

出國報告（出國類別：開會）

參加美國電力研究院發電諮詢會議
與低碳資源倡議會議
暨出席電力技術轉移獎頒獎典禮

服務機關：台電綜合研究所

姓名職稱：吳成有主任

派赴國家/地區：美國/費城

出國期間：113年9月8日至113年9月14日

報告日期：113年11月1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發電諮詢會議與低碳資源倡議會議暨出席電力技術轉移獎頒獎典禮

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/綜合研究所/化學與環境研究室/張茱琪/ 8078-2244

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

吳成有/台灣電力公司/綜合研究所/化學與環境研究室主任/8078-2231

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 8~14 日

派赴國家/地區：美國/費城

報告日期：113 年11 月1 日

關鍵詞：美國電力研究院（EPRI）、低碳資源倡議（Low-Carbon Resources Initiative, LCRI）、技術轉移獎、大型儲能、氫能樞紐（Hydrogen Hub）

內容摘要：

本公司因在超超臨界發電機組系統水處理方面的傑出表現，榮獲2023年美國電力研究院（Electric Power Research Institute, EPRI）技術轉移獎（Technical Transfer Award）。此次出國除代表公司參加在費城所舉辦的頒獎典禮之外，也參加同一時間與地點所舉辦的 EPRI Generation Advisory Meetings/ LCRI Committee Meetings。藉此機會瞭解國際減碳技術的發展現況，並蒐集 EPRI 所主導的 LCRI 在各領域之技術進展及未來規劃。尤其在大型儲能、跨域示範計劃、終端用戶技術及氫能樞紐相關等場次的會議中獲致寶貴的資料，並與相同領域專家交流的機會，對於未來的研究規劃助益良多。

目次

一、 出國任務與行程	1
二、 參加 2023 年EPRI發電技術轉移獎	3
三、 參加 EPRI-LCRI 低碳資源倡議會議	5
(1) 參加 P221: Bulk Energy Storage 議程.....	7
(2) 參加 LCRI's Crosscutting Demonstration Portfolio 議程.....	15
(3) 參加 Integrated Energy System Analysis 議程.....	18
(4) 參加 End Use Technical Subcommittee Session 議程.....	21
四、 心得與建議.....	32

一、出國任務與行程

目標：為積極響應政府2050淨零排放政策，本所近年來持續投入相關領域研究。此次獲頒EPRI發電技術轉移獎，將藉由出席頒獎典禮及參與EPRI/LCRI會議，與國際專家學者交流，深入了解全球電力技術發展趨勢，以提升本所研發能量，為達成淨零目標貢獻心力。

緣起：為落實永續能源政策，本公司積極推動能源結構改造與效率提升，並在超超臨界發電機組系統水處理方面取得卓越成果。此次榮獲2023年EPRI發電技術轉移獎「腐蝕產物監控優化」類別獎項，表彰本公司在林口電廠鍋爐系統水質改善上的卓越貢獻，故擬於會議出席授獎並和專業人士進行電力技術交流。

實施要領：為表彰本公司在超超臨界發電機組系統水處理方面的傑出貢獻，並深入了解全球電力技術發展趨勢，將出席 EPRI Generation Advisory Meetings/ LCRI Committee Meetings 接受頒獎，並積極參與各項技術交流，以拓展國際視野。

預期成果：透過此次出席典禮並獲獎，將能有效展現本公司在研究發展領域的卓越成果，提升國際知名度，進一步建立與國外電力機構的交流管道。藉由各項技術經驗的交流與分享，可深入了解國際先進技術，為本公司中長期的經營策略規劃提供寶貴的參考，加速技術創新。

表1. 出國行程簡述如下

日期	行程內容
9/8 (日)	從台灣前往費城
9/9 (一)	發電諮詢會議第1天
9/10 (二)	發電諮詢會議第2天，低碳資源倡議會議第1天，技術轉移獎頒獎典禮
9/11 (三)	發電諮詢會議第3天，與低碳資源倡議會議第2天
9/12 (四)	低碳資源倡議會議第3天
9/13-14 (五、六)	從費城返回台灣

二、參加 2023 年EPRI發電技術轉移獎

EPRI 發電技術轉移獎 (Technical Transfer Award; TTA) 是由 EPRI 發電技術轉移委員會 (Generation Council)，每年從引進其技術或程序的全球發電行業中，評選出成效卓著且能使公司和整個行業受益的專業人士所授與的一個獎項。旨在表彰將研究成果轉化為應用成果的領導者和創新者。發電獎獲獎者展示了發電研究和技術的卓越應用，以解決規模和重要性問題，在公司內部和整個行業中倡導一項技術，推動電力行業的進步，並為電力行業提供有意義的利益。本公司於2017年起參與 EPRI 鍋爐和渦輪蒸汽暨循環化學計劃Boiler and Turbine Steam and Cycle Chemistry program (Program 226) 計劃，該計劃乃通過EPRI所提供實用的解決方案，針對腐蝕的關鍵因素和沉積物損傷機制進行研究以來降低運維風險。該計劃內容涵蓋制定作業指引、問題解決技術方案，及現場的示範和訓練。目的在幫助工廠運營商和公用事業公司管理水循環化學，以減少計劃外停機和 O&M 成本。2023年度發電技術轉讓委員會共審查了 24 個獎項提名，選出包括本公司林口電廠#1機腐蝕產物監測優化的 11 個技術轉移獎項36 名獲獎者，並於2024/9/10 假費城市中心萬豪酒店 (Philadelphia Marriott Downtown) 進行授獎表揚。

本公司與 EPRI Program 226合作經由問題確定、開發和導入改進措施進行傳統火力電廠飼水與鍋爐水循環迴路中腐蝕沉積物的生成與傳輸進行管控。所導入的改善措施節省了大量用水和化學藥品，不僅減少了氧化鐵流向爐管，降低了常見破管相關故障的風險，也降低了鍋爐化學清洗頻率。

2023年的執行內容係通過與 EPRI 合作，改進氧氣含量和水質 pH 值控制方式，首先，項目團隊在飼水系統中使用線上比電導率讀數來控制氫氧化銨的進料速率，精確的 pH 值控制。不僅減少了氫氧化銨的使用量，也延長了冷凝水淨化系統再生的間隔，從而節省了用水量並降低了閥門、泵、管道和其他設備的磨損率。其次，團隊通過關閉低壓和除氧飼水加熱器的排氣口，來優化氧氣進料程序，以減少機組的氧氣損失量。這需要在加熱器 3 和 4 間增設隔離閥件，來減少了壓縮氧氣的使用量，又可以同時保持加氧處理的化學組成能更接近目標設定值。可經由模擬方式來確定氧氣控制系統是否能夠滿足這些新條件下的需求，結果表明的確有修改需要。經多次反應給原廠，並最

終得到製造商的認可和進行了修正。為了向台電公司領導層和製造商代表保證對林口1號機組化學成分的改變是成功的，團隊採用了原子吸收、分光光度法、離子色譜法和線上鐵分析儀的創新組合，以驗證鐵基管材腐蝕速率已從5~10 ppb降低到低於 1 ppb 或檢測不到（ND）。

與 2021 年相比，經這些改善措施後，台電公司 2022 年林口電廠 1 號機組避免了 25 次冷凝水淨化系統再生。以每次再生的總成本，包括人力、化學品、廢水處理和用水，估計為新臺幣 48,326 元，故 1 號機組每年的總節省估計為新臺幣 1,208,153 元（相當於約 40,000 美元）。林口 2 號和 3 號機組正在實施相同的更新改善，預計將可達到相同的節省成本效益。

林口 1 號機組化學成分的優化降低了腐蝕和腐蝕產物向蒸汽產生器（鍋爐）的輸送（氧化鐵）。這減少了鍋爐管中鐵氧化物的沉積，從而減少熱傳遞損失，使機組能夠以更低的化學清潔頻率更高的燃燒效率。此外，因為氧化鐵沉積速率降低時，高價的鍋爐管故障處理次數降低得多。在更改之前，鍋爐化學清洗之間的預期時間間隔為 5 年。通過這一改善措施，根據美國類似機組的經驗，化學清潔間隔可能會延長到 15 到 20 年。包括廢物處理和清除在內，這種規模的化學清潔鍋爐的成本可能高達新臺幣 30,000,000 元（1,000,000 美元）。這些循環化學改進預計在 15 至 20 年期間，每台設備可節省 60,000,000 新臺幣（2,000,000 美元），因降低氧化鐵沉積導致減少傳熱問題，所能節省的燃料很難預測，但估計會非常顯著。

本次出國行程中重要的任務為，代表台電公司團隊出席頒獎典禮，領取這項殊榮。



頒獎人：EPRI副總裁 Neva Espinoza女士



領獎後致詞



會場中於TPC Station 與EPRI孔博士



EPRI主題區與P226計劃主持人Brad等

三、參加 EPRI-LCRI 低碳資源倡議會議

電力研究院（EPRI）與氣體技術研究院（GTI）於2020年8月10日宣布，啟動為期五年的低碳資源倡議（LCRI），旨在加速低碳能源技術的開發與示範。此倡議旨在幫助電力和天然氣行業實現全球經濟範圍內的深度減碳，並吸引眾多來自能源行業的主要贊助商。該計劃目標是開發低碳發電技術及能源載體（如氫氣、氨氣、合成燃料和生物燃料），同時通過合作推動清潔能源研發。該計劃的贊助商包括美國主要電力公司和燃氣企業，並預計將大幅增加其初始的1億美元資金。LCRI不僅能夠促進技術的開發與評估，還將向公眾及利益相關者宣傳低碳未來的技術路徑與選項。

EPRI（電力研究院）的低碳資源倡議（LCRI）是一項國際合作計劃，旨在加速實現經濟範圍內的淨零排放目標，並促進低碳技術的發展。該倡議針對電力和天然氣領域的技術發展，通過跨部門的協作推動清潔能源的研發，並力圖創造可持續的未來。

LCRI 聚焦於低碳發電技術和低碳能源載體，如氫氣、氨氣、合成燃料和生物燃料等。其研究重點包括開發潛在技術、評估技術性能，以及向公眾和利益相關者提供技術選項的資訊。該倡議的資金目標為 1 億美元，通過公私合作大幅擴展初始資金。

此計劃的重點是通過技術開發、展示與評估，為全球減碳目標提供可負擔的路徑，同時確保能源的可靠性和經濟性。LCRI 的合作夥伴包括來自全球主要能源公司的贊助商，他們共同為推動能源轉型貢獻力量[1] [2].

- [1] [lcri-netzero.epri.com - Introduction and Framing](https://lcri-netzero.epri.com)
- [2] [lcri-vision.epri.com - LCRI Research Vision](https://lcri-vision.epri.com)

本公司於今（113）年5月正式加入美國電力研究院（EPRI）轄下低碳倡議專案（Low-Carbon Resources Initiative, LCRI）計畫，希望藉由EPRI的專業知識與全球觀點協助釐清臺灣未來淨零路徑與挑戰等議題，協助台電推動淨零轉型，在資源配置與技術布局上求得最佳解方。

5月29日於台電綜合研究所辦理「EPRI LCRI專案啟動會議」，邀請本公司參與電力淨零排放推動會報相關單位與會，由EPRI專家說明計畫執行情形及其研究成果亮點，俾後續展開與我方研究合作。5月30日於總管理處舉行「清潔能源轉型合作備忘錄」簽署儀式，由董事長曾文生（時任台電代理董事長）與EPRI總裁兼執行長Arshad Mansoor代表簽署，並邀請能源署副署長吳志偉、國營司專委林華宇、電網韌性辦公室教授連國龍、總經理王耀庭、本所所長鍾年勉、EPRI資深專案經理Jeffery Preece、EPRI專案經理Neil Kern等共同參與合作倡議；隨後舉行「低碳電力·淨零轉型」交流研討會，邀請產官學研界貴賓共同探討全球合作推動潔淨能源轉型的契機，以及台電為實現淨零排放所做的努力與未來規劃，活動順利圓滿。[3]

[3] <https://service.taipower.com.tw/tpcjournal/article/7061>

2024年9月10日至12日，低碳資源倡議（LCRI）在賓州費城的費城萬豪市中心酒店召開了為期三天的諮詢會議。此次會議彙集了多個行業的利益相關者，旨在討論當前低碳能源技術的研究進展，並促進這些技術的開發和布署。

會議目標：（1）審查研究進展，會議詳細介紹了與氫能、碳捕獲等相關的最新技術進展。（2）加快技術開發：與會者就如何加速低碳技術的開發和實施展開了深入討論，特別是清潔能源系統的整體佈局。（3）行業合作與規劃：LCRI通過此次會議鼓勵不同行業的緊密合作，以便共同推動全球範圍內的低碳技術部署。

關鍵討論點：（1）氫能發展，會議強調了氫能技術作為未來能源系統核心組成部分的關鍵作用 [4]。（2）創新與合作，跨行業合作被認為是加快低碳技術商業化的必要途徑 [5]。

[4] gti.energy - Low-Carbon Resources Initiative（LCRI）

[5] labs.incubatenergy.org - Program TSC-ES: TSC Environmental Aspects and Safety

會議議程：議程表中紅底白字為本次出國行程選擇參與之幾項議程，會議內容及

相關資訊分述於後。

表2. EPRI Generation Advisory Meetings/ LCRI Committee Meeting 議程表

EPRI Generation Advisory Meetings https://event.me/invrta		September 9 – 13, 2024 Philadelphia Marriott Downtown Philadelphia, PA		LCRI Low Carbon Resources Initiative https://event.me/2x77v5		Committee Meetings	
MONDAY, SEPTEMBER 9		10:15 AM – 12:00 PM SESSIONS		1:00 PM – 2:45 PM SESSIONS		3:15 PM – 5:00 PM SESSIONS	
PLENARY SESSION 8:00 AM – 9:45 AM		WELCOME AND OPENING PLENARY		WELCOME AND OPENING PLENARY		WELCOME AND OPENING PLENARY	
AIR		AI and Digital Twins		Air Quality, Health, and Communities (236)		Process Control and Automation (227)	
DIGITALIZATION		Advanced Generation and Carbon Capture and Storage (222)		Artificial Intelligence, Generative AI and LLMs for the Energy Sector			
NET-ZERO		Extreme Cold Weather Preparedness (EOP-12)					
PLANT OPTIMIZATION		Pressure Parts and Materials Joint Session (214, 215, 218, 229)					
PRESSURE PARTS AND MATERIALS		The Environmental R&D Imperative: Mitigating Energy Transition Impacts		Hydropower Generation (208)			
RENEWABLES		Environmental Aspects of Wind (250) Environmental Aspects of Solar (252)		Gas Turbine Advanced Components and Technologies (217)			
ROTATING EQUIPMENT		Water Quality and Effluent Guidelines (240)					
WATER AND LAND							
TUESDAY, SEPTEMBER 10		10:15 AM – 12:00 PM SESSIONS		1:00 PM – 2:45 PM SESSIONS		3:15 PM – 5:00 PM SESSIONS	
AIR		Air Quality Assessments and Multimedia Characterization (235)		Selective Catalytic Reduction (SCR) Performance Issues (232)			
NET-ZERO		Combustion and Carbon Control Issues (254)		Bulk Energy storage (221)			
PLANT OPTIMIZATION		Plant Management Essentials (225)		Heat Rate and Flexibility: Generation Fleet Optimization (223)		Plant Decommissioning and Site Redevelopment (255)	
PRESSURE PARTS AND MATERIALS		Reciprocating Internal Combustion Engine (RICE)		Hazardous Energy Control, Lockout/Tagout Workshop		Materials (229)	
RENEWABLES		Boiler Life and Availability Improvement (214)		Solar Generation (207)		Wind Generation (206)	
ROTATING EQUIPMENT		Solar Generation (207)		Geothermal Interest Group		Offshore Wind (249)	
WATER AND LAND		Generators and Auxiliary Systems (220)		Gas Turbine Life Cycle Management (216)		Steam Turbines and Auxiliary Systems (219)	
LOW-CARBON RESOURCES INITIATIVE (LCRI)		Coal Combustion Product Land and Groundwater Management (241)		Coal Combustion Product Land and Groundwater Management (242)		Water Treatment Technologies (238)	
WEDNESDAY, SEPTEMBER 11		10:15 AM – 12:00 PM SESSIONS		1:00 PM – 2:45 PM SESSIONS		3:15 PM – 5:00 PM SESSIONS	
AIR		Continuous Emissions Monitoring and Measurements (233)		Monitoring and Advanced Data Analytics (228)			
DIGITALIZATION		Cyber Security for Generation Assets (239)		Boiler and Turbine Steam and Cycle chemistry (226)			
NET-ZERO		Generation Transitions (GEN X 248)		Integrated Asset Management (224)			
PLANT OPTIMIZATION		Heat Recovery Steam Generators (218)		Power Plant Piping (215)			
PRESSURE PARTS AND MATERIALS		Wind Turbine Performance Monitoring – Digitalization and Implementation		Solar Generation Performance & Reliability			
RENEWABLES		Coal Combustion Product Land and Groundwater Management (242)		TSC: Delivery & Storage		TSC: Power Generation	
WATER AND LAND		LCRI Plenary		LCRI Demonstration Projects		TSC: Electrolytic Processes	
LOW-CARBON RESOURCES INITIATIVE (LCRI)		TSC: Hydrocarbon-based Processes		TSC: End Uses: Industrial, Transportation & Buildings		TSC: Environmental Aspects and Safety	
THURSDAY, SEPTEMBER 12		10:15 AM – 12:00 PM SESSIONS		1:00 PM – 2:45 PM SESSIONS		3:15 PM – 5:00 PM SESSIONS	
LOW-CARBON RESOURCES INITIATIVE (LCRI)		TSC: Hydrocarbon-based Processes		TSC: End Uses: Industrial, Transportation & Buildings		TSC: Renewable Fuels	

(1) 參加 P221: Bulk Energy Storage 議程

該計劃重點是針對化學、機械和熱的儲能類型提供可執行的研究方案，以期推展規模更大、更長效之儲能技術。研究重點領域涵蓋：儲能技術的評估和比較，設計和安全審查，火力發電廠與儲能整合，儲能技術發展路線圖，運維和支援測試，參與現場示範，季節性儲能技術，及經濟和效益評估等項目。該計劃目前（2024年）有 34 位會員橫跨3大洲、6 個國家、和美國20個州。2023 年舉辦超過 500場次的儲能會員會議，發表 600 篇以上的論文、文章和其他作品，此次會議之議程詳如表3，2024 年執行專案概況如表4 所示，

表3 . P221: Bulk Energy Storage 議程表

TIME	TOPIC	PRESENTER
8:00 a.m.	Introductions and Overview	Andrew Maxson, EPRI

8:30 a.m.	Energy Storage Costs: Lessons Learned	Justin Raade, EPRI
9:00 a.m.	2024 P221 Project Highlights Commercial Readiness ESTEEM	George Booras, EPRI Jacob Rushkoff, EPRI
9:30 a.m.	New Supplemental and TI Update	Kelyn Wood, EPRI
10:15 a.m.	2025 P221 Planned Project Deck	P221 Team, EPRI
11:15 a.m.	Member Panel Session: Use Cases and Future Energy Storage Needs (ConEd, ESB, SMUD, and TVA)	Scott Hume, EPRI
1:00 p.m.	Energy Storage Presentation: Fourth Power	Dr. Asegun Henry, Fourth Power
1:30 p.m.	Government Projects	Horst Hack, EPRI
1:45 p.m.	Member Roundtable	Jared Troyer, Duke; Tony Bazzi, DTE
2:30 p.m.	Special Announcement	Andrew Maxson, EPRI
2:45 p.m.	Adjourn	All

表4. 2024 執行及2025年預定執行之專案概況

Project Title	Completed
2024 Bulk Energy Storage Feasibility Study	Dec 2024
Bulk Energy Storage Field Projects	Dec 2024
Bulk Energy Storage Webcasts	Bi-monthly 2024
Carbon-Free CAES Feasibility Study	Jun 2024
Commercial Readiness Level Assessments for Bulk Energy Storage Technologies	Dec 2024
Energy Storage 101	Dec 2024
Energy Storage Technology Database (ESTD)	Dec 2024
Executive Summary – Inertia, Grid Stability, and Bulk Energy Storage	Apr 2024
Industrial Decarbonization Using TES	Dec 2024
Long-Duration Energy Storage Cost-Benefit Case Studies: Optimizing Duration with DER-VET Dispatch Analysis	Dec 2024
Member Buddy Meetings	Monthly 2024
Performance Modeling Reports	Dec 2024
Software System Development: ESST and ESTEEM	Aug 2024
Technical Meetings	July 30; Nov 2024

2024 P221 提出了兩個計劃亮點，其中一項為商業成熟度（Commercial Readiness level；簡稱CRL），較之國際各企業、政府機構、學研單位所使用技術成熟度（Technology Readiness Level；簡稱TRL），有所不同。主要是因TRL 未考量基本的商業化風險因子，例如市場契合度、需求、供應鏈、勞動力、選址和法規許可等。因此，P221計劃除了TRL外，引進了能源先進研究計畫署（Advanced Research Projects Agency - Energy；簡稱ARPA-e）和紐約州能源研究與發展局（New York State Energy Research and Development Authority；簡稱 NYSERDA）所採用的商業成熟度（Commercial Readiness level；簡稱CRL）或採用成熟度（Adoption Readiness Level；簡稱ARL）做為評估儲能技術時重要指標，一般認為只有技術驗證不足以進行布署，必須做好商業準備。並將 ARL/CRL指標 添加到儲能技術資料庫（Energy Storage Technology Database；簡稱ESTD）中所列的各項儲能技術，據以做為是否完成布署準備的兩個面向。

表5. ARPA-e CRL

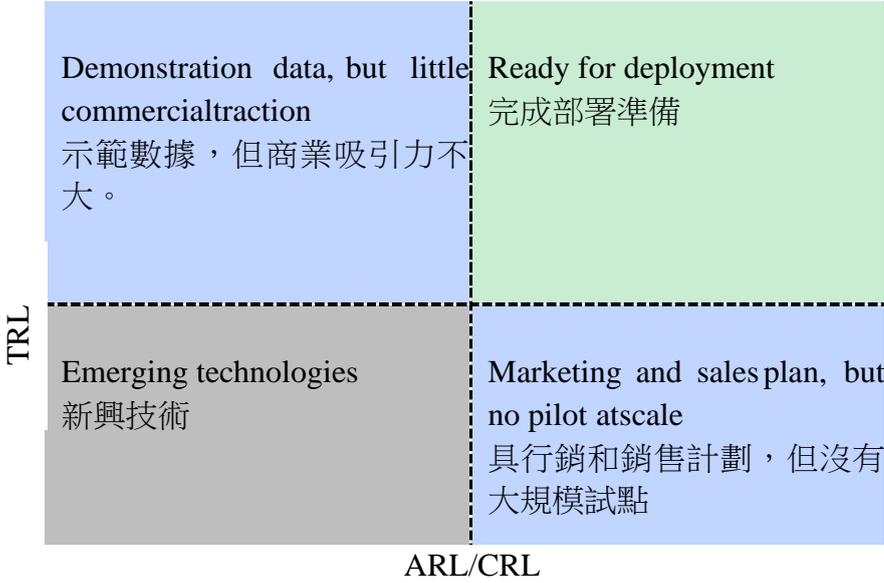


表6. 商業成熟度指標

1	對應用領域、使用案例和市場限制的瞭解有限
2	對潛在應用、市場和現有的競爭技術/產品僅有粗略的瞭解
3	對潛在應用、技術使用案例、市場需求/限制有更深入的瞭解，並已熟悉競爭技術和產品
4	通過市場分析和與潛在客戶的討論來識別和使產品完善。建立成本-性能模

	型來支援所主張的價值並提供權衡利害得失的設計。
5	瞭解目標應用和市場，並定義產品。創建詳細的成本效益和財務模型以驗證價值主張。與潛在供應商、合作夥伴和客戶建立關係。
6	定義並記錄市場和產品需求。在考慮詳細要求、成本/性能和製造權衡等因素的情況下進行設計優化。與整個價值鏈中的關鍵利益相關者建立合作夥伴關係。
7	設計完成，供應端和客戶協定已到位，所有利益相關者都參與其中。必要的認證和/或合規性都已滿足。
8	客戶資格齊全，並開始製造和銷售產品。商業化準備工作愈來愈成熟，據以支援更大規模的生產和銷售。
9	已達成了廣泛布署。

而另外一個計劃亮點是為儲能技術之經濟估計模型 Energy Storage Techno - Economic Estimation Model (ESTEEM)，截至目前ESTEEM所執行的專案其技術類型及代表廠商除了熟知的電池儲能系統 Battery Energy Storage System (BESS) 之外，基於長期儲能 (long duration energy storage) 需求日期增加，除了壓縮空氣之外，熱能儲存亦是被考量的技術之一，EPRI在2022~2025年之間的現場試驗專案包括：

1. Hydrostor先進壓縮空氣儲能 (Advanced Compressed Air Energy Storage)

Hydrostor 是一家提供先進壓縮空氣儲能解決方案的供應商，提供可靠且經濟實惠的長期儲能方案應用於公用事業，使電網運營商能夠擴展可再生能源開發，並確保電網容量。Hydrostor 已經完成專利的先進壓縮空氣儲能 (“A-CAES”) 技術之開發、布署、測試並證明可以提供長時間的儲能。A-CAES 使用來自採礦和天然氣作業的成熟元件與技術來創建一個可擴展的儲能系統，系統具有對環境影響小、成本效益高，並且可以在需要時存儲 5 小時到多天的能量。Hydrostor 在全球範圍內擁有處於不同開發階段的專案，每個專案可提供超過 200 MW 的容量。

2. Energy Dome CO₂ 電池

Energy Dome 是一家開發 CO₂ 電池的廠商，其技術是利用二氧化碳進行長時間、大規模儲能的技術。該系統使用熱力學原理，將二氧化碳存儲在壓縮狀態，並在需要時釋放以達到發電和儲能循環，原理類似於「液化空氣能源儲存，使用二氧化碳的優點在於液化二氧化碳可以常溫儲存，的另一項優點是不使用稀有金屬。製造時僅使用產出量較多的鋼鐵，更容易確保穩定的供應。與鋰離子電池相比，CO₂ 電池的成本約

為其一半，並且具備更長的儲能時間。其轉換效率可達 75%，使其成為大規模電網儲能的理想選擇。Energy Dome 已在歐洲建立了 20MW 的試點工廠，目標全尺寸電池容量可達 25MW，並儲存 100~200 MWh 能量，並計劃在全球推廣，尤其是在電網級應用中提供可再生能源的長期儲存解決方案。

3. Storworks 混凝土熱能儲存 Concrete Thermal Energy Storage (CTES)

Storworks 是一家開發混凝土熱能儲存技術的廠商，CTES 是一種熱能儲存方法，利用混凝土材料來存儲能量。這種技術針對工業熱過程脫碳設計，使用具有高熱容量和耐熱性的材料來捕獲和釋放熱量，如熔鹽、混凝土和耐火磚等。該技術的優點包括材料成本低、易於獲取，以及在長時間內高效儲存大量熱能，適合於工業及大規模能源儲存應用。混凝土熱能儲存。EPRI 和 Storworks Power 合計之 CTES 該技術已完成實驗室測試驗證，該設計使用大型混凝土塊，這些混凝土塊堆疊在發電廠附近的位置，並在電網不需要發電廠輸出時，通過嵌入在塊中的管子加熱它們，當發電量需要增加時，來自工廠的加熱給水被泵入管道並轉化為過熱蒸汽進行發電，以產生額外的輸出，這種方法可以延長工廠滿載運行的時間，提高效率並減少升降載和其他動態模式可能造成的損壞。每天的熱損失約為 1%，混凝土系統可以提供數天的存儲，EPRI 和 Storworks Power 在阿拉巴馬州電力公司 2021 年 9 月開始，於 2022 年底進行 10MWh 混凝土熱能儲存系統，該系統由 60 個區塊組成，每個區塊重 18 噸，存儲能力約為 200 kWh，能量轉換效率大約在 70% 到 80% 之間。

4. Highview 液態空氣儲能 (Liquid Air Energy Storage LAES)

該技術利用液化空氣儲存多餘的再生能源，當需求高時釋放能量來發電。空氣經過冷卻並液化後儲存在低溫容器中，當需要時重新加熱並膨脹，推動渦輪機發電，但液化空氣需要 -196°C 的溫度，因此儲存機制變得較為複雜。Highview Power 和可再生能源公司 Viridor 合作開發了 5MW/15MWh 的世界上第一個液體空氣儲能 (liquid air energy storage, LAES) 示範項目，2018 年 6 月正式啟動。該項目得到英國政府提供超過 800 萬英鎊的資金支持，位於英國曼徹斯特附近 Bury 的 Pilsworth 垃圾填埋場，通過使用剩餘電力（在非高峰時段）將空氣冷卻成 -196°C 的液體，然後將液態空氣儲存在低壓的隔熱罐中。當需要動力時，從罐中抽出液態空氣。暴露於環境溫度會導致快速再氣化和

體積膨脹700倍，產生了一種空氣形式的高壓氣體用於驅動渦輪機，在不燃燒的情況下產生電力。這項技術的優勢在於其靈活性、長時間儲能能力，以及環保的能源解決方案；

5. Malta抽熱儲能Pumped Heat Energy Storage (PHES)

Malta的抽熱儲能 (Pumped Heat Energy Storage, PHES) 是一種創新的電網級長時間能量儲存技術。它將電能轉化為熱能和冷能，分別儲存在高溫熔鹽和低溫液體中。當需要時，系統可以將儲存的熱量轉換回電能，提供穩定的電力供應。

EPRI大容量儲能現場試驗專案，該專案之目標是對現有儲能試驗性質場域 (pilot plant) 進行研究並安排現場訪問、審查測試計劃和性能數據蒐集，藉以評估技術狀態，分享經驗教訓。EPRI 成員會得到真實的測試數據和資訊，為後續的規劃和採購工作提供資訊，EPRI 也會對測試數據進行獨立評估，以提高行業對新興存儲技術的信心。表 8.列出了EPRI在2022~2025年之間的現場試驗專案。

表7. EPRI在2022~2025年之間的現場試驗專案

Year	Developer	Technology	Type	TRL	Location	Size
2022 2023	EnergyNest	Concrete	Mechanical	6	Norway	4 MWh
	Malta	Pumped heat	Thermal	4	TX (SwRI)	100 kW
	Renewell	Gravity/oil Wells	Mechanical	4	CA	100 kWh
	Energy Dome	CO2	Mechanical	7	Italy	4 MWh
	RedoxBlox	Magnesium oxide	Chemical	5	OR	100 kWh
2024	Antora Energy	Carbon graphite	Thermal	5	CA	500 kWh
	Hydrostor	Advanced compressed air	Mechanical	6	Canada	8 MWh
	Rondo	Refractory brick	Thermal	7	CA	2 MWh
2025	Advanced Rail Energy Storage	Gravity	Mechanical	6	NV	1 MWh
	Energy Dome	CO2	Mechanical	7	Italy	200 MWh
	Energy Vault	Gravity	Mechanical	7	TX	3.1 MWh
	Magaldi	Sand	Thermal	5	Italy	4 MW
	Sage Geosystems	Water	Mechanical	7	TX	1 MWh

在本次的會議中針亦對2025年的潛力候選技術進行說明，表8.~11. 按工作原理、優點、應用情境及技術現況做了說明。

表8. Advanced Rail Energy Storage (ARES)

工作原理			
充電時使用馬達/發電機將重型汽車拉上軌道進行。放電時系統降低汽車高度併產生動力。			
優點	缺點		
高效率 無待機損失 無毒性材料	需要較大的佔地面積 地理限制（需要足夠的海拔變化）		
應用情境		技術現況	
獨立儲能和能量轉移		循環效率：90%	TRL：6
		壽命：40年	最大規模：5 MW/1 MWh

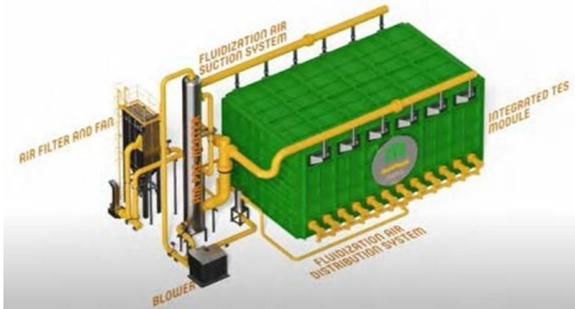
表9. Energy Dome

工作原理			
以 CO2 作為存儲介質/ 工作流體的壓縮空氣儲能的閉環變體。熱能存儲系統中捕獲的壓縮熱，在排放時返回CO2。液相中的CO2密度允許在環境溫度下進行緊湊的壓力容器儲存。排放的 CO2 在接近大氣壓的彈性氣囊中儲存。			
優點	缺點		
高效率 低成本	需要大量佔地面積 CO2 洩漏風險		
應用情境		技術現況	
獨立儲能、能量轉移和慣性供應（充電和放電），持續時間為10小時		循環效率： 75~80%	TRL：6
		壽命：30年	最大規模： 2.5 MW/4 MWh

表10. Energy Vault

工作原理			
<p>大塊被升高以儲存能量，並以受控速率下降以釋放系統。設備封閉在建築物中。</p>			
優點	缺點		
<p>高效率 模組化設計 允許根據需要進行尺寸調整 火災風險低 無毒材料</p>	<p>專案需要佔用空間大 缺乏慣性 需實現可靠運行的控制系統</p>		
應用情境		技術現況	
獨立儲能、能量轉移		循環效率：82%	TRL：7
		壽命：30年	最大規模：20MW

表11. Magaldi

工作原理			
<p>使用矽砂作為存儲介質的熱能存儲系統，允許工作溫度高達 2192°F（1200°C）。沙子包含在流化床中，可以通過工藝熱或電加熱，提供 5-100 MWh 的輸出和 4-10 小時的持續時間。</p>			
優點	缺點		
<p>低成本熱 存儲介質 佔地面積小</p>	<p>流化床加熱器是一種 新型設備 侵蝕問題</p>		
應用情境		技術現況	
獨立儲能、能量轉移		循環效率：82%	TRL：7
		壽命：30年	最大規模：20MW

(2) 參加LCRI’s Crosscutting Demonstration Portfolio議程

EPRI LCRI 所執行的示範計劃分成4個階段，包括①提案開發階段：由LCRI成員和執行團隊共同提出了示範專案；②審查與篩選階段：針對範圍和專案細節的協作進行討論及初步篩選；③參與計劃成員審查階段；④計劃執行階段：規劃LCRI 示範專案期程及各階段的目標，並開始階段 1執行。在階段 1的LCRI示範計劃共有24件，經費來自LCRI 資金估算達USD 9.7 M，而第一階段總成本則達到USD 211 M。從全程計劃來看來自LCRI 資金估算達USD 21 M，總預期成本會達到USD 500 M，LCRI的槓桿比率（Leverage Ratio）達24：1。對一般公司而言，槓桿比率（Leverage Ratio）的高低反映了公司財務結構中的風險和資金來源的分配方式，高槓桿比率，表示公司使用了較多的負債來資助其運營和擴展，但高槓桿也可能提高股東回報。低槓桿比率，表示公司更多依賴自身的股東權益資金，而非外部借貸來進行運營。這種結構風險較低，但可能也會限制公司的成長潛力。LCRI 所執行的計劃項目將依據所訂定的里程設計go/no-go決策，若項目需停止時，將彙整結果於報告產出之後把資金轉向其它的新興計劃。

表12.列出LCRI所轄之各技術委員會在2024~2027年期間預計推動之24個示範項目。

表12. LCRI所轄之各技術委員會在2024~2027年期間預計推動之24個示範項目

Lead TSC	Demonstration Project
Delivery & Storage	<ul style="list-style-type: none"> HyMist: Hydrogen Underground Storage Demonstration in Porous Rock at the Mist Natural Gas Storage Facility, Oregon
	<ul style="list-style-type: none"> Demonstration for Validation of Defect Tolerance in Repurposed Pipeline
	<ul style="list-style-type: none"> Assessment of Hydrogen Storage Opportunities in Underground Geologic Formation in Illinois
	<ul style="list-style-type: none"> System Design, Safety and Test Plan Review: Baltimore Gas & Electric’s Spring Gardens Hydrogen Blending Facility
Electrolysis	<ul style="list-style-type: none"> PEM Electrolyzer Demonstration Performance Testing & 100% H2 fired GT CEMS Compatibility Assessment
	<ul style="list-style-type: none"> Performance evaluation of power to Hydrogen to power system with AEM electrolyzer, integrated storage, and fuel cell
	<ul style="list-style-type: none"> Hydrogen microgrid demonstration with PEM, storage and microturbines
	<ul style="list-style-type: none"> Demonstration of an Integrated Alkaline Electrolysis, Hydrogen Storage, 100% Hydrogen-Fired Microturbine and Hydrogen Fuel Cell System
	<ul style="list-style-type: none"> Enabling Alternative Water Supplies for Resilient Electrolyzer

	Operations
End Use	• Raise Efficiency and Facilitate Carbon Capture (CCUS) and Waste Heat Capture, in combination with Aluminum Furnace Oxyfuel Combustion
	• Nebraska and Iowa I-80 Heavy-Duty Hydrogen Fueling Corridor
	• Integrated, Hydrogen-Enabled Microgrids for Utility Electric and Hydrogen Vehicles
	• CARBON-Zero-Datacenters: Crafting Advanced Resilient Back-up Operations with Net-Zero Emissions for Data Centers
	• Hydrogen*Connect: Demonstration of Integrated Green Hydrogen Production, Storage, and Use for Resiliency and Utility Vehicle Applications
	• Low-Carbon Fuels Demonstration for Food Processing Application
Power Generation	• Renewable Diesel for Clean + Dispatchable Power Generation
	• RICE Operating on Ammonia Demonstration (ROAD) for Low-Carbon Power Generation
	• Long-term Testing of Gas Turbine Hot Section Components
Hydrocarbons	• Pyrolysis demonstration for decarbonizing building space heating
	• A Feasibility Assessment of Retrofitting Compression Station Reciprocating Internal Combustion Engines with CO2 Capture
	• National Carbon Capture Center - Holistic Carbon Management
Renewable Fuels	• eGas Production for Hydrogen Hub Integration
	• Utilization and Long-Term Storage of Bio-Ethanol + E-Methanol in Utility Assets
	• Compressor Station Waste Heat Recovery and Combustion Exhaust for Low-Carbon Hydrogen and Synthetic Methane Production for Pipeline Utilization

除了LCRI執行的示範計劃之外，EPRI也與各國的公用事業推動大型示範計劃，在本次會議中安排3個具特色的示範計劃簡報：

- (1) 東京電力公司 (Tokyo Electric Power Company) : Energy Supply Chain from Hydrogen Production to End Use by Power-to-Gas for Carbon Neutrality 2050
- (2) 巴西國家石油公司 (Petrobras) : Demonstration of a Low-Carbon Microgrid 2MW Electrolyzer for Converting Renewable Energy to Hydrogen
- (3) 聯合愛迪生公司 Con Edison : Utilization and Long-Term Storage of Bio-Ethanol and E-Methanol in Utility Assets (Gas Turbines + Boilers)

其中的巴西國家石油公司2MW綠氫專案與本所刻申請中的能專計畫雷同，該專案

是緣於巴西國家石油公司與 Senai再生能源研究所簽署的一項合作協議，選擇了巴西國家石油公司位於 Rio Grande de Norte 的Alto Rodrigues 太陽光電廠，建造一座電解工廠以研究綠氫的供應鏈，其目的是評估利用太陽能電解水所產生的氫氣的生產和使用。Alto Rodrigues 太陽光電廠，最初係以研究目的而開發建置，未來將裝置容量從 1 MWp 擴展到 2.5 MWp，以滿足試點電解裝置的電力需求。該項目已於2024 年夏季啟動，預計於2027 年 1 月完成專案。內容涵蓋電解技術與可再生能源的整合、全面瞭解綠色氫能項目開發、監控電解槽和周邊輔助系統（Balance of Plant；BOP）子系統之性能，並與可再生能源相整合。



圖1. Alto Rodrigues Photovoltaic Plant, in Rio Grande do Norte

EPRI在這個專案中於扮演專案各個階段的支援角色 ①設計階段：根據所積累之實務經來協助需求建議書（Request For Proposal；RFP）審查，在專案關鍵階段提供利害關係人必要的協助，並強化 EPC 團隊、OEM 和專案開發人員之間的溝通。工程面則協助管件、儀錶配置及流程圖審查，以期達到提高設計精確度、優化系統性能、共享知識、增強協同作業之目的，在電力品質規劃方面進行電網衝擊評估、電力品質對電解槽耐用性及法規遵從性事項分析等工作；②驗收測試、危害與可操作性分析（HAZOP）作業及交付使用者期間：制定工廠和現場驗收的測試標準，以確保產品的可靠性和達到預期性能，降低風險並儘可能減少停機時間。強化安全性和設計完整性，風險識別和緩解措施制定，在確保系統完整性、安全性、可靠性與充份溝通的條件下交付使用者。③運行期間：先確保能啟動成功並順利過渡到初始操作，啟動期間進行系統評估，

驗證系統操作是否滿足規範的要求，為工作條件建立安全和性能檢查表。基於再生能源的特性來設計電解條件，下修再生系統操作條件使與電解槽目標達到一致（例如，降低峰值、最大化可再生能源之氫氣產量等）。電解槽與可再生能源整合的短期和長期影響，開發預防性維護資料庫，耐久性評估和系統監測，彙整經驗與教訓為潛在的可靠性問題和應注意事項提供相應的信息等。

EPRI在跨單位或跨公司的驗證示範型計劃中的定位明確，其工作性質與台電綜合研究所相近，幾乎在財務面不作太多的考量，主要還是著重於技術面規劃與實務經驗累積，作法值得借鏡。

(3) 參加Integrated Energy System Analysis議程

表13. Integrated Energy System Analysis議程表

8:00 a.m.	Introduction	
8:05 a.m.	Carbon Capture Costs for Industrial Sources	Romey James, EPRI
8:20 a.m.	US-REGEN Sensitivity Analysis Results	Geoff Blanford, EPRI
8:40 a.m.	Energy Pathways Tool: Comparing Energy Requirements Across Low-Carbon Fuel Applications	Chloé Fauvel, EPRI
9:00 a.m.	Clean Energy Network Analysis	Ansh Nasta, GTI Energy
9:15 a.m.	Member feedback and discussion	All
9:45 a.m.	Adjourn	

本項會議議程安排如表13.，並以會員間的資訊交流討論為主，會議中以Carbon Capture Costs for Industrial Sources 提供較多資訊，所選擇評估的對象是團隊成員認為對US-REGEN分析結果將最具影響力之水泥廠、造紙廠以及煉油廠，分析是針對這三種工業設施導入CCS（經由改造，非新設置的情境），且捕獲CO₂所採用的溶劑是通用型胺溶劑（非特定廠商專有）為前題下，所需的成本和效益分析，分析的結果如圖2.~圖x.。圖x.中顯示煉油廠導入CCS需要的總投資最高（分析的基礎是基於水泥廠的產能：900,000 噸/年；造紙廠：400,000 氣乾噸/年；煉油廠400,000桶/天）。圖2. 顯示出在這三種工業設施導入CCS的總成本以煉油廠最高，但若考量每小時CO₂的處理量時，則以水泥廠為最高（圖3.），其中又以二氧化碳捕捉單元所佔的資本支出比率最高（圖4.），

表15. 進一步分析了碳捕集廠的運營費用，由於細節無從得知，較難得到明確的結論，但應進行分析的項目則可供參考。

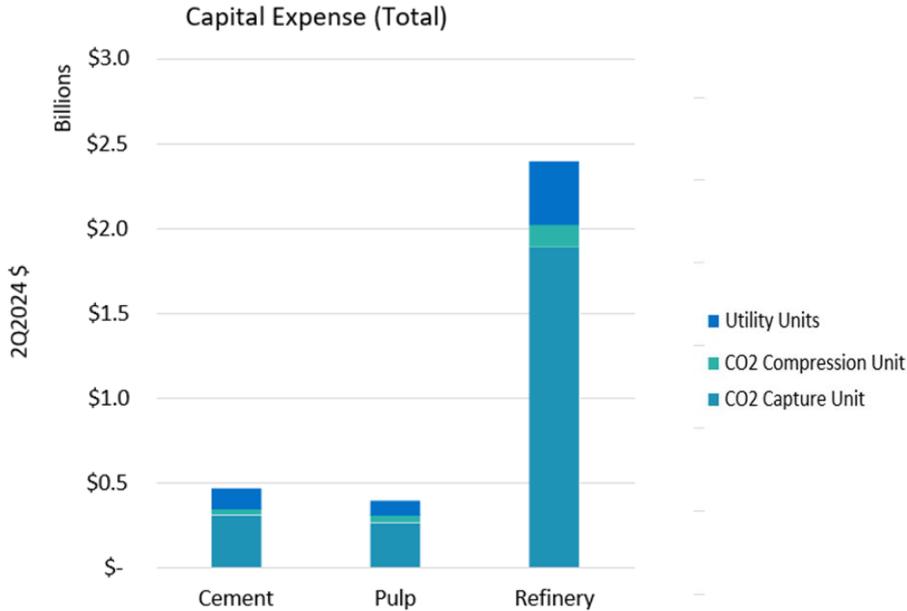


圖2. 導入CCS需要的總資本支出比較

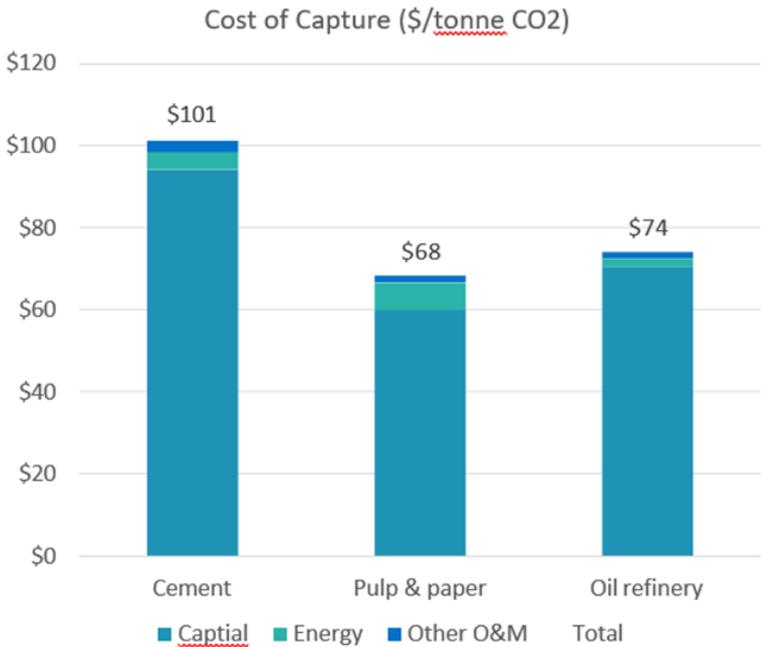


圖3. 導入CCS需要的單位資本支出比較

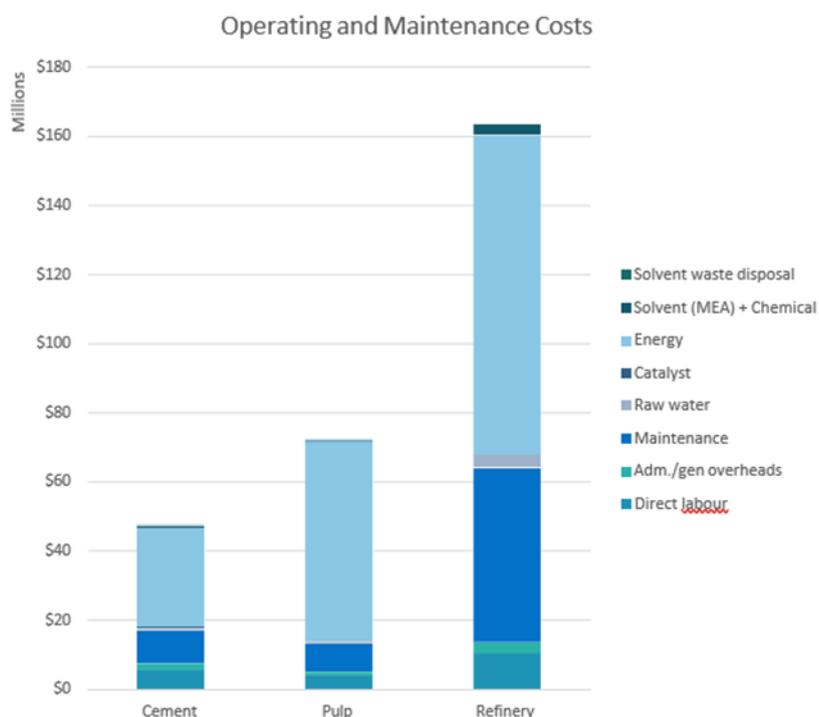


圖4. 碳捕集廠的運營費用

表14. 碳捕集廠的運營費用

		2024 年工業部門 CO ₂ 捕獲 O&M 成本		
		Cement	Pulp	Refinery
		\$/year	\$/year	\$/year
Fixed Costs	Direct labour	5,700,000	3,800,000	10,300,000
	Adm./gen overheads	1,721,300	1,149,600	3,150,600
	Maintenance	9,413,600	7,965,200	50,473,400
	Subtotal	16,834,900	12,914,800	63,924,000
Variable Costs	Raw water	471,500	676,400	3,812,700
	Catalyst	⁽³⁾ 477,000	0	0
	Fuel (Natural Gas)	12,251,000	0	114,222,500
	Solvent (MEA) + Chemical	⁽²⁾ 546,000	246,000	⁽¹⁾ 3,030,500
	Electric Energy ⁽⁴⁾	16,629,984	58,131,360	-21,780,864
	Solvent waste disposal	23,788	31,544	169,796
	Subtotal	30,399,272	59,085,304	99,454,632
TOTAL O&M COSTS		47,234,172	72,000,104	163,378,632

表14. 的備註說明如下：（1）包括石灰石消耗量；（2）包括氨消耗量；（3）SCR 催化劑；（4）水泥廠從外部電網購電，紙漿缺產（指生產過程因設備故障、供應短缺、調度問題或人為錯誤，這些問題可能導致生產週期結束時沒有預期的產品），個案中煉油廠負值表示售電。

固定成本項中的 Adm./gen overheads 是 administrative/general overheads 的縮寫，指的是公司在運營過程中的一般管理和行政間接成本。這些費用包括了並非直接產生於生產流程中的開支，從表15. 可知維護成本是固定成本的主要項目，而變動成本中則以能源使用（Fuel 與Electric Energy的加總）占大部份。

(4) 參加End Use Technical Subcommittee Session議程

表15.End Use Technical Subcommittee Session 議程表

TIME	TOPIC
10:15-10:25	Introduction and Meeting Overview
10:25-10:45	Low-Carbon Fuel Applications in Microgrids, Buildings and Resiliency Portfolio Update <ul style="list-style-type: none"> • Portfolio overview, project updates, and recent publications • Low-Carbon Fuel for Resiliency: Preliminary Assessment for Data Centers and Grid Impacts
10:45-11:05	Mobility Portfolio Update <ul style="list-style-type: none"> • Portfolio overview, project updates, and recent publications • Energy system impacts of hydrogen fueling stations
11:05-11:20	Member Perspective and Open Discussion: Role of utilities in hydrogen mobility applications
11:20-11:35	Industrial Portfolio Update <ul style="list-style-type: none"> • Portfolio overview, project updates, and recent publications • Hydrogen blending lab testing results for commercial and industrial boilers
11:35-11:45	DOE' s Hydrogen Hubs and Industrial Decarbonization Update
11:45-noon	Member perspective and Open Discussion: Utility strategy surrounding industrial decarbonization and low-carbon fueled energy hub development

表16. 示範專案概述

專案名稱	專案內容說明（最新進度）
案1 I-80 Heavy-Duty Hydrogen Fueling Corridor（NPPD）	.展示內布拉斯加州和愛荷華州 I-80 燃料走廊沿線長途、重型市場的四個加氫站的規劃、布署和大規模運營。（已召開啟動會議尋求聯邦資助以支持專案機會）
案2 Integrated, H2-Enabled Microgrids for Utility Electric and Hydrogen Vehicles（Southern Company）	評估經整合電動和氫能的雙燃料之系統級微型電網的優勢，支援全國電動和氫能公用車輛。（與 Southern Co 和 GM 舉行啟動會議，SOW已確認，開始簽約流程 預計開始時間：2024 年 10 月）
案3 Hydrogen*Connect（Xcel Energy）	展示綠色氫氣的生產、儲存和使用，用於公用事業運營的兩個關鍵應用：野火監測和通信的備用電源的基礎設施，和中型燃料電池車公用事業。（召開啟動會議，SOW已確認，任務 1 和 2 已啟動）
案4 CARBON-Zero-Datacenters（OPPD）	解決了脫碳的挑戰，為具有高韌性要求的公用事業客戶提供可靠的備用電源，特別是數據中心。（安排啟動會議，進行SOW審查，預計開始時間：2024 年 10 月）
案5 Raise Efficiency and Facilitate CCUS and Waste Heat Capture, in combination with Aluminum Furnace Oxyfuel Combustion（Southern）	使用富氧燃燒並加裝碳捕獲系統的鋁熔煉爐進行示範（召開啟動會議，SOW已確認，進行NDA 簽署）
案6 Demonstration of Hydrogen Blending at Nut Drying Host Site（SoCalGas）	適用於農產品的開火燃燒器乾燥應用方案之H2 燃燒器（H2/天然氣混燒可達 100%）技術示範及TEA/LCA評估。

表16. 所列的專案是現已啟動的示範專案，在本次會議中並未能詳細介紹，會後針對有興趣的兩個專案進一步蒐尋資料得知：案1 的“燃料走廊”，特別是替代燃料走廊（AFC），是美國國家高速公路系統沿線的指定路段，其中替代燃料基礎設施，如電動汽車（EV）充電、氫氣、丙烷和天然氣，隨時可用。這些走廊透過沿著主要路線提

供一致的加油站來支持向低排放交通的過渡，確保替代燃料車輛（AFV）可以長距離行駛而不會耗盡燃料。美國 I-80 燃料走廊是一個由政府支持的替代燃料和充電基礎設施項目，旨在促進I-80州際公路沿線電動車和替代燃料車輛的充電及加氫服務。該走廊橫跨美國東西，從加州舊金山延伸至新澤西州，穿越多個州及城市，是全美主要的長距離運輸路線之一。建設此燃料走廊的目的是減少長途卡車和汽車的碳排放，並提高可再生能源的使用率，以促進全國運輸系統的綠色轉型。在國零排放貨運走廊戰略中，將I-80燃料走廊納入重點發展範疇，規劃在走廊內增設更多充電和加氫站，以便支援中型和重型卡車的電動化轉型，目標是到2040年實現無縫且便利的充電和加氫服務。

案5 鋁爐富氧燃燒是用純氧代替空氣作為氧化劑在鋁熔煉爐中燃燒燃料的過程。與傳統的空氣燃料燃燒相比，這種方法被稱為“富氧燃燒”，可提高燃油效率並降低排放。透過消除燃燒過程中的氮氣，富氧燃燒可實現更高的火焰溫度，從而加快鋁熔化速度、使爐溫更加一致，並顯著降低能耗和二氧化碳排放量。

表17.是End Use技術委員會有關於低碳燃料在建築物中的應用和彈性產品組合進度更新說明。

表17. 有關於低碳燃料在建築物中的應用和彈性產品組合進度更新

Project	進度更新
Optimizing Hybrid Hydrogen-Capable Heat Pumps for Emissions Reductions	<ul style="list-style-type: none"> • 市場摘要 - 審查混合動力（雙燃料）熱泵設備的可用性 • 氫氣設備 - 審查最新性能和成本數據 • 控制開發 - 確定現有的控制策略
Analyzing Decarbonization Pathways for Space Heating in Buildings: Development of Analytical Framework and Case Studies (EUB1)	已完成：報告 # 3002028855
Conversion of Existing CHP Plants to low carbon fuels	<ul style="list-style-type: none"> • 制定CHP指南文件和技術篩選矩陣為目標 • 完成內部檔的研究並開始進行指南矩陣開發
ThermH2 Blending Demonstration (UT) – Project coordinated with Delivery & Storage TSC	<ul style="list-style-type: none"> • 猶他州的 GTI Energy 實地採樣：天然氣基線（2023 年中），初始 H2 混合為 5%（2023 年底），晚期 H2 混合（2024年

	<p>中)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 完成了八台電器（三角洲高中三套住宅、一台鍋爐/供暖/烹飪設備）的天然氣基線，在 2024 年夏季收集了 H2 混合樣品，在項目結束前對學校的最終用途設備進行持續監測，並進行最終數據分析。 • 在多個客戶/公用事業地點完成天然氣品質（GQ）採樣，包括基線（天然氣）和初始混合（H2 混合）樣品，最終採樣於 2024 年完成。在 2024 年上半年 LCRI 顧問與利害關係人參觀和現場訪問協調的多次混合示範。
<p>H2@Scale Add-on – Hydrogen-Ready Central Heating Plan Conversion/Demonstration</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 專案於 2024 年夏季啟動，團隊與 UT-Austin 團隊進行了實地考察，確定了大學、當地公用事業和 GTI Energy 專案團隊中的角色/職責。團隊審查了兩台 4 MMBtu/h 鍋爐的設計/運行歷史，並與製造商會面討論項目目標。 • 項目團隊目前正在準備基線監測系統包，以安裝在鍋爐廠，以便在秋季實施。與更廣泛的 H2 @ Scale “原型中心”活動協調。
<p>Characterize the performance and costs of AEC- fueled building end use equipment, including blended, behind-the-meter NG-H2 utilization (EUB2)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 完成數據收集和分析，在 2024 年歐盟 TSC 網路廣播中展示亮點，預計將於 2024 年最終發佈。 • 在 EPRI 電氣化（2024 年）上分享初步結果，計劃在 2025 年 AHR 博覽會上與加州大學歐文分校協調外展。

韌性（Resilience）在End use 部門也是相當重要的討論議題，其意指系統承受中斷、衝擊或壓力源並從中斷中恢復，同時保有其基本功能和結構的能力-在需要時提供關鍵電力。包含了從以往所習得的經驗，可吸納和適應不斷變化的狀況，以及為未來的挑戰做準備的能力。會議中特別從各個面向進行Resilience的探討，圖5. 對於用來確保電力系統韌性的低碳技術依照其功率範圍、用途及在額定功率下全黑起動時間說明。低碳燃料的體積能量密度、特性及來源說明於表18.

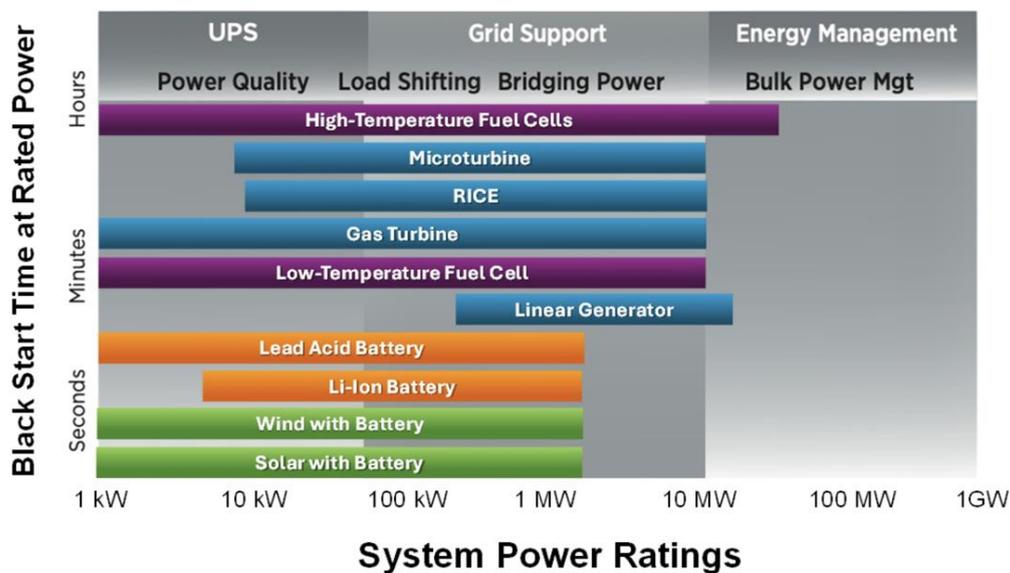


圖5. 低碳技術依照其功率範圍、用途及在額定功率下全黑起動時間

表18. 低碳燃料的體積能量密度、特性及製備方法。

	kWh/gal	Characteristics	Produced By
Hydrogen 	0.01 (1 atm) 9.0 (500atm) 21.9 (liquid)	Colorless, odorless, low molecular weight gas. Wide flammability range (4% - 75% in air).	Water Electrolysis, Autothermal Reforming Methane Pyrolysis, Steam-Methane Reforming w/CCS
Methane 	0.14 GAS 9.0 CNG 21.9 LNG	Simplest of HC eFuels, direct drop-in replacement for natural gas. Odorless gas, stored as pressurized or compressed gas (CNG), or liquified gas (LNG)	Sebatier Reaction/Hydrogenation of CO ₂ or syngas
Ammonia 	12.1	Non-hydrocarbon (HC) fuel. Stored as pressurized liquid. Toxicity concerns	Haber-Bosch synthesis, H ₂ + N ₂
Methanol 	16.8	Simplest of liquid hydrocarbon eFuels. Clear, biodegradable liquid. High octane fuel (100+).	Hydrogenation of CO ₂ or syngas
Ethanol 	22.4	Clear, biodegradable liquid. High octane fuel (100+). Most abundant renewable fuel today. 18 billion gallons globally. Clear, biodegradable liquid	Starch/sugar fermentation Cellulose hydrolyzation/fermentation
Renewable Diesel 	36.2	Clear, odorless liquid. US production grew from 1.8 to 3.9 billion GPY from Jan 2022 to Nov 2023. Direct drop-in replacement for petroleum diesel (ASTM D975). Renewable Diesel is NOT Biodiesel	Hydroprocessed Esters/Fatty Acids (HEFA) Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) Fischer-Tropsch Synthesis

數據中心是各電力用戶端部門被討論最多的對象，其能源配置和運營相當重要，依照等級不同之要求條件如表19，因功率需求範圍從 50 kW 到 100 MW 不等，甚至現今已接近 1 GW。有些數據中心建築物所佔地面積的40%專門用於電力基礎設施，為能保證正常運行時間，需通過多個公用設施互連和備用電源來實現冗餘（Redundancy）方

案，保持從 N+1 到 2N 不等之冗餘，也需要不間斷電源（UPS）。場域中常見的備用電力系統規格為：電源供應可持續 24-48 小時（適用於 1-2 級數據中心），配置電池+柴油發電機，其電池容量：5 分鐘運行時間，柴油機裝置容量：2.5 MW ~ 3 MW/單位（更大的客戶達到20 MW 備用模組），裝設系統效率：92% - 95%（按負載用電功率）之不斷電系統UPS。

Uptime Institute，是國際機房認證機構，從全球機房事故案件，制定了一套機房建置參考指南，Tier分級認證是依據各機房的水準，區分成4個不同等級，Tier I 等級僅需提供空間與電力即可；Tier II等級則要求機電設備必須N+1設計，也就是要有另外一臺備援設備的機制；Tier III要求可同時維修性（Concurrent Maintenance），意指在停電，水路管線停止供水的安全情況下，進行例行性維護作業，不會影響企業服務的運作，也不能有計畫性停機；Tier IV則要求機電設備要 N+N，並具有可容錯能力（Fault Tolerance）。Uptime Institute 亦規範了計畫性停機時間，Tier I每年最多停機2次，累計不能超過28小時左右，Tier II則是2年內停機3次，大約每年停機21小時，而Tier III和Tier IV則是不需要計畫性停機。因此，Tier III和Tier IV等級的機房可用性都超過99.9%。

表19. 數據中心能源和運營依照等級不同之要求條件

Tier 等級	正常運行時間保證	每年最長停機時間
Tier I	99.67%	28.8 hours
Tier II	99.74%	22 hours
Tier III	99.98%	1.6 hours
Tier IV	100.00%	0.4 hours (26.3 minutes)

表20. 比較不同電力用戶端部門確保能源韌性的準則與條件

部門	能源韌性準則	考慮項目	電力中斷限制
數據中心	Uptime Institute Tiers	<ul style="list-style-type: none"> • 層級側重於正常運行時間保證（與彈性間接相關） • 更高的層級（III和IV）需要強大的冗餘和備用電源，以實現最小的停電。 	1.6 hours/year (Tier III)

醫療保健設施	美國國家消防協會標準 (NFPA 70)	<ul style="list-style-type: none"> 基於設施類型和服務關鍵要求 (例如, 最小備份發電機運行時間) 做出建議。 該標準列出了緊急電源和備用電源的要求 	15 mins to 4 hours
電信設施	聯邦通信委員會 (FCC) 指引	<ul style="list-style-type: none"> 指引旨在確保中斷期間的網路和服務連續性。 可以指定預期最低備用電源運行時間。 	<4 hours
關鍵基礎設施	美國國土安全部 (CISA) 指南	<ul style="list-style-type: none"> 構建抵禦網路和物理威脅的復原能力的建議。 可能包括能源韌性措施的指導方針。 	minutes to days

因應能源韌性需求能源韌性即服務 (Energy Resiliency as a Service ,RaaS) 形成新的商業模式, RaaS公司按需要為客戶提供備用能源供應, 以在中斷期間維持關鍵設施的運營。RaaS 的範圍從僅僅銷售備用電源設備到提供全面的解決方案, 以確保在停電或電網不穩定期間繼續獲得能源。該服務包括備份的規劃、設計、安裝、操作和維護, 根據客戶的特定需求量身定製的電力系統 (通常是以化石燃料的發電機、電池存儲、微電網為基礎)。

表22.交通運輸行業正在進行的專案Transportation Sector Ongoing Projects

Project	Updates
Transportation Sector Customer Engagement and Education (EPRI)	<ul style="list-style-type: none"> 完成市場評估和利害相關人映射任務 已開發用戶端利害相關人擴大服務範圍的調查草案, 並已制定發送的聯絡名單 安排與利害相關人研討會 https://cvent.me/wnWBxm?i=5RC2gJgLzE-Ok61Xflntdw&locale=en-US

<p>Role of Hydrogen for EV Fast Charging Resiliency and Grid Integration (EPRI)</p>	<p>Architecture, State of the Art, Applications, Use cases and valuation tasks completed</p> <p>Exploring options for improving the load factor of the grid connection serving the DC Fast Charging plaza – significant potential for onsite H2 or SynFuel production</p> <p>Report due in October 2024, the work to be continued to support SuperTruck3 Demo project</p> <ul style="list-style-type: none"> • 已完成架構、最新技術、應用程式、用例和評估任務。 • 探索提高服務於直流快速充電場所的電網負載係數的選項-現場產製 H2 或合成燃料極具潛力 • 報告將於 2024 年 10 月提交，這項工作將繼續支援 SuperTruck3 示範專案。
<p>Hydrogen Fueling Infrastructure Landscape and Costs Assessment</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 臨時交付之「低碳燃料基礎設施：現狀評估」成果發佈 (3002028022) • 使用 ANL 開發的 HRSAM 和 HDSAM 模型，完成氫氣輸送和燃料相關成本和能源需求的情景評估。 • 加氫站平準化成本/ 電力需求：10.99 美元/公斤/當前狀態 LD 為 756 kWh/天;\$0.62/公斤/成熟市場 HD 為 25,600 kWh/天。 • 最終報告草案正在進行內部審查

美國ANL實驗室 (Argonne National Laboratory) 開發了兩個重要模型，用於分析氫氣運輸和加氫基礎設施。HRSAM (Hydrogen Refueling Station Analysis Model, HRSAM) 模型主要用於分析輕型燃料電池電動車 (FCEV) 的加氫站建設和運營成本，幫助評估輕型車輛加氫站的經濟性和可行性[6]。HDSAM (Hydrogen Delivery Scenario Analysis Model, HDSAM) 模型用於分析氫氣運輸和分銷的成本，特別是在不同的燃料電池車市場滲透率下，評估美國城市的氫氣運輸基礎設施需求和經濟效益。此模型適用於不同規模的城市，幫助計算從生產到消費端的氫氣成本[7]。這兩個模型均旨在推動氫能技術的商業化和基礎設施發展，支持未來可持續的氫能經濟。

[6] hdsam.es.anl.gov - Hydrogen Delivery Infrastructure Analysis

[7] [hdsam.es.anl.gov - Hydrogen Delivery Scenario Analysis Model \(HDSAM\)](https://hdsam.es.anl.gov - Hydrogen Delivery Scenario Analysis Model (HDSAM))

圖6. 是加氫基礎設施 - 按組成元件劃分的成本分佈情形，分別以HRSAM 及HDSAM模型分析的結果，因分析的主體不同，結果亦有所不同。

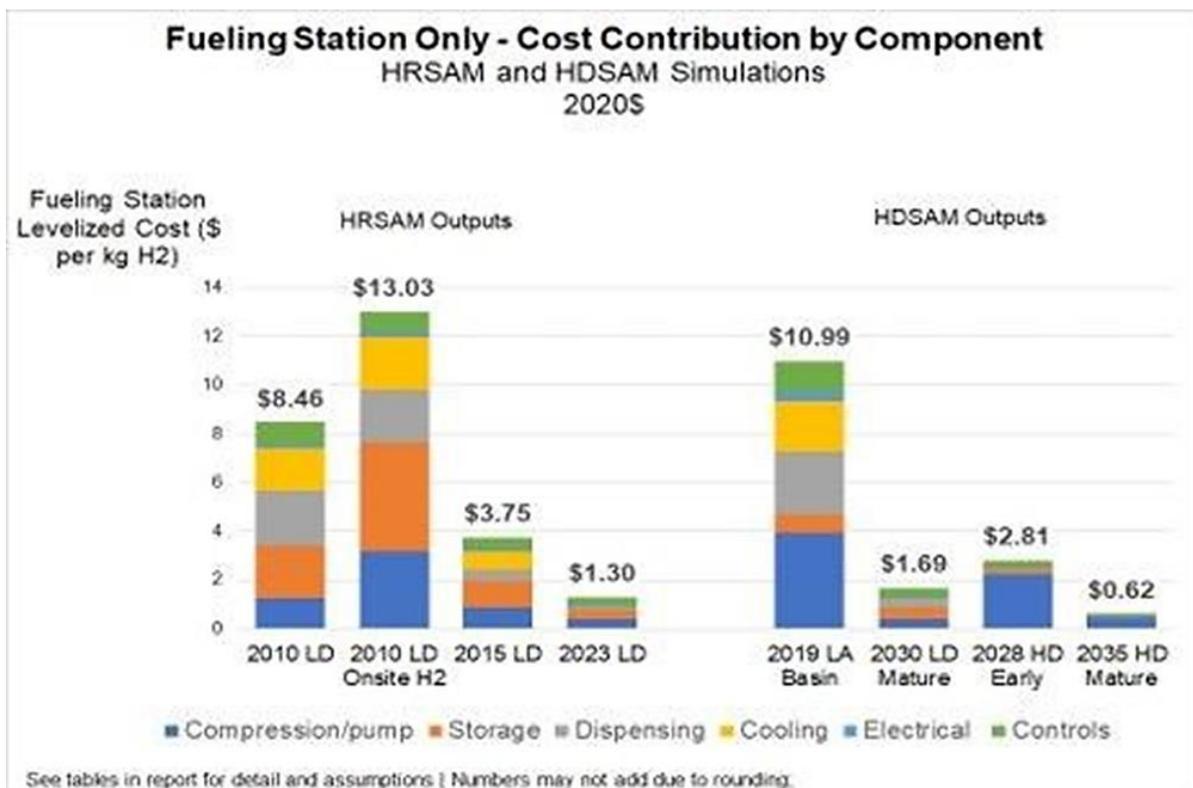


圖6.加氫基礎設施 - 按組成元件劃分的成本分佈

加氫站的設置對於能源系統的配置將造成相當大的衝擊，對於不同規模的加氫站依小型（Light-Duty，LD）、中/大型（Medium-/Heavy-Duty，MD/HD）在當前狀態、早期市場及成熟市場的電力和天然氣需求情境如表21。

表21. 加氫站電力和天然氣需求情境

	小型加氫站當前狀態		中/大加氫站早期市場		中/大加氫站成熟市場	
Design capacity (kg/day) /Capacity utilization (%)	450/ 24%		5,000/50%		16,000/80%	
Average kg H2 dispensed per day	108		2,500		12,800	
Hydrogen Production	A (註1)	B (註2)	A (註1)	B (註2)	A (註1)	B (註2)
	5,184	21.6/1,898.64	120,000	500/43,950	614,400	2560/225,504
Delivery Chain (註3) (kWh/day)	680.4		63,750		270,080	
Fueling Station (註3) (kWh/day)	756		5,000		25,600	

Total (kWh/day)	6,620.4 0	3,335.04	188,750	112,700	910,080	520,704
--------------------	--------------	----------	---------	---------	---------	---------

註1：Electrolysis（單位kWh/day）假設電解制氫效率為 48 kWh/kg-H₂

註2：SMR w/CC（NG: MMBTu/day；electricity: kWh/day）假設 SMR 的原料需求為 0.2 MMBTu-NG/kg-H₂，碳捕獲率為 96% 的 SMR 的電力需求為 17.58 kWh/kg（SMR 是指小型模組化反應爐（Small Modular Reactors）的簡稱，是一種核能發電技術）

註3：LCRI 報告3002028853的 EPRI 分析基於 HDSAMV4.1。輸送鏈的能源需求包括液化/壓縮、碼頭和 H₂ 牽引車或拖車。

在本次會議中，講者介紹了美國能源部選定的氫能中心，地理位置說明如圖7。截至目前美國 DOE 選擇了 7 個 H₂Hub 進行協商。其中3 個 H₂Hub（Appalachian Hydrogen Hub.；California Hydrogen Hub.；Pacific Northwest Hydrogen Hub.）最近才結束了協商並獲得獎勵並進入了第一階段，每個獲獎的 H₂Hub 都有一個網站，提供 H₂Hub 的情況說明，另外4 個仍在進行與 DOE協商。因H₂Hub 著重於 H₂ 和 H₂ 衍生物的生產、儲存、運輸和最終使用全供應鏈，因此通常會跨越多個州。



圖7. 美國能源部選定的氫能中心分佈圖

會議中介紹了EPRI 參與的兩個氫能中心 MACH2及 HyVelocity，MACH2為中大西洋清潔氫能中心（Mid-Atlantic Clean Hydrogen Hub，）- 中大西洋氫能中心橫跨特拉華河，包括賓州、特拉華州和新澤西州南部。Mid-Atlantic Hydrogen Hub 將有助於在大西

洋中部解鎖氫能驅動的脫碳，同時重新利用歷史悠久的石油基礎設施並利用現有的通行權。Mid-Atlantic Hydrogen Hub 計劃使用成熟和創新的電解槽技術從可再生能源和核電開發可再生氫生產設施，這有助於降低成本並推動技術進一步採用。它旨在將氫能應用擴展到重型運輸（例如卡車、公共汽車、垃圾車和街道清掃車）、製造和工業流程改進以及熱電聯產等行業，每年可顯著減少約100萬噸的碳排放量，這大約相當於每年220,000輛汽車的排放量。除了製氫，Mid-Atlantic Hydrogen Hub 還計劃擴大氫氣分配基礎設施，升級公車機械廠，並開發加氫站，以促進向更多最終使用者分配氫氣。氫基礎設施的擴建將降低儲存和分配成本，並最終有助於降低氫的成本並實現預期的減排[1]。

墨西哥灣沿岸氫能中心（Gulf Coast Hydrogen Hub）以HyVelocity 為名，墨西哥灣沿岸氫能中心將以美國傳統能源之都休斯頓地區為中心，並將橫跨德克薩斯州海岸。墨西哥灣沿岸氫能中心將利用墨西哥灣沿岸地區豐富的可再生能源和天然氣供應來降低氫能成本，利用墨西哥灣沿岸地區豐富的可再生能源和天然氣供應，幫助啟動清潔氫經濟，這是實現市場起飛的關鍵部分。為了說明降低分配和儲存成本並覆蓋更多的氫使用者，墨西哥灣沿岸氫能中心計劃開發鹽穴儲氫、大型開放式氫能管道和多個加氫站。墨西哥灣沿岸氫能中心將氫能用於燃料電池電動卡車、工業流程、氨、煉油廠和石化產品以及船用燃料（e-Methanol）。據估計，在這些行業引入清潔氫氣每年可減少 700 萬噸二氧化碳排放量，相當於 150 多萬輛汽車的年排放量 [8]。

[8] [Regional Clean Hydrogen Hubs Selections for Award Negotiations](#)

會議最終簡短說明獲得DOE \$6B 資金的 33 個工業示範計劃入選及獲獎專案[9]，涵蓋了包括鋁和金屬Aluminum and Metals，水泥和混凝土Cement and Concrete，化工和煉油Chemicals and Refining，食品和飲料Food and Beverage，玻璃Glass，鋼鐵Iron and Steel，製程熱 Process heat，紙漿和造紙 Pulp and Paper相關等產業。

[9] [Industrial Demonstrations Program Selected and Awarded Projects](#)

四、心得與建議

EPRI每年從引進其技術或程序的全球發電行業中，評選出成效卓著且能使公司和整個行業受益的專業人士授與技術轉移獎，旨在表彰將研究成果轉化為應用成果的領導者和創新者。本公司於2017年起參與 EPRI 鍋爐和渦輪蒸汽暨循環化學計劃 Program 226計劃，因在超超臨界發電機組系統水處理方面的傑出表現，榮獲2023年美國電力研究院技術轉移獎。此行代表台電公司團隊前往受獎深感光榮，典禮由EPRI 副總裁 Neva Espinoza女士擔任頒獎人，大部份的受獎團體都全體成員共同參與，足見EPRI及受獎公司對此活動的重視。本公司受限出國預算經費不免令人有遺珠之憾，未來有這樣的成績表現，建議可透過專案方式讓付出努力的同仁可以共享榮耀時刻。

從參與本次活動的議程中比較能瞭解EPRI為何能在電力領域享有盛名歷年不衰的原因，大致應可歸納為：定位明確、嚴實規劃、及落地執行。以示範專案為例，可以看到EPRI在各個階段均掌握重要的支援角色：①設計階段：根據所積累之實務經驗來協助需求建議書審查，在專案關鍵階段提供利害關係人必要的協助，並強化 EPC 團隊、OEM 和專案開發人員之間的溝通。工程面則協助管件、儀錶配置及流程圖審查，以期達到提高設計精確度、優化系統性能、共享知識、增強協同作業之目的，在電力品質規劃方面協助進行電網衝擊評估、電力品質對設備用性及法規遵從性事項分析等工作；②驗收測試、危害與可操作性分析作業及交付使用者期間：制定工廠和現場驗收的測試標準，以確保產品的可靠性和達到預期性能，降低風險並儘可能減少停機時間。強化安全性和設計完整性，風險識別和緩解措施制定，在確保系統完整性、安全性、可靠性與充份溝通的條件下交付使用者。③運行期間：先確保能啟動成功並順利過渡到初始操作，啟動期間進行系統評估，驗證系統操作是否滿足規範的要求，為工作條件建立安全和性能檢查表。EPRI在跨單位或跨公司的驗證示範型計劃中的定位明確，其工作性質與本所相近，作法值得借鏡。當然人力資源與配置是能否達到國際水準的重要因素，在有限的人力資源下以EPRI為師，落實每一個試驗場域的規劃與落實執行仍能有很好的成績。

大型儲能是各國對於提昇電網韌性、通往淨零碳排目標相當倚重的方案之一，EPRI 在今年的Bulk energy storage P221 計劃說明議程中，並未談及眾所週知的電池儲能

技術，而是以熱能及重力儲存技術開發示範為主，大抵符合儲能技術應布署在發電端，故在大型、長週期無法滿足經濟成本考量下，仍需發展以空間換取效益之可行技術的思維。因此，如何減少空間需求便是技術發展的重要指引，台灣在電池技術上的發展，落後技術先進的國家數十年，欲縮短差距滿足市場需求，以現今專業技術人才不受待見的氛圍，實非一朝一夕可達成。然若仍無法脫離鋰電池布署於電網成為儲能技術主流的作法，未能從本質上實務看待大型儲能技術發展，實非電力部門永續發展之計。

氫能技術的發展經過幾次的循環之後，受惠於淨零碳排及再生能源過剩議題發酵，在政府部門及相關產業看到商機後，終見一線曙光。但欲普及到能源終端使用者，從氫的製造、輸儲到使用，無一不涉及工程面的軟、硬實力，基礎建設成為重要的關鍵。只是政府與業界向來滿足於引以為傲的IOT產業技術，吃軟不吃硬，殊不知硬底子的工程領域才是成敗的關鍵所在，唯要決策者放棄追求亮點、急功近利、與短視速成的思維，期待深謀遠慮並不容易。