

出國報告（出國類別：開會）

高放處置國際地質科學研討會
（美國地球物理 2024 秋季會議）

服務機關：台灣電力公司 核能後端營運處

姓名職稱：邱琮翔 地質調查專員

派赴國家/地區：美國/華盛頓特區

出國期間：113年12月7日～113年12月16日

報告日期：114年1月15日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：高放處置國際地質科學研討會（美國地球物理 2024 秋季會議）

頁數 27 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司/黃惠淪/（02）2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

邱琮翔/台灣電力公司/核能後端營運處/地質調查專員/(02)2365-7210

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 12 月 7 日至 113 年 12 月 16 日

派赴國家/地區：美國/華盛頓特區

報告日期：114 年 1 月 15 日

關鍵詞：AGU Fall Meeting、用過核子燃料最終處置、深層地質處置

內容摘要：

台電公司執行用過核子燃料最終處置計畫，目前為第二階段「候選場址評選與核定」，工作重點包括：進一步調查臺灣本島及離島結晶岩體，取得更詳細的地質調查描述模型參數資訊；調查中生代基盤岩之深度分布與岩石特性，並建立相對應之地質概念模式，以供後續工程設計及安全分析應用，並據以提出建議優先詳細調查場址。本次赴美參加 AGU24，瞭解國際地球科學領域最新調查技術發展及相關研究成果，蒐集與處置有關之議題相關發表論文，作為本階段地質調查規劃及下階段技術發展之參考，以確保我國高放處置計畫得順利推動。

本文電子檔已傳至公務出國報告資訊網（<https://report.nat.gov.tw/Reportwork>）

摘要

台電公司執行用過核子燃料最終處置計畫，現階段為全程計畫第 2 階段「候選場址評選與核定」階段，工作重點包括：進一步調查臺灣本島及離島結晶岩體，取得更詳細的地質調查描述模型參數資訊；調查中生代基盤岩之深度分布與岩石特性，並建立其地質概念模式，以供後續工程設計及安全評估技術精進應用，以達到於 2028 年提出建議優先詳細調查場址之目標。

美國地球物理聯盟 (American Geophysical Union, AGU) 是由美國國家科學研究委員會成立於 1919 年的地球物理學非營利組織，會員超過 50,000 人。該聯盟的活動著重於組織和傳遞國際地球物理學跨學科的資訊，主要任務為：(1) 提升地球和太空環境的科學研究，並將結果告知大眾；(2) 增進地球物理學和相關學科組織之間的合作；(3) 發起和參與地球科學研究計畫；(4) 藉著科學會議、出版和傳遞訊息增進地球物理學各學科發展，是目前國際上最具規模的地球科學相關組織。因此，美國地球物理聯盟秋季會議亦是目前世界上最盛大的地球科學研討會，每年相關領域（地質、水文、大氣、海洋等）的菁英都會齊聚於此會議進行交流；也因此，藉由參加本次美國地球物理聯盟秋季會議 (AGU Fall Meeting 2024)，透過與相關領域的諸多專家學者進行面對面的交流，進而瞭解到國際間最新的地球物理調查技術，以及最新發表的研究成果，而交流所獲得的相關經驗可回饋至處置計畫的調查規劃中，提升高放處置地質調查技術能力與調查結果之可靠度。

在深層地質處置技術方面，國際間發展多模型驗證框架提供了可靠的風險評估工具，據以建立裂隙岩體特性、核種傳輸機制、微生物與化學交互作用之耦合分析，評估不同時間尺度下，設施安全與穩定性的評估依據。地球物理與地震監測近年多聚焦於分布式聲學感測和慢滑移地震的觀測技術，這些技術在高精度監測地震活動與裂隙演化中展現了顯著的應用價值，對於臺灣高放射性廢棄物處置

場址的規劃與風險管控將有甚大助益。而人工智慧的快速發展，亦為地質災害與氣候研究帶來嶄新突破，透過電腦學習及快速且大量計算能力，提升地震分析準確性、結合衛星影像進行地表侵蝕與氣候變遷風險的量化評估等。地表侵蝕研究則以高精度數據分析為趨勢，不僅呈現極端氣候事件對侵蝕速率的影響，亦強調自然與人類活動交互作用對地貌演化的深遠影響，此類研究均對高放廢棄物處置場址的長期穩定性評估具有重要意義。

本次研討會亦見跨國合作的重要性，透過與瑞典、西班牙、瑞士等國家之專家學者的交流，不僅使臺灣對國際標準和技術進展有更深入的认识，亦在核廢料裂隙岩體穩定性研究、核種傳輸與地球化學特性分析上獲益良多，更使臺灣在高放廢棄物處置的現地調查與模擬驗證方面有更新之技術與觀念，也為未來計畫之深化發展奠定重要基礎。

目錄

摘要.....	2
目錄.....	4
壹、出國目的.....	1
貳、出國過程.....	3
參、工作內容.....	4
一、 會議概要.....	4
二、 國際研發成果資料蒐集.....	12
水文學.....	12
近地表地球物理.....	15
地震學.....	16
構造地質學.....	18
火山學、地球化學與岩石學.....	20
綜合議題.....	22
肆、出國心得.....	25
伍、建議.....	27
陸、附錄.....	I

圖目錄

圖 1 : 華特•華盛頓會展中心正面全貌	7
圖 2 : 會場內大型 AGU 標誌.....	7
圖 3 : 會議討論室位置配置 (地下一層)	8
圖 4 : 會議討論室位置配置 (地上一層)	8
圖 5 : 會議討論室位置配置 (地上二層)	9
圖 6 : 贊助商展覽區	10
圖 7 : 海報展示區	11
圖 8 : 大會著作與隱私權政策	24

表目錄

表 1：出國行程及工作內容.....	3
表 2：AGU24 科學主題.....	6

壹、出國目的

台電公司依主管機關核定之「用過核子燃料最終處置計畫書」，執行用過核子燃料最終處置地質調查與安全評估技術發展等相關工作，依處置計畫書之規劃，全程工作分為 5 階段，分別為：「潛在處置母岩特性調查與評估（2005-2017）」；「候選場址評選與核定（2018-2028）」；「場址詳細調查與試驗（2029-2038）」；「處置場設計與安全分析評估（2039-2044）」及「處置場建造（2045-2055）」等 5 個階段，目前為第 2 階段「候選場址評選與核定」階段，階段目標為：完成候選場址調查區域的調查與評估並建議優先詳細調查之場址，及建立候選場址功能/安全評估技術。

台電公司於處置計畫第一階段，完成初步國內文獻調查與技術盤整，提出「我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告（SNFD2017 報告）」，第二階段主要目標為取得進一步地質調查資料並評估其處置之可行性，據以提出優先詳細調查之場址。惟現階段因國內缺乏高放處置設施選址相關法定程序與依據，且未取得國家授予針對高放處置場選址之地質調查權，現階段僅能透過國內外的資料蒐集與國際技術合作，建立調查能量與技術底蘊，

AGU 是國際上最大規模的地球科學學術盛會，涵蓋地球物理、地質、環境、海洋科學等多領域，是瞭解全球研究趨勢、促進跨領域合作的重要平台。根據會議行程，本次參會的核心目標包括：

1. 蒐集高放處置相關最新應用技術：

參與關於深層地質處置、地震監測、微地震應用及人工智慧與地球科學交互應用的學術討論。這些技術對臺灣的高放廢棄物最終處置地質調查與安全評估，特別是透過電腦學習及人工智慧提升地質調查與模型建構的效率與精度等均為會議關注的目標。

2. 國際專家技術交流：

透過現場與來自不同國家的專家學者就深層地質處置技術發展、地震危害度之風險評估及場址地質結構的特性分析等進行交流，有助於提升臺灣在高放廢棄物選場及相關技術發展。

3. 數據與模型之學習與驗證

檢視國際最新之地球物理模型與數據處理方法，包括應用分布式聲學感測技術進行地下結構成像、機率式地震危害度分析評估場址受震風險及結合人工智慧等相關深層地質處置場址設置規劃調查方法，以期能更妥善規劃臺灣處置場址的地質與安全評估。

本次會議主要參與 27 個主題中的 5 項科學議題，包括：水文學；近地表地球物理；地震學；構造地質學；及火山學、地球化學與岩石學。並旁聽其他相關議題如：生物地球科學；全球環境變遷；礦物及岩石物理；自然災害；非線性地球物理等。此行目的不僅在於提升我國地質科學與高放處置相關技術的國際化能力，也為未來具挑戰性的場址評估工作提供了解決方案，學習最新技術與研究趨勢，促進臺灣地質調查與高放廢棄物處置工作的進一步發展。

貳、出國過程

本次出國行程自 113 年 12 月 7 日出發，於 12 月 16 日返抵國門(共計 10 天)，行程為參加由美國地球物理聯盟 (American Geophysical Union, AGU) 於華特•華盛頓會展中心 (Walter E. Washington Convention Center, 圖 1) 舉辦之「美國地球物理聯盟 2024 年秋季年會 (AGU Fall Meeting 2024, AGU24)」，本次開會行程及工作內容如表 1 所示：

表 1：出國行程及工作內容

日期	地點與行程	工作內容
12 月 7 日	臺北 — 紐約	去程
12 月 8 日	紐約 — 華盛頓	
12 月 9 日	華盛頓	參加 AGU24
12 月 10 日		
12 月 11 日		
12 月 12 日		
12 月 13 日		
12 月 14 日 至 12 月 16 日	華盛頓 — 西雅圖 (轉機) — 臺北	返程

叁、工作內容

本次出國行程為參加美國地球物理聯盟 2024 秋季年會（AGU24），會議於 12 月 9 日開始辦理報到，並於 12 月 13 日閉幕，工作內容為蒐集可供應用於處置計畫地質調查技術與精進方法，及國外與處置計畫相關之研究成果發表內容。工作內容說明如下：

一、會議概要

美國地球物理聯盟是由美國國家科學研究委員會（United States National Research Council）於 1919 年成立的國際非營利科學組織，組織致力於地球與太空科學的發展以及傳播相關科學知識，透過出版科學期刊、各項技術出版物、贊助科學會議、協助教育及計畫發展，以提高公眾對科學的理解與支持。美國地球物理聯盟秋季大會目前為全球最大的地球科學相關領域研討會之一，每年都能吸引上百個國家、超過 25,000 名與會者，共同分享彼此最新研究成果，而今年更吸引了超過 30,000 名世界各國的專家學者報名參與。

每屆 AGU 年會均有其年度主題口號，今年的主題口號為「What's Next for Science.」，官方網站上闡述了會議的核心思想：「科學始終關乎新事物—當下與未來。這是驅動我們前行的動力，激發我們不斷提出問題，啟迪我們的研究。問題與答案的交替形成了一種節奏，一種韻律，一個故事。科學就是一個故事。它是一個充滿無限可能的故事，一個持續發現的故事，一個滿懷希望的解決方案的故事。這是我們旅程的故事；是我們創造未來的故事。我們共同塑造科學界的未來、探索的未來、地球的未來，以及科學的下一步。」。為此，須致力於更深入地瞭解我們的地球與環境，開啟通向新發現的道路；提高應對氣候變遷的意識；促進更大的合作以實現解決方案；並推動科學領域邁向一個以公平、正義、多樣性、包容性與歸屬感為核心的新時代。

本屆會議的舉辦時間為 113 年 12 月 9 日（星期一）至 113 年 12 月 13 日（星期五）共計 5 天，地點在美國首府華盛頓特區的沃爾特華盛頓會議中心（Walter E. Washington Convention Center），該會議中心占地 2.3 萬平方英尺，分為地上及地下兩層，有 5 個大型展廳以及 77 個小型的會議討論室，亦為美國國內僅有的 4 座符合美國綠建築協會（United States Green Building Council）頒布的 LEED 白金認證會展中心之一。

本屆大會將專業領域分為 27 項主題（Topic），完整主題分類如表 2。所示，各項主題的研究分別以口頭發表（Oral）及海報發表（Poster）兩種形式進行，依子議題分類於 5 日議程中舉行，其中口頭發表細分成 1,061 項子議題，分散在 49 個會議討論室中舉行（如圖 3 至 圖 5）；海報發表於地下層的 B 及 C 展示廳進行（如圖 7），亦細分成 1,148 項子議題。因大會議題及發表數量眾多，故不發行會議手冊，大會要求與會者下載專用手機應用程式（App），可自行選擇想參加之議題及編排會議行程。本屆會議更邀請了 323 個來自世界各地的廠商（如圖 6），展示地球科學的各項前端儀器、設備以及太空、大氣、水圈、地質等多項領域的科技心血，介紹給所有有興趣的與會人員。另外，會議中亦邀請國際知名專家於大型展廳進行專題演講，會場於特定區域設有數十台公用電腦，提供與會人員參加線上發表（eLightning）使用。

表 2：AGU24 科學主題

項次	專業議題（依字母排序）
1	Atmospheric and Space Electricity 大氣與太空電離
2	Atmospheric Sciences 大氣科學
3	Biogeosciences 生物地球科學
4	Cryosphere 冰雪圈
5	Earth and Planetary Surface Processes 地球與行星表面作用
6	Education 教育
7	Geodesy 測地學
8	Geohealth 環境健康
9	Geomagnetism, Paleomagnetism and Electromagnetism 地磁學、古地磁學與電磁作用
10	Global Environmental Change 全球環境變遷
11	Hydrology 水文學
12	Informatics 資訊學
13	Mineral and Rock Physics 礦物及岩石物理
14	Natural Hazards 自然災害
15	Near surface Geophysics 近地表地球物理
16	Nonlinear Geophysics 非線性地球物理
17	Ocean Sciences 海洋科學
18	Paleoceanography and Paleoclimatology 古海洋與古氣候
19	Planetary Sciences 行星科學
20	Science and Society 科學與社會
21	Seismology 地震學
22	SPA-Aeronomy 高層大氣物理
23	SPA-Magnetospheric Physics 磁層物理
24	SPA-Solar and Heliospheric Physics 太陽能與太陽圈物理
25	Study of the Earth's Deep Interior 地球深部研究
26	Tectonophysics 構造地質學
27	Volcanology, Geochemistry and Petrology 火山學、地球化學與岩石學



圖 1：華特·華盛頓會展中心正面全貌



圖 2：會場內大型 AGU 標誌

Walter E. Washington Convention Center

Street Level

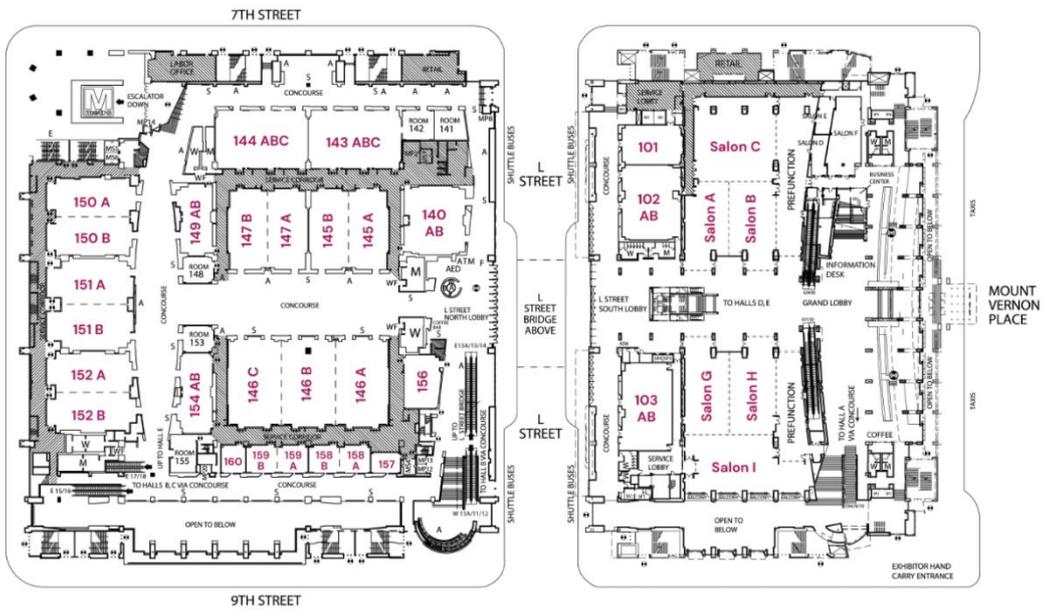


圖 3：會議討論室位置配置（地下一層）

Walter E. Washington Convention Center

Level 2

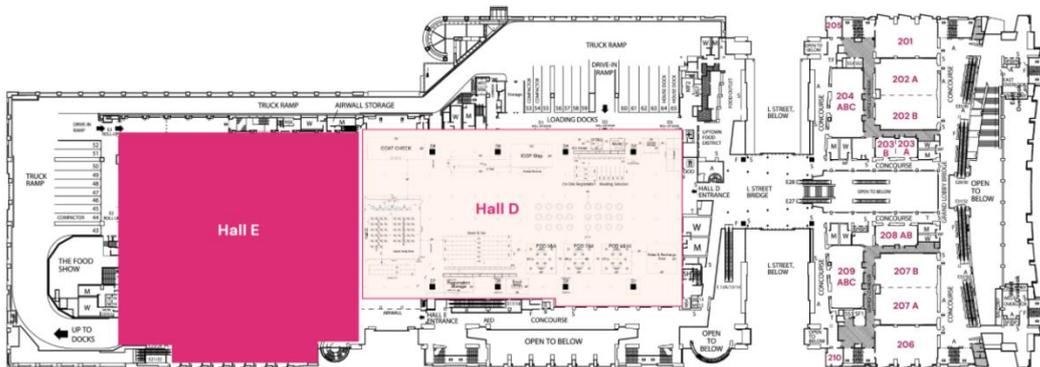


圖 4：會議討論室位置配置（地上一層）

**Walter E. Washington
Convention Center**

Level 3

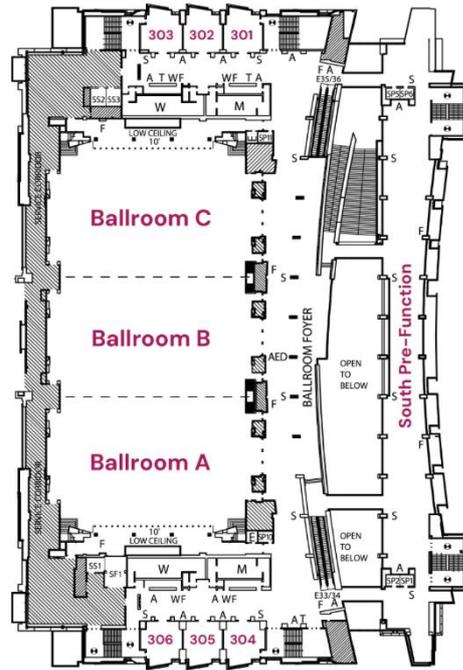


圖 5：會議討論室位置配置（地上二層）



圖 6：贊助商展覽區

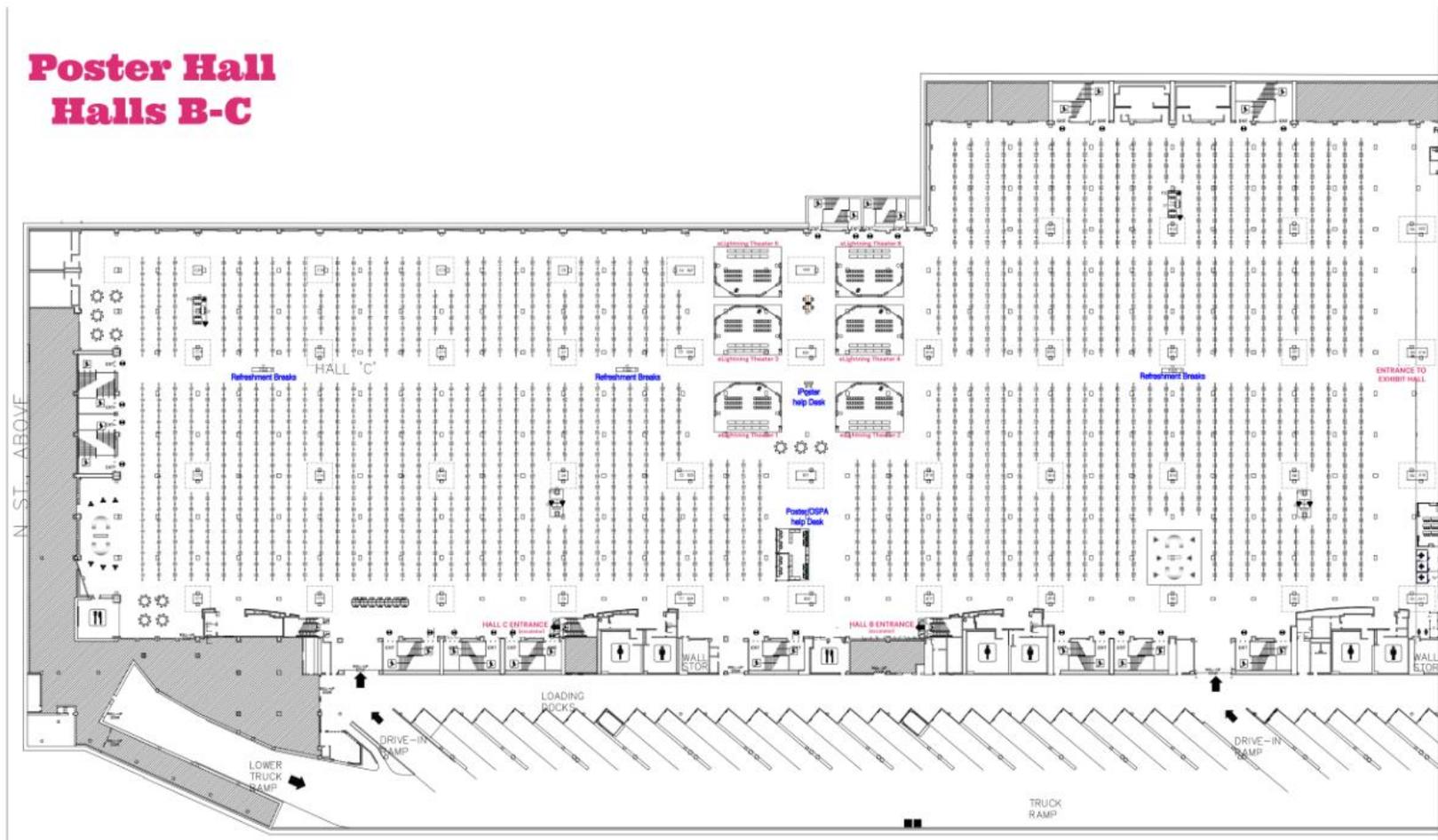


圖 7：海報展示區

二、 國際研發成果資料蒐集

應大會要求，為尊重相關研究之著作權及隱私權，原則上禁止於會議中（含海報）拍照及攝影，如取得作者同意，則同意攝影但僅限個人使用；若該篇研究明確標註禁止攝影圖案者，則一概禁止（如圖 8），故本次會議蒐集之成果，以文字說明呈現。

水文學

水文學包含之專業領域甚多，包括地表水與地下水相關研究；水資源調查與應用；地表（下）水汙染、評估與整治等相關專業。在高放處置技術領域中，水文學領域方面著重在瞭解地下水在地下的傳輸行為，以及在地下水在多種條件下之交互作用與影響評估。本屆研討會與高放處置相關之議題包括：多種材料與地質條件下的核廢料穩定性與交互作用、微生物影響、裂隙介質穩定性、熱-力耦合作用與創新技術應用等議題。相關研究成果摘述如下：

西班牙專業技術服務公司 Amphos 21 於會中發表，該公司開發出一套新式的反應傳輸模型，模型考慮了複雜有機分子降解的異質性，並詳細模擬有機碳的分解與硫酸鹽還原過程。在高放處置領域中，硫化物是造成核廢料金屬容器腐蝕的重要因素，硫化物主要來源為被微生物還原硫酸鹽類。研究團隊利用美國國家實驗室（Sandia National Laboratories）開發的開源程式 PFLOTRAN 的平行計算能力，成功模擬了單裂隙基質系統中，含溶解有機碳的水滲入硫酸鹽富集鹽水的反應過程。結果顯示，該模型能準確捕捉有機碳降解的長尾現象以及硫化物的累積趨勢，特別是在與乙酸菌和硫酸鹽還原菌作用的過程。研究結論指出，此模型有效重現了地球化學擾動的關鍵系統反應，並為核廢料處置的長期穩定性提供了可靠的科學工具。

瑞典核燃料與廢料管理公司 **SKB** 為強化其處置安全分析的可靠度並降低長期演化評估的不確定性，發起一國際高放處置技術發展合作平台 **Task Force GWFTS**，該平台近期致力於提高裂隙岩體之水流與溶質傳輸模型的準確性和適用性。該平台集結多個國家之團隊（包含台灣），採用多層次建模與試驗數據交互比對之方法，進行全面性的模型驗證和敏感度分析。研究顯示，模型的多概念設計能精準模擬單裂隙與多裂隙系統中的流體行為，並提供多尺度地質環境下關鍵變量的掌握性。研究亦指出，此建模方法對地質條件的多樣性具有良好的適應性，並能顯著提升裂隙系統中溶質傳輸行為的預測能力，為核廢料處置的安全評估提供了重要立論基礎。

裂隙間的孔隙連通性是地下水（及水中所含物質）傳輸的重要因子，美國國家實驗室（**Los Alamos National Laboratory**）近期利用 3D 列印技術製造的材料來模擬裂隙介質，並分析不同正向應力的裂隙間孔隙連通性變化趨勢。實驗結果顯示，隨著正向應力的增加，裂隙內的孔隙逐漸減少，導致連通性顯著降低。該研究更進一步提出影響流體流動的關鍵因素，包括裂隙幾何形狀、材料性質與應力條件等。該研究不僅顯示裂隙介質內流體行為的影響機制，更為提升開發項目之場址描述模型之精度與可靠度提供具體改善建議。

義大利發表將數位露頭模型中裂隙網路的定量參數化最佳化工作流程，該方法能夠有效分析出裂隙網路的多項關鍵參數，包括方位、連通性、裂隙長度以及間距與密度等，利用點雲資料，配合半自動分析方法所獲之裂隙數據，能夠準確地描述裂隙的分佈，且測試後發現費雪分佈（**Fisher distribution**）最符合裂隙特性，裂隙間距與裂隙長度之數據分佈亦具有相似的統計特徵。此外，裂隙強度指標（**P₁₀**、**P₂₀** 和 **P₂₁**）的分析結果也顯示裂隙的分佈呈現高度異質性。此研究提供了全面且系統性的方法，能夠有效

克服傳統調查方法在裂隙網路參數化過程中的局限性，對於裂隙對流體流動、核種傳輸，以及大地應力影響之評估，提供更精確的立論基礎。

近地表地球物理

近地表地球物理是利用地球物理探測技術，研究地表以下淺地層之地質結構、岩石性質及動態過程等相關特性，這些技術已廣泛應用於國內地質構造調查、資源勘探、環境監測及工程項目評估。依目前國內高放處置的處置概念，處置設施將設置於地下 300 至 1,000 公尺之深度，亦符合近地表地球物理調查的適用範圍。地球物理探勘技術目前屬相對成熟之調查技術，目前發展方向多以提升精細度及強化應用面，相關發表及研究成果摘述如下：

美國科羅拉多大學研究人員利用分布式聲學感測（Distributed Acoustic Sensing, DAS）技術，推估近地表深度 30 公尺之平均剪力波速（Vs30），將其結果與傳統地震檢波器（geophone）的結果進行比較。DAS 技術利用既有光纖通信纜線進行數據收集，其測線布設所耗費之人力成本低於傳統檢波器，並提供更高的空間和時間分辨率。研究團隊在在美國華盛頓州 Port Angeles 的卡斯凱迪亞隱沒帶區域（Cascadia subduction zone），進行長達 4.5 公里的光纖測試，結合多通道表面波分析法（Multi-station Analysis of Surface Wave, MASW），經與由 48 個 geophone 組成的陣列結果比較。結果顯示，DAS 測得的 Vs30 在 560 m/s 左右，而 geophone 測值約為 490 m/s，兩者均符合當地地質參考範圍（400 至 600 m/s）。在部分測試位置，兩種方法的吻合度良好，在中深層地層波速的逆推結果最佳。儘管 DAS 技術在淺層地層資訊捕捉上略顯不足，但其成本效益高且應用範圍廣泛，特別適用於城市地區的量測工作。而在臺灣，不論是利用既有電信公司的全島光纖電纜，或是重新架設研究用光纖，DAS 技術均提供了一種高效經濟的場址特徵化方案，可準確評估潛在場址的地震穩定性和剪力波放大效應，從而提升設施規劃的安全性與可靠性。

地震學

臺灣的地震活動頻繁，由過去資料來看，臺灣因地震所造成的災害並不少見。因此，國內高放處置場的安全評估必須地震影響列入考慮。而地震議題在高放處置中並非僅考慮地震引致之振動及斷層錯動，包括地震模式分析與危害度分析等亦屬重要議題。此外，因近幾年人工智能（AI）技術大幅提升，透過 AI 學習、大量運算的分析模式與運用亦如雨後春筍般大量出現，地震學主題下有數篇值得參考的研究，重點摘述如下：

美國加州的研究團隊藉由評估東加勒比的小安地列斯群島地區淺層地殼地震模型（NGA-West2）和隱沒帶地震模型（NGA-Subduction）的適用性，分析其總體偏差以及震源、路徑和場址的相關性。其結果指出在短周期內，隱沒帶地震模型表現較好，總體偏差接近於零。然而，淺層地殼地震模型在所有周期內均表現出明顯的負偏差，反映了其對該地區的預測適用性存在不足，並透過對地區性地震數據的分析，為 NGA 模型的修正和權重調整提出建議，為東加勒比地區更準確的地震危害評估提供了基礎。這些成果不僅對該地區的基礎設施安全設計具有重要意義，也為其他類似地區（如：同屬活躍板塊邊界上的台灣）的地震危害分析提供了模型精進的參考方向。

慢滑移地震（Slow-Slip Earthquake, SSE）是一種斷層滑移事件，其應力釋放過程緩慢且持續數小時至數月，與傳統地震不同，不易受到人為感知或對地表造成危害，但在地震週期中會對地震應力累積的過程造成重大的影響。德國地球科學研究中心研究人員分析了 Nicoya 半島和 Osa 半島的 SSE 觀測數據，這些地區的 SSE 分別每 2 年及每 4 至 5 年發生一次，規模約在 6.5 至 7.2。將 SSE 納入地震源模型，推導出更新的滑移速率和最大規模，並應用於概率式地震危害分析（Probabilistic Seismic Hazard Analysis,

PSHA)。結果顯示，忽略 SSE 會導致部分地區的地震危害被顯著高估或低估，例如 Nicoya 半島的地震加速度峰值高估約 15%，而 Osa 半島則低估約 30%。這顯示考慮 SSE 對提高 PSHA 模型準確性具有重要意義，尤其是靠近海岸的板塊俯衝邊緣地區。而臺灣中央山脈南段區域亦有 SSE 的跡象，未來仍須關注相關議題，將這類地質過程納入評估，以提升地震危害模型的精確性及完整性。

美國地質調查所的研究團隊探討了舊金山灣區地震地動模型（Ground Motion Model, GMM）中地動路徑效應與地殼性質的關聯性，揭示了影響模型預測準確性的關鍵因素。地動模型是 PSHA 的核心工具，但目前對震源至場址之間地殼特性如何影響地動的瞭解有限，導致路徑效應的不確定性增加。其發現路徑效應與地殼特性如：三維速度變化、斷層密度及沉積盆地效應存在顯著關聯。例如，斷層錯位區域會弱化地動衰減，而沉積盆地可能放大震源至場址的地動。這些發現不僅為改進地動模型提供了依據，也強調在地震危害評估中考慮複雜地殼特性的必要性。而臺灣複雜的地體構造更需要詳細分析地殼結構及其對震動效應的影響，方能更精確地評估地震風險來確保設施規劃的安全性。

構造地質學

依目前所發現的科學事證認為，臺灣約形成於 4 百多萬年前的弧陸碰撞事件，隨著碰撞運動的持續進行，褶皺造山活動形成現今臺灣島的骨幹雪山山脈及中央山脈，並朝西南加厚，逐漸發展成現今西部平原區、麓山帶；而隨著菲律賓海板塊向西北方推擠，海岸山脈等地質構造分區，而每年以 7 至 8 公分的速度，持續朝西北移動的菲律賓海板塊，所帶來的地質應力，也持續讓臺灣成為一個構造活躍的地區。處置設施的安全評估時間尺度長達 100 萬年，除考量火山、斷層等短期活動外，亦須將板塊尺度之長期演化列入考量，本次會議蒐集與臺灣構造運動有關之發表文章，摘述如下：

臺灣師範大學與日本東京大學合作，研究臺灣山脈中長微震（**tremor**）活動特徵與造山運動的關聯性。**Tremor** 為慢地震表現在地震波形的一種特性，透過分析 2012 年至 2022 年期間檢測到的約 7,000 個 **tremor** 事件，研究確認了五個高活動性區域，並首次發現北部和東部的“熱點”。結果顯示，這些好發區呈線性分布，與中央山脈斷層西傾的主震帶存在空間分隔，可能係淺部與深部之間的滑移耦合。地震矩張量逆推結果顯示，震源機制從低角逆衝斷層到高角逆衝斷層不等，反映造山過程中的多層次變形與流體運移，這些發現均深化了對臺灣造山帶構造動力學的理解。

臺灣師範大學的團隊研究臺灣山脈帶下的 **tremor** 與慢滑移事件（**SSE**）生成機制及構造特徵，尤其臺灣中央山脈南段下方 20 至 50 公里的下地殼深處區域，該區的事件由隱沒板塊釋放流體觸發，持續時間短且檢測難度大。利用最新的 10 年間 **tremor** 目錄及 **GNSS** 訊號分析，發現每日活動率最高的區域表現出顯著滑移訊號，推算出相當於地震矩規模 5.4 的能量釋放，遠高於理論預測值。而最佳化逆推顯示 **SSE** 為正斷層型滑移，與基於 **tremor**

的逆衝斷層機制結論相矛盾，這被解釋為造山運動導致的多層次變形：上地殼受壓縮主導，下地殼則由剪切控制，深部滑移訊號經過淺層張裂環境時可能轉化為正斷層滑移。此結果強調造山帶中複雜地殼變形對 SSE 的影響。

火山學、地球化學與岩石學

火山學、地球化學與岩石學在本屆會議中屬同一主題 (Topic)，本次參加會議著重於地球化學領域之資料蒐集，在高放處置技術中，微觀尺度的核種傳輸與地球化學特性在核廢料深層處置中扮演關鍵角色，此類研究不僅為基礎科學的探討，亦有助於推導不同條件下溶質的行為和系統穩定性。在高放處置系統中，流體（地下水）中溶質遲滯現象對物質傳輸和障壁功能，為安全評估的關鍵議題之一。而流體在不同地質條件下與岩石的交互作用，也是評估的關鍵議題。蒐集本屆研討會與地球化學有關之資訊，摘述如下：

裂隙岩體含水層中，溶質遲滯現象是深層地質處置中一個重要的關鍵議題。美國明尼蘇達大學團隊之研究成果顯示，透過現場含水層試驗和染料示蹤劑技術，詳細探討了基質與裂隙之間的交互作用，其結果顯示，基質的吸附作用和裂隙的流動行為是影響溶質遲滯的主要因素，團隊更進一步指出，此交互作用顯著延長了溶質的傳輸時間，並對遲滯效應的空間分布產生重要影響。該研究為改進裂隙岩體含水層中溶質傳輸模型提供了科學依據，且有助於提升高放廢棄物深層地質處置的可靠性。

韓國首爾大學近期針對氧化還原條件對深層地質處置之氧化鈾 (UO_2) 溶解及鈾遷移性的影響進行研究，並透過結合 COMSOL Multiphysics 與 PhreeqcRM 的反應傳輸模型分析，結果顯示，在氧化條件下， UO_2 的溶解顯著增加鈾離子的濃度，表示地下水的氧化性可能顯著影響鈾的遷移性。研究強調高放廢棄物處置安全評估需將氧化還原條件列入分析，並提供了一種結合模型與實驗的可靠方法來理解複雜的地球化學過程。

中國深層油氣國家重點實驗室，近期針對低滲透性且具有裂隙之岩石（如頁岩、花崗岩）探討其流體流動、化學傳輸，以及裂隙-基質交互作用

的行為。流體主要透過連通的裂隙網路流動，同時部分流體因毛細壓力梯度滲入相鄰基質中，並將化學物質帶入基質。此外，濃度梯度驅動的擴散作用亦會將化學物質擴散至基質內，並進一步發生吸附行為。該研究以多尺度方法結合微觀孔隙結構與宏觀流體流動與化學傳輸進行分析，以花崗岩與頁岩樣本進行三軸水力壓裂實驗。研究結果顯示，在低滲透岩石中，流動與傳輸主要受控於孔隙結構（如連接密度）而非孔隙幾何（如半徑），基質孔隙結構對流體滲吸與化學傳輸所產生之效應，將影響滲透性和吸附效率。該研究為低滲透岩石中流體與化學傳輸行為之解析提供實驗數據及機制探討，亦有助於瞭解深層地質處置之核種傳輸行為。

綜合議題

印度的研究單位利用 M-RNet101-DLabV3+混合深度學習模型，結合衛星影像與地面雷射掃描技術，準確檢測與分析 Chamoli 地區的 Kshetrapal 山崩變形，該模型整合了 ResNet-101 骨幹網絡、擠壓-激勵模塊 (squeeze-excitation blocks) 和稀疏空間金字塔池化技術 (Atrous Spatial Pyramid Pooling, ASPP)，顯著提升了特徵提取能力。在研究中，利用無人機和地面雷射掃描獲取高解析度數據，並結合雙線性插值進行邊界細化，最終精確率達到 99.37%。研究結論指出，該模型不僅顯著提升山崩檢測效率，還在減少雜訊和提高空間一致性方面展現了強大的潛力，為地質災害的預防和應對提供了具體的技術支援。

美國密西根大學研究團隊提出一種山崩潛感分析的新概念，其使用深度學習進行山崩潛感預測，過程中先利用水文分析和人工智慧將像素資料轉換為斜坡單元，再對人口和經濟脆弱性進行定量分析，提出綜合脆弱性評估矩陣及潛感與脆弱性構建風險評估矩陣。最後，整合卷積神經網路 (convolutional neural network, CNN) 與循環神經網路 (Recurrent neural network, RNN) 完成山崩潛感分析。研究結果顯示，結合其模型在準確性和泛用性上顯著優於過往之模型，亦顯示此方法有助於在氣候變遷背景下提供更可靠的地表侵蝕與山崩災害風險評估，對於區域規劃和災害預警具有實用價值。

美國史丹佛大學團隊利用機器學習模型來分析時間序列及山崩統計資料，並將山崩潛感分析從相對結果推進到量化結果，研究顯示，該方法在快速侵蝕地區具有明顯優勢，可有效改善過往因地貌劇烈變化而對模型訓練所造成的困難性，並將基於地形和環境分析所得之山崩潛感或脆弱性轉換為每單位面積、每單位時間內的山崩風險，並強調此過程必須使用一個包含每單位面積山崩發生率的數據集，而非僅記錄山崩存在或不存在的二元數據。

韓國世宗大學近期利用多時期合成孔徑雷達 (synthetic aperture radar, SAR)

數據，與光學夜間燈光數據進行山崩變化檢測，並以 2023 年江原道與慶尚道的山崩事件進行實際案例操作。透過光譜聚類演算法 (spectral clustering algorithm)、序列綜合統計演算法 (sequential omnibus algorithm) 以及深度學習 CNN 模型，將山崩變化分類從傳統的 5 類拓展至 8 類，提升分類之細緻度。分析結果顯示，即便變化區域相對較小，模型仍可成功區分新特徵的出現與現有地表特徵的消失，顯示此方法在長期變化監測及災害管理中具有廣泛之應用潛力，尤其適用於自然災害與人為活動交互作用下的特性分析。

美國 USGS 透過結合歷史與現代多源地形數據，針對阿拉斯加王子威廉海灣的 Barry Arm 與 Maynard Mountain 山崩進行了 65 年的動態分析，該研究基於點雲的演算法和多時期數據（包括 SfM 影像與光達），量化了山崩塊體的平移與旋轉，且進一步探討與冰川退縮相關的山崩加速與失穩現象，此外，在 Maynard Mountain，研究發現一處約 40 萬立方公尺的活動塊體，可能與 1964 年 M9.2 地震相關。該研究展示了遙測技術與歷史地形數據在分析山崩動態與評估災害風險中的重要性，且為瞭解冰川退縮與地貌演化的關係提供了新視角。

來自日本東北大學的研究團隊利用衛星導航系統 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 的靜態位移數據，結合深度學習方法，來估算板塊邊界的慢滑移事件 (SSEs) 滑移分佈。模型包括兩層卷積神經網絡 (CNNs)：第一層負責從稀疏的 GNSS 數據中重建連續且去噪的位移場，第二層根據位移場估算 SSE 的滑移分佈。測試顯示，該方法在準確度上優於傳統方法，能有效捕捉滑移時空演變。該研究應用於日本四國西部的 GNSS 數據分析中，成功解析 91% 的已知 SSE 事件。

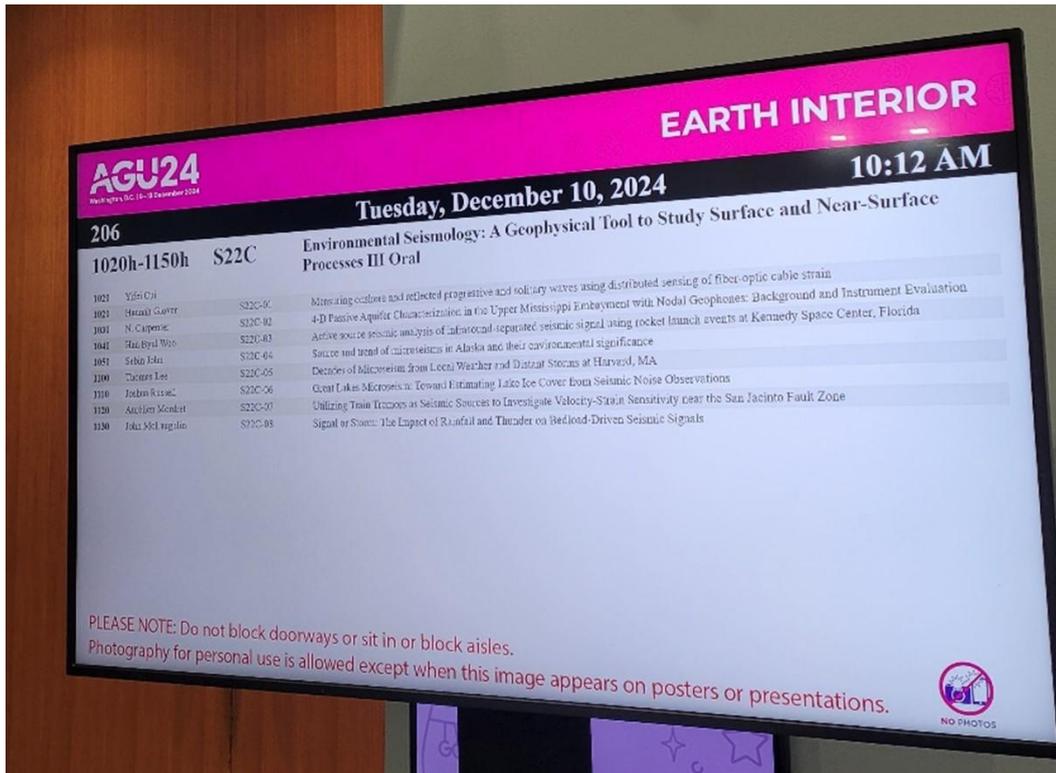


圖 8 : 大會著作與隱私權政策

肆、出國心得

本次赴華盛頓參加美國地球物理聯盟 2024 年秋季會議，就本次會議見聞與各國不同領域團隊之技術發展成果，以及上述成果對高放處置之相關應用，心得如下：

- 一、本次研討會明顯可見跨學科協作之重要性，尤其在高放廢棄物處置議題中，地質、水文、地球化學與人工智慧技術的整合將是未來的趨勢，本次會議的多元討論凸顯了整合不同領域的成果及應用於處置場設計與風險評估之重要性，尤其是人工智慧技術與地球科學結合的潛力。
- 二、高放處置技術發展方面，臺灣已與瑞典、西班牙、瑞士等國際研究單位建立初步合作關係，透過此次與各國專家交流之過程，學習各單位所發展之技術長處，並透過交流合作互補，臺灣未來需更加積極參與國際研究，以持續提升相關技術。
- 三、近年發展中的分布式聲學感測（DAS）技術已被廣泛應用於地下結構成像與裂縫監測，其結果亦顯示出對地震風險管理的強大潛力。這些技術經驗對除可應用於潛在處置場址的地質特徵調查外，對於國內地震或斷層活動之監測，以及防災方面亦有極大參考價值。
- 四、概率式地震危害分析（PSHA）是目前地震危害評估常用的工具，議題中探討了非均勻地殼特性及路徑效應可能對模型及結果產生的影響，利用物理建模來提高地震危害分析精度的方法，此可大幅提升模擬數據的空間與時間分辨率。此外，若能將慢滑移地震事件納入 PSHA 模型中，可提高其預測的準確性，亦可對地震的危害風險有更加完善的分析。
- 五、本屆會議發表眾多 AI 技術在地球科學中之應用，包括利用深度學習模型分析 GNSS 數據以檢測慢地震事件，及其在地震震源參數估算中的效能。多項研究均展示卷積神經網路應用在地層滑移分佈估算中的準確性，並透

過 AI 降低數據處理的複雜性。這些技術大幅度的提升數據處理效率，同時，人工智慧亦展現了其在地震監測與災害評估的巨大潛力。

六、氣候變遷是目前全球需重點應對的議題，也是高放處置安全需考量的重要因子之一，透過本次會議參與過程，了解目前國際上對氣候變遷最新研究成果，而氣候變遷議題並不僅止於處置設施封閉後的長期安全，在設施運轉期間，也需考慮與極端氣候相對應的配套措施，將可能的潛在風險列入運轉考量。

七、地表的剝蝕與沉降是高放處置須考量的地質因子之一，地表的剝蝕率與地表侵蝕速度息息相關，隨著全球氣候極端化加劇，地表侵蝕速度變化對深層地質處置的長期穩定性具極大影響力，未來應持續強化潛在場址區域之侵蝕風險模擬與長期監測等相關研究，以確保處置設施安全無虞。

伍、建議

本次赴美國華盛頓參加美國地球物理 2024 秋季會議，相關建議如下：

- 一、高放處置計畫長達數十年，且相關技術分跨地質、核工、土木、化學、水文、地震等多項專業領域，其最後各領域之分析與評估結果，仍須透過具經驗且熟悉整個高放處置計畫之人員整合。惟跨領域且有經驗的人才須長期培養，建議相關單位應及早做好人才與人力之規劃，避免技術斷層。
- 二、高放處置相關技術領域眾多且相關研究工作能持續進行中，國外相關機構已投入大量經費進行技術發展。國內應強化與國外相關機構之合作，除可學習先進技術外，尚能降低國內高放處置技術發展與研發之成本。
- 三、國內處置技術發展亦應向下紮根，強化與學術界之合作，透過學界培養具處置相關技術與能力之儲備人才，作為未來設施設計、建造及運轉階段所需之專業人力。
- 四、高放處置須深化與國際間之交流，參加國際會議或國際合作平台，蒐集國外技術發展之最新資訊，透過與相關專家面對面討論技術內容，就採用之模型、分析模式、特徵參數等技術細節，實際交換使用經驗，可加快技術發展，確保計畫朝目標正確邁進。
- 五、近年來人工智慧進步飛快，並逐步融入各項應用技術中，未來人工智慧將大量使用於科學、設計、監測、管理等應用中。未來高放處置技術或可導入人工智慧技術，不僅可加快分析速度、降低人為主觀判釋之差異，亦可藉由人工智慧的協助更有效且更全面的管理計畫。

陸、附錄

AGU Fall Meeting 2024 簡要議程



Schedule at a Glance

December 9-13, 2024

	Sun	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri
All Day	Pre-Conference Workshops					
08:30-12:20		AM Poster Session				
08:30-10:00		Oral Sessions				
10:00-13:00						Exhibit Hall Hours
10:00-18:00				Exhibit Hall Hours		
10:00-10:20		AM Break				
10:20-11:50		Oral Sessions				
11:50-12:20		Dedicated Poster Viewing				
12:20-12:30		Transition Break				
12:30-13:30		Lunch/Plenary/ Town Halls				
13:30-13:40		Transition Break				
13:40-14:10		Dedicated Poster Viewing				
14:10-17:30		PM Poster Session				
14:10-15:40		Oral Sessions				
15:00-18:00		Exhibit Hall Hours				
15:40-16:00		PM Break				
16:00-17:30		Oral Sessions				
17:30-18:30		Transition Break				
18:30-19:30		Town Halls & Events				