



行政院原子能委員會
放射性物料管理局

行政院原子能委員會放射性物料管理局
委託研究計畫研究報告

放射性廢棄物處置安全分析模式驗證
及場址特性調查審查技術之研究

計畫編號：101FCMA008

受委託機關(構)：國立中央大學水文與海洋科學研究所

計畫主持人：李明旭、董家鈞

報告日期：中華民國 101 年 12 月

中文摘要

放射性廢棄物最終處置需建立相關技術規範及審查技術，使設施設計、安全評估及施工營運能確保安全。物管局已於 100 年度初步完成「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版草案)」，為持續精進技術規範及提升有關審查技術，本研究針對放射性廢棄物坑道式處置之重要安全議題，包括安全評估及場址特性調查技術，透過蒐集、研析國際重要技術導則及文獻，研訂安全審查要項，以精進該二項關鍵議題之技術規範並建議相關審查技術。於安全評估方面，蒐集並研析國外與國際原子能總署(IAEA)近年來對最終處置安全分析模式發展現況，並分析其對模式驗證技術之發展趨勢；於場址特性調查方面，蒐集日本 NUMO 於 2010 年提出之報告，總結日本處置場址調查項目、方法、技術及資料整合作業。另外，因母岩裂隙不連續面為水文地質特性的重要影響因子，亦彙整研析國際岩石力學學會(ISRM, 1978)建議之不連續面調查方法，以建立對應之審查要項，並強化有關技術審查規範。依上述成果將進一步檢視低放處置審查導則第 0 版草案有關安全評估及場址特性描述章節，提出審查導則修正建議，以精進國內在放射性廢棄物處置安全評估模式驗證以及場址特徵化之技術。最後綜整前述各項工作成果，針對低放射性廢棄物處置安全評估及場址特性調查，提出後續技術發展建議。

Abstract

The success of radioactive waste disposal requires comprehensive technical guidelines and review techniques to secure each step of facility design, safety assessment, construction, and operation. The Review Guidelines on Safety Assessment of Low-Level Waste Disposal Repository (0 version draft) was completed by the Fuel Cycle and Materials Administration (FCMA) in 2011. The purpose of this study is to enhance two key review-techniques, safety assessment and site characterization, for the tunnel repository by collecting and reviewing important guidelines and documentations from other nations and international organizations. On the safety assessment perspective, recent developments of models and verification techniques suggested by the International Atomic Energy Agency (IAEA) and other nations were reviewed and analyzed. On the site characterizing perspective, items, methods, techniques, and data integration proposed by the Nuclear Waste Management Organization (NUMO) of Japan in 2010 were reviewed and analyzed. In addition, characterization guidelines for discontinuous fractures in host rock, affecting several import issues in hydrogeology, proposed by the ISRM (1978) were reviewed as well. The correspondent reviewing items were proposed to enhance review technique and guidelines. Based on results of reviewing and analyzing these documentations, version 0 of draft guidelines for low-level waste repository were further examined in this study and modifications were suggested aiming at chapters related to safety assessment and site characterization. The last goal of this study is to suggest future

development guidelines of techniques on safety assessment and site characterization for low-level waste repository in Taiwan.

目錄

中文摘要.....	i
Abstract.....	ii
目錄.....	iii
圖目錄.....	v
表目錄.....	viii
附表目錄.....	ix
第一章 前言.....	1
第二章 國際原子能總署最終處置安全分析模式技術導則.....	3
2.1 IAEA 放射性廢棄物處置之安全案例與安全評估技術導則... 3	
2.2 IAEA 放射性污染場址整治評估數學模式技術導則.....	27
第三章 處置場址調查項目、方法、技術及資料.....	40
3.1 國際岩石力學學會定量化描述岩體不連續面之建議方法概述.....	40
3.2 日本 NUMO 2010 報告書關於地質環境調查相關章節重點摘述整理.....	110

第四章 低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則第 0 版修正 建議.....	125
4.1 「第三章 場址之特性描述」修正建議	125
4.2 「第七章 處置設施之安全評估」修正建議	128
第五章 低放射性廢棄物處置安全評估及場址特性調查後續技術發展 建議.....	132
5.1 低放射性廢棄物處置安全評估後續技術發展建議	132
5.2 低放射性廢棄物處置場址特性調查後續技術發展建議	134
第六章 結論與建議.....	136
參考文獻.....	138
附件一 安全評估模式核種傳輸解析解回顧.....	140

圖目錄

圖 2 - 1 放射性廢料分類示意圖	4
圖 2 - 2 安全案例的組成要素	6
圖 2 - 3 管理系統的應用與管制機構暨利害關係團體之互動過程	6
圖 2 - 4. 安全評估所包含評估要項	7
圖 2 - 5. IAEA 所建議安全評估方法流程 (IAEA, 2004)	29
圖 2 - 6. 典型受汙染土地之暴露路徑	31
圖 2 - 8. 評估模式選取過程	32
圖 2 - 9. 生物地球化學過程示意圖	34
圖 2 - 10. 土壤中之動態水流過程示意圖	35
圖 2 - 11. 影響地表逕流與地表水之主要機制示意圖	36
圖 2 - 12. 地表逕流與底床水中之沉積物與污染物示意圖	36
圖 2 - 13. 模式中所考慮之生地化反應與交互作用示意圖	37
圖 2 - 14. 暴露路徑示意圖	38
圖 3 - 1. 立體圖可定性描繪節理與工程結構物空間關係	47
圖 3 - 2. 以下半球為參考半球(A)，將不連續面 K 以極點 P 及大圓	49

圖 3 - 3. 在極等面積投影網上以施密特等值線法呈現三組節理之位態.....	50
圖 3 - 4. 於露頭量測岩體節理間距.....	52
圖 3 - 5. 將所觀察之節理組的間距以直方圖表示.....	52
圖 3 - 6. 簡單素描與立體圖有助於辨識各組不連續面的相對延續性.....	55
圖 3 - 7. 本理想化的例子可說明對於潛在破壞面上完整岩橋.....	58
(INTACT BRIDGE)與階狀下降(DOWN-STEPPING).....	58
圖 3 - 8. 不同尺度取樣與試驗對應之不連續面的粗糙度.....	60
圖 3 - 9. 沿預估的潛在滑動方向，記錄不連續面二維粗糙度的方法.....	62
圖 3 - 10. 以三維方式記錄不連續面之粗糙度，本例適用於可能滑動方向為未知時.....	65
圖 3 - 11. 代表性粗糙度剖面圖及建議名稱.....	67
圖 3 - 12. 不連續面粗糙係數 JRC 之參考剖面[6].....	70
圖 3 - 13. 圖中說明張口不連續面之內寬與填充不連續面之寬度的定義.....	78
圖 3 - 14. 以填充不連續面為例，在岩石相互接觸，內壁粗糙度的振幅與填充物的厚度可指示剪位移量.....	84
圖 3 - 15. 填充不連續面之野外素描圖 [1].....	85

圖 3 - 16. 岩體形狀素描：(A)塊狀、(B)不規則狀、(C)平板狀、(D)柱狀..... 96

圖 3 - 17. 岩心各段長度的三種可能解釋。建議採用最實際可行的完整長度..... 100

表目錄

表 2-1. 影響核種傳輸過程之互動矩陣	33
表 3-1. 量化敘述不連續面的建議方法	71
表 3-2. 各風化階段詞彙說明	73
表 3-3. 黏土分級與岩石分級說明	73
表 3-4. 內寬詞彙說明	80
表 3-5. 不含填充物之不連續面	89
表 3-6. 含填充物之不連續面	89
表 3-7. 岩體(例如隧道內壁).....	89
表 3-8. 節理組數分類	93

附表目錄

附表 1. 單一物種傳輸解析重要程式與描述.....	141
附表 2. 多子核地下水核種傳輸解析解作者與描述	142

第一章 前言

放射性廢棄物最終處置方式採地下坑道式設計，為近年來重要技術發展方向，依安全管制需求，須逐步建立相關管制技術規範及審查技術，使設施設計、安全評估及施工營運能確保安全。低放射性廢棄物最終處置管制技術規範的研訂方面，物管局於 100 年度初步完成「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版草案)」。

為持續精進技術規範及提升有關審查技術，本研究針對放射性廢棄物坑道式處置之重要安全議題，包括安全評估及場址特性調查技術，透過蒐集、研析國際重要技術導則及文獻，研訂安全審查要項，以精進該二項關鍵議題之技術規範並建立相關審查技術。

本研究主要方法為資料蒐集與資料研析。於安全評估方面，地下處置安全分析模式在處置安全功能評估工作中扮演相當重要之地位，除了提供安全評估情節之量化模擬工作外，其模擬結果亦是後續處置工作精進之重要參考依據。而處置安全分析模式之驗證，目的在確立所採用之安全分析模式是可信賴與適用，而不適用或無法通過驗證之模式，其情節模擬結果不僅誤導審查單位外，亦攸關未來整體處置工作之成敗。因此為確保國內處置安全功能評工作之效益，裨益未來整體處置功能安全評估工作能通過國際同儕審查，國內在處置安全分析模式之篩選、驗證與審查，皆需與國際接軌。因此本研究將蒐集國外與 IAEA 近年來對最終處置安全分析模式發展現況，並分析其對模式驗證技術之發展趨勢。近程目標，在於釐清最終處置安全分析模式選取準則與驗證所需資訊，以提供審查單位對於最終處置安全分析模式審查導則修訂之建議。而在長程目標可協助建立管制單位對於功能安全評估模式獨立審查及分析之能力，裨益提升國內在安全分析模

式之技術。

於場址特性調查方面，本研究將蒐集日本 NUMO 於 2010 年提出之報告，總結日本處置場址調查項目、方法、技術及資料整合作業，因日本地形地質條件與台灣較相近，因此日本經驗對台灣場址調查作業與評估應有重要參考價值。除可提供台灣執行處置場址調查之參考，並有助於審查單位對最終處置場址特徵化審查導則之建立。另一方面，處置場址安全評估重點工作之一為地下水流場建立，而岩盤不連續面之特徵化為地下流場建立之基礎。本研究將蒐集國際岩石力學學會建議之不連續面調查準則，並進行重點整理，以提供台灣場址調查參考。

依前述二項工作成果，本研究進一步檢視低放處置審查導則第 0 版草案有關安全評估以及場址特性描述章節，提出審查導則修正建議，以精進國內在放射性廢棄物處置安全評估模式驗證以及場址特徵化之技術。最後，綜整前述各項工作成果，針對低放射性廢棄物處置安全評估及場址特性調查，提出後續技術發展建議。

第二章 國際原子能總署最終處置安全分析模式

技術導則

針對國際原子能總署最終處置安全分模式技術導則，本研究共蒐集整理二份文獻資料：

1. The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, IAEA Specific Safety Guide No. SSG-23, 2012.
2. Mathematical Models for Assessing Remediation of Radioactively Contaminated Sites (Draft) by Rodolfo Avila, Facilia AB; Horst Monken-Fernandes, IAEA; Diederik Jacques, Belgian SKCEN; Brent Newman, IAEA; Jiri Simunek, University of California, Irvine; George Yeh, National Central University, Taiwan/University of Central Florida, USA; Charley Yu, Argonne National Laboratory; Ming Zhu, DOE.

上述第一份文獻為針對放射性廢棄物處置之安全案例與安全評估技術導則，為 IAEA 於 2012 所出版，第二份文獻為 IAEA 則針對放射性污染場址整治評估數學模式技術導則，目前仍尚在編修中，部分章節亦尚未有初稿。

2.1 IAEA 放射性廢棄物處置之安全案例與安全評估技術導則

放射性廢料種類，依其活度與半衰期可分為 HLW(高放射性廢料)、ILW(中放射性廢料)、LLW(低放射性廢料)、VSLW(極短半衰期放射性廢料)、VLLW(極低放射性廢料)、EW(豁免放射性廢料)，如圖

2-1 所示，基本上此份技術導則適用於除 VSLW 與 EW 外之放射性廢棄物。

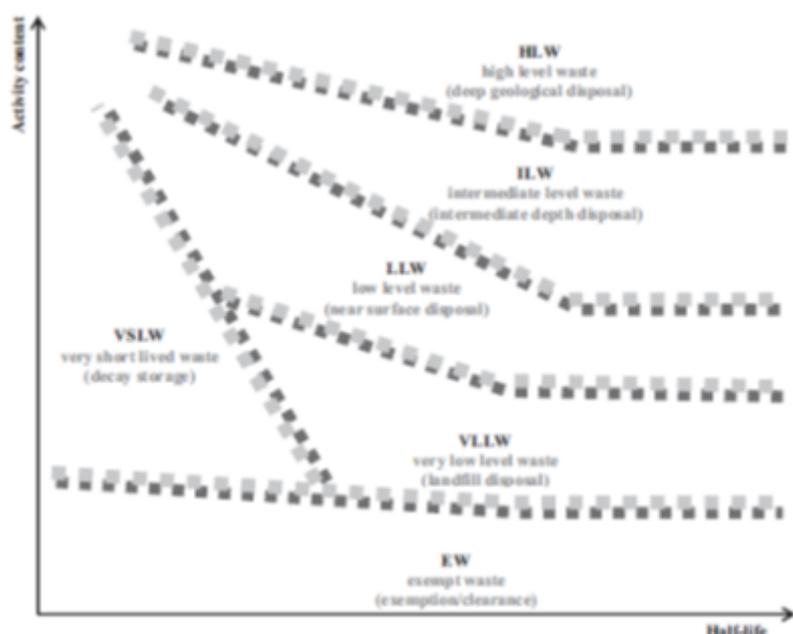


圖 2 - 1 放射性廢料分類示意圖

此份技術導則共有 8 章分述如下

1. 簡介：

共有 8 項，分述背景、目的、導則範圍與架構。

2. 放射性廢料處置之安全實證

共有 10 項，引述文獻說明放射性廢料處置現況(如 WIPP)，說明本技術導則所適用放射性廢棄物種類，定義"disposal"為將放射性廢料放置於某一設施或地點且無意圖再取出，定義"storage"為放射性廢料放置於某一設施或地點可供再取出。並說明處置設施之發展包含龐大的研究、設計與評估工作方案，且需歷時數拾年。

3. 安全原則與安全案例與評估需求

共有 17 項，條列 IAEA 所制定之 10 大基本安全原則，如安全之責任、政府之角色、安全之主導與管理、設施與功能之辯護(to identify

the risks that must be compensated for by the benefits provided by the facility or activity)、防護之最佳化、個體風險之限制、保護現在與未來世代、意外事件預防、緊急整備與應變、防護行動以降低現有或未規範之輻射風險。

4. 放射性廢棄物處置安全案例

共有 100 項，擇要另以 2.1.1 節詳述。

5. 封閉後之放射性衝擊評估

共有 74 項。

6. 特殊議題

共有 89 項，本章敘述相關特殊議題導則，如安全案例在不同設施發展階段之角色與內容、分級方法、多重防護、建全的處置系統與安全評估、評估之時間表、人類入侵、監管、可回收性廢棄物、方案之評比。

7. 安全案例文件資料與使用

共有 23 項。

8. 管制審查過程

共有 18 項。

2.1.1 放射性廢棄物處置安全案例

1. 本章節定義與提供安全案例的組成及其在處置設施的開發、運轉及封閉過程之導則。
2. 圖 2-2 為安全案例的組成要素，其必須包含以下要件：範圍、安全策略、設施的描述、安全評估、限制與控制條件、迭代與最佳化設計、不確定性管理及整合安全論證。

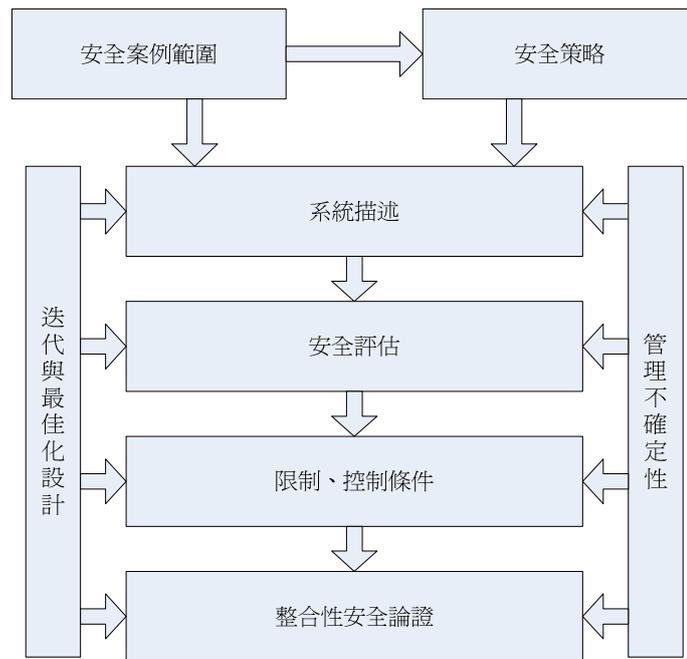


圖 2 - 2 安全案例的組成要素

3. 安全案例必須由設施的概念化發展，持續整個生命週期直至執照終止。管理系統須確保所有與安全相關工作的品質及必要之管制過程，如圖 2-3 所示。

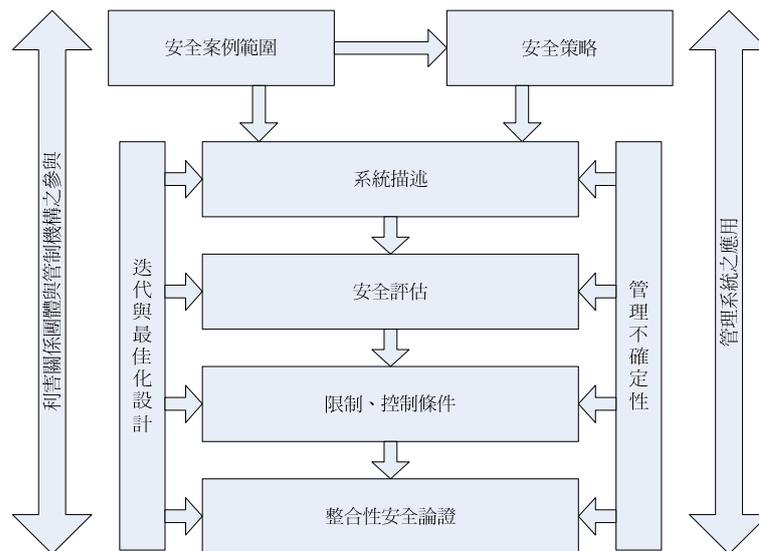


圖 2 - 3 管理系統的應用與管制機構暨利害關係團體之互動過程

4. 安全評估為安全案例的主要成分，並涉及許多評估要項，如圖 2-4 所示。安全評估的基本要件為評估輻射劑量與輻射風險對於人類及環境的影響；此外亦包含選址、工程、運轉安全、非放射性影響及管理系統。

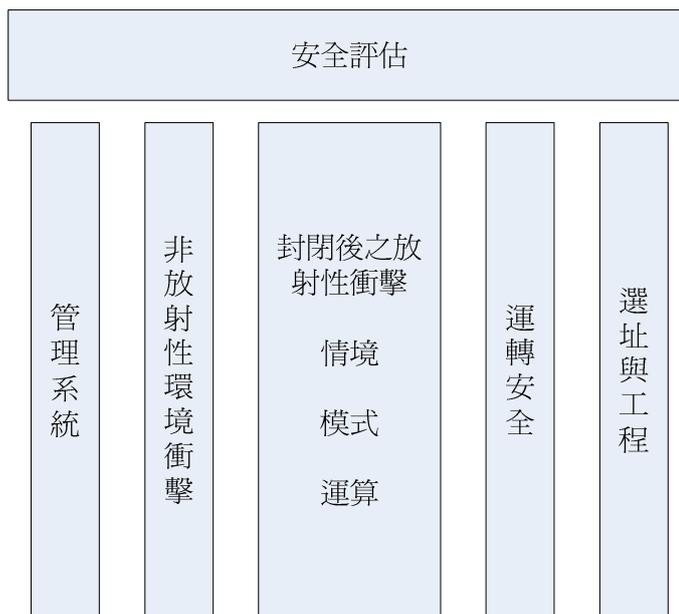


圖 2 - 4. 安全評估所包含評估要項

2.1.1.1 安全案例的角色及發展

1. 本安全導則著重在封閉後的安全，並提供安全案例的角色與組成之相關導則，以充分呈現所有必要的論證與評估證據、分析及論證處置設施之安全。因此安全案例之角色應提供：
 - 有系統、可追蹤且透明整合相關資訊以論證處置系統封閉後之變化與功能。
 - 鑑別處置系統的變化及功能之不確定性、分析顯著的不確定性、管理顯著不確定性的方法。

- 說明長期安全可以透過處置設施提供合理保障以保護人類健康與環境。
 - 支持決策以循序漸進的方式來發展處置設施。
 - 促進與利害關係團體溝通有關處置設施之相關問題。
2. 處置設施的開發為循序漸進方式進行：
- 有系統的蒐集與評估必要的科學與技術資料(數據)。
 - 評估可能的場址。
 - 發展處置概念。
 - 隨著逐步改善的資料以進行設計與安全評估之反覆研究。
 - 整合技術與管制審查的審查意見。
 - 諮詢公眾對於特定的決策意見。
 - 政治參與。
 - 實際推動步驟會視設施類型與國家政策為基礎來制定。
3. 安全案例的發展需著手於計畫的開始，並應持續於處置設施每個步驟的發展與設施運轉過程，直至其封閉及執照終止。同時，安全案例應作為選址過程、設施設計，開挖與施工過程，設施運轉及封閉的指南。應被用於確定研究和發展的需要，定義與制定限制、不同步驟的控制條件及作為提供許可執照程序的主要依據。同時也為與利害關係團體溝通的主要工具，如解釋安全功能以及如何確保能達到合理的安全程度。
4. 隨著處置設施的發展演變，安全案例的發展應該是一個反覆的過程。安全案例的形式與技術水平細節的發展，將取決於該專案發展的階段和國家特定的要求。處置設施的發展採取循序漸進的方式，以提供選址、設計、開挖施工、運轉和封閉之決策參考為基礎，並確認需進一步注意的問題，以提高理解影響處置系統安全

之因子和/或透過適當的設計選項以減少不確定性。

5. 安全案例的發展過程，須確認與充分了解所涉及相關團體(如政府、監管機構和利害關係團體)對安全案例的審查、使用與核准。安全案例包含支援安全評估是處置設施經營者的責任，需滿足不同利害關係團體的需求。
6. 逐步且循序漸近在保留處置設施之運轉與設計之彈性以隨時加入新的科學或科技資訊以及廢棄物管理與材料科技的進步。在每一個主要的決策點，應進行安全評估以確保對此階段處置系統之充分了解，以及完成相關不確定性評估，方可前進下一個決策點。安全案例與安全評估需在每個主要決策點上反覆且不斷的更新，以反應實際經驗及增加的知識(如從科學研究所獲得的知識)，同時考慮與運轉相關的長期安全。隨著設施開始運轉，安全案例與安全評估之修正或更新，需隨運轉操作、廢棄物形式或設計等有重大改變時。
7. 每個安全案例的發展須被記錄(如解釋新的數據、概念或數學模型改變的原因)，以使利害關係團體一目了然。
8. 監管機構應詳細指明需要變更的類型和/或幅度及需要更新的時間架構。典型的更新週期為五年至十年，考慮到各種因素，如新的資訊、重大的設計或運轉變更、人員的更新或培訓，知識的進步及計算能力的提升。
9. 在選址過程，由於必須對詳細場址特徵與處置設施設計進行假設，因此安全評估將只提供對處置設施功能之初步推估。因為安全案例在這個階段的主要作用只在評估所選場址是否原則上適合做為處置設施場址。在稍後的階段，將需要更多場址特性資料及發展設計的細節以進行運轉與長期功能評估。

- 10.安全案例的修訂，應根據最新的設施知識進展與變化，包含已發生的事件與所接收的廢棄物等。
- 11.設施的生命週期結束後，安全案例應包含所有需要傳遞給未來世代的資訊(如監管所需)。
- 12.針對不同類型的放射性廢棄物需要有不同的處置設施，因而也有不同級別的潛在危險。因此安全評估的內容與複雜程度會因設施類型而有所不同，且與廢棄物的潛在危險相關。此外每一階段針對處置設施發展與運轉所進行之安全評估的詳細程度將取決於風險的大小。

2.1.1.2 安全案例的構成要素

(A) 安全案例內容

(A1) 安全案例的目的

1. 安全案例為專案發展並用於監管單位及其他相關決策依據，如設計、支持研究工作或場址特性調查。
2. 安全案例修訂的目的，如處置設施發展的階段、是否需向監管機構提交作為正式許可執照的一部分等。安全案例的修訂，經營者應根據設施的發展階段，提供詳細的用途說明，包括：
 - 測試安全概念的初步想法。
 - 選址。
 - 處置設施的安全示範。
 - 設施設計的最佳化。
 - 確定與安全相關的議題，需要由研究和發展方案來解決。
 - 定義或修改限制、控制條件，如廢料的可接收標準。
 - 評估處置設施最大封存量。

- 理論之監管期間。
- 監測輸入和數據取得方案。
- 依法律或管制規定的要求定期重新評估。
- 應用於申請延長或升級設施或尋找新的場址或廢棄物管理設施。
- 設施的生命週期結束或其不符合管制規定，須封閉設施。
- 應用於由於不符合規定或因其他原因，需重新開啟封閉之設施。
- 決定是否需要整治行動。

(A2) 安全示範

1. 安全示範必須應用安全目標及安全原則以滿足管制要求。安全目標與安全原則可由管制機關制訂。安全目標為處置設施的選址、設計、建造、運轉和封閉，以確保封閉後之最佳化保護，且考慮社會和經濟因素。合理的保證也必須提供公眾長期的暴露劑量及風險不會超過限制以作為設計標準。
2. 除了定量化標準，管制機構須訂定明確的品質標準及提供如何依照與遵守這些標準的指南，以確保處置設施符合要求。
3. 安全示範的方法還應明確闡述如何管理安全案例的不確定性。這應最少包括如何鑑別不確定性、不確定性之特徵及用何種方法管理。

(A3) 分級方法

安全案例與支援安全評估的範圍、內容與詳細程度需考慮分級方法。例如進行選址前之一般處置概念所需考慮的細節少於針對特定場址或處置設施所需。分級方法之三個重點為：可能的輻射風險、設施的完整性、與設施的複雜程度。

(B) 安全策略

1. 安全策略的早期發展及採用是安全案例發展的關鍵。安全策略應包含處置設施之規畫、運轉及封閉等不同的活動的全面管理策略，包含：選址及設計、發展安全案例、安全評估、場址特性調查、廢棄物型式特徵、研究與發展。
2. 安全策略是指在選址和設施設計須遵守安全目標、原則和標準，以符合管制要求，並確保採用良好的工程施作以優化安全與防護。安全策略應建立於處置設施概念化的早期階段。
3. 安全策略應涉及一些關鍵要素，包含多重安全功能與多重防護的建立、廢棄物的封鎖和隔離、被動安全功能的採用、處置系統的健全、安全相關功能的證明及廢棄物的前處理管理。同時也應該解決管理的不確定性。
4. 需提供多重安全功能以避免過度依賴任一單一安全功能，並確保其他安全功能可以彌補當某安全功能未如預期發揮功能。安全策略應鑑別安全功能之有效時間期程，當障壁之功能衰變可由其他機制或處置系統彌補。安全策略應說明不同安全功能如何驗證、測試、或類比。
5. 放射性廢料的圍阻方法應在安全策略中提供，圍阻方法是否充足需實證並與管制手段一致。應明確說明圍阻功能的有效期限及理由。
6. 隔離的概念包含兩個實質方面：物理性隔離廢棄物以阻絕接觸環境與確保安全功能足以隔離干擾影響。
7. 由於處置設施的被動特性，不同的安全功能與範圍需被提出，且安全策略必須說明及提供如何達成安全功能。
8. 安全策略應說明安全功能之健全性與證明其健全性。

9. 安全策略應說明如何展示所設計設施在現場如實現。可由模型或現場處置設施的物理演示達成，不論是在地面或地下設施。
10. 安全策略應規畫如何考慮廢棄物管理與處置前處理間的互相依賴性，以確保廢棄物處置能相容於處置設施的設計及運轉。
11. 此外，安全策略應說明：
 - 當作決策和使用多管道說明時所採用之保守程度
 - 選擇評估方法的基本原則，評估之時間期程與時間階段，包括將用於驗證、確認和比較評估結果的各種評估方法及工具
 - 如何進行同儕審查
 - 如何說明與國際導則及慣例之一致性
 - 其他適當的高層級論證

(C) 處置系統的描述

1. 處置系統的描述應記錄的所有資訊及與處置系統有關的知識，並應提供所有安全評估實施所需。隨著計畫推動與反覆評估的推動，資訊的取得與處置系統相關的知識會趨於成熟。系統說明應根據的處置設施類型，包含以下資訊：
 - 近場應包含 (i) 廢棄物的類型(如起源、性質、廢棄物的數量與性質及放射性核種清單)；(ii) 系統工程，例如：廢棄物的固化與包裝、處置單元、工程障壁、處置設施的覆蓋及排水功能；及 (iii) 受到開挖及施工影響的地區其範圍及特性。
 - 遠場應包含如：地質、水文地質、水文、地球化學、地質構造與地震條件、土壤侵蝕速率等。
 - 生物圈應包含如：氣候與大氣、水體、當地居民、人類活動、生物群、土壤、處置設施的地形、地理範圍和位置。
2. 根據處置設施的類型，處置系統的描述應該包括以下內容：

- 明確規範與說明系統構成要素及其介面和相關的不確定性。
 - 說明整體的安全概念和安全功能。
 - 說明系統組成要素如何能持續提供安全功能，包含在預期的事件與及較少發生的事件。
 - 討論對系統構成要素之管制需求或其他需求已包含在設施設計。
 - 描述放射性、熱、水力、機械、化學和生物過程可能會影響處置系統。
 - 描述可能發生於系統組件間的相互作用。
 - 描述如何考慮廢棄物的空間異質性，包括相關的不確定性。
 - 說明系統的組成要素及介面，其特性與行為可能根據時間而更改，包含：系統組件之衰敗或毀壞及相關不確定性。
 - 說明環境的可能變遷與對處置系統組件的可能衝擊。
 - 說明預期演變與較少發生事件的放射性核種遷移路徑。
3. 處置系統的描述應提供資料支持安全評估，包括以下的資訊：
- 管理系統如何確保所使用安全相關資料的品質。
 - 所有使用的資料來源(例如測量和報告的參考文獻)。
 - 場址特性調查計畫的合理性(如樣本的選取及樣本的位置)。資料取得程序需反映先前安全評估堆資料需求的結論以符合反覆評估所需。
 - 說明場址特性調查與收集監測資料所採用之技術，及伴隨這些資料與相關技術的不確定性。
 - 說明如何估計放射性核種清單與不確定性。
 - 任何可用於支持及了解未來處置設施地區人類的行為(如目前該地區人類的活動、採礦記錄)。

4. 所描述資訊的廣度與深度隨著處置設施類型不同而異，對大量廢料與長半衰期或高活度廢料之處置設施設計而言，需要更廣泛與複雜的資訊提供。

(D) 安全評估

「安全評估」為在安全案例中所進行之所有評估，這包含任何與處置設施的發展、運轉和封閉所涉及的安全。因此，安全評估還涉及品質面向、非放射性議題以及組織和管理方面的問題。而在早期文獻，安全評估一詞著重於描述設施的輻射衝擊。本安全導則中的「安全評估」除定量輻射風險評估外，亦包含如操作安全和管理系統。以下各節將概述安全評估的關鍵要素

(D1) 封閉後的輻射衝擊評估

處置設施「安全案例」的核心為評估處置設施封閉後的輻射衝擊。除了定性評估外，也包含廣泛之定量評估：處置系統與環境的演化、導致潛在輻射衝擊之安全功能可能挑戰。情境是用來描述處置系統及其環境可能的演化。透過概念與數學模型以量化分析處置設施之放射物質的潛在遷與其在環境中的移動與輻射風險。

(D2) 選址與工程

1. 處置系統演化的定量評估為封閉後放射性衝擊評估的一部分，可提供選址建議與處置設施設計之依據。
2. 任何處置設施的安全性主要依賴於天然障壁和工程障壁其有利的特性或屬性。自然與工程障壁的重要特性包括長時間的健全性及可靠程度。有利於處置設的穩定性與可靠性及其所處環境於以下描述：

(D2-1) 被動安全 (Passive Safety)

1. 處置設施之被動安全概念在說明設施之長期安全不需要依賴主動

的組件或行動(如監測)，雖然這些主動安全對安全有貢獻，特別是在近地表處置設施。因此它主要為自然和工程障壁的組合，以提供設施封閉後的安全。

2. 在設施的設計中，被動安全措施也需加以考慮，以盡量減少運轉與封閉後對主動系統的安全依賴。

(D2-2) 多重安全功能 (Multiple Safety Functions)

1. 處置設施的多重保護(defence in depth)評估是必須的，將展示處置設施之多重安全功能。多重保護指的是透過階級式的多種設備或過程以維持物理障壁面對正常操作或意外狀況下之效能，這些障壁主要用以阻絕輻射物質遠離工作人員、公眾或環境。
2. 多重保護概念可確保處置設施的安全性，不會過度依賴一個單一的組件、控制程序、或安全功能。

(D2-3) 健全性 (Robutness)

健全性是一個與多重保護有關的概念可應用於處置系統的個別組件或整個處置系統。

(D2-4) 科學和工程原則 (Scientific and Engineering Principles)

1. 良好的科學實踐要素包括：進行觀測、發展與測試假說、可重複性與同儕審查。例如要瞭解特定場址之地下水流，需進地面及鑽井觀測、提出影響地下水流的假設、利用數據與模試測試這些假設、使用一個以上的方法或工作小組研究其他的概念模型、與檢驗可重複性及獨立的審查工作。
2. 安全案例應說明好的工程技術如何被應用於設施設計，而設施經營者應在安全案例中展示處置設施所使用之材料與工程技術已被充分了解且適用於預期目的。在可能的情況下，經營者應使用已成熟發展的施工技術，並應充分考慮過去在使用這些技術所得到

的經驗回饋。

(D2-5) 場址特性調查之品質

1. 安全案例應包括明確的描述使用的方法及選址的標準，並應證明所選場址符合安全策略及所建立的任何標準。安全案例應整合與場址相關的知識及周圍環境(如地質、水文地質、地表特徵、氣候及當地居民)，應利用模型來幫助了解系統可能的行為，場址資訊應足夠的廣泛使上述可行。
2. 若場址的特性描述及安全評估計畫是高品質的、若經營者所收集的場址數據與其他現有數據在參數值及所採用之測量方法有一致性、若安全評估模式的發展符合場址特性與基於科學原則的場址概念、若場址的概念性理解與安全評估模式僅需些微的調整即能持續與任何關於場址的新資訊相容且適用，則安全評估結果之可信賴度將可提升。

(D3) 運轉安全

操作階段的安全評估，與應用於廢棄物處置前管理之方法相似。另外亦與核能電廠的操作安全規定與安全導則有關。

(D4) 非放射性環境衝擊

1. 放射性廢棄物可能含有某些潛在非放射性為害成分(如重金屬、病原體)。
2. 處置設施評估非放射性所產生的影響將受環境保護法的要求。這是本安全導則範圍之外的，本導則所描述的評估方法亦可用於非放射性廢物造成的危害及最佳化安全評估。
3. 環境保護法及其相關法規對於處置設施的建設、運轉及封閉會有許多要求與限制。例如在交通與噪音污染方面的限制，這可能會限制設施的建設和運轉。其他的例子還有設施建設及運轉的水管

理限制、控制及需要條件，在設施建設和運轉，以及封閉後的水的排放控制規定。這些由環境保護法所產生的規定應適當的考慮於設施設計。因此，非放射性影響，應說明處置設施的整體安全及其整體需遵守的所有相關法律和法規要求。

(D5) 管理系統

1. 管理系統旨在提供品質保證適用於在處置設施的發展和運轉中所有與安全相關的活動、系統與組件。適當的應用管理系統將有助於安全案例的信賴度。
2. 管理系統影響安全案例的必要條件有2個。首先，管理系統應用於各階段設施發展的描述應做為安全案例重要的代表，對於選址的信心、設計、施工(建設)、運轉，封閉及封閉後安全做出貢獻。其次，方案的建立須確保全部活動的品質與安全案例及安全評估有關，如資料收集及模擬。

(E) 管理不確定性

安全分析的不確定性需使用定量方法或專業判斷(或以上二者)以診斷出其來源、本質與程度。透過不確定性與靈敏度分析來釐清不確定性對安全分析結果影響及決策依據。

(F) 反覆與最佳化設計 (Iteration and Design Optimization)

1. 設計的選擇是多方面的，幾個不同或有時互相抵觸的因素需調解以達成決策。在大多數實際的情況決策的過程將是反覆進行。反覆進行的次數將取決於設施所處之發展階段、決策的性質、以及可利用的資料與模型。
2. 決策過程之初期反覆依可利用的資料與能力來實施評估。反覆過程需持續進行直至評估判定目的已充足達成。有些決策可能只需要在某些特定方面的安全案例下反覆執行(例如改善特定模型的

資料需求)。有些則需要更多的反覆執行，這可能涉及到修改數個安全案例的組成要素，如：

- 安全案例的內容可能會調整，例如更真實地討論不確定性或擴大所考慮受體的範圍。
- 安全策略可能會修改。
- 場址的新資料取得及/或設計之進一步發展。
- 由變化或其他因素誘發(如同儕審查結果)，以致安全案例與相關安全評估的組成要素需進一步修改。

3. 處置設施的最佳化保護為一裁決過程，為設施設計之決策依據。應採用良好的工程和技術解決方案及良善管理原則，以確保在整個處置設施的開發、建設、運轉和封閉所有安全相關工作之品質。
4. 對於防護與安全之最佳化決策，以定性方法透過專家裁決與使用最充分與驗證過之技術可能已足夠。愈複雜的問題與處置設施之各面向互相連結愈多，愈需要驗證最佳化。為了證明安全性可被最佳化考慮，以下論點應被呈現可行：
 - 處置設施在開發、建設和運轉每個階段的各種的設計方案對長期安全性的影響是受到重視的。
 - 合理確保由處置系統預期之演化所產生的劑量或(與)風險將不能超出限制，以及不確定性尚不至於過大到足以影響結果之合理闡述之期間。
 - 透過盡可能合理的選址與設計以降低會干擾處置設施功能以及引致高劑量或風險的可能事件產生。
5. 設計方案之選取應驗證是透過良好規範與合理程序來選擇。若安全案例列出替代設計選項並評估其優點和缺點，以及所選取的理由，可增加所選取設計選項的信心。考慮替代方案在某些國家是

管制要求。

6. 在方案設計階段一般會考慮廣泛的不同方案選擇。安全案例應描述選擇最合適選項的過程，根據一套預先規定的標準或原因。用於替代方案的比較標準應該包括：安全標準、環境和社會經濟因素（如成本及公眾接受選項）。
7. 執行替代方案的調查，需要回答以下三個問題：
 - 有什麼替代方案呢？
 - 每個替代方案之衝擊與優缺點為何？
 - 選擇優先替代方案的基本理由是什麼？
8. 替代方案應提供足夠的細節來描述這些問題。例如替代的設計方案若考慮不同的障壁類型，則每個替代方案應描述潛在的放射影響、成本及效益。不同的選擇及標準分析應提供完整的文件紀錄，以支持其設計提案。

(G) 限制、控制及條件

1. 安全案例應被利用於協助限制、控制及條件的建立，以應用至所有影響設施安全的工作和活動，以及應用至設施的處置廢棄物。例如施工過程、置放操作、回填材料與技術之控制，廢棄物活度及數量在特定場址之限制，以確保操作上及長期安全性，監測與人員培訓之需求。
2. 處置設施特別重要的限制及條件為可接受廢棄物總量清單和/或廢棄物中特定核種的可接受濃度等級。安全評估應以此進行定義和/或判定為基礎。廢棄物可接受標準應由個別組件及整個設施來考慮各種可能情境(例如釋放至環境之輻射量及核種在環境之傳輸路徑)進行分析建立。人類入侵為重要情境且常被用以決定長半化期核種在近地表處置設施之可接受等級。然而大量的短半化期

核種也有潛在的問題，特別是在操作上的安全，且應納入安全評估，特別是在核種清單與濃度等極之限制。此外安全案例應被用於評估廢棄物與工程障壁中(如化學)物質等級，是否可能導致自然或工程障壁的衰敗。

3. 安全案例及相關評估也可用於建立場址與周圍區域之監測與監控方案以因應後續對特定場址之方案審查。所發展之監測與監控方案在特定時間區間內可用以證明處置設施是如所預期進行規劃且其組件符合安全功能。
4. 處置設施的安全性將取決於場址特性與行政管理安排的組合，也依賴是否有合適且合格之工作人員。工作人員的訓練需求應取決於安全評估所定義在設施的發展與運轉過程之可能潛在災害，以及面對預期操作事件與事故情況的措施。

(H) 整合安全性論證

1. 安全案例應該提供一個綜合現有的證據、論點及分析。應解釋如何考慮相關的數據資訊、如何測試模式及如何遵從合理且有系統的評估程序。安全案例應同時承認現有論點、論點及分析的任何限制因素，並應強調指出，處置設施應繼續規劃及發展的主要理由。安全案例應包含任何未解決的問題及潛在的不確定性破壞將得到解決和管理的方法。若證據、論點及分析並不能提供足夠的信心以支持一個正面的決策，那麼安全案例、設施設計，甚至處置概念可能需要修改。
2. 一般情況下，處置設施的規畫及發展於每個階段的安全案例應包含全部不同的證據、論點及分析使其可以支持設施的功能與品質評估。若發現安全案例與不確定性的論點有矛盾時，也應進行討論及分析。需要的詳細討論如下：

- 安全案例與相關評估不確定性的論述
 - 安全案例中基礎之科學與設計工作的品質與可靠性
 - 安全評估的品質及可靠性，包含每個情境的發展、情境考慮的範圍與適用性、可能性的評估、以及是否有適當的方法、模型、程式碼和資料庫使用。
 - 管理系統所要求進行安全評估推測以提供品質保證。
3. 強調不同的論點所提出的安全案例可能不同，但這取決於：
- 潛在客戶的關心和要求
 - 證明處置系統安全性之時間尺度及其危害隨時間而變化
 - 計畫開發階段
 - 處置系統可能的演化
 - 處置系統的功能及相關的不確定性
4. 定量評估結果最重要的用途是與安全標準比較，特別是劑量及風險的限制。此外，所伴隨之安全與功能指標可用計算結果的評估。定量分析必須輔以其他的推論，同時也考慮半定性與定性的論點。

(H1) 安全規範的比較

1. 安全目標與安全標準需明確區分，而指標為用以證明安全標準可以滿足與符合安全目標。安全目標多表示為通用詞彙且符合國際協議之陳述。國家法規通常建立標準或與特定指標有關的標準(如劑量或風險指標)，作為目標、約束或限制的標準及準則。這些指標可能因國而異。
2. 安全性評估的主要目的之一為比較安全評估結果與安全標準。然而，當所計算的劑量或風險指標低於相關的劑量或風險限制，並不足以接受此處置設施的安全案例，因為尚有其他要求必須被滿足，例如是否提供多種安全功能。此外，安全性必需最佳化。反

過來說，在某些不太可能發生的情況，若超出劑量限制也不然代表拒絕此安全案例。

(H2) 附屬安全指標與功能指標

1. 除了劑量及風險外，指標可用於安全案例中提供額外的信心及用於評估適當範圍內的放射性影響結果。附屬安全性指標的概念(即輔助劑量或風險計算結果的評估)主要使用於地質處置設施，但也可用於其它類型的處置設施。
2. 常用的輔助安全指標包括核種濃度和通量。其他指標可能與核種清單無關，但依照如工程障壁功能計算結果。其他附屬安全指標可能包括為驗證設施功能之監測計劃目標。
3. 附屬安全指標可以與導則、標準和參考值比較，以判斷處置設施功能的有效性或個別元件功能。參考值可以來自數個來源，如法律或法規及其他考慮因素，其中包括：
 - 管制標準之環境介質中最大允許的核種濃度。
 - 安全性評估的靈敏度分析結果(其可能指出，例如某一容器的最小生命周期對整體處置系統安全是相當決定性的)。
 - 透過獨立考慮某些作用或過程，處置設施所提供之安全功能。
 - 社會價值觀和期待。

(H3) 多管道闡釋

1. 安全案例的信心可由多管道闡釋而提升。多管道闡釋可能透過提供一系列不同的論述整合有信心之數據、假設及結果來增加安全案例的價值。此外，某些論點對特定的人士可能更有意義。
2. 替代的多管道闡述以輔助安全案例結果，例如透過自然與人為的類比，在安全案例中多管道闡釋包含處理古水文地質、古氣候與

新構造的部分。此外，透過簡化核種移棲與放射性衝擊計算以加強安全評估模擬結果的信心。

(H4) 未解決議題的計畫

1. 放射性廢物處置設施之安全案例發展是伴隨其生命期且日益增進更新。安全案例於每個階段的信心均可以提升，如果安全案例的修訂包含，未來的工作計畫中說明未解決議題，減少重大的不確定性、降低其相關性或完全避免，例如改變系統元件的設計以達成。
2. 在發展處置設施計畫的早期階段，可能有許多未解決的問題及不確定性，且安全案例應包含處理這些問題的清清楚楚方案(例如透過場址特性調查或系統設計的優化)，及提出如何達成這些計畫的方法。計畫的稍後階段為安全案例在一定時間內將成為提交證照申請的一部分，不確定性及未解決的問題應用適當的方法呈現以供決策。某些不確定性將不可避免(如地質障壁若未對其某些有益的特性進行干擾，將可能無法完整明瞭其特性)，但安全案例應指出為何這些不確定性不會逐漸損害設施安全的論點。

2.1.1.3 互動過程

1. 透過許多外部過程與安全案例發展互動以確保其品質與適當性。最重要的是管制過程中須遵守已制訂的標準及管制導則以滿足所制定標準。它也應該包括結構化的互動及溝通的過程，以確保安全案例能滿足管制端的期待，且需要解決的議題已被界定與管理。
2. 這些相互動過程應包括獨立的專家和利益關係團體的參與。

(A) 利害相關團體的參與

利害相關團體的早期參與需確保為提升處置設施的安全信心建立過程的一部分。利害相關團體的各種不同模式之參與已經被應用於不同國家，且大量的研究已進行探討如何使利害相關團體參與國家與國際的研究計畫。關鍵因素為利害相關團體的參與應採取公開且透明的協商框架且有明確的議事規則。安全案例中，利害相關團體的參與過程應列出。

(B) 獨立審查

1. 獨立審查為放射性廢料處置設施安全案例之信心建立中扮演重要角色。同儕審查應包括由合格及沒有直接利益關係(例如金融或政治利益)的專家組成。
2. 獨立同儕審查應扮演領導為安全案例發展的工作，須持續且不間斷的，且應於方案的早期階段便開始。同儕審查應充分的紀錄，包含：審查的目標與項目範圍、審查人員選取基礎、同儕審查結果、經營者對審查結果的回應、審查人員對這些回應的再審查。
3. 在某些情況下，應建立國際同儕審查小組以針對一個或多個特定的主題或整個安全案例和/或支援安全評估進行審查。

(C) 管理系統

1. 監管機構與經營者應建立妥適之管理系統以確保所有與安全相關的工作及活動之品質。應從以下幾個方面考慮制定適當的管理系統，該系統的設計應提供安全案例足夠的發展及審查的基礎：
 - 需要良好定義的、一致的且透明的標準根據已進行評估之安全案例或已完成之決策。
 - 需要適當的內部與外部檢查，以確定管理系統適當性及其執行。
 - 需要證明及增加擔任審查及進行這些安全案例及評估人員的資格、能力及適任與否，例如透過培訓計畫的提供及參與國際計

畫。

- 安全案例的發展與審查過程需要透明化及公眾的參與。
 - 安全案例的發展須考慮國際建議、安全目標、安全評估方法、時間期程及處置概念等。
 - 在整個專案的期間，需發展及維持經營者及監管機構的能力及知識。
2. 管理系統應包括進行一套有計劃且有系統的程序，並記錄過程中每個步驟中提供的輸入數據、模型和結果的品質。
 3. 若察覺相關議題未被解決，安全案例的信心將會減少。完整性為管制機構審查安全案例時優先的事情。其他利害相關團體認為重要的議題，也期許以得到解決。需要解決的議題其範圍將取決於處置設施發展的階段，可能來自幾個來源，如法規、規定與利害相關團體的關注。
 4. 可追溯性需要一個清晰且完整的記錄包含決策、假設、參數、資料及模式等之使用以達到所呈現的結果。可追溯性還包含追溯資料的來源及其他用於安全案例的資訊。因此應建立一個條理清晰的參考系統以支持安全案例。該系統應記錄結構化的資訊包括：什麼時候、什麼基礎和由什麼人做各項決策與假設、這些決策及假設如何執行、使用何種模式工具、數據的最原始源。
 5. 透明度需要開放性、溝通和責任制。這意味著安全案例和安全評估都應該以一個明確、公開和公正的方式記錄，例如處置系統同時提供安全效益和不確定性的特點。目標為提供決策者一個清楚全貌，如已完成哪些評估、結果及不確定性為何、結果為什麼如此、關鍵議題為何。為增加透明度，也可以適當的提供民眾安全案例的文獻，並確保所提供內容及程度是符合特定對象。

2.2 IAEA 放射性污染場址整治評估數學模式技術導則

本導則為透過中大國科會講座教授葉高次教授，取得目前最新之初稿，本報告目前共計有 12 章與四附件，然而目前該報告仍有許多章節或部分章節之主筆尚未完成初稿，因此目前僅能就較完整章節摘要說明。目前報告目錄與各章節負責主筆，標示於章節英文名稱後括弧內如下：

1. INTRODUCTION (Horst Monken-Fernandes and Brent Newman)
IAEA 尚未有初稿。
2. USE OF MODELS IN ENVIRONMENTAL REMEDIATION PROJECTS (M Zhu and R Avila)
主要說明為何需要模式、模式種類、模式選取時的主要考量因子、透過模式模擬支援決策分析，目前最新模式資訊等。
3. MODELLING PROCESS (R Avila and C Yu)
主要說明模式種類選取、概念模式發展、數值模式發展、參數檢定與驗證與模式模擬。
4. SOURCE TERM MODELS (C Yu and G Yeh)
主要有源項模式、劑量評估模式、地化反應模式最新發展等。
5. ATMOSPHERIC TRANSPORT (R Avila)
IAEA 尚未有初稿。
6. SUBSURFACE FLOW AND TRANSPORT (D Jacques/J Simunek and G Yeh)
主要說明為何需要地下水流與傳輸模式、分析所需 FEPS 與概念模式、模擬所需資料、模式能力與限制、案例說明與應用。
7. SURFACE WATER FLOW AND TRANSPORT (G Yeh and R Avila)
主要說明為何需要地表水流與傳輸模式、分析所需 FEPS 與概念模式、模擬所需資料、模式能力與限制、案例說明與應用。

8. EXPOSURE ASSESSMENT (C Yu)

主要說明暴露評估模式與各種可能暴露路徑。

9. Integrated Multimedia Environmental Modeling (M Zhu and R Avila)

主要說明現有整合式環境模擬環境之限制、與跨政府部門組織間之委員會運作來提升整合模擬效能、與對應之國際合作機制。

10. SENSITIVITY AND UNCERTAINTY ANALYSES (G Yeh and R Avila)

主要說明靈敏度與不確定分析方法。

11. STUDY CASES (G Yeh and D Jacques/J Simunek)

本章為模擬案例簡介，包含土壤整治、紬滲漏案例、現地滲漏案例等。IAEA 僅有部分初稿。

12. REFERENCES

為參考文獻

APPENDICES

附錄有下列四項

(1) APPENDIX A. SOURCE TERM MODELS (G Yeh and C Yu)

(2) APPENDIX B. SUBSURFACE FLOW AND TRANSPORT MODELS (D Jacques/J Simunek and G Yeh)

(3) APPENDIX C. SURFACE WATER FLOW AND TRANSPORT MODELS (G Yeh and R Avila)

(4) APPENDIX D. STUDY CASES (G Yeh and D Jacques/J Simunek)

本研究在整理此份文獻資料，由於此報告仍在編修階段，除第 1 章與第 5 章，IAEA 完全尚未有任何初稿外，其餘各章仍有許多章節 IAEA 所邀請作者仍在編修，因此內容亦不完整。針對較完整章節之內容摘要整理如下：

第 1 章、簡介

IAEA 尚未有初稿。

第 2 章、使用模式於環境整治計畫

功能評估為評定受汙染場址功能之過程，著重對人類健康與環境之潛在放射性效應 (IAEA, 1999)。環境整治之功能或風險評估為類比於安全評估 (安全評估起源於核能電廠之設計與運轉)。安全評估應包含(IAEA,1999)：

1. 針對所挑選之所有情況估計系統功能。
2. 對所估計之系統功能評估信賴等級。
3. 全面評估以符合安全要求。

IAEA 所建議之安全評估方法流程如圖 2 - 5 所示。

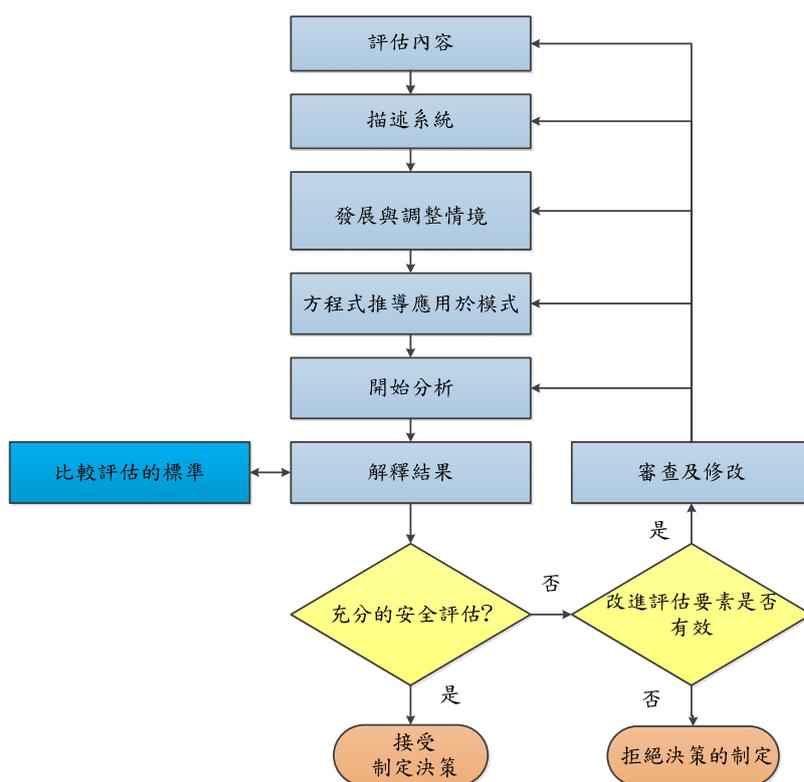


圖 2 - 5. IAEA 所建議安全評估方法流程 (IAEA, 2004)

在環境整治計畫中，模式主要用以：

1. 提供一個架構用以評估對場址水文地質條件 (如流向、路徑及速率等)之概念化理解。
2. 估計現存在地下水與土壤中之污染物本質與範圍，包含其控制之水文與生地化過程。
3. 估計替代整治方案之成本效益，包含不採取行動為替代方案。
4. 評估整治措施之效益配合監測資料，並進行長期功能預測。

使用於環境整治計畫之數學模式依典型暴露路徑 (如圖 2 - 6 所示)，可分類如下：

- 釋放源項：放射性污染土地之演化與釋放核種至環境。
- 地下水流與傳輸：水溶性核種在非飽和層、地下水流之流動與傳輸及與土壤或岩石之交互作用。
- 地表水流與傳輸：地表水體與受污染地下水體間之交互作用、地表逕流與核種在地表水之傳輸。
- 大氣延散：透過暴露土壤或岩石所釋放之核種在大氣之傳輸 (一般僅考慮延散傳輸)。
- 暴露路徑與劑量分析：暴露情境、路徑與評估對人類健康在受體位置之劑量衝擊。

在 2.3 節提到透過分級與反覆方式使用模式，管制機關通常建議使用具較保守假設之簡化模式討論限制案例。而在某些案例，管制人員甚至指定使用其所熟悉之特定模式以方便管制審查模擬結果。在 2.4 節針對模式選取所應考慮因子有：場址水文地質條件、污染物之本質與範圍、管制需求、經濟限制、利益關係人的意見

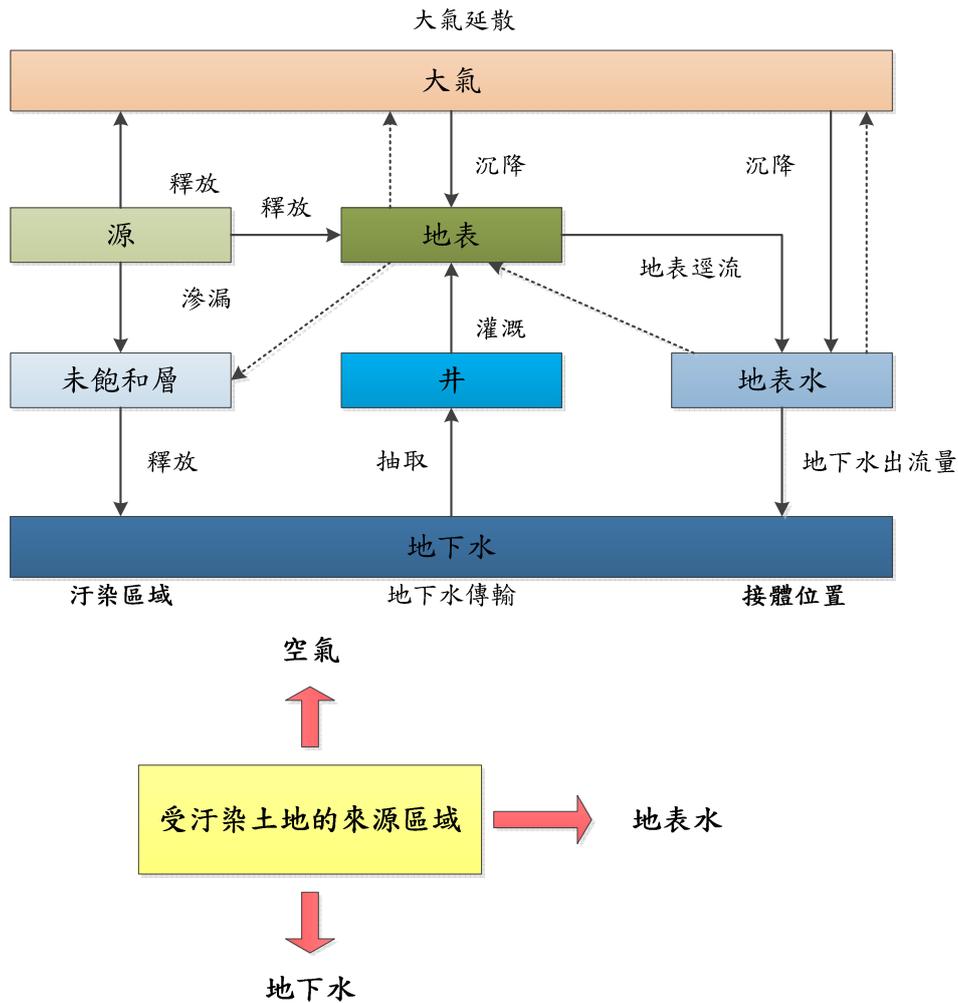


圖 2-6. 典型受污染土地之暴露路徑

第 3 章、模式過程

使用模式進行評估的目的在估計環境中個體在一個或多個位置(受體區域)所可能受到或暴露之放射劑量，該受體區域為已經或可能由一個或多個受污染區域(源項)釋放所影響。

往往許多模式被整合使用以進行模擬評估，圖 2-7 架構常用於環境整治計畫之主要評估模式與模式間之互動關聯。

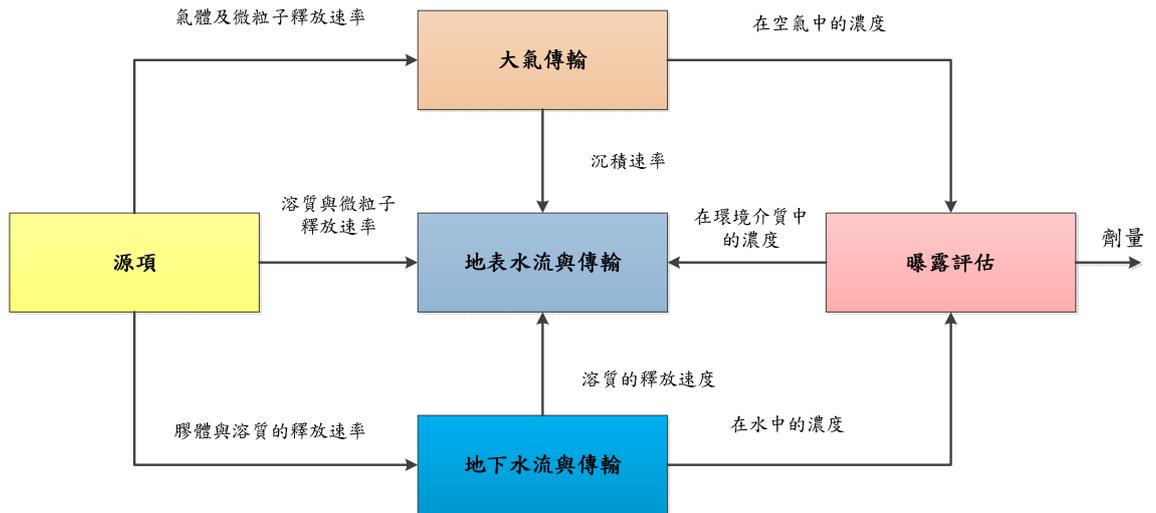


圖 2 - 7. 環境整治計畫所使用評估模式分類

評估模式選取過程主要包含三步驟：概念模式發展、確認對模式的要求、選取模式，如圖 2 - 8 所示。其中確認對模式的要求主要取決於：

1. 評估內容：包含對現況的評估與對未來狀態的評估。
2. 定義災害與暴露路徑分析。

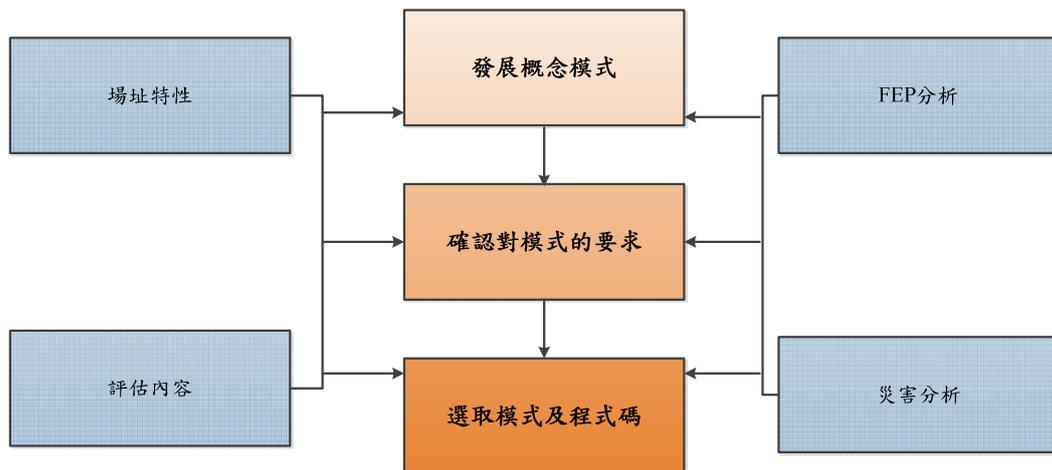


圖 2 - 8. 評估模式選取過程

概念模式可以透過如表 2 - 1 之互動矩陣關係呈現。對角線元素

為系統之主要組成元件，而非軸項元素則呈現這些主要元件間核種傳輸之機制。

表 2-1. 影響核種傳輸過程之互動矩陣

大氣	濕沉降 乾沉降 氣體吸收			濕沉降 乾沉降 氣體吸收	濕沉降 乾沉降 氣體吸收	外部輻射 吸入
再懸浮 揮發/放射 蒸發 蒸散	源	入滲 對流 擴散 延散 膠體傳輸		侵蝕 地表徑流		外部輻射 吸入
		未飽和層	釋放 對流 擴散 延散 膠體運輸			內部輻射
		毛細上升 對流 擴散 膠體傳輸	地下水	灌溉	地下水出 流/ 滲流	水攝取
再懸浮 揮發/射氣 蒸發 蒸散		入滲 對流 擴散 延散 膠體傳輸		地表	地表逕流	外部輻射 吸入 食物攝取
氣體釋放			釋放	灌溉 洪水	地表水	外部輻射 吸入 食物攝取
						人類

第 4 章、源項模式

源項模式主要需考慮由於受人類或自然活動所影響之受污染土壤或土地尺寸與幾何形狀、源項隨時間之變化、污染物之再分布。在過程等級之模式其核心為概念化生物地球化學過程後之反應系統，圖 2-9 為生物地球化學過程示意圖。

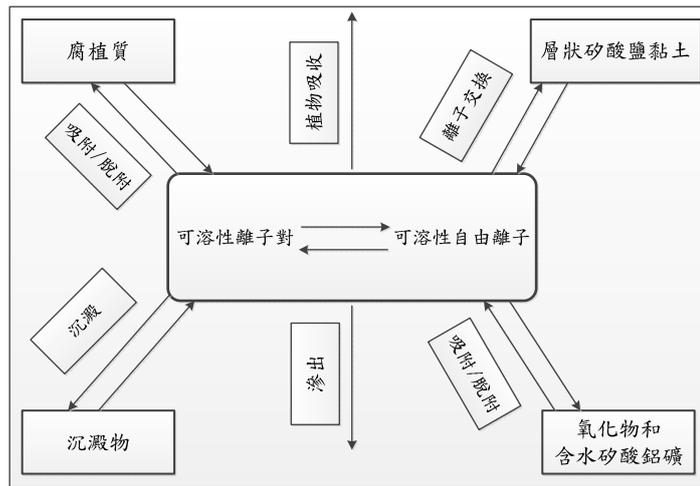


圖 2 - 9. 生物地球化學過程示意圖

第 5 章、大氣傳輸

IAEA 尚未有初稿。

第 6 章、地下水流與傳輸

地下環境有未飽和層與飽和含水層，核種之傳輸基本上受下列機制影響：

1. 平流：受流體移動傳輸（包含液相與氣相）。
2. 擴散：由於化學分子的不規則運動。
3. 延散：主要由於孔隙中不均勻流場所引致。
4. 地球化學反應：液相與不同相間皆需考慮。

動態之土壤水移動過程如圖 2 - 10 所示，水分主要透過入滲或灌溉進入地下環境、或由河川、湖泊與水庫之補注、或由於工業或都會區之排放產生。

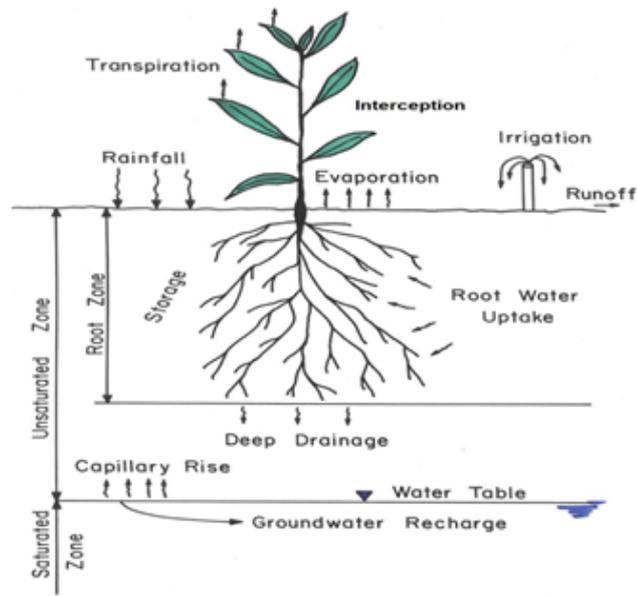


圖 2 - 10. 土壤中之動態水流過程示意圖

地下水流與傳輸模式主要在產出：

1. 核種從未飽和層進入地下水系統之滲漏。
2. 井內之核種濃度。
3. 從地下水進入地表水之通量。
4. 核種從土壤傳輸至植物。

第 7 章、地表水流與傳輸

影響地表逕流與地表水之主要機制如圖 2 - 11 所示包含：

1. 降水 (Q_R)。
2. 蒸發散 (Q_E)。
3. 地下水入受或抽取(Q_I)。
4. 防洪抽水控制 (Q_S)。

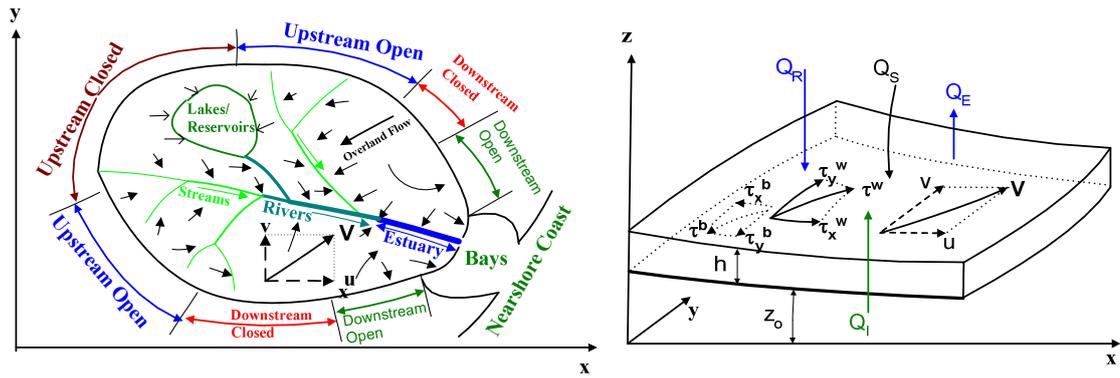


圖 2 - 11. 影響地表逕流與地表水之主要機制示意圖

沉積物分類主要依其物理與化學特性，對每一類型的沉積物皆可區分為可移動懸浮顆粒 (S_S)隨地表水體移動與不可移動顆粒 (S_B)累積在地表水之底床，如圖 2 - 12 所示。

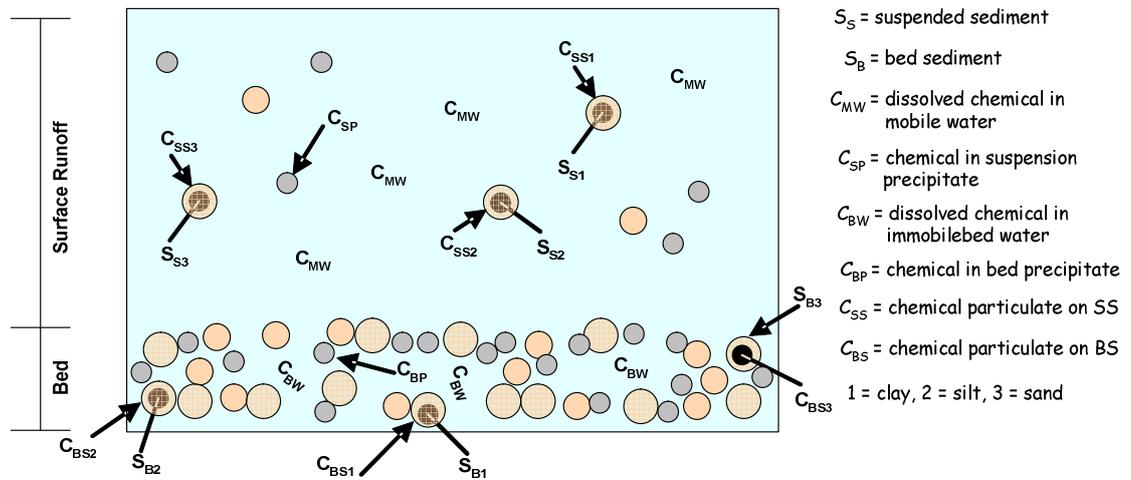


圖 2 - 12. 地表逕流與底床水中之沉積物與污染物示意圖

而圖 2 - 13 主要說明可移動地表水與不可移動底床水中所應考慮之生地化反應與交互作用：

- (1) 可移動水之水相錯合。
- (2) 可移動水與懸浮顆粒之吸脫附、離子交換。

- (3) 可移動水與懸浮沉澱相(固相)之沉澱溶解。
- (4) 可移動水與底床沉積相之吸脫附、離子交換。
- (5) 不可移動底床水之水相錯合。
- (6) 不可移動水與底床沉積相之吸脫附、離子交換。
- (7) 不可移動水與底床沉積相(固相)之沉澱溶解。
- (8) 可移動水之揮發。
- (9) 可移動水與不可移動水間之擴散。
- (10) 懸浮顆粒之沉澱。

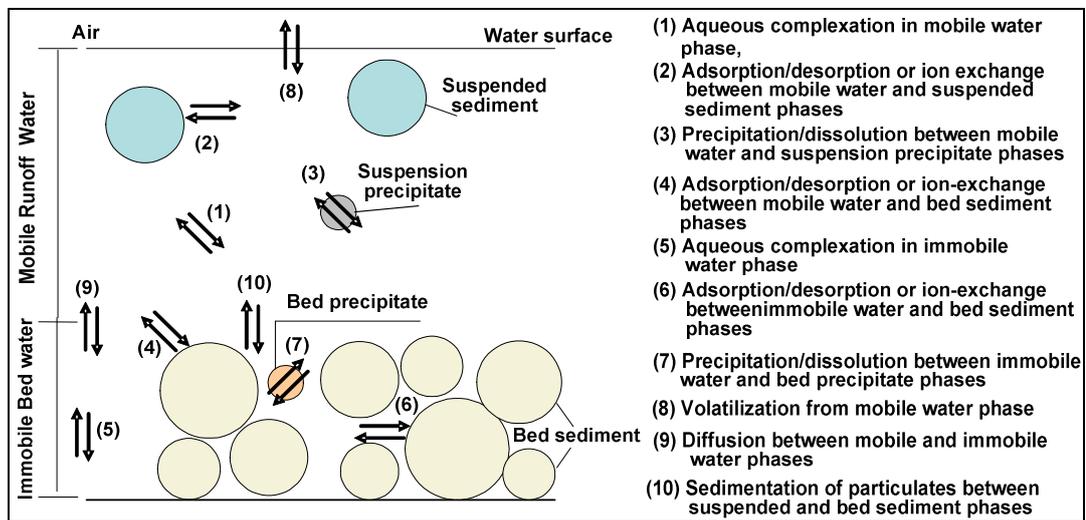


圖 2 - 13. 模式中所考慮之生地化反應與交互作用示意圖

第 8 章、暴露評估

主要暴露路徑如圖 2 - 14 所示有：

1. 直接暴露於來自受污染土壤物質之外部輻射。
2. 內部劑量來自吸入空氣傳播之核種。
3. 內部劑量來自攝取。
 - (a) 生長於受污染土地或受污染灌溉水之植物。
 - (b) 肉品或牛奶來自餵食受污染食物與水之畜牧生物。

- (c) 飲用受污染之井水或池水。
- (d) 受污染池水之魚。
- (e) 受污染土壤。

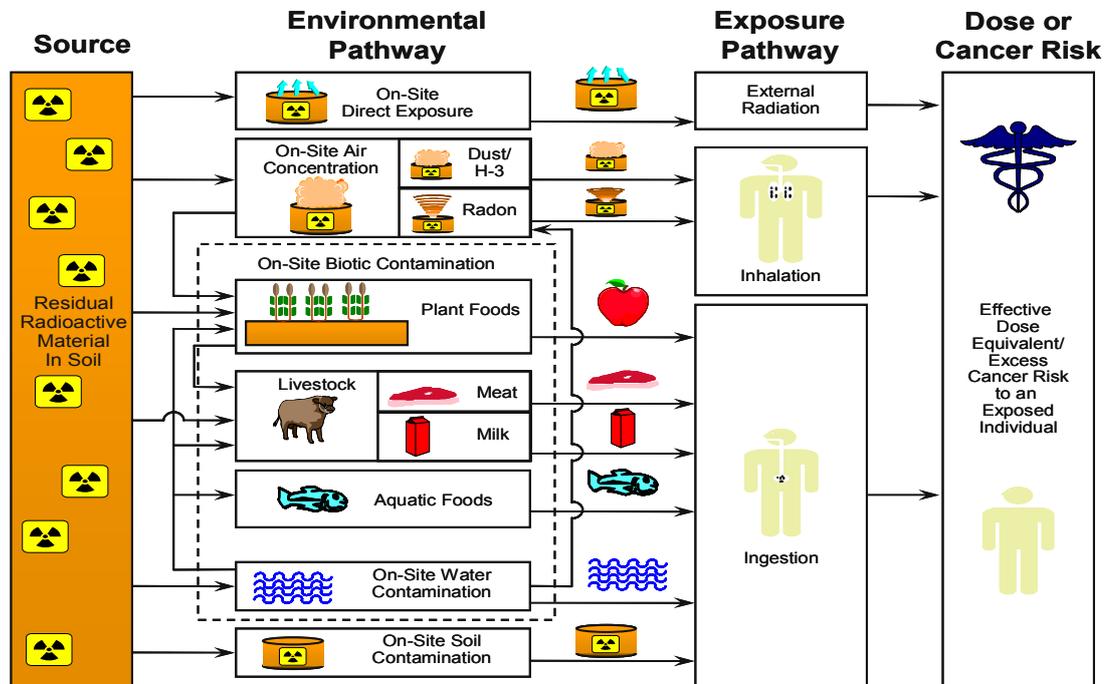


圖 2 - 14. 暴露路徑示意圖

第 9 章、整合多介質環境模式

美國能源部最近啟動了環境管理之進階模擬能力計畫 (ASCeM)，著眼於下一階段廢料衰敗及污染物釋出之功能評估所需，包含有：

1. 整合模擬與高效能。
2. 多相流。
3. 多主成分。
4. 多重尺度之地下水流與傳輸。
5. 環境暴露與風險評估。
6. 系統化不確定性分析與量化。

7. 耦合水力、化學、機械、熱傳。

美國聯邦單位已組成多介質環境模式之跨組織指導委員會以推動跨部門政府組織間在多介質環境模式研究與發展之合作（縮寫為 ISCMEM）。

而國際上跨國間之研究發展平台主要為成立於 2011 年的 IEM，IAEA 提供部分經費來源。

第 10 章、靈敏度與不確定性分析

任何模擬接會有不確定性，而不確定性來自於：

1. 模式不確定性。
2. 參數不確定性。
3. 邊界條件不確定性。
4. 初始條件不確定性。

不確定性分析方法可採用如：

1. 克利金 (Kriging)：推估空間中所欠缺之參數。
2. 靈敏度分析：分析模式對不同變因改變時之反應。
3. 模地卡羅模擬：將不確定性以統計觀點處理，將有限的可信賴資料，繁衍多組輸入參數組合，再透過模式大量模擬，以用以代表未知的真實情況。

第 11 章、研究案例

目前僅有葉教授提供之包含土壤整治、紬滲漏案例、現地滲漏等案例。

此外本研究並針對近年來在安全評估模式核種傳輸之解析解進行文獻蒐集與回顧整理，將其收錄於附件一。

第三章 處置場址調查項目、方法、技術及資料

3.1 國際岩石力學學會定量化描述岩體不連續面之建議方法 概述

接近地表(地表下數百公尺內)之岩體其力學行為受不連續面控制。除了以岩性進行岩體分類外，詳細描述岩體構造與節理特性亦非常重要。因此，力學或地下水流動分析需要之參數應盡可能的予以定量化。當岩體特性與不連續面的描述盡可能的完整且統一時，工程設計將可減少昂貴的現地試驗成本。另一方面，針對岩體現地特性進行詳盡的描述，將強化現地試驗的價值，原因是試驗結果的解釋與推論將會更可靠。因此，建立岩盤不連續面特性特徵化為重要工作。國際岩石力學學會為建立定量化描述岩體不連續面之標準，於1981年提出建議方法，以下為該文件之重要內容彙整。

詞彙表

建議以最適合的通用詞彙描述岩體內的所有「破裂」(fracture)。不過大部分研究人員偏好「不連續面」(discontinuity)勝過「破裂」(fracture)以作為所有節理(joints)、地層層面(bedding planes)、接觸面(contacts)、斷層(faults)的統稱。

節理(Joint)

岩石受到大地應力或地質作用而產生破裂面，且此破裂面兩側岩層並無相對位移，此破裂面即為節理。一群相互平行的節理稱為節理組，相互交叉的節理組則構成節理系。節理可以為張開、填充或閉合。與層面、葉理面及劈理面平行之節理，可分別稱為層面節理、葉理節

理與劈理節理。

斷層(Fault)

沿破裂或破裂帶發生明顯相對位移，位移規模從幾公分到幾公里不等，此破裂即為斷層。斷層面通常因為受到剪力錯動影響，而產生擦痕(即為斷面擦痕)且變光滑。斷層兩側的岩盤常呈破碎、劇烈變形或風化，形成如斷層角礫岩與斷層泥之類的填充物。斷層帶寬度可能從幾公厘到幾百公尺不等。

不連續面(Discontinuity)

泛指岩體內任何由物理因素所形成的不連續面的通用詞彙，不連續面不具任何張力強度或其張力強度極低。不連續面是節理、地層層面、片理面、弱帶及斷層的統稱。不連續面的十項定性描述如下：

- 1、不連續面的位態(Orientation)—指不連續面在空間中的方位。用來描述不連續面的傾向(dip direction) (方位角)及不連續面與水平面所夾之最大角度。例如：dip direction/dip($015^{\circ}/35^{\circ}$)。
- 2、不連續面的間距(Spacing)—指同一組不連續面中，兩相鄰不連續面的垂直距離。通常是指同一組節理的平均間距。
- 3、不連續面的延續性(Persistence)—指不連續面出露且可被觀察到的延伸長度。從不連續面的延續性，可概略瞭解不連續面的分佈範圍。不連續面的延續常會因遇到硬岩而中斷，或因其他不連續面的影響而降低其延續性。
- 4、不連續面的粗糙度(Roughness)—指不連續面的粗糙度與起伏程度。粗糙度與起伏程度將影響不連續面的剪力強度。值得注意的是，大規模起伏有可能造成不連續面的局部傾角變化。
- 5、不連續面的內壁強度(Wall Strength)—不連續面內壁的岩石其單壓強度。因風化作用或蝕變作用影響，使得內壁強度常低於岩石本

身強度。當不連續面內壁相互接觸時，內壁強度是影響剪力強度的重要因素。

- 6、不連續面的內寬(Aperture)—開口不連續面內壁間之垂直距離，其間充滿水與空氣。
- 7、不連續面的填充物(Filling)—係指區隔不連續面內壁之填充材料，填充物之強度通常低於母岩強度。一般填充物為砂、粉砂、黏土、角礫岩、斷層泥、糜嶺岩。此外，填充物亦包含由礦物所形成之薄層及使不連續面癒合之填充物，如石英或方解石脈。
- 8、不連續面的滲水狀況(Seepage)—指單一不連續面或全部岩體之滲水情形及潮濕程度。
- 9、不連續面的組數(Number of Sets)—指構成相互截切之節理系的節理組數量，岩體可被獨立的不連續面(individual discontinuities)進一步分割。
- 10、岩塊尺寸(Block Size)—岩塊尺寸受控於互相截切之節理組的位態以及節理間距，獨立的不連續面可能進一步影響岩塊尺寸與形狀。

取樣原則

在岩體調查工作中，依據不同精度之需求，可將調查工作分成兩大基本方法。(1)主觀(偏差)調查法：進行重要不連續面之調查與描述。(2)客觀(隨機)調查法：調查所有與特定直線相交之不連續面，或是出露於地表岩體中之不連續面。

在進行上述調查前，必須先判讀調查區域既有之地質圖，之後進行先期地質調查。先期地質調查重點包括岩性(岩石種類)、主要地質構造、斷層、岩脈及岩層接觸帶(lithological contacts)。此外，航照判釋結果對於先期地質調查工作亦有相當大之助益。先期調查階段之成

果為調查區域均勻區(domains)劃分，均勻區具有系統性之特徵，例如在均勻區內之節理具有相似之位態或間距，岩體之組構可視為均質。

客觀調查法之最大缺點為資料取得相當耗時，因此，欲分析所有資料，自動化資料分析方法是有必要的。對於無法輕易劃分構造均勻區之區域，客觀調查法是唯一的選擇。主觀調查法較適用於可明確劃分構造均勻區之區域，此一方法資料取得較為省時。通常，可明確劃分構造均勻區之區域不同調查線或調查區域調查所獲得之不連續面特性較一致。

岩體及岩體之不連續面特性主要可利用下列方法描述：

1. 露頭描述。
2. 岩心與鑽孔描述。
3. 攝影測量(terrestrial photogrammetry)。

以下針對不連續面十大特性調查之範疇、設備、程序以及報告進行說明。

1. 位態

範疇

不連續面是以傾角(dip)與傾向(dip direction)描述其在空間中之位態。傾角是指不連續面與水平面所夾之最大角度；傾向是指不連續面與水平面夾最大角度之方向，自正北往順時針方向計算。例如：傾角/傾向($025^{\circ}/45^{\circ}$)。

不連續面相對於工程結構之位態，明顯控制其穩定性。當不連續面低剪力強度以及不連續面數量或節理組數足以造成不穩定發生時，不連續面位態之重要性就隨之增加。另外，不連續面位態之相互關係將決定單一岩塊、岩層或呈鑲嵌狀岩體之形狀。

設備

一般使用地質羅盤與傾斜儀(Compass and Clinometer Method)。當岩石具強力磁性時，可使用傾斜尺(clino-rule)及 50 公尺膠帶，或使用分度器(protractor)直接測量方位角。無法觸及節理之傾角時，可使用附傾斜視角之傾斜儀估計節理位態。

程序

使用傾斜儀測量不連續面之最大傾角(dip)時，以兩位數字表示角度，例如：05 或 55(00-90)。傾向(dip direction)之測量方式是從正北方朝順時針方向移動測量角度，以三位數表示，例如：010 或 015(000°-360°)。記錄傾向(dip direction)與傾角(dip)時，先記錄傾角方向，再記錄傾角，並以斜線分隔三位數與二位數，例如：010/05。這一對數字代表傾角向量。

備註

因鐵管或鐵軌造成的磁偏，或礦體造成的磁力異常，有時會造成地質羅盤測得錯誤數值。

若不連續面之傾角對穩定性具有重大影響，測量傾角時應選擇一超過不連續面表面起伏波長之下傾(down-dip)基準長度。相對於不連續面平均傾角之局部起伏，是影響不連續面剪力強度的重要因素。需注意，潛在位移方向並不一定與上述下傾的方向一致。

欲定義特定均勻區的不同節理組，需測量足夠之節理數，所謂之足夠節理數從 80 至 300 不等。適當的節理數約為 150。因調查區不同、節理位態零散程度不同以及後續分析所需的詳盡程度不同，適當之節理調查數量也會不同。若不連續面位態趨於一致，謹慎地取樣將可大幅減少所需的樣本數。

使用地質羅盤與傾斜儀測量位態時，其正確性受到幾項因素影響，其中包括：不連續面之可及性、不連續面之出露範圍、不連續面

之平坦度與平滑度、磁性異常以及人為誤差。就岩石力學而言，用 5° 進位來表示不連續面之傾向和以 2° 進位來表示傾角即已足夠。但若需繪製不連續面之極點分布圖，建議測量角度以 1° 為單位，以減少節理極點相互重疊之情形。

利用三點法(three point method)可獲得主要不連續面(major discontinuities)之平均位態。在使用三點法求取位態時，必須有不連續面上三點之座標。若點為地表之露頭，則可用標示等高線之地形圖決定三點之座標。此外，亦可利用穿過不連續面之鑽孔資料，估算不連續面之位態。然而，延續性較差之不連續面，不一定能與三個鑽孔相交。

若從鑽孔所取得之岩心為定向岩心或利用孔內攝影儀可觀察到鑽孔之內壁時，則可估計不連續面之位態。當構造特徵(例如層面或葉理面)無明顯變化時，則可利用構造特徵進行岩心定向並決定不連續面位態。除此之外，井下觀測技術也提供其他有用資訊，如不連續面間距、填充物厚度以及滲透路徑位置。(詳見 11、鑽井岩心)

欲取得極度破碎岩體之位態資料時，建議採用特殊的岩心提取方法—完整岩心取樣法(integral sampling method)[1]。此法基本上是於取樣處先鑽小孔，於小孔中裝設強化圓柱型鋼棒並灌漿，然後使用直徑較大的圓形套筒再次套鑽已使用鋼棒與水泥漿強化的岩心。使用定位桿，可測得強化圓柱型鋼棒的方位角，並了解鑽取得岩心之方位。

結果報告

走向與傾角符號(Strike and dip symbols)：最簡單的資料呈現方式是在該區域之地質圖上，將走向與傾角符號標示於正確位置。例如：

 45° 代表不連續面傾角 45° ，直線方向表示走向、實心方塊表示傾向；



代表水平不連續面；



代表垂直不連續面，直線方向表示走向。

地質圖在空間上的限制，顯然不利於上述方法於相鄰區域同時表現數個不連續位態。不過，為呈現主要不連續面之位態時，此表示法仍相當有用。對於不同類型之不連續面，可進一步利用不同符號加以表示。例如下述符號通常用分別代表節理、層面與葉理面：



節理



層面



葉理面

符號的使用皆須有明確定義。主要不連續面之露頭必須直接繪於地質圖。例如粗實線(—)表示延續且可直接於露頭觀察之主要不連續面。粗虛線(-----)表示可能有延續但覆蓋於地表下之主要不連續面。

在初期評估與溝通階段，利用立體圖(Block diagrams)示有助於呈現野外所測得之位態測量結果。如圖 3 - 1(a)所示之立體圖，有助於瞭解工程結構與岩體構造之相互關係(可行時，亦可在該圖描繪應力橢圓體，提供主應力方向，以協助評估工程結構物配置的最佳位態)。圖 3 - 1 (b)顯示更大比例尺的立體圖。許多工程結構物均可採用此種理想化方式呈現，例如：隧道入口、隧道斷面或大型岩石地下空間、岩坡、大壩基礎等。(除不連續面位態外，視比例尺亦可於立體圖中呈現不連續面之間距與延續性)。圖 3 - 1 (c)則顯示一角被「挖除」之立體圖，此圖可提供岩體構造之視覺印象。當露頭遭植物或土壤局部遮蔽時，便可用此圖以取代照片。

圖 3 - 1 之立體圖有助於進行節理組之編號，同時可表現不連續面位態與真北之相對關係，另外，傾向與傾角可標示於圖側。(提供岩體構造照片時亦可如此表現不連續面位態)。

節理玫瑰圖(Joint rosettes)比前述方法更可定量表示節理位態，此

方法常用來呈現大量節理位態。以繪製簡化之圓形玫瑰圖為例，在 0-360° 以每 10° 為間距，畫一通過圓心之直線，將圓分割成數個夾角為 10° 之扇形。根據不同扇形區，將所測量之節理位態進行分組，節理數則標記於直線上，並分別畫出半徑為 5、10、15 之同心圓，以便在直線上標示節理數分別為 5、10、15 之刻度。節理走向可相對於玫瑰圖之圓心，以鏡射方式繪出如「花瓣」之圖形。在此節理玫瑰圖中，無法表示各節理組之傾角，因此將各節理組之傾角標記於玫瑰圖之周圍。

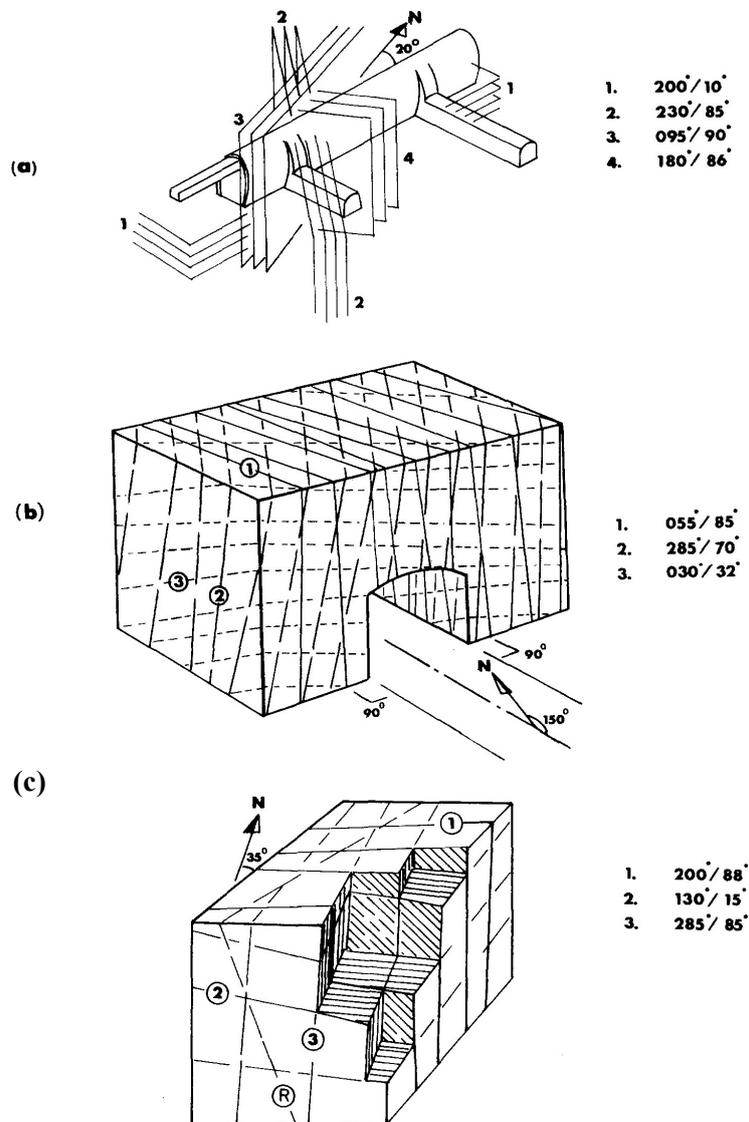


圖 3-1. 立體圖可定性描繪節理與工程結構物空間關係

注意，接近水平之不連續面其走向或傾向值不確定性高，因此以玫瑰圖顯示並不恰當。雖然採極座標之節理玫瑰圖廣泛被使用，但於某種程度會誤述資料。節理玫瑰圖誇大高密度之觀察群組且低估低密度之觀察群組。造成此現象之原因是每一扇形區之面積與徑向座標的平方成正比；但是在直方圖中，每一個長方形或扇形之面積其實是與頻率(半徑)成正比，而非與頻率(半徑)的平方成正比。(故理想的極座標圖應採用平方根徑向座標，Pincus [2])

為表達平面的位態，有許多不同的立體投影(Spherical projection)投影方法。與地質學有關之教科書中，對於各種投影法多有詳細描述。在此將只介紹等面積投影法。當球體中心點置於不連續面上，不連續面(α/β)即可用大圓或極點表示，並將其標示於參考半球(見圖 3 - 2 (a))。工程應用多以下半球為參考半球。將不連續面投影至等面積投影圖上，即可獲得該平面於投影圖之二維圖形。在圖 3-2 (a) 中，P 是不連續面(K)之極點，極點是不連續面的法線與下半球之交點。將極點繪於極等面積投影網(polar equal area net)時(圖 3 - 2 (b))，傾角 β 是自投影網圓心沿與走向垂直方向朝圓周計算。不連續面亦可於施密特投影網大圓表示(圖 3 - 2 (c))，不連續面走向 $\alpha+90^\circ$ 。的描繪方式是先將描圖紙標示正北並與投影網之正北疊合，再將投影網以順時針方向旋轉 $\alpha+90^\circ$ ，此時投影網之南北直徑即為走向。傾角描繪方式是先旋轉描圖紙，使走向與投影網之南北直徑疊合，再沿東西向直徑自圓周向圓心計算。不連續面之極點 P 亦可描繪在施密特投影網，上述兩投影網所呈現之極點分佈情形相同。目前已有許多商業軟體可進行不連續面位態立體投影極點或大圓繪製。

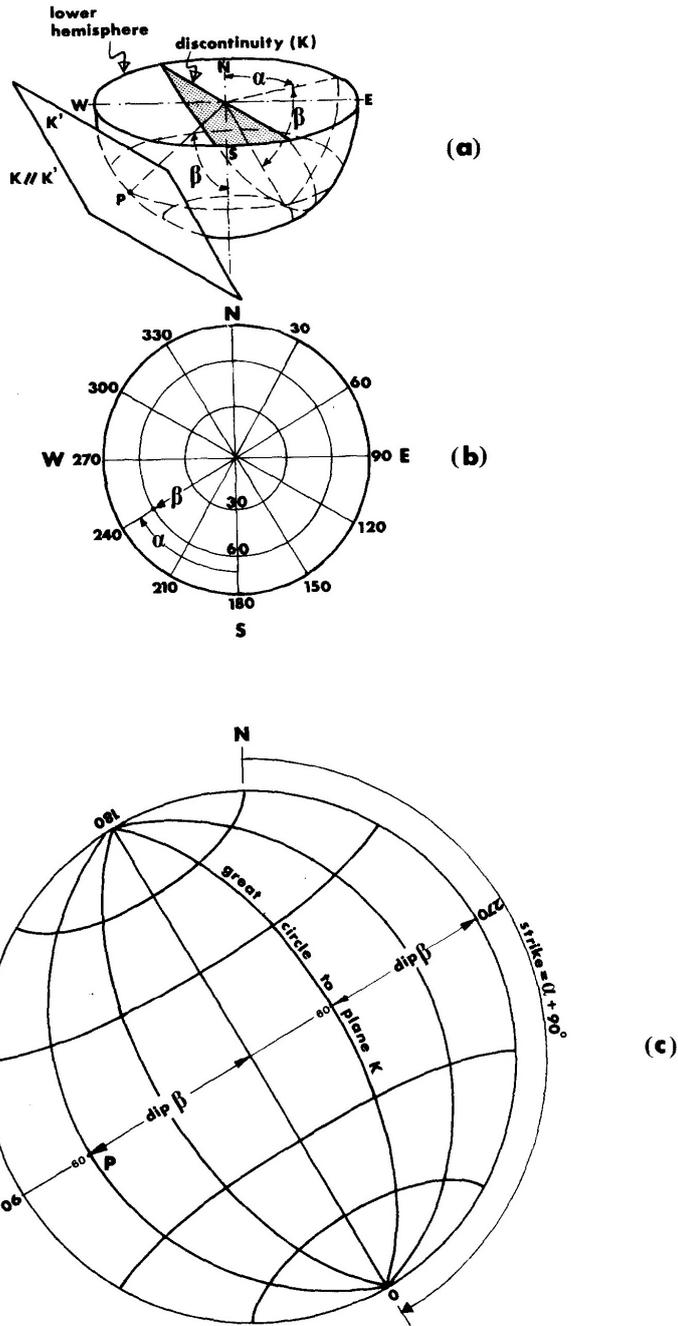


圖 3-2. 以下半球為參考半球(a)，將不連續面 K 以極點 P 及大圓表示於極等面積投影網(b)，以及施密特投影網(c)之方法

利用極等面積投影網描繪不連續面之極點時，因不必旋轉描圖紙，所以繪圖時相當方便。欲取得各組不連續面之平均位態，必須先以目視方式辨識不連續面之極點群集分佈狀況。施密特等值線法就是用於表示不連續面之極點密度，如圖 3-3 所示。繪製施密特等值圖

之方法，是在等面積投影網上疊合方型網格。將圖 3 - 3 中圓面積佔投影網總面積 1%的圓之圓心，置於投影網之格線交點，並計算此圓內之極點數，並將極點數記錄在格線交點旁。最後以最多 6 個間隔之等值線，繪製極點等密度圖。在極點密度最高之中心，其值可代表該組不連續面之平均位態。然而，由於位態具有變異性，故位態為與平均值有關、具特定離散程度(dispersion)之隨機變數(random variable)。因此，節理統計建議採用或然率方法進行更精確之分析。

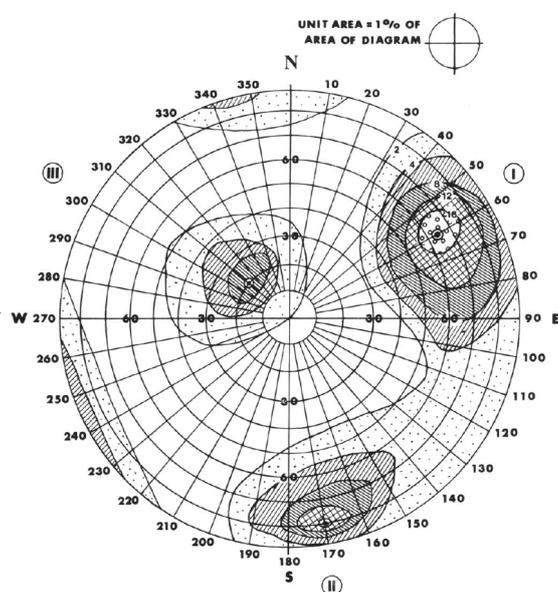


圖 3 - 3. 在極等面積投影網上以施密特等值線法呈現三組節理之位態主要節理 I 與 II 兩者幾乎互相垂直，而次要節理 III 則幾乎呈水平

除了常用的地質羅盤或傾斜儀量測不連續面位態以外，在某些情況下，攝影測量法(Photogrammetric Method)是唯一可用之方法，例如重要之岩面鄰近磁力異常帶，或者岩面不穩定且(或)無法到達。另外，只有在必須取得大量不連續面位態資料時，攝影測量法才具經濟效益。大的不連續面可用攝影測量技術精確地製圖，但不連續面越小，則製圖之正確性將會急遽將低。目前發展快速的光達技術是另一種可能之應用工具。

2. 間距

範疇

單一岩塊大小主要受控於不連續面之間距。當岩石具有數組間距緊密之不連續面時，則岩體凝聚力較低。然而，岩石不連續面間距較大時，則岩石呈互鎖狀(interlocking)，上述效應亦與各個不連續面之延續性有關。當不連續面間距非常緊密時，岩石破壞是因為小型岩塊旋轉或滾動造成，所以不連續面位態之重要性較小。如位態一節所述，當發生變形作用之條件存在時，間距重要性便增加。不連續面之間距，明顯影響岩體之滲透性及滲水特徵。假設各個節理之內寬相同時，通常節理之水力傳導性與間距成正比。

設備

至少 3 公尺長之量測帶(刻度為公厘)以及地質羅盤或傾斜儀。

程序

當條件許可，以量測帶測量於地表之不連續面間距時，量測帶必須與不連續面垂直。若量測帶無法垂直於不連續面，必須校正偏斜方向以獲得真實間距。測量與記錄不連續面間距之取樣長度應大於 3 公尺(若欲觀察之岩層厚度小於 3 公尺，則以岩層厚度為最小取樣長度)，另外，取樣長度最好是比預估間距大 10 倍。間距(d)之測量精度應能達其絕對值的 5% 範圍內。

以地質羅盤量測量測帶與節理組之夾角，角度不得小於 5° 。計算間距中值(most common spacing)之方程式如下：

$$S = d_m \sin \alpha$$

其中 d_m 是兩相鄰節理間距中值(modal spacing)。如圖 3-5 所示之直方圖適合用於呈現節理間距之變化。

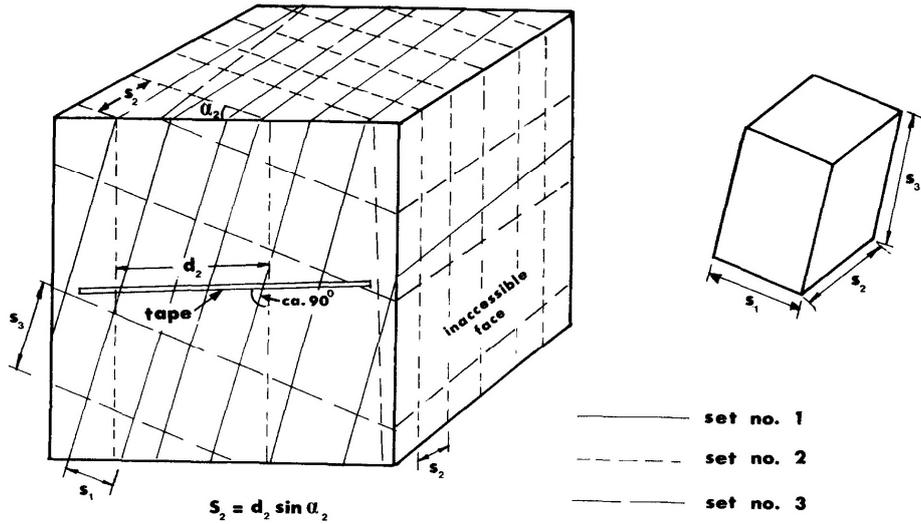


圖 3-4. 於露頭量測岩體節理間距

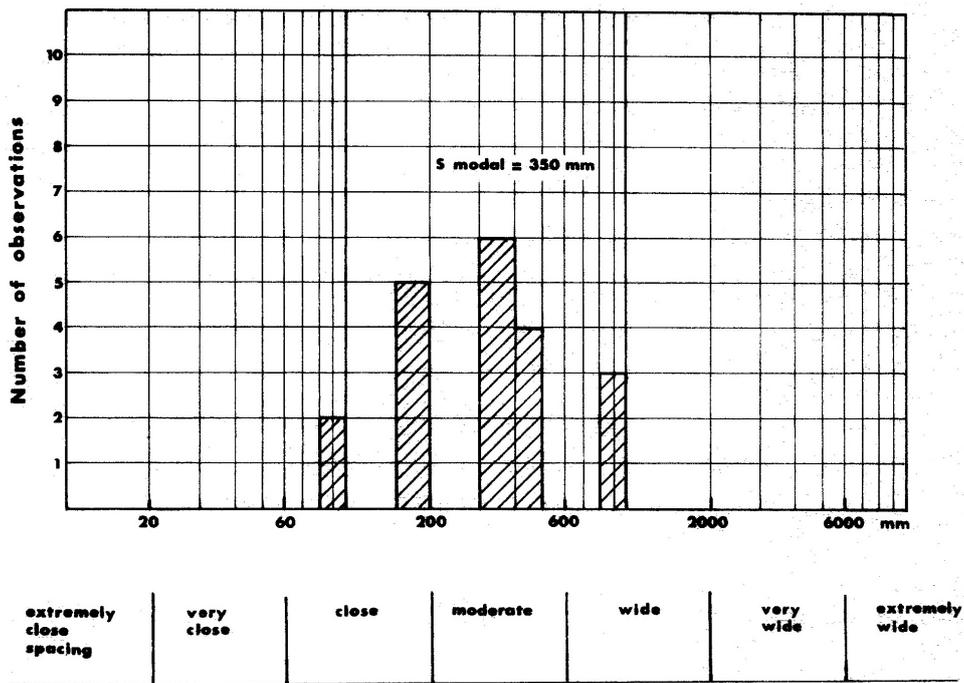


圖 3-5. 將所觀察之節理組的間距以直方圖表示

圖中可看出間距中值、最小間距及最大間距。與間距相關之描述建議置於直方圖下方

備註

雖然強烈建議以量測帶及地質羅盤進行間距量測，但如果工程地質師有足夠經驗時，則可用目視判斷，不一定要使用量測帶與地質羅盤。用工具量測間距或以目視判斷，端看精度要求。但必須了解，同組不連續面可能並非完全平行，因此節理間距量測精度仍有其限制。

間距中值之平均值(S_1 、 S_2 等)可用來代表岩塊的平均尺寸。利用間距描述岩塊尺寸之其他方法可參考「岩塊尺寸」一節。特定一組不連續面，具相似間距之區域，可能有必要與不連續面間距較寬之區域分開。立體圖(圖 3-1 (b))或直方圖(圖 3-5)便可指出上述情形之差異性。

通常因爆炸引起的破裂，在測量不連續面間距時應排除在外。對於岩石出露面積小或未出露之地區，可利用折射震測法估算淺層 20-30 公尺處岩體之不連續面間距。通常頻率(即每公尺不連續面之數量)和縱波或壓縮波(P)波速 V_p 有關。不連續面的間距或頻率亦可經由鑽孔岩心分析及孔內攝影技術獲得。

結果報告

應記錄各組不連續面之最小間距 $S(\min)$ 、間距中值(S)、最大間距 $S(\max)$ ，並以直方圖呈現間距分佈情形(如圖 3-5)。不連續面間距劃分如下：

說明	間距
極密	<20 mm
很密	20-60 mm
密	60-200 mm
中度	200-600 mm
疏	600-2000 mm
很疏	2000-6000 mm

極疏 >6000 mm

直方圖是呈現大量間距資料以供統計處理的便利方法，且每一組不連續面應繪製一組直方圖。每一組不連續面之頻率曲線可繪於同一張直方圖，以了解各組不連續面間距中值及間距分布情形。(註：以平均間距代替間距中值，有助於降低處理重複定義、定義不清或間距資料很少之難度。例如：負指數分佈)。間距也可以倒數表示，例如：每公尺不連續面之數量，此數值即頻率。

3. 延續性

範疇

延續性意指不連續面的平面延伸範圍或尺寸，藉由觀察不連續面的線痕長度，可概略量化其延續性。延續性是重要的岩體參數之一，也是最難量化的參數，因此只能取得概略值。

特定組之不連續面的延續性通常較其他組不連續面高，因此，次要不連續面大多為主要不連續面截切而中斷，或可能終止於較堅硬之岩石處。岩體出露的部分通常比不連續面的面積或長度來得小，因此只能依猜測估算真正的延續性。偶而，不連續面沿傾向以及走向的破裂長度可量測獲得，藉此，該不連續面之延續性即可利用或然率理論來推估。然而，在野外進行不連續面延續性量測時，充滿了困難與不確定性。

設備

至少 10 公尺長的量測帶。

程序

針對露頭或調查區域，需先描述各組不連續面的延續性，觀察獲得各組之不連續面可分別以延續性 (persistent)、低延續性 (sub-persistent) 及無延續性 (non-persistent) 加以描述。圖 3-6 為用來輔

助延續性說明的野外素描圖。

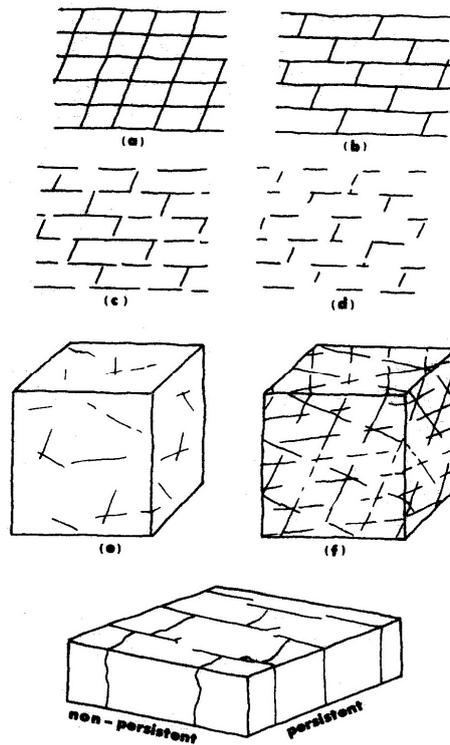


圖 3-6. 簡單素描與立體圖有助於辨識各組不連續面的相對延續性

建議沿不連續面的傾向及走向分別量測不連續面長度，然而，如果露頭出露面積有限，則可能無法完整測量。對於三維大型露頭，如明挖礦場或相交地下通道，便可完整量測不連續面長度，並得到各組不連續面尺寸的直方圖。

不連續面的線痕長度可根據下述規則描述：

很低	<1 m
低	1-3 m
中度	3-10 m
高	10-20 m
很高	> 20 m

進行不連續面長度的測繪時，同時記錄不連續面截切關係非常重要。不連續面痕跡線終止於露頭(x)、終止於岩石(r)或終止於其它不

連續面(d)對於延續性評估的意涵並不相同。若節理組屬於系統性的(systematic)、具較高比例的(x)，其延續性顯然較以(d)為主之次系統性(sub-systematic)節理組為佳，而節理組屬於無系統性(non-systematic)時，則(r)所佔比例通常最高。

應同時記錄不連續面兩端的截切情形(x、r 或 d)以及不連續面長度(單位為公尺)。(例如：8(dx)代表不連續面長度為 8 公尺，不連續面的一端被另一不連續面截切，而另一端則延伸至出露區域之外，故無法觀察)。詳細紀錄露頭大小非常重要，因為露頭大小會影響所觀察到的不連續面終止於露頭(x)之數量以及不連續面長度評估。

備註

Piteau [3]已證實，可同時觀察兩端終點的不連續面，通常比只能看見一端終點以及無法看見任何終點的不連續面來得少。在 Nchanga 礦坑觀察 3844 組節理樣本的研究中，兩端終點皆出露的不連續面有 1394(36%)組，其平均長度為 1.4 公尺；僅一端終點出露的有 1538(40%)組不連續面，其平均長度為 2.9 公尺；兩端終點皆無出露的有 912(24%)組不連續面，其平均長度為 6.3 公尺。

根據 Roberson [4]沿傾向以及走向進行的破裂長度量測結果發現，不連續面尺寸通常為等向性的。當不連續面與硬岩接觸而終止時，不連續面通常為圓形的；當不連續面為其他不連續面切截時，則不連續面常呈矩型。

當不連續面的型態近似圓形時，可將其直徑進行統計分析。若統計結果顯示岩體中的不連續面之直徑呈常態分佈，且不連續面的間距為隨機時，則平均線痕長度可能比平均直徑稍長或稍短[5]。這是因為線狀採樣(scanline)與大型不連續面相交的機會較大，因此使得線痕長度(即弦長)短於直徑的事實影響變小。

統計方法可用於分析不連續面的最大線痕長度。統計方法可估計在任何長度下不連續面的再現週期；亦可估計岩體部分不連續面超出特定長度的或然率。例如：若分析後發現主要不連續面在走向方向上的長度為 50 公尺或以上，且平均間距為 150 公尺，便可估計在走向方向上每 100 公尺量測間隔，不連續面長度為 50 公尺或 50 公尺以上的出現或然率等於 $100/150=0.66$ 。若已知完整的尺寸分佈(程序(b))，即可根據極值統計學計算特定尺寸的不連續面發生或然率。McMahon[6]提出將極值統計學應用在岩石邊坡穩定分析的應用實例。值得注意的是，若線痕長度觀測值的下限定義錯誤，恐怕導致不連續面頻率低估且尺寸高估的情形發生。

評估各組不連續面的延續性時，最重要的是先調查岩體是否有可能形成階狀破壞面(steped failure surface) (如圖 3 - 7 中的模式(2)與模式(3))。此種破壞模式可能發生於剪動的不連續面其延續性小於 100%時，當滑動面上完整岩石(intact dridges)的比例愈小，階狀破壞面的破壞模愈容易發生。除非不連續面或平行不連續面的區帶其延續性為 100%，否則它們的延續性通常較潛在破壞面的延續性低。

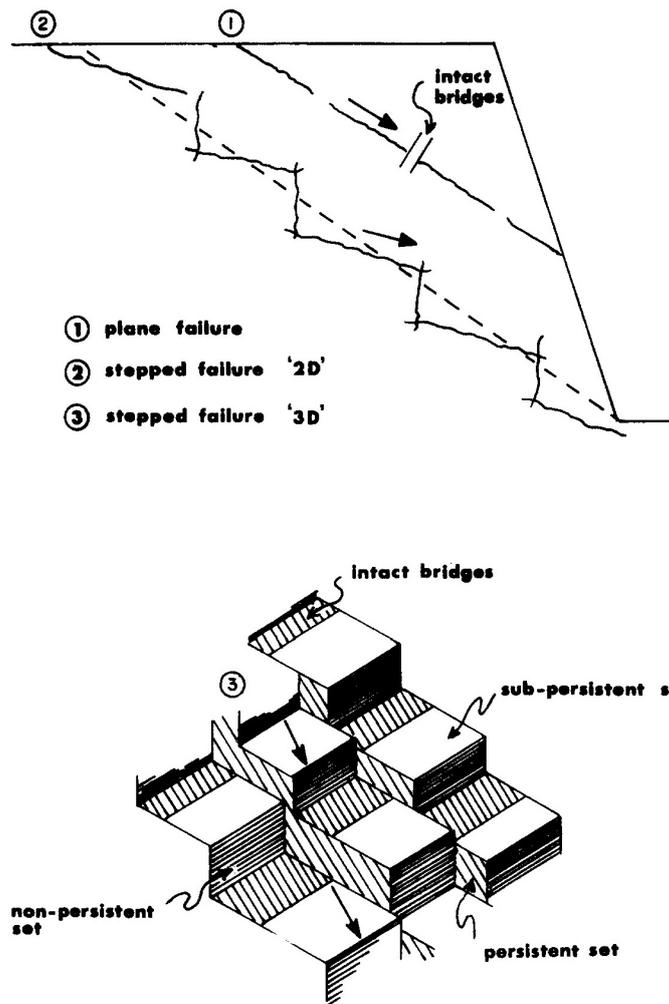


圖 3 - 7. 本理想化的例子可說明對於潛在破壞面上完整岩橋 (intact bridge)與階狀下降(down-stepping)

摘自於[4]與[7]

結果報告

依相對延續性，各組不連續面應描述其為系統性、次系統性或非系統性。直方圖或照片亦應加以標示。若露頭範圍夠大時，就必須將所觀察到的各組不連續面之線痕長度以尺寸頻率直方圖呈現(若後續有使用或然率理論，就必須繪製直方圖)，且必須提供平均線痕長度(沿走向及傾向)。

各個不連續面的終止資料(termination data)(例如：8dx)應該以終

止指標(termination index) (T_r)表示。 T_r 定義為終止於岩石的不連續面總數 (Σr) 與總終端數(total number of terminations) ($\Sigma r + \Sigma d + \Sigma x$) 的比值。因為每一條線痕有兩個端點，所以總終端數是總樣本數的兩倍。

$$T_r = \frac{(\Sigma r) \times 100}{2(\text{不連續面總數})} \%$$

在情況允許下，應估計潛在破壞面(包含階狀破壞面)的延續性，且估計延續性之百分比應無條件進位(例如：92%應假設為 100%)。

4. 粗糙度

範疇

不連續面的粗糙度是影響不連續面剪力強度之重要潛在因素，特別是不連續面未發生位移且互鎖(interlocked)時(例如：無填充物充填之節理)。粗糙度的重要性隨不連續面內寬、填充物厚度及位移量增加而下降。

粗糙度一詞是指不連續面上的起伏度(waviness；指不連續面上起伏程度較大，因其不易剪斷(sheared off)，若其為互鎖或接觸時，剪動會造成剪膨脹)以及不平坦度(unevenness；指不連續面上起伏程度較小者，這些小起伏會因剪動而遭到剪斷，如果不連續面的內壁强度高，及/或所受應力小，則這些小起伏才會造成剪膨脹現象)。

事實上，起伏度會影響主要不連續面上的初始剪位移方向，而不平坦度會影響室內試驗或現地直剪試驗所獲得之剪力強度(見圖 3 - 8)。

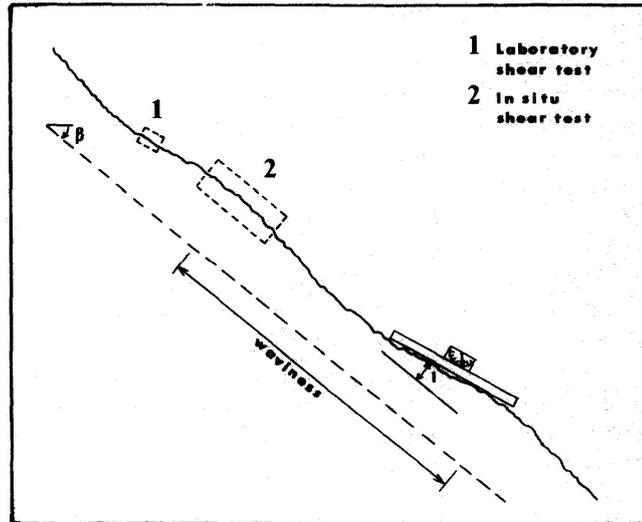


圖 3-8. 不同尺度取樣與試驗對應之不連續面的粗糙度

起伏度可用角度(i)表示

若知道潛在滑動方向時，則粗糙度應平行於此方向作一線性剖面進行取樣。大多數的潛在滑動方向是平行於傾向(傾斜向量)，若滑動是由兩相互截切的不連續面所控制時，則潛在滑動方向會平行於此兩不連續面之交線。

若無法得知潛在滑動方向時，進行粗糙度的三維取樣是相當重要的，而粗糙度的三維取樣可用地質羅盤或傾斜儀達成。測得之傾角與傾斜方向可用極點表示，並將其繪於等面積投影網。另外，也可用攝影測量法描繪出特定平面上(不連續面平均平面)之表面起伏。對於無法靠近直接量測的不連續面，此方法相當有用。

所有用於調查粗糙度之取樣方法，其最終目的皆是估計或計算出剪力強度與剪膨脹量。

設備

使用線性剖面法進行粗糙度取樣需要以下設備：(i)至少 2 公尺長之折疊直尺，其刻度為公厘，(ii)地質羅盤與傾斜儀，(iii)10 公尺長之

金屬線或尼龍線，每隔 1 公尺及 10 公分，分別塗上紅色及藍色記號。在線的兩端綁上小木塊或其他類似之物體，使線材能夠拉緊成直線，以做為不連續面上的參考線。

使用地質羅盤與圓盤傾斜儀(disc-clinometer)進行粗糙度取樣需要以下設備：(i)Clar(水準儀 Breithaupt)地質羅盤，具有水平校準氣泡及可旋轉的蓋子，並以具刻度之絞鍊紀錄傾角，(ii)四個不同直徑(即 5、10、20 與 40 公分)的輕質合金圓板，且固定於羅盤。[1]

程序

(a) 線性剖面圖(Linear profiling)：以可靠近且預期可能發生剪力破壞的不連續面為取樣之代表性不連續面。

視不連續面大小，將長 2 公尺的直尺或長 10 公尺的金屬線置於不連續面上方，且與潛在滑動方向平行。為了方便，直尺或金屬線要與不連續面的起伏最高點接觸，且金屬線盡可能的拉直(為了避免直尺從陡峭的節理面下滑，可以用小塊橡皮泥(plasticene)固定。橡皮泥可放在直尺與高點之間)。已知切向距離 (tangential distance)(x)，從不連續面表面至直尺(或金屬線)的距離為垂直距離(y)，精度至少為公厘(見圖 3 - 9)。建議選擇適當的(x)值進行取樣，若以固定間距(例如 5 公分)取樣，則可能影響剪力強度的小型階梯狀或相似特徵之起伏會被忽略。一般而言，(x)間距大約等於總測量長度的 2%即可取得不錯的粗糙度。在記錄(x)與(y)時，一併記錄量測方向與傾角。此一方向與傾角可能與不連續面的位態(α/β)不同。

以上述程序繪製剖面圖，並據此獲得最小、最常見、最大粗糙度，依詳細程度要求之不同，剖面圖可用在整個不連續面組，或單一不連續面，或對應各量測到的不連續面。起伏角(i)如圖 3 - 8 說明，若剖面圖太短以致於起伏度無法從剖面圖取得，則必須用直尺及傾斜儀測

量。若起伏度的波長與振幅太大而無法以剖面取樣時，則必須用估計的方式或者量測可靠近的不連續面以獲得之。將不連續面上的最小、中值(modal)、最大粗糙度進行拍照，並放置長 1 公尺的尺做為比例尺。

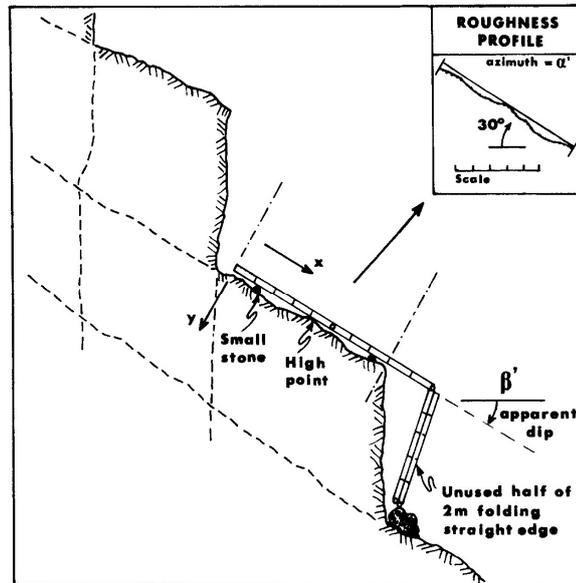


圖 3-9. 沿預估的潛在滑動方向，記錄不連續面二維粗糙度的方法

(b) 地質羅盤與圓盤傾斜儀(disc-clinometer)：以可靠近且預期發生剪力破壞的不連續面為取樣代表性不連續面。

欲測量小尺度(small scale)的粗糙角時，必須在不連續面上選取至少 25 個點，並以直徑最大之合金圓板量測(例如直徑 40 公分的圓板)，再記錄各點的傾斜方向與傾角(不連續面的面積至少是最大合金圓板面積的十倍)。重複上述量測步驟，依序以其他直徑的圓板進行量測。使用較小直徑的圓板測得大量資料，將可改善整體資料的靈敏度。例如：用直徑 20 公分的圓板量測 50 個點，用直徑 10 公分的圓板量測 75 個點，以及用直徑 5 公分的圓板量測 100 個點。

以極點表示各組不連續面之傾斜方向與傾角，並將極點畫在等面

積投影網。根據各組不連續面之極點，描繪各組不連續面的等值線。將不連續面上的最小、中值、最大粗糙度進行拍照，並放置長 1 公尺的尺做為比例尺。

備註

(a) 線性剖面圖：用於量測垂直距離(y)的尺，其刻度為公厘，且往尺的一端逐漸變細，如此才可測得更為詳細的粗糙度。

文獻已提到多種自動記錄剖面圖 (automatic recording profilographs) [1、3]，且大部分都可以得到很精確的粗糙度。顯然這些自動記錄剖面圖比本節所建議之方法精度更高，但如果是基於岩石力學研究之目的，則可不需要如此高的精度。

錯斷或階狀(step)將不連續面分成數段相互平行的面，使得不連續面缺乏延續性，故必須仔細地繪製剖面圖。

除剖面圖法之外，還有許多其他紀錄粗糙度的方法。例如：可量測不連續面上的波長與振幅，並依不同間距將其分類(如：<1 公分、1-10 公分、10-100 公分、>1 公尺)。然而，對於表面起伏非常大(例如：1 公尺)的節理，則可在節理面上放置直尺做為比例尺，沿下傾方向以 1 公尺為間距，以固定有直尺的傾斜儀迅速測量各個位置的傾角。可視情況依地質羅盤測量法所述，調整直尺長度。

(b) 地質羅盤與圓盤傾斜儀：使用直徑最小的圓板量測時，粗糙角離散程度最大且可獲得最大的粗糙角。使用直徑最大的圓板量測，則粗糙角離散程度最小且可獲得最小的粗糙角。

要取得各取樣平面的大量傾斜方向與傾角資料(約 200 個取樣點)需工作至少一個小時。只有在特殊情況下才會如此取樣，若有大量不連續面需進行量測，則建議採用攝影測量法。若知道潛在滑動方向，則建議採用剖面圖法，藉此資料收集量可減少，僅於單一個潛在滑動

方向取樣。

對於特定潛在滑動方向，特定尺寸之圓板對應之最大粗糙角可加以描繪(見圖 3 - 10)。當剪位移與特定之圓板底邊長度相等時，垂直於不連續面之剪位移(剪膨脹)為最大粗糙角之正切值乘上底邊長度(圓板的直徑)。將多組底邊長度(圓板直徑)以此方法進行分析，便可獲得膨脹曲線。若粗糙面所受之破壞極小時，則上述分析方法可獲得一個與實際剪動過程相近的膨脹曲線。當硬岩中的節理發生剪動，且有效正向應力小時，最適合以上述之方法進行分析。(假設比最小圓板直徑小的粗糙面(asperities)不影響剪膨脹過程)。見 Fecker and Rengers[1]以獲得更多詳細資訊。

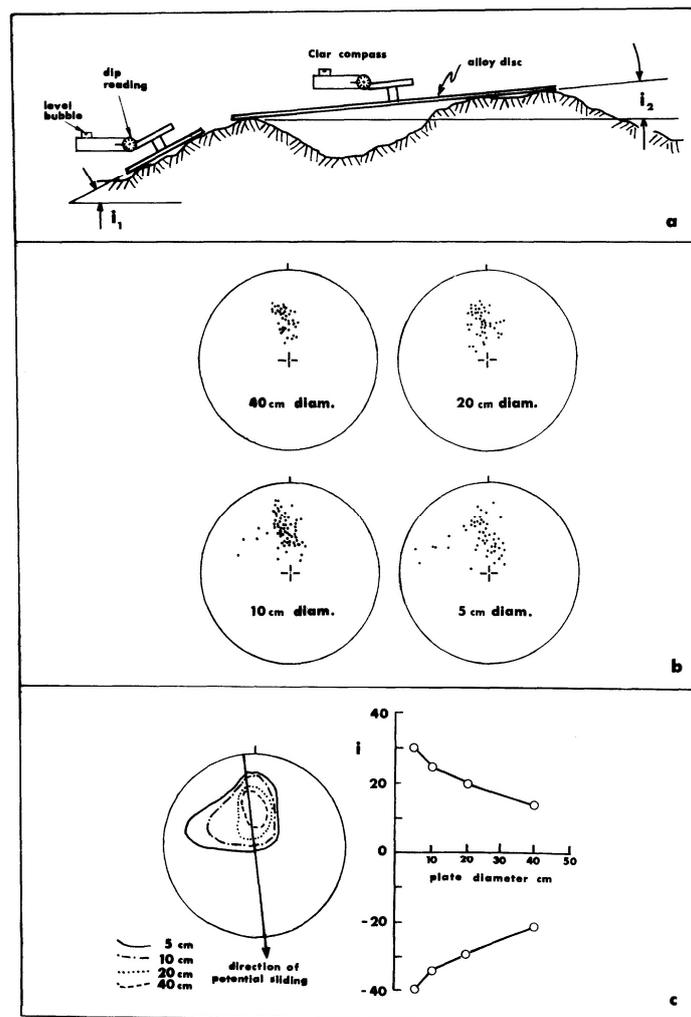


圖 3 - 10. 以三維方式記錄不連續面之粗糙度，本例適用於可能滑動方向為未知時

將 Clar 地質羅盤及傾斜儀依序固定於不同直徑之圓板(例如：直徑為 5、10、20 及 40 公分)，再將傾向與傾角之讀值以極點表示後繪於等面積投影網。修改自[1]與[2]

以不連續面上各點座標的統計分析為基礎，有許多方法可用於預估不連續面(尤其是未被填充物所填充的節理)的剪力強度及受剪膨脹的特徵[4, 5]。

結果報告

線性剖面圖：(x)與(y)值應以相同比例(不失真)描繪，且傾斜方向正確，如圖 3 - 9 所示。以剖面圖呈現最小、最常見(most common)及最大粗糙度時，應將三個剖面圖置於同頁面以利比較。根據不同精度之需求，這三個剖面圖可代表一組不連續面、單一不連續面或對應各個取樣表面。每一個剖面圖都必須有比例尺。若測量值與先前紀錄的不連續面位態 α/β 不同，則剖面圖應明確定義及描述施測剖面之傾斜方向與傾角。特定不連續面最小、中值(modal)、最大粗糙度之照片應與剖面圖一同呈現。

地質羅盤與圓盤傾斜儀：在野外以不同直徑的圓板量測傾斜方向與傾角，並將位態以極點表示，最後將各圓板的極點繪於等面積投影網。如圖 3- 10 所示，可將各圓板的極點資料整合後呈現在同一個等值線圖。必要時可將同一組不連續面的量測資料繪於同一個等面積投影網，以呈現粗糙度的範圍(以及任何因起伏所造成的位態變化)。

若可能的滑動方向未知時，應先繪製傾向(傾斜向量的方向)的剖面圖，以呈現粗糙度，而正確方向的剖面圖則可於後續階段繪製。特定不連續面的最小、中值、最大粗糙度之照片應與剖面圖 3- 1 同呈現。

在野外製圖的初步階段(例如可行性評估階段)，因為有時間的限制，所以可能無法以上述方法測量粗糙度。粗糙度的定性描述詞彙主要分成兩種尺度：小尺度(數公分)與中尺度(數公尺)。中尺度的粗糙度分成三級：階梯型、凹凸型、平面型，而中尺度又可再細分為小尺度，小尺度的粗糙度亦分成三級：粗糙、平順、斷面擦痕。圖 3-11 顯示九種典型的粗糙度剖面圖。

- I、 粗糙(或不規則)、階梯型
- II、 平順、階梯型
- III、 斷面擦痕、階梯型
- IV、 粗糙(或不規則)、凹凸型
- V、 平順、凹凸型
- VI、 斷面擦痕、凹凸型
- VII、 粗糙、平面型
- VIII、 平順、平面型
- IX、 斷面擦痕、平面型

「斷面擦痕」僅適用於有明顯證據顯示不連續面曾經發生剪位移時。應注意擦痕(striations)或斷面擦痕(slikensided)的方向應標明，因剪力強度會隨其方向而不同。

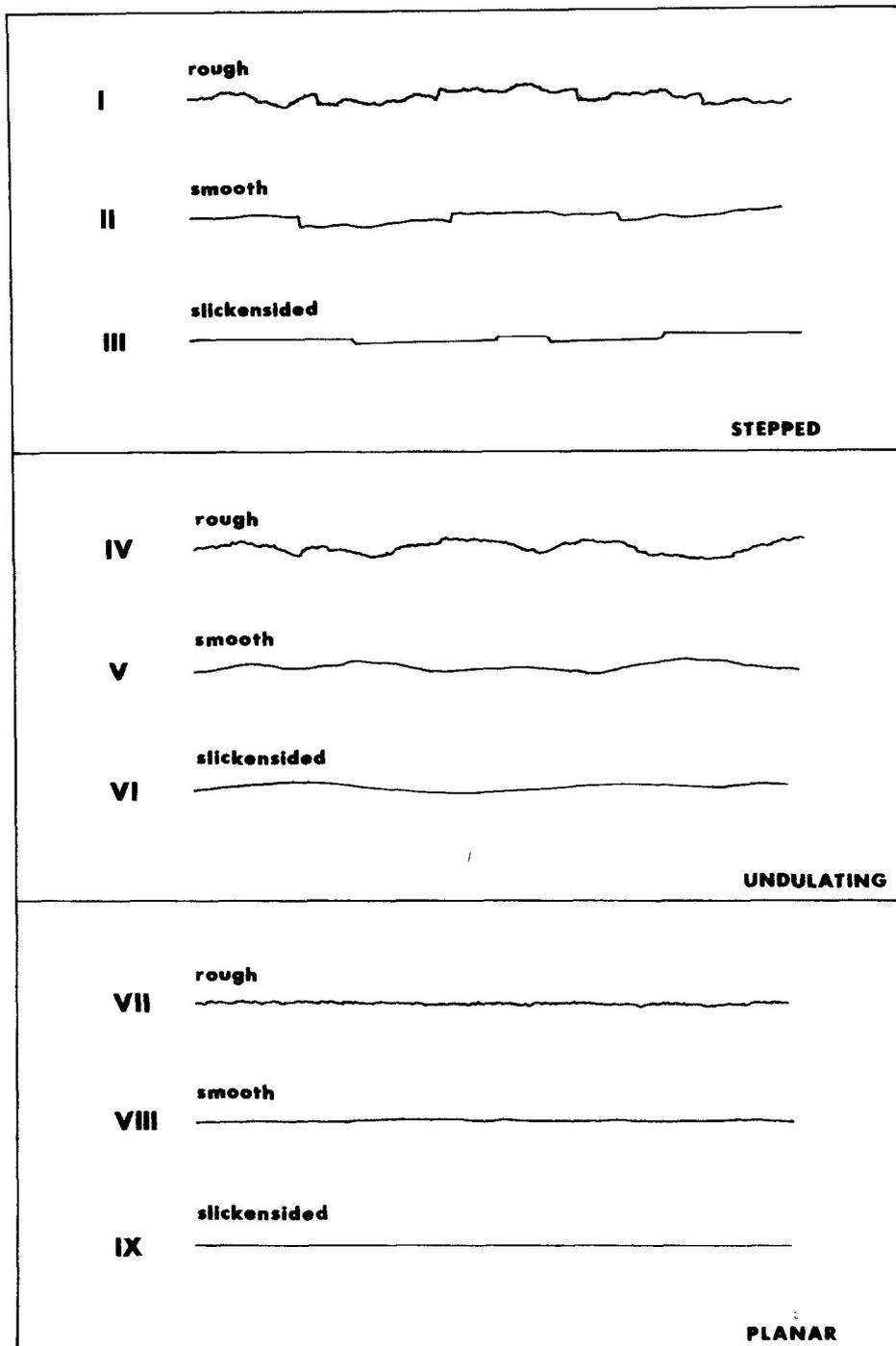


圖 3 - 11. 代表性粗糙度剖面圖及建議名稱

每一個剖面圖的長度範圍為 1 至 10 公尺，且垂直方向與水平方向之比例相同

若假設礦物被覆體(mineral coatings)不存在或含量相等時，這九種剖面圖的有效粗糙角(i)顯示出剪力強度大小為 $I > II > III$ 、 $IV > V > VI$

及 VII>VIII>IX，而且剪力強度大小 I>IV>VII、II>V>VIII、III>IX 及 VI>IX。上述部分關係式仍不確定，例如 VII 可能大於 III，這取決於位移膨脹量是否受到限制。地下孔穴的節理位移膨脹量通常會受限於圍岩的勁度，但岩坡的節理則較不受限。

在上述小尺度或中尺度觀察面，可能也會觀察到屬於大尺度的起伏，例如在平順、凹凸型(等級 V)中觀察到波長 10 公尺、振幅 50 公尺的大尺度起伏，亦需特別加以註記。與延續性相關的描述(即系統性、次系統性、非系統性)，將決定粗糙度的重要性。

剪力強度估計

進行不連續面粗糙度的描述，其主要目的為方便估計剪力強度大小。對於無填充物填充的不連續面，其剪力強度的估計可相當準確。大體而言，剪力強度包含最大(尖峰)或最小(殘餘)摩擦角，或部分中間值(依先前剪力位移程度決定)，若存在大尺度起伏時，則還包含(i)。因此

$$\tau = \sigma'_n \tan(\phi + i)$$

τ = 剪力強度(尖峰或殘餘強度)

ϕ = 摩擦角(尖峰或殘餘摩擦角)

σ'_n = 有效正向應力

i = 粗糙角

從上述式子可知，尖峰剪力強度與有效正向應力及粗糙度有關。無填充物之不連續面的尖峰摩擦角範圍一般是介於 30° 至 70°，平均值約 45°。若節理為垂直、呈陡峭的階梯狀或延續性小於 100%，則上式中的剪力強度還需考慮凝聚力(c)。(如圖 3-11 的 I、II、III 剖面圖)。

殘餘摩擦角與不連續面內壁的風化程度，以及岩石種類有關。若

不連續面內壁無風化，則殘餘摩擦角一般是介於 25° 至 35°，平均約 30°。但是如果不連續面內壁嚴重風化，即使沒有黏土填充，殘餘摩擦角仍可能只有 15°。殘餘摩擦角的估計方法是先以施密特錘量測風化後不連續面的回彈值(r)，再量測新鮮不連續面的回彈值(R)，最後根據兩數值的比值估計殘餘摩擦角。有關於殘餘摩擦角的估計方法可參考 Barton and Choubey[6]。尖峰摩擦角可用下列式子估計：

$$\phi_{peak} = JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma'_n} \right) + \phi_r$$

JRC=節理粗糙係數(圖 3 - 12)

JCS=節理內壁之單壓強度

ϕ_r =殘餘摩擦角

此方法的應用細節可進一步參考 Barton and Choubey[6]。一旦不連續面發生小量的相對位移，則尖峰剪力強度便會發揮。在計算尖峰摩擦角時，若將較大的起伏角(i)加入計算，則得到的剪力強度會不合理。實務上，對於延續性為 100%的節理，尖峰摩擦角可視為最大值。然而，殘餘摩擦角需發生大量相對位移後才能發揮，此時的粗糙角通常可加入計算，以求得合理的剪力強度。對於完全平坦，或者已發生極大剪動且不再發生剪膨脹的不連續面，其剪力強度只有殘餘摩擦角影響，此時，可視為不連續面的剪力強度最小之情況。

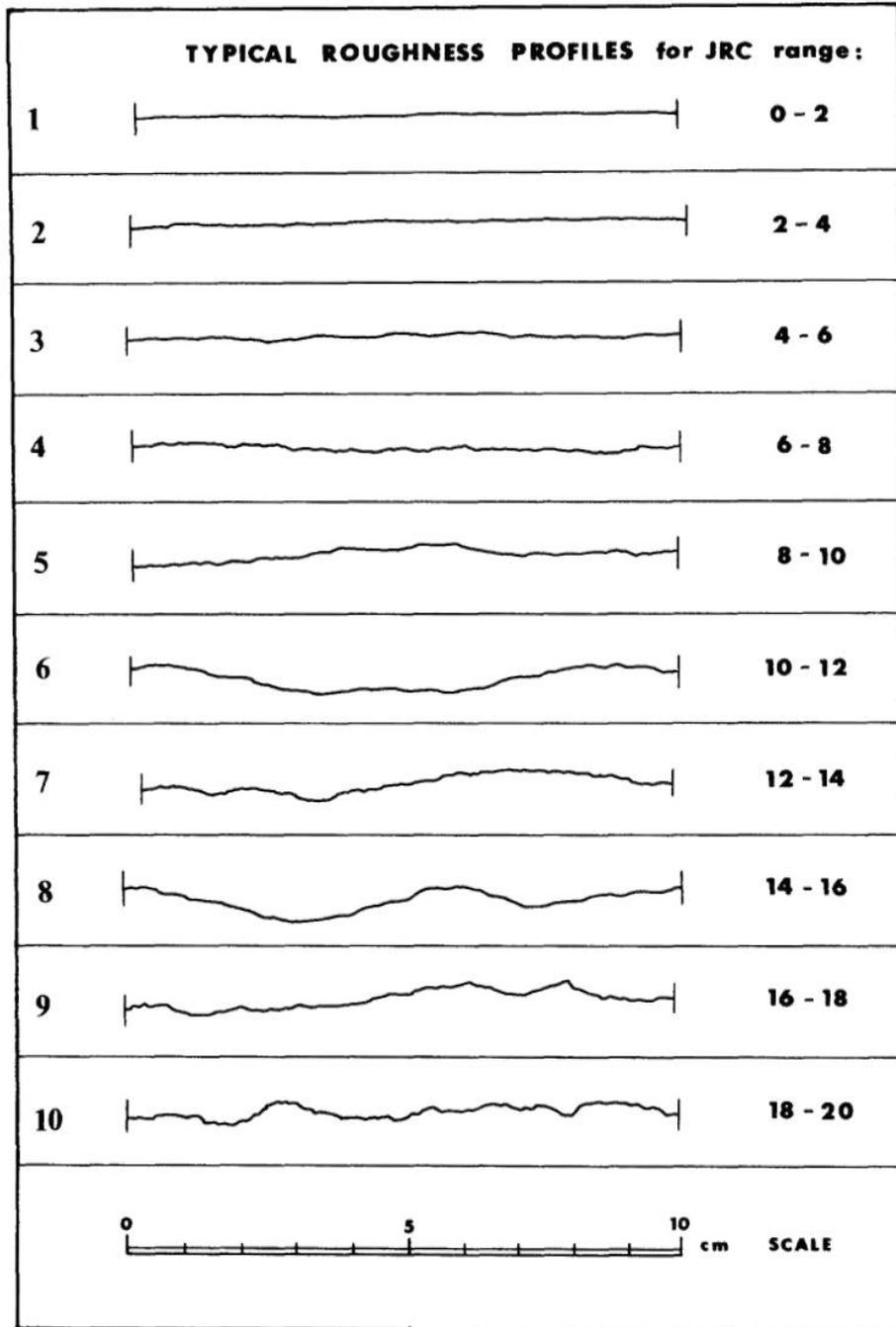


圖 3 - 12. 不連續面粗糙係數 JRC 之參考剖面[6]

5. 內壁強度

範疇

不連續面內壁的抗壓強度對於岩石的剪力強度與變形性來說相當重要，尤其是無填充物的弱面。當岩體受到剪應力作用後，會產生

極小的粗糙接觸面。粗糙接觸面部分位置的應力可能等於或大於壁面材料的抗壓強度，使得粗糙表面遭受破壞，進而沿節理面發生剪位移。

地表附近的岩體經常受到風化作用影響，有時也會受水化學作用影響而發生蝕變(altered)。風化作用(或蝕變作用)主要是影響不連續面的內壁，並使內壁強度減弱，這可藉由量測新鮮岩石的強度得知(新鮮岩石可由鑽井取得)。因此在描述內壁強度時，必須對岩石材料及岩體的風化程度及蝕變程度加以描述。

風化作用主要有兩種：一種是物理性崩解作用(mechanical disintegration)；另一種為化學性崩解作用(chemical decomposition)(包括溶解)。一般而言，物理風化與化學風化時常伴隨發生，但因氣候因素，其中一種風化作用的影響力可能較大。物理風化造成不連續面開裂、岩石破裂生成新的不連續面、沿顆粒邊緣開裂，以及礦物顆粒發生破裂或解理。化學風化造成岩石變色，最後矽酸鹽礦物分解成黏土礦物：部分礦物(尤其是石英)因為抗風化能力強，所以不因風化作用而發生變化。溶解是化學風化的一部份，對於碳酸鹽與鹽類礦物特別重要。

岩石內壁表面的薄層會影響剪力強度與變形性，可藉由簡單的方法測試。視(apparent)單壓強度可由施密特錘試驗、岩石刮痕，或地質錘測試結果加以估計。而後者已經用大量測試資料粗略校正。

若內壁平坦且光滑，則礦物被覆體(mineral coating)會對不連續面的剪力強度造成顯著影響。因此礦物被覆體必須加以描述，且必要時可進行採樣。

利用內壁粗糙係數(JRC)求得剪力強度後，一般建議使用施密特錘試驗獲得內壁強度的估計值。

表 3 - 1. 量化敘述不連續面的建議方法

詞彙	說明	等級
新鮮(fresh)	岩石無明顯風化現象；主要不連續面的表面可能輕微變色。	I
輕度風化(lightly weathered)	岩石與不連續面的表面因風化而變色。岩石可能因風化而變色，且變得比新鮮岩石軟弱。	II
中度風化(moderately weathered)	不到一半的岩石發生分解及(或)分裂成土壤。新鮮岩石或已變色的岩石，呈不連續狀或核心石(corestone)。	III
高度風化(highly weathered)	超過一半的岩石發生分解及(或)分裂成土壤。新鮮岩石或已變色的岩石，呈不連續狀或核心石(corestone)。	IV
完全風化(completely weathered)	所有的岩石都分解及(或)分裂成土壤。但原岩的構造仍然完整。	V
殘餘土壤(residual soil)	岩石全部轉變成土壤，岩石的構造及組構均被破壞。體積發生明顯變化，但土壤未被搬運。	VI

設備

尖頭地質錘；堅硬筆刀或類似工具；施密特錘(L型錘)，並附轉換圖表。轉換圖表的功用為(i)校正施密特錘反彈數與撞擊方向(製造商提供)；(ii)將施密特錘反彈數轉換成單壓強度；岩石乾密度的測量工具，例如：烤箱、天平、燒杯、水。

程序

岩體風化程度：應先描述整個岩體的風化(或蝕變)程度。上述詞彙常用於描述岩體風化程度，可根據實際狀況加以修改。

岩石材料風化程度：對於單一不連續面，或者特定不連續面組(例如任意位態的節理組)的內壁材料，應根據下表加以描述其風化(或蝕變)程度。

手動指標測試法(Manual index tests)：主要用於不連續面內壁或可代表不連續面內壁之材料，測試位置及數量則視需求而定。本方法

詳述於後方表格。此方法可用於量測重要節理組的內壁強度，但用於單一不連續面時，則必須有不連續面的詳細資訊。若欲取得岩橋(intact rock bridge)的強度，則可選取一塊新鮮的岩石手標本，並以本方法測試。此外，若可進行點荷重試驗，就在可能的破壞面上找一個較為完整的位置測試，以估計岩石的強度。

施密特錘測試法(Schmidt hammer test)：使用施密特錘測試法時，施密特錘需與不連續面的壁面垂直，且應在飽和狀態下進行測試，以取得最保守的結果。若岩石表面乾燥，則需先清除測試點附近的鬆散物質，並於測試結果註明此情形。

表 3-2. 各風化階段詞彙說明

詞彙	說明
新鮮 (fresh)	原岩無明顯風化現象。
已變色 (Discoloured)	新鮮岩石的顏色已經改變，需描述變色程度。若只有特定礦物變色，則需特別註明。
已分解 (Decomposed)	原岩風化成土壤，且部分或所有礦物顆粒均已分解，但仍完整保有原岩的組構。
已分裂 (Disintegrated)	原岩風化成土壤，但仍完整保有原岩的組構。岩石易碎裂，但礦物顆粒未分解。

上述各風化階段可用定性化的詞彙再加以細分，例如「輕微變色」、「中度變色」、「高度變色」。

表 3-3. 黏土分級與岩石分級說明

等級	說明	現地辨識	單軸壓縮強度範圍 (MPa)
S1	甚軟黏土	手掌易於插入	<0.025
S2	軟黏土	大拇指易於插入	0.025-0.05
S3	實黏土	大拇指用力可插入	0.05-0.10
S4	硬黏土	大拇指易於壓出凹痕但難插入	0.10-0.25
S5	甚硬黏土	大拇指指甲易於壓出凹痕	0.25-0.5
S6	堅硬黏土	大拇指指甲難於壓出凹痕	>0.5

R0	極弱岩石	大拇指指甲僅能壓出凹痕	0.25-1.0
R1	甚弱岩石	可以地質錘細端敲碎，可以小刀切削之	1.0-5.0
R2	弱岩石	小刀難於切割；地質錘細端敲出淺痕	5.0-25
R3	中強岩石	小刀無法切削；地質錘敲擊一次可裂	25-50
R4	強岩	地質錘敲擊一次以上始裂	50-100
R5	甚強岩石	地質錘敲擊多次始裂	100-250
R6	極強岩石	地質錘猛敲擊僅見小碎片跳出，極難於敲裂	>250

註：S1 至 S6 為黏土分級，例如黏土、沉泥質黏土或黏土與沉泥及砂的混合物，通常排水速度較慢。不連續面內壁強度通常適用於 R0 至 R6 等級(岩石分級)，而 S1-S6(黏土)適用於有填充物的不連續面(詳見「填充物」一節)。

部分強度值經過四捨五入以轉換成 S1 單位。

若施密特錘的衝力太大，使測試樣本移動時，通常測試的時候會聽到像鼓一樣的聲響，且所測得的數值較低，所以必須捨棄這些數據。基於上述原因，此方法不適用於鬆散且不連續面間距極密的岩石。每個面都必須測試數次，以獲得具代表性的結果。一般建議以 10 次為一組進行測試(即每個不連續面測試 10 次，或規模較大的不連續面，每一單位面積測試 10 次)，且在進行撞擊前，需先將施密特錘移至新位置。最後，將各組最低的 5 個讀值剔除，再以最高的 5 個讀值做為平均值(r)。

利用回彈值的平均值(r)及岩石密度(γ)，以估算節理內壁的抗壓強度(JCS)。若欲取得岩橋的強度(σ_c)，則可在新鮮岩石表面或岩石標本利用此方法測試。此外，可進行點荷重試驗，以估算潛在破壞面的強度。

當不連續面覆蓋一層薄層的礦物被覆體(mineral coatings)，且讓岩石無法相互接觸時，就必須用上述方法測試薄層礦物的強度。JCS 與剪力強度是否相關，需視礦物被覆體的厚度及硬度而定。在進行測試

時，需記錄此礦物薄層的組成礦物，例如：方解石、綠泥石、滑石、黃鐵礦、石墨、高嶺土等，必要時可進行採樣。此外，亦需記錄礦物薄層的分佈面積($\pm 10\%$)及其厚度(公厘)。

備註

岩體與岩石材料的風化程度：調查天然及人為的露頭並繪圖，以了解岩體風化程度的分佈情形。必須注意到，單獨出露與因開挖且出露範圍有限的岩石，其風化程度不一定代表整個岩體，因為風化作用變化極大。

此外，不同程度的風化作用不一定會在岩體同時出現，有時候特定程度的風化作用僅見於非常小的範圍。各種程度的風化作用之分佈，可能與岩石材料的孔隙及開口不連續面的出現有關。進行岩心記錄可瞭解岩石材料的風化程度及其分佈，但分佈情形則僅供參考。

岩石是因為出露在地表後，再受到風化作用影響；或是因為地表物質下滲形成熱水溶液，使岩石發生蝕變。兩者要盡可能地做出區別。然而，在許多情況下，不容易區分蝕變作用或風化作用。

許多岩石材料，特別是含有大量黏土時，在短時間內經歷乾濕交替的風化過程後，容易發生膨脹、弱化或崩解。故必須進行特殊的試驗，以確認其力學特性。(可參考 ISRM 的建議方法，以決定岩體的膨脹性與消散耐久性)

手動指標測試可獲得可代表不連續面內壁狀況的結果。然而，此試驗不適合用於具有薄層或礦物被覆體覆蓋的圍岩，因為它們會影響岩體的剪力強度及變形性。

在進行黏土分級時，可用標準式袖珍貫入器取代手動指標測試，以更精確進行的 S1-S6(詳見「填充物」一節)的分級。袖珍貫入器前端為記錄針(stylus)，測試時將記錄針以等速率壓入試體中，便可得到

最大阻力值，再將該數值校正即可得到試體的最大抗壓強度(此數值是試體未排水時的兩倍 $=\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$)。

施密特錘測試法：在實際狀況下，回彈值大約介於 10 至 60 之間。最小值屬於「弱岩石」(單壓強度 $\sigma_c < 20\text{MPa}$)，最大值屬於「甚強岩石」或「極強岩石」($\sigma_c > 150\text{MPa}$)。但「甚弱岩石」與「極弱岩石」則不適合用施密特錘測試法，因此單壓強度低於 15-20MPa 的岩石，則必須用手動指標測試法。

當施密特錘的撞擊方向為垂直向下時(反彈力需克服重力)，則獲得的回彈值為最小值；當施密特錘的撞擊方向為垂直向上時，則獲得的回彈值為最大值。因此必須進行回彈值的校正。

節理間距非常緊密或材料顆粒破碎且鬆散的岩石，因為某些因素使得回彈值異常的小，且很少有回彈值異常大的情形。以下兩組實際測量結果說明取得平均值的建議方法：

(a) 花崗岩中粗糙、平面且鏽染的節理

44、36、38、44、32、44、44、40、34、42

最大的 5 個讀值的平均值： $r=44$

(8 組 10 次測試的平均值： $r=43$)

(b) 角頁岩中粗糙、起伏且表面覆蓋方解石薄層的節理

28、28、30、30、28、24、24、28、30、20

最大的 5 個讀值的平均值： $r=29$

(3 組 10 次測試的平均值： $r=30$)

施密特錘測試法是少數考慮不連續面上風化材料的力學強度之方法。因為內壁材料影響剪力強度，所以內壁材料的性質是岩石品質的重要指標。節理內壁的單壓強度(JCS)，因為受到風化作用影響，所以通常只有相鄰完整岩石強度的 25%。

結果報告

岩體與岩石材料的風化程度：應將岩體中各風化區域之風化程度，以素描圖與(或)垂直剖面圖記錄，並清楚標示風化等級 I、II、III 等。必須描述單一不連續面，或特定不連續面組的岩石材料風化等級。例如：「1 號節理組：大部分的內壁為中度變色，約 20%為「新鮮」。

手動指標測試法：單一不連續面，或特定不連續面組的內壁材料強度，應與單壓強度的假設範圍一起標示。例如：「1 號節理組：內壁強度主要為「中強岩石」(R3, 25-50MPa)約 20%為「強岩」(R4, 50-100MPa)」。不連續面內壁的測量值應與岩體中的新鮮岩石之測量值區別。

施密特錘測試法：單一不連續面，或特定不連續面組的平均回彈值(r)，應該和岩體平均密度(γ)及內壁強度(JCS)估計值(MPa)一起標示。此外，必須選取一組有代表性的回彈值，以呈現回彈值的範圍。不連續面內壁的測量值應與岩體中的新鮮岩石之測量值區別。

6. 內寬

範疇

內寬是指張口不連續面內壁間之垂直距離，其間充滿水與空氣。所以內寬和填充不連續面(filled discontinuity)之寬度意義不同(見圖 3-13)。被填充物(如黏土)填充的不連續面，若部分填充物被沖刷，則此不連續面亦歸類為張口不連續面。

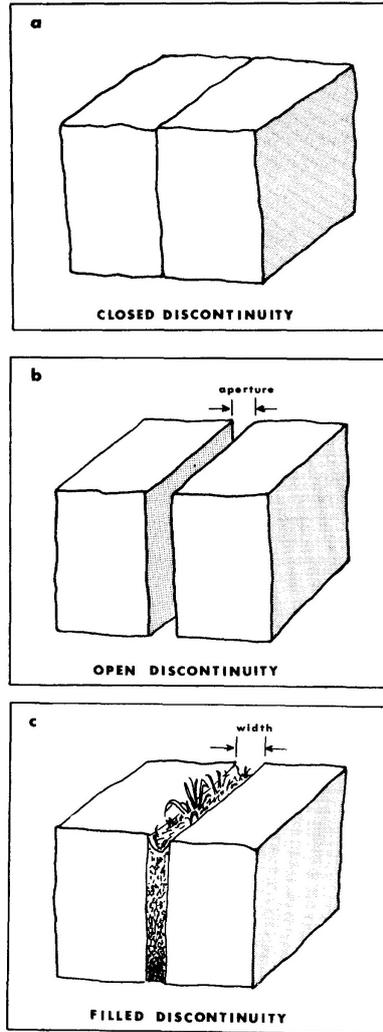


圖 3 - 13. 圖中說明張口不連續面之內寬與填充不連續面之寬度的定義

大型內寬的成因包括：粗糙且具明顯起伏的不連續面發生剪動、張力造成的開裂、裂隙沖刷(outwash)、溶解。河谷侵蝕及冰川後退會產生張力，因此形成陡峭且垂直的不連續面，不連續面可能有著極大的內寬。

大部分地表下之岩體的內寬相當小，且可能小於 0.5 公厘。相較之下，有些裂隙沖刷或張力造成的內寬可達數十公厘、數百公厘、甚至數千公厘。除非不連續面非常平滑，使得剪力強度不大，故內寬僅有 0.1 公厘或 1 公厘。即使透水性的間接影響很小，仍然有可能明顯地改變正向應力及剪力強度。

以目視方式觀測小型內寬是不可靠的，但很可惜的是，除了在鑽孔或隧道內的內寬可目測外，內寬通常會受到爆破或表面風化影響。評估內寬之影響的最好方法是滲透性試驗(water permeability testing)。

可根據內寬之釋水(loosening)及導水(conducting)能力加以紀錄。節理內之水壓、物質的流進與流出(包含液體與氣體)都會受到內寬影響。

設備

量測帶長度至少 3 公尺，其刻度為公厘；測隙規(feeler gauge)(用於測量極細內寬之寬度)；白色噴漆；用於清洗岩石的設備。

程序

應將露頭不新鮮之表層清洗乾淨。沿調查線噴上白漆，可使細小之不連續面變得清晰可見。良好的照明是必備條件。

微小內寬可用測隙規加以量測，而較大之內寬則可用刻度為公厘的尺進行量測。記錄所有與調查線相交的不連續面。主要不連續面之內寬可沿其痕跡量測。

備註

在出露的岩石中所觀測到的內寬已經受到擾動影響，例如表面的局部風化或不連續面上凹痕的型式。因為上述原因，所以量測到的內寬可能會比岩體的實際內寬大。利用機具所開挖之隧道(及鑽孔孔壁)，內寬未受擾動，故所測得之內寬可信度較高。調查鑽孔內壁不連續面內寬之工具為孔內攝影儀，以及 Fairhurst 與 Roegiers[1]所提之壓力感測封塞(pressure sensitive packers)。在某些特殊情況下，若欲取得內寬資料時，建議採用之岩心提取法(core recovery method)，又稱為整體取樣法(integral sampling method)。此方法是將岩心先以水泥固化成柱狀，再以直徑較大之取心鑽頭以同軸方式取樣。

即使是未受擾動的內寬，也很難衡量其潛在的導水力。內壁粗糙度可能會使實際導水力轉變為摩擦力，此摩擦力與內壁光滑時因摩擦及路徑曲折而造成之摩擦力相當。此外，有許多證據顯示節理內的液體流動比較像是管狀而非片狀利用現地滲透性試驗評估內寬之影響，會比用直接測量內寬之方式更具代表性、更可靠。

不連續面在受剪而發生位移後(例如：不穩定邊坡)，不連續面在不同位置之內寬會有很大的差異。粗糙面的相互接觸以及碎屑物的存在會形成「無效區(dead zone)」，在此區域若以內寬做為評估導水性的基礎，則所評估的結果會相當不可靠。

結果報告

內寬可以下述詞彙描述：

表 3-4. 內寬詞彙說明

內寬	說明	
<0.1mm	很緊閉	閉合
0.1-0.25mm	緊閉	
0.25-0.5mm	半開	
0.5-2.5mm	張開	間隙
2.5-10mm	中寬	
>10mm	寬	
1-10cm	很寬	張裂
10-100cm	極寬	
>1m	很空洞	

應記錄每一組不連續面之代表性內寬(指最常見的內寬)。若某一不連續面之內寬特別大(大於代表性內寬)時，則必須仔細描述，包含該不連續面之位置與位態資料。不連續面之內寬為極寬(10-100cm)或很空洞(>1m)時，則必須附上不連續面之照片。

7. 填充物

範疇

填充物是指相鄰不連續面岩壁間所夾雜的物質，例如：方解石、綠泥石、黏土、粉砂、斷層泥、角礫岩等。兩相鄰岩壁面之垂直距離稱為不連續面填充物寬度。以下的重要因素將決定填充物的力學行為

- (i) 填充物的礦物特性
- (ii) 級配或顆粒大小
- (iii) 過壓密比
- (iv) 含水量與滲透性
- (v) 已發生之剪力位移
- (vi) 內壁粗糙度
- (vii) 寬度
- (viii) 岩石內壁破裂或碎裂

每次實驗應紀錄上述因素，並配合素描圖與(或)彩色照片進行定量化描述。對於主要不連續面，建議可用特定的試驗進行更詳細的調查，以評估填充物對不連續面穩定性的影響。對於特殊的對象，像是壩體基礎或是主要邊坡，就需要這些野外調查與描述的結果以作為大尺度現地試驗的依據。

設備

量測帶長度至少 3 公尺，其刻度為公厘。至少 2 公尺長的折疊尺。可裝填充物樣本且容量為 1~2 公斤之取樣袋。在某些情況，可用土壤取樣管採取未擾動樣本，再將未擾動樣本用來進行剪力試驗。尖頭地質錘。筆刀或類似工具。

程序

寬度：量測填充不連續面(例如：黏土填充的節理)的最小寬度與最大寬度，且測量誤差為 10%。並估計平均內寬。如果內壁未發生蝕

變或風化，則可從最大內寬與最小內寬的差異，判斷是否發生剪位移。

當填充物很薄時，可用直尺量測內壁粗糙度的平均起伏差，並與填充物的平均寬度比較，如圖 3 - 14 所示。這對於後續研究填充物的剪力強度與變形性相當有價值。如果可以，應評估或測量重要且複雜的填充不連續面(例如：剪裂帶、破碎帶、斷層、斷層帶、岩脈以及岩石接觸面)，且測量誤差為 10%。對於與圍岩有關之重要現象(例如：破裂程度及(或)蝕變程度)可繪製野外素描圖(圖 3 - 15)，以傳達重要資訊。

風化等級：填充不連續面的填充物是因為不連續面發生風化作用，並使岩石發生分解或分裂，最後產生填充物。應記錄的重要類型。分解—岩石風化成土壤，但岩石組構仍保持完整，但是部分或全部的礦物顆粒已經分解。分裂—岩石風化成土壤，但岩石組構仍保持完整。岩石容易碎裂，但礦物顆粒未分解。

礦物學：對於各種填充不連續面而言，顆粒最細的填充物最引人注意，因其控制長期剪力強度。應確定細顆粒填充物的礦物組成，特別是可能有活性黏土或膨脹性黏土存在時。必要時可進行填充物採樣。經辨識或懷疑是膨脹黏土時，且攸關穩定度時，應取樣並進行膨脹壓力測試。(樣本的現地含水量記錄十分有用，該樣本應予以密封)

顆粒大小：根據填充物類型的不同，可用不同方法描述填充物的淘選度或顆粒大小。可藉由估計黏土、粉砂、砂與石塊的百分比(±10%)，以概略的量化描述填充物的淘選度。在估計淘選度前，可能需要先採取好幾公斤的填充物。可根據修改後的溫氏等級規範(Wentworth scale)，將顆粒大小予以分類：

巨礫(Boulders)	200-600mm
大礫(Cobbles)	60-200mm

粗礫(coarse gravel)	20-60mm
中礫(medium gravel)	6-20mm
細礫(fine gravel)	2-6mm
粗砂(coarse sand)	0.6-2mm
中砂(medium sand)	0.2-0.6mm
細砂(fine sand)	0.06-0.2mm
粉砂(silt)、黏土(clay)	<0.06mm

若可進行詳盡的土壤力學調查，則細顆粒的粒徑分布與物性試驗可在實驗室分析。

填充物強度：填充物的細顆粒部分通常是強度最弱的。根據「內壁強度」一節有關手動指標測試法的建議，用下表評估細顆粒填充物的強度。在 S1 至 S6 中，土壤的不排水剪力強度等於單壓強度的二分之一(利用下表評估具裂隙之黏土時，必須特別注意)。若要對單一填充不連續面進行詳盡的土壤力學調查(例如：估算排水剪力強度)，則可能需要未擾動樣本。而未擾動樣本可用取樣管進行取樣。

已發生之位移量：應謹慎確認填充不連續面是否發生剪位移(斷層擦痕、剪力、橫節理(cross joint)的位移)。對於任何黏土填充物，除了確認是否發生剪位移外，還需要過壓密比的估計值。

含水量與滲透性：填充不連續面的填充物含水量與滲透性，應以下述方式描述(亦可參考「滲水狀況」一節)。視需求以決定是否量測填充物的含水量及滲透性。

W1：填充物堅固、乾燥。因滲透性非常低，故無明顯的水流。

W2：填充物微濕，但無水流。

W3：填充物濕潤，偶爾滴水。

W4：填充物有明顯沖刷痕跡，有持續性的水流(應說明流量)。

W5：填充物局部被沖刷，大量的水沿著被沖刷過的通道流動(應說明流量、水壓)。

W6：填充物完全被沖刷，水壓極高，尤其是在水流剛出現的時候(應說明流量、水壓)。

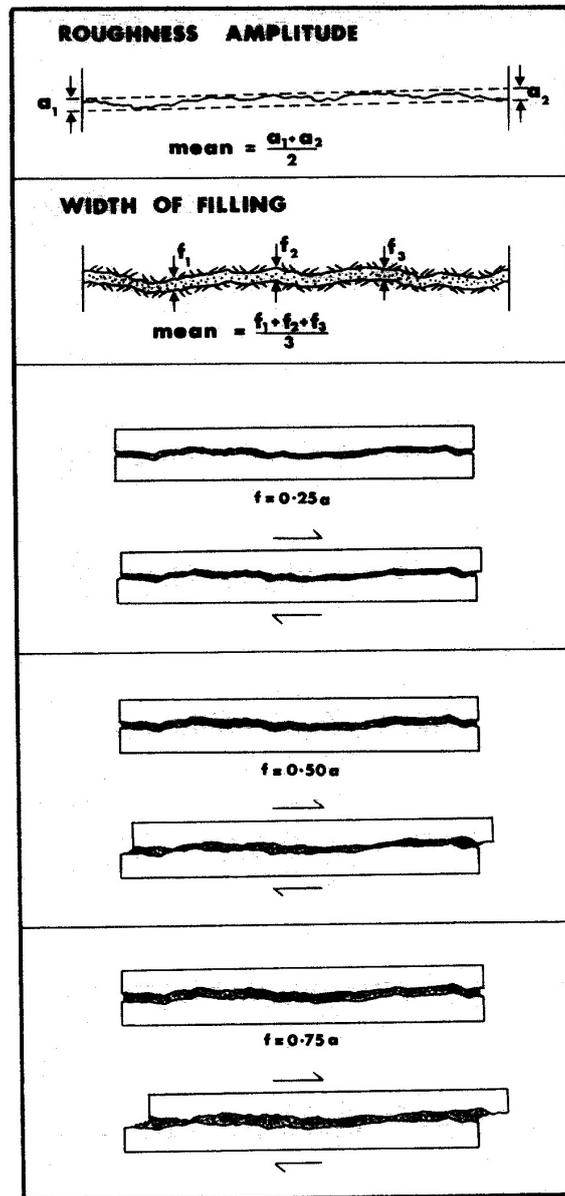


圖 3-14. 以填充不連續面為例，在岩石相互接觸，內壁粗糙度的振幅與填充物的厚度可指示剪位移量

(假設在剪動過程中，體積未發生變化)

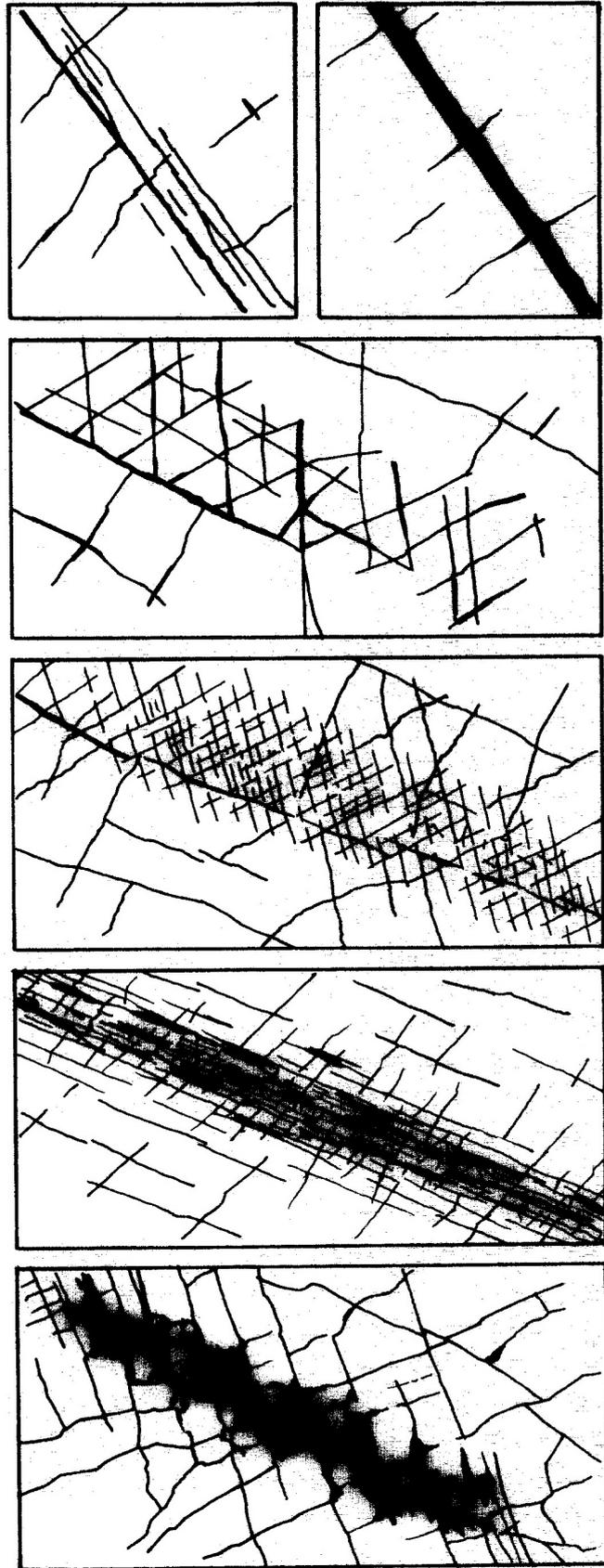


圖 3-15. 填充不連續面之野外素描圖 [1]

備註

在進行黏土分級時，可用標準式袖珍貫入器取代手動指標測試，以更精確進行的 S1-S6(詳見「填充物」一節)的分級。袖珍貫入器前端為記錄針(stylus)，測試時將記錄針以等速率壓入試體中，便可得到最大阻力值，再將該數值校正即可得到試體的最大抗壓強度(此數值是試體未排水時的兩倍 $=\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$)。

斷層泥受熱水換質作用影響及(或)熱水溶液發生沉澱，形成與破碎岩塊或圍岩無關係的礦物，所以造成礦物的辨識難度增加。

斷層很常有高滲透性的斷層角礫岩與高滲透性的斷層泥相鄰，使得斷層的導水能力有很高的異向性，甚至水僅平行於斷層面流動。若隧道或平坑未完全貫穿斷層，則可能會太早將斷層視為「乾燥」或「不透水」。

結果報告

報告的詳細程度視單一填充不連續面的重要性而定。一般而言，敘述應如下所示，以包含與計畫相關的因素。

(a) 幾何描述：寬度

內壁粗糙度

野外素描圖

(b) 填充物類型：礦物學

顆粒大小

風化等級

土壤物性指數

膨脹與否

(c) 填充物強度：手動測試指標(S1-S6)

剪力強度

過壓密比

位移/無位移

(d) 滲水狀況：含水量(等級 W1-W6)

滲透性量化資料

8. 滲水狀況

範疇

導水性高的不連續面(「次要」滲透性的成因)是流體在岩體中流動的管道，當水在此管道流動便形成所謂的滲水。有些沉積岩的材料性質具有較高孔隙率，故容易發生滲水，即為「主要」滲透性。滲水速度大致與水力坡降及滲流方向成線性關係，該比例依層流而定。當高流速的水流流過開口不連續面時，可能因紊流發生而造成的水頭損失。

預估地下水位、滲流路徑及水壓，可以事先進行穩定性或施工困難度評估。在進行現地滲透性試驗前，須先參考野外所做之岩體描述，因此在初期就必須做好岩體的相關描述。

岩體中不規則的地下水位與棲止地下水面之產生，是由岩脈、含黏土填充物之不連續面或滲透性較高之地層(permeable bed)等因素造成。對於需要深度開挖之隧道工程，因水流屏障可能造成水壓過高，故水流屏障(flow-barrier)與不規則的地下水位評估就顯得相當重要。

因工程開挖所造成的湧水具有相當大的影響，例如在地下水位面下降的情況下，會使得黏土層上方的結構物發生沉陷。

根據不連續面對穩定性的重要程度，應詳細描述單一不連續面或特定不連續面組的水文特性，包括詳細的滲水情況與該地區近期的降雨量。其他諸如地下水流趨勢、雨量與溫度記錄等資料也是有用的資訊。

岩石邊坡的初步設計，將根據有效正向應力的假設值進行設計。若現地觀察發現必須對水壓進行保守的假設(例如：張力裂縫中充滿水，但是在不連續面的前端水壓卻是零)，則所做之設計會是最保守的。現地觀察也包括是否可能會發生結冰，因結冰與(或)水壓增加導致岩石邊坡與隧道入口穩定性變差，是許多國家面臨的季節性問題。

設備

目視觀察(於隧道內需照明良好)；航照圖、雨量資料與溫度記錄(依可取得性而異)。

程序

從航照圖可知當地的水系與地下水位面。(地下水可從斷層與岩脈附近是否有植物生長判斷)。且應了解地下水位面是否受季節變動及雨量與溫度影響。

由於一開始沒有鑽孔，所以無法進行抽水試驗、洩降試驗、追蹤劑試驗、也未安裝水壓計以了解地下水位面位置，故野外製圖的初步階段對於水文特性說明將有所侷限。因此必須依地質特徵來推測地下水含水層的位置、水流屏障的方位與位置、可能的滲流方向來評估現地水文特性。必須評估是否有利用鑽孔求得地下水位面、進行追蹤劑試驗、安裝水壓計以及進行抽水試驗、洩降試驗的需求，且必須標示他們的理想位置。

應評估工程計畫與地下水流模式的相互關係，並彙整重要結論。在進行初步分析時，必須說明滲流的流入與流出對開挖(例如隧道或邊坡的開挖)的影響。此外，因說明地下水位下降對既有設施或黏土地基沉陷的預期影響。

不含填充物及含有填充物的不連續面，於隧道或地表出露的滲水狀況，分級如下：

表 3-5. 不含填充物之不連續面

滲水分級	說明
I	極緊閉、乾燥，不可能滲水者。
II	乾燥，無滲水跡象。
III	乾燥，但有滲水跡象。
IV	潮濕，尚無流流水。
V	滲水，偶有水滴，但無連續流水。
VI	連續流水。(應說明流量、水壓)

表 3-6. 含填充物之不連續面

滲水分級	說明
I	填充物為高度過份壓密者，透水性低，不易有顯著滲流。
II	填充物潮濕，尚無流水。
III	填充物潮濕，偶有水滴。
IV	少部分填充物被水沖失，水流連續。(說明流量)
V	部分填充物被水沖失，顯著水流。(說明流量、水壓)
VI	填充物全部沖失，挖開之初水壓很高。(說明流量、水壓)

對於需排水的岩石工程而言，例如隧道開挖，若可將各個結構的滲水狀況加以描述，則有助於工程的進行。地下水位或岩體中的水可能因開挖而快速排出，所以理想狀況是在開挖後立刻進行滲水狀況的描述。可根據下述規範進行滲水的描述：

表 3-7. 岩體(例如隧道內壁)

滲水分級	說明
I	乾燥無滲水。
II	輕微滲水，偶有水滴。
III	中度湧水，水流連續。(說明流量、開挖長度)
IV	大量湧水，顯著水流。(說明流量、開挖長度)
V	異常大量湧水，詳述異常湧水的源頭。(說明流量、開挖長度)

應進行傾斜鑽孔或建置排水廊道，以評估主要岩石邊坡的地表排

水效益。地表排水效益的評估是根據重要不連續面的位態、間距、內寬進行。

備註

若可取得區域性降雨資料，將有助於解釋所觀察到的滲水狀況。降雨記錄對地表露頭、邊坡、淺層的隧道特別重要。

若已經鑽孔，則可進行全面性的水文地質研究，包括如追蹤劑試驗(tracer test)、水壓計安裝、變水頭(falling head)與抽水試驗(pumping)。此外，也可使用孔內攝影儀調查孔壁滲水情況。

對於利用鑽孔進行試驗(如變水頭試驗與倫琴試驗(Lugeon test))來估計岩體滲透率，ISRM 已在其他文件的建議方法中說明。倫琴試驗的試驗結果可做為岩體與不連續面描述的補充說明。

層面節理與沉積岩的層面具有高滲透性(即「主要」滲透性)，且可能使廣大區域的沉積岩具水力連通(hydraulic connection)特性。在火成岩或變質岩地區，若無主要的區域性節理及斷層存在，則水力連通的特性就不明顯。

斷層很常有高滲透性的斷層角礫岩與高滲透性的斷層泥相鄰，使得斷層的導水能力有很高的異向性，甚至水僅平行於斷層面流動。若隧道或平坑未完全貫穿斷層，則可能會太早將斷層視為「乾燥」或「不透水」。

岩石邊坡最高處的滲水節理在進行初步穩定性分析時十分重要。同樣地，隧道的深度或隧道與軟弱帶的相對位置也很重要，因為可能會有大量湧水湧入隧道。

結果報告

根據所取得的水文地質資料，將地下水的流場以箭頭標示於空照圖、地質圖，或適當比例的平面圖上，且附上降雨及溫度資料。

將預估的不透水障蔽(例如：岩脈、被黏土填充的主要不連續面及不透水地層)繪於地質圖及地質剖面圖，並標示地下水位的位置。調查用之鑽孔(以及任何鑽孔)的理想位置也需適當標示。

應盡可能地說明工程計畫與地下水流模式之間的關係。若有足夠的水文資料可做出可靠的評估，則應該描繪出建設前與建設後的地下水位面。如果可以，必須指出異常氣候、結霜可能造成的影響，並附上人工測量的排水資料。

單一不連續面、特定的不連續面組及完整岩體的局部滲水狀況可以滲水分級 I-VI 表示。若有足夠的觀察資料，可將分級結果以等值線圖或直方圖呈現。在隧道工程中，滲水狀況可用縱剖面的方式呈現，倫琴試驗結果則可與鑽孔的地質資料一同呈現。

9. 組數

範疇

數組相互交叉的不連續面，影響岩體的力學行為與外觀。不連續面組數愈多，岩體愈易變形與破壞，但岩塊破壞，岩石材料未必破壞。

除了不連續面的位態與岩面的關係外，不連續面的組數對於岩坡穩定性也是相當重要的。不連續面的組數愈少，不穩定的或然率就愈小，也可能降至幾乎為零。換言之，若節理組具有緊密的間距，則可能讓岩石邊坡的破壞模式從平移或傾覆，轉變成旋轉或圓弧型。

在隧道穩定性的案例中，岩體具有三組(或以上)的節理時，岩體通常會構成立體的結構，且變形性高於具少於三組節理的岩體。例如：葉理發達且只有一組緊密間距之節理的千枚岩，其隧道開挖品質會與塊狀且具三組間距寬疏之節理的花崗岩相同。隧道工程的超挖量(overbreak)通常由節理組數決定。

設備

地質羅盤與傾斜儀。目視觀察與(或)攝影記錄。

程序

節理組數通常會影響製圖區域的範圍，因此在進行初步調查時，記錄所有的組是非常重要的。而且量測各節理組的位態時，通常都會同時進行節理分組。至少要量測 150 個節理位態，並將節理的極點繪於等面積投影網，以進行統計並決定節理組數。若位態幾乎一致，可減少節理的取樣數。

在詳細調查階段，應記錄局部區域的節理組數，以做為上述程序的參考資料。隧道或岩石邊坡的穩定性，或基礎的變形性，雖然與上述程序所得之節理組數結果相關，但是局部區域的節理組數影響更為明顯。

進行節理目視分組時，應以編號進行系統性的分組。例如具相似延續性及位態的節理，可將其標記為「NO.1」，依此類推。此外，亦可根據節理對穩定性的重要程度，而給予不同編號。

備註

記錄節理組數時，應區分系統性節理組與非系統性節理組。一般而言，系統性節理組具有良好的延續性，且節理為相互平行或近似平行，而非系統性節理組的位態則成隨機分佈，不具一致性。當野外無法進行直接分組時，則可將節理位態以極點表示，並繪於等面積投影網進行統計分析(圖 3-3)。

不連續面剛開始可能只是平行於層面、葉理面或劈理面，但是部分開挖方式可能會使這些不連續面進一步發展成層面節理、葉理節理(foliation joint)等，因此在估計局部區域的節理組數時，也必須考慮這些不連續面。

節理組數會影響製圖區域的範圍，進而影響必須進行解釋的區域

大小。各節理組的間距對於該區域解釋是扮演重要角色，例如：某區域以極點等值線法進行節理分組，可得到四組節理，其中也包含間距較寬的節理。雖然這些節理對短隧道的穩定性影響不大，但是對於規模較大的邊坡卻有重要的影響。

結果報告

將節理位態資料用圖呈現(見圖 3-1 立體地質剖面圖；圖 3-3 施密特等值線圖)，以利判別節理組數量。區域性之節理組數可依下表加以描述：

表 3-8. 節理組數分類

I	巨厚狀、偶有零星節理
II	一組節理
III	一組節理+零星節理
IV	二組節理
V	二節理組+零星節理
VI	三組節理
VII	三組節理+零星節理
VIII	四組節理或更多
IX	粉碎岩石、土壤狀

大規模的不連續面應以個別基礎記錄。

10. 岩塊尺寸

範疇

岩塊尺寸是岩體行為極為重要的指標。岩塊尺寸由不連續面的間距、組數及延續性決定。

不連續面組數與位態決定岩塊的形狀，岩塊形狀可能近似立方體、六面體、四面體、片狀等，而較少為規則的幾何形狀，因為任何一組節理很少是平行的。不過沈積岩中的節理所造成的岩塊形狀通常較具有規則。

在已知應力條件下，岩塊尺寸與鑲嵌岩體的剪力強度決定岩體的力學行為。由大岩塊組成的岩體較不容易變形，在進行地下工程時，可發揮有益的支撐功能與互鎖作用。對於邊坡而言，小岩塊可能會發生類似土壤的破壞型式(如圓弧型破壞/轉動式破壞)，而不連續面較為發達的邊坡較常發生的破壞模式為平移或傾覆。在特殊情況下，更小的岩塊尺寸可能造成的破壞模式為流動，如同在石英岩中方糖狀之剪裂帶。

岩石開採及爆破效果與現地的岩塊尺寸有關。岩體以岩塊尺寸大小進行分類，如同土壤依顆粒粒徑大小分類。描述岩塊尺寸有兩種方式：以代表性岩石的平均尺寸描述(岩塊規模指數 I_b)，或用與岩體單位體積相交的總節理數描述(單位體積之節理數 J_v)。

程序

岩塊規模指數(I_b)：可藉由觀察選擇各組的岩塊尺寸，再取平均尺寸來做估計。由於範圍可能從幾公厘到幾公尺，因此 10%的測量精度應已充足。各區域應標示代表性的 I_b 及岩塊尺寸範圍，如最大與最小的岩塊尺寸指數。記錄節理組數時也必須同時記錄岩塊規模指數 (I_b)，因為如果只有一組或兩組節理時，要將 I_b 換算成代表性岩塊之體積，則換算後的岩塊體積可能會不正確。

單位體積節理數(J_v)：體積節理數是指每公尺同組節理的節理數總和。對於經隨機取樣但不同組之不連續面亦可計算在內，但對結果可能會有些許影響。

各組節理數應沿著正交此節理組來計算。建議取樣長度為 5 或 10 公尺。再將節理數加總除以 5 或 10，使得結果相當於每公尺所含之節理數。

畫一直線與重要節理組垂直，建議此直線長度為 5 或 10 公尺，

計算與此直線相交之節理數量。最後，將節理數加總除以 5 或 10，便可得到相當於每公尺所含之節理數。

沿著 5 或 10 公尺垂直方向取樣，三組節理組與一組隨機取樣的不連續面計算結果如下所示：

以 5 或 10 公尺之採樣線垂直於三組重要節理組及任意一組節理為例，單位體積節理數計算如下：

$$J_v = 6/10 + 24/10 + 5/5 + 1/10$$

$$J_v = 0.6 + 2.4 + 1 + 0.1 = 4.1 \text{m}^3 \text{(岩塊中等)}$$

J_v 與岩塊大小之關係如下：

說明	J_v (節理)
岩塊很大	<10
岩塊大	1-3
岩塊中等	3-10
岩塊小	10-30
岩塊很小	>30

$J_v > 60$ 時代表不含黏土的粉碎岩石。

以下提供有關岩塊尺寸與形狀的描述：

(i) 厚層(massive) = 少量節理或節理間距非常寬

(ii) 塊狀(blocky) = 岩塊大小大約相等

(iii) 平板狀(tabular) = 岩體某一方向之長度遠小於其他兩個方

(iv) 柱狀(columnar) = 岩體某一方向之長度遠大於其他兩個方

(v) 不規則狀(irregular) = 岩塊尺寸與形狀變化很大

(vi) 破碎狀(crushed) = 岩體受節理高度切割其形狀如「方糖」

參見圖 3-16 所示。

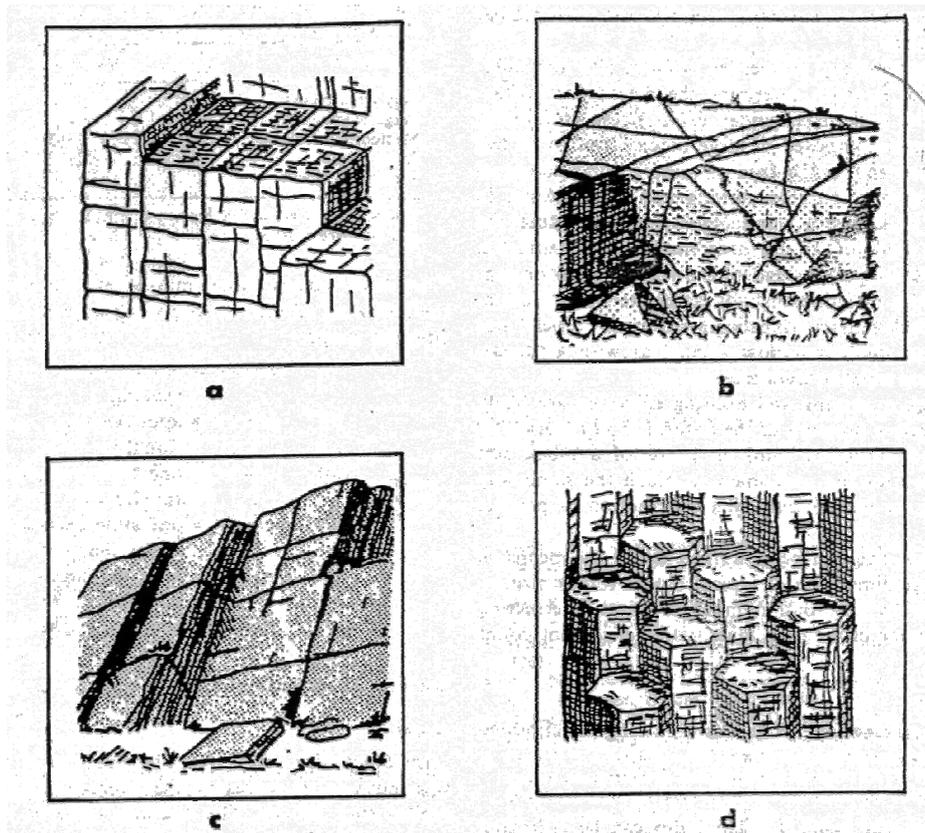


圖 3 - 16. 岩體形狀素描：(a)塊狀、(b)不規則狀、(c)平板狀、(d)柱狀

備註

岩塊規模指數(I_b)：岩塊規模指數在於表達岩塊的平均尺寸。若組數超過三組以上，且第四組間距寬大，將使 I_b 值增加，因此個別節理模型間距(S_1 、 S_2 等，詳見「間距」一節)的平均值，可能無法提供實際的 I_b 值，但對於現地觀察到的岩塊尺寸影響不大。若岩塊屬於沉積岩，且有兩組互相垂直的節理組以及層面，構成極常見的立方體或菱柱狀。在此情況下， I_b 修正為：

$$I_b = \frac{S_1 + S_2 + S_3}{3}$$

單位體積節理數(J_v)：若不需以量測帶測量節理間距，則野外的製圖工作可很快的完成，且大多數的人都可用步距或用估計的方式算

出 5 或 10 公尺的長度。觀察者應面向各節理組的走向方向，計算該節理數，再計算與走向垂直的節理數，藉此消去角度修正因子。

$$\text{應注意：} J_v \text{ 不等於 } \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \dots + \frac{1}{S_n}$$

J_v 是計算單位體積的平均間距，而非代表性間距。一般而言，兩者的結果相近，且傾向於對數常態分佈。除非系統性節理的間距很疏或非常疏(亦即 1-10 公尺)，否則隨機取樣的不連續面不會對 J_v 值造成顯著影響。有些情況下，則需考量不連續面寬度的間距，例如 10 公尺。

J_v 與 RQD 之關係如下：

$$RQD = 115 - 3.3J_v (\text{近似值})$$

$$(RQD = 100 ; J_v < 4.5)$$

當無法鑽孔時，可利用此關係估計 RQD。

位態資料可用於輔助說明長度非等向之岩塊的形狀，例如「高傾角片狀、板狀、層狀」等，或「垂直柱狀岩塊」等。若岩塊長度為等向時，則僅需描述岩塊形狀，例如立方體、六面體、菱柱形、四面體、不規則等。

結果報告

對於所關注的區域，紀錄具代表性的最大與最小岩塊尺寸的岩塊規模指數(I_b) (同時紀錄組數，並對延續性做描述)。另需記錄所關注區域的單位體積節理數(J_v)(同時記錄組數，並對延續性做描述)以及敘述岩體結構，如厚層、塊狀、平板狀、柱狀、破碎狀或其他適合的描述。

如果條件允許下，應利用攝影或野外素描(見圖 3-6)描繪具代表性的出露岩塊的尺寸與形狀。

11.鑽孔岩心

範疇

本節敘述的岩心鑽孔主要是為了提供有關不連續面的資訊。初步的野外製圖無法取得岩心鑽孔資訊。但可於得到的不連續面位態的資料，判斷是否有鑽孔需要及最理想的位置、鑽孔方位。

若可取得鑽孔岩心，首先可依據下述參數進行描述：總岩心回提取率(total core recovery)(R)、不連續面頻率(discontinuity frequency)(F)及岩石品質指標(rock quality designation)(RQD)。不過光這些參數不足以提供完整的不連續面資訊。

岩心鑽孔(及鑽洞)代表岩體的直線取樣。有些構造特徵如不連續面的位態、間距及組數等資訊，若未先不了解此區域的位態及組數，通常無法藉由一孔取得適當的結果。

先謹慎規劃與執行鑽探工作，再詳細描述岩心並進行鑽孔調查，將可提供前述「建議方法」段落所述，與岩體參數有關的資訊，亦即：1、位態；2、間距；3、延續性；4、粗糙度；5、內壁強度；6、內寬；7、填充物；8、滲水狀況；9、組數；10、岩塊尺寸。

設備

至少3公尺長且刻度公厘的量測帶。測量岩心軸與不連續面之間角度的量角器或類似量尺。清洗岩心的工具。後續測量鑽孔可能至少需要使用下述工具之一：鑽孔潛望鏡、相機、孔內攝影儀、液位計(電子接觸型)及相關電線與適合鑽孔長度與選取設備的通風機器。

程序

岩心在記錄前應先清洗乾淨。但對於含填充物的不連續面及對乾溼敏感的泥質岩應避開此步驟。

進行詳細觀察之前，應將岩心整體檢查一遍，確定將進行測量的構造邊界(均勻區)與地質特徵。應小心檢查標示範圍及每回開始與結束的深度是否有錯。

總岩心提取率(R)定義為鑽探取得岩心的總長度與鑽進長度的百分比，且提取率至少 2%。若岩心斷裂成數截時，將各截重新組合以估計岩心長度。

對於單一鑽進或完整鑽孔，以及無特殊構造出現之岩體，通常會用岩心提取率加以描述。欲從易碎之岩體鑽取岩心，則更需依賴鑽探設備及鑽探人員的技術。鑽探造成的岩心磨損可能造成岩心過度缺漏，岩心磨損部分需加以記錄。總岩心提取率(R)通常是由鑽探記錄直接取得，故此項數據是由各個岩心求得。岩心提取長度隨鑽井速率及鑽取的岩石材料而異。

隨時給予鑽探人員指示，使鑽探人員確實記錄岩心缺漏之深度。若有岩心缺漏，則可在缺漏位置放置兩端標有記號的木塊。

頻率(F)是指單位長度岩心所含的不連續面數量，而每一個岩心的單位長度為 1 公尺。

人為造成的破裂是因為粗魯的處理岩心或在鑽探過程中形成，如果人為造成的不連續面可與自然形成的不連續面區別時，則人為造成的不連續面可不必計算。

岩石品質指標(RQD)係指每次鑽取岩心中，長度超過 10 公分部分者之總長對全部岩心長之百分比。因節理、斷層或風化造成的小碎片不計算在內。若岩心因處理或鑽探過程而破碎(亦即是剛發生的破裂而非屬自然存在)，則應將破裂的各段聚合在一起成一段，且須達到 10 公分長。比周圍岩體脆弱的岩石材料，如過壓密之斷層泥，即使看似完好無缺且長度在 10 公分或以上，仍不計算在內。(此類岩石

材料通常只有在使用最先進鑽孔工具，並由經驗最豐富的鑽探人員執行鑽孔時取樣)。

為了不造成 RQD 值偏低，所以建議沿岩心的中心線估算各截岩心的長度(圖 3 - 17)。建議以每次岩心提鑽的長度決定 RQD 值。為了呈現特定地層、構造均勻區、軟弱帶等的變化性，以及提供低 RQD 或 RQD 為零之區帶的位置與帶寬，所以必須分別記錄特定地層、構造均勻區、軟弱帶的 RQD 值。

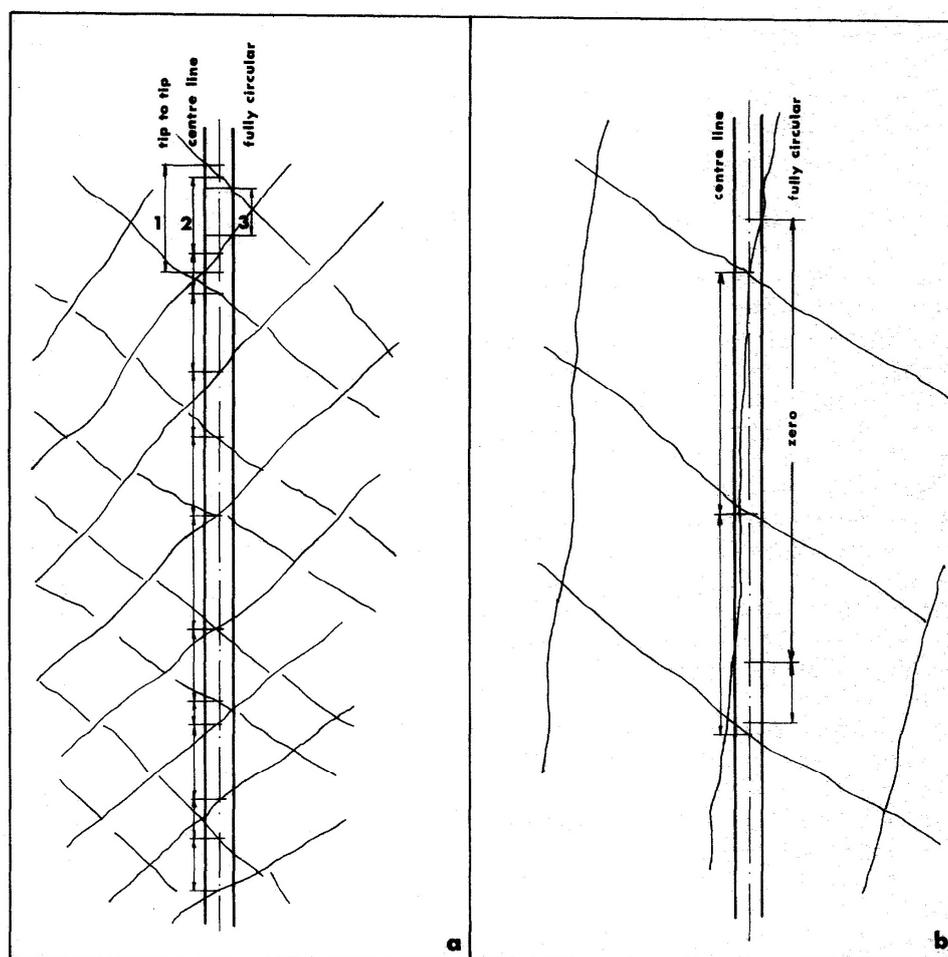


圖 3 - 17. 岩心各段長度的三種可能解釋。建議採用最實際可行的完整長度

補充資料

執行一般程序紀錄總岩心回收率(R)、頻率(F)及岩石品質指標(RQD)之後，建議調查下述項目，以進行量化的描述。

- 1、位態
- 2、間距
- 3、延續性
- 4、粗糙度
- 5、內壁強度
- 6、內寬
- 7、填充物
- 8、滲水狀況
- 9、組數
- 10、岩塊尺寸

評估提取之岩心時多少受到影響的參數(例如內寬、填充物、滲水情況)時，建議結合岩心記錄、鑽孔觀察(鑽孔潛望鏡、孔內攝影儀)與(或)注水試驗。

1、位態

使用分度器測量不連續面與岩心軸相交的銳角 θ (誤差範圍 $\pm 5^\circ$)。若鑽孔呈垂直，則角度 $(90-\theta)$ 將代表不連續面的真實傾角，但若岩心未定向，則傾向仍屬未知。

若兩個或兩個以上非平行鑽孔鑽在可被辨識的層面或葉理面中，則可使用繪圖方法推求傾向與傾角。[1]

若經繪圖已可指出節理組的約略位態，則已定位的鑽孔可用來檢查這些不連續面於深處的位態。當節理可能是垂直及水平時，可進行高傾角鑽孔，一般是以 45° 為主，如此即可從岩心記錄獲得不同位態

的節理組。

若在鑽孔過程中使用位態測量工具，則可由單一鑽孔獲得不連續面的真實位態(傾向與傾角)。可採用的方法如下所示：

- (a) 以每回鑽孔裝置定向儀器以取得岩心定向(Craelius 方法)。若相鄰岩心各截彼此接合，則此方法達到良好效果。若將此方法用於岩心缺失且不連續面互相垂直之區段，則會降低此方法的功效。
- (b) 利用溝槽削刮器(hardened steel groove scribe)與羅盤照片(compass photo device)決定岩心不連續面位態(Christensen-Huegel 方法)。
- (c) 完整取樣法(Integral sampling method)是指套鑽已使用鋼棒與灌漿強化的岩心。使用定位桿測得鋼棒的方位角，再使用直徑較大的圓形套筒，以同軸方式包覆強化岩心，並鑽取樣本。

不連續面的位態(傾向與傾角)可使用孔內攝影儀及潛望鏡透過鑽孔量測取得。孔內攝影儀可調整方位，使得不連續面於電腦螢幕上呈現一直線，傾向與傾角即可很快地被判定。孔內攝影儀曾被使用於鑽孔深度 400 公尺之下，不過在 150 公尺時可能就會受水壓影響。容許孔內攝影儀施測的最小鑽孔尺寸通常為 76 公厘。

鑽孔潛望鏡可使用在小孔徑，但基於光學路徑會產生扭曲，故深度通常僅限制在 30 公尺左右。

2、間距

具明顯葉理面或層面的岩石，應盡可能地將其與岩心進行比對，以估算岩心中的葉理節理、層面節理，以及其他規則節理的實際間距。沿著岩心軸(core axis)，量測同一組且相鄰之節理的距離，此距離即為 L 。不連續面與岩心軸的夾角則為 θ 。因此：

$$S = L \sin \theta$$

因為不連續面可能上下起伏且粗糙，所以 θ 會比從出露岩石所測的值

還不靠。

當節理組與鑽孔為正交時，因為 S 等於 L ，所以間距可直接量測。

當岩石不具明顯特徵時，如葉理面或層面，則任何節理組之間距的估算是根據岩心比對結果。缺少岩心的區段會無法計算間距，不過，如果與岩心截切的節理具有明顯 θ ，以及(或)面上具明顯特徵(如礦物被覆體、粗糙度)，則可沿著岩心記錄這些特徵以估算間距。

利用可調整方位的鑽孔調查設備(潛望鏡、孔內攝影儀)將會增加間距測量的可靠度。

3、延續性

除非鑽孔與鑽孔間的距離相當接近，否則通常不可能從鑽孔或岩心觀察不連續面之延續性。如果各鑽孔的位置非常接近，在沒有任何可供描繪不連續面延續性的資料前，必須詳細進行不連續面的對比。

4、粗糙度

不連續面的內壁粗糙度與相對應的剪力強度，不能光憑鑽孔方法評估。不過，通常可將不連續面的表面依平坦度及光滑度分類，這與圖十一所描述的粗糙度一致，但在此所說之平坦度與光滑度的大小分別是以公分及公厘為單位。

潛望鏡或孔內攝影儀通常不能提供較佳的粗糙度畫面，除非岩體種類太過脆弱且(或)鑽孔技術太差，使得岩心產生破碎。

5、內壁強度

描述內壁強度的建議內容有(a)岩體風化程度、(b)岩石材料風化程度、(c)手動指標測試、(d)施密特錘試驗，亦可使用之來描述岩心。

因為鑽孔岩心代表岩體的直線取樣，所以可直接從岩心觀察與記錄不連續面內壁的風化程度。岩心同時也可為力學試驗的樣本(亦即為描述內壁強度而進行的施密特錘試驗，或為描述岩石材料強度的點

荷重試驗)。Franklin 等人[2]認為應於岩心取樣時同步記錄點荷重強度指數(I_s)。

當評估內壁強度時，應小心檢查相關岩心各截是否能適當聚合。若無法聚合可能表示鑽孔過程中發生填充物流失、剪力位移或內壁嚴重風化等情形。

6、內寬

與鑽孔相交的不連續面，除非採用整體取樣法，否則只能猜測內寬大小。若不連續面兩端的岩心可以直接接合，不留下任何空隙，則該不連續面於現地很可能為「緊閉」(tight)。但即使如此也無法確定是否一定緊閉，也可能是「間隙」(gapped)。此時應檢查相關岩心的內壁排列。

若相鄰岩心不能緊閉，而且目視可發現空隙，則可使用「張裂」(open)一詞描述此不連續面。若未發現較軟之填充物，或在鑽孔過程曾發現高度風化的材料，則原本於岩心鑽孔樣本中被認定為張開的不連續面，其實於現地之內寬可能相當緊密。

使用孔內攝影儀或潛望鏡進行鑽孔調查，應可辨識上述的閉合與張裂特徵，不過最細微節理的內寬不太可能精準的量測到。從滲流的觀點衡量，最重要的是張裂不連續面，所以對於高滲透性岩體而言，上述限制並不重要。可藉由注水測試的結果進行統計分析，以估計導水不連續面的理論平滑內壁內寬 [3]。但因為內壁粗糙度與曲折度(tortuosity)影響，真實內寬可能是理論平滑內壁內寬的好幾倍。

7、填充物

除非使用整體取樣法(integral sampling method)或較好的鑽探設備，否則無法取得大量軟弱填充物。不管是微量或大量的填充物，都應該清楚的描述其寬度、礦物性質及強度等性質。當岩心提取率小於

100%，且大量的填充物或風化材料可能已於鑽探過程中流失，則必須估算填充帶的寬度、位置與位態。而鑽井人員所記錄的鑽進速率、水的流失量、岩屑以及沖洗液的顏色就非常重要。當必須考量變形、穩定性及滲水情況時，填充物的相關資料就變得相當重要，所以建議使用特殊的取樣方法或孔內觀測技術。

8、滲水狀況

進行鑽孔岩心觀察可獲得滲水位置的間接證據。紅棕色的鏽染(Fe^{3+})通常代表該岩體位於地下水位面上方。不連續面內壁的氧化作用，可能發生於地下水位面之下，但是氧化速率通常較慢。地下水位面的變動區域是最常發生鏽染的地方。

通常可使用簡單的電子裝置設備放進鑽孔測得地下水位。關於地下水的其他資訊應可從鑽孔人員的記錄中取得，也可使用潛望鏡與孔內攝影儀觀察鑽孔內壁的滲水情況。

為估計岩體滲透性及單一不連續面與不連續面組導水性，ISRM 針對岩心鑽孔執行的試驗另闢一主題(亦即變水頭測試、倫琴試驗、追蹤劑測試、水壓測量)。倫琴試驗的結果可與總岩心提取率、頻率及 RQD 等記錄相互比較，並加以描述做為補充說明。

9、組數

從鑽孔岩心或鑽孔可獲得的資料量，明顯受到鑽孔位態與不連續面位態之相對關係，以及節理長度與間距之相對關係影響。若既有的地表製圖已經指示特定不連續面的位態，則可利用已定位之鑽孔，確認在不同深度的不連續面組數。若鑽孔與各節理組是以不同角度相切，則岩心的觀察將會變得比較容易。通常需要至少兩口不平行的鑽孔。

在地表所觀察到的組數可能比在深處所觀察到的組數還多。將地

表觀察與隧道開挖做比較，發現此情形並非只是鑽孔取樣限制造成。

10、岩塊尺寸

岩塊尺寸是說明岩體如何被間距、組數、延續性及位態影響。觀察岩心所得之岩塊尺寸記錄，很明顯只能大約描述真實岩塊尺寸。

從鑽孔岩心估計岩塊尺寸的快速方法，是以目視選出幾個具代表性的岩心段，再計算其平均尺寸($\pm 10\%$)。每單位岩塊或均勻區均可依此方法評估。若鑽孔恰可與所有節理組相互截切，則破碎岩心的大小可概略代表本建議方法所定義的岩塊規模指數(I_b)。將指數之變化標示於深度資料中，則有助於進行鑽孔岩心的描述。

備註

(a) 從岩心鑽孔估計頻率或 RQD 時，必須排除因鑽孔過程造成的人

為破壞，以及將岩心裝箱時造成的破損。建議採用下述標準：

- (i) 在單一岩石中，若出現新鮮且粗糙的破裂面，則表示此破裂面是人為造成的。
- (ii) 若不連續面的壁面是平滑或輕微風化，且於壁面形成軟弱的外層(coating)或有填充物填充，例如：滑石、石膏、綠泥石、雲母或方解石，則代表此不連續面為自然形成。
- (iii) 若岩石中的葉理面、劈理面或層面與初始弱面(incipient weakness planes)平行時，則會使得自然形成的不連續面與人為造成的破裂面難以區分。若有謹慎的進行鑽井工作，則可將具有不確定性的破裂視為自然形成。
- (iv) 依鑽井設備而異，部分岩心可能因為內岩心桶的旋轉，使得不連續面的壁面被磨碎，或生成新的破裂。對於軟岩而言，是非常難以決定岩心中的破裂面是自然形成或人為造成。若不確定時，則應保守的假設這些破裂面視為自然形

成。

(v) 若可另外記錄人為造成的破裂面之頻率(以及 RQD 相對較低的區段)，將有助於評估爆破對軟弱沈積岩，與具葉理或片理的變質岩之影響。

(b) 在鑽孔過程中，岩心的碎裂程度可能與岩心直徑及軟岩種型有關。因為人為造成的破裂與自然不連續面難以區別(例如脆弱、易碎裂或葉理的岩石)，所以若擔心岩心強度不夠，則建議岩心試體直徑最好大於 NX (55mm)。鑽取較小直徑的岩心(例如 32 或 42mm)，將使得鑽探人員取得岩心的難度增加。用於校正 NX 岩心的 RQD 之方法如 Heuze[4]建議。

(c) 如圖 3 - 17 所示，有許多用於說明岩心長度之方法，例如：端點至端點(最大)測量法(tip to tip measurement)、中心線長度測量法(center line length)或全岩心測量法(fully circular measurement)。端點至端點的方法會重複計算岩心兩端的岩心長度，而全岩心測量法則會忽略岩心以小角度與不連續面相切而形成的岩心斷塊，所以建議採用中心線長度測量法。

(d) 某些成岩鍵結力(diagenetic bonds)相對較弱的頁岩與泥岩，其岩心記錄結果(頻率與 RQD)明顯受控於時間及含水量。岩心圓盤化(discing)是一個很常見的問題，岩心圓盤化是指完整的岩心沿原始面分裂成圓盤狀，此現象易在岩心提取後數分鐘內發生。此現象的有許多不同的原因：

(i) 在大地應力較高之地區進行岩心取樣時，岩心會因快速解壓而發生破裂(及膨脹)，此現象特別容易發生在頁岩質岩石。

(ii) 軟弱的泥岩及頁岩可能因為負孔隙水壓存在，使岩心得以

保持完整。當岩心發生脫水時破裂因此產生，故 RQD 可在數分鐘內由 100% 降至 0%。

(iii) 某些軟弱泥岩與頁岩會因潮濕而發生消散破裂(slaking crack)。

這些現象會降低岩心記錄中的頻率與 RQD 之可信度。若知道岩心會發生這些狀況，則工程地質師應及早記錄岩心。同時，因此時岩心仍為飽和狀態，工程地質師可儘速進行力學指標試驗(mechanical index test)，如點荷重試驗或施密特錘試驗。

(e) 在特定情況下，除了總岩心提取率(R)外，記錄固岩心提取率(solid core recovery)亦十分有益。固岩心提取率是指具有完整周長的岩心。若沒有提取到破碎的岩石材料(即厚層岩或缺失的岩心全由沖洗系統帶走)，則總岩心提取率等於固岩心提取率。

(f) 彩色照片方便用來記錄岩心外觀，而且具有快速參考與永久記錄的價值。照片中應含完整岩心箱長度的適當比例標示。岩心缺漏處應以木塊取代並適當標記深度。拍照前將岩心弄濕可利於區別不同岩石種類與礦物，但對觀察不連續面沒有影響。

結果報告

因為每個岩石工程的要求皆不同，所以不建議都以相同格式的記錄表進行記錄。若都使用相同格式的記錄表，對於某些計畫可能會記錄太多無關的資訊；對其他計畫而言，重要特徵則可能因此被忽略而未被記錄。記錄表格不須包含下述所有資訊，僅需選擇有用資訊記錄即可。

(a) 基本資料：(i)鑽孔數、(ii)地點、專案名稱、(iii)參考網格(grid reference)、(iv)鑽孔的海拔高度、(v)鑽孔的方位：傾向與傾角(α/β)、(vi)鑽機種類、鑽進方法(type of feed)、岩心管與鑽頭種

類、沖洗系統(flush system)。

(b) 記錄鑽孔深度的相關參數：(i)岩類圖元符號、(ii)點荷重指數(I_s)、(iii)總岩心提取率(R)、(iv)固體岩心提取率、(v)透水測試及地下水位、(vi)頻率(F)、(vii)岩石品質指標(RQD)、(viii)岩體規模指數(I_b)、(ix)不連續面圖元符號。

(c) 補充資料：若無法取得不連續面的完整資料作為相關記錄之參考，則下列參數應一併記錄。

- (i) 間距(估計組數)
- (ii) 粗糙度。
- (iii) 風化等級。
- (iv) 施密特錘試驗(內壁強度 JCS)
- (v) 內寬
- (vi) 填充物與鏽染

3.2 日本 NUMO 2010 報告書關於地質環境調查相關章節重點摘述整理

本計畫以與台灣地質環境條件類似之日本為例，挑選日本 NUMO 2010 報告書關於地質環境調查相關章節，進行重點摘述整理，整理章節包括第五章「地質環境調查與評估技術」與第八章「初步調查區選定與細部調查區選定階段之調查與評估技術」。

NUMO 第五章包括五大部分：(1)日本地質環境特徵評估之考量；(2)文獻調查與初步調查之基本考量與推動；(3)文獻調查與初步調查之架構；(4)調查及評估技術之準備；(5)總結。第五章重點內容分別摘述如下：

第五章 地質環境調查與評估技術

5.1 日本地質環境特徵評估之考量

5.1.1 自然現象之影響與預測

日本處置場址主要需考量的自然現象包括：(1)火山活動、(2)活動斷層與地震、(3)隆起與侵蝕作用之影響。為能妥善避免地質現象對處置場產生不利之影響，瞭解上述地質現象過去之變動(週期性、持續性、地域性及變動範圍)以及預測未來之變動相當關鍵。

上述自然現象主要受板塊運動與氣候變化影響，其中板塊運動影響火山活動、斷層活動與地震、隆起與侵蝕作用；氣候變化主要影響地下水及地表水的流動，與地下水的化學作用；同時，氣候長期變化與海平面高度有關，並將影響隆起、沈降，海水基準面併同隆起、沈降變化影響了侵蝕作用，並造成地下水流動之長期變化。以下簡述各自然現象對地表及地下設施所造成的影響，以及選址時所需蒐集資料及考慮因素：

(1) 火山活動：

地表下需注意岩漿對於地下設施的直接影響，以及高溫對於變質作用與地下水化學作用之影響；地表則需注意岩漿噴發、火山碎屑、火山泥流等對地表設施的直接影響，並評估火山活動的規模、影響範圍。此外，亦需考量其他熱源對地下水的影響，如地下水化學特性、流動特性等。

(2) 斷層活動與地震

斷層活動會造成設施損毀，並使放射性物質沿斷層遷移至地表，故需進行活斷層之調查。斷層周圍可能會伴隨大量裂隙生成，這將會影響岩盤之力學及水文特性。斷層活動所造成之震波會影響地下及地表設施，故需考量各設施之耐震設計。根據長期地下水監測，證實地下水會受斷層活動影響，故需考量斷層活動對地下水的可能影響。斷層活動時，在斷層面上會產生摩擦熱，研究結果顯示其溫度可高達 $1,400^{\circ}\text{C}$ ，故需考量斷層摩擦熱所造成的影響。

(3) 隆起、侵蝕

主要考慮地殼隆起、沉降以及侵蝕、沉積對於處置場址之影響，例如侵蝕可能造成貯存於地下之放射性物質出露於地表、地下水流動的變化。本項主要是考慮地殼長期變化(如十萬年)，而非短期變化。

為瞭解各自然現象可能造成之影響，需藉由蒐集大量文獻資料，並進行各自然現象之長期變化模擬與預測，主要考慮期間為未來十萬年內的變化。一般模擬與預測之方式主要分為外插法、類推法、數值模擬、機率法四類，其中以外插法最為常用。十萬至一百萬年之自然現象變動可以利用外插方式預測。NUMO 報告說明了如何利用各種方法進行自然現象變動之預測，外差法則有特別詳細之說明。

5.1.2 日本地質環境之多樣性

地下水流動及其化學特性(例如地下水與岩石間的化學作用、地下水腐蝕能力等)、岩盤之力學與熱等特性、物質傳輸特性、地質構造(例如斷層、節理影響地下水地流動),皆是在選擇處置場址所需考量的重要特性。這些特性與地質環境有關,日本境內地質環境複雜,不同地質環境地形特徵不同、地下水系統不同(沿海地區地下水為鹽水系統、內陸地區地下水為淡水系統)、岩盤特性不同(力學特性與水力特性、地下水流動特性等)。

日本於地質處置研究方面,有於內陸、火成岩、淡水系之計畫;有於內陸、沉積岩、鹽水系之計畫;也有於沿岸、沉積岩、鹽水系之計畫。地質處置應針對各種不同地質環境特性提出有效之處理方式,不同地質環境特性,其調查、評估方式考量即有所不同。

5.2 文獻調查與初步調查之基本考量與推動

5.2.1 文獻調查與初步調查之基本考量

場址之選擇應考量安全性,例如選擇地下水流量最小位置作為貯存場址,以確保地下設施安全性。

為進行安全評估,可藉由地質環境調查與評估結果,建立地質概念模式,並據此確認工程施作方式,以及後續進行各種安全評估。因此地質環境調查與評估以及建立地質概念模式對於安全評估而言非常重要且關鍵。

地質環境調查、評估與概念模式建立需考量各種因素之不確定性,不確定性可分為:數據之不確定性以及地質概念模式之不確定性。

調查與評估方法之適用性需確認,以有效獲得各項重要資料。各種調查或試驗結果需有系統的加以整合,以確切掌握場址特性。

5.2.2 文獻調查之推動流程

場址選定應先進行全國性的檢視,以初步了解合適之場址位置,

之後再個別檢視各區域之場址條件是否合適。場址於初步調查計畫擬定前，應先進行文獻蒐集。評估的主要事項有地震、火山噴發、地殼隆起與侵蝕、第四紀未固結沉積物分布、礦產資源分布。其中地殼隆起與侵蝕主要考慮過去十萬年內地殼抬升量是否超過 300 公尺，而地底下若有重要礦產資源存在亦需避免選為處置場址。

處置場址之文獻蒐集調查除了為瞭解上述地質環境特性外，同時亦需瞭解場址下列附加資訊：

(1) 地層物理性質及分布情形

包含岩盤強度、變形性、變質程度、異常孔隙水壓分布等

(2) 地下水特性

包含地下水流量、流速、pH 值、氧化還原性質等

(3) 地質環境之調查與評估

包含調查範圍、調查規模、調查時間、調查與評估方式之適用性、火山活動與地震之特性等

(4) 工程進行期間可能發生之自然災害

(5) 土地保護

(6) 運輸方式

為有效地進行文獻蒐集，需先擬定文獻蒐集相關之工作事項，例如文獻調查計畫書之製作、文獻資料管理、文獻資料整合與評估等。

不同文獻調查工作項目，蒐集工作標準可能即有所不同，例如火山活動調查範圍與一般地質調查範圍即不同，前者調查範圍較大。NUMO 完整的整理了(表 5.2.2-2)各調查項目之文獻蒐集目的、蒐集重點內容以及資料來源。

文獻蒐集成果應進行評估，確認文獻蒐集成果是否符合需求，並是否足以作為細部調查之參考依據。

5.2.3 初步調查之推動流程

NUMO 整理初步調查之目標，並建議應以初步調查成果作為是否有必要進行細部調查之篩選依據。初步調查應進行調查計畫之擬訂。調查計畫內容應包含調查目的、調查範圍、調查方法等項目。

初步調查仍應以分階段調查方式進行，由前一階段調查成果擬定下一階段調查計畫。初步調查通常是先進行地表調查(如文獻蒐集、影像判釋與地表調查等)，再進行地表下進一步之調查(如地質鑽探、地球物理探測等)，藉此降低地質環境特性之不確定性。

初步調查成果應進行之評估，初步調查主要是篩選更合適之場址進行細部調查。由於細部調查主要是為了瞭解場址未來變化，故初步調查亦需包含未來變化之資訊。

5.2.4 調查評估之品管

NUMO 是根據 JEAC4111(2000 年)之方式進行調查與評估之品管。初步調查與評估之品管，需有系統地管理、整合，最後製作初步調查成果報告書。

5.3 文獻調查與初步調查之架構

5.3.1 不同自然現象之調查與評估流程

火山活動

NUMO 整理火山活動文獻調查以及初步調查之方法、內容及適用性(NUMO 報告中之表 5.3.1-2)。NUMO 是將第四紀火山半徑 15 公里內列為迴避區域，需避免在此區域內設置貯存場。火山活動調查重點在於岩漿貫入、噴發之可能性與影響範圍，故除了考慮半徑 15 公里之範圍，亦需考慮火山未來可能之影響範圍。火山活動調查方式以文獻蒐集與遙測判釋為主，針對重要區域則再進行地球物理調查。

因火山活動可能造成地下水質改變、地溫上升等影響，因此火山

活動之調查尚包含地熱與熱水調查，調查目的為了解地熱與熱水影響範圍及規模，主要調查方式包含地表調查、地球物理探勘、地球化學調查。

斷層與地震活動

斷層與地震活動的調查與評估，可利用地形學(遙測判釋)、地質學、地球物理、測地學(GPS)、地震學、地球化學之方法進行。NUMO 報告將斷層與地震活動調查調查方法、內容與適用性整理於表 5.3.1-3(陸域)以及表 5.3.1-4(海域)。

隆起、侵蝕

隆起、侵蝕的調查與評估以過去 10 萬年的隆起量未超過 300 公尺之場址為主。此外，亦需調查各種侵蝕作用所造成之地形變化，例如海岸侵蝕、河流側蝕與下切作用等，NUMO 報告將隆起與沉降之調查方法彙整如表 5.3.1.5，侵蝕之調查方法如表 5.3.1-6。

5.3.2 地質環境之調查與評估

地質環境之調查與評估主要是為了解第四紀未固結沉積物之分布、礦產分布、地下設施安全性之評估，以及地質環境長期變化。進行地質環境初步調查後，可了解場址之地質與地質構造、地下水流動特性、地下水化學特性、岩盤特性、物質傳輸特性。進行工程建設前亦須先了解可能遭遇之特殊不利地質狀況，例如異常孔隙水壓、膨脹性材料、岩爆等狀況。

5.4 調查及評估技術之準備

5.4.1 調查與評估技術之發展現況

自然現象(火山、活動斷層與地震、隆起與侵蝕作用)調查主要於文獻調查與初步調查階段進行，地質環境特性的調查與評估主要於初步調查與詳細調查階段進行，NUMO 報告整理了已進行調查之工作

與參考文獻資料(NUMO 報告中表 5.4.1-1~5.4.1-8)。

不同地質環境特性，需考慮調查與評估方法之適用性，以有效獲取重要資訊。以日本為例，地質環境主要有結晶岩、地下水為淡水之沉積岩、地下水為鹹水之沉積岩，在不同地質環境會利用不同調查與評估方法。NUMO 報告強調必要時需再改進現有調查與評估方法，以達到獲取重要資訊之目的。目前日本相關調查機構也持續在改進調查與評估方法，且已實際應用於相關計畫中。

5.4.2 調查、評估技術之確認

必要時需對調查與評估結果進行確認，以降低調查與評估結果之不確定性。首先，根據既有文獻資料，建立地質環境報告第 0 版，同時藉以擬定初步調查計畫。其次根據初步調查計畫，先進行地表踏勘與地球物理探測，並建立地質環境報告第 1 版，同時藉以擬定地下勘查計畫。接著再進行地下勘查，包括鑽孔、岩石試驗與水力試驗，根據上述調查成果即可進一步建立地質環境報告第 2 版，最後根據地質環境調查報告進行地質環境特性評估。如此，可逐步降低調查結果之不確定性。

5.4.3 調查與評估技術之評估與信賴程度之提升

調查與評估技術須持續改進、發展，並從既有之經驗修正調查與評估技術，以更適用於各自然現象、地質環境之調查與評估工作。

目前 NUMO 在調查與評估技術需再改進之處如下：

- (1) 建立自然現象長期變化之調查與評估技術，以更精確預測未來變化趨勢。
- (2) 有系統性的進行地質環境特性長期變化之評估。
- (3) 確認海岸地區及海域之調查技術是否適用，並加以驗證。

自然現象與地質環境特性可再改進之課題如下(彙整如表 5.4.3)。

- (1) 火山活動履歷調查與評估：精進定年技術。
- (2) 火成岩貫入、噴出：案例累積、精進勘查與測定技術。
- (3) 熱及熱水：案例累積、精進勘查與測定技術。
- (4) 火山活動之機率理論：檢討不同理論所獲取之結果並加以改進，以更精準進行預測。
- (5) 確認活動斷層存在：精進斷層活動性評估方法、盲斷層確認與評估方法、地表近期活斷層調查與評估方法、不同區域之活動斷層特性綜合調查與評估方法。
- (6) 活動斷層變形帶範圍、活動斷層影響範圍、活動斷層延伸、破碎帶：整合地質調查與地質模型以進行分析、花崗岩以外之地區，相關案例探討與調查方法之改進。
- (7) 活動斷層之再活動性評估：改善斷層再活動性評估方法。
- (8) 斷層活動之機率理論：檢討不同理論所獲取之結果並加以改進，以更精準進行預測。
- (9) 隆起、侵蝕資料彙整：河階地對比與定年資料整理。
- (10) 隆起、侵蝕量調查與評估：提高河階對比之正確性，以及定年資料蒐集、內陸地區之河階地案例資料累積、利用沉積物評估隆起量之案例蒐集。
- (11) 侵蝕量與侵蝕速率之評估：改善侵蝕速率測定方法、地形變化模擬之驗證、改善地形變化模擬方法。
- (12) 氣候與海水面變動評估：案例累積、改善評估方法。
- (13) 地質環境特性調查與評估：海域鑽探資料累積、改善海岸地區之測量技術、不同地質環境之地質構造調查與重要地質界線探討、改善地下水對斷層影響之檢測方法、改善調查斷層水利特性之水文試驗方法、改善地質環境長期變遷之評估方法、改善三維應力

分析方法、物質於地下之傳輸特性說明。

- (14)綜合調查與評估：有系統地進行沿海地區與海域之調查與評估、無資料區域以外插或內插方式估算，並對此不確定性進行工程安全評估。

5.5 總結

NUMO 報告總結了調查與評估之考慮因素、如何進行調查與評估(分為文獻調查與初步調查)、調查與評估技術目前發展情形。

岩盤裂隙分析相關文獻整理如下：

1. Ishii, E., Funaki, H., Tokiwa, T. and Ota, K. (2010) : Relationship between fault growth mechanism and permeability variations with depth of siliceous mudstones in northern Hokkaido, Japan, *Journal of Structural Geology*, Vol.32, pp.1792-1805.
2. 小池克明,劉春学,天野健治,栗原新(2008)：広域的な地質構造・物性分布の空間モデル作成と有効性の検証－東濃地域における亀裂分布を主としたケーススタディー－, *Journal of MMIJ*,第 124 卷,第 12 号,pp.700-709.
3. 栗原新,天野健治,劉春学,小池克明(2008)：花崗岩体上部に発達する低角度亀裂の空間分布特性と地質学的解釈－瑞浪超深地層研究所周辺の土岐花崗岩からの知見－, *Journal of MMIJ*, Vol.124,No.12, pp.710-718.
4. 舟木泰智,石井英一,常盤哲也(2009)：新第三紀堆積岩中の割れ目は主要な水みちとなり得るか?,*応用地質*,第 50 卷,第 4 号, pp.238-247.
5. 石井英一,福島龍朗(2006)：新第三紀珪質岩における断層の解析事例,*応用地質*,第 47 卷,第 5 号,pp.280-291.
6. 石井英一,安江健一,大平寛人,古澤明,長谷川健,中川光弘(2008)：北海道北部,大曲断層近傍の背斜成長の開始時期,*地質学雑誌*,第 114 卷,第 6 号,pp.286-299.
7. 石井英一,安江健一,田中竹延,津久井朗太,松尾公一,杉山和稔,松尾重明(2006)：北海道北部,幌延地域における大曲断層の三次元分布と水理特性,*地質学雑誌*,第 112 卷,第 5 号, pp.301-314.

NUMO 第八章主要是總結各章，並說明各章之關聯。第八章重點內容分別摘述如下：

第八章 初步調查區選定與細部調查區選定階段之調查與評估技術

8.1 場址選擇階段安全考量

本章主要說明選址時需注意之安全性，從選址至確定場址主要可分三階段，第一階段為「初步調查區選定階段」（即進行文獻調查階段）、第二階段為「細部調查區選定階段」（即進行初步調查階段）、第三階段為「處置設施建設地選定階段」（即進行細部調查階段）。這三階段調查工作主要目的如下：

- (1) 挑選合適之場址
- (2) 以適當之設計、工程施工方式建設處置設施
- (3) 進行場址之長期安全性評估

根據調查結果，選址時需考慮下列因素：

- (1) 是否會受自然現象影響
- (2) 是否有合適之施工方式可克服先天地質條件不佳
- (3) 場址長期安全性
- (4) 需避免人類靠近
- (5) 不以具有經濟礦物之區域作為處置場址

同時，處置場址需考量是否具有多重安全防護措施，處置場址需具備之條件如下：

- (1) 地質環境需屬於長期性穩定。
- (2) 地質環境經評估後確認適合建設處置設施。
- (3) 需有完整之處置場建設、運轉、關閉規範。
- (4) 需有運轉期間及關閉後之長期安全性評估。

NUMO 報告以既有之案例，作為後續場址選擇、建設參考範本，

以降低安全不確定性，期達到詳細掌握場址特性。

8.2 初步調查區選定階段(文獻調查階段)

NUMO 報告闡述文獻調查階段之目標及目標達成要件。並說明文獻調查需提出文獻調查計畫書，內容包含：

- (1) 文獻調查之位置與目的。
- (2) 進行選址時，地方意見徵詢至地方主管機關同意之報告書。
- (3) 文獻調查結果。
- (4) 候選場址之自然環境補充資料。

NUMO 報告說明此一階段自然現象之調查與評估重點：

- (1) 火山活動調查與評估重點，例如岩漿的侵入、噴發、熱水溶液對處置設施之影響。
- (2) 斷層活動與地震調查、評估重點，例如鄰近斷層帶的透水性變化、地震波對設施之影響。
- (3) 隆起、侵蝕調查與評估重點，場址應避免選擇過去十萬年累積隆起量達 300 公尺以上。
- (4) 場址應避免位於第四紀未固結沉積物與地底具有經濟價值礦產之位置。

將進行初步調查之場址，需經過文獻調查篩選，且經專家開會審核文獻調查成果報告書後才決定何者將進行初步調查。進行文獻調查後，且將進行初步調查之場址，若包含下列條件，則有必要擴大範圍進行初步調查。

- (1) 為了解廣域地質構造條件，故需擴大初步調查範圍
- (2) 若場址位於活動斷層、火山影響範圍內，為確切掌握影響範圍，故需擴大初步調查範圍
- (3) 為了解隆起、侵蝕現象，故需擴大初步調查範圍，以便確切掌握

海階、河階分布範圍，進而了解隆起、侵蝕影響範圍

文獻調查後，是否進一步進行初步調查，則須經日本相關政府機關開會討論決定。初步調查階段需概略評估場址之工程特性，以確認合適之設計、施工方式。初步調查階段亦需概略評估場址之安全性。完成文獻調查後，需根據文獻調查成果制定初步調查計畫，且計畫亦需考量細部調查階段，以完整將各階段調查工作有效連接。為有效進行初步調查工作，故需具備一套良好之管理方式。

8.3 細部調查區選定階段(即進行初步調查階段)

NUMO 報告說明初步調查階段之主要目標。完成初步調查後需製作初步調查報成果告書及安全性評估報告書，評選細部調查場址之流程 NUMO 報告整理於圖 8.3.1-1。

地表調查之目的如下：

- (1) 確認文獻調查成果之正確性。
- (2) 有助於調整初步調查計畫內容，使初步調查可達預期成效。

鑽探調查目的，可降低文獻資料之不確定性，更了解地表下之地質條件。

進行初步調查時，需有良好之環境保護措施，以降低初步調查工作對於環境之影響。

NUMO 報告說明初步調查階段自然現象之調查與評估重點，條列如下：

- (1) 火山活動調查、評估項目：例如變質帶分布、熱水溶液之影響。
- (2) 活動斷層與地震調查、評估項目：例如變形帶範圍、斷層活動性評估等。
- (3) 隆起、侵蝕調查、評估項目：例如河階、海階調查、末期冰期以來之沉積物分布範圍等

NUMO 報告亦說明此一階段地質環境特性調查、評估項目包括：岩盤力學特性，地下水流動特性、地質構造等。由於地質環境特性影響地質概念模式之建立，故需有完善之調查、評估方式，以降低地質概念模式不確定性。

NUMO 報告強調需有不同性質之母岩供備選，候選母岩與地下設施建設位置考量條件如圖 8.3.5-1 與表 8.3.5-1 所示。篩選場址時，需進行之評估項目條列如下：

- (1) 熱評估，確保處置場址溫度不會過高。此外，亦需評估母岩熱傳導性質。因廢棄物會產生廢熱，故用於貯存廢棄物之緩衝材料溫度不高於 100°C。
- (2) 母岩力學評估，以確保貯存坑道等工程之安全性。此外，母岩力學特性亦會影響坑道規模、間距，以及地下設施建置深度，而深度又影響處置場溫度，故兩者是相互影響需同時考量。
- (3) 母岩地下水評估，例如地下水流速、流向等，且地下水評估亦有助於地下建設工程之進行。
- (4) 化學環境評估，例如地下水 pH 值、地下水與周圍岩石反應情形等。

為有效進行廢棄物長期貯存，故需慎選作為貯存容器或屏蔽用之材料，並根據不同地質環境特性做出適當之設計，且應根據不同地質環境特性設計合適之地下設施(如坑道)、基礎設施(排氣、排水系統，電力系統等)、地表設施以及工程建設過程中安全防護設施。

另外，在初步調查階段就必須進行長期性之初步安全評估，以篩選合適場址進行細部調查。不同工作階段，所進行之安全評估項目不同。例如：處置場設計階段，需主要評估設計是否合適；細部調查計畫中，則需深入掌握場址之地質狀況；處置場關閉後，則需評估長期

安全性。不同階段所作之安全評估主要是為了降低不確定性。

進行核廢料處置時，需了解下列各點，以確保場址之安全。

- (1) 在初步調查階段中，需了解地質環境之穩定性。
- (2) 處置場母岩特性。
- (3) 在初步調查階段中，需了解地質環境長期之變化。
- (4) 在初步調查階段中，需了解場址本身天然的貯存優勢條件。
- (5) 需了解人工屏蔽設施之安全設計概念及長期安全性。
- (6) 地下設施基本配置。
- (7) 處置場關閉措施之安全性及設計概念。
- (8) 核種遷移時間及遷移路徑。

NUMO 提醒應預想場址可能發生之狀況，且不同狀況所施行之安全措施亦不相同。據此達到有效管理處置場，並增加處置場之安全性。NUMO 亦說明如何利用安全評估模式評估核種遷移現象，同時，NUMO 報告亦說明可利用初步調查與鑽探調查等資料，進行核種遷移模擬，以了解核種在遷移過程之擴散、溶解等特性。結合地質環境資料、處置場設計資料、研究資料進行安全評估，以了解在各種因素同時影響下，場址安全性是否符合規範。安全性評估成果之可靠度，除了需多方考量、聘請專家進行審查，仍需注意下列各點：

- (1) 各評估項目之安全性定義是否符合規範。
- (2) 對於各項資料、研究數據均需深入了解。
- (3) 處置場正式運轉後，亦需檢核實際情形與模擬分析結果之異同。

處置場相關建設之安全評估，主要是根據地質環境特性、處置場設計等資料，以進行工程建設安全評估。NUMO 報告依序說明細部調查區域之確認事項，細部調查需先確認是否條件符合法規規定，不符合規定者則將不進行細部調查。專家、學者可根據初步調查報告書

進行審核、確認。符合細部調查規定者，則進一步決定調查範圍。

完成初步調查報告書，則將進行相關行政程序，徵求地方主管機關同意進行細部調查。前述工作皆準備就緒，則可開始擬定細部調查計畫。本階段可分為前、後兩階段，前一階段為地表調查，主要是獲取更多更正確之資訊；後一階段為處置場工程設計，主要是根據調查成果進行符合地質環境特性之設計。

8.4 總結

最後，NUMO 針對文獻調查、初步調查及細部調查應注意事項總結，各階段調查工作重要內容整理如第八章之末參考表 1 與參考表 2。

第四章 低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查

導則第 0 版修正建議

本章主要針對低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則第 0 版之第三章場址之特性描述與第七章處置設施之安全評估提出修正建議，分別以表列對照原文與修正建議。

4.1 「第三章 場址之特性描述」修正建議

頁碼	原文	修正建議
3-6	<p>(1)發展模式的方法、理論和根據，包含模式型態的呈現、驗證與校準。</p> <p>(2)輸入模式的資料，包括現地與實驗室測量與分析資料、使用地質統計或其他數據產生或簡化技術的資料、外界來源資料和現地的任何修正資料等。</p>	<p>(1)發展模式的方法、理論和根據，包含模式型態的呈現、驗證與校準。</p> <p>(2)水文地質概念模式建立，必須充份參考 3.11 節場址之大地工程特性調查成果，特別是岩盤不連續面特性之特徵化。</p> <p>(3)輸入模式的資料，包括現地與實驗室測量與分析資料、使用地質統計或其他數據產生或簡化技術的資料、外界來源資料和現地的任何修正資料等。</p>
3-7	<p>(1)地下水概念模式所描述的所有水文地質過程與特性是否正確？包含深層滲漏的潛勢、補注/流出區域、影響區域水文地質過程之異常物理參數、含水層與受限含水層之分佈、含水層間之作用以及飽和與未飽和層地下水的</p>	<p>(1)地下水概念模式所描述的所有水文地質過程與特性是否正確？包含深層滲漏的潛勢、補注/流出區域、影響區域水文地質過程之異常物理參數、含水層與受限含水層之分佈、含水層間之作用以及飽和與未飽和層地下水的</p>

	<u>移動。</u>	<u>移動、岩盤不連續面特性。</u>
頁碼	原文	修正建議
3-11	<p>2.<u>地質工程</u>、地球化學與地震調查：</p> <p>(1)可清楚陳述場址地質狀況之地質圖、地質剖面、地質構造、地質歷史與工程地質資料，及其測量方法。</p> <p><u>(2)場址地區土壤岩石的物理及強度特性</u>，特別是天氣與雨水對土壤與岩石具有風化和溶解濾出之地球化學作用。</p> <p><u>(3)處置設施設計基準地震事件的資料，必須包括地震的規模、地震之高程與位置、最大水平加速度、最大速度、地震的延時和場址土壤條件對地表震動放大效應之潛勢。</u></p>	<p>2.<u>工程地質</u>、地球化學與地震調查：</p> <p>(1)可清楚陳述場址地質狀況之地質圖、地質剖面、地質構造、地質歷史與工程地質資料，及其測量方法。</p> <p><u>(2)場址地區土壤岩石的工程地質與大地工程特性，特別是岩盤不連續面調查成果。</u></p> <p><u>(3)場址地區土壤岩石的化學特性</u>，特別是天氣與雨水對土壤與岩石具有風化和溶解濾出之地球化學作用。</p> <p><u>(4)處置設施設計基準地震事件的資料，必須包括地震的規模、最大水平加速度、最大速度、地震的延時和場址土壤條件對地表震動放大效應之潛勢。</u></p>
3-11	<p>(1)平面圖中應清楚顯示低放處置設施的輪廓和所有鑽孔、偵測點、處置坑、處置壕溝、<u>地球物理探測測線震度線</u>、水壓計、觀測井和地質剖面的位置。</p>	<p>(1)平面圖中應清楚顯示低放處置設施的輪廓和所有鑽孔、偵測點、處置坑、處置壕溝、<u>地球物理探測測線</u>、水壓計、觀測井和地質剖面的位置。</p>
3-11	<p>(1)場址及借土區之土壤及岩石，<u>經現地與實驗室試驗的項目(土壤指數及工程特性試驗方法)如下</u>：土壤分類、含水量、重量密度、空隙比、孔隙率、飽和度、阿太堡限度、比重、級配分析、夯實、收縮-膨脹、延散性、擴散特性、滲透性、水力傳導特性、</p>	<p>(1)場址及借土區之土壤及岩石，<u>現地與實驗室試驗的項目(指數及工程特性試驗方法)如下</u>：土壤分類、含水量、重量密度、空隙比、孔隙率、飽和度、阿太堡限度、比重、級配分析、夯實、收縮-膨脹、延散性、擴散特性、滲透性、水力傳導特性、</p>

	<p>壓密性、直接剪力試驗、三軸壓縮試驗、單軸壓縮試驗、相對密度、特別試驗(週期強度、剪力模數)、阻尼，視需要而定</p>	<p>壓密性、直接剪力試驗、三軸壓縮試驗、單軸壓縮試驗、相對密度、特別試驗(週期強度、剪力模數)、阻尼，視需要而定。</p>
3-12	<p>1.調查架構是否符合描述場址地工特性、水文地質與現地應力特性之需求？調查與評估方法是否適當與具代表性？<u>調查成果是否足以描述場址大地工程特性</u></p>	<p>1.調查架構是否符合描述場址地工特性、水文地質與現地應力特性之需求？調查與評估方法是否適當與具代表性？調查成果是否足以描述場址大地工程特性？<u>調查成果是否足以描述場址水文地質特性並足以合理建構3.6節所述之水文地質概念模式？</u></p>
3-12	<p>2.<u>地質工程</u>、地球化學與地震調查： (1)所有存在或可能發生地表或地下沉陷、上升或潰陷、變形、溶洞或構造弱點、岩盤中未釋放之壓力、以及可能因物理或化學特性而不穩定之岩石或土壤，<u>是否已被適當地評估？</u></p>	<p>2.<u>工程地質</u>、地球化學與地震調查： (1)所有存在或可能發生地表或地下沉陷、上升或潰陷、變形、溶洞或構造弱點、岩盤中未釋放之壓力、以及可能因物理或化學特性而不穩定之岩石或土壤，<u>是否已被適當地評估？岩盤之不連續面特性是否已適當的特徵化？</u></p>

4.2 「第七章 處置設施之安全評估」修正建議

頁碼	原文	修正建議
7-2	評估處置設施工程與天然障壁在設施運轉及封閉後，地下水滲流、擴散、延散與 <u>遲滯吸附</u> 等特性參數，以模擬分析地下水滲流機制、核種傳輸及處置設施之長期穩定性。	評估處置設施工程與天然障壁在設施運轉及封閉後，地下水滲流、擴散、延散與 <u>生地化反應速率</u> 等特性參數，以模擬分析地下水滲流機制、核種傳輸及處置設施之長期穩定性。
7-2	核種藉水與空氣介質的傳輸，外釋到人類的活動範圍。水介質是重要的傳輸機制，所以須提供水與核種在工程障壁與天然障壁間的滲流、擴散、 <u>延散等特性</u> ，	核種藉水與空氣介質的傳輸，外釋到人類的活動範圍。水介質是重要的傳輸機制，所以須提供水與核種在工程障壁與天然障壁間的滲流、擴散、 <u>延散、生地化反應速率等特性參數</u> ，
7-2	1. 處置場址附近的 <u>氣象資訊</u> ：水從處置設施覆蓋層(或坑道壁上層)的地表滲漏到處置單元之滲漏分析數據與滲漏分析方式。	1. 處置場址附近的 <u>水文與氣象資訊</u> ：水從處置設施覆蓋層(或坑道壁上層)的地表滲漏到處置單元之滲漏分析數據與滲漏分析方式。
7-2	(1)滲漏分析數據：包含地質統計技術、近似值、處理、數據產生及/或消去、保守估計、以及為達到較佳模擬結果而將現地資訊或實驗室數據所做之 <u>最佳化調整</u> 。	(1)滲漏分析數據：包含地質統計技術、近似值、處理、數據產生及/或消去、保守估計、以及為達到較佳模擬結果而將現地資訊或實驗室數據所做之 <u>最佳化調整、與不確定性分析</u> 。
7-2	(2) 滲漏分析方式：其描述包含 <u>文件、假設、驗證及校正</u> 。	(2) 滲漏分析方式：其描述包含 <u>資料、假設、模式、驗證及校正</u> 。

7-2	6.工程障壁材料與天然障壁對重要核種的 <u>遲滯吸附參數值</u> 。	6.工程障壁材料與天然障壁對重要核種的 <u>主要生地化反應速率參數值</u> 。
7-2	4. 擴散、延散與 <u>遲滯吸附</u> 參數值是否合理且足以提供合理之準確度或保守之分析。若場址參數無法取得，應確認採適當保守假設，若參數存在不確定性或不一致，其數值應與文獻中所得之相似地質介質數值範圍相比較。	4. 擴散、延散與 <u>生地化反應速率</u> 參數值是否合理且足以提供合理之準確度或保守之分析。若場址參數無法取得，應確認採適當保守假設，若參數存在不確定性或不一致，其數值應與文獻中所得之相似地質介質數值範圍相比較。 <u>若生地化反應速率參數無法取得，應以較保守之遲滯吸附參數推估，並估計其可信賴度。</u>
7-5	<p><u>(1) 依場址地質及水文地質特性，描述潛在的核種遷移地下水途徑。</u></p> <p><u>(2) 地下水之流場、流速與流向之分布與數值。</u></p> <p><u>(3) 核種藉地下水之傳輸模式。</u></p> <p><u>(4) 人類或生物圈可能接觸到地下水位置及場界位置之核種濃度。</u></p>	<p><u>(1)依場址地質及水文地質特性所建構之水文地質模型與假設</u></p> <p><u>(2)依所建構水文地質模型描述潛在的核種遷移地下水途徑。</u></p> <p><u>(3) 地下水之流場、流速與流向之分布與數值。</u></p> <p><u>(4) 核種藉地下水之水流與生地化反應傳輸模式。</u></p> <p><u>(5) 人類或生物圈可能接觸到地下水位置及場界位置之核種濃度。</u></p>
7-6	<p>(1) 核種遷移的所有可能的地表水概念模式。</p> <p>(2) 用於分析場址下游適當位置核種濃度之具有空間與時間分佈的<u>地表水傳輸模</u></p>	<p>(1) 核種遷移的所有可能的地表水概念模式。</p> <p>(2) 用於分析場址下游適當位置核種濃度之具有空間與時間分佈的<u>地表水水流與生</u></p>

	<p><u>式。</u></p> <p>(3) <u>地表水傳輸模式</u>之源項輸入參數，須包括地表水釋出速率、與<u>地下水介面之源項。</u></p> <p>(4) <u>經地表水傳輸模式</u>計算所得的核種濃度。</p>	<p><u>地化反應傳輸模式。</u></p> <p>(3) <u>地表水水流與生地化反應傳輸模式</u>之源項輸入參數，須包括地表水釋出速率、與<u>地下水界面之源/匯項。</u></p> <p>(4) <u>經地表水水流與生地化反應傳輸模式</u>計算所得的核種濃度。</p>
7-6	(3) 地下水概念模式中之水文地質、地質及 <u>地球化學資訊</u> 是否與安全分析報告中場址特性之數據一致。	(3) 地下水概念模式中之水文地質、地質及 <u>生物地球化學資訊</u> 是否與安全分析報告中場址特性之數據一致。
7-7	(2) <u>係數選擇與參數使用</u> 是否採用保守原則，未來所有可能的地表水改變(降水量變化或已知未來建造水井、水庫、取水口等)是否能於計算中反應。	(2) <u>參數選擇與使用</u> 是否採用保守原則，未來所有可能的地表水改變(降水量變化或已知未來建造水井、水庫、取水口等)是否能於計算中反應。
7-7	1.彙整 7.1 中一至六節之分析結果。確認最大個人劑量位置，主要放射性曝露介質， <u>主要攝入途徑。</u>	1.彙整 7.1 中一至六節之分析結果。確認最大個人劑量位置，主要放射性曝露介質， <u>主要攝入途徑，與不確定性分析結果。</u>
7-9	(2) 上游若有水庫，提供水庫的位置與大小、 <u>水庫瞬間損壞提出尖峰流量、分析水庫損壞的情形。</u>	(2) 上游若有水庫，提供水庫的位置與大小、 <u>水庫潰壩之出尖峰流量、分析水庫潰壩機率與損壞情形。</u>
7-9	(1)計洪水量須大於 PMF；若設計洪水量低於 PMF，則應審查設計洪水量的合理性，另外， <u>排水區域也應一併考量。</u>	(1)計洪水量須大於 PMF；若設計洪水量低於 PMF，則應審查設計洪水量的合理性，另外， <u>排水設施與區域設置也應一併考量。</u>

第五章 低放射性廢棄物處置安全評估及場址特性調

查後續技術發展建議

5.1 低放射性廢棄物處置安全評估後續技術發展建議

關於低放射性廢棄物處置場安全評估後續技術發展，茲提出以下三項建議：

1. 考慮生物地球化學反應傳輸模式。
2. 建立符合國內水文地質條件之環境基準案例。
3. 開發整合多介質環境模式。

上述三項建議之重要性與發展方向概述於後：

(1) 考慮生物地球化學反應傳輸模式

功能評估常使用遲滯吸附參數推估工程或天然障壁之遲滯效應，這已在許多文獻中證明使用 K_d (等溫線性吸附係數)是無法掌握核種移棲特性，此外某些地球化學特性，如酸鹼值與鹼度對環境微生物之核種生物降解反應有顯著影響，近年來隨著生物地球化學反應傳輸模式之發展已相當完整與成熟，未來之安全評估模式，不應只考慮簡化之遲滯吸附參數，而應採用完整之生物地球化學反應傳輸模式，合理評估核種在地表水與地下水體之移棲與宿命。

(2) 建立符合國內水文地質特徵之環境基準案例

水文地質條件無疑是影響核種在環境移棲之主要因子之一，而就國內之水文地質條件而言相對特殊 (如地表水與地下水交互作用明顯、地質活動頻繁、環境變遷快速)，透過建立環境基準案例，將可公開且透明進行模式交叉評比，也可作為未來安全評估模式選取的重要參考依據。採用環境基準案例，對管制審查而言，將可更明確評估所採用模式之評估結果可信賴度，也將可提高社會大眾對安全評估結

果之信心。

(3) 開發整合多介質環境模式

過去安全評估多採用許多現有之單一介質(如地下水、地表水)安全評估模式進行功能評估或安全分析，但受限於僅能分別考慮核種在單一介質之移棲模擬，對於不同介質交界面之質傳與熱傳僅能透過邊界條件處理，無法反應真實世界不同介質間之交互作用機制。此外又如功能評估常使用簡化之遲滯吸附參數是不夠完整的，應考慮完整之生地化反應傳輸。又如劑量與風險評估與不確定性分析等又獨立於核種傳輸模擬。各自獨立之模擬環境與介面使得安全評估工作存在許多交界面與資料或數據之銜接斷層。審視國際發展趨勢如 IAEA 目前尚在編寫中之放射性污染場址整治評估數學模式技術導則，即已建議發展整合多介質環境模式(如 2.2 節所摘述)，鑒於下一世代安全評估模式之開發相對於其他處置場址建置工作而言，所需投注之人力與物力是極其微小，確是最容易使國內在安全評估工作居國際領導地位的投資，因此建議積極投入或加入國際組織參與開發整合多介質環境模式。

5.2 低放射性廢棄物處置場址特性調查後續技術發展之建議

關於低放射性廢棄物處置場址特性調查後續技術發展，茲提出以下三項建議：

1. 岩盤不連續面調查技術發展。
2. 決定水文地質均質區技術發展。
3. 岩盤地下水模擬輸入參數評估技術發展。

上述三項建議之重要性與發展方向概述於後：

(1) 岩盤不連續面調查技術發展

岩體不連續面主控岩體力學及水力特性，間接亦影響熱傳與地球化學特性，國內關於岩體不連續面對岩體力學及水力特性對處置安全評估之影響已開始進行技術發展，然而，做為安全評估所需之場址不連續面特徵化技術，卻未獲得相對應之重視。相關於岩體不連續面調查技術，仍多僅散見於少數論文或技術報告。

ISRM (International Society for Rock Mechanics;1978)標準 (Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses)詳細說明岩體不連續面調查與定量描述之方法，包括不連續面之位態(Orientation)、間距(Spacing)、延續性(Persistence)、粗糙度(Roughness)、壁面強度(Wall strength)、開口寬(Aperture)、填充物(Filling)、滲水情況(Seepage)、組數(Number of sets)、岩塊尺寸(Block size)十大項，為一非常重要之參考資料。國內處置場址利用標準化方法進行不連續面特徵化之完整案例不多，相關技術發展(如利用影像或 LiDAR 技術)亦尚於起步階段，因此，不連續面調查技術發展值得列入低放射性廢棄物場址特性調查後續技術發展項目。

(2) 決定水文地質均質區技術發展

與岩體不連續面特徵化息息相關之議題，為如何決定水文地質均質區。目前流場分析方法，主要包括離散裂隙概念與等值連體介質概念兩大類，離散裂隙法直接考慮裂隙之影響，惟其問題在於廣域計算之效率提升仍待突破。等值連體介質概念將裂隙之影響等值化，透過等值化理論，廣域模擬效率可明顯提升。然而，此一方法之使用困境在於如何決定代表性體積(Representative Volume)，同時，如何決定均質區(代表性體積具有相同水力參數者)亦相當重要。此一問題顯然與不連續面調查與特徵化有關。從廣域尺度觀之，此一工作應先從構造地質學角度切入，進行水文地質區劃分，接著再將比例尺放大，利用各區不連續面特徵化結果，進行水文地質均質區細分。此一技術發展將可大幅度降低安全評估流場分析之不確定性。

(3) 岩盤地下水模擬輸入參數評估技術發展

如第(2)點所述，地下水流場分析不論採離散裂隙概念或等值連體介質概念，不連續面特徵具為最重要的輸入參數之一。如何從調查成果轉換為模式參數輸入，此一技術國內尚亟待發展。一個從不連續面調查、資料統計到參數特徵化與地下水流場模擬之完整案例探討，為低放射性廢棄物處置安全評估及場址特性。

第六章 結論與建議

1. 本研究蒐集及研析(1)國際原子能總署於 2012 年提出之放射性廢棄物處置之安全案例與安全評估技術導則；(2) 國際原子能總署尚在編寫中之放射性污染場址整治評估數學模式技術導則，並摘述兩份文件之重點。第一份文件針對放射性廢棄物處置之安全案例與安全評估著重原則性之技術導則，以條列式方式呈現；而第二份文件較著重於安全分析模式之最新發展與未來發展建議，但礙於尚未有完整初稿。
2. 本研究蒐集及研析(1)國際岩石力學會(International Society for Rock Mechanics)於 1978 提出之 Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses，(2)日本 NUMO 2010 報告第五章與第八章，並摘述兩份文件之重點。兩份文件詳細闡述了不連續面調查方法之標準化以及處置場址調查項目、方法、技術及資料整合作業。
3. 國際岩石力學會關於母岩不連續面調查標準方法，可提供作為未來審查之參考。
4. 本研究檢視低放處置審查導則第 0 版草案有關安全評估章節，並提出審查導則修正建議。相關建議特別強調化學反應傳輸與不確定性分析在安全評估工作之重要性。
5. 本研究檢視低放處置審查導則第 0 版草案有關場址特性調查章節，並提出審查導則修正建議。相關建議特別強調岩體不連續面特性之特徵化，以及不連續面特性之特徵化與水文地質概念模式之關聯性。

6. 本研究建議低放射性廢棄物處置安全評估後續技術發展建議，可考慮(1)生物地球化學反應傳輸模式；(2)建立符合國內水文地質條件之環境基準案例；(3)開發整合多介質環境模式。
7. 本研究建議低放射性廢棄物處置場址特性調查後續技術發展建議，可考慮(1)岩盤不連續面調查技術發展；(2)決定水文地質均質區技術發展；(3)岩盤地下水模擬輸入參數評估技術發展。

參考文獻

1. 行政院原子能委員會放射性物料管理局，低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第0版)，中華民國101年2月。
2. 任春平，2008，低放射性廢棄物最終處置功能安全評估模式審查技術之建立，行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告，97FCMA006。
3. 李境和，2007，低放射性廢棄物最終處置設施安全審查規劃研究，行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告，96FCMA001。
4. 董家鈞、陳瑞昇，2006，低放射性廢棄物隧道處置水文地質模擬技術發展現況與國內隧道工程水文地質模擬案例研究，行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告，952006FCMA002。
5. 董家鈞、陳瑞昇，2005，低放射性廢棄物隧道處置水文地質概念模式審查技術之建立，行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告，942005FCMA002。
6. IAEA, 2004, Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities.
7. IAEA, 2012, Mathematical Models for Assessing Remediation of Radioactively Contaminated Sites (draft), edited by R. Avila, H. Monken-Fernandes, D. Jacques, B. Newman, J. Simunek, G. Yeh, C. Yu, M. Zhu.
8. IAEA, 2012, The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, IAEA Specific Safety Guide No. SSG-23.
9. Japan Nuclear Cycle Development Institute, 2000, H12: Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Supporting Report 3: Safety Assessment of the Geological Disposal System, JNC-TN1410 2000-04, 458 pp.
10. Japan Nuclear Cycle Development Institute, 2000, H12: Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Supporting Report1: Geological Environment in Japan,

JNC-TN1410 2000-02, 393 pp.

- 11.NRC, 2000, A Performance Assessment Methodology for Low-Level Radioactive Waste Disposal Facilities, NUREG- 1573, Division of Waste Management, Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC 20555-0001.
- 12.NRC, 2006, Proceedings of the International Workshop on Conceptual Model Development for Subsurface Reactive Transport Modeling of Inorganic Contaminants, Radionuclides, and Nutrients, NUREG/CP-0193, Division of Systems Analysis and Regulatory Effectiveness, Office of Nuclear Regulatory Research, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC 20555-0001.
- 13.ISRM, 1978, Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. Int. Journ. Rock Min. Sci and Geomech. Abstr. 15: 319-368.
- 14.NUMO, 2010, 地層処分事業の安全確保（2010年度版）～確かな技術による安全な地層処分の実現のために～.

附件一 安全評估模式核種傳輸解析解回顧

目前各國於放射性處置場址的環境安全性評估，均以反應化學傳輸的觀點出發，分析處置設施於近場及遠場下各類地球化學傳輸作用。所以透過適當的反應化學傳輸數值模式將可評估處置場之長期功能及安全性，進一步釐清面臨安全疑慮下(如核種洩漏的發生)，對其所在之水文地質環境影響及人類生活圈的環境衝擊與人體可能的健康風險。過去數十年的研究中，學者發展許多複雜的反應化學傳輸數值模式，用以進行處置場之長期功能與安全性評估。由於模擬場址地層分布概況複雜，對這些反應化學傳輸數值模式而言，驗證其正確性是一項重要的工作。過去驗證工作通常是藉由數值模式與解析解模式交互比較。另外，解析解除可做為數值模式驗證之工具外，亦可提供做為相對簡單的篩選模型，模擬各種變化的情境的結果以進行靈敏度分析或情境模擬。

目前現存地下水反應化學傳輸的解析解主要是以單一物種為主，而考慮多物種反應化學傳輸的解析解相對而言則較為稀少，在單一物種反應化學傳輸的解析解基本上可模擬一、二、三維的情況，而且可考慮時變性之邊界條件或內部污染源釋放，附表 1 整理了幾個具代表性的單一物種反應化學傳輸的解析解。

附表 1. 單一物種傳輸解析重要程式與描述

程式/作者	描述
AT123/ Yeh (1981)	可模擬一維、二維與三維的情況，包含 288 選項。 三維(288 選項) 二維 x-y 平面(72 選項) 二維 x-z 平面(72 選項) 一維水流項(18 選項)
Wexler (1992)	USGS 的三維模擬軟體，包各種不同邊界條件與污染源。
STANMOD /Simunek et al. (1999)	(STANMOD STudio of ANalytical MODels)為以視窗為基礎公開可取得的程式模組，包含一維與二、三維的解析解。 一維溶質傳輸模擬 CXTFIT 2.0 [Toride et al., 1995] CFITM [van Genuchten,1980] CFITIM [van Genuchten, 1981] CHAIN [van Genuchten, 1985] SCREEN [Jury et al., 1983] 二、三維溶質傳輸模擬 3DADE [Leij and Bradford, 1994] N3DADE [Leij and Toride, 1997]

本研究進一步整理了目前文獻中相關多子核地下水核種傳輸解析解如附表 2，大致歸納出下列結論：

(1)多子核地下水核種傳輸之解析解，在過去的三十年研究中，一直是持續關注的議題。許多不同的解析方法被提出來解決這類問題，例如：Laplace 轉換法、轉換變數除耦法與矩陣對角化等數學運算技巧。但除 Pérez Guerrero et al. (2009, 2010)與 Chen et al. (2012a; 2012b)外，大部份學者都是考慮無限長度與半無限長度介質下，然而一般反應化學傳輸數值程式都只能考慮有限長度介質，因此發展有限

長度介質之解析解有其必要性。

(2)現有反應化學數值程式一般考慮多是二、三維傳輸問題，但目前能考慮二、三維傳輸問題的解析解，但都為半解析解(須進行 Laplace 數值逆轉換)，另外其介質多為無限長度與半無限長度介質。

(3)目前考慮的核種釋放大都為非時變性，少數考慮時變性物種的來源項也都侷限於 Bateman 指數型式污染源或 Delta 型式。

附表 2. 多子核地下水核種傳輸解析解作者與描述

作者	描述
van Genuchten (1985)	一維、單層均質、半無限長、多孔介質、至多四個子核種、完全解析解、Bateman 指數型式的核種釋放、FORTRAN 程式名稱：CHAIN (現在包含於 STANMOD (STudio of ANalytical MODels) 網址： http://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?stanmod
Bauer et al. (2001)	一、二、三維、單層均質、半無窮長、多孔介質、四個子核種、常數或 Delta 瞬時型式的核種釋放、半解析解(須利用 Laplace 數值逆轉換)、MATLAB
Quezada et al. (2004)	一、二、三維、單層均質、半無窮長、多孔介質、四個子核種、常數或 Delta 瞬時型式的核種釋放 半解析解(須利用 Laplace 數值逆轉換) 程式語言未知
Srinivasan and Clement (2008a, b)	一維、單層均質、半無限長、多孔介質、任意數目子核種、完全解析解、FORTRAN
Peréz Guerrero et al. (2009)	一維、單層均質、半無限長、多孔介質、任意數目子核種、常數(非時變)型式核種釋放、MATLAB 程式語言

Peréz Guerrero et al. (2010)	一維 單層均質 有限長度 Bateman 指數(時變)型式的核種釋放 遞迴解(非完全解析解, 計算關鍵子核種濃度 須從起始母核種逐一計算至關鍵子核種) MATLAB 程式語言
Chen et al. (2012a)	一維、單層均質、有限長度、多孔介質、四個子核 種、常數(非時變)型式核種釋放、完全解析解、 FORTRAN 程式語言
Chen et al. (2012b)	一維、單層均質、有限長度、Bateman 指數(時變) 型式的核種釋放、完全解析解(可任意計算至某一 關注子核種)、FORTRAN 程式語言

附件一之參考文獻

1. Bauer, P., Attinger, S., Kinzelbach, W., 2001, Transport of a decay chain in homogenous porous media: Analytical solutions. J. Contam. Hydrol. 49, 217-239.
2. Chen, J.S., Lai, K.H., Liu, C.W., Ni, C.F., 2012, A novel method for analytically solving multi-species advective-dispersive transport equations sequentially coupled with first-order decay reactions, J. Hydrol., 420-421(14), 191-204.
3. Chen, J.S., Lu, C.W., Liang, C.P., Lai, K.H., 2012, Generalized analytical solutions to sequentially coupled multi-species advective-dispersive transport equations in a finite domain subject to an arbitrary time-dependent source boundary condition, Journal of Hydrology, Available online 18 June 2012.
4. Jury, W. A., W. F. Spencer, and W. J. Farmer, Behavior assessment model for trace organics in soil: I. Description of model. J. Environ. Qual., 12:558-564, 1983.
5. Leij, F. J., and N. Toride, N3DADE: A computer program for evaluating nonequilibrium three-dimensional equilibrium solute transport in porous media, Research Report No. 143, U. S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, CA, 1997.
6. Leij, F. J., and S. A. Bradford, 3DADE: A computer program for evaluating three-dimensional equilibrium solute transport in porous media, Research Report No. 134, U. S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, CA, 1994.
7. Pérez Guerrero, J.S, Skaggs, T.H., van Genuchten, M.Th., 2009, Analytical solution for multi-species contaminant transport subject

- to sequential first-order decay reactions in finite media. *Transp. Porous Media*. doi:10.1007/s11242-009-9368-3.
8. Pérez Guerrero, J.S., Skaggs, T.H., van Genuchten, M.Th., 2010, Analytical solution for multi-species contaminant transport in finite media with time-varying boundary conditions. *Transp. Porous Med.* doi:10.1007/s11242-010-9553-4.
 9. Quezada, C.R., Clement, T.P., Lee, K.K., 2004, Generalized solution to multi-dimensional multi-species transport equations coupled with a first-order reaction network involving distinct retardation factors. *Adv. Water Resour.* 27, 508-521.
 10. Simunek, J., M. Th. van Genuchten, M. Sejna, N. Toride, and F. J. Leij, The STANMOD computer software for evaluating solute transport in porous media using analytical solutions of convection-dispersion equation. Versions 1.0 and 2.0, IGWMC - TPS - 71, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, 32pp., 1999.
 11. Srinivasan, V., Clement, T.P., 2008a, Analytical solutions for sequentially coupled one-dimensional reactive transport problems – Part I: Mathematical derivations. *Adv. Water Resour.* 31, 203-218.
 12. Srinivasan, V., Clement, T.P., 2008a, Analytical solutions for sequentially coupled one-dimensional reactive transport problems – Part I: Mathematical derivations. *Adv. Water Resour.* 31, 203-218.
 13. Srinivasan, V., Clement, T.P., 2008b, Analytical solutions for sequentially coupled one-dimensional reactive transport problems - Part II: Special cases, implementation and testing. *Adv. Water Resour.* 31, 219-232.
 14. systems with uniform flow. U.S. Geological Survey, *Techniques of Water-Resources Investigations*, Book3, Chap. B7.
 15. Toride, N., F. J. Leij, and M. Th. van Genuchten, The CXTFIT code for estimating transport parameters from laboratory or field tracer experiments. Version 2.0, Research Report No. 137, U. S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, CA, 1995.
 16. van Genuchten, M. Th., Convective-dispersive transport of solutes involved in sequential first-order decay reactions, *Computers & Geosciences*, 11(2), 129-147, 1985.
 17. van Genuchten, M. Th., Determining transport parameters from solute displacement experiments, Research Report No. 118, U. S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, CA, 1980.
 18. van Genuchten, M. Th., Non-equilibrium transport parameters from miscible displacement experiments, Research Report No. 119, U. S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, CA, 1981.
 19. Wexler, E.J., 1992. Analytical solutions for one-, two-, and three-dimensional solute transport in ground-water

20. Yeh, G.T., 1982, AT123D: Analytical transient one-, two, and three-dimensional simulation of waste transport in an aquifer system. ORNL-5602, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, 88p.