

出國報告（出國類別：開會）

高放射性廢棄物最終處置技術交流
研討會
(美國地球物理聯盟 2018 秋季大會)

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

俞舜文 技術規劃專員

派赴國家/地區：美國/華盛頓特區

出國期間：107 年 12 月 7 日~107 年 12 月 17 日

報告日期：108 年 1 月 24 日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：高放射性廢棄物最終處置技術交流研討會(美國地球物理聯盟 2018 秋季大會)

頁數 38 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司/陳德隆/(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

俞舜文/台灣電力公司/核能後端營運處/技術規劃專員/(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：107 年 12 月 7 日 至 107 年 12 月 17 日

派赴國家/地區：美國/華盛頓特區

報告日期：108 年 1 月 24 日

關鍵詞：美國地球物理、AGU Fall Meeting、用過核子燃料最終處置

內容摘要：(二百至三百字)

台電公司執行用過核子燃料最終處置計畫，現階段為「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，達到於 2028 年提出建議優先詳細調查場址之目標。本次赴美參加美國地球物理聯盟 2018 秋季大會，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與技術發展之參考，以確保本階段目標可如期如質的達成。

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，美國地球物理聯盟年會亦是目前世界上最盛大的地球科學年會，每年相關領域(地質、水文、大氣、海洋等)的菁英都會齊聚於此年會進行交流；也因此，藉由參加 2018 年的美國地球物理秋季大會(2018 AGU Fall Meeting)，可與許多相關領域的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，以期如質完成本階段之目標。

此次共參與了(1)水文地質、(2)礦物及岩石物理、(3)近地表地球物理、(4)地震學、(5)構造地質學以及(6)火山學、地球化學與岩石學等 6 個領域的交流，獲得之重要心得包括：(1)水文地質：ODFN3 模型是以隨機的方式在裂隙中央生成具有有限厚度(finite-thickness)的脆性斷層帶(Brittle Fault Zone, BFZ)群。有別於以往將 BFZ 視為一個簡單平面，這個新的 DFN 概念將具有較高的現地代表性，只是更複雜的模型與更多的裂隙亦代表帶來大量的電腦計算，然後這個問題可透

過將 DFN 升尺度至為等效連續多孔介質(Equivalent Continuous Porous Medium, ECPM)，透過在每一個 ECPM 單元(cell)中計算質點傳輸流徑與水流，並統計流徑特性，進一步計算每一個 ECPM 單元中的等效孔隙率、滲透率及裂隙面積，並使原參數的異質性與異向性不會因升尺度過程而喪失，在完成計算後，可再進一步簡化，將這些帶有異質性與異相性的參數投射回 BFZ 中，以進行後續的安全評估計算；(2)礦物及岩石物理：岩石的物理特性與其微觀尺度下的構造特性有關，利用碎形幾何理論(fractal geometry theory)研究岩石的物理特性。在微觀尺度下，碎形維度(fractal dimension)是岩石微構造的重要參數，該研究利用曲折度(tortuosity)假設的碎形模型推算孔隙空間(pore space)的碎形維度。先前已透過相關研究，建立孔隙尺寸分布與碎形維度的關係式，並利用砂岩的微斷層掃描影像(Micro-CT)進行測試，得到了相當好的對應結果，證實了多孔介質的微構造與碎形維度具高度相關性。未來可應用在滲透率、熱傳導係數及流體傳輸的數值模式中，以提供更符合實際的分析結果；(3)近地表地球物理：韓國的慶州地區在 2016 年發生了規模 5.8 的有感地震，這是南韓自有地震觀測史以來最大的地震，為進一步瞭解南韓東南部地區的地質構造，韓國地質科學與礦業資源研究所(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)以過去既有的資料搭配補充調查，重新分析 2012 至 2017 年間，在慶州南部及蔚山北部地區取得之大地電磁調查資料。透過二維逆推結果顯示，相關影像可與地表斷層及空中磁力探測所獲得之地表線型資料比對，新的分析結果有助於修正原有的地質模型，而相關資料也將提供後續進行國家高放廢棄物處置選址的參考；(4)地震學：發生在 2018 年初的花蓮地震，造成了花蓮地區地表破裂及房屋倒塌災情，根據臺灣地震科學中心(Taiwan Earthquake Research Center)發展臺灣地震模型(Taiwan Earthquake Model)指出，花蓮地區發生地震的機率較高，另透過機率式地震災害評估(Probabilistic Seismic Hazard Assessment, PSHA)方法評估不同區域之地震風險，本研究以 PSHA2015 模式及花蓮地震為案例，回顧模式在短時間尺度跟小區域之應用性。

研究指出過往地震評估多以地震事件發生均為獨立事件為假設前提，而該研究以庫倫應力變化作為地震序列的串接，分析結果與後續餘震的空間分布觀測結果相符，該方法建議評估特定地區應將應力擾動列入地震評估之重要參數；(5)構造地質學：臺灣東部造山帶的岩性組成差異甚大，該區域的地形變化主要是受控於岩性的差異，而構造活動與氣候的影響反而不大；換言之，未來在進行高放處置設施鄰近區域地景演化的評估時，亦應將岩性的影響納入評估，而非僅考量海水面及氣候的變化；(6)火山學、地球化學與岩石學：藉由水下無人載具(Remotely Operated Vehicle)取得熱液礦床與岩石樣本，並配合磁力與海底地形之特性，發現沖繩海域中的火山作用大致可分為弧後裂谷岩漿特性及島弧岩漿特性兩類，有助於協助進一步瞭解海底火山的成因。

經與本次會議的國際與國內專家學者討論及交換意見，除就地質調查作業規劃、地球物理探勘模式及地質調查資料解釋等方面，有更詳盡的瞭解外，更發現到在技術發展的同時，也應注意技術的推廣，透過社會教育方式，可以將技術與研究成果相關資訊散布給一般民眾，用簡單且淺顯易懂的言論，讓民眾接受科學的新發現。此外，國際間各項研究都著重在培養人才，而國內高放處置為長期計畫，為避免技術人才產生斷層，更應著手培養不同世代之參與人員，以確保計畫執行之順利。

目錄

摘要	i
目錄	iv
壹、出國目的	1
貳、出國過程	3
參、工作內容	4
一、美國地球物理聯盟 2018 秋季大會(2018 AGU Fall Meeting).....	4
(一) 水文地質.....	7
(二) 礦物及岩石物理.....	11
(三) 近地表地球物理.....	15
(四) 地震學.....	17
(五) 構造地質學.....	20
(六) 火山學、地球化學與岩石學.....	24
二、社會教育.....	25
肆、出國心得	29
伍、建議.....	31
陸、附錄.....	i

圖目錄

圖 1	： 本次大會海報張貼區域	6
圖 2	： 第 4 代反應器廢棄物深孔處置熱-水-力耦合模擬.....	9
圖 3	： 核種在脆性斷層帶中遷移之模擬方法比較	9
圖 4	： 以降尺度方法進行脆性斷層帶之核種傳輸模擬	10
圖 5	： 裂隙粗糙度及水流對裂隙內溶質分配之影響	10
圖 6	： 基於流量測量之裂隙粗糙度統計表示法	13
圖 7	： 以孔隙尺寸分佈決定孔隙空間與曲折度之碎型維度	13
圖 8	： 結晶岩用過核子燃料處置的熱-水模擬	14
圖 9	： 以 THMC 耦合長期加熱實驗瞭解膨潤土的變化行為	14
圖 10	： 以空中磁測與大地電磁法建構韓國東南部地區地下構造	16
圖 11	： 臺灣機率式地震災害評估之反思	19
圖 12	： 海岸山脈全新世海階與潛移斷層之關聯	23
圖 13	： 以大地電磁及高解析地電阻影像指示池上斷層	23
圖 14	： 石質隕石(A)與鐵鎳隕石(B)標本	27
圖 15	： 探空飛行器(A)與火箭(B)模型	27
圖 16	： 太空探測計畫(A)與天體觀測(B)專題簡報	28
圖 17	： 衛星觀測影像媒體(A)與互動式影像媒體(B)	28

表目錄

表 1 : 出訪行程及工作內容	3
表 2 : 專業領域主題	5

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。

根據台電公司 106 年提報主管機關之「我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告 (SNFD2017 報告)」指出，現階段的研究顯示臺灣本島及離島皆有合適的花崗岩體，其岩體尺寸及地質特性，具備提供後續進行深層地質處置研究的潛力；至於中生代基盤岩仍需持續關注進行研究，以探討其未來處置可行性。為達成「完成候選場址調查區域的調查與評估」之目標，仍須持續調查國內花崗岩與中生代基盤岩之地質特性，取得足供工程設計與安全評估之相關參數，以達成本階段之目標。

一般野外地質調查作業，可透過野外地表地質調查、地球物理調查及地質鑽探調查等 3 種方式，取得調查區域之相關地質特性參數。野外地表地質調查可取得地表之地質構造與地質特性分布；地球物理調查則透過量測該地區之物理特性(如重力值、地震波特性和磁感率、電阻率等)，間接推估可能的地下地質構造與分布；地質鑽探調查可取得鑽探深度內垂直向的地質特性變化。一般地質調查作業之規劃，先透過地表地質調查及地球物理調查取得初步的地質特性分布以及地下的物理特性分布，評估地下空間中構造分布與可能的地質特性，最後再以地質鑽探調查取得實際的地下岩層特性，以驗證地表地質調查與地球物理調查之分析結果。

用過核子燃料最終處置設施為高度鄰避(Not In My Back Yard, NIMBY)設施，

即便在過去非屬選址階段，當地居民亦不歡迎相關單位執行現場地質調查作業，且目前高放射性廢棄物尚無法定的選址程序，在未取得相關授權下進行地表地質調查及地球物理調查已屬不易，更遑論地質鑽探調查作業。爰此，為進一步分析既有之調查數據，取得更高解析之地下構造的解析結果，擬藉由參加美國地球物理 2018 年秋季大會(2018 AGU Fall Meeting)之機會，瞭解國際間最新之地球物理調查技術發展進程及各研究單位所發表之區域地質特性與成果，並將相關經驗回饋至處置計畫現地調查規劃作業中，以期如質完成本階段之目標。

貳、出國過程

本次出國自 107 年 12 月 7 日出發，迄 12 月 17 日返國(共計 11 天)，參加由美國地球物理聯盟(American Geophysical Union, AGU)於沃爾特•華盛頓會議中心(Walter E. Washington Convention Center)舉辦之「美國地球物理 2018 年秋季大會(2018 AGU Fall Meeting)」，本次開會行程及工作內容如 表 1 所示：

表 1：出訪行程及工作內容

日期	地點與行程	工作內容
12 月 7 日 至 12 月 8 日	臺北到美國紐約 美國紐約到美國華盛頓	往程
12 月 9 日	美國華盛頓	參加 2018 AGU Fall Meeting
12 月 10 日		
12 月 11 日		
12 月 12 日		
12 月 13 日		
12 月 14 日		
12 月 15 日 至 12 月 17 日	美國華盛頓到美國舊金山 美國舊金山到臺北	返程

叁、工作內容

本次出國行程為參加 2018 AGU Fall Meeting，會議於 12 月 9 日開始辦理報到，並於 12 月 14 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，詳細說明如下：

一、美國地球物理聯盟 2018 秋季大會(2018 AGU Fall Meeting)

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，近幾次大會與會人數超過兩萬餘人，發表研究成果超過上萬篇。

本次大會專業領域分為 28 類主題(Topic)，完整主題分類如表 2 所示，各主題研究成果分別以口頭發表與海報發表 2 種方式進行呈現，其中口頭報告共有 1,018 個子項(Sections)；海報報告共為 967 個子項，海報區概視如圖 1 所示。茲就與目前執行處置計畫有關之專業領域主題，如：「水文地質」、「礦物及岩石物理」、「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」等項目，及其發表成果進行摘要說明。

表 2：專業領域主題

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	Earth and Space Science Informatics 地球與太空科學信息
7	Education 教育
8	Geodesy 大地測量
9	Geohealth 環境健康
10	Geomagnetism, Paleomagnetism and Electromagnetism 地磁學、古地磁學與電磁作用
11	Global Environmental Change 全球環境變遷
12	Hydrology 水文地質
13	Mineral and Rock Physics 礦物及岩石物理
14	Natural Hazards 自然災害
15	Near Earth 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	Public Affairs 公眾議題
21	Seismology 地震學
22	Societal Impact and Policy Sciences 社會衝擊與政策科學
23	SPA-Aeronomy 高層大氣物理
24	SPA-Magnetospheric Physics 磁層物理
25	SPNFA-Solar and Heliospheric Physics 太陽能與太陽圈物理
26	Study of the Earth's Deep Interior 地球深部研究
27	Tectonophysics 構造地質學
28	Volcanology, Geochemistry and Petrology 火山學、地球化學與岩石學



圖 1：本次大會海報張貼區域

(一) 水文地質

在高放射性廢棄物最終處置相關研究議題中，水文地質為最關鍵的影響因子之一，因水為放射性核種的主要傳輸媒介，瞭解地下水在地下的傳輸行為為最終處置重要的課題，與高放處置相關之論文摘述如下：

1. 美國過去曾發展高放射性廢棄物深孔地質處置概念，本篇研究中主要的處置對象為第 4 代反應器「行波反應器」所產生的放射性廢棄物，分別就進行熱(thermal)-水(hydrological)-力(mechanical)之物理與數值耦合分析，分析結果顯示，在無限矩陣(infinite array)的假設下，核種不會外釋到地表；若改為半無限矩陣(semi-infinite array)之假設下，對流作用將在 20 萬年後會將核種帶到地表。在考量核種有可能外釋到地表之狀況下，應將化學模式列入評估中，在無限矩陣中熱-水-力全耦合顯示有效應力隨著時間降低(圖 2：H11N-1638)。
2. 為進一步精進芬蘭用過核子燃料最終處置場(Olkiluoto)的裂隙岩體的安全評估模式，在 Olkiluoto 處置場發展出一種新的離散裂隙網路(Discrete Fracture Network, DFN)模型，又稱為 ODFN3 模型，在此概念中透過 ConnectFlow 程式碼，以隨機的方式在裂隙中央生成具有有限厚度(finite-thickness)的脆性斷層帶(Brittle Fault Zone, BFZ)群。有別於以往將 BFZ 視為一個簡單平面，這個新的 DFN 概念將具有較高的現地代表性，只是更複雜的模型與更多的裂隙亦代表帶來更大量的電腦計算，然後這個問題可透過將 DFN 升尺度(upscaling)至為等效連續多孔介質(Equivalent Continuous Porous Medium, ECPM)，透過在每一個 ECPM 單元(cell)中計算質點傳輸流徑與水流，並統計流徑特性，進一步計算每一個 ECPM 單元中的等效孔隙率、滲透率及裂隙面積，並使原參數的異質性與異向性不會因升尺度過程而喪失，在完成計算後，可再進一步簡化，將這些帶有異質性與異相性的參數投射回 BFZ 中，再

進行後續的安全評估計算(圖 3：H51P-1514)。

3. 瑞典及芬蘭將於他們新的放射性廢棄物深層地質處置安全評估研究中，應用新的 DFN 概念，這個新的 DFN 中，脆性變形帶(Brittle Fault Zone, BFZ)將可被定義為裂隙群，並根據裂隙中心的冪分布(exponential distribution)特性，於隨機於生成的裂隙中產生。若採用此 DFN 進行全系統的質點傳輸計算，將大量消耗電腦資源，為保留裂隙的異質性特性，並降低模式的計算量，分別透過升尺度及降尺度(downscaling)的方法進行測試。目前透過將 DFN 升尺度至 ECPM 方法，並利用時域追蹤模組(MARFA)計算放射性核種的傳輸軌跡；另，以降尺度方法保留子網格(sub-grid)的異質性，其中地下水的滯留時間(residence time)及傳輸阻抗(transport resistance)是透過資料庫取得。將模擬結果與現實中的傳輸試驗結果比對，採用新的 DFN 方法較既有的方法(ECPM)具有較好的模擬結果(圖 4：H51P-1515)。
4. 在裂隙岩體的地下水傳輸中，裂隙交岔點處的混合流體常被以完全混合或是由流線分配的方式，簡化溶質的分配模式，但溶質的濃度分配卻是裂隙介質中擴散反應的重要關鍵。在這項研究中，以 OpenFOAM 程式碼進行納維-斯托克斯方(Navier-Stokes equations)及平流-擴散方程式的解算，透過裂隙粗糙度及流速的交互作用，以決定混合率及溶質的分配率(圖 5：H51P-1517)。

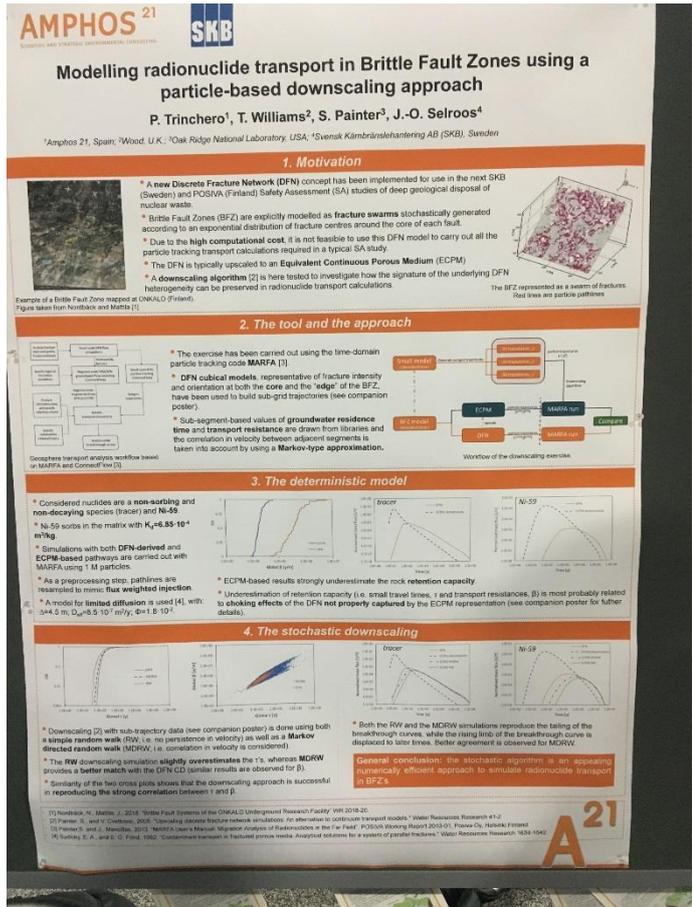


圖 4：以降尺度方法進行脆性斷層帶之核種傳輸模擬

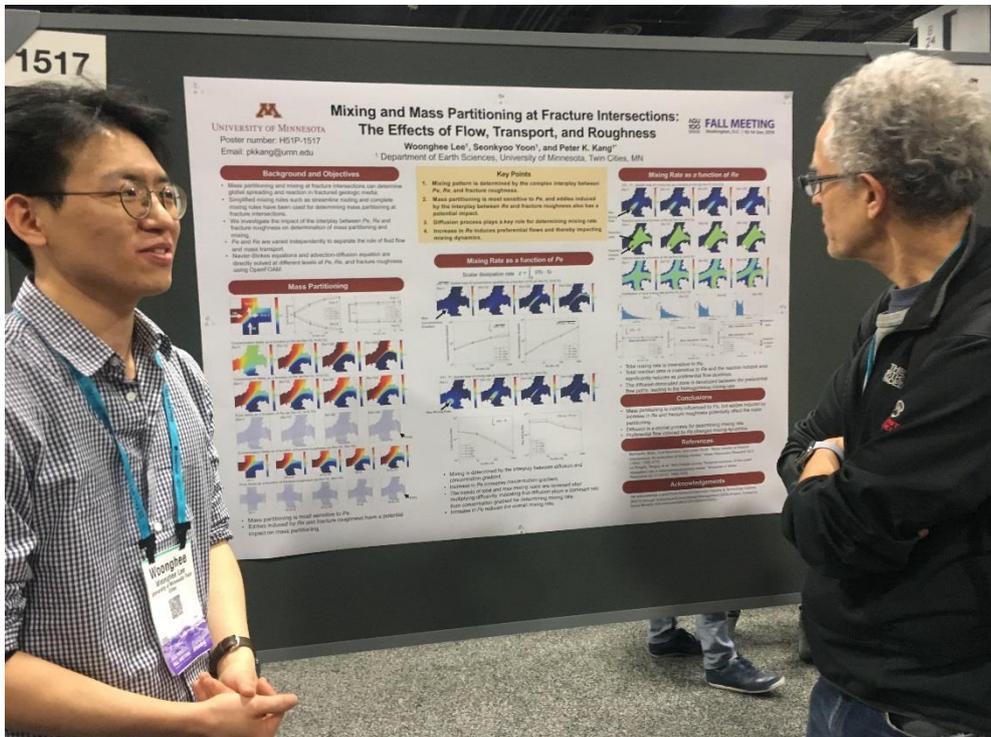


圖 5：裂隙粗糙度及水流對裂隙內容質分配之影響

(二) 礦物及岩石物理

在深層地質處置的概念中，多透過礦物或岩石的低透水特性來降低放射性核種外釋的機率，放射性核種在這些低透水性的礦物或岩石，通常僅能透過岩體內裂隙間的傳輸以及岩石內礦物間隙的擴散作用遷移，透過對小尺度的構造與行為特性的瞭解，有助於協助建立系統性評估所需之參數，以下就相關論文進行說明：

1. 目前已知裂隙表面的粗糙度對裂隙岩體中針對花崗岩岩心中單一裂隙，透過高解析度裂隙影像及測量不同壓力下的穩態滲透率，透過統計獲取一組裂隙粗糙度(roughness)的參數。並分別以數組模擬產生的裂隙形貌，與測量所得的裂隙形貌分別進行地下水流數值模擬，兩者分析結果具相同趨勢，且都可良好對應至該粗糙度參數，驗證該粗糙度參數的穩健性，結果亦顯示透過壓力與粗糙度的分析，可推估裂隙中滲透率的變化(圖 6：MR41C-0072)。
2. 岩石的物理特性與其微觀尺度下的構造特性有關，利用碎形幾何理論(fractal geometry theory)研究岩石的物理特性。在微觀尺度下，碎形維度(fractal dimension)是岩石微構造的重要參數，本研究利用曲折度(tortuosity)假設的碎形模型推算孔隙空間(pore space)的碎形維度。先前已透過相關研究，建立孔隙尺寸分布與碎形維度的關係式，並利用砂岩的微斷層掃描影像(Micro-CT)進行測試，得到了相當好的對應結果，證實了多孔介質的微構造與碎形維度具高度相關性。未來可應用在滲透率、熱傳導係數及流體傳輸的數值模式中，以提供更符合實際的分析結果(圖 7：MR41C-0084)。
3. 本研究以在結晶岩中處置商用用過核子燃料為研究對象，針對商用用過核子燃料的衰變熱及受熱可能產生的氣體遷移行為進行評估，目前

母岩特性假設為均質材料，未來將改以 DFN 或裂隙連續模型(fracture continuum models)進行模擬。模型假設處置場位在地下 500 公尺深，處置設施為對稱分布，在熱源附近加密網格，並就母岩、擾動岩區及緩衝材料特性進行敏感度分析，就處置場溫度與水流隨時間的變化進行分析(圖 8：MR51B-0069)。

4. 膨潤土為高放射性廢棄物最終處置常用的緩衝及回填材料，為澈底瞭解膨潤土在處置環境下的熱(T)-水(H)-力(M)-化(C)的演化模式，以評估回填的膨潤土是否能維持其低滲透性、高膨脹壓力、及遲滯放射性核種的能力。本研究利用瑞士 Grime 地下實驗室所進行的 T-H-M-C 耦合試驗，獲取試驗數據並據以發展 T-H-M-C 耦合模式，以助研究人員瞭解膨潤土的長期演化行為。熱的行為透過考量熱傳導及熱對流通量，取得相符的模擬結果；水的行為利用達西多相流(Darcy type multiphase flow)，可解釋與熱的耦合過程中，因膨脹造成孔隙率與滲透率的變化。力的行為反應在水合側為膨脹、受熱側為收縮，可透過狀態表面方法(state surface approach)模擬；化學數據在 T-H-M 耦合模型的校準上提供了重要的附加訊息，因受測礦物的變化受到樣品的異質性與測量方法的不確定性所影響，所以化學數據模型的解釋，很大程度取決於膨潤土和花崗岩中孔隙水的濃度。陰、陽離子濃度的分布與地下水傳輸過程及化學反應有關，觀測結果顯示，石膏的溶解及方解石與硬石膏的沉澱與模擬的定性結果相符，雖然模擬結果顯示，在加熱器附近可能有少量的伊利石(illite)沉澱與蒙脫石(montmorillonite)溶解，但觀測數據上無法檢核，因為從回收的樣本中兩種礦物比例差異過大而無法顯示出其空間上的分布差異，在電性構造上也無法與膨潤土有效的分辨(圖 9：MR51B-0070)。

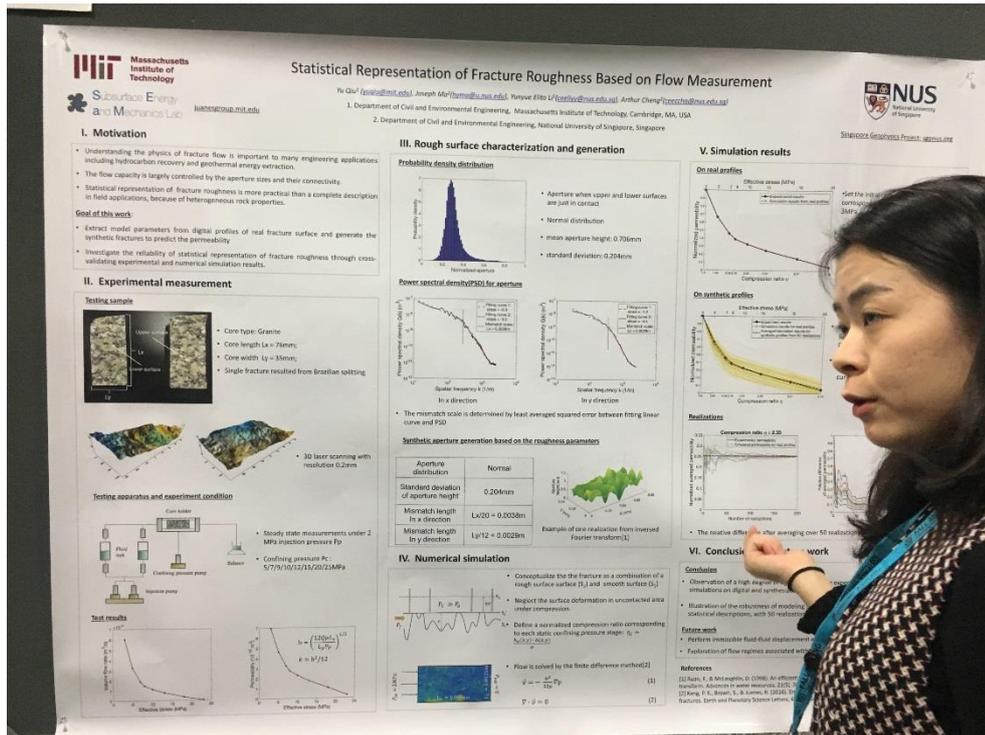


圖 6：基於流量測量之裂隙粗糙度統計表示法

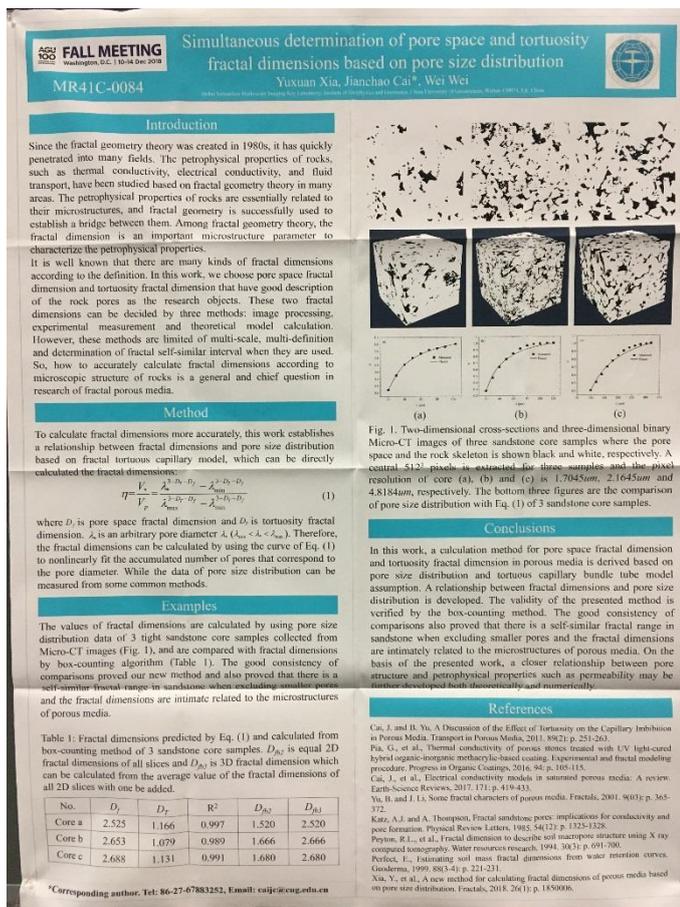


圖 7：以孔隙尺寸分佈決定孔隙空間與曲折度之碎型維度

(三) 近地表地球物理

近地表地球物理是利用物理探勘方法，調查地下距地表相對較近之地質構造與地質特性，依目前國內高放處置的概念，處置設施大概位於地下 300 至 1,000 公尺之深度，符合近地表地球物理調查的適用特性，本次就適用之地球物理調查方法與應用分述如下：

1. 韓國的慶州地區在 2016 年發生了規模 5.8 的有感地震，這是南韓自有地震觀測史以來最大的地震，為進一步瞭解南韓東南部地區的地質構造，韓國地質科學與礦業資源研究所(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)以過去既有的資料搭配補充調查，重新分析 2012 至 2017 年間，在慶州南部及蔚山北部地區取得之大地電磁調查資料。透過二維逆推結果顯示，相關影像可與地表斷層及空中磁力探測所獲得之地表線型資料比對，新的分析結果有助於修正原有的地質模型，而相關資料也將提供後續進行國家高放廢棄物處置選址的參考(圖 10 : NS11A-0580)。
2. 在被火山岩覆蓋的地區進行油氣探勘，用大地電磁法(Magnetotelluric, MT)可以得到不錯的效果，但如何提高 MT 的逆推精度是重要的課題。本研究利用加密的測線及寬頻大地電磁(Broadband Magnetotelluric, BMT)同時蒐集 AMT 及 MT 資料(有效頻寬：0.0005~10,400Hz；頻率點：98)。MT 資料處理和逆推工作的每一步驟都相當重要，通常，MT 逆推使用的頻率點應盡可能多。逆推模型以測量點為網格中心網格設計，確保每個測量點是獨立網格，並且網格縱向更密集。基於沉積盆地地層為水平連續及垂直分層的特性，MT 探測採用 Occam 法進行一維逆推；一維逆推結果提供二維非線性共軛梯度逆推的初始模型，這兩種逆推方法具有較高的互補性，保留一維逆推結果中的相關特性，且具有較快的計算速度(NS23A-0687)。

3. 透過地震震源的被動監測與定位可提供地表岩石變形、流體注入與遷移、區域應力環境及斷層破裂機制等重要訊息。在本研究中，提出新的被動監測方法，利用彈性逆時位移(reverse-time migration, RTM)之分量方法，透過觀測多分量記錄作為邊界條件求解彈性波方程式，建立向後傳播的彈性波場，然後利用向量分析定理(vector Helmholtz decomposition)將波場外推為 P 波及 S 波模式，應用分離的波場成像，並比較位移、能量與功率三種成像結果。數值實驗顯示功率成像有較高的辨識率及較低的噪訊敏感性，為了捕捉微震裂隙與地震破裂的傳遞行為，將局部視窗內分離的 P 波及 S 波乘積累加，進一步獲得整個空間與地震破裂的時間變化，透過二維及三維數值案例，該方法可以精確的定位震源，並描繪出水力壓裂與地震破裂的動態傳遞模式(NS31B-0746)。

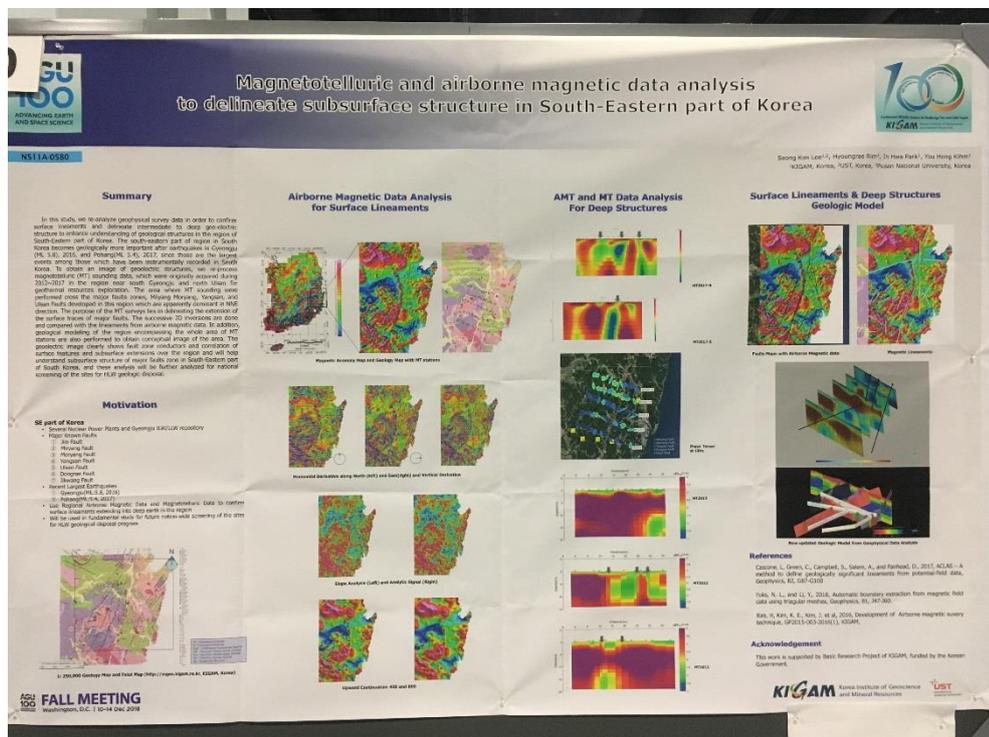


圖 10：以空中磁測與大地電磁法建構韓國東南部地區地下構造

(四) 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缺乏，因此，評估地震對於高放處置場的影響（如：封閉後，對於廢棄物處置罐的影響及地下水位場的影響）為一重要課題。在本次研討會中，有許多值得參考的研究，分別描述如下：

1. 紐西蘭位處於板塊碰撞的邊界，地質環境與臺灣相近，因此，地震災害評估的相關研究發展亦甚為進步。Kelvin Berryman 博士不僅是紐西蘭地質與核子科學研究所的首席科學家，亦是評估地震安全與危害度的國際專家。在他的演講中，首先他說明了震源模型的建立是地震危害度評估的基礎，並且說明震源模型建立的關鍵在於許多地質構造特徵的描述與量化，而這也是最困難的地方；他並且進一步地以紐西蘭南島東北部的 **Kaikoura surface rupture** 為例，來說明他對這個複合型的構造各項特徵進行描述與量化的緣由及過程(T21C-01)。
2. 在傳統的觀念中，認為大地累積的應變能都藉由地震所產生的滑移來進行能量的釋放，然而隨著現在觀測資料的累積，陸續發現到一些位移快速的區域其地震活動度確相對少，例如在加拿大的 **Cascadia** 以及加州的 **Parkfield** 皆有發現到所謂的無震慢滑移 (**slow slip**) 行為。根據過去到現在的觀察結果發現，慢滑移容易在隱沒帶發生，且不僅僅只有發生在地表，在不同深度皆有這個行為存在；換言之，慢滑移在隱沒帶是一個非常重要的變形行為。本研討會的發表歸納出產生慢滑移的地質條件可能有：**(a)**地層中含有較多的水合（黏土）礦物；**(b)**斷層中填充有減少滑移速度的材料；**(c)**地層中含有豐富的流體且受到高壓的作用；**(d)**斷層面的粗糙度高，並且斷層構造的側向發育與組成不均勻。其中流體對於慢滑移行為的影響最大(T21B-01)。

3. 發生在 2018 年初的花蓮地震，造成了花蓮地區地表破裂及房屋倒塌災情，根據臺灣地震科學中心(Taiwan Earthquake Research Center)發展臺灣地震模型(Taiwan Earthquake Model)指出，花蓮地區發生地震的機率較高，另透過機率式地震災害評估 (Probabilistic Seismic Hazard Assessment, PSHA)方法評估不同區域之地震風險，本研究以 PSHA2015 模式及花蓮地震為案例，回顧模式在短時間尺度跟小區域之應用性。研究指出過往地震評估多以地震事件發生均為獨立事件為假設前提，而本研究以庫倫應力變化作為地震序列的串接，分析結果與後續餘震的空間分布觀測結果相符，該方法建議評估特定地區應將應力擾動列入地震評估之重要參數(圖 11：T13G-0308)。

4. 過去十多年來，環境噪訊層析成像法(Ambient Noise Tomography)已被廣泛應用與發展，但大多數應用仍基於射線理論(ray theory)發展的 2D-1D 表面波逆推(surface wave inversion)方法，受惠於計算設備及效能的大幅提升，波動方程成像(Wave-Equation Tomography, WET)變的可行。透過最小化的觀測數據，與合成的全 3D 波場模擬交互比對，較過往的層析成像法，提供了更高分辨率的結果。本研究蒐集連續 4 年阿爾卑斯地區 304 個寬頻地震站之鉛直向連續觀測噪訊數據，重新反算了阿爾卑斯山地殼(Alpine crust)與上部地函(uppermost mantle)的速度模型，並成功解析數個新的地下特徵及獲得更適配的速度模型(S11A-04)。

(五) 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 7-8cm 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，茲就與臺灣構造運動有關發表文章摘述如下：

1. 海岸山脈記錄了 5 個可視為一系列的全新世海階，過去曾認為海階可能與地震或斷層事件有關，透過斷層崩積層的定年研究，比對海階的形成年代，來研究池上及利吉兩個潛移斷層的行為，可發現海階的年代可與較大的地震事件進行對比，不僅可進一步瞭解這兩個斷層的特性，亦有助於研究大地震的發生週期(圖 12：T23A-0335)。
2. 對於臺灣造山運動是否已達穩定的研究，目前仍無明確的定論，然而，造山運動是否已達穩定狀態，對於高放處置場址安全論證情節的建立，是一個關鍵的基礎。過去對於造山運動是否已達穩定的研究多以野外露頭的觀察以及露頭樣本定年分析的結果來進行討論；然而，本次的研討會，有學者嘗試以熱力學為理論基礎的模擬方法，來對臺灣造山運動進行研究、討論，此研究方法與過去最大的差異就在於此方法具有物理理論基礎，且以較宏觀的尺度來進行討論。初步的結果發現，六百萬年來臺灣的造山運動並非穩定的抬升，在六百萬至三百萬年期間，臺灣的造山運動處於一加速抬升的階段；而在三百萬年前時，玉山山脈的抬升速率則達到穩定（即達到穩定抬升的速率）(T32A-08)。

3. 地景演化是高放地質處置設施安全評估中一個重要的評估因子，而了解各區域的地表作用力是研究地景演化的關鍵。地表作用的營力可分為外部營力以及內部營力，外部營力包含有風化、侵蝕、搬運，以及沉積等作用，而內部營力則包含有火山、地震、板塊運動等，研究地表特徵（如：河流剖面梯度變化、海/河階等）的變化，可幫助我們釐清各區域控制地形變化的主要營力為何。臺灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊的交界，其構造活動頻繁且抬升速率快速，又加上由於臺灣位於東亞季風帶與太平洋的颱風影響區域，因此，侵蝕作用亦為強烈，故臺灣為一地表作用具有其獨特性，不同營力間的交互作用複雜且多元。在本次研討會中，有許多關於討論控制臺灣地形特徵主要作用力的研究，而其中有些研究區域正好鄰近潛在處置區，因此，具有參考價值。一般而言，在抬升速率較快的區域，其侵蝕速率亦會較快，且該區域的河流剖面與均夷河（即河流的侵蝕與堆積作用漸趨平衡）的剖面差異會較大，然而臺灣東部造山帶的南、北抬升速率差異甚大，且降雨量差異不大，但其河流剖面的變化並沒有很大的差異，而這與目前世界上大多數區域的觀察非常不同，根據目前初步結果的推論，這可能是因為臺灣東部造山帶的岩性組成差異甚大（包含有較堅硬的火成岩，以及較軟弱的沉積岩），因此，該區域的地形變化主要是受控於岩性的差異，而構造活動與氣候的影響反而不大；換言之，未來在進行高放處置設施鄰近區域地景演化的評估時，亦應將岩性的影響納入評估，而非僅考量海水面及氣候的變化(T23A-0336)。
4. 池上斷層為臺灣最活躍的活動斷層之一，本研究結合地表地電阻影像法、鑽井資料及過去大坡國小附近的大地電磁測勘數據，重新瞭解池上斷層近地表的幾何形貌，從大坡的岩心資料觀察發現，下盤由崩積礫石及沉積礫石組成；上盤為利吉混同層，透過地電阻影像顯示，過去認為

是池上斷層的地表露頭，其實是由上盤崩落的利吉混同層所形成的滑移面。本研究認為既有的應變儀觀測到的潛變行為可能主要受到震間質量滑移影響，而不是直接由斷層造成，並成功以大地電磁數據判釋東傾的斷層帶，且該電阻特性亦可指示利吉層與非固結的沉積物之間的邊界(圖 13：T51J-0327)。

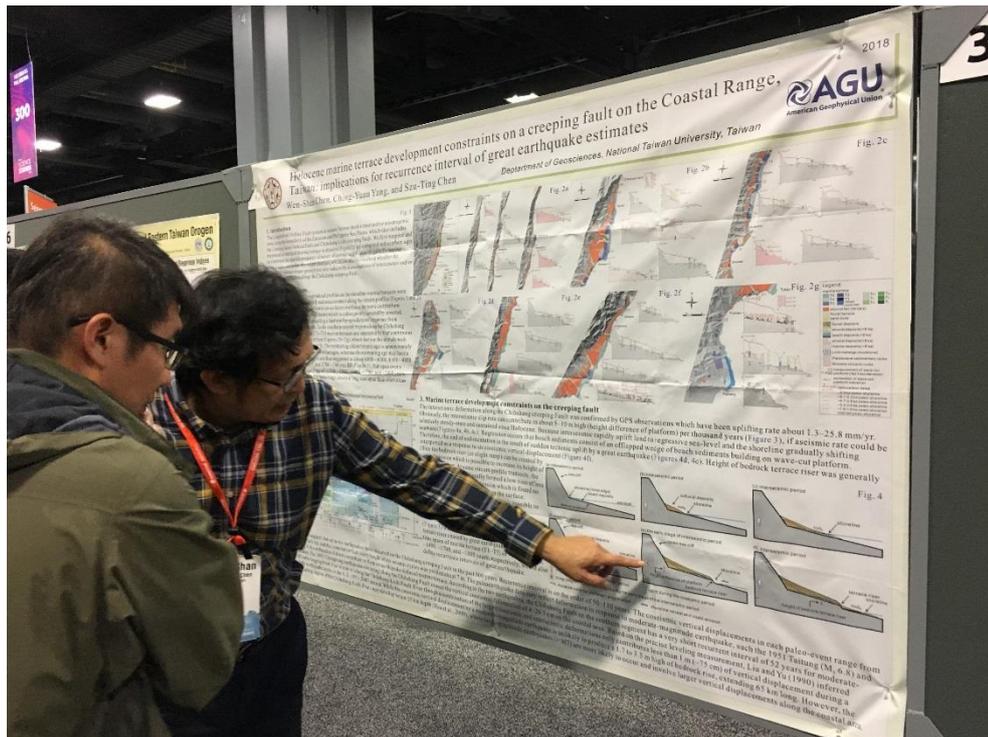


圖 12：海岸山脈全新世海階與潛移斷層之關聯

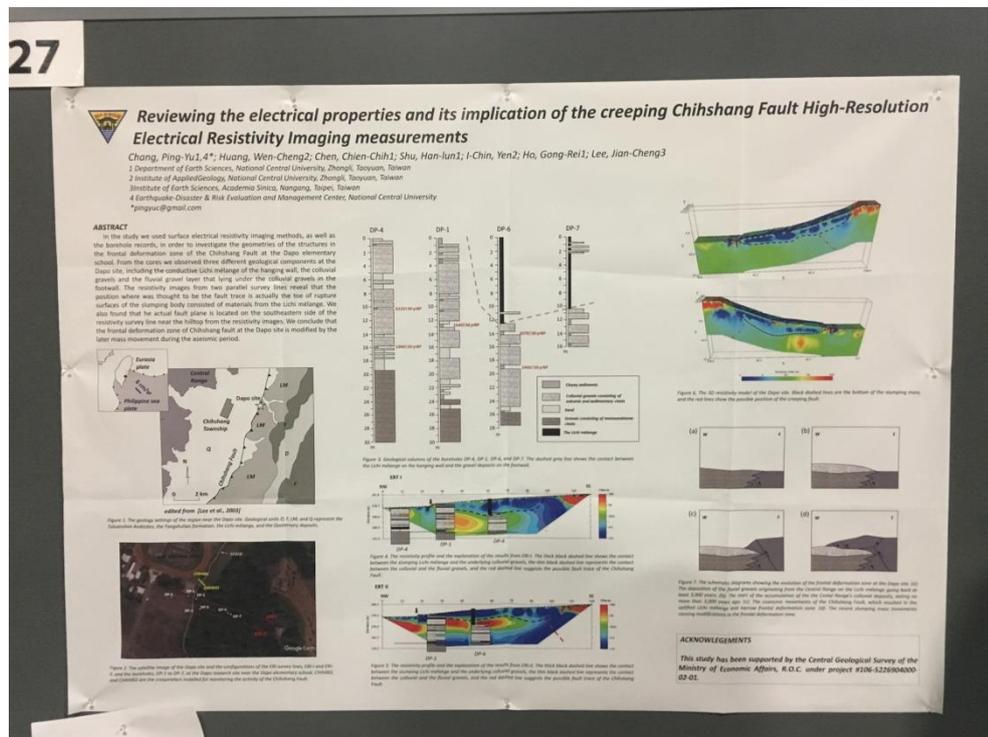


圖 13：以大地電磁及高解析地電阻影像指示池上斷層

(六) 火山學、地球化學與岩石學

1. 沖繩海槽是琉球隱沒系統衍生之弧後盆地，其高活動性受到矚目，最近藉由海洋探測發現多處熱液活動區域，藉由水下無人載具(**Remotely Operated Vehicle**)取得熱液礦床與岩石樣本，建立樣本的化學特性資料，再利用重力資料解析該地區的地殼厚度，並以磁力特性搭配海底地形，綜合解析該海域中的火山作用大致可分為弧後裂谷岩漿特性及島弧岩漿特性兩類，有助於協助進一步瞭解海底火山的成因(V43F-0169)。

二、社會教育

本次大會亦有規劃參展廠商展示攤位，參展廠商包括期刊商、各國地球科學相關研究單位、各國大學、設備商等將近 400 個攤位。各研究單位分別藉此展示其相關科學研究成果，除展現該單位之科學研究能力外，亦作為科普教育功能之一，其中又以美國國家航空暨太空總署(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的攤位吸引最多群眾，其相關作法或可成為未來推展社會教育與公眾溝通之參考，簡要摘述如下：

(一) 實體與模型展現

1. 現場展示了隕石的標本(如圖 14)，讓民眾可以親手觸摸來自外太空的溫度，並透過現場工作人員的解說，讓參加者實際瞭解手上的標本以及標本可能隱含的科學意義。
2. 攤位上擺設各式各樣的衛星設備以及飛機模型(如圖 15)，現場工作人員一一解說不同衛星的功能，透過這些衛星，提供人們更便利的生活。此外，這些衛星也提供許多有用的科學觀測數據，提供科學界能以更有效的方法研究地球的各種變化。

(二) 數位影像

1. 攤位現場定時會有專人演說(如圖 16)，演說內容包括目前執行中的太空計畫、天體觀測任務以及相關的研究成果等，以豐富的投影片以及簡單的科學常識，簡要說明新的科學發現及要傳達給一般人的科普知識
2. 除了專人演說外，現場還展示互動媒體設備(如圖 17)，透過 NASA 網站下載相關應用程式，展示過去數十年研究調查與蒐集之資料，建構行星、衛星、人造衛星及探測船等影像，除了可從不同視角觀察太空中星體的分布，也能透過探測船所收錄之資料，看到各行星的表面影像，還

可以透過時間軸的控制，實際瞭解探測船的目的與飛掠天體的過程，可以讓使用者猶如身歷其境般，翱遊在太空中。

3. 除此之外，NASA 亦開發供手機設備使用之應用程式(APP)，透過下載簡單的 APP，掃描現場提供的圖卡，即可在手機上以 3D 呈現相關影像(如火星探測車)，傳達不易以照片圖像呈現之 3D 畫面。

(三) 議題

1. 太空議題總是吸引多數人的目光，現場有許多與太空相關的展示議題，透過互動遊戲與影像的展示，傳達科學研究的成果。
2. 現場除了太空議題外，尚有與地球保護有關之相關議題，包括暖化議題、氣候變遷、極端天氣等，透過影像傳達科學觀測的結果，讓參與者實際瞭解他們生活的環境目前可能有哪些潛在的風險，以及要如何面對這些風險。

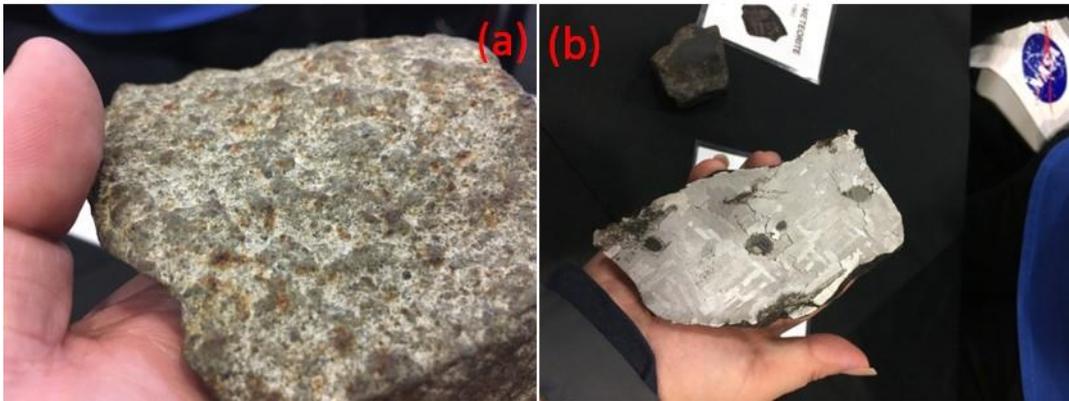


圖 14 : 石質隕石(a)與鐵鎳隕石(b)標本



圖 15 : 探空飛行器(a)與火箭(b)模型

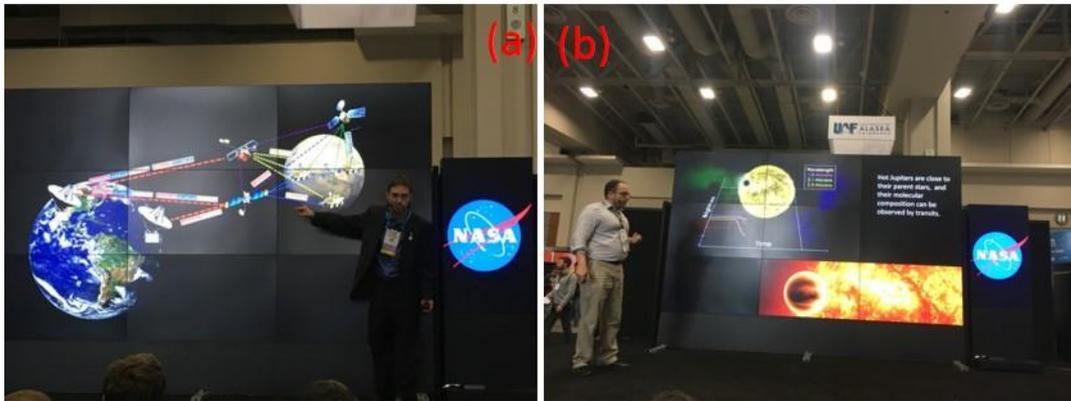


圖 16 : 太空探測計畫(a)與天體觀測(b)專題簡報

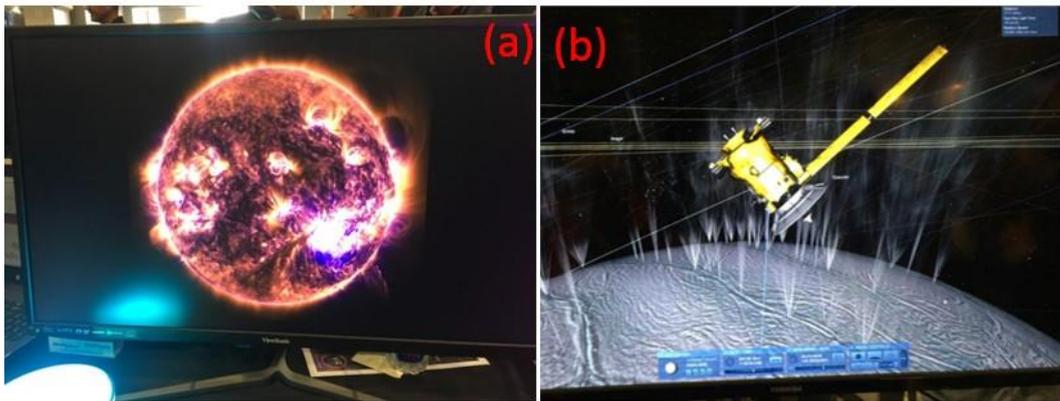


圖 17 : 衛星觀測影像媒體(a)與互動式影像媒體(b)

肆、出國心得

本次赴華盛頓參加美國地球物理 2018 年秋季大會，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、隨著科技的進步，探測儀器的體積越來越小，探測解析度越來越高，有些以往探測儀器不便設置的地方，現在都變的可能實現，如：使用無人載具進行相關觀測，過往臺灣山區有許多人跡罕至不易調查的區域，或許未來可考量採用無人載具進行相關的初步調查，以補足過往資料不足之處。
- 二、因探測儀器解析能力的提升，重新檢視過往所認知在地質上的一些假設前提，可能已與現實有一些不同，在進行野外調查工作時，應特別注意新事證的發現，重視證據的描述，避免過度解釋，陷入過往既定之成見中，而造成誤判。
- 三、隨著計算機(電腦)性能越來越強大，數值模擬的複雜度亦隨之提升，過往因受限計算機的運算能力，採用較簡化的程式碼或運算模式。現在可透過複雜的程式碼與模式，建立更符合現實條件下的模擬模式，以達到更具有代表性之分析結果。
- 四、國際間技術發展進度日新月異，相關基礎科學研究有越來越細緻化之趨勢，例如針對部分岩石與礦物的微觀特性研究，作為建立巨觀尺度模擬之參考依據，為確保國內技術發展能跟上國際的技術發展趨勢，參加與處置技術相關之國際研討會是必要的。
- 五、本次參加會議經與國際與國內專家學者討論及交換意見，就地質調查作業規劃、地球物理探勘模式及地質調查資料解釋等方面，有更詳盡的瞭解。
- 六、技術發展的同時，也應注意技術推廣的重要性，透過社會教育方式，可

以將技術與研究成果相關資訊散布給一般民眾，用簡單且淺顯易懂的言論，讓民眾接受科學的新發現。

七、國際間各項研究都著重在培養人才，本次與會可發現各年齡層均有相關技術與論文產出，且相關學者也有年輕化的趨勢，國內高放處置為長期計畫，為避免技術人才產生斷層，應著手培養不同世代之參與人員，以確保計畫得長久執行。

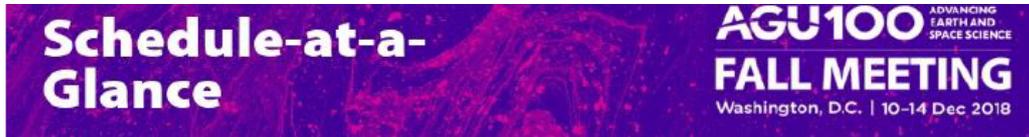
伍、建議

本次赴美國華盛頓參加 2018 AGU Fall Meeting 研討會，就與會經驗，相關建議如下：

- 一、參加相關專業技術之研討會可瞭解國際技術發展現況，透過與國際專家經驗交流，可作為國內計畫執行之參考，有助於確保國內處置相關技術符合國際水平。
- 二、在初步調查階段，在有限的調查數據下，亦可透過資料處理或模式轉換的方式，強化既有資料的運用性，以取得進一步的分析與應用。
- 三、社會教育或可作為高放處置民眾溝通的管道，透過宣導品、互動媒體、公開演說、應用程式等，可增加讓民眾接觸高放議題之管道，亦可藉此傳達高放處置相關技術的發展現況，以提升民眾對高放議題之興趣，以及對相關知識有初步的瞭解。
- 四、因放射性廢棄物處置計畫具高度敏感性，且相關技術具高度專業，民眾不易簡單理解計畫相關內涵，或許可透過數據蒐集瞭解民眾有興趣的議題內容，並以簡單的科普知識傳達給民眾，以達到社會教育與溝通之目的。
- 五、處置計畫為長期發展計畫，且涉及多項專業領域與各專業領域間之整合，為確保相關專業技術、研究成果及經驗能順利傳承，以及培養整合管理之人才，應持續培育相關人才庫。

陸、附錄

2018 AGU Fall Meeting 簡要議程



2018 AGU Fall Meeting Schedule-at-a-Glance

Sunday	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday
	REGISTRATION 6:00 A.M.- 7:30 P.M.	REGISTRATION 7:00 A.M.- 5:00 P.M.	REGISTRATION 7:30 A.M.- 5:00 P.M.	REGISTRATION 7:30 A.M.- 5:00 P.M.	REGISTRATION 7:30 A.M.- 5:00 P.M.
	SCIENTIFIC ORAL SESSIONS 8:00 - 10:00 A.M.	SCIENTIFIC ORAL SESSIONS 8:00 - 10:00 A.M.	SCIENTIFIC ORAL SESSIONS 8:00 - 10:00 A.M.	SCIENTIFIC ORAL SESSIONS 8:00 - 10:00 A.M.	SCIENTIFIC ORAL SESSIONS 8:00 - 10:00 A.M.
	POSTER SESSIONS 8:00 A.M. - 12:20 P.M.	POSTER SESSIONS 8:00 A.M. - 12:20 P.M.	POSTER SESSIONS 8:00 A.M. - 12:20 P.M.	POSTER SESSIONS 8:00 A.M. - 12:20 P.M.	POSTER SESSIONS 8:00 A.M. - 12:20 P.M.
	MORNING BREAK 10:00 A.M. - 10:20 A.M.	MORNING BREAK 10:00 A.M. - 10:20 A.M.	MORNING BREAK 10:00 A.M. - 10:20 A.M.	MORNING BREAK 10:00 A.M. - 10:20 A.M.	MORNING BREAK 10:00 A.M. - 10:20 A.M.
	EXHIBIT HALL 6:00 P.M.- 8:00 P.M.	EXHIBIT HALL 10:00 A.M.- 5:30 P.M.	EXHIBIT HALL 10:00 A.M.- 5:30 P.M.	EXHIBIT HALL 10:00 A.M.- 5:30 P.M.	EXHIBIT HALL 9:30 A.M.- 1:30 P.M.
	SCIENTIFIC ORAL SESSIONS 10:20 A.M. - 12:20 P.M.	SCIENTIFIC ORAL SESSIONS 10:20 A.M. - 12:20 P.M.	SCIENTIFIC ORAL SESSIONS 10:20 A.M. - 12:20 P.M.	SCIENTIFIC ORAL SESSIONS 10:20 A.M. - 12:20 P.M.	SCIENTIFIC ORAL SESSIONS 10:20 A.M. - 12:20 P.M.
REGISTRATION 12:00 P.M.- 6:30 P.M.	LUNCH BREAK 12:20 P.M. - 1:40 P.M. GENERAL SESSIONS/PLENARY 12:30 P.M. - 1:30 P.M.	LUNCH BREAK 12:20 P.M. - 1:40 P.M. SECTION BUSINESS MEETING & LUNCHEONS 12:30 P.M. - 1:30 P.M. GENERAL SESSIONS/PLENARY 12:30 P.M. - 1:30 P.M.	LUNCH BREAK 12:20 P.M. - 1:40 P.M. GENERAL SESSIONS/PLENARY 12:30 P.M. - 1:30 P.M.	LUNCH BREAK 12:20 P.M. - 1:40 P.M. GENERAL SESSIONS/PLENARY 12:30 P.M. - 1:30 P.M.	LUNCH BREAK 12:20 P.M. - 1:40 P.M. GENERAL SESSIONS/PLENARY 12:30 P.M. - 1:30 P.M.
	SCIENTIFIC ORAL SESSIONS 1:40 P.M.- 3:40 P.M.	SCIENTIFIC ORAL SESSIONS 1:40 P.M.- 3:40 P.M.	SCIENTIFIC ORAL SESSIONS 1:40 P.M.- 3:40 P.M.	SCIENTIFIC ORAL SESSIONS 1:40 P.M.- 3:40 P.M.	SCIENTIFIC ORAL SESSIONS 1:40 P.M.- 3:40 P.M.
	POSTER SESSIONS 1:40 P.M. - 6:00 P.M.	POSTER SESSIONS 1:40 P.M. - 6:00 P.M.	POSTER SESSIONS 1:40 P.M. - 6:00 P.M.	POSTER SESSIONS 1:40 P.M. - 6:00 P.M.	POSTER SESSIONS 1:40 P.M. - 6:00 P.M.
	AFTERNOON BREAK 3:40 P.M. - 4:00 P.M.	AFTERNOON BREAK 3:40 P.M. - 4:00 P.M.	AFTERNOON BREAK 3:40 P.M. - 4:00 P.M.	AFTERNOON BREAK 3:40 P.M. - 4:00 P.M.	AFTERNOON BREAK 3:40 P.M. - 4:00 P.M.
	SCIENTIFIC ORAL SESSIONS 4:00 P.M. - 6:00 P.M.	SCIENTIFIC ORAL SESSIONS 4:00 P.M. - 6:00 P.M.	SCIENTIFIC ORAL SESSIONS 4:00 P.M. - 6:00 P.M.	SCIENTIFIC ORAL SESSIONS 4:00 P.M. - 6:00 P.M.	SCIENTIFIC ORAL SESSIONS 4:00 P.M. - 6:00 P.M.
	ICEBREAKER 6:00 P.M.	SECTION BUSINESS MEETING & RECEPTIONS 6:30 P.M.	HONORS CEREMONY & BANQUET 6:00 P.M.	EPSP SECTION BUSINESS MEETING & RECEPTION 6:30 P.M. - 8:00 P.M. NIGHT AT THE MUSEUM 7:00 P.M.	