

出國報告(出國類別：考察)

114 年赴美量子及淨零科技訪查 出國報告

服務機關：國家科學及技術委員會

姓名職稱：林法正政務副主委、賴明治處長、黃冠毓科長

派赴國家：美國

出國期間：114 年 6 月 14 日至 7 月 2 日

報告日期：114 年 8 月 1 日

目錄

壹、訪查目的.....	3
一、量子.....	3
二、淨零.....	3
貳、訪查行程.....	5
一、量子.....	5
二、淨零.....	6
參、團員名單.....	7
一、量子成員.....	7
二、淨零成員.....	8
壹、訪查成果.....	10
一、量子.....	10
(一) SEEQC	10
(二) IBM Thomas J. Watson Research Center	12
(三) Brookhaven National Laboratory	14
(四) Flatiron Institute Center for Computational Quantum Physics	17
(五) NYU Courant Institute of Mathematical Sciences	19
(六) Flatiron Institute Center for Computational Biology & Center for Computational Mathematics	20
二、淨零.....	22
(一) 德州大學墨西哥灣碳中心(Gulf Coast Carbon Center, University of Texas).....	22
(二) ExxonMobil.....	25
(三) Calpine-Los Medanos Energy Center.....	28
(四) 勞倫斯利佛摩國家實驗室(Lawrence Livermore National Laboratory).....	31
(五) 史丹佛大學碳封存研究中心(Stanford Center for Carbon Storage).....	35
(六) 加州空氣資源委員會(California Air Resources Board)	38
(七) 加州大學洛杉磯分校 (University of California, Los Angeles)	41
貳、結論與建議.....	44
一、量子.....	44
二、淨零.....	45

壹、訪查目的

一、量子

量子電腦被視為具備在特定領域超越傳統電腦的潛力。美國在量子科技領域投入龐大資源，橫跨政府政策支持、尖端學術研究及產業化推動，已成為全球量子技術發展的領頭國之一。

為深入了解美國在量子電腦技術的發展現況與未來發展性，本次參訪行程特別安排拜訪美國重要研究機構與企業，包括 IBM 與 SEEQC，並就量子電腦之硬體（如超導量子位元）及軟體研發進行實地交流與合作探討。實地了解其在量子位元晶片技術、量子電腦及低溫控制電路等方面的技術進展。特別是在超導量子位元製備與操控、量子測量、軟體與演算法設計等領域，IBM 展現出高度的技術成熟度與前瞻應用視野。

透過與美國在量子科技領域的領導單位與專家互動，有助於掌握全球技術脈動、挑戰與應用趨勢，並為我國未來量子科技研發與國際合作策略提供寶貴參考，也與美方尋求未來在關鍵量子技術與應用端的合作契機，來加速我國量子科技的系統建構與產業化進程。

二、淨零

為減緩氣候變遷，淨零排放已成為國際共同目標。扣合賴清德總統推動臺灣第二次能源轉型，發展多元再生能源、氫能、碳捕捉利用及封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)、公正轉型之政策方向，爰規劃本次訪查。聚焦碳捕捉與封存(CCS)及核融合(Fusion)兩大主題，由本會林政務副主委法正偕淨零科研團隊學研專家及經濟部、工研院、中油等產業應用與示範計畫團隊，前往美國參訪加州與德州淨零科技相關單位及案場，交流技術發展、基礎設施、成本效益，以及社會接受度等關鍵議題。

德州具備深厚的油氣產業基礎、成熟的技術實力與優越的地質條件，在 CCS 領域的發展上具備多重優勢，是全美最具代表性的地區之一。本次安排拜會德州大學奧斯汀分校(UT Austin)墨西哥灣碳中心(Gulf Coast Carbon Center, GCCC)，長期與政府、能源業者及國際夥伴合作，進行地質封存潛勢評估、井下監測技術開發與風險管理模型建構；另拜訪跨國能源公司 ExxonMobil，該公司於 2022 年提出在德州休

士頓工業走廊地區建構一座年封存能力達1億噸CO₂的大規模CCS樞紐(CCS Hub)，該計畫將整合石化、煉油、氫能等高排放產業的碳捕捉設施，並透過管線輸送至墨西哥灣沿岸地質封存。

加州則為美國氣候政策最進步的州之一，於2006年通過《全球暖化解決方案法》(Assembly Bill 32, AB32)，建立全美首套碳市場與排放上限制度，並在2018年將CCS納入《低碳燃料標準》(Low Carbon Fuel Standard, LCFS)，成為取得碳強度減量積分的合法選項，強化CCS商業可行性。本次安排拜會加州空氣品質與氣候政策主管機關加州空氣委員會(California Air Resources Board, CARB)、學研單位史丹佛大學碳封存研究中心(Stanford Center for Carbon Storage, SCCS)與加州大學洛杉磯分校(University of California, Los Angeles, UCLA)，並實地參訪能源公司Calpine天然氣電廠CCS案場。針對核融合技術則規劃拜訪美國能源部旗下勞倫斯利佛摩國家實驗室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)，其擁有全球最先進的國家點火設施(National Ignition Facility, NIF)，研發慣性約束核融合(Inertial Confinement Fusion, ICF)技術並於2022年實現全球首度科學淨能量增益，為核融合技術發展史上的重大突破。

藉由與美方淨零科技相關單位交流技術與政策經驗，並實地觀摩技術設施與應用場域，除能深化臺美技術、人才與資訊交流，也有助拓展我國淨零科技的國際視野，促進臺美淨零科技產學研國際合作機會，增進我國淨零科研量能，並加速技術示範與場域應用落實。

貳、訪查行程

一、量子

日期	上午	下午	晚上	宿
6/14 (六)	-	臺灣出發 長榮航空(BR32) 19:10 TPE→22:05 JFK		紐約
6/15 (日)	移動至紐約市區、工作會議			
6/16 (一)	10:00-13:00 拜會紐約經文處李大使	14:00 – 17:30 拜會 SEEQC		
6/17 (二)	09:00-16:15 IBM Thomas J. Watson Research Center			
6/18 (三)	10:00-14:00 Brookhaven National Laboratory	14:00-16:00 Flatiron Institute Center for Computational Biology	部分量子 團員返臺 長榮航空 (BR31)	紐約
			6/19(四) 01:25 JFK→ 05:15 ⁺¹ TPE	機上
6/19 (四)	10:00-12:00 NYU Courant Institute of Mathematical Sciences	深度文化參訪 (美國國定假日)		紐約
6/20 (五)	工作會議	14:00-16:00 Flatiron Institute Center for Computational Quantum Physics	處長返臺 長榮航空 BR31 6/21(六) 01:25 JFK→ 05:15 ⁺¹ TPE	機上
6/21 (六)	交通移動			
6/22 (日)	抵臺			-

二、淨零

日期	上午	下午	晚上	宿
6/22 (日)	-		臺灣出發 長榮航空 (BR52) 21:20 TPE→ 22:20 IAH	休士頓
6/23 (一)	10:00-12:00 德州大學墨西哥灣碳封存 中心(GCCC)	交通移動 奧斯丁→休士頓	拜會休士頓 經文處	
6/24 (二)	08:50-14:30 ExxonMobil		交通移動 休士頓→舊金山 聯合航空(UA737) 17:10 IAH→19:18 SFO	舊金山
6/25 (三)	10:00-12:00 Calpine-Los Medanos Energy Center(LMEC)	14:00-16:30 勞倫斯利佛摩國家實驗室 (LLNL)	拜會舊金山 經文處	
6/26 (四)	09:00-11:00 史丹佛大學碳封存研究中 心(SCCS)	工作會議		
6/27 (五)	10:30-12:00 加州空氣資源委員會 (CARB)	科技學人社團交流		
6/28 (六)	交通移動 舊金山→洛杉磯 聯合航空(UA2487) 08:50 SFO→10:25 LAX			洛杉磯
6/29 (日)	工作會議			
6/30 (一)	10:00-12:30 加州大學洛杉磯分校 (UCLA)	13:00-14:30 拜會洛杉磯經文處	返臺 長榮航空 (BR11) 00:15LAX→ 05:10 ⁺¹ TPE	機上
7/1 (二)	交通移動			
7/2 (三)	抵臺			-

參、團員名單

一、量子成員

編號	姓名	單位	職稱
1	賴明治 Ming-Chih Lai	自然科學及永續研究發展處 Department of Natural Sciences and Sustainable Development	處長 Director General
2	黃冠毓 Kuan-Yu Huang	自然科學及永續研究發展處 Department of Natural Sciences and Sustainable Development	科長 Section Chief
3	劉芳君 Fang-Chun Liu	自然科學及永續研究發展處 Department of Natural Sciences and Sustainable Development	科技研發管理師 Project Manager
4	果尚志 Shangjr (Felix) Gwo	國立清華大學 National Tsing Hua University	教授 Professor
5	張文豪 Wen-Hao Chang	國立陽明交通大學 National Yang Ming Chiao Tung University	教授 Professor
6	王明杰 Ming-Jye Wang	中央研究院 Academia Sinica	特聘研究員 Distinguished Research Fellow
7	高英哲 Ying-Jer Kao	國立臺灣大學 National Taiwan University	教授 Professor
8	侯靜紋 Ching-Wen Hou	量子系統推動小組辦公室 Taiwan Quantum Program Office (TQPO)	計畫管理專員 Project Coordinator
9	楊安正 An-Cheng Yang	國研院國家高速網路與計算中心 National Center for High-performance Computing(NCHC)	副研究員 Associate Researcher

二、淨零成員

編號	姓名	單位	職稱
1	林法正 Lin, Faa-Jeng	國家科學及技術委員會 National Science and Technology Council	副主委 Deputy Minister
2	黃冠毓 Kuan-Yu Huang	自然科學及永續研究發展處 Department of Natural Sciences and Sustainable Development	科長 Section Chief
3	葉麟 Lin, Yeh	自然科學及永續研究發展處 Department of Natural Sciences and Sustainable Development	科技研發管理師 Project Manager
4	張瑞昕 CHANG, JUI-SHIN	國家科學及技術委員會 National Science and Technology Council	機要秘書 Secretary
5	陳崇憲 CHEN, CHUNG-HSIEN	經濟部能源署 Energy Administration, Ministry of Economic Affairs	組長 Division Director
6	吳逸民 Wu, Yih-Min	國立臺灣大學 National Taiwan University	教授 Professor
7	郭陳浩 Hao, Kuo Chen	國立臺灣大學 National Taiwan University	教授 Professor
8	羅夢凡 Lo, Meng-Fan	國立中央大學 National Central University	研發長 Dean of Research & Development
9	林殿順 Lin, Tien-Shun	國立中央大學 National Central University	教授 Professor
10	吳政岳 Wu, Cheng -Yueh	國立成功大學 National Cheng Kung University	助理研究員 Assistant Research Fellow
11	馬維揚 Ma, Wei-Yang	國家原子能科技研究院 National Atomic Research Institute	所長/研究員 Director-Researcher
12	柳克強 Leou, Keh-Chyang	國立清華大學 National Tsing Hua University	教授 Professor
13	邱俊銘 CHIU, CHUN MING	台灣中油探採事業部 CPC Corporation, Exploration & Production Business Division	組長 Manager
14	曾彥祺 TSENG, YEN CHI	台灣中油探採事業部 CPC Corporation, Exploration & Production Business Division	組長 Manager

編號	姓名	單位	職稱
15	陳仕恩 CHEN, CHARLIE SHIH- ERN	台灣中油探採事業部 CPC Corporation, Exploration & Production Business Division	組長 Manager
16	左峻德 TSO, CHUNTO	台灣經濟研究院 Taiwan Institute of Economic Research	副院長 Vice President
17	張家榮 Jean-Christophe, Chang	台灣經濟研究院 Taiwan Institute of Economic Research	副組長 Deputy Chief
18	黃祉瑄 Chih-Hsuan, Huang	台灣經濟研究院 Taiwan Institute of Economic Research	副組長 Deputy Chief
19	李奕亨 LI, YI-HENG	工研院綠能所 Green Energy & Environment Research Laboratories, ITRI	副組長 Deputy Chief

壹、訪查成果

一、量子

(一)SEEQC

1.時間：6/16 (一) 14:00-17:30

2.地點：150 Clearbrook Road #170, Elmsford, NY10523

3.與會人員

(1) John Levy-CEO and Co-Founder

(2) Shu-Jen Han, Ph.D.-Chief Technology Officer

4.訪查紀要

代表團於 2025 年 6 月 16 日前往位於美國紐約州 Elmsford 的量子運算新創公司 SEEQC 進行實地參訪與技術交流。SEEQC 成立於 2018 年，為原超導電子公司 HYPRES 所分拆而出，專注於開發次世代量子運算平台，推動「全數位量子運算」架構，並積極透過與產業界的合作。

此次訪問由 SEEQC 共同創辦人暨執行長 John Levy 博士與技術長 Shu-Jen Han 博士親自接待。活動首先由 SEEQC 團隊簡介公司發展歷程與技術路線，並說明其與 NVIDIA 於 2025 年 GTC 大會共同發表的最新成果——全球首款可連接量子處理器與傳統 GPU 的晶片對晶片介面。隨後，臺灣由張文豪教授簡要說明我國量子科技政策推動現況與量子國家隊的整體規劃，包含超導、冷原子、矽光子等不同平台的發展，以及與學研機構、產業鏈的合作策略。雙方進一步就量子控制模組、低溫系統、量測技術、模組化架構與軟體整合等技術議題，進行深入交流。

參訪團亦實地參觀 SEEQC 的實驗設施，包括該公司的無塵室。SEEQC 對於臺灣團隊在低溫控制電路與系統整合的研究進展表示高度關注，雙方並針對未來進一步合作的可能性進行初步探討，特別是與臺灣大學及工研院電光所團隊的合作計畫，預期將聚焦於低溫電子模組的共同開發與測試驗證。

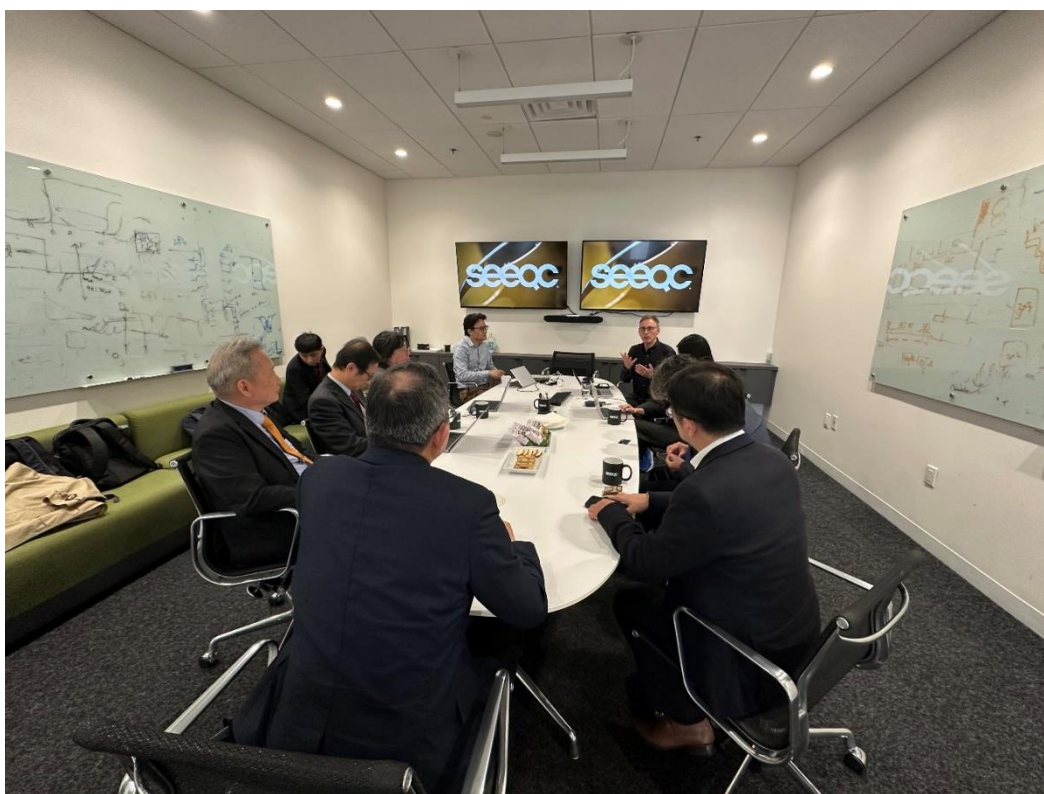


圖 1、SEEQC 執行長 John Levy 博士(中央右)與技術長 Shu-Jen Han 博士(中央左)正在向訪團介紹其公司概况



圖 2、SEEQC 實驗室負責人正在向臺灣訪團介紹實驗室概況

(二)IBM Thomas J. Watson Research Center

1.時間：6/17 (二) 09:00 -16:15

2.地點：1101 Kitchawan Rd, Yorktown Heights, NY 10598

3.與會人員

(1) TC Chen Vice - President, Strategy, Science & Technology, IBM Fellow

(2) Scott Crowder - Vice President, IBM Quantum Adoption and Business Development

(3) Jerry Chow - VP and Fellow, IBM Quantum

(4) Rizwan Hussain - Client Executive, IBM Quantum Public and Academic

(5) Hiroshi Horii -Head of IBM Quantum Japan, Senior Technical Staff Member

(6) George Tulevski- Senior Manager, IBM Think Lab

(7) Joss Miloz -Quantum Lead, IBM Research

(8) Gabriele Compostella -Quantum Lead, IBM Research

(9) Stella Lai -Head of Government and Regulatory Affairs

4.訪查紀要

代表團於 2025 年 6 月 17 日前往位於紐約州約克鎮高地的 IBM Thomas J. Watson Research Center 進行參訪與深度技術交流。該中心為 IBM 全球研究總部，是全球最具規模與歷史的工業研究機構之一，長年引領人工智慧、量子運算、半導體與雲端技術等多項關鍵科技的突破與應用。此次參訪由 IBM 高階團隊接待，成員包含 IBM 策略與科技副總裁 TC Chen、量子業務副總裁 Scott Crowder、量子技術副總 Jerry Chow 等多位資深主管，展現對臺灣量子科技代表團的高度重視。

活動首先由 IBM 介紹其全球研究布局與戰略方向，接續由臺灣代表張文豪教授簡報我國量子科技推動現況與國家策略，雙方對未來合作可能性展開初步交流。會議期間，IBM 團隊針對最新量子運算進展、Heron R2 量子晶片設計（具備 156 量子位元，採重型六角排列與雙層抑噪架構）、軟體層技術、量子-經典混合運算系統等核心技術進行說明。下午代表團參觀 Watson Center 內的 Think Lab 展示空間，實地觀摩 IBM 最前沿的量子電腦、AI 晶片與雲端原生超算原型系統。此外，IBM 團隊也特別簡報其 On-prem 專屬量子系統部署模式，以及針對可能與臺灣在地團隊及產業合作的可能方向與構想。最後雙方就供應

鏈與次系統合作進行實務討論。IBM 對臺灣在次系統模組化、製程及封裝等技術表達高度合作意願，也展現出尋求與臺灣建立更緊密技術合作關係的意願。



圖 3、國科會自然處賴明治處長(中央左)與 IBM 量子採納與業務發展副總裁 Scott Crowder(中央右)、參訪團員及 IBM 接待成員合影

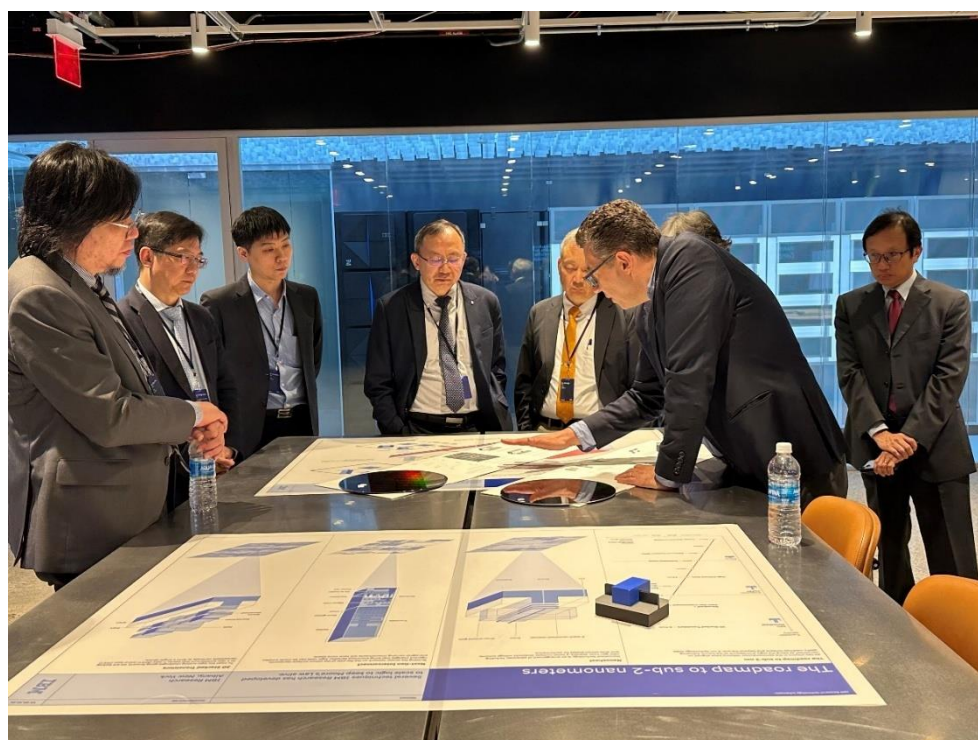


圖 4、國科會自然處賴明治處長率團參觀 IBM Thomas J. Watson Research Center 內的 Think Lab 展示空間

(三)Brookhaven National Laboratory

1.時間：6/18 (三) 10:00-14:00

2.地點：98 Rochester Street, Upton, NY 11973

3.與會人員

- (1) Scott Bronson, Manager, Government Relations & Strategic Engagement, Stakeholder Relations
- (2) Yu-Chen (Karen) Chen-Wiegart, Joint Appointment, Imaging & Microscopy Program, Physical Sciences & Research Operations Division, NSLS-II, Energy & Photon Sciences Directorate
- (3) Kahille Dorsinvil, Principal Community Relations Specialist, Stakeholder Relations
- (4) Andrew (Andy) Kiss, Lead Beamline Scientist, Imaging & Microscopy Program, Physical Sciences & Research Operations Division, NSLS-II, Energy & Photon Sciences Directorate
- (5) Cheng-Hung Lin, Beamline Scientist for Pair Distribution Function(PDF), Hard X-ray Methods Program, Physical Sciences & Research Operations Division, NSLS-II, Energy & Photon Sciences Directorate
- (6) David Manning, Director, Stakeholder Relations Office
- (7) Lisa Miller, Manager, User Services, Communications, Education & Outreach, NSLS-II, Energy & Photon Sciences Directorate
- (8) Huan-Hsin Tseng, Computational Scientist for Machine Learning, AI Codesign Group, Artificial Intelligence Department, Computational Research Division, Computing & Data Sciences Directorate
- (9) Denise Yazak, Senior Public Affairs Representative, User Services, Communications, Education & Outreach, NSLS-II, Energy & Photon Sciences Directorate

4.訪查紀要

Brookhaven National Laboratory 是美國的一所國家實驗室，位於紐約州長島蘇福克縣布魯克黑文鎮的阿普頓，1947 年在前美國基地阿普頓營原址建造。該實驗室由布魯克黑文鎮而得名。實驗室本來由美國原子能委員會所擁有，後來

因委員會被合併而轉交給美國能源部再外包予各大學及研究機構。

本次拜會以下實驗室各中心：

(1) 功能性奈米材料中心 (CFN)

CFN 是美國能源部專門研究奈米科技的用戶設施之一，聚焦於奈米材料的設計、製備、特性量測及理論模擬。它提供最先進的儀器與專業支持，協助全球研究人員探索奈米尺度材料在能源、電子、生物及環境領域的應用。本次參訪重點著重研究軟物質（聚合物、膠體、薄膜）和與生物有關的奈米材料，這些材料在新型感測、能源儲存、藥物載體等方面極具潛力，以及利用先進電子顯微技術（包括掃描與穿透電子顯微鏡）觀測原子級結構，分析材料的組成和功能。

(2) 國家同步輻射光源 II (NSLS-II)

NSLS-II 是世界最先進的同步輻射光源之一，可產生極高亮度、能量可調的 X 射線與紫外光，用於探測物質結構與性質，對於新材料、生命科學、能源科學研究至關重要。本次重點參訪光束線包括：NSLS-II 的設施規模、光源特性及多領域應用；前沿微聚焦蛋白質結晶學，利用微米甚至奈米級聚焦 X 光，研究生物大分子的晶體結構，有助於新藥開發；相干硬 X 射線散射，應用相干散射研究材料內部的動態變化，如磁性、電子序；次微米解析 X 射線光譜，透過 X 射線光譜及成像技術，解析材料的化學組成與氧化態，空間解析度可達數百奈米。

(3) 量子優勢共同設計中心 (C2QA)

C2QA 是美國能源部量子資訊科學中心，聚焦於量子材料、量子處理器、量子軟體的共同設計，旨在突破當前量子運算的限制。本次聚焦於量子材料研究，包括開發新型量子材料（如超導體、拓撲材料），支持下一代量子電腦；量子機器學習，探討結合量子運算與 AI 演算法，提升科學數據分析能力；另將 AI 應用於同步輻射光束線數據處理，提高實驗效率。

本會亦就量子國家隊推動情形向該中心進行簡報，同時邀請研究學者 11 月來臺參與國際研討會。



圖 5、訪團與 Brookhaven National Laboratory 專家合影

(四)Flatiron Institute Center for Computational Quantum Physics

- 1. 時間：**6/18 (三) 14:00-16:00
- 2. 地點：**162 5th Ave, New York, NY 10010
- 3. 與會人員：**Director Andrew Millis
- 4. 訪查紀要**

Flatiron Institute 是美國西蒙斯基金會(Simons Foundation)於 2016 年設立的內部研究機構，致力於透過計算方法推進科學研究，其方法包括資料分析、理論建模與模擬運算。該機構於 2017 年 9 月 6 日正式啟用，名稱源自其所在的紐約市 Flatiron 區。下設五大計算科學研究中心：計算天體物理中心(Center for Computational Astrophysics, CCA)、計算生物學中心(Center for Computational Biology, CCB)、計算量子物理中心(Center for Computational Quantum Physics, CCQ)、計算數學中心(Center for Computational Mathematics, CCM)、計算神經科學中心(Center for Computational Neuroscience, CCN)。

本次拜會計算量子物理中心，就量子計算、先進模擬方法及國際合作進行交流，並探討未來與我國科研單位之合作機會。CCQ 首先就強關聯電子行為的理論模型、計算資源與模擬規模之挑戰及計算量子物理在材料預測與量子計算交叉應用等主題進行簡報，我方亦就量子國家隊推動情形向該中心進行簡報，同時邀請研究學者 11 月來臺參與國際研討會。

本次參訪深刻體會 Flatiron Institute 在跨領域計算方法整合與研究社群建構之優勢，其以開放共享精神推動軟體平台，顯著加速國際合作。CCQ 對計算精確度與效率之追求，以及對先進理論工具之投入，值得國內相關單位借鏡。

(五)NYU Courant Institute of Mathematical Sciences

1. 時間：6/19 (四) 10:00-12:00
2. 地點：251 Mercer Street New York, NY 10012
3. 與會人員：Prof. Charles S. Peskin
4. 訪查紀要

Courant Institute of Mathematical Sciences(CIMS)是隸屬於紐約大學文理學院的一個數學與計算機科學教學研究獨立機構，研究水準領先世界。科朗數學所在世界上享有盛名，開設有數學、計算機科學、數據科學、金融數學等相關學位。科朗數學科學研究所的應用數學在美國新聞與世界報導(U.S. News & World Report)排名全美第一。

本次拜會雙方就計算數學、應用數學、數值模擬、人工智慧應用及國際學術合作等議題交換意見，同時深入瞭解 NYU 對於博士生、博士後與訪問學者的培養方式，及其國際交流計畫與申請管道。院方也表達歡迎臺灣學生與學者前來交流

此外，Courant Institute 展現出強大的跨領域整合能力與數學理論與實務應用並重的研究文化，特別在 AI、金融、物理建模與計算科學等領域，具備深厚學術基礎與國際影響力。其強調「數學為跨領域語言」的研究理念，與我國推動數位治理、氣候模擬與精準醫療等政策目標高度契合，具合作潛力。



圖 7、國科會自然處賴明治處長與 CIMS 合影

(六)Flatiron Institute Center for Computational Biology & Center for Computational Mathematics

1. 時間：6/20 (五) 14:00-16:00

2. 地點：162 5th Ave, New York, NY 10010

3. 與會人員：Director Michael Shelley, Director Leslie Greengard

4. 訪查紀要

本次拜會 Flatiron Institute Center for Computational Biology(CCB)與 Center for Computational Mathematics(CCM)，主要針對先進計算方法於生物醫學研究之應用進行交流，數學方法、演算法與軟體，以推進多個學科領域的科學研究，並了解最新研究成果及探討未來合作可能性，並探討 AI、數學模型在疾病研究及藥物發現的應用潛力，同時試圖建立國際合作聯繫，評估與我國相關單位未來合作及人才交流的可能性。

CCB 中心在跨尺度計算生物學研究方面，展現卓越的研究深度與技術創新。中心特別強調以下幾點：

- (1) 理論、算法與應用整合：從數學模型、統計學、電腦科學到生物學實驗驗證，形成閉環式研究模式。
- (2) 開放共享文化：所有開發軟體與資料集均以開源模式對外發布，積極推動科學透明性與再現性。
- (3) 跨領域培訓：中心重視培養研究人員的跨領域能力，培訓過程包含軟體工程、數學理論、生命科學應用。

CCM 則在高性能計算(HPC)、數值方法、資料驅動建模等領域之發展具有領先地位，因此拜訪過程中雙方探討未來與臺灣科研單位及學者之合作可能性，包括交流研究軟體開發、科研人才培育及學術社群經營經驗。

自然處長期支持跨領域相關研究，可考慮與 CCB 與 CCM 建立常態性合作管道，強化國際合作與人才培育，提升臺灣科研能量。

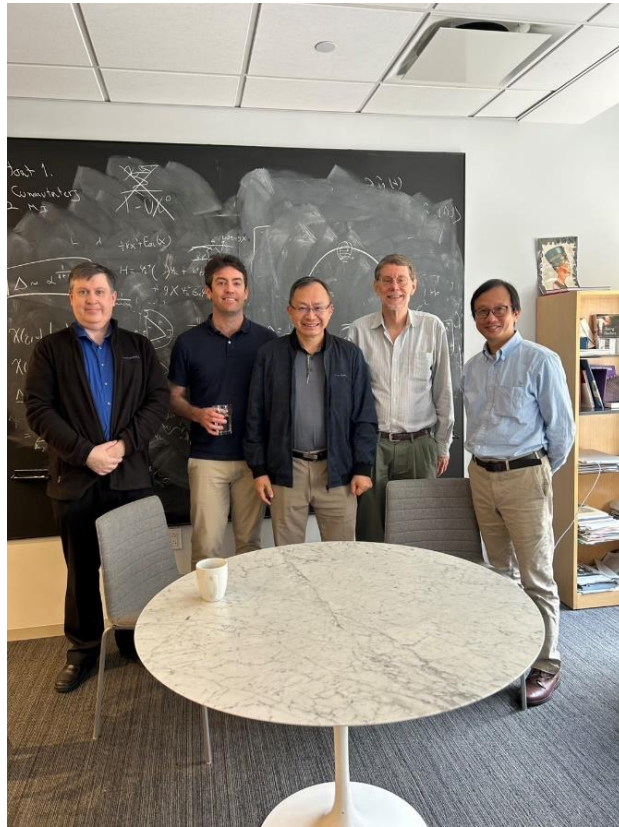


圖 8、國科會自然處賴明治處長與 Flatiron Institute, CCB and CCM 人員合影

二、淨零

(一)德州大學墨西哥灣碳中心(Gulf Coast Carbon Center, University of Texas)

1. 時間：6/23 (一) 10:00-12:00

2. 地點：GCCC, The University of Texas at Austin Building 130 (10100 Burnet Rd, Austin, TX 78758)

3. 與會人員

- (1) Moscardelli, Lorena-Director of the Bureau of Economic Geology & Texas State Geologist
- (2) Wisian, Ken Associate-Director & Program Director of HotRock Geothermal Research Consortium
- (3) Hovorka, Susan -GCCC Principal Investigator
- (4) Duncker Romanak, Katherine-Research Prof., Geochemist
- (5) Bump, Alex -Research Ass. Prof, Exploration, Basin Analysis, Structural Geologist
- (6) Hosseini, Seyyed -Research Prof. Multiphase Fluid Flow
- (7) Ni, Hailun -Research Ass. Prof., Fluid Flow Lab Lead
- (8) Trevino, Ramon-Program Manager
- (9) Bhattacharya, Shuvajit- Research Scientist, Petrophysicist/ Geophysicist
- (10) Ko, Tingwei “Lucy” -Research Ass. Integrated geologist, geochemist, and petroleum system analyser with STARR
- (11) van der Kolk, Dolores -GCCC Communications Coordinator, Sedimentologist, Stratigrapher

4. 訪查紀要

Gulf Coast Carbon Center(GCCC)成立於 1998 年，隸屬於美國德州大學奧斯汀分校經濟地質局(Bureau of Economic Geology, BEG)，專注於 CCS 技術的研究、發展與教育。主要資金來源包含美國能源部等政府單位及 Air Products、BP、Shell、ExxonMobil 等 16 個國際產業夥伴。

GCCC 近期研究重點包含最佳化封存時間、空間效率，如儲層與封蓋岩特性分析、儲存容量與封存潛力評估、地層結構與流體動力學模擬；監測與風險控制，如高解析三維震測系統(High Resolution 3-D Seismic System)；商業化推動

關鍵要素，如保險、政策配套及生態系統等。

會中 GCCC 向訪團分享，美國政府針實施 45Q 稅收抵免獎勵措施，提供地質封存二氧化碳每噸 85 美元的抵減額度，是企業投入 CCS 技術的關鍵經濟誘因。在法規面，美國《安全飲用水法》(Safe Drinking Water Act)早已建立地下灌注管制(Underground Injection Control, UIC)，專門監管各類地下灌注活動，使美國能在既有法規基礎上迅速建立 CCS 的管理機制，回應 CCS 發展需求。

在社會面，GCCC 重視 CCS 教育與公眾溝通，致力於提升社會對 CCS 的認知與專業人才培育，推動線上課程「Subsurface Skills for Carbon Capture and Storage」，由德州大學奧斯汀分校地質與工程專家共同開發，提供 CCS 領域的專業基礎訓練。此外，亦透過「Put It Back – Carbon Not Rescue」等網頁資源，推廣 CCS 概念，協助中小學師資與大眾理解地質封存原理與氣候變遷科學。

在技術發展方面，GCCC 協助執行能源部 CarbonSafe 墨西哥灣西北地區大規模 CCS 前期可行性調查，與前瞻 CCS 技術如離岸 3D 震測技術驗證、自動化無線注入井監測系統、基性岩石 CO₂ 礦化分析等研究；設計並部署高解析度三維地震成像技術(High-resolution 3D, HR3D)，協助日本苫小牧 CCS 計畫離岸監測技術驗證；此外，該中心亦開發 CCS 沙盒實驗技術，重建地質沉積結構模型，模擬並觀察流體於不同地層結構中的流動模式，以視覺和數值方式分析 CO₂ 移棲行為。

本次拜會，雙方主要針對 CCS 技術發展與實務推動經驗進行交流，並討論陸海域封存策略、成本效益、地震活動風險及雙邊科研合作機會等關鍵議題，該單位亦安排訪團實地訪視其碳封存實驗中心、沙盒實驗室及由 BEG 管理的全美最大學術岩芯庫之一的 Austin Core Research Center (CRC)，該中心儲存美國本土（尤其是德州與墨西哥灣沿岸）及國際超過 70 萬箱岩心樣本與研究設施，提供公眾參觀及多項地質與碳封存相關研究使用。

國科會近年來持續推動我國陸海域及近岸碳封存潛力場址評估、震測探勘分析技術開發與監測系統建置研究，學研團隊規劃將邀請 GCCC 合作進行桃園陸海域及碳封存試驗場之三維地質模型建立及二氧化碳封存量評估。



圖 9、訪團與 GCCC 專家合影



圖 10、訪團實地訪視 CRC 岩芯庫及研究設備

(二)ExxonMobil

1. 時間：6/24 (二) 08:50-14:30

2. 地點：ExxonMobil Houston Campus (22777 Springwoods Village Pkwy, Spring, TX 77389)

3. 與會人員

(1) Philip Wong, EM Taiwan

(2) Robert Chen, EM Taiwan

(3) Daniel Chen, LCS AP (Singapore)

(4) Jelena Schmitz, EMTEC (Houston)

(5) David Gombosi, EMTEC (Houston)

(6) Po Tai, EMTEC (Houston)

(7) Matthew White, Global CCS Storage Lead

(8) Alex Lee, Carbon Storage Technology Portfolio Manager

4. 訪查紀要

ExxonMobil 是全球最大的跨國石油和天然氣公司之一，擁有超過 140 年的歷史。該公司由 Exxon（前身為 Standard Oil of New Jersey）和 Mobil（前身為 Standard Oil of New York）兩家企業於 1999 年合併而成。總部位於美國德克薩斯州，業務範圍涵蓋石油勘探、開採、煉油、化工製造及石油產品的分銷與零售。作為全球能源領域的領導者，ExxonMobil 在油氣的上游、下游和化工領域均有重要布局，近年致力於推動永續能源，並積極發展低碳排放和 CCS 技術，以應對全球能源需求及環境挑戰。

ExxonMobil 向訪團分享該公司在當地主導跨產業 CCS 合作計畫 Houston CCS Hub，該計畫旨在大規模捕捉並封存來自休士頓地區工業設施的 CO₂，目標在 2030 年每年捕捉並封存 5,000 萬公噸 CO₂，並在 2040 年達到 1 億公噸的規模。其中，正在德州貝敦(Baytown)開發的低碳氫氣生產設施為其核心項目之一，該設施設計日產量為 10 億標準立方英尺低碳氫，相當於 150 萬戶家庭供電所需的能量，並可以年生產超過 100 萬噸的低碳氫，同時將部署 Honeywell 的 CO₂ 分餾與氫氣純化技術，預計可捕獲生產氫氣過程中產生的 98% 以上的二氧化碳，即每年約 700 萬公噸。應用端方面，ExxonMobil 已與日本最大電力公司 JERA 簽署協議，計畫每年運送 50 萬公噸的低碳氫供日本內陸需求使用。該計

劃已完成前端工程設計(FEED)，預計 2025 年做出最終投資決定。

ExxonMobil 在 2024 年與德州土地管理局(Texas General Land Office, GLO)簽訂德州水域超過 270,000 英畝的碳封存租賃協議，計畫在墨西哥灣沿岸打造完整的碳捕捉、運輸和封存網絡，目前正在開發多個封存點並連接現有的基礎設施。該公司已與 CF Industries、Calpine 等多家產業簽訂商業協議，將協助工業設施捕獲、運輸並永久封存 CO₂，總計 CCS 承諾量達 1,600 萬噸。

本次拜訪，ExxonMobil 亦邀請訪團參觀其位於休士頓的辦公園區、能源中心及 CCS 實驗室，並分享其對亞洲地區 CCS 發展的展望及推動模式觀察，如新加坡政府藉逐步提高碳稅促進減碳並將資金投入 CCS 發展，與 ExxonMobil、shell 等企業協力規劃、開發跨境 CCS，目標在 2030 年，達年捕捉並封存 250 萬噸二氧化碳之規模。日本則透過示範計畫、成立綠色基金等方式推動 CCS 發展，並於 2024 年 5 月通過《CCS 事業法》，為 CCS 開發與運營建立具體許可與管理制度，促進 CCS 技術開發與商業化，目前境內共有 9 個 CCS 專案開發中。借鏡國際經驗，雙方亦針對臺灣發展機會深入討論，該公司建議我國可參考其他國家推動經驗，由政府跨部會成立指導團隊，整合資源帶動企業投資，加速促成臺灣首個商業化案場。惟考量我國目前 CCS 開發成本遠高於碳費，企業投入誘因不足，現階段需由政府支持帶動 CCS 相關研究並由國營事業優先推動示範案場，此作法將有助完備法規環境、建立明確管理規範，亦有利於找出潛在利害關係人促進實質社會溝通，作為後續擴大開發及商業化模式建立之基礎。



圖 11、訪團與 ExxonMobil 會議交流



圖 12、訪團與 ExxonMobil 專家合影

(三)Calpine-Los Medanos Energy Center

1. 時間：6/25 (三) 10:00-12:00

2. 地點：750 E 3rd St, Pittsburg, CA 94565

3. 接待人員

(1) Barbara McBride, Strategic Origination Director

(2) Parsha Ghodsi, Strategic Origination Director

(3) Diana Gallegos, Government Regulatory Director

(4) Avis Kowalewski, VP of Government Regulatory Affairs

(5) Alfred Torres, Governmental and Community Affairs Manager

(6) Gary Kelly, Lead Consultant for ION's carbon capture pilot & technology

4. 訪查紀要

Calpine 成立於 1984 年，總部位於美國德州休士頓，現為美國最具規模私營電力公司之一，專注於提供低碳、高效率的電力解決方案。該公司旗下擁有 79 座營運中的能源設施以天然氣複循環發電廠(natural gas combined-cycle power plants)為主，輔以熱電聯產(cogeneration)、再生能源、儲能系統等，並擁有世界上最大的地熱發電場——位於加州的 The Geysers，總計裝置容量約 27,000 兆瓦(MW)，足以供應 2,700 萬戶家庭用電。

因應能源轉型，Calpine 積極投資 CCS 技術，開發多個商業規模的 CCS 項目。該公司說明，設施設置空間與與封存場址的銜接可行性，是部署碳捕捉設備時必須考量的兩大關鍵，Calpine 因此針對其既有發電廠進行全面盤點，最終選定 12 座條件適合的廠址優先試點。其中 Los Medanos Energy Center(LMEC)是 Calpine 於加州營運的複循環天然氣發電設施，裝置容量超過 500MW，為其推動 Project Enterprise CCS 示範項目的基地之一。該計畫與 ION Clean Energy 合作，旨在驗證天然氣電廠搭配碳捕捉技術與操作成效，ION 公司致力於燃燒後捕捉技術開發，所開發之 ICE-31™溶劑具高效率、高穩定等特性，經多次循環使用仍可維持 99%的捕捉效率，可支持碳捕捉系統連續運行而無需補充溶劑。該計劃第一階段於 2023 年 7 月啟動，總投資約 2,500 萬美元，主要由美國能源部國家能源技術實驗室(DOE-NETL)資助，Calpine 和 ION Clean Energy 共同分擔剩餘 20%成本。

訪團也藉此次拜會前往 LMEC 實地訪視其正在運作中的碳捕捉設備，與技

術人員交流技術開發成果與運作經驗。針對碳捕捉設施對發電效率與成本的影響，Calpine 說明，加裝碳捕捉系統將使可輸出電力減少約 15% 至 18%，而整體成本中以捕捉階段最多，管線運輸與封存成本則相對較低。在技術層面，目前開發中的溶劑捕捉技術經測試可達 99% 捕捉效率，但隨效率提升能耗亦增加，因此目前重點在於尋求 95% 至 99% 間的最佳平衡，期能兼顧捕捉效能與能源使用效率。相關技術將透過 LMEC 示範計畫進一步驗證實際運行條件下的效能與商業可行性。捕獲的二氧化碳則預計透過管道運輸至加州中部谷地或其他地質儲存點(鹽水層或枯竭油藏)進行永久封存。該公司表示，由於輸送二氧化碳所需壓力遠高於天然氣管線設計壓力，目前正在建造專用管道，以確保二氧化碳運輸安全與系統穩定性。

在民眾溝通方面，LMEC 表示該案場與加州政府合作進行多場社區說明會與聽證會，說明環境影響評估結果並回應民眾意見，表示因加州氣候較為乾燥，民眾特別關注水資源議題，亦即 CCS 計畫是否會影響當地水資源分配與污染，而 Calpine 則透過公開《環境影響報告》(EIR)，說明排放控制技術、預期污染物濃度變化與緩解措施，並與加州空氣資源委員會(CARB)及地方空污管理機關合作，建立持續監測制度與定期資訊通報機制。此外，Calpine 提出社區福利承諾(Community Benefit Commitments)，包括資助當地學校科學教育計畫、捐助消防設施改善，以及承諾使用在地勞工與服務供應商。LMEC 社區事務專員 Alfred Torres 表示 Calpine 開發初期即重視民眾參與、資訊透明與地方利益共享，可有效降低社會阻力，增進社區民眾信任，並將定期與當地民眾溝通以確保計畫持續順利推動。



圖 13、訪團與 Calpine 專家會議交流



圖 14、訪團實地參訪 LMEC 碳捕捉設施並與 Calpine 接待人員合影

(四)勞倫斯利佛摩國家實驗室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)

1. 時間：6/25 (三) 14:00-16:30

2. 地點：Lawrence Livermore National Laboratory (W Gate Dr, Livermore, CA 94550)

3. 接待人員：

(1) Dr. Patricia K. Falcone Deputy Director, S&T, LLNL

(2) Dr. Jeffrey D. Bude Deputy Principal Associate Director for Science & Technology, NIF&PS

(3) Dr. Glenn A. Fox Principal Associate Director, Physical and Life Sciences (PLS)

(4) Dr. Félicie Albert Director, Jupiter Laser Facility and Office of Fusion Energy Sciences LLNL Point of Contact, NIF&PS

(5) Dr. Tammy Ma Inertial Fusion Energy Institutional Initiative Lead, NIF&PS, LLNL

(6) Dr. M. John Edwards Senior Advisor, Science and Technology, Strategic Deterrence

(7) Dr. Clément Goyon Fusion Energy Sciences LLNL Point of Contact, PLS

(8) Dr. Bassem S. El Dasher Staff Scientist, Engineering, LLNL

4. 參訪紀要

LLNL 為美國能源部國家核安全局(National Nuclear Security Administration, NNSA)所屬的國家研究機構，專注於國防、核武器安全、能源與前瞻科學研究。在核融合領域，LLNL 主要研發雷射驅動慣性約束核融合(Inertial Confinement Fusion, ICF)，該技術利用強大的雷射脈衝將含有氘與氚的微小燃料球在極短時間內加熱並壓縮至極端高溫與高密度條件，觸發熱核融合反應。

國家點火設施(National Ignition Facility, NIF) 為 LLNL 核心設施之一，於 2009 年啟用，是目前全球最先進的慣性約束核融合實驗設施。LLNL 專家向訪團分享 NIF 系統包含 192 條高能雷射束，透過在系統內多級放大器與光路中的多重反射結構提升能量，總能量可超過 2 百萬焦耳，並精準聚焦於直徑僅約 2 毫米的氘氚燃料膠囊上。NIF 系統在設計過程中面臨到許多困難，包含如何確保高能雷射束在提升能量時移動路徑長度一致，並能精確同步抵達靶心，以及開發耐受高能量密度的雷射鏡面與光束傳輸管道材料等。NIF 在 2022 年 12 月的實

驗中實現核融合點火的重大突破，為世界首次達成核融合產生的能量超過激發燃料所需能量，達成 1.54 倍科學淨能量增益(scientific net energy gain)，亦即以 2.05 百萬焦耳(MJ) 的雷射能量輸入，產生約 3.15 MJ 的融合能量，更在 2025 年 4 月取得突破性 4.13 倍科學淨能量增益，亦即產生約 8.6 MJ 之能量。

LLNL 專家表示，若以現有 NIF 系統的技術條件為基礎估算，要實現基於慣性約束核融合系統之穩定運作與能源自給，科學淨能量增益至少需達 15 倍，而若要進一步邁向具工程可行性的商業化發電則須實現工程淨能量增益(engineering net energy gain)大於 1，約相當於須達到 100 倍科學淨能量增益。從 NIF 實驗性成功走向穩定且可商業化的核融合發電仍有許多挑戰需克服，包含目前實驗中的整體雷射系統能耗遠高於核融合反應所產出的能量，整體能量轉換效率仍有待大幅提升；NIF 的實驗屬於單次脈衝式操作模式，仍需開發可連續、高頻率運作的核融合系統，以支撐實際應用所需的穩定運行能力。此外，核融合裝置建造和運行成本仍然高昂，材料選擇、裝置設計與整體工程技術等方面皆有待突破。LLNL 將持續投入雷射技術升級、燃料靶丸設計優化與高精度模擬控制等關鍵技術的開發，同時積極推動跨機構與國際合作，聯合美國其他國家實驗室、學術單位與產業界，加速核融合技術邁向穩定、可持續、經濟可行性的能源應用階段。

我方也在會中向 LLNL 說明我國整體能源政策方向與核融合相關研究計畫。目前我國投入磁約束高溫電漿研究，專注於球型托卡馬克裝置中高 β 值(即電漿壓力與磁場壓力的比值)電漿的穩定控制與約束能力的提升，並建置電漿溫度可達 100 電子伏特 (eV) 之實驗系統，藉以驗證磁場對高溫電漿的約束效果，作為建構我國核融合研究平台與推動關鍵技術研發之基礎。此外，亦投入質子-硼(p - B)核融合技術的前瞻研究，該反應具備零中子放射、低輻射風險及燃料來源豐富等優勢，並具有直接將 α 粒子動能轉換為電能的潛力，能有效提升能源轉換效率。目標包括建立實驗診斷系統、開發數值模擬平台，並優化靶材與雷射條件，以提升核融合效率與反應速率，並進行質子-硼核融合反應驗證。

雙方會談中針對現有技術與研發成果進行交流，並認為雷射光基礎科學研究與核融合人才培育為未來可能合作面向。雷射光技術方面，我國科研方向與 LLNL 技術研究高度契合，可望透過雙邊基礎能量整合，加速技術規模化發展；人才缺口則為雙方共同面臨的關鍵挑戰，未來可透過研究人員交流、博士後聯

合培育、雙邊實驗室訪問與工作坊舉辦等方式進行合作。此外，將評估由我國國家原子能科技研究院(NARI)與 LLNL 建立合作機制，深化臺美在磁約束、慣性約束等核融合技術研發與人才培育等面向之合作。



圖 15、訪團與 LLNL 專家合影



圖 16、國科會林法正副主委與 LLNL 副執行長 Patricia 會後合影

(五) 史丹佛大學碳封存研究中心(Stanford Center for Carbon Storage, SCCS)

1. 時間：6/26 (四) 09:00-11:00

2. 地點：Green Earth Sciences Building(367 Panama St, Stanford, CA 94305)

3. 接待人員

(1) Dr. Sarah Saltzer Managing Director

(2) Hamdi Tchelepi Professor, Energy Science and Engineering Department Chair

(3) Sally Benson Professor, Energy Science & Engineering

(4) Lou Durlofsky Professor, Energy Science & Engineering

(5) Tony Kavscek Professor, Energy Science & Engineering

(6) Biondo Biondi Professor, Geophysics

4. 參訪紀要

史丹佛大學碳封存研究中心(Stanford Center for Carbon Storage, SCCS)隸屬於史丹佛大學永續學院，匯集能源科學與工程、地質科學與地球物理等多領域專家學者，致力於鹽水層及部分/完全枯竭油氣田灌注 CO₂ 之流體物理學、監測、地球化學、地質力學以及移棲模擬等 CCS 議題研究。

SCCS 中心與訪團分享其超過 20 年之碳封存研究與示範經驗。該中心研究聚焦於地底超臨界 CO₂ 之封存研究，並具備橫跨理論建模、物理模擬、現場監測、風險評估與公共溝通之整合能量。其研究架構涵蓋以下關鍵面向：

在多尺度模擬與歷史反演(history matching)方面，SCCS 結合高解析地層建模與深度學習建立「替代模擬模型」(surrogate models)，可於短時間內進行成千上萬次模擬，輔助井位最佳化設計與不確定性降低。該技術已成功應用於美國墨西哥灣、伊利諾州與澳洲 Otway 等實際示範場址，證實其在洩漏風險預測、壓力傳遞與多井注入策略設計上之效益。

在監測系統整合設計方面，SCCS 團隊積極推動主動與被動地震監測技術，包括應用光纖分布式聲學感測(Distributed Acoustic Sensing, DAS)技術於井下及地表監控，具備長期穩定性與即時回傳能力，可明顯降低整體監測成本並提升時空解析度。該技術已於加州與 Otway 場域實作驗證，並應用於地下水位變化、微震事件偵測與地層變形判讀。

此外，SCCS 強調其對於誘發地震風險之量化建模具備高度成熟度。研究團隊研發孔隙至岩心尺度(Pore to Core Scale)之跨尺度分析、開發地質力學/地球化

學整合模型及灌注、移棲行為模擬技術，並運用耦合地層力學與壓力擴散模擬，建立場址特定之「壓力與微震事件預測模型」，同時整合遙測地表變形（如 InSAR）與 GPS 資料進行反演驗證。在加州示範案中已成功辨識注入區域鄰近之斷層活動潛勢，並提出井位與注入速率之最佳配置建議，最大程度降低地震誘發風險。

最後，SCCS 亦投入 CCS 人才培育與環境教育，於學術端針對碩博士開設儲層地質、儲層模擬、3D 震測成像等 CCS 課程；於政策及產業端，針對政策制定者、CCS 專案管理者與投資者及 CCS 項目執行者等不同受眾，設計相應專業課程，同時藉由免費線上課程、研討會及講座等方式，提升社會大眾對 CCS 的理解，並促進跨界專業技術交流與合作。

SCCS 團隊與訪團分享與該中心合作模式包含三類：一為「附屬會員制度」(Affiliate Program)，會員可定期參與研究成果簡報與技術座談；二為「贊助研究計畫」(Sponsored Research)，可針對特定場址或技術議題與研究人員共同開發專案；三為「無附帶條件之研究捐贈」(Gift)，適用於學術推動或人才培育等方向。

雙方於會談中針對先導測試場址之監測需求、場址風險特性、資料處理與地震風險管理方式，進行深入交流。SCCS 並展示其在模擬技術之進階應用，包括透過機器學習進行快速歷史反演、評估不同監測佈局下之不確定性降低效果、以及結合光纖地震監測與地表變形觀測進行場址驗證。我方專家對與該校合作表達高度興趣，並建議可由大學間對接起步，如由設有永續學院的臺灣大學與中央大學啟動交流，逐步擴展至產業參與國際聯盟建立。

最後，雙方針對未來合作方向達成初步共識，建議可從三個面向推進：

- (1)由我國學術單位與 SCCS 建立學研合作機制，啟動聯合研究與人才交流計畫，合作議題優先聚焦近岸震測資料處理方法與 AI 微震監測系統結合光纖技術；
- (2)評估我國相關單位加入該中心會員可行性，以獲取國際技術資源與示範場域支援；
- (3)可規劃建立臺美 CCS 技術合作平台，透過定期舉辦工作坊與國際論壇促進技術研發討論與資訊交流，並推動跨國合作加速 CCS 計畫落地。



圖 17、訪團與 SCCS 專家會議交流



圖 18、訪團與 SCCS 專家合影

(六)加州空氣資源委員會(California Air Resources Board, CARB)

1. 時間：6/27 (五) 10:30-12:00

2. 地點：Conference Room 620, California Air Resources Board (1001 I Street, Sacramento, CA 95814)

3. 接待人員：

- (1) Dr. Steve Cliff Executive Officer, California Air Resources Board
- (2) Matt Botill Chief, Industrial Strategies Division (ISD)
- (3) Natalie Lee Assistant Chief, Industrial Strategies Division (ISD)
- (4) Carolyn Lozo Chief, Oil and Gas and GHG Mitigation Branch, ISD
- (5) Gavin Hoch Supervisor, Greenhouse Gas Measures Section, ISD
- (6) Clio Korn Policy Advisor to the Chair
- (7) Haynes Stephens Fellow, Office of the Chair
- (8) Nick Vizenor Market Monitoring Section, ISD

4. 參訪紀要

加州空氣資源委員會(California Air Resources Board, CARB)為加州負責空氣品質與氣候變遷政策的主要決策與執行機關，自 1967 年設立以來，致力於改善空氣品質、減緩氣候變遷，並推動低碳經濟的轉型。特別是在「淨零排放」目標與關鍵技術研發方面，CARB 扮演了關鍵性的政策推動者與規劃者角色。

CARB 制定並定期更新的《氣候變遷綜合規劃》(Scoping Plan)為全州不同部門（包括能源、運輸、建築、工業等）提供具體的減碳路徑與執行框架。該規劃強調系統性減排、環境正義、以及技術創新三大主軸，並與各級政府及產業建立密切合作關係。除了政策制定，CARB 亦結合經濟誘因與法規手段，包括推動碳排放交易制度(Cap-and-Trade)、低碳燃料標準(LCFS)、強化車輛排放標準、以及擴大零排放交通工具的普及等措施。此外，CARB 強調社會公正與弱勢社區的參與，確保氣候政策不僅為減碳，更為全民福祉所設計。

淨零技術方面，CARB 將 CCS 納入其長期減碳策略，並正積極建立技術標準、審核規範與監測機制；為保障環境安全與技術可行性，要求 CCS 計畫需通過嚴格的地質評估與長期儲存風險分析。目前 CARB 已開始布局加州 CCS 示範計畫，並積極與學研單位如 LLNL、加州大學等機構合作，共同研發碳捕捉技術、地質封存模擬與監測方法。CARB 亦與加州能源委員會(California Energy

Commission, CEC)合作，評估 CCS 在全州碳中和進程中的實質貢獻潛力。此外，CARB 積極推動直接空氣捕捉(Direct Air Capture, DAC)與碳移除(Carbon Dioxide Removal, CDR)技術，並提供 1,800 萬美元補助 DAC 技術研發與驗證。根據其氣候藍圖，加州目標 2045 年達到碳中和，預計 85% 將透過減少排放，其餘 15% 碳排（約每年 1 億噸 CO₂）則需透過 CDR 技術達成，其中包含工業 CCS 與非工業 CDR 技術，如 DAC、海洋礦化與自然解方（如森林、土壤碳封存等）。

會談中，我國向 CARB 分享正進行地質模擬、潮間帶地層探勘、風險評估與井下監測技術開發。並說明由於國內地震頻繁，加上土地使用限制，CCS 示範場址在推動過程中常面臨民眾疑慮與地方阻力，過去亦有試驗因地方反對而停擺。為提升社會對新技術之理解與溝通有效性，國科會已啟動教育推廣計畫，設立公共教育中心與專業諮詢機制，積極針對學生與社區推動科普教育與知識推廣。而對於常有民眾認為推動 CCS 是為延續油氣產業發展之誤解，CARB 表示 LCFS 法規嚴禁 CCS 用於提高石油採收率(EOR)，也正在規劃許可申請制度，整合場址評估、風險審查、第三方審核、100 年以上長期監測、資料公開與社區參與程序。

雙方亦針對碳價與投資誘因制度進行深入討論。CARB 指出，加州目前的碳價約為每噸 30 美元，搭配聯邦 45Q 稅收抵減與 LCFS 市場機制，可使 CCS 專案達到合理投資報酬率。相較之下，臺灣目前每噸 10 美元的碳費尚不足以支撐中大型 CCS 投資，未來除提高碳價外，亦須建立投資穩定性與長期政策確定性。加州的政策經驗顯示，制度設計應提供開發商清晰且可預期的誘因與規範，以減少初期投入的不確定風險。

最後，雙方在本次交流會議中達成共識，將建立定期對話與資訊交流機制，持續針對法規制定、社區參與、示範案資料與監測制度等議題進行互動。CARB 表示願與我方分享其與國家實驗室合作之 CCS/CDR 技術評估報告與監測框架等資訊；我方亦將提供示範案進展與公眾溝通作法。期能透過知識與經驗共享，共同促進 CCS 技術推動可行性與社會理解。



圖 19、訪團與 CARB 會議交流



圖 20、訪團與 CARB 官員合影

(七)加州大學洛杉磯分校 (University of California, Los Angeles , UCLA)

1. 時間：6/30 (一) 10:00-12:30

2. 地點：Tannas Alumni Suite, located in the Engineering VI Building (404 Westwood Plaza, Los Angeles, CA 90095)

3. 接待人員

(1) Alissa Park Dean of the UCLA Samueli School of Engineering

(2) Kang Wang Professor

(3) Gaurav Sant Professor, Director, Institute of Sustainability

(4) Chan Joshi Professor

(5) Yang Yang Professor

4. 訪查紀要

UCLA 工程學院(Samueli School of Engineering)為美國頂尖的工程教育與研究機構之一。工學院院長 Alissa Park 向訪團分享，該學院目前設有七大學系，涵蓋土木環境、電機、材料、生物工程、化工、機械航太與計算醫學，擁有強大的 AI 與機器學習研發實力，並與 Amazon、Google、Broadcom、TSMC、Qualcomm 等企業展開深度合作。在碳管理領域，該校聚焦於新材料開發、直接空氣捕捉與海洋捕碳(DAC/OC)、碳礦化與生質能轉換，並於洛杉磯港(Port of LA)設立海洋科技研發中心，結合港區能源轉型示範與實證測試。另於市中心與西區購物中心改建之 Research Park 建立創新研發與產業育成園區，促進學研與產業鏈結。

UCLA 碳管理研究中心(Institute for Carbon Management, ICM)專注於發展創新的碳捕捉與移除技術，致力於推動工業脫碳與淨零轉型。該研究中心透過電化學、礦物碳化與海水處理等方法，開發能夠大規模捕捉、封存並轉化二氧化碳的解決方案。其中，Equatic™ 海洋碳去除技術能同時從海水中去除 CO₂ 並生產負碳氫氣，已於新加坡建置中試廠，預計年移除能力達 4,000 噸 CO₂，並同步籌設加拿大 10 萬噸級商轉廠。此外，該中心亦積極推動碳負混凝土、DAC 及碳再利用，並與產業界合作推動技術商品化。

在核融合研究方面，UCLA 長期參與美國國家點火設施(NIF)相關計畫，並具備慣性約束融合(ICF)與磁約束融合(MCF)兩大路徑之實驗與理論研究基礎。其團隊除開發雷射靶丸材料與電漿模擬外，亦投入質子-硼融合(p-11B fusion)等

非中子產生型反應，以期未來降低中子誘發輻射，達成更安全且高穩定性的發電反應。UCLA 專家指出，實現核融合的商业化仍面臨能量增益比（Q 值）與系統壽命、建置成本三大瓶頸，須仰賴多國研發與產業投資持續投入。

此外，UCLA 亦投入前瞻太陽能材料研發，特別是在鈣鈦礦(perovskite)光電材料領域，其研究團隊提出多種增穩機制（如添加咖啡因、綠茶分子與晶種控制），成功提升模組效率與耐久性，並成立衍生公司「Molecule X」，專注於材料供應與技術轉移。該團隊強調，未來臺美可在材料合成、大量製程與應用端建立合作鏈結，特別針對美方化學製造高成本、臺灣具備規模量產優勢的產業互補性。

除技術層面外，雙方亦就政策制度、市場環境與創業育成等議題交換意見。UCLA 表示，加州雖在碳政策方面仍受聯邦與地方政治牽制，但其市場機制與企業投資動能不減。ICM 目前已吸引 Breakthrough Energy、Google Climate Fund 等投入氣候科技風投資金，並與多家工業公司如 ArcelorMittal、Holcim 建立策略聯盟，共同推動鋼鐵與水泥等高碳產業轉型。UCLA 表示在各領域已積極推動與我國合作，包含 AI 深度學習、半導體材料與鈣鈦礦等，未來在 CCS 與核融合領域雙邊也可透過博士後與研究人員互訪，提供學生實習、研究訪問與技術簡報資源分享，並可推動中長期合作計畫、共同建立研究中心或示範據點，深化雙邊人才鏈結與實質合作。



圖 21、訪團與 UCLA 專家會議交流



圖 22、訪團參訪 UCLA 核融合實驗室



圖 23、訪團與 UCLA 專家合影

貳、結論與建議

一、量子

量子電腦被視為下一代計算技術，具備在特定領域超越傳統電腦的潛力。本次訪問旨在深入瞭解美國在量子電腦軟硬體、演算法及相關應用上的最新進展，並探索臺美雙方於量子科技領域的合作契機。

本次參訪 SEEQC 讓代表團對當前國際先進量子運算平台的發展現況有更深刻了解。SEEQC 以其結合超導量子技術與低溫電子控制的「全數位量子運算架構」為特色，其技術上展現出極高的整合性與產業化潛力。特別值得注意的是，除其已與 NVIDIA 合作開發之晶片對晶片介面，已成功打通量子處理器與傳統 GPU 間的資料交換瓶頸之外，亦與 IBM 合作製作量子電腦。

SEEQC 對於「模組化設計」與「次系統驗證平台」的觀念與執行力，對我國目前正積極建構量子次系統的團隊極具啟發。其技術策略聚焦於量子與經典控制介面的同步設計與封裝，顯示其理解技術商轉路徑不僅需解決硬體效能，更需兼顧整體系統的可靠性與量產潛能。對臺灣而言，在晶片製造、封裝與低溫模組等環節具備一定基礎，若能適時結合 SEEQC 平台進行驗證與共研，將有助於推動我國在量子次系統整合上的突破。

整體而言，SEEQC 具備技術成熟度、跨域整合能力與商業落地視野，適宜做為為我國在全球量子科技體系中建立策略合作關係的理想夥伴之一。後續除現正在合作的團隊之外，亦建議持續推動其他研發團隊與之合作及互動，如此能為我國量子次系統團隊及產業鏈接軌開啟與國際產業潛在合作契機。

參訪 IBM Thomas J. Watson Research Center，不僅是與全球頂尖量子運算團隊的難得交流機會，也提供了我方對未來量子科技發展趨勢與應用策略的第一手觀察。IBM 團隊對於量子與傳統計算系統整合的戰略布局，特別是在量子晶片架構設計、錯誤抑制技術與超算軟體支援方面，展現出高度成熟且具系統思維的實作模式，對我國目前推動的「HPC-QC 混合運算架構」極具參考價值。

Heron R2 晶片的 156 量子位元設計與抗干擾重型六角結構，對於提升量子系統穩定度與擴展性具有重要指標意義。特別是 IBM 已發展出具備實用等級的 on-premise 專屬部署架構，未來若與我國量子團隊展開共研與模組驗證合作，將有助於強化臺灣次系統開發與測試平台的實戰能量。

綜觀而論，IBM 的量子運算技術與策略對臺灣極具啟發性，可望成為臺灣量子技術布局中最具價值的國際合作夥伴之一。後續將持續接觸該公司，並視我國團隊需求與之合作，以加速開發臺灣量子科技關鍵技術。

二、淨零

扣合賴清德總統推動臺灣第二次能源轉型，發展多元再生能源、氫能、碳捕捉利用及封存、公正轉型之政策方向，爰由本會林政務副主委法正偕淨零科研團隊學研專家及經濟部、工研院、中油等產業應用與示範計畫團隊，前往拜會美國加州與德州淨零科技相關之單位及案場，就碳捕捉與封存(CCS)及核融合(Fusion)兩大主題，與美方相關單位交流技術發展、基礎設施、成本效益，以及社會接受度等關鍵議題。期藉國際經驗加速我國技術發展與政策落地，強化人才培育並提升民眾對於淨零技術政策與技術發展之認知與認同。

建立臺美策略交流機制，強化碳管理與社會溝通能力

在政策方面，本次出訪聚焦碳捕捉與負碳技術領域的法規制度設計與治理機制。加州在相關政策設計上具創新及社會整合性，為其他州政府及國際單位提供重要參考。其政策主責機構加州空氣資源委員會(CARB)正逐步建立涵蓋監測與驗證(MRV)、社區參與與示範案管理之政策規範與實務指引，並強調環境正義與公眾參與為 CCS 發展的重要原則。

本次拜訪 CARB，雙方主要針對 CCS 及碳移除(CDR)政策推動進行交流，著重討論 MRV 制度設計、社區溝通策略、公平轉型考量及示範案管理流程等面向。CARB 的政策實踐強調社會接受度與區域環境正義(Environmental Justice)並重，尤其重視在技術應用前進行地方溝通與風險透明揭露，對於我國未來推動碳封存或其他淨零技術具重要借鏡價值。

訪團亦與 CARB 建立定期資訊交流與協作意向，CARB 將分享其與美國國家實驗室(如 LBNL、NETL)共同研擬之 CCS/CDR 技術評估方法、政策準則及公民參與經驗；我方則分享示範案與公共溝通推動進展。期透過與 CARB 等實務機構的持續交流，形成互惠合作模式並深化雙邊淨零政策夥伴關係，協助我國加速法規盤整與制度建立，提升淨零治理效能，同時藉由政策透明化、公眾溝通與社區參與機制，增進社會接受度，促進政策有效落實。

鏈結臺美科研能量，提升我國淨零關鍵技術研發實力

在技術方面，訪團積極拓展與美國頂尖學研機構及國家實驗室的實質合作。針對碳封存技術，本次拜訪德州大學奧斯汀分校的墨西哥灣碳中心 (GCCC)，其擁有豐富地質封存潛勢評估、監測技術與風險管理模型建構經驗。本會科研計畫團隊規劃將與其展開合作，強化桃園地區封存潛力評估、三維地質建模及地層完整性分析，建立本土陸海域 CCS 技術基礎與決策支持模型，並導入國際標準化方法與資料共享機制。

此外，史丹佛大學碳封存研究團隊(SCCS) 長期專注於海底光纖地震監測(DAS)與 AI 微震分析，並應用於多個示範場址，累積豐富實作經驗。本次聚焦封存監測、地震風險與資料處理等領域交流技術經驗，並針對未來合作可行性進行討論。雙方針對近岸震測資料處理方法及結合我國已發展的 AI 微震監測系統與其光纖監測技術，建立誘發地震預警與風險監測系統等議題，皆表達高度合作意願。後續將規劃與 SCCS 召開線上技術工作會議，由我方研究團隊與國家型能源企業（如中油）與其進一步討論、推進具體合作計畫。

在核融合技術方面，我國目前以小規模經費投入基礎研究，建構小型試驗設備與診斷技術，並積極尋求國際合作與人才培育機會，為未來技術接軌奠定基礎。勞倫斯利佛摩國家實驗室(LLNL)在慣性約束核融合領域具備世界領先研發能量與先進研究設施，亦高度重視人才培育。本次拜會除交流技術進展外，雙方亦就未來合作可能性進行討論，擬針對磁約束與慣性約束兩大技術路徑，聚焦電漿物理、雷射驅動與高能量密度物質行為等關鍵科學議題研究；並研議推動人才交流與短期研究計畫，以強化人才培育、促進研發能量接軌。

本次參訪美國 CCS 及核融合領域產、官、學、研機構，除深化技術與政策經驗交流外，亦奠定多項後續合作意向。期未來透過推動與美方在相關領域的常態性對話與科研協作，加速我國技術能力躍升，並擴展國際合作網絡，強化臺灣在全球淨零轉型鏈中的科技價值與策略角色。