

低放射性廢棄物最終處置計畫
執行成果報告
(修訂 2 版)
(103 年 8 月至 104 年 1 月)

台灣電力公司
104 年 5 月

目 錄

第一章	前言	1
第二章	處置技術建置計畫	8
第三章	處置設施選址計畫	20
第四章	民眾溝通專案計畫	27
第五章	綜合檢討與建議	39
附錄	低放射性廢棄物最終處置技術建置計畫 103 年度 執行成果摘錄	

第一章 前言

「放射性物料管理法」第 29 條規定：放射性廢棄物之處理、運送、貯存及最終處置，應由放射性廢棄物產生者自行或委託具有國內、外放射性廢棄物最終處置技術能力或設施之業者處置其廢棄物；產生者應負責減少放射性廢棄物之產生量及其體積。其最終處置計畫應依計畫時程，切實推動。「放射性物料管理法施行細則」第 36 條規定：低放射性廢棄物產生者或負責執行低放射性廢棄物最終處置者，應於本法施行後一年內，提報低放射性廢棄物最終處置計畫，經主管機關核定後，切實依計畫時程執行；每年 2 月及 8 月底前，應向主管機關提報上半年之執行成果。

台電公司依據上述規定於 92 年 12 月 25 日將「低放射性廢棄物最終處置計畫書」提報原子能委員會(以下簡稱原能會)審查，並於 93 年 1 月 16 日奉准核備。台電公司依據奉核之「低放射性廢棄物最終處置計畫書」(以下簡稱處置計畫書)所規劃時程與作業進行低放射性廢棄物最終處置計畫。

「低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例」(以下簡稱「場址設置條例」)於 95 年 4 月 28 日經立法院院會二、三讀完成立法，並於 95 年 5 月 24 日經 總統公布施行，主辦機關(經濟部)於 95 年 6 月 19 日召開研商「場址設置條例」應辦事宜會議，依據該條例第 6 條規定會商主管機關同意，指定台電公司作為低放射性廢棄物最終處置設施選址之作業者(以下簡稱「選址作業者」)；並依該條例第 5 條規定，聘任相關機關代表及各專業領域專家學者組成「低放射性廢棄物最終處置設施場址選擇小組」(以下簡稱「選址小組」)，依條例規定執行處置設施之選址工作。鑑於「場址設置條例」對於選址作業之程序與時限有所規範，台電公司原報奉核定之處置計畫書亦配合修訂，並於 96 年 4 月 26 日奉准核備。

場址設置條例公布施行迄今 8 年餘，於執行過程中，因面臨實務上窒礙難行之情況，例如主辦機關經濟部曾於 98 年 3 月公開上網及陳列「建議候選場址遴選報告」，建議台東縣達仁鄉南田村及澎湖縣望安鄉東吉嶼二處為建議候選場址，並規劃於 98 年底核定公告建議候選場址。惟因澎湖縣政府於 98 年 9 月將望安鄉東吉嶼劃為澎湖南海玄武岩自然保留區，致選址作業退回至潛在

場址篩選階段重新辦理。台電公司因應此一情況，重新檢討處置計畫時程，並依據物管局 2 次審查意見及「低放射性廢棄物最終處置計畫書(修訂二版)」審查會議紀錄修訂，於 101 年 4 月 23 日提陳「低放射性廢棄物最終處置計畫書(修訂二版)Rev.2」請主管機關核備，主管機關於 101 年 5 月 4 日來函同意核備處置計畫書(修訂二版)。

經濟部於 101 年 7 月 3 日核定公告台東縣達仁鄉及金門縣烏坵鄉兩處建議候選場址後，於 101 年 8 月 17 日函請建議候選場址所在地方政府同意接受委託辦理公投選務工作。金門縣政府於同年 9 月 26 日函復經濟部，略以：該縣近年各項公職人員選舉之投票率大部分均未過 50%，檢討原因乃離島交通不便，影響外地工作者投票意願，故辦理「縣地方性」低放場址選址公投，恐因交通及投票率門檻因素而不利推動。又謂烏坵鄉投票率如涉鄉公職者高達七、八成，未涉鄉公職者不及 3 成，以該鄉是孤立於 70 海浬外之離島鄉，及人口不及縣總人口 1%，由「縣」公投決定低放場址選址事務，似與「住民自決精神」相背。為符合住民自決精神，為方便低放場址選址作業順遂，建請修法低放場址選址公投以鄉為範疇。另台東縣政府於同年 10 月 9 日函復表示：「因本縣現階段法規訂定並不完備，且委託辦理地方性公民投票之內容不明確，另考量辦理地方性公民投票選務作業事項繁瑣，仍須與選舉委員會協商取得共識，故尚難協助辦理。」，致尚未能完成候選場址之選址作業。後續台電公司參加經濟部於 102 年 3 月 4 日邀集原能會、內政部及中選會召開之「低放射性廢棄物最終處置設施場址公投評估研商會議」討論低放選址相關議題，台電公司將持續配合經濟部指示辦理相關事宜，並持續進行台東及金門縣之溝通工作，以爭取該兩縣民眾支持。

依據低放射性廢棄物最終處置計畫書(修訂二版)Rev.2，台電公司本階段應執行工作包括實施環境調查與環境影響評估、核定場址及投資計畫、土地取得、民眾溝通、場址精查細部設計與安全分析、處置技術建置、建造執照及相關執照申請與審查等工作，惟因候選場址仍未能選定，致相關後續作業仍無法執行，台電公司目前則持續進行處置技術建置及民眾溝通工作，並將於辦理選址公投選出候選場址後積極執行相關作業。

為因應公投作業無法依預定時程辦理，主管機關於第 122 次放射性物料管制會議要求台電公司進行「低放射性廢棄物最終處置計畫書(修訂二版)第 10 章替代/應變方案」之強化修正。後續台電公司於 103 年 7 月 30 日將前述替代/應變方案提報主管機關，及於 103 年 8 月 19 日將「低放射性廢棄物最終處置計畫書(修訂二版)Rev.3」提送主管機關審查，並於 103 年 9 月 9 日獲主管機關核備新版處置計畫書。

依「場址設置條例」第 6 條規定，選址作業應提供選址小組有關處置設施選址之資料，並執行場址調查、安全分析、公眾溝通及土地取得等工作，且應於主辦機關設置之網站，按季公開處置設施場址調查進度等相關資料。本計畫每半年執行成果報告則按「放射性物料管理法」規定，及原能會物管局審查 101 年 2 月~101 年 7 月執行成果報告之意見，調整半年執行成果報告之章節架構為「前言」、「處置技術建置計畫」、「處置設施選址計畫」、「民眾溝通專案計畫」及「綜合檢討與建議」等章節。

本階段(103 年 8 月至 104 年 1 月)執行「處置技術建置計畫」部份，除延續各項執行中之計畫外，新增辦理「低放射性廢棄物最終處置技術發展整合規劃與評估」與「低放射性廢棄物資料庫系統精進案」，並依據主管機關審查意見與審查會議紀錄修訂「低放射性廢棄物最終處置技術建置計畫(103 年版)」、「低放射性廢棄物最終處置技術評估報告章節架構」、「低放射性廢棄物處置技術評估報告國際同儕審查規劃」等報告。「處置設施選址計畫」部份，依據低放射性廢棄物最終處置 104 年度工作計畫(修訂版)，辦理相關準備工作，及依據主辦機關經濟部指示，持續辦理相關配合工作，並依據主管機關放射性物料管理局指示，提送「低放射性廢棄物最終處置計畫書(修訂二版)Rev.3」。「民眾溝通專案計畫」部分，則依據 103 及 104 年度「低放選址地方溝通工作計畫」執行相關工作，及利用「金門縣烏坵鄉地方遠景規劃」作為溝通說明資料。另台電公司核能後端營運處低放督導組、台東區營業處及金門區營業處之「溝通小組」持續進行地方公眾溝通工作，包括達仁鄉及烏坵鄉各村落逐戶拜訪、台東縣與金門縣地方媒體溝通宣導與機關社團溝通宣導活動。另並說明低放射性廢棄物貯存設施所在地，包括各核能發電廠與蘭嶼貯存場相關公眾溝通工作等。

本階段(103年8月至104年1月)工作，主要為遵照主管機關指示辦理處置計畫相關技術準備工作，及配合經濟部指示辦理選址計畫與民眾溝通相關工作，相關工作及執行計畫項目與查核點表列如下：

一、主管機關指示事項

計畫名稱/工作項目	查核點	查核項目/查核情形說明
低放射性廢棄物最終處置計畫書(修訂二版) Rev.3	103年8月	依據主管機關意見，於103年8月27日前將「低放射性廢棄物最終處置計畫書(修訂二版)第10章替代/應變方案」之強化修正納入低放射性廢棄物最終處置計畫書/已於時限內提送主管機關
低放射性廢棄物處置技術評估報告國際同儕審查規劃	103年9月	依據主管機關103年6月6日來函審查意見，於103年9月底前將修訂版及審查意見答復說明提報主管機關/已於時限內提送主管機關審查
	103年11月	依據主管機關103年10月7日來函審查意見，於103年11月7日前將修訂版及審查意見答復說明提報主管機關/已於時限內提送主管機關審查
低放射性廢棄物最終處置技術建置計畫(103年版)	103年10月	依據主管機關103年6月10日來函審查意見，於103年10月底前將修訂版及審查意見答復說明提報主管機關/已於時限內提送主管機關審查
	103年12月	依據主管機關103年12月3日來函審查意見，於103年12月15日前將修訂版及審查意見答復說明提報主管機關/已於時限內提送主管機關審查

二、處置技術建置計畫

計畫名稱/工作項目	查核點	查核項目/查核情形說明
(一)整合性計畫		
低放射性廢棄物最終處置技術發展整合規劃與評估	103年10月~104年1月 103年12月	本案於103年9月2日完成議價決標作業，自103年10月起，每月提報工作月報/承商每月均按時提出審查，符合工作要求 承商提送「場址特性參數評估報告」(0版，初稿)台東縣達仁鄉、「場址特性參數評估報告」(0版，初稿)金門縣烏坵鄉、「建議候選場址概念設計報告(期中報告)」(0版，初稿)、台東縣達仁鄉場址特性調查計畫(103年版)」「金門縣烏坵鄉場址特性調查計畫(103年版)」「承商已依計畫時程提送審查
(二)廢棄物特性研究		
低放射性廢棄物資料庫系統精進案	104年1月 104年1月	本案於103年12月17日完成議價決標作業，自104年1月起每月提報工作月報/承商每月均按時程提出審查，符合工作要求 承商提送期初報告初稿/承商已依計畫時程提送審查
(三)場址調查評估		
場址特性調查計畫		併入「低放射性廢棄物最終處置技術發展整合規劃與評估」進行
(四)工程障壁材料調查研究		

低放射性廢棄物最終處置工程障壁中緩衝回填材料調查評估技術服務工作	103 年 8 月 ~104 年 1 月	每月提報工作月報/承商每月均按時提出審查，符合工作要求
	104 年 1 月	承商提送期末報告/承商已依計畫時程提送審查
(五)功能/安全評估		
低放射性廢棄物潛在場址之微生物核種吸附與工程障壁腐蝕安全影響評估	103 年 8 月 ~104 年 1 月	每月提報工作月報/承商每月均按時提出審查，符合工作要求
	103 年 10 月	承商提送第三次期中報告/承商已依計畫時程提送審查
低放射性廢棄物最終處置設施功能評估	103 年 8 月 ~104 年 1 月	每月提報工作月報/承商每月均按時提出審查，符合工作要求
	103 年 8 月	承商提送第 2 次期中報告初稿/承商已依計畫時程提送審查

三、處置設施選址計畫

計畫名稱/工作項目	查核點	查核項目/查核情形說明
低放射性廢棄物最終處置 104 年度工作計畫	103 年 10 月	提送 104 年度工作計畫/已於時限內提送主管機關審查
	103 年 12 月	依據主管機關 103 年 12 月 3 日來函審查意見，於 103 年 12 月 15 日前將修訂版及審查意見答復說明提報主管機關/已於時限內提送主管機關審查
低放選址作業資訊	103 年 10 月	提報選址作業資訊/於 103 年 10 月 15 日提報 103 年第 3 季選址作業資訊送國營會公布在主辦機關網頁。
	104 年 1 月	提報選址作業資訊/於 104 年 1 月 14 日提報 103 年第 4 季選址作業資訊送國營會公布在主辦

	機關網頁。
--	-------

四、民眾溝通專案計畫

計畫名稱/工作項目	查核點	查核項目/查核情形說明
低放選址地方溝通計畫	104 年 1 月	彙整地方公眾溝通紀錄

另，主管機關於 103 年起辦理「放射性廢棄物最終處置計畫執行成效評核作業」，訂於每年 2 月底台電公司提出執行成果報告後，辦理成果報告審查、專案檢查及評核作業，且於 103 年 12 月 23 日召開之第 128 次放射性物料管制會議議案 708 提出「為使評核委員完整了解全年度工作成效，請台電公司於每年 2 月底前提報低放射性廢棄物最終處置計畫下半年執行成果報告時，一併納入上半年工作成果，完整呈現全年度工作成效，俾妥善辦理適評核作業。」故將 103 年上半年之執行成果報告列於本次執行成果報告附錄。

第二章 處置技術建置計畫

有關處置技術建置計畫之時程規劃，依據「低放射性廢棄物最終處置計畫書(修訂二版)」所規劃之時程，圖說如下：

識別碼	任務名稱	工作月	2012		2013		2014		2015		2016		2017	
			H1	H2	H1	H2	H1	H2	H1	H2	H1	H2	H1	H2
1	候選場址選定													
18	辦理地方性公民投票	17	■											
19	核定候選場址	2			■									
20	實施環境調查與環境影響評估	30	■		■		■		■					
21	提出環境影響說明書送審	15	■											
22	提出環境影響評估書送審	15	■											
23	環境影響評估審查通過	-									◆	環評通過		
24	辦理投資可行性研究及核定場址	25.5	■		■		■		■					
25	辦理投資可行性作業(含初步安全評估)	24	■											
26	投資可行性報告陳報經濟部	-								◆	陳報經濟部			
27	陳報行政院核定場址及投資計畫	1									■	場址核定公告		
28	行政院核定場址及辦理公告	0.5										■	場址核定公告	
29	土地取得(含前置作業)	44	■		■		■		■		■			
30	前置調查作業	12	■											
31	土地取得	12										■	土地取得	
32	民眾溝通	171	■		■		■		■		■		■	
33	民眾溝通	171	■		■		■		■		■		■	
34	場址精查、細部設計與安全分析	26	■		■		■		■					
35	場址精查、細部設計與安全分析	26	■											
36	處置技術建置	96	■		■		■		■					
37	廢棄物特性研究	60	■											
38	場址調查評估	24	■											
39	工程障壁材料調查研究	63	■		■		■		■					
40	安全功能評估	84	■		■		■		■					
41	建造執照及相關執照申請與審查	27	■		■		■		■					
42	建造執照及相關執照申請文件準備	15	■											
43	審查作業	12								■	審查作業			
44	核發建造執照	-									◆	核發建造執照		

目前低放射性廢棄物最終處置計畫仍屬選址階段，國內低放射性廢棄物處置場址概念設計規劃與初步安全評估技術已具雛形，後續將持續逐步精進所需技術與相關考量項目。

一、過往執行成果重點

低放處置計畫相關工作成果表列如下：

工作項目	辦理情形	成果
廢棄物接收規範	已完成廢棄物接收規範(0版)，並於97年6月6日奉主管機關備查。	將持續精進更新，配合處置場設計作業之執行，進行相關細節之修訂與增訂。
低放射性廢棄物	台電公司已於102年8月底前	將持續精進更新，本報告將

最終處置設施概念設計	完成「低放射性廢棄物最終處置設施概念設計(C版)」報告更新進版及自主管理審查，更新內容包括處置場接收廢棄物總活度與數量更新、重裝容器之廢棄物特性分析及重裝容器之處置概念設計更新等。	併入「低放射性廢棄物最終處置技術發展整合規劃與評估」案執行。
低放射性廢棄物最終處置設施功能模擬評估	台電公司已於102年8月底前完成「低放射性廢棄物最終處置設施功能模擬評估(C版)」報告更新進版及自主管理審查，更新內容包括處置場接收廢棄物數量更新、原安全分析成果更新、重裝容器之廢棄物特性分析等。	將持續精進更新，本報告將併入「低放射性廢棄物最終處置技術發展整合規劃與評估」案執行。
低放射性廢棄物最終處置計畫(規劃階段)專案品質保證計畫	「低放射性廢棄物最終處置計畫(規劃階段)專案品質保證計畫(修訂四版)」已於103年1月13日主管機關物三字第1030000006號函同意備查。	「低放射性廢棄物最終處置計畫(規劃階段)專案品質保證計畫(修訂五版)」已於104年1月13日函請主管機關核備。 本案將每年定期檢討，若有修正時，將送主管機關審查。
低放射性廢棄物處置關鍵核種篩選報告	獲主管機關100年4月12日物三字第1000001063號函同意備查。	已備妥可應用，已將其成果納入「低放射性廢棄物最終處置設施功能評估」報告。

有關台電公司過去(至104年1月)已完成之低放處置相關研究發展案表列如下：

計畫名稱	起迄年度	研究成果摘要
低放射性廢料分類規劃	87.12~88.9	參考美、日核能先進國家法規與技術經驗，同時依物管局發函實施之「低放射性廢料分類補充規定」，衡量國內低放射性廢料產生、處理、貯存現況，研擬規劃作為日後履行法規及執行技術之藍圖，為未來低放射性廢料分類、最終處置建立執行模式。

建立低放射性廢棄物核種資料庫及分類	91.2~94.12	本計畫內容涵蓋電腦篩選廢棄物源代表桶、蘭嶼貯存場大規模開蓋取樣計測廢棄物桶、核種放射化學分析、國內首座檢整廢棄物桶，並利用 Excel 試算表進行廢棄物桶的分類試算，建立諸多方法與技術經驗。
蘭嶼貯存場廢棄物桶核種濃度評估計算與分類資料庫建立（第一期）	97.1~99.1	蘭嶼貯存場貯放早期產生之固化廢棄物，因核種資料欠缺或不完整，無法依法規要求進行分類，需配合檢整作業，完成整桶加馬活度計測、廢棄物桶分類。第一期完成 19,785 桶之核種分析及分類。
微生物對低放射性廢棄物最終處置之水泥固化體及工程障壁分解效應定量評估	97.12~99.12	本研究針對台灣之海島氣候環境，在微生物對低放射性廢棄物 (LLRW) 處置之水泥固化體及廢棄物桶材等工程障壁的分解效應進行量化評估，瞭解微生物對水泥固化體與廢棄物桶材之生物降解效應，以建立微生物對本土 LLRW 處置場工程障壁穩定性功能評估參數。
低放射性廢棄物最終處置射源項管理系統	98.11~100.11	參考 IAEA 標準與物管局建議規範，及配合最終處置場設計與功能評估工作需要，完成台電公司低放射性廢棄物相關單位（包括核一廠、核二廠、核三廠以及核後端處）資訊管理系統的建置，建立符合國內現況的低放射性廢棄物整合資料庫，可方便操作提高管理工作效率，以期順利完成申請建造執照作業。
低放處置潛在場址特性資料分析管理系統	100.1~101.1	成果包括低放射性廢棄物最終處置潛在場址地質資料 GIS、文件搜尋與管理及三維地質模型建置分析與評估及展示等三項系統設置工作，後續將可因應低放射性廢棄物最終處置候選場址選定後，銜接場址精查作業，並有利於低放最終處置計畫之推動。
低放射性廢棄物難測核種分析技術精進	100.1~102.1	本計畫針對蘭嶼水泥固化體樣品，利用改善後分析技術及結果，應用於其對應之廠年代廢棄物，修正現有比例因數，更新資料庫並重新分類計算，與原分類結果相較，超 C 類及 C 類廢棄桶皆明顯下降，證實藉由分析方法精進可以大幅降低核種的偵測極限，同時

		減少超 C 類及 C 類廢棄物桶分類數量比例。
蘭嶼貯存場廢棄物桶核種濃度評估計算與分類資料庫建立(第二期)	99.1~103.1	將蘭嶼貯存場廢棄物桶依據「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」規定，依其放射性核種濃度進行分類。
耐 100 年結構完整性之混凝土處置容器研究	99.09~103.06	本研究使用之高性能混凝土材料經耐化學阻抗試驗、耐廢棄物侵蝕試驗、耐生物劣化效應試驗、耐紫外線照射試驗、耐輻射照射試驗、耐熱負載試驗、透水試驗、透氣試驗、氯離子侵蝕試驗、硫酸鹽侵蝕檢驗、中性化試驗、溶出失鈣試驗及核種遷移等耐久性試驗，經由實驗結果顯示處置容器設計可達 100 年之服務壽命。另最後進行處置容器的試製與容器結構完整性測試，容器經噴灑、墜落、震動、穿刺、吊卸、擠壓以及滲水等試驗結果，均可符合原先預期之設計目標與功能。

二、現階段(半年)執行之具體工作項目與成果

台電公司本階段(103 年 8 月至 104 年 1 月)執行工作，主要包括依據主管機關審查意見及審查會議決議修訂「低放射性廢棄物最終處置技術建置計畫(103 年版)」、「低放射性廢棄物處置技術評估報告國際同儕審查規劃」、「低放射性廢棄物最終處置技術評估報告章節架構」等報告，及新增辦理「低放射性廢棄物最終處置技術發展整合規劃與評估」、「低放射性廢棄物資料庫系統精進案」，與持續辦理近年所規劃之低放處置技術相關研究發展案，包括：

1. 工程障壁材料調查研究

「低放射性廢棄物最終處置工程障壁中緩衝回填材料調查評估技術服務工作」。

2. 安全/功能評估

「低放射性廢棄物潛在場址之微生物核種吸附與工程障壁腐蝕安全影響評估」、「低放射性廢棄物最終處置設施功能評估」等。

前述各項計畫內容說明如下：

(一) 低放射性廢棄物最終處置技術發展整合規劃與評估

本案工作目標為針對我國低放射性廢棄物最終處置之廢棄物特性、場址特性調查、處置設施設計、設施營運、封閉監管與安全分析等處置相關工作項目，說明我國設置低放射性廢棄物最終處置設施所需之各項技術能力，完成「低放射性廢棄物處置技術評估」，並藉由國際同儕審查，提升處置技術評估之公信力，強化民眾與各界對於我國建置低放射性廢棄物最終處置設施之信心。

本案工作內容，主要將針對國內兩處建議候選場址，基於我國低放射性廢棄物最終處置相關法規規範，及對於確保低放射性廢棄物最終處置場安全所進行之相關研究與規劃成果，並參考國外低放射性廢棄物處置技術與經驗，進行處置各項相關技術發展整合規劃與評估，應執行規劃與分析之工作項目包含：

1. 低放射性廢棄物種類與特性彙整分析
2. 場址特性與調查規劃
3. 處置設施概念設計
4. 處置場興建、營運與封閉作業規劃
5. 低放最終處置安全分析技術評估作業
6. 低放最終處置技術評估
7. 技術綜合評估與精進方向
8. 進行國際同儕審查作業

本案於 103 年 6 月辦理招標公告，並於 103 年 9 月完成議價、決標。本階段(103 年 8 月至 104 年 1 月)之主要工作為歸納整合國內兩處建議候選場址之場址特性參數，並藉由上述場址特性參數評估成果，初步修正既有概念設計，以進一步優化場址配置。利用初步修正後之概念設計成果以及整合歸納後之場址特性，建立兩處建議候選場址之場址特性調查計畫，與提出「場址特性參數評估報告」(台東縣達仁鄉)、「場址特性參數評估報告」(金門縣烏坵鄉)、「建議候選場址概念設計報告(期中報告)」、台東縣達仁鄉場址特性調查計畫(103 年版)、「金門縣烏坵鄉場址特性調查計畫(103 年版)」等報告初稿。上述

相關工作成果將作為計畫後續工作之依據，本計畫其他相關工作成果陸續產出後，亦將據以回饋精進本階段之報告。

本案至 104 年 1 月底已完成全案約 16.9%，工作項目及進度皆符合原訂目標。

(二) 低放射性廢棄物資料庫系統精進案

本案工作目標為依據「低放射性廢棄物最終處置計畫」要求，彙整低放射性廢棄物射源項相關資料(如放射源組成與分類計算結果等)並建立功能完備之低放射性廢棄物資料庫，以作為安全分析的基礎及配合最終處置場或替代/應變方案各階段的設計與功能評估工作。

本案工作內容，主要為「低放射性廢棄物最終處置射源項管理系統」精進與低放射性廢棄物整合貯位資料查證等相關資料庫精進，完成「低放射性廢棄物資料庫系統」。本案主要工作範圍如下：

1. 「低放射性廢棄物最終處置射源項管理系統」分類計算方式查證。
2. 查對核一、核二、核三廠之固化廢棄物桶超 C 類桶數。
3. 精進蘭嶼貯存場廢棄物桶之核種分類計算方式。
4. 固化廢棄物「儀器最低可測值」(MDA)歸零試算。
5. 彙整核一、核二、核三廠、蘭嶼貯存場之固化廢棄物桶貯存位置資料。
6. 「低放射性廢棄物資料庫」欄位重新建置：
7. 更新「低放射性廢棄物資料庫」功能。
8. 建立資料即時更新環境。
9. 辦理「低放射性廢棄物資料庫」教育訓練。

本案於 103 年 12 月 17 日完成決標，103 年 12 月 29 日完成開案會議，至 104 年 1 月底已完成全案約 14%，工作項目及進度皆符合原訂目標。

(三) 低放射性廢棄物最終處置工程障壁中緩衝回填材料調查評估技術服務工作

本案於 102 年 1 月開始辦理，工作目標為蒐集國內及國際間(例如：美國、法國、日本及韓國等國家)工程障壁材料目前研究成果，並對其工程障壁材料之力學、熱傳及化學等特性(如密度、透水性、回脹性、熱傳導性、飽和度等)

加以分析與比較，了解國際上核能先進國家於工程障壁材料之選用情形，並進行台灣本土可作為工程障壁材料之料源調查(包含可作為緩衝材之黏土及不同場址之開挖料)。對台灣本土可作為工程障壁材料之料源進行料源力學、化學及開挖料與緩衝材之配比試驗等，同時進行障壁效果數值模擬分析；並提出適合國內低放射性廢棄物最終處置場之工程障壁材料及對障壁材料應用可行性作一規劃(穩定性、經濟性、施工性)。

本階段(103年8月至104年1月)，執行內容包括：

1. 以南田村露頭與金門地區公共工程之岩心，分別做為代表達仁場址與小坵場址之粒料，進行緩衝回填材料配比特性試驗之試樣，試驗結果顯示，粒料來源對緩衝材膨脹及導水等特性，影響有限。
2. 比較美國 BH 土與日興土兩種膨潤土基本材料性質，包括土壤基本物理性質試驗、水合特性試驗、膨脹指數(Free Swell)試驗、蒙脫石含量滴定試驗等。結果顯示，鈉系之美國 BH 土相較於鈣系之台灣台東日興土擁有較高之塑性與活性，成份中含有較高之蒙脫石礦物，故擁有較高之膨脹性能。
3. 單向度膨脹率試驗中，在相同配比下，BH 土在膨脹率表現上高於日興土，可與膨脹指數試驗結果相互印證。另提高試體之夯實壓力，可提升其初始單位重，使單位體積中膨潤土比例增加，膨脹潛能提升；試驗結果顯示：初始乾單位重的提高，其最大膨脹率呈線性增加。
4. 束制膨脹壓力試驗與水力傳導度試驗結果顯示：相同膨潤土比例下，BH 土在兩項特性中表現均優於日興土(膨脹壓力較高、水力傳導係數較低)。
5. 日興土無法滿足國外應用緩衝回填材之膨潤土關於蒙脫石含量之一般要求。但如果僅以膨脹壓力、滲透係數等性能作評估，且膨脹壓力之需求不大，則日興土或許尚有其應用之機會。

本案至104年1月已提送期末報告初稿，工作項目及進度皆符合原訂目標。

(四) 低放射性廢棄物潛在場址之微生物核種吸附與工程障壁腐蝕安全影響評估

本案自 101 年 7 月開始辦理，計畫目標為就金門縣烏坵鄉及台東縣達仁鄉 2 處建議候選場址進行微生物取樣，於實驗室模擬建議候選場址環境，評估本土微生物之生長、代謝對水泥固化體、廢棄物貯存桶材與緩衝材料膨潤土的作用，期瞭解微生物對低放射性廢棄物最終處置之安全影響，建立微生物對低放處置之安全評估本土參數。

本階段（103 年 8 月至 104 年 1 月）應執行內容包括：持續進行國內、外相關文獻彙整、測試不同夯實程度的膨潤土於不同環境下之水分及外觀變化及本土分離微生物於緩衝材料膨潤土中的存活能力評估、定期分析微生物作用造成水泥固化體之成分釋出與其環境 pH 值變化、評估微生物生長代謝造成貯存桶材試片之成分釋出與其環境 pH 值變化、評估微生物處理貯存桶材試片之物理性質及電化學分析測試等工作。

本階段（103 年 8 月至 104 年 1 月）執行成果如下，包括：

1. 將不同配比與夯實程度之緩衝材料，置於不同濕度的環境中，經 1 個月後測得全膨潤土試樣之水分含量高於 50% 膨潤土者，在相對溼度 85% 之環境會增加膨潤土試樣中之水分含量，但不同的夯實程度對膨潤土中之水分含量無明顯影響，置放時間增加至 3 個月及 8 個月其試樣水分含量無明顯變化。
2. 水泥固化體與菌株長期培養之試驗中，多數受測菌株可於含水泥固化體之環境中生長良好。混合細菌菌株培養 7 天後，可見於培養液表面有明顯之生物膜，隨培養時間增加，混合菌株中之優勢族群的變異甚大。而黴菌菌株至培養 1 個月時可見生物膜形成，培養 2 個月後可見大量之黴菌菌絲可與固化體親和生長。培養至 3、6、12 及 15 個月仍可見部分菌株之菌絲與固化體親和生長。
3. 水泥固化體與菌株經 3、6、12、15 個月之培養後，分析各固化體之劣化程度，結果顯示經菌株培養並未顯著影響固化體之鈣矽比。本實驗觀察仍持續進行中。而實驗中各水泥固化體經 1 年培養處理後之抗壓強度並無顯著差異，各固化體之抗壓強度均明顯高於低放射性廢棄物最終處置

及其設施安全管理規則」第六條規定之單軸抗壓強度 15 kgf/cm^2 ，後續將持續測試培養 2 年後之固化體，評估菌株對水泥固化體之抗壓強度影響。

4. 熱浸鍍鋅的耐腐蝕性有兩項特徵：鍍鋅皮膜之腐蝕生成物為一緻密的保護層，使後續之銹蝕難以繼續。但腐蝕速率因與其所在環境不同而有所差異。另一為犧牲防蝕作用，鍍鋅皮膜在瑕疵產生時，其周圍的鋅會形成陽離子以抑制鋼鐵材的腐蝕，此為鋅對鐵的犧牲防蝕作用。研究中鍍鋅鋼片的電化學腐蝕係數由低至高，再降低，推測是由於微生物生長或附著在鍍鋅碳鋼試片表面時，產生之氧化物隔絕了腐蝕環境，可能因此鍍鋅碳鋼的腐蝕速率由低升高後再度降低。

本案至 104 年 1 月底已完成全案約 89.4%，工作項目及進度皆符合目標。

(五) 低放射性廢棄物最終處置設施功能評估

本案工作目標為配合低放廢棄物最終處置技術建立，對於放射性核種在低放處置設施近場混凝土障壁及緩衝回填材料，遠場處置母岩及地質圈所形成之多重障壁複雜系統中傳輸的途徑，進行整體分析研究，進而評估生物圈所接收的輻射劑量與風險，以確保低放射性廢棄物最終處置場設立不會對周圍生物圈造成輻射影響。

主要工作內容包括蒐集國際間低放處置設施功能評估，了解國際上先進核能國家於功能評估上之設計基準及各項特徵、事件及過程(Features, Events, and Processes, 簡稱 FEPs)，並針對目前國際上用以進行功能評估(液體傳輸及揮發性核種傳輸)之模擬程式、方法進行蒐集比較，選擇適當程式進行低放處置設施近場、遠場放射性核種液體傳輸及揮發性核種傳輸模擬功能評估，及整體放射性核種傳輸機制模擬評估與生物圈輻射劑量評估等，最後將以現行兩處低放建議候選場址之設計概念為案例進行分析。

本案前期(103 年 2 月至 103 年 7 月)已完成工作包括蒐集整理功能評估(液體傳輸及揮發性核種傳輸)之模擬程式、方法，以及引入國外低放處置設施(坑道式處置)之功能評估(液體傳輸及揮發性核種傳輸)經驗等，並參考 IAEA(2004)所建議之功能評估流程，將所蒐集之資料進行歸納整理，有助於

本計畫對於各國進行功能評估之瞭解，相關工作成果將對本案後續安全評估工作之推動有所助益。

本階段(103年8月至104年1月)之主要工作內容為地化傳輸模式程式 HYDROGEOCHEM，以及整合評估程式 Goldsim 之測試，以及近場及遠場分析相關案例資料蒐集及彙整，評估各案例資料是否足以提供上述程式之輸入參數。後續將以地化傳輸模式之程式，進行低放處置設施近場(包括從廢棄物固化體至工程結構物等工程障壁部分)及遠場(地質圈)放射性核種傳輸模擬，以及整體放射性核種傳輸機制模擬評估。本案於103年7月底至8月初，辦理第1工作年度教育訓練，訓練對象包括台電公司核能發電處、核能安全處、核能技術處、營建處、環境保護處、核能後端營運處等參與低放處置計畫同仁。

本案至104年1月底已完成全案約43.27%，工作項目及進度皆符合原訂目標。

(六) 低放射性廢棄物最終處置計畫(規劃階段)專案品質保證計畫

低放專案品質保證計畫本階段(103年8月至104年1月)工作計畫執行檢討如下：

1.本品保計畫係適用於「規劃階段」，而低放計畫目前仍是處於此階段，故本品保計畫仍適用。

2.主辦部門於執行低放計畫時，皆能依循本專案品質保證計畫，確保作業品質；本階段在執行上並無待追蹤事項。

3.本品保計畫已依第2章規定於103年12月辦理定期檢討，會請主辦部門及相關單位(環保處、營建處、核技處、核安處、核發處)審查及檢討，並依審查意見修訂；本次修訂重點如：

(1)將不適用於本規劃階段之作業事項予刪除。

(2)增訂第一章第1.2節本公司專業总工程师之權責：協助推動本品保計畫有關業務。

(3)本文內容之文字修詞、因應本處組織變動而變更程序書編號等。

4.本品保計畫修訂(第5版)，已於104年1月13日函送主管機關審查。

三、執行成效、檢討及下階段工作要項

本階段工作執行成效與檢討：

計畫名稱	執行成效與檢討
低放射性廢棄物最終處置技術發展整合規劃與評估	本階段已提出2處建議候選場址之特性參數評估報告、概念設計報告及場址特性調查計畫等，相關工作成果將作為計畫後續工作之依據，本計畫其他工作成果陸續產出後，亦將據以回饋精進本階段之報告，以達成低放最終處置技術發展與整合之目標，並完成低放最終處置技術之評估。
低放射性廢棄物資料庫系統精進案	<p>本計畫目標為建立本公司低放射性廢棄物固化桶資料庫系統，確保資料的即時性與正確性，提供詳細判定各核能電廠及蘭嶼貯存場各類低放射性廢棄物固化桶之數量及貯存位置，以利將來低放射性廢棄物之最終處置工作推展。</p> <p>本階段工作主要為查證比對核能電廠低放固化桶之分類計算公式和資料之正確性，以及精進蘭嶼貯存場低放分類計算方法與結果，後續將持續精進強化資料庫相關功能並將上述精進後之低放資料匯入建好的資料庫內。</p>
低放射性廢棄物潛在場址之微生物核種吸附與工程障壁腐蝕安全影響評估	本階段工作為持續進行本土微生物之生長、代謝對水泥固化體、廢棄物貯存桶材與緩衝材料膨潤土的影響評估。將不同配比與夯實程度之緩衝材料，置於不同濕度的環境中，置放時間增加至3個月及8個月其試樣水分含量無明顯變化。水泥固化體與菌株長期培養之試驗中，多數受測菌株可於含水泥固化體之環境中生長良好。另，水泥固化體與菌株經3、6、12、15個月之培養後，分析各固化體之劣化程度，結果顯示經菌株培養並未顯著影響固化體之鈣砂比。
低放射性廢棄物最終處置工程障壁中緩衝回填材料調查評估技	本計畫於102年1月開始執行，已完成工作包括：完成國內、外相關文獻資料蒐集彙整、工程障壁緩衝回填材料需求評估、膨潤土料源市場分析、工程

術服務工作	障壁緩衝回填材料性能測試及工程障壁緩衝回填材料與坑道、處置窖及盛裝容器間力學互制模擬初步探討等工作，並歸納緩衝回填材料之施工方式，以針對不同位置之緩衝回填材料設置適合之工法提出建議，並就未來緩衝回填材料之潛在料源及產品進行實驗與初步評估，已挑選合宜之配比，進行緩衝材耐久性能測試，以瞭解緩衝材膨脹及導水等特性於強酸、強鹼及海水入侵等長期環境改變下之變化；同時進行工程障壁緩衝回填材料與坑道、處置窖及盛裝容器間力學互制模擬分析，以瞭解緩衝材與坑道、處置窖及盛裝容器間力學互制關係。
低放射性廢棄物最終處置設施功能評估	本階段主要工作內容包括地化傳輸模式程式與整合評估程式之測試，及近場及遠場分析相關案例資料蒐集及彙整，評估各案例資料是否足以提供上述程式之輸入參數。後續將進行低放處置設施近場及遠場放射性核種傳輸模擬，以及整體放射性核種傳輸機制模擬評估，並將視實際工作情況不定期辦理相關教育訓練。
低放射性廢棄物最終處置計畫(規劃階段)專案品質保證計畫	本階段辦理委外廠商品保稽查，就「低放射性廢棄物潛在場址之微生物核種吸附與工程障壁腐蝕安全影響評估」提出 6 件建議事項。本計畫已於 104 年 1 月份完成定期檢討、修訂，並陳主管機關審查。

台電公司下階段(104 年 2 月-104 年 7 月)，除將持續辦理現階段執行各項計畫外，亦將依據主管機關 103 年 12 月 23 日召開之第 128 次放射性物料管制會議議案 691 決議事項，及主管機關 103 年 12 月 26 日召開之「103 年放射性物料臨時管制會議」決議，於 104 年 3 月底前將「低放射性廢棄物分類計算統計結果及難測核種最低可測值應用研究」與「現有核能電廠內用過偵測元件(活化金屬)之貯存狀況與統計」報告提報主管機關。另將依據主管機關 103 年 12 月 25 日來函審查會議紀錄修訂「低放射性廢棄物最終處置技術建置計畫(103 年版)」，並於 104 年 6 月底前提送主管機關審查。

第三章 處置設施選址計畫

低放射性廢棄物最終處置計畫於選址過程中，應執行之工作內容包括場址調查、土地取得、選址公投及環評等工作。本階段(103年8月至104年1月)工作尚無場址調查、土地取得及環評等工作，目前僅為選址作業準備公投相關工作。

一、過往執行成果重點

場址設置條例於95年5月24日公布施行後，主辦機關經濟部依條例第6條規定會商主管機關同意，於95年7月11日指定台電公司為選址作業，依條例規定選址業者須提供選址小組有關處置設施選址之相關資料，並執行場址調查、安全分析、公眾溝通及土地取得等工作，台電公司並配合主辦機關辦理選址相關事項，及依條例第20條規定接續辦理原依放射性物料管理法等相關法規執行低放射性廢棄物最終處置計畫之選址工作。

場址設置條例第7條規定「選址小組應於組成之日起六個月內，擬訂處置設施選址計畫，提報主辦機關」，台電公司作為選址業者乃依經濟部指示於95年10月31日研提「低放射性廢棄物最終處置設施場址選址計畫」草案陳報經濟部國營會，送請選址小組審查，並遵照選址小組審查意見於95年12月28日將修訂之選址計畫草案再送國營會，經濟部續於96年1月25日召開選址小組第2次委員會議進行討論，台電公司遵照委員意見修訂完成選址計畫，由選址小組依前述規定提報主辦機關經濟部，經濟部則於96年3月21日將選址計畫刊登於行政院政府公報並上網公告1個月，並經會商主管機關及相關機關意見後，核定於96年6月20日生效。

經濟部依據場址設置條例完成選址計畫公告與核定後，選址小組則依據場址設置條例與選址計畫，以台灣全部地區為範圍進行潛在場址篩選，首先依據場址設置條例第4條規定及原能會發布之「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」與其他法規規定之禁止與限制開發條件，篩選出符合之可能潛在場址，再由選出之可能潛在場址依環境接受度、接收港條件、陸運環境、處置場設施所需空間、特殊地質條件以及處置方式等因

子進行評量，評選出較佳之可能潛在場址。台電公司除提供選址小組前述有關處置設施選址之相關資料外，並執行選址小組 96 年 10 月 23 日第 4 次委員會議初步同意之可能潛在場址其地球化學條件(地下水體氫離子濃度指數與地質介質對鈷及鈾之分配係數)調查及分析，以作為選址小組票選潛在場址之參考依據。

主辦機關經濟部於 97 年 8 月 19 日召開選址小組第 8 次委員會議票選潛在場址，選址小組針對評量較佳之可能潛在場址，再考量相關因子評量結果後，順利票選出「台東縣達仁鄉」、「屏東縣牡丹鄉」及「澎湖縣望安鄉」等 3 處潛在場址，並將票選結果提報經濟部，經濟部於 97 年 8 月 29 日核定公告。

台電公司續依經濟部規劃之選址作業期程，積極辦理建議候選場址遴選作業相關配合工作，如配合辦理選址小組委員於 98 年 2 月 9、10 日赴台東縣達仁鄉、屏東縣牡丹鄉等 2 處潛在場址現勘，及依 98 年 1 月 20 日選址小組第 10 次委員會議結論修訂「建議候選場址遴選報告」，於 98 年 2 月 13 日完成「建議候選場址遴選報告(修訂版)」供選址小組委員參考，選址小組於 2 月 20 日召開第 11 次委員會議，票選結果建議以「台東縣達仁鄉」與「澎湖縣望安鄉」為建議候選場址，台電公司並依票選結果及該次會議決議完成「建議候選場址遴選報告」定稿本送選址小組委員確認，選址主辦機關經濟部於 98 年 3 月 17 日依法將「建議候選場址遴選報告」公開上網及陳列 30 日(期間自 98 年 3 月 18 日起至 4 月 16 日止)。

公告期間經濟部共收到各界意見 140 件，其中有條件贊成者 1 件、涉及法律層面意見者 4 件、不具理由反對者 37 件及具理由反對者 98 件。主管機關原能會於 98 年 5 月 25 日發函經濟部洽前述各界意見之答覆情形，並請經濟部將各界意見答覆初稿會商相關機關，經濟部於 6 月 1 日函復原能會將督導台電公司積極辦理，故後續台電公司依據經濟部彙整各界意見之來函，研擬答覆初稿於 6 月 18 日函復國營會轉陳經濟部。經濟部於 7 月 9 日將各界意見會商主管機關原能會及相關機關，另指示台電公司研擬答覆原能會對建議候選場址遴選報告各界意見答覆初稿之評議意見並修訂答覆初稿內容，台電公司完成後於 7 月 30 日函復國營會轉陳經濟部。經濟部並於會商主管機關與各相關機關意見後於 11 月 12 日逐項答復意見採納情形。

台電公司於莫拉克颱風(98年8月8日)後，前往台灣本島東南部潛在場址與其他較佳可能潛在場址勘查，並於9月18日研提勘查評估報告陳報主管機關，經勘查確認場址範圍內未曾遭受地層崩塌滑動、侵蝕、洪水、土石流等災害，勘查評估結果顯示，前述場址地區環境相對穩定，並未受到豪雨之不利影響，場址評選時將地質、水文等因素納入考量，評估結果正確性獲得驗證。

經濟部原規劃於98年12月底前核定公告「建議候選場址」，惟因澎湖縣政府於98年9月15日公告將望安鄉東吉嶼大部分私有土地一併納入為「澎湖南海玄武岩自然保留區」，並經該管主管機關行政院農業委員會於9月23日核備。依「文化資產保存法」規定，該保留區禁止改變或破壞其自然狀態，造成僅存1處「台東縣達仁鄉」場址之情況，嗣經經濟部函請原能會釋明應核定公告2處以上「建議候選場址」，方符合「場址設置條例」規定，致未能依原訂規劃期程於98年12月底前辦理核定及公告作業。經濟部於99年1月26日召開選址小組第12次委員會議，研商補足「建議候選場址」之處理方案，經委員決議將選址作業退回至潛在場址篩選階段重新辦理。後續選址小組於3月8日第13次會議，經檢視相關法規條文修訂及法規公告區域更動情形，確認其餘可能潛在場址仍符合資格，並同意新增1處較佳可能潛在場址；於5月31日召開第14次會議討論選址作業提報各較佳可能潛在場址之調查資料與評比說明，99年7月13、15日並至新增之較佳可能潛在場址勘查。

經濟部於99年9月1日召開選址小組第15次會議，經出席委員三分之二以上之投票同意，票選出「台東縣達仁鄉」、「金門縣烏坵鄉」等2處潛在場址，經濟部並於9月10日公告。台電公司即就公告之2處潛在場址辦理場址遴選作業資料蒐集與彙整，並沿用或更新社經因素、場址環境因素與工程技術因素等評量因子之資訊，就各潛在場址特性進行評量，分析說明評估結果，並依100年2月25日選址小組第16次委員會議結論修訂「建議候選場址遴選報告」。經濟部續於3月21日召開選址小組第17次會議，經出席委員三分之二以上之投票同意，票選建議「台東縣達仁鄉」與「金門縣烏坵鄉」為建議候選場址，台電公司則依票選結果及該次會議決議完成「建議候選場址遴

選報告」定稿本送選址主辦機關，經濟部於100年3月29日依法將「建議候選場址遴選報告」公開上網及陳列30日(期間自3月29日起至4月27日止)。

「建議候選場址遴選報告」公開上網及陳列期間，經濟部共收到13件(76項)意見，其中具理由反對有11項，提出建議意見有12項，提出質疑意見有53項。台電公司依據經濟部彙整各界意見來函，研擬意見答復初稿於100年5月23日函復國營會，國營會於6月1日函示，鑒於日本福島核電廠事故後，社會各界關切核能安全議題，請台電公司就核安相關意見併同「核能電廠安全防護總體檢評估報告」重擬相關答復資料。台電公司遵照指示及參照「核能電廠安全防護總體檢評估報告」內容，補充相關答復資料於100年7月8日提報國營會，由國營會洽商主管機關與相關機關(包含選址小組票選建議之建議候選場址所在之地方政府)，至101年2月始獲得最後一機關之回復意見。經濟部參酌各機關回復意見，於101年3月7日正式答復各界對「建議候選場址遴選報告」所提意見，後續台電公司於101年5月19日陪同經濟部林前次長赴金門縣烏坵鄉現勘，並與烏坵鄉鄉長及當地居民溝通選址作業及後續公投工作，及於101年5月8日及5月21日陪同經濟部林前次長分別拜會台東縣及金門縣地方首長，洽談有關核定公告建議候選場址相關事宜。國營會續於101年5月24日向經濟部長簡報低放選址作業核定公告建議候選場址議題，經濟部於101年7月3日核定公告建議候選場址。後續主辦機關於101年8月17日函請建議候選場址所在地方政府同意接受委託辦理公投選務工作。惟兩地縣政府分別於同年9月26日及10月9日函復對於選址公投尚有意見，均未同意接受委託辦理公投。

台電公司於101年10月30日提報「低放射性廢棄物最終處置102年工作計畫」送主管機關審查。主管機關於101年11月27日提出第1次審查意見，台電公司依據審查意見於101年12月10日研提修訂版函復主管機關，後續主管機關於101年12月24日召開「低放射性廢棄物最終處置計畫-102年度工作計畫」審查會議，台電公司就會議紀錄及審查意見於102年1月29日研擬答復說明及計畫修訂2版提報主管機關，台電公司依據主管機關於102年2月6日就102年度工作計畫修訂2版函復之要求，應依101年12月24日之審查會議決議事項，切實執行年度工作計畫，俾各項工作品質及成效能確保

低放處置計畫依時程切實推動。該次會議決議有關請台電公司於 102 年 2 月底前提報充實低放最終處置專職人力之具體規畫部分，台電公司已於 102 年 2 月 22 日提報「最終處置專職人力具體規劃」送主管機關審查，主管機關於 2 月 27 日函復，請台電公司參酌國際處置專責機構之人力配置及規模，儘速加強充實，俾最終處置計畫依計畫時程切實推動。

台電公司依據國營會 101 年 12 月 17 日經國二字第 10100200630 號函，提報辦理選址公投選務工作所需人力、經費等資料，於 102 年 1 月 2 日送國營會。

台電公司於 102 年 2 月 26 日陪同經濟部梁政務次長等長官赴台東縣達仁鄉建議候選場址現勘，及簡報說明場址初步規劃設計(包括處置坑道佈置設計、低放廢棄物專用接收港配置設計、專用道路規劃設計、輔助區規劃與營運概念等)、場址地質等條件(包括處置區岩性及年代、斷層距離、地震與海嘯影響等)與周邊環境狀況。

台電公司於 102 年 3 月 4 日參加經濟部邀集原能會、內政部及中選會召開之「低放射性廢棄物最終處置設施場址公投評估研商會議」討論低放選址公投相關議題，但對於場址公投時程尚未有具體結論，致處置計畫書之選址作業時程仍有不確定因素。台電公司爰提報修正處置計畫書，將主辦機關辦理之場址公投時程採浮動方式提報，惟未獲主管機關原能會同意。

台電公司於 102 年 10 月 29 日將 103 年度工作計畫提報主管機關審查，並於 102 年 11 月 14 日參加主管機關召開之「放射性廢棄物最終處置計畫-103 年度工作計畫」審查說明會會議簡報年度工作計畫內容。台電公司依據 103 年度工作計畫修訂二版及主管機關 102 年 11 月 18 日「放射性廢棄物最終處置計畫-103 年度工作計畫」審查說明會會議紀錄，與 102 年 12 月 26 日來函「低放射性廢棄物最終處置 103 年工作計畫」之審查結論辦理與選址計畫相關工作。審查結論其中有關「請強化處置計畫之「替代/應變」方案，並研提具體可行之方案。」部份，台電公司已於 102 年 10 月 1 日第 124 次放射性物料管制會議簡報「替代/應變方案」，並依第 125 次放射性物料管制會議紀錄，「於送請經濟部審核及行政院民間與官方核廢料處理協商平台研討後，再行

提報主管機關。」辦理相關簡報準備事宜。經濟部為順利推動低放射性廢棄物最終處置設施選址作業等業務，於 102 年 11 月 18 日以任務編組方式成立核廢料處理專案辦公室，主要負責辦理放射性廢棄物營運專責機構之籌設、研訂放射性廢棄物營運相關政策暨執行策略工作。台電公司於 103 年 1 月 24 日會同該專案辦公室赴物管局討論低放選址替代/應變方案。後續主管機關於 103 年 3 月 20 日第 126 次放射性物料管制會議第 661 議案決議「請台電公司妥善規劃本案，並於送請行政院民間與官方核廢料處理協商平台研討後，再行提報本局。」台電公司在經濟部核廢料處理專案辦公室督導下，準備行政院民間與官方核廢料處理協商平台第 4 次會議之簡報(低放射性廢棄物最終處置計畫替代/應變方案)。行政院原訂 4 月 30 日召開第 4 次協商平台會議，因民間團體召開記者會，聲明退出平台會議，故無法依據第 126 次會議決議辦理。

主管機關於 103 年 6 月 19 日召開第 127 次放射性物料管制會議，就第 661 議案決議「由於行政院民間與官方核廢料處理協商平台之後續運作尚難預測，請台電公司依第 124 次會議決議，於 7 月底前提報本局，提報之替代/應變方案，應有明確之規劃時程；可參考美國藍帶委員會(Blue Ribbon Committee, BRC)或台電公司高放處置計畫應變方案之作法。」台電公司依據此項決議，於 103 年 7 月 30 日以電核端字第 1038060805 號函向主管機關提出「低放射性廢棄物最終處置計畫書(修訂二版)第 10 章替代/應變方案之強化修正」。

有關「放射性廢棄物最終處置計畫-103 年度工作計畫」審查說明會會議決議及審查結論「加強資訊公開及公眾溝通作業，並加強公眾參與之規劃及執行，俾有利於推動處置計畫」部份，台電公司已研定 103 年度溝通工作計畫，該計畫係規劃依照廣告文宣、議題管理、組織動員、調查研究、活動贊助、公益關懷等行動模組進行各類之行動方案。另，台電公司已協助主辦機關經濟部設置低放射性廢棄物最終處置官方網站(<http://www.llwfd.org.tw>)，該網站已就世界上主要運用核能科技國家之成功經驗進行說明，並刊載低放平面文宣、宣導短片、場址動畫等文宣作為溝通工作推展之輔助資料，以釐清民眾疑慮與增強對處置工作之信心。

台電公司前階段(103年2月至103年7月)選址工作主要為配合主辦機關經濟部辦理公投相關準備事宜。

二、現階段(半年)執行之具體工作項目與成果

台電公司於103年7月30日以電核端字第1038060805號函向主管機關提出「低放射性廢棄物最終處置計畫書(修訂二版)第10章替代/應變方案之強化修正」後，主管機關於103年8月12日以物三字第1030002133號函，要求台電公司將前述替代/應變方案併入「低放射性廢棄物最終處置計畫書」，台電公司遂於103年8月19日以電核端字第1030016757號函將「低放射性廢棄物最終處置計畫書(修訂二版)Rev.3」提報主管機關，並於103年9月9日獲主管機關核備。

三、執行成效、檢討及下階段工作要項

現階段選址計畫主要工作為選址公投準備作業，因兩處建議候選場址縣政府尚未同意經濟部委託辦理公投選務工作，經濟部評估自辦公投確有困難事項待克服，致公投時程具有不確定性因素存在，台電公司除持續加強與縣政府、議會及地方民眾之溝通外，並依據「104年度低放選址地方溝通工作計畫」據以執行，及依據經濟部與核廢料處理專案辦公室指示辦理選址相關配合工作。

第四章 民眾溝通專案計畫

一、選址溝通工作

「場址設置條例」於 95 年 5 月 24 日公布施行後，台電公司考量處置設施場址之產生須依地方性公投的結果來決定，於是成立「低放射性廢棄物最終處置場選址公投督導會報」，負責本項計畫重大決策之訂定，於總管理處公眾服務處下成立「督導組」(自 102 年 6 月 1 日起本組織歸屬核能後端營運處)，負責規劃及推動選址公投溝通宣導事宜，並於可能場址所在縣之區營業處設置「低放射性廢棄物最終處置場選址公投溝通宣導小組」，負責執行地方性溝通宣導工作。

台電公司近期致力於低放處置設施之概念設計及安全評估之預備作業，並依原能會物管局於第 8 次技術溝通平台會議之決議，將低放處置設施之設計概念及安全評估製作成動畫影片與低放處置場展示模型，使民眾了解低放處置場設施之安全特性，以有效提升民眾對低放處置安全之信心。目前本公司已製作有 2 種處置方式示意動畫及隧道處置之實體模型，可應用於公眾溝通，該實體模型已擺設於本公司核能三廠南部展示館，再配合 2 種處置方式之示意動畫播映，將有助於民眾瞭解處置概念與操作方式。

為提升建議候選場址所在鄉「台東縣達仁鄉」及「金門縣烏坵鄉」民眾支持度，台電公司特針對此 2 鄉進行逐戶拜訪說明，使民眾充分了解低放射性廢棄物及選址相關資訊。目前台東縣達仁鄉已完成 5 輪逐戶拜訪工作，第一輪(99 年 1 月 11 日至 10 月 8 日)、第二輪(99 年 10 月 25 日至 100 年 4 月 22 日)、第三輪(100 年 8 月 1 日至 100 年 12 月 16 日)、第四輪(101 年 8 月 30 日至 102 年 2 月 8 日)、第五輪(102 年 7 月 22 日至 102 年 12 月 13 日)，經深入耕耘，歷次民眾對設置處置場的支持度分別為 38%、40%、57%、60%及 61%，已有顯著提升。而金門縣烏坵鄉，則於 100 年 5 月 24 日至 6 月 3 日、100 年 9 月 15 日至 25 日、101 年 10 月 1 日至 15 日及 102 年 9 月 1 日至 15 日 4 次登島，進行逐戶拜訪工作；因烏坵旅台鄉親甚多，故亦請旅台宗親長輩代邀集家族成員座談以利說明低放公投事宜。

本階段(103年8月至104年1月)在全國及建議候選場址所在縣辦理之溝通工作計畫表述如下：

***全國性—103年8月-104年1月**

行動模組	行動方案	辦理情形	工作成效
廣告文宣	場址遠景規劃短片 網站環景(北展館、蘭嶼貯存場) 場址遠景規劃立體書模型 全國應用製作物	103.1.28-103.11.4 完成全部文宣製作工作。(包括拍攝短片2支、拍攝網站環景3支(含北展館、蘭嶼貯存場及核二廢料倉庫)、立體書2式、漫畫式文宣2式)	目前台東及金門區處利用辦理地方溝通說明會期間，適時播放該遠景規劃宣導短片及發送立體書、漫畫式文宣等，均獲得當地居民認同，對於本公司低放溝通宣導方面達到良好效果。
調查研究	電話民調	103.9.1-103.10.1 全部完成(包含全國、台東及金門縣)電話民調工作	針對全國、台東及金門縣電話民調數據，提供制訂低放選址公投公眾溝通宣導策略參考。
公益關懷	台東希望種子計畫 台東火金姑兒童閱讀 台東獨居老人圍爐	與台東區處合辦，辦理情形詳「台東縣—103年8月-104年1月」所述	

* 台東縣—103 年 8 月-104 年 1 月

行動模組	行動方案	辦理情形	工作成效
廣告文宣	第四台廣告 更生日報廣告 縣市廣播廣告 縣市燈箱廣告(航空站、火車站) 縣市應用製作物(三角桌曆)	104.1 辦理簽約 103.10.2 辦理 1 次 103.8.31 辦理完畢 6 家 全年辦理 2 處 103.11 辦理 1 式	讓低放宣導擴及全縣每一角落，使更多的縣民了解低放處置之安全資訊。
議題管理	地方記者座談會	103.9.18 辦理 1 次	提供媒體低放選址公投資訊與對低放之支持。
組織動員	縣府及地方機關首長拜會 議會議員拜會 村里及社區發展協會說明會 機關團體參訪及說明會 製作業務宣導品(如茶葉禮盒、環保袋、環保筷等)	104.1.14 辦理完畢 103.12.2 辦理第 2 輪 103.8-104.1 辦理 20 場 103.8-104.1 辦理 56 場 104.1.14 辦理完畢	1. 對於縣市首長及鄉鎮長等採面對面方式報告建議候選場址篩選過程及選址公投進度，即時答覆疑問，建立溝通管道並尋求支持，蒐集建議作為訂定地方性溝通策略參考。 2. 村里及機關團體參訪或說明會進行宣導工作，說明場址篩選過程、低放廢棄物之內涵、處理及處置方式、國外成熟技術經驗、地方公投規定、回饋經費與地方未來願景。 3. 民眾及教會人士等輔以核能設施參訪活動，讓民眾正確認識低放射性廢棄物，匯聚足夠民意基礎及互信感。
活動贊助	節慶、宗教、文化及體育等	103.8-104.1 辦理 12	現場辦理低放處置

		場	宣導，透過低放射性廢棄物最終處置場未來設置的藍圖和安全性之宣傳，以降低民眾心中的疑慮和提高相關設施之接受度。
公益關懷	台東火金姑兒童閱讀	103.12.13 辦理 1 次	增進民眾對本公司的認知與好感，進而達到敦親睦鄰的目標，提升公司形象有所助益，俾利低放選址公投作業之推展。

*金門縣—103年8月-104年1月

行動模組	行動方案	辦理情形	工作成效
廣告文宣	金門日報廣告 縣市應用製作物(文宣2式、三角桌曆)	103.7.28至103.8.20已辦理完畢 103.12辦理文宣1式、103.11辦理三角桌曆1式	透過媒體廣告及文宣發放，讓民眾對何謂低放射性廢棄物、處理及處置流程、低放射性廢棄物最終處置場安全概念及回饋項目更為了解。
議題管理	地方記者座談會	103.9.2辦理1場次	透過座談會讓媒體工作人對此項議題有更深入瞭解，屆時報導內容能更為確實、理性、公正客觀的報導，進而將低放選址公投訊息正確的傳達予民眾瞭解，增加民眾對於此項議題的支持率。
組織動員	縣府及地方機關首長拜會 議會議員拜會 村里說明會 機關團體說明會 製作業務宣導品 烏坵本島說明會 烏坵旅台鄉親家族說明會 烏坵旅台鄉親參訪活動 烏坵仕紳赴金門協助溝通	103.8-104.1辦理完畢 103.8-104.1辦理完畢 103.8-104.1辦理12場次 103.8-104.1辦理5場次 103.8-104.1辦理5式 103.7.31-8.16辦理登島1次 104.1.9辦理家族說明會1次 103.9.28及103.10.15各辦理1次 103.10.23辦理1次	1.對於縣市首長及鄉鎮長民代等由溝通小組採單獨拜會面對面方式報告建議候選場址篩選過程、何謂低放射性廢棄物及處理流程、低放射性廢棄物最終處置場安全概念及回饋項目，即時答覆疑問，建立溝通管道並尋求支持，蒐集建議作為訂定地方性溝通策略參考。 2.村里、機關社團及本處辦理之各項集會，以播放投影片方式說明宣導，並發放低放文宣、資料給現場參加人員，現場參加人

			員疑慮即時答覆、意見蒐集。 3.烏坵鄉民溝通除以登烏坵本島說明以外，另旅台鄉親溝通方式，則以家族說明會，並透過參觀相關設施以瞭解鄉民看法及意願，俾有助於促成地方公投作業與提高投票率。
活動贊助	節慶、宗教、文化及體育等	103.8-104.1 辦理 11 場次	藉由金門地方人文活動，本處溝通小組為持續辦理低放選址宣導業務，特配合於活動期間安排辦理低放宣導，以擴大宣導層面與成效。
公益關懷	學生教育、老人弱勢等	103.8-104.1 辦理 7 場次	本處希望取之於社會、用之於社會的經營理念及作法，能夠拋磚引玉帶動更多公、民營企業也來關心弱勢族群，讓整個社會更溫馨。同時也藉此機會向各團體溝通宣導低放選址公投業務，希望大家能支持此項政策，有效的完成宣導任務。

對於台東地區之溝通工作，除將辦理全縣各鄉鎮(市)村里民低放業務宣導說明會外，將持續辦理達仁鄉之逐戶拜訪工作。達仁鄉青壯人口離鄉率頗高，將持續辦理旅外鄉親選址溝通宣導座談會，使鄉民能增加對國家政策之了解。

金門地區民風純樸，目前因政府政策利多，生活條件良好，對政府政策相當配合。對於金門地區，將使烏坵民眾的意願能適切傳遞予金門民眾，並透過各種溝通管道，讓金門鄉親瞭解處置場的設置不但是支持政府的政策，還

可以提供烏坵鄉民一個新的發展契機。另烏坵常駐人口尚不及設籍人口之10%，烏坵鄉旅台鄉親仍列為溝通重點，溝通方式則以家族說明優於個別的拜訪，另依據委託金門大學完成之烏坵鄉遠景規劃報告，並持續與烏坵鄉民說明規劃辦理情形，以瞭解鄉民看法或意願，俾有助於促成地方公投作業與提高投票率。

因101年7月烏坵鄉才被公告為「建議候選場址」，故金門地區的溝通作業啟動時程較晚，為加速溝通廣度，比照過去為台東縣民眾所製作之文宣，亦針對金門縣民眾編製宣導文宣，以夾報方式寄送5,000份。烏坵現仍為軍管地區，設籍人口卻漸增至672人（103年12月），惟除冬季收割紫菜時返鄉人口較多外，常駐人口僅約30餘人，故仍須持續加強對旅台鄉親的溝通說明。

未來工作將配合經濟部依據「場址設置條例」之作業期程，於相關場址所在縣進行溝通宣導工作，加強廣度及深度，主要策略目標為讓民眾了解民生用途的核能應用設備均會產生低放射性廢棄物，有必要在國內興建一處低放最終處置場，以加強低放選址公投的政策之正當性、增進社會大眾對政府及台電公司的信任感。

溝通宣導重點分為運用全國性媒體循序宣傳，尋求聚集全國民眾焦點，並形成正面輿論，普及低放射性廢棄物最終處置場公投資訊，推廣活動識別系統，加強與民代、公職、媒體、環團及意見領袖溝通，對於場址所在鄉及週邊鄉鎮持續深化溝通，爭取認同，並疏通反對聲浪。

另為因應經濟部公投選址時程之不明確，台電公司已訂定「103年底放選址地方溝通工作計畫」及「104年底放選址地方溝通工作計畫」並據以執行中。期能經由上述溝通計畫之行動方案之執行，解除關鍵問題之所在，完成推展地方性公投選務工作。

另外，為因應低放射性廢棄物最終處置設施場址選址作業需求，且考量烏坵及金門地區溝通工作推展，爭取地方民眾支持選址作業，台電公司於101年6月委託國立金門大學針對烏坵鄉辦理「金門縣烏坵鄉地方遠景規劃」案，並於102年9月完成，相關工作成果已於烏坵鄉親說明及座談會中運用。

本計畫參考低放射性廢棄物最終處置設施規劃資料，進行包括烏坵鄉資

料收集、現地調查、現地訪談、資料彙整分析及環境與空間規劃設計等工作，以期建構出符合當地居民日常需求、安全及便利性優先的生活環境與公共空間，提升聚落活力。同時維繫本身自然環境條件，在環境改善、設施設計、閒置空間再利用上皆強調綠意、減碳、節能、保水等原則，以利後續建設工作之推動。且能找尋聚落本身及週邊可整合發展之契機與資源價值，形成地方城鄉景觀、休閒活動之新優質據點，進而帶動社區居民的地方認同。

二、放射性廢棄物貯存所在地方溝通

(一) 蘭嶼貯存場溝通工作

台電公司自 79 年營運蘭嶼貯存場以來，均持續辦理敦親睦鄰之公眾溝通活動，本階段(103 年 8 月至 104 年 1 月)之敦親睦鄰業務及業務宣導活動，羅列如下：

1. 敦親睦鄰

(1) 急難救助

補助蘭嶼鄉民赴島外轉診就醫，扶助無人照料長者、弱勢家庭及殘障貧病鄉民，並致贈慰問金，103 年 8 月至 104 年 1 月之轉診醫療補助，共發放 342 人次，補助金額共計約 88.4 萬元；專案補助共發放 5 人次，補助金額共計約 4 萬 4 仟元。

(2) 襄助地方事務

於本場人力資源範圍內，量能襄助鄉政運作及協助地方事務，協助鄉民吊卸船隻及搬運大型建材物料。103 年 8 月至 104 年 1 月完成協助鄉民吊卸船隻、物料 29 件。

(3) 公益關懷

台電公司聘用自蘭嶼招募之 8 位部落服務員，投入各部落服務，主動關懷社區各項需求，主辦或協辦部落體育文康及民俗節慶各項活動。貯存場主辦有「103 年度中秋節歌唱比賽暨業務宣導晚會」、第五期「獨居老人暨弱勢家庭持續關懷計畫」等活動，並配合蘭嶼鄉公所、地方機關及民間立案社團辦

理「慢速壘球賽活動」、「春節擴大防火宣導暨聯誼活動」等大型活動，並於過年期間及節慶時期受邀參與各項活動。

(4) 睦鄰補助

補助並參與機關、學校及社團辦理地方藝文、民俗節慶及具地方文化特色活動，如補助居家關懷協會辦理「103 年度聖誕節報佳音暨傳統歌謠活動」、蘭嶼高中辦理「103 學年度校慶園遊會活動」等活動，除補助活動經費外，亦至現場設置「業務宣導攤位」。

(5) 獎助學金

於每年 5 月至 6 月份辦理「核能後端基金獎助學金」，分學優、才優、清寒、身障四大類別，給予蘭嶼籍在學子弟獎助學金，鼓勵渠等努力向學。

2. 宣導與溝通

(1) 接待鄉民、民間團體、機關單位蒞場參訪，主動積極邀請蘭嶼鄉民蒞場參訪，說明貯存場目前之業務狀況，並於參訪結束後召開座談會回答鄉民之疑問。103 年 8 月至 104 年 1 月共計接待約 1,662 人(含自台灣參訪之遊客)。

(2) 自 101 年 9 月辦理「蘭嶼鄉全體鄉民全身計測活動」，除全身計測外，亦安排相關生態、文化學習等活動行程，俾利蘭嶼鄉之觀光發展，103 年 8 月至 104 年 1 月已辦理計約 319 人次。

(3) 核後端處召募自蘭嶼鄉 6 個部落之部落服務員共 8 位，除協助社區服務工作，亦協助相關業務之說明宣導，並陪同台電人員拜訪地方人士。

(4) 核後端處同仁每次發行 1000 份「蘭嶼貯存場敦親睦鄰花絮」，宣導相關業務、核後端處主辦或協辦之活動、急難救助報導等，並由部落服務員至各社區挨家挨戶發送，截至 104 年 1 月止共發行 44 期。

(二) 各核電廠之溝通工作

各核能電廠內均有貯存放射性廢棄物，台電公司亦不斷利用各種管道向當地鄉民溝通宣導貯存設施之安全性，目前核一、二廠主要就乾式貯存議題進

行溝通宣導，核三廠則就放射性廢棄物及核能安全等核能相關議題進行溝通
 宣導，茲將各核能電廠對地方溝通說明活動與核能安全、放射性廢棄物有關
 者表列如下：

核一廠、核二廠：無

核三廠：

編號	執行民眾溝通工作項目	目的	執行成效	備註
1.	財團法人恆春基督教醫院	核能安全宣導議題	良好	
2.	恆春鎮公所-103 年度暑期家 庭訪問	核能宣導議題	良好	
3.	恆春鎮民代表會	核能安全宣導議題	良好	
4.	核三廠員眷	核能宣導議題	良好	
5.	恆春鎮老人會	核安暨核廢料溝通議題	良好	
6.	恆春鎮公所 103 年度核安宣 導活動	核安暨核廢料溝通議題	良好	
7.	恆春鎮瑯嶠老人會	核安暨核廢料溝通議題	良好	
8.	國立清華大學	核安暨核廢料溝通議題	良好	
9.	恆春國中 102 學年度獎學金 頒獎典禮	核安暨核廢料溝通議題	良好	
10.	僑勇及恆春國小 102 學年度 獎學金頒獎典禮	核安暨核廢料溝通議題	良好	
11.	大光國小進廠參訪活動	核安暨核廢料溝通議題	良好	
12.	義守大學師生參訪活動	核安暨核廢料溝通議題	良好	
13.	恆春國中第 44 屆畢業典禮	核安溝通議題	良好	
14.	恆春鎮老人會宣導會活動	核廢料暨核能宣導議題	良好	
15.	恆春國中 102 學年度獎學金 頒獎典禮	核安暨核廢料溝通議題	良好	
16.	僑勇及恆春國小 102 學年度 獎學金頒獎典禮	核安暨核廢料溝通議題	良好	

編號	執行民眾溝通工作項目	目的	執行成效	備註
17.	大光國小進廠參訪活動	核安暨核廢料溝通議題	良好	
18.	義守大學師生參訪活動	核安暨核廢料溝通議題	良好	
19.	恆春國中第 44 屆畢業典禮	核安溝通議題	良好	

三、執行成效、檢討及下階段工作要項

在溝通過程中，民眾關心的事項，主要包括回饋金的分配與管理、地方遠景規劃、電力相關設施改善、處置場設置利弊、公投門檻及投票行政區域界定等。民眾意見均回饋至相關作業，以利達成處置場的選定。另於低放處置場址及基本設計確立後，將進行規劃製作低放處置設施 3D 數位展示模型，使民眾能更清楚了解處置場的配置及運作狀況。

對於台東地區，除將辦理全縣各鄉鎮(市)村里民低放業務宣導說明會外，將持續辦理達仁鄉之逐戶拜訪工作。達仁鄉青壯人口離鄉率頗高，將持續辦理旅外鄉親選址溝通宣導座談會，使鄉民能增加對國家政策之了解。對於金門地區，將使烏坵民眾的意願能適切傳遞予金門民眾，並透過各種溝通管道，讓金門鄉親瞭解處置場的設置不但是支持政府的政策，還可以提供烏坵鄉民一個新的發展契機。另烏坵常駐人口尚不及設籍人口之 10%，烏坵鄉旅台鄉親仍列為溝通重點，溝通則以家族說明會及個別拜訪之方式辦理，另並持續與烏坵鄉民在說明會時將烏坵鄉遠景規劃向鄉民進行說明，以瞭解鄉民看法或意願，俾有助於促成地方公投作業與提高投票率。

未來工作將依據「場址設置條例」之作業期程，配合經濟部公告核定建議候選場址，於相關場址所在縣進行溝通宣導工作，加強廣度及深度。主要溝通策略目標為讓民眾了解民生用途的核能應用設備均會產生低放射性廢棄物，有必要在國內興建一處低放最終處置場，以加強低放選址公投的政策之正當性、增進社會大眾對政府及台電公司的信任感。

溝通宣導重點分為運用全國性媒體循序宣傳，尋求聚集全國民眾焦點，並形成正面輿論，普及低放射性廢棄物最終處置場公投資訊，推廣活動識別系

統，加強與民代、公職、媒體、環團及意見領袖溝通，對於場址所在鄉及週邊鄉鎮持續深化溝通，爭取認同，並疏通反對聲浪。

另為因應經濟部公投選址時程之不明確，台電公司已訂定「104 年低放選址地方溝通工作計畫」。期能經由上述溝通計畫之行動方案之執行，解除關鍵問題之所在，完成推展地方性公投選務工作。

第五章 綜合檢討與建議

低放射性廢棄物最終處置計畫係屬於長期性工作，從場址選擇開始到處置場運轉、封閉、監管及(或)免於監管，需歷經數十或數百年之久，因此最終處置計畫可依其階段性目標與任務概分成四個階段：「處置場選址階段」、「處置場建造階段」、「處置場運轉階段」與「處置場封閉監管階段」。現階段選址作業依據場址設置條例規定程序辦理，相關作業尚涉及非技術層面可控制因素，致無法量化達成率。而實務上選址過程遭遇地方反對或不配合等影響選址進度之情形，至整體選址作業未能按原規劃進度與程序辦理。迄本階段(半年)選址作業執行進度已依序完成潛在場址篩選、建議候選場址遴選報告公開閱覽、建議候選場址核定公告等，本階段主要工作為洽商地方政府同意接受委託辦理選務工作等公投準備作業，後續將於進行地方公投通過，與環境影響評估後，才能陳報行政院核定場址，完成選址階段之任務。

場址設置條例公布施行迄今已 8 年餘，若選址過程一切順利情況下，應已完成選址任務，惟目前尚有選址公投與環評調查等工作尚待執行。經濟部雖已於 101 年 7 月 3 日核定公告建議候選場址，並於同年 8 月 17 日函請兩處建議候選場址所在縣政府同意接受委託辦理法定低放場址地方性公民投票選務工作，惟兩地縣政府分別於同年 9 月 26 日及 10 月 9 日函復經濟部，未同意接受公投選務工作之委辦，經濟部評估自行規劃辦理公投之可行性，於實務上確有困難事項待克服，例如由主辦機關辦理選務工作，因須動員人力、物力龐大，以及選務工作具有相當複雜性與專業性，在經驗不足情況下，執行選務任何環節出現瑕疵，恐遭「公投結果無效」之訴訟。故現階段除將持續與縣政府、議會及民眾溝通宣導外，亦檢討並研擬場址設置條例修正條文案。此外，為順利推動低放射性廢棄物最終處置設施選址作業等業務，經濟部於 102 年 11 月 18 日以任務編組方式成立核廢料處理專案辦公室，主要負責辦理放射性廢棄物營運專責機構之籌設、研訂放射性廢棄物營運相關政策暨執行策略工作。

現階段選址作業因客觀環境影響，致選址作業無法依處置計畫書規劃時程辦理，台電公司依據物管法規定，配合選址現況修訂「低放射性廢棄物最終

處置計畫書(96年4月26日核定之修訂版)」之計畫時程，於99年9月30日函陳主管機關，後續依據主管機關99年10月14日物三字第0990002744號函示意見及100年6月28日第116次放射性物料管制會議紀錄議案607之決議，洽詢選址主辦機關選址作業時程規劃，台電公司於100年8月25日依選址主辦機關函復說明陳報主管機關，建請准予核備99年9月30日提報之「低放射性廢棄物最終處置計畫書(修訂二版)」。

台電公司於100年11月10日依據主管機關就最終處置計畫書修訂二版所提審查意見提報「低放射性廢棄物最終處置計畫書(修訂二版)Rev.1」請主管機關審查，並依主管機關於101年3月27日來函之「低放射性廢棄物最終處置計畫書」(修訂二版)審查會議紀錄要求事項與時程，於101年4月23日提報「低放射性廢棄物最終處置計畫書(修訂二版)Rev.2」及於101年6月30日前完成替代/應變方案之強化修正、處置技術建置計畫、年度工作計畫與地方公投之公眾溝通方案等提報主管機關審查。主管機關分別於101年5月4日來函同意核備處置計畫書修訂二版，101年7月31日函復地方公投之公眾溝通方案審查意見、101年8月7日函復「替代/應變方案強化修正」、「低放處置技術建置計畫」及「101年度7至12月之工作計畫」等3項方案及計畫之審查意見。

有關「替代/應變方案強化修正」，主管機關於102年1月16日函復台電公司101年10月5日提出之「替代/應變方案強化修正」之第2次審查意見。台電公司依據審查意見修訂後，於102年6月28日提送主管機關審查。主管機關於102年8月6日復函表示替代/應變方案仍未具體明確，要求台電公司於10月底前重新切實研提低放處置計畫替代/應變方案，台電公司於102年10月1日第124次放射性物料管制會議簡報「替代/應變方案」。物管局102年12月24日第125次放射性物料管制會議紀錄，台電公司應將「替代/應變方案」於送請經濟部審核及行政院民間與官方核廢料處理協商平台研討後，再行提報主管機關。主管機關於103年1月17日函請經濟部督導台電公司提出替代應變方案(集中式貯存設施規劃)，續於103年3月20日第126次放射性物料管制會議，就「替代/應變方案強化修正」亦決議，「請台電公司妥善規

劃本案，並於送請行政院民間與官方核廢料處理協商平台研討後，再行提報本局。」

台電公司在經濟部核廢料處理專案辦公室督導下，準備行政院民間與官方核廢料處理協商平台第 4 次會議之簡報(低放射性廢棄物最終處置計畫替代/應變方案)。行政院原訂 4 月 30 日召開第 4 次協商平台會議，因民間團體召開記者會，聲明退出平台會議，故無法依據第 126 次會議決議辦理。主管機關於 103 年 6 月 19 日召開第 127 次放射性物料管制會議，決議「由於行政院民間與官方核廢料處理協商平台之後續運作尚難預測，請台電公司依第 124 次會議決議，於 7 月底前提報本局，提報之替代/應變方案，應有明確之規劃時程；可參考美國藍帶委員會(Blue Ribbon Committee, BRC)或台電公司高放處置計畫應變方案之作法。」台電公司依據此項決議，於 103 年 7 月 30 日以電核端字第 1038060805 號函向主管機關提出「低放射性廢棄物最終處置計畫書(修訂二版)第 10 章替代/應變方案之強化修正」，後續主管機關於 103 年 8 月 12 日以物三字第 1030002133 號函，要求台電公司將前述替代/應變方案併入「低放射性廢棄物最終處置計畫書」，台電公司遂於 103 年 8 月 19 日以電核端字第 1030016757 號函將「低放射性廢棄物最終處置計畫書(修訂二版)Rev.3 提報主管機關，並於 103 年 9 月 9 日獲主管機關核備。

有關處置技術建置計畫部份，台電公司依據主管機關 102 年 9 月 3 日來函之「低放射性廢棄物最終處置技術建置計畫書(修訂二版)」審查結論及 102 年 12 月 24 日第 125 次放射性物料管制會議議案 675 決議，於 103 年 6 月 3 日，研擬「低放射性廢棄物最終處置技術建置計畫書(103 年版)」送主管機關審查，並依據主管機關 103 年 6 月 10 日來函審查意見，於 103 年 10 月 23 日將修訂版提送主管機關審查，續依據主管機關 103 年 12 月 3 日來函審查意見，於 103 年 12 月 15 日研提修訂二版送主管機關審查，主管機關於 103 年 12 月 24 日召開「低放射性廢棄物最終處置 104 年度工作計畫」及「低放射性廢棄物最終處置技術建置計畫(103 年修訂版)」審查會議，台電公司將依據前述審查會議決議辦理，於 104 年 6 月底前提報處置技術建置計畫修正版。

有關「低放射性廢棄物處置技術評估報告國際同儕審查規劃」部份，台電公司於 103 年 6 月 3 日提送主管機關審查後，依據主管機關 103 年 6 月 6 日

來函審查意見，於 103 年 9 月 26 日將修訂版及審查意見答復說明提報主管機關，續依據主管機關 103 年 10 月 7 日來函審查意見，於 103 年 11 月 3 日將修訂 2 版及審查意見答復說明提報主管機關，獲主管機關 103 年 11 月 10 日函復同意備查。

有關「低放射性廢棄物最終處置技術評估報告章節架構」部份，台電公司於 103 年 6 月 3 日提送主管機關審查後，於 103 年 12 月 12 日參加主管機關辦理之「低放射性廢棄物最終處置技術評估報告(LLWD2016)章節架構」討論會議，後續將依據主管機關 103 年 12 月 12 日來函會議紀錄辦理相關事宜。

依據低放射性廢棄物最終處置計畫書(修訂二版)Rev.3，台電公司本階段應執行工作包括實施環境調查與環境影響評估、投資可行性研究、民眾溝通、場址精查、細部設計與安全分析、處置技術建置、建造執照及相關執照申請與審查等工作，相關工作規劃之執行現況、改善措施與查核點表列如下：

工作項目	執行現況	改善措施	查核點
環境調查與環境影響評估	公投通過後執行	台電公司將於公投通過後，修訂處置計畫書相關工作時程規劃，並於主辦機關決定候選場址後，依環境影響評估法辦理候選場址第一階段環境影響調查、範疇界定，辦理民眾參與表達意見及回應，與編製環境影響說明書，期程約 15 個月。後續將繼續辦理第二階段環境影響評估作業，調查工作與報告編撰加上由主辦機關轉送環保署進行報告之審查、修訂及定稿等作業時程，預估約需 15 個月完成，兩階段環境影響評估作業所需全部時程約需 30 個月。	公投選出候選場址決定後 15 個月及 30 個月
投資可行性研究	公投通過後執行	台電公司將於公投通過後，修訂處置計畫書相關工作時程規劃，辦理投資可行性評估作業，預估期程約 24 個月。	公投選出候選場址決定後 24 個月
土地取得	公投通過後執行	台電公司將於公投通過後，即開始進行土地取得之前置作業。	公投選出候選場址決定後 12 個月
民眾溝通	持續辦理		詳第一章查

	中，相關內容詳第4章		核點表列四、民眾溝通專案計畫
場址精查、細部設計與安全分析	公投通過後執行	台電公司將於公投通過後，修訂處置計畫書相關工作時程規劃，並於公投選出候選場址決定後開始辦理，預估期程約26個月。	公投選出候選場址決定後26個月
處置技術建置	持續辦理中，相關內容詳第2章		詳第一章查核點表列二、處置技術建置計畫
建造執照及相關執照申請與審查	公投通過後執行	台電公司將於公投通過後，修訂處置計畫書相關工作時程規劃，並於辦理投資可行性研究期間，準備建造執照及相關執照申請文件，預估期程約15個月，並依據放射性物料管理法第17條向主管機關提出申請，有關建造執照申請、應備文件及格式、審核程序及其他應遵行事項等，將依主管機關公布之相關規定辦理，預估審查時程為12個月。	公投選出候選場址決定後19.5個月及31.5個月

有關本階段工作計畫之執行進度，處置技術建置計畫部份，包括廢棄物特性研究、場址調查計畫、工程障壁材料調查研究、功能/安全評估等項目，各子項工作均照年度工作計畫進度執行中。

有關處置設施選址計畫部分，台電公司依據主辦機關經濟部指示，持續辦理相關配合工作，及提報主辦機關例行之低放選址作業資訊，以期順利達成選址目標；及依據主管機關103年8月12日物三字第1030002133號函，將強化修正之「低放射性廢棄物最終處置計畫替代/應變方案」併入「低放射性廢棄物最終處置計畫書」，台電公司遂於103年8月19日以電核端字第1030016757號函將「低放射性廢棄物最終處置計畫書(修訂二版)Rev.3提報主管機關，並於103年9月9日獲主管機關核備。

有關民眾溝通專案計畫部分，因應經濟部公投選址時程之不明確，台電公司已訂定「104年低放選址地方溝通工作計畫」並據以執行中，期能經由上述

溝通計畫之行動方案之執行，解除關鍵問題之所在，完成推展地方性公投選務工作。

下階段(104年2月至104年7月)工作，台電公司除持續辦理相關技術建置計畫及公眾溝通工作外，亦將積極配合主辦機關經濟部指示辦理選址計畫相關配合工作；及遵照主管機關指示辦理處置計畫相關準備工作，相關工作及執行計畫查核點表列如下：

一、主管機關指示事項

計畫名稱/工作項目	查核點	查核項目
低放射性廢棄物最終處置技術建置計畫	104年6月	於104年6月底前依據主管機關審查意見修訂完成「低放射性廢棄物最終處置技術建置計畫(104年版)」並提報物管局審查

二、處置技術建置計畫

計畫名稱	查核點	查核項目
(一)整合性計畫		
低放射性廢棄物最終處置技術發展整合規劃與評估	104年2月~104年7月 104年2月	每月工作月報彙整查核 更新「低放射性廢棄物最終處置技術建置計畫(103年修訂版)」、「低放射性廢棄物數量預估報告」、「低放射性廢棄物形態及特性報告」、提出「低放射性廢棄物最終處置技術評估報告(期中報告)」初稿

	104 年 6 月	更新「低放射性廢棄物最終處置場廢棄物接收規範」、提交 2 處建議候選場址之「低放射性廢棄物最終處置可行性研究概念設計報告(期末報告)」初稿、「低放射性廢棄物最終處置場興建、營運與封閉作業規劃」初稿
(二)廢棄物特性研究		
低放射性廢棄物資料庫系統精進案	104 年 2 月 ~104 年 7 月 104 年 3 月	每月工作月報彙整查核 配合「103 年放射性物料臨時管制會議」決議，完成決議事項所述報告並提送物管局。
(三)場址調查評估		
本階段相關工作併入「低放射性廢棄物最終處置技術發展整合規劃與評估」案辦理。		
(四)工程障壁材料調查研究		
後續相關工作將配合「低放射性廢棄物最終處置技術發展整合規劃與評估」案相關工作成果規劃辦理		
(五)安全/功能評估		
低放射性廢棄物潛在場址之微生物核種吸附與工程障壁腐蝕安全影響評估	104 年 2 月 ~104 年 7 月 104 年 7 月	每月工作月報彙整查核 提送期末報告初稿
低放射性廢棄物最終處置設施功能評估	104 年 2 月 ~104 年 7 月 104 年 7 月	工作月報彙整查核 提送第 3 次期中報告初稿

三、處置設施選址計畫(辦理地方性公民投票)

計畫名稱/工作項目	查核點	查核項目
低放選址作業資訊	104 年 4 月	提報 104 年第 1 季選址作業資訊 送國營會公布在主辦機關網頁
	104 年 7 月	提報 104 年第 2 季選址作業資訊 送國營會公布在主辦機關網頁

四、民眾溝通

計畫名稱	查核點	查核項目
低放選址地方溝通計畫	104 年 7 月	地方公眾溝通紀錄

最終處置計畫現階段面臨之困難主要來自非技術性層面，調查評估工作之推動完成有賴地方民眾與民意機關之同意接受及各相關主管機關之配合支持。台電公司將持續戮力與地方民眾及相關機關等溝通說明，加強宣導處置場興建營運安全、繁榮地方建設及社會福利之遠景規劃，俾提高社會接受度，使選址作業順利進行。

附錄

低放射性廢棄物最終處置技術建置計畫 103 年度執行成果摘錄

目錄

2.1 低放射性廢棄物最終處置工程障壁中緩衝回填材料調查評估	1
2.1.1 障壁緩衝回填材料施工方式評估	1
2.1.2 膨潤土料源市場分析	10
2.1.3 障壁緩衝回填材料性能測試	17
2.1.4 膨潤土與混合粒料之耐久性試驗	27
2.1.5 障壁緩衝回填材與坑道、處置窖間力學互制模擬	39
2.2 低放射性廢棄物最終處置設施功能評估	48
2.2.1 HYDROGEOCHEM 模式模擬簡介	48
2.2.2 HYDROGEOCHEM 模式驗證	52
2.2.3 核種衰變反應驗證	53
2.2.4 核種傳輸模擬驗證	54
2.2.5 核種連鎖衰變反應驗證	58
2.2.6 吸附反應驗證	64
2.3 低放射性廢棄物潛在場址之微生物核種吸附與工程障壁腐蝕安全影響評估技術服務工作	69

2.1 低放射性廢棄物最終處置工程障壁中緩衝回填材料調查評估

2.1.1 障壁緩衝回填材料施工方式評估

緩衝回填材料依其施做之位置，大致可區分為坑道與處置窖間之回填材料、處置窖頂部覆蓋層及外側包圍層之緩衝材及於封閉階段之洞口特殊封塞(Plug)等。其施工法可分為壓實法、預製堆疊法及澆置法等。茲就上述各方法說明如下：

一、壓實法

材料之施工以現地滾壓夯實作業最為常見，其施工方式如同一般道路鋪面之夯壓作業，不過在低放射性廢棄物最終處置工程障壁之緩衝回填材料施工中，因多數環境處於隧道環境或施工狹窄之空間，因應發展出相對應之施工設備(如圖 2.1.1-1)，以有效夯實回填層達需求之密度。對於處置坑道頂部，因無足夠之空間可供機具施做，故另可配合旁道工法(sideways)，採斜坡壓實(如圖 2.1.1-2)；或類似以乾式噴射混凝土方式，以噴注(shotcreting)方式處理處置坑道頂部(如圖 2.1.1-3)。本工法較適用於處置窖底層及坑道與處置窖間之回填，多採用膨潤土與軋碎岩體粒料混合之回填材料為主。

緩衝回填材料經壓實後之土體強度、膨脹特性、及導水性等功能表現，受到膨潤土特性、粒料強度與粒徑分佈、配比、夯實特性、含水量控制、壓實機具能量與壓實厚度等因素控制。



圖 2.1.1-1 因應隧道施工環境之現地滾壓夯實設備

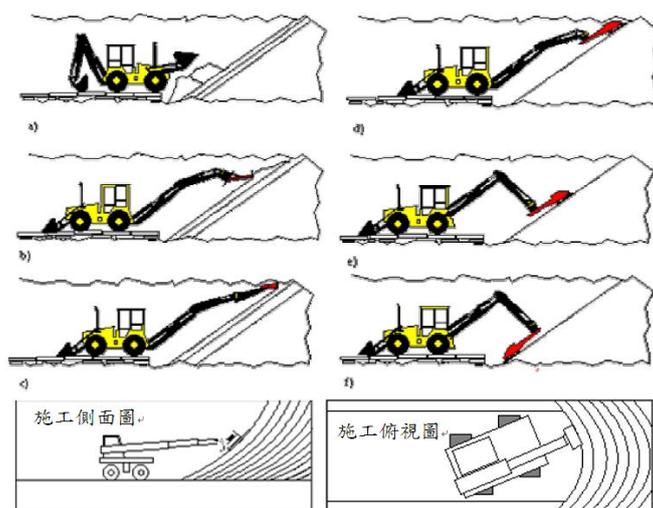


圖 2.1.1-2 旁道工法(sideways)壓實坑道頂部示意及壓實機具(SKB TR-02-12)

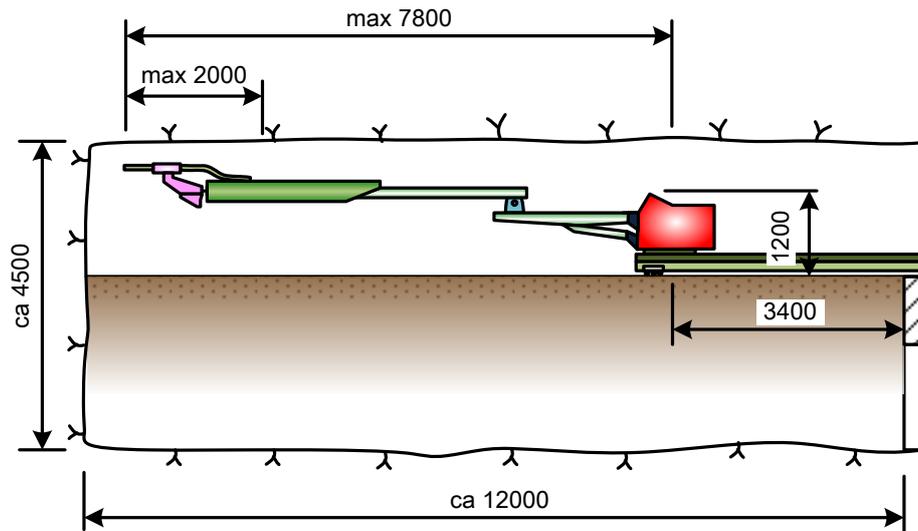


圖 2.1.1-3 噴注(shotcreting)方式施工(SK B TR-02-12)

二、預製堆疊法

雖然現地夯壓透過上述改良設備之使用後，可以增加壓密之品質，但由於仍然存在部分夯壓設備無法施作之空間，另外現地施工之品質與速度亦常受施工人員經驗與設備數量之影響，因此國外亦發展出以預製皂土磚堆疊之施工方式(如圖 2.1.1-4、圖 2.1.1-5)，而皂土磚堆疊區域之設計則包括圖 2.1.1-6 中(C)隧道冠部層、(D)隧道全斷面、(F)三明治複合層等三類。

將膨潤土以靜壓方式依預定之尺寸於工廠預製成塊體(blocks)，再依設計內容吊放於預定位置。由於預製膨潤土塊可以較高之能量壓製，其密度、膨脹性、強度及導水性等均較其它現地施做之方式標準更高，品質亦較易掌握。法國 ANDRA(如圖 2.1.1-7)及瑞典 KBS-3V(如圖 2.1.1-8)深層處置即應用本工法之概念。預製膨潤土塊亦搭配儲放容器之尺寸，視緩衝回填材料之設計需求填充於儲放容器間，如圖 2.1.1-9。對於坑道之不規則空間，國外亦有採膨潤土漿(slurry)或粒(pellet)配合填充的做法，如圖 2.1.1-10。

預製膨潤土塊之強度、膨脹特性及導水性等功能表現，除受到膨潤土種類影響外，亦受到預製方法、預製壓力、壓製後密度及含水量等因素控制。



圖 2.1.1-4 以預製皂土磚進行回填層施工(Dixon and Keto,2009)



圖 2.1.1-5 成形之預製皂土磚與應用於冠部之模擬施工

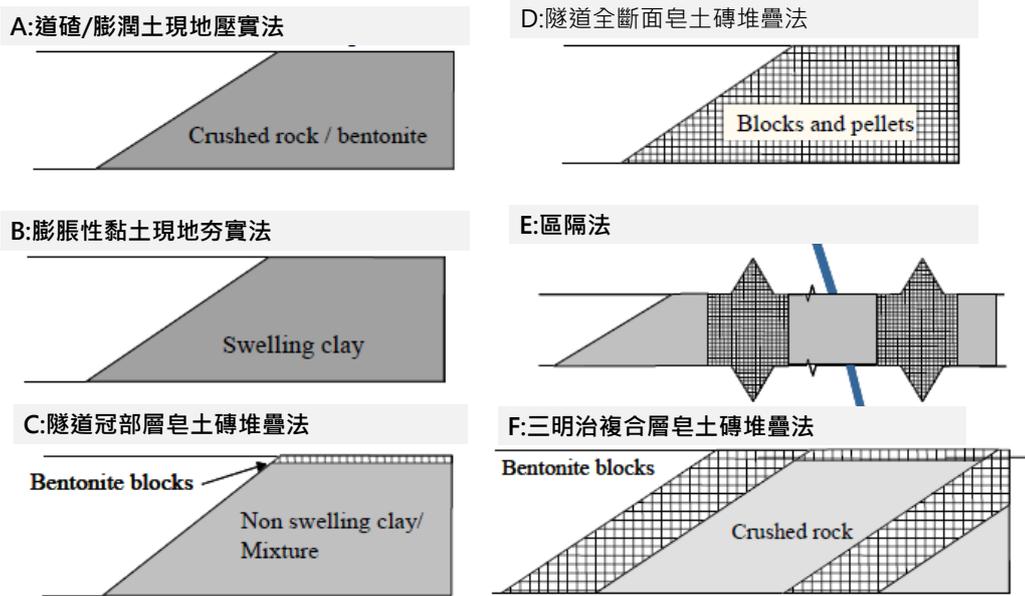


圖 2.1.1-6 六種回填工程之設計理念

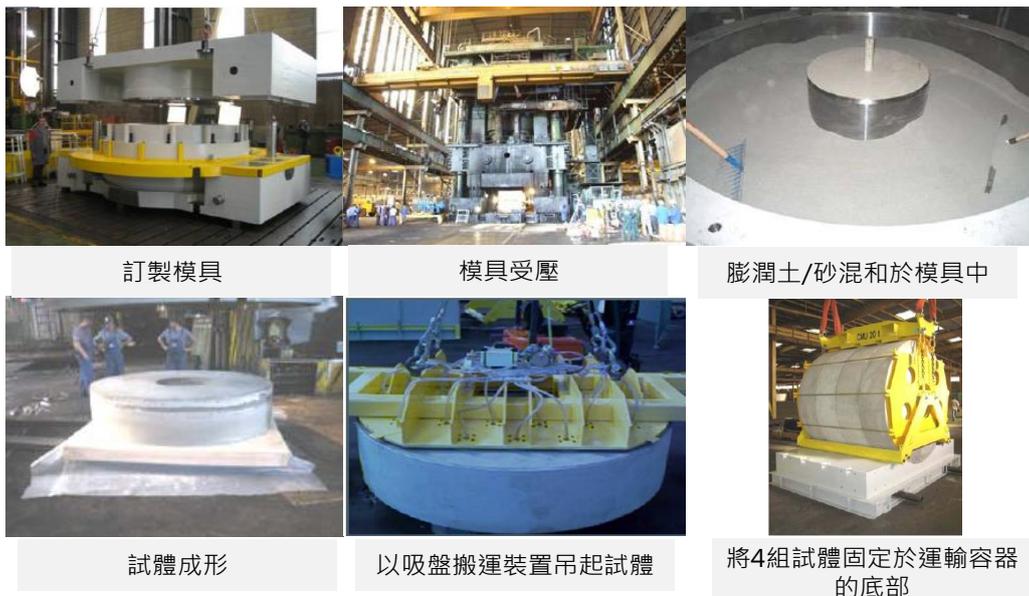


圖 2.1.1-7 法國 ANDRA 預製膨潤土塊生產過程(取自 ESDRED Module 1 Buffer Construction Technology)

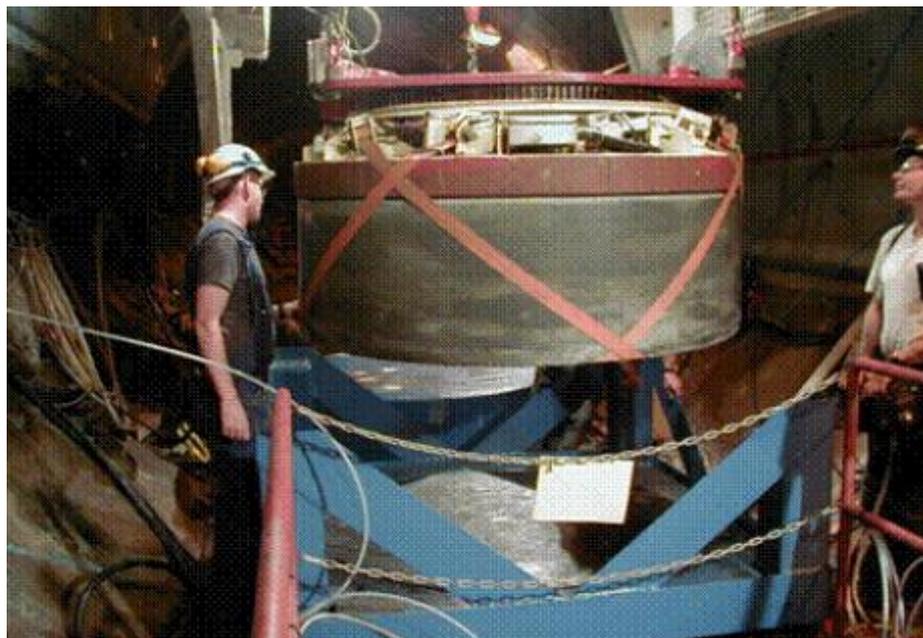


圖 2.1.1-8 瑞典 KBS-3V 吊放 2 噸重預製膨潤土塊(取自 SKB IPR-04-55)

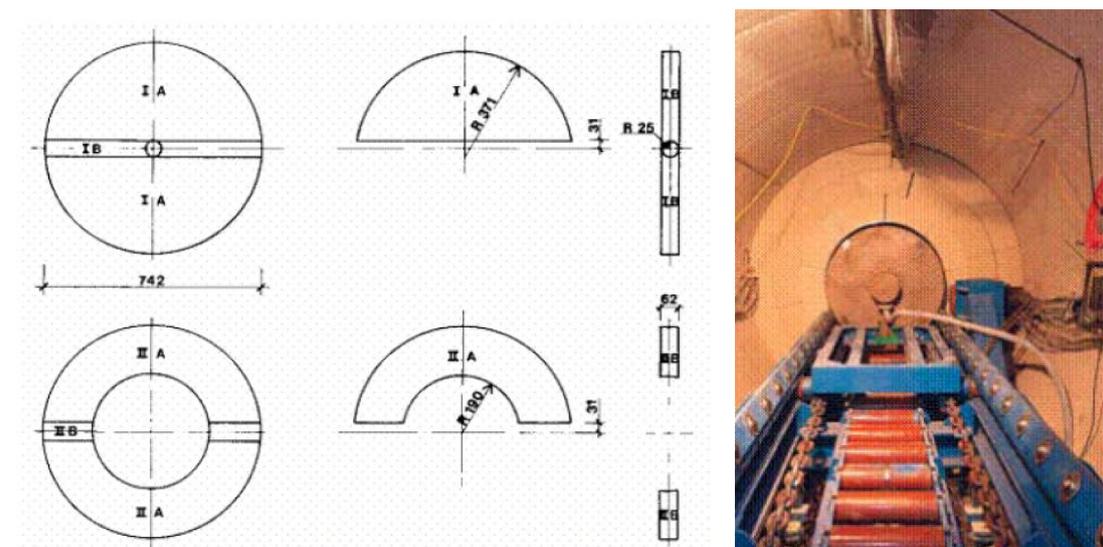


圖 2.1.1-9 預製膨潤土塊置放於儲放容器週邊(取自 SKB IPR-04-55)

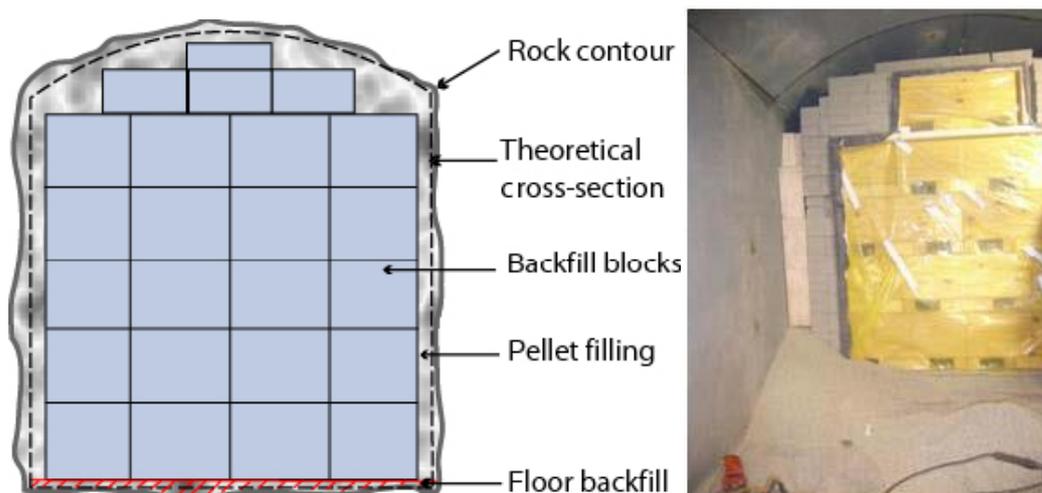


圖 2.1.1-10 膨潤土粒(pellet)配合填充坑道不規則之空間(取自 SKB P-11-44)

三、澆置法

採用塑性混凝土之概念，以澆置灌注方式進行施做。塑性混凝土之主要材料包括水泥、骨材、水及膨潤土等，以適當配比設計而具有初始彈性模數低，極限變形大，滲透係數低等，除可阻絕水及承受較大的變形外(如圖 2.1.1-11)另具高抗沖蝕性、抗化學性侵害。塑性混凝土之施工方法與一般混凝土相近，且因添加膨潤土，其施工性尚較一般混凝土為佳。目前塑性混凝土多應用於大型水利設施之阻、截水及滲流控制，經濟部水利署之湖山水庫計畫即採塑性混凝土做為截水牆材料。湖山水庫計畫塑性混凝土標準與世界大壩協會(ICOLD)截水牆材料要求如表 2.1.1-1；經配比及廠拌試驗之結果，塑性混凝土採用之水膠比為 2.0，配比每 1 立方公尺含量如

表 2.1.1-2。湖山水庫工程截水牆工作目前已全部施作完成，以塑性混凝土澆置完成之截水牆露頭如圖 2.1.1-12。

表 2.1.1-1 湖山水庫計畫塑性混凝土標準

性質	世界大壩協會(ICOLD) 截水牆材料要求	湖山水庫工程 塑性混凝土標準
水密性	$k=10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ cm/sec}$	K 值小於 $5 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ 。
變形性	彈性模數E高於地層數倍(4~5倍)	變形模數為 $14000 \sim 41000 \text{ kg/cm}^2$
強度	單壓數 kg/cm^2 ，不可太高以免降低可變形性	強度 $14 \sim 25 \text{ kg/cm}^2$

表 2.1.1-2 湖山水庫計畫塑性混凝土配比(每立方公尺含量，kg)

材料種類	水泥	皂土	水	粗骨材	細粒料
重量比例	190kg	40kg	390k	215kg	1230kg

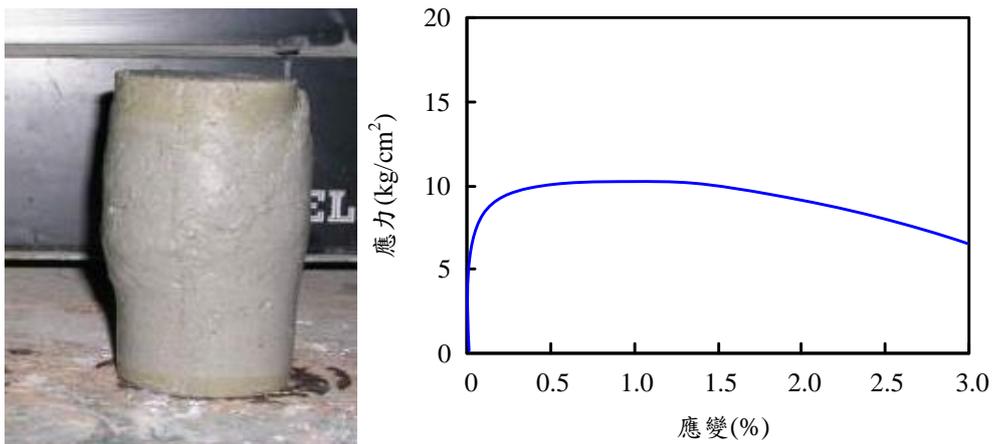


圖 2.1.1-11 塑性混凝土之應力應變關係及試體破壞形式



圖 2.1.1-12 湖山水庫之截水牆露頭

綜合以上之說明，歸納各工法適用範圍說明建議如下：

處置窖結構內外緩衝層：處置窖內側之緩衝材料之施做，可考量與處置容器週邊以澆置法一併施做，或以預製之膨潤土塊堆疊法施做。處置窖內側之緩衝材料，以預製之膨潤土塊以堆疊法施做較為合適，惟預製之膨潤土塊幾何形狀與堆疊方式須滿足坑道封填前之穩定。

處置窖頂部封層：本區域配合封閉階段之坑道回填，以壓實法施做，但由於其與坑道頂部間之淨空有限，須特別留意施工空間、夯實能量與機具間之配合。

坑道與處置窖間：本區域配合封閉階段以坑道開挖碴料進行回填。建議可添加膨潤土與坑道開挖碴料混合後，以壓實法施做，接近坑道頂部時，因施工空間受限，須配合特殊機具及工法(例如前述之旁道工法)或局部採預製堆疊法或澆置法施做。另由於概念設計採坑道底部收集滲流之方式，因此仍須保留盲溝、透水層連結至坑道底部之側溝，供做滲流水之通路。

針對概念設計中，處置坑道配置適用之工法及各工法主要控制參數及國內相關之施工經驗與技術對照比較列於表 2.1.1-3。

表 2.1.1-3 緩衝材料施工方法特性對照表

施做工法	適用範圍	主要控制參數	國內現有技術
壓實法	處置坑道與處置窖間 處置窖頂部封層	壓實特性(最佳含水量、最大乾密度等) 粒料配比	土石構造物之填築滾壓路，已有豐富經驗
預製堆疊法	處置窖結構週邊 處置容器週邊	製程壓力 製程技術 膨潤土含量	僅有小尺寸圓球狀產品，尚無大尺寸預製成品經驗
澆置法	處置坑道與處置窖間	膨潤土與水泥配 用水量	湖山水庫土石壩基礎截水牆塑性混凝土設計施工經驗

2.1.2 膨潤土料源市場分析

一、膨潤土料源國際市場概況

膨潤土資源豐富，但分佈不均衡，主要分佈在環太平洋帶、環印度洋帶和地中海-黑海帶。鈣基膨潤土分布較廣，鈉基膨潤土產量較少，且產地集中在中國大陸、美國、蘇聯、德國、義大利、日本及希臘等。據美國礦業局統計，世界膨潤土資源量為14.52億噸（不包括中國）。其中鈉基膨潤土資源略少於5億噸，主要產地為美國的懷俄明州等地，儲量6800萬噸；其他一些國家，如義大利，膨潤土已開採殆盡；日本和東南亞各國產地也很有限，每年都需大量進口原礦石。中國膨潤土資源居世界前列，礦產儲量多，主要分佈在廣西、新疆、內蒙古、江蘇、河北、湖北、山東和安徽等地。

天然白膨潤土主要產地為美國德克薩斯州和內華達州、土耳其的安卡拉地區、義大利的薩丁島和摩洛哥等、美國膨潤土開發時間長，懷俄明已有92年開採史，資源漸趨枯竭。亞洲的日本和東南亞各國產地也很有限，每年都需大量進口原礦石。

參考美國地質調查所，2002~2003年世界膨潤土主要生產國產量詳見表2.1.2-1。表中顯示，美國是最大的膨潤土生產國，其次是中國、希臘、俄羅斯、土耳其、德國和義大利。

表 2.1.2-1 全世界之膨潤土年產量(取自美國地質調查所)

國家	2002年 (萬噸)	2003年 (萬噸)	國家	2002年 (萬噸)	2003年 (萬噸)
美國	397.00	394.00	塞浦路斯	12.84	13.00
中國	214.00	172.28	阿根廷	12.00	12.84
希臘	95.00	95.00	伊朗	8.00	8.00
俄羅斯	75.00	75.00	摩洛哥	5.88	7.15
土耳其	55.92	60.00	埃及	5.00	5.00
德國	50.00	50.00	土庫曼斯坦	5.00	5.00
義大利	50.00	50.00	馬其頓	3.00	3.00
日本	40.00	40.00	匈牙利	2.80	3.00
墨西哥	43.29	42.50	巴基斯坦	2.80	2.80
烏克蘭	30.00	30.00	波蘭	2.62	2.70
保加利亞	21.10	25.00	阿爾及利亞	2.72	2.53

國家	2002 年 (萬噸)	2003 年 (萬噸)	國家	2002 年 (萬噸)	2003 年 (萬噸)
澳大利亞	20.00	20.00	羅馬尼亞	1.54	1.50
巴西	17.49	17.50	秘魯	2.08	1.49
捷克	17.40	17.50	克羅地亞	1.10	1.10
西班牙	15.00	15.00	其他國家	13.57	4.88
南非	21.85	14.51	總計	1244.00	1192.28

二、膨潤土料源國內分布概況

台灣地區膨潤土之礦脈分佈包括澎湖群島玄武岩中之蒙脫石及臺灣海岸山脈等，根據國內之相關研究顯示：含蒙脫石之黏土區主要分佈東部海岸山脈，而位於台東縣樟原鄉之日興礦業公司是目前已進行商業開採之膨潤土礦場，根據相關文獻該礦區之膨潤土蘊藏量初估達 320 萬噸。

台東樟原地區膨潤土，因係由日興礦業公司取得礦權故又名日興土。該黏土礦體的形成是由於斷層作用促使破碎安山岩質集塊岩經地下水長期之熱作用而成。其主要礦物過去一直被認為是以蒙脫石為主的變質礦物群，後來有學者研究認為是以鋁膨潤石為主。其他共生礦物有伊利石-膨潤石族交錯層、綠泥石、高嶺石、粉晶狀黃鐵礦、石英、白砂石、方解石、白雲母、斜長石及石膏等。本礦體包含鈣型及鈉型膨潤土，並有局部高嶺石化現象。由於日興土的可交換陽離子以 Ca^{2+} 為主，推斷日興土應為鈣基膨潤土。

三、膨潤土潛在料源評估

考量地緣關係、膨潤土產量、品質及國際上緩衝材實際應用之現況，對於我國未來低放射性廢棄物處置場之緩衝回填材料之潛在料源及產品，包括台東樟原膨潤土(簡稱日興土)、美國懷俄明膨潤土(簡稱BH土)及大陸高廟子膨潤土(簡稱GMZ)等，分別說明如下：

(一)台東樟原膨潤土

礦區位於花蓮縣與台東縣交界之台東樟原地區，屬大港口至長濱間山脈東側(圖 2.1.2-1)。樟原附近出露的地層包括第三紀和第四紀地層，主要是泥岩或頁岩與砂岩互層(大港口層)以及安山岩(都巒山層)。

樟原膨潤土礦床位於大峰溪上游，大港口逆斷層通過處，斷層東側的都巒山層掩覆於大港口層之上，礦床呈礦於都巒山層之破碎安山岩。樟原膨潤土礦呈厚脈狀約10m寬，20-45m深，其礦物成分以15Å與12Å膨潤石為主，15Å膨潤石經鑑定為鋁膨潤石(或稱貝得石，Beidellite)，12Å礦物，通稱為鈉蒙脫石。

樟原膨潤土礦的位置與地質簡圖見圖 2.1.2-2，樟原膨潤土礦床受斷層構造控制，礦床係沿著斷層帶成礦，斷層帶的安山岩經熱液滲透，並生成一個蝕變的礦物的組合體，鋁膨潤石與包括伊利石-蒙脫石，高嶺石，灰濛濛的黃鐵礦，微石英，方英石，方解石，白雲石，斜長石，貝得石，石膏等。一般而言，近地表處為酸性白土，深處則為膨潤土。膨潤土的品質大約在靠近斷層面3公尺範圍內較佳。本礦體包含鈣型及鈉型膨潤土，並有局部高嶺石化現象。

目前樟原膨潤土礦由日興公司持續開採營運中，其年銷量約2000噸，主要供應農藥載體、貓砂、OEM接地用漿材，歷年最高年產能3500噸。每年原礦開採約1-2次，每次開採約3-4

天，儲存半年生產用原料，堆置在工場西側空地。目前礦區開採範圍僅約 1 公頃。圖 2.1.2-3 為目前開採之露頭。目前開採不分品級，混同生產。原礦入庫後經初步碎礦，送至篩選機，細料送到料倉。再取料送至乾燥烤爐，以重油加熱隧道烤爐，烘乾後進料至磨粉機，由風選機，將極細料送至料倉，包裝成品。

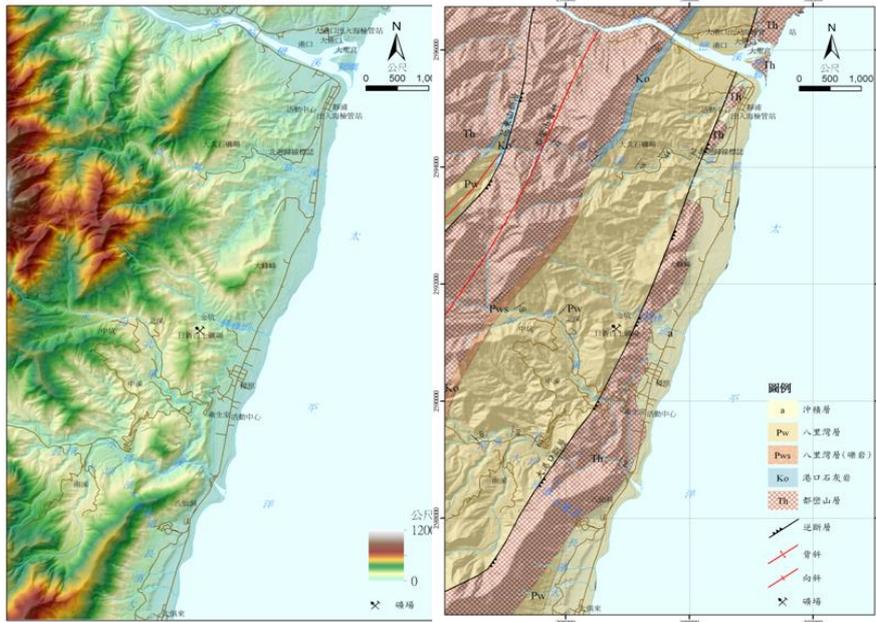


圖 2.1.2-1 樟原膨潤土礦區區域地形圖(左)及地質圖(右)

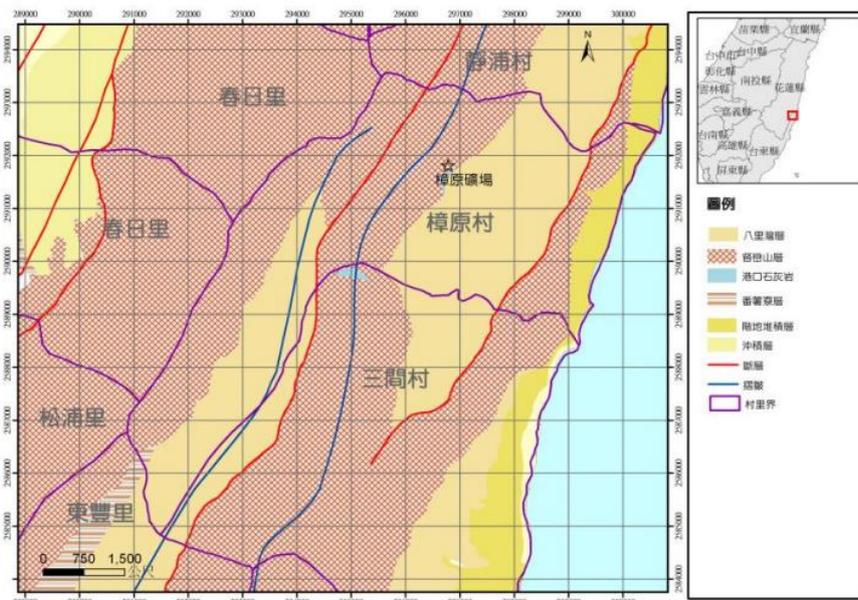


圖 2.1.2-2 台東縣樟原膨潤土礦地質簡圖



圖 2.1.2-3 台東縣樟原膨潤土開採露頭

(二)美國懷俄明膨潤土

美國懷俄明州地質歷史恆久，經由定年資料可知，基盤最古老岩層來自於約 28 億年前的前寒武紀結晶岩或變質岩，包括花崗岩或花崗片麻岩。爾後一系列板塊作用致使此區逐漸下陷，並隨著時間沉積數千公尺厚沉積岩。隨後在白堊紀及晚第三紀又先後經歷兩次造山運動(圖 2.1.2-4)，除了重新將此區由海底沉積環境抬升至表面，亦刻劃出山嶺、高原、盆地及平原等不同地貌(圖 2.1.2-5)。現今懷俄明州內可見之斷層及摺皺構造，多與此兩次造山運動有關。

膨潤土(Bentonite)最早由 Wilbur C Knight 以其出產地層 Benton Shale 命名，其出露範圍位於懷俄明州 Rock river。Benton 頁岩屬於白堊系地層，爾後經過調查，又將許多地層納入其相當地層，包括 Frontier Formation, Carlile Shale, Greenhorn Formation, Belle Fourche Shale, Mowry Shale, Aspen Shale, Muddy Sandstone, Newcastle Sandstone, Thermopolis Shale, Skull Creek Shale,以及 Bear River Formation 等等，這些白堊系沉積岩提供了全世界超過一半的膨潤土礦來源。其中，產量最豐富的地區，位於 Northern Black Hills (Colony) District, Southern Black Hills (Clay Spur) District, Kaycee District west of Kaycee,以及 Eastern Big Horn Basin 等地。

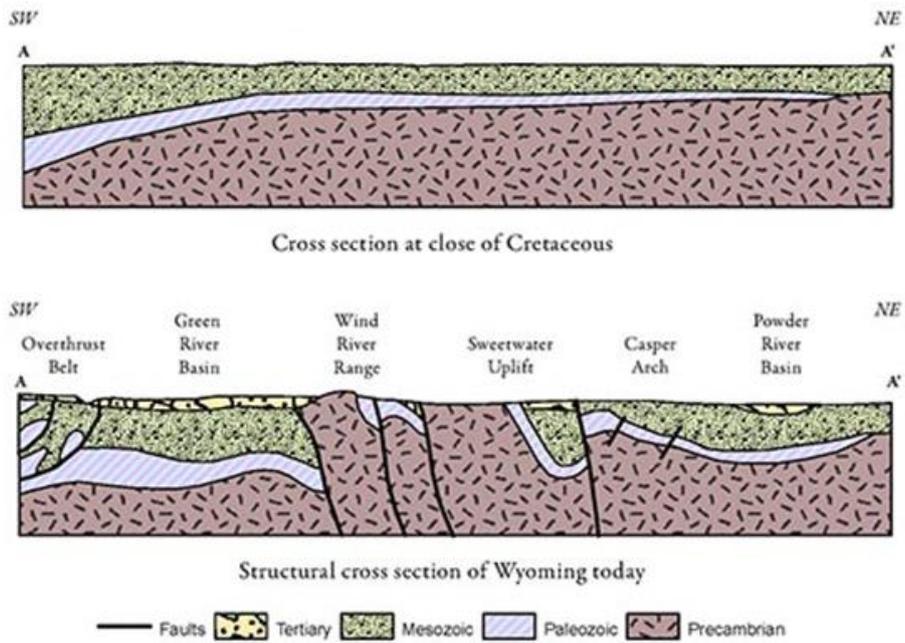


圖 2.1.2-4 美國懷俄明州造山運動前後時代地質剖面示意圖

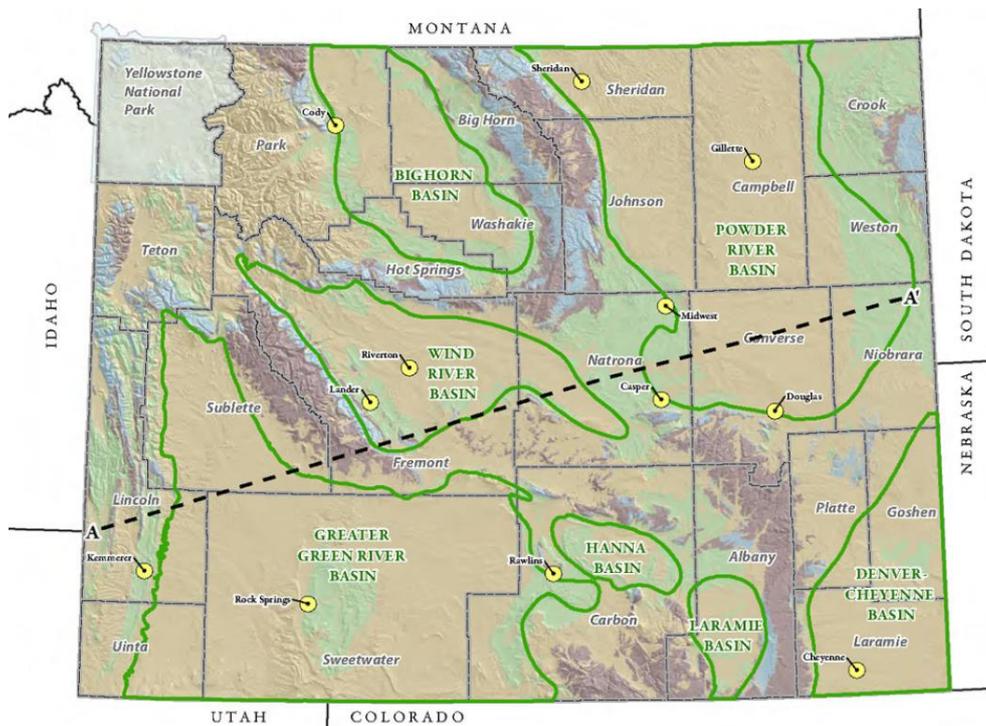


圖 2.1.2-5 美國懷俄明州現今地貌

美國懷俄明州膨潤土的礦層夾於頁岩和砂岩互層之間。礦層的厚度範圍從一小部分是 2 公分至 3.6 公尺。粉砂岩層和不純的膨潤土，高達 45 公尺厚。在大多數情況下，膨潤土礦層的

底部接觸新鮮頁岩。該頁岩較其下方之頁岩更為堅硬，上方之膨潤土形為起伏面(圖 2.1.2-6)。



圖 2.1.2-6 懷俄明州膨潤土的礦層

(三)大陸高廟子膨潤土

高廟子膨潤土礦床位於中國內蒙地區，儲量規模達 160 萬噸。高廟子膨潤土主要有鈣基膨潤土和鈉基膨潤土兩類。計畫作為緩衝回填材料用的鈉基膨潤土有一定的埋深，開採成本較高。其中鈉基膨潤土為 120 萬噸。其蒙脫石含量、陽離子交換能力、膠質價等性能參數頗佳。

礦區處於乾旱地區，地質構造和水文地質條件單純，工程地質條件複雜程度屬中等，開採難度不大。該區居民很少，絕大部分是荒漠地區，地面上農田、樹林稀少。

整體而言美國懷俄明膨潤土(商業型號 MX-80)及中國大陸高廟子(Gaomiaozi, GMZ)膨潤土，為國際間目前被評價為量、質較佳的緩衝回填材料。其中 MX-80 為瑞典、芬蘭採用之主要膨潤土緩衝回填材料。日興土則為國內唯一量產之本土膨潤土。表 2.1.2-2 為 MX-80 膨潤土、高廟子膨潤土及日興土之基本物性比較，表 2.1.2-3 為其主要化學成份比較。

表 2.1.2-2 MX-80、高廟子及日興土基本物性

性質	日興土	BH 土(MX-80)	GMZ
比重	2.67	2.69	2.725
砂質含量>74 μ m	28	2	-
粉土含量 2-74 μ m	46	33	-
黏土含量<2 μ m	26	65	-
塑性限度	18	54	99
液性限度	67	434	41
塑性指數	49	330	58
活度	1.88	2.85	-

表 2.1.2-3 MX-80、高廟子及日興土主要化學成份

成份	日興土	BH 土(MX-80)	GMZ
SiO ₂	55.43	64.55	76.57
Al ₂ O ₃	20.11	17.53	12.67
Fe ₂ O ₃	5.54	3.85	2.56
CaO	2.55	1.42	2.21
MgO	1.71	1.31	4.29
Na ₂ O	0.72	2.254	0.287
K ₂ O	1.35	0.4	0.65
SO ₃	2.5	0.3	0.046

2.1.3 障壁緩衝回填材料性能測試

本計畫利用懷俄明膨潤土、日興土依不同重量比例與國內兩處建議候選場址之岩體進行混合以製成工程障壁緩衝回填材料試體，再探討各種混拌比例下之單向度膨脹試驗，並依膨脹試驗之結果選取合宜比例進行膨脹壓力試驗與滲透係數試驗，最後建立國內障壁緩衝回填材料之配比性能資料庫。

緩衝回填材料中因砂的加入將使熱傳導性能和強度增加，但同時導致自癒性減弱、阻水性能降低；因此，砂與膨潤土於緩衝回填材中之使用要選擇合適的配比，使其在增加熱傳導性

能和強度的同時，仍滿足滲透性能要求，並維持適當的膨脹力。本計畫針對各試體規劃 10%、30%、50%、75%與 100%等五種不同膨潤土含量，以透過試驗完整描述膨潤土用量對於緩衝回填材之影響；此外，夯實應力之不同，將影響緩衝回填材中膨潤土之體積佔有比例及其膨脹性能，因此本計畫亦將 5 種不同之夯實應力納為配比參數，包括 100KPa、500KPa、1MPa、5MPa、10MPa 等，而各配比代號與表示方式如下表 2.1.3-1、表 2.1.3-2 所示。以下將就不同試驗結果綜合說明如后：

表 2.1.3-1 不同膨潤土與岩體混合料之代號

國家	日興土(Z)	懷俄明膨潤土(B)	混合土(M) (50%Z+50%B)
台東達仁硬頁岩(T)	TZ	TB	TM
金門花崗岩(K)	KZ	KB	KM

表 2.1.3-2 緩衝回填材配比編號表(以達仁硬頁岩與懷俄明膨潤土 BH 為例)

夯實應力	膨潤土含量				
	10%	30%	50%	75%	100%
100 KPa	10TB100K	30TB100K	50TB100K	75TB100K	100B100K
500 KPa	10TB500K	30TB500K	50TB500K	75TB500K	100B500K
1MPa	10TB1M	30TB1M	50TB1M	75TB1M	100B1M
5MPa	10TB5M	30TB5M	50TB5M	75TB5M	100B5M
10MPa	10TB10M	30TB10M	50TB10M	75TB10M	100B10M

一、水力傳導試驗

有關膨潤土回填材之水力傳導係數試驗為依據土壤滲透試驗之方法進行，其可分為定水頭試驗與變水頭試驗兩種，但由於膨潤土回填材之需求水力傳導係數較一般砂土為小，可能達 $10^{-7} \sim 10^{-12} \text{m/s}$ ，因此國外文獻多建議以 ASTM D5856 之變水頭試驗方法進行。本計畫依所選定之配比進行水力傳導試驗之結果彙整如表 2.1.3-3~表 2.1.3-5。表中顯示，若以日興土作為緩衝回填材之膨潤土材料，則其水力傳導之性能需求介於 $3 \times 10^{-9} \sim 5 \times 10^{-10}$

cm/sec 間；在 BH 土部分，其 30%~50% 取代量下之水力傳導介於 4×10^{-10} ~ 1.86×10^{-10} cm/sec 間，在混合土部分，其 50%~75% 取代量下之水力傳導介於 9×10^{-10} ~ 5×10^{-10} cm/sec 間，依膨潤土含量與夯實能量而變化，因此未來工程即可依需求選定合宜之緩衝回填材料配比作應用。

表 2.1.3-3 日興土於不同條件下之水力傳導係數

配比	傳導係數 (cm/s)	配比	傳導係數 (cm/s)	配比	傳導係數 (cm/s)
100Z1M	2.65E-09	75KZ1M	3.08E-09	75TZ1M	2.78E-09
100Z5M	6.12E-10	75KZ5M	1.67E-09	75TZ5M	8.35E-10
100Z10M	4.98E-10	75KZ10M	6.54E-10	75TZ10M	5.87E-10

表 2.1.3-4 BH 土於不同條件下之水力傳導係數

配比	傳導係數 (cm/s)	配比	傳導係數 (cm/s)
30KB500K	4.87E-10	30TB500K	4.87E-10
30KB1M	3.88E-10	30TB1M	3.62E-10
30KB5M	3.01E-10	30TB5M	3.12E-10
50KB500K	2.87E-10	50TB500K	2.67E-10
50KB1M	2.66E-10	50TB1M	2.68E-10
50KB5M	1.95E-10	50TB5M	1.86E-10

表 2.1.3-5 混合土於不同條件下之水力傳導係數

配比	傳導係數 (cm/s)	配比	傳導係數 (cm/s)
50KM500K	9.83E-10	50TM500K	9.57E-10
50KMB1M	8.45E-10	50TMB1M	8.21E-10
30KMB5M	6.75E-10	30TMB5M	7.88E-10
75KM500K	7.94E-10	75TM500K	7.34E-10
75KM1M	6.45E-10	75TM1M	6.07E-10
75KM5M	6.08E-10	75TM5M	5.94E-10

二、抗壓強度

緩衝回填材之抗壓強度試驗同樣依據 ASTM D4832 的方法，進行緩衝回填材圓柱試體之抗壓試驗，試驗之結果如表 2.1.3-6~2.1.3-8，而由本計畫之試驗結果可知，各緩衝回填材料之配比，其抗壓強度皆隨壓密能量之增加而提升，且乾單位重也將同時提升；而由實驗結果可知各配比抗壓強度與乾單位重之關係：日興土配比之抗壓強度與乾單位重之關係約略呈正向線性趨勢，至於 BH 土與混合土之抗壓強度與乾單位重之關係則呈正向指數成長趨勢。

表 2.1.3-6 日興土於不同條件下之抗壓強度

配比	乾單位重(t/m ³)	抗壓強度(kgf/cm ²)
100Z1M	1.43	2.24
100Z5M	1.67	7.83
100Z10M	1.90	15.76
75KZ1M	1.55	5.32
75KZ5M	1.80	15.77
75KZ10M	2.00	28.45
75TZ1M	1.50	4.97
75TZ5M	1.75	16.32
75TZ10M	1.95	28.48

表 2.1.3-7 BH 土於不同條件下之抗壓強度

配比	乾單位重(t/m ³)	抗壓強度(kgf/cm ²)
30KB500K	1.39	1.07
30KB1M	1.47	2.51
30KB5M	1.73	10.87
50KB500K	1.31	1.57
50KB1M	1.45	2.47
50KB5M	1.7	14.83
30TB500K	1.41	1.24
30TB1M	1.49	2.76
30TB5M	1.74	10.32
50TB500K	1.32	1.33
50TB1M	1.46	2.54
50TB5M	1.73	13.27

表 2.1.3-8 混合土於不同條件下之抗壓強度

配比	乾單位重(t/m ³)	抗壓強度(kgf/cm ²)
50KM500K	1.43	1.37
50KMB1M	1.55	2.65
50KMB5M	1.78	11.23
75KM500K	1.33	1.25
75KM1M	1.43	2.34
75KM5M	1.65	12.97
50TM500K	1.48	1.29
50TMB1M	1.57	2.75
50TMB5M	1.79	10.98
75TM500K	1.35	1.07
75TM1M	1.45	2.26
75TM5M	1.66	12.84

三、彈性模數

緩衝回填材之彈性模數試驗則是在進行緩衝回填材圓柱試體抗壓試驗之同時，利用變位計或應變計量測試體在抗壓過程中，其軸向之變位率，以配合抗壓應力求得應力應變曲線中之彈性模數值，而本計試驗之結果如表 2.1.3-9~表 2.1.3-11，而由本計畫之試驗結果可知，各緩衝回填材料之配比，其彈性模數與抗壓強度之趨勢相似，皆隨壓密能量之增加而提升，且乾單位重也將同時提升；而由實驗結果可知各配比彈性模數與乾單位重之關係：無論膨脹土使用種類為何，彈性模數與乾單位重之關係則呈正向成長趨勢。

表 2.1.3-9 日興土不同配比之彈性模數

配比	乾單位重(t/m ³)	彈性模數(kgf/cm ²)
100Z1M	1.43	236
100Z5M	1.67	772
100Z10M	1.90	1498
75KZ1M	1.55	503
75KZ5M	1.80	1512
75KZ10M	2.00	2874
75TZ1M	1.50	437
75TZ5M	1.75	1623
75TZ10M	1.95	2981

表 2.1.3-10 BH 土不同配比之彈性模數

配比	乾單位重(t/m ³)	彈性模數(kgf/cm ²)
30KB500K	1.39	128
30KB1M	1.47	243
30KB5M	1.73	1112
50KB500K	1.31	176
50KB1M	1.45	254
50KB5M	1.7	1429
30TB500K	1.41	114
30TB1M	1.49	256
30TB5M	1.74	1081
50TB500K	1.32	139
50TB1M	1.46	233
50TB5M	1.73	1349

表 2.1.3-11 混合土不同配比之彈性模數

配比	乾單位重(t/m ³)	彈性模數(kgf/cm ²)
50KM500K	1.43	145
50KMB1M	1.55	232
50KMB5M	1.78	1179
75KM500K	1.33	112
75KM1M	1.43	266
75KM5M	1.65	1321
50TM500K	1.48	145
50TMB1M	1.57	298
50TMB5M	1.79	1034
75TM500K	1.35	121
75TM1M	1.45	252
75TM5M	1.66	1234

四、性能試驗結果綜合評估

就日興土與 BH 土之土壤基本特性而言，二種膨潤土材料之活性(Ac)皆大於 1.25，因此在黏土分類上屬活潑性黏土，具有遇水易生回脹之特性，但由於礦物組成之比例與可活動離子不同，造就日興土之膨脹性低於美國懷俄明膨潤土(BH 土)，而若以國外應用緩衝回填材之膨潤土品質要求，日興土將無法滿足其品質，但如果僅以膨脹壓力、滲透係數等性能作評估，且膨脹壓力之需求不大，則日興土或許可有其應用之機會。

就膨脹壓力與水力傳導係數而言，透過本計畫之束制膨脹壓力試驗與水力傳導係數試驗已可界定，如圖 2.1.3-1 ~圖 2.1.3-3 。故未來在配合核種遷移分析之結果指定緩衝回填材料之需求性能，則可進一步挑選合宜之配比供工程中之使用。

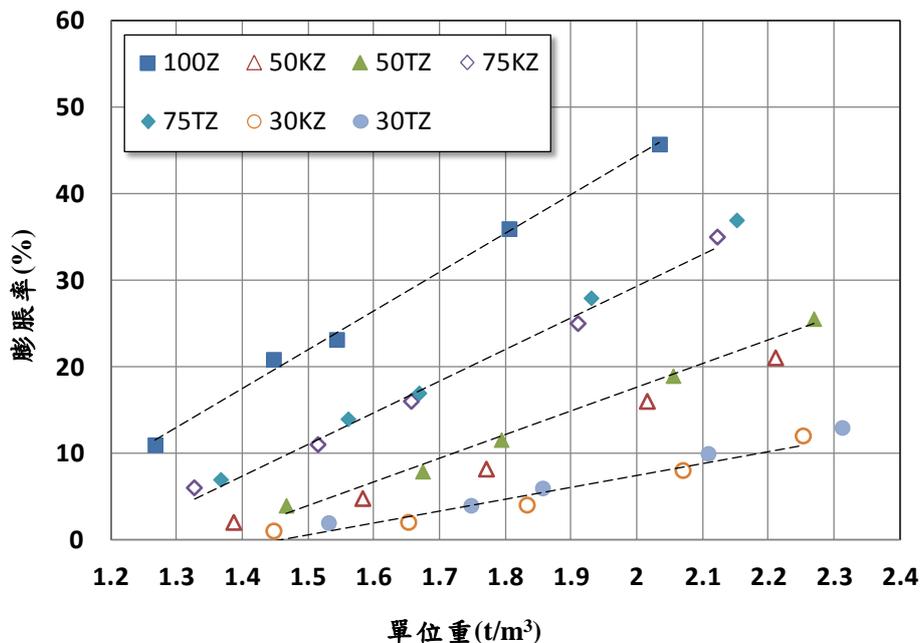


圖 2.1.3-1 日興土配比之性能分布區間

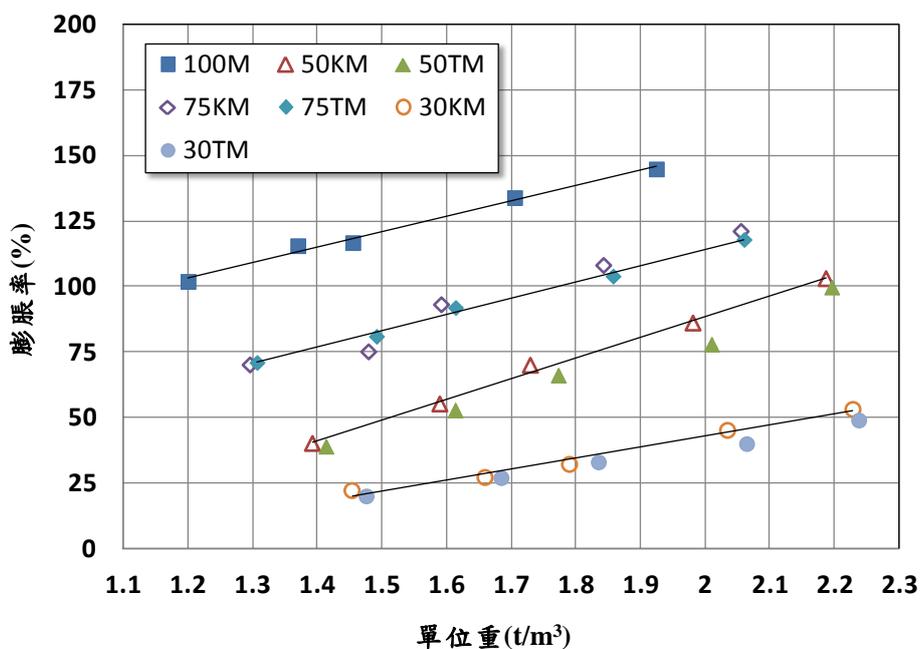


圖 2.1.3-2 混合土配比之性能分布區間

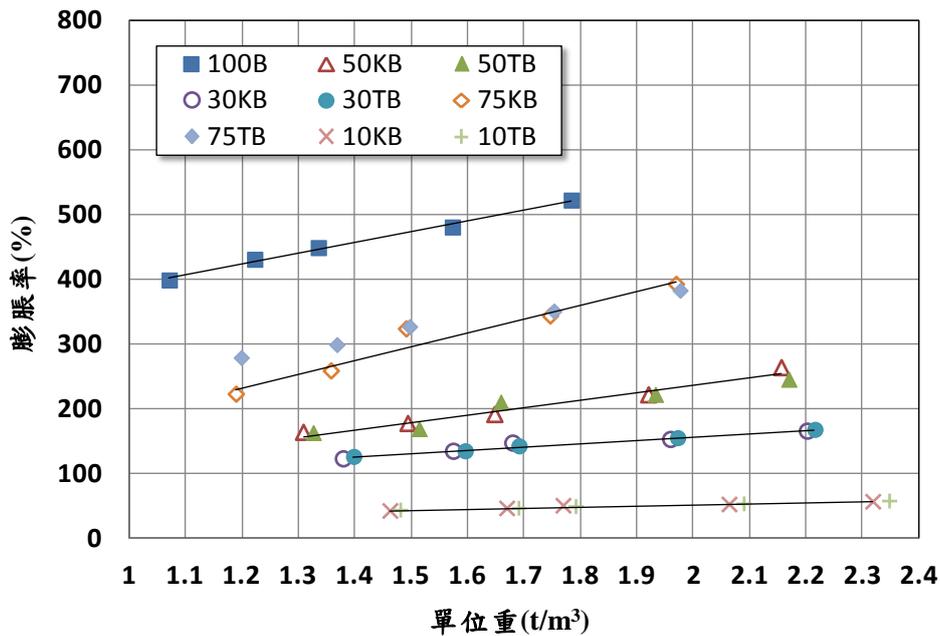


圖 2.1.3-3 BH 土配比之性能分布區間

五、緩衝回填材各配比間性質之交互關係

下圖為本研究進行束制膨脹壓力試驗之所有組別在不同初始乾單位重下最大膨脹壓力之表現圖，從圖中可以發現以下數個交互關係：

- (一)束制膨脹壓力之行為與單向度膨脹率試驗結果相仿，在膨脹壓力表現上，鈉系之懷俄明 BH 膨潤土明顯大於鈣系之日興土，根據文獻指出影響膨脹壓力表現最大之因素為膨潤土中的蒙脫石含量，而依據本研究進行之蒙脫石含量滴定試驗結果，懷俄明膨潤土之蒙脫石含量為 71.46%，混合土為 49.89%，日興土僅為 25.08%，因此可與本節所得之結果相互映證。
- (二)由試驗結果可以看出，不論膨潤土是何種重量添加比例、使用何種膨潤土、或添加何種回填岩體，如欲增加緩衝回填材的膨脹壓力以達到國外文獻之規定，除了提升緩衝回填材中的膨潤土的添加比例外，提升夯實壓力(亦即提升緩衝回填材乾單位重)也可以相當有效的提升緩衝回填材的膨脹性能，且由本研究之

試驗結果可看出，隨著試體之初始乾單位重增加，膨脹壓力亦會呈現指數增加，與文獻結果相符。

(三)從單向度膨脹率試驗結果中可發現，混合土在重量取代 100% 時之最大膨脹率表現，僅可與懷俄明土重量取代 30% 時表現相近，且在日興土重量取代 100% 時之最大膨脹率表現比懷俄明土重量取代 10% 時還低，但在膨脹壓力試驗結果中可發現 100% 混合土在最大膨脹壓力表現上已可大。於懷俄明土重量取代 50% 時之最大膨脹壓力，且在日興土重量取代 100% 時之最大膨脹壓力表現可與懷俄明土重量取代 30% 時表現相近。由此可以推論，日興土雖在膨脹率表現上明顯不如懷俄明土，且最大膨脹率相較之下極小，但在膨脹壓力表現上，日興土雖同樣不如懷俄明土，卻仍提供相當程度之膨脹壓力，因此如果未來僅針對膨脹壓力或水力傳導度作為放射性廢棄物最終處置場性能評估依據，純日興土或許仍有其應用之機會，但其品質之穩定性則需再酌以考量。

(四)透過圖 2.1.3-4~圖 2.1.3-5 之彙整，則當緩衝回填材之膨潤土比例確定，且透過量測計算得其壓密過之乾單位重後，將可利用下述兩圖以圖解之方式獲得該緩衝回填材料之最大膨脹壓力與相應之水力傳導係數；亦可利用兩圖推估在某一配比下，其欲達到膨脹壓力或傳導係數之乾單位重，再藉由壓密製程之反覆調整以獲得合宜之夯實壓力值。

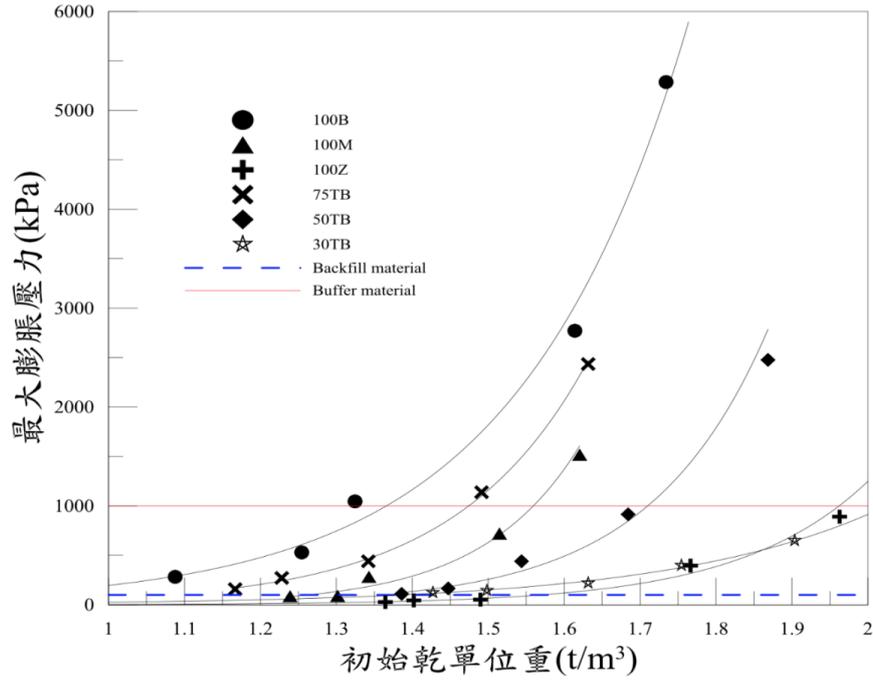


圖 2.1.3-4 各組別之束制膨脹壓力試驗結果比較圖

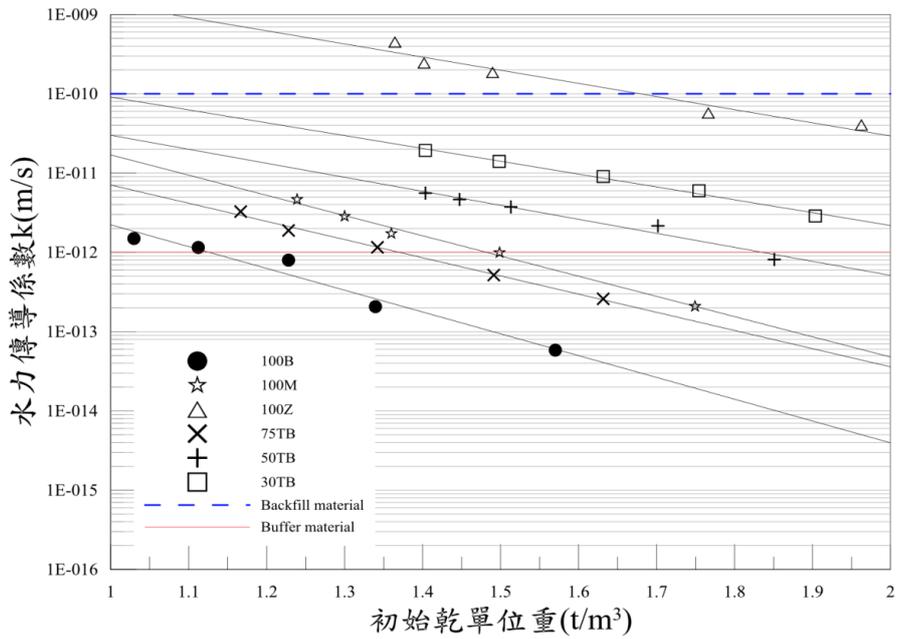


圖 2.1.3-5 各組別之水力傳導係數試驗結果比較圖

2.1.4 膨潤土與混合粒料之耐久性試驗

一、膨潤土與混合粒耐久性試驗規劃

基於我國的自然環境，對於低放射性廢棄物最終處置工程障壁之耐久性評估，應將氯化鈉的影響納入考量。因此除研究相關應用材料外，從圖 2.1.4-1 有關 MX-80 膨潤土之研究資料可知，該膨潤土在低壓密程度時(Dry density=500kg/m³)，其膨潤土膨脹性能隨氯化鈉溶液濃度之增加而降低(0.0M→0.07MPa，3.0M→0.01MPa)，但若膨潤土提升其壓密程度時(Dry density=1700kg/m³)，則其膨脹性能受氯化鈉溶液濃度之影響程度則不明顯。另一國外研究使用人工配製的類海水作為滲透流體進行滲透試驗，研究了不同滲透液對膨潤土和膨潤土/砂混合物滲透性的影響；研究結果(圖 2.1.4-2、圖 2.1.4-3)，表明相同條件下，海水試驗得到的水力傳導係數比蒸餾水得到的水力傳導係數為大，這可能是因為人工海水離子濃度比蒸餾水高，特別是二價陽離子在某種程度上抑制了膨潤土中蒙脫石礦物晶格的膨脹，試樣表現得更為密實而形成的。但此現象透過混合物乾密度之提升，則回脹性能受海水影響之程度則可大幅度之降低。

由此可知，在考量低放射性廢棄物最終處置工程障壁緩衝回填材料配比之耐久性時，氯化鈉之影響將是一重要之研究議題，且國內目前設定之兩個低放射性廢棄物最終處置地點皆有碰觸鹽化地下水之可能性，因此其配比在如是之環境下是否仍可達到預期之水流阻隔性能，更應於配比研究時作深入之探討與評估；故本計畫後續將依上述選定配比，持續進行其浸置於海水中之膨脹行為試驗，以評估量化緩衝回填材因海水而降低之膨脹量，並找尋可置放於海水中且性能合宜之配比。

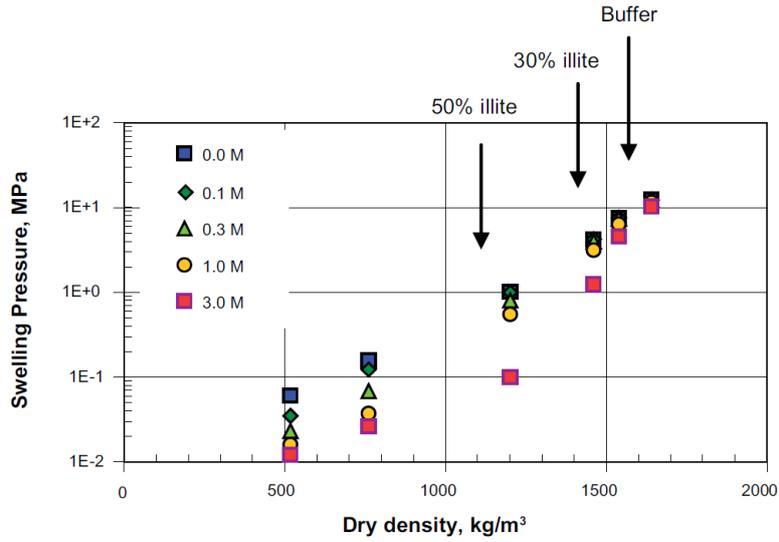


圖 2.1.4-1 膨潤土在不同濃度氯化鈉溶液中之膨脹能量

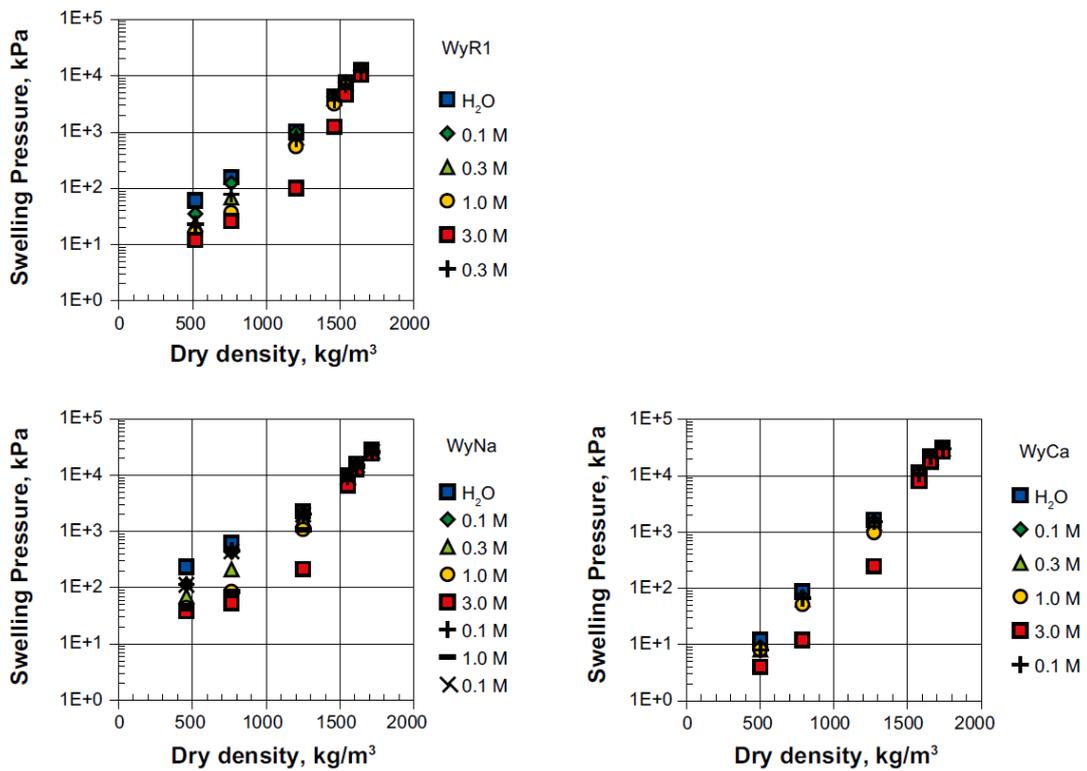


圖 2.1.4-2 不同乾密度混合料於不同濃度 NaCl 下之回脹性能

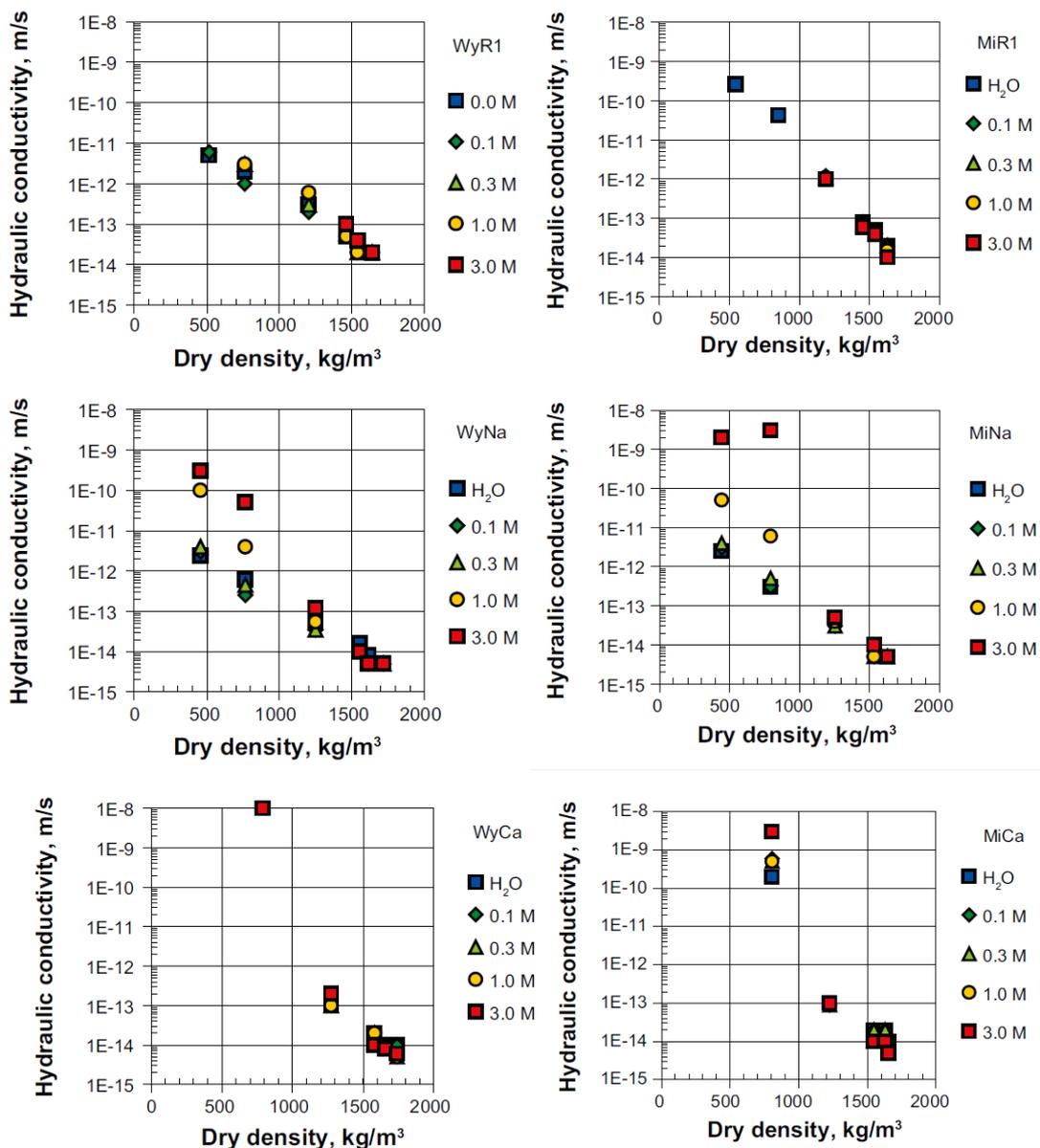


圖 2.1.4-3 不同乾密度混合料於不同濃度 NaCl 下之滲透性能

此外，水泥材料與膨潤土間之反應亦是膨潤土緩衝回填材料在耐久性部分被探討之議題，其目前主要認為水泥之高鹼性環境將使膨潤土中之蒙脫土溶解，而影響膨潤土回填材之孔隙率、膨脹性能、水力傳導係數及吸附水之能力，間接影響回填層阻水之效能及混凝土中鈣析出後，其障壁材料之結構穩定性，不過就目前之研究指出，水泥與膨潤土界面間之交互作用為一耦合、非線性之系統(圖 2.1.4-4)，以短期之研究資料並無法明確描述此複

雜之反應機制，因此其影響程度仍無定見。不過有一看法則是大家所認同的，即水泥之高鹼性環境是促使此反應機制之催化劑，因此若可降低水泥之鹼性或使用中性的水泥，則此水泥-膨潤土界面反應之速率將減緩，對於回填層之耐久性預期將可有一定程度之提升；故本計畫亦將以不同 pH 之環境探討緩衝回填材膨脹量之影響，並找尋性能影響低之合宜配比。

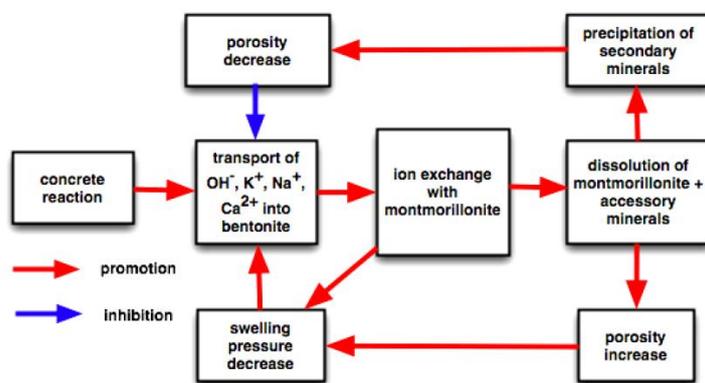


圖 2.1.4-4 水泥與膨潤土界面間之交互作用為一耦合、非線性之系統

二、膨潤土於人工海水中之行為

本研究計畫進行膨潤土於人工海水中之性能試驗係透過自由膨脹量之量測、最大膨脹壓力之量測與滲透係數之測試，來評估配比應用於緩衝材、回填材之可行性；而人工海水的部分，為參考 ASTM D1141 Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water 來進行配製，其使用之化學藥品與用量如表 2.1.4-1 所列，各配比皆採用相同濃度之人工海水進行試驗。

表 2.1.4-1 人工海水配製材料與用量

藥品名稱		用量
溶液 1 (200ml)	MgCl ₂ •6H ₂ O 含水氯化鎂	3889.0 g (= 555.6 g/L)
	CaCl ₂ (anhydrous) 無水氯化鈣	405.6 g (= 57.9 g/L)
	SrCl ₂ •6H ₂ O 含水氯化銦	14.8 g (= 2.1 g/L)
溶液 2 (100ml)	KCl 氯化鉀	486.2 g (= 69.5 g/L)
	NaHCO ₃ 碳酸氫鈉	140.7 g (= 20.1 g/L)
	KBr 溴化鉀	70.4 g (= 10.0 g/L)
	H ₃ BO ₃ 硼酸	19.0 g (= 2.7 g/L)
	NaF 氟化鈉	2.1 g (= 0.3 g/L)
溶液 3	sodium chloride 氯化鈉	245.34 g/8-9L)
	anhydrous sodium sulfate 無水硫酸鈉	40.94 g/8-9L)
	sodium hydroxide solution 氫氧化鈉溶液	0.1N(調整溶液 pH)

表 2.1.4-2 為緩衝回填材料於人工海水與純水中之性能試驗結果，由試驗結果可知人工海水對於乾單位重較低之組別，其膨脹行為將有大幅度之影響，以 30KB500K 配比組為例，其在人工海水下之最大自由膨脹量為 27%，僅為純水環境(最大自由膨脹量 133%)下之 20%，且最大膨脹壓力亦僅為純水之 8.4%、滲透係數提高 10 倍以上；但若將試驗組別針對乾單位重較大之配比，如 100B5M，則其最大自由膨脹量、最大膨脹壓力與滲透係數等性能仍有折減之情形，但影響程度則較小，符合國外文獻中，利用單位重之提升來減低環境對緩衝回填材之性能影響。

另外就海水之影響對配比性能與規範需求之符合度作一比較可知，在回填材配比部分(30KB500K、50KB500K 與 75KZ500K)，此三組配比在人工海水之浸置下，其最大膨脹壓力與滲透係數皆已無法達到 0.1MPa 與 1×10^{-10} m/s 之規範要求性能，因此後續再選擇 50KB1M 之配比作為回填材之補充試驗組，而由該組之試驗結果可知，其無論於純水環境或人工海水環境，皆具有符合回填材該有之阻水性能，故建議未來可依此配比作為工程設計之考量。至於緩衝材配比部分(50KB5M、75KB5M 與 100B5M)，其在人工海水中之阻水性能同樣有折減之趨勢，但影響程度則較低，不過在考量緩衝材於多重障壁中功能之重要性，因此建議以 100B5M 作為未來工程設計之參考配比。

表 2.1.4-2 緩衝回填材於人工海水與純水中之性能比較

配比編號	乾單位重 (t/m ³)	最大 自由膨脹量 (%)	最大 膨脹壓力 (kPa)	滲透係數 (m/s)	備註
30KB500K	1.33	133	75.68	2.3x10 ⁻¹⁰	純水
	1.32	27	6.42	8.6x10 ⁻⁹	人工海水
50KB500K	1.39	185	110.08	6.1x10 ⁻¹¹	純水
	1.39	45	15.73	4.3x10 ⁻¹⁰	人工海水
75KZ500K	1.42	15	20.23	2.8x10 ⁻⁹	純水
	1.44	10	16.28	8.8x10 ⁻⁹	人工海水
50KB5M	1.80	217	915.05	1.3x10 ⁻¹¹	純水
	1.78	146	343.77	2.5x10 ⁻¹⁰	人工海水
75KB5M	1.67	357	1138.53	2.3x10 ⁻¹²	純水
	1.66	282	808.16	5.2x10 ⁻¹¹	人工海水
100B5M	1.61	526	2771.15	5.1x10 ⁻¹³	純水
	1.61	454	2393.44	9.4x10 ⁻¹³	人工海水
50KB1M	1.47	223	185.34	4.3x10 ⁻¹¹	純水
	1.49	126	116.45	8.7x10 ⁻¹¹	人工海水

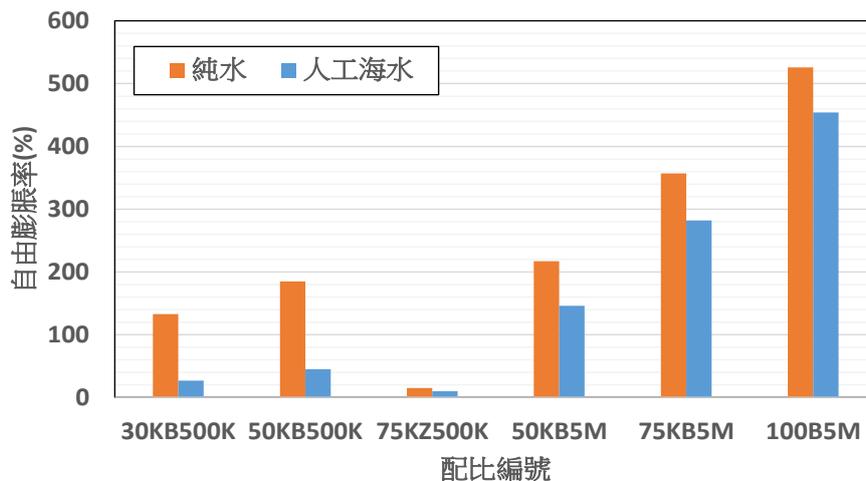


圖 2.1.4-5 不同緩衝回填材配比於純水與人工海水中自由膨脹行為

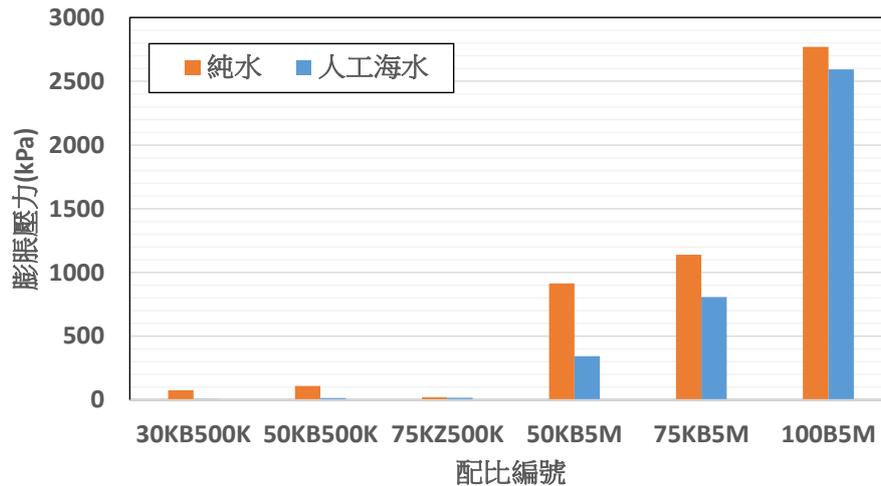


圖 2.1.4-6 不同緩衝回填材配比於純水與人工海水中膨脹壓力行為

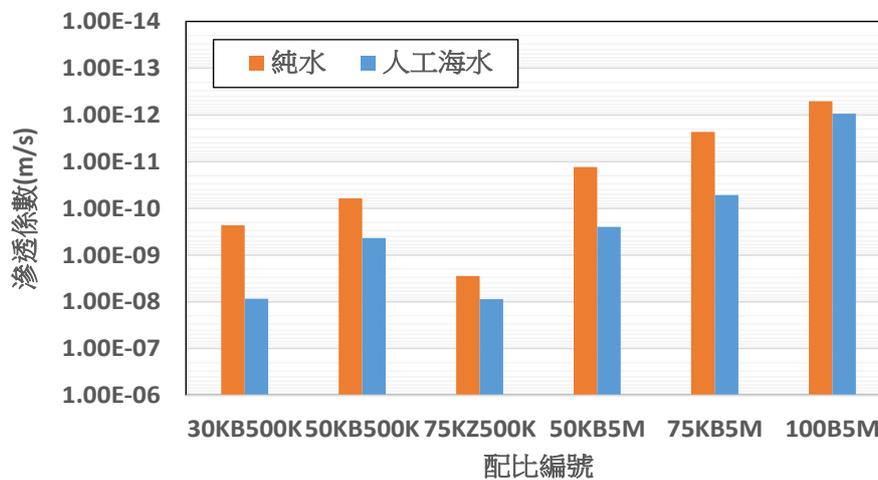


圖 2.1.4-7 不同緩衝回填材配比於純水與人工海水中滲透係數行為
三、膨潤土於硫酸溶液中之行為

表 2.1.4-3 為緩衝回填材料於 pH=3 之硫酸溶液與純水中之性能試驗結果，由試驗結果可知 pH=3 之硫酸溶液對於乾單位重較低之組別，其膨脹行為亦有明顯之影響，以 30KB500K 配比組為例，其在 pH=3 之硫酸溶液下之最大自由膨脹量為 66%，僅為純水環境(最大自由膨脹量 133%)下之 50%，且最大膨脹壓力亦僅為純水之 63%、滲透係數提高 10 倍以上；但若將試驗組別針對乾單位重較大之配比，如 100B5M，則其最大自由膨脹量、最大膨脹壓力與滲透係數等性能仍有折減之情形，但影響程度則較小；因此顯示 pH=3 之硫酸溶液與人工海水一樣，具有影響緩衝回填

材阻水性能之可能性，故未來若場址地區具有硫磺溫泉之地區，則應利用單位重之提升來減低環境對緩衝回填材之性能影響。

另外就 pH=3 硫酸溶液之影響對配比性能與規範需求之符合度作一比較可知，在回填材配比部分(30KB500K、50KB500K 與 75KZ500K)，除 50KB500K 配比外，其餘兩組配比在 pH=3 硫酸溶液之浸置下，其最大膨脹壓力與滲透係數皆無法達到 0.1MPa 與 $1 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 之規範要求性能，而 50KB500K 配比則無法達 0.1MPa 之最大膨脹壓力，但可符合 $1 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 之規範要求性能，不過在安全性之考量下，後續仍選擇 50KB1M 之配比作為回填材之補充試驗組，而由該組之試驗結果可知，其無論於純水環境或 pH=3 硫酸溶液環境，皆具有符合回填材該有之阻水性能，故建議未來可依此配比作為工程設計之考量。至於緩衝材配比部分(50KB5M、75KB5M 與 100B5M)，其在 pH=3 硫酸溶液中之阻水性能同樣有折減之趨勢，但影響程度則較低，不過在考量緩衝材於多重障壁中功能之重要性，因此建議以 100B5M 作為未來工程設計之參考配比。

表 2.1.4-3 緩衝回填材於酸液與純水中之性能比較

配比編號	乾單位重 (t/m ³)	最大 自由膨脹量 (%)	最大 膨脹壓力 (kPa)	滲透係數 (m/s)	備註
30KB500K	1.33	133	75.68	2.3×10^{-10}	純水
	1.32	66	47.84	4.1×10^{-9}	pH 3
50KB500K	1.39	185	110.08	6.1×10^{-11}	純水
	1.39	83	88.45	9.6×10^{-11}	pH 3
75KZ500K	1.42	15	20.23	2.8×10^{-9}	純水
	1.44	12	17.35	5.8×10^{-9}	pH 3
50KB5M	1.80	217	915.05	1.3×10^{-11}	純水
	1.78	187	786.23	7.4×10^{-11}	pH 3
75KB5M	1.67	357	1138.53	2.3×10^{-12}	純水
	1.66	333	1008.12	8.2×10^{-12}	pH 3
100B5M	1.61	526	2771.15	5.1×10^{-13}	純水
	1.61	489	2658.21	7.2×10^{-13}	pH 3
50KB1M	1.47	223	185.34	4.3×10^{-11}	純水
	1.49	189	142.11	6.2×10^{-11}	pH 3

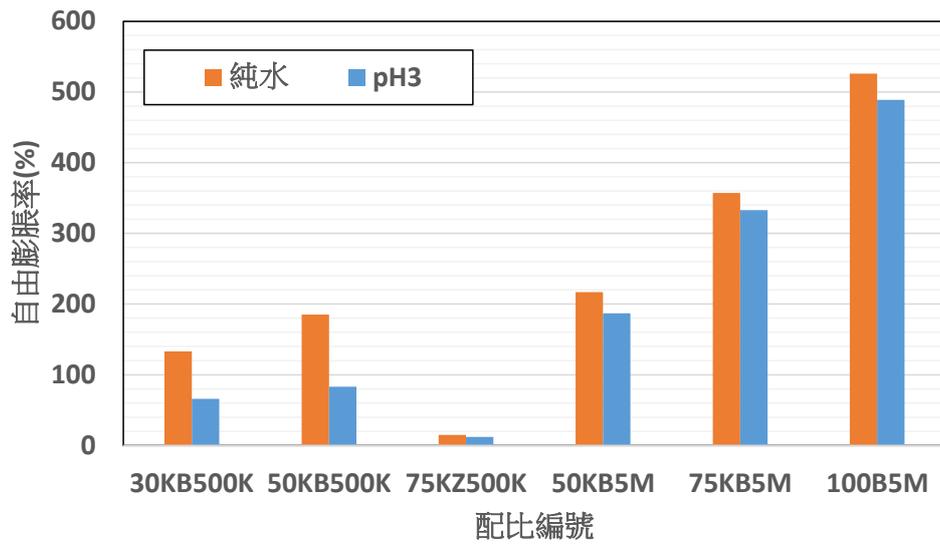


圖 2.1.4-8 不同緩衝回填材配比於純水與硫酸溶液中自由膨脹行為

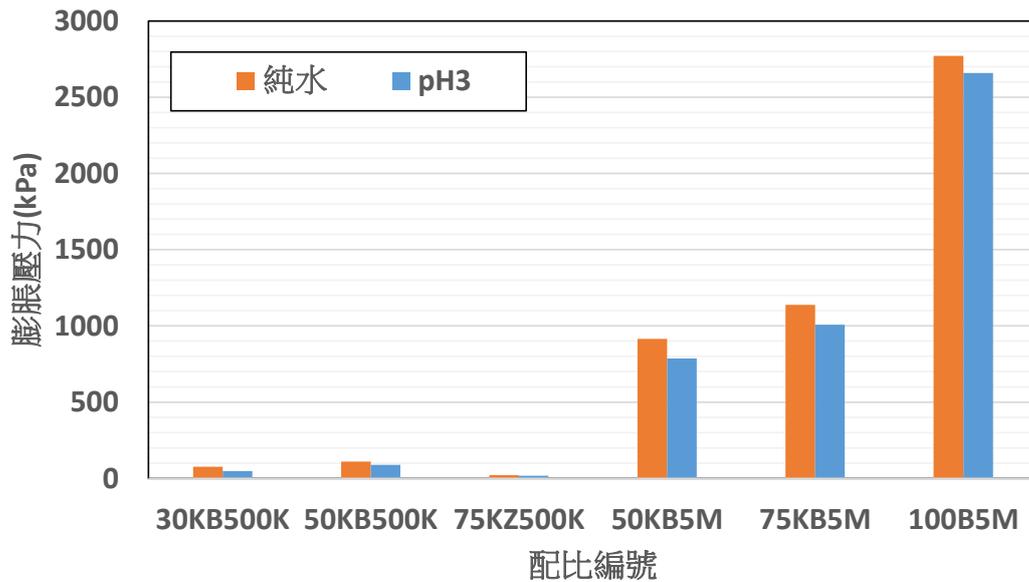


圖 2.1.4-9 不同緩衝回填材配比於純水與硫酸溶液中膨脹壓力行為

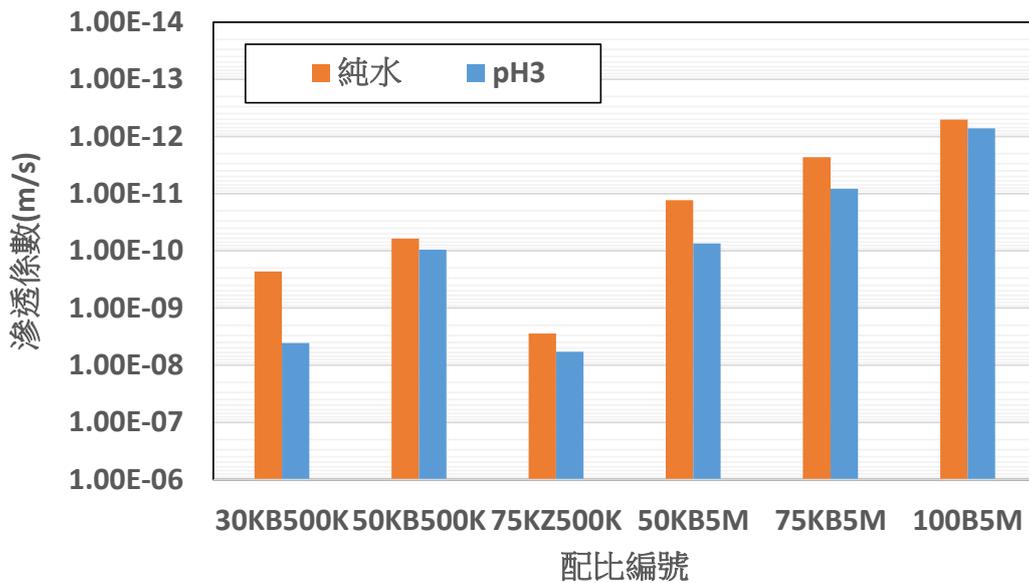


圖 2.1.4-10 不同緩衝回填材配比於純水與硫酸溶液中滲透行為

四、膨潤土於氫氧化鈉溶液中之行為

表 2.1.4-4 為緩衝回填材料於 pH=12 之氫氧化鈉溶液與純水中之性能試驗結果，由試驗結果可知 pH=12 之氫氧化鈉溶液對於緩衝回填材料之膨脹行為幾乎無明顯影響，以 30KB500K 配比組為例，其在 pH=12 之氫氧化鈉溶液下之最大自由膨脹量為 134%，幾乎與純水環境(最大自由膨脹量 133%)相等，且最大膨脹壓力為純水之 96%、滲透係數約略相等；因此顯示 pH=12 之氫氧化鈉溶液不具有影響緩衝回填材阻水性能之可能性，故未來若場址地區具有類似成份之地下水流，則對緩衝回填材之性能應無明顯影響。

表 2.1.4-4 緩衝回填材於 pH=12 之氫氧化鈉溶液與純水中性能比較

配比編號	乾單位重 (t/m ³)	最大自由膨脹量 (%)	最大膨脹壓力 (kPa)	滲透係數 (m/s)	備註
30KB500K	1.33	133	75.68	2.3x10 ⁻¹⁰	純水
	1.32	134	72.98	1.6x10 ⁻¹⁰	pH 12
50KB500K	1.39	185	110.08	6.1x10 ⁻¹¹	純水
	1.39	177	116.82	5.4x10 ⁻¹¹	pH 12
75KZ500K	1.42	15	20.23	2.8x10 ⁻⁹	純水

配比編號	乾單位重 (t/m ³)	最大自由膨脹量 (%)	最大膨脹壓力 (kPa)	滲透係數 (m/s)	備註
	1.44	16	21.35	3.5×10^{-9}	pH 12
50KB5M	1.80	217	915.05	1.3×10^{-11}	純水
	1.78	208	923.76	1.6×10^{-11}	pH 12
75KB5M	1.67	357	1138.53	2.3×10^{-12}	純水
	1.66	351	1208.55	4.2×10^{-12}	pH 12
100B5M	1.61	526	2771.15	5.1×10^{-13}	純水
	1.61	512	2756.64	5.9×10^{-13}	pH 12

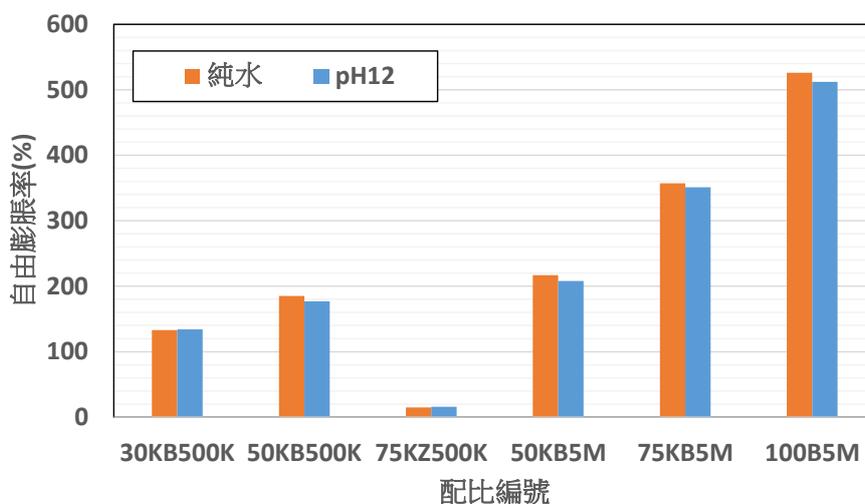


圖 2.1.4-11 不同緩衝回填材配比於純水與鹼溶液中之自由膨脹行為

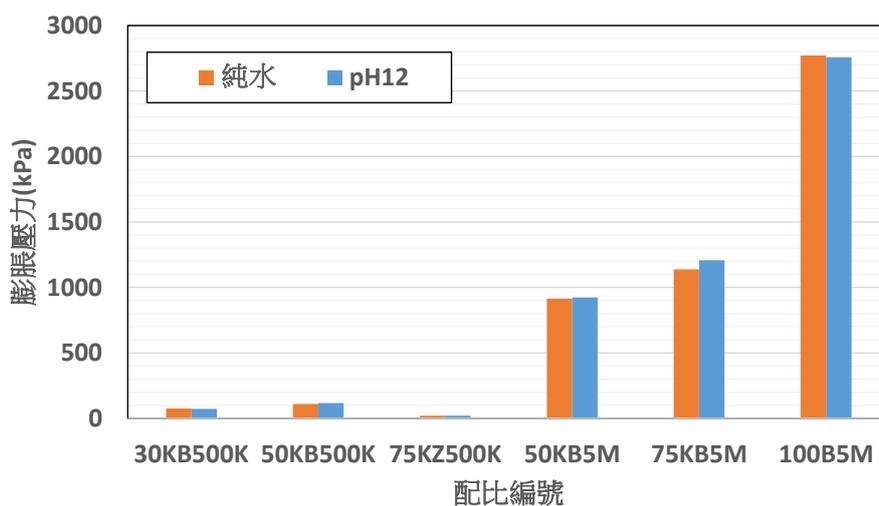


圖 2.1.4-12 不同緩衝回填材配比於純水與鹼溶液中之膨脹壓力行為

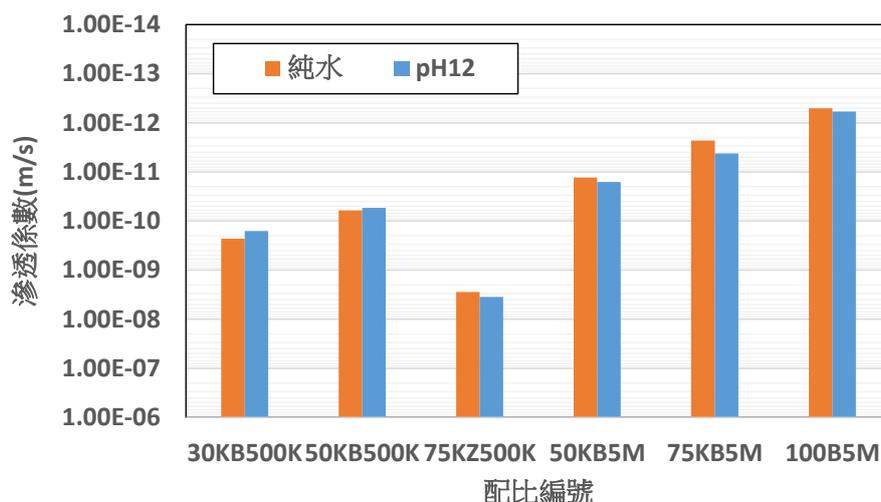


圖 2.1.4-13 不同緩衝回填材配比於純水與鹼溶液中之滲透行為

五、膨潤土配比之耐久性綜合評估

緩衝回填材料由於設計使用之年限需達百年以上，因此未來應用之環境將可能遭遇多種狀況，包括海水入侵、溫泉水及從其他設施所析出之鹼性溶液，而由上述彙整之結果可知，在人工海水與酸性溶液之環境下，緩衝回填材料之阻水性能將被大幅影響，尤其是乾單位重較小之配比組別，因此便需以提升乾單位重(亦即增加配比中膨潤土之總量)來提升配比性能，以使符合規範之需求；至於鹼性溶液則對配比阻水之性能無明顯影響。而透過本計畫對於緩衝回填材料之耐久性綜合測試，建議回填材之配比應使用 50KB1M 以上性能之組別，始具有在各種環境下皆可達到規範需求 0.1MPa、 1×10^{-10} m/s 之性能；至於緩衝材之配比則建議使用 100B5M 以上性能之配比組別，才具有 1MPa、 1×10^{-12} m/s 之阻水效益。

至於日興土應用於緩衝回填材之可能性部分，由於日興土屬於非鈉系的膨潤土，因此膨脹量較鈉系為低，而本次採樣之日興土中蒙脫石含量亦較低，僅 25%，故若欲採用日興土作為緩衝回填材料之原料使用，則應只可應用於回填材中，且摻用之比率需大於 75% 或夯實壓力需大於 1MPa 以上，始可在各種環境中皆符

合規範需求之性能；另外若欲於施工現場執行夯實作業，且使回填材之夯實後乾單位重大於 1MPa 以上，則恐無法執行，故推咎至此，就本計畫所獲得之日興土性能，其將無法應用於緩衝回填材料中。

2.1.5 障壁緩衝回填材與坑道、處置窖間力學互制模擬

一、分析工程障壁斷面及數值設定

本分析所考量之處置窖依放射性廢棄物之類型，有些許不同之設計。圖 2.1.5-1 為 A 類放射性廢棄物坑道式處置窖，以及 B、C 類放射性廢棄物坑道式處置窖。上述兩者之設計大致相同，較明顯之不同點在於 B 類及 C 類坑道式處置窖之牆內側增設砂與膨潤土層，以防止水滲入窖內。

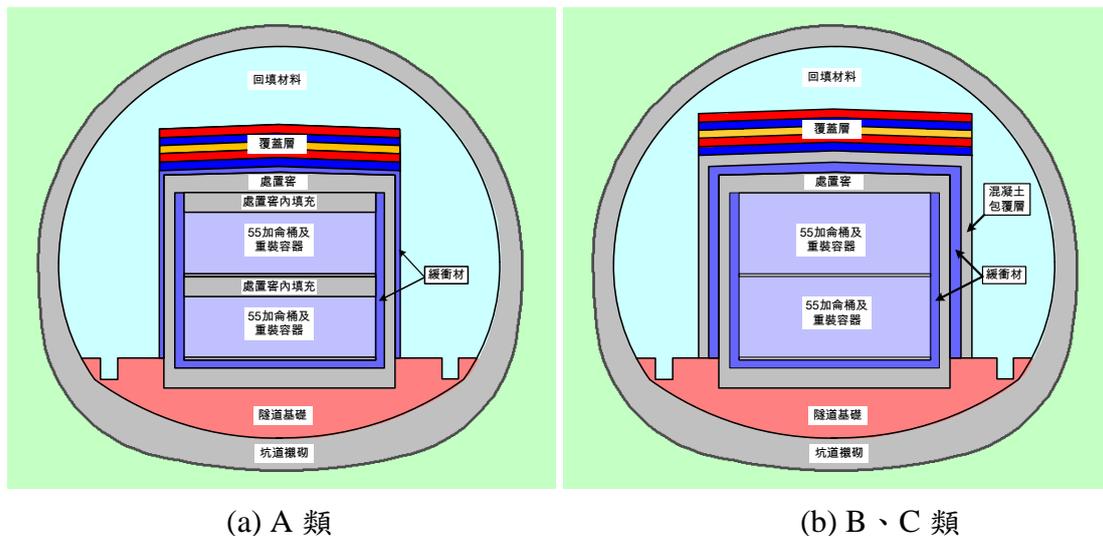


圖 2.1.5-1 坑道式處置窖示意圖

「多重障壁」系統之數值模擬，除了應根據處置設施之幾何條件建置適合之數值分析網格外，應依各種地工、結構材料特性，採用適當的組合律模式及材料參數。整個模擬過程亦應合理考量隧道開挖與圍岩之互制行為、內部結構體之構築過程，最後再模擬緩衝材料之回脹行為。各材料間之互制作用則由數值程式自動計算，並截取各個階段之分析結果，用以評估各結

構體之安全性。圖 2.1.5-2 及圖 2.1.5-3 分別為整體分析邊界與網格設定及近域數值分析網格。

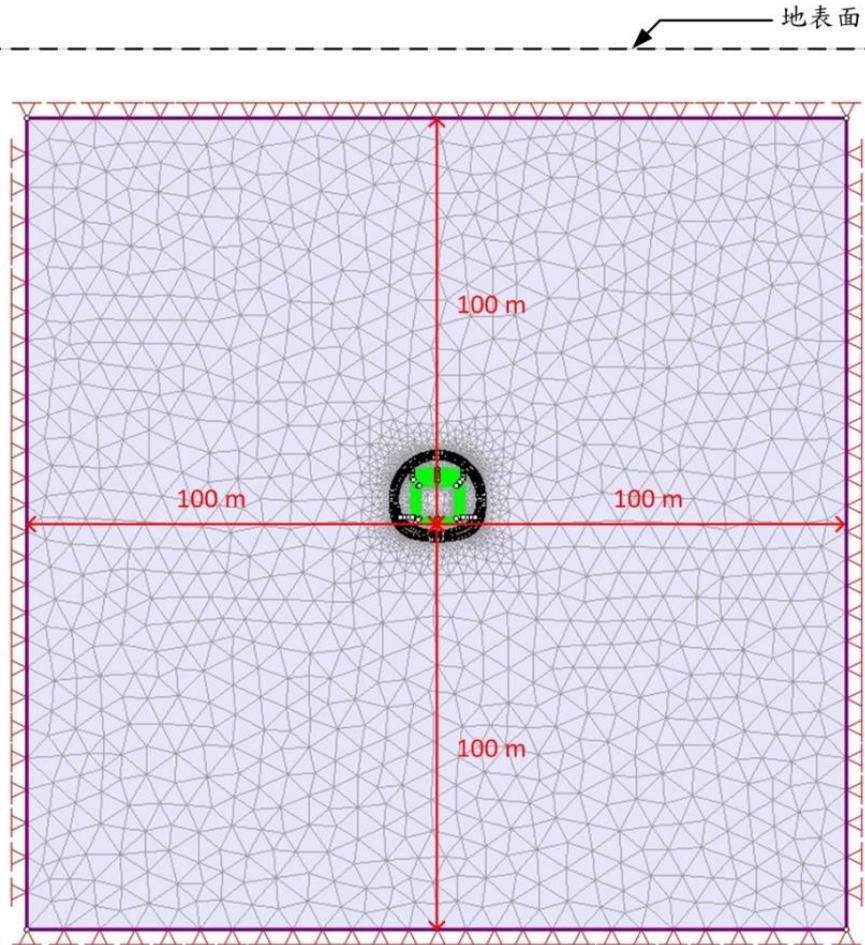
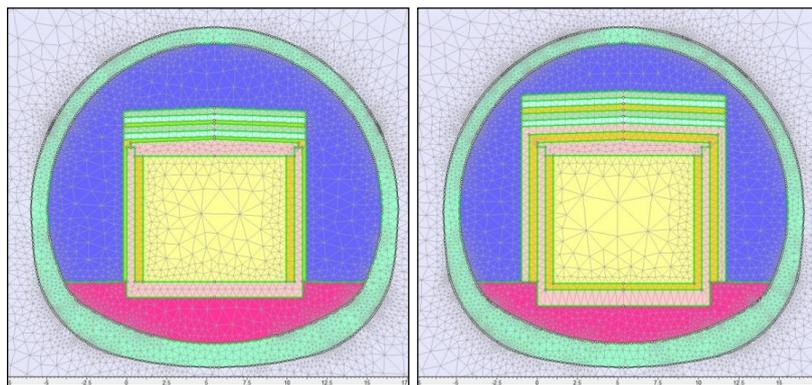


圖 2.1.5-2 整體分析邊界與網格設定



(a) A 類處置窖

(b) B、C 類處置窖

圖 2.1.5-3 近域數值分析網格

針對工程障壁內，各材料所選定之組合律模式，及應求取之參數表整理於表 2.1.5-1。各項參數之設定請參見「低放射性廢棄物最終處置工程障壁中緩衝回填材料調查評估」期末報告。

表 2.1.5-1 各種材料之組合律模式及待定力學參數

項目	組合律模式	待定參數
二次混凝土襯砌	Drucker-Prager	單位重(γ)、彈性模數(E)、柏松比(ν)、常數(α 、 k)
處置窖		
窖內廢棄物及填充		
隧道基礎		
回填材料	Mohr-Coulomb	單位重(γ)、彈性模數(E)、柏松比(ν)、凝聚力(c)、摩擦角(ϕ)
緩衝材		
處置窖外圍覆蓋層		
母岩	Hoek and Brown	單位重(γ)、彈性模數(E)、柏松比(ν)、岩石單壓強度(σ_c)、岩體材料參數(m_b)、岩體參數(s 、 a)

另針對緩衝材料回脹行為之模擬，本研究避開撰寫複雜之土壤組合律，直接將回脹壓力施加於回脹材料之周邊，以探討回脹材料膨脹後對於周圍障壁之影響。為釐清具回脹潛能材料在回脹過程中，產生的回脹壓力對於多重障壁之影響，因此除了依多重障壁材料特性，分別採用適當之組合律模式，並合理選定所對應之材料參數外，率定具回脹潛能材料之回脹壓力亦為數值分析之前期重要工作。對此，本研究工作已針對各種具回脹潛能材料，並配合與目前建議場址接近之岩心材料，在不同配比條件下，進行自由及束制回脹試驗，已可掌握未來場址採用之緩衝材、回填材在遇水後所產生之回脹壓力。本研究在進行數值模擬時為求保守，將依本計畫試驗結果，直接採用最大可能之回脹壓力，進行障壁系統之互制研究。

二、分析情境研擬

造成膨潤土回脹之條件為含水量，當內含膨潤土的回填材及緩衝材接觸到水則會發生膨脹，進而影響到障壁系統之應力條件。因此在分析時，需先假設可能發生之情境，並針對最可能發生之

情況進行評估，再從中選擇發生機率較高或是以較保守之情況進行分析。目前研擬之情境如下：

- (一)排水溝阻塞，地下水自排水溝流出，造成坑道內，與地下水接觸之回填材及緩衝材回脹。
- (二)二次襯砌防水功能失效，地下水自隧道周圍入侵，造成與二次襯砌接觸之回填材回脹。
- (三)二次襯砌防水功能失效，地下水自隧道周圍入侵，使回填材完全飽和回脹。
- (四)整個多重障壁系統之防水功能均失效，地下水充滿整個工程障壁，障壁系統內之緩衝材及回填材完全飽和回脹。
- (五)處置窖內部在回填水泥砂漿時，因為澆置過程未作好防水，造成處置窖內側之緩衝材接觸到水份而飽和回脹。

在上述分析情境中，情境(一)、(二)及(三)均屬具有發生機率，且回脹材發生回脹時，其額外產生之壓力可能造成障壁系統內部應力條件改變，因此應列入分析，以評估障壁系統在此條件下之安定情況。然情境(二)回填材膨脹壓力部分作用於二次襯砌之上，有助於抵抗圍岩壓力與坑道斷面內擠現象，因此坑道處於愈加安全之狀況，故無需進行分析。情境(四)為安全評估中，最不利之情況，然在本研究工作中，因為處置窖內、外部均有緩衝材或回填材包覆，因此在所有具回脹潛能之材料均吸水回脹的情況下，位於回脹材間之處置窖反而因為內、外壓力平衡而不會有不利之影響。故在本研究中不是關鍵之分析情況，無需列入分析。情境(五)為緩衝材在施工過程即遇水膨脹，使其功能受損。但是緩衝材在回脹過程因為沒有周圍之束制，使其回脹壓力得以釋放，故不會有多餘之壓力作用於處置窖中，因此亦無需進行分析。

為模擬處置窖在封存後因坑道滲水引起膨潤土膨脹(即前述情境(一)與(三))，將依據坑道內不同滲水位置，導致不同位置膨

潤土產生膨脹壓力，並考量膨脹壓力之差異，予以進行數值模擬，詳細情節設定如表 2.1.5-2 所示，並詳述如后。

表 2.1.5-2 膨潤土膨脹情節設定

斷面類型	膨脹位置	膨脹壓 (MPa)	分析代號
A 類	全側壁	1, 10, 15, 20	AW-1, AW-10, AW-15, AW-20
	上側壁	1, 10	AU-1, AU-10
	下側壁	1, 10	AL-1, AL-10
B & C 類	全側壁	1, 10, 15, 20	BCW-1, BCW-10, BCW-15, BCW-20
	上側壁	1, 10	BCU-1, BCU-10
	下側壁	1, 10	BCL-1, BCL-10

除上述一般情況下之考量外，針對工程障壁內混凝土材料，考量在長時間封存後，混凝土力學性質隨時間而劣化，其抗壓強度及彈性模數皆降低，此時若遭遇膨潤土膨脹效應，如 10 MPa 之膨脹壓力，評估此狀況下處置窖的穩定性。此情節的設定如表 2.1.5-3 所列。

表 2.1.5-3 混凝土劣化情節設定

劣化率	斷面類型	膨脹位置	膨脹壓 (MPa)	分析代號
50%	A 類、 B & C 類	全側壁	10	D5AW-10, D5BCW-10
40%	A 類、 B & C 類	全側壁	10	D4AW-10, D4BCW-10
30%	A 類、 B & C 類	全側壁	10	D3AW-10, D3BCW-10

三、分析結果

在檢視分析結果階段，將著重於混凝土處置窖是否出現材料降伏破壞點，當處置窖的混凝土材料已達降伏，此時混凝土可能出現粉碎或開裂現象，成為外部水源入侵或污染物外釋的捷徑。因此一旦在處置窖主體(即側壁與底板)出現降伏點，遂斷定處置窖已失去其障壁功能，即處置窖不符合原始功能設計之期望。

(一)A 類處置窖

表 2.1.5-4 列出 A 類處置窖受到不同位置膨脹壓力作用下，混凝土材料降伏之狀況。當膨脹壓力為 1 MPa 時，不論全側壁受力、下側壁受力或上側壁受力，皆不產生任何降伏點。

當膨脹壓力為 10 MPa 時，全側壁受力狀況下，處置窖內側膨潤土受到擠壓發生降伏，且處置窖側壁與頂蓋銜接處，亦發生零星的降伏狀況，如圖 2.1.5-4 中紅色交叉符號。若將膨脹壓力移至處置窖下方或上方，則材料降伏點亦集中於下方或上方之局部區域，顯見全側壁受力狀況係屬整體受力最大的案例。

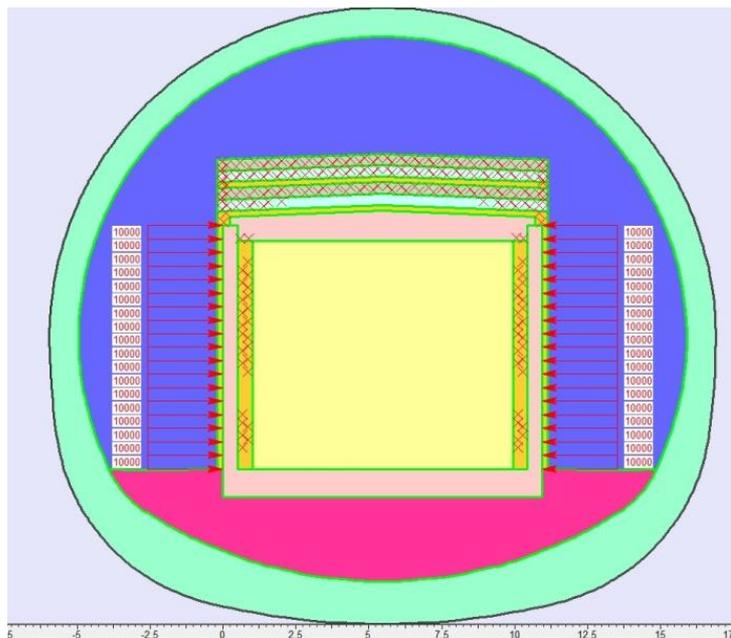


圖 2.1.5-4 AW-10 案例材料降伏狀況圖

就 A 類處置窖受到不同膨脹壓力(1、10、15、20 MPa)作用下之分析結果，在膨潤土的設計膨脹壓力範圍(1~10 MPa)內，處置窖的混凝土材料僅盖板發生零星降伏。甚至在膨脹壓力達到 15 MPa 時，處置窖本體及內部廢棄物(填充水泥砂漿)，皆沒有降伏情況發生。當膨脹壓力達到 20 MPa 時，可觀察到處置窖側壁與窖內填充會有降伏情況發生。

另就 A 類處置窖在不同程度的混凝土劣化影響下，遭受膨潤土膨脹壓力作用的分析結果顯示，在混凝土力學性質劣化 50% 的狀況下，仍可安全承受 10 MPa 的膨脹壓力。然劣化程度一旦達到 40% 以下，則混凝土處置窖主體及內部固化廢棄物皆會發生降伏現象。

表 2.1.5-4 A 類處置窖不同膨脹位置案例

位置	膨脹壓=1 MPa 降伏狀態	膨脹壓=10 MPa 降伏狀態
全側壁		
下側壁		
上側壁		

(二)B & C 類處置窖

表 2.1.5-5 列出 B & C 類處置窖受到不同位置膨脹壓力作用下，混凝土材料降伏之狀況。當膨脹壓力為 1 MPa 時，不論全側壁受力、下側壁受力或上側壁受力，皆不產生任何降伏點。

當膨脹壓力為 10 MPa 時，全側壁受力狀況下，處置窖內側膨潤土受到擠壓發生降伏，且處置窖側壁與頂蓋銜接處，亦發生零星的降伏狀況，如圖 2.1.5-5 中紅色交叉符號。若將膨脹壓

力移至處置窖下方或上方，則材料降伏點亦集中於下方或上方之局部區域，顯見全側壁受力狀況係屬整體受力最大的案例。

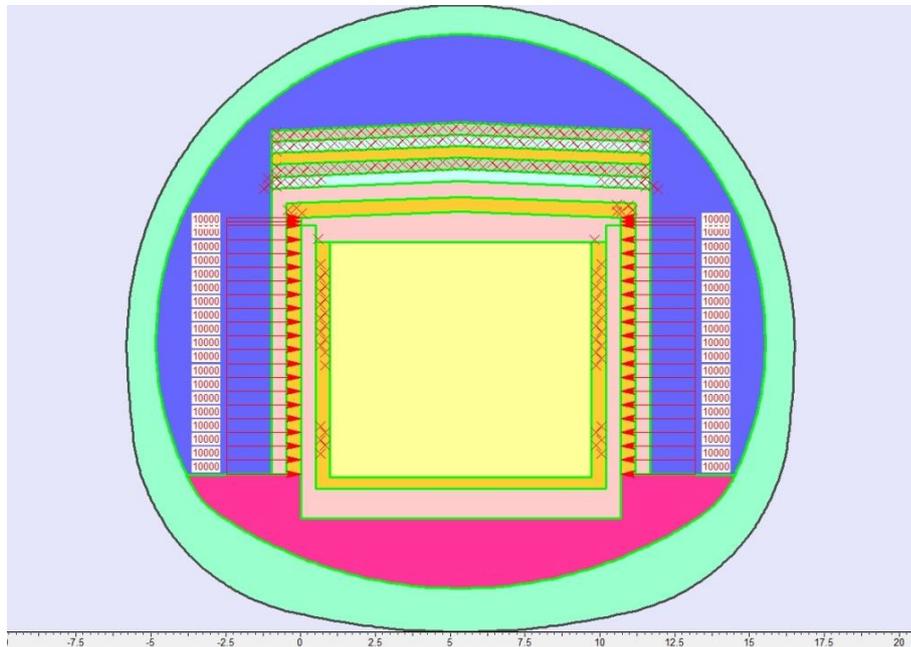
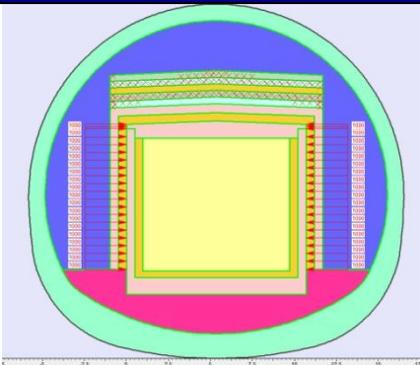
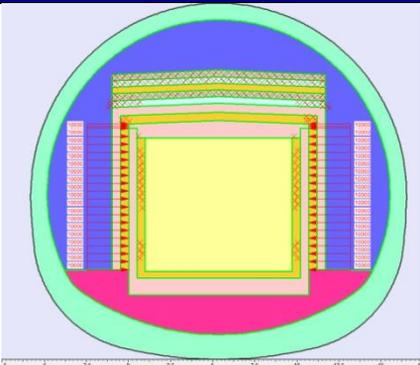
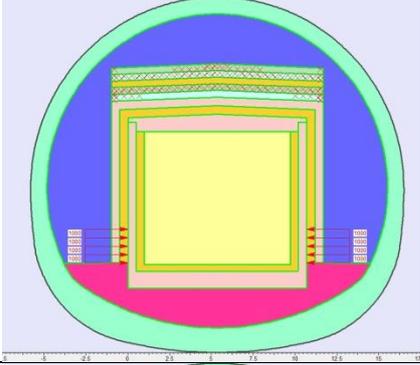
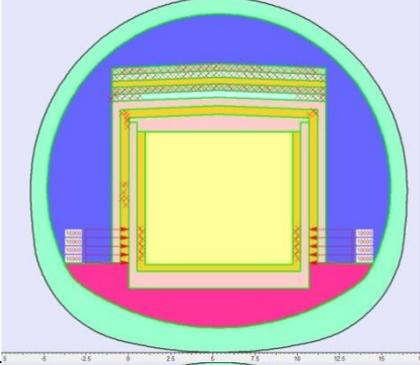
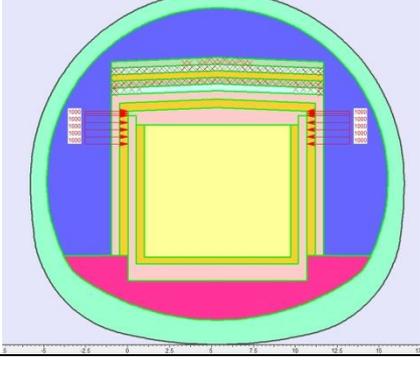
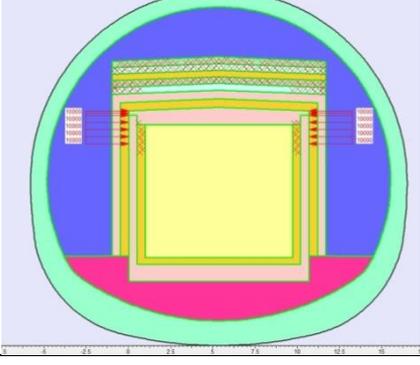


圖 2.1.5-5 BCW-10 案例材料降伏狀況圖

就 B & C 類處置窖受到不同膨脹壓力(1、10、15、20 MPa)作用下之分析結果，在膨潤土的設計膨脹壓力範圍(1~10 MPa)內，處置窖的混凝土材料僅蓋板發生零星降伏。甚至在膨脹壓力達到 15 MPa 時，處置窖本體及窖內填充，皆沒有降伏情況發生。當膨脹壓力達到 20 MPa 時，可觀察到處置窖側壁與窖內填充會有降伏情況發生。

另就 B & C 類處置窖在不同程度的混凝土劣化影響下，遭受膨潤土膨脹壓力作用的分析結果顯示，在混凝土力學性質劣化 50% 的狀況下，仍可安全承受 10 MPa 的膨脹壓力。然劣化程度一旦達到 40% 以下，則混凝土處置窖主體及窖內填充皆會發生降伏現象。

表 2.1.5-5 B & C 類處置窖不同膨脹位置案例

位置	膨脹壓=1 MPa 降伏狀態	膨脹壓=10 MPa 降伏狀態
全側壁		
下側壁		
上側壁		

四、分析討論

由兩種處置窖斷面的分析結果顯示，局部區域膨潤土浸水導致的膨脹壓力，僅影響該處的混凝土處置窖。所有位置假設案例中，最為關鍵的仍是全側壁受力的狀況，亦即坑道內的緩衝材全部浸水發生膨脹係為最需觀察與防範的情境。

就所觀察到的處置窖側壁與蓋板銜接處發生零星降伏情形，研判應與本概念設計於處置窖內部設置膨潤土層有關。當側壁受到膨脹壓力作用，會產生向窖內位移的趨勢，在側壁內側為較混

凝土軟弱的膨潤土層(兩者彈性模數相差 250 倍、降伏強度相差近 50 倍)，無法提供支撐側壁向內變位的支承力，因此混凝土蓋板角落處將承受大部分的膨脹壓力，故容易於此發生材料降伏現象。欲避免此類因支承材料差異導致的應力集中狀況，可於概念設計之後續精進時加以考量。

在本分析中所使用的 280kg/cm^2 混凝土在劣化至 50% 後，仍可承受最大設計膨脹壓力 10 MPa，混凝土材料不發生降伏。若考量到長時間混凝土劣化率將達到 40% 以下，為使混凝土依然提供相同的障壁功能，則必須使用更高強度的混凝土。

2.2 低放射性廢棄物最終處置設施功能評估

2.2.1 HYDROGEOCHEM 模式模擬簡介

HYDROGEOCHEM 5.5(以下簡稱 HGC)為目前最新版本，對於地下飽和及非飽和含水層中水文傳輸、熱傳以及生物地質化學反應，均可透過數學描述控制方程式，配合起始條件及邊界條件進行求解，而所解決的問題大多可以分成穩態模擬(steady-state simulation)以及暫態模擬(transient-state simulation)。當流場、熱傳以及生物地化反應的邊界條件均為定值且不隨時間變化時，此時可以得知最終所有物理量及化學濃度均會達到一穩定結果，便可透過穩態模擬進行求解。若是當邊界條件並非定值且隨時間產生變化時，例如模擬過程中，特定時段發生降雨現象，在地表產生入滲，此時在模擬過程中入滲量並非定值，而是隨著時間變化，因此必須考量時間上變化因數，而必須使用暫態模擬求解。

一、穩態模擬架構

圖 2.2.1-1 為 HGC 模式穩態分析流程圖，圖中說明了全系統耦合(strong couple)的方式進行求解，主因為地下水的密度以及黏滯性受到水中溶解的物質影響，生物地質化學反應的平衡常數會

受到溫度場影響而改變，而地下水流場又會影響溫度場以及物種傳輸濃度分布。因此 HGC 模式中同時求解所有模組，直到所有變數收斂，以下簡要敘述穩態模擬流程之步驟：

- (一)準備模擬區域內起始條件，並開始進行穩態模擬。
- (二)求解流場控制方程式，模擬區域內之壓力水頭、溫度、物種濃度分布等，均由起始條件和前一次計算結果提供，完成計算可以得到一收斂的暫態流速及含水量分布。
- (三)接著利用求得的暫態流場資訊，進行熱傳計算。
- (四)在更新模擬區域內的溫度場分布後，便可重新計算所有生物地化反應式的平衡常數。並開始計算生物地化反應傳輸，得到新的物種濃度分布。
- (五)檢查模擬結果與上一步驟結果相比，是否已經收斂，假使還需要繼續疊代，便回到步驟(二)重新計算一次，如果所有結果均已經收斂，便完成此次穩態模擬。
- (六)模擬完成後，將依據使用者之設定輸出項目，輸出最終模擬結果，以進行後續模擬成果分析使用。

二、暫態模擬架構

圖 2.2.1-2 為 HGC 暫態模擬分析流程圖與穩態模擬最大之不同，在於多了一個時間的疊代(transient loop)，在第一個時間步(time step)，起始條件為預先輸入或讀取穩態結果當作起始條件，而第二個時間步之後，起始條件為上一個時間步時的收斂結果。在每個時間步內的計算與穩態模擬相同，如果結果尚未收斂，則會繼續下一次的疊代，直到所有物理量及物種濃度均計算到全部收斂。接著進行下一個時間步之前，會先確認目前總共時間步數或是模擬時間是否已經達到預設目標，如果尚未達到預設目標，便繼續下一個時間步的演算，如果已經達到預設的時間步數或是模擬時間，模式便會自動終止運算，以及依據使用者的設定輸出成果資料。

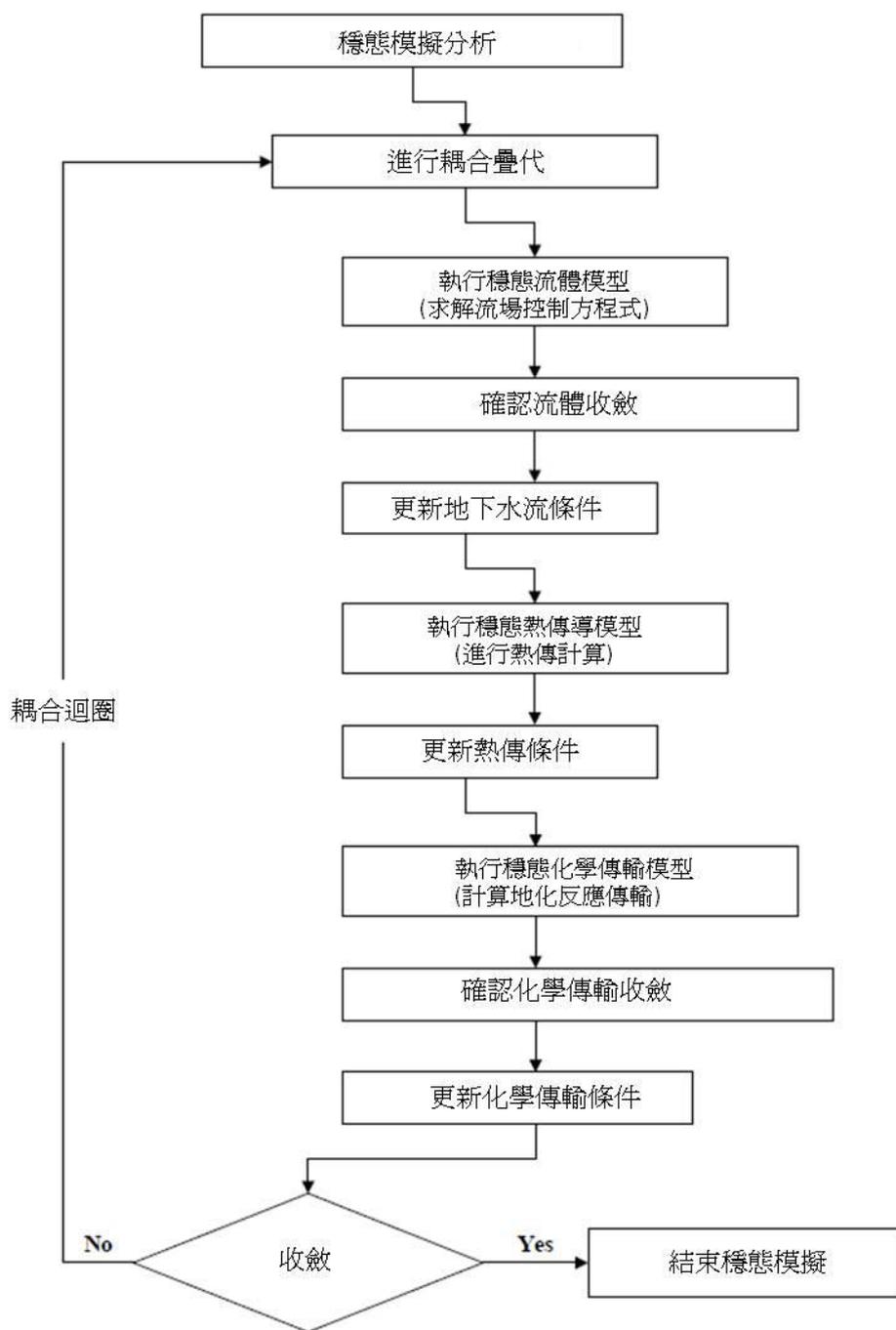


圖 2.2.1-1 HGC 模式穩態分析流程圖

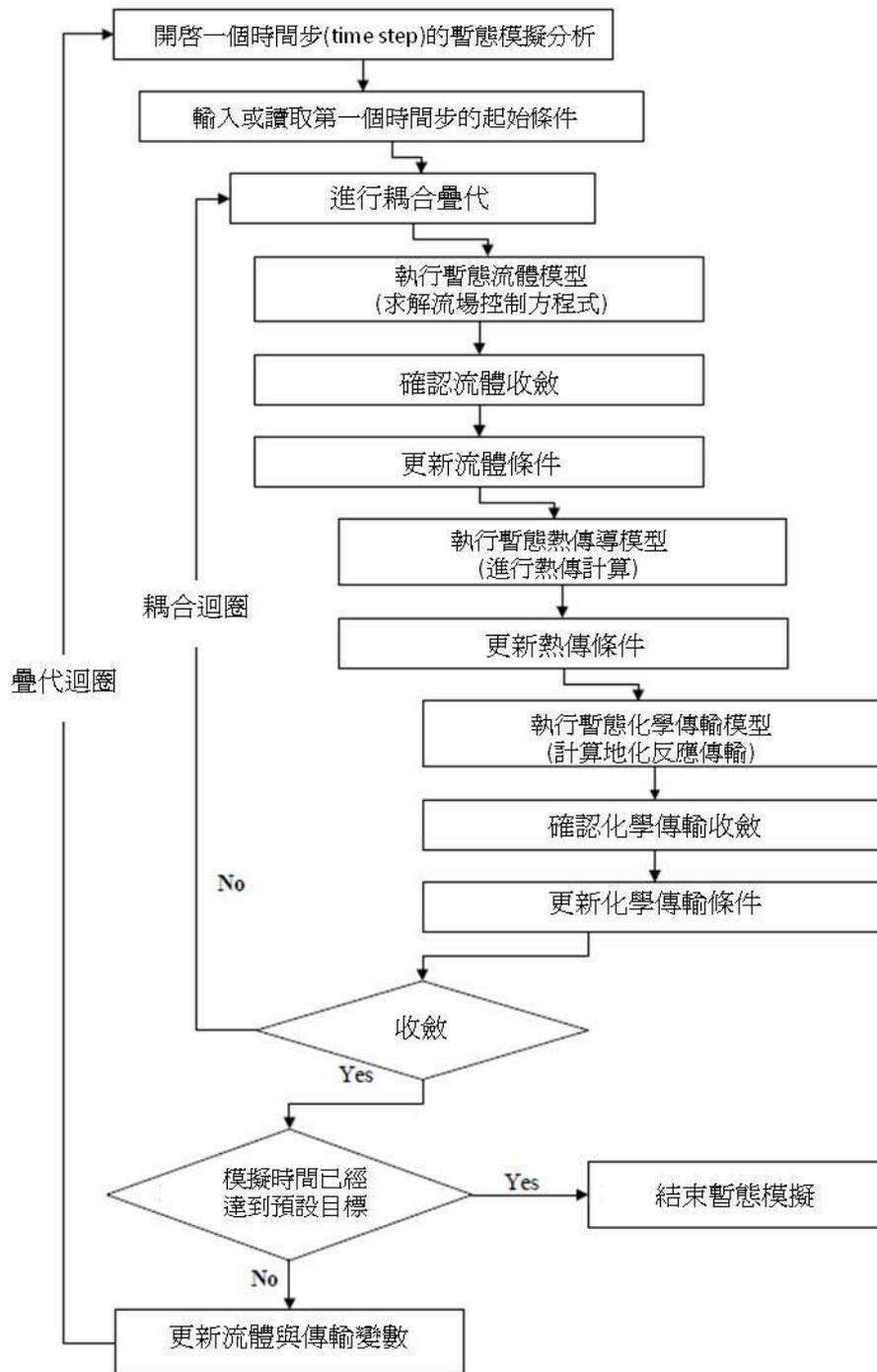


圖 2.2.1-2 HGC 模式暫態分析流程圖

2.2.2 HYDROGEOCHEM 模式驗證

在使用地化傳輸數值模式進行低放場址情境模擬前，必須先完成模式驗證動作，透過一系列地化傳輸模式驗證與討論後，可以探討所使用之數值模式是否可以正確描述將遭遇到之地化傳輸機制，在物種傳輸的機制包含有對流(convection)、擴散(diffusion)、延散(dispersion)等現象，單一核種衰變反應(decay)、核種衰變連鎖反應(decay chain)以及吸附反應(adsorption)。HGC 模式在發展過程中，已經過完整的模式驗證，可確保模式演算之正確性。地化模式為整體低放射性廢棄物處置場安全分析中的一項重要分析步驟，地化傳輸模擬成果之正確性，除了受限於地文、水文以及傳輸物種反應系統資訊完整性外，對於地化傳輸數值模型建立及數值參數設定等人為影響因素也必須考量。本節設計四種不同驗證情境，透過這些驗證案例，除了再次驗證模式的準確性外，同時檢定模式操作及分析人員是否可正確建立所欲分析之情境數值模型。

驗證案例一為單一核種衰變反應之驗證，案例二為核種傳輸之驗證，包含了物種的對流、擴散、延散以及衰變現象之驗證，案例三考慮核種在傳輸過程中，同時發生連鎖衰變反應模擬，案例四為考慮物種傳輸過程中與礦物發生吸附反應，而造成水中濃度下降。透過這四個驗證案例討論，建立基本核種傳輸反應模式概念外，同時率定數值模式所採用之參數。

2.2.3 核種衰變反應驗證

在核種傳輸當中，核種的衰變反應對於短半衰期之低放射性核種相當重要，如鈷-60(Co^{2+})其半衰期為 5.27 年、銻-90(Sr^{2+})半衰期為 28.9 年、銫-137(Cs^{2+})半衰期為 30 年以及銩-241(Am^{3+})半衰期為 432 年。故為了確保地化模式能準確反應核種衰變反應，本節模擬不同半衰期核種，在沒有傳輸現象下單純發生衰變反應，其衰變反應為一階反應(First order reaction)，其控制方程式與初始條件如下：

$$\frac{dC}{dt} = -\lambda C \quad (\text{Eq.2 - 1})$$

Initial Condition: $C=C_0$ at $t=0$

經積分後其解為

$$C = C_0 e^{-\lambda t} \quad (\text{Eq.2 - 2})$$
$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$$

其中 C_0 ：核種初始濃度(M)

C ：核種濃度(M)

λ ：核種衰變常數(1/T)

t ：時間(T)

$t_{1/2}$ ：半衰期(T)

模擬核種為銫-137(Cs^{2+})其半衰期為 30 年，總模擬時間為 72 年，模擬範圍長 10dm，寬 1dm，初始濃度為 1.0M，因不考慮任何傳輸現象，故網格解析度並不影響模擬結果，網格解析度設為 1dm，為了探討 Δt 對於模擬結果之影響，因此分別模擬 $\Delta t=0.125$ 年、0.25 年以及 0.5 年下，銫-137 衰變結果。模擬結果如表 2.2.3-1 所示，相對誤差定義如下所示；

$$\text{相對誤差(\%)} = \frac{|\text{數值解} - \text{解析解}|}{\text{解析解}} \times 100\% \quad (\text{Eq.2-3})$$

結果顯示不論 Δt 大小，相對誤差均隨著模擬時間增加，而逐漸增大，在 $\Delta t = 0.125$ 年以及 $\Delta t = 0.5$ 年時，第72年相對誤差分別可達到約0.25%及1%，仔細觀察不同 Δt 之間誤差比值，可以觀察到誤差比值與 Δt 的比值約略相同($T_{0.25y}/T_{0.5y} = E_{0.25y}/E_{0.5y} = 0.5$)，與模式中時間精度一階相符。因此，以一階時間精度來合理選擇 Δt ，則可獲得準確之演算結果。

表 2.2.3-1 核種銻-137 衰變反應之驗證結果

時間 (年)	$\Delta t=0.125$ (年)	相對誤 差 (%)	$\Delta t=0.25$ (年)	相對誤 差 (%)	$\Delta t=0.5$ (年)	相對誤 差 (%)	解析解
0	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000
1	0.977	0.003	0.977	0.007	0.977	0.013	0.977
2	0.955	0.006	0.955	0.014	0.955	0.027	0.955
4	0.912	0.013	0.911	0.027	0.911	0.054	0.912
8	0.831	0.026	0.831	0.054	0.830	0.108	0.831
12	0.758	0.041	0.757	0.080	0.757	0.161	0.758
24	0.574	0.080	0.573	0.160	0.573	0.322	0.574
36	0.435	0.121	0.434	0.240	0.433	0.484	0.435
48	0.329	0.160	0.329	0.320	0.328	0.645	0.330
72	0.189	0.240	0.189	0.483	0.188	0.963	0.189

2.2.4 核種傳輸模擬驗證

一般而言在多孔隙介質中，主要由三個傳輸機制控制了物種遷移，分別為對流、擴散以及延散，對流主要溶解在水中的物質隨著水流移動，因此其傳輸速度受到孔隙大小、含水飽和度、水力坡降以及水力傳導係數大小影響。擴散是一個分子無規則運動的物理現象，當流體靜止時布朗運動(Brownian Motion)

會將顆粒投射到所有方向，假使流體中粒子的濃度均相同，那粒子間的運動則不會改變濃度，相反的濃度分佈不均勻時，高濃度區域則會有較多的粒子會往低濃度區域移動。延散現象主要是描述在多孔介質中流場非均一性現象，在孔隙中流場速度並非平均，而是呈現拋物線分佈，因此在主軸上的物質傳輸速度會較兩側快，因此逐漸產生粒子往四周分散，因此延散主要用來說明在多孔介質中除了對流所考慮的平均移動速度之外，實際不均勻的孔隙分佈所造成的流場分佈。

本節將模擬核種在多孔介質中傳輸之現象，包含有對流、延散以及衰變之現象，參考 Bear, J. (1979) 單一種類物質在一維半無窮域中傳輸伴隨著一階衰變，可以定義為

$$\frac{\partial C}{\partial t} - D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + v \frac{\partial C}{\partial x} = -\lambda C$$

$$c(x, 0) = 0 \quad x \geq 0 \quad (\text{Eq.2-4})$$

$$c(0, t) = C_0 \quad t > 0$$

$$c(\infty, t) = 0 \quad t > 0,$$

同樣參考上節之核種，模擬核種鈉-137(Cs^{2+})半衰期為 30 年，在二維平面上單一方向傳輸模擬，模擬範圍以及參數如圖 2.2.4-1 所示，模擬一長 10dm 寬 1dm 的長方型區域，邊界條件固定自左方以 0.02 dm/year 傳入 1.0 M 濃度的鈉-137，介質的孔隙率 0.1，延散係數 0.0018 dm^2/year ，模擬區域內初始濃度為 0 M，模擬時間為 200 年。

為使第 200 年時在最後相對誤差不超過 5% 的情況下，依一階時間精度可推得之 Δt 必須小於 1.0 年，另外為了滿足 $\text{CFL} < 0.5$ 條件，因此必須滿足 $\Delta t < \Delta x / (2v)$ ，故模擬 Δt 必須為 $\min(1.0, \Delta x / (2v))$ 。在正式模擬開始之前，先不考慮核種衰變下，進行單純傳輸驗證，找出最適合之網格尺寸後再進行完整模擬。

因為本案例僅考慮單一方向傳輸變化，因此在 Y 方向僅設定一網格，而 X 方向則切割為 160 網格以及 320 網格進行傳輸模擬($\lambda = 0$)， Δt 取 0.5 年以滿足 $\min(1.0, \Delta x/(2v))$ ，模擬結果如圖 2.2.4-2 所示，當 X 方向網格數目 320 時($dx=0.03125dm$)，結果已經收斂到跟解析解相近，因此後續分析將採用 X 方向 320 網格以及 $\Delta t=0.5$ 年。

在考慮銫-137 半衰期為 30 年的情況下($\lambda=0.023105$)，進行傳輸模擬，模擬結果如圖 2.2.4-3 所示，在入流邊界條件銫-137 濃度為 1.0 M，隨著時間逐漸往 X 方向傳播，同時傳播的過程中銫-137 逐漸衰變，當銫-137 移動到距離入流邊界 6.5 dm 時，銫-137 濃度已經衰減至 0.01M 以下。

經由以上的模擬結果顯示在選擇適當之 Δt 以及網格解析度下，HYDROGEOCHEM 模式可以準確模擬核種傳輸以及衰變之現象，目前僅考慮單一核種衰變，然而在實際核種衰變時，通常會產生另外一個物種，甚至形成一連串的衰變反應，然而大多數放射性核種均會發生這類型的連鎖衰變反應，下一節將利用 HYDROGEOCHEM 進行連鎖衰變反應模擬，以驗證模式能準確模擬該現象。

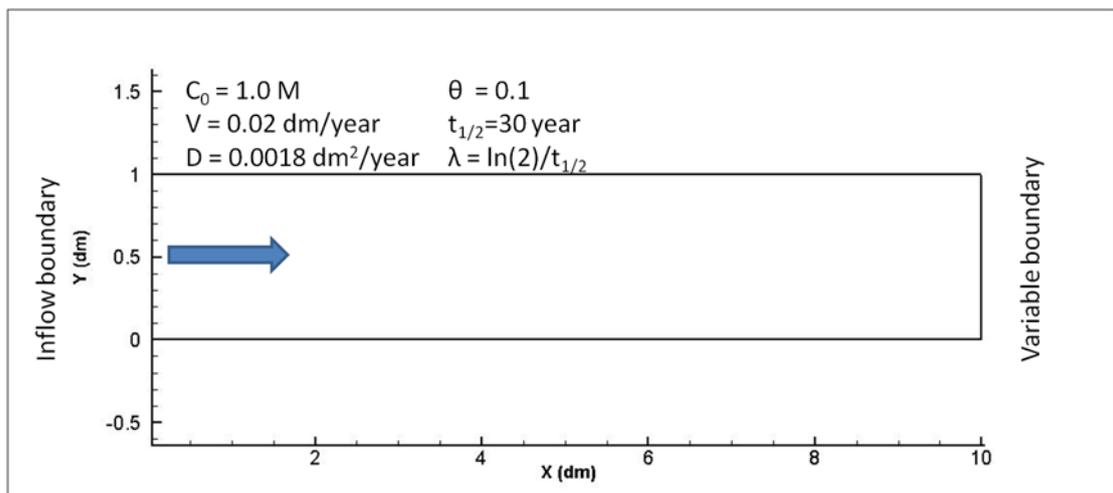


圖 2.2.4-1 模擬範圍及參數示意圖

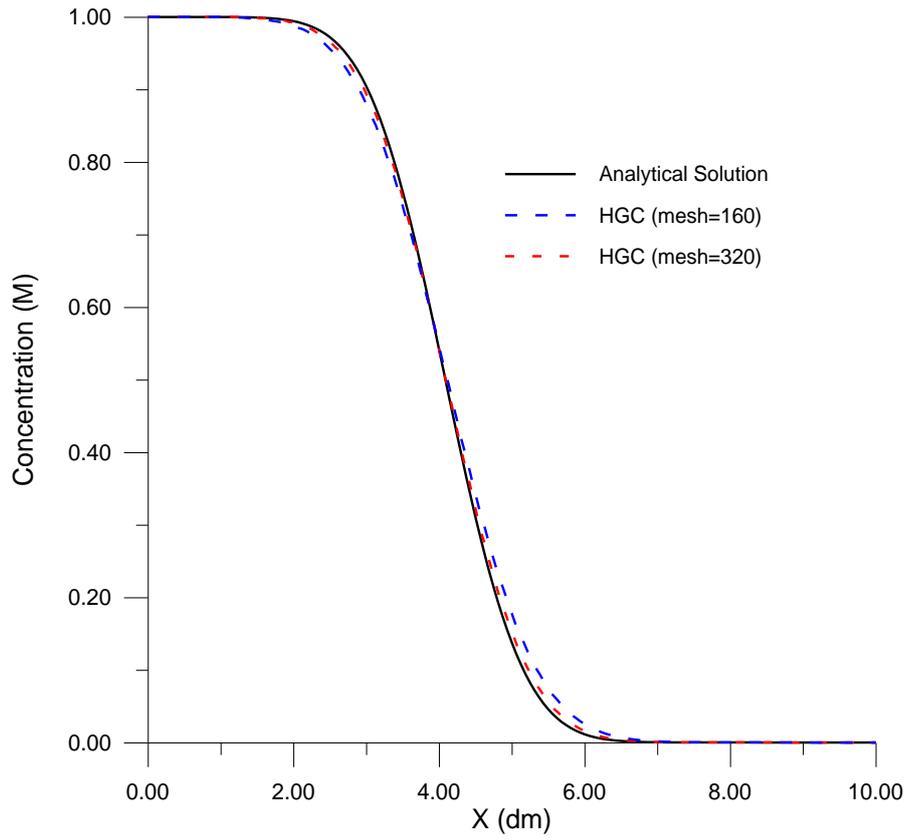


圖 2.2.4-2 第 200 年時考慮無衰變情況下之濃度傳輸分佈圖

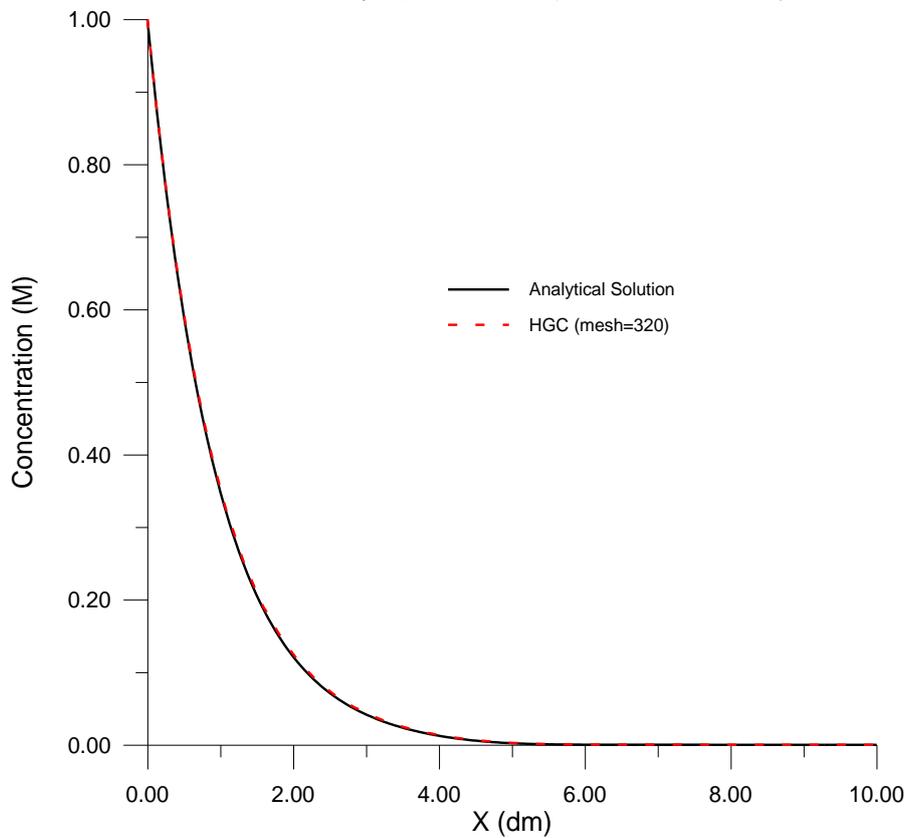


圖 2.2.4-3 第 200 年時考慮衰變情況下之濃度傳輸分佈圖

2.2.5 核種連鎖衰變反應驗證

連鎖衰變反應在放射性核種相當常見，如圖 2.2.5-1 為鈾-238 連鎖衰變鍊圖，圖中顯示了鈾-238 及其子核種的半衰期以及其衰變時所釋放之輻射線種類，圖中顯示鈾-238 其衰變鍊非常複雜同時伴隨著 α 、 β 及 γ 射線。表 2.2.5-1 描述了部分放射性核種衰變鍊，在母核種衰變過程中會出現 2~3 個子核種或甚至更多，各個放射性核種間之半衰期也不一樣，有時候甚至差異數千倍。如錒-90 半衰期為 28.8 年，其子核種 Y-90 的半衰期為 60 小時，也有子核種半衰期比母核種更長，如 Pm-147 半衰期 2.62 年，其子核種半衰期 Sm-147 為 1.06×10^{11} 年，因此如何準確模擬放射性核種連鎖衰變反應為本節驗證之重點。

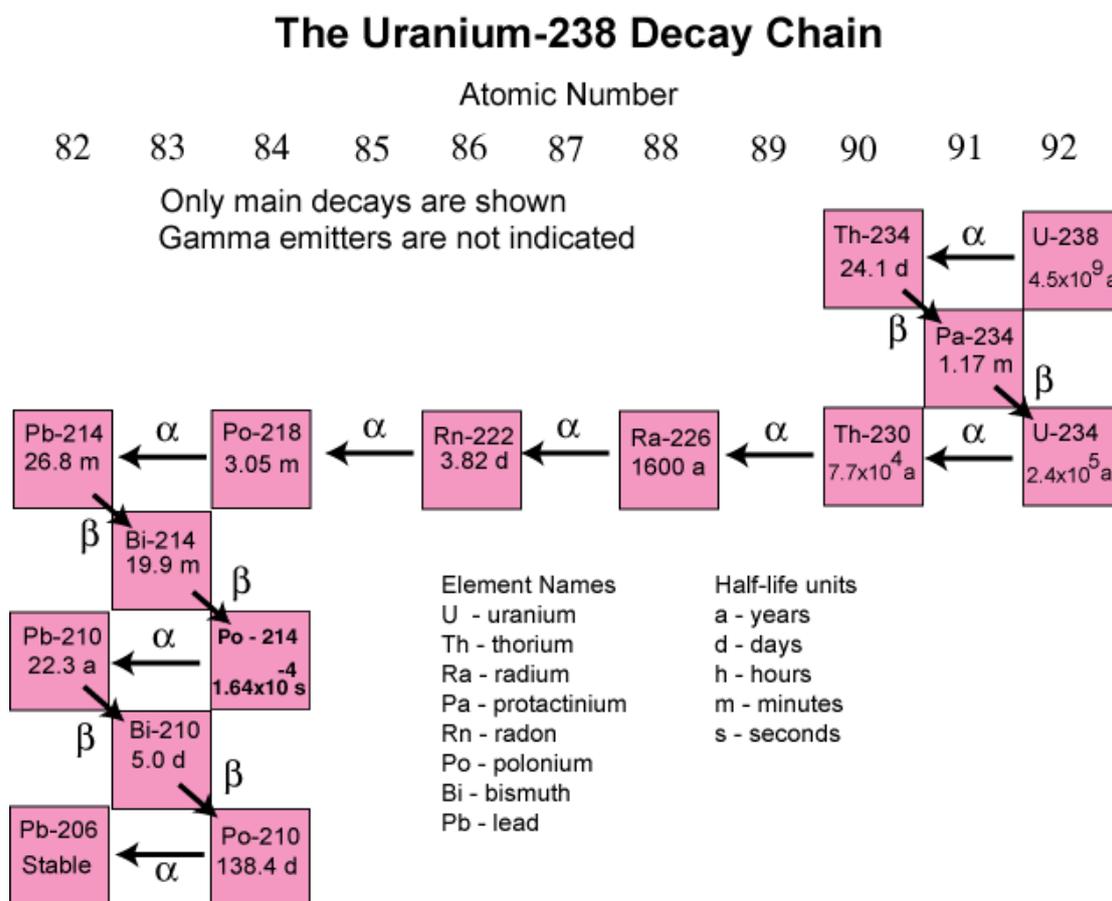


圖 2.2.5-1 鈾-238 連鎖衰變鍊圖

表 2.2.5-1 核種衰變鍊

核種	核種衰變鍊
Sr-90	Sr-90(28.8y) → Y-90(64h) → Zr-90(Stable)
Mo-93	Mo-93(3.5E+03y) → Nb-93m(16.13y) → Nb-93(Stable)
Ru-106	Ru-106(1.01y) → Rh-106(29.8s) → Pd-106(Stable)
Ag-108m	Ag-108m(418y) → Pd-108(91.3%, Stable) + Ag-108(8.7%, 2.37m) → Cd-108(97.15%, Stable) + Pd-108(2.85%, Stable)
Cd-109	Cd-109(1.27y) → Ag-109m(39.6s) → Ag-109(Stable)
Sb-125	Sb-125(2.8y) → Te-125m(57.40d) → Te-125(Stable)
Cs-137	Cs-137(30.0y) → Ba-137m(2.552m) → Ba-137(Stable)
Ce-144	Ce-144(284.893d) → Pr-144(17.28m) → Nd-144(2.4E+15y) → Ce-140(Stable)
Pm-147	Pm-147(2.62y) → Sm-147(1.06E+11y) → Nd-143(Stable)
Gd-152	Gd-152(1.08E+14y) → Sm-148(7.0E+15Y) → Nd-144(2.4E+15y) → Ce-140(Stable)
Eu-152	Eu-152(13.3y) → Sm-152(72.10%, Stable) + Gd-152(27.90%, 1.08E+14y) → Sm-148(7.0E+15Y) → Nd-144(2.4E+15y) → Ce-140(Stable)
U-238	U-238(4.47E+09 y) → Th-234(24.10d) → Pa-234m(1.17m) → U-234(2.45E+05y) → Th-230(7.7E+04Y) → Ra-226(1600y) → Rn-222(3.8235d) → Po-218(3.10m) → Pb-214(26.8m) → Bi-214(19.9m) → Po-214(164.3 μs) → Pb-210(22.1y) → Bi-210(5.013d) → Po-210(138.376d) → Pb-206(Stable)
Pu-239	Pu-239(24000y) → U-235(7.03E+08y) → Th-231(25.52h) → Pa-231(32800y) → Ac-227(21.7y) → Th-227(18.72d) → Ra-223(11.435d) → Rn-219(3.96s) → Po-215(1.781ms) → Pb-211(36.1m) → Bi-211(2.14m) → Tl-207(4.77m) → Pb-207(Stable)
Pu-241	Pu-241(14.4y) → Am-241(432y) → Np-237(2.14E+06y) → Pa-233(26.967d) → U-233(1.59E+05y) → Th-229(7340y) → Ra-225(14.9d) → Ac-225(10.0d) → Fr-221(4.9m) → At-217(32.3ms) → Bi-213(45.59m) → Po-213(4.2 μs, 97.91%) + Tl-209(2.20m, 2.09%) → Pb-209(3.253h) → Bi-209(Stable)
Cm-242	Cm-242(162.8d) → Pu-238(87.7y) → U-234(2.45E+05y) → Th-230(7.70E+04Y) → Ra-226(1600y) → Rn-222(3.8235d) → Po-218(3.10m) → Pb-214(26.8m) → Bi-214(19.9m) → Po-214(164.3 μs) → Pb-210(22.3y) → Bi-210(5.013d) → Po-210(138.376d) → Pb-206(Stable)
Cm-244	Cm-244(18.10y) → Pu-240(6540y) → U-236(2.34E+07y) → Th-232(1.41E+10y) → Ra-228(5.75y) → Ac-228(6.15h) → Th-228(1.9116y) → Ra-224(3.66d) → Rn-220(55.6s) → Po-216(0.145s) → Pb-212(10.64h) → Bi-212(60.55m) → Tl-208(35.94%, 3.053m) + Po-212(64.06%, 0.299 μs) → Pb-208(Stable)

一般推導溶解物傳輸問題的解析解，往往伴隨複雜的數學計算，同時這些解常常限制在一維問題或是特定邊界條件問題，本節參考 Sun (1999)之論文”Analytical solution for multiple species reactive transport in multiple domain”進行驗證案例設計。

延續上一驗證案例進行連鎖反應模擬，情境一延續上節單一核種傳輸參數，假設一連鎖反應為 $A \rightarrow B \rightarrow C$ ，其相對應之衰變常數(λ)分別為 0.05、0.03 以及 0.02，相對應之半衰期分別為 13.9 年、23.1 年以及 34.6 年，模擬區域及參數如同驗證案例二，模擬長 10dm 寬 1dm 的長方型區域，邊界條件固定自左方以 0.02 dm/year 傳入 1.0 M 濃度的假設物種 A，物種 B 以及物種 C 濃度在 $X=0$ 位置固定為 0 M，介質的孔隙率 0.1，延散係數 $0.0018 \text{ dm}^2/\text{year}$ ，模擬區域內 A、B 及 C 初始濃度均為 0 M，模擬時間為 200 年，網格同樣在 X 方向維持 320，同樣以一階時間精度考量推估 200 年時之相對誤差維持 5% 以內之 Δt ，計算結果各物種相對應之 Δt 分別為 0.2、0.6 以及 1.3 年，因此模式所採用之 Δt 為 $\min(0.2, \Delta x/(2v))$ ，以本情境最終 Δt 為 0.2 年。

模擬結果如圖 2.2.5-2、圖 2.2.5-3 及圖 2.2.5-4，分別為第 50 年、100 年以及 200 年時各物種傳輸濃度變化，結果顯示 HYDROGEOCHEM 模式模擬成果與解析解成果相當穩合，因設定之衰變長數 A 最短而 C 最長，所以可以發現物種 A 在很快的濃度就下降，而產生物種 B，接著物種 B 在衰變反應產生物種 C，然而物種 C 的半衰期較長，因此在隨著時間濃度持續上升且往 X 方項傳遞，在時間第 200 年仍未達到穩定狀態。圖 2.2.5-5 顯示在 $X=0.4\text{dm}$ 位置物種 A、B 及 C 濃度歷線，結果顯示隨著時間濃度變化會逐漸趨向穩定。

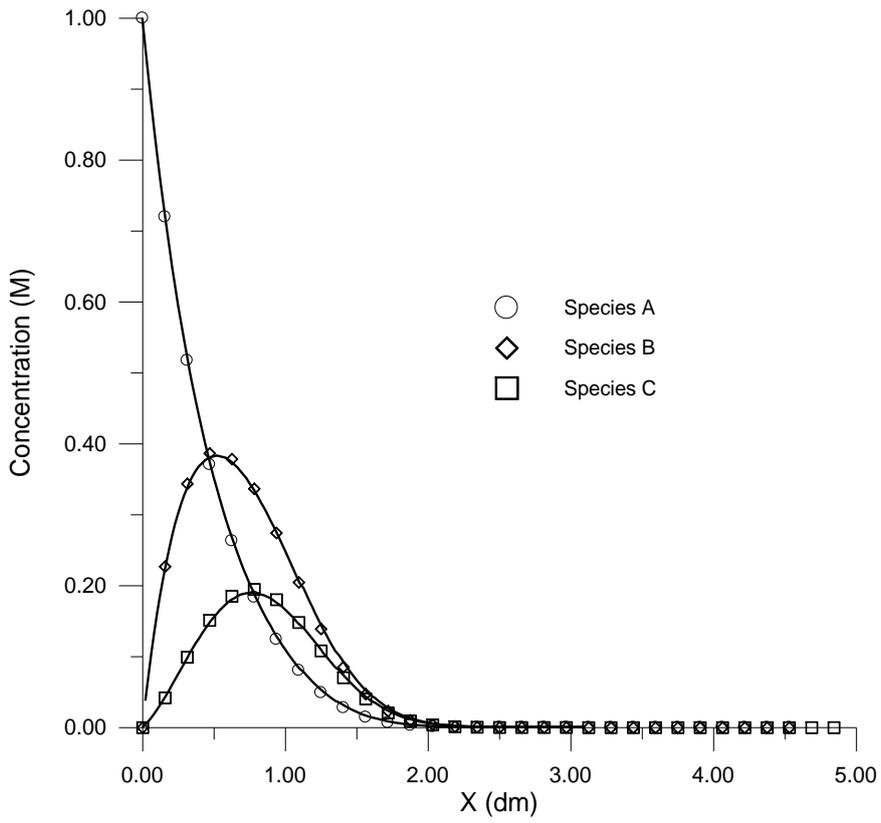


圖 2.2.5-2 第 50 年時 A、B 及 C 連鎖衰變情況下之濃度傳輸分佈圖

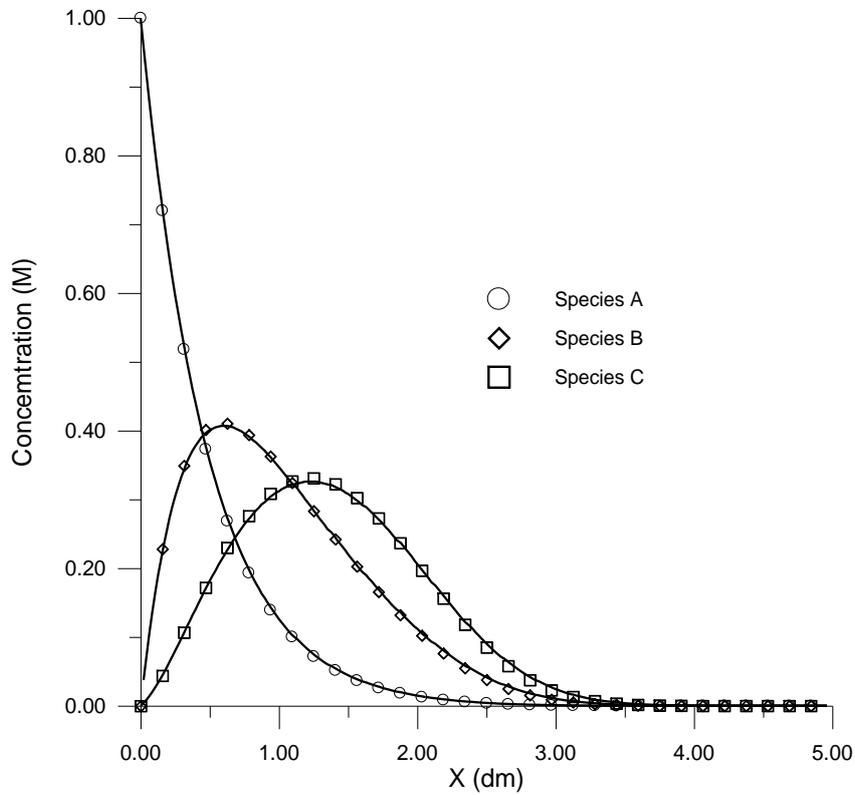


圖 2.2.5-3 第 100 年時 A、B 及 C 連鎖衰變情況下之濃度傳輸分佈圖

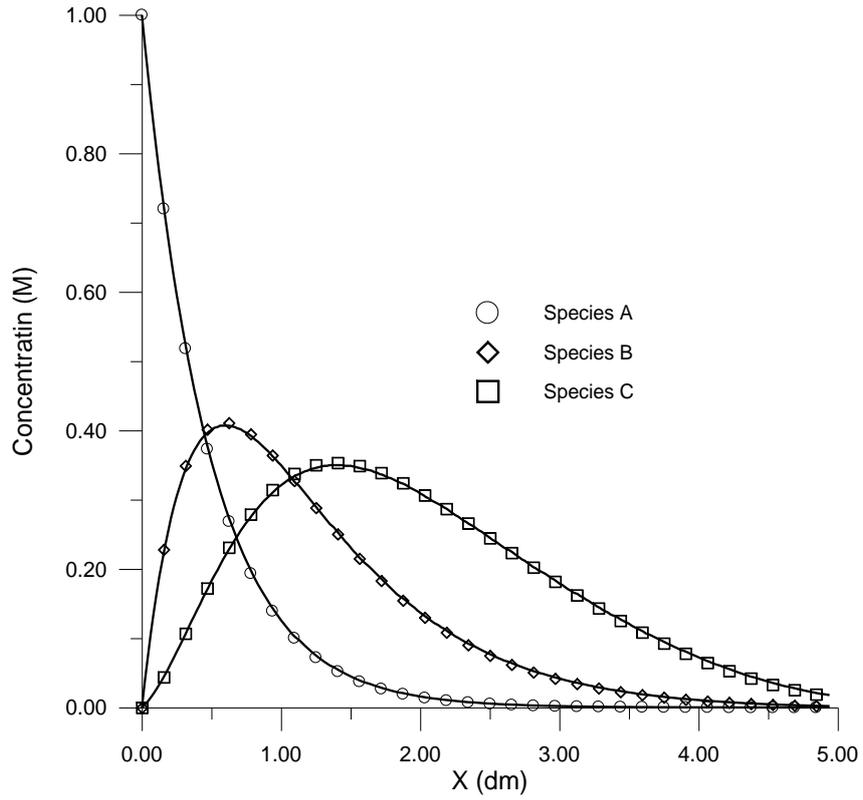


圖 2.2.5-4 第 200 年時 A、B 及 C 連鎖衰變情況下之濃度傳輸分佈圖

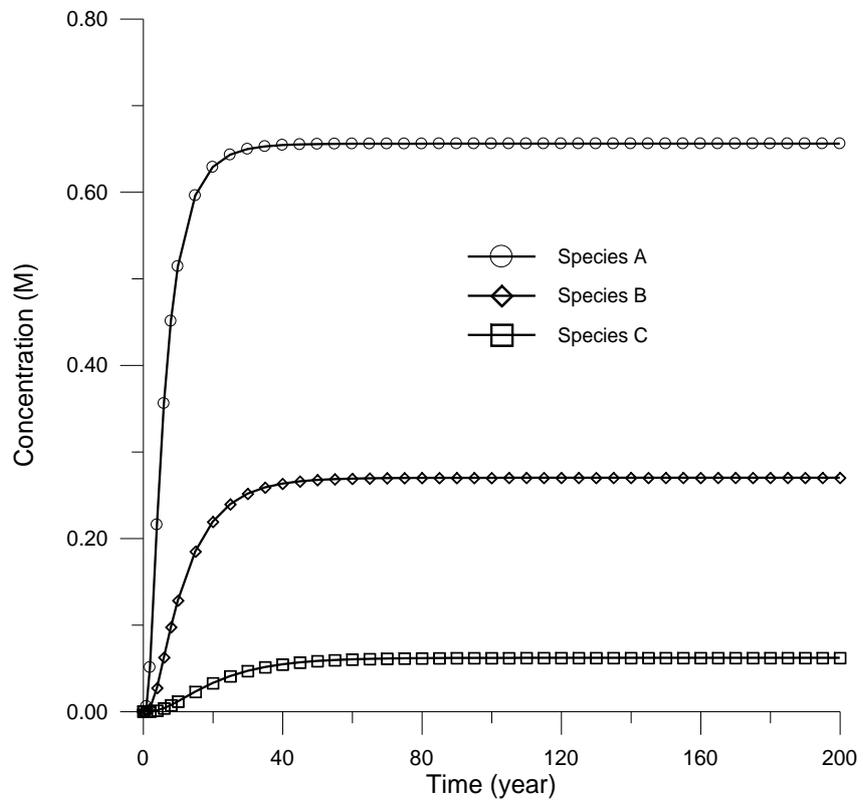


圖 2.2.5-5 在 X=0.4dm 位置物種 A 連鎖衰變情況下之濃度歷線圖

情境二同樣採用與情境一之相同數值參數、流速及多孔介質參數，銻-125(Sb-125)其衰變反應 $Sb-125 \rightarrow Te-125m \rightarrow Te-125(Stable)$ ，其半衰期分別為 2.8 年，0.1573 年以及不衰變，模擬時間為 25 年，然而 Te-125m 的半衰期非常短，推估相對誤差在 5% 內，其 $\Delta t=0.0002$ 年，考慮到計算效率 Δt 為 0.01 年進行模擬，模擬結果如圖 2.2.5-6 所示，Sb-125 以及 Te-125m 衰變得非常快，最後大多數均成為 Te-125(Stable) 型態，模擬結果仍在可接受範圍，圖 2.2.5-7 為 $X=0.4dm$ 處 Sb-125 衰變歷線，模擬結果顯示在 Sb-125 及 Te-125m 型態時，因半衰期短，所以在 10 年時後濃度已經趨近穩定，而 Te-125(stable) 濃度則在模擬過程中尚未穩定。

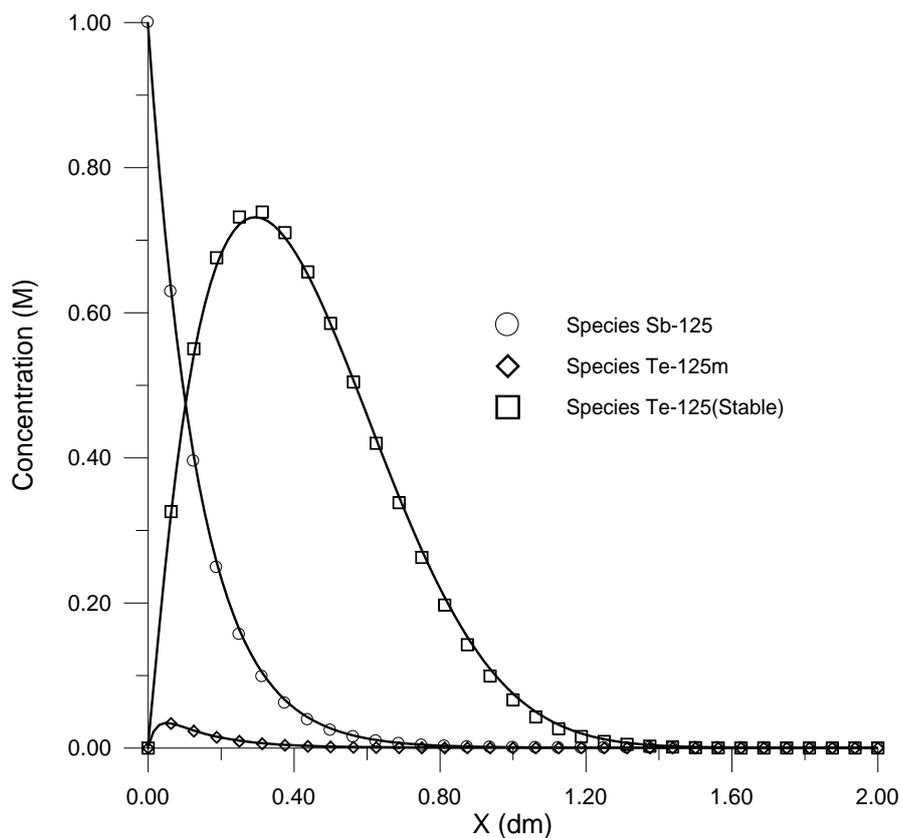


圖 2.2.5-6 第 25 年時 Sb-125 連鎖衰變情況下之濃度傳輸分佈圖

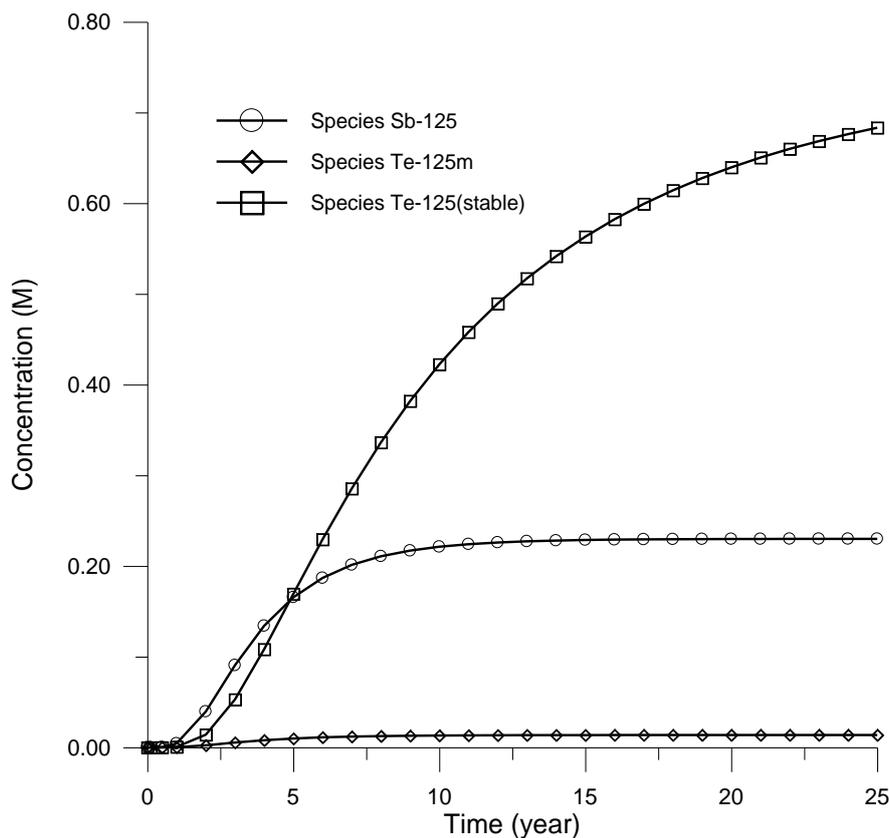


圖 2.2.5-7 在 X=0.4dm 位置 Sb-125 連鎖衰變情況下之濃度歷線圖

2.2.6 吸附反應驗證

吸附現象為水中或空氣中的原子(atoms)、離子(ions)或分子(molecules)附著在固體的表面，吸附作用為一在吸附物表面反應之現象，吸附反應廣泛的出現在自然、物理、生化及化學系統中，同時也廣泛的應用在工業中，例如使用活性碳吸附雜質。然而吸附反應在於低放射性廢棄物處置場地化模擬中，也扮演重要角色，藉著佈置適當之吸附體可以將某些放射性元素吸附在表面上，而降低其傳輸濃度，Tit (2006)論文中研究鋨-90 在混凝土 CSH 膠體中會與鈣離子產生交換反應，Marmier (1999) 利用表面錯合物吸附模式，模擬銫-90 在二氧化矽礦物(Silica) 表面的吸附反應。

如果考慮吸附反應為即時的(adsorption instantaneous)，即在水中的濃度以及在固體表面上的被吸附量隨時都處於平衡狀態下，則可以表示為

$$\theta \frac{\partial}{\partial t} (C + F) - D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + v \frac{\partial C}{\partial x} = -\theta \lambda (C + F) \quad (\text{Eq.2-5})$$

其中 θ 為孔隙率， C 為物種濃度， v 為流場速度， F 為核種在每單位固體體積表面上被吸附之質量，方程式 2-5 可以被改寫為

$$\frac{\partial C}{\partial t} - \frac{D}{\theta R} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{v}{\theta R} \frac{\partial C}{\partial x} = -\lambda C \quad (\text{Eq.2-6})$$

其中 R 為阻礙因子(Retardation factor)，由式子可以表示吸附反應相當於對於流速 v 以及延散係數 D 造成削減，對於單位體積固體吸附的量 F 在文獻上依據不同情況以及假設下(J. Bear 1979)，有許多不同表示，下面簡述三種不同吸附等溫線模型(adsorption isotherm models)。

A. Freundlich 's isotherm (Freundlich in Adamson, 1960)

$$F = K_d C^{1/m} \quad (\text{Eq.2-7})$$

其中 F 定義如上，即為核種在固體表面上之濃度， K_d 及 m 為常數， C 為核種在溶液中之平衡濃度，假如 $m=1$ 時則方程式 2-7 稱為線性平衡等溫線(linear equilibrium isotherm)。

B. Langimur's isotherm (Langmuir in Adamson, 1960)

$$\frac{\partial F}{\partial t} = kC \quad (\text{Eq.2-8})$$

其中 k 為常數，這方程式表示固相(Solid phase)對溶解物而言為 Sink，而固體表面上之濃度變化與溶液中之濃度呈現線性關係。

C. Hougen and Marshall's isotherm (1947)

$$\frac{\partial F}{\partial t} = k(C - mF) \quad (\text{Eq.2-9})$$

其中 k 及 m 為常數，這方程式描述一個可逆轉(reversible)的系統，當 mF 的濃度超過 C 時，此時固相對於溶解物而言為 Source，將核種釋放到水中。

本節採用 Freundlich isotherm 假設 $m=1.0$ ，因此 $F=K_dC$ ，帶入方程式 2-5 中，因此可以得知在方程式 2-6 中的阻礙因子 $R=1+K_d$ ，而 K_d 一般被稱為分佈係數(distribution coefficient)，方程式 2-6 的解表示如下：

$$C(x,t) = \frac{C_0}{2} \exp\left(\frac{vx}{D}\right) \left[\exp(-\beta x) \operatorname{erfc}\left(\frac{x - t\sqrt{(v/\theta R)^2 + 4\lambda D/\theta R}}{2\sqrt{Dt/\theta R}}\right) + \exp(\beta x) \operatorname{erfc}\left(\frac{x + t\sqrt{(v/\theta R)^2 + 4\lambda D/\theta R}}{2\sqrt{Dt/\theta R}}\right) \right]$$

其中

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{v}{2D}\right)^2 + \frac{\lambda\theta R}{D}} \quad (\text{Eq.2-10})$$

分析情境同樣考慮一 2 維平面，長 10dm，寬 1dm，模擬區域內平均流速(v) 為 0.01dm/s，延散係數(D)為 0.001dm²/s，孔隙率(θ) 為 0.2，衰變係數(λ) 為 0.01 s⁻¹，邊界條件為左側($X=0$ 處)持續注入一濃度 1.0M 之物種 A，以速度 0.01dm/s 持續往右邊傳輸，在模擬區域內充滿 10¹⁰M 濃度的吸附物 SOH，其分佈係數 $K_d = 1.0$ ，總模擬時間為 120s，相關之物種起始條件及邊界條件如表 2.2.6-1 所示，而反應系統請參考表 2.2.6-2。

表 2.2.6-1 起始邊界條件及邊界條件表

物種	邊界入流濃度(M)	模擬區域起始濃度(M)
A	1.0	0.0
B	0.0	0.0
SOH	0.0	10 ¹⁰
SOHA	0.0	0.0
SOHB	0.0	0.0

表 2.2.6-2 驗證案例四反應系統表

反應式	邊號	反應或平衡方程式
$A \leftrightarrow B$	1	$R_1 = \lambda_1[A]$
$SOH + A \leftrightarrow SOHA$	2	$K_e = [SOHA]-K_d[A]$
$SOHA \leftrightarrow SOHB$	3	$R_2 = \lambda_2[SOHA]$

參考方程式 2-4，推估出在第 120 秒時核種衰變相對誤差保持在 5% 以內，其相對應之 $\Delta t = 9s$ ，故模擬之 Δt 必須滿足 $\min(9.0, \Delta x/(2v))=0.4s$ ，本案例選定 $\Delta t = 0.1s$ ，以確保程式可以維持相對精確度。

圖 2.2.6-1 及圖 2.2.6-2 分別為第 60 秒及第 120 秒時模擬結果，途中包含有解析解以及 HGC 數值結果，另外為了比較單純傳輸現象以及受到單純吸附反應下結果之差異，因此在圖 2.2.6-1 及圖 2.2.6-2 分別增繪物種 A 單純受到水流傳輸之結果以及物種 A 傳輸時同時後到吸附作用之結果。在僅受到水流傳輸之影響時，模擬結果顯示隨著時間增加，物種 A 也隨之往右傳輸，同時受到延散效應部分傳輸速度較快，形成前端有一低濃度區域。再增加考慮吸附作用時，結果顯示在分佈係數 $K_d = 1.0$ 時，吸附作用相當明顯，然而隨著時間增加，上游處吸附作用也趨近平衡，SOHA 濃度趨近 1.0M。若在增加衰變現象時，結果顯示，此時在上游原本平衡狀態會受到改變，濃度不再維持在 1.0M，而是隨著時間而衰變，形成一指數型態下降，並隨著對流運動往右持續延伸。

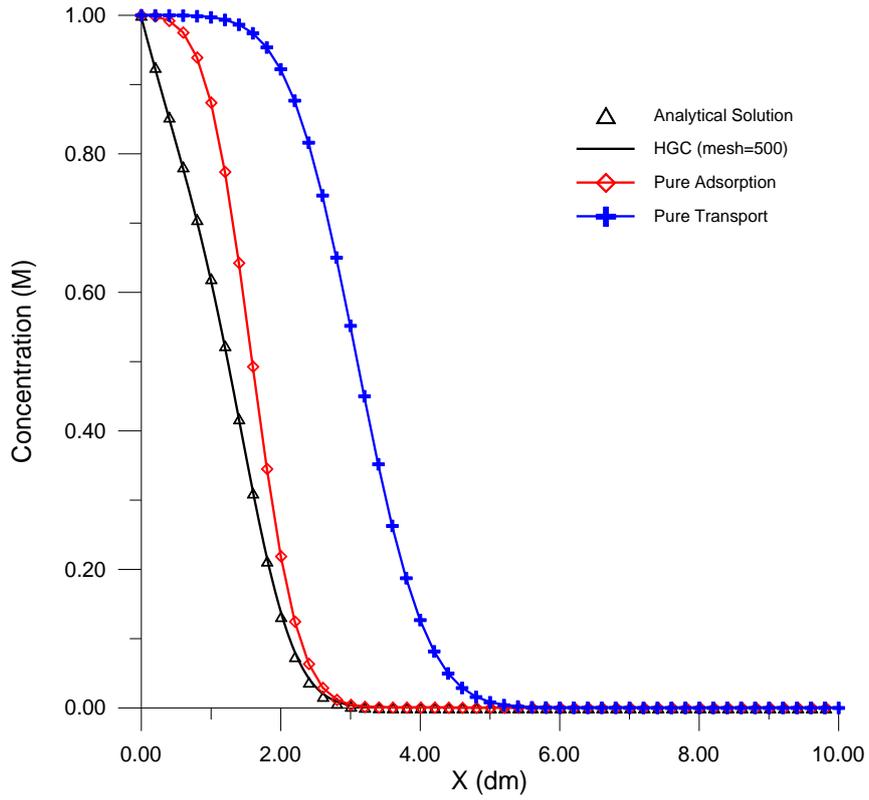


圖 2.2.6-1 第 60 秒時濃度傳輸分佈圖

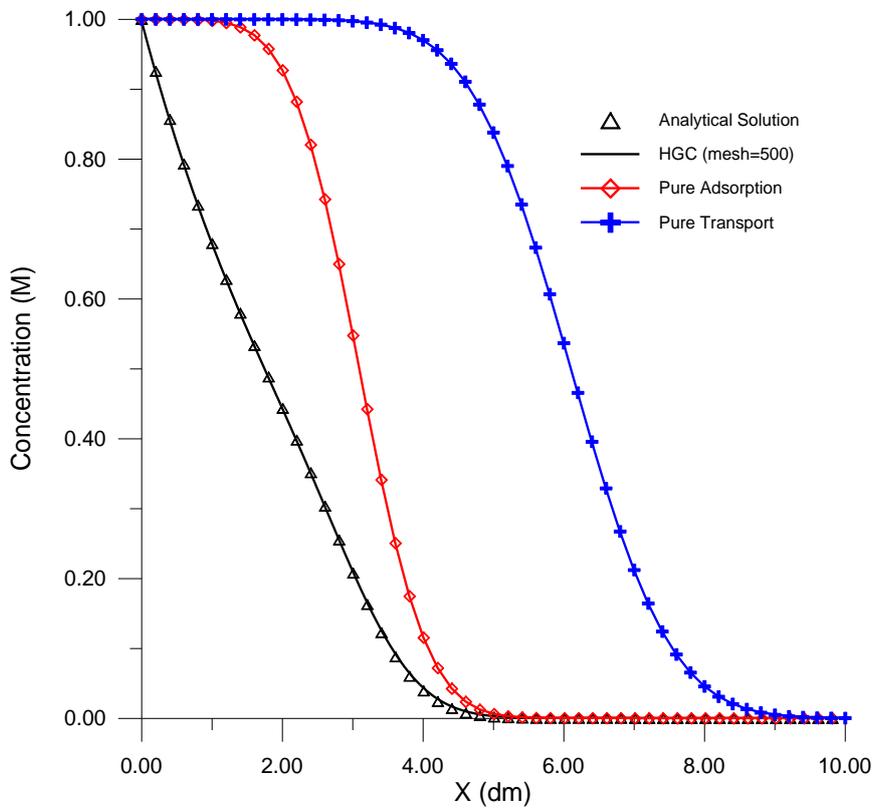


圖 2.2.6-2 第 120 秒時濃度傳輸分佈圖

2.3 低放射性廢棄物潛在場址之微生物核種吸附與工程障壁腐蝕安全影響評估技術服務工作

本工作計畫目標為就本土海島氣候環境，建立建議候選場址「台東縣達仁鄉」及「金門縣烏坵鄉」之本土微生物資料，並測試主要菌株對核種之吸附能力、在緩衝材料中之存活與生長能力，及對低放射性廢棄物水泥固化體及廢棄物桶等工程障壁分解效應之數據化評估。本研究成果可提供低放射性廢棄物最終處置場之安全評估參數，瞭解微生物對低放處置之安全影響，以期準確評估低放射性廢棄物最終處置場之安全穩定使用年限，避免造成對環境之衝擊。於 103 年主要研究成果為：

- 一、添加本土分離菌株於不同夯實程度之緩衝材料膨潤土中，進行菌株之生存與遷移測試，初步結果顯示：將不同配比與夯實程度之緩衝材料，置於不同濕度的環境中，經 1 個月後測得全膨潤土試樣之水分含量高於 50% 膨潤土者，在相對溼度 85% 之環境會增加全膨潤土與 50% 膨潤土試樣中之水分含量，但不同的夯實程度對膨潤土中之水分含量則無明顯影響，置放時間增加至 3 個月及 8 個月其試樣水分含量無明顯變化。
- 二、將本土分離菌株加入緩衝材料試樣中培養，其中加入 S9、KM1、KM2、KM4 菌株者，經培養 1 個月後於加菌之原點中仍可測得該菌株存活，而試樣中添加 SM1、SM6、KB4、KB5、KB6 菌株處理者，於原點之土樣中已未能測得該菌株。培養 3 個月及 8 個月時僅測得 S9 (*Arthrobacter* sp.) 及 KM4 (*Penicillium janthinellum*) 菌株存活，但其菌數明顯低於培養 1 個月時，顯示隨培養時間增加，菌株之存活數會逐漸下降。實驗中取距離添加菌株原點之 1、2、3 公分處土樣中均未測到菌株，顯示所有受測菌株於緩衝材料中 1 至 8 個月培養後，無菌株遷移之現象。本試驗較長時間之觀察仍持續進行中。

- 三、於放置水泥固化體之環境中，接種建議候選場址取樣的分離菌株，進行菌株對水泥固化體腐蝕劣化行為之定量測試仍持續中，觀察到多數受測菌株可於含水泥固化體之環境中生長良好。混合細菌菌株培養 7 天後，可見於培養液表面有明顯之生物膜，隨培養時間增加，混合菌株中之優勢族群的變異甚大。而黴菌菌株培養至 1 個月時可見生物膜形成，培養至 3、6、12 及 15 個月仍可見部分菌株之菌絲與固化體親和生長（圖 2.3-1 所示為培養 6 個月時的菌株生長狀況）。試驗結果顯示：菌株種類及生長速度會影響其培養液的酸鹼值與鈣、矽濃度，研究中測得不同菌株之生物膜對鈣與矽有不同之吸附濃度，其中 SM5 (*Penicillium sumatrense*) 菌株可於固化體表面大量生長，並將固化體中之鈣與矽積聚於菌體中，值得關注。
- 四、水泥固化體與菌株經 3、6、12、15 個月之共同培養後，分析各固化體之劣化程度，結果測得之固化體不同深度切片中的試體鈣矽比均高於 2，顯示與菌株共同培養並未顯著影響固化體之鈣矽比。而實驗中水泥固化體經 1 年培養處理後之抗壓強度並無顯著差異，各固化體之抗壓強度均顯著高於「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」第六條單軸抗壓測試強度大於 15 kgf/cm² 之規範，將持續評估共同培養 2 年後菌株對水泥固化體抗壓強度之影響。
- 五、持續進行建議候選場址取樣之主要分離菌株對廢棄物桶材試片鏽蝕、形態劣化的定量測試，圖 2.3-2 為桶材與微生物共培養 1 至 5 個月的外觀觀察，可見各菌株的生長速度及對桶材試片之親和性有顯著不同，且對桶材試片的影響程度亦有明顯差異，其中 KM5 (*Purpureocillium lilacinum*) 黴菌菌株處理之試片的重量損失、表面成分分析、抗彎強度等數值均優於對照組，KM5 菌株是否有抑低桶材腐蝕的發生、提供保護的效果，此仍有待進一步觀察與分析。

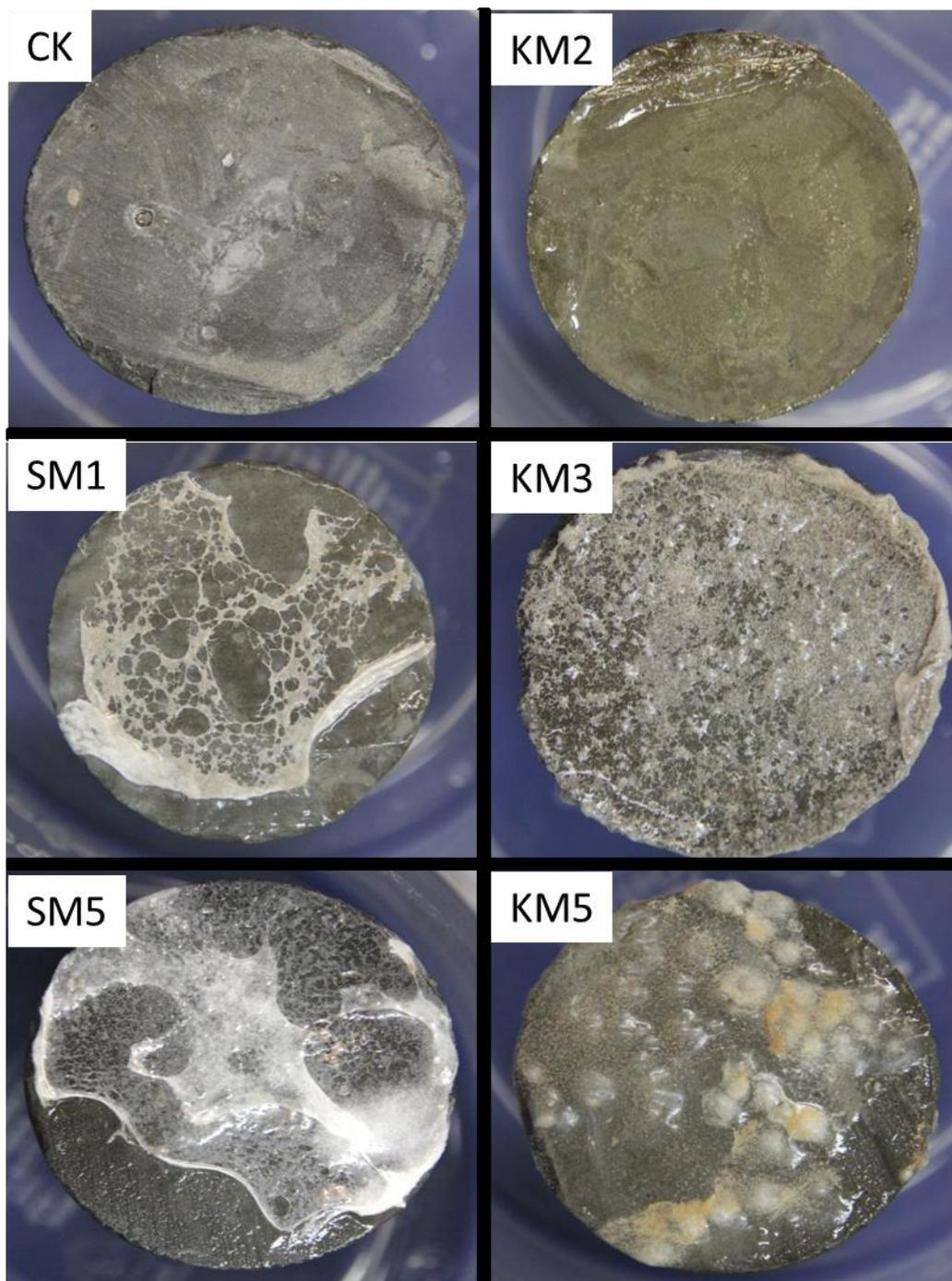


圖 2.3-1 固化體與分離黴菌共同培養 6 個月時觀察之微生物相：CK 為未接菌處理者，表面無菌株生長。SM1 為接種 *Pyrenochaeta* sp. 菌株者，SM5 為接種 *Penicillium sumatrense* 菌株者，KM2 為接種 *Cladosporium tenuissimum* 菌株者，KM3 為接種 *Penicillium* sp. 菌株者，KM5 為接種 *Purpureocillium lilacinum* 菌株者，接菌處理者可見菌株在固化體上親和性生長。

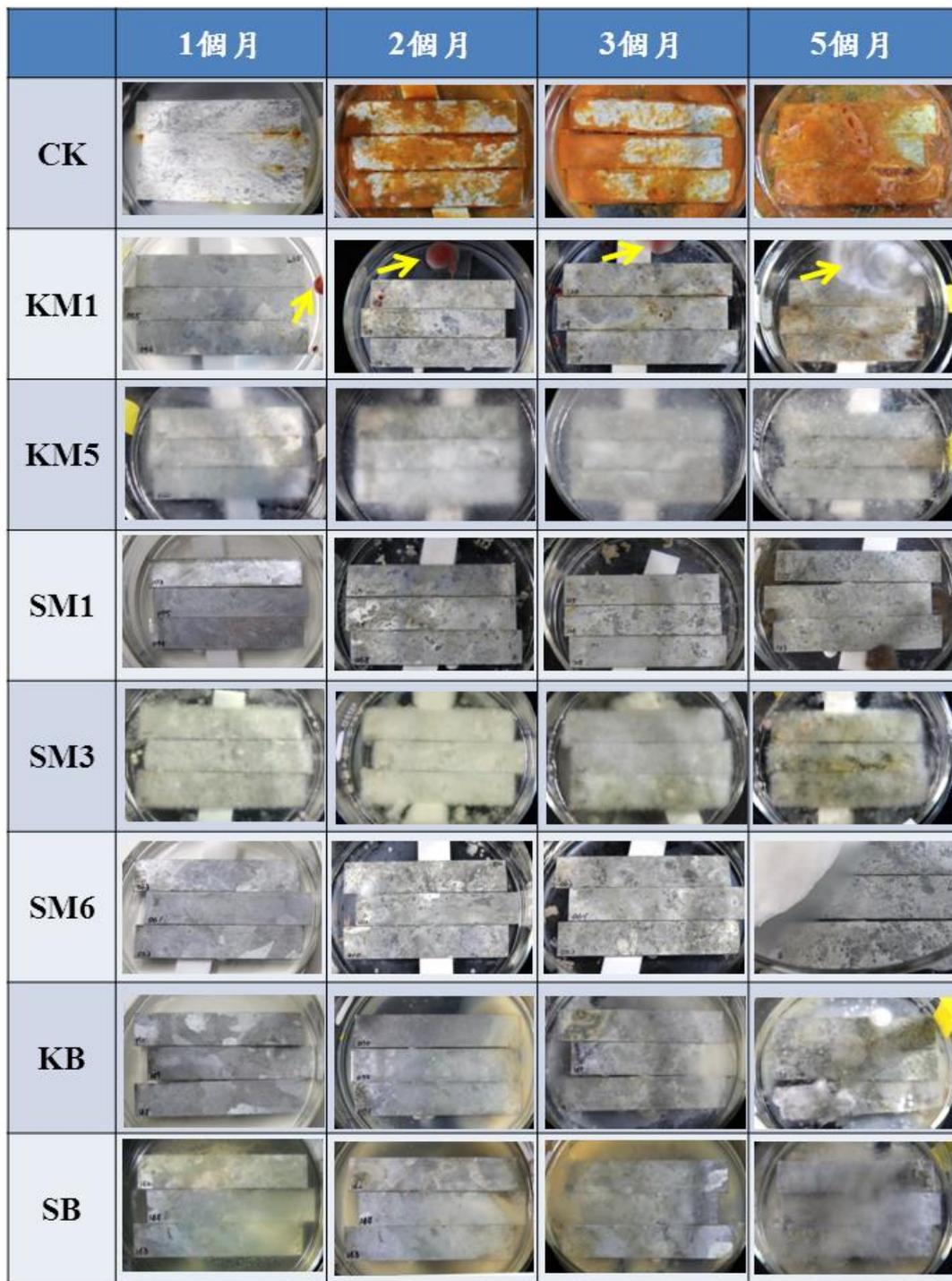


圖 2.3-2 桶材鍍鋅鋼片與本土分離菌株共培養 1~5 個月的外觀觀察