



行政院環境保護署

108 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

分散式光纖溫度感測器在地下水污染場 址之高解析度井下水文地質調查

期末報告（定稿）

主辦單位： 行政院環境保護署
專案執行單位：國立臺灣海洋大學／地球科學研究所
專案主持人：邱永嘉 副教授
專案執行期間：108 年 01 月 04 日起至
109 年 11 月 30 日止

中華民國 108 年 12 月 印製



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查



專案名稱

分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

主持人

邱永嘉

副教授

期末報告



一、專案基本資料表

專案性質	☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質		專案類別(單選)	☐ 研究型 ☒ 模場型	
研究主題	☐ 整治 ☒ 調查 ☐ 其他				
申請機構系所	國立臺灣海洋大學地球科學研究所				
機構地址	基隆市中正區北寧路2號				
專案主持人	邱永嘉	職等/職稱	副教授		
協同主持人	董天行	職等/職稱	經理		
專案名稱	中文	分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查			
	英文	Using fiber optic distributed temperature sensor as a downhole tool to investigate the hydrogeology with high resolution			
	關鍵字	fiber optic distributed temperature sensor, heat tracer, groundwater contamination, hydrogeology, filed experiment			
執行期程	自民國 108 年 1 月 4 日起 至民國 109 年 11 月 30 日止				
專案主持人	姓名：邱永嘉 E-mail：ycchiu@mail.ntou.edu.tw		專線：02-2462-2192#6515 手機：0988612599		
專任助理	姓名：曾燕翔 E-mail：ogurisho1231@gmail.com		專線：02-2462-2192#6516 手機：0912400063		
經費分析總表 (僅模場試驗專案需填寫兩年度金額)	專案預估經費		第一年金額	第二年金額	編列說明
	1.	人事費用	498,214	533,326	(1~5項相加之50%為限)
	2.	貴重儀器使用含維護費	0	0	(與計畫實驗相關)
	3.	消耗性器材與主要費用	600,000	480,000	(與計畫主體相關)
	4.	其它研究相關費用	202,900	141,900	(含差旅與租賃費用)
	5.	雜支費用	62,000	24,179	(1~6項相加之5%為限)
	6.	行政管理費	136,311	118,140	(1~5項相加之10%為限)
	7.	自籌款	0	0	(自行籌備款項)
	申請補助金額(1~6項)		1,499,425	1,299,545	總金額：2,798,970
	計畫總金額(1~7項)		1,499,425	1,299,545	總金額：2,798,970

專案主持人(簽名及蓋章)：

日期：108.12.23



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐申請計畫書 ☐期中報告
☐修正計畫書 ☒期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	108 年度	計畫類型	☐ 研究型 ☒ 模場型
計畫類別	☐ 整治 ☒ 調查 ☐ 其它		主持人：邱永嘉 NO：C7
計畫名稱	分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一 張簡水紋委員 (一) 第一年模場 DTS 設五口井，其反應區域面積小，但其反應各井孔差異相對大，P.63 圖 52.其正確性是否與設井時之地質、水文資料作校正？其差異？ (二) 明年度規劃模場是否只針對生物整治成效於含水層加熱可提昇其效果？其評估意義為溫度灌注評估其灌注路徑或提昇生物活性？作為評估提升整體成效？ (三) 目前專利申請規劃？		1. 本計畫所選定之五口注入井為廠區中央具有高污染風險區域，調查初期設井時之地質概念模型與水文地質資料可參考圖 24~27 與表 2(P.25~P.31)，資料顯示在岩心描述上皆略顯粗略，地下水面下不同深度之水文特性亦無法區分。圖 52 為本研究所獲得之成果，藉由高解析度 DTS 的量測可判釋不同深度地層之透水性與水力特性，後續霖昌公司將會再次進行多深度微水試驗，而本研究之分析結果將會與試驗結果相互比較，確認其可信度(P.63)。 2. 明年度之工作項目主要為透過主動式加熱法對含水層進行加熱，並透過地下水流攜帶熱能消散的過程判釋不同深度之透水區段。而含水層加熱對生物整治成效之評估，可進一步與霖昌公司配合，透過現地場址採樣分析，進而評估整體之成效，亦可透過實驗室實驗分析溫度變化對生物活性之影響。 3. 本研究第一年執行完成後，將申請”光纖置中器”的新型專利申請，專利申請目前正在進行書面資料的修改，待書面資料完成後，將遞交專利事務所進行專利申請，申請時程預計於明年第一季完成。	



(四) 本計畫調查成效與於傳統監測井內放置自記式水位儀在時間、空間差異之評估與校正及本模場技術與傳統評估方式之效益？

(五) 建議相關結果以 3D 方式作為現地調查垂直、水平地質層差異？及地質水平、垂直之優勢流範圍及由高、低滲透性差大(K 值差 10^2 以上)之運用可行性及校正評估之差異。

(六) 以既有熱水與光纖加熱之效果是否能有效在一般井有效影響半徑內做相關評估？

4. 傳統溫度感測器於井下進行量測時，需將溫度計以溫度陣列方式串連後，放置井下進行量測，為增加量測資料在空間上的解析度，需使用大量的溫度計，且溫度計之間的誤差校正與儀器量測飄移皆須納入考量，而此過程將耗費大量的人力與金錢成本。以光纖進行井下佈設與量測，除了高解析度的 DTS 可彌補溫度陣列在空間量測上的解析度不足，降低耗費的成本之外，可同時避免儀器間的同步與量測誤差校正所造成的不確定性(P.73)。

5. 感謝委員的建議。由於第一年度之工作僅針對單一口井之透水性進行解析，為 1-D 垂向的分析。明年度的工作項目將嘗試分析跨孔試驗之結果，進行 2-D 水平與垂向透水性評估、解析地層差異與優勢水流範圍，期最終之成果能以 3-D 的方式進行呈現。

6. 以第一年度注熱水試驗而言，根據第二次現地試驗結果，於廠區中游位置之監測井注入熱水後，約 24 小時以內可在下游位置監測井接收到溫度上升之訊號。此結果顯示，於廠區中游監測井注入熱水後，藉由地下水流所攜帶之熱能可影響至下游監測井。光纖加熱之效果亦可透過相同之方式進行評估，依據第一年之結果，於中游或上游監測井進行井下試驗時，可望在下游位置量測到溫度上升之訊號。至於影響半徑之評估則可透過數值模式的方式進行量化分析，其分析方式將會與傳統水文地質上之抽水試驗相似，唯一的差別僅在於將熱傳輸參數取代水文地質參數。



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

委員二 林怡利委員

(一) 使用感測器的靈敏度高，如何正確排除外在環境造成的溫度變化？

(二) 如何使用溫度變化的分析結果，定量現場不同深度位置的水力傳導係數？與現地微水實驗結果能否相驗證？model可再優化方向？目前模擬之 K 值不同深度差異不大，實屬相似滲透性之地質，或可調整感測靈敏度，找出真正滲透差異大區間。

1. 井下之水溫變化除了受到地下水流向與流速的影響之外，地表的日夜週期變化及降雨事件亦會影響溫度之變化。本研究在進行 DTS 量測時，主要著重於地下水面下之透水區段的判釋，而地下水面在量測期間非常穩定(地下水深度約 6m)，此深度之地下水溫並未受到地表日夜週期之變化影響。降雨事件對於水溫之影響可透過時間上的連續觀測予以準確的判釋並排除於後續分析。地下水水質變化對於水溫之影響，在水質濃度無劇烈改變之前提下，對於水溫亦無顯著之影響。在排除上述可能影響溫度量測之因素後，僅剩下地下水流向與流速會影響水溫之變化。

2. 本研究主要透過溫度變化之量測推估地下水流速，若能夠搭配地下水位之量測獲得水力梯度，將可推估水力傳導係數。DTS 可提供不同深度之溫度變化(每 25cm)，因此可獲得不同深度之水流速度，進而推估不同深度之水力傳導係數。圖 24~27 與表 2(P.25~P.31)為場址調查初期設井時之地質概念模型與水文地質資料，資料顯示在岩心描述上皆略顯粗略，地下水面下不同深度之水文特性亦無法區分。圖 52 為本研究所獲得之成果，藉由高解析度 DTS 的量測可判釋不同深度地層之透水性與水力特性，後續霖昌公司將會再次進行多深度微水試驗，而本研究之分析結果將會與試驗結果相互比較，確認其可信



(三) 明年度主動式加熱法的效率？加熱時間？均勻度？電磁效應對溫度量測準確度的影響，可再強化說明。	度。數值模式的修正與優化則為第二年的主要工作項目之一，模式修正將會著重於模式之邊界條件與熱傳輸參數之設定，參數敏感度分析亦為工作項目之一(P.63、P.73)。
(四) 本計畫以分散式光纖溫度感測器，搭配地下水文模式模擬，提供空間及時間上的高解析度連續資料，對釐清地下水文地質環境及污染物傳輸路徑上提供有效的確認工具。	3. 主動式加熱法之試驗流程、加熱功率、加熱時間及均勻度均會在實驗室進行測試後，才實際應用於現地。電磁效應對於溫度之影響，吾人認為委員主要是顧慮電磁感應加熱所造成的電磁效應，然而本研究主要是透過直流電的方式於金屬導體上通過一電流，產生熱能，並非感應加熱，且通電加熱提高之水溫僅約 5-10°C，其電磁變化對於產熱效率之影響應不顯著。
(五) 圖 18-22 缺圖例說明。	4. 感謝委員指導。
(六) 現地試驗時，遇大雨影響井內水溫，如何去除及辨識降雨或其外部干擾對井下溫度分布造成的影響效應？	5. 感謝委員指導，已於期末報告修正稿中加入圖例說明(P.17)。 6. 在試驗期間，監測井以角錐及井蓋進行保護，可避免外部干擾因素。降雨事件對於溫度所造成之影響，可透過時間上連續性的資料予以準確排除，僅針對未受到降雨事件影響之水溫進行解析。



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

(七) 現地佈設的光纖可能因作業過程或長使用時間造成受損，影響量測數值的準確度與品質，如何有效評估光纖的功能性？ (八) 請說明本方法實際應用時需的佈點(井位)密度。	7. 進行現地試驗前，均會測試光纖量測的數值與確保光纖外部的完整性。在試驗期間可觀察 DTS 雷射訊號於光纖中能量耗損情況，即時進行評估。試驗結束後，均會再次測試光纖量測的數值與光纖外部的完整性。由於光纖外部均有一層 PE 披覆層，即便在強酸或強鹼的環境下，仍具有一定的保護性，光纖本體為二氧化矽，具有抗強酸與強鹼的特性。此外，本研究之現地試驗均在 3-4 天內完成，對於光纖之影響並不顯著。 8. 本研究所提出注入熱水的試驗方法，主要受限於注入熱水的溫度、注入的流速、注入時間長短及地下含水層的孔隙率與比熱。上述之因素將影響注入熱水的影響半徑(如同抽水試驗之影響半徑)，可透過數值模式的參數敏感度分析及實驗室實驗予以準確評估。依據文獻回顧及現有的試驗設計，布點密度需在數十公尺的範圍內。
委員三 宋浚評委員 (一) 期末報告欠缺計畫預定甘特圖。 (二) 有關 3 次現地試驗得到的初步結果，建議能將測試時的條件加註，如加藥時的加壓壓力及加藥的溫度列出，考慮是否有外面因素影響。	1. 感謝委員指導，已於 P.77 補上計畫預定甘特圖。 2. 第一次現地試驗主要為監測背景值量測與降雨事件造成井內溫度變化，第二次與第三次試驗之試驗，僅於井口進行熱水注入，並未加壓或加藥(DPI)，注入之熱水條件已加註於期末報告修定稿中 (P.37、P.51)。



(三) 有關 P.63 頁圖 52 之現地試驗結果，建議收集各井之地質資料，進一步先比對。	3. 圖 24~27 與表 2(P.25~P.31)為場址調查初期設井時之地質概念模型與水文地質資料，資料顯示在岩心描述上皆略顯粗略，地下水面下不同深度之水文特性亦無法區分。圖 52 為本研究所獲得之成果，藉由高解析度 DTS 的量測可判釋不同深度地層之透水性與水力特性，後續霖昌公司將會再次進行多深度微水試驗，而本研究之分析結果將會與試驗結果相互比較，確認其可信度(P.63)。
(四) 後續計畫要有驗證的說明。	4. 本研究於第二年度將針對針對地一年度之井進行加熱試驗，霖昌公司亦會針對這些試驗井再次進行多深度微水試驗，而本研究之分析結果(第一年與第二年)將會與微水試驗結果相互比較驗證，確認其可信度。
(五) 自評表 A 學術產出國外投稿期刊論文，完成後請更新備註。	5. 感謝委員指導，待期刊論文完成稿後，即會於報告中更新備註。
(六) 專利發明完成申請後，請於報告內註明。	6. 本研究第一年執行完成後，將申請”光纖置中器”的新型專利申請，專利申請目前正在進行書面資料的修改，待書面資料完成後，將遞交專利事務所進行專利申請，申請時程預計於明年第一季完成，待專利申請完成審查通過後將會註明於報告內。
(七) P.63 頁圖 52，各井之間水區段在同一場址，差異性大，後續要有試驗確認。	7. 圖 52 為本研究所獲得之初步成果，第二年度之工作項目將針對這些井進行加熱試驗，後續霖昌公司亦會針對這些試驗井再次進行多深度微水試驗，而本研究之分析結果(第一年與第二年)將會與微水試驗結果相互比較驗證，確認其可信度。



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

委員四 陳志恆委員

(一) P.27, 請補充計算 K 值的經驗公式。

(二) P.37, 請補充注入熱水的溫度。

(三) 建議補充說明地質條件對水溫測量的影響。例如不同的土壤的孔隙率及 heat capacity。

(四) 本案藉由地下水溫的監測了解地下水的傳輸現象，對於現地模場整治有其貢獻。建議未來可以強化模式的應用範圍，增加污染物的傳輸參數。

(五) 明年度的實驗規劃應注意加熱的方式對溫度分佈的影響。

1. 感謝委員指導，已於文中補上經驗公式(P.27)。

2. 感謝委員指導，已於文中補上注入熱水溫度(P.37、P.51)。

3. 感謝委員指導。不同地質材料之孔隙率與比熱均會對溫度的量測造成一定的影響，其影響程度可透過參數敏感度分析進行評估，亦可透過現地採樣分析以減低其不確定性。敏感度分析將為第二年度之工作項目之一。

4. 感謝委員指導。數值模式的優化為第二年度之主要工作項目之一，亦會針對其應用範圍與使用限制加強說明，將盡可能的真實呈現現地污染物傳輸之行為。

5. 感謝委員指導。明年度之試驗主要以主動式加熱法進行地下含水層之溫度變化量測，加熱控制系統將提供一穩定且持續的加熱功率(例如:數小時)，井內之水溫將維持相對高溫的狀態，待停止加熱後，量測熱能消散時的溫度變化，用以判釋地下含水層之透水性。上述實驗規劃已於期末報告修正版中予以補充說明。

專案主持人：

(簽名及蓋章)



研究成果中文摘要

本專案計畫以分散式光纖溫度感測器(fiber optic distributed temperature, FO-DTS)進行土壤及地下水污染場址水文地質調查，藉由其在空間與時間上的高解析度連續性量測，可針對井下溫度分布與透水不透水區段進行判識。本研究於現地污染場址共進行三次現地試驗量測，根據第一次量測結果，因降雨事件造成井內溫度大幅變化，藉由溫度回復的快慢情況判識井下不同深度的地層透水區段，以此溫度回復法(temperature recovery)為概念，進行第二次與第三次井下注熱水試驗。在第二次現地試驗中，於現地佈設五口井，並設定其中兩口注水井進行注水；在第三次現地試驗中，同樣佈設五口井，並設定其中三口注水井進行注水，於停止注水後，監測井下各深度溫度回復情況，並將量測資料進行溫度校正。除了以DTS進行井下監測外，以地下水數值模式 MODFLOW 與 MT3DMS 模擬停止注水後溫度恢復的過程，並藉由 PEST 率定模式參數，將水文地質參數量化並驗證現地量測結果。研究結果顯示，兩次試驗之量測結果經由溫度校正可大幅提升溫度量測之精準度至 0.05 度。根據 DTS 量測結果顯示，於注水井可觀察到在停止注水後，不同深度之溫度回復情況各不相同，藉由溫度回復之快慢速率可判識透水區段。整體而言，除了井 E-04 以外，每口井之透水區段皆分布於淺層深度(6 公尺~9 公尺)，不透水區段則分布於中間區段(9 公尺~11 公尺)，然而井與井間之相對透水性高低仍需透過數值模式量化或複井跨孔試驗方可確認。針對井 E-01 與 E-04 兩口井進行數值模擬，模擬結果顯示，經率定後量測值與模擬值具有高度相關性，且誤差極小，根據量化後之水平向水力傳導係數所判識之透水與不透水區段與 DTS 量測結果相符合。以 DTS 進行現地監測試驗並由地下水數值模式驗證之結果，可提供污染場址改善與整治上一重要評估，藉由此創新量測技術未來可提升水文地質調查能力。

關鍵詞：分散式光纖溫度感測器、熱示蹤劑試驗、水文地質調查、地下水污染場址、數值模擬



二、 研究成果英文摘要

In this study, the fiber optic distributed temperature sensor (FO-DTS) is applied in a groundwater contaminated sites to investigate its hydrogeological conditions. The permeable zone in a single well can be identified through temperature measurements with high resolution in terms of space and time. Three field tests were conducted. In the first test, the rainfall events caused the large variation of temperature in the well and the permeable zone at different depths can be identified via different rates of temperature recovery. Accordingly, the injection of hot water into the wells was conducted in the second and third tests. Five boreholes with two injection wells were installed with FO-DTS in the second test, and five boreholes with three injection wells were installed with FO-DTS in the third experiment. After stopping injecting the hot water, the rates of temperature recovery at different depths in a single well were monitored and used to evaluate the permeabilities. Besides, the coupled numerical model of MODFLOW and MT3DMS was applied to simulate the process of heat transfer after ceasing injecting the hot water. The automatic parameter estimation software of PEST was used to calibrate the numerical model and the hydraulic conductivities were identified. The results showed that the accuracy of measured temperatures after calibrated can be improved up to 0.05 °C. The rates of temperature recovery every 25cm can be significantly differentiated and the permeable zone can be identified. In general, the shallow depth from 6 – 9 m is more permeable and the middle depth from 9 – 11m is less permeable in each injected well, except well E-04. The simulated results showed that the simulated temperatures can match the observations well and the hydraulic conductivities can be quantified. The preliminary experiments of FO-DTS as well as the verification of numerical models can provide the improved assessment of remediation in a groundwater contaminated sites. The innovative measurement technique can enhance the capability of hydrogeological survey in the future.

Keywords: fiber optic distributed temperature sensor, heat tracer, hydrogeological survey, groundwater contaminated site, numerical modeling



三、目次、圖次、表次

目次

(一) 前言	1
(二) 研究目的	2
(三) 文獻探討	2
(四) 研究方法與材料	9
(五) 結果與討論	36
(六) 結論	73
(七) 明年度工作計畫	74
(八) 參考文獻	81



圖次

圖 1 分散式光纖溫度感測器示意圖（摘自 http://www.spero.co.za/index.php/products-solutions/temp-measuring-envrionmental-monitoring/ap-sensing-technology ）	3
圖 2 FO-DTS 對於地下水向上補注區段之判識結果（摘自 Westhoff et al., 2007）	4
圖 3 FO-DTS 在美國懷俄明州的 beaver 水壩現地佈設情形（摘自 Briggs et al., 2012）	4
圖 4 (a) FO-DTS 的資料解析應用，(b) FO-DTS 於澳洲 Maules 河川的河岸邊佈設情形（Halloran et al., 2016）	5
圖 5 主動式分散式光纖溫度感測器在井下優勢水流路徑調查示意圖（摘自 Pehme et al., 2013）	6
圖 6 DTS 溫度資料圖，斜直線與曲線為觀測得的熱對流方向與流速變化(摘自 Leaf et al., 2012)	7
圖 7 DTS 於井下分析之實驗配置 (a)彈性井體套管安裝(flexible borehole liner);(b)分散式溫度感測器與主動加熱系統(摘自 Coleman et al., 2015).....	8
圖 8 DTS 量測結果 (a)加熱與自然冷卻之溫度差異分佈[Test#1];(b)套管無封篩[Test#2]與封篩[Test#3]之自然水流冷卻溫度差異(摘自 Coleman et al., 2015).....	8
圖 9 DTS 於井 MW-25 之加熱及冷卻溫度差異分佈與地層分佈情形、Natural gamma、ATV 強度、裂隙分佈、virtual caliper、FLUTE T 及 Packer T 比較(摘自 Coleman et al., 2015)	9
圖 10 散射訊號之頻率圖譜示意圖（摘自 Selker et al., 2006）	11
圖 11 (a) 雷射脈衝分析儀主機與 (b) 控制面板（XT-DTS™, Silixa Ltd）	12
圖 12 鎧裝光纖纜線及其剖面示意圖（Kaiphone, Taiwan）	12
圖 13 E-2000/APC 轉接頭.....	13
圖 14 光纖熔接器（Fujikura, Japan）	13
圖 15 光纖連接配置：(a) simple single-end、(b) duplex single-end、(c) double-end（摘自 Hausner et al., 2011）	15
圖 16 現地分散式光纖溫度感測器佈設示意圖	17
圖 17 FO-DTS 校正操作介面	18
圖 18 FO-DTS 量測資料	19
圖 19(a)光纖進入熱水參照水體位置、(b)光纖離開熱水參照水體位置	19
圖 20(a)光纖進入冰水參照水體位置、(b)光纖離開冰水參照水體位置	20
圖 21(a)光纖進入環境溫度參照水體位置、(b)光纖離開環境溫度參照水體位置	21



圖 22 光纖熔接訊號損失參照點	22
圖 23 全場址井位配置與地下水流向示意圖	24
圖 24 二維地質概念模型圖	25
圖 25 三維地質概念模型圖	26
圖 26 微水試驗結果	28
圖 27 多深度微水試驗結果	28
圖 28 MODFLOW 網格劃分元素示意圖 (McDonald and Harbaugh, 1988)	33
圖 29 第一次試驗井 E-06 絕對溫度剖面	36
圖 30 第二次現地光纖佈設	38
圖 31 現地試驗照片: (a)暗管注水、(b) 光纖佈設情形、(c) 光柵實驗佈設	39
圖 32 使用手冊參數校正輸出範例	41
圖 33 校正參數結果: (a) $\Delta\alpha$ 、(b)C、(c) γ	43
圖 34 第二次試驗地下水位監測資料	44
圖 35 井 OE-1 絕對溫度剖面	44
圖 36 井 OE-1 絕對溫度剖面(去除降雨效應)	45
圖 37 井 OE-3 絕對溫度剖面	46
圖 38 井 OE-5 絕對溫度剖面	47
圖 39 井 OE-2 絕對溫度剖面	48
圖 40 井 E-01 絕對溫度剖面	49
圖 41 井 E-01-1 絕對溫度剖面	50
圖 42 第三次現地光纖佈設	52
圖 43 現地試驗照片: (a)、(b)暗管注水(c)光纖佈設	53
圖 44 校正參數結果: (a) $\Delta\alpha$ 、(b)C、(c) γ	55
圖 45 第三次試驗地下水位監測圖	57
圖 46 井 E-01-2 絕對溫度	57
圖 47 井 E-04 絕對溫度剖面	58
圖 48 井 MW-03 絕對溫度剖面	59
圖 49 井 MW-05 絕對溫度剖面	60
圖 50 光纖傳遞距離與訊號衰減(a)光纖受損前(b)光纖受損後	61
圖 51 井 E-01-1 絕對溫度剖面	62
圖 52 第二次、第三次注水試驗透水區段示意圖	64
圖 53 數值模式網格劃分示意圖	65



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

圖 54 井 E-01 地下水位變化.....	68
圖 55 井 E-01 模擬結果.....	69
圖 56 井 E-04 模擬結果.....	71
圖 57 主動式光纖溫度感測器加熱控制系統: (a) 系統外觀, (b) 系統內部配置.....	75
圖 58 主動式光纖溫度感測所選用之光纖內部構造示意圖.....	76
圖 59 主動式分散式光纖溫度感測器井下佈設示意圖.....	76

表次

表 1 摘自 Silixa XT-DTS 取樣間隔時間與距離變化之解析度關係.....	14
表 2 簡易井基本資料.....	29
表 3 第一次試驗溫度校正與驗證之誤差分析.....	43
表 4 第二次試驗溫度校正與驗證之誤差分析.....	56
表 5 參數設定.....	66
表 6 井 E-01 參數率定結果.....	70
表 7 井 E-04 參數率定結果.....	72



四、 研究內容

(一) 前言

由於水文地質環境的非均質性 (heterogeneity)，在進行土壤與地下水污染場址調查時，欲更加瞭解複雜多變的水文地質狀況，對於研究區域在空間解析度上的需求，從過往公尺等級調查尺度已大幅提昇至公分等級尺度。然而，受限於人力與經費的限制，仰賴傳統感測器進行現地環境監測，將無法滿足調查研究上之所需，因此，找尋或研發能夠因應上述需求並適用於不同現地條件下的環境感測器已成為未來的主要趨勢。

自然環境下的溫度變化可用來追蹤水流所攜帶的熱能，藉由分析沉積物的溫度差異，將流體攜帶熱能後的流動行為做為示蹤劑使用，可追蹤地下水的流動方向與速度，藉由溫度量測與數值模式模型的分析可以提供水文地質及地下水流的相關資訊。將熱能當作地下水流動的示蹤劑 (tracer) 並非一項新的技術，早在 20 世紀初的研究中即發現水在通過沉積物及多孔隙介質過程中會產生熱能的轉移 (Bouyoucos, 1915)。20 世紀中，地下水水文學家開始探討透過溫度測量來評估水從地表往深層移動速率的可行性 (Rorabaugh, 1954; Stallman, 1963)。此後，溫度模式被廣泛的應用於地下水流系統之研究中，研究範圍由稻田灌溉用水擴及至火山底部的地熱水 (Suzuki, 1960; Sorey, 1971)。

利用熱能做為地下水示蹤劑，進行地下流動之解析，需透過大量且高精度的溫度計進行溫度的量測，方能獲得準確的資訊，然而，傳統的溫度感測器在進行溫度測量時往往只能於預先決策地點進行單點之量測，且受到成本的考量，在量測較長距離時，無法針對所有位置進行量測。由於熱能在傳導與對流的過程中會逐漸消散，在溫度量測的工作上，較難觀察空間中的連續溫度變化。以井下量測為例，若是於井下佈設多組溫度感測器進行量測，需考量佈設間距與使用的溫度感測器數量，量測之溫度結果亦無法呈現一連續空間中的溫度分佈結果，且各個獨立溫度計之間存在有著差異，因儀器生產或使用年限之差異造成所量測溫度之不同，將使得分析變得更加困難。同樣的，在井下溫度量測中若有外在因素影響，使得井內溫度發生劇烈變化，在時間解析度的考量上需要能夠精準掌握此影響因素的時間點，因此，若要將熱能為示蹤劑應用於地下水流分析上，在溫度的量測上，需要有更創新的量測技術滿足時間、空間上的高解析度測量。



(二) 研究目的

本計畫將引進創新的分散式光纖溫度感測器量測 (fiber optical distributed temperature sensing, FO-DTS) 技術進行現地污染場址的高解析度 (high resolution) 井下水文地質調查工作。土壤與地下水污染場址的水文地質調查工作，往往需要快速、大量且低成本的資料獲取，藉由分散式光纖溫度感測器在空間及時間上的高解析度優勢，可快速、大量且低成本的提供井下連續性的溫度量測資料。現地井下的連續性溫度量測結果，透過熱傳輸的原理分析，可解析井下透水區段、水文地質分層、地下水流向、流速及優勢水流路徑等資訊。本計畫所產出具有時、空上優勢的高解析度成果，將可提供未來土壤與地下水污染場址在水文地質調查、甚至污染整治成效評估之參考依據。

為了更清楚瞭解水文地質參數的細部特徵，本計畫將整合既有調查成果，藉由分散式光纖溫度感測器量測監測井之地下水溫度變化，包含自然條件溫度變化、整治過程藥劑灌注，乃至提供外在熱源（加熱式光纖溫度感測器）改變地下水溫度場，進一步評析廠區內地下環境細部分層狀況、水平及垂直向優勢流徑等，做為現場改善成效評估參考依據之一，即時調整改善灌助點位、頻率等設計，進而提升地下水污染場址之整治效益。

(三) 文獻探討

自然環境下的溫度變化可用來追蹤水流所攜帶的熱能，藉由分析沉積物的溫度差異，將流體攜帶熱能後的流動行為做為示蹤劑使用，可追蹤地下水的流動方向與速度，藉由溫度量測與數值模式模型的分析可以提供水文地質及地下水流的相關資訊。將熱能當作地下水流動的示蹤劑 (tracer) 並非一項新的技術，早在 20 世紀初的研究中即發現水在通過沉積物及多孔隙介質過程中會產生熱能的轉移 (Bouyoucos, 1915)。20 世紀中，地下水水文學家開始探討透過溫度測量來評估水從地表往深層移動速率的可行性 (Rorabaugh, 1954; Stallman, 1963)。此後，溫度模式被廣泛的應用於地下水系統之研究中，研究範圍由稻田灌溉用水擴及至火山底部的地熱水 (Suzuki, 1960; Sorey, 1971)。

過往的研究指出以熱能做為水流示蹤劑的發展仍處於理論發展的階段，鮮少實際應用的案例；然而，近年來透過監測儀器的改進、數據的收集及運算技術的提升，大幅降低了測量和模擬熱能與水流傳輸的困難度，並確立了以熱能做為水文示蹤劑的可行性。根據 Anderson 於 2005 年的回顧文獻中指出，熱能（或溫度量測）已被廣泛的使用於探討地表水的入滲、裂系水流及地下水流向的研究之中，



為一種效果良好的示蹤劑。Suzuki (1960) 及 Stallman (1963, 1965) 兩人為首次以單相流系統建立水流與熱傳輸數學模式，經由解析解的推導，透過地下水觀測溫度來推估飽和介質中的水流通量，而他們的研究成果奠定了以熱能做為示蹤劑來量化地下水流通量的可行性與理論基礎，並將其應用範圍擴展，從深層地下水系統 (Bredehoeft and Papadopoulos, 1965) 至潮濕坡地 (Cartwright, 1974) 環境，皆可利用熱能示蹤劑來量測與推估水流通量。

雖然以熱能作為地下水示蹤劑已成為廣泛使用的工具之一，然而受限於人力與經費，溫度計在現地裝設的數量有其限制，無法在空間上進行大範圍的連續量測工作。為克服此一困境，近年來，分散式光纖溫度感測器 (fiber optical distributed temperature sensor, FO-DTS, 圖 1) 的研發，透過光纖雷射激發後所產生的散射訊號 (scatter)，進行溫度上的連續性量測已成為一種創新的量測技術，並逐漸受到重視，並應用於水文環境上之調查。Westhoff et al. (2007) 將 FO-DTS 應用於河水與地下水交互作用，以長 1500 公尺的光纖佈設於河道中，每 2 分鐘記錄一筆連續的水溫資料，透過統計分析方法辨識地下水向上補注河水的河道區段，並透過能量守恒模式量化地下水對於河水的補注量 (圖 2)。Vogt et al. (2010) 針對一流失河川，將 PVC 管垂直埋設於河床中，並以 FO-DTS 纏繞于管壁上，量測不同深度的河床溫度。Briggs et al. (2012) 也使用與 Vogt et al. (2010) 相同的方式進行 FO-DTS 的佈設，並針對美國懷俄明州的 beaver 水壩進行伏流水空間上與時間上的解析 (圖 3)。Sebok et al. (2013) 利用 FO-DTS 並搭配地表地電阻及冰層厚度，探討丹麥 Vang 湖泊與地下水間之交互作用，研究結果顯示，由於 DTS 在空間上的高解析度，湖底沉積物的非均質特性將會影響地下水的補注量。Halloran et al. (2016) 將 FO-DTS 佈設於澳洲 Maules 河川的河岸邊，透過空間上的連續性溫度資料，嘗試研析量測資料對於一維、飽和且均質的河床模式假設之影響，並以 FO-DTS 所獲得的量測結果驗證所提出數值模式之可靠性 (圖 4)。

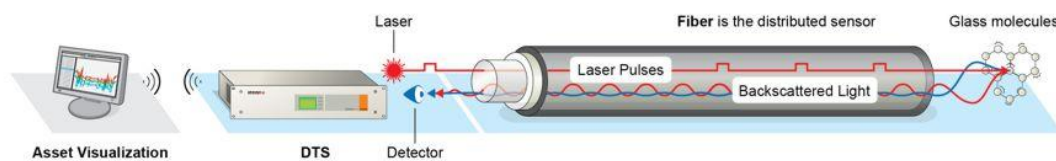


圖 1 分散式光纖溫度感測器示意圖 (摘自

<http://www.spero.co.za/index.php/products-solutions/temp-measuring-envrionmental-monitoring/ap-sensing-technology>)



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

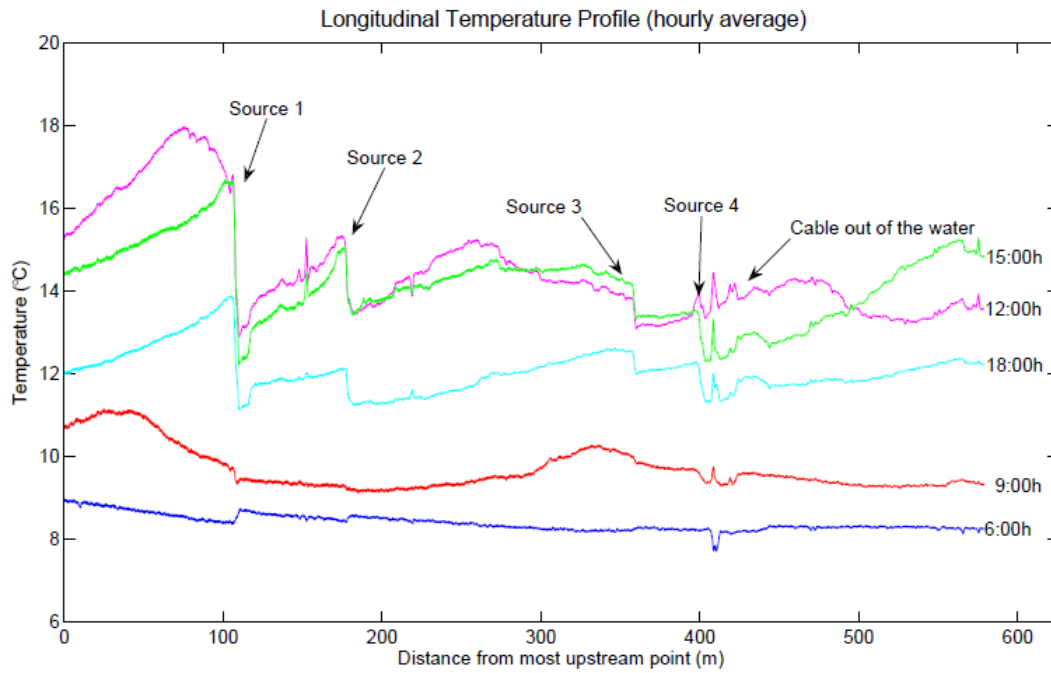


圖 2FO-DTS 對於地下水向上補注區段之判識結果（摘自 Westhoff et al., 2007）

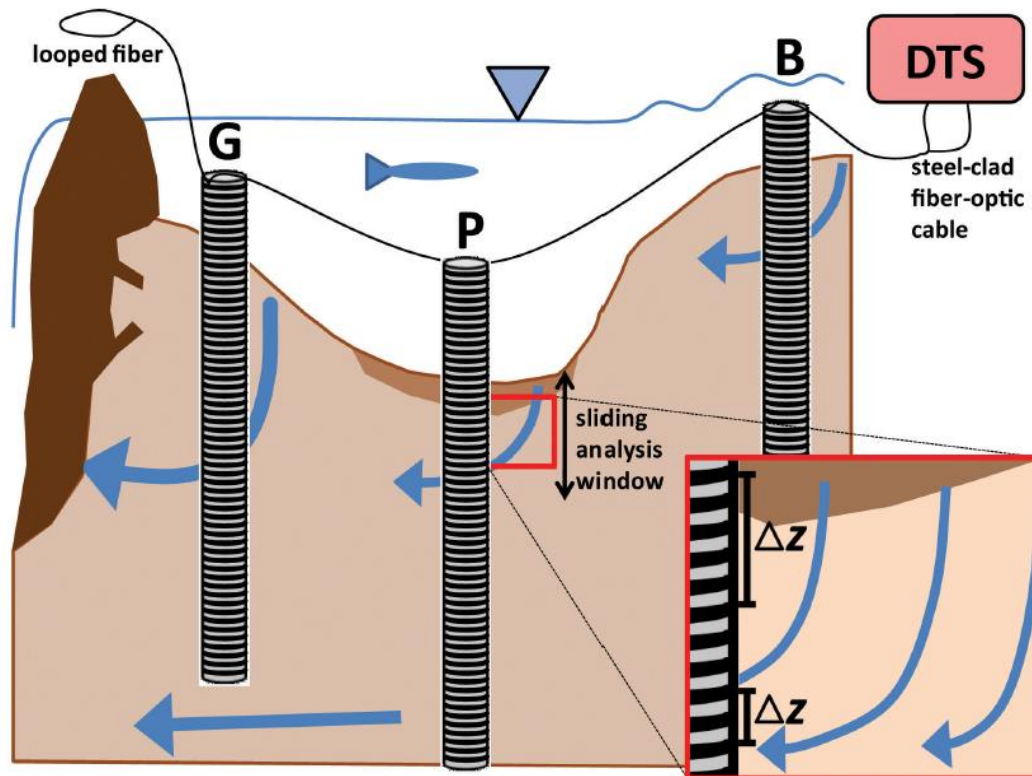


圖 3FO-DTS 在美國懷俄明州的 beaver 水壩現地佈設情形（摘自 Briggs et al., 2012）

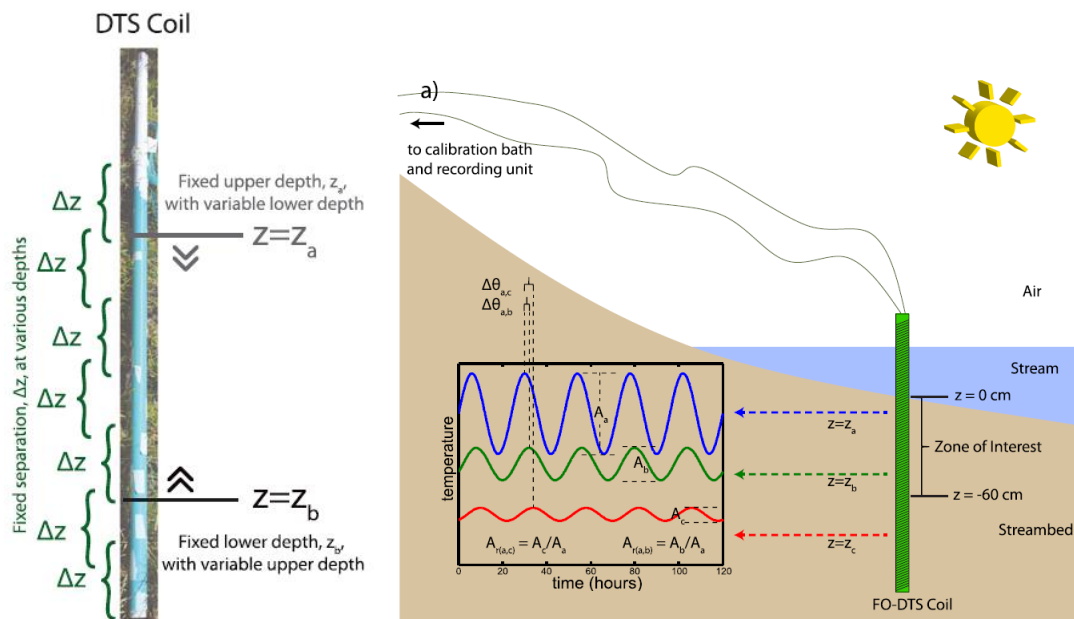


圖 4 (a) FO-DTS 的資料解析應用，(b) FO-DTS 於澳洲 Maules 河川的河岸邊佈設情形 (Halloran et al., 2016)

分散式光纖溫度感測器除了廣泛的運用於地表水與地下水交互作用之外，近年來也逐漸延伸其應用範圍至優勢水流 (preferential flow) 及裂隙岩體的地下水流研究之中 (Read et al., 2014; Coleman et al., 2015; Bense et al., 2016)，以 DTS 進行井下溫度監測時，其溫度訊號的變化可用於辨識地層岩性、井體周圍地下水流場，或是井內地下水流動方式。除此之外，原先被動式 (passive) 監測的 FO-DTS 改良為主動式 (active) 的 FO-DTS，藉由安裝於 DTS 上的加熱線圈，提昇地下水流在空間偵測上之解析度 (圖 5)。主動式加熱技術利用人為製造熱源，針對光纖纜線、井水或是周圍岩體直接進行加熱。在水文地質試驗的應用中藉由直接注入熱水，或是利用電熱技術提供熱源，而熱源位置也可依照實驗需求分為單點熱源釋放以及整口井熱源釋放。直接注入熱水方式可以針對特定位置進行小範圍加熱，Leaf 等人於 2012 年為觀測井內水體垂直方向流動特性以及流速變化，藉由精準控制熱源施放位置，針對不同特定目標深度進行加熱，其實驗結果明顯看到井內水流以 58 公尺深度位置裂隙為界，分為向上與向下之流動方式，且其流速據有明顯之差異 (圖 6)。



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

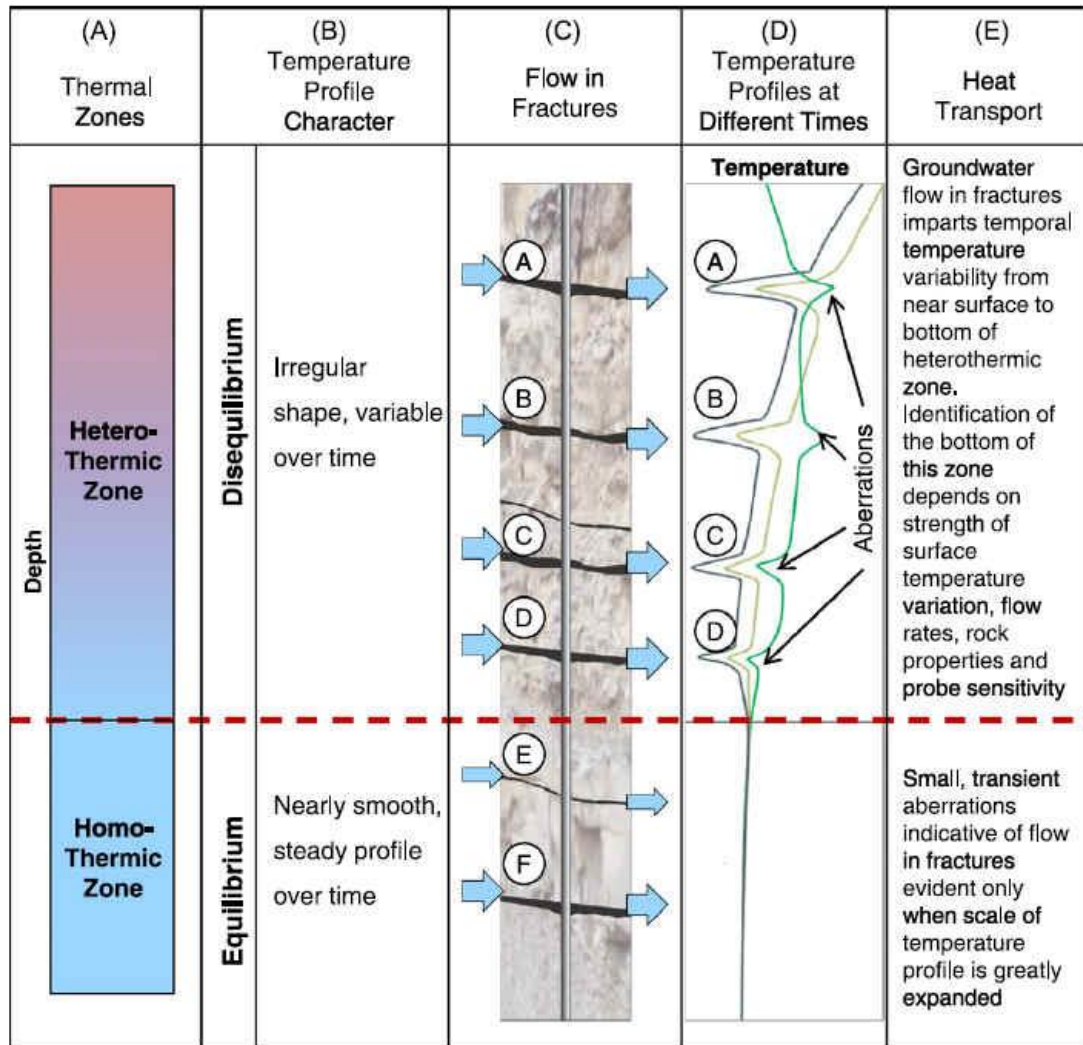


圖 5 主動式分散式光纖溫度感測器在井下優勢水流路徑調查示意圖（摘自 Pehme et al., 2013）

雖然直接注入熱水的方式可以容易針對特定位置進行加熱，然而注入熱水同時也易使得井內的原始水體的流動情形受到干擾，利用電熱技術直接加熱電纜可有效降低此干擾，同時也可在不干擾井內原始水體流動狀態下進行整口井連續熱源釋放。Coleman 等人於 2015 年針對井下裂隙水流流向進行分析，以井體套管 (borehole liner) 將井體內部進行封篩如圖 7a，阻絕井管內部水體流動所產生之交叉連結效應 (cross-connection effects)，以維持原自然水流之流動情形。分散式光纖溫度感測器搭配主動式加熱系統，透過分線盒 (junction box) 整合光纖纜線 (具不同設計共兩類型) 與加熱纜線並延伸至已套管之井體進行量測，如圖 7b。首先進行 30 分鐘之背景測量後，再持續加熱 4~6 小時，最後停止加熱由地下水流使其自然冷卻並監測 6~8 小時。結果顯示 (圖 8a)，DTS 於時間與空間上可提供連續之溫度資料，熱能於井管內受到傳導與對流效應影響，因此，隨深度之溫度變化將受岩



研究內容

體性質與地下水流強度影響；圖 8b 則顯示當井管內部是否進行封篩，對於熱散失差異相當明顯，無套管之試驗下，易受到垂直方向水流影響而難以確認是否由水平方向水流影響；而有套管之情形下，熱散失速率則與水流速率有關且較可確認為裂隙水流。將各鑽井分析結果與 DTS 量測結果進行比對，如圖 9，高熱散失之區塊，岩體結構分析結果近乎一致，可相互佐證裂隙存在之位置。

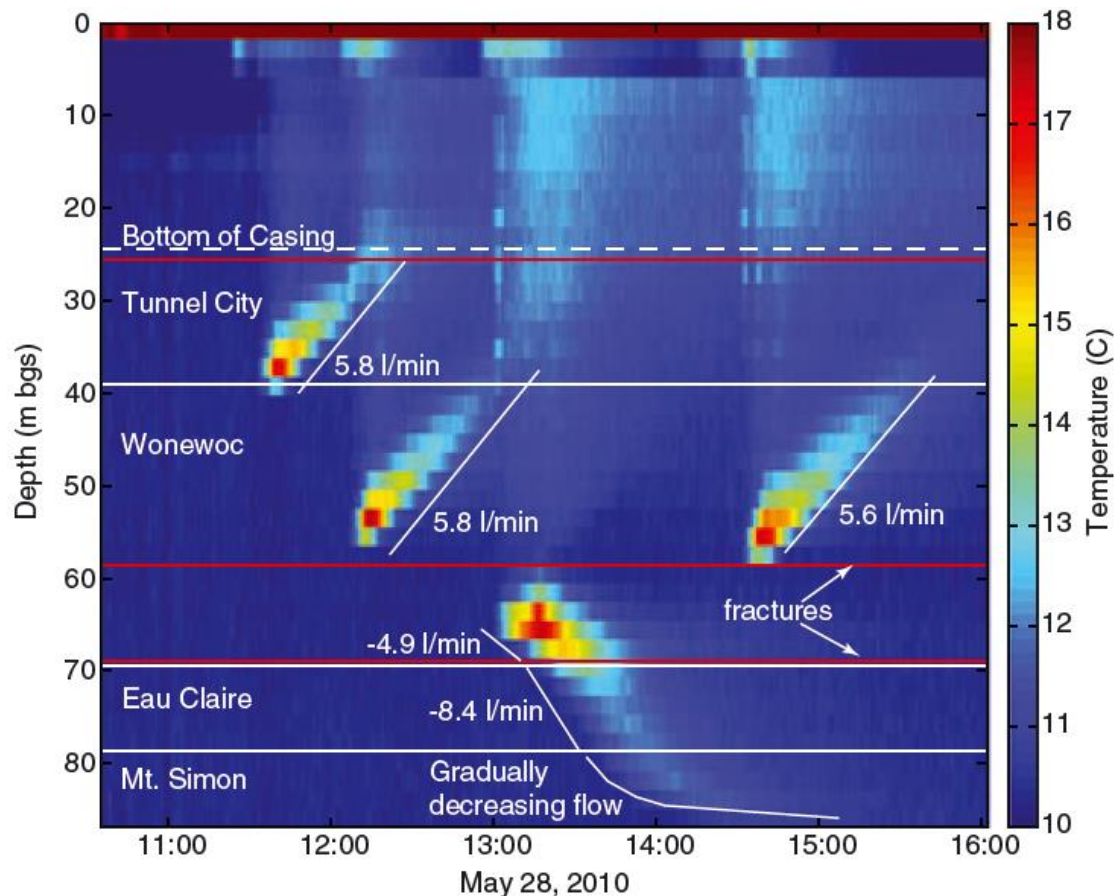


圖 6DTS 溫度資料圖，斜直線與曲線為觀測得的熱對流方向與流速變化(摘自 Leaf et al., 2012)



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

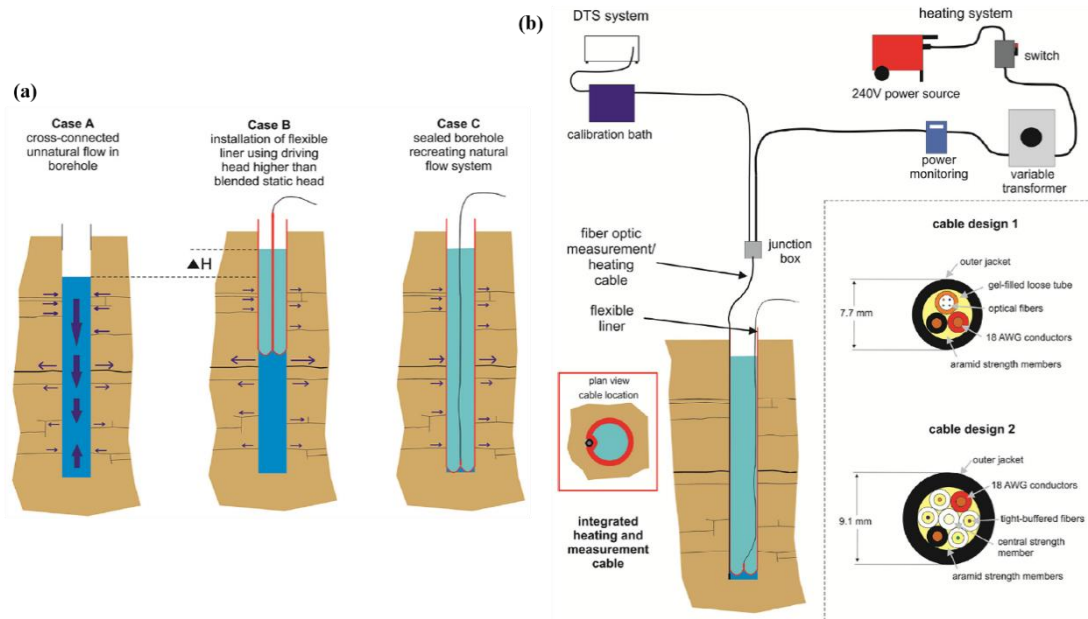


圖 7DTS 於井下分析之實驗配置 (a)彈性井體套管安裝(flexible borehole liner);(b)分散式溫度感測器與主動加熱系統(摘自 Coleman et al., 2015)

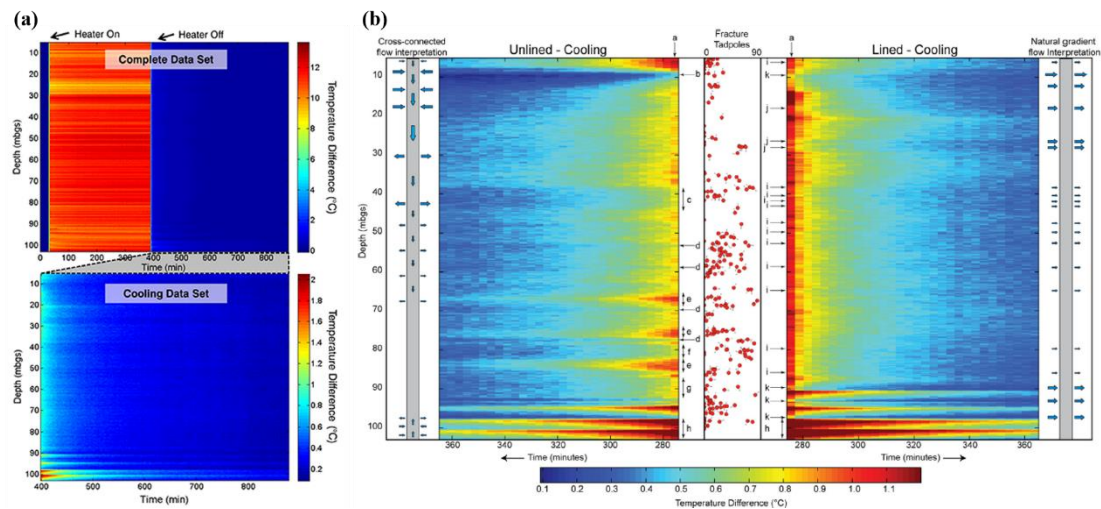


圖 8DTS 量測結果 (a)加熱與自然冷卻之溫度差異分佈[Test#1];(b)套管無封篩[Test#2]與封篩[Test#3]之自然水流冷卻溫度差異(摘自 Coleman et al., 2015)

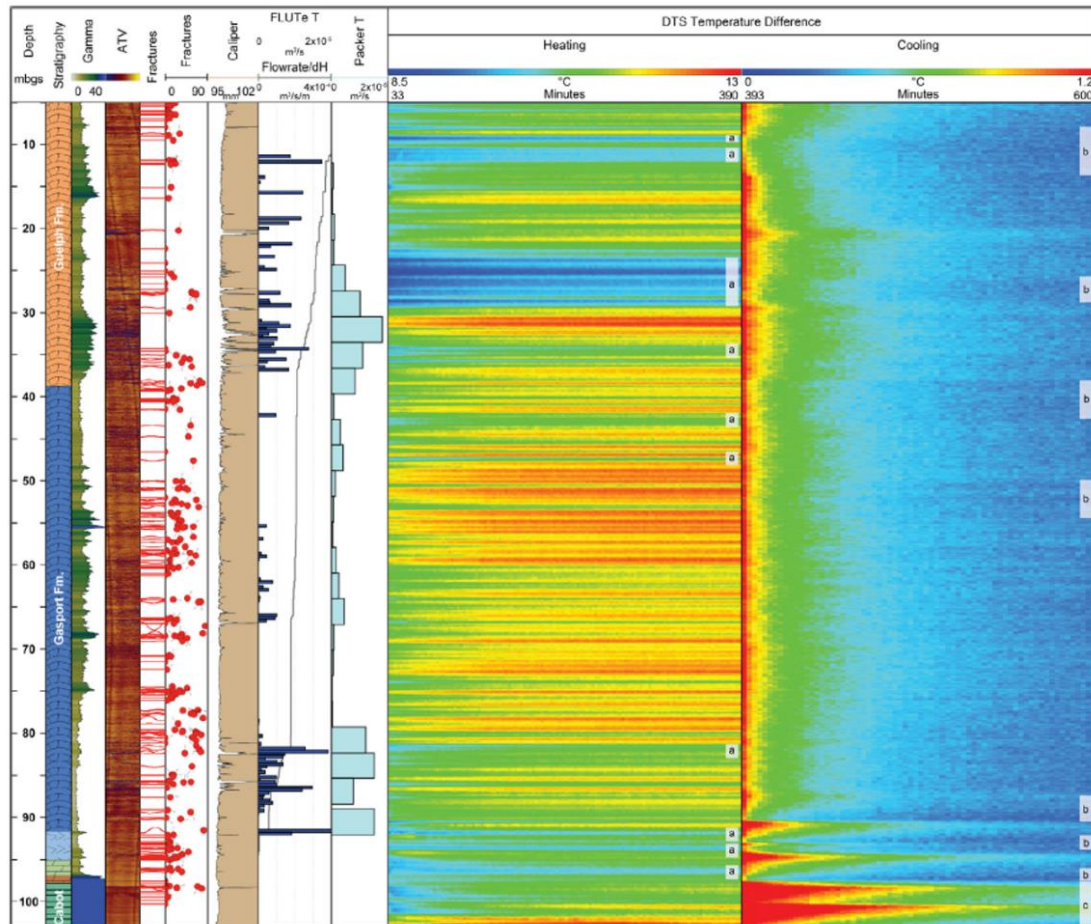


圖 9DTS 於井 MW-25 之加熱及冷卻溫度差異分佈與地層分佈情形、Natural gamma、ATV 強度、裂隙分佈、virtual caliper、FLUTe T 及 Packer T 比較(摘自 Coleman et al., 2015)

(四) 研究方法與材料

分散式光纖溫度感測器之主要優點為其在空間上與時間上的連續性量測，依據目前雷射脈衝分析儀的解析能力，在溫度的量測解析度上，以長度為 30,000 公尺的光纖為例，其空間解析度可達到每 0.25 公尺一個量測點，時間解析度則是每 5 秒可獲得一筆量測資料，量測溫度的準確度高達 0.1°C ，隨著量測時間的增加及後續的資料校正，可將量測準確性大幅提昇至 $0.001 - 0.005^{\circ}\text{C}$ 。目前商業化的雷射脈衝分析儀，其最大的光纖量測長度可達 30km 以上，換言之，在每 5 秒間隔時間內，可針對 30km 的範圍內進行溫度上的量測，並以每 0.25 公尺的空間高解析度進行資料點的呈現。隨著研發技術的持續提昇，攜帶式的雷射脈衝分析儀，在價格上越來越便宜，其應用範圍也越來越廣泛。



本計畫所採用之主要研究方法與材料分述如下：

4.1 分散式光纖溫度感測器量測原理

以分散式光纖溫度感測器量測溫度，其原理主要由雷射脈衝分析儀主機激發雷射傳遞至光纖之後，雷射於光纖內部傳遞，大部分的雷射光在傳遞的過程中，其反射訊號之頻率與原入射光相同，然而部分光子（photon）在傳遞的過程中因受光纖內部玻璃材質之折射率差異影響，入射光子碰觸介質分子後進行能量交換（其反射光子可能接收能量或喪失能量），能階改變將導致反射訊號產生散射（scattering），反射頻率將高於或低於原入射光頻率，此現象即稱之為拉曼散射效應（Raman scattering effect，圖 10），較入射光頻率低之散射訊號稱為史托克散射（Stokes scattering）；較入射光頻率高之散射訊號則稱為反史托克散射（Anti-stokes scattering）。史托克散射訊號與入射光強度之間具有線性關係；反史托克散射訊號除了與入射光強度具線性關係之外，亦與溫度變化呈現指數關係，因此，透過計算此兩者散射訊號強度之比例，可獲得光纖在空間特定位置中所感測的環境溫度。如以光纖自雷射脈衝分析儀主機出發點視為原點（ $z=0$ ），在 t 時間下，光纖在空間中距原點 z 之位置，其所感測之溫度計算如下：

$$T(z,t) = \frac{\gamma}{\ln\left(\frac{P_s(z,t)}{P_{as}(z,t)}\right) + C(t) - \int_0^z \Delta\alpha(z')dz'} \quad (\text{式 1})$$

式中， T 為溫度[K]； z 為長度[L]； t 為時間[T]； γ 為雷射光子狀態，定義為 $\gamma = \hbar\Omega/k$ [K]， $\hbar$ 為普郎克常數， Ω 為史托克散射與入射雷射之頻率差， k 為波茲曼常數。

$\ln\left(\frac{P_s(z,t)}{P_{as}(z,t)}\right)$ 為史托克散射與反史托克散射訊號強度比例並進行自然對數轉換；

$C(t)$ 為有效熱感測器針對史托克光子與反史托克光子訊號之偵測敏感度差異，此

參數將隨著時間與儀器本身內部溫度而有所改變； $\int_0^z \Delta\alpha(z')dz'$ 為訊號差分衰減

（differential attenuation）之積分量[dB]，雷射於光纖纜線傳遞將受內部玻璃材質影響，隨著傳遞距離，能量衰減程度越高，此參數與光纖纜線本身品質有關，良好光纖具有較小之衰減值。進一步關於光纖溫度感測器的基礎原理介紹可參照 Selker et al. (2006) 的文章。

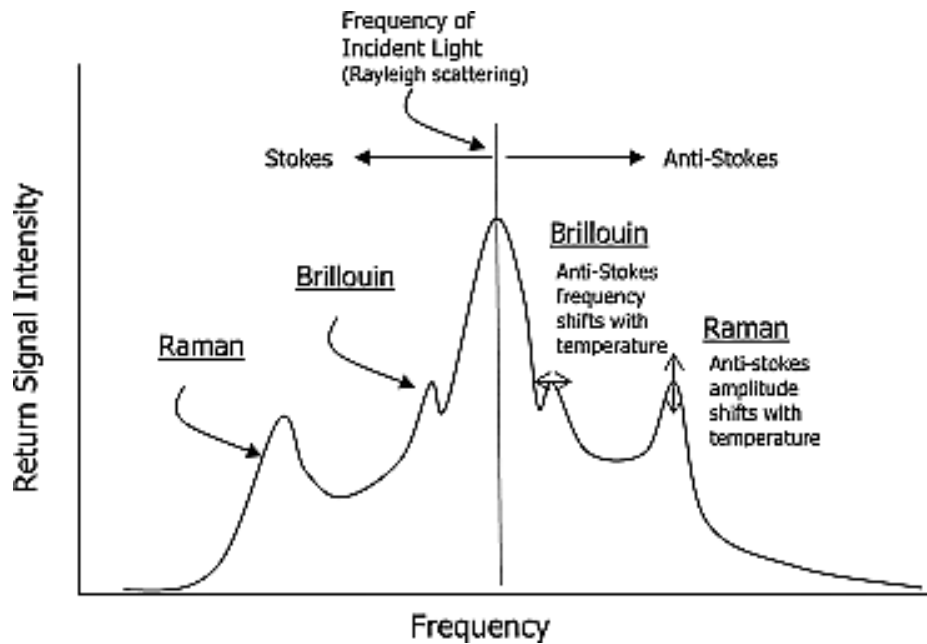


圖 10 散射訊號之頻率圖譜示意圖（摘自 Selker et al., 2006）

4.2 分散式光纖溫度感測器基本元件與延伸配件

分散式光纖溫度感測器之基本組成主要為雷射脈衝分析儀主機與光纖纜線兩大部分，主機如圖 11a 所示（型號：Silixa Ltd., XT-DTS™），其控制面板如圖 11b 所示，包括：光纖跳線連接口、參考溫度計連接口、外部電源及電腦傳輸連接孔等，以此型號為例，主機本身配置四個獨立雷射通道（channel），可接收分析四條不同光纖所反射的訊號。雷射脈衝分析儀主機同時有搭配兩組外部連接實體溫度計（型號：PT-100），配置纜線長度為 2 公尺；量測溫度範圍為 -50℃ ~ +250℃；溫度解析度則為 ±0.1℃，該組溫度計所量測到之絕對溫度資料可用於後續的溫度校正之參照。另外，如需更為精準之溫度量測資料以增加率定精確度時，可額外搭配外部獨立溫度計如微型水溫量測儀(RBRsolo³T)，其量測範圍為 -5℃ ~ 35℃，溫度精準度為 ±0.002℃；量測解析度則為 <0.00005℃；量測間隔可於 1 秒內量測 2 筆資料(2Hz)，精準度越高的實體溫度計可增加率定 DTS 量測溫度之可靠性。目前市面上有許多商業化之分散式光纖溫度感測器，如：Agilent Technologies, Inc；SensorNet, Ltd；SensorTran, Inc 及 Silixa Ltd 等，本計劃預計採用 Silixa 所製之 XT-DTS™ 進行土壤與地下水污染場址之井下現地試驗，其量測最大距離可達 10km，溫度解析度達 0.01℃，空間解析度為 0.25m，量測間隔為每 5 秒一筆資料。

分散式光纖溫度感測器的另一重要組成為光纖纜線（fiber optic cable），光纖纜線在量測中扮演相當重要的角色，依據量測環境的不同，所選用的光纖纜線也



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

有所差異，一般在野外現地所使用之光纖纜線須能夠承受現地惡劣之試驗環境，主要具備高延展性、金屬鎧裝及充油防水抗氧化等特性。光纖纜線的種類眾多，但其主要的組成包括（由內而外）：光纖芯（optic fiber）、高強度纖維束（Kevlar）、金屬管（Metal tube）、金屬編織層（Braiding）及塑膠被覆層（Jacket），圖 12 為鎧裝型光纖纜線示意圖（製造商：Kaiphone, Taiwan），亦為本計畫預計安裝於污染場址之纜線。雷射脈衝分析儀主機與光纖纜線間的連接主要透過 E-2000/APC 轉接頭（俗稱跳線，pigtail，圖 13）進行連接，有時為因應現地量測需求，需進行兩條不同光纖纜線的熔接（fusion splice），由於光纖本身之精密度極高，因此，光纖熔接的過程必須透過光纖熔接器（fusion splicer）方能完成（圖 14）。分散式光纖溫度感測器在時間上的敏感度則主要取決於光纖種類，若光纖要確實量測到環境之溫度，光纖必須與環境溫度達到平衡。依據本團隊於實驗室的測試結果，選用一般常用之光纖，期對於外在環境溫度變化之反應時間均在 30 秒以內，以地下水的流速及時間尺度而言，光纖溫度感測器均可準確紀錄並真實呈現現地量測資料。

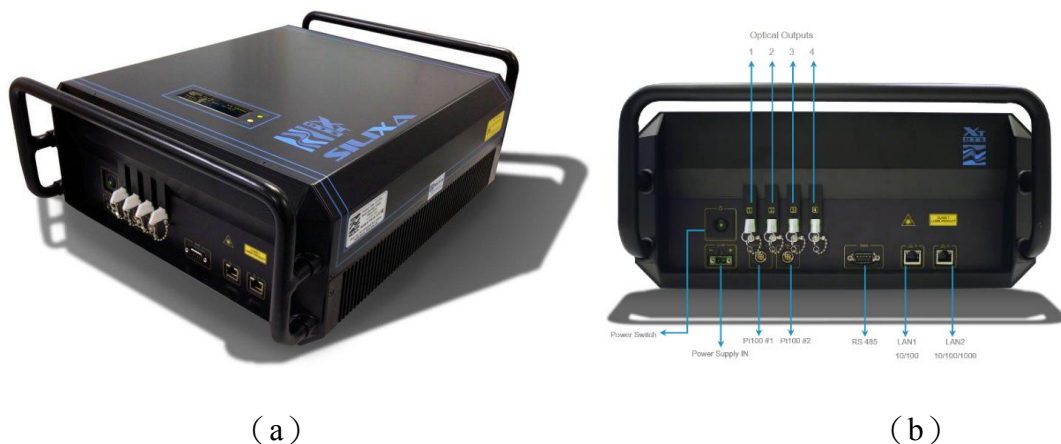


圖 11 (a) 雷射脈衝分析儀主機與 (b) 控制面板 (XT-DTS™, Silixa Ltd)



圖 12 鎧裝光纖纜線及其剖面示意圖 (Kaiphone, Taiwan)

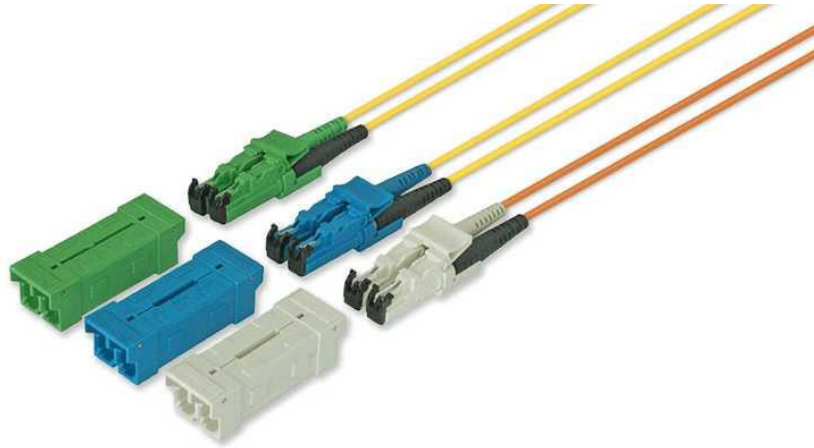


圖 13 E-2000/APC 轉接頭



圖 14 光纖熔接器 (Fujikura, Japan)

4.3 溫度校正

本研究計畫所選用的 Silixa XT-DTS 在生產時已針對溫度解析度進行測試，而溫度解析度的高低與取樣間隔及量測距離有關，以量測距離 1 公里為例，當取樣間隔時間為 10 秒時，所得之溫度解析度為 0.15 度；當取樣間隔時間增長為 600 秒，所得之溫度解析度為 0.02 度。當取樣間隔時間越長，所得之溫度解析度則越小，亦即當取樣時間拉長，所接受之光子能量較高，解析溫度資料更為穩定。當



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

量測距離增長為 10 公里，溫度解析度由 0.15 度變為 3.7 度，由於雷射於光纖內傳遞時，其雷射強度受到介質分子等影響將逐漸衰減，其散射訊號亦受到影響，導致溫度推算誤差增加，進而影響溫度解析度。表 1 為 Silixa XT-DTS 所測試取樣間隔時間與量測距離變化對溫度解析度的影響。

表 1 摘自 Silixa XT-DTS 取樣間隔時間與距離變化之解析度關係

	Range			Temperature resolution
	1km	5km	10km	
10s	0.15 °c	0.55 °c	3.7 °c	
60s	0.06 °c	0.23 °c	1.6 °c	
600s	0.02 °c	0.08 °c	0.5 °c	

FO-DTS 所量測之溫度雖然可達到一定之溫度解析，然而欲獲得絕對的環境溫度，仍需經過一率定之程序。由式 1 可知，雷射光子狀態(γ)、兩散射訊號(stoke & anti-stoke)之強度比率、光子訊號偵測敏感度(C)及差分衰減($\Delta\alpha$)等多項參數皆會影響溫度量測之準確度。上述參數因子中，發射雷射光子狀態和光子訊號偵測敏感度與 DTS 雷射脈衝分析儀主機本體組件有關；差分衰減則與光纖纜線種類有關，因此在率定的過程中，通常針對此三項參數進行率定，依據實體溫度所量測之溫度作為參考溫度，以最小均方根誤差 (root-mean-square error, RMSE) 為目標函數，找出最佳的參數組合。由於散射訊號強度與量測溫度轉換間呈現一直接之相關性，因此，現地試驗時，提供穩定參照來源與選擇適當光纖纜線配置方式，可增加溫度量測可靠度，率定的實驗配置需求如下：

a 差分衰減 (differential attenuation, $\Delta\alpha$)

由於雷射於光纖內傳遞時，其強度受到介質分子等影響將逐漸衰減，其散射訊號亦受到影響，導致溫度推算誤差增加，例：近主機處實際溫度為 25°C，而 2 公里處之實際溫度亦為 25°C，此兩處所反應之散射訊號應盡相同，然由於雷射訊號強度衰退導致兩者之散射訊號出現差異，經由式 1 換算後為不同溫度，此現象稱之為差分衰減 (differential attenuation)。隨著光纖纜線長度增加，愈末端處或經熔接點 (splice) 後，皆會使得雷射訊號強度減弱，尤其通過熔接點後或光纖損壞產生之階能損失 (step loss)，常使測量結果出現誤差。因此，需透過溫度校正之步驟，納入參照組溫度資訊與考量訊號喪失之影響，推估真實溫度分佈。



b 端點配置之溫度率定

不同配置方式所採用之溫度率定方式略有不同，單端點配置之率定方式可由式1為基礎進行率定，針對雷射光子狀態(γ)、有效熱感測器針對史托克光子與反史托克光子訊號之偵測敏感度差異 $C(t)$ 及差分衰減($\Delta\alpha$)進行參數率定。

雙端點配置進行現地試驗，雙端點配置可於相反方向取得同一位置同一時間的溫度資料，以式1為基礎，forward 方向 ($\rightarrow$) 為基準，距離 z 處與 reverse 方向 ($\leftarrow$) 之 T - z 為相同點位，此時所量測的溫度可於不同散射能量強度與衰減程度下進行雙重解析，提昇溫度分佈的可信度。雙端點配置之溫度率定主要為考量纜線的非均質性，透過分段計算差分衰退以及積分的方式求取累計衰減值，彌平因訊號衰減差異所造成的量測誤差。試寫 $T(z) = T(L-z)$ ，以式2與式3結合後移項計算可得式4，一旦獲得差分衰退值後，剩餘兩參數即可進行估算，最後透過式1將所得出之三參數組合即可帶回其他僅由散射訊號所轉換出之溫度進行溫度校正。

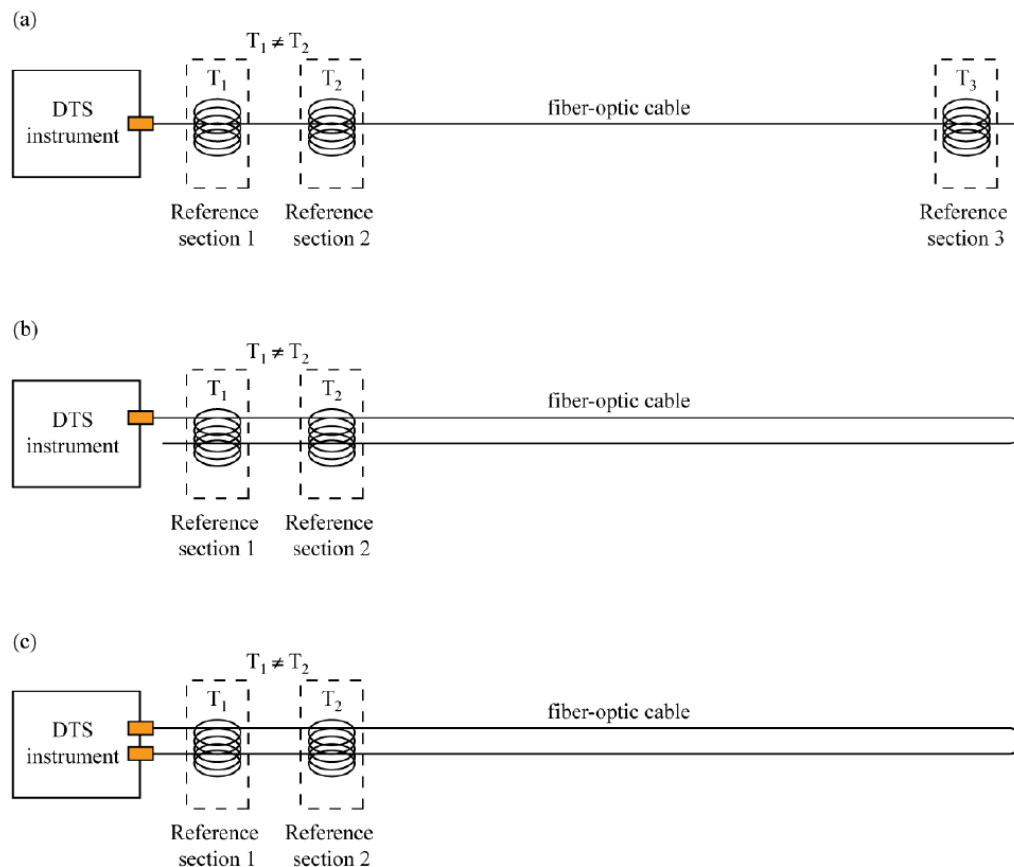


圖 15 光纜連接配置：(a) simple single-end、(b) duplex single-end、(c) double-end

(摘自 Hausner et al., 2011)



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

$$T(z) = \frac{\gamma}{\ln\left(\frac{P_s(z)}{P_{as}(z)}\right)_{\Rightarrow} + C - \int_0^z \Delta\alpha(z') dz'} \quad (\text{式 2})$$

$$T(L-z) = \frac{\gamma}{\ln\left(\frac{P_s(z)}{P_{as}(z)}\right)_{\Leftarrow} + C - \int_L^{L-z} \Delta\alpha(z') dz'} \quad (\text{式 3})$$

$$\int_z^{z+\Delta z} \Delta\alpha(z') dz' = \frac{\ln\left(\frac{P_s(z+\Delta z)}{P_{as}(z+\Delta z)}\right)_{\Rightarrow} - \ln\left(\frac{P_s(z)}{P_{as}(z)}\right)_{\Rightarrow} + n\left(\frac{P_s(z)}{P_{as}(z)}\right)_{\Leftarrow} - \ln\left(\frac{P_s(z+\Delta z)}{P_{as}(z+\Delta z)}\right)_{\Leftarrow}}{2} \quad (\text{式 4})$$

c 分散式光纖溫度感測器於現地井下量測配置

分散式光纖溫度感測器在現地進行量測時，在地面及井下之配置如圖 16 所示，雷射脈衝分析儀主機佈設於地表，以 E-2000/APC 接頭連接光纖纜線後，將兩段預設長度（10 倍取樣解析度）之纜線繞圈綑綁後，分別置入於兩組不同溫度之水體作為參照組（reference baths），一般現地常用的容器為儲存食物的冰桶，在兩個冰桶內分別置入冰水（同時加入冰塊）及熱水（cold and warm baths），維持冰桶內的溫度分別接近 0°C 及 40°C。為維持桶內溫度及均勻溫度分佈，冷熱桶內常置入沉水馬達以避免保溫桶內水體受熱不均而產生分層的情形。冰水桶中則常以小碎冰型式（slush bath）並適當搭配氯化鈉（鹽）以維持低溫環境；熱水則可透過加溫裝置維持恆定溫度。除此之外，使用絕緣物體覆蓋保溫桶減少熱散失，亦可提升保持恆定溫度之穩定性。此外，為驗證率定之準確性，亦常設置第三參照溫度水體於尾端，此水體為隨著環境溫度變化(ambient)之參照水體。纜線在離開容器後，依據現地井孔（或規劃量測）的深度，將纜線垂直置入於井中，為提昇溫度量測上的準確性，在纜線末端（井底）會將雙芯的光纖纜線進行熔接，形成一迴路，以利後續的溫度校正分析。

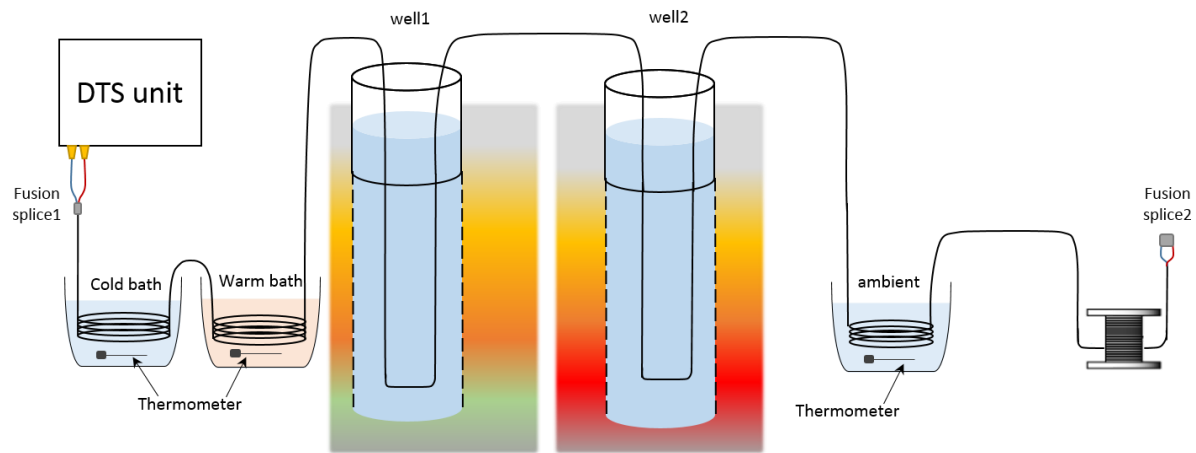


圖 16 現地分散式光纖溫度感測器佈設示意圖

d 校正方法

分散式光纖溫度感測器在進行溫度量測後，若能以有效的方式進行溫度校正，則可大大提升溫度量測的精準度。本研究以雙端點(double-end)方式進行實驗配置(圖 15c)，並於末端有一熔接點，分散式光纖溫度感測器所量測到的溫度是藉由 CTEMPs MATLAB® DTS Toolbox 進行溫度校正，CTEMP 提供了簡單的圖型介面來進行分散式光纖溫度感測器的資料處理。圖 17 為 CTEMPs MATLAB® DTS Toolbox 的使用畫面，進行溫度校正時，首先選取欲校正之溫度檔案，並選擇光纖運行於末端有熔接點的路徑進行設定。在進行參考溫度位置的選取時，可先將分散式光纖溫度感測器之量測資料以圖型方式匯出(圖 18)，圖上所顯示不同顏色的線代表在不同時間點所量測之溫度資料，由圖型上可觀察到光纖連接主機後，向外佈設的過程分別進入熱水、冰水環境中，接著進入監測井。由於光纖的末端有進行熔接，因此光纖形成一單獨迴路，圖型上可以看出有左右對稱的情況。參照水體的溫度位置選用熱水環境中的溫度做為第一參照水體(Ref1)，圖 19a、圖 19b 分別為光纖進入與離開熱水環境中的參照點位置，由於參照水體需選擇在較為恆溫的環境當中做為參照依據，因此需選擇圖型當中較為平穩的位置做為參照點。由圖 19 所選擇熱水環境中的參照點位置由 48 至 130。第二參照水體選用冰水環境中的參照點做為參照位置，圖 20a、圖 20b 分別為光纖進入與離開冰水環境中的參照點位置，根據圖型上較為平緩的位置所選擇的參照點位置由 145 至 216。除了以熱水與冰水做為參照水體外，亦設置第三參照溫度水體，圖 21a、圖 21b 為光纖進入與離開隨環境溫度變化之參照水體的位置，根據圖型上較為平緩的位置所選擇的參照點位置由 1631 至 1727。為驗證率定之準確性，因此將第三參照水體拆分為兩部分，其中一部分做為第三參照水體，另一部分用以進行驗證溫度。因此第三參照水體之參照點位置由 1631 至 1680，驗證之參照點為 1681 至 1727。



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

選取參照水體後，需考量因熔接所造成的能量耗損。圖 22 為末端熔接所造成能量耗損的參照位置，選取 3238 的參照點並考慮前後 10 個參照點為其影響範圍。

calDTS

Dataset to Calibrate

Load Dataset

DTS *.mat File: ch4.mat

Select Calibration Routine

(a) (b)

(b) Three Section Explicit with Step Loss [b...]

Designate Reference Locations

	Starting Index	Ending Index	Tref
Ref1	48	130	tref 1
Ref2	145	216	tref 2
Ref3	1631	1680	tref 3
Validation	1681	1727	tref 3

Step Loss Focus Point 3238

+/- Index to Equal 10

Plot Data

Calibrate Dataset

☒ Review Calibration

☐ Generate & Save Calibration ...

Project Name

Calibrate

圖 17FO-DTS 校正操作介面



研究內容

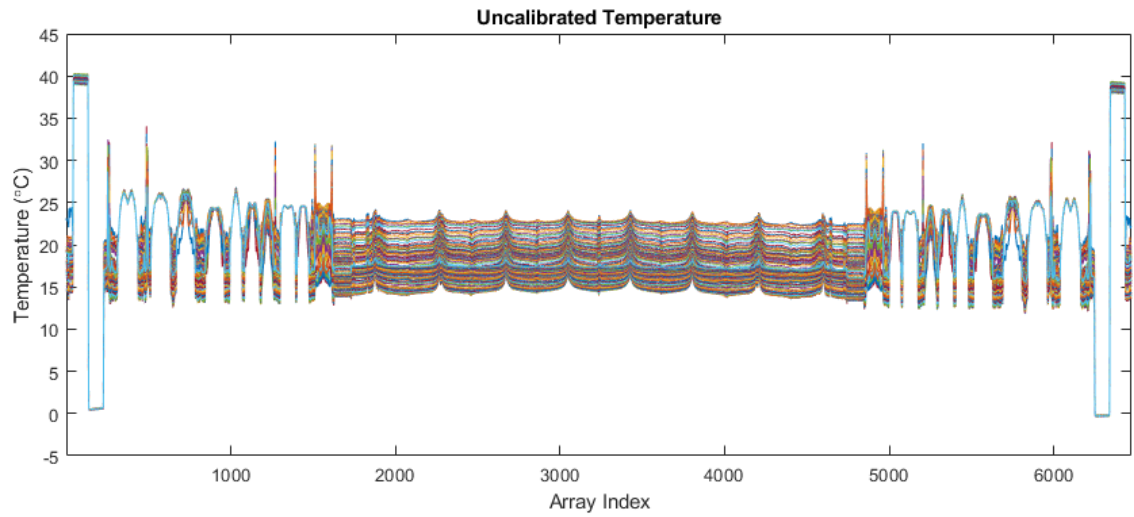


圖 18FO-DTS 量測資料

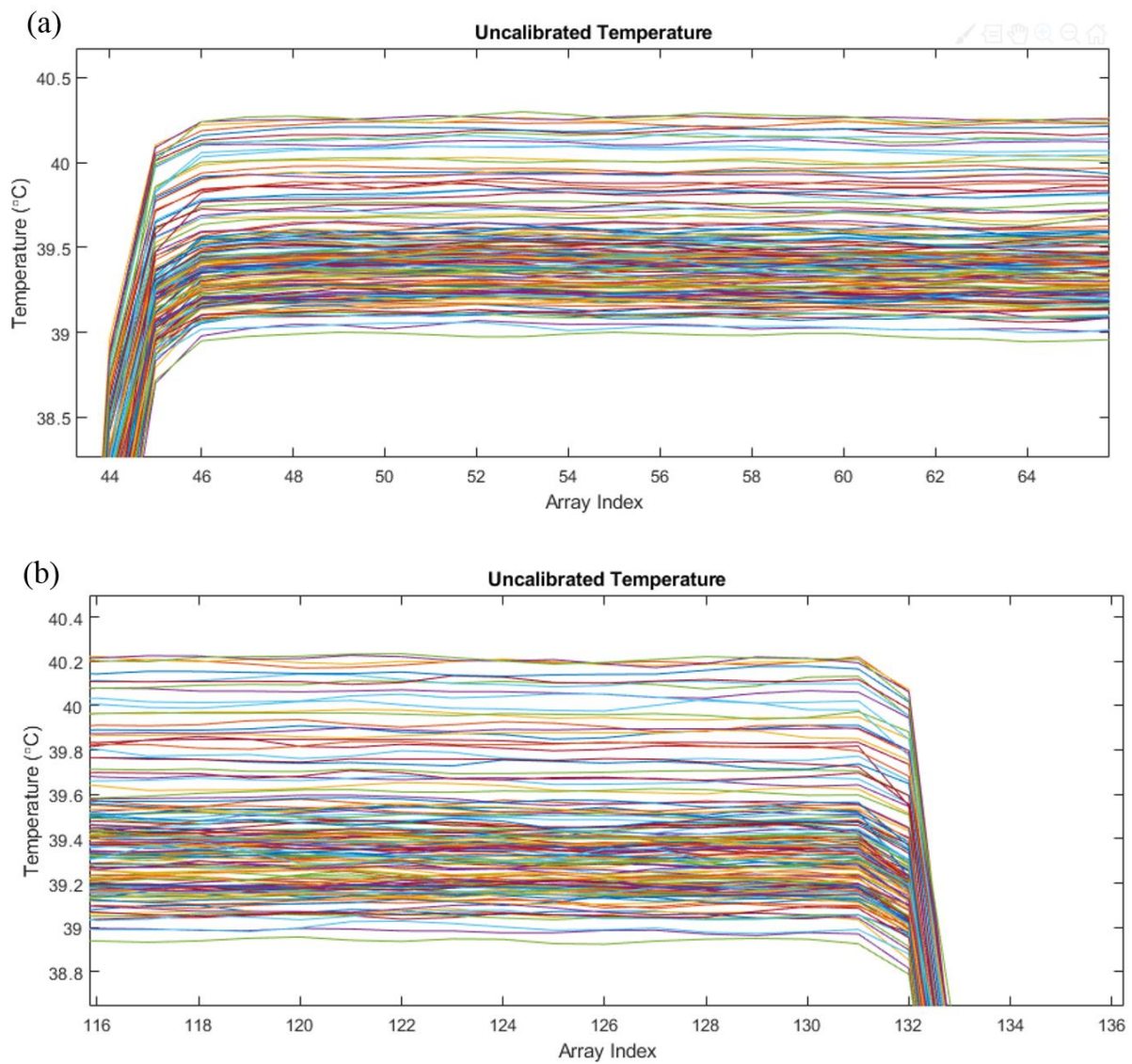


圖 19(a)光纖進入熱水參照水體位置、(b)光纖離開熱水參照水體位置



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

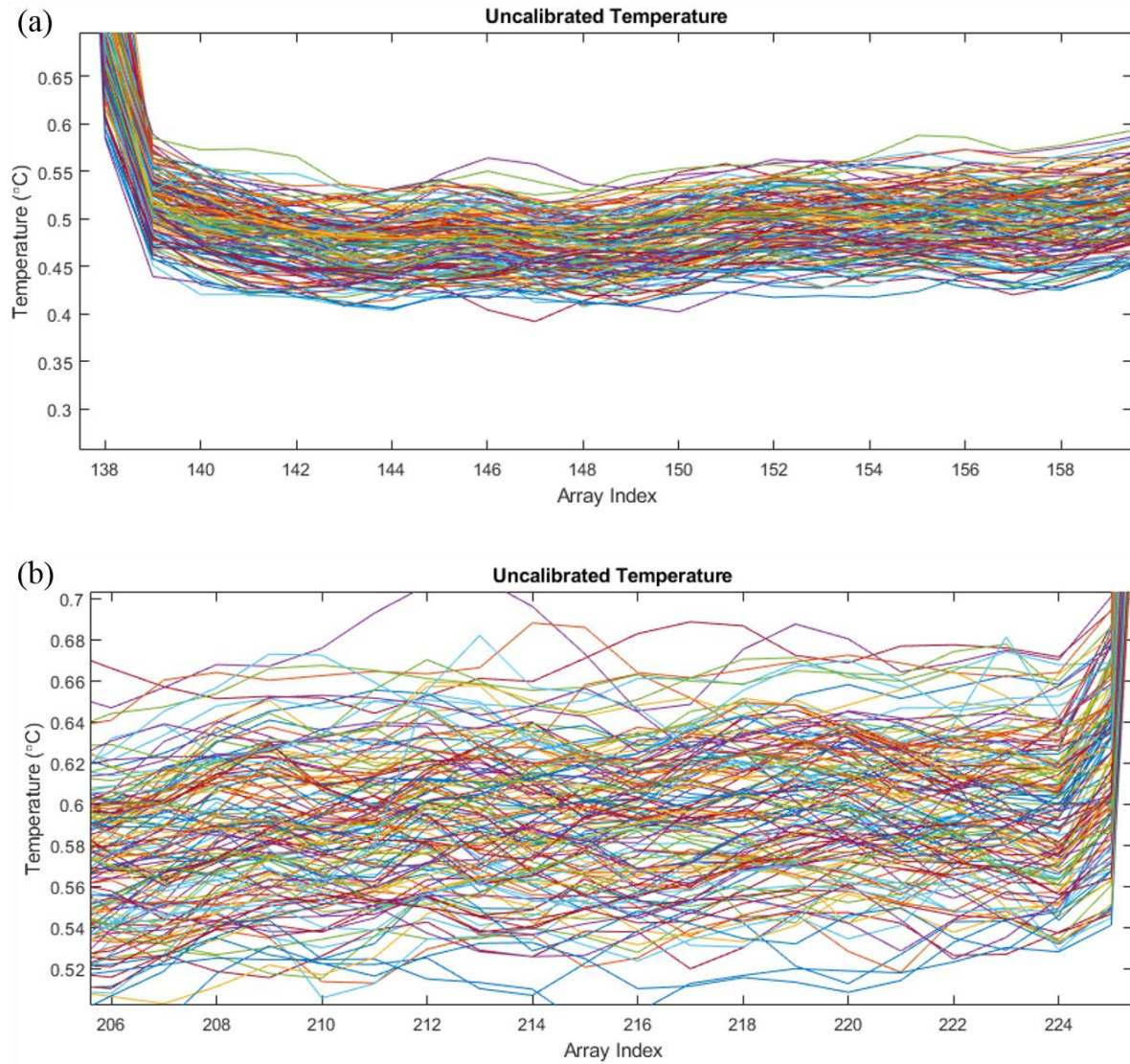


圖 20(a)光纖進入冰水參照水體位置、(b)光纖離開冰水參照水體位置

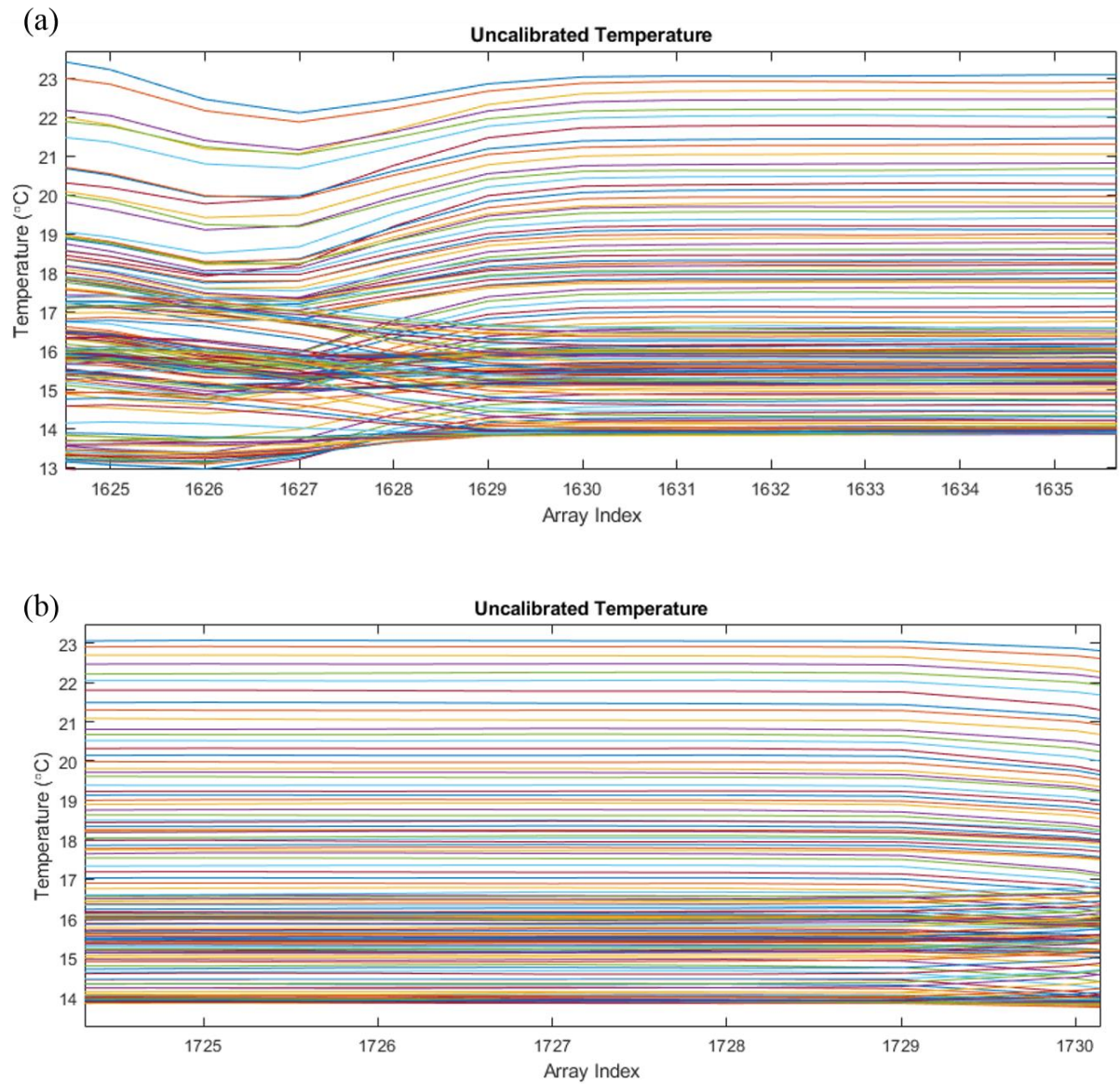


圖 21(a)光纖進入環境溫度參照水體位置、(b)光纖離開環境溫度參照水體位置



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

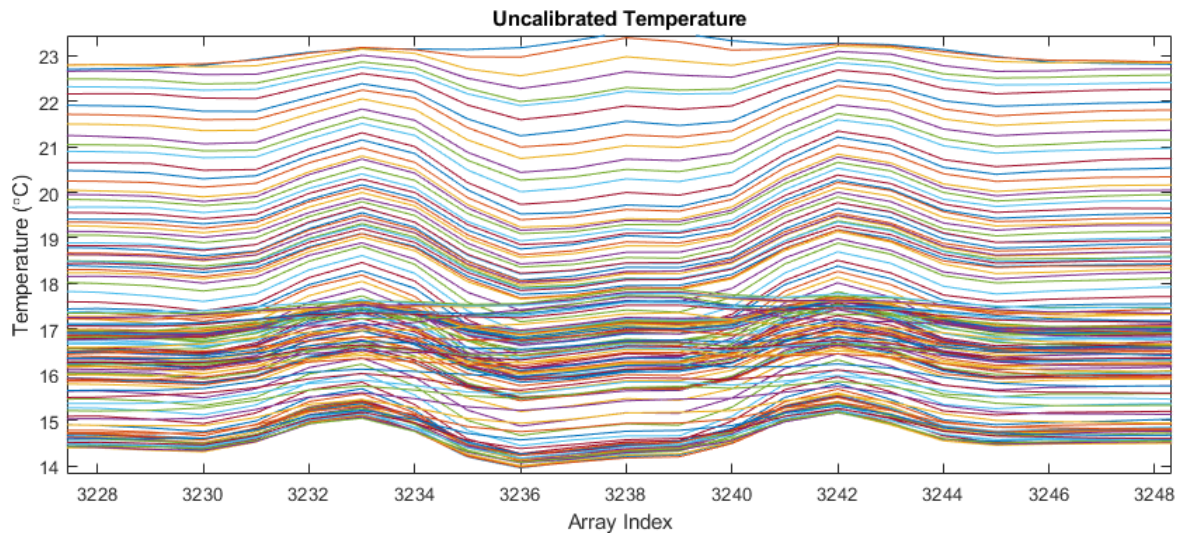


圖 22 光纖熔接訊號損失參照點

4.4 模場概況

本研究計畫所選定之污染場址位於桃園市中壢區的勝暉化成股份有限公司，場址面積約為 6400 m²，鄰近老街溪及炭仔腳分渠，東南方 700 公尺為中山高速公路，附近主要為農地及魚塢，並有零星工廠及住宅，使用地類別為丁種建築用地。場址係以生產各式工業助劑，如有機染料／顏料化學製造程序、界面活性劑化學製造程序的工業溶劑等，產品與服務主要以底片相紙沖印液、染料、顏料、塗料中間體、助劑製造，現況為運作中工廠。經由民國 103 年環保署「運作中工廠土壤及地下水含氯有機溶劑污染潛勢調查及查證計畫（第 5 期）」調查結果發現污染，土壤污染物包括：1,2-二氯苯（1,2-DCB）、1,3-二氯苯（1,3-DCB）、總石油碳氫化合物（TPH）等 3 項；地下水污染物包括：1,2-DCB 及 1,4-二氯苯（1,4-DCB）等 2 項。於 104 年 2 月 25 日公告為土壤及地下水污染控制場址；控制計畫書已於 105 年 2 月 17 日經環保局審查核定備查。依據過去鑽探設井（粒徑分析、水位量測）、地球物理多重式井測（物理性參數連續分布）與多深度水文試驗（微水試驗、單井流速流向）等調查結果顯示，地表至地下約 1 公尺處為鋪面及回填層，約地下 1 公尺至地下 3~5 公尺處為紅土層（以粉黏土為主），地下 3~5 公尺至地下 15~16 公尺為礫石層，其主要為礫石夾砂並夾雜少量粉土，該層為第一含水層（非受壓含水層），其下則轉變為緻密連續之粉黏土層。地下水水位約在地下 5~6 公尺處。場址配置及地下水流向如圖 23 所示，以 Rockworks™繪製本場址地質二維與三維模型圖如圖 24 與



研究內容

圖 25 所示。圖 24a 表示南北向（沿地下水流方向）之地質柱狀剖面，可發現紅土層大致由上游往下游遞減，靠近上游污染區（如 E-04 至 E-15）或鍋爐房附近之紅土層超過 4~5 公尺，礫石層深度也較深（約地下 16 公尺），往下游 OE-2、OE-1 方向之紅土層已減至約 2~3 公尺，礫石層深度約地下 14~15 公尺。圖 24b 則表示東西向（沿廢污水沿線系統主要污染分布區）之地質柱狀剖面，可發現紅土層在 MW-05 附近之紅土層最厚（超過 4.5 公尺），E-02 與 MW-03 之紅土層相對較薄（約 3 公尺），目前地下水調查數據顯示 E-02 與 MW-03 附近含水層各深度均有發現污染，但 MW-05 與下游 E-04 之各深度氯苯類測值較低，應與 MW-05 附近紅土層較厚而致洩漏至含水層之污染量較有限。

分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

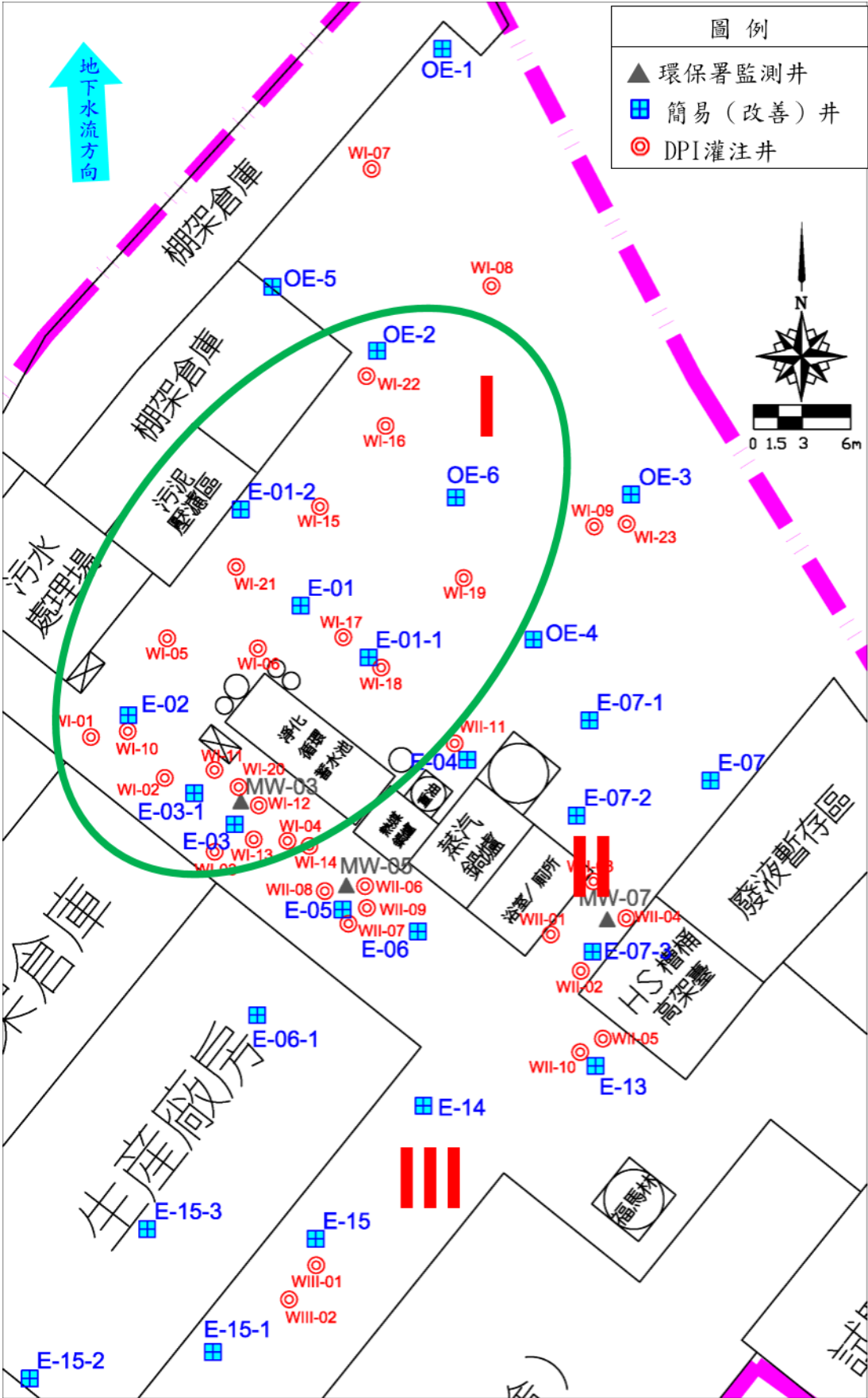
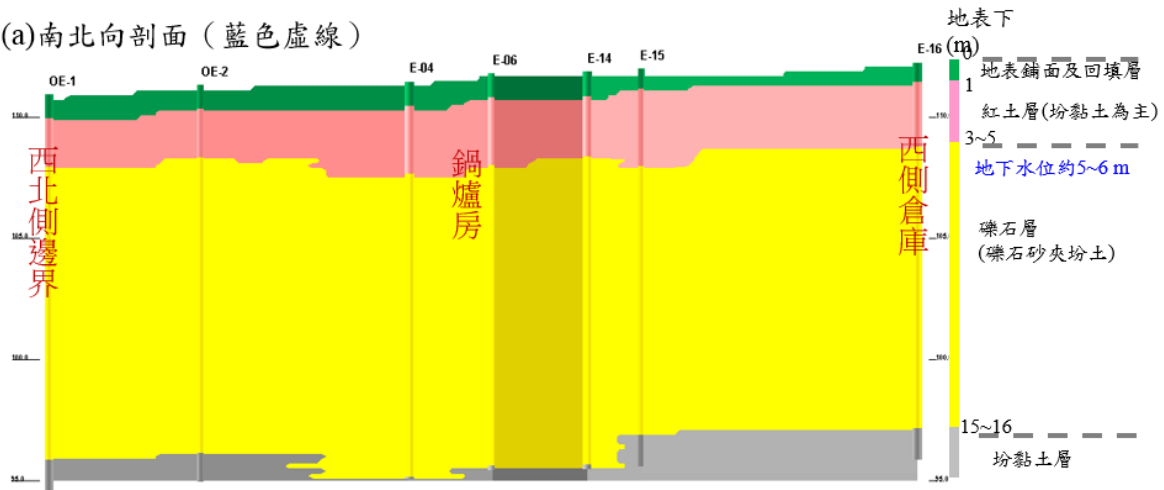


圖 23 全場址井位配置與地下水流向示意圖

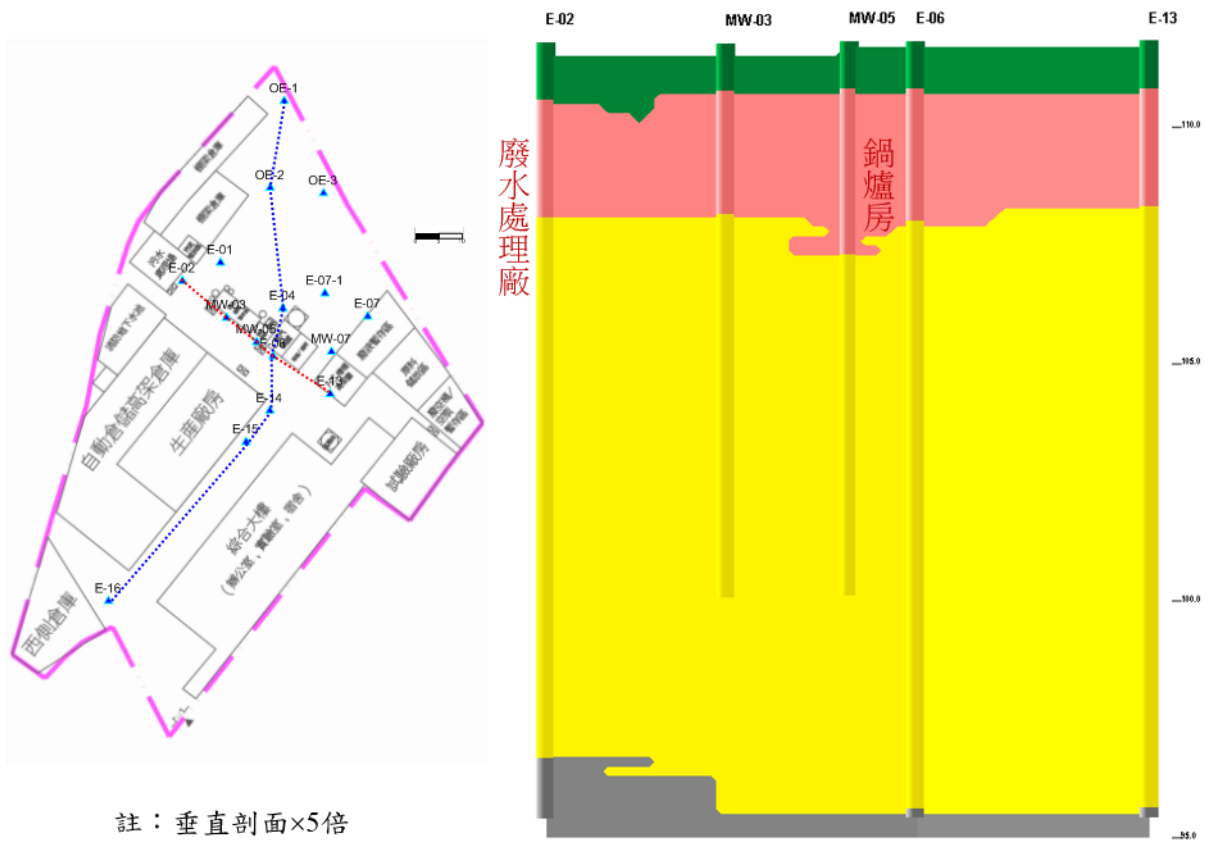


研究內容

(a)南北向剖面 (藍色虛線)



(b)東西向剖面 (紅色虛線)



註：垂直剖面×5倍

圖 24 二維地質概念模型圖



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

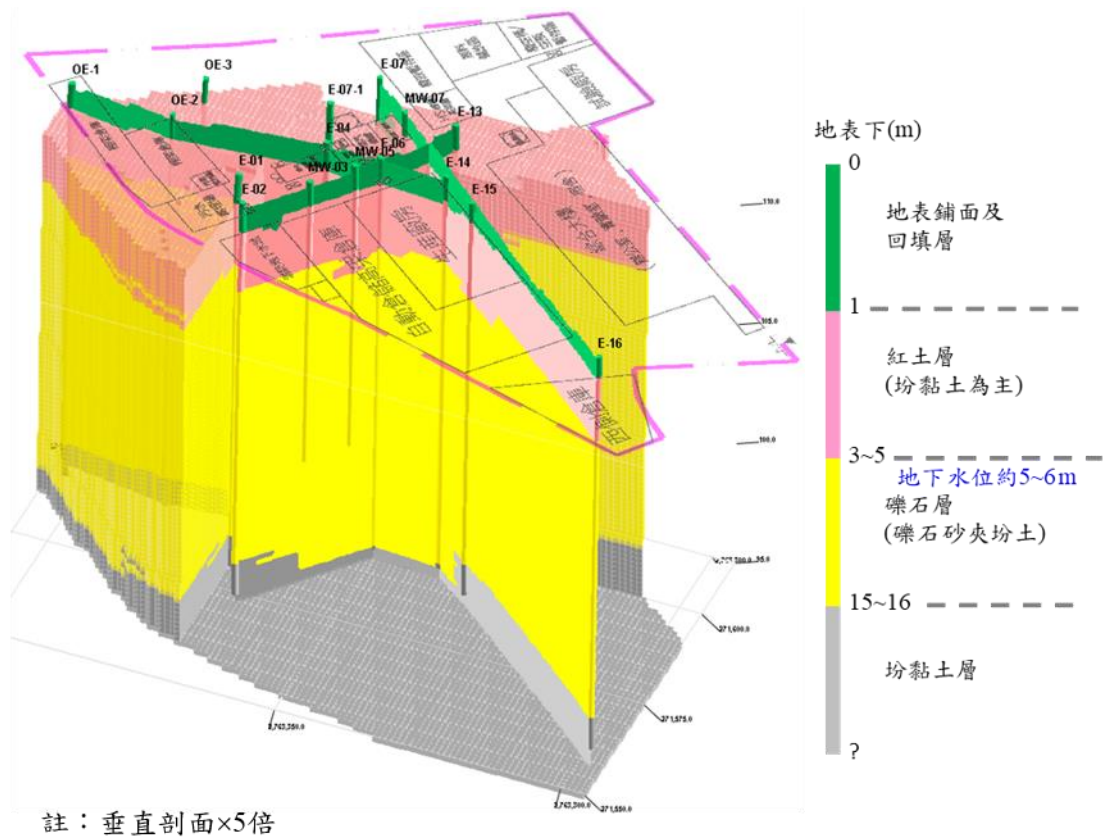


圖 25 三維地質概念模型圖

本場址執行之水文地質調查方式有鑽探設井（粒徑分析、水位量測）、地球物理多重式井測（物理性參數連續分布）與多深度水文試驗（微水試驗、單井流流流向）等，並求得以下結果：(1)含水層之水力參數、地下水位及地下水流向及流速之分布與變化評估、(2)土壤質地及地質剖面調查及(3)含水層組成及分布。以下依據調查方式及結果依序說明：

a. 鑽探設井（粒徑分析、水位量測）

簡易井設置位置、深度及開篩位置根據環保署調查、地調所鑽探井（井號：030201G1）鑽探資料綜合判斷，共規劃進行 13 口簡易井設置作業。茲參考本場址東北側下游附近約 4 公里（內定國小）之地調所鑽探資料結果，約 19.5 公尺遭遇岩盤；本場址進行簡易井設置鑽探至地下約深度 15~16 公尺則遭遇緻密而連續之黏土層（第一含水層底部）遂停止鑽進。井篩深度為自井底向上開篩 12 公尺。簡易井設置以氣旋式鑽堡鑽進，篩選數組樣品進行粒徑分析，。鑽探資料與粒徑分析結果，地下環境地質材料組成與分布依其粒徑顆粒大小與材質比例，大致可區分為兩層。淺層為紅土（厚度約 1~4 公尺，組成比例約以砂 8.1~11.7%、粉土 37.5~45.0%、黏土 43.3~54.4%），於較深層約 4~16 公尺則為砂夾礫石（組



成比例約礫石 17.9~31.5%、砂 60.0~76.8%、粉土 3.7~6.7%、黏土 1.1~4.5%) 或礫石夾砂 (組成比例約礫石 49.2~70.8%、砂 28.7~45.4%、粉土 0.4~4.0%、黏土 0.1~1.3%)。簡易井基本資料如表 2。

b. 多深度水文試驗 (微水試驗、單井流速流向)

地下環境地質材料組成與分布依其粒徑顆粒大小與材質比例，大致可區分為兩層：淺層未飽和層為紅土，於較深層約 4~16 公尺則多為砂夾礫石或礫石夾砂。於調查期間整廠地下水位約在地面下 5.09~6.04 公尺，依據 104 年 4 月 24 日量測之廠區簡易井之地下水高程繪製等水位推估圖，地下水大致為西南向東北流動 (廠區東北方為老街溪)。含水層地質滲透性調查包括：微水試驗及土壤粒徑組成經驗公式來推估 K 值。多深度微水試驗主要利用地質調查時開鑿之鑽孔，當於鑽孔內迅速注入或取出少量水，使得鑽孔內水位於短時間內有明顯上升或下降，同時觀測該鑽孔水位下降或回復為原來水位及其時間變化之關係，以推估該含水層之水力傳導係數 k。根據 Cedergren, 1967:

$$k = \frac{A}{F(t_1 - t_2)} \log_e \frac{b_1}{b_2} \quad (5)$$

式中，A 為截面積，F 為形狀因子， t_1 與 t_2 分別為試驗前後時間， b_1 與 b_2 分別為試驗前後之水位。試驗結果 K 值約在 $2.43 \times 10^{-4} \sim 2.79 \times 10^{-3}$ cm/s，平均約 1.90×10^{-3} cm/s，結果可參考圖 26。針對 6 口較高濃度污染之監測井及簡易井進行多深度微水試驗 (Multi-Level Slug Test; MLST)，其結果整理如圖 27 所示，試驗結果 K 值約在 $5.202 \times 10^{-4} \sim 6.953 \times 10^{-3}$ cm/s，其中有部份簡易井之特定深度 K 值相對較高，如 E-01 的深度 11、12 公尺及 E-04 的深度 7.5 公尺處，相對於 K 值較低處約大於 10 倍，較有利地下水流及污染物傳輸。



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

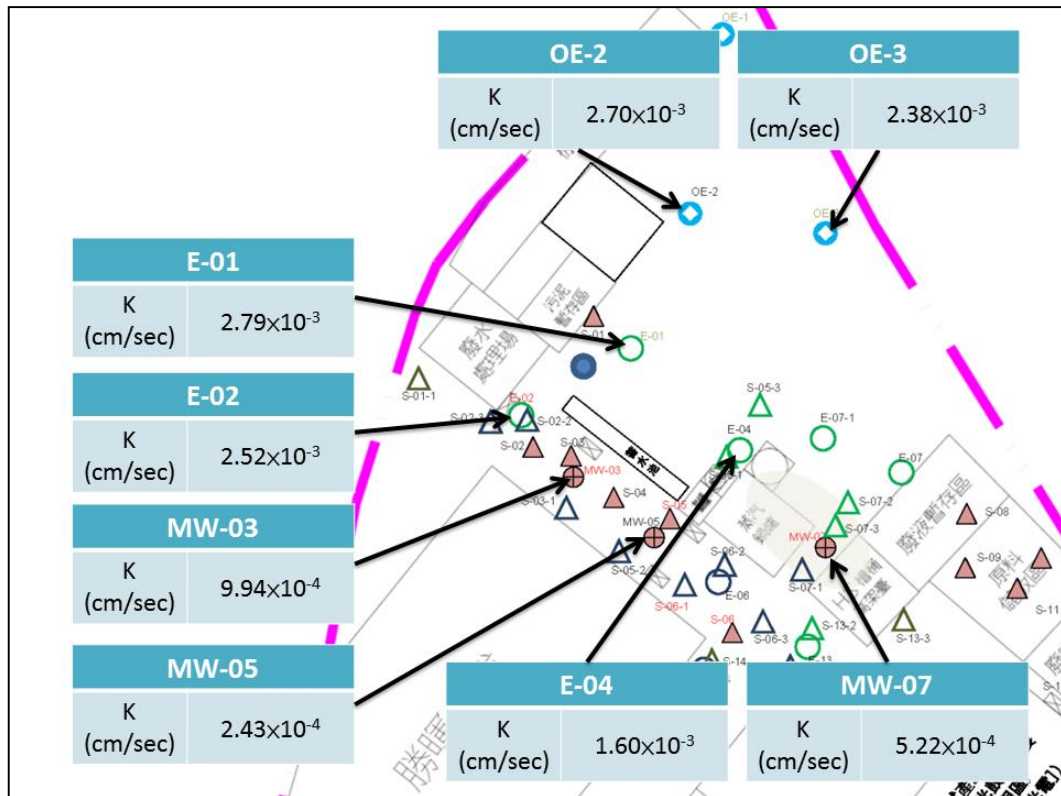


圖 26 微水試驗結果

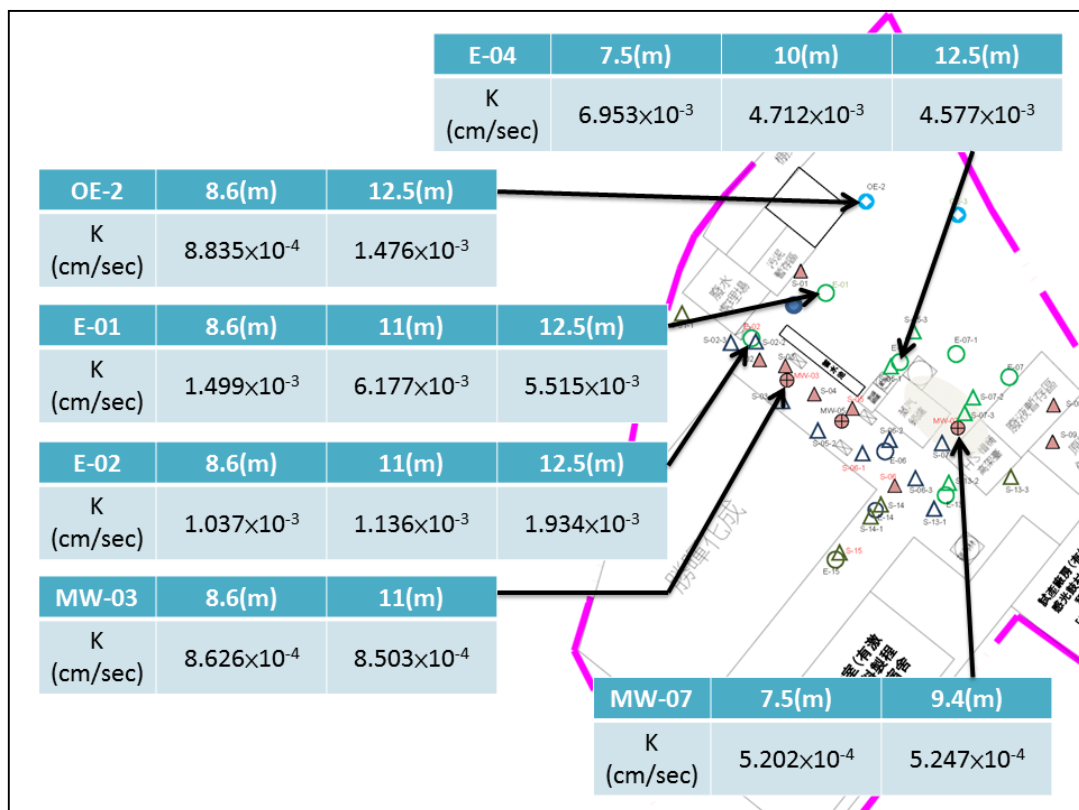


圖 27 多深度微水試驗結果

表 2 簡易井基本資料

井位	設置深度 (m)	井篩長度 (m)	97 座標		井頂高程 (m)	地層描述
			X	Y		
MW-3	11.683	6 (5.603~11.603)	271581.972	2763358.180	111.122	0~1.5 m 柏油及回填土；1.5~7.5m 紅棕色粉土夾礫石；7.5~12.0 m 棕色礫石夾砂
MW-5	11.672	6 (5.592~11.592)	271588.480	2763352.976	111.156	0~1.5 m 柏油及回填土；1.5~4.5m 紅棕色粉土；4.5~7.5m 紅棕色礫石；7.5~12.0 m 棕色礫石夾砂
MW-7	10.185	6 (4.105~10.105)	271604.561	2763350.892	111.089	0~1.5 m 柏油及回填土；1.5~4.5m 紅棕色粉土；4.5~7.5m 紅棕色礫石；7.5~10.5 m 棕色礫石夾砂
E-01	15.165	12 (3.16~15.165)	271580.705	2763370.059	111.496	0~1.2 m 柏油及回填土；1.2~2.0 m 粉土質砂；2.0~3.7 m 紅土；3.7~7.5 m 礫石夾砂；7.5~15.1 m 砂夾礫石；15.1 m 遇黏土停止
E-01-1	16.687	12 (4.687~16.687)	271589.858	2763367.189	110.851	0~0.9 m 混凝土及回填土；0.9~3.3 m 紅土；3.3~7.5 m 礫石夾砂；7.5~16.6 m 砂夾礫石；16.6 m 遇黏土停止
E-01-2	15.895	12 (3.895~15.895)	271581.970	2763376.327	110.811	0~0.8 m 混凝土及回填土；0.8~3.3 m 紅土；3.3~7.5 m 礫石夾砂；7.5~15.8 m 砂夾礫石；15.8 m 遇黏土停止
E-02	15.134	12 (3.134~15.134)	271572.000	2763366.100	111.795	0~1.2 m 柏油及回填土；1.2~2.0 m 粉土質砂；2.0~3.7 m 紅土；3.7~7.5 m 礫石夾砂；7.5~15.1 m 砂夾礫石；15.1 m 遇黏土停止
E-03	9.560	4.5 (5.060~9.560)	271581.604	2763356.891	111.000	0~1.5 m 柏油及回填土；1.5~3.7m 粉土夾礫石；7.5~9.5 m 礫石夾砂
E-03-1	9.583	4.5 (5.083~9.583)	271579.101	2763358.811	111.000	0~1.5 m 柏油及回填土；1.5~3.7m 粉土夾礫石；7.5~9.5 m 礫石夾砂
E-04	16.287	12 (4.287~16.287)	271594.100	2763360.200	111.481	0~1.0 m 混凝土及回填土；1.0~3.8 m 紅土；3.8~7.0 m 礫石夾砂；7.0~16.3 m 砂夾礫石；16.3 m 遇黏土停止
E-05	9.177	4.5 (4.677~9.177)	271588.254	2763351.614	111.800	0~1.5 m 柏油及回填土；1.5~3.8m 紅土；3.8~7.5m 砂夾礫石
E-06	16.196	12 (4.196~16.196)	271592.000	2763349.900	111.825	0~1.0 m 柏油及回填土；1.0~3.8 m 紅土；3.8~16.2 m 砂夾礫石；16.2 m 遇黏土停止
E-06-1	16.000	12 (4.000~16.000)	271582.991	2763345.103	111.588	0~1.5 m 混凝土及回填土；1.5~4.0 m 紅土；4.0~16.0 m 礫石夾砂；16.0 m 遇黏土停止

分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

井位	設置深度 (m)	井篩長度 (m)	97 座標		井頂高程 (m)	地層描述
			X	Y		
E-07	15.769	12 (3.769~15.769)	271612.357	2763358.485	111.522	0~2.0 m 混凝土及回填土；2.0~3.5 m 紅土；3.5~7.0 m 礫石夾砂；7.0~15.8 m 砂夾礫石；15.8 m 遇黏土停止
E-07-1	15.015	12 (3.015~15.015)	271603.145	2763363.445	111.522	0~2.0 m 混凝土及回填土；2.0~3.5 m 紅土；3.5~7.0 m 礫石夾砂；7.0~15.0 m 砂夾礫石；15.0 m 遇黏土停止
E-07-2	16.185	12 (4.185~16.185)	271602.682	2763357.430	110.863	0~0.8 m 混凝土及回填土；0.8~3.6 m 紅土；3.6~16.0 m 砂夾礫石；16.0 m 遇黏土停止
E-07-3	9.184	4.5 (4.684~9.184)	271603.663	2763349.020	111.090	0~1.5 m 柏油及回填土；1.5~4.5 m 紅土；4.5~7.5 m 砂夾礫石；7.5~9.1 m 礫石夾砂
E-13	15.183	12 (3.183~15.183)	271604.300	2763341.800	111.832	0~1.0 m 柏油及回填土；1.0~3.5 m 紅土；3.5~6.5 m 砂夾礫石；6.5~15.2 m 礫石夾細砂；15.2 m 遇黏土停止
E-14	16.158	12 (4.158~16.158)	271591.300	2763338.200	111.892	0~1.0 m 柏油及回填土；1.0~2.4 m 紅土；2.4~3.3 m 礫石夾黏土；3.3~3.7 m 紅土；3.7~6.5 m 礫石夾砂；6.5~16.2 m 砂夾礫石；16.2 m 遇黏土停止
E-15	15.141	12 (3.141~15.141)	271586.200	2763331.500	112.004	0~0.8 m 柏油及回填土；0.8~4.0 m 紅土；4.0~7.0 m 礫石夾砂；7.0~15.1 m 砂夾礫石；15.1 m 遇黏土停止
E-15-1	17.870	12 (5.870~17.870)	271580.258	2763324.299	111.377	0~0.7 m 柏油及回填土；0.7~3.5 m 紅土；3.5~7.0 m 礫石夾砂；7.0~17.8 m 砂夾礫石；17.8 m 遇黏土停止
E-15-2	18.800	15 (3.800~18.800)	271568.959	2763322.663	111.577	0~0.8 m 混凝土及回填土；0.8~3.0 m 紅土；3.0~7.0 m 砂夾礫石；7.0~17.5 m 礫石夾砂；17.5~17.6 m 黃土；17.6~18.8 m 礫石夾砂；18.8 m 遇黏土停止
E-15-3	16.700	12 (4.700~16.700)	271576.203	2763331.898	111.574	0~1.0 m 混凝土及回填土；1.0~3.5 m 紅土；3.5~7.0 m 礫石夾砂；7.0~16.7 m 砂夾礫石；16.7 m 遇黏土停止
E-16	15.133	12 (3.133~15.133)	271556.611	2763297.306	112.274	0~0.8 m 混凝土及回填土；0.8~3.5 m 紅土；3.5~7.0 m 礫石夾砂；7.0~15.1 m 砂夾礫石；15.1 m 遇黏土停止

井位	設置深度 (m)	井篩長度 (m)	97 座標		井頂高程 (m)	地層描述
			X	Y		
OE-1	15.195	12 (3.195~15.195)	271594.405	2763404.782	110.961	0~1.0 m 混凝土及回填土；1.0~2.5 m 紅土；2.5~3.0 m 紅土夾礫石；3.0~9.0 m 砂夾礫石；9.0~15.2 m 礫石夾細砂；15.2 m 遇黏土停止
OE-2	15.182	12 (3.182~15.182)	271590.390	2763386.122	111.355	0~1.0 m 混凝土及回填土；1.0~2.5 m 紅土；2.5~3.0 m 紅土夾礫石；3.0~9.0 m 砂夾礫石；9.0~15.2 m 礫石夾細砂；15.2 m 遇黏土停止
OE-3	15.206	12 (3.206~15.206)	271603.854	2763384.940	111.204	0~1.0 m 混凝土及回填土；1.0~2.5 m 紅土；2.5~3.0 m 紅土夾礫石；3.0~9.0 m 砂夾礫石；9.0~15.2 m 礫石夾細砂；15.2 m 遇黏土停止
OE-4	16.755	12 (4.75~16.755)	271600.021	2763368.294	110.818	0~0.8 m 混凝土及回填土；0.8~2.5 m 紅土；2.5~8.0 m 砂夾礫石；8.0~16.7m 礫石夾砂；16.7 m 遇黏土停止
OE-5	16.637	12 (4.637~16.637)	271583.938	2763390.073	110.634	0~0.8 m 混凝土及回填土；0.8~3.2 m 紅土；3.2~8.5 m 砂夾礫石；8.5~16.6m 礫石夾砂；16.6 m 遇黏土停止
OE-6	16.344	12 (4.344~16.344)	271595.227	2763377.071	111.200	0~0.9 m 混凝土及回填土；0.9~3.5 m 紅土；3.5~7.6 m 礫石夾砂；7.6~16.3 m 砂夾礫石；16.3 m 遇黏土停止



4.5 地下水數值模式

本專案計畫以分散式光纖溫度感測器監測井下溫度變化，並建置地下水流數值模式推估模擬結果，將模擬結果進行率定後，驗證模場試驗之監測結果。

4.5.1. 三維地下水流數值模式 (MODFLOW)

三維地下水流數值模式，全名為 Modular Ground-Water Model - the Ground-Water Flow Process (MODFLOW)，是由 USGS 所發展之地下水流數值模式，最早使用之版本為 McDonald 和 Harbaugh(1988)所建立，經由不斷修改與更新，目前最新版本為 MODFLOW-2005(Harbaugh, 2005)。MODFLOW 使用有限差分法 (finite difference method) 對地下水流統御方程式進行求解。在維度上，MODFLOW 可應用於一維、二維及三維之各式地下水流問題；在時態變化上，穩態 (steady state) 或瞬態模擬 (transient state) 可隨實際模擬情況進行設定，亦可單獨或同時使用。此外，含水層特性與系統的各種外部營力也都可以設定於模式之中進行模擬，如：受壓 (confined) 或非受壓 (unconfined) 含水層、抽注水井設置、特定邊界條件、河川水位變化及蒸發散等。

MODFLOW 模擬地下水流於土壤孔隙介質間的流動主要是依據地下水流統御方程式進行求解得出地下水位變化，此統御方程式為一偏微分方程式，表示如下：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right] + w = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{式 6})$$

式中， K_x 、 K_y 、 K_z 分別為沿著 x、y、z 軸之方向上之水力傳導係數 [LT^{-1}]；w 為單位體積之水流通量 [T^{-1}]；h 為水頭高度 [L]； S_s 為孔隙介質之比儲水係數 [L^{-1}]；t 為時間 [T]。當有限差分法進行地下水流模擬計算時，模擬系統會以塊狀之網格元素 (cell) 方式表示，塊狀網格主要由列 (row, i)、行 (column, j) 及層 (layer, k) 所組成，每一列高、行寬、層厚分別為 Δc_i 、 Δr_j 及 Δv_k ，劃分情形如圖 28 所示。有限差分法會根據相鄰的元素網格計算水位變化，計算之方程式如下所示：

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V \quad (\text{式 7})$$

式中， Q_i 為流入元素網格的水流速率 [L^3T^{-1}]， $\Delta h/\Delta t$ 為地下水位在單位時間內的變化量， ΔV 則為元素網格之體積。

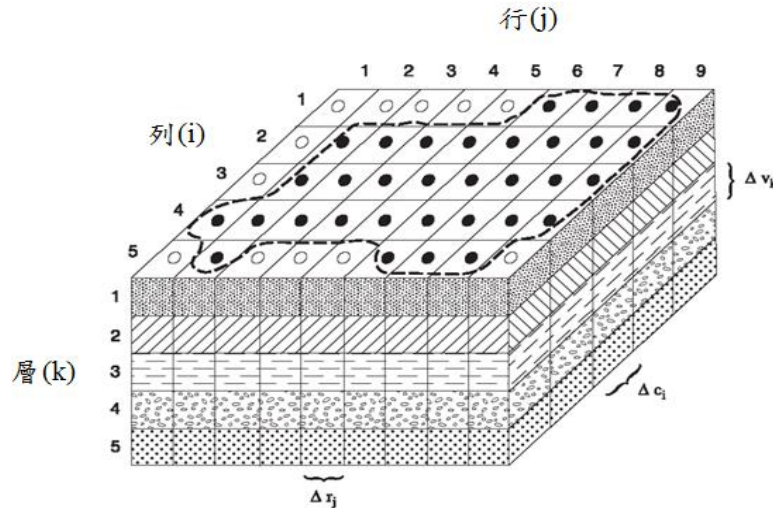


圖 28 MODFLOW 網格劃分元素示意圖 (McDonald and Harbaugh, 1988)

4.5.2. 三維地下水溶質傳輸模式 (MT3DMS)

三維地下水溶質傳輸模式，全名為 Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model (MT3DMS)，為 Zheng 和 Wang (1999) 所發展，主要目的為模擬地下水流中溶解物質在土壤孔隙介質中的傳輸與移動。MT3DMS 在維度、時態變化和含水層特性等，均與 MODFLOW 模擬之設定相同，因為地下水流場為溶質傳輸的首要建構條件，因此地下水流場的生成需搭配 MODFLOW 模式的模擬方可產生。MT3DMS 可模擬溶質於地下水流中的傳輸機制，包含對流(advection)和延散(dispersion)兩種方式，亦可將溶質間的化學反應納入考慮。

MT3DMS 模擬溶質在地下水流中的傳輸情形亦以有限差分法對偏微分統御方程式進行求解，此溶質傳輸的統御方程式如下：

$$\frac{\partial (\theta C^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C^k) + q_s C_s^k + \sum R_n \quad (\text{式 8})$$

式中， θ 為土壤孔隙率[-]； C^k 為溶質 k 之溶解濃度[ML^{-3}]； x_{ij} 為 i, j 各自沿著笛卡爾坐標系 (Cartesian coordinate system) 之坐標軸 (直角坐標軸) 上之距離[L]； D_{ij} 為水力延散係數 (hydrodynamic dispersion coefficient) [$L^2 T^{-1}$]； v_i 為孔隙中地下水流速[LT^{-1}]； q_s 為流體於含水層中之單位體積流率[T^{-1}]； C_s^k 為溶質 k 之釋放或降解通量的濃度[ML^{-3}]； $\sum R_n$ 則為化學反應項。

式中，等號左邊所代表的意義為溶質質量隨時間之變化，而等號右邊各項之意義依序為， $\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x_j} \right)$ 為考慮延散 (dispersion) 與擴散 (diffusion) 作用之計算項，



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

擴散作用一般常被忽略，僅在流速極小時，方須考慮； $\frac{\partial}{\partial x_i}(\theta v_i C^k)$ 為對流項 (advection)， $q_s C_s^k$ 為溶質的源 (source) 與匯 (sink) 之變化； $\sum R_n$ 則為化學反應項。

4.5.3 熱傳輸與溶質傳輸之轉換

溶質傳輸模式的概念與熱能傳輸相似，其控制方程式亦相似，因此，依據此一概念，將熱能傳輸的過程與溶質傳輸的過程進行類比，溫度的增減可視為溶質濃度的變化，透過適切的熱能與溶質參數轉換，可將(式 8)改寫為：

$$\left(1 + \frac{\rho_b K_d^k}{\theta}\right) \frac{\partial(\theta C^k)}{\partial t} = \nabla \cdot [\theta (D_m^k + \alpha \frac{q}{\theta}) \cdot \nabla C^k] - \nabla \cdot (q C^k) - q_s' C_s^k \quad (\text{式 9})$$

式中， ρ_b 為總體密度 [ML^{-3}]， K_d^k 為分佈係數 [$L^3 M^{-1}$]， D_m^k 為分子擴散係數 [$L^2 T^{-1}$]， α 為熱延散係數 [L]， q 為流速 [LT^{-1}]。等號左邊所代表的意義即為溫度隨時間之變化，等號右邊第一項為考慮了熱擴散與熱延散效應的分子擴散係數與熱延散係數，第二項則是考慮熱對流所產生的效應，第三項則是熱源在介質中進出的變化，即源 (source) 與匯 (sink) 之變化。總體密度可視作固體密度與固體孔隙體積的乘積，即 $\rho_b = \rho_s(1 - \theta)$ ；分佈係數 K_d^k 可由固體熱容量與液體熱容量與密度的比例表示，即 $K_d^k = C_{psolid}/\rho C_{pfuid}$ ；分子擴散係數 D_m^k 可表示為由溫度梯度所驅使的熱擴散率，即 $D_m^k = k_{Tbulk}/\theta \rho C_{pfuid}$ ， k_{Tbulk} 為熱傳導係數 (thermal conductivity)，將式 9 改寫為：

$$\left(1 + \frac{1-\theta}{\theta} \frac{\rho_s}{\rho} \frac{C_{psolid}}{C_{pfuid}}\right) \frac{\partial(\theta T)}{\partial t} = \nabla \cdot \left[\theta \left(\frac{k_{Tbulk}}{\theta \rho C_{pfuid}} + \alpha \frac{q}{\theta}\right) \cdot \nabla T\right] - \nabla \cdot (q T) - q_s' T_s \quad (\text{式 10})$$

4.5.4 模式率定

模式率定 (model calibration) 在數值模式建置過程中扮演極為重要的角色，初步建立之數值模式，在未經率定的情形下，模擬結果常無法準確模擬現地之實際情況。模式率定主要利用逆推理論 (inverse)，以現地觀測資料為基礎，針對模式中的參數進行反覆調整，期望模擬結果能夠盡可能的吻合現地資料，而率定結果將可大幅昇數值模式之可靠性。本研究選用自動化模式率定軟體 PEST (Doherty et al., 1994) 來進行模式的率定，PEST 屬於 model independent 的率定軟體，可適用於任何一種具有輸入項 (input) 與輸出項 (output) 的數值模式，亦常用於地下水數值模式率定之中 PEST 在自動迭代調整參數的過程中，將模擬結果與觀測值進行擬合，直到收斂條件達到預期目標為止。



Model calibration 的過程為最小化模擬值與實際觀測值之平方誤差的總和 (Φ)，當平方誤差總和越小時，所率定得到的參數組合可信度越高。PEST 中採用 Gauss-Marquardt-Levenberg algorithm (Levenberg, 1944; Marquardt, 1963) 針對參數進行最佳化，若數值模式為一線性方程式，其運算過程如下：

$$\Phi = (\mathbf{c} - \mathbf{X}\mathbf{b})^t \mathbf{Q} (\mathbf{c} - \mathbf{X}\mathbf{b}) \quad (\text{式 11a})$$

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}^t \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^t \mathbf{c} \quad (\text{式 11b})$$

$$\sigma^2 = \Phi / (\mathbf{m} - \mathbf{n}) \quad (\text{式 11c})$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{b}) = \sigma^2 (\mathbf{X}^t \mathbf{X})^{-1} \quad (\text{式 11d})$$

式中， Φ 為平方偏差的總和，希望最小化之目標值； $\mathbf{c}$ 為實際測量值； t 表示為轉置矩陣； $\mathbf{X}$ 為模擬值矩陣； $\mathbf{b}$ 為系統參數向量； $\mathbf{Q}$ 為觀測權重值，當觀測值間有不同重要性或有誤差影響時，可加入權重值進行考慮； σ^2 代表 $\mathbf{c}$ 矩陣中每一元素之變異數； $\mathbf{m}$ 為觀測向量之維度（觀測數量）； $\mathbf{n}$ 為參數向量之維度（參數數量）； $\mathbf{C}(\mathbf{b})$ 為 $\mathbf{b}$ 之共變異數矩陣（covariance matrix）。線性模式之參數推估較為容易，然大部分模式為非線性，故須透過重複求解的過程，推估適當參數。若數值模式為一非線性方程式時，運算過程如下：

$$\Phi = (\mathbf{c} - \mathbf{c}_0 - \mathbf{J}(\mathbf{b} - \mathbf{b}_0))^t \mathbf{Q} (\mathbf{c} - \mathbf{c}_0 - \mathbf{J}(\mathbf{b} - \mathbf{b}_0)) \quad (\text{式 12a})$$

$$\mathbf{u} = (\mathbf{J}^t \mathbf{Q} \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^t \mathbf{Q} (\mathbf{c} - \mathbf{c}_0) \quad (\text{式 12b})$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{b}) = \sigma^2 (\mathbf{J}^t \mathbf{Q} \mathbf{J})^{-1} \quad (\text{式 12c})$$

同上述模式以線性方式敘述時，式 11a 中 $\mathbf{c}$ 代換為 $(\mathbf{c} - \mathbf{c}_0)$ 、 $\mathbf{b}$ 代換為 $(\mathbf{b} - \mathbf{b}_0)$ ，則可寫成式 12a。 $\mathbf{b}_0$ 為原始參數， $(\mathbf{b} - \mathbf{b}_0)$ 為參數更新向量， $\mathbf{c}_0$ 為實際觀測值， $(\mathbf{c} - \mathbf{c}_0)$ 為模擬結果與實際觀測值之差值； $\mathbf{J}$ 為 Jacobian matrix； $\mathbf{u}$ 為參數更新向量。



(五) 結果與討論

5.1 第一次現地試驗

第一次現地試驗為連續監測十口井的溫度變化，由絕對溫度隨時間變化可以得知井下高溫與低溫分布情況，由溫度變化 ΔT 隨時間之變化速率可以辨別在不同深度下有著不同的地層環境。然而在監測期間卻發生多次的降雨事件，造成井下溫度急劇下降，降雨事件所造成的影響提供了後續第二、三次試驗的量測方式與分析方式。受限於篇幅上之限制，第一次現地試驗結果已於期中報告中詳細說明，在此僅針對試驗結果進行重點截錄。

5.1.1 試驗結果分析

圖 29 為第一次試驗中井 E-06 量測結果，由於整口井皆受到雨水滲入井管內，造成溫度大幅降低。在 3/23 06:00 所發生的降雨事件，使得井內溫度由初始量測到的 24.7 度下降為 19 度，然而在降雨過後，溫度逐漸回升的過程中可發現，在 3/23 12:00 深度 6-9 公尺與 12-13 公尺處，溫度已回升至原來的 24.7 度，中間深度(9-11 公尺)之量測溫度則為 22 度。此結果顯示井 E-06 在降雨過後井內回溫的過程中，是以淺層深度(6~9 公尺)與深層深度(11~13 公尺)溫度回升較快，透水性較高，中間深度(9~11 公尺)則為較不透水之區段。

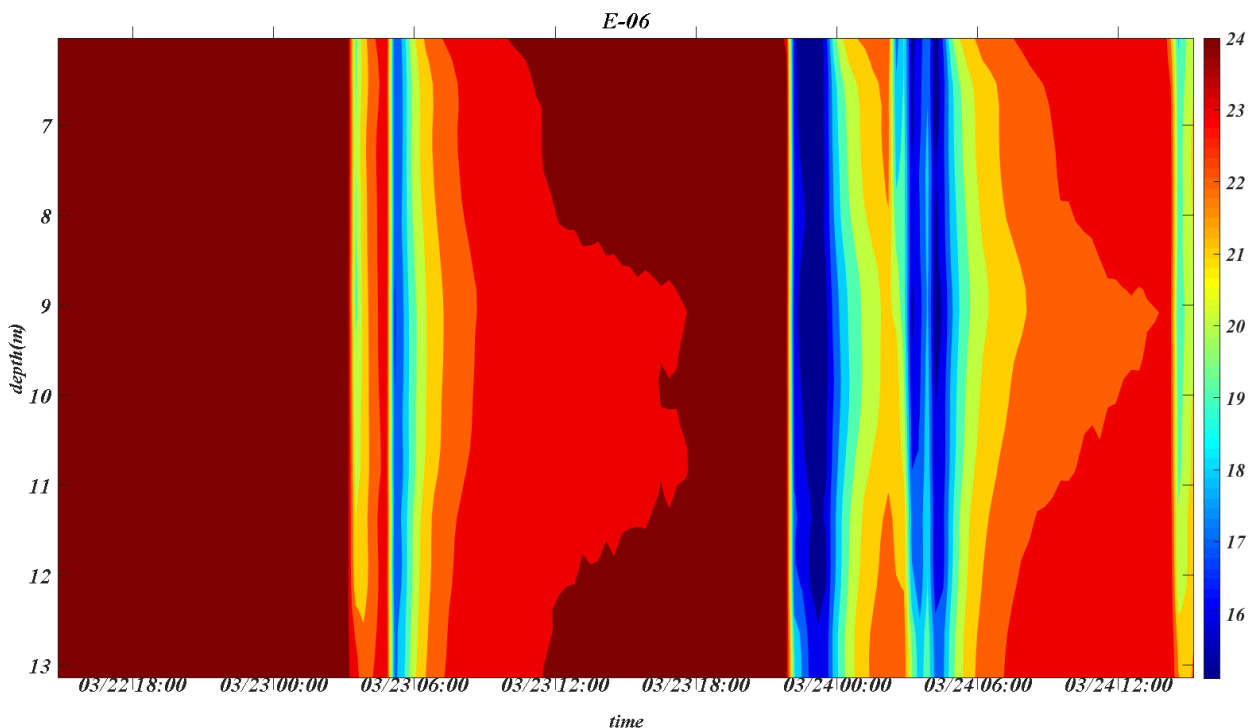


圖 29 第一次試驗井 E-06 絕對溫度剖面



5.2 第二次現地試驗結果

根據前一次現地試驗結果顯示，降雨所導致雨水流入井管內所造成之溫度變化可在溫度回復的過程中針對井下透水與不透水區段進行判識。因此，本研究嘗試於現地改善井中，以埋設之暗管進行井內灌注熱水實驗，並於停止注水後，監測井內溫度回復之過程，判識井下透水與不透水區段。試驗時間為 5/19-5/22 針對廠區下游位置之監測井進行光纖佈設，並於廠區中間鍋爐之監測井進行暗管注水，由量測到的絕對溫度分析井下溫度分佈，並根據溫度回復過程中的快慢情況，判別透水與不透水區段。由於井內地下水位約為 5.7~5.8 公尺深，量測結果以地下水位面以下的深度進行討論。

5.2.1 現地光纖佈設

圖 30 為第二次現地光纖佈設示意圖，此次現地試驗與交大張良正老師團隊配合一併進行，因此除了 DTS 的量測外，現地同時有光柵設備進行佈設。如圖上所示，黑色標示為 DTS 所佈設之量測順序，將帳篷營地設置於下游井 OE-1 附近，首先佈設井 OE-1，接著依序為井 OE-3、井 OE-5、井 OE-2、井 E-01、井 E-01-1。綠色標示為交大張良正老師團隊佈設光柵為井 E-01-2、井 OE-6、井 E-01、井 E-01-1，由於光柵設備直徑較大，因此放置於井內時，需將光纖抽離井管，因此在現地有進行光柵實驗的井將無進行 DTS 量測，紅色標示之井 E-01 與井 E-01-1 為使用暗管注熱水之注入井。5/19 為同時量測六口井之背景資料，5/20 開始進行井 E-01 注水實驗，在此日試驗中，DTS 佈設的井為井 OE-1、井 OE-3、井 OE-5、井 OE-2、井 E-01；光柵所佈設的井為井 E-01-2、井 OE-6、井 E-01-1。於暗管中注入每分鐘 7 公升，溫度 31 度的熱水，注入時間約 3 小時。5/21 為井 E-01-1 注入熱水之實驗，在此日試驗中，DTS 佈設的井為井 OE-1、井 OE-3、井 OE-5、井 OE-2、井 E-01-1；光柵所佈設的井為井 E-01-2、井 OE-6、井 E-01。於暗管中同樣注入每分鐘 7 公升，溫度 30 度的熱水，注入時間約 3 小時。圖 31 為現地光纖與光柵試驗照片。



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

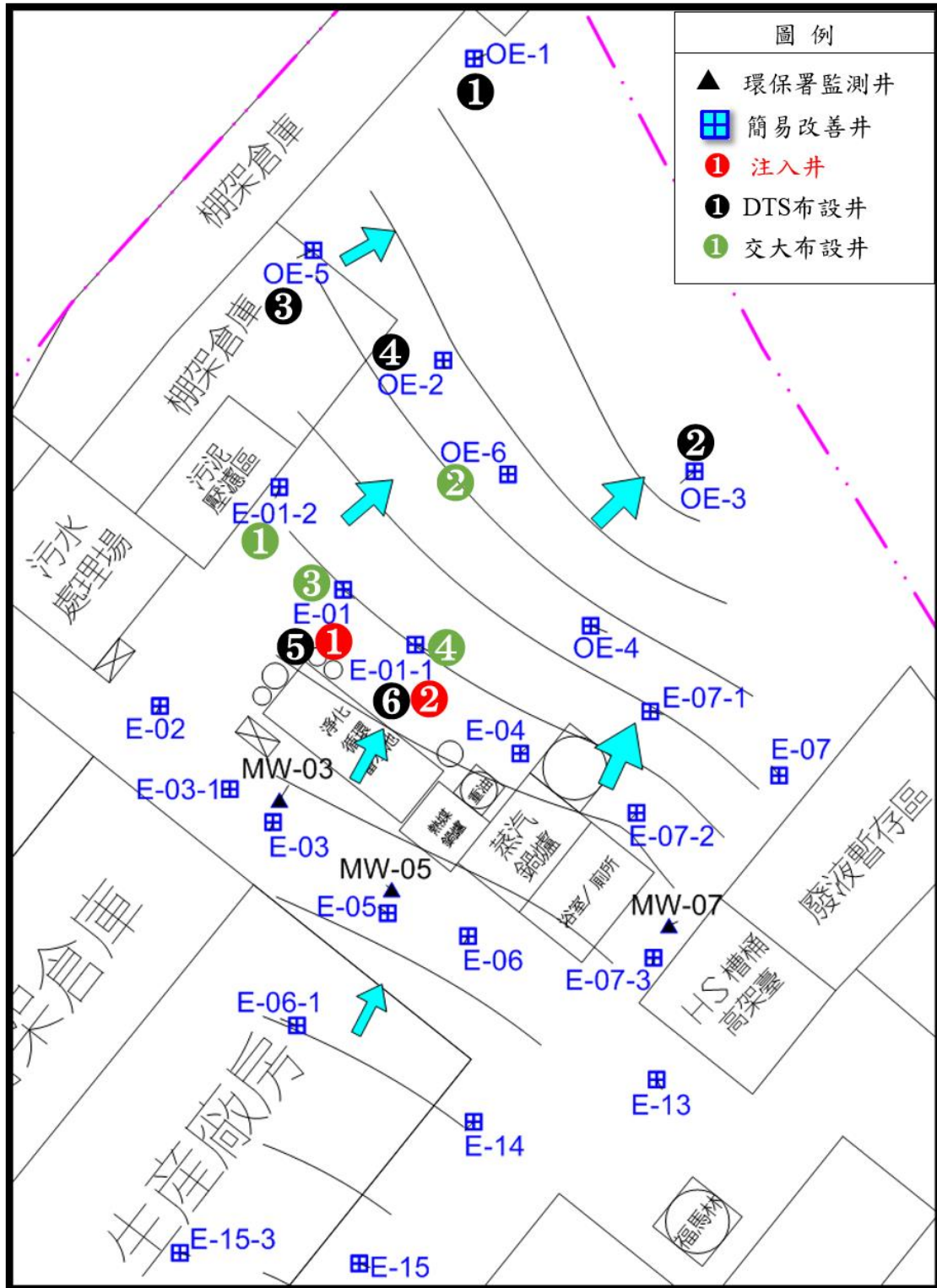
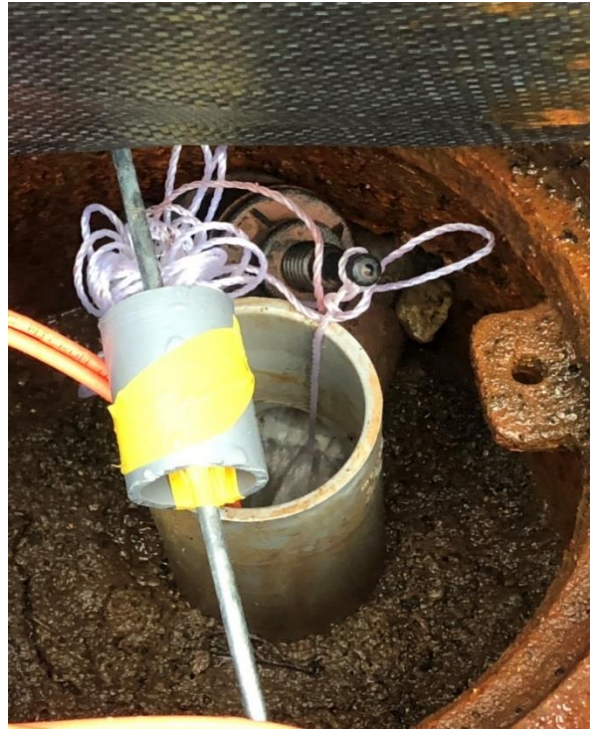
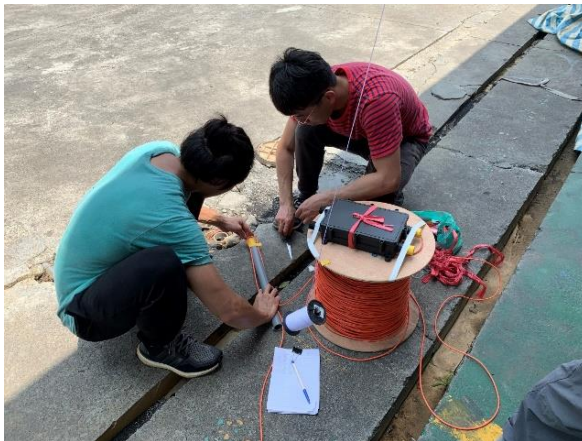


圖 30 第二次現地光纖佈設



(a)



(b)



(c)

圖 31 現地試驗照片：(a)暗管注水、(b) 光纖佈設情形、(c) 光柵實驗佈設

5.2.2 試驗校正結果

藉由 CTEMPs MATLAB® DTS Toolbox 進行溫度校正可估算差分衰減($\Delta\alpha$)、光子訊號偵測敏感度(C)、雷射光子狀態(γ)等多項參數。圖 32 為 CTEMPs calibration GUI Report 之標準校正結果。calibration RMSE 為校正後之均方根誤差，其估算值為 0.046，calibration Bias 為校正後對所有參照數據之平均誤差，其估算值為 0；validation RMSE 為校正後的結果進行驗證之均方根誤差，其估算值為 0.047，validation Bias 為對所有參照數據進行驗證之平均誤差其估算值為 0.021，



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

顯示其校正後之溫度精準度為 0.046 度。以此案例為參考指標，標準校正結果之三項參數所估算之範圍分別為，差分衰減介於 $8.6 \times 10^{-5} \sim 9.2 \times 10^{-5}$ ，光子訊號偵測敏感度介於 1.25~1.4，雷射光子狀態介於 475~490。圖 33 為本研究校正過後的參數結果，圖 33a 為差分衰減($\Delta\alpha$)的校正結果，差分衰減($\Delta\alpha$)受到光纖纜線種類及佈設長度有關，隨著光纖纜線長度增加，在末端處或經熔接後，皆會使得雷射訊號強度減弱，產生階能損失。差分衰減($\Delta\alpha$)估算之範圍在 $5.9 \times 10^{-5} \sim 6.15 \times 10^{-5}$ ，小於案例所提供之參考範圍，顯示所選用之光纖品質良好，適用於本研究計畫。圖 33b、圖 33c 為光子訊號偵測敏感度(C)、雷射光子狀態(γ)之估算結果，分別界於 1.58~1.6 與 478~479，此值主要受到 FO-DTS 主機之影響，理想狀態下應為一定值，然而，受到溫度與外在環境之影響，會隨時間有些許的波動。表 3 為校正後之誤差結果，calibration RMSE 為 0.048，calibration Bias 為 0，validation RMSE 為 0.043，validation Bias 為 -0.003，顯示校正後之溫度精準度為 0.048 度。本專案計畫使用之光纖種類與 DTS 製作廠商在實驗室所使用的標準校正流程不同，在參數的估算上會有不同結果，然而校正過後之誤差計算均優於標準校正流程，因此，校正後的溫度數據具有極高可信度。



CTEMPs Calibration GUI Report 23-Jul-2015 12:04:22 Site Location: Martis Creek

DTS Data Summary:

Date Range:
15-Aug-2012 01:50:05
17-Aug-2012 15:58:04

Number of Traces:
467

Length of Fiber:
1524.48

User Defined Parameters:

Calibration Routine:
Three Section Explicit [Hausner et al., 2011]

Calibration Reference Location and Temperature:

	Index		Distance (m)		Tref
	Z ₁	Z ₂	Z ₁	Z ₂	
Ref. 1	12	26	11.7	25.9	tref 1
Ref. 2	35	45	35.1	45.2	tref 2
Ref. 3	716	724	726	734.1	tref 3
Val.	46	55	46.2	55.3	tref 2

Calibration Step Loss Data:

Step Loss:
Index Location: N/A
Fiber Distance: N/A

Equal Distance Temperature:
Index Location: N/A
Fiber Distance: N/A

Calibration Results Summary:

Calibration RMSE: 0.046
Calibration Bias: 0.000

Validation RMSE: 0.047
Validation Bias: 0.021

	Mean	Min	Max
Ref. 1	0.043	0.021	0.073
Ref. 2	0.055	0.025	0.101
Ref. 3	0.039	0.013	0.070
Ref. Val.	0.047	0.020	0.098

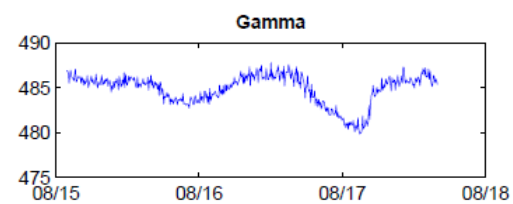
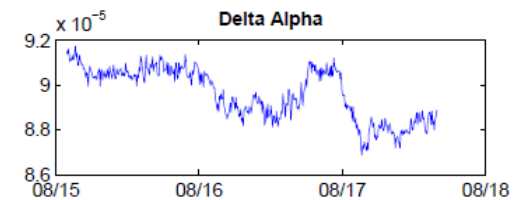
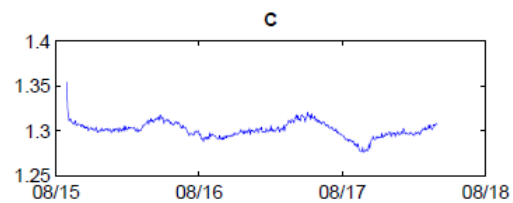
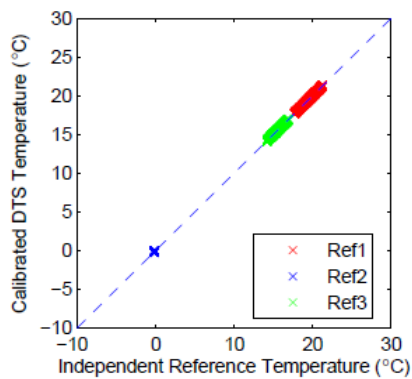
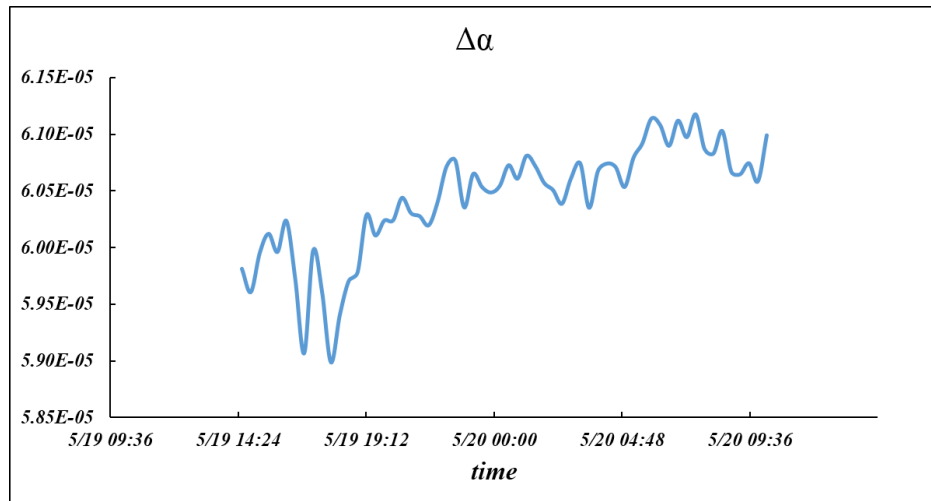


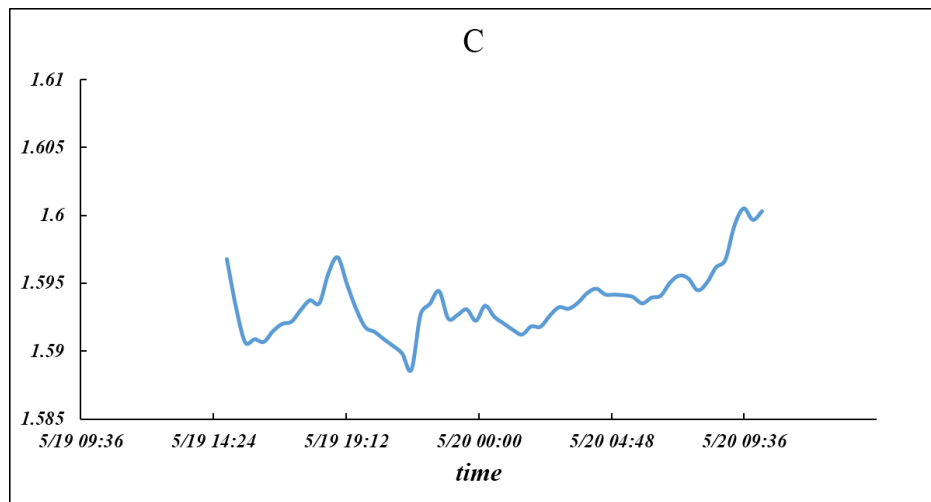
圖 32 使用手冊參數校正輸出範例



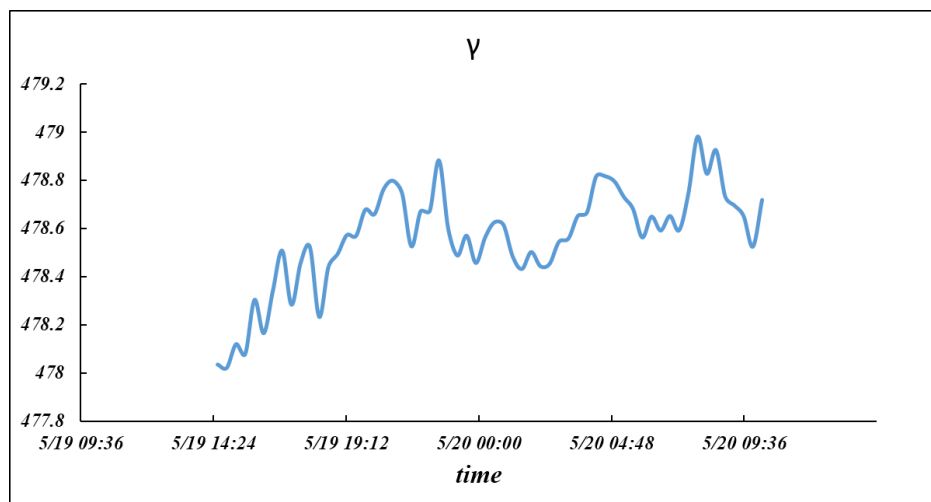
分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查



(a)



(b)



(c)

圖 33 校正參數結果: (a) $\Delta\alpha$ 、(b) C 、(c) γ

表 3 第一次試驗溫度校正與驗證之誤差分析

<i>Calibration RMSE</i>	<i>0.048</i>
<i>Calibration Bias</i>	<i>0</i>
<i>Validation RMSE</i>	<i>0.043</i>
<i>Validation Bias</i>	<i>-0.003</i>

5.2.3 試驗結果分析

圖 34 為第二次試驗地下水位監測資料，於第二次試驗期間(5/19~5/22)在五口監測井放置水位計監測地下水位變化，圖上紅色虛線與橘色虛線所標示時間分別為井 E-01 與井 E-01-1 開始注水與停止注水的時間。井內開始注水時，水位有明顯上升的情況，井 E-01 水位上升約 4 公尺，井 E-01-1 則上升約 3 公尺，停止注水後水位明顯恢復。此外，井 OE-1、井 OE-5、井 OE-2 在監測初期則受到降雨影響，使得地下水位有上升的情況。圖 35 為井 OE-1 所量測到絕對溫度對深度隨時間變化之量測結果。井 OE-1 的井深深度為 14.39 公尺，由圖上可觀察到在 5 月 20 日早上時，現地有發生極大的降雨事件，由於雨水溫度比井內地下水溫度高，因此井內溫度有明顯上升的情況。然而降雨所造成溫度上升的情況影響了對井下溫度分佈的判識，因此，後續針對井下溫度分佈的分析與透水不透水區段進行判識時，將去除降雨所造成之影響。將降雨所影響之效應去除後(圖 36)，可觀察到在降雨發生以前，井內之最低溫度與最高溫度變化區間約介於 22.95~23.2 度，井下 6 公尺~8 公尺處量測到溫度約為 23.2 度，隨著深度增加溫度逐漸降低，深度 9 公尺至井底 14 公尺處為最低溫 22.95 度。降雨造成井內溫度上升至 23.5 度，且整口井的溫度變化均勻，降雨過後溫度緩慢下降，於監測後期約為 23 度。由圖上可觀察到前後圖形之解析度並不相同，此原因為在 5/20 13:00 以前為量測井內水溫之背景值，因此 DTS 量測時間間隔為每 10 分鐘紀錄一筆量測資料，在圖形顯示上較為平滑。在 5/20 13:00 後配合中上游注水井(井 E-01、井 E-01-1)注入熱水實驗，為了精準獲取量測訊號，因此將 DTS 量測時間間隔調整為每 1 分鐘紀錄一筆量測資料。



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

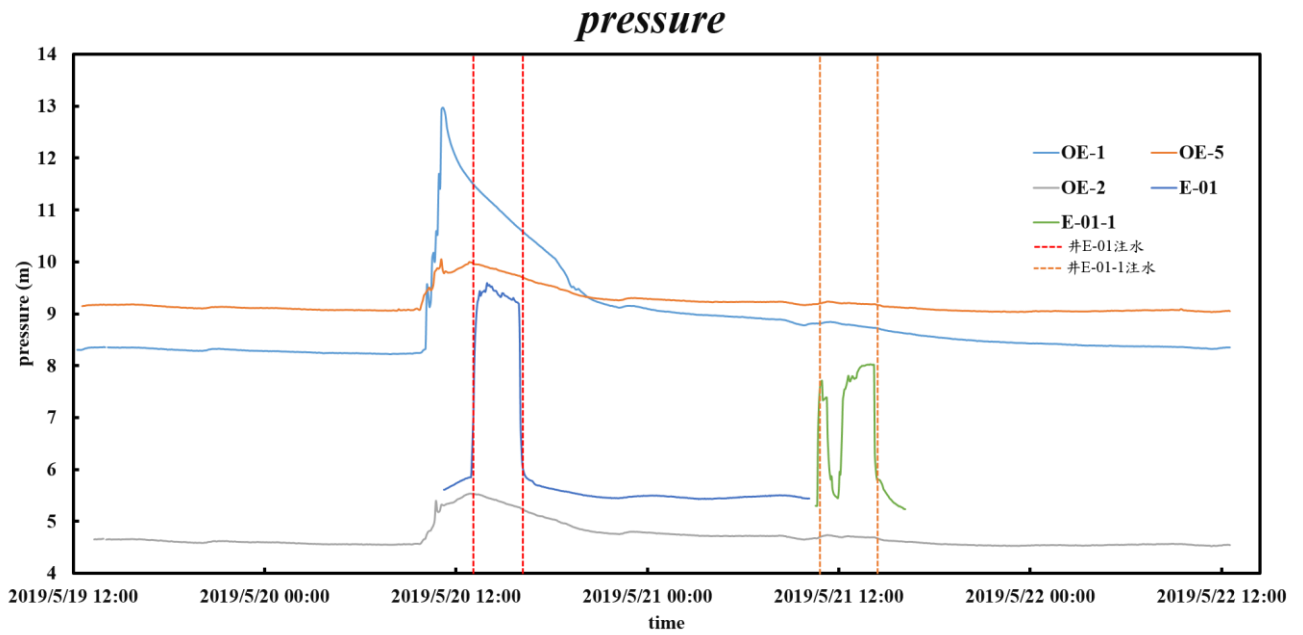


圖 34 第二次試驗地下水位監測資料

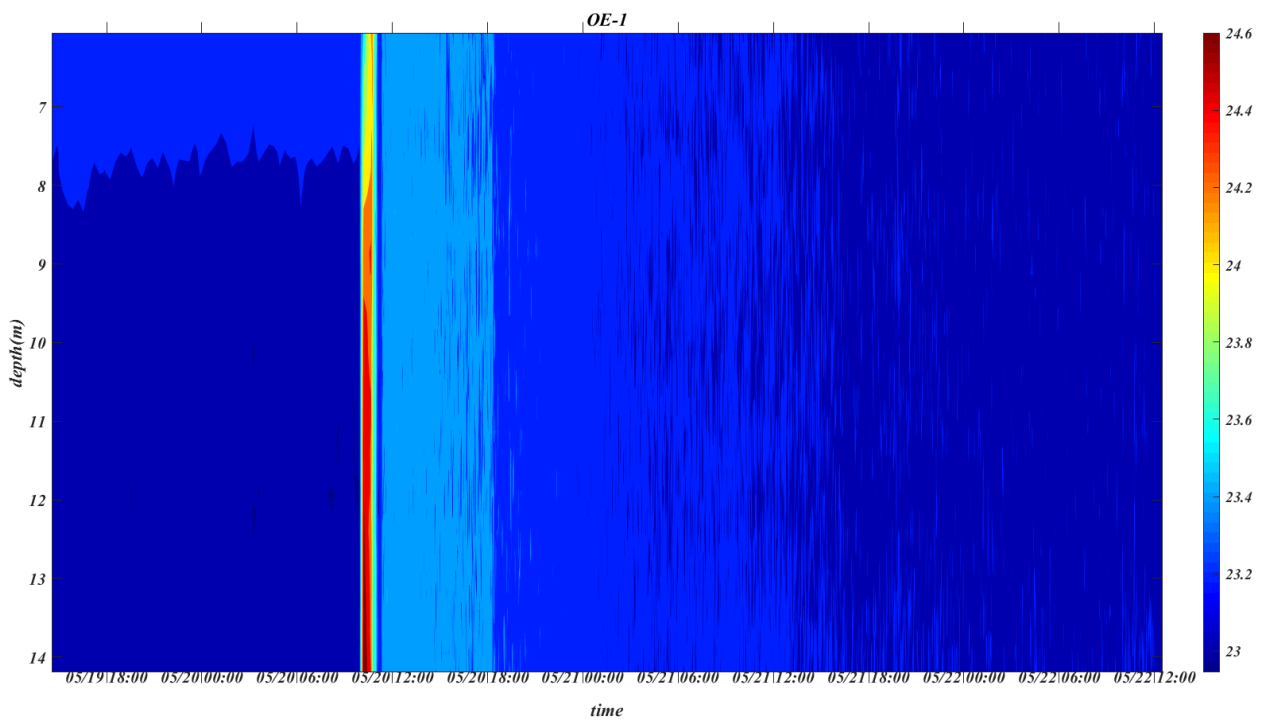


圖 35 井 OE-1 絕對溫度剖面

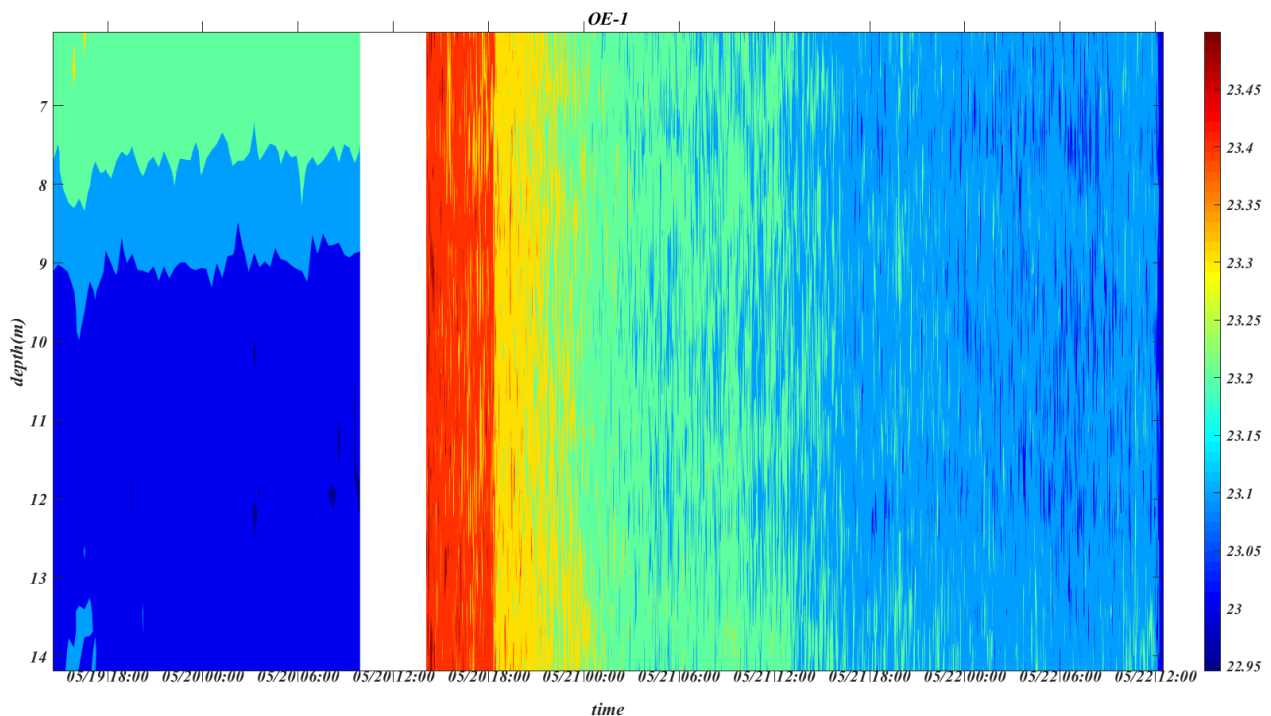


圖 36 井 OE-1 絕對溫度剖面(去除降雨效應)

圖 37 為井 OE-3 在去除降雨效應後所量測到絕對溫度對深度隨時間之變化。井 OE-3 的井深深度為 12.98 公尺，由圖上可觀察到在降雨事件發生前，井內之最低溫度與最高溫度變化區間約介於 23.9~24.7 度，隨著不同深度變化可量測到不同溫度，於最淺部 6~6.2 公尺處所量測到之溫度為最低溫 23.9 度，隨著深度增加井下溫度逐漸上升，在 8.5 公尺至井底 12.98 公尺處所量測到溫度為井內最高溫 24.7 度。降雨事件對井 OE-3 並未造成重大影響，降雨過後井下溫度分布仍然呈現穩定情況，在淺部(6 公尺~6.2 公尺)仍然量測到井下最低溫(23.9 度)；隨深度增加所量測到深部的區域(8.5 公尺~井底)仍為井下最高溫(24.9 度)。同樣的在 5/20 13:00 以前圖形較平滑為每 10 分鐘紀錄一筆量測資料，之後則配合注水實驗，調整為每 1 分鐘紀錄一筆量測資料。



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

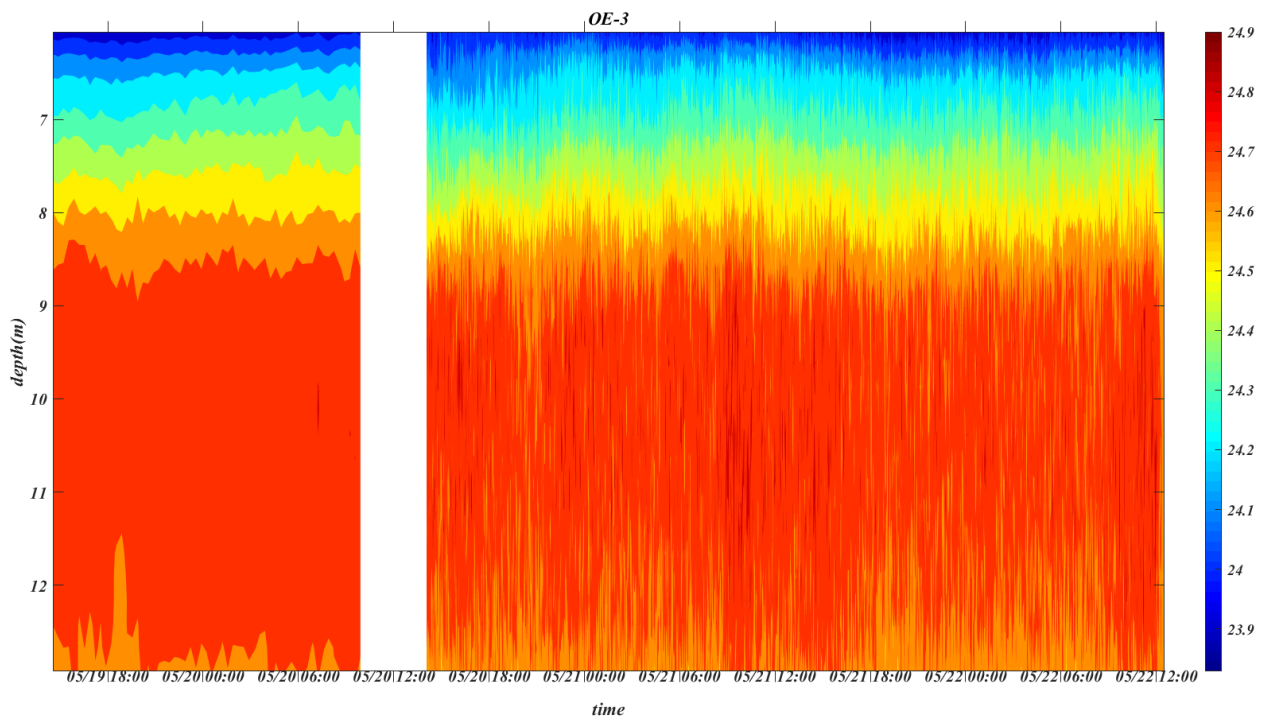


圖 37 井 OE-3 絕對溫度剖面

圖 38 為井 OE-5 在去除降雨效應後所量測到絕對溫度對深度隨時間之變化。井 OE-5 的井深深度為 15.11 公尺，由圖上可觀察到在降雨事件發生前，井內之最低溫度與最高溫度變化區間約介於 23.5~23.9 度，隨著不同深度變化可量測到不同溫度，於最淺部 6~6.2 公尺處所量測到之溫度為最低溫 23.5 度，隨著深度增加井下溫度逐漸上升，在 9 公尺至 12.8 公尺處所量測到溫度為井內最高溫 23.9 度，深度 13 公尺至井底溫度則下降為 23.8 度。降雨之後井下溫度分布則有些許變化，深度 6 公尺~12 公尺溫度約為 23.7 度~23.8 度，深度 12 公尺至井底溫度較高，約為 23.9 度。約 3~4 小時後溫度逐漸回復，且井內溫度分布亦相似於降雨前之溫度分布，深度 13 公尺至井底之溫度則仍然為較高溫(23.9 度)的情況。在 5/21 10:00 可觀察到有一溫度上升的訊號，溫度上升為 24.1 度，影響深度約為 8 公尺~13 公尺，此溫度上升訊號推測可能為 5/20 13:00 於注水井 E-01 所注熱水實驗所影響之溫度上升訊號，復井跨孔的熱示蹤劑試驗分析將是明年計劃之主要執行重點之一，本年度計畫將不針對此一現象進行解析。監測後期，由於井 OE-5 受到工廠堆高機碾壓，造成溫度量測異常，因此未能判別 5/21 10:40 於注水井 E-01-1 所注熱水實驗之溫度訊號。

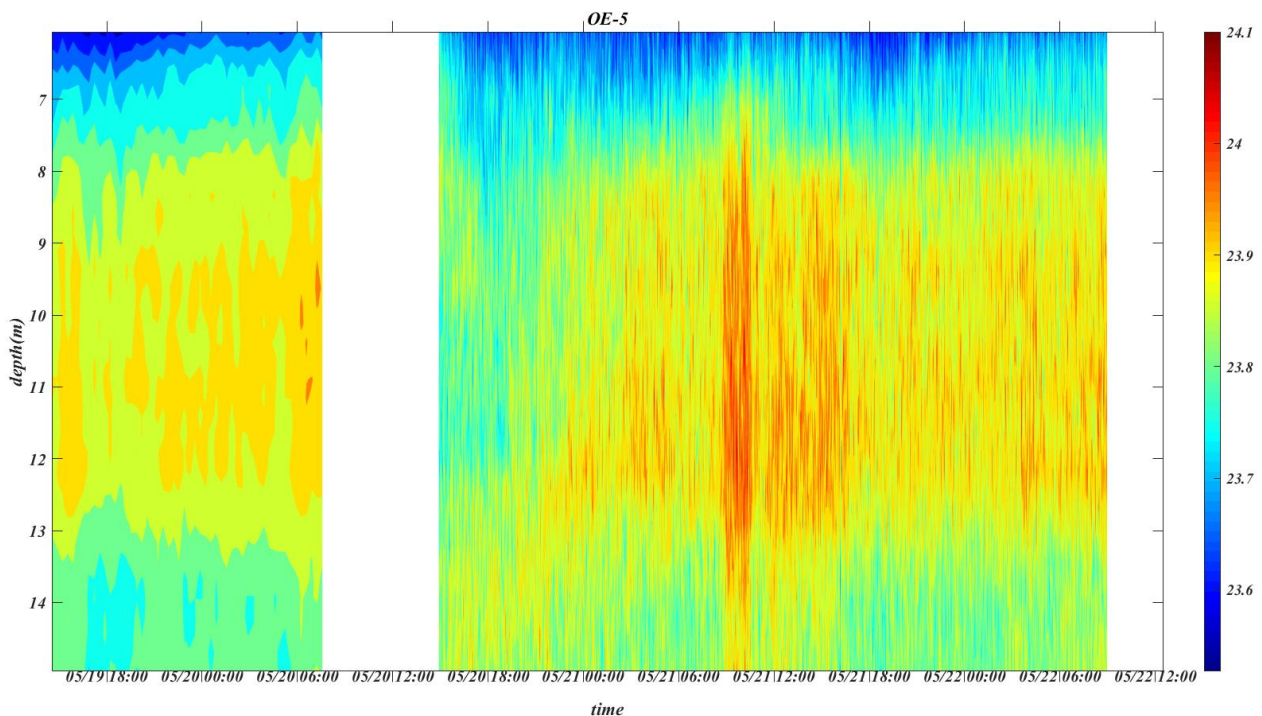


圖 38 井 OE-5 絕對溫度剖面

圖 39 為井 OE-2 在去除降雨效應後所量測到絕對溫度對深度隨時間之變化。井 OE-2 的井深深為 10.75 公尺，由圖上可觀察到在降雨事件發生前，井內之最低溫度與最高溫度變化區間約介於 24.65.5~24.95 度，隨著不同深度變化可量測到不同溫度，於淺部 6~7 公尺處所量測到之溫度為最低溫 24.65 度，隨著深度增加井下溫度逐漸上升，在 9 公尺至 10.75 公尺處所量測到溫度為井內最高溫 24.95 度。降雨之後井下溫度分布較無太大變化，深度 6 公尺~9 公尺溫度約為 24.8 度，深度 9 公尺至井底溫度較高，約為 24.95 度。降雨過後井內溫度分布亦相似於降雨前之溫度分布，深度 6 公尺~9 公尺處溫度約為 24.75 度，深度 9~10.75 公尺之溫度則仍然為較高溫(24.95 度)。在 5/21 10:00 可觀察到有一溫度上升的訊號，影響深度約為 9 公尺至井底，溫度上升至 25.15 度，此溫度上升訊號推測可能為 5/20 13:00 於注水井 E-01 所注熱水實驗所影響之溫度上升訊號，如同 OE-5 之溫度上升訊號，以此為基礎，復井跨孔的熱示蹤劑試驗分析為明年計劃之主要執行重點之一。在監測後期(約 5/22 12:00)同樣可觀察到深度 9~10.75 公尺有一溫度上升的訊號，溫度上升為 25.1 度，此溫度上升訊號推測可能為 5/21 10:40 於注水井 E-01-1 所注熱水實驗所影響之溫度上升訊號。由於廠區之地下水流方向為向北流動，在注水井(井 E-01-1、井 E-01)注入熱水時，井 OE-2 有接收到溫度上升訊號。



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

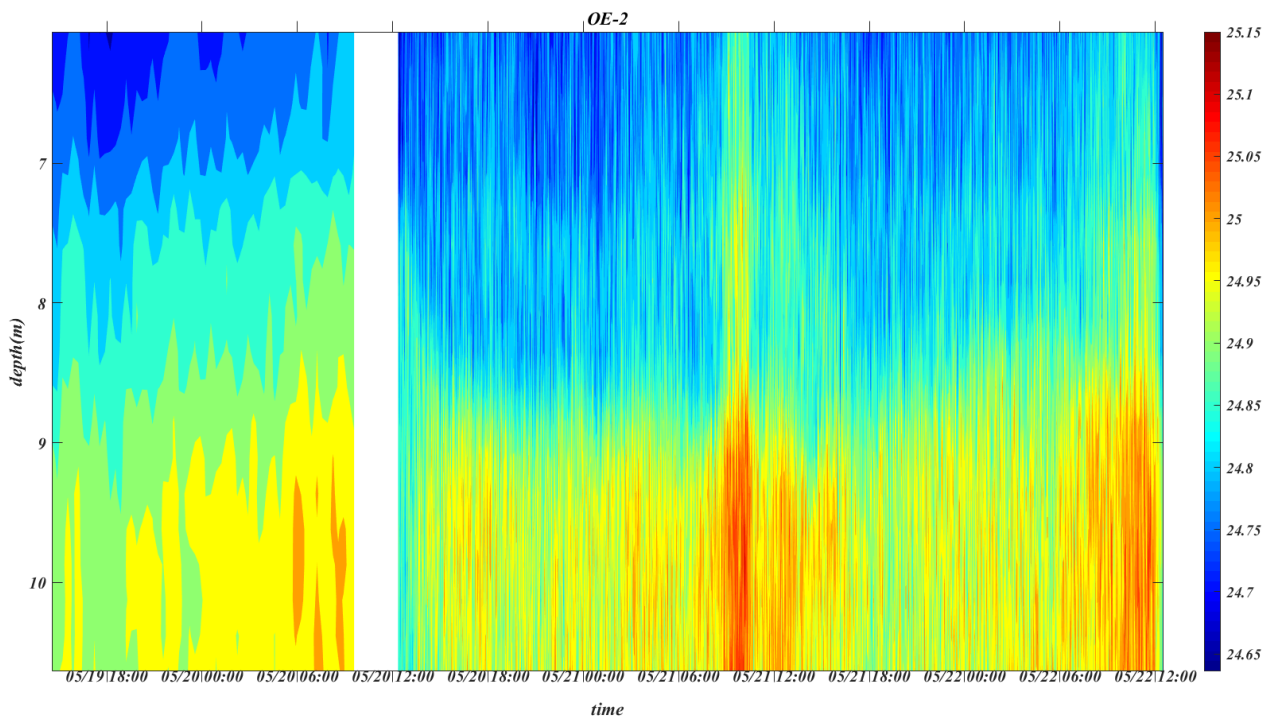


圖 39 井 OE-2 絕對溫度剖面

圖 40 為井 E-01 所量測到絕對溫度對深度隨時間變化之量測結果。井 E-01 的井深深度為 14.8 公尺，由於放置在井 E-01 內的光纖在監測前、後期需搭配光柵實驗移出，因此井 E-01 的監測結果僅呈現注入熱水實驗之後，溫度恢復的過程。井 E-01 於 5/20 13:00 開始注水，注入時間約 3 小時。由圖上可觀察到在注入熱水後，井下溫度上升至 30.5 度，接近井底(13 公尺~14.8 公尺)由於深度較深，熱水傳輸至井底過程可能溫度已消散，導致初始升溫過程緩慢。停止注水後，淺部(6 公尺~8 公尺)溫度急遽下降，深度 9 公尺~13 公尺之溫度則緩慢下降至 29 度。停止注水後 3 小時，深度 6 公尺~7.2 公尺之溫度已下降為 26.5 度，深度 8 公尺~10 公尺則下降為 27 度；深度 10 公尺~10.5 公尺之溫度下降為 28 度，深度 11 公尺~13 公尺所量測之溫度下降為 27 度。此結果顯示較淺部的區域(深度 6 公尺~7.2 公尺)有良好的透水性，其次為深部區域的 12 公尺~13 公尺；中間深度的 10 公尺~10.5 公尺之溫度變化則較為緩慢。停止注水約 8 小時後，淺部的區域溫度已下降至 25 度，深部的區域溫度同樣已下降至 25 度；中間深度所量測到的溫度依然維持 26 度直至監測結束。

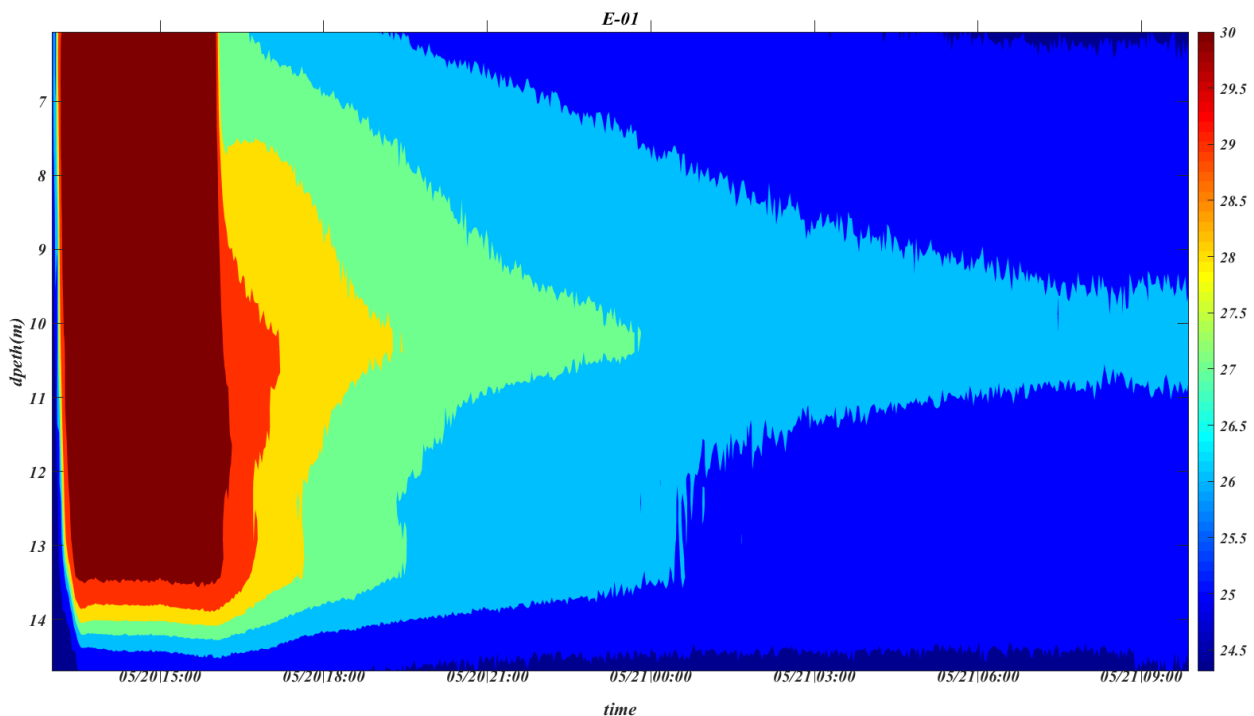


圖 40 井 E-01 絕對溫度剖面

圖 41 為井 E-01-1 所量測到絕對溫度對深度隨時間變化之量測結果。井 E-01 的井深深度為 15.39 公尺，由於放置在井 E-01-1 內的光纖在監測前、後期需搭配光柵實驗移出，因此井 E-01-1 的監測結果僅呈現注入熱水實驗之後，溫度恢復的過程。井 E-01-1 於 5/21 10:40 開始注水，注入時間約 3 小時。由圖上可觀察到在注入熱水後，井下 6 公尺~12 公尺溫度上升至 29.5 度，深度 12 公尺~14.8 公尺溫度則上升至 29 度，15 公尺處，由於深度較深，溫度上升至約 28.5 度。停止注水後，6 公尺~7.2 公尺溫度快速下降為 26.5 度，深度 12 公尺~15 公尺溫度則緩慢下降至 28 度。停止注水約 3 小時後，深度 6 公尺~7.2 公尺之溫度已下降為 25.5 度，深度 12 公尺~15 公尺則下降為 26.5 度；隨著時間演變，在 5/21 18:00，深度 6 公尺~8 公尺處溫度已下降至 25 度，深度 8 公尺~9 公尺處為 25.5 度，深度 12 公尺~15 公尺處溫度為 25.5 度。深度 9 公尺~11 公尺溫度則為 26 度。在 5/22 00:00 至監測後期可觀察到，深度 6 公尺~7.3 公尺處溫度已穩定維持至 25 度，深度 8 公尺~9 公尺處為 25.5 度，深度 11 公尺至井底溫度為 25.5 度。深度 9 公尺~11 公尺溫度則為 26 度。此結果顯示深度 6 公尺~7.2 公尺有良好的透水性，其次為深度 8~9 公尺、以及深度 11 公尺~15 公尺；深度的 9 公尺~11 公尺之溫度變化則較為緩慢。



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

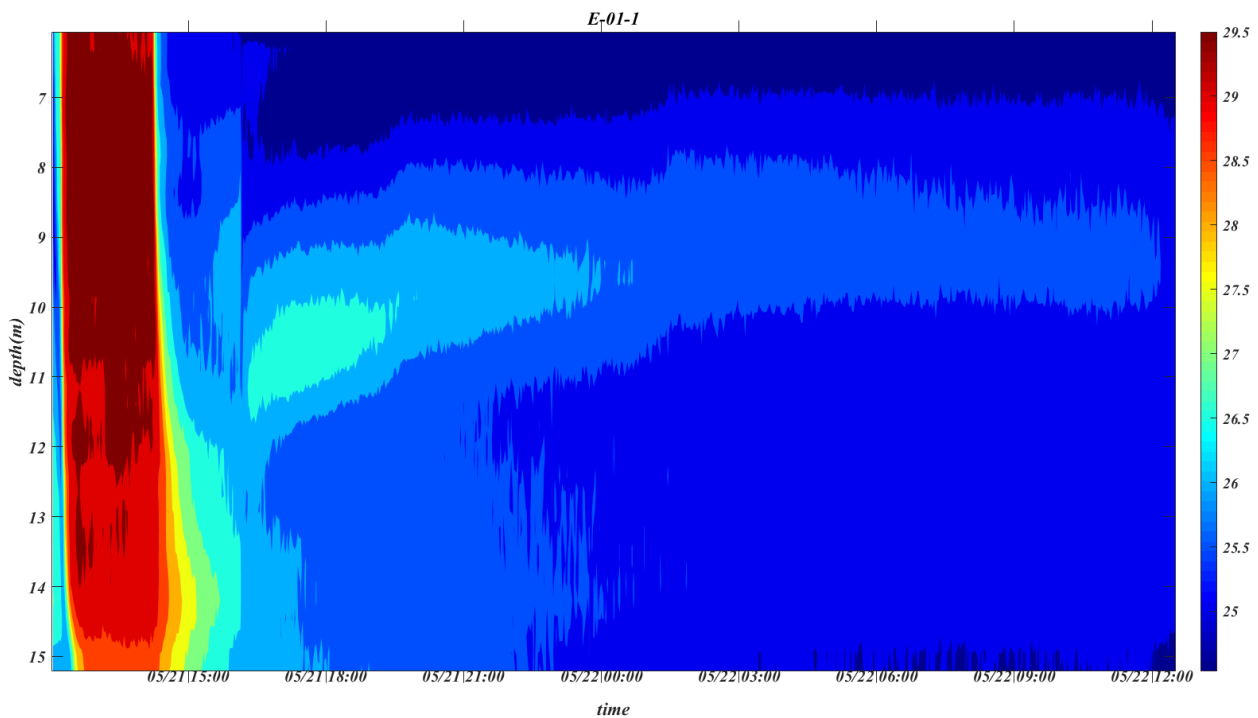


圖 41 井 E-01-1 絕對溫度剖面

由廠區中游注入井(井 E-01、井 E-01-1)注入熱水，監測中、下游六口井井內地下水溫度變化，結果顯示注入井之溫度變化在停止注水後，不同深度之溫度恢復情況各不相同，根據恢復的速率快慢，可辨識透水與不透水區段。井 E-01 在深度 6 公尺~7.2 公尺、深度 12 公尺~13 公尺具有良好的透水能力，在停止注水後溫度下降相當明顯；深度 10 公尺~10.5 公尺則透水性較差，於監測後期所量測到之溫度亦無太大變化。井 E-01-1 同樣藉由停止注水後可觀察到井內不同深度下溫度恢復情況不同，在深度 6 公尺~7.2 公尺為溫度恢復最快速的區段，因此可判定為較佳的透水區段，其次為深度 8~9 公尺以及深度 11 公尺~15 公尺深度 9 公尺~11 公尺則是溫度恢復過程緩慢，其透水性較差。下游所佈設之監測井，在實驗初期量測背景值資料時，受到降雨事件影響，使得井管內有雨水流入，由於雨水溫度高於地下水水溫，因此井內溫度有明顯上升的趨勢。井 OE-1 即為受到強降雨事件影響，造成井內溫度分布改變；相反的，由於地勢以及井所在位置的影響，井 OE-3 則較沒有受到太大的影響。井 OE-5、井 OE-2 在監測期間有明顯接收到溫度上升之訊號。此溫度上升現象推測是由於中游注入井(井 E-01、井 E-01-1)注入熱水所影響，根據廠區地下水流方向研判，向北流動之地下水流會攜帶注水井(井 E-01、井 E-01-1)所注之熱水到達監測井(井 OE-5、井 OE-2)，下游位置之井 OE-1、井 OE-3 可能因距離較遠與方向上的差異，使得熱水所攜帶之熱能於傳輸過程中被地下水流所消散，因此並沒有收到溫度上升之訊號。復井跨孔的熱示蹤劑試



驗分析為明年計劃之主要執行重點之一。

5.3 第三次現地試驗

有鑒於第二次試驗針對井 E-01 與 E-01-1 暗管注入熱水之成果，本團隊安排了第三次試驗，針對廠區中間中央鍋爐附近之監測井進行光纖佈設，並於中上游區之監測井進行注水，試驗時間為 10/1~10/4。

5.3.1 現地光纖佈設

圖 42 為第三次現地光纖佈設示意圖，此次現地試驗為監測中央蓄水池與蒸汽鍋爐附近監測井實驗，透過對監測井內進行注水，觀察停止注水後各個深度之溫度恢復過程，並判別井下透水與不透水區段。如圖所示，黑色標示為 DTS 所佈設之監測順序，將帳篷營地設置於井 E-01 附近，首先佈設井 MW-03，接著依序為井 MW-05、井 E-01-2、井 E-01-1、井 E-04。紅色標示之井 E-01-2、井 E-04 與井 MW-03 為注熱水之注入井。第二次現地試驗乃透過監測井之暗管進行注水，然而在此次實驗中，由於井 MW-03 為環保署監測井，並無設置井內暗管，且工廠控制暗管水閥有故障疑慮無法長時間進行注水，因此在第三次現地注水實驗中，注水實驗是以循環蓄水池提供之水源進行井管內注水。根據廠區中上游相對位置評估，為了不影響注入之熱水在地層傳輸過程中受到影響，因此以井 E-01-2 與井 E-04 首先做為注入井，井 MW-03 則因位於上游，因此為第三口注入井。實驗過程首先在 10/1 15:33 以每分鐘 5.1 公升，溫度 35.3 度的熱水進行井 E-01-2 的注水實驗，以循環蓄水池提供之水源連接水管直接將熱水注入井內，持續 3 小時。10/2 10:13 以每分鐘 4.2 公升，溫度 34.4 度的熱水進行井 E-04 的注水實驗，注水時間持續約 3 小時。10/4 20:58 以每分鐘 4.92 公升，溫度 33.46 度的熱水進行井 MW-03 的注水實驗，注水時間持續約 3 小時。由於蒸汽鍋爐視工廠運作情況進行水溫加熱，因此循環蓄水池在供給水源上之溫度會隨著工廠作業情況不同而改變。



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

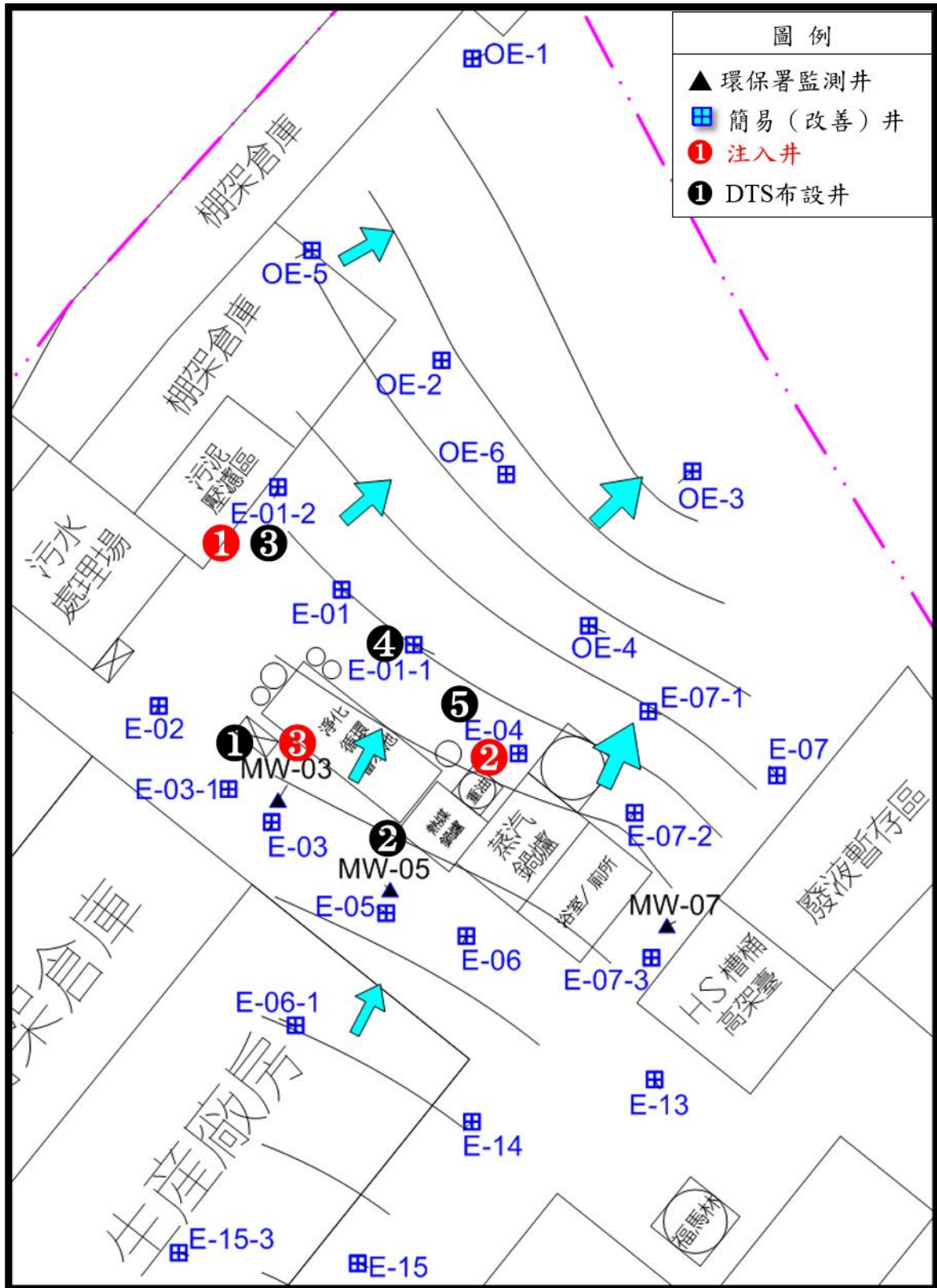


圖 42 第三次現地光纖佈設



研究內容



(a)

(b)



(c)

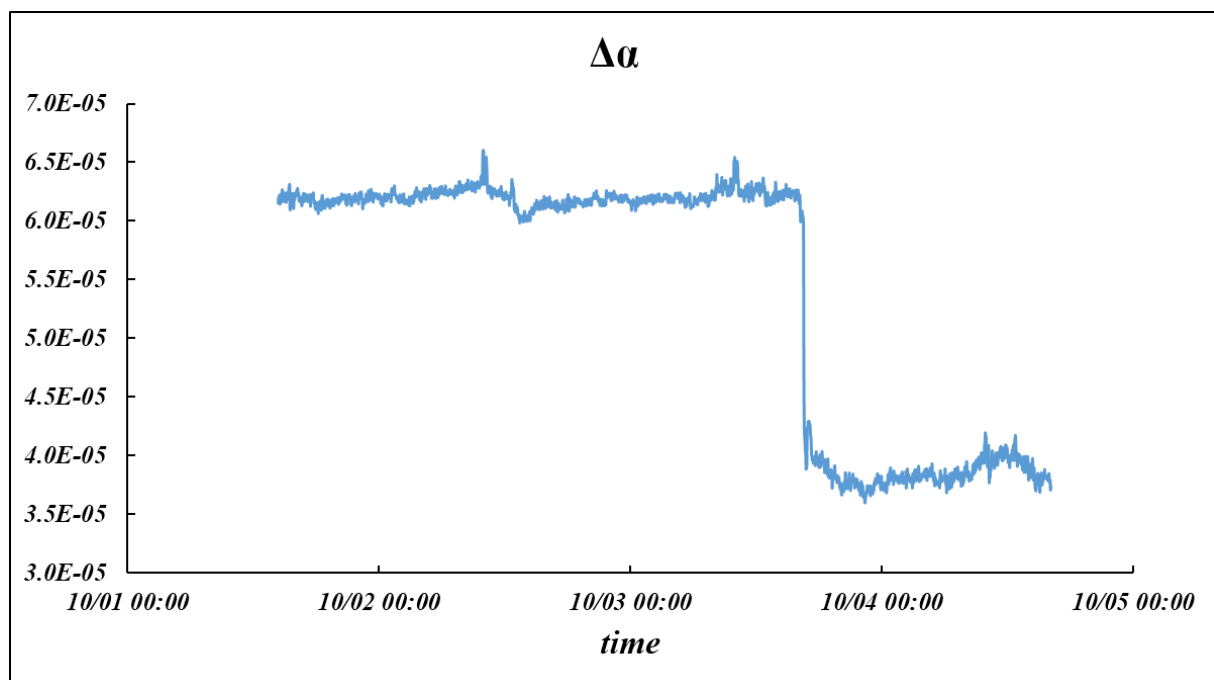
圖 43 現地試驗照片: (a)、 (b)暗管注水(c)光纖佈設



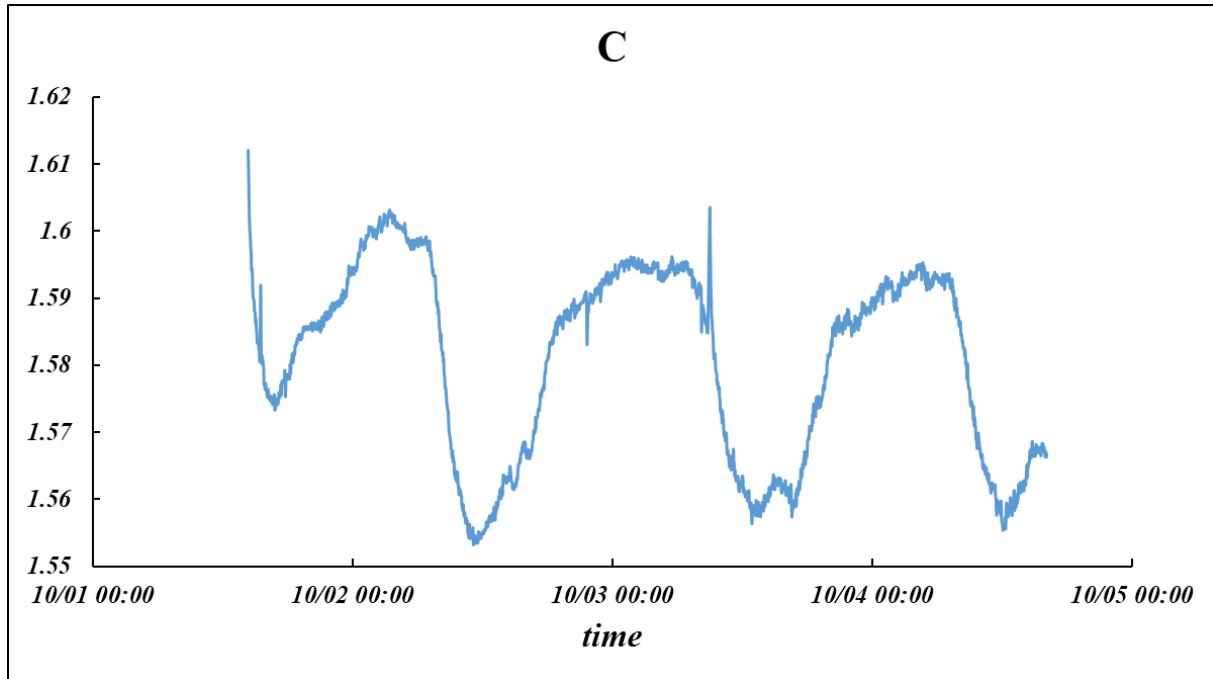
分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

5.3.2 試驗校正結果

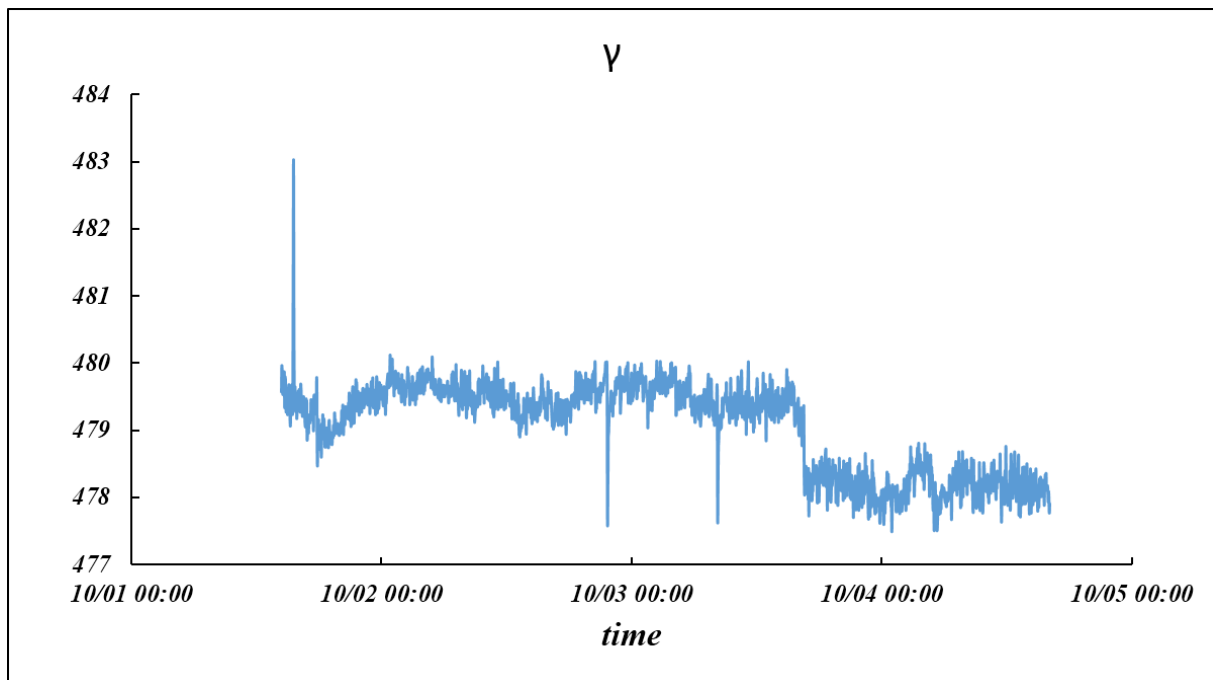
藉由 CTEMPs MATLAB® DTS Toolbox 進行溫度校正可估算差分衰減($\Delta\alpha$)、光子訊號偵測敏感度(C)、雷射光子狀態(γ)等多項參數。圖 44 為本研究校正過後的參數結果，圖 44a 為差分衰減($\Delta\alpha$)的校正結果，差分衰減($\Delta\alpha$)受到光纖纜線種類及佈設長度有關，隨著光纖纜線長度增加，在末端處或經熔接後，皆會使得雷射訊號強度減弱，產生階能損失。此外，在圖上可觀察到在 10/3 16:30 有一突然衰減的訊號，由於廠區施工時的動線會與光纖佈設動線交疊，為保護光纖不受到堆高機碾壓，在光纖移動的過程中不慎拉扯光纖而致損害，因此造成雷射訊號的強度明顯減弱。差分衰減($\Delta\alpha$)估算之範圍在 $3.6 \times 10^{-5} \sim 6.6 \times 10^{-5}$ 。圖 44b、圖 44 圖 33c 為光子訊號偵測敏感度(C)、雷射光子狀態(γ)之估算結果，分別界於 1.55~1.61 與 477~483，此值主要受到 FO-DTS 主機之影響，理想狀態下應為一定值，然而，受到溫度與外在環境之影響，會隨時間有些許的波動。表 4 為校正後之誤差結果，calibration RMSE 為 0.057，calibration Bias 為 0，validation RMSE 為 0.078，validation Bias 為 -0.002，顯示校正後之溫度精準度為 0.057 度。本次實驗之校正結果，除了在光纖受到拉扯損壞後有訊號衰減較大的情況外，其餘的參數估算結果之範圍皆優於標準校正流程。綜觀三次現地試驗之溫度校正結果，三次試驗之參數值經推估後的誤差範圍皆優於標準校正流程，且校正後溫度之均方根誤差最大僅 0.057，因此，經校正後所獲得之溫度數據具高度的可信度，可提高後續量測分析之精準度。



(a)



(b)



(c)

圖 44 校正參數結果: (a) $\Delta\alpha$ 、(b) C 、(c) γ



表 4 第二次試驗溫度校正與驗證之誤差分析

<i>Calibration RMSE</i>	0.057
<i>Calibration Bias</i>	0
<i>Validation RMSE</i>	0.078
<i>Validation Bias</i>	-0.002

5.3.3 現地試驗結果分析

圖 45 為第三次試驗地下水位監測資料，於第三次試驗期間(10/1~10/4)在五口監測井放置水位計監測地下水位變化，圖上紅色、黃色、橘色虛線所標示時間依序為井 E-01-2、井 E-04、井 MW-03)開始注水與停止注水的時間。井 E-01-2 在監測中後期(約 10/3 16:30)，由於工廠作業動線的影響，光纖與所有量測設備需抽離監測井，因此影響到水位計監測資料，故在中後期並無井 E-01-2 地下水位資料。井內開始注水時，水位有上升的情況，井 E-01-2 水位上升約 0.5 公尺，井 E-04 上升約 0.4 公尺，井 MW-03 則上升 0.6 公尺，停止注水後水位明顯恢復。由圖上可觀察到井 MW-03 在注水時，井 MW-05、井 E-01-2、井 E-01-1 與井 E-04 所監測之地下水位似乎有些微上升的情況，此現象可為後續廠區內的地下水流場提供一參考資料。圖 46 為井 E-01-2 所量測到絕對溫度對深度隨時間變化之量測結果。井 E-01-2 的井深深度為 10.73 公尺，從 10/1 15:33 開始注水，3 個小時後停止注水，停止注水後，各個深度之溫度變化各不相同。由圖上可觀察到井內之最低溫度與最高溫度變化區間約介於 24.3~35.7 度，由於井 E-01-2 為此次注水井之一，因此主要探討注水後井內溫度變化。於井管內注入熱水使得井內溫度上升至 35 度，井底(10.5 公尺~10.73 公尺)區段可能是由於淤泥堆積，因此熱水溫度無法傳達至底部。停止注水後約 3 個小時(10/1 21:00)，深度 6 公尺~6.8 公尺溫度已下降為 27 度，深度 7 公尺~7.5 公尺溫度下降為 28 度，深度 7.5 公尺~8.7 公尺溫度下降為 29 度，深度 8.7 公尺~9.5 公尺溫度下降為 30 度。深度 9.5 公尺至井底溫度下降為 31 度。在 10/2 03:00，深度 6 公尺~8.8 公尺溫度已下降為 26 度，深度 8.8 公尺至井底溫度同樣已下降為 27 度~28 度，直到 10/2 09:00，深度 6 公尺~8 公尺溫度下降至 25 度，深度 8 公尺至井底為 26 度。此結果顯示淺部深度降溫的情況非常快速，深度 6 公尺~7 公尺為透性良好的區段，其次為深度 8 公尺、9 公尺及 10 公尺，井底則為透水性較差的區段。由於井 E-01-2 深度只有 10.73 公尺，屬於較淺的監測井，對比其他深度超過 11 公尺的監測井，透水與不透水區段趨勢相似，淺部區域較為透水，中間深度則較不透水。



研究內容

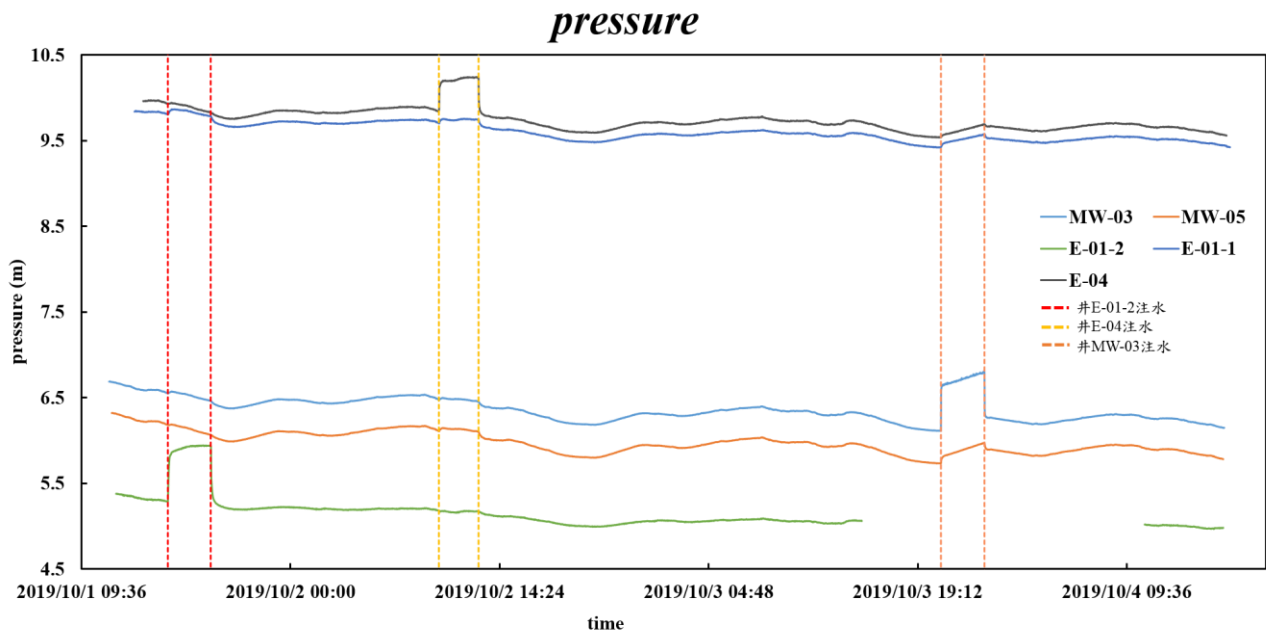


圖 45 第三次試驗地下水位監測圖

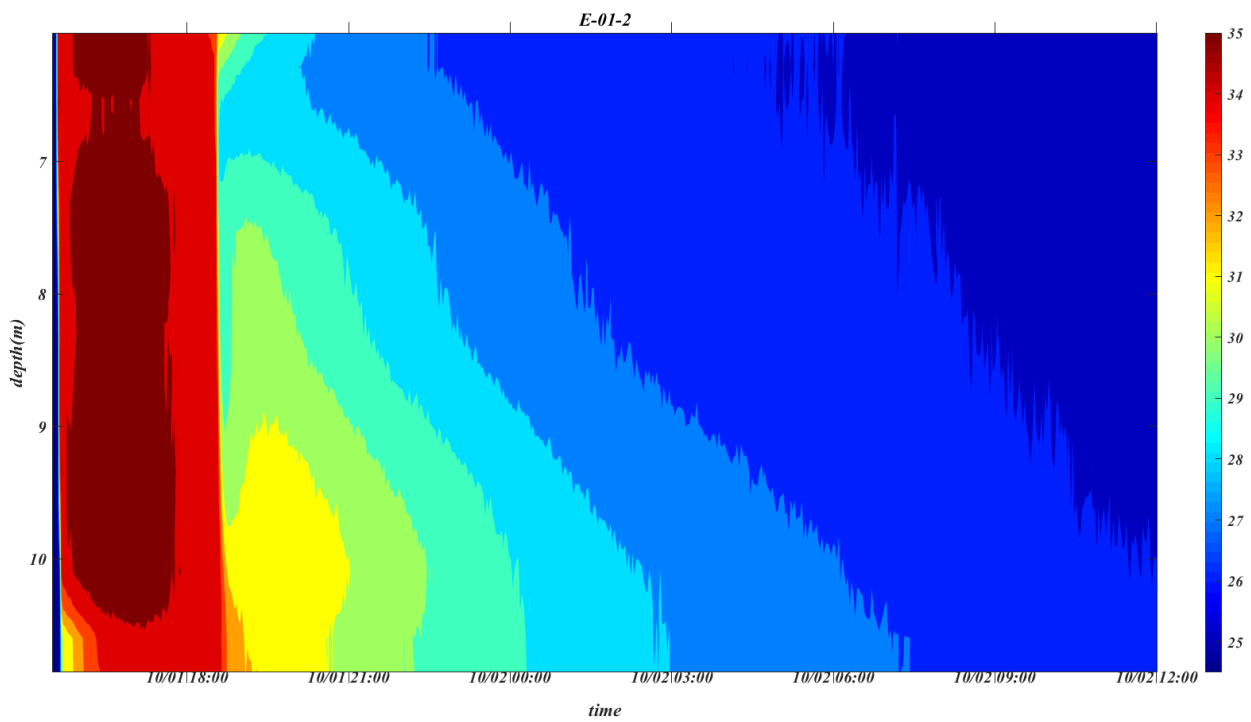


圖 46 井 E-01-2 絕對溫度



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

圖 47 為井 E-04 所量測到絕對溫度對深度隨時間變化之量測結果。井 E-04 的井深深度為 15.24 公尺，從 10/2 10:13 開始注水，約 3 個小時後停止注水，停止注水後，各個深度之溫度變化各不相同。由圖上可觀察到井內之最低溫度與最高溫度變化區間約介於 23.9~43 度。井 E-04 在注水時，初始量測注水之水溫為 34.4 度，但由於工廠進行運作，生產廠房與蒸汽鍋爐有大量使用水與加熱熱水，水源溫度變化極大，因此可發現在注水時，水溫有逐漸上升的趨勢，約莫在停止注水前半小時，注入之熱水溫度已達到 41.9 度。接近井底(14 公尺~15 公尺)由於深度較深，熱水傳輸至井底過程可能溫度已逐漸消散，導致初始升溫過程緩慢，亦或井底受到汙泥堆積，導致注入之熱水無法抵達井底。停止注水約 2 小時後(10/2 15:00)，深度 6 公尺~7.2 公尺溫度下降為 28 度，深度 7.2 公尺~9.2 公尺溫度下降為 30 度，深度 9.2 公尺~12 公尺溫度同樣下降為 28 度，深度 12 公尺~13 公尺溫度下降為 30 度，深度 13 公尺~14 公尺則下降為 32 度，深度 14 公尺至井底則較無變化。在 10/2 21:00，深度 6 公尺~8 公尺與深度 10 公尺~13 公尺所量測到之溫度下降為 26 度；深度 8 公尺~9.5 公尺與深度 13 公尺~14 公尺溫度則下降為 28 度~29 度，至 10/3 06:00 時，溫度變化趨勢亦相似。此結果顯示，井 E-04 在較淺部(深度 6 公尺~8 公尺)與 10 公尺~13 公尺擁有較佳的透水性；深度 8 公尺~9.5 公尺與深度 13 公尺~14 公尺透水性較差。

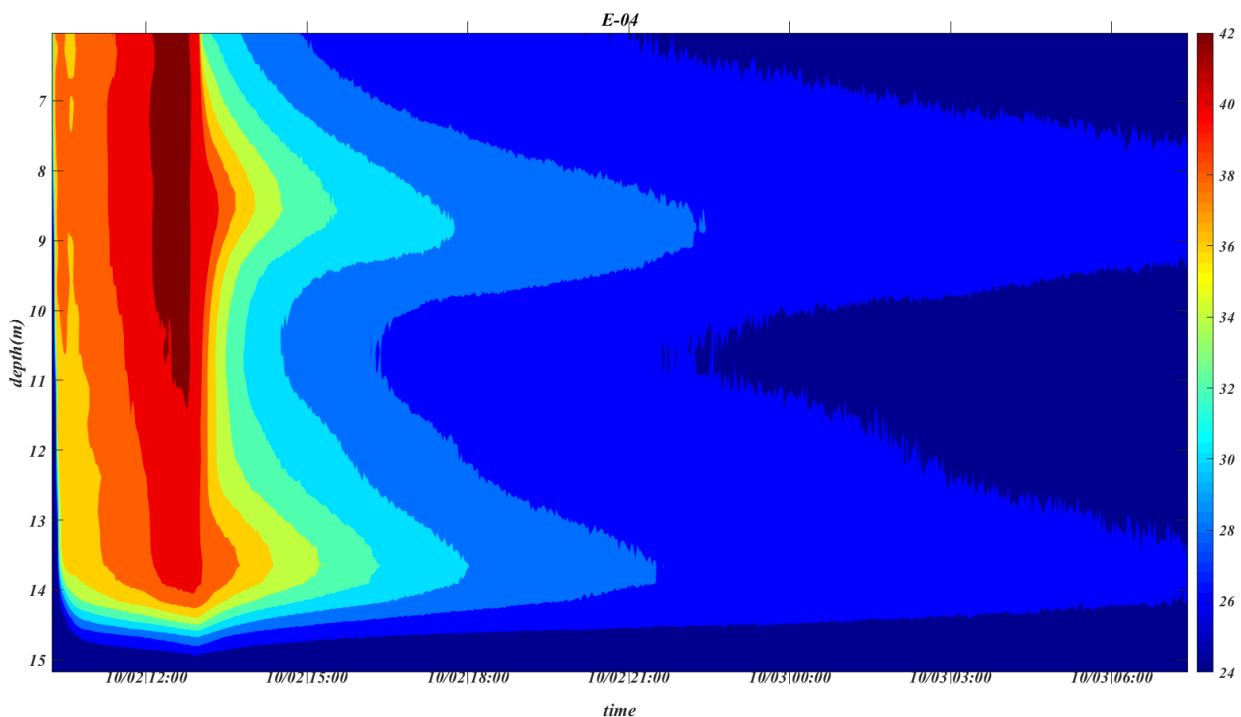


圖 47 井 E-04 絕對溫度剖面



圖 48 為井 MW-03 所量測到絕對溫度對深度隨時間變化之量測結果。井 MW-03 的井深深度為 11.83 公尺，於 10/3 20:58 開始注水，3 個小時後停止注水，停止注水後，各個深度之溫度變化各不相同。由圖上可觀察到井內之最低溫度與最高溫度變化區間約介於 23.8~32 度，由於井 MW-03 為此次注水井之一，因此主要探討注水後井內溫度變化。於井管內注入熱水使得井內溫度上升至 32 度，井底(11 公尺~11.83 公尺)可能是由於淤泥堆積，因此熱水溫度無法傳達至底部。停止注水後約 3 個小時(10/4 03:00)，深度 6 公尺~7 公尺溫度已下降為 25 度，深度 7 公尺~8 公尺溫度下降為 26 度，深度 8 公尺~9 公尺溫度下降為 27 度，深度 9 公尺至井底溫度下降為 28 度。在 10/4 09:00，深度 6 公尺~8.5 公尺溫度已下降為 25 度，深度 9.2 公尺至井底溫度同樣已下降為 25 度，然而中間深度(8.5 公尺~9.2 公尺)溫度依然維持在 26 度~27 度，一直到監測後期(10/4 15:00)，溫度亦緩慢下降至 25 度，顯示中間深度降溫的情況非常緩慢。因此可判定深度 6 公尺~8.5 公尺為透水性良好的區域，其次為深度 9.2 公尺~11.83 公尺，中間深度 8.5 公尺~9.2 公尺則是透水性較差的區域。

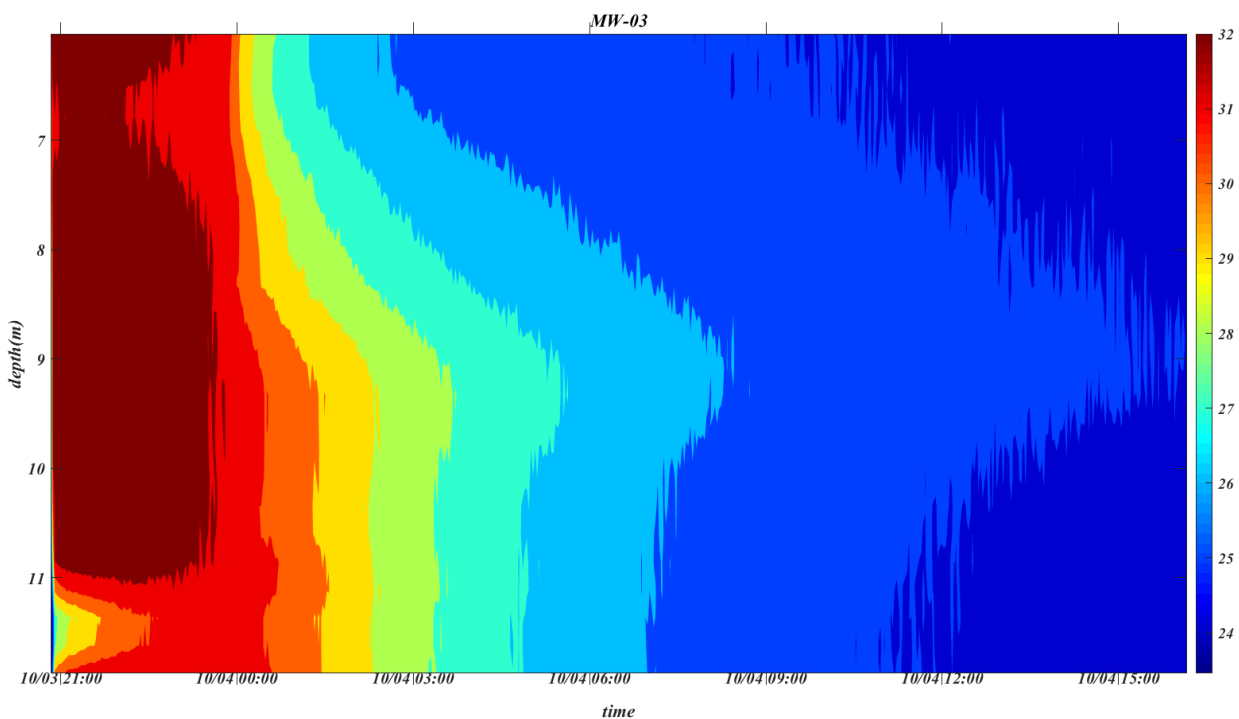


圖 48 井 MW-03 絕對溫度剖面



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

圖 49 為井 MW-05 所量測到絕對溫度對深度隨時間變化之量測結果。井 MW-05 的井深深度為 11.54 公尺，由圖上可觀察到井內之最低溫度與最高溫度變化區間約介於 22.8~25.4 度，井 MW-05 所在位置靠近生產廠房至蒸氣鍋爐間埋設輸送熱水管線位置，靠近地表溫度極高，間接影響了地層往下數公尺。深度 6 公尺~6.7 公尺為井內最高溫(25.4 度)，隨著深度增加，溫度逐漸下降，深度 9.7 公尺至井底量測到最低溫度為 24 度。由於井 MW-05 非注水井，且位於地下水上游位置，因此注入井所注之熱水並不會造成井 MW-05 有溫度上升之情況。在圖中可觀察到一溫度上的不連續 (約 10/3 18:00 前)，井下各個深度之溫度分布似乎有平移的現象，深度 6 公尺~深度 7 公尺所量測之溫度下降為 24.4 度，深度 9.5 公尺~11.5 公尺溫度下降至 22.8 度~23.4 度，造成此溫度變化的原因為 10/3 16:36 時，由於工廠作業需要必須移動光纖，在移動的過程中拉扯到光纖，導致光纖受損，因此在量測上出現溫度平移的情況。圖 50 為光纖隨傳遞距離與訊號衰減關係，兩條標示線所標示範圍為光纖衰減之能量，由圖上可觀察到在光纖受損前(圖 50a)，反史托克散射訊號能量衰減為 1.12db/KM；在光纖受損後(圖 50b)，反史托克散射訊號之能量衰減變為 13.12db/km。因此，光纖受損使得雷射光在傳遞過程中能量衰減增大，造成溫度量測受到影響。

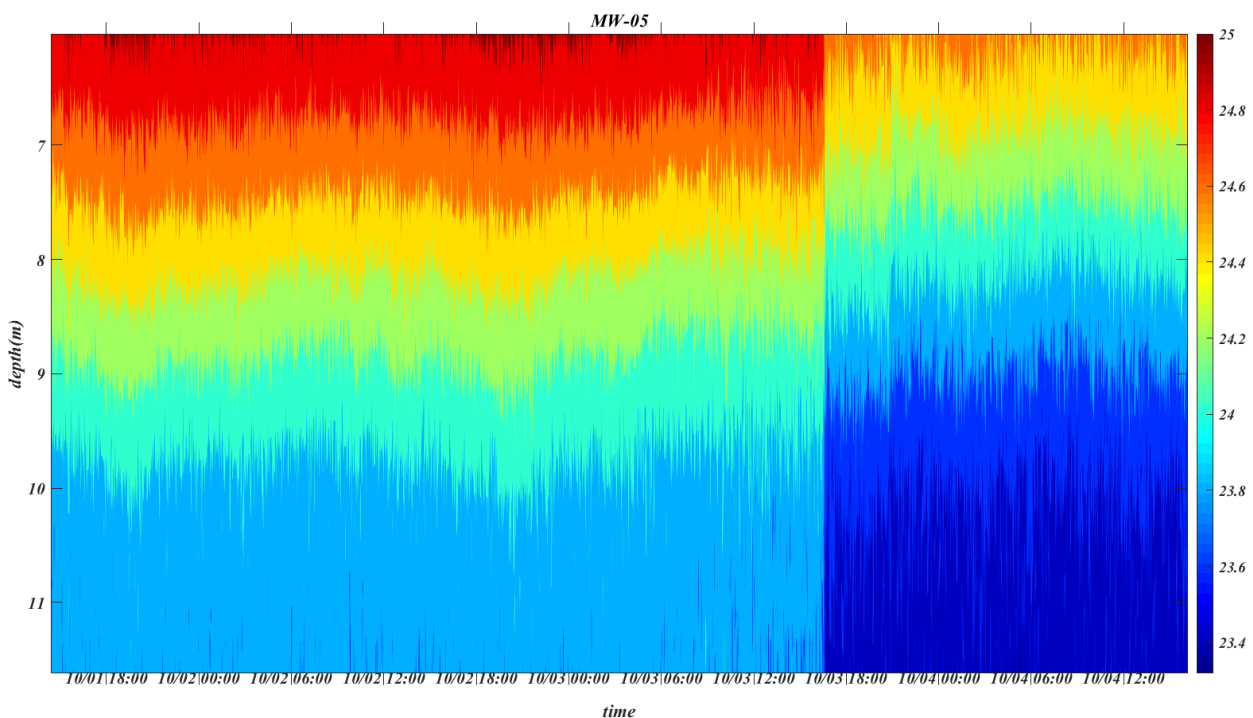
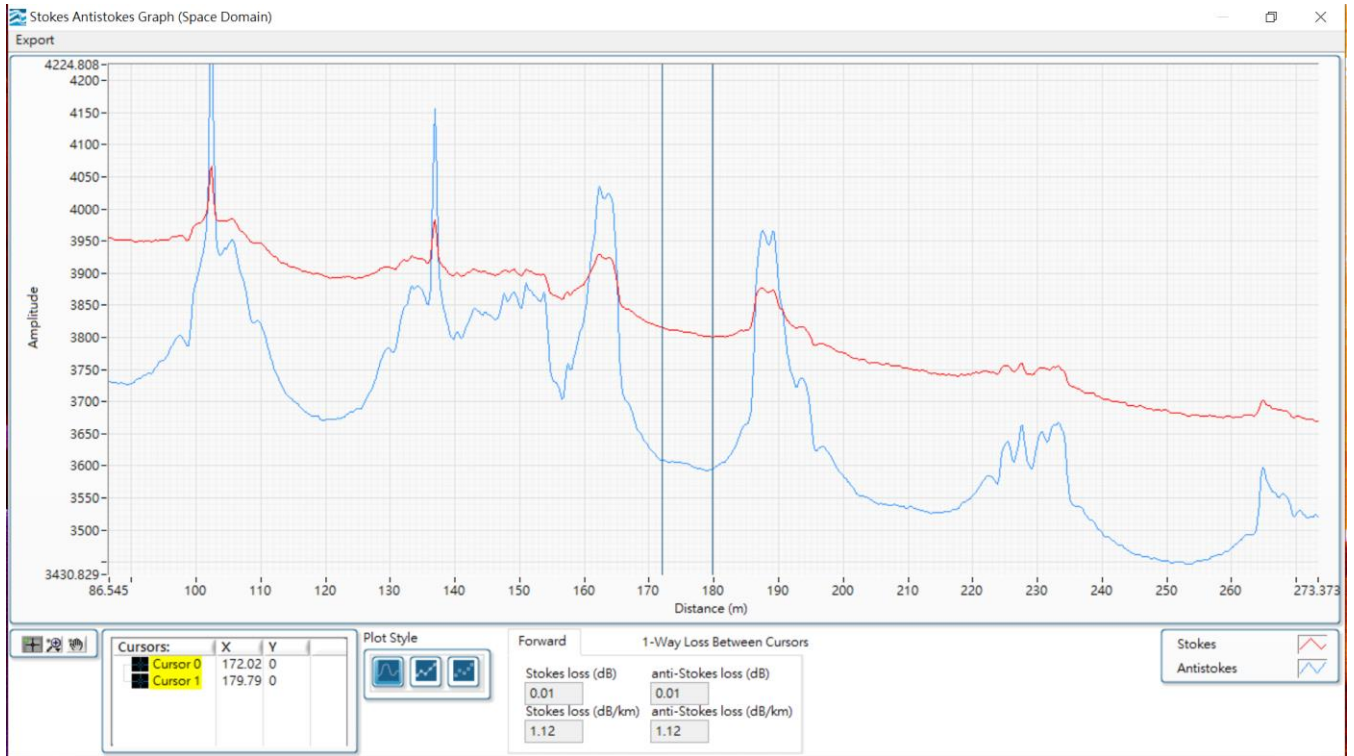


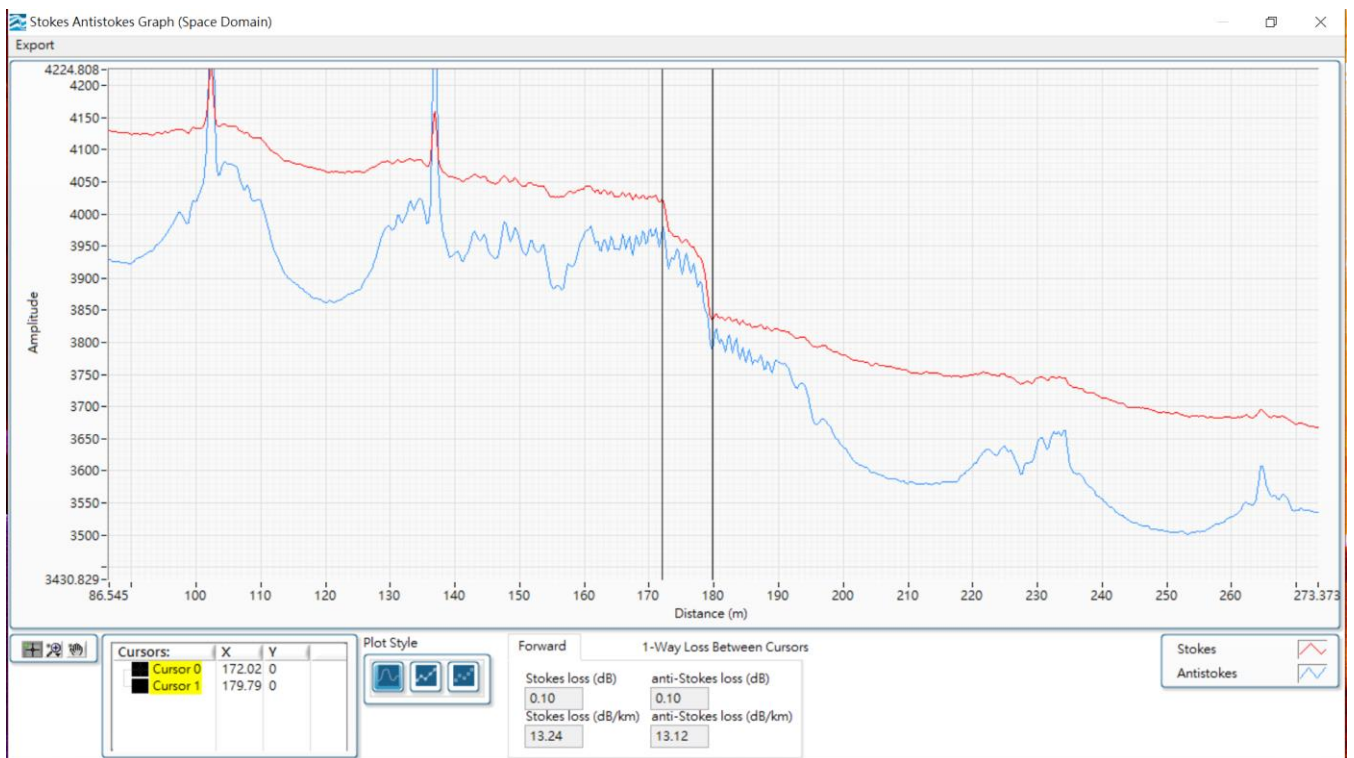
圖 49 井 MW-05 絕對溫度剖面



研究內容



(a)



(b)

圖 50 光纖傳遞距離與訊號衰減(a)光纖受損前(b)光纖受損後



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

圖 51 為井 E-01-1 所量測到絕對溫度對深度隨時間變化之量測結果。井 E-01-1 的井深深度為 15.1 公尺，由圖上可觀察到井內之最低溫度與最高溫度變化區間約介於 23.2~26.3 度。深度 6 公尺~6.5 公尺為井內最高溫(25.2 度)，隨著深度增加，溫度逐漸下降，深度 11 公尺至井底量測到最低溫度為 23.2 度。在圖中依然可觀察到一溫度上的不連續 (約 10/3 18:00 前)，井下各個深度之溫度產生平移的現象，深度 6 公尺~深度 6.5 公尺所量測之溫度上升為 25.8 度，深度 12 公尺~15.1 公尺溫度上升為 24.4 度~24.6 度，造成此溫度變化的原因與井 MW-05 相同，由於光纖受損造成量測上出現溫度平移的情況。然而井 E-01-1 溫度平移的變化為溫度上升，與井 MW-05 結果相反。井 E-01-1 位於蒸汽鍋爐旁屬於中游的位置，與注入井 E-01-2、井 E-04 位置位處於地下水流向之同一水平面上，因此在井 E-01-2、井 E-04 進行注水實驗時，並沒有收到明顯溫度上升的訊號。此外，上游注入井 MW-03 在進行注水時，由於光纖已經有受損，井內監測之溫度有平移上升的情況，因此，在井 E-01-1 也較難辨識由井 MW-03 所注熱水之溫度上升訊號。

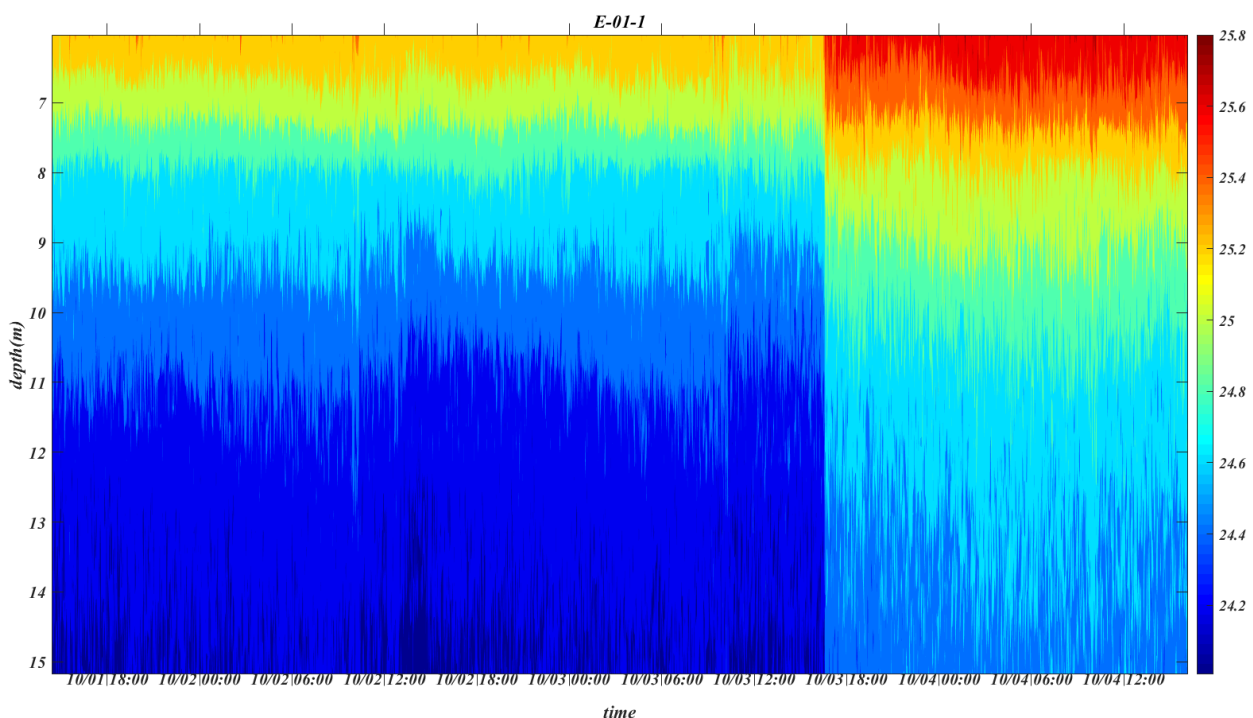


圖 51 井 E-01-1 絕對溫度剖面



由廠區中、上游注入井(井 MW-03、井 E-01-2、井 E-04)注入熱水，監測廠區中游五口井井內地下水溫度變化。監測結果顯示注入井之溫度變化在停止注水後，不同深度之溫度恢復情況各不相同，根據恢復的速率快慢，可辨識透水與不透水區段。井 E-01-2 同樣在停止注水後可觀察到井內不同深度下溫度恢復情況不盡相同，在深度 6 公尺~7 公尺為溫度恢復最快速的區段，因此可判定為較佳的透水區段，其次為深度 8 公尺、9 公尺、10 公尺至井底。井 E-04 在深度 6 公尺~8 公尺與深度 10 公尺~13 公尺為高透水區段，深度 8 公尺~9.5 公尺與深度 13 公尺~14 公尺則是透水性較差的區段。井 MW-03 在停止注水後深度 6 公尺~8.5 公尺溫度下降相當明顯，為透水性良好的區域，其次為深度 9.2 公尺~11.83 公尺，中間深度 8.5 公尺~9.2 公尺則是溫度變化較慢，屬於透水性較差的區域。井 MW-05、井 E-01-1 並非注入井，因此主要為監測井下隨深度變化之溫度分布。在監測中後期，由於工廠的運作動線須移動光纖，誤拉扯光纖造成光纖受損的情況，因此在溫度的量測上出現了平移訊號。圖 52 為第二次與第三次注水試驗中，透水與不透水區段示意圖。整體而言，除了井 E-04 以外，透水區段皆分布於淺層深度(6 公尺~9 公尺)，不透水區段則分布於中間區段(9 公尺~11 公尺)。由於熱水注入試驗僅針對單井進行分析，因此透水區段的定性分析僅針對單井，而井與井之間的相對透水性並無直接關聯性（例如：井 E-01 與 E-01-1 的淺層區段，雖然在井下皆屬於相對高透水性，但並無法說明這兩個區段之透水性相同），仍需透過後續的量化分析或複井跨孔試驗方能確認。後續霖昌公司將會再次針對所試驗的井進行多深度微水試驗，而本研究之分析結果將會與其試驗結果相互比較驗證，確認其可信度。



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

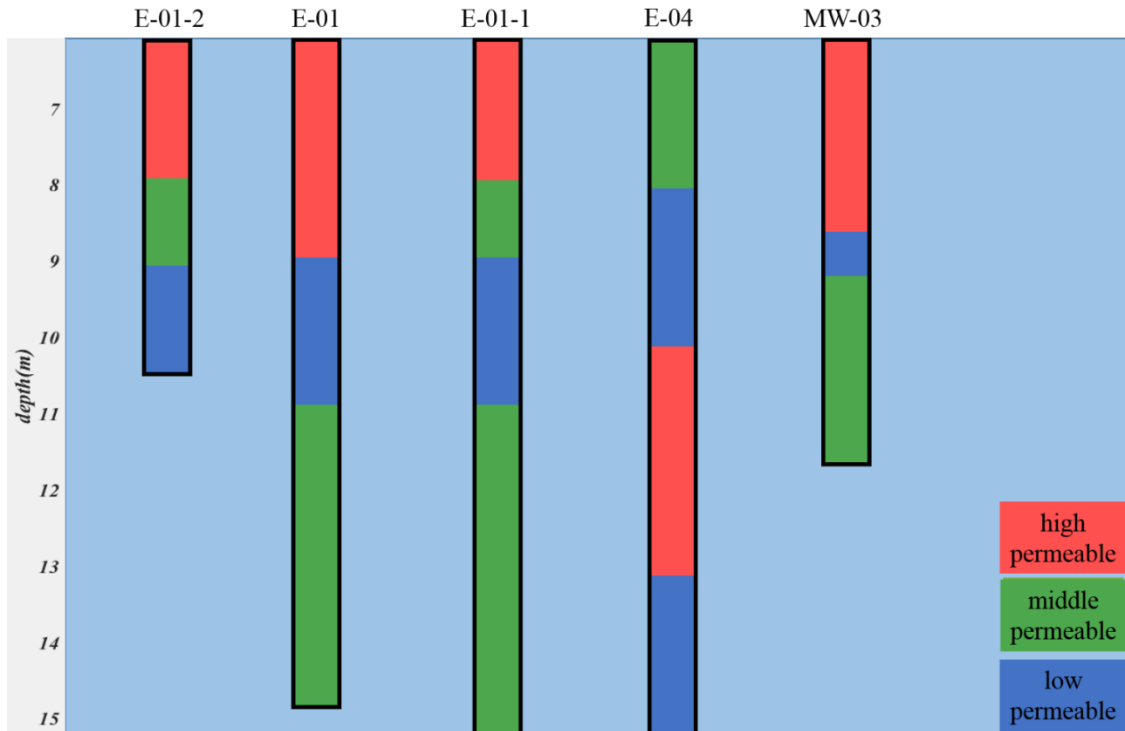


圖 52 第二次、第三次注水試驗透水區段示意圖



5.4 數值模式模擬

本計劃主要針對單井的熱水注入試驗進行數值模式模擬，以 MODFLOW-2005 建置地下水流數值模式以獲得穩態之地下水流，再藉由溶質傳輸與熱能參數之轉換，輸入 MT3DMS 模擬地下水流中熱在孔隙介質中的傳導與對流，並透過模式率定方法比對現地溫度量測結果，以獲取不同深度之水力傳導係數。由於現地的熱水注入試驗僅針對單井進行分析，因此模式假設為一維方向的熱傳導與熱對流，假設特定深度含水層為均質且地下水流沿此一維方向移動，井管內在垂直方向上的熱傳導與熱對流予以忽略，井內的水溫變化僅受地下水流速之影響，注入井假設具有極小井徑，井內水溫與地層水溫度可立即達到平衡。

5.4.1 模式建置

圖 53 為數值模式的網格劃分，左右兩側以現地既有監測井之距離為設定基礎，建立井與井之間的一維流場，網格大小設定為一公尺，共十個網格，因此左右兩側之距離為十公尺。地下水流方向設定為由左至右，將熱水注入井設置於左邊第二個網格，模擬地層中地下水流速對於熱能傳輸的影響。模式建置以第二次試驗中的井 E-01 與第三次試驗中的井 E-04 為目標，模擬時間為停止注水後水溫恢復的過程，藉由實際量測的地下水位資料輸入與水文地質及熱能傳輸參數的調整，擬合不同深度之溫度變化，藉此量化井下不同深度之透水區段。

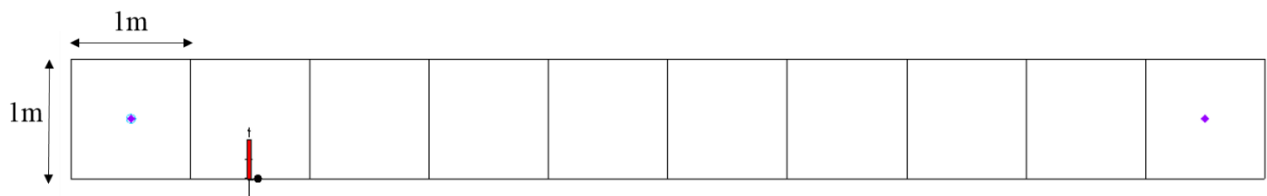


圖 53 數值模式網格劃分示意圖

5.4.2 邊界條件與初始條件設定

在 MODFLOW 中，網格建立後，需給定邊界條件與模式初始條件設定，在模擬第二次試驗中的井 E-01 時，根據第二次水位量測資料(圖 34)，左側邊界以井 E-01 的地下水位進行設定，右側邊界則以下游井 OE-2 的地下水位進行設定。根據水位資料結果，停止注水時，井 E-01 的水位約為 9.1 公尺，井 OE-2 的水位約為 4.6 公尺，模式兩側有約 4.5 公尺的水位差，中間網格之水位資料則由模式模擬所獲得，模擬時間為停止注水後的 60,000 秒（約 16.7 小時）。在模擬第三次試驗中的井 E-04 時與井 E-01 相同，根據第三次水位資料(圖 45)，左、右兩側邊界分別



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

以井 E-04 及 E-01-2 的地下水位進行設定，停止注水後，井 E-04 水位資料為 10.2 公尺，E-01-2 的水位資料為 5.17 公尺，模式兩側約有 5 公尺的水位差，模擬時間同樣為停止注水後的 60,000 秒。在 MT3DMS 中，初始溫度主要依據井下水溫之長期監測結果而設定，在第二次試驗中，依據井 E-01 的長時間監測結果設定為 24.7 度，注入井位置（第二個網格）的初始溫度設定為停止注水時之最高溫 30.5 度。而第三次試驗中，依據井 E-04 的長時間監測結果設定為 25.2 度，注入井位置的初始溫度設定為停止注水時之最高溫度 41.9 度。

5.4.3 參數設定

給定初始條件設定與邊界條件後，需要輸入模式所需之參數設定。表 5 為模式所需輸入之參數設定，在 MODFLOW 中，由於模式為一維方向之地下水流模式，因此在地層參數設定上，僅需給予水平方向之水力傳導係數(Horizontal Hydraulic Conductivity, HK)與比儲水係數(Specific Storage, S_s)。根據礫石與粉泥土混合之材質，井 E-01 與井 E-04 在初始所設定的水力傳導係數為 $4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ，比儲水係數為 0.0001 1/m。在 MT3DMS 中，需設定網格的熱延散係數(dispersivity)及一階吸附常數(1^{st} sorption constant)。在井 E-01 與井 E-04 的模擬，熱延散係數初始設定為 45 公尺，一階吸附常數為 $0.003 \text{ m}^3/\text{kg}$ 。

表 5 參數設定

MODFLOW 初始參數設定

水平向水力傳導係數(Horizontal Hydraulic Conductivity, HK)	$4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$
比儲水係數(Specific Storage, S_s)	0.0001 1/m

MT3DMS 初始參數設定

熱延散係數(dispersivity)	45m
一階吸附常數(1^{st} sorption constant)	$0.003 \text{ m}^3/\text{kg}$



5.4.4 模式率定

在地下水數值模式中，地下水位變化由井內所放置之水位計提供，因此，主要針對地層之水平向水力傳導係數進行率定，此外，熱延散係數與一階吸附常數同樣為敏感度較高的參數，以 PEST 自動化參數率定軟體進行參數逆推求解。初始設定之水平向水力傳導係數為 $4 \times 10^{-5} \text{m/s}$ ，將率定條件之最小值與最大值設定於 $10^{-5} \sim 10^{-2} (\text{m/s})$ 之間；初始設定熱延散係數為 45 公尺，將率定條件之最小值與最大值設定於 1~50 之間；一階吸附常數初始設定為 $0.003 \text{m}^3/\text{kg}$ ，將率定條件之最小值與最大值設定於 $10^{-5} \sim 10^{-1} (\text{m/s})$ 之間。模擬觀測點位設定為 100 個點，模式迭代次數設定為 100 次。模式收斂條件設定為將目前迭代之誤差值(φ_i)減去最小誤差值(φ_{min})後再除以目前迭代誤差值小於等於 0.0005 時停止迭代，即 $(\varphi_i - \varphi_{min})/\varphi_i \leq 5.0 \times 10^{-4}$ 。

5.4.5 率定結果分析與討論

在井 E-01 的模擬中，MODFLOW 所模擬之穩態地下水位如圖 54 所示，最左側與最右側網格為停止注水時之水位 9.1 公尺與 4.6 公尺，中間網格之水位則是由模式模擬所獲得。雖然 DTS 的量測每 25cm 可提供一個觀測點資料，然而本研究計畫之目的為針對 DTS 的量測結果進行分析，因此，配合現地多深度微水試驗之量測結果，僅挑選 5 個深度之溫度恢復過程進行擬合，分別為深度 7.0、8.6、10.0、11.1、12.4 公尺，井 E-01 率定結果如圖 55 所示，率定後的參數彙整於表 6。深度 11.1 公尺與深度 12.4 公尺之擬合結果最佳，降溫過程中監測值與模擬結果幾乎完整的重疊，具有最小的誤差值與最高的相關係數。深度 7 公尺所計算之水平向水力傳導係數為達到模式條件設定之最大值，主要因為在停止注水後，接近地下水位面附近的水位快速洩降，使溫度急速下降，造成模式所計算之水平向水力傳導係數達到所設定之最大值。以水平向水力傳導係數來看，屏除深度 7 公尺以外，深度 8.6 公尺擁有最大的水平向水力傳導係數為 $1.15 \times 10^{-3} \text{m/s}$ ，為井 E-01 最透水區段，其次則依序為深度 12.4 及 11.1 公尺，而深度 10.0 公尺擁有最小的水平向水力傳導係數，其值為 $3 \times 10^{-4} \text{m/s}$ ，為井 E-01 最不透水區段，此結果與 DTS 量測結果相符（圖 40）。深度 8.6、10.0、11.1、12.4 公尺所率定參數的誤差值皆非常小且相關性高，其結果極具可性度。

在井 E-04 的模擬中，MODFLOW 所模擬之穩態地下水位與圖 54 相似，因此不重複呈現。配合現地多深度微水試驗之量測結果，僅挑選 6 個深度之溫度恢復過程進行擬合，分別為深度 7.55、8.8、10.09、11.1、12.6、13.9 公尺，井 E-04 率定結果如圖 56 所示，率定後的參數彙整於表 7。由圖中可以觀察到，在六個深度所量測之溫度變化與模式模擬之溫度變化擬合程度相當高，在降溫過程中，溫度



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

變化相當一致。由表 7 得知，六個深度所率定之結果相關性皆高達 0.98，以各個深度之透水性來說，深度 10.09 公尺擁有最大的水平向水力傳導係數，其值為 $1.04 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ，透水性最佳，其次依序為深度 11.1、12.6 及 7.55，深度 13.9 及 8.8 公尺則擁有最小的水平向水力傳導係數，其值分別為 $1.65 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 及 $5.1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ，而此結果亦與 DTS 量測結果相符合(圖 47)。

由模式所模擬之結果經參數率定後可有效推估井下不同深度之水力傳導係數，進而對井下透水與不透水區段進行判識。由模擬之結果與廠區多深度微水試驗資料結果比較(圖 27)，井 E-01 的試驗資料僅有深度 8.6、11、12.5 公尺，且水力傳導係數變化範圍小，屬同一個量級，難以區分其相對透水性，經過 DTS 的高解析度量測資料與數值模式模擬，可進一步得知，介於深度 8.6 與 11 公尺之間，可能存在一不透水區段；井 E-04 之試驗資料同樣僅有深度 7.5、10、12.5 公尺，水力傳導係數變化亦屬於同一個量級之內且差距非常小，難以判別透水性，然而 DTS 量測資料與數值模式顯示，深度 7.5 與 10 公尺之間及深度 12.5 以下，可能存在兩個不透水區段。經由上述的比較發現，由於人力與經費上的限制，多深度微水試驗僅能提供井下特定區段之水文地質參數，在無現地資料佐證的區段，重要的水文資訊將可能流失。經由 DTS 之井下高解析度量測搭配地下水數值模式模擬，可提供井下高解析度的水力傳導係數，進而判識井下透水與不透水區段，對於後續整治場址之調查與整治將有所助益。此外，不同地質材料之孔隙率與比熱均會對溫度的量測造成一定的影響，其影響程度可透過參數敏感度分析進行評估，亦可透過現地採樣分析以減低其不確地性。

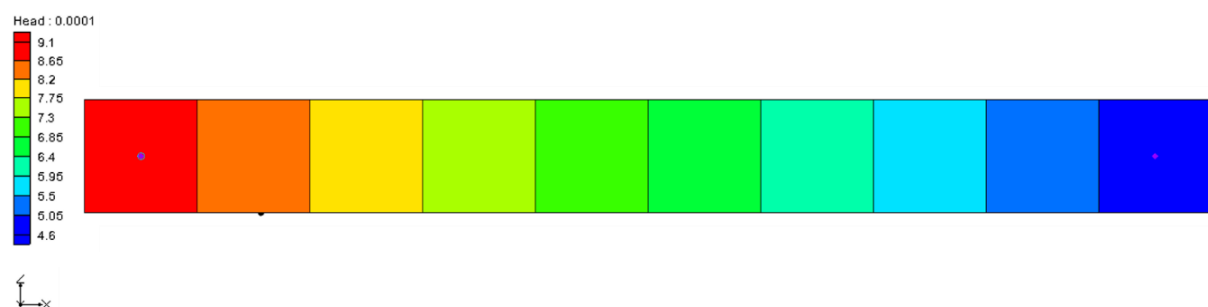


圖 54 井 E-01 地下水位變化



研究內容

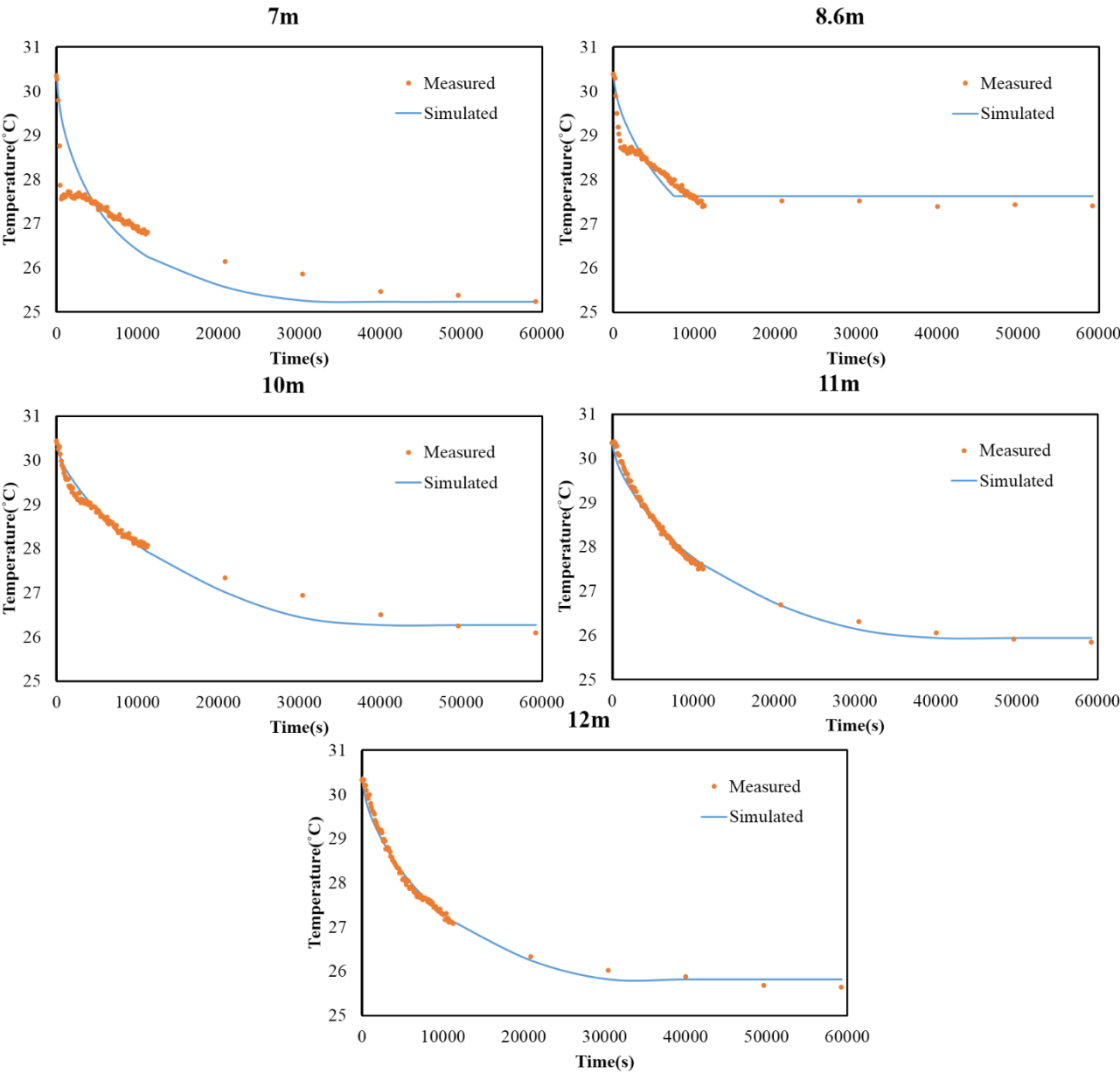


圖 55 井 E-01 模擬結果



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

表 6 井 E-01 參數率定結果

Depth(m)	Horizontal Hydraulic Conductivity, HK(m/s)	Dispersivity(m)	1 st sorption constant(m ³ /kg)	Phi(ϕ)	Correlation(R)
7	2.09×10^{-3}	22.698	4.15×10^{-2}	37	0.867
8.6	1.15×10^{-3}	3.612	6.3×10^{-3}	8.082	0.93
10	3×10^{-4}	40.247	2.71×10^{-2}	1.734	0.989
11.1	5.03×10^{-4}	33.19	3.11×10^{-2}	1.713	0.995
12.4	8.76×10^{-4}	21.695	2.76×10^{-2}	1.684	0.995



研究內容

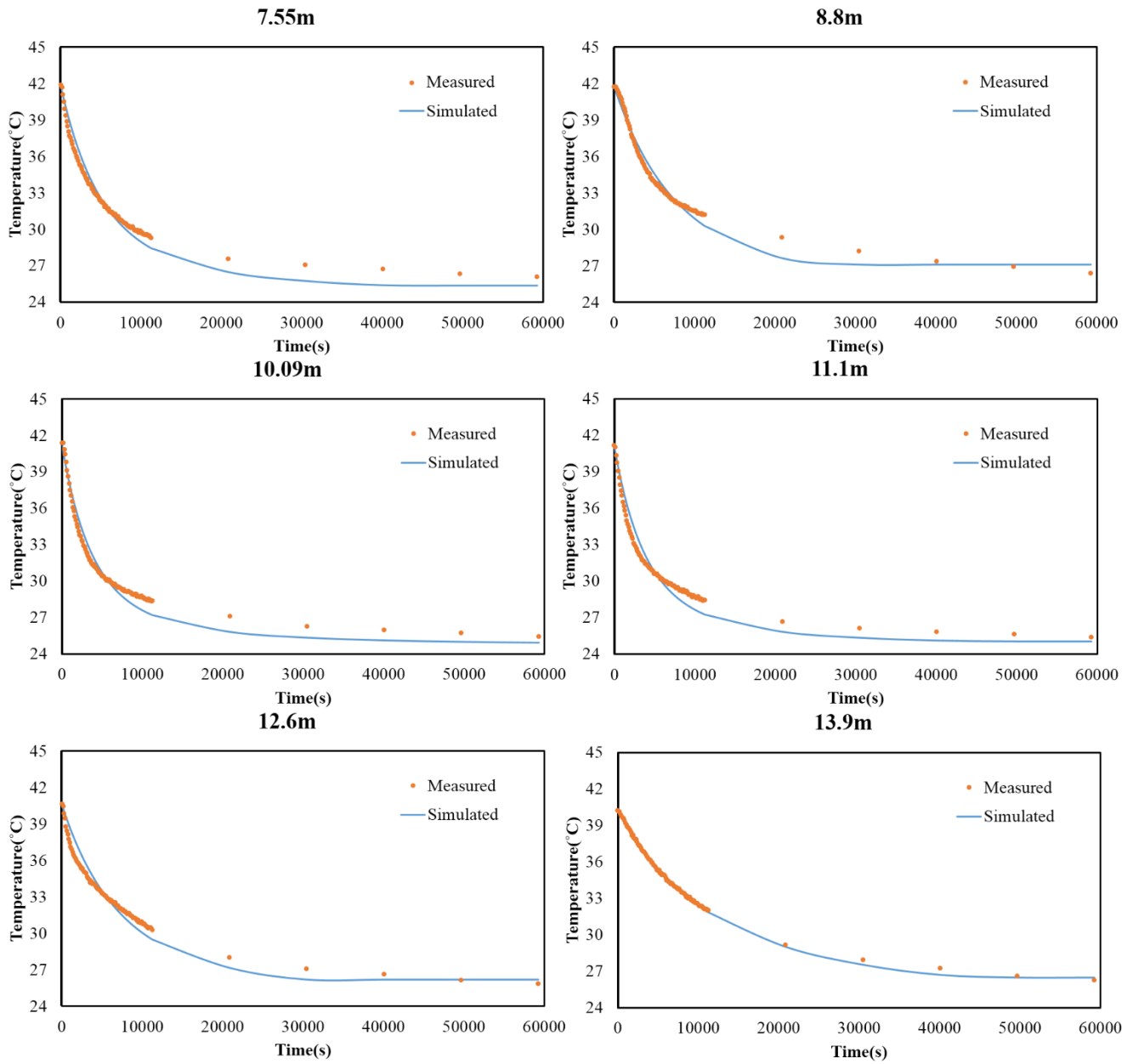


圖 56 井 E-04 模擬結果



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

表 7 井 E-04 參數率定結果

Depth(m)	Horizontal Hydraulic Conductivity, HK(m/s)	Dispersivity(m)	1 st sorption constant(m ³ /kg)	Phi(ϕ)	Correlation(R)
7.55	3.25×10^{-4}	25.041	2.49×10^{-2}	48.97	0.994
8.8	5.1×10^{-5}	33.91	7.72×10^{-3}	28.9	0.988
10.09	1.04×10^{-3}	25.93	6.13×10^{-2}	60.25	0.986
11.1	6.19×10^{-4}	24.69	3.57×10^{-2}	73.49	0.985
12.6	4.25×10^{-4}	6.574	1.22×10^{-2}	59.43	0.9885
13.9	1.65×10^{-4}	14.756	1.71×10^{-2}	1.438	0.999



(六) 結論

藉由分散式光纖溫度感測器在時間、空間上的高解析度量測，在現地進行了三次長時間井下溫度監測試驗。以第一次現地試驗中雨水造成的溫度差異可在溫度恢復過程中辨識井下透水與不透水區段為概念，進行了第二次與第三次現地試驗中的注熱水試驗。第二次試驗結果顯示注入井(井 E-01、井 E-01-1)在停止注水後，不同深度之溫度恢復情況各不相同。井 E-01 在深度 6 公尺~7.2 公尺、深度 12 公尺~13 公尺具有良好的透水能力；深度 10 公尺~10.5 公尺則透水性較差。井 E-01-1 在深度 6 公尺~7.2 公尺為溫度恢復最快速的區段，為較佳的透水區段，其次為深度 8 公尺~9 公尺、11 公尺~15 公尺，深度 9 公尺~11 公尺透水性較差。第三次現地試驗結果顯示在停止注水後，注入井(井 MW-03、井 E-01-2、井 E-04)不同深度之溫度恢復情況各不相同。井 MW-03 在深度 6 公尺~8.5 公尺為透水性良好的區域，其次為深度 9.2 公尺~11.83 公尺，中間深度 8.5 公尺~9.2 公尺為透水性較差的區域。井 E-01-2 在深度 6 公尺~7 公尺為較佳的透水區段，其次為深度 8 公尺、9 公尺、10 公尺。井 E-04 在深度 6 公尺~8 公尺與深度 10 公尺~13 公尺為高透水區段，深度 8 公尺~9.5 公尺與深度 13 公尺~14 公尺則是透水性較差的區段。

除了以 DTS 進行井下監測外，以地下水數值模式 MODFLOW 與 MT3DMS 模擬停止注水後溫度恢復的過程，並藉由 PEST 率定模式參數，將水文地質參數量化進而驗證現地試驗結果。以第二次現地試驗之注入井 E-01 與第三次現地試驗之注入井 E-04 為模擬目標，模擬井下不同深度之水溫變化過程，針對水力傳導係數、熱延散係數與一階吸附常數進行率定，透過逆推演算之迭代方式求得最佳參數組合。模擬結果顯示，模式率定後之誤差極小，量測值與模擬值具有高度相關性。透過率定後之水平向水力傳導係數可以得知，井 E-01 最透水區段為深度 7 公尺，其次則依序為深度 8.6、12.4、11.1，深度 10 公尺為最不透水區段。井 E-04 在深度 10.09 公尺為最透水區段，其次依序為深度 11.1、12.6 及 7.55 公尺，深度 13.9 及 8.8 公尺則為最不透水區段。模擬結果顯示井下透水與不透水區段均與 DTS 量測結果相符合。

以 DTS 進行現地量測試驗搭配地下水數值模式模擬，充分的提供了井下溫度背景資料與不同深度之透水性，由 DTS 所量測到的高解析度溫度時、空序列，解析不同深度地層之透水性並以地下水數值模式輔以佐證量測結果。相較於過去傳統的量測方式，受限於成本之考量，僅能經由試驗針對井下特定深度區段提供特定資訊，在無額外資料佐證之情形下，細部之重要資訊可能因此流失，導致後續調查與評估上之誤判，溫度計之間的誤差校正與儀器量測飄移現象亦為造成量測

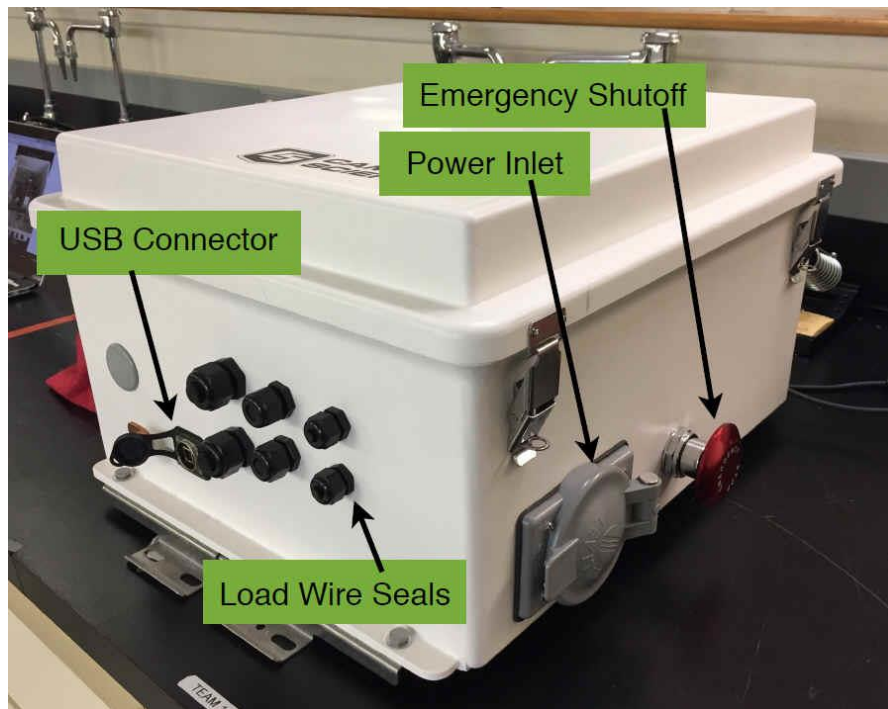


分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

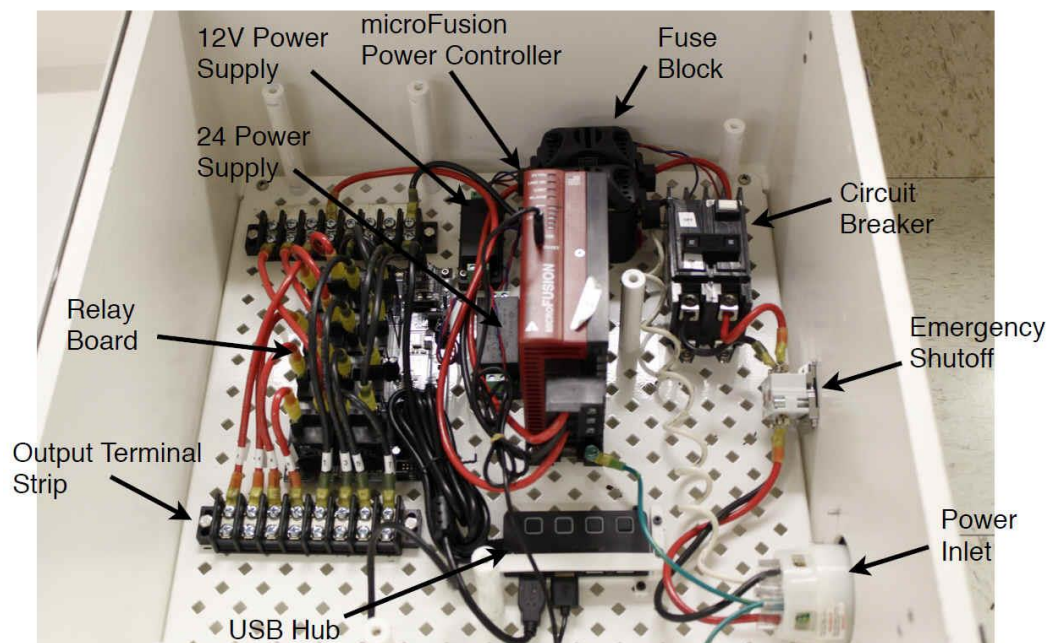
結果判釋上的不確定性，以 DTS 進行井下佈設與量測將可避免上述之誤差與不確定性。本專案計畫可提供土壤及地下水污染廠址一高解析度水文地質調查，藉由此創新量測技術提升調查能力與整治效率。本量測技術除了應用於現地進行污染調查評估，於河川及裂隙岩體中可針對地表地下水交互作用與優勢水流進行學術探討。憑藉著高解析度量測優勢，未來可進一步應用於跨領域研究。

(七) 明年度工作計畫

在今年度的模場試驗中，本專案計畫是以被動式的量測方式針對井下複雜之水文地質環境，進行高解析度且連續性的溫度量測。從量測井下溫度分布之背景值資料至現地注熱水實驗，藉由溫度恢復之過程進而推估井下透水區段、水文地質分層。本專案於下個年度之計畫中預計以主動式分散光纖溫度感測器進行現地監測實驗。主動式分散光纖溫度感測器與被動式的感測器相同，皆須使用雷射脈衝分析儀主機與光纖，唯一的差異在於光纖的加熱控制系統（heating pulse controller, HPC），如圖 57。HPC 的組成主要包括：microFusion power controller、relay board、power supply、fuse block、output terminal stripe、circuit break、emergency shutoff、USB connector 及 power inlet。所有的元件都安裝於一防水、可攜式的箱子中（圖 57a），其內部配置如圖。主動式分散光纖溫度感測器其運作原理主要是透過一般的電纜線將 HPC 與光纖進行連接，而加熱的原理則是以電纜線通電的方式產生熱能。因為需對於光纖進行通電，因此在光纖的選用上特別的需求，本專題於下個年度預計使用祥林科技股份有限公司所生產的光纖進行試驗（圖 58），選用之原因主要為光纖外層有包覆銅線，是通電加熱的最佳選擇。電纜線的連接的方式則依據試驗需求而有所不同，主要是針對所欲加熱的區間進行連結，如圖 59 所示，microFusion power controller 的主要功能是透過電壓的控制來調整加熱的溫度，而 relay board 的功能則是控制不同區段的光纖分別進行加熱（圖 59 中的 AB 段或 CD 段）。主動式與被動式分散光纖溫度感測器之不同處在於，主動式感測器可針對井下地下水流流速較緩慢或溫度變化較不顯著之區段進行加熱，提供一外部熱源，強化熱能傳輸的擴散情形，增加判識細小優勢水流路徑的能力，提昇井下透水區段的解析能力。主動式感測器可在不擾動地下水流的前提下進行量測，此量測方式對於地下水污染場址具有極大的優勢，不僅可避免污染物因注水或其它外力而造成污染範圍擴大，而其量測結果亦可同時提供許多量測資訊，並與被動式感測器量測結果進行交互驗證，增加分析結果之可信度。此外，主動式分散光纖溫度感測器可配合污染場址在生物整治灌藥時進行加熱量測，由於主動式感測器可依據需求調整加熱溫度，因此，可藉此瞭解井下含水層在灌藥過程中對於溫度的影響，並評估加熱含水層是否有助於整治成效的提昇，並可藉此評估最適整治操作溫度。



(a)



(b)

圖 57 主動式光纖溫度感測器加熱控制系統: (a) 系統外觀, (b) 系統內部配置



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

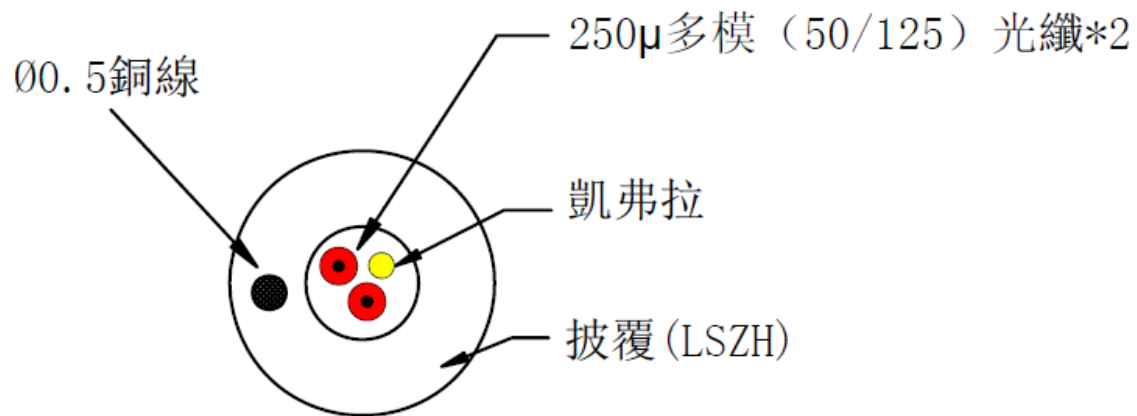


圖 58 主動式光纖溫度感測所選用之光纖內部構造示意圖

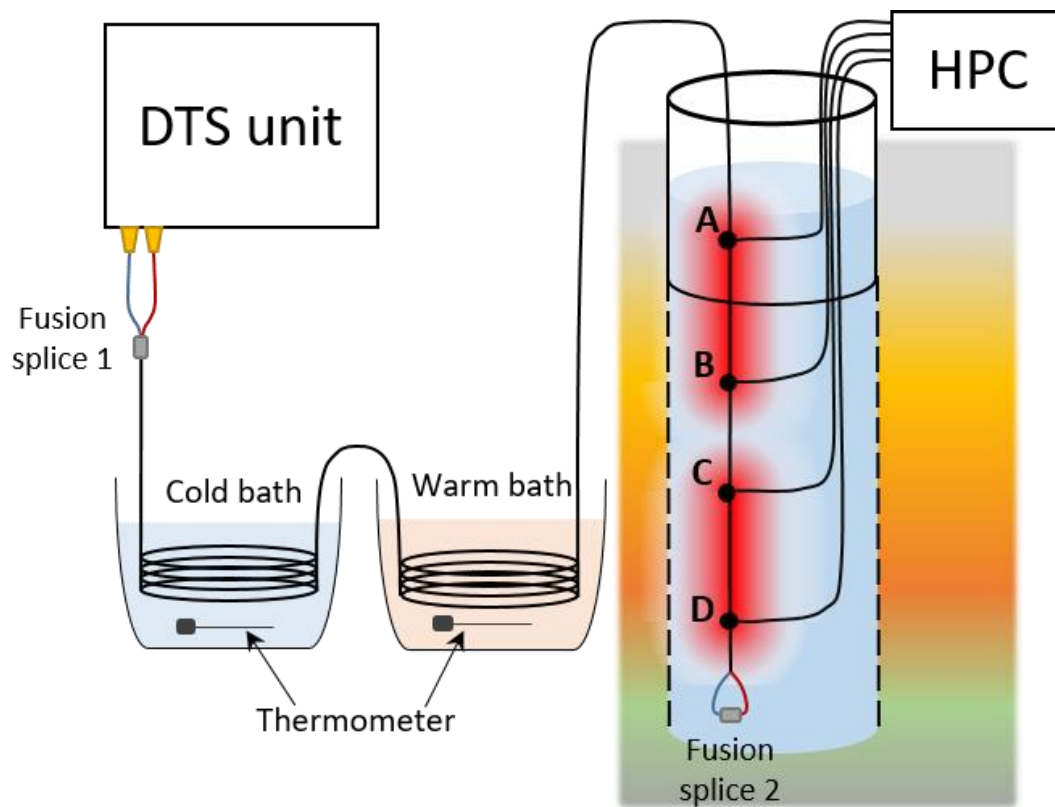


圖 59 主動式分散式光纖溫度感測器井下佈設示意圖



預期完成工作項目

第二年:主動式分散式光纖溫度感測器之量測、模擬與分析

1. 單井主動式分散式光纖溫度感測器之現地安裝、測試及初步量測試驗。
2. 單井主動式分散式光纖溫度感測器之井下溫度剖面連續性量測。
3. 單井主動式的溫度量測資料校正、解析、誤差分析。
4. 複井主動式分散式光纖溫度感測器之現地安裝與測試。
5. 複井主動式分散式光纖溫度感測器之井下溫度剖面連續性量測。
6. 主動式的溫度量測資料校正、解析、誤差分析。
7. 透過主動式分散式光纖溫度感測器量測結果（單、複井），建立熱傳輸數值模式，並針對模擬結果進行分析，判識井下溫度剖面分佈變化及井下透水區段。
8. 以主動式分散式光纖溫度感測器量測結果，推估現地水文地質分層、地下水流向、流速及優勢水流路徑。
9. 比較被動式與主動式分散式光纖溫度感測器所量測結果之差異，並進行其適用性之研析。
10. 研析主動式分散式光纖溫度感測器對於現地整治工作之效益。
11. 建立被動式與主動式分散式光纖溫度感測器量測標準流程與分析方法。
12. 撰寫期末報告。



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖）

第二年

年月 工作項目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	備 註
單井主動式分散式光纖溫度感測器之現地安裝、測試及初步量測試驗													
單井主動式分散式光纖溫度感測器之井下溫度剖面連續性量測													
單井主動式的溫度量測資料校正、解析、誤差分析						※							
複井主動式分散式光纖溫度感測器之井下溫度剖面連續性量測						※							
複井主動式的溫度量測資料校正、解析、誤差分析												※	
主動式熱傳輸數值模式建置與模擬						※						※	
井下溫度剖面分佈變化分析、井下透水區段判識、水文地質分層、地下水流向、流												※	



研究內容

速及優勢水流路徑推估													
被動式與主動式分散式光纖溫度感測器之差異比較及適用性研析												※	
研析主動式分散式光纖溫度感測器對於現地整治工作之效益												※	
分散式光纖溫度感測器量測標準流程與分析方法													
期末報告撰寫與繳交													
工作進度估計百分比 (累 積 數)	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	86%	92%	100%	
預定查核點	期中		1. 單井主被動式的溫度量測資料校正、解析、誤差分析。 2. 單井被動式分散式光纖溫度感測器量測結果數值模擬。 3. 井下透水區段判識、水文地質分層、地下水流向、流速及優勢水流路徑推估。										
	期末		1. 複井主動式的溫度量測資料校正、解析、誤差分析。 2. 複井主動式分散式光纖溫度感測器量測結果數值模擬。 3. 井下透水區段判識、水文地質分層、地下水流向、流速及優勢水流路徑推估。 4. 被動式與主動式分散式光纖溫度感測器之差異比較及適用性研析。 5. 主動式分散式光纖溫度感測器對於現地整治工作之效益研										



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

		析。 6. 期末報告撰寫與繳交。
說明： 1、工作項目請視專案性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起迄日期。 2、「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：(1) 工作天數，(2) 經費之分配，(3) 工作量之比重，(4) 擬達成目標之具體數字。 3、「預定查核點」，請在條形圖上標明※符號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。		



(八) 參考文獻

- Anderson, M.P. (2005). Heat as a ground water tracer, *Ground Water*, 43, 951-968.
- Bense, V.F., Read, T., Bour, O., Le Borgne, T., Coleman, T., Krause, S., Chalari, A., Monsanos, M., Ciocca, F., and Selker, J.S. (2016). Distributed temperature sensing as a downhole tool in hydrogeology, *Water Resources Research*, 52, 12, 9259-9273.
- Bouyoucos, G. (1915). Effects of temperature on some of the most important physical process in soils, *Michigan State University, Ag. Tech. Bull*, 24, 63.
- Bredehoeft, J.D., Papadopoulos, I.S. (1965). Rates of vertical groundwater movement estimated from earth's thermal profile, *Water Resources Research*, 1, 325-328.
- Briggs, M.A., Lautz, L.K., McKenzie, J.M., Gordon, R.P., and Hare, D.K. (2012). Using high - resolution distributed temperature sensing to quantify spatial and temporal variability in vertical hyporheic flux, *Water Resources Research*, 48, 2.
- Cartwright, K. (1974). Tracing shallow groundwater systems by soil temperature, *Water Resources Research*, 10, 847-855.
- Coleman, T.I., Parker, B.L., Maldaner, C.H., and Mondanos, M.J. (2015). Groundwater flow characterization in a fractured bedrock aquifer using active DTS tests in sealed boreholes, *Journal of Hydrology*, 528, 449-462.
- Doherty, J., Brebber, L., Whyte, P. (1994). PEST: Model-independent parameter estimation. Watermark Computing, Corinda, Australia, 122.
- Halloran, L.J., Roshan, H., Rau, G.C., Andersen, M.S., and Acworth, R.I. (2016). Improved spatial delineation of streambed properties and water fluxes using distributed temperature sensing, *Hydrological Processes*, 30, 15, 2686-2702.
- Hausner, M. B., F. Suarez, K. E. Glander, N. V. D. Giesen, J. S. Selker, and S. W. Tyler (2011), Calibrating single-ended fiber-optic Raman spectra distributed temperature sensing data, *Sensors*, 11, 10,859-10,879, doi:10.3390/s111110859.
- Harbaugh, A. W. (2005). MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process: US Department of the Interior, US Geological Survey Reston, VA, USA.



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

Leaf, A. T., D. J. Hart, and J. M. Bahr (2012). Active thermal tracer tests for improved hydrostratigraphic characterization. *Ground Water*, 50(5), 726–735, doi:10.1111/j.1745-6584.2012.00913.x.

Levenberg, K. (1944). A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. *Quarterly of applied mathematics*, 2(2), 164-168.

Marquardt, D. W. (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(2), 431-441.

McDonald, M. G., Harbaugh, A. W. (1988). A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model.

Pehme, P., B. Parker, J. Cherry, J. Molson, and J. Greenhouse (2013). Enhanced detection of hydraulically active fractures by temperature profiling in lined heated bedrock boreholes, *J. Hydrol.*, 484, 1–15, doi:10.1016/j.jhydrol.2012.12.048.

Read, T., Bour, O., Selker, J.S., Bense, V.F., Borgne, T.L., Hochreutener, R., and Lavenant, N. (2014). Active-distributed temperature sensing to continuously quantify vertical flow in boreholes, *Water Resources Research*, 50, 5, 3706-3713.

Rorabaugh, M.I. (1954). Streambed percolation in development of water supplies, U.S. Geological Survey Groundwater Notes on Hydraulics, 25, 13.

Sebok, E., Duque, C., Kazmierczak, J., Engesgaard, P., Nilsson, B., Karan, S., and Frandsen, M. (2013). High-resolution distributed temperature sensing to detect seasonal groundwater discharge into Lake Væng, Denmark, *Water Resources Research*, 49, 9, 5355-5368.

Selker, J.S., Thévenaz, L., Huwald, H., Mallet, A., Luxemburg, W., Van De Giesen, N., Stejskal, M., Zeman, J., Westhoff, M., and Parlange, M.B. (2006). Distributed fiber-optic temperature sensing for hydrologic systems, *Water Resources Research*, 42.

Sorey, M.L. (1971). Measurement of vertical groundwater velocity from temperature profiles in a well, *Water Resources Research*, 7, 963-970.

Stallman, R.W. (1963). Methods of collecting and interpreting ground-water data, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper, 36-46.

Stallman, R.W. (1965). Steady one-dimensional fluid flow in a semi-infinite porous



medium with sinusoidal surface temperature, *Journal of Geophysical Research*, 70, 2821-2827.

Suzuki, S. (1960). Percolation measurements based on heat flow through soil with special reference to paddy fields, *Journal of Geophysical Research*, 65, 2883-2885.

Vogt, T., Schneider, P., Hahn-Woernle, L., and Cirpka, O.A. (2010). Estimation of seepage rates in a losing stream by means of fiber-optic high-resolution vertical temperature profiling, *Journal of Hydrology*, 380, 1, 154-164.

Westhoff, M.C., Savenije, H.H.G., Luxemburg, W. M., Stelling, G.S., Van de Giesen, N.C., Selker, J.S., Pfister, L. and Uhlenbrook, S. (2007). A distributed stream temperature model using high resolution temperature observations, *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1469-1480

Zheng, C., Wang, P. P. (1999). MT3DMS: a modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reactions of contaminants in groundwater systems; documentation and user's guide. The University of Alabama.



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

五、專案成果績效自評表

一、專案基本資料

填表日期：108 年 12 月 23 日

專案性質	☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質	專案類別	☐ 研究型 ☒ 模場型
研究主題	☐ 整治 ☒ 調查 ☐ 其他		
申請機構系所	國立臺灣海洋大學 地球科學所	專案主持人	邱永嘉 副教授
專案名稱	分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查		
專案執行期程	☐ 申請階段 ☐ 期中 ☒ 期末		

二、成果績效自評

「計畫總預估數」應與計畫審查核定值相符，請執行單位依實際達成之量化成果填寫於欄位中。

(一) 學術面

項目 \ 目標達成程度			申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成 原因或學術產 出發表名稱)
A 學術 產出 及 活動	1.國內投稿 (篇數)	(1)論文					
		(2)研討會論文	1	2	2		
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1	0	0		期刊論文 正在撰寫 中。
		(2)研討會論文					
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告					
		(2)研究報告	1	1	2		
	4.專著 (本數)						
	5.辦理學術 會議(場數)	(1)研討/說明會					
		(2)成果發表會					
		(3)論壇					
6.研發改良 技術(項數)	(1)已開發技術	1	0	1			
	(2)技術平台						
B 人才 培育	7.研發人員 (人數)	(1)碩士	2	1	2		
		(2)博士					
	8.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊	2	0	2		
		(2)跨機構團隊	2	0	2		
		(3)形成研究中 心					
		(4)形成實驗室					
9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					



專案成果自評表

(二) 產業面

項目 \ 目標達成程度				申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成原因 或專利、技術轉移 相關詳細資料)
A 智慧財產權	1.專利 (件數)	已 核 准	發明					
			新型/設計					
			合計					
		申 請 中	發明	1	0	0		專利發明正在 著手申請中
			新型/設計	1	0	0		專利新型正在 著手申請中
			合計					
B 研發技術轉移	2.先期技術 成果移轉	件數						
		授權金(仟元)						
		衍 生 利 益 金 (仟 元)						
	3.技術移轉 (專利)	件數						
		授權金(仟元)						
		衍生利益金 (仟元)						
	4.技術移轉 (應用技 術)	件數						
		授權金(仟元)						
		衍 生 利 益 金 (仟 元)						
	5.可移轉 產業技術	(1)技術(件數)						
		(2)品種/系(件數)						
C 產學研合作	6.促成合作 研究	件數						
		金額(仟元)						
	7.促成投資	件數						
		投資金額 (仟元)						
	8.促成取得 業界科專	件數						
		業界投資金額 (仟元)						



分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

9.其他指標 (請自行命名)	(請自填)					
-------------------	-------	--	--	--	--	--

(三) 政策面

目標達成程度 項目		申請預 估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成原因 或 其他詳細資料)
A 服 務 便 民	1.技術服務	次數				
		收入(仟元)				
	2.諮詢服務	次數				
		收入(仟元)				
B 支 援 合 作	3.協助政府制定 (件數)	(1)政策				
		(2)法規				
		(3)規範				
		(4)標準				
D 社 會 效 益	4.獲得認證(件數)					
	5.獲得獎項(件數)					
	6.提升能源效率(%)					
	7.節能減碳效率(%)					
8.其他指標 (請自行命名)		(請自填)				



三、請依學術成就、技術創新、經濟效益、社會影響等方面，評估研究成果對現況或本署之學術或應用價值。（簡述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性，500 字為限）

本計畫藉由土壤與地下水污染場址的現地試驗，以創新的分散式光纖溫度感測器量測方式，進行高解析度的井下水文地質調查。本計畫的研究成果不僅可提供創新量測技術在水文地質調查上的應用，藉此提昇學術或產業界於水文地質調查之能力，透過空間上及時間上的高解析度連續資料，可進一步瞭解複雜的水文地質環境，井下透水區段、地下水流向與流速及優勢水流路徑，確實掌握污染物傳輸路徑，並針對後續的污染整治工作進行評估。

本計畫所建立的標準量測流程期能有助於提昇我國在裂隙岩體地下水流之解析能力，將此技術應用於放射性核廢料最終處置場址的調查，可望對國家之整體科技實力發展，具有積極正面的意義。除此之外，將此創新技術應用於地質敏感區之調查，快速、準確的獲取大量現地資料，確實充分掌握複雜的水文循環過程，提供水資源在規劃與管理上的最佳策略，有效解決台灣水資源匱乏的問題。

參與本計畫之研究人員在執行計畫的過程中，可學習分散式光纖溫度感測器的操作技巧及原理，研析以熱能作為地下水流示蹤劑辨識地下水流路徑，瞭解孔隙介質中熱傳輸與溶質傳輸之基礎知識。本計畫預計之主要成果包含 1-2 篇國內外研討會論文或國際期刊論文發表、研究團隊養成、博碩士培育。