



行政院原子能委員會  
放射性物料管理局

行政院原子能委員會放射性物料管理局  
委託研究計畫研究報告

國際高放射性廢棄物最終處置場址  
技術準則之研究

計畫編號：102FCMA014

受委託機關(構)：環興科技股份有限公司

計畫主持人：林伯聰

報告日期：中華民國 102 年 12 月





## 目錄

第一章	前言.....	1
1.1	計畫目的.....	1
1.2	服務項目及工作範圍.....	2
1.3	對高放射性廢棄物處置之了解.....	3
第二章	國際高放處置場址技術相關準則.....	5
2.1	瑞典.....	5
2.1.1	瑞典高放射性廢棄物最終處置場安全法規簡介.....	5
2.1.2	選址流程.....	8
2.1.3	確保安全之構想.....	15
2.1.4	場址篩選條件.....	19
2.1.5	場址特性.....	33
2.2	芬蘭.....	38
2.2.1	芬蘭高放射性廢棄物最終處置場安全法規簡介.....	38
2.2.2	選址過程.....	39
2.2.3	場址鑑別調查之場址篩選條件.....	46
2.2.4	初步場址調查階段.....	49
2.2.5	詳細場址調查與最終處置場址選址.....	58
2.2.6	芬蘭高放射性廢棄最終處置場簡介.....	62
2.3	日本.....	65
2.3.1	日本高放射性廢棄物最終處置場安全法規簡介.....	65
2.3.2	選址流程.....	66
2.3.3	確保安全之構想.....	71
2.3.4	場址篩選條件.....	76
2.4	美國.....	85
2.4.1	美國高放射性廢棄物最終處置場安全法規簡介.....	85
2.4.2	選址流程.....	86
2.4.3	確保安全之構想.....	92
2.4.4	場址篩選條件.....	95
2.5	瑞士.....	113
2.5.1	瑞士高放射性廢棄物最終處置場安全法規簡介.....	113
2.5.2	選址流程.....	116
2.5.3	處置概念.....	138
2.5.4	場址篩選條件.....	140
第三章	國外高放處置場址特性條件考量因子分析.....	146
3.1	各國高放射性廢棄物處置場選址過程分析.....	148

3.2 各國「場址篩選階段」與「場址調查階段」考量因子分析.....	155
第四章 我國高放處置場址特性條件考量因子分析.....	172
4.1 現行相關安全管制法規.....	172
4.2 技術準則研擬之探討.....	177
第五章 綜合分析(場址技術準則草案).....	181
第六章 結論.....	189
「國際高放射性廢棄物最終處置場址技術準則之研究」研究計畫期末報告審查意見與意見回覆.....	191

## 表目錄

表 2.1.2-1 瑞典候選場址的基本特性 .....	13
表 2.1.4.2-1 評估技術風險的方法 .....	27
表 2.2.2-1 芬蘭高放射性廢棄物最終處置場篩選階段表 .....	39
表 2.2.4-1 芬蘭各場址之岩石種類、露頭裂隙密度、岩心裂隙密度與百分比 .....	50
表 2.2.4-2 芬蘭各場址地質鑽探調查之破裂岩體特性表 .....	52
表 2.2.4-3 芬蘭各場址於 500 公尺以下之水力傳導係數調查與常態分布統計表 .....	52
表 2.2.4-4 芬蘭各場址於 200 公尺~500 公尺間之水力傳導係數調查統計表 .....	52
表 2.2.4-5 芬蘭各場址於 200 公尺以上之水力傳導係數調查統計表 .....	52
表 2.2.4-6 芬蘭各場址於 500 公尺深度之母岩與破裂帶地下水通量分析表 .....	53
表 2.2.4-7 芬蘭 5 處場址地下水質調查之綜合統計表 .....	53
表 2.2.6-1 芬蘭高放射性廢棄物最終處置場規劃基本資料 .....	63
表 2.3.4.1-1 日本最終處置法於各階段篩選之要求 .....	76
表 2.3.4.2-1 日本文獻調查的項目、內容及範圍(1/2) .....	82
表 2.3.4.2-1 日本文獻調查的項目、內容及範圍(2/2) .....	83
表 2.5.2-1 瑞士高放最終處置之場址安全與技術可行性評估準則 .....	119
表 3-1 IAEA 與處置場選址相關指引一覽表 .....	146
表 3.1-1 各國選址過程階段劃分與概述(1/3) .....	150
表 3.1-1 各國選址過程階段劃分與概述(2/3) .....	151
表 3.1-1 各國選址過程階段劃分與概述(3/3) .....	152
表 3.2-1 各國「場址篩選階段」之「長期安全」因子與考量準則(1/4) .....	156
表 3.2-1 各國「場址篩選階段」之「長期安全」因子與考量準則(2/4) .....	157
表 3.2-1 各國「場址篩選階段」之「長期安全」因子與考量準則(3/4) .....	158
表 3.2-1 各國「場址篩選階段」之「長期安全」因子與考量準則(4/4) .....	159
表 3.2-2 各國「場址篩選階段」之「營運安全與工程技術可行性」因子與考量準則 .....	160
表 3.2-3 各國「場址篩選階段」之「其他輔助考量」因子與考量準則(1/2) .....	161
表 3.2-3 各國「場址篩選階段」之「其他輔助考量」因子與考量準則(2/2) .....	162
表 3.2-4 「場址篩選階段」主要考量因子一覽表 .....	165
表 3.2-5 各國「場址調查階段」之評估因子與考量準則(1/5) .....	167
表 3.2-5 各國「場址調查階段」之評估因子與考量準則(2/5) .....	168
表 3.2-5 各國「場址調查階段」之評估因子與考量準則(3/5) .....	169
表 3.2-5 各國「場址調查階段」之評估因子與考量準則(4/5) .....	170
表 3.2-5 各國「場址調查階段」之評估因子與考量準則(5/5) .....	171
表 4.1-1 高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則與場址技術準則關聯 .....	

表(1/3).....	174
表 4.1-1 高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則與場址技術準則關聯 表(2/3).....	175
表 4.1-1 高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則與場址技術準則關聯 表(3/3).....	176
表 4.2-1 「場址篩選階段」之技術準則研擬(1/2) .....	178
表 4.2-1 「場址篩選階段」之技術準則研擬(2/2) .....	179
表 4.2-2 「場址調查階段」之考量因子建議表 .....	180

## 圖目錄

圖 1.3-1	最終處置概念示意圖 .....	4
圖 2.1.2-1	瑞典場址選擇流程示意圖 .....	8
圖 2.1.2-2	瑞典曾經討論或已實際完成可行性研究的縣市 .....	9
圖 2.1.2-3	瑞典全國的地質適宜性篩選結果 .....	11
圖 2.1.2-4	瑞典於可行性研究階段之場址篩選條件 .....	12
圖 2.1.2-5	瑞典於場址調查階段的候選場址 .....	13
圖 2.1.2-6	瑞典場址調查階段的場址篩選條件 .....	14
圖 2.1.3-1	瑞典 KBS-3 處置概念 .....	15
圖 2.1.3-2	瑞典用過核燃料與外層的包封容器 .....	16
圖 2.1.3-3	瑞典的容器封裝置放方式概念示意圖 .....	17
圖 2.3-3	瑞典的坑道回填概念示意圖 .....	18
圖 2.1.5-1	瑞典 Forsmark 最終處置場的位置及鄰近設施分布 .....	33
圖 2.1.5-2	瑞典最終處置場規劃布置概念示意圖 .....	34
圖 2.1.5-3	瑞典 Forsmark 最終處置場的場址調查範圍 .....	35
圖 2.1.5-4	瑞典 Forsmark 最終處置場的鑽孔位置與地質分布 .....	36
圖 2.1.5-5	瑞典最終處置場的處置坑道布置與變形帶之相對位置 .....	37
圖 2.2.2-1	芬蘭之調查區域篩選概念示意圖 .....	42
圖 2.2.2-2	芬蘭於場址鑑別調查階段之整體流程示意圖 .....	43
圖 2.2.4-1	芬蘭地表水與地下水樣品的主要離子比例 .....	54
圖 2.2.6-1	芬蘭高放射性廢棄物最終處置場預定位置示意圖 .....	63
圖 2.2.6-2	芬蘭高放射性廢棄物最終處置設施示意圖 .....	64
圖 2.2.6-3	芬蘭處置容器罐 .....	64
圖 2.3.2-1	日本高放射性廢棄物最終處置場場址篩選流程 .....	67
圖 2.3.2-2	日本活動斷層及第四紀火山分布圖 .....	67
圖 2.3.2-3	日本於文獻調查階段之流程 .....	70
圖 2.3.3-1	日本處置場的概念配置(內陸).....	72
圖 2.3.3-2	日本處置場的概念配置(沿岸).....	73
圖 2.3.3-3	日本深層地質處置的多重障壁系統概念圖 .....	75
圖 2.4.2-1	美國高放射性廢棄物最終處置場選址流程 .....	88
圖 2.4.2-2	美國 9 個候選場址的位置分布圖 .....	89
圖 2.4.3-1	美國深層地質處置之配置概念示意圖 .....	93
圖 2.4.3-2	美國最終處置場之處置設施示意圖 .....	94
圖 2.5.2-1	瑞士高放射性廢棄物最終處置場之選址流程 .....	118
圖 2.5.2-2	瑞士高放最終處置場址選址於第一階段之篩選結果 .....	119
圖 2.5.2-3	瑞士高放最終處置場址選址之第一階段流程圖 .....	121



圖 2.5.2-4	瑞士 Zürich Nordost 地區之處置場地下設施與地面設施範圍.....	121
圖 2.5.2-5	瑞士 Zürich Nordost 地區之區域地質剖面圖.....	122
圖 2.5.2-6	瑞士 Zürich Nordost 地區之地質詳細剖面圖.....	122
圖 2.5.2-7	瑞士 Zürich Nordost 地區內之候選區域一(Zno-1)的地形與現況空照圖 .....	123
圖 2.5.2-8	瑞士 Zürich Nordost 地區內之候選區域二(Zno-2)的地形與現況空照圖 .....	124
圖 2.5.2-9	瑞士 Zürich Nordost 地區內之候選區域三(Zno-3)的地形與現況空照圖 .....	124
圖 2.5.2-10	瑞士 Zürich Nordost 地區內之候選區域四(Zno-4)的地形與現況空照 圖.....	125
圖 2.5.2-11	瑞士 Lägern 北部地區之地質剖面圖 .....	126
圖 2.5.2-12	瑞士 Lägern 北部地區之地質詳細剖面圖 .....	126
圖 2.5.2-13	瑞士 Lägern 北部地區之處置場地下設施與地面設施範圍 .....	127
圖 2.5.2-14	瑞士 Lägern 北部地區內之候選區域一(NL-1)的地形與現況空照圖 .....	128
圖 2.5.2-15	瑞士 Lägern 北部地區內之候選區域二(NL-2)的地形與現況空照圖 .....	128
圖 2.5.2-16	瑞士 Lägern 北部地區內之候選區域三(NL-3)的地形與現況空照圖 .....	129
圖 2.5.2-17	瑞士 Lägern 北部地區內之候選區域四(NL-4)的地形與現況空照圖 .....	129
圖 2.5.2-18	瑞士 Jura Ost 地區之處置場地下設施與地面設施範圍 .....	130
圖 2.5.2-19	瑞士 Jura Ost 地區之地質剖面圖 .....	131
圖 2.5.2-20	瑞士 Jura Ost 地區之地質詳細剖面圖 .....	132
圖 2.5.2-21	瑞士 Jura Ost 地區內之候選區域一(JO-1)的地形與現況空照圖....	132
圖 2.5.2-22	瑞士 Jura Ost 地區內之候選區域二(JO-2)的地形與現況空照圖....	133
圖 2.5.2-23	瑞士 Jura Ost 地區內之候選區域三(JO-3)的地形與現況空照圖....	133
圖 2.5.2-24	瑞士 Jura Ost 地區內之候選區域四(JO-4)的地形與現況空照圖....	134
圖 2.5.2-25	瑞士高放最終處置場址選址之第二階段流程圖 .....	136
圖 2.5.2-26	瑞士高放最終處置場址選址之第三階段流程圖 .....	137
圖 2.5.3-1	瑞士的高放射性廢棄物種類 .....	139
圖 2.5.3-2	瑞士的深層地質處置概念示意圖 .....	140
圖 3.2-1	火山與火成活動概念圖 .....	163
圖 3.2-2	侵蝕與隆起活動概念圖 .....	163
圖 3.2-3	活動斷層與破碎帶概念圖 .....	164

## 第一章 前言

### 1.1 計畫目的

依國際上推動高放射性廢棄物最終處置作業階段區分，處於場址初步篩選階段之國家包含日本、加拿大與中國等國，此階段篩選工作大致以既有文獻資料調查與自願場址募集。進行場址特性調查階段之國家則有法國與德國等國，此階段主要透過場址地質環境與母岩特性等調查分析工作來確認場址的合適性。已進入安全審查申請階段之國家則包含：瑞典、芬蘭與美國等國。在確保最終處置對於人類與環境長期安全的共同目標下，隨著前述各國高放射性廢棄物最終處置場之不同階段推動過程，對於場址篩選所需考量項目、評估與選址方法已有相當之經驗累積，可供國內研訂高放最終處置場址技術準則之參考。

我國依「放射性物料管理法」已頒佈「高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」，規範我國高放射性廢棄物最終處置將採深層地質處置方式並利用多重障壁系統做為確保安全之規劃概念，另依台電公司所提高放處置計畫時程，預定於 2018 年後進入候選場址評選與核定階段。爰此，本計畫目標在於以我國環境特性及高放處置安全概念為基礎，藉由研析國際有關高放處置場址技術準則及國外相關推動高放處置場址調查經驗，進而研擬適於我國之高放射性廢棄物最終處置場址技術準則(草案)，強化高放處置安全管制。

## 1.2 服務項目及工作範圍

本計畫應執行之工作項目如下所列：

1. 蒐集國內外高放射性廢棄物最終處置場址技術準則之相關資料。
2. 研析各國高放射性廢棄物最終處置場址特性及確保安全之構想，及其對應之場址技術準則。
3. 依各國推動背景研析其地質與母岩篩選條件設定，主要涵蓋地質、地震、火山、水文地質、隆起與侵蝕等考量項目，分析其篩選項目之選定或排除之考量，供後續依我國環境特性研擬相關篩選條件之參酌。
4. 依各國推動背景研析其他篩選條件之篩選構想與評定標準，供後續研擬我國相關篩選條件之參酌。
5. 綜合分析前述研析成果，依我國環境特性與現行管理規範架構，提出高放射性廢棄物最終處置設施場址技術準則(草案)之建議。
6. 撰寫研究成果報告。

### 1.3 對高放射性廢棄物處置之了解

我國自 1978 年(民國 67 年)開始利用核能發電，迄今共有核一、二、三廠的六部核能機組，加上目前正在進行的龍門計畫(核四廠)，將來還會有二部機組加入運轉發電。其中，核一、二廠四座機組為沸水式，核三廠兩座機組為壓水式，核四廠兩部則為進步型沸水式反應器。預估此四座核能電廠的八部機組運轉 40 年將會產生約 7,350 公噸鈾的用過核子燃料。

用過核子燃料是指在核子反應器燃燒到無法再有效地支持核分裂反應且被移出反應器的核子燃料；而高放射性廢棄物則是指備供最終處置之用過核子燃料或其經再處理所產生之萃取殘餘物。高放射性廢棄物具有相當高之放射性，會釋放大量的衰變熱，其所含之放射性核種，半衰期長達數十萬年，且部分核種為阿伐發射體，對人體具長期潛在的輻射危害，因此需審慎尋找共同認可的隔絕方式，確保高放射性廢棄物可以長期摒除在可能影響生物圈的環境之外。

由於用過核子燃料從反應器退出時，具有較高之放射性及熱量，故一般對用過核燃料之處理是先在反應器廠房內的燃料池中冷卻，待其放射性及熱量降低後，再進行後續處理。由於用過核子燃料可經再處理回收鈾與鈾等有用資源，使其放射性降低為原來的百分之三，因此是否將其視為廢棄物直接處置，各國依其國情與社會環境，而有不同的選擇。我國用過核子燃料管理策略，曾就技術、安全、經濟、政治、人文社會與自然環境等因素之考量，經學者專家評估後，建議「近程採廠內燃料池貯存，中程進行乾式貯存，長程推動最終處置」為我國之管理策略。

深層地質處置為國際公認適於處置高放射性廢棄物之方式，所謂深層地質處置，是將高放射性廢棄物埋在深約 300 至 1000 公

尺的穩定地質環境中，如圖 1.3-1 所示，再配合廢棄物罐、緩衝與回填材料等工程設施，藉由工程障壁(廢棄物罐、緩衝與回填材料及廢棄物本身)與包含處置母岩及地質圈障壁所組成的多重障壁，可以有效阻絕或遲滯核種的外釋與遷移，以換取足夠的時間使高放射性廢棄物的輻射強度在到達生物圈之前已衰減至可忽略的程度。

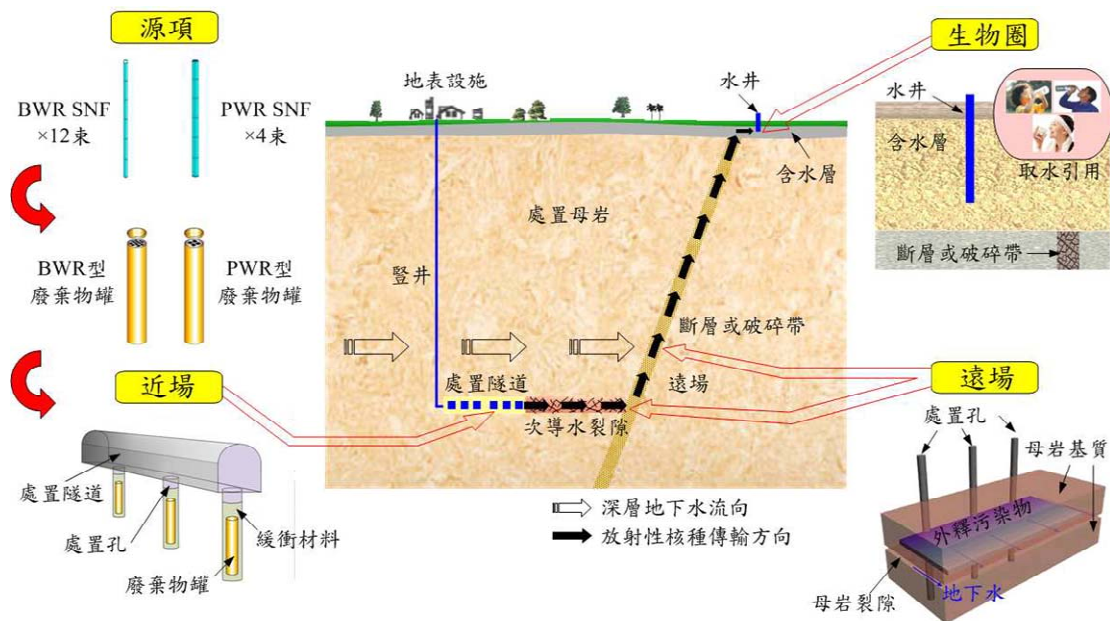


圖 1.3-1 最終處置概念示意圖

## 第二章 國際高放處置場址技術相關準則

### 2.1 瑞典

#### 2.1.1 瑞典高放射性廢棄物最終處置場安全法規簡介

瑞典高放射性廢棄物處置之安全主管機關為瑞典環境部下轄之 Swedish Radiation Safety Authority 簡稱為 SSM，成立於 2008 年。與選址有關的基本要求主要是根據 Nuclear Activities Act、Radiation Protection Act、Environmental Code 及 SSM 制訂的相關導則，說明如下。

##### 一、Nuclear Activities Act 與選址

Nuclear Activities Act 沒有針對選址有任何具體規範，但有提到須遵循 Environmental Code 第 2 章之要求。執行選址時主要參考 SSM 訂定的 SSMFS 2008：21 導則第 2 條及第 3 條。在導則中，SSM 指出「考量處置設施的位置與深度時，需選擇能提供充份穩定且有利的地質構造條件，確保處置場的障壁在時間內能發揮預期的功能。主要考慮的條件包括溫度、水文、力學(例如岩石力學、地震)、化學(地球化學、地下水化學)等。此外，場址應與現在已經在開採或未來可能會被開採的自然資源保持安全距離。」

##### 二、Radiation Protection Act 與選址

Radiation Protection Act 同樣沒有具體規定有關選址的要求。因此，SSM 制訂 SSMFS 2008：37 導則，其於第 4 條、第 8 條及第 9 條提到「處置場的選址、設計、建造、營運和關閉，其工程障壁與地質障壁都應盡可能合理的防止、限制及延遲放射性核種釋出。並評估不同措施對處置設施防護能力之影響。」

此外，SSM 考量輻射對人類健康與環境之影響，在 SSMFS 2008：37 導則第 3 條要求「在用過核燃料或放射性廢棄物最終管理的各個階段，都應保護人類健康與環境，免於受到游離輻射之影響。」

### 三、障壁功能與長期安全之要求

SSM 在 SSMFS 2008：37 導則第 5 條對於長期安全的要求，規定最終處置場需滿足風險基準：「用過核燃料或放射性廢棄物處置場封閉後，關鍵群體的最大暴露風險，其有害影響的年風險應低於  $10^{-6}$ 。」

最後，SSMFS 2008：37 導則第 2 條及第 3 條亦指出如何利用障壁及其功能達到安全要求。「處置場關閉後，由被動式障壁系統維持處置場的安全性。每個障壁都應具有單一或多重功能，以遏制或阻止放射性物質擴散，直接或間接保護障壁系統中的其他障壁。」，「處置場所需的障壁或障壁功能，取決於處置場放射線總量、其他會影響障壁安全功能的物質、處置場的設計與位置。」

### 四、Environmental Code 與選址

相較於 Nuclear Activities Act 及 Radiation Protection Act，Environmental Code 有較具體的選址規定。根據 Environmental Code 第 2 章第 1 段中的一般要求，當活動或措施之目的是土地或水的利用時，場址選擇要符合活動目的但又必須將其對人類健康及環境的破壞與損傷最小化。根據 Environmental Code 第 2 章第 7 節，當要滿足破壞與損傷最小化之要求為不合理時，破壞與損傷最小化之要求可以適當的放寬標準。

所謂適合的場址是指場址適於 Environmental Code 的目的，記載於第 1 章第 1 節：

「本法之目的是在確保現在及後代人民的健康與環境下，持續促進開發。這些開發必須承認自然是值得被保護，在我們利用自然資源的同時，也須負起管理自然資源的責任。Environmental Code 應確保：

- 1.保護人類健康與環境免於受到污染或其他影響造成的破壞與損傷。
- 2.保護與保留珍貴的自然與文化環境。
- 3.保留生物多樣性。
- 4.土地、水資源及物理環境的使用，要對生態、社會、文化和經濟等方面進行長期且良好的管理。
- 5.鼓勵材料與能源的再利用及再循環，以建立與維持自然循環。」



## 2.1.2 選址流程

瑞典的選址起源於 1977 年通過的 The Stipulations Act，該法要求核能業者需證明其可絕對安全地處置用過核燃料或高放射性廢棄物，並取得政府許可後才能啟動計畫中或已完成的核能反應爐。為此，瑞典四家電力公司合資成立瑞典核燃料與廢棄物管理公司 (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company，簡稱 SKB)，負責用過核燃料與核廢料的管理與處置，並著手進行地質資訊的收集與研究。由於瑞典對於選址並沒有直接的法令規定，政府是根據 The Act on Nuclear Activities (1984:3) 之規定，以申設執照的批准是否通過作為間接管控的手段。為選出適合的場址，SKB 除了先期根據 The Act on Nuclear Activities 的要求進行 RD&D 計畫，及於 1990 年建置硬岩實驗室 (Äspö Hard Rock Laboratory, Äspö HRL) 進行處置概念與調查方法的研究與驗證外，並於 1991 年開始進行處置場選址規劃，選址流程如圖 2.1.2-1 所示。場址篩選分為可行性研究及場址調查等兩階段，第 1 階段需選出 5~10 個場址進行可行性研究，第 2 階段則選出 2 個場址進行場址調查。

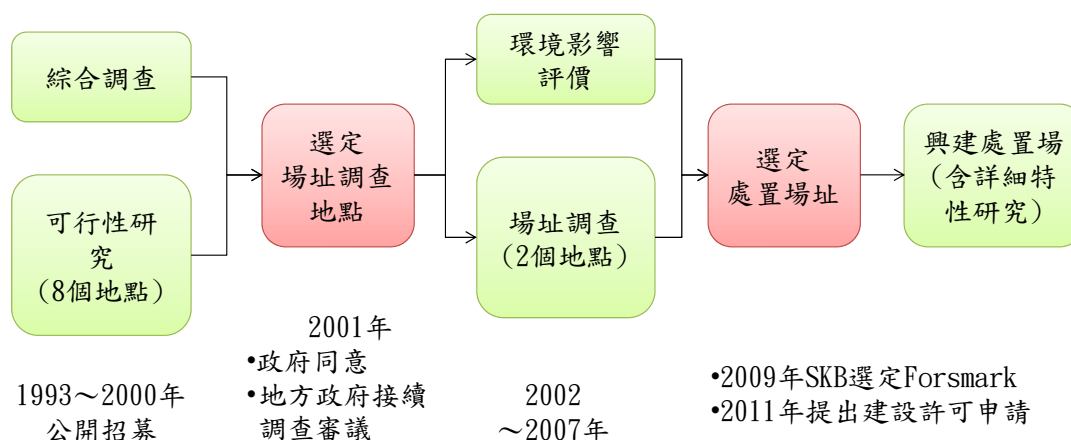


圖 2.1.2-1 瑞典場址選擇流程示意圖

第一階段篩選於 1993 年至 2000 年間實施，SKB 先利用過去的研究及公開招募的方式，初步篩選出 20 多個縣市，如圖 2.1.2-2 所示。Storuman 市及 Malå 市先表示出其參與選址之意願，加上 SKB 初步判斷這兩個縣市都具有對選址的有利條件，故先針對這兩個縣市進行可行性研究。雖然此二縣市的可行性研究結果，皆顯示出具有作為最終處置場的潛力，但因當地居民公投投票反對，Storuman 市及 Malå 市的選址作業宣告中止。

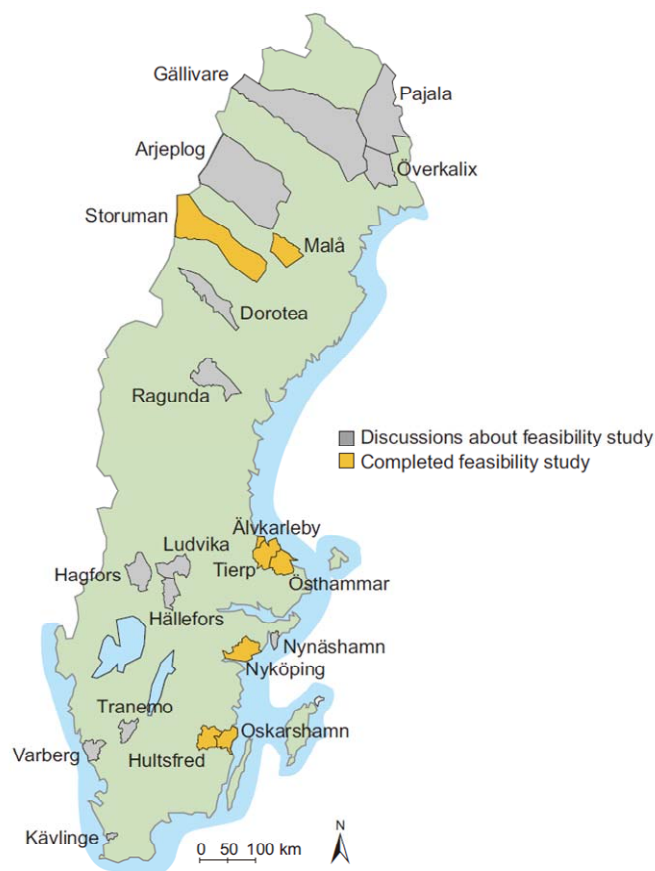


圖 2.1.2-2 瑞典曾經討論或已實際完成可行性研究的縣市

在 Storuman 市及 Malå 市進行可行性研究的同時，SKB 也針對已經有核能設施的縣市，例如 Oskarshamn、Nyköping、Östhammar、Varberg 及 Kävlinge 等縣市，評估其作為可行性研究對象的可能。其中，Oskarshamn、Nyköping 及 Östhammar

等縣市初步判斷其地質條件良好，可進行可行性研究。Varberg 市亦有進行可行性研究的優勢，但遭到市政府拒絕。Kävlinge 市則是因地質條件不利於最終處置場設置，故將其排除。另外，Tierp、Älvkarleby 及 Hultsfred 等三個縣市，因具有參與選址的意願及對選址的有利條件，一併進行可行性研究。故最後完成可行性研究且願意參與下一階段選址作業的縣市包括 Oskarshamn、Nyköping、Östhammar、Tierp、Älvkarleby 及 Hultsfred。

由於在進行可行性研究的同時，政府認為還要持續進行其他的場址補充研究，以充實選址的背景資料。因此，在 1990 年代末期，SKB 針對瑞典的所有縣市(Gotland 市除外)進行一般的場址研究，包括母岩條件、環境影響因子、現有的工業、交通基礎設施等調查。補充研究中，SKB 歸納出瑞典國內之適合、可能適合及不適合作為最終處置場的地質分布狀況，如圖 2.1.2-3 所示，可作為場址篩選之參考。

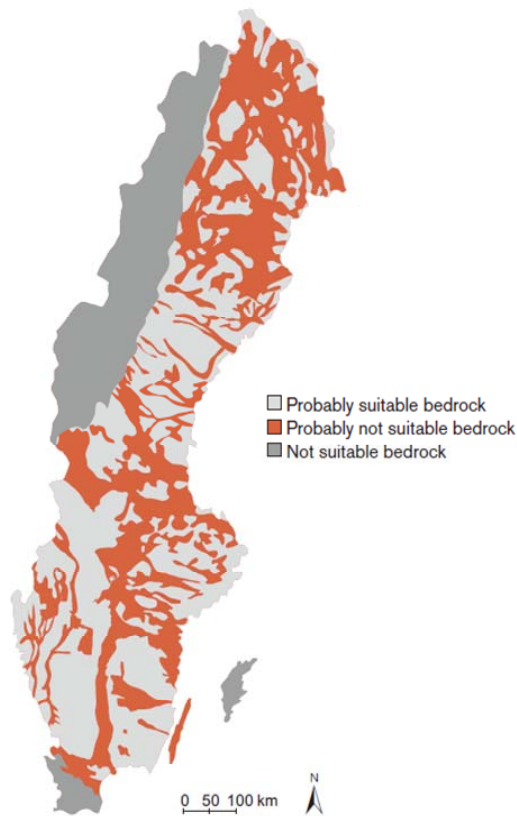


圖 2.1.2-3 瑞典全國的地質適宜性篩選結果

根據各縣市的可行性研究結果，考量安全、技術、土地與環境、社會等場址篩選條件(圖 2.1.2-4)，從 6 個縣市中篩選出適合進行場址調查的 8 個候選場址，如圖 2.1.2-5 所示，各場址之特性彙整如表 2.1.2-1 所列。其中，Älvkarleby 市的地質狀況因母岩容積不足，無法從中挑選出適宜的地方做為調查場址。

SKB 認為 Östhammar 市的 Forsmark 及 Oskarshamn 市的 Simpevarp 具有較佳的地質條件及社經條件，可優先進行場址調查。Tierp 市的北區及 Nyköping 市的 Fjällveden 之地質狀況則可作為替代方案。2001 年，SKB 將此結論提送至瑞典核能檢察署(Swedish Nuclear Power Inspectorate,SKI)審查，SKI 同意 SKB 的篩選結果後，SKB 即於 2002 年~2007 年開始第二階段篩選。第二階段主要是針對 Forsmark 及 Simpevarp 進行場址調查，由於在場址調查階段，發現 Simpevarp 區域內的 Laxemar，

其母岩性質更適合做為最終處置場址，故將 Simpevarp 場址改以 Laxemar 稱之。

SKB 根據場址調查結果，考量安全相關的場址特行、技術、社會資源、健康與環境等場址調查階段的篩選條件(圖 2.1.2-6)，比較兩處場址的優劣，最後選出 Forsmark 作為最終處置場址。

而後，瑞典於 2009 年經公民投票通過 Forsmark 為用過核燃料最終處置場，SKB 亦在 2011 年完成 Forsmark 最終處置場之安全分析報告，並向瑞典輻射安全機關(Swedish Radiation Safety Authority,SSM)提送用過核燃料最終處置場之建造申請。根據 SKB 規劃，預訂於 2019 年開始興建處置場，2020 年代中期開始營運。

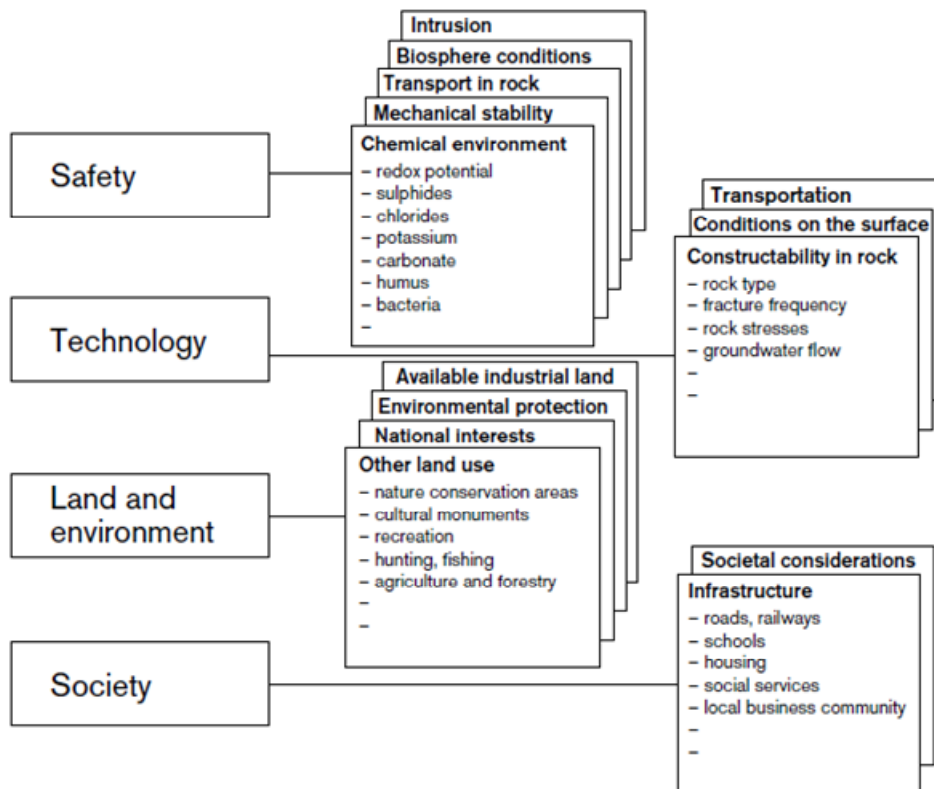


圖 2.1.2-4 瑞典於可行性研究階段之場址篩選條件

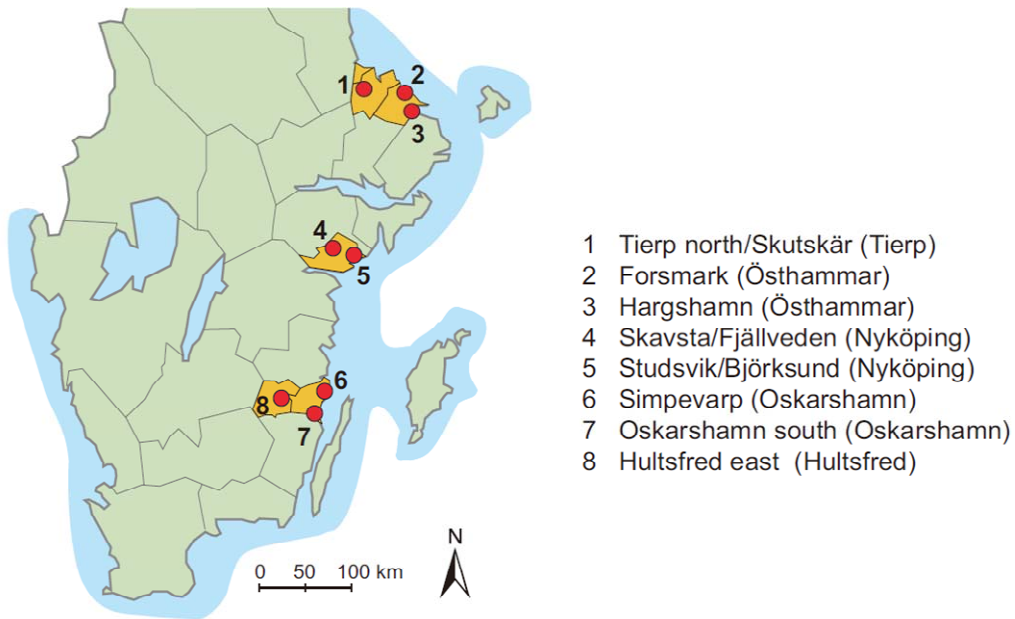


圖 2.1.2-5 瑞典於場址調查階段的候選場址

表 2.1.2-1 瑞典候選場址的基本特性

候選場址(所在縣市)		基本特性(母岩種類、地表設施的環境、交通運輸)
1	Tierp north/Skutskär (Tierp)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 花崗岩</li> <li>• 林地</li> <li>• 利用鐵路將用過核燃料從 Älvkarleby 市的 Skutskär 港運送到處置場</li> </ul>
2	Forsmark (Östhammar)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 片麻狀花崗岩(構造凸鏡體(tectonic lens))</li> <li>• 鄰近核電廠的工業用地</li> <li>• 利用公路將用過核燃料從 Forsmark 港運送到處置場</li> </ul>
3	Hargshamn (Östhammar)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 片麻狀花崗岩(構造凸鏡體(tectonic lens))</li> <li>• 林地</li> <li>• 利用公路將用過核燃料從 Hargshamn 內的港口運送到處置場</li> </ul>
4	Skavsta/Fjällveden (Nyköping)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 沉積脈狀片麻岩</li> <li>• 鄰近 Skavsta 機場</li> <li>• 利用鐵路或公路將用過核燃料從 Oxelösund 港運送到處置場</li> </ul>
5	Studsvik/Björksund (Nyköping)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 片麻狀花崗岩</li> <li>• 鄰近 Studsvik 設施</li> <li>• 利用公路將用過核燃料從 Studsvik 港運送到處置場</li> </ul>
6	Simpevarp	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 花崗岩(Småland 花崗岩)</li> <li>• 鄰近核電廠的工業用地</li> </ul>

	(Oskarshamn)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 利用公路將用過核燃料從封裝廠運送到處置場</li> </ul>
7	Oskarshamn south (Oskarshamn)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 花崗岩(Småland 花崗岩)</li> <li>• 鄰近 Oskarshamn 的港口</li> <li>• 利用公路或隧道將用過核燃料從 Oskarshamn 的港口運送到處置場</li> </ul>
8	Hultsfred east (Hultsfred)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 花崗岩(Småland 花崗岩)</li> <li>• 林地</li> <li>• 利用鐵路將用過核燃料從 Oskarshamn 的港口運送到處置場</li> </ul>

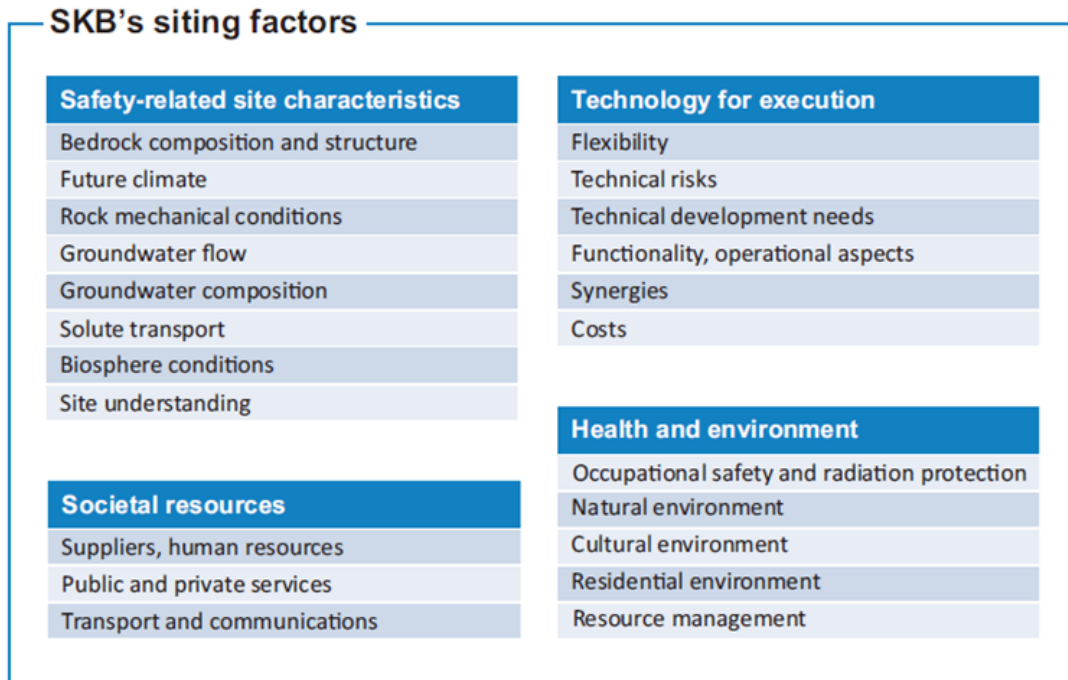


圖 2.1.2-6 瑞典場址調查階段的場址篩選條件

### 2.1.3 確保安全之構想

瑞典高放射性廢棄物最終處置之廢棄物主要為核電廠的用過核燃料，採用 KBS-3 的處置概念，將用過核燃料放置在地下 400~700 公尺的岩盤中，利用天然障壁及工程障壁組合而成的多重障壁系統，層層阻滯放射性核種遷移，如圖 2.1.3-1 所示。其設計至少可將高放射性廢棄物與人類生活圈隔絕 100,000 年，直到放射強度降至與天然鈾礦背景輻射強度相當為止。

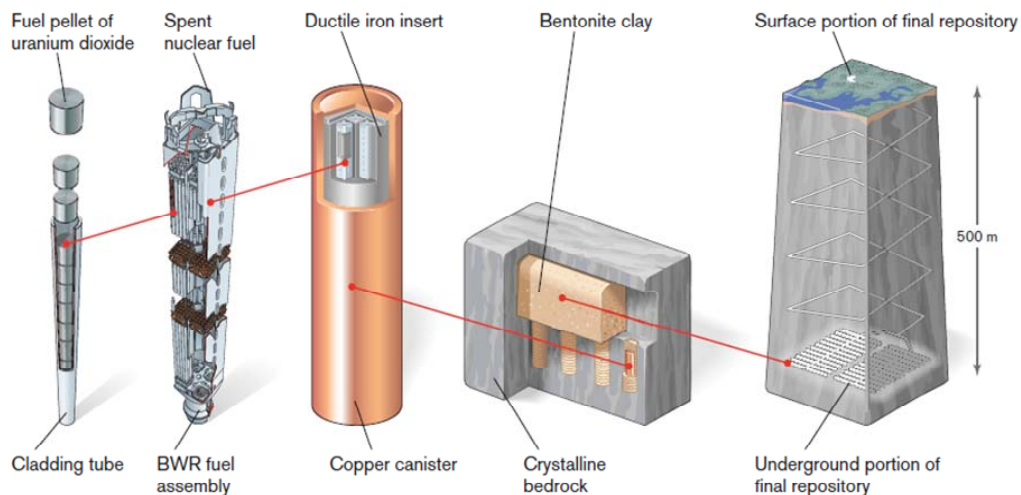


圖 2.1.3-1 瑞典 KBS-3 處置概念

瑞典的用過核燃料主要來自沸水反應爐(Boiling Water Reactor, BWR)及壓水反應爐(Pressurized Water Reactor, PWR)，由於用過核燃料中仍然包含大量的放射性元素，為確保運送途中或營運操作人員不會受到輻射暴露以及最終處置的長期安全，將用過核燃料置於厚度 50mm 的鑄鐵容器中，再放進厚約 100mm 的銅製包封容器，如圖 2.1.3-2 所示。外層的銅製容器用以抵禦腐蝕，內部鑄鐵容器則是負責抵抗外部應力作用，且容器的設計可承受地震力或其他岩石變動造成的作用力及未來冰河時期的各種影響。每個銅製包封容器可放 12 根 BWR



的用過核燃料或 4 根 PWR 的用過核燃料。每個金屬罐高約 5 公尺、直徑約 1 公尺，裝滿用過核燃料的銅製包封容器重達 25~27 噸。

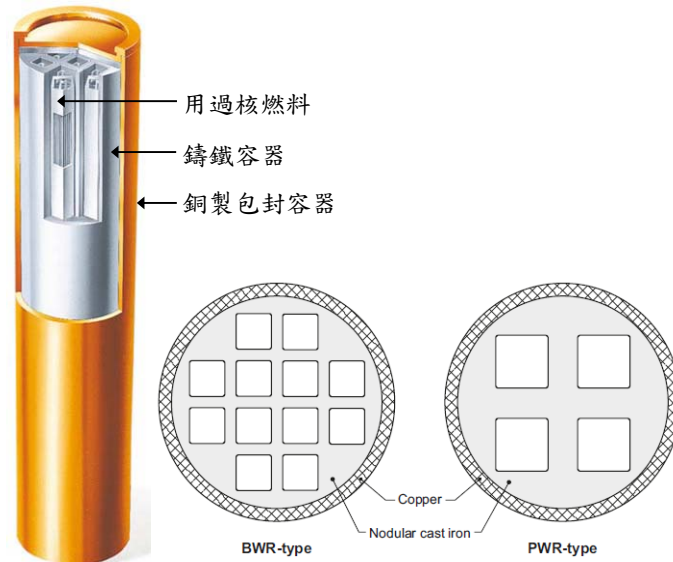


圖 2.1.3-2 瑞典用過核燃料與外層的包封容器

處置場位於地下 400~700 公尺深的結晶岩 (crystalline basement rock)，處置場周邊的岩石有助於將廢棄物隔絕，並提供包封容器及緩衝材穩定的化學環境，且不受地面活動干擾。瑞典的結晶岩並非堅固到不會破壞，岩石內仍有裂縫存在，地下水會以各種不同的方式流過。岩石中的大型破裂帶是地下水流的主要途徑，但破裂帶也可吸收一些岩石中的天然擾動，降低工程障壁的破壞機率。

最終處置場的地下設施主要包括立坑、斜坑、豎坑及坑道等設施。豎坑內先放入膨潤土緩衝材料，再將銅製包封容器放入豎坑中。每個豎坑直徑 1.75 公尺，深度約 8 公尺。豎坑之間的間距約為 6~8 公尺，實際距離則視岩石的熱導率及銅製包封容器的初始衰變熱而定。膨潤土緩衝材料中的蒙脫石含量達 80% 以上，其吸水膨脹及天然土壤的特性，可抑制地下水流量、限制微生物活性、防止膠體傳輸、保持銅製包封容器的穩定性、降低腐



圖 2.3-3 瑞典的坑道回填概念示意圖

## 2.1.4 場址篩選條件

由於選址過程中的可行性研究階段與場址調查階段，其場址資料的豐富度與精度有明顯差異，故考量之篩選條件亦有所不同，分別說明如后。

### 2.1.4.1 可行性研究階段之場址篩選條件

#### 一、篩選條件

可行性研究階段是利用既有的資料，在 6 個縣市中找出適合進行場址調查的地方。場址篩選考量條件可分為安全、技術、土地利用與環境、社會等四大類。

#### (一)安全

由於 SKB 規劃之深層地質處置的基本安全原則，是利用工程障壁與天然障壁組合的多重障壁系統，將用過核燃料長時間隔離，使處置設施內的放射性隨時間衰減降低至對人類或環境無害的程度。因此，母岩除須提供工程障壁長期且穩定的化學與力學環境外，亦需確保母岩本身的障壁效能。為達到確保長期安全之基本要求，母岩需考量以下條件：

1. 容器、膨潤土及燃料的化學環境
2. 岩石的力學穩定性
3. 岩石中，腐蝕物質與放射性物質的傳輸條件
4. 未來受到入侵的風險(例如：母岩中有可利用的自然資源)

#### (二)技術

跟深層地質處置的建設與營運有關的選址條件，可分為地表設施、地下設施及運輸系統等三部分。

### 1.地表設施

所有用過核燃料的接收、臨時存放及輸送皆在地面上進行，故地表設施的設計與設備需能使工作環境、輻射防護及其他環境保護等達到安全要求。

### 2.地下設施

地下設施包括通行隧道、工作人員作業區、處置區、傳輸隧道等，建造這些設施時需進行大規模的開挖。因此，母岩的特性需使開挖工作在兼顧安全性與技術可行性的條件下完成。根據相關研究及國際經驗，瑞典的結晶岩(crystalline basement)是地下設施的較佳選擇，可提供良好的施工條件，加上瑞典亦有其他地質工程的相關建設經驗可作為參考。但實際上在建造地下設施時，還須進行詳細的地質調查，包括岩石強度、破碎帶的位置與特性、載重(岩石應力)及岩石的含水特性等。

### 3.運輸系統

運輸用過核燃料或放射性物質所需的技術，瑞典早已展開研究。因此，若要新建運輸所需之港口、公路或鐵路時，其用地可能會與其他土地利用產生衝突。若場址附近有既存的基礎設施可供利用，則場址具有較高的優勢。

### (三)土地利用與環境

場址選擇與設施佈置應將利益衝突降至最低，廣泛而言是指自然環境與文化環境兩部分，包括自然保育、休閒娛樂、狩獵、漁業、其他戶外活動、文化古蹟、重要天然資源、農業及林業等項目。此外，處置設施、運輸設施及通訊設施等基礎設施，應配合地形進行適當規劃。因此，選址時須考量以下條件：

- 1.選址和設施配置時需考量保護區及有價值之區域。
- 2.當設施建造與操作營運時，可提供良好的條件並滿足環境要求。

#### (四)社會

社會條件對選址及設施佈置相當重要，處置設施的建設與營運會以不同的方式對當地居民與地區造成影響，其中最顯著的就是就業、經濟生活與地區服務。選址在政治及輿論上是敏感的議題，根據瑞典及其他國家的經驗顯示，選址會引起社會上的強烈感受與意見。因此，選址時需達到下列要求：

- 1.調查活動、建造、試運轉、營運等各階段皆有民意支持。
- 2.考量對社會及社會經濟產生的後果。

#### 二、選址準則

上述提及之場址篩選因子都需納入場址篩選的整體評估中，並盡可能取得評估所需之相關資料。但許多會影響長期安全與岩石施工條件的地質因子，僅能藉由詳細的調查取得。因可行性研究階段未包含調查作業，主要是彙整及分析現有之一般尺度數據資料(整個縣市)，故地質條件資訊較不完整。可行性研究著重於利用一般可用之資訊，辨識與分析地質條件是有利或不利於深層地質處置。應避免的條件包括：

- 岩石種類屬於易被礦產開採或作為其他利用之岩石。
- 高異質性或難以說明之母岩。
- 已知變形區或新構造運動斷層。
- 明顯的地下水流出區域。
- 地下水化學對於瑞典母岩是異常的。

這些場址評估因子可以排除掉部分區域，對於保留下來的區域需考量以下重要的問題：

- 哪些區域可能會有較佳的潛力，可以滿足安全、技術、土地利用與環境、社會等方面的要求？
- 這些區域中，哪個區域可以對後續進行的重要環境與安全因子調查，提供良好的前景？

對於不同的選址因子，以下是特別有利的條件：

- 不屬於自然資源利用的一般岩石種類。如此可降低此區域於未來被開發利用的風險。
- 大區域內有一些主要破裂帶。除可對未來的調查提供額外的彈性外，亦可增加在良好母岩建造大型且具有足夠安全性之處置設施的可能性。
- 高比例的裸露岩石、簡單且同質的母岩條件、規則系統的裂縫與破裂帶。可以增加在初期了解母岩條件與安全前景之機會。
- 具有所需的基礎建設及交通運輸建設，例如港口、鐵路、公路等。可將鐵路或道路的土地使用需求降至最低。
- 較少的土地使用競爭與環境利益。當需修改設施以符合環境要求時，可有較廣泛的選擇。
- 當地的正面關注。

根據這些準則，概略評估有可能進行進一步調查的區域，並尋找是否有適合場址可設置深層地質處置的地表設施。

#### 2.1.4.2 場址調查階段之場址篩選條件

選址過程中的最後一個步驟是有系統地比較兩個場址，以選出最終處置場，使最終處置場能按既定策略進行後續的工作。與上一階段的篩選類似，選址條件是兩個場址的比較基礎，選址條件分為 4 個部分，分別是安全相關的場址特性、執行技術、健康與環境、社會資源等。此分類是從上一階段的選址因子發展而來，以達到利用當前可用數據比較兩個場址之目的。場址調查結果所提供之場址資訊與前一階段所使用之資料，其精度與詳細度有很大的差異。由於場址調查的資料包括深地層的岩石狀況，故已經可以比較場址的安全性與技術可行性。

##### 一、安全相關的場址特性

最終處置場的安全是由安全分析評估。安全分析藉由不同的綜合計算與評估，了解處置系統(包括用過核燃料的處置孔、工程障壁、母岩及處置場外的生物圈)隨時間的變化。系統的未來狀態取決於初始狀態(用過核燃料及工程障壁設置完成時)、作用在處置系統內的內部衝擊(包括熱、水力、力學與化學等過程)以及作用在處置系統外的外部衝擊(包括氣候變遷、地震活動與人類入侵等)。在此階段內，可藉由場址調查取得之資料與模型，先以各個不同的因子評估場址，再考量這些因子對場址安全分析之影響。

##### (一)母岩的組成與結構

母岩的組成與結構決定岩石的力學與水文地質條件，亦會影響地下水組成及岩石遲滯溶質傳輸的能力。岩石條件將決定是否可以設置處置區及處置坑道，且要能符合長期安全之要求。這些要求主要自於長期安全的設計前提，例如處置設施與主要變形區的安全距離，以管理未來發生大地震的風



險；處置孔內的可接受最大流入水量，以確保緩衝材料不會在施工時被沖毀(侵蝕)；岩石特性能夠使處置坑道建造時不受開挖擾動帶影響，且與高滲透性保持相當長的距離；此外，亦需確認場址內是否具有可能會被挖掘開採的礦物存在，以降低處置場封閉後被入侵之風險。

## (二)未來氣候演變

氣候會影響處置場的深度與障壁的功能，處置場上覆蓋的冰層會影響地下水壓、壓力梯度(驅動地下水流)及滲入岩石的水之組成。未來冰河期可能會對地水組成之演變造成很大的衝擊，這會間接影響緩衝材及容器等工程障壁的功能。此外，亦需考慮處置場是否可能在永久凍土期間產生結凍，進而影響回填材、緩衝材及容器等工程障壁之功能。

## (三)岩石力學條件

長期安全性會受到現在及未來的載重(岩石應力)和岩石力學特性影響。當作用在處置設施周圍岩石的載重太大時，外力會使岩石開裂。故必須評估及預測未來地震發生時可能造成的風險與損害，但可藉由處置設施的布置規劃，使其遠離變形區與裂縫，降低未來受到地震影響之風險。

## (四)地下水

水文地質條件控制處置場的地下水流，特別是傳導裂隙的頻率和滲透性。這些條件會影響溶質遷移進入或離開緩衝材，進而降低緩衝材及容器的功能，甚至當容器損壞時，放射性核種會從用過核燃料中釋放，並經由地下水傳播擴散。低頻率的導水裂隙及低滲透性的裂隙有助於降低地下水流，相關參數會在安全評估中具體計算，包括傳輸阻力(F)及等效流( $Q_{eq}$ )等參數的定量評估。當傳輸阻力高及等效流低時，對場址較為有利。

### (五)地下水成分

地下水成分中的含鹽量、氧化還原條件、濃度等，會對緩衝材及容器造成不利影響。現在的地下水組成成分可由場址調查取得相關資訊，但未來的地下水成分，則必須藉由預測分析地下水流、氣候變遷及岩石中的化學反應對地下水之影響，以得到地下水組成之相關資訊。

### (六)溶質運移

當容器損壞時，則需靠場址發揮阻滯核種遷移的能力。場址遲滯核種遷移的能力，受到地下水流及岩石的擴散及吸附特性影響。可利用場址調查取得之岩石特性及傳輸特性，進行相關評估。

### (七)生物圈條件

放射性物質從處置設施傳輸至環境中時，地表及其附近的水文情況、未來的生態系統皆會受到影響。因此，需確定兩個場址的生物圈屬性不同所造成的輻射劑量差異。

### (八)對場址的了解

由於場址的安全評估是建立在場址資訊的基礎上，所以相關數據資料及調查資料須能針對場址提供說明及解釋。

## 二、執行技術

為使最終處置計畫能有效地執行，須考量技術的可行性。計算時間與成本可輕易比較出兩個場址的差異性，但為了達到處置安全所需的技術執行及相關技術發展，其執行上的不確定性則須經過詳細評估。

### (一)靈活性

靈活性是指(1)處置場經過場址調查，並了解實際岩石狀況後，可調整處置設施配置以符合長期安全之要求；(2)處置容量須達 6000 桶；(3)保有變更處置容量的餘裕。

根據各個場址的概述模型，針對其場址特性進行處置場的設計與配置，確保相關設計符合規定及長期安全之要求。場址配置主要是依據：

- 影響配置的條件、與主要變形區保持適當距離、岩石場域的邊界等相關資訊。
- 岩石的導熱性，可決定處置容器間的最短距離，以符合緩衝材料的容許最高溫度之要求。
- 岩石應力及岩石強度，用來確認處置坑道的位置與方向，以達到力學穩定性。

首先比較不同處置場的處置容量、假設的廢棄物數量及是否可優先進行完整場址調查。接著比較是否可容納增加的廢棄物數量，因為瑞典未來的核能計畫可能會改變，而使廢棄物數量增加。增加處置容量的方法包括更改設計或利用優先區域以外的地區。這些替代方案都需要進行新的研究及調查，故在比較兩個場址的靈活性時，只要依據一般的評估即可。

## (二)技術風險

母岩的確切狀況不可能在事先完整了解，必須在施工過程中蒐集詳細資料。針對蒐集所得之資料，持續修正施工作業，並管理不確定性及可能的技術風險，這稱之為觀察法。較簡單的狀況是在施工期間，將岩石的支撐及密封調整成適應觀察到的實際狀況。另一個更複雜但也很重要的觀察法應用狀況，是調整場址以符合長期安全之要求。

風險分析是設計過程中的一部分，用來說明技術風險。風險分析的目的是為了確定是否清楚風險及規劃方法，以利後續管理，或是否需要採取補充措施。相關分析簡述如下：

- 以會影響處置場施工或配置規劃的場址特性與地質條件之不確定性為基礎。

- 評估風險相關地質條件確實存在的可能性。
- 評估存在風險相關地質條件所帶來的後果。

風險分析包括所有可想像的風險相關地質條件及考量場址模型的不確定性，其中，風險相關地質條件可藉由地質與岩石力學的專業知識確認。風險是機率和造成的影響組合而成，如表 2.1.4.2-1 所示，分成可忽略或接受的風險及需要額外措施的風險兩大類。可忽略或接受的風險是指造成的影響在設計的過程中可被接受或在施工期間可利用觀察法管理，以及風險相關地質條件存在的機率低到可以被忽略。需要額外措施的風險是指造成的影響太大，可能需要執行相關措施(例如改變設計)，以減輕影響或管理風險。

當風險被判定為可忽略或可接受時，通常不會造成選址以外的成本增加或時程延宕。當風險具有較大的影響及高機率時，則需要額外的措施(例如變更處置場配置)，以免影響最終處置的安全性。

表 2.1.4.2-1 評估技術風險的方法

機 率	非常可能	可接受/ 可忽略	可接受/ 可忽略	額外措施	額外措施
	可能	可接受/ 可忽略	可接受/ 可忽略	可接受/ 可忽略	額外措施
	不可能	可接受/ 可忽略	可接受/ 可忽略	可接受/ 可忽略	額外措施
	極不可能	可接受/ 可忽略	可接受/ 可忽略	可接受/ 可忽略	可接受/ 可忽略
		極小	小	中	大
造成的影響					

與地質條件不確定性相關的風險可分為三類，第一種風險是處置孔剝離破裂(spalling)問題或處置場的穩定性問題

而影響營運操作安全的風險。就處置場的長期功能觀點而言，處置孔剝離破裂的風險是在不可接受的範圍內。第二種風險是對處置區的要求無法以現今的技術達成，或就處置設施的長期安全觀點而言，補救措施的要求無法被接受，以及處置設施的其他部分需要複雜且難以預測密封措施，導致工期延宕或造成重大環境衝擊。第三種風險是與場址長期安全相關的重要條件(例如長期變形區、高滲透性裂隙等)，會排除許多處置區域。

風險分析包含所有地下的處置設施，非處置區的風險評估主要是延宕或對功能的衝擊，處置區的風險評估是對裂縫頻率、水力特性與岩石強度的統計描述，以及岩石應力資料評估。

### (三)技術發展需求

技術風險可作為技術解決方案的管理規則，例如可以藉由處置坑道定向，將岩石應力場造成的處置孔內層裂問題最小化，並持續發展密封岩石的新方法與新材料。改變緩衝材及回填材的設計，可能可以降低地下水滲流限制之要求。技術發展亦涉及其他詳細特性的方法、檢查及最終處置的土工設計等方面。

為了在選址前評估技術風險，須先確定要管理的技術發展。然後評估技術發展若要達到預定目標，其所需的資源及如何掌握不確定性。

### (四)功能性

對最終處置場而言，評估功能性是設計工作的一部分。岩石設施的功能性受到許多不同的因素影響，因為在施工過程中，處置設施須能適應各種不同的岩石條件。因此，靈活性、技術風險及其管理方法是評估功能性的重要項目。

地下設施在物流、交通及公共設施(供電、通風、供水)等的空間使用上，亦有嚴格的物理限制。從功能性的角度，這些建設造成的干擾都需納入考量。在整個營運期間，處置作業與施工平行進行，因此須考量處置區域及運輸路線的數量、尺寸及相對位置，安排施工順序，且不能造成容量問題的風險或作業相互干擾。

大部分地上設施功能性的重要程度較地下設施低，只有交通運輸有較高的影響性。一般而言，施工期間的交通運輸需求量最大，主要是將多餘的岩石運走，並將施工材料運進場址。當處置場開始營運後，運輸量就會降低。此外，還有其他需要運輸的就是放射性廢棄物桶及封閉回填所需材料。

#### (五)協同作用

整個放射性廢棄物管理系統中佔最大部分的是用過核燃料的最終處置，最終處置與系統中其他部分的關連性也有可能受到選址影響。包括封裝廠與最終處置之間的關連性、研究設施與最終處置之間的關連性、暫時貯存設施與最終處置之間的關連性等，都需加以考量。對 SKB 公司而言，在選址過程中帶來的組織影響及協同作用，是最終處置計畫的執行效率及 SKB 公司的整體營運效率，這些影響無法用時間及金錢評估，但可以定性比較。

#### (六)成本

執行最終處置場計畫的成本包括施工、營運及兩個場址的相關前置作業。有些成本與場址有關，包括岩石開挖工程與地下設施回填。選址的成本反應了執行的效率，成本比較亦可了解不同階段的工作投入比例，可供後續參考。

### 四、健康與環境

評估及比較兩個場址的此項因子，主要依據 Environmental Code、Nuclear Activities Act 及 Radiation

Protection Act 等法規之規定。在處置場建造與營運期間，Environmental Code 提供與健康及環境衝擊有關的選址因子架構。而核能活動相關的環境與健康，由 Swedish Radiation Safety Authority 頒布的 Nuclear Activities Act 及 Radiation Protection Act 所規範。健康與環境可從職業安全與輻射防護、自然環境、文化環境、居住環境與健康、天然資源的管理等項目進行考量。

### (一)職業安全與輻射防護

不論最後選擇哪一個場址作為最終處置場，建設與營運都有其相對應的職業安全要求。為達到要求所採取的措施，會因場址不同而有不同的成本。在地表上時，採取的措施與一般工業設施相同。在地表下時，則需針對落石、火災風險、開挖時水災等狀況採取適當措施。此外，還要有氬氣暴露與爆炸煙霧的減輕措施。各場址及其所需措施，都可以技術投入與成本說明他們之間的差異條件。

輻射的來源是裝有用過核燃料的廢棄物容器，廢棄物容器的設計可以讓容器在搬運的過程中不會發生輻射外漏，故在容器的輻射外漏防護上，兩個場址採用的構造與措施是相同的。岩石含有不同數量的鈾、鈾和鉀放射性同位素，當這些物質衰變形成氬，加上通風不良的狀況下，會有健康風險。氬也會從地下處置設施的岩石表面、流入的地下水、碎石、坑道地板及岩石堆中排出。由於氬的排放量太大，存在暴露於氬的潛在風險，可藉由通風設施降低氬濃度。不同場址間可能會有不同的通風要求。

### (二)自然環境

除了被列為國家保護區的區域外，還有其他值得保護的區域或生態敏感區，包括主要棲息地、鈣質森林、沼澤森林及其他具有特殊自然價值的區域等，於選址時需一併考量。

另外，郡行政局(County Administrative Board)要求不可對物種保護條例(Species Protection Ordinance)附錄 1 或附錄 2 中所列之物種造成影響。

### (三)文化環境

景觀、土地利用及建築環境已經演變及變化超過一世紀，可由景觀的歷史知識選出特定的文化環境，以保護景觀歷史品質並持續發展。特別重要的文化環境已經給予某些型式的保護，例如國家文化遺產保護區、國家歷史建築、國家景觀保護區、國家考古遺跡等。

### (四)居住環境與健康

為了確認會被噪音、大氣排放及振動干擾的居民數量，以處置場操作區為中心，分別針對半徑 1km、5km 及 10km 的範圍內，蒐集人口、學校、醫療設施等資料。

處置場的施工與運輸等作業都會造成噪音，並對人類及居住環境產生較大的衝擊。故需計算施工跟營運期間的噪音，並與法規要求之限值比較。岩石鑽孔及爆破會引起震動和空氣衝擊波，如果震動和空氣衝擊波太大時，會損壞鄰近的建築物及設備。交通運輸活動產生的微粒、碳氫化合物、一氧化碳、二氧化硫和氮氧化物及岩石破碎產生的砂塵等氣體或顆粒會影響空氣品質，可以氮氧化物及微粒的濃度作為影響評估的參考。

噪音及其他干擾會影響附近的休閒及戶外活動，選址時亦須加以考量，包括登山、自行車、蘑菇和莓類採摘、打獵、釣魚、賞鳥、獨木舟、帆船等活動。

噪音、空氣污染及振動會影響人類健康，且放射性廢棄物會對人類造成不安和恐懼。環境影響評估報告中已有環境醫學專家評估空氣污染和噪音對健康的影響風險。SKB 亦在社會研究中，研究最終處置設施對人類的心理影響。



### (五)天然資源的管理

天然資源的消耗可視為物理消耗和成本的組合，後者含括在最終處置場的成本估計內。為了清楚比較兩個場址間的差異，天然資源的消耗需用特殊的比較方式，例如岩石的噸數、電能的 GWh、燃料的 GWh 等。當成本計算包含所有活動及資源消耗時，天然資源的管理已經著重於高資源消耗的部分，兩個場址因而產生差異性。

供水給最終處置場會使地下水位下降，對私有井及依賴此環境生存的動植物造成影響。處置場建置與營運期間，開挖出大量的土石，部分可作為處置場建置的材料，剩餘的土石則盡量賣出或是並從場址運至其他地方。緩衝材料所需的黏土數量與處置容器數量有關，由於兩個場址的處置容器數量相同，因此所需的緩衝材黏土數量亦相同。所有處置坑道及開口都需用黏土回填，回填體積則會受場址影響。不同類型的海上與陸上運輸、緩衝材與回填材的黏土開採、建設與營運的電力與燃料等能源需求。

### 五、社會資源

為確保以最佳方式執行最終處置計畫，SKB 基於其責任，以此為基礎進行社會方面的評估。最終處置計畫要能成功執行，必須得到地方社區的信任與接受。SKB 從處置計畫可以提供給社區的好處著手，包括各種型式的可用資源或未來可用資源，例如供應、服務、技術、招募、通訊及其他建立主要工業設施所需的項目等，也就是可以提供給社區的就業機會、需求服務及交通。而 SKB 僅只於提供訊息，建立最終處置場的影響是好是壞，則是留給市民自己決定。

### 2.1.5 場址特性

Forsmark 最終處置場位於瑞典東岸的 Östhammar 市，距離 Uppland 市 70 公里，附近有核能電廠、SFR 低放射性廢棄物最終處置場以及港口設施，如圖 2.1.5-1 所示。

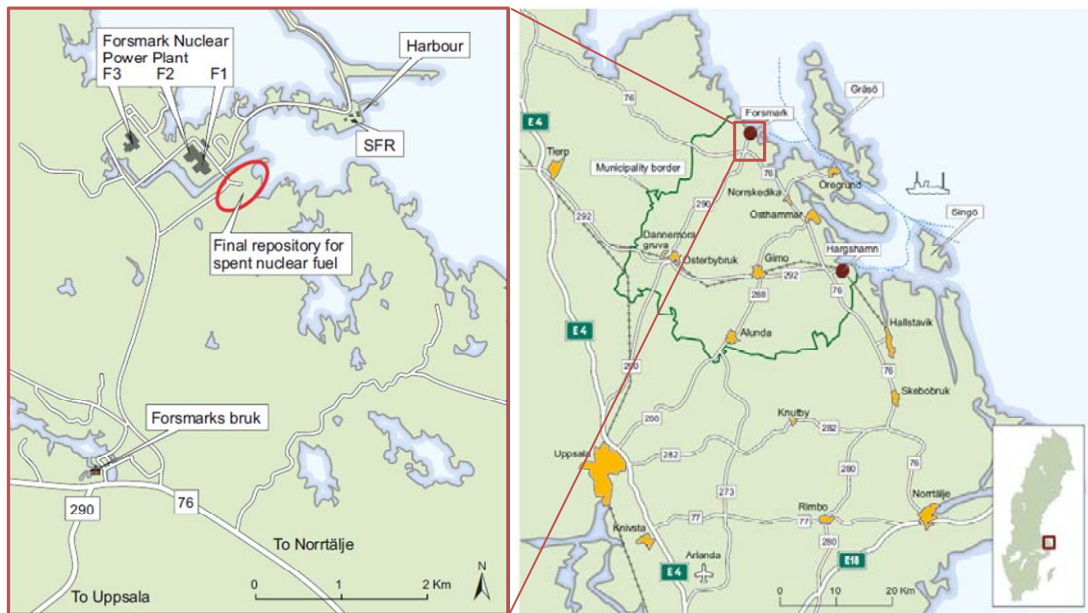


圖 2.1.5-1 瑞典 Forsmark 最終處置場的位置及鄰近設施分布

處置場分為地表設施與地下設施兩部分，地表設施包含營運區及岩石堆置區，地下設施則包括立坑、斜坑、處置坑道與連絡坑道，處置坑道位於地表下 450 公尺處，初步規劃可容納 6,000 罐用過核燃料，處置場的配置如圖 2.1.5-2 所示。

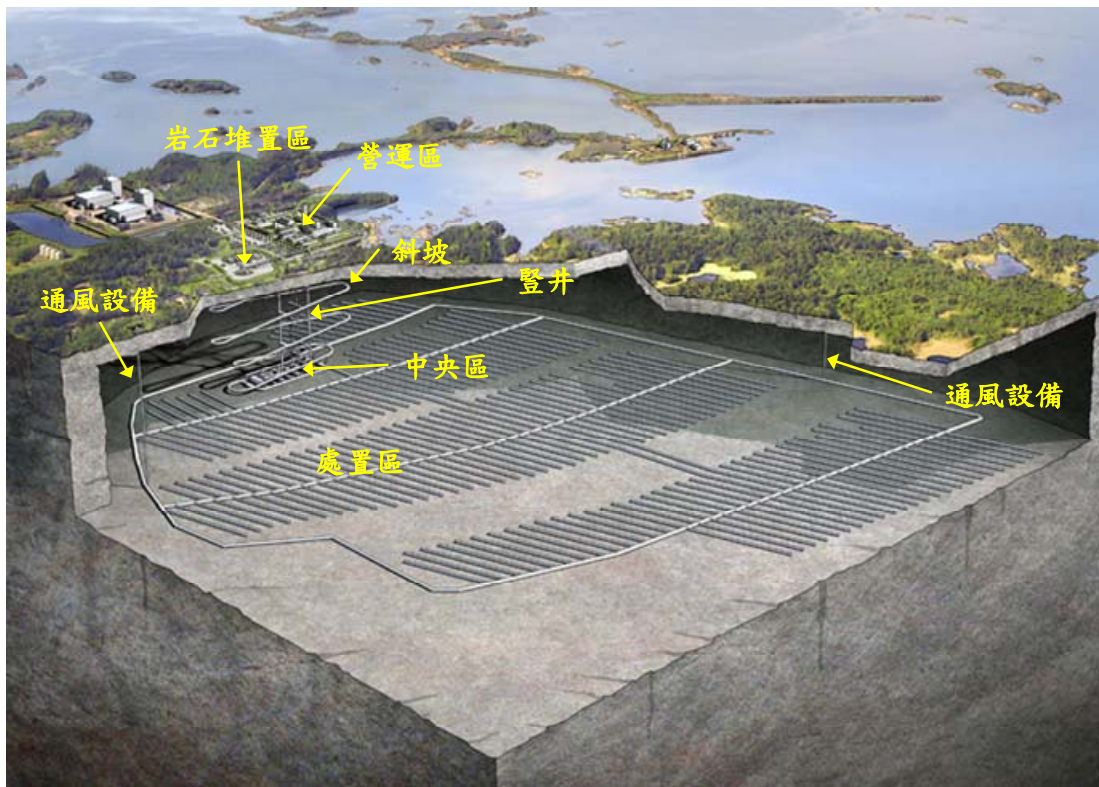


圖 2.1.5-2 瑞典最終處置場規劃布置概念示意圖

為充分了解處置場的地質狀況，SKB 於 2002 年開始進行場址調查，並於 2007 年結束調查工作。調查工作分為初步調查及詳細調查兩部分，先針對長約 6km、寬約 2km 的候選區進行初步調查，以釐清場址適宜性的關鍵問題，其範圍如圖 2.1.5-3 所示。由於早期的研究資料顯示候選區內的西北部份及東南部份，其地質條件都適合做進一步調查，但因東南區塊的地質滲透性略高於西北區塊，加上西北區塊就在工業用地下方，且可用的岩石體積足夠容納整個處置設施，故將詳細調查範圍集中在此區域內。詳細調查包括岩心鑽探、其他鑽探、地球科學的地表調查、生態的地表調查等項目。其中，岩心鑽探共 25 孔，內含 19 孔鑽孔深度跟處置區一樣或比處置區更深的鑽孔，其他鑽探則包括 38 個衝擊式鑽孔及 100 個以上的土井。

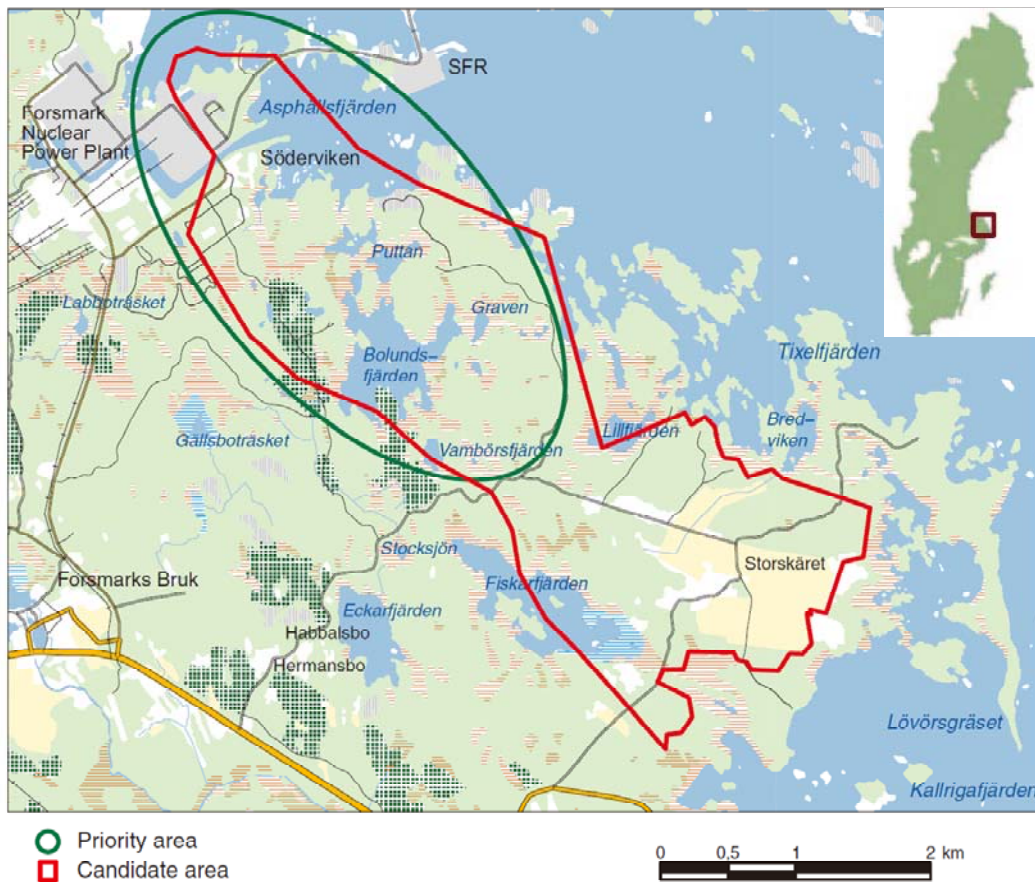


圖 2.1.5-3 瑞典 Forsmark 最終處置場的場址調查範圍

處置場附近自地表到地下至少 1000 公尺都是石英含量高的花崗片麻岩，此種岩石具有高導熱性及良好的強度，如圖 2.1.5-4 所示。詳細調查區內有一變形帶通過，將調查區分為兩部分，處置區則位於變形帶的西北側。為避免受到變形帶影響，處置坑道的佈置須避開變形帶並與其保持適當距離，如圖 2.1.5-5 所示。自地表到地下 200 公尺的範圍內，浸漬裂縫的導水頻率相對較高。裂縫的水力互連距離過大以及浸漬區太過平緩，都會使裂縫成為主要流動路徑。當深度大於 400 公尺時，傳導裂縫間的平均距離大於 100 公尺，其裂縫傳導頻率則相對較低。此區的岩石應力比瑞典一般母岩高，且隨著深度緩慢增加，岩石強度也相對較高。地下水的鹽度與年代隨著深度增加，且處置區的地下水成分與東南側的平緩浸漬區不同。這是因為處置區岩石內的地下水已與地

表水隔離相當長的時間，加上平緩浸漬區內含有 5,000~9,500 年前曾經覆蓋此區域的 Littorina Sea 之微量成分所造成。

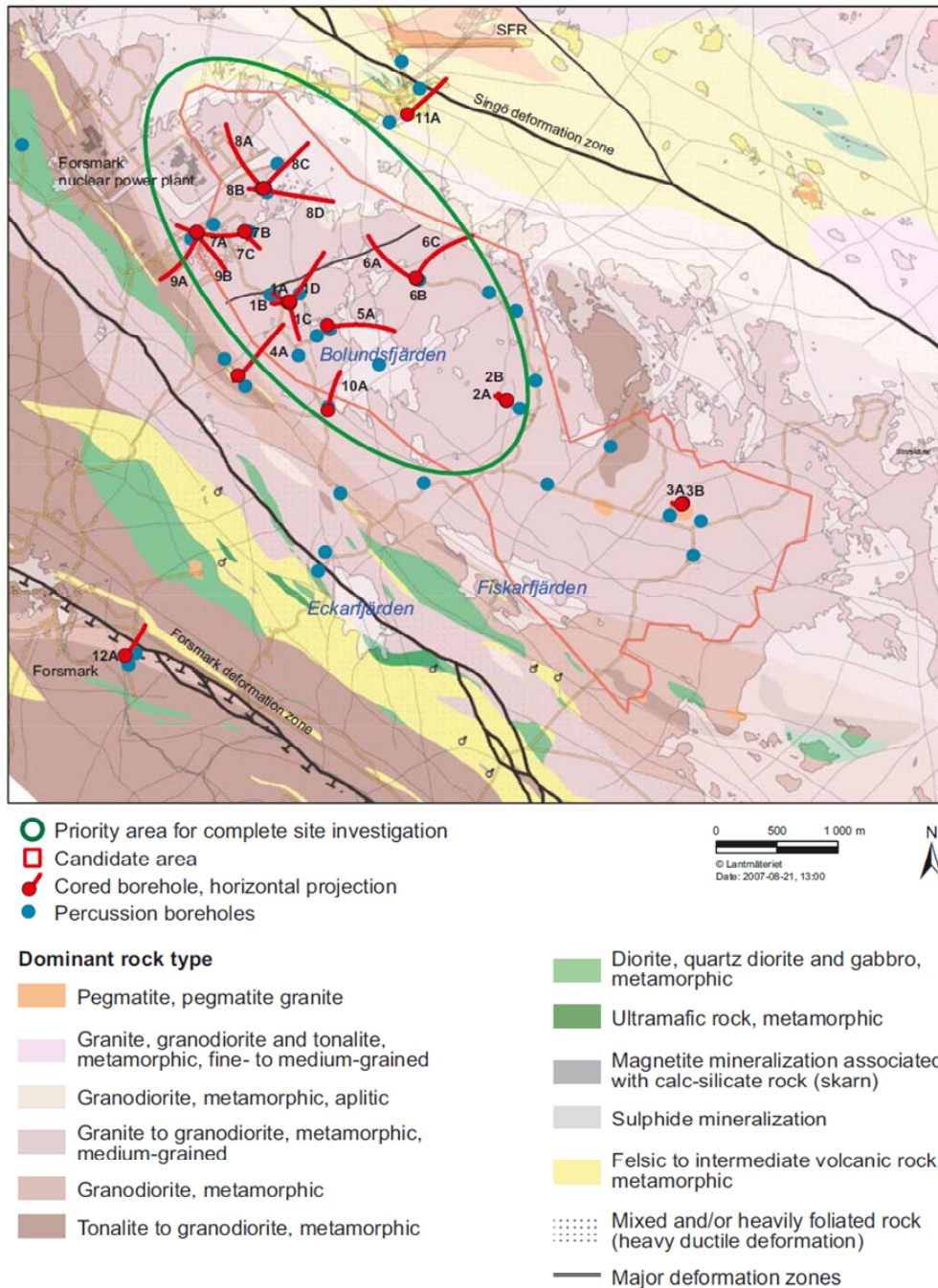


圖 2.1.5-4 瑞典 Forsmark 最終處置場的鑽孔位置與地質分布

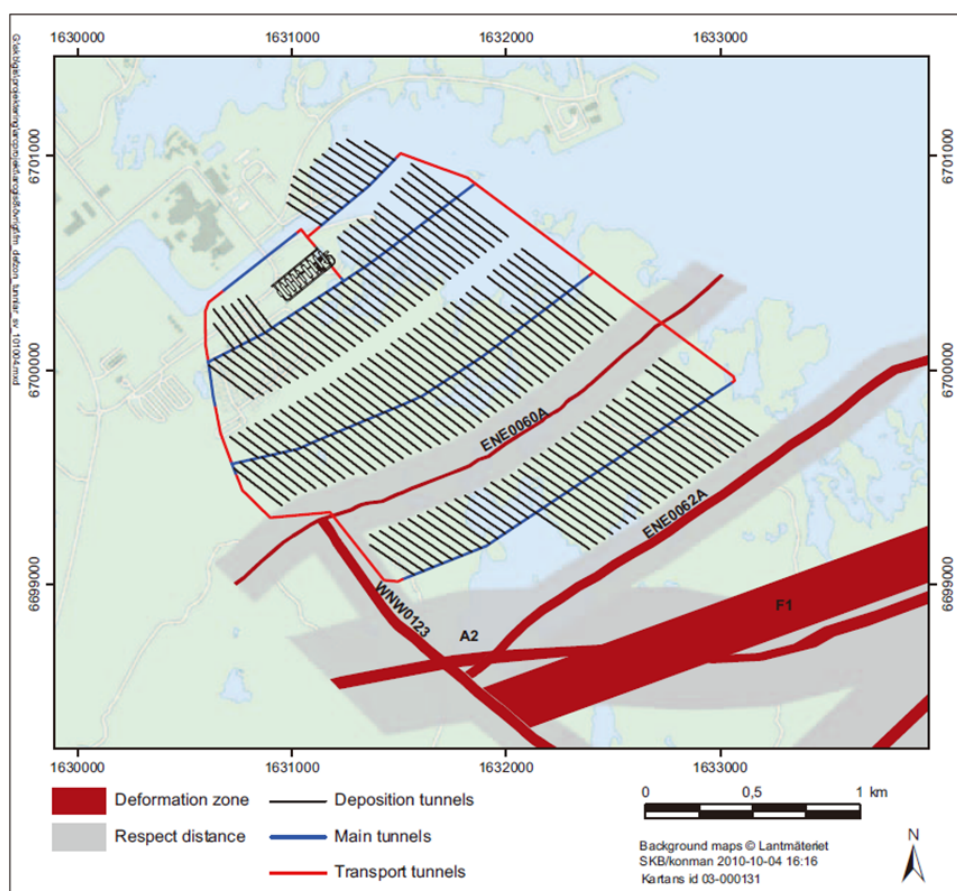


圖 2.1.5-5 瑞典最終處置場的處置坑道布置與變形帶之相對位置

## 2.2 芬蘭

### 2.2.1 芬蘭高放射性廢棄物最終處置場安全法規簡介

芬蘭之核能安全管制架構主要由「核能與輻射防護法案」(Nuclear Energy Act and Radiation Protection Act)與核能相關之條例(Decrees)所規範，而核能安全管制機構則為芬蘭輻射和核能安全中心(STUK)屬獨立機構。於 2008 年頒佈「放射性廢棄物最終處置安全法令」為目前芬蘭用過核燃料處置之主要安全法規。詳細的安全管制規則是由 STUK 依「核能與輻射防護法案」所制訂之安全基準，詳細的規定施行細節與適用範圍，此指引稱為 YVL 指引(Regulatory Guides on Nuclear Safety)。

最終處置長期安全之 YVL 指引原為 2001 年頒佈之「YVL8.4 用過核燃料處置之長期性安全」，以及 2002 年時另頒佈處置場營運之詳細安全規則「YVL8.5 用過核燃料處置場之營運安全指針」。而後於 2008 年開始將規劃將一系列 YVL8 指引改訂為 STUK-YVL D 指引，與本計畫相關之 YVL8.4 與 YVL8.5 將併入 STUK-YVL D.5「放射性廢棄物最終處置」之中。

依其安全規定，需預測至少數千年之間人類可能受到曝露所接收之劑量限值，對公眾之年有效劑量需低於 0.1mSv，而針對人口較高區域(沿岸行政區)則需低於 0.1mSv 之 1/10~1/100。

## 2.2.2 選址過程

芬蘭的高放射性廢棄物最終處置工作主要是由經營 Olkiluoto 核電廠的 Teollisuuden Voima Oy(TVO)公司負責。自 1983 年開始，芬蘭依循其法規開始進行高放射性廢棄物最終處置場址篩選作業，並可大致區分為三個階段，如表 2.2.2-1 所列。其用過核燃料最終處置場選址目標說明如下：

- 一、可以安全發展最終處置設施的場址。
- 二、場址可以保持長期抑制核種釋放的功能。
- 三、具備工程建設可行性。
- 四、不論是施工或封閉期間，其對環境的影響均是可接受的。
- 五、民眾可接受該場址的處置設施開發。
- 六、整體成本具可行性。

表 2.2.2-1 芬蘭高放射性廢棄物最終處置場篩選階段表

順序	年代	階段說明	主要調查目標
一	1983~1985	場址鑑別調查	選擇將進行初步調查之場址。
二	1986~1992	初步場址調查	針對具有合適母岩特性之區域進行初步場址調查。
三	1993~200	詳細場址調查	基於初步場址調查階段的成果，選擇幾處場址區域進行詳細調查，據以選擇最合適之區域。

### 一、場址鑑別調查階段



最初主要利用地質因子進行篩選，利用衛星影像(Landsat-1 的夏天與冬天影像)、航空磁測與重力測量圖來檢測基岩大尺度的斷層與破裂。由此分析成果，再藉由航拍影像、區域地球物理判釋與地質圖做更進一步的場址篩選。在此階段也開始拜訪被篩選出之區域，著手取得進行更進一步調查之許可。

雖然當時 IAEA 與 NEA (IAEA 1977; NEA 1977)也建議了許多其他的篩選因子，諸如：地形地貌、地震活動與侵蝕等。但芬蘭認為對其影響較為顯著之地質因子為斷層與破裂帶，並依據斷層與破裂帶的持續性(persistence)、寬度與規模(magnitude)等進行分類。由於大型破裂帶為斷層活動最主要之影響區域，地質構造穩定且被大型破裂帶所圍繞之岩區，可避免斷層活動直接切斷母岩內之處置設施，故其主要遴選目標為地質構造穩定且被大型破裂帶所圍繞之岩區。在此階段共選出了 327 個地質合適之標的區域(Target Areas)，其大多數的區域面積介於 100~200 平方公里。

為了刪減可能的調查區域與數量，進而引入了環境與交通運輸因素，並且將這些因素區分為排除性因素與其他合適因素兩大類。其中，排他因素主要包含如：地下水源保護區、國家環境保護區與高人口密度區域等。而其他合適因素之交通運輸的連結與衝擊因素，如：橋樑的載重限制、道路與鐵路系統等。土地所有權因素則是在取得場址長期調查許可的考量下，認為土地所有權人數量越少越好，甚至是最佳狀況是由單一地主所擁有。

標的區域主要藉由三級分類之方法進行刪減，最佳之第一級區域之因素考量以人口密度最低、良好的運輸連結以及非耕作區域為主。基於處置設施需求，標的區域之調查面積

至少需介於 5~10 平方公里方能取得足以代表區域之場址特性。詳細之篩選條件說明詳如 2.2.4 節與 2.2.5 節所述。

藉此，逐步將標的區域刪減至 61 個、再選出 134 個調查區域、再細分為 85 個潛力調查區域，乃至於 5 個初步調查場址，如圖 2.2.2-1 所示，而場址鑑別調查階段之整體流程如圖 2.2.2-2 所示。

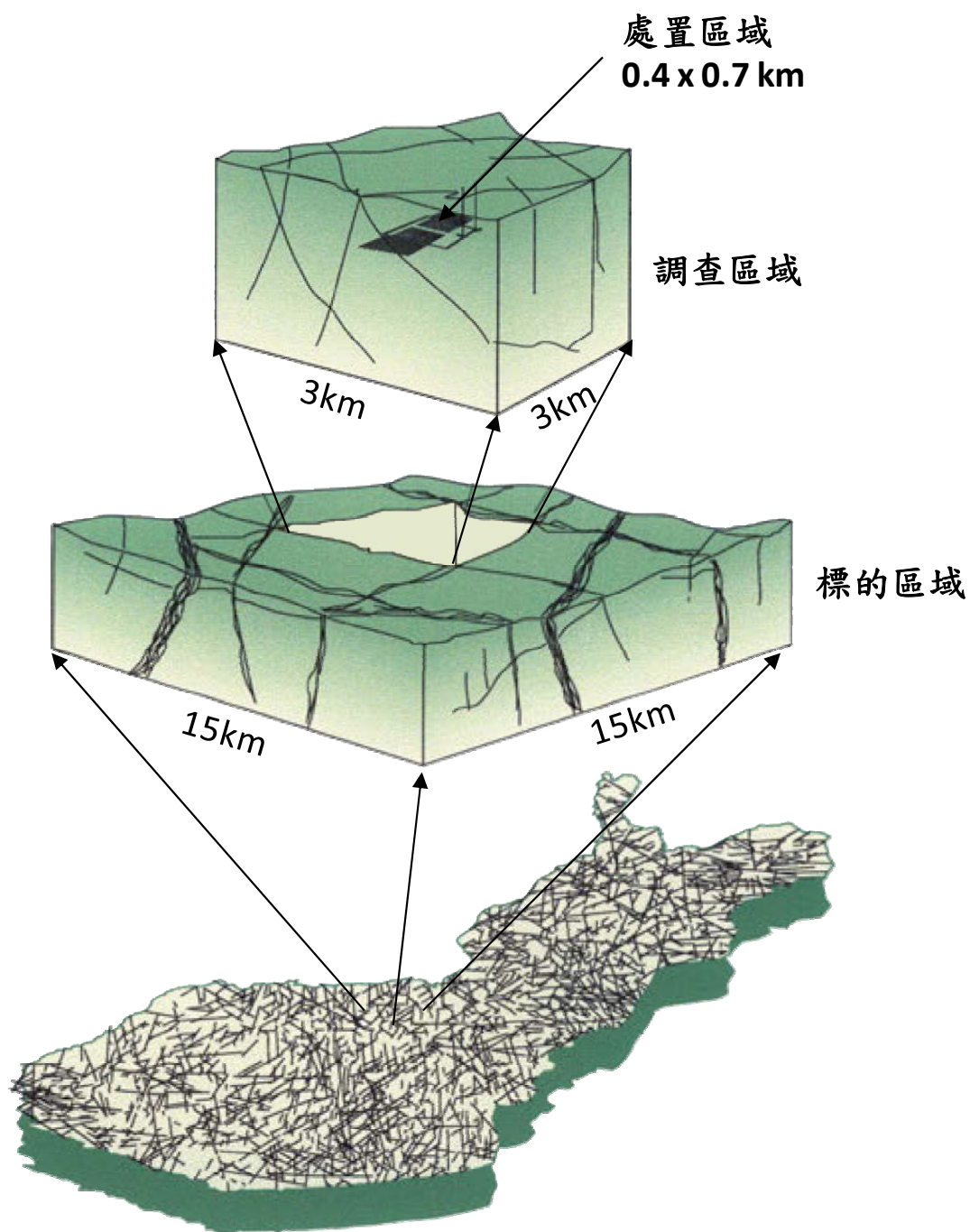


圖 2.2.2-1 芬蘭之調查區域篩選概念示意圖

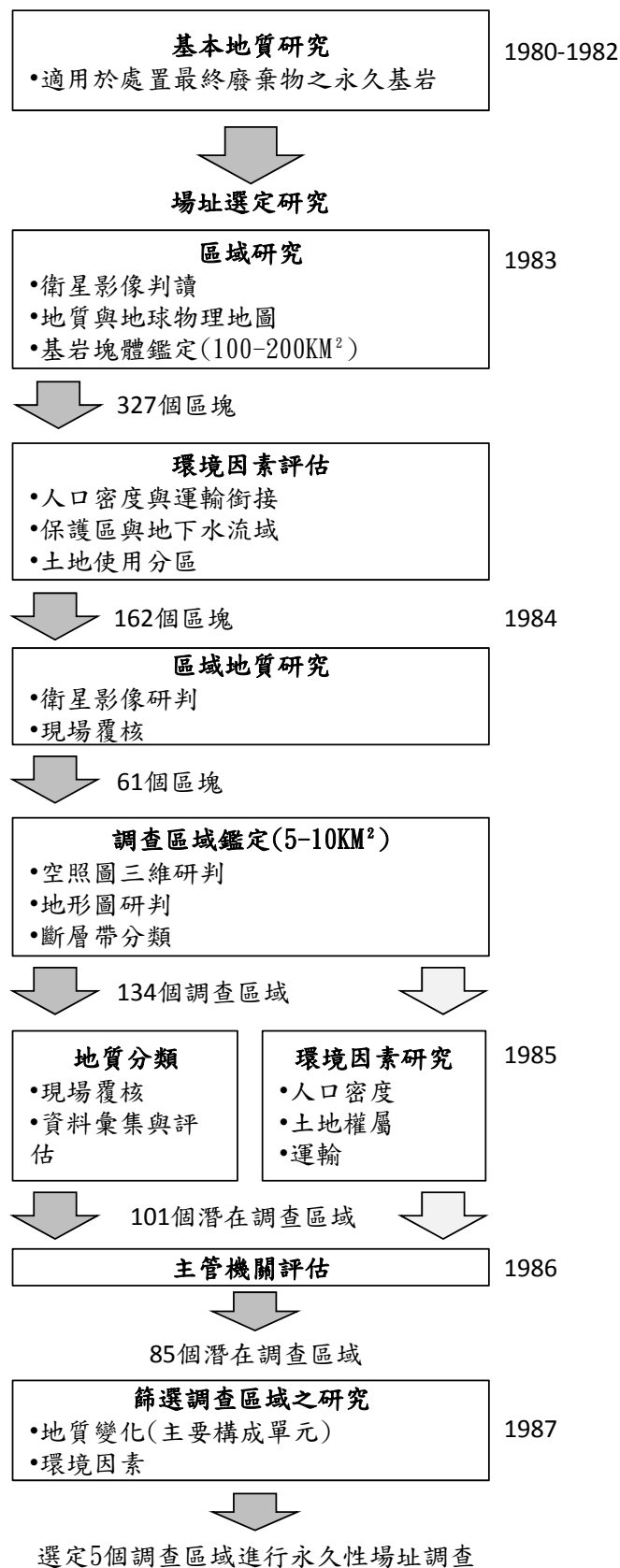


圖 2.2.2-2 芬蘭於場址鑑別調查階段之整體流程示意圖

## 二、初步場址調查階段

TVO 為了可以順利進行下一階段的調查工作，希望可以將場址數量降低至 2 或 3 處，以便進行更精細的調查。TVO 在此階段的場址篩選考量主要包括：

- (一)TVO 認為場址的地質條件越單純，則其所需的調查工作較單純，且安全分析的可靠度亦較高。所以，希望可以盡可能的選擇較單純的地質條件，以便使調查與安全分析的不確定性，可被有效的限制在可接受的範圍內。
- (二)由於被篩選出的場址其地質條件均十分類似，為了選擇出合適的場址，仍需要進一步考量其他的篩選因子。TVO 在此階段認為最重的因素為「對當地社區的影響」以及在相對無人居住地區的「潛在地區勞動力供應」。

在 1987~1992 年期間的初步場址調查結果，已直接應用於 TVO-92 的安全分析計畫(Vieno et al. 1992)。同時，也依據調查後發展的母岩地質模型，初步規劃出地質處置設施的工程佈置。且依其初步現場調查結果與初步安全分析成果，Syyry 與 Veitsivaara 等場址均是合適的場址，然而最終這兩處場址也被排除了。

## 三、詳細場址調查

其餘的 Olkiluoto、Romuvaara 與 Kivetty 場址於 1993~2000 年間進行了詳細的場址調查，並規劃於 2000 年選出 1 處最終處置場址。而在 1994 年，因核能法規修訂禁止用過核燃料的境外輸入與輸出，而不再由 Loviisa 核電廠船運過核燃料至俄羅斯，並準備在芬蘭境內進行最終處置。由於 Loviisa 已有相當多的地質與環境調查資料，且在 1995 年時其核電廠所在區域被考慮可成為最終處置區域，而且在 Loviisa 所在的 Hastholmen 島所進行的初步可行性研究獲得良好的成果。同時由核能發電業者組成 Posiva 接續 TVO 推

動最終處置作業，以 Olkiluoto、Romuvaara、Kivetty 與 Hastholmen 等 4 處場址，於 1997 年至 1999 年間同時進行詳細場址調查工作。

「原則決定」(Decision in Principle (DiP))是基於芬蘭核能法規規定，在重要核能設施進入實施階段前必須取得之決定。於 1999 年 5 月，Posiva 為了取得「原則決定」而向政府提出申請，並在此申請程序中宣布將僅針對 Olkiluoto 進行更詳細之調查。除了申請文件外，同時亦提交了四個場址的場址特性評估報告與 TILA-99 安全分析報告。在 TILA-99 安全分析報告中，其結論認為四處場址均能提供安全處置高放射性廢棄物必要之地質環境，而且並沒有哪一個場址的地質環境特別優良。

安全分析與報告審查由 STUK 負責審查，並於 2000 年 1 月向政府提出接受 Olkiluoto 為潛在場址的書面意見，並向政府提出下一階段的處置發展計畫(STUK, 2000)。場址所在地的 Eurajoki 地方政府於 2000 年 1 月由議會表決過 Olkiluoto 為最終處置場的決定(贊成：20，反對：7)。芬蘭政府於 2000 年 12 月同意「原則決定」，後於 2001 年 5 月經國會表決通過(贊成：159，反對：3)。

## 2.2.3 場址鑑別調查之場址篩選條件

### 2.2.3.1 「場址鑑別調查階段」初期之場址篩選條件

#### 一、場址地質篩選條件

在芬蘭進行選址工作初期，國際上之深層地質處置場地質篩選條件以 OECD/NEA 於 1977 年公布之建議為主，其建議之最終處置場地質包含：鹽丘(salt domes)、黏土質岩石沉積(argillaceous sequences)、結晶岩(crystalline rocks)、火山碎屑沉積(volcaniclastic deposits)。而 IAEA 於同年亦公布其深層地質處置場地質篩選條件建議文件(IAEA, 1977)。當時由芬蘭地質調查單位(GTK)負責針對當時國際間之相關工作成果，與 NEA 基於芬蘭地質條件所提出之建議進行探討。最後，基於「抑制核種釋放」與「限制核種傳輸途徑」兩大考量下，於「場址鑑別調查階段」初期其最主要之地質考量為：

- (一)岩石的礦物成分。
- (二)裂隙地下水與裂隙表面物質的化學關聯性。
- (三)構造與其對水力傳導特性的影響。

#### 二、其他選址條件

TVO 將環境因子篩選條件訂定為三級分類進行篩選：

##### (一)第一級環境因子篩選條件：

- 1.人口稀少，區內無已發展區域。
- 2.無交通流量大之道路系統，但整體之交通連接性佳。
- 3.該區域無明顯環境保護區域且無使用中之地下水資源。

##### (二)第二級環境因子篩選條件：

- 1.無大型城市分布或大小適合定居之區域。
- 2.有合理的交通連接性。
- 3.具有任何一種環境保護區，但其範圍相對較小。
- 4.區域內沒有明顯的地下水資源。

(三)第三級環境因子篩選條件：

- 1.區域內有大型都市。
- 2.具有交通流量大之道路系統且沿線有聚落分布。
- 3.該區域無交通系統。
- 4.區域內包含許多環境保護區，其範圍相對較大。
- 5.區域具有明顯的地下水資源。

在此階段，滿足第一級與第二級條件之場址各有 76 個，第三級條件之場址計有 186 個，而後再利用下列因子進行場址數刪減，將標的區域數降至 61 個，其條件如下：

- (一)標的區域面積大小。
- (二)標的區域內含有合適基岩分布率較小。
- (三)地質破裂的密度。
- (四)地形特徵。
- (五)地質露頭的等級。

### 2.2.3.2 「場址鑑別調查階段」後期之場址篩選條件

#### 一、場址地質篩選條件

後續 61 個標的區域中，利用既有調查數據、衛星影像與地圖等資料再篩選出 134 調查區域。為了區別 134 個可能的調查區域，GTK 擬定了地質適宜性分級，說明如下：



- (一)第一級地質適宜性：由 GTK 基於地表地質調查等資料，有最高的信心程度研判其具有地質適宜性的潛力，共計選出 20 個區域。
- (二)第二級地質適宜性：基本上仍屬具有地質適宜性潛力的場址，但於由於在資料研判上具有較大的不確定性，因而列入第二級，共計有 38 個區域。
- (三)第三級地質適宜性：在地質特徵上具有一些問題的場址，但經過地質鑽探調查後，或許可以證明其地質適宜性，共計有 43 個區域。
- (四)第四級地質適宜性：有明顯不利的地質構造且區塊面積普遍較小，共計有 33 個區域。

## 二、其他選址條件

TVO 在此階段也將非地質篩選因子進行分級，說明如下：

### (一)人口密度因子

- 1.第一級：該區域無人居住或耕作，並且沒有城市或人口分布於該地區。
- 2.第二級：該區域有建物但無大面積耕作，並且沒有城市或高密度人口分布於該區域。
- 3.第三級：該地區具高人口密度或人口分布，甚至地區有城市，有耕地且存在其他相關活動。

### (二)土地所有權因子

- 1.第一級：該區域幾乎為國家或私人企業所擁有，土地所有權人數少。
- 2.第二級：該區域部分為國家與私人企業所擁有，部分為私有土地。
- 3.第三級：該區域土地幾乎均為私有土地。

### (三)交通運輸因子

- 1.第一級：離鐵路系統之距離短於 10 公里。

- 2.第二級：離鐵路系統之距離介於 10~30 公里。
- 3.第三級：離鐵路系統之距離超過 30 公里。

## 2.2.4 初步場址調查階段

### 一、初步場址現地調查目標

場址現地調查的目標在於取得場址特性參數，作為進行場址設施長期安全功能評估以及施工可行性評估之依據。調查的重點在於確定場址之母岩地質結構與地下水流場特性。因此，本階段調查之主要目標為母岩的水力傳導係數、地質破裂帶之幾何特性、傳導特性與分布位置、以及地下水的化學特性。依學科領域區分場址調查目標如下：

#### (一)地質與地球物理調查

- 1.確定地質組成各岩態產狀、礦物組成、分布面積與深度。
- 2.測繪壓碎與破碎帶、不連續性，確認地質特性並發展地質概念模型。
- 3.測定地球化學、岩相、礦物質與礦物組成特性，用以評估母岩與地下水間之交互作用。
- 4.測定母岩的應力狀態與評估其方向性。
- 5.測定產生母岩現況構造的大地構造過程。
- 6.建構母岩岩性與構造模型。
- 7.鑽孔位置與取樣位置。

#### (二)水文地質調查

- 1.測量母岩之水文地質特性，包含：水力傳導係數、主要的水力連通特性與水頭分布。
- 2.確定地下水於母岩中運移受到何種地質構造控制與其特性(如：破碎帶、地層邊界、裂隙等)。
- 3.建置地下水流模型。
- 4.生成安全分析所需之初始條件。

### (三)地下水化學特性

- 1.產生場址不同位置與深度之地下水化學成分數據。
- 2.產生地下水起始與停留時間的數據與其組成變化。

#### 二、初步場址現地調查成果

摘錄各場址之初步調查成果如表 2.2.4-1~表 2.2.4-7 與圖 2.2.4-1 所示。

表 2.2.4-1 芬蘭各場址之岩石種類、露頭裂隙密度、岩心裂隙密度與百分比

場址	岩石種類	露頭裂隙密度 (裂隙 m <sup>-1</sup> )	岩心裂隙密度 (裂隙 m <sup>-1</sup> )	岩心裂隙 百分比(%)
Romuvaara	英雲片麻岩	0.4	2.1	5.8
	雲母片麻岩	0.4	2.0	6.8
	英閃片麻岩	0.5	2.2	1.2
	花崗閃長岩	0.7	1.9	0.4
	輝綠岩	1.2	3.7	1.9
Veitsivaara	英雲片麻岩	1.0	2.0	1.6
	花崗岩	1.5	2.9	21.1
	輝綠岩		4.1	64.4
Kivetty	斑狀花崗岩	0.7	2.4	2.2
	斑狀花崗閃長岩	0.7	1.4	1.3
	花崗岩	1.1	2.2	0.3
	花崗閃長岩	1.9	3.5	1.3
	輝長岩	2.0	1.8	
Syyry	英雲閃長岩	1.1	2.6	3.2
	雲母片麻岩		1.7	2.8
	淡色石英閃長玢岩	1.2	2.3	5.6
Olkiluoto	雲母片麻岩/脈狀片麻岩	0.7	2.1	2.1
	石英-花崗閃長岩	0.8	1.3	
	花崗岩/偉晶花崗岩	0.6	2.3	1.4



表 2.2.4-2 芬蘭各場址地質鑽探調查之破裂岩體特性表

場址	破裂岩體(%)	破裂面平均寬度(m)
Romuvaara	6.1	1.9
Veitsivaara	24.6	3.5
Kivetty	4.2	1.6
Syyry	8.7	1.9
Olkiluoto	2.3	1.8

表 2.2.4-3 芬蘭各場址於 500 公尺以下之水力傳導係數調查與常態分布統計表

場址	水力傳導係數調查數值( $\log_{10}ms^{-1}$ )			常態分布	
	平均值	中數	標準偏差	期望值	標準偏差
Romuvaara	-8.9	-9.2	1.3	-9.2	1.7
Veitsivaara	-8.7	-9.0	1.3	-9.0	1.6
Kivetty	-8.7	-9.0	1.3	-9.0	1.6
Syyry	-8.2	-8.5	1.9	-8.5	2.3
Olkiluoto	-8.7	-9.0	1.4	-9.1	1.8

表 2.2.4-4 芬蘭各場址於 200 公尺~500 公尺間之水力傳導係數調查統計表

場址	水力傳導係數調查數值( $\log_{10}ms^{-1}$ )		
	平均值	中數	標準偏差
Romuvaara	-9.3	-9.8	1.0
Veitsivaara	-9.1	-9.1	0.9
Kivetty	-9.0	-9.4	1.1
Syyry	-8.5	-9.3	1.8
Olkiluoto	-9.0	-9.2	1.3

表 2.2.4-5 芬蘭各場址於 200 公尺以上之水力傳導係數調查統計表

場址	水力傳導係數調查數值( $\log_{10}ms^{-1}$ )		
	平均值	中數	標準偏差
Romuvaara	-7.8	-8.1	1.3
Veitsivaara	-7.7	-7.4	1.5
Kivetty	-7.5	-8.0	1.4
Syyry	-7.1	-7.0	1.9

Olkiluoto	-7.9	-8.0	1.6
-----------	------	------	-----

表 2.2.4-6 芬蘭各場址於 500 公尺深度之母岩與破裂帶地下水通量  
分析表

場址	母岩地下水通量( $l m^{-2} a^{-1}$ )	破裂帶地下水通量( $l m^{-2} a^{-1}$ )
Romuvaara	$2 \times 10^{-2}$ - 0.15	$10^{-1}$ - 150
Veitsivaara	$10^{-2}$ - $10^{-1}$	1 - 2000
Kivetty	$10^{-2}$ - $5 \times 10^{-2}$	$5 \times 10^{-2}$ - 100
Syyry	$10^{-2}$ - $5 \times 10^{-2}$	0.2 - 300
Olkiluoto	$10^{-3}$ - $10^{-2}$	$10^{-2}$ - 30

備註：假設破裂帶寬度為 10 公尺。

表 2.2.4-7 芬蘭 5 處場址地下水質調查之綜合統計表

項目	Romuvaara			Veitsivaara			Kivetty		
	(最小)	(最大)	(中數)	(最小)	(最大)	(中數)	(最小)	(最大)	(中數)
TDS,mg/l	61.7	189.9	150.2	63.2	170.6	122.3	133.2	240.2	202.8
pH,field	6.8	9.3	8	6	8.2	6.9	7.2	8.5	7.8
el.cond.(field),mS/m	7.7	19.3	11.2	4.5	19.3	10.2	14.8	26	18.4
Eh(Pt,field),mV	-330	230	-91.5	-99	260	163.8	-350	400	3.3
O <sub>2</sub> (field),mg/l	0	1.1	0.5	0	8	2.7	0	0.4	0.1
Na,mg/l	4.3	43.2	9	2.5	31	11.9	4.7	27	13.6
K,mg/l	0.7	3	2	0.4	1.1	0.6	0.2	2.4	1.5
Ca,mg/l	2.7	23	13.9	3.9	18	11.9	11.2	33	23.9
Mg,mg/l	0.1	5.3	4	0.6	2	1.2	0.9	8.6	6.1
Fe(tot,lab),mg/l	0	3	1.1	0	0.9	0.3	0	1.4	0.3
Cl,mg/l	0.9	7.4	1.9	0.6	20	6.3	1	5.8	2.3
HC0 <sub>3</sub> ,mg/l	0	123.3	83.7	24.4	92.8	55.8	82.4	158.6	132.9
S0 <sub>4</sub> ,mg/l	1	6.5	2.2	0.5	6.8	2.1	0.1	3.5	1.6
H-3,TU	9.9	35.8	23.2	14	51	24.4	6	34	9.2
H-2,%oSMOW	-110.1	-98.5	-103.5	-104	-94.4	-98.9	-101.8	-92.7	-96.5
0-18,%oSMOW	-13.7	-12.8	-13.1	-13.7	-12.4	-13.1	-13.5	-12.4	-12.6
C-14,pmc	71.3	71.3	71.3	33.1	33.1	33.1	8.8	80.4	44.5
C-13,%PDB	-19.8	-19.8	-19.8	-19	-19	-19	-21	-19.3	-20
項目	Syyry			Olkiluoto					
	(最小)	(最大)	(中數)	(最小)	(最大)	(中數)			
TDS,mg/l	264.8	10991.4	3444.6	1374.3	35109.4	9119			
pH,field	6.5	9.3	8	7.2	9.1	8.3			
el.cond.(field),mS/m	24.9	1729	563.7	210	5000	1323.9			
Eh(Pt,field),mV	-487	70	-288.9	-290	35	-143.9			
O <sub>2</sub> (field),mg/l	0	0.9	0.1	0	0.9	0.3			
Na,mg/l	17	1870	609.9	360	6622	1917.8			
K,mg/l	2.2	26	7.9	4.7	19.8	10.6			
Ca,mg/l	26	2200	624.2	74	6214	1370.4			
Mg,mg/l	1	38	12.8	22.6	65.5	40.2			
Fe(tot,lab),mg/l	0	9.1	2.2	0.1	2.5	0.5			
Cl,mg/l	3.4	6830	2024.2	421	22000	5437.7			
HC0 <sub>3</sub> ,mg/l	19.5	189.2	96.8	12.8	346.6	174.9			
S0 <sub>4</sub> ,mg/l	1.5	20	7.9	0.1	396	126.2			
H-3,TU	3	34	9.2	6.4	25	-14.6			
H-2,%oSMOW	-104.7	-88.8	-93.6	-91.9	-64.4	-80.4			

0-18,‰SMOW	-12.9	-11.9	-12.2	-11.1	-8.7	-10.3	
C-14,pmc	33.6	75.1	62.9	18.7	47	38.5	
C-13,%PDB	-19.8	-5.6	-9.7	-20.8	-14.3	-17.8	

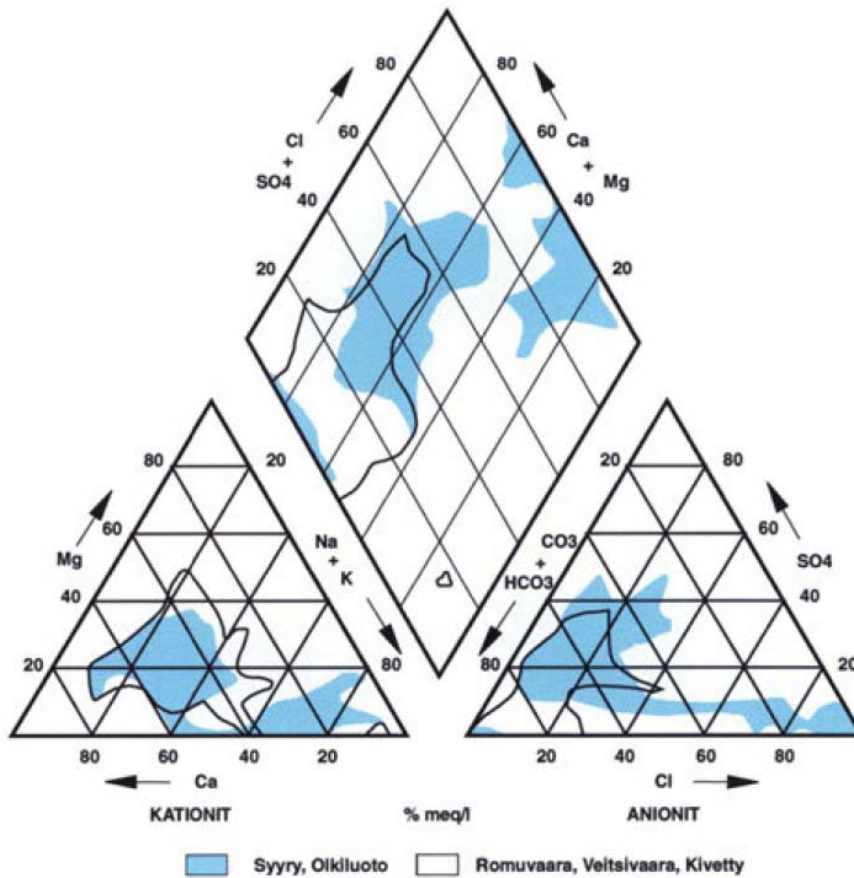


圖 2.2.4-1 芬蘭地表水與地下水樣品的主要離子比例

### 三、場址比較與總體評價

#### (一)場址比較

##### 1.Romuvaara 場址

依據 Romuvaara 場址建立地質模型的經驗，其破裂帶與完整母岩之區隔明顯，並能利用深層鑽孔量測水頭，據以證實破裂帶分布位置以及地下水流場特性。而此一調查特性，對於地下水數值模型建立以及參數校驗相當有幫助。由於在場址中心區域較淺層之地下水補注區域，有幾

個會對地下水流場產生主要影響之破裂帶分布，故建議應於此區域做進一步調查。



## 2. Veitsivaara 場址

Veitsivaara 場址的花崗岩與輝綠岩碎裂程度比片麻岩還高，而地下水主要自東向西流動。而遇到 Takkupuro-Varpuoja 破裂帶則立即轉北，此特性對於地水流場控制相形重要。其破裂帶的效應亦可清楚的在水頭分布量測之特性中反映出來。由於部分鑽孔量測剖面產生異常的水頭反應，故在其建立之母岩模型中有部分破裂帶特性不易解釋。因此，在地下水數值模式的解析與量測水位比較存在有較大的差異。這些主要的破裂帶與裂隙構造被視為決定此場址是否適合興建處置設施之決定性因素。有鑑於地下水流場特性與 Takkupuro-Varpuoja 破裂帶之主導特性，建議於下一階段針對此破裂帶進行更全面性的調查。

## 3. Kivetty 場址

Kivetty 場址受到西南側的沼澤影響其地下水位是變動的，而場址的特性主要受到中央區域的垂直破裂帶所影響。由於中央區的地下水流幾乎垂直破裂帶，從另一方面而言，這些破裂帶具有隔離母岩受到干擾的功能。在地下水流場模擬成果與長時間井測成果之比較，獲得良好的模擬結果，且由其中部分鑽孔的測試反應，證實了這些破裂帶對於場址而言具有水理邊界的效果。在 Kivetty 場址中數個位於破裂帶間之區域被考慮可視為處置設施布設位置。雖然此區域屬沼澤特性，一般認為是難以進行地質調查之區域，但由於其破裂帶具有一致性而提升了正確調查特徵的可能性。

#### 4.Syyry 場址

在這 5 個場址中，Syyry 場址是被調查出有最多破裂帶的區域，雖然可能是因此區域地質鑽孔數量也是最多的緣故。但其構造特性並不統一，同時破裂帶具有複雜的異質水力特性。因此，其水力試驗結果與模式解析成果的相關性亦較差，地下水流模擬成果也難以解釋長期井測的結果。而從場址調查的觀點而言，區域內的表面沉積物與雲母片麻岩即被認為是不利因素，同時也增加了建構地下水與地質概念模式建構的不確定性。

#### 5.Olkiluoto 場址

Olkiluoto 場址是這些場址中面積最小的，其鑽孔調查幾乎集中在整個島的中心。此區域相對具有較多破裂帶，而且在長期井測的過程中也證實了破裂帶與母岩間明顯的對比。大多數的水頭調查可以支持結構位置與方向，以及水力特性的推測。

### (二)總體評價

由 5 處場址的「調查難易度」、「安全分析所需資料的調查」與「處置設施設計」進行總體評價後，依獲取資料的難易度、可信度與不確定性等因素，將其區分為兩類。較佳的一類為 Romuvaara、Kivetty 與 Olkiluoto 場址，而 Veitsivaara 與 Syyry 場址則為較差的一類。因此，以 Romuvaara、Kivetty 與 Olkiluoto 等 3 處場址，進入詳細場址調查階段。

## 2.2.5 詳細場址調查與最終處置場址選址

### 一、詳細場址調查階段主要工作與目標

#### (一) 主要目標

在詳細場址調查的階段中，其主要工作目標如下：

1. 基於早期調查結果建立信心，並基於調查結果確認排除場址的理由。
2. 基於岩石特性調查的結果進行補充並擴大調查範圍。
3. 進一步確認安全分析所需之岩體與地下水系統重要參數的數據，例如：近場的地下水化學特性與破裂帶特性等。
4. 針對最終處置場開發與設施設計的需求，進行相關調查以取得數據。

#### (二) 主要工作

1. 基於需求條件、實驗室試驗、理論解析與數值模式的成果，準備場址的地質、水文地質與地球化學特性總評估報告。
2. 在已知的知識範圍內進行場址特性理解與評估，且對剩餘的不確定性部分亦進行評估，再綜整出場址的整體評價。
3. 更精確的定義出具有潛力的合適岩體，場址整體的合適性研判，以及最終處置所需技術與安全接受度。
4. 準備進行場址之最終處置設施功能評估工作。

### 二、詳細場址調查階段的最終處置場址選址

場址篩選過程的調查與評估，其目的在於建立一個評估場址整體合適性的方法，且同時兼具法定要求與環境安全。最後，芬蘭認為在評估場址適宜性有幾個因素是一定需要加以考慮的，包括：處置設施建設的可行性、基於長期安全性

評估考量下的場址重要地質特性、以及當地居民的支持程度。這些因素的考量說明如下：

### (一)長期安全性

依長期安全的考量，場址在處置深度的地質必須是穩定的，並且不應該被大型破碎帶切割。因為在這樣的環境中，水文地質和地球化學的演變過程才會是緩慢且可預測的。而接近中性 pH 值、低硫化物濃度與  $TDS < 100 \text{gl}^{-1}$  的環境與地球化學條件下，工程障壁的力學與阻滯核種遷移功能將可維持的更久。水文地質方面則以近場的通量為主要考量，故以水力梯度小與水力傳導係數低之環境為佳。

### (二)建造可行性

處置設施需要一處可以採用一般施工方法即可進行建造之場址，故需要一處在處置深度有合適岩石可建造坑道且不需過多額外支撐，開挖時可能遭遇的地下水滲入問題也需加以考量。因為採用的支撐技術或地下水控制措施都可能會導致長期安全性的風險。

### (三)擴建的可能性

場址選擇時需要考量是否具有擴充處置設施的可能性，這樣的需求可能會來自於核電廠延役，或是新增反應爐等能源政策的決定。

### (四)處置場營運

處置設施將會興建在一處符合所有安全法規要求之場址，並透過現場調查結果分析隧道穩定與營運風險。運輸用過核燃料至處置場也是營運階段的重要工作之一，在運輸過程中的安全性需仰賴合適的運輸包件設計與運輸方式。而場址區位選擇時，亦需考慮其對於用過核燃料的運輸需求。

### (五)社會衝擊

不論是場址調查、興建、營運與封閉等階段之社會接受度均是相當重要的考量因素，最好可以透過與當地政府以及居民一起合作的過程來提升接受度並降低社會衝擊。

#### (六) 土地利用與環境衝擊

處置設施場址需要一定的基地面積，依要求其僅能作為處置設施使用，不能再進行其他類型的土地利用。此外，運輸用過核燃料至處置場會對運輸路線之周圍環境造成潛在的風險與衝擊。

#### (七) 基礎建設

最終處置場需要搭配合適的基礎建設，包含交通網絡與需由當地提供的各項工業服務與服務業供應。

#### (八) 總成本

處置設施的建造與營運成本高低，直接受到場址選擇的影響。例如：運輸距離的運輸成本、設施興建成本等。

### 三、選址結果

1999 年 Posiva 提出 4 處候選場址之「用過核燃料處置安全評估報告」(TILA-99)。於 2000 年芬蘭政府認可「原則決定」，於 2001 年經議會通過，選定奧爾基洛托(Olkiluoto)為最終處置場，並於 2004 年開始建設地下特性調查設施 ONKALO。

## 2.2.6 芬蘭高放射性廢棄最終處置場簡介

### 一、處置場簡介

芬蘭的高放射性廢棄物最終處置場規劃處置用過核燃料，規劃之處置深度約為地下 400 公尺至 700 公尺之花崗岩層，目前由 Posiva 為負責執行機構。奧爾基洛托(Olkiluoto)位於芬蘭西南部，面向波西尼亞(Bosnia)灣，如圖 2.2.6-1 所示，處置場佈置如圖 2.2.6-2 所示，相關基本資料如表 2.2.6-1 所列。

### 二、安全對策

芬蘭高放射性廢棄物最終處置之廢棄物主要為核電廠之用過核燃料。其設計概念與瑞典 SKB 之概念類似，用過核燃料將被密封於具銅製外層與鑄鐵內層的容器罐中，如圖 2.2.6-3 所示。

而其處置概念與鄰國 SKB 所採行之「KBS-3 概念」亦十分類似，亦是將用過核燃料密封於容器罐中，密封容器罐周圍包覆緩衝材料(膨潤土)，希望可以達成力學與化學的穩定性，進而安定的定置於岩盤內。再由人工障壁與天然障壁組成之多重障壁系統來進行放射性廢棄物的長期隔離。其安全概念主要為隔離並遲滯核種自處置設施中釋出。而至於用過核燃料密封容器罐的定置方式，雖然暫以直立式定置為主要考量方案，但目前亦與 SKB 合作共同研究橫置處置坑道之技術開發。

表 2.2.6-1 芬蘭高放射性廢棄物最終處置場規劃基本資料

執行機構	Posiva
處置廢棄物	用過核燃料(BWR、VVER、ERP)
處置量	9,000 噸(2010 年規劃)
處置場址	奧爾基洛托(Olkiluoto)
地質環境	結晶質岩
處置深度	400 公尺~500 公尺
處置場規模	坑道設施面積：0.3 平方公里 地面設施面積：1.5 平方公里 處置坑道總長度：約 40 公里



圖 2.2.6-1 芬蘭高放射性廢棄物最終處置場預定位置示意圖



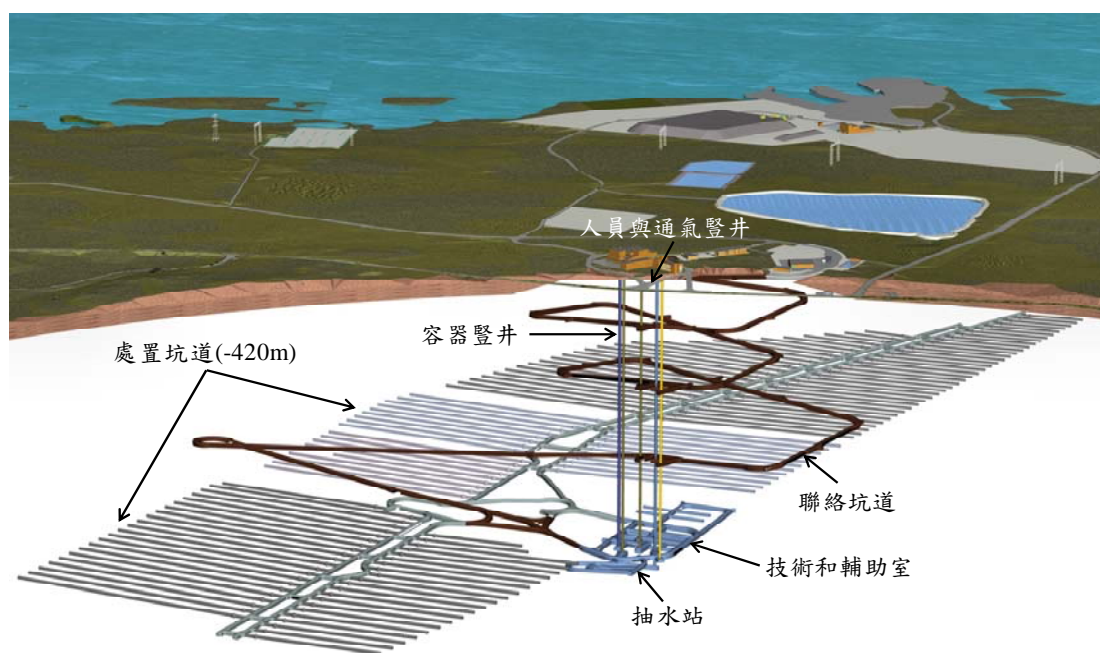


圖 2.2.6-2 芬蘭高放射性廢棄物最終處置設施示意圖



圖 2.2.6-3 芬蘭處置容器罐

## 2.3 日本

### 2.3.1 日本高放射性廢棄物最終處置場安全法規簡介

日本為完善處置處置用過核燃料的再處理廢棄物，並確保人民的健康與社會經濟安定發展，於 2000 年 6 月完成「特定放射性廢棄物最終處置法 (Specified Radioactive Waste Final Disposal Act)」(簡稱「最終處置法」)立法，且於同年 10 月設立高放射性廢棄物之專責機構-原子力發電環境整備機構 (Nuclear Waste Management Organization of Japan，簡稱 NUMO)，專門負責高放射性廢棄物之處置場選址、處置技術驗證、執照申請、處置場建造、運轉與封閉等工作。2002 年 9 月，原子力安全委員會針對不利於處置場的環境，提出「高放射性廢棄物處置之初步調查區域選定所考慮的環境條件」。2004 年，原子力安全委員會因應國際趨勢，提出「放射性廢棄物處置安全管制的共同重要事項」，認為處置的長期安全具有很高之不確定性，有必要參酌採用風險機率概念方式，進行放射性廢棄物處置的安全評估，並依不同發生頻度的對應情節，採取不同的劑量限值，讓安全評估更具科學的合理性，所考量的各情節分述如下：

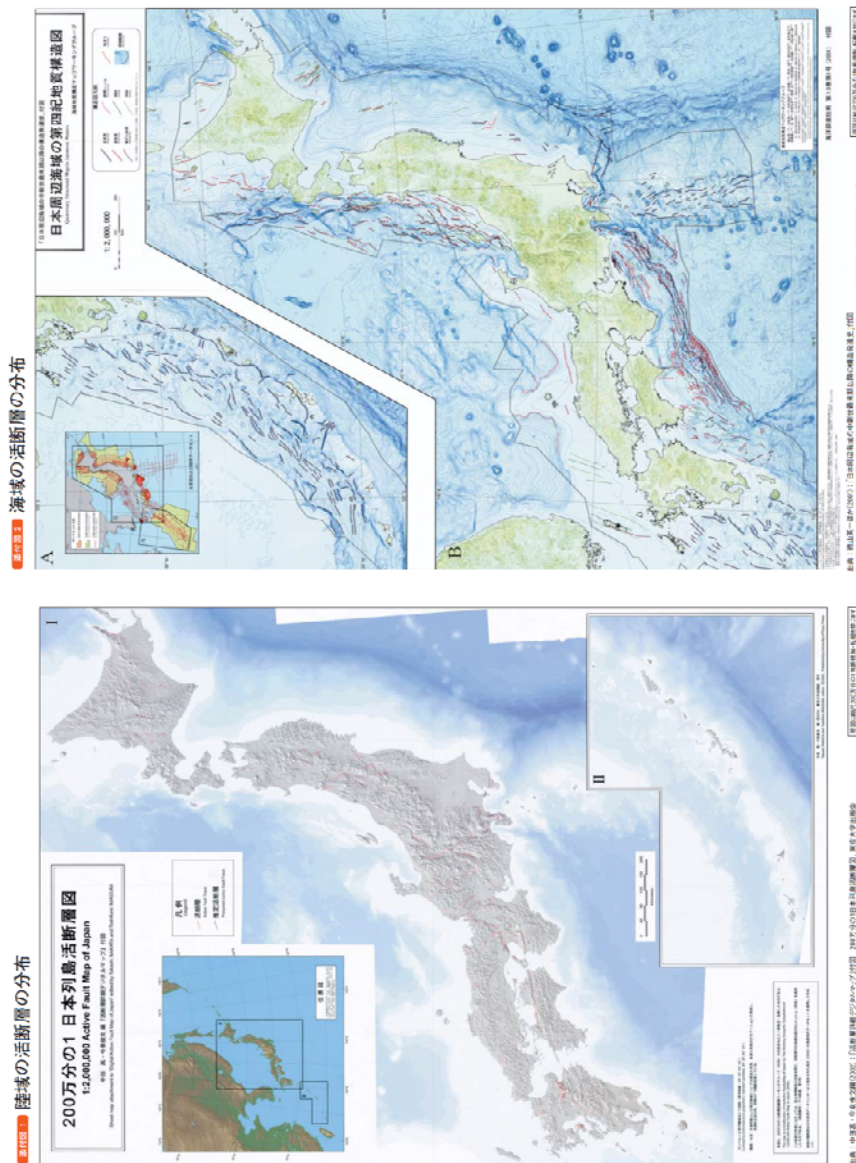
- 一、基本情節：劑量限值為  $10\mu\text{Sv}/\text{yr}$ ，考量在正常情況下處置設施的工程障壁，能如預期有效的將放射性廢棄物和人類生活圈隔離，地層隆起或侵蝕及氣候變遷所引起的地下水條件變動範圍較小，其評估情節確實而採用之評估數據適當。
- 二、變動情節：劑量限值採用為  $0.3\text{mSv}/\text{yr}$ ，考量在正常情況下，處置設施的工程障壁發生比預期較早的劣化，地層隆起或侵蝕及氣候變遷所引起的地下水條件變動範圍較大，其評估情節具科學的合理性，而採用之評估數據範圍適當。

三、人為或稀有事件情節：劑量限值為 10~100mSv/ yr，考量人為的偶發處置區挖掘行為，或是突發的大規模的地震對地下水造成極大變動的情節。由於未來人類挖掘行為的不可預測性，可採行現代的挖掘行為為預想的評估情節。

### 2.3.2 選址流程

日本的高放射性廢棄物最終處置的選址作業由 NUMO 專門負責，並依據「最終處置法」的相關規定辦理。日本基於尊重地方意願的觀點，其選址作業採公開徵求的方式，讓有意願之地方政府以市町村為單位提出自願申請，整個選址流程如圖 2.3.2-1 所示。提出申請後，NUMO 先利用全國性的文獻調查資料，判斷自願之市町村範圍內是否有活動斷層分布，以及是否位於未來數萬年間有可能活動之火山中心半徑 15km 範圍內，如圖 2.3.2-2 所示，確認地質條件符合要求後，再進行後續的調查作業。調查作業分為文獻調查、初步調查及詳細調查三階段，分別說明如下：





### 一、文獻調查(選定初步調查區域)

根據「最終處置法」第 2 條第 5 項，初步調查區域是為了選出詳細調查區域而先以文獻及相關資料初步篩選出適合之範圍，主要針對地震、火山噴發、隆起、侵蝕等會對地層造成顯著影響的自然現象(以下簡稱「地震等自然現象」)進行文獻調查。根據「最終處置法」第 6 條第 1 項，文獻調查項目包括過去發生過之「地震等自然現象」、未來可能會對地層造成顯著變動的「地震等自然現象」、經濟產業省規定的其他事項(第四紀鬆散沉積物存在狀況的相關資料、礦物資源

存在狀況的相關資料)等。最後，根據調查結果篩選出初步調查區域，將報告書提送至地方政府，並辦理公開閱覽及公開說明會，以達資訊透明化及廣納民意之目的。待經濟產業大臣同意後，即可進行下一階段的初步調查，有關選定初步調查區域之流程如圖 2.3.2-3 所示。

## 二、初步調查(選定詳細調查區域)

根據「最終處置法」第 2 條第 6 項，詳細調查區域是在初步調查區域內，藉由地表勘查、鑽探調查、物理探查等量測與試驗，篩選出未來較為穩定且不會對開挖造成阻礙之地層，以利後續選出最終處置設施建設地點。根據「最終處置法」第 7 條第 1 項，初步調查項目包括「地震等自然現象」、地層變動、岩石種類與特性、活動斷層的詳細資訊、破碎帶與地下水流的概要資訊以及經濟產業省規定之其他項目。完成調查後，同樣需要提送報告書至地方政府，所需的流程與文獻調查階段相同。

## 三、詳細調查(選定最終處置設施建設地點)

根據「最終處置法」第 2 條第 7 項，最終處置設施建設地點是在詳細調查區域內進行相關調查，針對地層的物理性質及化學性質，篩選出適宜作為最終處置設施設置之場址。根據「最終處置法」第 8 條第 1 項，詳細調查項目包括地層內的岩石強度及其他物理性質、地層內的氫離子濃度及其他化學特性、地層內的地下水流以及經濟產業省規定之其他項目。

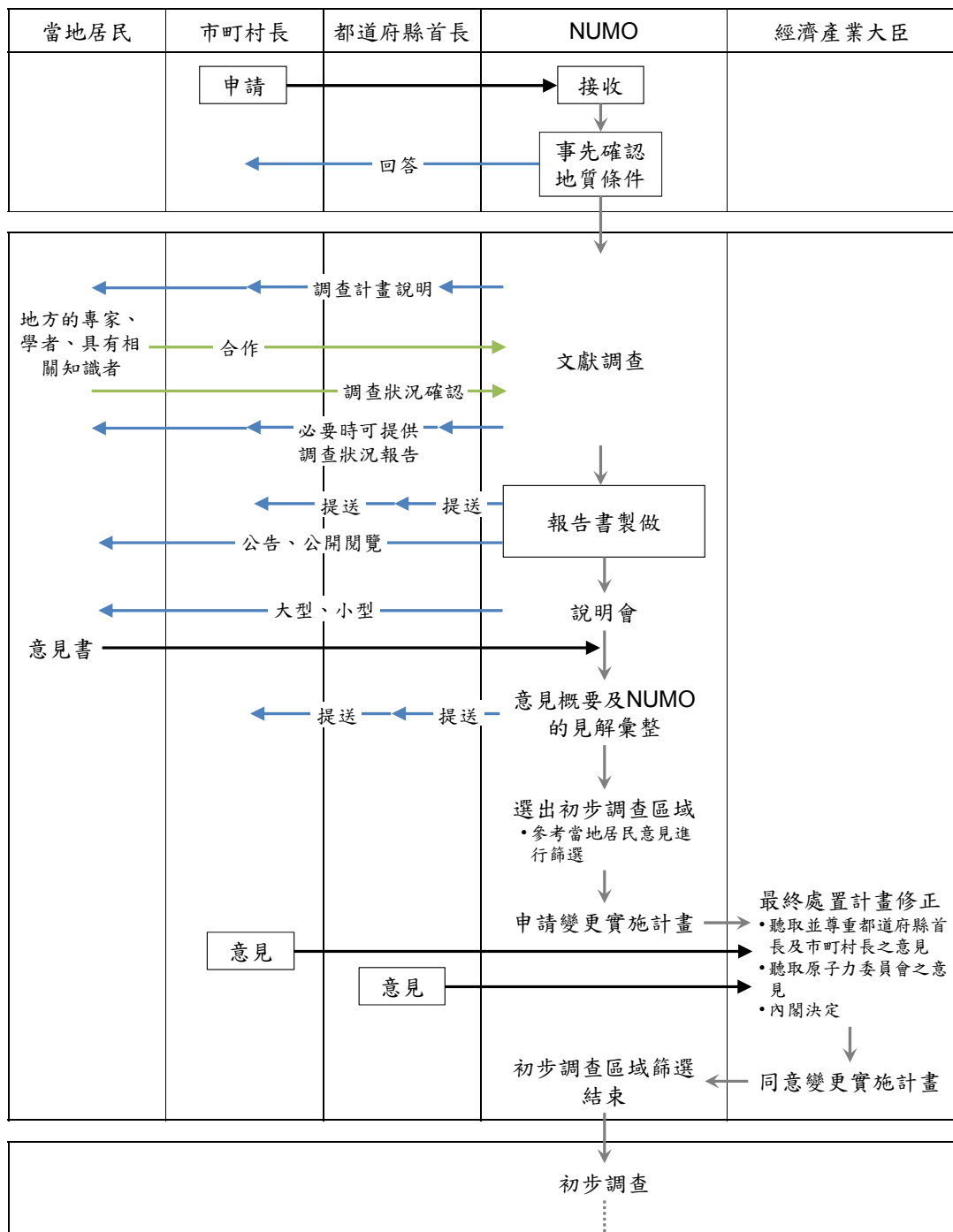


圖 2.3.2-3 日本於文獻調查階段之流程

NUMO 自 2002 年底開始，透過電視、雜誌、報紙及海報大力推動公開徵選志願場址。NUMO 在公開徵選處置場址開始前，已舉辦過 31 次公開討論會，而在公開徵選處置場址後，也已舉辦過 48 次小組辯論會。2007 年，高知縣的東洋町正式提出高放處

置自願場址之申請，但因當時的町長連任失敗，由另一位反對該鎮被選為處置場址之候選人當選，隨即撤回申請，迄今日本高處置選址作業仍在持續努力當中。

### 2.3.3 確保安全之構想

日本的放射性廢棄物分為第一種放射性廢棄物與第二種放射性廢棄物，相當於我國之高放射性廢棄物與低放射性廢棄物。對於高放射性廢棄物及部分低放射性廢棄物，日本主張以超過 300 公尺的深層地質處置方式進行最終處置。深層地質處置的高放射性廢棄物來源，是用過核燃料棒經過再處理之後產生的高放射性核廢液，由於液體狀態溶液在地震時溢出，或放置的容器損壞時容易造成液體流出，具有極高的危險性。因此將這些核廢液與玻璃原料混合放置到不鏽鋼的容器中使其固態化，稱為玻璃固化體。每個玻璃固化體的直徑約 0.4 公尺、高約 1.3 公尺，重量約 500 公斤，最終處置場將需能容納 40,000 個玻璃固化體。此外，MOX 燃料(Mixed oxide fuel)工廠或再處理工廠於加工處理的過程中，除了產生高放射性廢棄物外，亦會產生放射性較低、發熱量較小的低放射性廢棄物，稱之為 TRU 廢棄物，此種低放射性廢棄物亦須採深層地質處置。這些低放射性廢棄物來自於處理過程中產生的濃縮廢液、固體廢棄物、排氣過濾器中用過的吸附材料、用過核燃料棒的零件等，將其壓縮減容後，依據廢棄物種類放置於金屬罐(直徑 0.4m、高 1.3m)、金屬桶(直徑 0.6m、高 0.9m)或方型容器(長 1.2m、寬 1.2m、高 1.6m)中。初步估計，最終處置場需可容納 18,100m<sup>3</sup> 的低放射性廢棄物。

深層地質處置可以避免放射性廢棄物遭受地震、海嘯與颱風等天然災害影響，以及人為的戰爭與恐怖活動干擾。此外，當處



置設施位於較深的地底時，核種遷移主要是以地下水為傳輸媒介，然而此處的地下水流動相當緩慢，可延長核種傳輸至生物圈的時間。另一方面，處置容器在地底深處之氧化作用相較於地面上而言較不明顯，可降低處置容器發生銹蝕等化學作用之機率，進而延長其壽命。為確保處置場有足夠的安定性，從地理、地形及地質上考量場址的位置，可能位於內陸或沿岸的高山、平原、丘陵或島嶼，地質條件則可能為結晶岩或沉積岩，由於尚未確定場址的位置，故先針對內陸及沿岸分別進行概念配置，如圖 2.3.3-1 及 2.3.3-2 所示。

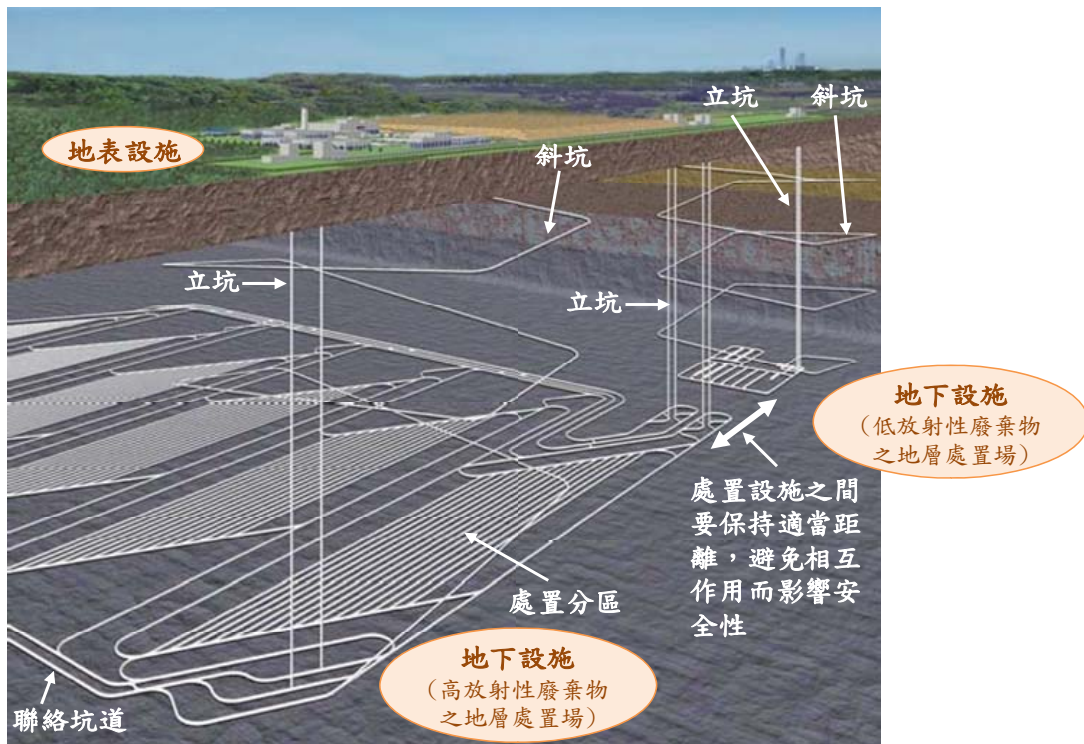


圖 2.3.3-1 日本處置場的概念配置(內陸)

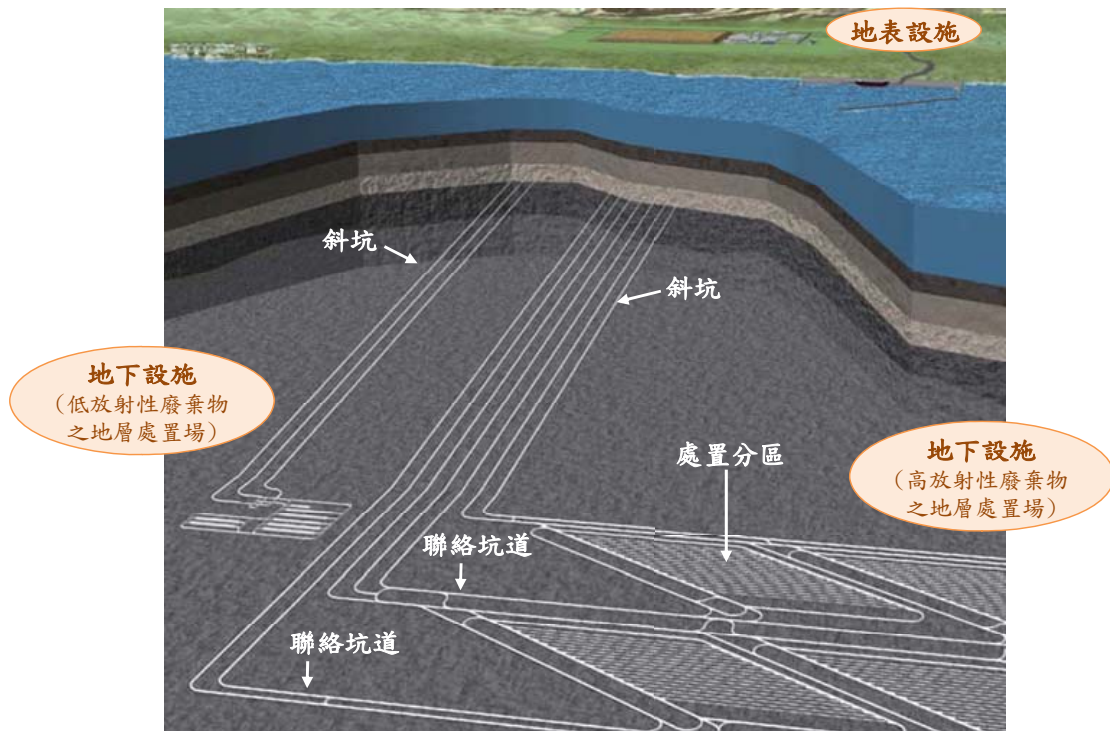


圖 2.3.3-2 日本處置場的概念配置(沿岸)

內陸的深層地質處置初步規劃位於地表下 1000 公尺的結晶岩中，包含地表設施及立坑、斜坑、處置坑道、連絡坑道等地下設施。高放射性廢棄物處置區內有 6 條立坑(直徑 7m)、1 條斜坑(直徑 5m)、數條處置坑道(直徑 5m)與連絡坑道，總長度約 270km，總開挖土方量約 690 萬立方公尺。低放射性廢棄物處置區內則有 2 條立坑(直徑 6m)、1 條斜坑(直徑 5m)、數條處置坑道(直徑 9m 或 12m)與連絡坑道，總長度約 30km，總開挖土方量約 80 萬立方公尺。沿岸的深層地質處置規劃位於地表下 500 公尺的沉積岩，包含近岸的地表設施及海床下的斜坑、處置坑道、連絡坑道等地下設施。高放射性廢棄物處置區內有 7 條斜坑(直徑 5m)、數條處置坑道(直徑 2m)與連絡坑道，總長度約 260km，總開挖土方量約 390 萬立方公尺。低放射性廢棄物處置區內則有 3 條斜坑(直徑 5m)、數條處置坑道(直徑 11m 或 12m)與連絡坑道，總長度約 30km，總開挖土方量約 120 萬立方公尺。

除了利用穩定的岩盤作為處置場的天然障壁外，也會根據廢棄物特性，以工程手段阻滯核種遷移，使核種在到達生物圈之前即衰減至對人體無害的程度。由工程障壁與天然障壁組合而成的多重障壁系統之概念，如圖 2.3.3-3 所示。高放射性廢棄物的放射性高且發熱量大，其放射性隨時間的衰變，約在 1,000 年後可達固化完成時的三千分之一，而在 100,000 年後則衰變至固化完成時的三萬分之一。為防止放射性物質與地下水接觸，故玻璃固化體須另外裝在厚度約 20 公分的鐵製包封容器內，再進行處置。而低放射性廢棄物的放射性較低且發熱量小，不需要多一層包封容器，但為了方便堆疊與處置，廢棄物金屬罐會以 4 個為單位，放在方型容器中，金屬罐間用水泥材料填充，可固定金屬罐並吸附與遲滯放射性核種的遷移。不論是低放射性廢棄物或高放射性廢棄物，周圍都會填充膨潤土與石英砂混合而成的緩衝材，其低透水性可延遲地下水入侵至廢棄物體的時間，遲滯放射性核種遷移。最後再以坑道開挖的剩餘土砂與膨潤土混合成的回填材料，將立坑、斜坑、處置坑道、連絡坑道等所有坑道與開口予以封閉，完成處置場的封閉作業。

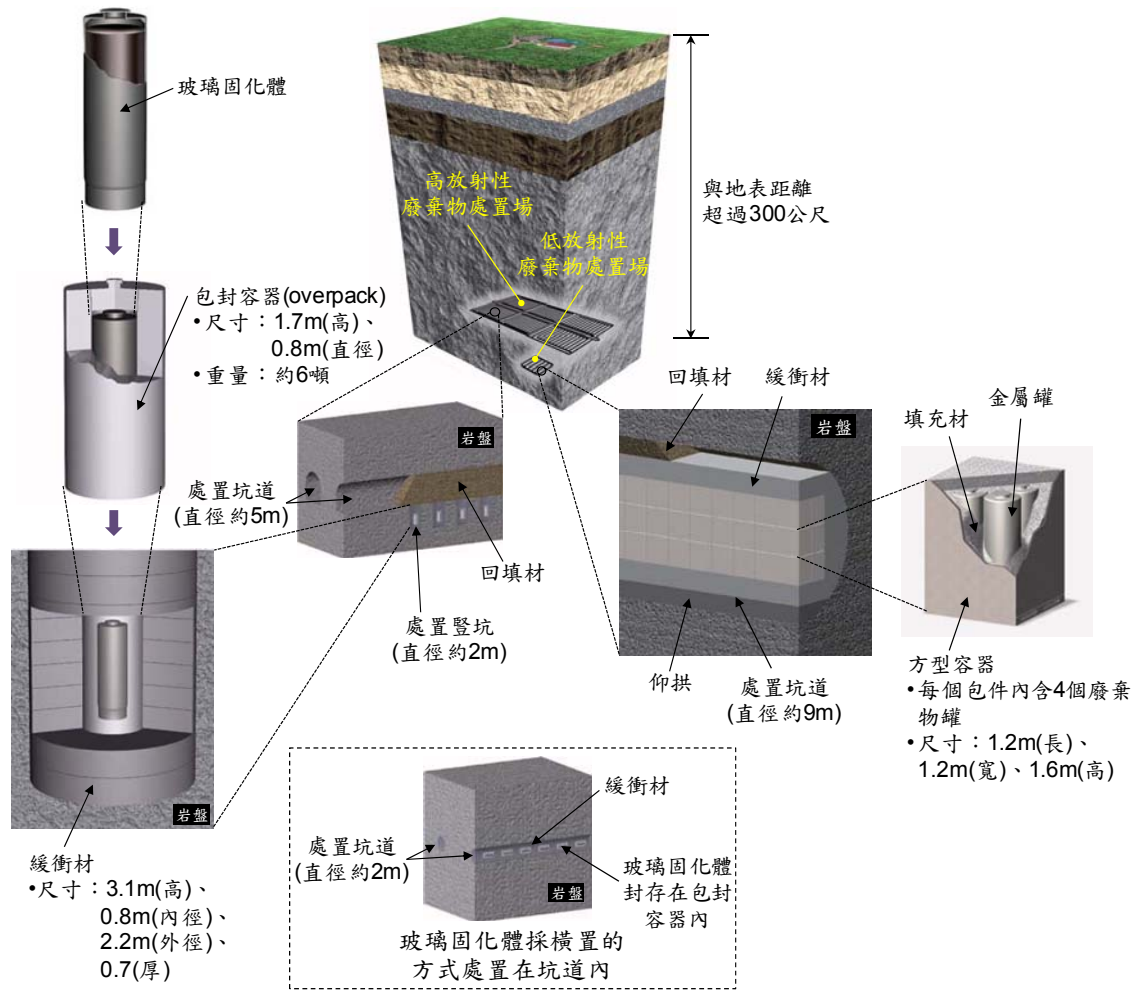


圖 2.3.3-3 日本深層地質處置的多重障壁系統概念圖

## 2.3.4 場址篩選條件

### 2.3.4.1 場址篩選要求

由前節可知，場址篩選分為文獻調查、初步調查及詳細調查三個階段。為選出初步調查區域、詳細調查區域及最終處置設施建設地點，「最終處置法」於第 6 條~第 8 條，分別規定篩選要求，如表 2.3.4.1-1 所示。

表 2.3.4.1-1 日本最終處置法於各階段篩選之要求

	特定放射性廢棄物最終處置法	特定放射性廢棄物最終處置法 施行規則
初步調查區域選定	(第 6 條第 2 項) 1.該區域內沒有「地震等自然現象」造成的顯著地層變動之紀錄。 2.該區域內，未來之「地震等自然現象」造成顯著地層變動的風險低。 3.其他由經濟產業省規定之事項。	(第 6 條第 2 項) 經濟產業省規定之事項包括： 1.該區域內沒有第四紀鬆散沉積物之紀錄。 2.該區域內沒有高經濟價值礦產資源存在之紀錄。
詳細調查區域選定	(第 7 條第 2 項) 1.«地震等自然現象»不會對該區域地層造成長期的顯著變動。 2.該區域之地層不會阻礙坑道開挖。 3.該區域內之活動斷層、破碎帶及地下水流不會對坑道及其他地下設施造成不利影響。 4.其他由經濟產業省規定之事項。	
最終處置設施建設地點選定	(第 8 條第 2 項) 1.地下設施在該區域之地層內，不易受到異常壓力作用，且地層的物理性質適合設置最終處置設施。 2.地下設施在該區域之地層內，不易受到異常腐蝕作用，且地層的化學性質適合設置最終處置設施。 3.該區域內之地下水及其水流，不會使地下設施的功能失效。 4.其他由經濟產業省規定之事項。	

此外，為確保未來能選出合適的處置場址，原子力安全委員會依據「最終處置法」，於 2002 年提出「高放射性廢棄物處置的初步調查區域選定階段所需考量的環境條件」，針對初步調查區域選定階段的地質環境條件，說明如下：

#### 一、隆起、沉降、侵蝕

隆起、沉降、侵蝕對處置場的影響可分為兩部分，其一是隆起與侵蝕會使處置設施及廢棄物接近地表，另一則是隆起、沉降與侵蝕則會造成地下水流及水質改變。這些都會使放射性物質滲出，且容易在周邊的地質環境中遷移。

考量相關影響後，初步調查區域選定階段的環境條件為：「由於隆起與侵蝕會造成處置場及其周邊地質環境改變，故就避免處置設施及廢棄物接近地表的觀點來看，利用文獻調查找出隆起與侵蝕的影響範圍，並確保初步調查區域不包含在此範圍內。」當無法由文獻調查確認隆起與侵蝕的影響範圍時，則需藉由後續的初步調查，檢討處置設施及廢棄物接近地表的可能性。

而因隆起、侵蝕與沉降造成的地下水流動特性及水質改變等影響，若沒有經過實際的初步調查，很難確認是否會對處置場造成影響，故在初步調查區域選定階段的環境條件先不考量此項影響，留待後續階段檢討。

#### 二、地震、斷層活動

地震、斷層活動對處置場及其周圍地質環境的影響分為兩部分，其一是岩盤斷裂與破碎對處置設施與廢棄物產生直接破壞，另一則是岩盤斷裂與破碎形成地下水快速遷移路徑或是岩盤應變造成地下水壓變化等原因，而使地下水流動特性與水質改變。

考量相關影響，初步調查區域選定階段的環境條件為：「就避免處置設施與廢棄物產生直接破壞的觀點而言，利用文獻調查確認初步調查區域內沒有活動斷層存在。」若無法從文獻調查確認是否有活動斷層存在時，可由後續的初步調查，檢討活動斷層的位置是否會對處置設施造成影響。

而因岩盤斷裂與破碎形成地下水快速遷移路徑或是岩盤應變造成地下水壓變化等原因，而使地下水流動特性與水質改變等影響，若沒有經過實際的初步調查，很難確認是否會對處置場造成影響，故在初步調查區域選定階段的環境條件先不考量此項影響，留待後續階段檢討。

### 三、火山、火成活動

火山、火成活動對處置場及其周圍地質環境的影響分為兩部分，其一是岩漿貫入或噴發對處置設施與廢棄物產生直接破壞，另一是岩漿的熱造成地溫上升與熱水對流，以及熱水或火山氣體使地下水質改變。

考量相關影響後，初步調查區域選定階段的環境條件為：「就避免處置設施及廢棄物直接損壞的觀點而言，利用文獻調查，確認初步調查區域內沒有活躍於第四紀的火山存在。」若無法從文獻調查確認是否有活躍於第四紀的火山存在時，必需藉由後續的初步調查進行檢討。

而因岩漿的熱造成地溫上升與熱水對流，以及熱水或火山氣體使地下水質改變等影響，若沒有經過實際的初步調查，很難確認是否會對處置場造成影響，故在初步調查區域選定階段的環境條件先不考量此項影響，留待後續階段檢討。

### 四、礦產資源含量

由於探查或開挖礦產資源時可能會挖掘到廢棄物，使作業人員受到輻射暴露。故初步調查區域選定階段的環境條件為：「利用文獻調查，確認初步調查區域內沒有高經濟價值

或重要的礦物資源之礦床存在。」此階段所針對之礦產資源包括現在已經在使用的資源，或是未來有可能使用之資源，亦即有利用價值的金屬礦物或是煤炭、石油、天然氣等能源資源。此外，若無法從文獻調查確認是否有礦產資源存在時，必需藉由後續的初步調查進行檢討。

#### 五、岩盤特性

考量處置設施的深度、規模、配置、處置容量等設計可能因岩盤特性而受到過度限制，故初步調查區域選定階段的環境條件為：「利用文獻調查，確認初步調查區域內沒有第四紀鬆散沉積層廣泛分布。」若無法從文獻調查確認是否有第四紀鬆散沉積層廣泛分布時，必需藉由後續的初步調查進行檢討。而除了第四紀鬆散沉積層分布狀況以外的岩盤特性，例如岩盤破碎帶分布、地質構造、岩盤的規模與形狀、岩石的熱力學特性、岩盤的不均質性等，皆需實際進行初步調查才能評估其適宜性，故於詳細調查區域選定階段再行檢討。

#### 六、其他項目

其他還有可能會對處置場及其周邊的地質環境造成影響的項目，包括氣候變遷與海平面變動、地下水的流動特性、地下水與岩石的地球化學特性等，需藉由基本的初步調查才能進一步確認。



### 2.3.4.2 調查評估項目

雖然場址篩選分為文獻調查、初步調查及詳細調查三個階段，但目前 NUMO 僅針對文獻調查階段提出「初步調查區域選定上的考慮事項及其背景與技術根據」，說明初步調查區域選定的考慮項目及相關調查方法，以符合「最終處置法」第 6 條第 2 項對於初步調查區域選定之要求。後續的詳細調查區域選定與最終處置設施建設地點選定之考慮項目，尚在研擬中，故本章節將針對文獻調查階段說明篩選的相關條件與資訊。

#### 一、文獻調查內容

文獻調查之內容分為法規要求事項及附加評估事項兩部分，法規要求事項是「最終處置法」及其施行規則規定之項目，附加評估事項則是 NUMO 認為應該增加的額外項目。相關內容說明如下：

#### (一)法規要求事項

##### 1.地震

活動斷層的相關資訊，包括活動斷層的寬度及其外側變形帶所涵蓋的範圍、活動斷層分支可能性高的範圍、活動性撓曲與褶曲之分布範圍等。

##### 2.火山噴發

第四紀火山的位置、第四紀火山周邊於未來數萬年間有可能發生岩漿自地殼貫入或噴發出地表的範圍、岩漿造成的熱影響範圍、岩漿造成強酸性熱水的可能存在範圍、岩漿造成熱水對流的可能存在範圍。

##### 3.隆起侵蝕

過去 10 萬年間，侵蝕或隆起現象顯著的地區。

##### 4.第四紀鬆散沉積物

第四紀鬆散沉積物的分布狀況。

## 5.礦物資源

高經濟價值的礦物資源分布狀況。

### (二)附加評估事項

#### 1.地層的物理性質、特性

岩石強度、變形狀況、裂縫狀況、風化狀況、變質狀況、地溫梯度、岩體的形狀與規模、隆起與侵蝕之速度、孔隙水壓異常的可能性、膨脹岩層存在的可能性、氣體噴發的可能性、岩爆的可能性等。

#### 2.地下水特性

地下水的流量、流速、水溫、pH、氧化還原性等。

#### 3.地質環境的調查與評估

調查範圍、調查規模、調查時間、調查技術與評估方法的適用性、火成活動或斷層活動等地質環境的評估與模式化之難易度、土地使用等限制之調查。

#### 4.施工與營運期間的自然災害

地震、山崩、洪水等重大自然災害發生之可能性。

#### 5.土地取得

土地取得的難易度。

#### 6.運輸

是否有可利用的港口或與港口候選地點之距離等運輸之便利性。

### 二、文獻調查範圍

文獻調查範圍視調查內容而定，不同的調查項目其調查範圍亦有所不同。有關文獻調查的項目及其對應之範圍如表 2.3.4.2-1 所列，但可依各個地方的地質環境條件加以調整。表 2.3.4.2-1 中的區域地質及地質構造調查項目，並不在法規要求的項目內，但在對大多數的法規要求調查項目進行綜合

評估時，需用到區域地質及地質構造之相關資訊，故將其列入調查項目中。

表 2.3.4.2-1 日本文獻調查的項目、內容及範圍(1/2)

項目	內容	範圍
法規要求事項		
區域地質、地質構造	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 區域地質、地質構造</li> <li>• 地質構造發展史</li> <li>• 區域水文地質</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 志願申請區及其周邊</li> </ul>
地震、斷層活動	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 活動斷層的寬度及其外側變形帶所涵蓋的範圍</li> <li>• 活動斷層分支或長度方向擴張等之可能性</li> <li>• 活動性撓曲或褶曲存在的範圍</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 自志願申請區的邊界向外延伸 15km 所涵蓋之範圍</li> </ul>
火山、火成活動	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 岩漿自地殼貫入或噴發出地表的紀錄及未來發生之可能性</li> <li>• 岩漿造成的熱影響、強酸性熱水、熱水對流的存在及未來發生之可能性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 自志願申請區的邊界向外延伸 10~100km 所涵蓋之範圍</li> </ul>
隆起、侵蝕	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 過去 10 萬年間的隆起總量</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 自志願申請區的中心向外延伸數十公里所涵蓋之範圍</li> <li>• 當段丘的分布較少時，可以擴大範圍</li> </ul>
第四紀鬆散沉積物	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 地層是否可能為第四紀鬆散沉積物</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 志願申請區內可能作為最終處置之地層</li> <li>• 當志願申請區內沒有處置地層的資料時，可將調查範圍擴大至周邊地區的同地層</li> </ul>
礦物資源	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 高經濟價值的礦物資源之分布</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 志願申請區內可能作為最終處置之地層</li> <li>• 當志願申請區內沒有處置地層的資料時，可將調查範圍擴大至周邊地區的同地層</li> </ul>

表 2.3.4.2-1 日本文獻調查的項目、內容及範圍(2/2)

項目	內容	範圍
附加評估事項		
地層的物理性質、特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 岩盤強度、變形特性、裂縫、風化、變質</li> <li>• 岩盤形狀、規模</li> <li>• 岩石的礦物組成、化學組成</li> <li>• 孔隙水壓異常、膨脹岩層、氣體噴發、岩爆的可能性</li> <li>• 斷層活動對岩盤造成的力學或水理影響</li> <li>• 地溫梯度</li> <li>• 隆起或侵蝕速度</li> <li>• 鬆散沉積物的存在及其對施工性或安全性的影響</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 自志願申請區內，但沒有資料時，可將調查範圍向周邊擴大</li> </ul>
地下水特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 地下水的流量、流速</li> <li>• 水溫</li> <li>• pH</li> <li>• 氧化還原性</li> <li>• 電導率</li> <li>• 地下水的地化特性</li> <li>• 地下水的形成過程與年代</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 包括地下水補注區、流出區及自願申請區，範圍約為 100km<sup>2</sup></li> </ul>
地質環境的調查與評估	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 調查的範圍、規模、時間</li> <li>• 火成活動、斷層活動等地質環境的評估與模式化的難易度</li> <li>• 土地利用等限制的現地調查</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 包括左列項目的所有範圍</li> </ul>
施工與營運期間的自然災害	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 地震、海嘯、山崩、洪水、土石流、火山碎屑流等自然災害發生的可能性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 自願申請區及其周邊地區</li> </ul>
土地取得	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 土地利用狀況、有無使用限制、是否有公有地</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 自願申請區及其周邊地區</li> </ul>
運輸	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 是否有可利用的港口或與港口候選地點之距離等運輸之便利性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 涵蓋可能利用的港口、港口候選地點、自願申請區的所有範圍</li> </ul>

### 三、文獻蒐集的方法

文獻蒐集可考慮以下方法。

#### (一)資料庫檢索

- 1.圖面檢索：原子力發電環境整備環機構 GIS、日本地質圖索引圖資料庫(產業技術綜合研究所)等。
- 2.文獻檢索：日本地質文獻資料庫(GEOLIS；產業技術綜合研究所)、科學技術文獻速報(JICST；科學技術振興事業團)等。
- 3.刊物、書籍檢索：日本科學技術相關逐次刊物總覽檢索(國會圖書館)、日本全國書籍檢索(國會圖書館)等。

#### (二)相關機構提供之資料

無法利用全國資料庫取得志願申請區及其周邊地區的相關文獻資料，或文獻資料只能在該地區取得時，可採訪相關機構或請其提供相關的文獻紀錄，例如鐵路、道路、電力、瓦斯、自來水、通訊、港口、水壩、礦山、建築物等相關調查與施工紀錄；主管機關、都道府縣、市町村等相關機構的歷史紀錄；教育委員會、博物館、寺院等機構之研究論文；大專院校等研究與教育機構。

## 2.4 美國

### 2.4.1 美國高放射性廢棄物最終處置場安全法規簡介

為安全處置放射性廢棄物，美國於 1982 年訂定「核能廢棄物政策法(The Nuclear Waste Policy Act of 1982)」，該法指示高放射性廢棄物處置為國家的責任，聯邦政府應負責推動永久處置，電廠及放射性廢棄物產生者應承擔處置費用，並設立放射性廢棄物基金，以確保執行處置相關作業時有充足的經費可供運用，州政府、原住民部落、公眾則有參與處置場規劃與開發的權利。此外，亦明定核能管制委員會(Nuclear Regulatory Commission，簡稱 NRC)為安全主管機關，能源部(Department of Energy，簡稱 DOE)為建造與營運的執行機關，環保署(Environmental Protection Agency，簡稱 EPA)則負責建立公眾健康與安全之標準。EPA 因而在 1985 年發布「管理與處置用過核燃料、高放射性廢棄物與超鈾廢棄物之環境輻射防護標準(40 CFR Part 191)」，其對個人防護的要求為處置 1 萬年後的年有效劑量不可超過 0.15mSv。而後，原本的核子廢棄物政策法於 1987 年修訂為「核能廢棄物政策修訂法(The Nuclear Waste Policy Amendments Act of 1987)」，考量多處候選場址同時進行場址特性調查時，將需投入巨額經費，並且可能延誤處置作業的進展，國會在此修訂法案中選定 Yucca Mountain 候選場址進行調查及監測，並在修定法生效後 90 天內停止其他場址的調查活動。

1992 年，「能源政策法(The Energy Policy Act of 1992)」要求環保署根據國家科學院(National Academies of Sciences，簡稱 NAS)的技術建議，針對 Yucca Mountain 處置場訂定封閉後維護公眾健康安全的要求。國家科學院在 1995 年

完成相關研究報告，作出了安全評估時程為 100 萬年的建議，並強調需依據地質穩定性以最高風險發生時間計算。環保署卻在 2001 年發布的「內華達州 Yucca Mountain 的公眾健康與環境輻射防護標準(40 CFR Part 197)」中，對個人防護的要求為處置 1 萬年後的年有效劑量不可超過 0.15mSv。環保署因而遭到內華達州及環保團體提出控告，美國法院判決環保署敗訴。故在 2008 年更新的法規內容中，將兩種標準並列，包括 1 萬年的年有效劑量不可超過 0.15mSv 及 100 萬年的年有效劑量不可超過 1mSv。

#### 2.4.2 選址流程

美國的高放射性廢棄物最處置場的選址，大致可以 1982 年訂定「核能廢棄物政策法」為分水嶺，分為兩階段。第一階段為 1950 年代~1982 年，第二階段則為 1982 年以後，整個流程如圖 2.4.2-1 所示。

由於美國在核能發展上較早推動，國家科學院早於 1957 年即建議發展地質處置系統，以處置用過核燃料及高放射性廢棄物，並將深層鹽岩列為地質的優先選項。因此在 1960 年代至 1970 年代早期，美國原子能委員會 (Atomic Energy Commission，簡稱 AEC) 偏好以鹽岩作為地質處置的母岩，並著手調查適合做為處置場的範圍。1975 年，原子能委員會下轄的能源研究與發展管理局 (Energy Research and Development Administration，簡稱 ERDA) 開始執行「國家廢棄物終端貯存計畫 (National Waste Terminal Storage program，簡稱 NWTs)」，以找出高放射性廢棄物的處置場址並進行相關處置研究。NWTs 計畫共調查美國 36 個州的地層構造，最終目標是希望在 2000

年前興建 6 個處置場。篩選程序採循序漸進、由大到小的方式，利用潛力母岩、地質圖、地震災害圖、土地利用、有用的水文數據、交通、人口等公開的文獻資料，從大領域的地質構造(例如洛磯山脈、哥倫比亞河流域的玄武岩、墨西哥灣海岸的鹽丘)縮小範圍至 100 平方公里左右的區域，為獲得更詳細的地層、水文、地球化學等地表下之特性，針對這些區域進行試驗與鑽探，以篩選出面積小於 25 平方公里的場址。此外，考量放射性活動造成的影響、場址篩選的成功機率以及 1970 年代後期的相關研究，將屬於能源部的 Hanford 預訂地及內華達測試場等非鹽岩地質的場址，一併進行場址篩選。最後，NWTS 計畫在 1982 年於路易斯安那州、密西西比州、德州、猶他州、內華達州及華盛頓州等地方選出 9 個場址作為候選場址的提案，如圖 2.4.2-2 所示。



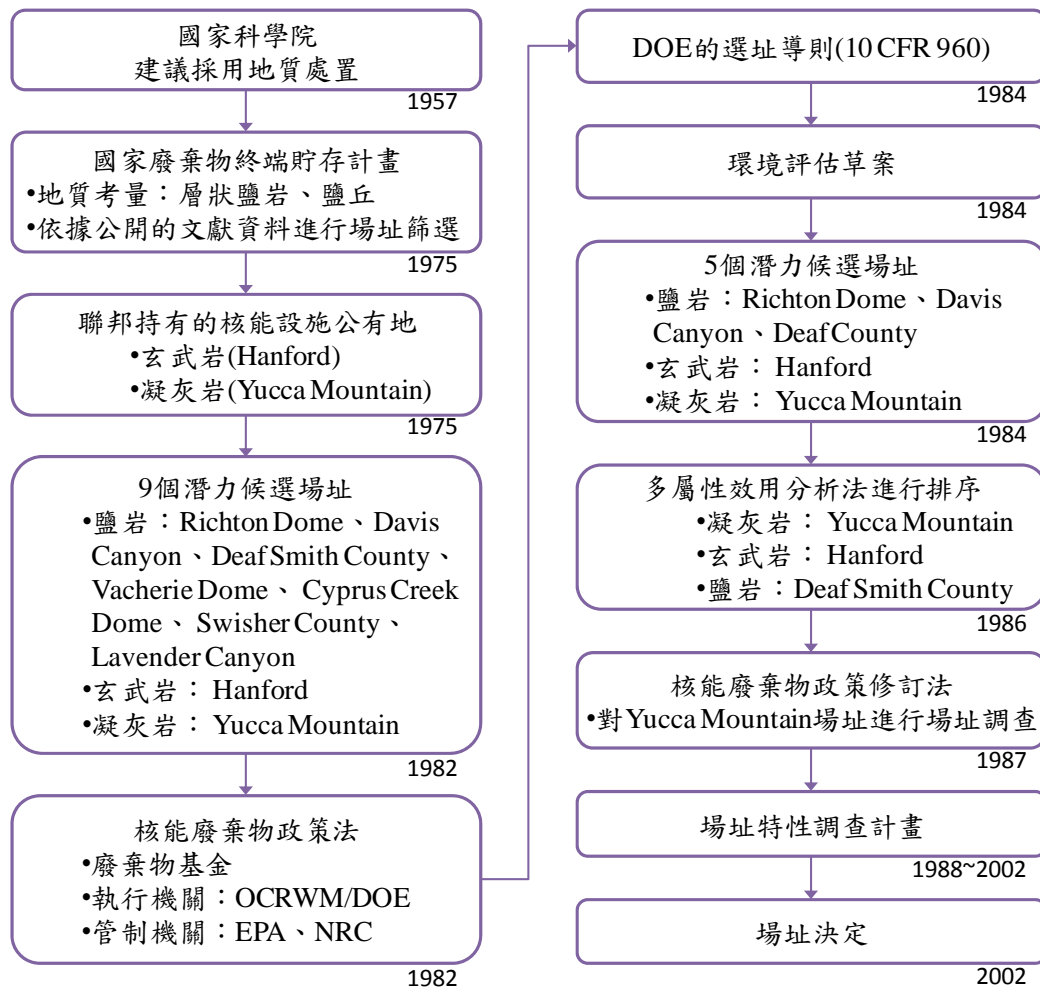


圖 2.4.2-1 美國高放射性廢棄物最終處置場選址流程

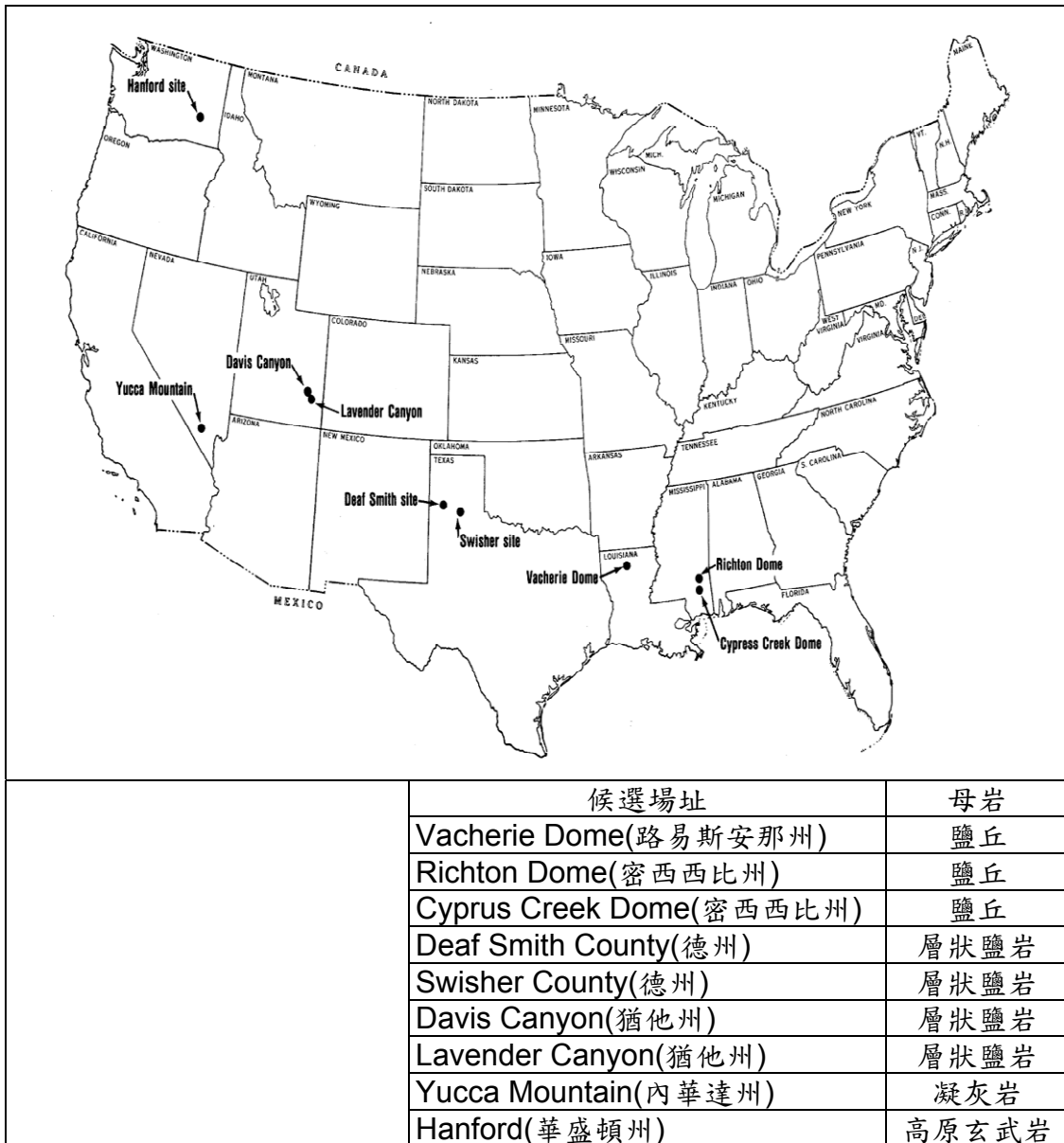


圖 2.4.2-2 美國 9 個候選場址的位置分布圖

受到 1982 年頒布之「核能廢棄物政策法」影響，場址篩選的執行單位改由能源部之民用放射性廢棄物管理局(Office of Civilian Radioactive Waste Management, 簡稱 OCRWM)負責。此法亦要求能源部選出 5 個場址特性合宜的候選場址，並從中選出 3 個場址向總統提名。因此，能源局於 1984 年訂定場址篩選導則(10 CFR 960)，民用放射性廢棄物管理局據此準則針對 9 處候選場址進行場址篩選以及環境評估。綜合法規要求

及環境評估草案報告之結果，於 1984 年篩選出 Hanford、Yucca Mountain、Richton Dome、Davis Canyon、Deaf Smith County 等 5 個優先候選場址。再以多屬性效用分析(Multi-Attribute Utility Analysis)排序 5 個優先候選場址的優劣，前三名的候選場址依序為 Yucca Mountain、Deaf Smith County 及 Hanford。並於 1986 年向總統提出篩選結果，當時的美國總統亦核定此計畫。

1987 年，美國國會通過「核能廢棄物政策修訂法」，指示能源部僅調查 Yucca Mountain 場址，並終止另兩處場址之調查工作。1988 年能源部開始執行場址特性調查計畫(site characterization plan)，確定 Yucca Mountain 場址的調查工作範圍，並於 1988 年至 2002 年間投入大量的科學家及工程人員，進行數百個地質鑽孔、科學調查、現地試驗、試驗坑道開挖、處置設施研究等，以了解 Yucca Mountain 場址之天然與工程特性。

2002 年 1 月，能源部部長親臨 Yucca Mountain 場址視察，同年 2 月即向布希總統提出 Yucca Mountain 場址建議案，並獲得布希總統的支持提送國會。同年 4 月，內華達州州長向國會陳遞不同意此場址建議案的官方決定，但眾議院仍支持這項建議，最後於 7 月 9 日由參議院通過 Yucca Mountain 場址之建議案。布希總統則於同年 7 月 23 日簽署同意 Yucca Mountain 場址申請案。能源部亦於 2008 年 6 月正式向 NRC 提出建造執照申請。

但歐巴馬總統上任後，宣布擱置現行 Yucca Mountain 高放射性廢棄物處置計畫，並於 2010 年初成立美國核能未來藍帶委員會(Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future，簡稱 BRC)，研議美國高放射性廢棄物管理策略。藍帶委員會經過兩年的調查、討論，於 2012 年 1 月向美國能源部提交正式報告，該報告回顧了美國放射性廢棄物管理歷史並對放射性廢棄物

管理現狀進行了調查和評估，在充分徵求公眾意見後提出美國當前的放射性廢棄物管理建議：

1. 未來在篩選放射性廢棄物管理設施時，應建立在共識的基礎上。
2. 成立專責執行放射性廢棄物管理計畫之機構，並且授予該機構足夠之權力及資源，促使計畫成功。
3. 使放射性廢棄物的基金能更有效被利用。
4. 致力於發展一個或多個放射性廢棄物地質處置設施。
5. 致力於發展一個或多個集中式貯存設施。
6. 為了將來集中式貯存及處置設施設置完成後的相關作業，須針對大規模的用過核子燃料與高放射性廢棄物之運送進行準備。
7. 支持核能科技創新和人才培育。
8. 美國應主動扮演國際上之核能安全、廢棄物管理、防止核子擴散及保安的領導角色。

### 2.4.3 確保安全之構想

美國高放射性廢棄物最終處置場處置的廢棄物來源，包括商用核電廠產生的用過核燃料、能源部保管之用過核燃料(研究用反應爐與海軍船舶反應爐)、製造核武器與商用核電廠用過核燃料再處理產生的玻璃固化體等。這些廢棄物具有高熱、高放射性、長半衰期及潛在危險性，因此，世界各國都採深層地質處置概念，以多重障壁方式進行高放射性廢棄物處置。而美國國家科學院更是早在 1957 年即開始研究地質處置之處置概念。由於美國在 2002 年已經決定以 Yucca Mountain 場址作為高放射性廢棄物最終處置場，加上相關研究與調查資訊相當豐富，因此處置場的處置概念是根據 Yucca Mountain 的天然環境特性進行工程障壁設計，以有效隔離廢棄物及確保處置場的安全。

處置場位於地表下約 200~500 公尺的凝灰岩層，與其下方的地下水位面距離 300 公尺遠，所以處置設施位於未飽和層，如圖 2.4.3-1 所示。由於 Yucca Mountain 場址位於沙漠地區且氣候乾燥，表土與地形特徵有助於限制地表水入滲至地下，若有降雨亦會隨地形往斜坡下游排除，僅少部份的水會在表層蓄積，但短時間即可蒸發。而處置坑道上方及下方之母岩，以孔隙多且節理少的非熔接凝灰岩(unwelded tuff)為主，加上位於未飽和層，孔隙及裂隙可減緩地下水入滲到處置坑道，或是降低地下水流速，延長放射性核種藉由地下水傳輸到地下水面以下之時間。處置坑道所在之地層，則以孔隙少且節理多的熔接凝灰岩(welded tuff)為主，除了裂隙會成為地下水排除的通道外，受到未飽和層的毛細現象影響，當水接近坑道時，會傾向停留在孔隙或裂隙中，而不會向坑道匯集。另外，由過去的調查與研究發現，Yucca Mountain 下方的飽和層，其地下水流動相當緩慢，但跟

未飽和層的流動速度相比仍然較快。估計從 Yucca Mountain 場址下方的飽和層流動到人類可達的井位約需數百年的時間，亦具有遲滯放射性核種遷移的效能。

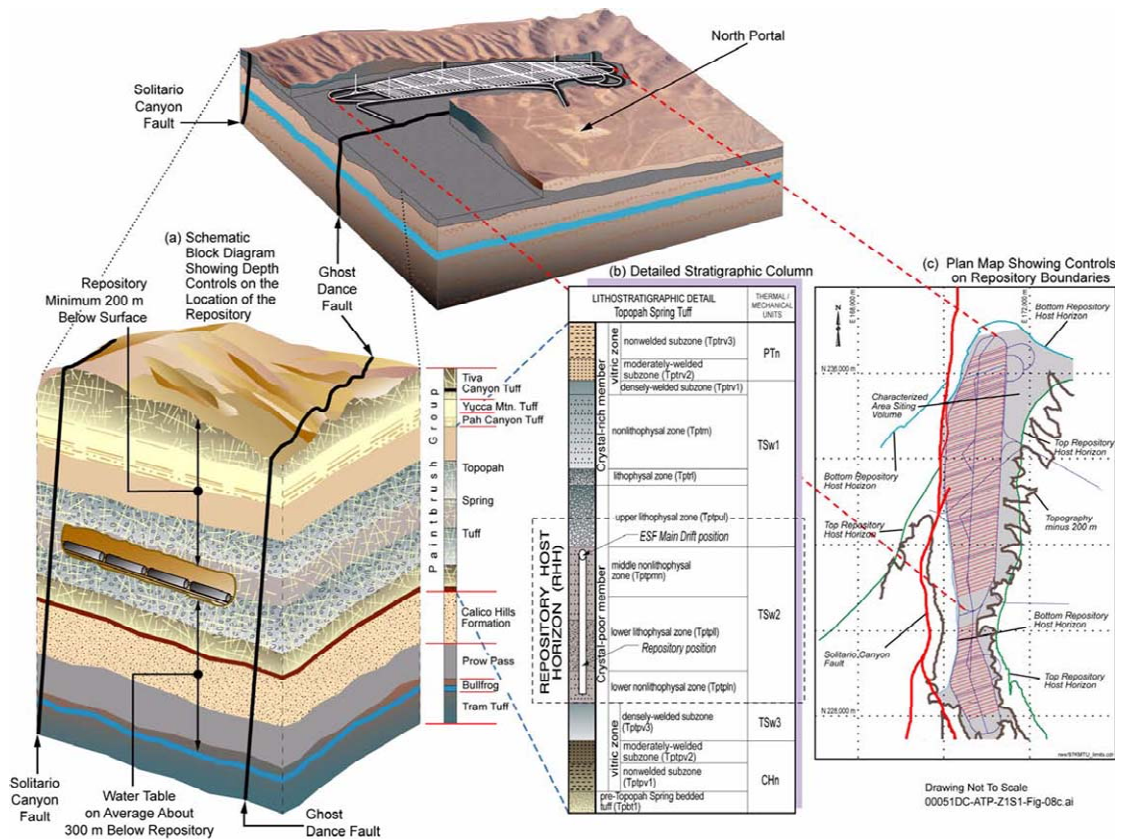


圖 2.4.3-1 美國深層地質處置之配置概念示意圖

處置場的主要設施為開挖至深地層岩盤中之處置坑道，其工程設計包含水滴屏蔽(Drip Shield)、廢棄物包件(Waste Package)及廢棄物包件支架(Invert)等，如圖 2.4.3-2 所示。每一個處置坑道寬 5 公尺、長 600 公尺，以鋼支保、岩栓及鋼線網支撐，避免掉落岩塊損壞工程設施。廢棄物包件由兩厚層金屬圓柱筒組成，內層圓柱筒為不銹鋼製，可提供強度與力學穩定性，外層圓柱筒為鎳合金製，可提供高度的抗腐蝕性。水滴屏蔽由抗腐蝕金屬製成，可保護廢棄物包件，避免水滴入滲產生腐蝕及掉落岩塊造成的損壞。廢棄物包件支架由鋼架及填充於其中的碎屑火山岩

組成，鋼架可支撐坑道內之廢棄物包件，碎屑火山岩則可減緩放射性核種隨著水流向下遷移。

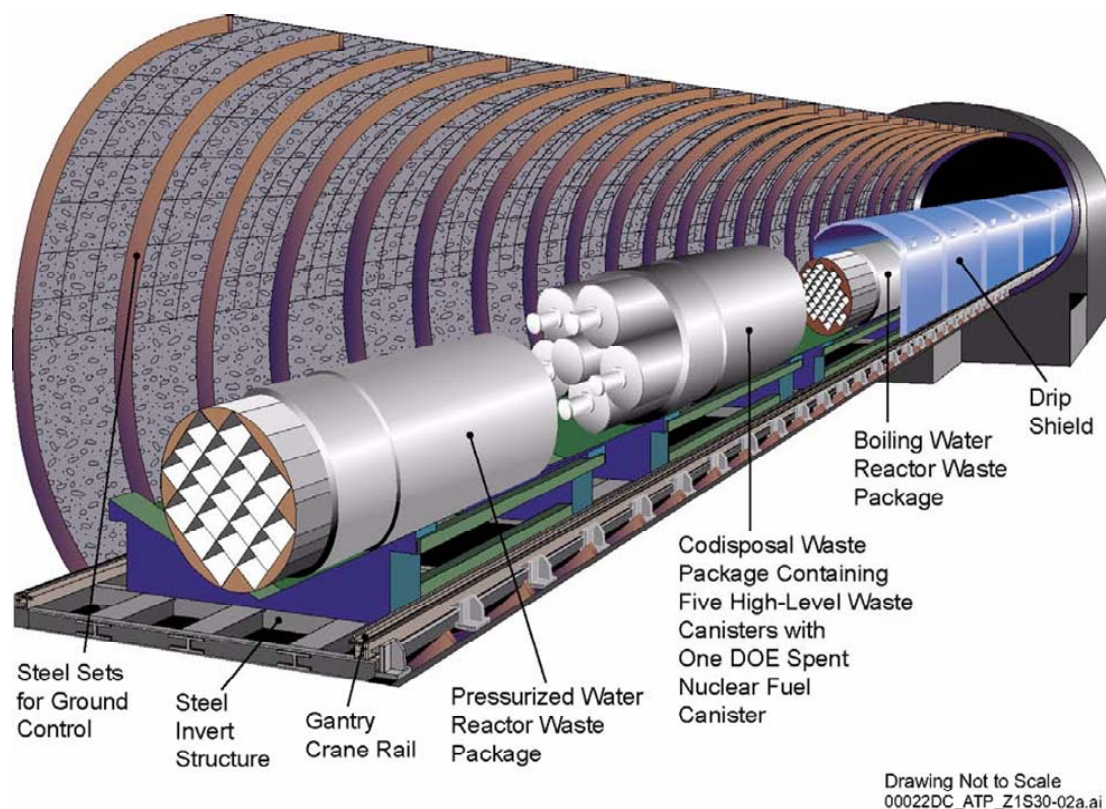


圖 2.4.3-2 美國最終處置場之處置設施示意圖

## 2.4.4 場址篩選條件

根據 1982 年的「核能廢棄物政策法」之規定，主管機關 NRC 應規範處置場的選址要求及處置設施建造、營運與封閉的核准申請程序，執行機關 DOE 應建立場址篩選準則，以篩選出符合相關法規規定且場址特性合適之場址。因此，NRC 及 DOE 分別提出「高放射性廢棄物的地質處置(10 CFR 60)」及「初步篩選放射性廢棄物處置場潛在場址(10 CFR 960)」，彙整其中與場址篩選條件有關之項目，分別說明如后。

### 2.4.4.1 10 CFR 60

為確保地質環境與工程障壁系統能發揮隔離廢棄物之功能，NRC 以「有利條件」及「潛在不利條件」檢核場址的適宜性。

#### 一、有利條件

(一)構造、水文地質、地球化學、第四紀期間的地形形成過程等特性，不會對地質處置隔離廢棄物的能力造成不利影響。

(二)處置設施位於飽和層時，水文地質需符合以下條件：

- 1.低滲透性之母岩。
- 2.母岩具有向下或顯著的水平水力梯度，且有完整的周圍水文地質構造。
- 3.母岩與周圍水文地質構造之間，具有低滲透性與低水力梯度。

(三)地球化學條件：

- 1.促進核種的沉澱與吸附。
- 2.抑制微粒、膠體、有機或無機錯合物等會使核種移動性增加的物質形成。
- 3.抑制核種藉由微粒、膠體及錯合物傳輸。



- (四)當受到熱作用時，礦物組成不會因此改變或雖有改變但不影響其抑制核種傳輸之能力。
- (五)廢棄物至少應存放在地表面下 300m 處(地表面是指擾動區以上的地表高程最低點)。
- (六)場址與封閉後之管制區需設在人口密度低之地帶，並盡量遠離人口密集區。
- (七)核種藉由地下水最快路徑，從擾動區進入環境的時間大幅超過 1,000 年。
- (八)處置設施位於未飽和層時，水文地質構造需符合以下條件：
  - 1.母岩與周遭水文地質構造具低水氣通量。
  - 2.地下水位與地下設施保持足夠距離，使飽和的連續孔隙及地下水位不會接觸到地下設施。
  - 3.母岩上方有低滲透性地質構造，可抑制地下水向下流動或將地下水分散到地下設施限制範圍之外。
  - 4.母岩可自由排水。
  - 5.平均年歷史降雨量小於平均年位蒸散量。

## 二、潛在不利條件

- (一)洪水氾濫或人造蓄水區崩壞導致場址淹水。
- (二)可能對地下水流動系統造成影響之人類活動，例如：抽取地下水、過度灌溉、地下抽蓄發電、地表的大型蓄水建設等等。
- (三)可能造成地下水流動系統改變之自然現象，例如：山崩、沉陷、土石流或火山運動等會產生大規模地表水蓄積而改變地下水流動之現象。
- (四)隆起、沉陷、褶皺作用、斷層作用等構造變形可能影響區域的地下水流動系統。
- (五)可能影響核種遷移之水力特性改變，例如水力梯度、平均階間速度(average interstitial velocity)、瀦蓄係數(storage

coefficient)、水力傳導係數(hydraulic conductivity)、天然補注(natural recharge)、電位或流出點等。

- (六)氣候變遷可能使水力特性改變。
- (七)化學組成、高離子強度或 Eh-pH 的範圍等地下水特性改變，可能使工程障壁系統的溶解性或化學反應增加。
- (八)地球化學過程可能會降低核種吸附能力與岩石強度，造成影響工程障壁系統之功能。
- (九)母岩中的地下水不具還原性。
- (十)溶解的證據，例如角礫岩管(brecca pipes)、溶蝕窟(dissolution cavities)或鹽水礦袋(brine pockets)。
- (十一)構造變形，例如第四紀期間的隆起、沉陷、褶皺作用、斷層作用。
- (十二)歷史上已經發生過的地震，若再發生可能對場址造成顯著影響。
- (十三)根據地震與大地構造形成過程、特性之相關性顯示，發生的頻率或地震規模可能增加。
- (十四)場址區域內的地震頻率或規模增加。
- (十五)自第四紀開始所發生的火成活動，其留下之證據。
- (十六)第四紀期間發生的強烈侵蝕所留下之證據。
- (十七)場址內有自然形成之材料存在：
  - 1.可預期未來會進行經濟開採
  - 2.此種材料的總價值或淨值高於其他面積相似區域的平均值。
- (十八)於場址內有開採地下礦產資源的證據。
- (十九)於場址內有鑽探的證據。
- (二十)岩石或地下水的條件，使地下設施的設計與建造、鑽孔與豎井的密封作業，需要複雜的工程措施。

(二十一)地質力學特性無法使地下開挖的孔室於永久封閉後仍保持穩定。

(二十二)地下水位上升使地下設施所在的未飽和層達飽和。

(二十三)現在或未來存在之靜止水體，可能使部分地下設施達飽和，或形成地下設施所在的未飽和層到達環境的快速流動路徑。

(二十四)核種可能以氣態型式，以未飽和地層中充滿空氣的孔隙為介質，傳輸進入環境中。

### 三、具有潛在不利條件之驗證

若有上述潛在不利條件存在時，為確保潛在不利條件不會危害地質處置之功能，須驗證以下事項：

- 1.充分調查所有不利的人類活動或自然條件，不論是已經存在或未被發現的條件，都需納入考量。
- 2.所有不利的人類活動或自然條件對場址的影響，都須進行敏感度分析，且不可低估其影響。
- 3.利用優勢特性補償不利的人類活動或自然條件造成的影響，使處置設施的功能符合隔離廢棄物之要求。
- 4.不利的人類活動或自然條件可以補救。

## 2.4.4.2 10 CFR 960

能源部將場址篩選條件分為場址封閉前與封閉後兩大類，封閉前的考量條件多針對營運期間的輻射防護、環境保護、社會經濟影響等項目，封閉後的考量條件則以處置設施的長期安全功能為主。

### 一、封閉後

#### (一)水文地質

##### 1.有利條件

- (1)核種藉由地下水最快路徑，從擾動區進入環境的時間大幅超過 10,000 年。
- (2)第四紀期間的水文歷程特性，於接下來的 10 萬年間，不會影響地質處置隔離廢棄物的能力。
- (3)場址有地層、構造、水文特性等水文地質系統，可以用合理的確定性進行特徵化與模型化。
- (4)處置場位於飽和區時，必須至少滿足下列其中一項條件：
  - (i) 母岩及周圍水文地質構造具有低水力傳導係數。
  - (ii) 母岩及周圍水文地質構造具有向下或顯著的水平水力梯度。
  - (iii) 母岩及周圍水文地質構造中具有低水力梯度。
  - (iv) 核種從母岩傳輸到環境的路徑中，岩石具有高有效孔隙率及低水力傳導係數。
- (5)處置場位於未飽和區時，必須至少滿足下列其中一項條件：
  - (i) 母岩及周圍水文地質構造中，具有低飽和度或幾乎恆定的飽和度。

- (ii) 地下水位與地下設施保持足夠距離，使飽和的連續孔隙及地下水位不會接觸到母岩。
- (iii) 母岩上方的水文地質構造，可將向下入滲的地下水分散到廢棄物處置區的限制範圍之外。
- (iv) 母岩可自由排水。
- (v) 平均年歷史降雨量小於平均年位蒸散量。

## 2. 潛在不利條件

- (1) 水力梯度、水力傳導係數、有效孔細率、母岩至周遭水文地質構造的地下水通量等水文地質條件改變，足以明顯增加核種傳輸至環境中的機率。
- (2) 沿著地下水自母岩流動至環境的路徑中，已經存在的地下水資源適合農作物灌溉或人類使用。
- (3) 岩脈(dikes)、岩床(sills)、褶皺、剪裂帶(shear zones)、溶解效應或鹽水礦袋(brine pockets)等現存的地質構造與特性，會明顯增加水文地質系統特性化與模型化的難度。

## 3. 取消資格的條件

如果核種以任何可能的路徑從擾動區傳輸到環境中的時間低於 1,000 年，則場址則失去作為最終處置場之資格。

## (二) 地球化學

### 1. 有利條件

- (1) 第四紀期間的地球化學歷程特性，於接下來的 10 萬年間，不會影響地質處置隔離廢棄物的能力。
- (2) 水文地質條件包括促進核種的沉澱、擴散至岩體或吸附；抑制微粒、膠體、有機或無機錯合物等會使核種移動性增加的物質形成；抑制核種藉由微粒、膠體及錯合物傳輸。

- (3)當承受預期的處置條件時，礦物組成保持不變或礦物組成阻滯核種傳輸的能力不變或增加。
- (4)母岩中預期的地球化學條件與水的容量流速率 (volumetric flow rate) 之結合，允許處置區內的總核種量在 1000 年的時候，以每年少於 0.001% 的比例被溶解。
- (5)任何地球化學與物理延遲過程的組合會減少核種累積釋放至環境的預測峰值，與沒有此種組合的基本地下水遷移時間預測相比差了 10 倍。

## 2. 潛在不利條件

- (1)母岩中的地下水條件會影響工程障壁系統的溶解性與化學反應到損壞處置功能的程度。
- (2)地球化學歷程與條件會減少核種吸附或降低岩石強度。
- (3)母岩中的地下水條件具有化學氧化的特性。

## (三) 岩石特性

### 1. 有利條件

- (1)母岩具有足夠的厚度與側向延伸範圍，能提供地下設施在深度、佈置與位置的選擇上有較多的彈性。
- (2)母岩具有熱傳導係數高、熱膨脹係數低或足夠的延性 (ductility) 等特性，可密封處置場建造、營運或封閉引起的裂縫，或是廢棄物、母岩、地下水與工程元件間交互作用引起的裂縫。

### 2. 潛在不利條件

- (1)岩石條件對於處置設施的建造、營運與封閉需要超出合理技術的工程措施，才能確保廢棄物的隔離。

(2)預期會影響廢棄物隔離的物理現象、化學現象或輻射相關現象，例如熱引起的裂縫、礦物組成的水化或脫水作用、鹽水遷移等。

(3)母岩及其周圍地質中的地質構造、地球化學性質、熱性質、水文條件之結合(例如廢棄物產生熱)，會明顯降低母岩隔離廢棄物之效能。

#### (四)氣候變遷

##### 1.有利條件

(1)未來 10 萬年的氣候循環等地表水系統，不會對廢棄物隔離造成不利影響。

(2)整個第四紀期間，氣候變遷已經對水文系統造成微小影響。

##### 2.潛在不利條件

(1)證據顯示，未來 1 萬年內的地下水位上升高度，足以讓地下設施所在的未飽和層成為飽和層。

(2)證據顯示，未來 1 萬年內的氣候變遷，造成水力梯度、水力傳導係數、有效孔隙率或母岩與周圍水文地質構造的地下水通量等特性之擾動，增加核種傳輸置環境的機率。

#### (五)侵蝕

##### 1.有利條件

(1)處置區與地表面距離至少 300 公尺。

(2)第四紀期間侵蝕過程造成的地質環境，於未來 1 萬年導致核種釋放至環境的機會少於 1 萬分之 1。

(3)處置場封閉後 100 萬年內，不會發生發掘廢棄物的狀況。

##### 2.潛在不利條件

(1)地質環境證據顯示第四紀期間有劇烈的侵蝕。

(2)第四紀期間的地形歷程，於封閉後的 1 萬年間，對地質處置隔離廢棄物之能力造成不利影響。

### 3.取消資格的條件

地下設施的所有構造與地表距離少於 200 公尺時，則場址失去作為最終處置場之資格。

## (六)溶解

### 1.有利條件

沒有證據顯示場址的母岩於第四紀期間受到明顯的溶解作用。

### 2.潛在不利條件

地質環境溶解導致廢棄物失去隔離的證據。例如角礫岩管(brecca pipes)、溶蝕窟(dissolution cavities)、母岩或周圍地層體積減少、其他任何構造崩塌。

### 3.取消資格的條件

於場址封閉後的 1 萬年內，根據地質紀錄預測到溶解作用導致廢棄物失去隔離，則場址失去作為最終處置場之資格。

## (七)大地構造

### 1.有利條件

第四紀期間持續至今的火成活動與構造歷程(例如隆起、沉陷、斷層、褶皺作用)，於未來 1 萬年導致核種釋放至環境的機會少於 1 萬分之 1。

### 2.潛在不利條件

(1)第四季期間的褶皺、斷層、貫入作用(diapirism)、隆起、沉陷等其他構造歷程與火成活動的證據。

(2)有可能再次發生規模與強度會對隔離廢棄物造成影響的歷史地震。



(3)根據地層構造、斷層及地震之間的相關性，研判場址內的地震頻率與規模有增加的趨勢。

(4)場址內發生的地震有更加頻繁與規模更大的現象。

(5)山崩、沉陷或火山活動等大規模的自然現象，會造成地表水蓄積而影響區域地下水流系統。

(6)可能會對地下水流系統造成不利影響的隆起、沉陷、褶皺或斷層等地層構造變形。

### 3.取消資格的條件

根據第四紀期間的地質紀錄，可能發生使廢棄物失去隔離的斷層運動或其他地體運動，則場址失去作為最終處置場之資格。

## (八)人類干擾

### 1.自然資源

#### (1)有利條件

- (i) 沒有已經存在或未來可能出現的已知自然資源，且資源的量體不足以成為商業開採的資源。
- (ii) 沿著核種從母岩傳輸到環境中的路徑，地下水有100萬分之1萬或以上的總溶解固體。

#### (2)潛在不利條件

- (i) 場址內的天然材料於未來可能進行經濟開採，或此種天然材料的總價值、淨值或商業潛力高於其他面積相似區域的平均值。
- (ii) 場址內有地表下採礦或資源開採的證據，且會影響廢棄物隔離。
- (iii) 場址內有鑽孔，且鑽孔深度足以影響廢棄物隔離。
- (iv) 有任何天然材料明顯集中的證據，且這種天然材料無法從其他來源大量取得。

(v) 潛在可預期的人類活動，會改變部分對廢棄物隔離很重要的地下水流系統，例如抽取地下水、大量灌溉、地下抽蓄發電、軍事活動、地表的大型蓄水建設等。

### (3)取消資格的條件

- (i) 場址內舊有的探勘、採礦、資源開採等具有商業重要性的活動，提供核種從地下設施傳輸到環境中的快速途徑。
- (ii) 場址範圍外，有正在進行或未來可能進行恢復目前有價值礦產資源的活動，導致廢棄物意外失去隔離。

## 2.場址的所有權及控制權

### (1)有利條件

能源部擁有土地所有權與控制權，以及所有地表或地表下的權利。

### (2)潛在不利條件

土地所有權的衝突無法藉由自願買賣協議、機關之間轉移、聯邦徵收訴訟等方式成功解決。

## 二、封閉前

### (一)人口密度與分布

#### 1.有利條件

- (1)場址內的一般區域具有低人口密度。
- (2)場址遠離人口密集區。

#### 2.潛在不利條件

- (1)場址邊界的住宅密度或白天人口密度高。
- (2)根據美國 10 年 1 次的最新人口普查結果進行計算，鄰近場址有人口密集區或每 1 平方英哩有 1000 人的區域。

### 3.取消資格的條件

- (1)處置場的地表設施位於人口密集區。
- (2)根據美國 10 年 1 次的最新人口普查結果進行計算，處置場的地表設施位於每 1 平方英哩有 1000 人以上的區域。
- (3)能源部無法建立符合法規要求的緊急應變計畫。

### (二)場址的所有權及控制權

#### 1.有利條件

能源部擁有土地所有權與控制權，以及所有地表或地表下的礦物權與水權。

#### 2.潛在不利條件

土地所有權的衝突無法藉由自願買賣協議、機關之間轉移、聯邦徵收訴訟等方式成功解決。

### (三)氣象

#### 1.有利條件

主要的氣象條件可以有效分散處置場營運與封閉期間釋出到大氣中的輻射，降低處置場附近民眾受到不可接受的暴露之可能性。

#### 2.潛在不利條件

- (1)主要的氣象條件會使處置場封閉作業排放出的輻射，先傳向人口密度比平均值高的地區。
- (2)歷史極端氣候現象(例如颶風、龍捲風、嚴重的洪災、嚴重或頻繁的冬季風暴)會明顯影響處置場的營運與封閉作業。

### (四)環境品質

#### 1.有利條件

對現在或未來世代造成的環境衝擊，可以藉由考慮技術、經濟、社會與環境等因素，利用合理的措施將衝擊降到最低。

## 2. 潛在不利條件

- (1) 與聯邦、州或地方的環境要求相衝突。
- (2) 無法避免或減輕環境衝擊。
- (3) 處置場或其相關設施對國家公園系統、國家野生動物保護區系統、國家野生和風景河流區系統、國家荒野保護系統、國家林地等區域造成環境影響。
- (4) 處置場或其相關設施對州或地方的資源保護區域(例如州立公園、野生動物保護區、歷史地區)造成環境影響。
- (5) 處置場或其相關設施對美國原住民資源(例如主要的印地安宗教場所、獨特文化價值)造成環境影響。
- (6) 處置場或其相關設施影響瀕臨絕種物種的棲息地。

## 3. 取消資格的條件

- (1) 在處置場選址、建造、營運、封閉或除役期間，受影響地區的環境品質無法得到充分的保護，或環境影響不能減輕到可接受的程度。
- (2) 處置場位於國家公園系統、國家野生動物保護區系統、國家野生和風景河流區系統、國家荒野保護系統的範圍內。

## (五) 社會經濟影響

### 1. 有利條件

- (1) 受影響地區內可提供充足的勞動力。
- (2) 增加就業與商業銷售，改善社區服務，增加受影響地區之政府收入。
- (3) 受影響地區的主要經濟不會被影響。

## 2. 潛在不利條件

- (1) 受影響地區內缺乏勞動力。
- (2) 購買水權會對影響區域的現在或未來發展造成影響。
- (3) 干擾受影響地區的主要經濟。

## 3. 取消資格的條件

人類用來飲用或灌溉作物使用的水，如果因為處置場的建設、營運或封閉導致品質降低或數量減少，且無法以合理措施補救或減輕時，場址失去作為最終處置場之資格。

## (六) 交通運輸

### 1. 有利條件

(1) 連接場址的公路或鐵路具有以下特點：

- (i) 與其他候選場址相比，其路線相對較短。
  - (ii) 聯邦不需使用徵收的方式取得路線的權利。
  - (iii) 不需挖方、填方、隧道、橋樑。
  - (iv) 這些路線沒有大幅度的轉彎、陡坡或不會受到山崩或岩石崩落影響。
  - (v) 這些路線會繞過當地的城鎮。
- (2) 不用升級或重建公路或鐵路，即足以提供處置場與地方公路或鐵路連接。
- (3) 鄰近有可以接到國家道路系統的公路、鐵路與內陸水路。
- (4) 當地的卡車、鐵路或水路的營運商，有能力及意願處理廢棄物裝運。
- (5) 區域的氣象歷史顯示不會出現季節性的交通運輸。

## 2. 潛在不利條件

(1)場址與地方公路及鐵路間的路線，其地形有陡坡、Z型路線、河流、湖泊、山崩、落石或其它會造成廢棄物運送危險的地形。

(2)現有的公路或鐵路需要大規模的重建或升級，才能滿足運輸需求。

#### (七)地表特性

##### 1.有利條件

(1)地勢平坦。

(2)排水良好。

##### 2.潛在不利條件

會造成地表或地下設施淹水的地表特性，例如沖積平原的佔用與修改、失效的地表水蓄水設施或處置設施的工程元件失效。

#### (八)岩石特性

##### 1.有利條件

(1)母岩具有足夠的厚度與側向延伸範圍，能提供地下設施在深度、佈置與位置的選擇上有較多的彈性。

(2)母岩的特性在地下開挖時只需要最少量或不需要人工支撐，即可確保處置場安全的建設、營運與封閉。

##### 2.潛在不利條件

(1)母岩適合處置場的建設、營運與封閉，但是因為太薄或側向限制，地下設施在深度、配置和位置的選擇上，彈性較小。

(2)岩石條件對於豎井及地下設施的建造，需要超出合理技術的工程措施。

(3)處置場營運與封閉期間，地質力學特性使地下通道需要大量維修。

- (4)熱引起的裂縫、礦物組成的水化或脫水作用等物理現象、化學現象或輻射相關現象，可能會在處置場營運期間，導致安全危害。
- (5)斷層、剪裂帶(shear zones)、壓力鹽水礦袋(brine pockets)、溶解效應或其他地層構造特性，會造成水流入或施工問題，而危害處置場人員之安全。

### 3.取消資格的條件

當岩石特性會使處置場的建造、營運與封閉期間的相關活動，即使考慮合理技術範圍內的減輕措施，仍會造成人類安全與健康上的風險時，場址失去作為最終處置場之資格。

#### (九)水文

##### 1.有利條件

- (1)母岩與地表之間沒有含水層。
- (2)沒有會造成處置場洪水的地表水系統。
- (3)可提供處置場建設、營運與封閉期間的用水需求。

##### 2.潛在不利條件

地下水條件使處置場的建設、營運與封閉需要合理技術範圍以外的複雜工程措施。

##### 3.取消資格的條件

根據地下水條件，當探勘用之豎井建造或處置場的建設、營運與封閉，需要合理技術範圍以外的工程措施時，場址失去作為最終處置場之資格。

#### (十)大地構造

##### 1.有利條件

場址的斷層特性(例如地震規模與強度)明顯低於核能設施建造與營運的容許範圍。

##### 2.潛在不利條件

- (1)場址內有活動斷層。
- (2)可能再發生的歷史地震會造成超出場址設計限值的地體移動。



(3)根據場址的地震以及地層構造形成過程與特性(例如斷層)，場址建造、營運與封閉期間的地震規模大於從歷史地震推估之地震規模。

### 3.取消資格的條件

根據斷層移動或地體移動特性，當探勘用之豎井建造或處置場的建設、營運與封閉，需要合理技術範圍以外的工程措施時，場址失去作為最終處置場之資格。

## 2.5 瑞士

### 2.5.1 瑞士高放射性廢棄物最終處置場安全法規簡介

瑞士的高放射性廢棄物最終處置之安全管制，主要是遵循聯邦核能安全監察局 (Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate, 簡稱 ENSI) 於 2009 年 4 月公佈之「深層地質處置的設計原則與安全要求(ENSI-G03)」。

放射性廢棄物深層地質處置必須確保能長期保護人類與環境，免於受到游離輻射的影響，且不將不必要的責任與義務強加於未來的世代。另為增加此導則之完整性，亦將核能條例(Nuclear Energy Ordinance)第 11 條之規定一併納入。因此，放射性廢棄物的深層地質處置須遵守以下原則。

#### 1. 人類的保護：

放射性廢棄物之深地質處置，造成的影響僅有少數人會暴露在少量的額外輻射。

#### 2. 環境的保護：

由於人類與其他生物的存在是以自然為基礎，故環境保護是必須的(核能法第 1 條)，而深地質處置不可危及生物的多樣性。

#### 3. 跨界保護：

放射性廢棄物的深地質處置所產生的風險不能高於鄰近國家可承受的風險。

#### 4. 未來保護：

未來深地質處置可能造成的危險，將不得高於現今國家允許的風險程度。

#### 5. 長期安全：

深地質處置場的設計必須在封閉後，無進一步之措施  
以保障長期安全的需求。

## 6. 安全障壁：

深地質處置場是藉由各階段與被動之工程障壁與天然障壁確保長期安全(多重障壁系統，核能條例第 11 條第 2b 節)。

## 7. 監測與恢復：

任何在深地質處置場的監測、維護或恢復不得危及被動安全障壁的功能。

## 8. 零負擔：

當代人享受核能帶來的好處並透過深地質處置場為廢棄物負責，對於後世不會造成不必要的負擔。

## 9. 自然資源：

可預見未來礦產的開發與利用，將不受深地質處置場而有所限制。

## 10. 最佳化：

為了深地質處置場規劃、興建與營運(包含封閉)之決策，從最佳化營運與長期安全的觀點考慮候選場址的選擇。

此外，為確保放射性廢棄物的深層地質處置能確實保護上列之標的，導則中亦訂量化的保護標準。針對封閉後的深地質處置場之未來發展，合理分為可能的改變(likely variants)與不太可能的改變(less likely variants)兩種狀況，以下將分述其說明：

### 1. 保護標準一：

對於未來可能發生改變之狀況，其釋放出的放射性核種不能超過每年 0.1 毫西弗的個人劑量。

## 2.保護標準二：

不太可能改變的狀況則不適用於保護標準一之內容，未來進行評估時，對健康損害的額外個人輻射風險不能超過每年百萬分之一。

### 2.5.2 選址流程

瑞士之選址程序主要是依據瑞士聯邦能源總署(SFOE)於2008年提出的「深層地質處置特別計畫(Sectoral Plan for Deep Geological Repositories)」進行場址篩選，並由瑞士聯邦、電力公司及廢棄物處理公司等相關產業共同組成之放射性廢棄物共同管理組織(National Co-operative for the Disposal of Radioactive Waste，簡稱NAGRA)，負責執行場址篩選工作。

在進行篩選工作之前，瑞士已經對其國內的地質狀況深入研究超過200年以上，包括地質圖編繪、大學研究、土工調查、地震與鑽探調查、石油與天然氣探勘等地質相關工作，都對大範圍或局部區域的地質條件提供相當高程度的知識訊息。而NAGRA在過去30年間，也進行了地震調查、深層鑽探、區域研究、地質綜合調查等室內外的地球科學探查。針對高放射性廢棄物最終處置，NAGRA最初建議的處置母岩為結晶岩，並於1979年提出申請在Grimsel地區(Bern郡)的結晶岩層建造岩石實驗室。建議以結晶岩為母岩的原因包括(1)瑞典等國家的研究成果與經驗；(2)良好的岩石力學特性(例如強度)有利於處置設施的建造與營運；(3)基於現有知識，假設瑞士北部的結晶岩內具有不受干擾的大型岩塊且水流速度慢的地下水；(4)沒有造成衝突的自然資源存在。除了以結晶岩作為辨識的條件外，地質的長

期穩定性亦須納入考量。阿爾卑斯山及瑞士的北部、西北部等地區，受到萊茵河谷影響，不符合這些要求而予以排除。此外，考量處置設施受到侵蝕的風險以及工程的可行性，處置設施需位於地表下 500 公尺~1,200 公尺。故要滿足這些條件的結晶岩層只有在瑞士北部，調查範圍因而縮小至 Solothurn、Aargau、Zurich 及 Schaffhausen 等郡。1980 年 6 月，NAGRA 申請在瑞士北部的結晶岩層進行反射震波測量及 12 個深層鑽探。1982 年 10 月至 1985 年 2 月間，NAGRA 在主管機關監督下，於 Böttstein、Weiach、Riniken、Schafisheim、Kaisten 及 Leuggern 等地區鑽探，1988 年 9 月至 1989 年 4 月間，又於 Siblingen 地區進行鑽探。由鑽探結果發現，瑞士北部的結晶岩被大型沉積槽 (sedimentary trough) 橫切 (稱為石炭二疊紀槽 (Permo-Carboniferous Trough))，故瑞士北部具有大量非破裂結晶岩層的假設被推翻，鑽探工作也不再進行，因此聯邦委員會要求廢棄物製造者再評估以其他岩體做為處置母岩的可行性。

NAGRA 從瑞士國內的沉積岩中，先挑選低淡水磨礫層 (Lower Freshwater Molasse，簡稱 LFM) 及 Opalinus 黏土等兩種岩體進行各種調查，並針對 Opalinus 黏土，於 Mont Terri 岩石實驗室 (Jura 郡) 開始進行一項國際性的研究計畫。根據所有的研究結果顯示，對於高放射性廢棄物處置而言，Opalinus 黏土在安全上的優勢高於 LFM。因此，NAGRA 提議以現地調查的方式對 Opalinus 黏土進行深入探討，並將 LFM 列為候補選項。ENSI、放射性廢棄物委員會 (Commission for Radioactive Waste Disposal，簡稱 CRW)、瑞士聯邦核能安全委員會 (Swiss Federal Nuclear Safety Commission，簡稱 NSC) 等主管機關亦於 1995 年同意此提案。而後，NAGRA 證實在 Benken、Trüllikon、Oerlingen、Marthalen 等區域的 Opalinus 黏土構造不易受到干擾，母岩量體足夠用於長期隔離放射性廢棄物，並將

這些區域列為潛力場址。經過聯邦機構與國際專家的嚴密審核與評估，聯邦委員會於 2006 年 6 月同意此項處置場的可行性驗證計畫，但這並不代表場址已經決定，建造地質處置場仍須遵循核能法(Nuclear Energy Act)的規定，故於 2008 年開始進行相關選址作業。

最終處置場的篩選流程共分為三個階段：第一階段為地質篩選區域；第二階段為至少選出兩個候選場址；第三階段為決定處置場場址，而後將選址結果提送聯邦委員會審核同意後，才能進行後續的申設作業，選址流程如圖 2.5.2-1 所示。



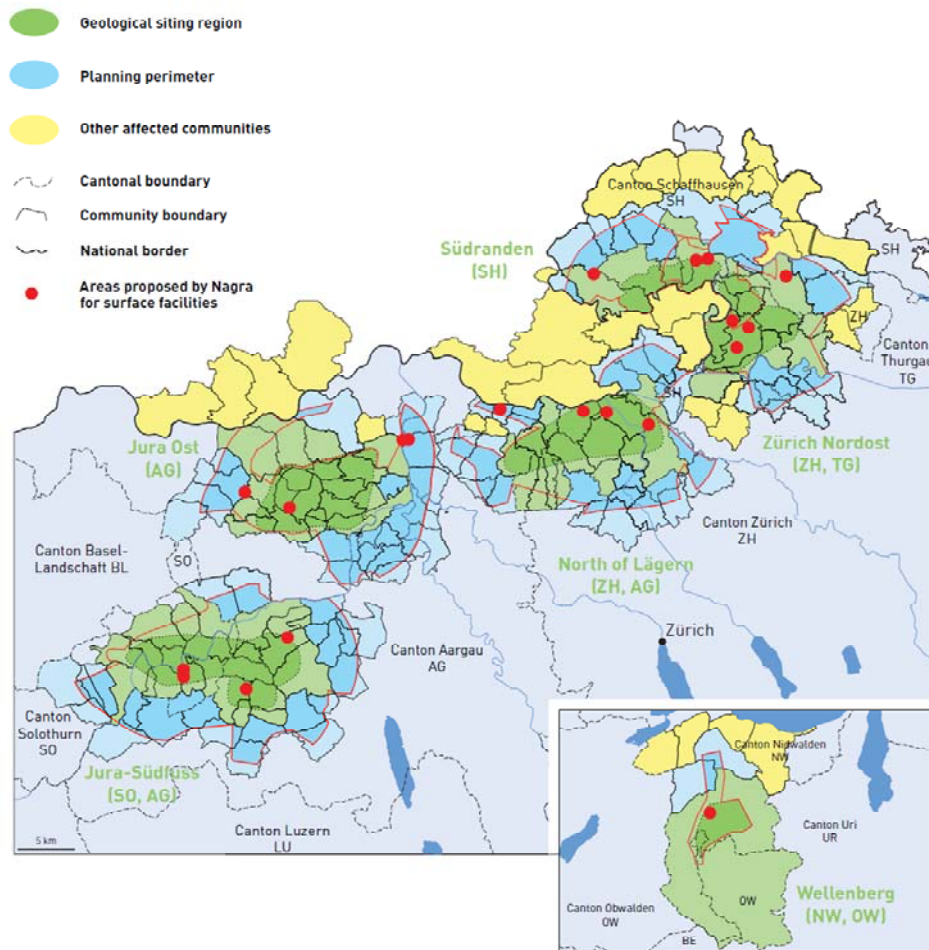
圖 2.5.2-1 瑞士高放射性廢棄物最終處置場之選址流程

#### 一、第一階段：地質篩選區域

此階段主要是從安全與技術可行性的觀點，分別針對場址母岩特性與有效的儲放範圍、長期穩定性、可靠的地質資訊、工程的適用性等四大類進行評估，各類別下的分項如表 2.5.2-1 所列。NAGAR 根據此準則，選出 Zürich Nordost、Lägern 北部地區及 Jura Ost 等三個區域，如圖 2.5.2-2，並將此結果提送至瑞士聯邦能源總署(SFOE)。

表 2.5.2-1 瑞士高放最終處置之場址安全與技術可行性評估準則

分類	準則項目	
1.場址母岩特性與有效的儲放範圍	1.1 空間範圍 1.2 阻水障壁之影響	1.3 地球化學之條件 1.4 遷移路徑
2.長期穩定性	2.1 場址與母岩之穩定性 2.2 侵蝕	2.3 場址所引發的影響 2.4 使用衝突
3.可靠的地質資訊	3.1 母岩性質描述 3.2 可探勘的空間狀況	3.3 可預期的長期變化
4.工程的適用性	4.1 母岩力學特性與狀態 4.2 地下通道與排水	



備註：最左邊及右下角之場址，為中低放射性廢棄物處置場的地質篩選區域

圖 2.5.2-2 瑞士高放最終處置場址選址於第一階段之篩選結果

收到申請後，聯邦環境、運輸、能源與通訊部(DETEC)  
與瑞士聯邦能源總署(SFOE)開始聯繫場址內之郡與地方單



位，成立郡委員會，以確保郡、地方單位與鄰近國家間的彼此合作，有效地解決彼此間的意見分歧。而郡委員會在聽取各政府單位與公共組織對於處置場的施工期間交通、是否影響當地自然環境、經濟發展與觀光等議題後，進行內部討論並向權責單位提出意見。ENSI 及其他審查機構則針對場址有效的儲放範圍、相關場址內外地質資料以及廢棄物生產者初擬的安全性準則能否滿足該場址之要求等內容，進行審查。有關第一階段之流程如圖 2.5.2-3 所示。

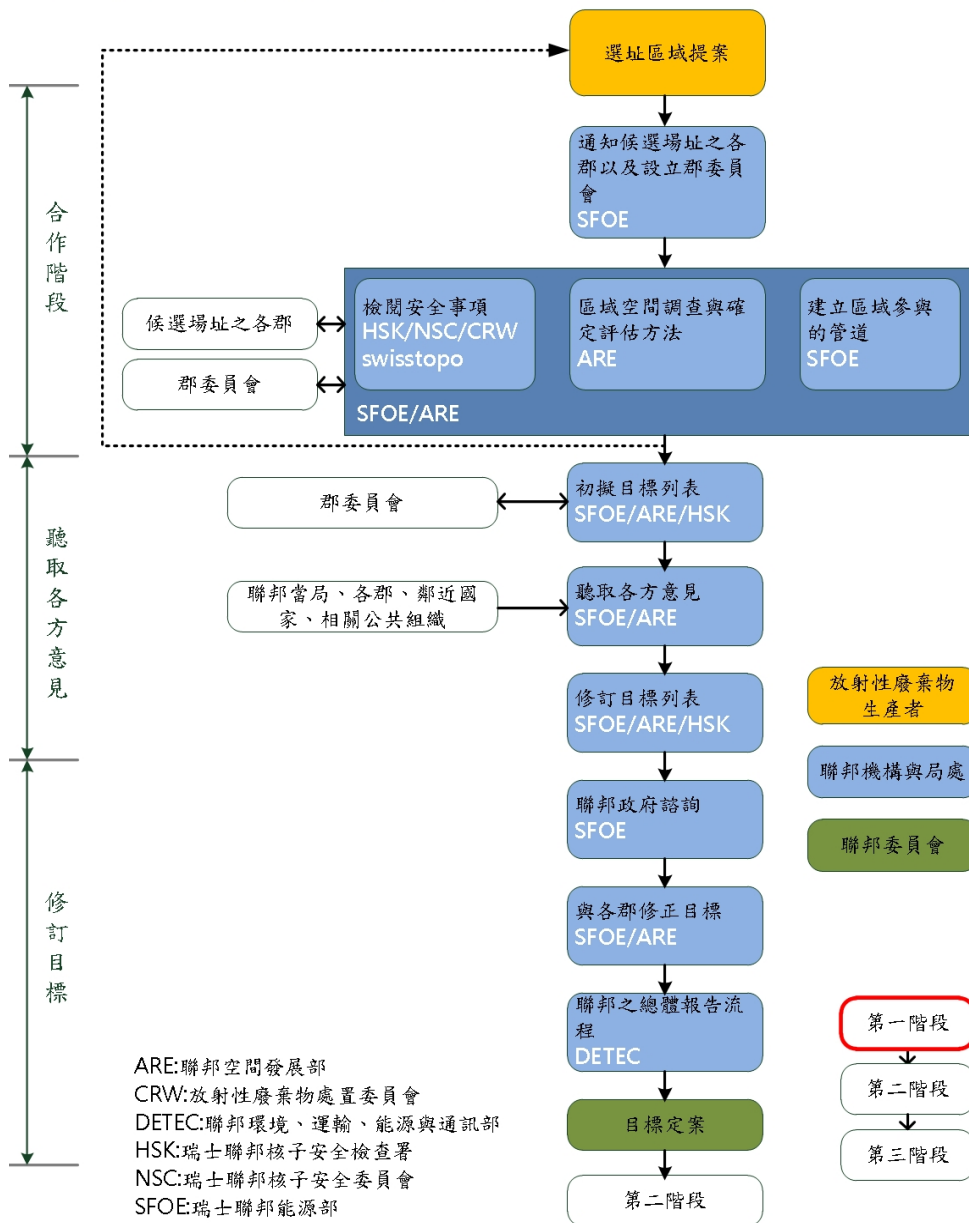


圖 2.5.2-3 瑞士高放最終處置場址選址之第一階段流程圖

最後，聯邦委員會於 2011 年 11 月同意 NAGRA 提出的地質篩選場址，並進入第二階段的場址篩選。有關各地質篩選區域概要說明如下：

(一) Zürich Nordost

Zürich Nordost 在 Zürich 東北部靠近萊茵河河畔的東南區域，如圖 2.5.2-4 所示，其岩層主要為 Opalinus 黏土，層理走向自西北至東南略為下降，穩定的地質構造在規劃處置窖與通道時，能夠擁有更大的彈性。此地層大約存在 1.8 億年且深度約地表下 400m 至 860m 之間，厚度約 110m 至 120m，地質剖面圖如圖 2.5.2-5 與圖 2.5.2-6 所示。

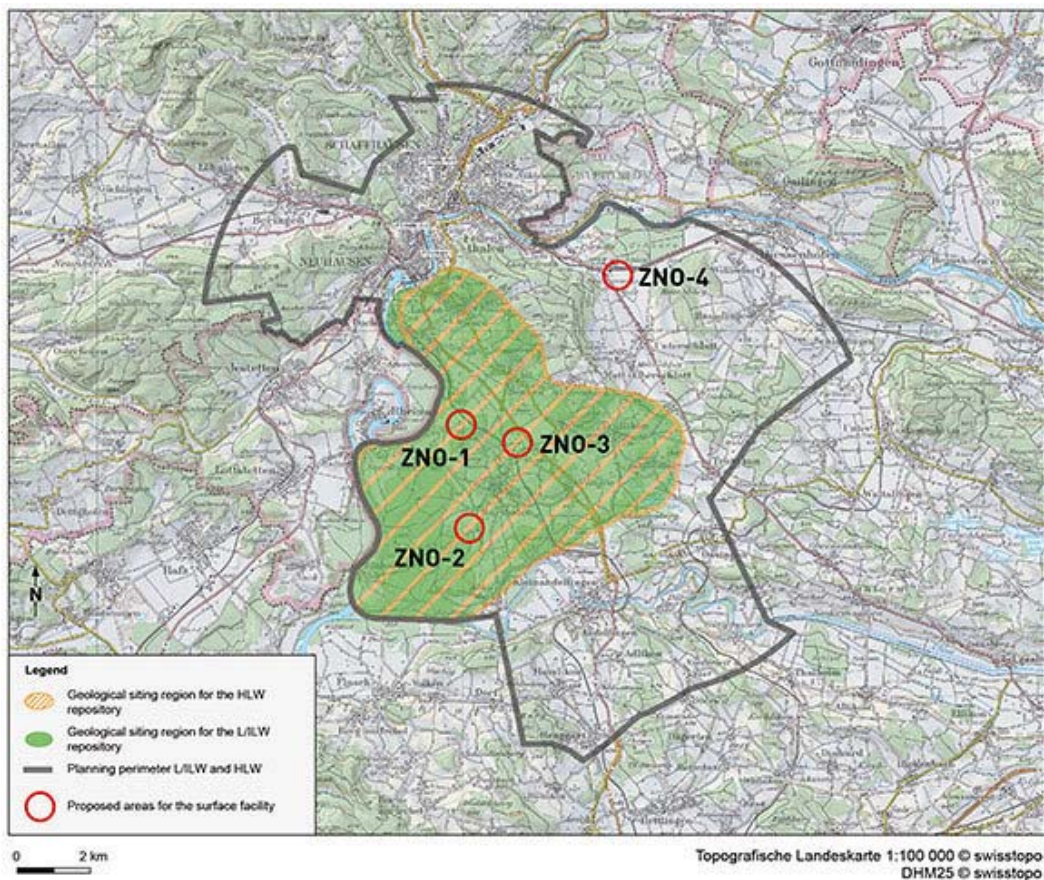


圖 2.5.2-4 瑞士 Zürich Nordost 地區之處置場地下設施與地面設施範圍

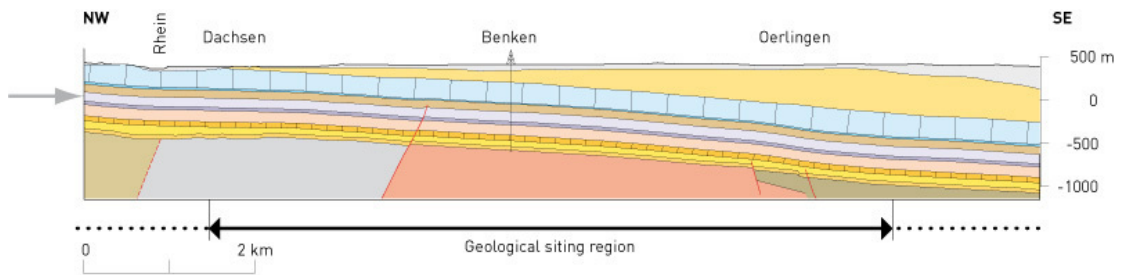


圖 2.5.2-5 瑞士 Zürich Nordost 地區之區域地質剖面圖

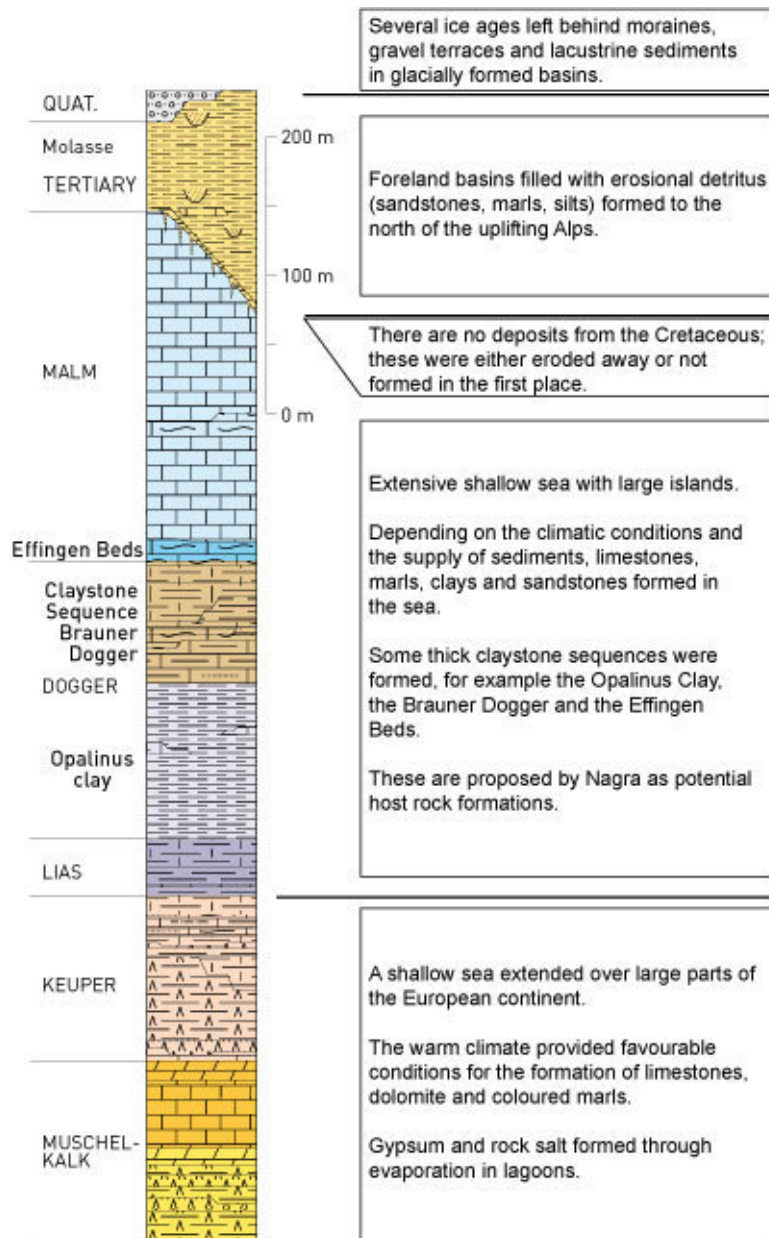


圖 2.5.2-6 瑞士 Zürich Nordost 地區之地質詳細剖面圖

處置場所所需的通道入口等地面設施物，可規劃於橙色區域外(邊界延伸 5 公里)。NAGRA 參酌公眾與權責單位之建議後，提出四個潛在的地面設施位置。

### 1. 候選區域一(Zno-1)

該區域位於 Rheinau 與部分 Marthalen 郡內，目前土地為農業使用，區域內有一條鐵路與部分次要道路經過該區域，且基地內無過多開發與結構物。因區域東南面有一森林阻擋，故視覺上地面設施僅能從西北側或更遠的地方才能察覺，位置如圖 2.5.2-7 所示。

### 2. 候選區域二(Zno-2)

該區域位於 Marthalen 郡內，基地內有一礫石坑與少部分農耕活動。因該區域無重大交通系統，如需興建鐵路，將大幅增加處置場的成本。以地理條件來看，區域位於森林與梯田之間且視覺隱密性良好，位置如圖 2.5.2-8 所示。



圖 2.5.2-7 瑞士 Zürich Nordost 地區內之候選區域一(Zno-1)的地形與現況空照圖

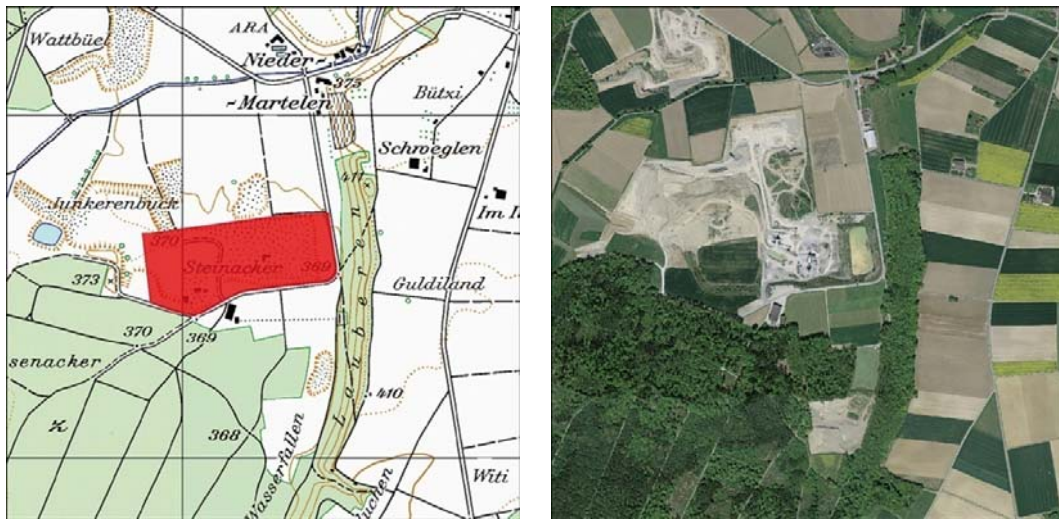


圖 2.5.2-8 瑞士 Zürich Nordost 地區內之候選區域二(Zno-2)的地形  
與現況空照圖

### 3.候選區域三(Zno-3)

該區域位於 Marthalen 郡內，基地鄰近火車站與工業區，而土地現況為農業使用。藉由既有鐵路網絡，廢棄物可直接運送至基地內，而地面設施的視覺衝擊將會影響周邊住宅區與當地的整體景觀，位置如圖 2.5.2-9 所示。



圖 2.5.2-9 瑞士 Zürich Nordost 地區內之候選區域三(Zno-3)的地形  
與現況空照圖

#### 4.候選區域四(Zno-4)

該區域位於 Schlatt 郡。現況的土地使用為農業使用並鄰近工業區。基地旁因有鐵路通過，廢棄物運送而言相對容易。基地旁工業區的建築物，會間接阻擋附近聚落對“Neu Paradies”的視覺景觀，使地面設施的視覺衝擊較低，但區域南面與西面仍然可見地面設施物，位置如圖 2.5.2-10 所示。



圖 2.5.2-10 瑞士 Zürich Nordost 地區內之候選區域四(Zno-4)的地形與現況空照圖

#### (二)Lägern 北部地區

Lägern 北部地區的地質以 Opalinus 黏土為主，並參雜部分 Jura 山脈褶皺。此 Opalinus 黏土地層大約存在 1.8 億年且深度約地表下 500m 至 860m 之間，厚度約 100m 至 120m，地質剖面圖如圖 2.5.2-11 與圖 2.5.2-12 所示。對於高放射性廢棄物而言，富含黏土的岩層有利於儲放廢棄物，有關高放射性廢棄物處置場的地下設施可設置範圍如圖 2.5.2-13 所示。通道入口等處置場所需的地面設施物，可規劃於地下設施區域外，NAGRA 並提出四個潛在的地面設施位置。

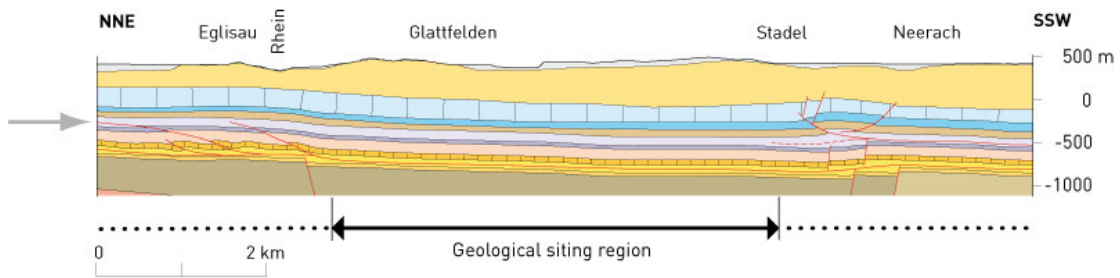


圖 2.5.2-11 瑞士 Lägern 北部地區之地質剖面圖

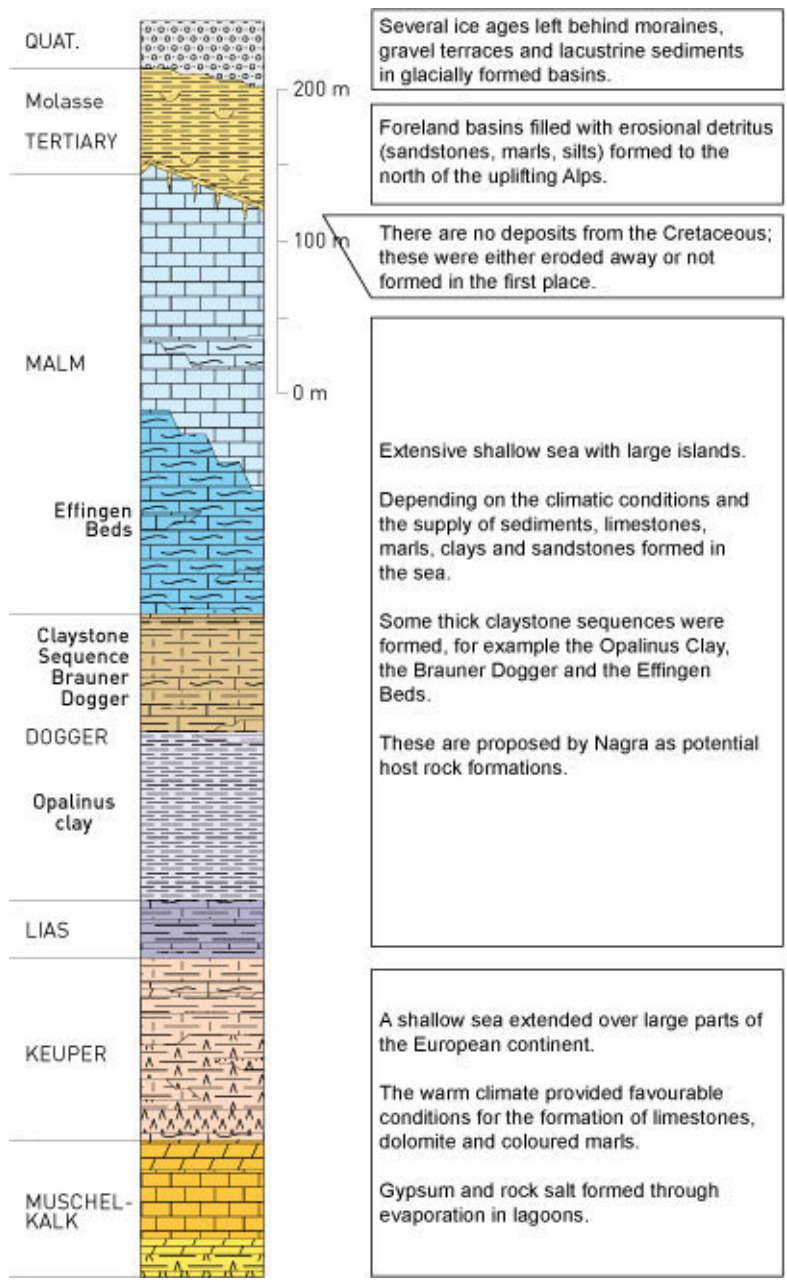


圖 2.5.2-12 瑞士 Lägern 北部地區之地質詳細剖面圖

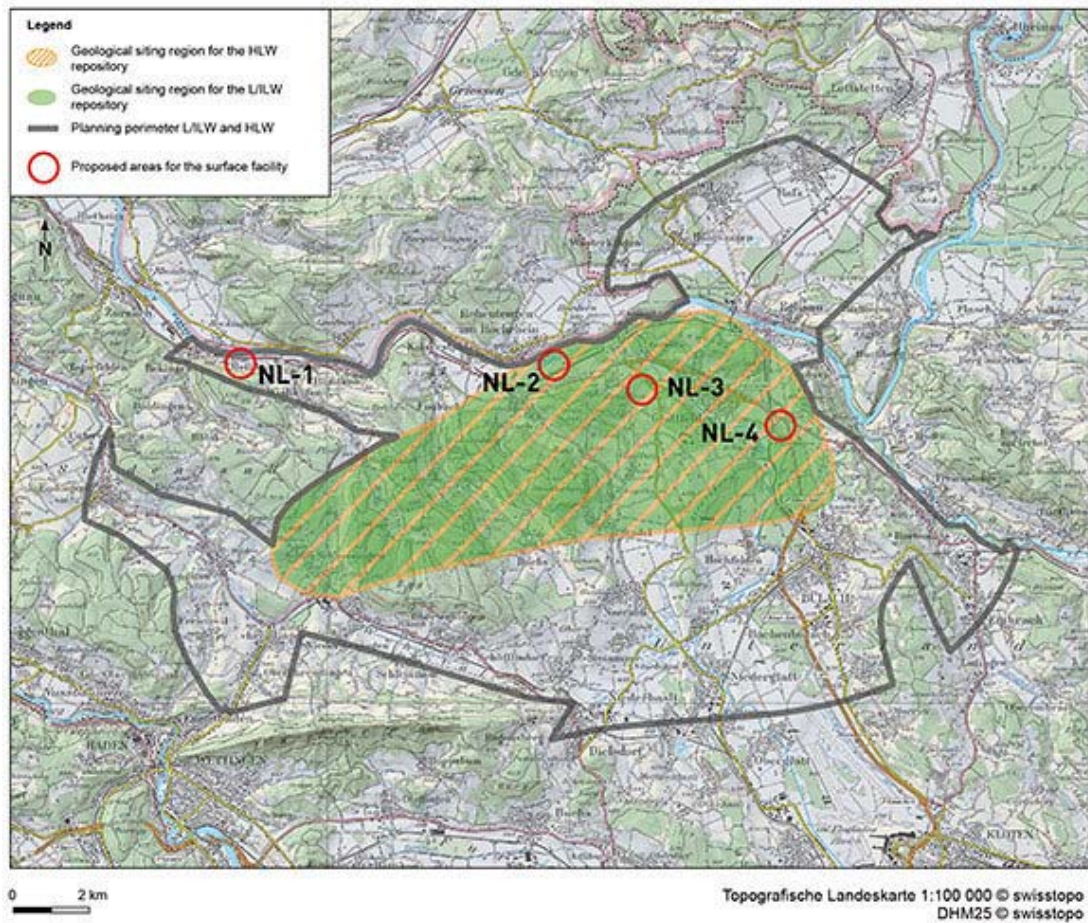


圖 2.5.2-13 瑞士 Lägern 北部地區之處置場地下設施與地面設施範圍

### 1. 候選區域一(NL-1)

該區域坐落於 Mellikon 與部分 Rekingen 郡內。基地東側為農業使用；西側為已開發的工業區並擁有公路與鐵路，為廢棄物運輸提供良好的入口通道。基地內的部分工廠將被拆除已符合地面設施需求。就視覺景觀而言，基地離住宅區仍有一段距離，地面設施造成的視覺衝擊有限，位置如圖 2.5.2-14 所示。

### 2. 候選區域二(NL-2)

候選區域位置在 Weiach 郡，基地內現有一礫石坑與少量的農耕活動，需興建基礎設施以利廢棄物運入。區域



北面為視覺衝擊較大之區域，可利用既有礫石坑底部興建基礎設施來減緩視覺衝擊，位置如圖 2.5.2-15 所示。

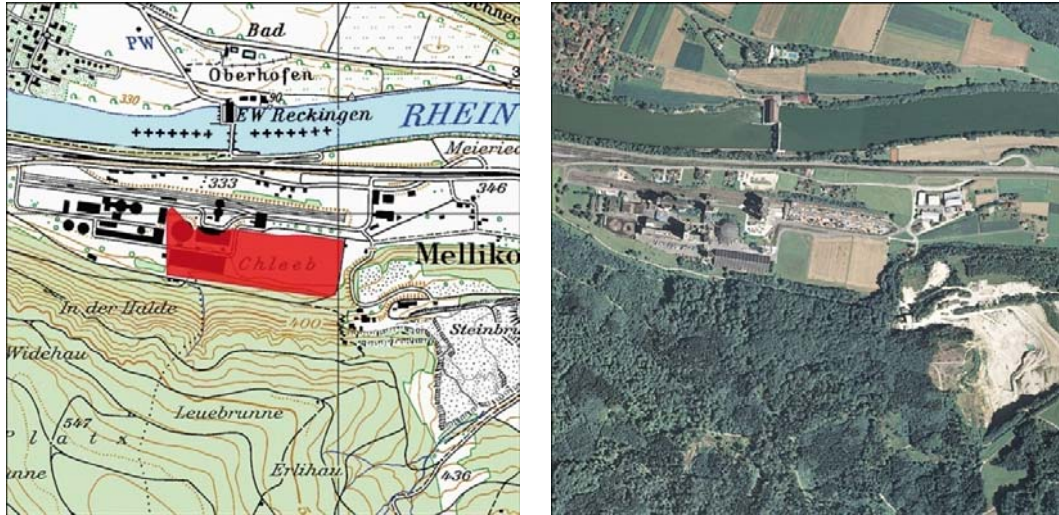


圖 2.5.2-14 瑞士 Lägern 北部地區內之候選區域一(NL-1)的地形與現況空照圖

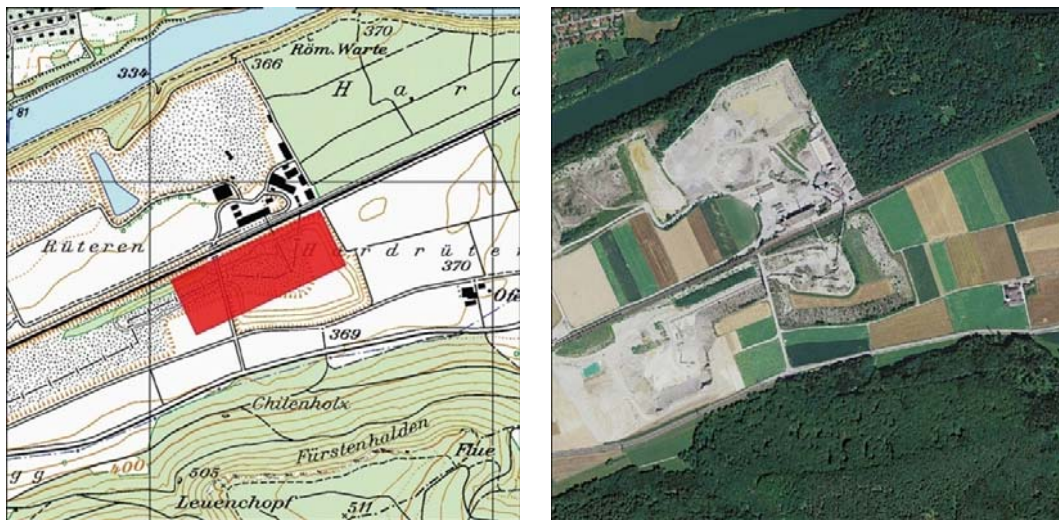


圖 2.5.2-15 瑞士 Lägern 北部地區內之候選區域二(NL-2)的地形與現況空照圖

### 3.候選區域三(NL-3)

區域位置在 Glattfelden 郡內並接近既有砂石採礦區，基地內部分區域為農業區與農業復作區。該區域並無

鐵路經過，造成未來運輸成本預期大幅增加。根據現況地形，住宅區的視覺衝擊影響較小，位置如圖 2.5.2-16 所示。

#### 4.候選區域四(NL-4)

該區域位於 Glattfelden 與部分 Bülach 郡內，基地現況有一礫石坑。建議利用既有公路系統可增加廢棄物運輸的便利性；周邊大型的住宅區與基地仍保持一段距離，其視覺衝擊微乎其微，位置如圖 2.5.2-17 所示。

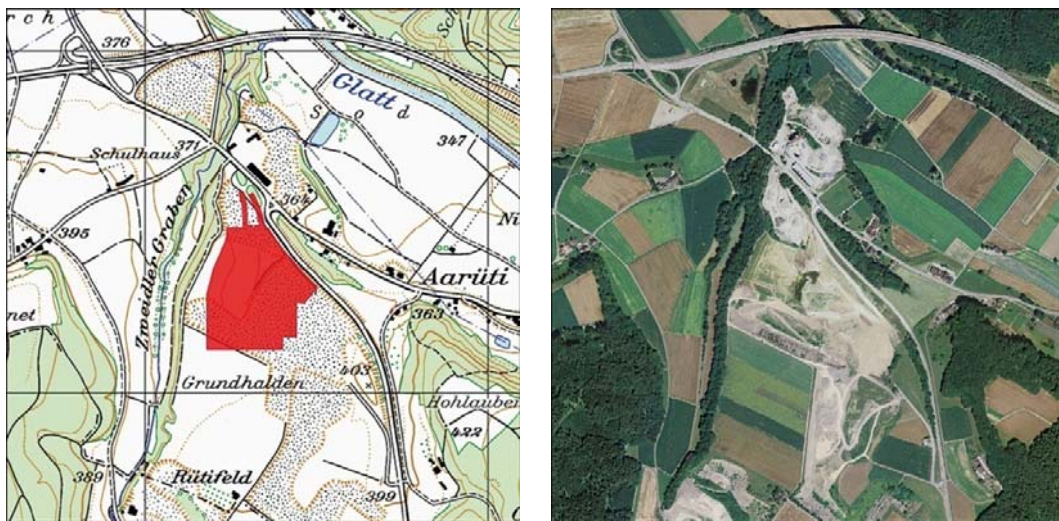


圖 2.5.2-16 瑞士 Lägern 北部地區內之候選區域三(NL-3)的地形與現況空照圖



圖 2.5.2-17 瑞士 Lägern 北部地區內之候選區域四(NL-4)的地形與現況空照圖

### (三)Jura Ost

Jura Ost 的場址篩選範圍如圖 2.5.2-18 所示，其主要母岩為 Opalinus 黏土，此地層大約存在 1.8 億年且深度約地表下 400m 至 550m 之間，厚度約 100m 至 120m，地質剖面圖如圖 2.5.2-19 與圖 2.5.2-20 所示。高放射性廢棄物處置場的地下設施主要設置於 Opalinus 黏土層內，其地質層理在南邊略微下降，穩定的地質狀況在規劃處置窖與通道時，能夠擁有更大的彈性。處置場所需的地面設施物如通道入口等，可規劃於地下設施布設範圍外(邊界延伸 5 公里)。NAGRA 已提出四個潛在的地面設施位置。

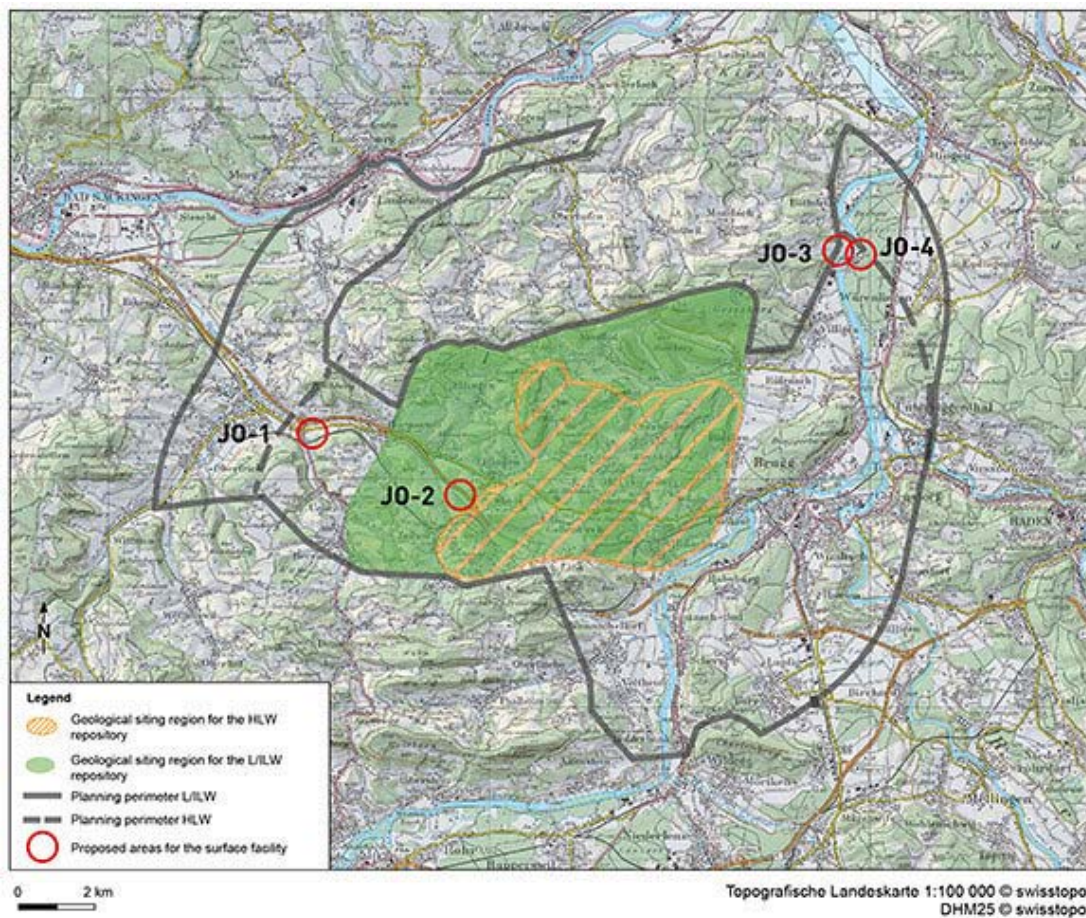


圖 2.5.2-18 瑞士 Jura Ost 地區之處置場地下設施與地面設施範圍

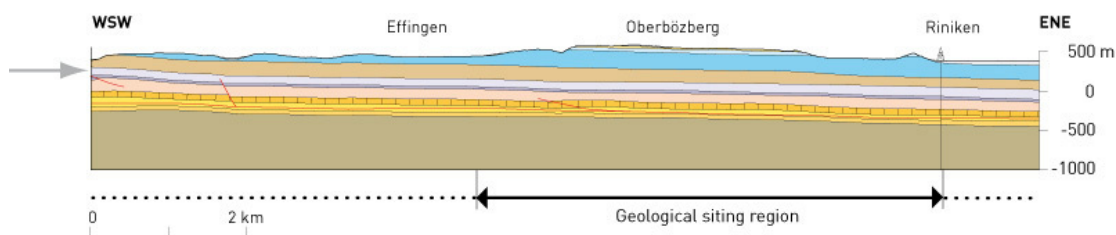


圖 2.5.2-19 瑞士 Jura Ost 地區之地質剖面圖

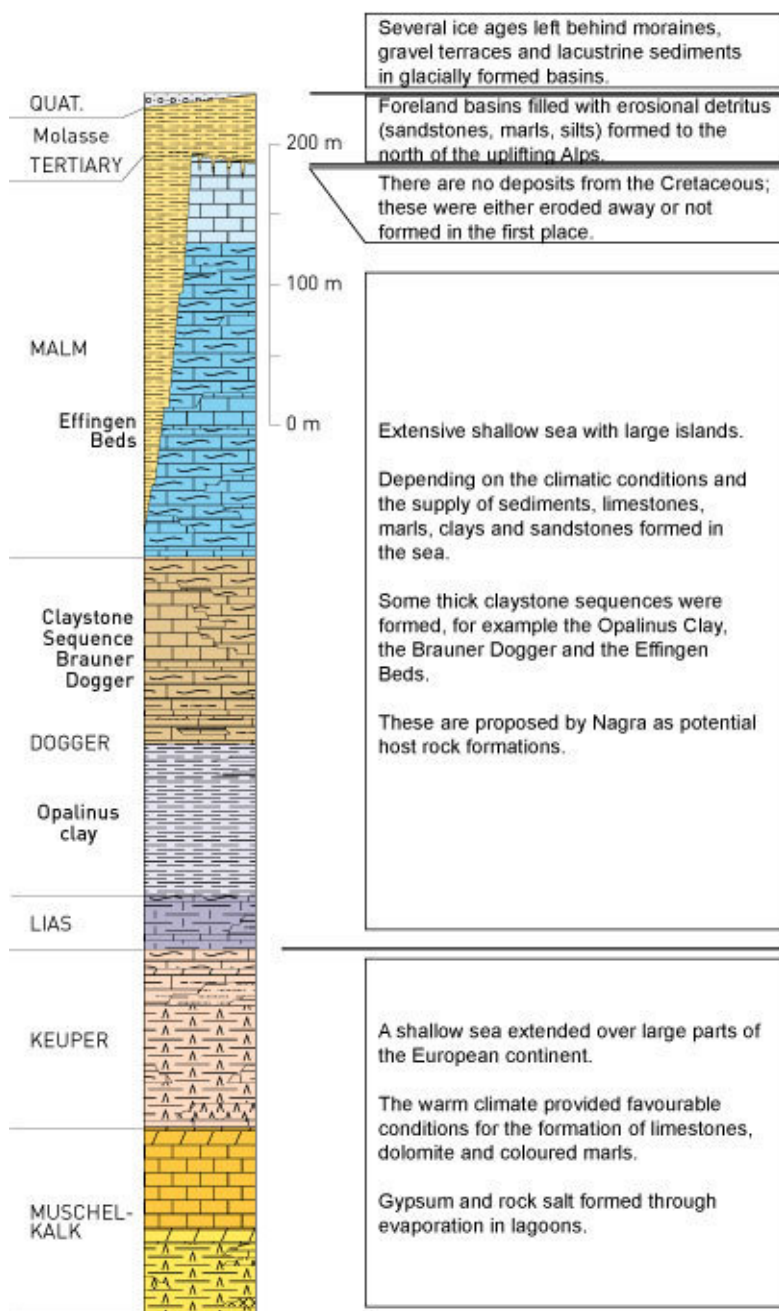


圖 2.5.2-20 瑞士 Jura Ost 地區之地質詳細剖面圖

### 1. 候選區域一(JO-1)

坐落於 Hornussen 郡的農業區裡，北臨 A3 高速公路並毗鄰位於 Frick 郡的工業區，需興建鐵路以利廢棄物運入；以視覺衝擊來說，周邊的住宅區域的影響較低，但 A3 高速公路以北少量的獨立建築物，可觀察到區域內的地面設施，位置如圖 2.5.2-21 所示。

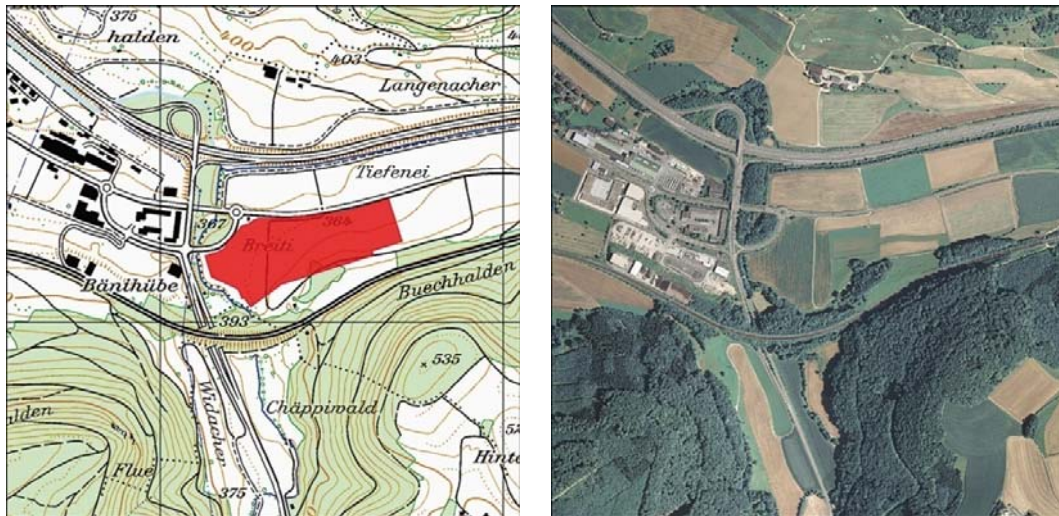


圖 2.5.2-21 瑞士 Jura Ost 地區內之候選區域一(JO-1)的地形與現況空照圖

### 2. 候選區域二(JO-2)

該區域位於 Bözen 郡與部分 Effingen 郡並緊鄰 A3 高速公路，主要的土地使用以農業為主。依據現況需施作基礎設施以利廢棄物運輸，地面設施對於部分住宅區是可見的。特別的是，地面設施與處置場將規劃半嵌入斜坡，位置如圖 2.5.2-22 所示。

### 3. 候選區域三(JO-3)

位於 Villigen 郡與部分 Böttstein 郡，且緊鄰 ZWILAG 核廢料處理公司與聯邦政府的臨時貯存設施。該區域曾是砂石採礦區，經過復育後土地目前為農業使用。區域鄰近

道路將會改道，並使該區域較不易察覺，位置如圖

2.5.2-23 所示。

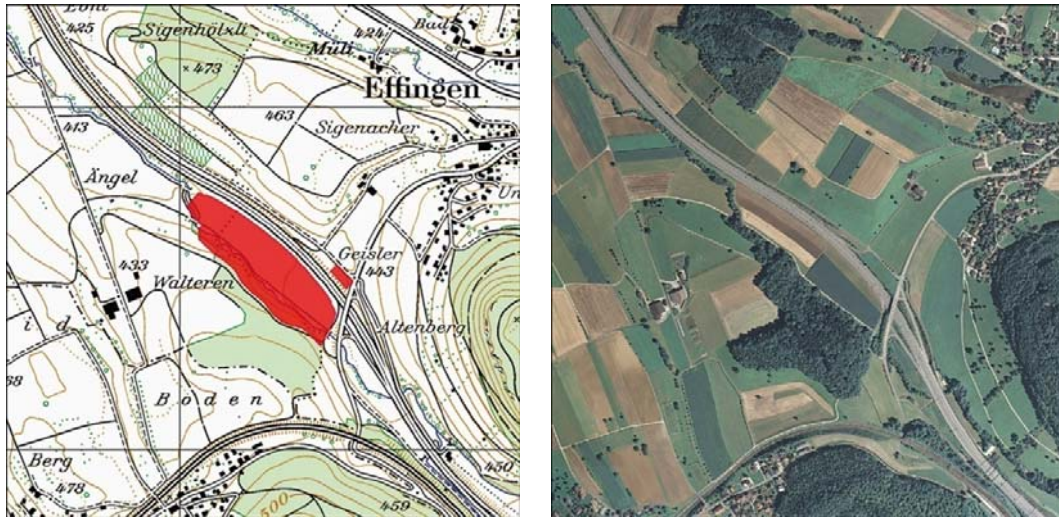


圖 2.5.2-22 瑞士 Jura Ost 地區內之候選區域二(JO-2)的地形與現況  
空照圖

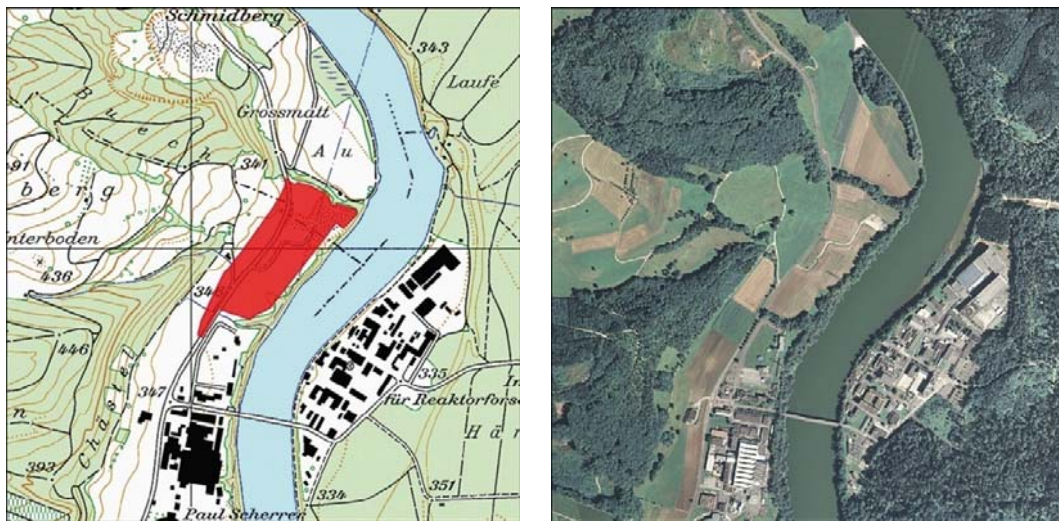


圖 2.5.2-23 瑞士 Jura Ost 地區內之候選區域三(JO-3)的地形與現況  
空照圖

#### 4. 候選區域四(JO-4)

該區域位於 Würenlingen 郡，且緊鄰 ZWILAG 核廢料處理公司與聯邦政府的臨時貯存設施。目前區域內為茂密的森林，未來需考量樹木的移除與復育。根據環境現

況，地面設施將被森林包圍且不易察覺，位置如圖  
2.5.2-24 所示。



圖 2.5.2-24 瑞士 Jura Ost 地區內之候選區域四(JO-4)的地形與現況  
空照圖

## 二、第二階段：至少選出兩個候選場址

由 SFOE 及 ARE 負責領導選址區域涵蓋的郡及地區，準備社會經濟方面及土地使用狀況評估等背景資料，根據第一階段的空間規劃狀況，擬訂土地使用現況與規劃之計畫。就區域參與而言，地質處置場的方案須多方面評估並與場址當地所在郡與公共組織進行溝通，包含場址對人類、環境或社會經濟的潛在影響等議題。此外，候選場址地區還具有下列具體任務：

1. 在 SOFE 的引導下，準備各候選場址區域的社會經濟調查。
2. 在可持續性發展的前提下準備配套措施，將對社會經濟與環境衝擊的潛在負面影響降至最低，並掌握其影響程度。
3. 與廢棄物生產者準備有關於處置場工程佈置、地點與地面入口基礎設施的提案。

假使候選場址區域沒有機會採取合作模式，廢棄物生產者與候選郡當局一起準備提案計畫書。

在與場址當地單位的合作下，工程的可行性將會是主要重點。廢棄物生產者準備提案計畫書包含所需的地面基礎設施配置、地質處置場單位的配置以及在地質選址區域內至少一處的選址，然後為此選址進行定量的安全分析，計算出的攝入輻射劑量必須低於 0.1 毫西弗。而根據其分析結果，廢棄物生產者須提出至少兩處可處理各類放射性廢棄物之處置場，並對所有類型的廢棄物進行討論。

第二階段的成果經聯邦當局審查後，結果報告與目標列表在經過 3 個月的磋商階段與修訂，交由聯邦委員會批准並將選址地點納入特別計畫。其餘選址地點將被指定為儲備方案並保留在特別計畫直到許可證被核發。整個第二階段的選址流程如圖 2.5.2-25 所示。

### 三、第三階段：決定處置場場址

在最後階段，廢棄物生產者須提供更詳盡的地質資訊包括地震測量、重力探測、地電測量、電磁測量、地表設施與既有地下結構物之地質測量、鑽探樣本、地下水樣本、泉水樣本、淺層壓力測量與追蹤劑試驗，確保最終處置場的安全要求。此外，對於當地社會經濟的深入調查，選址方案將作進一步的發展(項目包括可能的補償金、社會經濟和環境影響的監測)。假設補償金是可預期的結果，其程序需在第三階段需作透明化的協商，接下來廢棄物生產者將提出最終處置場的興建位置(中低放射性與高放射性廢棄物處置場各一處或一處可容納各類放射性廢棄物處置場)。

第三階段的許可證申請包含最初的環境影響評估到最後特別計畫中場址的規範，對於選定的場址，必須擁有足夠的資訊以利進行許可證申請。



聯邦委員會的核定是透過議會核准(假如有機會可採取全民公投)，其餘候選場址將保留其儲備身分，並保留在特別計畫中直到營運許可證被核發。整個流程如圖 2.5.2-26 所示。

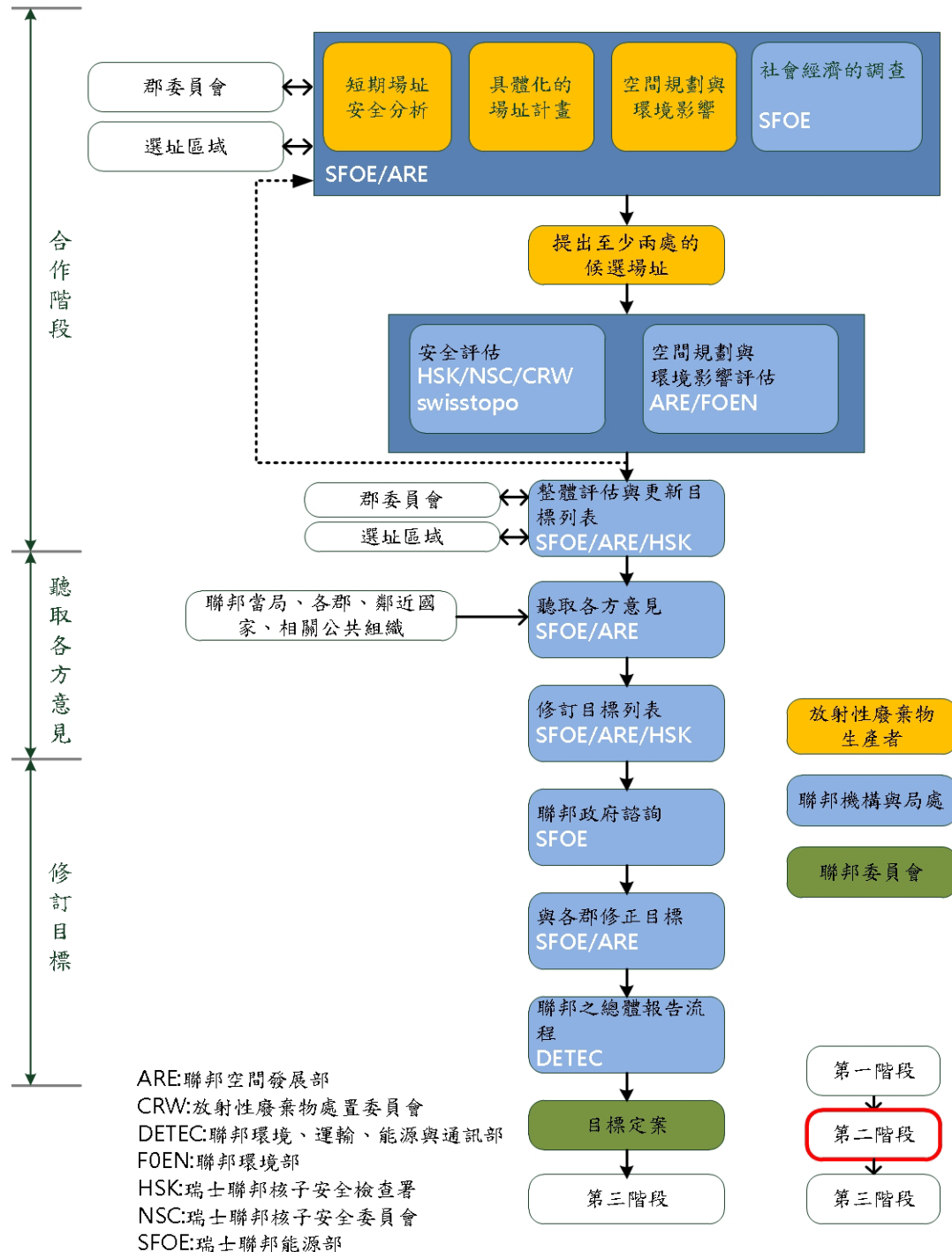


圖 2.5.2-25 瑞士高放最終處置場址選址之第二階段流程圖

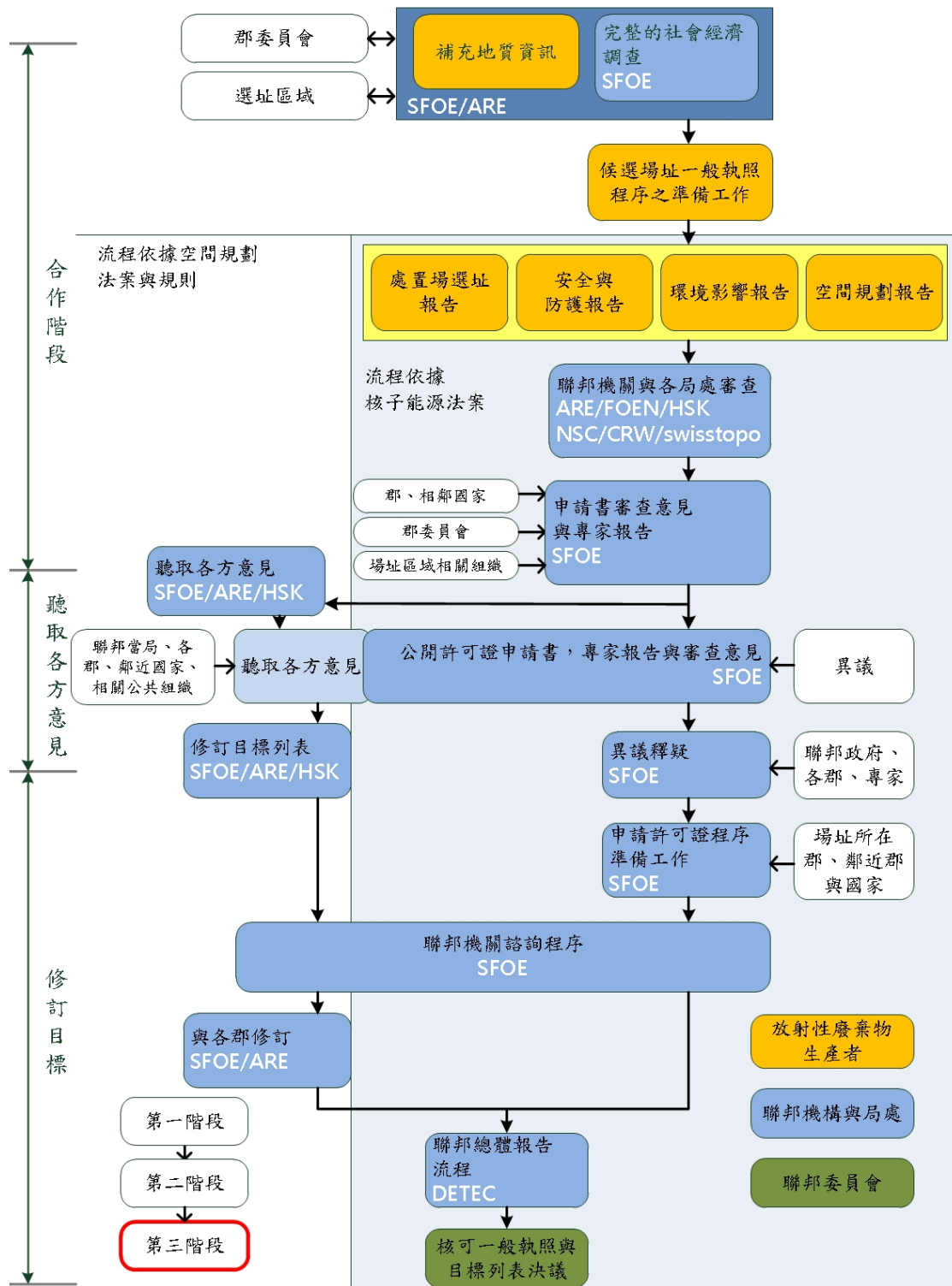


圖 2.5.2-26 瑞士高放最終處置場址選址之第三階段流程圖

### 2.5.3 處置概念

瑞士核能發電的用過核燃料，原本是由各家電力公司自行委託英國或法國進行再處理，但是 2003 年制定的核能法(Nuclear Energy Act)要求電力公司於 2006 年 7 月開始的 10 年內，禁止將用過核燃料運送至國外進行再處理，故目前是將用過核燃料先放入用過核燃料池中冷卻，再送到暫時貯存場存放。因此，瑞士的深層地質處置場之處置對象，包括用過核燃料、用過核燃料再處理後的玻璃固化體、再處理過程中產生的長半衰期放射性廢棄物等。玻璃固化體與用過核燃料因具有高放射性，需經過封裝後才能送到處置場。玻璃固化體的包封容器封為兩層，內層是不鏽鋼，外層容器的使用材料則尚未確定，封裝完後的玻璃固化體長度約 2 公尺、直徑約 0.94 公尺。用過核燃料則是直接放入厚度 15 公分的包封容器內，但容器的使用材料同樣尚未確定，封裝完後的用過核燃料長度約 4.6 公尺、直徑約 1.05 公尺，如圖 2.5.3-1 所示。



圖 2.5.3-1 瑞士的高放射性廢棄物種類

瑞士的深層地質處置規劃位於地表下 400~900 公尺的 Opalinus 黏土層。Opalinus 黏土層是 1 億 8000 萬年前的侏羅紀時期形成的沉積岩，以此岩層作為天然障壁，可提供良好的低透水性及核種吸附性，再加上處置設施的多層障壁，則可層層阻絕核種遷移。處置放射性廢棄物時，先在處置坑道內以膨潤土磚堆疊成基座，將封裝完成的高放射性廢棄物置於其上，再以膨潤土回填坑道內的空隙，如圖 2.5.3-2 所示。

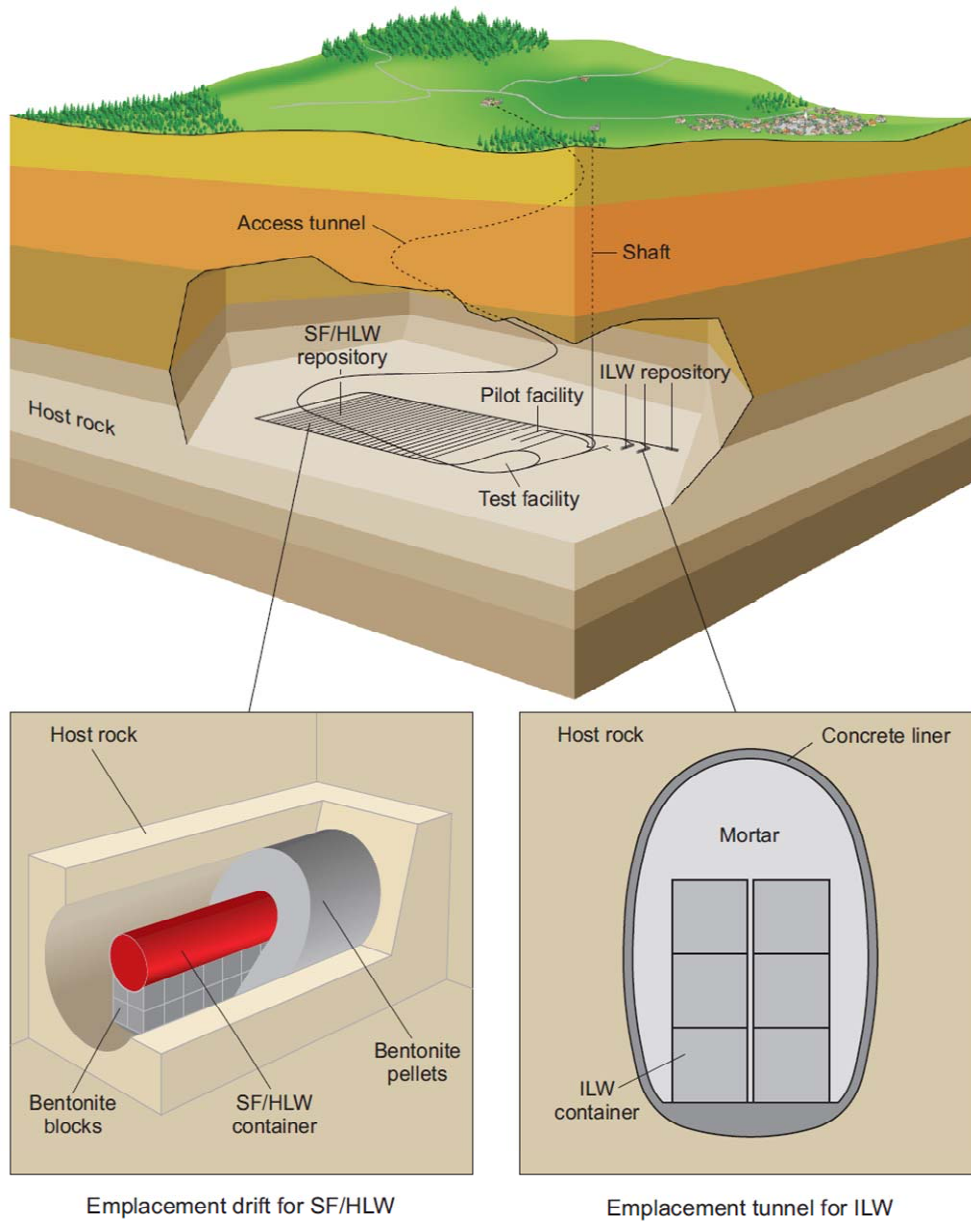


圖 2.5.3-2 瑞士的深層地質處置概念示意圖

## 2.5.4 場址篩選條件

最終處置場的場址篩選將依據「深層地質處置特別計畫 (Sectoral Plan for Deep Geological Repositories)」中的「場址安全與技術評估準則」，相關篩選條件說明如下：

### 一、場址母岩特性與有效的儲放範圍

#### (一)空間範圍

##### 1.評估內容

評估場址母岩的可能範圍、深度與有效的儲放範圍 (ECZ)，並考量區域的大地構造狀況(如區域斷層、冰川河谷與不適合之母岩)。佈置地下處置窖與通道之空間與彈性也列入評估考量。

##### 2.安全相關性

有利的條件如岩體種類組成、範圍與 ECZ 程度將放射性核種大量保留在母岩之中。

#### (二)阻水障壁之影響

##### 1.評估內容

確保放射性廢棄物處置窖，能長期隔離不受地下水影響，需評估水流方向、區域水文與溶解擴散現象。相關參數包括導水度、水壓梯度、主要傳輸模式(平流與擴散)與阻水障壁之功能。

##### 2.安全相關性

低導水度代表低水流量，其條件有利於工程障壁的功能與保護。在下一階段，確保放射性核種於母岩與 ECZ 區域內極為緩慢的遷移行為(屏障作用)。

### (三)地球化學之條件

#### 1.評估內容

就保存與延遲核種擴散(限制溶解度與吸附容量)而言，主要評估場址母岩與有效的儲放範圍之礦物種類、水化學、pH 值、氧化還原、鹽度、岩水反應、微生物反應，與工程障壁之長期狀態。

#### 2.安全相關性

就地球化學的條件而言，其特性將主導工程障壁之放射性核種滯留特性，且對工程障壁的長期穩定性也有所助益。

### (四)遷移路徑

#### 1.評估內容

主要評估核種的主要遷移路徑，包括母岩的散佈(多孔隙或裂縫為路徑)、孔隙空間、路徑長度與透射比。此外，地質中含大量的黏土所產生的自封能力(self-sailing capacity)也被納入考量。

#### 2.安全相關性

遷移路徑應是均勻分布在母岩的流道(flowpaths)中；相反的，遷移路徑可能集中於母岩裂縫、礦脈等不均勻的分布狀態。岩體中核種的遷移時間越長，核種在岩石中衰減的比例越大且不會接觸到生物圈。

## 二、長期穩定性

### (一)場址與母岩之穩定性

#### 1.評估內容

地質長期的穩定性，特別是場址母岩與有效的儲放範圍(ECZ)的隔離能力與地質變化為主要考量，地質變化如岩石擾動的差異移動(剪力、裂縫與斷層活動、水流組成

與氣體流路)，新構造活動(地震)，地球化學過程(溶解、岩融與岩水交互作用)與罕見地質活動(如裂隙活動伴隨強烈地震或火山活動)。

## 2.安全相關性

以長期考量，場址岩層的分佈需有利於工程障壁的屏障功能。此外，岩體內紋理因重力影響形成新的水流路徑，且因變形的地質紋理形成封閉型裂紋、裂縫與斷層，皆會影響母岩的穩定性。

### (二)侵蝕

#### 1.評估內容

處置場深度、抬升速率、侵蝕速率與冰川溝壑侵蝕等作用將危及母岩的障壁效果，以及 ECZ(岩石覆蓋層減少、場址母岩鬆弛(relaxation)並增加導水度)可能造成處置場於使用年限前暴露，故以上因素皆須評估。

#### 2.安全相關性

低度侵蝕對於母岩的屏障能力，可能不受影響或在很晚的階段產生影響，對於工程障壁的安全性是為有利的條件。

### (三)場址所引發的影響

#### 1.評估內容

包括評估廢棄物所產生的氣體、氣體傳輸、熱輸出與熱效應敏感度、熱傳-水力-機械耦合過程、化學交互作用、地下結構上方開挖所造成的損壞區域、可逆性的變化與自封能力，並評估處置場的佈置、存量與工程障壁材料特性。

#### 2.安全相關性

母岩的溫度敏感度、裂紋與裂縫的自封能力，將降低場址可能引發的劣化影響(降低工程障壁的功能性)。

#### (四)使用衝突

##### 1.評估內容

主要評估場址母岩所含之物質如鹽類、煙類、地熱、礦泉與溫泉可能與處置場的使用發生衝突，利用上述物質將影響場址母岩其障壁的功能性。

##### 2.安全相關性

自然資源經開發後可能導致降低母岩的屏障作用，故母岩須避免選擇具有明顯礦脈與其他可開採之自然資源。

### 三、可靠的地質資訊

#### (一)母岩性質描述

##### 1.評估內容

盡可能描述場址與有效的儲放範圍的母岩特徵，並判定其與安全相關之屬性(岩石成分的同質性與異質性、架構元素之性質、與安全相關的變異屬性)為主要評估重點。

##### 2.安全相關性

母岩盡可能選擇均勻的地質構造，並使用可預期的衡量方式且避免破壞式的調查方法(影響岩石的屏障功能)。母岩之性質可透過已知的國內外研究或相似的岩體樣本來進行評估。

#### (二)可探勘的空間狀況

##### 1.評估內容

包含岩床狀態、範圍與地層的連續性、岩性的空間延續性、場址母岩的邊界、斷層帶的位置、小規模斷層等。此外，第四紀的地質、地形、人口密度、植被等也列為評估重點。



## 2.安全相關性

不管是地表探勘母岩底層狀況與 ECZ 的幾何分布，或者是與安全屬性相關的觀察與調查，將是探勘空間狀況的重點，此外，還有其他因素可能使探勘變為複雜(例如第四紀沉積物較厚、複雜的地形、高密度森林與人口中心)。

### (三)可預期的長期變化

#### 1.評估內容

在一段時間內可能造成場址母岩與有效儲放範圍內母岩變化皆須考量，可預期的長期地質變化如運用氣候演變與地球動力模型、最近變動的跡象與地震，

## 2.安全相關性

經證據顯示獨立且長時間隔離的岩層(包含古孔隙水並證實獨立水循環)也是有利的場址條件，廢棄物處置的母岩幾何分布與 ECZ 區域，其安全可靠性是可預測的。

## 四、工程的適用性

### (一)母岩力學特性與狀態

#### 1.評估內容

從最終處置場施工、營運、監測到封閉的母岩力學特性與狀態需詳加評估，包含岩體強度、變形行為(deformation behavior)、深度、岩體應力、空隙的穩定性、天然氣體傳輸。

## 2.安全相關性

處置場的構成單元必須在無技術問題下進行結構性的封閉。以工程角度而言，在施工、營運、監測到封閉要求與易於管理將會是主要考量。

## (二)地下通道與排水

### 1.評估內容

評估通道與處置窖的工程與水文地質條件(包含施工、營運)與維護通道與豎井。

### 2.安全相關性

在地表以上無重大水文地質或工程問題將是有利的條件。

### 第三章 國外高放處置場址特性條件考量因子分析

高放射性廢棄物最終處置場為能確保人類生活環境與廢棄物之長期隔離功能，均採深層地質處置與多重障壁系統做為主要對策。多重障壁系統包含天然與工程障壁系統，而天然障壁系統之功能主要受處置設施所在母岩與周圍地質組成所影響，工程障壁系統則依工程規劃、設計與建造決定其功能。因此，選址時主要關注於會影響天然障壁系統對於遲滯核種傳輸功能性之因素，諸如：處置場的地質、周圍地層構造、水文地質、地球化學特性等。另外，工程技術、社會接受度與經濟可行性等議題亦需加以考量。比對 IAEA 對於選址相關指引(如表 3-1)，其考量因子主要亦在此範圍內。以下就各國篩選階段與因子分別進行綜合分析。

表 3-1 IAEA 與處置場選址相關指引一覽表

編號	指引名稱	概述
Safety Standards No.SSR-5	Disposal of Radioactive Waste	處置場之安全要求。
Safety Series No.96	Guidance for Regulation of Underground Repositories for Disposal of Radioactive Wastes	選址各階段之一般要求、法規要求與執行要求。
Safety Series No.60	Criteria for Underground Disposal of Solid Radioactive Wastes	技術準則分為：地質環境、處置設施、廢棄物與品保等。
Safety Standards No.SSG-14	Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste	處置場之安全要求。
Safety Series No.111-G-4.1	Siting of Geological Disposal Facilities	選址流程、選址準則及所需資料。
TECDOC Series No.563	Siting, Design and Construction of a Deep Geological Repository for the Disposal of High Level and Alpha Bearing Wastes	深層地質處置的選址、設計與建造。包括選址的流程、選址準則扮演之角色、處置場的設計與建造注意事項等。



### 3.1 各國高放射性廢棄物處置場選址過程分析

彙整與分析前述各國高放射性廢棄物處置場選址歷程，雖然各國在選址階段的時程與選址目標不盡相同，但依其選址階段目標加以區分，則可將各國選址過程大致區分為「篩選階段」、「調查階段」與「場址確定」階段。彙整如表 3.1-1 並分析如下：

#### 一、「場址篩選階段」目標與因子

##### (一)階段目標：

各國於此篩選階段最主要的目標均是希望篩選出「具有潛力成為最終處置場」且「具有後續調查作業可行性」的數個場址。

##### (二)篩選「具有潛力成為最終處置場」之區域：

此部分各國均以地質的長期穩定性為主要考量，基於各國既有地質調查與研究文獻為主要篩選資料，或輔以現場補充調查做為確認。

不論其篩選作業是以直接設定篩選條件遴選合適區域，或是採用公開招募再研判其合適性之作業方式進行，其最主要的篩選因子均為地質的長期穩定性，另以處置場是否具有可擴充性為主要考量之一。

##### (三)篩選「具有後續調查作業可行性」之區域：

由於高放射性廢棄物處置其調查作業具有一定調查難度、調查成果之解析不確定性，與處置場本身鄰避效應等因素。因此，選擇地質構造較為單純且易於解析之區域，將有助於後續調查作業確認場址合適性之研判可信度，為最主要的篩選考量之一。

此外，則以避開法定保護區、避免場址具有天然資源、避免對周圍住民產生衝擊、土地所有權與社會接受度等，基於長期安全所衍生之考量因子與社會接受度為主。

表 3.1-1 各國選址過程階段劃分與概述(1/3)

國家	場址篩選階段	場址調查階段		場址確定階段
瑞典	『可行性研究階段』 1.時程：1993~2000 年。 2.公開招募由 SKB 負責篩選。 3.設定選出 5~10 處地點，最終選出 8 處地點。 4.篩選因子類別：安全、技術、土地與環境、社會。	『場址調查階段』 1.時程：2002~2007 年。 2.最終選出 2 處地點。 3.篩選因子類別：場址特性、技術、社會資源、健康與環境。		『場址確定階段』 1.2009 年公投通過。 2.2011 安全分析報告審查通過。
芬蘭	『場址鑑別調查階段』 1.時程：1983~1987 年。 2.由 TVO 進行多階段式篩選。 3.1985 年選出 101 處潛在調查區域。 4.1986 年經主管機關評估降至 85 處潛在調查區域 5.1987 年篩選調查區域研究選出 5 處調查區域。 6.篩選因子類別：地質因子、環境因子。	『初步場址調查階段』 1.時程：1987~1992 年。 2.最終選出 3 處地點。 3.篩選因子類別：地質因子、環境因子、安全分析。	『詳細場址調查階段』 1.時程：1993~2000 年。 2.1994 年因芬蘭制訂禁止核燃料輸出入之核能法規，而增加了 1 處核電廠區域，成為 4 處調查區域。 3.篩選因子類別：場址特性評估、安全分析。	『場址確定階段』 1.2000 年由 STUK 審查同意接受場址。 2.同年，分別經過場址所在之地方政府議會表決通過，芬蘭政府同意「原則決定」。 3.2001 年經國會表決通過。

備註：

- 1.各國因國情不同，對選址時程之規劃具有不同的政策考量。
- 2.除了選址過程外，各國從選址前的先期研究到高放處置場的啟用，一般約需 50 年以上的時間。

表 3.1-1 各國選址過程階段劃分與概述(2/3)

國家	場址篩選階段	場址調查階段		場址確定階段
美國	<p>『核能廢棄物政策法訂定前之階段』</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.時程：1957~1982年。</li> <li>2.由 ERDA(Energy Research and Development Administration)進行篩選，主要以篩選鹽岩場址與聯邦政府既有核設施土地的適宜性。</li> <li>3.選出 9 個潛在候選場址。</li> </ol>	<p>『核能廢棄物政策法訂定後之階段』</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.時程：1984~1987年</li> <li>2.改由 OCRWM(Office of Civilian Radioactive Waste Management)進行篩選，法定需選出 5 個場址，並向總統提名 3 個場址。最終選出 3 個場址。</li> <li>3.篩選因子類別：10CFR960。</li> </ol>	<p>『核能廢棄物政策修訂法之階段』</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.時程：1987~2002年</li> <li>2.1987年國會通過「核能廢棄物政策修訂法」，指示 DOE 僅調查 Yucca Mountain 場址。</li> <li>3.於 1988年~2002年間進行場址特性調查與分析工作。</li> </ol>	<p>『場址確定階段』</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.2002年參議院通過場址建議案，布希總統簽署同意場址申請案。</li> <li>2.2008年 DOE 向 NRC 提出建造執照申請。</li> <li>3.2010年因歐巴馬政府政策改變，DOE 撤回建造執照申請。</li> </ol>
日本	<p>『文獻調查階段』</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.預計時程約 2 年</li> <li>2.目前向全國進行公開招募，當地方提出申請後，再由 NUMO 依文獻調查資料判釋申請場址是否適合列為初步調查場址。</li> <li>3.篩選因子類別：場址篩選因子(地震、火山噴發、隆起、侵蝕、第四紀鬆散沉積物、礦物資源)。</li> </ol>	<p>『初步調查階段』</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.預計時程約 4 年</li> <li>2.尚未進行。</li> <li>3.篩選因子類別：目前以地質穩定、無施工阻礙、地下水流對設施影響小為主要篩選目標。</li> </ol>	<p>『詳細調查階段』</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.預計時程約 15 年</li> <li>2.尚未進行。</li> <li>3.篩選因子類別：目前以符合岩石強度及其他物理性質、地層內的氫離子濃度及其他化學特性、地層內的地下水流以及經濟產業省規定之其他項目為主要篩選目標。</li> </ol>	<p>『場址確定階段』</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.尚未進行。</li> </ol>

備註：



- 1.各國因國情不同，對選址時程之規劃具有不同的政策考量。
- 2.除了選址過程外，各國從選址前的先期研究到高放處置場的啟用，一般約需 50 年以上的時間。

表 3.1-1 各國選址過程階段劃分與概述(3/3)

國家	場址篩選階段	場址調查階段		場址確定階段
瑞士	『地質篩選階段』 1.時程：2008～2011 年。 2. 由 NAGRA (National Co-operative for the Disposal of Radioactive Waste)負責篩選。 3.最後選出 3 個區域。 4.篩選因子類別：場址母岩特性與有效的儲放範圍、長期穩定性、可靠的地質資訊、工程的適用性。	『候選場址階段』 1.預計時程：2011～2016 年。 2.由 NAGRA 執行中。 3.篩選因子類別：社會經濟、土地使用、環境影響、工程規劃、安全分析。 4.需選出 2 個以上場址。	『決定場址階段』 1.預計時程：2016～2020 年。 2.尚未進行。 3.篩選因子類別：補償金、社會經濟和環境影響、安全分析。	『場址確定階段』 1.尚未進行。

備註：

- 1.各國因國情不同，對選址時程之規劃具有不同的政策考量。
- 2.除了選址過程外，各國從選址前的先期研究到高放處置場的啟用，一般約需 50 年以上的時間。

由於篩選依據多為既有文獻資料，其篩選條件評量以定性考量為主，但部分國家採公開招募方式進行篩選，則對於部分不利條件訂有確定數值之技術準則，做為場址合適性複核之用（例如：活動斷層距離、火山半徑距離等）。

## 二、「場址調查階段」目標與因子

### (一)階段目標：

調查階段最主要的目標均為篩選出「合適的場址」。由於篩選階段多以既有文獻為研判基礎，故以定性評量搭配學理推演為主要方式，其受參考的調查文獻精度與推演方式影響，其可靠度均有所差異。因此，為了篩選出「最具潛力之最終處置場」多延續其前階段之篩選因子類別，搭配「場址調查」與「安全分析」來確認場址合適性與遴選最佳場址。

### (二)「場址調查」與「安全分析」搭配方式：

- 1.「場址調查」主要目的：高放射性廢棄物最終處置場的調查作業，主要以取得場址地質、水文地質與地球化學等特性資料為主，同時亦需取得處置設施工程設計所需之必要資訊。
- 2.「安全分析」主要目的：由於高放射性廢棄物最終處場將採深層地質處置，且需確保長期隔離安全功能之時間亦長達數萬年以上，將藉由多重障壁系統之整體功能來達成確保人類環境安全之目的，故在此階段已開始藉由「安全分析」，來加以確認場址之整體適宜性，並確認處置設施將可滿足安全法規限值。
- 3.搭配方式：在「調查階段」為了完整掌握場址特性，各國會將「場址調查」分析所得特性資料，提供給「安全分析」與「場址設計」作業，重複檢證設計基準的合適性與安全功能是否滿足需求等重要考量。

### (三)「場址調查」之地下調查試驗工作：

由於高放射性廢棄物處置場母岩之障壁特性為確保安全功能之關鍵，但各場址母岩特性均具有獨特性，難以利用類比式的調查經驗或分析成果來正確掌握場址特性。因此，依各國推動選址之調查經驗，在進行地下調查與試驗工作的過程中，仍需針對場址特性發展合適的調查與解析技術。更進一步的掌握詳盡的場址資料，以利各種不同情境之安全分析，並降低調查與分析不確定性之影響。為此，如德國、瑞士、加拿大、日本與比利時等 IAEA 的會員國均設有地下研究試驗室。

## 三、「場址確定階段」目標與因子

### (一)階段目標：

經由主管機關或其他審查機關再次審查與確認，場址調查階段對於場址特性的掌握程度是否足夠。另外，各國依其法規體制亦會進行社會接受度之評量。

### (二)「場址確定」方式

雖各國場址確定依其法規體制有所差異，但主要均需提供場址設施詳細設計資料、安全分析結果、環境影響分析等與執照申請相關文件供審查機關審核。審查作業主要以場址調查階段所取得資料進行安全分析，並充分的瞭解所進行之調查與分析的不確定性。在充分掌握場址特性之基礎上，研判場址與設計的合適性，並基於安全分析結果做出場址確定的判斷。

### 3.2 各國「場址篩選階段」與「場址調查階段」考量因子分析

場址適於做為處置場之篩選條件通常依循各國法規體制加以訂定，但不論其訂定方式為何，各國均以安全因子做為判斷場址合適性之主要考量。因此，在選址過程中雖然會考慮不同篩選因子的優先順序，但仍以影響處置設施長期安全之因子為最優先考量。例如：在確定場址長期安全、技術可行性、營運安全性、自然環境影響等均滿足篩選安全條件的狀況下，討論政治、社會接受度與地區經濟的影響。反之，即使社會接受度相當高，亦無法接受有長期安全疑慮之場址。

場址篩選考量因子在研擬時主要考量：

- 一、考量因子如何影響場址的評價（包含：安全、營運、衝擊影響等）。
- 二、在場址篩選階段與場址調查階段中，考量因子能直接或間接取得資料之類型與精度。
- 三、在哪些情境狀況下，考量因子將會對場址形成限制條件或排除條件。
- 四、其他與處置設施相關之空間及時間考量因子均需被評估。

理論上，考量因子需有詳細並量化的規範或評估準則，但受限於調查技術、評估技術、投入資源等實務上可行性之限制，以及許多因子間亦具有相關性。因此，各國在執行上並未訂出各分項因子完整之量化標準，而將評量標準改由系統整體安全性做為判斷依據，而不特別強調個別考量因子之評量條件。因此，在整個選址過程中，僅部分評估準則會從定性研判轉變為特定的量化數值，最後多改採整體系統的安全評估做為研判標準。

場址考量因子的判斷準確性取決於可獲得的資料量與精度，而不同因子與選址階段所能取得資料有相當大之差異。有些資料

在選址初期即可由既有文獻資料取得，但有相當多之場址特性資料需透過現地調查與分析後才能取得，甚至有些場址特性資料需要透過地下調查試驗作業才能取得正確資訊，甚至有部分較特殊之資料需透過專家解析與研判。因此，各類考量因子均需清楚說明其調查時間、調查方式、分析方法與採用之假設條件等，並做成完整記錄以供判斷資料完整性與不確定性使用。

分析前述章節各國於「場址篩選階段」之考量因子大致可區分為：一、長期安全，二、營運安全與工程技術可行性，三、其他輔助考量（社會經濟、自然環境與社會接受），依此彙整各國篩選階段之考量因子如表 3.2-1~表 3.2-3 所列。

表 3.2-1 各國「場址篩選階段」之「長期安全」因子與考量準則(1/4)

國家	考量因子	考量因子與準則內容
瑞典	安全因子	<p><b>考量因子：</b> 安全因子主要考量處置設施之長期安全性，其主要考量母岩需提供工程障壁長期且穩定的化學與力學環境，亦需確保母岩本身的障壁效能，考量因子如下：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 容器、膨潤土及燃料的化學環境。</li> <li>2. 岩石的力學穩定性。</li> <li>3. 岩石中，腐蝕物質與放射性物質的傳輸條件。</li> <li>4. 未來受到入侵的風險(例如：母岩有可利用的自然資源)。</li> </ol> <p><b>考量準則：</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 此區域是否會有較佳潛力可滿足篩選因子考量。</li> <li>2. 對於後續調查階段之重要環境與安全因子調查工作，具有較佳之預期成效。</li> <li>3. 大區域內有一些主要破裂帶，可增加尋找具有足夠面積與安全性母岩之可能性。</li> <li>4. 母岩條件與構造系統較單純且具較多之露頭，可增加對母岩條件與安全性研判之可信度。</li> </ol> <p><b>排除因子：</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 岩石種類屬於易被礦產開採或作為其他利用之岩石。</li> <li>2. 高異質性或難以說明之母岩。</li> <li>3. 已知變形區或新構造運動斷層。</li> <li>4. 明顯的地下水流出區域。</li> <li>5. 母岩之地下水化學異於瑞典的一般特性。</li> </ol>

表 3.2-1 各國「場址篩選階段」之「長期安全」因子與考量準則(2/4)

國家	考量因子	考量因子與準則內容
芬蘭	地質因子	<p><b>初期考量因子：</b> 基於「抑制核種釋放」與「限制核種傳輸途徑」考量設定地質考量因子如下：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.岩石的礦物成分。</li> <li>2.裂隙地下水與裂隙表面物質的化學關聯性。</li> <li>3.地質構造與其對水力傳導特性的影響。</li> </ol> <p><b>初期考量準則：</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.依據斷層與破裂帶的持續性、寬度與規模等進行分類。</li> <li>2.主要遴選地質構造穩定且被大型破裂帶所圍繞之岩區。</li> </ol> <p><b>後期考量因子：</b> 主要目標在釐清前期篩選區域適宜性，其考量因子如下：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.地質適宜性。</li> <li>2.調查資料的信心程度。</li> </ol> <p><b>後期考量準則：</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.依考量因子合適與信心程度，分為四個級距進行比較。</li> </ol>
日本	場址篩選因子	<p><b>排除式考量因子：</b> 避免選於自然現象會對地層造成顯著影響區域為主要考量，其場址篩選因子如下：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.地震與活動斷層。</li> <li>2.火山活動。</li> <li>3.隆起與侵蝕。</li> <li>4.第四紀鬆散沉積物。</li> <li>5.礦物資源。</li> </ol> <p><b>排除式考量準則：</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.排除已知活動斷層區域、評估周圍破碎帶變形程度與活動性等。</li> <li>2.火山活動排除條件：第四紀火山半徑 15 公里之區域，文獻分析預測未來幾千年內可能會發生岩漿入侵或火山爆發區域，熱效應明顯、有高酸性熱水與顯著熱對流區域。</li> <li>3.有明確證據證明在過去 10 萬年間抬升達 300 公尺之區域。</li> <li>4.排除岩層為第四紀鬆散沉積物之區域。</li> <li>5.排除位於具有經濟價值礦物之區域。</li> </ol>

表 3.2-1 各國「場址篩選階段」之「長期安全」因子與考量準則(3/4)

國家	考量因子	考量因子與準則內容
日本	場址篩選因子	<p><b>有利式考量因子：</b> 有利因子採整體性評估考量，而不針對各項進行評比，並可能作為決定場址選擇之評估工具，其考量因子如下： 1.地質構造與性質。2.地下水文特性。3.地質環境調查與評估。4.建設與營運階段可能遭遇之自然災害。5.土地購置成本。6.交通運輸。</p> <p><b>有利式考量準則：</b> 1.考量力學強度、變形情況、斷層、風化、地溫梯度、岩體抬升與侵蝕速率、潛在孔隙水壓、母岩膨脹性、氣體噴流、岩爆與大規模水入流。 2.考量地下水流量、流速、溫度、pH 與氧化還原電位。 3.考量調查規模、範圍、時間、技術與評估方法適宜性，易於評估與建置地質模型、現場調查的用地限制。 4.發生天然災害的可能性，包含：地震、地滑、洪水。 5.考量直接購買土地成本。 6.便於運輸，例如：考量距離港口之距離。</p>
瑞士	場址母岩特性與有效的儲放範圍	<p><b>考量因子：</b> 主要以場址特性有利於遲滯核種之考量為主，其考量因子如下： 1.空間範圍 2.水力障壁之影響 3.地球化學之條件 4.遷移路徑場址安全與技術評估準則</p> <p><b>考量準則：</b> 1.考慮母岩與區域地層構造，評估設施佈置靈活性以及母岩與有效控制區之核種遲滯能力。 2.將地下水流場主導核種傳輸確保廢棄物隔離之功能視為水力障壁，主要考量低水力傳導係數與低水力梯度等特性。 3.考量地球化學之長期演化不會對母岩與工程障壁功能產生不利影響。 4.考量核種遷移路徑越長與核種傳輸速度越緩慢均較為有利。</p>

表 3.2-1 各國「場址篩選階段」之「長期安全」因子與考量準則(4/4)

國家	考量因子	考量因子與準則內容
瑞士	長期穩定性	<p><b>考量因子：</b> 主要以避免場址具有不利長期穩定之因素，其考量因子如下：</p> <ol style="list-style-type: none"><li>1.場址與母岩之穩定性</li><li>2.侵蝕</li><li>3.場址所引發的影響</li><li>4.使用衝突(天然資源)</li></ol> <p><b>考量準則：</b></p> <ol style="list-style-type: none"><li>1.考量場址母岩具長期穩定性，避免受到地震與斷層活動影響。</li><li>2.考量現況低侵蝕區域或長期侵蝕後不致降低障壁功能區域。</li><li>3.考量母岩在設施開發與營運過程不會產生明顯的功能減損。</li><li>4.考量該區域不具有價值之天然資源。</li></ol>



表 3.2-2 各國「場址篩選階段」之「營運安全與工程技術可行性」  
因子與考量準則

國家	考量因子	考量因子與準則內容
瑞典	技術因子	<p><b>考量因子：</b> 技術因子主要考量處置設施之建造、設施營運安全與運輸系統之技術需求。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.地表設施：地表設施的設計與設備需能使工作環境、輻射防護及其他環境保護等達到安全要求。</li> <li>2.地下設施：建造地下設施需進行大規模的開挖，故需評估母岩與工程技術是否滿足安全性與可行性需求。</li> <li>3.運輸系統：運輸系統需考量所需之運輸技術可行性，以及運輸系統是否會與既有土地利用產生衝突。</li> </ol> <p><b>考量準則：</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.具有所需的基礎建設及交通運輸建設(例如港口、鐵路、公路等)，可將鐵路或道路的土地使用需求降至最低。</li> <li>2.技術可行性以是否有類似之工程經驗為評估準則。</li> </ol>
日本	場址篩選因子	<p><b>有利式考量因子：</b> 有利因子採整體性評估考量，而不針對各項進行評比，並可能作為決定場址選擇之評估工具，其考量因子如下：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.地質構造與性質。</li> <li>2.地下水文特性。</li> <li>3.地質環境調查與評估。</li> <li>4.建設與營運階段可能遭遇之自然災害。</li> <li>5.土地購置成本。</li> <li>6.交通運輸。</li> </ol> <p><b>有利式考量準則：</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.考量力學強度、變形情況、斷層、風化、地溫梯度、岩體抬升與侵蝕速率、潛在孔隙水壓、母岩膨脹性、氣體噴流、岩爆與大規模水入流。</li> <li>2.考量地下水流量、流速、溫度、pH 與氧化還原電位。</li> <li>3.考量調查規模、範圍、時間、技術與評估方法適宜性，易於評估與建置地質模型、現場調查的用地限制。</li> <li>4.發生天然災害的可能性，包含：地震、地滑、洪水。</li> <li>5.考量直接購買土地成本。</li> <li>6.便於運輸，例如：考量距離港口之距離。</li> </ol>
瑞士	工程的適用性	<p><b>考量因子：</b> 主要考量設施工程特性的技術性，其考量因子如下：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.母岩力學特性與狀態。</li> <li>2.地下通道與排水。</li> </ol> <p><b>考量準則：</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.考量施工、營運、封閉等階段之工程技術需求具可行性。</li> <li>2.考量通行隧道與處置隧道等地下設施沒有重大的水文地質或工程問題需克服。</li> </ol>

備註：考量因子名稱沿用各國訂定之項目名稱。

表 3.2-3 各國「場址篩選階段」之「其他輔助考量」因子與考量準則(1/2)

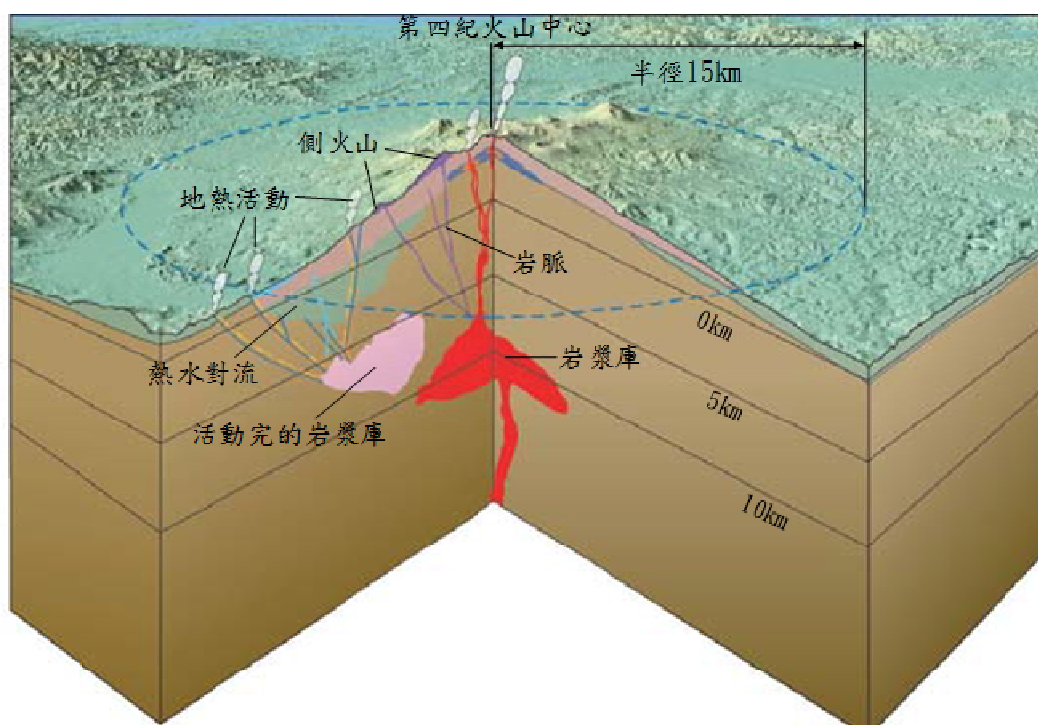
國家	考量因子	考量因子與準則內容
瑞典	土地利用與環境因子	<p><b>考量因子：</b> 土地利用與環境因子主要考量處置設施對於土地利用與環境之衝擊性。 1.選址和設施配置時需考量保護區與有具有自然資源與文化環境價值區域(如：自然保育、休閒娛樂、狩獵、漁業、其他戶外活動、文化古蹟、重要天然資源、農業及林業等)。 2.設施建造與營運時，均可滿足環境要求。</p> <p><b>考量準則：</b> 1.不屬於自然資源利用的岩石種類，可降低此區域未來被開發利用的風險。 2.區域內之土地使用競爭與環境利益較低，可提供較高的規劃彈性。</p>
瑞典	社會因子	<p><b>考量因子：</b> 社會因子主要考量處置設施對於政治與社會環境之衝擊性。 1.調查、建造、試運轉、營運等各階段皆有民意支持。 2.考量對社會及社會經濟可能產生之影響結果。</p> <p><b>考量準則：</b> 1.當地之正面關注程度。</p>
芬蘭	環境因子	<p><b>初期考量因子：</b> 環境因子主要考量環境中可能受處置設施影響之程度，其主要考量因子如下： 1.人口與發展區域分布。 2.場址附近的既有交通系統。 3.環境保護區與地下水資源。</p> <p><b>初期考量準則：</b> 1.依考量因子的影響程度，分為三個級距進行比較。 2.再依面積大小、合適基岩比例、地質破裂密度等場址特性再排除較差場址。</p> <p><b>後期考量因子：</b> 主要目標在釐清前期篩選區域適宜性，其考量因子如下： 1.人口密度因子：考量定居人口、農耕型態與城市規模。 2.土地所有權因子：國有、企業產權或私人產權。 3.交通運輸因子：場址距鐵路系統之距離。</p> <p><b>後期考量準則：</b> 1.各考量因子均設定為三個級距進行比較。</p>

表 3.2-3 各國「場址篩選階段」之「其他輔助考量」因子與考量準則(2/2)

國家	考量因子	考量因子與準則內容
瑞士	可靠的地質資訊	<p><b>考量因子：</b>                      主要以調查資訊取得難易與可靠性為考量，其考量因子如下：                      1.母岩性質描述                      2.可探勘的空間狀況                      3.可預期的長期變化</p> <p><b>考量準則：</b>                      1.母岩之地質組成與構造應儘量易於調查與分析。                      2.考量場址環境對於調查作業與評估作業進行之難易度。                      3.場址易於進行長期環境演化預測。</p>

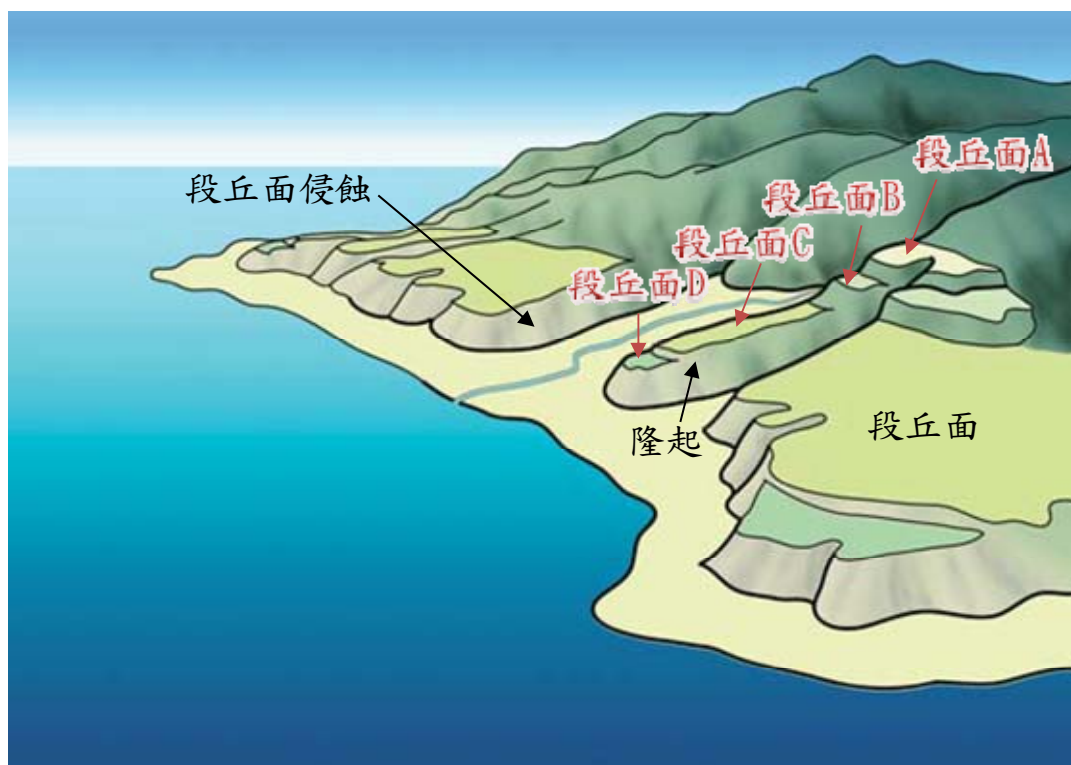
綜合前述各國考量因子與準則內容，依其考量項目、因子與特性彙整如表 3.2-4 所列。如同本節前述內容，最終處置場址的篩選過程中首重「長期安全性」，因此可發現表 3.2-4 彙整之準則內容中僅有「長期安全性」項目列有「排除式」因子與考量準則。其中，參考日本 NUMO 所訂定之「排除式量化標準」說明如下：

- 一、由於場址位於地下深處，為避免岩漿灌入直接破壞處置場，考量未來數萬年之岩漿活動範圍擴張的可能性，場址不宜在與第四紀火山中心距離 15 公里的範圍內，如圖 3.2-1 所示。
- 二、地形的隆起與侵蝕會使廢棄物接近地表，故以過去 10 萬年間的隆起量為判斷依據，當過去 10 萬年的隆起總量超過 300 公尺時，則不適宜做為場址，如圖 3.2-2 所示。
- 三、場址應避免位於活動斷層或其破碎帶，以避免斷層受地震等外力影響而錯動時，對設施產生直接破壞之影響，如圖 3.2-3 所示。另依日本土木學會依日本調查資料評估，因斷層活動而產生顯著影響之範圍，僅限於斷層起算之 1 公里範圍。



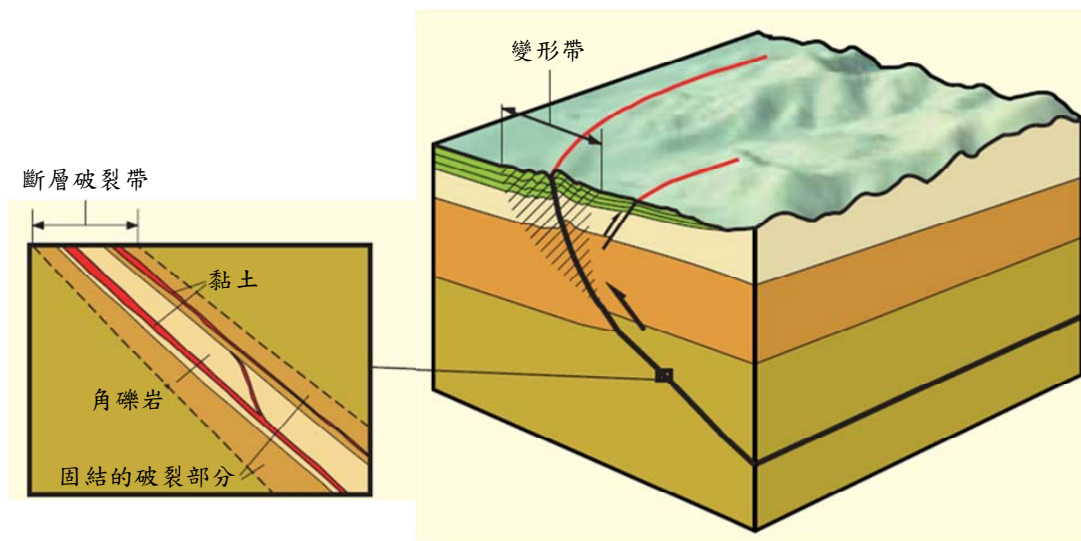
資料來源：原子力發電環境整備機構(2009)，概要調查地區選定上の考慮事項。

圖 3.2-1 火山與火成活動概念圖

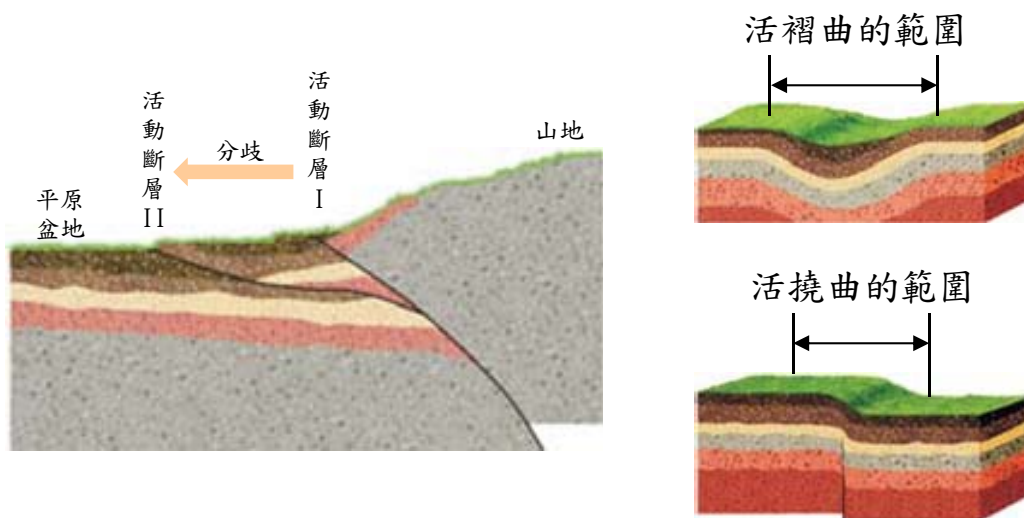


資料來源：原子力發電環境整備機構(2009)，概要調查地區選定上の考慮事項。

圖 3.2-2 侵蝕與隆起活動概念圖



活動斷層的寬度與破裂帶的概念



活動斷層分歧概念

活褶曲與活撓曲的範圍

資料來源：原子力發電環境整備機構(2009)，概要調査地区選定上の考慮事項。

圖 3.2-3 活動斷層與破裂帶概念圖

表 3.2-4 「場址篩選階段」主要考量因子一覽表

項目	相關考量因子	主要特性
長期安全性	<ul style="list-style-type: none"> <li>母岩特性</li> <li>地質構造、岩石力學、地質變化</li> <li>火山運動、泥火山活動</li> <li>地震</li> <li>水文地質</li> <li>地球化學</li> <li>氣候變遷與長期環境演化</li> <li>潛在的無意闖入</li> <li>廢棄物特性</li> <li>工程障壁特性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>遲滯核種能力</li> <li>活動斷層、斷層等地質構造</li> <li>噴出口一定範圍</li> <li>地震震央、規模與頻率</li> <li>地下水流場</li> <li>母岩與地下水之化學環境</li> <li>降雨量變化、抬升與侵蝕</li> <li>母岩深度</li> <li>廢棄物活度與數量等特性</li> <li>工程障壁遲滯核種特性</li> </ul>
營運安全與工程技術可行性	<ul style="list-style-type: none"> <li>地質與岩石力學</li> <li>水文地質</li> <li>地震</li> <li>洪水、土石流等天然災害威脅</li> <li>工程障壁特性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>母岩力學特性與坑道設計</li> <li>坑道與排水設計</li> <li>耐震設計</li> <li>潛在威脅區域、地表與地下設施工程設計</li> <li>工程障壁設計與可行性</li> </ul>
其他輔助考量	<ul style="list-style-type: none"> <li>農業與工業發展</li> <li>自然保育與環境衝擊</li> <li>經濟發展與土地規劃</li> <li>礦物資源</li> <li>土地所有權</li> <li>政治與民意</li> <li>交通運輸</li> <li>人口分布</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>場址周邊產業發展現況與發展規劃</li> <li>既有自然保育區與環境敏感區</li> <li>場址開發後是否會排擠周邊土地與經濟既定發展</li> <li>是否具有經濟價值之礦物</li> <li>取得土地之可行性</li> <li>民意接受度</li> <li>場址與鄰近交通運輸系統關聯性</li> <li>場址周圍人口分布狀況</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>既有文獻資料</li> <li>場址調查作業</li> <li>場址地質與構造組成</li> <li>長期環境演化預測</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>既有資料數量與精度</li> <li>調查作業與解析技術之精度與可行性</li> <li>場址地質組成與構造解析之可靠度</li> <li>長期環境演化預測之可靠度</li> </ul>

除上述量化式之排除標準外，其餘考量因子多為定性評量方式，或是採用分級評量與場址間比較之方式進行評量。當確認場

址「長期安全性」之後，該區域應已具備成為場址之潛力，後續則針對「營運安全與工程技術可行性」與「其他輔助考量」進行評量。此時，優先考量營運階段之安全風險是否可藉由工程設計加以降低且同時兼具技術與經濟可行性。再依據民意接受度、自然環境影響、土地權屬、人口分布、既有文獻資料、場址特性調查、地質構造與環境長期演化解析等，可能影響後續處置場址調查工作推展、解析工作精度與安全研判可靠性之項目進行評量。

進入「場址調查階段」後，各國在此階段規劃進行之調查場址均少於 5 處。由於資源與人力可集中投入，故各國均規劃進行較詳盡之場址特性調查項目，包含深地層地質調查與試驗分析等作業，部分國家搭配設置地下試驗室進行確認場址特性之調查與試驗研究。

由於場址已經過篩選階段的篩選，各項場址特性大致均已符合「長期安全要求」，加上許多因子之間具有交互影響的作用。若針對各項單一因子訂定量化要求，場址可能無法同時滿足所有量化標準。基於處置場是以多重障壁系統整體效能來確保長期隔離廢棄物之安全目標，在此階段各國均已採用「安全分析」來確認場址與處置設施規劃之合適性。彙整已進入或完成「場址調查階段」國家之評估因子與考量因子如表 3.2-5 所列。

表 3.2-5 各國「場址調查階段」之評估因子與考量準則(1/5)

國家	評估項目	評估因子與準則內容
瑞典	與安全相關的場址特性	<p><b>評估因子：</b>            主要藉由場址調查取得資料與建立模型，評估因子對於場址安全之影響。評估因子如下：            1.母岩組成與結構：評估母岩對於岩石力學、水文地質、地下水組成與遲滯核種溶質傳輸之能力。            2.未來氣候演變：評估氣候演變對於處置安全之影響。            3.岩石力學條件：研判母岩於現在與未來載重下之力學特性。            4.地下水流場特性：瞭解水文地質與地下水流場特性。            5.地下水之地球化學特性：瞭解地下水組成。            6.溶質運移特性：分析場址阻滯核種遷移能力。            7.生物圈條件：評估對於場址生物圈之影響程度。            8.對場址的了解：基於調查資訊對於場址的掌握度。</p> <p><b>評估準則：</b>            確認安全性，並進行場址間之安全性功能優劣比較。</p>
瑞典	執行技術	<p><b>評估因子：</b>            主要藉由建造時間與成本分析進行比較，並評估為達到處置安全所需的技術能力、技術發展與執行上的不確定性。評估因子如下：            1.靈活性：靈活性主要包含設施佈置可調整性、滿足處置容量規劃、具備擴充處置容量之可能性。            2.技術風險：由於母岩的確切狀況僅能在施工過程中才能蒐集到完整資訊，故需評估不確定性與可能的技術風險。            3.技術發展需求：主要評估技術發展是否可降低技術風險。            4.功能性：評估處置設施、地下設施(供電、通風、供水等)與地上設施(交通運輸等)之功能性。            5.協同作用：評估與最終處置設施相關設施間之關聯性，如：研究設施與處置場、封裝廠與處置場、暫存場與處置場等。            6.成本：評估前置作業、設施興建與營運等階段所需成本。</p> <p><b>評估準則：</b>            1.基於場址特性限制進行設施佈置，比較不同場址之處置容量、廢棄物處置設計數量、可擴充容納之廢棄物增量。            2.基於場址地質不確定性與場址佈置之關係，評估可能遭遇之技術風險與其可能後果，並評估此技術風險是否可忽略或需採額外因應措施。            3.評估技術發展所需投入資源與不確定性。            4.評估各設施是否滿足其功能需求之外，另需評估各項技術作業(如施工與營運同步進行)，是否會產生作業衝突。</p>



表 3.2-5 各國「場址調查階段」之評估因子與考量準則(2/5)

國家	評估項目	評估因子與準則內容
瑞典	執行技術	<p>5.在選址過程中帶來的組織影響與協同作用，將影響最終處置計畫執行效率與 SKB 公司營運效率，雖無法以時間與成本進行量化，但須做定性評估。</p> <p>6.成本比較可反應執行效率與投入比例。</p>
瑞典	健康與環境	<p><b>評估因子：</b>            主要依據瑞典之安全管理法規評估各場址對於健康與環境之影響程度。評估因子如下：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.職業安全與輻射防護：評估達到職業安全與輻射防護安全要求所需採取之對策與技術。</li> <li>2.自然環境：評估是否對於自然環境造成影響，如：國家保護區、生態敏感區、其他具保護價值區域。</li> <li>3.文化環境：評估是否對於文化環境造成影響。</li> <li>4.居住環境與健康：評估施工噪音、空氣污染、施工震動、對既有人類活動干擾、社會心理影響等評估。</li> <li>5.天然資源的管理：評估場址需消耗的天然資源量，主要著重於資源消耗量較高的部分(如：土石方、電能、燃料、回填材料量等)。</li> </ol> <p><b>評估準則：</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.評估場址間為達到職業安全與輻射防護所需投入之成本。</li> <li>2.比較場址間對於自然環境之影響程度。</li> <li>3.比較場址間對於文化環境之影響程度，以及所需採取之保護對策。</li> <li>4.比較場址間對於環境與健康之影響程度。</li> <li>5.比較場址間之天然資源消耗差異性。</li> </ol>
瑞典	社會資源	<p><b>評估因子：</b>            最終處置計畫要能成功執行，必須得到地方社區的信任與接受。主要評估建置處置設施後可以提供地方之工業發展與就業機會、服務需求與供給、通訊與交通等基礎建設等項目之資訊。</p> <p><b>評估準則：</b>            由地區公民決定。</p>

表 3.2-5 各國「場址調查階段」之評估因子與考量準則(3/5)

國家	評估項目	評估因子與準則內容
芬蘭	初步調查總體評價	<p><b>評估因子：</b> 初步調查總體評價，以利用調查過程所獲得的執行經驗與資訊進行評估，其評估因子分別為：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 調查難易度</li> <li>2. 安全分析所需資料的調查</li> <li>3. 處置設施設計</li> <li>4. 資料獲取的難易度、可信度與不確定性。</li> </ol> <p><b>評估準則：</b> 主要依總評價成果將場址區分為兩類。</p>
芬蘭	詳細場址調查評估	<p><b>評估因子：</b> 目的在評估場址整體合適性且同時合乎法定要求與環境安全。其評估因子如下：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 長期安全性</li> <li>2. 建造可行性</li> <li>3. 擴建的可能性</li> <li>4. 處置場營運</li> <li>5. 社會衝擊</li> <li>6. 土地利用與環境衝擊</li> <li>7. 基礎建設</li> <li>8. 總成本</li> </ol> <p><b>評估準則：</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 評估水文地質與地球化學演變過程是否緩慢且可預測，主要考量包含如：中性 pH 值、低硫化物濃度、TDS&lt;100gl-1、水力梯度小與水力傳導係數低。</li> <li>2. 場址所使用之施工方法，需為一般常使用之工法，且不需過多額外支撐。</li> <li>3. 考量是否具有擴充處置設施的可能性。</li> <li>4. 處置場營運需符合安全要求，並增加考量運輸安全需求。</li> <li>5. 調查、興建、營運與封閉階段之社會接受度評估。</li> <li>6. 處置設施與運輸路線對於土地利用與環境之潛在風險。</li> <li>7. 評估既有基礎建設的服務程度。</li> <li>8. 評估建造與營運的總成本高低。</li> </ol>

表 3.2-5 各國「場址調查階段」之評估因子與考量準則(4/5)

國家	評估項目	評估因子與準則內容
美國	10 CRF 960	<p><b>封閉後評估因子：</b> 封閉後以處置設施的長期安全功能考量為主，其評估因子如下：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 水文地質。</li> <li>2. 地球化學。</li> <li>3. 岩石特性。</li> <li>4. 氣候演變。</li> <li>5. 侵蝕特性。</li> <li>6. 溶解特性。</li> <li>7. 大地構造。</li> <li>8. 人類干擾(自然資源與土地所有權)。</li> </ol> <p><b>封閉後評估準則：</b> 分別訂定有利條件與潛在不利條件為主要評估準則，部分因子訂有取消資格條件的評估準則。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 以水文地質條件對於延緩核種傳輸之效能為有利與否之評量，當評估核種傳輸至地表的時間低於 1000 年則取消資格。</li> <li>2. 以地球化學長期演變與對遲滯核種傳輸之效能為有利與否之評量。</li> <li>3. 以母岩對處置之長期安全功能與施工條件為有利與否之標準。</li> <li>4. 以 1 萬~10 萬年之氣候演變對廢棄物隔離造成影響之利弊做為有利與否之評量。</li> <li>5. 以 1 萬年尺度之侵蝕評估對廢棄物隔離造成影響之利弊做為有利與否之評量，當處置設施與地表距離少於 200 公尺則取消資格。</li> <li>6. 以 1 萬年尺度之溶解評估對廢棄物隔離造成影響之利弊做為有利與否之評量，當評估處置設施會因此而失去隔離作用，則取消其資格。</li> <li>7. 以 1 萬年尺度之地震、斷層與火成活動評估對廢棄物隔離造成影響之利弊做為有利與否之評量，若依第四紀地質紀錄研判可能會發生使處置設施失去隔離功能之地質活動，則取消其資格。</li> <li>8. 分別以礦物與其他天然資源、預期之人類活動與土地所有權與控制權對於處置計畫推動之影響作為有利與否之評量。</li> </ol>

表 3.2-5 各國「場址調查階段」之評估因子與考量準則(5/5)

國家	評估項目	評估因子與準則內容
美國	10 CRF 960	<p><b>封閉前評估因子：</b> 封閉前多針對營運期間的輻射防護、環境保護、社會經濟影響與場址長期安全等考量為主，其評估因子如下：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.人口密度與分布。</li> <li>2.場址的所有權及控制權。</li> <li>3.氣象特性。</li> <li>4.環境品質。</li> <li>5.社會經濟影響。</li> <li>6.交通運輸。</li> <li>7.地表特性。</li> <li>8.岩石特性。</li> <li>9.水文特性。</li> <li>10.大地構造。</li> </ol> <p><b>封閉前評估準則：</b> 訂定有利條件與潛在不利條件為主要評估準則，部分因子訂有取消資格條件的評估準則。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.以人口密度與分布做為有利與否之評量，當設施位於人口密集區、每 1 平方英哩有 1000 人以上的區域或無法建立緊急應變計畫區域則取消資格。</li> <li>2.以場址土地所有權屬做為有利與否之評量。</li> <li>3.以場址所在氣象條件(含天然災害)是否會影響營運與封閉期間之輻射傳輸做為有利與否之評量。</li> <li>4.以是否能降低對環境造成之衝擊程度做為有利與否之評量，當場址位於國家法定保護區或對環境產生之衝擊難以降低，則取消其資格。</li> <li>5.以當地可提供之勞動力與是否會影響既有經濟發展做為有利與否之評量，當會影響當地灌溉或飲用水時則取消資格。</li> <li>6.以既有交通系統能量、路權、工程投入與安全性等做為有利與否之評量。</li> <li>7.以地形平坦度與排水功能做為有利與否之評量。</li> <li>8.以母岩對處置之長期安全功能與施工條件為有利與否之標準，當評估無法降低人類降康風險時予以取消資格。</li> <li>9.以地表水與地下水特性是否會影響施工做為有利與否之評量，當工程技術過於複雜或不具可行性則取消其資格。</li> <li>10.以活動斷層與地震規模之規模與程度做為有利與否之評量，當為了因應場址地層特性需要使用複雜的工程技術，則取消其資</li> </ol>

格。

## 第四章 我國高放處置場址特性條件考量因子分析

### 4.1 現行相關安全管制法規

我國已於 94 年 8 月訂定「高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」，明確規範我國高放射性廢棄物最終處置的安全標準年劑量限值為 0.25 mSv/yr(毫西弗/年)。此安全管制規則中亦包含與場址篩選技術準則相關之規定，說明管制規則條文與場址篩選之關聯性如表 4.1-1 所列。並說明如下：

#### 一、安全概念

我國對於高放射性廢棄物最終處置場之安全概念與國際各國相同，均採用深層地質處置與多重障壁系統做為確保長期安全隔離廢棄物之策略。而安全劑量限值之要求亦較國際輻射防護委員會建議的 0.3 mSv/yr 更為嚴格。

#### 二、安全管理規則中對於場址篩選之管理規定

如同國際上對於場址的要求均以安全為最優先之考量，我國在此安全管理規則中，為了確保場址之長期安全，亦針對場址的安全要求定下相關要求。由於本計畫以研擬場址篩選技術準則為研究目標，故依前述分析場址篩選考量項目彙整說明此安全管理規則之安全要求與場址篩選之關聯性：

##### (一)「場址篩選階段」之「長期安全性」考量因子

場址篩選之長期安全性考量因子可略分為：利於場址長期安全與穩定之接受型考量因子，以及已確定不安全的排除式考量因子。管理規則之相關規定以排除式考量因子為主，包含：

- 1.不得位於活動斷層或地質條件足以影響處置設施安全之地區。

- 2.不得位於地球化學條件不利於有效抑制放射性核種污染擴散，並足以影響處置設施安全之地區。
- 3.不得位於地表或地下水文條件足以影響處置設施安全之地區。
- 4.避免位於有火山活動之虞區域。此規定應是考量我國已無公告之活火山，「有火山活動之虞」已屬學理推論評估範疇，故採避免式之安全考量。
- 5.避免位於地質構造可能明顯變化、水文條件易改變者、處置母岩具明顯劣化現象、地殼具明顯上升或侵蝕趨勢之地區。

表 4.1-1 高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則與場址技術準則關聯表(1/3)

條文編號	條文內容	與場址篩選之關聯
第 3 條	高放射性廢棄物最終處置應採深層地質處置之方式。	1.屬於整體安全概念。 2.深層地質處置與多重障壁系統概念與各國之最終處置概念相同。
第 8 條	高放處置設施應採多重障壁之設計。	
第 9 條	高放處置設施之設計，應確保其輻射影響對設施外一般人所造成之個人年有效劑量不得超過 $0.25$ 毫西弗。	1.屬安全限值：「場址調查階段」與「場址確認」之安全分析作業依據。 2.此安全要求已較國際輻射防護委員會建議的 $0.3$ mSv/yr 更為嚴格。
第 10 條	高放處置設施之設計，應確保其輻射影響對設施外關鍵群體中個人所造成之個人年風險，不得超過一百萬分之一。	1.安全限值：「場址調查階段」與「場址確認」之安全分析作業依據。 2.進一步要求處置設施規劃需降低其對個人輻射風險值。
第 4 條	高放處置設施場址，不得位於下列地區： 一、活動斷層或地質條件足以影響處置設施安全之地區。 二、地球化學條件不利於有效抑制放射性核種污染擴散，並足以影響處置設施安全之地區。 三、地表或地下水文條件足以影響處置設施安全之地區。 四、高人口密度之地區。 五、其他依法不得開發之地區。	1.一～三屬於「長期安全性」之考量因子。 2.四～五屬於「其他輔助考量」考量因子。

表 4.1-1 高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則與場址技術準則關聯表(2/3)

條文編號	條文內容	與場址篩選之關聯
第 5 條	<p>高放處置設施場址，避免位於下列地區：</p> <p>一、有山崩、地陷及火山活動之虞者。</p> <p>二、地質構造可能明顯變化者。</p> <p>三、水文條件易改變者。</p> <p>四、處置母岩具明顯劣化現象者。</p> <p>五、地殼具明顯上升或侵蝕趨勢者。</p> <p>高放處置設施場址有前項情形時，其經營者應提出確保高放處置設施符合安全要求之解決方法。</p>	<p>1.一、之山崩與地陷屬於「營運安全與工程技術可行性」之考量因子。</p> <p>2.一、之火山活動屬於「長期安全性」之考量因子。</p> <p>3.二~五均屬於「長期安全性」之考量因子。</p>
第 6 條	<p>高放處置設施經營者，應檢附場址詳細調查規劃書，報經主管機關核准後，始得進行場址詳細調查。前項場址詳細調查規劃書，應載明下列事項：</p> <p>一、場址區域描述。</p> <p>二、高放處置設施作業區之概念設計。</p> <p>三、鑽探或開挖之必要性與作業規劃。</p> <p>四、研究及測試計畫。</p> <p>五、可能影響場址隔離高放射性廢棄物能力之調查作業及其管制計畫。</p> <p>六、品質保證計畫。</p> <p>七、復原計畫。</p> <p>八、財務說明。</p> <p>九、其他經主管機關指定之事項。</p>	<p>1.綜合分析第 6 條管理規定應載明事項內涵，其已明訂在進入「場址調查階段」時，應已具備：</p> <p>(1).適於該場址之處置設施概念設計。</p> <p>(2).調查作業技術可行性。</p> <p>(3).場址特性解析技術可行性與可靠性。</p> <p>(4).調查作業之品質可靠性。</p> <p>(5).財務可行性等。</p> <p>2.除概念設計外，均屬於「其他輔助考量」考量因子。</p> <p>3.概念設計分別涵蓋「長期安全性」與「營運安全與工程技術可行性」考量因子。</p>



表 4.1-1 高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則與場址技術準則關聯表(3/3)

條文編號	條文內容	與場址篩選之關聯
第 12 條	高放處置設施之重要結構、系統及組件設計，應符合下列規定： 一、可進行檢查、維護及測試，並符合核子保防作業之要求。 二、防範可預期之天然災害。 三、具備意外事件緊急應變功能。 四、確保高放射性廢棄物之各項作業，於正常運作及預期意外事件時，均能維持次臨界狀態。 五、具有火災或氣爆之防護功能。 六、其他經主管機關指定之事項。	1.二與三屬於「營運安全與工程技術可行性」考量因子。 2.其餘各項屬於安全要求。
第 13 條	高放處置設施封閉之設計，應確保地下通道及鑽孔封填後，不得成為放射性核種遷移之關鍵途徑。	屬於確保場址「長期安全性」之工程技術可行性考量。

(二)「場址篩選階段」之「營運安全與工程技術可行性」考量因子

安全管理規則在此項考量中，主要以我國較常見之災害類型做為訂定規則之項目並保留各場址應對其可能面臨之天然災害提出對應之工程設計，包含：

- 1.避免位於有山崩與地陷地區。
- 2.高放處置設施之重要結構、系統及組件設計應可防範可預期之天然災害。
- 3.高放處置設施之重要結構、系統及組件設計應具備意外事件緊急應變功能。

(三)「場址篩選階段」之「其他輔助考量」考量因子

依國際訂定「其他輔助考量」因子之概念，仍以安全為最主要考量。故除了與母岩直接相關之地質環境、水文地質與地球化學環境外，其餘如人口分布、環境敏感區、運輸安

全考量、民意接受度、經濟可行性、土地權屬、調查可行性等實際推動面之因子等均屬之。我國現行法規主要包含：

- 1.不得位於高人口密度之地區
- 2.其他依法不得開發之地區。
- 3.設施封閉設計，應確保地下通道及鑽孔封填後，不得成為放射性核種遷移關鍵途徑之工程技術可行性要求。
- 4.要求進行場址詳細調查前，鑽探或開挖之必要性與作業規劃、研究及測試計畫、可能影響場址隔離高放射性廢棄物能力之調查作業及其管制計畫、品質保證計畫、復原計畫、財務說明等均需取得核准。

#### (四)「場址調查階段」與「場址確認」

場址調查與場址確認之安全確認主要是透過安全分析作業來決定，其餘考量因子則是用於進行場址間之特性比較之用。此部分於安全管理規則中以個人年有效劑量與個人年風險限值為主要考量。

## 4.2 技術準則研擬之探討

綜合國際間進行高放射性廢棄物最終處置場之經驗與我國相關法規規定，場址篩選架構建議採用「場址篩選」、「場址調查」與「場址確定」之三階段方式加以規劃。分述如下：

### 一、「場址篩選階段」

參考各國場址篩選階段之考量因子架構，規劃採用「長期安全性」、「營運安全與工程技術可行性」與「其他輔助考量」做為研擬架構。考量我國位於板塊擠壓之環太平洋地震帶的地理環境，除參考各國在「長期安全性」考量項目中採用定性評估準則外，建議應研擬出已確定不具備長期安全

性可能區域之排除式考量因子與其定量標準，各考量因子與技術準則說明如表 4.2-1。

表 4.2-1 「場址篩選階段」之技術準則研擬(1/2)

類型	主要考量	考量因子與技術準則
長期 安全 性	<ul style="list-style-type: none"> <li>母岩組成與地質環境具有長期穩定性並有助於遲滯核種。</li> </ul> <p>(母岩特性、地質構造、岩石力學、地質變化、水文地質、地球化學、氣候變遷與長期環境演化、潛在的無意闖入)</p>	<p><b>考量因子與技術準則</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>岩石組成有利於遲滯核種傳輸。</li> <li>地質構造系統相對較單純。</li> <li>地下水流場穩定具低水力傳導係數與低水力梯度等特性，且無明顯的地下水流出區域。</li> <li>地質構造對水力傳導特性影響，有利於限制核種傳輸途徑。</li> <li>地球化學之長期演化不會對母岩與工程障壁功能產生不利影響。</li> <li>母岩深度需達 500 公尺以上。</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>不得位於自然現象會對地層造成顯著影響區域。</li> </ul> <p>(地震、活動斷層、火山運動、泥火山活動、水文環境、長期環境演化、地球化學)</p>	<p><b>排除式考量因子與技術準則</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>活動斷層之主要斷層跡線兩側各一公里及兩端延伸三公里之帶狀地區。</li> <li>後火山活動地區。</li> <li>泥火山噴出點半徑一公里範圍內之地區。</li> <li>地表或地下水文條件足以影響處置設施安全之地區。</li> <li>有明確證據證明在過去 10 萬年間抬升達 300 公尺之區域。</li> <li>地球化學條件不利於有效抑制放射性核種污染擴散，並足以影響處置設施安全之地區。</li> </ul>
營運 安全 與工 程技 術可 行性	<ul style="list-style-type: none"> <li>避免位於具有環境或天然災害威脅且無法藉由工程設計抵禦之區域。</li> </ul> <p>(地質與岩石力學、水文地質、地震、洪水、土石流等天然災害威脅)</p>	<p><b>考量因子與技術準則</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>岩石應力與礦物組成不會加劇工程設施的劣化速度與程度。</li> <li>場址周圍地下水在於營運期間不會造成工程難以克服之問題。</li> <li>發生天然災害之可能性，包含：地震、地滑、土石流、洪水、海嘯等。</li> <li>工程技術是否足以達成避災與耐災設計。</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>建造使用之工程技術需具備可行性。</li> </ul> <p>(工程障壁特性)</p>	<p><b>考量因子與技術準則</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>工程障壁系統所需技術未超出目前之工程技術範疇。</li> </ul>

表 4.2-1 「場址篩選階段」之技術準則研擬(2/2)

類型	主要考量	考量因子與技術準則
其他輔助考量	<ul style="list-style-type: none"> <li>降低場址對於人類活動產生影響，並避免未來人類無意闖入之風險。</li> </ul> <p>(人口分布、礦物資源)</p>	<p><b>排除式考量因子與技術準則</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>不得位於高密度人口區。</li> <li>場址區域無有價值之礦物資源。</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>盡量降低對於自然與人文環境可能潛在衝擊。</li> </ul> <p>(農業與工業發展、自然保育與環境衝擊、交通運輸、經濟發展與土地規劃)</p>	<p><b>考量因子與技術準則</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>場址附近區域農業型態與規模。</li> <li>場址附近區域工業型態與規模。</li> <li>場址附近區域之環境保育區、敏感區分布。</li> <li>場址周圍之地下水資源分布。</li> <li>交通運輸避免經過人口密集區。</li> <li>設施設置不會對區域既定之經濟發展與土地使用規劃產生不良影響。</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>具有政治與民意接受度場址，較具有推動可行性。</li> </ul> <p>(政治與民意、土地所有權)</p>	<p><b>考量因子與技術準則</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>政治與民意對於處置設施之接受度。</li> <li>調查作業與場址設施設置之土地所有權屬狀況。</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>用於場址篩選之文獻資料、場址調查與分析資料需確認其可靠性與不確定性。</li> </ul> <p>(既有文獻資料、場址調查作業、場址地質與構造組成、長期環境演化預測)</p>	<p><b>考量因子與技術準則</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>既有文獻資料之精度與不確定性。</li> <li>場址調查作業與解析技術之精度與不確定性。</li> <li>場址地質與構造組成異質性程度對於解析資料判讀之不確定性影響。</li> <li>長期環境演化預測之可靠性。</li> </ul>

## 二、「場址調查階段」

各國於此階段之執行過程中即已透過初步安全分析反覆推敲與確認場址特性調查之可靠性與場址安全性，建議於此階段將初步安全分析作業規範為必要之作業。規劃依場址篩選階段考量項目架構與因子，提供場址特性調查所得之調查與解析成果，利用初步安全分析來說明場址與設施設計之安全性。並基於通過安全分析之設計，說明其工程成本與工程技术可行性、擴充性等考量項目，做為場址間比較與遴選參考依據，其考量因子建議項目如表 4.2-2 所列。

表 4.2-2 「場址調查階段」之考量因子建議表

項目	考量因子	特性參數
長期安全性	初步安全分析	法定安全限值。
場址特性	地質特性	岩石分類、構造與斷層之空間幾何分布等。
	水文地質	透水係數、水力梯度、孔隙率等。
	地球化學	有效擴散係數、吸附分配係數、地下水水質、礦物組成等。
	熱力學	熱傳導係數、熱擴散係數、比熱等。
設施設計	工程設計可行性	技術可行性、工程總成本等。
其他	設施擴充性	擴充量推估值
	社會與民意	接受度
備註：長期環境演變影響、對周圍環境影響包含於初步安全分析之中。		

## 三、「場址確定階段」

各國均以安全分析成果需滿足安全限值為主要考量，建議以安全管理規則之安全限值為要求。

## 第五章 綜合分析(場址技術準則草案)

依行政院於 87 年核定之「放射性廢料管理方針」，明訂我國過核子燃料之管理策略為「近程燃料池貯存、中程乾式貯存、長程最終處置」。雖不排除在遵守國際核子保防協定下，尋求在國外進行用過核子燃料再處理之可行性。惟依國際慣例，用過核子燃料再處理所產生之高放射性廢棄物仍歸由各國自行負責處置。因此，高放射性廢棄物最終處置設施為政府施政之必要設施。

由於國際間仍認為，採用深層地質處置為高放射性廢棄物最終處置可行之安全策略。故為確保高放射性廢棄物處置達到與人類生活環境長期隔離之安全目標，國際上之核能先進國家已投入大量人力與物力資源，持續推動長期之最終處置相關技術研究。

由於選擇合適的處置場址，對於確保最終處置設施長期安全有決定性的影響。為確保可遴選出合適之高放射性廢棄物最終處置設施場址，參考國際核能先進國家在場址篩選規劃與考量之實際推動經驗，研擬高放射性廢棄物最終處置設施場址技術準則(草案)之技術準則考量建議，其要點說明如下：

- 一、說明場址篩選應符合技術準則要求，以及主要之八項技術準則考量(草案第一條～第二條)。
- 二、說明場址長期安全性之技術考量準則內容(草案第三條)。
- 三、基於場址長期安全性考量，規範場址不得位於明顯不利之區域(草案第四條)。
- 四、說明營運安全與工程技術可行性之場址篩選技術準則考量內容(草案第五條～第六條)。
- 五、說明場址篩選之其他輔助考量技術準則內容(草案第七條～第十條)。

六、依法需取得主管機關核准後，始得進行場址詳細調查(草案第十一條)。

七、說明場址詳細調查需同時進行初步安全分析，進行場址特性調查與解析、設施設計等相關工作之安全確認，若不符合法規安全要求則不得列為場址(草案第十二條～第十三條)。

八、說明場址詳細調查之技術準則考量內容(草案第十四條～第十六條)。

高放射性廢棄物最終處置設施場址技術準則草案說明如下。

技術準則	說明
<p>第一條 調查場址篩選應評量場址之長期安全性、營運安全與工程技術可行性及其他等技術準則，確認調查場址符合要求。</p>	<p>篩選時應首重場址區域之長期安全性，同時應考量工程可性、對天然與人文環境之影響等因素，確保後續作業推動可行性，以及設施安全性。</p>
<p>第二條 本技術準則第一條所述技術準則如下：</p> <p>一、 母岩組成與地質環境具有長期穩定性並有助於遲滯核種傳輸。</p> <p>二、 不得位於自然現象會對地層造成顯著影響區域。</p> <p>三、 避免位於具有環境或天然災害威脅且無法藉由工程設計抵禦之區域。</p> <p>四、 所需工程技術需具備可行性。</p> <p>五、 降低場址對於人類活動產生影響，並避免未來人類無意闖入之風險。</p> <p>六、 盡量降低對於自然與人文環境可能之潛在衝擊。</p> <p>七、 具有政治與民意接受度之場址，較具有推動之可行性。</p> <p>八、 用於場址篩選之文獻資</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 母岩礦物組成與周圍地質構造與環境對於遲滯核種傳輸與限制傳輸路徑，具有決定性的影響。因此，國際各國於篩選場址時，均先針對場址地質環境是否有利於場址進行評量。</li> <li>2. 場址需避開自然現象對設施產生明顯不利之區域，或難以藉由工程設計達到減災效果之區域，降低設施直接遭受破壞之可能性。</li> <li>3. 場址選擇時，亦需考量降低對於人類活動與天然環境可能之影響。</li> <li>4. 設施所採用之工程技術需具備可行性。</li> <li>5. 依國際經驗，後續可能進行場址詳細調查之區域若具有民意支持度，其調查作業較易推動。</li> <li>6. 依國際經驗，場址篩選時多利用既有文獻資料為主，或搭配</li> </ol>

技術準則	說明
<p>料、場址調查與分析資料需確認其可靠性與不確定性。</p>	<p>少量地表現場調查，為確保篩選之正確性，需確認所採用資料之可靠度與不確定性。</p>
<p>第三條 本技術準則第二條第一款所述之母岩組成與地質環境具有長期穩定性並有助於遲滯核種傳輸之技術準則應評量：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>一、 岩石組成有利於遲滯核種傳輸。</li> <li>二、 地質構造系統相對較單純。</li> <li>三、 地下水流場穩定具低水力傳導係數與低水力梯度等特性，且無明顯的地下水流流出區域。</li> <li>四、 地質構造對水力傳導特性影響，有利於限制核種傳輸途徑。</li> <li>五、 地球化學之長期演化不會對母岩與工程障壁功能產生不利影響。</li> <li>六、 母岩深度約介於地表下 300 到 1,000 公尺。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 母岩礦物組成亦為影響核種吸附能力之因素之一，故母岩之分配係數越高越有利。</li> <li>2. 場址篩選時，多利用既有文獻資料搭配地表調查進行研判，地質構造異質性越低其研判之準確度越高。</li> <li>3. 地下水流場為核種傳輸主要的驅動力之一，當地下水流場越緩慢對於抑制核種傳輸越有利。</li> <li>4. 場址周邊之斷層、層面與破碎帶等地質構造，其水力傳導係數將可能遠大於岩體，而成為核種傳輸之最短路徑。當地質構造對於水力傳導係數影響較小，或有助於限制地下水流流動，對於確保場址將有正向助益。</li> <li>5. 由於母岩之吸附特性受到環境之酸鹼值、氧化還原電位與溫度等因素影響，例如在強酸的環境中，核種容易轉為溶解態而易於傳輸，工程障壁系統在特定環境中亦會加速材料劣化而影響其阻滯核種功能。因此，應避免選擇地球化學環境演化不利於抑制核種傳輸之區域。</li> <li>6. 綜合考量傳輸路徑、侵蝕抬升、無意者闖入等因素，目前國際上已設置或規劃中之高放射性廢棄物最終處置場深度多介於地表下 300 到 1,000 公尺。</li> </ol>
<p>第四條 本技術準則第二條第二款所述不得位於自然現象會對地層造成顯著影響區域，其範圍及</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 場址應避免位於活動斷層或其破碎帶，以避免斷層受地震等外力影響而錯動時，對設施產</li> </ol>



技術準則	說明
<p>認定標準如下：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>一、活動斷層之主要斷層跡線兩側各一公里及兩端延伸三公里之帶狀地區。</li> <li>二、後火山活動地區。</li> <li>三、泥火山噴出點半徑一公里範圍內之地區。</li> <li>四、地表或地下水文條件足以影響處置設施安全之地區。</li> <li>五、有明確證據證明在過去 10 萬年間抬升達 300 公尺之區域。</li> <li>六、地球化學條件不利於有效抑制放射性核種污染擴散，並足以影響處置設施安全之地區。               <ol style="list-style-type: none"> <li>1.地下水體氫離子濃度指數（pH 值）小於四之地區。</li> <li>2.地質介質對關鍵核種之分配係數小於每公克三毫升之地區。</li> </ol> </li> </ol>	<p>生直接破壞之影響。依日本土木學會依日本調查資料評估，因斷層活動而產生顯著影響之範圍，僅限於斷層起算之 1 公里範圍。因此，沿用「低放射性廢棄物最終處置設施場址禁置地區之範圍及認定標準」之定量規範。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>2. 後火山活動活躍之地區，地溫梯度變化偏高且地下水對處置場之工程結構腐蝕性極強，為明顯不適用於場址設置區域。因此，沿用「低放射性廢棄物最終處置設施場址禁置地區之範圍及認定標準」之定量規範。</li> <li>3. 泥火山出現處常有泥岩層、天然氣、斷層等地質特徵，泥漿、氣體沿著背斜構造或斷層等通路，向地表噴出。其地質結構不穩定且地表沖蝕劇烈，不利場址周邊設施之維護。因此，沿用「低放射性廢棄物最終處置設施場址禁置地區之範圍及認定標準」之定量規範。</li> <li>4. 地表與地下水水文條件變動劇烈區域，容易產生高水力梯度流場而對抑制核種傳輸產生不利影響，故應避免位於此類區域。</li> <li>5. 地形的隆起與侵蝕會使放射性廢棄物接近地表，參考日本以過去 10 萬年間的隆起量為判斷依據，當過去 10 萬年的隆起總量超過 300 公尺時，則不適用做為場址。</li> <li>6. 由於母岩之吸附特性受到環境之酸鹼值、氧化還原電位與溫度等因素影響，故應避免選擇於地球化學條件不利於遲滯核種傳輸之區域。因此，沿用「低</li> </ol>

技術準則	說明
	<p>放射性廢棄物最終處置設施場址禁置地區之範圍及認定標準」之定量規範。</p>
<p>第五條 本技術準則第二條第三款所述避免位於具有環境或天然災害威脅且無法藉由工程設計抵禦區域之技術準則應評量：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>一、 岩石應力與礦物組成不會加劇工程設施的劣化速度與程度。</li> <li>二、 場址周圍地下水在於營運期間不會造成工程難以克服之問題。</li> <li>三、 發生天然災害之可能性，其中天然災害指地震、海嘯、火山、斷層活動、山崩、地滑、土石流、地層下陷、海岸變遷、洪水或其他天然災害。</li> <li>四、 工程技術是否足以達成避災與耐災設計。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 工程設施需確保在營運期間與封閉後之安全功能，因此，需避免選擇難以藉由工程設計確保營運期間安全之區域，或封閉後易受岩石應力分布與岩石礦物組成而加速設施變形與劣化之區域。</li> <li>2. 為確保處置安全，營運期間亦需避免廢棄物與水接觸。由於採深層地質處置，設施應位於地下水位以下，故需特別考量坑道是否會產生地下水湧水或大量滲水問題，避免衍生安全問題。</li> <li>3. 應避免選擇明顯具有天然災害威脅之區位，避免設施受到天然災害侵襲而損壞。</li> <li>4. 若無法採用避災設計，則應考量利用工程設計是否能達到抵禦天然災害侵襲之功能。若難以藉由工程設計克服，則應避免選擇此區域。</li> </ol>
<p>第六條 本技術準則第二條第四款所述建造使用之工程技術需具備可行性之技術準則應評量：工程障壁系統所需技術未超出目前之工程技術範疇。</p>	<p>雖然在場址篩選與場址詳細調查階段仍會進行相關技術研究，但仍應以既有之工程技術為主要考量，避免採用研發中或未經驗證之工程技術。</p>
<p>第七條 本技術準則第二條第五款所述降低場址對於人類活動產生影響，並避免未來人類無意闖入之風險，其技術準則應評量：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>一、 不得位於高密度人口區。</li> <li>二、 場址區域無有價值之礦物資源。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 場址選擇應降低其對人類活動可能產生之風險與衝擊，因此，各國均避免選擇高密度區域。</li> <li>2. 同時，為避免因人類活動之需求而產生人類無意闖入之風險，各國均避免選擇場址區域具有經濟價值礦物分布之區域，藉以避免未來人類為獲取礦物資源而進行開挖行為，而</li> </ol>

技術準則	說明
<p>第八條 本技術準則第二條第六款所述盡量降低對於自然與人文環境可能潛在衝擊之技術準則應評量：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>一、 場址附近區域農業型態與規模。</li> <li>二、 場址附近區域工業型態與規模。</li> <li>三、 場址附近區域之環境保育區、敏感區分布。</li> <li>四、 場址周圍之地下水資源分布。</li> <li>五、 交通運輸避免經過人口密集區。</li> <li>六、 設施設置不會對區域既定之經濟發展與土地使用規劃產生不良影響。</li> </ol>	<p>導致長期安全隔離功能失效之安全風險。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 各國於篩選場址時，均避免選擇會對既有自然環境與人文環境產生影響。為此，會考量選擇於附近無明顯農耕行為、無大型都市或聚落分布、無環境保育敏感區、無地下水資源可做供水使用，廢棄物運輸至場址時不會經過人口密集區、不會對地區既有經濟發展或土地使用規劃產生負面影響等之區域。</li> <li>2. 由於興建處置場與處置設施營運仍需周邊地區之工業與服務業提供相關人力資源，因此，各國與選擇場址時亦會考量周圍地區可能提供之產業能量。</li> </ol>
<p>第九條 本技術準則第二條第七款所述具有政治與民意接受度場址，較具有推動可行性之技術準則應評量：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>一、 政治與民意對於處置設施之接受度。</li> <li>二、 調查作業與場址設施設置之土地所有權屬狀況。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 依據國際經驗，不論最終處置場址調查或興建，均需在獲得當地政府與民意支持之情況下，方能順利推展，以避免重蹈他國選出調查場址卻無法順利調查之問題。</li> <li>2. 土地權屬單純，對於後續作業推動之作業較有利。</li> </ol>
<p>第十條 本技術準則第二條第八款所述用於場址篩選之文獻資料、場址調查與分析資料需確認其可靠性與不確定性之技術準則應評量：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>一、 既有文獻資料之精度與不確定性。</li> <li>二、 場址調查作業與解析技術之精度與不確定性。</li> <li>三、 場址地質與構造組成異質性程度對於解析資料判讀之不確定性影響。</li> <li>四、 長期環境演化預測之可靠</li> </ol>	<p>場址篩選階段受限於可投入時間與資源量之可行性限制，各國多採用既有調查文獻資料搭配現場地表調查成果，做為場址篩選是否合適之研判依據。因此，這些資料的數量、精度、可靠性與不確定均會直接影響篩選成果。過去，瑞士亦曾發生研判錯誤問題，而使調查場址失去成為場址之資格。故在進行場址篩選時，需充分掌握各項資料之可靠性與不確定。</p>

技術準則	說明
性。	
<p>第十一條 應依「高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」第六條規定取得主管機關核准後，始得進行場址詳細調查。</p>	<p>依我國「高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」規定，需取得主管機關核准後，始得進行場址詳細調查。</p>
<p>第十二條 場址詳細調查應配合進行初步安全分析，說明並確認場址長期安全性、場址特性調查與分析結果、設施設計與其他等技術準則之合適性。</p>	<p>由於確保最終處置安全是基於多重障壁系統之整體功能表現，故於場址詳細調查時，各國均已開始採用初步安全分析作業來檢視場址是否安全、所調查之場址特性是否滿足安全分析作業需求，處置設施設計是否合理等，場址調查與設施設計之適宜性確認工作。同時亦利用初步安全分析來確認場址特性參數之敏感性與不確定性。部分國家將此成果回饋給其技術研發機構，開發更精確之調查與解析技術。</p>
<p>第十三條 本技術準則第十二條所述長期安全性，若其初步安全分析結果不合法規安全限值，則不得列為場址。</p>	<p>當初步安全分析結果不合法規安全限值規範，且無法藉由更改設施設計或場址設施佈置等方法達成安全要求時，則此區域不得列為處置場址。</p>
<p>第十四條 本技術準則第十二條所述場址特性調查與分析結果，至少應包含以下項目：</p> <p>一、地質特性：岩石分類、構造與斷層之空間幾何分布等。</p> <p>二、水文地質：透水係數、水力梯度、孔隙率等。</p> <p>三、地球化學：有效擴散係數、吸附分配係數、地下水水質、礦物組成等。</p> <p>四、熱力學：熱傳導係數、熱擴散係數、比熱等。</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 依各國進行安全分析之經驗，羅列影響分析成果較關鍵之場址特性與其重要評量參數。</li> <li>2. 由於此階段已開始進行初步安全分析作業，各國均以安全分析成果做為確認場址安全之判斷依據，而不特別針對各場址特性訂下定量判斷準則。</li> <li>3. 但在不同場址間進行最終場址評量時，將會依各場址特性進行優劣比較。</li> </ol>
<p>第十五條 本技術準則第十二條所述設施設計應具備工程技術與工程成本可行性。</p>	<p>場址詳細調查後，已取多更詳細之場址特性資料以及安全分析成果，工程設計亦需依據這些資料重新檢核與修正設計成果。同樣</p>

技術準則	說明
	的，所使用之工程技術與工程總成本需具有可行性，方有繼續推動設置設施之可能性。
<p>第十六條 本技術準則第十二條所述其他技術準則考量，至少應包含以下項目：</p> <p>一、 場址之擴充性。</p> <p>二、 社會與民意接受度。</p>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. 依據國際經驗，不論最終處置場址調查或興建，均需在獲得當地政府與民意支持之情況下，方能順利推展。因此，在各階段均需有社會與民意之支持。</li><li>2. 各國於進行場址篩選時，均會依據當時政府之核能政策與使用核能設施狀況，規劃最終處置場之處置總量。但考量未來核能政策與使用核能之狀況亦可能有所改變。各國亦將處置場址之擴充可能性，列為不同調查場址間優缺比較之考量因素。</li></ol>

## 第六章 結論

- 一、綜合分析國際核能先進國家之高放射性廢棄物最終處置場選址過程，依其選址階段目的可區分為「場址篩選階段」、「場址調查階段」與「場址確定階段」。
- 二、「場址篩選階段」最主要的目標在於篩選出「具有潛力成為最終處置場」且「具有後續調查作業可行性」的數個場址。此階段技術準則以選擇合適地質條件場址為各國主要考量，部分國家搭配排除不利環境條件之禁置區域技術準則考量。由於僅考量地質條件所篩選出之場址通常會高於預期目標場址數，因而再加入其他長期安全性、營運安全與工程技術可行性及其他輔助考量等技術準則，同時確認場址是否符合預期安全要求，並降低預定調查場址數量至目標值。
- 三、「場址調查階段」之主要目標在於透過現地深地層調查與分析資料，確認調查場址之合適性。部分國家則是透過設置地下試驗室直接於場址區域進行場址特性研究。此階段各國均已開始採用初步安全分析作業來確認場址整體安全性，並利用分析過程確認場址特性調查之數量與精度是否足夠。依已確認最終處置場址國家之選址經驗，調查場址之初步安全分析通常都符合安全法規要求。但在選擇唯一之最終處置場址時，則以影響長期安全之場址特性參數，做為各場址間優劣比較與場址選定決策之依據。
- 四、「場址確定階段」主要經由主管機關或其他審查機關再次審查與確認，場址調查階段對於場址特性的掌握程度是否足夠。另外，各國依其法規體制亦會進行社會接受度之評量。
- 五、基於國際選址經驗與技術準則綜合分析，研擬我國「高放射性廢棄物最終處置設施場址技術準則(草案)」建議共計十六

條。主要包含「場址篩選階段」與「場址調查階段」之有利考量與排除式考量技術準則研擬，請參見第五章內容。

六、「場址確定階段」則回歸「放射性物料管理法」與「放射性廢棄物處理貯存最終處置設施建造執照申請審核辦法」規定辦理。

## 「國際高放射性廢棄物最終處置場址技術準則之研究」研究計畫期末報告審查意見與意見回覆

編號	頁碼	審查意見	回復說明
1		封面「行政院原子能委原會」應修正為「行政院原子能委員會」，以符合單位名稱。	感謝委員指正，已將封面之錯誤修正。
2	I	2.1.3、2.3.3、2.4.3 節標題應統一；2.1.4、2.3.4、2.4.4 節內容均為場址篩選條件，標題建議統一。	感謝委員建議，已將標題之名稱統一。
3	II	圖、表說明應述明國家或設施名稱，以利閱讀。	感謝委員建議，相關圖表之說明已修正。
4	1	報告全文中「深地層處置」請取代為「深層地質處置」，以符合管理規則第 3 條之法定用詞，亦符合英文 Deep Geological Disposal 之原意。	感謝委員建議，已將「深地層處置」修正為「深層地質處置」。
5	2	報告全文中「高放射性最終處置」請取代為「高放射性廢棄物最終處置」或簡化為「高放最終處置」。	感謝委員建議，已將「高放射性最終處置」修正為「高放射性廢棄物最終處置」。
6	11	最末行，興建處置場年份是否為 2019 年，請確認。	根據 SKB 網站之說明，SKB 預計於 2019 開始建造，其資料來源如下 <a href="http://www.skb.se/Templates/Standard___28848.aspx">http://www.skb.se/Templates/Standard___28848.aspx</a>
7	15	瑞典處置包封容器裝填 BWR 的燃料束應該是 12 根，而非 10 根。	感謝委員指正，已將數量修正。
8	20、145	「高異質性或難以說明之母岩」、「地下水化學對於瑞典母岩是異常的」意思難以理解，應重新檢視。	1. 「高異質性或難以說明之母岩」原文意指母岩組成成分過多且構造複雜，因具高度非均質性而難以說明岩體的特性。文句修正為「母岩組成複雜，在未進行詳細調查前難以研判其特性」以利閱讀。 2. 「地下水化學對於瑞典母



編號	頁碼	審查意見	回復說明
			岩是異常的」原文意指場址地球化學環境與一般瑞典常見之地球化學不同，因而不易在場址篩選階段僅靠文獻資料進行研判，文句修正為「母岩之地球化學特性與瑞典常見之特性不同」以利閱讀。
9	21	第 8 行，請補充說明「大區域內有一些主要破裂帶」為特別有利條件之理由。	由於破裂帶可以視為母岩的邊界，大區域內有一些主要破裂帶將有助於侷限調查區域範圍與確認母岩範圍。此外，瑞典欲尋找被主要破裂帶包圍之場址，其認為周圍被破裂帶完整包圍之場址，當斷層再次產生錯動時，僅會影響破裂帶而不會危及母岩區域。
10	39、146	所述芬蘭之「主要遴選目標為地質構造穩定且被大型破裂帶所圍繞之岩區」，其被大型破裂帶所圍繞為其場址遴選目標，應說明大型破裂帶有利地質條件之理由。	芬蘭之篩選概念與瑞典類似，其主要理由為避免母岩區域受斷層活動影響（參見第 9 題回覆說明）。並於第 39 頁中增加說明如下，「由於大型破裂帶為斷層活動最主要之影響區域，地質構造穩定且被大型破裂帶所圍繞之岩區，可避免斷層活動直接切斷母岩內之處置設施」。
11	73	第五行，核種濃度衰減到無害程度是否僅需 1000 年，請說明	感謝委員指正，將本句內容修改為「高放射性廢棄物的放射性高且發熱量大，其放射性隨時間的衰變，約在 1,000 年後可達固化完成時的三千分之一，而在 100,000 年後則衰變至固化完成時的三萬分之一」。
12	137	表 3-1 建議略提： Siting of Geological Disposal Facilities, IAEA Safety Series No. 111-G-4.1 Siting, Design and Construction	感謝委員建議，表 3-1 已增加此兩項導則之說明。

編號	頁碼	審查意見	回復說明
		of a Deep Geological Repository for the Disposal of High Level and Alpha Bearing Wastes, IAEA TECDOC Series No. 563	
13	139	建議在表 3.1-1 之後加註，或於另外段落說明，各國國情不同而對選址時程有不同的政策考量(例如直接處置或再處理)，以免因該表而被誤會為我國高放處置計畫執行不力。選址程序各國有不同的定義(例如法定程序與非法定程序)，各國從先期研究到高放處置場啟用一般需 50 年以上的時間，例如進度最快的芬蘭前期研究始於 1980 年代(該國首座核電廠 1977 發電)，高放處置場預定 2020 年啟用，歷時約 40 年。	感謝委員建議，已於表 3.1-1 增加備註說明，以避免引起不必要之誤解。
14	149	瑞典及瑞士之考量因子與考量準則內容相似，本文將考量因子區分為「技術因子」及「工程的適用性」是否合適，請說明。	<ol style="list-style-type: none"> <li>感謝委員意見，所述問題為表 3.2-2 中所述之考量因子各國原訂名稱，於瑞典訂為「技術因子」但於瑞士訂為「工程的適用性」，由於其均為「場址篩選階段」之「營運安全與工程技術可行性」，故彙整於表中供比較。</li> <li>為避免誤解，已增加備註說明考量因子名稱沿用各國訂定之項目名稱。</li> </ol>
15	151	瑞士之考量因子「可靠的地質資訊」列為其他輔助考量因子，是否合適，請說明。另本文特別將「可靠的地質資訊」列為一項考量因子是否合適，請說明。	<ol style="list-style-type: none"> <li>瑞士之場址安全與技術可行性評估準則分為：「場址母岩特性與有效的儲放範圍」、「長期穩定性」、「可靠的地質資訊」與「工程的適用性」等四項。</li> <li>瑞士之地質技術準則與各國一樣，在其場址母岩特</li> </ol>

編號	頁碼	審查意見	回復說明
			<p>性與有效的儲放範圍」與「長期穩定性」兩個考量因子中，已針對場址之長期安全設定考量因子與準則內容。</p> <p>3. 由於瑞士過去在 siblingen 地區進行場址鑽探時，依其鑽探結果推翻原本對於該區域之地質推論，進而放棄該區域。為避免於細部調查時才發現該區域不適於做為場址，故其考量有其合適性。</p>
16	170	WIPP 並非高放處置場。瑞典 Forsmark 還在申請中，預定 2019 年之前才開始建造。	感謝委員指正，有關美國 WIPP 及瑞典 Forsmark 的相關說明已予刪除。
17	171、172	本文將第二條第七款(政治與民意接受度議題)及第八款(資料可靠度)，列入技術準則是否合適，請說明。	<p>第二條第 7 款與第 8 款均屬於「場址篩選階段」之輔助性質的評估準則。各國於此階段會考慮這些評估準則，其原因主要是避免日後開始進行場址細部調查工作之後，如瑞典遭公民反對而終止調查，或如瑞士進行場址細部調查後發現地質構造與原推論不同而放棄場址。</p> <p>就場址篩選技術準則設計而言，此類輔助性質的篩選條件，主要是用於在諸多合適區域中選擇更合適的場址區域所使用，建議予以保留。</p>
18	172	IAEA 於 2001 年報告建議深地層處置深度約 300 到 1000 公尺，第三條第 6 款，要求母岩深度需達 500 公尺以上是否合適，請說明。	感謝委員意見，第三條第 6 款依 IAEA 之建議修正為「母岩深度約介於地表下 300 到 1000 公尺」。
19	174	第五條第 1 及第 4 款之說明相似，本文特別分列兩款是否合適，請說明。	第五條主要是為了證明其場址位置與工程設計可避免受環境或天然災害之威脅，其中第 1 款主要考量設施劣化之長期安

編號	頁碼	審查意見	回復說明
			全性，評估主體以處置單元為主體，第4款主要考量營運階段場址與設施安全性，其時程較短，且評估主體涵蓋地面上之輔助設施。兩者評估之時間與對象均有所差異，建議保留原條文設計架構。
20	174	第五條第3款有關天然災害之說明可參考地質法第三條。	感謝委員建議，參考地質法第三條修正如下： 三、發生天然災害之可能性，其中天然災害指地震、海嘯、火山、斷層活動、山崩、地滑、土石流、地層下陷、海岸變遷、洪水或其他天然災害。
21	175	第十條內容已涵蓋在第十二條之場址特性參數敏感性與不確定性，本文特別增列第十條是否合適，請說明。	第十條與第十二條雖然均涉及場址特性參數敏感性與不確定性，但由於其考量之方式有所差異，故採不同條文加以說明，其主要考量如下： 1. 第十條是考量在「場址篩選階段」時，所使用之資料以文獻資料為主，故需特別考量該文獻當時取得場址特性之調查與試驗方法，避免因誤判為詳細調查場址後，投入大量資源才發現該區域不適合做為場址。 2. 第十二條主要考量於「場址詳細調查階段」應搭配初步安全評估作業來評量場址，由於安全分析作業之精度受所選用與設定之參數影響，因而需說明其場址特性參數敏感性與不確定性。
22	文字修訂意見	1. 第1頁起，頁首請修訂為期末報告。 2. 第1頁倒數第5行，請修訂為候選場址評選與核定	感謝委員指正，相關文字與圖表已依委員建議修正。

編號	頁碼	審查意見	回復說明
		<p>階段。</p> <p>3. 第 26 頁，文中無表 2.1.4.2-1 之描述文字，請修訂。</p> <p>4. 第 35 頁，第 1 行請修訂為 5000~9500 年前。</p> <p>5. 第 40 頁，第 1 及第 2 行，圖號 3.2-1 及 3.2-2 有誤，請修訂。</p> <p>6. 第 33 及第 59 頁，圖 2.1.5-2 及圖 2.2.6-2 內容請中文化。</p> <p>7. 第 62 頁，圖號有誤，請修訂。</p> <p>8. 第 103 頁，第 8 行，語請修訂為與。</p> <p>9. 第 106 頁，最末行，佛請修訂為弗。</p> <p>10. 第 2.5.2 節，SFOE 應為聯邦能源總署非能源部，內文及圖說請對應修訂。</p>	