

行政院原子能委員會  
委託研究計畫研究報告

低放射性廢棄物隧道最終處置管制  
規劃計畫(1/1)

計畫編號：902003FCMA004

受委託機關：核能研究所

計畫主持人：施清芳博士

報告日期：92年12月

2007/10/20  
下午 04:36

## 中文摘要

我國原子能科技已被廣泛和平應用於醫、農、工、學術研究及核能發電等領域。為妥善管理放射性廢棄物最終處置工作，以維護民眾健康與環境安全，放射性物料管理局(物管局)對於我國放射性廢棄物最終處置之安全監督與管制工作肩負重大責任。低放射性廢棄物因其放射性較低，半衰期較短，故世界各先進國家皆普遍採用淺層之陸地處置。世界各國歷經數十年的營運經驗，已運轉之低放射性廢棄物處置場已超過 100 個，且設計、發照與建造中的低放射性廢棄物處置場亦達 42 個。我國低放射性廢棄物最終處置設施場址選定條例草案目前正於立法院審議中，為因應未來場址特性調查與審查工作之需要，確保經由選址程序產生之候選場址能符合規定，依據物管局考量國內現狀之需求，本計畫完成研擬低放射性廢棄物隧道最終處置場址之處置場地質穩定度、處置場岩性與地質構造、地表水及地下水與氣象、地球化學、岩石力學、人口密度等考量因素與評估方法，提供審查機關或申請機構未來進行場址調查之技術依循。

關鍵字：放射性廢棄物、低放射性廢棄物、最終處置、隧道、場址調查、物管局

## Abstract

Nuclear technology has widely used in the fields of medical, agriculture, industries, scientific research and power supply in Taiwan. In order to adequately manage the final disposal of the radioactive waste produced, the Fuel Cycle and Materials Administration (FCMA), AEC, is officially operated to assure a safe and controllable fulfillment for the nuclear waste management. Due to that only shorter half-life radionuclide are contained in the low-level radioactive waste (LLRW), shallow land bury is widely used for the final disposal of LLRW. After dealing with the shallow land disposal of LLRW for several tens of years, more than 100 disposal sites have been operated and 42 proposed sites are in the phase of design and application, technologies for constructing and managing LLRW final disposal site has been well developed in the world. In Taiwan, the draft version of the selection of the final disposal site for LLRW has been currently under examining in Legislative Yuan. The present project is conducted to provide key terms and methodology of the site characterizations for tunnel disposal of LLRW. Experts in the related fields of technology will be invited to join the project to evaluate the key term evaluation from the viewpoint of scientific basis. Geological stability, lithology and structure, surface water and groundwater, meteorology, geochemistry, rock mechanics, and population are categorized to demonstrate the technical issues in the study. It is expected that the result of the present study would produce a technical guidance for the characterization of a tunnel disposal site for the FCMA and the site applicants.

Keyword: radioactive waste, low-level radioactive waste, final disposal, site characterization, Fuel Cycle and Materials Administration (FCMA)

# 目 錄

中文摘要 .....	i
英文摘要 .....	ii
目 錄 .....	iii
表目錄 .....	v
一、 計畫目的與緣起 .....	1-1
1.1 背景說明與研究目的 .....	1-1
1.2 研究之重要性 .....	1-2
1.3 國內執行概況 .....	1-2
1.4 國外執行概況 .....	1-4
1.5 低放射性廢棄物的處置.....	1-7
二、 研究方法及步驟 .....	2-1
2.1 研究方法.....	2-1
2.2 研究步驟 .....	2-1
2.3 研究項目.....	2-2
三、 研究結果 .....	3-1
3.1 綜合說明.....	3-1
3.2 地質穩定度考量因素與評估方法之擬定 .....	3-3
3.3 岩性與地質構造考量因素與評估方法之擬定 .....	3-19
3.4 地表水與地下水考量因素與評估方法之擬定 .....	3-36
3.5 地球化學考量因素與評估方法之擬定 .....	3-53
3.6 岩石力學考量因素與評估方法之擬定 .....	3-77
3.7 人口密度考量因素與評估方法之擬定 .....	3-95
四、 結論與建議 .....	4-1

參考文獻..... A-1

附錄：低放射性廢棄物隧道最終處置考量因素名稱、索引編號與頁碼對照..B-1

## 表目錄

表 3.1-1 考量因素總表 .....	3-2
表 3.2.3-1 地質穩定度因素 .....	3-8
表 3.2.3-2 地質穩定度考量因素評估指引 .....	3-19
表 3.3.3-1 岩性與地質構造因素 .....	3-25
表 3.3.3-2 岩性與地質構造考量因素評估指引 .....	3-35
表 3.4.3-1 氣象、地表水與地下水之考量因素 .....	3-38
表 3.4.3-2 氣象、地表水與地下水考量因素評估指引 .....	3-52
表 3.5.3-1 地球化學考量因素 .....	3-57
表 3.5.3-2 地球化學考量因素評估指引 .....	3-76
表 3.6.3-1 岩石力學考量因素 .....	3-79
表 3.6.3-2 岩石力學考量因素評估指引 .....	3-94
表 3.7.3-1 人口密度考量因素分類說明 .....	3-97
表 3.7.3-2 人口密度考量因素評估指引 .....	3-99





## 一、計畫目的與緣起

### 1.1 背景說明與研究目的

我國原子能科技已廣泛和平應用於醫、農、工、學術研究及核能發電等領域，與國人生活息息相關。但一如其他工業，原子能和平應用，也帶來了放射性廢棄物的問題。如何妥善管理放射性廢棄物，以維護民眾健康與環境安全，乃應用原子能科技之現代化國家之責任。低放射性廢棄物之安全管理，一向為社會大眾所關心，其中有關低放射性廢棄物之最終處置，更是民眾關注之焦點。為追求國家永續發展，達成非核害家園之目標，加速推動低放射性廢棄物之最終處置，解決低放射性廢棄物最終處置問題，為政府當前積極進行之重點工作。由國內、外處理此問題之相關經驗顯示，低放射性廢棄物最終處置之關鍵在慎選場址，舉凡場址準則、遴選程序、資訊透明、公共參與、地方回饋及政府決策等，均為推動最終處置計畫順遂與否之關鍵。低放射性廢棄物問題的解決之道，在於興建永久處置場，將廢棄物埋藏於地下，藉多重防護措施，安全地隔離放射性廢棄物於人類生活環境之外。此種處置方式已獲國際原子能總署之認可與推薦，目前國外運轉中或曾經運轉過的低放射性廢棄物處置場已超過 100 個，設計、發照與建造中的低放射性廢棄物處置場亦有 42 個。(物管局，2003a，2003b)

低放射性廢棄物主要是來自核電廠運轉期間受污染的衣物、紙張、工具、廢棄的零組件與設備，以及廢液、污泥與廢離子交換樹脂等。這些低放射性廢棄物經處理固化裝桶後，目前均貯存在核能電廠的廢棄物倉庫及蘭嶼貯存場。核能電廠以外之小產源包括來自醫院、工廠、學校、研究機構等共四百多個單位所產生的廢棄物，如廢射源、廢液、塑膠廢棄物、鉛罐、過濾器、壓克力、保麗龍及廢紙等，係由專業單位負責接收處理並貯存。低放射性廢棄物之輻射強度會隨著時間遞減，以鈷-60 核種為例，其半衰期約 5.3 年，經過 50 年後約

衰減至原來之千分之一，若再經 50 年則放射性活度將降為原來的百萬分之一，其放射性將衰變殆盡。低放射性廢棄物內所含放射性核種以鈷-60 為大宗及少量的銻-137，故經 300 年後，絕大部份的放射性將自然消失得無影無蹤。低放射性廢棄物因其放射性較低，半衰期較短，世界各先進國家都已採淺層之陸地處置，並無工程技術上的困難 (物管局，2003a，2003b)。

行政院原子能委員會物管局(簡稱物管局)負責我國放射性廢棄物最終處置之安全監督與管制工作。低放射性廢棄物最終處置設施場址選定條例草案目前正於立法院審議中。為因應未來場址特性調查與審查工作之需要，確保經由選址程序產生之候選場址能符合規定，本研究依據物管局考量國內現狀之需求，將研擬低放射性廢棄物處置場地質穩定度、岩性與地質構造、地表水與地下水、地球化學、人口密度或其它考量因素與評估方法等，提供未來審查機關或管制單位與申請機構進行場址調查之技術依循。

## 1.2 研究之重要性

- (1)蒐集彙整之文獻可以提供作為審查場址適宜性之基礎資訊；
- (2)透過委方及技術專家意見之討論，先期整合產官學研界之意見，以建立共識，奠定後續工作推動之基礎；
- (3)計畫成果報告可以提供作為處置場調查之調查技術指引與依循。

## 1.3 國內執行概況

台電公司分別自民國八十二年及八十五年展開場址評選及徵選作業，已產生一處優先調查候選場址及五處候補調查候選場址。經濟部於九十一年七月底召開會議要求台電公司對各處可能場址進一步評估，台電公司已遵照經濟部指示就各種可能場址進行評估中。行政院為解決蘭嶼貯存場的遷場問題，已於民國九十一年五月成立「行政院蘭嶼貯存場遷場推動委員會」。九十一年七月十二日委員會之重要決議：(1)在最終處置場選址過程中，應尊重當地居民意見，除非蘭嶼居民

希望被列為替代場址，否則應將其排除；(2)請行政院原子能委員會儘速訂定「放射性廢棄物最終處置條例」草案，俾利選址作業之遂行。原能會依據委員會之決議，研擬完成「低放射性廢棄物最終處置場址選定條例」草案，於九十一年九月函報行政院審議。行政院於九十一年十二月四日通過該條例草案，並於九十一年十二月十一日將該條例草案送立法院審議(物管局，2003a)，同年十二月二十五日公佈「放射性物料管理法」(物管局，2003d)，並於九十二年七月三十日公佈「放射性物料管理法施行細則」(物管局，2003e)。

物管局為嚴密管制低放射性廢棄物最終處置之安全，針對最終處置場址已訂定下列管制要求(物管局，2003a)：

- (1)處置場之設置、運轉、封閉，應考量其土地之再利用。
- (2)場址應位於低人口密度及低開發潛力之地區。
- (3)場址應避免位於地質構造作用足以影響處置設施安全之地區。
- (4)場址應避免位於地表地質作用足以影響處置設施安全之地區。
- (5)場址應避免位於地表水文條件可能危及處置設施之地區。
- (6)場址應避免位於地下水文條件可能危及處置設施之地區。
- (7)場址應避免位於已知地質或水文條件複雜，無法確實評估之地區。
- (8)場址應避免位於有已知重要天然資源及其相關之地區。
- (9)場址應避免位於已知之生態保護區。
- (10)場址應避免位於已知之史蹟保存區。

另外，「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」第七條中規定低放處置設施場址應符合下列條件(物管局，2003f)：

- (1)不得位於活動斷層及其他足以影響處置設施安全之地區。
- (2)不得位於地質化學條件不利於有效抑制放射性核種污染擴散，並可能危及處置設施之地區。
- (3)不得位於地表水文條件、地下水文條件及地質可能危及處置設施之地區。
- (4)不得位於已知或經政府公告之生態保護區。

- (5)不得位於已知重要天然資源或經政府公告為國家資源之地區。
- (6)不得位於已知或經政府公告之史蹟保護區。
- (7)不得位於高人口密度及具開發潛力之地區。

台灣全境多山，平原地區人口稠密，場址選擇於偏遠山區或地區較容易被接受，相對之地形與空間對場址的限制就較大，隧道處置不失為一種可行之方式。本計畫之執行首先須考慮國內現狀與其相關之法規，重要法規包括有「放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則草案」、「低放射性廢棄物最終處置設施場址選定條例草案」、「開發行為環境影響評估作業準則」，或其它相關法規等(中鼎工程公司，1994)。本研究之目的係依據物管局考量國內現狀之需求，進行研擬低放射性廢棄物隧道最終處置場址考量因素與評估方法，提供審查機關與申請機構未來進行場址調查之技術依循。計畫執行得參考國內有關之技術報告、指引、導則、手冊或有關文件。

#### 1.4 國外執行概況

國際上對於低放射性廢棄物最終處置的方式，一般可分為陸地掩埋與海拋兩種，1983年倫敦公約中，各國同意暫時停止海拋，目前各國已運轉或規劃中的低放射性廢棄物最終處置場均採陸地處置方式，也就是將廢棄物埋藏於地表或地下，使其與人類生活環境隔絕。陸地處置可分為淺層處置與地質處置。淺層處置是將廢棄物放置於地表上或地表下最深不超過 30 公尺處的處置方式。地質處置則是將廢棄物放置於較深的地層岩中，包括隧道處置及海床下處置。自從 1944 年美國田納西州橡樹嶺(Oak Ridge)之世界第一座陸地低放射性廢棄物處置場運轉以來，核能工業界已累積有相當的經驗，該處置場是美國與其他國家低放射性廢棄物處置場的先驅(物管局，2003c)。

由世界核能先進國家已發展出之低放射性廢棄物處置技術與處置場管理運轉經驗，可知此領域之成熟與可行性。法國為核能科技先進國家，其核能發電比

例高達 75%，居世界第一位。在最終處置技術上，法國採用多重障壁概念之淺層處置，並已先後完成兩座處置場，即 Centre de la Manche 及 Centre de L'Aube 處置場。

美國自 1962 年開始，陸續有多座最終處置場開始商業運轉，第一座為 Beatty 處置場位於內華達州、第二座 Richland 處置場位於華盛頓州、第三座為 Barnwell 處置場位於南卡羅來那州，其中 Beatty 場在運轉 31 年後，於 1992 年 12 月關閉並進行長期監管。美國國會於 1980 年及 1985 年先後制訂通過「放射性廢棄物政策法」及其增修條文，明定州政府負有處置低放射性廢棄物的責任，同時鼓勵各州成立區域聯盟共同規劃建立最終處置場。目前美國已先後成立九大區域聯盟，其中中部區域聯盟(由阿肯色、路易斯安那、內布拉斯加、堪薩斯、奧克拉荷馬五州組成)及西南部區域聯盟(由加利福尼亞、內華達及科羅拉多三州組成)已分別提出執照申請。中部區域聯盟所規劃之 Butte 處置場可望於 1997 年或 1998 年開始運轉，屆時將成為低放射性廢棄物最終處置之生力軍。至於原已運轉的華盛頓州 Richland(隸屬西北部區域聯盟)及南卡羅來那州 Barnwell(隸屬東南部區域聯盟)兩座處置場，除了無條件接收區域聯盟內的低放射性廢棄物外，對於非區域聯盟則採收取較高費用或訂定時限不再接收，以促使其他各州負起自行處置低放射性廢棄物的責任。總而言之，美國各低放射性廢棄物處置場自選址、施工到運轉各階段，訂定公眾諮詢程序，以公開的資訊及建立不同意見的溝通管道。

日本於低放射性廢棄物最終處置之規劃不遺餘力，六所村(Rokkasho-Mura)處置場位於日本本州青森縣東北方海拔 30 至 60 公尺的平原上，採處置窖方式處置，於 1992 年 12 月由日本核燃料公司(JNFL)負責開始營運，第一期已接收 6 萬桶低放射性廢棄物，接收來自核能電廠與再處理廠之固化低放射性廢棄物。

瑞典低放射性廢棄物處置場(SFR)位於斯德歌爾摩北方約 160 公里歐納馬鎮東之 Forsmark 核電廠場址內，為世界上第一座建於海水深約 6 公尺並位於海床下 50 公尺結晶岩床之岩洞式低放射性廢棄物處置場，並於 1988 年 4 月開始接收低放射性廢棄物。

自 1959 年起，英國大部分的低放射性廢棄物，被送到英國核燃料公司(BNFL)所屬 Drigg 處置場進行處置，Drigg 採用簡易近地表掩埋方式，已處置約 65 萬立方公尺的廢棄物。

西班牙於 1984 年成立放射性廢棄物營運公司(ENRESA)，負責全國放射性廢棄物之收集、運輸、處理及最終處置，該公司於 1986 年參考引進法國 L'Aube 處置場之設計，於原有放射性廢棄物貯存地點 El Cabril 建造處置設施。EL Cabril 位於馬德里西南方約 450 公里科多巴(Cordoba)省山脈中，海拔 400 公尺，屬於片麻岩及雲母片岩之地質構造，採用近地表之多重障壁設計原理。

自 1960 年代早期，德國即決定以深地層處置放射性廢棄物。於 1965 年起，在德國 Asse 附近的廢棄鹽礦坑(Morsleben)中進行廢棄物處置研究，其處置深度為 490 至 750 公尺之間，該廢鹽礦區於 1970 年代初期被選為小產源放射性廢棄物最終處置場址。1972 年取得場址開挖執照後，於 1974 年取得建場執照，處置場建造完成後於 1978 年開始試運轉。

與瑞典、德國類似情況，芬蘭之低放射性廢棄物最終處置亦採取深地層處置，芬蘭有兩座核能電廠，所產生之低放射性廢棄物先暫貯於核電廠內，再送往集中貯存設施貯存一段時間，最後再送往 VLJ 處置場。VLJ 處置場位於 Olkiluoto，於 1980 年 Olkiluoto 核電廠開始運轉以後，立即展開低放射性廢棄物處置場之場址調查，最後並選擇 VLJ 處置場現址作為低放射性廢棄物處置場。

瑞士於 2001 年根據該國之核能法，經過 Nagra 公司評估建議於 Canton Nidwalden 之 Wellenberg 建造一個容量超過 10 萬立方公尺之低放射性廢棄物處置場，其場址以隧道內之坑洞處置(cavern disposal)方式進行(物管局，2003c)。

綜觀各國處置經驗得知，低放射性廢棄物處置方式的選擇，必須配合當地自然、社會、環境與廢棄物特性等進行通盤考量。目前法國、美國、日本、瑞典、瑞士、英國、西班牙、德國與芬蘭等國家都已完成低放射性廢棄物最終處置場，且順利運轉中。各國的處置方式雖因本身條件而異，但都能做到將放射性廢棄物與人類生活環境隔離，以保障大眾安全，維護環境品質。國際原子能總署(The

International Atomic Energy Agency, IAEA)低放射性廢棄物處置場場址調查之相關規範及技術報告(IAEA, 1982a, 1982b, 1984, 1985, 1994a, 1994b, 1999a, 1999b, 1999c)與美國放射性廢棄物處置法規之場址及環境文件規範等(USDOE, 1992, 1995; USNRC, 1982a, 1982b, 1983, 1987a, 1987b)皆適合作為低放射性廢棄物處置場設置之指引。

### 1.5 低放射性廢棄物的處置

低放射性廢棄物處置為目前台灣亟待解決之問題。根據台電公司所擬定的「低放射性廢棄物最終處置全程規劃時程」，處置計畫分為以下幾個主要階段來進行，依序是場地選擇/處置方式評選、環境評估、場址精查/工程設計、施工，以及運轉封閉與監管等階段。台電公司曾委託泰興工程顧問公司於民國八十二年進行最終處置方式之全盤性研究，以評估各種處置方式及其運用於我國之可行性探討。根據其評選結果，以淺層處置之地下處置窖及地表上土堆混凝土庫為最適合台灣地區之處置方式。然而台灣全境多山，平原地區人口稠密，所以在場址選擇時以偏遠山區及離島為主要考慮對象。基於選擇場址其地形與空間的限制，洞穴或深地隧道處置仍有可能為台電公司考慮作為低放射性廢棄物之最終處置方式(泰興工程公司, 1993; 台灣電力公司, 1993, 1994)。

物管局以其監督者的立場，接受台電公司低放射性廢棄物最終處置的申請並進行審查，核可之後方能發給處置場建造及運轉執照。為進行審查工作，物管局必須對諸多處置方式建立全面的審查技術能力。其中，淺地處置方式部分，曾委託核能研究所研發並完成安全分析評估程式集(LSD-01)，針對我國處置場輻射外釋情節與影響進行分析，以作為核照審查之用。而對於其他的處置方式，尤其是隧道處置，其場址環境特性、工程設計等與淺層處置有相當大的差別，因此該評估程式目前並無法完全適用於此處置方式(陳英鑒等, 1994)。

低放射性廢棄物最終處置的目的，主要是將廢棄物與人類環境生活圈長久的隔離，以保障一般民眾的安全及維護環境品質。由於 1985 年倫敦公約曾決議無

限期暫停有害廢棄物的海洋投棄處置，因此目前世界各國都採用陸地處置方式進行低放射性廢棄物之最終處置。而我國原子能委員會物管局於民國八十一年所頒定的「低放射性廢棄物陸地最終處置管制規範」(物管局，1992)，也僅以陸地處置作為管制之依據。

陸地處置的方式可分為淺層處置及深層處置兩大類，而各類又依處置設施之位置及工程特性再細分。其中淺層處置包括地下處置窖、地表上土堆混凝土庫，而深層處置則為洞穴隧道處置與深層隧道處置。淺層處置方式係將放射性廢棄物置於地表下之混凝土工程結構體內，上方及四周則施以覆土。目前已有許多國家採用此種處置方式，如日本核燃料工業公司(JNFL)在六所村(Rokkasho Village)所興建的低放射性廢棄物處置場已於 1991 年正式運轉(日本原燃株式會社，2003)。此處置方式與淺地掩埋十分類似，但是多增加了鋼筋混凝土結構作為防護。加上良好的排水系統設計，防止地下水及雨水的滲漏，因此在工程結構體與工程覆土之雙重防護下，可有效防止放射性核種之外釋。同時整座結構體置於地表下的壕溝內，可增加對自然災害之承受力。廢料桶間之空隙可以用砂石或膨潤土/砂混合物填充，甚可以結構性物質如水泥灌漿等予以填塞。在工程特性方面，向地表下開挖適當深度的壕溝，其深度視當地的地質與水文條件而定，不過一般都在含水層之上，且深度介於 10 至 20 公尺之間。壕溝底部及四周鋪設排水管，底座並設計成傾斜狀，使滲透的雨水或地下水能藉由重力作用排入排水系統，經過偵測後，再收集於集水池中以便處理。基座上以鋼筋混凝土築成一堅固之處置窖，內部可隔間成數個處置單元。在運轉期間，廢棄物容器可利用吊車或起重機由處置窖上方之入口吊放，或利用堆高機由處置窖兩側之入口運進去。處置單元內廢棄物接收作業完後，以砂石或膨潤土/砂填充各容器間之空隙。日本經驗則是以水泥漿灌填，使處置單元形成單一體(monolith)，以增加處置之穩定性。各個處置單元填滿後，再蓋上鋼筋混凝土版。整個處置窖在防水設計上，先鋪設一層防水材料(如瀝青或防水油布)，接著覆蓋一層低透水性之黏土，最後再選用數層不同透水性之覆土。最後覆土表面再種植一些植物作為水土保持之用。在安全特性上，地



下處置窖上方有覆土及鋼筋混凝土結構雙重保護，對於颱風、地震等天然災害可發揮很大的承受力。其良好之排水系統更可避免地表水流(包括洪水)之侵害而導致放射性核種外釋。即使有意外事故發生，也可藉由完善之監測系統提早預警而能即時處理，保障一般民眾的安全。

就工程結構而言土堆混凝土庫(earth mounded concrete bunker)其基本理念乃結合淺地掩埋和混凝土庫(concrete bunker)處置方式之特點，為一種綜合地上及地下的處置方式之特點，並配合回填技術，以防止放射性物質外釋，達到多重工程障壁功能。就技術層面而言土堆混凝土庫有其下列之特點：

- (1)不同強度放射性廢棄物放置於不同之處置單元(disposal cell)；
- (2)整座混凝土庫以多層不同滲水性之土質予以覆蓋；
- (3)廢料桶之間隙可用結構性材質(structural material)如水泥漿，做為回填物質，使廢棄物與水泥漿形成單一體；
- (4)結構之穩定性不僅來自混凝土庫壁(concrete bunker wall)，更可藉由完整之單一體以提供核種拘束之能力。

法國及美國中部聯盟(Central Interstate Compact, CIC)皆採用此方式處置低放射性廢棄物。以法國為例(ANDRA, 2003)，混凝土庫建於事先已建造完成之長條形壕溝上，其大小視實際地形及預備貯存量等因素決定。在壕溝底部與四周圍邊牆鋪設鋼筋並灌混凝土形成堅固之基座。基座上及四週滿佈排水系統，以收集施工或貯存期間之雨水與滲透物，而所有排水管和排水溝皆沿著其流向之傾斜度，最後到達集水坑以便偵測，而基座上以鋼筋混凝土材料構築成許多小隔間(compartment)之處置單元。處置單元內每放滿一層廢棄物便回填礫石或混凝土(視廢棄物之放射性強度而定)，重覆此過程直到廢棄物堆放到處置單元內最頂層時，以移動式之鋼筋混凝土版為蓋頂，使整個處置單元形成單一體。單一體一個接一個產生，當最後一個處置單元裝載完成後再以混凝土為封頂，並鋪一層不透水之材質做為防漏。接著進行覆土工程。為了確保處置設施長期之穩定性、無意闖入者之安全及防止雨水之滲漏，因此須特別小心覆土材質之選定與設計。首先鋪設

一層漏水性良好之回填砂，其上為一層透水性低之黏土層，再鋪設混凝土作為屏障與防水，最後再覆蓋數層滲水性不同之土質，表面並種植一些適合當地生長的植物，以達到水土保持之目的。在運轉期間，若有完備之操作程序及遙控操作設備將可降低人員之輻射曝露劑量，同時每當混凝土庫內放滿一層廢棄物即回填混凝土於空隙內，更可降低工作人員之劑量。就長期來看，混凝土庫以土壤覆蓋其上較其曝露於大氣中更能保持其穩定性與完整性，同時減少了自然災害之破壞與無意者之闖入之不安全性。

目前在洞穴及隧道處置(cavity & tunnel disposal)方面發展的國家主要有瑞士及西德(Nagra, 2003; BFS, 2003)等。瑞士因境內有阿爾卑斯山脈，可利用特有人工山區地形開挖人工洞穴。由於該區岩質較鬆散，於建造通道及貯存洞穴時需用混凝土內襯以補強土質之結構。西德為解決廢棄物問題，除進行勘查現有廢棄礦坑外，也計畫開挖人工洞穴來處置廢棄物。這種處置方法一般而言較為隱密，不但可防止人員無意的闖入，更有厚實的地層為天然屏蔽，防止輻射外釋。使用於低放射性廢棄物處置之洞穴包括廢棄的礦坑、人工洞穴及天然洞穴。瑞士採用洞穴隧道進行處置，其運轉設施建於地表之下，而處置設施則建於洞穴內。運轉設施包括接收設施、檢驗設施及輔助設備等；處置設施主要工程內容包括入口隧道、主隧道及處置洞穴。為防止雨水流入隧道內，在入口隧道附近的地面皆為傾斜，使水不致流進入口。在入口隧道周圍及洞穴內均設有排水溝，收集各處水流，於集水坑處經偵檢確定無污染後才由泵浦抽出排放。洞穴內壁的支撐以水泥漿或樹脂、螺釘及鐵絲網將岩層穩固，防止岩石掉落。在處置區域內可開挖數個處置洞穴，並可依廢棄物之放射性強度設計不同的處置單元，每一處置單元填滿後，即以混凝土回填。當一個處置洞穴存滿後，便用混凝土予以封閉，使與主隧道隔離。當所有洞穴均填滿放射性廢棄物容器並加以封閉後，其餘的主隧道部分可以用來貯存特殊體積或散裝的廢棄物。最後以不透水材料如壓縮黏土等將主隧道及入口隧道等全部填塞。填塞之區域應作好排水系統。

洞穴及隧道處置在安全上最大的優點，在於不受天候如洪水、暴雨之影響，

且處置區也沒有地層下陷的問題，惟其開挖費用較高、廢棄物輸送路線、操作設備可能較複雜，使用期間須加強其他的安全措施如通風、防爆、預警系統及緊急疏散等。洞穴隧道處置工程雖較淺地掩埋方式複雜，若考量其作為低放射性廢棄物處置場，具有以下安全特性：

- (1)有厚實之土石層作輻射屏蔽；
- (2)通道內封閉嚴密，通道頂部灌水泥漿強化不受外界天候影響；
- (3)出入口管制容易，可防止非工作人員之誤闖，且隱密性良好，在環保意識高漲的今日，可減少許多民眾反對的阻力。

將低放射性廢棄物放置於深地隧道(deep underground tunnel)或海床下隧道中的概念目前已有芬蘭、瑞典(TVO，2003；SKB，2003)等國家進行研究或已開始運轉。其概念是在地表下或海床下適當的深度挖掘隧道來處置廢棄物。處置設施可藉由岩層之穩定特性及海水作為屏障，將放射性廢棄物與人類生活圈隔離，以保障一般民眾，減少輻射之影響。其中芬蘭是採深地隧道方式(TVO，2003)，在 Olkiluoto 及 Loviissa 二座核能電廠內之地下 60 及 120 公尺處興建圓柱貯存倉庫貯存廢棄物，目前正在興建及申請執照階段。瑞典則自 1988 年起，經過多年的規劃，選定波羅地海 Forsmark 核能電廠附近海床下 60 公尺，興建以鋼筋混凝土結構為主的海床隧道貯存場，專門貯存中、低強度廢棄物。此處置設施之第一階段與第二階段的已於公元 2000 年前完成。

芬蘭的 Olkiluoto 設施位在地表下 50 至 100 公尺之母岩中。隧道分為聯絡隧道、運輸隧道及圓柱倉庫(silo)三個部分。聯絡隧道是作為附屬設施和地面控制室聯絡之用，施工期間之設施、機具設備皆置於附屬設施中，並可作為廢棄物送進圓柱倉庫之前的暫時貯存區。圓柱倉庫直徑 22 米，高 25 米，用來作為廢棄物之處置設施。芬蘭將固化廢棄物及乾性廢棄物，如活化金屬類分開處置。固化廢棄物以瀝青為固化劑，貯放此廢棄物的倉庫，構築時多一層 50 公分混凝土壁作為內襯。估計整個設施可貯放瀝青固化廢棄物 14,000 立方公尺，活化金屬 1,000 立方公尺。倉庫外則將母岩磨碎研細後作為回填。作業完畢後，隧道上方入口必須

封閉以免人員闖入，垂直豎坑則用磨碎的母岩及混凝土加以封填。

瑞典的海床隧道工程係於 Forsmark 電廠附近海床下 60 公尺深之岩盤處 (SKB, 2003)，經過嚴格的可行性評估後，覓得中、低強度放射性貯存場，興建 4 座圓柱型倉庫及 8 條貯存洞穴(cavern)。為便利於廢棄物集中處理及施工人員機具的運作，該公司於距電廠 2 公里處，擇定一處海港，作為海運集中港及聯絡隧道入口。

隧道分為施工隧道、運轉隧道及貯存洞穴。運轉隧道長度超過 1,000 公尺，8.5 公尺寬，7.5 公尺高，內有供水管及排水管道，為運轉中地面和地下的聯絡隧道。施工隧道大致和運轉隧道平行，相隔 15 公尺，其斷面有 8.5 公尺寬，5.5 公尺高，是施工期間爆破岩石外運及拖工機具、材料的聯絡隧道，將來可移作貯存庫之用。貯存洞穴則作為瑞典中、低強度放射性廢棄物處置之用。

圓柱倉庫在施工時，先行開挖 70 公尺高，30 公尺直徑的巨大洞穴，裡面再建築一 50 公尺高，直徑 25 公尺，牆壁厚 1 公尺之鋼筋混凝土圓柱倉庫。倉庫內再細分 2.5 公尺 x 2.5 公尺的小格間，以便貯存不同種類的廢棄物。為了有效地防止洞穴壁面崩塌及地下水入侵，在混凝土牆面和洞穴壁面之間空隙處以膨潤土回填，倉庫頂端以混凝土蓋(concrete plug)加以密封，頂蓋和洞穴頂之間再予以回填。其它附屬設施，有地面人員辦公室、機具維修場、廢棄物暫存場、地下之遙控起重設備，排水、排氣及放射性監測設備等。低強度放射性廢棄物，以金屬箱封裝，中強度放射性廢水以金屬箱、桶或混凝土箱封裝，經海運或陸運，送至地面廢棄物暫存場，而後再轉送至海床下之各貯存倉庫及貯存洞穴中。貯存場總容量可達 90,000 立方公尺。工程分為二階段實施，第一階段(1980~1988 年)先興建一座圓柱型倉庫，4 座 130 公尺長的貯存洞穴，施工及運轉隧道，及地面設施。而後第二階段(1995~2000 年)則完成興建 3 座圓柱倉庫及其他貯存洞穴。

在安全特性方面，芬蘭的深地隧道及瑞典的海床隧道處置方式，除了和淺層處置方式均具備監測設備和安全措施外，尚有密封和隔絕的安全效果。由於這些隧道均位於地表下或海床下深處之岩盤，地質均勻穩定，岩體地下水滲透性低，

再加上廢棄物固化體、混凝土及緩衝材等人工障壁的保護，使得人類生活圈更不易受核種外釋而污染。

我國低放射性廢棄物目前採淺層混凝土壕溝方式貯存於蘭嶼貯存場。一般而言，低放射性廢棄物無論採用隧道或淺層處置，以多重工程障壁配合場地之自然條件，應可達到保障公眾安全，維護環境品質的目的。採用隧道地質處置之方式係為增加天然障壁之效用，提供更長期穩定的屏障作用。然而此地質處置方式，其廢棄物接收/操作、作業時程及成本等問題應詳加評估。我國低放射性廢棄物之最終處置，應認知到台灣地區多山，平原地區狹小且人口眾多，所以可能的候選場址可能在偏遠山區或是離島地區。這些場址受地形和空間的限制，採用隧道處置方式是適合的。由於深地隧道處置深度較深，工程難度提高，而海床隧道需有特殊的地理及海域環境相配合。針對洞穴隧道方式，台灣現已具有洞穴隧道鑽挖之經驗與技術，在工程施行上較無問題。所以不管是新開挖人工洞穴，或是由舊的廢棄礦坑均不失為可行的處置方式。



## 二、研究方法及步驟

### 2.1 研究方法

- (1)資料蒐集彙整：蒐集彙整國際原子能總署或先進國家相關之法規與文獻；
- (2)資料分析研判：依國內現況，研擬低放射性廢棄物處置場考量因素與評估方法；
- (3)分析方法運用：依據實際需要，由(A)會商研究討論(B)專家諮商審議或(C)現地會勘調查等選擇適合方法進行處置場考量因素與評估方法之擬定；
- (4)專家諮商審議：委請專家學者進行處置場考量因素與評估方法內容與研究報告之審議；
- (5)會商研究討論：與委託單位、專家學者或業者保持密切溝通，確保計畫成果能符合需求；
- (6)現地會勘調查：依擬定之處置場考量因素與評估方法，赴現地勘查類似之場址與設施，提供研究人員與專家研議之實質基礎；
- (7)完成研究報告：完成計畫研究報告之撰寫與結案。

### 2.2 研究步驟

- (1)文獻回顧及資料蒐集；
- (2)考量因素類別之擬定；
- (3)考量因素架構與內容之擬定；
- (4)評估方法內容之擬定；
- (5)專家討論與研議；
- (6)技術內容之研議；
- (7)報告書之撰寫。

## 2.3 研究項目

### 2.3.1 原預期完成之工作項目

- (1)低放射性廢棄物處置場地質穩定度考量因素與評估方法之擬定。
- (2)低放射性廢棄物處置場岩性與地質構造考量因素與評估方法之擬定。
- (3)低放射性廢棄物處置場地表水與地下水考量因素與評估方法之擬定。
- (4)低放射性廢棄物處置場地球化學考量因素與評估方法之擬定。
- (5)低放射性廢棄物處置場人口密度考量因素與評估方法之擬定。

### 2.3.2 實際完成之工作項目

本計畫實際完成之工作項目為：

- (1)低放射性廢棄物處置場地質穩定度考量因素與評估方法之擬定。
- (2)低放射性廢棄物處置場岩性與地質構造考量因素與評估方法之擬定。
- (3)低放射性廢棄物處置場地表水與地下水考量因素與評估方法之擬定。
- (4)低放射性廢棄物處置場地球化學考量因素與評估方法之擬定。
- (5)低放射性廢棄物處置場岩石力學考量因素與評估方法之擬定。
- (6)低放射性廢棄物處置場人口密度考量因素與評估方法之擬定。



### 三、研究結果

#### 3.1 綜合說明

本研究目的在擬定放射性廢棄物隧道處置之處置場考量因素，包括地質穩定、岩性與地質構造、氣象/地表水與地下水、地球化學、岩石力學及人口密度因素等六大分類，各分類之考量因素如表 3.1-1 所示。

放射性廢棄物隧道最終處置之地質穩定分類中，考量具有時間變動性地質作用或現象，共有 6 個項目。由於處置場需有完整的區域自然地理、地形、地層、構造與地史等資料，以利評估與場址有關的各種地質現象，岩性與地質構造則考慮 6 個項目。由於區域性的地表水及地下水的特性與行為對處置設施長期安全有密切的關聯，而地下水的流動特性，亦將影響到核種釋出的能力。整體而言，地表水體對處置設施的影響，主要在於水體入侵的危害，如暴雨所形成之洪水、潮汐的暴漲而淹沒處置隧道，及流經處置場區之水體匯流至水源區等。地下水的影響，則集中在對核種遷移的阻隔能力，及對釋出核種的稀釋程度等。因此氣象/地表水與地下水分類中則考慮 10 項考量因素。針對廢棄物體、處置容器、回填材料與處置場環境間的化學與物化作用的程度，依土壤/岩石與地表水/地下水特性，地球化學分類共考慮 14 項因素。由於處置場址所在位置之環境、民生接受度等因素考量的差異，一般可分為地表貯藏及隧道掩埋兩種方式，其中隧道處置的安全性除受到選址、地質環境、工程及結構影響外，岩石及岩體的力學性質及調查技術為處置場安全及穩定之重要考量因素，因此岩石力學考量因素則考慮 13 項因素。此外，為說明考量因素可能面對之不利條件，以作為建議性之應用指引，各考量因素將列出評估指引表以供綜覽，並提出建議參考量值及參考依據。

表 3.1-1 考量因素總表

1.地質穩定度 (geological stability)	1.01 地震活動(seismic activity)	4.地球化學 (geological chemistry)	4.03 遲滯因子(retardation factor)
	1.02 斷層活動(faulting)		4.04 離子交換(ion exchange)
	1.03 火山活動(volcanic activity)		4.05 黏土/岩石礦物學 (clay/rock mineralogy)
	1.04 地殼升降作用(crust uplift/subsidence)		4.06 有機質含量(organic materials content)
	1.05 地表地質作用(surface geologic process)		4.07 土壤化學(soil chemistry)
	1.06 邊坡穩定性(slope stability)		4.08 氧化還原電位 (oxidation-reduction potentials)
2.岩性與地質構造 (lithology geological structure)	2.01 地體構造(tectonics)		4.09 酸鹼值(pH values)
	2.02 地形(geomorphology)		4.10 有機成分(organic constituents)
	2.03 地層(stratigraphy)		4.11 無機成分(inorganic constituents)
	2.04 地質構造(structure)		4.12 水質參數(water quality parameters)
	2.05 地史(geologic history)		4.13 輻射參數(radiological parameters)
3.氣象、地表水與地下水 (meteorology , surface water and groundwater)	3.01 風(wind)		4.14 膠體、腐植質、溶解氣體等(colloids , humus , dissolving gas , ect.)
	3.02 雨量(rainfall)		5.岩石力學 (rock mechanics)
	3.03 颱風(typhoon)		
	3.04 潮汐與海嘯(tide and tsunami)		
	3.05 流域(basin)		
	3.06 逕流與洪水(runoff and flood)		
	3.07 地表水資源(surface water resource)		
	3.08 水文地質特性 (hydrogeology)		
	3.09 地下水流(groundwater flow)		
	3.10 傳輸特性(transport)		
4.地球化學 (geological chemistry)	4.01 吸附(sorption)	5.01 凝聚力與摩擦角 (cohesion and friction angle)	
	4.02 分配係數 (partition/distribution coefficient)	5.02 彈性模數(modulus of elasticity)	
		5.03 單軸抗壓強度(uniaxial compressive strength)	
		5.04 剪力強度(shear strength)	
		5.05 張力強度(tensile strength)	
		5.06 點荷重指數(point load index)	
		5.07 塑性變形(plastic deformation)	
		5.08 岩體分類(classification of rocks)	
		5.09 現地應力(in-suit stress)	
		5.10 不連續面剪力強度(shear strength of discontinuity)	
		5.11 岩爆(rock burst)	
		5.12 岩體膨脹(rock dilation)	
		5.13 岩體擠壓(squeezing of rocks)	
		6.人口密度 (population density)	
		6.01 人口密度(population density)	

## 3.2 地質穩定度考量因素與評估方法之擬定

### 3.2.1 一般說明

本節說明低放射性廢棄物處置場地質穩定度考量因素與評估方法。經彙整相關法規與技術文獻，並從地質專業角度研判，列出六項主要因素，包括地震活動(seismic activity)、斷層活動(faulting)、火山活動(volcanic activity)、地殼升降作用(crust uplift subsidence)、地表地質作用(surface geologic process)、邊坡穩定性(slope stability)等。分別定義各因素需求目的、對場址適宜性之限制條件、對隧道式處置的重要性、對處置場發展的應用性，以及說明評估該影響因素所需之資料與方法。

以處置場長期穩定性為探討重點，考慮因素主要著重於具有時間變動性因素之地質作用或現象。至於與場址靜態特徵有關之岩性與地質構造考量因素與評估方法，則請參見第 3.3 節內容。

通常對於放射性廢棄物處置場而言，所謂的場址地區(site area)附近範圍，指的是連同潛在場址位置，約十餘公里尺度內的地區(USNRC, 1983)；而區域(region)一詞則較不明確，通常是指一個就專業判斷而劃分之完整地質區或地理區，其範圍可能達百餘公里。區域性的地質特徵與作用對場址的長期穩定性有密切關聯，而穩定性又影響處置設施長期安全功能的完整。處置場運轉期間與安全有關之重要結構、系統與組件設計，均須能承受如地震、崩塌、沉陷等自然作用之影響。因此在設計時必須考慮：(1)場址及鄰近地區最大及歷史紀錄之自然現象，包括適當精度、數量及時間範圍之資料(2)自然現象之影響(3)結構、系統與組件本身對於功能安全的重要程度。

整體而言，地質環境在放射性廢棄物處置扮演之角色主要歸納如下(紀立民，1997)：

#### (1)化學環境安定性

處置母岩的地球化學環境的安定性通常會造成對處置場選定的影

響，包括地下水的氧化還原電位、酸鹼值、鹽度、有機酸、硫化物含量等。廢棄物容器設計(材質、厚度)及處置場功能評估時應審慎考慮所處之地質環境。

#### (2)力學穩定性

低地表地質災害與地震活動之穩定地層較利於長期處置。不致因覆蓋層之風化侵蝕或地層之錯裂或擠壓，造成處置系統遭到破壞。

#### (3)核種遷移阻滯性

低滲透性、低孔隙率且少裂隙之地層，有助於延緩地下水之流動。地層中之部分礦物對特定核種具有吸附效果，可阻滯核種遷移。此外，將放射性廢棄物處置於適當深度的地質環境中，能促使核種在長期的遷移過程中，逐漸衰變至無害於生物之程度。

#### (4)人類侵入防止性

場址的選擇應避免位於有豐富天然資源的地區，一方面除造成資源的浪費外，也增加未來人類因探礦活動而無意侵入處置場之可能。適當的地質環境可避免前述困擾，而其深度亦為防止人類侵入的措施之一。

#### (5)施工可行性

均質且裂隙少之地質環境有助於處置設施之規劃與布置，並促進施工安全性。大地應力作用顯著或有害氣體存在之地質環境對深地層處置場的施工易產生危害。

### 3.2.2 安全原則

放射性廢棄物隧道處置(tunnel disposal)是介於近地表處置(near surface disposal)與深層地質處置(deep geologic disposal)的一種處置方式。在處置場的設計與作業型態雖然有所差異，但對於安全的要求卻是一致的，例如：

國際原子能總署對「近地表處置設施選址」所提出與地質環境相關之安全標準條文如下(IAEA, 1999a)：

- (1)準則編號 408：場址地質環境應有助於隔離放射性廢棄物並限制放射性核種釋出至生物圈。亦應有益於處置系統的穩定並提供充裕的容量與工程性質，以利於進行處置工作。
- (2)準則編號 409：應優先考慮具有均質與可預測地質環境之場址，該場址可以容易藉由地質調查技術瞭解其特性。
- (3)準則編號 410：在區域調查(area survey)階段，地質資訊須判別可能之地質構造與地層，包括深度、厚度、側向延伸性以及週邊之地質單元。
- (4)準則編號 411：在場址特性調查(site characterization)階段，地質資訊之蒐集須包括：
  - (A)地層、岩性、礦物組成；
  - (B)地質構造特性；
  - (C)地工特性。
- (5)準則編號 412：在場址確認(site confirmation)階段，必須進行廣泛且深入的調查，以滿足詳細安全評估、模式分析以及最終設施設計所需。

美國法規並未特別針對隧道式低放射性廢棄物處置加以規範，可能可以援用的是聯邦法規 10CFR61「放射性廢棄物陸地處置執照申請要求」(USDOE，2001)。其中與場址地質穩定度有關的條文摘譯如下：

- (1)10 CFR 61.12 特定技術資訊(a)須描述場址的自然特性，包括場址及其鄰近地區之地質、大地工程、水文、氣候與生物特徵。
- (2)10 CFR 61.50 陸地處置場址適宜性的要求(a)(9)須避免地體構造作用，如斷層、褶皺、地震、火山等之可能發生且其頻率與規模可能顯著影響處置場功能目標，或者有妨礙進行模擬與長期影響預測的地區。(a)(10)須避免地表地質作用，如塊體破壞(mass wasting)、侵蝕、崩塌(slumping)、地滑(landsliding)、風化等可能發生且其頻率與規模可能顯著影響處置場功能目標，或者妨礙進行模擬與長期影響預測的地區。

(3)10 CFR 61.53 環境監測(a)申請者提出執照申請時，須執行運轉前之環境監測計畫，以說明場址基本環境資料。所需資訊包括生態、氣象、氣候、水文、地質、地球化學與地震。若資料具季節性變化，則至少須涵蓋 12 個月的調查。

我國法規與處置場地質特性相之關係文則包括：

「放射性廢料管理方針」(行政院，1997；物管局，1997)

第十條、保護自然、社會及人文資源：(二) 放射性廢棄物之貯存場或處置場之設置，以不妨礙周圍地區資源永續使用保育為準。

「低放射性廢棄物陸地最終處置管制規範」(物管局，1996a)

第六條、場址應避免位於地質構造作用足以影響處置設施安全之地區。

第七條、場址應避免位於地表地質作用足以影響處置設施安全之地區。

第十條、場址應避免位於已知地質或水文條件複雜，無法確實評估之地區。

第十一條、場址應避免位於有已知重要天然資源及其相關之地區。

「低放射性廢棄物最終處置設施場址選定條例草案」(物管局，2002a)

第四條、低放射性廢棄物最終處置設施場址，應符合地質、水文、生態、資源、文化資產保護及低人口密度等要求；其準則，由主管機關定之。

「放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則草案」(物管局，2002b)

第三章 低放處置設施場址要求

第八條、低放處置設施場址應避免位於下列之地區：

- 一、地質構造作用足以影響處置設施安全之地區。
- 二、地表地質作用足以影響處置設施安全之地區。
- 三、地表水文條件可能危及處置設施之地區。

四、地下水文條件可能危及處置設施之地區。

五、已知地質或水文條件複雜，無法確實評估之地區。

第九條、低放處置設施場址應避免位於有已知重要天然資源之地區、生態保護區及史蹟保護區。

「低放射性廢棄物陸地最終處置場安全分析報告導則」(物管局，1996b)

#### 場址特性

第一條、地形與地貌：描述場址及附近地形與地貌，包括地形分區、地勢分布、地理特徵(如道路、河川、鄉鎮、山脈、湖泊、海岸線等)，並附適當比例之地圖。

第四條、地質與地震：說明場址及附近地區之地層、地質構造、地震等資料及其調查方法，並提供有紀錄以來之最大震度。

#### 安全評估

第四條、長期穩定性：評估並分析處置場運轉期及封閉後之長期工程穩定性，包括天然災害、場區排水與沖蝕防治、邊坡穩定、沈陷與下陷。分析時應說明分析方法、輸入參數、假設狀況、適用範圍、模式分析結果及不確定性。

場址地質穩定度依據前述法規由主管機關進行安全審查，申請者所提送之區域地質資料，其審查之接受基本原則為：

- (1)各種地質現象之調查紀錄與分析整理應力求完整。
- (2)應提供完整之區域自然地理、地形、地層、構造及地史等資料，以便評估與場址安全有關的各種地質現象與影響因素。

### 3.2.3 考量因素

參考法規與相關文獻並經專業討論，研訂低放射性廢棄物處置場地質特性調查與評估所需考慮的地質穩定度主要因素共六項，列示如表 3.2.3-1。並逐項說明如後。

表 3.2.3-1 地質穩定度因素

索引編號	考量因素名稱
1.01	地震活動(seismic activity)
1.02	斷層活動(faulting)
1.03	火山活用(volcanic activity)
1.04	地殼升降作用(crust uplift/subsidence)
1.05	地表地質作用(surface geologic process)
1.06	邊坡穩定性(slope stability)

#### 3.2.3.1 地震活動

索引編號：1.01

考量因素：地震活動(seismic activity)

類別：地質穩定度

定義：地震指因斷層或火山活動而引起的地盤急劇移動或震動。低放射性廢棄物處置場之場址調查報告或安全分析報告應就區域地震活動進行資料蒐集、分析與評估。

說明：

- (1)地震活動因素的重要性在於避免處置場因災害性地震的發生導致工程障壁(engineering barriers)圍阻放射性廢棄物之功能喪失。地震的發生及震波傳遞之效應，可能導致地表土壤與岩石材料之崩移，造成地表設施之破



壤，或地下岩層或處置設施結構產生裂隙甚或錯移，成為核種遷移之通道。

- (2)場址不宜位於地震活動頻繁地區。
- (3)地震活動對於採取隧道式處置者與採淺層地表式(shallow land)處置者考慮重點稍有差異，差異點在於前者處置母岩通常為飽和含水之岩石材料，後者則為非飽和之砂土層材料。因此二者在耐震設計上有別。
- (4)地震活動分析結果主要應用於場址安全評估、處置設施結構設計等。
- (5)處置母岩應選低沉陷及液化潛能者，並應分析材料之靜態與動態性質。

評估方法：

- (1)資料蒐集與分析：蒐集分析地震紀錄、地震區、地震斷層、微震觀測等文獻資料。
- (2)歷史地震與地震災害之分析：分析場址區域內芮氏規模 3.0 以上之地震歷史紀錄，並繪製震央分布圖、震源分布圖等。分析重大地震發生的位置、與場址距離、時間、規模與震度、伴隨之地震災害等。
- (3)地震與地質構造相關性之分析：考量區域性地體構造、地質構造及地震活動情形，分析其關聯性。
- (4)最大地震評估：考慮處置場的安全期限需求，進行地震危害度分析，並說明納入處置場設計之相關參數，如最大可能地震規模、最大地表加速度、持續時間、地震回復週期等。
- (5)震波傳遞與地動特性評估：考量場址地形、基盤及淺地層對地震波傳遞特性，分析最大地震可能之影響。
- (6)地震誘發災害評估：分析地震可能導致處置坑道回填材料及處置設施基礎材料發生土壤液化之可能性。此外，對於處置隧道出口邊坡穩定性，亦應考慮地震因素之影響。場址若鄰近海岸則另須考慮地震海嘯對運轉期間地表設施之影響。

### 3.2.3.2 斷層活動

索引編號：1.02

考量因素：斷層活動(faulting)

類別：地質穩定度

定義：斷層指岩體受力作用而斷裂且產生相對位移者。低放射性廢棄物處置場之場址調查報告或安全分析報告應就區域斷層活動說明斷層分布、位態、活動性、與地震活動關聯性等。

說明：

- (1)斷層活動因素對處置設施之設計與功能/安全評估均有重大的影響。除可能因斷層作用破壞工程障壁功能外，斷層本身亦可能成爲地下水流通及核種遷移之途徑。場址審查應將本項因素列爲重點，確認斷層活動特性調查與評估結果滿足法規需求，且不致危害處置場運轉期間的安全與長期穩定之功能。
- (2)場址範圍內有活動斷層通過者，應不適用於作爲最終處置場址。低放射性廢棄物處置場地下設施配置應與可能的斷層或主要岩體破碎帶間有適當之避退距離。
- (3)斷層活動對於採取隧道式處置者尤其重要，因爲採隧道式處置者通常位於山地或丘陵區，對於調查工作有一定的困難，增加斷層調查與評估的不確定性。
- (4)斷層活動之考量主要應用於處置設施配置與安全評估。
- (5)斷層之活動性得參考我國中央地質調查所之分類法進行調查與討論。該分類以斷層活動之地質時代爲基礎，將台灣地區的活動斷層分爲三類(林啓文等，2000)：
  - (A)第一類活動斷層(全新世活動斷層)：
    - 全新世(距今 10,000 年內)以來曾經發生錯移之斷層；

- 錯移(或潛移)現代結構物之斷層；
- 與地震相伴發生之斷層(地震斷層)；
- 錯移現代沖積層之斷層；
- 地形監測證實具潛移活動性之斷層。

(B)第二類活動斷層(更新世晚期活動斷層)：

- 更新世晚期(距今約 100,000 年內)以來曾經發生錯移之斷層；
- 錯移階地堆積物或台地堆積層之斷層。

(C)存疑性活動斷層(有可能為活動斷層的斷層，包括對斷層的存在性、活動時代、及再活動性存疑者)：

- 將第四紀岩層錯移之斷層；
- 將紅土緩起伏面錯移之斷層；
- 地形呈現活動斷層特徵，但缺乏地質資料佐證者。

評估方法：

斷層活動之調查規範建議參考美國法規對核能電廠場址適宜性之規定，進行以下項目之調查工作(USDOE，1996)：

- (1)蒐集岩性、地層、水文、地質構造與地史資料。
- (2)地質構造導致斷層發生之潛能，另亦包括考慮人為因素如抽水、採礦、築壩蓄水之影響。
- (3)調查斷層錯動之證據：包括航照判識、地形特徵、地質證據、地球物理探測、鑽探、槽溝開挖與地質定年等。
- (4)五英哩(約 8 公里)內長度大於一千英呎(約 300 公尺)者應判斷是否為能動斷層(capable fault)。
- (5)列出與前述能動斷層可能相關之歷史地震，包括日期、強度或規模、震央等。
- (6)對比五英哩(約 8 公里)內能動斷層與地震之關係。
- (7)調查五英哩(約 8 公里)內能動斷層之性質，包括(a)長度(b)與地質構造之

關係(c)位置、性質、位移量、移動史與單次地震在第四紀之最大位移量  
(d)延伸性等。

### 3.2.3.3 火山活動

索引編號：1.03

考量因素：火山活用(volcanic activity)

類別：地質穩定度

定義：火山活動指地下岩漿於地表噴發之作用。低放射性廢棄物處置場之場址調查報告或安全分析報告應就區域性火山活動史加以調查說明。

說明：

- (1)火山活動因素之重要性在於火山活動地區可能伴隨發生岩漿侵入或噴發導致處置設施損毀，造成核種意外釋出。火山活動地區可能伴隨頻繁之地震或蘊藏地熱資源，此外亦可能因較高的地溫梯度促進地下水流通，或加速地化反應改變地下水水質，這些潛在影響將增加處置場長期安全評估的複雜性與不確定性。
- (2)場址不宜位於有活火山活動之地區。
- (3)活火山目前學術界仍有不同的定義方式，其準則包括(宋聖榮、楊燦堯，2001)：
  - (A)以歷史記載來定義活火山；
  - (B)以噴發時間間距來定義活火山；
  - (C)以地底下有無岩漿庫來定義活火山。
- (4)火山活動調查評估結果應納入安全評估之情節分析考量。
- (5)日本針對高放射性廢棄物處置之研究顯示(JNC，2000)，處置場至少需距離火山中心 50 公里。
- (6)場址應進行泥火山、地熱、溫泉、火山氣體等與火山活動有關現象之分布與特性分析。

評估方法：

- (1)歷史文件之紀錄蒐整：以歷史文獻紀錄進行初步之判斷。
- (2)區域地體構造環境分析：由區域地體構造演變，研判是否具備火山活動之條件，包括(宋聖榮、楊燦堯，2001)：
  - (A)適當的地體構造環境；
  - (B)地底下地函(mantle)深處有岩漿的形成；
  - (C)地底下有岩漿庫的存在；
  - (D)岩漿能上升至地表噴發。
- (3)岩性與火山地形之研究：若處置場位於或鄰近火山岩分布區，則應配合岩性、地層年代與火山地形之研究說明火山活動之潛能。台灣火山岩分布區包括(陳正宏，1990)：
  - (A)北部岩區：大屯火山群、基隆火山群、觀音山、草嶺山、彭佳嶼、棉花嶼、花瓶嶼、黃尾嶼及龜山島等；
  - (B)東部岩區：海岸山脈、綠島、蘭嶼及小蘭嶼等；
  - (C)西部岩區：澎湖群島、關西-竹東、角板山、公館等；
- (4)微震探測亦為間接研判火山活動性之佐證資料。

#### 3.2.3.4 地殼升降作用

索引編號：1.04

考量因素：地殼升降作用(crust uplift/subsidence)

類別：地質穩定度

定義：地殼升降作用是地殼本身擠壓碰撞並且相對於海水面變化的結果。

說明：

- (1)地殼升降作用與相對應的海水面變動造成處置場水文地質環境的改變，進而影響安全評估結果的可靠性。
- (2)地殼升降作用劇烈之地區不適宜作為場址。

- (3)處置場若鄰近海岸地區，則海水面變化造成之水力梯度(hydraulic gradient)與水質變化的可能情形，應加以分析說明。
- (4)地殼升降作用結果可提供安全評估中納入情節分析(scenario analysis)考量。
- (5)本項因素得以分析暨有文獻成果，作為報告內容之說明，但若文獻仍有疑義，不足以釐清對場址長期穩定性之影響時，仍應由專業研究人員依據前述評估方法進行深入之研究。

評估方法：

- (1)蒐集分析場址所在地區與地殼升降有關之文獻資料：台灣地區以往針對地殼升降研究所採用的方法包括地形變遷分析(徐鐵良，1954，1980；Hsu，1962)、河流剝蝕率(Li，1976)、海階或河階沉積物及化石之放射性元素定年(Bonilla，1977；Konishi et al.，1968；Peng et al.，1977；Taira，1975)、三角點檢測法(陳慧芬，1984)等。場址調查報告或安全分析報告應依據前人研究結果提出場址地殼升降作用之過去變遷趨勢、作用原因、影響範圍、及升降速率推估等。
- (2)蒐集分析場址所在地區與古氣候及海水面變遷有關之文獻資料。
- (3)由前述分析推估地殼升降作用導致地盤上升或沉降，及海水面變遷之趨勢與速率。

#### 3.2.3.5 地表地質作用

索引編號：1.05

考量因素：地表地質作用(surface geologic process)

類別：地質穩定度

定義：場址所在區域地表地質作用，包括風化(weathering)與侵蝕(erosion)作用等。

- (1)風化作用：指地表或近地表岩石在日照、輻射、風吹、雨淋、冰裂、地

下水溶解、生物活動等影響下，導致物理形狀與化學組成漸變為土壤的過程。包括兩大類：

(A)機械風化(mechanical weathering)：係由風、雨、霜等營力將大顆粒裂解成小顆粒；

(B)化學風化(chemical weathering)：係水或空氣中之營力，如酸或水解之作用使礦物分解成新的複合物。

(2)侵蝕作用：為風、冰與水等營力造成地表物質的搬移。侵蝕可以概分為(中鼎工程公司，1994)：

(A)水力侵蝕(hydraulic erosion)：以水力方式(如降水、溪流、瀑布等)對地表土壤或岩石之沖刷侵蝕；

(B)磨蝕作用(abrasion)：流水或冰河夾帶岩屑，或暴風夾帶砂塵粒對地表土壤或岩石之磨擦侵蝕；

(C)溶蝕(corrosion)：含碳酸或有機酸等的水與土壤或岩石起化學反應，所造成之侵蝕；

(D)吹蝕作用(deflation)：強風吹擊地表乾燥或鬆散土壤產生之作用。

說明：

(1)地表地質作用因素的重要性在於地表地質作用常造成地表岩石與土壤性質與分布位置的改變。導致場址地表環境之變異，包括(USDOE，1985)：

(A)土壤工程特性之改變，如剪力、壓縮度和密度；

(B)水文地質特性之變化，如覆蓋層厚度、滲透度、孔隙率；

(C)礦物性質變化，如陽離子交換能力；

(D)有機物質累積；

(E)化學環境之變化等。

(2)處置場不宜位於地表地質作用足以影響處置設施安全之地區。包括地表風化或侵蝕作用盛行之地區，及地下水溶蝕作用發達之喀斯特地形區等。

(3)對於淺地層處置而言，風化作用為較重要因素；對採取隧道式處置者侵

蝕作用則相對於風化作用更顯重要。地下處置設施應位適當深度的穩定岩盤中，在設計的功能期限內，不能受到風化或侵蝕作用之不利影響。

- (4)地表地質作用調查成果主要應用於風化岩層之工程處理與水文地質環境長期變遷之評估。此外，河川或溪流造成之侵蝕作用對隧道式處置場入口邊坡與處置隧道穩定性的長期影響亦為評估重點。

評估方法：

- (1)以地質、大地工程、地球化學、水文調查與試驗方法取得地表地質作用評估所需資料。
- (2)調查成果應說明風化層分布、厚度、風化程度、並取得風化岩體或土壤特性參數。
- (3)對於風化層深度的確認通常採取鑽探與試溝開挖的方式進行確認。試溝可研究從未風化基盤道上部土壤層漸變的情形，建立詳細的測繪剖面與照片，並進行採樣分析工作(中鼎工程公司，1994)。
- (4)風化層較深處則須進行鑽井探查，並獲取岩屑或岩心樣品進行分析。鑽孔內並得進行孔內試驗，如透水試驗、變形試驗等取得現地參數資料。
- (5)區域性之風化層分布，則須藉由地球物理探測方法如地電阻法、透地雷達、震測法等加以調查。
- (6)採隧道處置方式的場址，通常屬多丘陵與溪流之地形。因此應重視河川侵蝕作用的評估及影響。可能的評估方法包括進行河川地形變遷分析、水文氣象環境背景調查、區域性侵蝕速率的地理統計等。

#### 3.2.3.6 邊坡穩定性

索引編號：1.06

考量因素：邊坡穩定性(slope stability)

類別：地質穩定度



定義：斜坡上的土石受到重力作用向下坡方向移動稱之為塊體運動(mass movement)。邊坡穩定性即場址區域邊坡穩定狀態之調查與說明。影響邊坡穩定性的因素主要分為內在與外在兩種(潘國樑，1988)，內在因素存在於邊坡之土壤或岩層本身包括 (1)礦物組成的性質(2)地質構造(3)地下水的存在(4)地形(5)植生。外在因素為誘發山崩的相關機制，包括 (1)岩層的風化作用(2)孔隙水壓增加(3)斜坡上加重負載(4)移除坡趾支撐(5)下伏地層垮塌(6)地震(7)其他，如石灰岩溶穴或地下礦坑坍塌等。

塊體運動可依移動方式概分為墜落(falls)、傾翻(topples)、滑動(slides)、側滑(spreads)、流動(flows)等常見型態。另可依土石材料強度與含水分多寡，及移動速度作進一步的類別區分。

低放射性廢棄物處置場之場址調查報告或安全分析報告應就邊坡穩定性加以調查說明。

說明：

- (1)低放射性廢棄物處置場採隧道處置者，通常位於多山地或丘陵而少平地之地區，因此邊坡穩定性之考量不僅影響施工與運轉期間隧道出口與地表設施安全外，亦影響處置場地表覆蓋層厚度與水文地質性環境長期變化之評估。
- (2)處置場不宜位於潛在崩塌區或崩積層內，亦不宜位於土石流事件可能影響之沖刷範圍。
- (3)隧道處置所考慮之邊坡穩定性為廣範圍之自然邊坡，與地表處置所考慮覆蓋層之人工邊坡有別。
- (4)邊坡穩定性調查成果主要應用於設施配置規劃(例如洞口位置、隧道深度或高程等)，以及長期安全之情節分析等。

評估方法：

- (1)邊坡穩定性分析須以地質與大地工程現地調查與室內分析方法取得評估所需資料。現地調查包括野外踏勘、測繪與鑽探。室內分析方法除文獻

蒐集外，尚包括含照判釋與地理資訊系統應用等。

- (2)調查成果應說明場址區域崩場地與崩積層分布現況、山坡地坡度分級、本區可能之山崩誘發因素及山崩潛能等。
- (3)若審查內容已含括設施配置之設計，則應對鄰近設施或結構物之邊坡進行穩定性評估，包括可能之邊坡破壞型式、規模，並研提必要之防患措施。

表 3.2.3-2 列出地質穩定度考量因素之評估指引，說明考量因素可能面對之不利條件，並提出建議參考量值及參考依據，以作為建議性之應用指引。

表 3.2.3-2 地質穩定度考量因素評估指引

	不利於場址	建議參考量值	依據
地震活動 (seismic activity)	位於地震活動頻繁且可能造成危害之地區	1. 無適用標準； 2. 暫以場址 10 公里範圍內無災害性歷史地震震央記錄為參考。	10 公里為一般場址地區之觀念；災害性歷史地震震央記錄以中央氣象局資料為準。
斷層活動 (faulting)	鄰近活動斷層	1. 無適用標準； 2. 暫以 8 公里(約五英哩)內無長度大於 300 公尺(約一千英呎)之能動斷層(capable fault)為參考。	美國核能電廠場址標準
火山活用 (volcanic activity)	鄰近活山活動地區	1. 無適用標準； 2. 暫以處置場至少需距離火山中心 50 公里為參考。	日本高放射性廢棄物處置研究成果
地殼升降作用 (crust uplift/subsidence)	位於地殼升降作用劇烈之地區	1. 無建議量值； 2. 應進行調查評估，確保不影響處置場長期安全。	
地表地質作用 (surface geologic process)	位於地表地質作用劇烈之地區	1. 無建議量值； 2. 應進行調查評估，確保不影響處置場長期安全。	
邊坡穩定性 (slope stability)	位於有發生大規模邊坡塊體運動之地區	1. 無建議量值； 2. 應進行調查評估，確保隧道出入口、地表設施不宜位於大規模崩塌區或土石流淹沒區，且地表覆蓋層崩移範圍及深度，不得影響地下處置設施之長期功能與安全。	

說明：暫定之建議參考量值，現階段不宜作為法規之唯一依據。

### 3.3 岩性與地質構造考量因素與評估方法之擬定

#### 3.3.1 一般說明

低放射性廢棄物隧道最終處置類似於高放射性廢棄物深層地質處置，同樣是將放射性廢棄物放置在適當的地下岩層中，但是，因為低放射性廢棄物所含的放射性核種以鈷-60 為大宗，另外含少量的銫-137，故在經歷 300 年後，絕大部份低放射性廢棄物的放射性將自然消失。簡言之，低放射性廢棄物因其放射性較低，半衰期較短，可採淺地層掩埋，並無工程技術上的困難(物管局，2003c)。經

驗顯示，近地表處置在適當法規管制下，能夠安全地隔絕低放射性廢棄物及保護人類健康與環境，為一種實際而且可行的方法(IAEA，1999a)。本計畫強調之低放射性廢棄物隧道最終處置(tunnel disposal)是一種介於近地表處置(near surface disposal)與深層地質處置(deep geologic disposal)的處置方式，本節將說明低放射性廢棄物隧道最終處置場，場址岩性與地質構造考量因素與評估方法。

場址的地形、岩性與地質構造的良弊通常是場址選定的最後關鍵，優良的低放射性廢棄物最終處置場址的條件包括(IAEA，1999a)：

- (1)地質：場址選擇的有利因素包括能夠限制放射性核種從處置場遷移至可接近環境(accessible environment)；場址在考量處置場設計可能使用之資源後，應能避免地下水資源遭受放射性污染。
- (2)地球化學：處置場地下水與地質之地球化學特性，應考量限制放射性核種自處置場遷移之潛在貢獻，同時不應危害到工程障壁之壽命。
- (3)地質構造與地震：適當之場址與區域之地質構造與地震特性，重要之地質構造、過程與事件(例如斷層、地震活動及火山活動)，不得預期會發生超過危害處置場之必要隔絕能力的強度。
- (4)地表作用：影響場址地表穩定性之地質作用，如洪水、侵蝕(erosion)、地滑(landsliding)或風化(weathering)等，其頻率與強度不能明顯地影響處置場隔絕廢棄物的穩定性；位於地表面上的處置設施，必須有利於排水的地形與水文特性，使得淹水發生的可能性減小。對於可能影響場址周圍地下水水流狀況的水庫及地表水流，其排水之任何預期改變，在管制機關核准或指定所要求的時間進行評估。
- (5)大氣與氣候：場址的氣候特性(尤其是降雨與蒸發)，及預估最惡劣氣候狀況下的潛在影響，並且評估對處置場設計與場址周圍水文環境的影響。封閉後階段，也應該考量可能因氣候變遷所造成之任何效應。
- (6)人類活動之影響：處置場及其鄰近地區，合理預期會發生之活動應不可危害處置場之隔離能力。尤其應考量場址及其附近之可能資源與發展

性；場址的聯外道路應妥善地建造與保養，以確保低放射性廢棄物能夠安全地運達處置場。在處置場所在地之可預見未來之開發及區域計畫，應考量處置場之土地使用及所有權。

### 3.3.2 安全原則

目前世界上營運中的處置場計有 76 處，分屬 34 個國家(物管局，2003c)，這些營運中的處置場絕大多數是採用近地表處置，這種處置方式也因此而獲得國際原子能總署的認可與推薦，我國限於地狹人稠，加上住民的反對，近地表處置方式的場址較難覓得，選擇放射性廢棄物隧道最終處置方式不失為一好的選擇，雖然放射性廢棄物隧道最終處置設計、安全需求等相關的文獻比較少，即便如此，低放射性廢棄物近地表處置的安全標準卻仍可以被建議適用於低放射性廢棄物隧道最終處置。以下分別介紹國際原子能總署與我國低放射性廢棄物最終處置的相關條文，並簡短說明之。

國際原子能總署在「近地表處置設施選址」提出與場址地質有關的安全標準條文(IAEA，1994a)如下：

(1)準則編號 408：場址地質環境應有助於隔離放射性廢棄物並限制放射性核種釋出至生物圈。應有益於處置系統的穩定並提供充裕的容量與工程性質，以利於進行處置工作。

(2)準則編號 409：應優先考慮具有均質與可預測地質環境之場址，該場址可以藉由地質調查技術瞭解其特性。

說明：對於低放射性廢棄物最終處置場的安全評估而言，具有均質與可預測地質環境之場址可以降低場址地質的不確定性與安全評估的複雜性。

(3)準則編號 410：在區域調查(area survey)階段，地質資訊須判別可能之地質構造與地層，大致包括深度、厚度、側向延伸性以及週邊之地質單元。

(4)準則編號 411：在場址特性調查(site characterization)階段，需要蒐集的地

質資訊包括：

- 地層、岩性、礦物組成；
- 地質構造特性；
- 地工特性。

說明：此項準則為本節主要探討的內容。

(5)準則編號 412：在場址確認(site confirmation)階段，必須進行廣泛且深入的調查，以滿足詳細安全評估、模式分析以及最終設施設計所需。

美國聯邦法規並未特別針對隧道式低放射性廢棄物處置加以規範，可能可以援用的是聯邦法規 10CFR61「放射性廢棄物陸地處置執照申請要求」(USDOE，2001)。其中與場址地質穩定度有關的條文摘譯如下：

(1)10 CFR 61.12 特定技術資訊(a)...須描述場址的自然特性...包括場址及其鄰近地區之地質、大地工程、水文、氣候與生物特徵。

(2)10 CFR 61.50 陸地處置場址適宜性的要求(a)(9)須避免地體構造作用，如斷層、褶皺、地震、火山可能發生且其頻率與規模可能顯著影響處置場功能目標，或者妨礙進行模擬與長期影響預測的地區。(a)(10)須避免地表地質作用，如塊體破壞(mass wasting)、侵蝕、崩塌(slumping)、地滑(landsliding)、風化可能發生且其頻率與規模可能顯著影響處置場功能目標，或者妨礙進行模擬與長期影響預測的地區。

(3)10 CFR 61.53 環境監測(a)申請者提出執照申請時，須執行轉前之環境監測計畫，以說明場址基本環境資料。所需資訊包括生態、氣象、氣候、水文、地質、地球化學、與地震。若資料具季節性變化，則至少須涵蓋 12 個月的調查。

我國低放射性廢棄物管理法規與場址有關之條文包括：

低放射性廢棄物陸地最終處置管制規範(物管局，1996a)：

六、場址應避免位於地質構造作用足以影響處置設施安全之地區。

說明：低放射性廢棄物最終處置場應該要避開斷層帶，特別是要注意活

動斷層，同時對於地震發生對場址地質穩定性的潛在影響也必須要評估。

七、場址應避免位於地表地質作用足以影響處置設施安全之地區。

說明：低放射性廢棄物最終處置場應該要避免遭受土石流、山崩或洪水等影響。

十、場址應避免位於已知地質或水文條件複雜，無法確實評估之地區。

說明：低放射性廢棄物最終處置場的地質或水文條件若過於複雜，在進行安全評估時，因為場址地質不確定性的提高而增加安全評估的複雜性。

十一、場址應避免位於有已知重要天然資源及其相關之地區。

說明：重要的天然資源包括礦產、水資源、森林等。

低放射性廢棄物最終處置設施場址選定條例草案(物管局，2003b)：

四、低放射性廢棄物最終處置設施場址，應符合地質、水文、生態、資源、文化資產保護及低人口密度等要求；其準則，由主管機關定之。

低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則(物管局，2003f)：

第三章 低放處置設施之場址及設計要求

第七條 低放處置設施場址，應符合下列規定：

- 一、不得位於活動斷層及其他足以影響處置設施安全之地區。
- 二、不得位於地質化學條件不利於有效抑制放射性核種污染擴散，並可能危及處置設施之地區。
- 三、不得位於地表水文條件、地下水文條件及地質可能危及處置設施之地區。
- 四、不得位於已知或經政府公告之生態保護區。

- 五、不得位於已知重要天然資源或經政府公告為國家資源之地區。
- 六、不得位於已知或經政府公告之史蹟保護區。
- 七、不得位於高人口密度及具開發潛力之地區。

說明：此條規則為低放射性廢棄物最終處置場場址選擇的排除條款，場址不得位於活動斷層暨地質條件可能危及處置設施之地區。

第九條 低放處置設施應採多重障壁之設計，並依廢棄物分類特性分區處置。

說明：場址的地質環境必須成為低放處置設施多重障壁的一環。

場址地質穩定度依據前述法規由主管機關進行安全審查，申請者所提送之區域地質資料，其審查接受基本原則為：

- (1)各種地質現象之調查紀錄與分析整理應力求完整。
- (2)應提供完整之區域自然地理、地形、地層、構造及地史等資料，以便評估與場址安全有關的各種地質現象與影響因素。

### 3.3.3 考量因素

綜合上述的說明，低放射性廢棄物隧道最終處置需有完整的區域自然地理、地形、地層、構造及地史等資料，以利評估與場址安全有關的各種地質現象與影響因素。參考法規與相關文獻並經專業討論，研訂低放射性廢棄物處置場地質特性調查與評估所需考慮的岩性與地質構造因素共 6 項，列示如表 3.3.3-1。並逐項說明如後。



表 3.3.3-1 岩性與地質構造因素

索引編號	考量因素名稱
2.01	地體構造(geotectonics)
2.02	地形(geomorphology)
2.03	地層(stratigraphy)
2.04	地質構造(structure)
2.05	地史(geologic history)

### 3.3.3.1 地體構造

索引編號：2.01

考量因素：地體構造(geotectonics)

類別：岩性與地質構造

定義：場址所在區域之地體構造特性，包括地體構造的型態、成因、規模、構造史及活動情形等，地體構造通常也是地質構造與地質作用的主要控制因子。

說明：

- (1)此因素的重要性在於說明場址是否位於長期穩定之地質環境中。
- (2)相關法規建議場址不宜位於地體構造作用激烈之地區。
- (3)本項因素對於採取隧道式處置者並無特別的要求。
- (4)主要應用於場址背景地質環境的建構，與場址安全有關的地質特徵與作用均源於其地體構造特性。
- (5)地體構造的調查應著重地震地質資料，包括活動構造體系和深部地質構造、近期地殼變形觀測資料、歷史最大地震和目前地震活動特性及其構造活動特徵等。

評估方法：

- (1)應藉由文獻資料蒐整，說明場址所處的地體構造區及其相關特性。

- (2)說明地體構造活動對場址穩定性的可能影響。
- (3)地震資料的蒐集與分析，包括地震危害度分析，活斷層的調查，地震地變的防災規劃及設計。

### 3.3.3.2 地形

索引編號：2.02

考量因素：地形(geomorphology)

類別：岩性與地質構造

定義：場址所在區域的地貌特徵，包括地形分區、地理特徵、坡度、水系等。

說明：

- (1)地貌發育的過程中，地質構造是一個主要的控制因子(王鑫，1991，第 15 頁)；場址的地貌特徵可以反映地質構造的特性，場址地表的高低起伏可以說明地形作用進行的速率，「地形」因素的重要性在於利用場址的地形反映出場址地表地質作用情形與地質構造的特性。
- (2)相關法規無特殊規定。
- (3)地形大致上已經限制工程種類、規模與型式等相關作業內容，何種地形會有何種工程問題，需要採取的工程技術以及地質調查的重點等，都有一定準則可供參考。
- (4)本項因素對於採取隧道處置者極為重要，因為對低放射性廢棄物處置而言，各國通常採取位於非飽和含水層的淺地層處置方式。場址位於缺少平坦地形的丘陵區或山區，則採取隧道處置方式為較佳之方案，對於採取隧道式處置者特別注重洞口的穩定性、地表水入滲路徑、排水等。
- (5)對於低放射性廢棄物最終處置場而言，分析流域盆地、河道形式、水系、地貌與坡度等地形資料是相當重要的工作，主要藉由區域地形分析，可以提供處置方式、場址位置、土地利用、設施配置、運輸路線規劃等之決策參考。

(6)有助於瞭解地表水的流動形式、邊坡穩定分析、潛在的地質災害等足以影響處置場安全營運的因素。

評估方法：

(1)利用應用地形學的研究範疇進行場址的地形分析，包括地形調查與各種主題製圖(thematic mapping)分析。

(2)地形調查需完成適當精度之地形圖幅，包括地形圖、近期航照圖、航空照相基本圖、衛星影像圖等。

(3)針對各種可能影響場址安全性的主題完成專門地圖，包括崩塌地分布圖、坡度分布圖、水系分布圖等

(4)進行地理影像判識，地理資訊系統數值分析等。分析項目包括水系、坡度、洪水平原、河階、流域盆地等。

(5)分析數據列表與平面及剖面圖件展示。

(6)數值地形分析，包括流域盆地分析、水系分析、坡度分析。

(7)現地量測，如隧道洞口段的地形測量。

(8)研究地形、地貌特徵，劃分地貌單元，分析地貌單元的形成過程及其與地層、地質構造及不良地質現象的關係。

(9)蒐集完整之地形資料包括：

(A)處置場場址及其鄰近地區的遙測影像及其判釋資料。

(B)處置場場址及其鄰近地區的地形、河流、湖泊、海岸線變遷、鄰近城市變遷，河流、湖泊的分布及其演變等資料。

(C)處置場場址氣候的基本資料，如氣溫(平均氣溫、最高氣溫、最低氣溫)、降雨(降雨量、降雨強度)、風(風向、風速)、氣壓、濕度、災害性天氣(颱風、暴雨)等氣象要素資料。

(D)處置場場址鄰近地區的水系分佈、流域範圍、地表水體水位、流量、流速、水量和洪水淹沒界線、洪澇災害等水文資料，及現有水利、防洪設施的資料。

(E)處置場場址及其鄰近地區的天然資源(水資源、礦產資源、天然建築材料資源以及旅遊景觀資源等)的分布、數量、開發利用價值等資料。

(F)處置場場址及其鄰近地區的土地利用現況資料。

其它：

(1)工程可行性評估及初步規劃階段，建議場址資料應標示於比例尺至少 1/5000 之地圖上，區域性資料應附比例尺至少 1/25000 之地圖。而細部規劃設計階段其比例尺則分別為 1/1000、1/500 以上。

(2)本項因素與地質穩定度、地表水與地下水、工程與結構技術等考量因素有密切關係。

### 3.3.3.3 地層

索引編號：2.03

考量因素：地層(stratigraphy)

類別：岩性與地質構造

定義：地層係指岩石的特性與分布，包括岩石的發生順序(original succession)、年代關係(age relation)以及岩石的形態(form)、分布(distribution)、岩性組成(lithology composition)、化石種類(fossil content)、地球物理性質、地球化學性質等。本項考量因素主要欲瞭解(1)地層的層系及其發生的順序、性質、分布、對比及其與時間、空間上的關係(2)場址所在區域之岩層組成、岩層種類、岩層分布、岩體範圍以及地表覆土的特性等。

說明：

(1)此因素的重要性在於瞭解區域地層，以評估場址地區之地質歷史，並以地層剖面顯示不同的沉積與侵蝕事件，及伴隨發生的火山活動等。由地層的連續性與分布說明場址地區地質材料的變異程度。

(2)相關法規建議場址地層應單純而易於評估。

(3)本項因素對於採取隧道式處置者尤其重要，因為處置設施可能位於飽和

含水的地層中，地層的層序、位態、厚度、完整性、延伸性，對處置場的穩定性有密切之影響。

(4)主要應用於場址之選定、設施配置之規劃、安全評估地質模型之建構等。

評估方法：

(1)蒐集整理相關地質資料，包括文獻、地質圖、遙測照片、檔案等，並註明資料來源。

(2)進行地質與地球物理調查與試驗，過程須遵照品保/品管程序，並提出書面報告。

(3)編繪提供適當比例尺之地質圖、地質剖面圖與地層柱狀圖，詳實註記地層單位分布、主要岩性、地層年代、地質構造等特徵。

(4)調查重點包括：岩層與表土的性質、岩層的時代與厚度及分佈範圍、風化程度及不同地層的接觸關係。

(5)表土應詳細調查是否為新近的堆積土、特殊性表土的類別、分布範圍及其工程地質特徵等。

其它：必要時提供地質調查路線、地球物理探查測線、取樣點、鑽探井位等現場調查工作地點之標示圖。

#### 3.3.3.4 構造

索引編號：2.04

考量因素：構造(structure)

類別：岩性與地質構造

定義：

(1)場址所在區域之地質構造，包括斷層與褶皺等主要構造，及剪裂帶、層面、節理或變質構造等小尺度構造之空間分布特性。

(2)不連續面因其形成之原因不同，有的在沉積過程中產生，有的則是經大地應力作用或變質作用產生。岩層中的不連續面依成因可區分為：

(A)原生不連續面：岩石在形成時伴隨而生的界面，包括：

-層面(bedding)：為沉積岩的特有構造。由於岩性、顆粒大小或組成物質的不同使岩層出現層狀的構造。

-不整合面(surface of unconformity)：連續地層與下接地層在地質時間上的不連續稱之不整合(unconformity)，其界面稱為不整合面。不整合面通常是由於風化、侵蝕等地質營力所造成，在工程上多屬於弱面。

(B)次生不連續面：岩層形成後因為各種不同的地質營力作用而形成的弱面，包括：

-節理(joint)：岩層受到大地應力或其他地質作用的影響而破裂，但沿著破裂面沒有相對位移者稱之，一般也可稱之為裂理(fracture)(楊昭男，1995)。

-葉理(foliation)：岩層受到高溫高壓的變質作用的影響，岩石材料中的粗顆粒礦物變形拉長，片狀礦物如雲母等則轉趨於平行排列所造成的平面構造，在工程上而言，也是一種潛在的弱面，容易受到地質營力的作用而分離。

-劈理(cleavage)：岩層中容易沿著次生構造面或裂理裂開成平行狀構造的破裂面稱之，通常是因為變質作用所造成(Bates and Jackson, 1987)。

-裂隙(fissure)：岩層內部規模甚小的裂面，其延伸通常很短，通常為岩石材料破壞的起點。

-破碎帶(fracture zone)：當岩層中的裂隙、裂理或節理等密集出現且呈帶狀分布時稱之，厚度可從數公分到數十公尺。

(3)褶皺：係指地層呈波浪狀彎曲的地質構造變動。褶皺兩翼的角平面分面稱為軸面(axial plane)。軸面與層面的交線稱為褶皺軸(fold axis)。褶皺軸位態的二要素，一為傾沒角(plunging angle)，就是軸線和其水平面投影線間所成的傾角；另一是軸線的傾斜方向。描述的項目除上述褶皺軸位態外，尚有褶皺型態、褶皺寬度、兩翼岩層位態、兩翼岩層厚度變化及附

屬構造描述等。

- (4)斷層：地層受力產生變形、破裂，斷面兩側的地層有相對移動發生時，該斷裂面即為斷層面。斷層的種類可分為正斷層、逆斷層或橫移斷層。斷層是一種較為特殊的不連續面，其斷面兩側的地層有相對移動發生，斷層性質、錯動量、位態及延伸長度是記錄重點。斷層可依其活動程度分為第一類活動斷層、第二類活動斷層、存疑性活動斷層、非活動斷層，調查單位可依據調查結果予以重新劃分。

說明：

- (1)構造相關的重要內容包括岩層均勻性，岩體節理分布以及不連續面狀況等。
- (2)此因素的重要性在於地質構造通常反應地質環境的變異性。構造多且複雜的地區，岩體通常亦較破碎，地層連續性差。且構造本身所構成不連續面系統，其填充物與導水性質常為核種遷移評估之重要影響因素。
- (3)相關法規建議場址不宜位於構造複雜地區，以免造成評估之不確定性增加。
- (4)本項因素對於採取隧道式處置者尤其重要。
- (5)主要應用於場址之選定、設施配置之規劃、安全評估地質模型之建構等。
- (6)對於低放射性廢棄物最終處置場而言，進行場址岩層不連續面的調查與分析相當重要。
- (7)不連續面會增加岩層的滲透性，在地表，會形成地表逕流與地下水入滲處置場的路徑；在隧道內，會形成地下水流動的路徑，是放射性核種外釋可能的途徑之一。
- (8)不連續面的密集出現會降低岩層的強度，在地表，容易造成山崩並且加速風化作用的進行；在隧道內，容易造成岩屑掉落，降低隧道的穩定性。
- (9)不連續面的調查對於採取隧道式處置者特別重要。
- (10)不連續面的調查重點包括：

- 種類(discontinuity type)：不連續面因其形成之原因不同，有的在沉積過程中產生，有的則是經應力作用或變質作用產生，而給予不同類別之區分。
- 位態(attitude)：不連續面位態之表示方法在構造地質學上常以走向與傾斜(strike and dip)加以表示。走向係指不連續面與水平面相交所成直線之方位，常以北為準。
- 間距(spacing)：係指同一組不連續面中，相鄰兩不連續面間之垂直距離。
- 持續性(persistence)：係指不連續面在平面上延續的範圍及尺寸。
- 粗糙度(roughness)：係指不連續面的起伏程度(waviness)。
- 內壁強度(wall strength)：係指鄰近不連續面岩石材料之單壓強度。
- 風化程度(weathering grade)：係指不連續面壁面岩石材料在常溫常壓下與空氣、水分或生物接觸，所發生的物理或化學性質的變化之程度。
- 內寬(aperture)：張口不連續面內壁間之垂直距離，其間充滿水與空氣。
- 充填物(filling)：係指區隔不連續面內壁之填充材料，例如方解石、綠泥石、黏土、沉泥、斷層泥、角礫石、糜嶺岩(mylonite)等。
- 滲水情形(seepage)：一般地下水多沿不連續面滲入岩體，而不連續面滲水對岩坡及隧道之安定關係重大。
- 組數(number of discontinuity sets)：岩體的外觀及力學行為受到不連續面組數所控制。主要不連續面的方位資料，可以位態向量、方塊圖(block diagram)、節理玫瑰圖(joint rosettes)與施密特極點等值圖(schmidt pole contour diagram)等方法表示。
- 一般描述(description)：對於不連續面的其他性質，如：由不連續面所切割而成的岩塊形狀，可在此描述之。

評估方法：

- (1)蒐集整理相關地質資料，包括文獻、地質圖、遙測照片、檔案等，並註



明資料來源。

- (1)蒐集整理相關地質資料，包括文獻、地質圖、遙測照片、檔案等，並註明資料來源。
- (2)進行地質與地球物理調查與試驗，過程須遵照品保/品管程序，並提出書面報告。
- (3)編繪提供適當比例尺之地質圖、地質剖面圖，詳實註記主次要構造分布、位態、延伸等特徵。
- (4)不連續面的調查方法包括：航照判釋、露頭及地上開挖面裂面調查、鑽井及地下開挖面裂面調查、水文地質調查、孔內透水試驗、文獻蒐集、現地踏勘、地球物理調查、鑽孔調查。
- (5)分析或表示地質構造時，常用的方法有：地質平面圖、地質剖面圖、柵狀圖、方塊圖及構造等高線圖等。

其它：

- (1)必要時需提供地質調查路線、地球物理探查測線、取樣點、鑽探井位等現場調查工作地點之標示圖。
- (2)本項因素與地質穩定度、地表水與地下水、工程與結構技術、岩石力學等考量因素有密切關係。

### 3.3.3.5 地史

索引編號：2.05

考量因素：地史(geologic history)

類別：岩性與地質構造

定義：

- (1)場址所在區域之地質演化歷史，包括各項地質活動事件之定年、地層與地質環境或地質構造的變動過程，及第四紀地質等。
- (2)研究處置場址及鄰近地區從遠古到現今的自然變遷，利用地層學、古生

物學及地球化學等的知識，來推論處置場址及鄰近地區各種地質變動現象及其發生年代與演變過程，進一步推論處置場設立後，未來可能經歷的自然變遷。

說明：

- (1)此因素的重要性在於整合文獻資料與各項調查工作成果，綜合說明場址區域地質環境的演變情形。藉由對過去的瞭解有助於對未來的可能演變加以推演。
- (2)相關法規對於本項因素並無特殊規定。
- (3)本項因素對於採取隧道式處置者並無特殊要求。
- (4)主要應用於安全評估之情節分析(scenario analysis)，並輔助其他因素如活動斷層與火山活動性之判斷。
- (5)地史調查應詳細說明區域地質概況，區域地層、時代、成因、產狀、岩性、接觸關係，地質構造體系或構造單元，處置場址及其鄰近區域的主要構造形態、形成次序和組合關係，新構造(neotectonic)運動的跡象與特徵等。
- (6)第四紀地質、地貌的概述：包括第四紀地層的分布、厚度、岩性特徵、地貌單元劃分及特徵等。第四紀構造活動的跡象、特點與地震活動的關係，現今地殼變形特徵、地震活動特點。

評估方法：

- (1)蒐集整理相關地質資料，包括文獻、地質圖、遙測照片、檔案等，並註明資料來源。
- (2)對主要地層、構造或地質事件年代加以取樣定年。定年方法包括野外觀察地質單元與沉積構造相關位置、古生物化石定年及同位素定年等。
- (3)由專家學者對各主要地層、構造或地質事件研判其先後關係與因果。
- (4)建立場址安全評估所需之地質環境演變情節。

表 3.3.3-2 列出岩性與地質構造考量因素之評估指引，說明考量因素可能面對之不利條件，並提出建議參考量值及參考依據，以作為建議性之應用指引。

表 3.3.3-2 岩性與地質構造考量因素評估指引

	不利於場址	建議參考量值	依據
地體構造 (geotectonics)	地體構造作用激烈之地區	1. 無建議量值； 2. 應著重活動構造體系和深部地質構造、近期地殼變形觀測資料、歷史最大地震和目前地震活動特性及其構造活動特徵等。	1. 美國聯邦法規 10 CFR 61.50； 2. 低放射性廢棄物陸地最終處置管制規範(物管局，1996)。
地形 (geomorphology)	地形作用過於劇烈的地區	1. 無建議量值； 2. 場址的地形分析，包括地形調查與各種主題製圖 (thematic mapping) 分析。	
地層(stratigraphy)	岩層種類複雜、高度不均勻之地區	1. 無建議量值； 2. 場址地層應單純而易於評估。	
地質構造 (structure)	1. 地體構造多且複雜的地區 2. 不連續面組數多且複雜之區域	1. 無建議量值； 2. 斷層與褶皺等主要構造，剪裂帶、層面、節理或變質構造等小尺度構造之空間分布特性為調查重點。	
地史 (geologic history)	區域地質環境的演變史過於複雜	1. 無建議量值； 2. 應詳述區域地質概況，區域地層、時代、成因、產狀、岩性、接觸關係，地質構造體系，處置場址及其鄰近區域的主要構造形態、新構造 (neotectonic) 運動的跡象與特徵等。	

### 3.4 地表水與地下水考量因素與評估方法之擬定

#### 3.4.1 一般說明

地表水與地下水分別是描述某一區域水文特性的二大分支。一般而言，地表水係指地面上天然與人工水體的總稱，包括溫海洋、河川、湖泊、人工渠道、水庫(蓄水池)等。地下水廣義的定義是泛指存在於地表下之水體，包含流動與不流動之地下水體；狹義的定義也是一般較常討論的地下水，則是指存在地表下之流動水體。對於放射性廢棄物處置場而言，地表水的區域性範圍，是指含蓋處置場之地形分水嶺內的所有水體；而地下水所指的區域性範圍，為流經處置場之水文地質單元體中的水體。

區域性的地表水及地下水的特性與行為對處置設施長期安全有密切的關聯，如降水分布、入滲、地表逕流、河川流量與潮汐變化等，都將影響到處置設施的設計與長期安全性，而地下水的流動特性，亦將影響到核種釋出的能力。整體而言，地表水體對處置設施的影響，主要在於水體入侵的危害，如暴雨所形成之洪水、潮汐的暴漲而淹沒處置隧道，流經處置場區之水體匯流至水源區等。而地下水的影響，則集中在對核種遷移的阻隔能力，及對釋出核種稀釋程度的影響等。

#### 3.4.2 安全原則

依據國內「放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則草案」中第八條指出：低放射性處置設施場址應避免地表水文與地下水文條件可能危及處置設施之地區、應避免已知地質或水文條件複雜，無法確實評估之地區(物管局，2002b)。審議中之「低放射性廢棄物最終處置設施場址選定條例草案」第四條亦列有：低放射性廢棄物最終處置設施場址，應符合地質、水文、生態、資源、文化、資產保護及低人口密度等要求(物管局，2003b)。

國際原子能總署(IAEA，1999a)針對放射性廢棄物最終處置依處置設施所處

之位置(近地表、淺地層、岩洞)，分別列出對場址需求的準則，其中與地表水文與地下水文有關之部分，依不同位置而有以下之準則：

(1)近地表：(A)水文地質條件較簡單(B)最高地下水位距處置單元底板應有一定的距離(C)無影響地下水長期穩定的因素(如開挖河流、建造水庫等)(D)不應對露天水源有污染影響、場址邊界與露天距離不宜少於 500 公尺(E)不會被洪水淹沒的地區。

(2)淺地層：(A)水文地質條件較簡單(B)最高地下水位距處置單元底板應有一定的距離(C)無影響地下水長期穩定的因素(如開挖河流、建造水庫等)(D)不應對露天水源有污染影響、場址邊界與露天距離不宜少於 500 公尺(E)不會被洪水淹沒的地區。

(3)岩洞：(A)必須避開水源保護區(B)必須避開地下水可能侵入的地區(C)必須避開可能受洪水危害或局部大雨造成水災的地區(D)處置場的水文地質特性徵(如孔隙度、滲透性、地下水化學組成、酸鹼度、氧化還原性、入流與排水、地下水動力學特徵等)應有利廢棄物的隔離(E)處置場的水文地質隔離性質不因處置洞穴的開挖而受到破壞。

美國核能管制局(USNRC，1982a)對低放射性廢棄物最終處置設施所訂的準則中，在地表水文與地下水文有關之部分亦有以下之規定：(A)處置場應排水良好，避免洪水與常淹水之地區及高危害海岸與濕地(B)應儘量減少匯流之區域以減少逕流量，避免侵蝕或淹沒處置場(C)處置距離地下水位應有足夠深度，以避免地下水滲入與廢棄物接觸(D)若處置場位於地下水位之下，傳輸機制應以擴散為主之緩慢地下水流區為宜(E)處置場應避免位於地下水位面變化區中。

### 3.4.3 考量因素

對最終處置場地地表水與地下水考量因素所需之資料，可如表 3.4.3-1 所示。

表 3.4.3-1 氣象、地表水與地下水之考量因素

索引編號	考量因素名稱
3.01	風(wind)
3.02	雨量(rainfall)
3.03	颱風(typhoon)
3.04	潮汐與海嘯(tide and tsunami)
3.05	流域(basin)
3.06	逕流與洪水(runoff and flood)
3.07	地表水資源(surface water resource)
3.08	水文地質(hydrogeology)
3.09	地下水流(groundwater flow)
3.10	傳輸特性(transport)

### 3.4.3.1 風

索引編號：3.01

考量因素：風(wind)

類別：氣象

定義：

(1)空氣在水平方向流動產生風 (中央氣象局網站，2003)，風向為地面風所吹來之方向，風向常以東西南北所劃分之十六方位來表示，風速為風之速度，即單位時間內，風之行程(移動的距離)。

(2)空氣流動，平行於地面者稱之為風(中國工程師手冊，1972，第 3-23 頁)。風之流動因地球表面高程之變化而產生風系，與海洋海流之風系交互作用而複雜。風有以下之特殊風：海陸風、山谷風、龍捲風、颱風、焚風等。

說明：

- (1)當放射性廢棄物釋出是放射性氣體至大氣時，將藉由大氣中風的傳輸而擴散，因此風向與風速是氣體廢棄物傳輸與擴散的重要參數之一。風係一種三維向量。氣象上觀測風僅以水平二維向量之風向及風速為考慮方向，而不考慮垂直向量。由於風速無法保持較長時間不變，因此國際氣象組織規定，風速採用 10 分鐘內之平均速度作為觀測的風速，以讓其更具有代表性(中央氣象局網站，2003)。風向與風速相同，乃採用 10 分鐘內出現頻率最高之方位為代表。
- (2)相關法規並無對風之項目有特別要求。在上述定義所述之特殊風中，台灣本島較易受到颱風影響，將另以考量因素說明；而焚風常在東部南端發生，對處置場址而言，需考量其影響。
- (3)本項因素對隧道處置比近地表處置較不明顯，由於隧道處置大都設在山區或深入地表下，直接受到風的侵襲較不明顯，與近地表處置相比，本項考量因素顯得較不直接對隧道產生破壞性的影響。
- (4)本項因素主要應用在隧道場址背景環境的建構，與場址安全有關之特性在於隧道排風口之風向，無論是山區或深地表之處置，排風口所排出之廢氣應避免朝向人口密集之群體。

評估方法：

- (1)可選擇蒐集處置場址附近氣象站之資料，或經由自設氣象觀測站之量測而獲得風速與風向之資料。
- (2)由於隧道處置場址所處之地形較為複雜，應有多年之統計資料為宜。

#### 3.4.3.2 雨量

索引編號：3.02

考量因素：雨量(rainfall)

類別：氣象

定義：

- (1)降水(precipitation)：凡降落於地面之水，無論其為液態或固態，統稱為降水，如雨、霰、雪等(易任、王如意，1983，第 59 頁)，在台灣主要的降水是以降雨為主。
- (2)暴雨(storm)：為降雨延時超過 12 小時以上，且累積降雨量超過 100 公釐(mm)以上之降雨。一般工程設計均以設計暴雨，即以設計年限為頻率水準之降雨量為工程設施主要排水之考量，其頻率水準視工程保護之水準而異。
- (3)可能最大降水(Probable Maximun Precipitation，PMP)：一區域經由一些特殊氣象條件結合後經由統計分析所得該區可能的最大降雨量(Raghunath，1985)。

說明：

- (1)降雨是處置場址水收支平衡的主要來源，為隧道處置評估的重要因素。雨水可經由入滲而滲入地表下形成地下水流流經處置場區，或形成漫地流而流入處置隧道之出入口。有效的降雨資料除可供進行暴雨分析，評估場址是否合適，且可提供作為隧道處置設施設計之依據，與規劃可行的排水措施以降低廢棄物與水之接觸。處置設施應考量超過 50 年以上，甚至 100 年以上者之可能最大降水來做為設計防範洪水之條件。
- (2)國內「低放射性廢棄物陸地最終處置場安全分析報告導則」(物管局，1996b)：第三章場址特性第三項，「提供場址附近之氣象資料，包括...降水量...」。  
國內「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則草案」(物管局，2002b)第四章第十三條中指出處置設施與安全有關之系統應具有可防範天然災害之特性。第三章第八條指出低放射性處置設施場址應避免地表水文條件可能危及處置設施之地區。
- (3)IAEA「於射性廢棄物近地表處置—規則」(IAEA，1999a)：場址之氣候



特性，特別是降水與蒸發及預估之可能極端氣象條件，對處置設施所造成的衝擊影響均須進行評估。

- (4)一般而言，隧道處置與近地表處置相比，隧道處置較不受氣象因素影響，降雨主要對隧道出入口設施之影響較大，可經由工程設計降低其影響。為最終處置之安全考量，隧道出入口設計與排風口宜以可能最大降雨做為分析與設計之安全考量因素。

評估方法：

- (1)場址附近雨量站之雨量紀錄之蒐集，或經由自設雨量計之量測而獲得資料。欲產生較佳之分析結果，紀錄之最小單位宜以”時”(hour)為佳，未能得到時雨量之紀錄時，亦得以日雨量紀錄為基本之要求。
- (2)可能最大降雨可從流域內之暴雨紀錄及地形、風、濕度等氣象因素進行頻率與統計分析而得，並據以推算流域內之可能最大洪水。

#### 3.4.3.3 颱風

索引編號：3.03

考量因素：颱風 (typhoon)

類別：氣象

定義：颱風是一種劇烈的熱帶氣旋，熱帶氣旋就是在熱帶海洋上發生的低氣壓。

在北半球的颱風，其近地面的風，以颱風中心為中心作逆時針方向轉動，在南半球作順時針方向轉動。(中央氣象局網站，2003)

說明：

- (1)台灣本島每年皆可能受到颱風的侵襲，颱風可能帶來暴風、暴雨、暴潮、洪水、山崩、土石流等，對陸地設施常形成災害。
- (2)國內「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則草案」(物管局，2002b)第四章第十三條中指出處置設施與安全有關之系統應具有可防範天然災害之特性。

- (3)本項因素對最終處置之地表設施影響甚鉅，颱風帶來之暴雨形成洪水、而造成山坡地的沖刷，導致崩塌或形成土石流，對設施均具相當的災害。隧道處置之地表設施及出入口宜對當地可能受到颱風侵襲所形成的災害加以分析，並進行工程技術的防治措施以避免災害的形成。

評估方法：分析歷年入侵颱風次數，並以水文統計分析方法對場址附近之暴雨進行分析，計算因颱風所形成之暴雨對場區的影響。

#### 3.4.3.4 潮汐與海嘯

索引編號：3.04

考量因素：潮汐與海嘯(tide and tsunami)

類別：氣象

定義：

- (1)由於月球和太陽等天體對地球各處引力不同所引起的水位、地殼和大氣的週期性升降現象，其中以海洋潮汐最為明顯（教育部高中地球科學中心網站，2003）。
- (2)海嘯為淺層地震的規模夠大時，造成海底地形變動，如海床垂直位移、海溝斜坡崩塌及火山爆發等現象，進而引起海面擾動而形成長週期的波浪，統稱為海嘯(中央氣象局網站，2003)。
- (3)當地震發生在海底，它會藉著震波，釋放出一股巨大的能量，並像漣漪一般不斷地向外擴展，這種地震波由地震的中心點，持續地向外圍擴散，使得海床發生動搖及移位，並造成一波波巨大的海浪。這些巨浪前進的速度，是根據海底的深度來決定，一般而言，它的時速大約是在六百四十公里至八百公里之間，這種巨大且快速的海浪就是所謂的海嘯(許麗雯，1995)。

說明：

- (1)海洋潮汐有週期性之升降，但若與海洋中熱帶性風暴(如颱風)結合，必然會帶來暴潮，暴潮挾帶之大量海水與巨浪湧上海岸，對岸上之設施將帶來巨大的威脅。
- (2)國內「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則草案」(物管局，2002b)第四章第十三條中指出處置設施與安全有關之系統應具有可防範天然災害之特性。
- (3)暴潮與海嘯所引起的巨浪可能造成沿海地區之侵襲，處置隧道出入口應評估暴潮危害的可能性。

評估方法：

- (1)進行潮汐資料之蒐集。
- (2)測潮桿 (tide pole)：最簡單的觀測工具，又稱為水尺，係由 2 吋厚，4 至 6 吋寬的堅實木桿做成，桿上畫有刻度，以人工目測每小時的潮位高度，觀測資料較可靠，適合短期的觀測。(教育部高中地球科學中心網站，2003)

#### 3.4.3.5 流域

索引編號：3.05

考量因素：流域(basin)

類別：地表水

定義：

- (1)地面上以分水嶺為界之區域稱為流域，為一立體之外形。流域在地形圖上所顯示之外形即由流域各種高程之輪廓投射於水平面之形狀(易任、王如意，1983)。
- (2)流域係指河川任意點之上游地域至該點間，流入河川之降水所涵蓋之區域。流域一詞在美國使用 drainage basin 或 watershed，在英國則採用 catchment(徐義人，1996)。

說明：

- (1)流域係以分水嶺為界，流域內若有降雨，除去入滲量後，則形成地表水而匯集於流域內之河川。流域在水文平衡計算時視為一個單元體，超滲降雨視為輸入，而流域最低點之流出水量視為輸出。所以在地表水體分析時，應釐清流域之界線以利有效的評估。
- (2)地表水體對隧道最終處置影響較不明顯，與地表水體有關之處置設施，以隧道之出入口最直接，出入口設施可視為控制流域內水體之控制點，為計算地表水體平衡方程式之重要參考點。而此參考點上游之水體，與下游排水之能力，均可能影響到出入口設計之考量。
- (3)由於地表水體大都經由河川為流動之通路，處置場址流域內之河川應詳細的調查。流域內河川之配置，主要由流域之地勢決定，其配置形狀為決定河川特性之一要素。流域內支流之配置形狀與降雨後流域產生之水文現象，尤其是該流域之洪水量與到達時間，均具有密切關係。影響流域特性之因素，計有流域面積、河川長度、流域形狀、地勢、地覆、地質、主/支流河川分佈狀況等(徐義人，1996)。
- (4)為隧道最終處置場出入口之安全考量，流域內之地表水體應詳細的調查與分析水體含量，以提供水文計算所需。流域內之地表水體除了河川徑流量，尚包括、水庫、湖泊、蓄水池等，這些水體可能對處置場址形成之危害應進行評估。

評估方法：

- (1) 取得場址附近區域地形航照圖，分析場址之河川、山脊與山峰區，界定分水嶺，並利用求積儀或方格法等工具推算流域面積。
- (2)現地勘查獲得地勢、地覆、地質等流域特性。

#### 3.4.3.6 逕流與洪水

索引編號：3.06

考量因素：河川逕流與洪水(runoff and flood)

類別：地表水

定義：

- (1)流域之降雨經由若干途徑流入河川後即為河川逕流(徐義人，1996)。這些路徑包括降雨後直接流入河川之地表逕流與入滲於地表下經一段時間後流入河川之地下逕流。
- (2)地表逕流：來自降水，除去降水損失(蒸發與蒸發散、窪蓄、截留、入滲)後，形成地表逕流，最後達於河川之水。
- (3)地下逕流：雨水入滲於地表下後，形成中間流及深層滲漏而形成地下水流，此二水流最後流入河川形成河川之基流。
- (4)洪水：降落於流域內之暴雨所形成之地表逕流，流入河川後，導致河川水位及流量急劇增加之現象，稱之為洪水(徐義人，1996)。
- (5)洪水平原(flood plain)：指一被河川切割，其鄰近土地在高水位時，易遭淹水之河谷平原(易任、王如意，1983)。

說明：

- (1)河川逕流量是流域內重要的水文參數，對為評估流經某一區域之水量，及可能遭受到洪水災害之程度，皆需藉由河川逕流的分析而得。
- (2)一區域因降雨而產生逕流，在水文分析與設計上，對降雨與逕流間關係之探討甚為重要。一般視一流域為一系統，並以黑盒分析來模擬此系統水量之變化，亦即視降雨為該系統之輸入，而計算或測得該區之逕流量為系統之輸出，藉由此輸入與輸出之關係，來評估該流域之水量變化情形。
- (3)位於山谷中之隧道式最終處置場，地表逕流量需藉由逕流係數來分析。逕流係數為評估一區域因降雨所形成地表水流動，及該區域地表流出能力之因數。此因素受地形、地覆、土壤飽和度有關，且不易推算，一般可由水平衡或模擬計算而得。
- (4)低放射性廢棄物隧道最終處置場應避免洪水對其地表設施之危害，亦應

避免設置於洪水平原中。

- (5)處置場場址應評估降雨對場址區域所形成之地表逕流，並蒐集附近河川之流量記錄，分析因降雨所形成的洪水，及對河谷地區的氾濫範圍，界定洪水平原的界線，分析規模應以可能最大降雨所形成之可能最大洪水(PMF)為分析要素，以確實評估處置隧道出入口的危害程度。

評估方法：

- (1)應蒐集處置場區之流域之流量觀測記錄，並估場址流域之逕流係數，配合推估之降雨記錄，利用合理化公式推算流域內之逕流量。
- (2)由所得之逕流量分析該區之單位歷線，計算暴雨所形成之洪水。
- (3)由頻率分析估算各頻率之可能洪水與可能最大洪水。
- (4)由計算所得之頻率洪水，配合地形圖計算洪水在山谷中可能達到之高程而劃定洪水平原，此高程即為出入口設計時應考慮之必要因素。
- (5)所需資料：降雨紀錄、流域內之流量紀錄或推算逕流歷線、地形圖。

#### 3.4.3.7 地表水資源

索引編號：3.07

考量因素：地表水資源(surface water resource)

類別：地表水

定義：

- (1)凡以水為對象，利用地表水體進行公共、工業、灌溉、養殖、發電、水運、遊憩等用途，稱為水資源利用(馮鍾豫，1972)。
- (2)水由水庫、湖泊或攔河堰等水利工程設施，藉助人為之努力與配合，經由灌溉水路或自來水系統等，供應各標的用途之需水，吾人生活或經濟活動，皆依賴此方式而得以持續進步與發展，稱之為水資源利用(經濟部水資會，1995)。

說明：

(1)台灣地區供應各標的用水之水源，大致可分為地面水與地下水二類，地面水包括河川、水庫、湖泊、山澗溪流、池塘、伏流水及海水淡化等水源(經濟部水資會，1995)。

(2)依據放射性廢棄物處最終處置及其設施安全管理規則草案之說明，應避免處置設施位於主要河川之行水區或水源保護區。因此放射性廢棄物處置場址區域應調查有無地表水資源之引用設施，且其排放水之路徑亦應避開水源之引水區域。

評估方法：

(1)分析與評估水資源使用及開發計畫，調查下游百姓之用水情況。

(2)所需資料包括：地面水與地下水之水權使用情形、上游有無水庫及其排放量、農業灌溉用水量、養殖水用量、水廠取水量、地下水抽取量等。

#### 3.4.3.8 水文地質

索引編號：3.08

考量因素：水文地質(hydrogeology)

類別：地下水

定義：水文地質是指地質與水相互關係之科學(Fetter，1988)。水文地質特性亦可指水在地層中之行爲特性，此特性可有水之入滲、地層中含水之能力、水在地層流動之能力、地層中持水之能力等。衡量這些特性需藉助地表水之入滲與滲漏、及地層中介質之孔隙率(或裂隙頻率)、流通係數、介質之比出水與保水量、水力傳導係數、比出水率與比貯水率等參數來顯示其特性。

說明：

(1)入滲與滲漏(infiltration and seepage)：水由地表穿越地表至地表下，稱為入滲；入滲於土壤中之水受重力作用繼續往深層滲透至地下水水位面，稱為滲透。在非受壓(自由)含水層，入滲及滲漏為地下水之主要來源，

入滲率較高之區域地下水水面變動之範圍較大(易任，王如意，1983，第208頁)。入滲在受壓含水層對水面影響相對的較不明顯。入滲與滲漏量為區域地下水流之邊界條件之一，於裂隙發達之岩體，地表之入滲與深層滲漏量大，水量可直接滲入至飽和層而匯入地下水。在孔隙(非固結)岩層中，地下水位面較高之地區，受地表入滲之作用影響較大；若地下水位面較深，則地表入深後，需靠深層滲漏始能到達飽和之地下水流中。無論地層為孔隙或裂隙介質，入滲與滲漏作用均可視為地下水主要補注的來源。

(2)孔隙率(porosity)：單位體積之土壤或岩石，其孔隙體積所佔之比率，稱之為孔隙率(USGS，1989)。孔隙率可分為初級孔隙率(primary porosity)，為土壤或岩石顆粒間之孔隙，大都發生在孔隙介質中；另一為次級孔隙率(secondary porosity)，是由大地力量(如應力)所形成之裂隙(fracture)，此一裂隙大都在緻密岩層中發生(Freeze and Cherry，1979)。孔隙率大小將影響地層中之水力傳導係數的變化。

(3)透水係數(transmissivity)與水力傳導係數(hydraulic conductivity)，皆為判釋地下水在地層中之透水能力。一般而言，孔隙介質之水力傳導係數表示水層之透水能力；裂隙介質則以流通係數表示之。對地層構造可能保存水分之能力，可藉由比出水率及比貯水率來表示。比出水率(specific yield)為在土壤或岩石於重力作用下所能排出之水量，而留存於土壤岩石表面或裂隙中之水量，稱之為比貯水率(specific retention)。

(4)水力傳導係數(hydraulic conductivity)之定義為在單位時間內，單位水力梯度，地下水流經一單位面積土壤或岩石之能力(USGS，1989)。此一參數代表在自然狀態下，地下水穿透岩層之性能。水力傳導係數為介質與流體之函數(Freeze and Cherry，1979)，在介質方面可能隨方向而變，在流體方面，不同流體在相同介質亦有不同之值。若區域性含水層之地層變化不大，可經由地質統計而得一均值，視為該區域為均質且等向性之水



層。

- (5)隧道終處置場直接接觸即為地表下之岩層，並以該岩層做為保護處置場在隧道內設施之屏壁。清楚釐清岩層中水文地質之特性，可對處置場進行合理且可靠的分析，對最終處置的安全性有很大的助益。因此，處置場區的孔隙率分佈、水力傳導係數或裂隙之傳輸係數在空間的分佈，地表入滲參數之獲得，可直接用於對評估處置場能隔阻核種傳輸的安全性。

評估方法：

- (1)進行場址之特性調查，包括地球物理探測、鑽孔、抽水試驗或封套試驗、井測等現地水文地質參數。
- (2)以地質統計方式進行水文地質模型之繪製，並由所獲得之數據配合場址岩層之岩性資料，判釋合理的數值。

#### 3.4.3.9 地下水流

索引編號：3.09

考量因素：地下水流(groundwater flow)

類別：地下水

定義：本研究所指之地下水流係指在飽和含水層中流動之水體，此飽和含水層之介質可為孔隙介質或裂隙介質。說明影響場址區域地下水流動之情形稱為地下水流特性，包括：水文地質特性、孔隙率、裂隙連通性、水力傳導係數，入滲量等，及場址區域之水力(壓力)水頭、地下水流速、方向、流量、與地形之邊界等。

說明：

- (1)核種在自然狀態下最有可能釋出之媒介，即為地下水流。地下水流流經已破損之處置設施時，極有可能溶解核種，並經由自然流動而流至下游之區域。以隧道為處置方式之最終處置場，除非該區地下水位很低且低於處置區，否則地下水流是無可避免的問題。因此，對最終處置場的區

域地下水流之釐清，是評估處置場安全與否之重要因素。

- (2)國內「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則草案」(物管局，2002b)中，第三章第八條指出低放射處置設施場址應避免地下水文條件可能危及處置設施之地區，及已知地質或水文條件複雜，無法確實評估之地區。
- (3)欲有效評估處置場之地下水流，應明確區分出處置場區域的地下水流之入流區與出流區及其可能影響之邊界情形，並估算地下水的流速與流向，以利進行安全評估之分析。因為對地下水的流速及流向估算，為任何場址進行安全評估的重要參數。
- (4)地下水常是人口稀少區域的重要水源之一，處置場之下游宜避免地下水水源引用之區域。因此，明確的地下水流特性，將可對下游引用水源做出適當的保護。

評估方法：

- (1)區域與地區性的地質單元、特性、含水層層次的界定。
- (2)地下水位觀測資料之蒐集與研判，定出可能之地下水流向。
- (3)配合水文地質特性估算地下水流速。
- (4)地下水模擬程式之計算分析。
- (5)地下水補注與排出之調查。

#### 3.4.3.10 傳輸特性

索引編號：3.10

考量因素：傳輸特性(transport)

類別：地下水

定義：傳輸特性指的是污染物在孔隙或裂隙介質中移動的性能，針對低放射性廢棄物而言，則為影響核種在孔隙或裂隙介質中遷移的能力。影響核種傳輸的因素包含上述之水文地質特性、場址地區之地下水流、地球化學

性質與介質中的傳輸參數等(如擴散係數、水力延散係數、分佈係數/遲滯因子等)。

說明：

- (1)低放射性廢棄物隧道最終處置將有大部分的處置設施置於地層中，核種一旦釋出，除了工程障壁的圍阻外，場區之地層將扮演核種遷移時遲緩作用的角色。因此地層的傳輸參數亦為處置場安全考量的重要因素。
- (2)國內「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則草案」(物管局，2002b)中，第三章第八條指出低放射處置設施場址應避免地下水文條件可能危及處置設施之地區，及已知地質或水文條件複雜，無法確實評估之地區。
- (3)考慮處置場場區之傳輸現象，地下水除與水文地質特性及地區之地下水流有關外，重要的影響因子亦包含核種在該區地下水的延散作用(含擴散與水力延散)及吸/脫附現象。延散為核種在含水層中擴展的稀釋現象，吸/脫附為核種附著/離開於水流通路之土壤或岩石表面的現象。延散度(dispersivity)評估地下水在地層之延散特性，吸/脫附現象則需藉由遲滯因子(retardation factor)來表示。因此，現地的延散度與核種的遲滯因子之獲得，可有利於對處置場安全評估工作的分析。

評估方法：

- (1)現地延散度之取得需進行現地含水層/裂隙之示蹤劑試驗，方法可利用自然水流之多井試驗，或加壓多井試驗、或鑽孔之封塞加壓試驗等。
- (2)遲滯因子之獲得需利用核種(或參考核種)配合現地之地下水水樣，進行實驗室之管柱或批次實驗而獲得。亦可經由現場之實驗而得到，唯其困難度較高。

表 3.4.3-2 列出氣象、地表水與地下水考量因素之評估指引，說明考量因素可能面對之不利條件，並提出建議參考量值及參考依據，以作為建議性之應用指

引。

表 3.4.3-2 氣象、地表水與地下水考量因素評估指引

	不利於場址	建議參考量值	依據
風(wind)	位於山谷山風之匯流區	1. 無適用標準； 2. 應進行調查評估，注意排風口所排出之廢氣應避免朝向人口密集之群體。	
雨量(rainfall)	處在區域降雨中心之地區	1. 以實際統計及頻率分析之結果不會對處置場區形成積水為主要考量； 2. 處置場區之排水能力應能及時排放以該區之可能最大降雨所形成之水量。	
颱風(typhoon)	鄰近颱風活動頻繁之地區	1. 無適用標準； 2. 應進行調查評估，確保不影響處置場附近山坡及河道之穩定性，同時亦能渲洩最大降雨之水量。	
潮汐與海嘯(tide and tsunami)	位於潮汐與海嘯升降作用劇烈之地區	1. 無建議量值； 2. 應進行調查評估，確保潮汐與海嘯不影響處置場附近之災害。	
流域(basin)	流域為重要地表水資源之引水區	1. 無建議量值； 2. 應實際調查界定處置場所屬之流域，以確實評估所屬流域之水文特性。	
逕流與洪水(runoff and flood)	位於逕流與洪水不易評估之地區	1. 無建議量值； 2. 應進行調查及統計與頻率分析，確保隧道出入口、地表設施不會遭受到可能最大洪水之淹沒，附平地亦會形成洪水平原之慮。	
地表水資源(surface water resource)	處置場區位於重要水資源保護區	1. 無建議量值； 2. 應實際調查處置場流域下方之引用水之來源，避免取用至處置場所排放廢田水	
水文地質特性(character of hydrogeology)	位於水文地質構造複雜不易評估之區域	1. 無建議量值； 2. 應實際針對水文地質參數進行調查與量測，評估處置場所處區域之建場合適性與否。一般而言，所處區域裂隙發達，地下水流快速，並流向主要人口聚落之地區，皆不適合場址之建造；相反的，地層通水性不佳，地下水流緩慢，較適合建造處置設施。	
地下水流(groundwater flow)	地下水文條件可能危及處置設施之地區，及已知地質或水文條件複雜，無法確實評估之地區	1. 無建議量值。	
傳輸特性(character of transport)	同上方地下水流之說明	1. 無建議量值； 2. 應實際針對水文地質參數及傳輸參數進行調查與量測，評估處置場所處區域之建場合適性與否。該區對傳輸愈不利之特性，較適合建造處置場。	

### 3.5 地球化學考量因素與評估方法之擬定

#### 3.5.1 一般說明

地球化學是研究化學元素在礦物、岩石、土壤、水及大氣中之分布及依據化學特性研究元素在自然界循環之科學，應用在放射性廢棄最終處置場之研究時，化學是指場址的水文地質的化學成份(hydrogeochemical composition)。

##### (1)場址的地球化學特性：

是指「說明可能影響場址安全及核種遷移之水化學，土壤與岩石之地球化學特性，以及相關之地化模擬資料」(物管局，1996c)。

##### (2)水化學：

提供可能受到場址建造、廢棄物處置及地區降雨影響地下水與地表水系統的水化學背景及預期變化。調查及分析可能影響場址安全之地表水與地下水之化學組成，包含無機與有機成分、溶解氣體、總溶解固體、膠體物質、溫度、比重、酸鹼值、鹼度及氧化還原電位等，資料蒐集應考慮季節性變化。水化學對場址的重要性來自於其直接影響污染物之傳輸，大部分的核種在水溶液中移動比較快。

##### (3)土壤與岩石地球化學：

提供礦物分類、鑑定岩石及土壤化學特性資料，說明場址土壤與岩石之地球化學特性對污染物遷移與長期穩定性的影響因素，包含土壤與岩石分類、礦物鑑定、非晶質固體及有機化合物組成、溶解度、離子交換與吸附能力、土壤酸鹼值、重金屬含量等。

##### (4)可接受的場址的地球化學特性：

處置場的地下水與地質之地球化學特性，應考量限制放射性核種從處置場遷移的潛在貢獻，同時不能危害到工程障壁的壽命(IAEA，1983，1994a，1994b，1994c)。

場址地化資訊的重要性有兩項基本理由(李境和，1999，2000)：

(A)地下水化學組成資料可用於建立地下水的滯留時間(residence time)、方向與速率，與驗證水文地質概念。

(B)建立核種傳輸行為有關的特性，如核種的溶解度與吸附性能等。

理想的場址的地化條件是可以提高從處置系統釋放出來之放射性核種的吸附與沉澱的能力，並且能避免形成容易傳送的化合物。地下水穿過裂隙與孔隙時，岩體基體與表面之礦物對放射性核種的遲滯作用是滿足處置系統長期功能的重要因素，影響核種遷移速度與數量的相關作用包含延散(dispersion)、擴散(diffusion)、沉澱(precipitation)、吸附(sorption)、離子交換(ion exchange)與化學反應(chemical interaction)；此外，地下水中膠體(colloid)與有機物質及氣體對放射性核種的傳輸也很重要，必須列入考慮。

考量處置系統內可能產生的化學反應時，下列的作用必須慎重處理：

(A)地下水對工程障壁的腐蝕性；

(B)影響放射性核種的溶解度(solubility)與型態(speciation)，及礦物與岩石對核種之吸附作用；

(C)地下水的氧化還原電位與酸鹼值(Eh & pH values)；

(D)影響天然膠體與有機物質存在的作用或條件；

(E)處置系統產生氣體的可能性。

(5)蒐集土壤、岩石及水之化學成分與化學特性的目的：(Lutton et al., 1982)

(A)瞭解可能的污染物濃度，以確保公眾之健康與安全，並符合相關法規的要求。

(B)蒐集地化基礎資料，以作為廢棄物處置行動前後之比較。

(C)確定廢棄物處置時及之後是否有廢棄物容器破壞之情況發生。

(6)需求數據

預估放射性核種遷移到生物圈之潛在力，所需資料包含場址的地球化學與水文化學條件，週遭的地質與水文地質環境，及地下水的潛在路

徑。主要資訊包含：

(A)地下水流系統的礦物學與岩石學的組成及其地化性質；

(B)地下水化學。

### 3.5.2 安全原則

廢料體、處置容器、回填材料與處置場環境間的化學與物化作用的程度必須詳細評估，需要蒐集的資料主要是(IAEA，1982b，1994b；Andersson，1998；Ström，1999；SKB，2000a，2000b，2002)：

(1)岩石的化學、放射化學與礦物學組成(包含裂隙填充物)；

(2)礦物與岩石對離子態重要放射性核種的吸附容量；

(3)地下水的放射性核種含量與化學組成；

(4)輻射與衰變熱對岩石與地下水化學之影響；

(5)有機物、膠體與微生物等物質的影響；

(6)岩石的孔隙結構與礦物表面特性(包含裂縫)；

(7)核種在岩體內的有效擴散速率；

(8)放射性核種的溶解度及化學型態。

上述考量因素之化學與物理參數可分成兩大類，一是土壤與岩石，二是地表水與地下水：(IAEA，1982b，1985，1994b，1994c)

(1)土壤與岩石(來自地表、露頭、裂隙表面、岩心材料、地表開挖、現場岩石)，主要的參數有：

(A)礦物組成；

(B)化學組成(定性與定量，包含有機物與無機物)；

(C)粒徑分布；

(D)天然放射性與定年；

(E)吸附性質：離子交換容量、分配係數( $K_d$ )、遲滯因子、相對遷移速度、

沉澱機理。

(2)地表水與地下水(來自泉水、滲水、井水、探勘鑽孔、地下開挖、岩心材料)，主要的參數有：

(A)主要化學離子；

(B)pH、Eh、電導度；

(C)天然放射性與定年；

(D)微量元素含量；

(E)氣體含量；

(F)膠體、錯合物、微生物含量(定性與定量)。

地化參數之評估目的在預測處置場內核種外釋的地化行爲，陽離子(包含大部分的放射性核種)受到黏土礦物、有機物質、氧化鐵、氧化錳等所吸附，導致之遲滯作用。分子擴散方式的傳輸作用比地下水流動的傳輸來得緩慢，因此若處置場址岩石與土壤具高陽離子交換容量(CEC)與低滲透率，則外釋的核種也不致於傳輸得太遠。

值得特別留意的是，由於地化條件和場址的週遭環境有很大關係，有些參數值會隨著量測時的狀況而變，所以說明某參數值時，必須對量測條件做適當的描述，並確認其穩定的程度。部分地化參數最好能現地直接量測，但是有些地化參數則僅能在實驗室內分析，在這種情況下，樣品的採樣、處理與量測操作必須要非常小心，務必要根據已確定過的技術步驟，從採樣開始，就要確實遵守品保與品管步驟，所有樣品的收集、標記、保藏、運送、儲存與分析都要符合主管機關核准的方法與標準。

### 3.5.3 考量因素

參考相關文獻並經專業討論，研訂低放射性廢棄物處置場地質特性調查與評估所需的地球化學考量因素列於表 3.5.3-1



表 3.5.3-1 地球化學考量因素

索引編號	考量因素名稱
4.01	吸附(sorption)
4.02	分配係數(partition/distribution coefficient)
4.03	遲滯因子(retardation factor)
4.04	離子交換(ion exchange)
4.05	黏土/岩石礦物學(clay/rock mineralogy)
4.06	有機質含量(organic materials content)
4.07	土壤化學(soil chemistry)
4.08	氧化還原電位(oxidation-reduction potentials)
4.09	酸鹼值(pH values)
4.10	有機成分(organic constituents)
4.11	無機成分(inorganic constituents)
4.12	水質參數(water quality parameters)
4.13	輻射參數(radiological parameters)
4.14	膠體、腐植質、溶解氣體 (colloids , humus , dissolving gas)

### 3.5.3.1 吸附

索引編號：4.01

考量因素：吸附(sorption)

類別：地球化學

定義：

為氣體或液體在固體孔隙或表面被吸附，形成固溶體或化合物之現象的泛稱，亦為吸收(absorption)與吸附(adsorption)無法嚴格區別或二者兼具時的統用語。吸收(absorption)通常是指發生在固體孔隙內的反應，因此固

體的吸收容量和孔隙體積有關；吸附(adsorption)則指發生在固體表面的反應，故其容量和固體的有效表面積成正比，離子交換(ion exchange)為 adsorption 的代表，一般是指固體從水中吸附某些離子，並釋出等量的它種離子的反應。實際應用上，吸附應包含溶質(放射性核種)在液相與固相間轉換的所有現象，如沉澱、結晶、礦化等。(IAEA，1994b；Andersson et.al.，1998；Andersson et.al.，2000)

說明：

核種被岩石或土壤吸附的狀況，通常以平衡分配係數(distribution coefficient)或遲滯因子(retardation factor)表示。

岩石與土壤對放射性核種的吸附能力是評量場址適合性之重要地化參數之一，良好的處置場址，其地化條件須有利於放射性核種的吸附與沉澱/共沉澱，且能抑制放射性核種形成易於傳輸之化合物。

評估方法：

場址岩石與土壤的吸附能力須在場址特性調查與驗證階段進行，由取樣與試驗求得。吸附容量依地下水化學與岩石/土壤的礦物學及化性而定，吸附量化的指標是分配係數或遲滯因子。

其他：

潛在不利之條件(potential adverse conditions)

潛在場址的岩石與土壤若不含黏土礦物，及地下水與地表水水質極度不良，不利於核種的吸附。岩石與土壤的地化特性會受到四周環境介質的影響，而處於不穩定狀況，例如場址的開挖後，部分地化條件會立即改變，影響量測其吸附容量的實際值。

### 3.5.3.2 分配係數

索引編號：4.02

考量因素：分配係數(partition/distribution coefficient)

類別：地球化學

定義：

- (1)在液—液萃取平衡時，萃取液相中溶質濃度和原液相中溶質濃度之比。
- (2)微量成分在平衡狀況下的固相與液相濃度之比。在放射性廢棄物處置上，分配係數是指特定核種在土壤或岩石與地下水中的分布比率，是吸附作用的粗估(gross measure of sorption)，可用下式表示：

$$K_d \equiv \frac{\text{核種吸附量} / \text{土壤重量}}{\text{核種溶解量} / \text{水的體積}}, (\text{cm}^3/\text{g}) \quad (3.5-1)$$

說明：

分配係數和 Eh、pH、吸附核種的化性與濃度、土壤的水分與組成及和溶液比率等因素有很大的關係。

量測分配係數最簡單的方法是利用批次實驗，將一定重量的土壤(或岩石)與一定體積含有已知濃度之特定核種的水溶液混合或攪拌一段時間，之後將水溶液過濾出來，分析濾液中核種的含量，計算出被土壤(岩石)吸附的核種量。

除批次法外，亦可用管柱法，將含核種的水溶液通過填滿土壤的圓柱，控制溶液通過管柱的流速，以模擬自然環境下水穿過土壤的真實情況。相較於批式法，管柱法具有尺寸上與較接近實際模擬的優點。

分配係數是場址地化特性中重要的評選參數之一，理想場址的岩石與土壤對將要處置廢棄物中關鍵性核種的分配係數越大越好，可延長核種的滯留時間。(李境和，2000；USNRC，1982a；Lutton et. al.，1982)

評估方法：

從地表、露頭、裂隙表面、岩心材料、地表開挖、現場岩石等採取樣品，在實驗室中利用批次法或管柱法，模擬處置場環境與條件，針對放射性廢棄物中的重要核種進行測試。

其他：

潛在不利條件

潛在場址的岩石與土壤若不含黏土礦物，及地下水與地表水水質極度不良，不利於核種的吸附。此外，由實驗室方法所獲得的分配係數與遲滯因子的預測值及實際值常有很大的差異，主要是因為實驗室和現場兩者之間的尺度問題，因此最好能做現場測試。

### 3.5.3.3 遲滯因子

索引編號：4.03

考量因素：遲滯因子(retardation factor)

類別：水化學

定義：

雨水及地下水在多孔性岩石與土壤中的移動過程，其所含之溶質會吸附在土壤或岩石之表面，並在孔隙中擴散，使水中溶質的遷移遲緩下來。此因素表示水流速度與溶質遷移速度的比值，隨著溶質與岩石及土壤之性質不同而改變。

在均勻的含水層中，遲滯因子可用下式表示：

$$R = 1 + \frac{(1-f)}{f} \times \rho \times K_d \quad (3.5-2)$$

其中， $f$ ：含水層的孔隙率

$\rho$ ：土壤或岩石的真密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$K_d$ ：土壤或岩石對特定核種的分配係數( $\text{cm}^3/\text{g}$ )

說明：

遲滯因子常用來說明土壤與岩石對特定核種的遷移限制能力，依岩石與土壤之性質而變，與土壤或岩石中的鹽類、分配係數、氧化還原電位、酸鹼值、水含量、及土壤的孔隙率與密度有關。

場址通常選在穩定土壤層之地點，和所選的地點有很大的關係，土壤所含黏土礦物具離子交換能力，可減緩外釋核種的遷移速度。(USDOE，1985；USNRC，1982a；Rogers et. al.，1982)

評估方法：

由前一項求得之分配係數，再量取孔隙率與土壤或岩石的真密度，利用上面公式即可算出遲滯因子。在尋求高遲滯因子的土壤時，必須特別留意該土壤是否有不利於長期場址功能，例如黏土會乾、會裂。

其他：

潛在不利條件

潛在場址的岩石與土壤不含黏土礦物，及地下水與地表水水質極度不良，不利於核種的吸附。此外，由實驗室方法所獲得的分配係數與遲滯因子的預測值及實際值常有很大的差異，主要是因為實驗室和現場兩者之間有尺度問題，因此最好能做現場測試。

#### 3.5.3.4 離子交換

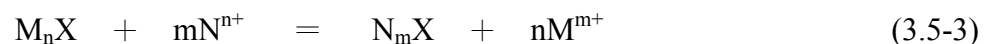
索引編號：4.04

考量因素：離子交換(ion exchange)

類別：水化學

定義：

土壤或岩石材料會從滲流水中吸附某些離子，並釋放出等量的它種離子，此稱為離子交換反應，可用下式表示：



離子交換反應有陽離子交換與陰離子交換兩類。

說明：

陽離子交換容量(Cation Exchange Capacity, CEC)為土壤或岩石從溶液中吸附陽離子之能力，和核種的遲滯能力有很大的關係，是影響核種遷移

的重要作用，在高離子交換能力環境下，主要的核種離子會交換到土壤的表面，明顯限制核種的遷移。許多過渡金屬(transition metals)以陽離子方式吸附在土壤。

離子交換容量除岩石與土壤本身的化學成分及粒徑分布有關外，和氧化還原電位與酸鹼值的關係最密切。

場址環境下的岩石與土壤具有高的離子交換能力時，主要的放射性核種將會被已吸附在土壤/岩石表面非放射性離子所取代，換言之，離子交換能力會影響放射性核種的吸附/遲滯能力，有利於延緩核種釋出到生物圈的速度(USNRC，1982a；Rogers et. al.，1982；Andersson，1998；Andersson，2000)。

評估方法：

採取地表、露頭、裂隙表面、岩心材料、地表開挖、現場岩石等樣品，作為場址特性評估之一部分，陽離子交換容量(CEC)可在實驗室內執行，土壤中可交換離子可由鈣、鎂、鉀、鈉等元素分析決定，亦可由可交換酸度(acidity)獲知。

其他：

潛在不利條件

潛在場址的岩石與土壤不含黏土礦物，及地下水與地表水水質極度不良，不利於核種的吸附。此外，由實驗室方法所獲得的分配係數與遲滯因子的預測值及實際值常有很大的差異，主要是因為實驗室和現場兩者之間有尺度問題。

### 3.5.3.5 黏土/岩石礦物學

索引編號：4.05

考量因素：黏土/岩石礦物學(clay/rock mineralogy)

類別：土壤與岩石地球化學

定義：

研究黏土/岩石之礦物組成、形狀、結晶及分類等的科學。礦物學資料可用來預測不同地層之風化特性，決定離子交換能力與核種吸附能力，預測特定地層之工程行爲，鑑別重要的黏土種類，評估地層之有機成分，鑑定可溶礦物及現地放射性來源。

說明：

土壤中礦物的化學特性變化很大，其種類與數量對離子交換、吸附作用機制的瞭解非常重要。

大的成岩與成土礦物可目視鑑定，鑑定所依據的物理特性包含劈理、晶態、硬度、比重、韌性、顏色及光澤。室內之光學顯微鏡用以鑑定細粒礦物，少見礦物可用岩性顯微鏡、化學法、摩光薄片法及 X 光繞色法、電子顯微鏡等。

風化作用可使岩石與土壤變化成非常不同的特性；土壤中的黏土礦物、有機物與方沸石須特別注意；離子交換容量隨礦物種類有所不同，有機質有高的陽離子交換能力；某些黏土礦物，如蒙脫石，對水分非常敏感，含蒙脫土多的岩層在乾、濕循環中之脹、縮反應強烈(Bath, 1994; USDOE, 1985; USNRC, 1982a; Smellie, 2002; Andersson, 2000; SKB, 2002)。

評估方法：

礦物分析是材料鑑定的輔助手段，土壤或岩石中的黏土藉吸附作用及減少孔隙率的方式，可遲滯核種外釋。氧化矽(silica)是所有岩石與土壤的主要組成，鋁是次多的氧化物，尤其在矽酸鋁礦物的酸化行爲，鐵是其中具氧化還原敏感性最多的元素。

其他：

潛在不利條件

土壤或岩石的可溶性成分太多，不利於穩定性；此外，若含有某些不利的材質，如可溶性的碳酸鹽類與蒸發岩類，可藉由礦物分析方式偵測出。

### 3.5.3.6 有機質含量

索引編號：4.06

考量因素：有機質含量(organic materials content)

類別：土壤與岩石地球化學

定義：

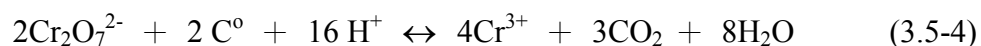
土壤的主要組成分為礦岩與有機質，其中有機質是指非礦物部分的物質，包含植物與動物材料，其數量及性質影響土壤的物理、化學及生物特性，並影響水中所含的可溶物質被吸收或通過。

說明：

有機質會留住水分，提供養分，當有機質含量較高時，會阻擋部分結構的吸附位置，成為和污染物結合的主體，；土壤中有機質含量可用總有機碳含量(Total Organic Carbon, TOC)或利用重量損失法來推估，將經過酸處理的樣本燃燒後，測量樣品的重量損失。土壤所含有機質具有高離子交換能力，對核種遷移的影響很大。地表植生之根系統也是助長放射性核種離子到達地表面的能力，有機質分解後產生的有機溶液與膠體物質有傳輸核種的潛力(USDOE, 1985; USNRC, 1982a; Andersson, 2000; Smellie, 2002; Strom et. al., 1999)。

評估方法：

土壤中的有機質可用  $K_2Cr_2O_7$  與  $H_2SO_4$  的熱混合液氧化處理，其化學反應是如下：



反應後，將過量的  $Cr_2O_7^{2-}$  用  $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$  滴定，所減少的  $Cr_2O_7^{2-}$  則相當於土壤所存在的有機碳，在乘上係數 1.724 即為土壤的有機質含量。

其他：



潛在不利條件

場址的岩石與土壤含有的有機碳與氮化合物的濃度太高。

### 3.5.3.7 土壤化學

索引編號：4.07

考量因素：土壤化學(soil chemistry)

類別：土壤與岩石地球化學

定義：

土壤的化學參數除有機及無機組成之外，主要的參數包含酸鹼值、氧化還原電位、電導度與電阻、天然加馬放射性等。

說明：

- (1)土壤酸度的來源是(A)有機質的分解(B)鋁、鐵、錳等離子的水解(C)空氣中的  $\text{CO}_2$  與土壤溶液形成碳酸；土壤的鹼度來自鹼土金屬碳酸鹽或重碳酸鹽水解產生的  $\text{OH}^-$  離子，有機物及厭氧菌之還原作用亦能使土壤呈鹼性。
- (2)土壤中的氧化劑有  $\text{O}_2$  及高價金屬離子，還原劑有厭氧下的分解物、有機物及低價金屬離子。
- (3)土壤的電導度與電阻反應孔隙水的總化性，成為層狀地層的分層依據，不過只適用於地下水面下的分層之用。
- (4)土壤的天然加馬放射性(natural gamma emission)為由其放射率與能譜所測得的天然輻射值，可作為分帶及描述土壤特性，是重要的環境基準資料。
- (5)土壤的酸鹼度會影響土壤的腐蝕性與離子活動能力，酸鹼值低的土壤可導致廢棄物容器腐蝕，破壞鋼材及水泥。

(6)電阻的大小反應出土壤的孔隙率、含水量、礦物學、孔隙水鹽度與粒子大小等的綜合影響，當土壤內有外釋的核種時，土壤的水化學會受到影響，進而改變土壤的電阻。電阻的量測對飽和與未飽和介質均適用。

(7)土壤的天然加馬放射性亦可作為未來核種遷移監測的背景值，利用加馬能譜儀，確認土壤主要的加馬射線放射性核種與強度(USNRC，1982a；Lutton et al.，1982)。

評估方法：

土壤的化學性質和礦物學(soil mineralogy)有很大關的。建立各種金屬物種形成穩定狀態的 Eh-pH 穩定圖，對探究土壤之金屬遷移轉換上極有助益。

其他：

潛在不利條件

對上述之土壤化學參數之量測務必配合相關項目來解釋，在短期間所量測到的值可能不具代表性，必須配合現地平衡試驗結果作詳細校正。

### 3.5.3.8 氧化還原電位

索引編號：4.08

考量因素：氧化還原電位(oxidation-reduction potentials)

類別：地下水/地表水化學

定義：

氧化還原電位(Eh)是在量測介質(水或土壤)中，相對於標準氫電極之白金電極的電動勢(electromotive force)，可用 Nernst 方程式表示：

$$Eh = E_0 + (RT/nF)\ln(Ox/Red) \quad (3.5-5)$$

Eh 值是地下水還原或氧化不同物質的能力的指標，當水中含有氧時則屬於氧化狀，其氧化還原電位為正值；Eh 為負值則處於還原狀，表示水中缺氧。

說明：

氧化還原電位是溶氧存在量的指示，可使用氧化還原電位計量測，並儘可能現場進行，以避免通風(aeration)與溫度等之影響改變原來條件。

在缺氧與良好的緩衝環境下，氧化還原電位是酸鹼值、亞鐵離子與硫化物含量的函數。其他情況下，即使是不含氧的地下水，氧化還原電位是非常難測量的；此時，通常還須要分析亞鐵離子( $\text{Fe}^{2+}$ )、錳離子( $\text{Mn}^{2+}$ )及硫化物( $\text{HS}^-$ )。

氧化還原電位通常由水與岩石的長期反應所控制，也常藉微生物當觸媒，一般而言，地下水隨著深度與留置時間愈長，愈具還原性。氧化還原電位是改變核種價數(valence)的能力，影響核種的溶解度與移動能力。因此，理想場址的地下水最好具有低 Eh 值，並存在著  $\text{Fe}^{2+}$  與  $\text{HS}^-$ 。在低 Eh 值及/或高 pH 值條件下，很多核種的溶解度非常低，因此不易溶於水而傳輸到生物圈(Ström et. al., 1999; SKB, 2000a, 2000b, 2002; USDOE, 1985; USNRC, 1982a)。

評估方法：

採取場址區域泉源、滲流、井水、調查鑽孔等之水體樣品，氧化還原電位與酸鹼值是兩項最重要的地下水化學參數，控制著核種的溶解度與吸附行為。

其他：

潛在不利條件

氧化態的地下水，水中溶氧會加速處置容器的腐蝕，並且提昇廢棄物體的溶解速度，減低緩衝材料與岩體及土壤對核種的吸附。

### 3.5.3.9 酸鹼值

索引編號：4.09

考量因素：酸鹼值(pH values)

類別：地下水/地表水化學

定義：

酸鹼值(pH)是描述體系中氫離子活性的值，等於 $-\log a_{H^+}$ ，其中  $a_{H^+}$  是氫離子的活性。在稀溶液中，活性基本上等於濃度，則酸鹼值的定義：

$$pH = -\log[H^+] \quad (3.5-6)$$

$[H^+]$ 為以摩爾/公升為單位的氫離子濃度，溶液的 pH 值從 0~7 呈酸性，7 為中性，7~14 為鹼性。

說明：

地下水的酸鹼值主要會影響處置容器的腐蝕與核種的吸附。酸鹼值計通常都是玻璃-甘汞(glass-calomel)電極系統，不用時電極必須泡在稀釋的酸液中，以避免乾燥；但當酸鹼值大於 9 時，玻璃電極內的鈉就必須用鋰取代。

酸鹼值與氧化還原電位為地球化學中兩個最重要參數，影響核種的溶解度與吸附性質，場址的地下水最好是呈中性，在 6~10 之間。

前項氧化還原電位與酸鹼值間有密切關係，兩者所組成的 Eh-pH 圖可以用來決定各元素的穩定範圍，尤其當元素含有(1)一種以上價數(2)隨 Eh 或 pH 而變化(3)隨溶液中總溶解元素之數量而變化；瞭解那些核種在那種情況下穩定，對於評估核種的行為非常重要(USDOE，1985；USNRC，1982a；Ström et. al.，1999；SKB，2000a，2002b，2002)。

評估方法：

採取場址區域泉源、滲流、井水、調查鑽孔等之水體樣品，可用酸鹼值計直接量測，同時配合氧化還原電位與酸鹼值之關係，可瞭解核種在該場址環境條件下的可能情況，是評估放射性核種之行為的重要基本參數。

其他：

潛在不利之條件

地下水的酸鹼值若是太高或太低，不但會影響核種的溶解度與吸附能

力，也不利於處置場工程材料的長期功能。

低放射性廢棄物處置場的建造會使用大量的混凝土建材，高鹼性的水泥會改變地下水的酸鹼值，此點必須特別注意。

#### 3.5.3.10 有機成分

索引編號：4.10

考量因素：有機成分(organic constituents)

類別：地下水/地表水化學

定義：

一般指溶解在地下水中所含有機類物質，統稱溶解有機碳(Dissolved Organic Carbon, DOC)，其中錯合物、微生物、有機膠體物質等對核種的傳輸影響較大。錯合物(complexing agents)是指在溶液中會與其他物質形成錯合物的物質，而錯合物則為化合物中的分子有一部分是以配位鍵結合，或是配位正(負)離子及含有這些離子的化合物。微生物(microbe)無所不在，其粒徑變化很大，從最小的單細胞細菌(0.2  $\mu$  m)到最大的硫氧化菌(0.75mm)

說明：

地下水中若含有錯合劑，包含聚有機酸胺(amine polycarboxylic acids，如 EDTA，DTPA)、氫氧有機酸(hydroxy-carboxylic acids)與聚有機酸(polycarboxylic acid)，如檸檬酸(citric acid)，碳酸(carbolic acid)與葡萄糖酸(glucinic acid)等，會和重金屬離子形成堅強的錯合物，在核種傳輸之評估中扮演重要的角色。

處置場址地下水若含有的過高的有機物質，促使細菌轉化作用，會產生各種有機酸，增加核種傳輸的機會。

場址之地下水與地表水所含的有機成分越低越好，理想值在 20 mg/l 以下(Ström et. al.，1999；SKB，2000a；Pedersen，2000；USNRC，1982a；

Lutton et. al. , 1982)。

評估方法：

採取場址區域泉源、滲流、井水、調查鑽孔等之水體樣品，氣體層析儀(Gas Chromatography, GC)是測量有機成分的標準方法。

其他：

潛在不利條件

有機物可能自然地存在地下水中或因微生物在近場的作用而產生。除應避免場址地下水含有過高的有機成分外，若處置容器內含有紙、衣物、皮、動植物等未經安定化處理過的廢棄物，則未來就可能會有地下水含有過量有機物質的不利情況發生。

放射性核種與有機物比與無機物容易結合形成穩定的錯合物，但由於有機物的化性極為複雜，較缺乏熱力學資料，不易模擬。

### 3.5.3.11 無機成分

索引編號：4.11

考量因素：無機成分(inorganic constituents)

類別：地下水/地表水化學

定義：

為溶解於水中之離子態無機類成分，水中所有無機陰陽離子的總合稱為總鹽度(total salinity)，一般都用總溶解固體(Total Dissolved Solids, TDS)來表示，地下水中的組成之特性與總溶解固體濃度大小主要是會影響處置容器的腐蝕與緩衝材料的穩定性及對核種的吸附能力。

說明：

可能會影響處置場功能的地下水與地表水中之主要離子包含  $\text{Na}^+$ ， $\text{Ca}^{2+}$ ， $\text{Mg}^{2+}$ ， $\text{K}^+$ ， $\text{Cl}^-$ ， $\text{HCO}_3^-$ ， $\text{SO}_4^{2-}$ ， $\text{NO}_3^-$ ， $\text{NO}_2^-$ ， $\text{NH}_4^+$ ， $\text{HPO}_4^{2-}$ 等，其中雙價位離子的影響較大；此外，Eh 值與 $[\text{Fe}^{2+}]$ 及 $[\text{HS}^-]$ 的存在是地

下水缺氧的表徵。地下水由地質圈流入處置場，其化學性質將因和週遭環境作用而產生變化。

地下水的組成對土壤與岩石的遲滯性質的影響很大，特別是吸附與擴散，其中總溶解固體含量(TDS)、酸鹼值、氧化還原電位及碳酸鹽等對銻(Cs)與銻(Sr)的吸附有很大關係。 $[Cl^-]$ ， $[CO_2]$ ， $[SO_4^{2-}]$ 的濃度會影響灌注泥漿材料的選擇，地下水的總溶解固體濃度最好能低於 100 g/l(Ström et. al.，1999；SKB，2000a，2002b；Andersson，2000；Lutton et. al.，1982；USNRC，1982a)。

評估方法：

採取場址區域泉源、滲流、井水、調查鑽孔等之水體樣品，大部分水溶液中的金屬離子都可用原子吸收光譜(AA)分析；陰離子可用色度計或滴定法。

其他：

潛在不利條件

除總溶解固體含量外，個別離子的濃度也須注意，高濃度的氯離子( $Cl^-$ )會加速處置容器的腐蝕， $[Ca^{2+} + Mg^{2+}]$ 的濃度太高不利於膨潤土的穩定性，100 mg/l 的  $HCO_3^-$ 有利於系統酸鹼值的緩衝作用，鉀離子( $K^+$ )濃度最好低於 400 mg/l， $NO_3^-$ ， $NO_2^-$ ， $NH_4^+$ ， $HPO_4^{2-}$ 等的濃度能低於 1 mg/l，硫酸根( $SO_4^{2-}$ )濃度低於 1，500 mg/l。

### 3.5.3.12 水質參數

索引編號：4.12

考量因素：水質參數(water quality parameters)

類別：地下水/地表水化學

定義：

水質參數包含鹼度、色度、味道、硬度、酸鹼值、導電度、懸浮顆粒、

溫度、濁度等。其中鹼度是指水和氫離子反應的能力，可用玻璃電極為指標，甘汞電極為參考電極，用標準酸液滴定至終點通過 pH 計。色度是指已除去濁度的水的顏色，其測定是將樣品和已知濃度的有色溶液進行目視比色，或用經過適當校正的特製玻璃色片來比色。水的味道是憑藉人的味覺器官，用適當的詞句加以定性描述。導電度之測定用標準導電溶液先行校正之導電度計，再測量水樣的導電度。懸浮顆粒是將水樣過濾後，留在標準玻璃纖維濾紙上的物質，在 103°C~105°C 的溫度下烘乾至恆重，濾紙所增加的重量即為懸浮顆粒重。濁度是由於水中微細分散的懸浮粒子，使水的透明度降低的程度，可用散射濁度計、濁光濁度儀。

說明：

水質資料主要是用來作為處置場場址運轉前後背景資料之比較，有充分準確的水質參數背景資料後，才能評估因處置場設置後而引起的任何水質變化，受影響之水質參數依場址特性、處置場的建材與廢棄物成分而定。

包含地表水與地下水，水質參數資料和取樣的地點、時間及方法等三者有很密切的關係，好的分析方法亦無法彌補不良的取樣方法，也沒有定出適合所有狀況的標準取樣方法，水流特性、地形、土地利用等均會影響水質(USDOE, 1985; USNRC, 1982a; Lutton et. al., 1982)。

評估方法：

採取場址區域泉源、滲流、井水、調查鑽孔等之水體樣品，取樣點的位置與數目依場址大小及其水文特性而定，水文架構越複雜者，取樣點的數目必須增加，傳統的各種標準分析法均可應用來分析水質。

其他：

潛在不利條件

場址水質參數會受到四周環境介質的影響，而處於不穩定狀況，重要水質參數，須於現地直接量測，或取樣後立即分析，特殊情況則須添加防腐劑以預防欲測成分逸失。水中溶解固體量、比導電度、濁度等太高則不



利外釋核種的吸附。

### 3.5.3.13 輻射參數

索引編號：4.13

考量因素：輻射參數(radiological parameters)

類別：地下水/地表水化學

定義：

來自天然輻射源的放射性，包含阿伐(alpha)、貝他(beta)、加馬(gamma)、鉀 40、碳 14、銻 134、銻 137、鈷 60、碘 131、氡、銻 90、鐳 226 與其衰變產物(特別是氦)、及鈾 232 與其衰變產物。

說明：

天然輻射源包含來自地球以外的體外輻射源，即宇宙線，與來自地球的體外輻射源，即存在於地殼與空氣中的放射性同位素，依局部的地理條件不同，在各地有不同的變化。

建立場址放射性強度基準值及各特定核種之濃度資料，此背景值之量測與未來評估核種遷移、監測計畫及環境影響評估有密切關係。此外，碳 14 之含量亦可作為礦物及地下水定年(dating)之用。

量測時包含空氣、土壤、水、動植物、農作物等之採樣，範圍寬廣度及複雜度隨場址情況而定(USNRC, 1982a; Lutton et. al., 1982; Strom et. al., 1999; SKB, 2000a, 2000b, 2002)。

評估方法：

一般情況下，由於阿伐與貝他值都很低，主要是利用閃爍計數器測定加馬放射性強度。放射性核種依其特性可用各種標準放射化學分析方法，進行定性與定量測量。場址的輻射性參數必須持續監測，在處置場運轉後，若量測到有增加的現象，即表示處置場有放射性核種釋出的情形。

其他：

潛在不利條件

在無特殊理由下，天然環境之輻射性極低，因此取樣與分析時必須特別小心。

#### 3.5.3.14 膠體、腐植質、溶解氣體

索引編號：4.14

考量因素：膠體、腐植質、溶解氣體(colloids, humus, dissolving gas)

類別：地下水/地表水化學

定義：

- (1)膠體：粒徑在 1 nm~0.45 μm 間的水中懸浮顆粒，其濃度大致隨著酸鹼值的增加、氧化還原電位的變動、水流速度的改變、離子濃度與溫度的變化而提高，膠體本身可能是有機質，如腐植酸、磺酸、脂肪酸與蛋白質，或無機質，如黏土礦物、二氧化矽、氫氧化鐵。
- (2)腐植質：為生物化學穩定之各種複雜有機酸，為有機物質在自然環境下的腐敗後產生，包含腐植酸(humic acid)、磺酸(fulvic acid)與腐黑酸(humin)，三者之結構相似，但分子量與功能基不同。
- (3)溶解氣體：水中主要的溶解氣體包含 H<sub>2</sub>， O<sub>2</sub>， N<sub>2</sub>， CH<sub>4</sub>， CO， CO<sub>2</sub>， He， Ar 等。

說明：

地下水中若含有膠體、腐植質、溶解氣體與微生物及細菌等存在時，會影響放射性核種的傳輸。吸附在膠體上的放射性核種，會隨著地下水流傳輸，其行為和相同的放射性元素不相同；和腐植酸與磺酸錯合的核種會減低其吸附性，細菌及微生物的存在也會不利於核種遲滯。

場址應選在地質較老的區域或未經人為破壞過的區域，以避免地下水中有膠體與腐植質及微生物等的存在。水文地質化學性質的變動會刺激膠

體的產生(Allard, 1991; Lakksoharju et al., 1995; Wickham et al., 2000; Merceron and Mossman, 1994; 莊文壽等, 1999)。

評估方法：

採樣時必須特別留意汲水時產生的化學變化，及樣品處理與分析時可能的空氣與空中微粒的污染，需求資料包含膠體的種類、顆粒數目與粒徑分布，腐植質的種類與濃度，及水中溶解氣體的總體積與各種氣體的濃度。

其他：

潛在不利條件

膠體與腐植質極微生物會隨著地下水漂浮移動，會使工程障壁退化，所結合的核種的傳輸速度較有溶解限制時之傳輸為快。水中溶氧量過高則將加速處置容器的腐蝕。

表 3.5.3-2 列出地球化學考量因素之評估指引，說明考量因素可能面對之不利條件，並提出建議參考量值及參考依據，以作為建議性之應用指引。

表 3.5.3-2 地球化學考量因素評估指引

	不利於場址	建議參考量值	依據
分配係數 (partition/distribution coefficient)	1. 母岩對關鍵性核種的分配係數、遲滯因子、離子交換能力太小； 2. 母岩不含黏土礦物或會乾、會裂； 3. 地下水與地表水水質極度不良。	1. 無建議量值； 2. 應進行調查評估，確保不影響處置場長期安全。	
遲滯因子 (retardation factor)			
離子交換 (ion exchange)			
黏土/岩石礦物學 (clay/rock mineralogy)	1. 母岩含可溶性成分太多； 2. 母岩含可溶性的碳酸鹽類與蒸發岩類； 3. 母岩含脹縮反應強烈的黏土礦物。	1. 無建議量值； 2. 應進行調查評估，確保不影響處置場長期安全。	
有機質含量 (organic materials content)	母岩含有機碳與氮化合物的濃度太高	1. 無建議量值； 2. 應進行調查評估，確保不影響處置場長期安全。	
土壤化學 (soil chemistry)	土壤酸鹼值低	1. 無建議量值； 2. 應進行調查評估，確保不影響處置場長期安全。	
氧化還原電位 (oxidation-reduction potentials)	地下水 Eh 值高或含有 $Fe_2^+$ 與 $HS^-$	1. 無建議量值； 2. 應進行調查評估，確保不影響處置場長期安全。	
酸鹼值 (pH values)	地下水酸鹼值太高或太低	1. 無適用標準； 2. 暫以呈中性，在 6~10 之間為參考。	
有機成分 (organic constituents)	地下水所含的有機成分太高	1. 無適用標準； 2. 暫以有機成份在 20 mg/l 以下為參考。	瑞典 SKB 等國之標準
無機成分 (inorganic constituents)	1. 地下水的總溶解固體濃度太高； 2. 地下水含氯離子( $Cl^-$ )、鉀離子( $K^+$ )、 $NO_3^-$ 、 $NO_2^-$ 、 $NH_4^+$ 、 $HPO_4^{2-}$ 、硫酸根( $SO_4^{2-}$ )的濃度太高	1. 無適用標準； 2. 地下水的總溶解固體濃度最好低於 100 g/l(暫定) 3. 鉀離子( $K^+$ )濃度能低於 400 mg/l(暫定) 4. $NO_3^-$ 、 $NO_2^-$ 、 $NH_4^+$ 、 $HPO_4^{2-}$ 濃度能低於 1 mg/l(暫定) 5. 硫酸根( $SO_4^{2-}$ )濃度能低於 1,500 mg/l(暫定)	瑞典 SKB 等國之標準
水質參數 (water quality parameters)	地下水溶解固體量、比導電度、濁度太高	1. 無建議量值； 2. 應進行調查評估，確保不影響處置場長期安全。	
膠體、腐植質、溶解氣體 (colloids, humus, dissolving gas)	1. 地下水膠體與腐植質及微生物過多； 2. 地下水中溶氧量過高。	1. 無建議量值； 2. 應進行調查評估，確保不影響處置場長期安全。	

### 3.6 岩石力學考量因素與評估方法之擬定

#### 3.6.1 一般說明

國際上對於低放射性廢棄物處理之方式，因處置場場址所在位置環境、民生接受度等因素考量的差異，一般可分為地表貯藏及隧道掩埋兩種方式。其中隧道處置的安全性除受到選址、地質環境、工程及結構影響外，岩石及岩體的力學性質及調查技術，為處置場安全及穩定之重要考量因素。

岩體強度及其特性的差異將直接影響隧道方位、深度、斷面大小之評選及設計，同時對於隧道支撐設計之安全及施工前後之監測亦有密切之關係。為維持隧道處置施工期間及封閉後運轉之完整性，對於岩體強度及穩定性須採系統化之方式進行分析考量。低放射性廢棄物隧道處置中，可分為岩石材料力學及岩體力學因素兩類，其所需考量的內容包括：

- (1)岩石材料力學參數：岩石材料參數的測定於隧道分析及設計時扮演極為重要的角色，同時也可作為初步判斷岩石材料特性的依據，包括凝聚力與摩擦角及彈性模數兩項重要因子。
- (2)岩石基本力學特性：岩石力學基本特性包括單軸壓縮強度、剪力強度、張力強度、點荷重指數及塑性變形等五項，力學特性將直接影響分析模式的假設。
- (3)岩體分類：以岩體分類結果作為隧道輪進深度、支撐時間及型態選擇的依據，最常用的方法有 Bieniawski 岩體分類及 Barton-Q 值。此法的優點在於可快速依照現地岩體狀況進行即時研判，並對施工、設計進行調整，並可作為研判岩體良莠之參考。
- (4)現地應力(in-situ stress)：岩體因形成年代、構造型態或地質變化的差異，岩體形成過程承受不同階段之應力。當岩體進行地下構造物施工而開挖時，大地應力將因施工擾動及隧道方位等因素，使得岩體擾動所在位置之現地應力產生變化，進而引起如岩爆等嚴重影響隧道安全的岩體變

化。目前對於現地應力多採用實地量測的方法進行評估。

(5)應力引致之岩體缺陷(rock mass leakage due to stress effect)：以應力為基礎探討其所可能引起之岩體缺陷，其原因多由於岩體本身構造或岩性強度不足所致，如泥頁岩層或鹽岩等因其礦物成分組成等因素，在受到長時間大地應力的作用下，將逐漸產生變形及岩體擠壓的作用，於處置場封閉後長期的安全性上，具有重要的影響性。

### 3.6.2 安全原則

國際上之放射性廢棄物隧道處置多於地表下數十公尺至數百公尺深度處。雖然各國於處置場的設計與作業方式各有不同，但對於安全的要求卻是一致的，例如用過核燃料管理安全及放射性廢棄物管理安全聯合公約(物管局，2003c)所載：

#### 第9條 設施的運轉

四、在用過核燃料管理設施的整個運轉壽期內，可獲得一切安全有關的領域內的工程和技术支援。

#### 第13條 擬議中設施的選址

一、評估在此類設施運轉壽期內可能影響其安全以及在其封閉後可能影響處置設施安全的與場址有關的一切有關因素。

#### 第14條 設施的設計和建造

四、設計和建造放射性廢棄物管理設施時採用的技術得到經驗或分析的支持。

#### 第15條 設施的運轉

四、在放射性廢棄物管理設施的整個運轉壽期內，可獲得一切安全有關領域內的工程和技术支援

另外放射性廢棄物管理方針(物管局，1997)亦提到：

十一、加強安全分析與環境影響評估工作：

甲、放射性廢棄物營運設施之開發行為，應提出營運設施之安全分析報告。

依 環境影響評估法規應實施環境影響評估者，從其規定。

十二、加強貯存及最終處置方案之規劃：

乙、提昇低放射性廢棄物貯存之安全，並研究長期安全貯存方式之可行性。

### 3.6.3 考量因素

低放射性廢棄物處置場岩石力學考量因素，可分為岩石材料力學及岩體力學兩大分類其因素共計 13 項，如表 3.6.3-1 所示：

表 3.6.3-1 岩石力學考量因素

索引編號	考量因素名稱
5.01	凝聚力與摩擦角(cohesion and friction angle)
5.02	彈性模數(modulus of elasticity)
5.03	單軸抗壓強度(uniaxial compressive strength)
5.04	剪力強度(shear strength)
5.05	張力強度(tensile strength)
5.06	點荷重指數(point load index)
5.07	塑性變形(plastic deformation)
5.08	岩體分類(classification of rock)
5.09	現地應力(in-situ stress)
5.10	不連續面剪力強度 (shear strength of discontinuity)
5.11	岩爆(rock burst)
5.12	岩體膨脹(rock dilation)
5.13	岩體擠壓(squeezing of rock)

### 3.6.3.1 凝聚力與摩擦角

索引編號：5.01

考量因素：凝聚力與摩擦角(cohesion and friction angle)

類別：岩石材料力學

定義：岩石材料利用直接剪力或三軸試驗等類似方式，可獲得岩石於不同應力條件下之破壞關係，經由此資料可繪製成莫爾圓(Mohr's Circle)，而莫爾圓上切線與座標垂直軸之截距稱之為凝聚力、切線與水平線之夾角則稱為摩擦角。

說明：

岩石材料之凝聚力與摩擦角為岩石產生剪力破壞時之基本力學參數之一，其可由莫耳-庫倫破壞準則獲得。基本理論為假設破壞時，岩石材料沿一破壞面產生滑動，其正向應力與剪應力之關係為直線，可表為下式：

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (3.6-1)$$

其中， $\tau$ ：破壞時之剪應力；

$c$ ：縱軸之截距，或稱凝聚力；

$\phi$ ：破壞包絡線之角度，一般稱為內摩擦角；

$\sigma_n$ ：破壞面上之正向應力。

評估方法：

- (1)岩石三軸壓縮試驗：岩樣在不同的圍壓下，施加軸向壓力得其抗壓強度，並由強度破壞包絡線推求岩石之凝聚力 $c$ 和內摩擦角 $\phi$ 。
- (2)岩柱三軸抗壓試驗：其目的在求得岩體於三軸應力狀態之強度和變形性質，若採用莫耳-庫倫直線破壞包絡線評估，則可求得岩體強度參數 $c$ 、 $\phi$ 值。(Gilg, 1966)



### 3.6.3.2 彈性模數

索引編號：5.02

考量因素：彈性模數(modulus of elasticity)

類別：岩石材料力學

定義：岩石材料受力作用時，在產生塑性變形前之應力與應變的比值，其意義為岩體之剛性程度，於設計隧道支撐或開挖分析時之重要參數。

說明：

岩石試體以單軸加壓或三軸加壓方式直到試體破壞，試驗進行中紀錄其荷重與變形量之關係，經由數據換算後可得產生塑性變形前之應力-應變曲線，此曲線之切線斜率即為彈性模數。

岩體於加載過程中不易獲得線型良好之應力-應變圖形，因此有以下幾種方式可求得近似彈性模數：

- (1)割線彈性模數：取原點彈性模數和曲線上單壓強度之半(50%)的應力點，兩點連線之斜率。
- (2)切線彈性模數：取曲線上單壓強度之半的應力點，過該點的切點斜率。

評估方法：

- (1)單軸抗壓試驗：

在單軸抗壓試驗中，輔以應變計量測可記讀壓力及所對應的軸向應變，即可得到彈性模數。

- (2)平鈹千斤頂試驗(plate loading test)：

於岩體的表面鋼鈹(承壓鈹)施加壓力於岩體上，以加解壓反覆循環之方式進行試驗，利用再加荷重(reload)與變形所得之關係，利用 Jaeger 所導得的公式(Jaeger and Cook, 1976)來計算彈性模數。

- (3)震測法(洪如江, 1998)：

在每一平鈹載重試驗位置鑽 6m 深之探測孔，在地表發震，孔中測 P

波速度與 S 波速度，由下式計算岩石之動態彈性模數  $E_d$ ：

$$E_d = \rho \frac{v_s^2 (3v_p^2 - 4v_s^2)}{(v_p^2 - v_s^2)} \quad (3.6-2)$$

上式中， $v_p$ ：P 波速度， $v_s$ ：S 波速度， $\rho$ ：岩石單位重。

將所得動態彈性模數除以 2，可得相當之靜態彈性模數。

### 3.6.3.3 單軸抗壓強度

索引編號：5.03

考量因素：單軸抗壓強度(uniaxial compressive strength)

類別：岩石材料力學

定義：岩石材料於單軸(單向度)受壓狀況下，發生壓縮破壞時試體單位面積所承受之極限荷重，稱之為單軸抗壓強度。

說明：

岩石材料單壓強度的判定，對於隧道斷面型態、開挖方式的選擇及支撐設計等有密切的關係，影響單壓強度之因素大致可歸納為兩方面：

- (1) 岩石本身：包含礦物成份、結晶狀況、顆粒大小和級配、膠結物質和狀況、密度、葉理(含頁理、層理、劈理和片理)和裂隙的方向及特性、風化程度和含水比等。
- (2) 試驗處理：含試體大小、形狀、長徑比、平整度、加載速率和溫度(Mogi, 1966)。

評估方法：

- (1) 單軸抗壓強度試驗(ISRM, 1981)：

將岩心試體裁切成長/徑比為 2.5~3.0，並以固定速率加壓直至破壞為止，俟試體破壞紀錄其荷重-變形關係，即可得到岩石之單軸抗壓強度。

- (2) 三軸壓力試驗(triaxial compression test)：

類似於單軸抗壓試驗的進行，惟不同處係於加壓過程中於岩體周圍施加對稱之圍壓。詳細試驗方法見 ASTM D2664-67(1974)，與 ISRM 委員會(ISRM, 1981) 所建議之步驟。

(3)岩石硬度錘試驗(Hoek and Bray, 1981)：

以施密特(Schmidt)硬度錘壓打岩石的表面(該表面不需磨平)，並由硬度錘的反彈數及岩石的單位重反查經驗圖表，可推估岩石的單壓強度。

### 3.6.3.4 剪力強度

索引編號：5.04

考量因素：剪力強度(shearing strength)

類別：岩石材料力學

定義：岩體於沿受力水平方向發生破壞時，岩體所能提供之最大抵抗應力。

說明：

影響節理面剪力強度之因素除節理面材料本身強度、岩石礦物間基本摩擦特性及節理面之粗糙度之外，尚還有剪力作用方向和夾層泥等因素。

評估方法：

(1)現地直接剪力試驗(field direct shear test)(ISRM, 1981)：

本試驗之目的在於求取現地地層之剪力強度參數。依現地應力決定適當之正向應力，於試體上施加正向應力並壓密完成，再以適當方法施加剪力，同時量測剪動變形及正向變形，以求得岩體剪裂面之剪力強度。

(2)直剪試驗(direct shear test)：

本試驗主要在求岩石的基本摩擦角  $\phi_b$ ，使用時需配合量測現場可能滑動面的粗糙度，推估正向應力  $\sigma$  及兩接觸面間之單壓強度，代入 Patton 或 Barton 弱面剪力強度公式分析(Patton, 1966; Barton, 1971)。

(3)弱面直剪試驗：

此試驗乃將取得的弱面試體直接進行試驗，所求得之結果即為該弱

面之剪力強度參數，但於引用時須注意(1)試體的代表性及尺度效應(2)含水量的變化(3)剪動方向應與可能的滑動方向一致。

### 3.6.3.5 張力強度

索引編號：5.05

考量因素：張力強度(tensile strength)

類別：岩石材料力學

定義：張力強度亦稱拉力強度。岩石材料承受與斷面垂直方向之作用力時，其抵抗伸張破壞之應力稱之。

說明：

岩石材料與土壤材料之不同點，在於岩石具有張力強度，但其張力強度並不大，通常僅為抗壓強度的十分之一，其張力強度受岩石中裂紋密度及分布之影響，亦與其試驗方式有關。一般而言，直接張力強度受裂紋之影響較大，故比間接張力強度(巴西試驗)為低。

評估方法：

(1)岩石直接抗張試驗(direct tensile test)：

裁切長徑比約為 2 的岩心試體，將試體中央段平順地磨成細頸型成為骨頭狀試體，將試體兩端以特製金屬圓帽夾具夾住，利用拉力機將試體拉斷，即可求得岩石材料的抗拉強度。

(2)岩石間接抗張試驗(indirect tensile test)，又稱為巴西試驗(Brazilian test)(ISRM，1981)：

裁切厚徑比約為 0.5 的岩心試體，將試體放進特製的載重夾，並置放在壓力機上加壓，記讀載重與位移量直到破壞。並依理論公式可求得岩石張力強度。

(3)岩栓拉拔試驗(李生林與劉蕙蘭，1990)：

以岩栓的拉拔試驗求得岩體的抗張強度。其抗張強度  $\sigma_t$  計算如

$$\text{下：}\sigma_t = \frac{P}{r_1^2 - r_2^2} \quad (3.6-3)$$

其中， $P$ ：拔出岩栓的力； $r_1$ ：拔出錐狀岩體表面半徑； $r_2$ ：孔底固定端半徑

#### (4)彎曲試驗(施國欽，1999)：

將一長段岩心置於兩支點上，其跨度為 $L$ ，而在頂部距離支點各 $\frac{L}{3}$ 長度施加集中載重，使試體在中央段 $\frac{L}{3}$ 範圍，承受純彎矩(無剪力)，讓試體下緣因受彎曲拉應力而破裂，由此可求得岩石材料的抗拉強度。

### 3.6.3.6 點荷重指數

索引編號：5.06

考量因素：點荷重指數(point load index)

類別：岩石材料力學

定義：岩石材料於特定點位承受外加荷重之能力，其值可用於岩石硬度及特殊點位強度之即時研判。

說明：

點荷重試驗由 Broch 與 Franklin 共同發展。評估方法係將岩石置於兩堅硬之鋼錐體間並施加荷重，使其產生一與荷重軸平行之拉力裂縫而達到破壞。以點荷重儀之兩圓錐夾破規則或不規則形狀之岩石樣本，若所施加的力為 $P$ ，岩樣等值直徑為 $De$ ，則 $P/De^2$ 為點荷重指數。點荷重強度試驗可於鑽探工地即時進行試驗。

評估方法：

依岩樣形狀和加壓方向，國際岩石力學學會(ISRM，1985)將點荷重試驗細分為：

(1)徑向試驗(radial test)：試體長徑比要大於1，岩心端點至加壓位置要大於試體直徑的0.5倍。

- (2)軸向試驗(axial test)：試體長度  $D$  與直徑  $W$  之比值在 0.3~1.0 之間。
- (3)方塊體試驗(square block test)：  $D/W$  應在 0.3~1.0 之間。
- (4)不規則塊體試驗(irregular block test)：  $D/W$  應在 0.3~1.0 之間。
- (5)異向性試驗(anisotropy test)：分別進行徑向及軸向試驗，求得最小及最大強度方向之點荷重指數。

### 3.6.3.7 塑性變形

索引編號：5.07

考量因素：塑性變形(plastic deformation)

類別：岩石材料力學

定義：岩石受到岩體本身重量、外加荷重作用或現地應力的釋放，使得岩石強度達到界限平衡而產生塑性變形。此為不可回復之變形量，並多發生於軟弱岩層中。

說明：

隧道開挖完成後造成原有現地應力產生變化，對於剛性較大或強度較高之岩體，其於開挖形成之自由面(free surface)將產生彈性變形，而於泥頁岩、鹽岩等軟弱岩層或當岩體中具有微裂隙、節理等軟弱面存在時，岩體則因應力重新分配而使得裂隙逐漸增大或形成不可回復之位移，此稱之為塑性變形(Brady and Brown, 1985a)。

塑性變形的產生對於隧道支撐的選擇及處置設計概念評估等有密切的關係。一般對於隧道塑性變形的評估係以標示岩體中特定區或特定帶的方式為探討依據。

評估方法：

- (1)數值分析：以有限元素法(FEM)、邊界元素法(BEM)或不連續體元素法

(DDA)等數值方法，以理論公式配合現地調查所得之岩體或岩石基本力學參數進行分析，以探討開挖面可能產生塑性變形之區域，或塑性變形量。

(2)收斂釘：收斂釘(convergence arrays)係於開挖完成後，將其裝設於特定岩體之表面，並定期觀測期間所產生之變形量，並可以此為量測開挖淨空位移等相關資料。

(3)三軸應變計：三軸應變計(triaxial strain cell)此為量測岩體因開挖所產生的應變情形。此儀器可同時量測岩體三個方位的應變，並藉由應力應變理論公式，可推估岩體的應力變化狀況(Emsley, 1997)。

(4)開挖破壞帶伸長儀：開挖破壞帶伸長儀(excavation damage extensometer, EDEX)傳統伸長儀的設計是針對較大規模之岩體進行監測的工作，故對於需要精確量測的開挖擾動帶，無法提供可靠的監測數據。因此加拿大白殼(white shell) 實驗室的 Mine-by-experiment 計畫中，改良傳統之伸長儀並自行研發點式開挖破壞帶伸縮儀。改良後之點式伸縮儀長度為 1m、直徑 3.8 cm，並具有自動溫度自動修正的功能(Emsley, 1997)。

### 3.6.3.8 岩體分類

索引編號：5.08

考量因素：岩體分類(classification of rock)

分類：岩體力學

定義：岩體分類係對隧道開挖中所面臨之岩體特性，以定性及定量式資料加以分類評分，作為訂定開挖程序與輪進長度之用，並提供支撐類型選擇之參考。

說明：

岩體等級分類係根據分類基準做成之岩體等級分類，通常為工程契約中指定地盤條件的指標之一，在施工期間已被有效利用於綜合輔助監測結果之判斷。

提供岩體分類法於實務利用之先決條件為(Bieniawski, 1974)：

- (1)應用於與隧道之設計與施工目的有關聯者。
- (2)在隧道全線可獲得分類評估因子者。
- (3)由一般性之調查法與試驗法中獲得者。
- (4)其等級可與設計與施工之分級對應者。

評估方法：

- (1)Bieniawski 岩體分類：Bieniawski 之地質力學分類法(geomechanics classification system)(Bieniawski, 1973)其評估因子有 6 項，分別評分後其總和稱為岩體評分(Rock Mass Rating, RMR)。其評估因素包括有岩石材料強度、RQD、弱面間距、弱面狀況、地下水情形、弱面方位等。
- (2)Barton-Q 值：由挪威之 Barton、Lien 及 Lunde (Barton, 1987)三位所創之 Q 值為評分標準，評估因子計有 6 項。其評等因素及岩體描述遠較 Bieniawski 所提出之方法更為詳細。
- (3)奧地利：奧國之評估方法屬定性描述，僅將岩體粗分為六類，並建議支撐方式(Deere, 1987)。

### 3.6.3.9 現地應力

索引編號：5.09

考量因素：現地應力(in-situ stress)

類別：岩體力學

定義：現地應力可分為初始應力 (original stress)及誘發應力(induced stress)兩類。分別代表隧道開挖前後岩體中所存在的應力，其具有大小、方向等特性(洪如江, 1991a)。

說明：

當隧道上覆蓋地盤厚度大且隧道斷面高時，須調查地盤之現地應力，



以供檢討隧道形狀並設計隧道支撐。現地應力具備大小及方向特性，除影響隧道開挖走向外，對於支撐的選擇有決定性的影響。對於岩層覆蓋甚厚之隧道，須進行地盤現地應力之調查，同時亦可用於評估隧道開挖後岩爆可能性。

評估方法：(Brady and Brown, 1985b)

- (1)三軸應變計(triaxial strain cell)：以至少三組不同方向之應變規，將其固定於岩體或薄殼之表面，紀錄該位置之應變大小並配合理論計算或設備本身提供之換算方式決定該點之應力值。本法較適用於特定點位、孔洞應力之量測。
- (2)平板載重法(flatjack)：利用一極大剛性之平板及施壓機械(如千金頂)，於岩體位置進行施壓，並量測得其反力及應變量。本法適合較大範圍之應力量測，惟施作前須將開挖所造成的岩體擾動區域加以清除，以提高量測的準確性。
- (3)水力劈裂法(hydraulic fracturing)：於施測位置鑽挖適當之孔洞後，施加水壓使岩體產生微裂隙，並利用反覆加壓及解壓之動作，以研判現地應力大小。
- (4)套鑽法(overcoring)：先於岩體鑽挖一較小之孔洞，並設置應變計紀錄讀數，而後以孔洞之圓心為準鑽挖較大之岩體，經由岩體鑽挖前後應變計之變化可得知其現地應力變化情形。

#### 3.6.3.10 不連續面剪力強度

索引編號：5.10

考量因素：不連續面剪力強度(shear strength of discontinuity)

類別：岩體力學

定義：岩石塊體或岩層間之相合介面，當受外力擾動作用時，因介面間之岩體粗糙特性或碎岩夾層泥等阻滯，產生相互位移之抵抗能力。

說明：

不連續面泛指斷層、節理、裂隙等，此等地質層面間可能為潔淨之地下水通路，亦可能具有細屑、泥灰、碎石塊等物質充塞其間。不連續面受外力作用時其所能維持岩體穩定的能力，端視其擾動影響範圍及介面間之剪力強度而定，當地下結構物施作時必須穿越具有不連續特性之地質構造帶時，須對其介面之間剪力強度特別評估，以確保工程的安全性。

評估方法：

(1)直接剪力試驗(direct shear test)：將兩塊岩體置於剪力盒中，以平行方向施加作用力，並記錄作用力與變形量之關係可得剪力強度特性。

(Goodman, 1976; Hoek and Bray, 1981, 1980)

(2)三軸試驗(triaxial test)：利用傳統土壤之三軸試驗機制，以液體為介質，並於岩體橫向施加圍壓後，再施加壓或拉力於岩體軸向，同時紀錄壓力與變形之關係圖，則可獲得不連續面之剪力強度。此法適用於已知岩體中之不連續面與軸向呈 25-40° 的條件。

(3)JRC 經驗法則：經由節理糙度係數(Joint Roughness Coefficient, JRC)的判斷，再配合 Barton 式所建議之經驗公式計算不連續面之尖峰(peak)剪力強度值(Brady and Brown, 1985c)。

$$\tau = \sigma_n' \tan \left[ JRC \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n'} \right) + \phi_r' \right] \quad (3.6-4)$$

其中，JCS：弱面兩壁岩石之抗壓強度(joint compressive strength)；

$\sigma_n'$ ：正向應力(normal stress)；

$\phi_r'$ ：內摩擦角(friction angle)。

(4)震測調查：選擇特定隧道線為主測線，必要時再輔設橫斷之副測線，利用地盤傳播震波之速度差異以推估地質分布之不均勻性。調查結果以震波速度分布圖表示(Goodman, 1976)。

(5)鑽孔實驗：於欲調查之位置進行岩體鑽孔，以取得岩石或土壤試樣並進行後續相關物理性試驗。利用鑽孔實施之現地實驗包括標準貫入試驗、孔內變形試驗、地盤初始應力量測等(Goodman, 1976)。

(6)電阻分層：以電阻探測的方式評估電阻值突然產生變異之處，可用於判斷地質構造或斷層，及含水量較高岩體之密度及相關岩石特性(Goodman, 1976)。

### 3.6.3.11 岩爆

索引編號：5.11

考量因素：岩爆(rock burst)

類別：岩體力學

定義：岩體開挖面之切向應力(tangential stress)對岩石材料強度超過某一限度時，所產生的岩石破壞情況(洪如江, 1991b, 1991c)。

說明：

隧道於深層硬岩開挖時，可能發生因開挖而導致岩體蓄積之巨大彈性應變能量釋放，而產生岩體劇烈破壞之現象。通常在岩石近似完全之彈性體、因開挖產生局部應力擾動及破壞後岩石剛性比周圍岩盤剛性為大時等三種狀況，較易產生岩爆。

評估方法：

岩爆之評估可根據工程特性之個別需要進行相應之必要調查(陳堯中, 1997a)，其評估方式包括：

(1)鑽探：經由航照圖、地質圖進行研判，並依據相關地質探查準則或經驗，進行特定點位及深度之鑽探，利用取得的岩心研判地質構造等相關特性，並可進行後續岩石試驗。

(2)岩石試驗：進行單壓強度、剪力及張力等基本力學試驗及測試，並推算其彈性及剪力模數，以作為岩石基本特性研判的依據。

(3)節理調查：以聲波、誘導震波，鑽探等破壞性或非破壞性檢測方式，探查地層狀態並繪製地層斷面圖，進而研判可能的節理或構造帶位置。

(4)地下水流：調查區域性水文特性，並配合鑽探結果得到等地下水流線(contour)。研判其水流方向及壓力後，可獲得對地下設施或隧道可能造成之具特定方向之壓力或可能之破壞。

### 3.6.3.12 岩體膨脹

索引編號：5.12

考量因素：岩體膨脹(rock dilation)

類別：岩體力學

定義：含黏土或沉泥質較高之岩體，如泥、頁岩及凝灰岩等，於水分充足之環境中岩體礦物吸水膨脹之行爲。

說明：

於綠色凝灰岩區域之新第三紀泥岩與凝灰岩等含有多量黏土礦物且覆蓋厚度大之地盤中開挖隧道時，隧道淨空可能大幅縮小，此地盤稱之爲膨脹性地盤，其岩體屬膨脹性岩體。對於此類岩盤或岩體必須詳細評估其膨脹潛能及膨脹壓力大小。

評估方法：

(1)基本物理試驗：包括液性限度、塑性限度、黏土含量與吸水率試驗等。

(2)消散耐久性：消散耐久性試驗(slake durability)係將岩石磨碎成特定尺寸之細塊後將其置於轉動滾筒中，經過特定之轉動次數後將岩體碎塊進行篩析，利用岩塊粉碎程度判斷其軟弱程度及耐久性(Franklin et al, 1979)。

其它：

對於蛇紋岩、黑色片岩、泥質片岩、斷層泥等難以試驗方式得知其膨脹特性，故須參考以往之案例進行研判(陳堯中，1997b)。

### 3.6.3.13 岩體擠壓

索引編號：5.13

考量因素：岩體擠壓(squeezing of rock)

類別：岩體力學

定義：凡開挖後隧道產生顯著變形、內空縮小，使得支撐承受長期持續增加之壓力地盤，如膨脹性礦物或因擠壓而產生塑性化嚴重者，均可視為岩體擠壓(陳堯中，1997c)。

說明：

於軟弱岩層中進行開挖而失去原有之岩體支撐時，使得現地應力得到釋放。由於岩體強度變低，或相對承受之壓力極大時，在應力作用下逐漸產生界限平衡之狀態進而產生塑性變形。岩體的塑性變形將使得岩塊間互相擠壓，並可能影響隧道斷面型態及隧道支撐。岩體擠壓與現地應力對無圍壓縮強度的比值以及岩石耐久性間有密切關係。

岩體擠壓造成地盤性之膨脹原因約略可包括四項，分別為吸水引致之單純物理現象、化學變化結果、造山運動殘留之能量釋放及岩盤強度比值較低等。

評估方法：

(1)地盤強度與岩覆壓力比：初步評估地盤擠壓之指標，以 Goel 公式最具代表性(陳堯中，1997c)，即

$$H \times B^{0.1} > 270 \times N^{0.33} \quad (3.6-5)$$

其中， $H$ ：隧道覆蓋厚度(m)

$B$ ：隧道開挖寬度(m)

$N$ ：Barton 之 Q 值(但 SRF=1)

表 3.6.3-2 列出岩石力學考量因素之評估指引，說明考量因素可能面對之不利條件，並提出建議參考量值及參考依據，以作為建議性之應用指引。

表 3.6.3-2 岩石力學考量因素評估指引

考量因素	不利於場址	建議參考量值	依據
凝聚力與摩擦角(cohesion and friction angle)	岩體試驗結果數值越低者越不佳，但視沉積岩或結晶岩類，其允受標準有所不同。	1. 無適用標準； 2. 建議以此參數進行隧道穩定分析後再行決定； 3. 需視岩體類別分別考量。	
彈性模數(modulus of elasticity)			
單軸抗壓強度(uniaxial compressive strength)		1. 無適用標準； 2. 需視岩體類別分別考量； 3. 建議以此參數進行隧道穩定分析後再行決定。	
剪力強度(shear strength)	視沉積岩或結晶岩類，其允受標準有所不同。		
張力強度(tensile strength)	一般而言，強度越低者越不佳。		
點荷重指數(point load index)			
塑性變形(plastic deformation)	塑性變形潛能大者。	1. 無適用標準； 2. 進行隧道力學穩定分析後可初步判塑性變形量。	
岩體分類(classification of rocks)	Bieniawski 分類越趨向於 V 級者	需視隧道設計、現地開挖狀況、支撐設計等條件而定。	
現地應力(in-suit stress)	1. 沉積岩類現地應力太小者 2. 結晶岩類現地應力太大者	1. 無適用標準； 2. 需考量產生岩爆之可能性。	
不連續面剪力強度 (shear strength of discontinuity)	岩體不連續面間剪力強度低者	1. 無適用標準； 2. 建議進行鑽探或開挖後現地量測。	
岩爆(rock burst)	現地主、次應力比達到某種程度者	1. 調查鑽探研判現應力及開挖後進行現地監測； 2. 滿足 $\sigma_c/\sigma_1 < 2.5$ 或 $\sigma_1/\sigma_1 < 0.16$ 之條件者為具有強烈岩爆潛能之區域。 其中 $\sigma_c$ : 岩體單壓強度； $\sigma_1$ : 岩體抗拉強度； $\sigma_1$ : 岩體最大主應力。	陳堯中，1997a
岩體膨脹 (rock dilation)	岩層之膨脹潛能大者	可依岩體之基本特性如凝聚力、彈性係數、單軸抗壓強度、黏土含量、阿太堡限度等參數判斷。	
岩體擠壓 (squeezing of rocks)	過於軟弱之地盤	具擠壓性地盤之經驗式成立： $H \times B^{0.11} > 270 \times N^{0.33}$ 其中 $H$ : 隧道覆蓋厚度； $B$ : 隧道開挖寬度； $N$ : Barton 之 $Q$ 值(但 $SRF=1$ )。	陳堯中，1997c

說明：暫定之建議參考量值範圍，現階段不宜作為法規之唯一依據。

### 3.7 人口密度考量因素與評估方法之擬定

#### 3.7.1 一般說明

我國放射性廢棄物分爲低放射性與高放射性兩大類，國內的廢棄物大多屬於低放射性，只有極少數的高放射性廢棄物，即是核電廠發電過後所產生的用過核燃料(spent nuclear fuel)。在放射性廢棄物管理辦法(物管局，1998a)第一五六四三號令修正發布法規全文四十二條中第三條除備供最終處置之用過核燃料或其經過再處理所產生之萃取液或產物以外之放射性廢棄物，定義爲低放射性廢棄物。同時，「低放射性廢棄物陸地最終處置管制規範」(物管局，1996a)第二章第七條亦規定：低人口密度及低開發潛力，處置場址不可設於人口密度大於台灣地區平均人口密度之地區。

在放射性廢棄物處置現況方面，各國的低放射性廢棄物大多採用地表或淺層處置方式，且爲提昇處置作業安全，確保民眾健康，維護環境品質，本節將探討處置場人口密度考量因素，以因應放射性廢棄物最終處置之需。

#### 3.7.2 安全原則

放射性廢棄物管理方針(中華民國七十七年九月十六日行政院台七十七科字第二五七七六號令發布，中華民國八十六年九月二日行政院台八十六科字第三三九五一號令修正發布)(物管局，1997) 有關的章節如下：

##### 第二章 策略

五、放射性廢棄物之管理應考慮國民之安全與環境保護，並應尊重有關國際公約。

八、放射性廢棄物之最終處置，採境內、境外並重原則，積極推動；不論境外是否可行，仍應在境內覓妥處置場址備用。

##### 第三章 措施

九、健全法令規範及管理制度：

(四)健全天然放射性物質廢棄物之安全管理，以避免對環境造成不良影響。

十、保護自然、社會及人文資源：

(一)放射性廢棄物之貯存場或處置場，應儘量設於人口稀少地區。

(二)放射性廢棄物之貯存場或處置場之設置，以不妨礙周圍地區資源永續使用及保育為準。

(三)大量放射性廢棄物之運送，應儘可能採用海運，減少陸上運送。

(四)放射性廢棄物處理、貯存設施之除役，應採拆除方式為原則，使場址之土地資源能再度供開發利用。

中華民國八十五年七月十八日物局二字第八五一七〇〇號函發文實施低放射性廢棄物處理設施管制規範(物管局，1996a)，將低放射性廢棄物分為固體低放射性廢棄物處理設施及液體低放射性廢棄物處理設施，其範圍為(1)固體低放射性廢棄物處理設施包括溼性低放射性廢棄物之收集減容、固化前處理與固化系統等處理設施，以及乾性低放射性廢棄物之除污、減容與固化等處理設施。(2)液體低放射性廢棄物處理設施包括各類液體低放射性廢棄物之收集、處理以及回收等處理設施。

低放射性廢棄物減量策略於中華民國八十七年十二月二十一日物局二字第八七二八九〇號函發文修正(物管局，1998b)，因台灣地區地狹人稠，各廢棄物產生者，應積極執行低放射性廢棄物減量措施，以減少廢棄物產量及抑低其對大眾及環境所造成之影響。



表 3.7.3-1 人口密度考量因素分類說明

索引編號	考量因素
6.01	人口密度(population density)

### 3.7.3.1 人口密度

索引編號：6.01

考量因素：人口密度(population density)

分類：人口密度

定義：人口密度是指一單位面積土地上的平均人口數目。一般使用的單位是每平方公里人數或每平方米人數。它通常用於計算一個國家、地區、城市或全球的人口分布狀況。適當的人口密度能夠保證良好的居住、衛生及經濟條件。將總人口數字除以面積即為人口密度，通常折算為每一平方公里的人數以作比較；亦可稱為人地比率(man-land ratio)。(行政院主計處第三局，2003)

說明：

- (1)人口稠密之地區土地利用價值高，應予避免之。
- (2)應儘量設於低人口密度區，力求減少對民眾之輻射曝露。
- (3)場址應儘量遠離人口聚集區。
- (4)減少人體之曝露劑量。
- (5)場址應儘量設於對下游沖積平原影響較小之河川集水區。
- (6)場址不可設於人口密度大於台灣地區平均人口密度之地區。

評估方法：

- (1)人口密度計算方式，台灣本島之院、省轄市以區為單位，各縣市以市、鄉、鎮為計算單位；離島中，含一個以上之市、鄉、鎮者，以市、鄉、鎮為計算單位，不足一市、鄉、鎮者，用逐島計算方式，表示其人口密

度

- (2)計算歷史年的年增加率，以瞭解人口增加率對處置場區域之衝擊。
- (3)建議引用美國低放射性廢棄物淺地處置環境報告(R.G.4.18；USNRC，1983)中要求人口分布、土地利用，均以場址十公里以上之區域給予最有利評分，並等距離間隔之。
- (4)若欲於同區域進行篩選，建議以村、里為統計單位。
- (5)由於主要河川下游普遍係人口稠密集中的地區，多屬農田水利灌溉區域，同時這些主要河川流域為本省地下水源之重要補注區，場址宜儘量遠離。可依據河川集水區的流域分區相對比較；分級考量依據行政院農業委員會所出版之「台灣地區河川流域圖」(行政院農業委員會，1989)主要、次要、普通河川與沿海等集水區劃分等配合比較人口密度進行篩選。
- (6)依低放射性廢棄物陸地最終處置管制規範(中華民國八十五年四月十二日物局一字第第八五〇八八八號函；放射性廢棄物管理局，1996a)所載：
  - 十六、處置場之設計，對公眾中任何個人之年有效等效劑量，應低於 0.25 毫西弗(25 毫侖目)。
  - 十七、處置場之設計，應評估封閉後個人及集體等效劑量，在任何個人年有效等效劑量低於 0.01 毫西弗(1 毫侖目)及年集體有效等效劑量低於 1 人西弗(100 人侖目)時，始得免於監管。

因此應評估人口密度與個人及集體等效劑量的關係，並預估未來可能的衝擊。表 3.7.3-2 列出人口密度考量因素之評估指引，說明考量因素可能面對之不利條件，並提出建議參考量值及參考依據，以作為建議性之應用指引。

表 3.7.3-2 人口密度考量因素評估指引

考量因素	不利於場址	建議參考量值	依據
人口密度 (population density)	考量人口密度因素導致個人及集體等效劑量超過法規值之地區	1. 無適用標準； 2. 應評估人口密度與個人及集體等效劑量的關係。	



#### 四、結論與建議

爲因應未來場址特性調查與審查工作之需要，確保經由選址程序產生之候選場址能符合規定，依據放射性物料管理局考量國內現狀之需求，本計畫完成研擬低放射性廢棄物隧道最終處置場址之處置場地質穩定度、處置場岩性與地質構造、氣象與地表水及地下水、地球化學、岩石力學、人口密度等考量因素與評估方法，提供審查機關或申請機構未來進行場址調查之技術依循。經由放射性物料管理法及施行細則(放射性物料管理局，2003d，2003e)之公佈，我國原子能科技應用於醫、農、工、學術研究及核能發電等所產生之低放射性廢棄物將有法源依據，藉以爲進行最終處置與妥善管理。低放射性廢棄物因其放射性較低，半衰期較短，世界各國經過數 10 年的營運經驗，已累積豐富工程技術經驗。本計畫研擬之低放射性廢棄物隧道最終處置場址之處置場地質穩定度、處置場岩性與地質構造、氣象與地表水及地下水、地球化學、岩石力學、人口密度等爲起始之技術議題，未來最終處置場址之考量因素與評估方法仍需視實際場址之特性而可進行調整。建議未來仍可延續本計畫擬定或擴增相關技術議題，釐清場址條件之合適性與不利特性，並分析建議性之量值或範圍，以提供管制單位或申請機構之依循，或作爲指引。



## 參考文獻

- 中央氣象局網站，2003，<http://www.cwb.gov.tw>
- 中國工程師學會，1972，中國工程師手冊，第 3-23 頁。
- 中鼎工程股份有限公司，1994，低放射性廢料最終處置場址特性參數評估研究(附件：場址特性調查計畫書導則草案)，物管局委託計畫。
- 王鑫，1991，地形學，聯經出版事業公司。
- 日本原燃株式會社(JNFL)網站，2003，<http://www.jnfl.co.jp>。
- 台灣電力公司，1993，1994，低放射性廢料最終處置計畫「候選場址評選委員會」會議簡報資料。
- 行政院，1997，放射性廢料管理方針，中華民國八十六年九月二日行政院台八十六科字第三三九五號令修正發布。
- 行政院主計處第三局，2003，台灣地區經社觀察表一年資料表，<http://www.dgbas.gov.tw/dgbas03/bs8/look/looky.htm>。
- 行政院農業委員會，1989，台灣地區河川流域圖。
- 李生林、劉蕙蘭，1990，岩石工程地質研究方法手冊，地質出版社，北京。
- 李境和，1999，放射性廢料最終處置輻射安全評估，國立清華大學工程與系統科學系，ESS5700 放射廢料工程之教材。
- 李境和，2000，放射廢料處置，國立清華大學工程與系統科學系，ESS4700 放射廢料工程之教材。
- 宋聖榮、楊燦堯，2001，來自地底的活力-台灣的活火山/龜山島，中華民國自然生態保育協會，大自然雜誌社，126-139 頁。
- 易任、王如意，1983，應用水文學，茂昌圖書有限公司。
- 林啓文、張徽正、盧詩丁、石同生、黃文正，2000，臺灣活動斷層概論(第二版)一五十萬分之一臺灣活動斷層分布圖說明書，經濟部中央地質調查所特刊第 13 號，共 122 頁。

- 物管局，1992，低放射性廢料陸地最終處置管制規範。
- 物管局，1996a，低放射性廢料陸地最終處置管制規範，中華民國八十五年四月十二日物局一字第八五八八八號函發文實施。
- 物管局，1996b，低放射性廢料陸地最終處置場安全分析報告導則，中華民國八十五年十一月十三日物局一字第八五二六九號函發文實施。
- 物管局，1996c，放射性廢料詞彙。
- 物管局，1997，放射性廢料管理方針，中華民國八十六年九月十二日修正發布。
- 物管局，1998a，放射性廢料管理辦法，中華民國八十七年八月十二日修正發布。
- 物管局，1998b，低放射性廢料減量策略，中華民國八十七年修正發布。
- 物管局，2002a，低放射性廢料最終處置設施場址選定條例草案，中華民國九十一年十二月版。
- 物管局，2002b，放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則草案，中華民國九十一年十二月版。
- 物管局，2003a，低放射性廢棄物最終處置的安全管理。
- 物管局，2003b，低放射性廢棄物最終處置設施場址選定條例草案。
- 物管局網站，2003c，<http://fcma.aec.gov.tw>。
- 物管局，2003d，放射性物料管理法。
- 物管局，2003e，放射性物料管理法施行細則。
- 物管局，2003f，低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則。
- 洪如江，1991a，初等工程地質學大綱，財團法人地工技術研究發展基金會，台北，第 229-240 頁。
- 洪如江，1991b，初等工程地質學大綱，財團法人地工技術研究發展基金會，台北，第 234-235 頁。
- 洪如江，1991c，初等工程地質學大綱，地工技術研究發展基金會。
- 洪如江，1998，岩石工程力學性質規模效應研究綜合研究報告，財團法人中興工程科技研究發展基金會。



- 施國欽，1999，岩石力學，文笙書局，台北。
- 徐義人，1996，應用水文學，二版，大中國圖書公司。
- 徐鐵良，1954，台灣東部海岸山脈地形與近期上升運動，台灣省地質調查所彙刊，第 7 號，9-18 頁。
- 徐鐵良，1980，從地形特徵申論其與台灣新構造關係，中國地質學會會刊，第 23 期，3-5 頁。
- 莊文壽、洪錦雄、董家寶，1999，地下水中膠體物質對核種遷移的影響，台電核能月刊，第 196 期，78~90，88 年 4 月。
- 許麗雯，1995，洪水與海嘯，錦繡文化企業，文庫出版。
- 陳正宏，1990，台灣之火成岩，經濟部中央地質調查所，137 頁。
- 曹以松，1995，地下水，第三版，中國土木水利工程學會，第 4-23 頁。
- 紀立民，1997，放射性廢料最終處置場場址地質特性調查之研究，核能研究所對內報告，INER-T2323，第 3-3 頁。
- 陳英鑒、吳宗霖、邱顯殷，1994，低放射性廢料淺地處置安全評估程式研究，放射性待處理物料管理處研究計劃期末報告。
- 陳堯中，1997a，隧道工程設計準則，中國土木水利工程學會，第 104-105 頁。
- 陳堯中，1997b，隧道工程設計準則，中國土木水利工程學會，第 16-18 頁。
- 陳堯中，1997c，隧道工程設計準則，中國土木水利工程學會，第 99-101 頁。
- 陳慧芬，1984，從三角點檢測成果見到的台灣的地盤升降，經濟部中央地質調查所特刊，第 3 號，217-140 頁。
- 楊昭男，1995，臺灣的地質構造現象，經濟部中央地質調查所出版。
- 泰興工程公司，1993，我國低放射性廢料最終處置方式評選報告。
- 馮鍾豫，1972，水資源規劃，中國工程師手冊水利類上冊，中國土木水利工程學會編。
- 潘國樑，1988，坡地開發環境影響評估，環境影響評估講習班教材，中華民國工程環境學會。

教育部高中地球科學中心網站，2003，<http://content.edu.tw>

經濟部水資會，1995，台灣地區之水資源民國八十四年版，經濟部水資統一規劃委員會編。

Allard B., Karlsson F., and Neretnieks, I., 1991, Concentrations of particulate matter and humin acid in deep groundwaters and estimated effects on the adsorption and transport of radionuclides, SKB TR-91-50.

ANDRA website, 2003, <http://www.andra.fr>

Andersson J., Almen, K. E., Ericsson, L.O., Fredriksson, A., Karlsson, F., Stanfors, R., and Strom, A., 1998, Parameters of Importance to Determine During Geoscientific Site Investigation, SKB TR-98-02.

Andersson, J., Strom, A., Svemar, C., Almen, K.E. and Ericsson, L.O. 2000, What Requirements USDOEs the KBS-3 Repository Make on the Host Rock, SKB TR-00-12.

Bath, A.H., 1994, Hydrochemical Characterization of Argillaceous Rocks, in Hydraulic and Hydrochemical Characterization of Argillaceous Rocks, OECD/NEA.

Barton, N.R., 1971, A Relationship Between Joint Roughness and Joint Shear Strength, Proc. Intl. Sym. Rock Fracture, Nancy, France, pp.1~8.

Barton, N., 1987, Rock Mass Classification and Tunnel Reinforcement Selection using the Q-system: ASTM Special Technical Publication = American Society for Testing and Materials Special Technical Publication, Vol. 984. p. 59-84.

Bates, R.L. and Jackson, J.A., 1987, Glossary of Geology, 3<sup>rd</sup> ed., Amer. Geol. Inst., Alexandria, Virginia.

BFS(Bundesamt für Strahlenschutz) website, 2003, <http://www.bfs.de>

Bieniawski, Z.T., Engineering Classification of Jointed Rock Masses, 1973, Transactions, South African Institution of Civil Engineers, Vol.15, No.12, pp.

335-344.

- Bieniawski, Z.T., 1974, Geomechanics Classification of Rock Masses and its Application in Tunneling, Proc. 3rd Int. Congress Rock Mechanics, Vol. 11A, Int. Soc. Rock Mech., Denver, pp.27-32.
- Bonilla, 1977, Summary of Quaternary Faulting and Elevation Changes in Taiwan, Mem. Geol. Soc., China, No. 2, pp.43-55.
- Brady, B. H., and Brown, E. T., 1985a, Rock Mechanics for Underground Mining, Chapman & Hall, London, pp.113-115.
- Brady, B. H., and Brown, E. T., 1985b, Rock Mechanics for Underground Mining, Chapman & Hall, London, pp.141-161.
- Brady, B. H., and Brown, E. T., 1985c, Rock Mechanics for Underground Mining, Chapman & Hall, London, pp.118-137.
- Broch, E. and Franklin, J.A., 1972, The Point Load Strength Test, Int. J. Rock Mech. and Mining Sci., Vol. 9, No. 6, pp.669~697.
- Deere, D. U. and Deere, D. W., 1987, The Rock Quality Designation (RQD) index in practice: ASTM Special Technical Publication, American Society for Testing and Materials Special Technical Publication, Vol. 984. pp. 91-101.
- Emsley, S., Olsson, O., Stenberg, L., Alheid, H. J., and Falls, S., 1997, ZEDEX-A Study of Damage and Disturbance from Tunnel Excavation by Blasting and Tunnel Boring. SKB Technical Report, TR-97-30.
- Fetter, C. W., 1988, Applied Hydrogeology, 2nd, Merrill Publishing Company.
- Franklin, J. A., Vogler, U. W., Szlavin, J., Edmind, J. M., and Bieniawski, Z. T., 1979, Suggested Methods for Determining Water Content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties and Swelling and Slake Durability Index Properties for ISRM Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests, Int. J. Rock Mech., Min. Sci., Vol. 16, No. 2, pp.114-156.

- Freeze, R. A., and Cherry, J. A., 1979, Groundwater, Prentic-Hall, Inc.
- Gilg, B., 1966, Verformung and Bruch Von Gesteinsproben unter Dreiaxialer Belastung, Proc.1<sup>st</sup> Cong. Int. Soc. Rock Mech., Lisbon, Vol. 1, pp.601~606.
- Goodman, R. E., 1976, Methods in Geological Engineering in Discontinuities Rock, West, St. Paul.
- Hoek, E. and Brown, E.T., 1980, 1980, Underground Excavations in Rock, Revised Second Edition, The Institution of Mining and Metallurgy London.
- Hoek, E. and Bray, J.W., 1981, Rock Slope Engineering, Revised Third Edition, The Institution of Mining and Metallurgy London.
- Hsu, T.L., 1962, A Study on The Coastal Geomorphology of Taiwan, Proce. Geol. Soc. China, No.5, pp.29-45.
- IAEA, 1982a, Site Investigations for Repositories for Solid Radioactive Wastes in Shallow Ground, Technical Reports Series No. 216.
- IAEA, 1982b, Site investigations for repositories for solid radioactive wastes in deep continental geological formation, IAEA TR-215.
- IAEA, 1983, Criteria for underground disposal of solid radioactive wastes , IAEA Safety Series No. 60.
- IAEA, 1984, Procedures and Data; Site Investigations, Design, Construction, Operation, Shutdown and Surveillance of Repositories for Low- and Intermediate-Level Radioactive Wastes in Rock Cavities, IAEA Safety Series No.62.
- IAEA, 1985, Techniques for Site Investigations for Underground Disposal of Radioactive Waste, Technical Report Series No. 256.
- IAEA, 1994a, Near Surface Disposal of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series, No. WS-R-1, International Atomic Energy Agency, Vienna, pp.13-14.
- IAEA, 1994b, Siting of Near Surface Disposal Facilities, IAEA Safety Series, No. 111-G-3.1.

- IAEA, 1994c, Siting of Geological Disposal Facilities, IAEA Safety Series, No. 111-G-4.1.
- IAEA, 1999a, Safety assessment for near surface disposal of radioactive waste, IAEA Safety Standards Series-Safety Guide, No. WS-G-1.1.
- IAEA, 1999b, Near Surface Disposal of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series-Requirements, No. WS-R-1.
- IAEA, 1999c, Siting of Near Surface Disposal Facilities, IAEA Safety Series, No. 111 G3.1, International Atomic Energy Agency, Vienna, pp.13-14.
- ISRM, 1981, Rock Characterization Testing and Monitoring, Suggested Methods, Pergamon, Oxford.
- ISRM, 1985, Suggested Method for Determining Point-Load Strength, Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.22, No.2, pp.53~60.
- Jaeger, J.C. and Cook, N.G.W., 1976, Fundamental of Rock Mechanics, Second Edition, Chapman and Hall, London.
- JNC, 2000, H12: Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan, JNC TN1410 2000.
- Konishi, K., Omura, A., and Kimura, T., 1968, U-234 and Th-130 Dating of Some Late Quaternary Coralline Limestones From South Taiwan, Geology and Paleontology of Southeast Asia, Vol.5, pp.221-224.
- Laaksoharju, M., Degueldre, C. and Skarmenm C., 1995, Studies of Colloids and Their Importance for Repository Performance Assessment, SKB TR-95-24.
- Li, Y.H., 1976, Denudation of Taiwan Island Since the Pliocene Epoch, Geology, Vol.4, pp.105-107.
- Lutton, R.J., Butler, D.K., Meade, B.B., Patrick, D.M., Strong, A.B., and Taylor, Jr. H.M., 1982, Tests for Evaluating Sites for Disposal of Low-level Radioactive Waste, NUREG/CR-3038.

- Merceron, T. and Mossmann, J.R., 1994, The ARCHIMEDE-ARGILE Project : Acquisition and Regulation of the Water Chemistry in a Clay Formation, in Hydraulic and Hydrochemical Characterization of Argillaceous Rocks, OECD/NEA.
- Mogi, K., 1966, Some Precise Measurements of Fracture Strength of Rocks Under Uniform Compressive Stress, *Rock Mech. Eng. Geol.*, Vol.4, pp.41~45.
- NAGRA website, 2003, <http://www.nagra.ch>
- Patton, F.D., 1966, Multiple Modes of Shear Failure in Rock, *Proc. 1st. Intl. Cong. Rock Mechanics*, London, Vol.1, pp.509~513.
- Pedersen, K., 2000, Microbial Processes in Radioactive Waste Disposal, SKB TR-00-04.
- Peng, T.H., Li, Y.H., and Wu, F.T., 1977, Tectonic Uplift Rates of Taiwan Island Since the Early Holocene, *Mem. Geol. Soc. China*, No.2, pp.57-69.
- Raghunath, H. M., 1985, *Hydrology*, Wiley Eastern Limited.
- Rogers, V.C., Sutherland, A.A., and Adam, J.A., 1982, *A Handbook for Low-level Radioactive Waste Disposal Facilities*, EPRI-NP-2488LD.
- SKB, 2000a, Geoscientific Programme for Investigation and Evaluation of Sites for The Deep Repository, SKB TR-00-20.
- SKB, 2000b, Integrated Account of Method, Site Selection and Programme Prior to Site Investigation Phase, SKB TR-01-03.
- SKB, 2002, Preliminary Safety Evaluation, Based on Initial Site Investigation Data, SKB TR-02-28.
- SKB website, 2003, <http://www.skb.se>
- Smellie, J., Laaksoharju, M. and Tullborg, E.L., 2002, Hydrogeochemical Site Descriptive Model – A Strategy for The Model Development During Site Investigations, SKB R-02-49.

- Ström, A., Almén, K.K., Andersson, J., Ericsson, L.O. and Svemar, C., 1999, Geoscientific Evaluation Factors and Criteria for Siting and Site Evaluation, SKB, R-99-07.
- Taira, K., 1975, Holocene Crustal Movements in Taiwan As Indicated by Radiocarbon Dating of Marine Fossils and Driftwood, *Tectonophysics*, Vol.28, pp.T1-T5.
- TVO website, 2003, <http://www.tvo.fi>
- USDOE, 1985, Site Characterization Field Manual for Near Surface Geologic Disposal of LLW, USDOE/ID/12514-T1.
- USDOE, 1992, General Guidelines for the Recommendation of Sites for Nuclear Waste Repositories, 10 CFR Part 960.
- USDOE, 1995, Licensing Requirements for Land Disposal of Radioactive Waste, 10 CFR Part 61, Technical Requirements for Land Disposal Facilities.
- USDOE, 1996, 10 CFR Part 100 Appendix A.-Seismic and Geologic Siting Criteria for Nuclear Power Plant, U.S. Department of Energy.
- USDOE, 2001, 10 CFR Part 61-Licensing Requirements For Land Disposal Of Radioactive Waste, U.S. Department of Energy.
- USGS, 1989, Basic Ground-Water Hydrology, United States Geological Survey Water-Supply Paper 2220, Sixth printing, P.12.
- USNRC, 1982a, Parameters for Characterizing Sites for Disposal of Low-Level Radioactive Waste, NUREG/CR-2700.
- USNRC, 1982b, Tests for Evaluating Sites for Disposal of Low-Level Radioactive Waste, NUREG/CR-3038.
- USNRC, 1983, Standard Format and Content of Environmental Reports for Near-Surface Disposal of Radioactive Waste, R.G.4.18.
- USNRC, 1987a, Standard Format and Content of a License Application for a Low-Level Radioactive Waste Disposal Facility-Safety Analysis Report,

NUREG-1199.

USNRC, 1987b, Standard Review Plan for the Review of a License Application for a Low-Level Radioactive Waste Disposal Facility-Safety Analysis Report, NUREG-1200.

Wickham, S.M., Bennett, D.G. and Higgs, J.J.M., 2000, Evaluation of Colloid Transport Issues and Recommendations for SKI Performance Assessments, SKI Report 00:33.



## 附錄

### 低放射性廢棄物隧道最終處置考量因素名稱、索引編號與頁碼對照表

<u>索引編號</u>	<u>考量因素名稱</u>	<u>頁碼</u>
1.01	地震活動(seismic activity).....	3-08
1.02	斷層活動(faulting).....	3-10
1.03	火山活用(volcanic activity).....	3-12
1.04	地殼升降作用(crust uplift/subsidence).....	3-13
1.05	地表地質作用(surface geologic process).....	3-14
1.06	邊坡穩定性(slope stability).....	3-16
2.01	地體構造(geotectonics).....	3-25
2.02	地形(geomorphology).....	3-26
2.03	地層(stratigraphy).....	3-28
2.04	構造(structure).....	3-29
2.05	地史(geologic history).....	3-33
3.01	風(wind).....	3-38
3.02	雨量(rainfall).....	3-39
3.03	颱風 (typhoon).....	3-41
3.04	潮汐與海嘯(tide and tsunami).....	3-42
3.05	流域(basin).....	3-43
3.06	逕流與洪水(runoff and flood).....	3-44
3.07	地表水資源(surface water resource).....	3-46
3.08	水文地質(hydrogeology).....	3-47
3.09	地下水流(groundwater flow).....	3-49
3.10	傳輸特性(transport).....	3-50
4.01	吸附(sorption).....	3-57
4.02	分配係數(partition/distribution coefficient).....	3-58
4.03	遲滯因子(retardation factor).....	3-60

<u>索引編號</u>	<u>考量因素名稱</u>	<u>頁碼</u>
4.04	離子交換(ion exchange) .....	3-61
4.05	黏土/岩石礦物學(clay/rock mineralogy).....	3-62
4.06	有機質含量(organic materials content) .....	3-64
4.07	土壤化學(soil chemistry).....	3-65
4.08	氧化還原電位(oxidation-reduction potentials) .....	3-66
4.09	酸鹼值(pH values) .....	3-67
4.10	有機成分(organic constituents) .....	3-69
4.11	無機成分(inorganic constituents).....	3-70
4.12	水質參數(water quality parameters).....	3-71
4.13	輻射參數(radiological parameters) .....	3-73
4.14	膠體、腐植質、溶解氣體(colloids , humus , dissolving gas) .....	3-74
5.01	凝聚力與摩擦角(cohesion and friction angle).....	3-80
5.02	彈性模數(modulus of elasticity) .....	3-81
5.03	單軸抗壓強度(uniaxial compressive strength) .....	3-82
5.04	剪力強度(shearing strength).....	3-83
5.05	張力強度(tensile strength) .....	3-84
5.06	點荷重指數(point load index).....	3-85
5.07	塑性變形(plastic deformation) .....	3-86
5.08	岩體分類(classification of rock ) .....	3-87
5.09	現地應力(in-situ stress) .....	3-88
5.10	不連續面剪力強度(shear strength of discontinuity).....	3-89
5.11	岩爆(rock burst) .....	3-91
5.12	岩體膨脹(rock dilation) .....	3-92
5.13	岩體擠壓(squeezing of rock) .....	3-93
6.01	人口密度(population density) .....	3-97