



如何幫核廢料找個安全的家

柯建仲* / 財團法人中興工程顧問社深地質研究專案計畫 副理

莊伯禹 / 財團法人中興工程顧問社深地質研究專案計畫 組長

顏銀桐 / 財團法人中興工程顧問社防災科技研究中心 組長

魏倫璋 / 財團法人中興工程顧問社深地質研究專案計畫 組長

陳耐錦 / 財團法人中興工程顧問社深地質研究專案計畫 組長

多年來，高放射性核子燃料（又稱核廢料）的深層地質處置研究常是諸多產官學研各界關注且討論熱烈的課題，除了專業研究技術的討論外，如何找尋一個具長期穩定性及安全性佳的處置地點及地質環境，是各界最為聚焦也最不易產生共識的問題，主要係因過去的研究常參考國際先進國家之技術資料進行評估，較難以本土的數據資料執行處置設施安全性與長期穩定性的分析及評估，進而落實民眾與各界之溝通，來尋求最佳的共識。然，近年來臺灣電力公司已逐步整合國內外學研能量，推動場址描述模型建置、工程概念設計與安全評估的整合概念，期望藉此國際處置研究的共通經驗，使臺灣可以發展與國際接軌的核心技術，據此，本文主要提出建置各領域場址描述模型之重點內容與須發展之關鍵技術，進而可真正的凝聚共識朝向幫核廢料找到安全的家之路前進。

臺灣用過核子燃料處置全程工作規劃

臺灣電力公司依照「放射性物料管理法」與其「施行細則」之相關規定，已於 2004 年底提出「用過核子燃料最終處置計畫書」，並於 2006 年經行政院原子能委員會（現為核能安全委員會，以下簡稱核安會）核定，台電公司必須依該計畫書之期程確實執行，並且每 4 年考量國際發展趨勢及國內實際進展狀況，進行工作內容之檢討與修訂，而於 2015 年 3 月完成之修訂版內，將全用過核子燃料處置規劃分為 5 個任務階段（如圖 1），依序為：

- 潛在處置母岩特性調查與評估階段（2005～2017 年）
- 候選場址評選與核定階段（2018～2028 年）
- 場址詳細調查與試驗階段（2029～2038 年）
- 處置設施設計與安全分析評估階段（2039～2044 年）
- 處置設施建造階段（2045～2055 年）



圖 1 臺灣用過核子燃料處置全程規劃

台電公司自 1986 年起積極展開相關研究計畫，整體策略在於循序發展必要的處置技術，使處置安全符合國際水準，以落實保障公眾健康與維護環境品質的最終目標。目前國際公認深層地質處置為用過核子燃料最可行之處置方式，藉由將用過核子燃料處置於深度約 300 至 1,000 公尺

* 通訊作者，ccke@sinotech.org.tw

的地下穩定岩層中，配合廢棄物罐、緩衝回填材料等工程設施形成「多重障壁」系統，以達到隔離（使地表的地質作用與人類活動不會影響地下的處置設施）、圍阻（使處置設施中的放射性物質不易釋出到地層）與遲滯（有效遲滯放射性核種的釋出與遷移，使放射性物質在影響人類生活環境之前，已衰變到對人體健康無害的程度）的安全功能。根據 Viswanathanl 等人 [1] 對於深層地質環境相關的工程應用研析成果，核廢料處置不僅是最長工程生命週期的議題外，亦是須整合岩石力學、水文地質、熱學、地球化學、傳輸與地表生態環境特徵的耦合分析程序（圖 2）。

場址描述模型建置技術

依據「我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告」（SNFD2017 報告）及「我國用過核子燃料最終處置技術初步安全論證報告」（SNFD2021 報告），在現階段無特定場址之前提下，須持續進行最終處置相關技術發展與技術建置，然而受到缺少更新地質調查數據與參數的條件下，工程設計與安全評估之技術發展進程仍受限制，因此，如何建立 1 套嚴謹且有系統性的用過核子燃料高階安全處置方案，亦為當前深受輿論關切的課題。參考國際先進國家經驗可歸納得知，包含區域地質、岩石力學與熱學、地球化學、水文地質、傳輸特性、地表系統、生物圈等 7 個主要領域的場址描述模型（Site Descriptive Model, SDM）建置技術，將決定用過核子燃料最終處置設施安全性評估的精準度與可信度，

其中最關鍵也最困難的工作，即是如何詳實地勾勒出近場及遠場地質圈的處置母岩地質環境特徵，並準確地掌握裂隙岩體中核種的流動與傳輸路徑。

有別於歐美國家之地質環境，臺灣因受劇烈造山運動影響，造成地質構造多且破碎，加上地形陡峭嶙峋，致使水文地質條件極端複雜，各地區岩石的物理特性、化學特性、力學特性與生成條件皆不相同，所呈現的應力分布、地下水系統與傳輸行為無論在時間或空間維度上都有相當大的變異性，倘若無法取得現地高信度參數或資訊，對於後端執行安全性評估會有相當程度的困難性，也將增加諸多安全評估上的不確定性。因此，原子能委員會（現為核子安全委員會）建議應持續加強地質調查與現地應力量測及其相關應用技術之建置，以確保高放處置技術最佳化且符合國際水平，提升處置設施的安全性，確保民眾安全及環境品質。

在尋求安全的最終處置設施過程中，需可取得研究區域之完整調查數據，以提供後續建立場址功能 / 安全評估技術，本文主要說明七大科學領域之場址描述模型之關鍵主軸與重點調查研究，除提供處置技術發展的建議課題外，並希冀藉由各領域實質工作間的交互關聯性，完整的建立可應用於本土地質環境具長期安全性與穩定性的選址方向，進而達成最終處置設施建置之目標。相關場址描述模型建置的流程係參考瑞典 SKB 的研究規劃（圖 3），包含調查及資料蒐集、闡述區域地質單元特性分布，再藉由區域地質單元分布結果，分別進行七個領域之場址描述模型建置與場址描述。

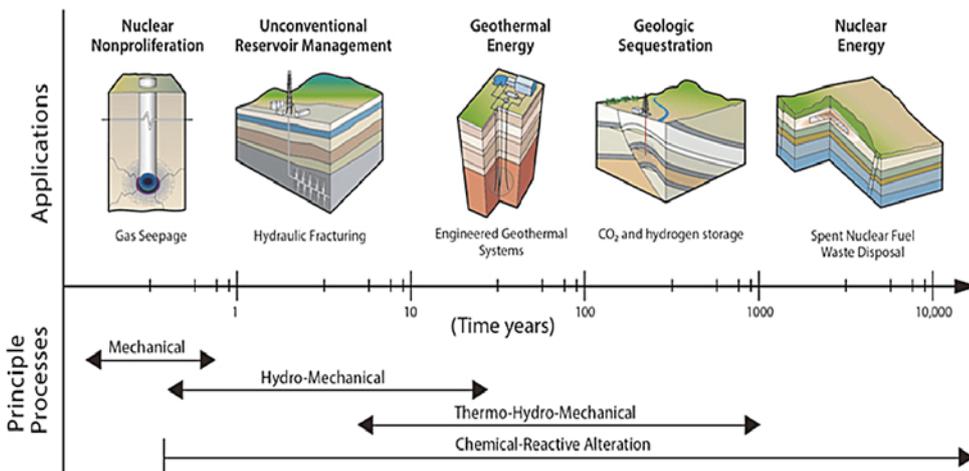


圖 2 深層裂隙岩體相關之綠能資源探查 / 貯集 / 處置工程應用與其工程生命週期及主要影響作用 [1]

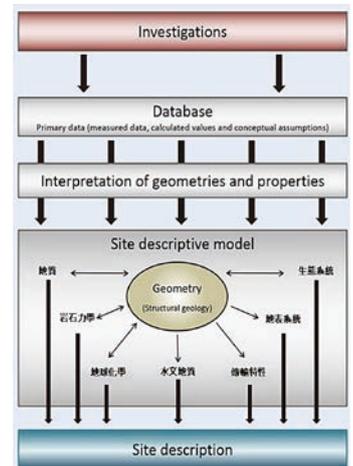


圖 3 瑞典 SKB 場址描述模型建置流程 [2]

區域地質描述模型

因深層地質處置概念中，最須優先掌握之關鍵為研究區域之地質環境特徵與其分布特性，包含地形、速度構造、地表線型及露頭與井下裂隙特徵，並可藉由參數特徵化技術建置區域地質描述模型。以下說明各項特性之重點調查技術與方法。

區域地形模型

為進行後續各項三維場址描述模型之建置，並提供區域地表構造線型判釋以及地表系統分析使用，須建立研究區域剝除植生後之高精度數值高程模型 (Digital Elevation Model, DEM)。此外，亦須產製研究區域之正射影像，以輔助判釋工作之進行，藉以瞭解地表之植生、裸露地、土地利用等概況，據此建置區域地形模型。

近年來針對廣域之區域地形模型取得方法通常以光學雷達 (Light Detection And Ranging, LiDAR, 簡稱光達) 為主，而一般常採用有人飛機搭載 LiDAR 方式 (亦即 Air-Borne LiDAR, 空載光達)，依據地形特性規劃航線，並配合飛機上的全球定位系統 (Global Positioning System, GPS) 以及慣性測量單元 (Inertial Measurement Unit, IMU)，來解算各反射點的三維空間位置，產製成帶有 X, Y, Z 坐標資訊的原始點雲 (point cloud)，進而產製符合真實地形 DEM。

三維速度構造模式建置

三維速度構造為建構地質特性描述模型所需之基礎資訊，其主要參考各類地球物理調查資料來進行分析整合，建置區域三維速度構造模式之重點有二，其一為彙整選定研究範圍之區域尺度地球物理文獻，並探討及釐清區域內地球物理資料於構造解釋上不足之處；其二為，地物探查方法比較分析及補充探查規劃，依研究範圍現有之波速構造進行彙整研析，瞭解現有波速研究成果之使用限制，再據此擬定施行地球物理方法探測之適宜策略，以建置研究區域內之三維速度構造模式。

受限於研究區域之地形地貌及人文地理分布，適合應用於波速調查之方法種類有所不同。波速調查施測前，將先行針對研究區域進行初步勘查，得以評估最適合應用之波速調查方法。根據使用震源差異及施測特性，波速量測可分為三種方法：(1) 主動震源侵入式方法 (active source invasive method)；(2) 主動震源非侵入式方法 (active source non-invasive method)；(3) 被動震源非侵入式方法 (passive source non-invasive method)。

其中，主動震源侵入式方法常見以懸盪式速度井測系統 (suspension PS-logging system) (Ogura^[3], Kaneko *et al.*^[4]) 進行施測，但由於需透過鑽井調查，雖其成果較精確且具代表性，但施測成本較高。而主動震源非侵入式方法，常見如多頻道表面波震測 (Multi-channel Analysis of Surface Wave, MASW) 方法 (Park *et al.*^[5,6]) 以及反射震測 (Seismic Reflection Method) 方法 (Steeple and Miller^[7]) 或折射震測 (Seismic Refraction Method) 方法 (Palmer^[8])。前者由於其低成本與施測便利特性，在工程實務調查上被廣泛應用，對於近地表數十公尺至百公尺範圍，可以獲得相對高精確度的波速剖面。而震測法利用人為產生的震波，紀錄通過地下地層反射或折射後的訊號，經震波分析，得以描繪地層形貌。該方法廣泛使用於石油探勘及大地工程地下構造測勘，也對於活動斷層的偵測提供極大貢獻。

區域地質構造與不連續面分布調查與參數特徵化

區域地表構造線型與露頭裂隙分布調查

(1) 地表構造線型

近年來剝除植生與建物之高精度 DEM 已廣泛應用於人工或半自動之地質構造、地表線型，以及崩塌地等地形貌判釋工作^[9-14]。為瞭解研究區域內可能的地質構造分布，利用前述所產製之剝除植生與建物之高精度 DEM 來進行地表構造線型判釋。

(2) 露頭裂隙分布資料

為建置研究區域內之 Geo-DFN (Geological Discrete Fracture Network)，須針對地表露頭及鑽孔之井下裂隙進行調查。首先在露頭裂隙分布調查部分，其可分為兩個方法，第一種採用二維視窗法進行人工量測，第二種則係採用無人機光達進行三維半自動分析。前者將針對研究區域內人車可及的露頭進行人工測繪，然而，此類調查常碰到雖有完整露頭，但因人力難以到達坡腹或坡頂，以致於無法獲得完整露頭之所有裂隙數據，僅能以地面可量測處之資料進行分析，但此做法可能受到局部露頭的裂隙出露狀況影響統計結果，且人力量測次數仍屬有限，是故，近期已發展以無人機光達 (Unmanned Aerial Vehicle Light Detection And Ranging, UAV LiDAR) 針對完整露頭施測，據以進行完整露頭三維點雲模型建置，進而分析萃取完整露頭之裂隙數據資料。

(3) 井下裂隙分布調查

前述透過地表露頭調查技術已可取得區域及場址尺度之裂隙分布特性，而為建置序率式區域地質模型

及提供離散裂隙網路參數集，另需挑選研究區域範圍內之鑽孔進行井下裂隙分布調查。

孔內攝影係於鑽孔中置入一攝影設備，於鑽孔吊放或拉升的過程直接攝錄孔壁影像，可獲取鑽孔岩層狀況、節理及裂隙分布及特殊地質材料，評估地層破碎程度與主要含水層位置 [15-17]，對於傳統鑽探調查限制的改善提供解決之道。

常用之孔內攝影調查方法分成音射式與光學式兩種。以下說明兩種設備之調查內容與方法。

(a) 音射式孔內攝影技術：音射式孔內攝係於液體中發射超音波束，側錄地層的反射波以獲得井壁軟硬程度的反射振幅，此外從反射回波的走時訊號可獲得音波發射源至孔壁之間的距離，藉由鑽孔的全方向掃描與縱深向測量，可獲得孔壁的連續影像與鑽孔的 360 度半徑資訊。本技術應用超音波在液體中的傳導來顯像，故無法提供地下水水面以上之側錄成果，但可於高濁度水質之地下水環境進行量測位態資訊而不受干擾。

(b) 光學式孔內攝影技術：光學式孔內系統硬體包含 LED 光源、鏡頭以及感光元件，藉由光源控制孔壁反射光量並透過鏡頭控制曝光強度後，被攝孔壁投影至感光元件上以數位資訊保存。本技術應用光學原理成像，攝影過程不受介質差異影響，即便在無地下水的鑽孔內，亦能側錄到完整井下裂隙資料，但光學成像對空間通視需求性高，在地下水環境中側錄時，濁度將主導攝影的品質優劣。

因上述兩種設備各有其優劣，且地質環境、地下水位深度及鑽探過程所導致之水質變化情形均會影響調查成果之品質，故一般會於鑽孔執行兩種量測技術，以利後續進行比較分析與互補設備本身量測資訊及結果不足之處。圖 4 為孔內攝影量測結果的展示圖，包含光學式孔內攝影調查獲得之裂隙分布成果及音攝式之 3D 裂隙岩體結構特徵影像（鑽孔尺度），圖 5 則為井下裂隙特性的統計結果展示。

序率式區域地質模型特徵化與離散裂隙網路參數集建置

過去在 SNFD2017 報告中，僅透過孔內裂隙分布資料進行統計分析，分別歸納岩層層與地下岩層之裂隙叢集分布情形，建構離散裂隙網路參數集（DFN Recipe），而工程設計與安全評估則利用此參數集生成裂隙網路進行後續分析，由於離散裂隙網路生成過程中，採取隨機生成的方式，過去瑞典 SKB 研究指出離

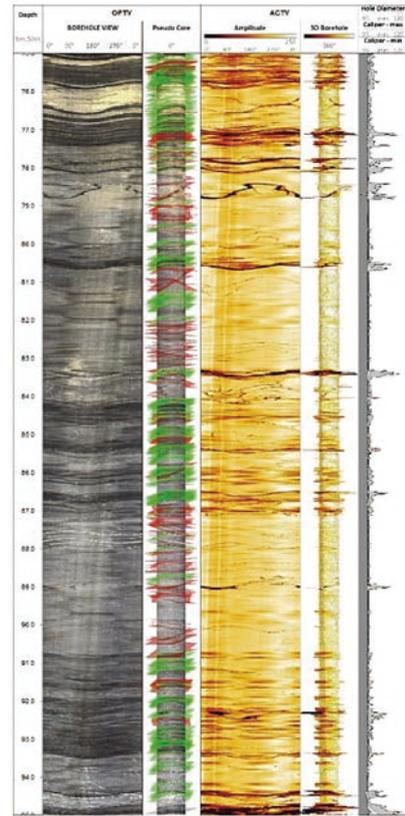


圖 4 孔內攝影示意圖

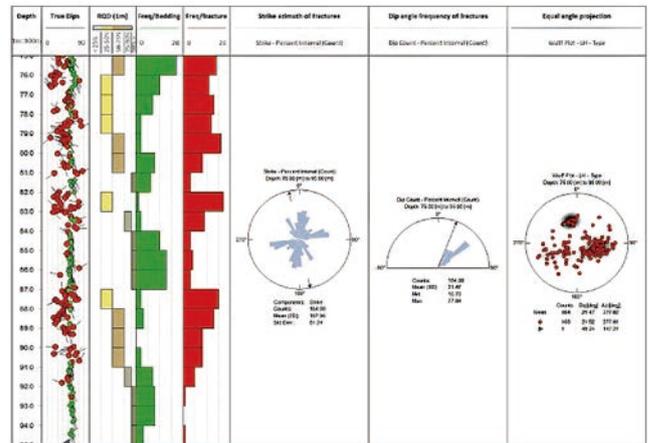


圖 5 孔內攝影位態分析示意圖

散裂隙網路參數集仍須結合地表露頭調查資料與不斷的驗證更新才能獲得較具場址代表性之結果 [2]。

此外，Munier [18] 提出以系統化方法針對裂隙調查數據進行序率式分析，離散裂隙網路所需採用之調查數據與對應生成參數，如圖 6 所示；而 Fox et al. [19] 則以瑞典 Forsmark 場址周圍以及各裂隙域之調查數據進行實務之模型建立與不確定性探討，並建議使用鑽孔之裂隙調查數據執行離散裂隙網路模式之驗證（Verification）與條件式（Conditioning）模擬，以降低模式之不確定性。離散裂隙網路模式特徵化之流程概念可參考圖 7。



圖 6 建立離散裂隙網路模式之調查數據與生成參數項目
資料來源：重繪自 Munier [18]

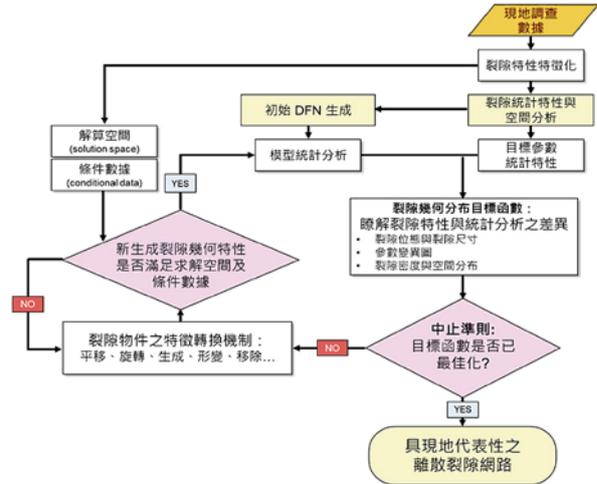


圖 7 離散裂隙網路模式建立與特徵化程序
資料來源：重繪自 Tran et al. [20]

岩石力學及熱學描述模型

國際上針對高放射性廢棄物之最終處置，皆採取深層地質處置的方法，透過天然障壁的隔絕與圍阻，避免放射性核種外釋對生物圈產生危害，而如何選取適當的深度進行處置場設計，以及評估母岩特性是否能滿足工程設計與安全評估需求，皆有賴於岩體之物理特性與岩石力學特性，因此須取得研究區域內岩體之含水量、孔隙率、密度、力學及熱學特性（包含各種岩石力學室內試驗、裂隙面之正向勁度、單壓強度、潛變特性及熱傳導特性等）與地溫梯度等岩石物理特性資料，綜整量測數據資料，判釋地質構造分布情形，建立三維地下岩體孔隙率分布模式、地下岩體密度與地質構造分布模式及地下岩體熱特性分布模式。

區域應力場空間分布

現地應力量測的方法眾多，一般工程較常用的包括水力破裂法（hydraulic fracturing）、平鈹千斤頂法（flat jack），以及套鑽法（overcoring）、井孔崩落法（borehole breakout）等，由於這些試驗大多在隧道中進行，必當受到開挖擾動影響而改變原始應力的大小及方向，相形之下水力破裂法、套鑽法，以及井孔崩落法（如圖 8）可透過鑽井穿越應力釋放帶（開挖擾動帶），因此試驗較能反映自然應力的結果，惟水力破裂法係對地層施壓產生裂隙，在高岩覆的堅硬岩盤需具備相當規模的加壓設施得以將地層劈裂，且可能有增加水力連通性等隱憂，因此不論在經濟性或安全性均有其限制。另一方面，套鑽法係以鑽孔後，岩石於自由面應力釋放產生的變形來

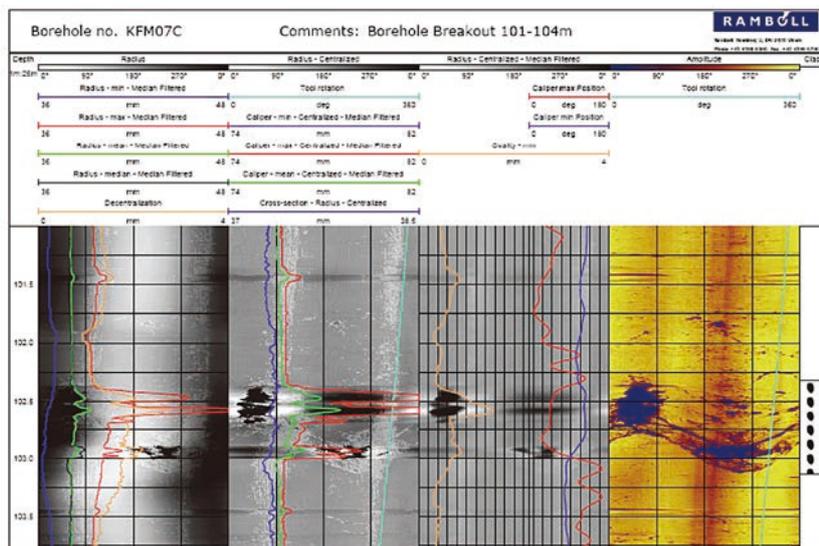


圖 8 井孔崩落法之實際案例 [21]

量測現地應力；而井孔崩落法則係透過鑽孔過程，孔壁受現地應力影響而產生之不對稱變形，進而由井徑變化情形來推估現地主應力方向。

另室內試驗亦可採用岩心音射量測技術、岩心非彈性應變回復量測及岩心直徑試驗等方法，來與現地量測結果進行比較分析。此外，廣域地質構造之間接量測，例如全球衛星定位系統（GPS）連續觀測資料分析、震源機制解等，則可做為量測成果之區域代表性檢核，包含其方向性、最大與最小主應力之比值等。藉由上述資料比對之結果，亦可採定量或半定量方式檢視量測成果的試驗誤差，進而探討其誤差來源為儀器限制性抑或是人為操作等，並評估影響試驗結果因素之不確定性。

場域受震行為特性分析

1. 位移定值影響特性模式

臺灣地體構造如此活躍區域，處置設施長時間受鄰近斷層、孕震構造及隱沒帶所引致地震所產生之永久位移影響，為安全評估之重要議題。當時間納入安全考量，則可經由機率式斷層位移危害度分析（Probabilistic Fault Displacement Hazard. Analysis, PFDHA），量化特定時間內斷層錯動時可能引致之地表位移量超越機率，提供結構物設計對抗潛在斷層位移災損合理參數。機率式斷層位移危害度分析方法中，主斷層錯動產生位移之預估式為重要關鍵。然，斷層位移模型（Fault Displacement Models）仍寥落且約束性不佳，關鍵原因在於缺乏詳細且足夠的斷層位移觀測資料。有鑑於此，須探討國內外各類靜態及動態模擬方法，配合輔助機率式斷層位移危害度模式所需，以發生過地震斷層引致地表變形之案例性分析之餘，確認方法可行性後，進而使用模擬成果探討應用於臺灣使用斷層位移預估之適用性

2. 位移機率影響特性模式

斷層錯動與地變形之效應是處置設施最需考量的受地震影響作用。因劇烈地震所產生之同震地表位移，對位於斷層上或附近之結構物可能造成重大損害，並將影響未來結構安全性，評估可能位移量值可作為結構適當之設計依據而減輕危害衝擊。Youngs 等人^[22]提出機率式斷層位移危害度分析來估計斷層位移量，但對於斷層位移錯動之危害分析仍然有相當高之不確定性，部分原因乃是缺乏詳細之斷層位移觀測資料。此

外，機率式斷層位移危害度分析，須搭配合宜之位移資料庫，並選擇適合本土之地表破裂分布函數、斷層震源模型、斷層活動度等進行機率式斷層位移危害度分析運算，另亦須考量地震模擬、斷層破裂物理學和流變學之成果及區域地質、地震活動和構造特徵，來降低分析結果之不確定性。

場域振動影響特徵分析

1. 地表及井下振動特徵模式

高放處置設施之建置前、建置階段及營運階段之地震監測工作，須瞭解環境背景震動特性及受地震引致震動特性，作為不同階段對於地震安全評估的依據。針對臺灣地震活動極為活躍的背景，場址描述模型勢必要探討其地震及引致之地震動特性，作為後續場址安全評估的基礎背景資料。從以往的隧道及礦場坑道地震監測相關文獻資料，一般而言，地底下深部所記錄到之地震動，比起地表地震動來的小^[23-27]。然而，隧道及坑道設施隨之地震所引發地震動之衝擊下，仍有引致損壞的可能性^[28]。

我國之「高放射性廢棄物最終處置場址技術規範」雖明文規定場址不得設置於活動斷層或地質條件足以影響處置設施安全之地區，然臺灣多震環境下，雖從法規上已初步排除活動斷層及構造之直接影響，然而間接由非場址區域內之斷層構造發生地震所引致地動影響則無法排除，因此地震引致處置場址之地震影響為安全評估之關鍵議題。而處置場若規劃於 300 m 至 1,000 m 概念下，場域振動影響是否隨深度有其差異性亦為探討分析之重點。

2. 場域背景震動特性模式

地震儀器監測目的在於釐清場域之長期背景地震活動，及提供設施建置後，脆弱構造所引致之地震及岩石不穩定狀況。經由空間及時間高解析監測下，則可於設施建置同時，辨識岩層細部弱帶、活動斷層或構造、岩石內水移棲路徑之發展狀況，並且輔助瞭解區域應力狀態。藉由場域背景震動特性模式技術及分析程序之建立，將可應用於獲取場址尺度所記錄之背景振動特性。

針對地下處置設施於建構前、中、後期之振動訊號分析，必須經由完整分析評估連續振動記錄，釐清季節性及事件性之特定場域特性，作為後續系統安全及風險評估之重要基礎資訊。

適性地動預估式及其不確定性模式

高放處置地下設施之地震影響性評估，較一般地表結構物有不同的考量，尤其是考慮堅硬岩盤內之地震動模式。一般地表結構物之設計地震歷時的計算，會以參考地盤（760 m/s）進行地震危害度分析計算，再利用地盤反應分析，往上計算至特定地盤特性之地震歷時與地動值表現。雖然過往地下地震監測資料顯示，地震動隨深度會有逐漸減弱的趨勢，然而對於堅硬母岩區域之地動特性缺乏實際之觀測紀錄。若以特定場址特性而言，母岩環境的差異必然存在地震動表現的差異，當有現地地震監測資料，經由與其他監測資料比較，可深入探討場址區域性地表震動特性差異，除了更能瞭解場址地盤特性所造成的場址效應外，也能透過區域差異的修正獲得現地可使用之場址特性參考基準。

岩石力學參數特徵化與岩石力學描述模型建置

國際上針對高放射性廢棄物之最終處置，均以深層地質處置為設計方案，因此如何決定最佳處置深度以及選取合適岩層進行施工，取決於岩層的材料特性與力學特性。而在安全評估方面，岩石力學描述模型更可用來評估各種地質作用對於處置場穩定性之影響。透過岩石力學現地調查技術發展，可獲取不同岩層之參數特性，並提供後續場址描述模型、隧道設計與施工、地震剪力情節的安全評估使用。

岩石力學描述模型之建置，除了各岩石力學單元之空間分布外，各單元之岩石力學特性更是該模型最重要的內涵，因此在模型建置前，首重於確認模型所需涵蓋之特徵化參數，這些參數不僅是岩石力學單元劃分的重要依據，亦是模型建置後，賦與各單元特性的基礎資料，故有必要先透過文獻蒐集研析之過程，歸納所需之參數表。

岩石力學描述模型的建立可分為理論方法（theoretical approach）、經驗方法（empirical approach）以及應力方法（stress approach）等3種主要面向（SKB^[29]，圖9），在完成模型的建置後，可藉由後續的檢驗工作，逐步確認模式內各參數的敏感度及模式的不確定性。

地球化學描述模型

地球化學調查資料與參數特徵化

岩石礦物之組成成分為地球化學描述模型建置時之重要參數資料^[30,31]，母岩之岩石礦物組成成為影響地下

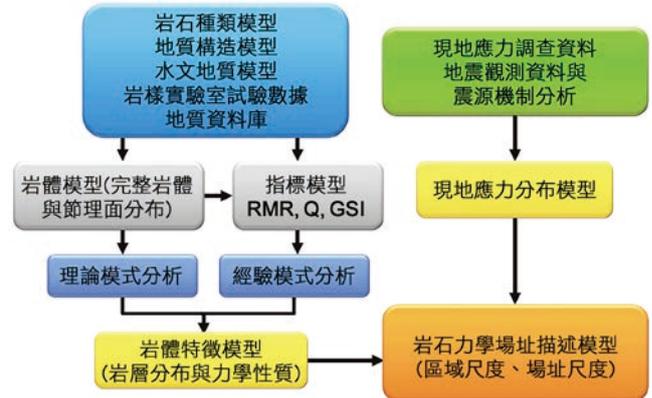


圖9 岩石力學描述模型建置之流程圖^[29]

水及地表水成分的主要因素，然而，除了母岩之外，因裂隙為地下水流動之主要路徑，因此裂隙填充物亦對地下水成分與核種吸附特性具有顯著的影響，另一方面，裂隙填充物多由古地下水沉積與沉澱所生成，其亦可反映出地下水的成分演化，因此在建置地球化學描述模型前，須先透過岩石礦物分析工作掌握母岩及裂隙填充物之特性。除了地球化學描述模型的建置外，地史演化歷程亦可從岩石礦物成分及定年結果進行推導，從而建立地史演育模型^[32]。

1. 地下水成分與特性分析

國際高放處置皆選取低透水性之岩體作為處置母岩進行放射性廢棄物處置^[2]，而存在於岩體中的裂隙或破碎帶，不僅是地下水流動的主要通道，同時也會影響地下水化學特性演化，進而導致核種傳輸之遲滯能力變化，因此如何調查現階段之地下水組成分布將影響著後續安全評估的成果，藉由不同季節與不同深度之地下水樣本，瞭解研究區域內之地下水組成季節性變化情形，並透過地下水水質長期監測資料，觀測其受到自然作用之變動範圍與影響特徵，如：降雨、地震等，歸納地下水歷時演變特徵，以提供後續模式分析使用。

2. 地表水體成分與特性分析

地下水與地表水地球化學特性是高放處置分析很重要的參數（如表1）^[2]，透過比較地下水與地表水之化學特性可協助釐清研究區域地下水補注來源與劃定模型之補注邊界，亦可透過地表水化學特性，瞭解核種外釋至近地表區域，近地表土壤層之核種吸附能力與遲滯能力，因此須取得研究區域內不同季節地表水樣本之地球化學特性，瞭解研究區域內之地表水成分季節性變化情形，並提供地表描述模型分析使用。

的導水特性為場址描述模型與安全評估的關鍵參數，因此在瑞典 SKB 提及裂隙尺寸與導水特性具有場址特性，但受限於過去參考案例之數據不足，此假設具關鍵性之影響，故建置本土化之裂隙尺寸與導水係數的經驗公式有其必要。

序率式岩體透水性評估模型

在 SNFD2017 報告中，係以離散裂隙網路參數集 (DFN Recipe) 為基礎，在後續工程設計與安全評估的應用，包含廢孔準則之處置孔截切分析、裂隙水流分析、核種外釋模擬等，都使用不同軟體生成各自之離散裂隙網路實現值，有些分析生成上百組實現值，為確定一組具代表性之實現值，瑞典 SKB 在場址描述模型中以下列兩種方式進行探討，第一種為地質離散裂隙網路參數集 (Geo-DFN Recipe)，透過地表裂隙調查與孔內裂隙分布資料統計獲得；第二種為水力離散裂隙網路參數集 (Hydro-DFN Recipe)，為進一步比對水力調查資料後，所獲得較貼近場址裂隙水流之參數集。

水文地質場址描述模型建置

過去臺灣處置計畫以離島結晶岩測試區為基礎，建置相關數據分析與特徵化技術，而 SNFD2021 報告則延續離島結晶岩之基礎，精進工程設計與安全評估技術，然而受限於水文地質之數據量不足，導致在後續安全評估數值分析過程中，很多參數都引用至國外場址資料，由於無法量化各種假設與引用下之不確定性，以致於安全評估結果缺乏本土代表性。因此，實務面的研究應基於本土取得之完整的現地試驗數據與水力試驗成果，進行水文地質參數率定，建置不同尺度之水文地質描述模型，並依循國外建置流程 (如圖 11)，分階段進行水文地質描述模型之更新。

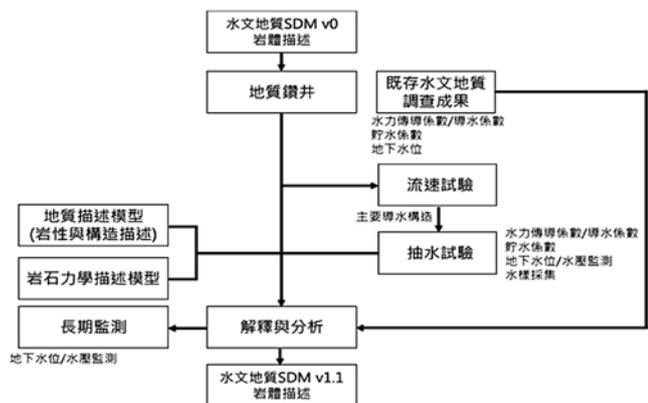


圖 11 執行初次調查前之水文地質描述模型工作規劃流程 [2]

傳輸特性描述模型

岩體傳輸參數特性分析與模式評估

在國際高放處置安全評估中，假設核種由處置場外釋的過程 (圖 12)，將經由岩體中的裂隙域 (Hydraulic Conductor Domain, HCD) 和岩石域 (Hydraulic Rock Domain, HRD)，最終經由近地表之土壤域 (Hydraulic Soil Domain, HSD) 傳輸至生物圈，而天然障壁 (地質圈) 之遲滯能力主控於岩層與土壤傳輸特性，對應將影響傳輸至生物圈的時間與放射性核種的活度。地質圈之遲滯能力是選址過程中所需考慮的要素之一，受到裂隙之通道水流效應、岩體之擴散與延散特性、岩體對於核種的吸附特性、遲滯特性等影響，均是性能評估與安全評估的關鍵影響因子 (圖 13)。因此，如何有效獲得研究區域天然障壁之傳輸特性與遲滯能力，對於後續傳輸特性描述模型之建立具有關鍵影響。一般常以示蹤試驗與岩石吸附試驗等方法，來獲得岩體中裂隙域與岩石域之傳輸特性與遲滯能力，以利後續建置傳輸特性場址描述模型。示蹤試驗示意如圖 14。

土壤或岩屑層傳輸特性分析與模式評估

水文地質空間通常可分為裂隙域 (HCD)、岩石域 (HRD) 與土壤域 (HSD)，SKB [39] 提到瑞典 Forsmark 的土壤域 (HSD) 約在地下 0 m 至地下 20 m 的深度

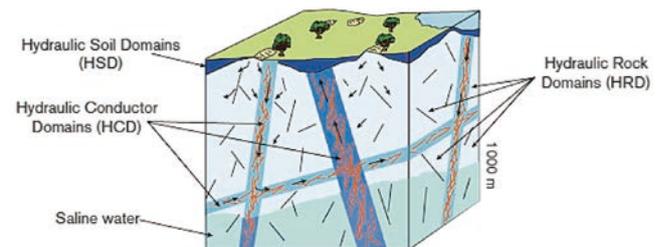


圖 12 研究區域之裂隙域 (HCD)、岩石域 (HRD) 與土壤域 (HSD) 示意圖 [2]

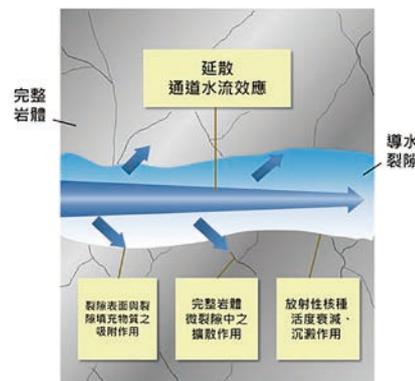


圖 13 核種於導水裂隙中傳輸所需考慮之作用機制 [2]

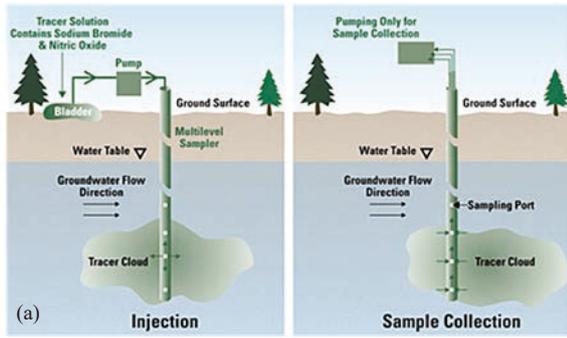


圖 14 (a) 單孔示蹤試驗示意圖；(b) 跨孔示蹤試驗示意圖

資料來源：(a) USGS: <https://www.usgs.gov/media/images/single-well-tracer-test>,
 (b) USGS: https://toxics.usgs.gov/highlights/contamination_sim2.html

區間中，此區域係由土壤介質所組成的岩屑層，描述溶質在土壤域（HSD）的傳輸情形通常使用溶質平流-延散方程式來表示，方程式中重要參數為孔隙率、延散係數與分配係數（吸附係數）：延散係數將影響著核種或是溶質在孔隙介質的傳輸特性；分配係數（Distribution Coefficient）為一旦核種進入土壤域（HSD）後，描述岩屑層的吸附特性；孔隙率則與土壤孔隙介質之含水量、流通量與滲透率有關，將影響著核種或溶質的傳輸速率。最後將區域地質特性之數值地形模型與地表系統之岩屑層分布結果，搭配研究區域的土壤樣本之孔隙率、延散係數與分配係數（吸附係數）的量測，據以建立土壤分類與土壤傳輸單元，以提供後續數值模式分析使用。

傳輸特性參數特徵化與溶質傳輸描述模型建置

由於不同岩體具備不同的傳輸特性，考量地質圈之 FEPs 需評估溶解物種的平流傳輸與混合、裂隙與岩石基質溶解物種的擴散傳輸、物種形成與吸附及膠體作用等影響，因此，基於國內外研究成果，及現地示蹤劑試驗數據、岩石吸附試驗與土壤延散試驗，進行傳輸特性參數率定，建置不同尺度之傳輸特性描述模型，並依循國外建置流程（如圖 15）建置傳輸特性描述模型。

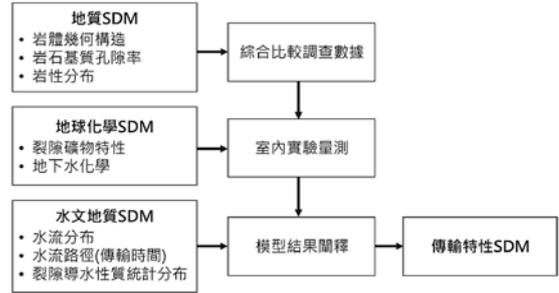


圖 15 傳輸特性場址描述模型所需資訊與建置規劃流程 [2]

地表系統描述模型

地表系統空間分布特性與三維數值分析

大氣中的水以降水、蒸發散、入滲及逕流等形式循環（圖 16），不斷在大氣、陸地及海洋之間交換，因此地表水、地下水及氣象長期且穩定的監測及不同季節之變化情形，對於研究區域因應未來處置設施之長期演化與安全評估需求，扮演著重要的角色。據此須評估土壤厚度分布及分析土壤樣本試驗參數，以及取得長時間之氣象、地表水及地下水的監測數據，以瞭解各式監測資料之歷時變化，方能建立本土地表系統空間分布特性及三維數值分析。

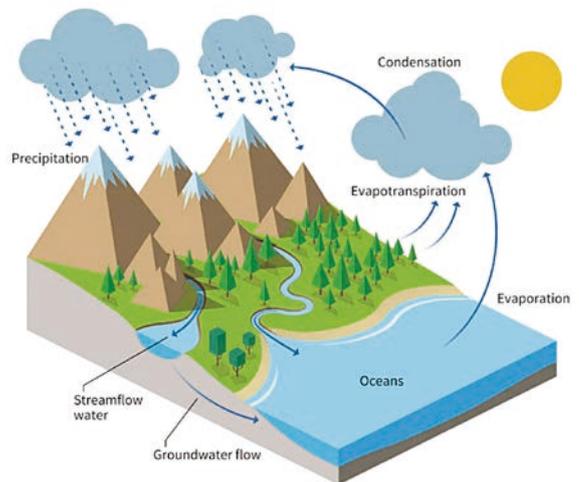


圖 16 大氣、地表水、地下水之水循環分布圖
 資料來源：<https://npwa.org/water-cycle/>

區域地表剝蝕速率評估

由地形演育觀點或依據地殼均衡原理可知地表抬升與構造有關，亦可能與剝蝕有關（如圖 17）^[40]，但不論地殼抬升與否，地表剝蝕（denudation）皆會造成處置設施靠近人類生活圈（如圖 18），其行為包含固體或溶質的形式流失的土地質量^[41]、風化（weathering）、搬運（transportation）及侵蝕（corrasion），故臺灣常見之地表

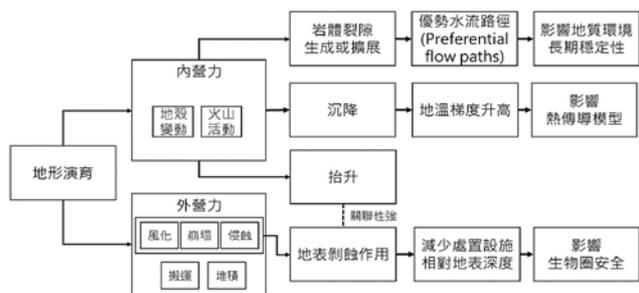


圖 17 地形演育造成區域地表抬升或沉降之影響

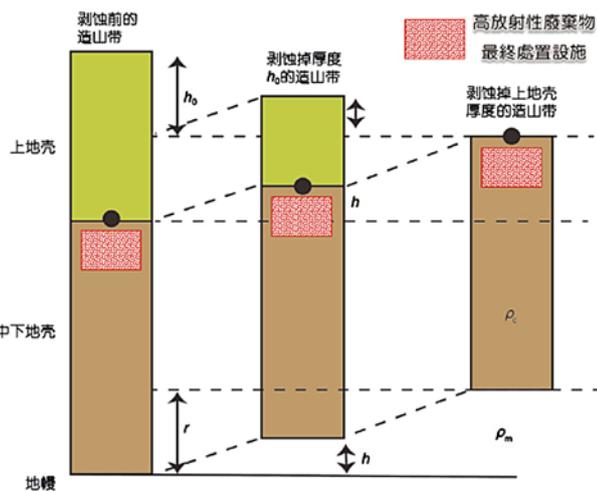


圖 18 地表剝蝕造成用過核子燃料最終處置設施靠近人類生活圖示意圖

資料來源：重繪自劉靜等人 [42]

剝蝕的行為，如：土壤沖蝕或基岩剝蝕、河床下刷或側淘、土石流及崩塌等。

此外，若以一個氣候循環的為分界，地表高程變化量可分為兩類評估方法，超過者為無法區隔侵蝕速率及抬升速率且需配合定年之長時間尺度推估法，另一者屬於需要分別量測地表抬升 / 沉降量及地表剝蝕 / 堆積量之短時間尺度監測法（如圖 19），且部分方法於臺灣地區已有研究成果（如圖 20）。但前述短時間尺度之地表抬升 / 沉降監測資料分布較為零散，且地表剝蝕多位於歷史災害發生地點，故須有長期的觀測數據方能具體評估最終處置設施之適宜性。

地表系統參數特徵化與地表系統描述模型建置

目前在高放處置計畫中之地表系統研究相對缺乏，對於崩積層厚度與地下水補注量皆採單一數值假設，此簡化假設均會影響地表水文與地下水文循環關係，亦間接影響處置設施的長期圍阻安全功能之評估結果，一旦處置設施發生圍阻失效的情形，放射性核種藉由地下水，經母岩之裂隙傳輸至地表後，亦將隨

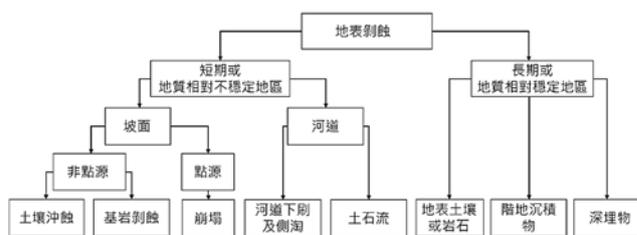


圖 19 短期及長期地表剝蝕評估對象分類示意圖

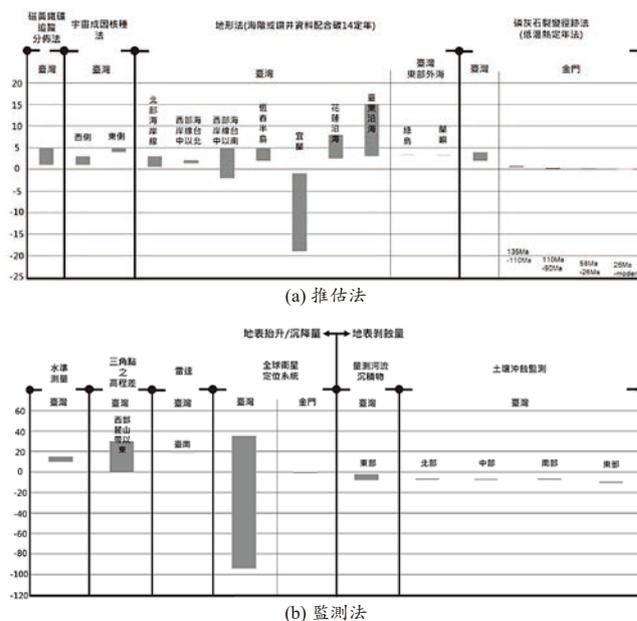


圖 20 地表高程變化量之推估法及監測法應用於臺灣地區前人成果圖（資料來源：[43-63]）

著地表河川流向進行傳輸，造成生物圈中對應的關鍵群體與曝露劑量之影響。為針對處置設施之長期安全評估，及滿足地下水文與生物圈發展相關模式需求，應取得完整的地表系統量測數據與觀測資料，進行地表系統模型參數率定，建置不同尺度之地表系統描述模型（如圖 21）。

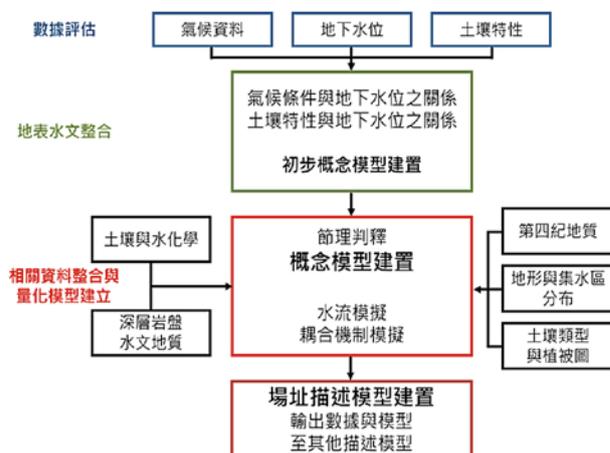


圖 21 地表系統與近地表水文場址描述模型建置概念流程

生態系統描述模型

生態系統調查資料間分布之數值模擬

生物圈安全評估的主要目的是評估當放射性核種自圍障壁釋放後，放射性核種進入生物圈環境，使人類或其他物種接受輻射曝露，增加輻射對其健康危害之風險。評估內容將可作為生物圈完整描述和分析，並評估不同放射性核種將導致人類或生物圈物種可能接受之輻射劑量，進而提供安全評估其輻射導致健康危害之年風險。因此，生態系統描述模型需包括生態系統模型架構、主要傳輸途徑、地景模型及生態系統參數。生物圈核種傳輸之起點是指放射性核種由近場釋出到地質圈再遷移進入連通之地景發展生態系統。對於生物圈的主要組成部分如圖 22 所示，相關數據蒐集與生態調查的內容，包括：植物相生態模式、動物相生態模式、農林漁牧業分布與土地使用型態模式等，利用各種生態模式所獲得之森林分布與農林漁牧業分布等資料，搭配水體分布資訊，可進行整合性分析，建立地景模式；而搭配地景模式，得以研究生態系統調查資料間分布及進行數值模擬。

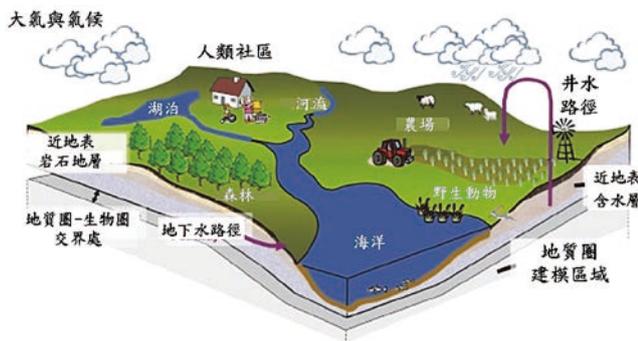


圖 22 生物圈組成示意圖

1. 植物相生態模式

植物生態系統為核種外釋後之生態傳播路徑與關鍵群體之選擇，亦屬生物圈重要的一環。植物相調查以物種為對象，須將某一地區所有植物種類列出清單，詳細記錄每一物種的族群數量、族群結構、族群分布、族群動態及生育環境等基本資料。而植群調查則以植物社會（一群對環境需求相似的植物集合體）為對象，利用取樣的方式，調查某一地區所有植物社會，並記錄每一種植物社會的組成、結構、分布等，並推測各植物社會演替動態及植物社會間的相互關係。

2. 動物相生態模式

動物生態系為核種外釋後之生態傳播路徑與關鍵

群體之選擇，亦屬生物圈重要的一環。因此，在進行生態系統特徵化評估時，為完整描述生物圈特性，並評估不同放射性核種將導致人類或其餘物種可能接受之輻射劑量，透過安全評估分析核種外釋輻射導致其健康危害之年風險。

3. 農林漁牧業分布與土地使用型態模式

在生物圈描述模型的建構方面，研究區域內農林漁牧業活動之分布資料，包含：土地使用型態資料、作物栽種與動物飼養、人口與聚落分布調查、農產型態及畜牧型態調查資料等，可代表人類在研究區域內的活動型態，以及在放射性核種釋出後，人類可能接觸、吸入或攝入放射性核種之途徑，並分析各項參數變動之影響因素，探討參數間的關聯性，建立農林漁牧業分布與土地使用型態模式。

4. 地景模式

有鑑於地景演化議題，涵蓋許多元素的交互影響，其中水體分布資訊、森林地景變遷（forest landscape change）與地質模擬（geology simulation）均為重要的議題，同時，考量演化分析受時間、空間與人為因素等三大主軸之影響，依據特定研究區與尺度各自發展出不同的模式與應用，故有不同的參數選定、演算法、不確定性及情境分析等時空交互作用所構成的關鍵議題。地景模式（如圖 23）須利用其他生態模式所獲得之森林分布與農林漁牧業分布資料，搭配水體分布資訊，進行整合性的分析，作為生態系統調查資料間分布及進行數值模擬研究之依據。

生態系統描述模型建置

生物圈係為處置系統核種釋出經由工程障壁至天然障壁，再由地質圈外釋出的受體。生物圈評估內容須確定該核種污染物在環境中的分布，並確定與處置系統

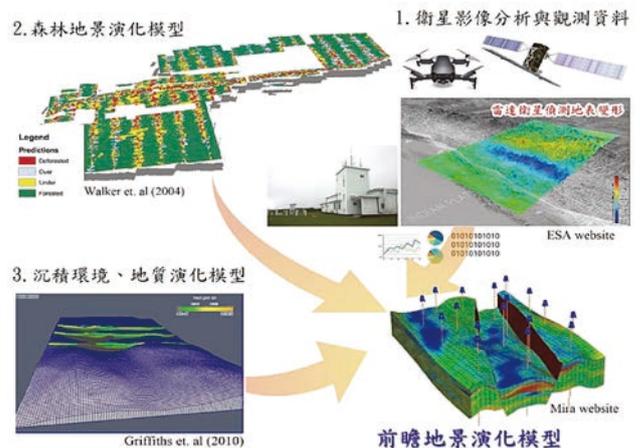


圖 23 地景演化模型示意圖

有關之傳輸終點。這些終點包括潛在環境濃度和人類及其他生物體的潛在曝露途徑。在評估過程中，放射性核種通過生物圈的遷移需要進行模擬預測，以便能夠估計環境介質（例如土壤或地表水）中的核種濃度。這些濃度用以估計關鍵群體（可能最易受輻射的群體）和非人類生物群的輻射接收劑量。因此，生態系統描述模型為放射性核種從深層處置系統外釋的潛在後果提供環境背景條件。為了研究此環境背景條件，需分析地景地表系統內部和之間的物質通量，任何處置系統之生物圈可分為三大生態系統：陸地、地表水（包括溪流、河流和湖泊）和河口海岸海洋系統，如圖 24 所示。

在我國尚未選定高放處置場階段，先行建立生物圈生態系統特徵化與模組，可預先完成生物圈安全評估有關之場址描述模型技術發展。針對生態系統植物相、動物相、農林漁牧業分布與土地使用型態及地景模型進行基本資料調查，並再使用特徵化技術與描述模型建置方法（圖 25），除單個生態系統外，並針對確定特定生態系統或子生態系統內部和不同生態系統間之轉移通量的機制和動態建構模式，以便能對生物圈系統能有長期持續的認知與評估。

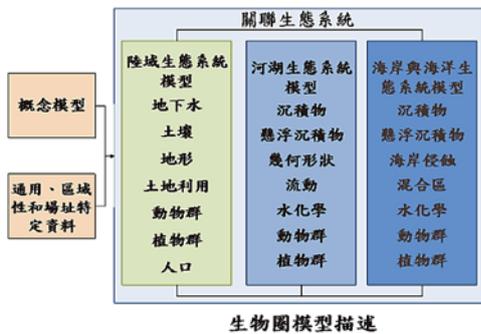


圖 24 生物圈模型描述概念示意圖

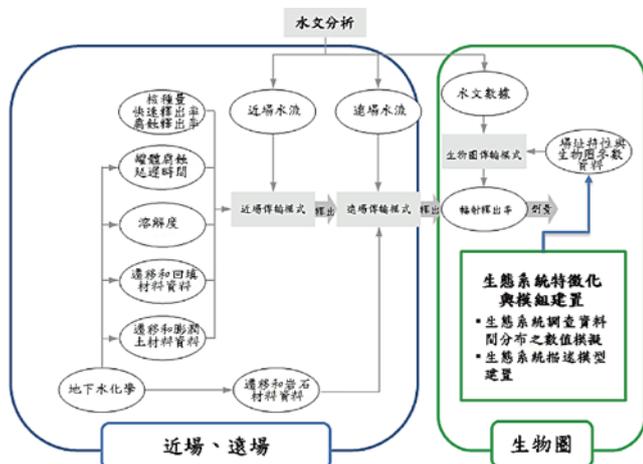


圖 25 近場、遠場及生物圈安全評估作業之模式計算流程

現階段發展之關鍵技術

高階核廢料處置場址模型對於岩體裂隙與優勢水流路徑必須詳細調查，完整且熟稔的孔內水文地質調查技術即可掌握關鍵的特性及參數。針對建構合理化之裂隙岩體模型，地表露頭及孔內攝影調查量測之裂隙位態分布與孔內地下水流速調查量測之垂直流速數據最為關鍵，以下分別說明三種量測技術之發展情況。

UAV 光達之露頭調查技術

為建置研究區之離散裂隙網路模型 (Discrete Fracture Network, DFN)，地表露頭調查為獲取裂隙特性最直接、有效且可信的方法，然傳統之露頭調查常碰到，雖有完整露頭，但因人力難以到達坡腹或坡頂，以致於無法獲得完整露頭之所有裂隙數據，僅能以地面可量測處之資料進行分析，但此做法可能受到局部露頭的裂隙出露狀況影響統計結果，且人力量測次數仍屬有限。近年無人機 (UAV) 承載能力與飛行穩定性大幅提升，又因光達 (LiDAR) 模組微型化，故以無人機光達 (Unmanned Aerial Vehicle Light Detection And Ranging, UAV LiDAR) 可針對完整露頭施測，據以進行完整露頭三維點雲模型建置，進而分析萃取完整露頭之裂隙數據資料。

無人機光達方法之三維半自動分析方面，將可建置完整露頭之三維點雲模型並分析其裂隙分布特性，首先於室內作業階段預先規劃施測航線以及地面控制點布設位置，其施測範圍將包含傳統二維視窗法範圍，以供比對分析使用。室外作業時，將採用同時搭載 IMU 與即時動態定位技術 (Real Time Kinematic, RTK) 之 UAV LiDAR 設備，於完成地面控制點之布設後，以地面 RTK 設備量測地面控制點之坐標，並依據規劃之航線施測。施測完成之三維點雲模型將進行其精度檢核，並於編修及濾除植生之點雲後，產製剝除植生後之完整露頭三維點雲資料 (圖 26)。基於空間中至少三個點便可形成一個面的概念，可利用點雲資料進行裂隙面的萃取 (圖 27)，如片理、解壓節理，以及其他裂隙，而為提高裂隙面的代表性，亦須依據各露頭之岩石特性來訂定每個裂隙面至少所需包含的點雲數量，以避免萃取到由太少點雲所構成的零碎面。

為了確保前述無人機光達方法之三維半自動分析成果與二維視窗法之人工量測成果有其一致性，以確信可利用完整露頭三維點雲資料來進行所有裂隙萃取面的組

數、延伸性、間距等特性分析，後續亦須利用兩種分析成果進行比對分析（圖 28），以確認探討人工量測與半自動分析之誤差，進而降低量測之不確定性 [64,65]。

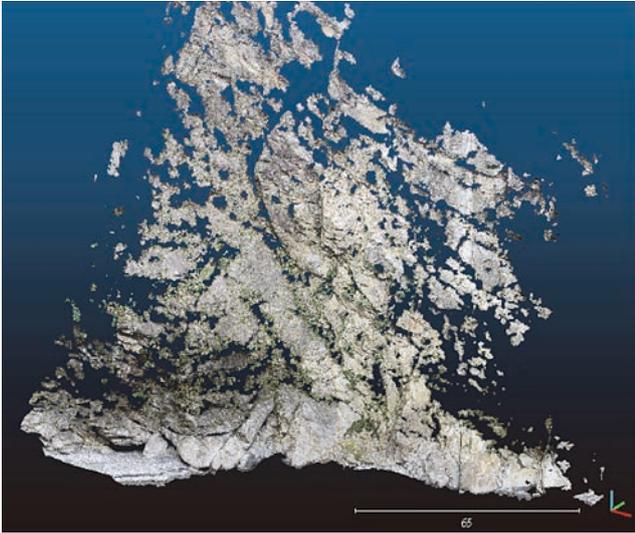


圖 26 完整露頭之三維點雲模型

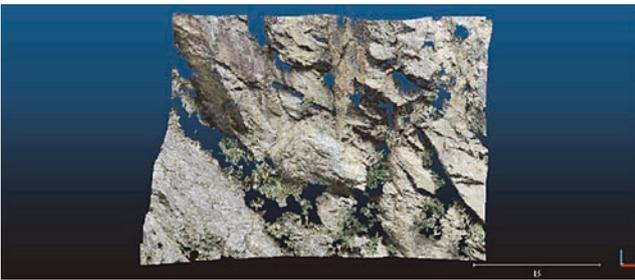


圖 27 利用三維點雲資料進行裂隙面萃取之成果示意圖

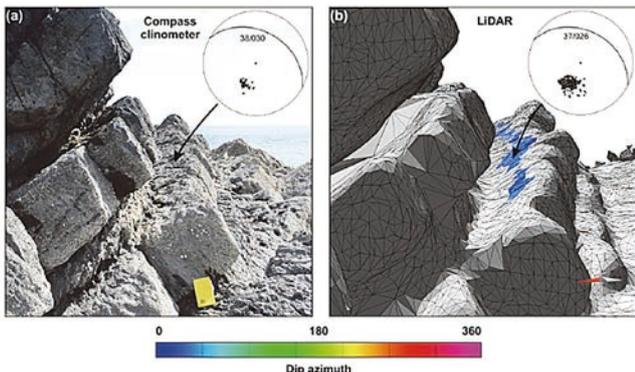


圖 28 不連續面位態之人工量測、LiDAR 模型半自動分析成果比對示意圖 [64]

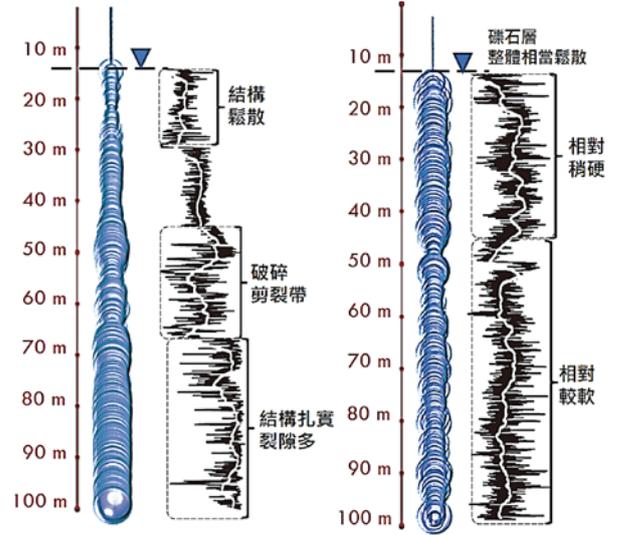


圖 29 擬三維岩體結構顯影。(左) 裂隙岩層；(右) 岩屑層

孔內攝影調查之三維成果展示

孔內攝影調查技術依其功能可分為光學式及音射式兩種，一般來說，除地下水位太深而以光學式探頭進行調查外，常以音射式進行側錄，其優點為可不受水質濁度影響而獲取裂隙位態分布及可由音波反射振幅之結果進階分析獲得岩體結構特徵，從最初僅能顯示地層結構相對鬆散與堅硬之擬三維顯影（圖 29），至最新的全視角三維結構顯影技術（圖 30），已可整合位態資訊、井徑變化及內寬大小呈現出真實地層細緻的三維裂隙分布結構特徵，大幅提升孔內攝影判釋成果的易讀性及工程應用的便利性，並可與工程規劃階段所建置之裂隙岩體分析模型進行驗證比較，提高規劃結果的可信度。

孔內高精度地下水流速調查

藉由孔內攝影之三維岩體結構特徵結果可掌握地層主要裂隙區段及位態分布，進而產製 Geo-DFN，惟研究場址的地下水流動特性往往是影響工程規劃設計與評估成果的關鍵要素，且如何從 Geo-DFN 結合地下水流動特性轉化為 Hydro-DFN，為工程分析與設計的重點研究之一，而孔內地下水流速調查技術為最直接且可獲得地下岩層各深度流動特性之方法，可分為自然流場與抽水狀態兩種量測方式，其中，以抽水狀態對提升透水裂隙之解析能力有較佳之效果，然而在流速儀量測時獲得的流速（流量）資料為量測點以下地層所提供，因此每個量測位置容易受到其下方區段出水量干擾，降低其解析能力。

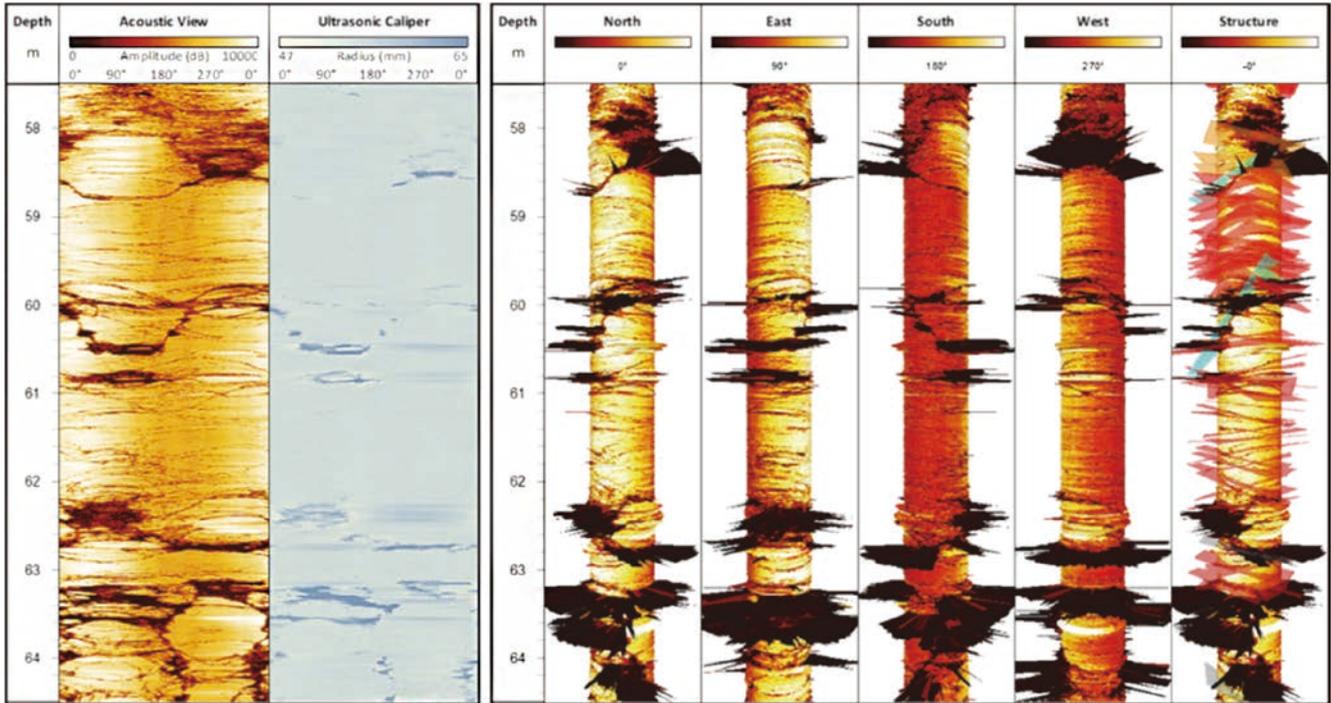


圖 30 全視角三維岩體結構特徵 (結合井徑調查)

據此，國內外專家學者分別研發相關具量測特定區段範圍之流速裝置，如圖 31 所示，其中圖 31(a) 為芬蘭 POSIVA 公司針對核廢料處置場址之裂隙水流特性自行研究發展之探測設備，其中並整合單點電阻及導電度之量測功能，屬於多功能之整合式探頭。圖 31(b) 為國內自行研發之封塞水流分離裝置結合既有之商用地下水流速探測設備，於量測時搭配抽水系統，可獲取 10 cm 區段內單一裂隙之高精度地下水流速，對於瞭解優勢水流路徑之區段及關鍵裂隙之流速流量精準度有相當大的助益，將可大幅提升工程設計的可靠度。

結語

隨著國際先進國家（如芬蘭及瑞典等）已取得核廢料處置設施建置執照且刻正執行建設或規劃的階段，臺灣相關高放深層地質處置技術之發展除了仰賴國內具專業技術的產學研團隊外，亦可透過國際交流合作習取實務處置場址之關鍵地質環境特徵調查、分析與評估技術，促使國內各界投入相關技術研究發展。

建立場址描述模型為處置研究最首要且優先的關鍵課題，而其基礎條件則須具備本土完整的各項領域相關試驗及調查數據，因此若可凝聚各研究團隊的專業合作，並搭配合宜的溝通方式，將可達成核廢料安全處置的最終目標。



圖 31 (a) 芬蘭 POSIVA 製作之整合式封塞流速儀 (最小量測區段為 25 cm); (b) 熱脈衝流速儀之封塞水流分離裝置 (最小量測區段為 10 cm)

參考文獻

1. Viswanathan, H.S., Ajo-Franklin, J., Birkholzer, J.T., Carey, J.W., Guglielmi, Y., and Hyman, J.D. (2022). "From fluid flow to coupled processes in fractured rock: Recent advances and new frontiers." *Reviews of Geophysics*, **60**, e2021RG000744. <https://doi.org/10.1029/2021RG000744>.

2. SKB (2001). *Site Investigations—Investigation Methods and General Execution Programme*, SKB Report TR-01-29, 261pp.
3. Ogura, K. (1988). *Expansion of Applicability for Suspensor PS Logging*, OYO Technical Report, pp. 69-98.
4. Kaneko, F., Kanemori, T., and Tonouchi, K. (1990). "Low-frequency shear wave logging in unconsolidated formations for geotechnical applications." In: Paillet, F.L. and Saunders, W.R. (eds.), *ASTM International, West Conshohocken, PA*, pp. 79-98.
5. Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J. (1999). "Multichannel analysis of surface waves," *Geophysics*, **64**, pp. 800-808.
6. Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J., and Ivanov, J. (2007). "Multichannel analysis of surface waves (MASW)—Active and passive methods," *The Leading Edge*, **26**(1), pp. 60-64.
7. Steeples, D.W. and Miller, R.D. (1988). "Seismic reflection methods applied to engineering, environmental, and ground-water problems," *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, pp. 409-461.
8. Palmer, D. (1981). "An introduction to the generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation," *Geophysics*, **46**(11), pp. 1508-1518.
9. Begg, J.G. and Mouslopoulou, V. (2010). "Analysis of late Holocene faulting within an active rift using lidar, Taupo Rift, New Zealand," *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **190**(1-2), pp. 152-167.
10. Grebby, S., Cunningham, D., Naden, J., and Tansey, K. (2012). "Application of airborne LiDAR data and airborne multispectral imagery to structural mapping of the upper section of the Troodos ophiolite, Cyprus," *International Journal of Earth Sciences*, **101**(6), pp. 1645-1660.
11. Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M.H., Loye, A., Metzger, R., and Pedrazzini, A. (2012). "Use of LIDAR in landslide investigations: A review," *Natural Hazards*, **61**(1), pp. 5-28.
12. Scheiber, T., Fredin, O., Viola, G., Jarna, A., Gasser, D., and Api Ska-Viola, R. (2015). "Manual extraction of bedrock lineaments from high-resolution LiDAR data: methodological bias and human perception." *Gff*, **137**(4), pp. 362-372.
13. Yeomans, C.M., Middleton, M., Shail, R.K., Grebby, S., and Lusty, P.A. (2019). "Integrated object-based image analysis for semi-automated geological lineament detection in southwest England," *Computers & Geosciences*, **123**, pp. 137-148.
14. Booth, A.M., McCarley, J.C., and Nelson, J. (2020). "Multi-year, three-dimensional landslide surface deformation from repeat lidar and response to precipitation: Mill Gulch earthflow, California," *Landslides*, pp. 1-14.
15. Chung, M.C., Hsu, S.M., Ku, C.Y., Tan, C.H., and Chi, S.Y. (2008). "Case studies of high resolution acoustic televiewer for geotechnical exploration and core sample correction," *The 3rd International Conference on Site Characterization*, pp. 679-685.
16. Gaillot, P., Brewer, T., Pezard, P., and Yeh, E.C. (2007). "Borehole imaging tools—principles and applications," *Scientific Drilling*, **5**, pp. 1-4.
17. Williams, J.H. and Johnson, C.D. (2004). "Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies," *Journal of Applied Geophysics*, **55**(1-2), pp. 151-159.
18. Munier R. (2004). *Statistical Analysis of Fracture Data, Adapted for Modelling Discrete Fracture Networks, Version 2*, SKB Report R-04-66, 55pp.
19. Fox A., La Pointe P., Hermanson J., and Öhman J. (2007). *Statistical Geological Discrete Fracture Network Model Forsmark Modelling Stage 2.2*, SKB Report R-07-46, 406pp.
20. Tran, N.H., Chen, Z., and Rahman, S.S. (2006). "Integrated conditional global optimisation for discrete fracture network modelling," *Computers & Geosciences*, **32**(1), pp. 17-27.
21. SKB (2014). *Forsmark Site Investigation: Mapping of Borehole Breakouts KFM08D, Processing of Acoustical Televiewer Data from 2007 and 2014*, SKB Report P-14-29, 32pp.
22. Youngs, R.R., Arabasz, W.J., Anderson, R.E., Ramelli, AR., Ake, J.P., Slemmons, D.B., McCalpin, J.P., Doser, D.I., Fridrich, C.J., Swan, F.H., Rogers, A.M., Yount, J.C., Anderson, L.W., Smith, K.D., Bruhn, R.L., Knuepfer, L.K., Smith, R.B., dePolo, C.M., O'Leary, K.W., Coppersmith, K.J., Pezzopane, S.K., Schwartz, D.P., Whitney, J.W., Olig, S.S., and Toro, G.R. (2003). "A methodology for probabilistic fault displacement hazard analysis (PFDHA)," *Earthquake Spectra*, **19**(1), pp. 191-219.
23. Nasu, N. (1931). "Comparative studies of earthquake motions above ground and in a tunnel," *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, **9**, pp. 454-472.
24. Kanai, K. and Tanaka, T. (1951). "Observations of earthquake motion at different depths of the earth," *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, **28**, pp. 107-113.
25. Komada, H. and Hayashi, M. (1980). *Earthquake Observation Around the Site of Underground Power Station*, CRIEPI report, E379003, pp. 1-34.
26. Matsunami, K., Zhang, W., Irikura, K., and Xie, L.L. (2003). "Estimation of seismic site response in the Tangshan area, China, using deep underground records," *Bulletin of the Seismological Society of America*, **93**, pp. 1065-1078.
27. Atkinson, G.M. and Kraeva, N. (2010). "Ground motions underground compared to those on the surface: A case study from Sudbury, Ontario," *Bulletin of the Seismological Society of America*, **100**(3), pp. 1293-1305.
28. Aydan, Ö., Ohta, Y., Geni, M., Tokashiki, N., and Özbayir, K. (2010). "Response and stability of underground structures in rock mass during earthquakes," *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **43**(6), pp. 857-875.
29. SKB (2002a). *Site Investigations—Strategy for Rock Mechanics Site Descriptive Model*, SKB Report TR-02-01, 150pp.
30. SKB (2006). *Oskarshamn Site Investigation—Modal and Geochemical Analyses of Drill Core Samples 2006 and Updated Bedrock Map of the Laxemar Subarea*, SKB Report P-06-279, 37pp.
31. SKB (2007). *Oskarshamn Site Investigation—Modal and Geochemical Analyses of Drill Core Samples 2007 and ⁴⁰Ar/³⁹Ar Dating of a Dolerite*, SKB Report P-07-191, 25pp.
32. Shao, W.Y., Chung, S.L., Chen, W.S., Lee, H.Y., and Xie, L.W. (2015). "Old continental zircons from a young oceanic arc, eastern Taiwan: Implications for Luzon subduction initiation and Asian accretionary orogeny," *Geology*, **43**(6), pp. 479-482.
33. SKB, (2000). *Geoscientific Programme for Investigation and Evaluation of Sites for the Deep Repository*. SKB Report TR-00-20, 115pp.
34. SKB (2002b). *Hydrogeochemical Site Descriptive Model—A Strategy for the Model Development during Site Investigations*, SKB Report R-02-49, 63pp.
35. Berkowitz, B. (2002). "Characterizing flow and transport in fractured geological media: A review," *Advances in Water Resources*, **25**(8-12), pp. 861-884.
36. 工研院 (2015) · 用過核子燃料最終處置計畫潛在處置母岩特性調查與評估階段—潛在母岩特性調查 (104 ~ 107 年度計畫) · SNFD2017 參考案例及數據彙整說明報告, 表二: 地質概念模式及特性數據。
37. 台電公司 (2017) · 用過核子燃料最終處置計畫—潛在母岩特性調查與評估階段—105 年度計畫成果報告 (修訂二版) · 共 388 頁。
38. SKB (2010). *Data Report for the Safety Assessment SR-Site*, SKB Report TR-10-52, 458pp.
39. SKB (2008), *Site Description of Forsmark at Completion of the Site Investigation Phase*, SKB TR-08-05, 539pp.
40. England, P. and Molnar, P. (1990). "Surface uplift, uplift of rocks, and exhumation of rocks," *Geology*, **18**, pp. 1173-1177.

41. Anderson, R.S. and Anderson, S.P. (2010). *Geomorphology—The Mechanics and Chemistry of Landscapes*, first edition, 651pp.
42. 劉靜、張金玉、葛玉魁、王偉、曾令森、李根、林旭 (2018), 「構造—氣候—地表過程相互作用的交叉研究」構造地貌學, 第 63 卷, 第 30 期, 第 3070-3088 頁。
43. 樓穎慧 (1989), 大屯火山區海階的碳十四定年研究, 國立臺灣大學地質研究所, 碩士論文, 共 78 頁。
44. 陳于高 (1993), 晚更新世以來南臺灣地區海面變化與新構造運動研究, 國立臺灣大學地質學研究所博士論文, 共 158 頁。
45. 劉佳怡 (2006), 臺灣西北部海岸階地的地形學研究, 中國文化大學地質研究所碩士論文, 共 80 頁。
46. 蔡佳穎 (2013), 臺灣東北部之海階地形及其新構造意義, 國立臺灣師範大學地球科學系碩士論文, 共 215 頁。
47. 蘇清全 (2011), 蘭陽平原末次冰期以來沉積環境變遷與構造作用特性, 國立臺灣大學地質學研究所碩士論文, 共 129 頁。
48. 謝孟龍、劉平妹 (2010), 花東海岸全新世地殼上升速率的再檢討, 經濟部中央地質調查所彙刊, 第 23 號, 第 165-199 頁。
49. Liew, P.M., Hsieh, M.L., and Lai, C.K. (1990). "Tectonic significance of Holocene marine terraces in the Coastal Range, eastern Taiwan," *Tectonophysics*, **183**, pp. 121-127.
50. Liew, P.M., Pirazzoli, P.A., Hsieh, M.L., Arnold, M., Barusseau, J.P., Fontugne, M., and Giresse, P. (1993). "Holocene tectonic uplift deduced from elevated shorelines, eastern Coastal Range of Taiwan," *Tectonophysics*, **222**, pp. 55-68.
51. Yamaguchi, M. and Ota, Y. (2004). "Tectonic interpretations of Holocene marine terraces, east coast of Coastal Range, Taiwan," *Quaternary International*, **115**, pp. 71-81.
52. 楊清淵 (2018), 兩萬年以來花東海岸北段的海階演化, 國立臺灣大學地質學研究所碩士論文, 共 171 頁。
53. 陳思婷 (2018), 晚更新世以來花東海岸南段的階地演化, 國立臺灣大學地質學研究所碩士論文, 共 163 頁。
54. 台電公司 (2015), 用過核子燃料最終處置計畫—潛在處置母岩特性調查與評估階段—潛在母岩特性調查 (104~107 年度計畫) — SNFD2017 參考案例及數據彙整說明報告—表二: 地質概念模式及特性數據, SNFD ITRI TR2015 0001, 108 年 3 月, 共 297 頁。
55. Ching, K.E., Hsieh, M.L., Johnson, K.M., Chen, K.H., Rau, R.J., and Yang, M. (2011). "Modern vertical deformation rates and mountain building in Taiwan from precise leveling and continuous GPS observations, 2000-2008," *Journal of Geophysical Research*, **116**, B08406, pp. 1-16.
56. 饒瑞鈞、景國恩、謝宗訓、余致義、侯進雄、李元希、胡植慶、詹瑜璋、李建成、洪日豪 (2003), 台南台地的地表變形與地震潛能, 活動斷層調查研究專刊, 經濟部中央地質調查所特刊, 第十四號, 第 147-156 頁。
57. 陳惠芬 (1984), 「從三角點檢測成果見到的臺灣的地盤升降」, 紀念徐鐵良先生榮退地質學論文集, 第 127-140 頁。
58. Fruneau, B., Pathier, E., Raymond, D., Deffontaines, B., Lee, C.-T., Wang, H.-T., Angelier, J., Rudant, J.P., and Chang, C.-P. (2001). "Uplift of Tainan Tableland (SW Taiwan) revealed by SAR interferometry," *Geophysical Research Letters*, **28**, pp. 3071-3074.
59. 國土測繪中心 (2019), 內政部國土測繪中心 108 年度精進現代化 TWD97 國家坐標系統變位模式採購案工作總報告, 共 290 頁。
60. 台電公司 (2017), 用過核子燃料最終處置計畫—潛在處置母岩特性調查與評估階段—我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告 (SNFD2017 報告), 共 559 頁。
61. 陳炳權 (2017), 造山運動期間地殼動力演化: 以華南沿海金門島為例, 國立臺灣師範大學理學院地球科學研究所碩士論文, 共 103 頁。
62. 水保局 (2016), 105 年水庫集水區土砂環境檢查及治理成效追蹤, 共 473 頁。
63. 水保局 (2017), 106 年水庫集水區土砂環境檢查與評估, 共 524 頁。
64. Cawood, A.J., Bond, C.E., Howell, J.A., Butler, R.W., and Totake, Y. (2017). "LiDAR, UAV or compass-clinometer? Accuracy, coverage and the effects on structural models," *Journal of Structural Geology*, **98**, pp. 67-82.
65. Thiele, S.T., Grose, L., Samsu, A., Micklethwaite, S., Vollgger, S.A., and Cruden, A.R. (2017). "Rapid, semi-automatic fracture and contact mapping for point clouds, images and geophysical data," *Solid Earth*, **8**(6), 1241-1253. 



歡迎加入學會



www.ciche.org.tw
下載入會申請書

e-mail: service@ciche.org.tw

電話: (02) 2392-6325

傳真: (02) 2396-4260

土木水利 雙月刊

向您約稿

本刊出版有關土木水利工程之報導及論文, 以知識性、報導性、及聯誼性為主要取向, 為一綜合性刊物, 內容分工程論著、技術報導、工程講座、特介、工程新知報導及其他各類報導性文章及專欄, 歡迎賜稿, 來稿請 email: service@ciche.org.tw 或寄 10055 台北市中正區仁愛路二段 1 號 4 樓, 中國土木水利工程學會編輯出版委員會會刊編輯小組收, 刊登後將贈送每位作者一本雜誌, 不再另致稿酬; 歡迎以英文撰寫之國內外工程報導之文章, 相關注意事項如後:

- 工程新知及技術報導, 行文宜簡潔。
- 技術研究為工程實務之研究心得, 工程講座為對某一問題廣泛而深入之論述與探討。工程報導為新知介紹及國內外工程之報導。
- 本刊並歡迎對已刊登文章之討論及來函。
- 工程論著及技術研究類文章, 由本刊委請專家 1~2 人審查, 來文請寄電子檔案, 照片解析度需 300dpi 以上。
- 文章應力求精簡, 並附圖表照片, 所有圖表及照片務求清晰, 且應附簡短說明, 並均請註明製圖者及攝影者, 請勿任意由網站下載圖片, 以釐清版權問題。