



放射性廢棄物地質處置之 地下水流動與傳輸分析

倪春發／國立中央大學應用地質研究所 教授兼任所長

余允辰／國立中央大學應用地質研究所 博士生、行政院原子能委員會核能研究所 副研究員

李奕賢／國立中央大學環境研究中心 副研究員

Vu, Phuong Thanh／國立中央大學應用地質研究所 碩士

放射性廢棄物深地層處置評估時，處置母岩通常包含複雜裂隙系統，處置母岩的地下水流動與污染傳輸分析是評估處置場址安全性的重要步驟之一。本研究藉由蒐集國際上放射性廢棄物地質處置相關的安全原則，概述與地下水流動及污染傳輸評估相關的法令與規範，說明地下水流動及污染傳輸在此議題的重要性。此外，亦透過資料蒐集與評析，簡述放射性廢棄物地質處置的概念，分類介紹國際上使用核能國家選擇處置母岩種類與其特性。本研究最後專注於處置母岩的潛在地下水流動與污染傳輸機制議題，比較不同地下水流動與污染傳輸評估方法在裂隙岩層的應用與限制，並提出放射性廢棄物深地層處置工作的待解決議題與重要挑戰。

關鍵詞：放射性廢棄物、地下水流動、污染傳輸、地質處置、裂隙岩層

The groundwater flow and transport analysis is one of the key processes for safety assessment of the radioactive waste in geological disposal sites, where the complex fracture systems are typically observed. The study collects and reviews international safety disposal regulations and standards, and addresses the essential issues in the guidelines relevant to the groundwater flow and transport behavior. In the study, the concepts of different types of geological disposals were introduced and the consideration of different host rocks in different countries were evaluated to show the site-specific conditions. The study then focuses on the issues of the groundwater flow and transport mechanisms in host rocks. The applications and limitations of simulation models were assessed based on different types of models in quantifying groundwater flow and transport in fractured rocks. Potential issues and challenges had been proposed to address the future tasks in assessing the geological disposal of the spent nuclear fuel.

Keywords: Radioactive waste, groundwater flow, transport, geological disposal, fractured rocks.

前言

核能為目前用以發電的能源之一，其原理為利用核燃料的分裂反應放出大量的熱能，經加熱蒸汽產生器中的水變成水蒸氣後，再推動渦輪機轉動，以帶動發電機切割磁場，進一步將機械能轉變為電能。雖然核能發電的過程中不會產生廢氣，但從核燃料的開採（即鈾擴開採）、濃縮、發電、退出爐心等過程，以及核能電廠產

生之運轉廢棄物，各反應器除役之廢棄物等，皆會產生放射性強度不一的廢棄物；此外，工業界、醫院、學校、研究機構等進行同位素應用亦會產生小量的廢棄物，上述的所有廢棄物統稱為放射性廢棄物^[1]。

放射性廢棄物為污染物的一種，若無適當的防護措施，則可能會對人體及環境造成嚴重危害，必須要謹慎處理、貯存與處置，以滿足相關的法令與技術規

範的要求，確保處置場附近生物的生命安全。為了進行放射性廢棄物處置場地下水汙染之防治與管理，考慮場址附近的水文地質條件，使用數學模式對流場及傳輸行為進行量化分析，評估污染物的傳輸行為及可能的化學反應則非常關鍵。相關數學模式分析方法可大略分為解析法（analytical method）及數值法（numerical method）兩種；其中，解析法多用於水文地質條件簡易、傳輸機制相對單純的案例；當地質條件與特性相對複雜（如裂隙或岩脈等），且包含多種須考慮的污染物傳輸與反應機制時，使用數值法為較合適的手段。

本文首先藉由蒐集國際上放射性廢棄物管理中與地下水污染與防治相關的重要法規，說明地下水流動與傳輸分析在此管理議題中的重要性；接著介紹目前通用的地質處置概念，探討地質處置概念中可能面臨的地下水流動與污染物傳輸問題；此外，亦彙整並簡述國際上重要核能國家選定的潛在處置母岩及其特性，說明潛在污染物的傳輸機制，以及目前不同的污染物傳輸評估方法。本研究將著重數值法之說明以及其應用，並藉由實際的案例運算展示數值法在複雜問題中的處理方法與措施，最終提出放射性廢棄物處置目前待解決的重要議題與挑戰。

國際上放射性廢棄物地質處置之相關規範

國際原子能總署（International Atomic Energy Agency, IAEA）在 2006 年訂定核子設施的安全標準，以及其安全相關計畫的基本安全目標、安全原則與安全概念，以作為各會員國奉行之圭臬。其目的是提升核子設施與輻射作業的安全性，以保護人類與環境免於輻射的潛在危害，此一核定版文件稱為基本安全原則（SF-1）^[2]。

針對放射性廢棄物之處置，IAEA 詳細訂定所有類型放射性廢棄物的安全目標以及必須滿足的要求（SSR-5：放射性廢棄物處置）^[3]；並且，特別針對地質處置設施的發展與監管提供指導與建議（SSG-14：放射性廢棄物地質處置設施）^[4]。其中，水文地質被列為重要考慮因子之一，並提到地下水移動機制的評估以及流向與流速的分析，是進行安全評估時的一項重要輸入參數項目。因為污染物最有可能的釋出形式是藉由處置區域的地下水流傳輸^[4]；此外，更針對氣象與水文危害進行特別論述，說明氣象與水文對傳輸的影響（IAEA-SSG-18：核子設施場址評估之氣象與水文危害）^[5]。因此，核能發電國家

在訂定其各自放射性廢棄物處置相關法令與規定時，皆將水文地質條件調查、地下水流動與傳輸模擬議題視為重要的研究項目。

地質處置概念與處置母岩種類及特性

國際上目前公認可行的處置方式為地質處置，此一處置方式較符合道德、環保要求與國際相關法令與規範^[4]。國際上放射性廢棄物多採高、低階兩類放射性廢棄物的分類方式，例如美國、瑞典、西班牙、巴西、保加利亞、捷克等國，不論是何種類型的放射性廢棄物，其整體的處置概念皆以「多重障壁系統」為原則，亦即，將放射性廢棄物與人類生活環境隔離，並使用「工程障壁」及「天然障壁」層層阻絕核種影響人類健康與環境安全（圖 1）^[6]。

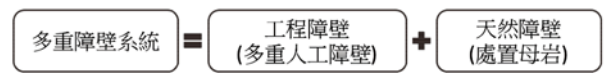


圖 1 多重障壁系統之設計概念

由於高、低放射性廢棄物所含核種半衰期長短與活度大小不同，影響人類環境的嚴重程度及相對應的處置措施也會有所差異。目前低放射性廢棄物採近地表、坑道或海床下處置的設計；其中，工程障壁元件包含盛裝容器、膨潤土混合材料、混凝土處置窖、回填渣料等，而在工程障壁以外則屬天然障壁的範圍（圖 2）^[7]。圖 3 為高放射性廢棄物深地層處置的多重障壁系統概念圖；高放射性廢棄物直接採用深地層處置的方式，亦即，將放射性廢棄物埋藏於深約 300 公尺或更深的穩定地層中，再將高放射性廢棄物盛裝於耐腐蝕、抗圍壓、抗剪力的銅殼廢棄物罐中。在廢棄物罐外層填充透水性極低，核種吸附性佳的緩衝材料，最後再以回填材料填充處置隧道，共同組成工程障壁。在此工程障壁以外則屬天然障壁的範圍，也就是處置區域附近的母岩^[8]。

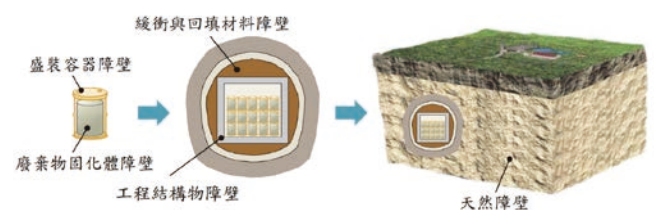


圖 2 低放射性廢棄物處置之多重障壁概念圖^[7]

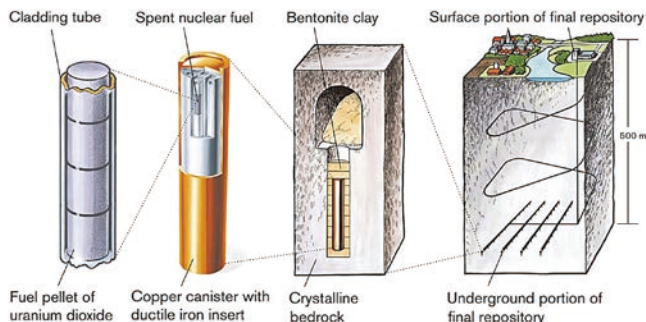


圖 3 高放射性廢棄物處置之多重障壁概念圖^[9]

前述工程障壁系統藉由「隔離」及「圍阻」以避免外部地下水及有害物質的侵入；萬一盛裝低放射性廢棄物的容器或者置放高放射性廢棄物的銅殼廢棄物罐受到損害，則工程障壁系統配合天然障壁同樣可以達到「遲滯」及「吸附」核種的釋出，使核種在到達人類生活圈前，便已衰變至可接受程度。綜上所述，地下水是影響放射性廢棄物是否釋出，以及不幸釋出後的傳輸媒介之一。因此，瞭解地下水如何影響工程障壁系統並造成處置元件的破壞，以及分析潛在核種釋出，遷移至人類生活環境的途徑，為放射性廢棄物潛在地下水污染及防治的重要工作。

工程障壁系統可藉由工程與製造手段生成，但天然障壁則取決於各國的地理位置、地質環境背景、處置策略等決定。目前世界各國在高放射性廢棄物處置母岩的選用可大致分為三類，分別為結晶岩、黏土（或泥）岩及其他類；以下分別簡介這三種母岩的特性與國際上選定作為潛在處置母岩的國家（表 1）：

結晶岩

結晶岩大部分由石英、長石等組成，結構十分緻密，因此透水性甚低，傳輸性質亦不佳，致使污染物在其中傳輸的速度十分緩慢；此外，結晶岩的力學强度高，對於熱、水、力、化等作用也相當穩定，使其成為最多國家首選的潛在處置母岩，使用結晶岩作為處置母岩的國家包括白俄羅斯、中國、捷克、印度、南韓、俄國、西班牙、瑞典及芬蘭等。

雖然結晶岩有低透水性的優點，但是結晶岩中常有長度、寬度不一的裂隙（fracture）分布，這些裂隙的透水性質可能高於岩石基質（matrix）好幾個數量級（order），可成為地下水流的快速通道，若這些大小、尺寸不一的裂隙相互交接成為裂隙系統且延伸至地表，則可能導致污染物有快速傳輸的路徑，此為結晶岩中重要的地下水流動及污染物傳輸所需探究之重要議題。

表 1 處置母岩種類與國家

處置母岩種類	國家
結晶岩	白俄羅斯、中國、捷克、印度、南韓、俄國、西班牙、瑞典及芬蘭等
黏土岩	比利時、保加利亞、法國、匈牙利及瑞士
其他	德國（鹽岩）、美國（凝灰岩）

黏土（或泥）岩

黏土岩大部分由黏土礦物組成，如伊利石、綠泥石及高嶺石等，這些黏土礦物因具有很強的吸附能力，因此能夠大量吸收污染物並有效遲滯其移動；此外，雖然黏土岩中也可能有裂隙的存在，但由於遇水後，岩層內容易自行填塞（自癒）的特性，使其裂隙分布通常較為分散、尺寸也較小，不易相互連通而成為快速地下水流通的裂隙系統。此外，黏土岩的透水性低，地下水在岩層內流動非常緩慢，同樣能夠有效減緩污染物的傳輸速度。

然而，黏土岩的力學強度較低，乾的黏土岩在開挖過程中可能會遇到因力學性質不佳而衍生的工程與營運問題；濕的黏土岩雖然具有自癒能力，但其力學強度將大大減損導致更不利的工程條件，此為黏土岩中重要的議題。國際上選擇黏土岩作為潛在處置母岩的國家則有比利時、保加利亞、法國、匈牙利及瑞士等。

其他

除了結晶岩及黏土岩外，德國將其境內的鹽岩也列為潛在的處置母岩選項之一。鹽岩為蒸發岩（Evaporite）的一種，因原有含礦物質的水體蒸發而形成的化學沉積岩。由於鹽岩同樣具有遇水自癒的能力，雖然力學強度尚可，但同樣在受水侵蝕後會有強度弱化的情事。此外，由於國際上對於鹽岩的研究不如結晶岩與黏土岩豐富，因此對於熱、水、力、化綜合作用下的影響也需要進一步探討。

美國則選擇凝灰岩（tuff）作為潛在處置母岩，凝灰岩為火山碎屑岩系列中的一種，在火山活動過程中，火山碎裂物吹入於大氣中的固化灰份所組成。凝灰岩的力學強度甚高，且岩石基質的透水性低，是被認為具有潛力的處置母岩之一。但其岩體中的裂隙系統也是地下水流動及污染物傳輸的快速通道，且國際上凝灰岩的分布較前述岩類少，對於熱、水、力、化綜合作用下的影響也須進一步探討。

綜上所述，結構緻密的結晶岩具有較高的力學強度，但是裂隙系統是重要的傳輸通道；包含黏土礦物的黏土岩則力學強度較低，會有衍生的工程議題。此兩類處置母岩在國內部分地區都存在，亦為目前國內處置母岩的可能選項。結晶岩為目前國際上較廣泛選用的處置母岩，地下水在其裂隙系統中的流動與污染物傳輸，是非常重要的卻相當複雜的研究課題。因此，本文以結晶岩或所謂的裂隙岩體作為探討對象，說明其常用的污染物傳輸數值方法，並展示相關的分析成果與應用範例。

裂隙岩體中污染物傳輸之數值分析方法

裂隙岩體地下水流及傳輸分析方法可大致區分為離散 (discrete)、連續 (continuum) 與當量網路 (equivalent network) 等模式。地下水流模擬採用的分析模式，通常於汙染物傳輸分析中也同樣依據此模式執行。離散裂隙網路模式，是依據各裂隙幾何參數，建構與現實裂隙岩體相近之離散裂隙網路，假設裂隙岩體是透過多組裂隙面所分割的許多小岩塊構成，而裂隙岩層中的地下水流動與傳輸，則透過裂隙面流動，經由計算裂隙面交錯網路之水流與污染傳輸，進行量化評估。連續模式則將裂隙岩層視為連續孔隙介質 (porous media) 型態，又可分為連續裂隙面以及等效孔隙介質模式兩種。連續裂隙面模式將裂隙網路轉化為多組無限長之裂隙面，組成連通的裂隙網路，大多研究假設此模式為連續正交裂隙面模式。然而，等效孔隙介質模式則是選用代表性體積 REV (representative elementary volume)，在 REV 內視為均勻等效孔隙介質，此一選定的 REV 可以是多個異質性孔隙介質岩塊所組成的裂隙岩體。此類模式常使用於較大尺度模擬範圍，或是裂隙頻率較高之裂隙岩體。當裂隙幾何參數無法有效量測，或是產生極大量且複雜裂隙網路時，可採用此模式解決相關問題。當量網路模式是將原始之裂隙網路採用統計之方式，以交接節點網路或是當量管流概念，獲得空間中線狀的一維管流網路。管流網路中的流量類比於裂隙流量，管徑則類比於裂隙滲透率或開口寬，此一架構在電腦計算能力不高的時代，大大節省電腦計算資源。無論採用何種模式進行裂隙岩體的地下水流模擬，都須仰賴求解地下水水流控制方程式獲得，三維地下水水流控制方程式是依據質量守恆的概念，配合達西定律獲得，有以下形式：

$$\nabla \cdot [K\nabla h] + Q = 0 \quad (1)$$

其中， K 為裂隙的水力傳導係數 [L/T]， h 為總水頭 (L)， Q 為源 / 匯項 [1/T]。而邊界條件可描述如下：

$$h|_{\Gamma_D} = h_D \text{ 與 } [K\nabla h] \cdot n|_{\Gamma_N} = q_N \quad (2)$$

其中， h_D 為定水頭邊界條件 (Dirichlet boundary, Γ_D)， q_N 為定流率邊界條件 (Neumann boundary)， Γ_N 為垂直於邊界的單位向量。起始條件則描述如下：

$$h(x, y, z) = f(x, y, z) \quad (3)$$

其中， $f(x, y, z)$ 為已知的水頭值 [L]。

污染物在裂隙岩體中的傳輸分析依據地下水流場進行，國際上目前主要有兩種模擬污染物在裂隙岩體中傳輸及其濃度的概念，第一種是使用流體質點追蹤 (particle tracking) 方法，先計算流動路徑，為節省計算資源，污染物傳輸行為就以移動路徑進行一維傳輸分析，此一傳輸分析可再配合化學反應模組計算複雜污染反應濃度 [10-17]。

另外一種模擬概念則是直接求解裂隙岩體流場中的移流延散方程式 (advection dispersion equation, ADE)，配合適當的化學反應方程式，求解污染團在裂隙岩體中的傳輸行為 [10,18-22]。相同地，無論採用何種概念進行裂隙岩體的傳輸模擬，都須仰賴求解傳輸方程式獲得，三維地下水污染傳輸控制方程式中，同樣是依據質量守恆的概念，但是依據費克定律 (Fick's law) 獲得，污染物的遷移控制方程式有以下形式：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v\nabla C + \nabla \cdot [D_e \nabla C] + Q_c + R_c \quad (4)$$

其中， C 為液相體積容積濃度 [M/L³]， v 為滲流速度 (seepage velocity) [L/T]， D_e 為延散係數 (dispersion coefficient) [L²/T]， Q_c 為體積容積濃度之源 / 匯項 [M/L³/T]； R_c 為化學反應項 [M/L³/T]。而邊界條件可描述如下：

$$C|_{\Gamma_D} = C_D \text{ 與 } [D_e \nabla C] \cdot n|_{\Gamma_N} = q_C \quad (5)$$

其中， C_D 為定濃度邊界條件， q_C 為定濃度梯度邊界條件。起始條件則描述如下：

$$C(x, y, z) = C_0 \quad (6)$$

其中， C_0 為初始濃度 [M/L³]。

不同分析概念進行裂隙岩體的傳輸模擬，可以是如上式的完整三維地下水傳輸方程式，或者簡化為一維的傳輸方程式，進行流體質點路徑上的傳輸分析。

使用質點追蹤可快速獲得污染物在三維裂隙岩體中複雜的傳輸行為，由於較簡化，計算效率高，故可以執行多組參數敏感度或不確定性分析，藉以瞭解處置區傳輸特性的影響。質點追蹤模擬係假設溶質為不與地下水及母岩反應之粒子，僅跟隨地下水流場進行移動，其控制方程式可表示為：

$$\frac{dX}{dt} = v(X, t) \quad (7)$$

其中， X 為空間中之位置 [L]， t 為時間 [T]。當流場已知的情況下，則可以使用簡易數值方法求解一階偏微分方程式，如簡易的尤拉 (Euler) 方法所描述的一階偏微分方程式如下：

$$X(t + \Delta t) = X(t) + v\Delta t \quad (8)$$

其中， Δt 為特定的時間步階 (time step) [T]。藉由式 (8) 可記錄不同時間步階下質點的位置，再將所有時間步階下質點的線段及傳輸時間加總，即可獲得質點的軌跡總長以及總傳輸時間，並可換算特定時間步階的速度。由於計算方式簡易且快速，質點追蹤係目前溶質傳輸研究中非常普遍的方法之一。

當獲得三維空間的質點軌跡後，即可使用一維的概念執行化學反應計算，最終計算不同傳輸路徑上，流體質點分段的不同化合物的濃度。一維的污染物移流延散反應偏微分控制方程式 (advection reaction dispersion, ARD) 可表示為：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v \frac{\partial C}{\partial x} + D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{\partial q_c}{\partial t} \quad (9)$$

其中， $v \frac{\partial C}{\partial x}$ 表示污染物的移流作用， $D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$ 表示延散作用， $\frac{\partial q_c}{\partial t}$ 為污染物受反應作用的濃度變化。上式 (9) 亦為 PHREEQC 模式中使用的一維分析控制方程式。

測試案例與應用

限於篇幅，本文僅展示不同傳輸分析概念，在裂隙岩層中所獲得的傳輸分析結果。因為裂隙是主要關注分析區域，在結果的呈現上，將以裂隙上的傳輸模擬結果，作為討論依據。

流體質點追蹤法結合化學反應模式分析

為了模擬污染物在複雜裂隙岩體中的傳輸與反應行為，Vu *et al.* [23] 使用 FracMan 軟體作為水流模擬工具，並生成一複雜的三維裂隙系統進行穩態地下水流

場分析，並使用質點追蹤模組 MAFIC 模擬污染物的傳輸路徑，獲得污染物的傳輸路徑與軌跡。接著使用 PHREEQC 進行污染物的反應模擬，此法可將三維的傳輸軌跡降維度成為一維的線段，分析裂隙岩層中複雜的污染物隨時間反應與遷移情況。

當獲得三維空間中的質點傳輸路徑後，即可使用化學反應模組如 PHREEQC 進行後續的化學反應計算。PHREEQC 是常見用於執行化學反應分析的程式之一，其由美國地質調查所 (U.S. Geological Survey) 開發的免費軟體，在國際上的化學反應模擬研究中受到廣泛的應用並獲得良好的結果。PHREEQC 可計算物質形成種類與礦物的溶解、飽和指數，並可計算一維條件下物質的傳輸與反應，最終計算不同傳輸路徑上的不同化合物的濃度。

圖 4 為流體質點追蹤法結合化學反應模式分析案例之概念模式與裂隙網路。在此假想測試例中，分析案例的模擬範圍 $5,000 \times 5,000 \times 2,000$ m，假想例處置場位於模擬區域中央 $500 \times 500 \times 500$ m (圖 4(a))。模擬區域的地下水由左右兩側定水頭邊界主控，由左側的高水頭邊界 ($h = 1,000$ m)，流向右側低水頭邊界 ($h = 950$ m)。流體質點釋放位置位於處置場中央。圖 4(b) 為 FracMan 生成之全模擬區域裂隙網路分布。在此案例中，裂隙網路模式僅分析處置場的範圍，而在處置場之外，採用升尺度後的連續模式分析；亦即，以網格尺寸作為 REV，將裂隙分布轉換成網格上的等效孔隙介質參數如水力傳導係數。

圖 5 為分析案例之水流流場分析結果與質點傳輸路徑圖。圖 5(a) 為模擬範圍內三維的水流流場分布。此一結果顯示，雖然邊界條件為定水頭設定，整體水流趨勢是由左側往右側流動，但裂隙分布使得流場具高度非均

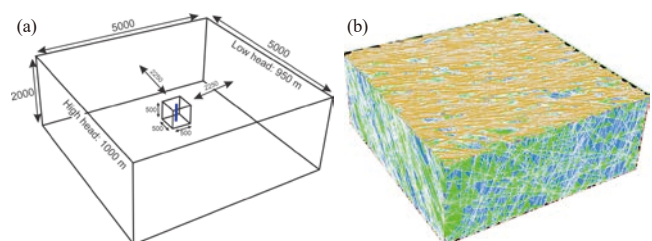


圖 4 流體質點追蹤法結合化學反應模式分析案例之概念模式與裂隙網路：(a) 分析案例之模擬範圍 $5,000 \times 5,000 \times 2,000$ m，假想例處置場位於模擬區域中央 $500 \times 500 \times 500$ m，區域地下水由左側高水頭邊界 ($h = 1,000$ m)，流向右側低水頭邊界 ($h = 950$ m)，流體質點釋放位置位於處置場中央；(b) 由 FracMan 生成之全模擬區域裂隙網路分布。此案例中，裂隙網路模式僅分析處置場址的範圍，處置場址之外，採用裂隙網路升尺度後的連續模式分析。亦即，以網格尺寸為 REV，將裂隙分布轉換成網格上的等效孔隙介質參數。

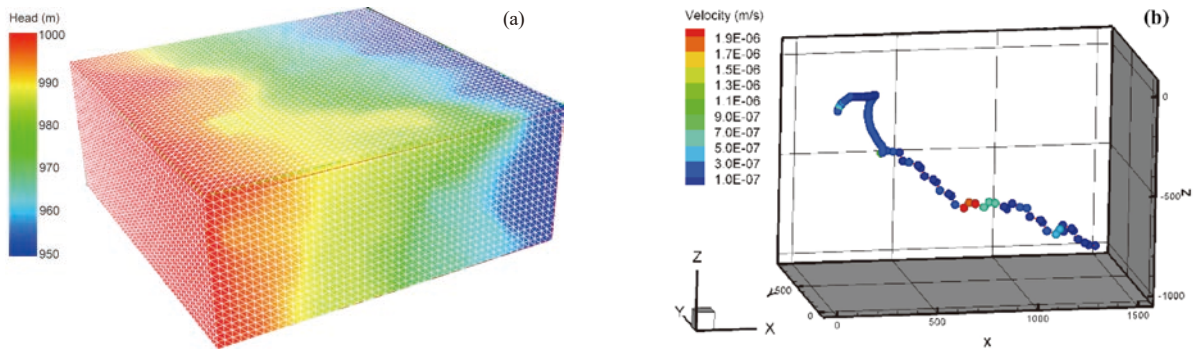


圖 5 分析案例之水流流場與質點傳輸路徑：(a) 模擬範圍 5,000 × 5,000 × 2,000 m 之水流流場分布，水流由左側往右側流動。雖然邊界條件為定水頭設定，但裂隙分布使得流場具高度非均勻性；(b) 流體質點路徑與路徑上的滲流速度分布，流體質點釋放位置位於處置場中央，質點流動由處置場往下游邊界，直至抵達邊界。此一流動路徑與路徑上各節點的速度為 PHREEQC 模式分析時，流場的輸入參數。

勻性，此一結果也使得流體質點的移動路徑與路徑上的速度變化極大（圖 5(b)）。此一流動路徑與路徑上各節點的速度即為 PHREEQC 模式分析時，流場的輸入參數。圖 6 說明了測試例中，選擇的核種傳輸反應鏈。此測試例使用 PHREEQC 分析模式，分析流體質點路徑上（圖 5(b)），U234 衰變至 Rn222 的歷程（圖 7）。透過流體質點追蹤法結合化學反應模式分析，可以有效提升複雜三維裂隙網路分析效率，由於模擬時間與傳輸距離長，使用三維模式計算量大，將難以討論反應傳輸機制。此測試例中，利用流體質點路徑，將反應傳輸分析問題降至一維，可有效探討反應傳輸機制。

使用 ADE 求解污染物傳輸行為與濃度

為了直接求解污染物在三維複雜裂隙系統中的傳輸與分布，Lee *et al.* [24] 隨機生成裂隙系統並進行連通

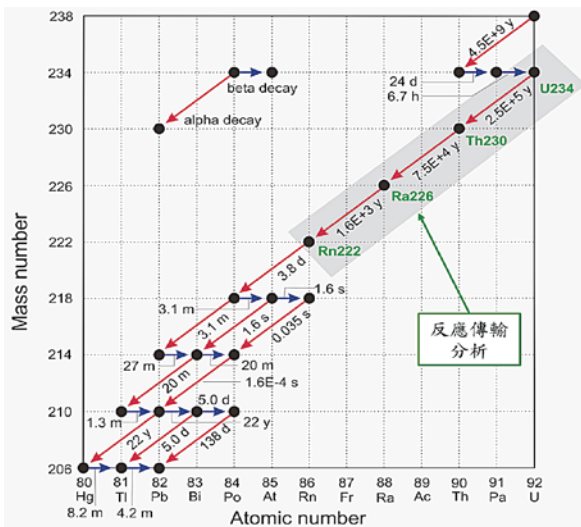


圖 6 測試案例選擇分析的核種反應鏈，反應傳輸專注於 U234 至 Rn222 的衰變（圖修改自 <https://www.pinterest.com/pin/20618110767746566/?nic=1a>）

性分析，將獨立或不具有導水能力的裂隙移除後，將剩下來的裂隙系統稱為有效離散裂隙網路（effective DFN, DFN_e），並使用自行發展的網格生成模式進行三維有限元素法的計算網格建構，並求解地下水的流動以及保守性污染物的傳輸。

圖 8 為 DFN_e 的裂隙分布及地下水流場與污染物傳輸之模擬結果。圖 8(a) 為三維 DFN_e 及其水頭分布。由於裂隙的大小、位態在空間中具高度變異性，而裂隙中使用非常精細的有限元素建構計算網格，如此才可獲得準確的水頭分布。圖 8(b) 則是不同時間下污染物的傳輸行為與濃度分布，由於裂隙系統錯綜複雜，污染物的傳輸行為及濃度分布亦呈現高度變異。此外，即便同一片裂隙亦具有不同濃度分布，顯示三維裂隙岩體之傳輸模擬深具挑戰與困難性。

待解決議題與挑戰

三維複雜裂隙岩體中地下水流動與污染物傳輸模擬尚有諸多尚未解決的議題以及挑戰，而放射性廢棄物處置亦有許多面向的困難需要克服，以下分別以調查面、分析技術面、管理面及溝通面進行說明並提供可能的建議作法：

調查面

在放射性廢棄物的處置概念中，地下水的流動特性除了影響膨潤土混合材料 / 緩衝材料的侵蝕，以及盛裝容器 / 廢棄物罐的腐蝕之外，更是核種在地層中遷移與分布的重要因素。為了充分瞭解深層地下水的運移，以及膨潤土混合材料 / 緩衝材料侵蝕、盛裝容器 / 廢棄物罐腐蝕特性，須獲得核種於安全評估計算所需

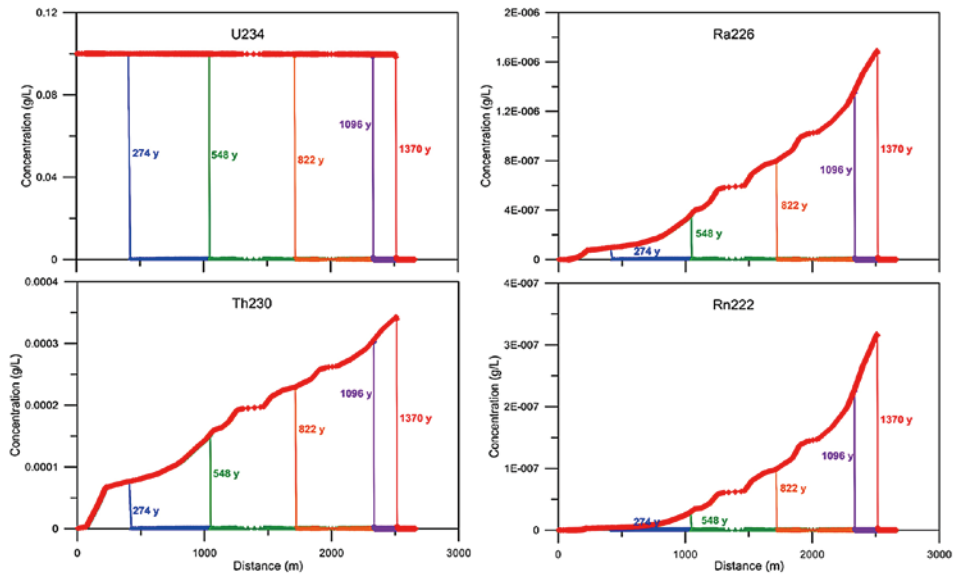


圖 7 沿流體質點路徑上，核種反應傳輸濃度分布。

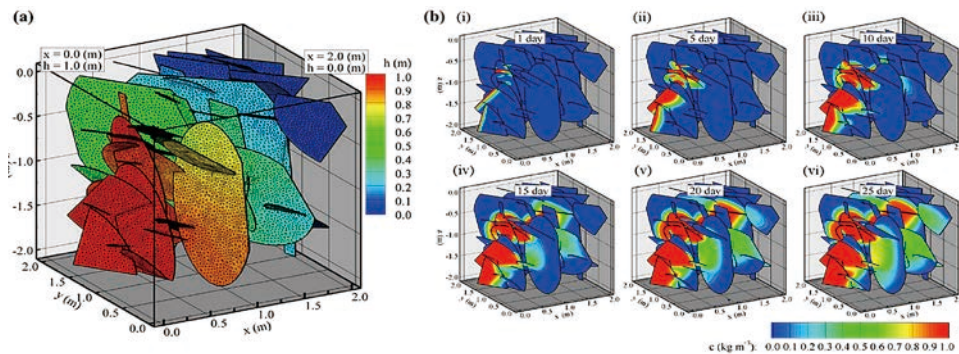


圖 8 DFNe 的裂隙分布及地下水流場與污染物傳輸之模擬結果：(a) 裂隙分布、有限元素網格生成與地下水模擬結果。(b) 不同時間下之污染物傳輸與濃度分布。(修改自 Lee *et al.* [24])

之地下水流相關參數。在確定處置母岩的水文地質特性及瞭解物理性質後，需建構符合現地狀況之水文地質概念模式，進行地下水模擬等一系列重要任務 [25]。

影響地下水流的地質特性稱為水文地質特性，可藉由現地調查、現地試驗、室內實驗等方法獲得地質材料與水文地質有關的參數（如岩石的水力傳導係數、孔隙率等）。配合集水區、分水嶺、河流、湖泊等自然條件進行模擬區域劃分或邊界條件設定，即可組成具現地代表性的水文地質概念模式，後續模擬者皆可依據此水文地質概念模式進行地下水流場及污染物傳輸模擬（圖 9）。

綜上所述，正確的模擬結果仰賴具代表性的水文地質概念模式，而具代表性的水文地質概念模式則依靠詳細的特性調查，在經濟、人力及經費有限的情況下，合理的分配各項調查所需的資源，讓各調查項目都能獲得具代表性的結果，以及持續精進調查與分析技術，能夠更有效且更準確地獲得並分析調查數據，是調查面所需精進的方向。

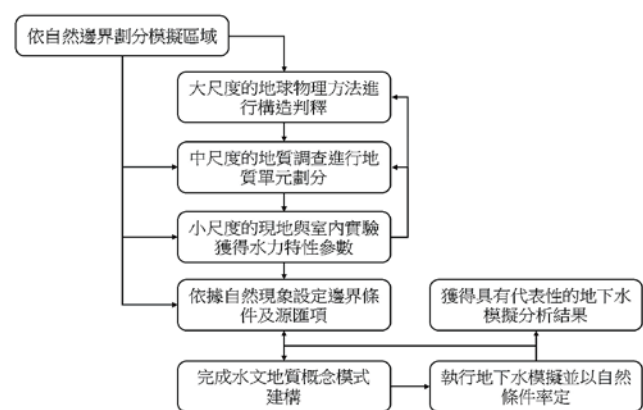


圖 9 水文地質概念模式建構及地下水模擬分析流程

分析技術面

當獲得代表性的水文地質概念模式後，亦須藉由數值分析方法模擬地下水流動及污染物的分布。如何獲得三維裂隙岩體中污染物的傳輸情形一直是這個領域數十年來面臨的挑戰與進步的目標。不同的研究學者與團隊

亦使用日益精進的方法、概念等，模擬更複雜、尺度更大的地下水流動與污染物傳輸行為。本文僅簡介了兩種最常見的求解概念，而此兩種方法各有其在分析面可精進之處，如質點追蹤配合化學反應模組具有將三維傳輸資訊降為一維線段的簡化行為，且質點追蹤與化學反應之計算應朝全耦合發展，以著實反應化學作用對於水流與傳輸的影響，綜合進行污染物傳輸與濃度分布計算。直接使用 ADE 求解三維複雜裂隙系統的地下水流動與傳輸現象已經是一大突破，若能再增加化學反應機制直接於傳輸過程中求解，則更可以精準地獲得污染物的傳輸行為同時判斷化學反應後各物種的濃度分布。

管理面

地下水污染與防治一直是污染物整治與管理中非常重要的議題，即便是目前最常見的含氯有機溶劑污染與防治，國際上就已發展許多方法與手段進行污染物傳輸模擬並協助整治策略擬定；對於放射性廢棄物處置而言，地下水污染與防治更涉及諸多研究領域與科學背景，包括工程、地質、構造、調查、輻射防護、氣候、熱、水、力、化作用等，皆須要廣泛的納入並通盤考量，並非少數機構、單位或研究學者即可勝任。此一跨領域工作更需要跨領域的溝通與合作，不同背景所關注的研究重點不同，甚至溝通的語言也不一致。因此，管理者如何用更高的角度、更廣的視野看待這個議題，以及如何規劃各研究領域的重點項目，同時安排橫向的溝通、聯繫與合作，是非常重要的且困難的挑戰。

溝通面

地下水污染與防治一直是人類關注的重點議題之一，因為地下水是非常重要的資源，且不同的污染會對於人類與環境造成不同程度的危害，必須審慎看待。除了積極的研究與防治外，民眾溝通也是非常重要的一環，藉由淺白的方式向民眾展示分析結果，成果轉譯並持續溝通、專注聆聽以了解需求與憂慮，是地下水污染與防治工作中不可或缺的一環。然而，此一工作仍須跨域合作，才能達成。

結論

放射性廢棄物處置為國際上重要的地下水污染、防治與管理議題之一。由於污染物可能會對人體及環境造成嚴重危害，必須審慎處理、貯存與處置，以滿足相關的法令與技術規範的要求。本文藉由蒐集國際上重要的

法令與規範，論述地下水及水文地質在此議題中的重要性，並蒐集與彙整國際上各國處置母岩與特性後，選擇最多潛在處置母岩類型的結晶岩作為技術探討對象，簡述兩種最常使用的污染物傳輸模擬概念，並展示相對應的結果，獲得重要結論如下：

IAEA 針對地質處置設施的發展與監管控制提供指導與建議；其中，水文地質被列為重要考慮因子之一，且地下水移動機制的評估以及流向與流速的分析，是進行安全評估時的一項重要輸入項目，因為污染物最有可能的釋出形式是藉由地下水流傳輸。


國際上各國的潛在處置母岩以結晶岩最多、黏土岩次之、其他岩類最少。而結晶岩為裂隙岩體的一種，雖其岩石基質具有低透水之特點，但裂隙可成為地下水流動及污染物傳輸的快速通道。因此，研究學者皆朝發展更精細、準確的方法，模擬三維裂隙岩體中的地下水流動及污染物傳輸。

目前常使用質點追蹤配合化學反應模組共同計算，或者直接求解 ADE 獲得污染物傳輸行為與濃度，前者有其運算快速且方法簡易的優點，後者則是可以較精準獲得污染物的濃度分布，本文分別展示此兩種概念所獲得之分析與應用。

地下水污染與防治尚有調查面、分析技術面、管理面及溝通面等不同面向的議題需要解決。三維複雜裂隙岩體中，地下水流動與污染物傳輸模擬亦尚有諸多挑戰，如何同步進行技術面的精進，同時在調查、溝通及管理面中成長，是地下水污染與防治議題之重要目標。

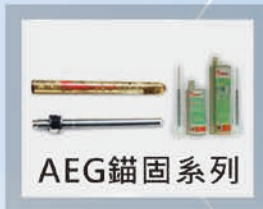
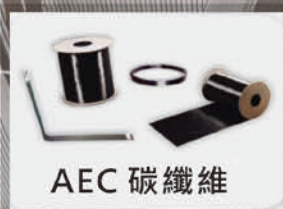
參考文獻

1. 台灣電力公司 (2021), <https://www.taipower.com.tw/tc/page.aspx?mid=203&cid=148&cchk=f8477804-f7b0-49c9-8ec6-3a1ba86ff2df>。
2. IAEA, Fundamental Safety Principles, IAEA Safety Standards Series No. SF-1, Internal Atomic Energy Agency, Vienna (2006).
3. IAEA (2011a), Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. SSG-14, Internal Atomic Energy Agency, Vienna.
4. IAEA (2011b), Disposal of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. SSR-5, Internal Atomic Energy Agency, Vienna.
5. IAEA (2011c), Meteorological and Hydrological Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations, IAEA Safety Standards Series No. SSG-18, IAEA, Vienna.
6. 行政院原子能委員會 (2021), https://www.aec.gov.tw/%E4%BE%BF%E6%B0%91%E5%B0%88%E5%8D%80/%E6%B0%91%E7%9C%BE%E5%B8%B8%E8%A6%8B%E5%95%8F%E7%AD%94%E9%9B%86/%E6%94%BE%E5%B0%84%E6%80%A7%E7%89%A9%E6%96%99%E7%AE%A1%E7%90%86--220_237_2275.html。
7. 台電電力公司 (2017), 低放射性廢棄物最終處置技術評估報告 (精簡版) (定稿本), LLWD1-SC-2016-05-V05, 核能後端營運處。
8. 台灣電力公司 (2019), 我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告, SNFD2017 報告, TPC-SNFD2017-V1, 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。

9. SKB (2011), Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project, SKB TR-11-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
10. Hyman, J.D., Karra, S., Makedonska, N., Gable, C.W., Painter, S.L., and Viswanathan, H.S. dfnWorks, (2015), A discrete fracture network framework for modeling subsurface flow and transport. *Comput. Geosci.*, 84, 10-19.
11. Makedonska, N., Painter, S.L., Bui, Q.M., Gable, C.W., and Karra, S. (2015), Particle tracking approach for transport in three-dimensional discrete fracture networks. *Comput. Geosci.*, 19, 1123-1137.
12. Stalgorova, E. and Babadagli, T. (2015), Modified Random Walk-Particle Tracking method to model early time behavior of EOR and sequestration of CO₂ in naturally fractured oil reservoirs. *J. Pet. Sci. Eng.*, 127, 65-81.
13. Wang, L., Cardenas, M.B., Slotke, D.T., Ketcham, R.A., Sharp, and J.M. (2015), Modification of the Local Cubic Law of fracture flow for weak inertia, tortuosity, and roughness. *Water Resour. Res.*, 51, 2064-2080.
14. Painter, S., Cvetkovic, V., Mancillas, J., and Pensado, O. (2008), Time domain particle tracking methods for simulating transport with retention and first-order transformation. *Water Resour. Res.*, 44.
15. Xu, T. and Pruess, K. (2001), Modeling multiphase non-isothermal fluid flow and reactive geochemical transport in variably saturated fractured rocks: 1. Methodology. *Am. J. Sci.*, 301, 16-33.
16. Steefel, C.I., Appelo, C.A.J., Arora, B., Jacques, D., Kalbacher, T., Kolditz, O., Lagneau, V., Lichtner, P.C., Mayer, K.U., and Meeussen, J.C.L. (2015), Reactive transport codes for subsurface environmental simulation. *Comput. Geosci.*, 19, 445-478.
17. Deng, H., Dai, Z., Wolfsberg, A., Lu, Z., Ye, M., and Reimus, P. (2010), Upscaling of reactive mass transport in fractured rocks with multimodal reactive mineral facies. *Water Resour. Res.*, 46.
18. Cacas, M.C., Ledoux, E., de Marsily, G., Barbreau, A., Calmels, P., Gaillard, B., and Margritta, R. (1990a), Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: Calibration and validation: 2. The transport model, *Water Resour. Res.*, 26, 491-500.
19. Cacas, M.C., Ledoux, E., de Marsily, G., Tillie, B., Barbreau, A., Durand, E., Feuga, B., and Peaudecerf, P. (1990b), Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: calibration and validation: 1. The flow model, *Water Resour. Res.*, 26, 479-489.
20. de Dreuzy, J.-R., Pichot, G., Poirriez, B., and Erhel, J. (2013), Synthetic benchmark for modeling flow in 3-D fractured media, *Comput. Geosci.*, 50, 59-71.
21. Liu, L. and Neretnieks, I. (2006), Analysis of fluid flow and solute transport through a single fracture with variable apertures intersecting a canister: Comparison between fractal and Gaussian fractures, *Phys. Chem. Earth*, 31, 634-639.
22. Lee, I.H. and Ni, C.-F. (2015), Fracture-based modeling of complex flow and CO₂ migration in three-dimensional fractured rocks, *Comput. Geosci.*, 81, 64-77.
23. Vu, P.T., Ni, C.-F., Li, W.-C., Lee, I.-H. and Lin, C.-P. (2019), Particle-Based Workflow for Modeling Uncertainty of Reactive Transport in 3D Discrete Fracture Networks. *Water*, 11, 2502.
24. Lee, I.H., Ni, C.F., Lin, F.P., Lin, C.P., and Ke, C.C. (2019), Stochastic modeling of flow and conservative transport in three-dimensional discrete fracture networks. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23, 19-34.
25. JNC (2000), H12 Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Project Overview Report, 2nd Progress Report on Research and Development for the Geological Disposal of HLW in Japan, JNC Technical Report TN1410 2000-001, Japan Nuclear Cycle Development Institute, Tokai-mura, Japan. 

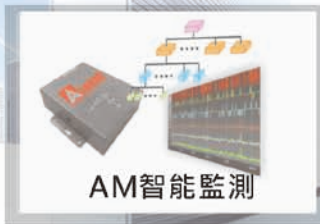


安得固



建築修復結構補強

STRUCTURE REPAIR & REINFORCE SYSTEM



免費服務電話
0800-009-666

台北 02-29813223 台中 04-23810055 高雄 07-3500090
桃園 03-4022192 雲林 05-5967603 上海 021-54370088
更多的資訊請上安固官方網站 www.anchors.com.tw

