



台灣電力公司

核能後端營運處

低放射性廢棄物最終處置技術評估報告

(精簡版)

(定稿本)

中華民國 106 年 9 月

目錄

第一章 序論.....	1
1.1 低放射性廢棄物與來源.....	1
1.2 低放射性廢棄物處置簡介	2
1.3 國際低放射性廢棄物處置設施設計概述	3
1.4 國內低放射性廢棄物處置作法	5
1.5 我國低放射性廢棄物相關管理法規	6
1.6 國內低放射性廢棄物處置推動現況	7
1.7 計畫範疇與目標.....	8
1.7.1 計畫目標	8
1.7.2 低放處置安全技術評估方法	8
1.7.3 本報告之技術評估方法	9
第二章 低放射性廢棄物處置安全	11
2.1 低放射性廢棄物處置之運轉安全管理	11
2.2 低放射性廢棄物處置之長期安全功能	12
第三章 場址特徵化	15
3.1 場址特徵化分析工作概述	15
3.1.1 達仁鄉建議候選場址既有調查文獻彙整	16
3.1.2 烏坵鄉建議候選場址既有調查文獻彙整	17
3.2 達仁鄉建議候選場址特徵化	19
3.2.1 地質環境概念模型	19
3.2.2 水文地質概念模型	22
3.2.3 地球化學概念模型	27
3.2.4 生物環境概念模型	28
3.3 烏坵鄉建議候選場址特徵化	28
3.3.1 地質環境概念模型	28
3.3.2 水文地質概念模型	31
3.3.3 地球化學概念模型	36
3.3.4 生物環境概念模型	36
3.4 場址特徵化不確定性研判與調查規劃	37
3.4.1 場址特徵化不確定性來源	37
3.4.2 達仁鄉建議候選場址特徵化不確定性研判與調查計畫調整	37

3.4.3 烏坵鄉建議候選場址特徵化不確定性研判與調查計畫調整	39
第四章 處置設施概念設計與作業規劃	41
4.1 處置設施概念設計要求	41
4.1.1 處置設施規劃需求	41
4.1.2 工程障壁系統設計需求	42
4.1.3 處置設施封閉規劃需求	44
4.1.4 輔助區規劃需求	45
4.2 達仁鄉建議候選場址概念設計	47
4.2.1 處置設施與輔助區規劃	47
4.2.2 工程障壁系統設計	48
4.2.3 處置設施封閉設計	50
4.3 烏坵鄉建議候選場址概念設計	52
4.3.1 處置設施與輔助區規劃	52
4.3.2 工程障壁系統設計	53
4.3.3 處置設施封閉設計	55
4.4 階段作業時程與興建施工規劃	57
4.4.1 處置場選址與建造階段作業時程規劃	58
4.4.2 設施興建施工規劃	62
4.4.3 施工安全對策	64
4.5 運轉階段作業規劃	65
4.5.1 運轉基本作業流程	65
4.5.2 運轉階段之排水與防滲考量	69
4.5.3 輻射屏蔽考量	70
4.6 封閉階段作業規劃	72
4.7 處置場費用初估	73
第五章 最終處置安全分析模擬技術	75
5.1 建議候選場址之安全分析模擬技術	75
5.1.1 安全分析模擬技術之基本假設	75
5.1.2 低放射性廢棄物描述	75
5.1.3 處置系統描述	76
5.2 建議候選場址設計情節之安全分析模擬技術	78
5.2.1 參考演化發展	79
5.2.2 發展設計情節	82
5.2.3 分析模式與參數設定	86

5.2.4 設計情節分析結果	91
5.2.5 敏感度及不確定性分析	94
5.3 建議候選場址替代情節之安全分析模擬技術	102
5.3.1 發展替代情節	102
5.3.2 替代情節分析結果	103
5.3.3 敏感度及不確定性分析	104
5.3.4 人類入侵情節分析	107
第六章 綜合分析與結論	110
6.1 法規符合性分析	110
6.2 處置安全性分析	110
6.3 結論	112
參考文獻	114

表目錄

表 1.1-1	低放射性廢棄物預估總量	2
表 2.2-1	低放射性廢棄物處置設施安全功能需求與評估指標	13
表 3.1-1	場址特性項目與特徵模型	15
表 3.1.1-1	達仁鄉建議候選場址特徵模型參考文獻彙整	16
表 3.1.2-1	烏坵鄉建議候選場址特徵模型參考文獻彙整	17
表 3.2.3-1	達仁鄉建議候選場址地球化學環境演化	27
表 3.3.2-1	烏坵鄉建議候選場址地球化學環境演化	36
表 4.1.1-1	低放射性廢棄物最終處置設施法規需求	41
表 4.1.2-1	工程障壁各構件之安全功能需求及評估指標	43
表 4.5.3-1	輻射防護之法規依據及劑量限值	70
表 4.5.3-2	放射性廢棄物之表面劑量率及屏蔽厚度關係(處置窖) ..	71
表 5.1.2-1	A 類與 B、C 類低放廢棄物之核種濃度初始值設定表 ..	76
表 5.2.5-1	評估參數之不確定性來源評估及目前處理方式	94
表 5.2.5-2	金屬核種釋出率之影響(達仁鄉建議候選場址)	96
表 5.2.5-3	金屬核種釋出率之影響(烏坵鄉建議候選場址)	96
表 5.2.5-4	不同分配係數設定下對於劑量評估結果之影響(達仁鄉建 議候選場址)	98
表 5.2.5-5	工程障壁擴散係數之影響(達仁鄉建議候選場址)	99
表 5.2.5-6	工程障壁擴散係數之影響(烏坵鄉建議候選場址)	99
表 5.3.1-1	2 處建議候選場址分析情節之考量條件	102
表 5.3.2-1	各分析情節下之劑量分析總表(達仁鄉建議候選場址) ..	103
表 5.3.2-2	各分析情節下之劑量分析總表(烏坵鄉建議候選場址) ..	104
表 5.3.3-1	採用既有核種活度資料庫下之劑量評估總表(達仁鄉建議 候選場址)	105
表 5.3.3-2	不同母核種初始活度下之劑量評估結果比較表(達仁鄉建 議候選場址)	105
表 5.3.3-3	採用既有核種活度資料庫下之劑量評估總表(烏坵鄉建議 候選場址)	106
表 5.3.3-4	不同核種初始活度下之劑量評估結果比較(烏坵鄉建議候 選場址)	106

圖目錄

圖 1.1-1	低放射性廢棄物來源及活度衰變示意圖	1
圖 1.3-1	放射性廢棄物最終處置深度概念	3
圖 1.3-2	日本六個所村近地表低放處置場鳥瞰圖	4
圖 1.3-3	瑞典 SFR1 及 SFR3 中低放處置場立體透視圖	5
圖 1.4-1	低放射性廢棄物最終處置多重障壁概念圖	6
圖 1.7.2-1	安全論證核心架構示意圖	9
圖 1.7.3-1	低放射性廢棄物處置技術之關聯示意圖	10
圖 3.2.1-1	達仁鄉建議候選場址地體構造剖面圖	19
圖 3.2.1-2	達仁鄉建議候選場址地質環境模型示意圖	20
圖 3.2.1-3	海水面變化推演示意圖	22
圖 3.2.2-1	達仁鄉建議候選場址區域水文地質模型邊界與水文地質 單元示意圖	23
圖 3.2.2-2	達仁鄉建議候選場址區域地下水模型與流場	24
圖 3.2.2-3	達仁鄉建議候選場址上游山區質點追蹤流線圖	25
圖 3.2.2-4	達仁鄉建議候選場址尺度水文地質分界示意圖	26
圖 3.2.2-5	達仁鄉建議候選場址地下水模型與流場模擬示意圖	27
圖 3.3.1-1	烏坵鄉建議候選場址區域地質平面圖	29
圖 3.3.1-2	烏坵鄉建議候選場址地質環境模型	30
圖 3.3.2-1	烏坵鄉建議候選場址區域水文地質概念分區示意	32
圖 3.3.2-2	烏坵鄉建議候選場址區域水文地質概念分層示意	32
圖 3.3.2-3	烏坵鄉建議候選場址區域地下水數值模型網格	33
圖 3.3.2-4	大陸地區海水與淡水交界面	34
圖 3.3.2-5	烏坵鄉建議候選場址尺度水文地質分界示意圖	35
圖 3.3.2-6	烏坵鄉建議候選場址地下水模型與流場模擬示意圖	35
圖 4.2.1-1	達仁鄉建議候選場址處置設施空間配置與重力排水規劃 示意圖	47
圖 4.2.1-2	達仁鄉建議候選場址輔助區平面布置圖	48
圖 4.2.2-1	達仁鄉建議候選場址 A 類低放射性廢棄物處置坑道工程 障壁設計	49
圖 4.2.2-2	達仁鄉建議候選場址 B、C 類低放射性廢棄物處置坑道工 程障壁設計	50
圖 4.2.3-1	達仁鄉建議候選場址封閉設計(1/2)	51

圖 4.2.3-1	達仁鄉建議候選場址封閉設計(2/2).....	51
圖 4.3.1-1	烏坵鄉建議候選場址處置設施空間配置與重力排水規劃 示意圖.....	52
圖 4.3.1-2	烏坵鄉建議候選場址輔助區平面布置圖.....	53
圖 4.3.2-1	烏坵鄉建議候選場址 A 類低放射性廢棄物處置坑道工程 障壁設計	54
圖 4.3.2-2	烏坵鄉建議候選場址 B、C 類低放射性廢棄物處置坑道工 程障壁設計	55
圖 4.3.3-1	烏坵鄉建議候選場址封閉設計(1/2).....	56
圖 4.3.3-1	烏坵鄉建議候選場址封閉設計(2/2).....	57
圖 4.4.1-1	台東縣達仁鄉建議候選場址選址及興建作業流程圖.....	59
圖 4.4.1-2	達仁鄉建議候選場址各期施工內容及範圍.....	60
圖 4.4.1-3	金門縣烏坵鄉建議候選場址選址及興建作業流程圖.....	61
圖 4.4.1-4	烏坵鄉建議候選場址各期施工內容及範圍.....	61
圖 4.5.1-1	運轉期間基本作業流程.....	66
圖 4.5.1-2	達仁建議候選場址處置坑道運轉示意.....	67
圖 4.5.1-3	烏坵建議候選場址處置坑道運轉示意.....	68
圖 4.5.2-1	擋水遮罩設施概念示意.....	69
圖 5.1.3-1	台東縣達仁鄉建議候選場址地理位置圖.....	77
圖 5.1.3-2	金門縣烏坵鄉建議候選場址地理位置圖.....	78
圖 5.2.2-1	陸域生活型態之生物圈核種傳輸示意.....	86
圖 5.2.2-2	島嶼型地表生態系統核種傳輸示意.....	86
圖 5.2.3-1	A 類處置坑道放射性核種液體傳輸外釋途徑概念圖.....	87
圖 5.2.3-2	B、C 類處置坑道放射性核種液體傳輸外釋途徑概念圖	87
圖 5.2.3-3	GoldSim 整體評估數值分析模型	87
圖 5.2.3-4	達仁鄉建議候選場址粒子追縱監測點與其出流位置說明	90
圖 5.2.3-5	烏坵鄉建議候選場址粒子追縱監測點.....	91
圖 5.2.4-1	設計情節下之個人年有效劑量評估結果(達仁溪流域)...	92
圖 5.2.4-2	設計情節下之個人年有效劑量評估結果(塔瓦溪流域)...	93
圖 5.2.4-3	設計情節下之劑量評估結果(烏坵鄉建議候選場址).....	93
圖 5.2.5-1	設計情節之金屬廢棄物核種釋出率敏感度分析(達仁鄉建 議候選場址).....	97

圖 5.2.5-2 設計情節之金屬廢棄物核種釋出率敏感度分析(烏坵鄉建議候選場址).....97

圖 5.2.5-3 設計情節之工程障壁擴散係數敏感度分析(達仁鄉建議候選場址).....100

圖 5.2.5-4 設計情節之工程障壁擴散係數敏感度分析(烏坵鄉建議候選場址).....100

圖 5.3.4-1 人類入侵情節下之個人年有效劑量評估結果(達仁河流域).....108

圖 5.3.4-2 人類入侵情節下之個人年有效劑量評估結果(塔瓦河流域).....109

第一章 序論

1.1 低放射性廢棄物與來源

國內低放射性廢棄物來源包括核能發電廠與小產源(醫學、農業、工業、教學、研究等)兩大產源類別，依其產生之作業方式，可再分為運轉廢棄物與除役廢棄物。

廢棄物依其類型會採用不同的處理方法，包括：濃縮、減容、安定化與固化等處理方式，再裝入盛裝容器中貯存。由於核種具衰變特性，因此其放射性活度會因為核種衰變而隨著時間逐漸下降，如圖 1.1-1 所示。

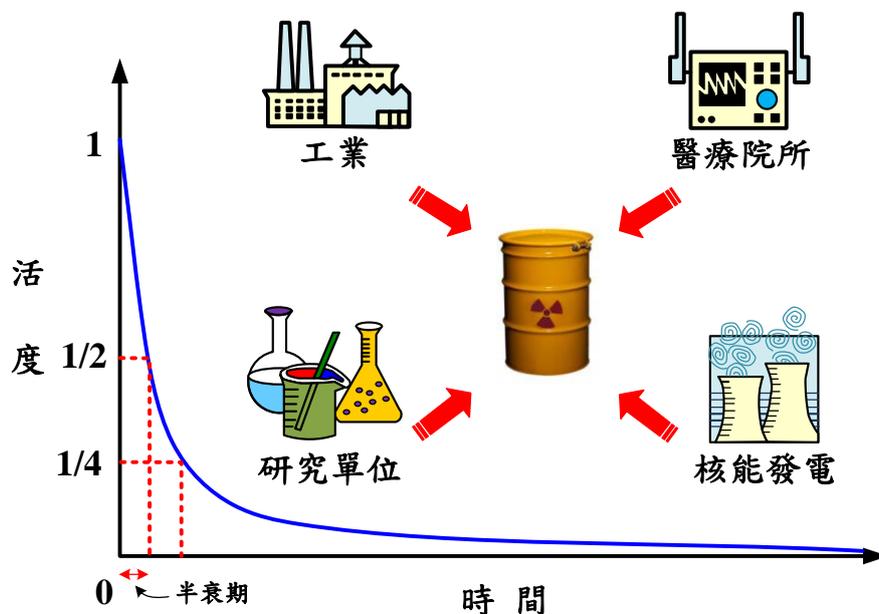


圖 1.1-1 低放射性廢棄物來源及活度衰變示意圖

以核能電廠放射性廢棄物營運管理年度運轉年報、核研所運轉廢棄物統計年報、核一廠除役計畫與美國 NUREG/CR-0130 報告 (US.NRC, 1984, p2.3、p4.1) 等為估算基礎，並以核一廠、核二廠與核三廠運轉 40 年為估算運轉廢棄物產生之時間，估算低放射性廢棄物總數量約相當於 59 萬桶 55 加侖桶，如表 1.1-1 所列。

表 1.1-1 低放射性廢棄物預估總量

核能設施	運轉廢棄物(桶)	除役廢棄物(桶)	總計(桶)
核一廠	49,300	61,800	111,100
核二廠	63,600	95,700	159,300
核三廠	10,600	144,600	155,200
減容中心	0	1,100	1,100
蘭嶼貯存場	100,277	11,000	111,277
小產源	19,500	32,400	51,900
總計	243,277	346,600	589,877

備註：表中僅蘭嶼貯存場運轉廢棄物之數量為實際統計值，其餘數量皆為預估值，並進位至百位數。

依前述數量估算分析，低放射性廢棄物中，運轉廢棄物約佔 40%，除役廢棄物約佔 60%。依「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」第三條規定進行廢棄物分類後，A 類廢棄物約佔總數量之 95%。

1.2 低放射性廢棄物處置簡介

我國與國際上使用核能之國家，對低放射性廢棄物處置均採用長期隔離低放射性廢棄物於人類生活環境外之處置策略。利用低放射性廢棄物具衰變的特性，在隔離於人類生活環境外之處置設施中，逐步降低其放射性強度。

此概念與垃圾掩埋場相似，垃圾掩埋場利用其設施提供隔離功能與足以讓垃圾分解之時間，來達成其垃圾掩埋目標。不同的是，低放射性廢棄物處置設施須提供更長的隔離時間。為了實現此功能需求，各國將視其國家自然環境特性，選擇其國內合適之自然環境並搭配處置設施設計，在外來長期隔離的時間中，儘量維持放射性核種停滯於處置設施中，以及盡量降低未來可能流經處置設施的水量。此一由自然環境與工程設施所組成的處置系統，稱為多重障壁系統，也是國際上低放射性廢棄物處置設施之設計概念。

就技術層面而言，為了確認低放射性廢棄物最終處置場之多重障壁系統功能性，必須經過嚴密的場址選擇、場址特性調查、工程設計、安全分析、環境影響評估、興建與運轉、封閉與監管等程序之安全審核與把關。

1.3 國際低放射性廢棄物處置設施設計概述

依據國際原子能總署放射性廢棄物分類安全導則(IAEA, 2009, p7)，整理各類放射性廢棄物之處置深度概念，如圖 1.3-1 所示。建議基於核種半化期長短與活度大小，依放射性廢棄物分類可採用近地表處置、深地質處置以及介於兩深度間之中等深度處置方式。

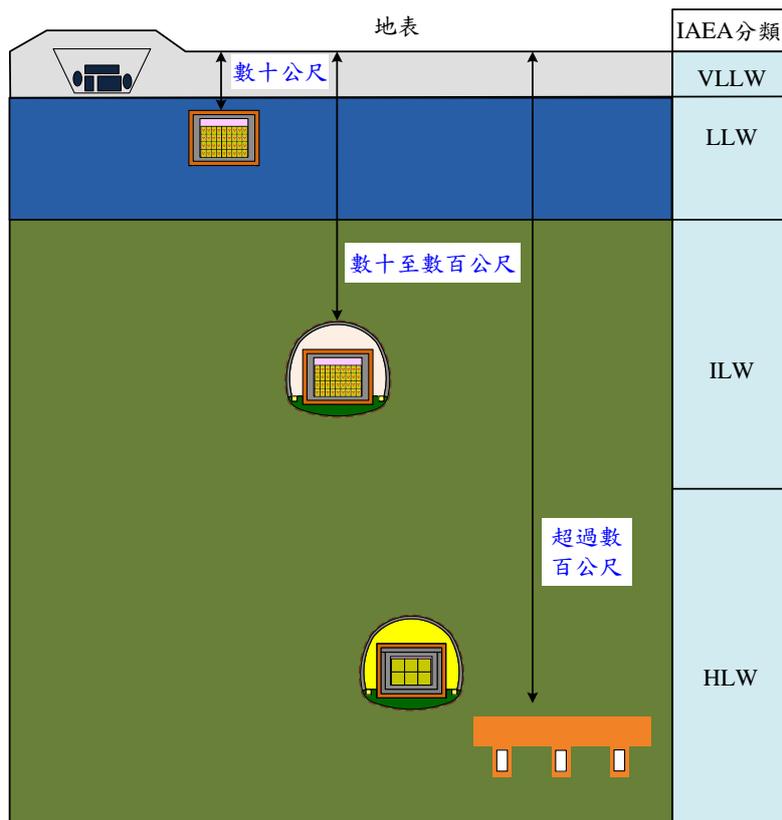


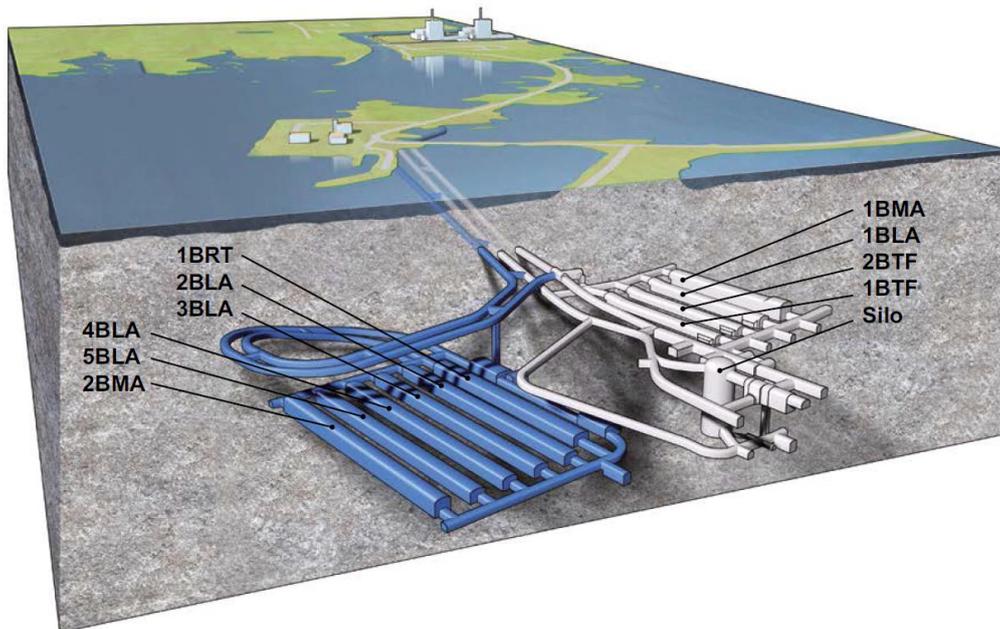
圖 1.3-1 放射性廢棄物最終處置深度概念

除了處置深度之考量外，針對低放射性廢棄物處置方式的選擇，亦須配合當地自然、社會、環境與廢棄物特性等進行通盤考量，所以各國採取的作法不盡相同。目前包括法國、美國、日本、瑞典、英國、西班牙及芬蘭等幾個國家，已興建數座低放射性廢棄物最終處置場，且持續運轉中。而目前已興建運轉之低放射性廢棄物最終處置的型式可略分為地面處置窖式與坑道處置型式，例如日本六個所村近地表低放處置場即是採用地面處置窖式，如圖 1.3-2 所示。坑道處置型式則是將廢棄物放置於相對較深的岩層中，其型式可為坑道型態或豎坑型態，例如瑞典 SFR1 及 SFR3 中低放處置場，如圖 1.3-3 所示。各國的處置設施設計雖因其所在環境條件而有所差異，但都以建構「多重障壁」系統為設計原則。



資料來源：<http://www.jnfl.co.jp/business-cycle/llw/llw-center.html>

圖 1.3-2 日本六個所村近地表低放處置場鳥瞰圖



資料來源：SKB(2014a, p11)

圖 1.3-3 瑞典 SFR1 及 SFR3 中低放處置場立體透視圖

1.4 國內低放射性廢棄物處置作法

國內低放射性廢棄物最終處置概念為坑道式，其設計原則與國際上常見之「多重障壁」概念相同。目前國內針對多重障壁之考量包括：廢棄物固化體、盛裝容器、緩衝與回填材料、工程結構物，以及地層等工程和天然障壁之多重組合。低放射性廢棄物最終處置多重障壁概念如圖 1.4-1，下面就多重障壁各構件之功能簡述如下：

- 一、廢棄物固化體：將廢棄物與固化劑混合固化，使放射性核種被緊密地侷限在固化體中不易移動。
- 二、盛裝容器：在容器的有效年限內，具有隔絕廢棄物固化體與外部滲流水接觸的功能。
- 三、工程結構物障壁：用以堆置廢棄物盛裝容器之工程結構物，具有隔絕廢棄物盛裝容器與外部滲流水接觸的功能，另運轉階段於處置區域周圍需有完善的排水系統，使滲流水在未進入填充材料障壁前就被排水系統隔絕。

四、緩衝與回填材料：緩衝與回填材料具備低滲透性及高吸附等特性，可使外部滲流水不易入侵到工程設施，即使外部滲流水與廢棄物接觸，放射性核種仍會被緩衝與回填材料緊密的吸附住，而不易遷移。

五、天然障壁：利用處置場附近的地質條件，遲滯核種遷移，使核種遷移至人類生活環境時，放射性已衰減到無害的程度。

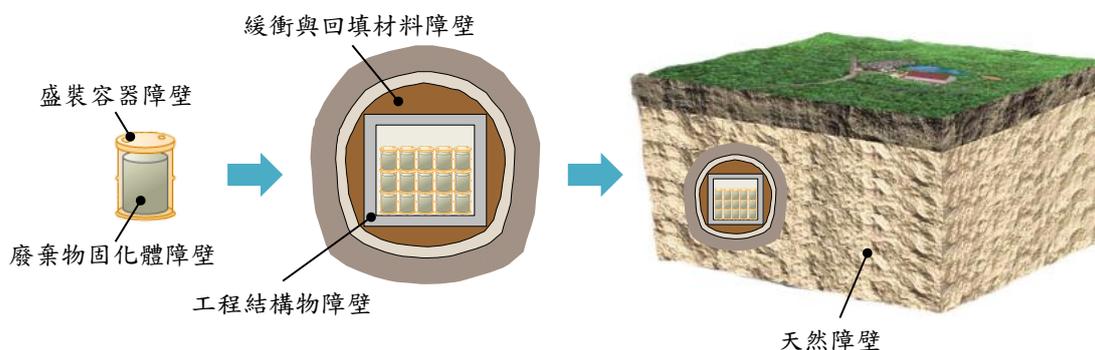


圖 1.4-1 低放射性廢棄物最終處置多重障壁概念圖

1.5 我國低放射性廢棄物相關管理法規

依據「放射性物料管理法」(簡稱物管法)第 2 條，管理放射性物料之主管機關為行政院原子能委員會，並依物管法第 21 條規定，訂定「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」。在管制作為方面，涵蓋前置作業、設施興建、運轉與封閉等各階段作業，在公開透明且安全無虞的條件下逐步展開，確保低放射性廢棄物最終處置之安全。針對低放射性廢棄物最終處置各項管理作業，可供依循之國內相關法規包括：

- 一、放射性物料管理法。
- 二、放射性物料管理法施行細則。
- 三、低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例。
- 四、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。

- 五、低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則。
- 六、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。
- 七、低放射性廢棄物最終處置盛裝容器審查規範。
- 八、低放射性廢棄物盛裝容器使用申請書導則。
- 九、低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則。
- 十、放射性廢料管理方針。
- 十一、游離輻射防護法。
- 十二、游離輻射防護安全標準。

依我國「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」，對於低放處置設施最終處置之廢棄物、不得設置場址地區、設施設計原則、輻射防護，以及處置設施安全系統與組件設計規定等項目，均有其要求。其中第 9 條規定，低放射性廢棄物最終處置設施應採多重障壁設計，並依廢棄物分類特性分區處置。而第 8 條則規定，低放處置設施之設計，應確保其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，並應符合合理抑低原則。此外，依據「游離輻射防護法」第 15 條，需確保輻射工作人員所受的職業曝露不超過劑量限值並合理抑低，而依據「游離輻射防護安全標準」第 7 條，輻射工作人員的職業曝露劑量限值為每連續五年週期之有效劑量不得超過一百毫西弗，任何單一年之有效劑量不得超過五十毫西弗。

1.6 國內低放射性廢棄物處置推動現況

低放處置作業可概分為選址公投階段、選址調查與申照階段、興建、運轉、封閉、監管以及免於監管等階段。我國自 101 年 7 月依「低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例」公告台東縣達仁鄉與金門縣烏坵鄉 2 處建議候選場址後，受到政治、社會、環境及地方民意等因素影響，導致選址作業仍未能順利進行。也因此，

目前 2 處建議候選場址均尚未正式進場調查，後續之設施設計、安全分析與環境影響評估工作亦尚未正式展開。

1.7 計畫範疇與目標

1.7.1 計畫目標

「低放射性廢棄物最終處置技術評估報告」（以下簡稱本報告）利用既有場址調查文獻資料，配合推論與假設之方法，研判 2 處建議候選場址可能之場址特性，研擬因應環境特性之處置概念，並進行最終處置安全分析模擬技術。藉此方式，說明低放射性廢棄物最終處置場規劃與設計所應用之技術與執行流程，以及概念設計與場址環境所組成之多重障壁系統，可達成其功能目標。

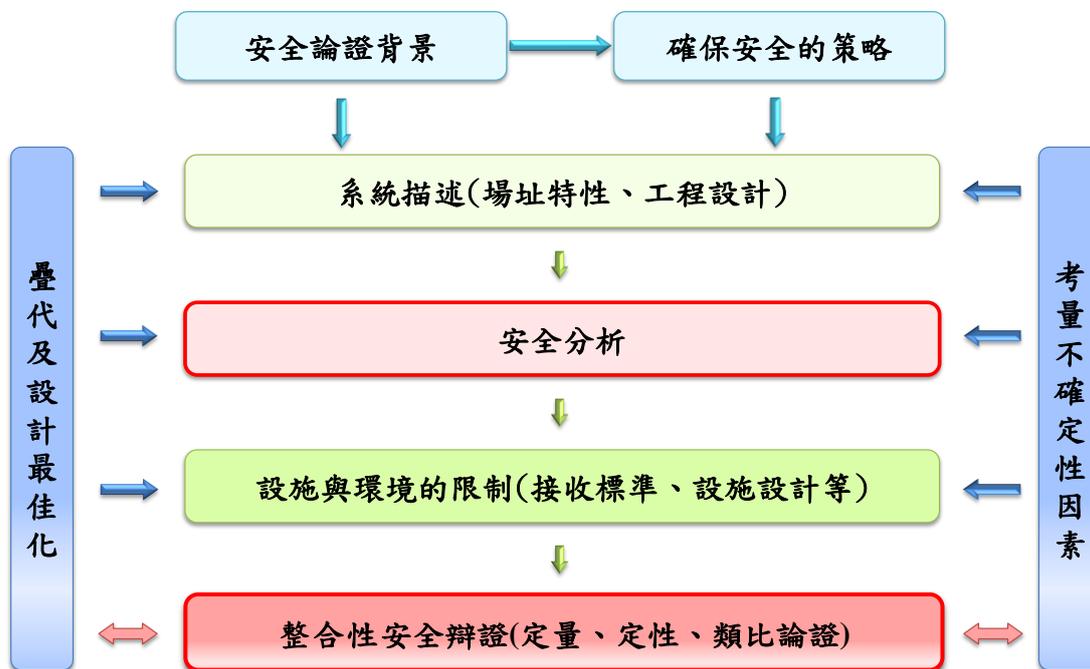
由於本報告係依現有法規、技術及資料，對我國的低放射性廢棄物最終處置技術進行評估，未來如法規修訂，國際上處置概念或技術改變，區域或場址之環境資料新增、修正等，足以影響評估結果時，應適時重新進行評估。

此外，本報告雖以 2 處建議候選場址作為分析對象，然礙於場址特性調查工作尚未推動，故本報告產出之成果僅能作為初步檢視多重障壁系統設計安全性與所需分析技術是否符合實務需求之用。在未經法定程序確定前，此 2 處建議候選場址將不會直接成為最終處置場址。

1.7.2 低放處置安全技術評估方法

國際上，為確認處置安全與建立對分析結果之信心，IAEA(2012)發布 SSG-23 安全導則，說明了安全論證的執行架構，如圖 1.7.2-1 所示。安全論證主要是利用 1. 定量的安全評估；

- 2.其他定量與定性的證據支持；3.設施健全性與可靠性度評斷；
4.安全評估相關之設施設計邏輯與成果的評斷等，進行綜合論證。



備註：修改自 IAEA(2012, p16)

圖 1.7.2-1 安全論證核心架構示意圖

1.7.3 本報告之技術評估方法

針對處置設施之安全確認及信心建立，將依 IAEA(2012)發布之 SSG-23 安全導則所建議之安全論證執行架構與精神，研擬本報告對於處置安全技術評估之架構，如圖 1.7.3-1 所示。

首先利用既有文獻資料為依據，建置地質環境、水文地質、地球化學與生物環境等 4 類場址特徵化模型。據此，加入規劃處置之低放廢棄物數量與特性，進行多重障壁系統之工程障壁系統概念設計，再進行安全評估以瞭解處置設施安全性。

其中安全評估則是依 IAEA(2004a, p17)所建議之評估流程，分為評估內容、描述處置系統、建立及界定情節、建置概念及數學模型、分析結果與建立信心等過程。最後，除據以檢視是否符合國內安全管制法規規定，另由敏感度與不確定性分析工作，綜

合論證設施安全性，藉以確認我國已具備執行低放射性廢棄物最終處置所需技術。

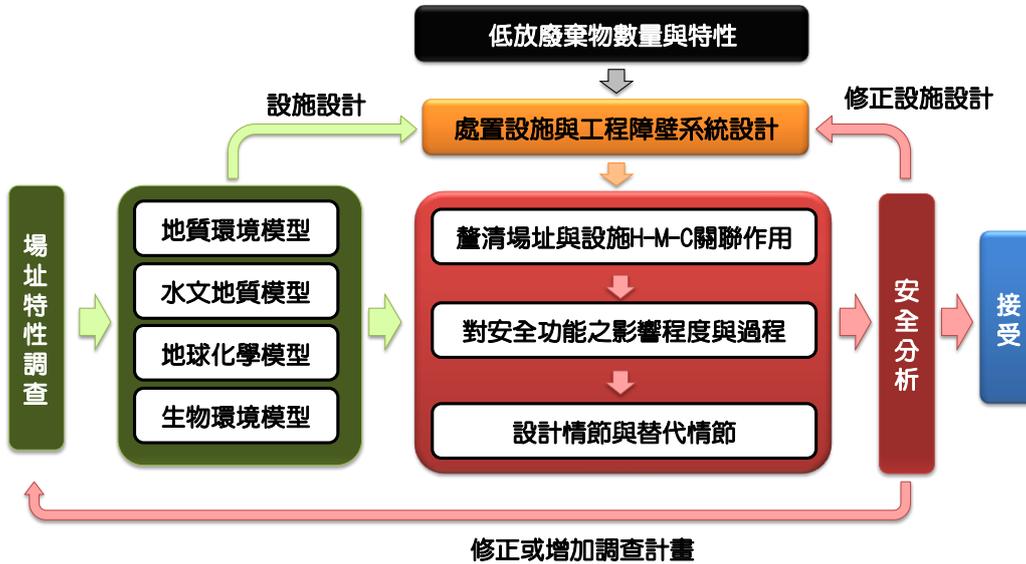


圖 1.7.3-1 低放射性廢棄物處置技術之關聯示意圖

第二章 低放射性廢棄物處置安全

2.1 低放射性廢棄物處置之運轉安全管理

低放射性廢棄物處置設施於設計時，將針對各階段之安全考量納入規劃設計，藉以確保處置系統、工作人員、公眾與環境之安全，並藉由環境監測確認成效。因此，本節針對未來處置設施運轉時，其重要運轉安全管理方式進行簡介。

規劃運轉安全管理策略時，將會針對處置場環境、處置設施設備，以及處置場自運轉至封閉前之各項作業運轉方式等，進行潛在意外事件與危害分析。針對各項作業研擬運轉安全管理方式，以確保設施符合相關規範要求，同時保護工作人員、公共大眾與環境安全。參考美國處置場運轉安全管理相關文獻(DOE, 2016a, p14~p15; DOE, 2016b, p5-14, p5-17~p5-19, p5-21~p5-23)，其管理項目包含運轉期間之輻射防護、危險物品防護、放射性與危險廢棄物管理、檢查與維護、運轉與消防安全、作業程序與訓練、品質保證、緊急應變、組織與管控、廢棄物接收管理等 10 項主要管理考量。其考量項目可略分為：確保運轉安全之相關作業與檢查程序、安全管理組織與權責、人員資格與作業品質管控，以及緊急應變等。

依運轉安全管理對象區分，其管理法規概分為一般作業之「職業安全衛生法」，以及與放射性廢棄物處置相關之管理法規(詳見 1.5 節)。如：遵循「游離輻射防護法」之輻射防護作業管理、其主要基於輻射曝露合理抑低原則，除設施輻射屏蔽設計外，運轉作業藉由人員訓練、使用輻射防護設備、輻射監測、輻射曝露控制等管理作為確保其安全性。依「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」之規範，則包含：放射性廢棄物管理、檢查與維護、運轉安全、作業程序與訓練、品質保證、緊急應變、組織與管控、廢棄物接收管理等作業規範。而危險物品防護與危險廢棄物管理則屬於「職業安全衛生法」管理範疇。

依「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」之低放射性廢棄物處置作業安全要求規定，低放處置設施作業，應符合該設施安全分析報告及輻射安全防護之相關規定。於提出設施安全分析報告時，其內容將包含：輻射安全設計之安全限值、職業曝露合理抑低；廢棄物接收、暫存、處置作業與其監測及查驗；設施之組織規劃、行政管理及人員訓練計畫；品質保證計畫；消防防護計畫；設施之保安等與運轉安全管理相關項目。通過審查後，各項運轉安全管理將納入低放處置場作業程序書，納入品質保證系統進行管理。

2.2 低放射性廢棄物處置之長期安全功能

由於低放射性廢棄物具有放射性活度隨時間增加而遞減之特性。在經過一定時間以後，低放射性廢棄物終將衰變至對人類無害之程度。因此，在合理的情況下，盡量延長低放射性廢棄物外釋到人類生活圈所需時間，為低放射性廢棄物處置安全之核心對策。而實現處置安全對策則有賴發揮以下兩項主要安全功能：

一、圍阻(containment)核種外釋

圍阻功能係指防止處置廢棄物與處置設施遭受外力直接破壞、維持設施力學穩定、運轉階段防止水接觸廢棄物等功能。

二、遲滯(retardation)核種傳輸

遲滯功能是當水突破圍阻功能後，藉由工程障壁及天然障壁來降低通過廢棄物的流量，以及遲滯核種傳輸到生物圈的時間，並藉由其吸附性來減少核種傳輸至生物圈的活度。

依照安全功能作用之時間順序，圍阻功能主要藉由 1.選擇不易導致處置設施被外力所破壞之場址環境，2.以工程設施設計來避免低放射性廢棄物於運轉階段與水接觸，3.考量減緩工程材料劣化設計與工法，以延後低放射性廢棄物體於封閉後與水接觸的發生時

間。於封閉後，當低放射性廢棄物體與水接觸後，核種將逐漸自廢棄物體溶解至水中，隨著地下水流動方向緩慢往處置設施外滲出，再流至地下水可能的出滲位置，如：河川、海洋，或經由抽水而到達地表面。因此，遲滯功能主要藉由工程障壁設計減緩核種傳輸速度，包含：1.低透水性與低擴散性設計、2.選擇具核種吸附性之材料、3.降低地下水滲入設計等，再搭配於場址選擇階段已納入考量有利於抑制核種傳輸之場址特性，形成低放射性廢棄物處置設施之多重障壁系統。

我國低放射性廢棄物處置以多重障壁系統為概念，其障壁單元包含：廢棄物固化體、盛裝容器、工程結構物、緩衝與回填材料，以及天然障壁等。以下彙整各障壁單元與人類活動等評估項目，以及考量前述安全功能下，所需功能與評估指標，如表 2.2-1 所列。

表 2.2-1 低放射性廢棄物處置設施安全功能需求與評估指標

項目	安全功能需求	評估指標
廢棄物體	限制平流傳輸	固化體的水力傳導係數
	限制擴散傳輸	固化體的擴散係數
	固化體與盛裝容器圍阻功能	封閉後喪失圍阻功能
	核種溶解度	無限制
	活化金屬核種溶出率	核種釋出率
	其他廢棄物核種溶出率	瞬間溶出
	吸附性	分配係數
盛裝容器	限制平流傳輸	假設無效果
	限制擴散傳輸	假設無效果
	力學穩定	假設封閉後即失效
	吸附性	假設無效果
工程結構物	限制平流傳輸	水力傳導係數
	限制擴散傳輸	擴散係數
	力學穩定	材料強度
	吸附性	分配係數
緩衝與回填材料	限制平流傳輸	水力傳導係數
	限制擴散傳輸	擴散係數

項目	安全功能需求	評估指標
	力學穩定	材料強度
	吸附性	分配係數
天然障壁	限制平流傳輸	水力傳導係數
		環境水力梯度
	限制擴散傳輸	擴散係數
	吸附性	分配係數
人類活動	生活形態	海岸線推移
	避免封閉後無意闖入	設計岩覆深度

第三章 場址特徵化

3.1 場址特徵化分析工作概述

我國 2 處經場址篩選出之低放射性廢棄物建議候選場址，已避開可能影響處置安全之自然環境區域，以及因社會環境與法規限制而無法設置處置場之區域。不利於設置處置場之自然環境條件，包括主要火山活動區、活動斷層影響範圍、地質敏感區、崩坍面積過大之區域、洪氾區與不利核種遲滯之環境等；而社會環境則考量避免鄰近重要民生經濟、國防軍事設施，並依相關土地使用管理法規限制條件檢視場址合宜性。

為瞭解場址特性，將影響處置安全主要環境因素區分為地質環境、水文地質、地球化學與生物環境等 4 種場址特徵模型，場址特徵模型與特性關聯如表 3.1-1 所列。建立場址特徵模型之目的，在於特徵化場址特性以提升對於場址的認知，以作為設施設計與安全分析等相關工作之基礎。此外，隨著場址調查、工程興建等不同階段之場址調查與監測資料更新與累積，場址特徵模型亦需隨之更新與確認場址特徵。受限於未進行建議候選場址之場址特性調查工作，現階段以蒐集既有文獻調查資料作為基礎，用以建立 4 種場址特徵模型，未來待進場調查後再予以更新。

表 3.1-1 場址特性項目與特徵模型

場址特徵模型	場址特性主要關聯項目
地質環境	地質與地震、地形與地貌、氣象、地表水、大地工程
水文地質	氣象、地質、地形與地貌、地表水、地下水
地球化學	地球化學、地質、地貌、地表水、地下水
生物環境	天然資源、生態、輻射背景偵測、社會與經濟、交通、其他

備註：場址特性主要關聯項目依據「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則」及「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版)」中「場址之特性描述」

3.1.1 達仁鄉建議候選場址既有調查文獻彙整

各項場址參數主要參考自 LLWD2-SI-2014-01-V06-場址特性參數評估報告-台東縣達仁鄉(台灣電力公司，2016c，p29~p166)所述。該報告所蒐集之既有調查文獻來源，涵蓋學術界研究論文、產業界研究報告以及政府機關相關研究計畫，依 4 種場址特徵模型分別列出參考之主要文獻，如表 3.1.1-1 所列。

表 3.1.1-1 達仁鄉建議候選場址特徵模型參考文獻彙整

場址特徵模型	關鍵特性項目	主要文獻
地質環境	場址地質特性	Chang et al.(2009, p395)
		Lin et al.(2009, p28)
		Lu et al.(2001, p213)
		Malavieille and Trullenque (2009, p391)
		McIntosh et al.(2005, p24)
		Suppe(1984, p21)
		台灣電力公司 (2006，p3-1~p3-11)
		台灣電力公司 (2007，p3-1~p3-6)
		台灣電力公司 (2009，p3-19~p3-22)
		林偉雄等(1993，p7~p10、地質圖幅)
	宋國城(1991，p20~p21、p50~p51、地質圖幅)	
	陸地隆升沉降	Ching et al.(2011, p7, p10)
		經濟部中央地質調查所(2012，p115)
	陸地剝蝕	Dadson et al.(2003, p649)
海水面變化	行政院原子能委員會放射性物料管理局 (2013，p265~p266)(該報告引用 Shinn, 2001)	
	IPCC(2013, p1204) 行政院原子能委員會放射性物料管理局(2013，p268)(該報告引用楊任徵，2002)	
海嘯	國家災害防救科技中心-災害潛勢地圖網站	
水文地質	地下水流場	Auckland Transport (2014, p11)
		Blümling and Konietzky (2002, p91)
		Golder Associates Ltd. (2014, p7.2-B-2 ~ p7.2-B-3)
		Heath (1983, p9)

場址特徵模型	關鍵特性項目	主要文獻
		Johnson (1967, p22)
		Martin and Lanyon (2002, p6-23)
		NWMO (2011, p35)
		Rieke and Chilingarian (1974, p7)
		Schwartz and Zhang (2003, p76)
		台灣電力公司 (2017, p32~p35)
		交通部公路總局 (2011, AD-59 地質鑽探土壤試驗一覽表: p16)
		台灣電力公司 (2006, p3-1~p3-11)
		台灣電力公司 (2007, p3-1~p3-6)
		宋國城 (1991, p23)
		宋國城與林偉雄 (1993, p9)
		經濟部水利署(2015b, p463)
地球化學	地化環境條件	行政院原子能委員會(2010, p8~p10)
		台灣電力公司(2008, p B-11~p B-16)
	分配係數	JAEA(2013, p54~p56)
生物環境	生活型態	台東縣政府主計處網站
	關鍵群體分布	台東縣太麻里戶政事務所網站

3.1.2 烏坵鄉建議候選場址既有調查文獻彙整

各項場址參數主要參考自 LLWD2-SI-2014-02-V06-場址特性參數評估報告-金門縣烏坵鄉(台灣電力公司, 2016d, p14~p181) 所述。該報告所蒐集之既有調查文獻來源, 涵蓋學術界研究論文、產業界研究報告以及政府機關相關研究計畫, 依 4 種場址特徵模型分別列出參考之主要文獻, 如表 3.1.2-1 所列。

表 3.1.2-1 烏坵鄉建議候選場址特徵模型參考文獻彙整

場址特徵模型	關鍵特性項目	主要文獻
地質環境	場址地質特性	工研院能資所(1999a, p22~p30、p44、p48~p49)
		工研院能資所(1999b, 圖版四~七)
		工研院能資所(2000b, 圖版二~四)
		工研院能資所(2000d, p7-1)

場址特徵模型	關鍵特性項目	主要文獻
		工研院能資所(2001a, 附錄 A-1~附錄 A-7)
		福建省地質礦產局(1985, p465、p481、p487、附圖之一)
		工研院能資所, 2000c, p2-2 (該報告引用劉以宣等人, 1989)
	陸地隆升沉降	工研院能資所(1999a, p13)(該報告引用李寄嶼, 1998)
		工研院能資所(2000a, p3-3)(該報告引用黃玉昆等人, 1992)
		鄧國雄及黃發明(2001, p3)
	陸地剝蝕	福建省國土資源廳(2013, p1)
	海水面變化	IPCC(2013, p1204)
		行政院原子能委員會放射性物料管理局 (2013, p265~p266)(該報告引用 Shinn, 2001)
		行政院原子能委員會放射性物料管理局(2013, p265~p266、p268)
行政院原子能委員會放射性物料管理局(2013, p268)(該報告引用楊任徵, 2002)		
海嘯	台灣電力公司(2011, p17、p197)	
水文地質	地下水流場	Ahlbom et al.(1983, p2)
		Domenico and Schwartz (1997, p14)
		Paces et al.(2010, p411~p414)
		Park et. al (2009, p479~p481)
		Popov and Pusch (2006, p77)
		Schwartz and Zhang (2003, p44, p76)
		USGS(2001, p14)
		工研院能資所(2000a, p3-6~p3-23、p5-17~p5-25)
		工研院能資所(2001b, p3-24)
		林軍(2006, p446、p449)
		崔建軍等人(2013, p87)
福建省地質礦產局 (1985, p140)		
地球化學	地化環境條件	工研院能資所(2000a, p7-11、p7-24)
		台灣電力公司(2002, p3-48)
	分配係數	JAEA(2013, p54~p56)
		SKB(2008, p240)
生物環境	生活型態	台灣電力公司(2002, p3-56、p3-58、p3-71)
	關鍵群體分布	金門縣政府民政處網站

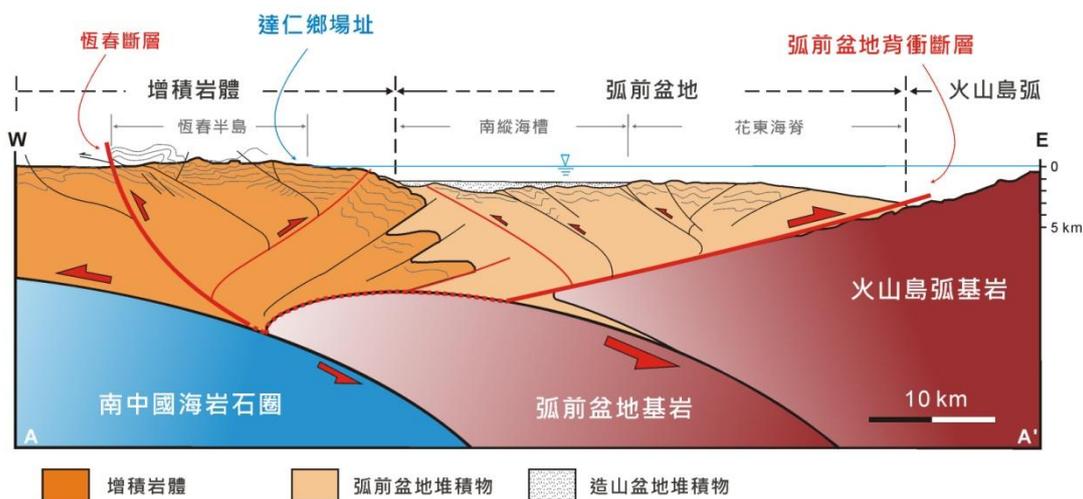
3.2 達仁鄉建議候選場址特徵化

3.2.1 地質環境概念模型

地質環境的現況與演化，為評估處置場封閉後長期安全的重要參數，安全分析的遠場核種傳輸與情節設定，將以此作為評估依據。

一、地質環境特性與模型範圍

達仁鄉建議候選場址位於台灣島東南側，地質環境屬於歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊的聚合帶，由於菲律賓海板塊持續向西北方推擠，造成北北西走向的呂宋島弧與東北向的歐亞大陸邊緣產生斜碰撞。斜向的碰撞使弧陸碰撞的位置由北而南發育(Suppe, 1984, p21)，位於中央山脈南段的達仁鄉建議候選場址，則屬於初期弧陸碰撞之構造環境(McIntosh et al., 2005, p24; Chang et al., 2009, p395; Lin et al., 2009, p28)。在南中國海岩石圈隱沒至菲律賓海板塊的作用下，形成了增積岩體及向西伸向的褶皺逆衝帶(Malavieille and Trullenque, 2009, p391)，如圖 3.2.1-1 所示。



資料來源：修改自 Malavieille and Trullenque (2009, p391)

圖 3.2.1-1 達仁鄉建議候選場址地體構造剖面圖

場址地質環境模型以達仁溪與塔瓦溪集水區水域分水嶺以及海岸線作為邊界。依野外地質調查結果顯示，場址區域範圍內皆屬於潮州層，潮州層岩性以硬頁岩為主，間夾透鏡狀砂岩體砂岩，部分區域為板岩偶夾變質砂岩(宋國城，1991，p20~p21；林偉雄等，1993，p7~p10)。區域地層因受多期的構造活動，地層走向多變，常見小規模之褶皺與斷層構造。此外，藉由不連續面的變化及地表地形特徵，配合折射震測與地電阻等前人之地球物理調查結果(台灣電力公司，2006，p3-1~p3-11；台灣電力公司，2007，p3-1~p3-6)，推測區域內可能有高角度裂隙帶，如圖 3.2.1-2 所示。



圖 3.2.1-2 達仁鄉建議候選場址地質環境模型示意圖

二、地形演繹

(一)陸地隆升沉降趨勢

陸地隆升沉降趨勢依時間尺度可分為短期(short-term)與長期(long-term)兩種，短期陸地隆升沉降趨勢是參考場址附近的水準測量資料而得，地殼垂直變動速率約在-3.87~0.96 mm/yr。長期陸地隆升沉降趨勢則依據 Ching et al. (2011, p7, p10)中央山脈與雪山山脈地殼垂直變動速率進行推估，場址的長期地殼垂直變動速率約在 0~5.2 mm/yr。

(二)陸地剝蝕速率

綜整 Dadson(2003, p649)磷灰石核飛跡定年結果，估算場址附近的陸地剝蝕速率約為 2.0~3.0 mm/yr。

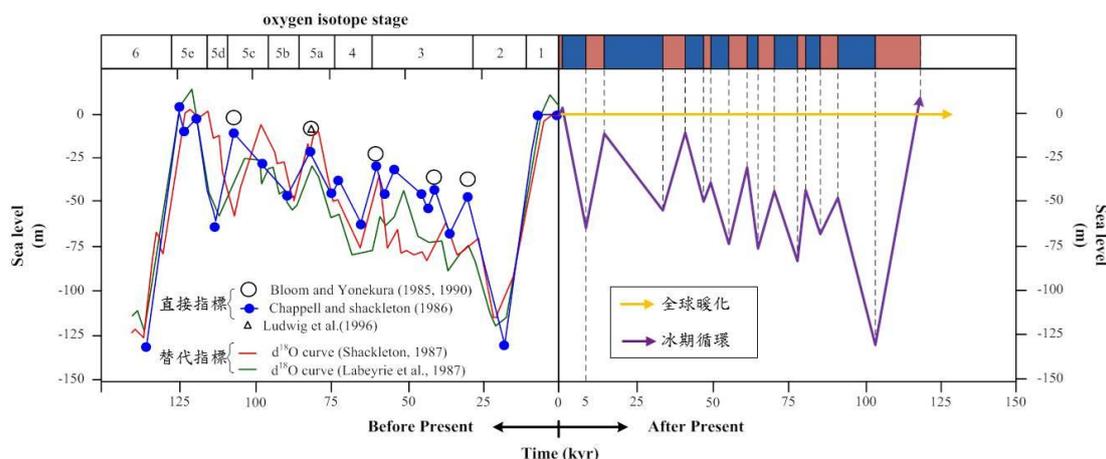
綜整前述陸地隆升沉降趨勢與陸地剝蝕速率之評估結果，達仁鄉建議候選場址一萬年內的抬升速率採 2.6 mm/yr (0~5.2 mm/yr 之平均)，侵蝕速率採 2.5 mm/yr (2.0~3.0 mm/yr 之平均)。因此一萬年內的平均地表高程變化速率為 0.1 mm/yr，研判處置設施位置所在區域的地表長期屬於抬升趨勢。

三、海水面變化

海水面變化受到全球暖化現象與冰期循環影響，以行政院原子能委員會放射性物料管理局(2013, p265~p266；該報告引用 Shinn, 2001)對過去 15 萬年來的海水面變化趨勢評估結果做為預測基準，如圖 3.2.1-3 所示，並考量長期氣候變遷的可能發生情境，假設未來長期海水面變化趨勢主要包含以下兩種可能性：

(一)海水面變化依循冰期循環的變化：

假設現在處於間冰期末期，並於間冰期結束後隨即進入冰期，進入冰期後的海水面變化趨勢，將與 12.5 萬年前開始之冰期相同。在此情況下，海水面將會在 5,000 年後下降至最低海水面 EL-61 m。



資料來源：改繪自行政院原子能委員會放射性物料管理局(2013, p265)(該報告引用 Shinn, 2001)

圖 3.2.1-3 海水面變化推演示意圖

(二)海水面變化受全球暖化影響：

假設全球暖化將影響冰期的發生時間，導致 10 萬年內都不會進入冰期，且在未進入冰期前，海水面不會發生變化。故在 10 萬年內都不會進入冰期的情況下，海水面將設定為不變。

3.2.2 水文地質概念模型

根據地質與水文特性，分別針對區域尺度及場址周邊建立水文地質模型，並分析其地下水流場。

一、區域尺度水文地質模型

區域尺度水文地質模型的範圍，跨越恆春半島東西兩岸，以海岸為東西側邊界，南北側邊界設於集水區分界，垂直向則是以 EL-2,000 m 為界，在此範圍內之地質特性可概分為 3 個單元，如圖 3.2.2-1 所示。降雨量及海水潮位為水文地質模型之基本設定，場址的降雨量採用距場址最近的壽卡雨量站(經濟部水利署，2015a, p230)，年平均降雨量為 3,396.2 mm(西元 1980 至西元 2014 年)。潮位資料則參考大武站(東海岸)與東港站(西海岸)(中央氣象局)，平均潮位分別為 0.193 m 與 0.288 m(西元 2003 至西元 2014

年)。各水文地質單元之相關參數，主要是參考既有調查資料與相關研究文獻進行設定(台灣電力公司，2017，p32~p35)。

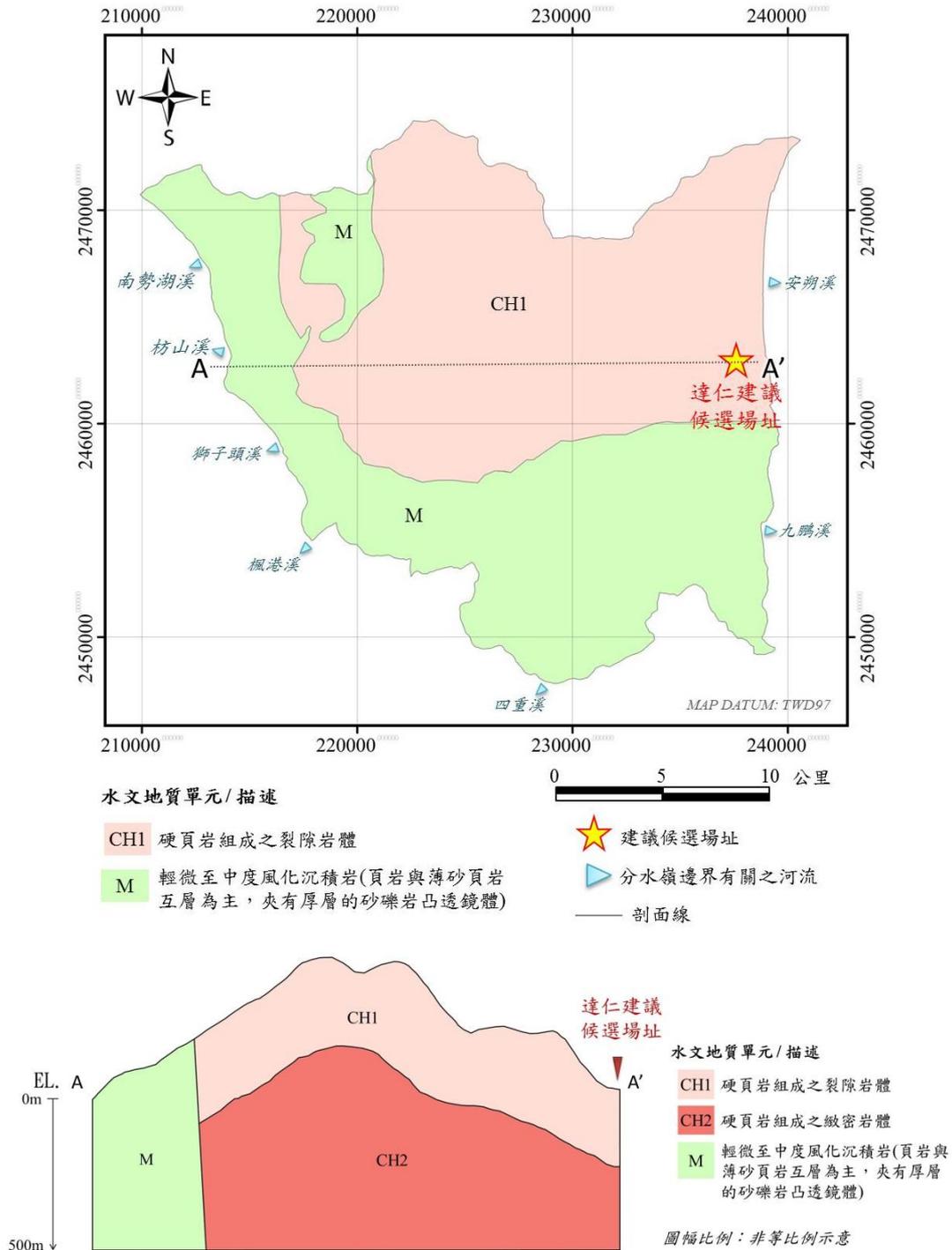
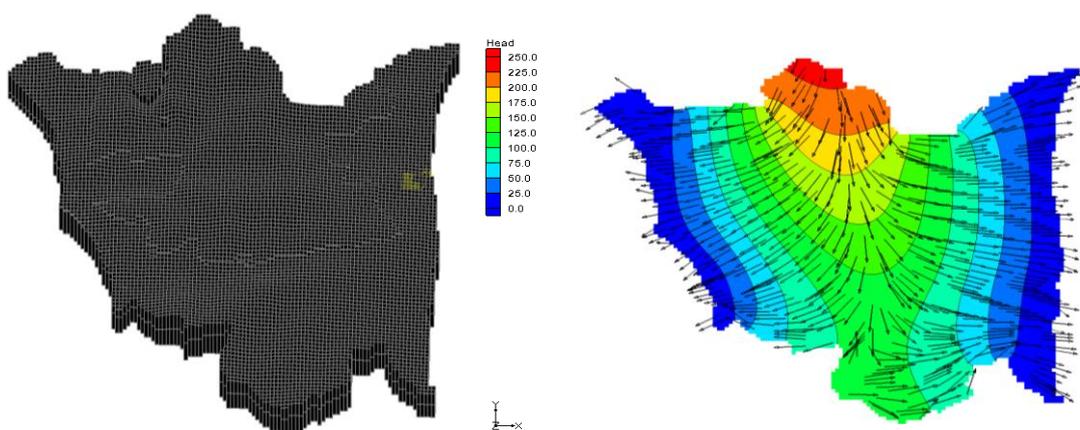


圖 3.2.2-1 達仁鄉建議候選場址區域水文地質模型邊界與水文地質單元示意圖

地下水流場分析利用上述水文地質模型與參數，以及場址附近測站之降雨量及海水潮位統計資料，以 HYDROGEOCHEM 之地下水模式設定邊界條件與建立網格模型，進行三維度流場分析模擬。區域地下水模擬結果如圖 3.2.2-2 所示，顯示區域地下水流場以中央山脈為界往西邊與東邊海岸流動。

另為了解中央山脈至場址間的地下水流對場址之影響，以質點追蹤方式進行分析，模擬結果如圖 3.2.2-3 所示，圖中沿流線分布之箭頭，反映場址地下水流動深度與方向，因此來自中央山脈的地下水流深度可達約 EL -700 m，而場址所在區域一定深度以內(約 EL -50m 內)的地層中，其地下水流不會受到中央山脈地下水流場影響。



(左)模型網格，(右)地下水頭流場向量分布圖(單位: m)

圖 3.2.2-2 達仁鄉建議候選場址區域地下水模型與流場

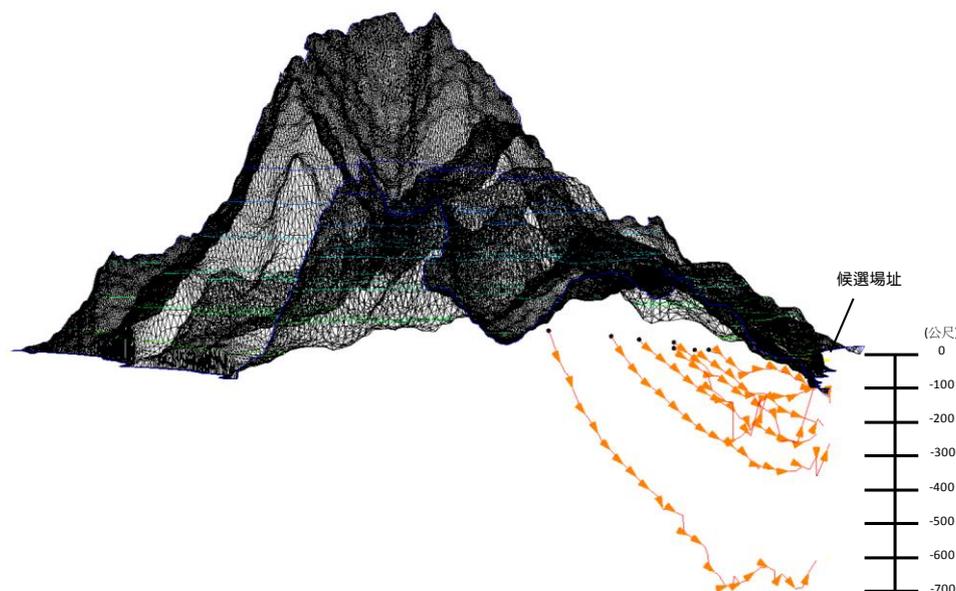


圖 3.2.2-3 達仁鄉建議候選場址上游山區質點追蹤流線圖

(二)場址尺度水文地質模型

場址尺度水文地質模型涵蓋達仁溪與塔瓦溪流域，模型分為硬頁岩組成之可能導水構造帶(PCZ)與可能導水構造帶以外之硬頁岩區(AZ1、AZ2 與 AZ3)，如圖 3.2.2-4。模型深度參考區域模擬顆粒追蹤(particle tracking)的測試結果，將場址尺度模型的底部深度設定在 EL -600 m。

經地表地質調查發現，水文地質單元 AZ1、AZ2 與 AZ3 的裂隙發達，考量現階段僅有初步的野外露頭調查記錄可供參考，略將此區設定為均質之孔隙介質。此外，鑒於鑽孔資料尚待補充的情況下，依一般學理依據推測裂隙發達程度隨深度加深而減少，設定水文地層參數隨深度加深而有所不同，各水文地質單元的水力傳導係數參考區域尺度之設定及數值模擬測試結果進行調整。

水文地質單元 PCZ 的深度設定，考量地質構造的發生不一定只限於近地表處地層，水力傳導特性對深度的反應(depth dependency)可能不具規律性。因此在資料精度尚待提升之現狀前提下暫不予以分層造區。可能導水構造帶傾角暫以 90 度做設定，

寬度則參考地球物理調查結果(台灣電力公司，2006，p3-1~p3-11；台灣電力公司，2007，p3-1~p3-6)皆設定為 200 m 寬之均質帶。

場址尺度地下水模擬結果如圖 3.2.2-5 所示，場址所在範圍之地下水將分別流向北側達仁溪與南側塔瓦溪，出滲至河川中。另有部分則是直接往太平洋方向出滲至海水中。

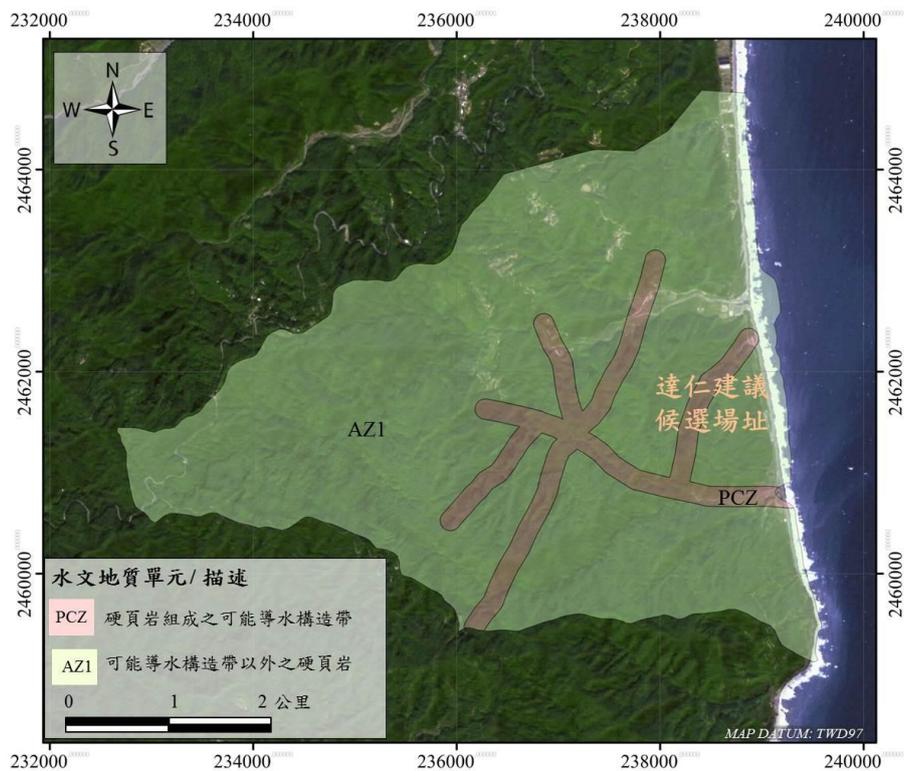
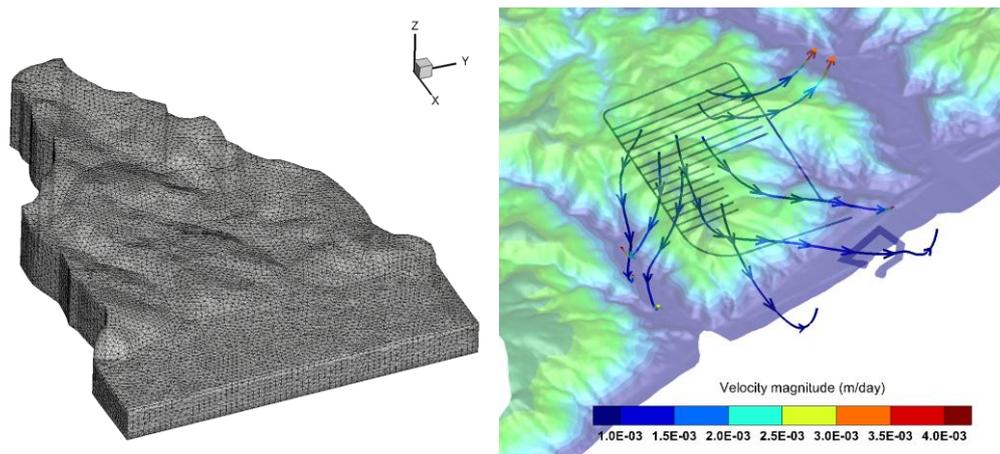


圖 3.2.2-4 達仁鄉建議候選場址尺度水文地質分界示意圖



(左)模型網格，(右)地下水流場分布圖

圖 3.2.2-5 達仁鄉建議候選場址地下水模型與流場模擬示意圖

3.2.3 地球化學概念模型

處置設施的地球化學環境，將隨著設施興建階段、運轉階段、以及封閉後的長期環境演化階段而改變，近場工程障壁及母岩地球化學環境演化之推估如表 3.2.3-1。

處置設施建造前，圍岩推估為還原狀態，當處置坑道開挖後，隨著大氣進入坑道中，擴大設施周邊岩盤的氧化範圍。而當處置設施回填後，因再灌水或再飽和使地下水流動產生變化，處置設施周邊岩盤可能再回復為還原狀態。達仁鄉建議候選場址因未來海水位面呈現下降趨勢，因此場址的地下水將仍然維持淡水系統，其 pH 值及化學特性應與現況相近。

表 3.2.3-1 達仁鄉建議候選場址地球化學環境演化

階段	工程障壁	開挖擾動區母岩	非開挖擾動區母岩
興建運轉階段	氧化態	淡水、氧化態	淡水、還原態
設施回填後	還原態	淡水、還原態	
設施回填後一定時間	淡水、還原態	淡水、還原態	

備註：地下水之 pH 值約為 7

由於目前國內尚無各種材料於不同狀態下之線性分配係數資料庫，因此暫時參考日本 JAEA(2013, p54~p56)所提供針對水泥類材料、膨潤土材料以及岩盤等障壁材料，在不同環境條件下之分配係數(K_d)。

3.2.4 生物環境概念模型

達仁鄉戶籍登記人口共有 3,616 人，其中處置場所在的南田村僅 363 人，屬臨海聚落。產業發展多以一級產業為主，但全鄉 90% 以上均為丘陵山坡地，耕地面積僅有 1,855 公頃且耕地貧瘠，農業發展頗受限制。根據台東縣政府主計處統計資料，達仁鄉生產的農產品以甘藷、芋、釋迦和梅的產量較多。達仁鄉無漁港，因此漁業並不發達。另外，經現場實際勘查，養殖漁業主要分布於台 26 線沿線以及達仁溪出海口附近，養殖水源來自海水，另外加少許的淡水，淡水主要則來自地下水。

3.3 烏坵鄉建議候選場址特徵化

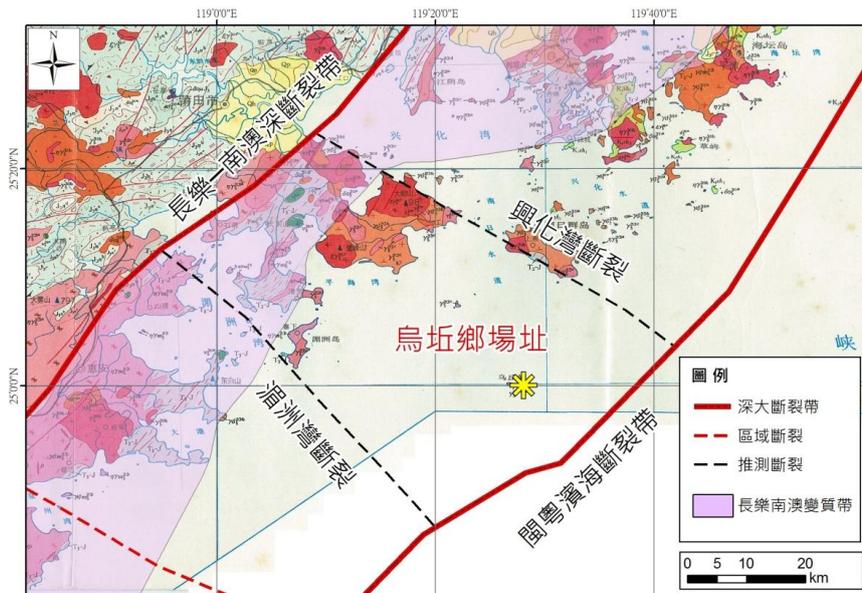
3.3.1 地質環境概念模型

一、地質環境特性與模型範圍

烏坵鄉建議候選場址所處的福建沿海位於華夏陸塊之東南地區，屬於「閩東南沿海燕山變質地帶」，而以東北西南向之「長樂—南澳深斷裂帶」為界，再區分為西北側的「福清—雲霄變質岩帶」和東南區的「平潭—東山變質岩帶」(以下簡稱平東變質帶)(福建省地質礦產局，1985，p465)。平東變質岩帶界於閩粵沿海的平潭島至東山島之間，呈東北西南走向分布，長約 500 km，寬約 40 至 60 km，烏坵鄉建議候選場址約位於其北段。根據工研院能資所的研究成果(工研院能資所，2000c，p2-2，該報告引用劉以宣等，1989)，認為平東變質帶內東北向的斷裂系統以壓性

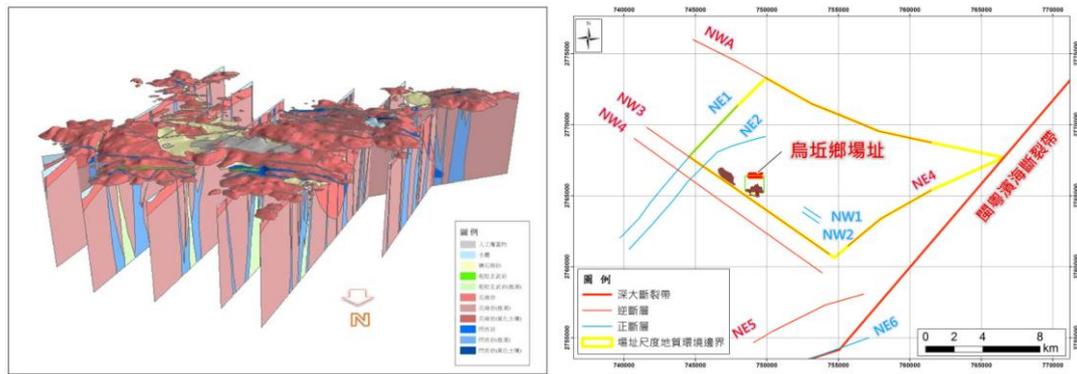
(compressive)為主，強烈活動主要於中生代時期發生，目前屬於老年期演化階段的斷裂系統，以長樂—南澳深斷裂帶與閩粵濱海斷裂帶兩條主要構造為代表。西北向的斷裂系統則以剪力(shear)或轉換拉張(transensional)為主，在新生代的活動跡象明顯，屬少年期演化階段的斷裂系統，其中有海潭北斷裂、興化灣斷裂、烏坵斷裂、湄洲灣斷裂、泉州灣斷裂等。

場址地質環境模型則以長樂—南澳深斷裂帶、閩粵濱海斷裂帶、興化灣斷裂、湄洲灣斷裂為邊界，如圖 3.3.1-1 所示。由地表地質調查成果顯示(工研院能資所，1999a，p22~p30)，烏坵嶼及小坵嶼岩性以基性的輝長岩以及酸性的花崗岩為主，岩體內節理發達，但無顯著的斷層構造。局部具侵入岩脈，岩脈於小坵嶼分布較多，以西北走向為主，多為閃長岩脈。由海域地球物理探測成果顯示(工研院能資所，2000c，p5-3；工研院能資所，1999b，圖版四~七)，場址周邊海域存在多條基盤斷層(basement fault)，鄰近場址的基盤斷層 NW3、NE1、NWA 與 NE4 形成主要的地質邊界，而斷層的延伸線於場址周邊劃分出來的岩體，內部即為受斷層作用影響較為輕微的處置母岩區，如圖 3.3.1-2 所示。



資料來源：底圖引用自福建省地質礦產局(1985，附圖之一)

圖 3.3.1-1 烏坵鄉建議候選場址區域地質平面圖



(左) 小丘嶼三維地質模型，(右) 場址區域地質構造分布

資料來源：(a)彙整自工研院能資所(2000b，圖版二~四)；(b)彙整自工研院能資所(1999b，圖版四~七；2000c，p5-3)。

圖 3.3.1-2 烏坵鄉建議候選場址地質環境模型

二、場址地形演繹

(一)陸地隆升沉降趨勢

本場址位於歐亞大陸板塊邊緣，屬於被動大陸邊緣的穩定環境。依據鄧國雄及黃發明(2001，p3)研究湄洲島的海階與斷層地形，推估 10 萬年以來地盤的抬升速率約為 0.48 mm/yr。此外，以鋯石進行核飛跡定年及其冷卻溫度，推估 80 百萬年來長期的地形隆升速率約為 0.075 mm/yr(工研院能資所，1999a，p13，該報告引用李寄嶼，1998)。

(二)陸地剝蝕速率

根據福建省國土資源廳委託中國地質大學所做的研究發現(福建省國土資源廳，2013，p1)，福建省區域花崗岩體的平均侵蝕率約在 0.1 mm/yr，研判本場址之陸地侵蝕速率應亦在此範圍內。

綜整現階段彙整成果，烏坵鄉建議候選場址的一萬年內抬升速率採 0.48 mm/yr，侵蝕速率採 0.1 mm/yr。因此一萬年內的平均地表高程變化速率為 0.38 mm/yr，研判處置設施位置所在區域的地表長期屬於抬升趨勢。

三、海水面變化

相關之說明請參見本報告 3.2.1 節「三、海水面變化」。

3.3.2 水文地質概念模型

一、區域尺度水文地質模型

假設地下水分水嶺與地表水分水嶺一致，區域尺度水文地質模型遂以位於福建沿海且大致平行長樂—南澳斷裂帶的分水嶺作為西側的東北-西南向的陸域邊界，其餘邊界則分別依照區域的主要斷裂帶劃分。模型依各地層的特性分為不同的水文地質單元，根據相似地質條件的調查文獻擬定初始數值模擬的參數，並依據學理給定參數校正範圍，區域水文地質特性分布示於圖 3.3.2-1 與圖 3.3.2-2。烏坵鄉建議候選場址的降雨量採用馬祖站(中央氣象局設立，距離場址 72 海浬)，平均年雨量 1,182.4 mm(西元 2006 至西元 2014)。因區域尺度範圍無完整潮位記錄，鑒於區域尺度範圍約達數千平方公里，潮位高度對模擬結果影響不明顯，因此在不影響區域尺度模擬結果的前提下，假設潮位高度為 0 m。

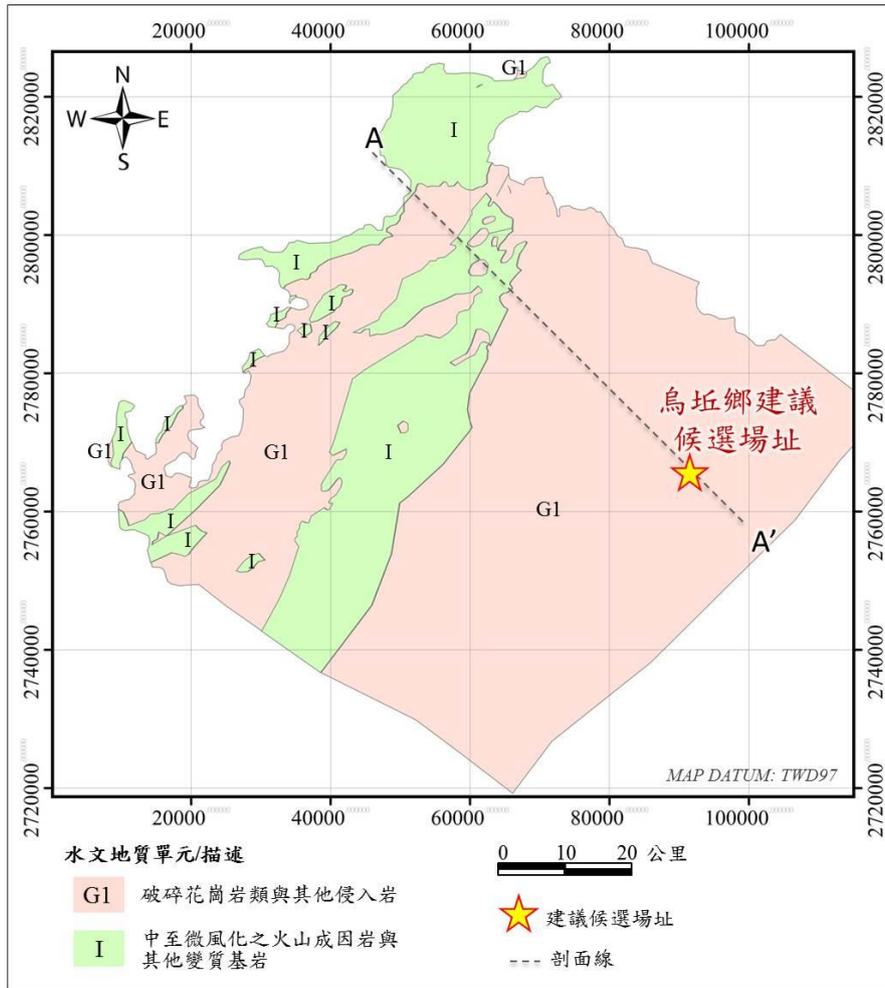


圖 3.3.2-1 烏坵鄉建議候選場址區域水文地質概念分區示意

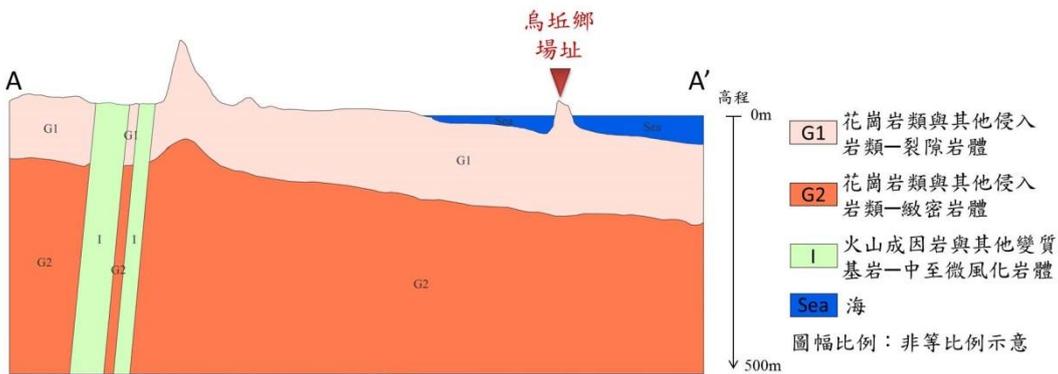


圖 3.3.2-2 烏坵鄉建議候選場址區域水文地質概念分層示意

區域地下水數值模型以長寬皆為 500 m 之網格製作，模擬區域東邊為海洋，以海底地形等高線作為分界依據，其餘為集水區邊界線。設定東邊海岸為定水頭邊界條件(Dirichlet boundary condition)，總水頭為高程 EL0 m，集水區邊界線則定為無通量邊界條件(no flux boundary condition)。垂直模擬範圍為自地表面延伸到高程 EL-2,000 m，數值網格如圖 3.3.2-3 所示。

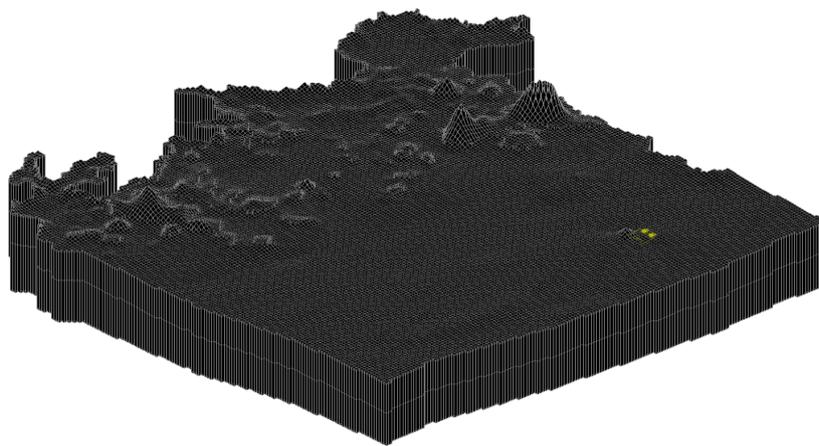


圖 3.3.2-3 烏坵鄉建議候選場址區域地下水數值模型網格

區域模擬結果以海淡水交界面呈現，以淡水平均密度 $1,000 \text{ kg/m}^3$ 與海水平均密度 $1,025 \text{ kg/m}^3$ 作為初始條件設定，模擬結果如圖 3.3.2-4 所示。圖中顯示，區域海淡水交界面距離烏坵鄉建議候選場址尚有相當距離，並且不會明顯受到長期的自然環境演變(如氣候、地形地貌)影響，研判烏坵鄉建議候選場址附近地下水流場應不受大陸地區地下水流場影響，主要的影響因子係來自烏坵鄉建議候選場址與其周邊區域。

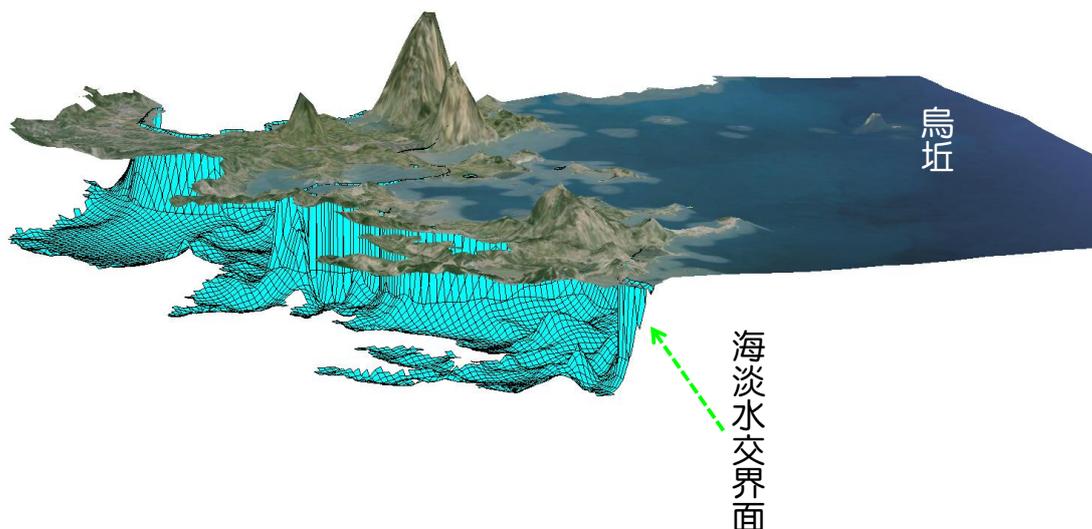


圖 3.3.2-4 大陸地區海水與淡水交界面

(二)場址尺度水文地質模型

場址尺度水文地質模型以區域水文地質模型為基礎，考量模型地形精度採既有海域地形調查範圍為邊界(工研院能資所，2000a，p3-6~p3-23)，邊界條件則依區域地下水模擬成果進行設定。水文地質模型垂直向的深度參考大區域模擬分析結果，場址尺度模型底部設定為 EL-600 m，岩性則區分岩脈侵入帶與花崗岩，分區架構如圖 3.3.2-5 所示。

參數以區域水文地質模型參數為基礎，利用數值模擬結果檢驗參數的合理性後進行調整。岩脈侵入帶以外的花崗岩區水文地質架構分為 3 個水文地質單元(GZ1~GZ3)，各水文地質單元以等效均質概念考量。彙整岩脈侵入帶分布趨勢後，劃分為 5 條西北-東南向、2 條東北-西南向，寬 40 m 的岩脈侵入帶之水文地質單元(DZ)。各水文地質單元的水力傳導特性假設為均質。

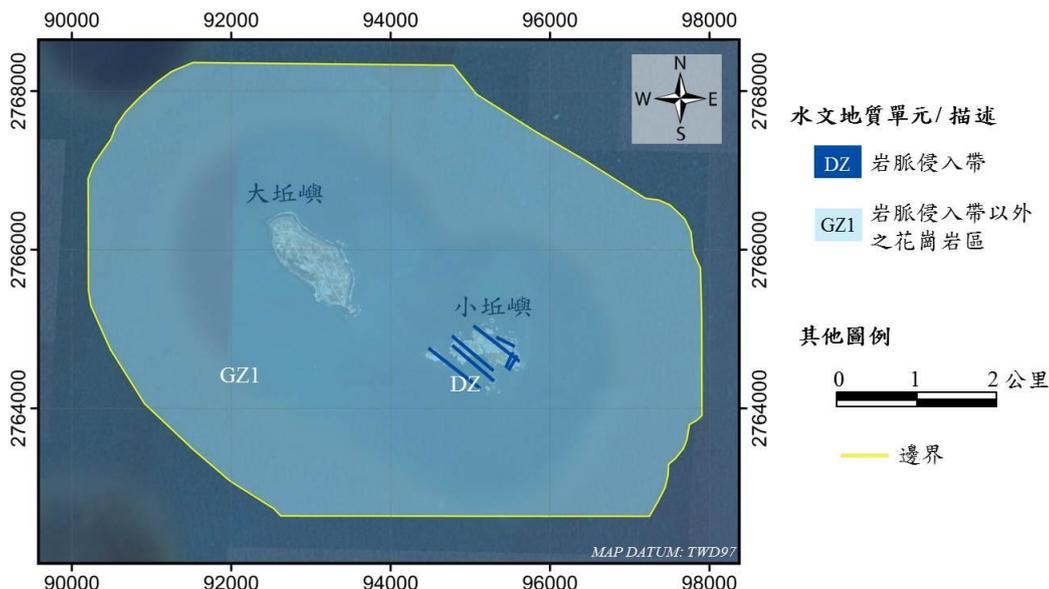
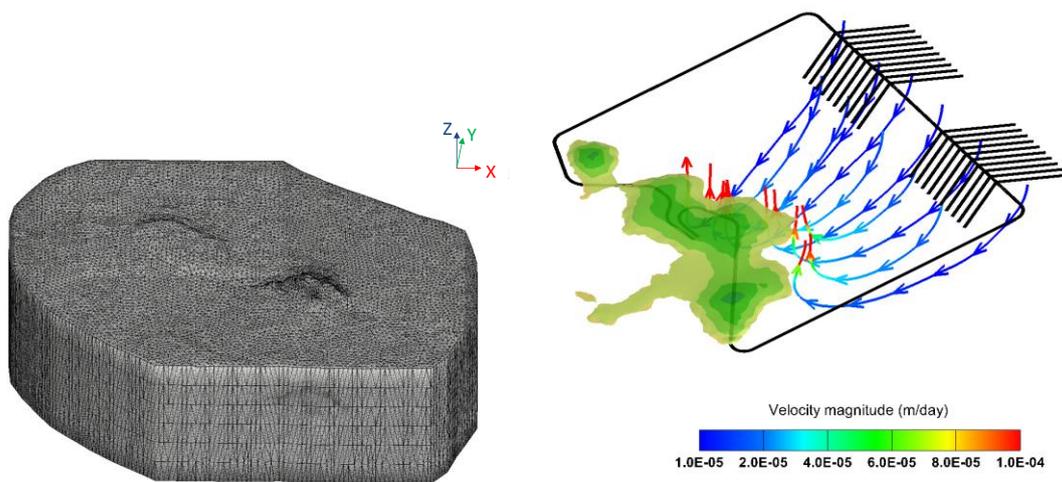


圖 3.3.2-5 烏坵鄉建議候選場址尺度水文地質分界示意圖

場址尺度地下水模擬三維度模型網格採用非結構化網格，如圖 3.3.2-6(左)所示。烏坵鄉建議候選場址地下水流場模擬如圖 3.3.2-6(右)所示，受鹽水分布變化的影響，地下水流向於靠近島嶼的區域受海淡水交界面影響而改變流向。由於烏坵鄉建議候選場址處置設施將位於海床下，因此設施附近之地下水流速相當緩慢，水流方向為朝向小坵，流動流速約 $1.0E-05$ m/d~ $1.0E-04$ m/d 之間。



(左)模型網格，(右)地下水流場

圖 3.3.2-6 烏坵鄉建議候選場址地下水模型與流場模擬示意圖

3.3.3 地球化學概念模型

處置設施興建與封閉對於地球化學環境影響與 3.2.3 節之地球化學環境演化相似，近場工程障壁及母岩地球化學環境演化之推估如表 3.3.3-1。此外，烏坵鄉建議候選場址處置設施將位於海水水位以下，故處置設施將長期處於海水系統，惟有在冰期造成海水水面劇烈下降並轉為陸地環境後，方有可能轉為淡水系統。

表 3.3.2-1 烏坵鄉建議候選場址地球化學環境演化

階段	工程障壁	開挖擾動區母岩	非開挖擾動區母岩
設施興建前	-	-	鹽水*、還原態
興建運轉階段	鹽水、氧化態	鹽水、氧化態	
設施回填後	鹽水、還原態	鹽水、還原態	
設施回填後 一定時間	鹽水*、還原態	鹽水*、還原態	

*-冰期造成海水高程大量下降時，處置系統將轉為淡水系統。

烏坵鄉建議候選場址分配係數選用，暫時參考日本 JAEA(2013, p54~p56)所提供針對水泥類材料、膨潤土材料以及岩盤等障壁材料，在不同環境條件下之分配係數(K_d)，如表 3.3.2-2 所列。需注意的是，工程障壁在鹽水條件下均不考慮其吸附特性，針對在不同水質條件下花崗岩體之分配係數(K_d)，則參考瑞典 SKB(2008, p240)的資料。

3.3.4 生物環境概念模型

烏坵鄉建議候選場址戶籍登記人口為 671 人，其中大坵有 310 人，小坵有 361 人，當地居民多以外出就學就業，小坵的常住人口僅有 10 餘人(金門縣政府民政處網站 104 年 5 月份人口數統計資料)。

由於烏坵鄉屬於軍事管制區，且物產資源不豐富，物資補給全賴軍方定期船艦，對外交通較不方便。根據金門縣統計年報資

料，烏坵鄉未登錄有農業人口或漁業從業人員，亦未登錄有飼養家禽或家畜，故無農、漁和畜牧等產業活動。小坵島上居民僅在住家附近貧瘠土地種植蔬菜自用，或是採集紫菜、釣魚、拾取風螺、抓螃蟹和小章魚等，作為日常食物的來源之一(台灣電力公司，2002，p3-56、p3-58、p3-71)。

3.4 場址特徵化不確定性研判與調查規劃

3.4.1 場址特徵化不確定性來源

一、特徵化概念不確定性

特徵化概念不確定性源自於對作用(Process)的認知不夠完全，或數學模式無法正確描述，因而造成特徵模型與自然環境有所差異。如地質構造演化、長期海水面變化，導水裂隙分布概念化，長期的氣候、地球化學環境與生物環境預測等。

二、資料不確定性

資料不確定性可能由樣本代表性與調查方式而產生。樣本代表性所產生之不確定性源自於環境異質性、採樣位置與樣本數等影響。而調查方式所造成之不確定性則來自調查方式本身之適用性、分析方式以及採用參數之代表性。

3.4.2 達仁鄉建議候選場址特徵化不確定性研判與調查計畫調整

現階段受限於設施所在位置之關鍵特性參數缺乏實際調查資料所致，場址特性概念模式特徵化不確定性分析如下：

- 一、地質環境概念模型：區域尺度地質環境概念模型的不確定性，主要在於長時間尺度預測之變化量，如：地層抬升量隨時間之變化量、地形剝蝕率與空間特性等，特徵趨勢則相對較可靠。而需要較多處置母岩與周圍環境調查資料之場址尺度概念模型，雖已利用周圍地區資料輔以學理研判，但受限於現地調查資料不足，難

以驗證與確認其準確性，故在概念特徵與參數選用上均具有不確定性。

二、水文地質概念模型：水文地質概念模式與地質環境概念模型相似，在缺乏現地鑽孔、地下水位監測與水力試驗等資料之現況下，場址尺度概念模型亦具有不確定性。

三、地球化學概念模型：由於目前安全分析規劃採用線性吸附模式，就地球化學特性而言，其較大的不確定性來自於相關線性分配係數數據均參考國外試驗資料庫，而非使用國內場址現地樣品試驗資料。

四、生物環境概念模型：基於達仁鄉建議候選場址具備較不利經濟開發之因素（例：臨海地區且地勢陡峭、交通較鄰近地區不便），在假設人類生活行為與周圍經濟發展均與現況相似之前提下，推測長期環境差異可能不大，研判關鍵群體生活型態之不確定性較低。

現階段之場址特性調查規劃請參見台灣電力公司(2016a, p25~p120) LLWD2-SI-2015-01-V06-台東縣達仁鄉場址特性調查計畫。依場址特徵化不確定性研判調整調查計畫說明如下：

一、地質環境特性調查：鑽孔深度與位置已調整部分鑽孔深度需低於處置設施底部高程，現階段概念模型中高角度裂隙帶特徵仍未完全掌握，規劃以鑽孔調查搭配多種地球物理探測方法以釐清其特徵。

二、水文地質特性調查：因缺乏較多之現地調查資料，故須先進行初步之鑽孔、水力試驗與水位監測，再視其特性調整與增設監測與調查項目。

三、地球化學特性調查：規劃須針對關鍵核種進行現地樣本之線性分配係數試驗，並與國外資料庫數據進行比對。

四、生物環境特性調查：達仁鄉建議候選場址之生物環境特性調查則按場址特性項目進行調查，未依不確定性做調整。

3.4.3 烏坵鄉建議候選場址特徵化不確定性研判與調查計畫調整

現階段受限於設施所在位置之關鍵特性參數缺乏實際調查資料所致，場址特性概念模式特徵化不確定性分析如下：

- 一、地質環境概念模型：雖然區域尺度地質環境概念模型在長時間尺度預測變化量之準確性較低，考量場址所在地質環境演化相對較為穩定，故其不確定性亦較低。另由於處置設施所在母岩位於海床下且離島嶼陸地已有一段距離，雖已採用過去於島嶼陸域與近岸之調查資料輔以學理研判，但受限於場址母岩所在位置調查資料不足，難以驗證與確認其準確性，故在概念特徵與參數選用上均具有不確定性。
- 二、水文地質概念模型：水文地質概念模式與地質環境概念模型相似，雖處置母岩位於海床下，研判其地下水流場特性應相對單純，但在缺乏現地鑽孔、地下水位監測與水力試驗等資料之現況下，場址尺度概念模型亦具有不確定性。
- 三、地球化學概念模型：由於目前安全分析規劃採用線性吸附模式，就地球化學特性而言，其較大的不確定性來自於相關線性分配係數數據均參考國外試驗資料庫，而非使用國內場址現地樣品試驗資料。
- 四、生物環境概念模型：若考量冰期海水下降特性，烏坵鄉建議候選場址現況之島嶼生活環境將可能因海水退去後，周圍出現廣大陸地而轉變，其外來生活環境型態預測具有較高之不確定性。

現階段之場址特性詳細調查規劃請參見台灣電力公司(2016b, p25~p120) LLWD2-SI-2015-02-V06-金門縣烏坵鄉場址特性調查計畫。依場址特徵化不確定性研判調整調查計畫說明如下：

- 一、地質環境特性調查：依現階段處置設施布置，規劃增加海上鑽孔以釐清場址母岩特性，另搭配進行地球物理探測以釐清場址鄰近區域，部分有疑慮之地質構造特性。

- 二、水文地質特性調查：因缺乏較多之現地調查資料，故須先進行初步之鑽孔、水力試驗與水位監測，再視其特性調整與增設監測與調查項目。
- 三、地球化學特性調查：規劃須針對關鍵核種進行現地樣本之線性分配係數試驗，並與國外資料庫數據進行比對。
- 四、生物環境特性調查：雖然烏坵鄉建議候選場址生物環境預期會由島嶼生態環境轉變為陸域生活型態，但特性調查亦規劃按場址特性項目進行調查，而陸域生活型態特性則以類比方式進行。

第四章 處置設施概念設計與作業規劃

4.1 處置設施概念設計要求

4.1.1 處置設施規劃需求

低放射性廢棄物最終處置設施設計時，應符合之法規要求彙整如表 4.1.1-1 所示。低放處置設施應採多重障壁系統，利用多層障壁阻滯核種外釋，或延緩核種釋出到生物圈的時間。此外，進行處置設施空間規劃時，需搭配地下水流場分析結果，將處置坑道布置於地下水流速較緩區域，且需避開明顯破碎帶與地下水流速較高區域。

表 4.1.1-1 低放射性廢棄物最終處置設想法規需求

項目	法規需求	法規依據
處置區容量	放射性廢棄物最終處置設施應接收全國所產生之放射性廢棄物。(本低放處置設施目前僅考量 A、B、C 類低放射性廢棄物)	放射性物料管理法
處置安全	低放處置設施應足以保障公眾之健康及安全。	
廢棄物包裝	廢棄物分類包裝應符合低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則第 4、5、6 條之要求。	低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則
分區處置	低放處置設施應依廢棄物分類特性分區處置。	
設計原則	低放處置設施應採多重障壁概念進行設計。	
設施外輻射限值	低放處置設施之設計應確保其對設施外一般人所造成之個人年有效劑量，不得超過 0.25 mSv，並應符合合理抑低原則。	
排水與防滲設計	低放處置設施封閉前，其排水與防滲設計，應能防止廢棄物與積水或滲漏水接觸。	
保安與警示設計	低放處置設施之保安與警示設計，應能防止人員誤闖或占用。	游離輻射防護安全標準
工作人員輻射防護	<ul style="list-style-type: none"> 每連續 5 年週期之有效劑量不得超過 100 mSv，且任何單一年內之有效劑量不得超過 50 mSv。 眼球水晶體之等價劑量於 1 年內不得超過 150 mSv。 皮膚或四肢之等價劑量於 1 年內不得超過 500 mSv。 	

處置設施保守預估可處置 A 類低放射性廢棄物至少 67.5 萬桶，B、C 類低放射性廢棄物至少 7.5 萬桶。

4.1.2 工程障壁系統設計需求

工程障壁系統包括廢棄物體、盛裝容器、填充材料、處置窖、緩衝材料、回填材料、二次襯砌、基礎層、開挖擾動區等構件，其所需具備之安全功能，彙整如表 4.1.2-1 所列。處置場封閉後的長期安全功能主要與圍阻與遲滯核種釋出有關，運轉期間的安全功能則以力學穩定性和輻射防護為主。以下分別就工程障壁構各構件說明其設計要求。

一、廢棄物體：

廢棄物體應符合「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」第 5 條、第 6 條之規定，以確保廢棄物體的穩定性。

二、盛裝容器：

廢棄物盛裝容器包括 55 加侖桶(熱浸鍍鋅塗裝鋼桶)、83 加侖桶(熱浸鍍鋅塗裝鋼桶)、混凝土盛裝容器以及蘭嶼貯存場之 3x4 與 3x1 桶裝之重裝容器(表面熱浸鍍鋅塗裝之鋼材)，但在概念設計階段，先暫以 55 加侖桶(熱浸鍍鋅塗裝鋼桶)作為設計考量，待處置場可接收之盛裝容器確定後再行調整。此外，未來處置場可接收之盛裝容器需符合「放射性廢棄物處理貯存及其設施安全管理規則」第 8 條及 9 條規定。

三、填充材料：

填充材料主要填充於廢棄物盛裝容器與處置窖內空隙。填充材料目前以水泥砂漿為考量，其目的在於增加運轉期間處置窖內廢棄物堆疊之力學穩定性，避免廢棄物體因外力而傾倒或損壞，並於處置場封閉後遲滯核種釋出。

表 4.1.2-1 工程障壁各構件之安全功能需求及評估指標

階段	安全功能需求	評估指標	廢棄物體	盛裝容器	填充材料	處置窖	緩衝材料	回填材料	二次襯砌	基礎層	開挖擾動區	天然障壁
運轉期間	力學穩定	材料強度	●	●	●	●	-	-	●	●	●	●
		坑道幾何、配置	-	-	-	-	-	-	-	-	-	●
	廢棄物定置	廢棄物定置與填充材料施工性	-	●	○	●	-	-	-	●	-	-
	防止污染擴大	防止核種釋出	●	●	●	●	-	-	-	-	-	-
封閉後	限制平流傳輸	水力傳導係數	●	-	●	●	●	●	●	●	●	●
	限制擴散傳輸	擴散係數	●	-	●	●	●	●	●	●	●	●
	限制核種溶解	溶解度	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	活化金屬核種溶出	核種釋出率	●	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	其他廢棄物核種溶出	溶出率	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	核種吸附	分配係數	●	-	●	●	●	●	●	●	●	●
	工程障壁劣化	水力傳導係數比	-	-	●	●	●	●	●	●	●	-
防止人類入侵	設施材料強度、岩覆	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	

●：具有此安全功能，且列入設計考量。
○：具有此安全功能，但不列入設計考量。
-：無此功能

四、處置窖：

處置窖之結構物材料以鋼筋混凝土為考量。其目的在於運轉期間承載窖內廢棄物及回填材料之重量，提供輻射屏蔽確保作業安全，並於處置場封閉後可長期遲滯核種釋出。

五、緩衝材料：

因 B、C 類低放射性廢棄物含有較高濃度之長半化期核種，應盡量使核種釋出工程障壁的時間延後，以確保其長期安全性。故針對放置 B、C 類低放射性廢棄物的處置窖，周圍將使用緩衝材料以抑制地下水滲流量。緩衝材料以膨潤土(Bentonite)為主要考

量，利用膨潤土遇水膨脹可填充空隙之特性，降低地下水流入之水量。

六、回填材料：

回填材料主要填充於處置坑道內，處置窖或緩衝材料(僅 B、C 類廢棄物)施工後剩餘的空間。在處置場封閉後，應能長時間遲滯核種釋出。回填材料以混凝土為主要考量材料。

七、基礎層：

基礎層設置在處置窖下方，以鋼筋混凝土材料為主要考量。主要功能為提供廢棄物盛裝容器、填充材料、處置窖等構件在力學上的支撐作用。基礎層在運轉期間須能承載來自於緩衝材、處置窖、回填材料以及廢棄物之重量；在處置場封閉後，應能長時間遲滯核種釋出。

八、二次襯砌：

二次襯砌主要功能為運轉期間承載處置坑道周圍岩體荷重，以及減少圍岩地下水入滲。考量材料以鋼筋混凝土為主。由於達仁鄉建議候選場址預期存在許多地質弱面，在坑道開挖與一次襯砌完成後，仍有可能發生局部崩落或較大變形，故在設計上使用二次襯砌。

九、開挖擾動區：

處置坑道圍岩將因開挖擾動而增加裂隙。為確保處置設施之長期安全功能，處置坑道在開挖時應採用對於圍岩擾動較小之開挖工法，例如機械開挖、平滑開炸等。於斷面開挖後應針對開挖擾動區進行固結灌漿，以盡量降低其透水量。灌漿範圍則視開挖擾動範圍而定。

4.1.3 處置設施封閉規劃需求

處置場接收低放射性廢棄物達到預定處置容量後，即依「放射性物料管理法及」其施行細則規定擬訂封閉計畫及監管計畫，

經報請主管機關核准後實施封閉與監管作業。封閉之概念係為了確保工程障壁能確實發揮遲滯核種遷移的功能，避免處置場封閉後形成核種遷移的快速路徑，以及減緩工程障壁的功能退化。

4.1.4 輔助區規劃需求

處置場附屬輔助設施，主要提供處置場運轉所需之支援設備與人力空間，輔助區之主要設施包括：運轉大樓、工安大樓、行政大樓、空調室及通風機室、污水處理廠、維護工廠、警衛室及接收港等。各設施之需求分別說明如下。

一、運轉大樓

運轉大樓的主要功能，包括做為放射性廢棄物桶之暫存倉庫、檢查站及保健室等。暫存倉庫區之設計存量需考慮碼頭區毀損時之運送調節量。運轉大樓內之空調排放水及廢棄物檢整暫存區之排放水均須導入獨立的集水坑中，坑內廢水應經取樣確認後，由排水泵排至廢水收集容器內，再以移動式放射性污染廢液處理設備處理。

二、行政大樓

本大樓內設有場長、副場長辦公室，處置場運轉、封閉及監管期間相關行政事務之辦公場所。

三、污水處理廠

污水處理廠提供輔助區運作所產生之工業廢水、生活污水之處理，並將處置區內所排放之廢流水導引至污水處理廠處理。規劃依各廢水類型獨立設置對應之工業廢水、生活污水與處置區廢水處理系統。

四、維護工廠

維護工廠負責輔助區內機電設備、車輛之維護修理，以維持場區內之正常運轉。

五、空調室

空調室設置於通行隧道入口附近，其主要功能為提供輔助區及地下處置設施內之空氣調節。空調機需具有控制溫度、濕度及空氣流動方向之功用，同時於通風設備之進出口，偵測空氣中輻射劑量。

六、通風機室

通風機室設置於通行隧道入口附近，其主要提供地下處置場通風加壓所需設施，使冷空氣適當分佈於坑道內每一個角落。通風機室應裝設風機設備以達到最佳冷房效果。

七、工安大樓

工安大樓主要負責場區運轉、車輛運輸人員進出管理，並負責所有人員之勞工安全教育訓練、環境保護。

八、接收港

接收港主要用以停靠運輸低放射性廢棄物以及各項物資之船舶。

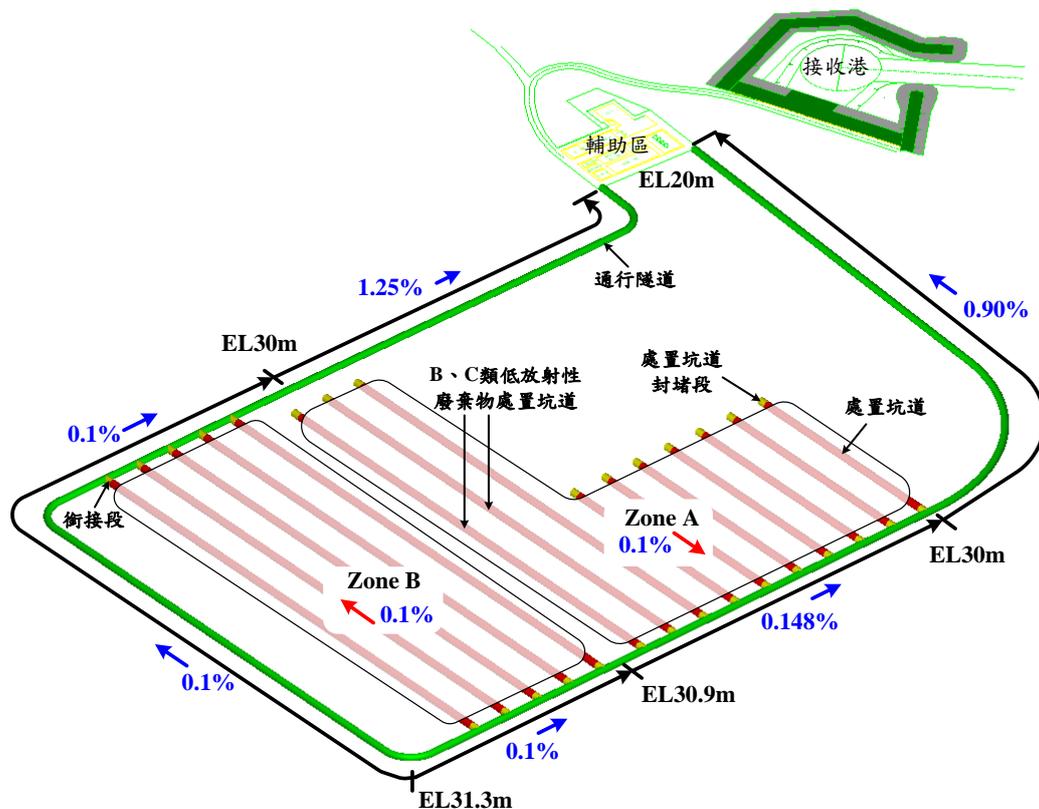
九、警衛室

警衛室主司輔助區及處置場進出車輛及人員之登記、檢查，以策安全。

4.2 達仁鄉建議候選場址概念設計

4.2.1 處置設施與輔助區規劃

考量台東縣達仁鄉建議候選場址之場址特性、處置容量需求與設計要求，處置設施的空間配置參見圖 4.2.1-1。處置坑道位於高程 EL30 m~EL31.2 m 之間，共有 13 條 A 類低放射性廢棄物處置坑道，以及 2 條 B、C 類低放射性廢棄物處置坑道，處置坑道總長度為 8,938 m。A 類低放射性廢棄物處置坑道岩覆深度大於 62.2 m；B、C 類低放射性廢棄物處置坑道岩覆深度大於 76.4 m。



備註：箭頭方向為重力排水方向。

圖 4.2.1-1 達仁鄉建議候選場址處置設施空間配置與重力排水規劃示意圖

達仁鄉建議候選場址輔助區，規劃於進出通行隧道之出入口處，需藉由開挖、回填及整地等以達到需求之面積。有關之山坡開挖、回填、擋土、護坡、排水及設置滯洪沉砂池等設施，除需

符合水文、降雨強度及道路標準等相關規定外，亦須符合水土保持技術規範之規定。整個輔助區及接收港平面布置圖參見圖 4.2.1-2。

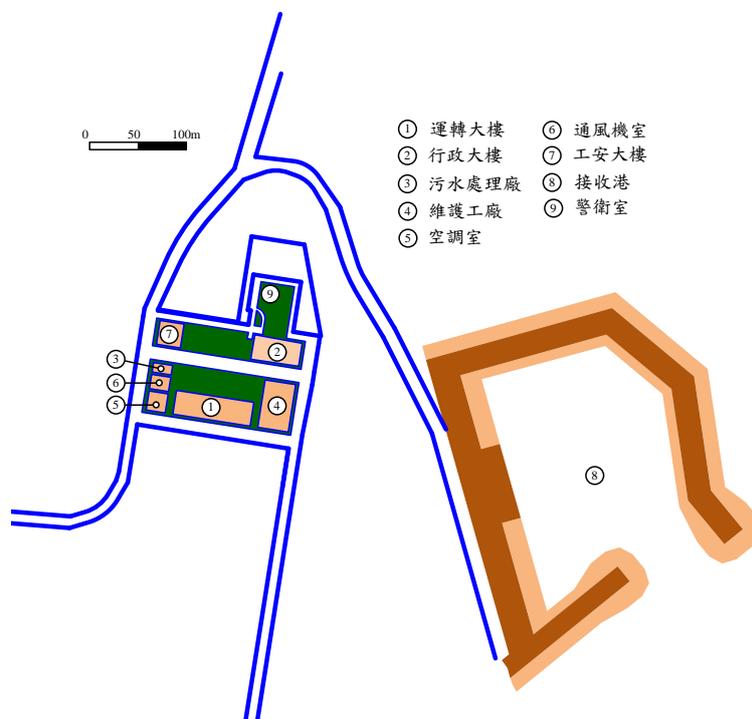


圖 4.2.1-2 達仁鄉建議候選場址輔助區平面布置圖

4.2.2 工程障壁系統設計

考量台東縣達仁鄉建議候選場址為硬頁岩，內含許多地質弱面，為提升坑道與圍岩之安定，整體輪廓將以近似圓形設計。坑道內空斷面則考量到工程障壁之尺寸，以及運轉期間之維護、裝載設備、排水設施所需預留之空間，處置設施所需之淨寬度至少 12.1 m。另依照「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」，分別針對 A 類低放射性廢棄物和 B、C 類低放射性廢棄物，設計對應之「多重障壁」系統，如圖 4.2.2-1 及圖 4.2.2-2 所示。其中，針對 B、C 類低放射性廢棄物，因其廢棄物活度較高，故加厚處置窖之厚度，並另外配置緩衝材料，以確保處置設施內，

核種傳輸特性可長期維持擴散主導，降低核種藉由平流傳輸而快速釋出之可能性。

A 類低放射性廢棄物處置窖之寬約為 8.5 m、高約為 5.9 m、深度為 16 m，每個處置窖內可堆放 1,500 桶之 55 加侖桶。B、C 類低放射性廢棄物處置窖之寬約為 7.2 m、高約為 5.5 m、深度為 16 m，每個處置窖內可堆放 900 桶之 55 加侖桶。

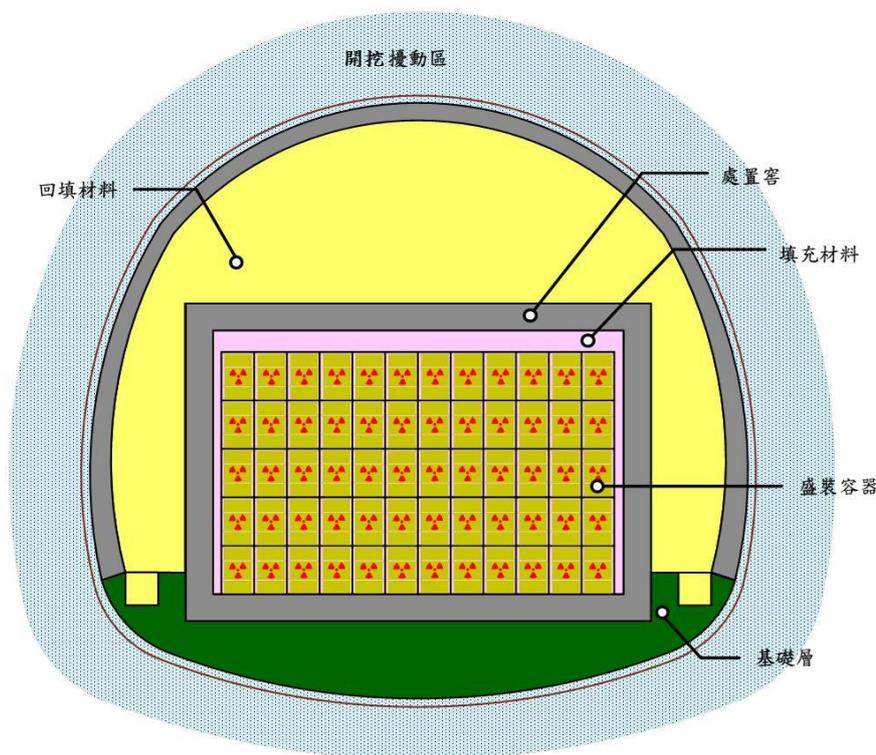


圖 4.2.2-1 達仁鄉建議候選場址 A 類低放射性廢棄物處置坑道工程障壁設計

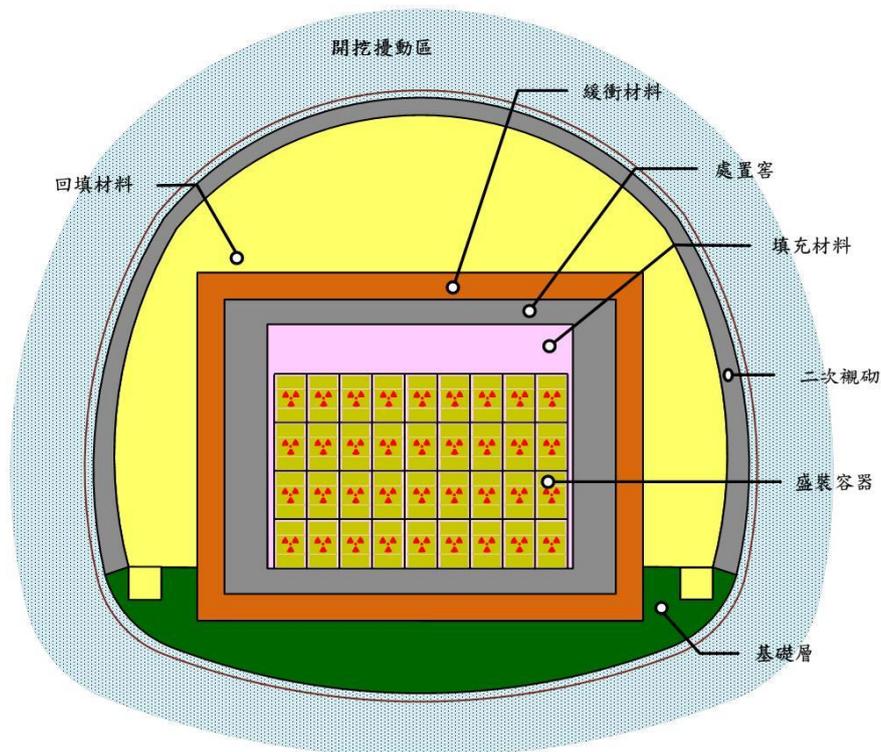


圖 4.2.2-2 達仁鄉建議候選場址 B、C 類低放射性廢棄物處置坑道工程障壁設計

4.2.3 處置設施封閉設計

針對達仁鄉建議候選場址的概念設計與環境條件，並參考瑞典、日本等國際上之作法，規劃處置坑道及銜接段之回填材料與封塞概念設計，如圖 4.2.3-1 所示，其中回填材料須達到維持與周邊岩盤相當的低透水性；水力封塞須達到與緩衝材料相同之性能；力學封塞則應提供進行回填及水力封塞施築過程之力學穩定，並具備低透水性之特性。回填材料、水力封塞與力學封塞需視運轉後之設施與環境狀況，依此功能目標調整設計尺寸與型式，故於概念設計階段僅先訂定其設計功能。

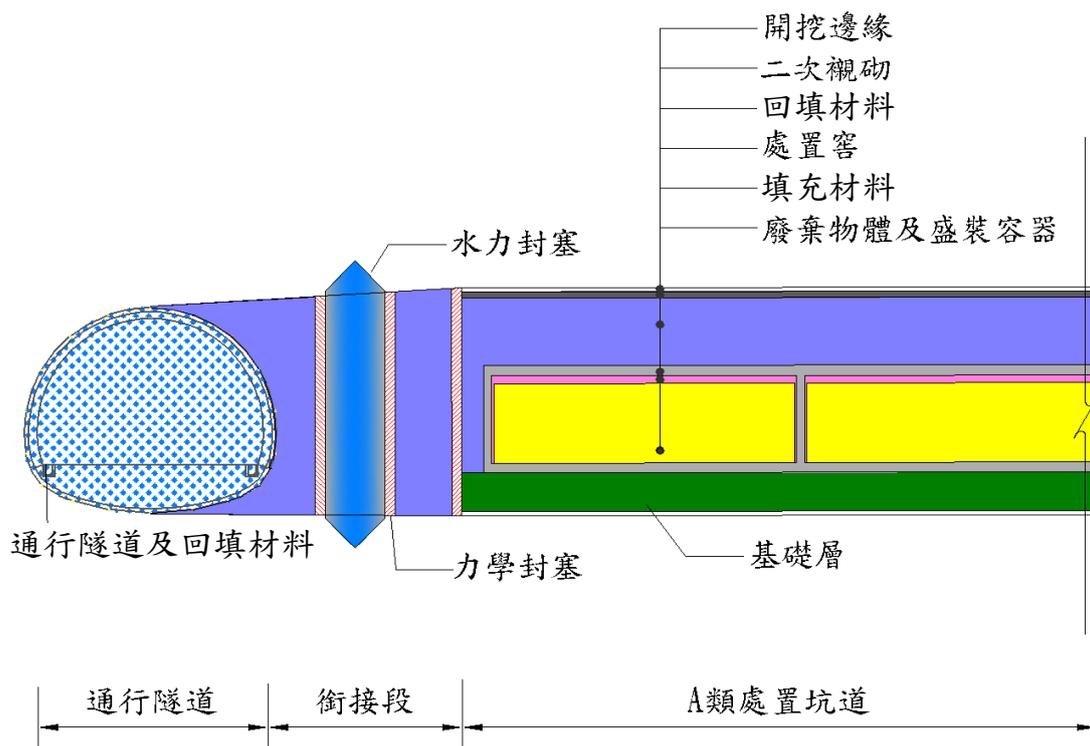


圖 4.2.3-1 達仁鄉建議候選場址封閉設計(1/2)

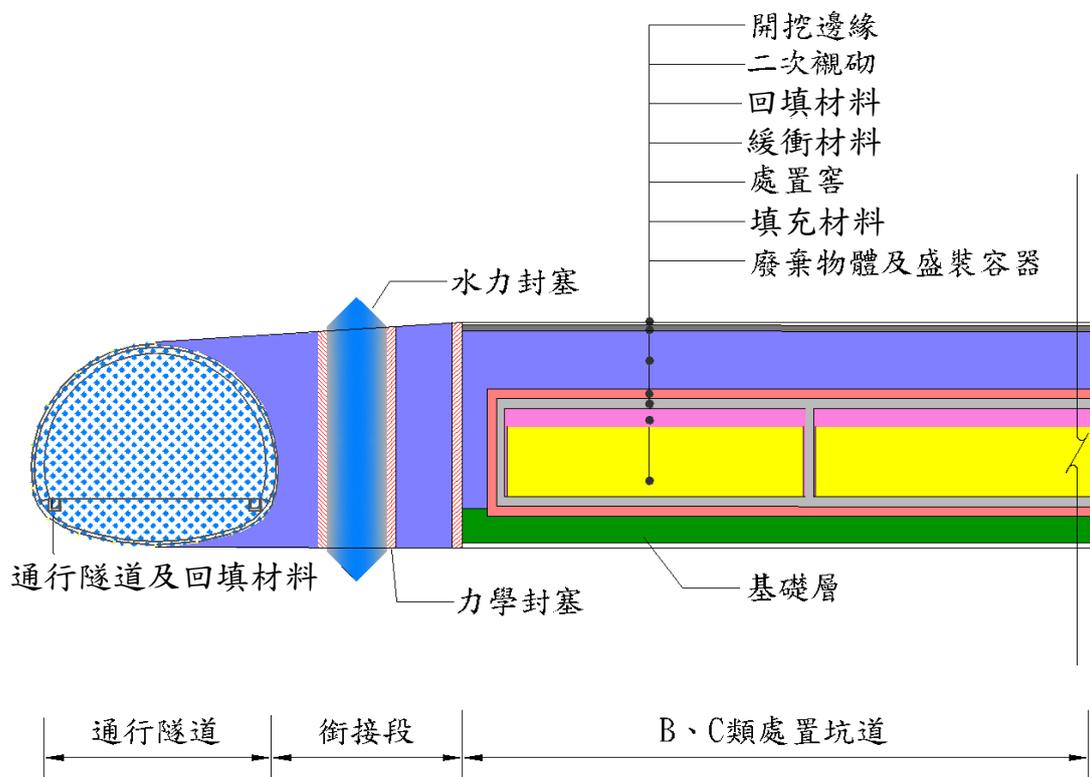


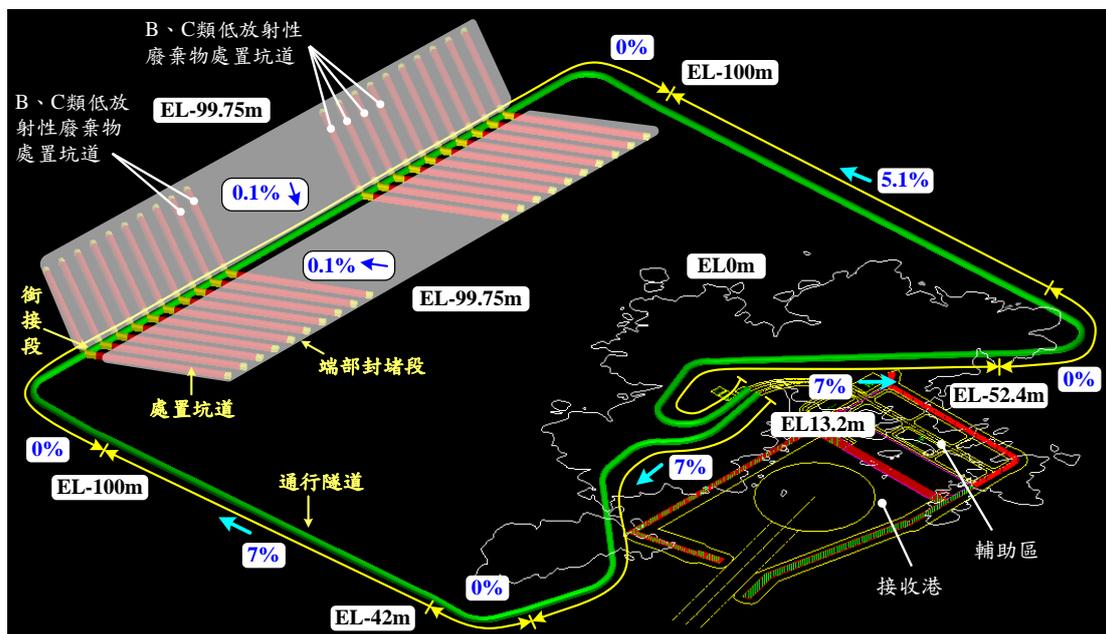
圖 4.2.3-1 達仁鄉建議候選場址封閉設計(2/2)

4.3 烏坵鄉建議候選場址概念設計

4.3.1 處置設施與輔助區規劃

考量金門縣烏坵鄉建議候選場址之場址特性、處置容量需求與設計要求，處置設施的空間配置參見圖 4.3.1-1。處置坑道位於高程 EL-99.7 m 至 EL-100 m 之間，共有 34 條 A 類低放射性廢棄物處置坑道，以及 6 條 B、C 類低放射性廢棄物處置坑道，處置坑道總長度為 8,800 m。處置坑道上方岩覆為 58.8 m~59.0 m。

烏坵鄉建議候選場址輔助區規劃於進出通行隧道之出入口附近，需藉由開挖、回填及整地等以達到需求之面積。有關之回填、擋土、護坡、排水及設置滯洪沉砂池等設施，除需符合水文、降雨強度及道路標準等相關規定外，亦須符合水土保持技術規範之規定。整個輔助區及接收港平面布置圖參見圖 4.3.1-2。



備註：箭頭方向為重力排水方向。

圖 4.3.1-1 烏坵鄉建議候選場址處置設施空間配置與重力排水規劃示意圖

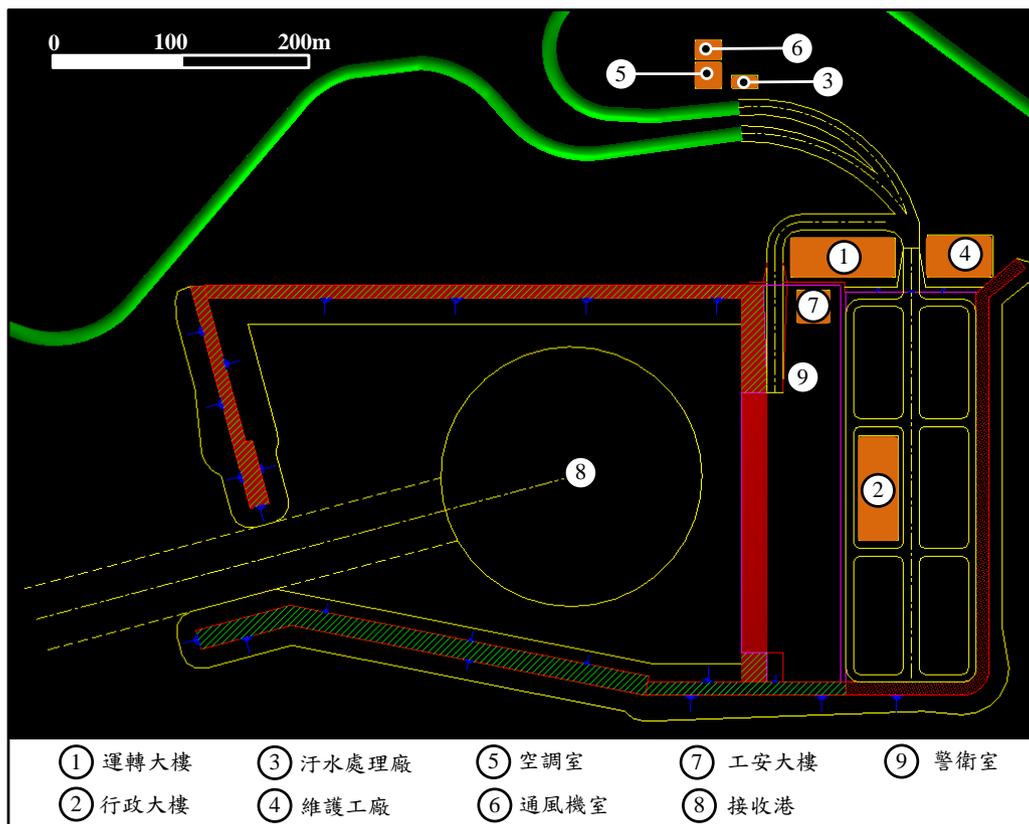


圖 4.3.1-2 烏坵鄉建議候選場址輔助區平面布置圖

4.3.2 工程障壁系統設計

考量烏坵鄉建議候選場址母岩屬岩性堅實之花崗岩，因此整體輪廓以方便運轉考量之倒 D 型設計。坑道內空斷面則考量到工程障壁之尺寸，以及運轉期間之維護、裝載設備、排水設施所需預留之空間，處置設施所需之淨寬度至少 10.7 m。另依照「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」，分別針對 A 類低放射性廢棄物和 B、C 類低放射性廢棄物，設計對應之「多重障壁」系統，如圖 4.3.2-1 及圖 4.3.2-2 所示。其中，針對 B、C 類低放射性廢棄物，因其廢棄物活度較高，故加厚處置窖之厚度，並另外配置緩衝材料，以確保處置設施內，核種傳輸特性可長期維持擴散主導，降低核種藉由平流傳輸而快速釋出之可能性。

A 類低放射性廢棄物處置窖之寬約為 8.5 m、高約為 5.9 m、深度為 16 m，每個處置窖內可堆放 1,500 桶之 55 加侖桶。B、C 類低放射性廢棄物處置窖之寬約為 7.2 m、高約為 5.5 m、深度為 16 m，每個處置窖內可堆放 900 桶之 55 加侖桶。

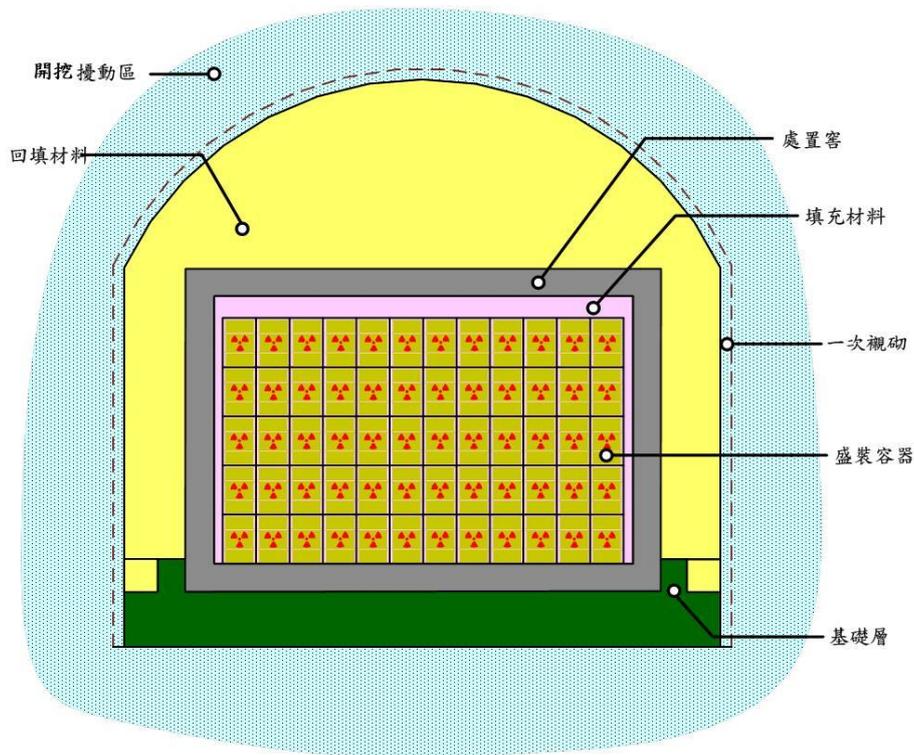


圖 4.3.2-1 烏坵鄉建議候選場址 A 類低放射性廢棄物處置坑道工程障壁設計

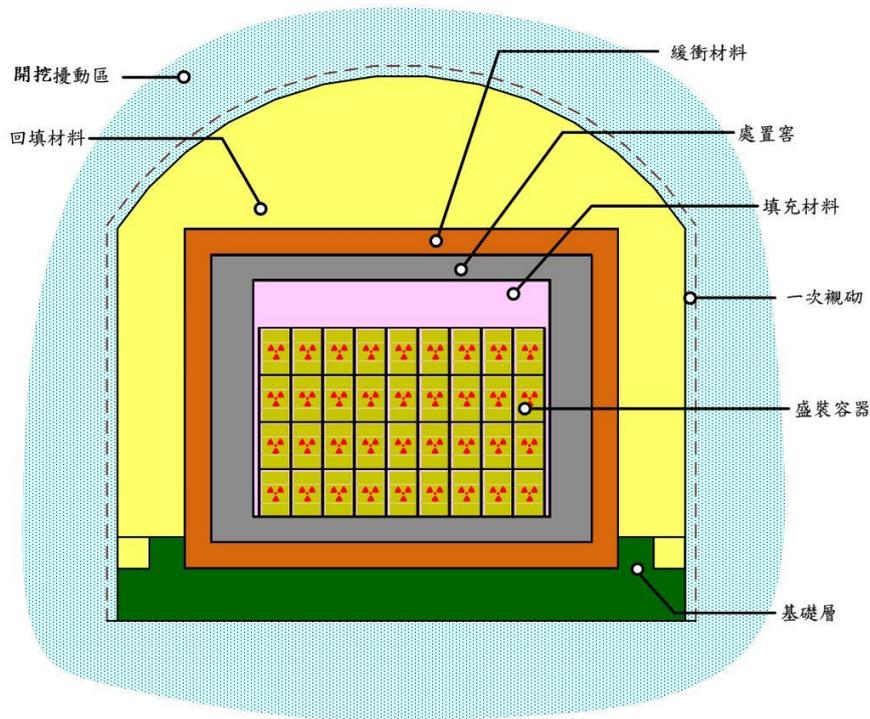


圖 4.3.2-2 烏坵鄉建議候選場址 B、C 類低放射性廢棄物處置坑道工程障壁設計

4.3.3 處置設施封閉設計

針對烏坵鄉建議候選場址的概念設計與環境條件，並參考瑞典、日本等國際上之作法，規劃處置坑道及銜接段之回填材料與封塞概念設計，如圖 4.3.3-1 所示，圖中回填材料須達到維持與周邊岩盤相當的低透水性；水力封塞須達到與緩衝材相同之性能；力學封塞則應提供進行回填及水力封塞施築過程之力學穩定，並具備低透水性之特性。回填材料、水力封塞與力學封塞需視運轉後之設施與環境狀況，依此功能目標調整設計尺寸與型式，故於概念設計階段僅先訂定其設計功能。

地表

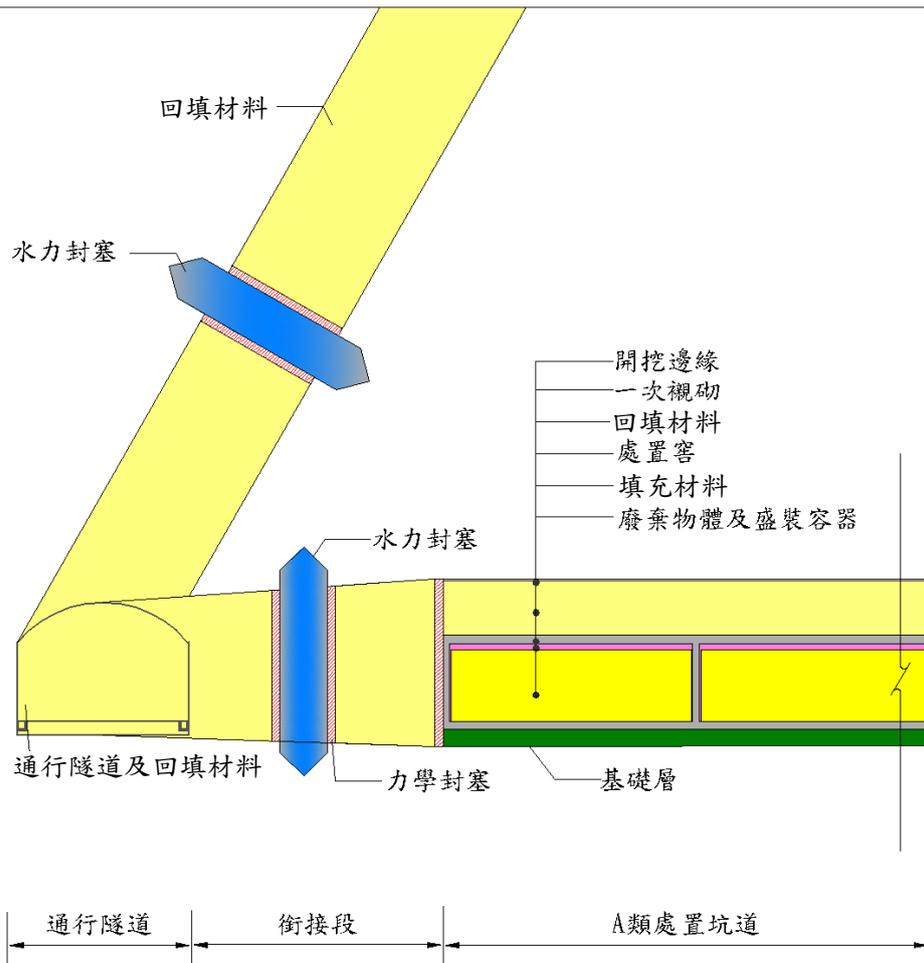


圖 4.3.3-1 烏坵鄉建議候選場址封閉設計(1/2)

地表

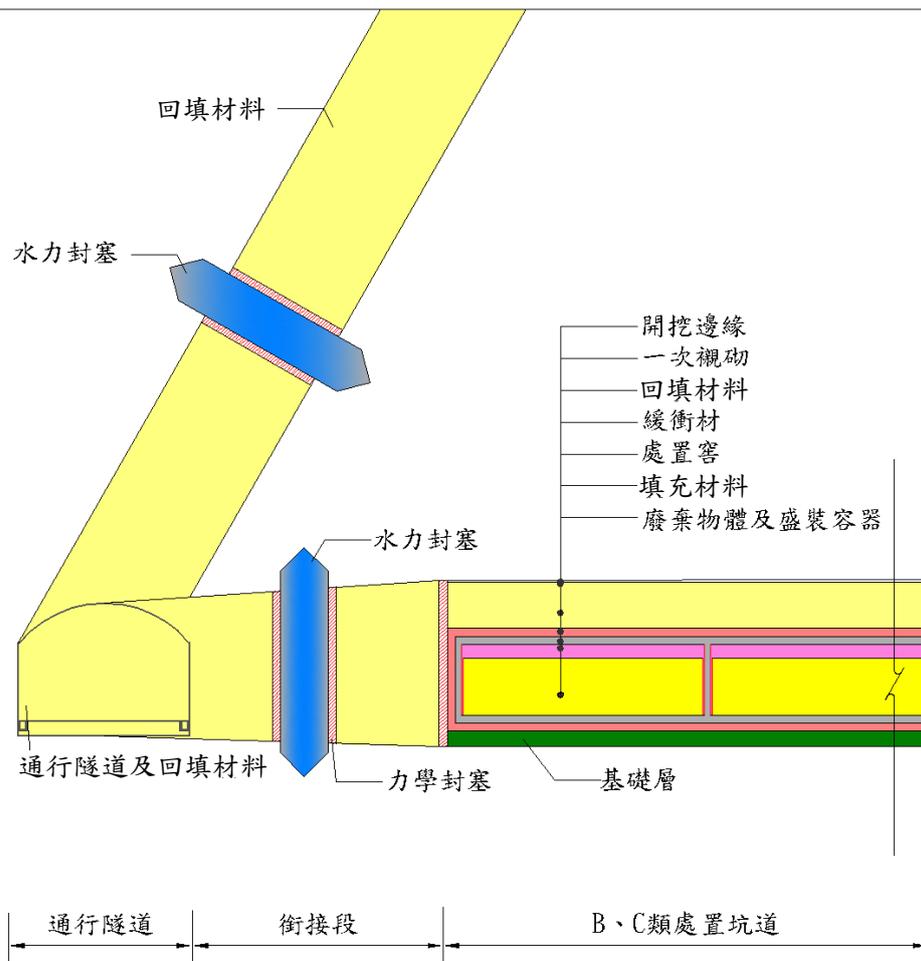


圖 4.3.3-1 烏坵鄉建議候選場址封閉設計(2/2)

4.4 階段作業時程與興建施工規劃

低放射性廢棄物最終處置計畫依其階段性目標與任務概分成四個階段，以下分別說明各階段預期辦理工作內容：

一、處置場選址階段

本階段之待辦事項包含：辦理地方性公民投票(決定候選場址)、投資可行性研究報告審查、實施環境調查與環境影響評估、行政院核定場址、辦理土地取得、執行工程設計、建造執照及相關執照申請與審查等。

二、處置場建造階段

(一)施工階段：包括發包作業及辦理工程契約簽定等施工前置作業及施工，處置場之施工大致分為整地排水、處置坑道與處置窖(包含暫時性的結構物，以輔助處置坑道與處置窖的建造)、接收港及輔助區建築施工等四大部份。

(二)申請核發運轉執照：擬定試運轉計畫，報經主管機關核准進行試運轉。完成試運轉後，向主管機關申請核發運轉執照。

三、處置場運轉階段

第一期將接收核能電廠運轉廢棄物及蘭嶼貯存場之除役廢棄物。第二期接收核一、二及三廠陸續除役拆廠之除役廢棄物，預計最大接收量可達 75 萬桶廢棄物，整體運轉時程暫定為 60 年。

四、處置場封閉監管階段

處置場完成接收低放射性廢棄物後，即依「放射性物料管理法」及其施行細則規定擬訂封閉計畫及監管計畫，經報請主管機關核准後實施封閉與監管作業。封閉作業包括處置場回填封塞等作業及綠化工程等。另依「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」，完成封閉後，應對處置管制地區之穩定性，進行至少 5 年之觀察及監測，並依主管機關核准之監管計畫進行監管。

4.4.1 處置場選址與建造階段作業時程規劃

一、達仁鄉建議候選場址

若達仁鄉建議候選場址通過公投成為候選場址，將開始進行場址調查與基本設計，並提送投資可行性研究報告至經濟部審查，經行政院核定後，方能進行土地取得作業，亦須提送安全分析報告與建造申請，以取得原能會核發之建造許可。期間亦須提交環境影響評估說明書、開發計畫、海岸利用管理說明書、水土保持規劃書、變更「高雄港未來發展及建設計畫(106-110年)」給各主管機關，以取得開發許可。相關執照申請完成後，即可進行

整地排水、處置坑道、港灣及輔助區建築等施工作業，考量到處置場投入運轉之時效性，茲將處置坑道分為 2 期施作。處置場第一期坑道與處置窖完工後，擬定試運轉計畫，報經主管機關核准進行試運轉。完成試運轉後，再向主管機關申請核發運轉執照，開始進入處置場運轉階段。作業流程規劃如圖 4.4.1-1 所示，各期施工內容及範圍如圖 4.4.1-2 所示。

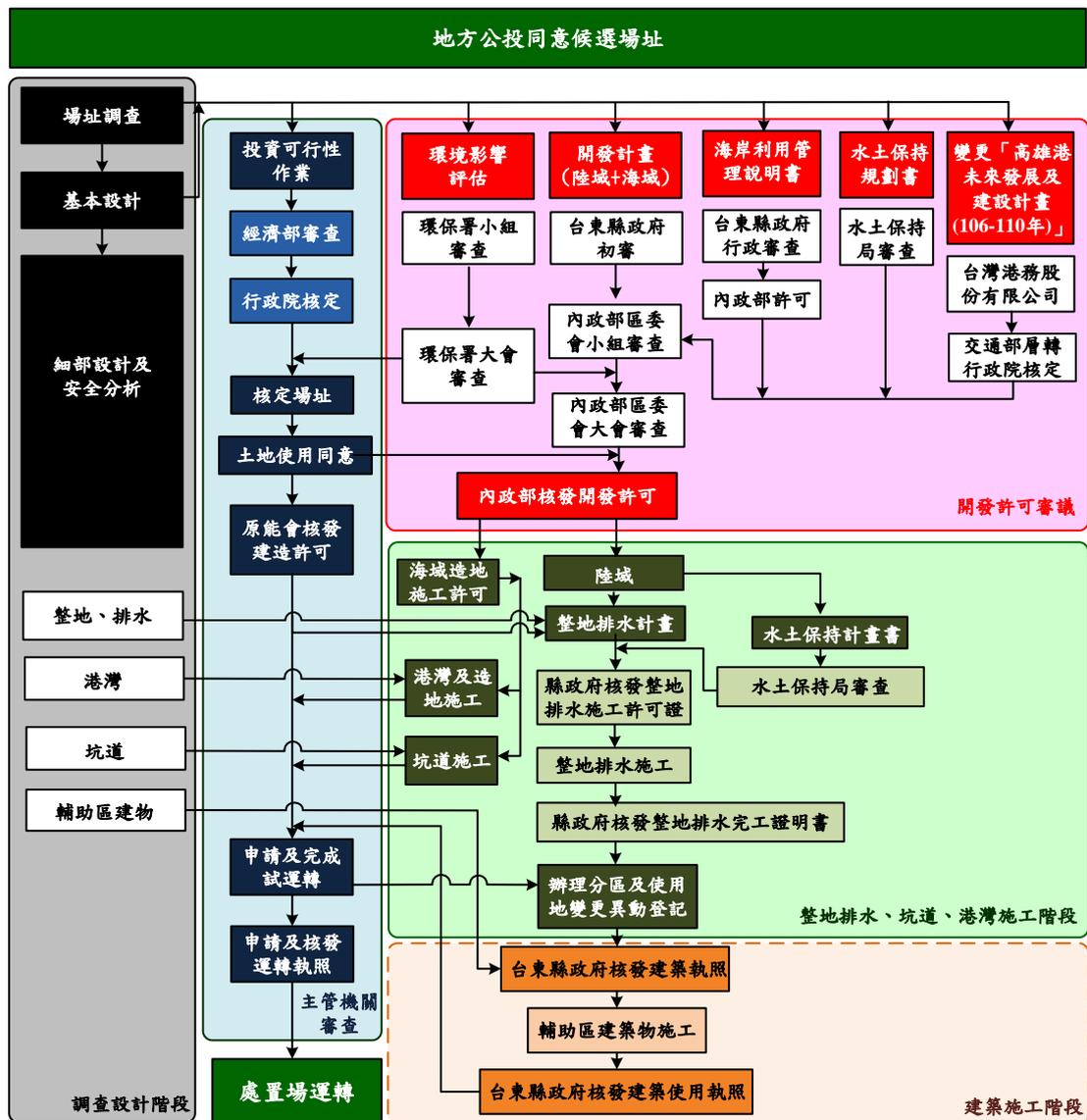


圖 4.4.1-1 台東縣達仁鄉建議候選場址選址及興建作業流程圖

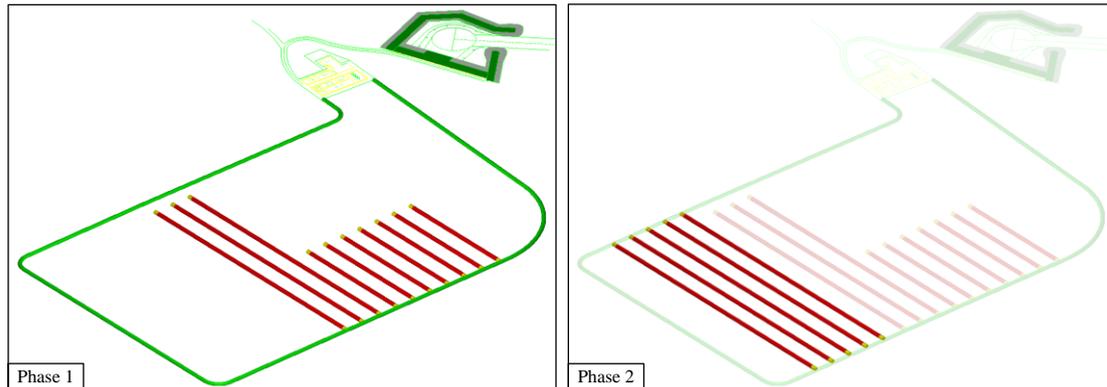


圖 4.4.1-2 達仁鄉建議候選場址各期施工內容及範圍

二、烏坵鄉建議候選場址

若烏坵鄉建議候選場址通過公投成為候選場址，其作業流程大致與達仁鄉建議候選場址近似。辦理流程中，因場址並非屬山坡地，無須辦理水土保持計畫，僅須辦理二階段之排水計畫及相關審查，另開發計畫中應包含海埔新生地造地之相關規劃評估。處置坑道分為 2 期施作，其中第 1 期施工包含所有通行隧道及部分處置坑道；第 2 期之施工內容及範圍主要包括第 1 期施工範圍以外之處置坑道。作業流程規劃如圖 4.4.1-3 所示，各期施工內容及範圍如圖 4.4.1-4 所示。

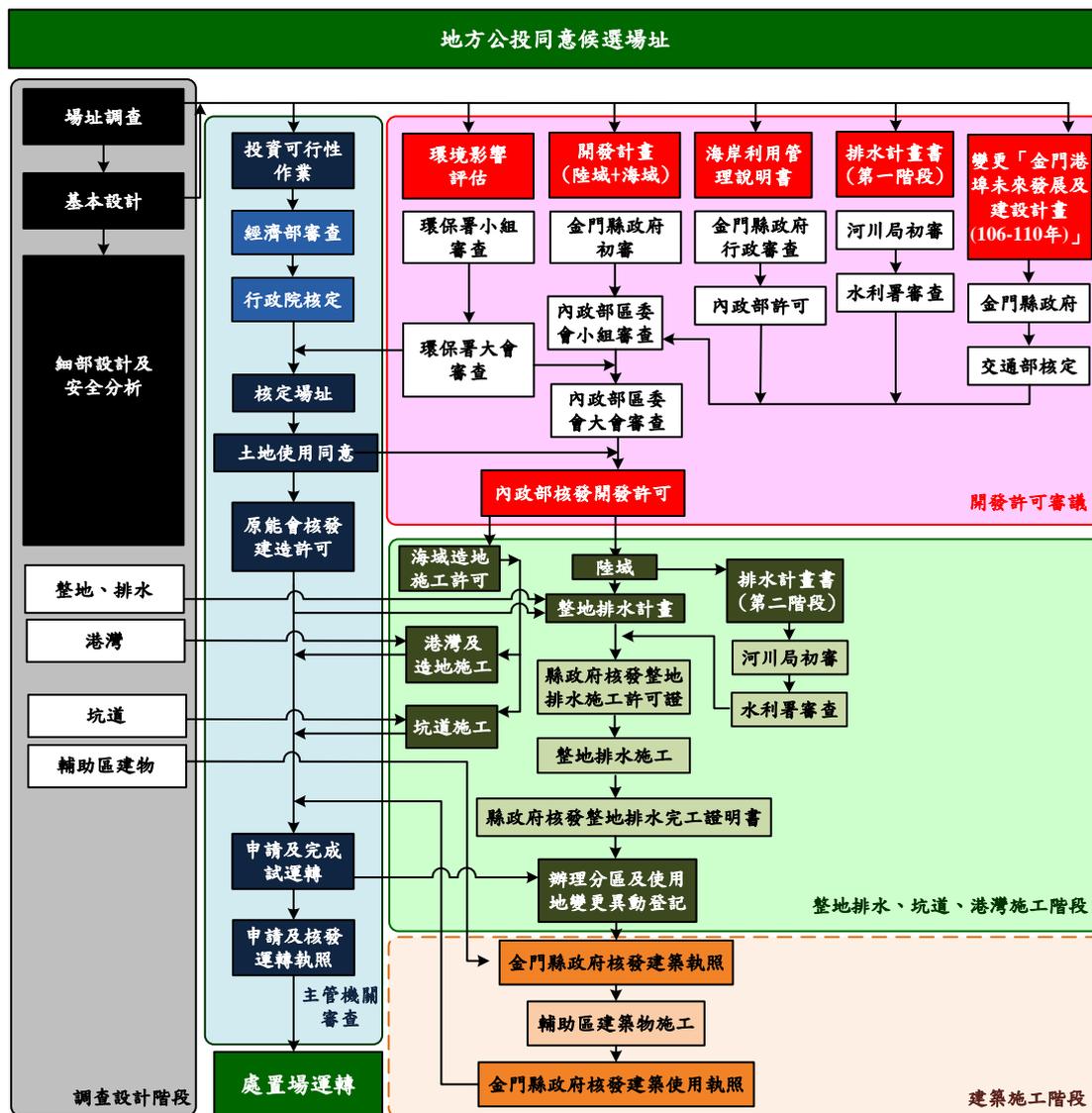


圖 4.4.1-3 金門縣烏坵鄉建議候選場址選址及興建作業流程圖

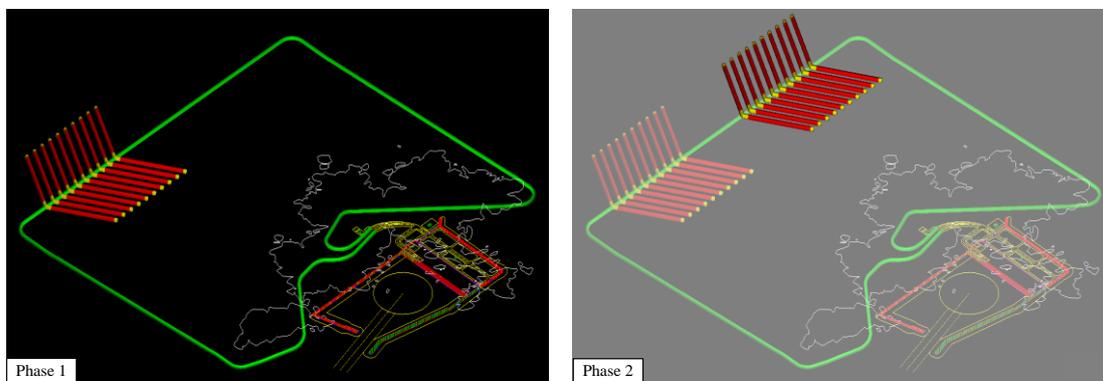


圖 4.4.1-4 烏坵鄉建議候選場址各期施工內容及範圍

4.4.2 設施興建施工規劃

設施興建工程之主體在於處置坑道及接收港灣施工，以下將就此二項主體工程說明其施工規劃與方法。

一、坑道開挖施工

依目前坑道概念設計，通行隧道與處置坑道接近直交，受限於轉彎半徑，初步排除隧道鑽掘機全斷面開挖工法，另依目前掌握之達仁鄉建議候選場址地質資料，岩體單壓強度小於 50 MPa，初步研判坑道開挖應採局部斷面開挖工法，例如懸臂式掘削機 (roadheaders)、開挖機 (excavators) 為主，如遭遇強度較高之岩體，考量採用鑽炸法 (drill and blast) 為輔。烏坵鄉建議候選場址依目前掌握之地質資料，初步研判坑道開挖應採採用鑽炸法為主，如遭遇強度較低或較破碎之岩體，可採局部斷面開挖工法為輔，例如懸臂式掘削機、開挖機等。

坑道開挖過程所使用之支撐系統，主要參考新奧工法之理念進行，將岩石本身視為支撐構件的一部分，亦即充分考量岩石本身的力學性質及變形行為，使其發揮自有的支撐能力，利用應力重新分布之時間依附性 (time-dependent)，尋求二次應力平衡所需的安全又經濟之最小支撐。

施工時將藉由監測以瞭解隧道開挖之地盤變化、變形及支撐狀況等及因施工對周邊環境造成的影響，大致包括以下類別：

- (一)坑道洞內監測：開挖面使用之監測儀器包括收斂觀測點、伸張計等；隧道襯砌使用之監測儀器包括荷重計、計測岩栓、鋼支保及襯砌應變計；處置窖結構監測儀器包括鋼筋應變計、傾斜計等。各監測儀器原則採自動紀錄系統。
- (二)坑道洞外監測：坑道外使用之監測儀器包括沉陷點量測、地中傾度儀、層別沉陷計及傾斜計(針對結構物)；水文狀況監測包括地下水位井及水壓計等。各監測儀器原則採自動紀錄與傳輸系統。

(三)環境監測：著重於坑道施工對環境的影響，主要監測項目包括空氣、水質及噪音等。

二、港灣興建施工

接收港工程之主要工程項目包括防波堤、專用碼頭、消波護岸、港池浚挖及填地等，茲就其施工方法及程序加以說明。

(一)防波堤

接收港外廓防波堤之淺水段及深水段分別規劃為拋石堤與沉箱合成堤。

(二)專用碼頭

達仁鄉建議候選場址接收港專用碼頭為重力式砌方塊結構型式。烏坵鄉建議候選場址接收港因其潮差大且碼頭設計水深較深，地盤承载力良好可採重力式結構，加上材料須由台灣供應，考量縮短施工工期，專用碼頭型式可採重力式沉箱碼頭。

(三)消波護岸

達仁鄉建議候選場址接收港專用碼頭南、北兩側之消波護岸，採拋石堤心外覆消波塊保護，依施工進度分段施築保護，基本上其施工程序與防波堤及專用碼頭同。烏坵鄉建議候選場址接收港專用碼頭南側與淺水段防波堤銜接段，以及北側貯存場下方之護岸為消波式護岸，其結構型式為斜坡式拋石堤，其施工程序同斜坡式拋石堤。

(四)港區浚填

達仁鄉建議候選場址接收港之港池浚挖數量不大，初步規劃以挖斗式挖泥船機，搭配受泥船運至棄方區，部份至港區填築，施工作業程序包括船隻動員、挖區海上標定、挖泥船開挖及裝船、受泥船運棄或港區填築等。烏坵鄉建議候選場址之港池浚挖為其先期工程，除將浚深船舶操航所必須之航道及迴船池外，其浚方可作為填築臨時碼頭後線及上岸道路之材料，以利運輸人員、機具、材料，展開貯存場開挖整地工程施工面，利用整地開

挖石料逐步擴大碼頭後線基地及延長拋石段防波堤，形成具規模之施工場地及遮蔽水域，以便利後續人機料等之補給運輸，使工程能順利進行。

4.4.3 施工安全對策

一般營造工程為確保作業人員與場所之安全，將進行危害控制程序，如安全施工方法、安全裝置、警告裝置、教育訓練等。而針對本設施主體工程(坑道開挖與港灣施工)之安全對策，說明如下。

一、坑道施工之安全對策：

- (一)施工時應採取一切合理適當之措施，以維護工地之安全，若發生任何事故、火災、傷亡等，設施管理單位應立即依相關規範處理（例：事故分類判定程序、事故處理程序等），包含依循回報機制，向所規定的對象呈報（例：特定層級的主管機關、應變機構、應疏散對象等），並作適當善後處理，以確保公共安全及施工安全。
- (二)爆炸物之儲存、運送及使用應依照相關法令規章妥善處理。
- (三)工地應備妥簡易醫療設備，並詳細瞭解工區鄰近醫療資訊。
- (四)不同標別之承包商應互相協調工作，以期工程順利。
- (五)遵照政府頒佈之職業安全衛生法及其施行細則、勞動檢查法及其施行細則等相關法令確實辦理工地安全衛生。
- (六)落實出入管制，未經核准人員不得進入隧道，隧道洞口須設置名牌或出入紀錄，隨時確定停留洞內之人員。洞內正進行中之作業（如鑽孔、開炸、出渣、噴凝土等）應標示於洞口，以維進出人員與機具之安全。
- (七)坑道內應設有適當之通風、照明、消防及有毒氣體偵測等設備，以維護施工人員安全。

(八)嚴格管制坑道內所有電器、切割或電焊火焰、打火機、爆裂物和其他任何引發火源的來源，並應禁止在隧道中吸菸，需另在隧道外規劃吸菸區。

(九)隧道內之機具、設備及施工人員的工作服需採用不會產生靜電之材料製成，以防止因靜電而產生火花，並且工作人員應定時將兩手觸碰開挖岩面以消除靜電；進入隧道車輛應加掛適當之靜電消除裝置。

二、港灣施工溺斃之預防措施：

(一)水上作業勞工有落水之虞時，應穿著救生衣，並設置監視人員及救生設備。

(二)水上動力船隻應設置滅火器及堵漏設備、急救設備，於夜間作業時，應依國際慣例懸掛燈號及有足夠照明。

(三)水上作業時，應先查明鋪設於水下之電纜管路及其他水下障礙物位置，經妥善處理後，再行施工。

(四)有水上、岸上聯合作業情況時，應設置通訊設備或採行具聯絡功能措施，並選任指揮聯絡人員。

4.5 運轉階段作業規劃

4.5.1 運轉基本作業流程

運轉階段是指低放射性廢棄物的運送、接收、檢查與放置等作業。將低放射性廢棄物裝在運輸容器中，自各電廠與相關核能設施，由專用運輸車送達專用運輸船停泊港，再由專用輸送車送到運轉大樓之接收與檢查設施，進行廢棄物盛裝容器檢整。檢整工作主要為廢棄物盛裝容器外觀檢視、容器標示與編號查驗、放射線強度檢測、必要時進行容器表面除銹補漆，廢棄物桶如有破損或不符合規定，則需再送回電廠或其他核能設施處理。經檢查完成之廢棄物盛裝容器，先送至廢棄物盛裝容器暫時貯存區，等

待運出至地下設施進行處置。考量到廢棄物包件的輻射曝露，上述檢整工作應儘量採取遠距操作為原則，其流程詳圖 4.5.1-1。

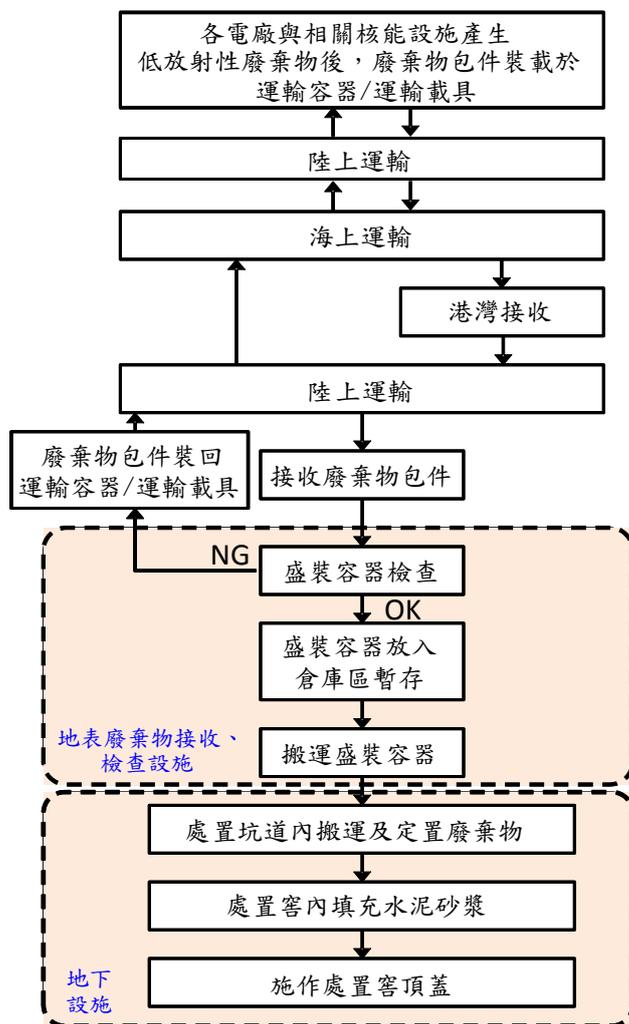
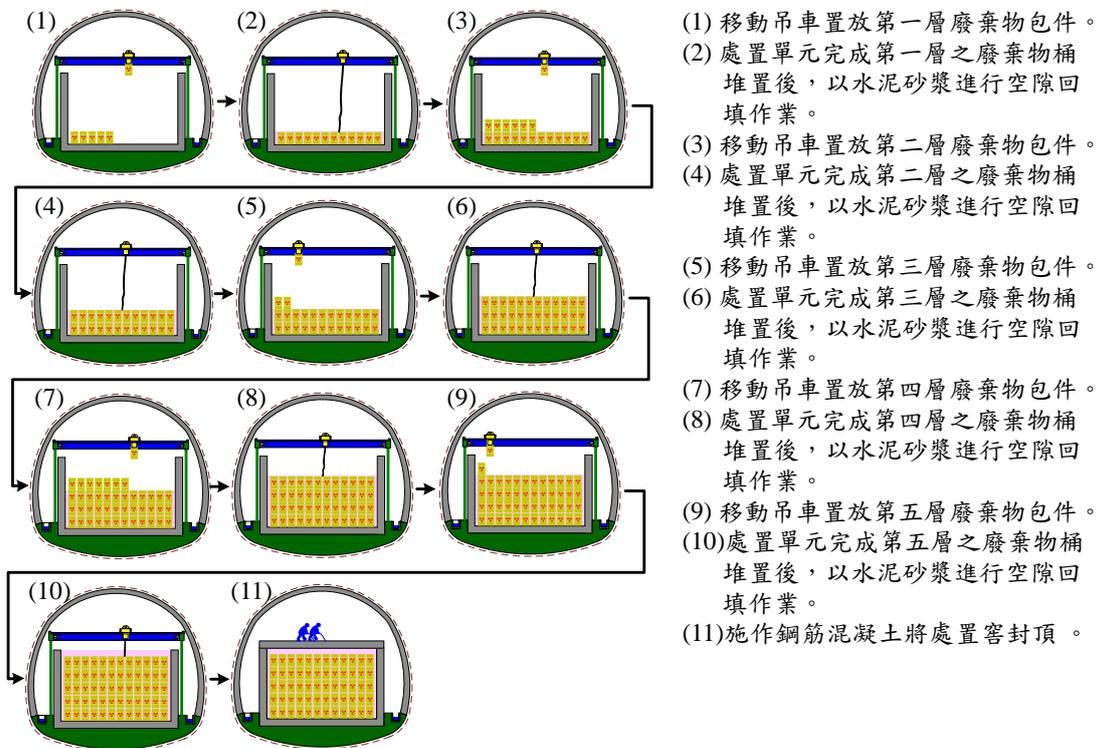


圖 4.5.1-1 運轉期間基本作業流程

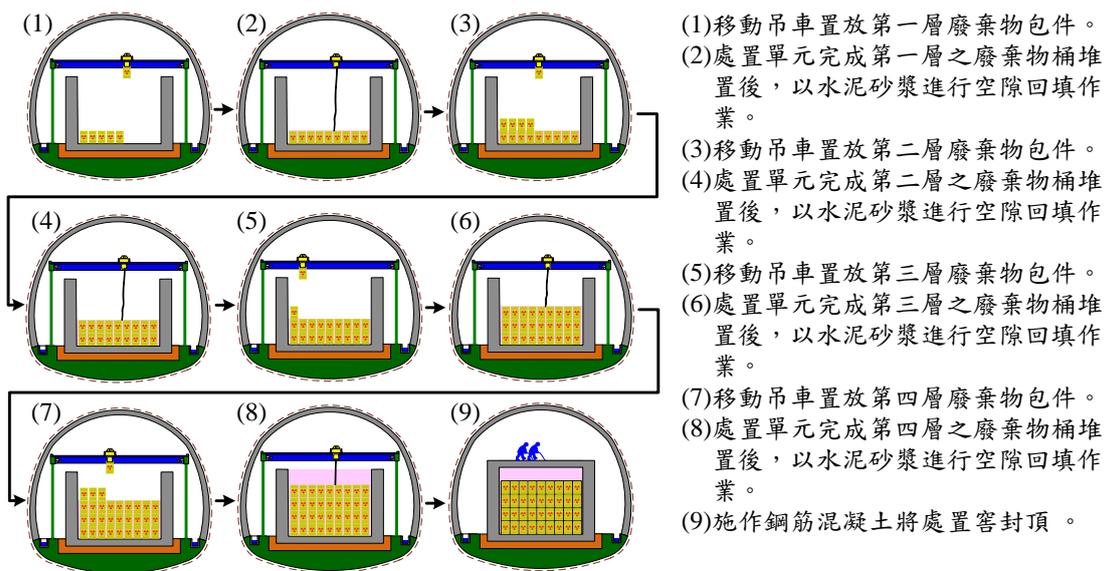
運轉階段於地下設施內之運送、定置、窖內填充及封頂作業，是利用通行隧道的專用運輸車拖運，將廢棄物盛裝容器運到處置坑道之處置單元周邊後，再以軌道吊車搬運至定點進行吊裝置放。每堆疊完一層廢棄物盛裝容器，即進行水泥砂漿澆置，以填充盛裝容器間之孔隙。施工應採用遠距操作的方式，須注意水泥砂漿的流動性、材料離析性、壓送管的設置等施工問題。待處置窖內廢棄物盛裝容器堆疊完成後，再以水泥砂漿填充處置窖內剩餘之空間，並進行處置窖封頂作業。

達仁鄉建議候選場址不同類型處置窖所規劃之作業流程示意如圖 4.5.1-2 所示，烏坵鄉建議候選場址不同類型處置窖所規劃之作業流程示意則如圖 4.5.1-3 所示。



- (1) 移動吊車置放第一層廢棄物包件。
- (2) 處置單元完成第一層之廢棄物桶堆置後，以水泥砂漿進行空隙回填作業。
- (3) 移動吊車置放第二層廢棄物包件。
- (4) 處置單元完成第二層之廢棄物桶堆置後，以水泥砂漿進行空隙回填作業。
- (5) 移動吊車置放第三層廢棄物包件。
- (6) 處置單元完成第三層之廢棄物桶堆置後，以水泥砂漿進行空隙回填作業。
- (7) 移動吊車置放第四層廢棄物包件。
- (8) 處置單元完成第四層之廢棄物桶堆置後，以水泥砂漿進行空隙回填作業。
- (9) 移動吊車置放第五層廢棄物包件。
- (10) 處置單元完成第五層之廢棄物桶堆置後，以水泥砂漿進行空隙回填作業。
- (11) 施作鋼筋混凝土將處置窖封頂。

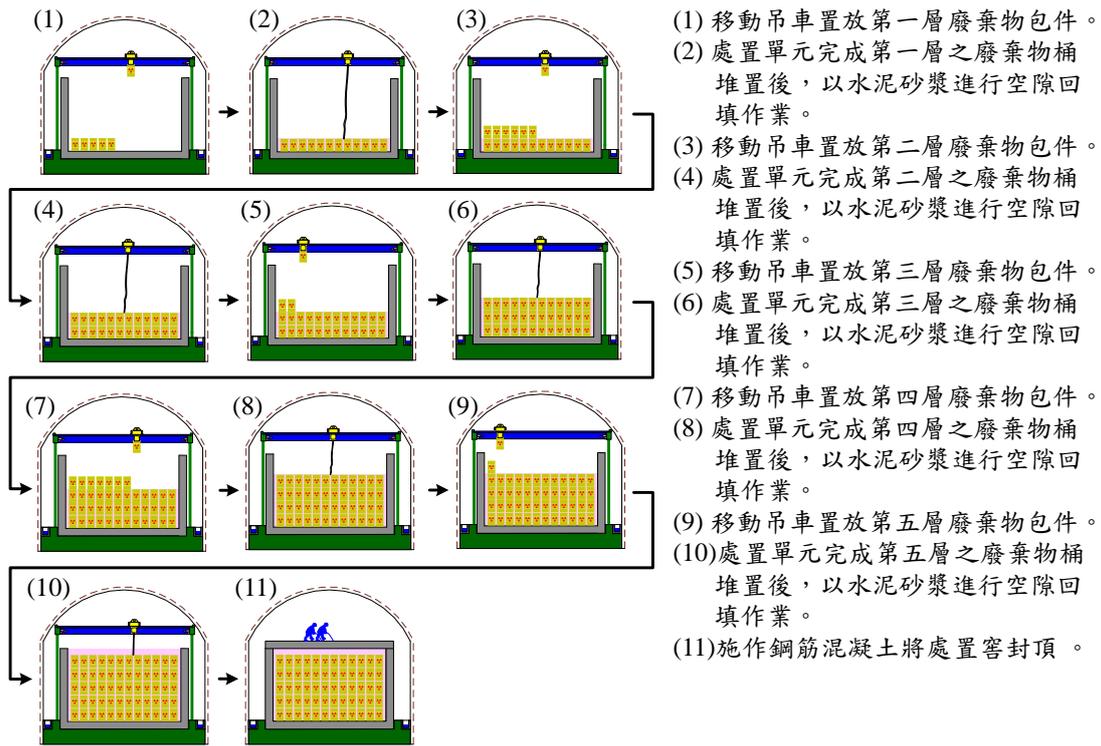
(a) A 類處置坑道



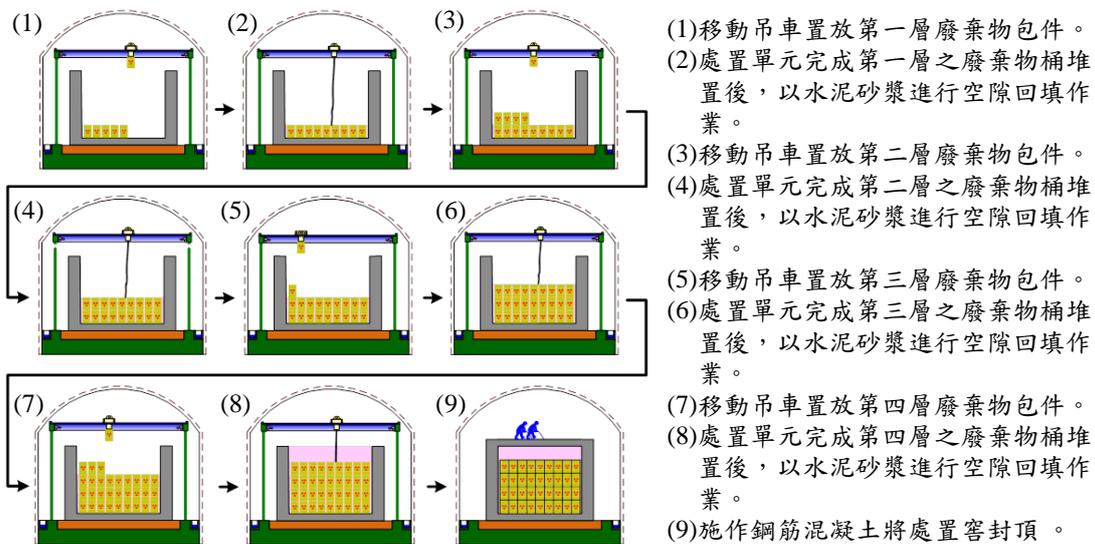
- (1) 移動吊車置放第一層廢棄物包件。
- (2) 處置單元完成第一層之廢棄物桶堆置後，以水泥砂漿進行空隙回填作業。
- (3) 移動吊車置放第二層廢棄物包件。
- (4) 處置單元完成第二層之廢棄物桶堆置後，以水泥砂漿進行空隙回填作業。
- (5) 移動吊車置放第三層廢棄物包件。
- (6) 處置單元完成第三層之廢棄物桶堆置後，以水泥砂漿進行空隙回填作業。
- (7) 移動吊車置放第四層廢棄物包件。
- (8) 處置單元完成第四層之廢棄物桶堆置後，以水泥砂漿進行空隙回填作業。
- (9) 施作鋼筋混凝土將處置窖封頂。

(b) B、C 類處置坑道

圖 4.5.1-2 達仁建議候選場址處置坑道運轉示意



(a) A 類處置坑道



(b) B、C 類處置坑道

圖 4.5.1-3 烏坵建議候選場址處置坑道運轉示意

4.5.2 運轉階段之排水與防滲考量

運轉期間處置坑道採重力排水設計，並視需要於處置窖上方配置臨時擋水遮罩，設置概念如圖 4.5.2-1 所示。將滲入處置坑道之水體，引導至兩邊側溝(縱向坡度為 0.1%)，再經由通行隧道，並藉由抽水設施排至污水處理廠進行處理後再排出。此外，針對處置窖所排出之收集水，應先經過取樣、偵測確定無污染後才能排放。



資料來源：Skogberg, M. and Ingvarsson, R., 2011, p15

圖 4.5.2-1 擋水遮罩設施概念示意

達仁鄉建議候選場址因通行隧道高於隧道洞口，整個處置系統匯集於通行隧道之地下水，應經查核點檢查後將以重力排水方式排出。

烏坵鄉建議候選場址因本場址通行隧道高程低於隧道洞口，整個處置系統匯集於通行隧道之地下水，應經查核點檢查後，以抽水機抽排至地表排放。

4.5.3 輻射屏蔽考量

運轉時之輻射安全遵循輻射防護之法規及劑量限值要求，詳表 4.5.3-1。輻射安全應以合理抑低為原則，儘量就時間、距離、屏蔽三原則降低工作人員及場界外民眾所曝露之劑量。並依據「輻射工作場所管理與場所外環境輻射監測作業準則」與「環境輻射監測規範」規定，在實施環境輻射監測前檢具環境輻射監測計畫，報請主管機關核准後實施。

表 4.5.3-1 輻射防護之法規依據及劑量限值

一、參考法規、資料		
名稱	發行/頒行機關	發行/頒行日期
游離輻射防護安全標準	行政院原子能委員會	2005/12/30
放射性物質安全運送規則	行政院原子能委員會	2007/12/31
低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則	行政院原子能委員會	2012/7/9
二、劑量限值		
對象	要求	
工作人員	連續五年週期之有效劑量不得超過 100 mSv	
工作人員	單一年內之有效劑量不得超過 50 mSv	
場界外民眾	年有效劑量不得超過 0.25 mSv	

針對輻射屏蔽，應考量之項目包括施工及運轉界面、運轉過程以及封閉階段等三個部分。針對運轉過程以及封閉階段，輻射屏蔽之考量將反應在屏蔽厚度設計。對於施工及運轉界面則需考量到人員進出動線以及排水系統之區隔。茲就上述考量說明如下：

一、屏蔽厚度

處置窖為地底處置設施，故僅探討工作人員之直接輻射曝露。依據「游離輻射防護安全標準」第 7 條，工作人員的年有效劑量限值為 50 mSv，五年平均不超過 20 mSv，因此保守以 20 mSv 為參考限值。假定工作人員在此工作區一年工作 2,000 小時(一年

工作 50 週，一週工作 5 天，一天工作 8 小時)，放射性廢棄物源項核種以 Co-60 作為代表核種，核種濃度由放射性廢棄物(55 加侖桶)之表面劑量率推算，評估不同表面劑量率之放射性廢棄物所需的屏蔽厚度，以符合工作人員之輻射劑量限值，MicroShield 分析結果詳表 4.5.3-2。依表 4.5.3-2 之分析結果研判，處置窖已具有足夠之輻射屏蔽設計，且依輻射防護之合理抑低原則，貯存或於處置窖定置放射性廢棄物時，會把高表劑量率的放射性廢棄物堆疊於內圈，藉由廢棄物與廢棄物間之自屏蔽效應，降低直接輻射曝露，達到合理抑低之效。

表 4.5.3-2 放射性廢棄物之表面劑量率及屏蔽厚度關係(處置窖)

放射性廢棄物之表面劑量率(mSv/h)	20	10	2	1	0.5	0.2
屏蔽厚度(cm)	61	55	43	37	32	25

註：屏蔽厚度係以工作人員年劑量不得大於 20 mSv 為考量進行評估。

二、施工與運轉界面之考量

由於處置場址之興建分為二階段。興建第一階段完工後，該區域即開始運轉。然此時第二階段之興建工程尚在進行，為避免施工與運轉之動線重疊，增加運轉風險。因此應於施工及運轉界面，設置臨時阻隔牆，以分離排水系統及行進動線。

三、運轉中之監測

處置場址運轉階段之監測包括坑道內外之穩定監測及環境輻射監測等。其中坑道內外之監測，原則上將沿用施工中之部分監測儀器，可選取施工中監測結果變化較明顯或較具代表性之點位加以沿用。環境輻射監測則包括直接輻射(加馬劑量)、空氣(空氣微粒、空氣碘及落塵等)、水質(海水、河水、地下水及雨水等)、生物(植生、農作物、淡水生物及海水生物等)、陸地土壤及海底沉積物等。

4.6 封閉階段作業規劃

處置場接收低放射性廢棄物達到預定處置容量後，即依「放射性物料管理法」及其施行細則規定擬訂封閉計畫及監管計畫，經報請主管機關核准後實施封閉與監管作業。封閉之概念係為了確保工程障壁能確實發揮遲滯核種遷移的功能，避免處置場封閉後形成核種遷移的快速路徑，以及減緩工程障壁的功能退化。

封閉作業包括處置場回填封塞等作業及綠化工程等，預定工作期程為 32~36 個月。低放處置設施完成封閉後，應對處置管制地區之穩定性，進行至少 5 年之觀察及監測，並依主管機關核准之監管計畫執行監管。監管計畫應載明之事項包括：執行單位之組織、場址保安作業、環境輻射監測作業、品質保證方案、紀錄及檔案管理、其他經主管機關指定之事項。

處置場封閉階段之監測，因坑道內已進行回填，原則上坑道內不進行監測；坑道外之穩定監測，將沿用運轉階段之部分監測儀器，可選取運轉階段監測結果變化較明顯或較具代表性之點位加以沿用。環境輻射監測則包括直接輻射(加馬劑量)、空氣(空氣微粒、空氣碘及落塵等)、水質(海水、河水、地下水及雨水等)、生物(植生、農作物、淡水生物及海水生物等)、陸地土壤及海底沉積物等。

處置坑道進行封閉時，於處置窖兩側及頂部以澆置混凝土方式施工，澆置時將分區塊進行，每一區塊之長度約 25 m，高度約 2.5 至 3.0 m。針對 B、C 類處置坑道，澆置前須以系統模板預留緊接處置窖壁體之緩衝材料之空間，待拆模後再放置緩衝材料，依此順序進行至回填完成。

以下將針對台東縣達仁鄉及金門縣烏坵鄉 2 處建議候選場址之封閉作業進行說明。

一、達仁鄉建議候選場址之封閉階段作業規劃

根據暫擬之施工程序進行封閉期程估算，考量模板拆裝、緩衝材料排放等施工程序，以澆置速率 250 m³/day 加以估算。通行

隧道則以夯實碎石等高透水性材料予以前封閉，考量材料運送與壓實能量，以壓實速率 $450 \text{ m}^3/\text{day}$ 加以估算。依據概算之處置坑道與通行隧道之回填量體及施工速率加以推算，處置坑道回填約需 20.1 月；通行隧道之回填約需 12.4 月，總計約 32.5 月。

二、烏坵鄉建議候選場址之封閉階段作業規劃

考量模板拆裝、緩衝材料排放等施工程序，以澆置速率 $250 \text{ m}^3/\text{day}$ 加以估算。通行隧道則以夯實土料或澆置法予以封閉，考量材料運送與壓實能量或澆置速率，以澆置速率 $300 \text{ m}^3/\text{day}$ 加以估算。依據概算之處置坑道與通行隧道之回填量體及施工速率加以推算，處置坑道回填約需 15.3 月；通行隧道之回填約需 19.9 月，總計約 35.2 月。

4.7 處置場費用初估

一、達仁鄉建議候選場址之費用估算

達仁鄉建議候選場址第 1 期興建費用初步估算為 15,665,909(仟元)，其中包括施工費為 11,466,776(仟元)；勞工安全衛生及環境保護費 917,342(仟元)；施工管理費 1,238,412(仟元)及預備金 2,043,379(仟元)。第 2 期興建費用初步估算為 5,904,719(仟元)，其中包括施工費 4,322,002(仟元)；勞工安全衛生及環境保護費 345,760(仟元)；施工管理費 466,776(仟元)及預備金 770,181(仟元)。

二、烏坵鄉建議候選場址之費用估算

烏坵鄉建議候選場址第 1 期興建費用初步估算為 20,634,864(仟元)，其中包括施工費為 15,103,838(仟元)；勞工安全衛生及環境保護費 1,208,307(仟元)；施工管理費 1,631,215(仟元)及預備金 2,691,504(仟元)。第 2 期興建費用初步估算為 6,562,052(仟元)，其中包括施工費 4,803,142(仟元)；勞工安全衛生

及環境保護費 384,251(仟元)；施工管理費 518,739(仟元)及預備金 855,920(仟元)。

第五章 最終處置安全分析模擬技術

5.1 建議候選場址之安全分析模擬技術

5.1.1 安全分析模擬技術之基本假設

- 一、在保守考量的前提下，分析時採用的低放射性廢棄物數量為處置場的容納上限。亦即達仁鄉建議候選場址為 A 類低放射性廢棄物 70.2 萬桶，B、C 類低放射性廢棄物 8.8 萬桶，共 79 萬桶。烏坵鄉建議候選場址為 A 類低放射性廢棄物 71.4 萬桶，B、C 類低放射性廢棄物 7.6 萬桶，共 79 萬桶。
- 二、安全評估僅分析處置設施封閉後之長期安全。
- 三、安全評估僅分析對人類的影響，開發行為對環境影響屬環境影響評估分析範疇。
- 四、僅針對放射性影響進行評估，則於依廢棄物接收標準已排除化學或生物毒性影響之可能性。
- 五、基於土地利用現況與社會發展趨勢，研判此地區將來不可能發展成為都市或工業區。
 - (一)台東縣達仁鄉建議候選場址未來之民眾生活形態以小型農業或魚蝦養殖為主。
 - (二)金門縣烏坵鄉建議候選場址未來之民眾生活形態以漁業及採集海菜為主。
 - (三)不考量當地居民及社會結構轉變。
- 六、不考慮封閉後的處置設施可恢復性與補救措施。

5.1.2 低放射性廢棄物描述

安全評估將假設處置設施封閉後，除活化金屬以外之放射性廢棄物所含核種瞬間釋出，故廢棄物體之力學特性並非長期安全主要考量。達仁鄉建議候選場址的處置容量上限為 A 類低放射性

廢棄物 70.2 萬桶，B、C 類低放射性廢棄物 8.8 萬桶。烏坵鄉建議候選場址的處置容量上限為 A 類低放射性廢棄物 71.4 萬桶，B、C 類低放射性廢棄物 7.6 萬桶。依其分類保守考量其封閉後之初始活度如表 5.1.2-1 所列。

表 5.1.2-1 A 類與 B、C 類低放廢棄物之核種濃度初始值設定表

核種	濃度值(TBq/m ³)		
	A 類低放射性廢棄物	B、C 類低放射性廢棄物	
C-14	0.03	0.3	
C-14 (活化金屬內)	0.3	3	
Ni-59 (活化金屬內)	0.81	8.1	
Nb-94 (活化金屬內)	0.00074	0.0074	
Tc-99	0.011	0.11	
I-129	0.0003	0.003	
TRU (半化期大於 5 年之超鈾阿伐放射核種)	以 Pu-238 為代表核種	0.37 kBq/g	3.7 kBq/g
Pu-241	13 kBq/g	130 kBq/g	
Cm-242	74 kBq/g	740 kBq/g	
H-3	1.5	9.9	
Co-60	26	270.4	
Ni-63	0.13	26	
Ni-63 (活化金屬內)	1.3	260	
Sr-90	0.0015	260	
Cs-137	0.037	170	

5.1.3 處置系統描述

一、達仁鄉建議候選場址

達仁鄉建議候選場址之處置母岩環境屬於潮州層，場址尺度岩性以硬頁岩為主。處置設施之地理位置及處置設施平面布置及分區處置概念詳見圖 5.1.3-1。本設計係以坑道式之多重障壁概念進行設計，其處置深度超過 62.2 m，整個設施預計容納國內所有 A、B 及 C 類低放射性廢棄物。處置坑道共 15 條，其中 2 條用以

處置 B、C 類低放射性廢棄物，其餘坑道則用以處置 A 類低放射性廢棄物。

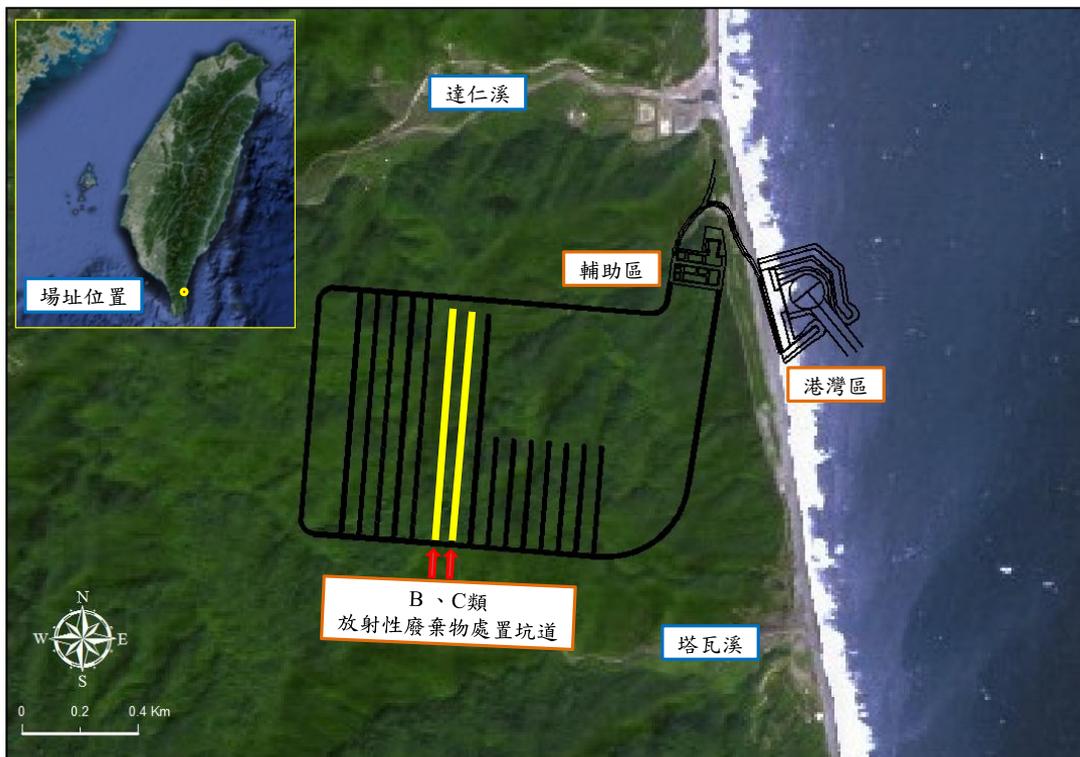


圖 5.1.3-1 台東縣達仁鄉建議候選場址地理位置圖

二、烏坵鄉建議候選場址

烏坵鄉建議候選場址之場址岩性以基性的輝長岩以及酸性的花崗岩為主，岩體內節理發達，但無顯著的斷層構造。整個處置設施之地理位置、處置設施平面布置及分區處置概念詳見圖 5.1.3-2。本設計係以坑道式之多重障壁概念進行設計，處置設施位於海床下 58 m 處，整個設施預計容納國內所有 A、B 及 C 類低放射性廢棄物。處置坑道共 40 條，其中 6 條用以處置 B、C 類低放射性廢棄物，其餘坑道則用以處置 A 類低放射性廢棄物。

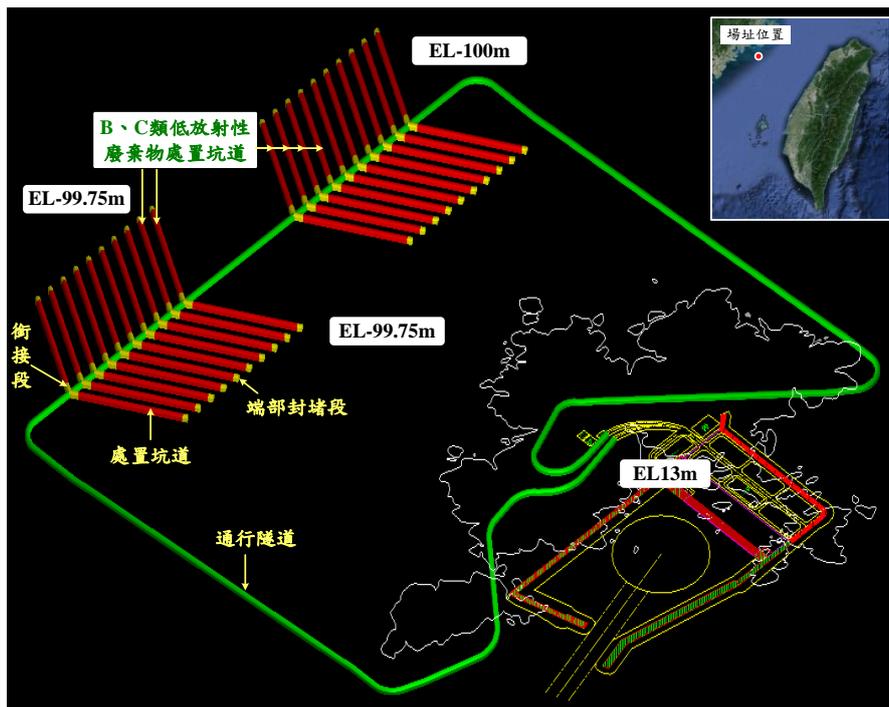


圖 5.1.3-2 金門縣烏坵鄉建議候選場址地理位置圖

5.2 建議候選場址設計情節之安全分析模擬技術

情節設定為安全分析之考量要項。參考 IAEA(2014)，低放處置設施安全分析應考量之時間尺度長達數千年，甚至長達數萬年。因此在處置設施演化之考量上，需要進行情節分析，以評估未來演化之不確定性。對此，需先就未來可能之演化，以及處置系統各單元可能面臨之事件及作用，進行適度考量。爾後再進行 FEP 表單分析，選定設計情節，再依交互作用矩陣分析，識別各個特徵、事件、作用，並量化安全評估之分析數據。最後則是依建置之模型進行安全分析，並針對不確定性參數進行敏感度及不確定性分析。

5.2.1 參考演化發展

針對參考演化之描述，將先參考過去氣候演化以及溫室效應之影響，綜合推估未來氣候之演化。氣候演化所考量條件，包括冰期循環因全球暖化而推遲至 100,000 年後，以及處置設施封閉後馬上進入冰期循環。

一、參考演化一(冰期循環推遲 100,000 年)

(一)氣候演化

根據 IPCC(2013, p132)評估未來高碳排放量的趨勢，瑞典 SKB(2014a, p143)依此結論推估處置設施(SFR)所在地 Forsmark 將因大氣中二氧化碳濃度無法有效降低，冰期循環推遲至十萬年後才開始，據此推測參考演化一情境，在 100,000 年內皆不會進入冰期循環。

在此氣候環境演化狀況下，受溫室氣體影響其海水位與降雨量應呈上升趨勢。惟經分析後，此海水面上升程度對於達仁鄉建議候選場址與烏坵鄉建議候選場址之地下水流場影響並不明顯，故均假設海水位維持現況平均潮位高程(達仁鄉建議候選場址為 EL0.193 m；烏坵鄉建議候選場址為 EL0 m)。

此外，對於 2 處建議候選場址之降雨量採年降雨量增加 10% 之設定，代表受溫室氣體影響下之降雨量變化。

(二)地表生態系統演化

在此氣候演化狀況下，氣候與海岸線並未劇烈變化，推估 2 處建議候選場址之地表生態系統不會明顯變化。

(三)力學作用演化

1.達仁鄉建議候選場址

台灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊的聚合帶，受到菲律賓板塊持續以 8 至 9 cm/yr 的速率向西北方推擠(Yu et al., 1997, p41~p59)，造成北北西向的呂宋島弧與東北向的歐亞大陸邊緣產生斜碰撞。

2. 烏坵鄉建議候選場址

金門縣烏坵鄉建議候選場址自第三紀晚期至今，區域應力方向大致維持不變，主應力方向為西北西向，應力軸傾角平緩，顯然此一應力場與太平洋板塊向歐亞板塊的俯衝有關(工研院能資所，2000a，p3-3，該報告引用黃玉昆等人，1992)，因此，處置場封閉後仍有可能受到構造運動影響。

(四) 水文地質演化

考量海水面高程維持現況，場址尺度地下水流場邊界範圍內並無活動斷層，以及採用抬升與剝蝕率設定之分析，2 處建議候選場址所在區域之地形地貌並無明顯改變。預期場址之水文地質特性僅受降雨量增加而使其地下水水力梯度微幅增加，其餘水文地質條件則無明顯變化。

(五) 地球化學演化

處置母岩現應屬還原狀態，當坑道開挖後，空氣接觸被開挖之處置母岩後，隨著氧氣擴散與溶氧水體移動，皆會使氧化範圍擴大。當處置設施回填後，因圍岩地下水補注之再飽和過程，以及鐵製材料腐蝕作用，皆會使處置設施周邊處置母岩再回復為還原狀態。根據 SKB(2014a, p159)之推估，SFR 處置場在封閉後 5 年，處置場周圍會從氧化態轉變為還原態。

處置場地球化學條件之改變，主要發生於建造至封閉後 1,000 年內期間。當處置設施回填後，因地下水入滲而再飽和，使處置設施周邊岩體再回復為還原狀態，故在封閉後 1,000 年至 10,000 年期間，處置場周圍之地球化學條件將維持還原態。

此外，在此氣候演化條件下，烏坵鄉建議候選場址之處置設施將保持位於海床下之狀態，因此處置設施附近之地下水均屬海水。

(六)工程障壁演化

工程障壁的演化，需考量處置設施所在岩體、土壤和地下水中所含之硫酸鹽、氯離子和鎂離子將與混凝土材料交互反應，以及混凝土溶出之失鈣效應的長期影響，導致膨潤土障壁可能因而鈣型化，使其遲滯功能受到影響。此外，因混凝土材料所造成之高 pH 值環境亦將使膨潤土中的蒙脫石溶解，而影響其回脹性能。

二、參考演化二(處置設施封閉後即進入冰期循環)

(一)氣候演化

本情節假設溫室效應影響有限，自處置設施封閉後即進入冰期循環，推估海水面將在設施封閉後持續下降。對於達仁鄉建議候選場址，海水面將於封閉後 5,000 年降至 EL-61 m 後再回升；對於烏坵鄉建議候選場址，海水面將於封閉後 1,000 年時約下降至 EL-10 m 左右，至封閉後 5,000 年時降至 EL-61 m 後再回升。

2 處建議候選場址之降雨量特性假設維持與現況相同。

(二)地表生態系統演化

進入冰期循環後，達仁鄉建議候選場址的東部海岸線受海水面下降影響，將會往東側移動，惟處置場東部海底地形較為陡峭，故因海平面下降而出露之地表面積不大，對地表生態系統影響有限。烏坵鄉建議候選場址之處置設施封閉後 1,000 年至 10,000 年，因海平面將下降至 EL-61 m，處置設施上方海床因缺少海水披覆而出露，進而改變當地的植被與生態系統，但仍屬亞熱帶生態系統，生物圈活動也將從島嶼型態改為陸域型態。因此推估 2 處建議候選場址之產業發展仍以一級產業為主。

(三)力學作用演化

相關說明參見參考演化一之論述。

(四)水文地質演化

考量海水面將在處置設施封閉後持續下降，因此，設施所在區域之地下水水力梯度受到海水面下降之影響，將使地下水流速

持續增加，至封閉後 5,000 年達到最大，而後再隨著海面上升而使地下水流速趨緩。

針對烏坵鄉建議候選場址，需特別注意隨著海水面下降，處置設施周圍地下水流場將由具海淡水交界且覆蓋海水之緩慢流場，逐漸轉變為由海水位邊界與降雨入滲控制，地下水流速相對較快之地下水流場。

(五)地球化學演化

相關說明參見參考演化一之論述。惟針對烏坵鄉建議候選場址，當該場址之處置設施上方所覆蓋之海水退去後，設施所在區域之地下水將由海水轉為淡水。

(六)工程障壁演化

由於達仁鄉建議候選場址位於熱帶地區，烏坵鄉建議候選場址位於亞熱帶地區，故進入冰期循環後之環境仍與現況相似，亦不會發生永凍土現象。相關說明參見參考演化一之論述。

5.2.2 發展設計情節

一、參考演化之選擇

根據 IPCC(2013, p132)評估未來高碳排放量的趨勢，故就各參考演化中，以參考演化一為最可能發生之演化條件。因此在設計情節中，將採用參考演化一作為情節設定之參考。

二、FEP 表單篩選

安全分析採用 IAEA(2004a, p1~p413)針對近地表處置設施所發展之通用 FEP 表單，依據前述參考演化一之氣候、地表生態系統、力學作用、水文地質、地球化學與工程障壁演化推測，以及處置場址特性及概念設計，進行 FEP 篩選。

三、交互作用矩陣分析

參考 IAEA-ISAM 建議之交互矩陣方法進行系統性分析。首先依據傳輸形態與系統特性訂定交互矩陣主對角線元素，再依系統各元素間之傳輸特性訂定非對角線元素，藉此完整描繪出分析情節中需考量之交互作用。

四、建置設計情節

情節發展需考量地質及氣候之作用與影響、處置設施的長期演化以及未來人類的活動，以未來較可能發生之條件進行假設，設計情節所考量為參考演化一(冰期循環推遲 100,000 年)。針對設計情節之描述，以下將先就外部條件包括氣候演化、海水位變化及地層抬升及地表侵蝕進行說明，然後再分別描述地質圈、處置設施及地表生態系統。

(一)外部條件

1.氣候演化

參考演化一之氣候演化，預期冰期循環受溫室氣體影響，將推遲至處置設施封閉後 100,000 年後才開始。亦即在未來 100,000 年內氣候形態大致與現在相似，但受溫室氣體影響推估降雨量可能增加 10%。

2.海水位變化

在本設計情節下，依參考演化一之氣候演化推測，海水面上升程度對於 2 處建議候選場址之地下水流場影響並不明顯，故海水位均假設維持於現況平均潮位高程(達仁鄉建議候選場址為 EL0.193 m；烏坵鄉建議候選場址為 EL0 m)。

3.地層抬升及地表侵蝕

依據場址特徵化成果，達仁鄉建議候選場址假設地層平均抬升率為 2.6 mm/yr，平均剝蝕率為 2.5 mm/yr；烏坵鄉建議候選場址，假設地層平均抬升率為 0.48 mm/yr，平均剝蝕率為 0.1

mm/yr。目前依資料精度採用平均抬升與剝蝕率方式推估，故地表地貌特徵將與現況相同。

(二)地質圈

1.地下水流場特性

由於地形、地貌與海平面高程均與現況相似，僅年平均降雨量提高 10%，故推測於分析期間內之受補注量增加影響，地下水流速將會微幅提升，其餘地下水流場特性如：流向與流徑等，將與初始狀態相似。

針對烏坵鄉建議候選場址，處置設施所在位置地下水流場受海水位控制，故地下水流場特性應與初始狀態相似。

2.地球化學

依參考演化一之地球化學演化推測均屬還原狀態。因此，在整個分析之時間尺度下，地質圈之地球化學條件將維持與初始狀態相近。

3.力學作用

本場址為坑道式處置，由於選址時已避開活動斷層直接影響區域，故推測地震對於地質圈之影響，主要位於分析邊界以外之區域。在工程障壁具有良好施工品質的前提下，地震對於工程障壁系統之影響有限，故於設計情節中不考慮地震對於地質圈之影響。

4.核種傳輸

核種傳輸過程將考量之機制包括核種衰變，以及平流、延散、擴散及吸附等，影響空間中核種濃度分布之機制。

(三)處置設施

針對處置設施內之水文條件，以及工程障壁在設計情節下之演化說明如下：

1. 水文條件

處置設施周圍之地下水流場與初始狀態相似，處置設施將採回填方式封閉，受設施回填範圍之水力傳導特性設計影響，推估處置設施之地下水流場特性於分析期間內，仍將與初始狀態相似。

2. 工程障壁

工程障壁材料可概分為混凝土材料及膨潤土材料，茲就其劣化考量說明如下：

- (1) 混凝土材料劣化將產生裂縫及增加孔隙，進而提高水力傳導度、孔隙率及擴散係數，而吸附功能仍可長時間維持。
- (2) 鈉型膨潤土會因為其周圍混凝土材料之溶出失鈣現象而導致蒙脫石溶解並鈣型化，使其滲透係數增加且降低其回脹性，進而降低其遲滯功能。

3. 核種傳輸考量

核種傳輸過程將考量之機制包括核種衰變、非金屬放射性廢棄物溶解度、金屬放射性廢棄物釋出率、平流、延散、擴散及吸附等，影響空間中核種濃度分布之機制。

(四) 地表生態系統

在本設計情節下，處置場封閉後 100,000 年內之氣候形態與現況差異不大，推估未來地表生態系統與現況相差不大，產業發展多以一級產業為主。圖 5.2.2-1 與圖 5.2.2-2 分別為達仁鄉建議候選場址(陸域生活型態)與烏坵鄉建議候選場址(島嶼生活型態)之核種傳輸示意圖。



圖 5.2.2-1 陸域生活型態之生物圈核種傳輸示意

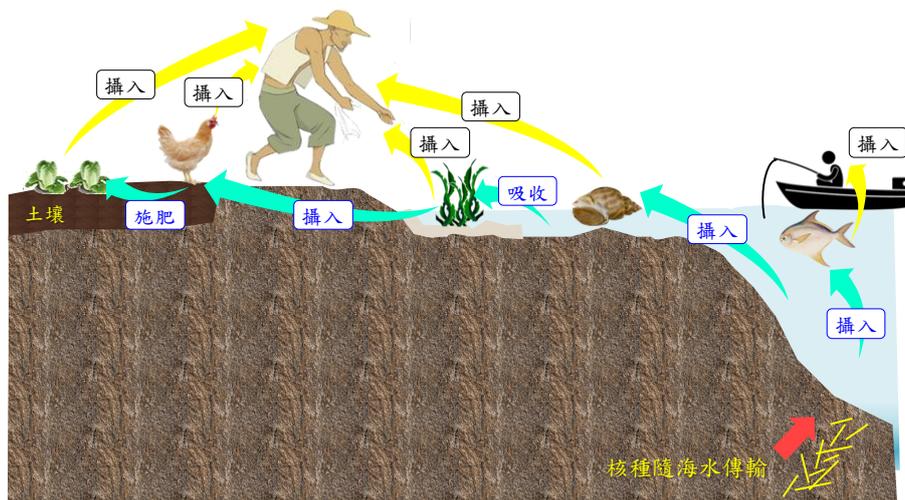


圖 5.2.2-2 島嶼型地表生態系統核種傳輸示意

5.2.3 分析模式與參數設定

本評估擬利用 GoldSim 軟體進行此場址的安全評估模擬。該程式為 IAEA 所推薦之整合性評估程式，其評估結果在國際上深具公信力，已廣泛運用於美國、日本、法國、西班牙、匈牙利等國。圖 5.2.3-1 與圖 5.2.3-2 為處置場址之整體分析概念模擬模型，圖 5.2.3-3 為 GoldSim 處置場之數值分析模型。

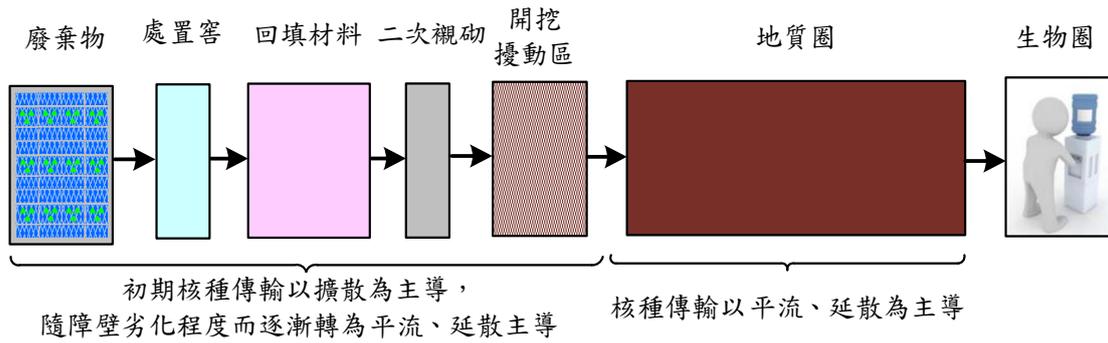


圖 5.2.3-1 A 類處置坑道放射性核種液體傳輸外釋途徑概念圖

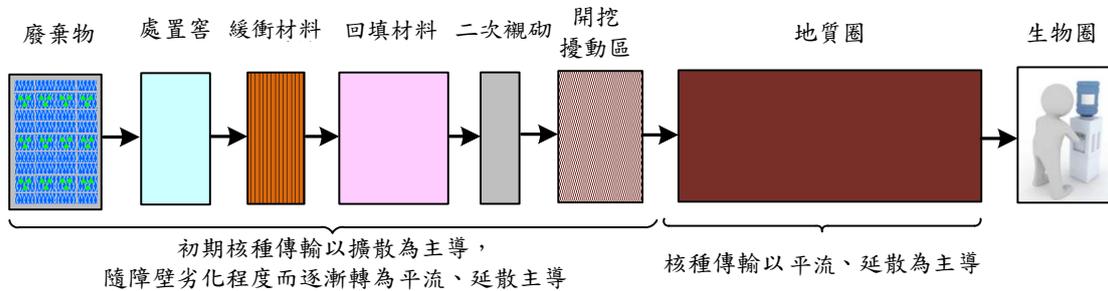


圖 5.2.3-2 B、C 類處置坑道放射性核種液體傳輸外釋途徑概念圖

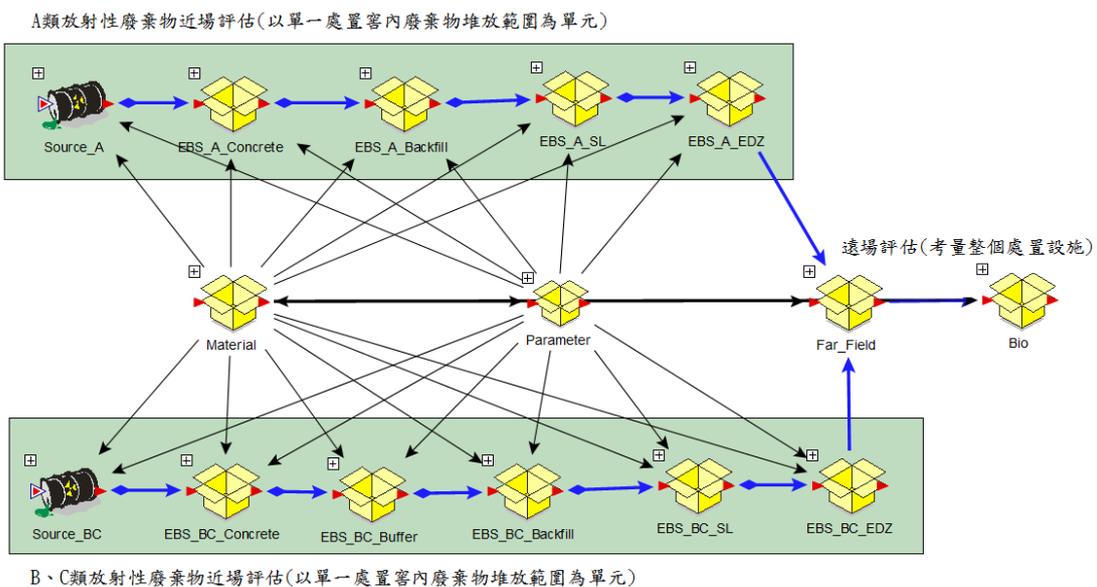


圖 5.2.3-3 GoldSim 整體評估數值分析模型

一、廢棄物

安全評估假設 A 類、B 類和 C 類廢棄物皆以 55 加侖桶盛裝，每個 55 加侖桶內含之母核種濃度詳表 5.1.2-1。

分析的起點設定為處置場封閉後，假設此時廢棄物體內孔隙充滿水，55 加侖桶內未利用之空間亦充滿水。非金屬廢棄物內之核種完全溶解於孔隙水中，金屬廢棄物依 JAEA(2013, p48)建議之金屬釋出率進行設定。

本源項評估係以處置窖內堆放廢棄物之範圍為分析單元，因此對於 A 類低放射性廢棄物，所考量之廢棄物為 1,500 桶 55 加侖桶；對於 B、C 類低放射性廢棄物，所考量之廢棄物為 900 桶 55 加侖桶。

二、處置窖

分析時以一個處置窖內堆放廢棄物之範圍為分析單元，對於平流傳輸之截面積以處置窖之縱剖面為考量，擴散之面積則以處置窖之周長面積為考量。

地下水中的氯離子將會藉由擴散作用入侵至混凝土鋼筋表面，並破壞鋼筋保護膜造成鋼筋腐蝕，羅欣蕙(2011, p87~p92)以海水中的氯離子濃度進行鋼筋腐蝕推估，其結果顯示，當處置場封閉後約 300 年，混凝土中鋼筋將會因氯離子影響而開始腐蝕。因此，隨著處置窖劣化程度的發展，核種傳輸之機制由擴散逐漸轉變為平流與延散效應。此外，參考 IAEA 的分析案例(IAEA, 2004b, p292)，設定工程障壁之吸附功能將在分析時間超過 500 年後，折減至原設定之 10%。

綜合考量上述工程障壁材料的劣化評估，以及處置場概念設計、材料特性等因子後，參考 SKB 於 2014 年發行之 R14-14 報告(SKB, 2014b, p27)，以調整處置窖水力傳導係數之方式，再配合不同時期下之流場條件，評估處置窖在不同劣化條件下的滲入流量。

三、緩衝材料

針對緩衝材料(膨潤土)劣化之考量，本研究將參考 SKB 於 2014 年發行之 R14-14 報告(SK B, 2014b, p27)，以調整緩衝材料水力傳導係數之方式，再配合不同時期下之流場條件，評估緩衝材料在不同劣化條件下的滲入流量。

四、回填材料

針對回填材料(混凝土)劣化之考量，本研究將參考 SKB 於 2014 年發行之 R14-14 報告(SK B, 2014b, p27)，以調整回填材料水力傳導係數之方式，再配合不同時期下之流場條件，評估回填材料在不同劣化條件下的滲入流量。

五、二次襯砌

二次襯砌以鋼筋混凝土材料為主要考量，考量材料隨著時間劣化等因子後，設定二次襯砌在不同時間下，因劣化造成水力傳導係數改變之比例。而烏坵鄉建議候選場址之處置坑道設計並未使用二次襯砌，故烏坵鄉建議候選場址不考慮此因素。

六、開挖擾動區

坑道斷面開挖後，開挖擾動區會以混凝土材料進行固結灌漿。針對開挖擾動區劣化之考量，本研究將參考 SKB 於 2014 年發行之 R14-14 報告(SK B, 2014b, p27)，以調整開挖擾動區水力傳導係數之方式，再配合不同時期下之流場條件，評估開挖擾動區在不同劣化條件下的滲入流量。

七、地質圈

外釋核種離開工程障壁(近場)後即進入遠場地質圈，並在地質圈中受到地下水流場之驅動而進入生物圈，以下將分別對 2 處建議候選場址進行說明。

(一)達仁鄉建議候選場址

圖 5.2.3-4 為針對達仁鄉建議候選場址設定之粒子追蹤監測點以及流出位置說明。圖中每個監測點間隔 30 m 至 80 m。圖中

紅色圓點為流往達仁溪流域之區域；綠色圓點為流往東側太平洋之區域；藍色圓點則是流往塔瓦溪流域之區域。進行遠場評估時，將依各出流區域特性，再分別針對各流域關鍵群體進行生物圈劑量評估。其中針對流往太平洋之區域，因為出流位置接近具有快速稀釋特性之海水，且地下水與海水混合後，因鹽份較高，無法直接飲用，亦難以作為農業用途，因此分析時僅考量達仁溪流域與塔瓦溪流域之關鍵群體。

(二)烏坵鄉建議候選場址

圖 5.2.3-5 為針對烏坵鄉建議候選場址設定之粒子追蹤監測點。圖中藍色圓點即為粒子追蹤監測點，每個相鄰追蹤監測點間距離為 44 m。

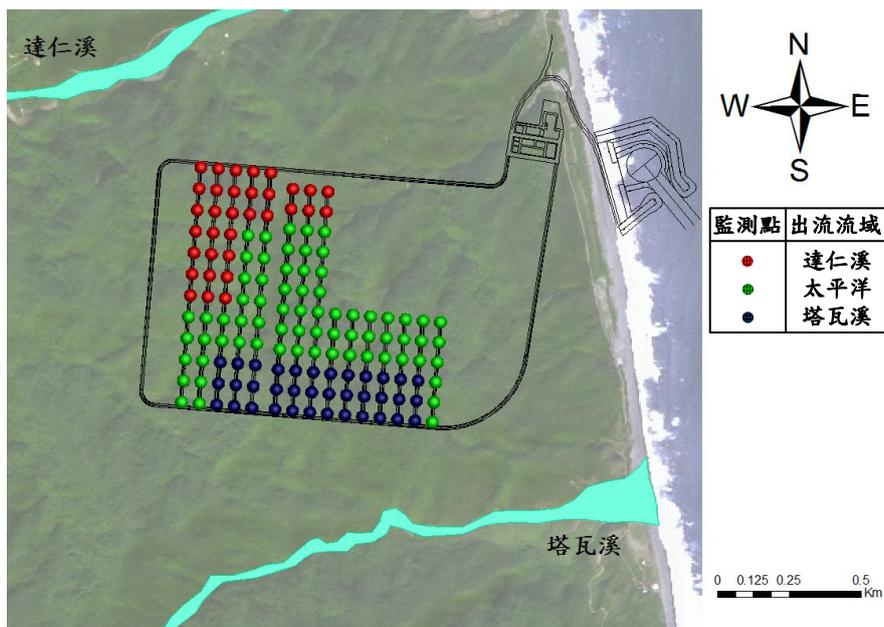


圖 5.2.3-4 達仁鄉建議候選場址粒子追蹤監測點與其出流位置說明

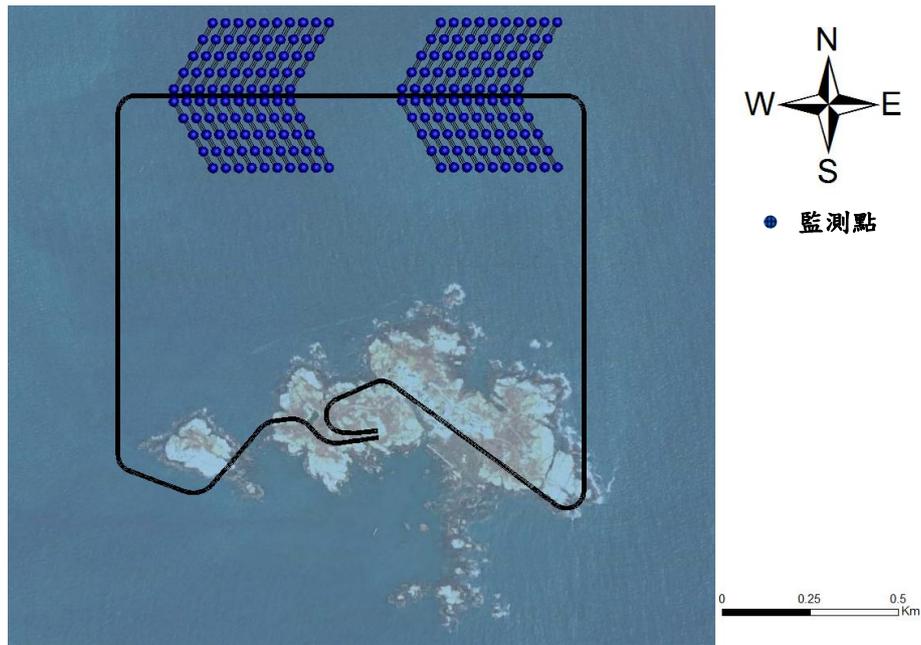


圖 5.2.3-5 烏坵鄉建議候選場址粒子追縱監測點

八、生物圈

依據 2 處建議候選場址之地質圈特性與人類生活型態，評估關鍵群體之輻射劑量。

九、處置設施與地質圈之地下水流場

各情節之處置設施與地質圈地下水流場分析均採用 HYDROGEOCHEM 模式模擬，再將其流量與流徑等成果，作為 GoldSim 使用之輸入參數。

5.2.4 設計情節分析結果

一、達仁鄉建議候選場址

設計情節依核種釋出至達仁溪流域或塔瓦溪流域之區別，分別考量關鍵群體之劑量估算，不同流域下各核種之劑量分析結果如圖 5.2.4-1 及圖 5.2.4-2 所示，圖中橫軸代表時間，縱軸則代表年有效劑量。由分析結果顯示，不同位置之關鍵群體個人年有效劑量均遠低於法規要求(0.25 mSv)。達仁溪下遊之關鍵群體在此情節下最大個人年有效劑量為 $2.59E-04$ mSv，發生時間為場址封閉後

5,110 年；塔瓦溪下遊之關鍵群體在此情節下最大個人年有效劑量則為 1.02E-03 mSv，發生時間為場址封閉後 5,440 年。

二、烏坵鄉建議候選場址

設計情節之海水位沒有明顯下降，因此關鍵群體均以島嶼型生活形態為考量，並據以評估其年有效劑量。各核種之劑量分析結果如圖 5.2.4-3 所示，圖中橫軸代表時間，縱軸則代表年有效劑量。如圖所示，關鍵群體在此情節下最大年有效劑量為 5.30E-06 mSv，發生時間為場址封閉後 18,050 年。

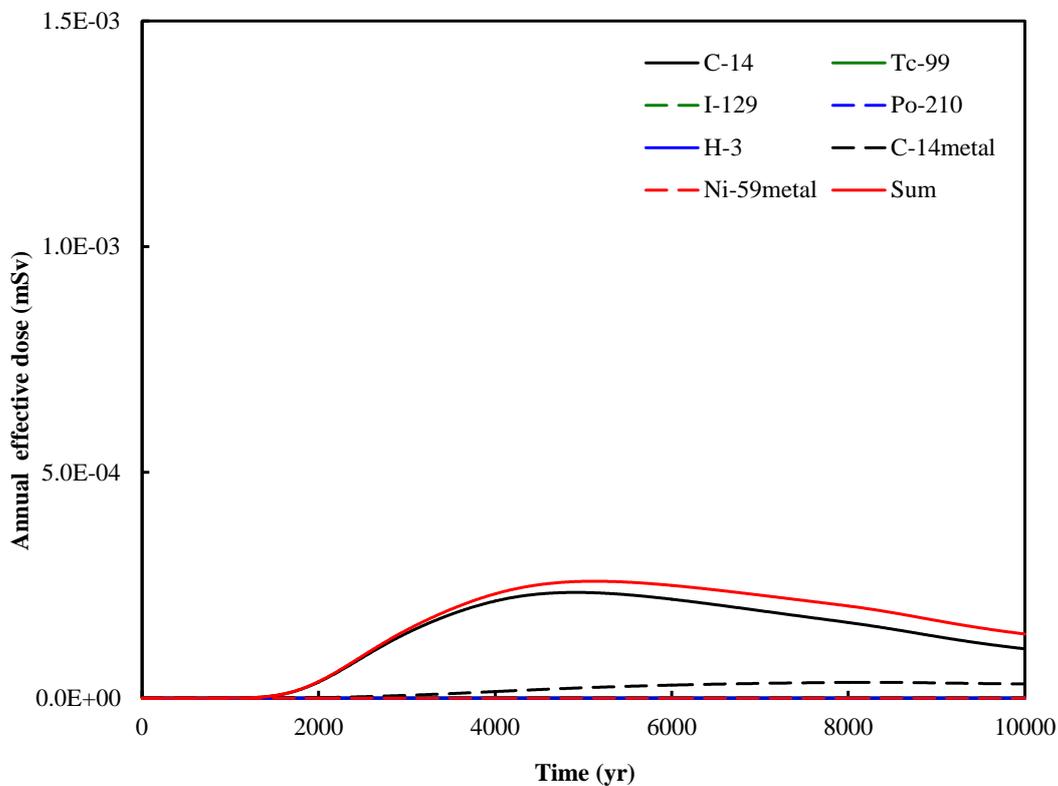


圖 5.2.4-1 設計情節下之個人年有效劑量評估結果(達仁河流域)

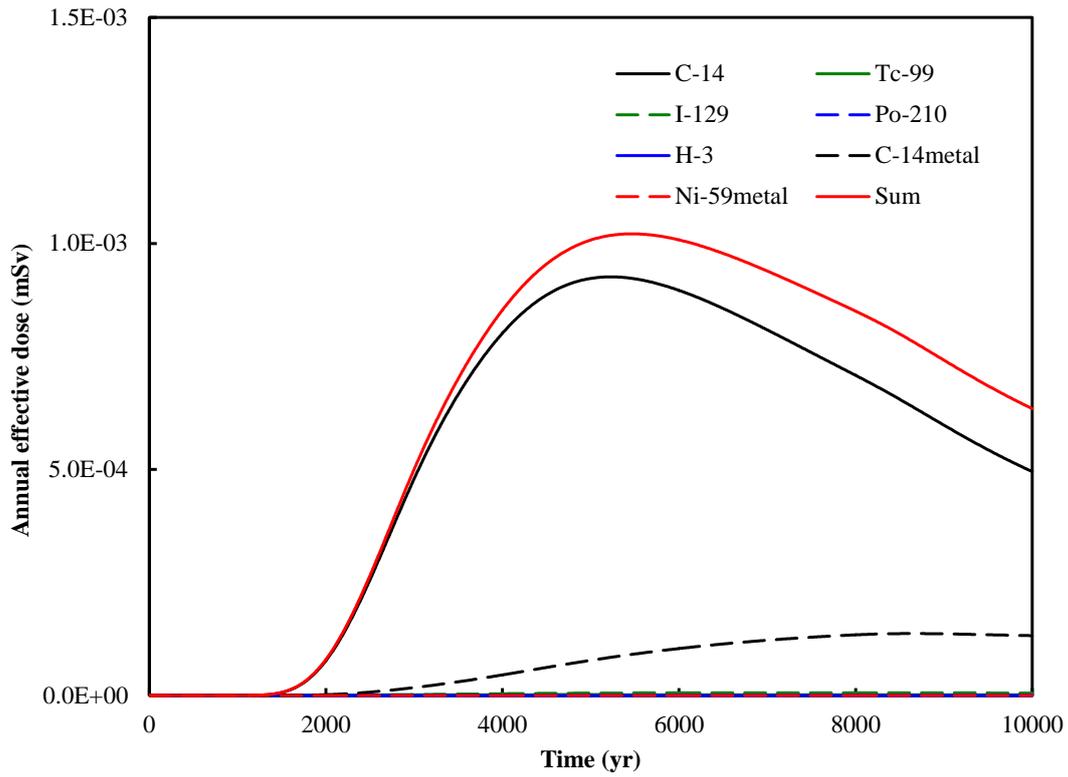


圖 5.2.4-2 設計情節下之個人年有效劑量評估結果(塔瓦溪流域)

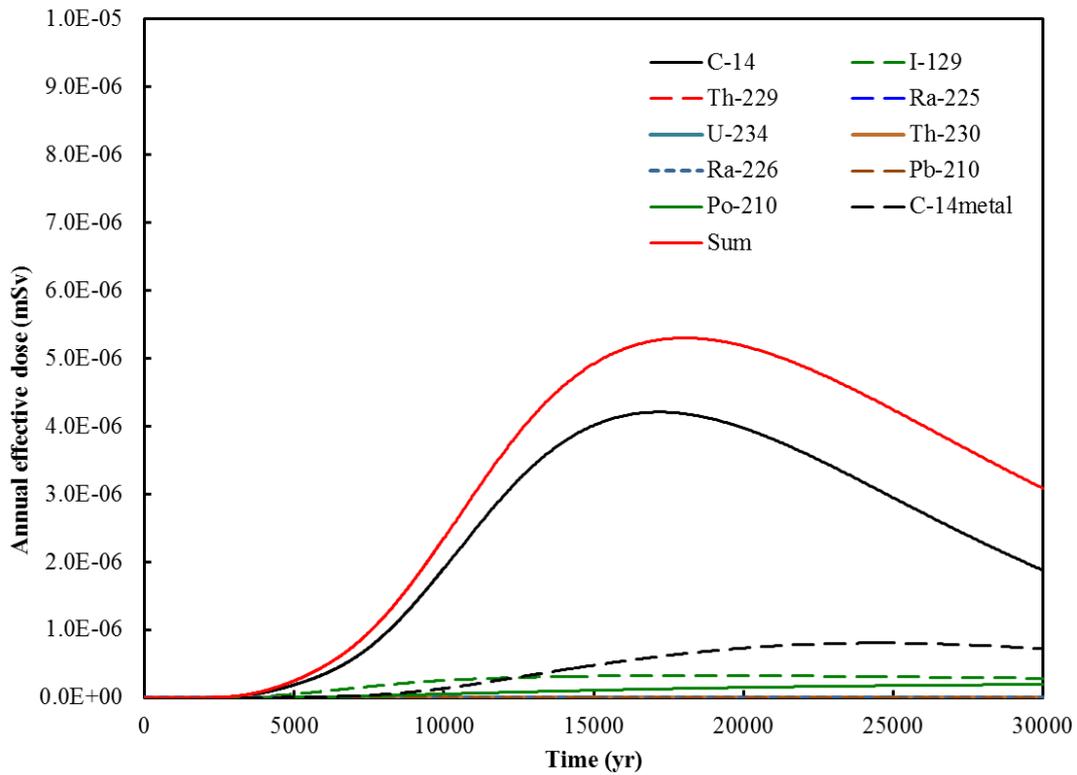


圖 5.2.4-3 設計情節下之劑量評估結果(烏坵鄉建議候選場址)

5.2.5 敏感度及不確定性分析

安全評估的架構包括源項、近場、遠場及生物圈，針對各分析域所涵之各分析參數，以及其對應之不確定性來源探討與目前處理方式詳表 5.2.5-1。以下將就各分析域之不確定性來源之處理說明如下：

表 5.2.5-1 評估參數之不確定性來源評估及目前處理方式

項目	不確定性來源	處理方式	
源項	核種活度	母核種及其活度資料庫尚未完成。	以法規核種活度上限值進行評估，並以蘭嶼貯存場實測結果進行敏感度分析。
	溶解度	受環境特性影響。	假設核種無限溶解(不包括活化金屬)。
	釋出率	受環境特性影響。	參考相關文獻進行設定，並進行敏感度分析。
近場	水力傳導係數	已設定功能需求，惟施工後仍會些微差異。障壁長期劣化影響難以準確掌握。	參考相關文獻進行設定，並於不同情節考量不同程度劣化後之影響。
	擴散係數	已設定功能需求，惟施工後仍會些微差異。障壁長期劣化影響難以準確掌握。	參考相關文獻進行設定，並進行敏感度分析。
	分配係數	等溫吸附特性易受場址特性影響。	參考相關文獻進行設定，並進行敏感度分析。
	坑道及處置窖內流量	評估所需之流場條件缺乏實測資料驗證。障壁長期劣化所增加之流量難以準確掌握。	根據有限元素數值分析所得之流場條件進行評估。障壁劣化之影響係以調整水力傳導係數方式進行設定，並以替代情節考量加劇劣化之情況。
遠場	水文地質單元	未進行現地調查。	以假設條件進行水文地質單元分區。
	水力傳導係數	未進行現地調查。	參考既有文獻進行參數假設。
	分配係數	吸附特性易受場址特性影響。	參考相關文獻進行設定，並進行敏感度分析。
	流徑長度及速度	處置設施範圍廣泛，不同位置所得流徑長度及速度不一。	設定多個粒子追蹤監測點，並分別計算。
	地下水流場	地下水流場分析結果缺乏實測資料驗證。	待現地調查工作推動後，藉由現地鑽孔、地下水位監測與水力試驗等，驗證分析結果。

項目		不確定性來源	處理方式
生物圈	關鍵群體生活方式及曝露途徑	核種外釋之位置可能位於不同流域。	評估時已針對核種可能外釋之各流域進行關鍵群體劑量評估。

一、源項

(一)核種活度

本安全評估所採用之母核種活度將以法規上限值進行分析，然由既有之資料庫顯示，實際核種平均活度約低於法規限值二個數量級。為釐清兩者差異，故本研究分別針對兩種核種初始活度條件下，進行設計情節下之安全評估。

1.達仁鄉建議候選場址

評估結果顯示，在以核種實測平均值之條件下，關鍵群體之最大年有效劑量為 $1.28E-05$ mSv，遠小於法規限值(0.25 mSv)，亦低於採用法規活度上限值所得之結果($1.02E-03$ mSv)約二個數量級。顯示採用法規活度上限值作為源項輸入相當保守。

2.烏坵鄉建議候選場址

評估結果顯示，關鍵群體之最大年有效劑量為 $7.02E-08$ mSv，遠小於法規限值(0.25 mSv)，亦低於採用法規活度上限值所得之結果($5.30E-06$ mSv)約二個數量級。顯示採用法規活度上限值作為源項輸入相當保守。

(二)非金屬廢棄物之核種溶解度

源項資料中，非金屬廢棄物之核種溶解度為另一個不確定性參數。由於缺乏進一步之試驗資料，因為評估時保守假設核種可於水中無限溶解。由於此假設已為最保守之條件，且目前尚無其他資料可供參考，因此不針對核種溶解度作進一步之分析與探討。

(三)金屬廢棄物之核種釋出率

金屬廢棄物之核種釋出率因無相關資料可供參考，因此本安全評估先採用文獻資料。為釐清此參數之影響，在此分別假設金

屬廢棄物之核種釋出率為原設定值之 10 倍及 100 倍，並以設計情節之條件進行分析。

1. 達仁鄉建議候選場址

達仁鄉建議候選場址之分析結果整理如表 5.2.5-2 及圖 5.2.5-1。由分析結果顯示，尖峰個人年有效劑量值與核種釋出率呈正相關，當核種釋出率提升至原設定 100 倍時，尖峰個人年有效劑量為 7.41E-03 mSv，約為原設定之 7.2 倍，主要劑量來源核種為金屬廢棄物釋出之 C-14_{metal}。

2. 烏坵鄉建議候選場址

烏坵鄉建議候選場址之分析結果整理如表 5.2.5-3 及圖 5.2.5-2。由分析結果顯示，個人年有效劑量尖峰值與核種釋出率呈正相關，當核種釋出率提升至原設定 100 倍時，尖峰個人年有效劑量為 3.35E-05 mSv，約為原設定之 6.3 倍，主要劑量來源核種為金屬廢棄物釋出之 C-14_{metal}。

表 5.2.5-2 金屬核種釋出率之影響(達仁鄉建議候選場址)

金屬廢棄物核種釋出率	個人年有效劑量尖峰值(mSv)	發生時間(yr)	流域	主要劑量來源核種
原設定	1.02E-03	封閉後 5,440 年	塔瓦溪	C-14
放大 10 倍	1.97E-03	封閉後 7,330 年	塔瓦溪	C-14 _{metal}
放大 100 倍	7.41E-03	封閉後 6,840 年	塔瓦溪	C-14 _{metal}

表 5.2.5-3 金屬核種釋出率之影響(烏坵鄉建議候選場址)

金屬廢棄物核種釋出率	個人年有效劑量尖峰值(mSv)	發生時間(yr)	主要劑量來源核種
原設定	5.30E-06	封閉後 18,050 年	C-14
放大 10 倍	1.10E-05	封閉後 20,850 年	C-14 _{metal}
放大 100 倍	3.35E-05	封閉後 19,300 年	C-14 _{metal}

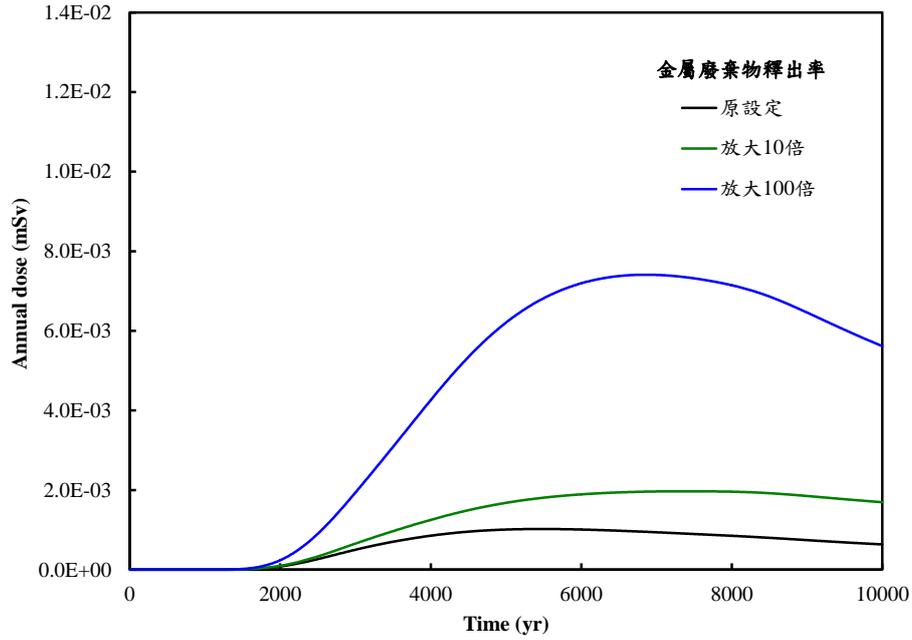


圖 5.2.5-1 設計情節之金屬廢棄物核種釋出率敏感度分析(達仁鄉建議候選場址)

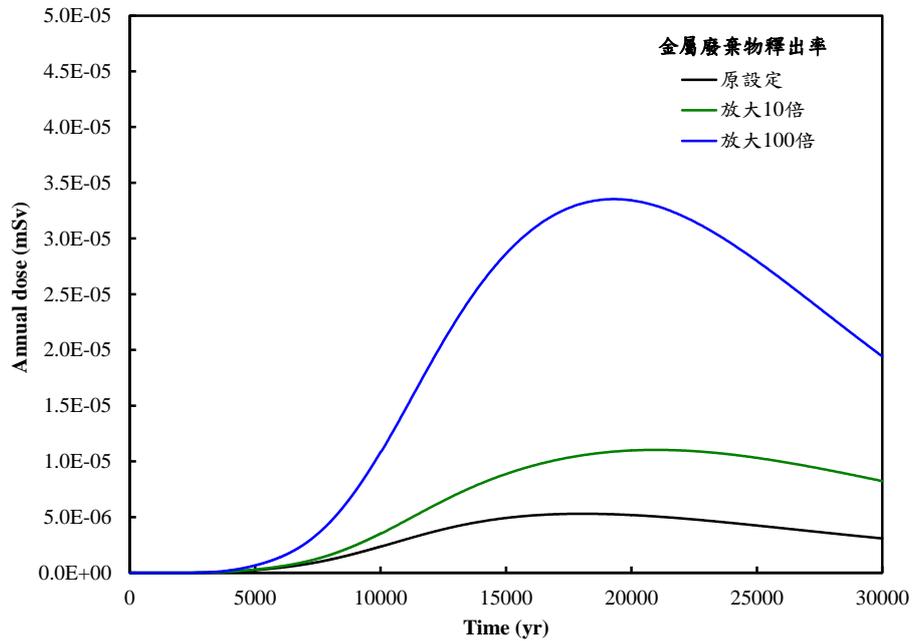


圖 5.2.5-2 設計情節之金屬廢棄物核種釋出率敏感度分析(烏坵鄉建議候選場址)

二、近場

(一)分配係數

1.達仁鄉建議候選場址

達仁鄉建議候選場址之安全評估對於近場材料分配係數之設定係參考自文獻資料，並假設於處置設施於封閉後 500 年後，吸附功能僅剩初始狀態之 10%。為釐清分配係數之影響，在無進一步資料下，在此將以保守為原則，分別設定不同障壁失效條件如表 5.2.5-4 所示。再依表中各分配係數設定條件，針對設計情節重新進行安全評估。由分析結果(表 5.2.5-4)顯示，在所有分析條件下，關鍵群體之最大年有效劑量均低於法規限值(0.25 mSv)。

表 5.2.5-4 不同分配係數設定下對於劑量評估結果之影響(達仁鄉建議候選場址)

分配係數設定		個人年有效劑量 尖峰值(mSv)	發生時間 (yr)	流域	主要劑量 來源核種
工程障壁	天然障壁				
如預期	如預期	1.02E-03	封閉後 5,440 年	塔瓦溪	C-14
如預期	不考慮	1.48E-03	封閉後 4,550 年	塔瓦溪	C-14
不考慮	如預期	1.18E-03	封閉後 4,570 年	塔瓦溪	C-14
不考慮	不考慮	1.69E-03	封閉後 3,820 年	塔瓦溪	C-14

備註：(1)如預期：有吸附功能。
(2)不考慮：沒有吸附功能。

2.烏坵鄉建議候選場址

烏坵鄉建議候選場址之處置設施位於海床下，因此工程障壁之吸附功能在初始設定時即採用最保守之考量。在無其他資料可供參考下，將不再針對近場工程障壁之吸附功能，進行參數敏感度分析。

(二)擴散係數

為釐清擴散係數之影響，在此分別假設工程障壁之擴散係數為原設定值之 10 倍及 100 倍，並以設計情節之條件進行分析。

1.達仁鄉建議候選場址

達仁鄉建議候選場址之分析結果整理如表 5.2.5-5 及圖 5.2.5-3。由分析結果顯示，個人年有效劑量尖峰值與擴散係數呈正相關，當擴散係數提升至原設定 100 倍時，尖峰年有效劑量為 2.50E-02 mSv，約為原設定之 25 倍，個人年有效劑量尖峰值發生之時間亦由處置設施封閉後 5,440 年提早至 2,260 年。

2.烏坵鄉建議候選場址

烏坵鄉建議候選場址之分析結果整理如表 5.2.5-6 及圖 5.2.5-4。隨著個人年有效劑量尖峰值與擴散係數呈現正相關，當擴散係數提升至原設定 100 倍時，尖峰個人年有效劑量為 5.93E-05 mSv，約為原設定之 11 倍，個人年有效劑量尖峰值發生時間則提早約 3,500 年。

表 5.2.5-5 工程障壁擴散係數之影響(達仁鄉建議候選場址)

工程障壁 擴散係數設定	個人年有效劑量 尖峰值(mSv)	發生時間 (yr)	流域	主要劑量 來源核種
原設定	1.02E-03	封閉後 5,440 年	塔瓦溪	C-14
放大 10 倍	5.58E-03	封閉後 3,280 年	塔瓦溪	C-14
放大 100 倍	2.50E-02	封閉後 2,260 年	塔瓦溪	C-14

表 5.2.5-6 工程障壁擴散係數之影響(烏坵鄉建議候選場址)

工程障壁 擴散係數設定	年有效劑量尖峰值 (mSv)	發生時間(yr)	主要劑量來源核種
原設定	5.30E-06	封閉後 18,050 年	C-14
放大 10 倍	3.03E-05	封閉後 15,500 年	C-14
放大 100 倍	5.93E-05	封閉後 14,550 年	C-14

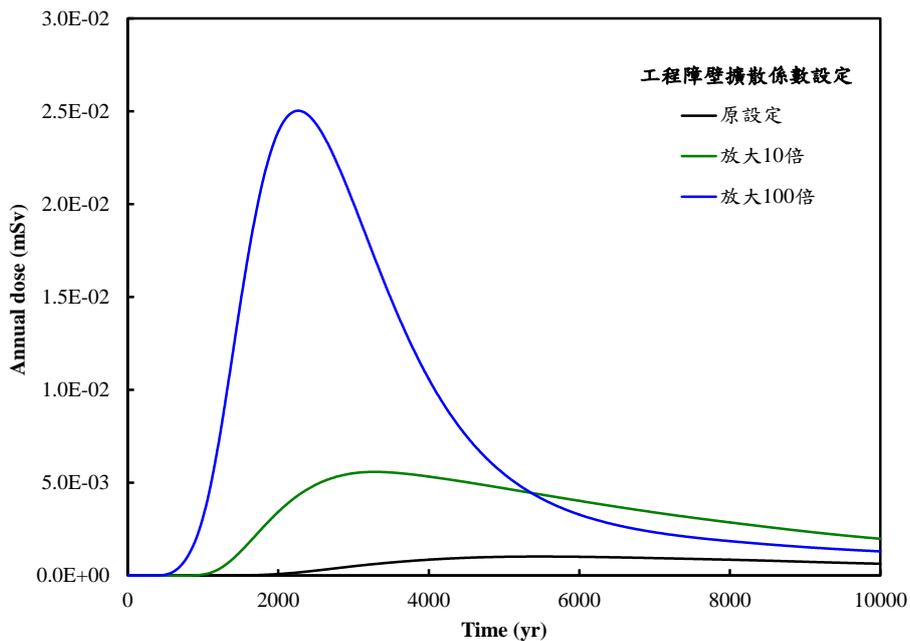


圖 5.2.5-3 設計情節之工程障壁擴散係數敏感度分析(達仁鄉建議候選場址)

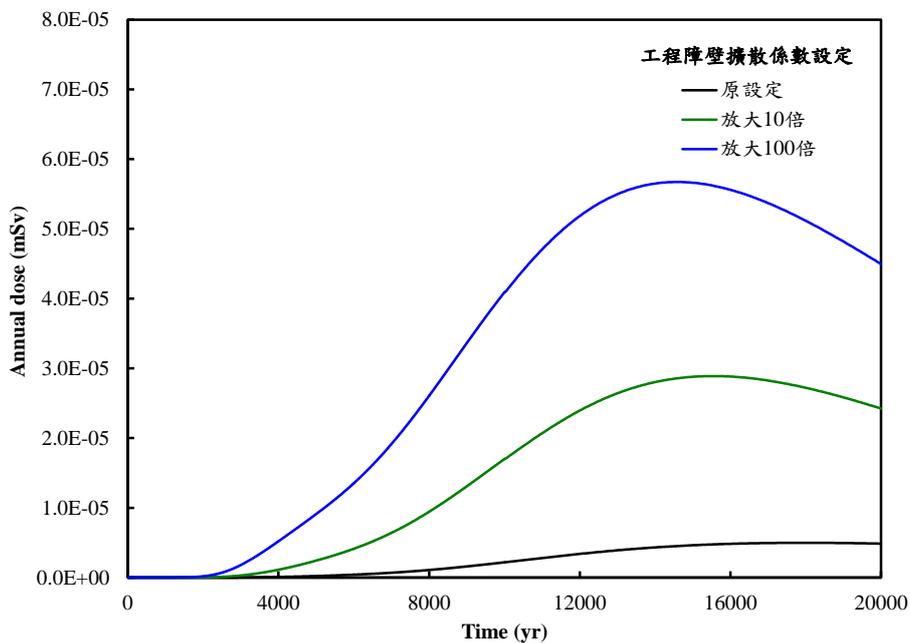


圖 5.2.5-4 設計情節之工程障壁擴散係數敏感度分析(烏坵鄉建議候選場址)

(三)坑道及處置窖內流量

本評估針對近場流量評估，係考量工程障壁在不同時間點之劣化條件，以及不同時期之近場邊界條件，再配合有限元素法進行評估，整個方法應屬合理。然由於遠場之流場評估結果無實際試驗資料可供佐證，未來待場址進場試驗後，應進一步率定流場評估成果，並重新評估坑道內初始流量。至於因工程障壁劣化而改變近場流量之現象，本評估參考 SKB(2014b, p27)，以調整水力傳導係數之作法，量化工程障壁劣化之影響，並以替代情節考量加劇劣化之情況，已可掌握不同劣化程度對於分析結果之影響。在無更合理之數據下，暫不再作評估。

三、遠場

由於處置設施不同位置均有不同流徑長度及流速，因此在安全評估中，粒子追蹤所得之流徑長度及速度為重要輸入參數。為合理考量此現象，本評估已於處置設施各位置設定粒子追蹤點，求得各位置之流徑長度及流速，以考量處置設施各位置傳輸特性。至於粒子追蹤長度及速度，則需參考場址流場條件。然由於目前無完整之現場調查成果，因此流場評估所需之參數均參考自相關文獻。未來待場址進場試驗後，應進一步率定流場評估成果。

四、生物圈

對於 2 處建議候選場址之場址特性，本評估已針對核種可能外釋之各流域進行關鍵群體劑量評估。

5.3 建議候選場址替代情節之安全分析模擬技術

5.3.1 發展替代情節

依據氣候演化推測於 5.2.1 節分別針對冰期循環推遲 100,000 年以及處置設施封閉後即進入冰期循環，發展出 2 種參考演化。替代情節設定依據 2 種參考演化推估，設定其地表生態系統演化、力學作用演化、水文地質演化、地球化學演化與工程障壁演化等演化過程。另針對影響安全功能較明顯之工程障壁劣化與地震等因素，採保守考量並列入替代情節中。

本安全分析所考量核種傳輸介質均以液體為主，主要影響情節設定之考量為參考演化與工程障壁劣化是否加劇，所有分析情節共 5 個，各情節之考量條件如表 5.3.1-1 所示。

表 5.3.1-1 2 處建議候選場址分析情節之考量條件

情節		氣候演化	降雨量設定	障壁劣化程度
設計 情節	維持氣候暖化情節	冰期循環推遲 100,000 年	增加 10%	如參考演化
替代 情節	維持氣候暖化且工程障 壁劣化加劇情節	冰期循環推遲 100,000 年	增加 10%	劣化加劇
	進入冰期循環情節	封閉後 立即進入冰期循環	同現況	如參考演化
	進入冰期循環且工程障 壁劣化加劇情節	封閉後 立即進入冰期循環	同現況	劣化加劇
	地震後嚴重劣化情節	冰期循環推遲 100,000 年	增加 10%	地震後嚴重劣化

5.3.2 替代情節分析結果

由於處置場址未來演變不易完整掌握，造成安全評估結果具不確定性。因此，本安全評估發展出 4 種替代情節並進行劑量評估，以下將針對 2 處建議候選場址之安全評估結果進行說明。

一、達仁鄉建議候選場址

達仁鄉建議候選場址之分析結果如表 5.3.2-1 所示。表中顯示，在各情節下處置設施自封閉後關鍵群體之年有效劑量均低於法規上限值(0.25 mSv)，主要之劑量來源核種為 C-14。就設計情節(維持氣候暖化情節)中，關鍵群體之最大年有效劑量為 1.02E-03 mSv，所對應之時間為設施封閉後 5,440 年。各替代情節之分析結果顯示，考量為地震事件所造成之工程障壁劣化之地震後嚴重劣化情節為最關鍵之替代情節。該情節下關鍵群體之最大年有效劑量為 3.84E-03 mSv，所對應之發生時間則為 3,320 年。由於場址特徵化未經實測數據驗證，現階段僅適宜做為趨勢分析應用。

表 5.3.2-1 各分析情節下之劑量分析總表(達仁鄉建議候選場址)



二、烏坵鄉建議候選場址

烏坵鄉建議候選場址之分析結果如表 5.3.2-2 所示。表中顯示，在各情節下關鍵群體之年有效劑量均低於法規上限值(0.25 mSv)，主要劑量來源核種為 C-14。就設計情節(維持氣候暖化情節)中，關鍵群體之最大年有效劑量為 5.30E-06 mSv，所對應之時

間為設施封閉後 18,050 年。分析結果顯示，進入冰期循環且工程障壁劣化加劇情節為最關鍵之替代情節，關鍵群體之個人最大年有效劑量為 5.80E-03 mSv/y，所對應之發生時間為 5,010 年。由於場址特徵化未經實測數據驗證，現階段僅適宜做為趨勢分析應用。

表 5.3.2-2 各分析情節下之劑量分析總表(烏坵鄉建議候選場址)

情節		主要劑量來源核種	最大個人年有效劑量 (mSv)	最大個人年有效劑量發生時間
設計情節	維持氣候暖化情節	C-14	5.30E-06	封閉後 18,050年
替代情節	維持氣候暖化且工程障壁劣化加劇情節	C-14	5.30E-06	封閉後 18,050年
	進入冰期循環情節	C-14	5.68E-03	封閉後 5,000年
	進入冰期循環且工程障壁劣化加劇情節	C-14	5.80E-03	封閉後 5,010年
	地震後嚴重劣化情節	C-14	5.30E-06	封閉後 18,050年

個人年有效劑量(mSv)

5.3.3 敏感度及不確定性分析

本安全評估之不確定性分析已於 5.2.5 節說明。該節另以設計情節為前提，針對金屬核種釋出率、分配係數及擴散係數，進行敏感度分析，並釐清以上參數之影響趨勢，故此處不再評估。在此僅以既有核種活度實測成果進行各情節下之劑量評估。

表 5.3.3-1 及表 5.3.3-2 顯示達仁鄉建議候選場址各情節下使用實測核種活度之劑量評估結果；表 5.3.3-3 及表 5.3.3-4 顯示烏坵鄉建議候選場址各情節下使用實測核種活度之劑量評估結果。達仁鄉建議候選場址與烏坵鄉建議候選場址之分析結果顯示，關鍵群體之最大個人年有效劑量遠小於法規限值(0.25 mSv)，而關鍵群體之最大個人年有效劑量低於採用法規活度上限值所得之結果約二個數量級。顯示採用法規活度上限值作為源項輸入相當保守。

表 5.3.3-1 採用既有核種活度資料庫下之劑量評估總表(達仁鄉建議候選場址)



表 5.3.3-2 不同母核種初始活度下之劑量評估結果比較表(達仁鄉建議候選場址)

情節		採用台電資料庫平均值		採用法規上限值		劑量比 (%)
		最大個人年有效劑量(mSv)	最大個人年有效劑量發生時間	最大個人年有效劑量(mSv)	最大個人年有效劑量發生時間	
設計情節	維持氣候暖化情節	1.28E-05	封閉後 5,250年	1.02E-03	封閉後 5,440年	1.25%
替代情節	維持氣候暖化且工程障壁劣化加劇情節	1.88E-05	封閉後 4,860年	1.52E-03	封閉後 5,020年	1.24%
	進入冰期循環情節	1.13E-05	封閉後 5,330年	8.94E-04	封閉後 5,580年	1.26%
	進入冰期循環且工程障壁劣化加劇情節	1.63E-05	封閉後 4,730年	1.30E-03	封閉後 4,940年	1.25%
	地震後嚴重劣化情節	4.78E-05	封閉後 3,230年	3.84E-03	封閉後 3,320年	1.24%

表 5.3.3-3 採用既有核種活度資料庫下之劑量評估總表(烏坵鄉建議候選場址)

情節		主要劑量來源核種	最大個人年有效劑量(mSv)	最大個人年有效劑量發生時間	個人年有效劑量(mSv)
設計情節	維持氣候暖化情節	C-14	7.02E-08	封閉後 17,350年	
替代情節	維持氣候暖化且工程障壁劣化加劇情節	C-14	7.02E-08	封閉後 17,350年	
	進入冰期循環情節	C-14	6.67E-05	封閉後 4,830年	
	進入冰期循環且工程障壁劣化加劇情節	C-14	6.81E-05	封閉後 4,830年	
	地震後嚴重劣化情節	C-14	7.02E-08	封閉後 17,350年	

表 5.3.3-4 不同核種初始活度下之劑量評估結果比較(烏坵鄉建議候選場址)

情節		採用台電資料庫平均值		採用法規上限值		劑量比 (%)
		最大個人年有效劑量(mSv)	最大個人年有效劑量發生時間	最大個人年有效劑量(mSv)	最大個人年有效劑量發生時間	
設計情節	維持氣候暖化情節	7.02E-08	封閉後 17,350 年	5.30E-06	封閉後 18,050 年	1.32%
替代情節	維持氣候暖化且工程障壁劣化加劇情節	7.02E-08	封閉後 17,350 年	5.30E-06	封閉後 18,050 年	1.32%
	進入冰期循環情節	6.67E-05	封閉後 4,830 年	5.68E-03	封閉後 5,000 年	1.17%
	進入冰期循環且工程障壁劣化加劇情節	6.81E-05	封閉後 4,830 年	5.80E-03	封閉後 5,010 年	1.17%
	地震後嚴重劣化情節	7.02E-08	封閉後 17,350 年	5.30E-06	封閉後 18,050 年	1.32%

綜合評估 5.2 節與 5.3 節之分析結果，基於目前之場址特徵化、工程概念設計與安全分析設定，影響最大年有效劑量最明顯之因素為核種初始活度設定，其次依序為工程障壁擴散係數、金屬廢棄物之核種釋出率、設施劣化演化、分配係數與氣候演化等。

5.3.4 人類入侵情節分析

一、達仁鄉建議候選場址

依據 NUREG-2175(NRC, 2015, p4-9)，人類入侵的情節設定可根據場址特性，合理性預測人類未來活動。台東縣達仁鄉建議候選場址位於中央山脈南段延伸，地勢由東往西逐漸升高，高程可爬升至 200 m，場址地形坡度約為 1:0.3~1:0.8，此坡度一般不適合作為建築物興建，故初步排除未來於場址區域有建物開發行為。觀察過去類似生活環境居民之飲水習慣，受限於山區鑿井位置、深度與施工均不易，致使當地居民慣於利用簡易設施取用山泉水或溪水，故初步排除未來有鑿井取水的行為。針對場址周邊交通，已具有台 9 線、台 26 線與南迴鐵路作為主要運輸，故研判未來無開發新交通路線或交通隧道之需求。此外，選址過程中已排除具有地質資源價值區域，故研判未來無資源探勘之行為。此外，考量處置設施已具一定深度岩覆且坑道設施、坑道與處置窖間之回填，應具有一定程度之防止無意入侵作用。綜上所述，研判場址應無發生直接人類無意闖入的可能性。

因此，另假設處置設施封閉 100 年後，相關警示設施已完全損毀且無法辨識，民眾於處置設施附近進行鑽探作業而導致核種傳輸路徑減半，作為人類無意侵入情節設定。

分析成果如圖 5.3.4-1 與圖 5.3.4-2 所示，分析結果顯示，不同位置之關鍵群體所之個人年有效劑量均遠低於法規要求(0.25 mSv)。達仁溪下游之關鍵群體在此情節下最大個人年有效劑量為 $3.07E-04$ mSv，發生時間為場址封閉後 4,170 年；塔瓦溪下游之關鍵群體在此情節下最大個人年有效劑量則為 $1.22E-03$ mSv，發生時間為場址封閉後 4,350 年。

二、烏坵鄉建議候選場址

依據 NUREG-2175(NRC, 2015, p4-9)，人類入侵的情節設定可根據場址特性，合理性預測人類未來活動。金門縣烏坵鄉建議候

選場址之處置設施位於海平面以下，在設計情節之情境下，設施鄰近區域均覆蓋海水，故初步排除場址未來有任何開發行為，例如建物開發、鑿井取水等。於選址過程中已排除具有地質資源價值區域，故研判未來無資源探勘之行為。此外，考量處置設施已具有一定深度岩覆且坑道設施、坑道與處置窖間之回填，應具有一定程度之防止無意入侵作用。綜上所述，研判場址應無發生直接人類無意闖入的可能性，故不另評估人類入侵情節。

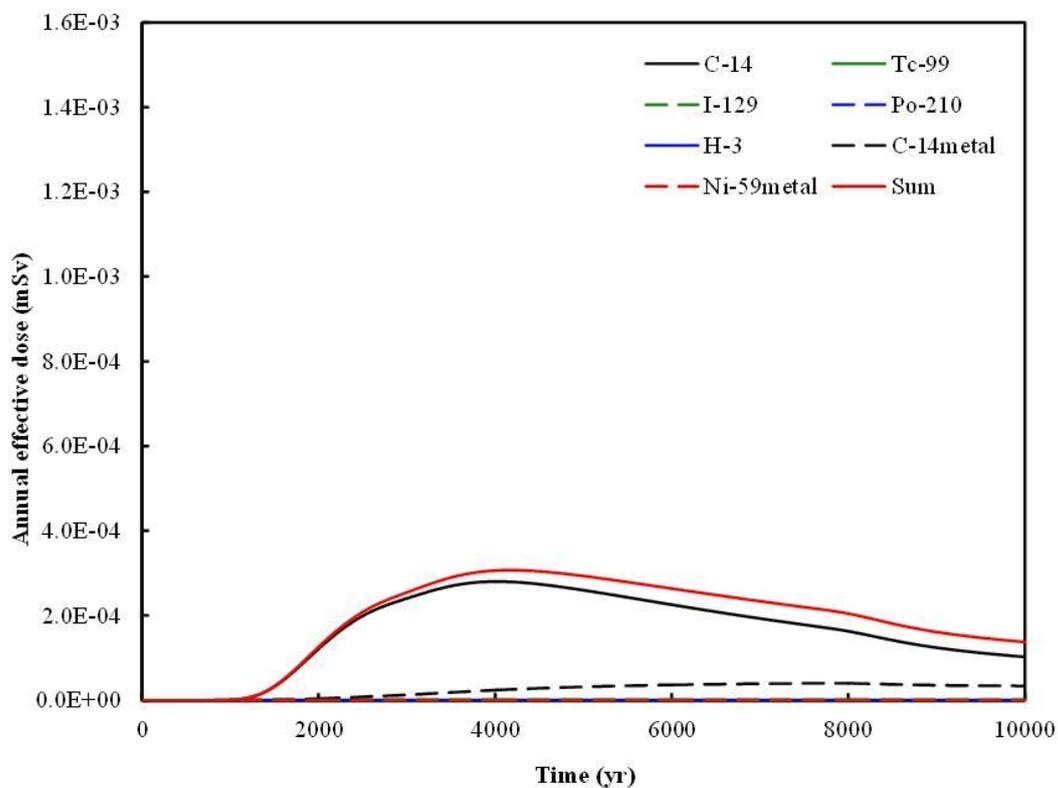


圖 5.3.4-1 人類入侵情節下之個人年有效劑量評估結果(達仁溪流域)

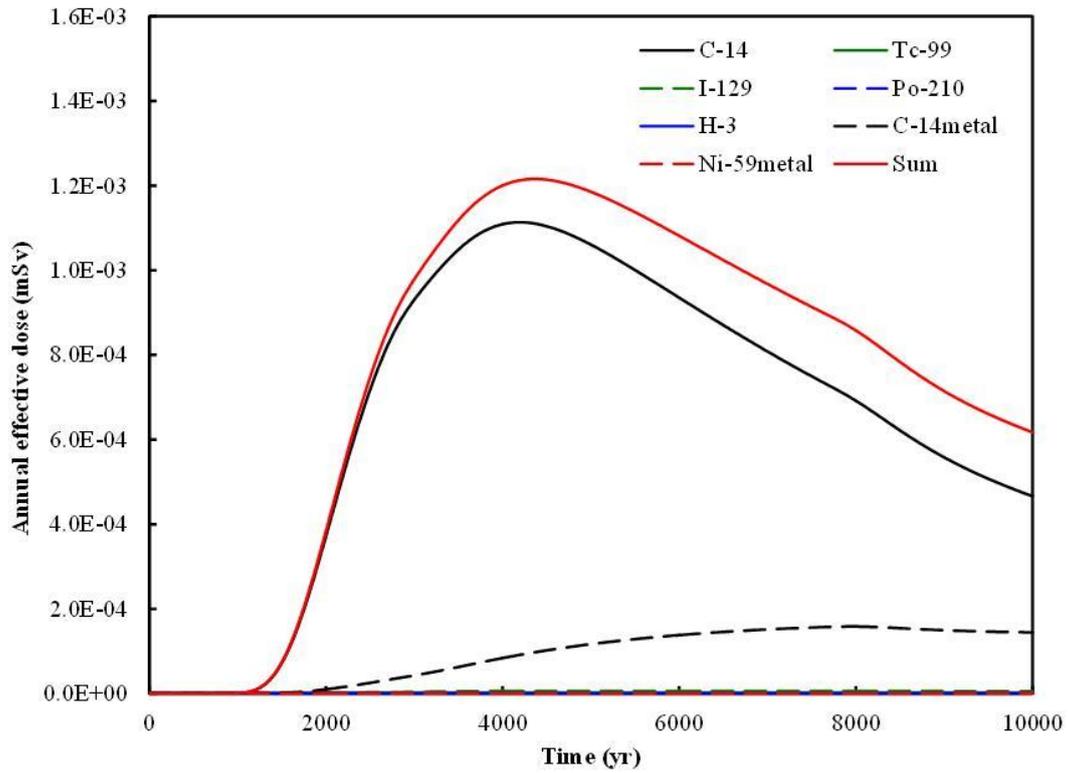


圖 5.3.4-2 人類入侵情節下之個人年有效劑量評估結果(塔瓦溪流域)

第六章 綜合分析與結論

6.1 法規符合性分析

由於本報告採用既有文獻或推論方式進行分析，且目的在於論述處置安全相關技術之可行性，故在法規符合性分析主要評估是否已具備達成法規要求之相關技術。

針對低放射性最終處置技術評估，可供依循之國內相關法規包括「放射性物料管理法」、「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」、「低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例」。本報告基於接收全國所有核能設施產生之低放射性廢棄物為設計容量考量，依廢棄物分類採用不同之工程障壁系統設計之分區處置規劃。處置系統設計經過場址特徵化與安全分析作業顯示，已具備執行場址特徵化、工程概念設計與安全分析情節所需技術。安全分析各情節之評估過程與結果，可供評斷低放處置設施之設計，是否可確保其對設施外一般人所造成之個人有效劑量不超過 0.25 mSv/yr 之安全限值。

6.2 處置安全性分析

低放射性廢棄物最終處置場之場址與設施設計確認，必須經過嚴密的場址選擇、場址特性調查、工程設計、安全分析、環境影響評估、興建與運轉、封閉與監管等程序之安全審核與把關。

現階段因 2 處建議候選場址均尚未正式進場調查，後續之設施設計、安全分析與環境影響評估工作亦尚未正式展開。但為檢視現階段低放處置設施規畫之安全性，針對 2 處建議候選場址利用既有文獻與理論推估等方式進行場址特徵化、工程概念設計與安全分析等技術評估。除藉以檢視分析技術適宜性，同時也可初步研判 2 處建議候選場址其處置設施概念設計之安全性。

由於本報告採用既有文獻成果進行場址特徵化、工程概念設計與安全分析參數設定之方式執行相關分析。使得場址尺度之場址特徵化結果具有較高之不確定性。而為了降低不確定性對於處置長期安全研判之影響，在分析過程中採用較保守之假設與設定來降低其影響，分別說明如下：

一、廢棄物考量

就廢棄物考量而言，較保守的設定包含：

- (一) 初始活度採用法規分類濃度限值作為初始條件設定之參考：依分析結果可能會使最大年有效劑量上升兩個級數。
- (二) 忽略非金屬類廢棄物體之溶出率：即核種於封閉後立即溶至水中。
- (三) 假設無溶解上限：即假定核種瞬時全數溶解於水中，開始進入傳輸過程。

二、近場考量

就近場考量而言，較保守的設定包含：

- (一) 忽略盛裝容器之圍阻與遲滯功能：進行安全分析時，盛裝容器無法減緩流速或吸附核種。
- (二) 工程障壁劣化演化採用較大劣化程度與較快發生劣化行為之設定：設定時參考各國對於障壁劣化程度與發生時間之考量，採用較保守之封閉後 700 年即完全劣化。意即此時近場已有較多水流通過，增加核種藉由平流作用傳輸之總量。整體而言，也將會使核種在較早的時間即有可能傳輸至地質圈。
- (三) 吸附功能折減設定：假設工程障壁之吸附功能將在分析時間超過 500 年後，折減至原設定之 10%，意即核種可遲滯於近場之總量將降低。

三、遠場考量

就遠場考量而言，由於場址尺度之特徵化具有較高之不確定性，故其較保守的設定僅包含：

- (一)在海水面下降之替代情節中，採用較快速地下水流場時段代表海水位下降之影響，而不另再區分出較緩慢之地下水流場時段
- (二)地質圈水力傳導係數設定不採用較佳條件。假定具有較破裂區域，局部流場將會增速。

在前述保守條件考量下，不論是在設計情節或替代情節，2 處建議候選場址之最大年有效劑量仍低於 0.25mSv，可初步研判其多重障壁系統具有確保安全之功能。惟未來取得場址特性調查與相關試驗資料後，仍需更新分析並再次確認其確保安全之功能。

6.3 結論

本報告依循國內低放處置之相關法規，並參考國際相關文獻 (IAEA, 2012、IAEA, 2014)，瞭解當前國際上針對近地表放射性廢棄物處置設施開發、運轉、封閉、與管制措施的指引與建議，以符合 IAEA 訂定的安全要求。在確認安全與建立信心之部分，則是參考 IAEA 於 2012 年發行之 SSG-23 「The safety case and safety assessment for the disposal of radioactive waste」，已掌握國際最新趨勢。並以「台東縣達仁鄉」及「金門縣烏坵鄉」2 處建議候選場址為分析對象，逐一檢視低放處置所需之各項技術，藉以論證處置技術之可行。

依規劃與分析結果，處置設施採用 A 類廢棄物與 B、C 類廢棄物分區處置，並分別採用不同工程障壁系統之設計概念。經由安全分析、不確定性與敏感度分析，說明多重障壁系統各單元之安全功能敏感度。以目前之場址特徵化概念、處置設施概念設計，在設計情節與不同替代情節之氣候與設施劣化評估下，仍初步可達成最大年有效劑量低於 0.25mSv 之法規限值，並符合相關法規與安全要求。

因此，可初步推論於達仁鄉及烏坵鄉 2 處建議候選場址推動低放射性廢棄物最終處置場相關作業進行之可行性。然國內低放射性

廢棄物最終處置事業自民國 101 年 7 月，經濟部公告「台東縣達仁鄉」及「金門縣烏坵鄉」2 處為低放射性廢棄物最終處置設施建議候選場址後，即無明顯之進展。在未選出候選場址的現況下，場址特性調查工作亦無法順利推動。因此，文中所述之場址特性資料仍待未來現場調查後方能確認，屆時本報告中各項評估成果仍需依調查結果予以更新。

參考文獻

1. 工研院能資所，1999a，烏坵地區地表地質調查報告。財團法人工業技術研究院能源與資源研究所低放射性廢料最終處置第一階段工作顧問服務(第一次工作變更)計畫，4ML1100-RG-2015-R.1，共 82 頁，p13、p22~p30、p44、p48~p49。(該報告 p13 引用李寄嶠，1998，烏坵地區火成活動與區域地質構造研究。財團法人工業技術研究院能源與資源研究所低放射性廢料最終處置計畫報告。)
2. 工研院能資所，1999b，烏坵地區海域地球物理探測報告。附冊：震測剖面圖。財團法人工業技術研究院能源與資源研究所低放射性廢料最終處置第一階段工作顧問服務(第一次工作變更)計畫，4ML1100-RG-4016-R.0，圖版四~圖版七。
3. 工研院能資所，2000a，小坵優先調查候選場址-場址調查報告。財團法人工業技術研究院能源與資源研究所低放射性廢料最終處置第一階段工作顧問服務(第一次工作變更)計畫，4ML1100-RS-2100-R.1，共 275 頁，p3-3、p3-6~p3-23、p5-17~p5-25、p7-11、p7-24。(該報告 p3-3 引用黃玉昆、張珂、王明峰、邵和平，1992，閩南粵東沿海北西向斷裂構造的近代活動性與應力場的探討，中國廣州中山大學學報論叢，No.1，p19~p39。)
4. 工研院能資所，2000b，小坵嶼地質圖(1/1000)說明書。財團法人工業技術研究院能源與資源研究所低放射性廢料最終處置第一階段工作顧問服務(第一次工作變更)計畫，4ML1100-RG-2101-R.0，圖版二~圖版四。
5. 工研院能資所，2000c，烏坵地區海域地球物理探測。財團法人工業技術研究院能源與資源研究所低放射性廢料最終處置第一階段工作顧問服務(第一次工作變更)計畫，4ML1100-RG-4015-R.1，共 94 頁，p2-2、p5-3。(該報告 p2-2 引用劉以宣、邱學林、陸成

- 斌、李趕先，1989，台灣海峽西部石油地質地球物理調查研究，海洋出版社。)
6. 工研院能資所，2000d，地工調查大地應力量測分析報告。財團法人工業技術研究院能源與資源研究所低放射性廢料最終處置第一階段工作顧問服務(第一次工作變更)計畫，4ML1100-RG-3502-R.0，p7-1。
 7. 工研院能資所，2001a，小坵嶼孔內地球物理探測孔內攝影工作報告。財團法人工業技術研究院能源與資源研究所低放射性廢料最終處置第一階段工作顧問服務(第一次工作變更)計畫，4ML1100-RG-4601-R.1，共 109 頁，附錄 A-1~附錄 A-7。
 8. 工研院能資所，2001b，小坵嶼地下水文調查工作報告。財團法人工業技術研究院能源與資源研究所低放射性廢料最終處置第一階段工作顧問服務(第一次工作變更)計畫，4ML1100-RG-5510-R.1，p3-24。
 9. 中華民國總統府，2002，放射性物料管理法。
 10. 中華民國總統府，2002，游離輻射防護法。
 11. 中華民國總統府，2013，職業安全衛生法。
 12. 中華民國總統府，2015，勞動檢查法。
 13. 台東縣太麻里戶政事務所網站，
<http://tmh.taitung.gov.tw/bin/home.php>
 14. 台東縣政府主計處網站，<http://www.taitung.gov.tw/Accounting/>。
 15. 台灣電力公司，2002，小坵場址初步安全分析報告，台灣電力公司-低放射性廢料最終處置計畫，p3-48、p3-56、p3-58、p3-71。
 16. 台灣電力公司，2006，低放射性廢棄物最終處置場可行性研究技術服務工作，地電阻探查野外作業報告(0 版)，p3-1~p3-11。
 17. 台灣電力公司，2007，低放射性廢棄物最終處置場可行性研究技術服務工作，折射震測野外作業報告(B 版)，p3-1~p3-6。

18. 台灣電力公司，2008，可能潛在場址地質介質核種分配係數量測與地下水氫離子濃度測量報告，p B-11~p B-16。
19. 台灣電力公司，2009，低放射性廢棄物最終處置場可行性研究技術服務工作—地質評估報告八號場址(B版)，p3-19~p3-22。
20. 台灣電力公司，2011，核能發電廠海嘯總體檢評估，p17、p197。
21. 台灣電力公司，2016a，LLWD2-SI-2015-01-V06-台東縣達仁鄉場址特性調查計畫，p25~p120。
22. 台灣電力公司，2016b，LLWD2-SI-2015-02-V06-金門縣烏坵鄉場址特性調查計畫，p25~p120。
23. 台灣電力公司，2016c，LLWD2-SI-2014-01-V06-場址特性參數評估報告-台東縣達仁鄉，p29~p166。
24. 台灣電力公司，2016d，LLWD2-SI-2014-02-V06-場址特性參數評估報告-金門縣烏坵鄉，p14~p181。
25. 台灣電力公司，2017，LLWD2-SA-2015-03-V10-低放射性廢棄物最終處置功能模擬評估報告(台東縣達仁鄉)，p32~p35。
26. 交通部公路總局西部濱海公路南區臨時工程處，2011，台9線南迴公路拓寬改善後續計畫-安朔至草埔段新闢四車道工程委託設計委外地質探查工作-隧道段地質鑽探工程報告，AD-59 地質鑽探及土壤試驗一覽表：p16。
27. 行政院原子能委員會，1997，放射性廢料管理方針。
28. 行政院原子能委員會，2003，放射性物料管理法施行細則。
29. 行政院原子能委員會，2005，游離輻射防護安全標準。
30. 行政院原子能委員會，2006，低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例。
31. 行政院原子能委員會，2009，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。
32. 行政院原子能委員會，2010，低放射性廢棄物最終處置地質材料對核種遷移之參數研究，p8~p10。

33. 行政院原子能委員會，2010，低放射性廢棄物最終處置盛裝容器審查規範。
34. 行政院原子能委員會，2012，低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則。
35. 行政院原子能委員會，2016，低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則。
36. 行政院原子能委員會，2017，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。
37. 行政院原子能委員會放射性物料管理局，2013，低放射性廢棄物坑道處置核種遷移參數評估技術之研究，p265~p266、p268。(該報告 p265~p266 引用 Shinn, E.A., 2001, Coral reefs and shoreline dipsticks, in Gerhard, L.C., Harrison, W.E., and Hanson, B.M., eds., Geological Perspectives of Global Climate Change: American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology No. 47, p251~p264; 該報告 p268 引用楊任徵，2002，我國用過核廢料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段-潛在母岩特性調查計畫-海水面變遷情景分析及不確定性探討報告，台灣電力公司委辦計畫，SNFD-ERL-90-167，工業技術研究院。)
38. 宋國城，1991，五萬分之一臺灣地質圖及說明書—恆春半島，中央地質調查所，p20~p21、p23、p50~p51、地質圖幅。
39. 宋國城與林偉雄，1993，五萬分之一臺灣地質圖及說明書—枋寮，中央地質調查所，共 37 頁，p9。
40. 林軍，2006，臺灣海峽西岸城市群地質環境特徵研究，中國地質，第 33 卷，第二期，p446、p449。
41. 林偉雄，林啟文，高銘健，1993，五萬分之一臺灣地質圖及說明書—大武，中央地質調查所，p7~p10、地質圖幅。
42. 金門縣政府民政處網站，
http://www.kinmen.gov.tw/Layout/sub_A/index.aspx?frame=3。

43. 國家災害防救科技中心，災害潛勢地圖網站，
<http://satis.ncdr.nat.gov.tw/Dmap/102news.aspx>。
44. 崔建軍、張岳橋、董樹文、江博明、徐先冰、馬立成、李建華、蘇金寶、李勇，2013，華南陸緣晚中生代造山及其地質意義，中國地質(Geology in CHINA)，第四卷，第一期，p87。
45. 經濟部中央地質調查所，2012，斷層活動性觀測研究第二階段-斷層監測與潛勢分析研究 第二階段總結報告，共 422 頁，p115。
46. 經濟部水利署，2015a，民國 103 年台灣水文年報第一部分—雨量，p230。
47. 經濟部水利署，2015b，中華民國 103 年台灣水文年報第二部分—河川水位及流量，p463。
48. 福建省地質礦產局，1985，福建省區域地質誌，地質出版社，p140、p465、p481、p487、附圖之一。
49. 福建省國土資源廳，2013，福建省花崗岩地貌對比研究，p1，
<http://www.fjgtzy.gov.cn/cms/html/fjsgtzyt/2013-05-23/1499177562.html>。
50. 鄧國雄、黃發明，2001，福建湄洲島的海階與斷層地形，福建地理，16，3，p3。
51. 羅欣蕙，2011，低放射性廢棄物障壁混凝土受氯離子入侵之劣化及預估研究，碩士論文，國立中央大學，中壢，p87~p92。
52. Ahlbom, K., Albino, B., Carlsson, L., Nilsson, G., Olsson, O., Stenberg L. and Timje, H., 1983, Evaluation of the geological, geophysical and hydrogeological conditions at Gidea, p2.
53. Auckland Transport, 2014, Penlink - Hydrogeology Assessment, p11.
54. Blümling, P. and Konietzky, H., 2002, Feasibility study Opalinus clay - geomechanical aspects, International Meeting „Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement", 9.-12.12.2002, Reims (Frankreich), p91.

55. Chang, C.P., Angelier, J., Lu, C. Y., 2009, Polyphase deformation in a newly emerged accretionary prism: folding, faulting and rotation in the southern Taiwan mountain range, *Tectonophysics*, 466, p395.
56. Ching K.E., Hsieh M.L., Johnson K. M., Chen K- H, Rau R- J, and Yang M., 2011, Modern vertical deformation rates and mountain building in Taiwan from precise leveling and continuous GPS observations, 2000–2008, *Journal of geophysical research*, 116, B8, p7, p10.
57. Dadson, S.J., Hovius, N., Chen, H., Dade, B., Hsieh, M.L., Willett, S.D., Hu, J.C., Horng, M.J., Chen, M.C., Stark, C.P., Lague, D., and Lin, J.C., 2003, Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen, *Nature*, 426, p649.
58. DOE, 2016a, Waste Isolation Pilot Plant: Documented Safety Analysis, DOE/WIPP-07-3372, Waste Isolation Pilot Plant, Carlsbad, NM, p14~p15.
59. DOE, 2016b, Waste Isolation Pilot Plant: Technical Safety Requirements, DOE/WIPP 07-3373, Waste Isolation Pilot Plant, Carlsbad, NM, p5-14, p5-17~p5-19, p5-21~p5-23.
60. Domenico P. A. and Schwartz F. W., 1997, Physical and chemical hydrogeology, p14.
61. Golder Associates Ltd., 2014, Final Environmental Impact Statement (FEIS) – Meliadine Gold Project: Volume 7.0 Freshwater Environment, Prepared for Agnico Eagle Mines Ltd, p7.2-B-2~p7.2-B-3.
62. Heath, R. C., 1983, Basic ground-water hydrology, U.S. Geological Survey Water Supply Paper 2220, Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, p9.

63. IAEA(International Atomic Energy Agency), 2004a, Safety assessment methodologies for near surface disposal facilities, Vol. 1, IAEA, Vienna, p1~p413.
64. IAEA(International Atomic Energy Agency), 2004b, Safety assessment methodologies for near surface disposal facilities, Vol. 2, IAEA, Vienna, p292.
65. IAEA(International Atomic Energy Agency), 2009, Classification of radioactive waste, General Safety Guide No. GSG-1, IAEA, Vienna, p7.
66. IAEA(International Atomic Energy Agency), 2012, The safety case and safety assessment for the disposal of radioactive waste, Specific Safety Guide No. SSG-23, IAEA, Vienna, p16.
67. IAEA(International Atomic Energy Agency), 2014, Near surface disposal facilities for radioactive waste, Specific Safety Guide No. SSG-29, IAEA, Vienna.
68. IPCC, 2013, Climate change 2013: the physical science basis: summary for policymakers. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, p132, p1204. Available at: <http://www.ipcc.ch>.
69. JAEA, 2013, Development of the assessment tool for groundwater scenario concerning sub-surface disposal, JAEA-Data Code 2013-015, p48、p54~p56.
70. JNFL web site:
<http://www.jnfl.co.jp/business-cycle/llw/llw-center.html>

71. Johnson, A. I., 1967, Specific yield-compilation of specific yields for various materials, U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1662-D, p22.
72. Lin A.T., Yao B, Hsu S.K., Liu C.S., and Huang C.Y., 2009, Tectonic features of the incipient arc-continent collision zone of Taiwan: Implications for seismicity, *Tectonophysics*, 479, p28.
73. Lu, C. Y., Chang, K. J., Malavieille, J., Chan, Y. C., Chang, C. P. and Lee, J. C. , 2001, Structural evolution of the southeastern Central Range, Taiwan. *Western Pacific Earth Science* 1, p213.
74. Malavieille and Trullenque, 2009, Consequences of continental subduction on forearc basin and accretionary wedge deformation in SE Taiwan: Insights from analogue modeling, *Tectonophysics*, 466, 3-4, p391.
75. Martin, C.D. and Lanyon, G.W., 2002, EDZ in Clay Shale, Mont Terri Technical Report TR 2001-01, p6-23.
76. McIntosh et al., 2005, Crustal-scale seismic profiles across Taiwan and the western Philippine sea, *Tectonophysics* 401, p24.
77. NRC, 2015, Guidance for Conducting Technical Analyses for 10 CFR Part 61, Draft Report for Comment, NUREG-2175, p4-9.
78. NWMO, 2011, Excavation Damaged Zones Assessment, NWMO internal report DGR-TR-2011-21, p35.
79. Paces, T., Buzek, F., Blaha, V., Pacesova, E., 2010, Long term chemical behavior of groundwater in granite with low permeability. In Birkle P., Rorres-Alvarado I.S: Water-Rock Interaction, 13th International Symposium Proceedings, Guanajuato, Mexico, 16-20 August 2010, p411~p414.

80. Park, J. B., Jung, H. R., Lee, E. Y., Kim, C. L., Kim, G. Y., Kim, K. S., Koh, Y. K., Park, K. W., Cheong, J. H., Jeong, C. W., Choi, J. S., Kim, K.D., 2009, Wolsong Low- and Intermediate-level Radioactive Waste Disposal Center: Progress and Challenges, Nuclear Engineering and Technology, Vol. 4, No. 4, p479~p481.
81. Popov, V., and Pusch, R., 2006, Disposal of Hazardous Waste in Underground Mines, p77.
82. Rieke H. H. and Chilingarian G. V., 1974, Compaction of argillaceous sediments: Developments in sedimentology, Elsevier Scientific Publishing Company, 424 p, p7.
83. Schwartz, F. W. and Zhang, H., 2003, Fundamentals of ground water, p44, p76.
84. SKB, 2008, Safety analysis SFR 1: Long-term safety, SKB R-08-130, Svensk Kärnbränslehantering AB, p240.
85. SKB, 2014a, Safety analysis for SFR Long-term safety - Main report for the safety assessment SR-PSU, SKB TR-14-01, Svensk Kärnbränslehantering AB, p11, p143, p159.
86. SKB, 2014b, Flow and transport modelling on the vault scale - Supporting calculations for the safety assessment SR-PSU, SKB R-14-14, Svensk Kärnbränslehantering AB, p27.
87. Skogberg, M. and Ingvarsson, R., 2011, Project website, p15, Available from <http://www.euronuclear.org/events/topseal/presentations/PP-Session-III-Skogsberg.pdf>.

88. Suppe, J., 1984, Kinematics of arc-continent collision, flipping of subduction, and back-arc spreading near Taiwan, Geol. Soc. China Mem., 6, p21.
89. U.S.NRC, 1984, Technology, Safety and costs of decommissioning a reference pressurized water reactor power station, NUREG/CR-0130, Volume 1 and Addendum 3, p2.3, p4.1.
90. USGS, 2001, Hydraulic-Property Estimates for Use With a Transient Ground-Water Flow Model of the Death Valley Regional Ground-Water Flow System, Nevada and California, Water-Resources Investigations Report 01-4120, p14.