

行政院原子能委員會放射性物料管理局

106 年用過核子燃料處置長期安全評估

審驗技術之研究

子項計畫二：深地層處置設施等效耦合模型之

驗證技術建立

期末報告

受委託單位：社團法人中國土木工程學會

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：105FCMA010

中華民國一〇六年十二月

106 年用過核子燃料處置長期安全評估

審驗技術之研究

子項計畫二：深地層處置設施等效耦合模型之 驗證技術建立

受委託單位：社團法人中國土木工程學會

研究主持人：黃偉慶

協同主持人：張瑞宏

研究期程：中華民國 106 年 2 月至 106 年 12 月

研究經費：新台幣陸拾柒萬玖仟伍佰壹拾貳元整

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 106 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

深層地質處置場近場之配置十分複雜，在多孔設施系統中，各處置孔之幾何與材料性質並不會完全相同；一般而言，由於材料異質特性、處置程序、工程擾動、或是區域裂縫等因素，都可能造成各處置孔間的局部差異。在此情況下，需要採用「處置設施多孔幾何配置」的概念建構分析模型，進行多孔處置場之整體模擬，方能描述實際之差異行為；然而，對三維有限元素分析而言，此概念需消耗大量計算資源，因而侷限分析案例所能容納之處置孔數量。本研究因此擬就 T-H-M 耦合分析所需，建立相應之「等效 T-H-M 耦合數值分析模型」，在設計規範考量的準確需求下，適度降低分析模型之運算自由度，增加模型內之處置孔數量。此外，本研究將與瑞典 SKB 報告、日本 H-12 報告、或相似評估案例之熱傳導多孔配置結果進行比較驗證，以確認本研究模型之可靠性；同時，進一步就局部差異引發之 T-H-M 耦合效應進行初步的模擬演算。另一方面，彙整國際間高放處置計畫階段成果報告，針對其中 T-H-M 效應之國際相關資訊進行研析，提出深地層最終處置設施耦合分析審查重點或注意事項之建議。

在處置設施多孔幾何配置問題的分析上，本年度與 105 年度之研究內容相較，具有更加深入的探討內容，茲說明如下：

1. 105 年度多孔幾何配置分析中，並未考慮不同性質處置設施之情況。
2. 本年度提出等效耦合模型驗證技術之概念，可更為有效率的進行多孔幾何配置的驗證分析。
3. 本年度多孔幾何配置分析中，考慮不同性質之處置設施，更能代表多孔處置設施相異之情形。
4. 本年度與瑞典 SKB 報告對於熱傳導多孔配置結果進行比較分析，可確認本計畫平行驗證技術之執行效能。

目錄

摘要.....	i
目錄.....	iii
圖目錄.....	vii
表目錄.....	xi
第一章、緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 研究動機與目的.....	1
1.3 研究主題與方法.....	2
第二章、文獻回顧.....	3
2.1 用過核子燃料的最終處置.....	3
2.2 我國的最終處置評估相關研究.....	3
2.3 各國處置場概念現況.....	5
2.3.1 芬蘭.....	5
2.4 文獻研析.....	7
第三章、處置設施多孔幾何配置.....	17
3.1 前言.....	17

3.2 多重障壁系統.....	17
3.3 代表體積單元.....	19
3.4 分析工具.....	21
3.5 完全耦合熱—水—力學分析	22
第四章、等效熱傳導數值分析驗證技術	25
4.1 前言	25
4.2 軸對稱熱傳導數值驗證技術	25
4.2.1 模型尺寸與材料參數.....	25
4.2.2 初始條件與邊界條件.....	29
4.2.3 軸對稱熱傳導模型案例之驗證.....	30
4.3 等效熱傳導數值驗證技術	32
4.3.1 等效熱傳導分析模型與材料參數.....	32
4.3.2 等效模型熱傳導分析案例及結果驗證	33
第五章、瑞典 SKB 報告多孔幾合配置熱傳導案例之驗證分 析.....	37
5.1 前言	37

5.2 三維多處置孔模型建立與案例介紹	37
5.2.1 網格配置與幾何模型建立.....	37
5.2.2 熱傳導分析材料參數介紹.....	40
5.2.3 初始條件以及邊界條件.....	42
5.3 三維多處置孔模型熱傳導分析結果平行驗證	42
5.3.1 三維多處置孔模型熱傳導分析案例介紹	43
5.3.2 案例 1 熱傳導分析結果.....	43
5.3.3 案例 2 與 3 熱傳導分析結果.....	45
5.3.4 案例 4 熱傳導分析結果.....	51
5.4 小結.....	54
第六章、等效熱-水-力耦合數值分析驗證技術	55
6.1 前言	55
6.2 代表體積單元驗證模型建立	55
6.2.1 初始條件與邊界條件.....	58
6.2.2 完全耦合熱-水-力學分析結果.....	60
6.3 等效模型驗證技術.....	63

6.3.1 等效模型尺寸與材料參數.....	63
6.3.2 等效熱-水-力耦合分析模型之案例評估.....	66
6.4 多孔幾何配置之完全耦合熱-水-力學影響效應研析	68
第七章、審查重點或注意事項之建議.....	76
第八章、結論.....	78
參考文獻.....	80

圖目錄

圖 3-1 處置場配置圖(側視圖).....	16
圖 3-2 長向距離之熱傳對稱面示意圖.....	17
圖 3-3 短向距離之熱傳對稱面示意圖.....	17
圖 3-4 處置場配置幾何示意圖.....	17
圖 3-5 不同位置處置孔之邊界示意圖.....	18
圖 3-6 完全耦合熱-力學分析流程圖.....	19
圖 4-1 全域模型天然障壁尺寸表示[21].....	21
圖 4-2 處置罐內不詳細分佈及凸緣之詳細尺寸與幾何形狀[21].....	21
圖 4-3 處置孔內部材料對應位置關係名稱圖[21].....	22
圖 4-4 左圖：熱衰函數 0 年至 5000 年隨時間變化圖 右圖：熱衰函數 0 年至 100 年隨時間變化圖[21].....	23
圖 4-5 最高溫位置(點 3)示意圖[21].....	24
圖 4-6 案例 1a、1b、1c 文獻與本文前 20 年熱傳導分析比較.....	25
圖 4-7 不同程度簡化之等效模型(紅色為軸對稱模型銅罐上半部):由左 至右分別為上述之一至三型等效模型.....	27
圖 4-8 第一型等效模型與文獻案例 1a-1c 熱傳導曲線圖.....	29
圖 4-9 第二型等效模型與文獻案例 1a-1c 熱傳導曲線圖.....	30
圖 4-10 第三型等效模型與文獻案例 1a-1c 熱傳導曲線圖.....	30
圖 5-1 案例 1 和 2 有限元素軟體模型示意圖.....	32
圖 5-2 案例 3 有限元素軟體模型示意圖.....	33
圖 5-3 案例 4 有限元素模型示意圖.....	33
圖 5-4 處置隧道與處置孔局部放大圖.....	33

圖 5-5 各材料相對應位置	36
圖 5-6 案例 1 與文獻[21]之溫度隨時間變化趨勢比較圖	38
圖 5-7 案例 1 熱傳導分析雲彩圖	39
圖 5-8 中心處置罐熱傳導分析雲彩圖	39
圖 5-9 案例 2 與文獻[21]之溫度隨時間變化趨勢比較圖	41
圖 5-10 案例 3 與文獻[21]之溫度隨時間變化趨勢比較圖(母岩熱傳導 係數 3.16(W/m-K))	42
圖 5-11 案例 3 與文獻[21]之溫度隨時間變化趨勢比較圖(母岩熱傳導 係數 3.48(W/m-K))	42
圖 5-12 案例 2 熱傳導分析雲彩圖	43
圖 5-13 案例 2 中心處置罐熱傳導分析雲彩圖	43
圖 5-14 案例 3 母岩熱傳導係數 3.16(W/m-K)處置隧道之熱傳導分析 雲彩圖	43
圖 5-15 案例 3 母岩熱傳導係數 3.48(W/m-K)處置隧道之熱傳導分析 雲彩圖	44
圖 5-16 案例 3 母岩熱傳導係數 3.16(W/m-K)中心處置罐熱傳導分析 雲彩圖	44
圖 5-17 案例 3 母岩熱傳導係數 3.48(W/m-K)中心處置罐熱傳導分析 雲彩圖	44
圖 5-18 案例 4 與文獻[21]之溫度隨時間變化趨勢比較圖(母岩熱傳導 係數 3.16(W/m-K))	46
圖 5-19 案例 4 與文獻[21]之溫度隨時間變化趨勢比較圖(母岩熱傳導 係數 3.48(W/m-K))	46
圖 5-20 案例 4 母岩熱傳導係數 3.16(W/m-K)處置隧道之熱傳導分析 雲彩圖	47

圖 5-21 案例 4 母岩熱傳導係數 3.48(W/m-K)處置隧道之熱傳導分析雲彩圖.....	47
圖 5-22 案例 4 母岩熱傳導係數 3.16(W/m-K)中心處置罐熱傳導分析雲彩圖.....	47
圖 5-23 案例 4 母岩熱傳導係數 3.48(W/m-K)中心處置罐熱傳導分析雲彩圖.....	48
圖 6-1 模型示意圖	49
圖 6-2 模型局部尺寸放大圖	50
圖 6-3 模型邊界熱對流係數示意圖	52
圖 6-5 力學邊界條件設置示意圖	53
圖 6-6 孔隙壓力模型邊界示意圖	53
圖 6-7 分析之位置	54
圖 6-8 溫度與時間歷時圖	55
圖 6-9 飽和度與時間歷時圖	55
圖 6-10 應力與距離分布圖(第 8 年).....	55
圖 6-11 局部網格圖	57
圖 6-12 溫度與時間歷時圖	58
圖 6-13 飽和度與時間歷時圖	58
圖 6-14 應力與距離分布圖(第 8 年).....	59
圖 6-16 點 2 應力與時間分布圖(第 8 年).....	60
圖 6-17 點 2 應力與時間分布圖(第 10000 年).....	60
圖 6-18 分析位置示意圖	61
圖 6-19 分析位置示意圖	61
圖 6-20 溫度與於時間歷時圖	62
圖 6-21 飽和度與時間歷時圖	63

圖 6-22 非均質廢料罐溫度之雲彩圖	63
圖 6-23 非均質廢料罐於參考線 1 之溫度分佈圖	64
圖 6-24 非均質廢料罐飽和度之雲彩圖	64
圖 6-25 非均質廢料罐於參考線 1 之飽和度分布圖	65
圖 6-26 非均質廢料罐 Mises 應力雲彩圖	65
圖 6-27 非均質廢料罐於參考線 2 之 Mises 應力分布圖	66

表目錄

表 2-1 芬蘭放射性廢棄物計畫與重要里程(已更新 2015 年資訊)[8]	7
表 2-2 緩衝材料再飽和階段材料參數[9]	8
表 2-3 三種孔隙比之緩衝材料飽和度對應熱傳導係數關係[9]	9
表 2-4 飽合狀態不同孔隙比與溫度之緩衝材料水力傳導係數 K [9]	9
表 2-5Abaqus 計算採用之保持曲線[9]	10
表 2-6 降伏函數[9]	10
表 2-7 混凝土構件之水力材料參數[9]	11
表 2-8 破碎岩石構件與母岩之水力材料參數[9]	11
表 2-9 銅罐、鑄鐵及母岩之熱傳導參數[9]	11
表 4-1 熱傳分析所需之各材料參數[21]	22
表 4-2 熱衰變公式 a_i 與時間關係圖[21]	23
表 4-3 各案例描述	24
表 4-4 案例 1a、1b、1c 文獻與本文比較	25
表 4-5 各型等效模型之幾何形狀及材料參數 (以母岩熱傳導係數 λ = $2.5\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 為例)	27
表 4-6 各案例描述	28
表 4-7 第三型等效模型所使用之材料參數	28
表 4-8 案例 1a-1c 三種型式等效模型使用之緩衝材料熱傳導係數	28
表 4-9 案例 1a-1c 三種型式等效模型與文獻熱傳導分析結果對照	29
表 5-1 案例 1 的熱傳導分析之材料參數	34
表 5-2 案例 2 的熱傳導分析之材料參數	35
表 5-3 案例 3 與案例 4 的熱傳導分析之材料參數	35

表 5-4 各處置罐對應最高溫與發生時間	37
表 5-5 本文與文獻[21]案例 1 熱傳導分析結果比較	38
表 5-6 本文與文獻[21]案例 2 熱傳導分析結果比較	40
表 5-7 本文與文獻[21]案例 3 熱傳導分析結果比較	41
表 5-8 本文與文獻[21]案例 4 熱傳導分析結果比較	45
表 6-1 模型分析之材料參數	50
表 6-2 緩衝材料飽和度與熱傳導係數對應關係	51
表 6-3 材料參數	57
表 6-4 達最高溫與飽和度的時間	59
表 6-5 第八年隧道一、隧道二之比較	62

第一章、緒論

1.1 前言

由於用過核子燃料所產生的衰變熱以及其核輻射污染對於生物圈具有相當大的威脅，因此對於用過核子燃料的最終處置方式，國際間一致認為「深層地層處置」是最好的處理方法，將用過核子燃料置入離地表 500 至 1000 公尺深地層的處置隧道，並利用緩衝材料、回填材料、外包件所構成的工程障壁系統以及周圍岩層所構成的天然障壁系統，隔絕用過核子燃料所產生的衰變熱以及其所造成的核污染，兩者合稱多重障壁系統。

深層地質處置場近場之配置十分複雜，在多孔設施系統中，由於各處置孔間的局部差異，需要採用「處置設施多孔幾何配置」的概念建構分析模型，需消耗大量計算資源，因而侷限分析案例所能容納之處置孔數量。本研究因此擬就 T-H-M 耦合分析所需，建立相應之「等效 T-H-M 耦合數值分析模型」。此外，本研究將彙整國際間高放處置計畫階段成果報告，針對其中 T-H-M 效應之國際相關資訊進行研析，提出深地層最終處置設施耦合分析審查重點之建議。

1.2 研究動機與目的

根據用過核子燃料最終處置計畫書，處置場的設置包括潛在場址選擇、概念設計、施工、運轉、封閉、監管等各項工作。在施工前階段，處置場建造前，選定場址之周圍地質環境為平衡且安定的狀態，但受到施工過程的縱向開挖、橫向開挖、抽水、化學灌漿、管幕等施工的影響，使得原本地質環境的平衡狀態改變，場址周圍的母岩受到開挖擾動後，水力及力學性質產生改變，將造成處置場封閉開始運作後安全功能上的疑慮。

進行處置場近場安全評估，主要的研究工作項目為處置區之熱效應、處置場熱-水-力學效應等，此部分研究相當重要但行為與機制複雜，將先蒐集國外文獻進行研析，針對數值模擬審查時的注意要點，為國內審查制度提供建議。

深層地質處置場開始運作後，近場處置區域將受到高放射性廢棄物所釋出的大量衰變熱，影響著處置場與周圍母岩的溫度場；在地下開挖的施工階段會先大

量抽取地下水，使地下水位下降，方便後續的施工，但處置場運作後數十年，由於處置場周圍之母岩飽和度較低，因孔隙壓力差，處置場外部的地下水壓大，地下水將會由遠場逐漸回注至處置場之中，當地下水由母岩向內傳遞至緩衝材料時，整個處置場障壁系統從未飽和狀態直至完全飽和狀態，這個過程稱為再飽和階段，其中各材料之間的水-力學行為相互影響過程複雜，需要了解與探討，以確保障壁系統的安全功能。

深層地質處置場之多孔設施系統中，整個處置場中各個處置孔之幾何與材料性質並不會完全相同；一般而言，由於材料異質特性、處置程序、工程擾動、或是區域裂縫等因素，都可能造成各個處置孔之間的性質上的差異，因此對應這些複雜條件，處置場整體的分析須探討其間之影響，並力求描述實際的差異。

1.3 研究主題與方法

為了使處置場配置之模擬分析更接近真實情況，本研究考慮處置場多孔之情況。當假設高放射性廢棄物都具有相同的性質與熱衰函數、及處置場中各個處置孔都具有相同的材料性質時，可以利用「代表體積單元」的概念，從處置場內部分離出一個具有代表性的處置場來進行分析，以此模型之分析結果作為整個處置場的設計參考依據。但實際上在進行多處置孔分析時，各個處置孔間都存在著部分的局部差異，因此採用「處置設施多孔幾何配置」的概念建構分析模型。用模型進行處置場系統整體環境的分析，才能充分描述實際上複雜的處置孔情況，但其中模型網格數量繁多，大量的元素數目與節點，使分析上受到了限制，至使無法有效的進行分析。因此為了解決這個問題，將採用「等效模型」的概念，將原始複雜的模型簡化與修正，方可進行後續之分析。

第二章、文獻回顧

2.1 用過核子燃料的最終處置

在核子反應爐中經過一段時間反應後不再具有支持核分裂反應的高效能而被排除出核子反應爐的核子燃料，稱作「用過核子燃料」。用過核子燃料會釋放出高放射性輻射且會釋放出大量的衰變熱，如未予以妥善處理，將會對於生物圈造成不可抹滅的輻射災害，因此，要將放射性廢棄物放置在可以遠離生物圈以至於不影響到其生活環境，對於用過核子燃料的最終處置研究是非常重要的。

對於用過核子燃料的最終處置有許多的處置方式，在經過多年國際間的研究，認為「深層地質處置」是最為可行的一種處置方法，深層地層處置能夠有效地將放射性廢棄物與生物圈隔離並將用過核子燃料永久安置以確保環境永續發展。

「深層地質處置」概念來於瑞典 KBS-3 處置概念，是利用深部地層以及人工材料的阻隔性質所組成的「多重障壁」系統，概念是將用過核子燃料埋放於 300 至 1000 公尺深的天然岩層中，再透過人工材料的隔絕，使得用過核子燃料可以在經過長時間的衰變使得其對生物圈的輻射危害可以降低到可以忽略的地步。「多重障壁」是由天然障壁以及人工障壁系統所組成，天然障壁系統就是位於深地層的天然母岩，而人工障壁系統是由廢料罐、緩衝材料以及回填材料所組成。不可預期因素而導致外釋的核輻射以及輻射熱將受到多重障壁系統隔離與阻絕[1]。

2.2 我國的最終處置評估相關研究

處置場的安全性可以藉由事前評估、各國資料蒐集以及適合處置場環境的選定來提高最終處置場的安全性及穩定性，然而在所有國家對於核能的最終處置概念中，以瑞典的 KBS-3 概念較為成熟，並且該國的用過核子燃料特性與規模與我國較為相近，因此我國的深層地質處置設計概念是以 KBS-3 為參考對象，因此對於國際間選用之「深層地質處置」母岩的合適條件便成為關鍵所在。

為了善用國外發展經驗並考量我國地質環境相似的國家，將參考瑞典 SKB 發展的 SR-Site 計畫[2]、日本 H12 報告[3]以及芬蘭 ONKALO 處置設施的成果，以及我國台電報告[1]中提到地質環境、工程障壁系統設計與穩定性研究、安全評估之技術發展規劃如下：

(1)地質環境

- (a) 區域環境地質：處置母岩的選擇相當重要，因此需要進行潛在處置母岩特性資料的蒐集以及調查，以結晶岩具有長期穩定性為佳。此外，該地區需要蒐集區域範圍深井長期觀測的壓力變化，以進行地下水量的估算評估。
- (b) 深層地質特性：對於我國水文地質、水文地球化學、核種傳輸路徑、岩石特性等進行深層地質調查，進而建立地質概念模型(JNC,2000,p.III-7)，並參考瑞典(SKB)最新處置技術(Andersson et al.,2013,p1049)，建立我國各地深層地質參考資料，提供後續對於最終處置場的工程設計與安全評估分析技術發展之基礎；
- (c) 地質處置合適性研究:蒐集我國地質圈長期演化的相關資訊，以便了解地殼及岩體可能造成的影響，內容包括台灣的大地構造、抬升與沉陷作用、氣候與海平面變遷等影響處置環境長期穩定性的影響因子。

(2)工程障壁系統設計與穩定性研究

- (a) 處置設施概念研究：以日本 H12 報告及瑞典 SKB 之 SR-Site 相關技術經驗為重要參考資訊。內容包括整體處置概念及處置概念的影響因子、工程障壁系統及地下處置設施的設計需求等，以此建立國內參考處置概念。
- (b) 處置設施設計研究：彙整國外深層地質處置設施之設計資訊，探討工程障壁的穩定性，包括緩衝材料之再飽和特性、力學穩定特性、受震穩定性及氣體遷移等，並進行工程障壁 THMC 特性實驗/模擬之初期技術發展。
- (c) 工程技術：取得深層設施之建造、運轉、封閉等技術資訊，進行工法經濟效益與影響之探討，並發展處置設施之營運和管理技術。

(3) 安全評估：

目前國內用過核子燃料最終處置設計是以國際間經過多年研究而成熟的 KBS-3 為參考概念，依據我國用過核子燃料最終處置計畫書（2014 年修訂版）的規劃目標，第一階段「潛在處置母岩特性調查與評估階段」於 2017 年完成「用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告」（簡稱 SNFD2017 報告），預計完成

此階段之以下目標。(1) 完成我國潛在處置母岩特性調查與評估；(2) 建立潛在處置母岩功能/安全評估技術，並建議下階段(2018年至2028年)候選場址的建議調查區域。

而原能會針對 SNFD2017 報告，要求要達成以下 3 階段目標：(1) 能否找到合適的花崗岩進行地質處置；(2) 地質處置工程技術能力是否完備；(3) 地質處置設施長期安全性之評估。

2.3 各國處置場概念現況

目前國際間對於用過核子燃料都已提出相關之管理政策，且以深地層處置作為主要處置目標，積極於地下實驗室進行試驗，以取得現地之地質參數及試驗結果。彙集國外處置場相關經驗中，即便以都是深地層處置為共同的目標，也會因每個國家不同的文化、政治、歷史、時空和背景的情況，而有各自的計劃過程。因此，掌握各國家對於用過核子燃料之最終處置發展現況、最新動態及消息，可以了解到更多國家的相關分析技術發展。

目前西班牙、比利時、韓國這三個國家處於用過核子燃料處置計畫方法討論階段；日本、中國、加拿大、瑞士、德國、英國更進一步處於處置場公開招募以及文獻蒐集調查階段[4]；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，下一個小節將以芬蘭做為舉例。

2.3.1 芬蘭

芬蘭自 1970 年代後期國內首座核子反應爐開始運轉時，就已經開始為用過核子燃料的最終處置做準備，並於 1983 年首次完成最終處置的時程表，同時也確立用過核子燃料管理的目標與規劃。

在 1994 年通過修改其《核子能源法規 (Nuclear Energy Act)》後，芬蘭境內所產生的用過核子燃料及放射性廢棄物，均必須在芬蘭境內處理、貯存以及處置，生產者則必須負擔所需的費用。因此，芬蘭自 1996 年開始即停止將境內核電廠所生產的用過核子燃料運送至俄羅斯進行再處理，取而代之的是將其暫存在電廠

內的用過核子燃料池內。

自 1990 年起，芬蘭已有低放射性廢棄物的最終處置場在運作，位於兩處核電廠區內。至於用過核子燃料最終處置場址，自 1978 年開始進行處置場址的調查，經過場址初步調查、細部場址調查，到 1999 年~2001 年正式進入法定程序（Decision in Principle, DiP）提出以 Olkiluoto 為放射性廢棄物最終處置場址，並獲得地方及中央政府與議會同意。同時，興建 ONKALO-URL 做為展示及各項安全性實驗之用，將在地下 437 公尺的地方，建立技術研究設施，進行處置相關技術的試驗與探查工作，而最終用過核子燃料的處置地約為地下 500 公尺左右。

芬蘭政府於 2015 年 11 月 12 日核發全球首張深層地質處置場的建築執照，准許放射性廢棄物處理專責公司——Posiva 於芬蘭西南部的 Olkiluoto 島，建造用過核子燃料封裝廠(encapsulation plant)與用過核子燃料最終處置場。預計 2022 年開始營運，芬蘭放射性廢棄物計畫與重要里程如表 2-1 所示。

由文獻[7]中提到芬蘭在放射性廢棄物管理的成功經驗，有幾點如下：

1. 明確的權責與組織架構
2. 明確的決策原則
3. 處置計畫具有彈性的微調策略(“do and see” strategy)與全程規劃
4. 成功的技術研究發展計畫
5. 國際互動與合作
6. 溝通與承諾
7. 健全財務

其中第四點提到，Posiva 公司於 Olkiluoto 電廠之 ONKALO-URL 進行工程開挖及技術驗證，此舉也是做為與公眾溝通的方式之一；最終處置設施概念採用 KBS-3 多重障壁系統，且已長期實際為處置場相關分析進行技術驗證。

表 2-1 芬蘭放射性廢棄物計畫與重要里程碑(已更新 2015 年資訊)[8]

1983年展開高放射性廢棄物相關研究計畫。
1985年完成初步場址篩選。
1987年Olkiluoto核能電廠用過核子燃料貯存設施開始運轉。
1992年完成5處候選場址的初步調查(1987-1992)。
1995年成立POSIVA。
1996年Lovissa電廠停止將放射性廢棄物運送至蘇聯處理。
1999年完成4處場址的詳細調查(1993-1999)。
1999年選定Olkiluoto核能電廠附近之Eurajoki作為用過核子燃料處置場址。
1999年5月POSIVA正式向芬蘭政府提出在Okilouto建造高放性廢棄物深層地質處置場的申請。
2001年5月芬蘭國會以159票贊成對3票反對的壓倒性投票結果，授權政府開始在Okilouto進行深層地質最終處置場的建造。
2004年6月開始建造ONKALO-URL。
2012年12月提出最終處置場建照申請。
2015年11月12日核發深層地質處置場的建築執照，開始興建封裝廠及最終處置場設施。
預定於2020年申請處置場運轉執照。
預定於2050年封閉處置場。

2.4 文獻研析

1. “THM modelling of buffer, backfill and other system components”,TR-10-44[9]

這份報告是對 SR-site 系列研究中所採行材料數據的統合整理，並符合 SKB 的品質要求。報告中列出緩衝材料、回填材料及障壁系統內其他材料在 THM 耦合過程中性質改變的問題。報告中考慮 22 個模擬分析議題，各代表了處置場運作過程中不同方面的問題。報告中列出這些案例中所使用的材料性質數據。這些案例使用了 Code_Bright 跟 ABAQUS 兩個分析軟體。數據資料的重點為緩衝材料與回填材料中的膨潤土，及隧道塞孔與鑽孔中的密封材料。其中與膨潤土相關之材料行為皆使用 MX-80 膨潤土進行處理。

本文亦列出 MX-80 膨潤土所使用相關參數的資料來源，並確認數據的準確性。本文中列出大部分的資料都已更新過，特別是 Code_Bright 所使用的參數。所呈現的數據也經過一系列透明檢測，從測量，通過評估，到參數確定等等。測

量資料盡可能選擇近期的、可追溯的和獨立的。經過這個檢驗程序的數據資料，才可被認為是合格的。

在列出的數據資料中，亦簡要的討論概念不確定性、空間和時間變異性及相關性。更多討論是關於測量之精度、偏差和代表性，以及材料性質在膨脹壓力、水力傳導性、剪力強度、保水性能和熱傳導性所造成的不確定性等等。

使用的資料是經過詳細評估後的測量數據。為了加強確認各參數值的相關性，在參數值評估中考慮了較新的或獨立的測量結果，從最近的測量值重新評估過去使用的膨脹壓力、水力傳導性和剪力強度之間的關係。而保水性質與熱傳導性的獨立量測，證明了所使用的參數值和過去文獻表格中的參數一致。這些參數對水力傳導過程、均質性與溫度峰值的計算是非常重要，特別是對 Code_Bright 中使用的 BBM(Barcelona Basic Mode)力學參數。BBM(Barcelona Basic Mode)是目前最常使用做為分析非飽和土壤彈塑性材料行為之模型，本文獻量化了在不同乾密度下之 BBM 模型參數，包括參考應力(reference stress) P^c 以及土壤常數(soil constant) r 。

至於其他材料資料(銅罐、鑄鐵、母岩、擾動帶、碎石及混凝土)，報告中僅進行部分的定義與討論。報告中列出了採用這些其他材料參數值的主要文件，但由於這些材料在定義上具有不同程度的差異，因此並未進行廣泛的認證程序。應該注意的是，分析模型任務通常不是針對特定場址，而是通過敏感性分析來說明部分參數的可變性。

在 SR-site 模型分析中使用的數據將在報告結尾處彙編成表格(表 2-2、2-3、2-4、2-5、2-6、2-7、2-8、2-9)。

表 2-2 緩衝材料再飽和階段材料參數[9]

Parameter/variable	Value	Comment
Thermal conductivity, λ	$f(S_r, e)$	1)
Specific heat, c	$c = 800/(1+w)+4,200w/(1+w)$	
Hydraulic conductivity, K	$f(S_r, e, T)$	2)
Thermal vapour flow diffusivity, DT_v	$f(S_r, e, T)$	3)
Isothermal vapour flow diffusivity	$D_{pv} = 0$	
Water retention curve	$u = f(S_r)$	4)
Porous elasticity	$\kappa = 0.2$	
Moisture swelling data	$f(S_r)$	5)
Poisson ratio	$\nu = 0.4$	
Friction angle in p-q plane	$\beta = 16^\circ$	Drucker Prager Plasticity model
Cohesion in p-q plane	$d = 100 \text{ kPa}$	Drucker Prager Plasticity model
Dilation angle	$\psi = 2^\circ$	Drucker Prager Plasticity model
Yield function	$\varepsilon_{pl} = f(q)$	6)
Particle density	$2,780 \text{ kg/m}^3$	

表 2-3 三種孔隙比之緩衝材料飽和度對應熱傳導係數關係[9]

Sr	λ (W/m,K) (e=0.5)	λ (W/m,K) (e=0.78)	λ (W/m,K) (e= 1.0)
0	0.4	0.3	0.2
0.2	0.4	0.3	0.2
0.3	0.5	0.4	0.3
0.4	0.65	0.55	0.45
0.5	0.85	0.75	0.65
0.6	1.05	0.95	0.85
0.7	1.2	1.1	1.0
0.8	1.3	1.2	1.1
0.9	1.35	1.25	1.15
1.0	1.4	1.3	1.2

表 2-4 飽合狀態不同孔隙比與溫度之緩衝材料水力傳導係數 K [9]

Void ratio	$K \cdot 10^{13}$ (m/s) (T=20°C)	$K \cdot 10^{13}$ (m/s) (T=40°C)	$K \cdot 10^{13}$ (m/s) (T=60°C)	$K \cdot 10^{13}$ (m/s) (T=80°C)
0.4	0.035	0.05	0.07	0.1
0.6	0.2	0.31	0.44	0.55
0.8	0.65	1.0	1.45	1.8
1.0	1.75	2.75	3.85	4.9

表 2-5Abaqus 計算採用之保持曲線[9]

Suction (MPa)	Sr (-) e=0.56	Sr (-) e=0.636	Sr (-) e=0.78
295.1	0.163	0.143	0.117
149.7	0.458	0.403	0.328
71.2	0.755	0.665	0.542
65.4	0.770	0.680	0.555
54.5	0.800	0.700	0.570
47.5	0.820	0.720	0.590
37.0*	0.849	0.747	0.610
33.6	0.861	0.763	0.625
30.2	0.873	0.780	0.642
25.2	0.892	0.806	0.671
22.0	0.904	0.825	0.694
14.3	0.936	0.877	0.762
11.3	0.949	0.899	0.796
8.4	0.961	0.923	0.836
6.9	0.968	0.935	0.858
5.5	0.974	0.947	0.882
4.1	0.981	0.960	0.908
2.7	0.987	0.973	0.936
1.4	0.994	0.986	0.967
0.7	0.997	0.993	0.983
0	1	1	1

* = Initial value.

表 2-6 降伏函數[9]

q (kPa)	ϵ_{pl}
1	0
50	0.005
100	0.02
150	0.04
200	0.1

表 2-7 混凝土構件之水力材料參數[9]

Parameter		Tunnel plug	Bottom plate	Prefab beams
Porosity	n (-)	0.135	0.135	0.135
Intrinsic permeability	k (m ²)	5E-19	5E-19	1E-15
Relative permeability	k _r (-)		S _r ³	
Water retention curve	P ₀ (MPa)		9	
	λ (-)		0.3	
Elastic parameters	E (GPa)		35	
	ν (-)		0.27	
Aggregates	(-)	0.67	0.67	-

表 2-8 破碎岩石構件與母岩之水力材料參數[9]

Parameter		Crushed rock		Rock materials		EDZ
		Plug filter	Filling	Rock matrix	Fracture material	
Porosity	n (-)	0.35/0.39	0.18	0.003	0.003	0.003
Intrinsic permeability	k (m ²)	1E-15	1E-15	1E-18 – 1E-20	Specified	1E-15
Relative permeability	k _r (-)	1	1	νG: λ=0.6	νG: λ=0.6	νG: λ=0.6
Water retention curve	P ₀ (MPa)	3E-3	3E-3	1.74	1.74	1.74
	λ (-)	0.9	0.9	0.6	0.6	0.6
Elastic parameters	E (MPa)	60/20	-	-	-	-
	ν (-)	0.2				

表 2-9 銅罐、鑄鐵及母岩之熱傳導參數[9]

Parameter		Copper	Cast iron	Rock
Density	ρ (kg/m ³)	8,930	5,700–7,200	2,700
Specific heat	c (J/kgK)	390	500	800
Thermal conductivity	λ (W/mK)	390	30–50	3.5

2. “Independent Calculations for the SRCan Assessment”, SKI Report 2008:12 [10]
SKB 已經對 Forsmark 或 Laxemart 場址進行用過核子燃料深地層處置場的 SR-Can 系列評估，這份報告是正式交付管理之前的最終評估。[10-11]

這份報告進行獨立計算，以確認 SKI 對 SR-Can 的審查。計算類型有：

- (1) 對 SKB 之特定分析進行平行驗證。
- (2) 使用獨立的分析軟體平行驗證 SKB 的分析，以確認 SKB 已完成的結果之正確性，並檢核分析是否已正確記錄。
- (3) 平行驗證，檢核特殊情況案例的安全性。

平行驗證後得到的結果：

- (1) 平行驗證能夠為 SKB 提出的論點提供支持
- (2) SKB 提供的資料不足以讓第三方進行 SR-Can 分析的平行驗證

由於本報告是根據 SKI 對 SR-Can 評估審查的時間表進行撰寫，因此一些平行驗證結果尚未得到充分的記錄。

目前已得出以下部分結論：

- (1) SKB 一直在努力回應對以前績效評估的批評，SR-Can 是一項令人印象深刻的成果。
- (2) 在某些部分，資料不足或不一致，因此不可能完全重現 SKB 的分析，這是 SKB 在 SR-Site 評估中需要改進的重點。
- (3) 需要進一步審查 SKB 對處置場封閉後運作過程的描述，整體而言 SKB 僅有限的考慮系統達到新平衡之前的耦合過程。
- (4) 從熱傳導過程的分析結果得知，某些廢料罐達到接近 100°C 的最大標準溫度，由於處置場配置的方式存在不確定性，因此不可能完全重現由 SKB 提供的分析。
- (5) SKB 的處置場再飽和分析尚具不確定性，在 QPAC-EBS 分析中得到的再飽和時間大致上與 SKB 時間一致，但是在某些組合假設下，得到大於 200 年的時間結果，之後將進行進一步的平行驗證。

3. “Final Report on the Surface-based Investigation Phase(Phase I) at the Mizunami Undergroud Research Laboratory Project”, 2011 ,JAEA.[12]

日本 JAEA 文獻內容主要針對日本瑞浪地區地下處置研究中心進行事前調

查及量測，並進行後續作業實施規劃。

首先是對於地表與地質的調查與量測，並且將其分成多重步驟進行調查，其中針對地質構造、地下水流量特徵、核種阻隔及傳輸、地下處置隧道數量配置研究、局部應力狀態調查、地下隧道數量與配置、大地應力及空間變異性等等進行調查並說明其注意事項，以確認該地質是否適合置放廢料罐。

經過調查確認後，再針對地下設施進行設計及施工步驟之說明及其注意事項，設計及施工內容包括確認地下水壓力變化、地下水流場變化及分佈、地質力學特性、地球物理探測、水化學調查、流體測井、地球物理測井、流場變化、液壓試驗、探鑽調查、初始應力測量、質量控制以及地質和地下水分析等物裡探測相關說明。

除此之外，針對地下設施挖掘所造成的效應建立分析模型，預測影響範圍以及詳細說明相關事項，並且進行地下設施的設計與施工研究、施工時維持地下設施週遭母岩穩定之基礎配套措施、施工工程環境影響評估、地下坡道設計、抗震的穩定性、觀測施工噪音與震動與限制地下水的侵入等等安全措施的規劃以及評估說明。最後再針對深層地下工程技術的開發以及步驟進行一連串的說明，以便進行地下處置中心建立之實施。

4. “Thermo-Hydraulic Modelling of Buffer and Backfill”, POSIVA2012-48[13]

這份報告利用數值分析方法研究了工程屏障系統中的各項參數的時間演變，例如飽和度、孔隙壓力和溫度等。在本篇報告中進行了一組實驗測試來校準模型分析中使用的參數，分析的模型包含水力分析以及熱-水力分析，這兩項分析所需的各項參數及特徵，都已經收集完成。本報告使用有限元素軟體 CODE_BRIGHT 來進行建模，並採用輔助計算的程式來進行分析。

本報告的主要目標是提高對影響 Olkiluoto 處置場中緩衝材料的熱-水力過程和材料性質的瞭解，並確定分析中各項參數以準確預測此過程，分析的內容包括評估初始廢料罐溫度和間隙對緩衝材料的影響，以及裂縫和位於裂縫之間的岩石對緩衝材料和回填材料再飽和所造成的影響。在熱-水力分析中，最主要是檢查熱流對緩衝材料再飽和過程之影響。對於參數的不確定性、邊界條件的變化、模型幾何和熱-水力現象進行了敏感性分析評估。

對於所有模型分析的案例，本報告都仔細選擇材料參數、模型幾何和假設，

所有模型分析的參數必須與實驗室所測量的結果進行比較和評估。本報告的分析結果表現出地下水流過岩體和岩石裂縫的重要性，以便實現關於緩衝材料飽和度的可靠預測，因為岩石的水文條件不同，飽和時間可能在幾年到幾萬年之間。除了岩石的水力傳導率和裂縫透射率之外，飽和過程也受到緩衝材料和回填材料的材料性質影響，對於熱流和水氣輸送則影響較小。關於溫度變化，處置場內部部件的熱傳導率和緩衝材料中孔隙的行為是關鍵的變數。

5. 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，台灣電力公司[14]

本報告為「用過核子燃料最終處置計畫」於 103 年度工作成果摘要報告。內容涵蓋「地質環境」、「處置技術的研究發展」、「用過核子燃料處置的功能評估」等技術發展成果。在地質環境方面，主要成果包括：(1)運用過去多年整合地質、地球物理、地下水等調查技術，應用於東部結晶岩體規模、地震、沉陷等特性調查之成果，有助於未來以本土特性調查資料評估地質圈對核種傳輸的影響。(2)進行東部結晶岩鑽井岩心的詳細礦物分析，並完成井下裂隙分析，獲致此區地下地質與導水構造的特性相關資料，顯示不僅井下裂隙特性皆順既有構造發育而具相當一致性，且均有地下水帶來的方解石充填物。持續進行離島結晶岩深井之水文地質長期監測；並根據現地特性調查與參數化資料，建構二維水文地質概念模式。(3)建置長期微震及 GPS 監測站，獲致此區結晶岩體及鄰近岩層之地震相對安靜帶分布及短期沉陷趨勢之量測紀錄。在處置設計與工程技術方面，主要成果包括：(1)針對國內用過核子燃料特性，根據瑞典 SKB 提出之 KBS-3 型工程障壁之概念，提出國內工程障壁系統設計需求要項，做為處置設計之功能試驗與工程技術發展之基礎。(2)探討與分析處置概念影響因子，包含重新用過核子燃料之熱與輻射特性與關鍵核種，並針對廢棄罐、緩衝材料與母岩等特性，分析對處置設施的重要影響因子。(3)分別進行處置設施、工程障壁、廢棄物罐等熱-水-力-化耦合特性分析，以發展國內本土化之分析能力。

第三章、處置設施多孔幾何配置

3.1 前言

多孔處置場之配置十分複雜，場內有許多相互平行的隧道，隧道之間距稱為長向距離，沿著隧道各廢料罐之距離則稱為短向距離。在多孔處置場系統中，各處置孔之幾何與材料性質並不會完全相同，甚至由於局部分佈的裂縫、擾動區域的存在、或是材料的變異等因素，都可能造成各處置孔間較大的差異；在此情況下，需要採用「處置設施多孔幾何配置」的概念建構分析模型，直接進行多孔處置場之整體模擬；亦即，在相應的處置參數條件下，直接建構多個廢棄物罐等之模型，以此進行運算。在此概念建構的模型中，可以考慮各處置孔的局部差異。

根據多孔處置場的設計概念，處置孔之間的距離越近，處置場可埋置的廢料罐也越多，然而由於其距離縮短，熱傳空間隨之減小，處置場內的溫度也會隨之升高，在長期高溫下，即可能對其功能造成不良的影響，由此可知處置孔間距尺寸為相關設計中極重要的考量因子。此外，在建立處置場之數值分析模型時，需要考慮的多重障壁系統包含廢料包件、緩衝材料、回填材料、母岩等，分析中使用的熱、水力、變形之材料特性包括熱傳導係數、密度、比熱、彈塑性力學參數等。由於放射性廢棄物最終處置目前在我國仍處於初步規劃階段，處置之場址亦尚未決定，除了上述緩衝材料之各項相關參數之外，其餘均配合我國放射性廢棄物處置場相關分析選用的材料，對於現階段未知參數的選擇，宜考慮一般性的狀況，以作為未來細部設計的參考依據。

3.2 多重障壁系統

多重障壁系統係阻絕廢料罐中的放射性物質與有害物質傳遞到生物圈。在多重障壁系統中，可分為工程障壁與天然障壁，其中工程障壁系統由廢料罐、緩衝材料、回填材料所組成；天然障壁則是自然環境之母岩。關於多重障壁之材料說明如下：

1. 廢料罐：可分為未處理與再處理

- (1) 未處理：即是將核廢料直接放入廢料罐，作後續的處置。

- (2) 再處理：以濕式冶金分離程序，將鈾與鈾元素，分別自溶液中萃取出，與無使用價值的分裂物分離，將分裂物以玻璃固化後密封於不鏽鋼桶中，再進行後續處置。

廢料罐為最先阻絕高階核廢料外洩之材料，以設計的基本要求，應具備條件有：(i)廢料罐本身沒有內部腐蝕問題，外部受到地下水與化學作用侵蝕，必須能阻止與核廢料的接觸；(ii)材料必需堅固且壽命長；(iii)對緩衝材料及母岩的化學性質影響甚少；(iv) 材質不能影響用過核子燃料的溶解與放射性核種在緩衝材料及岩體中的傳輸。故選擇廢料罐材料時，需考慮其耐蝕性、耐壓性、耐熱性、耐放射性及製作性[16]。

2. 緩衝材料：

緩衝材料主要是圍繞著廢料罐的外圍，可以長時間隔離放射性核種的材料。其特性：(i)可以快速傳導廢料罐的熱能進入周圍的母岩；(ii)必須有較低的水力傳導係數，避免地下水與廢料罐本體接觸；(iii)受應力作用時需產生彈性變形之材料且具有回脹特性，可自行修復裂縫與填充孔隙；(iv)對核種有吸附性可遲滯放射性核種遷移。

3. 回填材料：

係用來填充處置場孔隙，目的在於使處置場之環境恢復到開挖前的天然環境，維持自然的平衡。其特性：(i)滲透係數須小於等於周圍母岩，以阻止地下水流，且不可使地下水的品質變壞，長時間保持化學之穩定性；(ii)具有回脹壓力以維持處置系統之穩定性及安全性，必須與母岩緊密接觸避免產生空隙；(iii)具有高密度性及低壓縮性，將緩衝材料固定於處置孔內，避免緩衝材料之膨脹擠壓影響隧道之穩定性。

4. 處置場母岩：

母岩是防止核種遷移的天然障壁，母岩是否適合進行最終處置為處置場選址之首要條件。其特性(i)地下水流動緩慢；(ii)長期地質穩定；(iii)水文穩定。多重障壁系統中各障壁其相對重要性隨母岩之不同而有所不同。例如:母岩為沉積岩

時，天然地質障壁是最重要障壁，其次為回填與密封，再其次為廢料罐與外包裝桶；當母岩為結晶岩時，緩衝材料為最重要障壁，其次為廢料罐與外包裝桶，再其次為地質障壁[17]。以台灣區域環境考量，以結晶岩體之花崗岩為優先調查研究。

3.3 代表體積單元

在處置場模擬分析時，如圖 3-1，處置場內部有許多平行隧道，隧道與隧道的距離稱之長向距離；隧道內廢料罐與廢料罐的距離稱之短向距離由[18]得知，長向間距中央與短向間距中央，如圖 3-2、圖 3-3，皆存在熱傳導對稱面，且在對稱面上沒有熱量流動，因此溫度梯度視為零，對稱面所圍成之體積為「代表體積單元」，如圖 3-4。進行熱傳分析時，對稱面視為代表體積單元之熱傳邊界。由於對稱面的位置位於長向間距、及短向間距中央，因此可推得代表體積之長向尺寸(L)、及短向尺寸(S)。

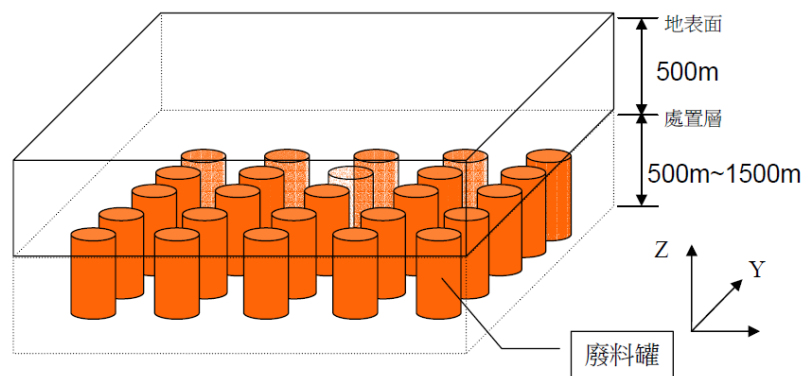


圖 3-1 處置場配置圖(側視圖)

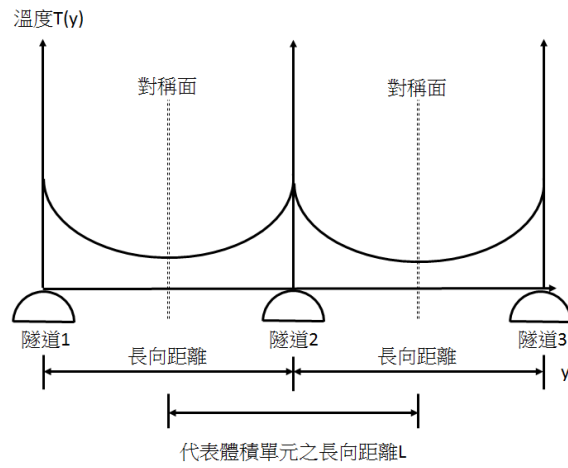


圖 3-2 長向距離之熱傳對稱面示意圖

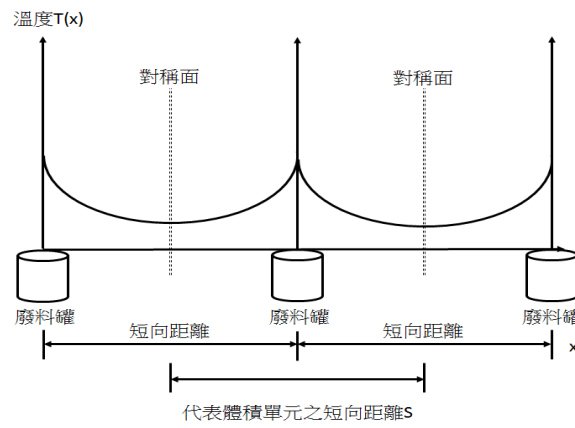


圖 3-3 短向距離之熱傳對稱面示意圖

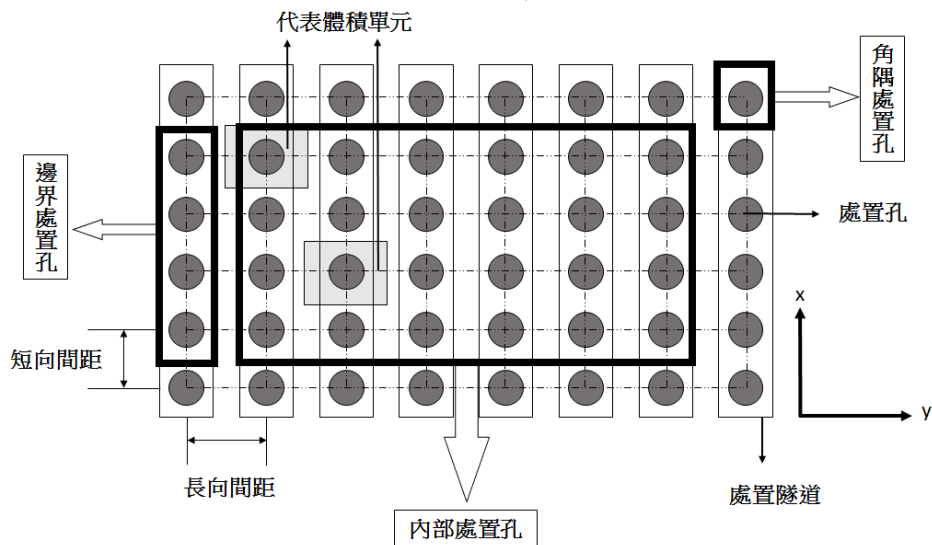


圖 3-4 處置場配置幾何示意圖

處置場中依廢料罐埋設位子不同，可分為內部處置孔、邊界處置孔、角隅處置孔三中類型如圖 3-4，不同類型之位置其邊界也不相同如圖 3-5。1 號處置孔位於短向邊界處，2 號處置孔位於角隅邊界處，3 號處置孔位於內部，4 號處置孔位於長向邊界處。因此藉由改變模型之邊界，即可模擬內部處置孔、邊界處置孔、角隅處置孔。

一般而言，處置孔所放置的廢料罐，其熱源強度皆相同，邊界處置孔與角隅處置孔，具有無限邊界，則其熱傳遞空間範圍較大，所以溫度較低；反之內部處置孔，因其為有限邊界，所以溫度較高[18]。本研究採用溫度較高的情形，即內部處置孔之邊界作為模型建構與分析討論。

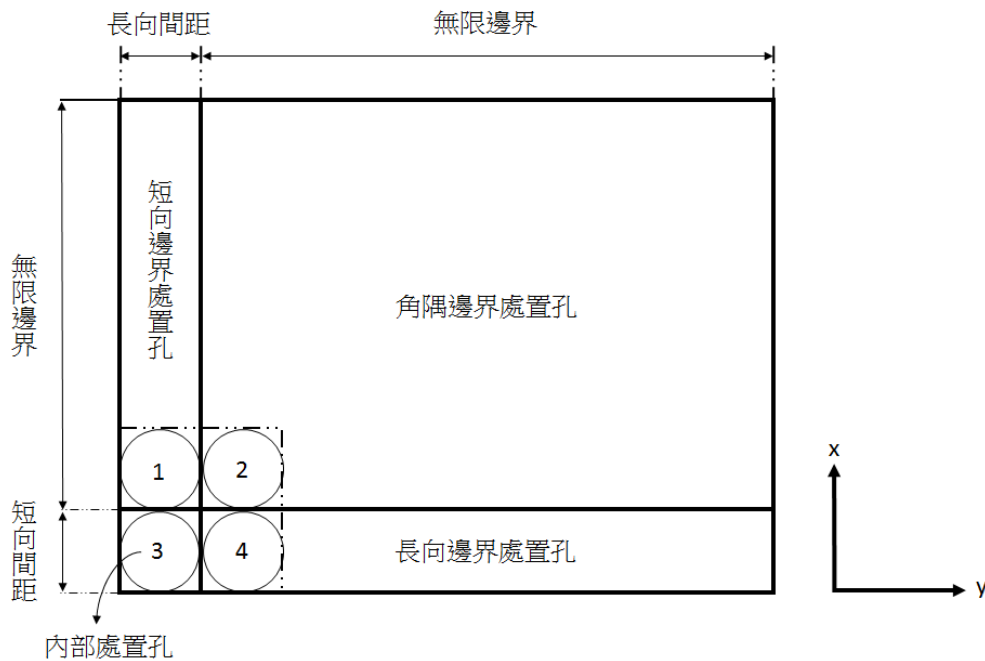


圖 3-5 不同位置處置孔之邊界示意圖

3.4 分析工具

本系列之研究係持續採用 ABAQUS 進行計算。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[26]：

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。

3.5 完全耦合熱-水-力學分析

本耦合分析方法，係採用國內外相關研究長期以來最常使用之分析概念 [1][3][9]，內容茲說明如下。

於分析處置場問題時，假設處置場受廢料罐產生的高溫作用，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[19]:

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 3-6 所示。

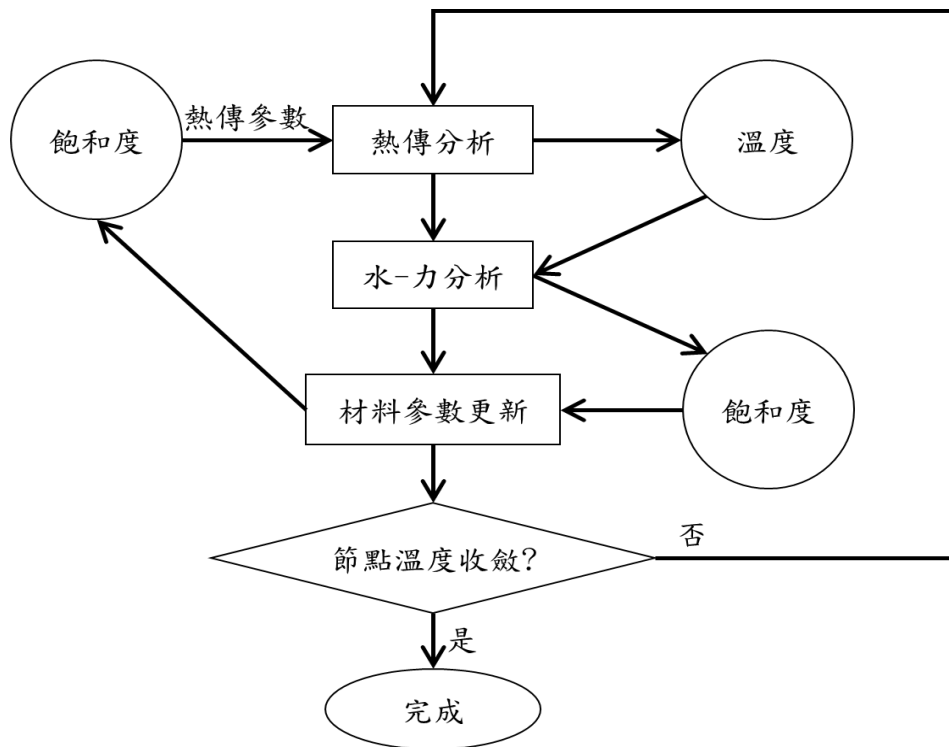


圖 3-6 完全耦合熱-力學分析流程圖

第四章、等效熱傳導數值分析驗證技術

4.1 前言

處置區之衰變熱產生溫度變化，介質內部之熱量傳遞係經由熱傳導及熱對流兩種方式進行，其中熱傳導藉著靜止物體內部粒子間的活化交互作用傳遞熱量，而熱對流則是直接經由粒子的運動傳遞熱能。在本文所考慮之處置場的多重障壁系統中，除了地下水的流動外，其餘各介質均可視為靜止；同時，根據相關研究結果顯示[20]，在處置場的障壁系統中，由地下水流引致的熱對流效應可以忽略，亦即，其熱量傳遞行為主要由熱傳導現象所控制。

4.2 軸對稱熱傳導數值驗證技術

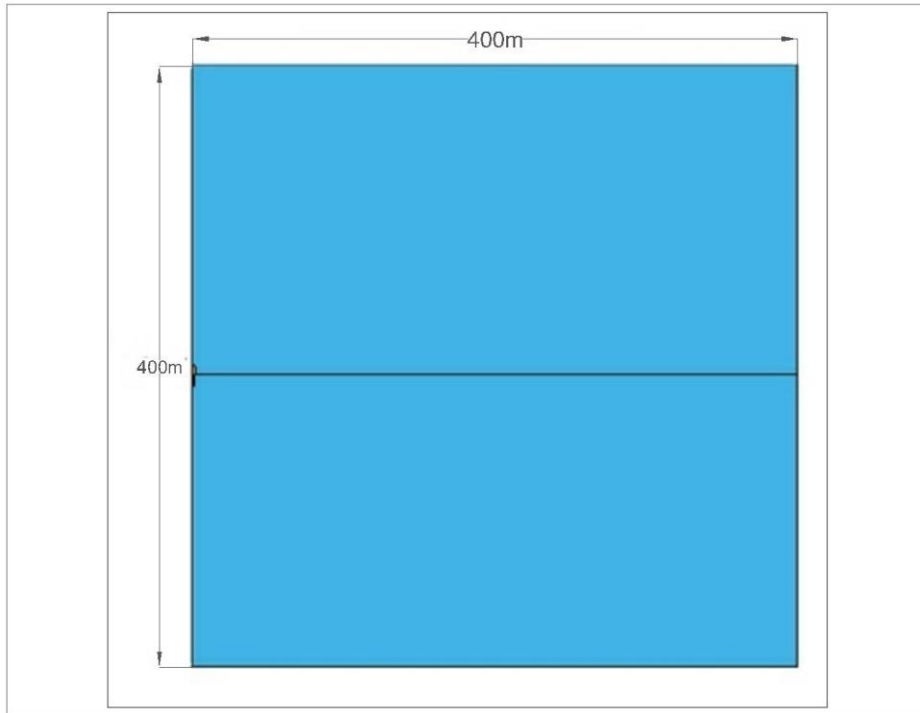
本章節將依據瑞典 SKB 報告[21-23]之案例模型原型作為基礎並對照，及做為 4.3 節中等效熱傳模型建立之基礎。文獻中以母岩之熱傳導係數 $\lambda = 2.0\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、 $\lambda = 2.5\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、 $\lambda = 3.0\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 為最基礎之案例，並分別以 1a、1b、1c 代表不同熱傳導係數下案例之分析結果。並以 1a、1b、1c 案例為基礎分別分析緩衝材料參數、回填材料參數、間隙材料及尺寸參數等影響。

本章將針對處置場內相關材料參數的影響行為進行模擬並與文獻[21-23]各結果進行對照，做為等效熱傳模型及後續三維模型建立之基礎。

4.2.1 模型尺寸與材料參數

文獻中利用處置場及處置孔本身對稱性質，在全域的狀況下建立總高度 400 公尺、徑向距離 400 公尺之軸對稱模型來描述處置孔內之分佈情形如圖 4-1 所示，處置孔尺寸為高度 6.98 公尺、半徑 0.875 公尺，廢料罐尺寸為高度 4.575 公尺、半徑 0.525 公尺，熱源外圍以高度 4.83 公尺、厚度 50mm 含有較複雜凸緣之銅罐包覆，處置罐內部設置及凸緣詳細尺寸以圖 4-2 表示，處置孔與緩衝材料間包括高度 4.83 公尺。

軸對稱有限元素模型由 8738 個元素組成，元素形式為 DCAX8 設置，即由 8 個結點所構成之軸對稱熱傳導分析模型。



□

圖 4-1 全域模型天然障壁尺寸表示[21]

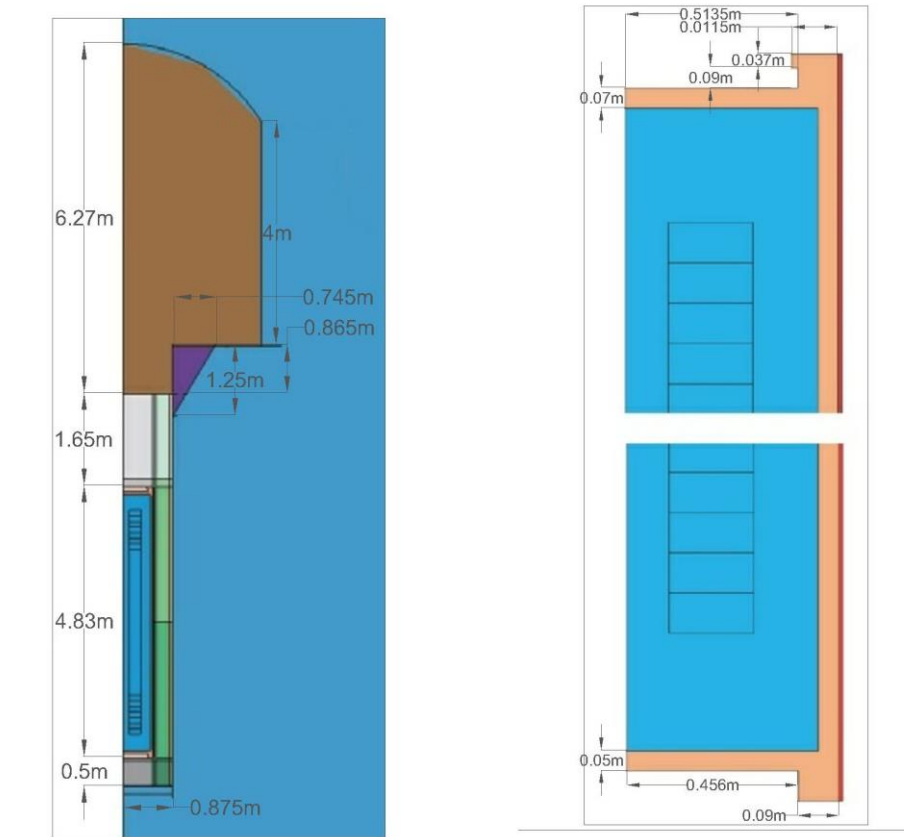


圖 4-2 處置罐內不詳細分佈及凸緣之詳細尺寸與幾何形狀[21]

熱傳分析由文獻中附錄 A 提供之材料參數包括熱傳導係數、密度、比熱[21]，而使用之多重障壁系統包含熱源&外包件(overpack)、銅罐(copper)、緩衝材料(buffer1、2)、回填材料(backfill)、母岩(rock)各詳細數值如表 4-1 中所示。本文使用包括(1)熱源、(2)銅罐、(3)處置罐及緩衝材料間之間隙、(4)熱傳導係數 1.1 之緩衝材料、(5)熱傳導係數 1.0 之緩衝材料、(6)處置孔及母岩間之含粒料間隙、(7)回填材料、(8)翼板、(9)母岩[21]，如圖 4-3。

表 4-1 熱傳分析所需之各材料參數[21]

材料種類

材料性質	熱源&外包件	銅罐	gap1	gap2	緩衝材料	回填材料	母岩
------	--------	----	------	------	------	------	----

熱傳導係數 (W/m-K)	25	390	0.04	1.0	1.1、1.0	0.7	2.5
比熱 (J/kg-K)	500	390	1000	800	800	780	770
密度(kg/m ³)	7200	8930	1.3	2780	2780	2500	2770

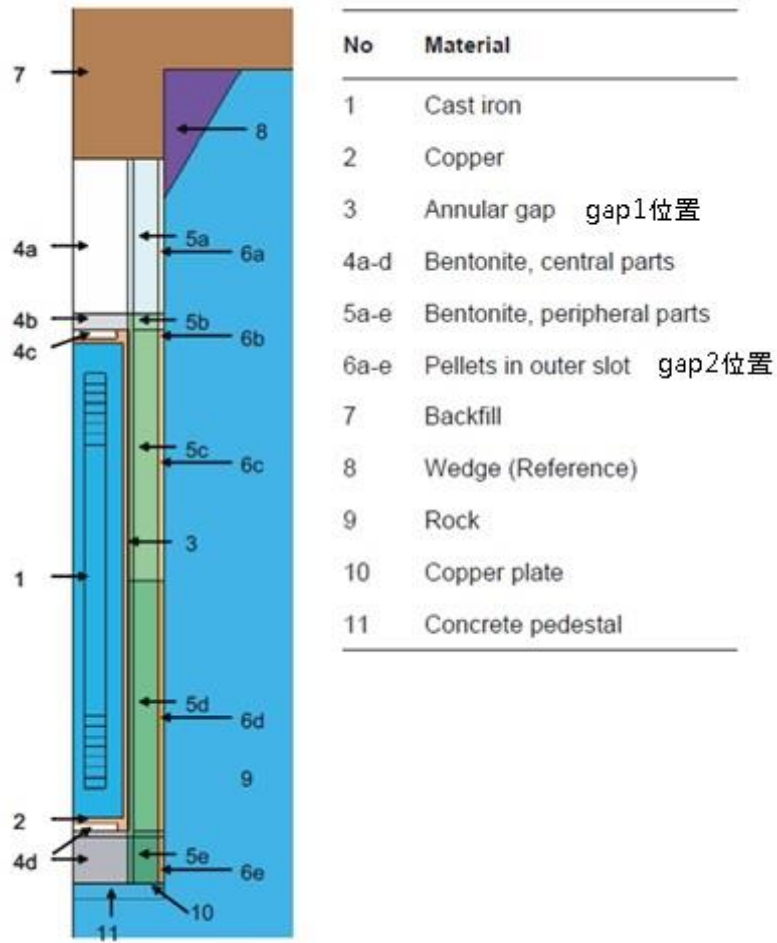


圖 4-3 處置孔內部材料對應位置關係名稱圖[21]

4.2.2 初始條件與邊界條件

本文軸對稱模型與文獻[21-23]相同；初始條件以 10°C 設置均勻分佈於整個模型；不再另外設置熱對流係數及其他相關條件。廢料罐能量由文獻得知為 1700W[21-23]；並分別在高度 4 公尺、半徑 0.105 之表面設置總能量之 1/3 及高度 4 公尺、半徑 0.315 之表面設置總能量之 2/3，計算出之面積分別為 2.6389m² 及 7.9168m²，有限元素分析軟體中依單位體積熱源設置分別為 214.736W/m² 及 143.155 W/m²。熱衰函數則由文獻所提供之公式 4.1 及表 4-2 所求得之熱衰變函數輸入隨時間變化之數值，熱衰函數隨時間變化之曲線圖以圖 4-4 表示。

熱衰函數公式：

$$P(t) = \sum_{i=0}^7 a_i \exp(-t/t_i) \quad (4.1)$$

表 4-2 熱衰變公式 a_i 與時間關係圖[21]

i	t_i [years]	a_i [-]	i	t_i [years]	a_i [-]
1	20	0.060147	5	2,000	0.025407
2	50	0.705024	6	5,000	-0.009227
3	200	-0.054753	7	20,000	0.023877
4	500	0.249767			

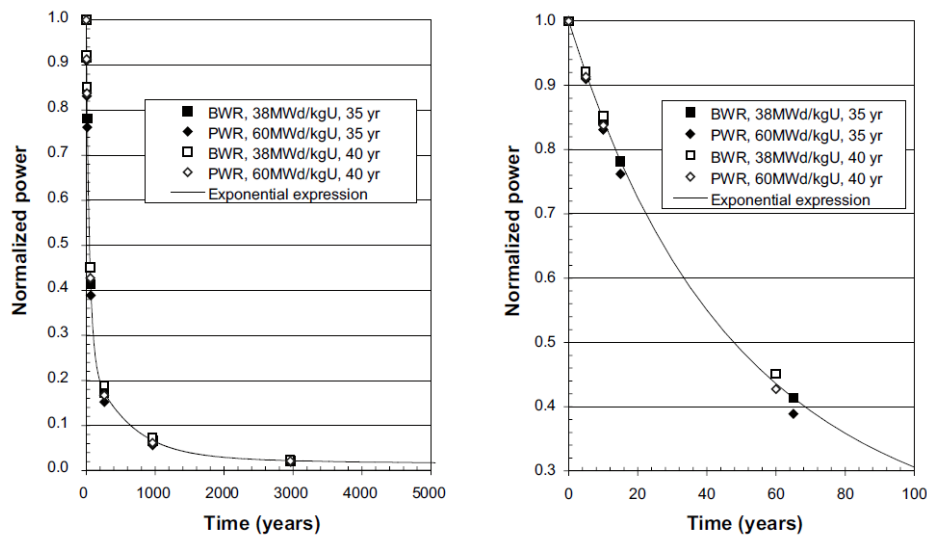


圖 4-4 左圖：熱衰函數 0 年至 5000 年隨時間變化圖

右圖：熱衰函數 0 年至 100 年隨時間變化圖[21]

4.2.3 軸對稱熱傳導模型案例之驗證

此節會將本文與文獻之熱傳分析結果進行結果對照。瑞典報告中最高溫發生位置如圖 4-5 表示，以軸對稱處置孔高度中心延伸線之緩衝材料及母岩交界處(點 1)、文獻中[21-23]求得點 1 與軸對稱處置孔之頂部中心銅罐與緩衝材料交界處之溫度間之差值(點 2)、兩點合即為處置孔中最高溫度(點 3)。本文與文獻對照之點位係以置孔之頂部中心銅罐與緩衝材料交界處，即最高溫發生之點位，(如圖 4-5 中點 3 之溫度值)。

此章節中將進行 3 個不同案例之最高溫結果對照，為 1a~3a：不同母岩傳導係數下之熱傳結果對照，案例描述於表 4-3 列出。

表 4-3 各案例描述

案例	案例描述
Case 1a	使用表 4-1 之材料參數建立之熱傳導分析模型
Case 1b	母岩熱傳導係數 $\lambda = 2.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
Case 1c	母岩熱傳導係數 $\lambda = 3.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

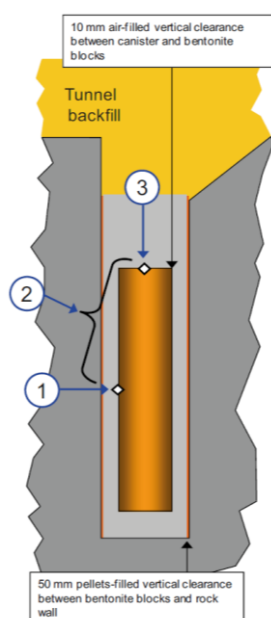


圖 4-5 最高溫位置(點 3)示意圖[21]

文獻中所列之溫度結果是由上述之解析近似求解最高溫方式，本文則藉由有限元素軟體 ABAQUS 以數值分析求解，依文獻所述案例 1a、1b、1c 天然障壁熱傳係數分別為 $\lambda=2.5、2.0、3.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，以案例 1a 分析結果為例：最高溫度發生年限為第 2 年，第 2 年銅罐與緩衝材料交界處最高溫為 78°C ，而本文之熱傳分析結果最高溫於第二年時發生最高溫則為 77.79°C ，差異百分比為 0.26%，3 種案例詳細文獻與本文結果比較以表 4-4 圖 4-6 表示。

表 4-4 案例 1a、1b、1c 文獻與本文比較

案例	最高溫發生時間(年)	最高溫度($^\circ\text{C}$)	差異百分比(%)
1a			
文獻	第 2 年	78.00°C	-
本文	第 2 年	77.79°C	0.26
1b			
文獻	第 2 年	84.20°C	-
本文	第 2 年	84.18°C	0.02
1c			
文獻	第 2 年	73.75°C	-
本文	第 2 年	74.04°C	0.4

註：產生最高溫之位置皆為緩衝材與銅罐之交界處。

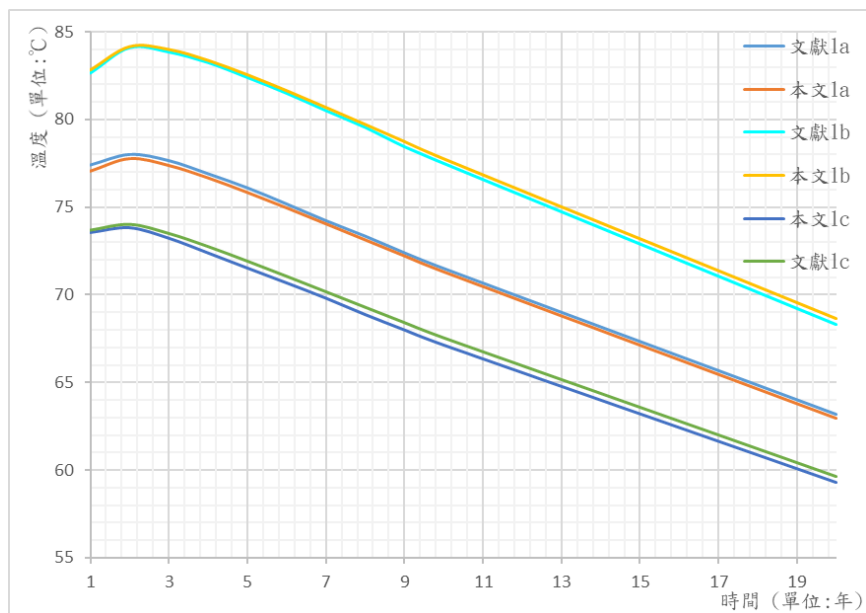


圖 4-6 案例 1a、1b、1c 文獻與本文前 20 年熱傳導分析比較

4.3 等效熱傳導數值驗證技術

現實狀況下，核廢料處置場中有大量處置隧道及大量處置孔，包括相鄰處置孔間距及處置隧道間距都會造成溫度的互相影響，此兩種間距則是一個處置場中能在確保安全的情況下放置多少廢料罐最重要的影響因素，因此分析多個處置孔及隧道之間的影响是使數值分析更接近實際狀況所需克服的課題之一。

本文認為等效模型之建立則是分析多處置孔模型所需先行完成之課題，原因在於分析各處置孔及隧道間互相之影響需要分析大量的處置罐及複雜之幾何形狀，因此藉由等效模型之建立可以有效的將複雜之網格簡化外而不造成分析上之誤差，藉由複合材料的基礎概念將幾何形狀及材料係數的配合得到近乎相同之數值結果。

4.3.1 等效熱傳導分析模型與材料參數

本文於第四章將建立多個軸對稱模型用以分析及對照瑞典 SKB 報告[21-23]，為了詳細模擬 SKB 報告描述之情況，銅罐除上下凸緣不對稱之外，上緣也以文獻提供之不規則形狀建立，而後續分析本文希望藉由將簡化處置場內部之廢料罐幾何結構，包括不規則形狀之銅罐等元素，藉由簡化後得到之同等效力之模型以便於後續章節數值模型熱傳導分析及相關參數分析使用，而後續將簡稱此種模型為等效模型。

本節中建立之等效模型分為三種不同程度之簡化如圖 4-7，第一型等效模型為將銅罐不規則凸緣處簡化為單純矩形凸緣之模型、第二型為不保留銅罐凸緣之模型、第三型為將銅罐及廢料罐完全簡化為一體之分析模型，本文等效模型所使用之緩衝材熱傳導係數是以造成相同溫度效應結果經試誤法求得之參數，不同程度簡化下等效熱傳分析模型所使用之幾何形狀及熱傳導係數於表 4-5 中列出。

表 4-5 各型等效模型之幾何形狀及材料參數
(以母岩熱傳導係數 $\lambda = 2.5\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 為例)

等效模型	第一型	第二型	第三型
幾何形狀 (詳見圖 4-1 表示)	銅罐凸緣簡化	矩形銅罐簡化	無銅罐
材料參數 (熱傳導係數)			
母岩	$\lambda = 2.5\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	$\lambda = 2.5\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	$\lambda = 2.5\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
間隙	$\lambda = 0.04\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	-	-
回填材料	$\lambda = 0.7\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	$\lambda = 0.7\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	$\lambda = 0.7\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
緩衝材料	$\lambda = 1.05\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	$\lambda = 0.55\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	$\lambda = 0.54\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
銅罐	$\lambda = 390\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	$\lambda = 390\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	-
廢料罐	$\lambda = 25\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	$\lambda = 25\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	$\lambda = 25\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

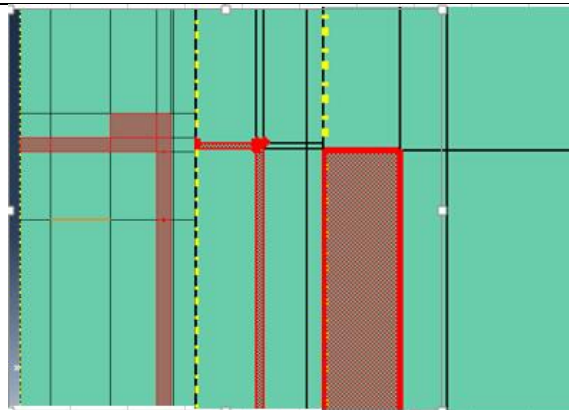


圖 4-7 不同程度簡化之等效模型(紅色為軸對稱模型銅罐上半部):由左至右分別為上述之一至三型等效模型

4.3.2 等效模型熱傳導分析案例及結果驗證

此節中將以等效模型第三型作為熱傳分析結果驗證主要使用之模型，並與文獻中描述之各個案例做熱傳導分析結果之驗證，而各案例內容之描述於下表 4-6 中詳細介紹，本文等效模型第三型所使用之基礎材料參數於表 4-7 列出。

本文所使用之等效模型驗證不同案例結果時以熱源外圍之緩衝材料熱傳導係數做為影響最高溫度之唯一變數，於表 4-8 列出各等效模型於案例 1a-1c 驗證

時所使用之緩衝材料熱傳導係數作為參考，案例 1a-1c 三種型式等效模型與文獻熱傳分析結果對照將於表 4-9 中列出，各分析結果曲線圖以圖 4-8 至 4-10 表示。

表 4-6 各案例描述

案例	案例描述
Case 1a	使用表 4-1 之材料參數建立之熱傳導分析模型
Case 1b	母岩熱傳導係數 $\lambda = 2.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
Case 1c	母岩熱傳導係數 $\lambda = 3.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

表 4-7 第三型等效模型所使用之材料參數
材料種類

材料性質	熱源	緩衝材料	回填材料	母岩
	(簡化後廢料罐)			
熱傳導係數 (W/m-K)	25	1.1、1.0	0.7	2.5
比熱 (J/kg-K)	500	800	780	770
密度 (kg/m ³)	7200	2780	2500	2770

表 4-8 案例 1a-1c 三種型式等效模型使用之緩衝材料熱傳導係數

案例	第一型	第二型	第三型
Case 1a	1.05 W/(m · K)	0.55 W/(m · K)	0.54 W/(m · K)
Case 1b	1.1 W/(m · K)	0.54 W/(m · K)	0.53 W/(m · K)
Case 1c	1.13 W/(m · K)	0.555 W/(m · K)	0.545 W/(m · K)

表 4-9 案例 1a-1c 三種型式等效模型與文獻熱傳導分析結果對照
 文獻案例 第一型 第二型 第三型
 (最高溫發生時間/最高溫度)

1a(2/78°C)	2/78.67°C	2/77.87°C	2/78.14°C
1b(2/84.2°C)	2/84.18°C	2/84.25°C	2/84.62°C
1c(2/73.75°C)	2/74.85°C	2/73.57°C	2/73.82°C

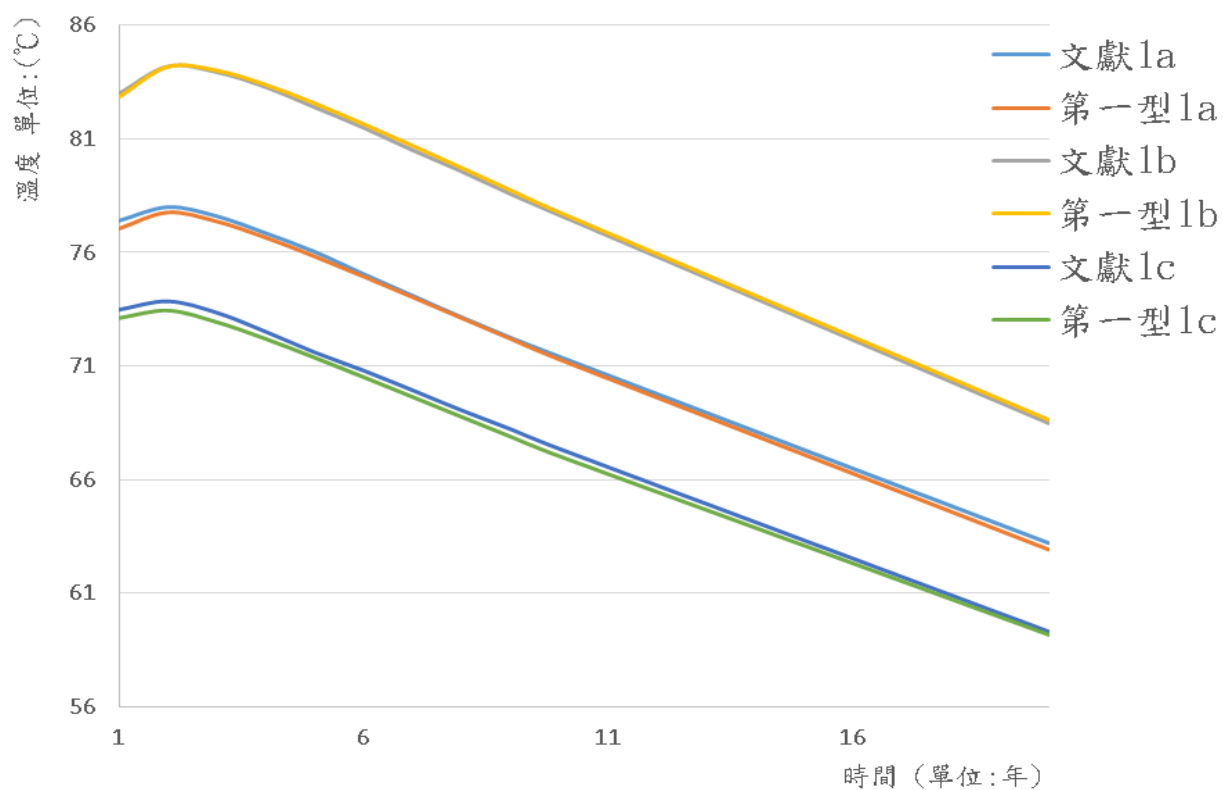


圖 4-8 第一型等效模型與文獻案例 1a-1c 熱傳導曲線圖

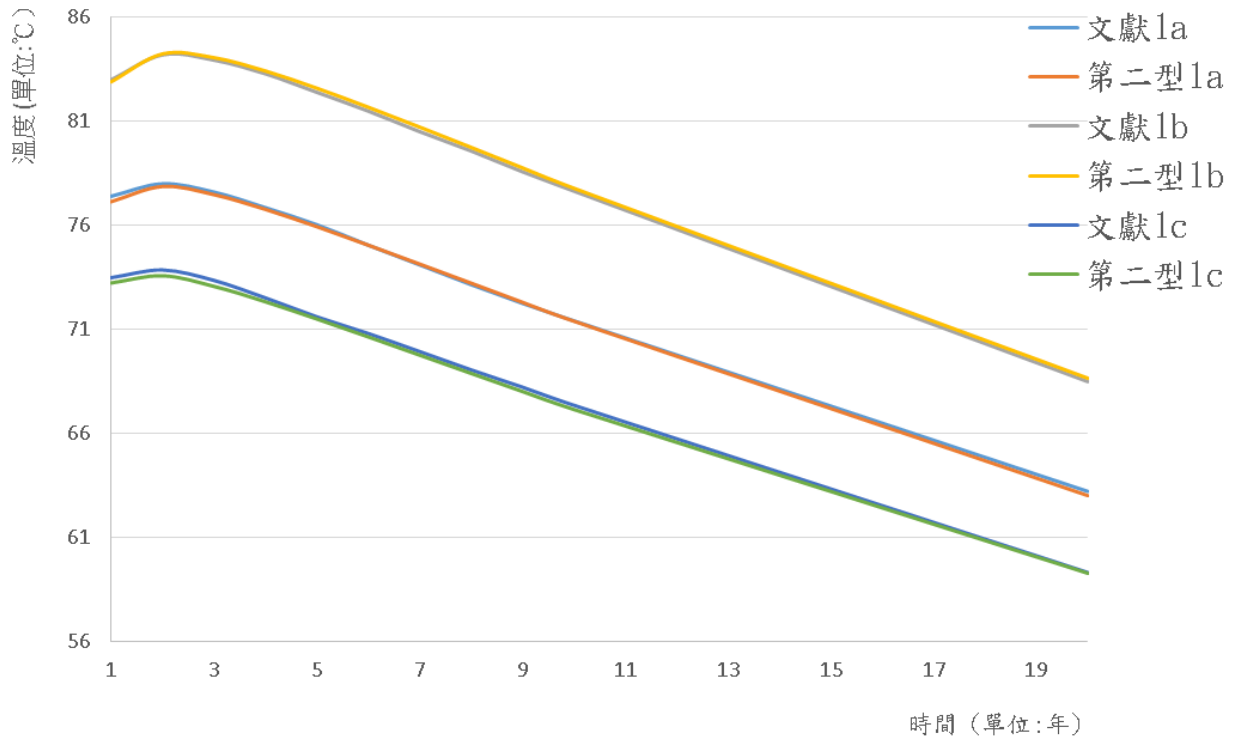


圖 4-9 第二型等效模型與文獻案例 1a-1c 熱傳導曲線圖

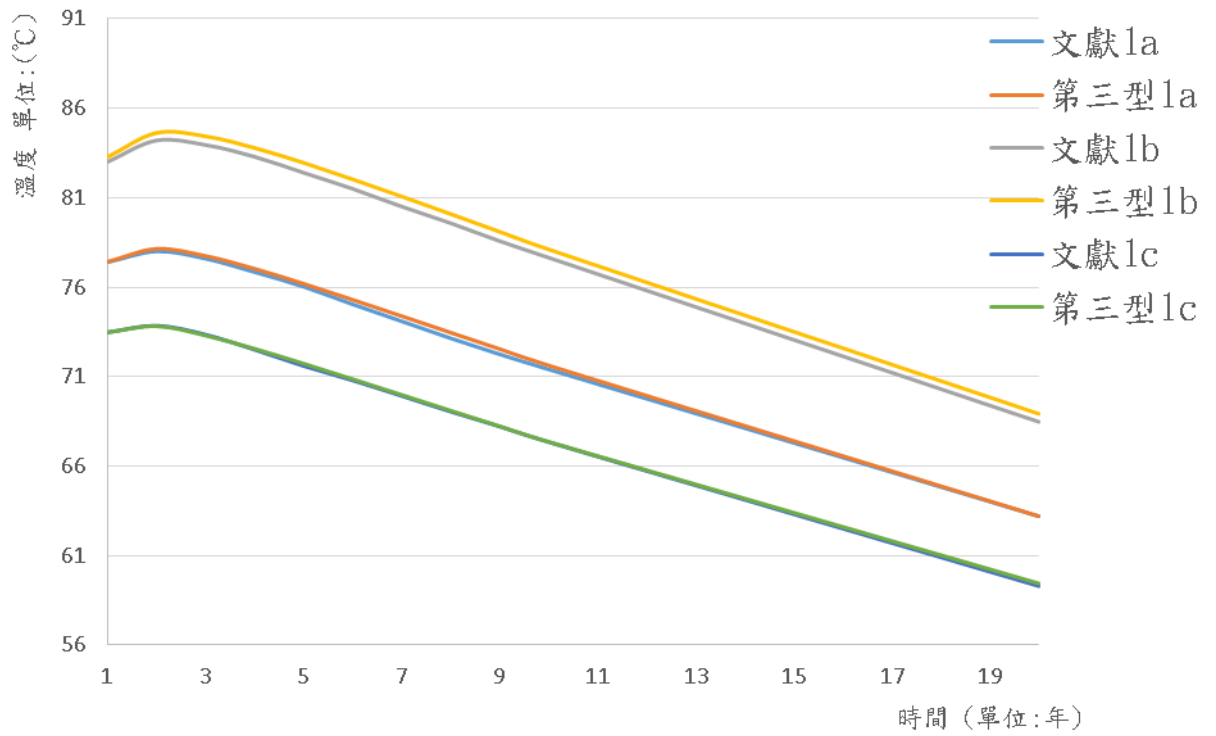


圖 4-10 第三型等效模型與文獻案例 1a-1c 熱傳導曲線圖

第五章、瑞典 SKB 報告多孔幾合配置熱傳導案例之驗證分析

5.1 前言

用過核子燃料最終處置場是一個位於深地層且佔地龐大的建物，內部由大量的處置隧道與處置孔所組成，由於母岩所佔的比例為所有材料中最多的，因此母岩的熱傳導性能對於處置孔內的最高溫影響極為重要。然而，在現實中母岩的材料性值為非均質且分布區域無規則可循，因此選擇放置處置罐的地點相當重要，放到較低熱傳導係數的母岩附近，容易低估處置孔內的最高溫；反之，放到較高熱傳導係數的母岩附近，容易高估處置孔內的最高溫。由於母岩的空間異質性相當複雜，因此本章進行熱傳導分析的母岩熱傳導係數皆為均值。

本章會使用第四章所述的緩衝材料與母岩熱傳導係數的關聯性進行分析之外，也會分析在同一處置場不同母岩的均質熱傳導係數的情況下所得到的處置孔內最高溫以及發生之年限，並且分析之結果會與瑞典 SKB 報告[21-23]的數據做平行驗證。

5.2 三維多處置孔模型建立與案例介紹

三維多處置孔模型之建立將延續第四章所描述的等效模型進行熱傳導分析，模型尺寸以及材料參數皆與相對應的等效模型相同，因此使用的材料參數只有母岩、回填材料、緩衝材料以及處置孔四種。在本節將會研究三種不同的案例進行分析，案例 1 和 2 是使用等效模型第三型的網格以及材料係數配置且只有單一處置隧道的單隧道模型；案例 3 以本報告第三章所敘述之等效模型概念進行分析，是採用有兩個間距為 40 公尺之相鄰處置隧道的雙隧道模型；案例 4 與案例 3 所使用的等效模型以及材料係數皆相同，差別在於案例 4 為縮小處置隧道縱向距離進行分析。

5.2.1 網格配置與幾何模型建立

建立的三維多處置孔模型為參考 SKB 報告[21-23]中所使用的幾何模型。案

例 1 和 2 的單隧道模型是以長 148 公尺、寬 40 公尺、高 120 公尺母岩所建立之矩形模型，模型包含一個處置隧道與九個處置孔，處置隧道填滿著回填材料且尺寸為長 52.6 公尺、寬 4.6 公尺、高 5.405 公尺，並且在每一個處置孔也有占有一個半徑 0.875 公尺、高 0.865 公尺的圓柱，每一個處置隧道包含九個處置孔放置處置罐，而處置孔為高 7.85 公尺、半徑 0.875 公尺之圓柱體，處置孔內包含高 6.985 公尺、半徑 0.875 公尺的緩衝材料以及高 4.675 公尺、半徑 0.535 公尺的圓柱體處置罐，處置隧道間距為 40 公尺且處置孔彼此的間距皆為 6 公尺，第一個處置孔距離處置隧道縱向邊界距離為 60 公尺，而第九個處置孔距離處置隧道相反縱向邊界距離為 40 公尺，處置孔底部距離模型底部為 60 公尺。

案例 3 的雙隧道模型為兩個單隧道案例模型所組成；案例 4 是以長 54 公尺、寬 80 公尺、高 120 公尺母岩所建立之矩形模型，第一個處置孔與第九個處置孔距離處置隧道縱向邊界皆為半個處置孔間距，其餘配置皆與案例二相同。圖 5-1 至 5-3 為案例 1 至案例 4 的有限元素模型示意圖，而更詳細的處置隧道與處置孔配置圖則在圖 5-4 呈現。模型的每個元素為 20 個節點所構成，使用的元素型式為 DC3D20。

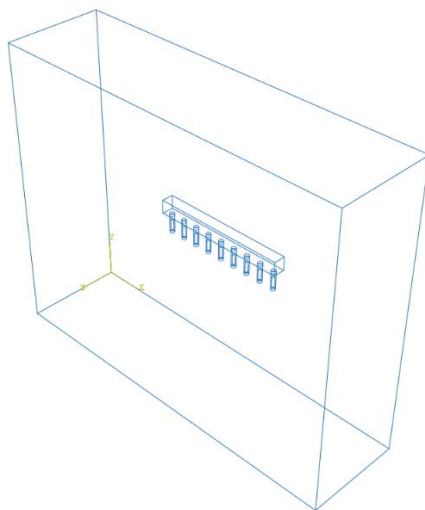


圖 5-1 案例 1 和 2 有限元素軟體模型示意圖

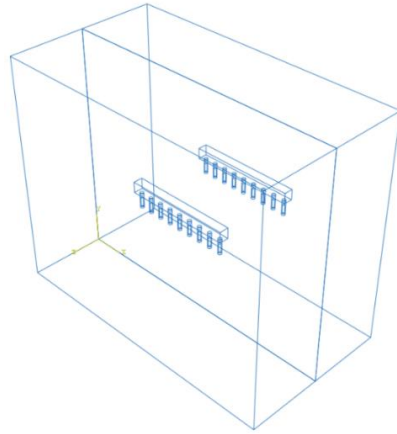


圖 5-2 案例 3 有限元素軟體模型示意圖

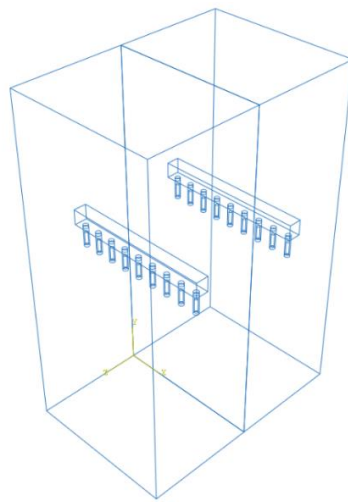


圖 5-3 案例 4 有限元素模型示意圖

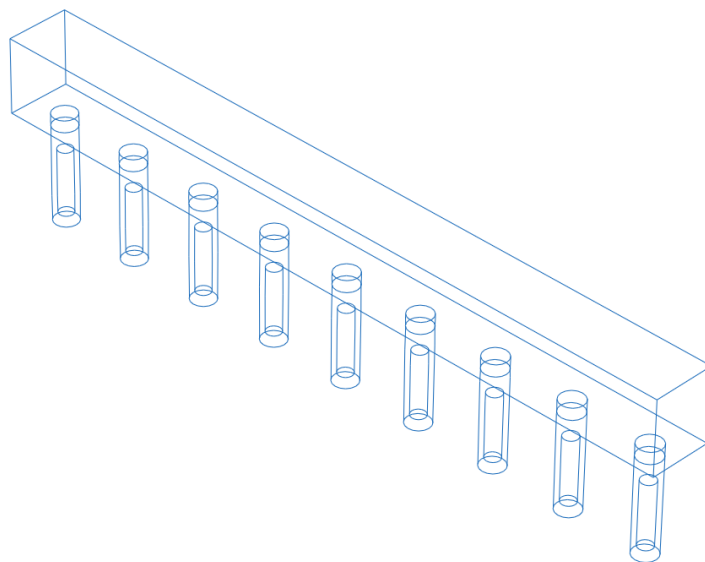


圖 5-4 處置隧道與處置孔局部放大圖

5.2.2 熱傳導分析材料參數介紹

在所有案例使用的材料參數除了文獻[21-23]所提供的母岩熱傳導係數以及熱容量之外，其餘材料參數都與第四章所提及等效模型的材料參數一樣，案例 3、4 的材料係數皆相同，但是與案例 1 的母岩熱傳導係數、緩衝材料熱傳導係數以及熱容量皆不相同。案例 2 為使用文獻[21-23]所給定的材料係數以及初始條件，但是使用單隧道模型進行熱傳導分析；案例 3 則是與案例 2 條件相同，但是是使用雙隧道模型進行熱傳導分析，案例 3 與案例 4 的兩個相鄰隧道周遭母岩熱傳導係數皆有著 10% 的差異性。

詳細的案例 1 至案例 4 的材料參數見表 5-1、5-2、5-3(注:案例 3 及案例 4 所使用材料係數相同，已編列於表 5-3)，而各個材料參數在有限元素軟體模型相對應的位置關係圖見圖 5-5。

表 5-1 案例 1 的熱傳導分析之材料參數
材料種類

材料性質	熱源	緩衝材料	回填材料	母岩
熱傳導係數 (W/m-K)	25	0.578	0.7	2.8
比熱 (J/kg-K)	500	800	780	794.224
密度 (kg/m ³)	7200	2780	2500	2770

表 5-2 案例 2 的熱傳導分析之材料參數

材料種類

材料性質	熱源	緩衝材料	回填材料	母岩
熱傳導係數 (W/m-K)	25	0.578	0.7	3.16
比熱 (J/kg-K)	500	800	780	783.4
密度 (kg/m ³)	7200	2780	2500	2770

表 5-3 案例 3 與案例 4 的熱傳導分析之材料參數

材料種類

材料性質	熱源	緩衝材料	回填材料	母岩	
				隧道一	隧道二
熱傳導係數 (W/m-K)	25	0.5755	0.7	3.16	3.48
比熱 (J/kg-K)	500	800	780	783.4	783.4
密度 (kg/m ³)	7200	2780	2500	2770	2770

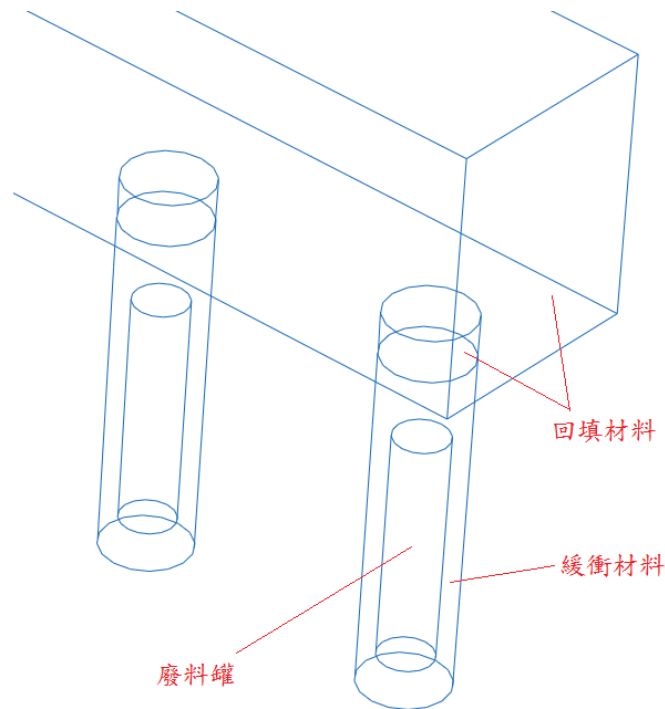


圖 5-5 各材料相對應位置

5.2.3 初始條件以及邊界條件

進行熱傳導分析的初始條件是依照文獻[21-23]所給定的，案例 1 的的初始溫度為 10.6°C ，其餘案例的初始溫度皆為 15°C ，且所有案例皆不再另外設置邊界熱對流係數以及其他相關條件。所有案例的處置罐能量則是使用文獻[21-23]所給的 1700W 並且獨立設置於各熱源中，熱衰函數由公式 3-16 以及表 3-2 所求得，將對應的能量代入該式中求得隨時間能量變化的熱衰變函數。

5.3 三維多處置孔模型熱傳導分析結果平行驗證

本節使用有限元素軟體所建立之三維多處置孔模型進行熱傳導分析，依據瑞典 SKB 文獻所給定的設計規範，將處置罐頂端中心點與緩衝材料交界處得到的峰值溫度為分析要點，並且與瑞典 SKB 文獻的結果做平行驗證[21-23]。

5.3.1 三維多處置孔模型熱傳導分析案例介紹

以下會介紹上述所建立之有限元素模型的三種案例進行熱傳導分析：

案例 1：均質母岩熱傳導係數 2.8(W/m-K)之單隧道熱傳導分析。

案例 2：均質母岩熱傳導係數 3.16(W/m-K)之單隧道熱傳導分析。

案例 3：均質母岩熱傳導係數 3.16 與 3.48(W/m-K)之雙隧道熱傳分析。

案例 4：均質母岩熱傳導係數 3.16 與 3.48(W/m-K)但幾何模型變更之雙隧道熱傳分析。

5.3.2 案例 1 熱傳導分析結果

案例 1 分析模型為單一隧道與九個處置孔所組成，處置罐間距為 6 公尺且隧道中心距離側邊邊界為 20 公尺。計算處置孔內的最高溫是選擇中心點的處置罐周圍的五個處置罐，也就是排除頭尾各兩個處置罐取中間五個處置罐頂端與緩衝材料交界處的溫度取平均並且與文獻進行平行驗證，主要原因在於頭尾各兩個處置孔的最高溫以及發生最高溫之年限與最中心處置罐相差過大(見表 5-4)，並且考慮到處置罐中心週遭處置罐之影響而取平均。文獻所提及最高溫發生年限為 10 年以內，因此本文將取 10 年內溫度隨時間變化之數據與文獻對照。

案例 1 與文獻[21-23]熱傳導分析結果於表 5-5 進行對照，案例 1 與文獻[21-23]熱傳導分析結果曲線圖於圖 5-6 表示，圖 5-7 為熱傳導分析雲彩圖，圖 5-8 為中心處置罐熱傳導分析雲彩圖。

表 5-4 各處置罐對應最高溫與發生時間

處置罐	1	2	3	4	5	6	7	8	9
最高溫 (°C)	90.7	96.7	99.0	100	100	100	99.0	96.7	90.7
時間(年)	4.4	5.2	5.8	6.3	6.4	6.3	5.8	5.2	4.4

表 5-5 本文與文獻[21]案例 1 熱傳導分析結果比較

時間(年)	緩衝材料峰值溫度(°C)	
	文獻	本文
0.5	63.9	85.61
1	67.2	91.53
2	69.8	96.24
3	70.9	98.17
4	71.5	99.10
5	71.8	99.53
6	71.9	99.67
7	72.0	99.61
8	71.9	99.41
9	71.8	99.10
10	71.7	98.72

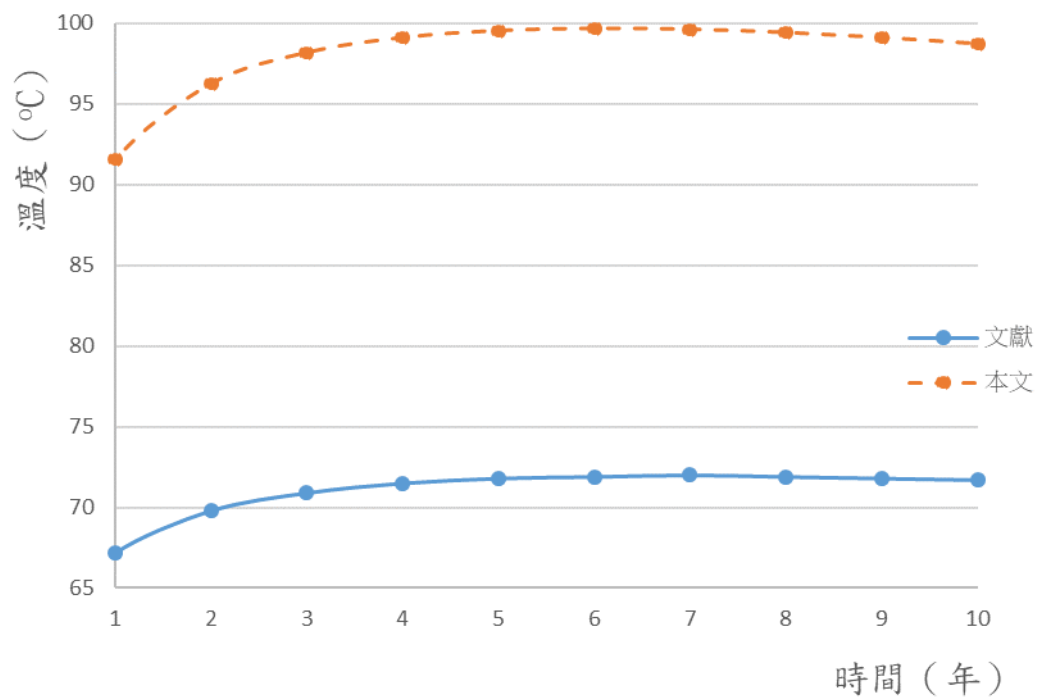


圖 5-6 案例 1 與文獻[21]之溫度隨時間變化趨勢比較圖

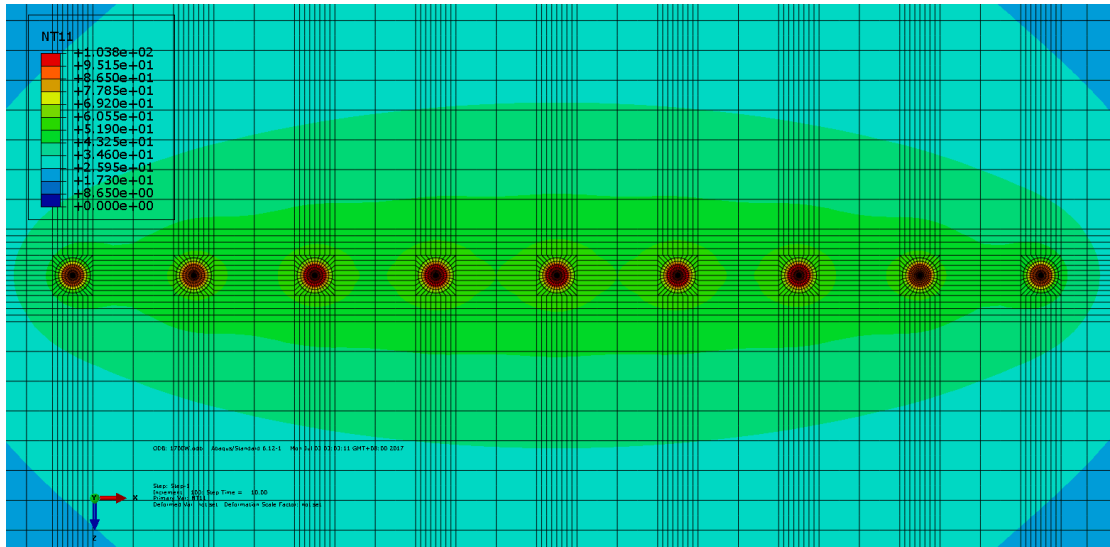


圖 5-7 案例 1 熱傳導分析雲彩圖

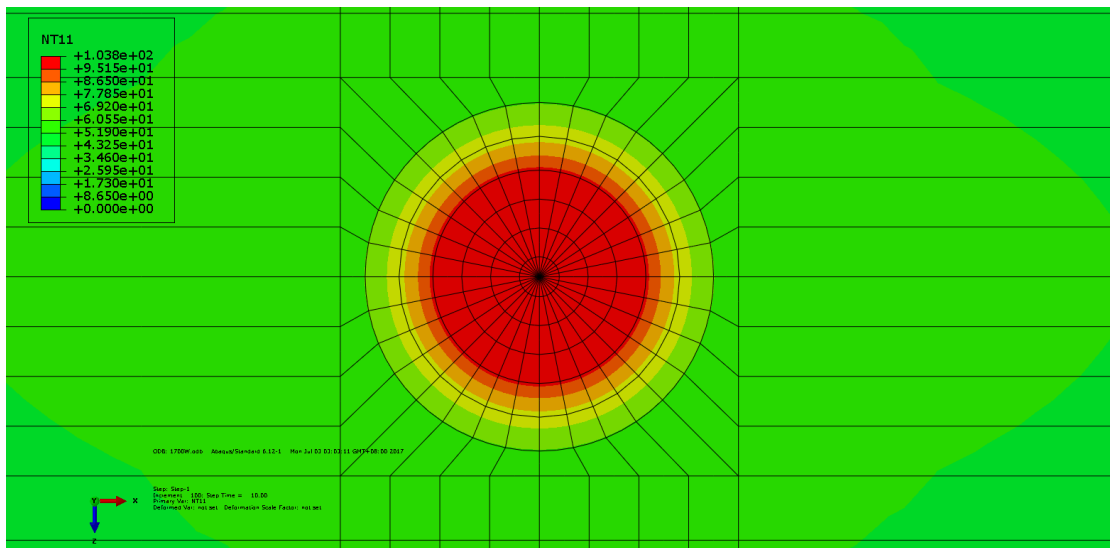


圖 5-8 中心處置罐熱傳導分析雲彩圖

5.3.3 案例 2 與 3 熱傳導分析結果

案例 3 由兩個單處置隧道模型所組成，且每一個處置隧道一樣配有 9 個處置孔，因此整個雙隧道模型一共有 18 個處置孔，並且兩個處置隧道圍繞的母岩熱傳係數不相同，一個母岩的熱傳係數為 3.16(W/m-K)，另一個母岩的熱傳係數與相鄰母岩熱傳係數存有 10% 差距，也就是 3.48(W/m-K)。兩個案例在計算處置

孔內的最高溫亦是選擇中心點的處置罐周圍的五個處置罐溫度變化與文獻進行平行驗證。

案例 2、3 與文獻[21]熱傳導分析比較結果於表 5-6 與 5-7 進行對照，案例 2、3 與文獻[21-23]熱傳導分析比較結果曲線圖於圖 5-9、5-10、5-11 表示，圖 5-12、5-14、5-15 為熱傳導分析雲彩圖，圖 5-13、5-16、5-17 為中心處置罐熱傳導分析雲彩圖。

表 5-6 本文與文獻[21]案例 2 熱傳導分析結果比較

時間(年)	處置罐頂端中心與緩衝材料交界處溫度(°C)	
	文獻	本文
0.5	79.0	78.96
1	83.8	84.23
2	87.8	88.30
3	89.5	89.92
4	90.3	90.67
5	90.5	91.00
6	90.6	91.06
7	90.8	90.95
8	90.6	90.74
9	90.3	90.38
10	89.9	89.97

表 5-7 本文與文獻[21]案例 3 熱傳導分析結果比較

時間(年)	處置罐頂端中心與緩衝材料交界處溫度(oC)			
	文獻	本文	文獻	本文
	母岩熱傳係數 3.16 之隧道		母岩熱傳係數 3.48 之隧道	
0.5	79.1	78.32	77.4	76.59
1	83.9	83.59	81.7	81.37
2	87.9	87.67	85.3	84.98
3	89.5	89.30	86.7	86.39
4	90.5	90.07	87.4	87.03
5	90.9	90.40	87.7	87.28
6	91	90.48	87.8	87.31
7	90.9	90.37	87.7	87.17
8	90.7	90.13	87.4	86.92
9	90.4	89.80	87.1	86.58
10	90	89.39	86.7	86.17

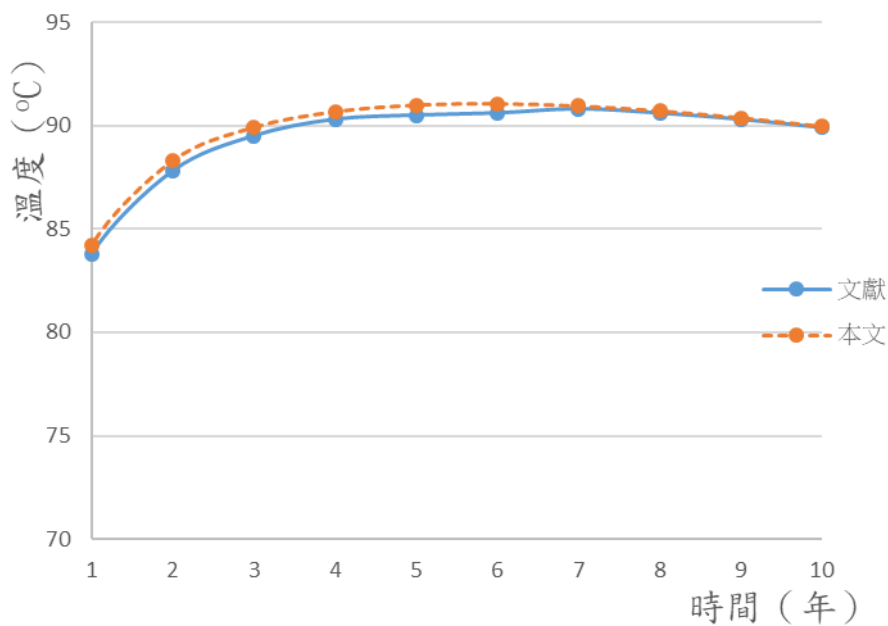


圖 5-9 案例 2 與文獻[21]之溫度隨時間變化趨勢比較圖

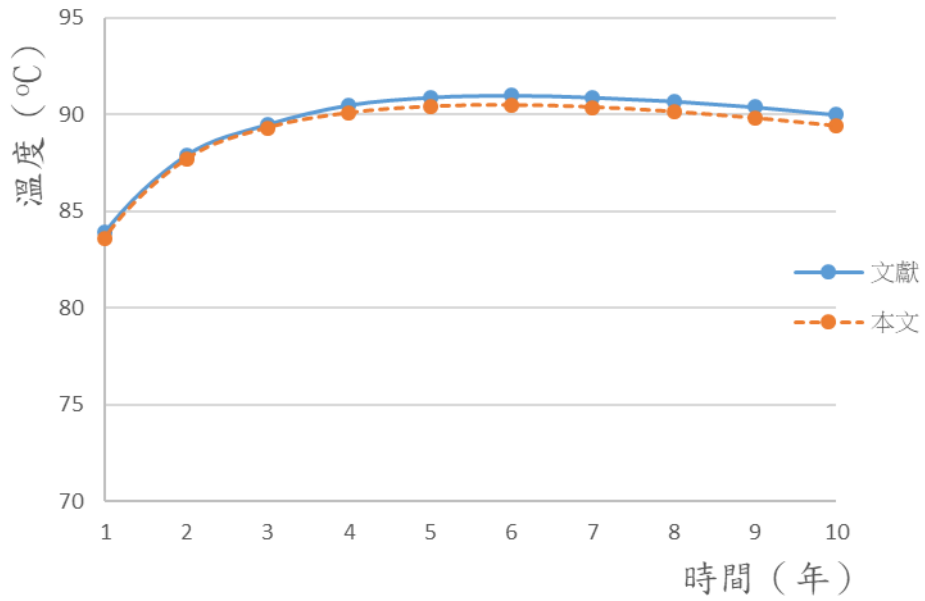


圖 5-10 案例 3 與文獻[21]之溫度隨時間變化趨勢比較圖(母岩熱傳導係數 3.16(W/m-K))

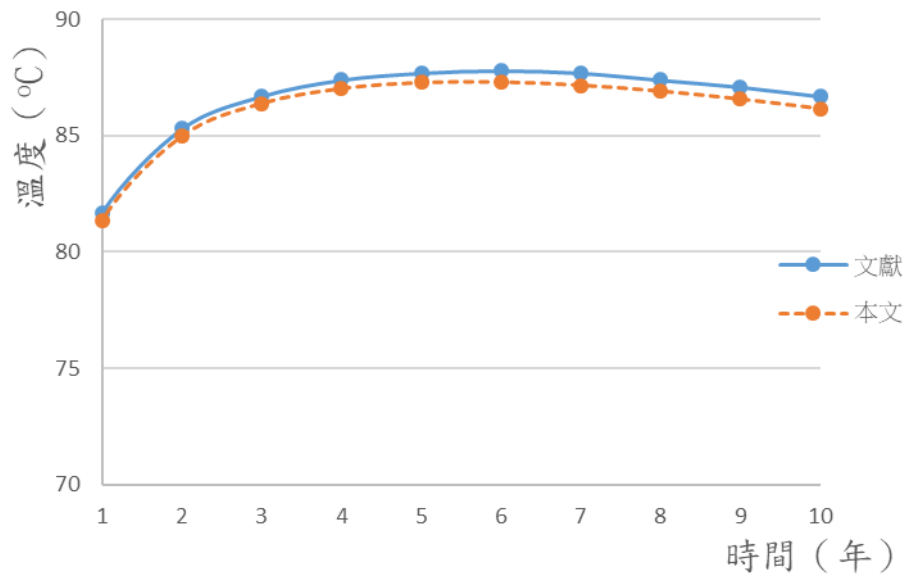


圖 5-11 案例 3 與文獻[21]之溫度隨時間變化趨勢比較圖(母岩熱傳導係數 3.48(W/m-K))

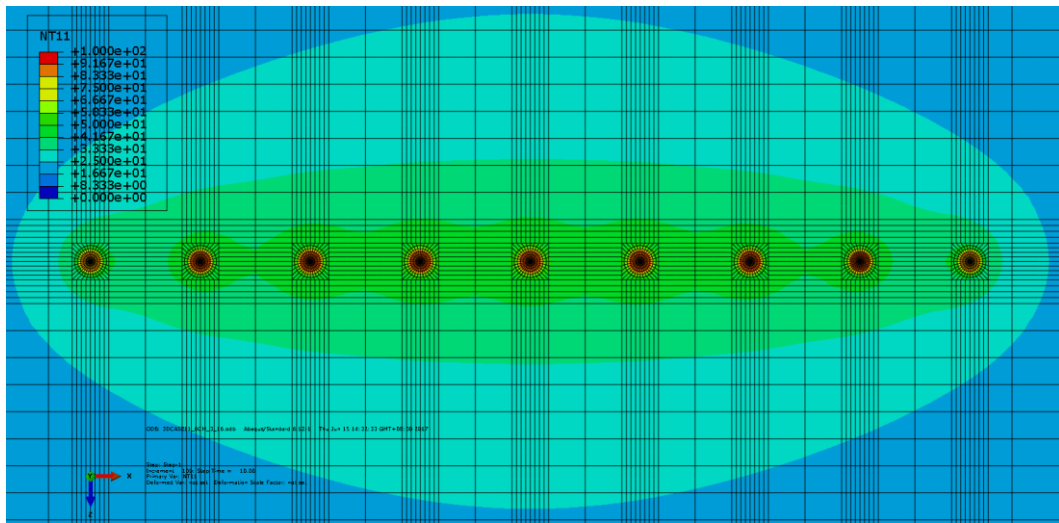


圖 5-12 案例 2 熱傳導分析雲彩圖

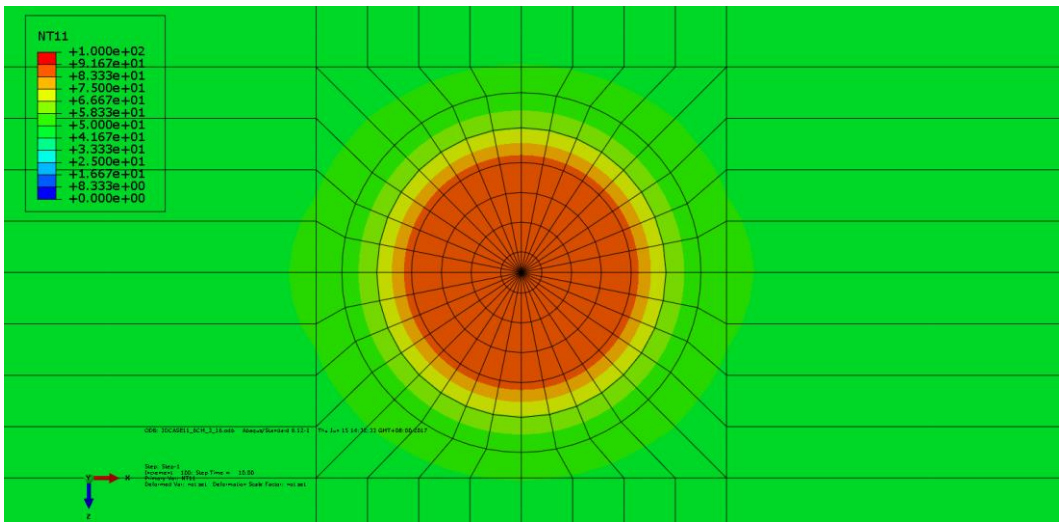


圖 5-13 案例 2 中心處置罐熱傳導分析雲彩圖

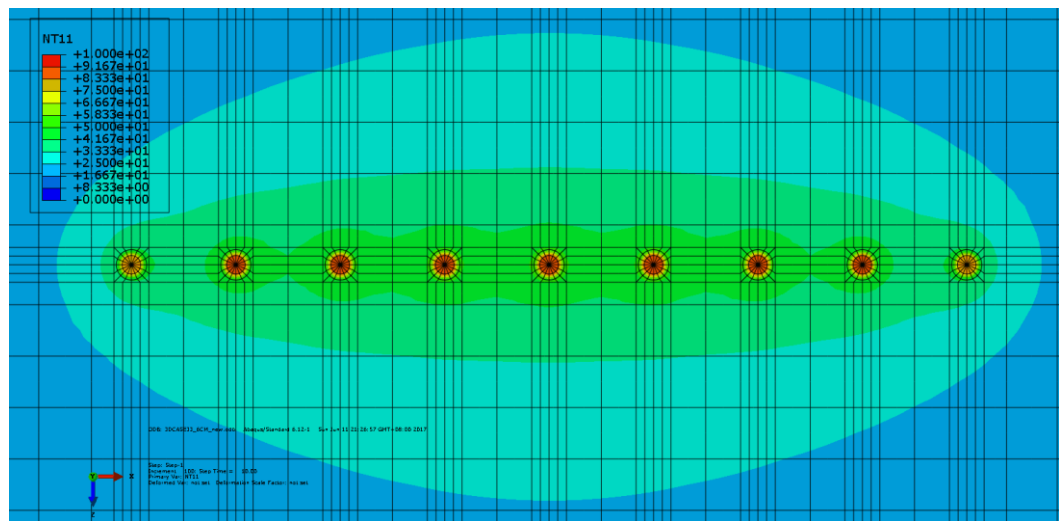


圖 5-14 案例 3 母岩熱傳導係數 3.16(W/m-K)處置隧道之熱傳導分析雲彩圖

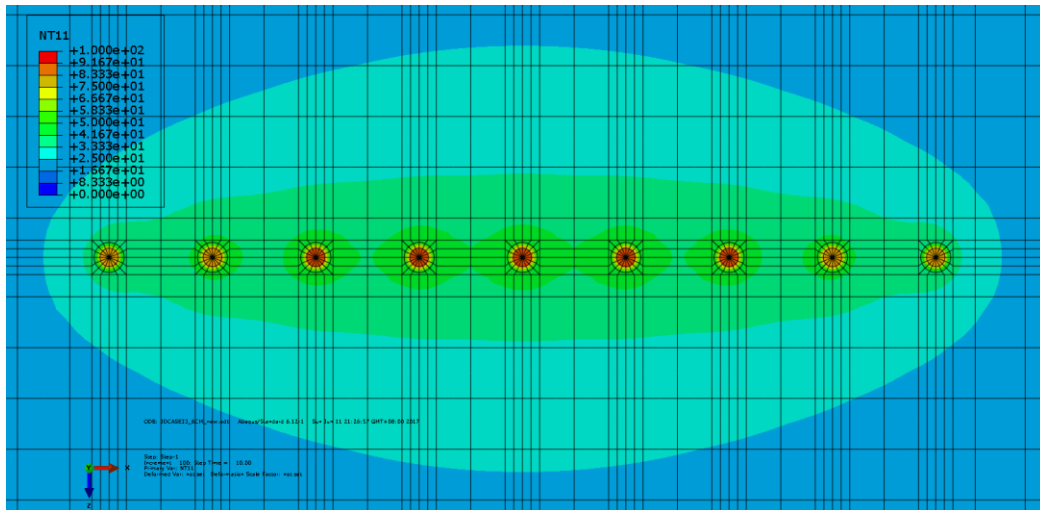


圖 5-15 案例 3 母岩熱傳導係數 3.48(W/m-K)處置隧道之熱傳導分析雲彩圖

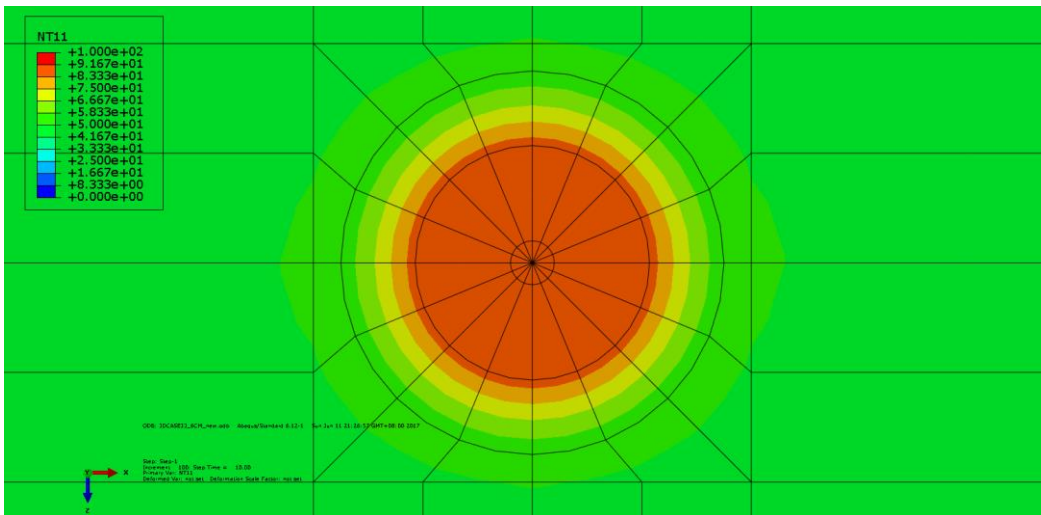


圖 5-16 案例 3 母岩熱傳導係數 3.16(W/m-K)中心處置罐熱傳導分析雲彩圖

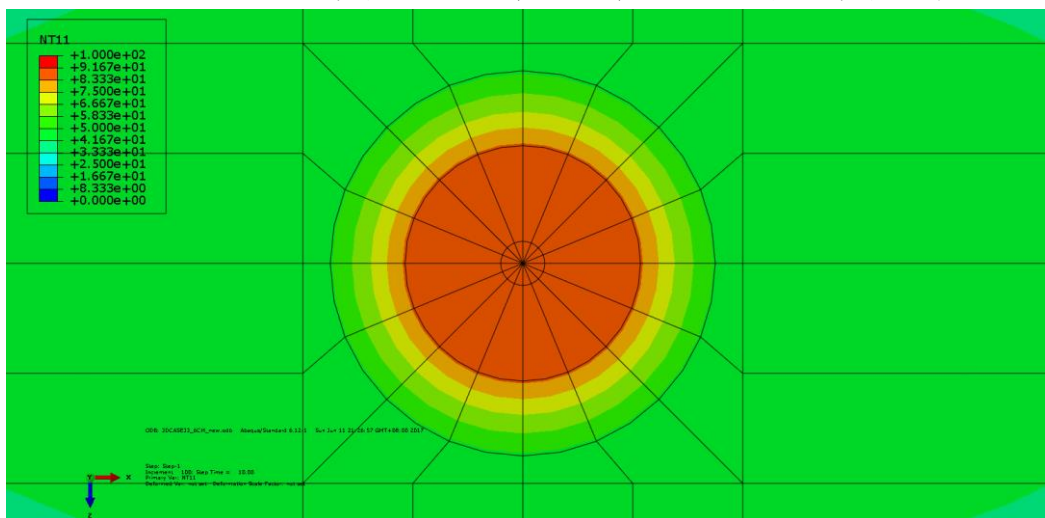


圖 5-17 案例 3 母岩熱傳導係數 3.48(W/m-K)中心處置罐熱傳導分析雲彩圖

5.3.4 案例 4 熱傳導分析結果

案例 4 是以案例 3 的模型為基礎並將處置隧道縱向方向距離邊界縮小的分析模型，也就是第一個與第九個處置罐都離邊界只有半個處置罐的間距的距離，用代表體積單元的概念，案例 4 是以一個連續處置隧道的概念進行分析。案例 4 的材料參數皆與案例 3 的相同，計算處置孔內的最高溫亦是選擇中心點的處置罐周圍的五個處置罐溫度變化與文獻進行平行驗證，而文獻[21-23]的最高溫度約發生在第 12 年，因此案例 4 的熱傳導分析設至最高年限為 13 年，以確保最高溫發生時間。案例 4 與文獻[21-23]熱傳導分析比較結果於表 5-8，案例 4 與文獻[21-23]熱傳導分析比較結果曲線圖於圖 5-18、5-19 表示，圖 5-20、5-21 為熱傳導分析雲彩圖，圖 5-22、5-23 為中心處置罐熱傳分析雲彩圖。

表 5-8 本文與文獻[21]案例 4 熱傳導分析結果比較

時間(年)	處置罐頂端中心與緩衝材料交界處溫度(°C)			
	文獻	本文	文獻	本文
	母岩熱傳係數 3.16 之隧道		母岩熱傳係數 3.48 之隧道	
1	84.0	83.30	81.8	81.12
2	88.0	87.88	85.4	85.24
3	89.9	89.94	87.1	87.08
4	91.0	91.14	88.0	88.15
5	91.8	91.92	88.7	88.86
6	92.3	92.45	89.1	89.35
7	92.7	92.81	89.5	89.68
8	92.9	93.06	89.7	89.90
9	93.0	93.19	89.8	90.03
10	93.1	93.25	89.8	90.09
11	93.1	93.25	89.8	90.10
12	93.1	93.20	89.8	90.05
13	93.0	93.12	89.7	89.99

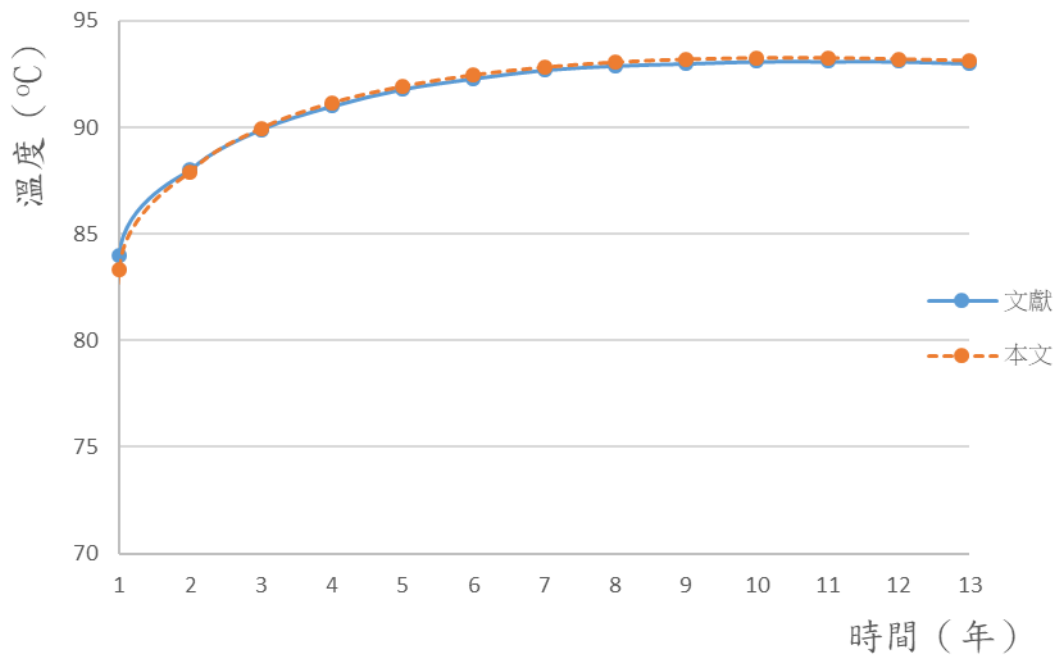


圖 5-18 案例 4 與文獻[21]之溫度隨時間變化趨勢比較圖(母岩熱傳導係數 3.16(W/m-K))

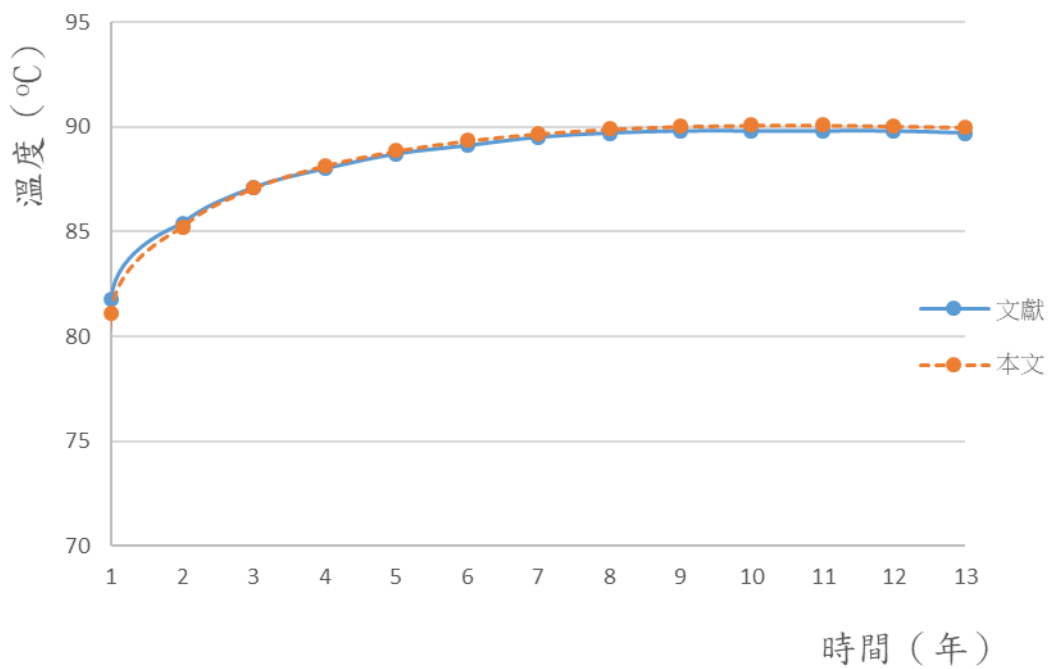


圖 5-19 案例 4 與文獻[21]之溫度隨時間變化趨勢比較圖(母岩熱傳導係數 3.48(W/m-K))

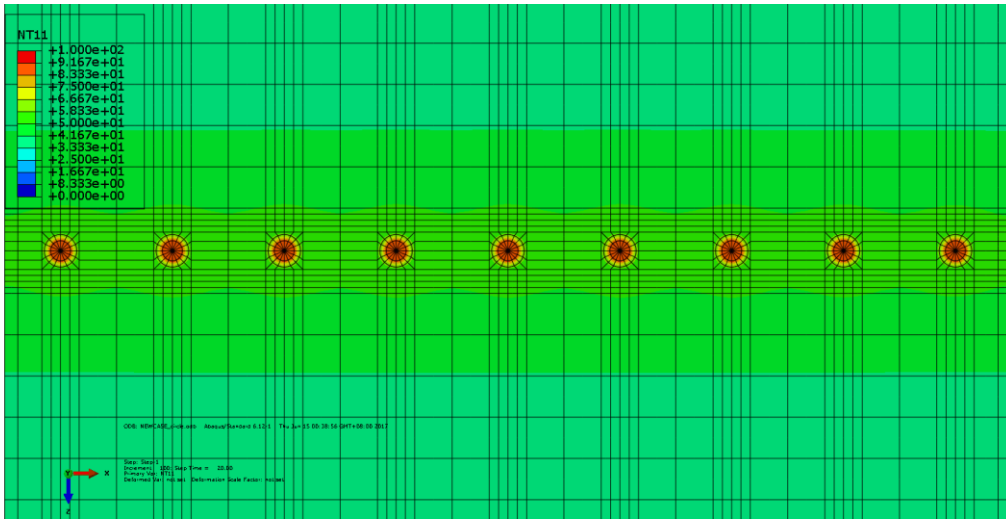


圖 5-20 案例 4 母岩熱傳導係數 3.16(W/m-K)處置隧道之熱傳導分析雲彩圖

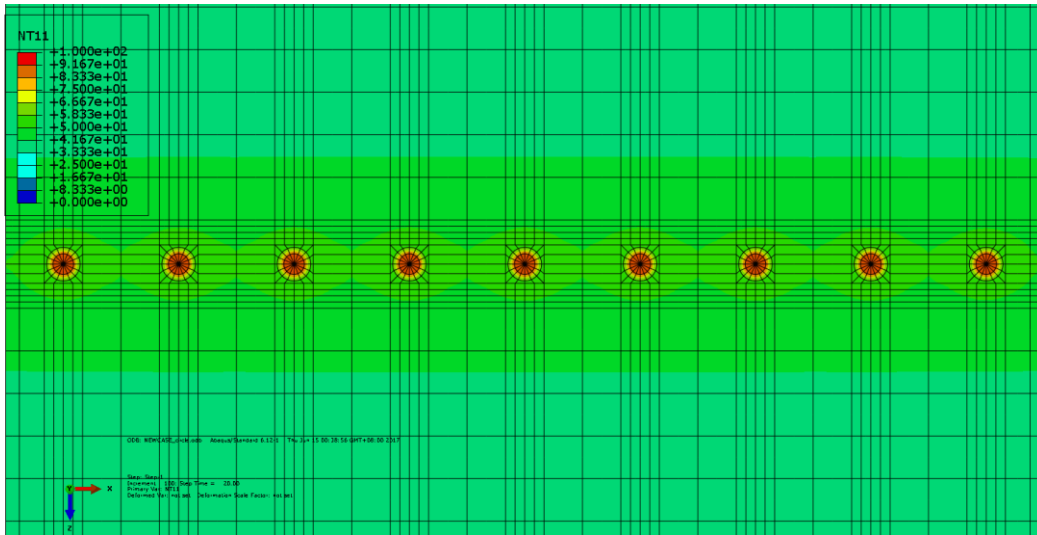


圖 5-21 案例 4 母岩熱傳導係數 3.48(W/m-K)處置隧道之熱傳導分析雲彩圖

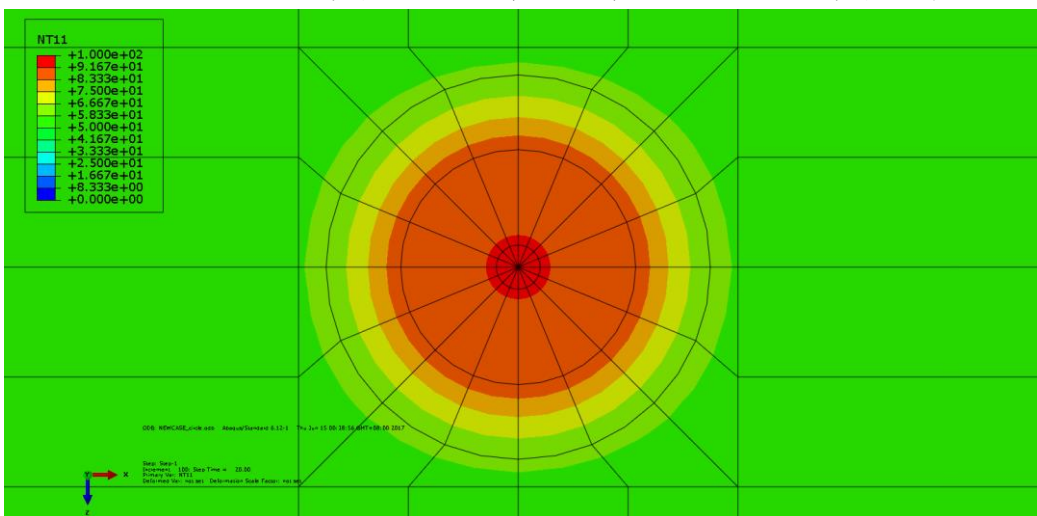


圖 5-22 案例 4 母岩熱傳導係數 3.16(W/m-K)中心處置罐熱傳導分析雲彩圖

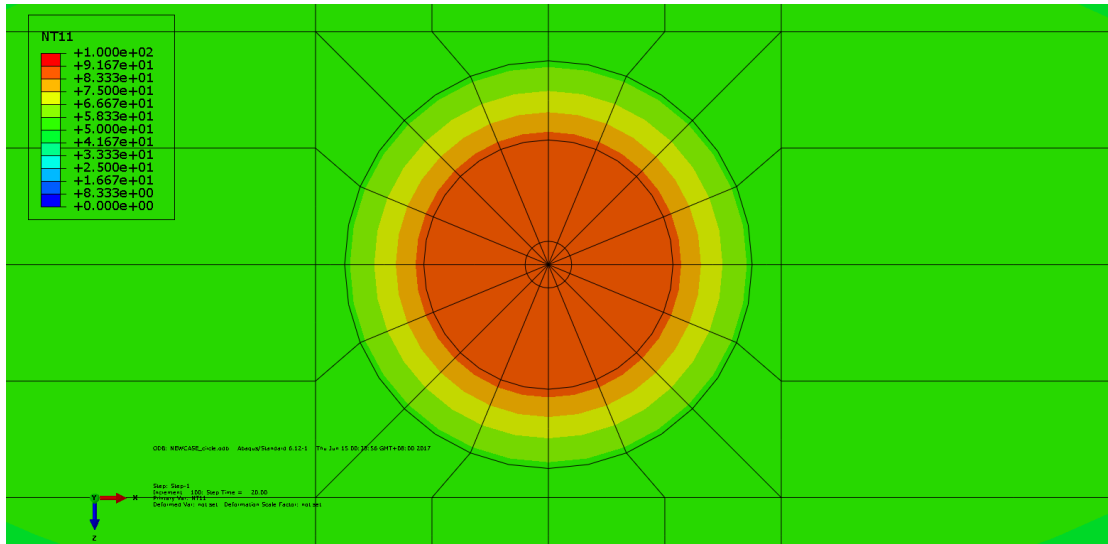


圖 5-23 案例 4 母岩熱傳導係數 3.48(W/m-K)中心處置罐熱傳導分析雲彩圖

5.4 小結

除了案例 1 之外的所有案例皆與文獻[21-23]的結果十分相近，因此案例 1 的處置罐能量的問題需要進行探討。文獻在所有的案例只有描述母岩熱傳導係數、熱容量以及處置場溫度初始條件，並沒有對於處置罐能量進行任何說明，而且文獻講述在深層地質處置場的處置罐的能量要為 1700W 且不得超過，因此使用 1700W 進行多處置孔案例之熱傳導分析，最後發現僅有案例 1 的結果相差非常大。本文認為文獻並無將案例 1 的其餘條件說明完全，以至於其緩衝材料最高溫結果與文獻無法達到相近結果。

第六章、等效熱-水-力耦合數值分析驗證技術

6.1 前言

處置場之衰變熱除了產生溫度變化之外，也會造成內部孔隙水壓、有效應力、及變形場的改變；由於溫度場、水力變數場、及有效應力三者之間會相互影響，形成十分複雜的分佈機制。於分析處置場問題時，處置場受高溫作用使得水力-力學參數發生變化，而熱傳參數與水力-力學參數間的相互影響亦甚大，故分析時須藉由水力參數重複疊代之方式達成完全耦合熱—水—力之分析。

6.2 代表體積單元驗證模型建立

根據核能研究所(2002)[24]之概念設計，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 公尺埋置一個核廢料罐，模型之尺寸長向距離為 40m，短向距離為 6m，如圖 6-1、圖 6-2。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，廢料罐、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 6-1，緩衝材料之熱傳導係數隨飽和度變化如表 6-2。

105 年度係採用原始模型進行分析，而本年度則改用等效模型分析，二者結果極為接近，顯示等效模型在運用較少計算資源的情況下仍能得到相近結果，已達成本年度研究之目的。

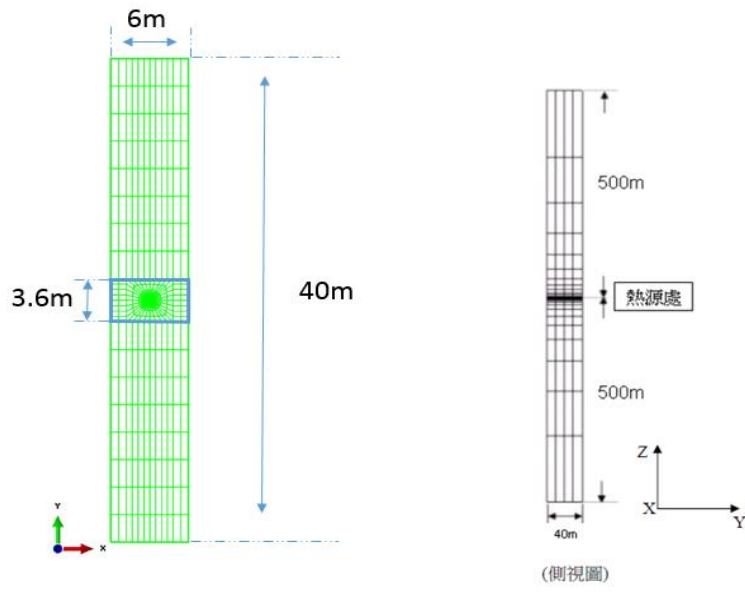


圖 6-1 模型示意圖

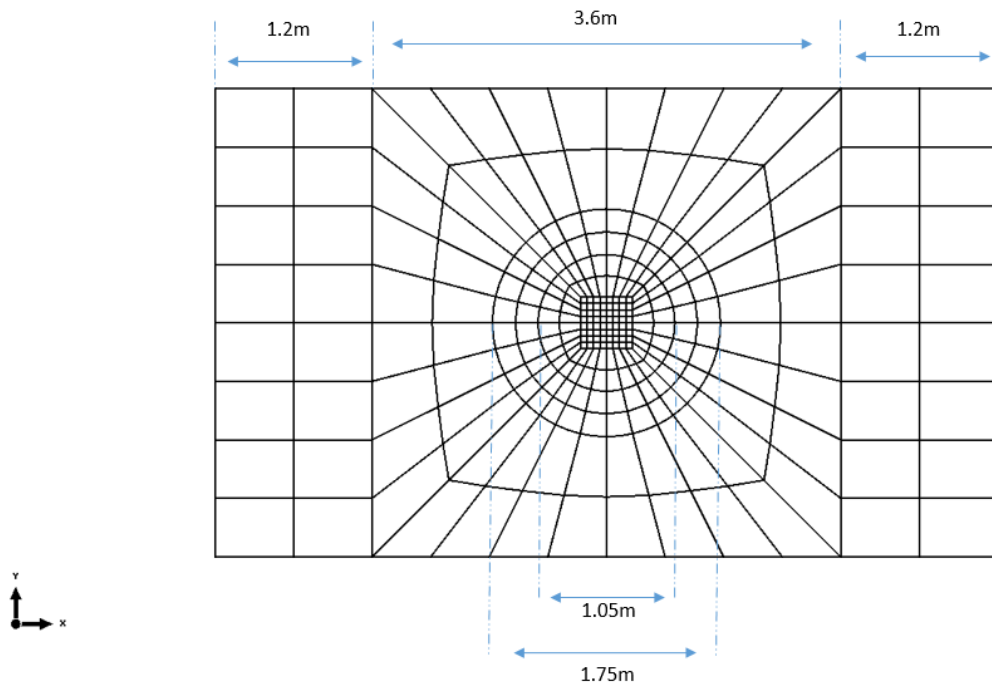


圖 6-2 模型局部尺寸放大圖

表 6-1 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 6-2 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
0.9	1.35
1.0	1.4

6.2.1 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，因此廢料罐中心於地表下 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 6-3)，因此在模型邊界設置對流係數 10W/m² -K。

根據核研所(2002)[24]所提出處置場之單一廢料罐產生之熱能為 1714W，所使用之熱衰減公式如(6.1)式:

$$Q=1714(0.696e^{-0.02t} + (1-0.696)e^{-0.0013t}) \quad (6.1)$$

Q：為隨時間進行而變化之發散熱強度，t:為時間(年)

圖 6-4 為總熱能隨時間之變化趨勢，熱源之發散熱強度將隨時間行進而衰減。

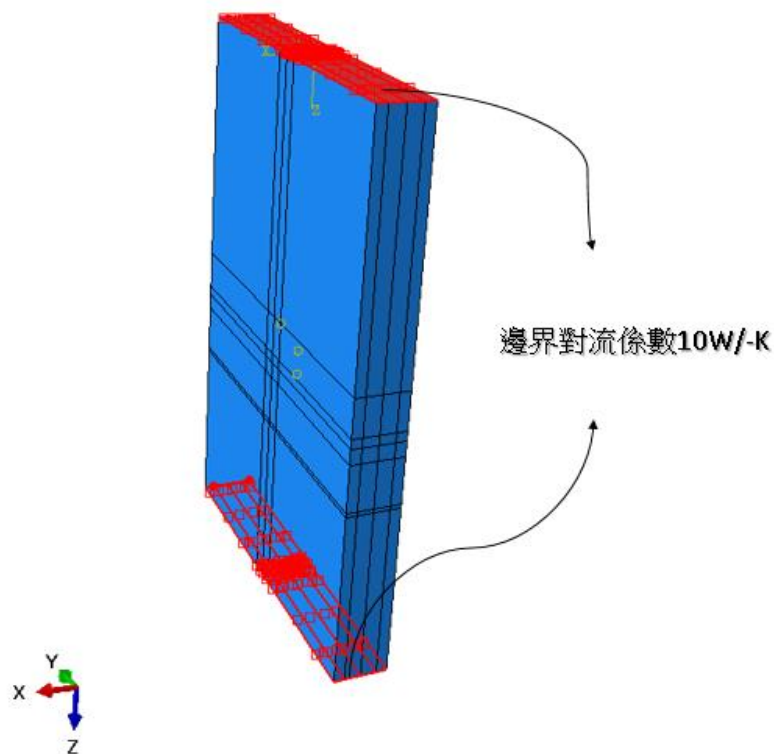


圖 6-3 模型邊界熱對流係數示意圖

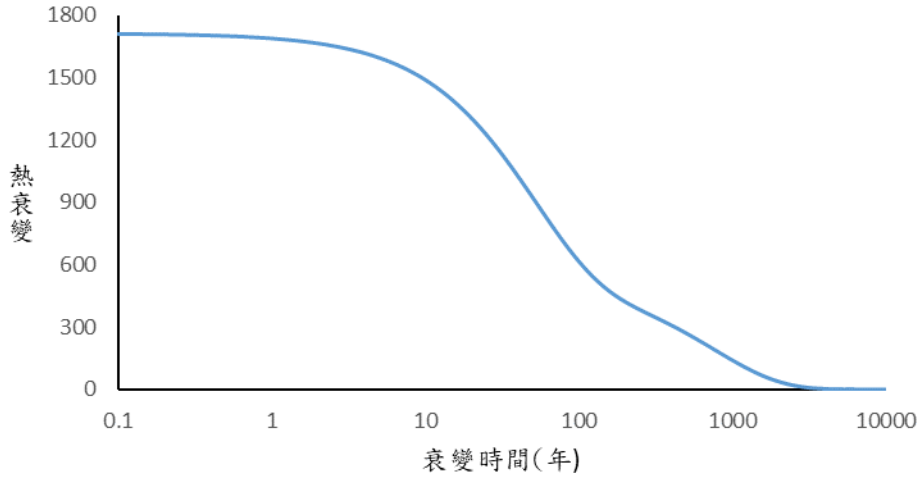


圖 6-4 熱源衰變圖歷時圖

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 6-5 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 6-6 所示。

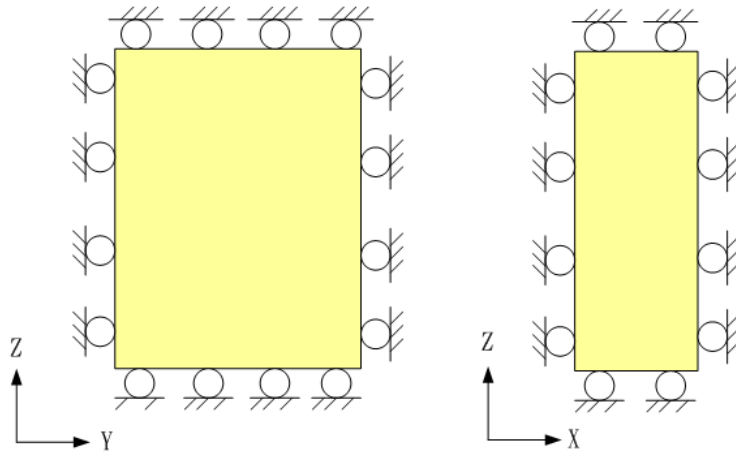


圖 6-5 力學邊界條件設置示意圖

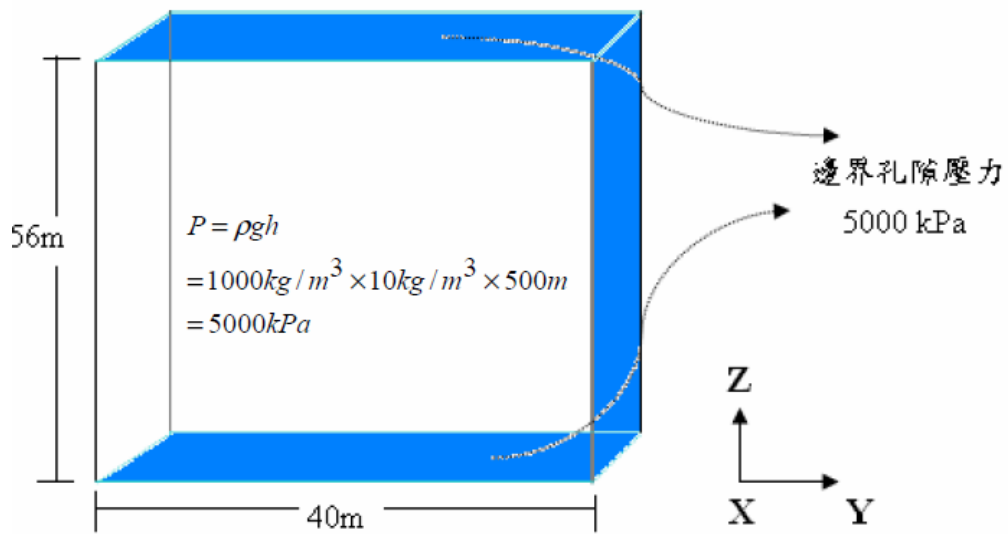
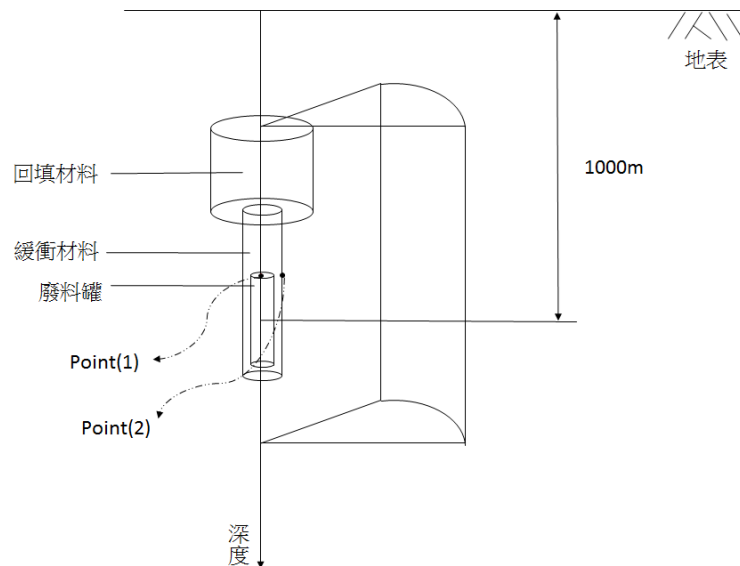


圖 6-6 孔隙壓力模型邊界示意圖

6.2.2 完全耦合熱-水-力學分析結果

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，如圖 6-7，分析結果的溫度與時間的歷時圖如圖 6-8，最高在第八年，溫度為 96.89°C。



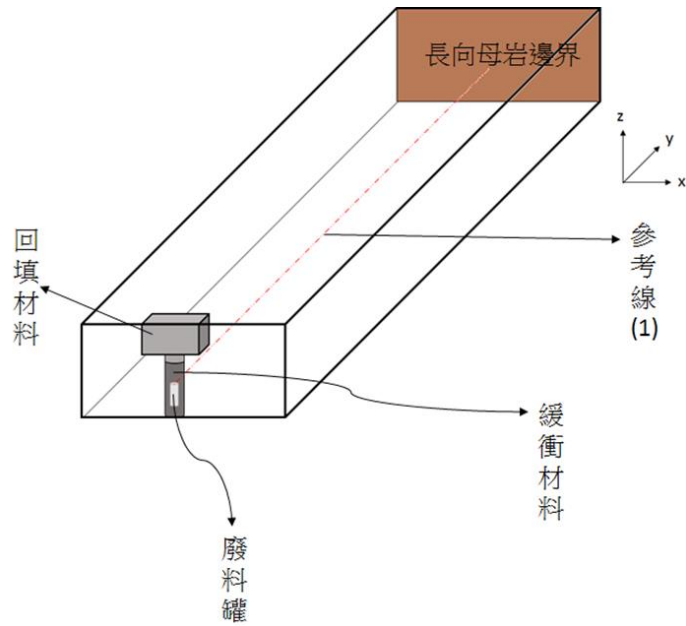


圖 6-7 分析之位置

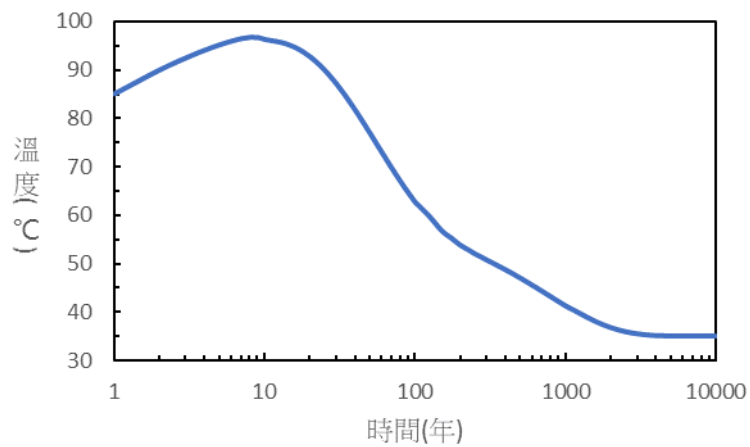


圖 6-8 溫度與時間歷時圖

在點 1 上飽和度與時間歷時圖如圖 6-9，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，第八年參考線(1)之應力分析如圖 6-10，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。

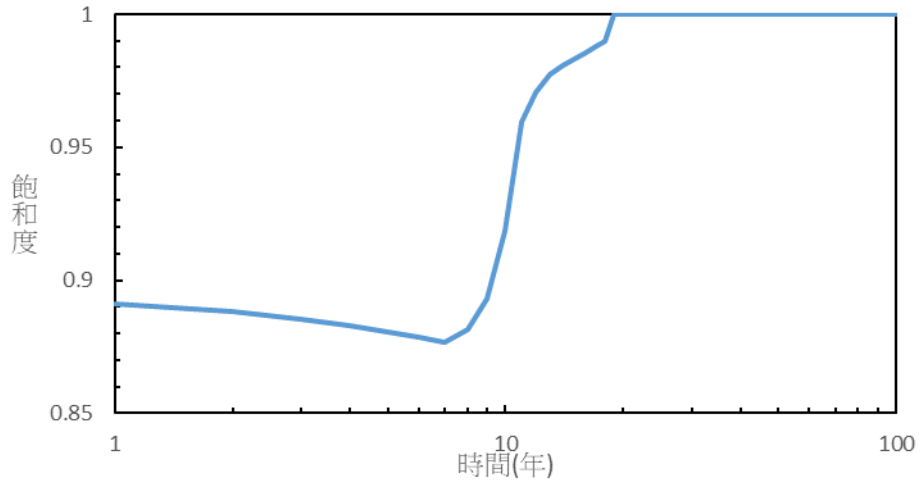


圖 6-9 飽和度與時間歷時圖

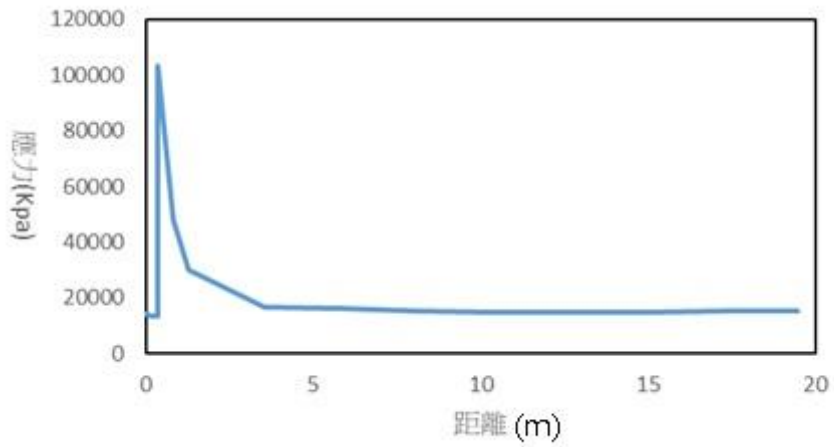


圖 6-10 應力與距離分布圖(第 8 年)

以上計算係採用原始模型進行分析，其分析概念已詳述於 105 年度之計畫報告，以下將進一步提出等效模型之概念，目的在運用較少計算資源的情況下仍能得到相近結果，此為與 105 年度工作內容最主要不同之處。

6.3 等效模型驗證技術

再多處置孔分析中，網格數目繁多，在分析程式上受到了分析之限制，致使無法分析，為了解決這問題，本研究必須作些簡化與修正。

等效模型建立之步驟，須先將有限元素數值模型之網格簡化。但簡化後之分析結果與未簡化模型不同，因此在未簡化之網格模型上，將具有代表性之特定位置上溫度、飽和度、與 Mises 應力之計算結果作為建構等效模型之依據，依此設定簡化有限元素模型之材料參數，使簡化模型與原始模型之數值分析達到相近的結果，其中 Mises 應力又稱為等效應力，其方程式如公式 6.2。

$$\begin{aligned}\sigma_v &= \sqrt{3J_2} \\ &= \sqrt{\frac{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)}{2}}\end{aligned}\quad (6.2)$$

等效模型只適用在特定點位上，因為此模型僅適用於特定位置上之溫度、飽和度、Mise 應力進行比較。

等效模型概念在工程上有許多的應用，如鋼筋混凝土、smear crack model、複合材料等，其概念皆是使複雜與多項的材料、裂縫等，將其等效為單一楊氏模數、剛度等問題，方可後續之處理與運算。

6.3.1 等效模型尺寸與材料參數

尺寸使用 6.2 小節分析的模型大小，等效模型網格與部分的材料參數變動如圖 6-11、表 6-3，其餘條件皆與原始

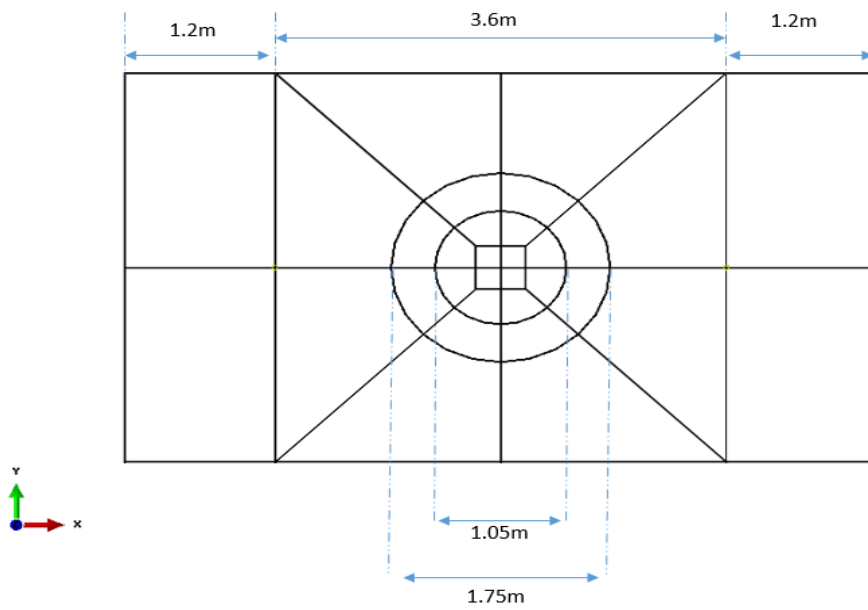
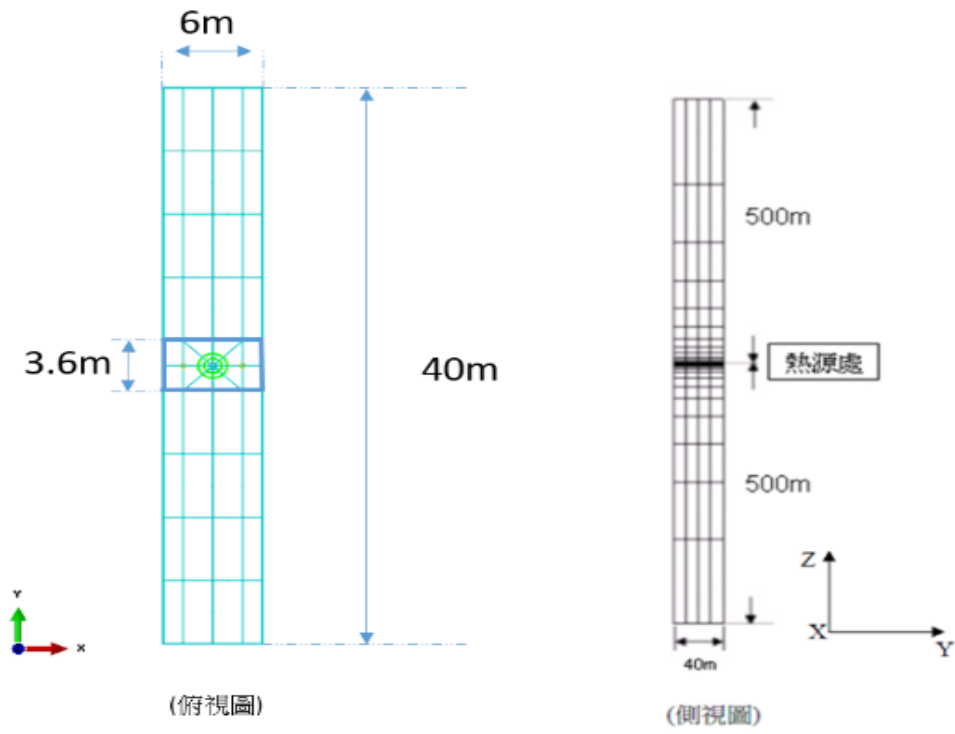


圖 6-11 局部網格圖

表 6-3 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	3.264×10 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	9×10 ⁻⁶
滲透係數 (m ²)	---	3.28×10 ⁻²¹	5×10 ⁻¹⁸	6.9×10 ⁻¹⁹
孔隙率	---	0.41	0.63	0.02

為了使簡化的模型可以與原始的模型有著相近的分析結果，所以藉由部分材料參數更動設定 (表 6-3 灰底之參數即是)，使得在特定位置上之溫度、飽和度、應力之數值結果相近，即為「等效模型」。

6.3.2 等效熱-水-力耦合分析模型之案例評估

點 1 分析結果的溫度與時間的歷時圖，如圖 6-12，飽和度與時間歷時圖，如圖 6-13，第八年廢料罐頂部徑向延伸至母岩邊界之 Mises 應力分析如圖 6-14，與原始模型分析結果的比較表 6-4，圖 6-15、6-16、6-17 分別於點 2 的應力歷時分析結果。

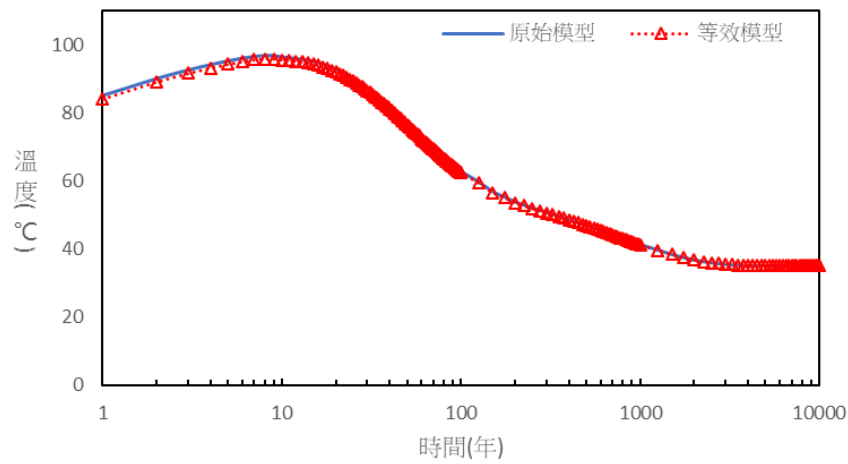


圖 6-12 溫度與時間歷時圖

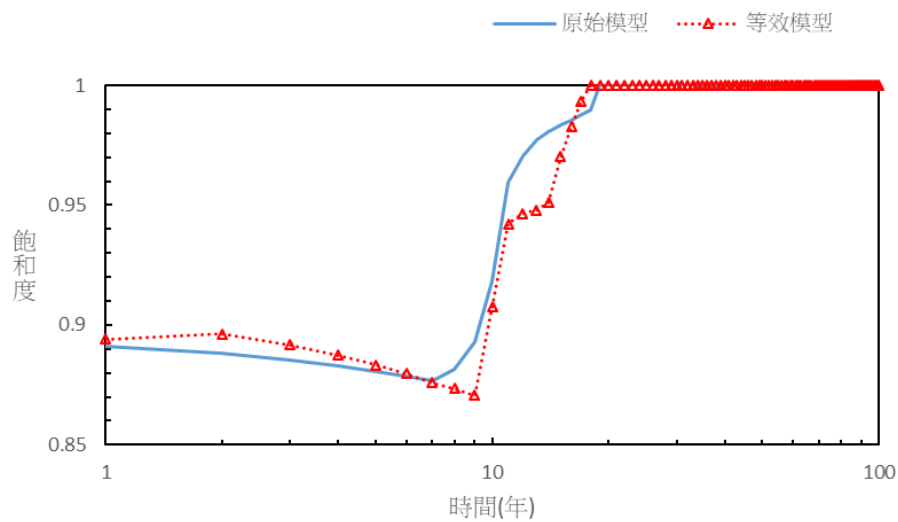


圖 6-13 飽和度與時間歷時圖

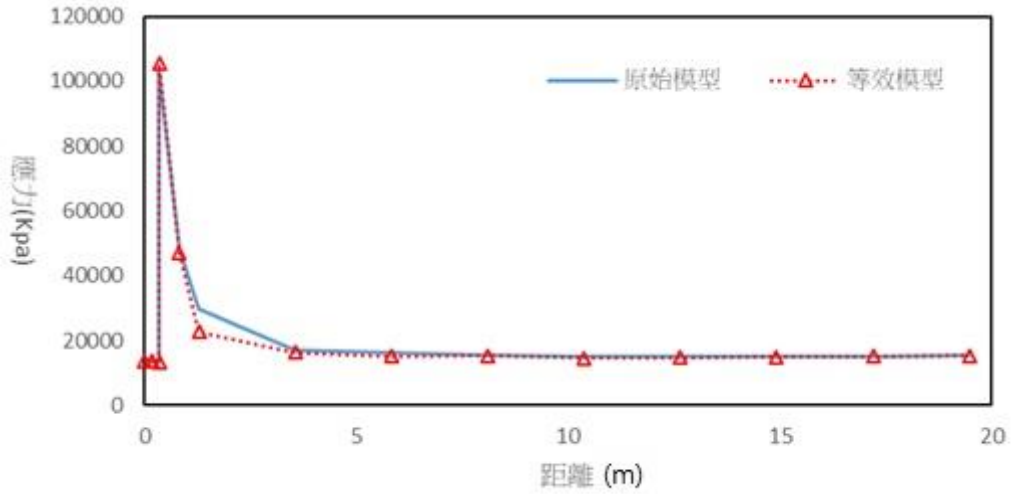


圖 6-14 應力與距離分布圖(第 8 年)

表 6-4 達最高溫與飽和度的時間

	原始模型	等效模型
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

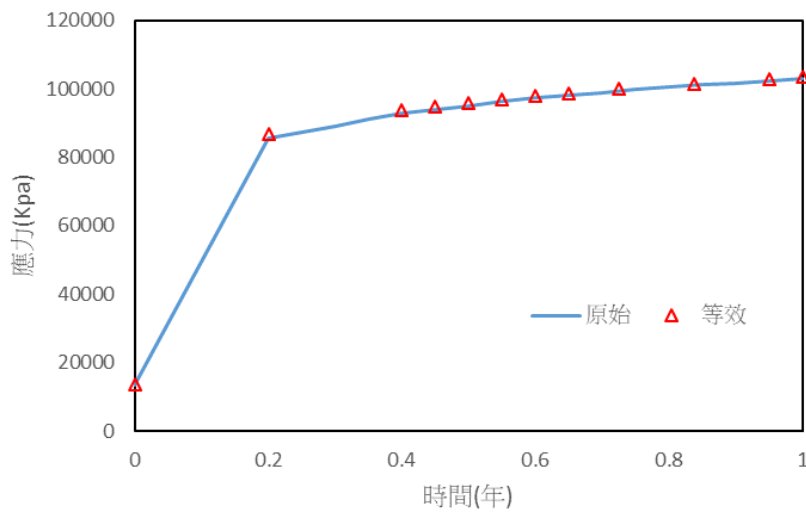


圖 6-15 點 2 應力與時間分布圖(第 1 年)

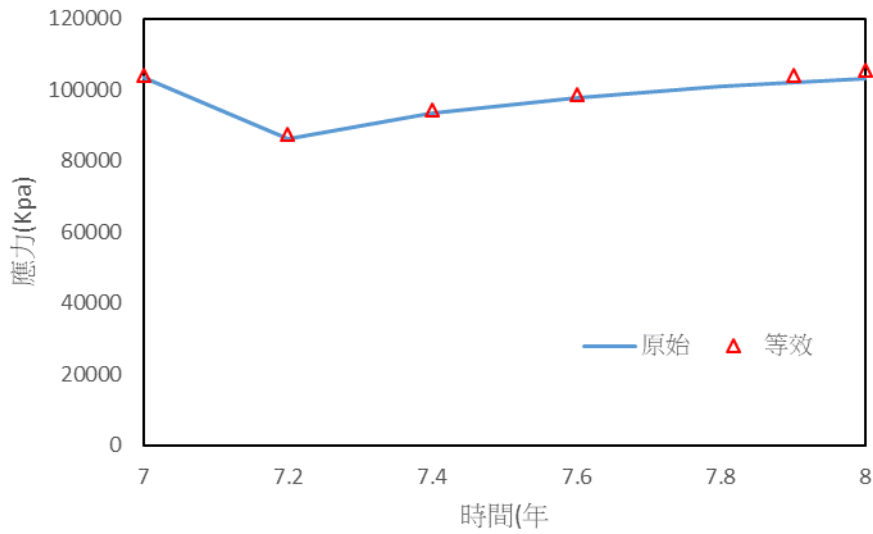


圖 6-16 點 2 應力與時間分布圖(第 8 年)

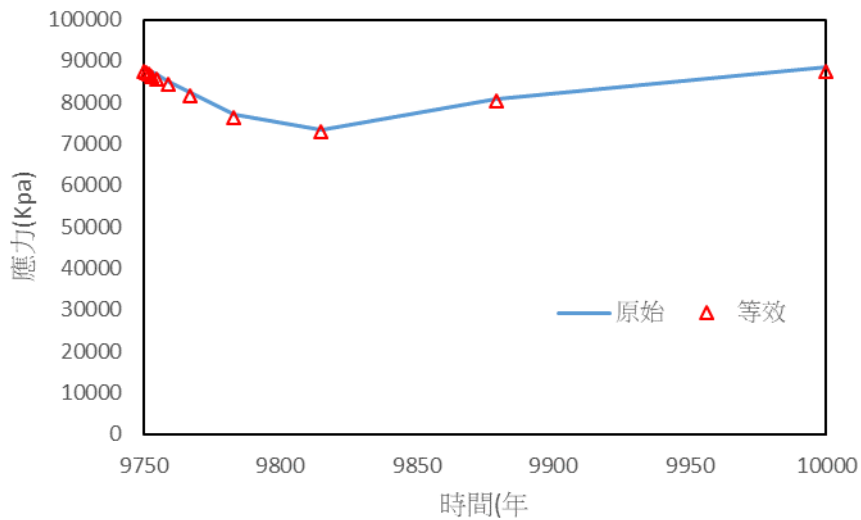


圖 6-17 點 2 應力與時間分布圖(第 10000 年)

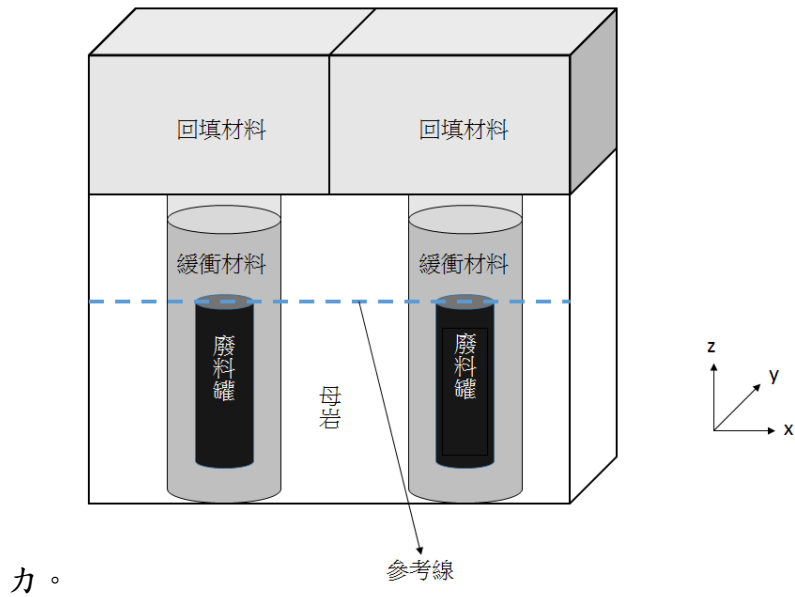
6.4 多孔幾何配置之完全耦合熱-水-力學影響效應研析

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」等效模型進行建立。

模型之尺寸、參數皆與 6.3 節完全相同，不同的是我們將處置孔擺放成兩條的處置隧道，這兩條隧道彼此間互相平行，處置孔數量都為 10 個。

本節分析為第八年之圖形與分析之數據，分析之位置有廢料罐上方沿著短向方向，如圖 6-18 之虛線，處置孔邊緣在廢料罐上方高度與短向方向，如圖 6-19 之虛線，圖 6-18 位子分析有溫度、飽和度，圖 6-19 位置分析有 Mises 應



力。

圖 6-18 分析位置示意圖

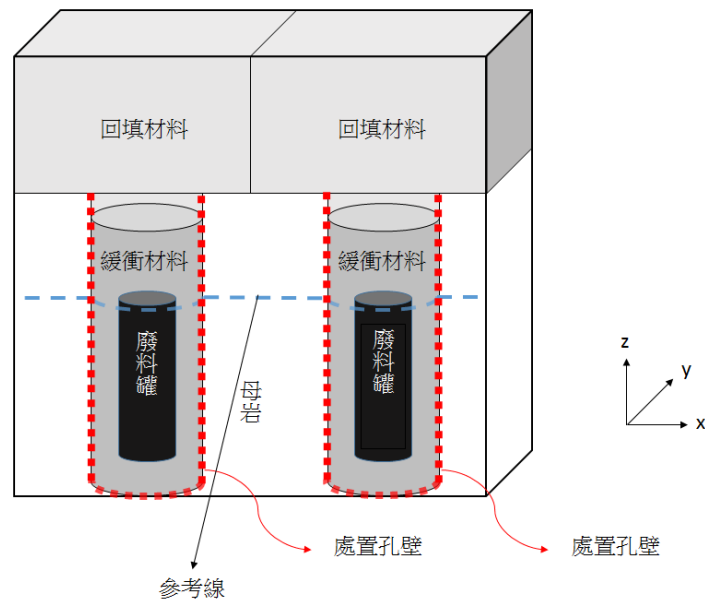


圖 6-19 分析位置示意圖

這裡將分析兩條平行隧道，其周圍的母岩熱傳導係數不同，在隧道一其母岩熱傳導係數為 3 (W/m-K)，隧道二母岩熱傳導係數為 30 (W/m-K)。於 Point(1) 上隧道一其最高溫發生於第七年為 94.67°C，隧道二則是第三年為 58.28°C 如圖 6-20，隧道一達飽和時間為 18 年，隧道二為 19 年如圖 6-21，於第八年參考線 1 上之溫度雲彩圖，如圖 6-22，其溫度分佈圖，如圖 6-23；於第八年參考線 1 之飽和度雲彩圖，如圖 6-24，其飽和度分佈圖，如圖 6-25；於第八年參考線 2 之 Mises 應力雲彩圖，如圖 6-26，其 Mises 應力分布圖，如圖 6-27。於第八年各隧道比較表 6-5。

本年度之雙隧道問題係考慮不同材料性質分析結果(圖 6.23、圖 6.25、圖 6.27)，而 105 年度計畫雙隧道之問題則僅考慮相同材料性質之情況較為單純。

表 6-5 第八年隧道一、隧道二之比較

	隧道一	隧道二
最高溫度(°C)	94.67	57.18
最大飽和度(%)	87.6	87.4
Mises 應力(Mpa)	128	116

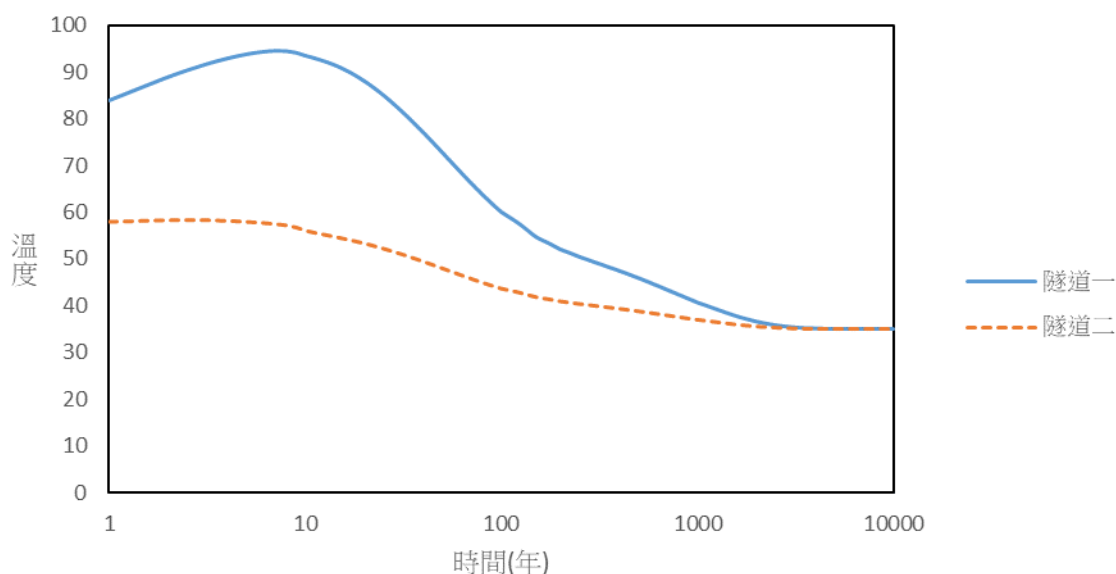


圖 6-20 溫度與於時間歷時圖

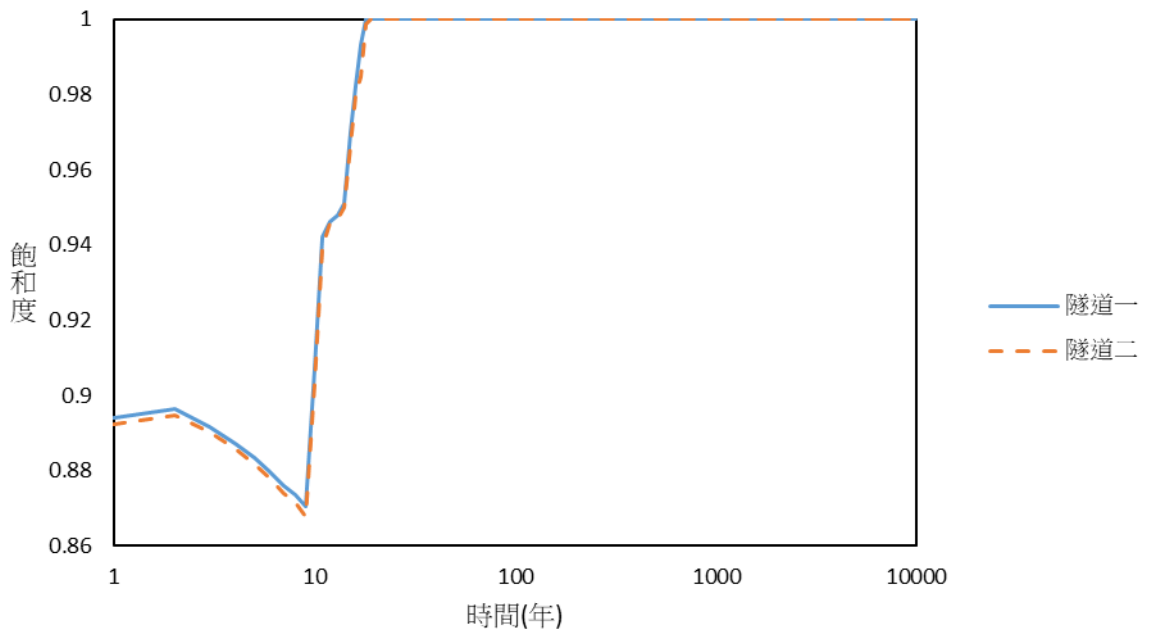


圖 6-21 飽和度與時間歷時圖

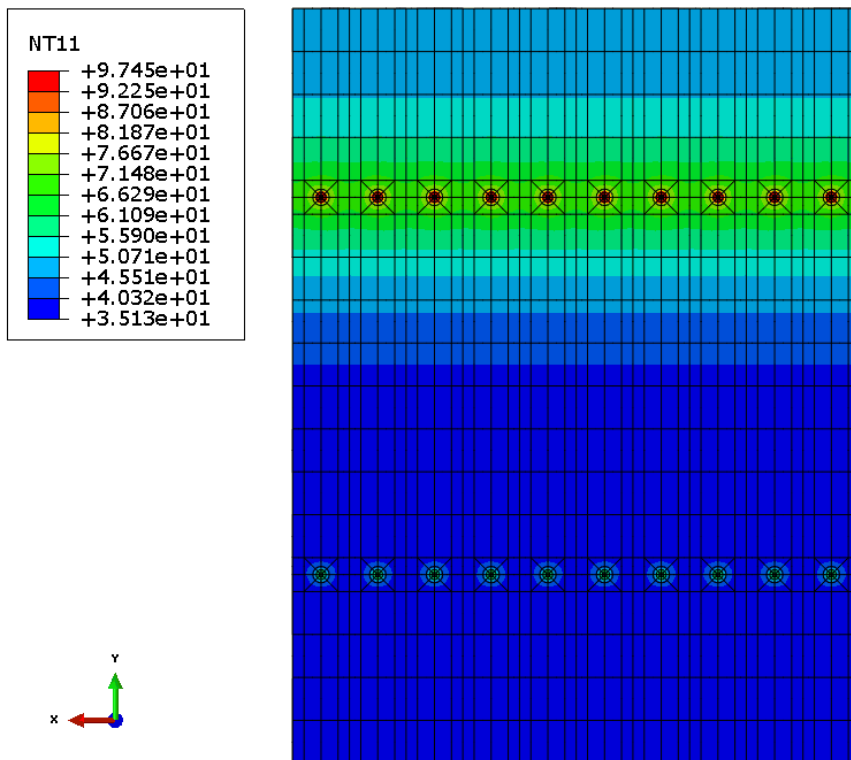


圖 6-22 非均質廢料罐溫度之雲彩圖

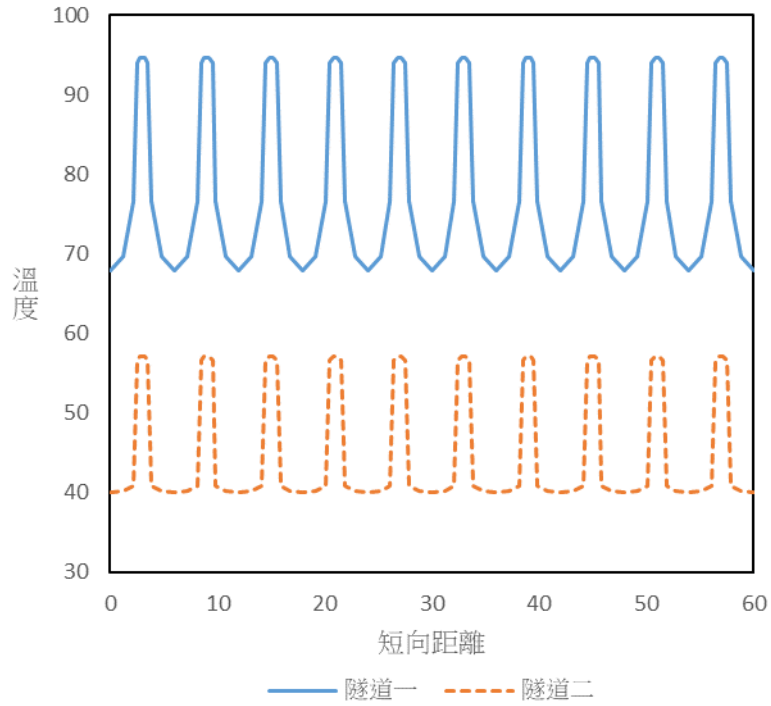


圖 6-23 非均質廢料罐於參考線 1 之溫度分佈圖

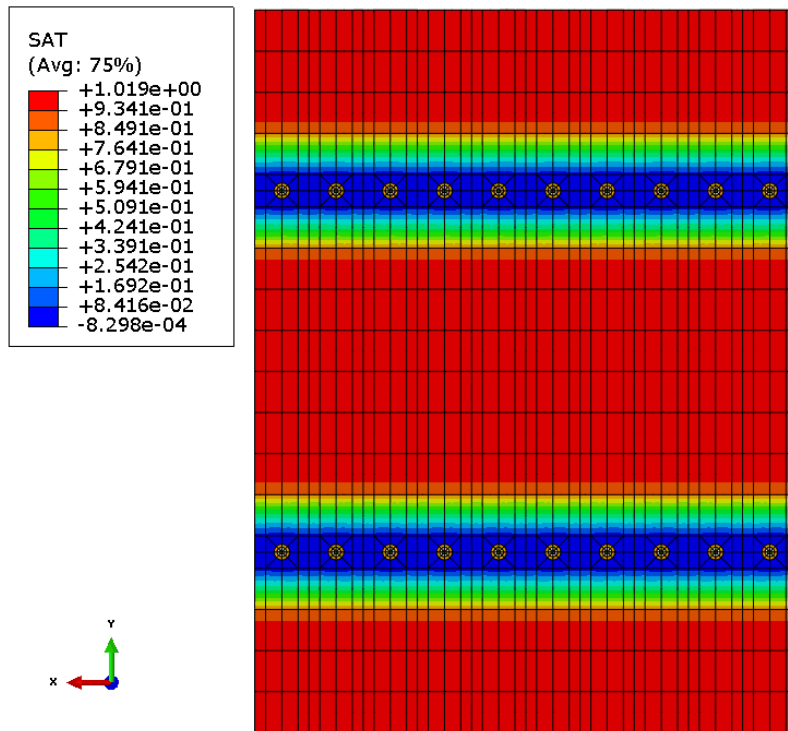


圖 6-24 非均質廢料罐飽和度之雲彩圖

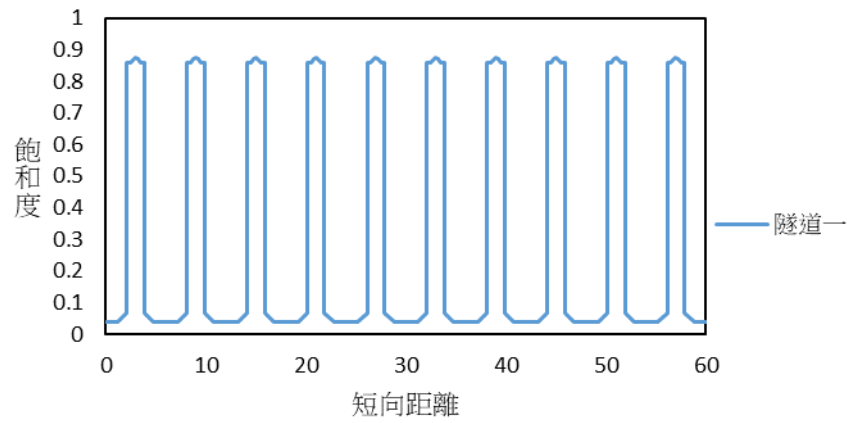
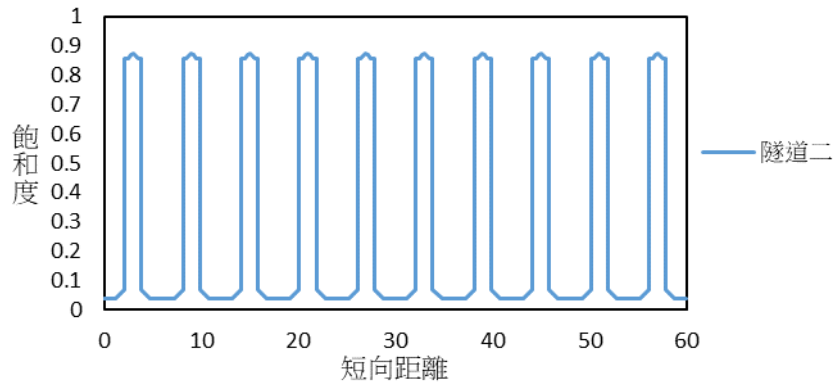


圖 6-25 非均質廢料罐於參考線 1 之飽和度分布圖

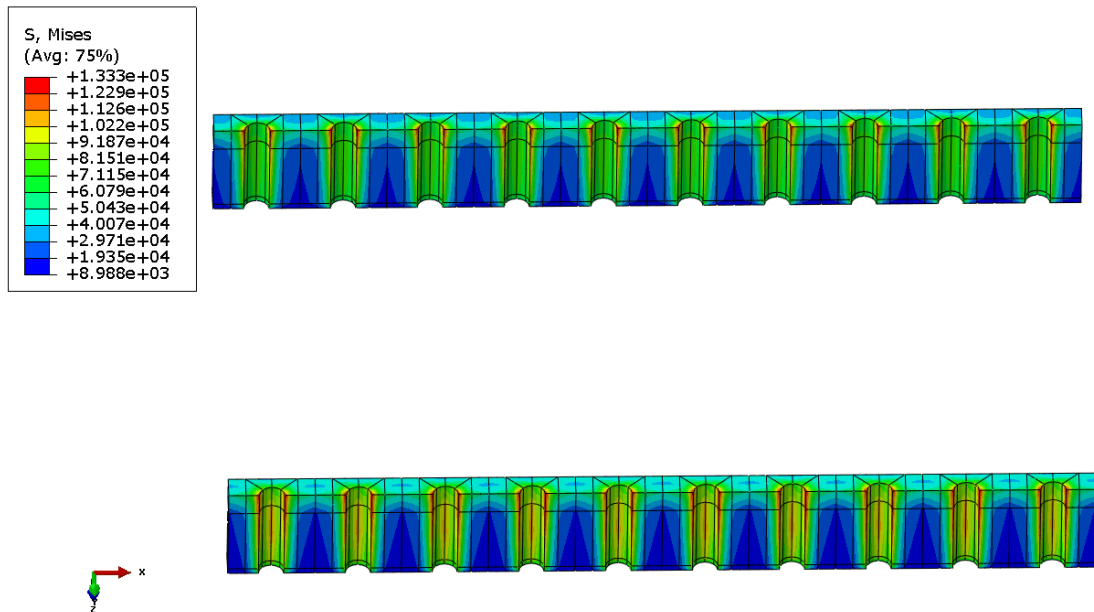


圖 6-26 非均質廢料罐 Mises 應力雲彩圖

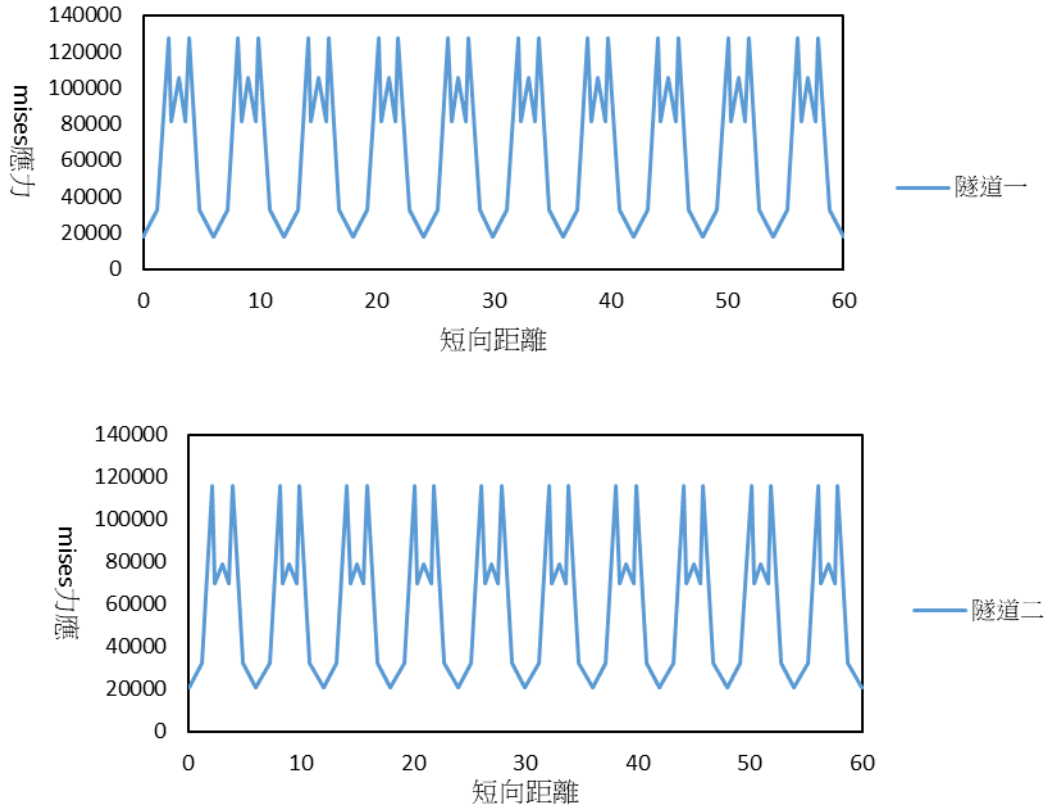


圖 6-27 非均質廢料罐於參考線 2 之 Mises 應力分布圖

第七章、審查重點或注意事項之建議

本文研析國際相關資訊，配合我國將來用過核子燃料最終處置場之可能需要因應發展的情況，針對深地層最終處置設施耦合分析之審查重點，建議以八個分析面向進行討論，茲分別說明如下。

1. 處置場環境演變過程：

須完整描述處置場運轉後周圍環境的演變過程，並依此確認後續分析之重要議題。

了解各種材料在處置過程中，經過輻射、熱傳、水力、力學、化學、生化及外部影響等演變過程，材料性質的改變是否會影響處置場的安全性。如文獻[5]中即針對各材料在演變階段的變化，進行詳細的討論與整理。

2. 分析議題：

須依據處置場環境演變過程確立重點分析議題，各議題之目的、方法及內容須完整描述。

文獻[9]中，將處置場環境的演變過程分成 22 的主要分析議題，各代表了處置場運作過程中不同方面的問題。另外，須嚴謹審視分析時所考慮的假設條件，各項變數如材料性質、幾何配置與條件、使用之分析軟體程式等等也須詳細的說明與討論。

3. 材料性質：

針對處置場各組成主材料(如緩衝材料、回填材料等)所採用之材料參數，須說明其來源並確認其準確性。

一方面可方便未來追蹤數據資料；另一方面為要求數據資料的準確性，亦可提高分析之可信度。文獻[6]中提供緩衝材料相關參數的資料來源與數據品質，這些數據資料都有通過一系列檢測來確認其準確性，而唯有合格的數據資料才會被採用。

4. 幾何配置與條件：

須完整描述處置場各分析案例所使用之配置方式與幾何條件，可確認分析案例是否是針對選定之場址所建立，且要求分析案例要附上完整的模型幾何與配置方式，以利後續之審查與驗證作業。

5. 假設條件：

須完整說明分析案例之假設條件，並確認其是否合理。分析中的假設條件，將直接影響分析結果，因此需要了解假設條件的合理性與對分析結果的敏感性，如邊界條件、有無外力影響、極端條件及簡化分析方法等。

6. 分析軟體程式：

須確定所使用電腦軟體之分析能力，並完整了解其背後之理論基礎，並確認不同軟體的相互影響，以及不同軟體間資料傳遞的方式。

審查時，要確定分析軟體是否適用於分析之目的；有無正確操作使用；軟體程式開發過程是否遵循適當的程序，並且軟體程式分析的結果要準確；且要清楚說明如何在不同的程式之間傳遞分析數據[25]。

7. 分析結果：

須完整描述各分析案例之分析目的、方法及過程，並完整列述分析結果及相關重點討論。

8. 平行驗證：

就上述各項重點，提供第三方單位進行平行驗證之分析依據，有完整之資料，才能重現相同案例之分析。須進行平行驗證，以深入審查的分析結果、識別被忽略問題、並測試和評估各種假設條件的敏感度。

第八章、結論

1. 等效熱傳導數值分析驗證技術之結果
 - (1) 等效熱傳導數值分析模型與瑞典 SKB 報告熱傳分析結果十分相近。
 - (2) 回填材料參數影響分析之結果與文獻結論相近。
 - (3) 各案例中，三組等效模型之熱傳分析結果均十分相近，等效模型之概念可應用於未來相關參數之分析中。
2. 瑞典 SKB 報告多孔幾何配置熱傳導案例之驗證結果

本文依照文獻所給定的條件進行三維多處置孔之四組案例進行平行驗證，其中案例二(包括二子案例)至案例四之結果皆與文獻相當接近，平行驗證相當成功。唯有案例一的分析結果與文獻不符，依此結果研判，係由於文獻對於案例一的條件並沒有完整說明所致。
3. 等效熱-水-力耦合數值分析驗證技術之結果
 - (1) 在具有代表性之特定位置上，針對其溫度、飽和度、與 Mises 應力，建構出適用的功能式等效模型，在這些特定位置上計算得出的結果皆與原始模型極相似。
 - (2) 使用等效模型的建構「處置設施多孔幾何配置」之分析模式，可以更有效率的呈現多處置孔的模擬分析。
4. 本報告針對深地層最終處置設施耦合分析之審查重點，以八個分析面向提出建議。
5. 在處置設施多孔幾何配置問題的分析上，本年度與 105 年度之研究內容相較，具有更加深入的探討內容，茲說明如下；
 - (1) 105 年度多孔幾何配置分析中，並未考慮不同性質處置設施之情況。
 - (2) 本年度提出等效耦合模型驗證技術之概念，可更為有效率的進行多孔幾何配置的驗證分析。
 - (3) 本年度多孔幾何配置分析中，考慮不同性質之處置設施，更能代表多孔處置設施相異之情形。
 - (4) 本年度與瑞典 SKB 報告對於熱傳導多孔配置結果進行比較分析，可確

認本計畫平行驗證技術之執行效能。

6. 在處置設施多孔幾何配置問題的分析上，本年度與 105 年度之研究內容相較，具有更加深入的探討內容，茲說明如下；
 - (1) 105 年度多孔幾何配置分析中，並未考慮不同性質處置設施之情況。
 - (2) 本年度提出等效耦合模型驗證技術之概念，可更為有效率的進行多孔幾何配置的驗證分析。
 - (3) 本年度多孔幾何配置分析中，考慮不同性質之處置設施，更能代表多孔處置設施相異之情形。
 - (4) 本年度與瑞典 SKB 報告對於熱傳導多孔配置結果進行比較分析，可確認本計畫平行驗證技術之執行效能。

參考文獻

- [1] 台灣電力公司，2016，「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-104 年度成果報告」。
- [2] SKB ,2010,“Data report for the safety assessment SR-Site”,TR-10-52.
- [3] JCN ,2000, “H12-Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan”,Japan Nuclear Cycle Development Institute.
- [4] 行政院原子能委員會放射性物料管理局，2016，「深層地質處置設施多孔配置之近場效應分析(期中報告)」
- [5] Svensk Kärnbränslehantering AB,2010, “Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site”, TR-10-47.
- [6] Svensk Kärnbränslehantering AB ,2010,“Spent nuclear fuel for disposal in the KBS-3 repository.”,SKB, TR-10-13.
- [7] Posiva ,2014, “Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto FEP Screening and Processing”,POSIVA 2014-03.
- [8] 劉文光、蔡富豐、黃秉修、張仁坤，2004，「赴瑞典、芬蘭考察放射性廢棄物營運設施」。
- [9] SKB,2010,“THM modelling of buffer, backfill and other system components”,TR-10-44.
- [10]Philip Maul, Peter Robinson, Alex Bond, Steven Benbow, 2008 ,“Independent Calculations for the SRCan Assessment”, SKI Report 2008:12.
- [11]SKB, “Long-term safety for KBS-3 Repositories at Forsmark and Laxemar - a First Evaluation.” ,TR-06-09.
- [12]JAEA,2011,“Final Report on the Surface-based Investigation Phase(Phase I) at the Mizunami Undergroud Research Laboratory Project”
- [13]POSIVA,“Thermo-Hydraulic Modelling of Buffer and Backfill”,POSIVA 2012-48.
- [14]台灣電力公司，2014，「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」。
- [15]Dassault Systems ,2008,Simulia Corp, “ABAQUS manuals”, ABAQUS Inc.

- [16] 邱太銘，1999，「國外用過核燃料/高放射性廢料最終處置現況」，行政院原子能委員會核能研究所化工組。
- [17] 劉尚志、林鴻旭、焦自強，1988，「高放射性廢料深層地質處置」，原子能委員會核能彙刊，第二十四卷，第五期，第 2-33 頁。
- [18] 謝馨輝，2003，「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。
- [19] SKB,2006,“Water saturation phase of the buffer and backfill in the KBS-3V concept”,TR-06-14.
- [20] A.P.S. Selvadurai*, T.S. Nguyenb,1996, “Scoping analyses of the coupled thermal-hydrological-mechanical behaviour of the rock mass around a nuclear fuel waste repository”.
- [21] SKB,(2009b), “Strategy for thermal dimensioning of the final repository for spent nuclear fuel ”, R-09-04.
- [22] Svensk Kärnbränslehantering AB, 2010, “Design, production and initial state of the buffer for the safety assessment SR-Site.” ,SKB ,TR-10-15.
- [23] Svensk Kärnbränslehantering AB, 2010d. “Design, construction and initial state of the underground openings for the safety assessment SR-Site.” ,SKB,TR-10-18.
- [24] 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。
- [25] Svensk Kärnbränslehantering AB,2010, “Model summary report for the safety assessment SR-Site”, TR-10-51.
- [26] Dassault Systèmes,2009, “Abaqus 6.9 Online Documentation”