
113/09/15 至 113/09/18	美國加州 洛杉磯	EPRI	■參加能源輸送與用戶解決方案研討會。 ■討論能源系統與氣候分析議題。
113/09/19 至 113/09/20	返程	-	-

## 二、會議內容

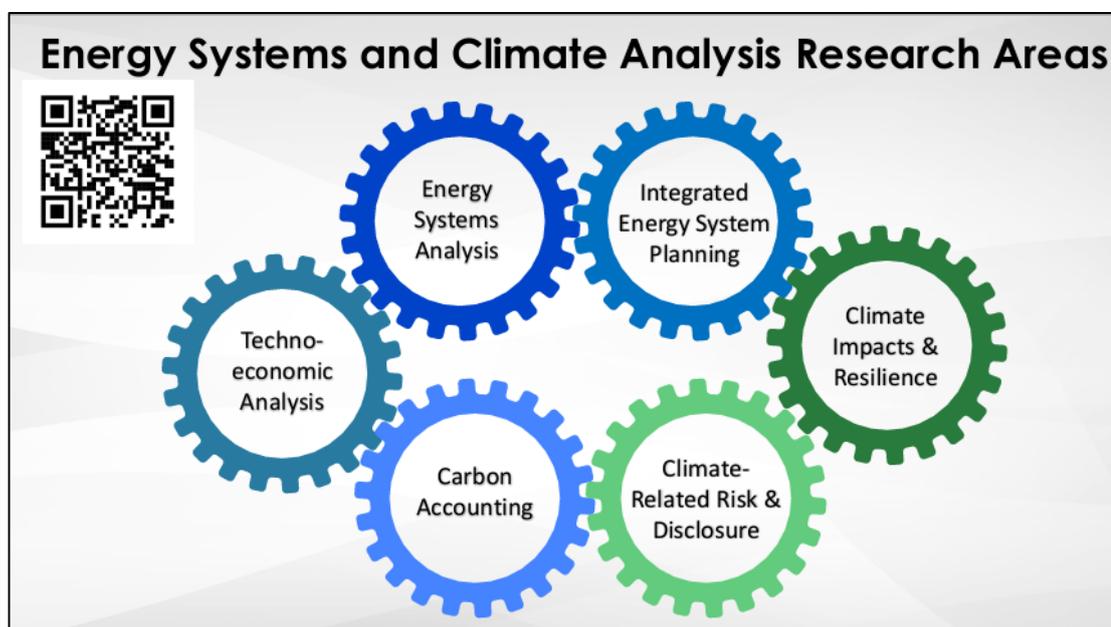
### (一) 能源系統與氣候分析

脫碳(Decarbonization)和氣候影響驅動企業經營決策、投資策略、環境管理、資源規劃、商業策略、政策制定及產業結構的變化。EPRI 的研究能夠提供技術資料和資訊、分析工具及觀點，協助電業進行資源與策略規劃，並在能源轉型的過程中促進電業與監管機構、股東和其他利害相關人之互動。具體而言，包括研析電力部門和總體經濟達成淨零排放的技術路徑、評估前瞻能源技術的價值、比較氣候政策設計，及評估氣候相關風險、影響和電力部門韌性。

能源系統與氣候分析(Energy Systems and Climate Analysis, ESCA)小組所進行的研究，有助於公私部門在減碳、氣候韌性、政策、投資策略、規劃方法、新興技術、環境管理、目標設定和風險管理等方面進行決策。尤其，政策、技術、經濟和氣候影響之間的交集是一個不斷演變的領域，充滿許多挑戰。ESCA 團隊能夠提供基本的見解，協助電業面對這些挑戰，提供長期策略建議。

ESCA 提供技術數據和資訊、分析工具以及能源系統建模，為電業在脫碳化的過程中提供轉型策略建議，瞭解既有和未來政策的影響，並評估氣候變遷對電力系統韌性之影響。大致可分為六大研究領域：技術經濟分析(Techno-economics Analysis)、能源系統分析(Energy Systems Analysis)、整合能源系統規劃(Integrated Energy System Planning)、氣候

影響與韌性(Climate Impacts & Resilience)、氣候風險與資訊揭漏(Climate-related Risk & Disclosure)、碳核算(Carbon Accounting)等，如圖 1 所示。



資料來源：EPRI

圖 1 能源系統與氣候分析之研究領域

為了達成 2050 淨零排放，EPRI 能源系統與氣候分析研究，提出以下重要觀點。

- (1) 以清潔電力(Clean Electricity)、能源效率(Efficiency)、電氣化(Electrification)之 3Es 為基礎，實現大幅度的減碳。
- (2) 透過電網現代化與投資，支持系統可靠性、韌性、電氣化、彈性、資產利用與用戶選擇權。
- (3) 擴大既有低碳資源的價值，維持核能、再生能源、儲能等重要淨零能源。
- (4) 淨零必須仰賴技術進步與研究發展，例如先進核能、CCS、生

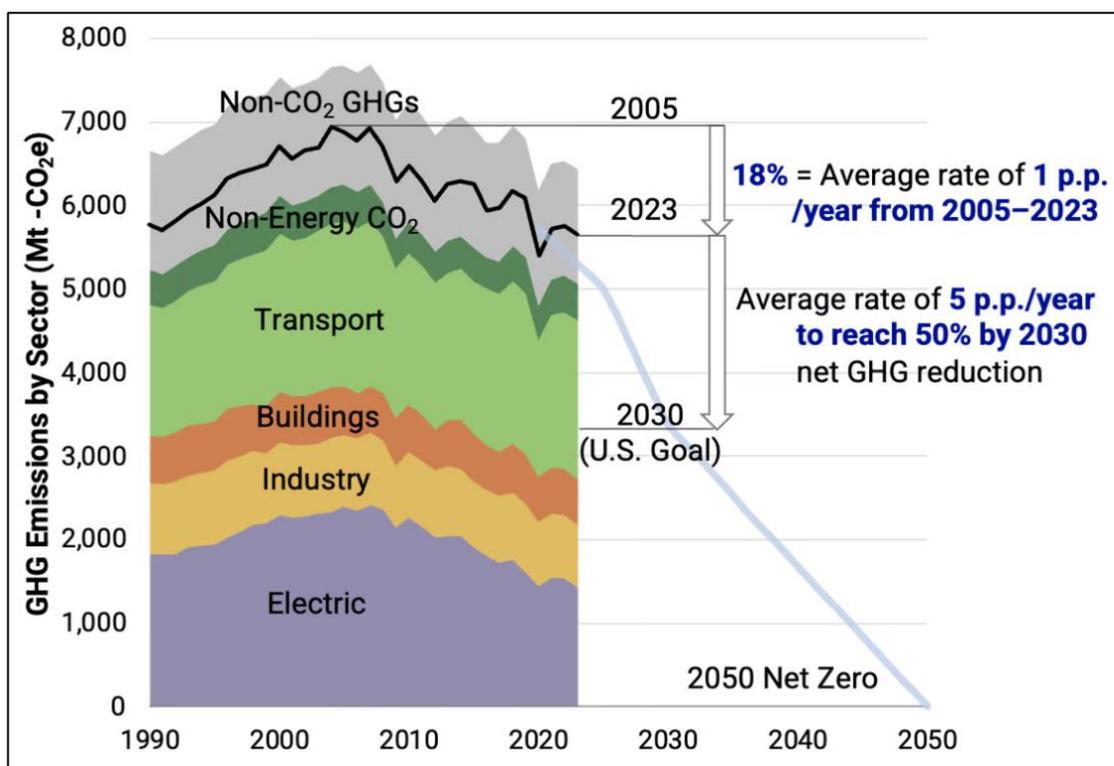
質能、氫能、低碳燃料等穩定電力供給。

- (5) 評估高價值的技術選項，例如天然氣與生質能搭配 CCS、直接空氣捕捉等，有效控管成本。
- (6) 從發電端至終端能源應用，評估不同低碳燃料組合情境，彌補減碳目標差距。
- (7) 根據不同容量因素與天然氣使用種類等情境，評估天然氣的容量與基礎設施的減碳效益。
- (8) 考量用戶參與、成本可負擔與社會公平，淨零目標的實踐取決於家戶、企業的參與，以及低碳技術應用。

## (二) 美國減碳趨勢

為了達成 2030 年美國氣候政策目標，減碳速率必須提高至歷史速度的 5-6 倍。根據 Rhodium 研究顯示，相較於 2022 年水準，2023 年美國經濟體系的溫室氣體排放量減少約 1.9%，而 GDP 經濟成長率為 2.4%。此外，自 2005 年以來，美國溫室氣體排放量下降 18%，其中電力部門減量幅度高達 41%。

依據巴黎協定，美國 2030 年減碳目標為：減少溫室氣體排放量達 2005 年水準的 50-52%，故未來平均每年需減少 5-6% 的排放量，才能於 2030 年達成目標。再者，減碳力道還必須持續加速，才能達成 2050 淨零排放目標，如圖 2 所示。



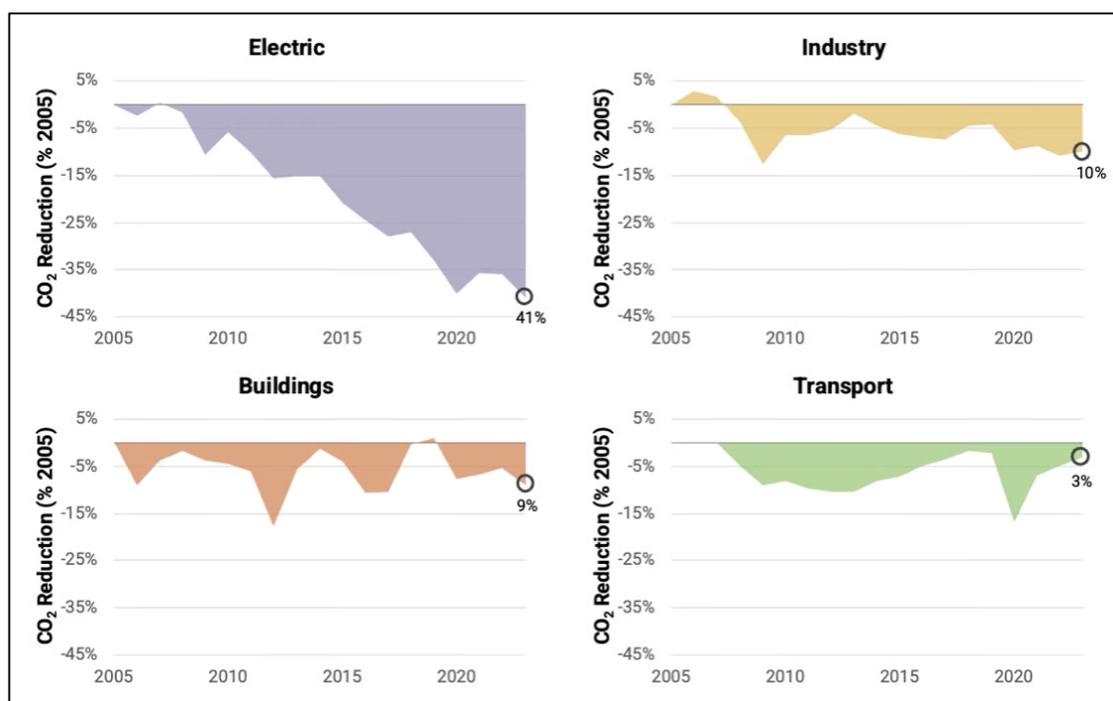
資料來源：EPRI

圖 2 美國減碳趨勢

綜觀美國經濟體系的各個部門，過去以電力部門減碳貢獻最為巨大，占總體經濟減碳的 80%。受益於燃煤發電減少至 2005 年尖峰水準的 60%，2023 年燃煤發電占比約 17%，故 2022-2023 年減碳 8%，累積減碳幅度高達 41%。

交通運輸部門，相對 2005 年水準，目前僅減碳 3%。然而，2022 至 2023 年間，電動車銷售成長 50%，占全部汽車銷售量的 10%，短期排碳量成長 2%。此外，住宅及商業建築部門，由於 2023 年冬季氣候溫和、供暖需求降低，2023 年減碳幅度為 4%，相對 2005 年水準，已降低 9% 排碳量。工業部門，2023 年在經濟成長帶動下碳排放量成長 1%，然而，

相對 2005 年水準，已降低 10% 排碳量。如圖 3 所示。

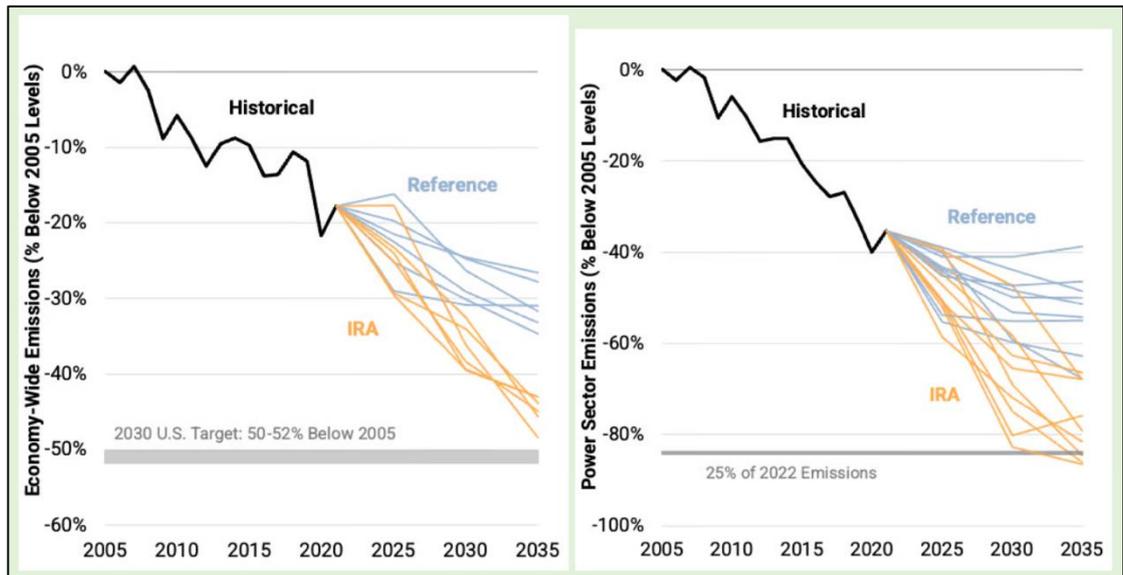


資料來源：EPRI

圖 3 美國各部門減碳趨勢

根據 EPRI 近期研究顯示，評估美國降低通膨法案(Inflation Reduction Act, IRA)，預期在未來十年內可使整體經濟的減碳量與清潔發電量成長約一倍。

模型顯示，在實施 IRA 下，2035 年整體經濟的碳排放量可能會從 2005 年水準降低 43-48%；相比之下，若不實施 IRA，則只會下降 27-35%。除了減少碳排放之外，IRA 的目標在於使清潔能源轉型更公平且可負擔，預期 2035 年每個家庭每年能源成本最多可節省 400 美元。再者，IRA 可加速清潔能源的佈建，風力和太陽能發電量的成長速度可達到沒有 IRA 時的四倍；且 2035 年電動汽車占新車銷售比例將達到 30-82%。美國 IRA 的減碳效果可參考圖 4。

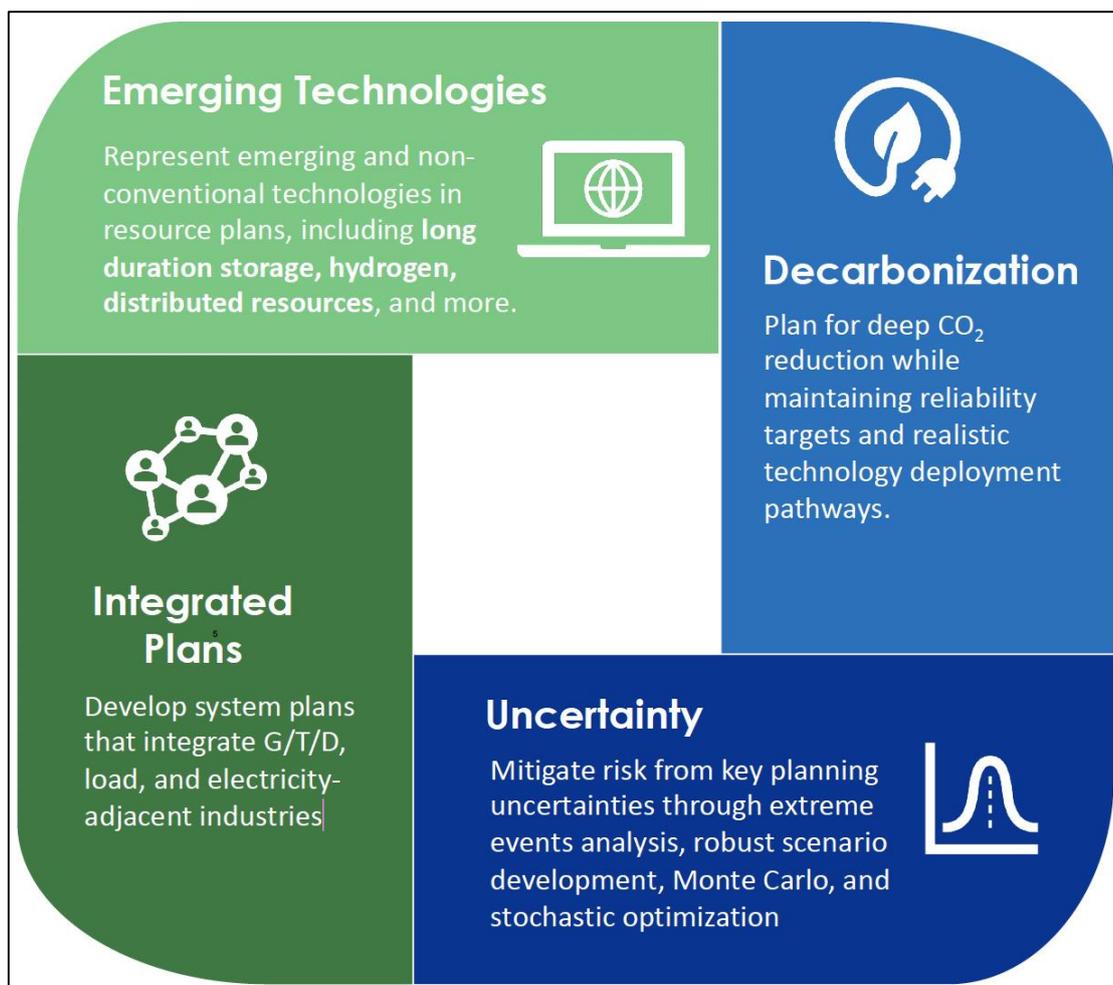


資料來源：EPRI

圖 4 美國 IRA 的減碳效果

EPRI 建議整合能源系統規劃方法，需涵蓋四個分析內容，依序為

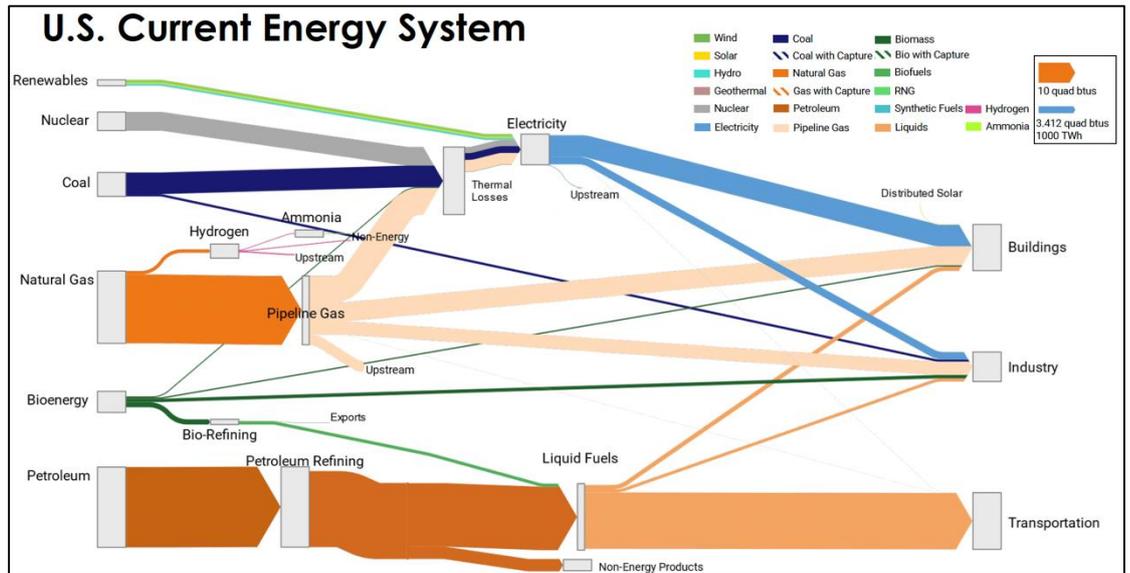
(1)新興技術：包含長效型儲能、氫能、分散式能源等；(2)脫碳化：在維持供電可靠度與實際技術佈署下，進行深度減碳計畫；(3)不確定性：透過極端事件分析、穩健情境發展、蒙地卡羅與隨機最佳化方法，減緩關鍵規劃的不確定風險；(4)整合規劃：整合發輸配、負載及電力相關產業。如圖 5 所示。



資料來源：EPRI

圖 5 整合能源系統規劃方法

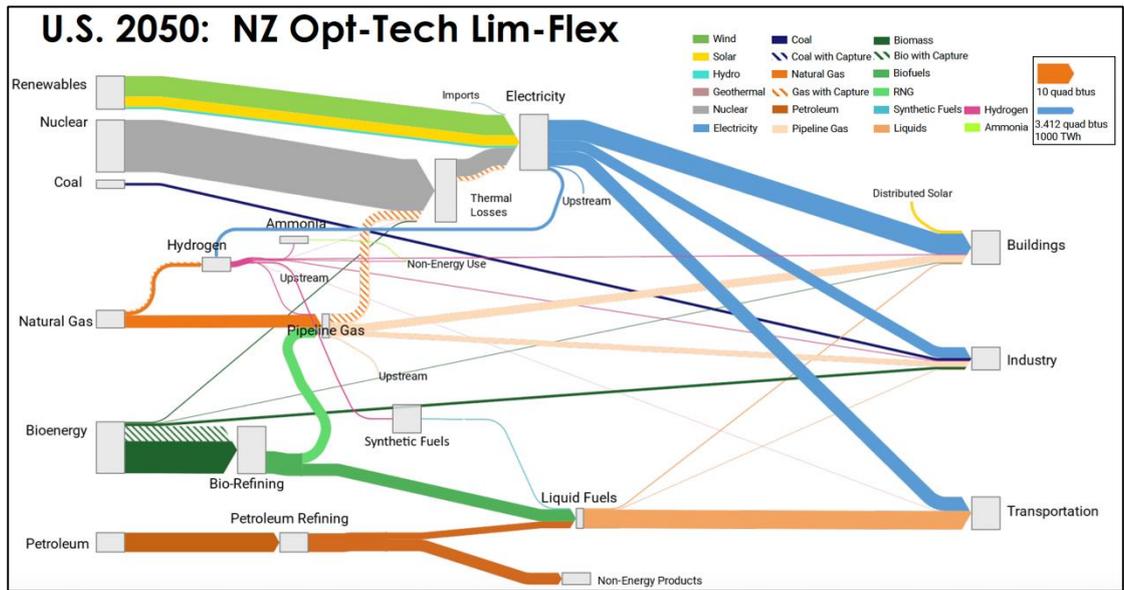
觀察美國能源系統現況，初級能源以化石燃料為大宗，煤礦主要用於燃煤發電，天然氣經由管線運輸，用於燃氣機組發電，其餘輸送至建築部門供暖並滿足工業部門需求，此外石油主要用於交通部門，滿足車輛燃料需求。如圖 6 所示。



資料來源：EPRI

圖 6 美國現行能源系統示意

相對地，美國 2050 淨零能源系統，化石燃料使用大幅下降，初級能源以再生能源（風力、太陽光電及水力發電）、核能及生質能為主，加上少部分的天然氣機組搭配 CCS，產生電力供給。因應電氣化趨勢，建築、工業及交通等終端能源使用部門均大量使用電力，取代過去的化石燃料。值得注意的，交通部門使用石油的比例仍超過五成，如圖 7 所示。

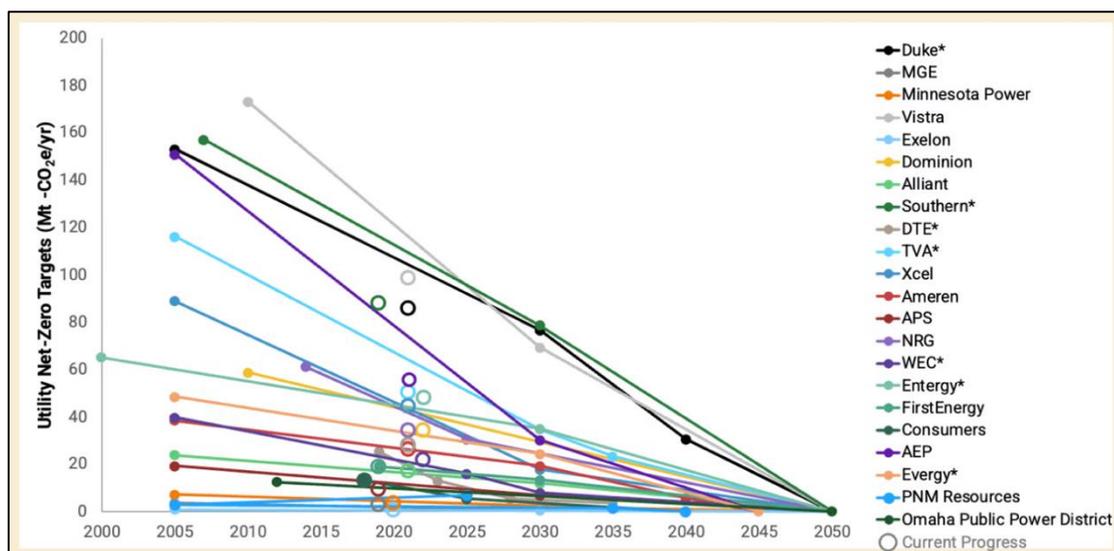


資料來源：EPRI

圖 7 美國 2050 淨零能源系統示意

### (三) 電力部門淨零轉型

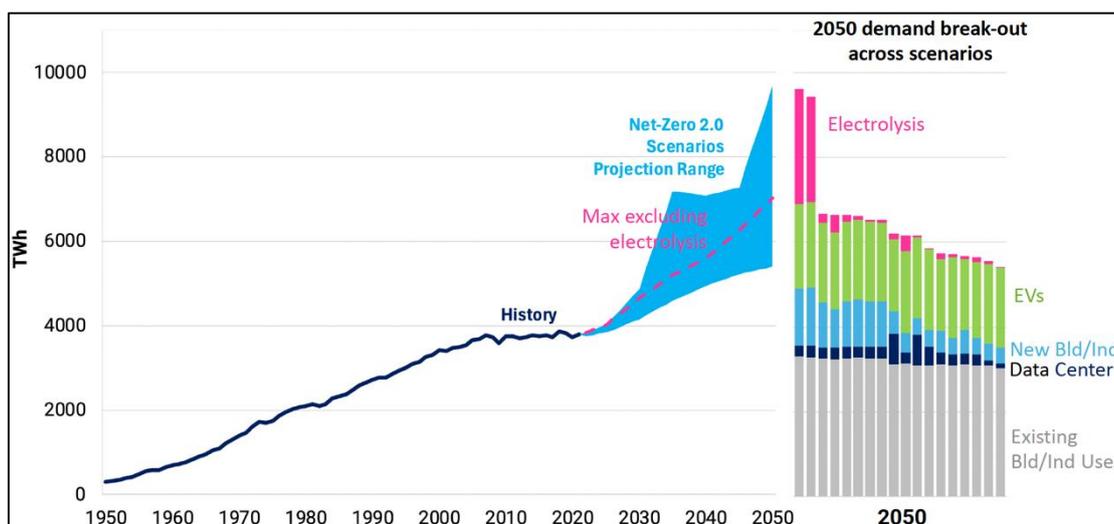
美國許多電力公司已公佈自願二氧化碳減量目標（如圖 8 所示），其中包含發電機組達成淨零排放的目標。同時，2005 年電力部門約 90% 的碳排放量，已受到電力公司目標或州政府碳排放政策的限制。



資料來源：EPRI

圖 8 美國電力公司自願性淨零目標

目前美國電力需求每年近 4000TWh，考量 2050 各種可能情境，分析電力需求組成，除了既有住宅及工業部門的用電需求外，未來電力需求成長主要來自電解產氫、電動車、住宅及工業部門電氣化、資料中心等。如圖 9 所示。



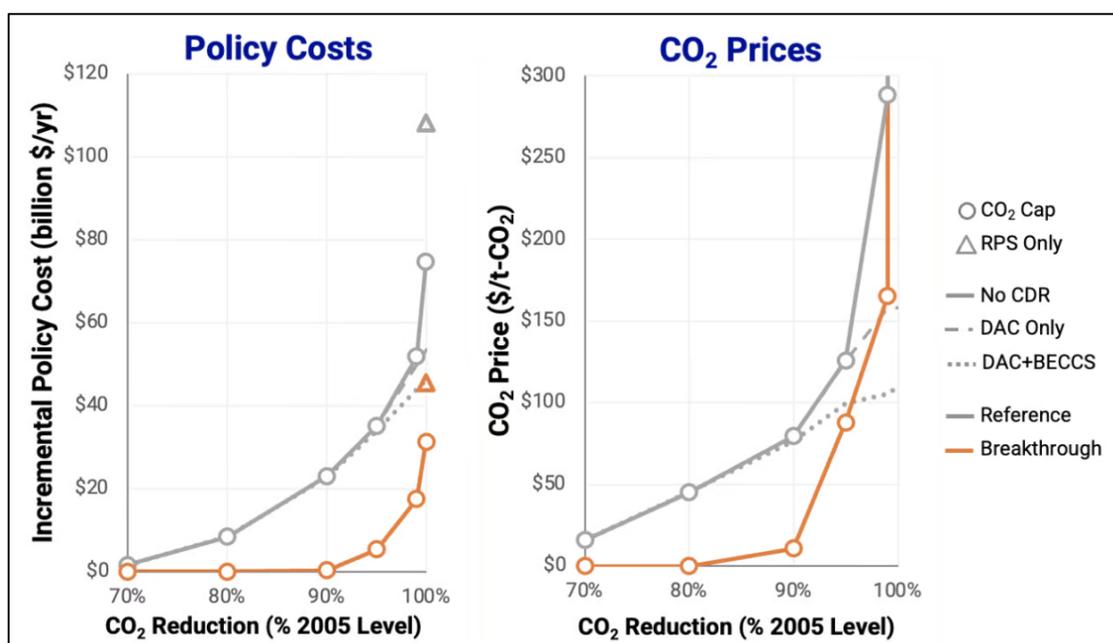
資料來源：EPRI

圖 9 美國 2050 年電力需求成長趨勢

然而，達成淨零排放是一個多目標的均衡問題，包含以下四個面向。

### (1) 成本可負擔(Affordability)

在潔淨能源轉型過程中，決策者試圖平衡幾個目標，包括成本負擔能力、永續性、可靠性、韌性和公平性。這些權衡取捨取決於情境和背景，在某些情況下，採取行動可同時改善多個目標的系統效能。例如，高效的電氣化可以減少家庭能源支出，同時降低二氧化碳排放量並改善空氣品質。但在其他情況下，提高一個領域的績效意味著降低另一個領域的績效，例如在更嚴苛的減碳條件下，政策成本可能會增加，可參考圖 10 美國減碳政策成本與碳價變化。



資料來源：EPRI

圖 10 美國減碳政策成本與碳價變化

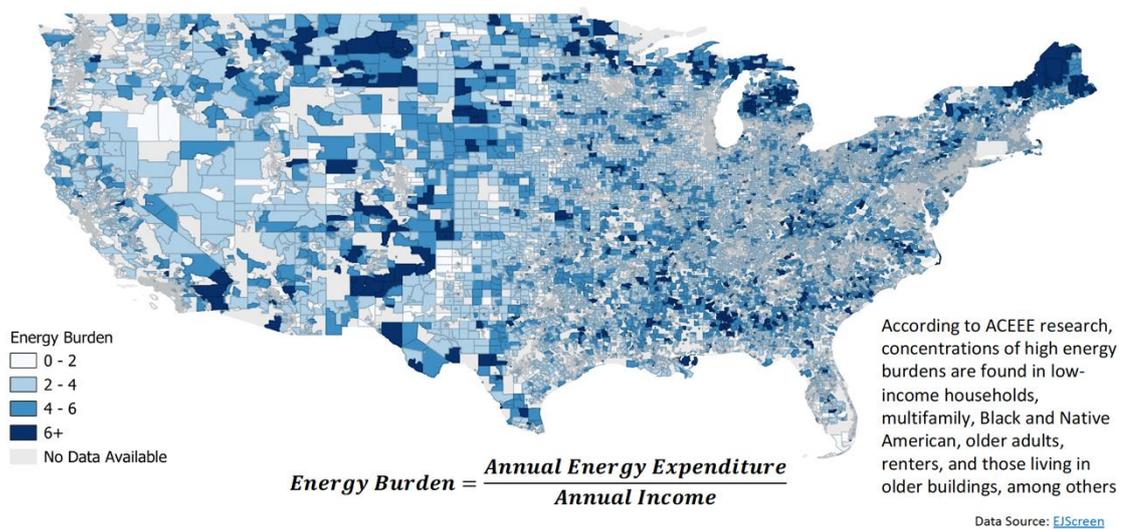
有鑒於達成 2050 年淨零排放目標，需要鉅額資金投入減碳技術研發，對於如何估算脫碳成本，目前還沒有明確的共識。系統成本、發

電價格變動、用戶電力成本、政策成本和收入，以及能源支出的所有計量方法，都能部分反應能源轉型成本。

比較各種脫碳成本指標並應用於具體的政策情境與路徑，將有助於理解和傳達這些指標的意義和重要性，並讓利害關係人更清楚瞭解各項減碳策略可能需要的成本，以及如何解釋成本和價格的估算。

關於脫碳路徑的成本可負擔(Affordability)，從支出成本面思考，具體包含用戶帳單、系統成本、電力或能源服務、機會成本、監管費用、技術研發、終端技術，分別由公用事業、製造商、研發投資人、用戶、政府及社會大眾負擔。

所謂能源負擔率係指每年能源支出占總收入的比率，目前美國各區域的能源負擔率並不公平，根據研究發現，高能源負擔率現象往往集中於低家庭收入與低社會經濟地位的區域，如下圖 11 所示。為了促進社會公平，未來可藉由市場機制與費率設計、補貼、目標制定、價格訊號等政策工具，達成重分配效果。



資料來源：EPRI

圖 11 美國區域能源負擔率

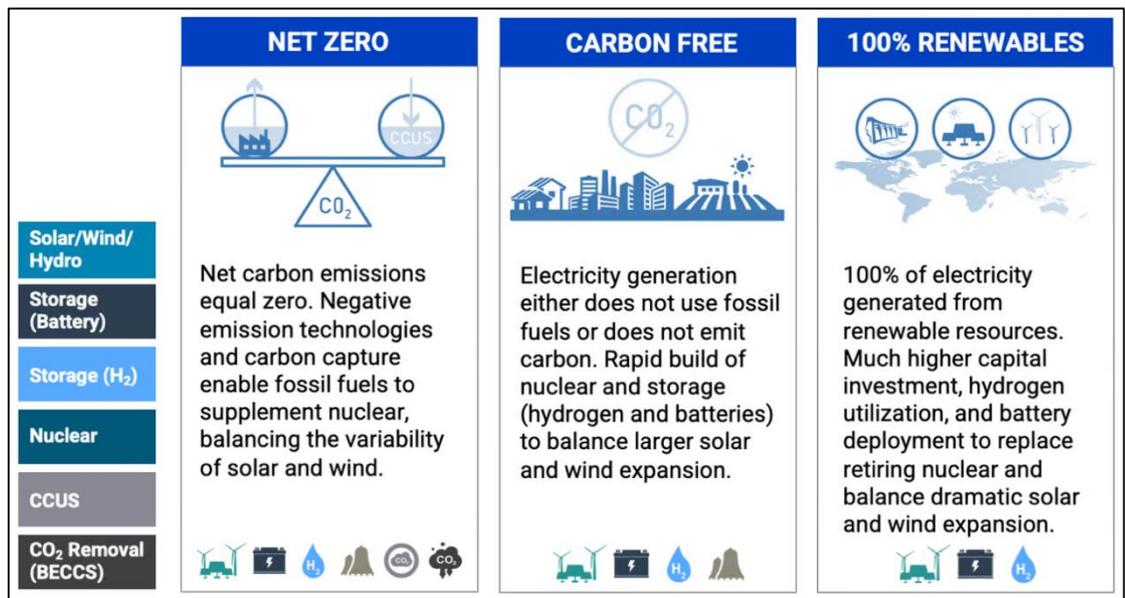
綜合上述，能源效率提升和電氣化趨勢，可能提高總體經濟達成淨零路徑的負擔能力，同時，降低整個經濟體碳排放量的政策干預，可能提高家庭的能源服務成本。若整體經濟未進行所得重分配，低收入戶家庭恐面臨能源支出比例大幅增加。因此，需要透過費率設計、政策干預或其他補償措施，進行成本或收入的重分配。而重新分配的方法將大幅改變特定人群和家庭的結果，可能對用戶行為產生無法預測的影響，最終電費總額可能增加。

## (2)目標定義(Target definition)

減碳目標的清楚界定十分重要，會影響成本與技術組合。同時，電力部門目標必須與整體經濟體目標有所區別，儘管電力產業在淨零路徑中扮演重要角色，但並非整個經濟體減碳的唯一機會。

有關減碳目標的定義，從寬鬆到嚴苛可區分為三種。首先、淨零排

放(Net-zero)可在考量負排放、碳捕捉及封存技術下使用化石燃料發電。  
 零碳(Carbon free)則不使用化石燃料發電，仰賴核能、氫能與電池儲能平衡大量再生能源併網。100%再生能源(100% Renewables)完全使用再生能源發電，必須仰賴高額資本支出、氫能應用與電池佈建，因應核能發電廠除役，以及平衡更大量的風力與太陽光電併網。如圖 12 所示。



資料來源：EPRI

圖 12 減碳目標定義

### (3)可選擇性(Optionality)

在整個經濟體系中實現脫碳化，同時維持能源供應的可靠度，必須仰賴一系列多元的低碳技術。無論是在整體經濟或電力部門實現淨零排放，對資源與技術選擇施加更大的限制，恐顯著增加實現減碳目標的整體成本。因此，完整的資源組合與先進技術可降低未來的減碳成本。

### (4)創新(Innovations)

目標定義和時間對投資和成本十分重要。在總體經濟範圍的減碳目標下，可靈活分配二氧化碳的正排放和負排放，將讓各產業和地區能夠遵循自身的減碳路徑，同時最大限度地降低整體成本。

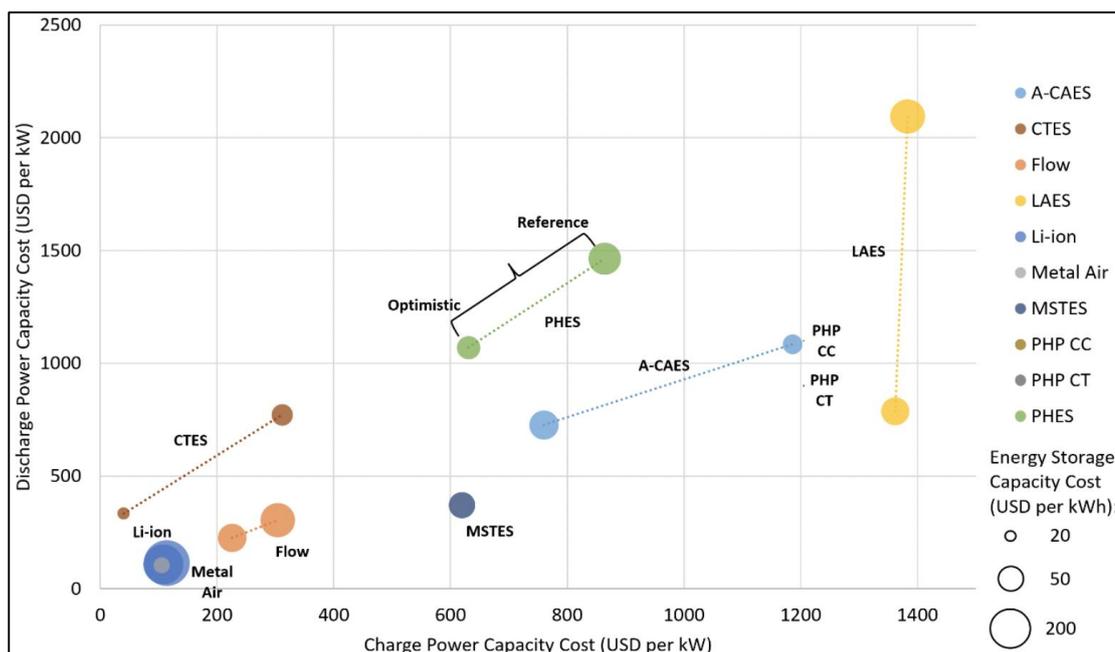
雖然有許多潛在的低碳技術情境與方案，但未來的成本和效能仍然存在很大的不確定性。邁向淨零能源之路需要多種形式的創新，包含從技術、市場和監管結構到用戶行為和商業模式等不同面向。因此，強大的研究、開發和示範，對於推進可實現淨零排放的技術而言至關重要。

本次主要參與 P201-C「因應電力系統轉型之新興技術分析」計畫討論，本計畫目標為透過經濟分析，探討未來電力系統減碳 80%以上，所需具備的既有與新興技術，作為公用事業投入研究發展與經營策略規劃的決策參考。具體可分為個研究方向：(1)電力系統分析、(2)新興技術的相互影響、(3)對整體供需資源規劃、成本及溫室氣體排放的影響。

本研究小組還為改善長期資源規劃和企業風險管理提供關鍵資訊、分析和工具，包括新興和現有技術的客觀成本和性能數據，以及解決去碳化、技術整合和韌性規劃的新資源規劃方法。

以 EPRI 預估 2035 年儲能裝置容量成本為例，液態空氣儲能(Liquid Air Energy Storage, LAES)成本變異性最大，充電成本約 1400 美元/kW，放電成本參考情境(Reference)高達 1400 美元/kW、樂觀情境(Optimistic)可低至 800 美元/kW。相反地，鋰離子電池(Lithium-ion batteries, Li-ion)

成本最低。如圖 13 所示。



資料來源：EPRI

圖 13 2035 年儲能裝置容量成本

主要原因為液態空氣儲能(LAES)使用多餘再生能源電力為液化器提供動力，液化器將空氣冷卻並壓縮成 $-196^{\circ}\text{C}$ 的液體形式，然後將其儲存在罐中，需要時將其釋放、加熱並轉化為氣體推動渦輪機產生能源。以這種方式改變能量狀態會導致能量損失，LAES 效率會降低至原有的 50-70%，這比效率約為 99%的鋰離子電池(Li-ion)效率低得多。

此外，儲能技術在深度減碳情境中扮演重要角色，配合淨零排放或 100%再生能源政策目標，各種儲能技術更具有高度價值。同時，由於各個區域的再生能源稟賦差異，容量擴充模型的結果也有所差異，例如風力發電充足的區域享有較低的能源成本，適合發展橫跨多天的長效型儲

能；而太陽光電豐富的區域，單日再生能源滲透率高，需要日內儲能進行調度。

電力部門和經濟體系達成零碳的過程中，隨著再生能源、儲能、終端使用電氣化、電力衍生燃料和分散式能源資源的成長，將為系統可靠度帶來挑戰和機會。本研究採用 EPRI「美國區域經濟、溫室氣體與能源模型(US-REGEN)」，以 2050 年前總體經濟體系達成淨零排放為目標，評估各種電力部門技術路徑，並採用更細緻的商用容量擴充模型與電網運轉模擬模型，辨識每種路徑的潛在可靠性問題與挑戰。研究結果顯示，若 2050 年完全淘汰現有可彈性調度的發電機組，在缺乏可靠的發電容量選項，且大量間歇性再生能源併網之下，將為系統可靠度帶來嚴峻的挑戰。同時，本研究也強調區域內輸電容量不足的潛在問題，故在投資發電設備時，也需要更新輸電基礎設施，以改善深度脫碳下的系統可靠度。

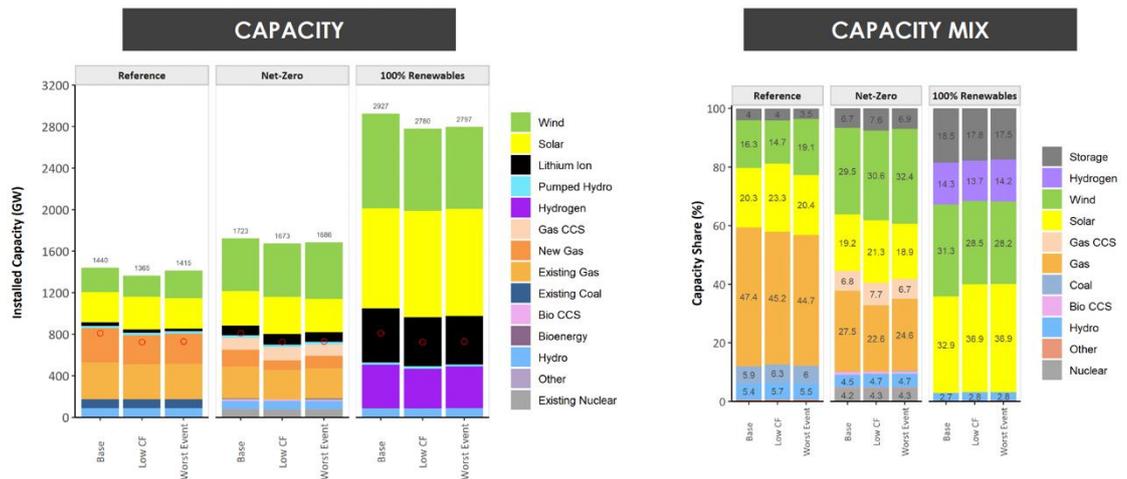
本計畫可深入瞭解政策驅動深度脫碳化的潛在系統可靠性挑戰，有助於公用事業制定因應策略與緩解計劃，包括採購額外的彈性發電資源。持續探討未來在各種系統條件與情境下的可靠性議題，例如：燃氣機組除役、新資源的供應鍊限制、電池退化與供電短缺。

#### (四) 氣候風險與政策

因應氣候風險與溫室氣體排放相關政策趨勢，電力部門環境與政策分析研究必須及時分析新的氣候政策與法規和其他具影響力的提案，為公用事業提供策略規劃，提供資訊與利害關係人討論，包含政策分析、對規劃成本與碳排放量的影響、區域的相互影響等。

隨著未來再生能源大量併網，氣候變遷與天氣變化對太陽光電與風力發電出力的影響日益顯著，EPRI 根據容量因數歷史資料，設計三種情境：基礎情境(Base)、低容量因素情境(Low CF)、最差事件情境(Worst Event)，評估 2050 年參考情境(Reference)、淨零情境(Net-Zero)、100%再生能源情境(100% Renewables)的裝置容量。

研究結果如圖 14 顯示，若再生能源發電出力惡化，太陽光電裝置容量增加，將部份取代風力裝置容量。同時，「低容量因素情境(Low CF)」與「最差事件情境(Worst Event)」兩個情境的 2050 年電力需求與尖峰負載差異不大。此外，「100%再生能源情境(100% Renewables)」需積極佈建氫能發電機組，主要提供備轉容量。



資料來源：EPRI

圖 14 分析美國天氣變化對 2050 裝置容量的影響

此外，今年度 EPRI 成立 P261「溫室氣體核算與策略應用」計畫，目標提升公司員工對於溫室氣體排放核算問題的相關知識，探討較具挑戰性的溫室氣體核算新興領域，例如範疇三係企業在上下游價值鏈所產生的各種相關排放，所涉及的供應鏈複雜，不易核算。同時，深入瞭解 24/7 全時無碳電力(24/7 Carbon-Free Energy, 24/7 CFE)，以及電力公司開發每小時匹配的全時無碳電力產品所需考慮的複雜經濟、技術、法規和運營等因素。藉此參與溫室氣體核算技術工作小組，協助公司員工瞭解溫室氣體排放抵銷的價值，以及如何使用它們來協助公司實現減碳目標。

確認(Validation)是有系統、有記錄的評估，以確定建議的溫室氣體抵換專案(GHG emission offset projects)或其他溫室氣體前瞻性「主張」是否基於合理的假設和計算，並符合相關協議或方法。通常，溫室氣體盤查(GHG emissions inventory)不會進行確認，因為它不具前瞻性；溫室氣體

抵換專案則會在實施前進行確認。確認(Validation)通常由獨立且公正的第三方進行。

驗證(Verification)是一種有系統、有記錄的評估，用支持性證據確認報告的溫室氣體排放量或排放減量的計算符合相關計劃規則和協議，並已如實報告。驗證的目的在於「證明」輸入資料、計算和最終結果是根據相關規則開發的，而且這些元素是真實且精準的。同樣地，驗證(Verification)通常由獨立且公正的第三方進行。

雖然有時候確認(Validation)和驗證(Verification)兩個詞彙會交替使用，但在探討溫室氣體核算和抵換時，它們實際上有不同的意涵。例如，某公用事業決定執行一項溫室氣體抵換專案(GHG emission offset projects)，計畫捕捉二氧化碳排放並將其封存於混凝土，確認(Validation)係指在執行此計畫前，公用事業需向第三方機構提交正式專案文件，以確認是否符合計畫相關規章與此特定的碳抵銷方法論。驗證(Verification)則發生於專案實施後，公用事業會向第三方機構提交數據、報告和其他資訊，以驗證實現多少碳排放減量，而在第三方機構簽發碳抵換額度前，必須審核並批准最終的驗證報告。

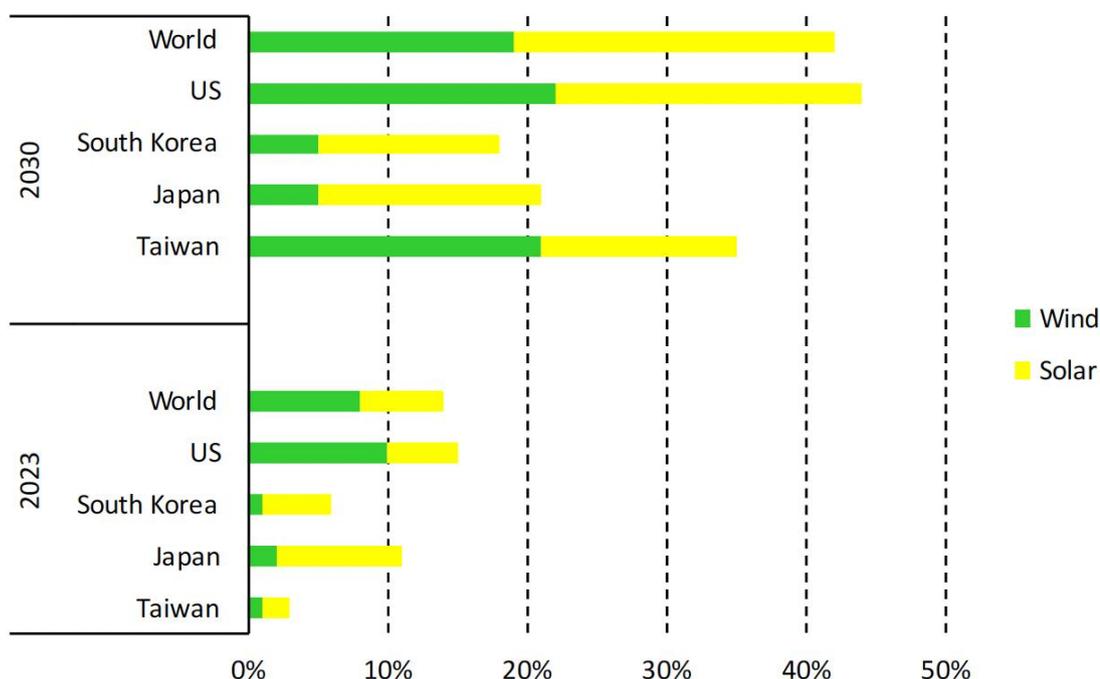
### 三、心得建議

透過參與 EPRI 研究計畫，與 EPRI 專家協調討論、合作研究，我們可以了解新興能源技術的經濟性與有效性，取得高可信度的研究資料來源，為公司經營策略、資源規劃、負載預測和第三方利害關係人提供獨立分析資訊，對於新興能源技術在電力部門與總體經濟深度減碳過程中所扮演的角色，提出可行的發展策略方針。同時，利用先進的能源經濟模型工具，及時分析政府提出的減碳政策，協助公司分析利弊得失、評估成本效益。

觀察美國減碳趨勢與電力部門淨零策略，綜合比較全球、美國、日本、南韓及我國之電力部門淨零路徑，可以發現，將風力與太陽光電整合至淨零路徑情境，對於實現淨零排放目標至關重要。2030 年風力和太陽能發電占比規劃，南韓和日本約 20% 左右；然而，我國在非核政策限制下，2030 年風力和太陽能發電占比需超過 30%，始能符合 2050 年淨零排放路徑的要求。

根據彭博新能源財金(Bloomberg New Energy Finance, BNEF)公布新能源展望報告，2030 年全球風力與太陽能發電占總發電量的比例將超過 40%，與國際能源總署(International Energy Agency, IEA)2024 年發布的淨零情境一致。然而，如今只有少數國家（如丹麥、西班牙、愛爾蘭）的風力與太陽光電占比達到相同水準。彙整全球、美國、日本、南韓及我國風力與光電占比現況與目標，如圖 15 所示

## Shares of Wind and Solar in Electricity Generation in Net Zero Roadmaps and Net Zero Scenarios



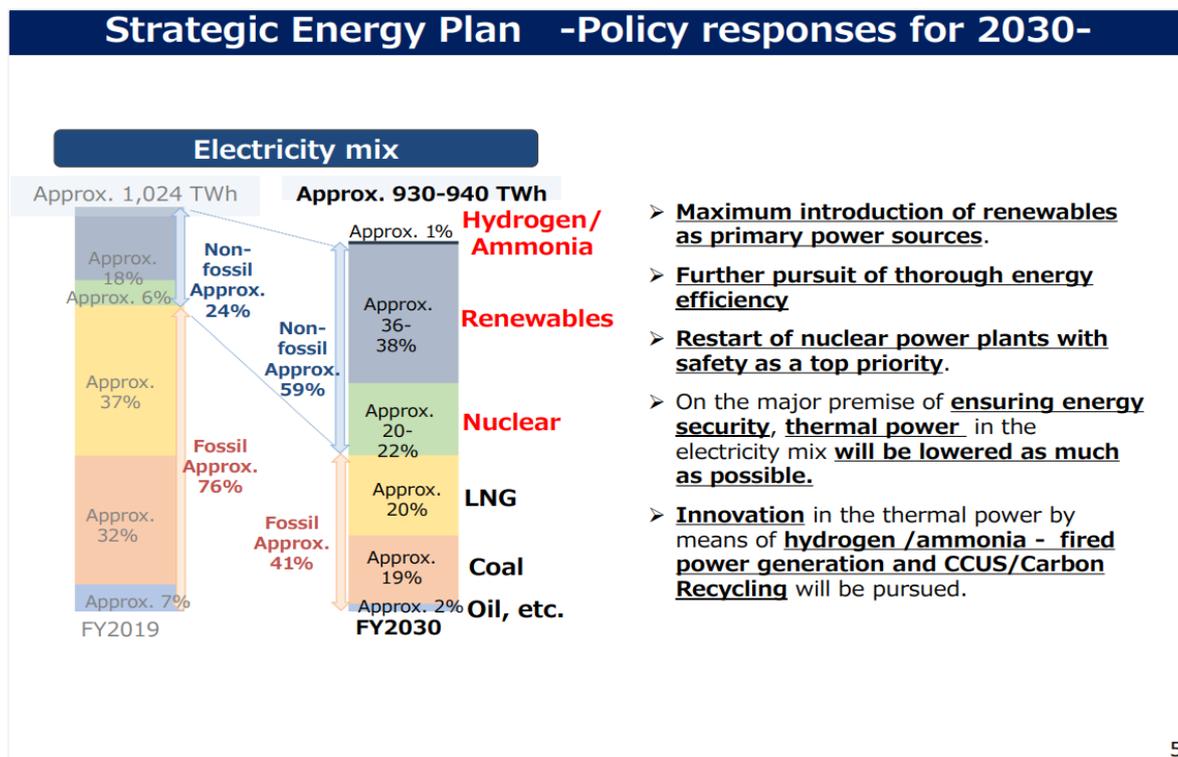
Sources: Japan 6<sup>th</sup> Strategic Energy Plan; South Korea's 11<sup>th</sup> BPE, Taiwan REGEN Net Zero Scenario, BNEF 2024 New Energy Outlook

圖 15 比較各國風力與光電占比

此外，間歇性再生能源，尤其是陸域風力與太陽光電，隨著成本下降且政策支持而日益增加，預計會在電力系統去碳化過程中發揮顯著的效益。然而，額外的風力和太陽能發電容量的經濟價值會隨著其滲透率的增加而降低。因此，重要的是系統成本，而非單一電廠的均化成本，這就是電力系統深度減碳研究，通常會去找尋低排放發電資源組合的原因。同時，面對間歇性再生能源、儲能、低碳穩定的能源資源，具有獨特的經濟特性，需要詳細的模型工具進行評估。

根據日本經濟產業省（Ministry of Economy, Trade and Industry, METI）公布之第六版能源策略規劃，設定 2030 年的電力配比目標為：氫氦能 1

%、再生能源 36-38%、核能 20-22%、天然氣 20%、燃煤 19%、燃油與其他 2%，如圖 16 所示。



資料來源：經產省第六版能源策略規劃

圖 16 2030 年日本電力配比目標

日本目標是在 2030 年前將溫室氣體排放量減少至 2013 水準的 46%，並在 2050 年前達成淨零排放。目前發電是日本最大的二氧化碳排放源，佔 2020 年總碳排放量的 37%。因此，針對電力部門的各項技術，日本訂定淨零路徑發展目標，如表 2 及表 3 所示。

表 2 2030 年日本電力淨零技術與里程碑

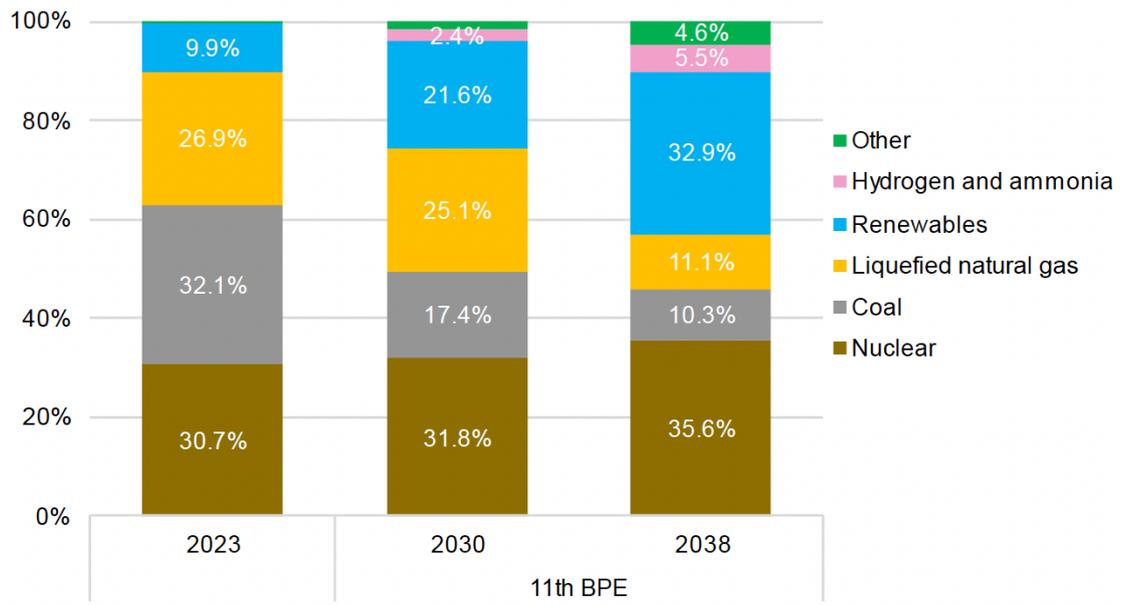
技術	里程碑
核能	<ul style="list-style-type: none"> <li>•在目前運轉的 12 座反應爐基礎上，2030 年政府目標再增加 26 座反應爐。</li> </ul>
再生能源	<ul style="list-style-type: none"> <li>•2030 年再生能源發電（包含風力、太陽光電、地熱、水力發電、生質能等）須達到 36~38%。</li> <li>•離岸風電裝置容量達 10 GW、太陽光電裝置容量達 104~118 GW。</li> </ul>
氫氨能	<ul style="list-style-type: none"> <li>•2030 年氫氨能發電占比達 1%。</li> <li>•2030 年燃氣發電導入氫混燒比例 30%。</li> <li>•2030 年燃煤發電導入氨混燒比例 20%，2035 年達 50%。</li> <li>•推廣混燒與專燒技術技術示範。</li> </ul>
化石燃料	<ul style="list-style-type: none"> <li>•2030 年燃煤發電占比降至 19%（2021 年為 32%）。</li> <li>•2030 年燃氣發電占比降至 20%（2021 年為 37%）。</li> </ul>

表 3 日本淨零政策配套措施

主要政策	說明
綠色創新基金 (Green Innovation Fund)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 成立於 2021 年，初始資金為 2 兆日圓。</li> <li>• 為關鍵減碳技術之研究發展，提供長達 10 年的支持。</li> </ul>
綠色轉型 (Green Transformation, GX)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 目標在 10 年內募集 150 兆日圓的公私部門投資，以支持脫碳計畫。</li> <li>• 2024 年 2 月首次發行 GX 轉型債券，這些債券將由碳定價導入財務資源。政府目標透過發行主權 GX 轉型債券，募集 20 兆日圓，以支持公私投資目標。</li> </ul>
碳費	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 自 2028 年起適用於化石燃料進口商，初期課徵費用低，其後逐步增加。</li> </ul>
碳交易機制	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2023 年 4 月起以自願為基礎，實施碳交易機制，參與者承諾並揭露範疇一及範疇二之溫室氣體減量目標。</li> <li>• 預計 2033 年對電力公司實施碳權競標。</li> </ul>
氫能事業促進法案 與 CCS 事業法案	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2024 年 5 月立法，目標佈建氫能設施、促進 CCS 商業發展。</li> <li>• 實施差價合約機制，彌補生產低碳氫氣和化石燃料之間的差距。</li> </ul>

此外，日本能源策略規劃要求現有燃煤電廠導入氫混燒技術，主要因素如下。(1)日本燃煤電廠相對多，約占總發電量 30% (2021 年燃煤發電裝置容量為 49 GW)，在不淘汰這些燃煤機組下，氫混燒技術提供減碳方法。(2)土地限制往往是日本公用事業發展再生能源的挑戰。(3)日本政府目標成為混燒技術的領先者，從而擴大技術輸出。值得注意的，日本政府透過綠色創新基金、低碳與零碳技術容量支付機制，持續為開發氫混燒技術提供財務支援。

再者，根據南韓第 11 次長期電力供需基本計畫，2023 至 2038 年核能與再生能源發電大幅成長，而化石燃料發電顯著下降。核能是南韓政府減碳路徑規劃的核心，2030 年核能發電占比約 30.7%，政府目標在 2035 年前試行 700 MW 的小型核能發電技術(Small Modular Reactor ,SMR)，預計 2038 年核能發電占比達 35.6%。此外，2030 年氫氫能發電占比為 2.4%，2038 年成長至 5.5%。綜觀南韓零碳能源規劃，2023 年核能及再生能源發電占比約 40%，未來加上氫氫能發電，2030 年零碳發電占比超過 50%，2038 年達 70%。如圖 17 及表 4 所示。



Source: [Ministry of Trade, Industry and Energy](#)

圖 17 南韓發電占比目標

表 4 南韓電力部門淨零路徑目標

	2030 年	2038 年
核能	1.4 GW Saeul-3 和 1.4 GW Saeul-4 兩個 反應爐正式商轉。	•增加大型核能達 4.4 GW，小型核能 700 MW。
再生 能源	風力與光電累計裝 置容量：72 GW。	•風力與光電累計裝置容量：115.5 GW。  •再生能源總裝置容量：119.5 GW。  •目標每年增加 6 GW 之風力和光電裝 置容量。
氫能	發電占比達 2.4%。	•發電占比達 5.5%
儲能	-	•長效型儲能裝置容量達 21.5 GW。
化石 燃料	-	•增加 LNG 區域供熱發電廠至少 2.5 GW。  •區域供暖燃氣電廠轉型為氫混燒發 電。  •14.1 GW 燃煤電廠轉型為燃氣發電。  •將 2038 年除役的 12 座燃煤電廠轉型 為零碳（氫能）發電。

借鏡美國能源系統規劃研究成果，回顧東亞地區（包含日本、南韓與我國）之淨零政策，可初步歸納達成淨零排放所面臨的七大挑戰。依序說明如下：

- (1) 供應鏈(Supply chain)：因應潔淨能源佈建與人力資源部署，如何持續維護既有能源系統，並維持健全的供應鏈，以安全、可靠、環境友善的方式提供設備元件；同時，東亞地區如何建構進口氫氦能等低碳燃料之全球供應鏈，以實現國內氫能經濟體系，也是達成淨零排放目標的關鍵。
- (2) 先進技術(Advanced technology)：為達成減碳，相關先進技術的技術與經濟潛力為何？如何取得技術進步，足以支持低碳燃料的生產、運輸、儲存和利用，具體包含：CCS、氫氦能、地熱、海洋能、儲能技術等。
- (3) 可靠性(Reliability)：淨零路徑該如何滿足系統可靠性與韌性的要求？如何提升運轉能力以控制動態且分散的資源？同時監管與規劃程序如何支援未來能源系統的需求。
- (4) 電氣化(Electrification)：利害關係人網路（包含公用事業、監管機關、技術供應商、市場營運者）如何協調以降低電氣化的障礙？同時如何改善電網規劃及營運，透過智慧充電、快速充電與儲能整合電力系統與交通網路。
- (5) 需求面參與(Electrification participation)：在容量擴充、輸電和配電系

統規劃中納入彈性需求和分散式資源，對經濟和碳排放的影響為何？而終端用戶採用彈性資源的驅動因素為何，同時用戶會對哪些市場訊號做出反應。

(6) 負載預測(Load forecasting)：預測如何同步整合再生能源變動與負載型態、天氣對負載的動態影響，並考量機率性的預測方法？如何更新資料以包含分散式資源、終端技術應用、天氣歷史資料與未來預測？

(7) 氣候韌性(Climate Resilience)：因應東亞地區颱風、地震、海嘯等自然災害與極端事件，現有的氣候相關資料有哪些缺口，以及哪些變數和指標可有效應用於電力系統？在設計新資產時，我們如何有效地應用氣候趨勢和預測。

我國面對減少溫室氣體排放量的挑戰，未來建議有幾個策略選項，包含：(1)提升能源效率：在供應相同終端能源服務的條件下，減少能源使用；(2)電力部門減碳：採用低碳發電技術、儲能、輸電系統、需求面管理等方法；(3)終端用戶電氣化：針對交通運輸部門、住宅及工業部門供暖，以電力取代化石燃料使用；(4)加速新興技術的創新發展：涵蓋生質能、CCS 碳捕捉、氫能、先進核能、長效型儲能等技術；(5)減少土地碳排放量：土地利用相關的減緩碳排放機會，包括將具生產力的土地用於農業、減少食物浪費、改變飲食習慣，以及改善耕地和牧場的管理策略，在建置太陽光電設施的案場，評估蓄電共生與農電共生之可行性。

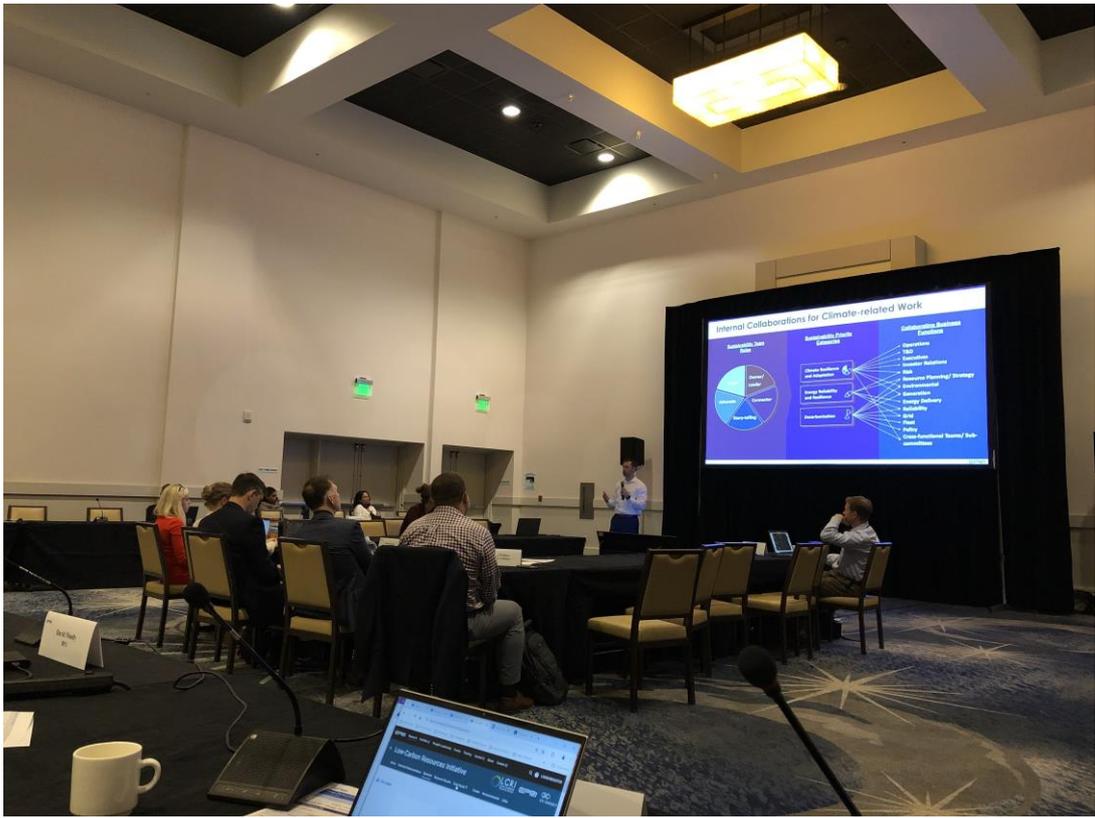


圖 18 EPRI 能源輸送與用戶解決方案研討會



圖 19 與 EPRI 能源系統與氣候分析研究人員合影