

行政院原子能委員會放射性物料管理局

用過核子燃料處置安全審驗技術建立之國際資訊研析

子項計畫二：深層地質處置設施多孔配置之
近場效應分析

期末報告

受委託單位：國立中央大學

子計畫主持人：張瑞宏

業務委託單位：行政院原子能委員會放射性物料管理局

計畫編號：104FCMA020

中華民國一〇五年十二月

用過核子燃料處置安全審驗技術建立之國際資訊研析

子項計畫二：深層地質處置設施多孔配置之 近場效應分析

受委託單位：國立中央大學

研究主持人：黃偉慶

協同主持人：張瑞宏

研究期程：中華民國 105 年 1 月至 105 年 12 月

研究經費：新台幣捌拾玖萬元整

行政院原子能委員會放射性物料管理局 委託研究

中華民國 105 年 12 月

(本報告內容純係作者個人之觀點，不應引申為本機關之意見)

摘要

目前國際間高放射性廢棄物一致採用採用深地層處置方式進行，高放射性廢棄物處置開始時，處置罐裡之用過核子燃料會產生衰變熱 (Heat decay) 而形成溫度場，其所包含之熱會因為緩衝材料之熱傳性質而向外部擴散，並且使緩衝材料溫度升高進而影響處置效果；再者隨著處置時間拉長，地下水入侵近場環境後進而影響緩衝材料，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，此現象稱之為熱-水-力學耦合效應(T-H-M)。本研究參考國際間聯合組織 DECOVALEX T-H-M-C 報告之 T-H-M 耦合效應進行相關研究，進行代表體積單元有限元素分析模型之建立，以建立緩衝材料實驗量測與模擬驗證方法，並針對 T-H-M 耦合情形研析，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。

關鍵字：用過核子燃料、緩衝材料、熱傳導係數、時域反射技術、有限元素分析

目錄

摘要.....	i
目錄.....	iii
圖目錄.....	vii
表目錄.....	xiii
第一章、緒論	1
1.1 研究動機	1
1.2 研究目的	2
1.3 研究方法與研究範圍	2
第二章、文獻回顧	5
2.1 深層地質處置設計概念	5
2.2 各國處置場現況.....	6
2.3 用過核子燃料之緩衝材料功能要求.....	15
2.4 THMC 效應之國際同儕審查資訊研析.....	17
2.4.1 瑞典-SSM 處置計畫-Technical Note-2012:30 審查報告研析.....	17
2.4.2 SKB-P-14-22 之研析.....	20
2.4.2.1 試驗設備	20
2.4.2.2 試體尺寸及試驗配置	22
2.4.2.3 試驗結果	23
2.4.2.4 模擬測試	24
2.4.2.5 結論	27

2.4.3 DECOVALEX-THMC 之研析	28
2.4.3.1 任務 A.....	28
2.4.3.2 任務 B.....	29
2.4.3.3 任務 C.....	30
2.4.3.4 任務 D.....	30
2.4.3.5 任務 E	31
第三章、小型模擬實驗材料與方法	33
3.1 試驗材料	33
3.2 試驗儀器與模具.....	33
3.2.1 暫態熱源法資料擷取系統	34
3.2.2 熱探針及熱源供給系統	35
3.2.3 TDR 監測系統.....	39
3.2.4 溫度分佈之有限元素分析模擬	44
3.2.5 含水量-視介電常數-溫度三相圖建置	45
3.2.6 緩衝材料 T-H 耦合作用分析.....	46
3.3 試驗模具、試體製作	47
第四章、小型模擬實驗結果與分析	51
4.1 小型模擬實驗熱傳量測及數值比較驗證.....	51
4.1.1 一維軸對稱溫度分佈驗證	51
4.1.2 二維軸對稱溫度分佈驗證	52
4.2 含水量-視介電常數-溫度三相圖建置	54
4.3 含水量監測與分層含水量歷時計算分析	57
4.4 小型模擬實驗熱-水力耦合效應量測及比對.....	59

第五章、有限元素分析.....	65
5.1 分析工具	65
5.2 代表體積單元.....	65
5.3 完全耦合熱-水-力學分析	66
第六章、完全耦合日本 JNC-H12 報告驗證.....	69
6.1 前言	69
6.2 熱傳分析	69
6.2.1 熱傳分析網格設置與建立幾何模型	69
6.2.2 熱傳分析材料參數之介紹	70
6.2.3 初始條件與邊界條件	71
6.2.4 熱傳分析結果驗證	73
6.3 熱-水-力學分析	74
6.3.1 水-力學網格設置與建立幾何模型	74
6.3.2 水-力學分析材料參數之介紹	75
6.3.3 熱-水-力學分析驗證結果.....	82
6.3.3.1 熱-水-力學水頭高之驗證.....	82
6.3.3.2 熱-水-力學含水量與時間之驗證.....	84
6.4 日本 JNC 與瑞典 SKB 的配置差異	86
第七章、完全耦合熱-水-力學多孔幾何配置模型分析.....	89
7.1 前言	89
7.2 代表體積單元模型建立	89
7.2.1 初始條件與邊界條件	91

7.2.2 熱水力學完全耦合分析結果	94
7.3 多孔幾何模型建立	97
7.3.1 熱水力學完全耦合分析結果比較	97
7.3.2 多孔幾何模型熱水力學完全耦合分析結果	99
第八章、結論與後續研究方向	105
參考文獻	107

圖目錄

圖 2.1 日本深地層處置場多重障壁概念圖	6
圖 2.2 各國處置場進展與比較.....	9
圖 2.3 處置場近場環境 THMC 影響	17
圖 2.4 試驗設備示意圖.....	21
圖 2.5 傳感器配置	22
圖 2.6 實際試體尺寸	23
圖 2.7 模型示意圖	25
圖 2.8 膨潤土塊含水量的等值線圖	26
圖 2.9 Comsol Multiphysics 的二維軸對稱模型	27
圖 3.1 試驗所使用 SPV 200 膨潤土(自然含水狀態).....	33
圖 3.2 暫態熱源法-熱探棒法試驗儀器之配置圖	34
圖 3.3 暫態熱源法-熱探棒法試驗儀器連結配置簡圖.....	34
圖 3.4 MX100-02E 資料擷取系統(A)；程式操作介面(B).....	35
圖 3.5 (A)熱源供給系統；(B)熱探針.....	35
圖 3.6 熱探針升溫及持溫曲線.....	36
圖 3.7 溫度分佈量測系統.....	36
圖 3.8 熱電偶與試體備製圖.....	37
圖 3.9 熱電偶埋設位置圖.....	37

圖 3.10 溫度分佈設計概念.....	38
圖 3.11 溫度分佈測量位置表示.....	38
圖 3.12 熱探針校正狀態.....	39
圖 3.13 TDR1500.....	40
圖 3.14 RG58- A/U 同軸線.....	40
圖 3.15 真空凡士林.....	41
圖 3.16 空氣與水典型波形率定圖.....	42
圖 3.17 同軸線率定情況.....	42
圖 3.18 試體分層含水量計算概念.....	43
圖 3.19 分層含水量圖例與換算公式(3-3)、(3-4).....	43
圖 3.20 邊界條件設定示意圖.....	44
圖 3.21 三相圖建置概念示意圖.....	45
圖 3.22 三相圖建置系統.....	46
圖 3.23 T-H 耦合作用分析系統.....	47
圖 3.24 實驗模具組 (mm).....	48
圖 3.25 壓製完成所得之 SPV 膨潤土試體.....	48
圖 3.26 試體俯視示意圖(未按比例).....	49
圖 3.27 壓桿、內模組合圖.....	49
圖 3.28 試驗試體完成組裝組合圖.....	50

圖 4.1 一維軸對稱溫度分佈分析圖	52
圖 4.2 一維軸對稱溫度分佈驗證圖	52
圖 4.3 二維軸對稱溫度分佈分析圖	53
圖 4.4 二維軸對稱溫度分佈驗證圖	54
圖 4.5 含水量-視介電常數-溫度三相圖	55
圖 4.6 視介電常數與溫度關係圖(14%)	55
圖 4.7 視介電常數與溫度關係圖(24%)	56
圖 4.8 TDR 波型圖(34%)	56
圖 4.9 含水量監測歷時變化	58
圖 4.10 分層含水量歷時變化	58
圖 4.11 含水量監測歷時變化	59
圖 4.12 不同 TDR 感測器深度之含水量歷時變化	61
圖 4.13 T-H 耦合試體內部配置與進水痕跡	62
圖 4.14 T-H 耦合之分層含水量歷時變化	62
圖 4.15 T-H 耦合試驗溫度分佈影響歷時變化	63
圖 4.16 單一熱傳與耦合試驗之溫度分佈	64
圖 5.1 長向距離之熱傳對稱面示意圖	65
圖 5.2 處置場內部之代表體積單元示意圖(俯視圖)	66
圖 5.3 完全耦合熱-力學分析流程圖	67

圖 6.1 完全耦合熱-力學分析流程圖	70
圖 6.2 處置場以左側為軸對稱的模型示意圖	70
圖 6.3 邊界對流係數設置示意圖	72
圖 6.4 熱衰減率隨時間變化之趨勢	72
圖 6.5 模型之位置點	73
圖 6.6 文獻溫度歷時圖	74
圖 6.7 本文溫度歷時圖	74
圖 6.8 回填材含水量與吸附曲線關係[41]	77
圖 6.9 母岩含水量吸附曲線關係[41]	77
圖 6.10 緩衝材料含水量與水頭高關係[44]	78
圖 6.11 水-力學模型的力學邊界條件束制示意圖	82
圖 6.12 Case 1-1 文獻與本文壓力水頭比較	83
圖 6.13 Case 1-2 文獻與本文壓力水頭比較	83
圖 6.14 Case 2 文獻與本文壓力水頭比較	84
圖 6.15 模型之位置點	85
圖 6.16 回填材料點(1)的含水量與時間驗證圖	86
圖 7.1 模型示意圖	90
圖 7.2 模型局部尺寸放大圖	90
圖 7.3 模型邊界熱對流係數示意圖	92

圖 7.4 熱源衰變圖歷時圖.....	93
圖 7.5 力學邊界條件設置示意圖.....	93
圖 7.6 孔隙壓力模型邊界示意圖.....	94
圖 7.7 分析之位置.....	95
圖 7.8 溫度與時間歷時圖.....	96
圖 7.9 飽和度與時間歷時圖.....	96
圖 7.10 應力與距離分布圖(第 8 年).....	97
圖 7.11 溫度與時間歷時圖.....	98
圖 7.12 飽和度與時間歷時圖.....	98
圖 7.13 應力與距離分布圖(第 8 年).....	99
圖 7.14 分析位置示意圖.....	100
圖 7.15 分析位置示意圖.....	100
圖 7.16 各廢棄物罐之溫度雲彩圖.....	101
圖 7.17 各廢棄物罐於參考線 1 之溫度分布圖.....	102
圖 7.18 各廢棄物罐飽和度之雲彩圖.....	102
圖 7.19 各廢棄物罐於參考線 1 之飽和度分布圖.....	103
圖 7.20 各廢棄物罐 Mises 之雲彩圖.....	103
圖 7.21 各廢棄物罐於參考線 2 之 Mises 分布圖.....	104

表目錄

表 2.1 各國處置場規格與處置方法	8
表 2.2 各國用過核子燃料管理及處置動態	10
表 2.3 2015 年版各國處置現況.....	11
表 2.4 2016 年版各國處置現況.....	13
表 2.4 試體尺寸	23
表 2.4 DECOVALEX 任務	32
表 3.1 SPV 200 膨潤土成份分析表.....	33
表 3.2 材料參數設定	45
表 6.1 熱傳分析所需材料參數.....	71
表 6.2 熱傳分析之結果驗證.....	73
表 6.3 水-力學模型分析之各材料參數.....	76
表 6.4 緩衝材料溫度增量與水力傳導係數關係.....	76
表 6.5 文獻案例	76
表 6.6 各材料飽和度對應之孔隙水壓(case1-1、case1-2).....	79
表 6.7 各材料飽和度對應之孔隙水壓(case2).....	80
表 6.8 case1-1、case1-2 材料的熱-水-力學分析之初始條件	81
表 6.9 case2 材料的熱-水-力學分析之初始條件	81
表 6.10 文獻與本文熱-水-力學分析結果達最高含水量時間之對照 .	85

表 7.1 模型分析之材料參數.....	91
表 7.2 緩衝材料飽和度與熱傳導係數對應關係.....	91
表 7.3 達最高溫與飽和度的時間.....	99

第一章、緒論

1.1 研究動機

核電廠產生之高放射性廢棄物極具放射性，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，形成一定範圍的溫度場效應，因此高放射性廢棄物料之管理多年來一直是國際間關注焦點，如何長期及有效安全的處置高放射性廢棄物成為核能使用國家共同發展之環保議題。對於高放射性廢棄物之定義，根據依我國「放射性物料管理法施行細則」第4條定義，係指用過核子燃料或經過再處理所產生之萃取殘餘物，而我國在目前處理高放射性廢棄物上並未經過再處理之程序，因此我國高放射性廢棄物為用過核子燃料。因此在用過核子燃料最終處置場建置下，我國對放射性核廢料管理策略以技術、安全、經濟、政治、人文社會及自然環境等六大因素計畫近、中、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[1][2]。

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。國際間之核能先進國家如美國、瑞典、芬蘭、加拿大、英國、法國、日本等，皆長期進行處置技術的相關在地研究、合作組織研究與資訊共享，可見相關技術及價值的重要性。

深地層處置近場、遠場、生物圈依照影響範圍之環境而劃分，當中以近場環境影響為最大，且為衰變熱與放射性影響區域，其近場環境範圍包括處置孔(Deposition Hole)或隧洞、緩衝材料與回填材料、開挖擾動及周圍接觸母岩；未受衰變熱與輻射侵擾的處置區域外圍基岩部分稱為遠場(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) [3-5]。

對於高放射性廢棄物深地層處置場的近場與遠場演化程序，主要受到四大因素所影響，包含熱學(Thermal, T)、水力(Hydraulic, H)、力學(Mechanical, M)、化學(Chemical, C)，簡稱為 T-H-M-C 耦合效應等單一因素影響或複雜的耦合交互作用進而影響其最終處置場之預期功能。預期功能主要重點之一為緩衝材料應具備

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。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，故建立相關重要影響因素量測能力，了解最終處置場耦合影響過程具有不可替代的必要性[6-10]。

1.2 研究目的

本研究首先將蒐集國際間熱-水力-力學耦合效應研究報告，以及國際聯合組織 DECOVALEX 之 T-H-M-C 階段性報告文獻並做文獻回顧及研析，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參考[11-21]。

再來是建立緩衝材料實驗量測與模擬驗證方法，以及建立緩衝材料熱-水力-力學耦合小型計算模型並進行研析；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並進行參數蒐集，建立代表體積單元有限元素分析模型[22-25]。

1.3 研究方法與研究範圍

近場 T-H-M-C 效應對於處置場整體功能有著相當重要的影響，而目前各國對此四項耦合效應尚未發展完全，其中化學效應因參與平衡反應的因子與條件極為複雜，難以短時間內獲致成果，多透過國際合作並集中於 T-H-M 耦合效應的實驗及數值模擬。

實驗室模擬方面將以膨潤土為研究材料，建立小型 T-H 耦合模型以模擬深地層處置地下水環境下的 T-H 狀況緩衝材料相關性質及近場溫度分佈，針對緩衝材料不同狀態實驗以模擬現實處置場現況，取得相關參數以作為有限元素分析之重要參數，再加以驗證實驗與有限元素分析結果[26-31]。

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棄物處置孔之問題，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[22][25]。

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)，於用過核子燃料四周加以圍阻，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。在用過核子燃料經中期儲存 30~40 年後，利用內部鑄鐵外部銅殼之廢棄物罐裝填用過核子燃料，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料填充，以維持處置場的穩定性[9][24]。

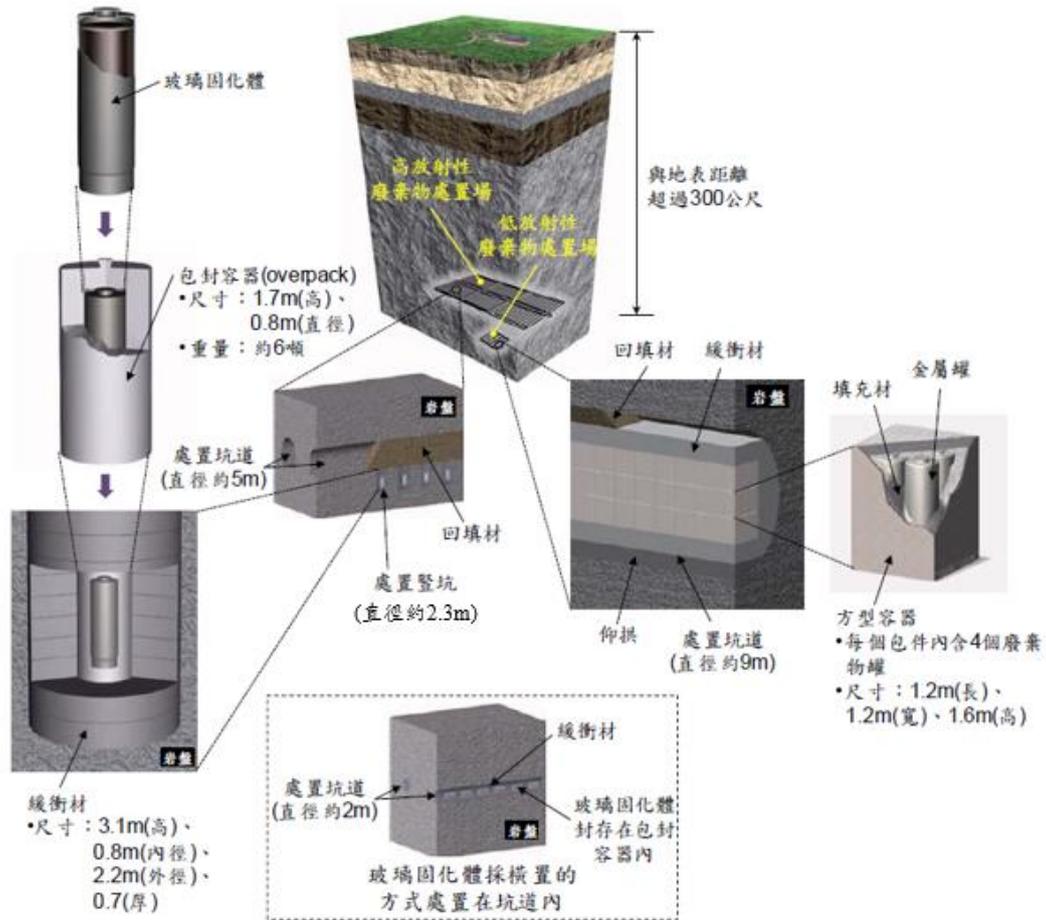


圖 2.1 日本深地層處置場多重障壁概念圖

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。

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

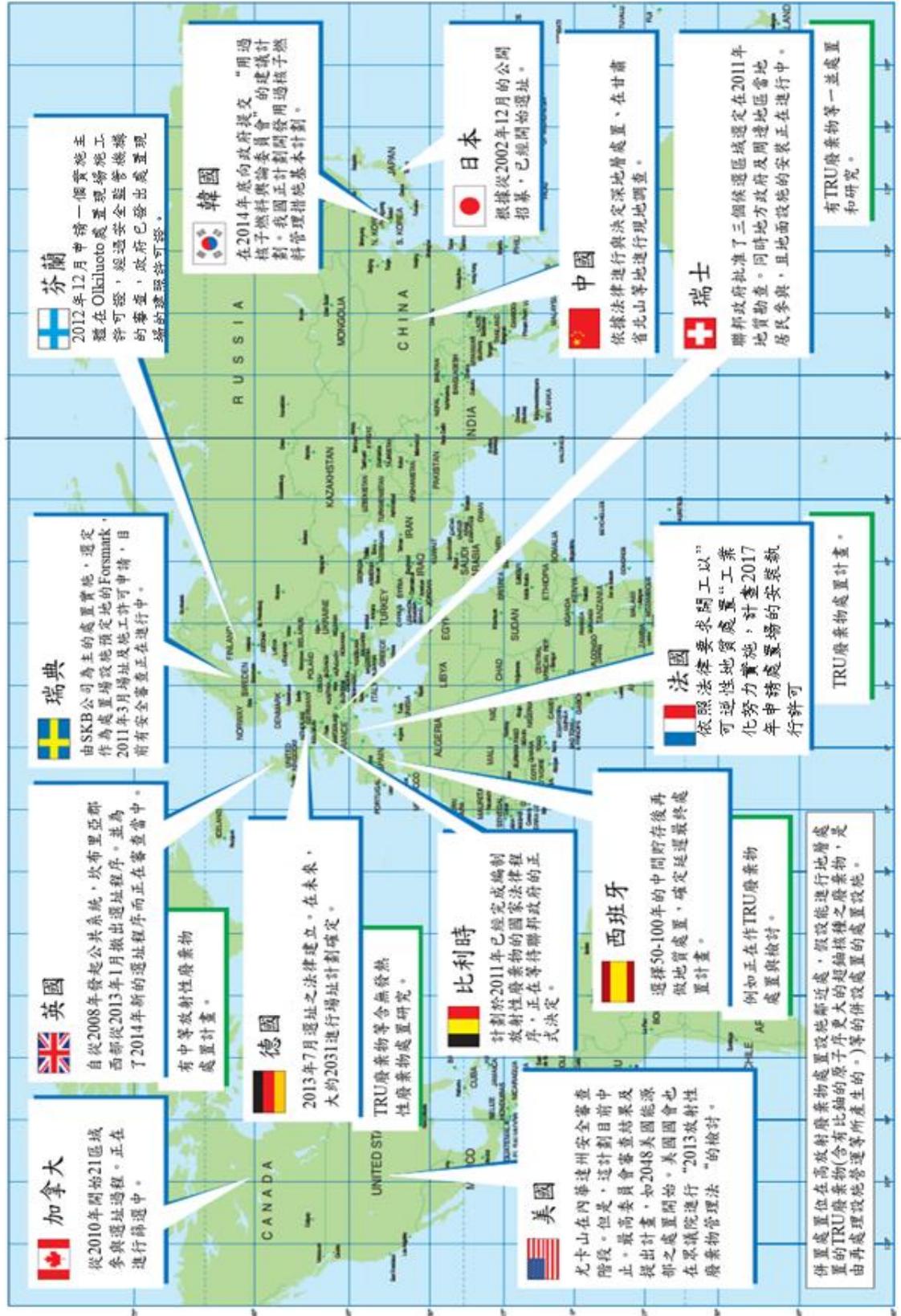
與德國，其他國家皆使用純膨潤土或膨潤土混合不同比例的砂石製作緩衝材料與回填材料；而在處置場的位置設置方面，各國最終處置場預定的處置深度大約在300~1000公尺處，除了美國之外，其他國家的處置場位置皆在飽和基岩帶。在各國的處置概念中，以瑞典的 KBS-3 概念發展較早且成熟，且該國之用過核子燃料特性與規模亦較近似我國，加上其研發過程之相關技術文獻亦較為完整詳盡，因此國內深層處置場設計概念係以瑞典 KBS-3 處置概念為參考對象；另外日本其地質環境特性與我國類似，並且研究發展規劃相當完整，亦值得我國學習參考 [32]。

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；再下一步法國為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 [33]。

表 2.1 各國處置場規格與處置方式

國家	燃料類別	冷卻(年)	燃料處理方式	燃料罐/包封材料	緩衝材料	回填材料	封存方式	深度(m)	處置地質環境	處置場設計	處置罐安裝方式
比利時	用過核子燃料 高放射性廢料	50		不鏽鋼	FoCa膨潤土(60% 鈣膨潤土、35% 石英砂、5%石墨)	砂-膨潤土混合物 Boom黏土	處置隧道掘砌	250	沉積岩/飽和帶；低於水滯	三條橫坑道	高放射性除棄物放置 於坑道中央；用過核 子燃料放置於四周
加拿大	用過核子燃料	10	UO ₂	鋼製外殼 破鋼內襯	砂-膨潤土混合物 (50:50)	砂-膨潤土混合物 (50:50)	橫坑與豎井封存	500-1000	結晶岩/飽和帶	一條主隧道連接多條處置 隧道	垂直放置於處置孔內 或橫式放置於處置隧 道
捷克	中低放射性廢料		混凝土	鋼	純膨潤土		膨潤土封存	450-500	花崗岩/飽和帶		
	用過核子燃料		UO ₂	鋼	純膨潤土		膨潤土封存	450-500	花崗岩/飽和帶		
芬蘭	高放射性廢料		玻璃體	鋼	純膨潤土		膨潤土封存	450-500	花崗岩/飽和帶		
	用過核子燃料	40	UO ₂	鈦-鐵	膨潤土與膨潤土混 塊	砂-膨潤土混合物 (50:50)	膨潤土與膨潤土封 存	500	結晶岩/飽和帶	一條主隧道連接多條處置 隧道	垂直放置於處置孔內 直徑2m高8m
法國	中低放射性廢料	15	CUI、CU2型	不鏽鋼、混凝土容器	純膨潤土	膨潤土或頁岩	膨潤土與膨潤土封 存	400-1000	結晶岩或沉積岩/飽和帶		
	用過核子燃料	15		鋼製包封材料 不鏽鋼內襯	砂-膨潤土混合物 (70:30)	膨潤土或頁岩	膨潤土封存	400-1000	結晶岩或沉積岩/飽和帶		
德國	高放射性廢料	15	UO ₂ 、MOX玻璃 化固體(C型)	破鋼包封材料(厚 55mm長1.6m直徑 55cm)	純膨潤土與鑄鐵 坑道	膨潤土或頁岩	膨潤土封存	500	黏土質岩	一條主隧道連接多條處置 隧道，主隧道直徑0.7m全 長40m每間隔8m設計一處 置坑道，長30m	垂直放置於處置孔內 直徑2m高8m
	高放射性廢料	40	不考慮工程障壁	不考慮工程障壁	鹽混凝土	膨潤土或頁岩	封存	870	鹽岩/飽和帶	兩條主隧道連接多條處置 隧道，主隧道直徑0.6m全長300m	垂直放置於處置孔內 用過核子燃料垂直置 置
日本	高放射性廢料	50	玻璃化固體	破鋼包封材料	砂-膨潤土混合物 (70:30)	膨潤土、砂、 碎石	隧道封存	花崗岩1000 泥岩500	結晶岩或沉積岩/飽和帶	四條主隧道與中間連隧道 連接處置	垂直放置於處置孔內 用過核子燃料垂直置 置
韓國	用過核子燃料		UO ₂	鋼製或不鏽鋼外殼 破鋼內襯	純膨潤土或砂-膨 潤土混合物	純膨潤土					
西班牙	用過核子燃料	30	UO ₂	破鋼包封材料	花崗岩、泥岩、純 膨潤土	純膨潤土	泥凝土與膨潤土封 存	花崗岩550 泥岩250 鹽岩600	結晶岩或沉積岩/飽和帶	兩條主隧道連接多條處置 隧道	橫式放置於處置隧道
瑞典	用過核子燃料	30-40	UO ₂	鋼-鐵、不鏽鋼外殼 直徑2m長100m	MX-80膨潤土	碎石-膨潤土混合 物	隧道回填材料	400-700 面 積 0.3km ²	結晶岩/飽和帶	一條主隧道連接多條處置 隧道	KBS-3V 垂直放置處 置孔，直徑2m高8m
瑞士	高放射性廢料	40	玻璃體	鋼	純膨潤土	膨潤土或砂-膨 潤土混合物	膨潤土與膨潤土封 存	花崗岩1000 泥岩850	結晶岩或沉積岩/飽和帶	一條主隧道連接多條處置 隧道	橫式放置於處置隧道
英國	中低放射性廢料		水泥灌漿	鋼骨箱殼混凝土	水泥回填材料		低滲透係數封存				
中國	高放射性廢料		玻璃化固體		高矽子膨潤土			800-1000	花崗岩/飽和帶		
	用過核子燃料		直接處置		高矽子膨潤土			800-1000	花崗岩/飽和帶		
美國WIPP	TRU	10		208L鋼骨	氧化鈣回填材料		泥凝土與膨潤土封 存	300	凝灰岩/不飽和帶		
美國YMP	商業用過核子燃料	10	不鏽鋼覆蓋、 UO ₂	50mm厚不鏽鋼內襯			15mm鈦合金防罩	300	凝灰岩/不飽和帶	三條平行處置隧道	橫式放置於處置隧道
	防護用過核子燃料		MOX、PuU、 鈾				鈦合金防罩				
	高放射性廢料						鈦合金防罩				

圖 2.2 各國處置場進展與比較



由日本放射性廢棄物管理研究中心文獻所整理各國於 2014 年一月至 2016 年十月(2016 年版)之最終處置場之最新動態資訊，如表 2.2 及表 2.3 所示，由此整理能更清楚掌握各國重要及最新狀況。

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版本之放射性棄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 2015 年版各國處置現況

2 月 03 日	提交瑞典 SKB 公司廢棄物罐封裝設備的用過核子燃料施工許可證申請的補充
2 月 03 日	美國進行 2016 年度的高放射性廢棄物相關處置年度預算請求-1 億 836 萬美元
2 月 10 日	瑞士(NAGRA)進行深地層處置場選址的第二階段發表
2 月 10 日	法國核能安全管理局(ASN)表示深地層處置中之"可逆性"一說
2 月 10 日	美國(WCS)向 NRC 提交用過核子燃料臨時儲存設施的核准申請通知
2 月 16 日	芬蘭輻射和核安全中心 (STUK) 公布用過核子燃料處置場建照許可證申請的審查結果
3 月 24 日	美國內華達州所選出的國會眾議院議員呼籲討論美國尤卡山處置場議題
4 月 08 日	英國地質學會設立了獨立的評估小組(IRP)進行地質篩選
4 月 15 日	德國提出"高放射性廢棄物處置委員會"的設立
4 月 17 日	美國能源部(DOE)發表"廢棄物隔離試驗場(WIPP)第二次服社事件事故調查報告書
5 月 18 日	法國核安全管理局 (ASN) 對於放射性廢物管理機構 (ANDRA) 提出在身地層處置場相關的風險管理業務審查結果
5 月 21 日	英國開始低放射性廢棄物處置場的驗收
5 月 25 日	德國進行高放射性廢棄物處置場的狀況檢討
5 月 26 日	芬蘭進行原子能及輻射法修正案
5 月 26 日	英國政府發表地區代表工作組 (CRWG) 之活動狀況
6 月 02 日	英國政府針對高放射性廢棄物或相關的地質處置管理政策開始進行公眾諮詢
6 月 18 日	韓國用過核子燃料輿論委員會公布"用過核子燃料管理建議"

6月18日	英國用過核子燃料處置場的公眾諮詢會開始
6月19日	美國放射性廢棄物技術審查委員會（NWTRB）公布一份獨立由美國能源部處置之計畫的評估報告
6月22日	法國國家評估委員會（CNE）公布第9份評估報告
6月26日	瑞典 SSM”用過核子燃料最終處置場”選址及建照許可申請的中期安全審查結果公布
7月03日	法國放射性廢棄物管理機構（ANDRA）公布2015年版的國家放射性廢棄物儲存報告
7月13日	法國深地層處置場安裝許可申請變更相關法律成立
7月24日	美國 NRC 進行德克薩斯州當局 C 類低放射性廢棄物過剩檢討
7月30日	英國放射性廢棄物管理公司（RWM）公布放射性廢棄物儲存報告
8月10日	英國政府公布深地層處置相關業務的地點規定評估和可持續性評估草案的實施內容
8月10日	法國憲法委員會進行深地層處置場的安裝許可申請時間表的變更違憲判斷
8月21日	德國聯邦政府批准國家放射性廢棄物管理計畫
9月08日	韓國中、低放射性廢棄物處置場第一階段設施竣工
9月08日	瑞士 NAGRA 落實地質後選區之立體彈性波探勘級許可證發放
9月10日	英國放射性廢棄物管理公司（RWM）開始地質篩選的指導草案
9月24日	英國原子能安全監管機構公布深地層處置實施主體的審查報告
10月16日	法國長壽命低放射性廢棄物處置項目的進展情況報告
9月10日	
9月10日	

表 2.4 2016 年版各國處置現況

1 月 01 日	法國公佈地質處置項目成本評估的進展情況
1 月 07 日	美國展開超深處置孔現場測試
1 月 14 日	芬蘭輻射與核安全中心 (STUK) 制定安全法規
1 月 29 日	瑞典開始核廢棄物最終處置場選址和施工許可申請，並針對密封罐設施的建照許可證之申請進行公眾諮詢
2 月 12 日	美國進行 2017 年高放廢棄物相關預算請求共 1 億 5064 萬美元
2 月 18 日	英國公佈低放射性廢棄物的最新版的政府管理策略
2 月 26 日	美國能源部公佈在美國 C 類低放射性廢物處置 (FEIS) 的最終環境影響評估最新報告
3 月 22 日	美國聯邦眾議院發了一封信給能源部 (DOE) 部門代表詢問尤卡山計劃重啟事宜
3 月 29 日	瑞士聯邦能源環境局(NAGRA)公佈針對環境影響評估的初步調查報告和規範
4 月 07 日	美國 NRC 通知埃迪利能源聯盟 (ELEA) 網站上 Horutekku 公司的臨時貯存設施建設許可申請時間表
4 月 18 日	中國開始在地下實驗室進行現場鑽井評估
4 月 27 日	在英國地質篩選放射性廢物管理公司 (RWM) 發布指導
5 月 06 日	美國 NRC 發布補充尤卡山處置場 (SEIS) 在建設批審環境影響報告書的最終版本
5 月 10 日	德國由後端資金委員會公募資金推薦審議的方式是與放射性廢棄物管理基金相同
5 月 26 日	加拿大在喬克河實驗室淺層地下處置場建設項目的環境影響評估過程中開始招聘公眾意見
5 月 31 日	韓國工業貿易能源局公布“高放射性廢棄物管理基本草案”
6 月 01 日	法國發布了國家評估委員會 (CNE) 第 10 次的評估報告
6 月 02 日	英國地質處置放射性廢棄物管理公司 (RWM) 發布研究和開發程序

6月21日	法國核安全管理局（ASN）公佈可逆性的技術解釋的書面意見
6月22日	德國“高放廢棄物處置委員會”決定公眾參與程序或類似的處置場選址的最後報告
6月24日	芬蘭 Fenovoima 公司（EIA）針對廢棄物處置場環境影響評估提交了一份計劃
6月29日	德國聯邦議會通過一項法案，以改變放射性廢物處置場的現實系統
6月30日	對於瑞典 SSM 用過核子燃料最終處置場土地的施工許可申請，環境法院提交了書面意見
7月11日	德國“高放廢物處置委員會”提交了最後報告
7月13日	法國建立地質處置設施的可逆性以及施工許可證條件方面的法律
7月28日	加拿大核燃料廢物管理機構（NWMO）開始進行 2017-2021 執行計畫的意見招募
8月01日	英國放射性廢物管理委員會（CoRWM）公佈 2015 年年度報告
8月02日	瑞士監管機構 ENSI 在隧道開挖現場進行 Oparinasu 黏土層的調查
8月16日	瑞士 NAGRA 公布選址技術可行性標準評估的補充文件
9月15日	美國的能源部（DOE）彙整協議選址過程的意見
10月03日	瑞士 NAGRA 提交了實施第三階段選址調查的牌照申請

2.3 用過核子燃料之緩衝材料功能要求

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，以維持廢棄物罐之完整性，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[48]：

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子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。

2.4 THMC 效應之國際同儕審查資訊研析

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[34]，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。

日本方面在 2011 發表的技術報告中[35]，詳述其最終處置概念之 T-H-M-C 作用，如圖 2.3 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，配合圖形分別對其程序與影響做了詳細說明。

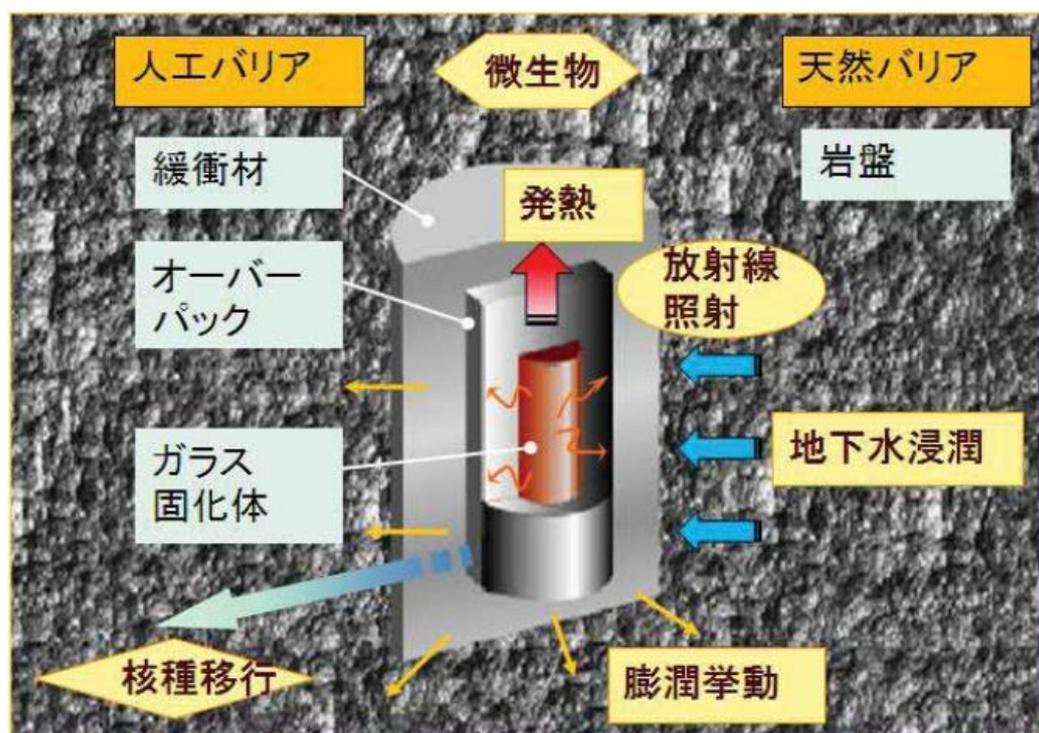


圖 2.3 處置場近場環境 THMC 影響

2.4.1 瑞典-SSM 處置計畫-Technical Note-2012:30 審查報告研析

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 提出之建照許可申請。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/管流單獨成一章進行探討。
- 第 6 章：處置場建照及裝置工程。
- 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 5 cm；結冰覆蓋區為 3 km。

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 10 cm 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：

● 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。

● 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。

● 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。

● 侵蝕/管流(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。

5. 審查建議

要求 SKB 仔細考慮在這份報告中，主要審查結果所提出的問題。

應該做一些進一步的有限元素模型，以便能夠支持 SKB 呈現的結果。輸入值的不同將有可能看到關於不同選擇的結果。

均質雖然很好理解，但要求以一個元件的規模為原型進行更多的測試。

在再飽和和侵蝕/管流這兩個區塊成熟之前應該需要更多的測試和建模。

2.4.2 SKB-P-14-22 之研析

由於開始回填之前必須覆蓋處置隧道內所有的沉積孔，處置隧道內的緩衝器組件及容器必須被保存最多三個月的時間。在此期間內，緩衝材料-膨潤土塊會以塑膠或橡膠製成的緩衝保護層進行保存，以保證膨潤土不會受到高相對濕度的影響，並會在回填開始前移除保護層進行回填作業，在這段時間內廢棄物罐的熱量會影響緩衝材料並引起土塊緩衝區內的水分進行再分佈，針對這個水分再分佈的過程，其研究進行實驗室的小型實驗，並基於小型實驗的結果決定以全尺寸重複進行實驗，原因是因無法在小規模測試中同時實現正確的溫度和溫度梯度。

2.4.2.1 試驗設備

其研究使用平均含水量為 17% 之 MX-80 膨潤土，小型實驗配置如圖 2.4，以下為各項圖示說明：

- (1) 鋼蓋覆蓋以發泡泡沫隔離 > 250 mm。
- (2) 隔離玻璃棉 100 mm (也覆蓋在容器頂部)。
- (3) 該罐有 150 mm 厚的溫控水套，這使得在緩衝器的外部設置溫度以模擬緩衝保護和岩牆的溫度。另外為了確保整個氣缸的溫度均勻，在整個實

驗過程中使用幫浦循環水。

- (4) 緩衝塊和水套之間的空間。
- (5) 上緩衝環。
- (6) 下緩衝環。
- (7) 5±5 層的泡沫聚苯乙烯 (Sundolitt XPS300) , T = 100 mm 。
- (8) 用於提升穩定性的上部鋼組件。
- (9) 水位。
- (10) 四個螺桿焊接到加熱器的提升叉 (調整加熱器放置) 。
- (11) 緩衝土塊和泡沫聚苯乙烯之間 50 mm 的隔離玻璃棉;泡沫聚苯乙烯和加熱器之間。
- (12) 放下加熱器的提升叉。
- (13) 五個熱單元距離外邊緣 250 mm ; 距離砂底 200 mm 填充加熱器。
- (14) 加熱器和緩衝土塊之間的空間。
- (15) 均勻分布的砂。
- (16) 50mm 玻璃棉隔離, 以保護泡沫聚苯乙烯免受加熱器的熱影響。

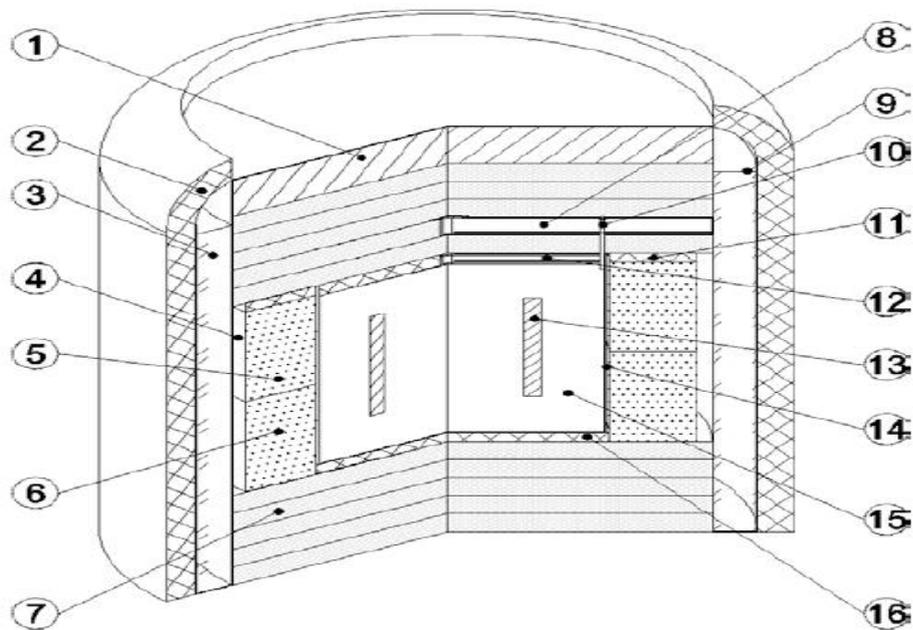


圖 2.4 試驗設備示意圖

2.4.2.2 試體尺寸及試驗配置

為了監控實驗的進度，其研究安裝一組用於測量溫度和相對濕度的傳感器，分別安裝在上下膨潤土塊上表面的四個垂直方向。試驗所使用之 RH(相對溼度)傳感器是 KIMO TH200 型，內置溫度傳感器 (Pt100 熱電偶)。根據電容的測量原理總共埋設了 8 個 RH 傳感器如圖 2.5 所示，詳細尺寸及配置如表 2.4 和圖 2.6 所示。

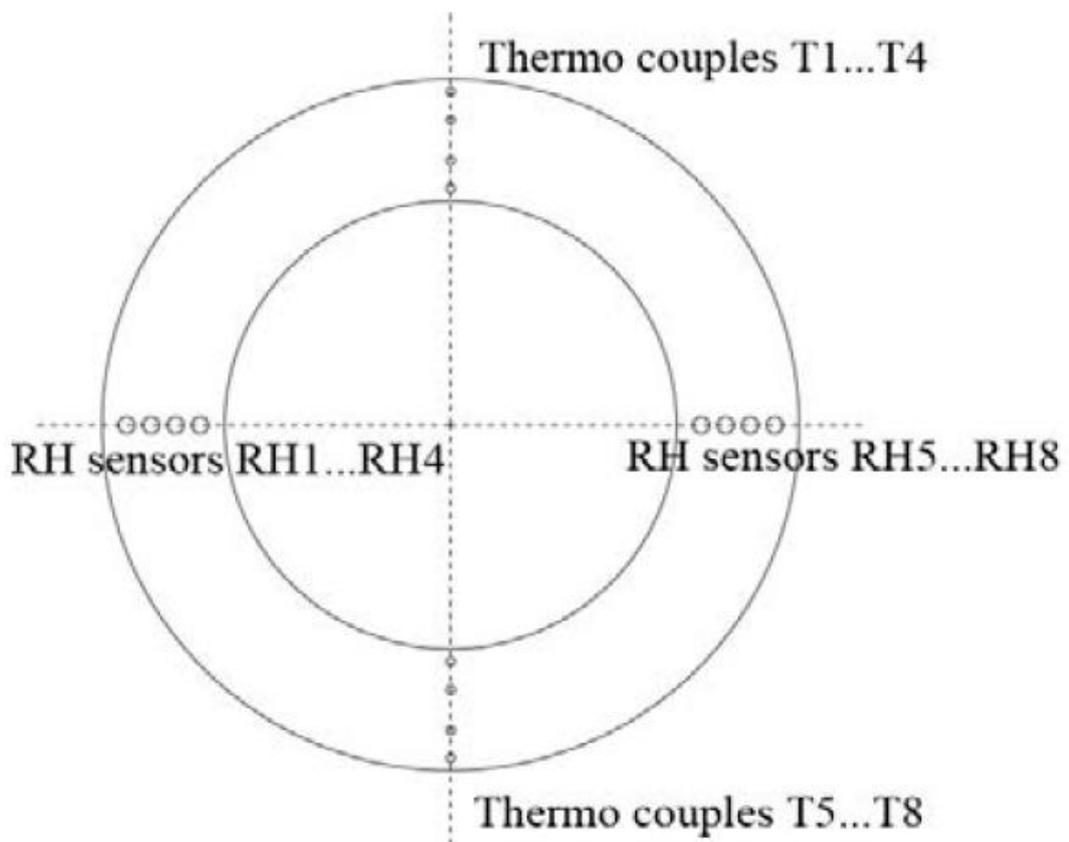


圖 2.5 傳感器配置



圖 2.6 實際試體尺寸

表 2.4 試體尺寸

總寬度	2,250 mm
氣缸寬度 (外側)	2,050 mm
氣缸寬度 (內)	1,750 mm
加熱器	1,050 mm
絕緣體	每個500 mm的頂部和底部泡沫聚苯乙烯的熱傳導係數0.033 W/(m*K)
額外的外絕緣體	250 mm玻璃棉的熱傳導係數0.04 W/(m*K)
緩衝材料	2個環總共1000 mm

2.4.2.3 試驗結果

升溫試驗進行 120 天後開始進行試體拆卸，並取上下部土塊進行含水量測定，從測量的兩部分土塊的含水量可以確定膨潤土在拆解時的平均含水量，並與

其初始含水量進行比較。計算結果表明緩衝材料中，最初的 390 kg 水損失約 45 kg。膨潤土塊中損失的水減去觀察到的冷凝水，顯示實際試體已經損失了約 25 kg 的水，表明測試裝置具有不完全氣密的情況。

2.4.2.4 模擬測試

根據實際進行的試驗，以三種數值模型來模擬測試中的拆卸過程；

1. 使用 Code_Bright 的一維軸對稱模型。

此建模是為了研究測試內部的蒸發，並將其與初始模擬的結果進行比較。

2. 使用 Code_Bright 的二維軸對稱模型。
3. 使用 Comsol Multiphysics 的二維軸對稱 FEM 模型。

進行第二和第三建模用以評估以下情境：

- A. 來自內部槽的軸向洩漏。
- B. 來自內部槽裂縫到外部槽的徑向洩漏是乾燥的主要原因。

上述所使用的兩種工具的主要區別在於，使用 Comsol Multiphysics 的第三種建模包括自然對流的支持。

(1) Code_Bright 一維軸對稱模型

1D 軸對稱模型分析以下三個熱-水傳輸過程：

1. 熱傳遞，由溫度梯度控制（傅立葉定律）。
2. 水輸送，由液體壓力梯度控制（達西定律）。
3. 通過蒸氣質量分數梯度（Fick 定律）控制的蒸氣傳輸。

數值模型的模擬時間首先對應測試運行的 120 天後，將模擬時間再延長 600 天以獲得穩定條件，並對應分析以下三種情況：

1. 外部水含量為 15% 的液壓邊界。
2. 外部水含量為 17% 的液壓邊界（= 46 MPa 的吸力）。
3. 沒有水可以通過模型的表面（封閉邊界）。模型中不包括重力，並且氣體壓力保持恆定為 0.1 MPa。

模擬結果顯示在所有的曲線部分中含水量均降低，並且在模擬結束時外部含水量為 15%，內部含水量為 9%。

(2) Code_Bright 二維軸對稱模型

1D 模擬的結果表明，實際測試內部的蒸發更多。故可以假定乾燥源自兩個過程：

1. 通過內部槽的軸向洩漏。這個過程由水支撐平衡計算。
2. 通過從內縫隙到外縫隙的徑向洩漏，這個過程驗證在土塊中存在斷裂面。

2D 建模的目的是找出上述兩個過程中哪一個是相關性最大的。因此其數值模擬假設三種情況分別進行 120 天的模擬分析。

1. 沒有任何洩漏路徑
2. 存在徑向洩漏
3. 存在軸向洩漏

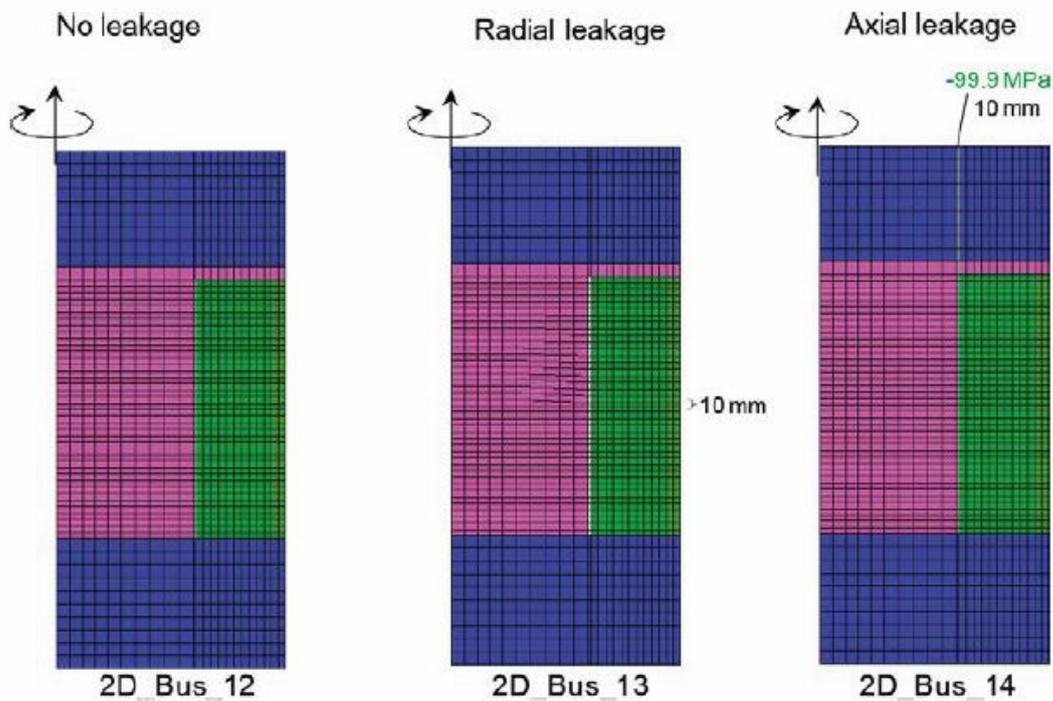


圖 2.7 模型示意圖

三種情況於 120 天後膨潤土塊含水量的等值線圖如圖 2.8 所示。初始含水量為 17%，圖 2.8 表明膨潤土除了在含水量相對不變的上部之外已經受到改變。三個模型之間的比較表明，具有徑向或軸向洩漏的幾何形狀顯然導致含水量的減少，但是這是有限的。

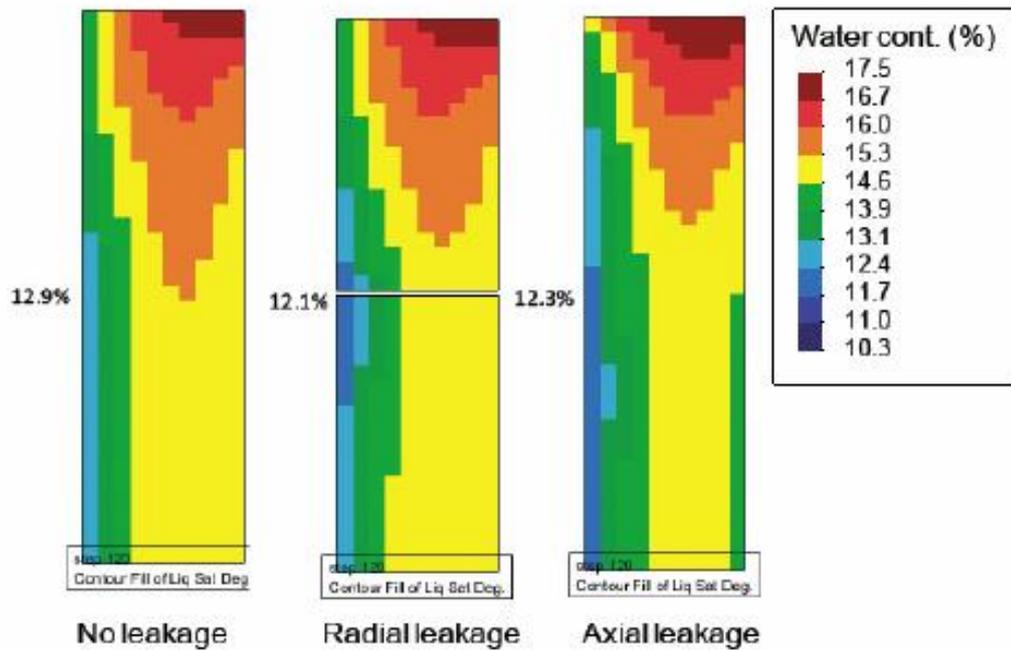


圖 2.8 膨潤土塊含水量的等值線圖

與沒有洩漏的基礎情況相比，徑向和軸向洩漏的模型顯示膨潤土含水量較低，這種效果取決於間隙的寬度，較寬的間隙導致緩衝材料含水量較低。然而，沒有一個數值模型顯示與物理模型實驗一樣低的含水量，這意味著數值模型似乎缺乏一些傳輸過程/機制來解釋在現地實驗廣泛的低含水量現象。其研究結果顯示所提出的三個模型仍無法確定軸向或徑向洩漏何者具有最高的相關性。

(3) Comsol Multiphysics 的二維軸對稱模型

其研究使用 Comsol 2D 軸對稱幾何形狀分析熱-水耦合過程中模型的運輸過程，如圖 2.9 所示，包含：

- (a) 熱傳輸。
- (b) 膨潤土塊中的水傳輸。
- (c) 膨潤土塊和槽中的蒸氣傳輸。

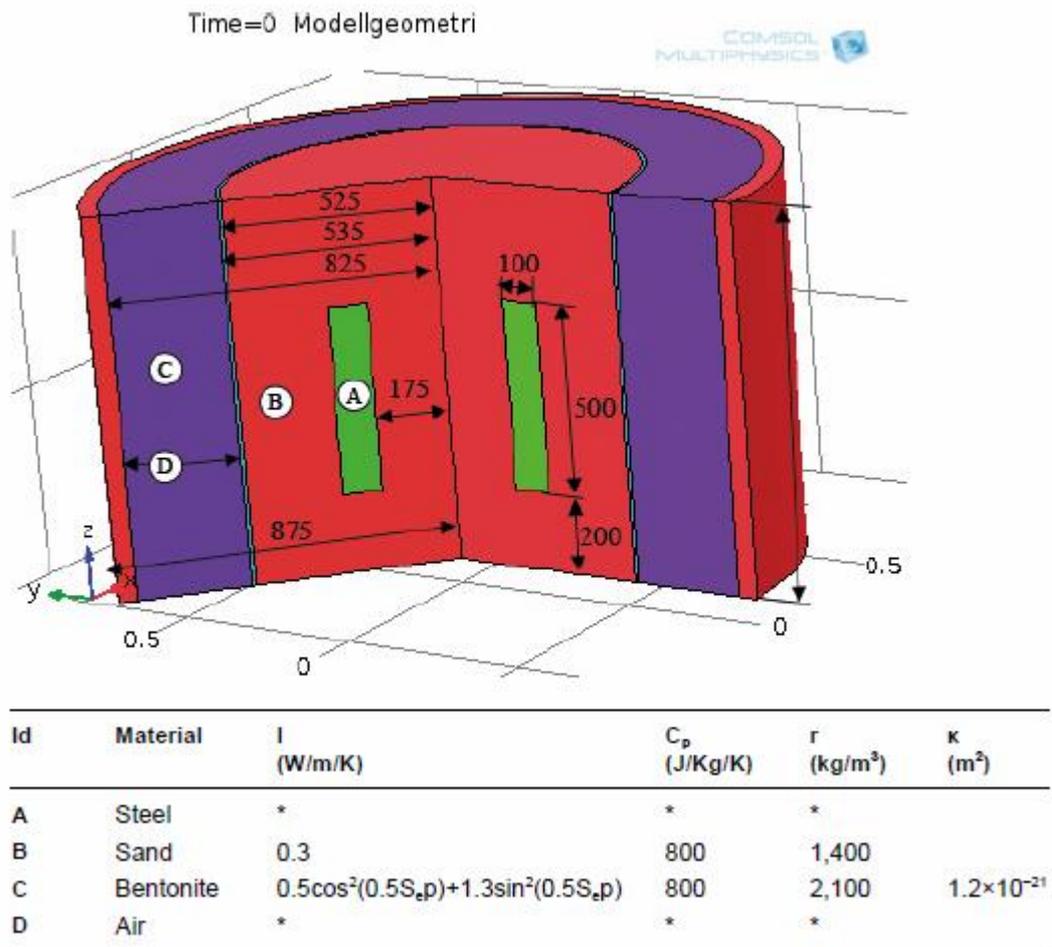


圖 2.9 Comsol Multiphysics 的二維軸對稱模型

2.4.2.5 結論

1. 在物理模型測試中溫度的升高和緩衝材料上的溫度差導致水含量的降低和體積的減小，並使膨潤土塊的幾乎所有部分的乾密度增加。例外情況是測試裝置底部的緩衝材料的部分膨潤土吸收冷凝水，導致含水量增加，與其初始狀態相比乾密度降低。
2. 當測試圓筒的上部和下部的熱量洩漏，以及水通過膨潤土塊並從測試裝置流出時，測量的溫度和含水量分佈可以使用 Code_Bright 和 Comsol 來建構數值模型。儘管如此，在 Code_Bright 數值模型中還是低估了緩衝區內部的干擾。
3. 在測試圓筒的內表面上已經發生水的冷凝。這種冷凝（測試圓筒的內表面接近 $R_h = 100\%$ ）與溫度下降越過外間隙，在緩衝土塊的外部產生恆定的低含

水量，意即緩衝材料的連續乾燥。這很可能也將發生在真實的沉積孔中。

4. 膨潤土塊的內部到外部乾密度的增加和變化，可能是土塊中觀察到的裂紋發生的原因。土塊在沒有裂縫的情況下不能承受溫度和溫度梯度的劇烈變化，這個變化已經引起緩衝材料的收縮。
5. 來自 RH(相對溼度)傳感器的數據表明緩衝材料約 50 天後開始乾燥並持續到測試期結束。然而這些測量尚無法提供關於緩衝材料乾燥(時間的函數)的任何細節信息。
6. 試驗的建模和試驗的結果表明，水的傳輸和乾燥行為，取決於溫度和存在於緩衝材料間隙中的溫差。
7. 在測試中觀察到的進程很可能也存在於處置場中。基於報告的試驗結果，目前尚不能描述裂縫形成和水的冷凝的程度。因此，基於該單次測試的結果，不能夠完全評估裝置的有效性。

2.4.3 DECOVALEX-THMC 之研析

DECOVALEX 是一個於 1992 年由多個國家共同發起的國際性合作研究計畫，其主要目的是要了解熱-水力-力學-化學的耦合情形及針對其對用過核子燃料深地層處置系統性能的影響進行安全性評估[11]。任務簡述如表 2.4 所示。針對上述主要目標，DECOVALEX 團隊分別就各方面來模擬深地層處置系統可能遭遇到的問題並進行了 5 項實驗任務。

2.4.3.1 任務 A

目標是評估 THM 耦合在處置場近場的長期性能影響的過程。工程專家將會在 (D-THMC) 的部分協同工作，並有性能/安全分析師在現場參與互動[12][13]。其中分為以下子任務:

子任務-A1

1. 初步的 THM 模型開發以及近場 THM 分析初步計算。
2. 模型開發與標定:這階段主要工作是微調計算工具(THM 計算機代碼)，在這階段的建模與實驗之間的信息會進行交流與反饋，藉以得到推廣。
 - A. 關於岩石的 THM 模型發展，因為考慮到破壞力學的緣故，實驗室試驗和現場實驗皆可用來校準模型。在加拿大 URL，whiteshell 的

TSX 實驗中，考慮到包容損傷力學效應 HM 模型校準原位實驗，建議關注彈性參數和滲透率的變化和裂紋擴展的發生。

B. THM 模式不飽和土壤屏障的發展，在經過實驗室測試過後證明是可行的，建議與 TSX 實驗一樣考慮模型校準原位實驗。

3. 近場 THM 最終分析:

A. 安全指標；溫度及破壞帶的確定.滲透性的變化.工程屏障的再飽和.回脹壓力以及變水頭分佈。這些從研究小組所獲得的資料將會反饋給性能/安全分析員。

B. 將以一千年來進行模擬分析，各階段包括挖掘及廢棄物安置(30 年)，觀察和週期性監測(70 年)，和處置場封閉後(200-1000 年)。

子任務-A2:了解 THM 耦合現象對核廢棄物處置場性能的影響

1. 進行破壞帶隧道挖掘和岩石損害評估的三軸試驗。

2. 隧道周圍的測試開挖以及孔隙壓力變化測量。

2.4.3.2 任務 B

目標是理解與改善開挖破壞帶的發展，並能夠進行範圍內的放射性廢棄物處置場的結晶岩破壞帶 THMC 機制數值模擬，研究從裂紋/裂縫的演變中，從力學和水力的破壞帶中須建立何種程度的耦合模型[14-16]。

研究計畫由以下幾點組成:

1. 解完整岩石的失敗單軸壓縮以及使用不同化學物理測試的數值模型，進行結果與效果的協調。

2. 在開挖破壞帶進行基準測試(BMT)建模與熱-水力-力學-化學效應，檢查有沒有預先存在斷裂面。

3. 處理不確定性方法的發展。

4. 測量方法的建立以及理解一個新的結晶岩破壞帶。

而為了實現這些目標，將任務 B 再細分為以下 5 個階段；

1. 破壞帶與水力、化學方面文獻、信息的編譯。

2. 數值模擬和單軸壓縮和物理測試結果的比較.完整岩石樣品的應力-應變曲線的物理測試。

3. 使用瑞典 ASPO HRL 的實驗數據，在破壞帶進行 BMT 建模。

4. 對於處理建模不確定性方法的開發。
5. 對在破壞帶附近出土的結晶岩生產指導文件。

2.4.3.3 任務 C

目標是透過法國 Tournemire 地區，無論是實驗室實驗或現場調查彙整而成之良好的數據庫，以開發或應用適當的數字代碼來模擬泥質岩的物理現象，並與其他另類的建模方法做比較。這使得破壞帶的現場時間演變與數值時間演變預測是有可能實現的[17][18]，以下分為 3 個子任務

子任務-C1:隧道破壞帶周圍的建模

1. 使用量測數據計算後的結果來進行數值模型的開發，用來預測周圍破壞帶損害的程度。
2. 共有 3 組團隊分別依照不同數據結果來進行建模作業，並與模擬模型進行比較與驗證。

子任務-C2:破壞帶隨時間的演變情形

1. 在 Tournemire 網站有 3 次不同時間挖掘的破壞帶試驗，研究團隊以數值預測方式以及破壞帶在給定時間內測定的程度進行比較試驗，發現校準階段後的模擬隊預測破壞帶的時間演變是有用的。

子任務-C3:岩石斷裂帶對開發破壞帶的延伸影響

2.4.3.4 任務 D

探討火山及結晶膨潤土系統 THM 和 THC 效應對開挖破壞帶近場長期滲透率/孔隙率的影響。組織簡化了兩種可能的處置場的安置條件，第一種處置場是位於飽和結晶岩(Febex 型)，處置隧道以膨潤土作為緩衝材料。第二種處置場是尤卡山型的簡化版本，採不飽和火山岩的開放式充氣隧道，組織以這兩種處置場作為對比，使研究團隊能有更廣泛的理解[19][20]。根據 THM 與 THC 效應各分為兩部分進行任務。

1. 任務 D_THM1：針對位於一個飽和的地質力學模擬結晶岩處置場，在隧道回填緩衝材料（FEBEX 型）。
2. 任務 D_THM2：對（尤卡山型）的不飽和火山岩開放式通風隧道進行處置場地質力學模擬。
3. 任務 D_THC1：對一個飽和結晶岩處置場隧道回填緩衝材料（FEDEX

型) 後進行熱學-水力-化學模擬。

4. 任務 D_THC2：在位於不飽和火山岩的處置場開放式通風隧道，進行熱學-水力-化學模擬（尤卡山型）。

D_THM 和 D_THC 簡述:D_THM 和 D_THC 被設計為以一個現實的方式引入未來預期的處置場物理過程，對邊界條件以及模型的幾何形狀進行了簡化。在任務 D_THM 考慮的主要過程是熱傳遞，流體流動，壓力和變形，孔隙率及滲透率。

任務 D_THM 具體 THM 的研究包括：

1. 熱學-力學轉變為近場水力及流場的相對重要性。
2. 不可逆力學變化與可逆的力學變化的相對重要性。
3. 不同岩石類型的處置場的設計效果對比。
4. 應力滲透性和應力孔隙率關係的演變。
5. 績效評估過程中的重要性。
6. THMC 完全耦合過程評估（必要性，方法）。
7. 預測不確定因素，不確定參數，替代概念模型，非均質性等因素造成的評估。

2.4.3.5 任務 E

加拿大的深地層處置場會受到氣候變化的長期影響，這會顯著改變地表條件，其中包括凍土層的長期覆蓋。長期 THM 可能影響到深地層處置的性能，任務 E 的主要目標是了解冰川的影響和盾流系統的演變以及進行熱-水-力學耦合的績效考核[21]。

表 2.4 DECOVALEX 任務簡述

主任務	主要內容	子任務	子任務內容
A	評估近場環境T-H-M耦合之性質影響。	A1	<ol style="list-style-type: none"> 初步的THM模型與計算。 以一千年進行分析，挖掘及廢棄物安置(30年)，週期性監測(70年)、處置場封閉後(200-1000年)。
		A2	<ol style="list-style-type: none"> 進行破壞帶隧道挖掘和岩石損害評估的三軸試驗。 隧道周圍的測試開挖以及孔隙壓力變化測量。
B	HMC開挖擾動帶(EDZ)之研究。	-	<ol style="list-style-type: none"> 破壞帶與水力、化學方面文獻編譯。 數值模擬和單軸壓縮和物理測試結果的比較。 使用瑞典ASPO HRL的實驗數據進行BMT建模。 對於處理建模不確定性方法的開發。 對在破壞帶附近出土的結晶岩生產指導文件。
		32	
C	開挖Toumemire之泥質岩石擾動帶(EDZ)。	C1	隧道破壞帶周圍建模
		C2	破壞帶隨時間的演化情形
		C3	岩石斷裂帶對開發破壞帶的延伸影響
D	THC和THM過程中永久滲透率/孔隙的變化。	THM1	針對飽和之地質力學模擬結晶岩處置場 (FEBEX) 。
		THM2	對 (尤卡山型) 的不飽和火山岩開放式通風隧道進行力學模擬。
		THC1	飽和結晶岩處置場隧道回填緩衝材料 (FEDEX) 後進行T-H-C模擬。
		THC2	針對不飽和火山岩處置場通風隧道，進行T-H-C模擬 (尤卡山) 。
E	氣候變化對THM影響：冰期的案例研究。	-	加拿大的深地層置場會受到氣候變化的長期影響，這會顯著改變地表條件，其中包括凍土層的長期覆蓋。

第三章、小型模擬實驗材料與方法

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，主要礦物含有黏土礦物的蒙脫石、長石、方解石，少量石英，如圖 3.1，由 AMCOL 公司在美國懷俄明州 Black Hills 地區開採生產（磊盈公司進口），型號為 SPV 200，以下簡稱 SPV 膨潤土，表 3.1 顯示本試驗所使用之膨潤土成份分析表。此膨潤土產品主要應用於陶瓷工業，化學式為 $(\text{Na,Ca})_{0.33}(\text{Al}_{1.67}\text{Mg}_{0.33})\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ，顆粒通過#200 篩(0.074 mm)達 65% 以上，含水量在 14% 以下。而 SPV 膨潤土的可交換陽離子以 Na^+ 為主，屬鈉型膨潤土[10]。



圖 3.1 試驗所使用 SPV 200 膨潤土(自然含水狀態)

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

根據 ASTM D5334 暫態熱源法-熱探棒法量測規範[36]，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 及圖 3.3 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：

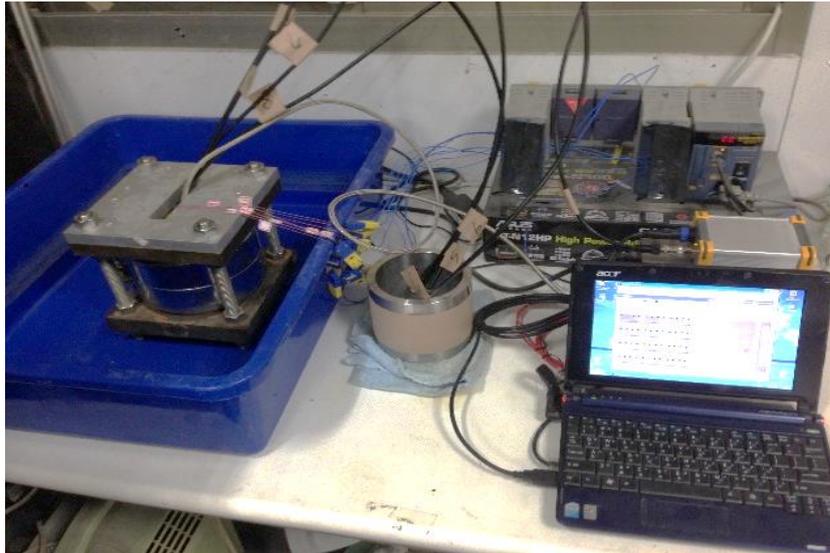


圖 3.2 暫態熱源法-熱探棒法試驗儀器之配置圖

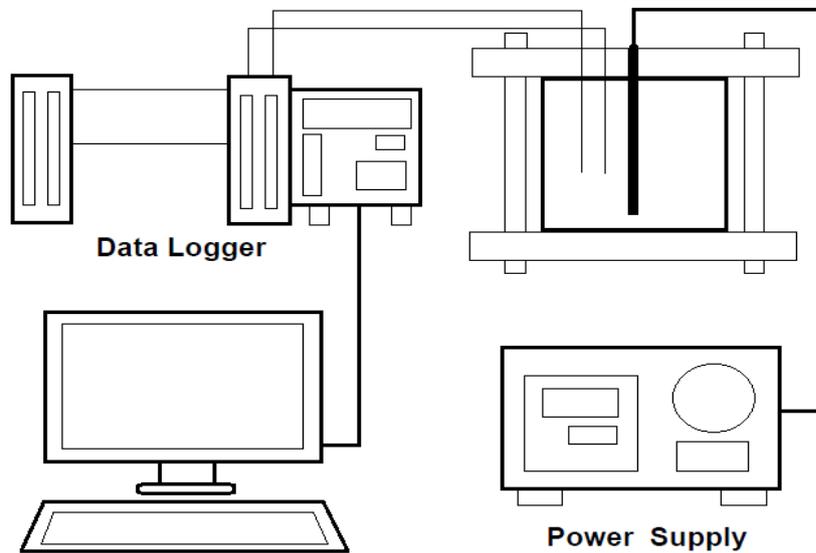


圖 3.3 暫態熱源法-熱探棒法試驗儀器連結配置簡圖

3.2.1 暫態熱源法資料擷取系統

採用日本 YOKOGAWA 公司所生產的 MX100-02E 資料擷取系統，如圖 3.4，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。



(A)MX100-02E 資料擷取系統



(B)程式操作介面

圖 3.4 MX100-02E 資料擷取系統(A)；程式操作介面(B)

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，分為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 3.5 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。



(A)熱源供給系統



(B)熱探針

圖 3.5 (A)熱源供給系統；(B)熱探針

圖 3.6 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°C 、 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。

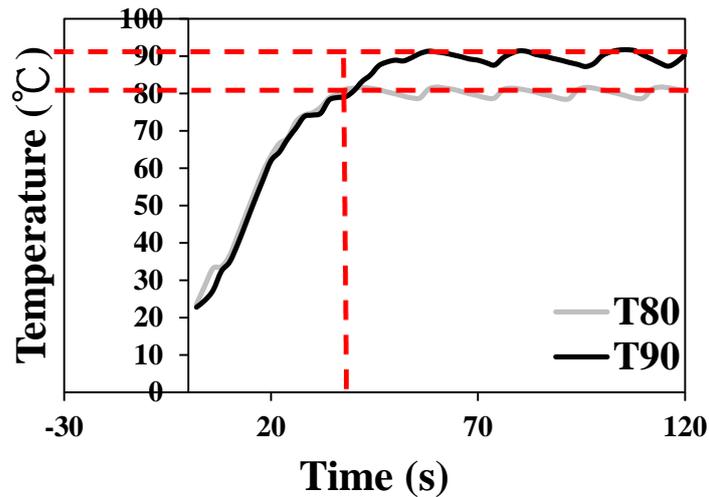


圖 3.6 熱探針升溫及持溫曲線

(一) 緩衝材料之溫度分布量測

基本上溫度分佈量測系統與測量熱傳導係數系統相似，不同測量目的所得之數據不同，因此在做法上有些許不同，圖 3.7 顯示溫度分佈量測系統，使用熱探針埋於分裂模試體中央位置進行加熱，如圖 3.8，搭配資料擷取系統與熱源供應器提供穩定的熱源，由試體附近不同位置埋設熱電偶感測溫度，如圖 3.9，擷取不同位置之點位溫度值，進而得知試體溫度分佈。另外藉由前項熱探針試驗所得之熱傳導係數帶入於有限元素建立相同試驗狀況以取得有限元素分析之溫度分佈而進行驗證[37]。



圖 3.7 溫度分佈量測系統

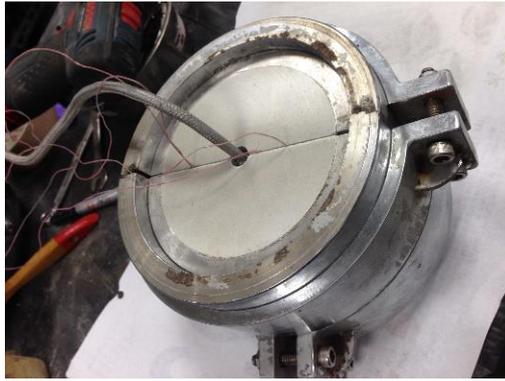


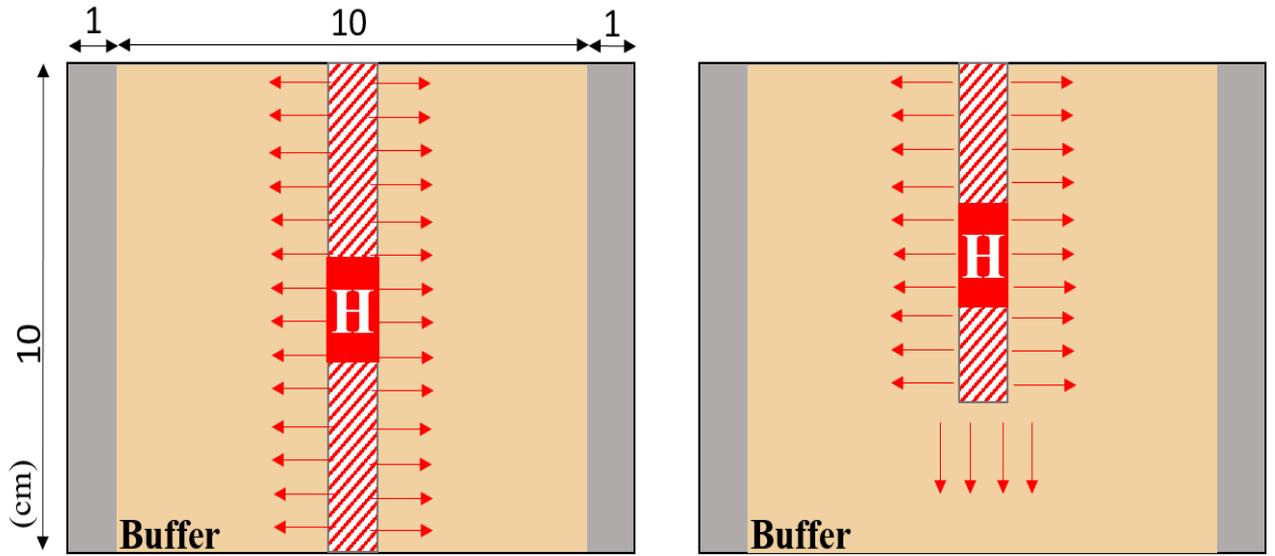
圖 3.8 熱電偶與試體備製圖



圖 3.9 熱電偶埋設位置圖

(二) 試驗設計

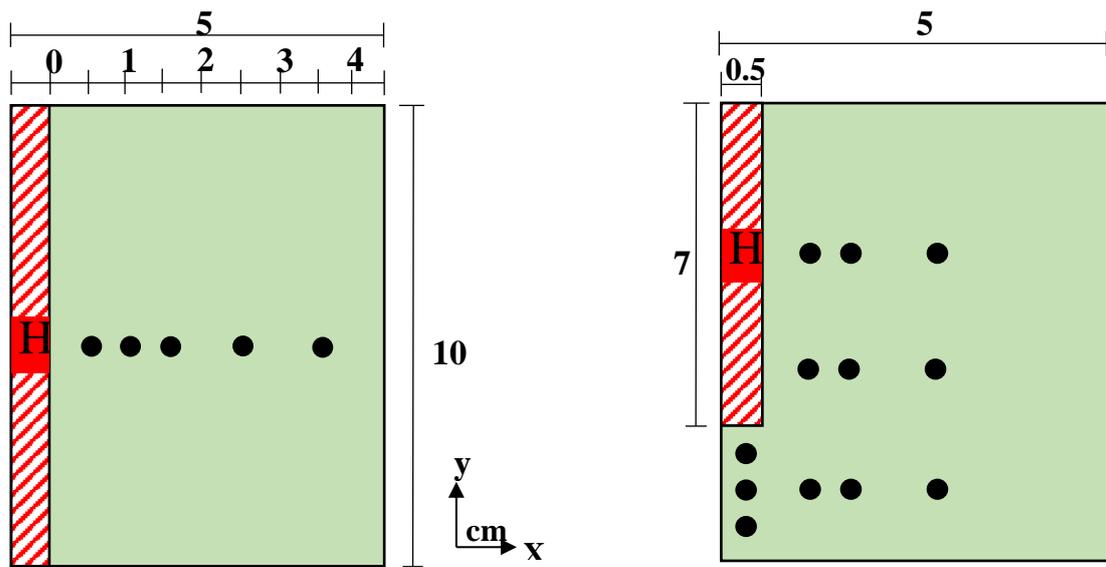
試驗設計上，分成軸對稱一維設計與軸對稱二維設計，示意圖如圖 3.10，並選用試體乾密度為 1.4 g/cm^3 ，其軸對稱一維設計目的主要為量測熱源於軸對稱徑向傳遞之溫度分佈狀態，熱電偶埋設位置為試體中央深度並徑向 0.5、1、1.5、2.5、3.5 cm 等 5 點位置，以軸對稱表示如圖 3.11(a)所示。再者軸對稱二維設計主要量測目的為熱源下方區域之緩衝材料溫度分佈，熱電偶埋設於熱源下方 0.5、1、1.5 cm 之 3 點位置；而在深度 3、5、8 cm 處理設徑向方向 0.5、1、2 cm 共 9 點位置，如圖 3.11(b)所示(王雅薇，2008)。



(a) 軸對稱一維設計

(b) 軸對稱二維設計

圖 3.10 溫度分佈設計概念



(a) 軸對稱一維設計點位

(b) 軸對稱二維設計點位

圖 3.11 溫度分佈測量位置表示

(三) 熱探針校正

ASTM D5334 說明熱探針測量之校正方法[36]，可使用甘油(Glycerol or Glycerin)與水(去離子水或自然純水)進行校正試驗，本試驗選用水進行校正，已知水於 25°C 狀態下其熱傳導系數為 0.607 W/m,K，其規範中提到熱探針的加熱會

造成水的對流，此對流會導致相當大的誤差，而為了防止這樣的錯誤，水必須穩定處理，因此規範規定之方法為每公升水加入 5 公克的洋菜粉(Agar)進行處理。洋菜粉應加入熱水溶解並充分攪拌直到均勻，最後冷卻至室溫固化後再進行校正作業，校正後測量值為 0.609 W/m,K ，相當接近已知數值，其試驗狀態如圖 3.12 所示。



圖 3.12 熱探針校正狀態

3.2.3 TDR 監測系統

時域反射技術 (Time Domain Reflectometry, TDR)，為一種利用電磁波進行監測之方法。TDR 系統概念類似於雷達，由一脈衝電磁波製造器形成脈衝電磁波進入測量之同軸電纜，再由示波器接收並紀錄因同軸電纜之阻抗不連續而造成電磁波反射訊號進行監測。此技術目前廣泛使用於土木工程，例如在結構工程應用上，使用於橋樑之錯動分析;而在大地工程方面，應用於地層滑動分析。另外透過量測電磁波於感測器間之波速，可延伸應用於上述土壤含水量，因此本研究嘗試以 TDR 作為含水量量測技術使用。

(一) TDR1500

由德國公司 SYMPULS 製造，如圖 3.13，頻寬為 1.5 GHz ，測量時間軸之範圍為 $-50 \text{ ps} \sim 20 \mu\text{s}$ ，最快擷取時距(Sampling time interval)為 10 ps ，設計上接口為 USB，可直接與電腦中進行控制與監測作業，TDR 感測器可以直接藉由 SMA 連接到該儀器的面板。



圖 3.13 TDR1500

(二) RG58 同軸線(Radio Guide-58)

為 50Ω 同軸電纜線，其使用型號為 RG-58 A/U，如圖 3.14 所示，由外置內部結構為包覆體(PVC)、外部導體 (軟銅線網)、遮蔽層(鋁箔)、絕緣體(LDPE)、中心導線(軟銅線)。其性能適用溫度可達 90°C，使用頻率最高可達 1GHz。



圖 3.14 RG58- A/U 同軸線

(三) 真空凡士林

為確保浸水試驗之水方向由底部進入，因此使用真空凡士林將可能進入水的地方塗上真空凡士林，又稱矽油脂膏，如圖 3.15。採用道康寧(Dow Corning)，其顏色為白色透明，適用溫度為-40 至 204°C，可耐酸鹼與水，常用於化學加工、實驗設備、管路系統上做為防漏與潤滑。



圖 3.15 真空凡士林

(四) TDR 感測器參數率定

圖 3.16 顯示 TDR 典型之空氣與水的波形圖；而圖 3.17 為同軸線空氣與水之率定情形，其圖中金屬色為銅-雙面導電膠帶，使 TDR 連結外導體，其計算視介電常數主要藉由橫軸之時間軸(Δt)進行計算，而 Δt 計算方式定義為電磁波進入介質之波形開端 t_0 至後端波形 Open 點之差。而為了使計算上能更為精確，可於同軸線上制定一個人為基準點(Time mark)，如圖 3.16 波形所示，以作為此同軸線的基準點來計算 Δt ，以空氣與水進行率定，如 3-1 式所示，未知值為 t_0 、 L ，其餘值皆為已知，再利用聯立方程式可解出 t_0 、 L ，因此再將這兩值代入 3-2 式，即為計算土壤的視介電常數，以做為含水量之推估使用。

$$\Delta\tau_a = t_0 + \frac{2L}{c} \sqrt{\varepsilon_a} \quad (3-1)$$

$$\begin{aligned} \Delta\tau_w &= t_0 + \frac{2L}{c} \sqrt{\varepsilon_w(T)} \\ \Delta\tau_s &= t_0 + \frac{2L}{c} \sqrt{\varepsilon_s(T)} \end{aligned} \quad (3-2)$$

$\Delta\tau_a$ ：以空氣為介質之時間軸距離。

$\Delta\tau_w$ ：以水為介質之時間軸距離。

$\Delta\tau_s$ ：以土壤為介質之時間軸距離。

ε_a ：空氣視介電常數，標準值為 1。

ε_w ：水視介電常數，25°C 狀態下標準值為 81，實際隨著水溫而變化。

ε_s ：土壤視介電常數。

t_0 ：電磁波進入介質之起始點位置。

L ：感測器深度(m)。

C : 光速= 2.99×10^8 (m/s)。

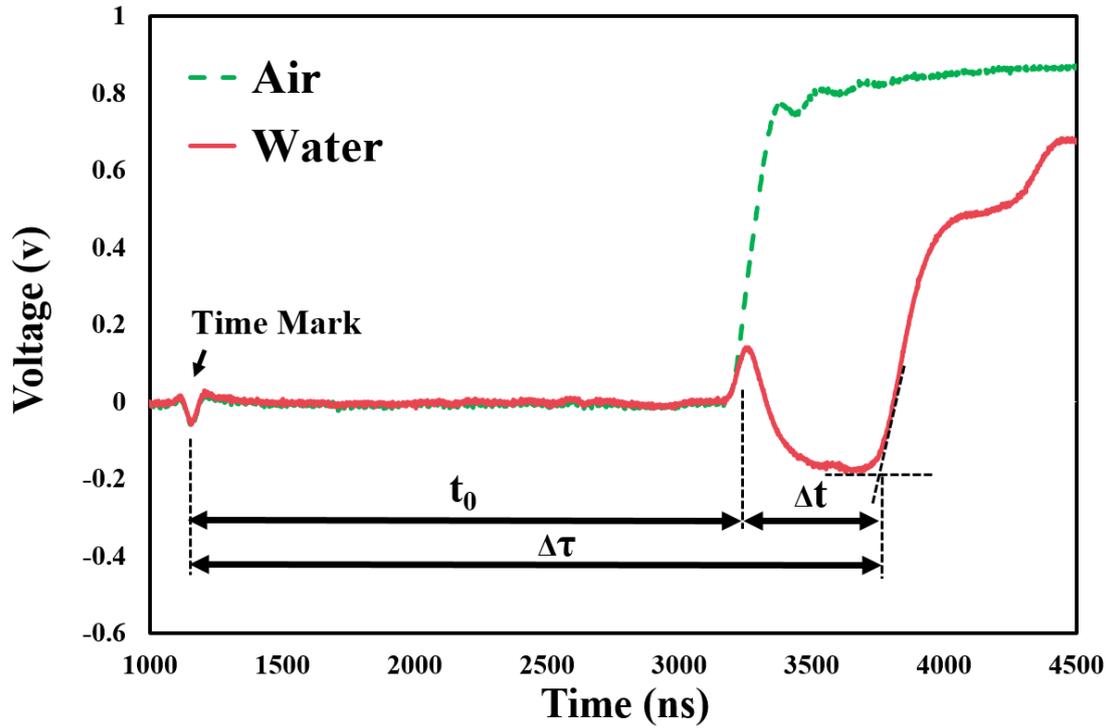


圖 3.16 空氣與水典型波形率定圖



(A)感測器空氣率定情況



(B)感測器水之率定情況

圖 3.17 同軸線率定情況

(五) 分層體積含水量計算方式

使用 TDR 系統進行體積含水量監測，目的為了解緩衝材料之體積含水量歷時變化，並進一步得出分層含水量之歷時體積含水量變化，因此本研究提出分層含水量之計算方法，如圖 3.18 為實際試體尺寸：

藉由 TDR 感測器不同深度(9、10 cm)與固定 r 為 5 cm，分別計算出體積，即為平均體積含水量。而分層含水量係將兩體積之平均體積含水量相減即為如圖 3.18 之 1 cm 之分層含水量。

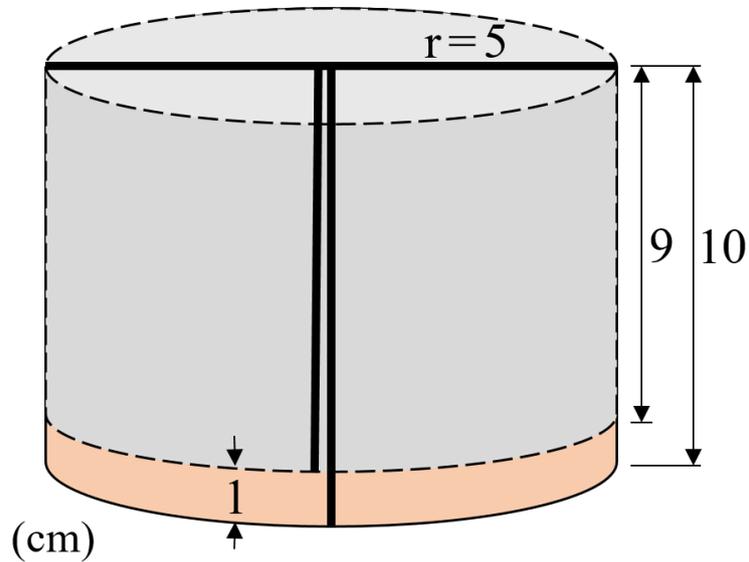
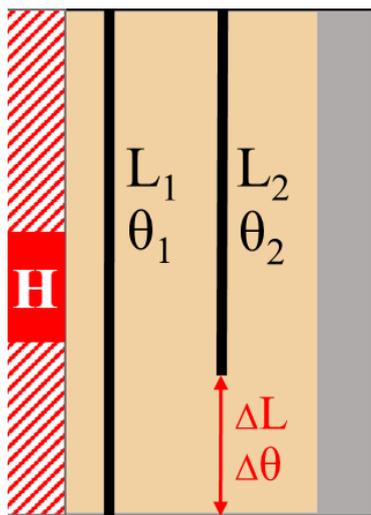


圖 3.18 試體分層含水量計算概念

再者將上述之體積概念簡化，如圖 3.19 所示，扣除共有之半徑 r，因此可簡化推導為感測器深度與含水量關係。由兩條不同針深度 L_1 、 L_2 ，其分別測得各體積下之平均體積含水量 θ_1 、 θ_2 ，目的求得 ΔL 下之 $\Delta\theta$ ，即為分層含水量，而相互關係表示於公式(3-3)，經由移項後可得 ΔL 下之 $\Delta\theta$ 。



$$L_1 \theta_1 = L_2 \theta_2 + \Delta L \Delta \theta \quad (3-3)$$

$$\Delta \theta = \frac{L_1 \theta_1 - L_2 \theta_2}{\Delta L} \quad (3-4)$$

圖 3.19 分層含水量圖例與換算公式(3-3)、(3-4)

L_1 、 L_2 ：兩不同長度之感測器， $L_1 > L_2$ (m)。

θ_1 、 θ_2 ：由 L_1 、 L_2 求得之體積含水量(%)。

ΔL : L1、L2 相互長度差(m)。

$\Delta\theta$: ΔL 長度下體積含水量(%)。

3.2.4 溫度分佈之有限元素分析模擬

有限元素分析模擬，使用 ABAQUS 有限元素分析程式，此分析程式之建立分析模型包括建立網格，定義節點、元素編號；定義材料性質；加入邊界條件、初始條件，而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。

而此緩衝材料溫度分佈模擬試驗，其主要目的用以驗證實驗與模擬之研究，以有限元素分析模擬相同實驗狀態下之溫度分佈，基本設定包含一維軸對稱設計與二維軸對稱設計皆與實驗相同，建模方式採用二維軸對稱進行建模，其主要元件為熱源(Heater)與緩衝材料(Buffer)建立分析模型，熱探針之熱源供應功率為 80 W，需要換算單位功率為 10.1859 W/cm^3 輸入分析程式熱載重，其熱源溫度設定為定值，並無額外之熱衰函數設定。

另外必須設定邊界條件，因試體限制於試體模中，所以為了使熱源不向外流失而設定邊界條件，如圖 3.20，由圖中藍色線段部分皆為緩衝材料，其邊界條件設定為 22.5°C ；而紅色線段為熱探針，其邊界條件設定為 90°C ，此數據皆為實際實驗所得之重要數據，其餘重要參數皆顯示於表 3.2。

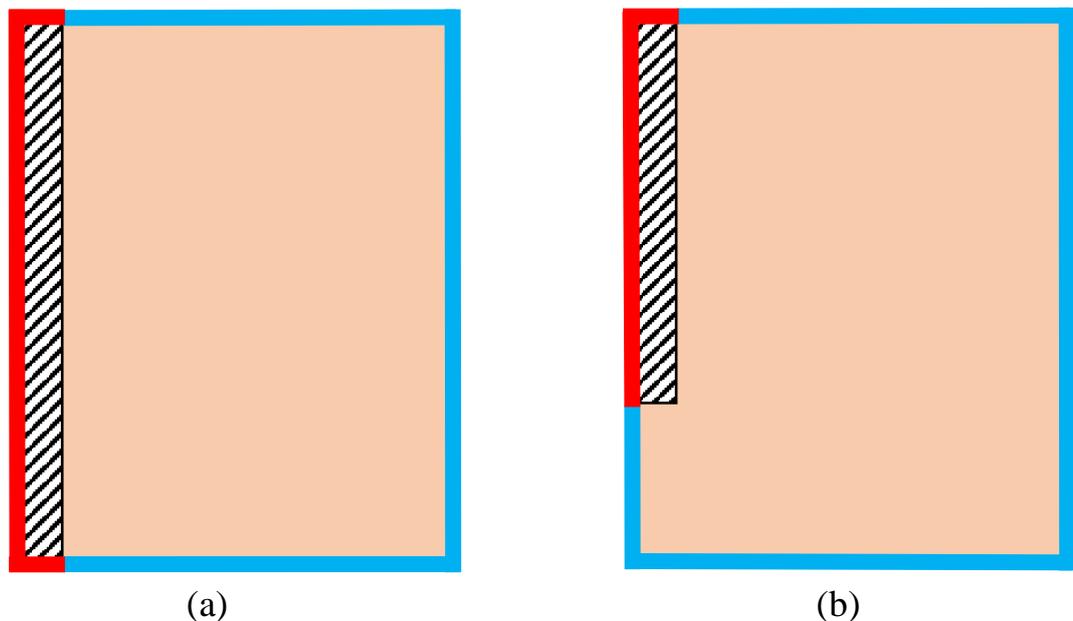


圖 3.20 邊界條件設定示意圖

表 3.2 材料參數設定

	密度 (g/cm ³)	熱傳導 (W/m·K)	比熱 (J/kg·K)	初始溫度 (°C)
Heater	7	200	400	23.0
Buffer	1.4	0.471	800	26.4

3.2.5 含水量-視介電常數-溫度三相圖建置

如欲在不同含水量下進行視介電常數的量測，須事前依照需求進行膨潤土含水量的配置，整個過程至少需要一至兩天，相當耗費時間，所以本研究將試驗結果彙整後進行含水量 θ -視介電常數 K_a -溫度 T 的三相圖建立作業。當三相圖建立完成後，未來在已知溫度下 若得到一組 K_a 量測值即可快速得知緩衝材料-膨潤土相應的含水量。圖 3.21 為三相圖建置概念。

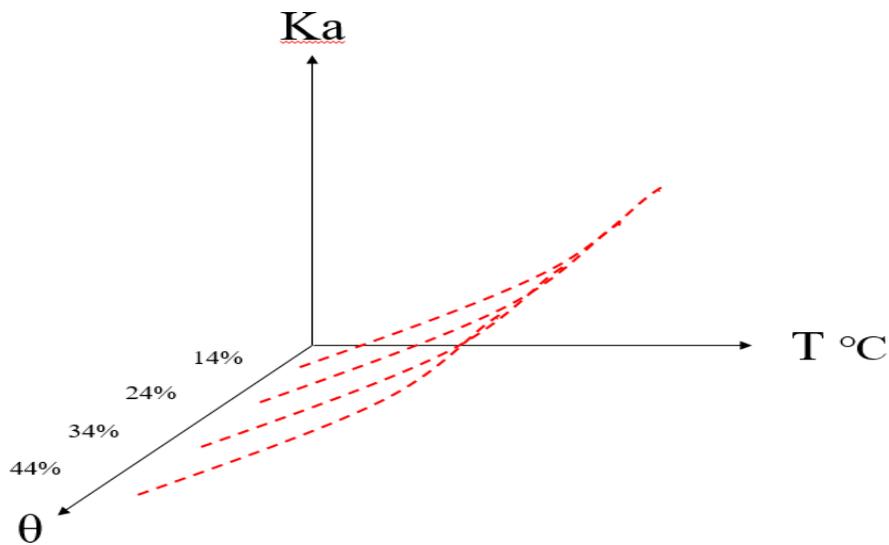


圖 3.21 三相圖建置概念示意圖

三相圖建置試驗設計:

1. 製作不同含水量(14%、24%、34%、44%)的緩衝材料試體。
2. 埋設熱電偶、TDR 感測器。
3. 以外模及外束環固定試體，並在上下層試體與空氣接觸面均勻塗抹真空

凡士林防止水分散失。

4. 室溫下將試體放入烘箱以 90°C 定溫進行加熱。
5. 以熱電偶進行試體內部溫度量測並記錄 27°C 、 40°C 、 60°C 、 80°C 時之 TDR 波型。
6. 數據彙整及計算。
7. 進行三相圖繪製及建立。



(A) 90°C 定溫烘箱；(B) 試體配置圖

圖 3.22 三相圖建置系統

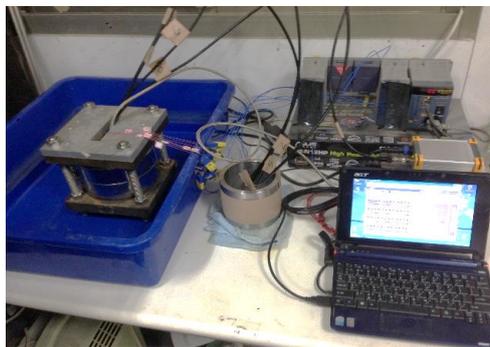
3.2.6 緩衝材料 T-H 耦合作用分析

緩衝材料 T-H 耦合作用分析，此分析試驗結合上述之所有試驗，也就是 ASTM D5334 之暫態熱源法與 TDR 之時域反射法，將兩項方法結合於待測試體中，如圖 3.23 所示，熱源的部分設定熱探針熱源為 80°C 之定值，以模擬緩衝材料於處置場初期之乾燥狀態，並設置 9 點熱電偶線於中間位置與試體底部進水區以上 0.5、2 cm 處個水平方向各 3 點，間距為 1 cm，進行溫度分佈監測，待溫度加溫至穩定後，開始加水使水從試體底部被試體自然吸收，最後設置 4 條分別為 7、8、9、10 cm 與間距約 0.5 cm 之 TDR 感測器作為含水量監測，以模擬近場環境緩衝材料受浸水之歷時影響，以此建立緩衝材料 T-H 耦合作用監測系統 [6][7][10][38]。

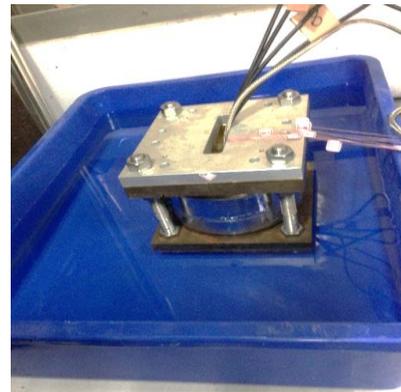
近場 T-H 試驗步驟設計：

1. 製作緩衝材料，並埋設熱探針、TDR 感測器、熱電偶。

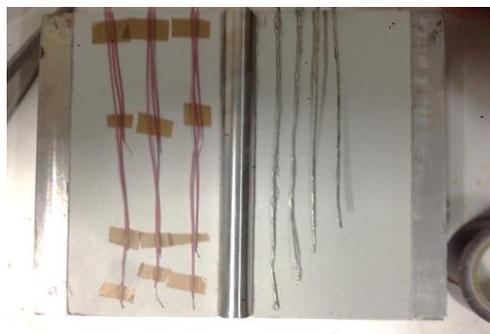
2. 測量緩衝材料初始含水量狀態、試體溫度。
3. 模擬乾燥狀態，開啟溫度擷取器後啟動 80 W 熱探針至 80°C 恆溫。
4. 試體溫度約 5hr 後溫度分佈穩定，測量目前含水量。
5. 模擬再飽和狀態，加入水至試體 6 分高度。
6. 連結溫度擷取器紀錄水溫。
7. 溫度持續記錄，每 6hr 測量 TDR-含水量監測。
8. 彙整數據。



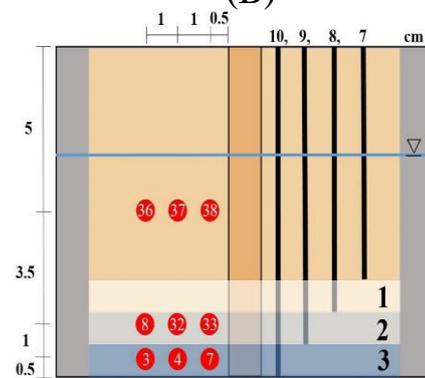
(A)



(B)



(C)



(D)

(A) 實際系統配置；(B) 待測試體浸水；
(C) 實際試體內部配置；(D) 系統配置與尺寸
圖 3.23 T-H 耦合作用分析系統

3.3 試驗模具、試體製作

本研究所設計之模具如圖 3.24，應用靜壓夯實法製作密度 1.6 Mg/m^3 之圓柱土體，將之束制於外直徑 120 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：

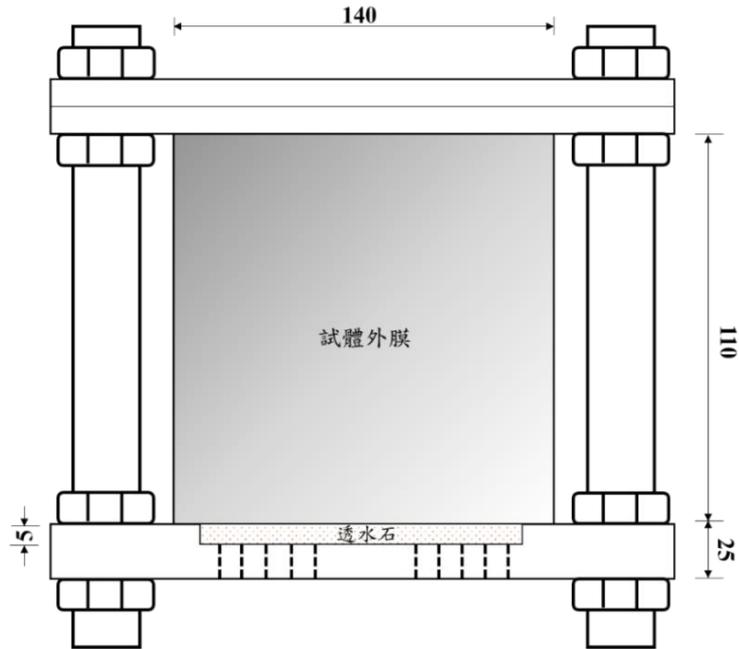


圖 3.24 實驗模具組 (mm)

(一) 試驗土樣

採用 SPV 膨潤土，設計密度 1.4 Mg/m^3 。以固定體積的方式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 3.25 為壓製完成所得之試體。

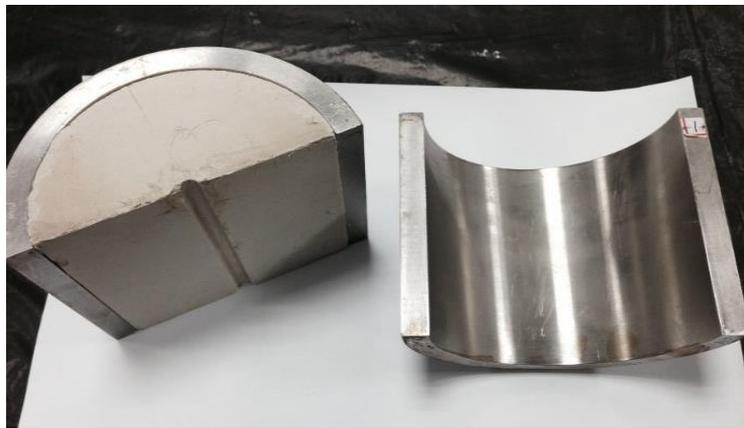


圖 3.25 壓製完成所得之 SPV 膨潤土試體

(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 3.26 所示。

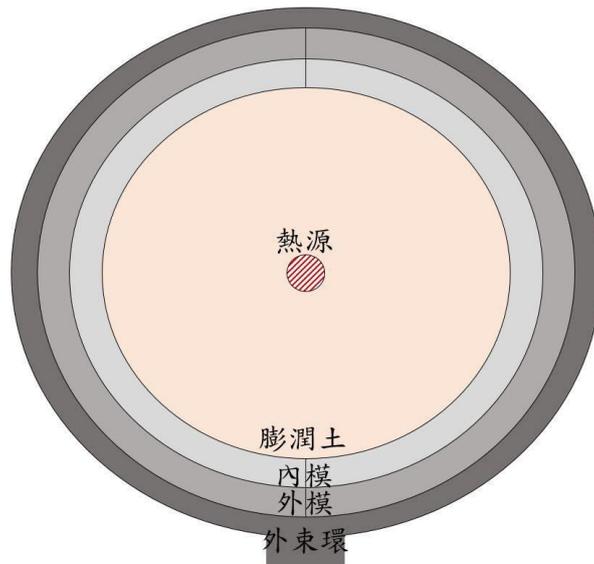


圖 3.26 試體俯視示意圖(未按比例)

(三) 壓桿、內模

壓桿及內模如圖 3.27，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 3.27 壓桿、內模組合圖

(四) 固定模具設備

圖 3.28 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。

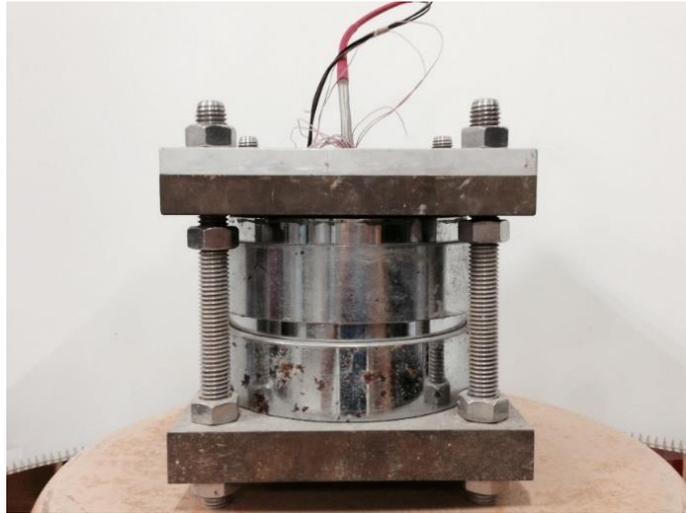


圖 3.28 試驗試體完成組裝組合圖

第四章、小型模擬實驗結果與分析

4.1 小型模擬實驗熱傳量測及數值比較驗證

4.1.1 一維軸對稱溫度分佈驗證

在溫度分佈試驗中，選用 1.4 g/cm^3 乾密度進行溫度分佈試驗，並使用前部分熱傳導所測量之 0.471 W/mK 參數進行分析，而此部分主要目的是建立有限元素熱傳模型於相同實驗狀態下之溫度分佈驗證，因此由圖 4.1 顯示一維軸對稱溫度分佈驗證結果。首先於圖 4.1 中可得知溫度分佈設定之點位與有線元素建模之溫度分佈圖型，埋設的點位主要考量一維軸對稱徑向溫度的傳遞過程，其數據結果取最高溫度而得之此圖，而溫度於 5 hr 後趨於穩定狀態，因此在時間控制上共 10 hr 後結束試驗。最後將圖 4.1 溫度結果繪製成圖 4.2 得知一維軸對稱有限元素分析與實驗之結果相近，顯示使用在有限元素分析上有相當的可信度。

另外針對熱傳導係數隨溫度變化之關係，理論上應將熱源向外之徑向距離之熱傳導係數值隨不同溫度變化而設定不同熱傳導係數值，而較貼近實際之熱傳導試驗變化，但此部分有限元素分析將熱傳導係數設定為定值，由於在分析上將熱傳導係數設定為變數對於後續的溫度結果並沒太大的變化，因此在方便性及分析速度性上選用 1.4 g/cm^3 乾密度與定值 0.471 W/mK 做為此部分驗證之分析參數。

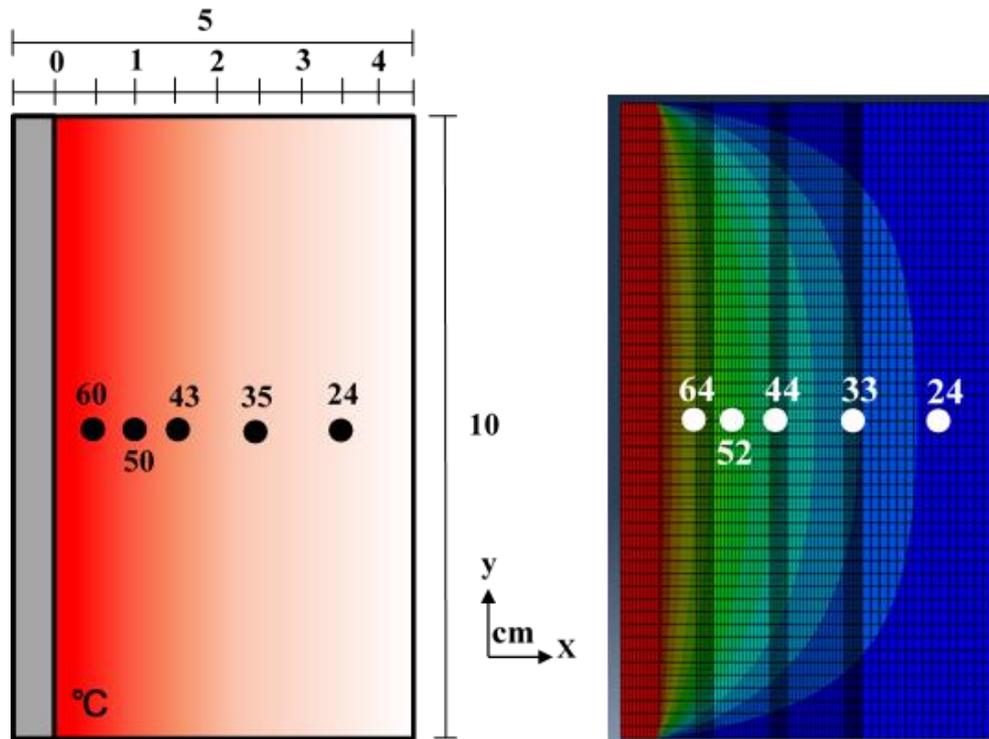


圖 4.1 一維軸對稱溫度分佈分析圖

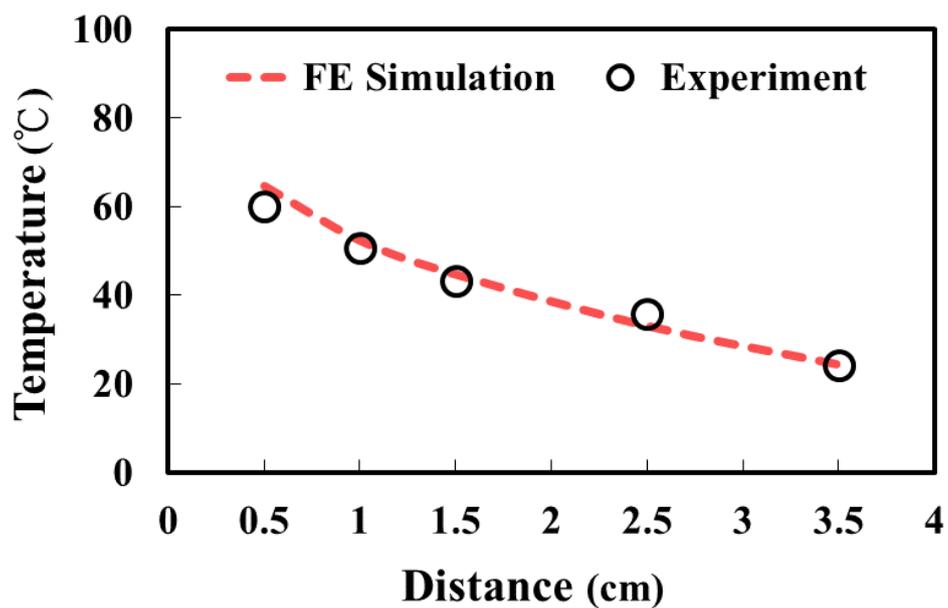


圖 4.2 一維軸對稱溫度分佈驗證圖

4.1.2 二維軸對稱溫度分佈驗證

二維軸對稱溫度分佈設計與一維軸對稱溫度分佈設計最主要不同處為垂直剖面的分析，共佈設 12 條熱電偶感溫線，佈設的位置主要考量為熱探針中心位

置以下進行佈設，如圖 4.3，由圖右側溫度分佈明顯往右下方傳遞，顯示模型所設定之邊界效應造成的影響，其二維軸對稱熱源設定位置下方距離邊界較大，因此影響較小，所以熱方向往影響較小之地方傳遞，而形成此型狀。

再者由圖 4.4 顯示，下方橫坐標為距熱探針之距離；上方橫坐標為熱電偶埋設深度；縱座標為溫度，可知距離熱探針較遠其溫度較低，徑向影響距離約 2 cm 左右，並且熱探針底部影響範圍約 1 cm 左右，溫度分佈實驗部分之徑向距離最高溫與最低溫相差約 37°C；而有限元素模擬相差 35°C，另外對於埋設深度來說，埋設深度 8 cm 較偏離熱探針影響範圍，因此溫度較其他位置溫度低，並最低溫度發生在此位置，最後實驗上溫度分佈與有限元素模擬溫度分佈皆相當接近，因此不論是實驗上或分析模擬上皆具有可信度。

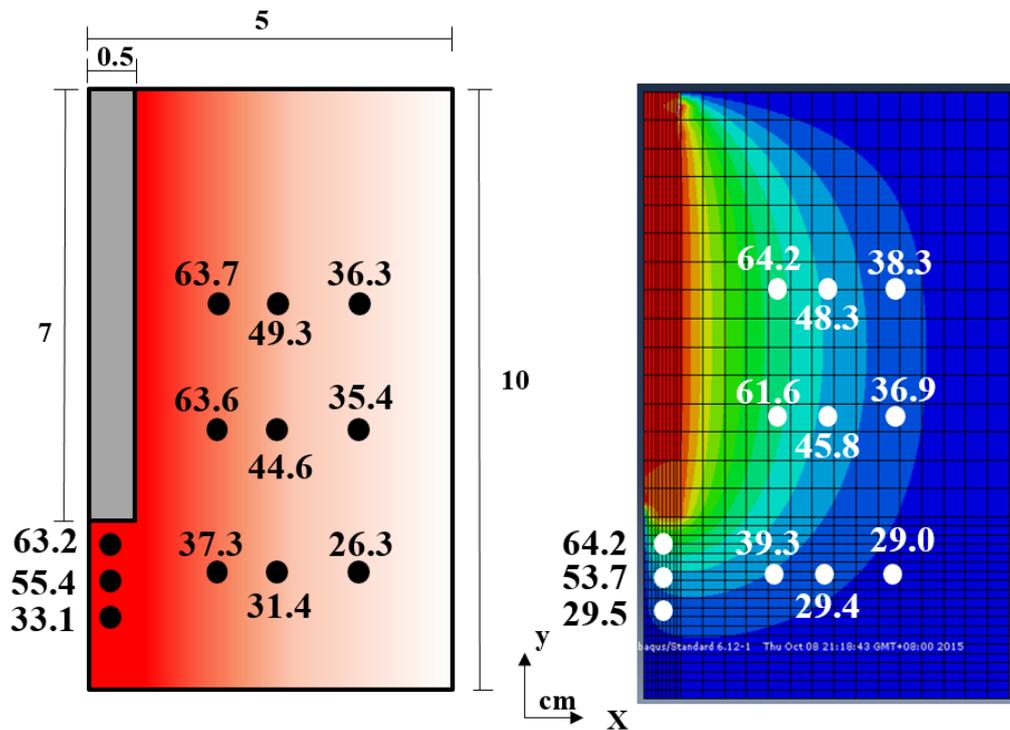


圖 4.3 二維軸對稱溫度分佈分析圖圖

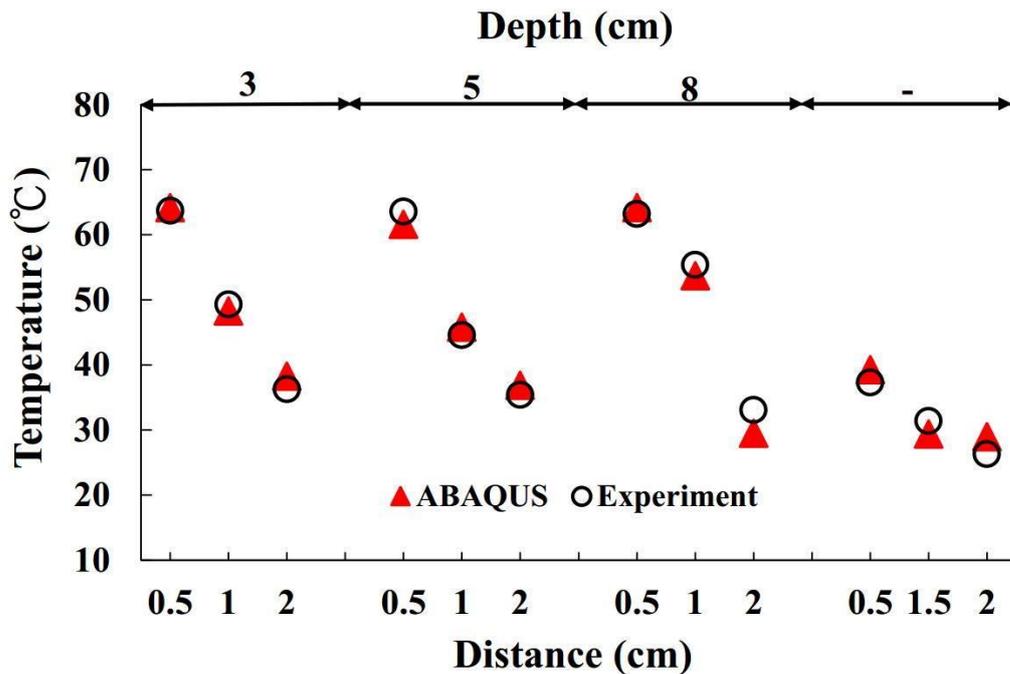


圖 4.4 二維軸對稱溫度分佈驗證圖

4.2 含水量-視介電常數-溫度三相圖建置

圖 4.5 為 14% 與 24% 體積含水量之含水量-視介電常數-溫度三相圖，試驗將 14%、24%、34% 體積含水量之緩衝材料試體由室溫 27°C 開始以 90°C 定溫進行加熱，藉由試體內埋設之熱電偶進行試體內部溫度擷取，紀錄 27°C、40°C、60°C、80°C 時之 TDR 波型，並以上述率定之 t_0 、 L 進行不同溫度及含水量下之 K_a 值計算，彙整而得之。

目前本研究已經完成 14%、24% 體積含水量試體隨溫度改變之 K_a 值的量測，圖 4.6 為視介電常數與溫度關係圖(14%)，同樣的視介電常數為溫度的函數關係，視介電常數隨著溫度上升而增加；而圖 4.7 為視介電常數與溫度關係圖(24%)，可以看出視介電常數也是隨著溫度上升而增加，但其上升趨勢較 14% 體積含水量來得稍慢，而在 60 度以上因為膨潤土之化學性質影響，使得其土壤導電度的快速上升，造成 TDR 波形嚴重平滑化，故無法進行 K_a 測量計算。同理從圖 4.8 可以觀察到，在 34% 體積含水量的部分，其 TDR 波型隨著溫度升高而趨於平緩無起伏，這是因為在高溫下，高含水量的試體導電度上升，導致無法進行 K_a 值的計算，因此本研究將進行 TDR 感測器的改良，企圖以絕緣(coating)方式減緩導電度之影響，以符合高含水量與高溫下之含水量量測需求，以將三相圖建置完全。

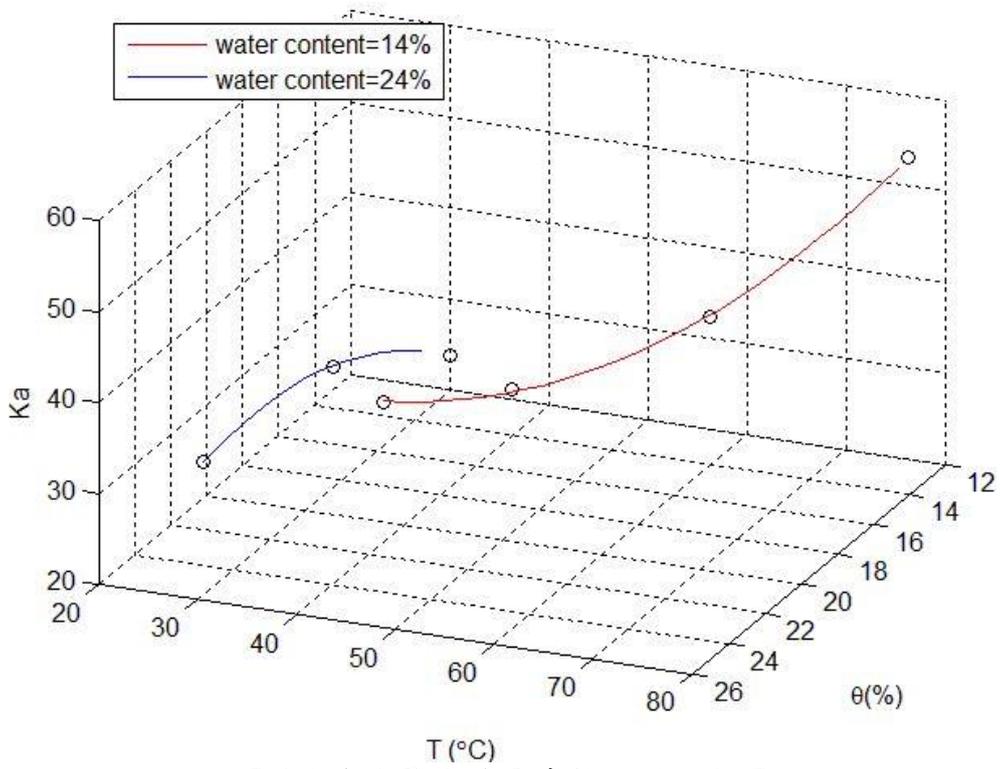


圖 4.5 含水量-視介電常數-溫度三相圖

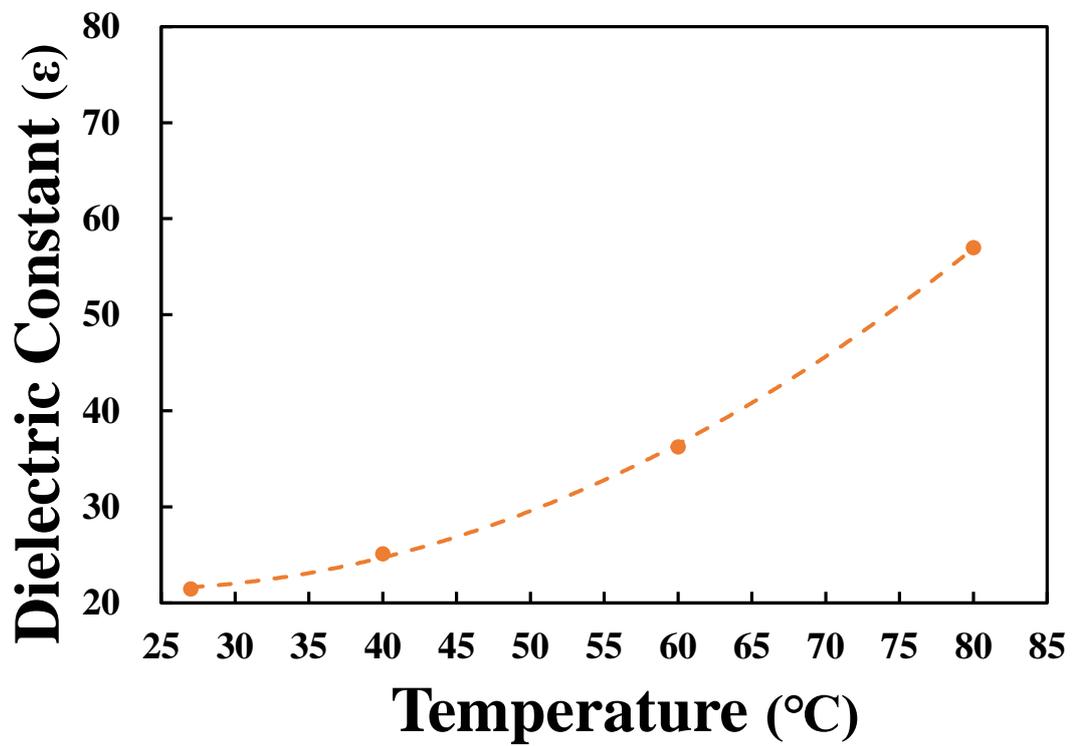


圖 4.6 視介電常數與溫度關係圖(14%)

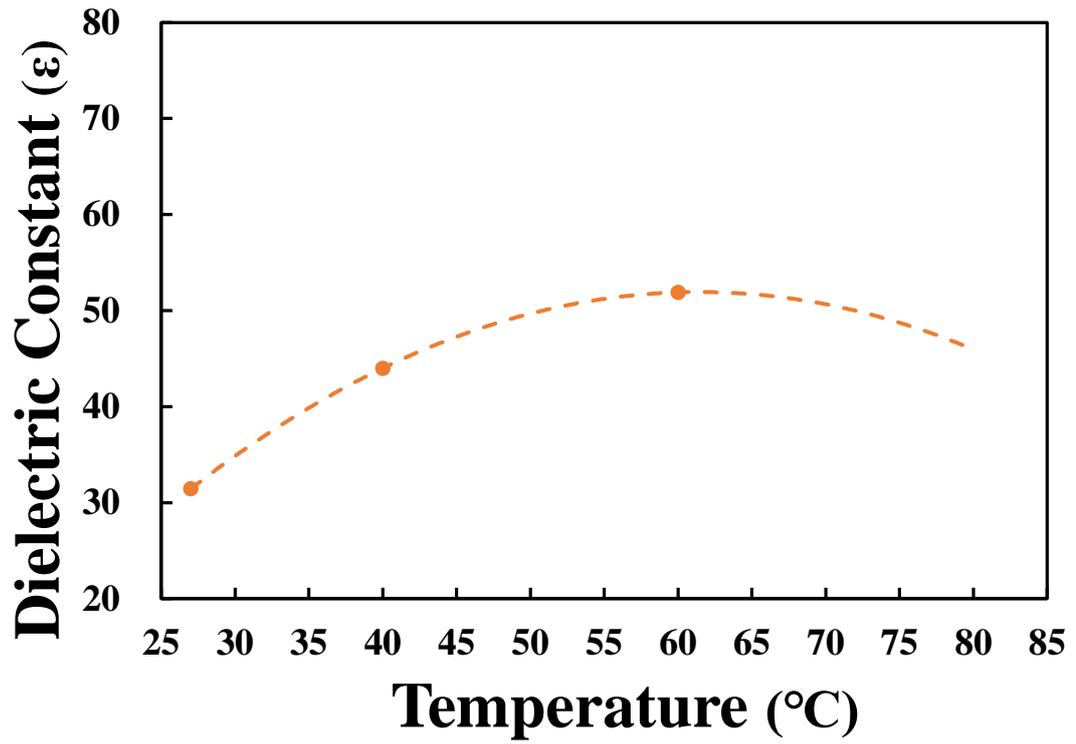


圖 4.7 視介電常數與溫度關係圖(24%)

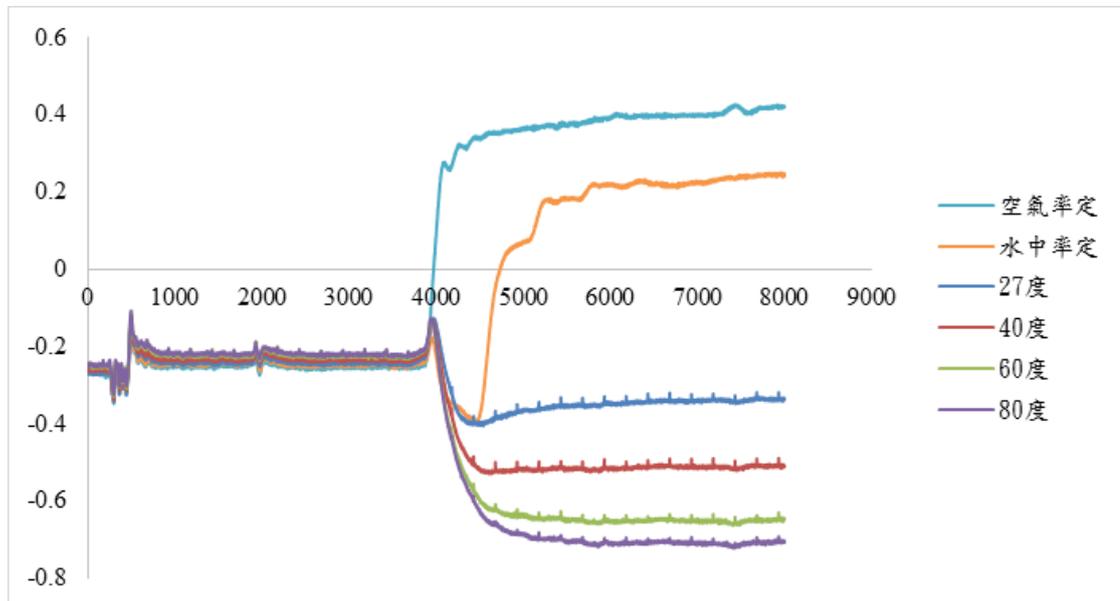


圖 4.8 TDR 波型圖(34%)

4.3 含水量監測與分層含水量歷時計算分析

基於現有 TDR 視介電度與膨潤土含水量關係，圖 4.9 為含水量監測之歷時變化，其中埋設 3 條不同監測感測器深度進行含水量監測，分別為 8、9、10 cm，而試驗示意圖如圖 4.10 右側所示，目的藉由不同長度之 TDR 感測器以監測不同深度之體積含水量歷時變化，由圖 4.9 顯示感測器 8、9 cm 變化相當接近，但感測器 9 cm 於試驗約第 72 hr 後較有明顯增加的現象，而 8 cm 感測器所影響雖有增加的現象，但僅有細微變化，由於試驗時間僅進行 120 hr，並不長久，因此並未提供足夠之時間讓水分由下方往上入侵。

圖 4.9 之試驗目的是為了進而計算膨潤土分層含水量，因此由三條 TDR 感測器可計算出 2 層不同之分層含水量歷時變化，其計算結果如圖 4.10 所示，並其相關配置於圖 4.10 之右側所示。其中圖 4.8 不同於圖 4.10 為所監測之體積大不相同，圖 4.9 其所求之體積含水量為各不同深度感測器所求之體積含水量，即為感測器深度 10 cm 下之體積含水量，以此類推感測器 8 與 9 cm 深度；而圖 4.10 監測之範圍體積僅只有 1 cm 之體積含水量。在計算分層體積含水量之前，由於固定試體體積 772.3 cm^3 與乾密度 1.4 g/cm^3 ，計算飽和時最大體積含水量 V_v 為約 47%，此體積含水量值可作為一界限值，因理論上體積含水量不可超過此定體積條件下之理論值。

而分層含水量計算方式根據第三章之(3-3)、(3-4)式來計算，由圖 4.11 顯示最大體積含水量發生於 9-10 cm 之第 2 層，其含水量為 47.5%，雖超過理論值 0.05%，但由於體積有略為膨脹關係，因此造成大於理論值之現象，因此在第一層之體積含水量變化為 14~47%；而第二層之體積含水量變化範圍為 14~17%，其每層解析度為 1 cm 之距離進行分析皆為合理。

於 120 hr 試驗時間將試驗系統結束後，拆開內部之試體剖面情形如圖 4.11 所示，由此圖可知浸水後之影響距離為圖 4.11 中藍色虛線距底部約為 2-2.5 cm，範圍並不大，但皆在埋設感測器之試驗長度範圍內，而在 10 cm 感測器所測量之體積含水量變化範圍為 14~28.6%，增加了約 14%之體積含水量，且試驗結束經由秤重法得到底層含水量平均為 29.7% (底層為影響最明顯部分而選取)，由於 10 cm 感測器埋設於最接近進水口之最底部位置，因此對於有此變化的現象是合理的，並可推測 9~10 cm 之 1 cm 距離而體積含水量變化較顯著，藉由圖 4.11 可

驗證所得結果為合理現象。

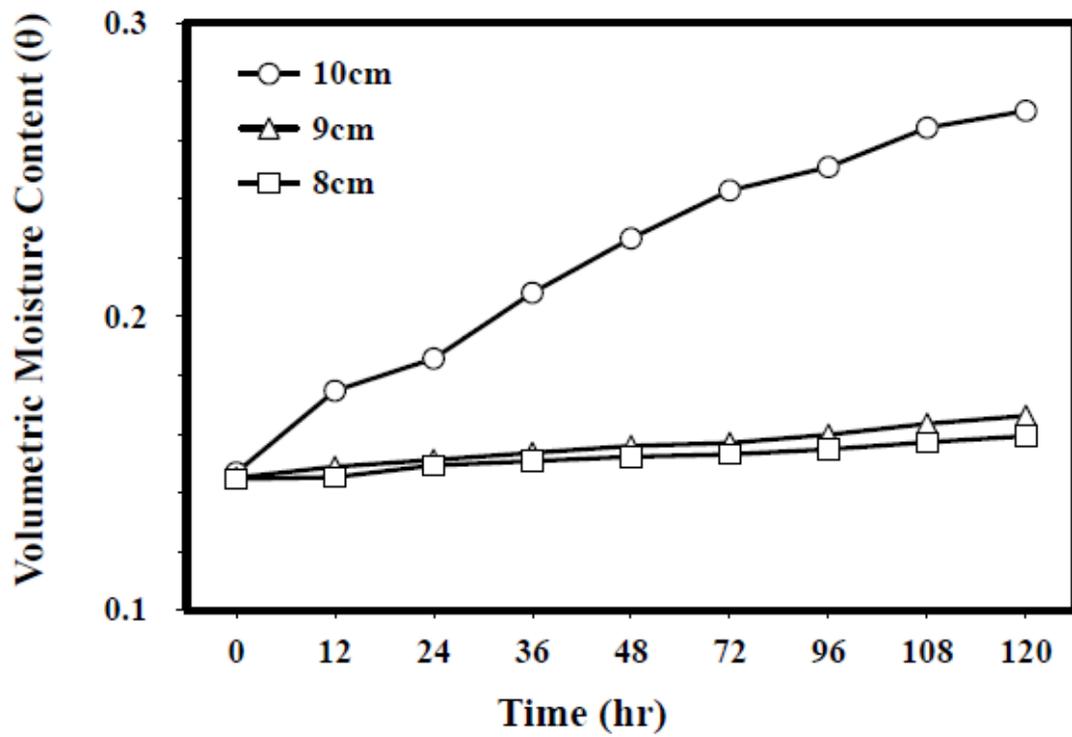


圖 4.9 含水量監測歷時變化

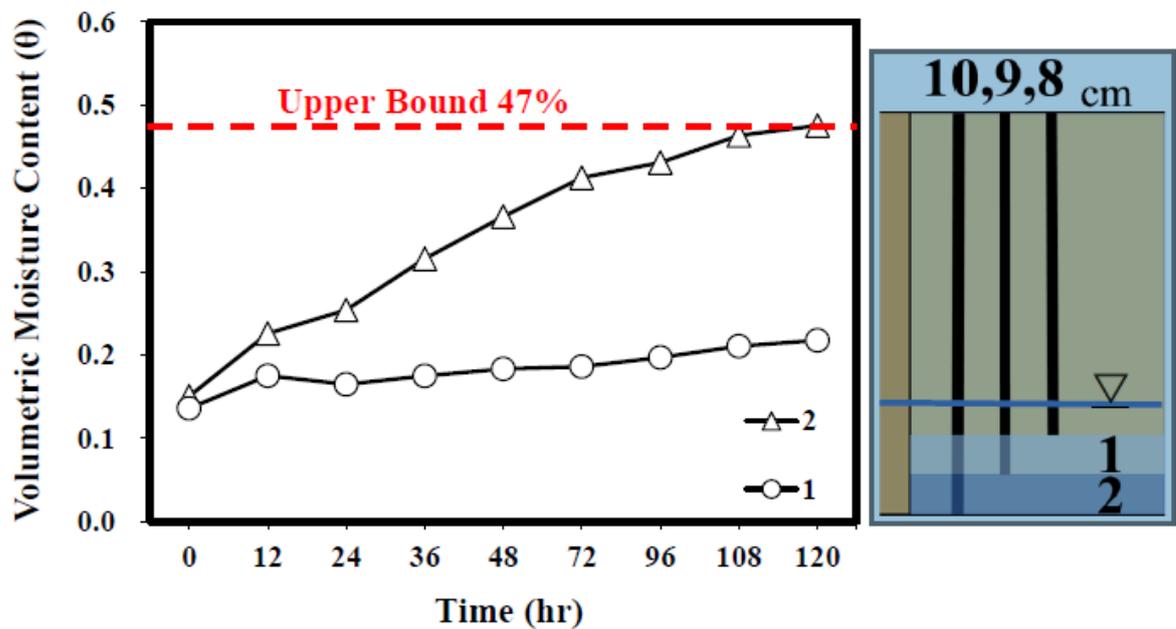


圖 4.10 分層含水量歷時變化

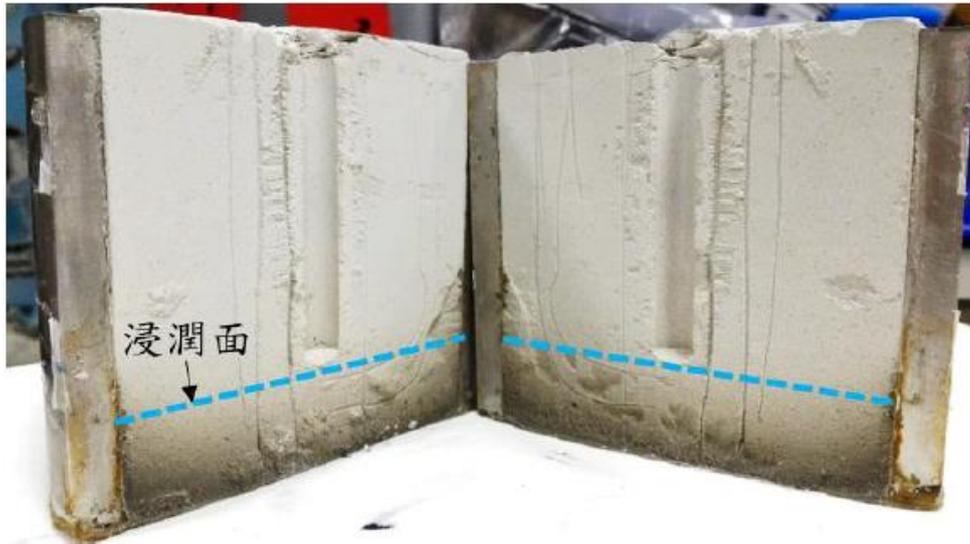


圖 4.11 含水量監測歷時變化

4.4 小型模擬實驗熱-水力耦合效應量測及比對

基於上述研究成果，本計畫嘗試進行緩衝材料 T-H 耦合試驗結果如下，如圖 4.12 為 4 種深度之 TDR 感測器監測體積含水量之歷時變化；而藉由圖 4.12 結果進而計算三層之分層含水量之歷時變化而得圖 4.13 與相關配置示意圖，而整體試驗之相關儀器如 TDR 感測器、熱探針與熱電偶於試體上之配置如圖 4.14 所顯示，最後圖 4.14 顯示 T-H 耦合試驗之溫度分佈歷時變化之結果。對於 T-H 耦合試驗步驟簡述，首先藉由熱探針進行 80°C 加熱 5 hr 其緩衝材料達到穩定之最高溫度後，再進行浸水步驟，試驗時間共為 148 hr 與熱源穩定供應，觀察其溫度分佈與體積含水量之歷時變化，而緩衝材料初始體積含水量為 14 %；初始溫度為 24.9°C；水溫變化介於 26.6-27.2°C。

由圖 4.12 中顯示試體之體積含水量受到溫度之影響相當明顯，由圖中 41 hr 之紅色作為分界前期與 100 hr 之後稱為後期，觀察可知界線之前其含水量變化逐漸喪失，除了 10 cm 感測器接觸底層以外，後續再做說明，其餘感測器所測之體積含水量接隨著時間而下降，顯示前期熱源影響大於浸水之影響，也就是含水量喪失之速度較進水之速度快；而中期介於 41~100 hr 其 7~9 cm 感測器深度所測之體積含水量逐漸上升現象，顯示此階段熱源與進水影響速度差不多；在後期階段上 7~9 cm 感測器之結果皆上升之幅度較大，顯示此階段進水之速度影響較快。10 cm 感測器於前期之後半段雖有下降的現象，但整體曲線皆為上升之趨勢，顯示試體底層持續受進水之影響，但亦受熱源影響而含水量有些微下降之現

象。

圖 4.13 所示 T-H 耦合試驗進行 148 hr 完成後；拆開模具取出試體，所攝得的試體斷面照片圖中所標示之藍色虛曲線，在這藍色虛曲線之浸潤面為開始浸水至試驗結束所影響之區域，比較圖 4.11 之虛線浸潤面，可明顯觀察出圖 4.13 熱源影響之範圍造成試體底部浸潤面的改變，也就是 T-H 耦合所造成之結果。再者進行圖 4.11 分層體積含水量計算，其結果顯示第 3 層之底層最高體積含水量為 47.9%，而試體經試驗結束後進行重量含水量試驗得出平均為 35.14%，換算體積含水量為 49.2%，而第一層與第二層之最大體積含水量分別為 21.0、22.7%，且三層含水量皆約於第 120 hr 後趨於平緩上升，但如前者所提，由於熱作用所產生不同於只有單純垂直 Y 方向浸水影響之浸潤面，而造成分層含水量不均的問題，推測其原因為設計上熱探針的影響方向為水平直徑方向向外影響，進水方向為垂直方向上影響，因此方向上的不同造成分層含水量之每層水平方向含水量非均勻而影響計算上之準確性。

T-H 耦合試驗溫度的量測結果如圖 4.15 所示，其未浸水之第 5 hr 溫度達到最高溫為 55.2°C，此溫度發生位置為 38 號位置於試體中央高度位置，而相同時間點與垂直剖面之 33 與 7 號位置最高溫度分別為 50.3 及 35.4°C，推測試驗熱感測器之熱作用接近點熱源的方式進行影響，並於 5 小時浸水後其溫度開始受到水影響而下降，其中以 3、4、7 號位置下降幅度最大，因這 3 點位置最接近浸水面，其次是下降幅度為 8、32、33 與 36、37、38 位置，其中最低溫發生於 3 號位置，因這點位受到熱影響最少且最接近浸水面，其溫度平均約為 26.7°C。

另外針對熱-水耦合試驗，由於本研究尚未完全掌握緩衝材料於不同含水量狀態受溫度影響之介電常數關係，因此在計算介電常數中尚未對溫度進行修正，建議爾後在耦合試驗之介電常數計算時，必須先完整建立考慮相關因素。而由圖 4.16(a) 為緩衝材料試體浸潤面與溫度分佈相互影響之示意圖，由圖可顯示浸潤面的變化與溫度分佈之關係，並可明顯看出熱源影響方向與進水方向上的不同所造成之結果，其中圖 4.16(a)之溫度分佈可明顯觀察出進水影響區域溫度偏低，其藍色溫度分布面積與試驗結果之浸潤面底下面積完全貼合，顯示試驗結果的一致性，並且比較有限元素熱傳一維軸對稱試驗之溫度分佈曲線圖 4.16(b)，其耦合溫度分佈曲線與單純熱傳溫度分佈曲線相似，其原因最主要差異為進水的因素造成

溫度下降，因此耦合試驗之熱源影響能改變不同之浸潤面，而後續試驗必須更進一步探討，所以在此建議兩項重要議題，首先現階段試驗模型由於熱探針配置與浸水方向不一致，熱探針之熱能所影響的方向為直徑方向；而進水之方向為垂直方向，因此造成 T-H 耦合議題較為複雜，藉此建議修改探針埋設位置，將熱能影響方向與進水方向一致化，其計算分層含水量較為準確；再者針對 TDR 介電常數溫度之校正部分，由於介電常數受到含水量與溫度之交互影響，目前試驗階段溫度校正能力尚未建立完善，只得出單一較低含水量狀態之溫度影響曲線，未建立較高或多種含水量之溫度影響曲線，因此本研究無針對溫度進行校正，後續可將此部分作為研究要點，掌握重要膨潤土材料參數。

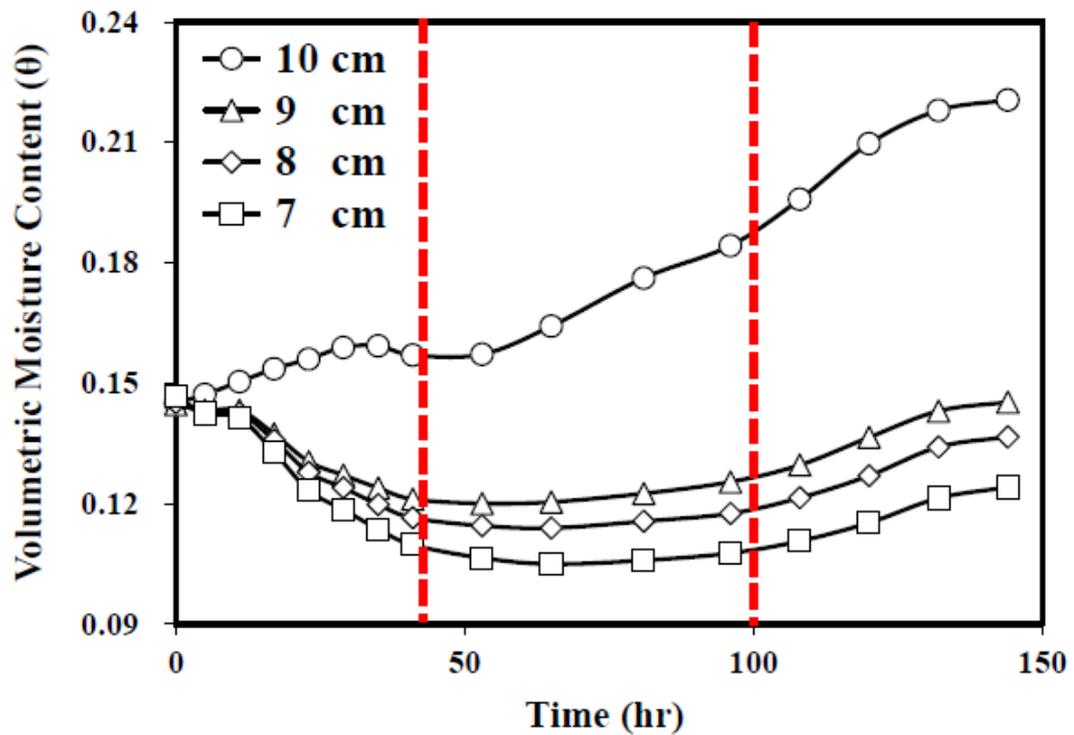


圖 4.12 不同 TDR 感測器深度之含水量歷時變化

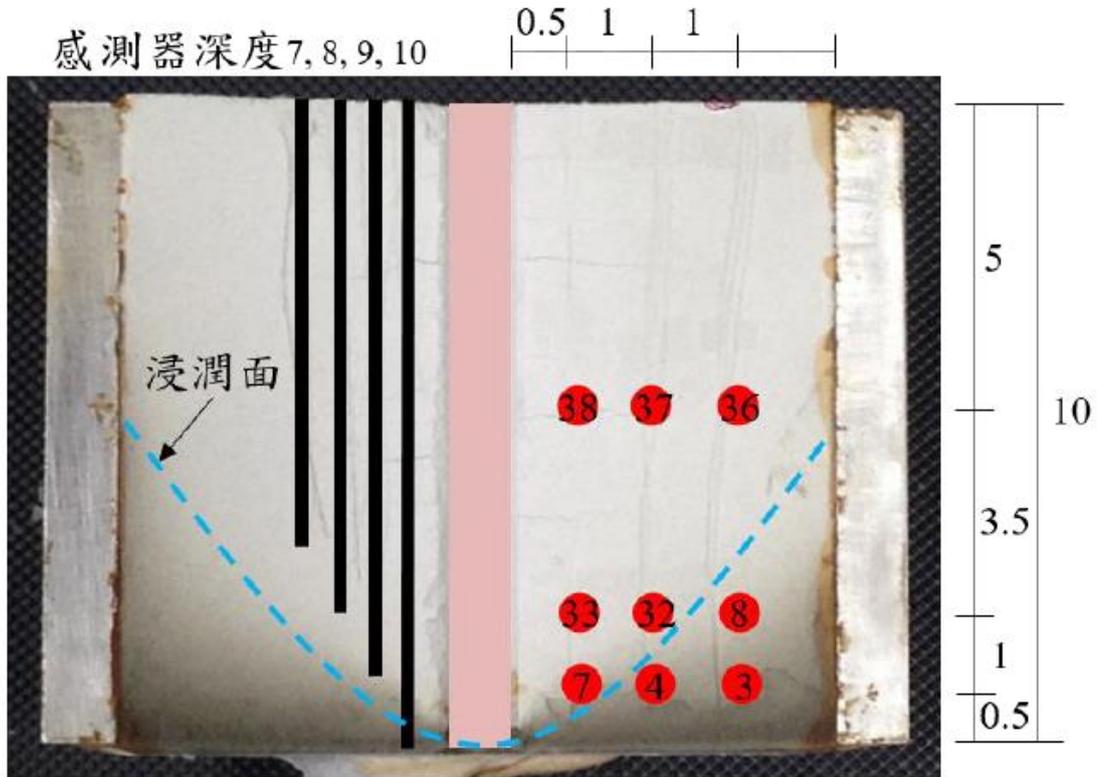


圖 4.13 T-H 耦合試體內部配置與進水痕跡

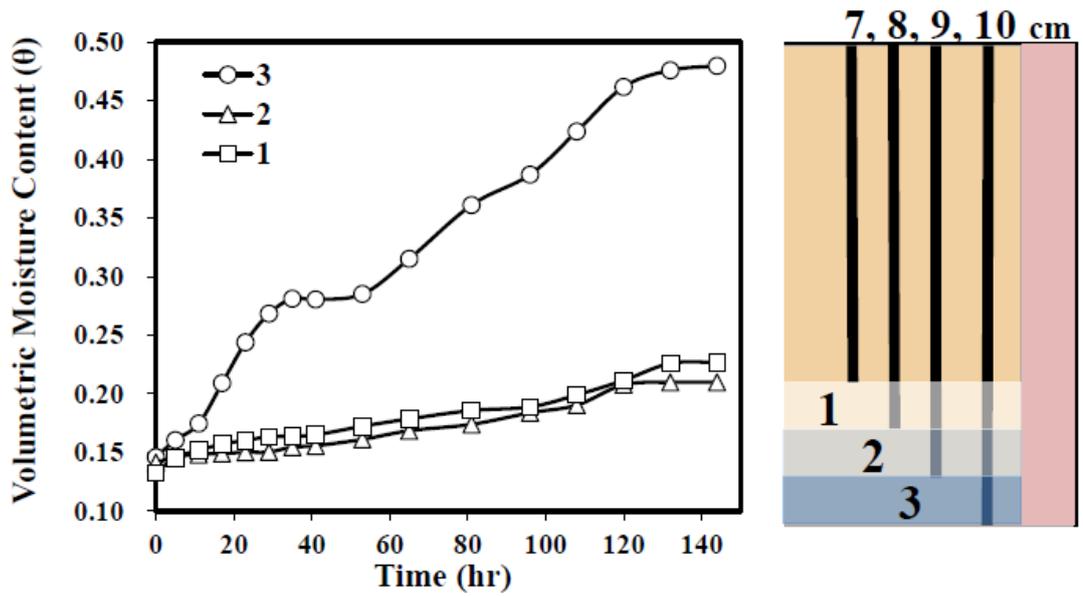


圖 4.14 T-H 耦合之分層含水量歷時變化

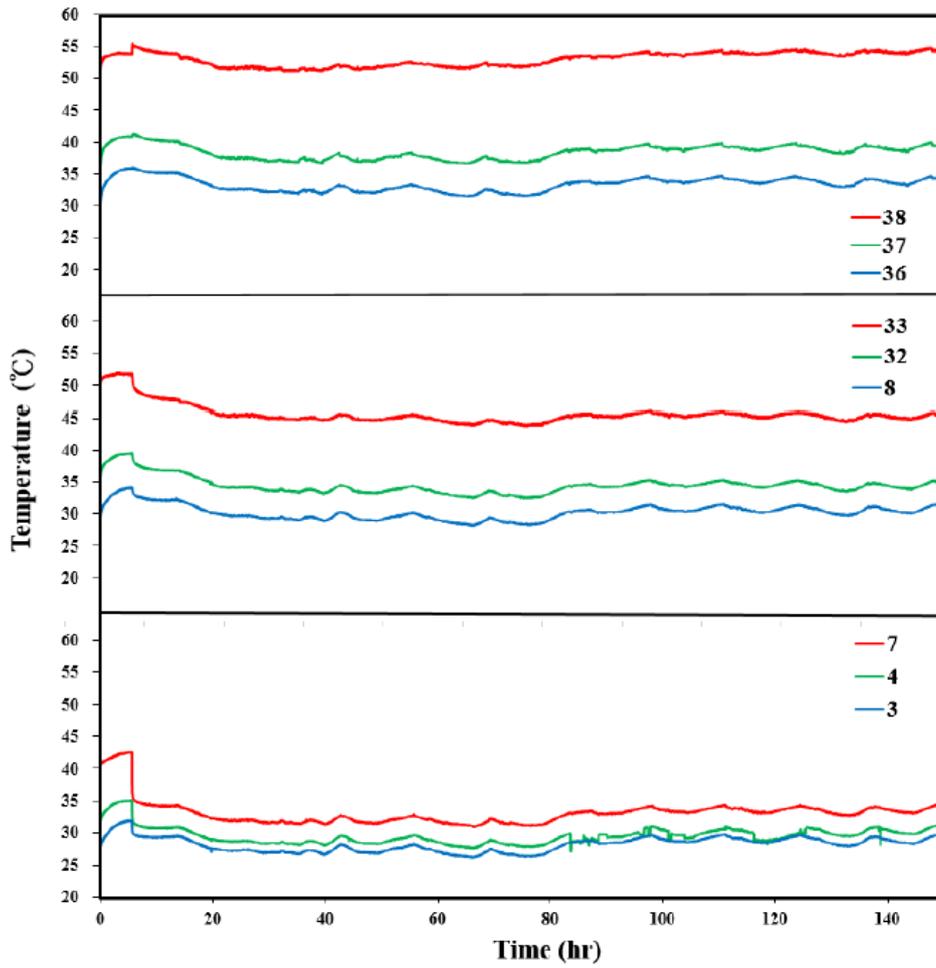
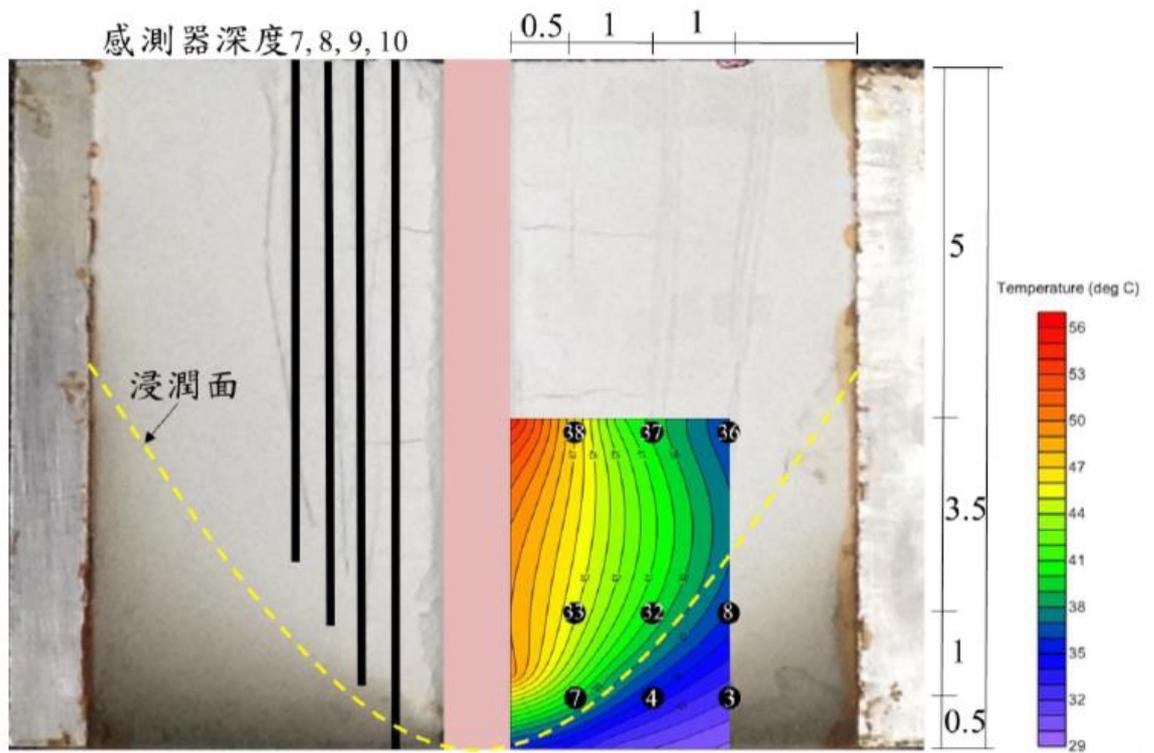
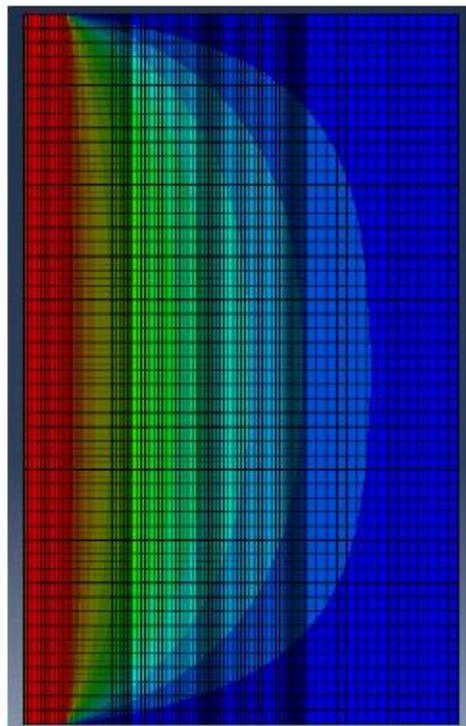


圖 4.15 T-H 耦合試驗溫度分佈影響歷時變化



(a) 耦合試驗浸潤面與溫度分佈關係



(b) 單一有限元素熱傳試驗

圖 4.16 單一熱傳與耦合試驗之溫度分佈

第五章、有限元素分析

5.1 分析工具

本研究使用目前於工程上廣泛使用的有限元素分析軟體 ABAQUS/CAE 進行模擬，ABAQUS/CAE 是將分析模組整合成一個全 ABAQUS 的環境，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

在進行處置場之模擬分析時，因為廢棄物罐彼此間的排列方式具有規則性及對稱性，且在對稱面上沒有熱量流動，溫度梯度視為零，以長向距離之熱傳對稱面為例(圖 5.1)，因此可利用對稱面，將處置場內部截取出代表體積單元 (representative volume unit) (圖 5.2)進行分析。

處置場內有許多相互平行的隧道，隧道與隧道間之距離稱為長向距離；沿著隧道每隔一固定的距離埋置一個廢棄物罐稱為短向距。

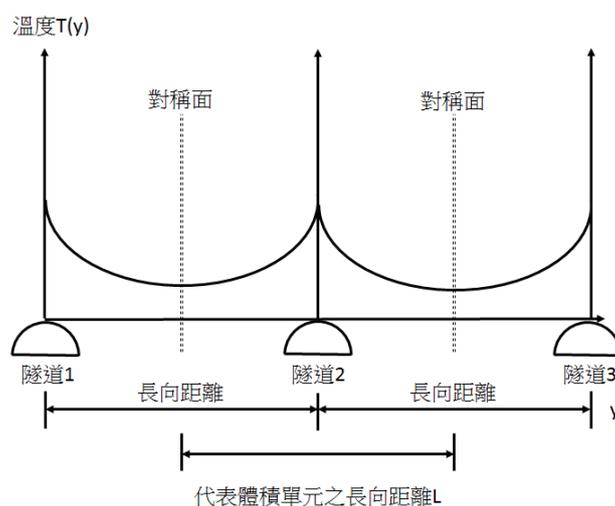


圖 5.1 長向距離之熱傳對稱面示意圖

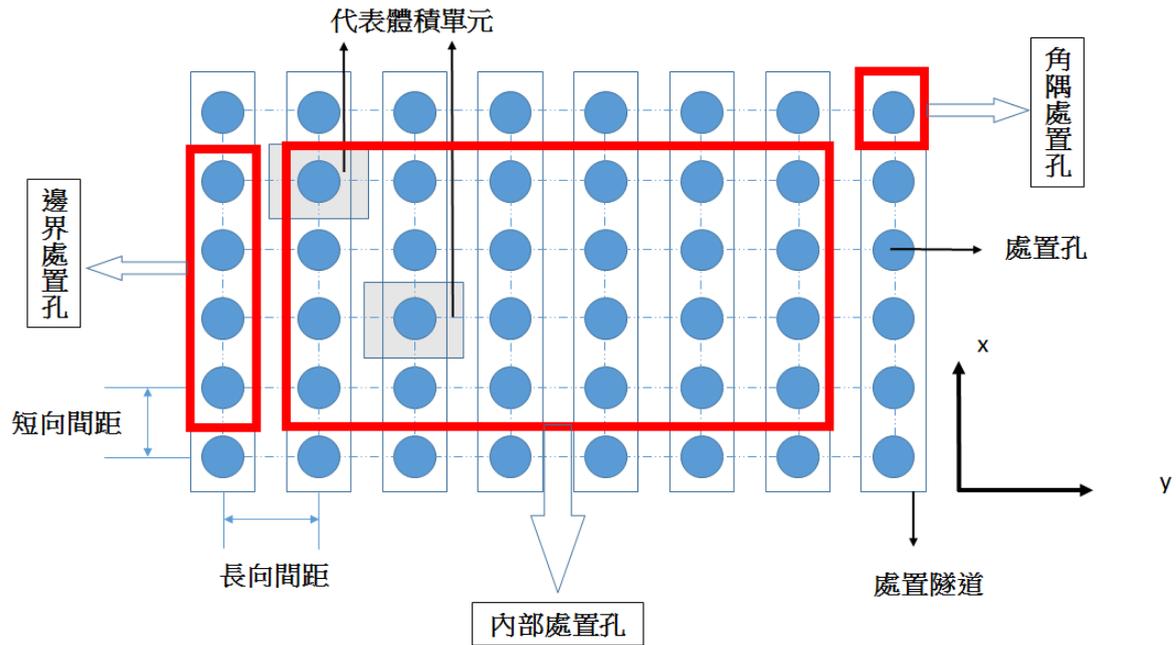


圖 5.2 處置場內部之代表體積單元示意圖(俯視圖)

5.3 完全耦合熱-水-力學分析

於分析處置場問題時，假設處置場受廢棄物罐產生的高溫作用，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 點之步驟敘述。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)，並以廢棄物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 5.3 所示。

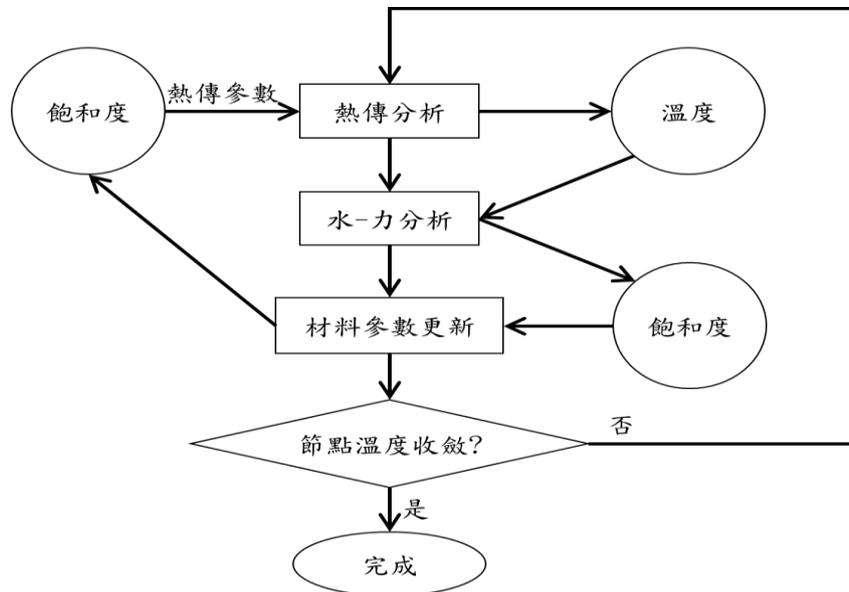


圖 5.3 完全耦合熱-力學分析流程圖

第六章、完全耦合日本 JNC-H12 報告驗證

6.1 前言

根據日本 H12(JNC)於 2000 年所提出深層地質處置模型進行分析[41]。一般核廢棄物地下處置場若長期處於在高溫的環境下，可能會對處置場之安全性造成不良的影響，所以處置場的溫度分析結果須符合各國對溫度之限制(文獻[41]規定為處置場溫度不超過 100°C)，避免工程障壁系統材料的變質、地下水的滲流速提高等不良的影響。本章節將針對處置場再飽和前的狀態下進行分析，因此建立此模型並利用完全耦合熱-水-力學分析。為確認本研究所建立之數值模型之適用性以及可靠度，本章將與文獻[41]進行驗證。本章節共四小節，6.1 前言；6.2 熱傳分析驗證；6.3 熱-水-力學分析驗證；6.4 日本 JNC 與瑞典 SKB 的差異

6.2 熱傳分析

先進行初始熱傳分析，將依據文獻的設定建立幾何模型與網格，並輸入各別的材料參數、邊界條件、初始條件等進行分析，並將得到之熱傳分析結果(溫度)與文獻進行對照。

6.2.1 熱傳分析網格設置與建立幾何模型

在建立幾何模型上，由於文獻[41]中提到處置場深度為 1000m(圖 6.1)，並由於處置場中處置孔分布其本身有軸對稱之特性，在此則採用二維軸對稱之網格模型來進行分析，以左側為對稱軸(圖 6.2)，模型高度為 60 公尺，徑向距離為 4 公尺；其中高放射性廢棄物半徑為 0.22 公尺，高度 1.35 公尺；外包件半徑 0.41 公尺，高度 1.73 公尺；緩衝材料半徑 1.11 公尺，高度 4.13 公尺。在元素形式採用的是 8 個節點的軸對稱熱傳分析 DCAX8。

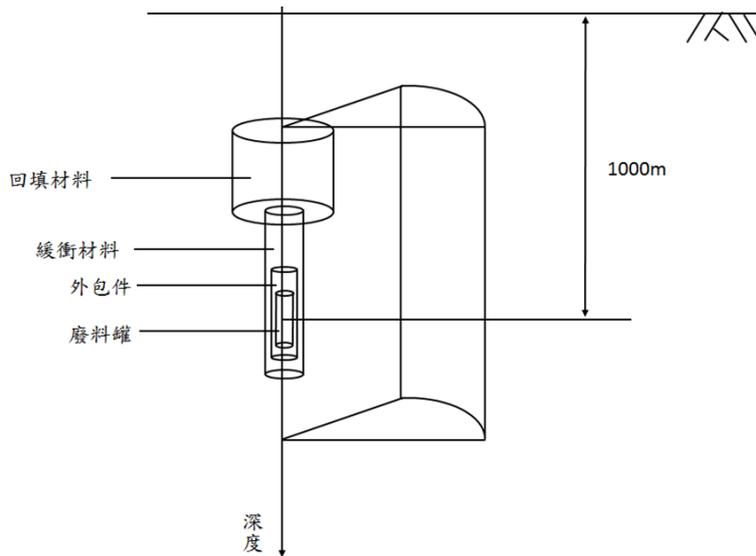


圖 6.1 完全耦合熱-力學分析流程圖

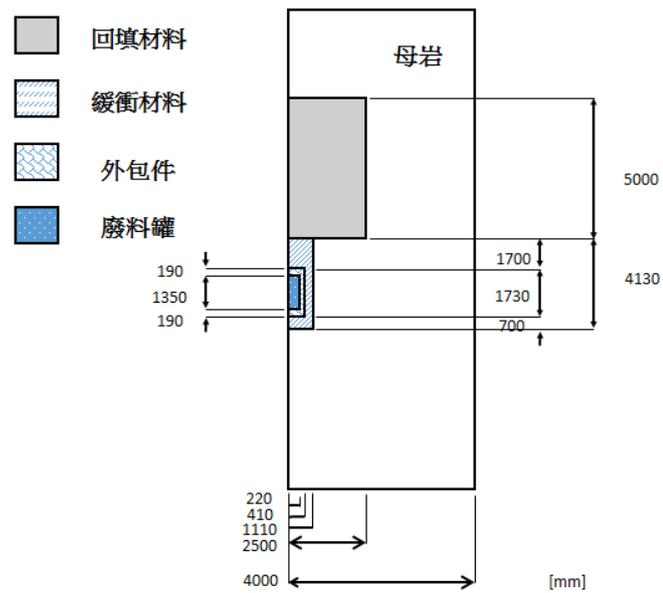


圖 6.2 處置場以左側為軸對稱的模型示意圖

6.2.2 熱傳分析材料參數之介紹

熱傳模型分析之模型由高放射性廢棄物、外包件、緩衝材料、回填材料以及母岩所組成，茲將各材料的參數列於表 6.1。

表 6.1 熱傳分析所需材料參數

材料性質	材料種類				
	廢棄物	外包件	緩衝材料	回填材料	母岩
密度 (kg/m ³)	2800	7800	1600	1800	2670
熱傳導係數 (W/m-K)	1.2	53	0.783	1.027	2.8
比熱 (J/kg-K)	960	460	590	690	1000

6.2.3 初始條件與邊界條件

由於文獻中提到處置場深度為地表下 1000 公尺，故在設定初始溫度上以地溫梯度來設定，以地表為 15°C 每下降 100 公尺上升 3°C 估算則高放射性廢棄物中心為 45°C，並於模型上下邊界設置對流係數 $f=0.04$ W/m-K，此對流係數係比較全域模型與局部模型之熱傳分析結果後所推得之適當模擬值，如圖 6.3，此對流係數僅為模擬全域模型之假設。此外單一高放射性廢棄物所產生之熱源強度為 350W，並利用體積求得單位體積的熱源強度為 $350W \div (0.22^2 \times \pi \times 1.35)m^3 = 1705.06$ W/m³，並使用文獻提供之熱衰變函數如圖 6.4，進行分析。

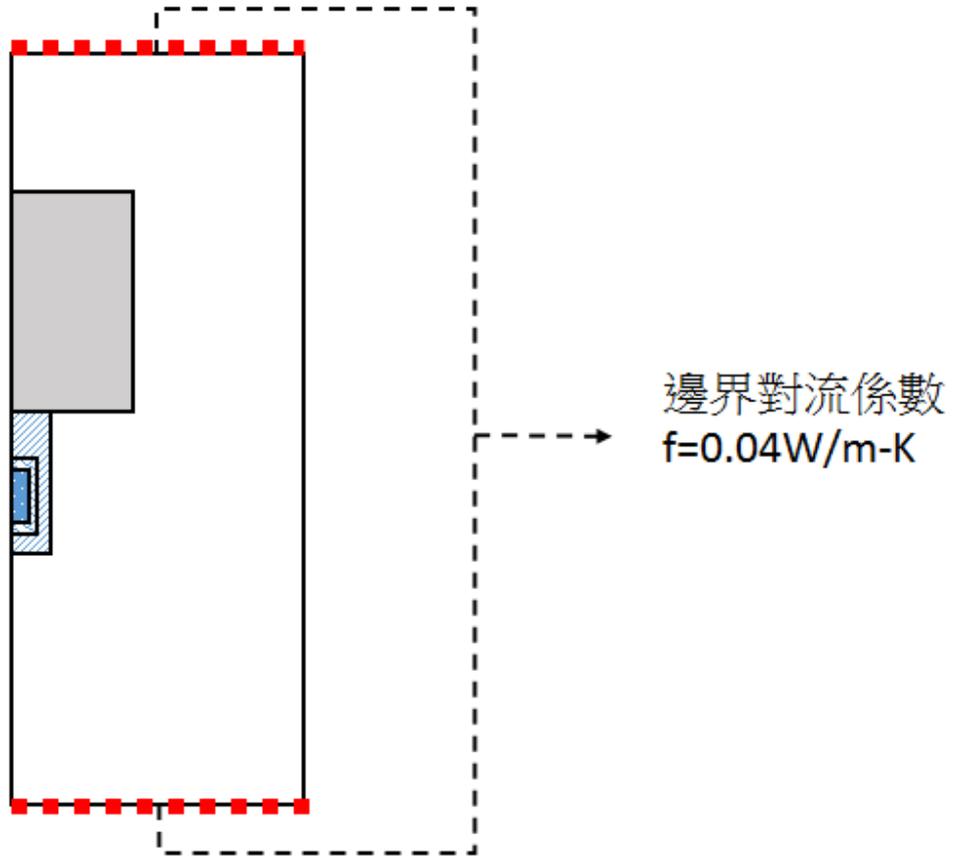


圖 6.3 邊界對流係數設置示意圖

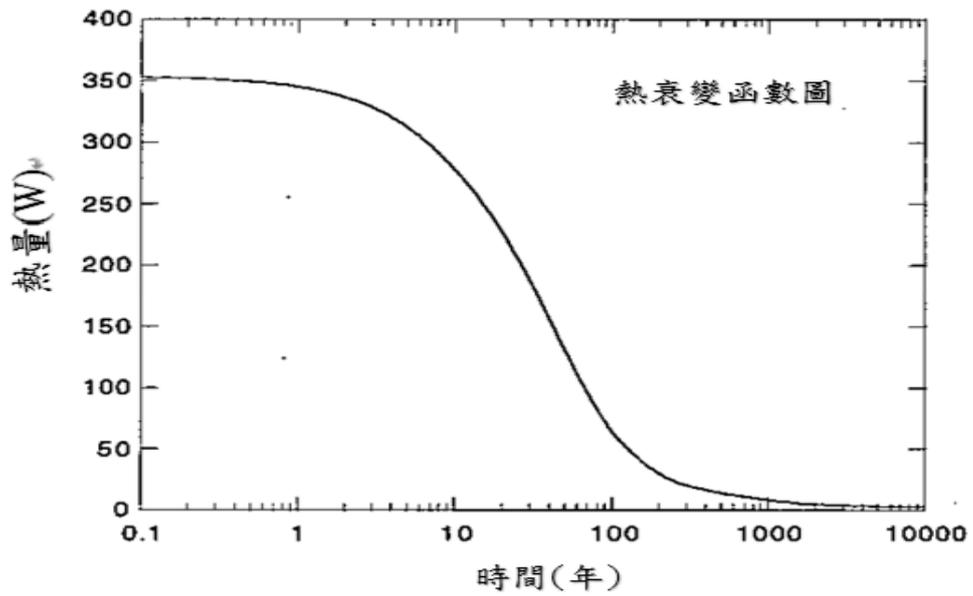


圖 6.4 熱衰減率隨時間變化之趨勢

6.2.4 熱傳分析結果驗證

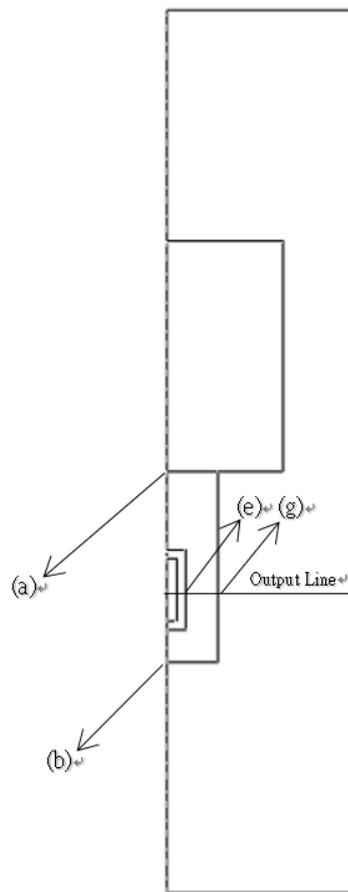


圖 6.5 模型之位置點

在熱傳分析結果中我們比較其點(e)、點(g)、點(b)、點(a)之最高溫發生時間、最高溫與文獻作為驗證，並列表於表 6.2、圖 6.6、6.7。

表 6.2 熱傳分析之結果驗證

文獻	Point-e	Point-g	Point-b	Point-a
最高溫時間(Year)	17	40	17	50
最高溫(°C)	97	83	96	78
本文	Point-e	Point-g	Point-b	Point-a
最高溫時間(Year)	18	40	18	52
最高溫(°C)	97.72	83.09	96.82	81.72

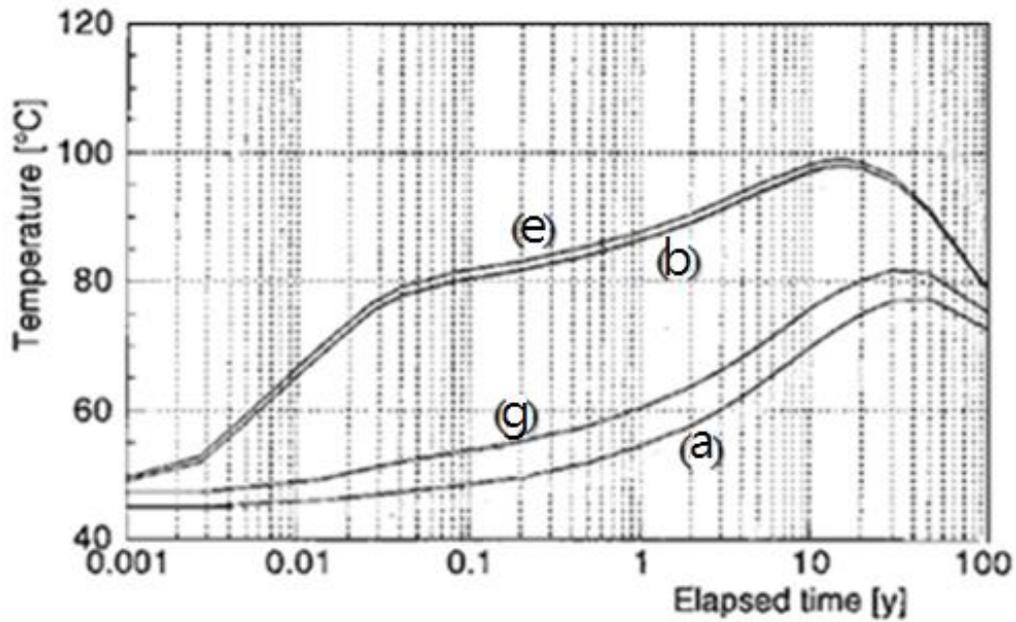


圖 6.6 文獻溫度歷時圖

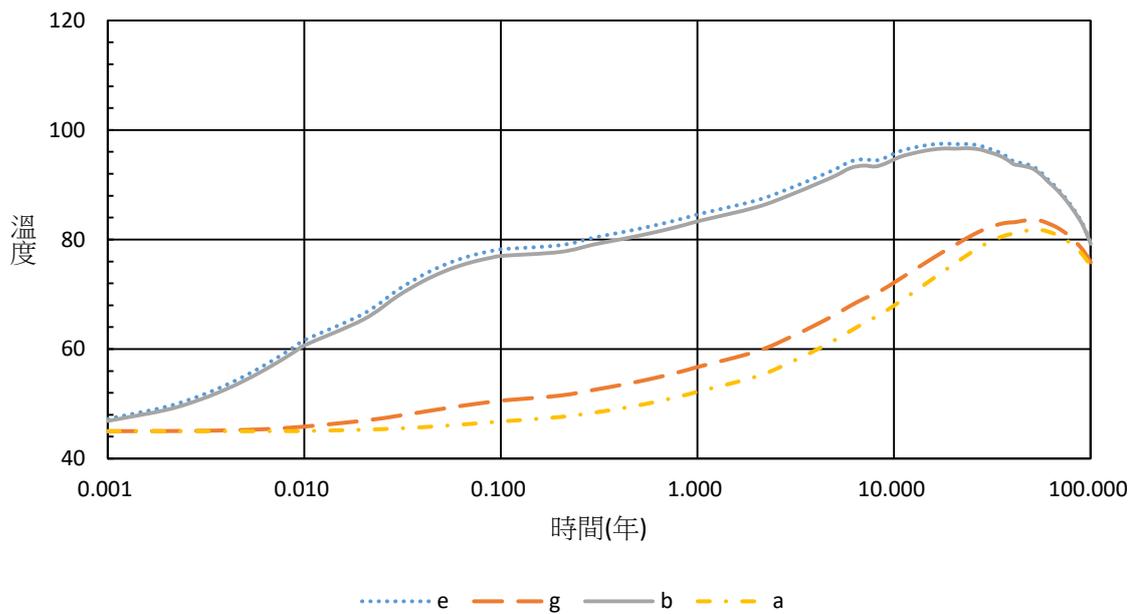


圖 6.7 本文溫度歷時圖

6.3 熱-水-力學分析

以熱傳分析結果做為熱-水-力學分析的熱載重，接續進行水-力學分析。
將與文獻的水孔隙壓力、含水量作為比較。

6.3.1 水-力學網格設置與建立幾何模型

在水力學分析上所採用的模型與網格設置，與熱傳分析使用的模型相同，

只有元素型式不同，在分析上緩衝材料、回填材料、母岩為 8 個節點軸對稱力學及孔隙壓力元素 CAX8P，而高放射性廢棄物、外包件部分，由於文獻中提到這兩種材料為不透水所以採用 8 個節點軸對稱力學元素 CAX8。

6.3.2 水-力學分析材料參數之介紹

文獻提供之水-力學分析之模型由高放射性廢棄物、外包件、緩衝材料、回填材料以及母岩所組成，其各材料所需之參數列於表 6.3、表 6.4。文獻提供的回填材料、母岩、緩衝材料的含水量與吸附曲線關係圖分別為圖 6.8、圖 6.9、圖 6.10 並經換算成之飽和度與孔隙水壓關係列於表 6.6、表 6.7(表 6.6 是適用在 Case1-1 與 Case1-2，表格 6.7 是適用在 Case2)，文獻[41]提供的緩衝材料的水頭高與含水量無法有相近的結果，所以由文獻[41]延伸提供的原始文獻[44]找出圖 6.10 與關係式(6.1)，才可以得到較符合的結果

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \{1 + |\alpha' \psi|^{n'}\}^{-\left(1 - \frac{1}{n'}\right)} \quad (6.1)$$

S_e =飽和度， $\alpha' = 8 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$ ， $n' = 1.6$ ， $\theta_r = 0$ ， $\theta_s = 0.403$ ， θ = 含水量

表 6.3 水-力學模型分析之各材料參數

材料性質	材料種類				
	廢棄物	外包件	緩衝材料	回填材料	母岩
密度 (kg/m ³)	2800	7800	1600	1400	2650
楊氏模數E (Pa)	8.2×10 ⁷	2×10 ⁸	5×10 ⁵	3×10 ³	3.7×10 ⁷
水力傳導係數 (m/s)	----	----	表 6.4	9.8×10 ⁻¹²	1.6×10 ⁻⁸
波松比	0.3	0.3	0.3	0.4	0.25
線膨脹係數 (1/°C)	1×10 ⁻⁶	1.64×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁶	1×10 ⁻⁶	1×10 ⁻⁶

表 6.4 緩衝材料溫度增量與水力傳導係數關係

使用溫度增量	
水力傳導係數(m/s)	temperture
3.29×10 ⁻¹³	-25
5.976×10 ⁻¹³	-5
8.358×10 ⁻¹³	-15
1.098×10 ⁻¹²	35
1.38×10 ⁻¹²	55

表 6.5 文獻案例

	Case1-1	Case1-2	Case2
母岩邊界初始孔隙水壓(kpa)	0	0	10000
母岩水力傳導係數(m/s)	1.6×10-8	1.6×10-13	1.6×10-8

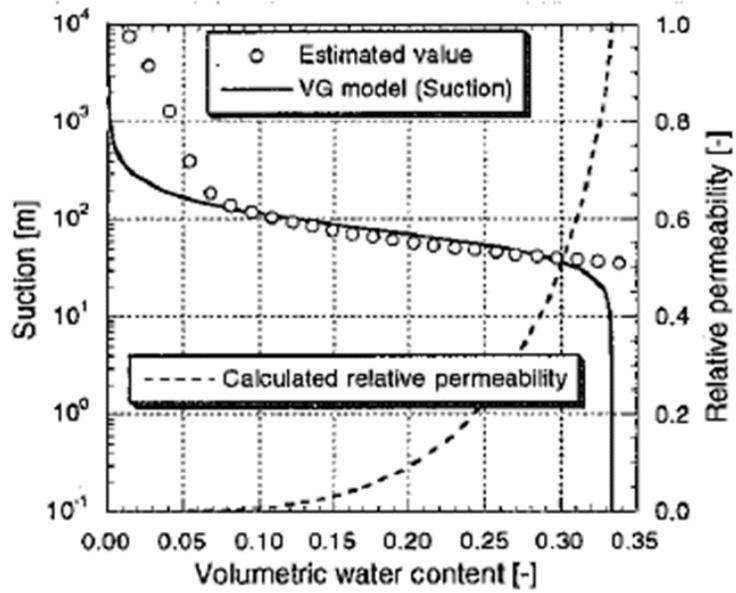


圖 6.8 回填材含水量與吸附曲線關係[41]

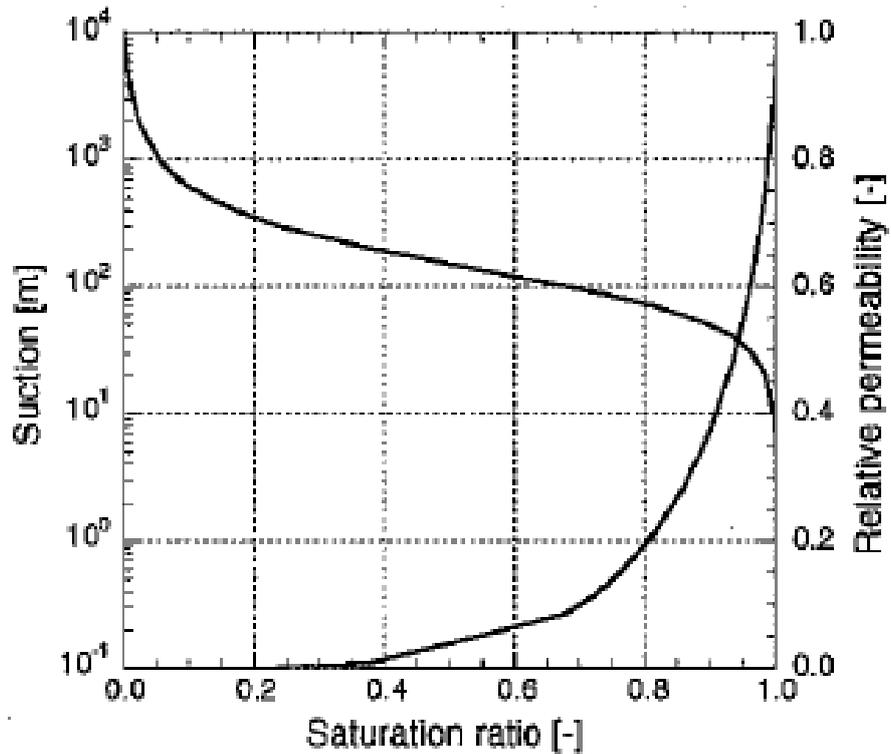


圖 6.9 母岩含水量吸附曲線關係[41]

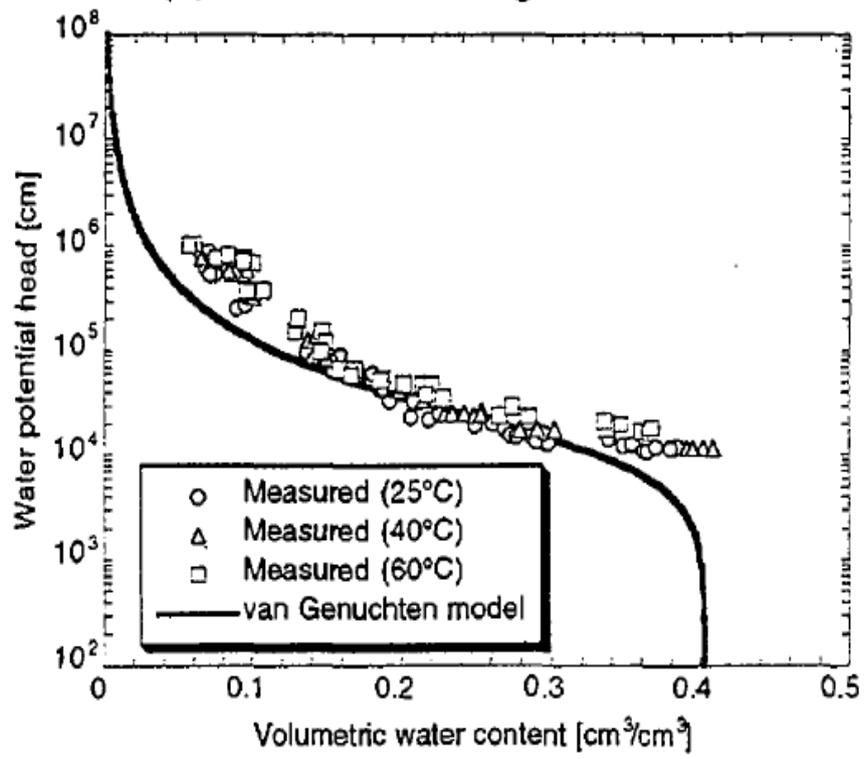


圖 6.10 緩衝材料含水量與水頭高關係[44]

表 6.6 各材料飽和度對應之孔隙水壓(case1-1、case1-2)

回填材料		緩衝材料		母岩	
孔隙水壓	飽和度	孔隙壓力	飽和度	孔隙壓力	飽和度
-5886	0.012334	-981000	0.018119	-44100	0.01
-4905	0.01775	-882900	0.019302	-23500	0.02
-3924	0.027692	-784800	0.020715	-17200	0.03
-2943	0.049025	-196200	0.047586	-14700	0.04
-1962	0.10845	-98100	0.072111	-11800	0.05
-1471.5	0.186755	-88290	0.076812	-5880	0.1
-1226.25	0.258883	-68670	0.089295	-3430	0.2
-981	0.373836	-58860	0.097932	-2550	0.3
-882.9	0.437104	-49050	0.109224	-1810	0.4
-784.8	0.512197	-39240	0.124817	-1470	0.5
-686.7	0.598893	-29430	0.148207	-1180	0.6
-588.6	0.694177	-19620	0.18863	-971	0.7
-490.5	0.790847	-14715	0.223596	-736	0.8
-392.4	0.877764	-9810	0.283402	-490	0.9
-294.3	0.943518	-8829	0.301178	-333	0.95
-196.2	0.982396	-7848	0.322214	-245	0.975
-98.1	0.997756	-5886	0.378903	-157	0.9875
0	1	-4905	0.418737	-98	0.99375
		-3924	0.471379	0	1
		-2943	0.544503		
		-2452.5	0.592861		
		-2207.25	0.621088		
		-1962	0.652569		
		-1471.5	0.727165		
		-1226.25	0.771105		
		-981	0.819607		
		-882.9	0.840144		
		-784.8	0.861178		
		-686.7	0.882533		
		-588.6	0.903952		
		-490.5	0.925072		
		-392.4	0.945397		
		-294.3	0.964253		
		-196.2	0.980721		
		-98.1	0.993487		
		0	1		

表 6.7 各材料飽和度對應之孔隙水壓(case2)

回填材料		緩衝材料		母岩	
孔隙水壓	飽和度	孔隙壓力	飽和度	孔隙壓力	飽和度
-3920	0.03	-1000000	0.018119	-44100	0.01
-2940	0.06	-900000	0.019302	-23500	0.02
-2160	0.09	-800000	0.020715	-17200	0.03
-1570	0.152	-200000	0.047586	-14700	0.04
-1130	0.303	-100000	0.072111	-11800	0.05
-981	0.379	-90000	0.076812	-5880	0.1
-883	0.455	-70000	0.089295	-3430	0.2
-785	0.53	-60000	0.097932	-2550	0.3
-686	0.606	-50000	0.109224	-1810	0.4
-588	0.681	-40000	0.124817	-1470	0.5
-510	0.758	-30000	0.148207	-1180	0.6
-441	0.833	-20000	0.18863	-971	0.7
-343	0.909	-15000	0.223596	-736	0.8
-294	0.939	-10000	0.283402	-490	0.9
-245	0.97	-9000	0.301178	-333	0.95
-216	0.984	-8000	0.322214	-245	0.975
0	1	-6000	0.378903	-157	0.9875
		-5000	0.418737	-98	0.99375
		-4000	0.471379	0	1
		-3000	0.544503		
		-2500	0.592861		
		-2250	0.621088		
		-2000	0.652569		
		-1500	0.727165		
		-1250	0.771105		
		-1000	0.819607		
		-900	0.840144		
		-800	0.861178		
		-700	0.882533		
		-600	0.903952		
		-500	0.925072		
		-400	0.945397		
		-300	0.964253		
		-200	0.980721		
		-100	0.993487		
		0	1		

文獻中只提供緩衝材料、回填材料的初始孔隙比、初始含水量，母岩的部分則是提供其初始孔隙壓力，故本文作者利用土壤力學公式 $S \times e = \omega \times G_s$ (其中 S 為飽和度； e 為孔隙比； ω 為含水量； G_s 為材料密度) 推算緩衝材料、回填材料之初始飽和度並再由文獻所提供之圖 6.8、圖 6.9、圖 6.10 利用含水量及飽和度對應其孔隙壓力並列於表 6.8 與表 6.9，並以模型中各材料所設定的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的平衡狀態。

表 6.8 case1-1、case1-2 材料的熱-水-力學分析之初始條件

	緩衝材料	回填材料	母岩
			case1-1、case1-2
孔隙比	0.68	0.49	0.02
孔隙壓力(kPa)	-10006	-740	0
飽和度	0.28	0.55	1
初始有效應力	-2800	-407	0

表 6.9 case2 材料的熱-水-力學分析之初始條件

	緩衝材料	回填材料	母岩
			Case2
孔隙比	0.68	0.49	0.02
孔隙壓力(kPa)	-10200	-755	10000
飽和度	0.28	0.55	1
初始有效應力	-2856	-415.25	10000

在邊界條件設定上，模型的對稱軸上節點以滾支承約束徑向位移，其餘三邊的母岩材料邊界以鉸支承約束徑向與軸向位移，如圖 6.11。

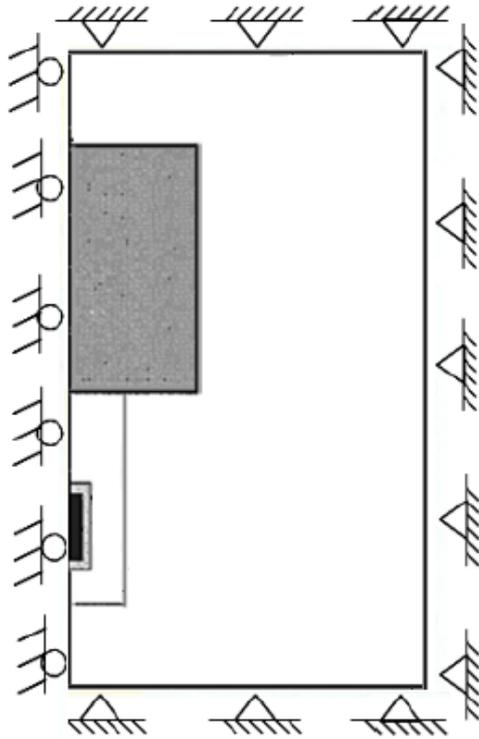


圖 6.11 水-力學模型的力學邊界條件束制示意圖

6.3.3 熱-水-力學分析驗證結果

在本小節中將比較本文與文獻[41]中 Case01-1、Case1-2 及 Case02 其熱-水-學完全耦合之溫度結果以及模型各位置水頭高、含水量結果做為驗證。其中 Case01-1、Case1-2 母岩初始孔隙壓力為 0 MPa, Case02 母岩初始水頭高為 1000m; Case1-1、Case2 母岩的水力傳導係數 $1.6 \times 10^{-8} \text{m/s}$, Case1-2 母岩的水力傳導係數 $1.6 \times 10^{-13} \text{m/s}$ 。

6.3.3.1 熱-水-力學水頭高之驗證

在文獻 Case01-1 之水-力學分析壓力水頭高結果中，由圖 6.12，Case1-2 圖 6.13，Case2 圖 6.14 可看出與文獻與本文分析之結果。

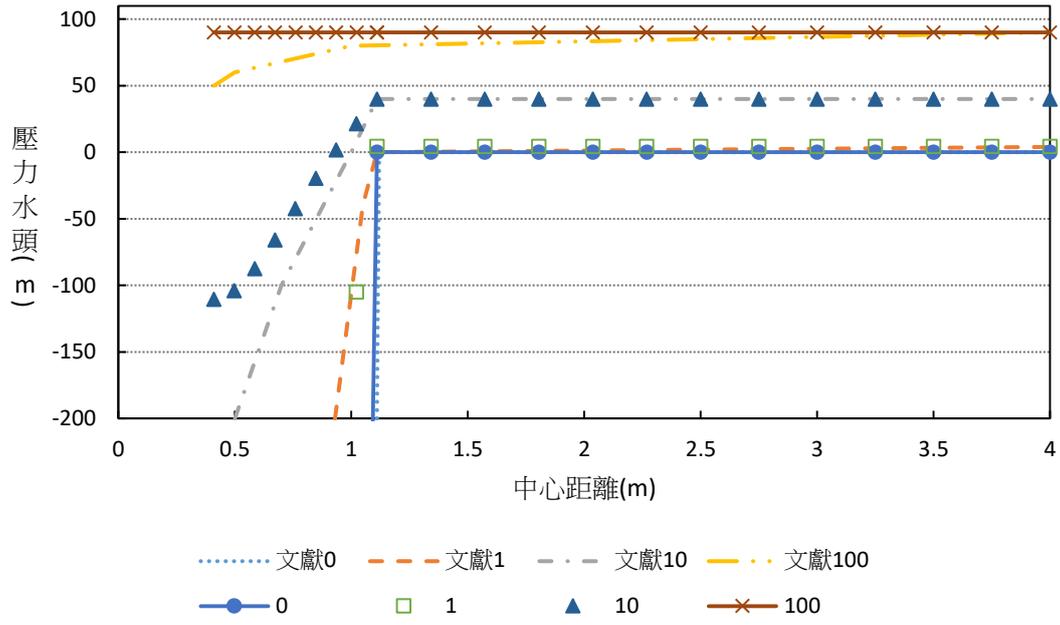


圖 6.12 Case 1-1 文獻與本文壓力水頭比較

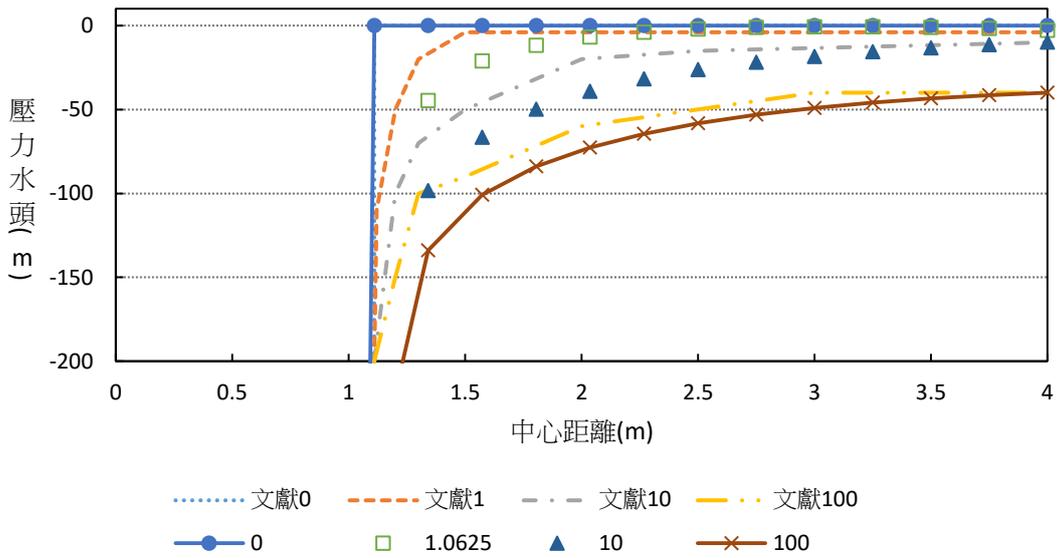


圖 6.13 Case 1-2 文獻與本文壓力水頭比較

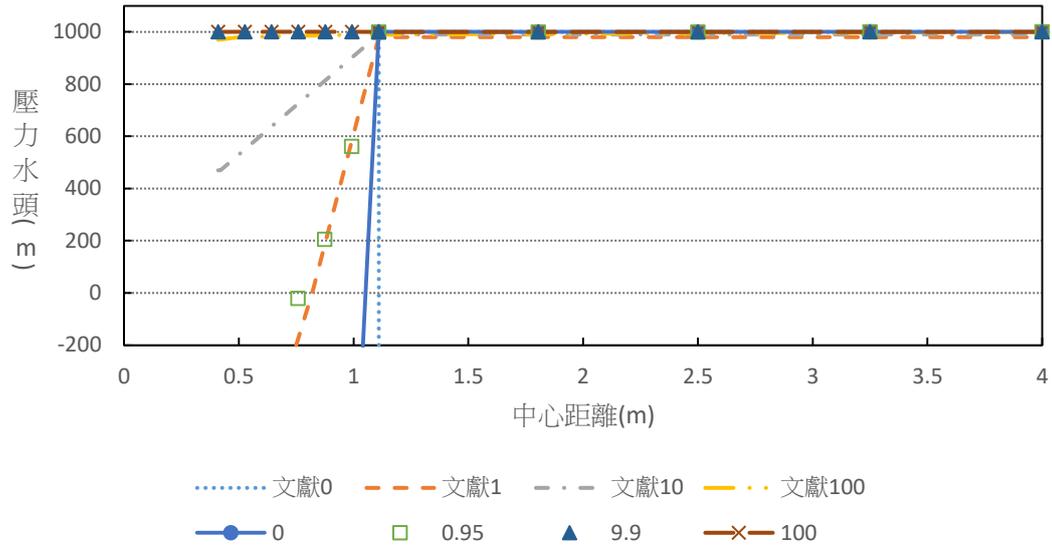


圖 6.14 Case 2 文獻與本文壓力水頭比較

6.3.3.2 熱-水-力學含水量與時間之驗證

在文獻[41] Case01-1 與 Case02 中緩衝材與母岩交界處 outputline 上點(f)、(g) 含水量驗證列於表 6.10，Case1-2 點(f)、(g)在 100 年時的含水量驗證列表 6.11，Case1-1 回填材料中點(1)含水量與時間的驗證關係如圖 6.16

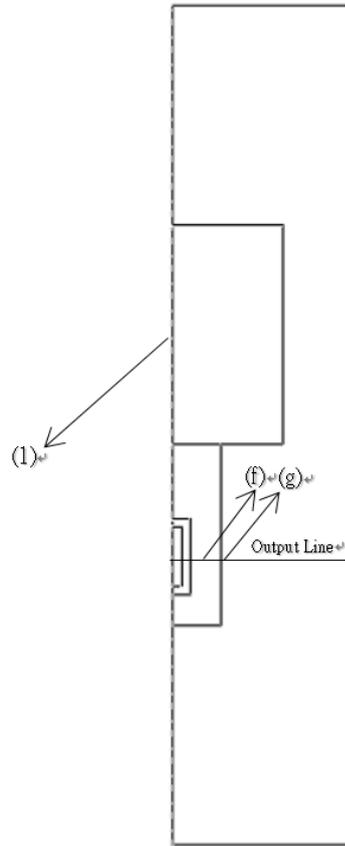


圖 6.15 模型之位置點

表 6.10 文獻與本文熱-水-力學分析結果達最高含水量時間之對照
緩衝材料飽和時間(含水量)

	文獻	本文
point(f)		
case1-1	20 年(25%)	13 年(25.298%)
case2	4 年(25%)	1.66 年(25.298%)
point(g)		
case1-1	0.5 年(25%)	0.5 年(25.298%)
case2	0.011 年(25%)	0.95 年(25.298%)

表 6.11 文獻與本文熱-水-力學分析在 100 年時的含水量
Case1-2 緩衝材料 100 年的含水量

	文獻	本文
point(f)	12.50%	13.95%
point(g)	13.50%	14.23%

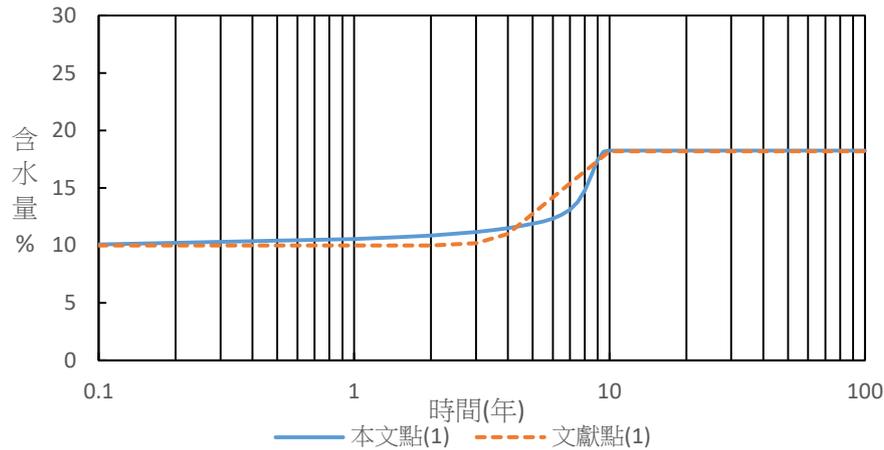


圖 6.16 回填材料點(1)的含水量與時間驗證圖

在本文與文獻的對照上，本文與文獻上有相同的趨勢，本文中(f)點在 Case1-1 與 Case2 達到飽和的時間比文獻中提早一些，使得水頭在緩衝材料內同樣的時間上水頭高也比文獻來的高，所以無法達到完全一樣的值，而 Case1-2 是母岩的水力傳導係數很小，在母岩的位子上，水頭高比文獻來的低一些，以上的不同可能的原因是文獻中沒有明確的提到母岩的含水量、飽和度、孔隙比，各個材料之間的交互作用，ABAQUS 在分析上時間步幅的限制，無法在特定的時間上得到分析值，這些都可能是造成本文無法與文獻上完全依一吻合的原因。

6.4 日本 JNC 與瑞典 SKB 的配置差異

日本 JNC 與瑞典 SKB 最大的差異是，處置場的深度與廢棄物罐外圍是否有外包件的存在，在廢棄物罐處置深度 JNC 是地下 1000 公尺，SKB 是 500 公尺，也造成初始母岩的孔隙水壓 10000MPa 與 5000MPa 的不同，日本的 JNC 在高放射性廢棄物廢棄物罐表面再包上一層玻璃固化物(外包件)再進行後續的地下處置，而 SKB 則是直接將高放射性廢棄物廢棄物罐直接放入地下處置。

JNC 與 SKB 在各材料的參數與對應值的轉換不同，在 JNC 滲透係數的單位 (m^2)SKB 水力傳導係數的單位是(m/s)，但在 abaqus 程式輸入的是水力傳導係數單位是(m/s)，所以 JNC 的滲透係數須經由水力傳導係數公式： $k_s = K \frac{\rho g}{\mu}$

ks:水力傳導係數(hydraulic conductivity)

K:滲透係數(intrinsic permeability)

ρ :水密度

g:加速度

μ :水之黏滯係數

JNC 廢棄物罐熱能是 350W，SKB 廢棄物罐熱能是 1680W。JNC 文獻提供的是含水量對應的熱傳導係數，SKB 則是飽和度對應的熱傳導係數。

第七章、完全耦合熱-水-力學多孔幾何配置模型分析

7.1 前言

在多孔處置場系統中，各處置孔有相近的幾何配置與材料性質時，「代表體積單元」可作為適當及有效的分析模型，但真實的處置場幾何配置與材料性質並不會完全相同，例如有局部分的裂縫、擾動區的存在等因素，在此情況下「代表體積單元」則不適合作為分析使用，因此採用的模型概念為「處置設施多孔幾何配置」建立模型。

本章節對多處置孔幾何配置，建構兩個、四個、六個、二十個、處置設施之模型，每個處置設施的幾何配置與材料參數皆為相同，此分析是為了先確定與「代表體積單元」之分析有相同的分析結果，來確定多孔幾何配置模型是可適用的。

7.2 代表體積單元模型建立

根據核能研究所(2002)之概念設計[41]，其處置場設計尺寸為40m×6m×1000m(長向×短向×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公尺埋置一個核廢棄物罐，模型之尺寸長向距離為40m，短向距離為6m，如圖7.1、如圖7.2。其中處置孔半徑0.875m，深度全長7.91m；廢棄物罐半徑0.525m，廢棄物罐全長4.91m，廢棄物罐、緩衝材料，回填材料及母岩的熱傳導係數、比熱、密度、楊氏模數等。各材料參數如表7.1，緩衝材料之熱傳導係數隨飽和度變化如表7.2。

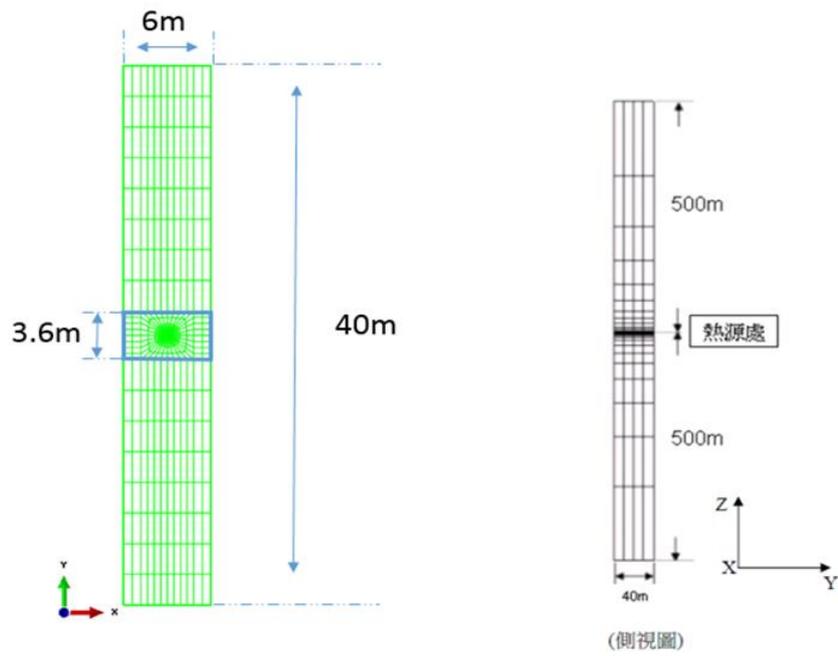


圖 7.1 模型示意圖

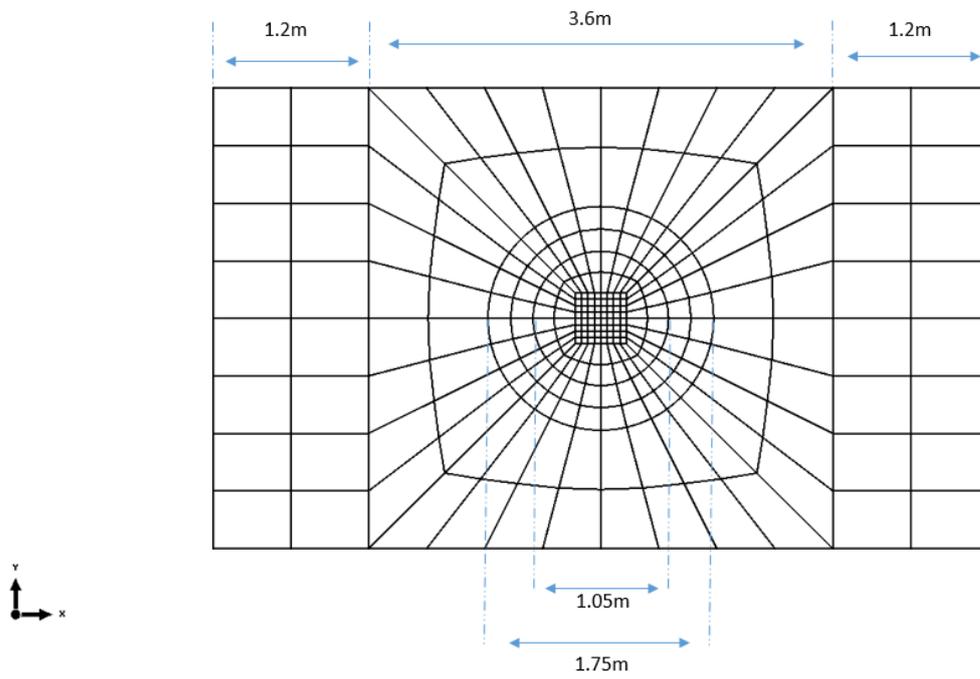


圖 7.2 模型局部尺寸放大圖

表 7.1 模型分析之材料參數

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
密度 (kg/m ³)	7800	1600	1400	2650
比熱 (J/kg-K)	460	800	800	850
楊氏模數 E (Pa)	2*10 ⁸	2.04*10 ⁴	1.74*10 ³	6*10 ⁷
波松比	0.3	0.3	0.3	0.3
線膨脹係數 ($\frac{1}{^{\circ}\text{C}}$)	1.4*10 ⁻⁵	1*10 ⁻⁵	1*10 ⁻⁵	1*10 ⁻⁵
滲透係數 (m ²)	---	6.5*10 ⁻²¹	5*10 ⁻¹⁸	6.9*10 ⁻¹⁹
孔隙率	---	0.41	0.63	0.02

表 7.2 緩衝材料飽和度與熱傳導係數對應關係

飽和度	熱傳導係數 (W/m-K)
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	1.3
	1.35
1.0	1.4

7.2.1 初始條件與邊界條件

在熱傳模型分析，假設地表溫度為 20°C，每向下延伸 100 公尺溫度上升 3°C，因此廢棄物罐中心於地表下 500 公尺之初始溫度約為 35°C，本章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 7.3)，所以在模型邊界設置對流係數 $10\text{W}/\text{m}^2\text{-K}$ ，此對流係數係比較全域模型與局部模型之熱傳分析結果後所推得之適當模擬值。

根據核研所(2002)所提出處置場之單一廢棄物罐產生之熱能為 1714W ，所使用之熱衰減公式如(7.1)式:

$$Q=1714(0.696e^{-0.02t} + (1-0.696)e^{-0.0013t}) \quad (7.1)$$

Q:為隨時間進行而變化之發散熱強度，t:為時間(年)

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。

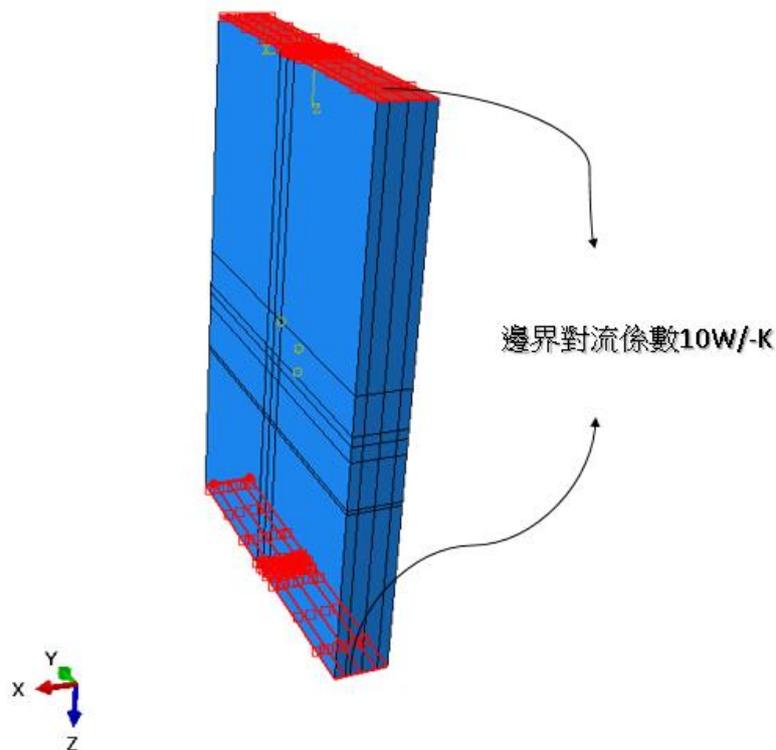


圖 7.3 模型邊界熱對流係數示意圖

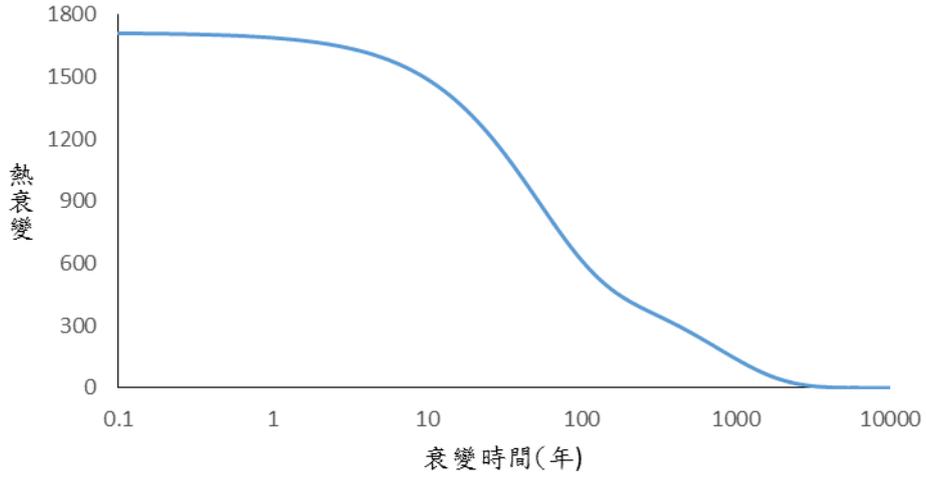


圖 7.4 熱源衰變圖歷時圖

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。

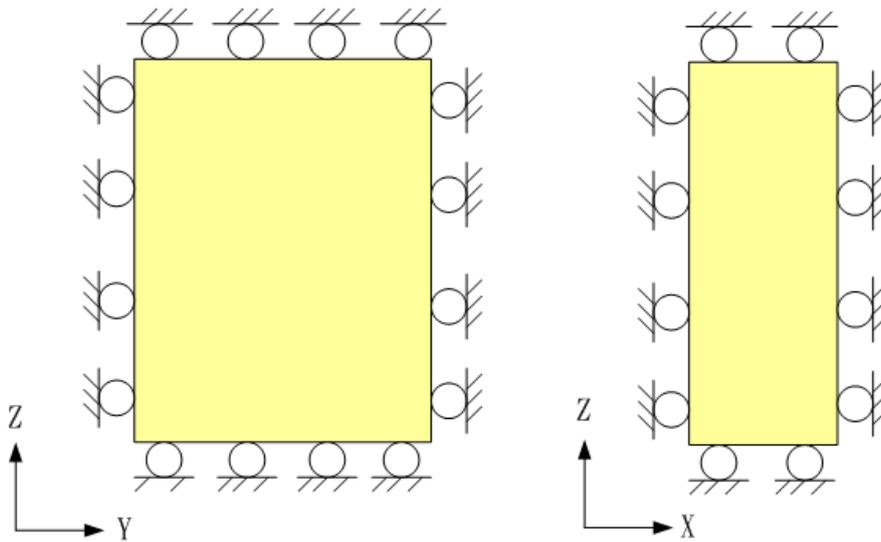


圖 7.5 力學邊界條件設置示意圖

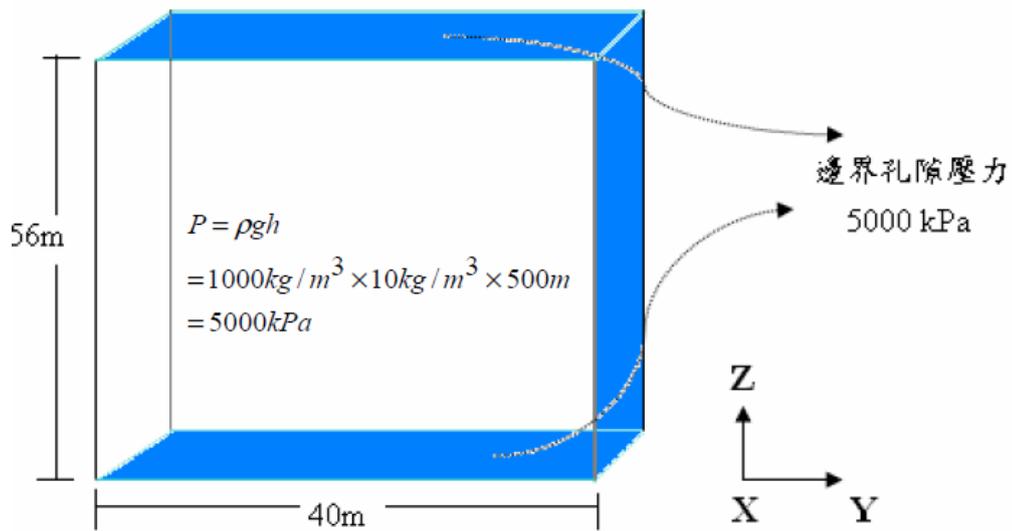


圖 7.6 孔隙壓力模型邊界示意圖

7.2.2 熱水力學完全耦合分析結果

本文之完全耦合之溫度分析點在熱源中心上方與緩衝材料交界上點 1(圖 7.7), 分析結果的溫度與時間的歷時圖(圖 7.8), 最高在第八年, 溫度為 96.89°C 。

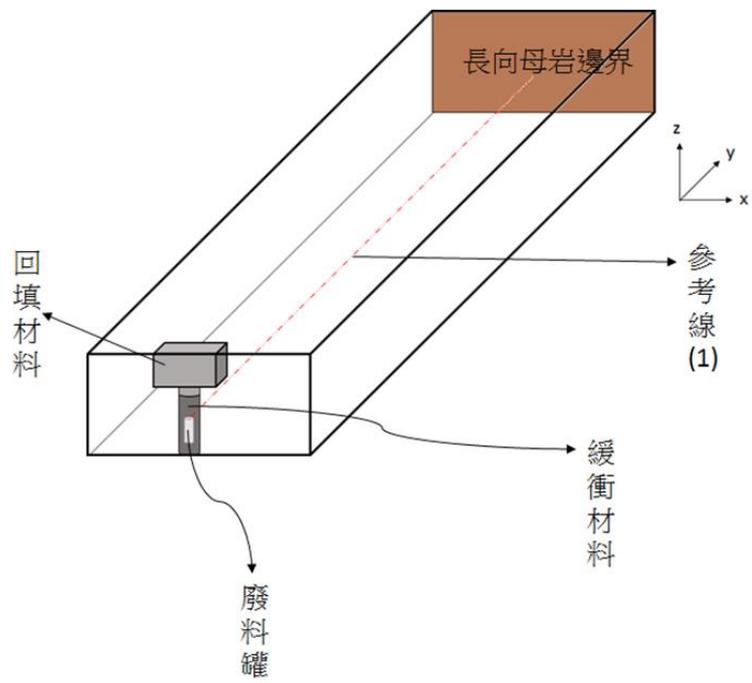
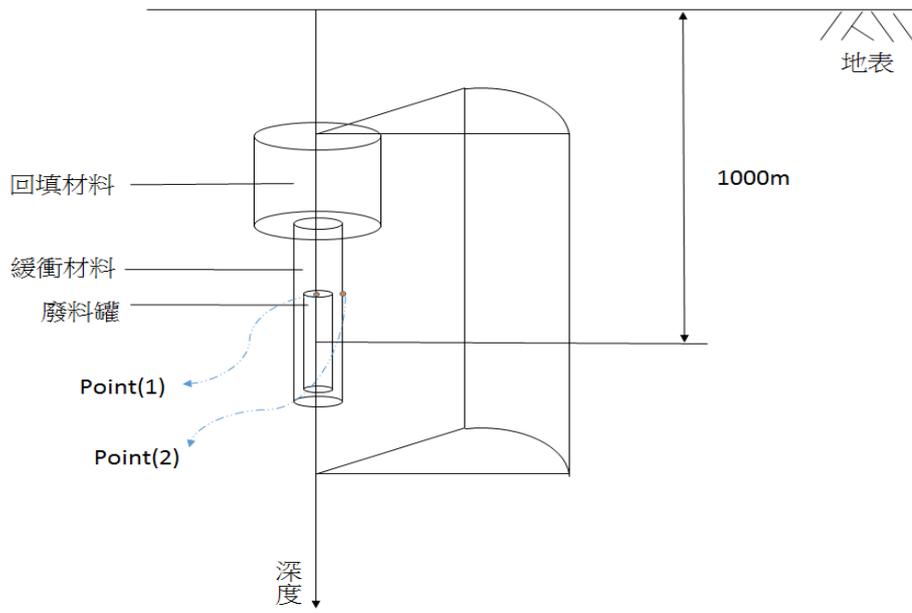


圖 7.7 分析之位置

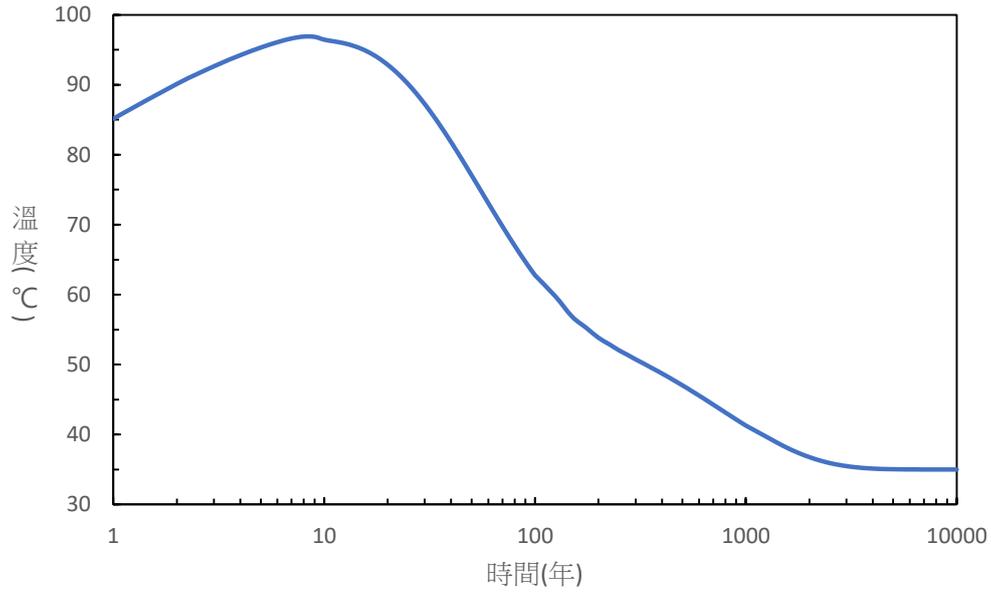


圖 7.8 溫度與時間歷時圖

在點 1 上飽和度與時間歷時圖(7.9)，飽和度大於 95% 的時間為 11 年、大於 98% 的時間為 14 年、達到完全飽和時間為 19 年，第八年廢棄物罐頂部徑向延伸至母岩邊界之應力分析(圖 7.10)，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。

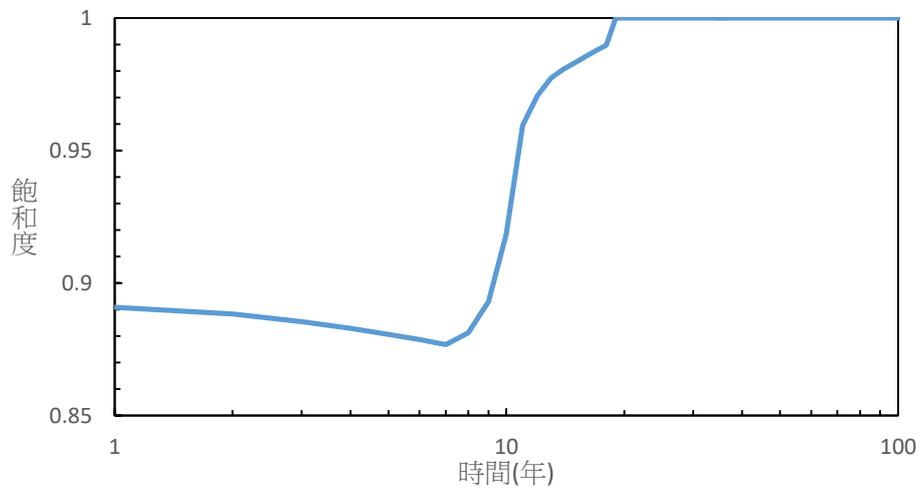


圖 7.9 飽和度與時間歷時圖

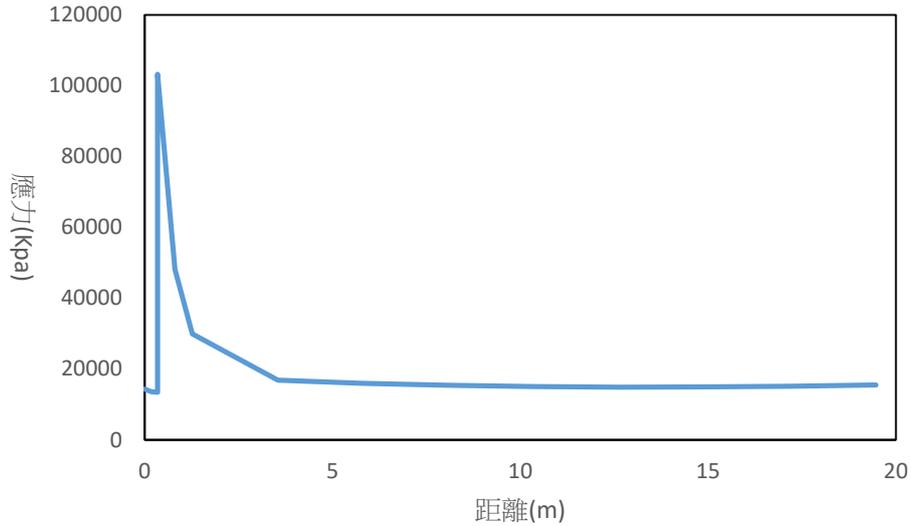


圖 7.10 應力與距離分布圖(第 8 年)

7.3 多孔幾何模型建立

模型之尺寸、參數皆與 7.2 章節完全相同，不同的是處置孔的數量，有兩個、四個、六個、二十個，二十個處置孔是由兩條平行隧道組成，每一條隧道有十個處置孔。

7.3.1 熱水力學完全耦合分析結果比較

多孔幾何配置模型中，不管數量各處置孔的分析結果相同，所以全部取一與代表體積單元模型進行比較，點 1 分析結果的溫度與時間的歷時圖(圖 7.11)，飽和度與時間歷時圖(圖 7.12)，第八年廢棄物罐頂部徑向延伸至母岩邊界之 Mises 應力分析(圖 7.13)，與代表體積單元模型分析結果的比較表 7.3。

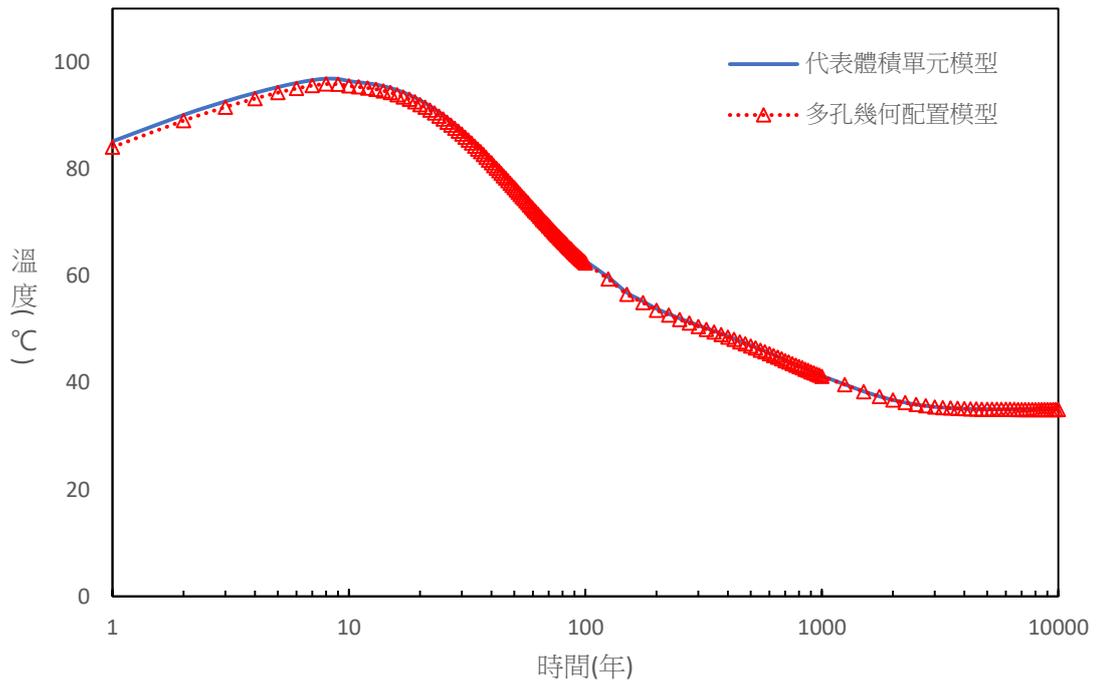


圖 7.11 溫度與時間歷時圖

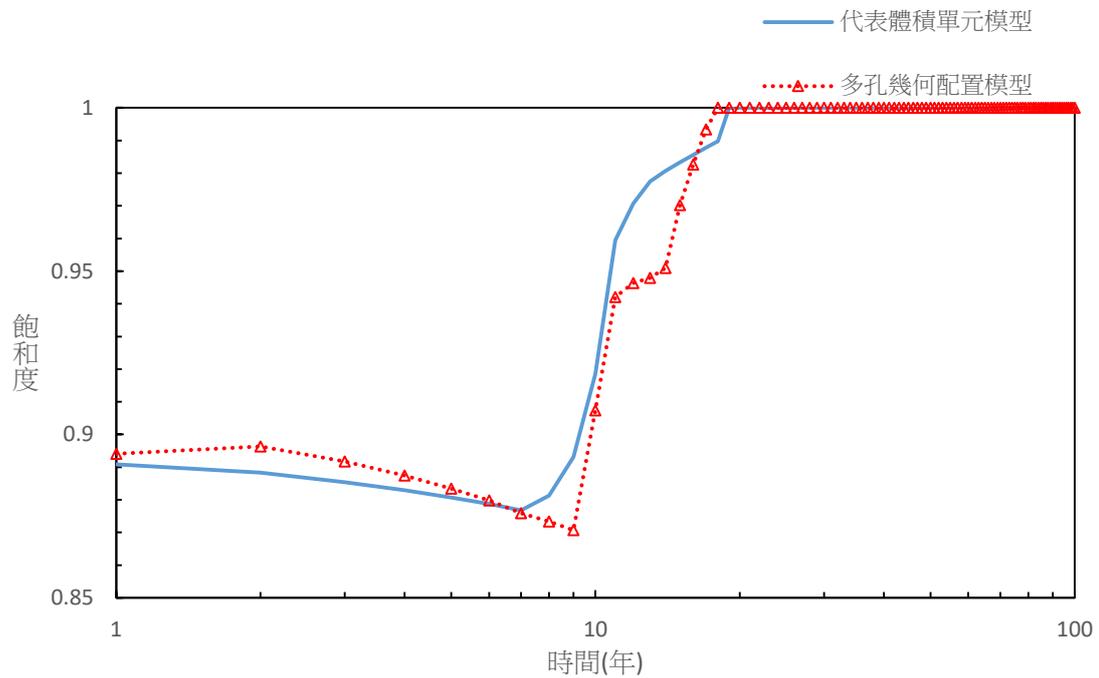


圖 7.12 飽和度與時間歷時圖

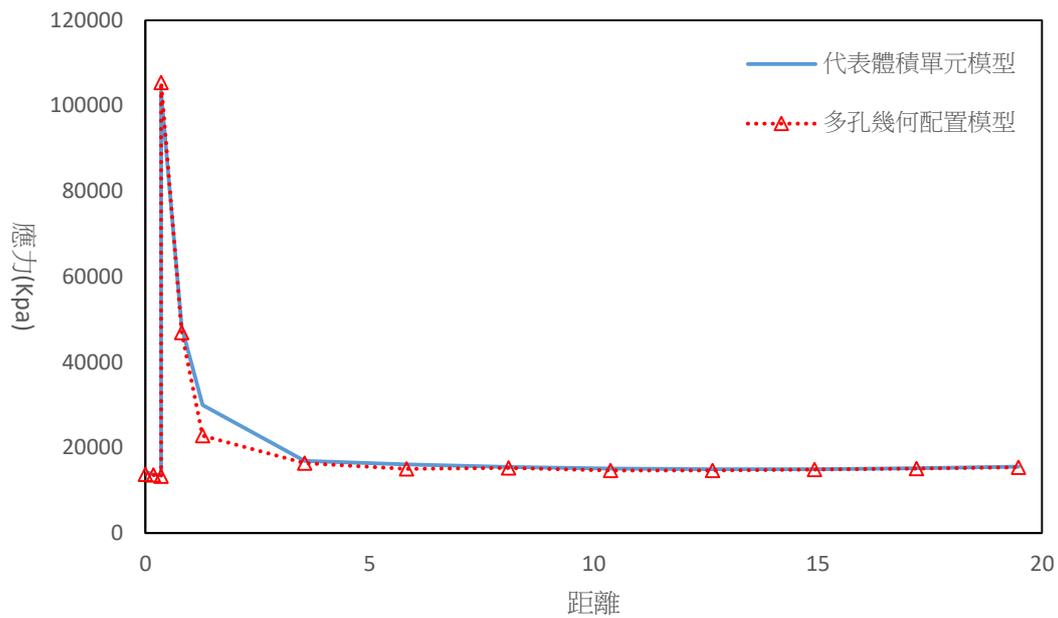


圖 7.13 應力與距離分布圖(第 8 年)

表 7.3 達最高溫與飽和度的時間

	代表體積單元模型	多孔幾何配置模型
點 1 發生最高溫度時間(溫度)	第 8 年(96.89°C)	第 8 年(95.89°C)
點 1 飽和度達 95%之時間(年)	11	14
點 1 飽和度達 98%之時間(年)	14	16
點 1 達完全飽和度之時間(年)	19	18

7.3.2 多孔幾何模型熱水力學完全耦合分析結果

本章節分析為第八年之圖形與分析之數據，分析之位置有廢棄物罐上方沿著短向方向(示意圖 7.14 虛線)，處置孔邊緣在廢棄物罐上方高度與短向方向(示意圖 7.15 虛線)，圖 7.14 位子分析有溫度、飽和度，圖 7.15 位置分析有 Mises 應力。

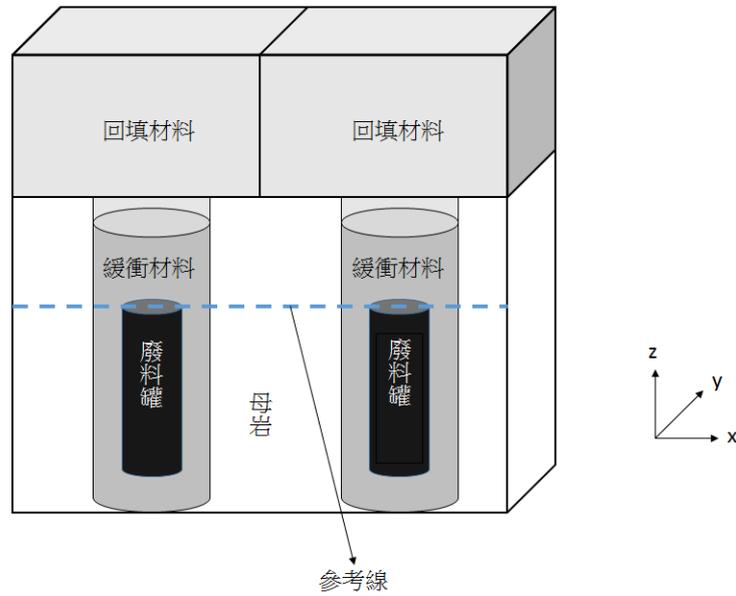


圖 7.14 分析位置示意圖

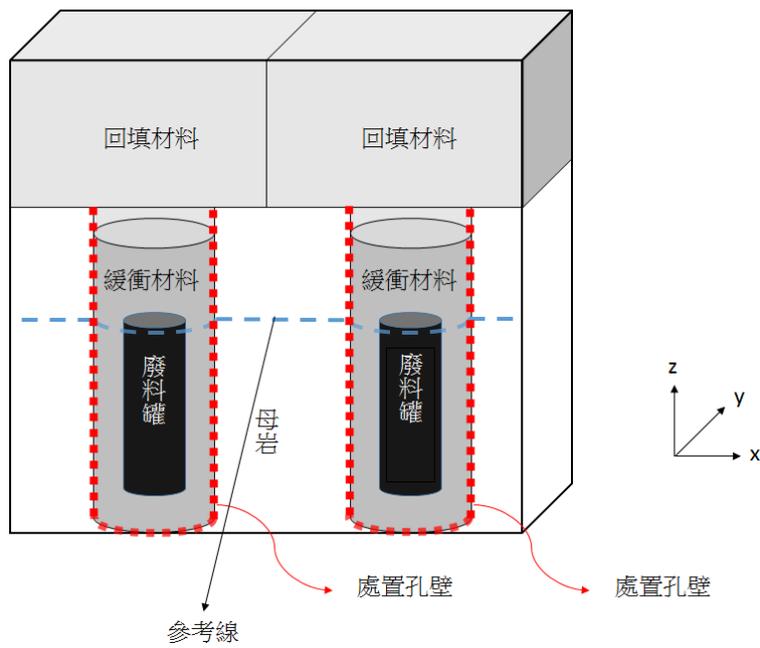


圖 7.15 分析位置示意圖

於第八年參考線 1 之溫度雲彩圖，如圖 7.16，分別為兩個、四個、六個、二十個廢棄物罐。其各廢棄物罐於參考線 1 之溫度分布圖，如圖 7.17，於參考線 1 上各模型分析之最高溫度皆為 95.89°C 。

於第八年參考線 1 之飽和度雲彩圖，如圖 7.18，分別為兩個、四個、六個、二十個廢棄物罐。其各廢棄物罐於參考線 1 之飽和度分布圖，如圖 7.19，於參考

線 1 上各模型分析之最高飽和度為 87.34%。

於第八年參考線 2 之 Mises 應力雲彩圖，如圖 7.20，分別為兩個、四個、六個、二十個廢棄物罐。其各廢棄物罐於參考線 2 之 Mises 應力分布圖，如圖 7.21，於參考線 2 上各模型分析之最大 Mises 應力為 129MPa。

比較各模型分析結果顯示皆與「代表體積單元」分析結果相同，故此多處置孔幾何配置是正確無誤的。

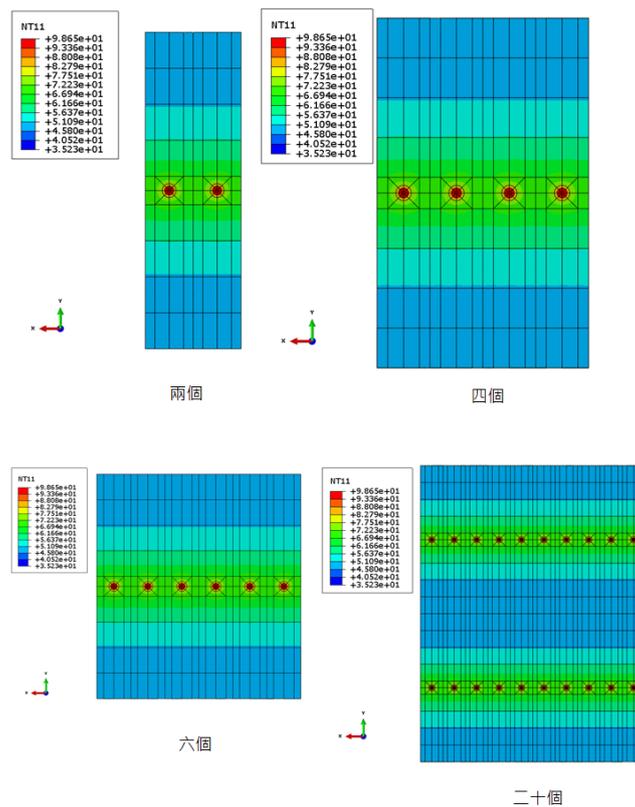


圖 7.16 各廢棄物罐之溫度雲彩圖

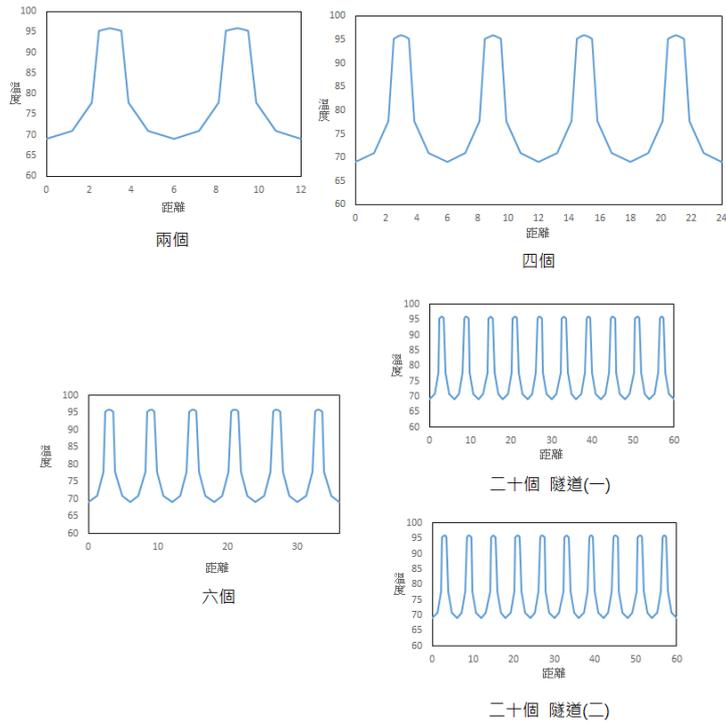


圖 7.17 各廢棄物罐於參考線 1 之溫度分布圖

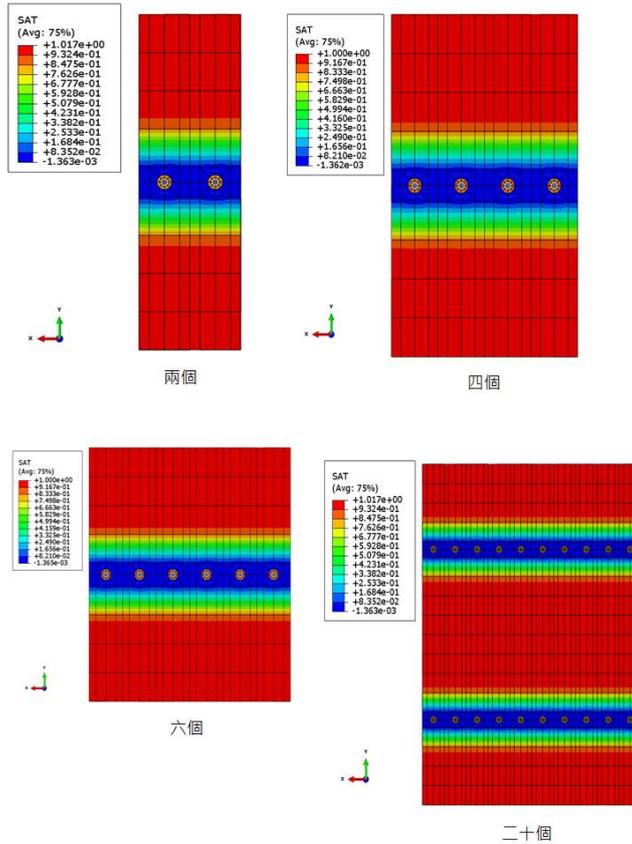


圖 7.18 各廢棄物罐飽和度之雲彩圖

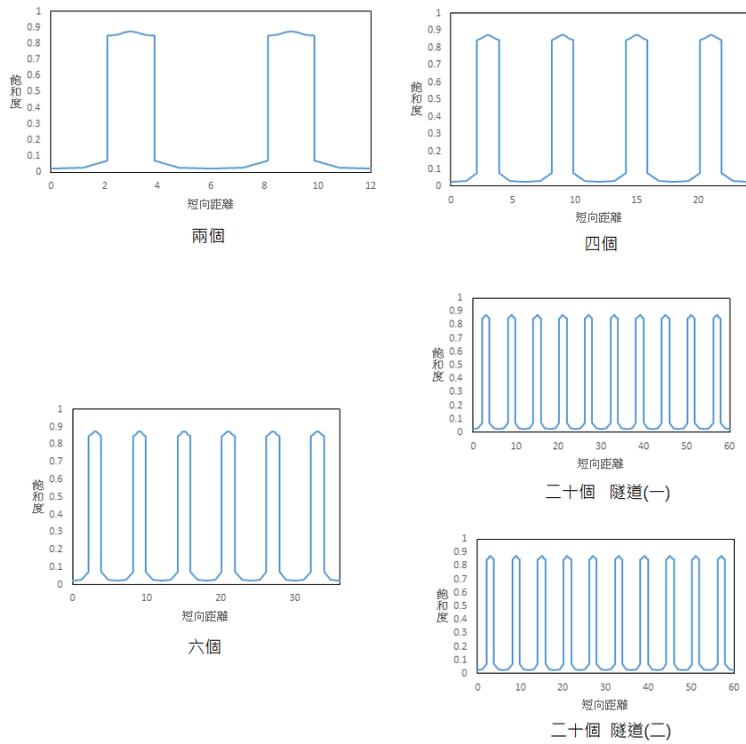


圖 7.19 各廢棄物罐於參考線 1 之飽和度分布圖

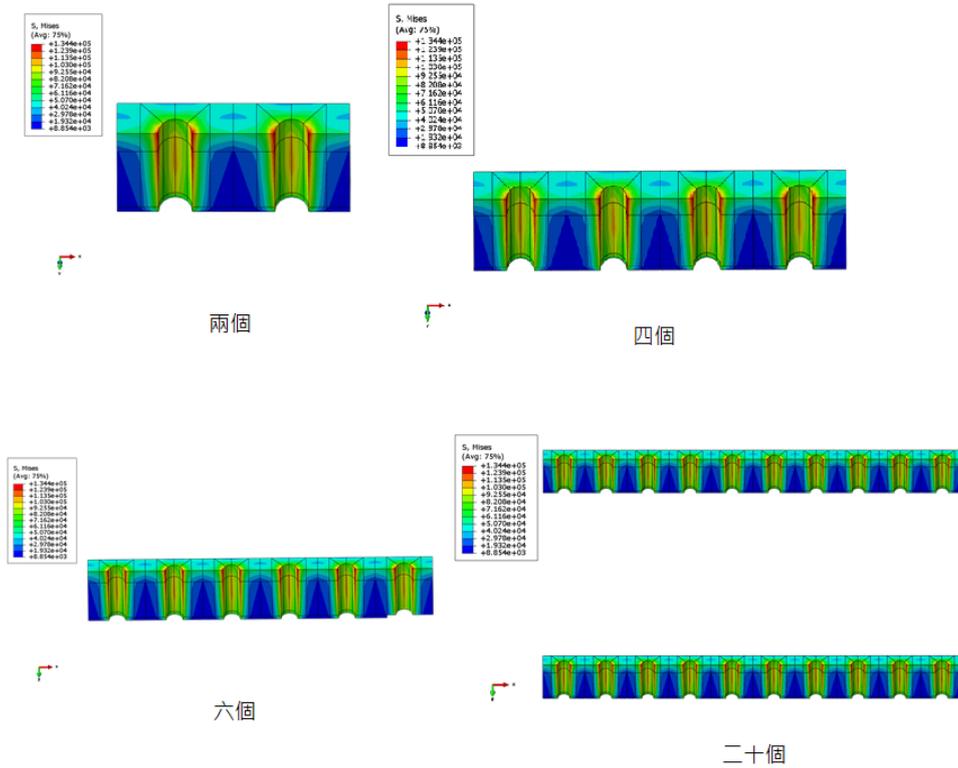


圖 7.20 各廢棄物罐 Mises 之雲彩圖

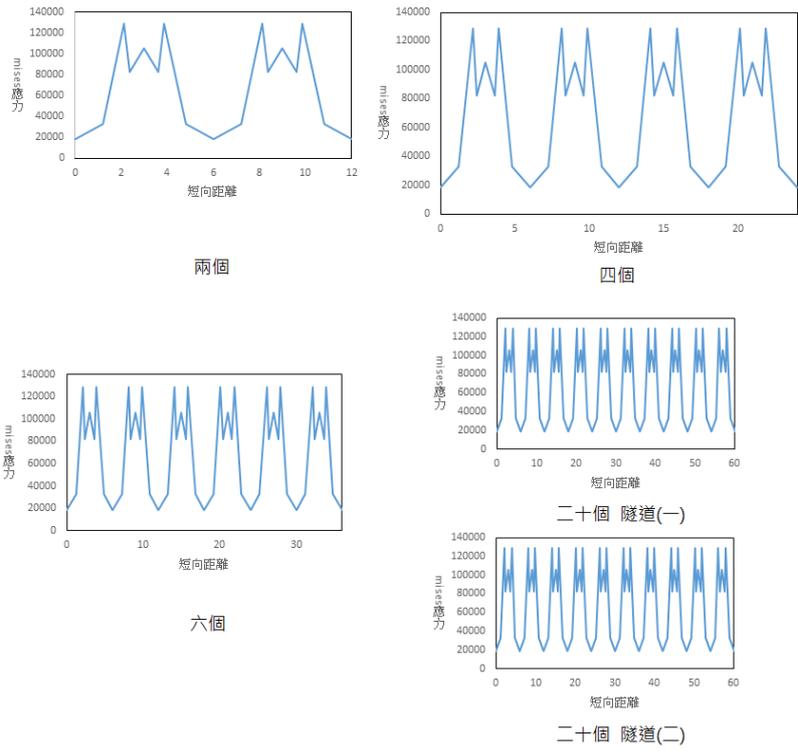


圖 7.21 各廢棄物罐於參考線 2 之 Mises 分布圖

第八章、結論與後續研究方向

1. THMC 相關審查資料評析：
 - (1) 已針對國際間聯合組織 DECOVALE 之 T-H-M-C 效應階段性研究報告所提出之 A-E 計畫要項進行研析。
 - (2) 已針對 SKB-P-14-22 報告:緩衝材料回填前之水份再分佈量測原尺寸試驗進行實驗室試驗並進行結果研析。
 - (a) 在測試圓筒的內表面上發生水的冷凝（測試圓筒的內表面接近 $RH = 100\%$ ）。這種冷凝與溫度下降會越過緩衝土塊的孔隙，在緩衝材料外部產生恆定的低含水量，意即緩衝材料的連續乾燥。這很可能也將發生在真實的處置孔中。
 - (b) 試驗的建模和試驗的結果表明，水的傳輸和乾燥行為，取決於溫度和存在於緩衝材料間隙中的溫差。
 - (c) 在測試中觀察到的進程很可能也存在於處置場中。基於報告的試驗結果，目前尚不能描述裂縫形成和水的冷凝的程度。因此基於該次測試的結果，並不能夠完全評估裝置的有效性。
2. 針對小型模擬實驗熱傳量測及數值比較驗證，本研究已經完成小型實驗熱傳導性質量測，其試驗參數應用於有限元素進行一維軸對稱及二維軸對稱溫度分佈模擬驗證上有一致性結果，顯示所建立之有限元素模型能有效模擬分析小型實驗之實際狀況，分析上有相當的可信度。
3. 針對小型模擬實驗熱-水力耦合效應量測及比對部分：
 - (1) 透過 TDR 建立含水量量測技術，並考慮 14%、24%含水量-視介電常數-溫度三相圖建立，然目前 34%含水量因為高溫下之導電度上升無法進行測量，未來須進行 TDR 感測器之改良，使其符合高溫下之導電度需求。
 - (2) 本計畫已提出 TDR 分層含水量之計算，並獲得有效的結果。目前已可由 4 條 TDR 感測器得到解析度 1 cm 之 3 個膨潤土層水平面歷時體積含水量變化。
 - (3) 針對小型模擬實驗 T-H 耦合效應量測採用 TDR 系統與溫度分佈系統進行含水量即時量測與溫度分佈歷時變化，現階段由於熱作用的影響不

同於單純垂直 Y 方向浸水影響之浸潤面，造成分層含水量不均的問題，但整體含水量曲線皆為上升趨勢，顯示試體持續受到進水影響，TDR 量測之最高體積含水量為 47.9%，與重量法換算出來之體積含水量 49.2% 相當接近。模擬分析之熱傳分布與實際浸潤面位置一致。

- (4) 現階段試驗模型由於熱探針配置與進水方向不一致，熱探針之熱能所能影響方向為直徑方向；而進水方向為垂直方向，因此造成 T-H 耦合議題較為複雜，建議修改熱探針埋設位置，使熱能影響方向與進水方向一致化，其分層含水量的計算較為準確。
4. 第六章日本 JNC 驗證之熱傳分析，最高溫時間與溫度結果相似，但文獻沒有提供確切之衰變函數公式，因此最高溫有些微差異。
 5. 第六章日本 JNC 熱-水-力學驗證，本研究與文獻上有相同的趨勢，但些微的差距原因可能是文獻中沒有明確的提到母岩的含水量、飽和度、孔隙比，各個材料之間的交互作用，ABAQUS 在分析上時間步幅的限制，無法在特定的時間上得到分析值，這些都可能是造成本文無法與文獻上完全依一吻合的原因。
 6. 第七章完全耦合熱-水-力學多孔幾何配置模型分析將比較代表性之特定位置上之溫度、飽和度、與 Mises 有效應力，而建構出的多孔幾何配置模型，在這些特定位置上分析的結果皆與代表體積單元模型有這相似的值，而在處置孔壁上會有出現 Mises 應力集中的趨勢。
 7. 第七章「處置設施多孔幾何配置」使用的模型建構模式，此分析可以更真實的呈現多處置孔的模擬分析。

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] 行政院原子能委員會，(2010)，「放射性物料管理法」，行政院原子能委員會放射性物料管理局，華總一義字第 09100248760 號。
- [3] 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。
- [4] 台灣電力公司，(2015)，「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」，103 年度成果報告上冊。
- [5] 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。
- [6] 原子力バックエンド研究，(1994)，「緩衝材の地球化学プロセスに着目した熱-水-化学連成挙動に関する工学規模の人工バリア試験と解析評価」，Vol.1 No.1。
- [7] J.A. Hudsona, O. Stephanssonb, J. Anderssonc, C.-F. Tsangd, L. Jingb (2001). “Coupled T-H-M issues relating to radioactive waste repository design and performance”, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 38, 143-161.
- [8] 独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廃棄物処分関連。
- [9] 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。
- [10] Fabrice Dupray, Chao Li, Lyesse Laloui (2013) “THM coupling sensitivity analysis in geological nuclear waste storage”, *Engineering Geology* 163 113-121.

- [11] DECOVALEX THMC,(2004-2007). “DECOVALEX-THMC project Executive summary”, SKI Report 2008:40.
- [12] DECOVALEX THMC,(2004-2007). “Task A, Influence of near field coupled THM phenomena on the performance of a spent fuel repository”, SKI Report 2007:07.
- [13] DECOVALEX THMC,(2004-2007). “Task A, Influence of near-field coupled THM phenomena on the performance of a spent fuel repository,Report of Task A2”, SKI Report 2008:41.
- [14] DECOVALEX THMC,(2004-2007). “TASK B, Understanding and characterizing the excavation disturbed zone (EDZ)”, SKI Report 2008:43.
- [15] DECOVALEX THMC,(2004-2007). “TASK B, Understanding and characterizing the excavation disturbed zone (EDZ), Phase 2 Report Edited”, SKI Report 2007:08.
- [16] DECOVALEX THMC,(2004-2007). “TASK B, Understanding and characterizing the excavation disturbed zone (EDZ), Phase 3 Report Edited”, SKI Report 2008:42.
- [17] DECOVALEX THMC,(2004-2007). “TASK C, Excavation Damaged Zone (EDZ) in argillaceous rock at Tournemire site (France)”, SKI Report 2007:09.
- [18] DECOVALEX THMC,(2004-2007). “TASK C, Hydro-mechanical response of the Tournemire argillite to the underground openings excavation: unsaturated zones and mine-by-test experiment, Final Report”, SKI Report 2008:44.
- [19] DECOVALEX THMC,(2004-2007). “Task D, Long-Term Permeability/Porosity Changes in the EDZ and Near Field due to THM and THC Processes in Volcanic and Crystalline-Bentonite Systems, Phase 1 Report”, SKI Report 2007:10.
- [20] DECOVALEX THMC,(2004-2007). “Task D, Long-Term Permeability/Porosity Changes in the EDZ and Near Field due to THM and THC Processes in Volcanic and Crystalline-Bentonite Systems, Final Report”, SKI Report 2008:45.

- [21] DECOVALEX THMC,(2004-2007). “TASK E, Implications of Glaciation and Coupled Thermohydrromechanical Processes on Shield Flow System Evolution and Performance Assessment, Final Report”, SKI Report 2008:46.
- [22] Kristensson O, Hökmark H, (2007). Prototype Repository. Thermal 3D modelling of Prototype Repository. SKB IPR-07-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [23] SKB, (2009b) “Strategy for thermal dimensioning of the final repository for spent nuclear fuel ”, R-09-04.
- [24] SKB, (2010b). “Design, production and initial state of the buffer for the safety assessment SR-Site”, SKB TR-10-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [25] 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。
- [26] Ledieu, J., De Ridder, P., and Dautrebande, A. (1986).“ A Method for Measuring Soil Moisture by Time Domain Reflectometry.” Journal of Hydrology, Vol. 88, pp. 319-328.
- [27] Heimovaara, T.J. (1993). Design of triple-wire time domain reflectometry probes in practice and theory. Soil Sci. Soc. Am. J. 57, 1410–1417.
- [28] 陳家宙、陳明亮、何圓球，(2001)，「各具特色的當代土壤水分測量技術」，湖北農業科學，第3卷。
- [29] Baker JM, and Allmaras RR. (1990). “System for automation and multiplexing soil moisture measurement by time-domain reflectometry. ” Soil Sci Soc . Am J 54:1-6.
- [30] Davis, J.L. and Annan, A.P. (1977).“ Electromagnetic Determination of soil moisture: Progress report I.” Canadian Journal of Remote Sensing, Vol. 3, pp. 76-86.
- [31] Topp, G.C., Davis, J.L., and Annan, A.P. (1980). “ Electromagnetic

Determination of Soil water Content: Measurement in Coaxial Transmission Lines.” Water Resources Research, Vol. 16, pp. 574-582.

- [32] 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.
- [33] 原子力環境整備促進・資金管理センター, (2015), 「諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について」。
- [34] SKB (1999). “Deep Repository for Spent Nuclear Fuel: SR 97 Post-Closure Safety”, SKB Technical Report 99-06.
- [35] 経済産業省・資源エネルギー庁, (2011), 「遠隔搬送・定置技術の開発」, 第3章。
- [36] ASTM. (2014). “Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure 1” D5334 .
- [37] 王雅薇, 「緩衝材料在熱/水力耦合作用下溫度分布與水力傳導性研究」, 國立中央大學, 碩士論文, (2008)。
- [38] Fälth B, Hökmark H, (2006). Mechanical and thermo-mechanical discrete fracture near-field analyses based on preliminary data from the Forsmark, Simpevarp and Laxemar sites. SKB R-06-89, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [39] PNC, (1992), 「緩衝材の熱物性試験」, TN 1410-92-052, 動力炉・核燃料開発事業団。
- [40] 放射性廃棄物研究, (2009), 「緩衝材大型試験設備 (BIG-BEN) における熱-71<-応力連成試験」, Vol.16 No.1。
- [41] 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。
- [42] JCN, “H12-Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW

- Disposal in Japan”, Japan Nuclear Cycle Development Institute, 2000.
- [43] 邱太銘，「國外用過核燃料/高放射性廢棄物最終處置現況」，行政院原子能委員會核能研究所化工組，1999。
- [44] JNC, Evaluation of Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Phenomena in the Near Field for Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste
- [45] 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
- [46] 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。
- [47] 台灣電力公司，(2010)，「用過核子燃料最終處置計畫書」。
- [48] 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。
- [49] Lars-Erik Johannesson, Ola Kristensson, Mattias Åkesson, Tests and simulations of THM processes relevant for the buffer installation. SKB, Svensk Kärnbränslehantering AB.