

行政院原子能委員會放射性物料管理局

深地層處置設施緩衝材料
熱-水力-力學耦合模擬研析
(期末研究報告)

計畫編號：104FCMA004

計畫主持人：張瑞宏 教授

共同主持人：黃偉慶 教授

受委託單位：國立中央大學

報告日期：中華民國 104 年 12 月

摘要

用過核子燃料深層地質處置為先進核能國家一致認同是目前解決高放射性廢棄物最可行的方法。而其用過核子燃料深層處置場近場包括廢棄物包件、緩衝材料、回填材料等工程障壁及相鄰岩體所組成，其中工程障壁材料如緩衝材料及回填材料屬於土石材料，其受水分入侵時之行為與所處環境溫度場相關，而由於各工程障壁元件皆緊密圍束於處置坑及連通隧道內，其力學行為亦受環境溫度及水分所影響，故對熱-水力-力學 (T-H-M) 耦合作用相關課題進行研究，其重點分成三個部份，第一部分為國外緩衝材料相關性質收集與彙整，並針對國外 T-H-M 階段性報告進行研析；第二部份於實驗室進行小型試驗，針對緩衝材料熱傳導性質量測；第三部建立緩衝材料 T-H-M 有限元素分析模型，與國外分析結果進行驗證並進行相關參數分析。對於緩衝材料相關性質已彙整各國用過核子燃料最終處置近場配置、配比與材料參數等資訊，另外對於緩衝材料熱傳性質已彙整瑞典與日本相關數據。再者蒐集瑞典放射性安全管制署(SSM)對 SKB 所提 SR-Site 審查報告書進行研析。最後有限元素分析模擬中，針對處置場演化歷程中，由開挖、營運至封閉階段之 T-H-M 耦合效應進行探討，期能有助於用過核子燃料最終處置計畫工程障壁相關審查工作。

目錄

第一章 緒論.....	12
1.1 研究動機.....	12
1.2 研究方法與範圍.....	13
1.3 研究目的.....	15
第二章 文獻回顧.....	16
2.1 深層地質處置設計概念.....	16
2.2 各國處置場現況.....	18
2.2.1 各國處置概況.....	18
2.2.2 瑞典.....	24
2.2.3 芬蘭.....	25
2.2.4 日本.....	26
2.2.5 德國.....	28
2.2.6 中國.....	30
2.3 用過核子燃料之緩衝材料.....	33
2.4 THMC 耦合效應.....	52
2.5 THM 耦合相關研究.....	61

2.6 瑞典 THM 相關審查報告研析.....	65
2.7 國外最終處置計畫階段性報告審查結果評析	72
第三章 實驗方法與材料.....	73
3.1 試驗材料.....	73
3.2 試驗儀器與模具-ASTM D5334 暫態熱源法	74
3.2.1 資料擷取系統.....	76
3.2.2 熱探針及熱源供給系統.....	76
3.2.3 試驗模具、試體製作.....	78
3.3 試驗儀器與模具-攜帶式熱傳導係數	82
第四章 熱傳試驗結果分析.....	85
第五章 有限元素分析方法.....	88
5.1 分析工具.....	88
5.2 代表體積單元.....	88
5.3 完全耦合熱-水-力學分析	89
5.4 二維軸對稱完全耦合熱-水-力學分析之模型建立.....	90
5.5 模型之材料參數.....	92
5.6 初始條件與邊界條件.....	93

5.7 三維幾何模型.....	95
第六章 熱-水-力學分析之瑞典文獻驗證.....	96
6.1 網格設置與建立幾何模型.....	96
6.2 材料參數介紹.....	98
6.3 初始條件與邊界條件.....	103
6.4 熱傳分析結果.....	105
6.5 耦合熱-水-力學分析驗證結果.....	108
第七章 三維模型完全耦合熱-水-力學之參數分析.....	111
7.1 模型幾何與材料參數.....	111
7.2 初始條件與邊界條件.....	113
7.3 多處置孔之間距尺寸效應分析.....	116
7.4 長向距離分析之結果.....	117
7.5 短向距離分析之結果.....	118
第八章 結論.....	126
參考文獻.....	128

圖目錄

圖 2.1 日本深地層處置場多重障壁概念圖.....	17
圖 2.2 各國處置場進展和比較.....	21
圖 2.3 瑞典處置場設計概念圖.....	24
圖 2.4 芬蘭處置罐圖示.....	25
圖 2.5 芬蘭處置場設計概念圖.....	26
圖 2.6 日本瑞浪(Mizunami)深地層研究所斷面圖.....	26
圖 2.7 日本幌延(Horonobe)深地層研究計畫斷面圖.....	27
圖 2.8 Goareben 處置場概念圖(左)與多重障壁系統之概念圖(右).....	29
圖 2.9 德國處置場對於處置罐處置方式示意圖.....	29
圖 2.10 岩鹽丘之石鹽礦床在德國北部的分佈.....	30
圖 2.11 中國高放射性廢棄物處置場候選區域.....	32
圖 2.12 中國進行高放廢棄物處置之三階段.....	32
圖 2.13 可交換鈣離子對膨潤土結構與回脹性影響示意圖.....	38
圖 2.14 可交換鈉離子對膨潤土結構與回脹性影響示意圖.....	38
圖 2.15 鈉型膨潤土變質示意圖.....	41
圖 2-16 土壤熱學性能與含水量關係.....	44
圖 2-17 導熱係數 λ 時間和溫度關係.....	45
圖 2.18 日本 PNC 膨潤土熱傳導係數與溫度關係結果.....	48

圖 2.20 處置場近場環境 THMC 影響.....	56
圖 3.1 本試驗所用 SPV 200 膨潤土.....	73
圖 3.2 實際試驗儀器之配置圖.....	74
圖 3.3 試體加熱系統之配置圖.....	75
圖 3.4 試驗儀器連結配置簡圖.....	75
圖 3.5 MX100-02E 資料擷取系統(左)；程式操作介面(右).....	76
圖 3.6 熱源供給系統(左)；熱探針(右).....	77
圖 3.7 熱探針升溫及持溫曲線.....	77
圖 3.8 實驗模具組 (mm).....	78
圖 3.9 壓製完成所得之 SPV200 膨潤土試體.....	79
圖 3.10 SPV200 膨潤土試體壓製完成與熱探針示意圖.....	79
圖 3.11 試體俯視示意圖.....	80
圖 3.12 壓桿、內模組合圖.....	81
圖 3.13 試驗試體完成組裝組合圖.....	81
圖 3.14 攜帶式熱傳導係數測儀.....	82
圖 3.15 表面接觸式探測計.....	83
圖 3.16 探測計量測示意圖.....	83
圖 3.17 攜帶式熱傳試驗模具.....	84
圖 4.1 熱探針法之各乾密度於不同溫度下熱傳導係數.....	85

圖 4.2 攜帶式與熱探針法之各乾密度於不同溫度下熱傳導係數對比	86
圖 5.1 處置場內部之代表體積單元示意圖(俯視圖).....	88
圖 5.2 完全耦合熱-力學分析流程圖	90
圖 5.3 二維軸對稱模型 3D 示意圖	91
圖 5.4 二維軸對稱分析模型網格之尺寸示意圖.....	91
圖 5.5 邊界對流係數設置示意圖	93
圖 5.6 衰變熱隨時間變化之趨勢.....	94
圖 5.7 模型之力學邊界條件束制示意圖.....	94
圖 5.8 三維模型之示意圖	95
圖 6.1 處置場二維軸對稱模型材料示意圖.....	97
圖 6.2 分析模型網格之尺寸示意圖.....	98
圖 6.3 母岩與緩衝材料之飽和度與吸力關係曲線圖.....	101
圖 6.4 熱衰減率隨時間變化之趨勢.....	103
圖 6.5 邊界對流係數設置示意圖	104
圖 6.6 模型之力學邊界條件束制示意圖.....	105
圖 6.7 熱傳分析溫度歷時圖.....	106
圖 6.8 熱傳分析於第 16 年時廢料罐周圍之溫度分佈輪廓圖	107
圖 6.9 緩衝材於第 4 年飽和度分佈.....	109
圖 6.10 廢料罐頂部沿徑向積分點之飽和度歷時圖.....	110

圖 7.1 模型尺寸示意圖	111
圖 7.2 模型尺寸放大示意圖	112
圖 7.3 邊界熱對流係數設置示意圖	114
圖 7.4 熱源衰變圖歷時圖	114
圖 7.5 力學邊界條件設置示意圖	115
圖 7.6 孔隙壓力邊界示意圖	115
圖 7.7 各尺寸孔隙壓力分析結果(第 8 年)	120
圖 7.8 各尺寸應力分析結果(第 8 年)	120
圖 7.9 各分析尺寸溫度歷時圖(緩衝材料內側)	122
圖 7.11 各分析尺寸飽和度歷時圖(緩衝材料內側)	122
圖 7.10 各分析尺寸最高溫之熱傳分析之雲彩圖	123
圖 7.12 各分析尺寸飽和度分析之雲彩圖(第 8 年)	124
圖 7.13 各分析尺寸飽和度分析之雲彩圖(第 8 年)	125

表目錄

表 2.1 各國處置場規格與處置方法.....	20
表 2.2 各國用過核子燃料管理及處置動態 2014 年 1 月-2015 年 1 月.....	22
表 2.3 各國用過核子燃料管理及處置動態 2015 年 2 月-10 月.....	23
表 2.4 各國緩衝材料性質彙整.....	39
表 2.5 在 1atm 與 20°C 狀態下土壤成份之熱學性質.....	45
表 2.6 日本 PNC 膨潤土試體編號.....	46
表 2.7 日本 PNC 膨潤土熱傳導係數結果.....	47
表 2.8 日本 JNC 膨潤土 1.0-1.4 乾密度熱傳導係數量測結果.....	49
表 2.9 日本 JNC 膨潤土 1.6 乾密度熱傳導係數量測結果.....	50
表 2.10 日本 JNC 膨潤土 1.8、2.0 乾密度熱傳導係數量測結果.....	51
表 2.11 瑞典緩衝材料 T-H-M-C 交互耦合作用.....	55
表 2.12 處置場初始狀態.....	57
表 2.13 處置坑施工時 THMC 程序與影響.....	58
表 2.14 處置場營運中 THMC 程序與影響.....	58
表 2.15 放置完成時 THMC 程序與影響.....	59
表 2.16 處置場封閉後 THMC 程序與影響.....	59
表 2.17 封閉後數百年處置場 THMC 程序與影響.....	60
表 2.18 封閉後數千年處置場 THMC 程序與影響.....	60

表 2.19 封閉後數十萬年處置場 THMC 程序與影響	61
表 2.20 SSM 建議之審查議題.....	71
表 3.1 SPV 200 膨潤土成份分析表	74
表 4.1 攜帶式各乾密度熱傳測量儀數據.....	87
表 5.1 分析所需材料參數.....	92
表 6.1 熱傳分析材料參數.....	99
表 6.2 緩衝材料之飽和度與熱傳係數對應關係.....	99
表 6.3 各材料於水力模型分析之力學參數.....	100
表 6.4 緩衝材料水力傳導係數與溫度、孔隙比之關係	101
表 6.5 母岩與緩衝材吸水曲線之孔隙壓力與飽和度對應關係	102
表 6.6 各材料於水-力學分析之初始條件	104
表 6.7 文獻[19]與本文非耦合熱傳分析之比較.....	106
表 6.8 文獻[19]與本文水力分析結果中緩衝材料飽和時間之對照.....	109
表 6.9 文獻[19]與本文水力分析結果最大位移之對照.....	109
表 7.1 模型分析之材料參數.....	112
表 7.2 長向尺寸最高溫與發生時間比較表.....	117
表 7.3 緩衝材料飽和時間之對照.....	118
表 7.4 短向尺寸最高溫與發生時間比較表.....	119
表 7.5 緩衝材料飽和時間之對照.....	119

第一章 緒論

1.1 研究動機

自 1980 年代以來，如何安全有效的處置高放射性廢棄物成為核能使用國家高度重視的環保議題。核電廠反應器所產生之用過核子燃料極具放射性，其中所含核種壽命長達千百年至數十萬年以上，且放射性廢棄物因核種衰變作用會長期的釋放衰變熱。為不使核種影響自然環境，我國對放射性核廢料管理策略，曾就技術、安全、經濟、政治、人文社會與自然環境等因素考量近程、中程、長程計畫，近程採用廠內燃料池貯存；中程則進行乾式貯存；最後長程以最終處置作為我國之管理策略。對於用過核子燃料或高放射性廢棄物的最終處置，國際間一致採行「深層地質處置」的方式，以多重障壁(multiple barrier)的設計，將用過核子燃料置放於地下數百公尺的穩定地層中，利用廢棄物體、廢棄物包件、工程障壁及周圍岩層等構成層層保護，使其與人類生活圈完全隔離。各核能先進國家如美國、瑞典、加拿大、英國、法國、日本等，均長期進行處置技術的相關研究，可見相關技術的重要性。

深地層處置設施中，依照影響範圍之環境分為近場、遠場、生物圈，廢棄物衰變熱與放射性影響所及區域，包括廢棄物處置坑室或隧洞、緩衝區與回填區、開挖擾動區及周圍接觸母岩稱為近場(near field)；處置區域外圍未受衰變熱與輻射侵擾的基岩部分稱為遠場(far field)或地質圈(geosphere)，而人類與其他生命有機體居住之環境則稱為生物圈(biosphere)。高放射性廢棄

物深地層處置場的近場與遠場演化程序，主要受到熱學(thermal：T)、水力(hydraulic：H)、力學(mechanical：M)、化學(chemical：C)等四項因素而影響其預期功能。

緩衝材料所須具備的功能性質，包括低水力傳導特性、高回脹潛能、適當的熱傳導性以及遲滯核種遷移能力。而影響緩衝材料特性的重要因素為其材料組成與礦物特性，通常鈉型膨潤土的工程性質與鈣型膨潤土存有很大的差異；此外，緩衝材料的行為也與處置場址的環境有很大關聯性，而各國處置場的設計則必須綜合考量場址環境、材料特性後方能進行理想的設計。因此，雖然國際間目前對緩衝材料成效的研究甚多，然而由於考量的近場環境不同，難以將國外相關研究成果直接加以應用，故建立適合國內之環境與材料參數的本土化研究，具有不可替代的必要性。

1.2 研究方法與範圍

近場之 T-H-M-C 效應對於處置場整體功能的影響相當重要，而目前各國對此類耦合效應的試驗尚未發展成熟，多透過國際合作，一方面進行地下實驗室的試驗模擬，一方面發展數值模式擴大模擬的規模，以便能掌握整個處置場的功能成效。其中，化學效應因參與平衡反應的因子與條件極為複雜，加以時間因素難於短時間內獲致成果，故目前各核能先進國家皆集中研究能量於 T-H-M 耦合效應的實驗及數值模擬。

藉由實驗室之模擬試驗，可取得適於國內處置環境與本土緩衝材料的 T-H-M 設計參數，以與國外常用膨潤土參數值進行比較，並了解膨潤土在非飽和狀態下，受到熱-水力耦合作用時，膨潤土性質及近場溫度場分布，作為未來國內處置計畫細部設計之參考依據。試驗方面，本研究將以膨潤土為研究材料，探討深地層處置地下水環境下的熱-水力-力學耦合機制。

在模擬分析方面，將採用有限元素法進行模擬分析。由於緩衝材料的熱-水力-力學耦合效應對於障壁系統之劣化及破壞機制有直接的影響，為考慮工程的安全及穩定性，對於處置運作之中長期間三者耦合行為必須有詳細的評估。目前對於處置場問題之研究，主要以數值分析及地下實驗室試驗為主。在數值分析方面，相關的研究多著重於處置區近場行為之探討，研究重點在於實際現場狀況之模擬與各類型參數之驗證評估。早期由於電腦效能的限制，一般多侷限於單一廢料處置孔之問題，近期則已逐漸擴展至多處置孔之情況，各研究中所使用的材料模型多是由特定位址之材料行為建構而成，並不完全適用於其他位址，在應用上較受侷限。整體而言，不論是緩衝材料或其周圍之工程及天然障壁，在模擬上必須採行三維之暫態模式，同時在材料及數值模型的建立上，亦需要審慎的處理，始能獲得較符合實際狀況的分析結果。本研究因此針對多孔處置場之問題，依據我國深層地質處置的初步設計概念，採用三維有限元素方法，建立適當的數值模型，對於緩衝材料中長期之熱-水力-力學耦合效應進行暫態分析。

1.3 研究目的

本研究首先工作將透過文獻回顧，以掌握目前國際間用過核子燃料深層地質處置之工程障壁設計及材料特性要求，同時針對各國材料特性及其於熱-水力-力學耦合作用下之行為加以比較分析整理，以供國內深地層最終處置緩衝材料考量，部分資料並可提供本研究有限元素模型分析參考運用。

接著將建立緩衝材料熱-水力-力學耦合計算模型，並提出一運算方案，期能有效推估相應之溫度場、飽和度場、與應力場；其次，將考慮多孔處置場及其周圍之多重障壁系統，以各組成材料之特性、及處置場內部之幾何配置作為主要參數，藉由數值分析，針對各相關參數在處置場緩衝材料再飽和程序開始前之影響效應進行評估。

第二章 文獻回顧

2.1 深層地質處置設計概念

對於用過核子燃料(高放射性廢棄物)，深地層處置為國際間核能先進國家對放射性廢棄物最終管理較推崇之方式，依照影響範圍之環境分為近場、遠場、生物圈，其近場(near field)包含廢棄物處置坑室、隧洞、緩衝區與回填區、開挖擾動區及周圍接觸母岩，此部分皆為用過核子燃料衰變熱與輻射影響所及區域；遠場(far field)或地質圈(geosphere)則為處置區域外圍未受衰變熱與輻射侵擾的基岩部分；生物圈(biosphere)為人類與其他生命有機體居住之環境稱之。

如圖2.1日本深地層處置場多重障壁概念圖所示，其設計理念為選取足夠體積且完整的岩體，於適當之深度鑽鑿坑道，將固化處理後之放射性廢棄物，利用廢棄物包件、緩衝材料、回填材料及周圍岩層等組成多重障壁系統(multi-barrier system)在高放射性廢棄物四周加以圍阻，構成近場的一部份。其功能以阻絕、延遲放射性廢棄物外釋或影響地下環境，達到將放射性廢棄物永久隔離生物圈之目的。

在用過核燃料經中期儲存30~40年後，利用內部鑄鐵外部銅殼之廢棄物罐裝填用過核燃料，提供足夠強度與抵抗外部侵蝕能力保護內部廢棄物體，也可防止核種外釋至自然環境中。接著將廢棄物罐運送至處置場址，利用豎井輸送至地下至少300公尺或更深處已開挖好的岩體處置坑中，在將廢棄物

罐嵌入前，處置坑內事先已襯填好夯實的膨潤土塊（處置坑底部）與膨潤土圈（環繞於廢棄物罐周圍），嵌入廢棄物罐後再利用膨潤土塊填滿處置坑。此項介於處置基岩與廢棄物罐間之系統稱之為緩衝材料(buffer)，具有防止侵蝕性物質直接侵蝕廢棄物罐及減緩廢棄物罐內核種釋出等功能，在設計使用年限內，確保廢棄物與外部環境完全隔離。當處置工作完成後，工作坑道與豎井將會利用膨潤土與碎石混合物填充，以維持處置場的穩定性。



圖 2.1 日本深地層處置場多重障壁概念圖[1]

2.2 各國處置場現況

用過核子燃料(高放射性廢棄物)需要長期遠離我們的生活環境，以「深層地質處置」的方法能夠以穩定且安全的放置在地下深處，是國際上選擇最恰當之處置方法。彙集國外處置場相關經驗當中，即便以長期管理放射性廢棄物為共同的目標，也會因為每個國家的文化、政治和歷史的情況下而有不同的計劃過程。因此，彙集各國家對於用過核子燃料之最終處置發展現況、掌握最新動態及消息，為達成最終安全長期管理放射性廢棄物目標之必要程序與步驟。

2.2.1 各國處置概況

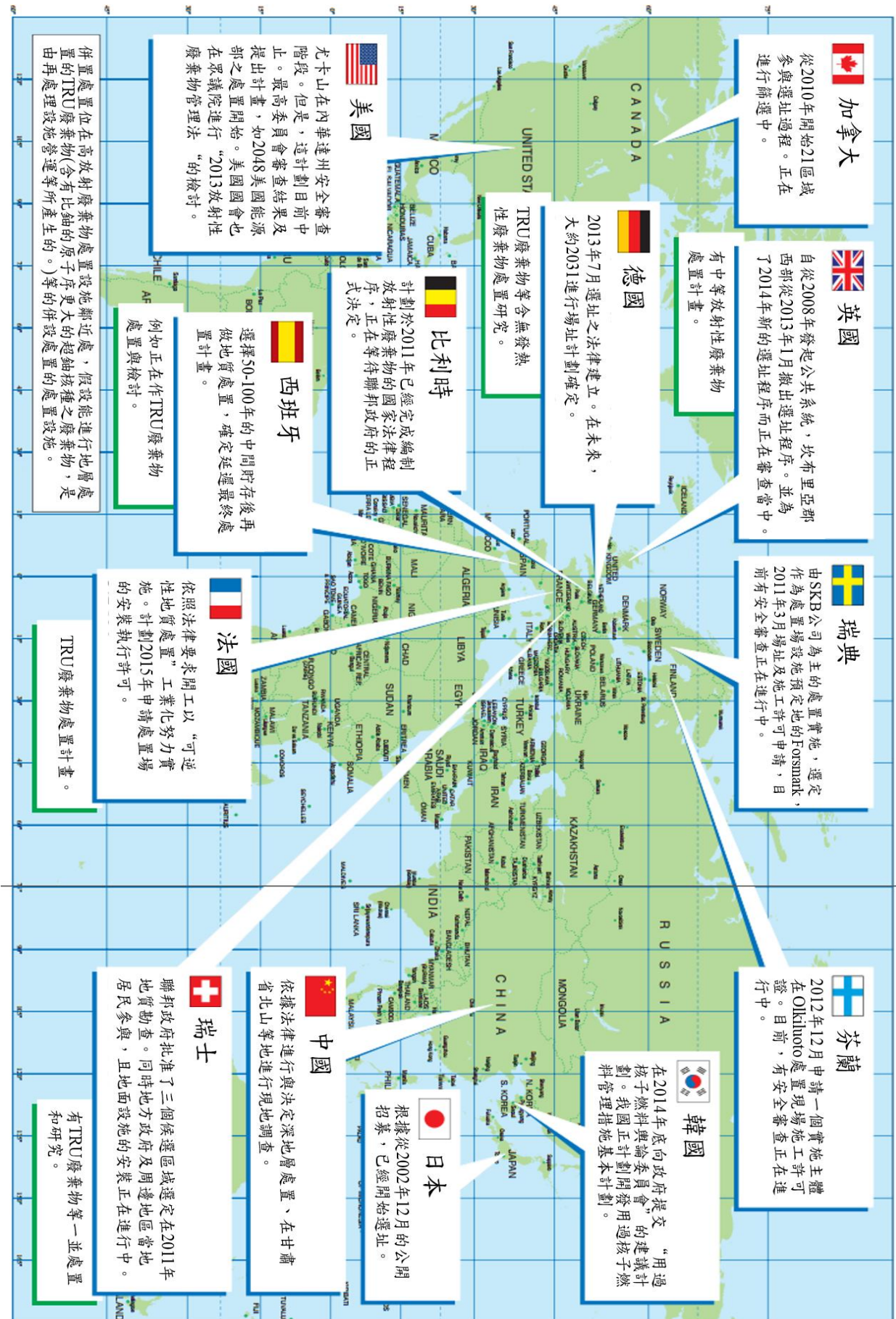
目前各國對於用過核子燃料(高放射性廢棄物)提出之長期管理政策，多以深地層處置為處置目標(深度多介於300~1000公尺)；且考量天然障壁功能性不同而選擇結晶岩類、沉積岩類或鹽岩。目前各國均積極進行地下實驗室現地試驗工作，一方面取得現地參數，另一方面可驗證實驗室或模式預測結果。

表2.1彙整各國處置場規格與處置方法，在處置場工程障壁方面，除了英國與德國，其他國家皆使用純膨潤土或膨潤土混合不同比例的砂石製作緩衝材料與回填材料；而在處置場的位置設置方面，各國最終處置場預定的處置深度大約在300~1000公尺處，除了美國之外，其他國家的處置場位置皆

在飽和基岩帶。在各國的處置概念中，以瑞典的KBS-3 概念發展較早且成熟，且該國之用過核燃料特性與規模亦較近似我國，加上其研發過程之相關技術文獻亦較為完整詳盡，因此國內深層處置場設計概念係以瑞典KBS-3 處置概念為參考對象；另外日本其地質環境特性與我國類似，並且研究發展規劃相當完整，亦值得我國學習參考。

由圖2.2之各國處置場進展和比較，可了解國際上各國目前之進度狀況，以圖2.2中顯示資訊進行分類整理，目前比利時、西班牙、韓國這三個國家位於用過核子燃料處置計畫方法討論階段；日本、加拿大、中國、瑞士、英國、德國更進一步處於處置場公開招募以及文獻蒐集調查之階段；再下一步法國已進行精密調查處置場場址階段之國家；而目前發展較為成熟之國家為瑞典、芬蘭、美國已進行安全性審查階段，但其中美國內華達州之尤卡山安全審查目前為中止狀態，將進行進一步計畫與檢討。

圖 2.2 各國處置場進展和比較[3]



由日本放射性廢棄物管理研究中心文獻及網站所彙整各國於2014年一月至2015年十一月之最終處置場之最新動態資訊，如表2.2、表2.3所示，由此彙整能更簡易掌握各國重要與最新狀況。

表 2.2 各國用過核子燃料管理及處置動態 2014 年 1 月-2015 年 1 月 [3]









2014年	
	1月16日 加拿大用過核子燃料之處置場選址狀況中，剔除了安大略州南部內兩個地區。
	1月23日 西班牙放射性廢棄物管理(ENRESA)，申請暫存設施ATC之建設許可。
	1月29日 韓國用過核子燃料之公共委員會，執行策劃之民意計畫。
	2月3日 法國加強與民眾之公開討論，並且於市議會中發表地層處置計畫之相關見解。
	2月12日 法國國家委員會(CNDP)於公開發表會中出版一本總報告書。
	2月13日 英國核能除役管理局(NDA)發表2013版本之放射性廢棄物處存庫報告書。
	2月15日 美國廢棄物隔離試驗廠(WIPP)發生輻射外洩事件。
	3月3日 英國政府開始公開協議，針對國外用過核子燃料之擬定相關替代管理方案。
	3月4日 美國在2015年度會計預算中，編入7900萬美金處理高放射性廢棄物的相關事項。
	3月5日 美國卡爾斯巴德環境監控研究中心(CEMRC)發表WIPP廢氣塔空氣過濾器放射線性分析。
	3月14日 美國廢棄物隔離試驗廠(WIPP)發表火災事故之調查報告書。
	3月26日 美國廢棄物隔離試驗廠(WIPP)重新提出關於相容性申請書。
	3月28日 加拿大用過核子燃料處置場選址狀況-開始第3階段第2回合之區域進度。
	4月1日 英國相關處置機關變動-新組織為廢棄物管理局(RWMD)和核能監管局(ONR)。
	4月10日 瑞典SSM發表關於用過核子燃料處置之民意調查結果。
	4月10日 德國場址選定法成立[高放射性廢棄物處置委員會]。
	4月15日 瑞士聯邦能源局修改地層處置之場址選定程序。
	4月24日 美國能源部首次公布廢棄物隔離試驗廠(WIPP)輻射外洩之初步調查報告。
	4月30日 芬蘭地層特性調查設施(ONKALO)之建設狀況-直立坑道挖掘已完畢。
	5月6日 法國放射性管理機關(ANDRA)決定地層處置計畫之後續相關事宜並發表總報告書。
	5月24日 瑞士聯邦能源局決定地層處置場之地面設施設置區域選定。
	5月30日 美國廢棄物隔離試驗廠(WIPP)針對輻射外洩事件廢棄物容器實施隔離計畫。
	6月17日 加拿大用過核子燃料處置場選定狀況-決定撤除安大略州之尼皮貢鎮。
	6月25日 瑞士聯邦委員會決定廢物管理基金條例修正案。
	6月27日 瑞典監管部門公布2015年核廢料基金單價預算。
	7月24日 英國政府發表地層處置設施之新場址選定程序白皮書。
	8月21日 加拿大用過核子燃料場址選定狀況-安大略州的休倫湖中央直轄市開始第3階段第1回進度。
	8月26日 美國NRC批准用過核燃料繼續暫存之相關規則。
	8月28日 瑞士ENSI實施地球科學調查來初步判斷安全評估。
	8月29日 德國聯邦新放射性廢棄物處置機關，放射性廢棄物處置局(BfE)正式設立。
	9月30日 美國廢棄物隔離試驗廠(WIPP)重新營運，並公布未來之恢復計畫。
	10月16日 英國核能除役管理局(NDA)之放射性廢棄物管理會(RWM)針對地質學相關的技術事件發表報告書。
	11月18日 瑞士聯邦能源局發表地層處置場對社會、經濟、環境相關影響之最終調查結果。
	12月2日 加拿大用過核子燃料處置場選定狀況-安大略州的布魯斯郡內5個區域之第3階段第1回已調查完畢。
	12月16日 法國發表地層處置場封閉技術之相關安全規定見解。
	12月19日 瑞典SKB申請延長低中放射性廢棄物處置場。
2015年	
	1月19日 瑞典SKB申請用過核子燃料廢料罐封存設施之建設許可。
	1月20日 美國得克薩斯州地方政府批准用過核子燃料之暫存設施計畫。
	1月22日 加拿大用過核子燃料處置場選定狀況-安大略州北部6個區域之第3階段第1回已調查完畢。
	1月29日 美國NRC完成五冊完整尤卡山處置場的安全評估報告(SER)。
	1月30日 瑞士NAGRA發表第2階段地層處置場選定程序結果。

表 2.3 各國用過核子燃料管理及處置動態 2015 年 2 月-11 月

2 月 03 日	瑞典 SKB 公司提出用過核子燃料罐封閉場所補充計畫書之施工許可申請。
2 月 03 日	美國 2016 年高放射性廢棄物相關處置之財務預算請求 1 億 8.36。
2 月 10 日	瑞士 NAGRA 公開第二階段最終處置場選址結果。
2 月 10 日	美國 WCS 公司提交施用過核子燃料臨時貯存設在 NRC 申請批准。
2 月 16 日	芬蘭輻射與核安全中心 (STUK) 公開用過核子燃料處置場申請施工許可證之安全審查的結果。
3 月 05 日	加拿大用過核子燃料處置場選址情況 2 個地區剔除。
3 月 24 日	美國內華達州選出國會眾議院的代表討論尤卡山處置場址。
4 月 15 日	德國“高放廢棄物處置委員會”建議建立一個具體新的處置方案。
4 月 17 日	美國能源部廢物隔離試驗工廠 (WIPP) 公開美國的輻射事件之第二階段事故調查報告。
5 月 18 日	法國核能安全管理局 (ASN), 對於放射性廢物管理機構 (ANDRA) 在最終處置場的風險管理上提出評審結果。
5 月 21 日	英國敦雷新的低放射性廢物處置設施開始處理廢棄物。
5 月 25 日	德國“高放廢棄物處置委員會”研究情況檢討。
5 月 26 日	芬蘭原子能法和輻射法修正案。
6 月 02 日	英國威爾士政府確定在實施過程中開始公開諮詢作為高放廢棄物最終處置管理方針。
6 月 18 日	韓國公開用過核子燃料輿論委員之“用過核子燃料管理之建議 (草案)”。
6 月 19 日	美國放射性廢棄物的技術審查委員會 (NWTRB) 是由美國能源部單獨進行處置計畫並公開評估報告。
6 月 22 日	法國國家評估委員會 (CNE) 公開第 9 階段評估報告。
6 月 26 日	瑞典 SSM 回顧公開用過核子燃料最終處置場選址和施工許可證之中期 (第一階段) 安全審查成果。
6 月 26 日	德國 BMUB Goareben 建議玻璃化儲存替代臨時儲存設施。
7 月 03 日	法國放射性廢棄物管理機構 (ANDRA) 公佈 2015 國家放射性廢棄物儲存報告。
7 月 13 日	法國法案成立最終處置場之安裝許可證申請日程安排。
7 月 30 日	英國放射性廢物管理公司 (RWM) 公開發表最終處置場放射性廢棄物儲存報告書。
8 月 10 日	英國政府宣布最終處置場之內容草案關於可行性發展評估及棲息地評估法規。
8 月 21 日	德國聯邦政府批准國家放射性廢棄物管理計劃。
9 月 08 日	韓國的中低放射性廢物處置場第一階段工程完成。
9 月 08 日	瑞士 NAGRA 在地質候選區域實施三維彈性波勘探許可。
9 月 10 日	英國放射性廢棄物管理公司 (RWM) 在地質篩選上建議開始公眾諮詢。
9 月 24 日	英國核能安全監管機構對深地層處置之執行發表了一篇綜合報告。
10 月 19 日	瑞士聯邦委員會發表關於補助與賠償關於深地層處置設置地區之報告。
10 月 20 日	英國放射性廢棄物轉讓協議 (WTC) 之契約價格制定受到歐盟委員會 (EC) 批准- 公開國家補助不相違背之條款。
10 月 20 日	德國聯邦政府保障資金方式考慮建立委員會之決議。
10 月 30 日	加拿大用過核子燃料處置場之安大略省中部休倫市進行第三階段第二回進度。
11 月 12 日	芬蘭政府發放用過核子燃料處置場施工許可證。
11 月 19 日	美國的原子能管理委員會 (NRC) 舉行用過核子燃料管理部門之監管會議。
11 月 24 日	美國放射性廢棄物技術審查委員會 (NWTRB) 公布深地層處置場之選址報告。

2.2.2 瑞典

瑞典對於高放射性廢棄物處置場址調查工作分為兩階段進行：

第一階段:為可行性研究，此階段工作仍不進行現場調查，主要就現有地質、水文地質、地球物理、地球化學等資料進行研究，從中分析其主要地質構造及岩性，並篩選出適合作為第二階段場址調查之用。

第二階段:場址調查階段為在可能場址範圍之內，進行地表調查（包括地質調查、地物探測等）、深井鑽探、孔內探測。最後依據場址調查結果決定最終場址。

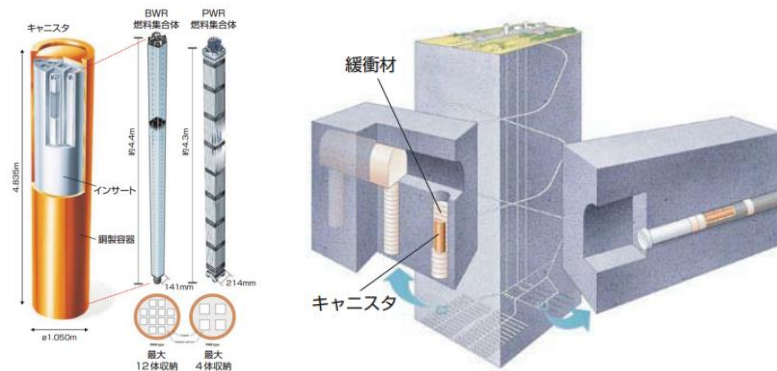


圖 2.3 瑞典處置場設計概念圖[3]

瑞典於 2009 年經公民投票選定 Forsmark 為用過核子燃料最終處置場，其設計概念如圖 2.3，瑞典核燃料及廢棄物管理公司(SKB)在 2011 年完成 Forsmark 最終處置場之安全分析報告，並向瑞典的輻射安全機關(Swedish Radiation Safety Authority(SSM))正式提送用過核子燃料最終處置場及封裝廠之建造申請。預訂於 2015 年開始興建處置場，2025 年開始營運，但審查機關要求提交更完整研究內容，因此至今尚未有最新動作。

2.2.3 芬蘭

芬蘭政府 2015 年 11 月 12 日批准 Posiva 處置執行機構之建設許可證，在 Olkiluoto 建造用過核子燃料最終處置場，成為世界第一個通過建造許可的最終處置場。用過核子燃料最終處置場，預計建於芬蘭 Olkiluoto 西南部，處置深度為地下 400-450 m。對於處置罐設計，外表由銅製成，裡面由鑄鐵製成之雙層結構，確保安全性。處置場之處置容量高達 6500 噸，此外，施工許可證之許可條件要求項目為處置場對環境的影響分析、用過核子燃料的回收可能性、運輸風險、可能影響處置之因素。

Posiva 為芬蘭核廢棄物管理組織機構，曾在 2012 年 12 月提交了規劃許可申請，經濟部為監管機構收到施工許可證申請，按照原子能法和核燃料條例規定程序，並且 2015 年 2 月安全審查機構輻射與核安全中心 (STUK) 提交了一份書面審查意見。經濟部根據已提交的書面意見，做好對施工許可證的許可條件之研究。



圖 2.4 芬蘭處置罐圖示[3]



圖 2.5 芬蘭處置場設計概念圖[3]

2.2.4 日本

日本放射性廢棄物處置專責機構：原子力發電環境整備機構(Nuclear Waste Management Organization of Japan, NUMO)於2010年執行「地層處置事業的安全確保(2010年度版)」計畫，於2011年發布正式報告(報告編號 NUMO TR-11-01) [4]，藉以澄清安全概念與證明技術的進展，並做為選址與公眾溝通的背景技術資訊。

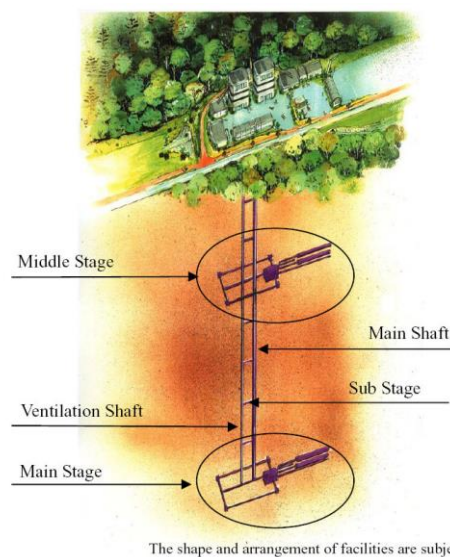


圖 2.6 日本瑞浪(Mizunami)深地層研究所斷面圖[4]

現行日本對於候選處置母岩之考量主要有二種：(一)以花崗岩為主要母岩；(二)以沉積岩類為主要母岩。對於處置技術之研發以及現地試驗及驗證，日本於1996年推展「瑞浪(Mizunami)超深地層研究所」試驗計畫（花崗岩地層），預計於2015年完成深度1000公尺之地下實驗室，如圖2.6所示，但目前尚未有最新動態消息之發布，另外沈積岩部分則於2000年開始推展「幌延(Horonobe)深地層研究計畫」，預計完成深度500公尺之地下實驗室，如圖2.7所示。

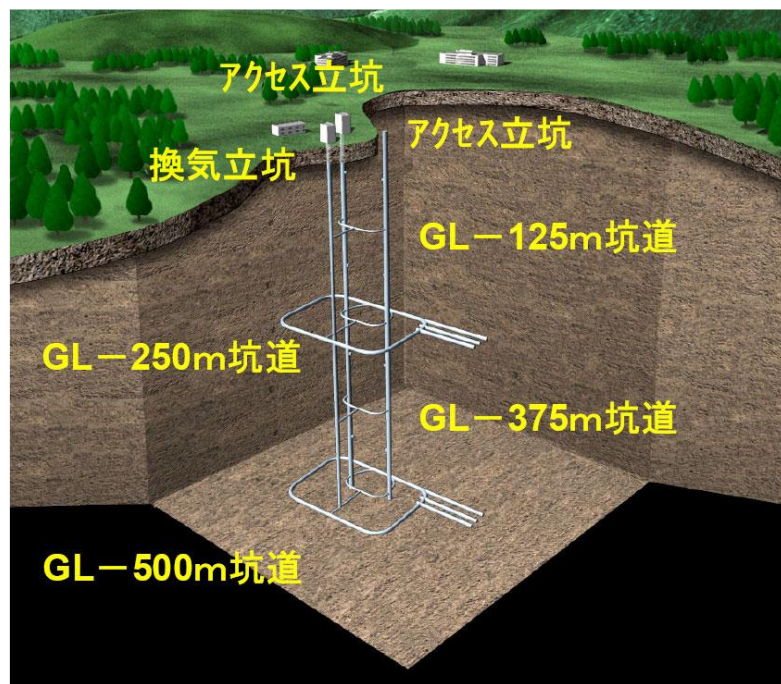


圖 2.7 日本幌延(Horonobe)深地層研究計畫斷面圖[4]

2.2.5 德國

德國用過核子燃料最初政策是以委託國外進行再處理之政策，因此委託國外分別是法國（COGEMA）與英國(BNFL)簽訂用過核子燃料再處理之契約。於 2002 年修訂原子能法，改變其政策，禁止運送用過燃料到國外進行再處理。另外德國高放射性廢棄物之最終處置計畫，其計畫預計 2035 年完成，其中於 1979 年開始進行 Goareben 岩鹽調查，然而於 2013 年頒布新法律後，終止調查程序，重新進行選址階段，所以目前尚未決定調查區域及場址，爾後可能另作時程規畫調整。

如圖 2.8(左)顯示 Goareben 處置概念，該場址調查時間為 1979 年到 2011 年，處置深度為地下 840m，面積為 3km²。在工程障壁系統中，如圖 2.8(右)，工程障壁包裹放射性廢物之術語如一個木桶，其利用所述岩鹽層為天然屏障之地質構造作為研究。以兩種類型固定方法，如圖 2.9 所示，左側圖為處置隧道水平方法，其將廢棄物放置在側向處置孔，再進行填充碎石鹽作為回填材料；右邊顯示處置孔垂直放置方法，處置孔向下挖掘，處置罐放置在垂直方向，固定後，再進行填充碎石鹽作為回填材料。由圖 2.10 顯示德國之岩鹽資源相當的豐富，其分部甚廣。

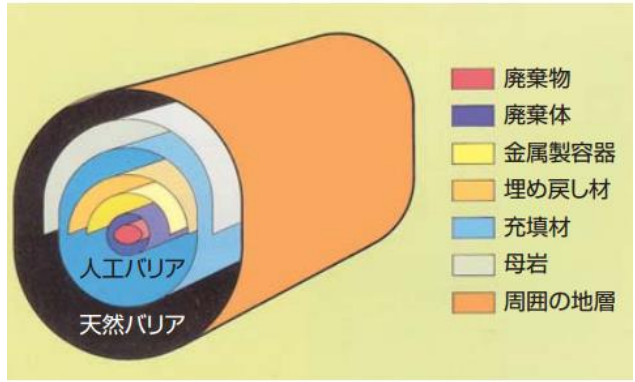
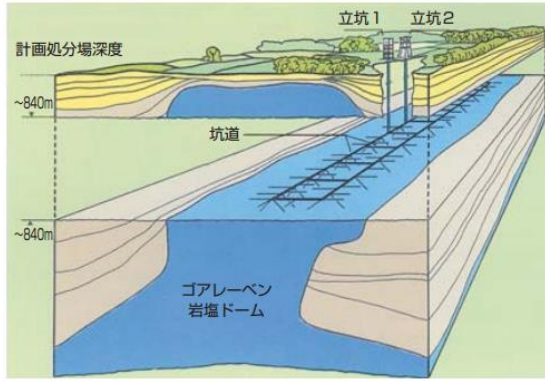
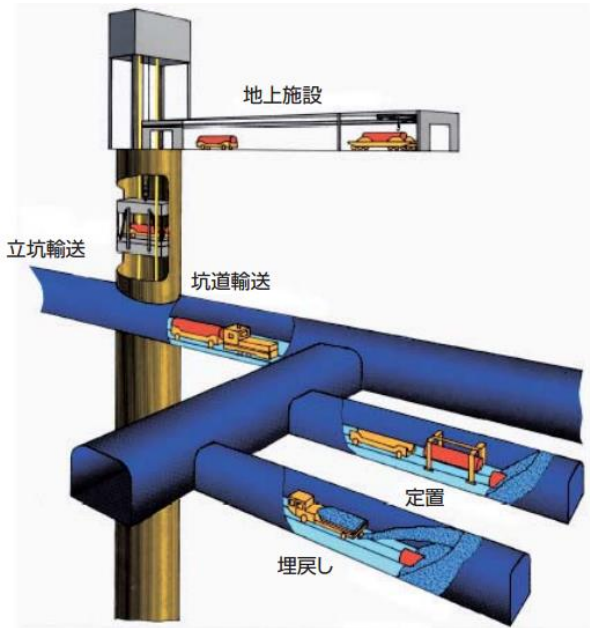
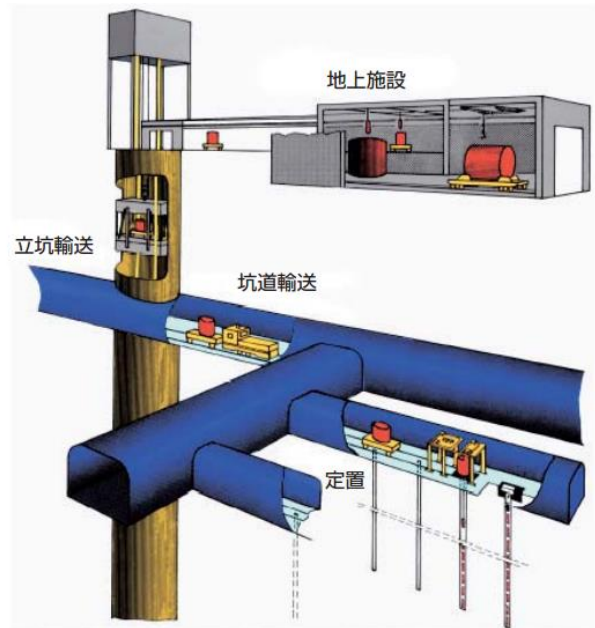


圖 2.8 Goareben 處置場概念圖(左)與多重障壁系統之概念圖(右) [3]



處置罐水平處置方式



處置罐垂直處置方式

圖 2.9 德國處置場對於處置罐處置方式示意圖[3]



圖 2.10 岩鹽丘之石鹽礦床在德國北部的分佈[3]

2.2.6 中國[21]

中國大陸 2003 年制定「中華人民共和國放射性污染防治法」，曾對 6 個區域，如圖 2.11，包括西南、廣東、內蒙、新疆、華東和西北進行評估，經評估後認為西北地區具有適當的地質、氣候及經濟條件，因此將其列為重點候選區，之後並將重點集中在甘肅省北山。北山位於內蒙古高原西南邊緣，氣候乾燥，方圓百公里內荒蕪人煙，且屬戈壁灘及沙漠地帶，中國大陸已於 2000 年在該地開始進行鑽探作業。

其中國高放射性廢棄物深地層處置場研究始於 1985 年，在核能工業部

制定初步的研究計畫，簡稱 SDC 計畫，並成立「研究協調組國家環保總局」及「環境保護研究機構」，針對「中華人民共和國放射性污染防治法」進行大量研究，研究和處置場工程建設包括三個階段，如圖 2.12：

- 2006—2020: 試驗室研究開發和處置場選址階段。

完成各學科領域試驗室研究開發任務（前期），初步選出處置場場址，完成地下實驗室的可行性研究，並完成地下實驗室建造的安全審評。

- 2021—2040: 地下試驗階段。

完成地下實驗室研究開發任務，初步確認處置場場址，完成處置場可行性研究報告，完成原型處置場可行性研究和安全審評。

- 2041—本世紀中葉: 原型處置場驗證與處置場建設階段。

完成原型處置場驗證實驗，最終確認處置場場址，完成處置場可行性研究和處置場建造的安全審評。建成處置場，通過處置場運營的安全審評。



圖 2.11 中國高放射性廢棄物處置場候選區域[3]

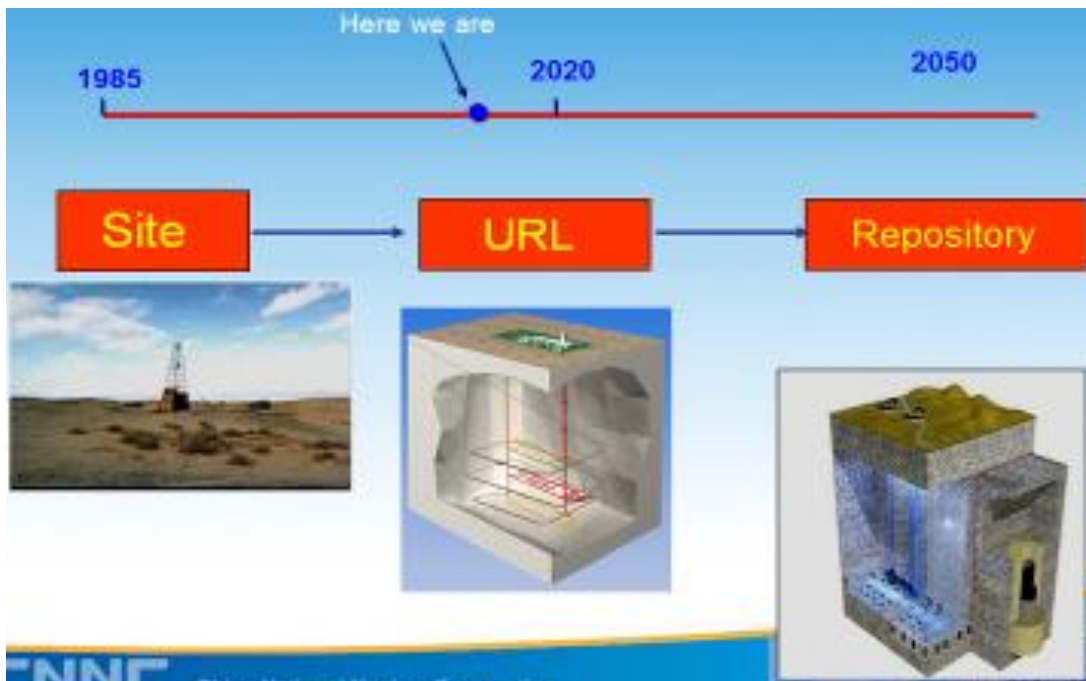


圖 2.12 中國進行高放廢棄物處置之三階段[22]

2.3 用過核子燃料之緩衝材料

2.3.1 緩衝材料概念與功能

深地層處置設計概念中，所採用之緩衝材料為高塑性膨潤土，將其夯實成膨潤土塊後，填充於廢棄物罐與岩體處置坑之間，其功用在於遲滯廢棄物罐內核種向外傳輸與延緩由遠場入侵之地下水，防止侵蝕性物質直接接觸廢棄物包件，以維持廢料罐之完整性，為防止核種外釋之重要安全因子之一。

緩衝材料須應付地下處置場不斷變化之地質環境，且須有良好的穩定性以維持處置場要求之使用年限，因此緩衝材料須具備下述各項功能[5]：

1. 適當回脹潛能：

在處置作業期間，緩衝材料與母岩或廢棄物包件間會產生空隙和間隙。處置作業完成後，緩衝材料必須能自我封塞，將緩衝材料與母岩及廢棄物包件之間的空隙填充補滿。在設計使用年限內，地下水侵入緩衝材料將難以避免，因此須有適當的回脹潛能，如此才能填塞裂縫及孔隙，以阻隔地下水的入侵。

2. 適當回脹壓力：

當緩衝材料吸水回脹填塞於地層的裂縫或工程設施的空隙之中後，如繼續吸水而無多餘空間可供回脹時，此時緩衝材料將產生過大的回脹壓力，並對廢棄物包件或岩體造成額外的應力。因此緩衝材須具備適當回脹壓力，以防壓迫廢棄物包件產生擠壓破壞，造成核種外釋。

3. 低乾縮量：

因處置場安置廢料後為密封狀態，廢料衰變熱的高溫將導致周圍環境增溫，此時緩衝材料中的黏土可能因高溫乾燥收縮而產生裂縫，如此將大幅影響緩衝材料的功能，故理想的緩衝材料須具備微量乾縮的特性，以降低裂縫的形成而造成核種外釋。

4. 廢棄物包件支撐：

係指在廢棄物包件長期荷載下，緩衝材料的承載能力與變形行為，其行為包括沉陷與潛變。理想的緩衝材料應具有足夠的支撐能力使廢棄物包件能長時間固定在緩衝材料內。

5. 應力緩衝效應(stress buffering effect)：

係指當地震或其他的地層活動發生及廢棄物包件腐蝕產物膨脹時，緩衝材料的存在可以將所產生的應力釋放，避免廢棄物包件直接受到擠壓而變形。

6. 長期穩定性：

在處置場的安全評估期程內，緩衝材料必須保持其物理性、化學性、及礦物相的穩定性，不會因為放射性廢棄物產生的衰變熱、廢棄物包件的重量而發生變化。

7. 低水力傳導性：

由於高放射性廢棄物與地下水接觸是導致放射性核種釋出或遷移的

主要途徑，因此緩衝材料必須具備低水力傳導的特性。在處置場中緩衝材料達飽和前，可延遲地下水和廢棄物包件接觸；一旦緩衝材料達飽和後，低水力傳導性的緩衝材料可遲緩核種在地下水中的傳輸。

8. 高熱傳導性：

熱源的產生來自於用過核燃料所釋放出來的衰變熱，緩衝材料及處置場周圍的母岩必須盡量將這些熱量由設施往遠場地質圈傳遞；如果熱傳導率過低，則緩衝材料可能因高溫而喪失其原有的障壁功能，而處置坑道也會因為溫度的上升而產生額外的應力，影響近場環境的穩定性。

9. 核種遷移遲滯能力：

黏土礦物遲滯放射性核種遷移的機制，主要分為五種，分別是黏土的吸附作用、陽離子交換作用、同質異構取代作用 (isomorphous substitution)、膠凝作用 (coagulation) 和氧化還原作用，將核種牢牢嵌制在近場中，減低其傳輸速率。適當的化學緩衝能力，使得近場環境中地下水的 pH 值能受到控制，使廢棄物包件處於微鹼性、還原狀態環境，減低廢棄物包件的腐蝕速率以及降低放射性核種的溶解度。

10. 膠體過濾(colloid filtration)：

當廢棄物包件受損後，放射性核種將溶解在地下水中，放射性核種會和黏土中膠體物質結合，因此膠體過濾即可減緩核種的遷移。

目前國際間核能先進國家對於高放射性廢棄物最終處置方式均採深

地層處置，因考慮置放技術之可行性、材料取得便利性及成本等工程考量，各國所採用之緩衝材料有所不同，例如法國使用鈣型膨潤土混合花崗岩碎石作為緩衝材料；加拿大建議使用鈉型膨潤土與石英砂以 50/50% 比例混合使用；瑞典將顆粒狀膨潤土 MX-80 以 100 MPa 的壓力製成膨潤土塊(bentonite black)做為緩衝材料。

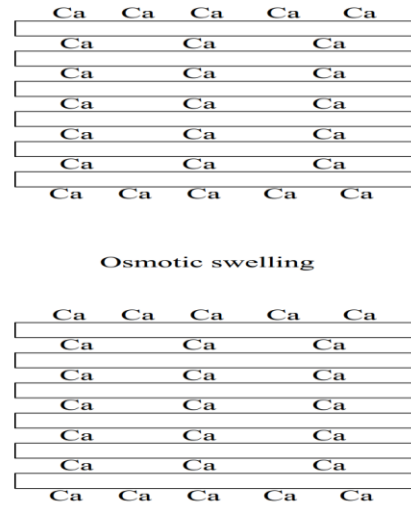
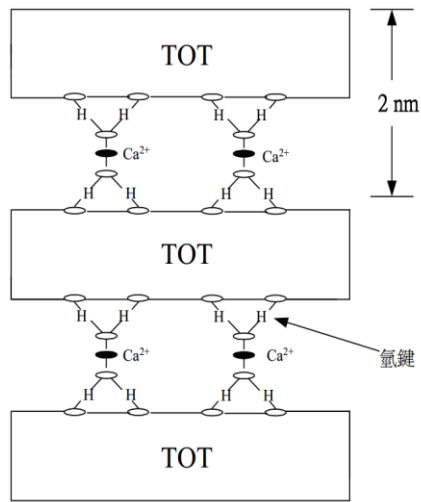
2.3.2 緩衝材料基本性質

表 2.4 彙整出各國所選用之緩衝材料相關性質，包括化學組成分析、基本物理性質分析、可交換陽離子含量等。顯示各國所選用之緩衝材料皆為膨潤土，並區分為鈉型膨潤土與鈣型膨潤土，由表 2.4 之可交換陽離子含量鈉與鈣之含量顯示各國所採用之膨潤土多為鈉型膨潤土。鈉型膨潤土其膨潤度較大，pH 較高約為 9-9.5，耐火度在 1100°C；鈣型膨潤土膨潤度較小，pH 較低約為 6-6.5，耐火度在 1235°C。

如圖 2.13、2.14 顯示鈉型膨潤土與鈣型膨潤土之土壤結構示意圖。鈉型膨潤土與鈣型膨潤土與水發生水合作用時，會使其膨潤土內部黏土結構會發生明顯差異性。首先，鈣型膨潤土與水接觸產生水合作用，可交換陽離子之鈣離子因水合反應而形成水合鈣離子($\text{Ca}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$)，其中水合鈣離子中的水分子與膨潤土表面上之氧原子會形成氫鍵，相互鍵結形成兩 TOT 夾層(四面體-八面體-四面體)緊密結合，並呈現規則排列，稱為擬結晶結構，為一個穩定的結合，如圖 2.13(a)所示。另外此擬結晶結構內部發展僅能產

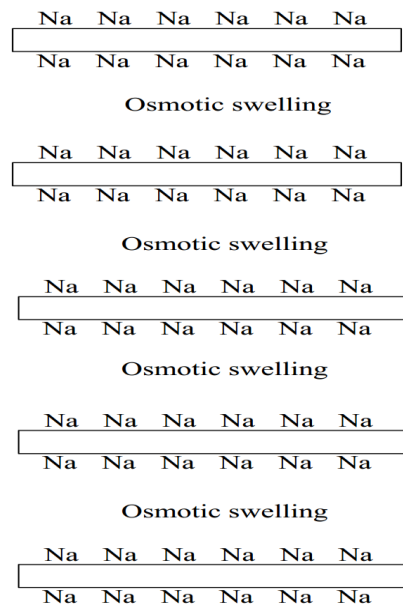
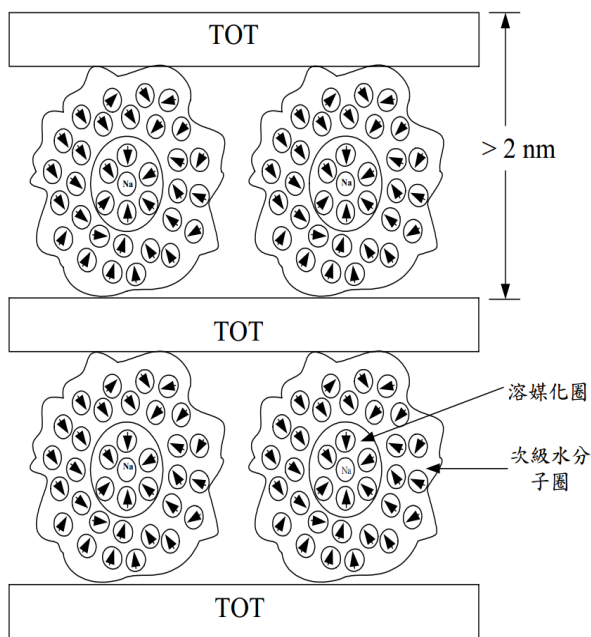
生兩層水層之晶格回脹，而外表面則會因擴散，產生雙層斥力而造成滲透回脹，如圖 2.13(b)所示。擬結晶結構之形成會阻礙黏土回脹，形成此結構後，其黏土回脹行為大幅降低，因回脹行為僅限於晶格回脹，而滲透回脹無法發生。

由不同可交換陽離子所形成之擬結晶結構亦不同，而每一擬結晶結構可包含 TOT 夾層數量也不同。 Na^+ 離子水合反應特性與 Ca^{2+} 離子水合反應特性有很大的差異，其 Na^+ 離子與水分子發生水合作用時，靠近 Na^+ 離子附近水分子之負極受到強烈吸引，因而成定向性排列，此狀況發生稱為溶媒化圈 (solvation sphere)，而在溶媒化圈內水分子的數目稱為初級水合數目 (primary hydration number)， Na^+ 離子初級水合數目約在 5 左右，最高可高達 71。另外初級水合圈的外面，仍受電荷之影響，其稱為次級水分子圈 (second sphere of water molecules)，但這些水分子與離子結合狀況並不密切而排列方式雜亂，距離離子電荷影響約達 1~2 nm 之範圍，如圖 2.14(a)所示。由於 Na^+ 離子所形成水合離子於黏土表面並不像 Ca^{2+} 離子會有強烈的氫鍵鍵結，因此所有的黏土層都會偏向完全分離的分散結構，造成每一膨潤土層皆可發生擴散雙層產生回脹，如圖 2.14(b)所示。[10]



(a) 鈣水合離子在膨潤土層間作用 (b)鈣型膨潤土擬結晶結構

圖 2.13 可交換鈣離子對膨潤土結構與回脹性影響示意圖[6]



(a) 鈉水合離子在膨潤土層間示意圖 (b) 鈉型膨潤土分散結構

圖 2.14 可交換鈉離子對膨潤土結構與回脹性影響示意圖[6]

表 2.4 各國緩衝材料性質彙整[10]

項目	BH bentonite	日本 Kunigel V1	加拿大 Avonseal	瑞典 MX-80	法國 FoCa	Unit	
化學組成分析							
SiO ₂	64.55	69	61.4	56-64	56.67		
Al ₂ O ₃	17.53	13	18.1	18-21	27.63		
Fe ₂ O ₃	3.85	2.0	3.2	2.5-2.8	10.26		
CaO	1.42	-	0.6	0.1-1.0	3.37	%	
MgO	1.31	2.0	2.3	2.5-3.2	0.9		
Na ₂ O	2.24	2.6	2.2	1.5-2.7	0.2		
K ₂ O	0.40	-	0.4	0.2-0.4	0.18		
SO ₃	0.3	-	-	-	-		
緩衝材料基本物理性質分析							
Gs	2.69	2.7	2.75	2.7	2.6	-	
砂質含量	2	3	-	5	-	>74μm	
粉土質含量	33	47	-	79	-	74 ~2μm	
黏土質含量	65	50	82	16	-	<2μm	
PL	54	21	49	70	35	%	
LL	434	416	257	400	90	%	
PI	380	395	208	330	55	%	
Ac	5.85	7.9	2.54	4.02	-	-	
各國緩衝材料的可交換陽離子含量							
CEC	82.2	52	82	79	64		
K ⁺	4.8	1.3	0.7	2.3	1	meq 100g	
Na ⁺	56.7	54.6	46.5	56.0	4		
Ca ²⁺	19.6	41.9	39.5	30.1	64		
Mg ²⁺	1.1	6.6	7.0	15.6	8		
Na ⁺ / Ca ²⁺	2.89	1.3	1.18	1.86	0.05		-

2.3.3 緩衝材料劣化性質

由於高放射性廢棄物處置開始時，首先面臨處置罐所造成衰變熱而產生溫度場，其高溫對於膨潤土會產生化學效應，此效應會造成膨潤土中蒙脫石轉變為伊利石產生變質，如圖 2.15，為防止膨潤土發生變質進而影響膨潤土發揮預期效果，因此處置場近場溫度不可長時間超過 100°C，下列列舉 3 點之相關重要性: [24]

- 回脹潛能減低致使膨潤土間隙有可能產生移流並減少膠體過濾。
- 膨潤土之陽離子交換容量減低致使核種在近場之遲滯效應降低。
- 伊利石回脹性較蒙脫石低，會降低膨潤土自密性功能並增加水力傳導係數。

依據 Aoyagi 及 Kazama 等研究推論，其化學變化為膨潤石相變化轉變為伊利石與膨潤石礦物混合相，再轉變為伊利石。相變化主要兩個關鍵因素，第一為層間水分子移動；第二為鈣、鈉離子被鉀離子取代。另外蒙脫石與伊利石轉換只於四面體層電荷增加及層間離子被鉀離子取代之狀態下發生，因此層間鉀離子存在是必要的條件，所以限制鉀離子數量與降低近場溫度可防止膨潤土伊利石化。[23]

- 溫度低於 60°C 時，蒙脫石在 100,000 年內幾乎不會轉變成伊利石。
- 溫度高於 300°C 時，蒙脫石在 10 年內幾乎 100% 轉變成伊利石。
- 除了溫度，鉀離子多寡是否足夠來支持蒙脫石轉變成伊利石。

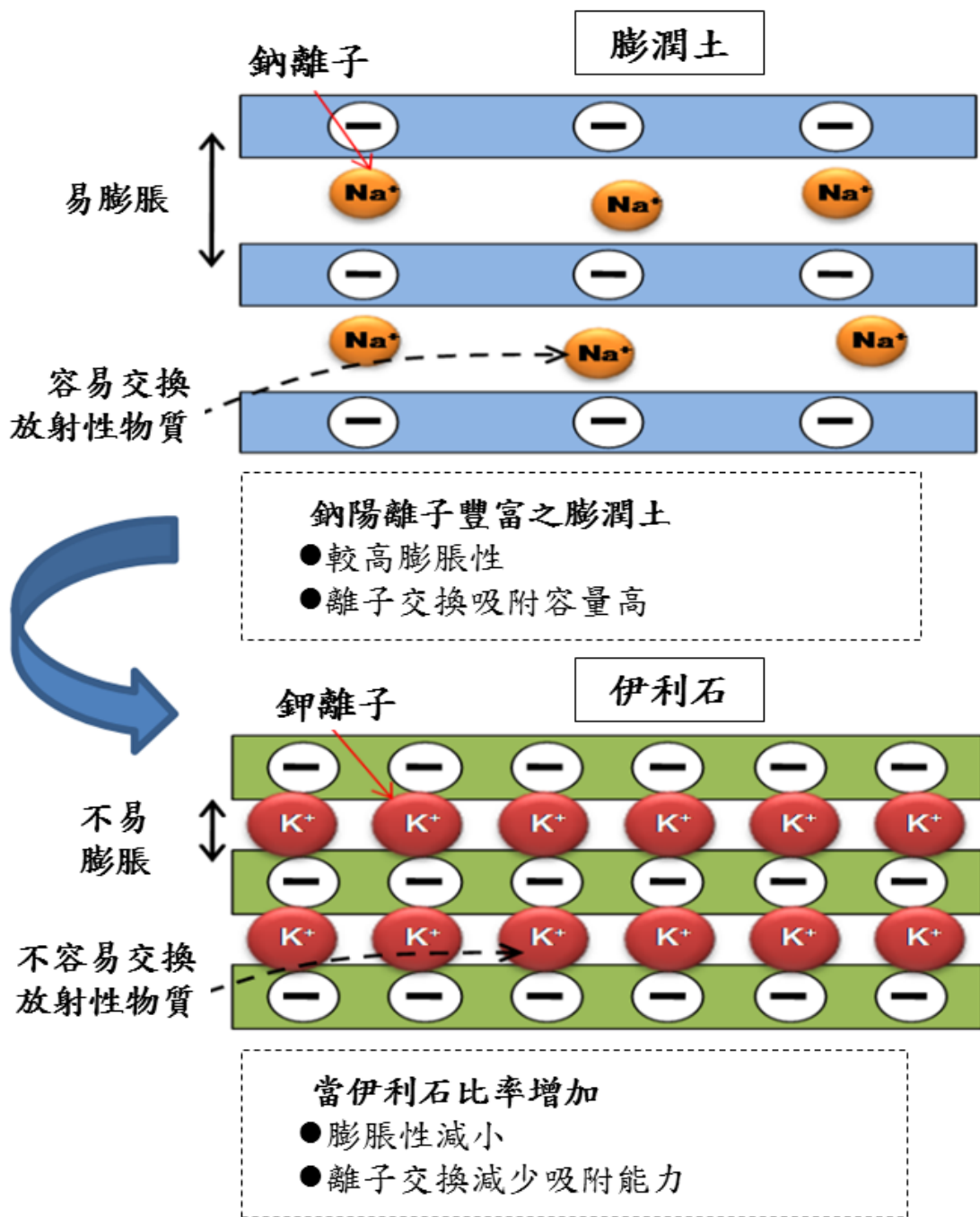


圖 2.15 鈉型膨潤土變質示意圖[24]

2.3.4 瑞典緩衝材料熱傳性質 [25]

1. 熱傳導係數-Heat (thermal) conductivity λ , W/m,K

其處置罐放入處置場中，緩衝材料所需要的特性就是消散處置罐所產生衰變熱，且處置罐的溫度不超過一定的限度，又因處置罐與緩衝材料長期受到溫度的影響，因此緩衝材料的熱學性質必須加以探討。由文獻得知 3 個相關經驗式，首先關於膨潤土的熱傳導係數相關經驗公式為 2-1 式。

$$\lambda = 0.56 + 0.60 \rho + 0.4 \rho^3 w / (w + 1) \quad (2-1)$$

W = 含水量； ρ = 容積密度

膨潤土另一個相關經驗式如下：

$$\lambda = \lambda_0 + K_e (\lambda_1 - \lambda_0) \quad (2-2)$$

相關式如下：

$$\lambda_0 = 0.034 \cdot n^{-2.1}$$

$$\lambda_1 = 0.56^n \cdot 2^{(1-n)}$$

$$K_e = 1 + \log S_r$$

λ_0 = 熱傳導係數於飽和度 $S_r = 0$

λ_1 = 熱傳導係數於飽和度 $S_r = 100\%$

K_e = 表示飽和度的影響因素

n = 孔隙度

2.熱容量- Heat capacity , E+6 J/m³,K

$$C = \rho c \quad (2-3)$$

C=熱容量； ρ =密度；c=比熱

以瞬態條件中，單位體積下提高 1°C 溫度所需的能量。如果固體、水、空氣的體積存在於土壤中之單位體積分別為 X_s ， X_w 和 X_a ，則：

$$C = x_s C_s + x_w C_w + x_a C_a \quad (2-4)$$

C_s ， C_w 和 C_a 以 % 為單位，定義為單位體積的熱容量。

另外體積熱容量 C_u 如下式：

$$C_u = \frac{\rho_d}{\rho_w} \left(0.18 + 1.0 \frac{w}{100} \right) C_w \quad (2-5)$$

ρ_d =土壤單位重

W =含水量

ρ_w =水單位重

C_w =水熱容量

土壤的熱傳導係數與體積熱容量在已知的含水量下對照圖，如圖 2-16。

由上述所列出之相關式子彙整出關係圖，藉由此圖的相關位置對照可以清楚得知在已知的含水量下土壤熱傳導係數與體積熱容量的相關係數，其含水量範圍在 10-60%；熱傳導係數土壤粒徑細的範圍在 0.55-1.3W/m,K、粒徑粗的範圍在 0.6-2.0 W/m,K；體積熱容量範圍在 35-49 E+6 J/m³,K。

圖 2-17 顯示熱傳導係數之溫度與時間關係圖，對於鈉型膨潤土與空隙

比 $e = 1.5$ 和飽和度 $S_r = 98\%$ 之試體，並使用功率為 1w 、長度 8cm 的熱探針量測熱傳導係數。圖中顯示，該溫度曲線 $T \text{ vs. } \log t$ 為之間大約直線在 50 秒和 500 秒，其最佳熱傳導係數結果 $\lambda = 1.08 \text{ W/m,K}$ 。

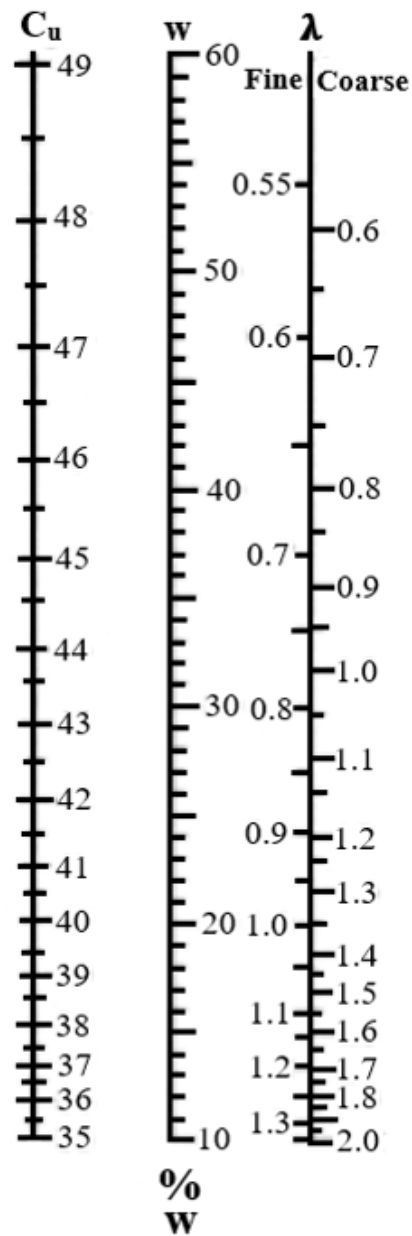


圖 2-16 土壤熱學性能與含水量關係[25]

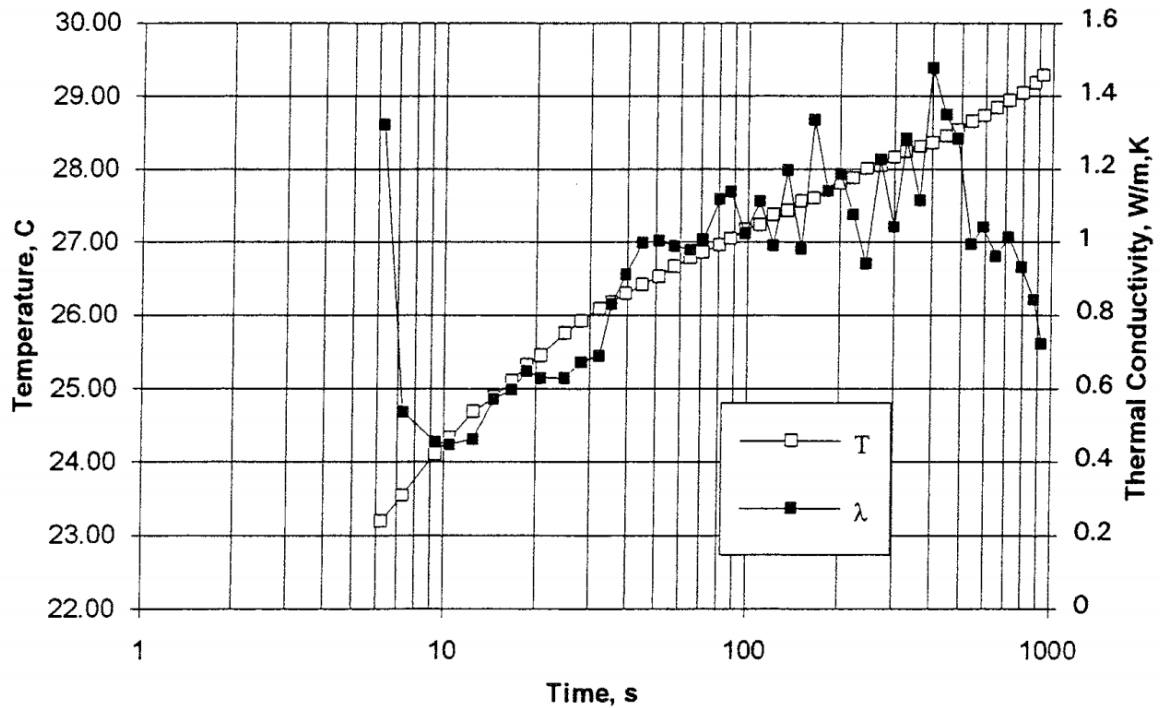


圖 2-17 導熱係數 λ 時間和溫度關係[26]

3. 相關材料熱學參數

由表 2.5 顯示其他相關材料之熱性質參數，其中最高的熱傳導性質為石英；最低的是空氣，兩者比值為約 350 : 1。各種土壤成份單位體積所佔的比例對土壤的熱傳導係數有直接性的影響。

表 2.5 在 1atm 與 20°C 狀態下土壤成份之熱學性質[25]

材料	密度 $\rho(\text{kg/m}^3)$	比熱 $C(\text{Ws/kg, K})$	熱傳導 $\lambda(\text{W/m,K})$	熱擴散 $\alpha(10^{-7} \text{ m}^2/\text{s})$
石英	2650	733	8.4	43
土壤礦物*	2650	733	2.9	15
土壤有機物*	1300	1927	0.25	1.0
水	1000	4190	0.6	1.42
空氣	12	1048	0.026	0.21

* 近似平均值

2.3.5 日本緩衝材料熱學性質

由表 2.6-2.7 顯示日本 PNC 對於膨潤土之熱傳導係數之測量結果，表 2.6 顯示試驗中各膨潤土試體編號與配置；其熱傳結果顯示於表 2.7 與圖 2.18。試驗過程設定四種溫度，大致分別為室溫、40°C、60°C、80°C，使用絕熱的方法進行室溫狀態下之測量以避免外在溫度變化影響。而 40°C 以上溫度皆將試體放置於恆溫水槽中進行量測，藉由控制外在環境溫度對試體之熱傳導影響。

表 2.6 日本 PNC 膨潤土試體編號[27]

試驗體 番号	直 徑 [cm]	高 さ [cm]	体 積 [cm ³]	重 量 [g]	乾燥密度 [g/cm ³]	飽和度 [%]
1	11.2	12.3	1209	1872	1.44	23.2
2	11.2	12.0	1186	1865	1.46	23.9
3	11.2	11.5	1182	2200	1.47	85.6
4	11.1	12.2	1176	2111	1.42	79.1
5	11.1	11.7	1127	2196	1.70	67.0
6	11.2	12.5	1227	2442	1.72	74.5
7	11.2	12.3	1212	2440	1.74	76.9
8	11.1	12.1	1168	2386	1.71	90.8
9	11.1	12.0	1163	2390	1.71	92.3
10	11.2	12.1	1190	2130	1.79	0.5
11	11.2	12.1	1192	2253	1.78	32.2
12	11.2	11.9	1172	2265	1.82	34.6
13	11.1	12.2	1178	2382	1.77	74.9
14	11.1	12.0	1159	2389	1.80	78.4

表 2.7 日本 PNC 膨潤土熱傳導係數結果[27]

試験体 番号	熱伝導率 [W/(m K)]	温 度 [°C]	試験体 番号	熱伝導率 [W/(m K)]	温 度 [°C]	試験体 番号	熱伝導率 [W/(m K)]	温 度 [°C]			
									①	②	①
1	①	0.457	26	6	①	1 1	①	0.936	20		
		0.471	46					0.913	40		
		0.479	66					0.869	60		
		0.501	97					0.881	80		
	②	0.457	34		②	②	0.860	20			
		0.468	45				0.822	40			
		0.473	65				0.826	60			
		0.501	97				0.851	80			
2	①	0.474	23	7	①	1 2	①	0.922	20		
		0.513	45					0.901	40		
		0.519	66					0.952	60		
		0.540	97					0.908	80		
	②	0.492	26		②	②	0.947	20			
		0.507	46				0.928	40			
		0.515	66				0.971	60			
		0.537	97				0.928	80			
	3	①	1.227		20	8	①	1 3	①	1.256	20
			1.243		40					1.265	40
			1.272		60					1.266	60
			1.229		80					1.228	80
②		1.211	20	②	②		1.264	20			
		1.202	40				1.272	40			
		1.322	60				1.283	60			
		1.335	80				1.240	80			
4		①	1.160	20	9		①	1 4	①	1.284	20
			1.206	40						1.315	40
			—	60						1.239	60
			1.314	80						1.201	80
	②	1.159	20	②		②	1.323	20			
		—	40				1.249	40			
		1.208	60				1.281	60			
		1.248	80				1.245	80			
	5	①	1.151	20		1 0	①	①	0.678	39	
			1.161	40					0.676	47	
			1.165	60					0.671	68	
			1.184	80					0.679	96	
②		1.144	20	②	②		0.662	25			
		1.154	40				0.678	47			
		1.160	60				0.672	68			
		1.177	80				0.679	96			

圖 2.18 為熱導係數和溫度關係曲線圖，縱軸是熱傳導係數，橫軸是溫度。在此試驗條件 100°C 與較低之環境溫度下量測，環境溫度效應對於熱導係數影響不顯著，呈現出幾乎為定值之熱傳導係數。

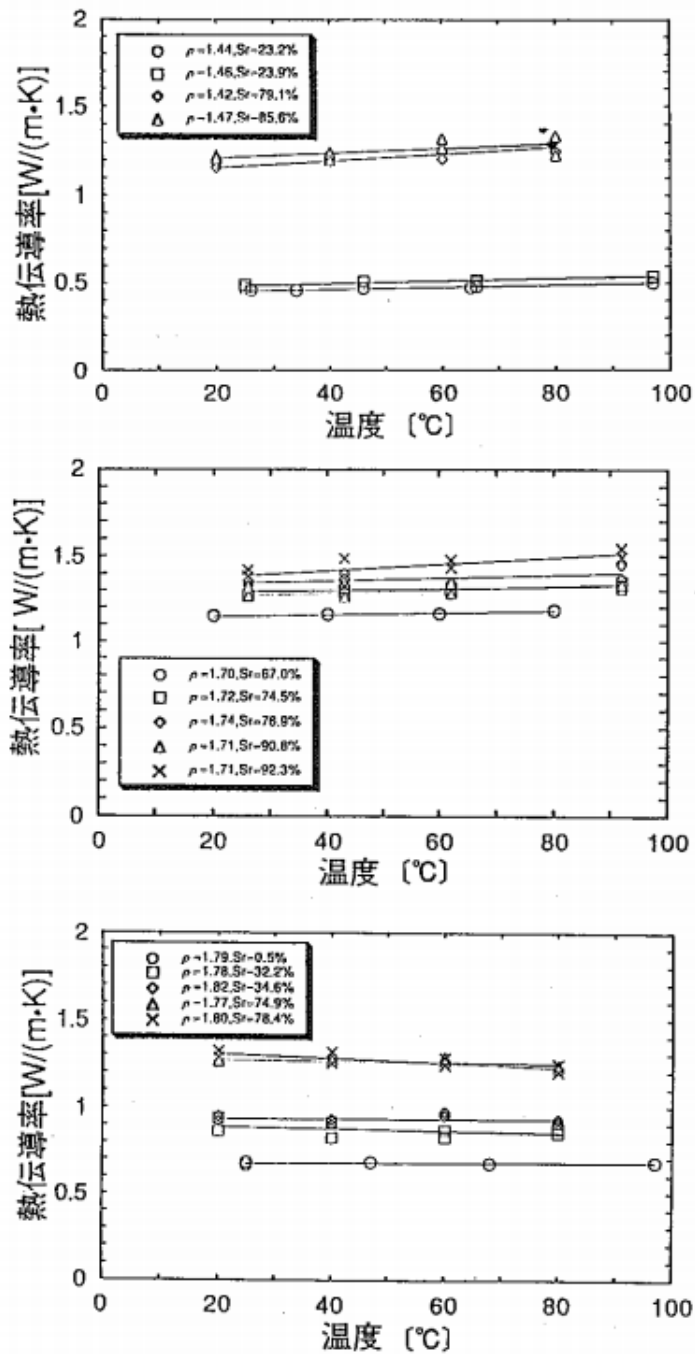


圖 2.18 日本 PNC 膨潤土熱傳導係數與溫度關係結果[27]

表 2.8-2.10 顯示日本 JNC 對於膨潤土之熱傳導係數之測量結果，由表可知共有 6 個乾密度，分別為 1.0、1.2、1.4、1.6、1.8、2.0g/cm³ 進行試驗量測，並選用混和砂料 0%、30%、50% 取代膨潤土。另外藉由所測得之熱傳導係數結果彙整出相關公式，如 2-6 式，而表中 a、b、c、d 皆由實驗數據所得參數，此公式顯示膨潤土熱傳導係數受飽和度影響相當大。[28]

$$\lambda = a + b\omega + c\omega^2 + d\omega^3 \quad (2-6)$$

λ : 熱傳導係數(W/m,K)

ω : 飽和度%

表 2.8 日本 JNC 膨潤土 1.0-1.4 乾密度熱傳導係數量測結果[28]

乾燥密度 ρ_d [g/cm ³]	ケイ砂混合率 Rs [wt%]	含水比 ω [%]	熱伝導率 λ [W/m K]	關係式(3-2)中 の係数		
1.0	0	0.25	0.129	a=0.129 b=-2.09E-4 c=8.36E-4 d=-6.49E-6		
		6.17	0.158			
		21.00	0.433			
1.2	0	0.24	0.178	a=0.178 b=-6.74E-4 c=2.82E-3 d=-7.25E-5		
		9.76	0.373			
		20.93	0.736			
	30	0.29	0.159	a=0.159 b=-7.19E-4 c=2.48E-3 d=-8.62E-6		
		7.01	0.273			
		14.25	0.628			
1.4	0	0.0	0.275	a=0.275 b=1.79E-2 c=2.09E-3 d=-9.60E-5		
		5.0	0.404			
		7.5	0.483			
		10.0	0.574			
		12.5	0.631			
		15.0	0.691			
	30	0.41	0.312	a=0.312 b=-1.51E-3 c=3.71E-3 d=-5.18E-5		
		6.73	0.454			
		14.20	0.890			
		30.03	1.655			
		50	0.37		0.227	a=0.227 b=-4.06E-3 c=1.12E-2 d=-5.19E-4
			4.97		0.419	
9.70	0.765					
33.05	1.878					

表 2.9 日本 JNC 膨潤土 1.6 乾密度熱傳導係數量測結果[28]

乾燥密度 ρ_d [g/cm ³]	ケイ砂混合率 Rs [wt%]	含水比 ω [%]	熱伝導率 λ [W/m K]	関係式(3-2)中 の係数
1.6	0	0.0	0.417	a=0.417 b=3.12E-2 c=1.66E-3 d=-4.85E-5
		4.9	0.595	
		6.4	0.687	
		9.1	0.787	
		12.0	0.955	
		14.7	1.073	
		19.8	1.307	
		23.7	1.438	
	30	0.21	0.411	a=0.444 b=1.38E-2 c=6.14E-3 d=-1.69E-4
		0.21	0.511	
		1.76	0.509	
		3.63	0.562	
		4.82	0.585	
		5.12	0.646	
		5.89	0.680	
		6.05	0.729	
		7.76	0.746	
		8.58	0.845	
		10.31	1.105	
		10.34	1.126	
		12.69	1.385	
		12.87	1.321	
		15.68	1.558	
		15.86	1.447	
	19.57	1.728		
	25.13	1.854		
	25.56	2.144		
	50	0.28	0.440	a=0.438 b=4.31E-3 c=7.63E-3 d=-2.00E-4
		4.71	0.607	
		10.05	1.050	
24.51		2.192		

表 2.10 日本 JNC 膨潤土 1.8、2.0 乾密度熱傳導係數量測結果[28]

乾燥密度 ρ_d [g/cm ³]	ケイ砂混合率 Rs [wt%]	含水比 ω [%]	熱伝導率 λ [W/m K]	関係式(3-2)中 の係数
1.8	0	0.00	0.556	a=0.515 b=5.81E-2 c=1.33E-3 d=-9.34E-5
		0.00	0.662	
		0.15	0.466	
		0.15	0.453	
		0.18	0.447	
		4.70	0.835	
		6.70	0.916	
		7.00	0.992	
		9.30	1.092	
		11.80	1.191	
		13.80	1.363	
		14.00	1.256	
		17.00	1.585	
		17.71	1.407	
	18.32	1.407		
	18.49	1.434		
	30	0.00	0.731	a=0.733 b=-4.22E-2 c=1.93E-2 d=-7.33E-4
		4.58	0.900	
		6.84	1.060	
		10.00	1.543	
14.65		1.928		
17.49		1.972		
50	0.35	0.688	a=0.686 b=-2.60E-3 c=1.68E-2 d=-6.28E-4	
	3.25	0.827		
	4.77	0.999		
	5.00	1.006		
	10.27	1.745		
80	0.06	0.482	a=0.478 b=7.34E-2 c=1.80E-2 d=-7.69E-4	
	2.00	0.691		
	4.02	1.015		
	17.63	3.153		
2.0	0	0.00	0.777	a=0.777 b=1.98E-2 c=1.20E-2 d=-7.78E-4
		4.30	1.023	
		7.40	1.262	
		8.70	1.348	
		10.90	1.410	

2.4 THMC 耦合效應

2.4.1 瑞典關於 THMC 耦合相關資訊

瑞典核燃料與廢棄物管理公司針對深地層處置的長期安全評估，於 1999 年提出 SR-97 報告中[7]，針對整個處置系統包括燃料廢棄物體、廢棄物包件、緩衝回填材料、母岩、地質圈等相關之熱-水-力-化學效應(Thermo-Hydraulic-Mechanical-Chemical process, 簡稱 THMC)，與其影響程度有詳盡描述，表 2.11 為該報告中描述的緩衝與回填材料 THMC 效應示意圖，以下針對表 2.11 所列之熱—水力—力學—化學作用程序加以說明。[2]

(1)對於熱部分，當處置罐放置完成後，其處置罐與緩衝材料開始接觸進而發生影響。

- **輻射衰變/熱傳導**：處置罐因 γ 與中子輻射之輻射衰減所產生的高溫開始向低溫的緩衝材料流動，其中的熱流是藉由緩衝材料的熱傳性質向外擴散而增加緩衝材料的溫度，造成一範圍的溫度場。

(2)對於水力部分，由於處置場建構於於地下數百公里，其地下位置不免為母岩飽和帶。

- **水利傳導**：在建置處置孔時會將處置空內的水抽乾後再進行緩衝材料的放置，但隨著處置時間，又因緩衝材料的孔隙中所存在的負毛細壓力，這造成岩層裡的水慢慢傳輸到緩衝材料內，使緩衝材料逐

漸形成飽和狀態，一旦再飽和後，其水利傳導將會變得非常緩慢，並回復成原來母岩飽和的初始狀態。

- **氣體傳輸/溶解**：氣體傳輸亦會在飽和過程中發生，因溫度升高所形成的水蒸氣會向外移動，就是母岩的方向，並凝結在較冷的區域；而在飽和狀態下若處置罐受損，將可能造成處置罐腐蝕作用產生氫氣，而原本在緩衝材料的氣體會溶解於緩衝材料的孔隙水中持續存在。

(3)在力學方面的影響，此部分與水力同步造成影響。

- **回脹**：由於緩衝材料吸附水後會回脹而對處置罐發生推擠壓力，稱為回脹壓力。
- **緩衝/回填交互作用**：並因著緩衝材料回脹而填補初始處置狀態之間隙。
- **熱膨脹**：若此時處置罐為高溫狀態時，孔隙水則會因熱膨脹而擴張。

(4)緩衝材料化學變化較為複雜其時間也較為久遠，並受制於各種型態的傳輸與反應程序。

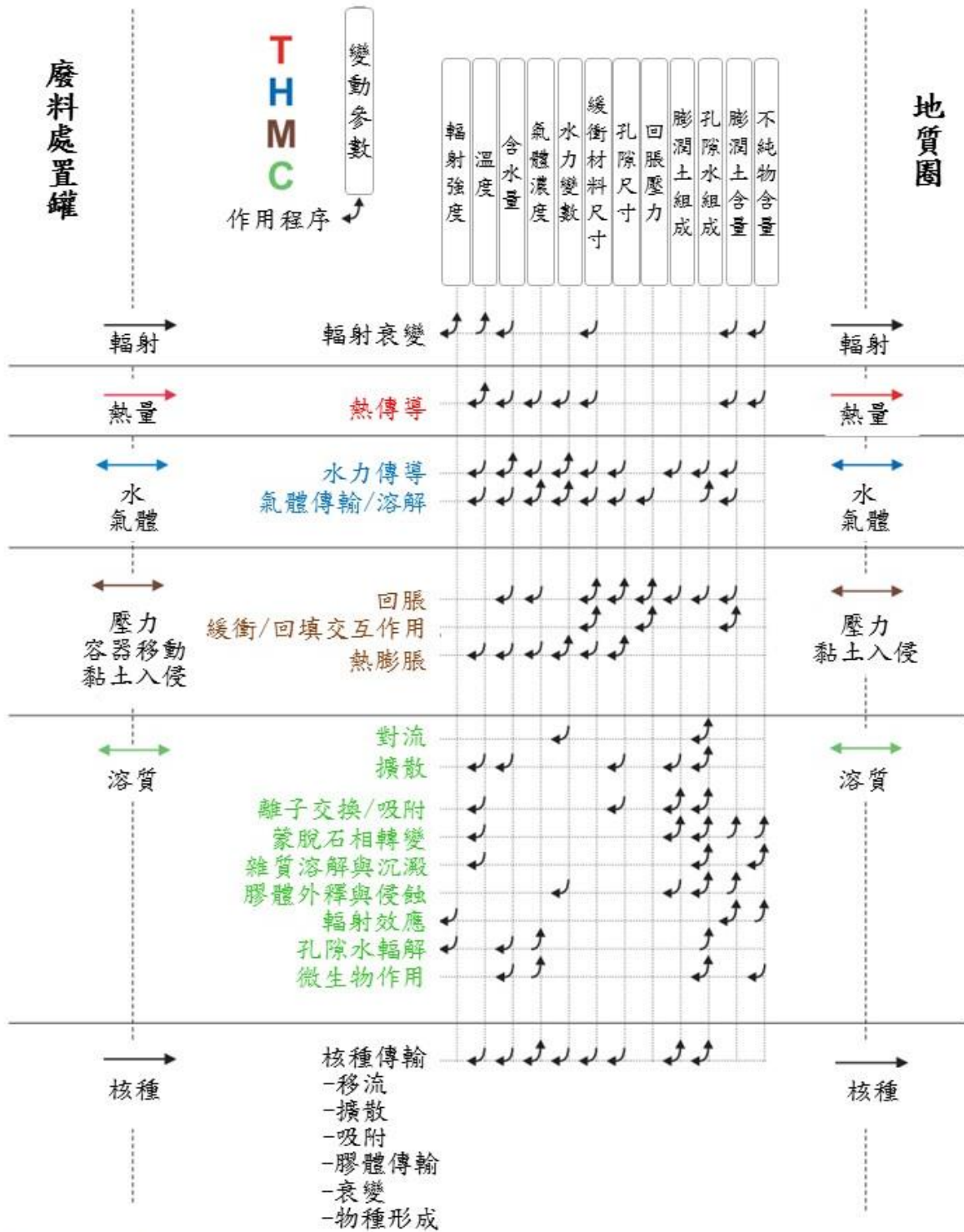
- **離子交換/吸附**：溶質藉由對流與擴散傳輸，而緩衝材料在飽和狀態中，主要的傳輸機制是對流，再者為擴散。接著緩衝材料表面顆粒相互接觸藉由離子交換和吸附作用，將核種交換而留在緩衝材料中。
- **蒙脫石相轉變**：由前面章節所提到長期高溫作用使膨潤土內蒙脫石

有可能發生伊利石之化學劣化。

- **雜質溶解與沉澱**：造成溶解與沉澱反應可能原因為緩衝材料內含之不純物。
- **膠體外釋與侵蝕**：回脹的緩衝材料如果鑽入至周圍岩層裂隙裡，可能造成膠體被帶到地下水中，並導致緩衝材料逐步受到侵蝕作用。
- **孔隙水輻解**：膨潤土之黏土材料因輻射效應而造成轉變，其孔隙水可能因射解作用進而分解。
- **微生物作用**：微生物作用亦可能造成緩衝材料內發生劣化現象。
- **核種傳輸**：處置孔再飽和後，核種傳輸在緩衝材料內主要藉由孔隙中與黏土顆粒表面之擴散機制，另外移流(advection)與膠體傳輸則不一定會發生在緩衝材料飽和中。再者推測核種可能因吸附而附著於黏土顆粒表面，而吸附機制關鍵在於核種的化學型態，主要由兩個因子所決定，第一為緩衝材料的化學環境；第二為物種形成程序。

表 2.11 瑞典緩衝材料 T-H-M-C 交互耦合作用[7]

緩衝材料/回填材料



2.4.2 日本關於 THMC 耦合相關資訊

日本方面在 2011 發表的技術報告中[8]，詳述其最終處置概念之 T-H-M-C 作用，如圖 2.20 所示。該報告中並對近場從初始狀況至封閉後數十萬年期間的 T-H-M-C 效應，彙整於表 2.12-2.19，並配合圖型分別對其耦合程序與影響做了詳細說明。

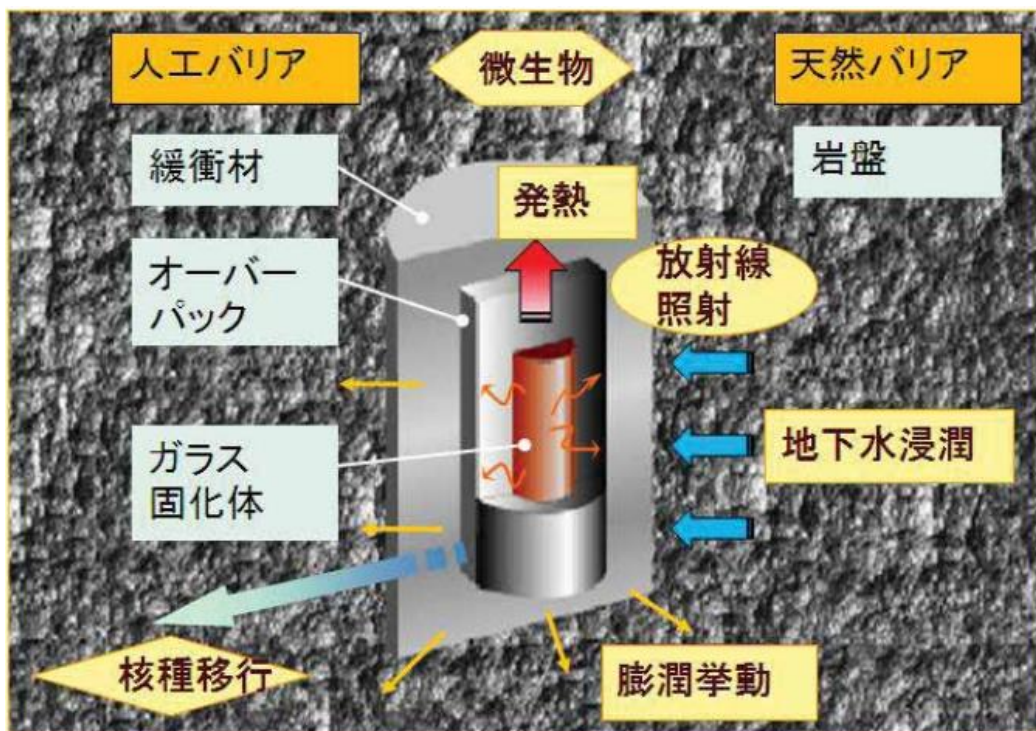
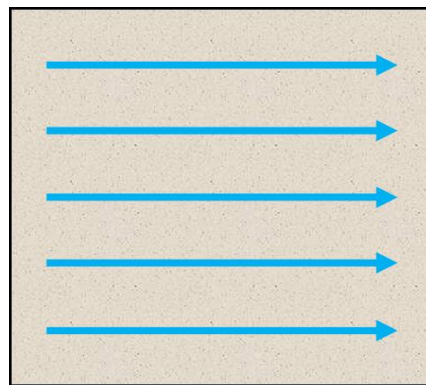


圖 2.20 處置場近場環境 THMC 影響[9]

表 2.4-2.11 顯示處置場近場環境階段性 THMC 所發生現象，其中深地層處置場緩衝材料所需幾何外觀大小由廢棄物包件的溫度與輻射強度決定；緩衝材料水力性質主要由含水量決定，而氣體壓力與水力參數為次要決定因子，其中水力參數包括水壓力、水流、氣體壓力、氣體流動等項目；緩衝

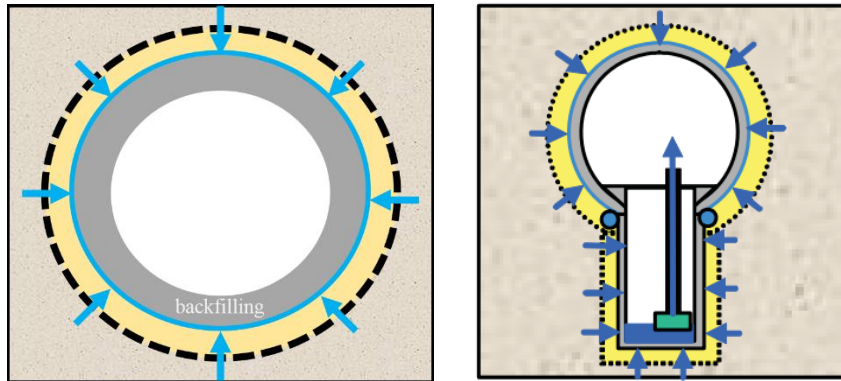
材料的力學性質由回脹壓力決定；緩衝材料的化學狀態則是由膨潤石含量與膨潤石組成決定，膨潤石組成包括黏土表面離子種類、不純物含量以及孔隙水組成。高放射性廢棄物所含核種半衰期非常長，處置設施內可能引發之 T、H、M、C 等效應影響處置系統的空間與時間亦相當長遠，倘若各效應相互耦合時，處置設施安全評估工作更為複雜。

表 2.12 處置場初始狀態[8]



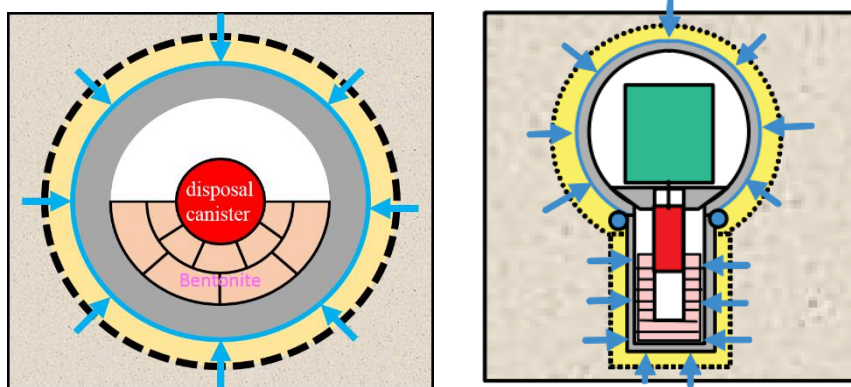
熱(T)	水力(H)	力學(M)	化學(C)
初始溫度 35~45°C	地下水流量受到水力梯度、 透水係數、孔隙率的影響	初期應力 5~10 MPa	pH=7.0

表 2.13 處置坑施工時 THMC 程序與影響[8]



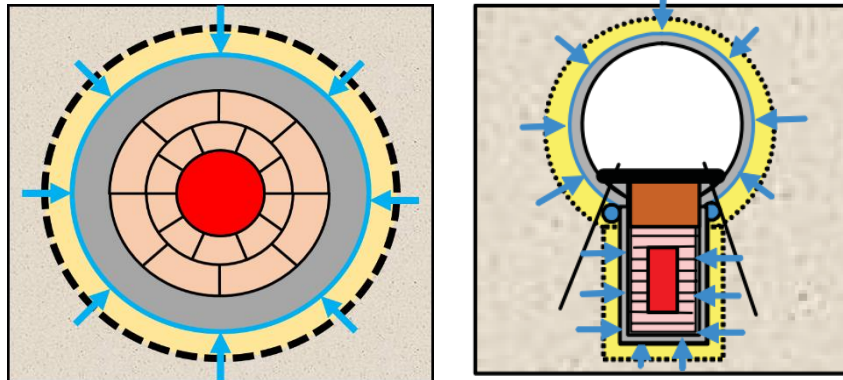
	熱(T)	水力(H)	力學(M)	化學(C)
程序	處置坑道內空氣對流: max37°C	排水施工影響 區域主要在不 飽和層	坑道與坑道襯砌之 間的力學平衡	母岩與襯砌材料之 間的影響
影響	處置孔內溫度與 空氣的對流	排水系統+泵送	高透水， 襯砌的支撐	整體性維持 水中性

表 2.14 處置場營運中 THMC 程序與影響[8]



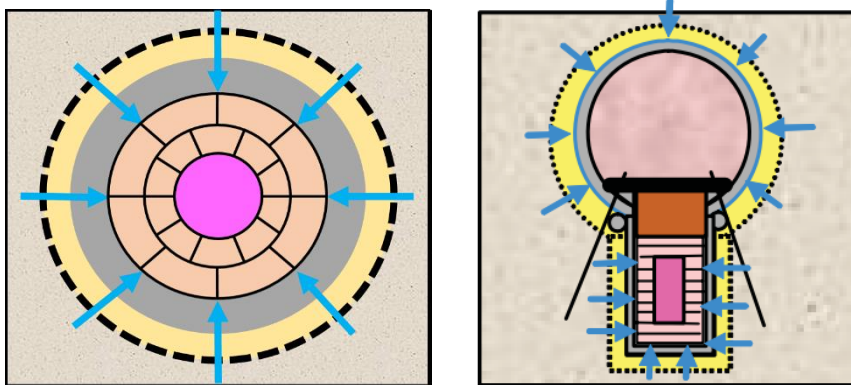
	熱(T)	水力(H)	力學(M)	化學(C)
程序	廢棄物包件開始發 熱，但因空氣對流， 溫度沒有明顯變化	水開始入侵至施 工影響區域	襯砌材料安定維 持，緩衝材料支撐 廢棄物包件	襯砌材料溶出，pH 值上升
影響	緩衝材溫度上升	緩衝材與 地下水接觸	存在數公分的間隙	因內部溫度導致腐 蝕開始

表 2.15 放置完成時 THMC 程序與影響[8]



	熱(T)	水力(H)	力學(M)	化學(C)
程序	由於廢棄物包件發熱，緩衝材料溫度上升	水入侵至施工的影響區域，不飽和層減少	襯砌材料安定維持，緩衝材料支撐廢棄物包件	襯砌材料溶出，pH 值上升
影響		緩衝材膨脹開始	膨脹導致間隙減少	Ca 溶出劣化開始

表 2.16 處置場封閉後 THMC 程序與影響[8]



	熱(T)	水力(H)	力學(M)	化學(C)
程序	廢棄物包件發熱減少	水入侵至不飽和層和緩衝材料產生回脹壓力	襯砌材料安定維持，緩衝材料支撐廢棄物包件	水入侵、Ca 溶出高 pH 值環境
影響	緩衝材最高溫度	膨脹增加	膨脹導致間隙減少	開始腐蝕(緩衝材料變質)

表 2.17 封閉後數百年處置場 THMC 程序與影響[8]

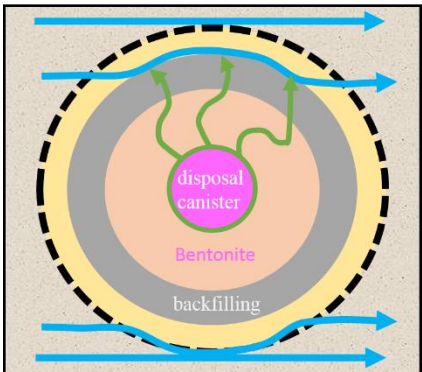
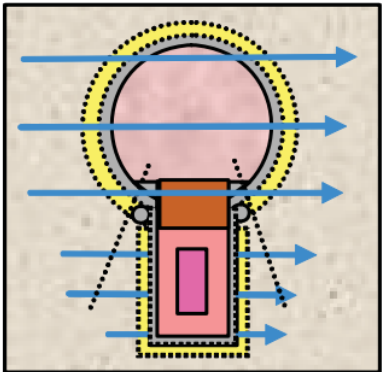
					
		熱(T)	水力(H)	力學(M)	化學(C)
程 序 — 影 響	廢棄物包件發熱影響降低，處置場回到周圍岩盤溫度		處置場趨近於飽和，周圍的水流動向回到初始狀態	施工的影響區域開始回歸初始的應力狀態	Ca 溶出，高 pH 值環境，緩衝材料、襯砌材料持續變質
			完全飽和 膨脹壓最大	障壁材劣化、 膨脹壓、大地應力	持續腐蝕並且 產生氣體

表 2.18 封閉後數千年處置場 THMC 程序與影響[8]

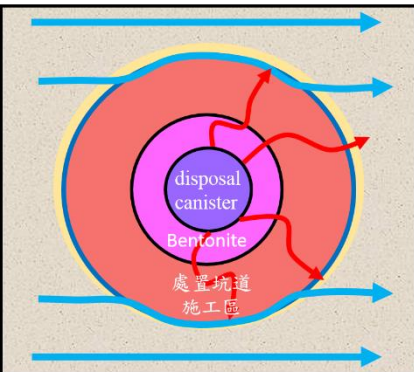
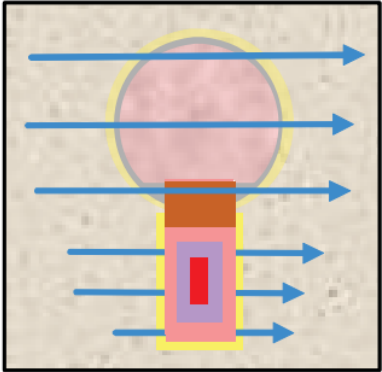
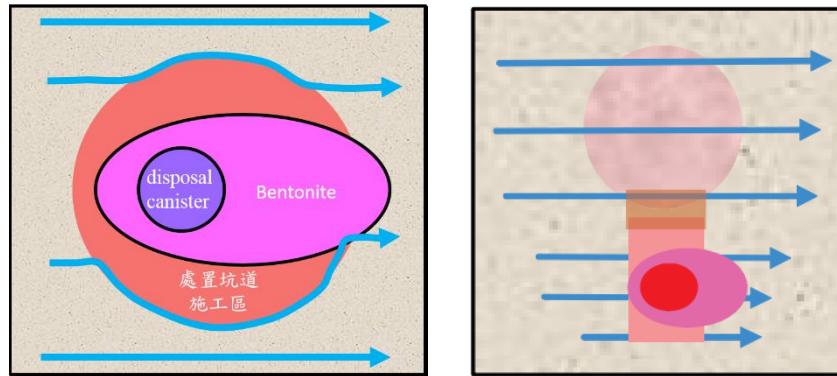
					
		熱(T)	水力(H)	力學(M)	化學(C)
程 序 — 影 響	周圍岩盤溫度		緩衝材料周圍的水壓回歸初期狀態	施工的影響區域減少，回歸初期應力狀態	高 pH 值環境，緩衝材料持續變質(可塑性可能消失)
			完全飽和 膨脹壓繼續	障壁材劣化、 膨脹壓、大地應力	持續腐蝕並且 產生氣體

表 2.19 封閉後數十萬年處置場 THMC 程序與影響[8]



	熱(T)	水力(H)	力學(M)	化學(C)
程序	周圍岩盤 溫度	隆起、侵蝕作用造成水的流動場改變	初期應力狀態	高 pH 值環境，緩衝材料持續變質(塑性可能消失)
影響		完全飽和 膨脹壓繼續?	沒有間隙	持續腐蝕並且產生氣體

2.5 THM 耦合相關研究

高放射性廢棄物最終處置場位於地表下數百公尺處之穩定岩盤中，雖施工期間會將處置場內之水份抽乾，但於完工數十年後，地下水將會由遠場漸漸回注至處置場中，放射性廢棄物持續產生之衰變熱，使得地下處置場內會因溫度與水份產生交互影響。以下將溫度影響、地下水入侵與其交互反應對處置場的近場環境可能產生的影響加以說明，以及介紹國內外對處置場熱-水-力學影響之相關研究。

深地層處置設施中，因廢棄物衰變熱與輻射影響所及區域，包含廢棄物處置孔或工作隧道、緩衝區與回填區、開挖擾動帶及周圍接觸母岩稱之為近

場(near field);處置區域外圍較不易受衰變熱與輻射侵擾之區域稱為遠場(far field)或地質圈 (geosphere)，而人類與其他生命有機體居住之環境則稱為生物圈(biosphere)。

處置場近場環境並非為一穩定均勻的溫度環境，因廢棄物罐內廢棄物體產生衰變熱，經由廢棄物罐、緩衝材料、回填材料及處置基岩向外傳輸，溫度效應會隨著放射性廢棄物的衰變速率及近場多重障壁系統之材料熱傳導特性遞減。深地層處置場初期地下水尚未入侵前，受到衰變熱的乾燥作用影響，近場環境維持乾燥加熱狀態，且因周圍多重障壁系統之熱傳特性與廢棄物衰變作用，形成一不斷變化之溫度場。處置場封閉初期的近場環境處於非飽和狀態，與廢棄物包件接觸的緩衝材料可能受到高溫作用形成乾燥加熱。而當地下水由處置母岩漸漸入侵至緩衝材料至完全達飽和後，緩衝材料處於水熱環境狀態[10]。

J.A.Hudsona [11]等人研究針對 DECOVALEX 蒐集最先進資料，首先介紹 THM 背景與執行成效評估 (PA-performance assessment)；再者針對 THM 處置場設計進行討論，其中包括了處置孔的挖掘、運作和關閉後階段之過程，詳細了解 THM 之處置場環境；另外以數值分析進行討論；最後針對最新之蒐集資訊，以此設計用過核子燃料處置場。結果其 THM 整體過程及數值分析建模方面還有許多困難之處，但藉由數值分析可以解決不同母岩及各種處置場之條件而進行分析，因此需了解 THM 之 PA 以作為數值分析建模。

所以針對 PA 之探討，其結果分成四項，第一項是確認 THM 耦合作用程序之 PA；第二項為用過核子燃料處置場之系統穩定性分析；第三項為處置場相關設計與性能之研究；最後第四項針對整體處置場數值參數進行驗證查核。

賈善坡 [12]等人根據多孔性材料中 THM 之間複雜的耦合關係，基於連續介質力學和混合物理論，以 ABAQUS 數值模擬軟體求解，在 MATLAB 得出相應的計算程式匯出變形多孔介質 THM 三場耦合模型及其控制方程，探討有限元素法之求解過程，並驗證其正確性。結果中，首先以連續介質力學和混合物理論為基礎，考慮模型變形與熱量、流體之間之耦合作用，建立了多孔介質 THM 耦合模型，並以 MATLAB 語言為平臺，輔以 ABAQUS 軟體得出 THM 耦合數值計算模型，並通過驗證；第二建立井壁 THM 耦合模型，詳細分析 THM 耦合作用過程，比較了不同物理場耦合作用下井壁圍岩溫度、孔隙壓力和應力之變化規律，結果顯示，採用全耦合模型和部分耦合模型得出之井壁圍岩應力、孔隙壓力和溫度有較大差別；第三此文提出的方法為多孔介質分析 THM 耦合過程能提供一項有效的分析方式，進而為研究 THMC 全耦合問題奠定基礎；最後由於岩體所處地質環境複雜和諸多因素所造成不確定性，目前 THM 耦合模型未能考慮地下工程施工擾動所帶來之損傷對耦合過程的影響，較難以實現擾動區多物理場耦合效應分析。

C.F. Tsang [13]等人在其研究中探討用過核子燃料處置場之 THM 於黏土地層變化過程，其使用包含塑性黏土，如比利時 Boom 黏土及較硬之法國 Callovo 黏土、瑞士 Opalinus 黏土。根據實驗分析結果建議，近場環境 THM 影響過程中，包括破壞機理，相位變化，以及多種材料應接觸而相互作用(如多重障壁系統)，而 TH 耦合對黏土質環境其變化較小。連接問題，包括處置罐、緩衝材料、隧道襯砌和鋼架支撐之間的連接等，需要在不同 THM 條件下之數值計算參數方法進行研究。在岩壁上可能與隧道襯砌接觸而造成條件不同，需要進一步釐清。在控制大地應力條件中，應力場可以是在空間上變化，取決於當地土層結構和岩體強度，在應力狀態和長期作用所造成之變形特性需要進一步研究。

Fabrice Dupray [14]等人使用 ACMEG-TS 模型進行分析，清楚地強調工程障壁系統(EBS)行為正確的敏感性分析評估影響。此項研究，藉由敏感性分析，描述 THM 在 EBS 對處置場影響之重要性，參考瑞典設計，用 80°C 左右之最高溫度進行案例研究，結論顯示，在物理過程上，強調蒸汽產生和擴散作用的重要性，即使在較低的溫度，熱對流作用僅在特定條件下有明顯的效果，由於處置孔設於較硬之邊界，所以忽略體積變型在 EBS 模擬 THM 耦合。在再飽和過程而言，TH 耦合影響性非常大，同時也會影響緩衝材料的力學(M)行為，若不考慮溫度(T)的耦合效應影響，其 EBS 之系統設計所作之估算就不正確。

Chen and Liu [15]等人描述中國大型模擬試驗研究，提出有關處置場 THM 條件下之高廟子 (GMZ) 膨潤土的行為。按照高放射性廢棄物處置在中國目前的處置理念，處置罐設計為直立式圓筒形罐，四周圍滿經壓實後之 GMZ 膨潤土。並整體模擬實驗中加上加熱器，模擬處置罐因用過核子燃料衰變熱所造成近場環境溫度升高狀況，另外於處置罐和緩衝材料之間之間隙中放入膨潤土顆粒，並於模擬罐外安裝水合系統模擬地下水入侵之狀況，實驗設施正常運作試驗共 500 天。其結果是完整地觀察到緩衝材料區域靠近加熱器從乾燥到飽和過程，該膨潤土具有非常低的滲透性，使水從外部進入內部相當緩慢，特別觀察到在靠近加熱器區域仍相當乾燥。在相對濕度變化中，特別注意到溫度的波動，由於複雜的交互機制之產生與相對濕度的波動，包括蒸汽產生，烘乾效果等，可作為感溫器的可靠性和靈敏度之驗證。

2.6 瑞典 THM 相關審查報告研析

瑞典輻射安全局- SSM (Strålsäkerhetsmyndigheten or Swedish Radiation Safety Authority) 為瑞典審查機關，任務為審查相關核能安全、輻射防護、區域核不擴散，能主動性之監督角色，預防性、保護人民與環境在未來中不受輻射所影響，因此主要負責瑞典 SKB 申請用過核子燃料處置場之審查。此機關委託顧問公司以獲得用過核子燃料處置相關資訊，並以提供具體之專家建議為首要審查工作項目之一，最後彙整為 SSM 技術說明審查報告以協助 SKB 完成作業。

2.6.1 SSM-2012-30 THM 審查報告研析[16]

此報告說明 SKB 之 SR-Site 初步技術安全分析審查。關於最終處置場緩衝材料之 THM 問題初步審查，目的在於確認研究資料或相關需求，以利於 SKB 提出之建造許可申請。該報告審查公佈相關 SKB 報告結果，指出疑問及不完整之資料，並且針對所假設之參數進行合理性探討。使用 Finite Element Modelling (FEM)-ABAQUS 進行緩衝材料之 THM 問題分析。

1. 審查報告大綱結構

- 第 2 章：以膨潤土基本行為進行研究，針對有限元素建立模型與定義各材料性質進行探討，藉此評估此建模可信程度。
- 第 3 章：外在因素作用，例如剪切作用和土壤液化作用，其中也探討地震與冰凍作用之問題討論。
- 第 4 章：進場環境之不同狀況影響，如處置罐下沉或處置罐上舉。
- 第 5 章：侵蝕/擠出單獨成一章進行探討。
- 第 6 章：處置場建造及裝置工程。
- 第 7 章：審查結果。
- 第 8 章：SSM 建議

2. 有限元素模型建立

下列顯示有限元素建模設計問題之解決及狀況描述:

- 均質性探討，排除飽和度隨時間改變，因為這項假設對整體分析相當重要。
- 不同處置孔測試，為了在有限元素程序上能精準預測密度和含水量的結果。
- 摩擦力探討，在不同的密度上與母岩和處置罐所產生的摩擦或膨潤土之間的黏結力，取決於膨脹壓力。
- 滲透率探討，取決於孔隙的大小。
- 侵蝕性探討，所產生的侵蝕為內部侵蝕而不是沿外圍產生侵蝕。

有限元素模型-為了驗證有限元素模型適合作為預測工具，在精度要求上還有許多有待加強的部分。

分散(Scatter) -實際上無論精度如何，在不同的參數上可以預測不同類型的分散。

精度(Accuracy)-模型預測如何達到實際要求？

- 由於模型本身。
- 在使用的材料參數？可根據規格，黏土含量 75-90%而有所不同。

3. 外在因素之影響

該地區處置場若靠近地震帶可能會因地震而發生剪力作用而造成處置罐的損壞。因此膨潤土作為緩衝材料其性質分析相對重要，如結冰所造成的影響與地震所造成的剪力作用，由實驗設計考量，其剪力作用設計 5cm；結冰覆蓋區為 3km。

首先關於液化的部分，針對所試驗之膨潤土，SKB 所得到的結論其實液化不是一個問題，因為膨潤土經過壓密後是在一個非常密集的狀態，任何剪切作用下會降低膨潤土的孔隙壓力，並增加土壤的強度。

再者關於膨潤土溫度低於攝氏 0 度時，首先會造成膨脹壓力減小，最後膨脹壓力消失下降至 0。膨潤土從開始到冷凍或者冰的形成而如果不加以限制，會影響膨潤土的膨脹，因為膨潤土膨脹壓力主要隨時間及溫度而變化，期凍結和膨脹的過程具有可逆性。

在回填材料部分中可能會凍結，但是如果解凍後就會恢復膨脹壓力，又因為無流動的性質，所以對於工程障壁並無造成威脅。因此可以得出結論，冰的產生可能發生在膨潤土封閉後，然而隨著時間遞進，其冰在不會超過 10cm 的影響下，是可以接受的。

最後關於結凍區域研究，凍土及溫度下降至 -2°C ，不會危及緩衝材料、回填材料和處置孔之封閉功能。

4. 審查報告主要審查項目：

(1) 有限元素法 (FEM) 建模的參數

雖然有大量的測試結果，但是需要針對 Code_Bright 和 Clay Tech 如何在 FEM 中模擬黏土於不同階段下之行為及模擬結果進行比較，或進行一些成分分析。並且針對這兩個模型參數能有類似 SKB TR-10-44 報告中之明確解釋。

(2) 均質性(Homogenisation)

在 FEM 分析中，雖然假設材料均質性易於理解，但膨潤土如何在不同邊界和測試條件下有均質性，此部分缺乏實驗數據來驗證，需針對如何在不同的邊界條件下與隨時間變化下所假設均質性加以探討。

(3) 再飽和程序(Resaturation)

緩衝材料再飽和是膨潤土作為工程障壁整體功能的一個關鍵問題，膨潤土尚未飽和之狀況會產生負孔隙壓力，此時負孔隙壓力將水吸進入膨潤土，直到達到飽和狀態。在接近緩衝區中心位置溫度上升，此位置膨潤土非常乾燥而低飽和度。從測試結果顯示，緩衝材料從不飽和直到孔隙壓力產生造成飽和，需要不同邊界條件下的再飽和參數，而進一步研究。

(4) 侵蝕/擠出(Erosion/Piping)

由於這涉及到化學議題，這領域在 FEM 建設模型技術成熟前，需要更多長時間或預測處置場封閉的狀況下的測試和模擬。

2.6.2 SSM-2012-42 審查報告研析[17]

此報告由 SSM 進行初步審查階段技術說明，針對 SKB 之程序編號 SFS1984：3 用過核子燃料封裝工廠與處置場建設及運營作審查，此技術報告簡要的說明緩衝材料和回填材料之功能和建議設計，並探討安裝及測試之修正方案。審查顯示，建議程序上及實際工程方面，例如：品質保證程序應需要做更詳細的審查。並應該針對緩衝材料和回填材料之屬性、行為進行適當的安全性評估做更詳細審查，而表 2.20 顯示 SSM 對於緩衝材料與回填材料之審查建議議題，其 SSM 之專家學者建議未來在總報告書中著重下列方向深入研究，而表中也比較潛在重要性與優先之關係，此議題為額外的實驗工作項目，需要逐一進行解釋。而表中右側顯示分別有「高」、「中」、「低」之三種表示，其「高」意味著重要優先順序較高；「中」意味著重要優先順序介於兩者之間；「低」意味著潛在重要優先順序較低。另外本審查報告討論可能成為回填材料(Milos BF 04)和兩個緩衝材料 (MX-80 和 Ibeco RWC) 進行性質說明與安全評估。例如：

- 所假設初始狀態之安全評估敏感性如何？
- 緩衝材料模型製造過程是否具代表性？
- 近場傳輸之運算是否考慮到緩衝材料初始的不均勻性質（填充不實之間隙或通道）？

表 2.20 SSM 建議之審查議題

議 題	Potential Significance /Priority
1 預期處置孔和隧道之入流量。	高
2 關於膨潤土部分飽和與膨潤土再飽和之水力傳導係數，審查 Åkesson 相關模擬研究（2010 TR-10-11）已經有品質保證。	高
3 空間變異性所造成處置場溫度、緩衝材料和回填材料再飽和之潛在影響。	中
4 SKB 建議潛在的緩衝材料和回填材料因擠出和侵蝕所造成每個處置孔質量損失結果高達 100 kg 是可接受的。	高
5 隧道封塞之安裝和性能。	高
6 進一步的證據實驗上和 SKB 所計劃之緩衝材料和回填材料均質性。	高
7 溫度對回填材料和緩衝材料性質及行為之影響。	低
8 對於 SR-Site 假設緩衝材料和回填材料初始狀態安全評估之靈敏度。	高
9 SKB 規劃緩衝材料和回填材料之安裝方法進行進一步的測試。	高
10 部分存在於處置孔底部的水造成處置罐向上移動。	低
11 處置場建設之檢驗和驗證計畫，EBS 安裝及操作。	中

2.7 國外最終處置計畫階段性報告審查結果評析

本項工作參考瑞典最終處置計畫審查報告 SSM-2012-30 之 T-H-M 耦合方面研究的進展，以及相關報告審查經驗，掌握國際同儕審查報告內容對此議題的 審查要項及結果，以供國內未來審查工作之借鏡。由於瑞典原預計 2015 年開始興建處置場，2025 年開始營運，但相對於技術上與安全問題受到審查單位質疑並要求更完整之研究內容，因此至今 2015 年末尚未有重大變動消息，可知瑞典對於用過核子燃料之最終處置場審查作業相當嚴謹。

對於 SSM-2012-30 此報告所提審查要點，第一為有限元素法 (FEM) 建模的參數模擬所述能於緩衝材料在不同條件狀態下進行參數模擬，此部分有諸多研究空間進行分析，而本研究於第七章中有更進一步之參數研究，第二為均質性之適用性，在目前的模擬中皆將材料定義為均質，但實際上材料具有異向性，因此爾後研究此議題需要加以而外探討，第三部分關於再飽和程序上為處置場緩衝材料必須經歷之過程，能否在有限元素法模擬與實際上更為貼近需要在實驗上以做確認，最後第四部份為侵蝕與擠出關於化學性質分析，此部分需要以較長之時間進行試驗。另外對於此審查報告所提出關於膨潤土溫度低於攝氏 0 度時產生膨潤土冰凍會影響膨潤土的膨脹，此部分對於台灣氣候特色其處置場設計或有限元素模擬上應當以我國為主，因此冰凍部分能作為一個參考性的影響因素。

第三章 實驗方法與材料

3.1 試驗材料

本研究所使用的膨潤土材料為美國懷俄明州開採的膨潤土，如圖3.1，由AMCOL公司在美國懷俄明州Black Hills地區開採生產，而後藉由磊盈公司進口，型號為SPV 200，其表3.1顯示本試驗所使用之膨潤土成份分析表，由磊盈公司所提供。此膨潤土產品在市面上主要應用於陶瓷工業，化學式為 $(\text{Na,Ca})_{0.33}(\text{Al}_{1.67}\text{Mg}_{0.33})\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2.n\text{H}_2\text{O}$ ，顆粒通過#200篩(0.074 mm)達65%以上，含水量在9%。而SPV 200之膨潤土可交換陽離子以 Na^+ 為主，因此屬於鈉型膨潤土[10]。



圖 3.1 本試驗所用 SPV 200 膨潤土

表 3.1 SPV 200 膨潤土成份分析表

Elemental Analysis	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	LOI	Al ₂ O ₃	FeO	Na ₂ O	Trace
%	63.02	3.25	2.67	0.65	5.64	21.08	0.35	2.57	0.72

3.2 試驗儀器與模具-ASTM D5334 暫態熱源法

根據ASTM D5334暫態熱源法-熱探棒法量測規範所建立[18]，其儀器設備包含熱探棒、資料擷取系統及熱源供應器，如圖3.2-圖3.4為暫態熱源法-熱探棒法之實際儀器配置圖和儀器連結配置簡圖：



圖 3.2 實際試驗儀器之配置圖



圖 3.3 試體加熱系統之配置圖

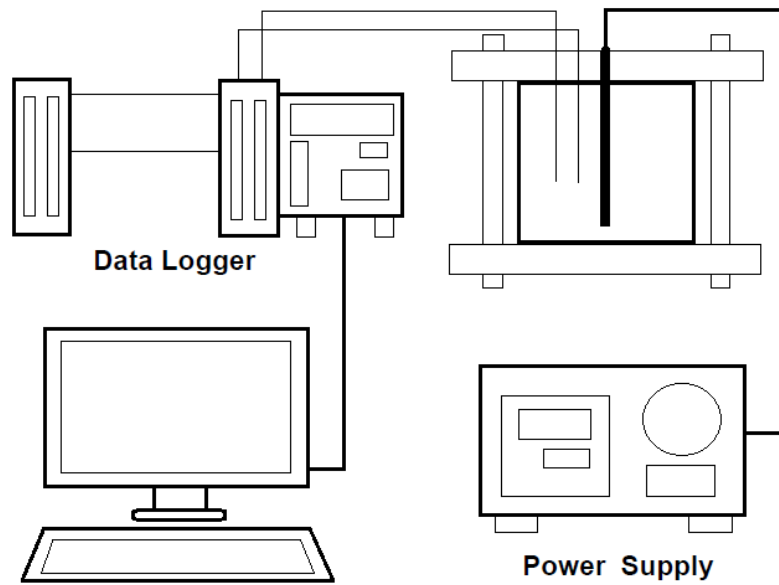


圖 3.4 試驗儀器連結配置簡圖

3.2.1 資料擷取系統

採用日本 YOKOGAWA 公司所生產的 MX100-02E 資料擷取系統，如圖3.5，可同時進行20組訊號之記錄，讀取間距最小可達0.1秒，最大1 hour。使用前先進行擷取系統溫度校正，觀察結果發現，熱電偶讀取溫度值與溫度計觀察值極為接近，平均誤差在 0.2°C 以內，量測系統相當穩定。



圖 3.5 MX100-02E 資料擷取系統(左)；程式操作介面(右)

3.2.2 熱探針及熱源供給系統

本研究採用之熱量測系統係委託正泰電熱股份有限公司製作，可分熱源與溫度量測探針兩部分，熱探針之長度10 cm，直徑1 cm採用銅-康銅(Constantan，為55 %銅與45 %鎳組成之合金) 組成之T型熱電耦，埋置於熱探針內部中央處。溫度量測範圍 $-200^{\circ}\text{C} \sim 400^{\circ}\text{C}$ ，搭配資料擷取系統，量測解析度可達 0.1°C ，如圖3.6所示。熱源供應方面，則採用可調整瓦數並能自動演算校正之供應器，讓熱探針穩定提供固定功率。

圖3.7所示為熱探針升溫及持溫曲線，由圖中可以得知熱探針與熱源供

給配合結果，圖中假設80、90°C與時間設定為2 min進行升溫與持溫測試，得知其升溫部分不論是80°C或90°C皆能在1 min之內達到所需之溫度要求；持溫部分顯示其熱源供給器之敏感性相當高，使實驗達到所需之需求。

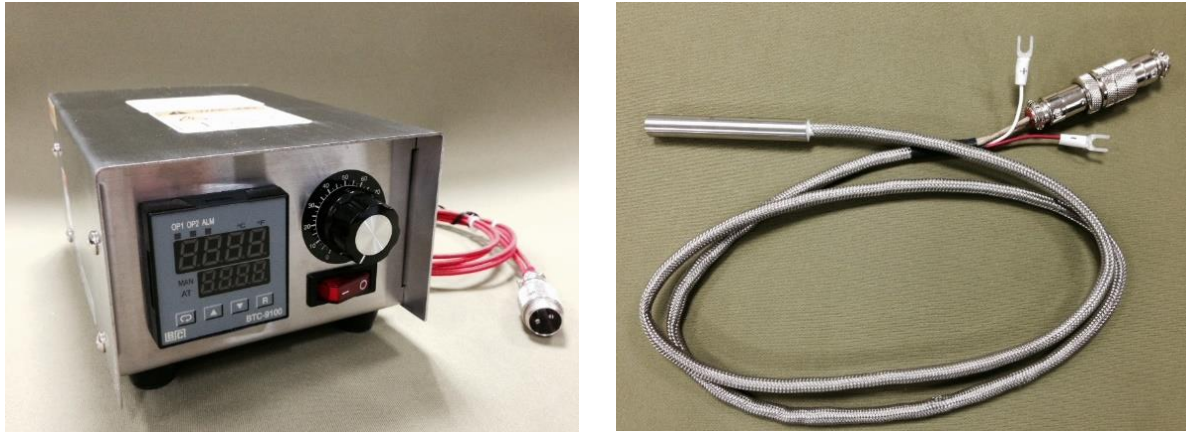


圖 3.6 熱源供給系統(左)；熱探針(右)

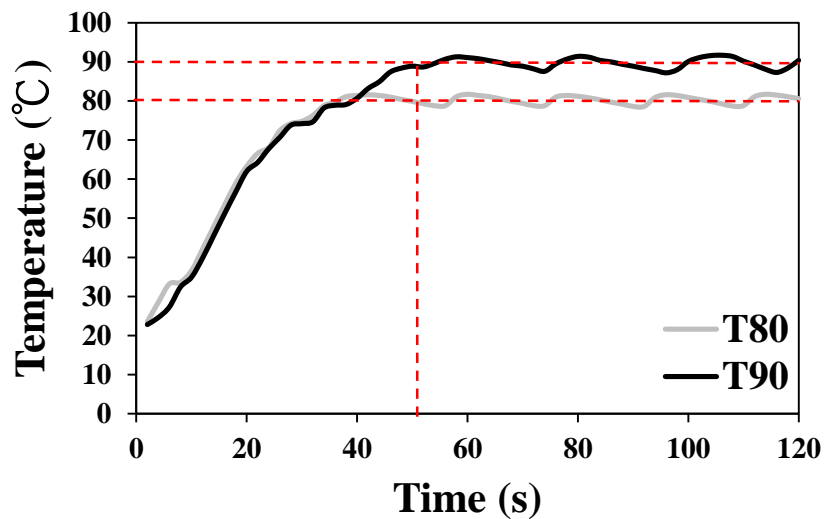


圖 3.7 熱探針升溫及持溫曲線

3.2.3 試驗模具、試體製作

本研究所設計之模具如圖3.8，應用靜壓夯實法製作密度1.4、1.5、1.6、1.7 Mg/m^3 之圓柱土體，將之束制於外直徑140 mm、高 110 mm空心圓柱外模內，最後把整組外模置放於固定模具設備基座上，旋緊上蓋螺絲，其組成要件分別敘述如下：

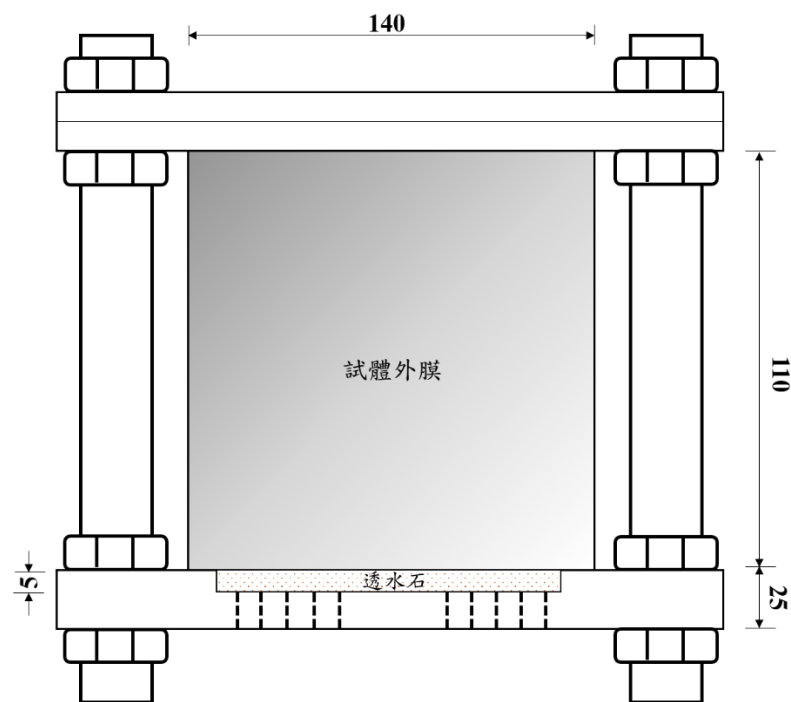


圖 3.8 實驗模具組 (mm)

(一) 試驗土樣

採用SPV200膨潤土，設計密度1.4、1.5、1.6、1.7 Mg/m^3 。將秤好重量之土樣放入模具中，將土樣表面整平後，將壓桿放置土樣上，再將整體模具置於萬能試驗機上加壓即可獲得試體，如圖3.9為壓製完成所得之試體，而圖3.10顯示熱探針與膨潤土試體裝置示意圖。

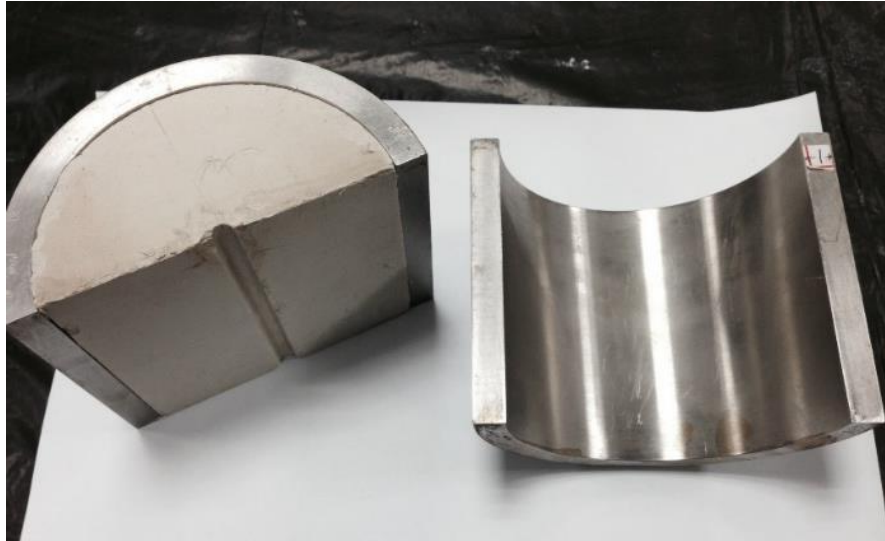


圖 3.9 壓製完成所得之 SPV200 膨潤土試體

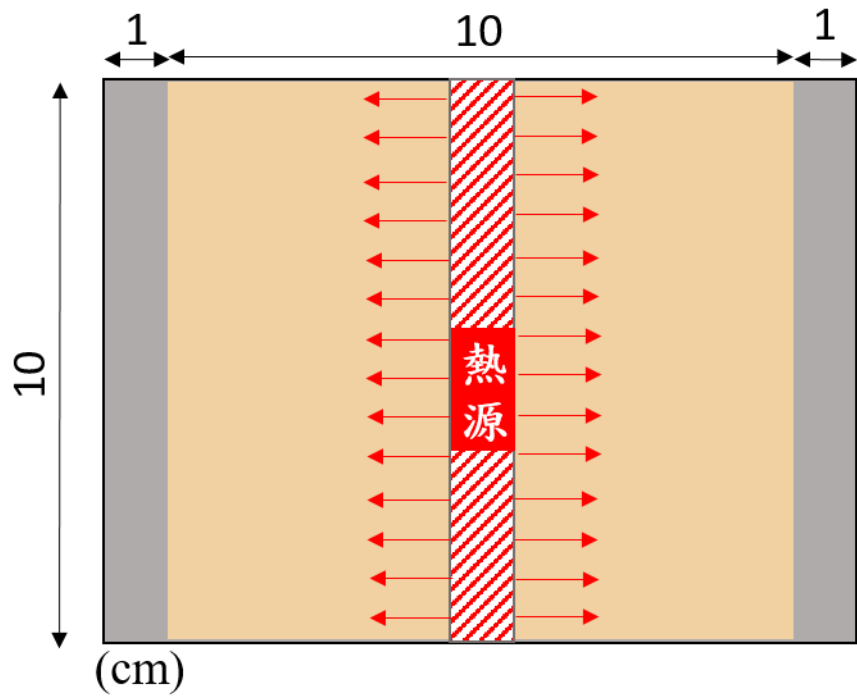


圖 3.10 SPV200 膨潤土試體壓製完成與熱探針示意圖

(二) 外模

採用分裂模的觀念，設計於分裂內模的外圍利用圓形不鏽鋼圈(外束環)加以束制，以達到使兩半圓柱土體密合的效果。經由土體間隙測試及耦合回脹測試，結果發現分裂外模不僅可以使兩土體中間達到近乎無間隙，同時也發揮了良好的束制效果，如圖3.11所示。

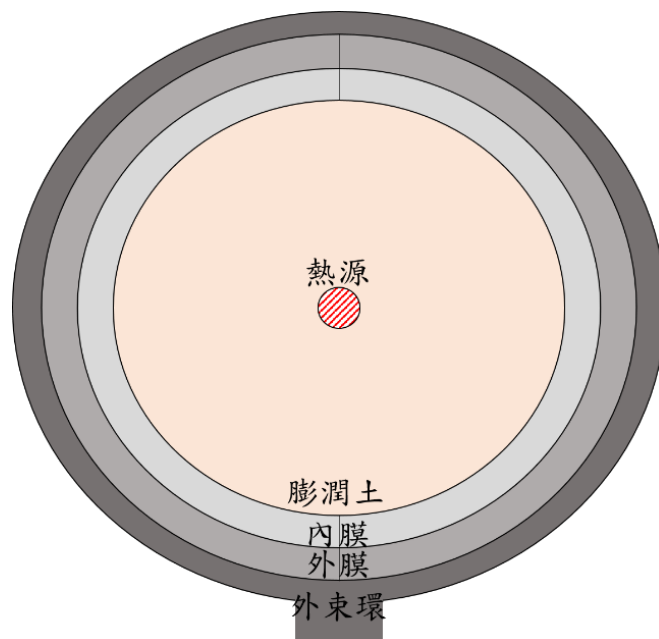


圖 3.11 試體俯視示意圖(未按比例)

(三) 壓桿、內模

壓桿及內模如圖3.12，皆由實心不鏽鋼製成，並都經過表面鍍鉻及熱處理以提供較大硬度及較低摩擦力。兩個半圓內模組合後形成高100 mm，半徑50 mm的圓柱試體，藉由控制萬能試驗機壓實速度，使緩衝材料成型。



圖 3.12 壓桿、內模組合圖

(四) 固定模具設備

圖3.13為完成組合試驗模，上下蓋皆由實心不鏽鋼製成，為量取土體內距離熱源不同位置之溫度變化，因此埋置深度不同距離之T型熱電耦。

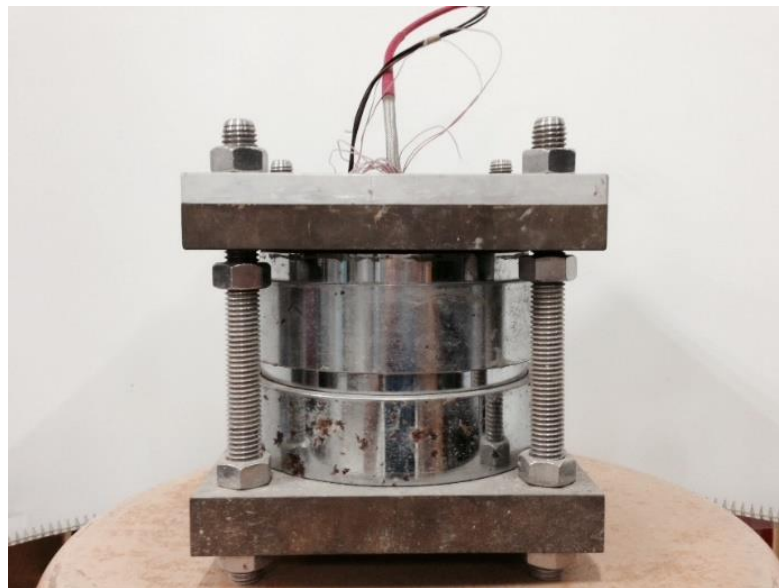


圖 3.13 試驗試體完成組裝組合圖

3.3 試驗儀器與模具-攜帶式熱傳導係數

使用「攜帶式熱傳導係數(ISOMET M2104)」進行膨潤土熱傳導係數之量測，目的藉由此儀器與 ASTM D5334 暫態熱源法進行對照，其試體溫度控制在室溫與 50°C 進行試驗及比對。[29]

3.3.1 攜帶式熱傳導係數

ISOMET M2104，為一攜帶型可直接測試材料熱傳導性質量測儀器，如圖 3.14 所示，其使用範圍甚廣，探測計使用表面接觸式，如圖 3.15 所示，表面接觸式用於硬質材料測試，而測試時間約為 8~16 分鐘。由圖 3.16 使用表面接觸是連接熱傳導係數測儀後，將探測計放上試體表面進行量測。

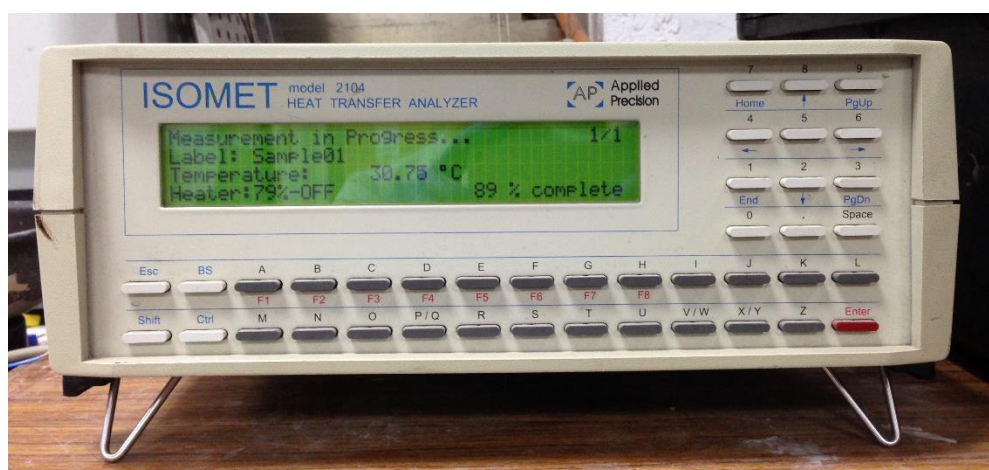


圖 3.14 攜帶式熱傳導係數測儀



圖 3.15 表面接觸式探測計



圖 3.16 探測計量測示意圖

3.3.2 試驗模具

設計模具如圖3.17，相同的靜壓夯實法製作密度 1.4 、 1.5 、 1.6 、 1.7 g/cm^3 之圓柱土體，試驗試體高度為 30mm ；直徑 100mm 。



圖 3.17 攜帶式熱傳試驗模具

第四章 熱傳試驗結果分析

熱傳導係數計算方式藉由溫度範圍 ΔT 和時間 $\ln(t)$ 之間線性關係來決定其值，圖 4.1 為 D5334 熱探針法之各乾密度於不同溫度下熱傳導係數，由圖顯示膨潤土之熱傳導係數隨著溫度影響而有所變化，在各階段試驗溫度下其試驗乾密度皆為 $1.7 > 1.6 > 1.5 > 1.4 \text{ g/cm}^3$ ，顯示壓密度對於熱傳導性質有顯著的影響，熱傳導性質隨乾密度越高其熱傳導係數越高之正比關係。

另外本次試驗膨潤土其含水量只有約 8-9%，因此在熱傳導係數會比 JNC 與 PNC 數據較低，再者 SPV200 之膨潤土其粒徑較小，大約 65% 通過 200#，因此在控制溫度對熱傳導係數變化影響，其變化較大，也顯示溫度對於熱傳導係數亦有影響。

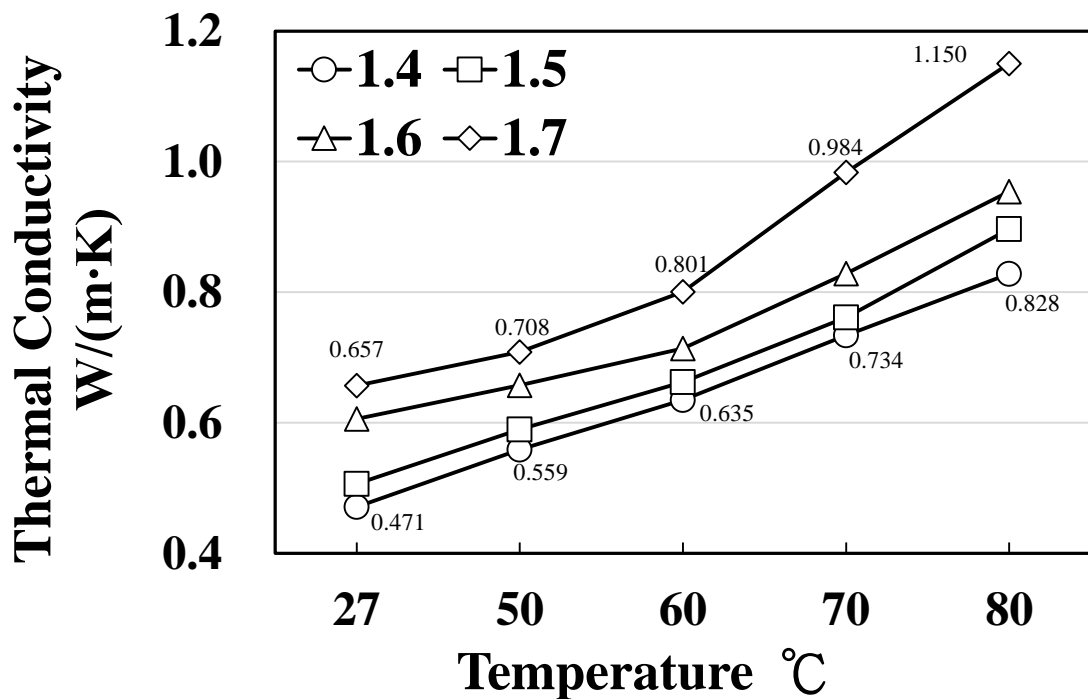


圖 4.1 熱探針法之各乾密度於不同溫度下熱傳導係數

為了使熱探針法有明確的相關對照，因而使用 ISOMET 2104 儀器以做比對，其結果顯示於圖 4.2；數據顯示於表 4.1，而圖 4.2 之 D 表示 D5334 熱探針法；M 表示為 M2104 攜帶式熱傳法；27 與 50 所表示為溫度，所以 M50 所表示為使用攜帶式熱傳法測試 50°C 狀態下之膨潤土熱傳導，相互對照兩種方法 27°C 與 50°C 數據結果，由於攜帶式熱傳試驗儀器有測量溫度限制，因此相互對照部分為 27°C 與 50°C，結果顯示不論是熱探針法或是攜帶式熱傳法，期數據上皆大致相近，而在攜帶式熱傳法 M27 與 M50 之 1.5 乾密度數據上有較大之差異，推測在熱探針試驗過程中有低估的現象，藉由攜帶式熱傳法也藉機驗證熱探針法之正確性。

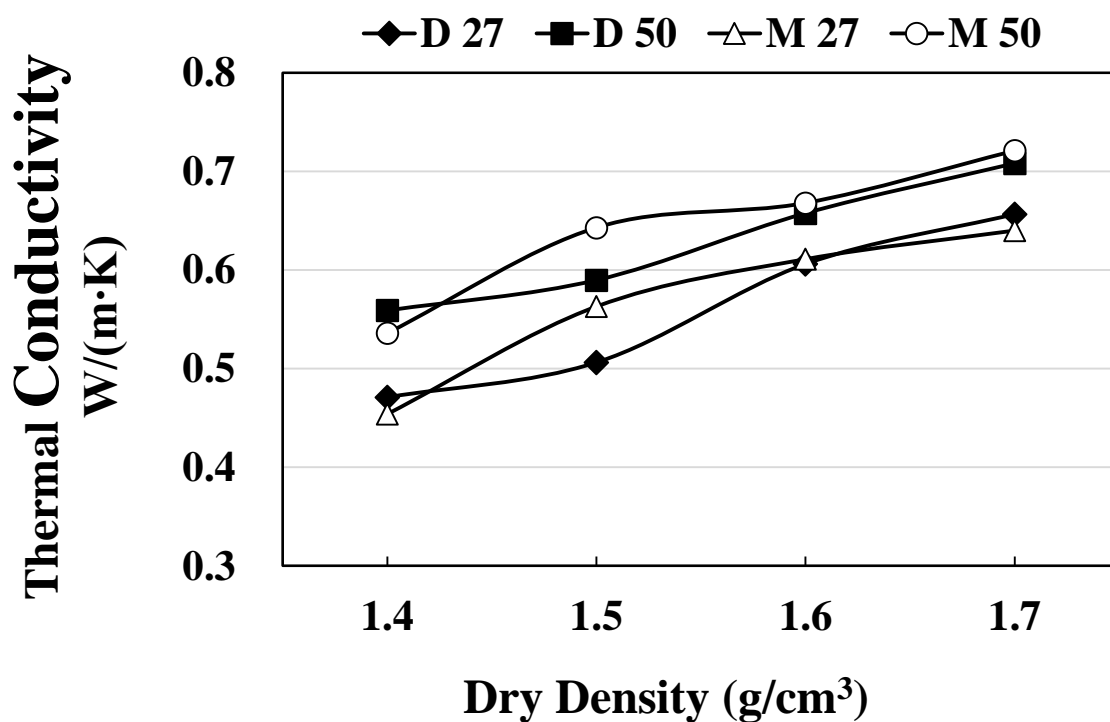


圖 4.2 攜帶式與熱探針法之各乾密度於不同溫度下熱傳導係數對比

表 4.1 攜帶式各乾密度熱傳測量儀數據

ρ (kg/m ³)	1.4		1.5		1.6		1.7	
Temp (°C)	27	50	27	50	27	50	27	50
1	0.444	0.551	0.543	0.638	0.617	0.669	0.636	0.704
2	0.451	0.511	0.557	0.643	0.600	0.660	0.646	0.733
3	0.460	0.538	0.564	0.663	0.610	0.649	0.651	0.711
4	0.465	0.551	0.572	0.655	0.607	0.664	0.636	0.709
5	0.453	0.547	0.566	0.649	0.613	0.676	0.637	0.712
6	0.450	0.516	0.568	0.614	0.615	0.656	0.640	0.723
7	0.451	0.532	0.568	0.647	0.612	0.678	0.638	0.726
8	0.453	0.527	0.566	0.653	0.613	0.679	0.641	0.733
9	0.455	0.545	0.565	0.656	0.613	0.669	0.638	0.725
10	0.456	0.541	0.556	0.614	0.605	0.677	0.637	0.722
AVG.	0.454	0.536	0.563	0.643	0.611	0.668	0.640	0.720
Standard Deviation (10⁻³)	0.005	0.013	0.008	0.016	0.005	0.010	0.005	0.010

第五章 有限元素分析方法

5.1 分析工具

本研究使用有限元素分析軟體 ABAQUS/CAE 進行模擬，將其分為兩個部分：

1. 建立分析模型：建立網格，定義節點、元素編號及元素種類；定義各元素之材料組成模式，並設定材料性質之相關參數；定義特殊節點束制、邊界條件與初始狀態。
2. 計算分析：以有限元素法作模型之運算，並進行後處理之分析討論。

5.2 代表體積單元

本研究在進行處置場之模擬分析時，因為廢料罐的排列方式具有規則性及對稱性，因此可利用對稱面之特性，在處置場內部截取代表體積單元（representative volume unit）（圖 5.1）進行分析。

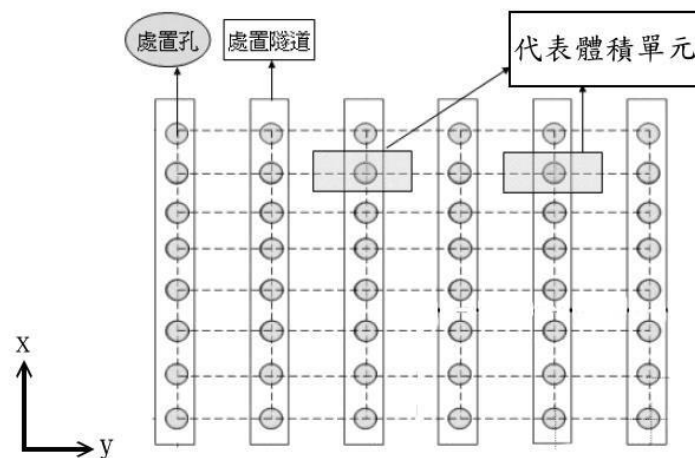


圖 5.1 處置場內部之代表體積單元示意圖(俯視圖)

5.3 完全耦合熱-水-力學分析

於分析處置場問題時，假設處置場受高溫作用使得水-力參數發生變化，而水-力參數之變化並不影響溫度的結果，此種分析方式稱為「依序耦合熱-水-力分析」，但由於實際上，熱傳參數與水-力學參數間的相互影響甚大，故分析時須藉由水力參數重複迭代之方式達成「完全耦合熱-水-力學之分析」(Fully coupled thermal-hydro-mechanical analysis)，如以下 4 點之敘述。說明如下：

- (1) 首先以給定之初始條件設定各材料之水力參數，由其參數間的相互影響關係函數求得初始之熱傳參數值(包括熱傳導係數、比熱)，並以廢料體衰變熱作為熱源進行熱傳導分析。
- (2) 以熱傳導分析所得之溫度場作為熱載重，接續進行水-力分析，求得應力、孔隙壓力、孔隙比及飽和度等隨時間之分佈變化。
- (3) 以水-力分析結果之飽和度與孔隙比進行材料參數更新，進一步所得之飽和度與水含量即可求取熱傳分析所需之熱傳係數與比熱。
- (4) 重複步驟(1)-(3)，以迭代之方式進行依序耦合熱-水-力分析，直到前一次熱傳分析與該次迭代熱傳分析結果之溫度場達收斂為止。

※在有限元素軟體 ABAQUS 中，熱傳分析與水-力學分析之間為非耦合，並無直接可進行其交互影響的分析功能，故須藉由重複以上分析步驟，以達到完全耦合熱-水-力學模型之效應。完整分析流程如圖 5.2 所示。

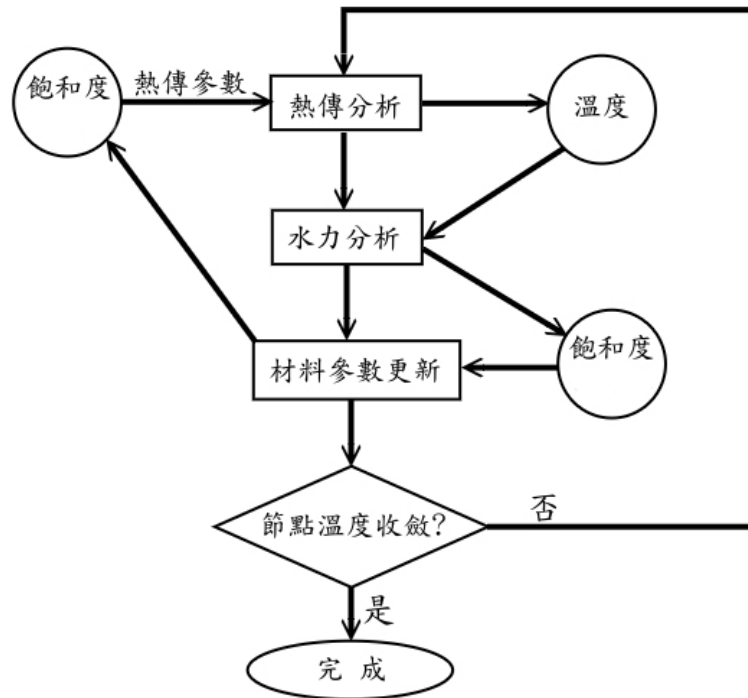


圖 5.2 完全耦合熱-力學分析流程圖

5.4 二維軸對稱完全耦合熱-水-力學分析之模型建立

利用處置場中處置孔分佈與其本身之對稱性，如圖 4.3，以處置孔中心為對稱軸，設置軸對稱之二維網格模型進行分析，模型高度為 24 公尺，徑向距離為 11 公尺；其中廢料罐半徑為 0.525 公尺，處置孔半徑為 0.875 公尺，其餘尺寸由於文獻並無明確解說，在此以文獻圖 4.4 所提供之模型高度與徑向距離作為基準，以比例關係概略估計設置，廢料罐高度 5 公尺，處置孔深度 8 公尺。[19]

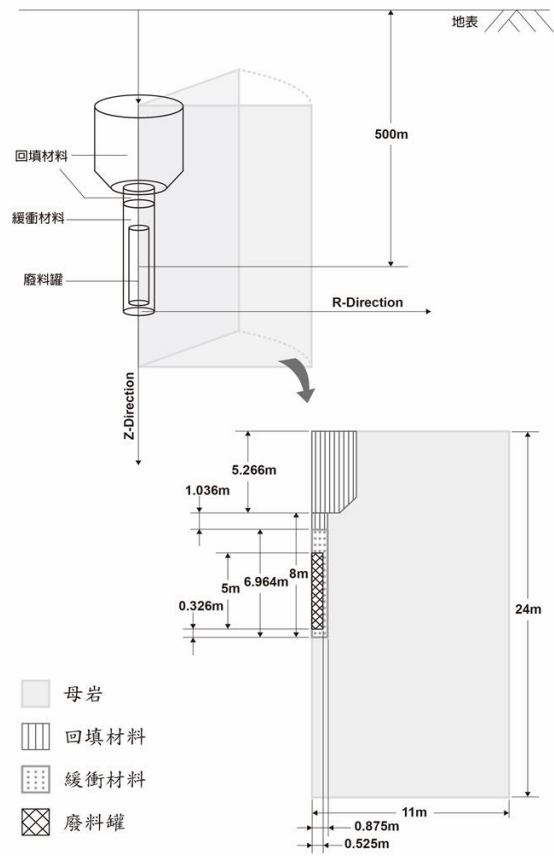


圖 5.3 二維軸對稱模型 3D 示意圖[19]

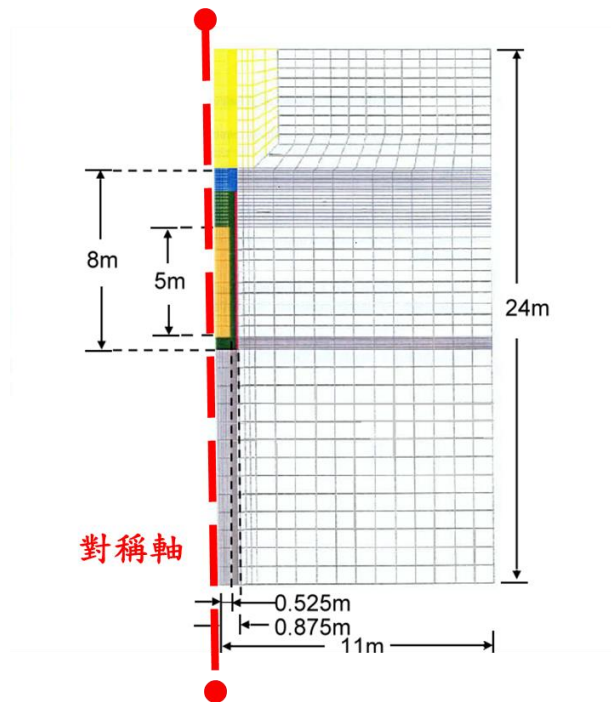


圖 5.4 二維軸對稱分析模型網格之尺寸示意圖[19]

5.5 模型之材料參數

緩衝材料被分為兩層，距處置孔壁 0.1 公尺之緩衝材假設為完全飽和狀態，水含量為 0.277，以緩衝材(一)稱之，其餘靠近熱源之緩衝材則假設其初始飽和度為 0.61，水含量 0.169，以緩衝材(二)稱之；此將造成緩衝材有兩種不同的熱傳係數及比。茲將各材料於分析所需之參數列於表 5.1。

表 5.1 分析所需材料參數

材料性質	材料種類				
	熱源	緩衝材料(一)	緩衝材料(二)	回填材料	基岩
熱傳導係數 (W/m-K)	200	1.3	0.965	1.5	3
比熱 (J/kg-K)	400	1537.51	1291.53	1200	800
密度 (kg/m ³)	7000	1570	1570	2000	2600
楊氏模數 (kPa)	2.1e8	0.2	0.2	3e4	1.85e6
波松比	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3
線膨脹係數 ($\frac{1}{^{\circ}\text{C}}$)	8.2e-6	1.65e-3	1.65e-3	8.6e-6	8.6e-6

5.6 初始條件與邊界條件

模型之初始溫度為 10°C ，並於模型邊界設置對流係數 $f = 0.015 \text{ W/m-K}$ (如圖 5.5)。單一廢料罐所產生的熱源強度為 1680 W ，使用之熱衰減公式如(5.1)式：

$$P(t) = P_0 [0.769e^{-0.02t} + 0.163e^{-0.002t} + 0.067e^{-0.0002t}] \quad (\text{式 } 5.1)$$

※所示熱衰減率與時間之變化趨勢可見圖 5.6，即熱源之發散熱強度將隨時間之行進而衰減。

$P(t)$: 隨時間變化之發散熱強度

P_0 : 廢料罐安置完成後之初始發散熱強度 1680 W

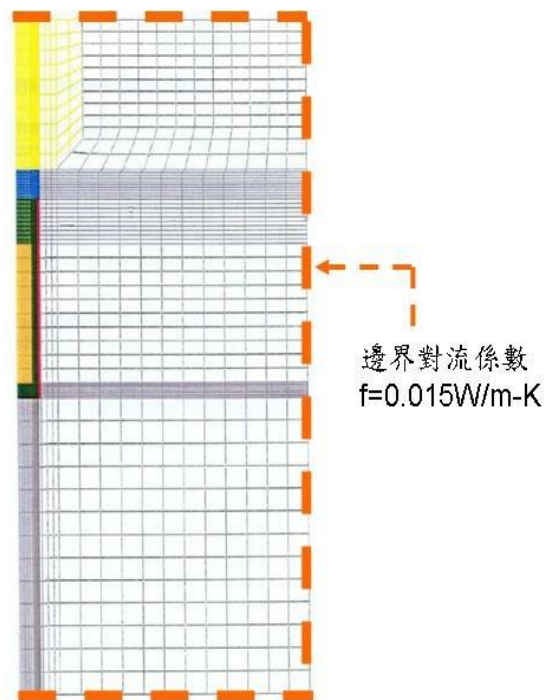


圖 5.5 邊界對流係數設置示意圖

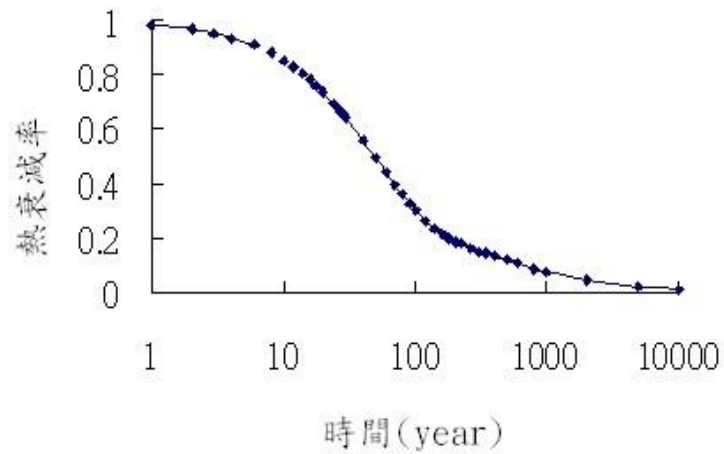


圖 5.6 衰變熱隨時間變化之趨勢

力學之束制方式為束制模型之對稱軸上所有節點的徑向位移，其餘三邊包括基岩與回填材料邊界則束制其徑向與軸向位移，如圖 5.7 所示。

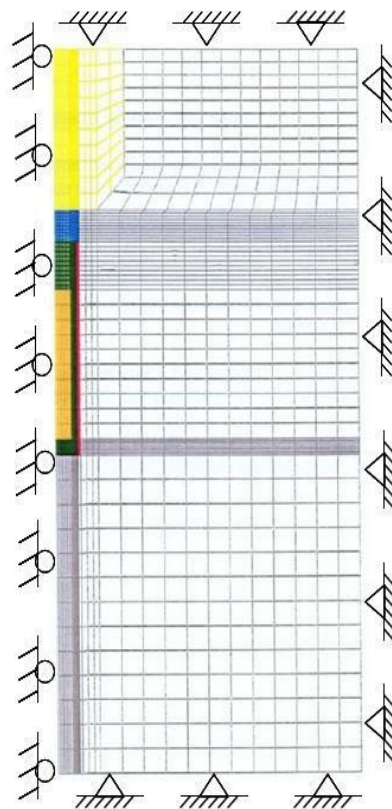


圖 5.7 模型之力學邊界條件束制示意圖

5.7 三維幾何模型

根據文獻模型尺寸長向距離為 50 m，短向距離為 6 m。其中廢料罐半徑 0.525 m，廢料罐全長 4.91 m，處置孔半徑=0.875m 高度=7.91m。建立之分析模型尺寸為長 25 m、寬 3 m、深 56 m，如圖 5.8。[20]

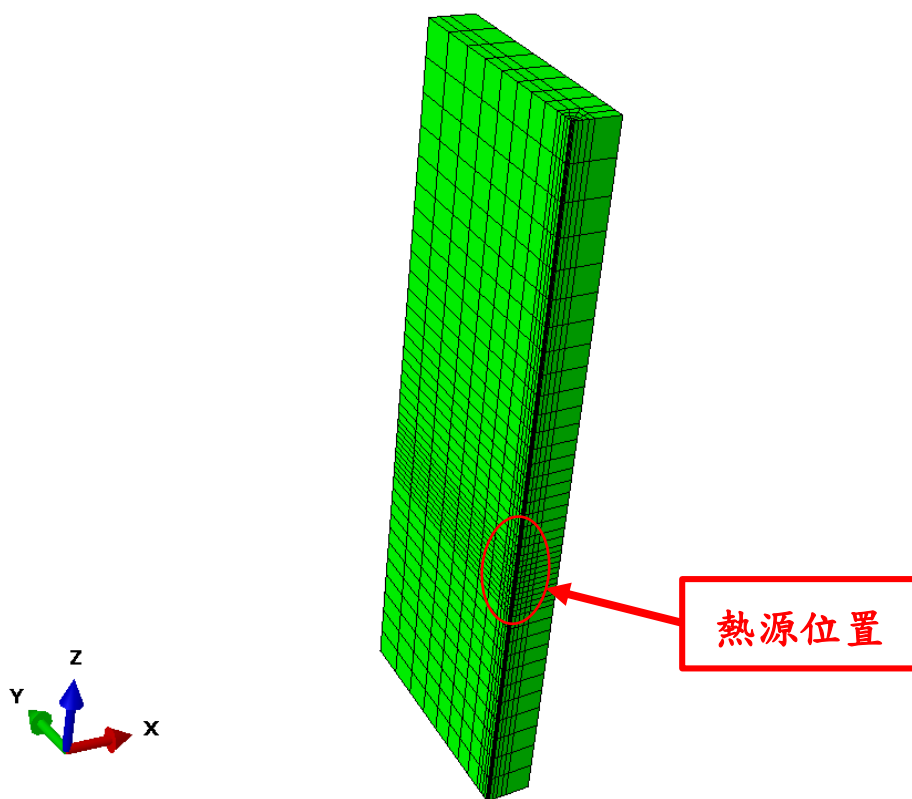


圖 5.8 三維模型之示意圖

第六章 熱-水-力學分析之瑞典文獻驗證

6.1 網格設置與建立幾何模型

文獻[19]利用處置場中處置孔分佈與其本身之軸對稱性(圖 6.1)，以處置孔中心為對稱軸，設置二維軸對稱網格模型進行分析。模型由 2514 個元素組成，每個元素由 8 個結點構成。在熱傳導分析中元素為 DCAX8。在水-力學分析中母岩、回填材料及緩衝材料之元素為孔隙壓力元素 CAX8P，而在廢料罐進行分析時則模擬為無吸水的特性，故採用元素型式為力學元素 CAX8。

模型高度為 24 公尺，徑向距離為 11 公尺；其中廢料罐半徑為 0.525 公尺，處置孔半徑為 0.875 公尺，其餘尺寸由於文獻並無明確解說，在此以文獻所示網格圖形(圖 6.2)之高度與徑向距離作為基準，以比例關係概略估計設置，廢料罐高度 5 公尺，處置孔深度 8 公尺。

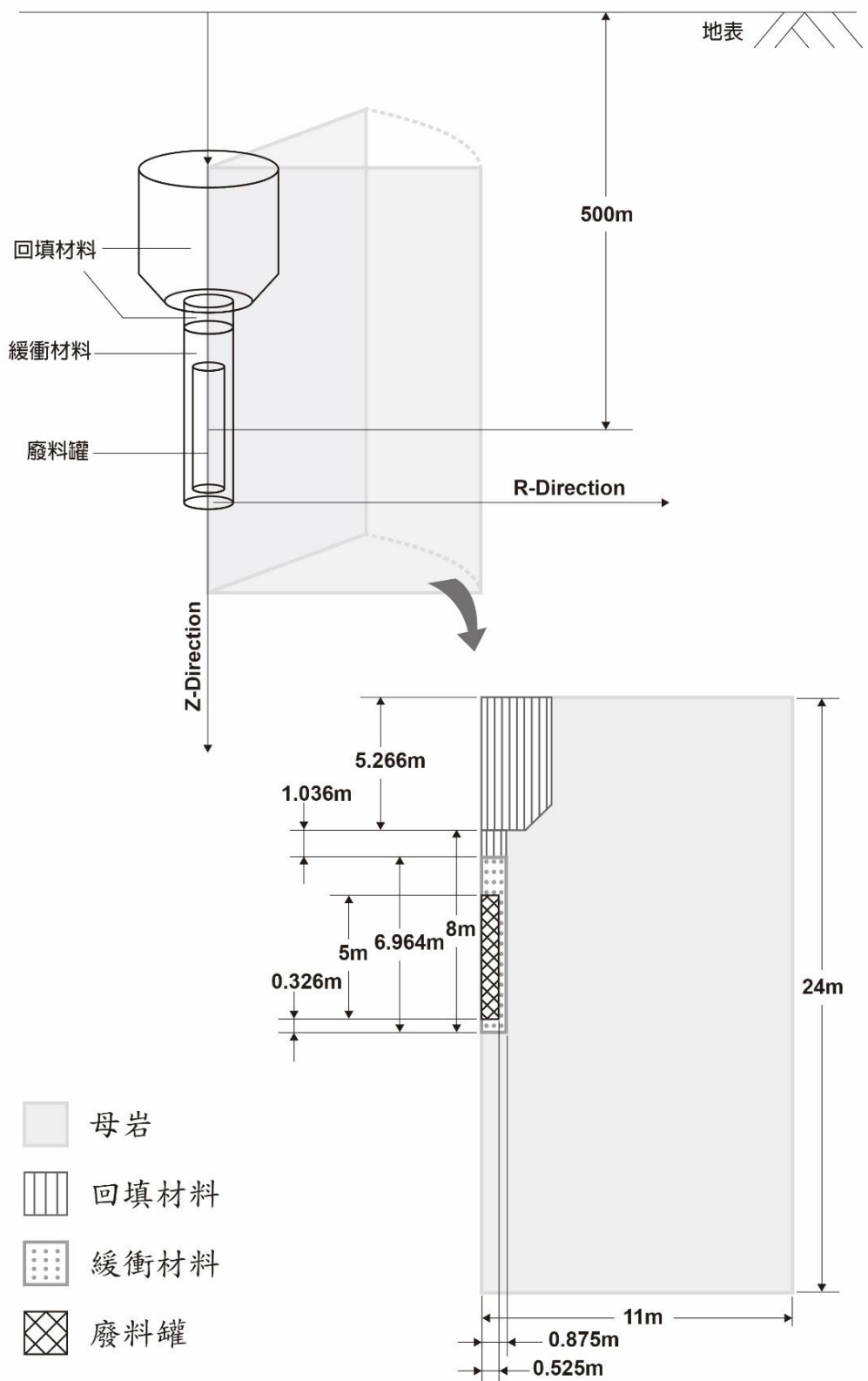


圖 6.1 處置場二維軸對稱模型材料示意圖[30]

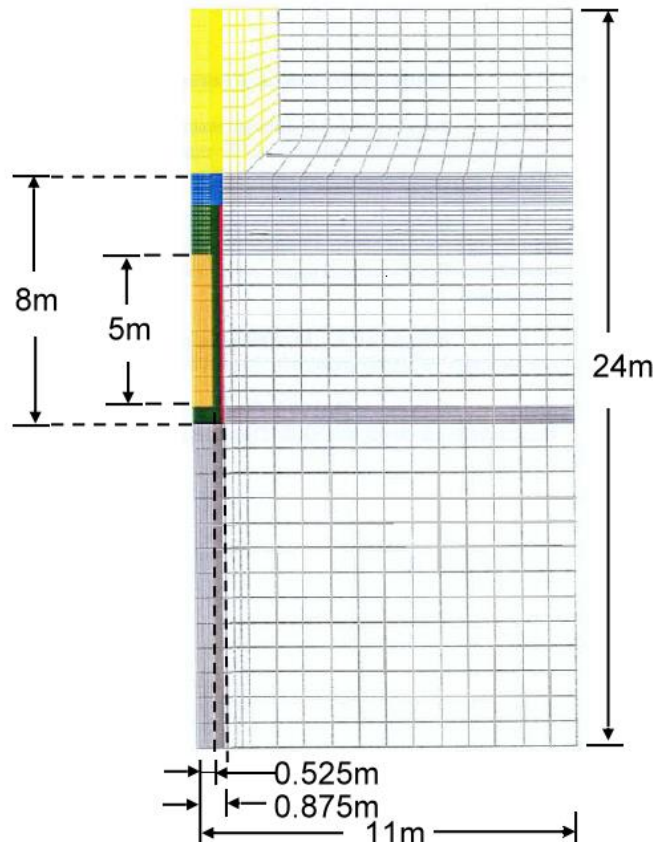


圖 6.2 分析模型網格之尺寸示意圖[19]

6.2 材料參數介紹

文獻提供之多重障壁系統所需之材料包含廢料罐、緩衝材料、回填材料及母岩所組成。其中緩衝材料被分為兩層，距處置孔壁 0.1 公尺之緩衝材為完全飽和狀態，水含量為 0.277，以緩衝材(一)稱之，其餘靠近熱源之緩衝材其初始飽和度為 0.61，水含量 0.169，以緩衝材(二)稱之；此將造成緩衝材有兩種不同的熱傳係數及比熱，飽和度對應之水含量由公式(6.1)式求得。

$$S \times e = \omega \times G_s \quad (6.1)$$

(其中 S 為飽和度；e 為孔隙比； ω 為含水量； G_s 為材料密度)

熱傳分析中所需各材料參數之包含熱傳導係數、比熱、密度如表

6.1，其中緩衝材料之熱傳係數與飽和度關係如表 6.2。

表 6.1 熱傳分析材料參數[19]

材料性質	材料種類				
	熱源	緩衝材料(一)	緩衝材料(二)	回填材料	母岩
密度 (kg/m ³)	7000	1570	1570	2000	2600
熱傳導係數 (W/m-K)	200	1.3	0.965	1.5	3
比熱 (J/kg-K)	400	1537.51	1291.53	1200	800

表 6.2 緩衝材料之飽和度與熱傳係數對應關係[19]

飽和度	熱傳導係數 (W/m-K)
0	0.3
0.2	0.3
0.3	0.4
0.4	0.55
0.5	0.75
0.6	0.95
0.7	1.1
0.8	1.2
0.9	1.25
1.0	1.3

水-力學分析所需各材料性質包含密度、楊氏模數、水力傳導係數、波松比、膨脹係數(表 6.3)。其中緩衝材料之水力傳導係數係隨溫度與孔隙比

的不同而變化(表 6.4)。母岩與緩衝材料之飽和度與吸力關係曲線圖如圖

6.3 所示，曲線中各點所對應孔隙壓力隨飽和度之變化詳見表 6.5。

表 6.3 各材料於水力模型分析之力學參數[19]

材料性質	材料種類			
	熱源	緩衝材料	回填材料	母岩
密度 (kg/m ³)	7000	1570	2000	2600
楊氏模數 E (kPa)	2.1*10 ⁸	孔隙回彈模數= 0.2	3*10 ⁴	1.85*10 ⁶
波松比	0.3	0.4	0.3	0.3
線膨脹係數($\frac{1}{^{\circ}\text{C}}$)	8.2*10 ⁻⁶	0	8.6*10 ⁻⁶	8.6*10 ⁻⁶
水力傳導係數 ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$)	--	表 5-4	2*10 ⁻¹⁰	1*10 ⁻¹⁰

表 6.4 緩衝材料水力傳導係數與溫度、孔隙比之關係[19]

溫度(°C)	孔隙比	水力傳導係數 [10 ⁻¹³](m/s)
20	0.4	0.035
20	0.6	0.2
20	0.8	0.65
20	1.0	1.75
40	0.4	0.05
40	0.6	0.31
40	0.8	1.0
40	1.0	2.75
60	0.4	0.07
60	0.6	0.44
60	0.8	1.45
60	1.0	3.85
80	0.4	0.1
80	0.6	0.55
80	0.8	1.8
80	1.0	4.9

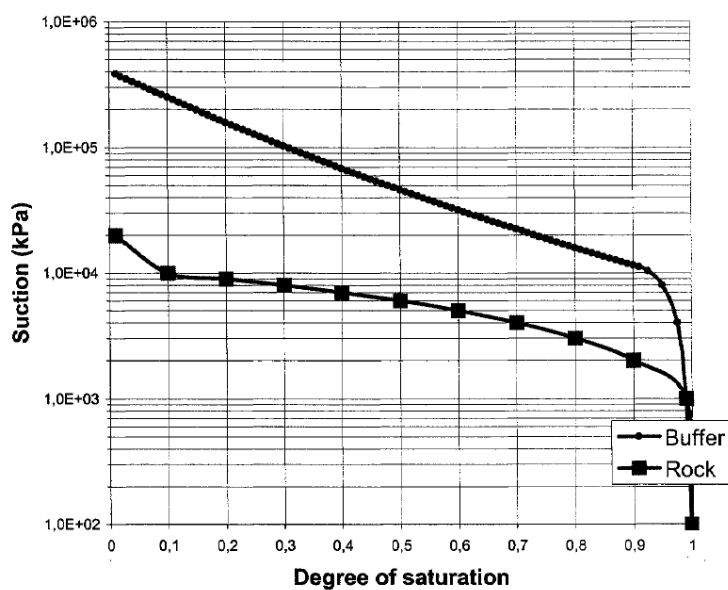


圖 6.3 母岩與緩衝材料之飽和度與吸力關係曲線圖[19]

表 6.5 母岩與緩衝材吸水曲線之孔隙壓力與飽和度對應關係[19]

母岩		緩衝材料
飽和度	孔隙壓力(kPa)	孔隙壓力(kPa)
0.01	-20 000	-400 000
0.1	-10 000	-240 000
0.2	-9 000	-160 000
0.3	-8 000	-100 000
0.4	-7 000	-70 000
0.5	-6 000	-47 000
0.6	-5 000	-31 000
0.7	-4 000	-22 000
0.8	-3 000	-17 000
0.9	-2 000	-12 500
0.925		-11 000
0.95		-8 000
0.975		-4 000
0.99	-1 000	-1 200
0.995	-500	-600
0.996		-480
0.997	-300	-360
0.998		-240
0.999	-100	-120
1.0	0	0

6.3 初始條件與邊界條件

6.3.1 熱傳分析之初始條件與邊界條件

模型之初始溫度為 10°C ，並於模型邊界之母岩設置對流係數 $f=0.015$ $\text{W}/\text{m}-\text{K}$ (如圖 5-5)。單一廢料罐所產生的熱源強度為 1680W ，使用之熱衰減公式如(6.2)式：

$$P(t) = P_0[c_1 e^{-0.02t} + c_2 e^{-0.002t} + c_3 e^{-0.0002t}] \quad (6.2)$$

$P(t)$: 隨時間變化之發散熱強度

P_0 : 廢料罐安置完成後之初始發散熱強度 1680W

$$c_1 = 0.769$$

$$c_2 = 0.163$$

$$c_3 = 0.067$$

其中 6.1 式所示熱衰減率與時間之變化趨勢可見圖 6.4，即熱源之發散熱強度將隨時間之行進而衰減。

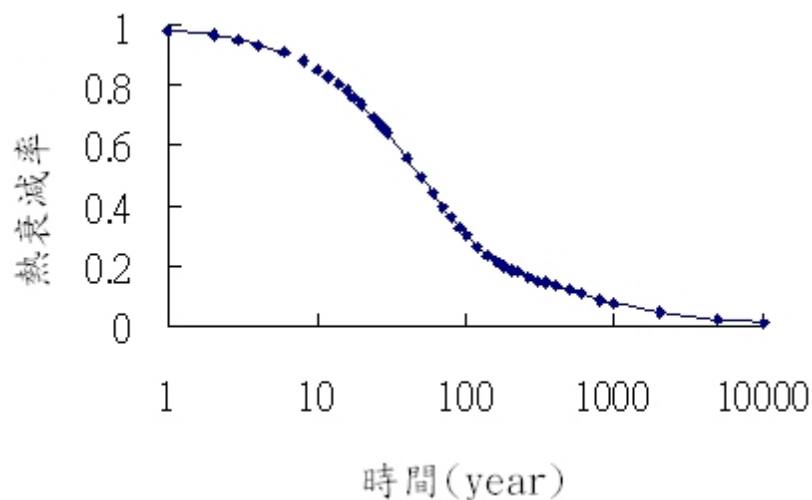


圖 6.4 熱衰減率隨時間變化之趨勢

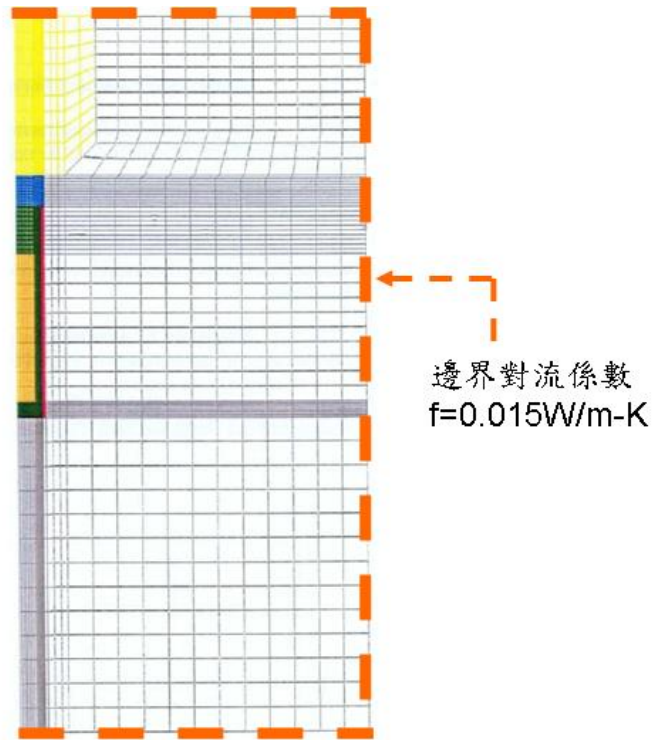


圖 6.5 邊界對流係數設置示意圖

6.3.2 水-力學分析之初始條件與邊界條件

在水力學初始條件設置各材料所設置之初始孔隙比、飽和度及所對應之初始孔隙壓力如表 6.6 所示，並以各材料所假設之初始孔隙壓力計算其初始有效應力，利用有效應力與水之重量達成一初始應力場之平衡狀態。

水-力學邊界條件束制模型之對稱軸上所有節點的徑向位移，其餘三邊的母岩與回填材料邊界則束制其徑向與軸向位移，如圖 6.6 所示。

表 6.6 各材料於水-力學分析之初始條件

	緩衝材料	回填材料	母岩
孔隙比	0.77	0.57	0.23
孔隙壓力(kPa)	-31000	-500	-4000
飽和度	0.61	0.67	0.7

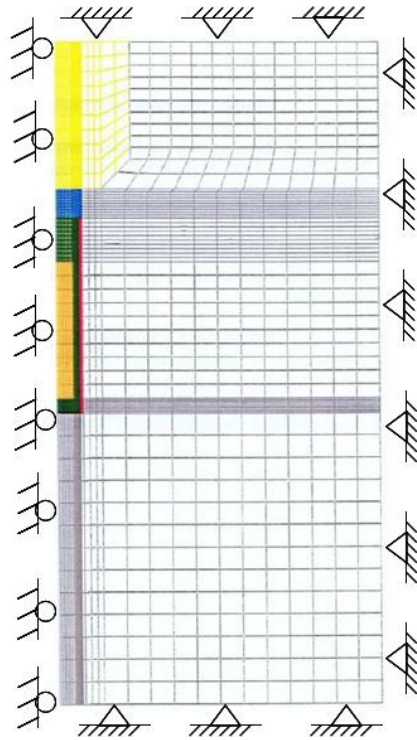


圖 6.6 模型之力學邊界條件束制示意圖[19]

6.4 熱傳分析結果

由於文獻中所列之溫度結果是沒有考慮緩衝材料的熱傳係數會隨飽和度變化之特性，所以本文假設緩衝材料有一初始飽和度對應一固定的熱傳係數，使用此模型進行熱傳分析驗證，文獻與本文之熱傳分析結果比較見表 6.7；依文獻所述，19 年後廢料罐表面將發生最高溫度 75°C ，而本研究依文獻模擬之熱傳分析結果為 19 年後，廢料罐表面達 75.1°C ，差異百分比為 0.13%，即文獻與本文之熱傳分析結果顯示，達最高溫的位置相同，僅最高溫度有些微的差異。圖 6.7 將對照文獻與本文熱分析結果溫度隨時間之變化趨勢，所取之分析位置為於廢料罐中間高度，由廢料罐表面至處

置孔壁間等距之 13 個節點的溫度變化。

圖 6.8 則比較文獻與本文熱分析結果於第 16 年時，廢料罐周圍處置場之溫度分佈輪廓圖，對照兩圖可看出此時各溫度分層所囊括之範圍大致相同，唯最高溫度有些許差異，文獻最高溫為 74.41°C，本文則為 74.74°C。

表 6.7 文獻[19]與本文非耦合熱傳分析之比較

	最高溫發生時間(年)	最高溫度(°C)	差異百分比(%)
文獻	19	75	-
本文	19	75.1	0.13

註:產生最高溫度之位置皆為緩衝材料與熱源交界處

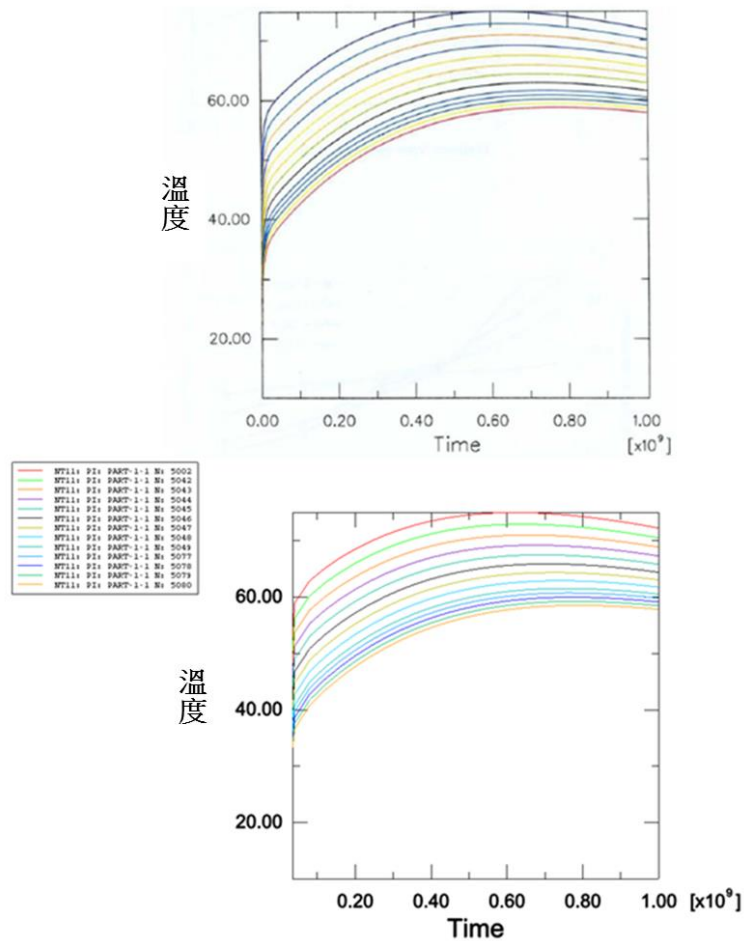


圖 6.7 熱傳分析溫度歷時圖(上、下圖分別為文獻[19]與本文之分析結果)

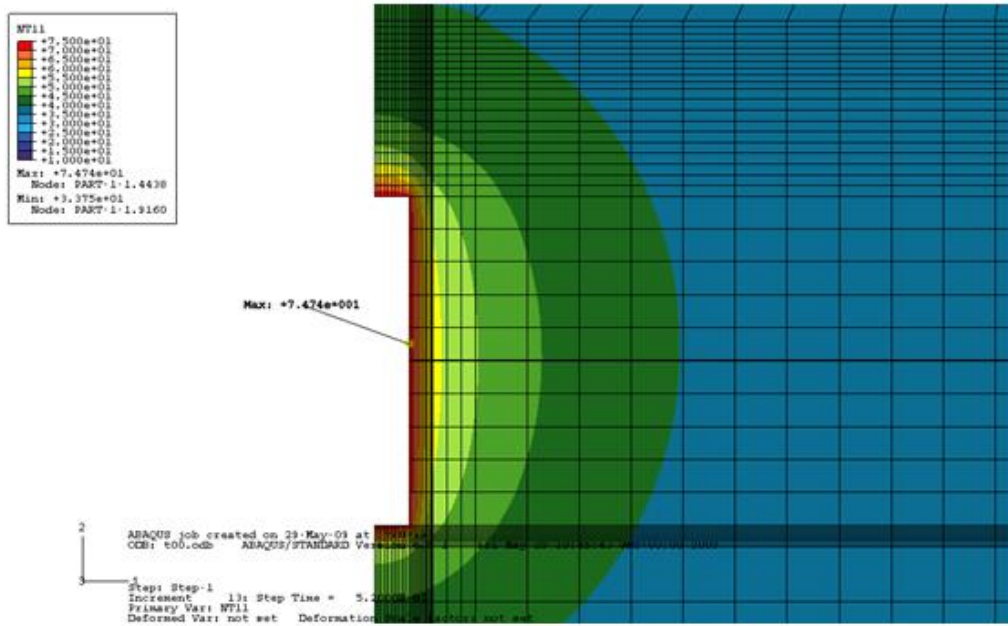
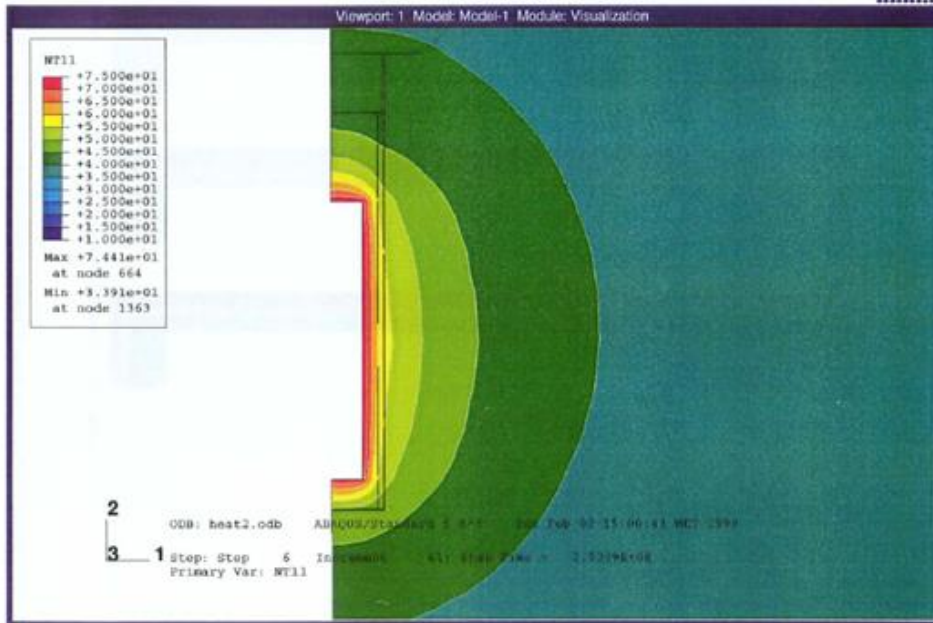


圖 6.8 熱傳分析於第 16 年時廢料罐周圍之溫度分佈輪廓圖
(上、下圖分別為文獻[19]與本文之分析結果)

6.5 耦合熱-水-力學分析驗證結果

表 6.8 為本文與文獻結果之比較對照，分別顯示對稱軸上廢料罐頂部與緩衝材交界處節點之飽和度達 99% 和 95% 所需時間。文獻飽和度大於 95% 所需時間為 6.7 年，而本文分析為 9 年；文獻飽和度大於 99% 時間為 10.5 年，本文分析為 18 年。

圖 6.9 為文獻與本文之緩衝材料於第 4 年飽和度分佈情形，圖中緩衝材料大部分飽和度已達到 95%，而廢料罐頂部之緩衝材飽和度低於 95%。

圖 6.10 為廢料罐頂部沿徑向積分點之飽和度歷時圖，圖中顯示文獻與本文分析結果相似。

表 6.9 為文獻中指定之材料點的最大位移與本文比較對照。於對稱軸上廢料罐與緩衝材交界處文獻最大位移 0.3 公分而本文分析為 0.32 公分；而對稱軸上緩衝材與回填材交界處文獻最大位移 7 公分而本文分析為 8.3 公分，分析結果與文獻相似。

此節之文獻與本文研究分析之結果有落差的部份，乃由於文獻中分析模型中各材料幾何尺寸部份材料參數並未清楚說明(包括回填材料之部份材料性質、各材料之熱膨脹係數和回填材料及母岩之初始飽和度)，故本文以合理之假設將其參數納入分析，此外文獻中無清楚說明降飽和相關參數，導致水-力學分析結果將有些許差距。

表 6.8 文獻[19]與本文水力分析結果中緩衝材料飽和時間之對照

	飽和度>95% 之時間(年)	飽和度>99% 之時間(年)
文獻	6.7	10.5
本文	9	18

註:分析位置為廢料罐頂部正中央之材料點

表 6.9 文獻[19]與本文水力分析結果最大位移之對照

	最大位移(cm)	
	廢料罐與緩衝材交界處	緩衝材與回填材交界處
文獻	0.3	7
本文	0.32	8.3

註:分析位置於對稱軸上之材料交界處

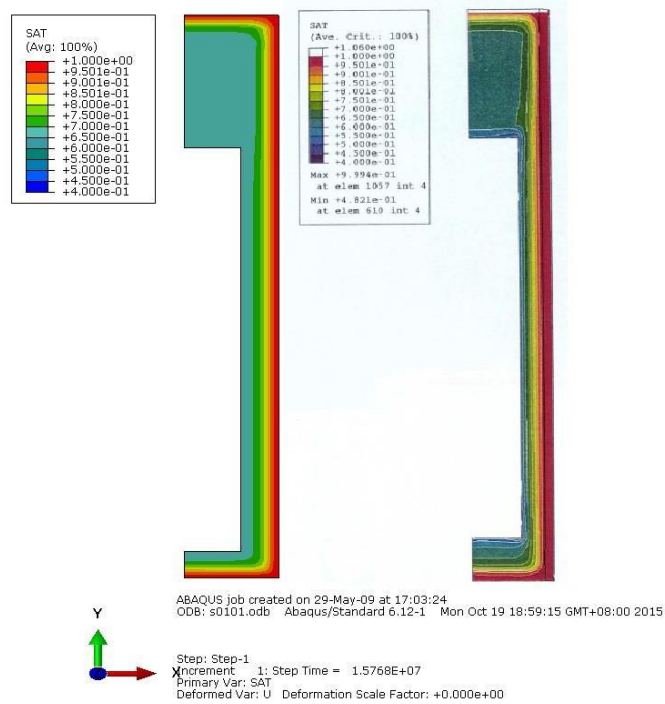


圖 6.9 緩衝材於第 0.5 年飽和度分佈(左、右分別為本文與文獻[19]分析結果)

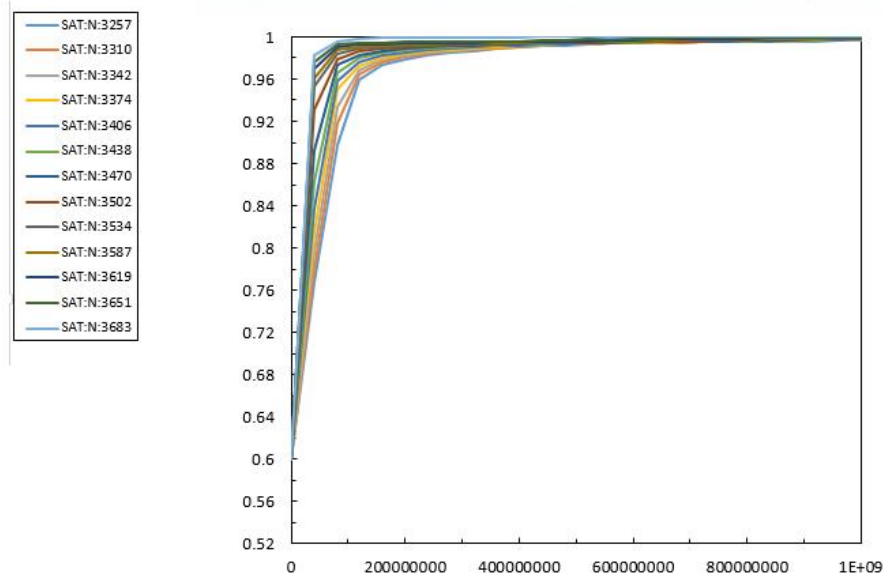
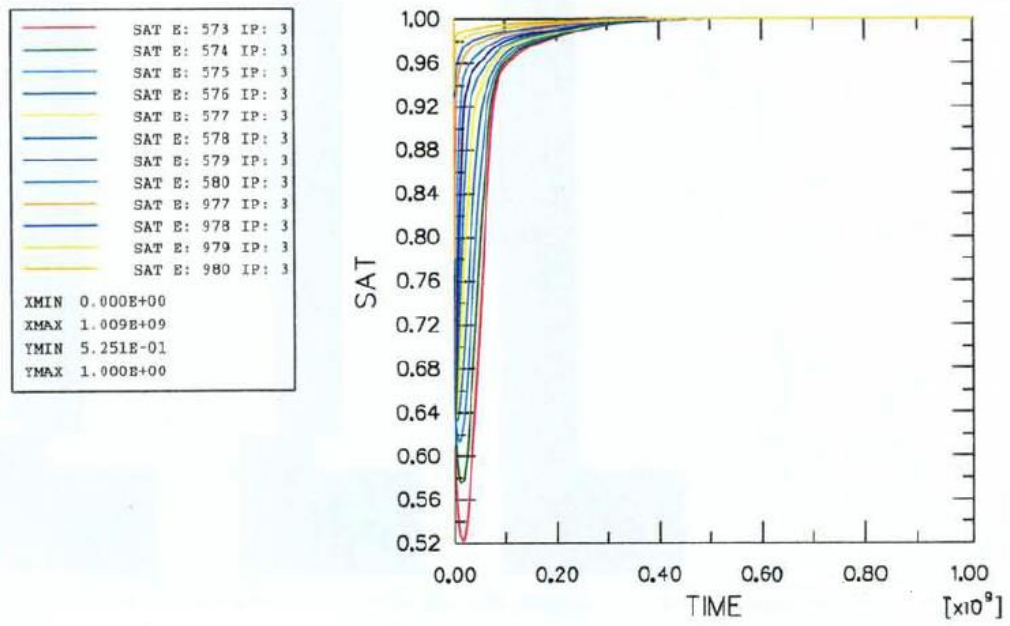


圖 6.10 廢料罐頂部沿徑向積分點之飽和度歷時圖

第七章 三維模型完全耦合熱-水-力學之參數分析

7.1 模型幾何與材料參數

本章節針對核能研究所[20]之概念設計進行分析。模型之尺寸長向距離為 40m，短向距離為 8m。其中處置孔半徑 0.875m，深度全長 7.91m；廢料罐半徑 0.525m，廢料罐全長 4.91m。因此分析之模型尺寸為長 40m、寬 8m、深 1000m(圖 7.1、圖 7.2)。材料為廢料罐、緩衝材料，回填材料及母岩，各材料性質包含熱傳導係數、比熱、密度、楊氏模數等。各材料參數詳細介紹如表 7.1。

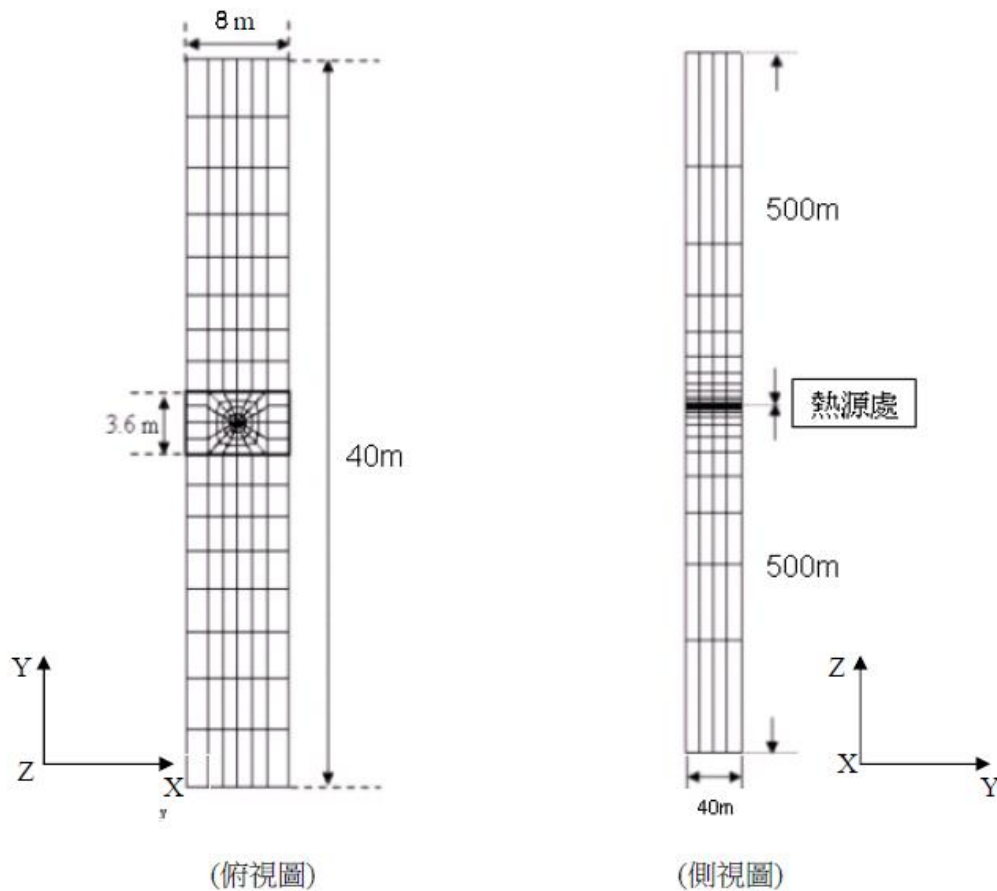


圖 7.1 模型尺寸示意圖

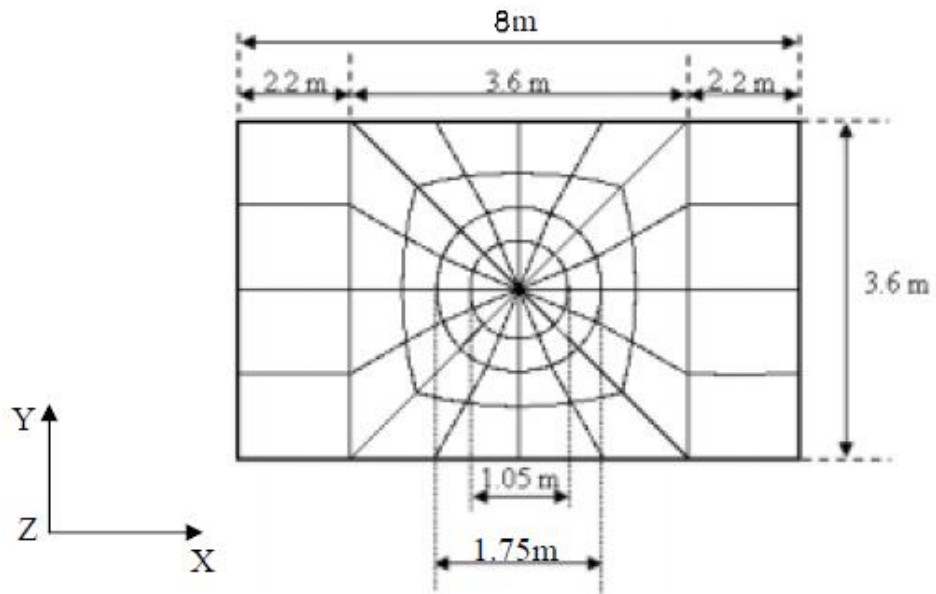


圖 7.2 模型尺寸放大示意圖

表 7.1 模型分析之材料參數[31][32]

材料性質	材料種類			
	熱源	緩衝材料	回填材料	母岩
熱傳導係數 (W/m-K)	59	1.3	1.25	3
比熱 (J/kg-K)	460	800	800	850
密度 (kg/m ³)	7800	1600	1400	1650
楊氏模數 E (MPa)	2×10^5	2.04×10^2	1.74	1.85×10^6
波松比	0.3	0.3	0.3	0.3
線膨脹係數 ($\frac{1}{^\circ\text{C}}$)	14×10^{-6}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}
滲透係數 (m ²)	---	6.5×10^{-21}	5×10^{-16}	6.9×10^{-19}
孔隙率	---	0.41	0.63	0.02

7.2 初始條件與邊界條件

在熱傳模型分析，為了符合台灣地區環境，因此設定地表溫度為 20°C，每向下延伸 100 公尺溫度上升 3°C，因此廢料罐中心於地表下 500 公尺之初始溫度約為 35°C，本章設定整個截取使用之處置場分析模型，其初始溫度為 35°C。多處置孔分析中，長向距離及短向距離無熱量流動，因此熱對流係數僅設置於模型上、下的兩個水平邊界(圖 6-3)，因此在模型邊界設置對流係數 $10W/m^2-K$ 。

根據核研所[20]所提出處置場之單一廢料罐產生之熱能為 1714W，所用之熱衰減公式如(7.1)式：

$$Q = Q_0(\alpha_1 e^{-\alpha_2 t} + (1 - \alpha_1) e^{-\alpha_3 t}) \quad (7.1)$$

其中

Q : 為隨時間進行而變化之發散熱強度

Q_0 : 為處置完成之初始發散熱強度(1714W)

$$\alpha_1 = 0.696$$

$$\alpha_2 = 0.02$$

$$\alpha_3 = 0.0013$$

圖 7.4 為熱衰減率隨時間之變化趨勢，熱源之發散熱強度將隨時間行進而衰減。

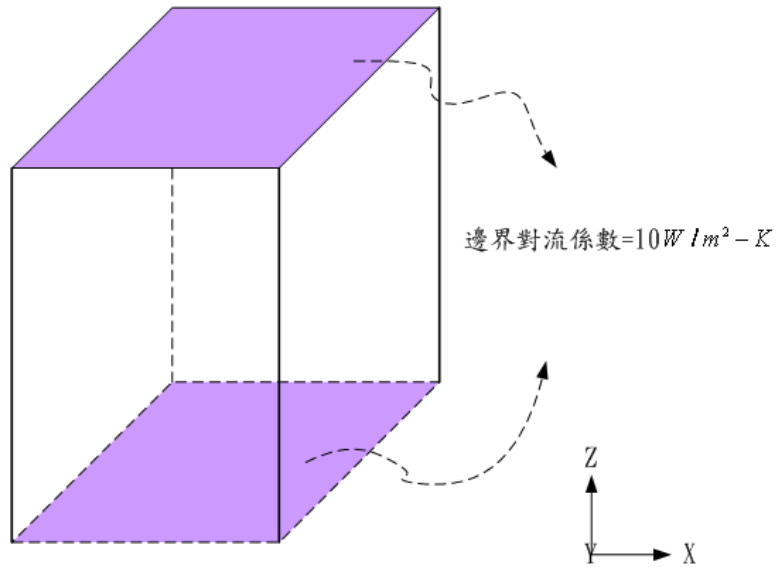


圖 7.3 邊界熱對流係數設置示意圖

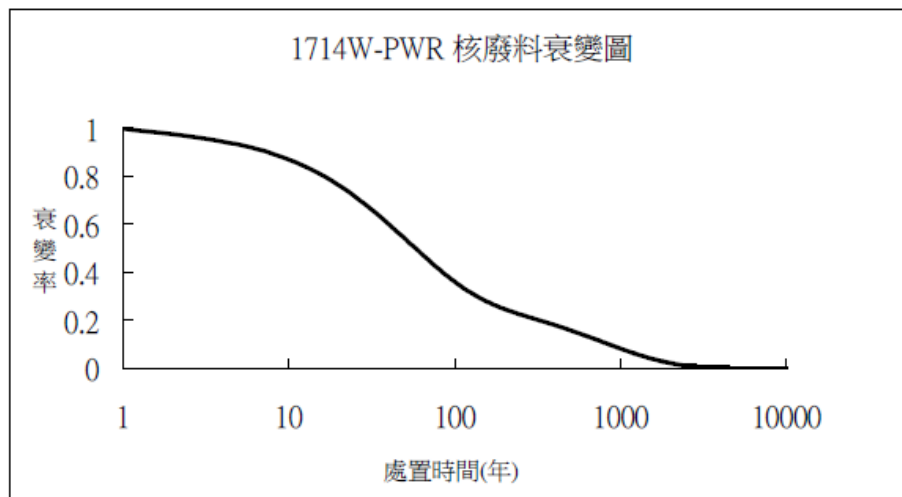


圖 7.4 熱源衰變圖歷時圖

在水力學模型的部分，由於處置場分析模型位於地表下 500 公尺處，承受覆土載重，所以在力學邊界條件上，以滾支承束制模型之垂直向與水平向之位移，如圖 7.5 所示。為使欲分析之水力模型被模擬為處於地下 500 公尺深的位置，於母岩邊界設置 5000kPa 之孔隙水壓邊界條件，如圖 7.6 所示。

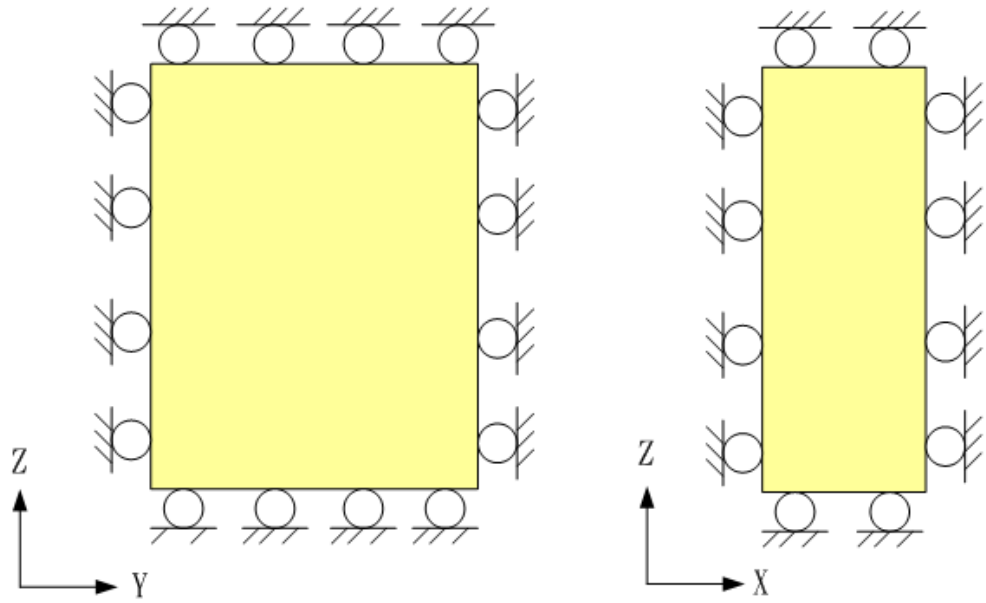


圖 7.5 力學邊界條件設置示意圖

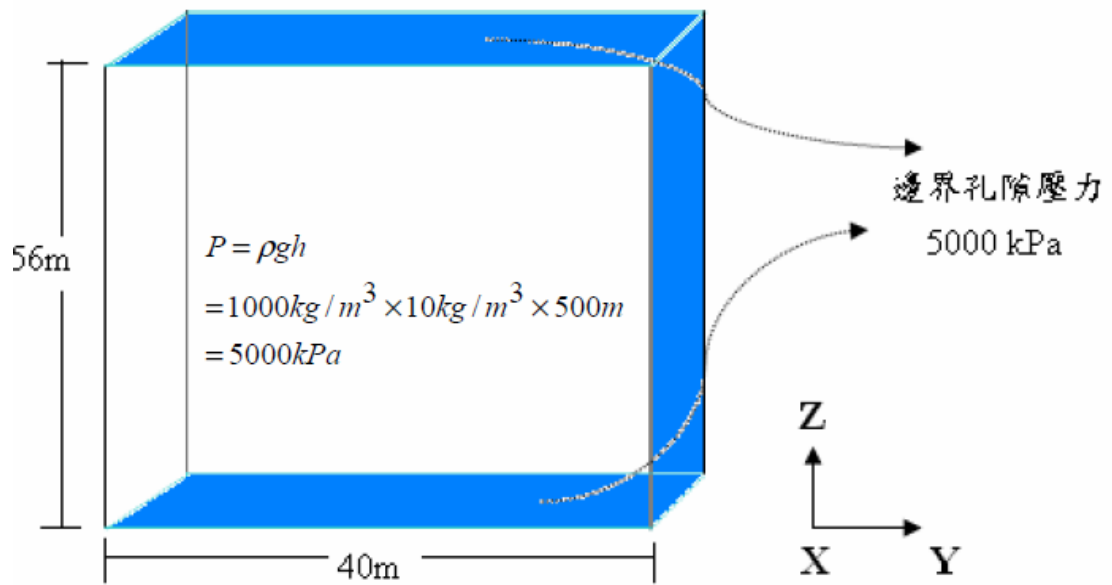


圖 7.6 孔隙壓力邊界示意圖

7.3 多處置孔之間距尺寸效應分析

根據核能研究所 [20] 之概念設計，其處置場設計尺寸為 $40\text{m} \times 6\text{m} \times 1000\text{m}$ (長向 \times 短向 \times 總深度)。依此設計尺寸，在地面下 500 公尺深之處置層開挖許多平行隧道，每條隧道之距離為 40 公尺，沿著隧道方向每隔 6 公尺埋置一個核廢料罐。

謝馨輝[33]提出對核能研究所設計之長向尺寸及短向尺寸進行改變，觀察不同間距所產生之溫度情形。改變尺寸的方式分為以下兩種。

- (1) 固定短向間距，令其維持為 6m；另一方面改變長向之長度，選擇以 20m、30m、40m、50m、60m 此五種尺寸，作為長向尺寸。以 $20 \times 6\text{m}^2$ 、 $30 \times 6\text{m}^2$ 、 $40 \times 6\text{m}^2$ 、 $50 \times 6\text{m}^2$ 、 $60 \times 6\text{m}^2$ 此五種尺寸做為長向分析。
- (2) 固定長向間距為 40m，改變短向之長度，選擇以 5m、6m、7m、8m 四個距離作為短向尺寸。以 $40 \times 5\text{m}^2$ 、 $40 \times 6\text{m}^2$ 、 $40 \times 7\text{m}^2$ 、 $40 \times 8\text{m}^2$ ，此四種尺寸，其為短向分析。

由於鄭博昇[30]於長向間距及短向間距之熱傳分析結果中，尺寸 $20 \times 6\text{m}^2$ 、 $30 \times 6\text{m}^2$ 、 $40 \times 5\text{m}^2$ 之緩衝材料內測溫度高於 100°C ，SKB 之研究提出處置場溫度不超過 100°C ，因此研究將對 $40 \times 6\text{m}^2$ 、 $50 \times 6\text{m}^2$ 、 $60 \times 6\text{m}^2$ 、 $40 \times 7\text{m}^2$ 、 $40 \times 8\text{m}^2$ 尺寸進行完全耦合分析。

7.4 長向距離分析之結果

根據完全耦合長向分析之溫度結果如表 7.2 所示，可知 $40 \times 6\text{m}^2$ 緩衝材料內側最高溫度 96.84°C ，相對溫差表分比為 2%；處置孔壁最高溫度 78.72°C ，相對溫差百分比為 3.5%。由分析結果顯示，當長向距離增加，熱傳傳遞速度較快，而使最高溫降低。

完全耦合分析之飽和度結果如表 7.3 所示，可知模型尺寸 $40 \times 6\text{m}^2$ 飽和度大於 95% 所需時間為 11 年，飽和度大於 99% 所需時間為 18 年。由於分析之長向距離增加，使得模型邊界外部孔隙水壓至緩衝材料之距離增加，因此達到飽和之時間也增加。

表 7.2 長向尺寸最高溫與發生時間比較表

模型尺寸		分析位置	
		緩衝材料內側	處置孔壁
$40 \times 6\text{m}^2$	最高溫($^\circ\text{C}$)	96.84	78.72
	時間(年)	8	13
$50 \times 6\text{m}^2$	最高溫($^\circ\text{C}$)	95.44	76.67
	時間(年)	8	11
$60 \times 6\text{m}^2$	最高溫($^\circ\text{C}$)	94.99	75.94
	時間(年)	8	11

表 7.3 緩衝材料飽和時間之對照

模型尺寸	飽和度 >95% 之時間(年)	飽和度>99% 之時間(年)
40×6m ²	11	18
50×6m ²	14	22
60×6m ²	17	24

註:分析位置為廢料罐頂部正中央之材料點

7.5 短向距離分析之結果

根據完全耦合短向分析之溫度結果如表 7.4 所示，可知 40×6m² 緩衝材料內側最高溫度 96.84°C，相對溫差百分比為 7.6%；處置孔壁最高溫度 78.72°C，相對溫差百分比為 10%。由分析結果顯示短向距離增加，邊界面積增加使熱傳傳遞速度較快，因此最高溫降低。

短向分析之飽和度結果如表 7.5 所示，由分析結果可知，短向距離增加，使模型短向邊界外部孔隙水壓之面積增加，因此飽和時間減少。

表 7.4 短向尺寸最高溫與發生時間比較表

模型尺寸		分析位置	
		緩衝材料內側	處置孔壁
40×6m ²	最高溫(°C)	96.84	78.72
	時間(年)	8	13
40×7m ²	最高溫(°C)	92.17	73.81
	時間(年)	8	13
40×8m ²	最高溫(°C)	89.48	70.72
	時間(年)	7	12

表 7.5 緩衝材料飽和時間之對照

模型尺寸	飽和度 >95% 之時間(年)	飽和度>99% 之時間(年)
40×6m ²	11	18
40×7m ²	11	18
40×8m ²	11	17

註:分析位置為廢料罐頂部正中央之材料點

圖 7.7 為各間距尺寸之廢料罐頂部徑向延伸至母岩邊界之孔隙壓力分析結果，由於母岩之邊界設置 5000kPa 孔隙水壓，因此母岩邊界最早達到飽和且孔隙水壓為 5000kPa。模型尺寸為 40×6m²、50×6m²、60×6m² 之達飽和之時間差異較大，因此孔隙壓力之分析結果也不相同；模型尺寸為 40×6m²、40×7m²、40×8m² 孔隙壓力差異不大，原因為三個尺寸之飽和度分析結果差

異不大。圖 7.8 為各間距尺寸廢料罐頂部徑向延伸至母岩邊界之應力分析，由圖可知，處置孔壁與母岩之交界處有應力集中之現象，約為 103MPa。

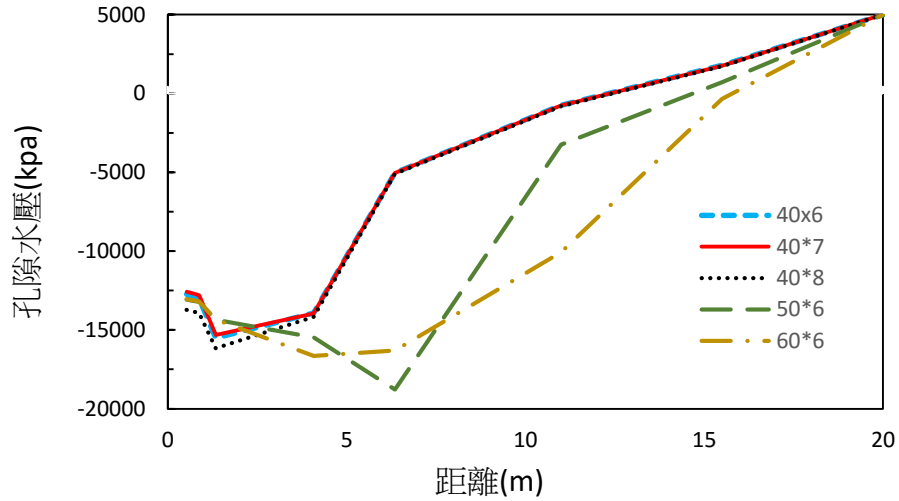


圖 7.7 各尺寸孔隙壓力分析結果(第 8 年)

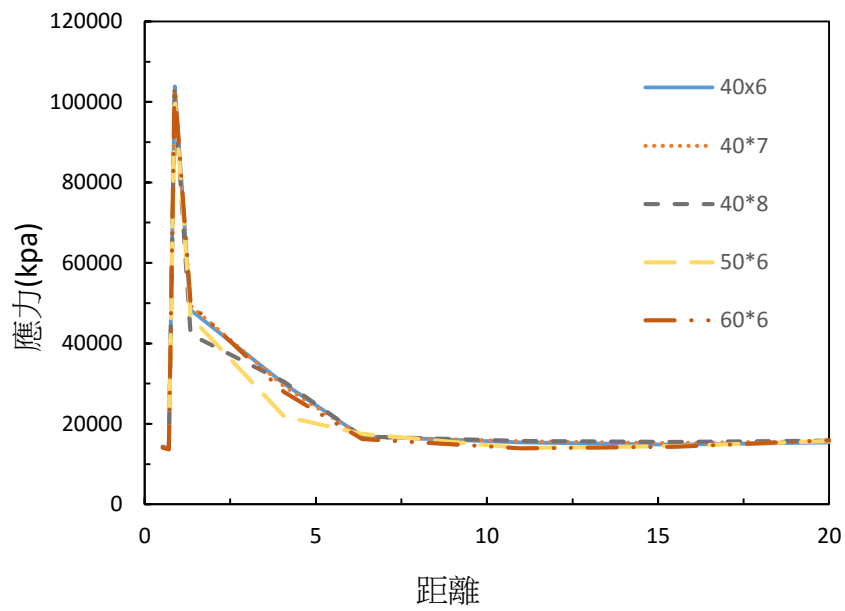


圖 7.8 各尺寸應力分析結果(第 8 年)

由改變間距尺寸之溫度分析結果得知，改變短向距離由 6m 變為 8m 之溫差為 7.36°C ；而改變長向距離由 40m 變為 60m 之溫差為 1.85°C ，因此對於最高溫影響，改變短向距離之尺寸相對於改變長向距離之尺寸影響較大。圖 7.9 為各分析尺寸溫度歷時圖(緩衝材料內側)。圖 7.10 為各尺寸分析模型之最高溫發生時間雲彩圖，可看出分析尺寸為 $40\times 8\text{m}^2$ 最高溫較其它分析尺寸低。

由改變間距尺寸之飽和度分析結果得知，長向距離增加，使緩衝材料達飽和時間增加；短向距離增加時，使緩衝材料達飽和時間減少如圖 7.12 所示。由於緩衝材料之熱傳係數會因飽和度改變，飽和度越高熱傳導係數越大[19]，因此可知短向分析影響溫度場及飽和度場較長向分析大。圖 7.11 為各分析尺寸飽和度歷時圖(緩衝材料內側)。圖 7.13 為各分析尺寸應力之雲彩圖，由圖可知處置孔周圍應力較處置場其它區域大。

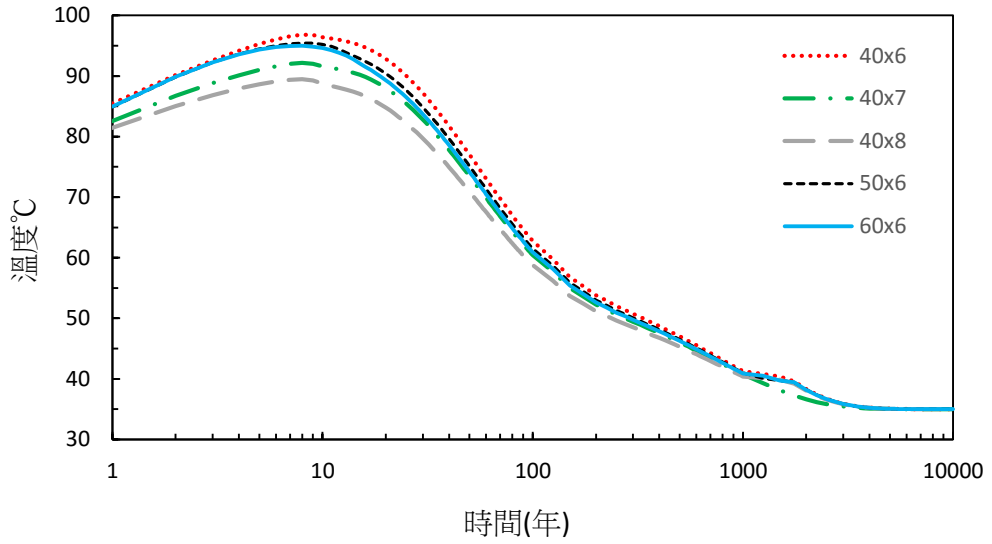


圖 7.9 各分析尺寸溫度歷時圖(緩衝材料內側)

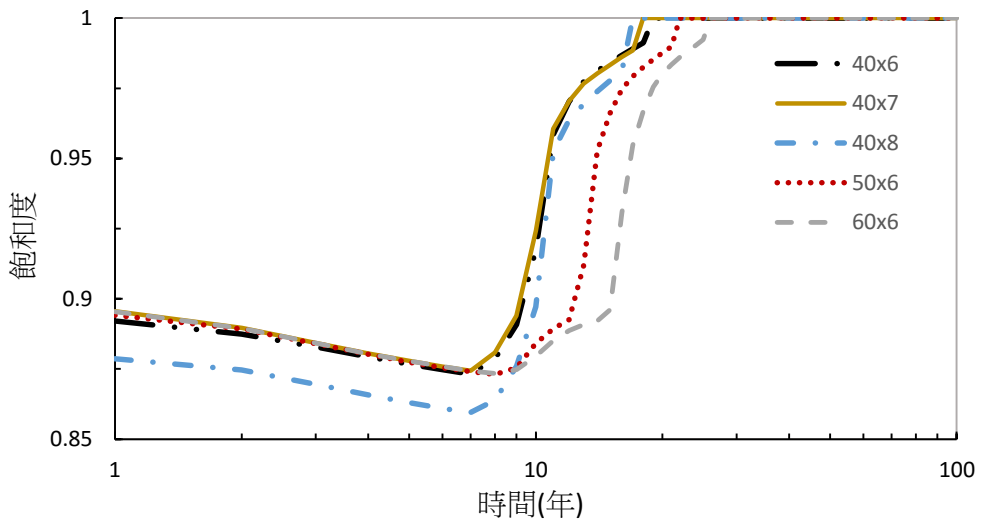


圖 7.11 各分析尺寸飽和度歷時圖(緩衝材料內側)

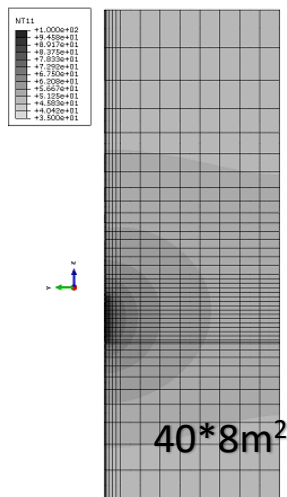
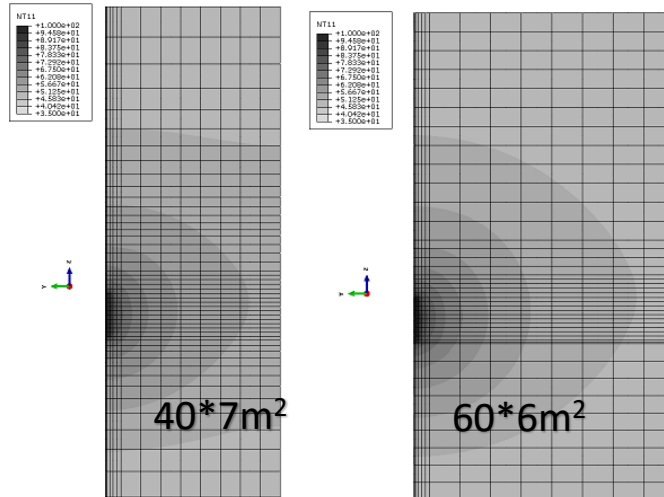
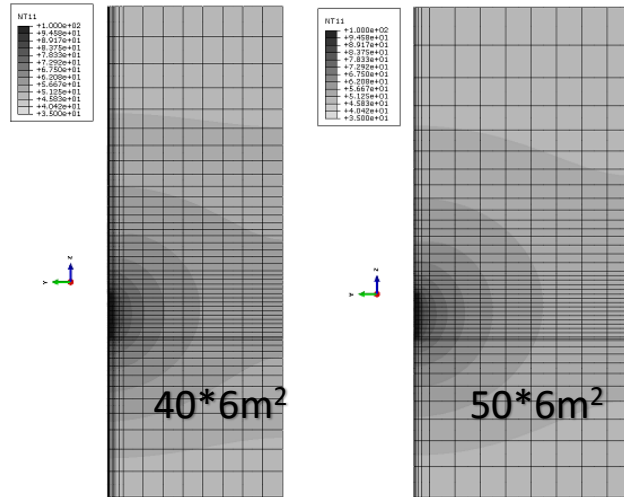
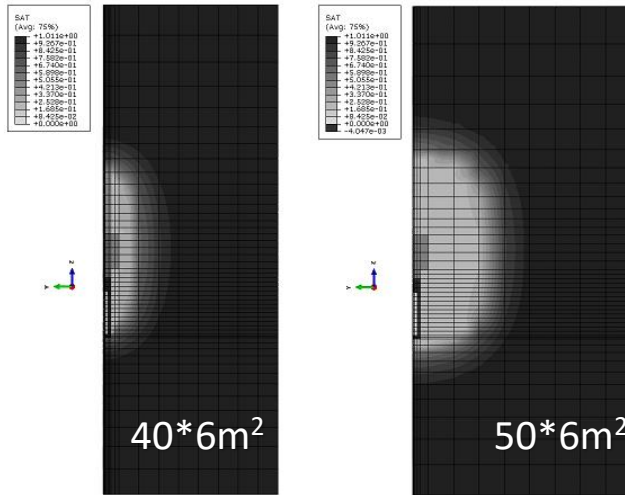


圖 7.10 各分析尺寸最高溫之熱傳分析之雲彩圖



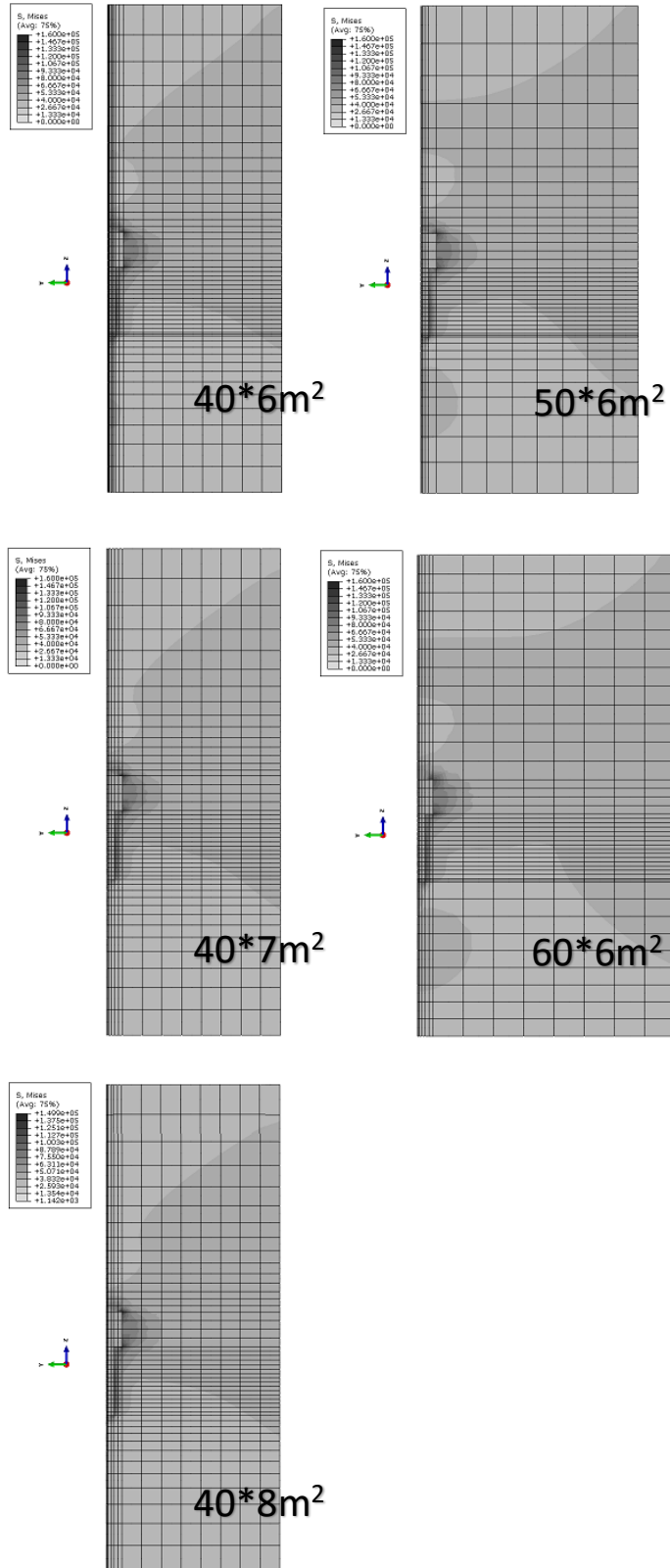


圖 7.13 各分析尺寸飽和度分析之雲彩圖(第 8 年)

第八章 結論

1. 蒐集瑞典放射性安全管制署(SSM)對 SKB 所提 SR-Site 審查報告書，用於研析關於 T-H-M 耦合相關之審查，其審查重點包含有限元素法(FEM)建模的參數模擬、均質性適用性、再飽和程序模擬、侵蝕/擠出。
2. 關於瑞典 SSM-2012-30 之 T-H-M 耦合相關之審查評析對於所提出幾項審查要點皆需要深入且長時間的驗證探討並須針對本國實際情形以做調整。
3. 已完成建立小型耦合試驗方式、量測設備建置及試體製作模具，對於緩衝材料不同條件下之試體進行熱傳導係數量測，取得膨潤土材料的熱性質。
4. 熱傳分析瑞典文獻驗證(SK B)的部分，本文分析之結果與文獻差異極小，皆於第 19 年時發生最高溫度，溫度差異百分比約為 0.13%，而此差異性是文獻中對於分析模型之幾何尺寸並無明確說明所致。
5. 在接續耦合水-力學分析文獻驗證的部分，本文分析之結果，在緩衝材飽和時間和指定材料點之位移與文獻差異不大，分析結果有落差的部份，乃由於文獻中部份材料參數並未清楚說明，導致水-力學分析結果將有些許差距，分析模型中各材料幾何尺寸並無完整交代，亦可能為出現差異的原因。
6. 間距尺寸分析之溫度結果，改變處置孔短向間距對於近場溫度場之影響

較改變長向間距大，溫度對於短向間距較為敏感。

7. 間距尺寸分析之飽和度結果，長向距離增加，緩衝材料達飽和時間明顯增加，短向距離增加，緩衝材料達飽和時間略減少。
8. 間距尺寸分析應力結果，處置孔周圍與母岩交界處產生應力集中之現象。

參考文獻

- [1] 林伯聰，(2013)，「國際高放射性廢棄物最終處置場址技術準則之研究」，行政院原子能委員會放射性物料管理局，委託研究計畫研究報告。
- [2] 黃偉慶，(2014)，「用過核子燃料深層地質處置場近場緩衝材料耦合效應研析」，行政院原子能委員會放射性物料管理局，委託計畫研究期末報告。
- [3] 原子力環境整備促進・資金管理センタ，(2015)，「諸外国における高レベル放射性廢棄物の処分について」。
- [4] 台灣電力公司，(2010)，「用過核子燃料最終處置計畫書」。
- [5] 王欣婷，(2003)，「緩衝材料在深層處置場模擬近場環境下回脹行為基礎研究」，國立中央大學土木工程學系，碩士論文。
- [6] Huang, W.H., and Chen, W.C (2004). “Swelling behavior of a buffer material under simulated near field environment” *Journal of Nuclear Science and Technology*, 41(12), 1271-1279.
- [7] SKB (1999). “Deep Repository for Spent Nuclear Fuel: SR 97 Post-Closure Safety”, SKB Technical Report 99-06.
- [8] 經濟產業省・資源エネルギー庁 (2011) 「遠隔搬送・定置技術の開発」，第3章。
- [9] 獨立行政法人日本原子力研究開発機構，(2010)，「処分システム化学影響評価高度化開発」地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廢棄物処分関連。

- [10] 陳文泉，(2004)，「高放射性廢棄物深層地質處置緩衝材料之回脹行為研究」，國立中央大學土木工程學系，博士論文。
- [11] J.A. Hudson^a, O. Stephansson^b, J. Andersson^c, C.-F. Tsang^d, L. Jing^b (2001). “Coupled T–H–M issues relating to radioactive waste repository design and performance”, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 38, 143–161.
- [12] 賈善坡，冉小豐，王越之，肖桃李，譚賢君，(2012)，「變形多孔介質溫度–滲流–應力完全耦合模型及有限元分析」，*岩石力學與工程學報*，第 31 卷。
- [13] C.F. Tsang, J.D. Barnichon, J. Birkholzer, X.L. Li, H.H. Liu, X. Sillen (2012). “Coupled thermo-hydro-mechanical processes in the near field of a high-level radioactive waste repository in clay formations” *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 49, 31–44.
- [14] Fabrice Dupray, Chao Li, Lyessse Laloui (2013) “THM coupling sensitivity analysis in geological nuclear waste storage”, *Engineering Geology* 163 113–121.
- [15] L. Chen, Y.M. Liu, J. Wang, S.F. Cao, J.L. Xie, L.K. Ma, X.G. Zhao, Y.W. Li, J. Liu (2014). “Investigation of the thermal-hydro-mechanical (THM) behavior of GMZ bentonite in the China-Mock-up test”, *Engineering Geology* 172 57–68.
- [16] SSM (2012). “Initial review of physical properties and processes of the buffer

- and backfill. THM and other physical processes” Technical Note 2012-30.
- [17] SSM (2012). “Initial review of physical properties and processes of the buffer and backfill – Installation and initial state” Technical Note 2012-42.
- [18] ASTM, 「 Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure1 」, D5334-14 .
- [19] Lennart Børgesson, and Jan Hernelind (1999).“Coupled thermal-hydro-Mechanical calculations of the water saturation phase of a KBS-3 deposition hole”, SKB Technical Report 99-41.
- [20] 核能研究所, (2002), 「我國用過核燃料深層地質處置概念討論會」, 行政院原子能委員會核能研究所。
- [21] 國防科學技術工業委員會, (2006), 「高放廢物地質處置研究開發規劃指南」, 中國國防科學技術工業委員會科學技術部國家環境保護總局。
- [22] 劉文忠、李彥良, (2013), 「第四屆東亞放射性廢棄物管理論壇會議暨參訪北京地質研究院、中國原子能科學研究院」, 行政院原子能委員會放射性物料管理局。
- [23] Aoyagi, K. and Kazama T. (1980). “Transformational changes of clay minerals”, zeolites and silica minerals during diagenesis: *Sedimentology* 27, 179-188.
- [24] 総合資源エネルギー調査会, (2015), 「地層処分技術 WG 第 12 回会合参考資料」, 総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会 原子力小委員会。

- [25] SKB (2002). “The Buffer and Backfill Handbook- Part 1: Definitions, basic relationships, and laboratory methods”, SKB TR-02-20.
- [26] SKB (1994). “Heat conductivity of buffer materials”, SKB TR-94-29.
- [27] PNC, (1992), 「緩衝材の熱物性試験」, 動力炉・核燃料開発事業団。
- [28] JNC, (1999), 「熱的特性の緩衝材仕様に対する影響」, 核燃料サイクル開発機構。
- [29] 徐震宇, (2008), 「不同透水性鋪面材料對鋪面溫度影響之探討」, 國立中央大學土木工程學系, 碩士論文。
- [30] 鄭博昇, 「台灣用過核燃料最終處置之參數影響分析」, 國立中央大學, 所碩士論文, 2014
- [31] 台灣電力公司, 「用過核子燃料最終處置計畫潛在處置母岩特性調查與評估階段成果報告」, 2013。
- [32] JCN, “H12-Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan”, Japan Nuclear Cycle Development Institute, 2000.
- [33] 謝馨輝, 「核廢料地下處置之熱傳導及初步熱應變分析」, 國立中央大學, 碩士論文, 2003