

行政院原子能委員會
放射性物料管理局

低放射性廢棄物坑道處置設施設計與工程品質
審查規範之研擬

成果報告

目錄

第一章	概論	1
1.1	計畫目的	1
1.2	低放射性廢棄物地下處置設施	2
1.3	地下處置設施之機能要求	6
第二章	水泥系材料	11
2.1	低擴散層	12
2.1.1	設計	12
2.1.2	品質管理	23
2.1.3	檢查	30
2.2	處置窖	33
2.2.1	設計	33
2.2.2	品質管理	36
2.2.3	檢查	39
2.3	窖內空隙填充材	41
2.3.1	設計	41
2.3.2	品質管理	44
2.3.3	檢查	48
第三章	膨潤土系材料	50
3.1	低透水層	51
3.1.1	設計	51
3.1.2	品質管理	62
3.1.3	檢查	67
3.2	坑內空隙填充材	69
3.2.1	設計	69
3.2.2	品質管理	76
3.2.3	檢查	80
3.3	回填材	83
3.3.1	設計	83
3.3.2	品質管理	88
3.3.3	檢查	91
第四章	處置坑道	93
4.1	設計	93
4.2	品質管理	99
4.3	檢查	103
第五章	相關技術規範彙整	105

5.1 我國相關技術規範彙整與比較	105
5.2 「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版草案)」設計 相關章節之精進建議	118
參考文獻	134

表目錄

表 1.3-1	機能要求與各階段之關係.....	6
表 1.3-2	地下設施各單元的主要機能要求.....	7
表 2-1	水泥系材料設施之機能要求與技術條件.....	11
表 2.1.1-1	低擴散層的機能要求、技術條件與設計項目.....	12
表 2.1.1-2	擴散特性的代表現象、反應及相關項目.....	15
表 2.1.1-3	核種吸附性的代表現象、反應及相關項目.....	16
表 2.1.1-4	產生矽灰石膏而發生劣化的條件.....	20
表 2.1.1-5	各種反應生成物的分配係數.....	22
表 2.1.2-1	低擴散層的品質管理項目.....	27
表 2.1.2-2	影響水泥系材料長期狀態的品質項目與內容.....	28
表 2.1.2-3	低擴散層的品質管理項目及其試驗與管理方法.....	29
表 2.1.3-1	低擴散層的機能要求、技術要件與檢查項目之關係.....	31
表 2.1.3-2	低擴散層的檢查方法.....	32
表 2.2.1-1	處置窖的機能要求、技術條件及設計項目間之關係.....	34
表 2.2.2-1	處置窖的品質管理項目.....	37
表 2.2.2-2	處置窖的品質管理項目及其試驗方法與管理方法.....	38
表 2.2.3-1	處置窖的機能要求、技術條件與檢查項目.....	39
表 2.2.3-2	處置窖的檢查方法.....	40
表 2.3.1-1	空隙內填充材的機能要求、技術條件與設計項目.....	41
表 2.3.2-1	窖內空隙填充材的品質管理項目.....	46
表 2.3.2-2	窖內空隙填充材的品質管理項目及其試驗方法與管理方法.....	47
表 2.3.3-1	窖內空隙填充材的機能要求、技術條件與檢查項目.....	48
表 2.3.3-2	窖內空隙填充材的檢查方法.....	49
表 3-1	膨潤土系材料各設施的機能要求與技術條件.....	50
表 3.1.1-1	低透水層的機能要求、技術條件與設計項目.....	51
表 3.1.1-2	低透水層的代表現象、反應及相關項目.....	52
表 3.1.2-1	低透水層的品質管理項目.....	65
表 3.1.2-2	低透水層的品質管理項目與試驗方法.....	66
表 3.1.3-1	低透水層的檢查項目.....	67
表 3.1.3-2	低透水層的檢查方法.....	68
表 3.2.1-1	坑內空隙填充材的機能要求、技術條件與設計項目之關係.....	69
表 3.2.1-2	混和土材料的基本特性.....	71
表 3.2.1-3	膨潤土混合土的特性試驗.....	73
表 3.2.1-4	混合材料的基本特性.....	74
表 3.2.2-1	坑內孔隙填充材的品質管理項目.....	76

表 3.2.2-2	坑內空隙填充材的品質管理項目與試驗方法	79
表 3.2.3-1	坑內空隙填充材的機能要求、技術條件與檢查項目之關係	80
表 3.2.3-2	坑內空隙填充材的檢查方法	81
表 3.3.1-1	回填材的機能要求、技術條件與設計項目間之關係	84
表 3.3.2-1	回填材的品質管理項目	89
表 3.3.2-2	回填材的品質管理項目與試驗方法	90
表 5.3.3-1	回填材的機能要求、技術條件及檢查項目間之關係	91
表 5.3.3-2	回填材的檢查方法	92
表 4.1-1	處置坑道的機能要求與技術條件	93
表 4.1-2	處置坑道的機能要求、技術條件及設計項目間的關係	95
表 4.2-1	處置坑道的品質管理項目	100
表 4.2-2	處置坑道支撐作業的品質管理方法	101
表 4.2-3	處置坑道防水作業與排水作業的品質管理方法	102
表 4.2-4	處置坑道的觀察、測量方法	102
表 4.3-1	處置坑道的機能要求、技術條件與檢查項目間之關係	103
表 4.3-2	處置坑道的檢查方法	104
表 5.1-1	水泥系材料之品質管理方法與國內規範對照表(1/2)	107
表 5.1-1	水泥系材料之品質管理方法與國內規範對照表(2/2)	108
表 5.1-2	水泥系材料的檢查方法與國內規範對照表(1/2)	109
表 5.1-2	水泥系材料的檢查方法與國內規範對照表(2/2)	110
表 5.1-3	膨潤土的品質管理方法與國內常用規範對照表(1/2)	111
表 5.1-3	膨潤土的品質管理方法與國內常用規範對照表(2/2)	112
表 5.2-4	膨潤土的檢查方法與國內規範對照表(1/3)	113
表 5.2-4	膨潤土的檢查方法與國內規範對照表(2/3)	114
表 5.2-4	膨潤土的檢查方法與國內規範對照表(3/3)	115
表 5.1-5	處置坑道的品質管理方法與國內規範對照表	116
表 5.1-6	處置坑道的檢查方法與國內規範對照表	117

圖目錄

圖 1.2-1	低放射性廢棄物地下處置設施概念圖.....	2
圖 1.2-2	工程障壁構造示意圖	3
圖 1.2-3	處置坑道之建設及運轉工程(1/2)	4
圖 1.2-3	處置坑道之建設及運轉工程(2/2)	5
圖 1.3-1	工程障壁的長期狀態考量.....	8
圖 1.3-2	檢討流程.....	10
圖 2.1.1-1	鈷 60 γ 射線的有效劑量穿透率	13
圖 2.1.1-2	空隙率與擴散係數之關係.....	14
圖 2.1.1-3	裂縫寬度和氡水的有效擴散係數之關係.....	14
圖 2.1.1-4	齡期 28 天~378 天的孔徑分布變化	18
圖 2.1.3-1	檢查單位.....	31
圖 3.1.1-1	膨潤土系材料的材料組成評估指標	55
圖 3.1.1-2	有效黏土密度和透水係數之關係	56
圖 3.1.1-3	壓縮粒狀膨潤土的有效黏土密度與透水係數之關係.....	57
圖 3.1.1-5	有效蒙脫石密度與膨潤壓之關係	58
圖 3.1.1-6	含水比和單軸抗壓強度之關係	59
圖 3.1.1-7	含水比和變形係數之關係	60
圖 3.1.1-8	Ca 型化膨潤土的有效黏土係數與透水係數之關係	61
圖 3.1.1-9	不同反應溫度的溶解速度與 PH 值之關係.....	61
圖 3.2.1-1	礫石率(P_g)與最大乾燥密度之關係.....	72
圖 3.2.1-2	砂中膨潤土率(P_{bs})與剪力摩擦角(ψ_{cu})之關係	72
圖 3.2.1-3	碎石混合率與變形係數之關係	73
圖 3.2.1-4	礫石混入率(G_m)及膨潤土混入率(B_m)與乾燥密度之關係.....	75
圖 3.2.1-5	剪力摩擦角與礫石混入率(G_m)之關係	75
圖 3.2.2-1	脆弱岩的壓縮性分類圖.....	77
圖 3.2.3-1	坑內空隙填充材的檢查單元.....	81
圖 3.3.1-1	膨潤土率與透水係數之關係	86
圖 3.3.1-2	膨潤土混入率(B_m)與透水係數之關係	87

第一章 概論

1.1 計畫目的

為確保低放射性廢棄物最終處置設施可滿足安全需求，原子能委員會放射性物料管理局於 100 年度初步完成「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版草案)」，做為後續低放射性廢棄物處置作業推動之管制規範。考量我國與日本之地理環境特性較為相似，以及低放射性廢棄物處置設施之工程障壁系統設計與施工品質為確保處置安全之重要關鍵因素之一，今(101)年度為提升管制技術及持續精進管制規範，擬就日本現行之「低放射性廢棄物地下處置設施之設計、品質管理與檢查考量技術」進行研析，彙整其技術考量管制重點，藉以提升關鍵管制技術之技能與相關規範的精進。

本計畫目標在於研析日本「低放射性廢棄物地下處置設施之設計、品質管理與檢查考量技術」，瞭解其工程障壁系統之工程設計、品質管理與檢查考量項目要求，釐清其主要考量與相關檢查方法，彙整其使用之技術規範與我國既有相關技術規範，並研提「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版草案)」之精進建議。

1.2 低放射性廢棄物地下處置設施

低放射性廢棄物地下處置設施之概念如圖 1.2-1 所示。其設施包含低放射性廢棄物接收設施、低放射性廢棄物埋設之處置坑道、處置坑道之聯絡坑道，以及包含處置坑道之工程障壁系統。

地下處置設施主要是利用天然障壁及人工障壁組合而成的多重障壁系統來遲滯放射性核種，使放射性核種依其半衰期自然衰減至可接受之輻射劑量以下，藉以確保人類之安全。因此，日本土木學會就處置坑道與人工障壁，進行設施之設計、品管與檢查之檢討。由於工程障壁所需具備的功能要求及最佳構造型式，端視處置場址現地條件、欲掩埋之廢棄物特性等因素來決定，故工程障壁的構造、型式及功能要求並無統一之規格。後續檢討皆以圖 1.2-2 所示之工程障壁構造示意圖作為基礎假設條件，並依構成工程障壁系統所使用之材料，將工程障壁系統區分為：水泥系材料類、膨潤土系材料類及與處置坑道相關之支保工、周邊岩盤等。

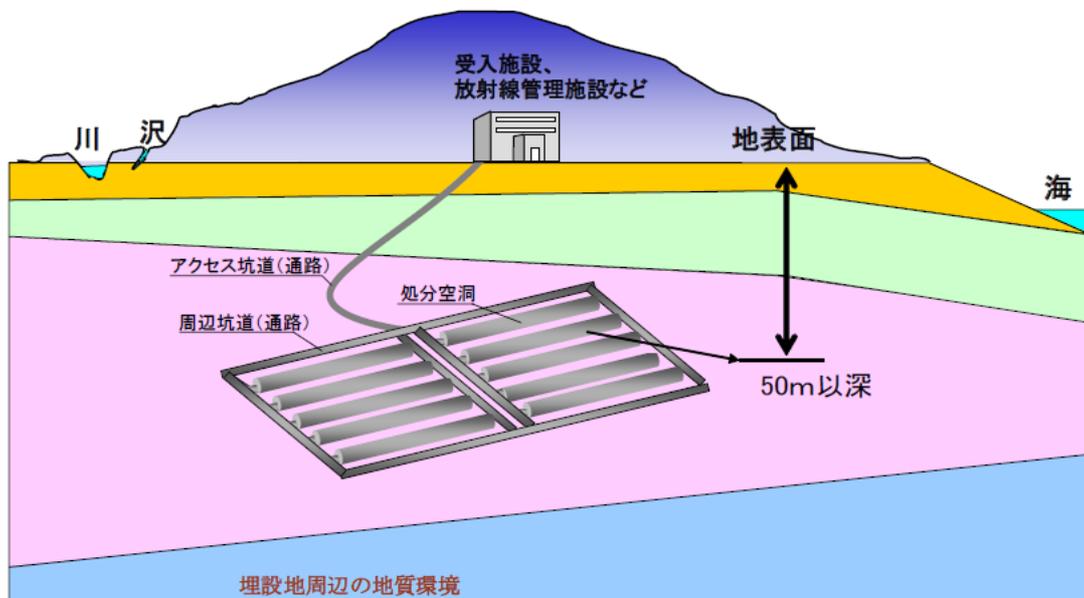


圖 1.2-1 低放射性廢棄物地下處置設施概念圖

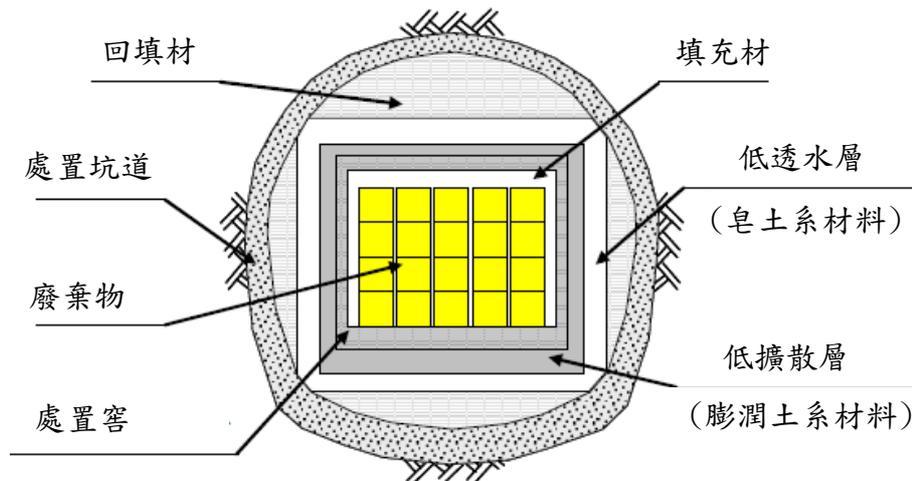
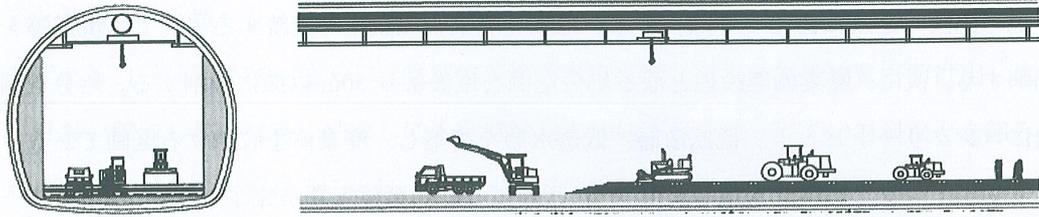


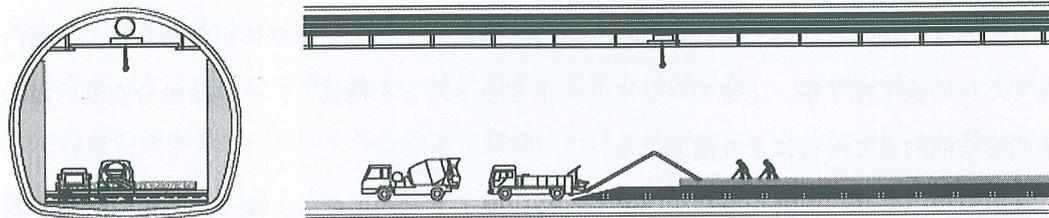
圖 1.2-2 工程障壁構造示意圖

地下處置設施的建置須先自地表開始向下挖掘與處置場址接續之聯絡坑道以及位於地表下 50 公尺之處置坑道。處置坑道內先興建處置窖、低擴散層及低透水層，於收納廢料包件的處置窖內吊放廢料包件，當廢料包件在處置窖內吊放完成後，則以填充材填充處置窖內空隙。因廢料包件含有高輻射劑量，故從廢料包件吊放到窖內空隙填充材施工的過程中，須限制人員不得進入處置坑道內。當處置坑道內之處置窖都已放滿廢料包件且確定窖內空隙填充材施工完成後，方可開始進行上部處置窖之施工，待上部處置窖施工完成後，於處置坑道內之空間進行坑內空隙填充材的回填施工。上述由處置坑道的挖掘至坑內空隙填充材施工結束的過程中，可能會同時好幾個處置坑道一起施工，故當所有處置坑道完全封閉後，須將聯絡坑道、週邊坑道、施工時搬運設備及廢料包件之通道等設施進行回填。有關地下設施的建置如圖 1.2-3 所示。

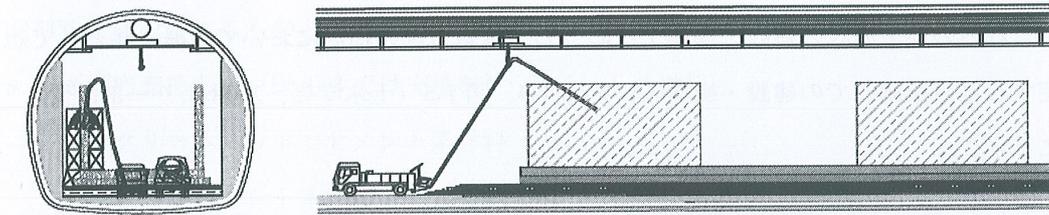
Step1：底部低透水層施工



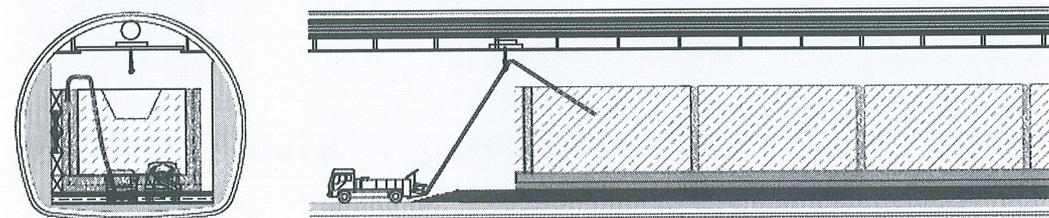
Step2：底部低擴散層施工



Step3：底部、側面處置窖施工



Step4：側面低擴散層施工



Step5：廢料包件定置

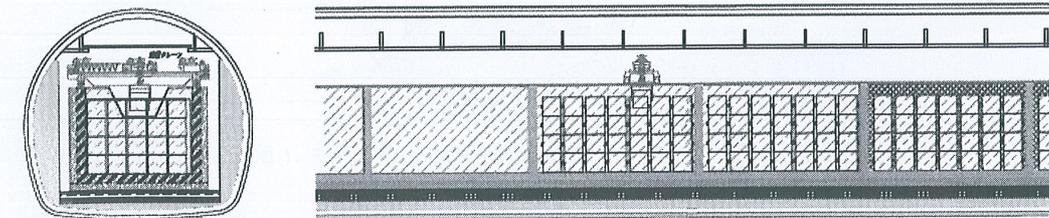
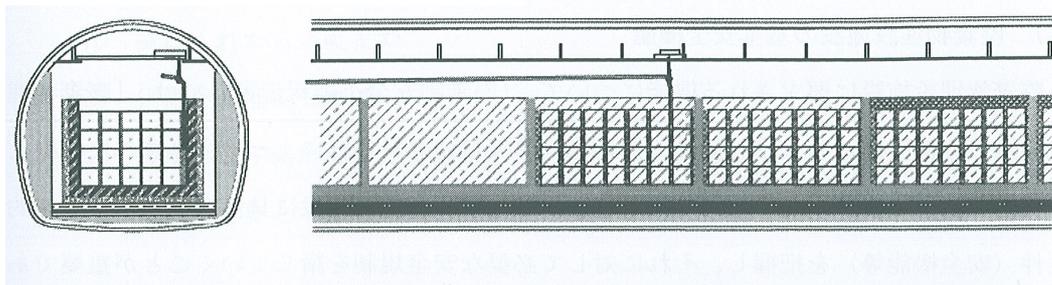
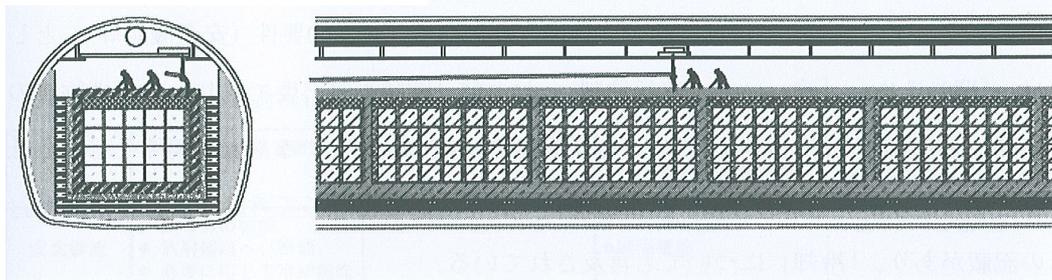


圖 1.2-3 處置坑道之建設及運轉工程(1/2)

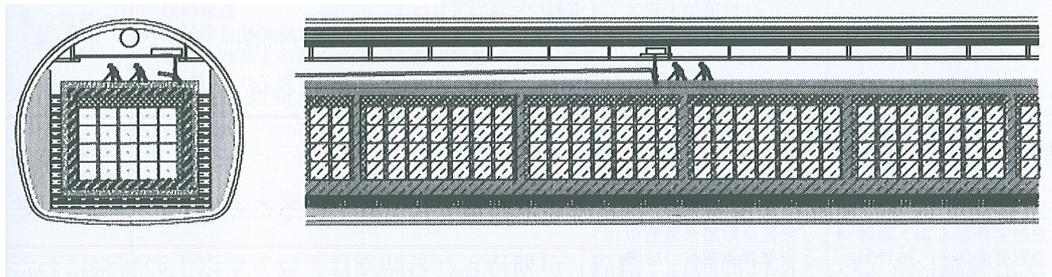
Step6：窖內空隙填充材施工



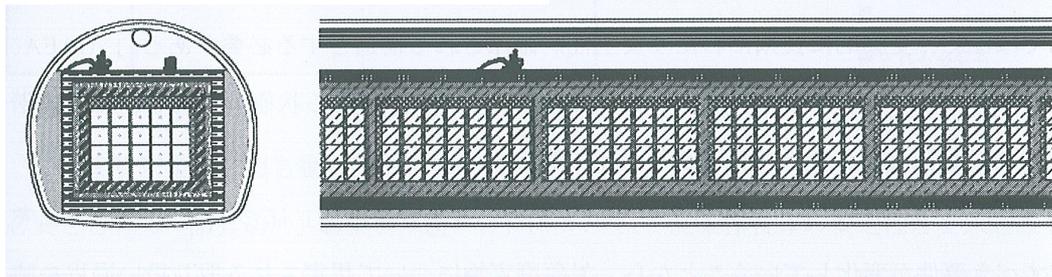
Step7：上部處置窖施工



Step8：上部低擴散層施工



Step9：底部、側面低透水層施工



Step10：坑內空隙填充材施工

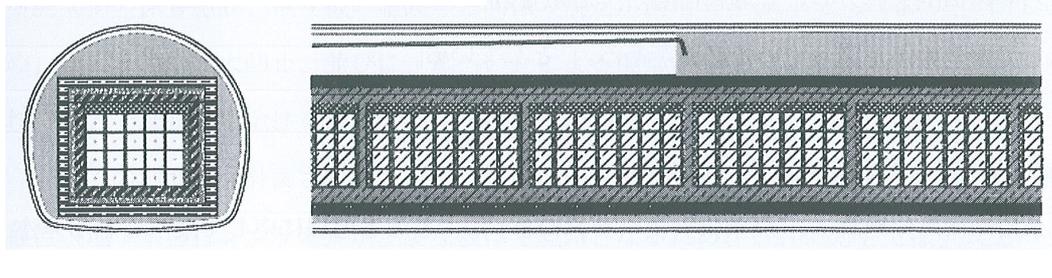


圖 1.2-3 處置坑道之建設及運轉工程(2/2)

1.3 地下處置設施之機能要求

處置設施依時間尺度及營運狀態可區分為建設與營運階段，以及回填封閉後階段。建設營運階段預估約需數十年，設施處置事業則約在數百年後結束，而後續需考量之時間約可延伸至十萬年後。在此期間內，處置設施須具備「基本安全機能」，以防止核燃料物質或其污染物擴散而產生災害，各階段所需具備之基本安全機能如表 1.3-1 所示。

表 1.3-1 機能要求與各階段之關係

機能要求		廢棄物處置設施				
		接收~吊放	吊放~回填施工(搬運、施工坑道回填)	回填完成~監管期結束	監管期結束以後	
基本安全機能	密閉	密閉				
	屏蔽	屏蔽				
	抑制遷移					抑制遷移
	隔離					隔離
營運操作機能		營運操作機能				
階段		關閉前階段		關閉後階段		
		建設與營運階段		回填封閉後階段		

處置設施從廢料包件接收到坑道回填結束期間，所需具備之基本安全機能為「密閉」與「屏蔽」。「密閉」機能主要是利用低透水性的特性，抑止地下水侵入工程障壁，並藉由地下處置設施的力學安定性等措施，抑制地下水與廢棄物接觸。「屏蔽」機能則利用設施結構及設備操作，來降低廢料包件對輻射業務從業

人員及週遭民眾的輻射量。回填結束後的「基本安全機能」則著重於「抑制遷移」與「隔離」，「抑制遷移」主要是藉由工程障壁與天然障壁組合而成的處置系統，抑制放射性物質向人類生活圈遷移。「隔離」機能考量監管期結束後，如何減少人類偶發性活動時之暴露或降低輻射影響，主要利用安全評估之結果決定廢料包件與地表面的距離、深度及位置，進行廢料包件的處置。同時，為避免人類進入處置場址周圍，須將連絡通道進行適當的封堵。除了從防止輻射傷害的觀點上思考之基本安全機能外，還需保留建設與營運操作時所需之空間，並確保其力學安定性，此機能稱之為「營運操作機能」。

故在進行地下設施的設計、品質管理及檢查的檢討時，將以「密閉」、「屏蔽」、「抑制遷移」、「隔離」、「營運操作機能」等五種機能，作為檢討的機能要求，並以達到前述功能作為設計、品質管理及檢查方法之基本條件。有關地下設施各單元所需具備的主要機能，彙整如表 1.3-2 所示。

表 1.3-2 地下設施各單元的主要機能要求

		窖內空隙填充材	處置窖	低擴散層	低透水層	坑內空隙填充材	回填材	處置坑道	
基本安全機能	密閉	—	●	—	●	—	—	—	
	屏蔽	●	●	●	—	—	—	—	
	抑制遷移	核種吸附性	●	●	●	—	—	—	—
		低擴散性	—	—	●	—	—	—	—
		低透水性	—	—	—	●	●	—	—
	防止遷移路徑形成	—	—	—	—	—	●	—	
	隔離	確保隔離距離	—	—	—	—	—	—	●
		阻止民眾入侵	—	—	—	—	—	●	—
營運操作機能		—	●	●	●	—	—	●	

由於處置設施掩埋的放射性廢棄物可能包含長半衰期核種，故在半衰期內須仰賴「基本安全機能」中之抑制遷移、隔離等功能，且可能須歷時數萬年以上。此期間較難以持續的主動管理與監視達到成效，須被動的依賴長時間的自然衰退，故須確保結構物經過長時間的耗損後仍能保有安全性。對於工程障壁系統之長期安全考量，依時間尺度預測設施構造可能之變化，做為後續確保人工障壁系統考量之評估依據。其長期狀態考量如圖 1.3-1 所示。

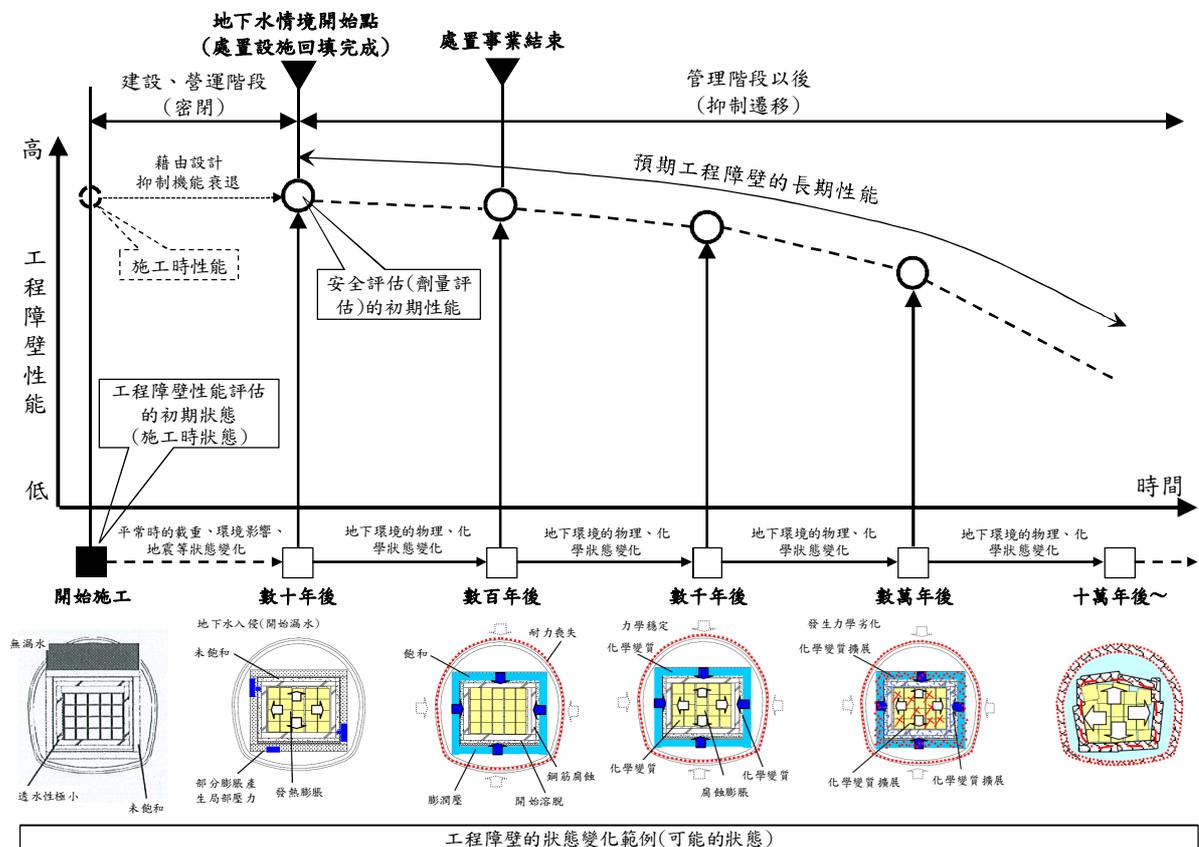


圖 1.3-1 工程障壁的長期狀態考量

日本低放射性廢棄物地下處置設施之設計、品質管理及檢查之檢討流程如圖 1.3-2 所示，是以前述的機能要求為基礎，選出機能要求所需之技術條件，並將其中與設計施工相關的項目整合為「設計項目」。設計項目是為達到技術條件之要求所對應的設計

方法，並彙整重要性較高的項目而成。設計地下設施時，每一階段要求的機能不一定相同，須分開討論。建設與營運階段需要密閉及屏蔽兩種機能，此階段的處置設施以既有土木工程施工方法為主。而回填後所需的抑制遷移及隔離機能，考量其時間尺度大幅超過一般土木工程結構物之使用年限，應先推估處置場址未來可能的環境條件，利用設計讓處置設施在此環境下能長期維持抑制遷移機能。此外，在規劃設計時也須考量施工性與經濟性，並使用目前可行的技術。

「品質管理項目」是從材料管理、工法管理、狀態管理及環境管理等觀點，選出影響設計項目的因子作為管理項目。地下處置設施使用的材料，如水泥系材料、膨潤土系材料等，都早有完備的施工管理方法，基本上可直接沿用。但因處置設施的使用年限比一般土木結構物的使用年限長，故在沿用既有管理方法時，須明確了解機能及性能保證的範圍。對於無法適用的範圍，則由品質管理項目中的設計項目或其他方法進行檢討。原則上，品質管理從施工階段即開始施行。

地下處置設施的檢查是針對抑制遷移與隔離機能，希望設施在長時間的被動狀態下，仍能達到相關機能要求。在滿足機能的條件下，選擇影響該機能的因子，依此訂定適合的「檢查項目」。除訂定檢查方法、檢查時間與頻率外，也須確定檢查值能滿足設定的規格值。

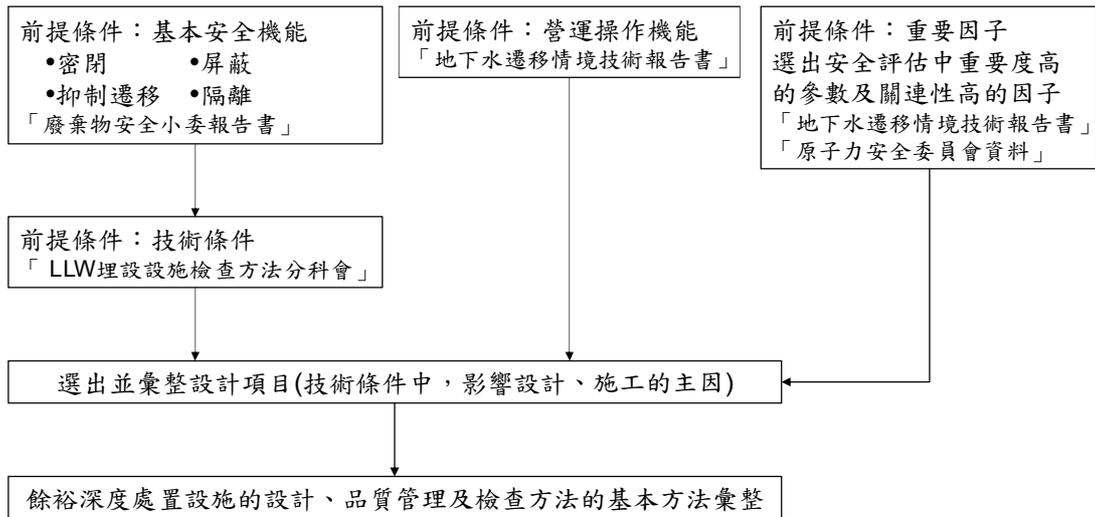


圖 1.3-2 檢討流程

第二章 水泥系材料

處置設施中，以水泥系材料為主要構成材料之設施，包括低擴散層、處置窖及窖內空隙填充材，各設施之機能要求與技術條件整理如表 2-1 所示，並針對不同設施之設計、品質管理及檢查方針，分別說明如後。

表 2-1 水泥系材料設施之機能要求與技術條件

機能要求	階段	機能內容	是否需要此機能			技術條件	
			低擴散層	處置窖	窖內空隙填充材		
基本安全機能	密閉	建設	防止輻射物質露出掩埋地外	—	●	—	• 力學特性
	屏蔽	與營運	對於來自廢料包件的放射線有屏蔽效果	●	●	●	• 輻射的屏蔽性能
	抑制遷移	回填後	抑制放射性核種的擴散遷移	●	—	—	• 擴散特性
			吸附放射性核種	●	●	●	• 核種吸附性
			藉由低透水性，降低通過處置設施的地下水量	—	—	—	—
			不要形成連續性的地下水遷移路徑	—	—	—	—
	隔離		確保隔離距離	—	—	—	—
			防止任意入侵	—	—	—	—
營運操作機能	建設與營運	確保建設與營運時所需的空間及力學安定性	●	●	—	• 力學特性	
		維持坑道形狀	—	—	—	—	

2.1 低擴散層

2.1.1 設計

一、技術條件與設計項目

低擴散層在建設與營運階段為屏蔽廢料包件所釋放的輻射，並提供足夠的強度以保護廢料包件與處置窖，故其技術條件為輻射的屏蔽性能與力學特性。而在回填後階段，為達到抑制放射性核種的擴散遷移及吸附放射性核種之功效。故此階段的技術條件為擴散特性與核種吸附性。各技術條件對應之設計項目彙整如表 2.1.1-1 所示，並分別說明如下。

表 2.1.1-1 低擴散層的機能要求、技術條件與設計項目

機能要求		階段	技術要件	設計項目	
				施工時的性能與狀態	長期狀態變化
基本安全機能	屏蔽	建設與營運	輻射的屏蔽性能	<ul style="list-style-type: none"> 乾單位重 構件尺寸(厚度) 抗壓強度 	—
	抑制遷移	回填後	擴散特性	<ul style="list-style-type: none"> 有效擴散係數 構件尺寸 裂縫開口面積 	<ul style="list-style-type: none"> 有效擴散係數 礦物組成 抗壓強度
			核種吸附性	<ul style="list-style-type: none"> 吸附分配係數 構件尺寸 	<ul style="list-style-type: none"> 礦物組成
營運操作機能		建設與營運	力學特性	<ul style="list-style-type: none"> 抗壓強度 	—

(一)輻射的屏蔽性能

須屏蔽的輻射一般係指 γ 射線、中子等，但此處僅以 γ 射線為代表。遮蔽 γ 射線的能力，與屏蔽體的單位容積與厚度有一定的比例關係，如圖 2.1.1-1 所示。而在維持低擴散層的屏蔽性能時，也需考量力學特性，因此，影響屏蔽性能的設計項目包括乾單位重、構件尺寸(厚度)及抗壓強度。但

裂縫的寬度與深度對屏蔽輻射性能的影響有限，故不列入設計項目的檢討對象。

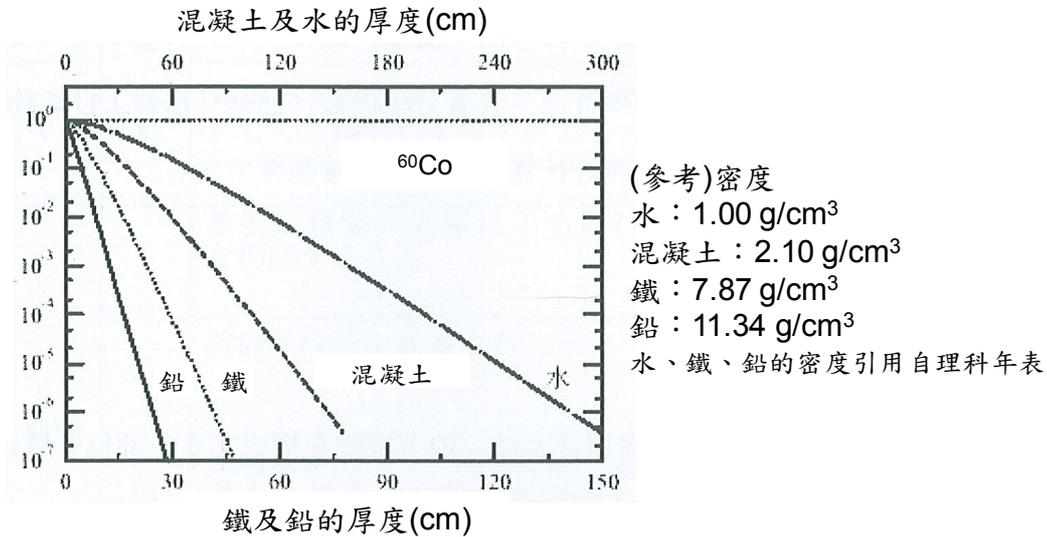


圖 2.1.1-1 鈷 60 γ 射線的有效劑量穿透率

(二)擴散特性

放射性核種的遷移擴散會受到水泥系材料健全部分的有效擴散係數及裂縫影響，故以劣化的比例評估抑制放射性核種因擴散而遷移的機能。因此，將水泥系材料的構件尺寸、裂縫開口面積及健全部分的有效擴散係數作為設計項目。

水泥系材料中不含裂縫的部分(以下稱為基質材料(matrix))，其有效擴散係數會隨空隙率增加而變大，如圖 2.1.1-2 所示。而裂縫寬度對有效擴散係數的影響遠小於透水係數，如圖 2.1.1-3 所示，在一般鋼筋混凝土結構物產生的裂縫寬度範圍內，因裂縫寬度增加對有效擴散係數的變化為 10^{-x} 次方的關係，故裂縫寬度對有效擴散係數的影響並不大。

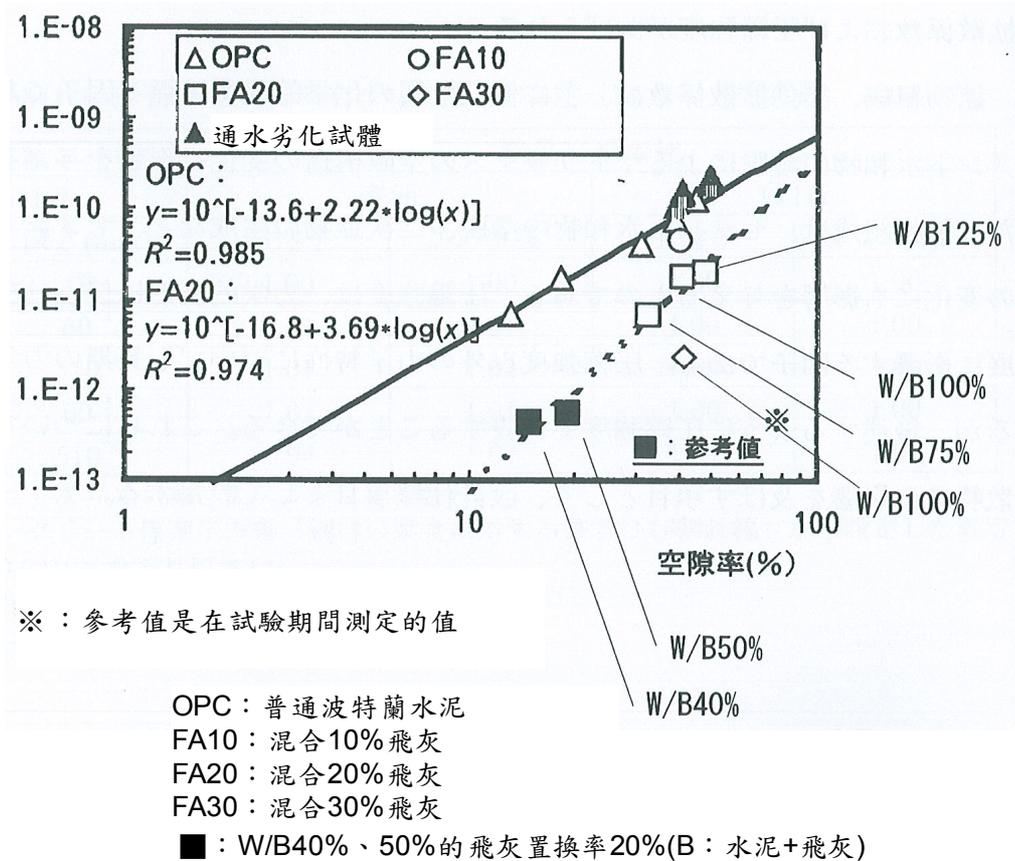


圖 2.1.1-2 空隙率與擴散係數之關係

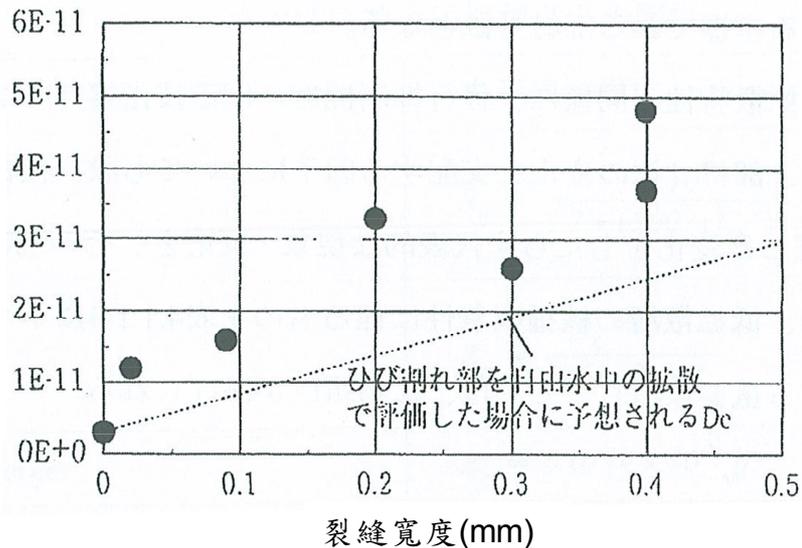


圖 2.1.1-3 裂縫寬度和氬水的有效擴散係數之關係

此外，因「抑制遷移」歷經數萬年後仍須保有該機能，故設計項目就須將長期的有效擴散係數、材料尺寸、裂縫開

口面積的變化作為考慮項目，如表 2.1.1-2 所示。由表 2.1.1-2 可知，影響低擴散層長期變化的重要項目為礦物組成、有效擴散係數及抗壓強度。礦物組成及有效擴散係數為影響低擴散層化學變質之主要因素，並使基質材料的孔隙構造產生變化。此外，礦物組成的不同會伴隨發生水泥水化物的溶出、生成次生礦物等現象，亦會影響水泥系材料中健全的部位。抗壓強度則會影響力學變形產生的裂縫及裂縫的擴張。抗壓強度以外的力學特性，尚有長期的力學變形，但後續僅以抗壓強度作代表即可，因上述各項將會影響長期的擴散特性，故皆列為設計項目。

表 2.1.1-2 擴散特性的代表現象、反應及相關項目

重要度高的參數	影響性能的物理、化學特性	評估長期狀態時需注意的現象與反應	影響左列現象與反應之項目
有效擴散係數	基質材料的空隙構造	<ul style="list-style-type: none"> • 水泥水化物的溶出、生成次生礦物 • 硝酸鹽、硫酸鹽等可溶性鹽的影響 	<ul style="list-style-type: none"> • 礦物組成 • 有效擴散係數
裂縫開口面積	裂縫的寬度、長度、數量	<ul style="list-style-type: none"> • 次生礦物產生造成裂縫的形成 • 硝酸鹽、硫酸鹽等可溶性鹽的影響 • 微生物活動 • 力學變形伴隨裂縫的產生與擴展 • 低透水層不均勻沉陷產生的應力，所產生的裂縫 	<ul style="list-style-type: none"> • 礦物組成 • 抗壓強度
厚度	厚度(健全部分)	<ul style="list-style-type: none"> • 水泥水化物的溶出、生成次生礦物 • 硝酸鹽、硫酸鹽等可溶性鹽的影響 	<ul style="list-style-type: none"> • 礦物組成

(三)核種吸附性

「抑制遷移」機能中的核種吸附性，是以吸附分配係數評估其吸附性能。當由工程障壁來推估核種的遷移量時，處置窖中孔隙水的核種濃度，與處置窖的體積大小有關。故設計項目是以吸附特性及放射性核種的吸附量作為指標來決定構件尺寸。

由於核種吸附性與擴散特性皆為「抑制遷移」機能的技術條件，故長期的吸附分配係數、影響構件尺寸變化的因子等亦為設計項目之一，如表 2.1.1-3 所示。由表 2.1.1-3 可知，礦物組成亦為影響低擴散層核種吸附性長期變化的重要項目。

表 2.1.1-3 核種吸附性的代表現象、反應及相關項目

重要度高的參數	影響性能的主要物理與化學特性	評估長期狀態時需注意的現象與反應	影響左列現象與反應之項目
分配係數	礦物組成	<ul style="list-style-type: none"> • 水泥水合物的溶出、生成次生礦物 • 熱變質造成的礦物變質 	• 礦物組成
	孔隙水的水質	<ul style="list-style-type: none"> • 水泥水合物的溶出、生成次生礦物 • 硝酸鹽、硫酸鹽等可溶性鹽的影響 	—
吸附體積	該部位的體積	<ul style="list-style-type: none"> • 水泥水合物的溶出、生成次生礦物 	• 礦物組成

(四)力學特性

需要具備運轉操作機能主要是在建設與營運階段，其設計年限仍在目前的土木結構設計耐用年限範圍內，故可從目前土木領域中選擇適用的設計方法即可。與力學特性相關之

項目，除抗壓強度外，尚有抗拉強度、彈性模數等，其中以抗壓強度較具代表性，故以抗壓強度作為設計項目。

二、材料選擇與配比設計之考量

(一)材料選擇

處置窖、窖內空隙填充材等也會持續提到水泥系材料，關於材料選擇的基本考量皆可通用。以下針對水泥、卜作嵐材料、石灰石粉末、骨材及添加劑等常用材料，考量其對擴散係數、裂縫及抗壓強度之影響，作為材料選擇之參考。

1.水泥

由混凝土透水試驗量測混凝土中水的擴散係數，於齡期 14 天時，使用不同水泥種類之試體，其擴散係數有明顯的差異，但超過 28 天齡期之後，則擴散係數的差異性則明顯下降。由於低擴散層的擴散特性主要考量回填後的狀況，齡期多超過 28 天以上，故使用的水泥種類對擴散係數的影響不大。

波特蘭水泥中，以低熱水泥的水化熱較低且自生收縮應變較小，可降低因水化熱或自生收縮產生的裂縫，加上低熱水泥中的鹼性成分比例較低，可降低混凝土因鹼骨材反應而產生之裂縫。

低擴散層需要的力學特性可分為側邊低擴散層與底部低擴散層兩部分，側邊低擴散層所需的抗壓強度，須能使附著於處置窖的遮蔽體在拆模後仍能自立；而底部低擴散層所需的抗壓強度，則要能支撐廢料包件或處置窖，這些部分都為早齡期時即需達成的要求條件。但低熱水泥從拆模到 28 天齡期，其抗壓強度都較其它種水泥低，齡期超過 28 天後，抗壓強度才開始快速提升。故使用低熱水泥時，擬訂施工計畫需將拆模後的強度變化納入考量。

2. 卜作嵐材料與石灰石粉末

添加飛灰、高爐爐渣、矽灰或石灰石粉末等混合材料，除可減少初期水泥砂漿或混凝土的裂縫外，尚有抵抗化學侵蝕、增加耐久性等功能。混合飛灰後的水泥，其孔隙率變化如圖 2.1.1-4 所示，在齡期 28 天~378 天會產生硬化體組織的細化，可減低水的擴散係數及氙水的有效擴散係數。

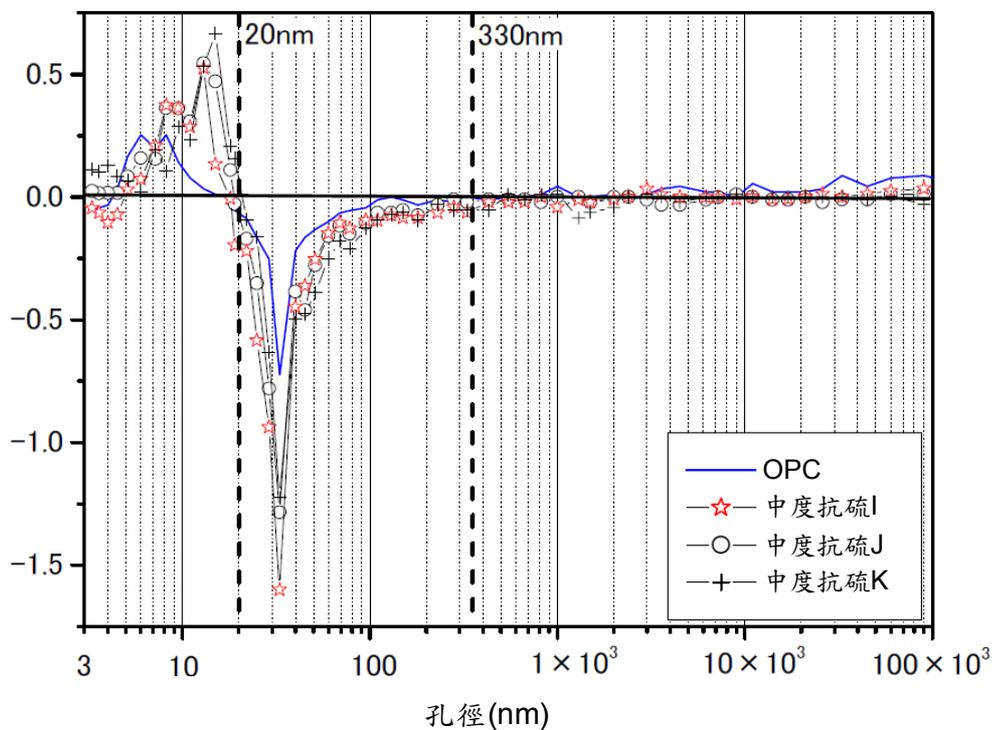


圖 2.1.1-4 齡期 28 天~378 天的孔徑分布變化

不同的飛灰、高爐爐渣、矽灰與石灰石粉末置換率，會影響混凝土的裂縫生成。絕熱溫度上升量及溫度上升速度皆與飛灰、高爐爐渣及石灰石粉末之置換率成反比，即置換率越大，溫度上升量越小。因此水泥添加飛灰、高爐爐渣與石灰石粉末後，可減少因水化熱所產生的裂縫。但使用石灰石粉末置換水泥時，須留意水灰比對抗壓強度的

影響，當水灰比增加時，抗壓強度也會隨之降低。此外，添加矽灰的混凝土，其自生收縮比沒有添加者大。若要減少因收縮產生的裂縫，則矽灰的加入量須減少。而對鹼骨材反應產生的裂縫而言，當高爐爐渣或矽灰的置換率超過 30% 或飛灰的置換率超過 20% 時，膨脹率就會開始下降。若要減少因鹼骨材反應所產生的裂縫，則須增加飛灰、高爐爐渣或矽灰的置換率。

3. 骨材

選擇骨材的主要考量為減少裂縫產生或加速劣化，其可能使混凝土產生裂縫的因素包括熱脹冷縮與鹼骨材反應，由於混凝土的線膨脹係數會受骨材的熱膨脹係數影響，故須選擇熱膨脹係數與線膨脹係數小的骨材。此外，骨材的熱膨脹係數與水泥漿體的熱膨脹係數落差很大時，亦可能產生裂縫，須納入考慮。鹼骨材反應會生成膨脹膠體，使骨材分解而產生孔隙，造成結構耐力降低，故在選擇骨材時需檢討骨材之性質。

混凝土受到材料與環境影響，可能會生成矽灰石膏而發生劣化，容易產生矽灰石膏而發生劣化的條件整理如表 2.1.1-4，主要有：(1) 石灰石粉末混入混凝土中，或骨材選用石灰岩。(2) 地下水或土壤中含有 SO_4^{2-} ，或是溶出的離子含有此成分。(3) 暴露在低溫環境(矽灰結晶的生成存在環境通常在 $15^{\circ}C$ 以下，但在接近 $5^{\circ}C$ 左右的溫度最容易生成)。關於矽灰石膏的生成機制，國外有較多相關研究，最新研究報告顯示，矽灰石膏在 $20^{\circ}C$ 的常溫下也會產生，故須密切注意矽灰石膏產生劣化的相關問題。

表 2.1.1-4 產生矽灰石膏而發生劣化的條件

原因		發生條件
周邊環境	土壤、水中的成分	高濃度的硫酸鹽
	溫度	15°C 以下或接近 5°C
	濕度	潮濕的環境、有地下水流的環境
使用材料	水泥	硫酸鹼成分多、C ₃ A 含量多
	骨材	使用石灰石骨材
	配比	高水膠比

4. 添加劑

在水泥系材料中加入添加劑可提升混凝土的施工性與耐久性，添加劑的性能主要依拌合水的減水率來分類，一般來說，單位用水量少，則孔隙生成少，耐久性提升，但施工性會降低。因此，在考量低擴散層的機能要求時，需選擇適當的添加劑，例如要施工性與耐久性高的自充填型高流動混凝土，則可加入高性能 AE 減水劑。添加劑的主成分有木質素(lignin)、磺酸化萘甲醛系鈉鹽(naphthalene)、羧酸(polycarboxylic acid)等，須從中選擇對吸附分配係數影響較小的添加劑。

(二) 配比設計

1. 乾單位重

乾單位重需配合有效擴散係數、裂縫開口面積、施工性等作為設計的基本，主要為確保乾單位重能滿足屏蔽機能。

2. 有效擴散係數

有效擴散係數會受到基質材料的細度影響，基質材料的細度會影響水灰比的設定、混合材料的置換率等基本配比設計。為使有效擴散係數經過長時間也不會增加，配比

設計時須謹慎考量降低化學變質，如水泥水化物中鈣的溶出等。基質材料的細度為影響長期化學變質的原因之一，故要抑制長期有效擴散係數增加，則須降低基質材料的細度，亦即水灰比的設定。但在降低水灰比的同時，也會使裂縫增加及施工性降低，故配比設計時謹慎衡量。

3. 裂縫開口面積

低擴散層的低擴散性及基質材料的擴散性，皆會受到裂縫的影響，而長時間的化學變質則是影響裂縫的原因之一。配比設計的主要目的即為減少低擴散層在施工階段產生的裂縫，裂縫生成的主要成因為硬化前產生粒料分離或急速乾燥的現象，或是水化、乾燥使基質材料的體積變化。水泥水化作用引起的裂縫，會受到環境條件、結構物的形狀尺寸、材料的熱特性、材料的力學特性及施工方法等項目影響，故在配比設計時，儘可能使用水化熱低的水泥或減少單位水泥量。而基質材料的體積變化，並非僅有基質材料的水分流失所產生的乾燥收縮，尚有伴隨水泥水化產生的自生收縮。基質材料體積變化引起的裂縫，與使用的材料、配比、結構物形狀、尺寸、管理條件、溫溼度等環境條件有關。故在配比設計時，儘可能降低拌合水量或減少單位水泥量。

4. 吸附分配係數

吸附分配係數受到水泥系材料的礦物組成所影響，由表 2.1.1-5 可知，不同的核種具有不同的分配係數，且吸附分配係數會依砂漿的材料種類、組合、品質的不同有所變動。由材料設計的觀點來看，考量放射性廢棄物的核種吸附分配係數時，可藉由安全評估過程中所收集到的資料來選擇適合的材料。

表 2.1.1-5 各種反應生成物的分配係數

主成分	添加成分	Kd(mL/g)			
		C-14	Cs-134	Co-60	Am-241
SiO ₂	Ca(OH) ₂	9800	50	1700	18000
	NaOH	<1	0.8	1.1	4.2
	NaOH+CaCl ₂	32000	1	12000	50000
	NaOH+NaCl	<1	0.7	1.1	12

5. 抗壓強度

低擴散層在建設與營運階段所要求之抗壓強度，主要為確保連接於處置窖的遮蔽體自立所需之強度，以及能支撐廢料包件與處置窖所需之強度。抗壓強度與乾單位重一樣，設計時需考量有效擴散係數、裂縫開口面積、後續施工性等項目，此外，還須確保抗壓強度能滿足營運操作機能。

6. 施工性

低擴散層施工時，盡可能使用填充容易且均一的水泥系材料，即施工性能高的水泥系材料。由於施工過程中，需採用人力進行固定等作業的施工場合甚多，故施工品質不均的情況相對也較多。在施工品質不均的情況下，要確保達到所要求的機能及狀態較為不易，建議採用不易受到施工品質影響的水泥系材料。故在施工性的配比設計時，須依此機能要求進行設計。一般常用較難影響施工品質且施工性能較高的水泥系材料有自充填型高流動混凝土或砂漿。

2.1.2 品質管理

考量設計項目與性能之關係，將影響設計項目的因素區分為材料管理、工法管理、狀態管理(成品管理)及環境管理四個類別，並依此列出相關的品質管理項目。檢討低擴散層的品質管理時，使用的材料為高流動性砂漿，材料的選定及配比設計以前述方針為基本，故針對低熱波特蘭水泥、細骨材飛灰、膨脹材料、石灰石粉末、高性能 AE 減水劑等材料進行檢討。有關低擴散層的品質管理項目整理如表 2.1.2-1 所示，並說明如下。

一、滿足乾單位重的品質管理項目

滿足乾單位重的品質管理項目包括水泥及骨材等材料的密度或計量值、砂漿的單位重等。當需考量整個低擴散層的乾單位重時，為確保所用之材料可均勻的填充，於施工時需針對充填性進行管理，如搬運方法、搬運時間等。品質管理項目中的充填性，是從水泥系材料中選出與充填性有關之影響因子，包括變形性、抗析離性等，這些特性可藉由坍度試驗、漏斗流下時間、空氣量、砂漿溫度及可泵性等管理項目進行管理。

二、滿足構件尺寸的品質管理項目

模板、支保工的品質將影響構件厚度，故需由施工方法進行管理。

三、滿足有效擴散係數的品質管理項目

有效擴散係數會受到空隙率之影響，而空隙率會因為水泥或混合材料的種類、混合比例不同、溫度與溼度等養護條件不同而有所差異，此外，水膠比亦會受到水、水泥與混合材料的計量誤差，以及骨材的表面含水率誤差影響。水膠比增加，可使有效擴散係數增大。

四、滿足裂縫開口面積的品質管理項目

水泥系材料產生裂縫的原因，除與材料性質及施工有關外，環境條件、外力等亦會影響。

五、滿足吸附分配係數的品質管理項目

由於吸附分配係數的機制尚不明確，故不易篩選影響因素。因此，吸附分配係數的品質管理項目將以安全評估假設範圍內的材料品質、配比、養護條件等項目作為管理項目。

六、滿足礦物組成的品質管理項目

水泥系材料的礦物組成會受到使用的材料、配比、養護條件與環境條件之影響，故上述項目即為滿足礦物組成的品質管理項目。材料的管理要選擇能抵抗長期物理、化學劣化的水泥系材料，且其伴隨產生的性能退化，不能超出安全評估的預期狀況，並以此作為品質管理的要件。將水泥系材料在長期狀態下影響的品質項目與內容，彙整如表 2.1.2-2。其中骨材中之有害礦物、混合劑主成分等項，並非既有規格項目。

(一)水泥

水泥的品質管理主要在減少膨脹破壞，增加長期的安定性。水泥中的 MgO 、 SO_3 、 C_3A 、鹼含量、膨脹材料及 R_2O 等成分及水泥的細度，若含量過多或細度不足，皆會引發膨脹性裂縫，若含量過少，則會有異常凝結，影響砂漿的流動性。

氯離子為鋼筋腐蝕的主要原因，在無筋砂漿的低擴散層中，氯離子將 C_3A 固化形成佛萊第鹽類(Friedel's salt)，佛萊第鹽類與硫酸鹽反應生成鈣礬石，此為膨脹破壞之主因。當混合材料非石灰石粉末時，其水泥風化程度可以燒失量作為指標。當使用風化後的水泥時，可能將無法於安全評估中，進行狀態設定以及推估長期的物理與化學變化。 C_3A 為水泥

主要的化合物之一，若與硫酸鹽反應，則會生成鈣礬石，引發膨脹性裂縫。

(二)骨材

骨材材料管理的主要考量為骨材中的氯離子、黏土塊或泥土、有機雜質、有害礦物等成分。骨材中的氯離子與水泥中的氯離子之品質管理相同，可將 C_3A 固化形成佛萊第鹽類，產生膨脹裂縫。而骨材中的黏土塊與泥土會妨礙骨材與水泥漿附著，進而降低強度及增加滲透性，黏土塊也會影響聚羧酸高性能減水劑之砂漿的流動性。骨材中的有機雜質會阻礙水泥中石灰的水化反應。骨材中的有害礦物則指造成鹼反應礦物、膨脹性裂縫等原因的成分，如高嶺土等黏土礦物、硫化鐵等。其中，除鹼反應礦物有既定規格外，其他有害礦物以往皆無規定。

(三)飛灰

飛灰會受到 MgO 、 SO_3 、 R_2O 、氯離子及燒失量的影響，其品質管理項目與含有上述成分的水泥相同。飛灰可與水泥水化產生的氫氧化鈣發生化學反應，再形成水化矽酸鈣、水化矽鋁酸鈣或水化鋁酸鈣等膠體，意即具有卜作嵐活性。水泥硬化後的長期狀態受到卜作嵐活性影響甚大，評估飛灰的卜作嵐活性指標中，直接指標為活性指數，間接指標則為細度。

(四)膨脹材料

膨脹材料使用量較水泥或飛灰少，對膨脹材料的性能要求主要在建設與營運階段。膨脹材料的品質管理項目為 MgO ， MgO 為石灰石原料之一，若含量過高則會引發膨脹性裂縫，損害長期的安定性。

(五)石灰石粉末

石灰石粉末與水泥相同，若用量過多，則無法自行反應形成硬化體。石灰石粉末的品質管理項目係考量 CaCO_3 、 MgO 、 Al_2O_3 等石灰石粉末的主要成分。 CaCO_3 若含量過少可能造成雜質混入，進而影響長期狀態。 MgO 與水泥的品質管理項目相同，若含量過高會引發膨脹性裂縫，損害長期的安定性。 Al_2O_3 則可做為黏土含量指標。

(六)化學添加劑的品質管理項目

化學添加劑的品質管理項目為 R_2O ，當含量過多時，則會因鹼骨材反應引發膨脹破壞。化學添加劑中的氯離子與水泥中的氯離子作用相同，會將 C_3A 固化形成佛萊第鹽類產生不良影響。由於添加劑的主要成分不同，對核種遷移會產生影響，故也將此項選出。

日本對於低擴散層的品質管理方法，主要以日本工業規格、土木學會規格與標準為基礎。未包含之項目，則參考以往試驗實際經驗，設定試驗方法、實施時間及頻率等管理項目。其中有關材料品質、計量值、單位重、模版、支保工及養護方法等，其管理方法係依據日本土木學會出版之「混凝土標準示方書〔施工篇〕」（以下簡稱「JSCE RC 示方書」）之規定。而與放射線屏蔽性能相關的品質管理項目，則依據日本建築學會出版之「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5N 原子力發電所設施相關之鋼筋混凝土工程」（以下簡稱「JASS5N」）之品質管理方法，各品質管理項目的試驗與管理方法彙整如表 2.1.2-3 所示。

表 2.1.2-1 低擴散層的品質管理項目

機能要求	階段	技術要件	設計項目	品質管理項目								
				材料管理	工法管理		狀態管理(成品管理)	環境管理				
					施工	養護						
基本安全機能	屏蔽	輻射的屏蔽性能	乾單位重	<ul style="list-style-type: none"> • 材料密度 • 計量值 • 單位容積質量 • 充填性 	<ul style="list-style-type: none"> • 搬運方法 • 搬運時間 • 灌漿方法 	—	—	—				
			構件尺寸(厚度)	—	• 模板、支保工	—	—	—				
			抗壓強度	<ul style="list-style-type: none"> • 水泥品質 • 混合材料品質 • 計量值 • 充填性 	<ul style="list-style-type: none"> • 搬運方法 • 搬運時間 • 灌漿方法 	• 養護方法	—	• 坑內環境溫度、濕度				
	抑制遷移	回填後	擴散特性	施工時性能、狀態	有效擴散係數	<ul style="list-style-type: none"> • 水泥品質 • 混合材料品質 • 計量值 • 充填性 	<ul style="list-style-type: none"> • 搬運方法 • 搬運時間 • 灌漿方法 	• 養護方法	—	• 坑內環境溫度、濕度		
					構件尺寸	—	• 模板、支保工	—	—	—		
					裂縫開口面積	<ul style="list-style-type: none"> • 水泥品質 • 混合材料品質 • 骨材品質 • 計量值 • 砂漿溫度 • 充填性 	<ul style="list-style-type: none"> • 搬運方法 • 搬運時間 • 灌漿方法 	• 養護方法	—	• 坑內環境溫度、濕度		
					吸附分配係數	<ul style="list-style-type: none"> • 材料品質 • 計量值 • 充填性 	<ul style="list-style-type: none"> • 搬運方法 • 搬運時間 • 灌漿方法 	• 養護方法	—	• 坑內環境溫度、濕度		
			擴散特性	長期狀態變化	核種吸附性	核種吸附性	有效擴散係數	<ul style="list-style-type: none"> • 水泥品質 • 混合材料品質 • 計量值 • 充填性 	<ul style="list-style-type: none"> • 搬運方法 • 搬運時間 • 灌漿方法 	• 養護方法	—	• 坑內環境溫度、濕度
							礦物組成	<ul style="list-style-type: none"> • 材料品質 • 計量值 	—	• 養護方法	—	• 坑內環境溫度、濕度
							抗壓強度	<ul style="list-style-type: none"> • 水泥品質 • 混合材料品質 • 計量值 • 充填性 	<ul style="list-style-type: none"> • 搬運方法 • 搬運時間 • 灌漿方法 	• 養護方法	—	• 坑內環境溫度、濕度
							礦物組成	<ul style="list-style-type: none"> • 材料品質 • 計量值 	—	• 養護方法	—	• 坑內環境溫度、濕度
							核種吸附性	<ul style="list-style-type: none"> • 材料品質 • 計量值 	—	• 養護方法	—	• 坑內環境溫度、濕度
			營運操作機能	建設營運	力學特性	抗壓強度	<ul style="list-style-type: none"> • 水泥品質 • 混合材料品質 • 計量值 • 充填性 	<ul style="list-style-type: none"> • 搬運方法 • 搬運時間 • 灌漿方法 	• 養護方法	—	• 坑內環境溫度、濕度	

表 2.1.2-2 影響水泥系材料長期狀態的品質項目與內容

材料	影響長期狀態的品質項目	影響內容
水泥	MgO	膨脹性裂縫
	SO ₃	膨脹性裂縫
	鹼	鹼骨材反應
	氯離子	膨脹性裂縫
	燒失量	與安全評估不符合
	矽酸二鈣	水化反應
	矽酸三鈣	膨脹性裂縫
細骨材 粗骨材	氯離子	膨脹性裂縫
	黏土塊	增加物質穿透性
	泥含量	
	有機雜質含量	妨礙水化反應
	有害礦物	膨脹性裂縫
飛灰	MgO	膨脹性裂縫
	SO ₃	膨脹性裂縫
	鹼	鹼骨材反應
	燒失量	與安全評估不符合
	SiO ₂	水化反應
	活性度指數 (API 值)	水化反應
膨脹材	MgO	膨脹性裂縫
石灰石 粉末	CaCO ₃	膨脹性裂縫
	CaO	膨脹性裂縫
	SO ₃	膨脹性裂縫
	Al ₂ O ₃	增加物質穿透性
化學添 加劑	全鹼	鹼骨材反應
	氯離子	膨脹性裂縫
	主成分	核種遷移動作

表 2.1.2-3 低擴散層的品質管理項目及其試驗與管理方法

品質管理項目		試驗與管理方法
材料 管理	材料品質	「混凝土材料及補強材料的品質管理」(JSCE RC 示方書、施工標準) 或是「混凝土材料的試驗與檢查」(JASS5N)
	計量值	「混凝土的製造和品質管理」(JSCE RC)
	砂漿溫度	溫度量測
	單位容積質量 充填性	「混凝土的品質管理」(JSCE RC 示方書、施工標準)
工法 管理	搬運方法 搬運時間 灌漿方法 模板、支保工	「施工品質管裡」(JSCE RC 示方書、施工標準) 或是「混凝土的品質管理和檢查」、「模板工程的品質管理和檢查」(JASS5N)
	養護方法	「施工品質管裡」(JSCE RC 示方書、施工標準)
環境 管理	坑內溫度	溫度量測
	坑內濕度	相對濕度量測

2.1.3 檢查

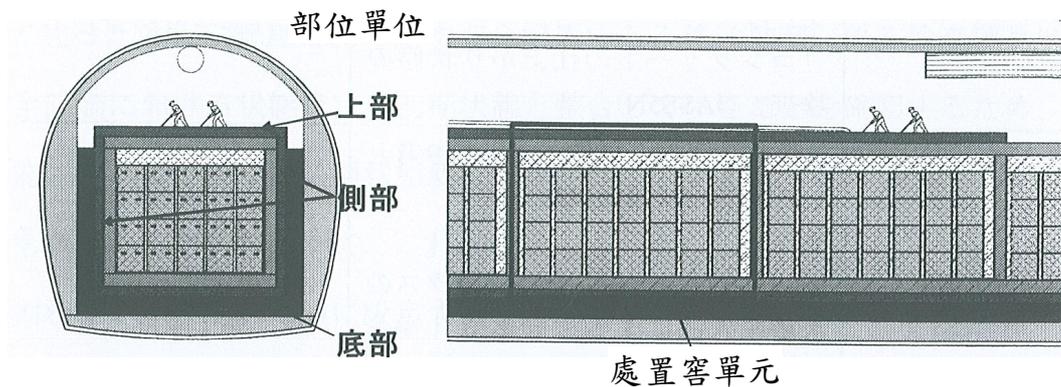
檢查項目主要是確認處置設施能夠滿足所需的機能要求而實施，各機能要求對應的技術條件中，影響設計施工的主要因素即為設計項目，因此檢查項目與設計項目相同。低擴散層的檢查項目如表 2.1.3-1 所示，包括有乾單位重、材料尺寸、有效擴散係數、裂縫開口面積、礦物組成、抗壓強度及吸附分配係數。

低擴散層的檢查方法適用標準主要為 JSCE RC 示方書及 JASS5N，因低擴散層為無筋砂漿構造，故檢查方法可適用 JSCE RC 示方書之規定，而與放射線屏蔽性能相關的技術條件，則可適用 JASS5N。由於 JSCE RC 示方書的適用範圍為設計使用年限未滿 100 年之結構物，而低擴散層需要的抑制遷移機能必須維持數萬年以上的時間，若要使用 JSCE RC 示方書的規定，則須檢討是否可行，故對於低擴散層之抑制遷移機能檢查，也可參考以往試驗實績來檢討檢查方法。低擴散層的檢查方法與頻率，如表 2.1.3-2 所示。

檢查頻率依施工單元進行，假設一次施工一個處置窖單元，「施工單元」如圖 2.1.3-1 所示。此一單元中，低擴散層的底部、側邊及上部，各自的施工間隔約有數月的差異，因此使用材料的品質，依季節變動須考量溫度變化，並須對每一施工單元進行檢查。

表 2.1.3-1 低擴散層的機能要求、技術要件與檢查項目之關係

機能要求		階段	技術要件	檢查項目
基本安全機能	屏蔽	建設與營運	輻射的屏蔽性能	<ul style="list-style-type: none"> • 乾單位重 • 構件尺寸(厚度) • 抗壓強度
	抑制遷移	回填後	擴散特性	<ul style="list-style-type: none"> • 有效擴散係數 • 構件尺寸 • 裂縫開口面積 • 礦物組成 • 抗壓強度
			核種吸附性	<ul style="list-style-type: none"> • 吸附分配係數 • 構件尺寸 • 礦物組成
營運操作機能		建設與營運	力學特性	<ul style="list-style-type: none"> • 抗壓強度



當指底部、上部時：每1個處置窖單元=1個施工單元
當指側部時：每1個處置窖單元(左右兩側)=1個施工單元

圖 2.1.3-1 檢查單位

表 2.1.3-2 低擴散層的檢查方法

檢查項目	試驗與檢查方法	檢查時間與頻率
乾單位重	JASS5N T-601 或是 JASS5N T-602	時機：配比強度的標準 齡期 頻率：施工單元
構件尺寸 (厚度)	「混凝土構件的位置及形狀尺寸的 檢查」(JSCE RC 示方書、檢查標準) 或是「混凝土灌漿狀態的檢查」 (JASS5N)	時機：襯板或拆除支柱 後，可進行檢查 的時候 頻率：施工單元
有效擴散 係數	參考日本原子力學會標準 F008 的有 效擴散係數試驗方法 或是參考 JIS R16555「由精密陶瓷的 水銀壓入法造成成型體的氣孔孔徑 分布試驗方法」來測量空隙率	時機：配比強度的標準 齡期 頻率：施工單元
裂縫開口 面積	「表面狀態的檢查」(JSCE RC 示方 書、檢查標準)	時機：襯板或拆除支柱 後，可進行檢查 的時候 頻率：施工單元
礦物組成	「混凝土材料接收時的檢查」(JSCE RC 示方書、檢查標準) 或是「預拌混凝土接收時的檢查」 (JSCE RC 示方書、檢查標準)中的配 比檢查	以 JSCE RC 示方書(檢 查標準)為基礎
吸附分配 係數	日本原子力學會標準 AESJ-JC-F003：2002 或是 AESJ-JC-F008：2006	時機：配比強度的標準 齡期 頻率：施工單元
	或與「材料品質、配比」檢查相同	
抗壓強度	「預拌混凝土接收時的檢查」(JSCE RC 示方書、檢查標準)中的抗壓強度 檢查 或是「結構體混凝土強度檢查」 (JASS5N)	時機：配比強度的標準 齡期 頻率：施工單元

2.2 處置窖

2.2.1 設計

一、技術條件與設計項目

處置窖在建設與營運階段的要求與低擴散層相同，須能屏蔽廢料包件所釋放的輻射，故技術條件為輻射的屏蔽性能。此外，技術條件中的力學特性包括處置窖在承受載重、地震力後仍然安全，並使內部的廢料包件仍保有「密閉」、「屏蔽」機能。而處理廢料包件時，吊放天車的支撐物亦必須有足夠耐力。處置窖在抑制遷移機能上之要求為核種吸附性，故此技術條件為核種吸附性。各技術條件對應之設計項目彙整如表 2.2.1-1 所示，並分別說明如下。

(一)力學特性

處置窖需具備「密閉」機能的時間，尚屬一般混凝土構造物設計耐用範圍內，故可適用現行土木領域使用的結構設計與耐久性設計的方法。與力學特性相關的設計項目為混凝土抗壓強度、鋼筋強度、配筋、鋼筋續接及鋼筋保護層等。

(二)輻射的屏蔽性能

處置窖在開始吊放廢棄物到處置坑道回填完畢為止的這段時間內，都需具備「屏蔽」機能，於設計時需整合低擴散層所需的性能一併設計。設計項目與低擴散層相同，皆為乾單位重、構件尺寸(厚度)。此外，維持「屏蔽」機能所需的力學特性，其設計項目有混凝土抗壓強度、鋼筋強度、配筋、鋼筋續接及鋼筋保護層等。

(三)核種吸附性

在「抑制遷移」機能中，核種吸附性的機能與低擴散層相同，與混凝土的吸附分配係數、放射性核種吸附量相關的指標有材料尺寸與礦物組成，此亦為設計項目。

表 2.2.1-1 處置窖的機能要求、技術條件及設計項目間之關係

機能要求	階段	技術條件	設計項目	
			施工時的性能與狀態	長期狀態變化
基本安全機能	密閉	力學特性	<ul style="list-style-type: none"> • 混凝土抗壓強度 • 鋼筋強度 • 配筋、鋼筋續接、鋼筋保護層 	—
	屏蔽		輻射的屏蔽性能	<ul style="list-style-type: none"> • 乾單位重 • 材料尺寸(厚度) • 混凝土抗壓強度 • 鋼筋強度 • 配筋、鋼筋續接、鋼筋保護層
	抑制遷移	回填後	核種吸附性	<ul style="list-style-type: none"> • 吸附分配係數 • 材料尺寸
營運操作機能	建設與營運	力學特性	<ul style="list-style-type: none"> • 混凝土抗壓強度 • 鋼筋強度 • 配筋、鋼筋續接、鋼筋保護層 	—

二、材料選擇與配比設計之考量

(一)材料選擇

處置窖的主要材料包括水泥、骨材、混合材料等的選定，與低擴散層之材料選擇相同。此處僅針對處置窖特有的鋼筋材料之選擇方法作一說明。材料選擇時需特別注意材料間的相互作用，確保使用材料無內含對其他材料可能產生不良影響之物質。

在建設與營運階段，使用鋼筋的主要目的為減少處置窖因載重影響所產生的裂縫，選擇方式與一般結構用鋼筋相同即可。但考量回填後鋼筋的腐蝕膨脹，可能使鄰近低擴散層產生裂縫，由低擴散層維持「抑制遷移」機能的觀點來看，須盡可能降低鋼筋使用量。

若要降低鋼筋使用量，可採用加大斷面的方法。材料的腐蝕對策，可使用耐侵蝕性高的補強材料，如鍍鋅鋼筋、不

銹鋼筋、鈦筋或碳纖維等。但前者與坑道挖掘量及混凝土使用量的增加有直接關連，後者因材料單價較一般鋼筋為高，故對成本影響甚大必須審慎評估。

(二) 配比設計

1. 混凝土抗壓強度

混凝土的配比強度、水灰比等配比設計，以設計基準強度、耐久設計基準強度為基準，依據不同的使用材料、製造設備、混凝土的抗壓強度實績等來進行設定。為確保處置窖施工、完工後的機能要求，依照不同場合，例如低擴散層的施工作業載重、營運時廢料包件載重等，來要求適當的強度。故考量載重的大小、載重時間、澆置混凝土時的溫度、環境溫度等訂定配比強度。

2. 乾單位重

乾單位重除考量混凝土的抗壓強度外，還須考量後續施工性來進行配比設計。乾單位重要能滿足屏蔽機能要求。

3. 吸附分配係數

吸附分配係數受到水泥系材料的礦物組成與液相的化學組成所影響，此傾向依核種的種類不同而有所不同。故吸附分配係數隨著水泥的材料種類、組合、品質等不同而有所變動。由材料設計的觀點來看，考量放射性廢棄物的核種吸附分配係數時，可藉由安全評估過程中所收集到的資料來選擇適合的材料。

4. 施工性

處置窖在施工時，須先確保所需的狀態與性能後才能進行施工。混凝土的選擇須以施工性能高、施工品質不易受到影響為目標。故施工性的配比須以該機能要求為基礎進行設計。

2.2.2 品質管理

在檢討處置窖的品質管理時，假設處置窖的使用材料為高流動混凝土，其組成材料包括低熱波特蘭水泥、粗骨材、細骨材、飛灰、膨脹材、石灰石粉末及高性能 AE 減水劑等。依據處置窖使用的材料，彙整出處置窖的品質管理項目，如表 2.2.2-1 所示，以下針對處置窖特有的品質管理項目進行說明。

一、滿足鋼筋強度的品質管理項目

滿足鋼筋強度的品質管理項目有鋼筋的直徑與強度。此為確保鋼筋混凝土結構之材料強度的必要項目。

二、滿足配筋、鋼筋續接、鋼筋保護層的品質管理項目

滿足配筋、鋼筋續接的材料品質管理項目有加工尺寸、直徑、數量。與施工相關的品質管理項目有鋼筋續接固定的位置、固定的長度、固定的間隔、支撐架或間隔物(Spacer)或鋼筋支架(Bar support)的配置、鋼筋的固定程度、鋼筋續接的焊接外觀等。滿足鋼筋保護層的品質管理項目主要是澆置中襯板(Sheathing)與最外層鋼筋的距離。混凝土澆置後，很難確認鋼筋保護層是否如原先設定，故澆置混凝土時，管理維持襯板與最外層鋼筋的距離十分重要。

處置窖的品質管理方法主要參考 JSCE RC 示方書之規定，而輻射屏蔽機能的品質管理項目，則依照 JASS5N 之規定，將品質管理項目整理如表 2.2.2-2 所示。

表 2.2.2-1 處置窖的品質管理項目

機能要求	階段	技術條件	設計項目	品質管理項目				
				材料管理	工法管理		狀態管理	環境管理
					施工	養護		
基本安全機能	封閉	力學特性	混凝土壓縮強度	<ul style="list-style-type: none"> •水泥品質 •混和材料品質 •計量值 •充填性^{*1} 	<ul style="list-style-type: none"> •搬運方法 •搬運時間 •灌漿方法 	<ul style="list-style-type: none"> •養護方法 	—	<ul style="list-style-type: none"> •坑內環境溫度 •濕度
			鋼筋強度	<ul style="list-style-type: none"> •直徑、強度 	—	—	—	—
			配筋、鋼筋續接、鋼筋保護層	<ul style="list-style-type: none"> •加工尺寸 •直徑/數量 	<ul style="list-style-type: none"> •鋼筋續接固定的位置、長度、間隔 •支撐架、間隔物 (Spacer)、鋼筋支架 (Bar support) 的配置 •鋼筋的固定程度 •鋼筋續接的焊接外觀 •澆置中襯板 (Sheathing) 與最外層鋼筋的距離 	—	—	—
	遮蔽	輻射的遮蔽性能	乾單位重	<ul style="list-style-type: none"> •構成材料密度 •計量值 •單位重 •充填性^{*1} 	<ul style="list-style-type: none"> •搬運方法 •搬運時間 •灌漿方法 	—	—	—
			構件尺寸(厚度)	—	•模板、支保工	—	—	—
			混凝土壓縮強度	與封閉機能的品質管理項目相同				
			鋼筋強度					
	配筋、鋼筋續接							
	抑制遷移	回填後核種吸附性	施工時性能、狀態	<ul style="list-style-type: none"> •材料品質 •計量值 •充填性 	<ul style="list-style-type: none"> •搬運方法 •搬運時間 •灌漿方法 	<ul style="list-style-type: none"> •養護方法 	—	<ul style="list-style-type: none"> •坑內環境溫度 •濕度
			構件尺寸	—	•模板、支保工	—	—	—
			長期狀態變化	<ul style="list-style-type: none"> •礦物組成 •計量值 	—	<ul style="list-style-type: none"> •養護方法 	—	<ul style="list-style-type: none"> •坑內環境溫度 •濕度
	運轉上的機能	建設、運轉	力學特性	混凝土強度 鋼筋強度 配筋、鋼筋續接、鋼筋保護層	與封閉機能的品質管理項目相同			

*1：坍塌度、漏斗流下時間、空氣量、混凝土溫度及可泵性

表 2.2.2-2 處置窖的品質管理項目及其試驗方法與管理方法

品質管理項目		試驗方法與管理方法
材料 管理	• 材料品質	「混凝土材料及補強材料的品質管理」(JSCE RC 示方書、施工標準) 或是「混凝土材料的試驗與檢查」(JASS5N)
	• 計量值	「混凝土的製造和品質管理」(JSCE RC 示方書、施工標準)
	• 鋼筋直徑、強度 • 鋼筋加工尺寸 • 鋼筋直徑/數量	「混凝土材料及補強材料的品質管理」(JSCE RC 示方書、施工標準)
	• 單位重 • 充填性	「混凝土的品質管理」(JSCE RC 示方書、施工標準) 或是「混凝土的品質管理和檢查」(JASS5N)
工法 管理	• 鋼筋續接固定的位置、長度、間隔 • 支撐架、間隔物 (Spacer)、鋼筋支架 (Bar support) 的配置 • 鋼筋的固定程度 • 鋼筋續接的焊接外觀 • 澆置中襯板 (Sheathing) 與最外層鋼筋的距離	「施工品質管裡」(JSCE RC 示方書、施工標準)
	• 搬運方法、時間 • 灌漿方法 • 模板尺寸	「施工品質管裡」(JSCE RC 示方書、施工標準) 或是「模板工程的品質管理和檢查」(JASS5N)
	• 養護方法	「施工品質管裡」(JSCE RC 示方書、施工標準)
環境 管理	• 坑內溫度	溫度量測
	• 坑內濕度	相對溼度量測

2.2.3 檢查

檢查項目主要是確認能夠滿足所需的機能要求而實施。由於設計項目是從影響技術條件的因子中選出，因此各機能對應的檢查項目與設計項目相同，彙整如表 2.2.3-1 所示，處置窖的檢查項目包括混凝土抗壓強度、鋼筋強度、配筋、鋼筋續接、鋼筋保護層、乾單位重、構件尺寸(厚度)、吸附分配係數、礦物組成等。

表 2.2.3-1 處置窖的機能要求、技術條件與檢查項目

機能要求		階段	技術條件	檢查項目
基本安全機能	密閉	建設與營運	力學特性	<ul style="list-style-type: none"> • 混凝土抗壓強度 • 鋼筋強度 • 配筋、鋼筋續接、鋼筋保護層
	屏蔽		輻射的屏蔽性能	<ul style="list-style-type: none"> • 乾單位重 • 構件尺寸(厚度) • 混凝土抗壓強度 • 鋼筋強度 • 配筋、鋼筋續接、鋼筋保護層
	抑制遷移	回填後	核種吸附性	<ul style="list-style-type: none"> • 吸附分配係數 • 構件尺寸 • 礦物組成
營運操作的機能		建設與營運	力學特性	<ul style="list-style-type: none"> • 混凝土抗壓強度 • 鋼筋強度 • 配筋、鋼筋續接、鋼筋保護層

檢查方法主要以 JSCE RC 為基準，與輻射屏蔽性能相關的技術條件，其對應之檢查方法則可適用 JASS5N。當抑制遷移機能的檢查要使用 JSCE RC 示方書之規定時，則須檢討是否可行，故設定處置窖之抑制遷移機能檢查時，需參考以往試驗實績。

而在建設與營運階段機能要求的檢查，則參考既有標準即可。處置窖的檢查方法、時間與頻率彙整如表 2.2.3-2 所示。

表 2.2.3-2 處置窖的檢查方法

檢查項目	試驗與檢查方法	檢查時間與頻率
混凝土抗壓強度	「預拌混凝土接收時的檢查」(JSCE RC 示方書、檢查標準)中的抗壓強度檢查或是「混凝土構造體的強度檢查」(JASS5N)	時機：配比強度的標準齡期 頻率：施工單元
鋼筋強度	「補強材料接收時的檢查」(JSCE RC 示方書、檢查標準)	JSCE RC 示方書(檢查標準)的規定
配筋、鋼筋續接、鋼筋保護層	「鋼筋工程的檢查」(JSCE RC 示方書、檢查標準)	
乾單位重	JASS50 T-601 或是 JASS5N T-602	時機：配比強度的標準齡期 頻率：施工單元
構件尺寸(厚度)	「混凝土構件的位置及形狀尺寸的檢查」(JSCE RC 示方書、檢查標準)或是「混凝土灌漿狀態的檢查」(JASS5N)	時機：配比強度的標準齡期 頻率：施工單元
吸附分配係數	日本原子力學會標準 AESJ-JC-F003：2002 或是 AESJ-JC-F008：2006	時機：配比強度的標準齡期 頻率：施工單元
	或與「材料品質、配比」檢查相同	
礦物組成	「混凝土材料接收時的檢查」(JSCE RC 示方書、檢查標準)或是「預拌混凝土接收時的檢查」(JSCE RC 示方書、檢查標準)中的配比檢查	JSCE RC 示方書(檢查標準)的規定

2.3 窖內空隙填充材

2.3.1 設計

一、技術條件與設計項目

窖內空隙填充材的機能要求，係以防止輻射傷害的觀點來要求基本安全機能，有「屏蔽」及「抑制遷移」。窖內空隙填充材的機能要求、技術條件與設計項目整理如表 2.3.1-1。在建設與營運階段時，當廢料包件吊放後，為建置上部處置窖，施工人員必須進入窖內空隙填充材上方。因此，窖內空隙填充材需擁有屏蔽廢料包件輻射的性能。

表 2.3.1-1 空隙內填充材的機能要求、技術條件與設計項目

機能要求		階段	技術條件	設計項目	
				施工時性能、狀態	長期狀態變化
基本安全機能	屏蔽	建設與營運	輻射的屏蔽性能	<ul style="list-style-type: none"> 乾單位重 構件尺寸 抗壓強度 	—
	抑制遷移	回填後	核種吸附性	<ul style="list-style-type: none"> 吸附分配係數 填充量 	<ul style="list-style-type: none"> 礦物組成

(一)輻射的遮蔽性能

當一個處置窖單元的填充材回填完畢並開始進行上部處置窖施工時，設計須能滿足「屏蔽」機能。「屏蔽」機能的設計項目與低擴散層相同，包括乾單位重與構件尺寸。此外，為維持「屏蔽」機能的力學要求，故需檢討之設計項目為抗壓強度。

窖內空隙填充材的尺寸厚度，依據廢料包件的吊放位置、窖內空隙填充材澆置自平性而定，皆需納入考量後進行設計。

(二)核種吸附性

在「抑制遷移」機能中，對於核種吸附性的要求與低擴散層相同，其設計項目有水泥系材料的吸附分配係數、構件尺寸(若為窖內空隙填充材則指填充量)等與放射性核種吸附量相關的指標、礦物組成。

二、材料選擇與配比設計之基本考量

(一)材料選擇

窖內空隙填充材需達到不易受溶出影響、抑制長期的劣化及降低安全評估的不確定性等目標，以材料一致性的觀點來看，材料選擇的方向與低擴散層相同。此外，由於窖內空隙填充材是在輻射管理下進行長距離壓送及遠距離操作施工，因此填充材需有在廢料包件間的狹隘空間進行自充填的必要性。需檢討使用高性能 AE 減水劑的種類，並選擇能保持高坍度及自充填佳的材料。在材料的選定上，與自充填相關的項目需較低擴散層更為嚴格。加上上部窖內空隙填充材施工完成後，會有施工人員在其上進行處置窖及低擴散層的施工，故須確保單就窖內空隙填充材就能達到屏蔽機能，需檢討使用有較高性能的粗骨材。

(二)配比設計

1.乾單位重

乾單位重為配比設計之基礎，將會影響後續的填充性及施工性，在此情況下，還須確保乾單位重能滿足屏蔽機能之要求。

2.混凝土抗壓強度

窖內空隙填充材的抗壓強度，係指在建設與營運階段時，須能維持屏蔽機能所需之強度。抗壓強度與乾單位重相同，皆為配比設計之基礎，將會影響後續的填充性及施

工性。在此情況下，還須確保抗壓強度能滿足屏蔽機能之要求。

3. 吸附分配係數

吸附分配係數受到水泥系材料的礦物組成與液相化學組成，以及核種的種類所影響，故會因構成混凝土的材料種類、組合、品質之不同而有所變動。就材料設計的觀點而言，放射性廢棄物的核種吸附分配係數，可由安全評估分析時所蒐集的資料來選擇材料。

4. 充填性、施工性

窖內空隙填充材的施工會受到施工填充區域狹小、輻射管理區域內施工、長距離壓送等種種施工環境上的限制，須充分考量這些影響因素來進行設計。例如窖內空隙填充材之一般區域(廢料包件與廢料包見間的區域、廢料包件與處置窖間的區域)，需要在廢料包件之間狹窄的空間進行填充，故需具備較高的自充填性能，可採用無粗骨材的砂漿較為有利。窖內空隙填充材的上部僅能依靠窖內空隙的填充材料來發揮屏蔽機能的効果，因此，窖內空隙填充材的上部，遮蔽機能重視的乾單位重增加時，則可以粗骨材為檢討對象，但對自充填性的要求，則不需像充填於廢料包件間的區域時所要求之高充填性。

以施工性考量，模擬實際的施工與環境條件，包括狹隘空間的寬度、熱影響的程度、壓送距離等，進行壓送性與充填性實驗，配比設計需確保在特殊施工條件下，仍能達到所需的填充量。

另，因窖內空隙填充材與其他部位相同，填充後皆不容易進行修補。故在窖內空隙填充材設計時，除預想之施工條件外，由配比設計來降低施工不良造成的初期缺陷及訂定施工計畫也很重要。

2.3.2 品質管理

檢討窖內空隙填充材的品質管理時，假設處置窖的使用材料為高流動混凝土，其組成材料包括低熱波特蘭水泥、細骨材、飛灰、石灰石粉末及高性能AE減水劑等。依據處置窖使用的材料，彙整出處置窖的品質管理項目，如表 2.3.2-1 所示，以下針對處置窖特有的品質管理項目進行說明。

(一) 滿足乾單位重的品質管理項目

乾單位重的品質管理項目包括水泥與骨材等構成材料的密度或計量值、窖內空隙填充材下料時的單位重等。當需考量整個窖內填充材的乾單位重時，由於窖內空隙填充材需均勻的填充，以確保充填效果，故需進行充填性的材料管理(坍流度、漏斗流下時間、可泵性、砂漿溫度、空氣量)及搬運方法、時間等施工管理。

(二) 滿足構件尺寸的品質管理項目

窖內空隙填充材的厚度，須確保廢料包件吊放完成後，填充材能充滿處置窖內除了廢料包件以外的空間。因此，滿足構件尺寸的品質管理項目為檢查廢料包件吊放前實施的處置窖完成成果、廢料包件尺寸、廢料包件個數、廢料包件吊放位置及填充材的填充量等。

(三) 滿足抗壓強度的品質管理項目

抗壓強度的品質管理可採現行土木、建築領域的方法即可。

(四) 滿足吸附分配係數的品質管理項目

由於吸附分配係數的機制尚未充分理解，故不易挑選影響因素。因此，在窖內空隙填充材中，推估會影響安全評估的材料品質、配比、養護條件，作為管理項目。

(五) 滿足充填量的品質管理項目

充填量的品質管理項目中，首先要管理能填充於廢料包件與廢料包件間之侷限空間的材料品質。為求在此侷限空間能有自充填性，其品質管理方法可適用高流動混凝土的品質管理方法。一般高流動混凝土的品質管理方法中，沒有考量地下設施特有的條件，例如在輻射管理區域內施工有長距離壓送、遠距離操作、配管閉塞等風險，需考量相對應的處理對策。除管理窖內空隙填充材的材料與配比、澆置時的填充性與壓送性外，為確認填充沒有空隙，必須裝設填充用的監視系統，以確保所需的機能要求能夠達成。

(六)滿足礦物組成的品質管理項目

礦物組成的品質管理項目將受使用材料、配比、養護條件與環境條件之影響。配比的管理可適用於目前土木領域採用的管理方法。材料的品質管理中，須選擇能抵抗長期物理、化學劣化的材料。

窖內空隙填充材的品質管理項目，大部分皆與低擴散層的管理項目相同，故基本上採用相同方法進行管理。而低擴散層中未提及之輻射管理下的作業區域影響，屬於地下設施的特有項目，需於事前進行相關評估，在現行土木領域使用的品質管理體系上，加上能管理上述影響的方法。輻射屏蔽機能的品質管理項目，則依照 JASS5N 的規定，將品質管理項目整理如表 2.3.2-2 所示。

表 2.3.2-1 窖內空隙填充材的品質管理項目

機能要求	階段	技術條件	設計項目	品質管理項目						
				材料管理	工法管理		狀態管理	環境管理		
					施工	養護				
基本安全機能	屏蔽	建設與營運	輻射的屏蔽性能	乾單位重	<ul style="list-style-type: none"> •構成材料密度 •計量值 •單位重 •充填性^{*1} 	<ul style="list-style-type: none"> •搬運方法 •搬運時間 •灌漿方法 	—	—	—	
				構件厚度	—	<ul style="list-style-type: none"> •處置窖完工形狀 •廢料包件的尺寸、溫度 •廢料包件吊放位置 •充填量 	—	—	—	
				抗壓強度	<ul style="list-style-type: none"> •水泥品質 •混合材料品質 •計量值 •充填性^{*1} 	<ul style="list-style-type: none"> •搬運方法 •搬運時間 •灌漿方法 			•坑內環境溫度濕度	
	抑制遷移	回填後	核種吸附性	施工時性能、狀態	吸附分配係數	<ul style="list-style-type: none"> •材料品質 •計量值 •充填性^{*1} 	<ul style="list-style-type: none"> •搬運方法 •搬運時間 •灌漿方法 	•養護方法	—	•坑內環境溫度濕度
					充填量	<ul style="list-style-type: none"> •材料品質 •計量值 •充填性^{*1} •灌漿溫度 	<ul style="list-style-type: none"> •充填量 •填充時損失量 •填充高度 	—	—	•坑內環境溫度濕度
				長期狀態變化	礦物組成	<ul style="list-style-type: none"> •材料品質 •計量值 	—	•養護方法	—	•坑內環境溫度濕度

*1：坍塌度、漏斗流下時間、空氣量、砂漿溫度及可泵性。

表 2.3.2-2 窖內空隙填充材的品質管理項目及其試驗方法與管理方法

品質管理項目		試驗與管理方法	
材料管理	材料品質	「混凝土材料及補強材料的品質管理」(JSCE RC 示方書、施工標準)或是「混凝土材料的試驗與檢查」(JASS5N)	
	計量值	「混凝土的製造和品質管理」(JSCE RC)	
	單位重 充填性	「混凝土的品質管理」「施工品質管理」(JSCE RC 示方書、施工標準)或是「混凝土的品質管理與檢查」(JASS5N)	
工 法 管 理	施 工	成品結果檢查	「混凝土構造物的品質管理」(JSCE RC 示方書、施工標準)或是「混凝土成品的狀態檢查」(JASS5N)
		廢料包件的尺寸、數量 廢料包件的放置位置	確認操作記錄
		充填量	「施工品質管理」(JSCE RC 示方書、施工標準)
		灌漿溫度	溫度量測
	養 護	填充時損失量 壓送性	「施工品質管理」(JSCE RC 示方書、施工標準)
環境管理	坑內溫度	溫度量測	
	坑內濕度	相對濕度量測	

2.3.3 檢查

窖內空隙填充材的檢查項目如表 2.3.3-1 所示，有乾單位重、材料尺寸、抗壓強度、吸附分配係數、填充量、礦物組成。

檢查方法適用的標準以 JSCE RC 為基準。對於放射線遮蔽性能的技术要件來說，則可適用 JASS5N。窖內空隙填充材的抑制遷移機能因需維持數萬年以上，若要使用 JSCE RC 示方書的規定，則須檢討是否可行。故窖內空隙填充材之抑制遷移機能檢查時，可參考以往試驗實績，檢討檢查的方法。而在建設與營運階段之機能要求的檢查，則參考既有標準即可。窖內空隙填充材的檢查方法、時間與頻率，匯整如表 2.3.3-2 所示。

表 2.3.3-1 窖內空隙填充材的機能要求、技術條件與檢查項目

機能要求		階段	技術條件	檢查項目
基本安全機能	屏蔽	建設與營運	輻射的屏蔽性能	<ul style="list-style-type: none"> • 乾單位重 • 構件厚度 • 抗壓強度
	抑制遷移	回填後	核種吸附性	<ul style="list-style-type: none"> • 吸附分配係數 • 填充量 • 礦物組成

表 2.3.3-2 窖內空隙填充材的檢查方法

檢查項目	試驗與檢查方法	檢查時間與頻率
乾單位重	JASS50 T-601 或是 JASS5N T-602	時機：配比強度的標準齡期 頻率：施工單元
構件尺寸 (厚度)	規模、測量儀器計算所得之窖內體積以及廢料包件吊放的位置與尺寸	時機：廢料包件吊放前及上部澆置結束以後 頻率：1 次/處置窖單元
抗壓強度	「預拌混凝土接收時的檢查」(JSCE RC 示方書、檢查標準)中的抗壓強度檢查或是「混凝土構造體的強度檢查」(JASS5N)	時機：配比強度的標準齡期 頻率：施工單元
吸附分配係數	日本原子力學會標準 AESJ-JC-F003：2002 或是 AESJ-JC-F008：2006	時機：配比強度的標準齡期 頻率：施工單元
	或與「材料品質、配比」檢查相同	
填充量	量測實際數量或填充高度	時機：上部澆置完成後 頻率：1 次/處置窖單元
礦物組成	「混凝土材料接收時的檢查」(JSCE RC 示方書、檢查標準)或是「預拌混凝土接收時的檢查」(JSCE RC 示方書、檢查標準)中的配比檢查	JSCE RC 示方書(檢查標準)的規定

第三章 膨潤土系材料

處置設施中，以膨潤土系材料為主要構成材料之設施，包括低透水層、坑內空隙填充材及回填材，各設施之機能要求與技術條件整理如表 3-1 所示，並針對不同設施之設計、品質管理及檢查方針，分別說明如下。

表 3-1 膨潤土系材料各設施的機能要求與技術條件

機能要求	階段	機能內容	是否需要此機能			技術條件	
			低透水層	坑內空隙填充材	回填材		
基本安全機能	密閉	建設	防止輻射物質露出掩埋地外	●	—	—	● 透水特性
	屏蔽	與營運	對於來自廢料包件的輻射有屏蔽效果	—	—	—	—
	抑制遷移	回填後	抑制放射性核種的擴散遷移	—	—	—	—
			吸附放射性核種	—	—	—	—
			由低透水性，降低通過處置設施的地下水量	●	●	—	● 透水特性 (低透水層) ● 力學特性 (坑內空隙填充材)
			不要形成連續性的地下水遷移路徑	—	—	●	● 透水特性
	隔離		確保隔離距離	—	—	—	—
防止任意入侵			—	—	●	● 閉塞性	
營運操作機能	建設與營運	確保建設、運轉所需的空間及力學的安全性	●	—	—	● 力學特性	
		維持坑道形狀	—	—	—	—	

3.1 低透水層

3.1.1 設計

一、技術條件與設計項目

低透水層的技術條件為透水特性與力學特性，各技術條件對應之設計項目彙整如表 3.1.1-1 所示，並分別說明如下。

表 3.1.1-1 低透水層的機能要求、技術條件與設計項目

機能要求		階段	技術條件	設計項目	
				施工時性能、狀態	長期狀態變化
基本 安全 機能	密閉	建設與營運	透水特性	<ul style="list-style-type: none"> • 透水係數 • 厚度 	—
	抑制遷移	回填後	透水特性	<ul style="list-style-type: none"> • 透水係數 • 厚度 	<ul style="list-style-type: none"> • 膨潤壓 • 礦物組成 • 密度(總體密度) • 強度、變形係數 • 膨潤壓
營運操作機能		建設與營運	力學特性	<ul style="list-style-type: none"> • 強度、變形係數 	—

(一) 透水特性

為確保建設與營運階段所需之密閉機能，須抑制地下水侵入廢料包件，評估地下水侵入廢料包件的時間與侵入量。而地下水侵入廢料包件的時間與侵入量，則受到低透水層的透水係數與厚度所影響。因此，在密閉機能中，低透水層對於透水特性的設計項目為透水係數與厚度。

回填後階段之「抑制遷移」機能所需的技術條件亦為透水特性，以降低通過工程障壁的地下水量為目標。為確保抑制遷移機能可維持數萬年以上，故設計項目須挑出影響長期透水係數與厚度變化的因素，彙整於表 3.1.1-2。影響低透

水層長期變化的特性有礦物組成、密度(總體密度)、強度、變形係數、膨潤壓。

表 3.1.1-2 低透水層的代表現象、反應及相關項目

重要度高的參數	影響性能的物理、化學特性	評估長期狀態時需注意的現象與反應	影響左列現象與反應之項目
透水係數	蒙脫石的層間離子組成	• 交換性陽離子的變化	• 礦物組成(層間離子組成) • 密度(總體密度)
	蒙脫石含有率	• 蒙脫石溶解	• 礦物組成(蒙脫石含有率)
	乾燥密度	• 因力學變形造成密度、形狀的變化 • 膨潤土自鄰近材料之空隙流出	• 強度、變形係數 • 膨潤壓
	孔隙水的水質	• 鹽水的影響 • 硝酸鹽、硫酸鹽等可溶性鹽類的影響	—
厚度	厚度	• 因力學變形造成密度、形狀的變化 • 膨潤土流出至鄰近材料之間隙	• 強度、變形係數 • 膨潤壓
	有無短路徑	• 因力學影響產生的物理損傷 • 因膨脹造成自封閉	• 膨潤壓

(二)力學性能

在建設與營運階段時，於底部低透水層的上方設置低擴散層與處置窖，故底部低透水層須承受上方的載重作用。此外，也需考量地震的影響。由於底部低透水層需具備相當的強度才能承受這些載重，因此，從營運操作機能中選出強度與變形係數作為設計項目。

二、膨潤土系材料的特徵

膨潤土是以蒙脫石為主成分的黏土岩，蒙脫石有片狀結晶構造，結晶層間可吸收水分，使層間距離增加，產生膨脹特性。蒙脫石的層間陽離子可分為 Na 離子及 Ca 離子兩種，層間陽離子的不同，將左右蒙脫石的特性。若是 Na 離子較多的蒙脫石，則有高膨潤性。

在壓縮狀態下的高密度膨潤土，具有非常低的透水性，而且對力學的變形也有可塑性，故施工上產生的空隙與不均性或是受力造成的受損，膨潤土可發揮自我修復功能。此外，因膨潤土為天然材料，對於地下環境來說，有化學安定性的優點，故可作為需長期維持機能之工程障壁的極佳材料。因此，國內外對於膨潤土作為地下處置的工程障壁材料，積極的研究其施工性與長期性能。膨潤土系材料除可作為低透水層的材料外，亦可作為坑道內空隙填充材及回填材的材料。

膨潤土可以多種樣態使用在多種用途上，但以膨潤土主材料，並將之壓縮成高密度之建築材料來使用者，則僅有放射性廢棄物處置領域。膨潤土作為工程障壁的材料可分為單用膨潤土及膨潤土與骨材混合使用。日本對於地下處置設施的低透水層採用前者，而坑道內空隙填充材、回填材及地層處置使用的緩衝材等，則採用後者。對於膨潤土與骨材的混合比率，定義為骨材混合率 $R_s(\%)$ ， R_s 為骨材重量佔全部乾燥重量的比例，以下式表示之。

$$R_s = \frac{m_{sd}}{m_{bd} + m_{sd}} \times 100$$

其中：

R_s ：骨材混合率(%)

m_{bd} ：膨潤土乾燥重量(g)

m_{sd} ：骨材乾燥重量(g)

透水係數及膨潤壓與材料中黏土的密度有關，可採用有效黏土密度或有效蒙脫石密度作為評估指標。所謂有效黏土密度是指全部體積扣除骨材體積後，剩餘的氣相或黏土的密度。有效蒙脫石密度則為全部體積扣除骨材及次生礦物體積後，剩餘的氣相或蒙脫石的密度，詳見圖 3.1.1-1。

$$\rho_b = \frac{\rho_d(100 - R_s)}{100 - \rho_d \frac{R_s}{\rho_s}}$$
$$\rho_m = \frac{\rho_b C_m}{100 - \rho_b \frac{(100 - C_m)}{\rho_{et}}}$$

其中：

R_s ：骨材混合率(%)

ρ_d ：乾燥密度(Mg/m^3)

ρ_b ：有效黏土密度(Mg/m^3)

ρ_m ：有效蒙脫石密度(Mg/m^3)

ρ_s ：骨材粒子密度(Mg/m^3)

ρ_{et} ：膨潤土次生礦物粒子密度(Mg/m^3)

C_m ：蒙脫石含有率(%)

蒙脫石含有率是假設精製後的蒙脫石中，蒙脫石含有率為 100%，再藉由甲基藍吸附量試驗(Methylene blue)評估蒙脫石的含量，利用試驗結果推估蒙脫石含有率，相關說明如下式，其中甲基藍吸附量試驗，則依據日本膨潤土工業會 JBAS-107-91 之方法進行。

$$C_m = \frac{MBC}{MBC_{100}} \times 100$$

其中：

C_m ：膨潤土中的蒙脫石含有率(%)

MBC：膨潤土的甲基藍吸附量(mmol/100g)

MBC₁₀₀：精製蒙脫石的甲基藍吸附量(mmol/100g)

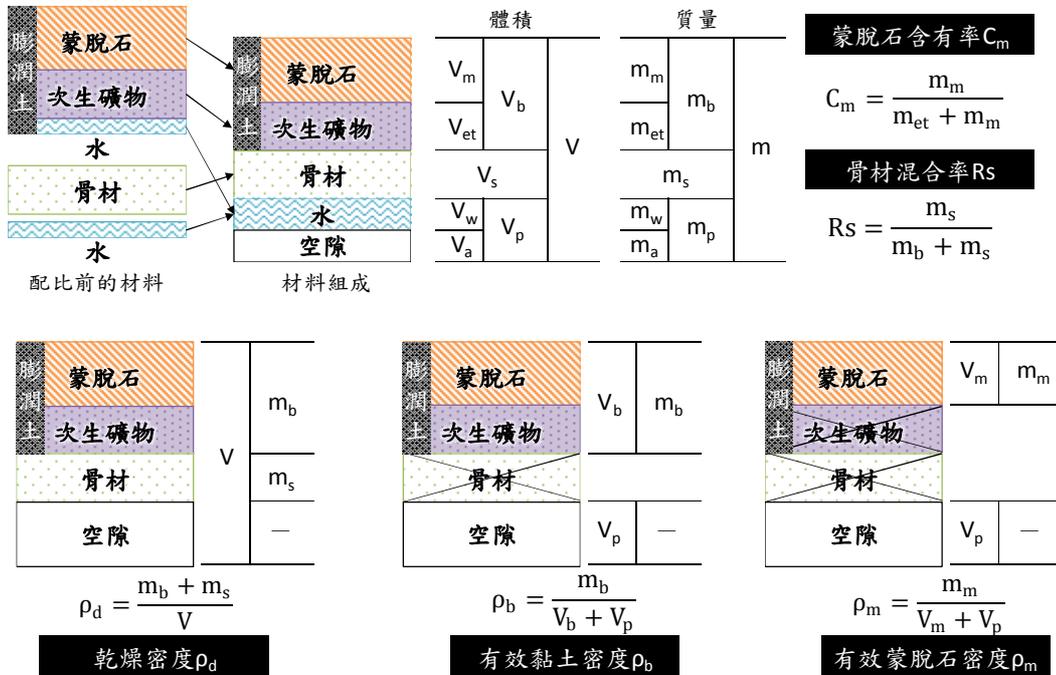


圖 3.1.1-1 膨潤土系材料的材料組成評估指標

三、低透水層設計的基本考量

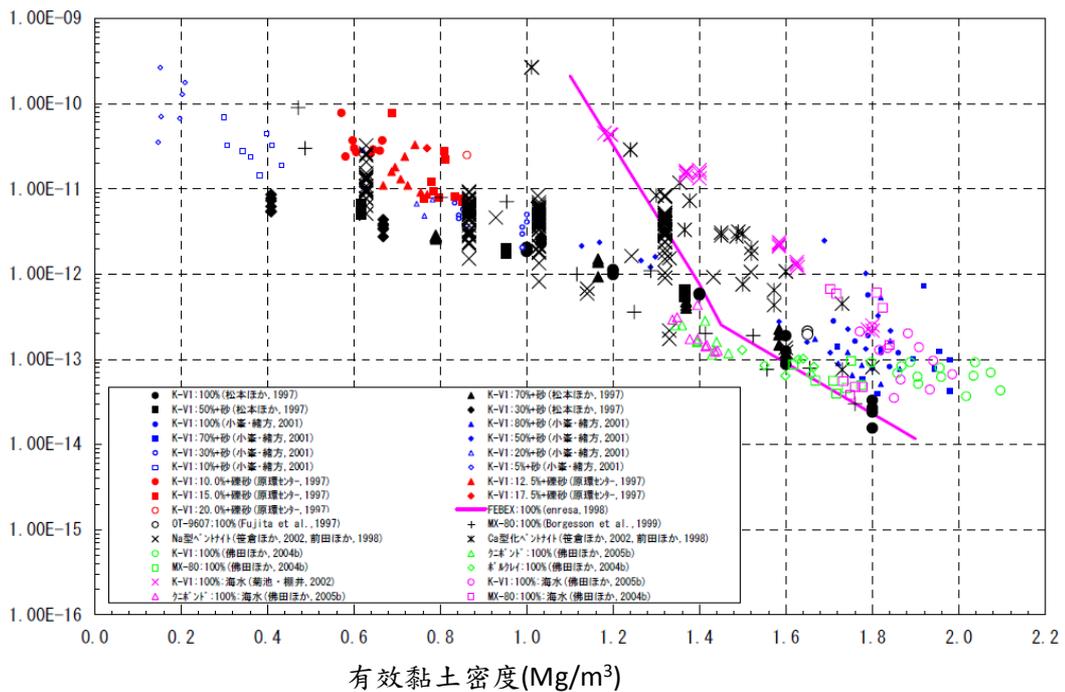
為確保低透水層滿足機能要求，須進行適當的設計、品質管理與檢查，此時須明確了解設計項目與性能的關係。以下整理設計項目與性能的關係，將設計的基本考量說明如下。

(一) 透水係數

日本在地層處置領域對壓縮膨潤土的透水係數有豐富的數據及經驗累積，蒐集膨潤土的透水係數與有效黏土密度相關數據，整理如圖 3.1.1-2。圖 3.1.1-3 則是以粒狀膨潤土壓縮試體為對象，進行相同的試驗。由上述兩圖可知，有效黏土密度與透水係數具有關聯性。

圖 3.1.1-4 為各種不同蒙脫石含有率及層間陽離子組成的膨潤土，其透水係數與有效蒙脫石密度的關係。由圖 3.1.1-4 可知，Kunigel V1 與 Volclay 雖為不同蒙脫石含有率的 Na 型膨潤土，但有效蒙脫石密度與透水係數間仍存在關聯性。也就是說，層間陽離子組成相近之膨潤土，即便採取的礦場不同，而使蒙脫石含有率不同，但仍可以有效蒙脫石密度作為透水係數的指標。

綜上所述，為使透水係數降低，須儘可能增加有效蒙脫石密度，故低透水層採用高密度或蒙脫石含量多的材料，為有效降低透水係數之方法。



注1：Kunigel V1簡寫成K-V1

圖 3.1.1-2 有效黏土密度和透水係數之關係

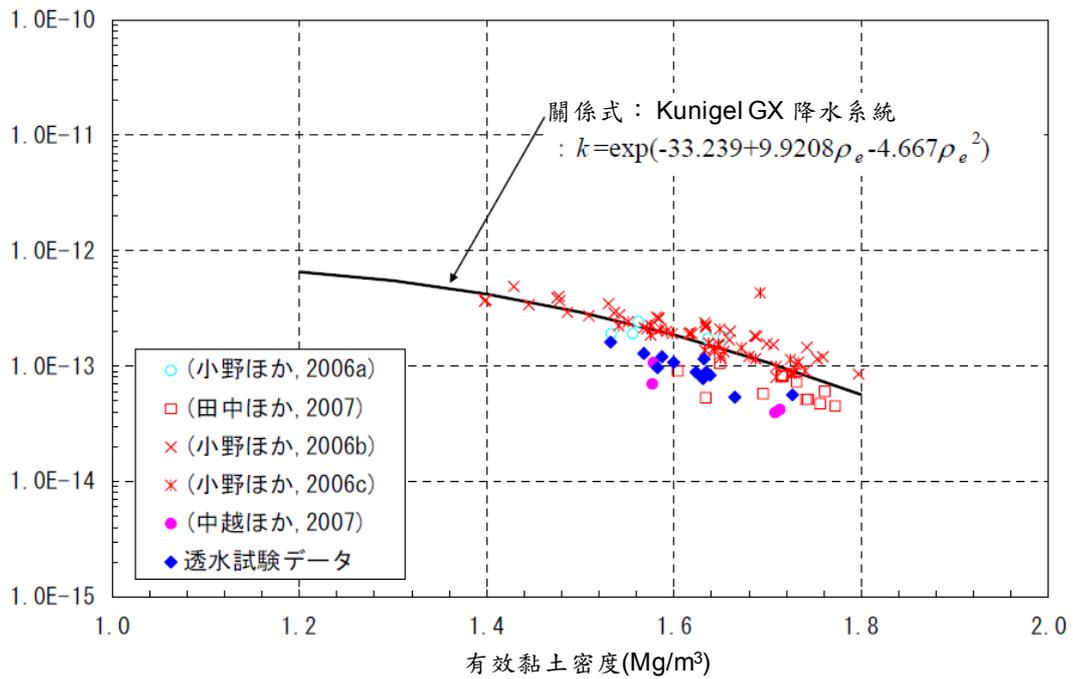


圖 3.1.1-3 壓縮粒狀膨潤土的有效黏土密度與透水係數之關係

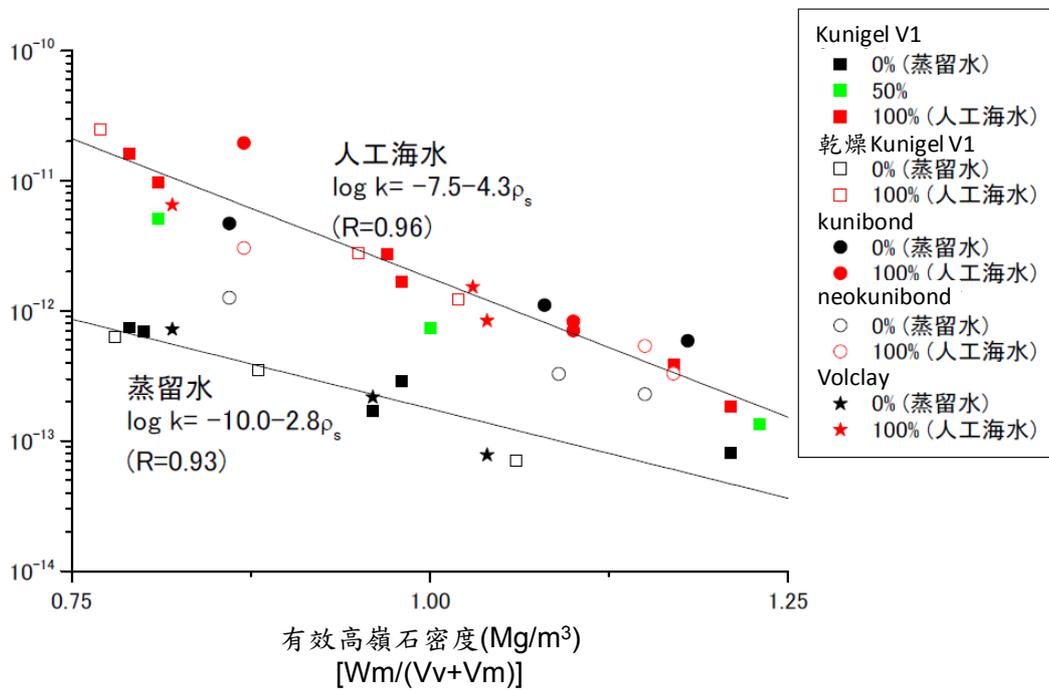


圖 3.1.1-4 有效蒙脫石密度和透水係數之關係

(二)膨潤壓

膨潤土的膨潤性質可封閉低透水層因施工而產生的空隙、封閉因外力損傷造成低透水層中的水路及封閉劣化造成的設施內部空隙等，故膨潤壓為評估長期工程障壁的力學狀態之重要性質。

由以往研究之有效蒙脫石密度與膨潤壓的關係可知，有效蒙脫石密度越高之膨潤土，自主修復效果越好，如圖 3.1.1-5 所示。故低透水層建議選擇高密度及膨潤性佳的材料。但過大的膨潤壓會造成低擴散層的損傷，故在設計時需考量鄰近構造的力學影響。

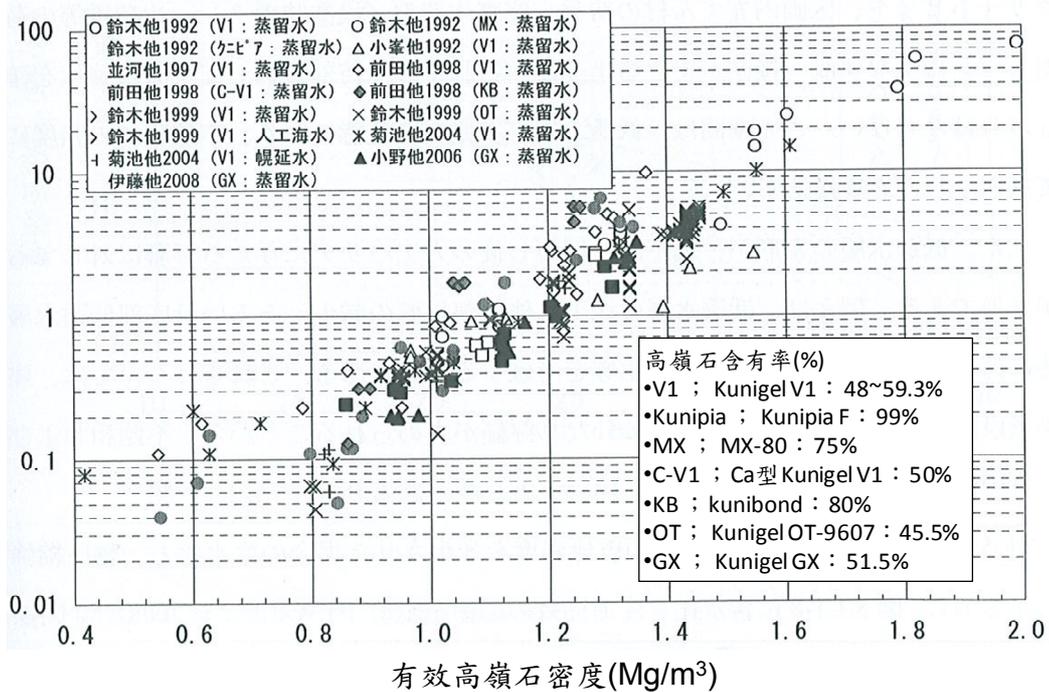


圖 3.1.1-5 有效蒙脫石密度與膨潤壓之關係

(三)強度、變形係數

由於建設與營運階段，底部低透水層的上方有低擴散層、處置窖、窖內空隙填充材、廢料包件等構件之載重，以及營運時天車的載重等，為使建設與營運順利進行，須確保支撐

材料具有足夠的強度。在此期間，因低透水層屬於不飽和狀態，所以需檢討不飽和狀態的強度是否足夠。

此外，需考量低透水層的變形是否會對回填後的工程障壁造成影響。例如低透水層下沉造成厚度減少、底部低透水層變形造成低擴散層產生裂縫等。為進行建設與營運階段到回填後階段的長期評估，需檢討不飽和與飽和狀態的低透水層之變形係數。

不同乾燥密度的壓縮膨潤土，其含水比與單軸抗壓強度之關係如圖 3.1.1-6 所示，圖 3.1.1-7 則為含水比與變形係數的關係圖。由圖 3.1.1-7 與圖 3.1.1-8 可知，強度、變形係數與密度及含水比具有相關性，隨著乾燥密度降低與含水比增加，單軸抗壓強度及變形係數皆有下降的趨勢，由支撐材料的強度與抑制長期力學變形的觀點來看，低透水層採用高密度與低含水比的材料較佳。

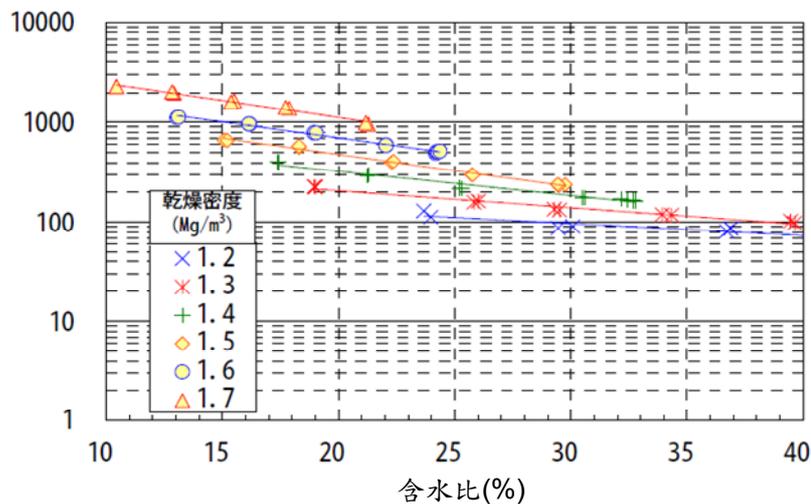


圖 3.1.1-6 含水比和單軸抗壓強度之關係

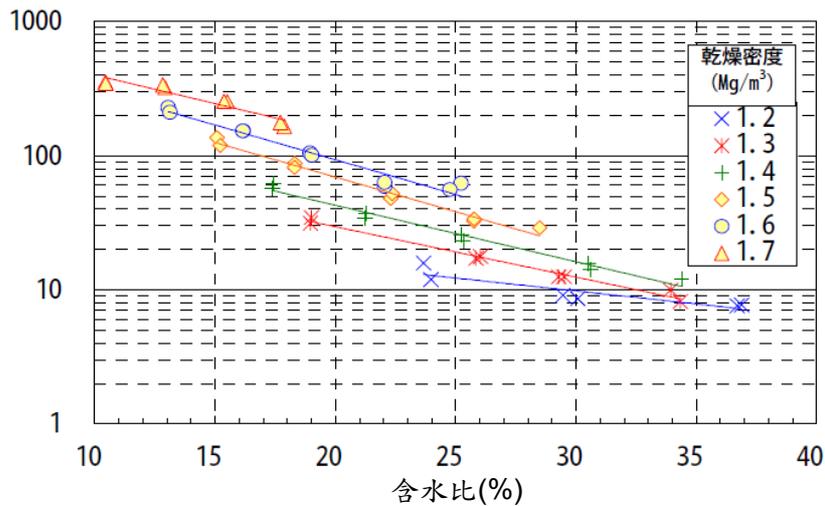


圖 3.1.1-7 含水比和變形係數之關係

(四)對化學變質的抵抗性(密度、礦物組成)

因地下處置設施使用大量的水泥作為材料，當水泥成分溶出使地下水中 Ca 離子濃度增加，在使用 Na 型膨潤土的情況下，可能產生蒙脫石的層間 Na 離子與 Ca 離子置換(Ca 型化)、透水係數增加、膨潤性降低等現象。但有效黏土密度高時，Ca 型化對透水係數影響較小(圖 3.1.1-8)。因此，若想要抑制因 Ca 型化而造成的透水係數增加時，可提高低透水層的黏土密度。

當水泥成分瀝濾而產生高鹼性的孔隙水時，可能使膨潤土的組成礦物溶解，進而產生次生礦物。由圖 3.1.1-9 可知，蒙脫石的溶解受到溫度與 PH 值的影響。由於設計無法讓蒙脫石增加對溶解的抵抗力，故從安全評估的觀點考量，需注意的問題是溶解後蒙脫石的殘留量及有效蒙脫石密度。因此，需特別留意材料初期的蒙脫石含有率。

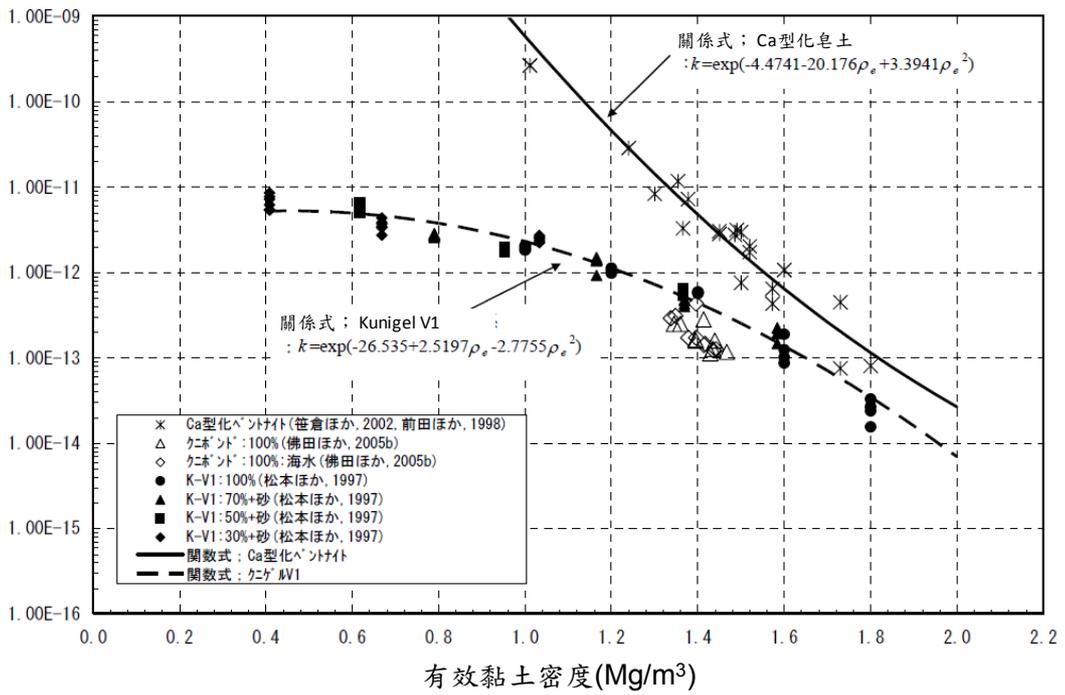


圖 3.1.1-8 Ca 型化膨潤土的有效黏土係數與透水係數之關係

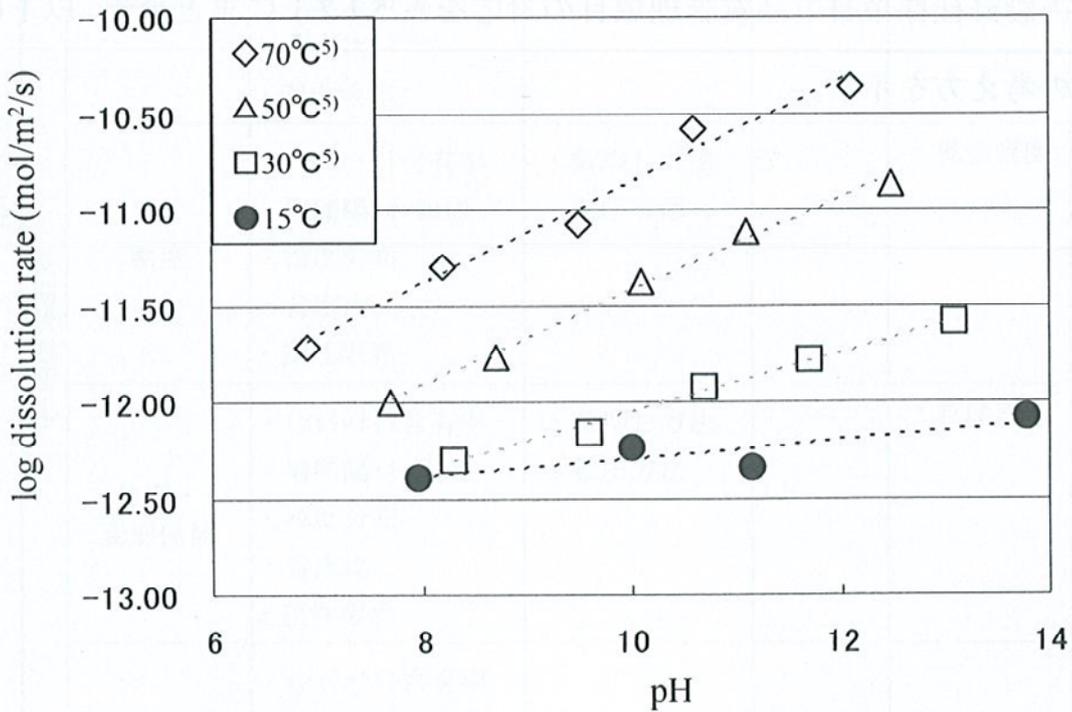


圖 3.1.1-9 不同反應溫度的溶解速度與 PH 值之關係

3.1.2 品質管理

考量設計項目與性能之關係，從材料管理、工法管理、狀態管理(成品管理)、環境管理等觀點，選出影響設計項目的因子作為管理項目。低透水層的施工方法可採用靜態的以堆疊壓縮膨潤土的方式施工，或動態的在施工處使用震動滾壓，本報告之檢討以後者的施工法為前提。

低透水層的品質管理項目彙整於表 3.1.2-1，以下說明選擇品質管理項目的方針。

一、滿足透水係數、膨潤壓的品質管理項目

扣除地下水質等外部因子，則透水係數、膨潤壓主要受到有效蒙脫石密度、層間陽離子組成之影響。其中，有效蒙脫石密度受到使用材料的蒙脫石含有率及施工所得之乾燥密度影響，而層間陽離子組成，則視使用之材料而定。故透水係數、膨潤壓的品質管理項目，從材料管理的觀點來看，設定為蒙脫石含有率與層間陽離子組成；從狀態管理(成品管理)的觀點來看，則設定為乾燥密度。此外，乾燥密度也會受到工法管理影響，故必須針對與壓密有關的材料進行管理，或訂定適當的施工流程與方法。

二、滿足強度、變形係數的品質管理項目

強度、變形係數係受到乾燥密度、含水比的影響。故滿足強度、變形係數的品質管理項目，從材料管理的觀點來看，設定為含水比；從狀態管理(成品管理)的觀點，則設定為乾燥密度。此外，由於層間陽離子組成等也可能影響強度、變形係數，故也需一併考慮。乾燥密度也會受到工法管理影響，故必須針對與壓密有關的材料進行管理，或訂定適當的施工流程與方法。

三、滿足密度(總體密度)的品質管理項目

膨潤土的壓密與一般土質相同，除與粒徑分佈、含水比有關外，也會受到蒙脫石含有量及層間陽離子組成之影響。小峯、緒方等人對於壓密的管理指標，提出「導入塑性界限的黏土壓密特性評估」，塑性界限小的土壤，其壓密密度較高。故塑性界限作為品質管理項目時，須包含上述提及之膨潤土品質的影響管理。要確保一定材料的壓密性時，品質管理項目可設定為蒙脫石含有率、層間陽離子組成、粒徑分佈、含水比、塑性界限。

此外，因施工時之壓路機的衝擊能量可能造成密度的變化，因此在工法上對於乾燥密度的管理，需加上總壓密能量的管理，並具體的規定壓路用機械。

四、礦物組成的品質管理項目

膨潤土的長期化學變質抵抗性及工程障壁周邊化學環境的形成等，皆有可能受到礦物組成的影響。故需藉由管理使工程障壁維持長期機能。尤其是蒙脫石含有率及層間陽離子組成的初期值，為預測與決定長期透水係數的重要因子。此外，次生礦物的化學變質，除會使低透水層產生空隙外，亦會對周邊的化學環境產生影響。

因此，規定使用材料的樣式與品質時，也需考量輻射曝曬量之敏感度等安全評估的重要性，來選擇相對應的管理項目。而對於次生礦物而言，由於現行測量技術無法使含有比率定量化，加上天然礦物很難調整其組成礦物，故不易以嚴謹的標準值來做管理，需補充相關資料來做為安全檢討。

五、厚度的品質管理項目

由狀態管理(成品管理)的觀點來看，設定構件尺寸作為厚度的品質管理項目。因側邊低透水層的構件尺寸是由已設置的低擴散層尺寸精度來決定，故在低擴散層的設計與施工時，需考量對低透水層的影響。

六、施工環境觀點的品質管理項目

當膨潤土含水比受到施工時坑內環境的影響時，材料的壓密性可能會因此改變。周邊環境的相對溼度會與壓縮膨潤土的水分互相平衡，因此，設定品質管理項目時，由環境管理的觀點來看，需考量坑內環境中的溫度與濕度。此外，若有湧水流入處置坑道內部或露水等現象時，將使施工產生滴水，膨潤土則可能因為吸溼而影響成品，且因滴水可能使施工後的低透水層產生品質變化，故需針對滴水的對策進行必要的管理。

依據日本工業規格(JIS)、土木學會、地盤工學會(JGS)、日本膨潤土工業會(JBAS)等的規格與標準為基礎。未包含之項目，因需滿足低透水層之檢查，需預先設定相關的實驗方法、實驗時間與頻率。此外，低透水層的品質管理，希望能由直接檢查確認低透水層沒有損傷與劣化。當品質管理時的取樣與實驗發現低透水層有所損傷時，需將低透水層修復至損傷前狀態。品質管理方法整理如 3.1.2-2。

表 3.1.2-1 低透水層的品質管理項目

機能要求	階段	技術要件	設計項目	品質管理項目								
				材料管理	工法管理		狀態管理(成品管理)	環境管理				
					施工	養護						
基本安全機能	密閉	建設與營運	透水特性	透水係數	<ul style="list-style-type: none"> 蒙脫石含有率 層間陽離子組成 粒徑分部 塑性限界 	<ul style="list-style-type: none"> 鋪設方法 碾壓方法 	—	<ul style="list-style-type: none"> 乾燥密度 	<ul style="list-style-type: none"> 坑內環境溫度濕度滴水 			
				厚度	—	—	—	<ul style="list-style-type: none"> 構件尺寸 				
	抑制遷移	回填後	透水特性	施工時性能、狀態	透水係數	<ul style="list-style-type: none"> 蒙脫石含有率 層間陽離子組成 粒徑分部 塑性限界 	<ul style="list-style-type: none"> 鋪設方法 碾壓方法 	—	<ul style="list-style-type: none"> 乾燥密度 	<ul style="list-style-type: none"> 坑內環境溫度濕度滴水 		
					厚度	—	—	—	<ul style="list-style-type: none"> 構件尺寸 			
				長期狀態變化	膨潤壓	<ul style="list-style-type: none"> 蒙脫石含有率 層間陽離子組成 粒徑分部 塑性限界 	<ul style="list-style-type: none"> 鋪設方法 碾壓方法 	—	<ul style="list-style-type: none"> 乾燥密度 	<ul style="list-style-type: none"> 坑內環境溫度濕度滴水 		
					密度	<ul style="list-style-type: none"> 蒙脫石含有率 層間陽離子組成 粒徑分部 塑性限界 	—	—	<ul style="list-style-type: none"> 乾燥密度 			
					強度、變形係數	<ul style="list-style-type: none"> 蒙脫石含有率 層間陽離子組成 粒徑分部 塑性限界 	<ul style="list-style-type: none"> 鋪設方法 碾壓方法 	—	<ul style="list-style-type: none"> 乾燥密度 			
					礦物組成	<ul style="list-style-type: none"> 材料品質 計量值 	—	—	—			
				運轉上的機能	建設與營運	力學特性	強度、變形係數	<ul style="list-style-type: none"> 蒙脫石含有率 層間陽離子組成 次生礦物※ 	<ul style="list-style-type: none"> 鋪設方法 碾壓方法 	—	<ul style="list-style-type: none"> 乾燥密度 	<ul style="list-style-type: none"> 坑內環境溫度濕度滴水

表 3.1.2-2 低透水層的品質管理項目與試驗方法

品質管理項目		試驗方法、管理方法	備註	
材料 管理	粒徑分布	JIS A1204 土壤粒徑試驗		
	塑性限界	JIS A1205 土壤液性、塑性限界試驗		
	含水比	JIS A1203、JGS0122、紅外線水分計		
	蒙脫石含有率	JBAS-107-91(MBC 試驗)		
	層間陽離子組成	浸出陽離子的分析		若有發生變更 製品與礦區之 情況時(頻率低)
	次生礦物	X 光繞射(XRD)※		
工法 管理	鋪設方法	規定鋪設厚度及鋪設設備		
	碾壓方法	規定碾壓次數及碾壓設備		
狀態 管理 (成品 管理)	乾密度	岩心密度試驗、RI 密度量測		
	含水比	JIS A1203、JGS0122、紅外線水分計、 RI 法		
	構件尺寸	水準測量、3D 雷射測量		
環境 管理	坑內溫度	溫度量測	—	
	坑內濕度	相對濕度量測		
	坑內滴水	目視確認滴水狀況		

※視需要實施

3.1.3 檢查

檢查項目主要是確認能夠滿足所需的機能要求而實施。低透水層的檢查項目如表 3.1.3-1 所示，有透水係數、厚度、密度(總體密度)、礦物組成、膨潤壓、強度、變形係數。

檢查的試驗方法，依據日本工業規格(JIS)、土木學會、地盤工學會(JGS)、日本膨潤土工業會(JBAS)等的規格與標準為基礎。若未包含之項目，為滿足低透水層的機能要求，則需設定實驗方法、實驗時間與頻率。若想採用文獻或論文中新的實驗方式，則需收集施工或實驗實績相關資料，評估是否適用再決定是否採用。有關低透水層檢查項目對應的檢查方法，整理於表 3.1.3-2 中。

表 3.1.3-1 低透水層的檢查項目

機能要求		階段	技術條件	檢查項目
基本安全機能	密閉	建設與營運	透水特性	<ul style="list-style-type: none"> • 透水係數 • 厚度
	抑制遷移	回填後	透水特性	<ul style="list-style-type: none"> • 透水係數 • 厚度 • 膨潤壓 • 密度(總體密度) • 礦物組成 • 強度、變形係數
營運操作機能		建設與營運	力學特性	<ul style="list-style-type: none"> • 強度、變形係數

表 3.1.3-2 低透水層的檢查方法

檢查項目	試驗方法、檢查方法	時間、頻率
透水係數	<p>由蒙脫石含有率及乾燥密度求得有效蒙脫石密度</p> <ul style="list-style-type: none"> 蒙脫石含有率是用甲基藍析復量試驗 (JBAS-107-91) 乾燥密度可由 3D 雷射測量數據及投入質量計算平均密度，或是以 JIS A1225 土壤濕潤密度試驗方法量測 <p>或是定水位法、透水試驗、壓密試驗</p>	<ul style="list-style-type: none"> 處置窖單元內的每一個部位完工時 側邊低透水層從上方與下方分階段實施(每個施工階段)
構件尺寸	水準測量、3D 雷射測量	
膨潤壓	<p>由蒙脫石含有率及乾燥密度求得有效蒙脫石密度</p> <ul style="list-style-type: none"> 蒙脫石含有率是用甲基藍析復量試驗 (JBAS-107-91) 乾燥密度可由 3D 雷射測量數據及投入質量計算平均密度，或是以 JIS A1225 土壤濕潤密度試驗方法量測 <p>或是膨潤壓試驗</p>	
密度(總體密度)	<p>3D 雷射測量數據及投入質量計算平均密度</p> <p>或是抽樣試驗：JIS A1225 土壤濕潤密度試驗方法</p>	
礦物組成	甲基藍吸附量試驗(JBAS-107-91)及蒙脫石含有率量測	
強度、變形係數	<p>由蒙脫石含有率、乾燥密度、含水比求得強度、變形係數</p> <ul style="list-style-type: none"> 蒙脫石含有率是用甲基藍析復量試驗 (JBAS-107-91) 乾燥密度可由 3D 雷射測量數據及投入質量計算平均密度，或是以 JIS A1225 土壤濕潤密度試驗方法量測 含水比是用 JIS A1203 土壤含水比試驗方法量測 <p>或是以下強度、變形係數的試驗方法：</p> <ul style="list-style-type: none"> 抽樣試驗 <ul style="list-style-type: none"> JIS A1216 土壤單軸壓縮試驗 JGS 0524 土壤三軸壓縮試驗 原位置試驗(只有變形係數) <ul style="list-style-type: none"> JGS 1521 地盤的平板載重試驗 JIS A 1215 道路的平板載重試驗 FWD 試驗 	

3.2 坑內空隙填充材

3.2.1 設計

一、技術條件與設計項目

坑內空隙填充材要求的技術條件為力學特性，要求力學特性的原因是希望在回填以後，即使經過很長時間，低透水層的膨潤變形仍舊可控制在極小的範圍內，因此將設計項目設定為強度、變形係數，並彙整如表 3.2.1-1 所示。

由於低透水層在經過數萬年後，仍需維持抑制遷移機能，故對於要控制低透水層膨潤變形的坑內空隙填充材而言，其力學特性也需達到長期之要求。礦物組成為影響坑內空隙填充材化學變質的主要因素，故將設計項目設定為礦物組成。由於構成礦物的溶解，會使坑內空隙填充材形成空隙，須管理是否有影響力學特性變化的成分，故需選擇化學安定性高的材料。

表 3.2.1-1 坑內空隙填充材的機能要求、技術條件與設計項目之關係

機能要求		階段	技術條件	設計項目	
				施工時性能、狀態	長期狀態變化
基本安全 機能	抑制 遷移	回填後	力學特性	強度、變形係數	礦物組成

二、坑內空隙填充材的材料

假定在近場的環境條件下，坑內空隙填充材的材料選擇，須選出能在長時間下仍可抑制低透水層膨潤變形的材料。

土壤系材料與水泥系材料皆可列為候選材料，從狹窄地區的施工方法與力學特性方面來看，土壤系材料須注意材料與配比。若從自充填性與化學安定性來看，土壤系材料較水

泥系材料佳。而水泥系材料須注意鈣溶出等會影響力學特性的長期變化，若就材料的鋼性與強度等力學特性而言，水泥系材料則較土壤系材料佳。各種材料皆須依照使用場合來考慮與選擇。

日本對於坑內空隙填充材的材料，是以膨潤土混合土為前提來進行檢討。有關膨潤土系材料的設計考量可參考低透水層之設計，以下針對膨潤土與混合的骨材作說明。

1. 現地開挖餘土

現地開挖餘土是指開挖時所產生之棄土。若要使用現地開挖餘土，除需進行粒徑與含水比等物理試驗、消散試驗(Slaking test)、與膨潤土混合時的壓密試驗等外，同時還需檢討耐久性與化學安定性，再評估是否可作為坑內空隙填充材之骨材。此外，粒徑、含水比也可同時作為施工性的指標。

2. 買進材料

若要買進土壤材料，除需可穩定進貨至現場外，還要檢討是否與現地開挖餘土一樣，可作為坑內空隙填充材的骨材。

若有便宜且可穩定進貨的工程副產品時，可將之作為候補材料，但須檢討此候補材料是否有影響安全評估的物質，或是在需要的環境條件下能否有化學安定性。

二、設計的基本考量

抑制低透水層的膨潤變形需要「力學特性」，除考量壓縮性等變形特性與強度特性外，也會受到骨材本身的特性、膨潤土與骨材的配比、混合土的密度等影響。因此，藉由壓密試驗與力學試驗，掌握個別的特性後，再設定材料、密度與壓密方法。

由於研究混合礫石的膨潤土混合土之相關力學特性的案例有限，以下介紹相關研究案例。日笠山等(2000)以山砂與礫石(混凝土用碎石)混合膨潤土後的混合土作為研究對象，整理如表 3.2.1-2 所示，將礫石率(礫石混合質量比)與膨潤土率(膨潤土混合質量比)作為參數，進行壓密試驗、透水試驗與三軸壓縮試驗。其壓密試驗結果如圖 3.2.1-1 所示，當礫石率(P_g)介於 0~40%時，扣除礫石後的細粒土壓密密度(ρ_{dc})不受礫石率的影響，亦即礫石並沒有影響壓密能量的傳達機制，壓密的特性主要受到扣除礫石後剩餘的部分之特性所影響。此外，若山砂中的膨潤土率(P_{bs})固定，則礫石率(P_g)越大者，剪力摩擦角 ϕ_{cu} 越大。反之，當礫石率(P_g)固定時，若山砂中的膨潤土率(P_{bs})越大則 ϕ_{cu} 越小。(圖 3.2.1-2)

表 3.2.1-2 混和土材料的基本特性

試料名		山砂	礫石	膨潤土
		富津產	JIS2005	250#
土粒子密度	ρ_s g/cm ³	2.711	—	2.600
礫石比重	G_s	—	2.688	—
礫石吸水率	Q_s %	—	0.64	—
平均粒徑	D_{50} mm	0.29	8.50	—

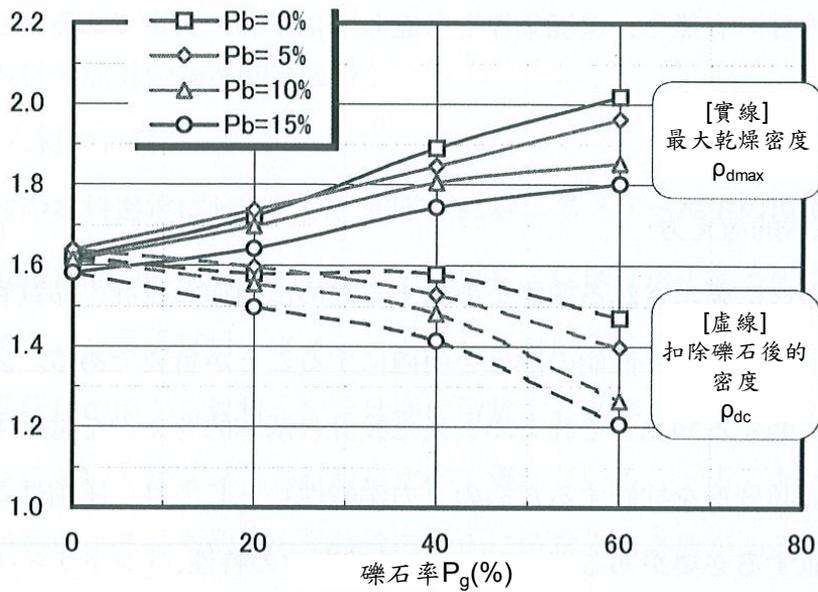


圖 3.2.1-1 礫石率(P_g)與最大乾燥密度之關係

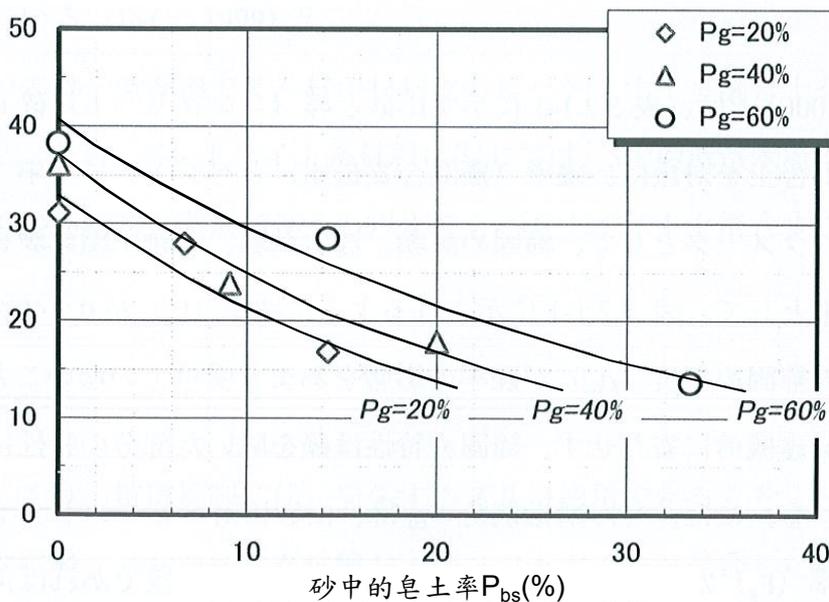


圖 3.2.1-2 砂中膨潤土率(P_{bs})與剪力摩擦角(ϕ_{cu})之關係

尾崎等(2007)對碎石或爐渣加入膨潤土的混合土進行力學特性的試驗。由表 3.2.1-3 的結果可知，混合碎石的膨潤土混合土，其變形係數較高，碎石混合率(碎石混合質量比)越高則變形係數越高(圖 3.2.1-3)。

表 3.2.1-3 膨潤土混合土的特性試驗

試驗案例		乾燥質量比(%)			壓密度 Dc (%)
		膨潤 Bm	砂* Sm	礫石 Gm	
【系列 1】 貧配比膨潤土 混合土	1-1	10	90	—	100
	1-2	15	85		
	1-3	20	80		
【系列 2】 加入礫石的膨 潤土混合土	2-1	15	45	40	100
	2-2		35	50	100
	2-3		25	60	100
【系列 3】 壓密度的影響	3-1	15	35(山砂)	50	100
	3-2				90
	3-3				80

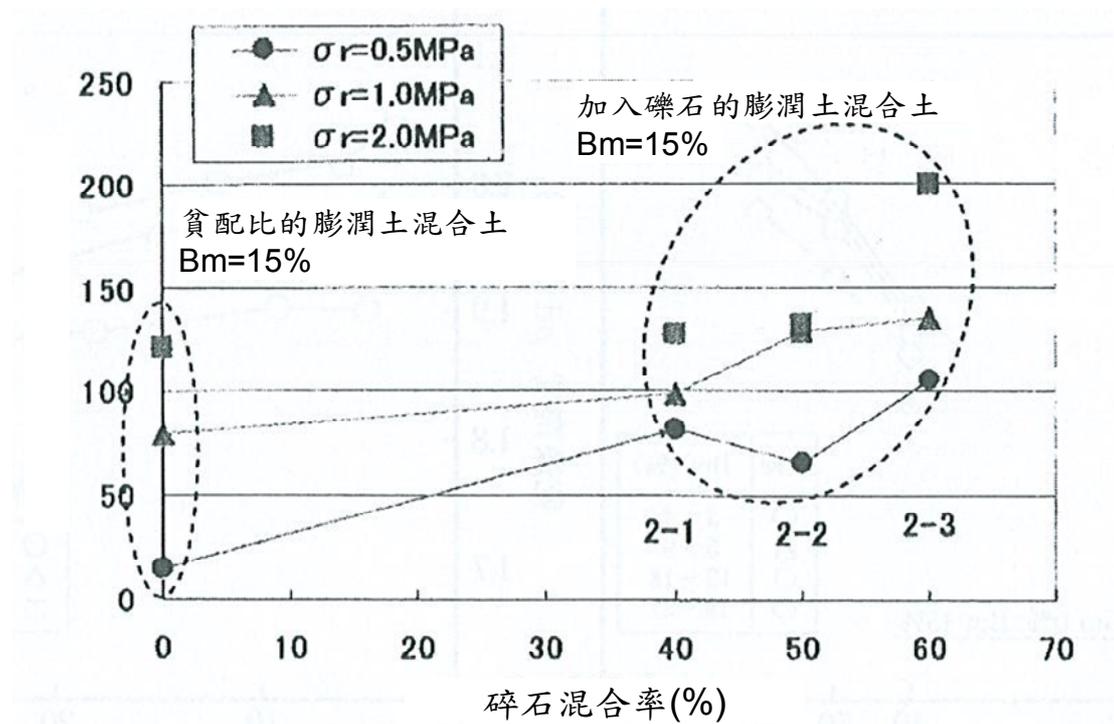


圖 3.2.1-3 碎石混合率與變形係數之關係

栗原等(1993)以砂與礫石(混凝土用之骨材)混合膨潤土後的混合土為對象，進行壓密試驗、透水試驗與膨潤試驗，相關材料特性如表 5.2.1-4 所示。檢討不同的礫石混入率(礫

石混合質量比)、膨潤土混入率(膨潤土混合質量比)及砂中的膨潤土質量比，對於各種特性的影響。以壓密特性來說，礫石混入率越大，則乾密度越高，但膨潤土混入率越大，則乾密度會降低，詳圖 3.2.1-4。此外，礫石混合會使膨潤率降低，礫石混入率越大，則內部摩擦角也會隨之上昇，詳圖 3.2.1-5。

由上述研究案例顯示，以膨潤土、砂與礫石混合形成的混合土時，當礫石混入率越大，或膨潤土混合質量比越小，則設計項目中的強度、變形係數會增加。

表 3.2.1-4 混合材料的基本特性

符號	材料種類		使用材料	物性
G	礫石	A 礫石	混凝土用骨材 標稱直徑：20~05mm	比重 2.64 最大乾燥密度 1.739t/m ³ 最小乾燥密度 1.505t/m ³ 吸水率 0.71%
		B 礫石	在 A 礫石中混入細骨材(10~02mm，混合比例 1:1)	比重 2.60 最大乾燥密度 1.992t/m ³ 最小乾燥密度 1.605t/m ³ 吸水率 0.79%
S	砂		最大粒徑調整至 2mm	比重 2.64 粒徑小於粉土的含有率 20% 自然含水比 0.71%
B	膨潤土		kunigel V1	比重 2.55

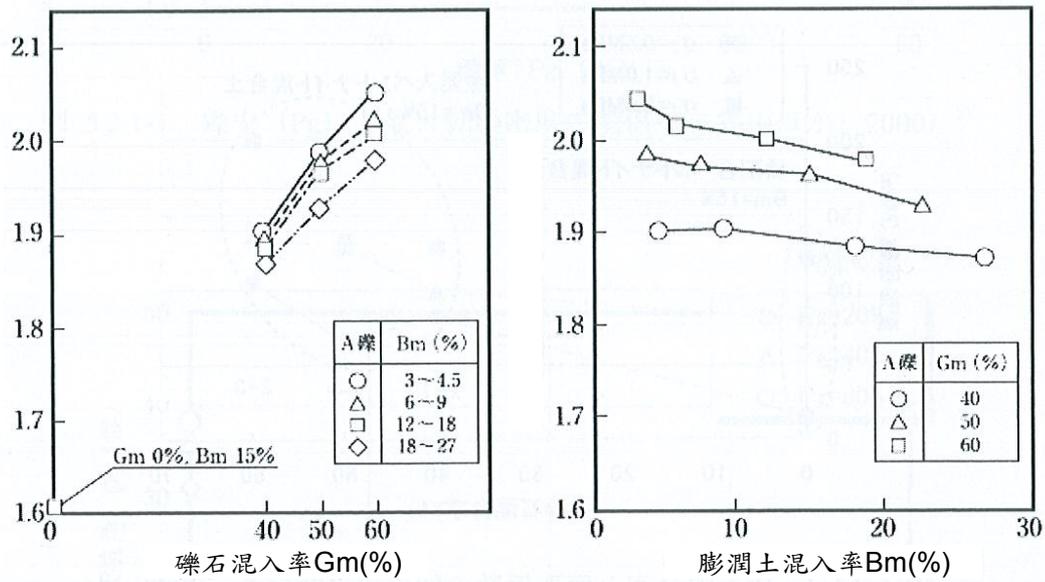


圖 3.2.1-4 礫石混入率(G_m)及膨潤土混入率(B_m)與乾燥密度之關係

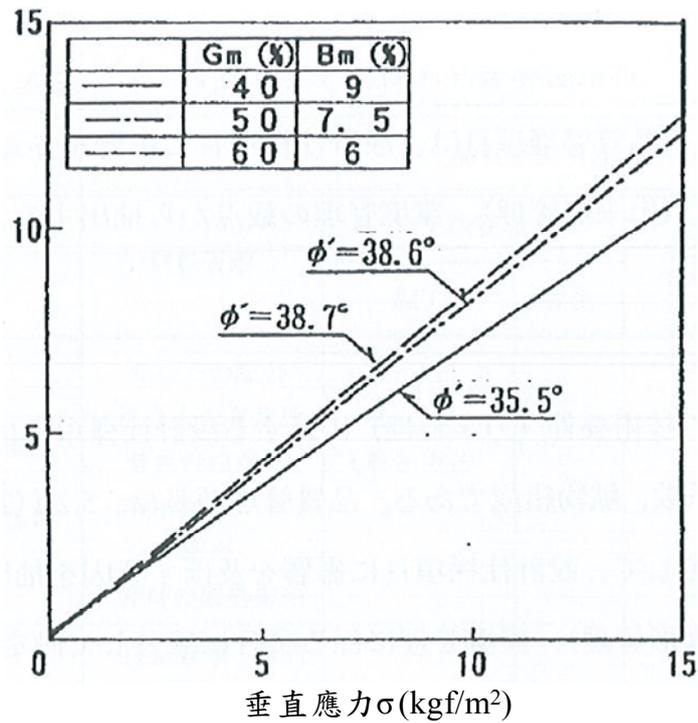


圖 3.2.1-5 剪力摩擦角與礫石混入率(G_m)之關係

3.2.2 品質管理

考量設計項目與性能之關係，從材料管理、工法管理、狀態管理(成品管理)、環境管理等觀點，選出影響設計項目的因子作為管理項目。坑內空隙填充材的施工方法包括靜態的由壓縮膨潤土堆疊施工，或是在原址使用震動壓土機(Compactor)等方式，本報告以後者的施工法作為後續檢討之前提。

坑內空隙填充材的設計項目與品質管理項目對照表，可參見表 3.2.2-1，以下說明選擇品質管理項目的方針。

表 3.2.2-1 坑內孔隙填充材的品質管理項目

機能要求	階段	技術要件	設計項目		品質管理項目				
					材料管理	工法管理		狀態管理(成品管理)	環境管理
						施工	養護		
基本安全機能	抑制遷移	回填後	力學特性	施工時性能、狀態	<ul style="list-style-type: none"> • 混合土的配比 • 混合土的含水比 • 骨材的粒徑 • 骨材的消散率※ • 骨材的破碎率※ 	<ul style="list-style-type: none"> • 撒鋪方法 • 碾壓方法 	—	<ul style="list-style-type: none"> • 乾燥密度 	<ul style="list-style-type: none"> • 坑內環境溫度 • 濕度 • 滴水
				長期狀態變化	礦物組成	<ul style="list-style-type: none"> • 材料種類、品質 	—	—	

※當使用現地開挖餘土時

一、滿足強度、變形係數的品質管理項目

滿足強度、變形係數的品質管理項目中，從材料管理的觀點來看，設定為混合土的配比、混合土的含水比、骨材的粒徑分布、骨材的消散率、骨材的破碎率等，而從狀態管理(成型管理)的觀點來看，則訂為乾燥密度。此外，乾燥密度也會受到工法管理影響，故必須針對與壓密有關的材料進行管理，或訂定適當的施工流程與方法。

(一)混合土的配比

強度、變形係數會依據骨材的種類與混合質量比的不同而有所差異。因此，在品質管理項目中，設定為混合土用的骨材種類(礦物組成)及配比兩項。

(二)混合土的含水比

膨潤土混合土的乾燥密度會受到含水比的影響。故在品質管理項目中，設定為施工時的混合土含水比。

(三)骨材的粒徑分布

在相同壓密能量下，乾燥密度會受到膨潤土的粒徑分布所影響，因此，在品質管理項目中，由施工觀點來看，設定為骨材的粒徑分布。

(四)混合材的消散率與破碎率

當混合材使用軟岩或脆弱岩等現地的土壤時，混合材的壓縮性將會受膨潤土混合土的變形係數影響。島、今川等人(1980)以脆弱岩材料為對象，由消散率與破碎率來推估壓縮歪斜狀況，提出脆弱岩的分類方法(圖 3.2.2-1)。因此，若採用現地的土壤時，品質管理項目將設定為消散率與破碎率。

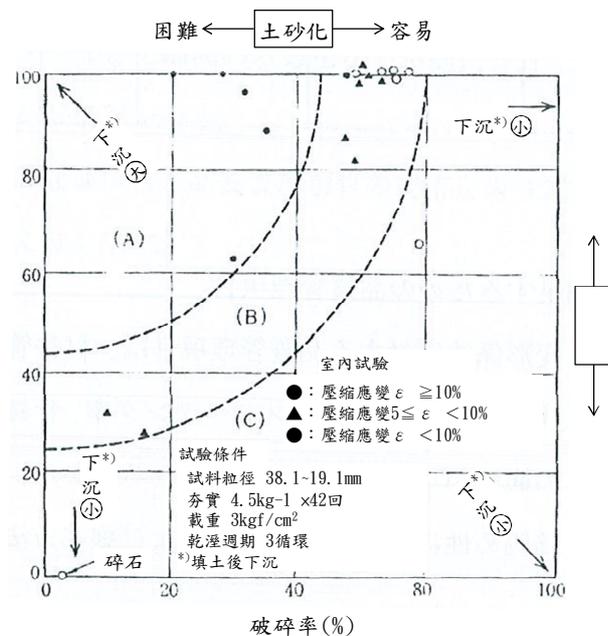


圖 3.2.2-1 脆弱岩的壓縮性分類圖

二、滿足礦物組成的品質管理項目

礦物組成的管理是選擇在處置環境下具有化學安定性的材料，並規定材料的樣式與品質，而使用的材料進貨時，須確認材料符合規定且檢附相關試驗結果。安全評估時，由於輻射暴露量的影響程度高，相關試驗報告以外的成分或可能含有量難以確認時，可檢討由X光繞射(XRD)等方法來對應。

三、施工環境觀點的品質管理項目

當坑內空隙填充材使用膨潤土混合土時，施工坑內的環境(坑內溫度與坑內濕度)將會影響膨潤土的混合比例，可能會導致無法達到所訂定的乾燥密度。故在設定品質管理項目時，選擇坑內的溫度與濕度。此外，為避免施工後的坑內空隙填充材產生品質變化，必須針對滴水進行對策或管理。

品質管理方法依據日本工業規格(JIS)、土木學會、地盤工學會(JGS)、日本膨潤土工業會(JBAS)等的規格與標準為基礎。未包含之項目，需預先設定相關的試驗方法、試驗時間與頻率。此外，坑內空隙填充材的品質管理，希望能由直接檢查確認坑內空隙填充材沒有損傷與劣化。若在進行品質管理的取樣與試驗時，發現坑內空隙填充材有所損傷，需將坑內空隙填充材修復至損傷前狀態。有關品質管理之方法整理如表 3.2.2-2。

表 3.2.2-2 坑內空隙填充材的品質管理項目與試驗方法

品質管理項目		試驗方法、管理方法	備註
材料 管理	混合土的配比	確認膨潤土及骨材的種類 膨潤土及骨材的計量值	平均值須能代 表其施工量
	混合土的含水比	JIS A1203、JGS0122、紅外線 水分計	
	骨材粒徑	JIS A1204 土壤粒徑試驗	
	混合材料的消散率	日本道路公團 JHS 110	
	混合材料的破碎率	日本道路公團 JHS 109	
工法 管理	撒鋪方法	選擇撒鋪厚度及撒鋪設備	平均值須能代 表其施工量
	碾壓方法	選擇碾壓次數及碾壓設備	
狀態 管理	乾密度	岩心密度試驗、RI 密度量測	平均值須能代 表其施工量
環境 管理	坑內溫度	溫度量測	—
	坑內濕度	相對濕度量測	
	坑內滴水	目視確認滴水狀況	

3.2.3 檢查

坑內空隙填充材的檢查項目如表 3.2.3-1 所示，有強度、變形係數與礦物組成。其中，礦物組成須選擇化學安定的材料，而由檢查觀點來看，則需檢查使用材料是否與計畫內容相同。

表 3.2.3-1 坑內空隙填充材的機能要求、技術條件與檢查項目之關係

機能要求		階段	技術條件	檢查項目
基本安全機能	抑制遷移	回填後	力學特性	<ul style="list-style-type: none"> 強度、變形係數 礦物組成

檢查的試驗方法主要依據日本工業規格(JIS)、土木學會、地盤工學會(JGS)、日本膨潤土工業會(JBAS)等規格與標準。若未包含之項目，為滿足坑內空隙填充材的機能要求，須先設定試驗方法、試驗時間與頻率。若想採用文獻或論文中新的試驗方式，則需收集施工或試驗實績的資料，評估是否適用再決定是否採用。

坑內空隙填充材的檢查，希望能由直接檢查確認坑內空隙填充材沒有損傷與劣化。若在檢查時的取樣與試驗，發現坑內空隙填充材有所損傷，需將坑內空隙填充材修復至損傷前狀態。

依據施工計畫，在確保坑內空隙填充材機能要求的前提下，選擇適當時間做為檢查時間。坑內空隙填充材的檢查單位可參考圖 3.2.3-1。檢查頻率除依據試驗實績外，也可參照日本工業規格(JIS)的抽樣檢查規格來設定。對於坑內空隙填充材檢查項目

對應的檢查方法(試驗方法、試驗時間、頻率),整理於表 3.2.3-2,以下針對設定的檢查方法進行說明。

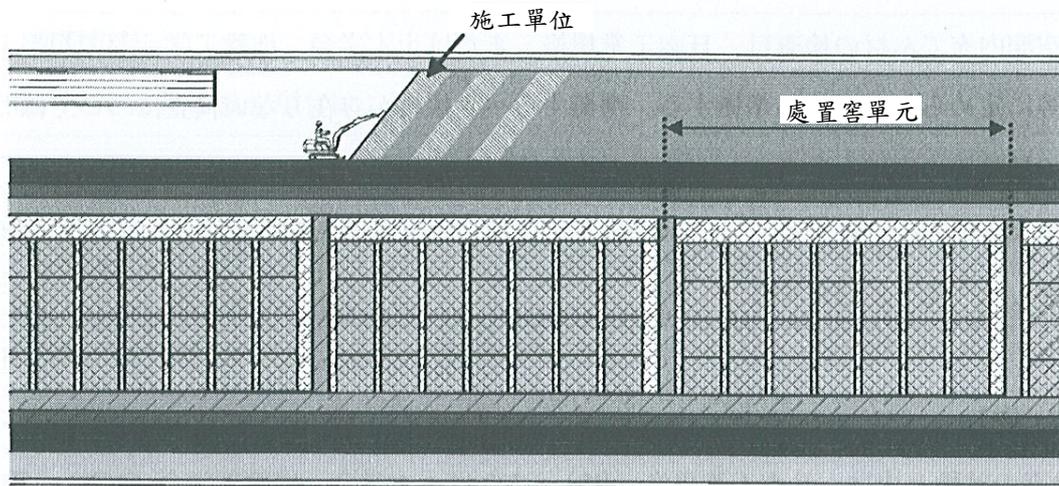


圖 3.2.3-1 坑內空隙填充材的檢查單元

表 3.2.3-2 坑內空隙填充材的檢查方法

檢查項目	試驗方法、檢查方法	時間、頻率
強度、變形係數	由乾燥密度求得強度、變形係數 <ul style="list-style-type: none"> 乾燥密度可由 3D 雷射測量數據及投入質量計算平均密度,或是以 JIS A1225 土壤濕潤密度試驗方法量測 或是以下強度、變形係數的試驗方法 <ul style="list-style-type: none"> 抽樣試驗 <ul style="list-style-type: none"> JIS A1216 土壤單軸壓縮試驗 JGS 0524 土壤三軸壓縮試驗 	各處置窖施工結束時
礦物組成	材料的試驗結果、確認施工記錄	

一、強度、變形係數

坑內空隙填充材的強度與變形係數,其測量方法可分為施工後在原地進行量測或是取樣後進行室內試驗。變形係數選擇在施工後原地進行量測時,可參考地盤的平板載重試驗(JGS 1521)、道路的平板載重試驗(JIS A1215)等方法。此外,小型 FWD(Falling Weight Deflectometer)試驗因裝置較容易

攜帶至現場，除不會對坑內空隙填充材產生損傷外，短時間內即可知道結果。目前對於小型 FWD 試驗雖沒有規格化，但日本已累積許多實績經驗，因此試驗方法應可採信。

由上述所求得之變形係數，由於施工時的含水比可能無法與技術條件的飽和時之變形係數相對應。故若檢查方法採用原地進行量測時，須藉由事前的施工試驗，掌握原地測量所得不飽和之變形係數，與要求之圍壓下所得飽和之變形係數兩者的關係。

採用取樣後進行室內試驗者，可參考 JIS A1216 土壤的單軸壓縮試驗或 JGS 0524 土壤的三軸壓縮試驗。單軸壓縮試驗較為簡便，且可於短時間內進行，但因沒有圍壓，在使用膨潤土混合土的情況下，調整含水比不易，故限定以施工時的含水比進行試驗。三軸壓縮試驗的試體，在要求的圍壓條件下須為飽和試體，故要取得與技術條件相同的變形係數，需花費很長的時間。土壤系材料的變形係數與強度會受到圍壓的影響，故進行三軸壓縮試驗時，須考量低透水層的膨潤壓力下的圍壓。採用單軸壓縮試驗時，可藉由事前的施工試驗，掌握圍壓下飽和變形係數與強度兩者的關係。

(二)乾密度

坑內空隙填充材的乾密度，其測量方法可分為施工後在原地進行量測，或是取樣後進行室內試驗。

若是採用原地量測，可以 3D 雷射測量與施工處投入重量算出的平均密度，或是非破壞試驗的 RI 法(散亂型)、破壞試驗的 RI 法(透過型)與砂置換法。若以取樣來進行者，則可使用土壤濕潤密度試驗方法(JIS A1225)。

(三)礦物組成

礦物組成的管理，可藉由材料試驗結果與施工紀錄，檢查並紀錄使用的材料是否符合規定的樣式。

3.3 回填材

3.3.1 設計

一、技術條件與設計項目

回填材主要用途為回填建設與施工階段時建置的機具材料搬運坑道、廢料包件搬運坑道及地下設施的換氣排水坑道等坑道，以確保天然障壁不會因形成連續核種遷移路徑，對生物圈造成影響，故其機能要求為「抑制遷移」與「隔離」。為將地下水流動場恢復到坑道開挖前的狀態，在「抑制遷移」的觀點上要求的技術條件為透水特性。而「隔離」要求的特性，主要為避免建設與營運階段時所使用的坑道成為侵入處置設施的路徑，故需採用人員侵入困難且長期安定的材料，作為閉塞坑道內部空間之材料，故技術條件為坑道內部空間的閉塞性。此外，對於技術條件中的透水特性，因劣化將會導致透水性大增，故須對於坑道內的支撐部分或坑道周邊因挖掘所影響的區域，進行水理性能的改善。將各技術條件對應之設計項目彙整如表 3.3.1-1 所示，並分別說明如下。

(一) 透水特性

「抑制遷移」的技術條件為透水特性，其主要目的為確保天然障壁內不會形成連續的核種遷移路徑，因此回填材的設計項目為透水係數。由於「抑制遷移」機能須經過數萬年以上的時間，仍可維持其機能，故影響長期透水係數變化的因子，也需設定為設計項目。基本上與低透水層相同，影響長期透水係數變化的因子設定為膨潤壓、密度(總體密度)、礦物組成。

(二) 閉塞性

隔離的技術條件為坑道內部空間的閉塞性，主要是將建設、營運中使用的聯絡坑道、周邊坑道及將來人員入侵路徑

等可能有害的空間全部閉塞。就防止入侵的觀點而言，設計項目訂為閉塞狀態。對於回填部分，為確保閉塞狀態能長期維持且能抵抗開挖行為，須要求其具有足夠的強度。除此之外，考量化學變質的抵抗性，則礦物組成也需要納入考量，選擇在地下環境中仍可維持化學安定的材料。故設計項目設定為強度與礦物組成。

表 3.3.1-1 回填材的機能要求、技術條件與設計項目間之關係

機能要求		階段	技術條件	設計項目	
				施工時性能、狀態	長期狀態變化
基本安全機能	抑制遷移	回填後	透水特性	• 透水係數	• 膨潤壓 • 密度(總體密度) • 礦物組成
	隔離		閉塞性	• 閉塞狀態	• 強度 • 礦物組成

二、回填材的材料

假定在近場的環境條件下，回填材的材料須選擇經過長時間後仍可維持透水特性及閉塞狀況的材料。

國外對於地下處置的聯絡坑道、主要坑道及處置坑道，其回填材多使用膨潤土。此外，因透水性較高的開挖影響區域與坑內支撐材料可能會有長期劣化的現象產生，且聯絡坑道、周邊坑道回填材或挖掘影響區域等部位將因長期劣化而連接在一起形成地下水遷移路徑，若研判須分開時，可由坑道的圖面來檢討設置止水封塞。利用高密度、富配比的膨潤土及砂混合土，以遮斷因開挖影響區域所形成的地下水遷移路徑，並須檢討止水封塞與回填材配合使用下，是否能確保所訂定的機能。

假設回填材使用的材料為膨潤土與骨材的情況下，其材料選擇說明如下：

(一)現地開挖餘土

所謂現地開挖餘土，即伴隨開挖時所產生之棄土。除進行粒徑、含水比等物理試驗、消散試驗(Slaking 試驗)、與膨潤土混合時的壓密試驗外，同時需檢討其耐久性與化學安定性，並確認有無阻礙膨潤土膨潤性的物質，考量是否有可作為回填材之骨材的可能性。並注意避免使用到具有消散(Slaking)等會降低透水性的有害材料。此外，粒徑、含水比也可同時作為施工性的指標。

(二)買進材料

調查可穩定進貨至現場的土壤材料，同時檢討是否與現地開挖餘土一樣，可作為回填材(建設、搬運坑道的回填)的骨材。

若有便宜且可穩定進貨的工程副產品時，可將之作為候補材料，但須檢討此候補材料是否有影響安全評估的物質，例如是否有阻礙膨潤土膨潤性的物質。加上考量環境條件下的化學安定性，作為是否可以利用的判斷基準。

三、設計的基本考量

滿足機能要求之回填材，須進行適當的設計、品質管理與檢查，此時須明確了解設計項目與性能的關係。以下整理主要的設計項目與性能，將設計的基本考量說明如下。

(一)透水係數、膨潤壓

可參考以膨潤土系材料為主要材料的低透水層，其有效黏土密度的特性說明。但因混合礫石的貧配比膨潤土混合土，其透水特性與膨潤特性的資料較少，有可能無法利用目前所知的骨材與配比。因此對於候補材料，需由事前的透水試驗、膨潤特性掌握其特性，設定材料、密度與壓密方法。

日笠山等人(2000)以山砂與礫石(混凝土用碎石)混合膨潤土後的混合土作為研究對象，將礫石率(礫石混合質量比)

與膨潤土率(膨潤土混合質量比)作為參數，進行壓密試驗、透水試驗與三軸壓縮試驗。當膨潤土混合質量比在 10% 以下時，透水係數會急速下降，即使在膨潤土混合質量比大於 10% 之後，雖有略微上昇，但上升幅度不大(圖 3.3.1-1)。

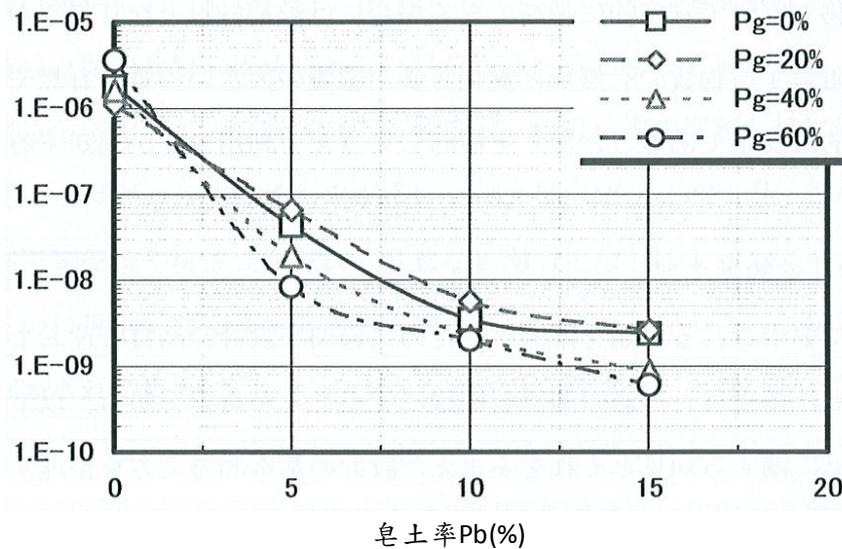


圖 3.3.1-1 膨潤土率與透水係數之關係

栗原等人利用砂與礫石(混凝土用之骨材)混合膨潤土後的混合土為對象，進行壓密試驗、透水試驗與膨潤試驗。檢討不同的礫石混入率(礫石混合質量比)、膨潤土混入率(膨潤土混合質量比)、膨潤土中的含砂質量比，對於各種特性的影響。對透水係數而言，膨潤土混合質量比在 12% 以下者，膨潤土混合質量對透水係數影響甚大，若超過此比例則影響降低(圖 3.3.1-2)。此外，加入礫石會使膨潤率降低，當礫石混合質量比越大，則內部摩擦角也會隨之上升，有效膨潤土的間隙比值(混合土的間隙體積除以混合土中的膨潤土體積)介於 4~5 時，將因膨潤土膨潤而充滿混合土中的間隙，膨潤率會急速上升。

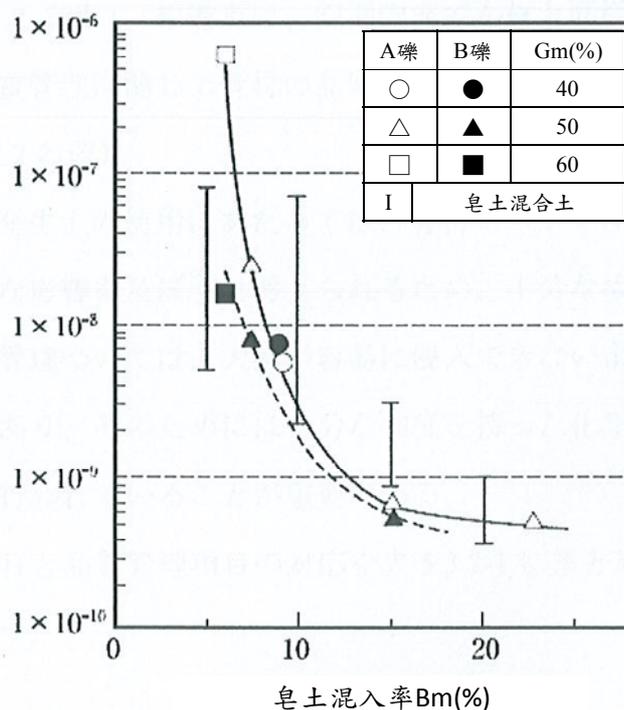


圖 3.3.1-2 膨潤土混入率(Bm)與透水係數之關係

(二)化學變質的抵抗性

使用貧配比的 Na 膨潤土時，在有效黏土密度低的狀況下，可能因 Ca 型化而導致透水特性及膨潤特性的變化，故須考量 Ca 型化程度及 Ca 型化的特性變化。此外，須注意有效黏土密度低與地下水為海水等兩種環境下的膨潤特性差異。

(三)閉塞狀態

閉塞狀態是利用物理、化學安定的材料，使其經過長時間仍可存在，且不會形成人類侵入路徑。

對於物理的安定性而言，為抵抗外部的物理作用，強度是很重要的一項。對於化學的安定性而言，主要決定於回填材的礦物組成。由設計的觀點來看，在於不要使用含有促進化學劣化成份的材料。

3.3.2 品質管理

檢討回填材的品質管理時，假設回填材的施工方法採用震動壓路機(roller)等壓密方法，以此為前提作為後續品質管理之參考。設計項目中有關透水係數及膨潤壓的品質管理方法，基本上與低透水層相同，但因回填材使用膨潤土混合土作為材料，故與窖內空隙填充材相同，材料的品質管理須增加骨材品質與配比、消散率、破碎率等項目。此外，當使用軟岩等現地餘土時，骨材的消散率對於膨潤土混合土的透水係數影響甚大，需事先了解其特性。對於閉塞狀態的品質管理，重要的是具備堅固的回填狀態，使人類不易入侵。因此，需使用能提供足夠強度且化學安定的材料，並完全填充於所有間隙。回填材的設計項目對應之品質管理項目彙整如表 3.3.2-1。

回填材的品質管理方法主要依據日本工業規格(JIS)、土木學會、地盤工學會(JGS)、日本膨潤土工業會(JBAS)等的規格與標準。未包含之項目，因需滿足回填材的檢查規格值，需預先設定相關的試驗方法、試驗時機與頻率。品質管理方法整理如表 3.3.2-2。

表 3.3.2-1 回填材的品質管理項目

機能要求	階段	技術要件	設計項目	品質管理項目						
				材料管理	工法管理		狀態管理(成品管理)	環境管理		
					施工	養護				
基本安全機能	抑制遷移	回填後	透水特性	施工時性能、狀態	<ul style="list-style-type: none"> • 蒙脫石含有率 • 層間陽離子組成 • 粒徑分布 • 含水比 • 塑性限界 • 骨材品質、配比 	<ul style="list-style-type: none"> • 鋪設方法 • 碾壓方法 	—	<ul style="list-style-type: none"> • 乾燥密度 	<ul style="list-style-type: none"> • 坑內環境溫度 • 濕度 • 滴水 	
				膨潤壓	<ul style="list-style-type: none"> • 蒙脫石含有率 • 層間陽離子組成 • 粒徑分布 • 含水比 • 塑性限界 	<ul style="list-style-type: none"> • 鋪設方法 • 碾壓方法 	—	<ul style="list-style-type: none"> • 乾燥密度 	<ul style="list-style-type: none"> • 坑內環境溫度 • 濕度 • 滴水 	
				密度	<ul style="list-style-type: none"> • 蒙脫石含有率 • 層間陽離子組成 • 粒徑分布 • 含水比 • 塑性限界 	<ul style="list-style-type: none"> • 鋪設方法 • 碾壓方法 	—	<ul style="list-style-type: none"> • 乾燥密度 		
				礦物組成	<ul style="list-style-type: none"> • 蒙脫石含有率 • 層間陽離子組成 • 混合土的礦物組成^{**} 	—	—	—		
	隔離	回填後	閉塞性	施工時性能、狀態	—	—	—	<ul style="list-style-type: none"> • 閉塞狀態(完全填充有害空隙) 	—	
				長期狀態變化	強度	<ul style="list-style-type: none"> • 蒙脫石含有率 • 層間陽離子組成 • 粒徑分布 • 含水比 • 塑性限界 • 骨材品質、配比 	<ul style="list-style-type: none"> • 鋪設方法 • 碾壓方法 	—	<ul style="list-style-type: none"> • 乾燥密度 	<ul style="list-style-type: none"> • 坑內環境溫度 • 濕度 • 滴水
				礦物組成	<ul style="list-style-type: none"> • 混合土的礦物組成^{**} 	—	—	—	—	
				—	—	—	—	—		

※必要時實施

表 3.3.2-2 回填材的品質管理項目與試驗方法

品質管理項目		試驗方法、管理方法	備註
材料 管理	混合土的配比	確認膨潤土及骨材的種類 膨潤土及骨材的計量值	平均值須能代表 其施工量
	混合土的含水比	JIS A1203、JGS0122、紅外 線水分計	
	骨材粒徑	JIS A1204 土壤粒徑試驗	
	混合材料的消散率	日本道路公團 JHS 110	
	混合材料的破碎率	日本道路公團 JHS 109	
	蒙脫石含有率	JBAS-107-91(MBC 試驗)	
	層間陽離子組成	浸出陽離子的分析	當製品或礦區變 更時實施，或是定 期實施(頻率低)
混合土礦物組成	X 光繞射(XRD) [*]		
工法 管理	鋪設方法	規定鋪設厚度及鋪設設備	平均值須能代表 其施工量
	碾壓方法	選擇碾壓次數及碾壓設備	
狀態 管理	乾密度	岩心密度試驗、RI 密度量測	平均值須能代表 其施工量
	閉塞狀態	目視確認	
環境 管理	坑內溫度	溫度量測	—
	坑內濕度	相對濕度量測	
	坑內滴水	目視確認滴水狀況	

※必要時實施

3.3.3 檢查

檢查項目主要是確認能夠滿足所需的機能要求而實施。回填材的檢查項目如表 3.3.3-1 所示，有透水係數、膨潤壓、密度、礦物組成、閉塞狀態、強度。

表 5.3.3-1 回填材的機能要求、技術條件及檢查項目間之關係

機能要求		階段	技術條件	檢查項目
基本安全機能	抑制遷移	回填後	透水特性	<ul style="list-style-type: none"> • 透水係數 • 膨潤壓 • 密度(總體密度) • 礦物組成
	隔離		閉塞性	<ul style="list-style-type: none"> • 閉塞狀態 • 強度 • 礦物組成

檢查的試驗方法，主要參考日本工業規格(JIS)、土木學會、地盤工學會(JGS)、日本膨潤土工業會(JBAS)等的規格與標準。若是未包含之項目，為滿足回填材的機能要求，須先設定試驗方法、試驗時間與頻率。若想採用文獻或論文中提及之新的試驗方式，則需收集施工或試驗實績的資料，評估其適用性後再決定是否採用。

回填材的檢查，希望能由直接檢查確認回填材沒有損傷與劣化。若在檢查時的取樣與試驗，發現回填材有所損傷，需將坑內空隙填充材修復至損傷前狀態。

依據施工計畫，在確保回填材的機能要求的前提下，選擇適當時間做為檢查時間。考量處置窖的坑道長度、回填容積來決定檢查單元。檢查頻率與檢查數量的部分，除依據試驗實績外，也可參照日本工業規格(JIS)的抽樣檢查之規格來設定。對於回填材檢查項目對應的檢查方法(試驗方法、試驗時間、頻率)，整理於表 3.3.3-2。

關於透水係數、膨潤壓、密度、礦物組成、強度等檢查方法，因與低透水層相同，故在此省略。閉塞狀態的檢查，則採用目視檢查的方式，確認所使用的材料是否充分填塞坑道內空隙。檢查時間與頻率，以材料鋪設開始到壓密完成為一施工單元，待完成施工後進行檢查。

表 5.3.3-2 回填材的檢查方法

檢查項目	試驗方法、檢查方法	時間、頻率
透水係數	由蒙脫石含有率及乾燥密度求得有效蒙脫石密度 <ul style="list-style-type: none"> • 蒙脫石含有率是用甲基藍析復量試驗 (JBAS-107-91) • 乾燥密度可由 3D 雷射測量數據及投入質量計算平均密度，或是以 JIS A1225 土壤濕潤密度試驗方法量測 或是定水位法、透水試驗、壓密試驗	• 各施工單元完工時
閉塞狀態	目視確認	
膨潤壓	由蒙脫石含有率及乾燥密度求得有效蒙脫石密度 <ul style="list-style-type: none"> • 蒙脫石含有率是用甲基藍析復量試驗 (JBAS-107-91) • 乾燥密度可由 3D 雷射測量數據及投入質量計算平均密度，或是以 JIS A1225 土壤濕潤密度試驗方法量測 或是膨潤壓試驗	
密度(總體密度)	3D 雷射測量數據及投入質量計算平均密度 或是抽樣試驗：JIS A1225 土壤濕潤密度試驗方法	
強度	由乾燥密度、含水比求得強度 <ul style="list-style-type: none"> • 乾燥密度可由 3D 雷射測量數據及投入質量計算平均密度，或是以 JIS A1225 土壤濕潤密度試驗方法量測 • 含水比是用 JIS A1203 土壤含水比試驗方法量測 或是以下的強度試驗方法： <ul style="list-style-type: none"> • 抽樣試驗 <ul style="list-style-type: none"> JIS A1216 土壤單軸壓縮試驗 JGS 0524 土壤三軸壓縮試驗 	
礦物組成	甲基藍析復量試驗(JBAS-107-91)及蒙脫石含有率量測	

第四章 處置坑道

4.1 設計

在防止輻射曝露的觀點上，處置坑道的機能要求為基本安全機能中的「隔離」，並且在建設與營運時，須確保空間與力學的安定性及維持坑道形狀。由於處置坑道周邊的岩盤並無防止輻射曝露的機能要求，故在設計處置坑道時，其安全評估時須一併考量處置坑道周邊岩盤的條件。

處置坑道在建設與營運階段須滿足「營運操作機能」要求，即在建設與營運時，確保載重條件下的力學安定性並維持坑道形狀，故要求之技術條件為力學特性及確保內空。此外，低透水層與坑內空隙填充材的材料主要為膨潤土系材料，可能將因水而產生膨脹，故在建設與營運時，須考量對於湧水等現象的防水與排水性。有關營運操作機能於此部分考量可參考一般地下構造物(例如：道路隧道、鐵路隧道等)的機能要求。

處置坑道對於回填後的「隔離」機能要求，主要為確保由地表面起算的隔離距離。在建設階段，確定隔離距離已滿足設定的處置坑道的深度。有關處置坑道的機能要求與技術條件整理如表 4.1-1，其對應之設計項目與設計之基本考量說明如後。

表 4.1-1 處置坑道的機能要求與技術條件

機能要求		階段	機能內容	是否需要此機能	技術要件
基本安全機能	隔離	回填後	確保隔離距離	●	● 隔離距離
			防止任意入侵	—	—
營運操作機能		建設與營運	確保建設與營運所需的空間及力學的安定性	●	● 力學特性 ● 防水與排水性
			維持坑道形狀	●	● 力學特性 ● 確保內空

一、技術條件與設計項目

處置坑道須滿足的技術條件有隔離距離、力學特性、防水與排水性、確保內空等，其對應之設計項目整理如表 4.1-2。

(一) 隔離距離

基本安全機能中的「隔離」機能對應之技術條件為回填後的處置坑道與地表面間的隔離距離。即廢棄物埋設深度需較安全評估的深度更深。實際的隔離機能要求階段是在回填後，但需確認建設、運轉階段時，處置坑道的設置是否有滿足要求的深度，故設計項目為處置坑道位置。

(二) 力學特性、防水與排水性、確保內空

技術條件中的力學特性，需考量坑道型式、地層特性、施工時載重、營運時載重、地震力等因子，對處置坑道的內空變位、混凝土襯砌、仰拱等構造進行設計。其中混凝土襯砌、仰拱的設計項目可參考處置窖等相似的鋼筋混凝土構造物，亦即混凝土抗壓強度、鋼筋強度、配筋、鋼筋續接、鋼筋保護層等。此外，技術條件中的防水與排水性會影響建設與營運的作業，如廢料包件的吊放、各部位的建設等，須預留適當的作業空間，因此需設計坑道內部的滲水量(防水工程、排水工程)。技術條件中的確保內空，為確保處置坑道內有足夠的建設、運轉空間，故設計項目為坑道內徑尺寸。

表 4.1-2 處置坑道的機能要求、技術條件及設計項目間的關係

機能要求		階段	技術條件	設計項目	
				施工時性能、狀態	長期狀態變化
基本安全機能	隔離	回填後	隔離距離	• 處置坑道位置	—
運轉上的機能		建設、運轉	力學特性	• 內空變位 • 混凝土襯砌、仰拱的混凝土抗壓強度、鋼筋強度、配筋、鋼筋續接、鋼筋保護層	—
			防水與排水性	• 坑道內部的滲水量(防水工程、排水工程)	—
			確保內空	• 內徑尺寸	—

二、處置坑道設計的基本考量

(一)設計檢討範圍

處置坑道機能要求的技術條件為隔離距離、力學特性、防水與排水性、確保內空等。其中，確保隔離距離的設計項目為處置坑道位置，此亦為處置坑道的設計條件，故確保建設階段訂定之處置坑道設置位置是很重要的一環。日本對於處置坑道之設計，包括力學特性、防水與排水性、確保內空等技術條件，基本上參考隧道標準示方書(土木學會，2006)。但須注意隧道標準示方書中所使用之長期耐久性、永久構造物等用詞，主要是以一般地下構造物(道路隧道、鐵路隧道等)為對象，與地下處置坑道回填後對時間尺度的要求並不相同。

雖然對處置坑道周邊的岩盤並無防止輻射曝露的機能要求，但土木學會(2008)提到，坑道周邊岩盤受開挖影響，

將使透水性產生變化，此變化若在安全評估中無法忽略時，需依據力學作用之推估結果，來評估開挖影響區域的透水性。處置坑道的尺寸、形狀、施工方法、支撐作業、襯砌等項目，都會影響開挖影響區域。因此，設計處置坑道時，需考量安全評估中坑道周邊岩盤條件。

隧道工法中除山岳工法外，還有潛盾機工法、開挖工法、鋼板樁工法、TBM 工法等。但若依照隧道標準示方書，潛盾機工法適用對象為較軟弱地層，且最大坑道直徑在 14m 以內，而開挖工法最大開挖深度在 40m，皆不適用於地下處置設施。另外，鋼板樁工法多用於開挖斷面小的情況，TBM 工法用於延長水路隧道或先進導坑等，亦非適用對象。

(二)材料設定的基本考量

關於處置坑道的支撐作業、襯砌、仰拱、防水工程與排水工程的材料說明如下。

隧道標準示方書中所提到的支撐作業，稱為一次支撐作業或一次支撐。依照隧道標準示方書之內容，支撐作業之主要目的是整合隧道挖掘後及周邊地層的狀況，使其達到早期安定化之效果。支撐作業的材料有噴漿混凝土、岩錨(Rock bolt)、鋼支撐架等，可參考隧道標準示方書的材料來設定。

這裡指的襯砌在隧道標準示方書中稱為二次襯砌，設計時需檢討地層條件、載重條件、構造物的重要度等，以滿足品質要求。若採用地下水漏水少且水密性佳的構造物時，則可提高檢查與保養的作業性。關於力學特性，一般選擇在地層變形收斂後進行施工，故基本上不考慮載重作用。但若地層變形尚未收斂即進行襯砌施工時，則須考慮因襯砌施工造成之水壓或垂直載重等外力。襯砌的形狀、厚度、混凝土強度與配比等，可參照隧道標準示方書。

依據隧道標準示方書，仰拱主要與支撐作業合為一體，以確保地層的安定為目的。為使仰拱與襯砌等永久構造物能充分發揮機能，設計時須考量地層條件、坐落位置、使用目的、必要的機能與品質等項目。仰拱的形狀、厚度、混凝土強度與配比等，與襯砌相同，可參照隧道標準示方書進行設計。

由於襯砌與仰拱並未要求回填後的機能，故使用水泥系材料時，可參考低擴散層與處置窖的設計方針，但須考量水泥水化物的溶出等長期的化學變質。

在防水工程與排水工程的設計上，隧道標準示方書中提到，設計須滿足所需用途。若依照隧道標準示方書，一般山岳隧道在排水時，需確保隧道周邊地下水不會滯留在襯砌背面，且結構不會因過大的地下水壓使襯砌內面產生漏水。地下處置的處置坑道，可適用隧道標準示方書，為確保襯砌內面不會漏水，除利用防水膜等防水工程作為適當的湧水對策外，也可針對排水工程選擇適當之內部排水材，以確保隧道湧水不會滯留。此外，若進行防水作業後，仍然在施工縫等處發生漏水到襯砌內面時，則須進行止水、導水等漏水處理對策。

由於地下處置坑道的建設與營運期間可能超過數十年，故須評估內部構造物回填後的狀態。因此，考量地下設施其他構成材料產生的影響，在選擇處置坑道的支撐作業(水泥系材料、岩錨、鋼製支撐架等)、防水工程、排水工程之材料時，須能滿足耐久性。

(三)設計的基本考量

對於支撐作業、襯砌、仰拱的設計，須充分考量設計項目與設計條件，並檢討適當的方法，一般山岳隧道的設計採用下列方法：

1.標準設計

適用於設計條件與以往設計及施工實績差異不大的情況。設計條件會依隧道的使用目的(道路、鐵路、水路等)、各單元(坑道斷面、形狀等)、地層條件等有所不同，各企業皆有各自的標準設計方法、支撐方法。

2.類似條件的設計

適用於以往有類似的隧道施工及設計條件時。即使使用目的及各單元不同，但因地層條件與地質條件類似，故可參考以往案例進行設計。

3.解析方法

對於大斷面、特殊地層、近接施工等特殊設計，當無法適用標準設計或類似條件設計之方法時，可採用解析方法。適用於此方法者，同樣可參考類似的隧道設計、施工案例等。

設置地下處置坑道的主要目的為處置放射性廢棄物，以往並無前例。一般在距離地面甚遠(50~100m)的地下建設處置坑道，具有相較之下較大的斷面、連續的複數處置坑道相連等特殊條件，故須使用解析方法來設計。在設計時若有類似的隧道設計、施工案例時皆可納入參考。

4.2 品質管理

處置坑道的技術條件(隔離距離、力學特性、防水與排水性、確保內部空間)對應之設計項目包括處置坑道的位置、內空變位、混凝土襯砌、仰拱(混凝土抗壓強度、鋼筋強度、配筋、鋼筋續接、鋼筋保護層)、坑道內部的滲水量、坑道內徑尺寸等。考量設計項目與性能的關係，從材料管理、工法管理、環境管理等觀點，選出影響設計項目的因子作為管理項目，將處置坑道的品質管理項目彙整如表 4.2-1。

影響內空變位的因素有觀察或測量地質與支撐作業的狀況、支撐作業(噴漿混凝土、岩錨、鋼支撐架、襯砌)的品質管理等。關於混凝土襯砌、仰拱混凝土的抗壓強度、鋼筋強度、配筋、鋼筋續接、鋼筋保護層等品質管理項目，可適用如處置窖等類似的鋼筋混凝土構造物的品質管理項目。防水與排水性的設計項目為坑道內部的滲水量，故品質管理項目需考量防水工程與排水工程。而坑道內徑尺寸則適用處置窖構件尺寸的品質管理項目中，與模板、支撐作業相關的品質管理項目。

對於回填後需要的隔離機能而言，設計項目為坑道的設置位置，由隧道標準示方書可知，其檢查項目為定期測量坑道的設置位置，但品質管理項目卻沒有此項目。故由隔離機能觀點來看，坑道的設置位置沒有設定品質管理項目。

表 4.2-1 處置坑道的品質管理項目

機能要求		階段	技術條件	設計項目	材料管理	施工管理	環境管理
基本安全機能	隔離	回填後	隔離距離	處置坑道的位置	—	—	—
				運轉上的機能	建設、運轉階段	力學特性	內空變位
襯砌、仰拱的混凝土抗壓強度 ^{*1}	<ul style="list-style-type: none"> 水泥品質 混合材品質 計量值 充填性^{*2} 	<ul style="list-style-type: none"> 搬運方法 搬運時間 灌漿方法 養護方法 	—				
襯砌、仰拱的鋼筋強度 ^{*1}	<ul style="list-style-type: none"> 直徑、強度 	—	<ul style="list-style-type: none"> 坑內環境溫度 濕度 				
襯砌、仰拱的配筋、鋼筋續接、鋼筋保護層	<ul style="list-style-type: none"> 加工尺寸 直徑/數量 	<ul style="list-style-type: none"> 鋼筋續接固定的位置、長度、間隔 支撐架、間隔物(Spacer)、鋼筋支架(Bar support)的配置 鋼筋的固定程度 鋼筋續接的焊接外觀 澆置中襯板(Sheathing)與最外層鋼筋的距離 	—				
防水與排水性	坑道內部的滲水量	<ul style="list-style-type: none"> 防水工程 排水工程 	<ul style="list-style-type: none"> 防水工程 排水工程 				—
確保內空	坑道內徑尺寸	—	<ul style="list-style-type: none"> 模板、支保工 				—

*1：關於「襯砌·仰拱的混凝土抗壓強度、鋼筋強度、配筋·鋼筋續接·鋼筋保護層」尺寸的品質管理項目，可適用混凝土處置窖的品質管理項目（參考 4.2 節）。

*2：坍度、空氣量、混凝土溫度及可泵性。

處置坑道的品質管理方法，依據日本工業規格、土木學會、地盤工學會等規格與標準為基礎。未包含之項目，則參考以往試驗實績，設定方法、實施時間、頻率。處置坑道的支撐作業(噴漿混凝土、岩錨、鋼支撐架、襯砌)、防水工程與排水工程之品質管理、觀察與測量方法，以隧道標準示方書的方法為基礎。關於混

凝土襯砌與仰拱的混凝土抗壓強度、鋼筋強度、配筋、鋼筋續接、鋼筋保護層、模板、支撐作業的品質管理項目，可適用鋼筋混凝土的處置窖之品質管理方法。

一、支撐作業的品質管理方法

處置坑道的支撐作業，其品質管理方法、試驗時機、頻率整理如表 4.2-2。

二、防水作業與排水作業的品質管理方法

處置坑道的防水作業與排水作業，其品質管理方法、試驗時機、頻率整理如表 4.2-3。

三、觀察與測量的品質管理方法

處置坑道的觀察・測量項目，其品質管理方法、試驗時機、頻率整理如表 4.2-4。

表 4.2-2 處置坑道支撐作業的品質管理方法

項目	試驗方法	試驗時機	頻率
噴漿混凝土	依據隧道標準示方書 第 169 條 噴漿混凝土的材料、計量及拌合方法 第 170 條 噴漿混凝土的厚度及強度	依據隧道標準示方書	依據隧道標準示方書
岩錨	依據隧道標準示方書 第 171 條 岩錨的材料 第 172 條 岩錨的配置及定位		
鋼支撐架	依據隧道標準示方書 第 173 條 鋼支撐架的材料 第 174 條 鋼支撐架的建置		
襯砌	依據隧道標準示方書 第 175 條 襯砌的材料、配比、強度 第 176 條 模板的安裝及襯砌的成形		

表 4.2-3 處置坑道防水作業與排水作業的品質管理方法

項目	試驗方法	試驗時機	頻率
防水作業	依據隧道標準示方書 第 177 條 防水作業、抑制裂縫 作業的品質管理	依據隧道 標準示方 書	依據隧道 標準示方 書
排水作業	依據隧道標準示方書 第 178 條 排水作業的品質管理		

表 4.2-4 處置坑道的觀察、測量方法

觀察、測量項目	觀察、測量方法、時機、頻率	備註
觀察調查 • 開挖面地質 • 既有施工區間支撐架 • 既有施工區間襯砌 • 湧水狀況	依據隧道標準示方書 第 182 條 觀察、測量位置 第 183 條 觀察、測量頻率 第 183 條 選擇使用機器 第 185 條 觀察重點 第 186 條 測量重點 第 187 條 觀察、測量結果整理	
內空變位測量 • 內空變位 • 頂部沉陷 • 底部沉陷		
觀察調查 • 地表狀態		
地表面沉陷測量 • 沉陷 • 地滑		土壤保護層為隧道開 挖寬度兩倍以下之較 小隧道為對象。
地層取樣試驗 • 物理試驗 • 化學試驗		
現地調查、試驗 • 地層特性 • 工學特性		須考量可能損傷地層 之可能性。
開挖面隆起測量		
地中變位測量		將對地層鑽孔，須考量 鑽孔造成之影響。
岩錨軸力測量		
噴將混凝土應力測量		
鋼製支撐架應力測量		
襯砌應力測量		
襯砌變位測量		
周邊構造物變形測量		
地下水位測量 • 地下水位 • 間隙水壓		將對地層鑽孔，須考量 鑽孔造成之影響。

4.3 檢查

處置坑道的檢查項目如表 4.3-1 所示，有處置坑道的位置、內空變位、混凝土襯砌與仰拱的混凝土抗壓強度、鋼筋強度、配筋、鋼筋續接、鋼筋保護層、坑道內部的滲水量、坑道內徑尺寸。

表 4.3-1 處置坑道的機能要求、技術條件與檢查項目間之關係

機能要求		階段	技術條件	檢查項目
基本安全機能	隔離	回填後	隔離距離	<ul style="list-style-type: none"> 處置坑道位置
運轉上的機能		建設與營運	力學特性	<ul style="list-style-type: none"> 內空變位 混凝土襯砌與仰拱的混凝土抗壓強度、鋼筋強度、配筋、鋼筋續接、鋼筋保護層
			防水與排水性	<ul style="list-style-type: none"> 坑道內部的滲水量
			確保內空	<ul style="list-style-type: none"> 坑道內徑尺寸

處置坑道的檢查方法，基本上依據隧道標準示方書所規定的方法為基本。但力學特性的技術條件中，有關混凝土襯砌、仰拱的設計項目，可參考鋼筋混凝土的處置窖的設計項目。因此，對於混凝土襯砌、仰拱的混凝土抗壓強度、鋼筋強度、配筋、鋼筋續接、鋼筋保護層的檢查方法，可參考鋼筋混凝土的處置窖的檢查方法。關於處置坑道的檢查方法(試驗方法、試驗時機、頻率)，整理於表 4.3-2。

表 4.3-2 處置坑道的檢查方法

檢查項目	試驗方法	試驗時機	頻率
處置坑道的 位置	依據隧道標準示方書之坑外基準點 【第 94 條 坑外基準點】	開挖前	依據隧道標準示方書
	依據隧道標準示方書之坑內測量 【第 95 條 坑內測量】	開挖中	依據隧道標準示方書
內空變位	依據隧道標準示方書 【第 182 條 觀察、測量位置】 【第 183 條 觀察、測量頻率】	開挖後~灌漿前	依據隧道標準示方書
襯砌、仰拱的 混凝土抗壓強度	「預拌混凝土接收時的檢查」(JSCE RC 示方書、檢查標準)中的抗壓強度檢查	根據配比強度訂定之標準與齡期	施工單元
襯砌、仰拱的 鋼筋強度	「補強材料接收時的檢查」(JSCE RC 示方書、檢查標準)	依據 JSCE RC 示方書 (檢查標準)	依據 JSCE RC 示方書 (檢查標準)
襯砌、仰拱的 配筋、鋼筋續接、鋼筋保護層	「鋼筋作業的檢查」(JSCE RC 示方書、檢查標準)	依據 JSCE RC 示方書 (檢查標準)	依據 JSCE RC 示方書 (檢查標準)
襯砌內部的 滲水量	依據隧道標準示方書 【第 176 條 模版的安裝及襯砌的成形】	施工結束時	依據隧道標準示方書
襯砌內徑尺寸	依據隧道標準示方書 【第 176 條 模版的安裝及襯砌的成形】	施工結束時	依據隧道標準示方書

*1：襯砌、仰拱的混凝土抗壓強度、鋼筋強度、配筋、鋼筋續接、鋼筋保護層，適用於 4.2 節的檢查方法。

第五章 相關技術規範彙整

5.1 我國相關技術規範彙整與比較

根據日本「低放射性廢棄物地下處置設施之設計、品管與檢查考量技術」，彙整出水泥系材料、膨潤土系材料及處置坑道等設施所使用之品質管理方法與檢查方法。

水泥系材料主要以土木學會出版之「混凝土標準示方書〔施工篇〕」(簡稱 JSCE RC 示方書)及日本建築學會出版之「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5N 原子力發電所設施相關之鋼筋混凝土工程」(簡稱 JASS5N)作為品質管理及檢查之主要參考依據，並輔以日本原子力學會標準及日本工業規格等標準，作為有效擴散係數及吸附分配係數等檢查項目之參考，其中 JASS5N 為針對核能發電設施之鋼筋混凝土工程規範，我國尚無相關對應之規範，故不將 JASS5N 列入比較。將我國規範與日本水泥系材料品質管理及檢查方法比較如表 5.1-1 及表 5.1-2，大部分管理項目可對應我國中國土木水利學會出版之「混凝土工程施工規範與解說 [402-94a]」及公共工程委員會訂定之「施工綱要規範」，但有效擴散係數與吸附分配係數等檢查項目，或是較特殊的檢查方法，不屬於一般建築構造物之規範項目，則國內尚無可對應之標準或規範。

膨潤土系材料非一般常用之建築材料，較無一定標準可依循，日本對於膨潤土系材料的品質管理方法及檢查方法主要參考日本工業規格(JIS)、日本地盤工學會(JGS)、日本膨潤土工業會(JBAS)等規定，大部分與土壤試驗相關，故以國內土壤試驗常用之國家標準(CNS)或美國材料試驗協會(ASTM)的試驗方法為參考，找出相似的標準與規範，並彙整如表 5.1-3 及表 5.1-4 所示。膨潤土的品質管理項目中，鋪設方法、碾壓方法、構件尺寸、坑內溫度、坑內濕度、坑內滴水及混合土的配比等項目，係由直接量測、觀

察或記錄來管理，未有對應之規範。而檢查項目中的透水係數及膨潤壓，除了可以用有效蒙脫石含有率或乾密度間接檢查外，亦有定水位法、透水試驗、壓密試驗與膨潤壓試驗等方式，但受到膨潤土自身特性的限制，故沒有適用之標準。

日本處置坑道的隧道工法係使用山岳工法，故品質管理及檢查方法主要以日本土木學會出版之「隧道標準示方書[山岳工法篇]·同解說」為參考依據，部分與混凝土或鋼筋相關之檢查項目，則參考 JSCE RC 示方書。國內規範中，與隧道工程品質管理較為相關的規範主要有交通部出版之「隧道施工技術規範」與「國道高速公路施工技術規範-隧道工程施工規範」及公共工程委員會訂定之「施工綱要規範」。檢查項目則依據項目不同，其檢查方法可參考中國土木水利學會出版之「隧道工程設計準則與解說」與「混凝土工程施工規範與解說[402-94a]」、公共工程委員會訂定之「施工綱要規範」及國家標準(CNS)等規定。但處置坑道的位置及襯砌內部滲水量等項目，於國內之規範中，未有對應之標準可供參酌。

表 5.1-1 水泥系材料之品質管理方法與國內規範對照表(1/2)

品質管理項目		JSCE RC 示方書 [施工標準] (日本土木學會)	混凝土工程施工規範與解說 [402-94a] (中國土木水利工程學會)	施工綱要規範 (公共工程委員會)	現場量測或 確認記錄
材料 管理	• 材料品質	• 混凝土材料及補強材料的品質管理	• 混凝土工程品質管制	• 第 03050 章 混凝土基本材料及施工一般要求 • 第 03052 章 卜特蘭水泥 • 第 03053 章 水泥混凝土之一般要求	
	• 計量值	• 混凝土的製造和品質管理	• 混凝土工程品質管制	—	
	• 單位重 • 高流動性混凝土之充填性 ^{※1}	• 混凝土的品質管理 • 施工品質管理	• 混凝土工程品質管制 • 自充填性能要求與檢驗	• 第 03315 章 自充填混凝土	
	• 鋼筋直徑、強度 • 鋼筋加工尺寸 • 鋼筋直徑/數量	• 混凝土材料及補強材料的品質管理	• 鋼筋工程品質管制	• 第 03210 章 鋼筋	
	• 砂漿溫度				• 量測溫度
工 法 管 理	• 搬運方法、時間 • 灌漿方法 • 模板、支保工 • 模板尺寸	• 施工品質管理	• 混凝土工程品質管制 • 混凝土產製與輸送 • 混凝土澆置 • 模板工程品質管制	• 第 03110 章 場鑄結構混凝土用模板	

※1：填充性包括坍流度、漏斗流下時間、空氣量、砂漿溫度及可泵性。—：表示沒有相關規範可參考。

表 5.1-1 水泥系材料之品質管理方法與國內規範對照表(2/2)

品質管理項目		JSCE RC 示方書 [施工標準] (日本土木學會)	混凝土工程施工規範與解說 [402-94a] (中國土木水利工程學會)	施工綱要規範 (公共工程委員會)	現場量測或 確認記錄
工 法 管 理	• 養護方法	• 施工品質管理	• 混凝土工程品質管制 • 混凝土養護與保護	• 第 03390 章 混凝土養護	
	• 鋼筋續接固定的位置、長度、間隔 • 支撐架、間隔物、鋼筋支架的配置 • 鋼筋的固定程度 • 鋼筋續接的焊接外觀 • 澆置中襯板與最外層鋼筋的距離	• 施工品質管理	• 鋼筋工程品質管制	• 第 03210 章 鋼筋	
	• 高流動性混凝土之填充量	• 施工品質管理	—	—	
	• 高流動性混凝土填充時損失量 • 高流動性混凝土壓送性	• 施工品質管理	—	—	
	• 灌漿溫度				• 量測溫度
	• 廢料包件的尺寸、數量 • 廢料包件的放置位置				• 確認操作 記錄
	• 坑內溫度				• 量測溫度
環 境 管 理	• 坑內濕度				• 量測相對 溼度

※1：填充性包括坍流度、漏斗流下時間、空氣量、砂漿溫度及可泵性。—：表示沒有相關規範可參考。

表 5.1-2 水泥系材料的檢查方法與國內規範對照表(1/2)

檢查項目	日本的檢查方法	國內規範
乾單位重	JASS5N T-601 或是 JASS5N T-602	—
構件尺寸 (厚度)	「混凝土構件的位置及形狀尺寸的檢查」(JSCE RC 示方書、檢查標準)	• 第 18 章驗收(混凝土工程施工規範與解說[402-94a])
	或是「混凝土灌漿狀態的檢查」(JASS5N)	—
有效擴散 係數	日本原子力學會標準 F008 的有效擴散係數試驗方法	—
	或是 JIS R1655 「由精密陶瓷的水銀壓入法造成成型體的氣孔孔徑分布試驗方法」來測量空隙率	—
裂縫開口 面積	「表面狀態的檢查」(JSCE RC 示方書、檢查標準)	• 第 9 章混凝土表面修補與修飾(混凝土工程施工規範與解說[402-94a])
礦物組成	「混凝土材料接收時的檢查」(JSCE RC 示方書、檢查標準)	• 第 16 章檢驗及查驗(混凝土工程施工規範與解說[402-94a])
	或是「預拌混凝土接收時的檢查」(JSCE RC 示方書、檢查標準)中的配比檢查	• CNS 3090 預拌混凝土
吸附分配 係數	日本原子力學會標準 AESJ-SC-F003：2002	—
	或是 AESJ-SC-F008：2006	—
抗壓強度	「預拌混凝土接收時的檢查」(JSCE RC 示方書、檢查標準)中的抗壓強度檢查	• 第 16 章檢驗及查驗(混凝土工程施工規範與解說[402-94a]) • CNS 3090 預拌混凝土
	或是「結構體混凝土強度檢查」(JASS5N)	—

—：表示沒有相關規範可參考。

表 5.1-2 水泥系材料的檢查方法與國內規範對照表(2/2)

檢查項目	日本的檢查方法	國內規範
鋼筋強度	「補強材料接收時的檢查」(JSCE RC 示方書、檢查標準)	<ul style="list-style-type: none"> • 第 03210 章 鋼筋(施工綱要規範) • 第 16 章 檢驗及查驗(混凝土工程施工規範與解說 [402-94a])
配筋、鋼筋續接、鋼筋保護層	「鋼筋工程的檢查」(JSCE RC 示方書、檢查標準)	<ul style="list-style-type: none"> • 第 03210 章 鋼筋(施工綱要規範) • CNS 560 鋼筋混凝土用鋼筋
填充量	量測實際數量或填充高度	直接量測。

—：表示沒有相關規範可參考。

表 5.1-3 膨潤土的品質管理方法與國內常用規範對照表(1/2)

品質管理項目		日本	國內常用規範
材 料 管 理	粒徑分布	JIS A1204 土壤粒徑試驗	<ul style="list-style-type: none"> • CNS 11776 土壤粒徑分析試驗法 • ASTM D422 土壤粒徑分析試驗方法
	塑性限界	JIS A1205 土壤液性、塑性限界試驗	<ul style="list-style-type: none"> • CNS 5088 土壤液性限度試驗、塑性限度試驗及塑性指數決定法 • ASTM D4318 土壤液性限度、塑性限度及塑性指數試驗方法
	膨潤土含水比	JIS A1203 土壤含水比試驗方法	<ul style="list-style-type: none"> • CNS 5091 實驗室土壤含水量測定法 • ASTM D2216 土壤、礫石之含水量室內試驗法
		JGS0122 使用微波爐的土壤含水比試驗	—
		紅外線水分計	—
	高嶺石含有率	JBAS-107-91 甲基藍吸附量試驗(MBC 試驗)	• ASTM C837 黏土甲基藍指數試驗方法
	層間陽離子組成	JBAS-106-77 陽離子交換容量實驗	—
	次生礦物	X 光繞射(XRD)	<ul style="list-style-type: none"> • CNS 13617 混凝土粒料岩相分析指引 • ASTM C295 混凝土骨材岩相分析指引
	混合土的配比	確認膨潤土及骨材的種類	直接確認，無對應規範。
		記錄膨潤土及骨材的計量值	直接確認，無對應規範。
混合土的含水比	JIS A1203 土壤含水比試驗方法	<ul style="list-style-type: none"> • CNS 5091 實驗室土壤含水量測定法 • ASTM D2216 土壤、礫石之含水量室內試驗法 	
	JGS0122 使用微波爐的土壤含水比試驗	—	
	紅外線水分計	—	

—：表示沒有相關規範可參考。

表 5.1-3 膨潤土的品質管理方法與國內常用規範對照表(2/2)

品質管理項目		日本的品質管理方法	國內常用規範
材 料 管 理	骨材粒徑	JIS A1204 土壤粒徑試驗	<ul style="list-style-type: none"> • CNS 11776 土壤粒徑分析試驗法 • ASTM D422 土壤粒徑分析試驗方法
	骨材的消散率	日本道路公團 JHS 110 岩石的消散率試驗	<ul style="list-style-type: none"> • ASTM D4644 頁岩和軟弱岩的消散耐久性試驗方法
	骨材的破碎率	日本道路公團 JHS 109 岩石的破碎率試驗	—
	混和土礦物組成	X 光繞射(XRD)	<ul style="list-style-type: none"> • CNS 13617 混凝土粒料岩相分析指引 • ASTM C295 混凝土骨材岩相分析指引
工 法 管 理	鋪設方法	規定鋪設厚度及鋪設設備	視實際設計狀況而定。
	碾壓方法	規定碾壓次數及碾壓設備	視實際設計狀況而定。
狀 態 管 理	乾密度	JGS1614 土壤密度試驗法之 RI 法	—
		JIS A1214 土壤密度試驗方法之砂置換法	<ul style="list-style-type: none"> • ASTM D1556 砂錐法測定現場土壤密度試驗法
	膨潤土含水比	放射性同位素法(Radioisotope, Ri 法)	—
	構件尺寸	水準測量、3D 雷射測量	直接量測。
	閉塞狀態	目視確認	直接確認。
環 境 管 理	坑內溫度	溫度量測	直接量測。
	坑內濕度	相對濕度量測	直接量測。
	坑內滴水	目視確認滴水狀況	直接確認。

—：表示沒有相關規範可參考。

表 5.2-4 膨潤土的檢查方法與國內規範對照表(1/3)

檢查項目	日本的檢查方法		國內常用規範
透水係數	直接檢查	定水位法、透水試驗、壓密試驗	日本對低透水性材料的透水係數直接試驗方法並無特別規定，未來可視場址狀況，提出適合之試驗方法。
	間接檢查 (由蒙脫石 密度確認)	由蒙脫石含有率求得有效蒙脫石密度： • 甲基藍吸附量試驗(JBAS-107-91) 由乾燥密度求得有效蒙脫石密度： • JIS A1225 土壤濕潤密度試驗方法量測 • 3D 雷射測量數據及投入質量計算平均密度	• ASTM C837 黏土甲基藍指數試驗方法 • ASTM D2937 土壤密度試驗方法之圓柱挺進法(Drive-Cylinder Method)
構件尺寸	水準測量、3D 雷射測量		直接量測。
膨潤壓	直接檢查	膨潤壓試驗	日本對膨潤壓的試驗方法並無統一規格化，未來可視場址狀況，提出適合之試驗方法。
	間接檢查 (由蒙脫石 密度確認)	由蒙脫石含有率求得有效蒙脫石密度： • 甲基藍吸附量試驗(JBAS-107-91) 由乾燥密度求得有效蒙脫石密度： • JIS A1225 土壤濕潤密度試驗方法量測 • 3D 雷射測量數據及投入質量計算平均密度	• ASTM C837 黏土甲基藍指數試驗方法 • ASTM D2937 土壤密度試驗方法之圓柱挺進法(Drive-Cylinder Method)
密度 (總體密度)	3D 雷射測量數據及投入質量計算平均密度		直接量測。
	抽樣試驗：JIS A1225 土壤濕潤密度試驗方法		• ASTM D2937 土壤密度試驗方法之圓柱挺進法(Drive-Cylinder Method)

—：表示沒有相關規範可參考。

表 5.2-4 膨潤土的檢查方法與國內規範對照表(2/3)

檢查項目		日本的檢查方法	國內常用規範
礦物組成	高嶺石含有率	甲基藍吸附量試驗(JBAS-107-91)	• ASTM C837 黏土甲基藍指數試驗方法
	層間陽離子組成	JBAS-106-77 陽離子交換容量實驗	—
	次生礦物	X 光繞射(XRD)	• CNS 13617 混凝土粒料岩相分析指引 • ASTM C295 混凝土骨材岩相分析指引
強度、變形係數	直接檢查	JIS A1216 土壤單軸壓縮試驗	• CNS 12239 A3270 土壤單向度壓密試驗法
		JGS 0524 土壤三軸壓縮試驗	• ASTM D2850 凝聚性土壤不壓密不排水之三軸壓縮強度試驗法 • ASTM D4767 凝聚性土壤壓密不排水之三軸壓縮強度試驗方法 • CNS 9531 不測定孔隙壓之不排水岩心試驗三軸抗壓強度試驗法
		JGS 1521 地盤的平板載重試驗	—
		JIS A 1215 道路的平板載重試驗	• CNS 12392 A3290 土壤與柔性鋪面之非反覆式靜力平板載重試驗法(用於機場與公路鋪面之設計與評估) • ASTM D1195 土壤與柔性鋪面之反覆式靜力平板載重試驗(用於機場與公路鋪面之設計與評估) • AASHTO T221 土壤與柔性鋪面之反覆式靜力平板載重試驗(用於機場與公路鋪面之設計與評估)

—：表示沒有相關規範可參考。

表 5.2-4 膨潤土的檢查方法與國內規範對照表(3/3)

檢查項目	日本的檢查方法		國內常用規範
強度、變形係數	直接檢查	FWD 試驗	<ul style="list-style-type: none"> • ASTM D4694 落重式衝擊載重之撓度試驗方法 (Falling-Weight-Type Impulse Load Device)
	間接檢查	由高嶺石含有率求得強度、變形係數： <ul style="list-style-type: none"> • 甲基藍吸附量試驗(JBAS-107-91) 	<ul style="list-style-type: none"> • ASTM C837 黏土甲基藍指數試驗方法
		由乾燥密度求得強度、變形係數： <ul style="list-style-type: none"> • JIS A1225 土壤濕潤密度試驗方法量測 • 3D 雷射測量數據及投入質量計算平均密度 	<ul style="list-style-type: none"> • ASTM D2937 土壤密度試驗方法之圓柱挺進法 (Drive-Cylinder Method)
		由含水比求得強度、變形係數： <ul style="list-style-type: none"> • 用 JIS A1203 土壤含水比試驗方法量測 	<ul style="list-style-type: none"> • CNS 5091 實驗室土壤含水量測定法 • ASTM D2216 土壤、礫石之含水量室內試驗法
閉塞狀態	目視確認		直接確認。

表 5.1-5 處置坑道的品質管理方法與國內規範對照表

品質管理項目		隧道標準示方書 [山岳工法篇] (日本土木學會)	隧道施工技術規範 (交通部台灣區國道新建 工程局)	國道高速公路施工技術規範-隧 道工程施工規範 (交通部台灣區國道高速公路局)	施工綱要規範 (公共工程委員會)
支撐 工程	噴漿 混凝 土	第 169 條 噴漿混凝土的材料、計量 及拌合方法	第 02424 章 隧道噴凝土	04603 噴凝土	第 02424 章 隧道噴凝土
		第 170 條 噴漿混凝土的厚度及強度	—	04603 噴凝土	第 02424 章 隧道噴凝土
	岩錨	第 171 條 岩錨的材料	第 02423 章 隧道用岩栓	04602 岩栓	第 02423 章 隧道用岩栓
		第 172 條 岩錨的配置及定位	第 02423 章 隧道用岩栓	04602 岩栓	第 02423 章 隧道用岩栓
	鋼支 撐架	第 173 條 鋼支撐架的材料	第 02422 章 鋼支保	04606 鋼支保	第 02422 章 鋼支撐架
		第 174 條 鋼支撐架的建置	第 02422 章 鋼支保	04606 鋼支保	第 02422 章 鋼支撐架
	襯砌	第 175 條 襯砌的材料、配比、強度	第 02425 章 隧道襯砌	04902 混凝土	第 02425 章 隧道襯砌
		第 176 條 模版的安裝及襯砌的成形	第 02425 章 隧道襯砌	04901 隧道模板	第 02425 章 隧道襯砌
防水 排 水 工 程	防水 作業	第 177 條 防水作業、抑制裂縫作業 的品質管理	第 02448 章 隧道防水層	04801 防水層	第 02448 章 隧道防水層
	排水 作業	第 178 條排水作業的品質管理	—	05106 清水排水系統 05107 鋼筋混凝土地下排水管 05112 排水鑽孔與埋管	第 02449 章 隧道其他工 作

—：表示沒有相關規範可參考。

表 5.1-6 處置坑道的檢查方法與國內規範對照表

檢查項目	日本的檢查方法	國內常用規範
處置坑道的位置	第 94 條 坑外基準點(隧道標準示方書)	—
	第 95 條 坑內測量(隧道標準示方書)	—
內空變位	第 182 條 觀察、測量位置(隧道標準示方書)	<ul style="list-style-type: none"> • III 8.2 監測項目及儀器(隧道工程設計準則與解說) • 第 047 章 計測及儀器(國道高速公路施工技術規範-隧道工程施工規範) • 第 02447 章 隧道計測及儀器(施工綱要規範)
	第 183 條 觀察、測量頻率(隧道標準示方書)	<ul style="list-style-type: none"> • III 8.3 監測方式與頻率(隧道工程設計準則與解說)
襯砌的混凝土抗壓強度	「預拌混凝土接收時的檢查」(JSCE RC 示方書、檢查標準)中的抗壓強度檢查	<ul style="list-style-type: none"> • 第 16 章檢驗及查驗(混凝土工程施工規範與解說 [402-94a]) • CNS 3090 預拌混凝土
仰拱的混凝土抗壓強度		
襯砌的鋼筋強度	「補強材料接收時的檢查」(JSCE RC 示方書、檢查標準)	<ul style="list-style-type: none"> • 第 16 章檢驗及查驗(混凝土工程施工規範與解說 [402-94a])
仰拱的鋼筋強度		
襯砌的配筋、鋼筋續接、鋼筋保護層	「鋼筋作業的檢查」(JSCE RC 示方書、檢查標準)	<ul style="list-style-type: none"> • 第 03210 章 鋼筋(施工綱要規範) • CNS 560 鋼筋混凝土用鋼筋
仰拱的配筋、鋼筋續接、鋼筋保護層		
襯砌內部的滲水量	第 176 條 模版的安裝及襯砌的成形(隧道標準示方書)	—
襯砌內徑尺寸	第 176 條 模版的安裝及襯砌的成形(隧道標準示方書)	<ul style="list-style-type: none"> • 第 02425 章 隧道襯砌(施工綱要規範)

—：表示沒有相關規範可參考。

5.2 「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版草案)」 設計相關章節之精進建議

由前述章節可知處置設施的機能要求主要為密閉、屏蔽、抑制遷移、隔離及營運操作等機能，故以此為基礎檢視「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版草案)」，針對 4.1 設計目標與功能需求、4.3 結構設計、4.4 土木設計及 5.2 施工計畫等設計相關章節提出之建議如下：

- [1] 若要達到長期隔離之目的，處置設施內的各個構造都需發揮其既有功用。因此在考量構造的穩定性時，除了填充材、廢棄物及覆蓋物外，處置窖亦應納入考量。
- [2] 近地表及坑道兩種不同型式之處置設施，其封閉回填之方式亦有所差異。近地表處置設施是於處置單元周圍回填混合黏土之回填土石材料，並加以壓密夯實成為低透水區域，低透水區上設置一濾層做為降雨入滲排除之用，而後於其上覆土植生；坑道處置設施的封閉回填則是以土石料混製成滲透性極低之回填材料，夯實填充於處置單元與坑道內襯砌之空間。因此，對於降低廢棄物與積水接觸之機制或是排水設計，亦會受到處置設施的不同而影響，應予以區隔。
- [3] 封閉作業施工時，依據施工方法之不同，可能會有施工人員進入到處置窖上方，因此對於施工人員的輻射抑低措施，亦應加以考量。
- [4] 坑道型處置設施的處置窖，其外層有一層低擴散層及低透水層包覆。低擴散層為防止裂縫產生，可能會使用膨脹材料，故須考慮低擴散層硬化產生的膨脹壓對處置窖之影響。低透水層的膨潤壓受到周邊地下水浸潤狀況不同，並非均一的作用力，故須加以評估其對處置窖之影響。

- [5] 低放射性廢棄物的處置概念是將低放射性廢棄物處置於適當深度的地質環境中，利用工程障壁層層阻絕，延長核種遷移時間，使之在長期的遷移過程中，逐漸衰變至無害之程度。故在處置設施回填封閉後，建議增加考量工程材料之核種吸附性及擴散性，前者可使廢棄物與外部滲流水接觸後，放射性核種仍會被工程材料緊密的吸附住，而不會受地下水遷移影響，後者則可降低核種擴散之速率，抑制核種的擴散遷移。
- [6] 施工材料除了坑道處置窖或淺地處置窖之建造材料外，回填及封閉階段使用之回填材料與覆蓋材料，亦會影響處置設施的安全性，因此相關材料的材料特性及其試驗標準皆應清楚說明。
- [7] 由於處置設施之使用年限較一般土木構造物長，除對材料和施工方法進行品質管理外，完工後的檢核亦非常重要，包括檢核項目、檢核方法及檢核頻率之設定，以確保處置設施在封閉前都能維持最佳狀況，並在封閉後的長時間被動狀態下，有效發揮抑制遷移及隔離之功能。

有關「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版草案)」之內容建議修改如下：

4.1 設計目標與功能需求：說明處置設施之設計基準、設計要項及設計規格等。

處置設施設計目標與功能，係為提供廢棄物的長期隔離、降低處置設施接收與處置放射性廢棄物之輻射劑量、降低處置場關閉後維護工作量以及改進場址自然環境，以保護群眾的健康與安全。為達成設計目標與功能，故須提供下列資料供審查。

(一)提供資料

1. 說明降低處置單元水滲透之設計基準、設計要項及設計規格。
2. 說明處置單元覆蓋完整性之設計基準、設計要項及設計規格。

3. 說明回填物、處置單元[1]、廢棄物及覆蓋物構造穩定性之設計基準、設計要項及設計規格。
4. 說明降低廢棄物與積水接觸之設計基準、設計要項及設計規格。
5. 說明運轉及封閉期場區排水之設計基準、設計要項及設計規格。
6. 說明場址封閉與穩定化之設計基準、設計要項及設計規格。
7. 減少長期維護需求之設計基準、設計要項及設計規格。
8. 防止非故意侵入處置場障壁之設計基準、設計要項及設計規格。
9. 合理抑低職業曝露之設計基準、設計要項及設計規格。
10. 現場監測之設計基準、設計要項及設計規格。
11. 可適當監管與補救緩衝區之設計基準、設計要項及設計規格。

(二) 審查作業

對降低水滲透、處置單元覆蓋完整性、構造穩定性、降低廢棄物與積水接觸、運轉及封閉期場區排水、場址封閉與穩定化、減少長期維護需求、防止非故意侵入、合理抑低職業曝露、現場監測、緩衝區等資料，提供審查作業須注意的事項。

1. 降低處置單元水滲透之設計，是否清楚說明：(1)導引場區降水離開處置單元、(2)導引場外降水流入排水系統及導引地下水離開處置單元。導引場區降水與地下水離開處置單元的主要設計準則必須說明其排水系統可以控制降水流速和地下水位。此最低流速與地下水位必須根據(1)最大降雨(PMP)所導致的最壞狀況(2)因意外狀況所產生之堵塞。
2. 處置單元覆蓋完整性之設計，是否清楚說明：採取的方法可使覆蓋物(1)達成預期使用時期、(2)避免連續性維護需求、(3)可抵抗地表地質與生物活動之削夷作用。處置單元覆蓋物侵蝕保護之主要設計準則至少應說明(1)一般運作狀況時的地表水和風速；(2)異常性地表水與風速以及正常水位。處置單元覆蓋物完整性的主要設計準則至少應說明(1)評估整體性與差異性沉陷以及預估廢棄物與填充材料的密度增加狀況；(2)預估覆蓋物材料在掩埋廢棄

- 物可能受災時的強度與耐受性；(3)相關於最大地震的異常地表震動。
3. 構造穩定性之設計，是否清楚說明廢棄物可長期隔離及避免經常維護。確保填充材、處置單元、廢棄物和廢棄物覆蓋物的結構穩定性之主要設計準則至少應說明(1)廢棄物容器內與容器內填充材料之間預知的空隙容量；(2)因運作而產生的空隙效應；(3)設計基準異常事件對於結構穩定性的效應；和(4)在廢棄物有害時期，因地質化學環境使填充材、處置單元、廢棄物形態和廢棄物覆蓋材料的剝蝕。^[1]
 4. 降低廢棄物與積水接觸之設計，是否清楚說明使用方法可使廢棄物在暫時貯存、處置場運轉中、場區關閉期間，降低與積水的接觸。主要設計準則至少應(1)清楚說明；(2)說明廢棄物之貯存、吊卸和封閉處置單元；(3)若處置設施為近地表型式，說明處置單元覆蓋物表土下與表土的排水和暫存區域；(4)若處置設施為近地表型式，描述處置單元地面自然材料與排水材料及地面排水間的滲透性，若處置設施為坑道型式，則描述回填材料及坑道口封堵材料間之滲透性；和(5)描述暴露於空氣中之廢棄物暫時存放平臺與覆蓋物。是否提出防範運轉期主動性排水系統組件意外破壞和封閉後被動性排水系統組件被破壞之設計準則。^[2]
 5. 處置場運轉中與封閉期場區排水之設計，是否清楚說明使用方法可將(1)地表水或地下水引導遠離廢棄物，(2)以速度與斜度的方法控制排水系統流出處置單元。主要設計準則至少應(1)清楚說明；(2)說明運轉期和封閉後場址表土或坑道的排水狀況；(3)涵蓋表土或坑道的排水特性、分流結構和表土排水斜坡等。是否提出因應上游水庫毀壞或下游排水堵塞之設計準則。^[2]
 6. 場址封閉與穩定化之設計，是否清楚說明其措施，可(1)提供廢棄物長期隔離的功能與避免經常性維護之需求。(2)提供場址關閉與穩定計劃，並可應改善場區自然環境特性。場址關閉及穩定化之

- 主要設計準則應至少說明(1)設計時應提出場址封閉計劃的相關項目；(2)封閉與可能主動維護的設計基準。
7. 減少長期維護需求之設計，是否清楚說明處置場關閉後，如何避免長期維護之需求。主要設計準則必須預測(1)材料之耐用度；(2)侵蝕作用；(3)排水系統退化的效應；和(4)監控系統的退化。
 8. 防止非故意侵入處置場障壁之設計，是否清楚說明設立之障壁，以避免個人不經意的侵入處置設施。障壁主要設計準則必須說明標示物、障壁材料，障壁退化比率的可能範圍。
 9. 合理抑低職業曝露之設計，是否清楚說明如何合理抑抵職業曝露。減少職業曝露之主要設計準則必須說明(1)接收、檢查、管控、貯存、處置和封閉作業之輻射合理抑低措施；(2)對已知較高活性廢棄物之屏蔽設計；和(3)處置非穩定性廢棄物或裝載意外破損廢棄物的預備方案。**[3]**
 10. 現場監測之設計，是否清楚說明處置場運轉中及運轉後的環境監測計畫。現場監測系統之主要設計準則必須說明(1)監測系統設備與組件的已知使用壽命；(2)退化的可能速率和監測設備失效的可能事件的處理方法。
 11. 緩衝區之設計，是否清楚說明外圍處置單元與場界間緩衝區之特性。緩衝區之主要設計準則必須說明(1)可供監測所需的空間尺寸；(2)不可接受的輻射發生時可採取正確措施所需的空間尺寸。

4.3 結構設計：說明處置設施主要結構物之結構分類、設計荷重及其組合等。

為促進處置設施各類重要結構物的安全，在結構設計方面，須提供下列資料供審查。

(一)提供資料

1. 主要結構物之結構分類與各類結構的負載。負載包括靜負載(D)和活負載(L)、偶發液態水平和垂直壓力之負載(F)、土壤壓力之負

載(H)、溫度差之熱負載(T)、風壓力之負載(W)，地震之負載(E)，
膨脹壓力之負載(B)。[4]

2. 說明混凝土結構物及鋼構結構物之設計所選用之負載組合，並說明所選用負載組合的原因。
3. 適用之法規、標準和規範。
4. 設計與分析步驟：資料包含(1)每一個結構及其基礎之描述，若結構物經破壞將導致工作人員或民眾之輻射危害，需提出結構物補強措施等；(2)設計的假設包含邊界狀況和假設之基礎等；(3)設計的分析步驟描述包含電腦程式和有效性；(4)描述設計基準地震力之計算方法；(5)用以確認設計的方法。
5. 場址之衝擊因素：結構設計對場址特性(地質、地震、氣象、氣候、水文和大地工程與地質化學特性)之衝擊，說明如何被列入考量。

(二)審查作業

1. 主要結構物之結構分類是否適當？各類結構的負載因子是否正確且充分考量？
2. 混凝土結構之強度(U)設計，必須大於最大的負載組合。鋼構結構物之設計，可使用彈性應力方法，強度(S)設計必須大於最大的負載組合。
3. 所引用的法規、標準或規範是否適切？
4. 設計與分析步驟：結構分析與設計和結構系統與構件之資料，與所使用之設計、分析方法和結果，均是否保守且為優良工程設計之代表。
5. 若場址之衝擊因素：是否已清楚定義與評估可能之衝擊；該場址因素是否將不會被結構物設計造成有害的影響。

4.4 土木設計：說明處置設施主要結構物之工程材質、屏蔽材料之特性與設計標準 (包括處置設施及其覆蓋、回填等)、地表防洪及地下排水系統之設計。

為促進處置設施安全，應慎選工程材質與屏蔽材料，並須考量置設施覆蓋與回填、地表防洪、地下排水系統及護坡工程等，在土木設計方面，須提供下列資料供審查。

(一)提供資料

1. 工程材質與屏蔽材料之組成、密度、抗壓強度、耐久性、退化率、滲水性、核種吸附性、擴散性等特性及其設計標準。[5]
2. 地表防洪的材料特性、設計標準、排水功能。
3. 地下排水系統的材料特性與排水規劃、排水設計、抑低滲入處置單元設計。
4. 護坡工程的材料特性、設計標準、應力監測等。
5. 適用之法規、標準和規範。

(二)審查作業

1. 工程材質與屏蔽材料之組成與特性是否符合場址特性要求？設計標準是否適切？
2. 地表防洪的材料特性、設計標準、排水功能是否可防止水入侵至處置單元。
3. 地下排水系統的材料特性與排水規劃、排水設計，是否適當？是否可抑低地下水滲入處置單元？
4. 護坡工程的材料特性、設計標準、應力監測等是否適當？是否具有長期穩定的特性？
5. 所引用的法規、標準或規範是否適切？

5.2 施工計畫：處置設施之建造應擬具可行施工計畫，包括工程經營管理、施工佈置、施工材料、施工方法、施工機具設備、施工程序(含與處置作業並存之施工程序)、施工時程、工業安全衛生、水土保持與環境保護、品管與品保方案及緊急應變處理等。

處置場之施工，需分階段進行，故應擬妥可行的施工計畫，並提出下列資料供審查。

(一)提供資料

1. 工程經營管理：說明工程經營管理組織、權責與管理作業、場址計畫、建造資料及其藍圖。
2. 施工佈置：說明場址邊界、管制區域、保全區域、緩衝區、操作區以及處置設施的總體配置。
3. 施工材料：說明回填材料、**覆蓋材料**、混凝土與灌漿成分、鋼筋與構造鋼材等材料之特性、規格、檢驗作業方法與標準。**[6]**
4. 施工方法：
 - (1) 說明場址準備、水的控制與分流、處置單元建造、混凝土與鋼材施工、回填與封閉的施工方法與步驟。
 - (2) 廢棄物容器週邊回填材料的施工方法：應包括：**(a)**廢棄物容器的堆疊排序計畫；**(b)**降低使用可分解材料以防止未來沉陷；**(c)**確保回填材料在置入時維持適當的含水量；**(d)**廢棄物容器與回填材料的置入順序計畫以確保容器間隙空間的填滿。
5. 施工機具設備：
 - (1) 設備形式：**(a)**場址整備、地面水與地下水安全控制設備；**(b)**處置單元開挖與支撐設備；**(c)**材料搬運設備；**(d)**填充及壓實設備；**(e)**低放射性廢棄物搬運、處理及置放設備；**(f)**處置單元回填設備；**(g)**鋼材及混凝土施工設備；**(h)**個別處置單元及場址封閉設備。
 - (2) 設備規格及性能
 - (3) 設備保管、維護、替代及檢查等作業程序。
6. 施工程序(含與處置作業並存之施工程序)
7. 監測計畫與回饋設計計畫
8. 施工時程
9. 工業安全衛生
10. 水土保持計畫核定本與環境影響評估報告。

11. 品管與品保方案：說明品質控制程序與品質保證方案，各建造工項之檢核項目與檢核標準、不合格之處理流程等。

12. 緊急應變處理

(二) 審查作業

1. 工程經營管理：(a) 建造參考資料，工程藍圖與規格、場址準備，水的控制及分流，處置單元之建造，混凝土及鋼材施工，回填，以及封閉各項作業，是否經過系統化的整合且為可行之建造計畫。(b) 工程藍圖是否顯示尺寸、剖面與場址界線內各設施之相關位置。(c) 所有計畫與工程圖是否以足夠的比例顯示，以充分表達設計資料並經過技師簽證。(d) 建造規格是否與設計與運轉規範相容一致。

2. 施工佈置：場址邊界、管制區域、保全區域、緩衝區、操作區以及處置設施的總體配置是否明確。

3. 施工材料：

(1) 坑道處置窖或淺地處置窖建造材料、**回填材料及覆蓋材料**之特性、品質和耐用度等資料，是否可被接受；測試是否依正確與熟知的法規和標準進行。**[6]**

(2) 建造使用之混凝土必須為高密度低穿透性材料，足以安全支撐所負載之重量並對抗不利之處置環境。

(3) 鋼材需以環氧樹脂或抗氧化物質包覆。

(4) 建造材料、**回填材料及覆蓋材料**是否使用核准的材料，若提出使用非核准的材料，則須提出充足的測試資料以建立其材料的接受性。**[6]**

4. 施工方法

(1) 場址準備：低放廢棄物處置的場址準備是否建立適當的方法以保護公眾健康及安全與水土資源並控制侵蝕及堆積作用的發生。場址準備的描述應以適當的工程藍圖及建造規格詳細配合與參考。

- (2) 水的控制及分流：開挖及回填區之地表水與地下水控制計畫是否適當。個別處置單元的建造階段與場址封閉時期，皆應考慮水的控制及分流。
 - (3) 處置單元建造：(a)開挖(界線、坡度與深度或底部的高程；不適用材料的判別，需回填混凝土的開挖區域；開挖廢土之處理等)、(b)填土區域(界線、坡度以及高度或頂部高程；填土前的表面處理；填土的材料種類；對於填土層鋪平與含水量控制之要件；大顆粒材料之移除；現地夯實度檢驗程序)、(c)開挖區導引與控制降雨及地表逕流的配置細節、(d)品質控制試驗(例如，工地密度、填土的含水量、級配、塑性及夯實試驗，包括試驗標準及試驗頻率之說明)等之描述是否確實。
 - (4) 混凝土與鋼材施工：混凝土是否包含設計，製造，拌合，鋼筋，成形(forming)，運輸，澆置，完成面與養護，品質控制試驗標準及試驗頻率之說明。構造鋼材是否包含設計，構製以及建物與組件之架設。[7]
 - (5) 回填：回填資料(a)廢棄物容器之堆疊放置計畫、(b)可分解材料限制的方案、(c)非凝聚性回填材料適當級配和含水量狀況之控制以避免空隙的生成、(d)廢棄物容器與填土材料之置入運作計畫與其順序，(例如，在每一廢料層放妥之後填入填土，以確保空隙被填滿；而非完成所有廢棄物堆疊之高度後才進行填土作業)是否正確完整，以確保開挖的回填有長期的穩定性。
 - (6) 個別處置單元之封閉：封閉資料，包括覆蓋在廢料回填土之上或是填充於坑道與處置窖間的材料特性，是否足以降低水入滲，同時確保處置設施在建造時期與場址封閉後的效能可被接受。[2]
5. 施工機具設備：是否足以安全地履行其預期功能。

- (1) 設備的形式(如起重機、挖泥機、岩石破碎或切削機、壓土機等)及設備組件是否被適當的使用，使處置設施安全地建造及操作。
 - (2) 設備規格及性能：設備的規格說明書，是否已提供每一設備組件有關的功能及使用方法。設備的性能，是否足以安全地將廢棄物罐依設計的堆疊排列方式，從地表搬移置放於開挖的處置單元中，並可適當的將回填材料充填於廢棄物罐的間隙，以減少未來沉陷作用。
 - (3) 設備保管、維護、替代及檢查：是否提供合理的保證，不會發生建造及操作上不安全的中斷或延遲，且安全的管理或受污染設備的處置可適當的處理。
6. 施工程序(含與處置作業並存之施工程序)：是否正確完整，以確保開挖的回填有長期的穩定性，以減少未來沉陷作用。
 7. 監測計畫與回饋設計計畫：包括監測作業之目的、項目、儀器設備之安裝、計讀之頻率、監測資料之處理流程以及與設計結果之比對、監測預警系統(含預警值、行動值與相應之應變處理措施)，以及回饋設計作業流程等。
 8. 施工時程：是否符合處置量的需要。
 9. 工業安全衛生：是否工業安全衛生之規定。
 10. 水土保持與環境保護：施工計畫是否符合水土保持及環境影響評估相關規定，另外，其是否落實水土保持計畫核定本與環境影響評估報告相關之承諾。
 11. 品管與品保方案：品質控制程序、建造技術是否足以確認建造品質，不致降低而影響處置設施之穩定度及其結構之整體性。**檢核項目與檢核標準，是否足以確認興建的設施具備遲滯核種遷移之功能。[7]**
 12. 緊急應變處理：是否充分考量意外事件的發生，其應變處理計畫是否合理可行。

「第四章處 置設施之設計」修正建議

頁碼	原文	修正建議
4-1	3. 說明 <u>回填物、廢棄物及覆蓋物</u> 構造穩定性之設計基準、設計要項及設計規格。	3. 說明 <u>回填物、處置單元、廢棄物及覆蓋物</u> 構造穩定性之設計基準、設計要項及設計規格。
4-1 4-2	3. 構造穩定性之設計，是否清楚說明廢棄物可長期隔離及避免經常維護。 <u>確保填充材、廢棄物和廢棄物覆蓋物的結構穩定性</u> 之主要設計準則至少應說明(1)廢棄物容器內與容器內填充材料之間預知的空隙容量；(2)因運作而產生的空隙效應；(3)設計基準異常事件對於結構穩定性的效應；和(4)在廢棄物有害時期，因地質化學環境使填充材、廢棄物形態和廢棄物覆蓋材料的剝蝕。	3. 構造穩定性之設計，是否清楚說明廢棄物可長期隔離及避免經常維護。 <u>確保填充材、處置單元、廢棄物和廢棄物覆蓋物的結構穩定性</u> 之主要設計準則至少應說明(1)廢棄物容器內與容器內填充材料之間預知的空隙容量；(2)因運作而產生的空隙效應；(3)設計基準異常事件對於結構穩定性的效應；和(4)在廢棄物有害時期，因地質化學環境使填充材、處置單元、廢棄物形態和廢棄物覆蓋材料的剝蝕。
4-2	4. 降低廢棄物與積水接觸之設計，是否清楚說明使用方法可使廢棄物在暫時貯存、處置場運轉中、場區關閉期間，降低與積水的接觸。主要設計準則至少應(1)清楚說明；(2)說明廢棄物之貯存、吊卸和封閉處置單元；(3)說明處置單元覆蓋物表土下與表土的排水和暫存區域；(4)描述處置單元地面自然材料與排水材料及地面排水間的滲透性；和(5)描述暴露於空氣中之廢棄物暫時存放平臺與覆蓋物。是否提出防範運	4. 降低廢棄物與積水接觸之設計，是否清楚說明使用方法可使廢棄物在暫時貯存、處置場運轉中、場區關閉期間，降低與積水的接觸。主要設計準則至少應(1)清楚說明；(2)說明廢棄物之貯存、吊卸和封閉處置單元；(3)若處置設施為近地表型式，說明處置單元覆蓋物表土下與表土的排水和暫存區域；(4)若處置設施為近地表型式，描述處置單元地面自然材料與排水材料及地面排水間的滲透性，若處置設施為坑道

頁碼	原文	修正建議
	<p>轉期主動性排水系統組件意外破壞和封閉後被動性排水系統組件被破壞之設計準則。</p>	<p><u>型式，則描述回填材料及坑道口封堵材料間之滲透性；</u>和(5)描述暴露於空氣中之廢棄物暫時存放平臺與覆蓋物。是否提出防範運轉期主動性排水系統組件意外破壞和封閉後被動性排水系統組件被破壞之設計準則。</p>
4-2	<p>5. 處置場運轉中與封閉期場區排水之設計，是否清楚說明使用方法可將<u>(1)地表水引導遠離廢棄物</u>，(2)以速度與斜度的方法控制排水系統流出處置單元。主要設計準則至少應(1)清楚說明；<u>(2)說明運轉期和封閉後場址表土排水狀況；(3)涵蓋表土的排水特性，分流結構和表土排水斜坡等</u>。是否提出因應上游水庫毀壞或下游排水堵塞之設計準則。</p>	<p>5. 處置場運轉中與封閉期場區排水之設計，是否清楚說明使用方法可將<u>(1)地表水或地下水引導遠離廢棄物</u>，(2)以速度與斜度的方法控制排水系統流出處置單元。主要設計準則至少應(1)清楚說明；<u>(2)說明運轉期和封閉後場址表土或坑道的排水狀況；(3)涵蓋表土或坑道的排水特性、分流結構和表土排水斜坡等</u>。是否提出因應上游水庫毀壞或下游排水堵塞之設計準則。</p>
4-2	<p>9. 合理抑低職業曝露之設計，是否清楚說明如何合理抑抵職業曝露。減少職業曝露之主要設計準則必須說明<u>(1)接收、檢查、管控、貯存和處置作業之輻射合理抑低措施</u>；(2)對已知較高活性廢棄物之屏蔽設計；和(3)處置非穩定性廢棄物或裝載意外破損廢棄物的預備方案。</p>	<p>9. 合理抑低職業曝露之設計，是否清楚說明如何合理抑抵職業曝露。減少職業曝露之主要設計準則必須說明<u>(1)接收、檢查、管控、貯存、處置和封閉作業之輻射合理抑低措施</u>；(2)對已知較高活性廢棄物之屏蔽設計；和(3)處置非穩定性廢棄物或裝載意外破損廢棄物的預備方案。</p>
4-3	<p>1. 主要結構物之結構分類與各類結構的負載。負載包括靜負載(D)和活負載(L)、偶發液態水平和垂直壓力之負載</p>	<p>主要結構物之結構分類與各類結構的負載。負載包括靜負載(D)和活負載(L)、偶發液態水平和垂直壓力之負載(F)、土壤壓力之負</p>

頁碼	原文	修正建議
	(F)、土壤壓力之負載(H)、溫度差之熱負載(T)、風壓力之負載(W)，地震之負載(E)。	載(H)、溫度差之熱負載(T)、風壓力之負載(W)，地震之負載(E)， <u>膨脹壓力之負載(B)</u> 。
4-4	1. 工程材質與屏蔽材料之 <u>組成、密度、抗壓強度、耐久性、退化率、滲水性</u> 等特性及其設計標準。	1. 工程材質與屏蔽材料之 <u>組成、密度、抗壓強度、耐久性、退化率、滲水性、核種吸附性、擴散性</u> 等特性及其設計標準。

「第五章處 處置設施之建造」修正建議

頁碼	原文	修正建議
5-2	3. 施工材料：說明 <u>回填材料，混凝土與灌漿成分，鋼筋與構造鋼材等材料</u> 之特性、規格、檢驗作業方法與標準。	3. 施工材料：說明 <u>回填材料、覆蓋材料、混凝土與灌漿成分、鋼筋與構造鋼材等材料</u> 之特性、規格、檢驗作業方法與標準。
5-2 5-3	3. 施工材料： (1) <u>坑道處置窖或淺地處置窖建造材料</u> 之特性、品質和耐用度等資料，是否可被接受；測試是否依正確與熟知的法規和標準進行。 (2) 建造使用之混凝土必須為高密度低穿透性材料，足以安全支撐所負載之重量並對抗不利之處置環境。 (3) 鋼材需以環氧樹脂或抗氧化物質包覆。 (4) <u>建造材料是否使用核准的材料</u> ，若提出使用非核准的材料，則須提出充足的測試資料以建立其材料的接受性。	3. 施工材料： (1) <u>坑道處置窖或淺地處置窖建造材料、回填材料及覆蓋材料</u> 之特性、品質和耐用度等資料，是否可被接受；測試是否依正確與熟知的法規和標準進行。 (2) 建造使用之混凝土必須為高密度低穿透性材料，足以安全支撐所負載之重量並對抗不利之處置環境。 (3) 鋼材需以環氧樹脂或抗氧化物質包覆。 (4) <u>建造材料、回填材料及覆蓋材料是否使用核准的材料</u> ，若提出使用非核准的材料，則須提出充足的測試資料以建立其材料的接受性。
5-3	4. 施工方法 (4) <u>混凝土與鋼材施工：混凝土是否包含設計，製造，拌合，鋼筋，成形(forming)，運輸，澆置，完成面與養護</u> 。構造鋼材是否包含設計，構製以及建物與組件之架設。	4. 施工方法 (4) <u>混凝土與鋼材施工：混凝土是否包含設計，製造，拌合，鋼筋，成形(forming)，運輸，澆置，完成面與養護，品質控制試驗標準及試驗頻率之說明</u> 。構造鋼材是否包含設計，構製以及建物與組件之架設。
5-3	4. 施工方法 (6) 個別處置單元之封閉：封閉	4. 施工方法 (6) 個別處置單元之封閉：封閉

頁碼	原文	修正建議
	<p>資料，<u>包括覆蓋在廢料回填土之上的材料特性</u>，是否足以降低水入滲，同時確保處置設施在建造時期與場址封閉後的效能可被接受。</p>	<p>資料，<u>包括覆蓋在廢料回填土之上或是填充於坑道與處置窖間的材料特性</u>，是否足以降低水入滲，同時確保處置設施在建造時期與場址封閉後的效能可被接受。</p>
5-4	<p>11. 品管與品保方案：品質控制程序與建造技術是否足以確認建造品質，不致降低而影響處置設施之穩定度及其結構之整體性。</p>	<p>11. 品管與品保方案：品質控制程序、建造技術是否足以確認建造品質，不致降低而影響處置設施之穩定度及其結構之整體性。<u>檢核項目與檢核標準，是否足以確認興建的設施具備遲滯核種遷移之功能。</u></p>

參考文獻

- [1] 余裕深度処分における地下施設の設計,品質管理および検査の考え方,財団法人土木学会 エネルギー委員会 低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会,2009。
- [2] 山本武志,フライアッシュのポゾラン反応性を評価するための促進化学試験法(API法)の適用性の拡張,コンクリート工学年次論文集,Vol.30, No.1, 2008。
- [3] TRU 廃棄物処分技術検討書,電気事業連合会、核燃料サイクル開発機構,2005。
- [4] 平成 20 年度管理型処分技術調査等委託費地下空洞型処分施設性能確証試験報告書,原子力環境整備促進・資金管理センター,2009。
- [5] ベントナイトの透水浸潤特性への海水影響,電力中央研究所報告,2004。
- [6] 千々松正和、鈴木康正、伊藤裕紀、庭瀬一仁,ベントナイトクニゲル GX の基本特性試験(その2)不飽和支持力に関する検討,土木学会第 63 回年次学術講演会,2008。
- [7] 日笠山徹巳、平間邦興、松尾龍之,礫を混入したベントナイト混合土の透水および強度特性について,土木学会第 55 回年次学術講演会,2000。
- [8] 尾崎充弘、庭瀬一仁、平川芳明、松支良展、田島孝敏、新村亮、武内邦文,放射性廃棄物処分施設の土質系埋戻材の特性,日本原子力学会秋の大会,2006。
- [9] 栗原宏武、深沢栄造、八鍬昇、田中俊行,止水材料としての礫混入ベントナイト混合土に関する室内試験,第 38 回土質工学シンポジウム,1993。

- [10] 島博泰、金川史郎，スレーキング材料(ぜい弱岩)の圧縮沈下と対応策，土と基礎，1980。
- [11] 混凝土工程施工規範與解說[402-94a]，中國土木水利學會，2007。
- [12] 施工綱要規範，公共工程委員會。
- [13] 隧道施工技術規範，交通部台灣區國道新建工程局，2003。
- [14] 國道高速公路施工技術規範-隧道工程施工規範，交通部台灣區國道高速公路局。
- [15] 中華民國國家標準 CNS：
- CNS 3090 預拌混凝土。
 - CNS 560 鋼筋混凝土用鋼筋。
 - CNS 11776 土壤粒徑分析試驗法。
 - CNS 5088 土壤液性限度試驗、塑性限度試驗及塑性指數決定法。
 - CNS 5091 實驗室土壤含水量測定法。
 - CNS 13617 混凝土粒料岩相分析指引。
 - CNS 12239 A3270 土壤單向度壓密試驗法
 - CNS 9531 不測定孔隙壓之不排水岩心試驗三軸抗壓強度試驗法
 - CNS 12392 A3290 土壤與柔性鋪面之非反覆式靜力平板載重試驗法(用於機場與公路鋪面之設計與評估)
- [16] 美國材料試驗協會規範(American Society for Testing and Materials)：
- ASTM C837 黏土甲基藍指數試驗方法
 - ASTM C295 混凝土骨材岩相分析指引
 - ASTM D422 土壤粒徑分析試驗方法
 - ASTM D4318 土壤液性限度、塑性限度及塑性指數試驗方法

- ASTM D2216 土壤、礫石之含水量室內試驗法
- ASTM D4644 頁岩和軟弱岩的消散耐久性試驗方法
- ASTM D1556 砂錐法測定現場土壤密度試驗法
- ASTM D2937 土壤密度試驗方法之圓柱挺進法 (Drive-Cylinder Method)
- ASTM D2850 凝聚性土壤不壓密不排水之三軸壓縮強度試驗法
- ASTM D4767 凝聚性土壤壓密不排水之三軸壓縮強度試驗方法
- ASTM D1195 土壤與柔性鋪面之反覆式靜力平板載重試驗(用於機場與公路鋪面之設計與評估)

[17] 美國州公路及運輸官員協會規範(American Association of State Highway and Transportation Officials)

- AASHTO T221 土壤與柔性鋪面之反覆式靜力平板載重試驗(用於機場與公路鋪面之設計與評估)
- ASTM C837 黏土甲基藍指數試驗方法
- ASTM D2937 土壤密度試驗方法之圓柱挺進法 (Drive-Cylinder Method)
- ASTM D2216 土壤、礫石之含水量室內試驗法
- ASTM D4694 落重式衝擊載重之撓度試驗方法 (Falling-Weight-Type Impulse Load Device)