



行政院環境保護署

109 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：109 年 01 月 30 日起至
109 年 12 月 04 日止

中華民國 109 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 1 0 9 年 1 月 3 0 日 起 至 民 國 1 0 9 年 1 2 月 0 4 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		535,038	(1~5 項相加之 50%為限)		
	2.	貴重儀器使用含維護費		0	(與計畫實驗相關)		
	3.	消耗性器材與主要費用		480,000	(與計畫主體相關)		
	4.	其它研究相關費用		141,900	(含差旅與租賃費用)		
	5.	雜支費用		24,179	(1~6 項相加之 5%為限)		
	6.	行政管理費		118,111	(1~5 項相加之 10%為限)		
	7.	自籌款		0	(自行籌備款項)		
	申請補助金額(1~6 項)			1,299,228	總金額：2,798,228		
計畫總金額(1~7 項)			1,299,228	總金額：2,798,228			

專案主持人(簽名及蓋章)：_____ 日期：_____



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 審查意見回復對照表

計畫年度	109 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：C6	
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	
一、鄭明典委員： 1. 以熱為追蹤源為此方法之優勢，報告說明及提列數據完整，審查通過。		1. 感謝委員肯定。	
二、黃志彬委員： 1. 藉由分散式光纖溫度感測器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，然而，本研究分析結果，僅及分析出不同深度的透水性，尚無法提供地下水流向等資訊，請說明。 2. 井 E-01 第一次試驗結果顯示在深度 6.5~10 公尺透水性較高，其次為深度 10~13 公尺、深度 13 公尺至井底；然而在第三次試驗結果顯示在深度 7~10 公尺透水性最高，其次為深度 13~14 公尺、深度 11~12.5 公尺。同一口井，兩次試驗卻存在差異，請解釋之。		1. 本研究於第二、第三次現地試驗中除了加熱井外，於監測井周圍與下游監測井同樣佈設光纖進行量測，寄望藉由跨孔的試驗及井溫變化，推測地下水流之方向。然而，根據量測結果顯示，監測井周圍及下游監測井在加熱過程中並未接收到溫度上升之訊號。造成此量測結果之原因除了受地下水流方向之外，加熱井與監測井間之距離較遠或熱散失過快，因此無法準確獲得地下水流向資訊。為克服此一問題，後續將透過多條光纖之排列組合設計，僅利用單井之方式，判釋地下水流方向。 2. 兩次試驗間之差異主要為加熱時間的不同，第一次試驗中井 E-01 加熱時間為 3 小時，第三次試驗中則為 48 小時。將兩次試驗進行比較，最透水之區段均位於淺層深度 7~10 公尺，結果相當一致。在透水區段範圍判釋上之差異（6.5m vs 7m）應該與加熱時間長短所造成的影響。根據參數敏感度分析結果顯示，加	



3. 建議在第四章研究方法，放入兩年的工作項目實際進度及完成表(非計劃書的工作進度甘梯圖)，方可清楚了解那些項目是第一年完成，哪些項目是第二年完成，也可以知道哪些項目是跨年完成的。 4. 目錄過於簡單，請修正之。 5. 期末報告多深度流速流向量測結果，和模擬之流速差異頗大，建議探討之。 6. 建議將井篩因阻塞產生本案量測之誤差，作一評論及說明。	熱時間若小於 24 小時，溫度變化對地下水流之敏感較小，當加熱時間超過 24 小時，敏感度將達到最大值，因此，當加熱時間相對過短時，在透水區段判釋上容易造成誤差。兩次試驗所推估的地下水流速在絕對值上有所差異，其可能原因與場址正在進行整治有關，當生物藥劑透過監測井灌入地下進行整治時，可能因為藥劑阻塞篩孔，導致地下水流速有下降之趨勢。 3. 感謝委員建議，已將兩年工作項目實際進度及完成表附於 p.27。 4. 感謝委員建議，已修改目錄。 5. 霖昌公司所提供兩次多深度流速流向試驗結果僅能提供特定單點深度之流速，同時又受到儀器量測極限所限制，且兩次量測時間相隔久遠，在量測值差異極大的前提下，僅能以定性化方式進行比較。本研究所推估之透水性與流速為連續深度之變化值，且經過地下水數值模式與熱傳輸解析解驗證，應具有一定之可信度。 6. 本研究根據量測加熱前後之溫度差異判釋井下透水與不透水區段並推估地下水流速。在量測前，會以水位尺測量井深與地下水位，兩次試驗之水位差異不大，因此可初步排除水位差異對於地下水流速之影
---	--



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

	響。在兩次試驗期間，場址亦同時進行生物注藥或洗井的工作，此過程確實有可能改變監測井狀況與井內的環境。依據本研究之三次試驗結果，所推估之流速有逐漸變慢的趨勢。初步推斷應該與生物注藥整治導致井篩阻塞有關，然而，由於缺乏井下攝影資料，無法進一步確認。以上說明將於期末報告定稿中予以補充。
三、 盧至人委員： 1. 依所提送的期末報告初稿所述，本計畫對執行現況、流程及研究方法的說明具體詳盡。 2. 計畫後續執行工作項目及建議已於 p.82 中說明。 3. 計畫執行進度與預定進度查核表相符，並無未執行項目。 4. 依自評表的說明，成果與結案標準達成情形。 5. 研究成果的說明與原計畫目的相符，整體研究成果符合原計畫的預期(5.4.3 節，本技術的適用條件？建議討論)(本技術的相關參數建議量化討論，例如：p.80 “…只要加熱時間足夠”，若能更具體說明當更佳)(部分誤繕請修正，例如 p.69 “物差” …等)	1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員肯定。 3. 感謝委員肯定。 4. 感謝委員肯定。 5. 感謝委員建議。5.4.3 節參數敏感度分析，主要比較不同流速條件下，加熱時間對於溫度變化之敏感度變化，根據分析結果，當加熱功率 20W/m 時，不論流速快或慢，只要加熱時間超過 24 小時，即可準確的解析不同深度之地下水流速；加熱時間超達 36 小時，敏感度將達到最大值。於 5.4.3 節中，“只要加熱時間足夠”的模糊用字將修改為較精準的用字“當加熱時間超過 24 小時”。P.69 的誤植已修改。



6. 根據研究內容所提出之討論與建議合理可行。 7. 研究成果與過程有相關研究人員參與(助理或研究生)，對土水領域的人才培育有貢獻。 8. 成果研發已獲得專利，績效佳。 9. 本研究領域與國內土水污染技術研發一致，研究成果對土水技術發展有助益。	6. 感謝委員肯定。 7. 感謝委員肯定。 8. 感謝委員肯定。 9. 感謝委員肯定。
四、 宋浚評委員： 1. 工作項目及內容說明詳細。 2. 工作進度符合原訂目標。 3. 自評表勾選期中請更正為期末。 4. 論文期刊發表後請註明。 5. 依研究成果已獲 2 項發明專利。 6. 7. 有關研究成果，未來如何應用於整治結合，請補充說明。	1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員肯定。 3. 感謝委員建議。自評表中的錯誤已更正。 4. 感謝委員建議，待論文期刊完成後將予以註明。 5. 感謝委員肯定。 6. 感謝委員建議。本研究所產出之量測結果主要提供井下解析度達 0.5m 的地下水流速分佈，不僅可用於地下水污染場址之水文地質調查，亦可提供場址在進行改善或整治上重要的參考依據。整治策略可根據井下各深度透水情況與流速變化進行評估，採用不同的策略。例如：針對低透水區段、流速較慢之深度是否需要加強進行整治。以上說明將於期末報告定稿中予以



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

	補充。
五、 林淵淙委員： 1. 地下水環境可能含有金屬物質、或部分含有含氯或苯環污染物質(導致傳熱效果變差或好)，熱傳導係數如何修正或應用？未來是否可能衍生為地下水污染調查技術？	1. 感謝委員之建議。影響溫度之變化主要以熱傳導與熱對流為主，熱對流主要受控於地下水流速，而熱傳導則與土壤或岩石本身及流體的熱特性有關。在土壤或岩石不隨時間改變的前提下，本計畫中假設流體的熱傳導係數等於水的熱傳導係數，且為一定值。當地下水環境含有不同的有機物或污染物時，確實會改變流體的熱傳導係數，進而影響溫度變化。在地下水流速較快的環境下，熱的傳輸主要受控於熱對流，熱傳導的效應可以忽略，也間接導致污染物對於熱傳導係數之影響無法判釋；然而在地下水流速較慢的環境下，熱傳導的影響需予以考量，將有機會透過熱傳導係數之分析，間接推測污染物分佈，甚至濃度。目前尚未有根據不同有機物與污染物所對應之熱傳導係數資料庫存在，最主要的原因為大多數污染場址之污染物成分複雜且多樣，因此較難分辨不同成分與組成之熱傳導係數，或許未來可將此議題納入後續之研究工作之一。
2. 建議是否可提供井中水位計水位變化情形或井中流速流向測定儀地下水流向測定，擬合分散式光纖溫度感測器測定結果進行數據比對，以利瞭解分散式光纖溫度感測器準確度。	2. 感謝委員之建議。由於水位計數量有限，因此無法有效監測所有監測井之水位，附件圖 1 為第一次試驗水位變化圖。由圖上可發現加熱井 E-01 為 4 口井中水位最高之監測井，因此地下水流理論上是由井 E-



3. 井中流速流向測定儀導致地下水流動透過加熱時熱損失變化判定，另根據 5.3.4 節中陳述第二次加熱試驗之擬合結果不理想，原因為加熱時間與加熱功率為主要原因。建議探討針對不同加熱時間與功率關係進行數據擬合解析，以利求出最佳控制因子。

4. 第二次現地試驗提及井 E-01、E-01-1 及 E-01-2 距離皆大於 0.5 m，監測距離拉大需將加熱功率與時間提高，則影響半徑同時

01 向外輻射流動。然而受限於水位計數量，無法於下游井有效監測水位，因此需憑靠監測井接收熱源訊號量測溫度變化，確定地下水流方向。

3. 感謝委員之建議。5.4.3 節參數敏感度分析，主要比較不同流速條件下，加熱時間對於溫度變化之敏感度變化，根據分析結果，當加熱功率 20W/m 時，不論流速快或慢，只要加熱時間超過 24 小時，即可準確的解析不同深度之地下水流速；加熱時間超達 36 小時，敏感度將達到最大值。第一次試驗至第三次試驗即不同加熱時間之試驗，而根據試驗結果與敏感度分析可得知加熱時間短於 24 小時時，敏感度較小，流速在判釋上的不確定性較大，相較於第三次試驗，前兩次試驗在升溫過程之擬合結果相對較差。加熱功率設定時，主要需考量單位長度所承受之熱能。若加熱功率過小，則升溫變化不顯著，可能需要較長的加熱時間；若加熱功率過大，井內的水會因為自然對流之關係產生垂直水流，進而影響溫度量測。如何設定適切的加熱功率，依現地地質環境與光纖纜線材質均有密切關係，在試驗進行前，需於實驗室先行測試，方可於現地達到最佳之加熱效果。以上說明將於期末報告定稿中予以補充。

4. 感謝委員之建議。附件圖 2 為根據本研究試驗設定調整線性熱源與量測光纖之距離之影響半徑圖。根據結果顯示，當光纖距離熱源 0.5



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

增加，建議推算加熱時有效影響半徑及加熱用電成本考量，以利未來實場實際應用之可行性。

公尺後，升溫與降溫過程變化已不明顯。由於現地監測井彼此距離大於 0.5 公尺，在提高加熱功率與時間的同時，需選用高耐熱材質光纖外皮。光纖加熱試驗由於仍在試驗階段，試驗設計之優化將為未來的方向之一，而試驗之成本分析未來的亦會納入考量，以利未來實場實際應用之可行性。

5. 除了解流速外，是否可推估流向，另由 E-01 流速變化差頗大，是否已阻篩。

5. 本研究於第二、第三次現地試驗中除了加熱井外，於監測井周圍與下游監測井同樣佈設光纖進行量測，寄望藉由跨孔的試驗及井溫變化，推測地下水流之方向。然而，根據量測結果顯示，監測井周圍及下游監測井在加熱過程中並未接收到溫度上升之訊號。造成此量測結果之原因除了受地下水流方向之外，加熱井與監測井間之距離較遠或熱散失過快，因此無法準確獲得地下水流向資訊。為克服此一問題，後續可考慮透過多條光纖之排列組合設計，僅利用單井之方式，判釋地下水流方向。兩次試驗所推估的地下水流速在絕對值上有所差異，初步推斷應該與生物注藥整治導致井篩阻塞有關，然而，由於缺乏井下攝影資料，無法進一步確認。以上說明將於期末報告定稿中予以補充。

6. 已獲得新型專利，未來請加速發明專利。

6. 感謝委員建議。發明專利申請已送出，然其審核時間較長，未來一旦獲得審核通過，將予以註明。

7. 感謝委員建議。根據文獻顯示，加熱前後水溫變化小於 8~10 度，井



7. 加熱溫度若太高，是否會影響水流動方向。

內將不會發生自然對流之情形，亦不會產生井內的垂直水流。根據井下放置之溫度計與光纖量測溫度結果顯示，加熱過程之水溫變化均小於 8~10 度，因此，將不會影響井內之垂直水流。由於加熱之影響半徑較小，井外因水溫變化所造成的水流方向改變影響亦微乎其微。

8. PPT 加熱時間試驗(E-01)中，預計 20w/m 加熱一天即可，是否有不同加熱功率之成果。

8. 感謝委員建議。加熱功率設定時，主要需考量單位長度所承受之熱能。若加熱功率過小，則升溫變化不顯著，可能需要較長的加熱時間；若加熱功率過大，井內的水會因為自然對流之關係產生垂直水流，進而影響溫度量測。如何設定適切的加熱功率，依現地地質環境與光纖纜線材質均有密切關係，在試驗進行前，需於實驗室先行測試，方可於現地達到最佳之加熱效果。本研究三次試驗所設定之功率皆是經過實驗室測試後所設定之最佳功率。

專案主持人：_____ (簽名及蓋章)



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

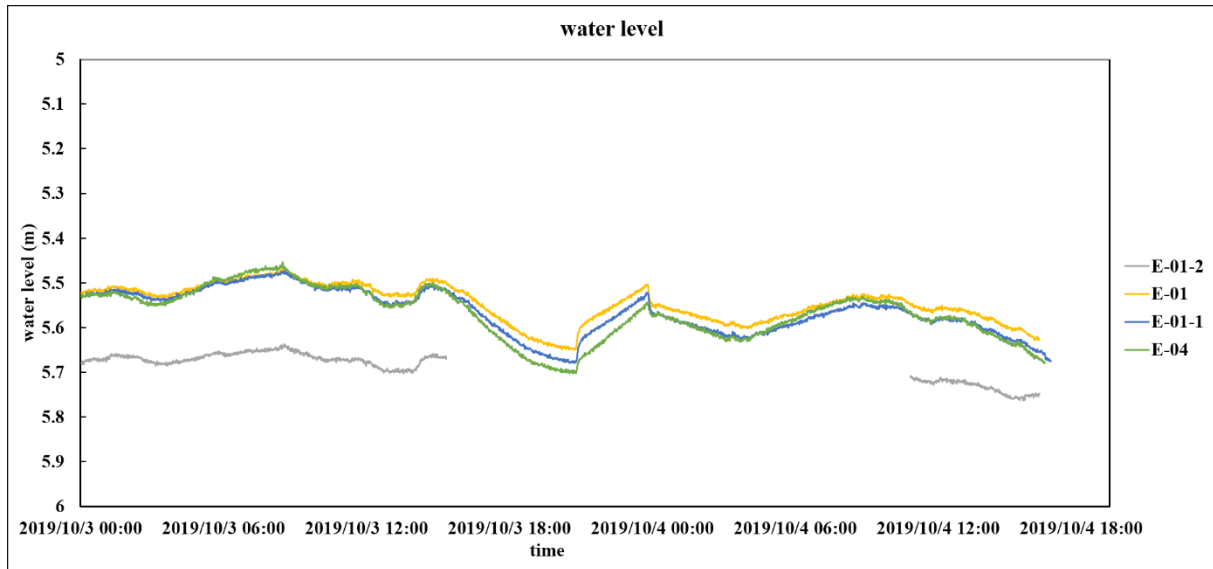


圖 1 第一次試驗監測井水位變化

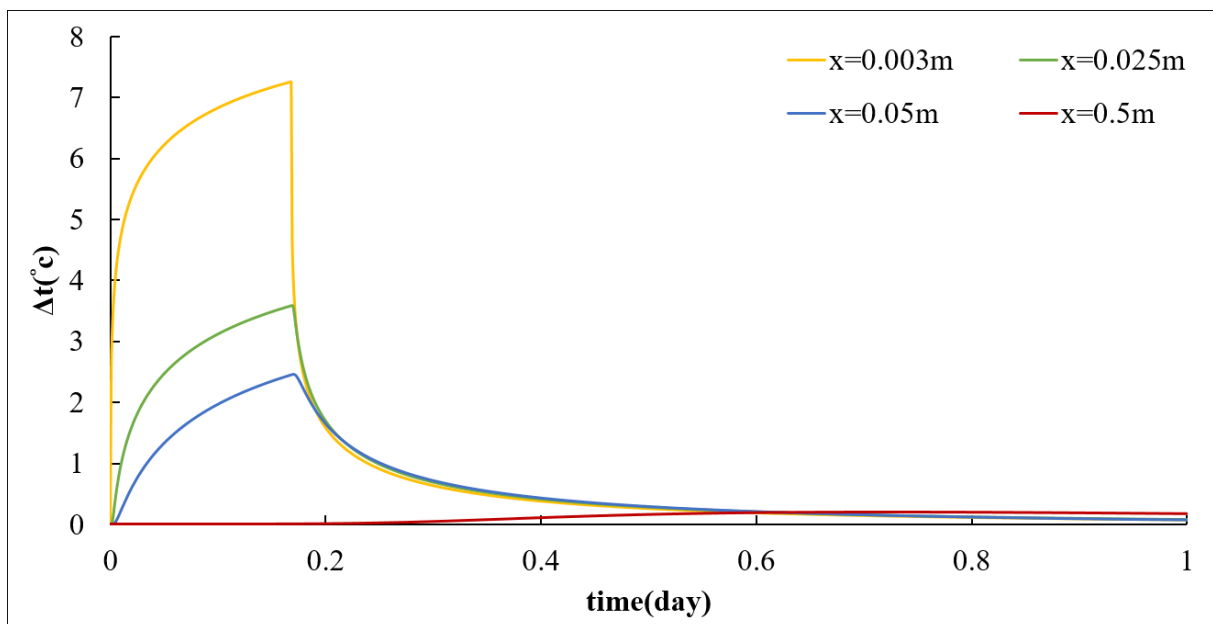


圖 2 影響半徑結果



一、 研究成果中文摘要

本研究為兩年期模場試驗專案，以分散式光纖溫度感測器(fiber optic distributed temperature sensor, FO-DTS)於地下水污染廠址進行高解析度水文地質調查。第一年度執行項目為針對監測井進行熱水注入試驗，藉由溫度回升的過程可判釋不同深度之透水性，並以耦合地下水數值模式 MODFLOW 與 MT3DMS 模擬停止注水後溫度回復之過程，針對水文地質參數進行量化。第二年度執行項目為以主動式加熱法針對監測井進行加熱試驗，透過升溫和回復的過程判釋井下不同深度之透水區段，並以線性熱源之熱傳輸解析解分析溫度量測資料，進而推估不同深度之地下水流速。研究區域主要以廠區內地下水上游的井 E-01 與周圍監測井 E-01-1 與 E-01-2 為主，地下水下游的監測井則僅進行溫度變化監測。研究結果顯示，上游監測井之透水區段主要分佈在深度 7~10 公尺，不透水區段為 12~14 公尺，下游監測井在加熱期間亦可接收到些微溫度上升之訊號。以耦合數值模式所計算之水平向水力傳導係數與熱傳輸解析解量化溫度資料後所推估之地下水流速結果相符合。由於 FO-DTS 可提供時、空中的高解析度連續性量測資料，在分析井下不同深度之地下水流速分佈時，其空間中的解析度可高達 50 公分；由於光纖佈設成本相對較低，不僅可同時針對多口監測井進行試驗，亦可於短時間進行多次量測，提供水文地質環境隨時間之演變。透過解析解針對加熱時間與地下水流速進行敏感度分析，可更進一步提供 FO-DTS 搭配加熱系統在量測作業上之標準流程。本專案計畫提供之 FO-DTS 創新量測技術可在不擾動地下水流的情況下有效進行井下高解析度水文地質調查，避免污染物因注水或其它外力而造成污染範圍擴大，本計劃之研究成果可提供污染場址調查與整治上之重要評估與參考依據，藉由此創新量測技術的研發，未來可大幅度提升我國在水文地質調查的解析能力。

關鍵詞：分散式光纖溫度感測器、熱示蹤劑試驗、主動式加熱法、地下水流速、水文地質調查、地下水污染



二、 研究成果英文摘要

This study is a two-year in-situ project. The fiber optic distributed temperature sensor (FO-DTS) is applied in a groundwater contaminated sites to investigate hydrogeological conditions. The injection of hot water into the wells were conducted in the first year. The permeable zone at different depths can be identified via temperature recovery. Besides, the hydrogeological parameters can be estimated by the coupled numerical models of MODFLOW and MT3DMS which are used to simulate the process of heat transfer. In the second year, the active-DTS is applied to estimate the groundwater flow velocities at different depths. The permeable zone at different depths can be identified via the temperature rising and recovery. Besides, the groundwater flow velocity is quantified by the analytical solution of heat transfer with a heated line source. This study area mainly focused on three wells at the upstream of groundwater flow direction, i.e., E-01, E-01-1 and E-01-2 and the rest of wells at the downstream of were used for monitoring. The results show that the distributions of high and low permeable zones are at the depth of 7~10m and 12~14m, respectively. The temperature changes were observed in the wells at the downstream. Compared to the hydraulic conductivities obtained from the coupled numerical models, the estimated flow velocities through the analytical solution are consistent with each other. Due to continuous measurements of FO-DTS, the spatial resolution of estimated flow at different depths can reach to 50 cm. The low cost of fiber optic cable makes it is feasible to conduct many field tests within a short period of time and provides further information of changes of hydrogeological environment. Furthermore, the analysis of using the analytical solution can provide the sensitivity between the heating time and temperature changes and establish a standard operating procedure for the FO-DTS test. In this study, the innovative FO-DTS can provide an alternative technique of hydrogeological investigation effectively without disturbing groundwater flow and extending the contaminated plume. The developed technique and measured procedure can be considered as a reference tool and improve our capability of hydrogeological site investigation and groundwater contaminated sites remediation.

Keywords: fiber optic distributed temperature sensor, heat tracer, active-DTS, line heating source, hydrogeological survey, groundwater contamination



三、 目次、圖次、表次

目次

(一) 前言	1
(二) 研究目的	3
(三) 文獻探討	3
(四) 研究方法與材料	10
4.1 分散式光纖溫度感測器量測原理	11
4.2 分散式光纖溫度感測器基本元件與延伸配件	12
4.3 主動式分散式光纖溫度感測器	14
4.4 線性熱源之熱傳輸解析解	17
4.5 模場概況	18
4.6 兩年工作項目與進度	27
(五) 結果與討論	28
5.1 第一年度研究結果	28
5.1.1. 第一次現地試驗	28
5.1.2. 第二、三次現地試驗	29
5.2 第二年度研究成果	35
5.2.1. 第一次現地試驗	35
5.2.2. 第二次現地試驗	38
5.2.3. 第三次現地試驗	53
5.3 熱傳輸解析解	63
5.3.1 解析解驗證	63
5.3.2 線性熱源熱傳輸解析解參數設定	64
5.3.3 井 E-01 第一次加熱試驗擬合結果	65
5.3.4 井 E-01 第二次加熱試驗擬合結果	70
5.3.5 井 E-01 第三次加熱試驗擬合結果	74
5.3.6 井 E-01 井下地下水流速隨深度變化	78
5.4. 討論	79



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

5.4.1	與多深度流速流向、岩心結果比較.....	79
5.4.2	與第一年度注熱水結果比較.....	80
5.4.3	參數敏感度分析	81
(六)	結論	82
(七)	參考文獻.....	85



圖次

圖 1 飽和沉積物水力傳導係數與熱傳導係數與沉積物顆粒組成之關係圖 (摘自 Stonestrom and Constantz, 2003)	2
圖 2 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-environmental-monitoring/ap-sensing-technology)	4
圖 3 FO-DTS 對於地下水向上補注區段之判識結果 (摘自 Westhoff et al., 2007)	5
圖 4 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)	5
圖 5 (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)	6
圖 6 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)	7
圖 7 FO-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).....	8
圖 8 FO-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).....	9
圖 9 FO-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).....	9
圖 10 FO-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).....	10
圖 11 散射訊號之頻率圖譜示意圖 (摘自 Selker et al., 2006)	12
圖 12 (a) 雷射脈衝分析儀主機與 (b) 控制面板 (XT-DTS™, Silixa Ltd)	14
圖 13 Ultima-DTS™, Silixa Ltd.....	14
圖 14 鍍裝光纖纜線及其剖面示意圖 (Kaiphone, Taiwan)	14



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 15 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.....	15
圖 16 主動式光纖溫度感測所選用之光纖內部構造示意圖	16
圖 17 主動式分散式光纖溫度感測器井下佈設示意圖	16
圖 18 場址內井位配置與地下水流向示意圖	19
圖 19 二維地質概念模型圖	20
圖 20 三維地質概念模型圖	21
圖 21 微水試驗結果	23
圖 22 多深度微水試驗結果	23
圖 23 第一次試驗井 E-06 絕對溫度剖面	28
圖 24 井 E-01 絕對溫度剖面	30
圖 25 井 E-01-1 絕對溫度剖面	31
圖 26 井 E-01-2 絕對溫度	32
圖 27 井 E-04 絕對溫度剖面	33
圖 28 井 MW-03 絕對溫度剖面.....	34
圖 29 第二次、第三次注水試驗透水區段示意圖	35
圖 30 井 E-01 第一次加熱試驗溫度量測結果 (圖中紅框分別為升溫與回溫的區間)	37
圖 31 井 E-01 第一次加熱試驗溫度上升 (heat) 過程	37
圖 32 井 E-01 第一次加熱試驗溫度回復 (revocery) 過程.....	38
圖 33 第二次加熱試驗現地光纖佈設	39
圖 34 現地試驗照片: (a) 光纖加熱井口佈設, (b) 光纖加熱佈設, (c) 夜間持續加熱	40
圖 35 第二次加熱試驗井 E-01、E-01-1 與 E-01-2 之溫度變化 (圖中紅框分別為各加熱井之升溫與回復區間)	42
圖 36 井 E-01 第二次加熱試驗溫度上升過程	43
圖 37 井 E-01 第二次加熱試驗溫度回復過程	43
圖 38 井 E-01-1 第二次加熱試驗溫度上升過程	45
圖 39 井 E-01-1 第二次加熱試驗回復過程	45
圖 40 井 E-01-2 第二次加熱試驗溫度上升過程	47
圖 41 井 E-01-2 第二次加熱試驗回復過程	47
圖 42 井 E-04 第二次加熱試驗溫度變化 (黑框分別為 E-01、E-01-1 與 E-	



01-2 的加熱時間)	48
圖 43 井 OE-2 第二次加熱試驗溫度變化 (黑框分別為 E-01、E-01-1 與 E-01-2 的加熱時間)	49
圖 44 井 OE-5 第二次加熱試驗溫度變化 (黑框分別為 E-01、E-01-1 與 E-01-2 的加熱時間)	50
圖 45 井 OE-1 第二次加熱試驗溫度變化 (黑框分別為 E-01、E-01-1 與 E-01-2 的加熱時間)	51
圖 46 井 OE-3 第二次加熱試驗溫度變化 (黑框分別為 E-01、E-01-1 與 E-01-2 的加熱時間)	52
圖 47 井 E-01 第三次加熱試驗溫度變化	54
圖 48 井 E-01 第三次加熱試驗溫度上升過程	55
圖 49 井 E-01 第三次加熱試驗溫度回復過程	55
圖 50 井 E-01-2 第三次加熱試驗溫度變化	56
圖 51 井 E-01-1 第三次加熱試驗溫度變化	57
圖 52 井 E-04 第三次加熱試驗溫度變化	58
圖 53 井 OE-2 第三次加熱試驗溫度變化	59
圖 54 井 OE-5 第三次加熱試驗溫度變化	60
圖 55 井 OE-1 第三次加熱試驗溫度變化	61
圖 56 井 OE-3 第三次試驗溫度變化	62
圖 57 解析解所計算之不同熱源距離之溫度變化(摘自 Bakker et al.,2015)	63
圖 58 以 Bakker et al(2015) 之解析解與參數設定驗證不同熱源距離之之溫度變化結果	64
圖 59 井 E-01 第一次加熱試驗溫度擬合結果: 7~8.5m、(b)9~10.5m、(c)11~12.5m、(d)13~14.5m.....	68
圖 60 井 E-01 第二次加熱試驗溫度擬合結果: (a) 7~8.5m、(b) 9~10.5m、(c) 11~12.5m、(d)13~14.5m.....	72
圖 61 井 E-01 第三次加熱試驗溫度擬合結果: (a) 7~8.5m、(b) 9~10.5m、(c) 11~12.5m、(d)13~14m.....	76
圖 62 三次加熱試驗推估之地下水流速隨深度變化	78
圖 63 解析解擬合之地下水流速與多深度流速流向及地層岩心描述之比較	80
圖 64 解析解地下水流速與第一年度注入熱水之透水性分佈比較	81



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 65 流速隨時間敏感度變化	82
-----------------------	----

表次

表 1 XT-DTS 與 Ultima-DTS	13
表 2 簡易井基本資料	24
表 3 解析解之參數設定	65
表 4 井 E-01 第一次加熱試驗之參數擬合結果	69
表 5 井 E-01 第二次加熱試驗之參數擬合結果	73
表 6 井 E-01 第三次加熱試驗之參數擬合結果	77



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)。以溫度為示蹤劑之優勢除了量測容易，儀器便宜之外，另一主要原因為不確性的大幅降低。以傳統直接量測地下水位之方式進行地下水流速推估時，由不同岩性組成的含水層，其水力傳導係數變化範圍可相差數個量級以上 (圖 1)，即使擁有高精度的水位量測資料，所推估的地下水流速將因水力傳導係數的不確定性而產生量級上的誤差。若透過量測溫度之方式進行地下水流速推估，其主要控制因素為含水層的熱傳導係數 (thermal conductivity)，而此係數在不同岩性組成的含水層中，其變化範圍僅有 1-3 倍的差異 (主要岩性之熱傳導係數約介於 1~3 W/m/c，圖 1)，因此，當擁有高精度的溫度量測資料時，所推估地下水流速的不確定性僅為倍數上的誤差，相較於水力傳導係數不確定性所導致數量級上的差異，以溫度法所推估的水流速度之可信度可大幅提升。



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

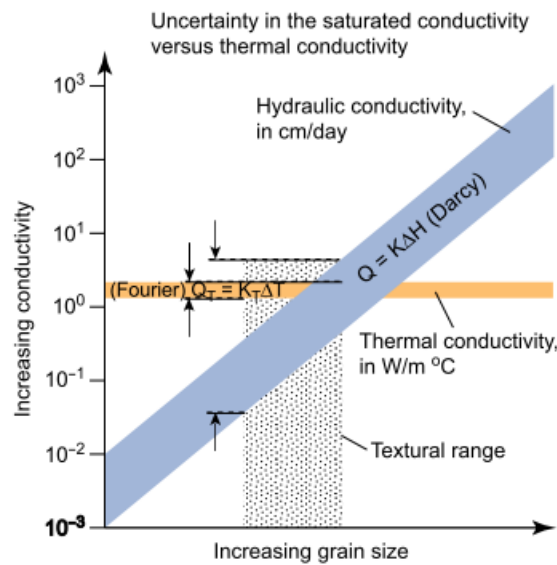


圖 1 飽和沉積物水力傳導係數與熱傳導係數與沉積物顆粒組成之關係圖（摘自 Stonestrom and Constantz, 2003）

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，需要更加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，



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

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 2) 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，並透過能量守恆模式量化地下水對於河水的補注量 (圖 3)。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 4)。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 5)。

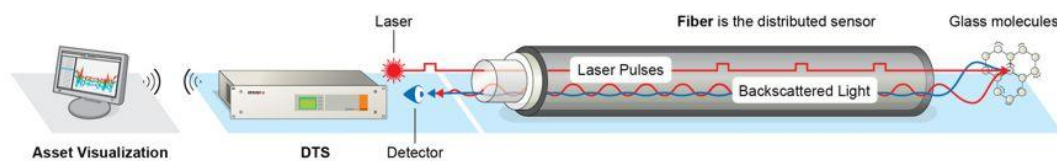


圖 2 分散式光纖溫度感測器示意圖 (摘自

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

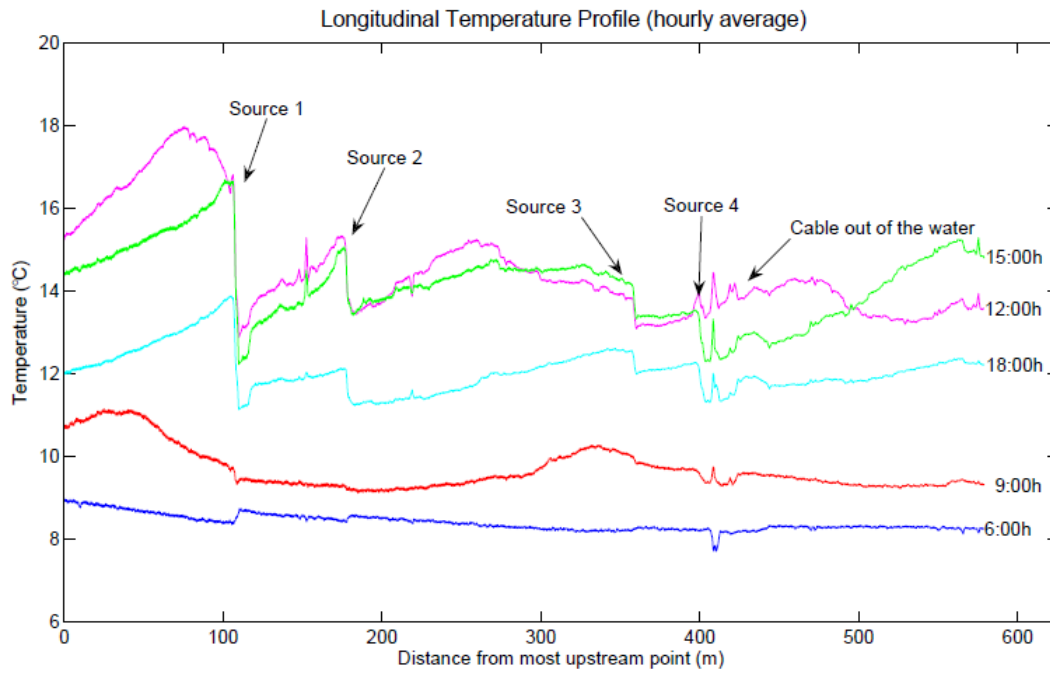


圖 3 FO-DTS 對於地下水向上補注區段之判識結果（摘自 Westhoff et al., 2007）

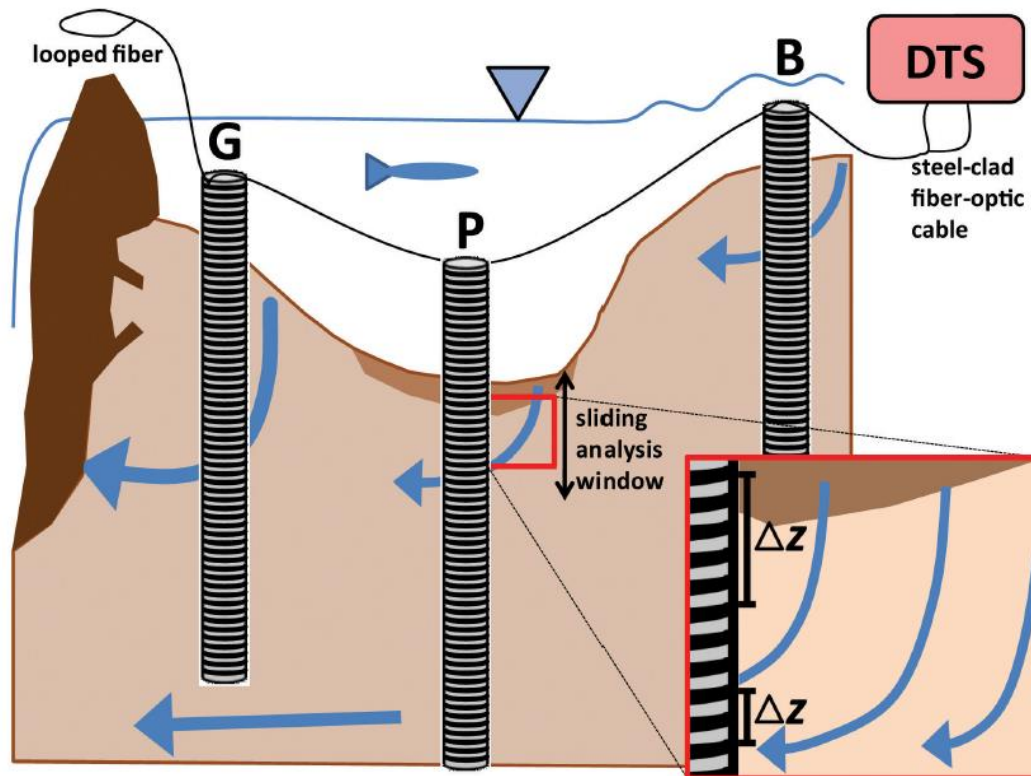


圖 4 FO-DTS 在美國懷俄明州的 beaver 水壩現地佈設情形（摘自 Briggs et al., 2012）



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

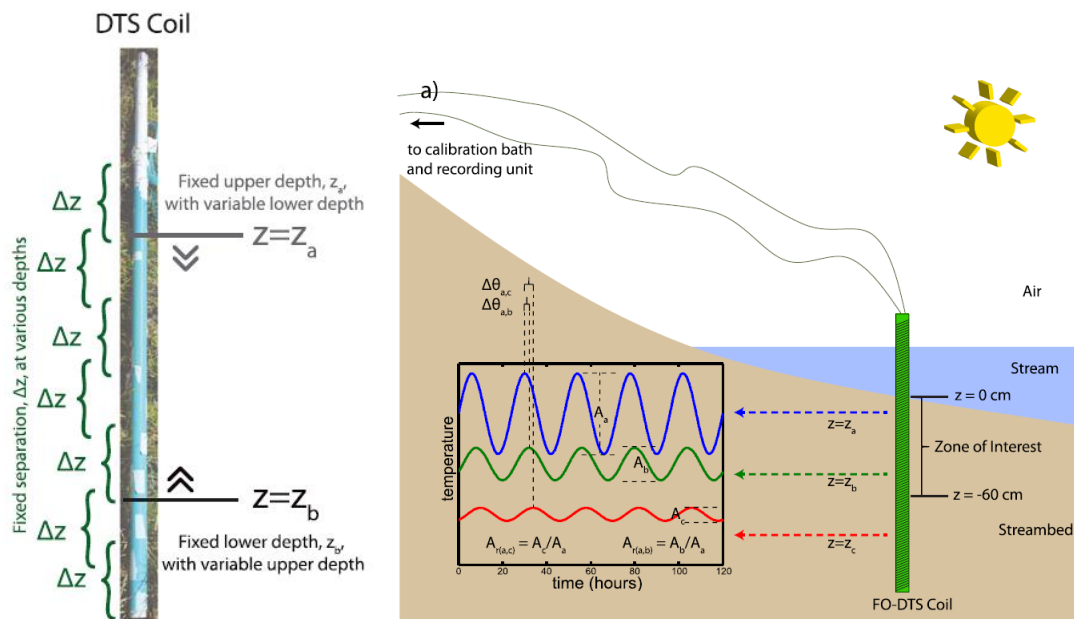


圖 5 (a) FO-DTS 的資料解析應用，(b) FO-DTS 於澳洲 Maules 河川的河岸邊佈設情形 (Halloran et al., 2016)

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 6)。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 7)。

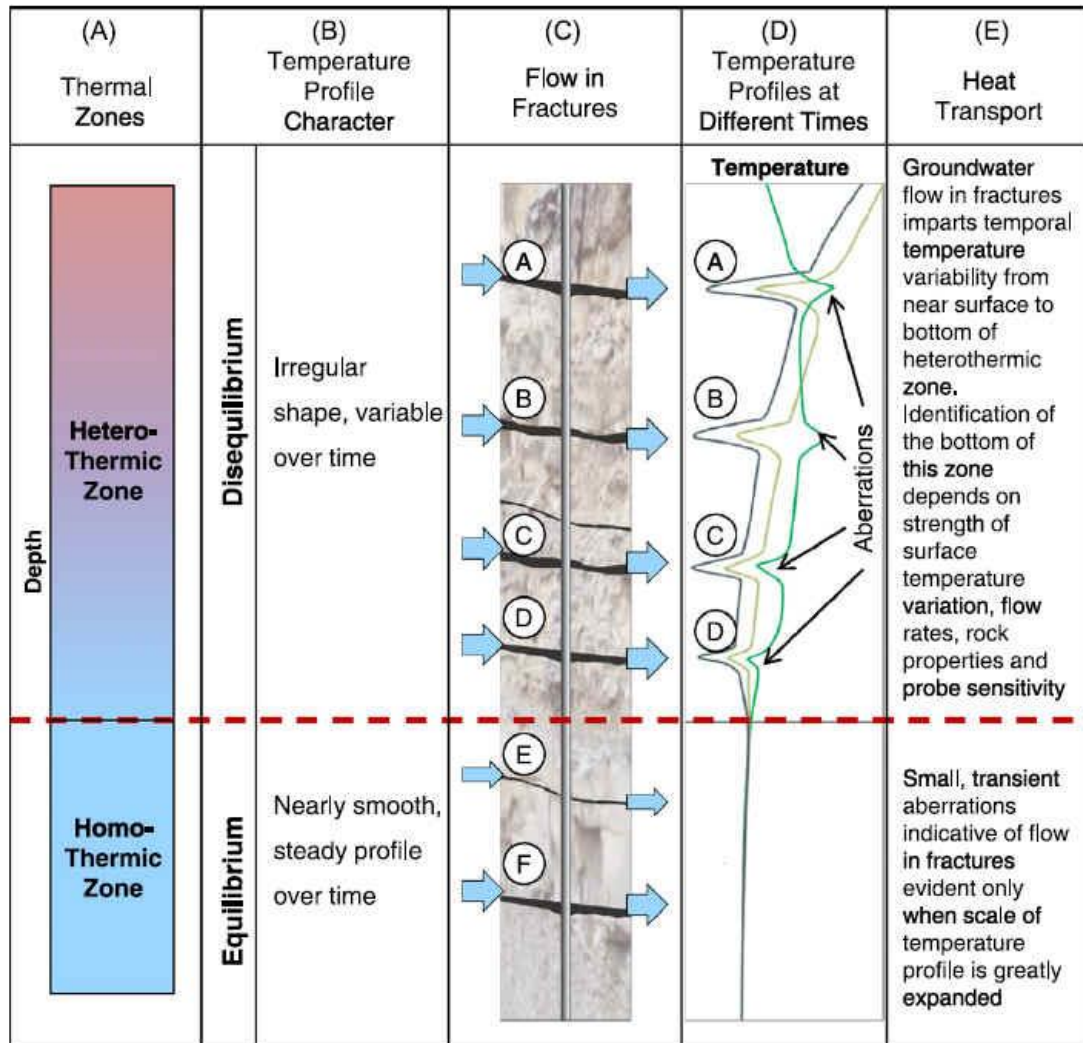


圖 6 主動式分散式光纖溫度感測器在井下優勢水流路徑調查示意圖（摘自 Pehme et al., 2013）

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 8a，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 8b。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 9a)，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



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

體性質與地下水流強度影響；圖 9b 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 10，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。

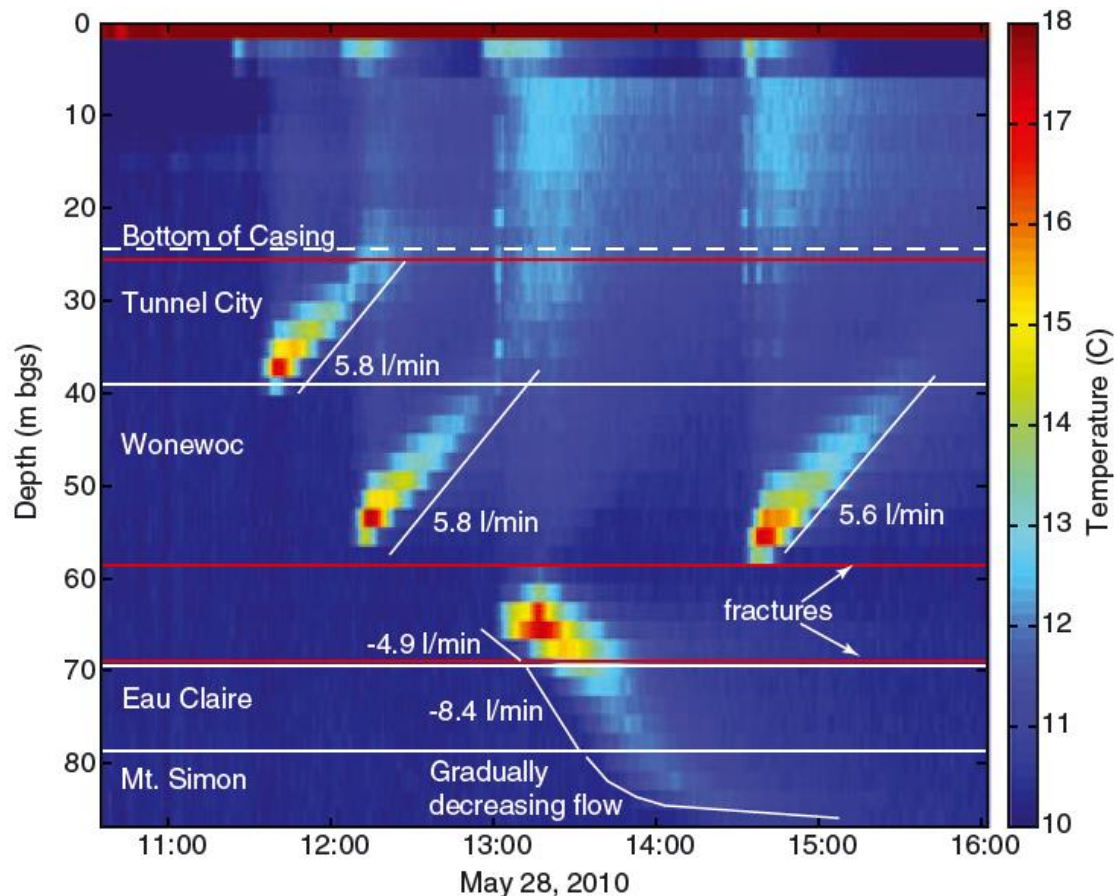


圖 7 FO-DTS 溫度資料圖，斜直線與曲線為觀測得的熱對流方向與流速變化(摘自 Leaf et al., 2012)



研究內容

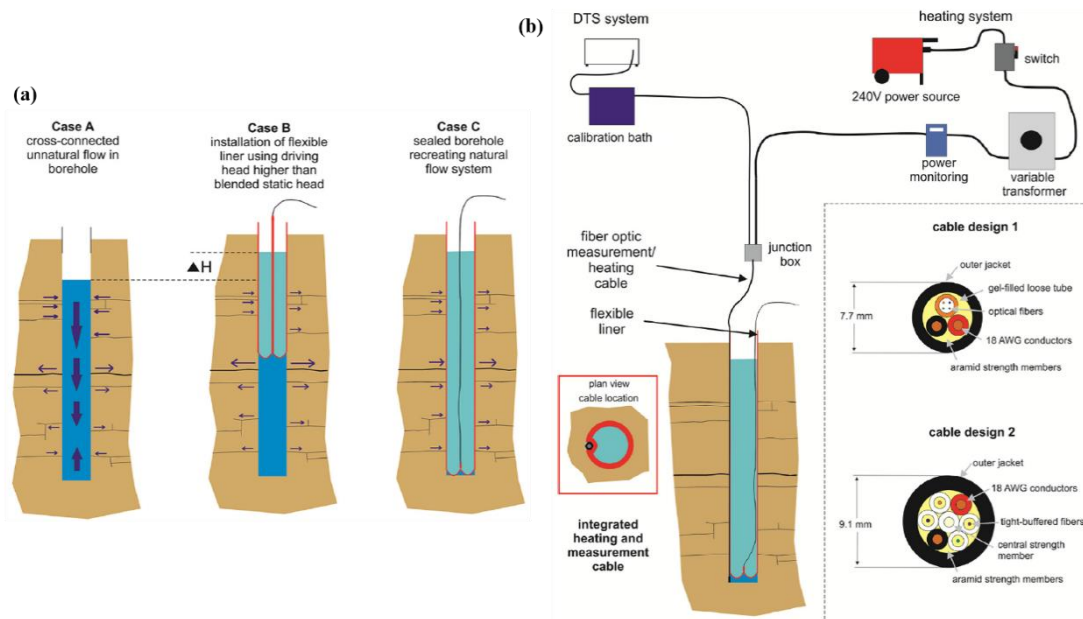


圖 8 FO-DTS 於井下分析之實驗配置 (a)彈性井體套管安裝(flexible borehole liner);(b)分散式溫度感測器與主動加熱系統(摘自 Coleman et al., 2015)

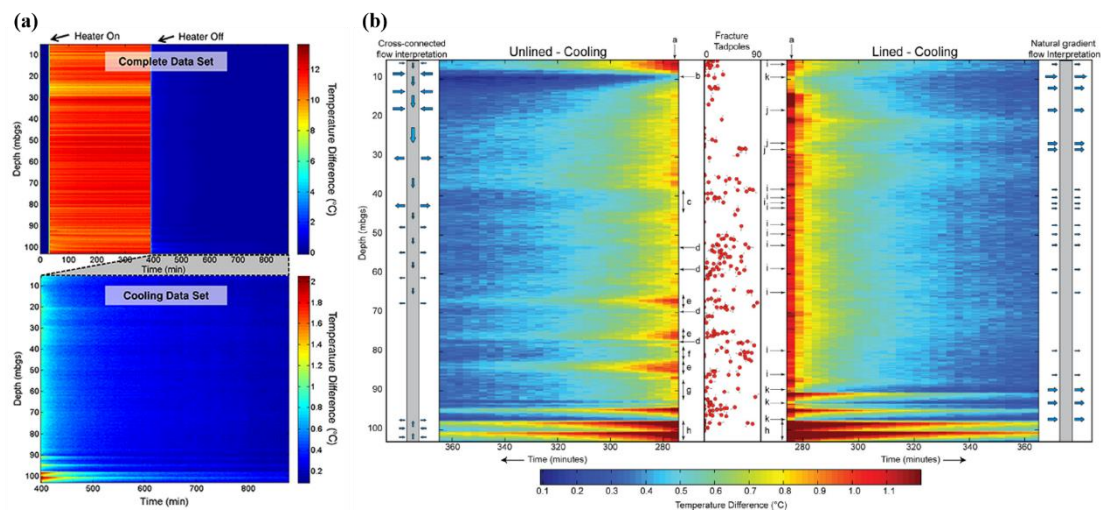


圖 9 FO-DTS 量測結果 (a)加熱與自然冷卻之溫度差異分佈[Test#1];(b)套管無封篩[Test#2]與封篩[Test#3]之自然水流冷卻溫度差異(摘自 Coleman et al., 2015)



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

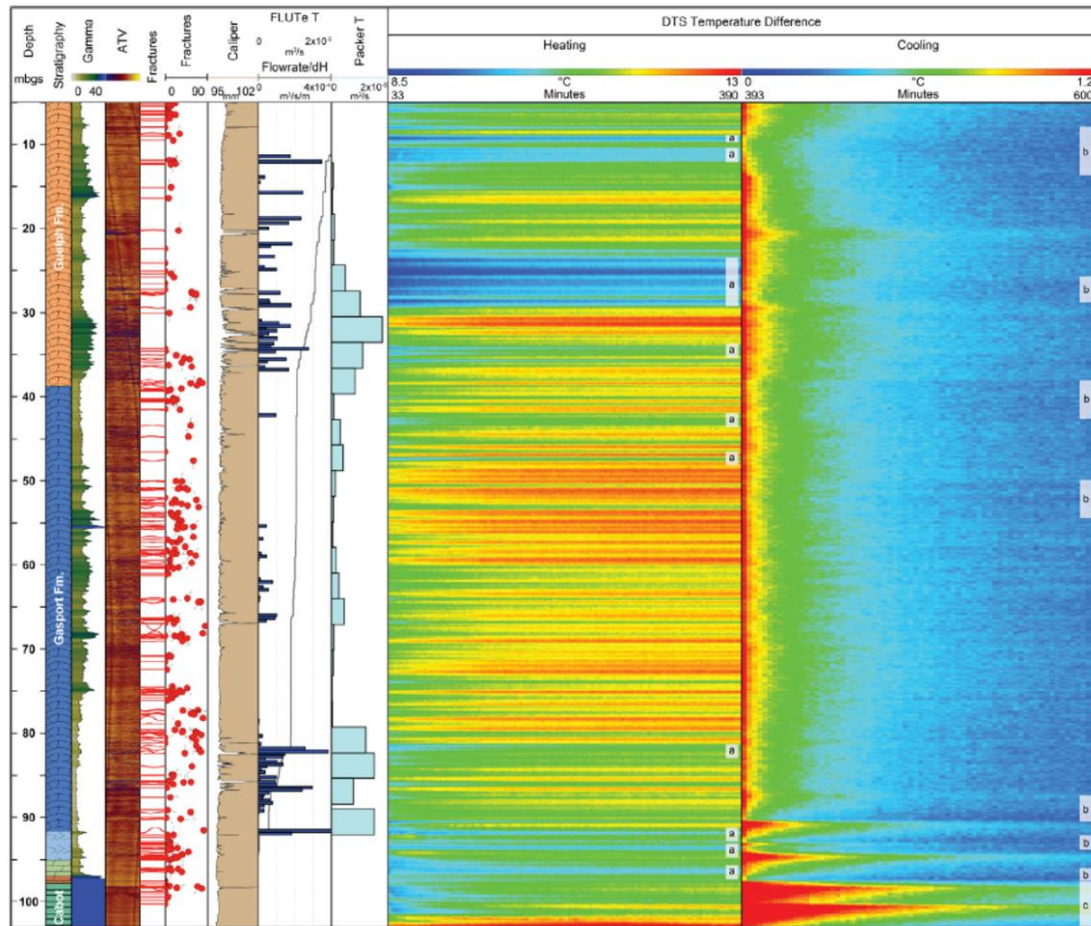


圖 10 FO-DTS 於井 MW-25 之加熱及冷卻溫度差異分佈與地層分佈情形、Natural gamma、ATV 強度、裂隙分佈、virtual caliper、FLUTE T 及 Packer T 比較(摘自 Coleman et al., 2015)

(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 °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 11），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]， $\hbar$ 為普朗克常數， 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。



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

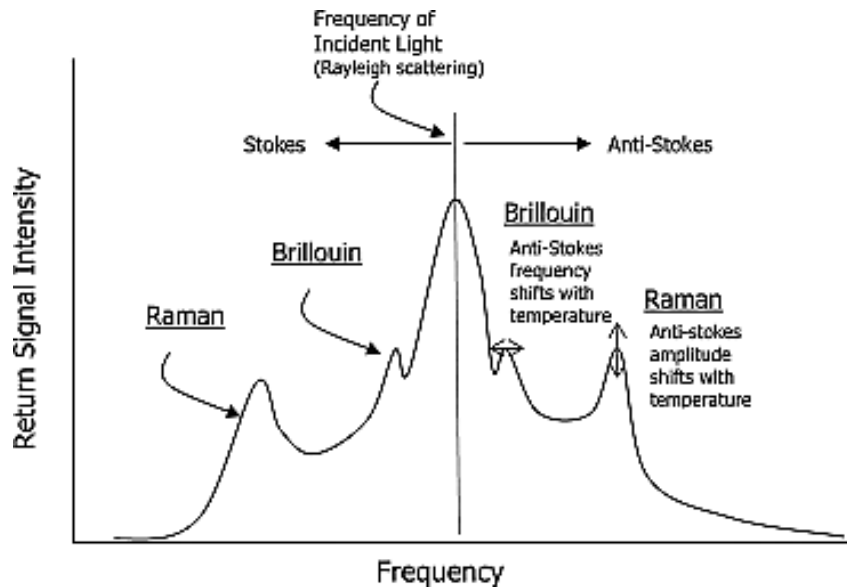


圖 11 散射訊號之頻率圖譜示意圖（摘自 Selker et al., 2006）

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 12a 所示（型號：Silixa Ltd., XT-DTS™），其控制面板如圖 12b 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。圖 13 為另一型號之分散式光纖溫度感測器主機（型號：Silixa Ltd., Ultima-DTS™），其控制面板與 XT-DTS™ 大同小異，但主機需連接外接螢幕與操控的鍵盤及滑鼠。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™ 與 Ultima-DTS™ 進行土壤與地下水污染場址之井下現地試驗，XT-DTS™ 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；Ultima-DTS™ 其量測最大距離可達 5km，溫度解析度達 0.01℃，空間解析度為 0.125m，量測間隔為每 1 秒一筆資料（表 1）。



表 1 XT-DTS 與 Ultima-DTS

	XT-DTS™	Ultima-DTS™
量測距離	10km	5km
溫度解析度	0.01°C	0.01°C
空間解析度	0.25m	0.125m
量測間隔	5s	1s

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 14 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) 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。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。



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

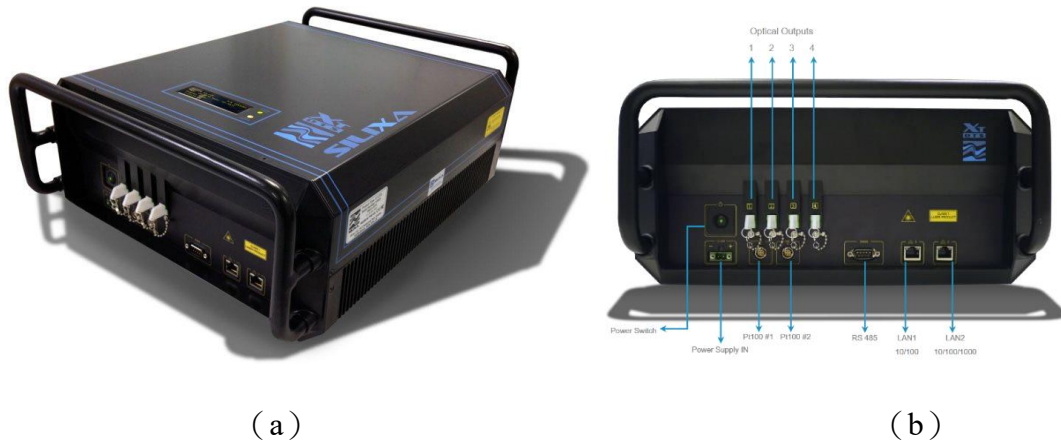


圖 12 (a) 雷射脈衝分析儀主機與 (b) 控制面板 (XT-DTS™, Silixa Ltd)



圖 13 Ultima-DTS™, Silixa Ltd



圖 14 鎧裝光纖纜線及其剖面示意圖 (Kaiphone, Taiwan)

4.3 主動式分散式光纖溫度感測器

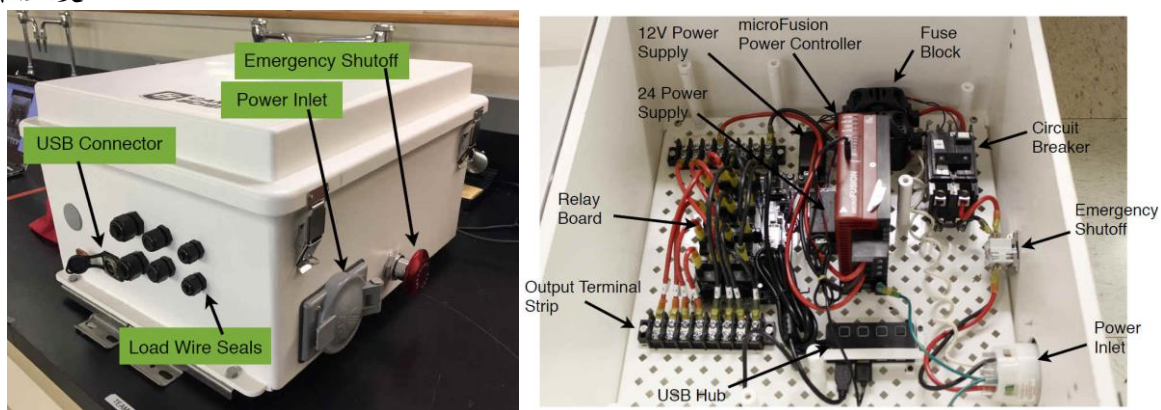
主動式分散光纖溫度感測器為本專案於第二年度主要使用方法，主動式分散光纖溫度感測器與被動式的感測器相同，皆須使用雷射脈衝分析儀主機與光纖，唯一的差異在於光纖的加熱控制系統 (heating pulse controller, HPC)，如圖 15。HPC 的組成主要包括：microFusion power controller、relay board、power supply、



fuse block、output terminal stripe、circuit break、emergency shutoff、USB connector 及 power inlet。所以的元件都安裝於一防水、可攜式的箱子中（圖 15a），其內部配置如圖 15b。

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有特別的需求，本專題計畫預計將使用祥林科技股份有限公司所生產的光纖進行試驗（圖 16），選用之光纖外層有包覆銅線，目的為透過銅線通電而達到加熱的效果。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 17 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 17 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。主動式感測器量測結果亦可提供更多的量測資訊，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汙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 15 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

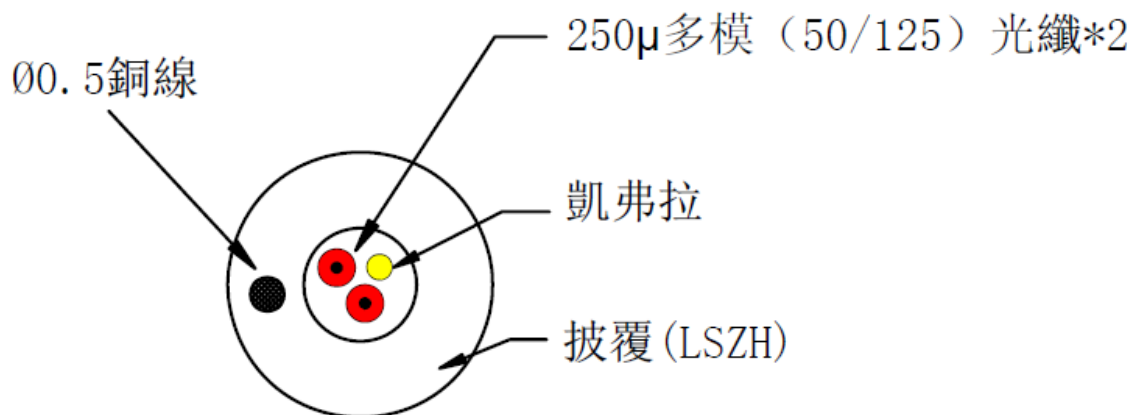


圖 16 主動式光纖溫度感測所選用之光纖內部構造示意圖

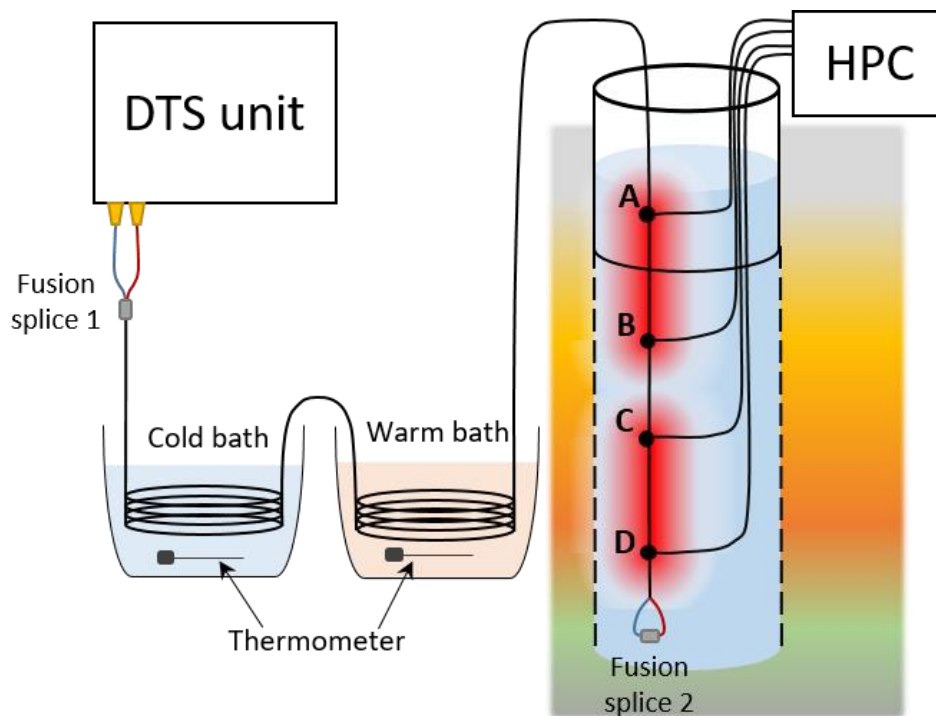


圖 17 主動式分散式光纖溫度感測器井下佈設示意圖



4.4 線性熱源之熱傳輸解析解

在獲取時空上高解析度的溫度量測資料後，藉由熱-水流傳輸解析公式可用以推估井下各深度之溫度，藉以驗證 DTS 之量測結果。假設一水平向延伸的地層中，含水層呈現垂直分佈，而地下水流與熱能僅能在單一地層中流動；層與層之間的垂向傳輸則忽略不計。每一地層均假設為均質，且地下水流沿著 X 軸方向上之穩態流動。當黏滯性與密度影響忽略不計，且水和固體的溫度達到瞬間平衡時，考慮地下水流與熱傳輸在水平向無限延伸之含水層中的耦合，地層中溫度變化的控制方程式為(Hopmans et al., 2002; Rau et al., 2012; Smith & Chapman, 1983):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) - \frac{u}{R} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{式 } 2)$$

式中，T 為溫度，t 為時間，D 為熱擴散係數，R 為熱遲滯係數。後兩項參數與水和固體顆粒的特性有關：

$$D = \frac{k}{c\rho} = \frac{nk_w + (1-n)k_s}{nc_w\rho_w + (1-n)c_s\rho_s} \quad (\text{式 } 3)$$

$$R = \frac{c\rho}{nc_w\rho_w} 1 + \frac{(1-n)c_s\rho_s}{nc_w\rho_w} \quad (\text{式 } 4)$$

式中，k 為熱傳導係數，c 為比熱容， ρ 為密度，n 為孔隙率。式中 s 代表固體，w 則代表水。假設一條和水流方向垂直且無限延伸之熱源，將起點視為坐標系統中原點之位置，當熱源以穩定功率 q，在 $t=t^*$ 進行加熱時，溫度的變化的函數式可寫為 (Ren et al., 2000; Kluitenberg and Warrick, 2001)：

$$\Theta(x, y, t, t^*) = \frac{q}{4\pi k} \exp\left(\frac{ux}{2DR}\right) W\left(\frac{x^2 + y^2}{4D(t-t^*)}, \frac{u\sqrt{x^2 + y^2}}{2DR}\right) \quad (\text{式 } 5)$$

W 為 Hantush Well 函數 (Veling and Maas, 2010)

$$W(a, b) = \int_a^\infty \frac{1}{s} \exp\left(-s - \frac{b^2}{4s}\right) ds \quad (\text{式 } 6)$$

熱源在開始加熱(t_0)與結束加熱(t_1)之溫度函數式可寫成

$$\begin{aligned} T(x, y, t) &= \Theta(x, y, t, t_0) & t_0 \leq t \leq t_1 \\ T(x, y, t) &= \Theta(x, y, t, t_0) - \Theta(x, y, t, t_1) & t \geq t_1 \end{aligned} \quad (\text{式 } 7)$$



4.5 模場概況

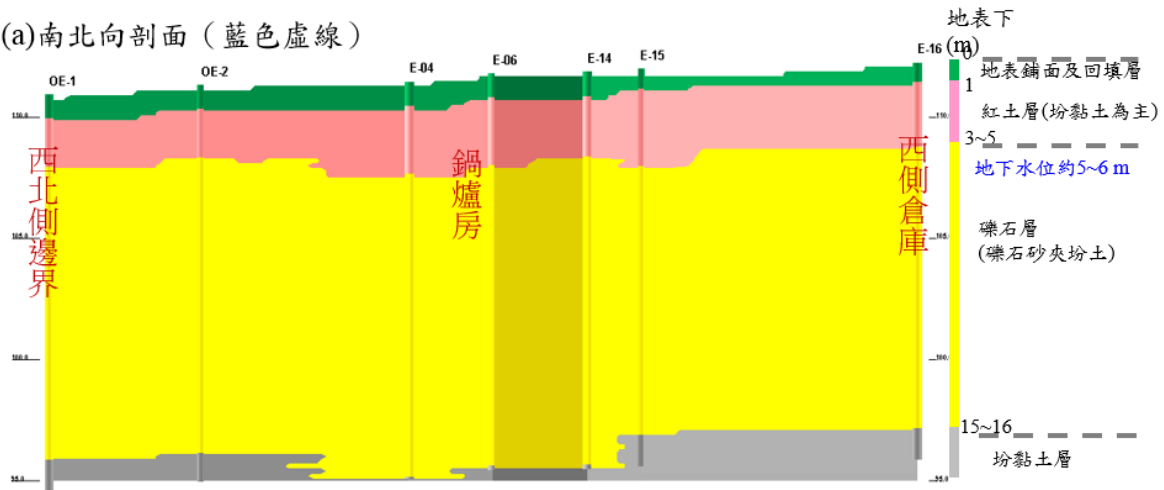
本研究計畫所選定之污染場址位於桃園市中壢區的勝暉化成股份有限公司，場址面積約為 6400 m²，鄰近老街溪及炭仔腳分渠，東南方 700 公尺為中山高速公路，附近主要為農地及魚塢，並有零星工廠及住宅，使用地類別為丁種建築用地。場址係以生產各式工業助劑，如有機染料／顏料化學製造程序、界面活性劑化學製造程序的工業溶劑等，產品與服務主要以底片相紙沖印液、染料、顏料、塗料中間體、助劑製造，現況為運作中工廠。經由民國 103 年環保署「運作中工廠土壤及地下水含氯有機溶劑污染潛勢調查及查證計畫（第 5 期）」調查結果發現污染，土壤污染物包括：1,2-二氯苯（1,2-DCB）、1,3-二氯苯（1,3-DCB）、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 18 所示，以 Rockworks™繪製本場址地質二維與三維模型圖如圖 19 與圖 20 所示。圖 19a 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 19b 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

(a)南北向剖面（藍色虛線）



(b)東西向剖面（紅色虛線）

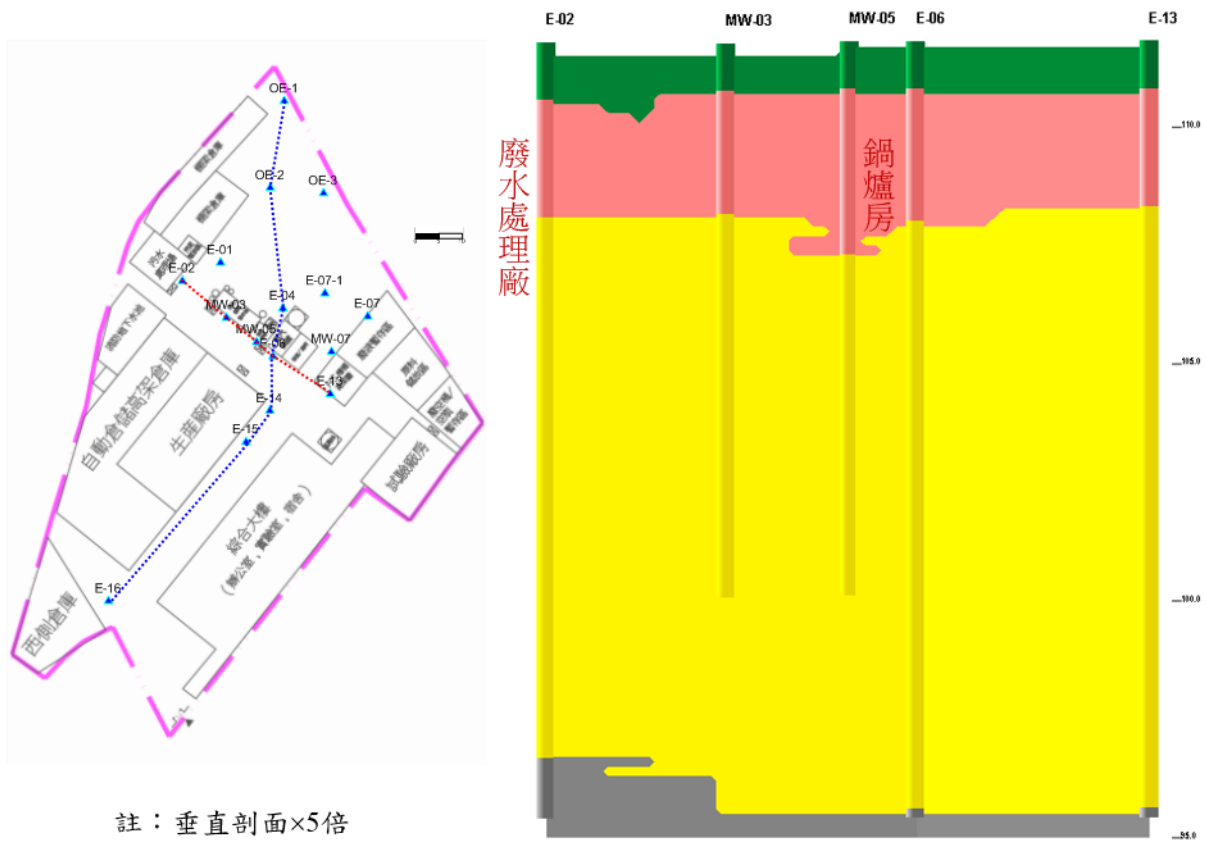


圖 19 二維地質概念模型圖

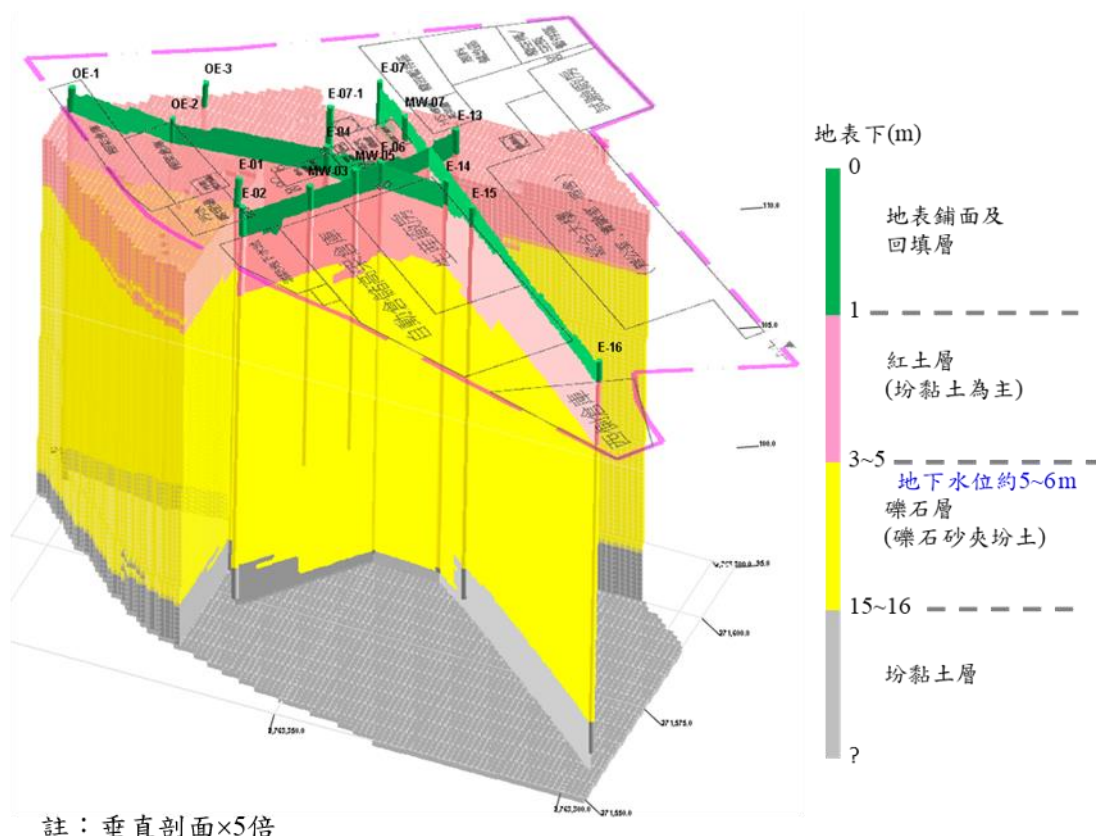


圖 20 三維地質概念模型圖

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%、砂土 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



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

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:

$$k = \frac{A}{F(t_1 - t_2)} \log_e \frac{b_1}{b_2} \quad (\text{式 } 8)$$

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 21。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 22 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。



研究內容

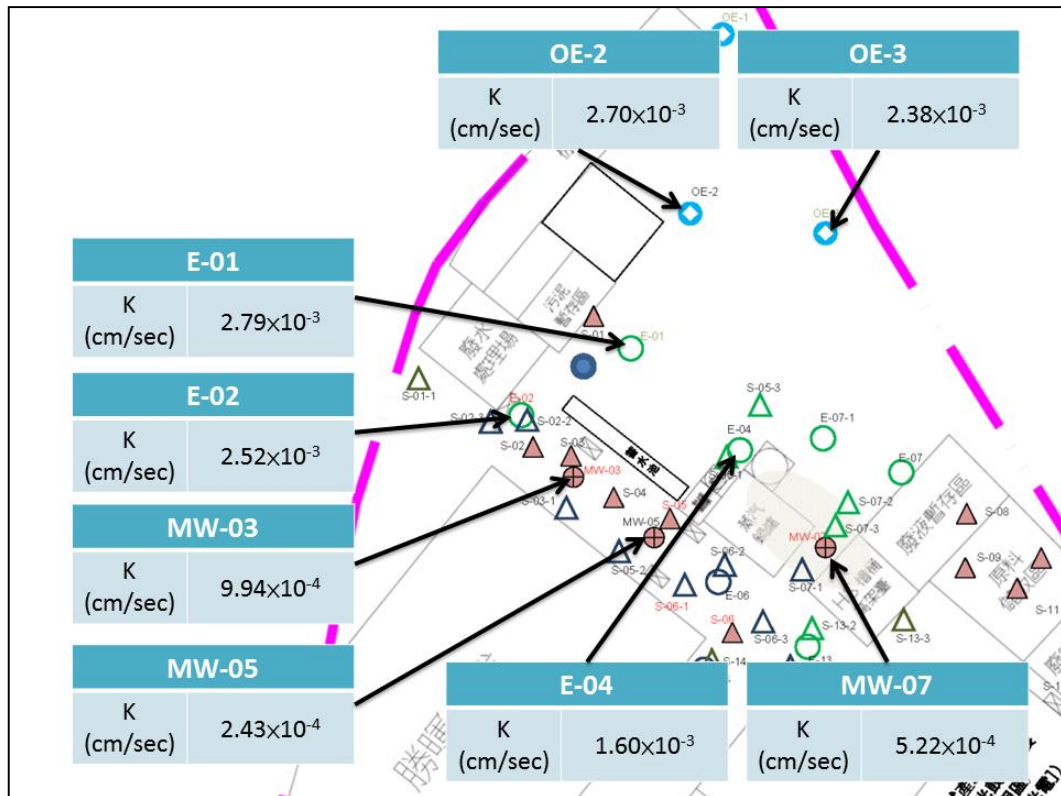


圖 21 微水試驗結果

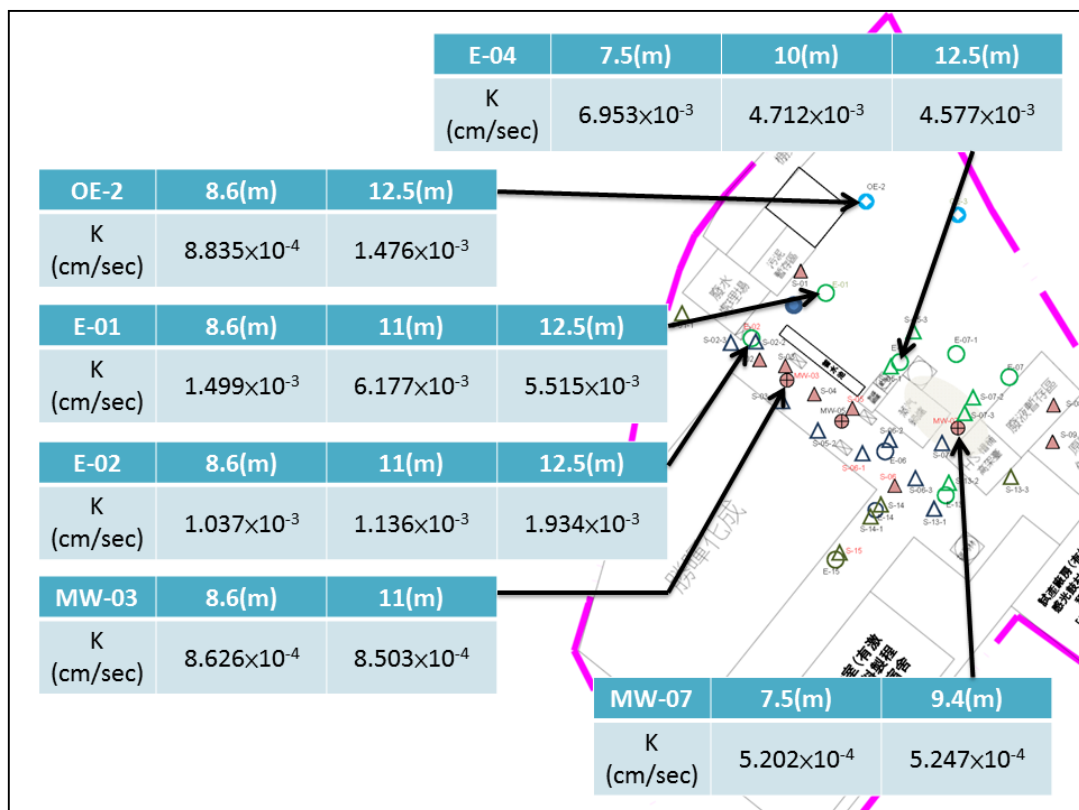


圖 22 多深度微水試驗結果

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

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

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		
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



4.6 兩年工作項目與進度

第一年：完成被動式分散式光纖溫度感測器之量測、模擬與分析

1. 完成污染場址的背景資料蒐集彙整及場址現勘。
2. 完成單井被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. 完成單井被動式的溫度量測資料校正、解析、誤差分析。
4. 完成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。
5. 完成複井被動式的溫度量測資料校正、解析、誤差分析。
6. 完成被動式量測結果之熱傳輸數值模式建置與模擬（單、複井）。
7. 完成井下溫度剖面分佈變化分析、井下透水區段判識、流速推估，並完成過往現地資料之交互驗證。
8. 完成計畫期末報告撰寫與繳交。

第二年：完成主動式分散式光纖溫度感測器之量測、模擬與分析

1. 完成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. 完成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. 完成單井主動式的溫度量測資料校正、解析、誤差分析。
4. 完成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。
5. 完成複井主動式的溫度量測資料校正、解析、誤差分析。
6. 完成以線性熱源之解析解方式，判識井下溫度剖面分佈變化及井下透水區段。
7. 完成井下溫度剖面分佈變化分析、井下透水區段判識、地下水流速推估。
8. 完成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。
9. 建立分散式光纖溫度感測器量測標準流程與分析方法。
10. 完成計畫期末報告撰寫與繳交。



(五) 結果與討論

本研究計畫在第一年的第一次現地試驗針對十口井進行連續的溫度監測，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注入熱水與主動式加熱試驗的量測方式與分析方法。

5.1 第一年度研究結果

5.1.1. 第一次現地試驗

圖 23 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 2019/3/23 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 2019/3/23 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。

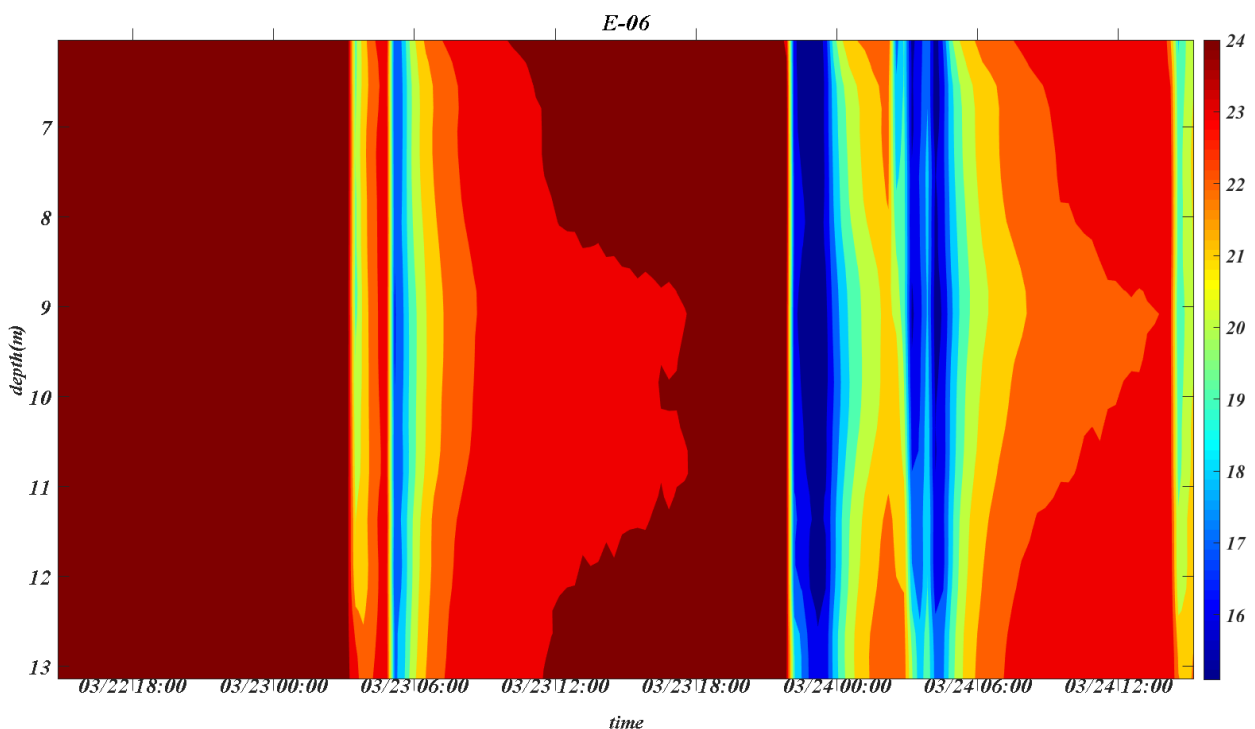


圖 23 第一次試驗井 E-06 絕對溫度剖面



5.1.2. 第二、三次現地試驗

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。第二次試驗時間為 2019 年 5/19-5/22，第三次試驗時間為 2019 年 10/1~10/4，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。

圖 24 為第二次試驗井 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 2019/5/20 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。



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

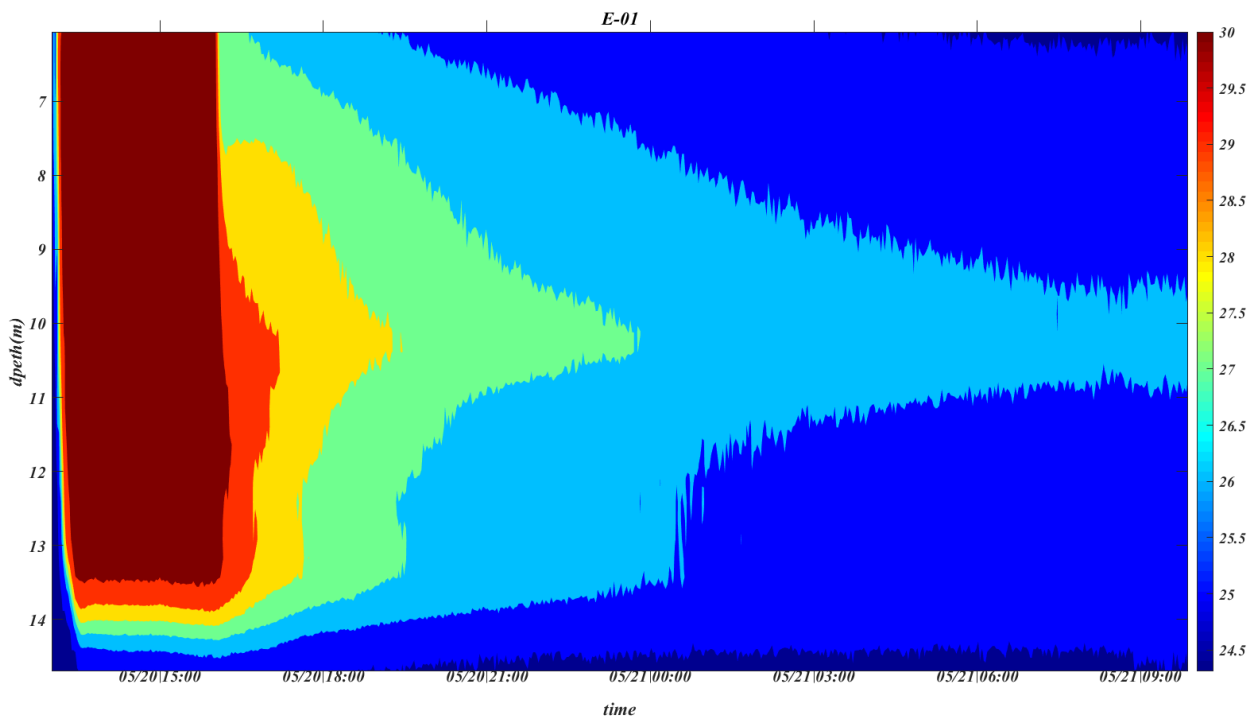


圖 24 井 E-01 絕對溫度剖面

圖 25 為第二次試驗井 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 2019/5/21 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 2019/5/21 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 2019/5/22 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。

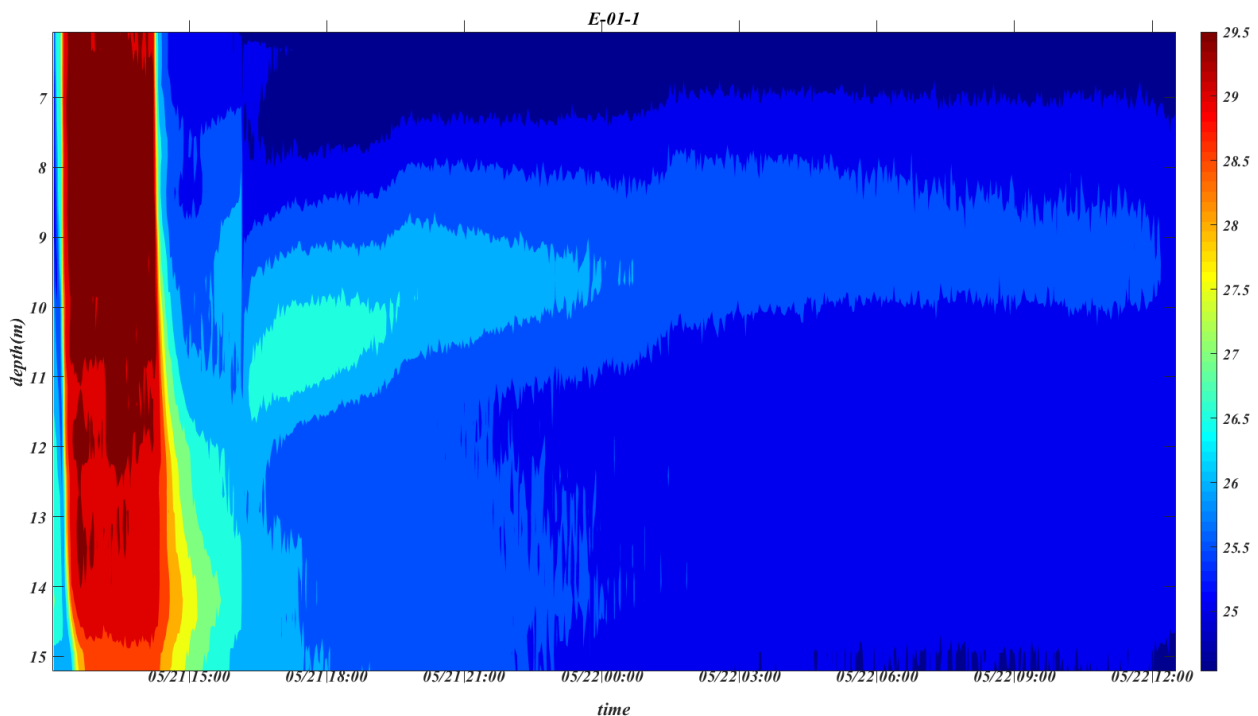


圖 25 井 E-01-1 絕對溫度剖面

圖 26 為第三次試驗井 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 2019/10/1 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(2019/10/1 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 2019/10/2 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。



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

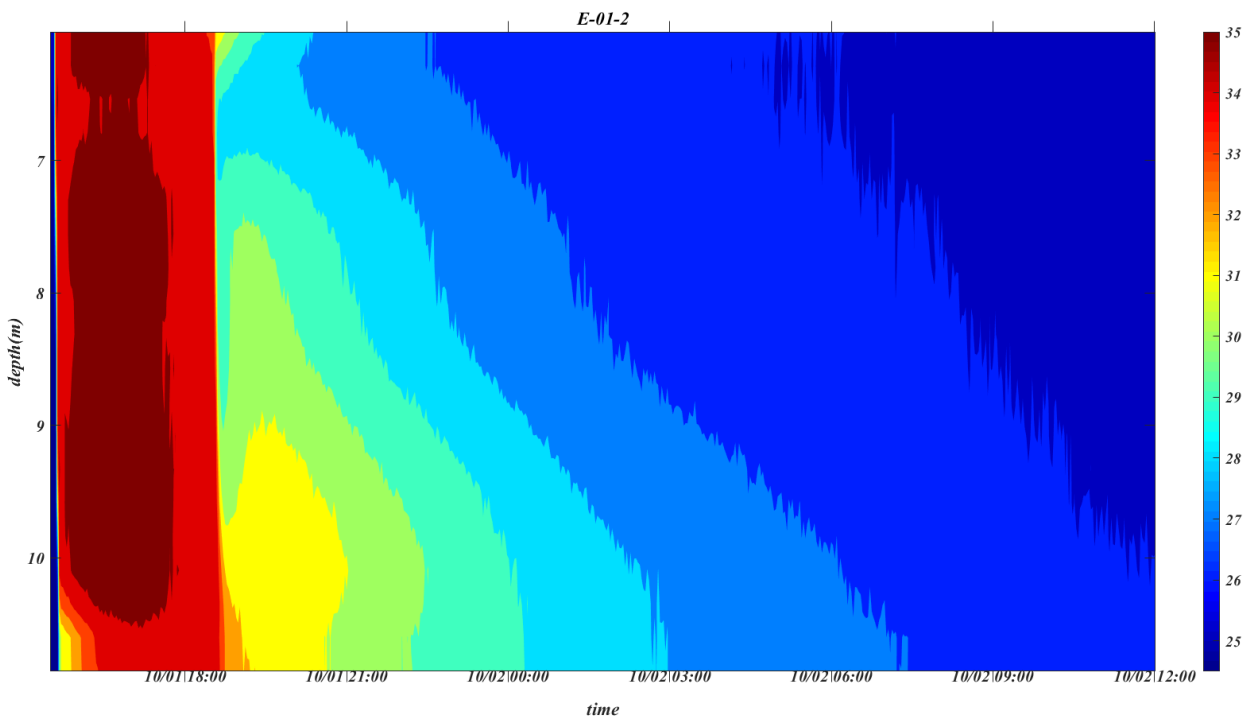


圖 26 井 E-01-2 絕對溫度

圖 27 為第三次試驗井 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 2019/10/2 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(2019/10/2 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 2019/10/2 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 2019/10/3 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。

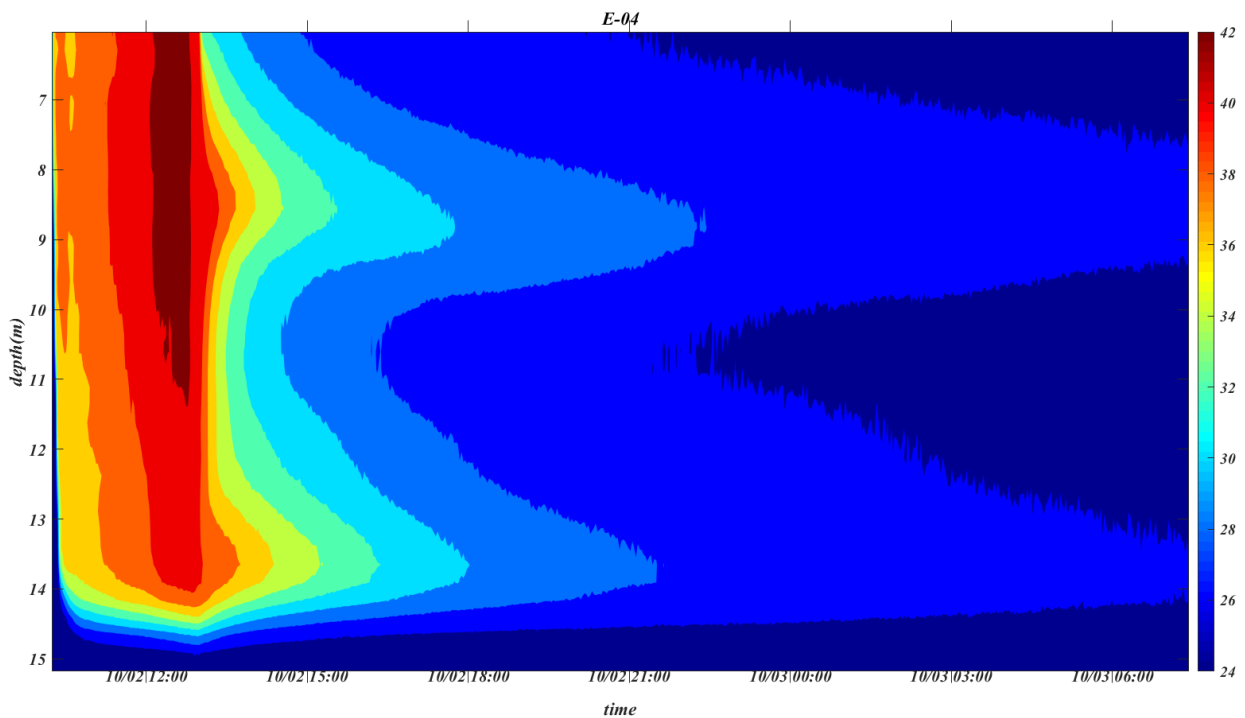


圖 27 井 E-04 絕對溫度剖面

圖 28 為第三次試驗井 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 2019/10/3 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(2019/10/4 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 2019/10/4 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(2019/10/4 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。



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

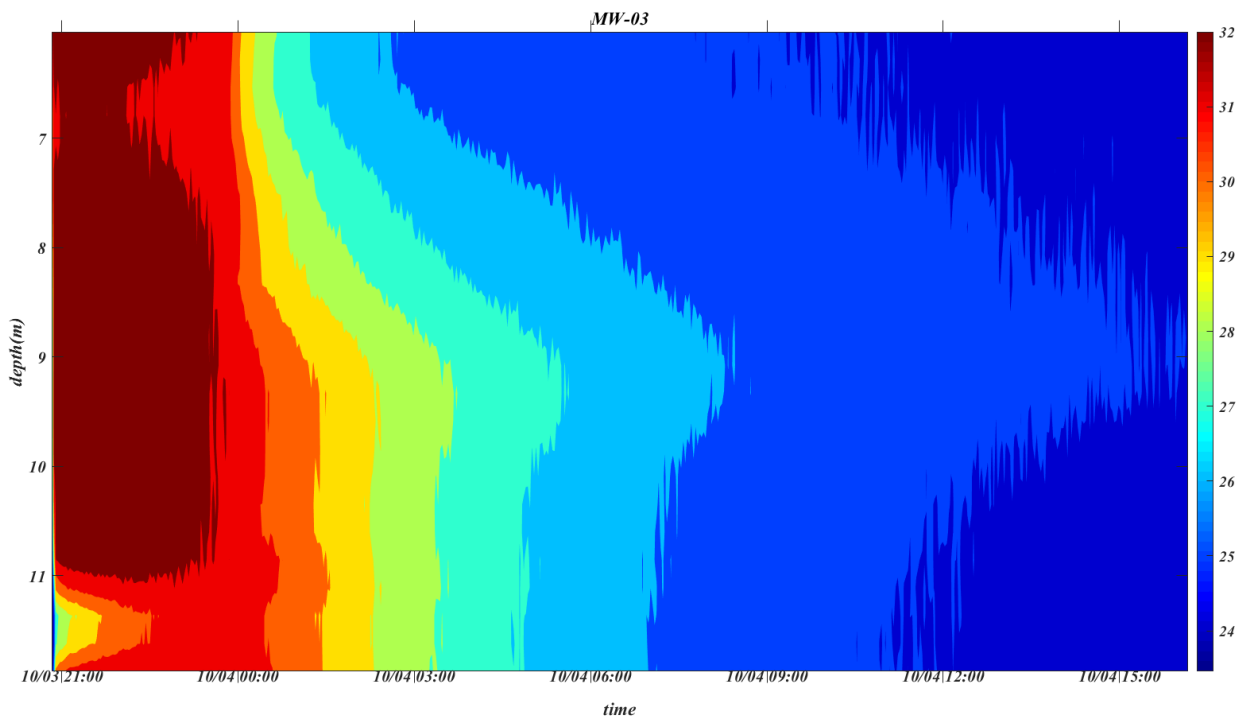


圖 28 井 MW-03 絕對溫度剖面

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。圖 29 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一加熱井，而井與井之間的相對透水性或連通性並無直接關聯性(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或具有連通性)，仍需透過後續的量化分析或複井跨孔試驗方能確認。

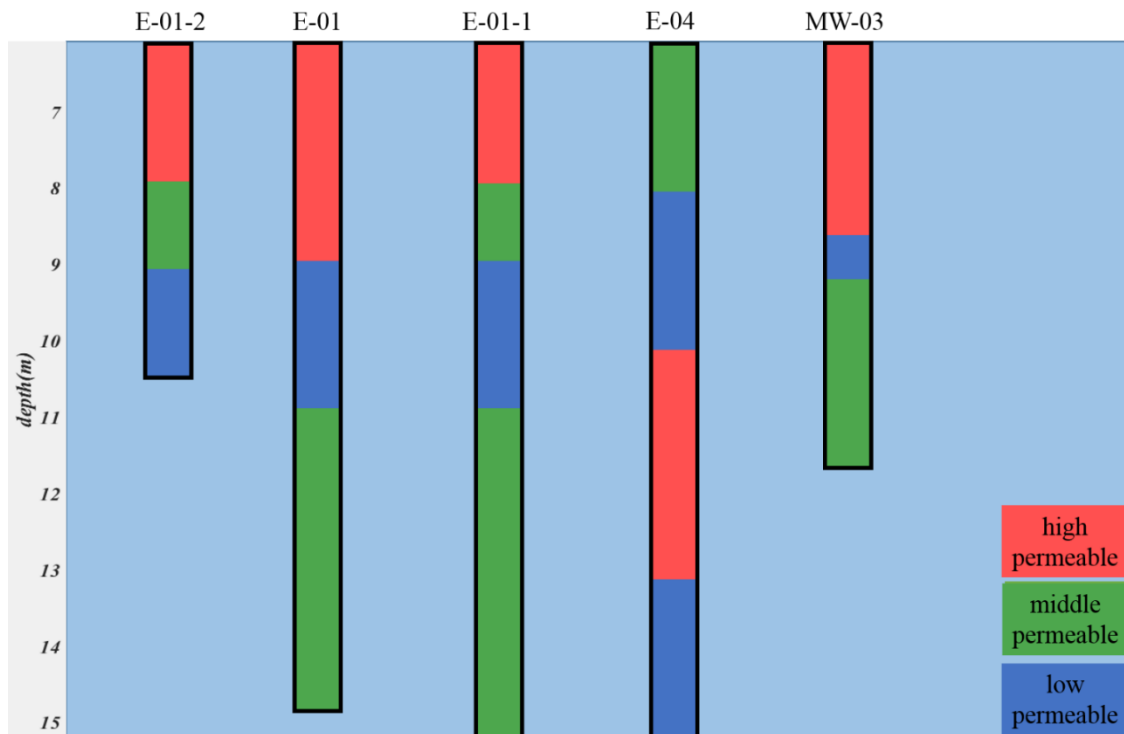


圖 29 第二次、第三次注水試驗透水區段示意圖

5.2 第二年度研究成果

本專案計劃於第一年度的模場試驗中，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。藉由第一年度的現地經驗，第二年度的模場試驗是以主動式分散光纖溫度感測器進行現地監測實驗，以自製研發的加熱系統（heating pulse control system, HPC）搭配複合式光纖（光纖與加熱銅線整合於光纖纜線內），進行現地試驗，並藉由熱傳輸解析解量化 DTS 量測結果，推估水平向的地下水流速及熱傳導係數。第二年度共進行三次現地試驗，第一次試驗為 2019/10/3~10/4，以單井 E-01 進行整口井加熱，在停止加熱後，量測井下溫度回復。第二次試驗為 2020/4/8~4/10，此次試驗在廠區上游與下游共佈設 8 口井，於上游井 E-01、井 E-01-1 與井 E-01-2 進行加熱，並觀測下游井溫度變化。第三次試驗為 2020/7/21~7/24，同樣為上游井 E-01 進行加熱，並量測周圍監測井與下游監測井之溫度變化。

5.2.1. 第一次現地試驗

第一次試驗是以單井進行加熱，於井 E-01 佈設光纖，光纖佈設方式為置入井下後再出井。於 2019/10/3 10:00 開始加熱，加熱時間共 3 小時，輸出功率為 300



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

瓦特，亦即每公尺光纖輸出約為 20 瓦特，為了能獲取加熱與回復過程中的溫度訊號，量測時間以 1 分鐘為量測間隔。於加熱期間量測井下溫度變化，並在停止加熱後量測井下溫度恢復。由於井內地下水位約為 6 公尺深，量測結果以地下水位面以下的深度進行討論。

圖 30 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 的深度為 14.8 公尺，加熱時間為 2019/10/3 10:00~13:00 共 3 個小時。由圖上可觀察到由於整口井進行加熱，由於溫度變化幅度範圍較大，使得溫度剖面圖在升溫與降溫的過程中較不易判識，因此以下將升溫與降溫的過程分別進行討論。

圖 31 為井 E-01 在加熱期間(2019/10:00~13:00)溫度對深度隨時間變化量測結果，初始加熱時溫度約在 25 度左右，深度 7.5 公尺在加熱約 10 分鐘後，溫度上升至 27 度，加熱 30 分鐘後，溫度上升至 29 度，直到加熱結束前，溫度約維持在 29~30 度之間。同樣的，在深度 9.8、11.5 公尺可觀察到在加熱前十分鐘溫度緩慢上升至 27 度，深度 9.8 公尺在加熱 70 分鐘後，溫度上升至 29 度，深度 11.5 公尺則是在加熱 90 分鐘後溫度才上升至 29 度。此情況顯示，深度 7.5、9.8、11.5 在加熱過程中，周圍地層屬於高透水區段，地下水流動十分快速，釋放的熱源被不斷湧入且溫度較低的地下水流冷卻，使得光纖在對地下水流加熱的過程中溫度上升較為緩慢。深度 9 公尺、10.5 公尺在加熱 5、6 分鐘後溫度即上升至 28 度，加熱 90、100 分鐘後溫度可達至 30、31 度。深度較深的 12、13.5 公尺至井底同樣可觀察到在加熱 30 分鐘後溫度上升至 29 度，加熱 70 分鐘後溫度上升至 30~31 度。此現象顯示，深度 9、10.5、12、13.5 公尺周圍的地層透水性較差，地下水流流動十分緩慢，即熱源在釋放的過程中，受到周圍較低溫之地下水流補注較為緩慢，熱能持續累積，因此造成升溫過程較快速、且升溫幅度也較大。

圖 32 為停止加熱後，井內溫度回復量測結果。由圖上可觀察到在停止加熱後，井內各深度溫度回復情況不相同，深度 7~7.5 公尺在停止加熱 3 小時後，溫度已下降至 25 度，在 18:00 時溫度下降為 24 度，顯示溫度回復情況相當明顯。深度 10~13 公尺在停止加熱兩小時內溫度同樣回復至 25 度，但至試驗結束前溫度皆維持在 25 度左右並無明顯變化，深度 13 公尺至井底同樣可觀察到溫度回復至 25.5 度後亦無明顯溫度變化。根據降溫的量測結果顯示，深度 6.5~10 公尺在溫度回復過程中溫度變化較大且溫度可回復至較低溫度，其次為深度 10~13 公尺，深度 13 公尺至井底溫度變化則較為緩慢。經由加熱與回復的試驗結果，初步可判定深度 6.5~10 公尺透水性較高，其次為深度 10~13 公尺、深度 13 公尺至井底。



研究內容

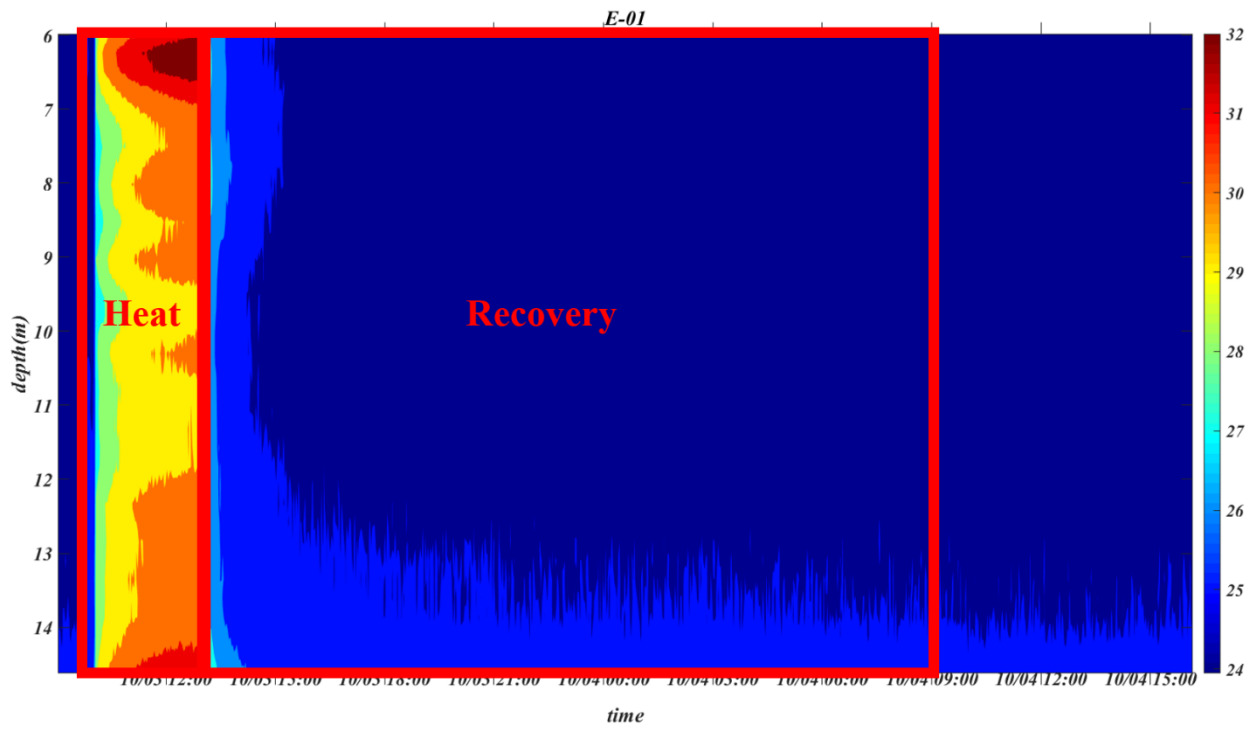


圖 30 井 E-01 第一次加熱試驗溫度量測結果（圖中紅框分別為升溫與回溫的區間）

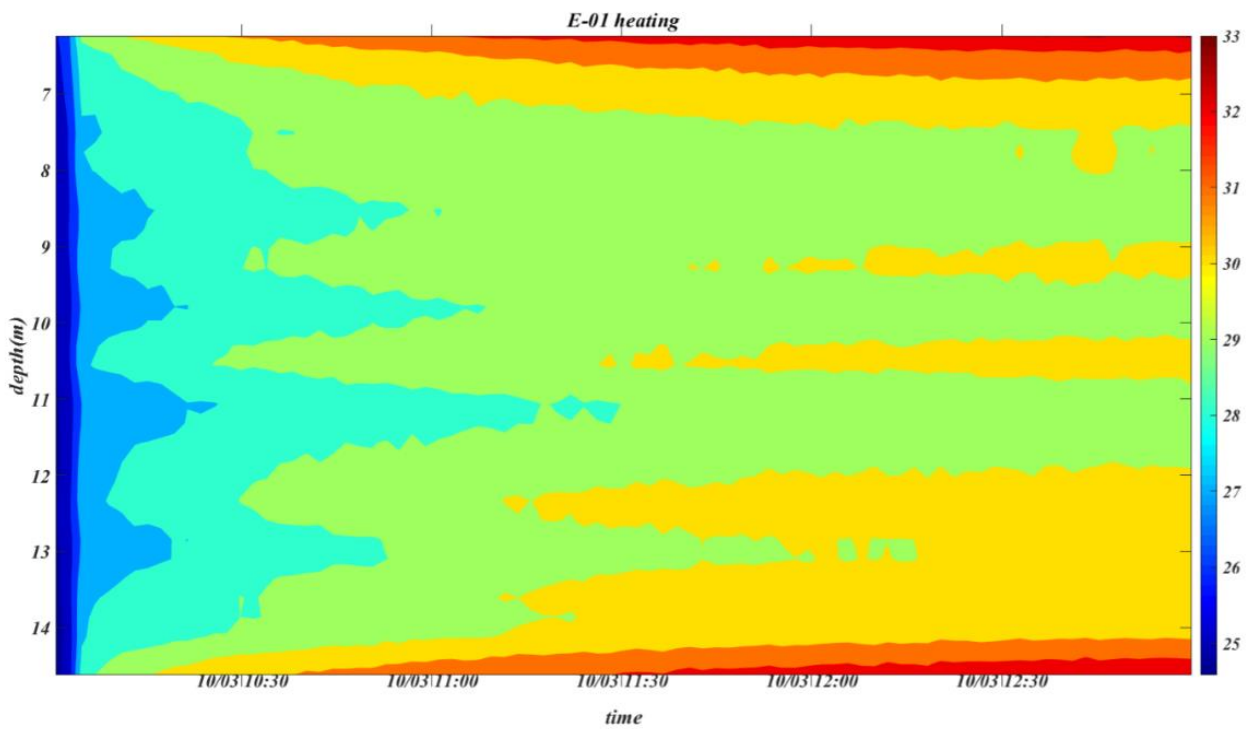


圖 31 井 E-01 第一次加熱試驗溫度上升（heat）過程



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

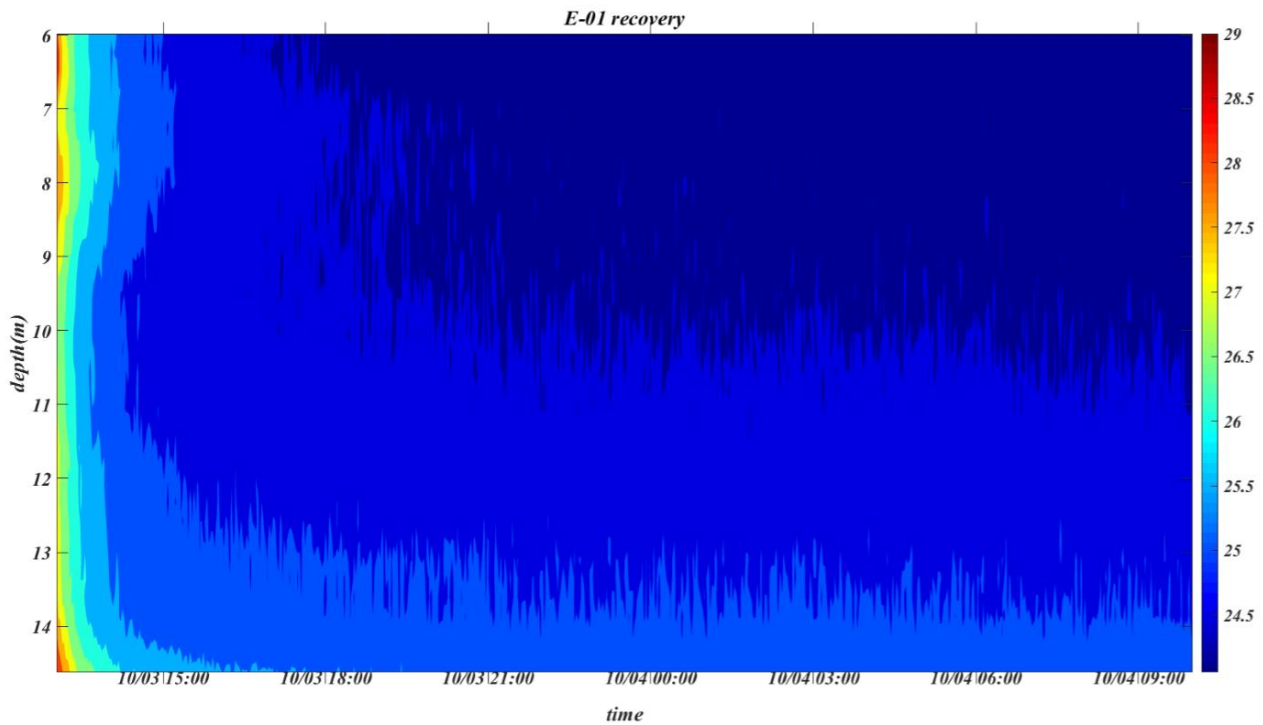


圖 32 井 E-01 第一次加熱試驗溫度回復 (revocery) 過程

5.2.2. 第二次現地試驗

有鑒於第一次試驗針對井 E-01 進行主動式光纖加熱量測，可初步判識井下透水與不透水區段之成果，本團隊進行了第二次試驗，針對廠區中間中央鍋爐附近之監測井進行光纖佈設，選取其中三口井分別進行加熱並量測溫度變化，於廠區下游之監測井進行溫度量測，試驗時間為 2020/04/08~04/10。

a. 現地光纖佈設

圖 33 為第二次現地光纖佈設示意圖，此次現地試驗同時使用 XT-DTS 與 Ultima-DTS 進行量測。以 Ultima-DTS 進行廠區蓄水池與蒸汽鍋爐附近監測井量測，佈設的井依序為井 E-01-2、井 E-01、井 E-01-1、井 E-04，其中，井 E-01-2、井 E-01、井 E-01-1 為此次試驗之加熱井。廠區下游之監測井以 XT-DTS 進行溫度量測，光纖佈設順序首先為井 OE-2，接著依序為井 OE-5、OE-1、OE-3。為了在加熱與溫度回復過程中能準確獲取溫度變化之訊號，Ultima-DTS 以 1 分鐘為量測間隔，XT-DTS 所量測之下游監測井則是以 2 分鐘為量測間隔。實驗流程首先以井 E-01 做為第一口加熱井，於 2020/4/8 18:00 開始進行加熱，輸出功率為 300 瓦特，井 E-01 深度約為 15 公尺，即每公尺光纖所受功率為 20 瓦特，加熱時間



研究內容

持續 4 小時。第二口加熱井為井 E-01-1，於 2020/4/9 07:30 開始進行加熱，輸出功率為 300 瓦特，井 E-01-1 深度約為 15 公尺，即每公尺光纖所受功率為 20 瓦特，加熱時間持續 6.5 小時。第三口加熱井為井 E-01-2，於 2020/4/9 22:00 開始進行加熱，輸出功率為 206 瓦特，井 E-01-2 深度約為 10.8 公尺，即每公尺光纖所受功率為 20 瓦特，加熱時間持續 6.5 小時。圖 34 為現地試驗照片。

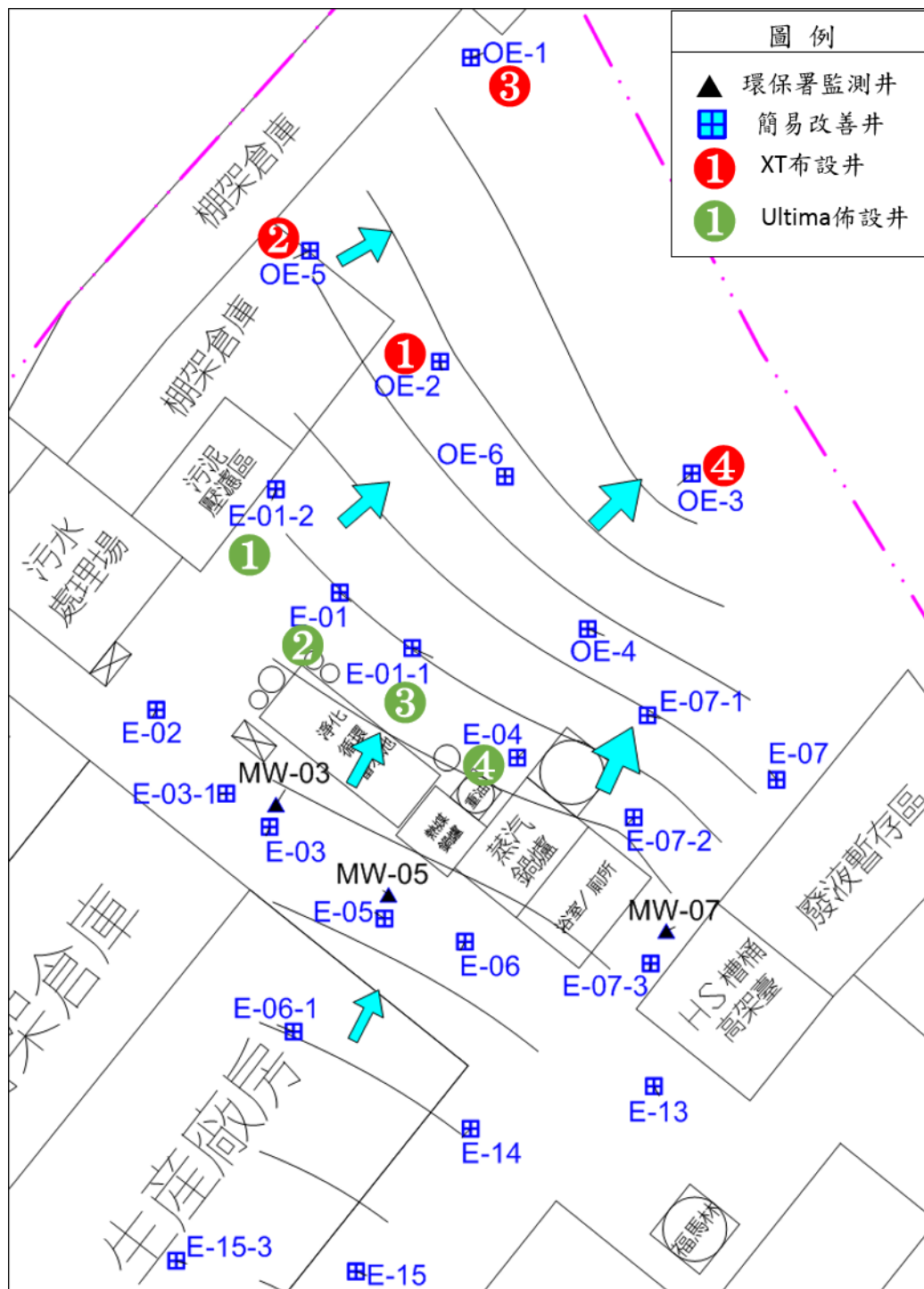
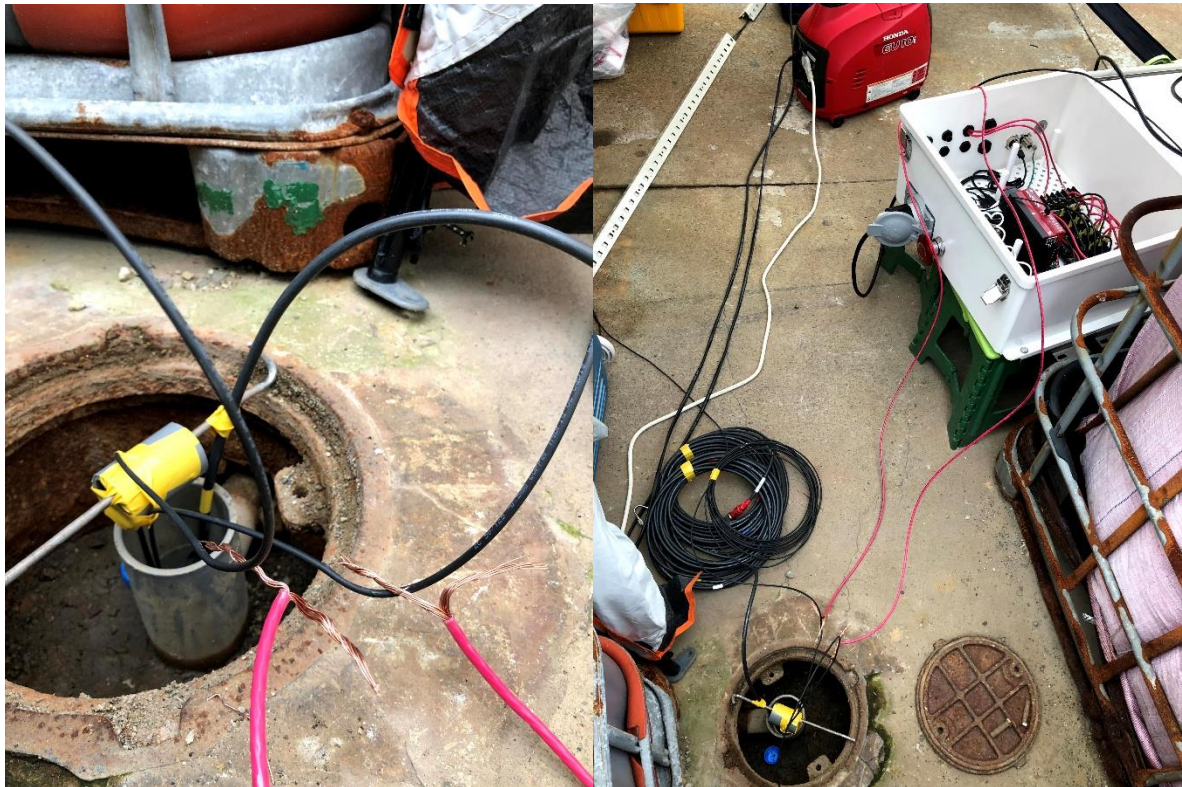


圖 33 第二次加熱試驗現地光纖佈設

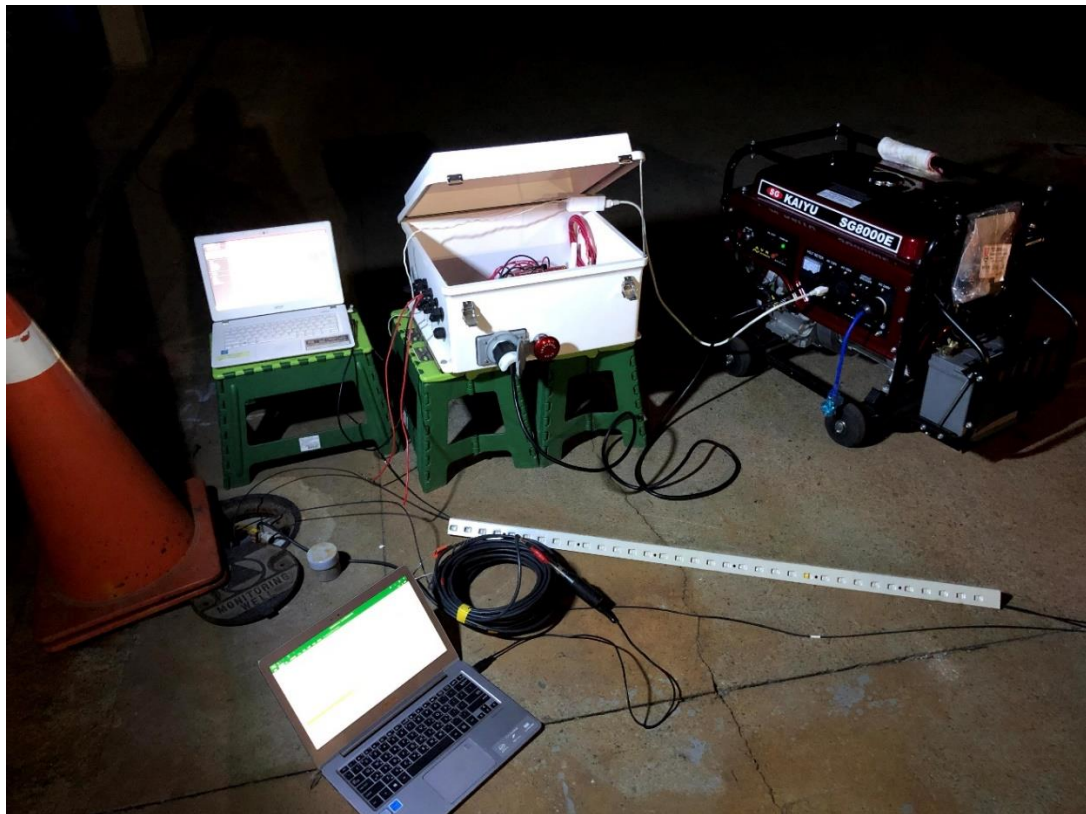


分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查



(a)

(b)



(c)

圖 34 現地試驗照片：(a) 光纖加熱井口佈設，(b) 光纖加熱佈設，(c) 夜間持續加熱



b. 現地試驗結果分析

圖 35 為第二次試驗加熱井溫度對深度剖面圖。第二次試驗共加熱三口井，根據加熱的順序依序為井 E-01、井 E-01-1、井 E-01-2。由圖上可觀察到由於加熱使得井內溫度大幅上升，由於溫度變化幅度範圍較大，使得溫度剖面圖在升溫與回復過程中各深度的溫度變化不易判釋，因此以下將針對各加熱井在升溫與回復的過程分別進行討論。

圖 36 為井 E-01 在加熱期間(2020/4/8 18:00~22:00)溫度對深度隨時間變化量測結果。井 E-01 因底部有些微淤積，因此井深深度約為 14.5 公尺，較上次試驗淺了 0.3 公尺。初始加熱時溫度約在 27 度左右，深度 7.5~8.5 公尺在加熱約 10 分鐘後，溫度上升至 28 度，加熱 35 分鐘後，溫度上升至 29 度，直到加熱結束前，溫度約維持在 30~31 度之間。同樣的，在深度 9.8、10.5、11.5 公尺可觀察到在加熱前 10 分鐘溫度上升至 28 度，加熱 35 分鐘後，溫度上升至 29 度，在加熱 120 分鐘後，溫度上升至 31 度，直到加熱結束前約維持在 31~32 度。此量測結果與第一次試驗相似，顯示深度 7.5~8.5 公尺與深度 9.8、10.5、11.5 公尺在加熱過程中，由於周圍地層較透水，地下水流動十分快速，熱源受到溫度較低的地下水流影響，使得光纖在對地下水流加熱的過程中溫度上升較為緩慢。深度 10 公尺、11 公尺在加熱約 10 分鐘、35 分鐘後溫度即上升至 28、29 度，大約在加熱 70 分鐘後溫度可達到 32 度。至加熱結束前約維持在 32 度。深度較深的 12~14 公尺同樣可觀察到在加熱 10 分鐘、35 分鐘後溫度上升至 28、29 度，加熱 70 分鐘後溫度上升至 31~32 度。在加熱 150 分鐘後溫度可高達 33~34 度。此現象顯示深度 10、11、12~14 公尺周圍透水性較差，地下水流流動十分緩慢，顯示熱源在釋放的過程中，受到周圍較低溫之地下水流影響較為緩慢，熱能持續累積，因此升溫過程較快速、且升溫幅度也較大。

圖 37 為井 E-01 在停止加熱後，井內溫度回復之量測結果。由圖上可觀察到在停止加熱後，井內各深度溫度回復情況不相同，深度 7~9 公尺在停止加熱 30 分鐘後，溫度已下降至 27 度，在 23:00 時溫度下降為 26 度，在 00:30 時甚至可回溫至低於 25 度，顯示溫度回復情況相當明顯。深度 10~11 公尺在停止加熱 30 分鐘內溫度同樣可回復至 27 度，約在 23:15 時可回溫至 26 度，大約在凌晨 02:00 時可回溫至 25 度左右，降溫情況較深度 7~9 公尺緩慢。深度 12 公尺至井底可觀察到在停止加熱 40 分鐘後，溫度可回溫至 28 度，停止加熱約一小時後約 27 度，在 00:00 時約為 26 度，直至量測結束前再無明顯降溫情況。根據降溫的量測結果顯示淺部深度 7~9 公尺在溫度回復過程中溫度變化較快速且溫度可回復至較低溫度，其次為深度 10~11 公尺。相較之下，深度 12 公尺至井底溫度變化則較為緩慢，初步可判定淺部深度 7~9 公尺透水性較高，其次為深度 10~11 公尺、深度 12 公尺至井底。

此量測結果與第一次試驗結果相似，由升溫的過程可判定淺部深度 7.5~9.8、



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

11.5 公尺因透水性高、地下水流流速較快不易升溫，加熱過程溫度變化較緩慢；深部深度 11、12~14 公尺則是因地下水流流速緩慢，熱源在釋放過程中受到影響較小，因此升溫過程較快速，溫度上升幅度也比較大。由溫度回復過程可判定深度 6.5~9 公尺由於溫度回復過程較快速，顯示較低溫之地下水流可迅速冷卻溫度，因此溫度回復情況較明顯且可在短時間內回復至背景溫度，10 公尺以下之深部地層，其透水性大小依序為深度 10、11 公尺與深度 13 公尺至井底。

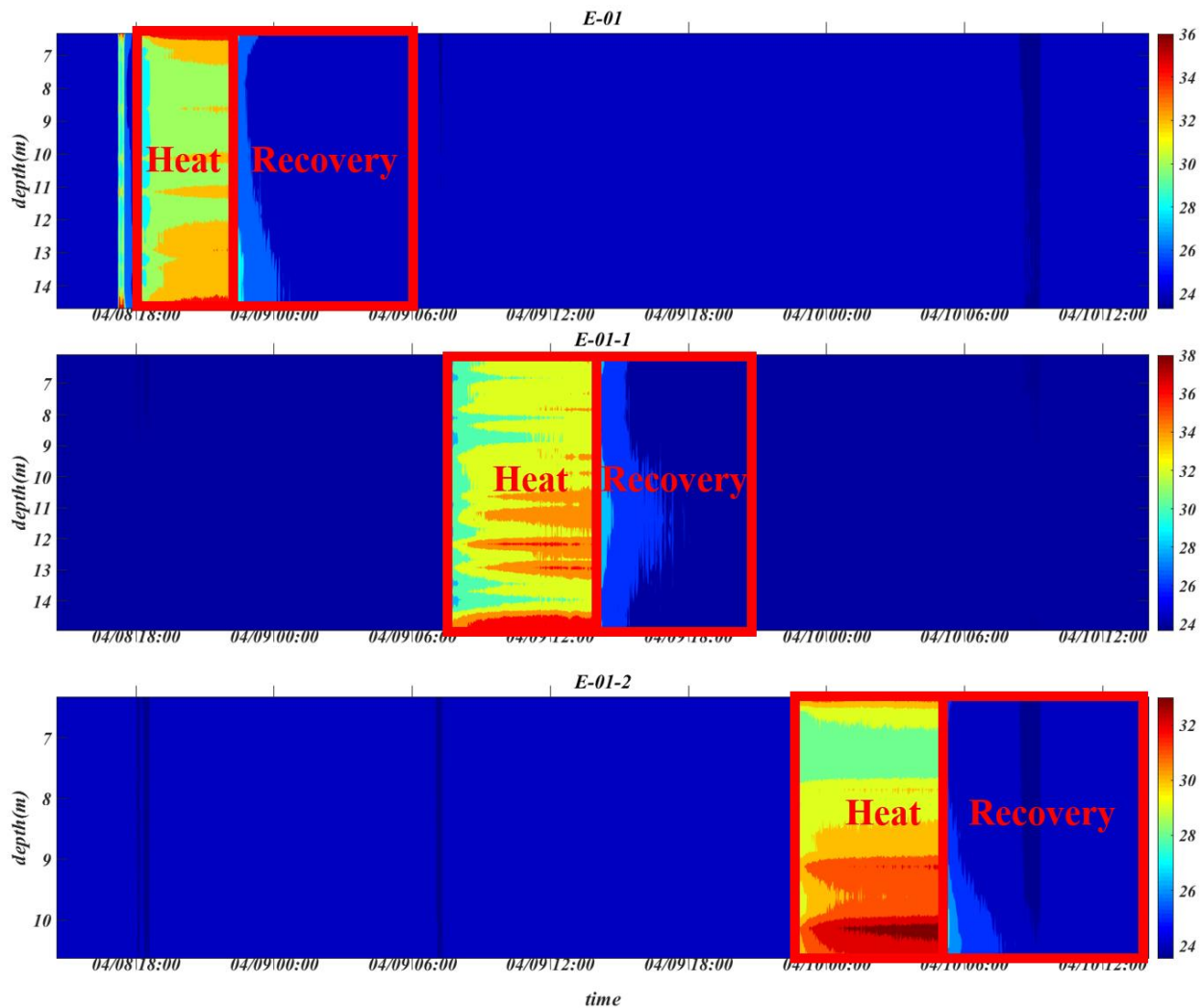


圖 35 第二次加熱試驗井 E-01、E-01-1 與 E-01-2 之溫度變化（圖中紅框分別為各加熱井之升溫與回復區間）



研究內容

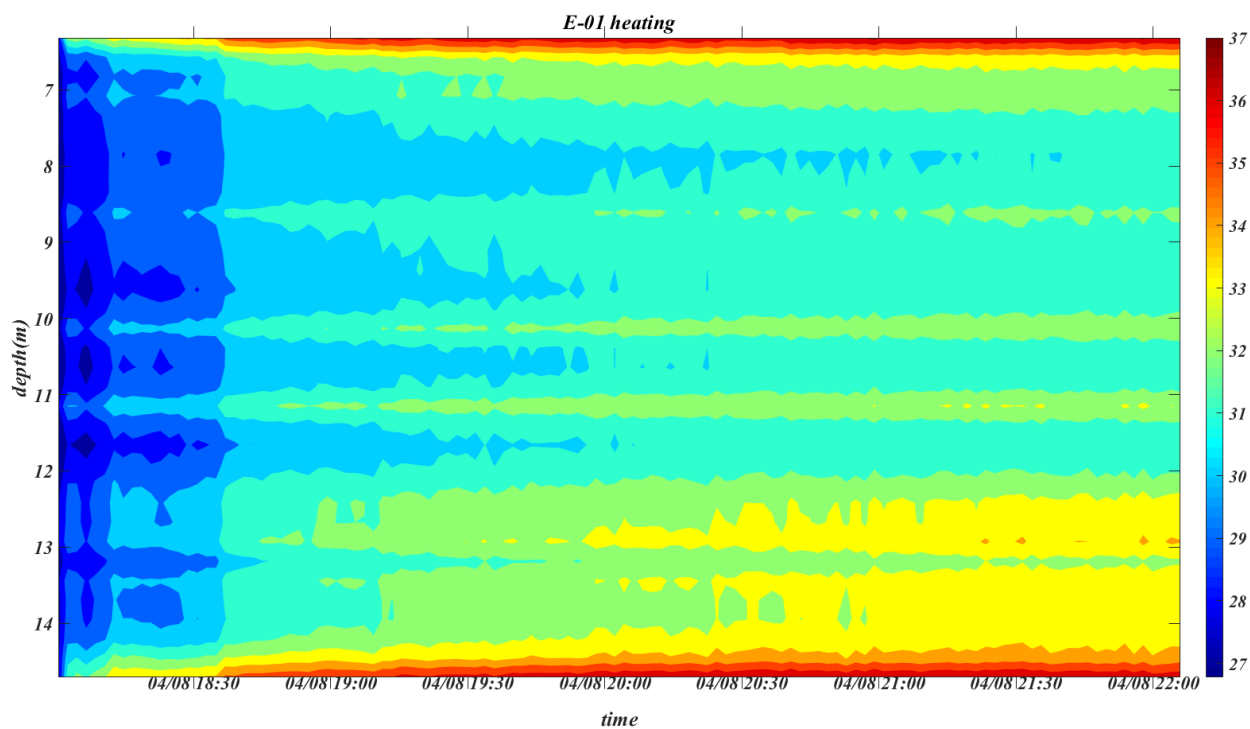


圖 36 井 E-01 第二次加熱試驗溫度上升過程

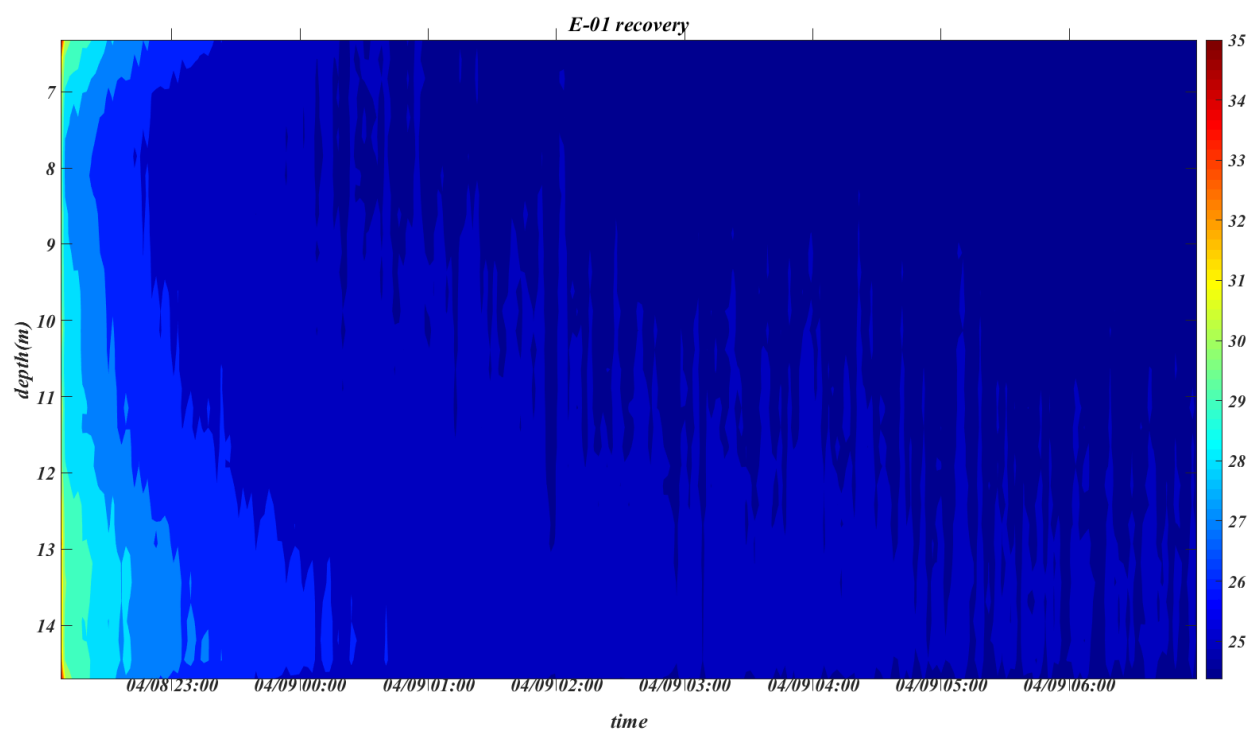


圖 37 井 E-01 第二次加熱試驗溫度回復過程



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 38 為井 E-01-1 在加熱期間(2020/4/9 07:30~02:00)溫度對深度隨時間變化量測結果。井 E-01-1 底部同樣有些微淤積，井深深度約為 14.5 公尺。初始加熱時溫度約在 26 度左右，深度 7~8 公尺在加熱約 5 分鐘後，溫度上升至 28 度，加熱 30 分鐘後，溫度上升至 30 度，加熱 60 分鐘後，溫度上升至 32 度，直到加熱結束前，溫度約維持在 32 度左右。同樣的，在深度 8~9、13~14 公尺可觀察到在加熱 5 分鐘內溫度上升至 28 度，加熱 30 分鐘後，溫度上升至 30 度。一直到 12:30 約維持在 31 度左右，顯示加熱情況更加緩慢。直到加熱結束前，溫度約為 32 度左右。此量測結果顯示深度 7~8 公尺與深度 8~9、13~14 公尺在加熱過程中，因周圍地層較透水，地下水流動十分快速，加熱過程受到溫度較低的地下水流影響，使得光纖在對地下水流加熱時溫度上升較為緩慢。深度 10.5~11.5 公尺在加熱約 20 分鐘後溫度即上升至 28 度，大約在加熱 40 分鐘後溫度可達到 32 度。約加熱至 100 分鐘後溫度可上升至 34 度。同樣在深度 12、13 公尺處可觀察到在加熱約 20 分鐘後溫度已上升至 32 度，其中，深度 12 公尺甚至在加熱 90 分鐘後溫度可上升至 37 度。此現象顯示深度 10.5~11.5 公尺、深度 12、13 公尺周圍的地層較不透水，地下水流流動十分緩慢，在加熱的過程中，受到周圍較低溫之地下水流影響較為緩慢，因此升溫過程較快速、且升溫幅度也較大。

圖 39 為井 E-01-1 在停止加熱後，井內溫度回復之量測結果。深度 7~9 公尺在停止加熱 10 分鐘內，溫度已下降至 28 度，停止加熱 30 分鐘內溫度下降為 26 度，在 15:30 時甚至可回溫至 25 度以下，顯示溫度回復情況相當明顯。同樣在深度 13、14 公尺至井底可觀察到相似的現象，深度 13 公尺在 14:30 時溫度回復至 27 度，深度 14 公尺則是已達到 26 度，接著在 16:00 與 15:30 分別降至 25 度，溫度下降十分快速且明顯。此結果顯示停止加熱後，在較為透水的區段中，低溫的地下水流流速較快，將熱能迅速消散，因此溫度回復較快。深度 10~13 公尺在停止加熱 15 分鐘內溫度仍在 29.5 度左右，約在 14:30 時溫度回復至 28 度，大約在下午 15:30 時回溫至 26 度左右，直到接近 17:00 時才回溫到 25 度上下。顯示中間深度 10~13 公尺在降溫過程中因地層較不透水，使得熱能在消散過程中較為緩慢，溫度變化也相對趨緩。根據降溫的量測結果顯示淺部深度 7~9 公尺在溫度回復過程中溫度變化較快速且溫度可回復至較低溫度，在深度 13、14 公尺至井底亦可觀察到同樣的現象。中間深度 10~13 公尺溫度變化則最為緩慢，因此可判定淺部深度 7~9 公尺透水性較高，其次為深度 13~14 公尺、深度 10~13 公尺。



研究內容

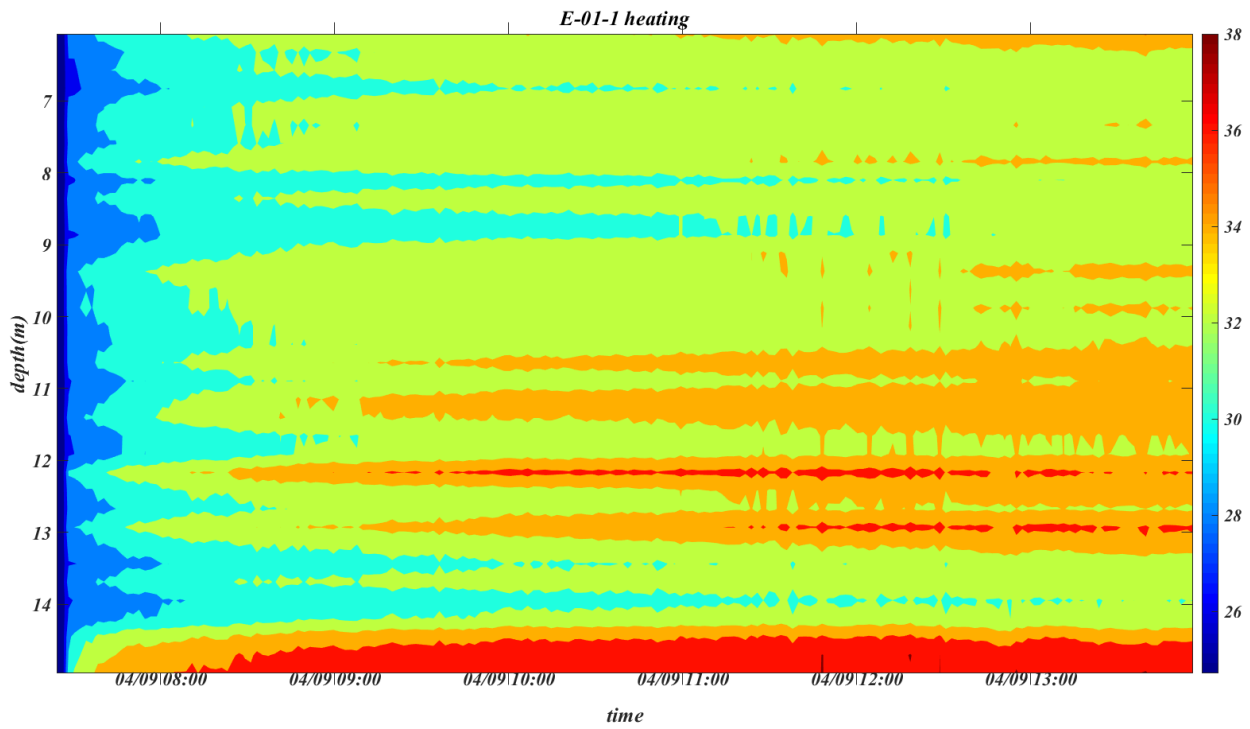


圖 38 井 E-01-1 第二次加熱試驗溫度上升過程

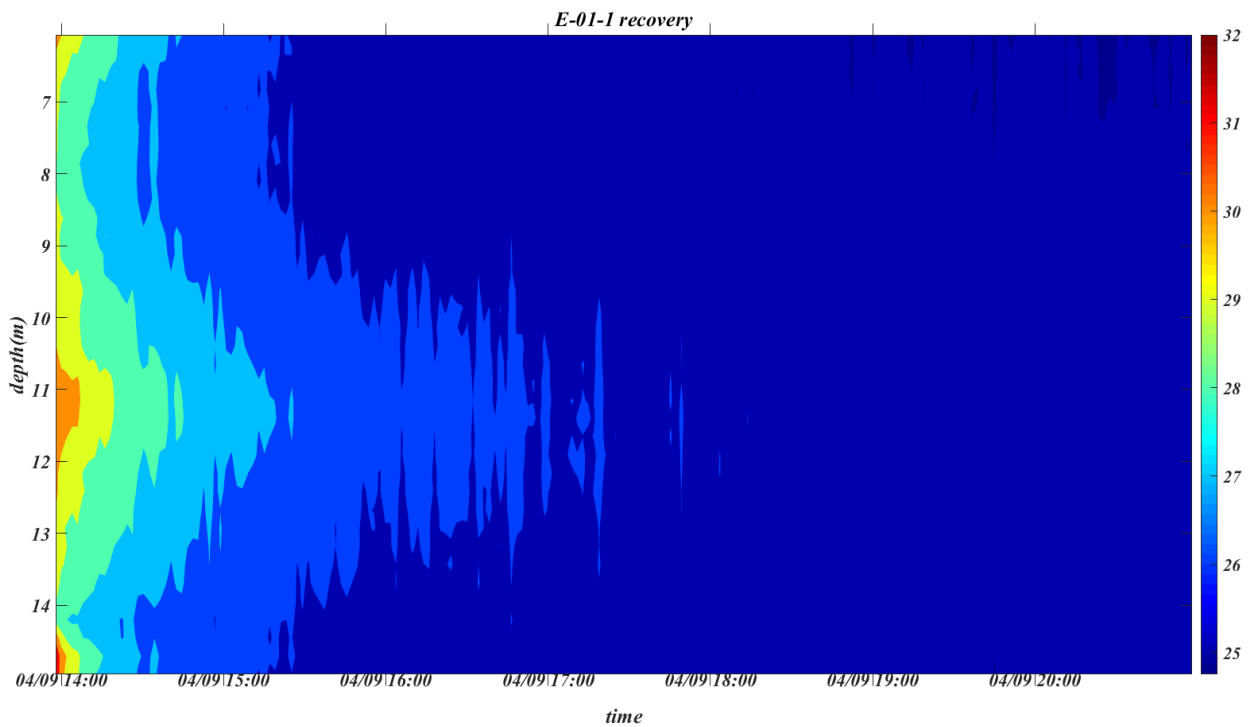


圖 39 井 E-01-1 第二次加熱試驗回復過程



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 40 為井 E-01-2 在加熱期間(2020/4/9 22:30~05:00)溫度對深度隨時間變化量測結果。井 E-01-2 為深度較淺的監測井，井深深度約為 10.5 公尺。初始加熱時溫度約在 27.5 度左右，深度 6.8~7.8 公尺在加熱約 10 分鐘內，溫度上升至 28 度，直到加熱結束前，溫度皆維持在 28~28.5 度左右，顯示溫度變化非常微小。在深度 7.8~8.5 公尺可觀察到在加熱 5 分鐘內溫度由 28 度上升至 29 度，之後約維持在 29.5~30 度。深度 8.5~9 公尺則是在加熱 1 小時後溫度上升至 30 度，之後亦維持在 30 度左右。此量測結果顯示深度 6.8~7.8 公尺之地層深度透水性相當高，在加熱過程中地下水流動十分快速，使得溫度上升非常緩慢，同樣在深度 7.8~8.5 公尺、8.5~9 公尺處也因為高透水性，較低溫度的地下水流使得升溫過程緩慢。深度 9 到 10.5 公尺在加熱 30 分鐘後溫度已上升至 30 度，深度 9 公尺則持續升溫至 31.5 度，深度 10 公尺至井底在加熱 1 小時後溫度更是達到 32.5 度，直到加熱結束前，溫度維持在約 33 度左右。此量測結果顯示深度 9 到 10.5 公尺周圍較不透水，因此在加熱過程中地下水流的影响較為緩慢，溫度上升相對明顯且比較高溫。

圖 41 為井 E-01-2 在停止加熱後，井內溫度回復之量測結果。由圖上可觀察到在停止加熱後，井內各深度溫度回復情況不相同，深度 6.8~7.8 公尺在停止加熱 10 分鐘內，溫度已下降至 25 度，停止加熱 20 分鐘後溫度下降為 24.5 度，在 07:00 時甚至可回溫至 24.5 度以下，顯示溫度回復情況相當快速且明顯。7.8~9 公尺間各個深度變化不盡相同，但在停止加熱 45 分鐘後溫度皆已回復至 25 度，至量測結束前約維持在 24.5~25 度左右，此結果顯示在停止加熱後，在高透水性的地層中，快速流動的地下水流將熱能快速消散，因此溫度回復相當快速。深度 9~9.5 公尺在停止後，各個深度的溫度變化皆相當緩慢，直到 1 小時後才回溫至 25 度，深度 9.5~10.5 公尺直到 07:30 才回溫至 25 度。顯示深度 9~9.5、9.5~10.5 公尺處因地層較不透水，熱能消散較為緩慢，所量測到溫度變化也較慢。根據升溫與降溫的溫度剖面圖可判定，深度 6.8~7.8 公尺與深度 7.8~8.5 公尺透水性較高，其次為深度 8.5~9 公尺。深度 9~10 公尺透水性較差，深度 10~10.5 公尺之透水性最低。

井 E-01 與井 E-01-1 在井深深度上相當接近，藉由升溫與降溫的過程可判定淺部 (深度 6.5~9 公尺)較為透水，中段 (深度 9~11 公尺)則會有一較不透水的區段，深部(深度 11 公尺至 12、13 公尺)則為次要透水區段。井 E-01-2 同樣可判定淺部 (深度 6.8~9 公尺)較為透水，中段(深度 9 公尺~10.5 公尺)較不透水。由於井 E-01-2 的井深僅 10.5 公尺，若僅針對淺部與中段地層進行比較，對應至井 E-01 與井 E-01-1 的深度可發現，三口加熱井之透水與不透水區段分佈相當接近。



研究內容

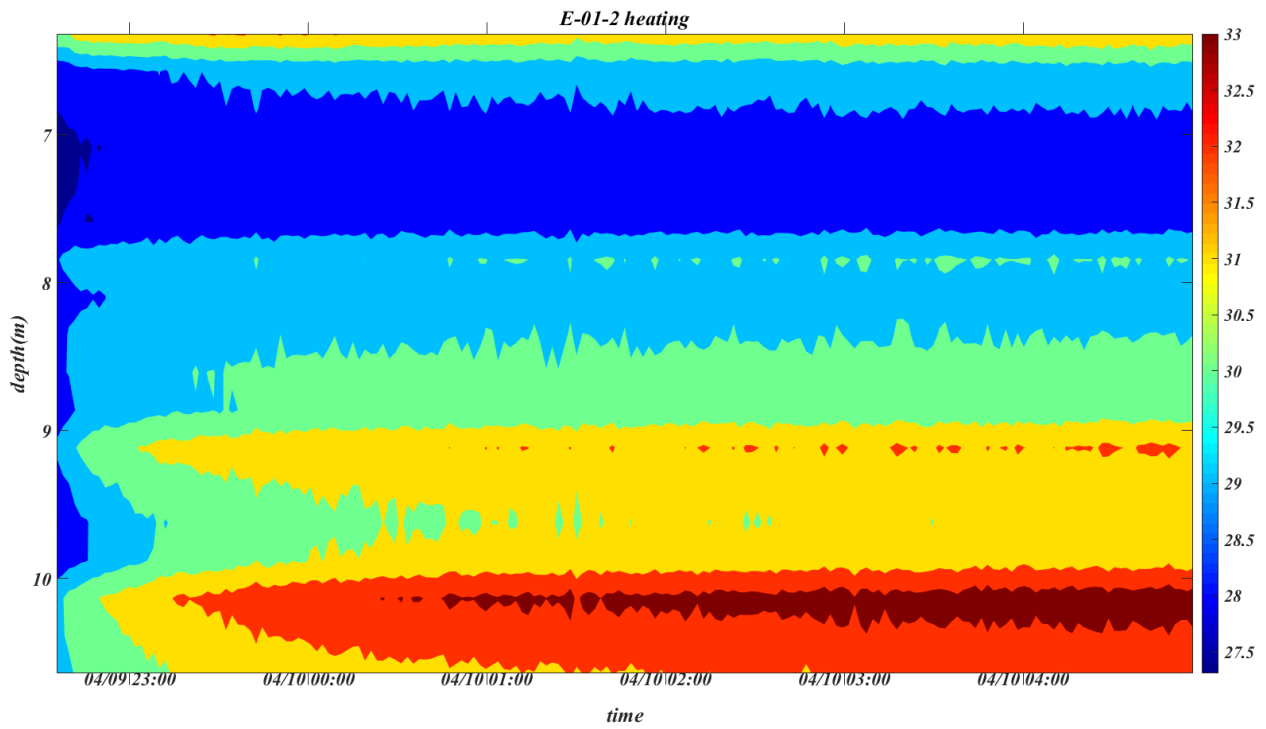


圖 40 井 E-01-2 第二次加熱試驗溫度上升過程

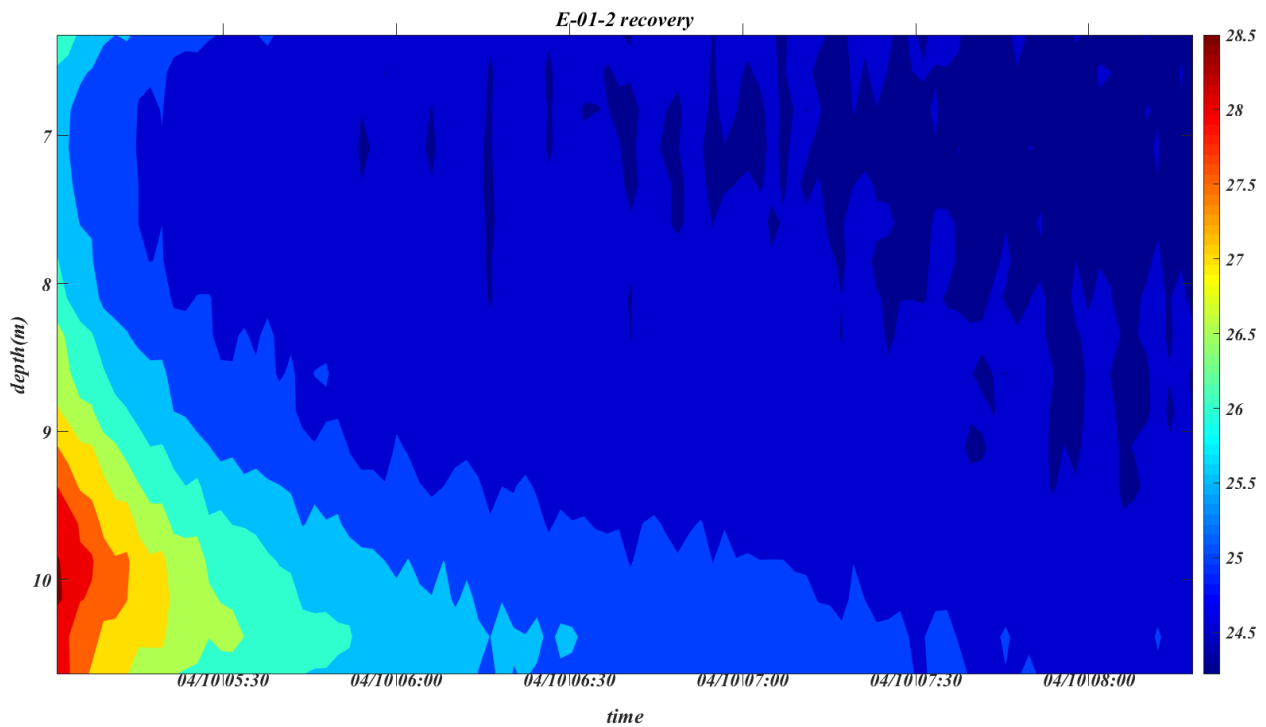


圖 41 井 E-01-2 第二次加熱試驗回復過程



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 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 的深度為 14.7 公尺，井內之最低溫度與最高溫度變化區間約介於 23.8~25.8 度。由圖上可觀察到井 E-04 在量測期間溫度變化不大且整口井溫度分布均勻，在三次加熱的時間內，井 E-04 有些許溫度上升的訊號，量測溫度為 25.6~25.8 度。雖然井 E-04 所在位置與三口加熱井皆位於地下水流之上游，由於地下水流方向之不確定性，此溫度上升訊號不排除可能是由加熱井所釋放之熱源，藉由地下水流攜帶至井 E-04 所造成之溫度上升訊號。由圖上可觀察在 2020/4/8 18:00、2020/4/9 07:30 與 2020/4/10 09:00 時，主機訊號異常造成量測到的溫度偏低，推測是由於主機在發射雷射光過程中發生訊號錯誤，使得光子能量異常，造成量測溫度偏低。由於發生異常訊號的時間與加熱井進行加熱時間相近，未來將再進一步釐清外部供電對 DTS 主機與加熱器使用間的相互影響。

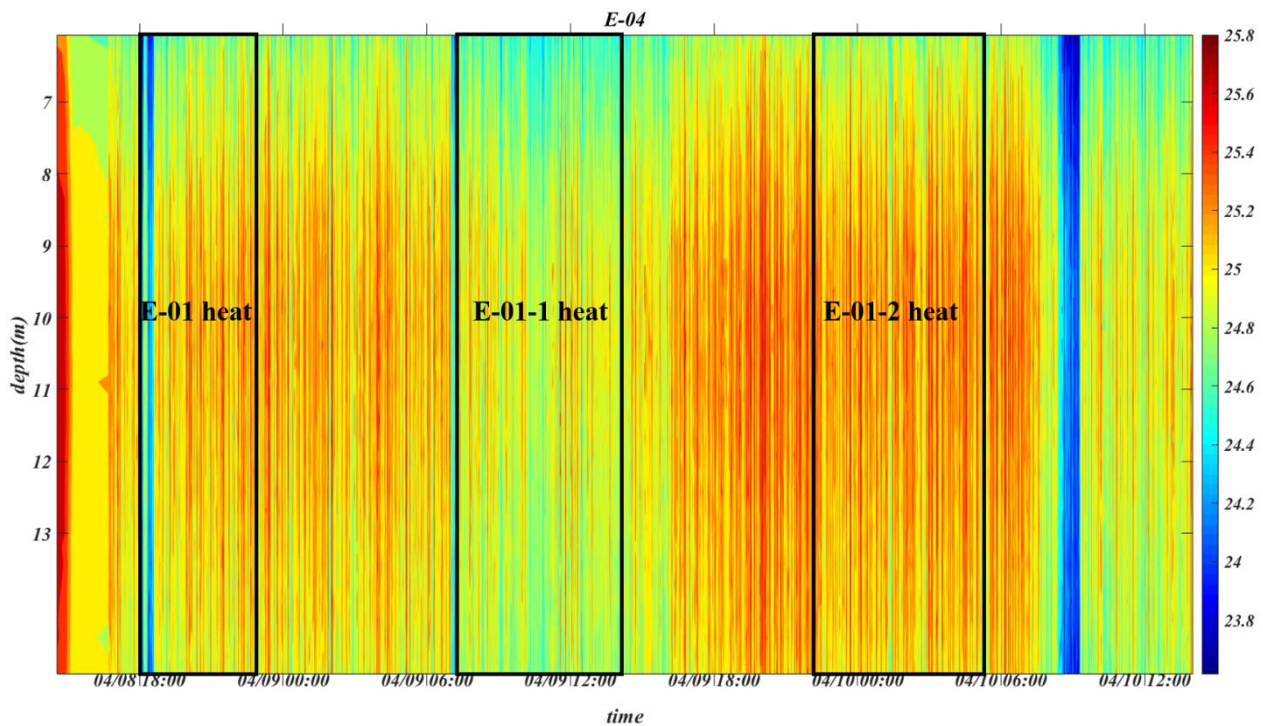


圖 42 井 E-04 第二次加熱試驗溫度變化（黑框分別為 E-01、E-01-1 與 E-01-2 的加熱時間）



研究內容

廠區內地下水下游所佈設之光纖，其主要目的是用以判釋上游加熱井所釋放之熱源是否經由地下水流傳遞至廠區下游，以下依據光纖佈設之順序分別進行討論。圖 43 為井 OE-2 所量測到絕對溫度對深度隨時間變化之量測結果。井 OE-2 的深度為 10.72 公尺，井內之最低溫度與最高溫度變化區間約介於 23~25 度，溫度變化較小。在 2020/4/9 接近 06:00 時，在深度 7~9 公尺有接收到一溫度上升的訊號，溫度約為 24.8 度，同樣在 2020/4/10 06:00 時，在深度 6~9.5 公尺也接收到溫度上升之訊號，溫度約為 25 度。井下所收到之溫度訊號可能是由於上游加熱井所釋放之熱源經由地下水流攜帶至下游所造成溫度上升之訊號，此溫度訊號需再進一步進行分析探討。此外，由圖上可觀察到，下游之監測井同樣在 2020/4/8 18:00、2020/4/9 07:30 與 2020/4/10 09:00 時有受到因主機在發射雷射光過程中的訊號錯誤導致量測溫度有偏低的情況。此外，在 2020/4/9 08:03 時量測到井下有一低溫訊號，同樣在 2020/4/10 9:25 也量測到井內有一低溫訊號。除了前面所描述受到主機雷射光子影響外，此低溫訊號可能是由於發電機為了長時間供應外部電源，在現地環境長時間使用下可能因吸入粉塵與油管阻塞，導致供電不穩，使得訊號不穩定，因此量測到較低的溫度訊號。

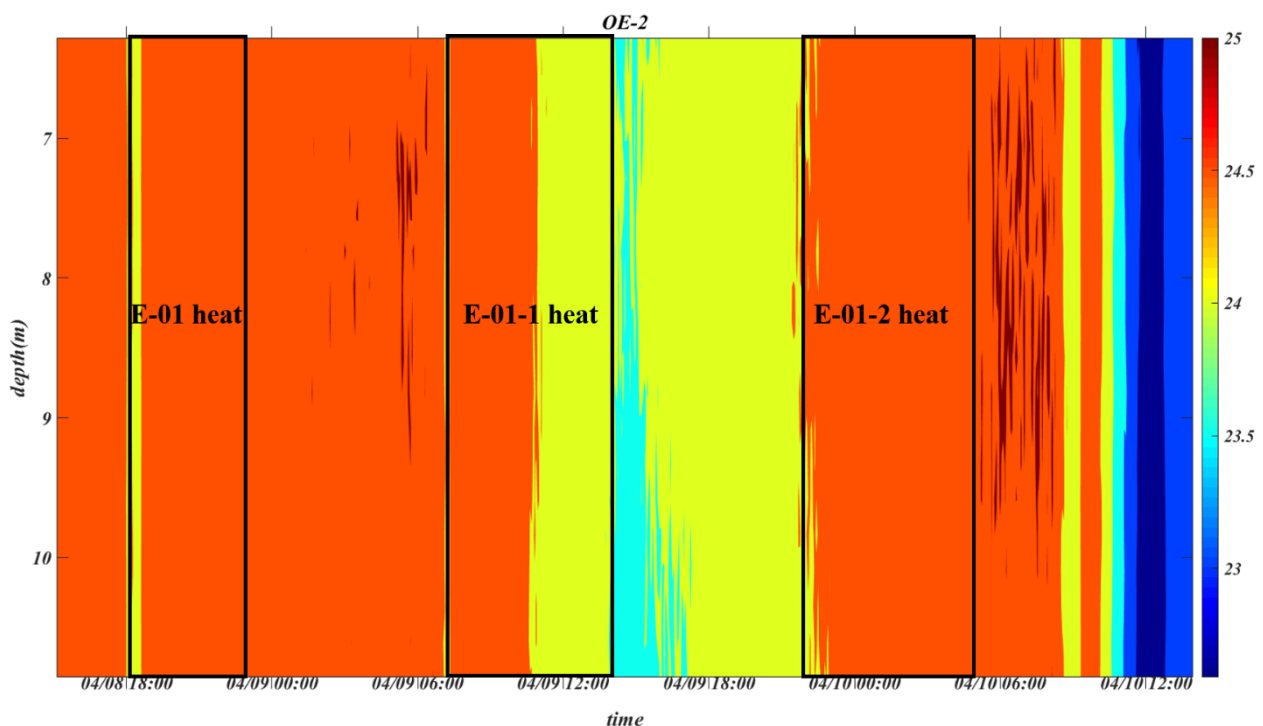


圖 43 井 OE-2 第二次加熱試驗溫度變化（黑框分別為 E-01、E-01-1 與 E-01-2 的加熱時間）



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 44 為井 OE-5 所量測到絕對溫度對深度隨時間變化之量測結果。井 OE-5 的深度為 15 公尺，井內之最低溫度與最高溫度變化區間約介於 20.5~24 度。在 2020/4/9 接近 00:00 時，在深度 7.5~13 公尺有接收到一溫度上升的訊號，溫度約為 24 度，同樣在 2020/4/10 06:00 前後，在深度 7~15 公尺也接收到溫度上升之訊號，溫度約為 24 度。井下所收到之溫度訊號可能與井 OE-2 所收到之溫度訊號相同。推測是由於上游加熱井所釋放之熱源經由地下水流攜帶至下游所造成溫度上升之訊號，此溫度訊號需再進一步進行分析探討。此外，由圖上同樣可觀察到，在 2020/4/8 18:00、2020/4/9 07:30 與 2020/4/10 09:00 時受到主機的雷射光異常訊號導致量測溫度偏低。在 2020/4/9 08:03、2020/4/10 9:25 時同樣也量測到井內有一低溫訊號。除了受到主機雷射光子影響外，此低溫訊號同樣推測是由於作為外部供電的發電機因長時間使用，導致供電不穩，使得訊號不穩定，因此量測到較低的溫度訊號。

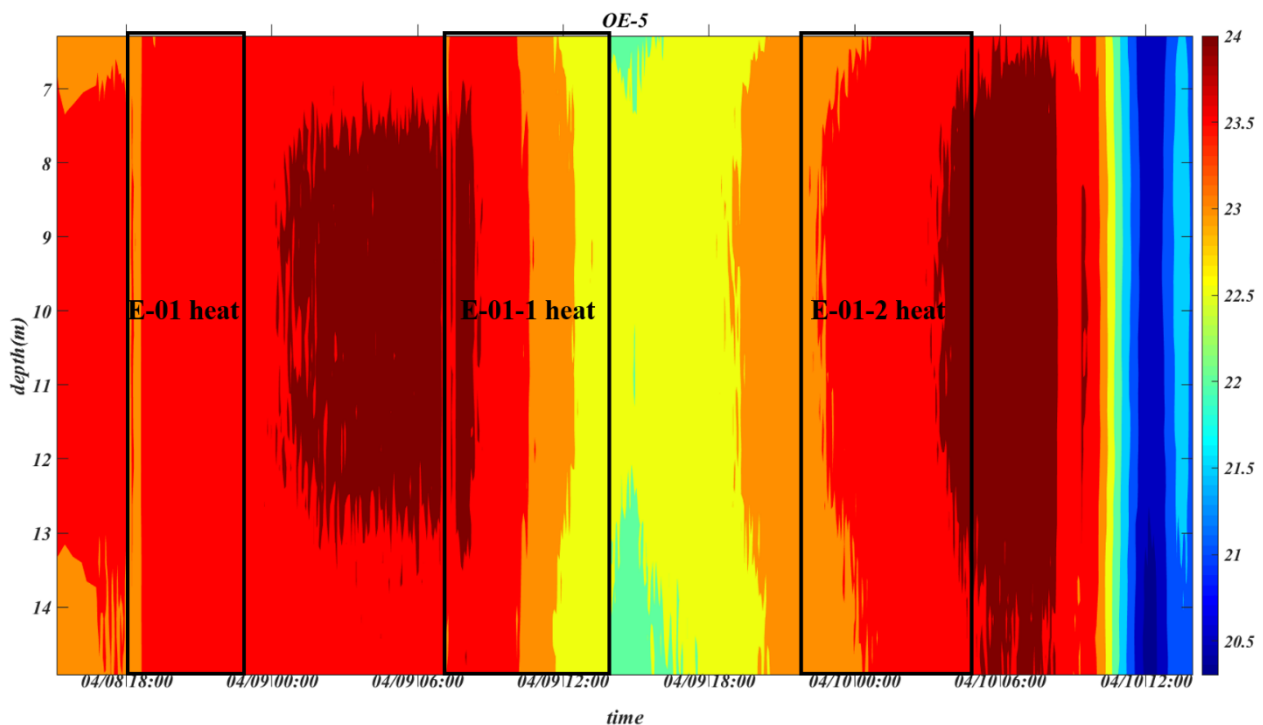


圖 44 井 OE-5 第二次加熱試驗溫度變化（黑框分別為 E-01、E-01-1 與 E-01-2 的加熱時間）

圖 45 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 的深度為 13.89 公尺，井內之最低溫度與最高溫度變化區間約介於 18~23.5 度。在 2020/4/9 接近 00:00 時，在深度 9.5~13.8 公尺有接收到一溫度上升的訊號，溫度約為 22.5 度，同樣在 2020/4/10 06:00 前後，在深度 11~13.8 公尺也接收到溫度上升之訊號，溫度約為 23.5 度。井下所收到之溫度訊號可能與井 OE-2、OE5 所收



研究內容

到之溫度訊號相同。推測是由於上游加熱井所釋放之熱源經由地下水流攜帶至下游所造成溫度上升之訊號，此溫度訊號需再進一步進行分析探討。由圖上同樣可觀察到，在 2020/4/8 18:00、2020/4/9 07:30 與 2020/4/10 09:00 時受到主機的雷射光異常訊號導致量測溫度偏低。在 2020/4/9 08:03、2020/4/10 9:25 時同樣也量測到因外部供電不穩，使得訊號不穩定，因此量測到較低的溫度訊號。

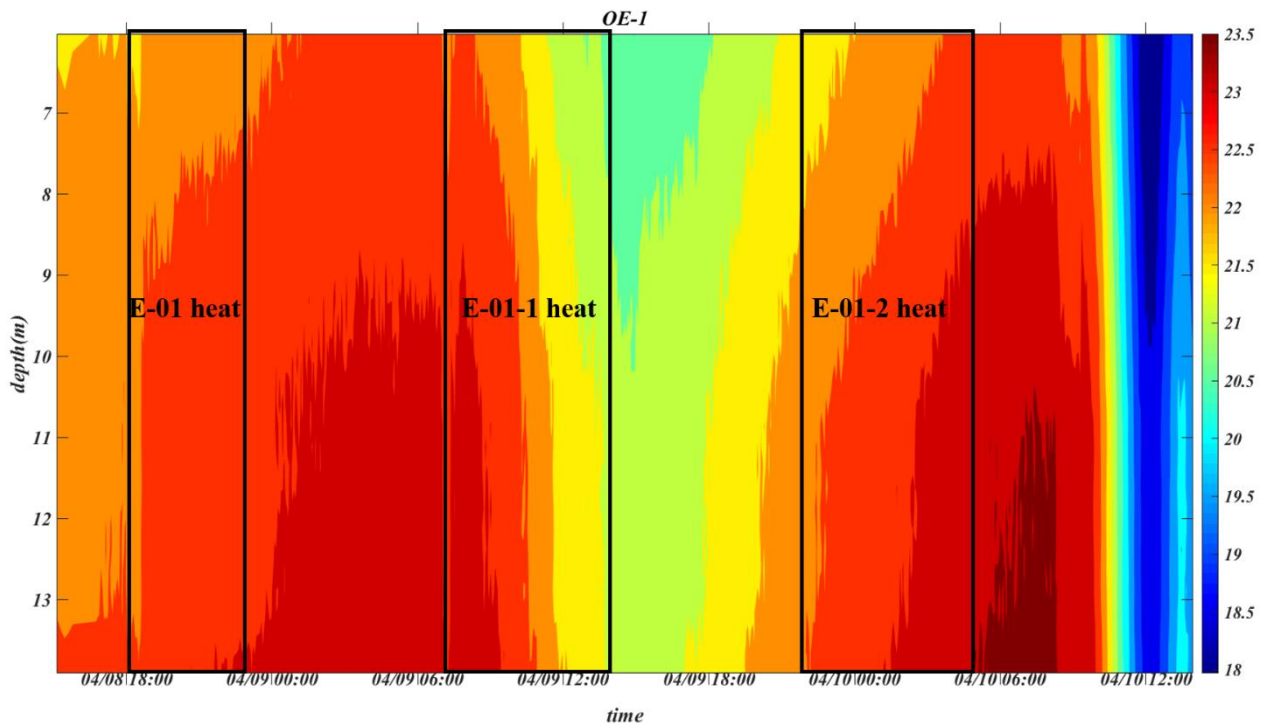


圖 45 井 OE-1 第二次加熱試驗溫度變化（黑框分別為 E-01、E-01-1 與 E-01-2 的加熱時間）

圖 46 井 OE-3 所量測到絕對溫度對深度隨時間變化之量測結果。井 OE-1 的深度為 13.1 公尺，井內之最低溫度與最高溫度變化區間約介於 18~25 度。在 2020/4/8 18:00 時，在深度 8.5~13 公尺有接收到一溫度上升的訊號，溫度約為 24 度，同樣在 2020/4/10 00:00，在深度 7~13 公尺接收到溫度上升之訊號，溫度約為 24 度，在 2020/4/10 06:00 前後，在深度 11~13 公尺也接收到溫度上升之訊號，溫度約為 25 度。井下所收到之溫度訊號可能與井 OE-2、OE5、OE-1 所收到之溫度訊號相同。推測是由於上游加熱井所釋放之熱源經由地下水流攜帶至下游所造成溫度上升之訊號，此溫度訊號需再進一步進行分析探討。由圖上同樣可觀察到，在 2020/4/8 18:00、2020/4/9 07:30 與 2020/4/10 09:00 時受到主機的雷射光異常訊號導致量測溫度偏低。在 2020/4/9 08:03、2020/4/10 9:25 時同樣也量測到因外部供電不穩，使得訊號不穩定，因此量測到較低的溫度訊號。



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

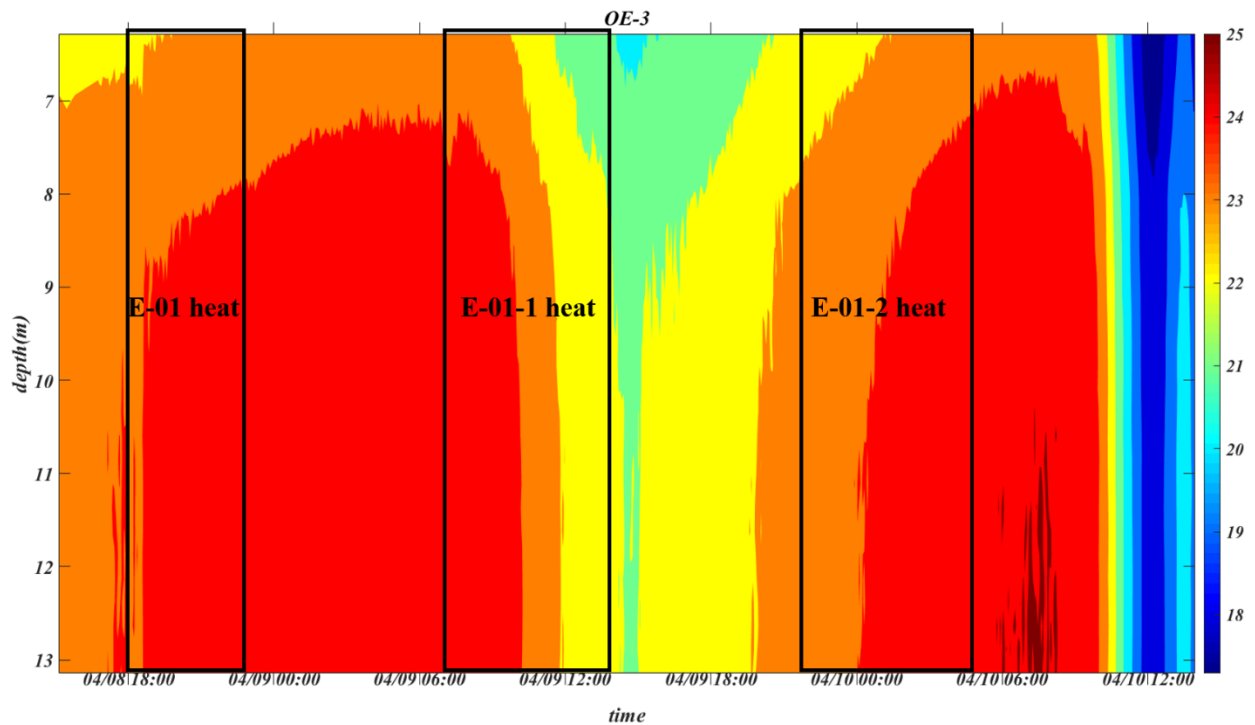


圖 46 井 OE-3 第二次加熱試驗溫度變化（黑框分別為 E-01、E-01-1 與 E-01-2 的加熱時間）

由廠區內上游之量測結果可發現，三口加熱井 E-01、E-01-1、E-01-2 在加熱與降溫的過程中不同深度之溫度變化明顯不相同，若地下水流速較快，在升溫過程中會因熱源不斷的被地下水流帶走，導致升溫緩慢且溫度上升幅度較小；若地下水流速慢，在升溫過程中熱源可持續累積，溫度上升較快且升溫幅度較大。井 E-04 同樣位處上游，當加熱井在加熱時亦會受到地下水流攜帶熱源而量測到溫度上升之訊號。

根據廠區下游所佈設光纖得到的量測結果可發現，上游在進行加熱的過程中，下游監測井似乎可接收到溫度上升的訊號，下游每個監測井在不同的時間與不同的深度內量測到溫度上升的訊號。然而，井內的溫度分佈確實受到訊號異常的影響，導致各個深度的溫度分佈不明顯。在三個時間點(2020/4/8 18:00、2020/4/9 07:30 與 2020/4/10 09:00)因主機在發射雷射光過程中發生訊號錯誤，使得光子能量異常造成量測到的溫度偏低。此外，下游井在 2020/4/9 08:03、2020/4/10 9:25 時同樣也量測到異常訊號。造成的原因推測是發電機作為外部供電時，因長時間且不間斷的使用，可能因粉塵影響與油管阻塞，使供電不穩，造成訊號異常不穩定。由於上述訊號異常現象皆與外部供電與主機有關，除了改善外部電源供應外，未來需釐清外部電源給予 DTS 主機供電與加熱器使用時的相互影響。



5.2.3. 第三次現地試驗

第三次現地試驗主要針對井 E-01 進行加熱，但大幅度延長加熱時間至 48 小時，光纖之佈設順序與量測井皆與第二次現地試驗相同，同樣於上游三口監測井 E-01-2、E-01-1、E-04 及下游四口監測井 OE-2、OE-5、OE-1、OE-3 進行量測，試驗時間為 2020/07/21~07/24。

圖 47 為井 E-01 所量測溫度對深度隨時間變化之量測結果，由圖上可觀察到由於整口井進行加熱，由於溫度變化幅度範圍較大，溫度的上升與回復變化較不易判識，因此以下將升溫與降溫的過程分別進行討論。圖 48 為井 E-01 在加熱期間(2020/7/21 16:13~7/23 16:15)溫度對深度隨時間變化量測結果。初始加熱時溫度約在 27 度左右，深度 7~9、10.5、13~14 公尺在加熱約 10 分鐘後，溫度上升至 28 度，加熱 60 分鐘後，溫度上升至 31 度，直到加熱結束前，溫度約維持在 32.5 度之間。在深度 10、11~12 公尺可觀察到在加熱前十分鐘溫度上升至 28 度，加熱 60 分鐘後，溫度上升至 32 度，直到加熱結束前約維持在 33~33.5 度。深度 12 公尺則是在加熱一小時後溫度上升至 33 度，直到加熱結束前溫度約在 34.5 度。井內各個深度在加熱過程中溫度變化雖不相同，但在加熱約 14 小時後(2020/7/22 06:00)，各深度溫度上升情況趨於穩定，此量測結果顯示深度 7~9、10.5、13~14 公尺，因地下水流動十分快速，在加熱過程中，熱源受到溫度較低的地下水流影響，使得光纖在對地下水流加熱的過程中溫度上升較為緩慢且不易升溫。深度 12 公尺之地下水流則因流動緩慢，因此在加熱過程中，受到周圍較低溫度之地下水流影響較小，在升溫過程中溫度變化較為快速、且升溫幅度也較大。

圖 49 為井 E-01 在停止加熱後，井內溫度回復之量測結果。由圖上可觀察到在停止加熱後，井內各深度溫度回復情況不相同，深度 7~10 公尺在停止加熱 30 分鐘後，溫度由 30 度下降至 28 度，在 2020/7/23 17:00 時溫度下降為 26 度，在 18:00 時溫度回復至 24 度，在 2020/7/24 9:00 時溫度回復至 23 度，顯示溫度回復情況相當明顯。深度 13、14 公尺同樣在停止加熱 30 分鐘後，溫度由下降至 29 度，60 分鐘後溫度下降至 27.5 度，直至 20:00 左右下降至 24 度，顯示溫度變化較淺部 7~10 公尺慢。深度 11~12.5 公尺在停止加熱 120 分鐘後溫度才回復至 26 度，約在 21:00 時可回溫至 24 度，在 7/24 14:00 回溫至 23 度左右，降溫情況最慢。根據降溫的量測結果顯示深度 7~10 公尺在溫度回復過程中溫度變化較快速且溫度可回復至初始溫度，其次為深度 13~14 公尺。相較之下，深度 11~12.5 公尺溫度變化則較為緩慢，因此可判定深度 7~10 公尺透水性較高，其次為深度 13~14 公尺、深度 11~12.5 公尺。

此量測結果與前兩次試驗結果相似，由升溫的過程可判定 7~9、10.5、13~14 公尺透水性高、地下水流流速較快不易升溫，加熱過程溫度變化較緩慢；深度 12



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

公尺則是因地下水流流速緩慢，熱源在釋放過程中受到影響較小，因此升溫過程較快速，溫度上升幅度也比較大。由溫度回復過程可判定深度 7~10 公尺由於溫度回復過程較快速，顯示溫度較低之地下水流可快速冷卻溫度，因此溫度回復情況較明顯且可回復至更低溫，接著依序為深度 13~14 公尺與深度 11~12.5 公尺。

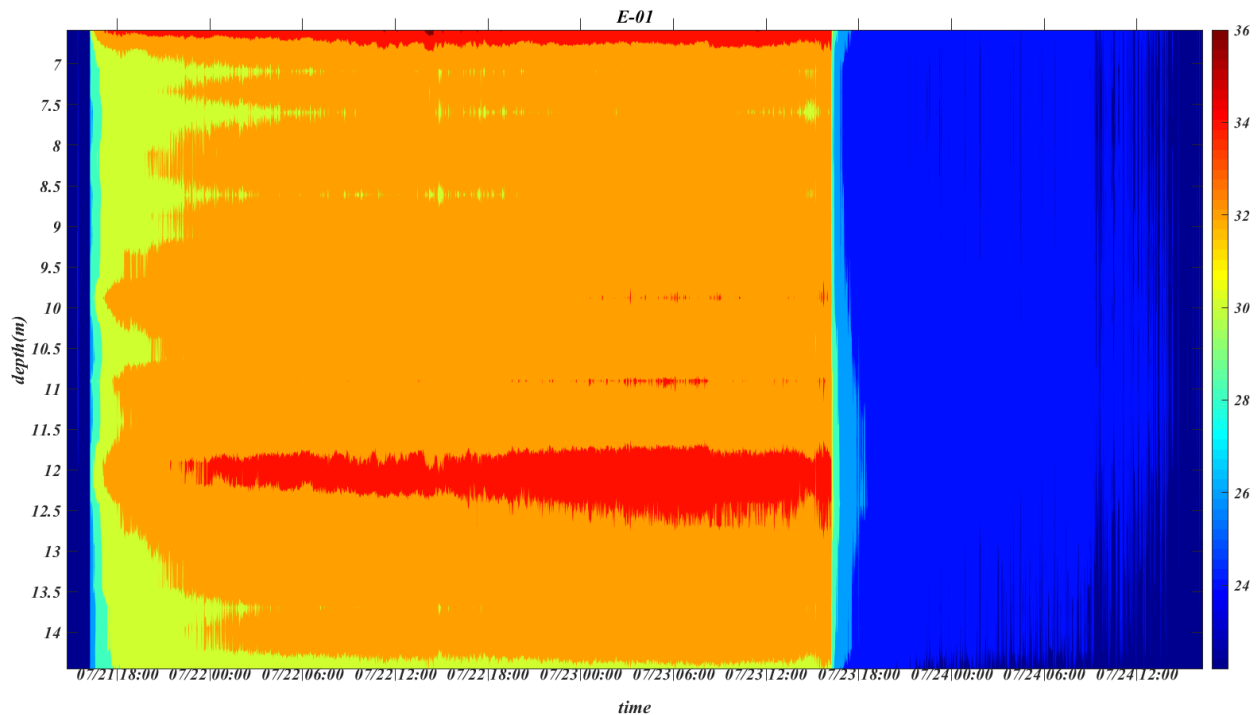


圖 47 井 E-01 第三次加熱試驗溫度變化



研究內容

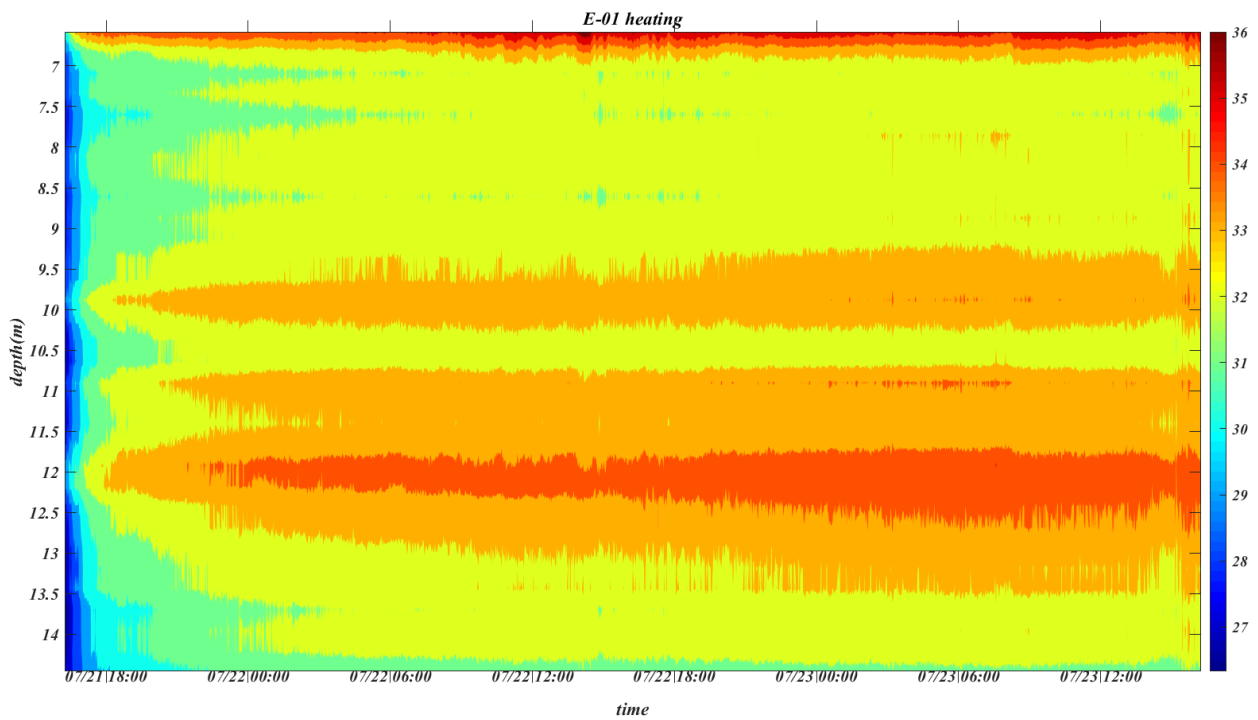


圖 48 井 E-01 第三次加熱試驗溫度上升過程

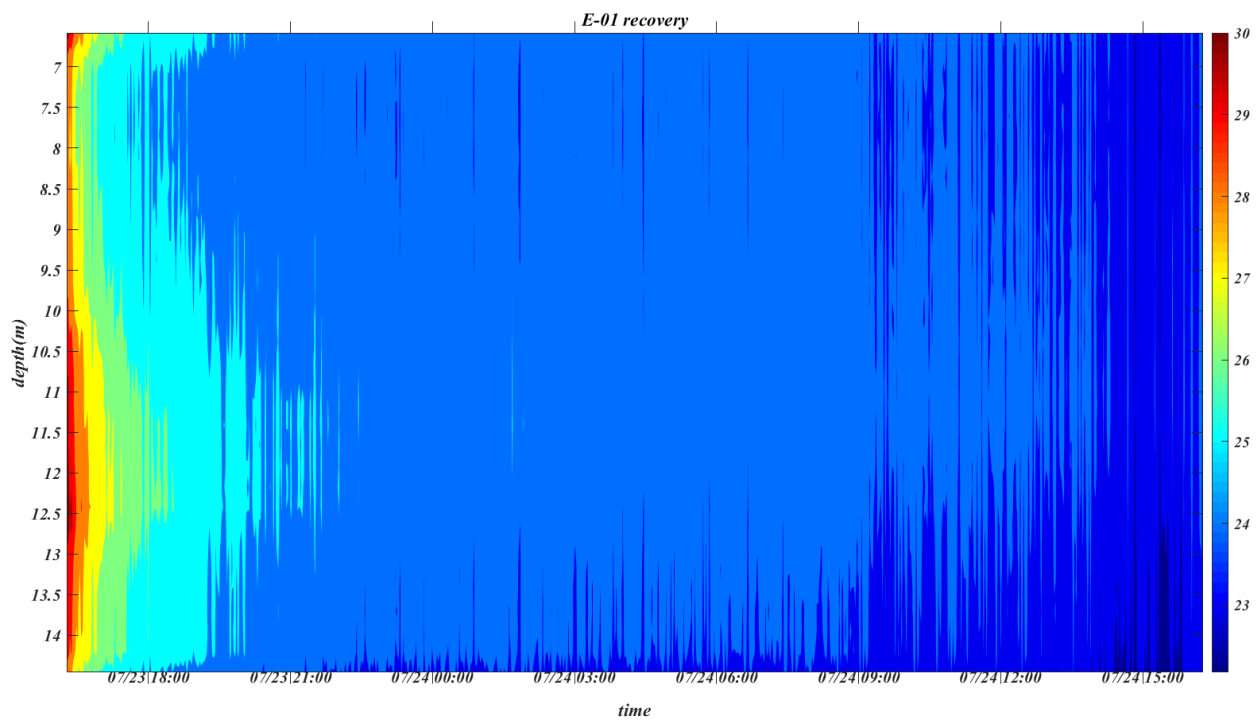


圖 49 井 E-01 第三次加熱試驗溫度回復過程



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 50 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 的深度為 11 公尺，井內之最低溫度與最高溫度變化區間約介於 23.35~23.85 度。由圖上可觀察到井 E-01-2 在量測期間溫度變化並不大，僅約 0.05 度。在井 E-01 開始加熱後，井 E-01-2 在深度 7~9 公尺有些許溫度上升的訊號，溫度上升約 0.1 度。井 E-01-2 所在位置與井 E-01 相同，皆為上游井，且兩口井距離相近，在加熱期間僅有較淺深度(7~9 公尺)有溫度上升訊號。根據第二次試驗井 E-01-2 的加熱結果(圖 40、圖 41)可發現，深度 7~9 公尺確實為較透水之區段，此次井 E-01 加熱結果可進一步推測，深度 7~9 公尺因為較為透水，可接收到井 E-01 加熱時之溫度訊號，而 9 公尺至井底則因為較不透水，因此無明顯溫度上升之訊號。地表溫度的日夜週期變化，亦是可能造成淺部地層地下水溫上升的可能原因之一，跨孔之間的熱傳輸仍須更進一步的試驗方可進行確認與驗證。

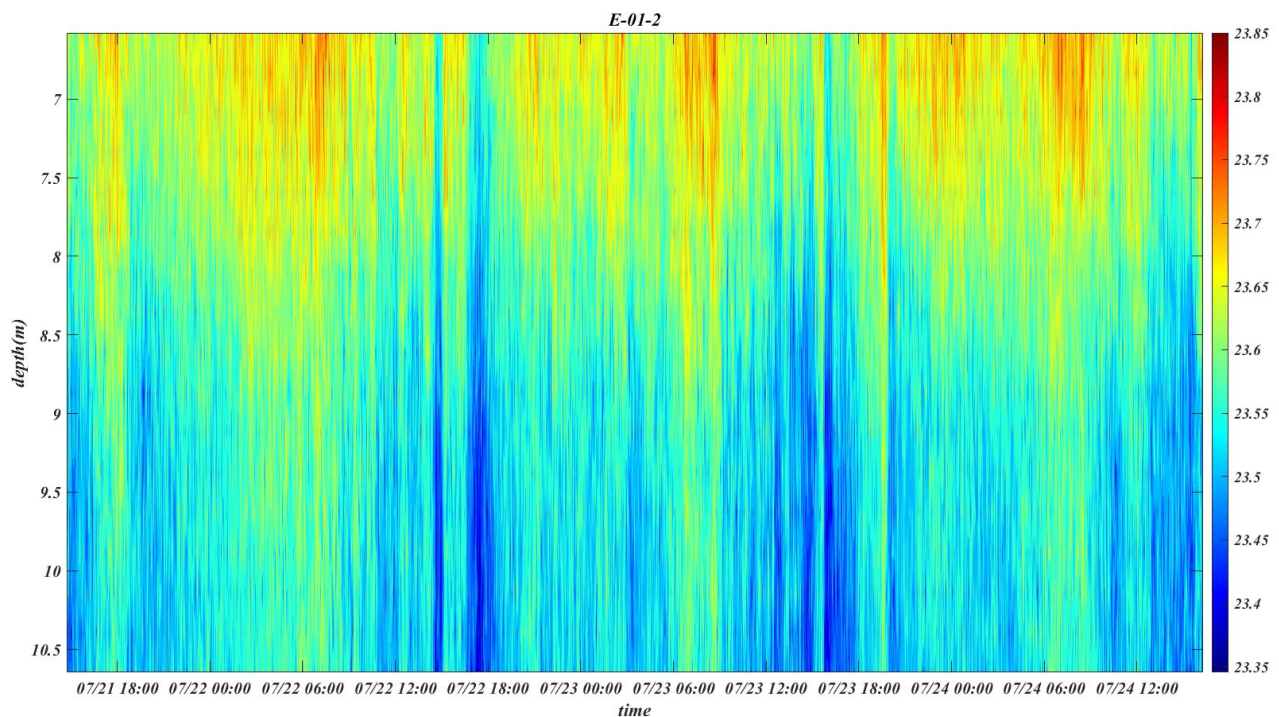


圖 50 井 E-01-2 第三次加熱試驗溫度變化

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 的深度為 14.69 公尺，井內之最低溫度與最高溫度變化區間約介於 23.4~24 度。由圖上可觀察到井 E-01-1 在量測初期並無明顯溫度變化，井內溫度約在 23.4~23.6 之間，約在 2020/7/23 16:00 可明顯觀察到井內溫度上升至 23.7 度，於 18:00 量測到溫度約為 23.9~24 度。井 E-01-1 所在位置與井 E-01、E-01-2 相同，皆為上游井，且兩口井距離相近，此溫度上升訊號可能是由加熱井所釋放之熱源藉由地下



研究內容

水流攜帶至井 E-01-1 所造成溫度上升之訊號。然而在 2020/7/24 08:00 左右溫度逐漸趨於平緩不再上升，此情況亦可能是由於停止加熱後(2020/7/23 16:15)，熱源已被地下水流沖散，因此後續並無明顯溫度上升的情況。

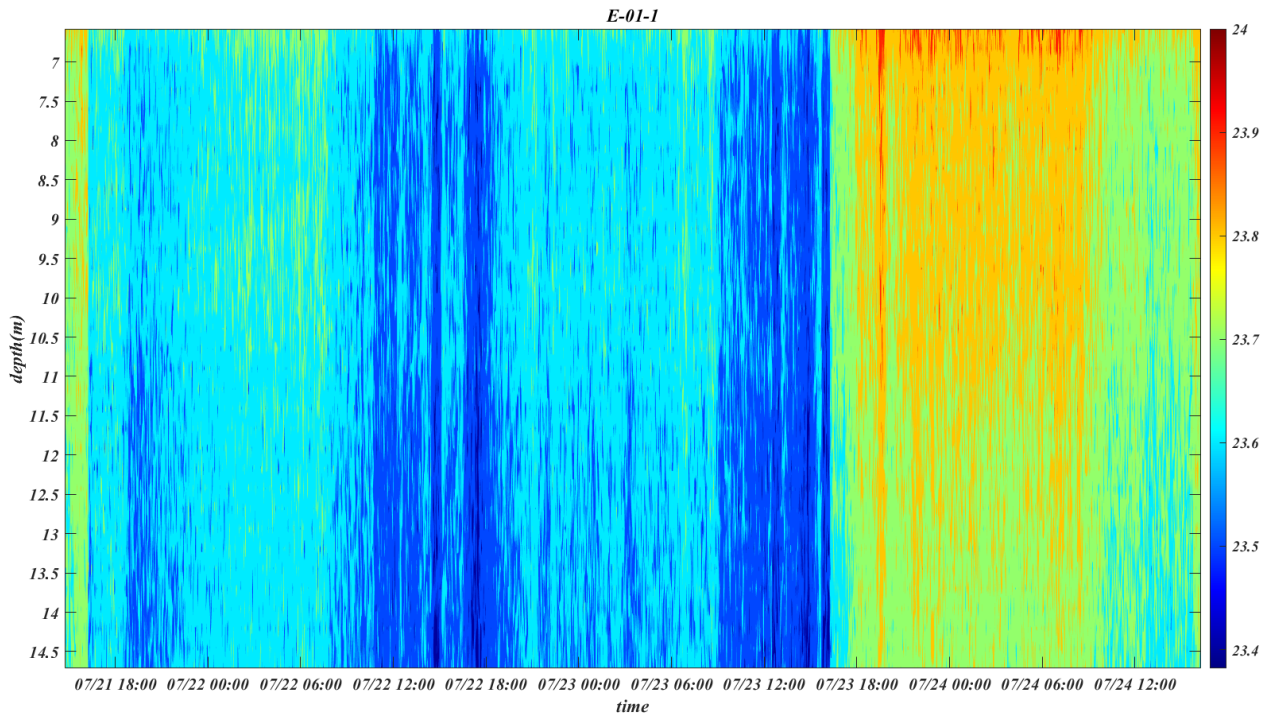


圖 51 井 E-01-1 第三次加熱試驗溫度變化

圖 52 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 的深度為 14.63 公尺，井內之最低溫度與最高溫度變化區間約介於 23.35~23.85 度。由圖上可觀察到井 E-04 在量測期間溫度變化約在 23.7~23.8 之間，其中，約在 2020/7/22 12:00 可明顯觀察到井內溫度有下降的變化，同樣於 2020/7/23 12:00 量測到溫度約下降至 23.4 度。此溫度下降情況可能是由於井 E-04 附近有積水，廠區在施工時，在井周圍堆放砧板、化學物，造成積水有流入井中，使得井 E-04 量測溫度受到干擾。井 E-04 所在位置與井 E-01、E-01-2、E-01-1 相同，皆為上游井，井的位置靠近蒸汽鍋爐區，因此井 E-04 在溫度變化上較難判定溫度上升之過程是否與井 E-01 加熱有關。



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

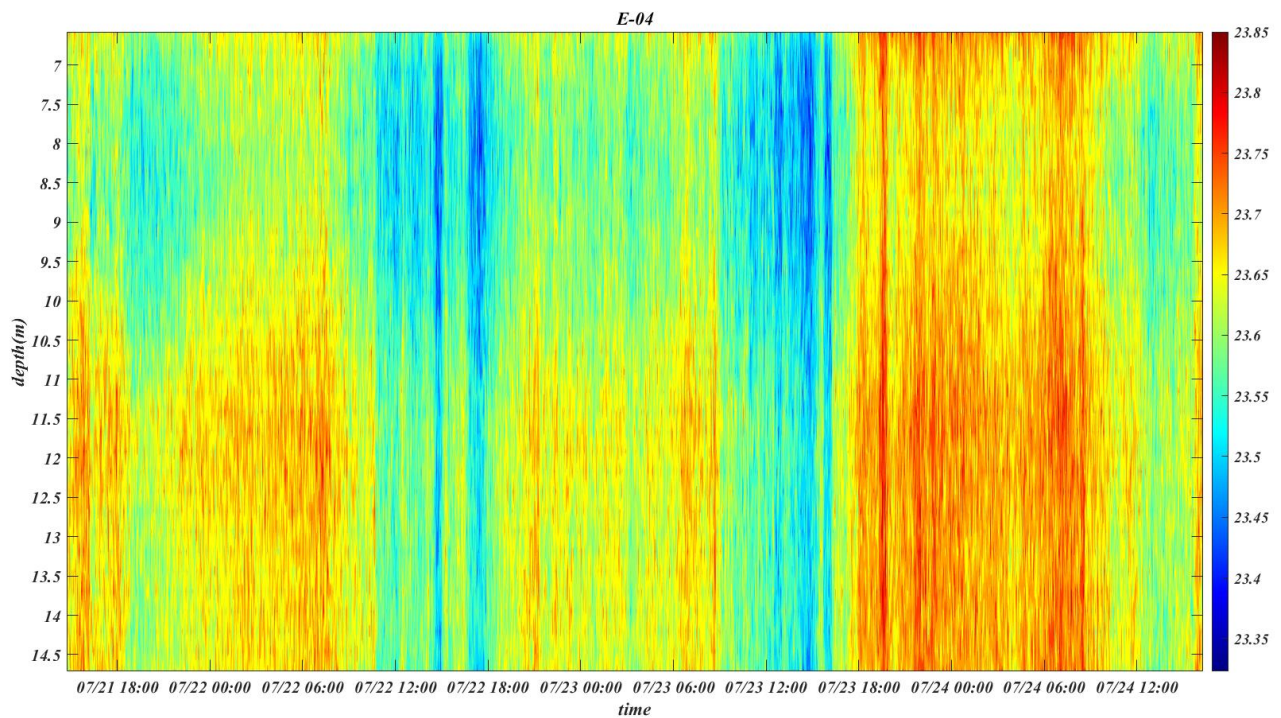


圖 52 井 E-04 第三次加熱試驗溫度變化

圖 53 為井 OE-2 所量測到絕對溫度對深度隨時間變化之量測結果。井 OE-2 的深度為 10.73 公尺，井內之最低溫度與最高溫度變化區間約介於 24.35~24.85 度。井 OE-2 為下游之監測井，由圖上可觀察到井 OE-2 在量測期間之溫度分布為深度 7~8 公尺約在 24.65~24.85 度，深度 8.5 公尺~井底溫度約為 24.35~24.6 度。圖中有一空白處(2020/7:22 12:00)為霖昌公司採集水樣時將光纖拉起，因此在量測過程不將此時間之量測資料進行分析。加熱期間，明顯觀察到井 OE-2 有明顯溫度上升之訊號，僅接近地下水位面有些許升溫的情況，整體而言，井下溫度變化小且穩定。



研究內容

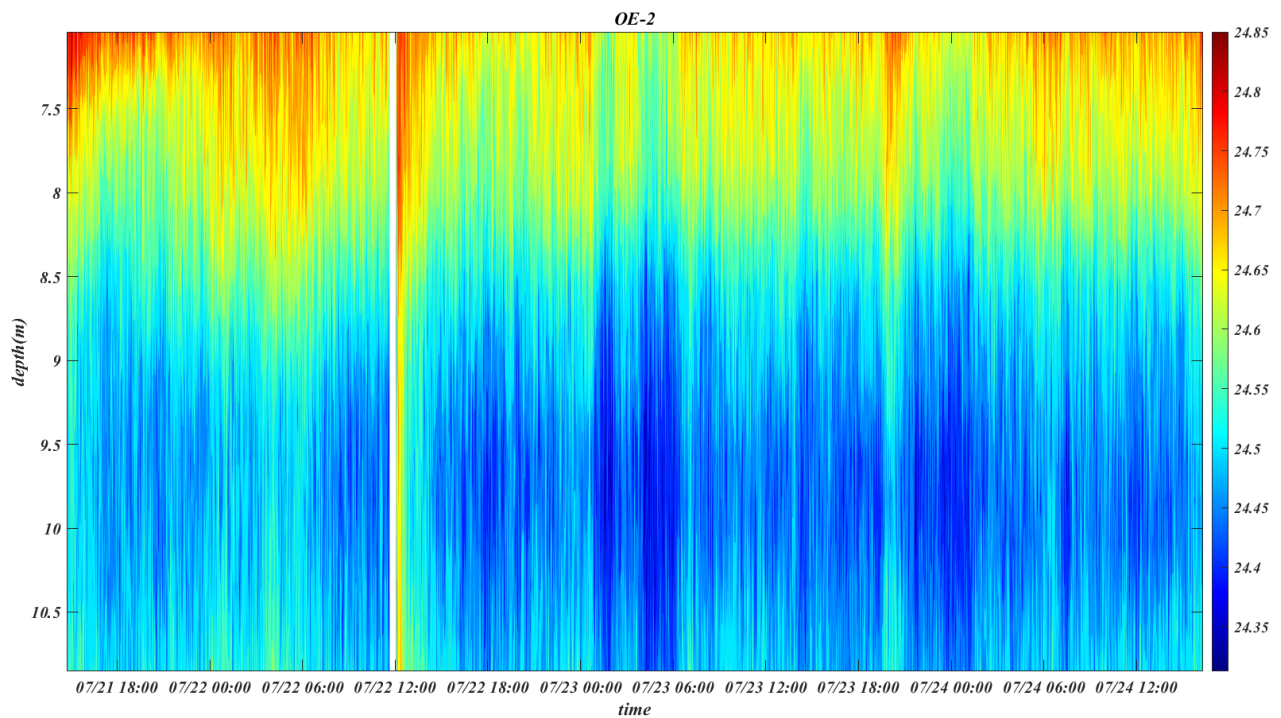


圖 53 井 OE-2 第三次加熱試驗溫度變化

圖 54 為井 OE-5 所量測到絕對溫度對深度隨時間變化之量測結果。井 OE-5 的深度為 14.17 公尺，井內之最低溫度與最高溫度變化區間約介於 23.6~24.8 度。井 OE-5 同樣為下游之監測井，由圖上可觀察到井 OE-5 在量測期間之溫度分布為隨著深度增加而遞減，深度 7.2~7.7 公尺溫度為 24.4 度，深度 7.7~8.1 公尺溫度為 24.2 度，深度 8.1~8.7 公尺溫度為 24 度，深度 8.7~9.5 公尺溫度為 23.8 度，深度 9.5~14.1 公尺溫度則約為 23.6 度。整體而言，隨著時間演變，井內各深度所量測之溫度維持相當穩定，在初始量測、井 E-01 加熱期間與停止加熱後，井內之溫度皆無明顯變化。



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

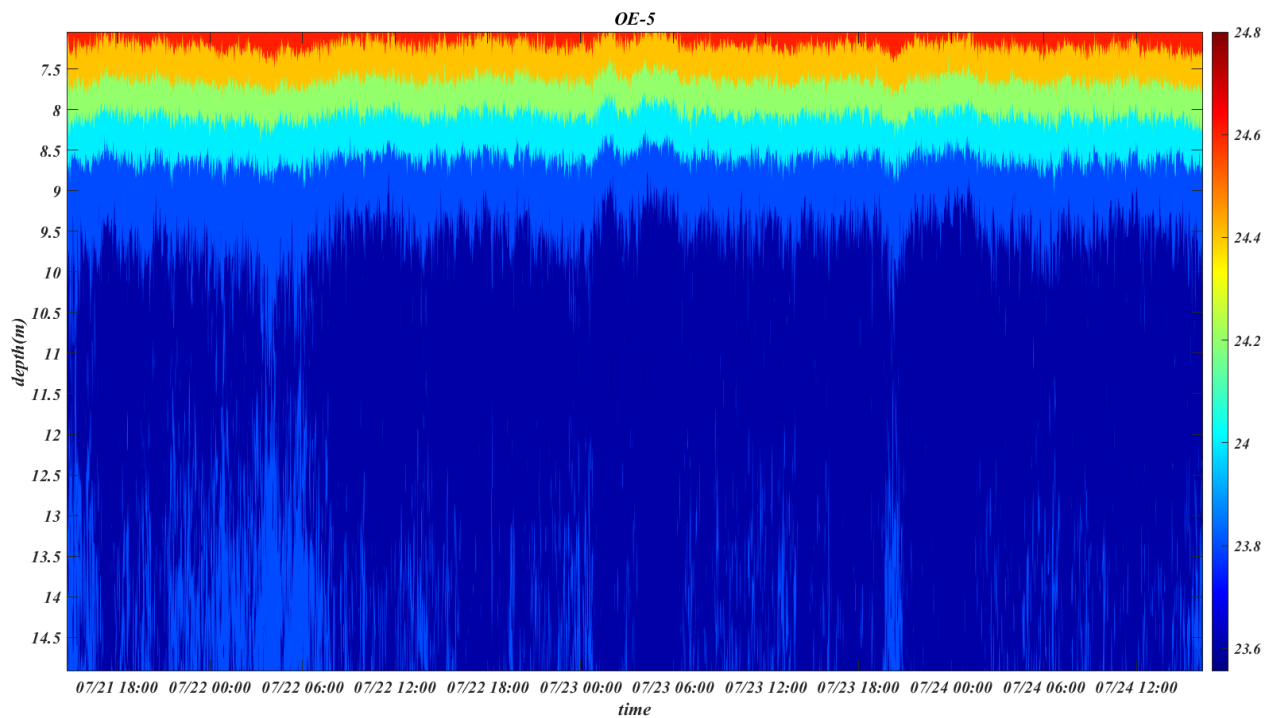


圖 54 井 OE-5 第三次加熱試驗溫度變化

圖 55 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 的深度為 13.57 公尺，井內之最低溫度與最高溫度變化區間約介於 23.35~23.7 度。由於廠區進行施工並堆放砧板等雜物，因此井 OE-1 在試驗初期(2020/7/21 16:00~2020/7/22 12:00)並無量測資料。由圖上可觀察到井 OE-1 在量測期間高溫主要分布於接近深度 7~7.5 公尺，深度 7.5 至井底 13.5 公尺溫度分布較為零散，溫度變化為 23.35~23.55 度。由井 OE-1 之溫度變化來看，最高溫度與最低溫度差距僅 0.35 度，由於並沒有明顯觀察到井 E-01 加熱所釋放之高溫訊號，亦沒有停止加熱後溫度降低之情況。整體而言，井 OE-1 之溫度變化相當小。

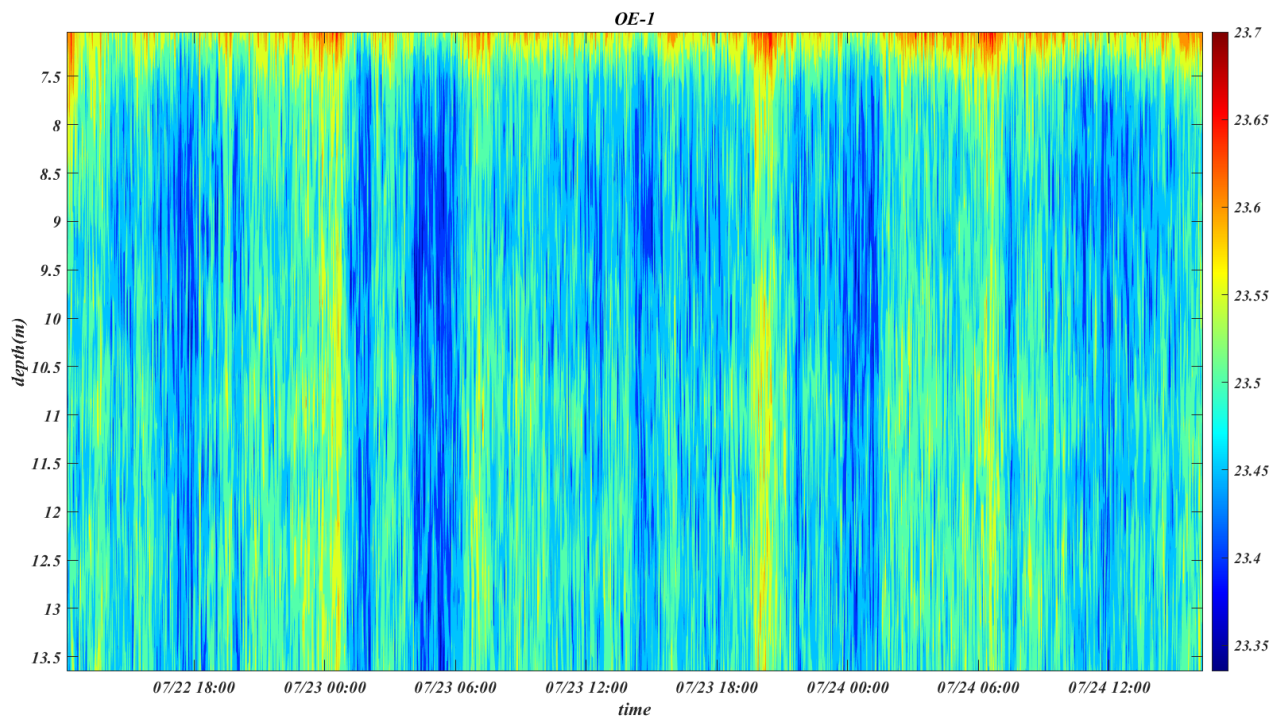


圖 55 井 OE-1 第三次加熱試驗溫度變化

圖 56 為井 OE-3 所量測到絕對溫度對深度隨時間變化之量測結果。井 OE-3 的深度為 12.41 公尺，井內之最低溫度與最高溫度變化區間約介於 24.15~24.55 度。在監測前期(2020/7/21 18:00~7/22 06:00)，井 OE-3 有接收到溫度上升之訊號，溫度上升約 0.1~0.25 度。然而井 OE-3 與加熱井 E-01 之直線距離約 25 公尺，在較長的距離下，線性熱源所釋放之熱能在傳輸過程中可能已被較低溫之地下水流所消散，且後續(7/22 06:00 後)並沒有持續升溫的情況發生，因此，井 OE-3 在監測前期溫度上升之情況仍有待釐清。以溫度變化來看，井 OE-3 和井 OE-1 相似，最高溫度與最低溫度差距僅有 0.4 度，除了前期監測之升溫情況外，井 OE-3 並沒有明顯溫度變化。



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

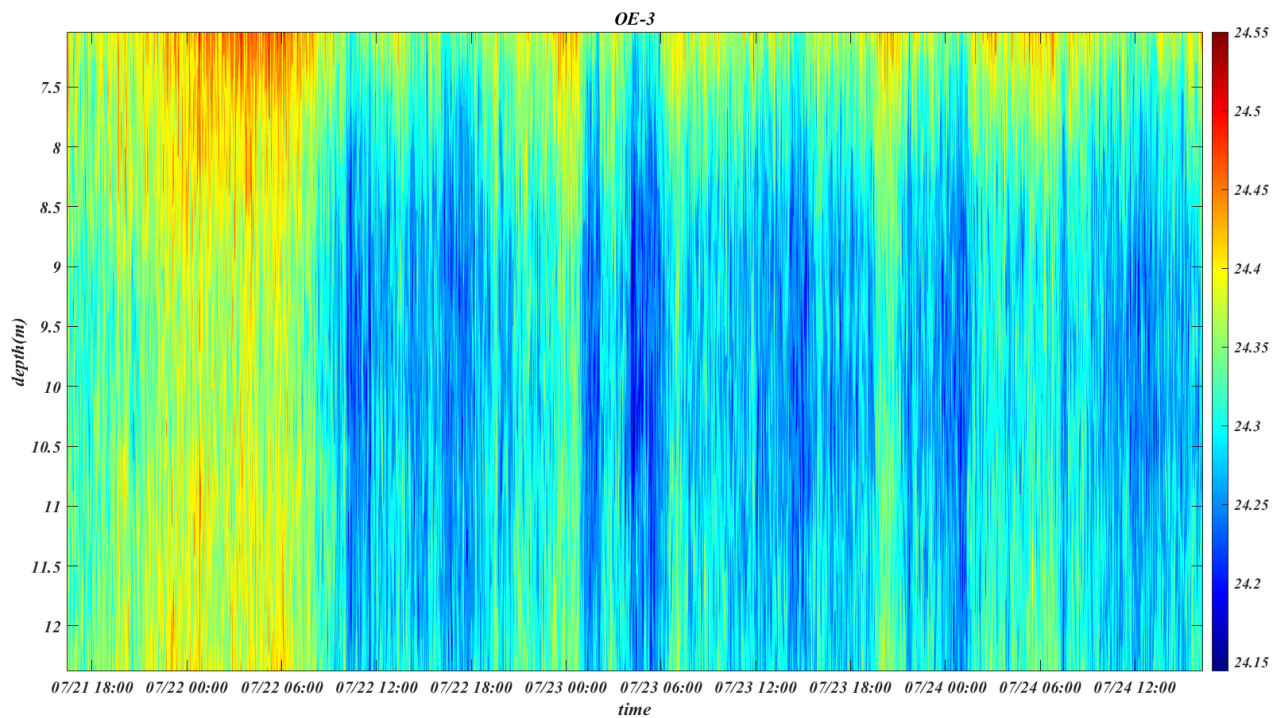


圖 56 井 OE-3 第三次試驗溫度變化

由廠區內上游之量測結果可發現，加熱井 E-01 在加熱與降溫的過程中溫度變化明顯不相同，由溫度變化的差異可判釋不同深度之透水性。井 E-01-2、E-01-1 所在位置因與加熱井 E-01 距離相近，在加熱過程中，可明顯觀察到井內有溫度上升的情況，井 E-04 同樣為上游之監測井，然而在量測過程中受到積水干擾造成井內溫度下降，且因位置靠近蒸汽鍋爐區，溫度上升之情況較難判定是否與井 E-01 加熱有關。

根據廠區內於地下水下游所佈設光纖得到的量測結果可發現，上游井 E-01 在進行加熱的過程中，下游監測井 OE-2、OE-5、OE-1、OE-3 似乎並沒有接收到溫度上升的訊號，井 OE-2、OE-5 在各深度所量測之溫度分布相當穩定，隨著深度增加，溫度逐漸遞減。井 OE-1、OE-3 在溫度量測上分布較為零散，僅深度 7~8 公尺為較高溫的情況。然而井 OE-1、OE-3 之最高溫度與最低溫度差距僅有 0.4 度以內，由於並沒有明顯接收到加熱井 E-01 之升溫訊號，也沒有停止加熱後溫度下降的情況，因此，井 OE-1、OE-3 在量測結果上較無明顯溫度變化。下游監測井在此次試驗中由於距離較遠、溫度變化小且受到廠區施工與採集水樣等影響，不容易對升溫與降溫訊號進行判釋，僅能針對不同深度之溫度背景進行量測。



5.3 熱傳輸解析解

5.3.1 解析解驗證

為了進一步量化 DTS 所測量之溫度資料，本研究嘗試以線性熱源之熱傳輸解析解解析加熱光纖在加熱與停止加熱後井內溫度之變化。圖 57 為 2015 年 Bakker 等人以線性熱源加熱井下水溫所推導的熱傳輸解析解公式，計算鄰近熱源的 5 口監測井在加熱與降溫期間，井內溫度變化結果。圖上所標之 x, y 為各監測井與熱源之相對位置，加熱時間為 4 天，總量測時間為 8 天。由圖上可觀察到在開始加熱後，各個位置之溫度變化各不相同，期中，藍色線(1,0)距離熱源最近，且位於地下水流下游方向，因此溫度上升最高，接著依序為綠色(0,1)；紅色線(-1,0)雖然與熱源距離相同，但位於地下水流上游方向，因此溫度上升較不顯著；淺藍色線(2,0)因距離較遠，溫度上升的幅度明顯降低。紫色線所在位置為距離熱源水平方向 1 公尺外，熱能在傳輸過程中可能已消散，因此所接收到溫度訊號較弱。依據 2015 年 Bakker 等人所推導的解析解公式（式 7），本研究以 MATLAB 程式進行解析解公式的撰寫，並以相同之參數設定，驗證程式之正確性。透過解析解計算後所描繪出的溫度曲線如圖 58 所示，將其與圖 57 進行比較發現，兩者非常一致。經過正確性驗證後之程式，後續將用於量化分析 DTS 所測量之溫度變化資料，推估每口加熱井在不同深度之地下水流速。

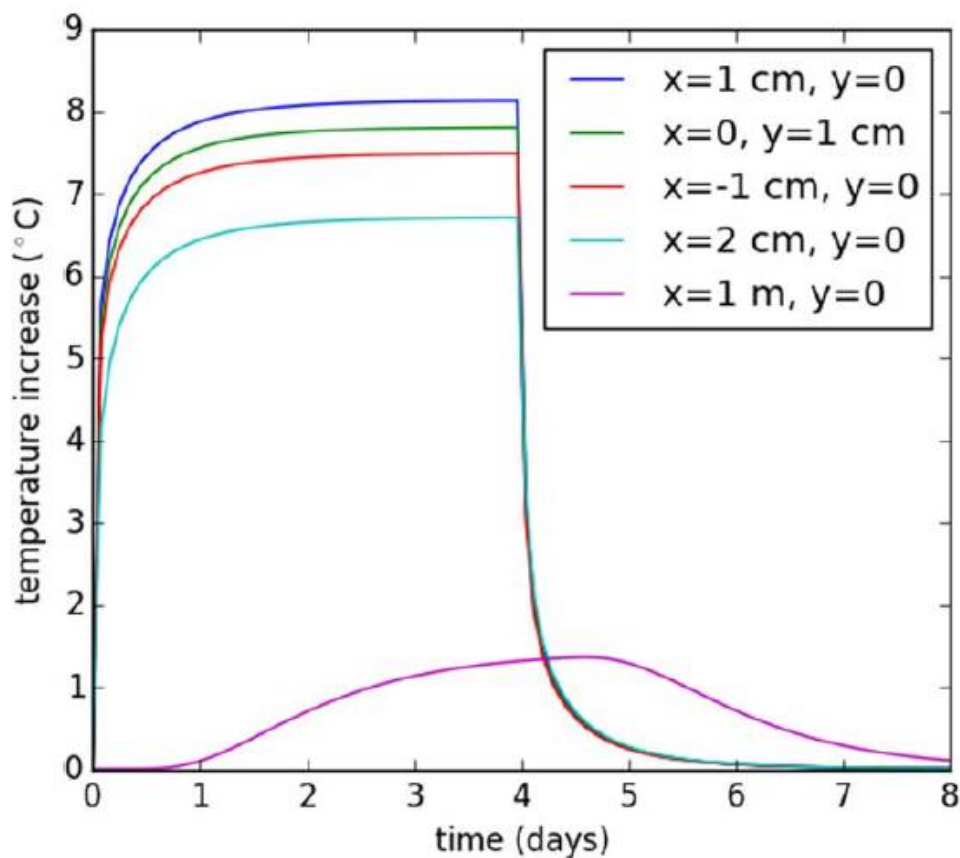


圖 57 解析解所計算之不同熱源距離之溫度變化(摘自 Bakker et al.,2015)



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

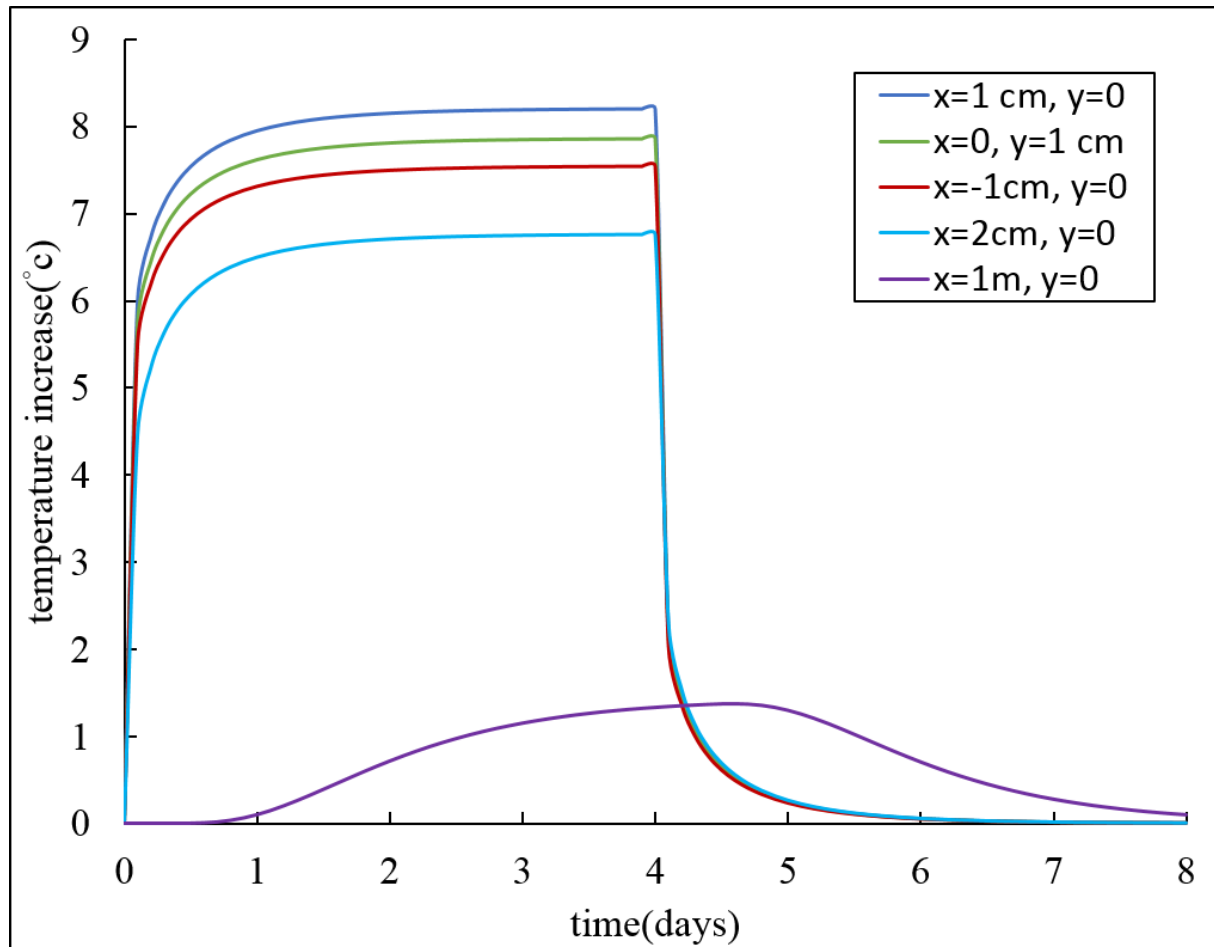


圖 58 以 Bakker et al(2015) 之解析解與參數設定驗證不同熱源距離之之溫度變化結果

5.3.2 線性熱源熱傳輸解析解參數設定

經由 5.3.1 章節對於 Bakker et al. (2015) 所提出解析解的驗證，將根據 MATLAB 所撰寫的程式計算在加熱與停止加熱期間的溫度上升與回復變化，並與 DTS 所量測之結果進行擬合，推估不同深度之地下水流速 (groundwater velocity)。由於三次現地試驗均有針對井 E-01 進行加熱，因此以井 E-01 為目標，透過量測溫度剖面之擬合，推估不同深度之地下水流速。由於 DTS 的空間高解析度，本計畫以每 0.5 公尺之解析度推估各深度之水流速度。DTS 量測的空間解析度為 25 公分，首先將井 E-01 地下水位面以下各深度上下的 DTS 量測值進行平均後，開始進行擬合，在 6.5~14.5 公尺區間，一共分為 17 個深度進行擬合，因此可獲得 17 個深度之水流速度。在解析解參數設定中，除了欲擬合之水流速度與熱傳導係數外，仍需針對孔隙率 (porosity)、熱傳導係數 (thermal conductivity)、熱擴散係數 (heat diffusivity)、熱遲滯係數 (retardation coefficient) 及輸出功率等參數進行設定。在



同一含水層且岩性組成變化變異性不大的假設前提下，孔隙率、熱傳導係數、熱擴散係數與熱遲滯係數可視為一定值，因此分別設定為 $2.0 \text{ w/m}^\circ\text{C}$ （第二與第三次試驗設定為 $1.5 \text{ w/m}^\circ\text{C}$ ）、 0.4 、 $0.06 \text{ m}^2/\text{d}$ 與 2 。在加熱過程中，加熱系統總輸出功率為 300 W ，光纖加熱長度為光纖進入井內後再出井的總長度，共 30 公尺，即每公尺光纖得到熱源 20 W 的輸出（ 20 W/m ）。加熱時間依不同試驗進行設定（分別為 3 、 6.5 及 48 小時），總量測時間亦依據不同試驗進行設定（分別為 1.2 、 1 及 3 天）。由於加熱銅線與光纖均包覆於 PE 材質內，距離相當接近，因此在設定熱源與光纖間之距離以光纖直徑 0.003 公尺進行設定，上述解析解之相關設定列於表 3 中。在完成基本參數設定後，以加熱區間的溫度上升變化作為率定 (calibration) 的資料，而停止加熱區間的溫度回復變化作為驗證 (validation) 的資料，並以窮舉法，嘗試不同的水流流速與熱傳導係數組合，擬合 17 個不同深度之 DTS 溫度量測資料，當最小均方根誤差 (root-mean-square-error, RMSE) 達到最小值時，此時的水流流速與熱傳導係數即為最佳之組合。

表 3 解析解之參數設定

參數	值
孔隙率 n	0.4
熱傳導係數 $k (\text{w/m}^\circ\text{C})$	2.0 或 1.5^*
熱擴散係數 $D (\text{m}^2/\text{d})$	0.06
熱遲滯係數 R	2.0
總輸出功率 $Q (\text{W})$	300
光纖長度 (m)	30
單位長度光纖加熱功率 (W/m)	20

*第二與第三次試驗之設定值

5.3.3 井 E-01 第一次加熱試驗擬合結果

圖 59 為根據 5.3.2 章節的參數設定後所擬合之溫度變化。圖上以圓圈標示的為 DTS 量測之溫度資料，線條則為解析解所推估之溫度變化，圖上可發現，以解析解所推估之溫度變化與 DTS 量測結果相當接近。圖 59a 為深度 7 公尺到 8.5 公尺的溫度變化。在停止加熱前，深度 7 公尺溫度上升約 7 度。深度 7.5 公尺溫度上升約 5.8 度，深度 8 、 8.5 公尺溫度變化則介於 $4.8 \sim 5.1$ 度之間。停止加熱後，深度 8.5 、 8 公尺在降溫時較其他深度快，其它深度的溫度變化則較接近。圖 59b 為深度 9 公尺到 10.5 公尺在加熱期間的溫度變化。在停止加熱前，深度 10 公尺的溫度上升了 5.3 度，深度 9.5 、 10.5 公尺溫度變化則約為 5.2 度左右，深度 9 公

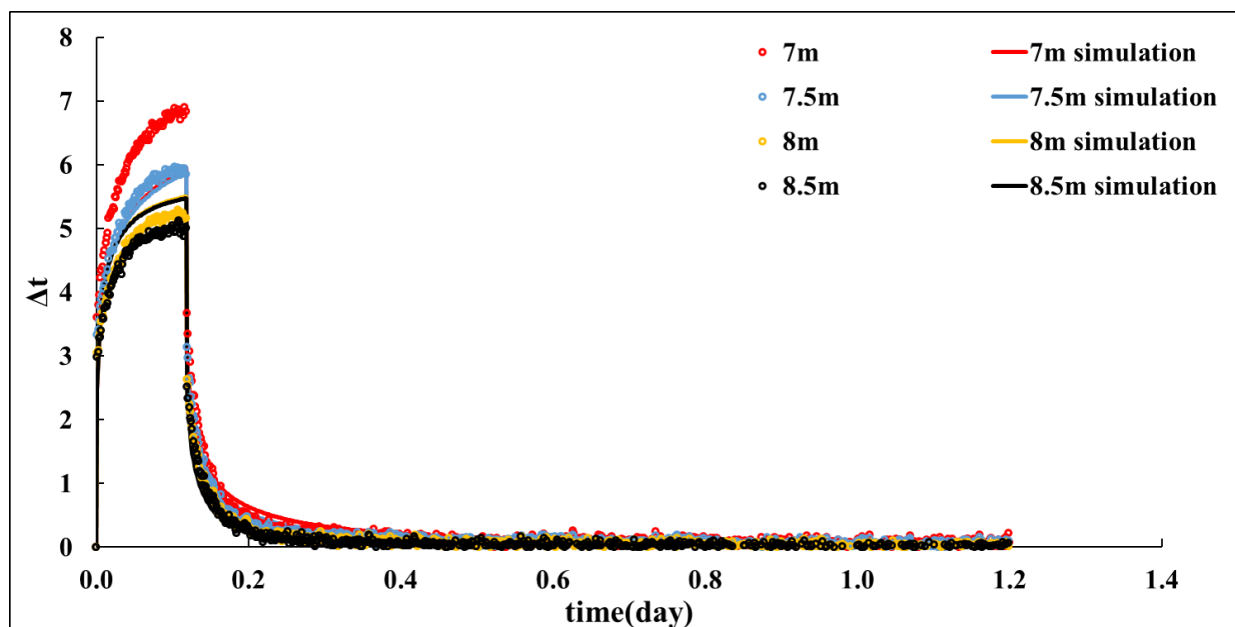


分散式光纖溫度感測器在地下水污染場址之高解析度井下水文地質調查

尺溫度上升為 4.9 度。停止加熱後，所有深度的溫度變化皆相當接近。

圖 59c 為深度 11 公尺到 12.5 公尺在加熱期間的溫度變化。在停止加熱前，深度 11、12.5 公尺的溫度上升了 5.6 度，深度 11.5、12 公尺溫度則分別上升了 5.3、5.1 度。停止加熱後，深度 12 公尺在降溫時較其他深度快，接著依序為 11.5、11、12.5 公尺。圖 59d 為深度 13 公尺到 14.5 公尺在加熱期間的溫度變化。在停止加熱前，深度 14.5 公尺的溫度上升了 6.7 度，深度 14 公尺的溫度上升了 6.25 度，深度 13、13.5 公尺上升之溫度變化則介於 6~6.1 度之間。停止加熱後，深度 13.5 公尺在降溫時較其他深度快，其它深度的溫度變化則較接近。

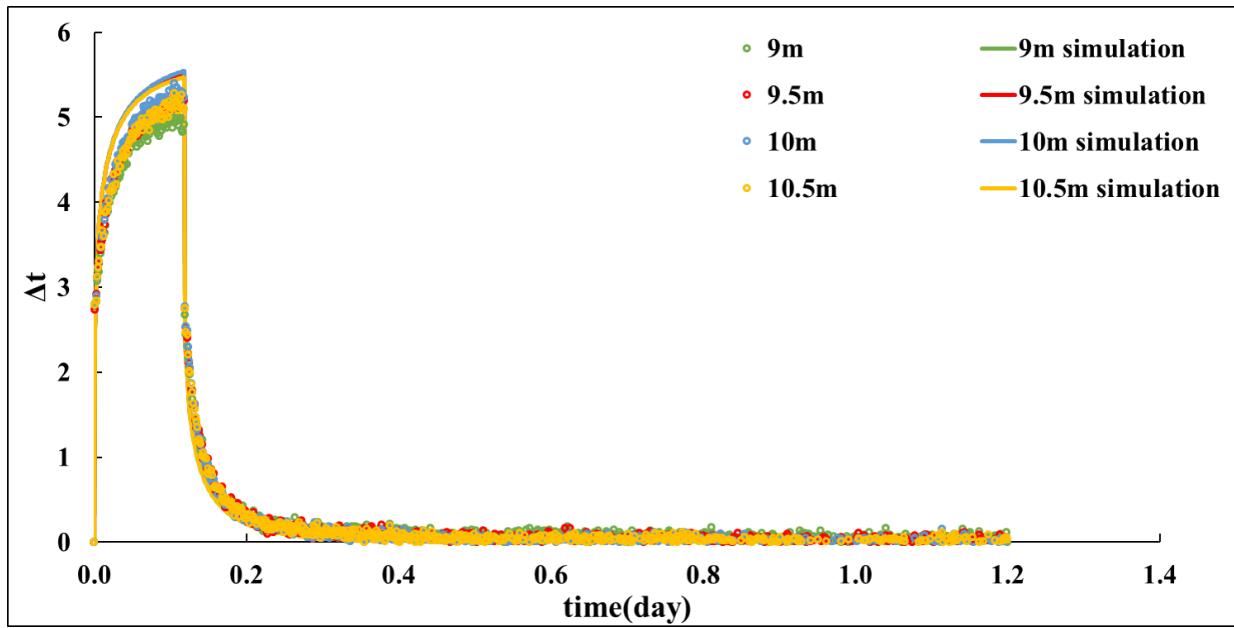
各深度以窮舉法所擬合之結果列於表 4。由表中結果可觀察到，除深度 7 公尺之外，其它深度位置溫度率定之 RMSE 介在 0.1~0.6 之間（LSE 值介於 1.01 ~ 38.6），顯示擬合之誤差相對較小；而溫度驗證之 RMSE 均介在 0.05 ~ 0.15 之間（LSE 值介於 2.42 ~ 19.4），顯示擬合之結果可信度高。深度 7 與 14.5 公尺溫度率定擬合之 RMSE 值分別為 0.86 與 0.67（LSE 值分別為 63.12 與 38.61），溫度擬合之誤差大，其原因為在深度 7 與 14.5 公尺在加熱初始升溫過程時(0.03~0.11day)之曲線擬合結果較差。



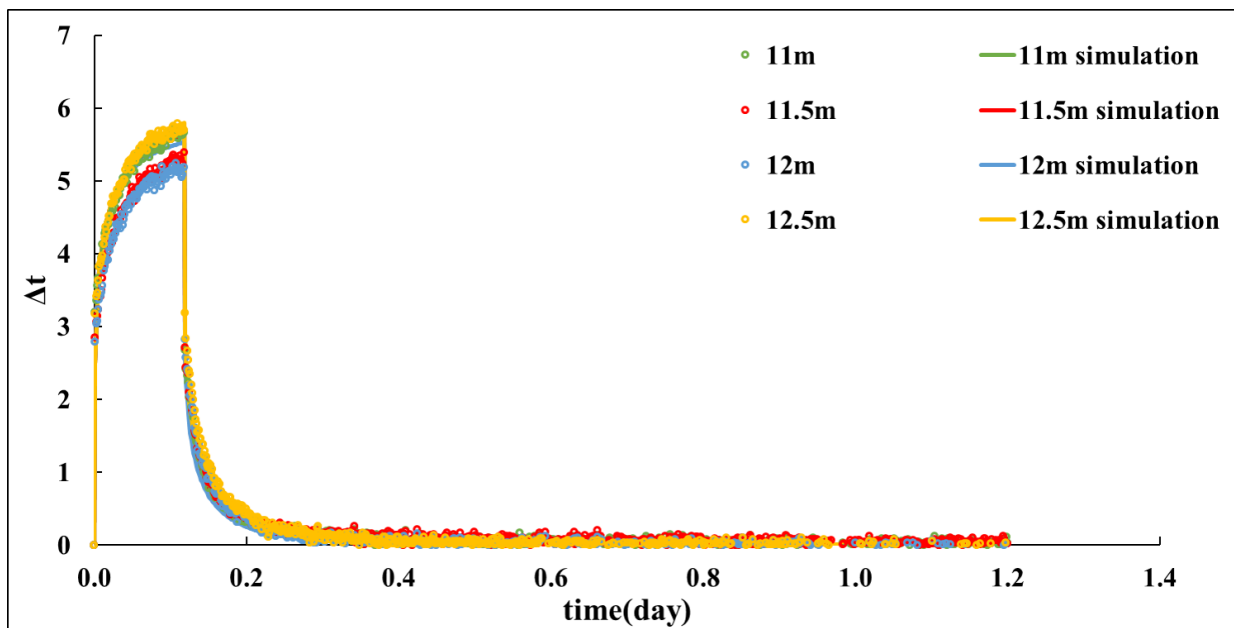
(a)



研究內容



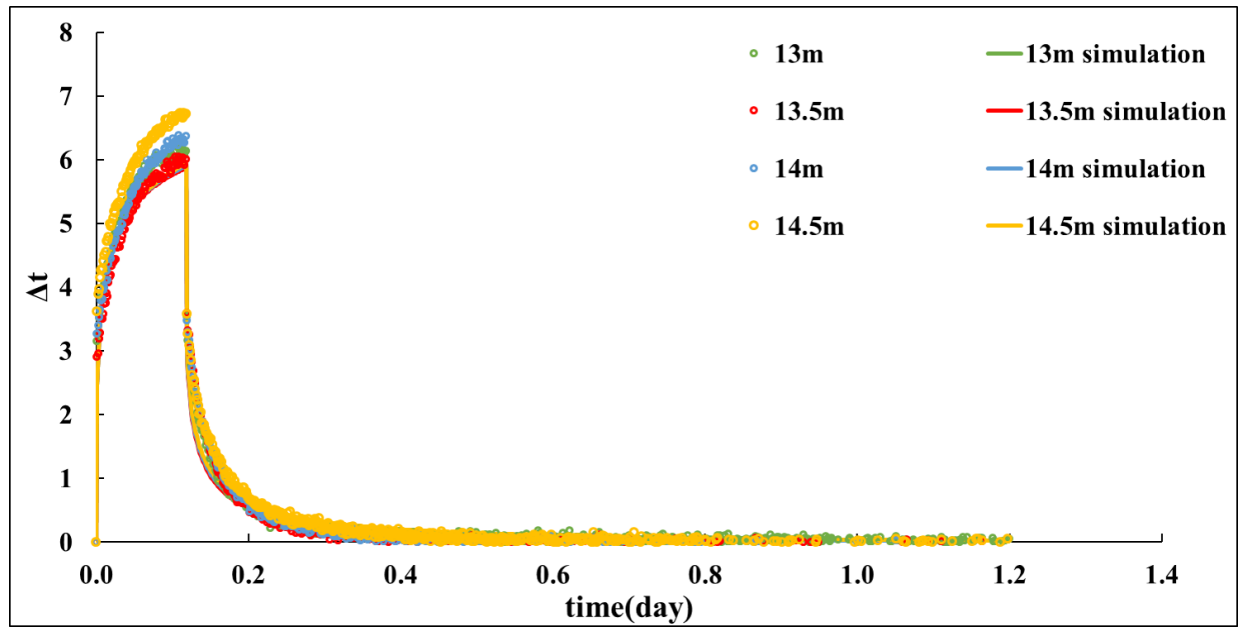
(b)



(c)



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



(d)

圖 59 井 E-01 第一次加熱試驗溫度擬合結果: 7~8.5m、(b)9~10.5m、
(c)11~12.5m、(d)13~14.5m



表 4 井 E-01 第一次加熱試驗之參數擬合結果

m	流速 u(m/d)	率定 LSE	率定 RMSE	驗證 LSE	驗證 RMSE
7	0.9	63.12	0.861	8.56	0.1
7.5	1.45	2.57	0.17	4.86	0.07
8	2.9	7.66	0.3	4.95	0.079
8.5	3	16.03	0.434	3.66	0.068
9	3	22.95	0.519	7.97	0.101
9.5	2.9	11.36	0.36	6.02	0.087
10	2.75	9.68	0.33	4.46	0.075
10.5	3	13	0.391	6.07	0.088
11	2.1	1.25	0.12	2.42	0.055
11.5	2.45	13.1	0.392	5.31	0.08
12	2.8	15.29	0.42	7.26	0.09
12.5	1.8	1.01	0.1	5.26	0.08
13	1.15	5.99	0.26	9.45	0.11
13.5	1.45	3.89	0.21	19.4	0.15
14	1.25	9.21	0.32	19.12	0.15
14.5	0.95	38.61	0.67	15.97	0.143

*number of calibrated data point = 85; number of validated data point = 779



5.3.4 井 E-01 第二次加熱試驗擬合結果

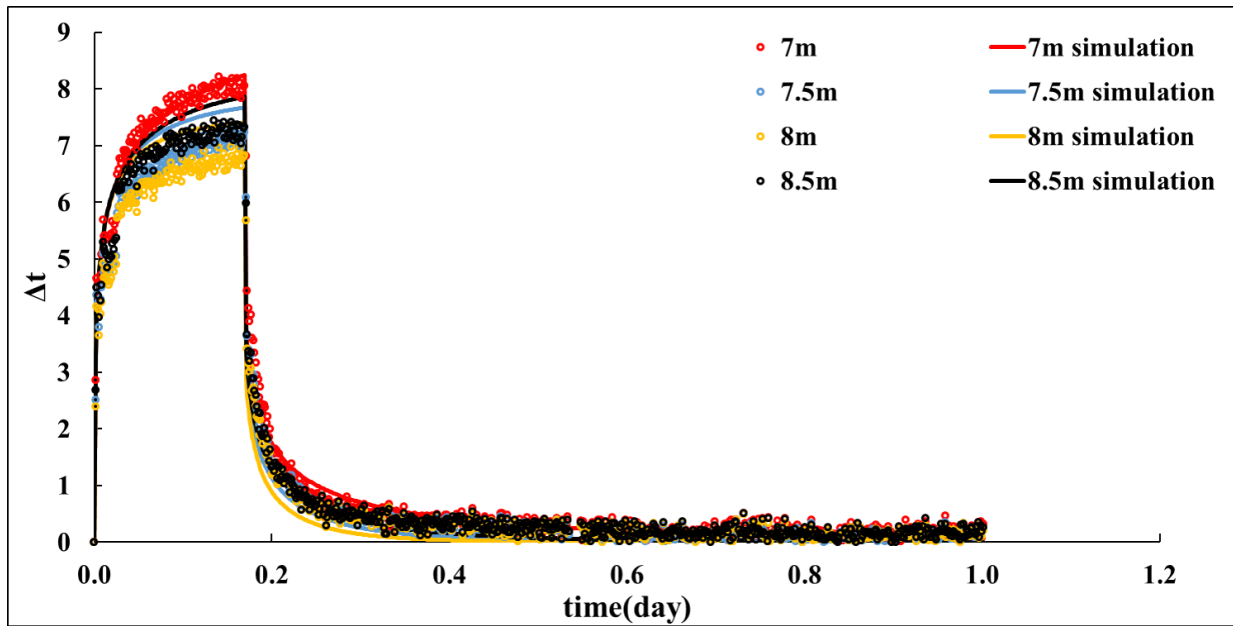
圖 60 為根據 5.3.2 章節的參數設定後所擬合之溫度變化。圖上以圓圈標示的為 DTS 量測之溫度資料，線條則為解析解所推估之溫度變化，圖上可發現，以解析解所推估之溫度變化與 DTS 量測結果相當接近。圖 60a 為深度 6.5 公尺到 8.5 公尺的溫度變化。在停止加熱前，深度 7 公尺的溫度上升了 8 度，深度 8.5 公尺則上升約 7.3 度。深度 7.5、8 公尺溫度變化則介於 6.7~7.2 度之間。停止加熱後，深度 8 公尺在降溫時較其他深度快，接著依序為深度 7.5、7.5、7 公尺。圖 60b 為深度 9 公尺到 10.5 公尺在加熱期間的溫度變化。在停止加熱前，深度 10 公尺的溫度上升了 7.4 度，深度 9、9.5、10.5 公尺溫度變化則介於 6.9~7.1 度之間。停止加熱後，深度 9 公尺之回溫速度略快於其他深度的回溫速度。

圖 60c 為深度 11 公尺到 12.5 公尺在加熱期間的溫度變化。在停止加熱前，深度 12.5 公尺的溫度上升了 8.9 度，深度 12、11 公尺溫度則上升約 7.7、7.6 度。深度 11.5 公尺溫度則上升約 7 度左右。停止加熱後，深度 11 公尺在降溫時較其他深度快，其它深度的溫度變化則較接近。圖 60d 為深度 13 公尺到 14.5 公尺在加熱期間的溫度變化。在停止加熱前，深度 14.5 公尺的溫度上升了 12 度，深度 13、13.5、14 公尺上升之溫度變化則介於 9~9.3 度之間。停止加熱後，所有深度位置在降溫過程中的溫度變化皆十分接近。

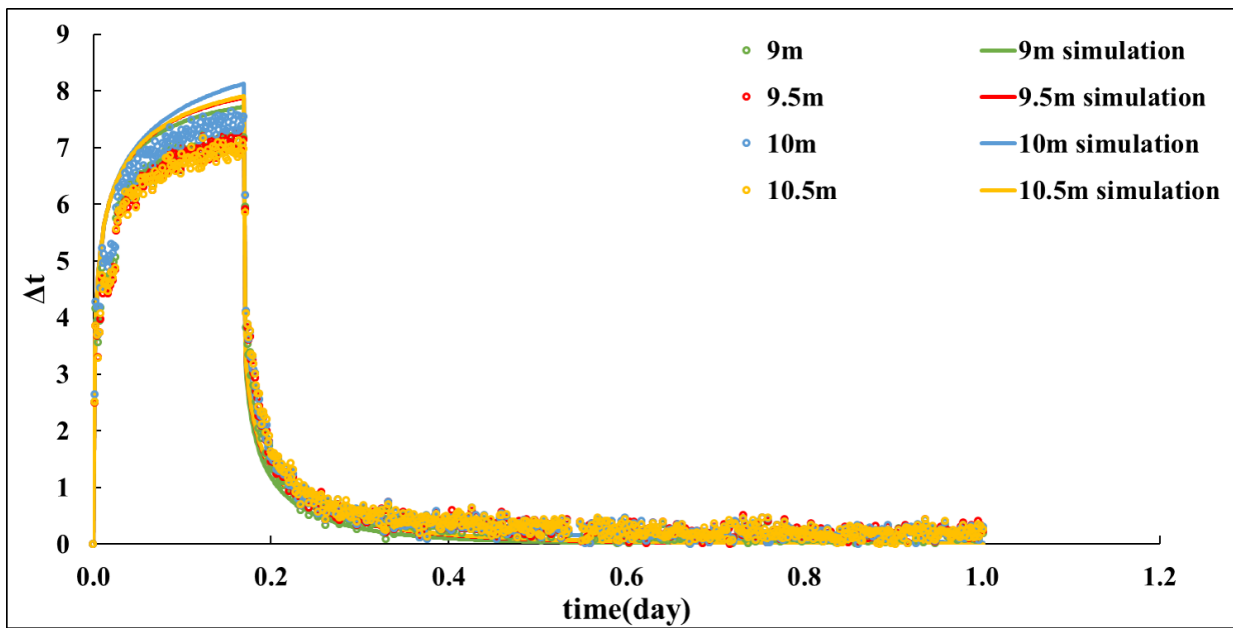
各深度以窮舉法所擬合之結果列於表 5，由表中可觀察到，各深度溫度率定之 RMSE 值變化範圍較大；而驗證之 RMSE 值介於 0.2~0.4 之間（LSE 值介於 25.7~115），顯示擬合結果之可信度很高。深度 11.5 與 14.5 公尺溫度率定之 RMSE 值分別為 1.09、4.25（LSE 值分別為 147、2208），顯示率定結果誤差較大，造成此區間誤差較大的原因在於初始加熱升溫過程(0.03~0.16day) 之曲線擬合結果較不理想。然而在溫度驗證之 RMSE 值則分別為 0.23、0.43（LSE 值介於 32.4 ~ 115.4），顯示驗證之誤差較小且可信度高。



研究內容



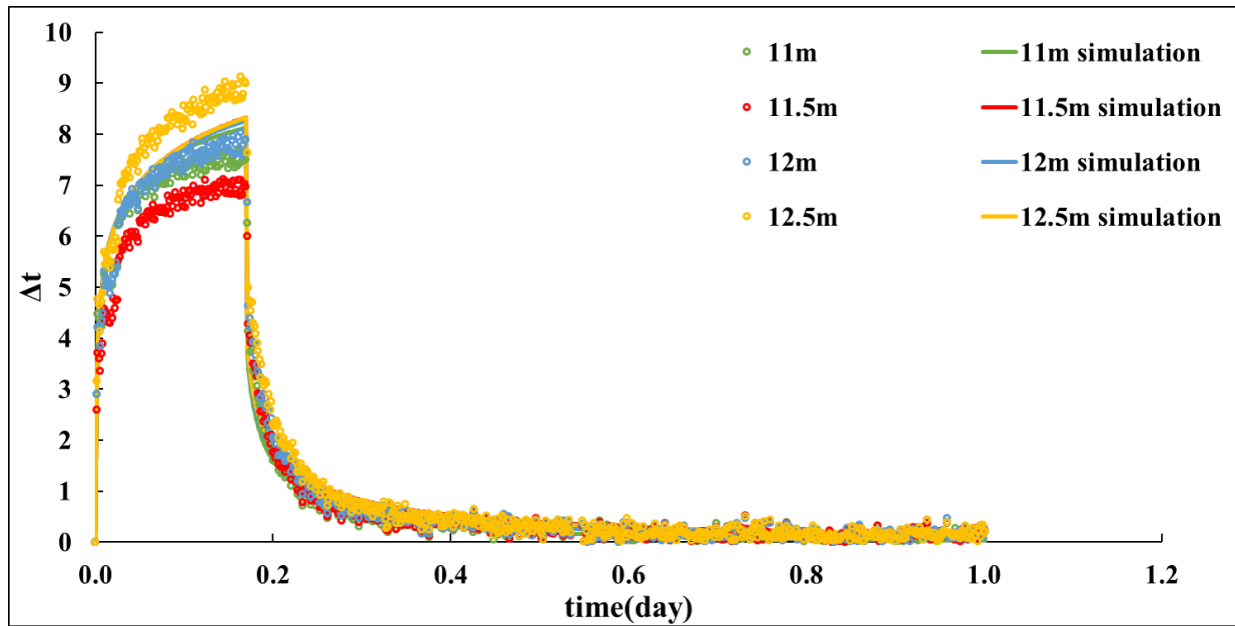
(a)



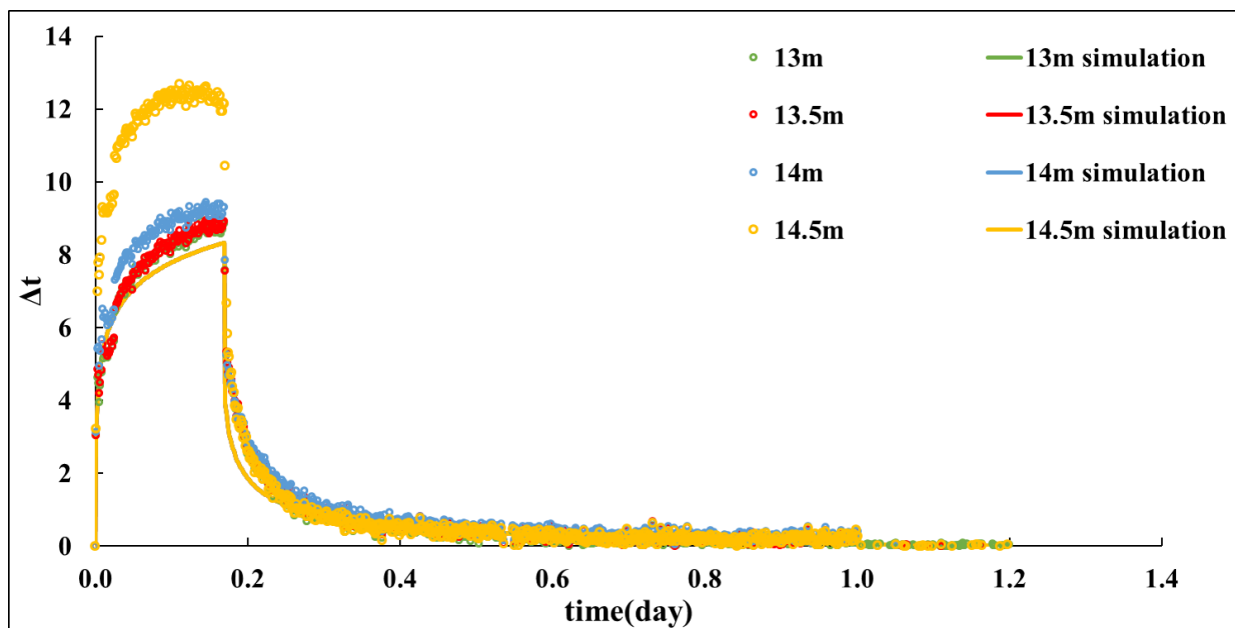
(b)



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



(c)



(d)

圖 60 井 E-01 第二次加熱試驗溫度擬合結果：(a) 7~8.5m、(b) 9~10.5m、(c) 11~12.5m、(d) 13~14.5m



表 5 井 E-01 第二次加熱試驗之參數擬合結果

m	流速 u(m/d)	率定 LSE	率定 RMSE	驗證 LSE	驗證 RMSE
7	1	6.633428	0.233179	30.39361	0.225257
7.5	2.45	48.98808	0.633673	38.2292	0.25263
8	3	68.18145	0.747572	50.44623	0.290202
8.5	2.05	33.17255	0.521446	29.74768	0.22285
9	2.35	56.62277	0.681264	39.19507	0.255801
9.5	2	87.65924	0.847655	42.50693	0.266389
10	1.4	38.20726	0.55962	26.47857	0.210249
10.5	1.95	99.90119	0.90491	45.31329	0.275042
11	1.4	27.45755	0.474407	25.70559	0.207157
11.5	0.5	147.2595	1.098656	32.49204	0.232903
12	0.95	19.15193	0.396211	37.16104	0.249075
12.5	0.55	38.79683	0.563921	58.91004	0.313604
13	0.5	27.0329	0.470724	72.15765	0.347079
13.5	0.5	32.05526	0.51259	80.83005	0.367344
14	0.5	127.8567	1.023722	96.39097	0.401148
14.5	0.5	2208.298	4.254504	115.4295	0.43898

*number of calibrated data points = 122; number of validated data point = 599



5.3.5 井 E-01 第三次加熱試驗擬合結果

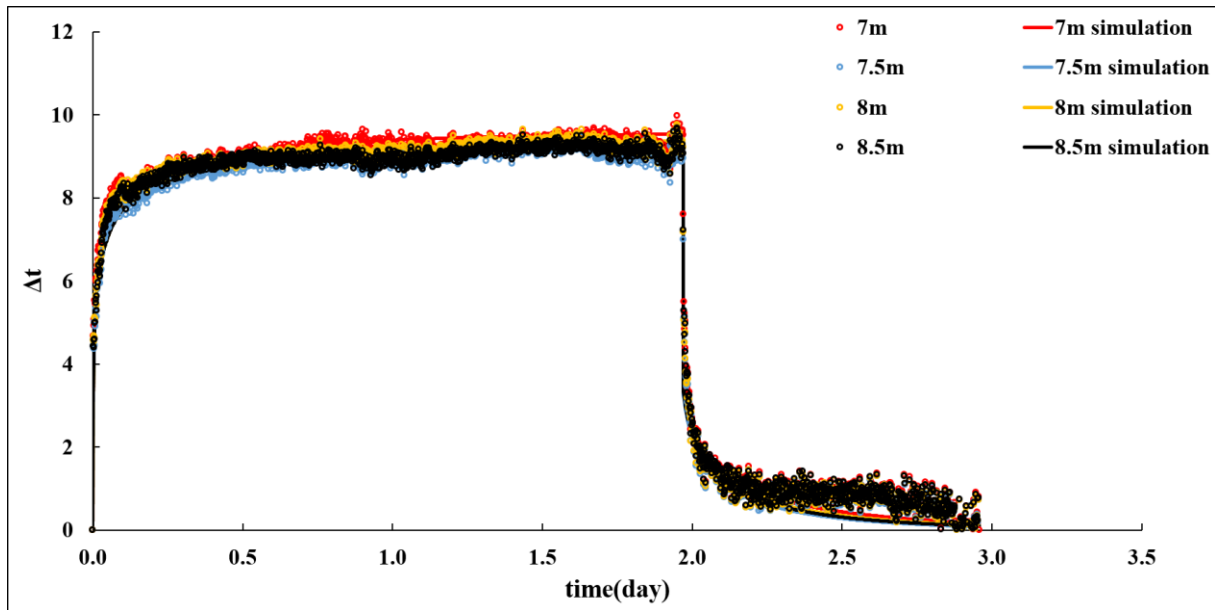
圖 61 為根據 5.3.2 章節的參數設定後所擬合之溫度變化。圖上以圓圈標示的為 DTS 量測之溫度資料，線條則為解析解所推估之溫度變化，圖上可發現，以解析解所推估之溫度變化與 DTS 量測結果相當接近。圖 61a 為深度 7 公尺到 8.5 公尺的溫度變化。在停止加熱前，深度 7、8 公尺之溫度上升約 9.5 度。深度 7.5 公尺上升 9.2 度、8.5 公尺溫度變化則介上升約 9.4 度。停止加熱後，深度 7.5 公尺在降溫的過程中較其他深度快，深度的溫度變化則較接近。圖 61b 為深度 9 公尺到 10.5 公尺在加熱期間的溫度變化。在停止加熱前，深度 9.5 公尺溫度上升的幅度最高，為 10.3 度，深度 10 公尺溫度變化為 9.9 度，深度 9、10.5 公尺溫度變化為 9.6~9.7 度之間。停止加熱後，深度 9 公尺在降溫過程中，溫度回復最快，其它深度的溫度變化皆相當接近。

圖 61c 為深度 11 公尺到 12.5 公尺在加熱期間的溫度變化。在停止加熱前，深度 12 公尺的溫度上升了 11.3 度，深度 12.5 公尺溫度則上升約 10.9 度。深度 11~11.5 公尺溫度則上升約 10.3~10.6 度左右。停止加熱後，深度 11 公尺在降溫時較其他深度快，其它深度的溫度變化則較接近。圖 61d 為深度 13 公尺到 14 公尺在加熱期間的溫度變化。在停止加熱前，深度 13 公尺的溫度上升了 10.5 度，深度 13.5、14 公尺上升之溫度則分別為 10.3、9.8 度。停止加熱後，深度 14 公尺在降溫時較其他深度快，接著依序為深度 13.5、13 公尺。

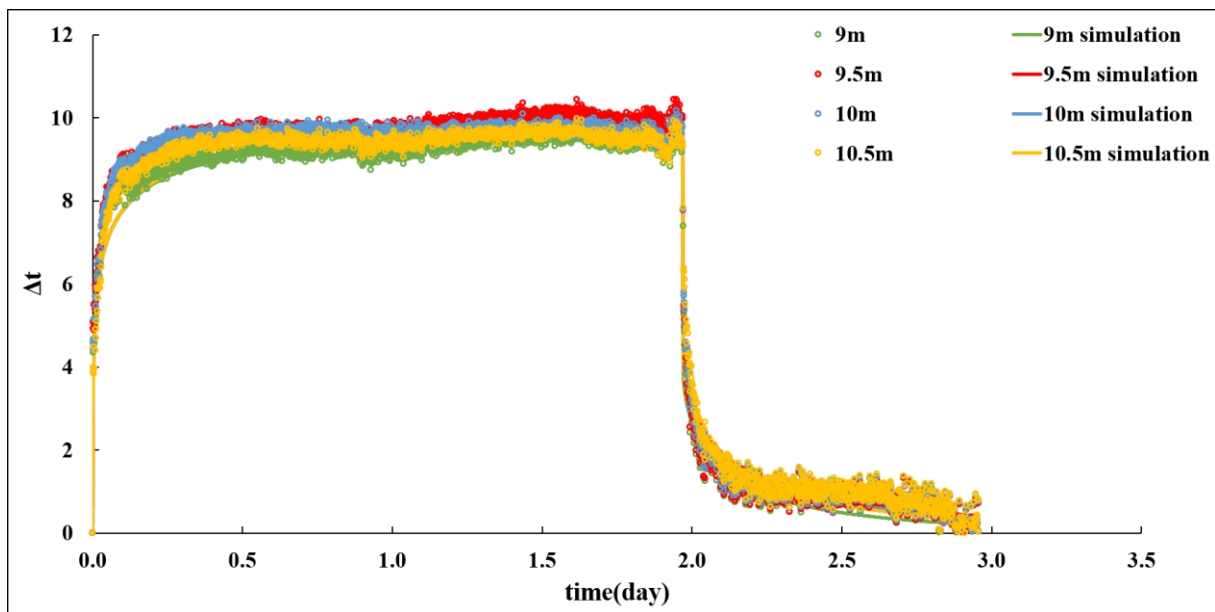
各深度以窮舉法所擬合之結果列於表 6。由表中可觀察到，深度 7~9 公尺溫度率定之 RMSE 值約為 0.2 左右 (LSE 值介於 59.5~83)，顯示溫度擬合之誤差小；而驗證之 RMSE 值介於 0.42~0.51 之間 (LSE 值介於 130~190)。深度 9.5~11.5 公尺溫度率定之 RMSE 值介於 0.34~0.66 之間 (LSE 值介於 165~632)，顯示溫度擬合之誤差值較大；驗證之 RMSE 值介於 0.38~0.45 之間 (LSE 值介於 104~146)，顯示驗證結果優於律定結果。深度 12 公尺溫度率定之 RMSE 值為 1.15 (LSE 值介於 1875.81)，此結果顯示驗證過程之溫度擬合誤差非常大，在升溫過程中，模擬值溫度上升較緩慢，實驗量測值則是變化較大。因此造成擬合結果不理想；驗證之 RMSE 值為 0.446 (LSE 值為 141.7)，顯示驗證結果較好。深度 13~14 公尺溫度率定之 RMSE 值約為 0.26~0.32 左右 (LSE 值介於 82~146)，顯示溫度擬合之誤差小；而驗證之 RMSE 值介於 0.41~0.55 之間 (LSE 值介於 119~219)。



研究內容



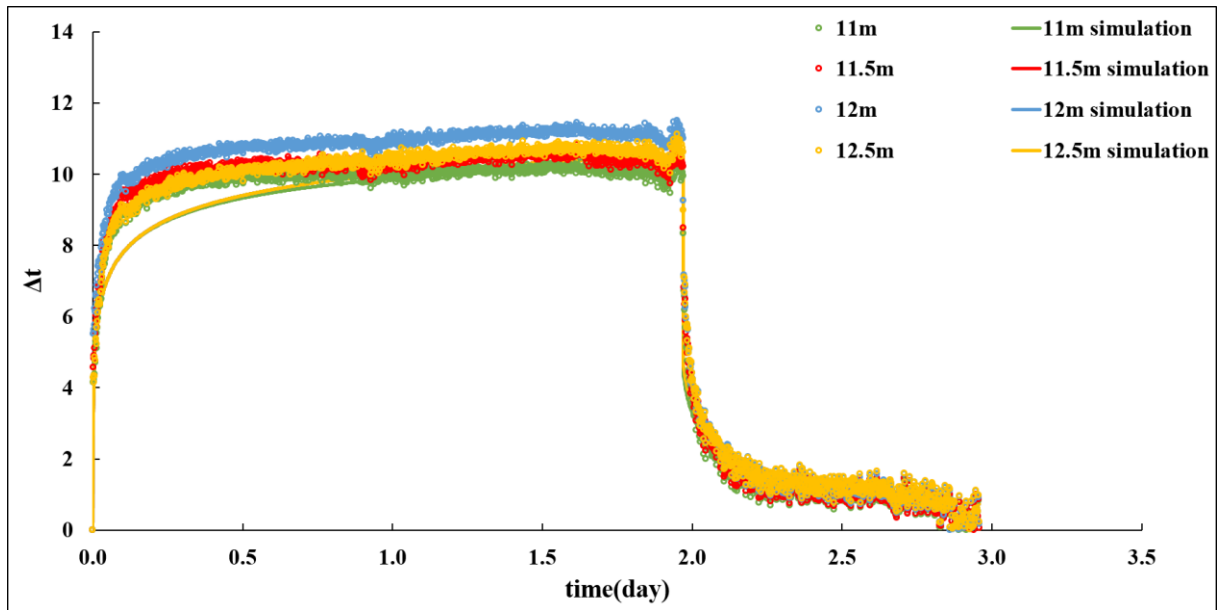
(a)



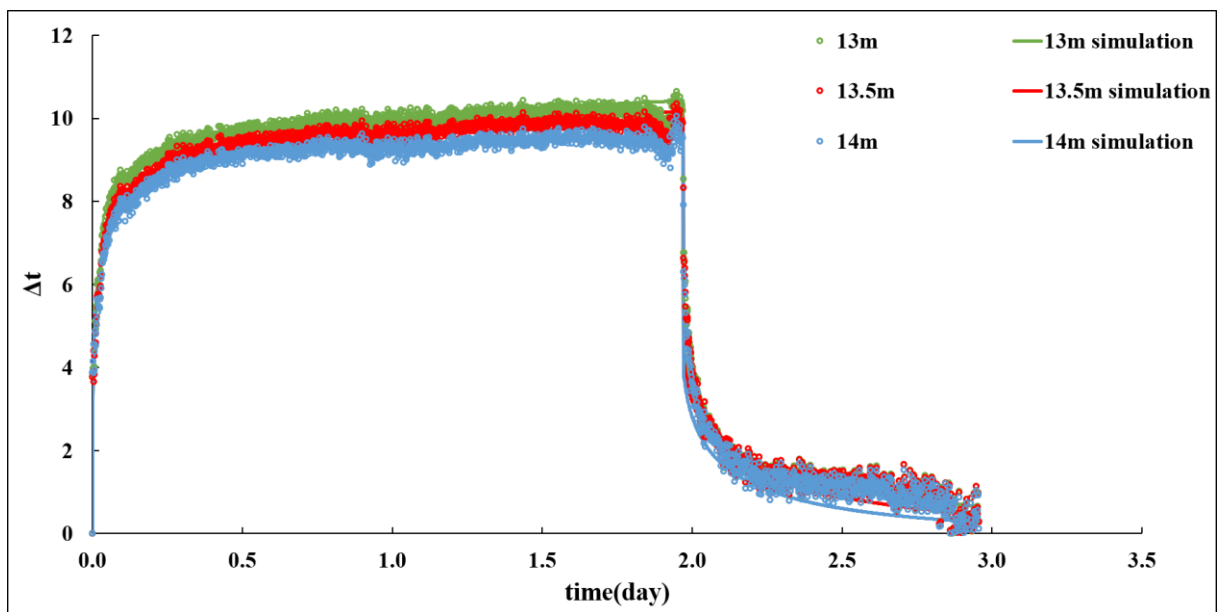
(b)



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



(c)



(d)

圖 61 井 E-01 第三次加熱試驗溫度擬合結果：(a) 7~8.5m、(b) 9~10.5m、(c) 11~12.5m、(d) 13~14m



表 6 井 E-01 第三次加熱試驗之參數擬合結果

m	流速 u(m/d)	率定 LSE	率定 RMSE	驗證 LSE	驗證 RMSE
7	1.05	83.068	0.242	147.198	0.455
7.5	1.25	50.994	0.189	187.35	0.51
8	1.15	59.583	0.204	156.9	0.469
8.5	1.2	60.937	0.207	190.23	0.51
9	1	82.168	0.24	130.71	0.428
9.5	0.75	272.364	0.438	111.714	0.396
10	0.8	279.3	0.443	104.99	0.384
10.5	0.85	165.02	0.341	143.02	0.448
11	0.65	299.863	0.459	118.49	0.408
11.5	0.5	632.873	0.668	146.35	0.45
12	0.5	1875.81	1.15	141.7	0.446
12.5	0.5	470.285	0.575	138.205	0.41
13	0.55	146.01	0.32	119.84	0.41
13.5	0.7	82.456	0.241	151.65	0.461
14	0.9	102.54	0.26	219.02	0.555

*number of calibrated data points = 1418; number of validated data point = 711



5.3.6 井 E-01 井下地下水流速隨深度變化

根據 5.3.3~5.3.5 章節所擬合的結果，將三次試驗所率定各深度之水流速度隨深度繪製成圖 62。由圖上可觀察到，三次試驗結果所推估之流速分布並不相同，2019 年 10 月進行第一次試驗所推估之流速分布範圍介於 0.9~3 m/day，其中，深度 8.5、9 公尺流速最快，深度 7 公尺最為緩慢。2020 年 4 月進行第二次試驗所推估之流速範圍介於 0.5~3 m/day，深度 8 公尺流速最快，深度 13~14.5 公尺流速最慢。2020 年 7 月進行第三次試驗推估之流速範圍介於 0.5~1.25 m/day，深度 7.5 公尺流速最快，深度 11.5~12.5 公尺流速最慢。

綜合三次試驗所推估之流速分布來看，從第一次試驗到第三次試驗，流速隨深度變化整體趨勢為逐漸變慢，第一次試驗之流速變化主要集中在 2~3 m/day。第二次試驗所推估之流速雖然分布範圍變大，然而整體趨勢主要集中在 1.5~2.5 m/day。第三次試驗之流速變化明顯較前兩次試驗低，主要分布於 0.8~1.2 m/day。以流速相對快慢來看，第一次試驗推估之流速是以深度 8~9.5 公尺最快，其次為 10.5、12 公尺，最慢則是深度 13~14.5 公尺，此外，在深度 11 公尺亦為流速較慢之區段。第二次試驗之流速結果是以深度 7.5~9 公尺最快，其次為 10.5 公尺，最慢同樣為深度 13~14.5 公尺，11~11.5 公尺亦為流速慢之區段。第三次試驗推估之流速是以深度 7.5~8.5 公尺最快，最慢則是深度 11~13 公尺。

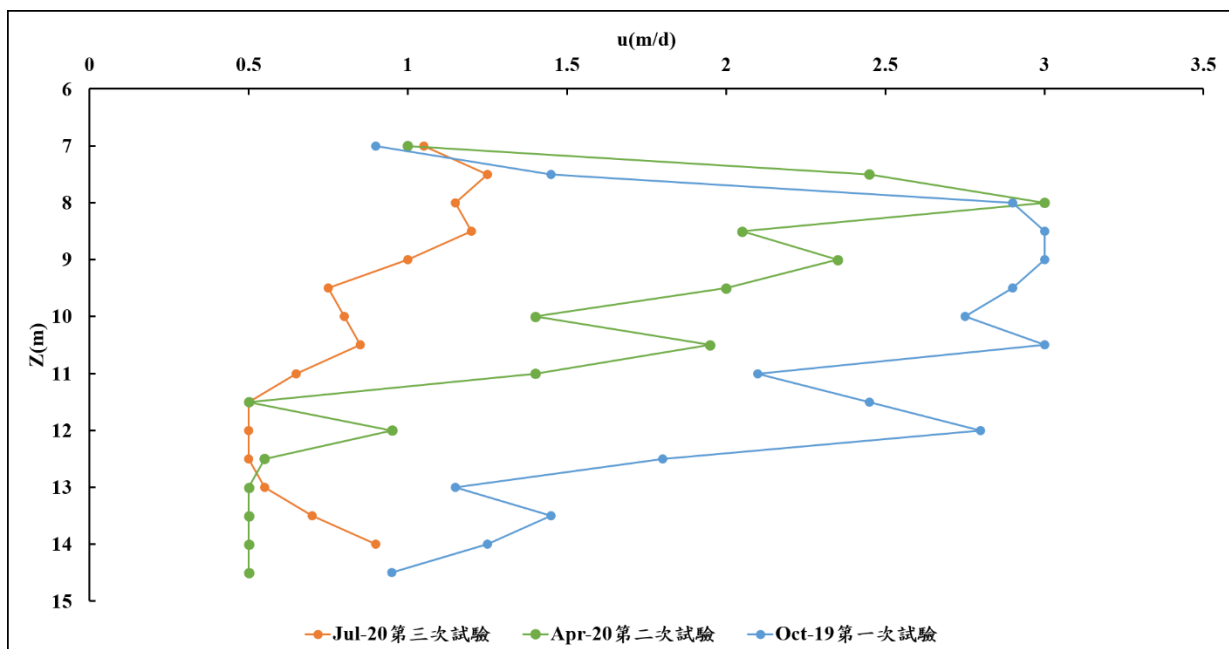


圖 62 三次加熱試驗推估之地下水流速隨深度變化



5.4. 討論

5.4.1 與多深度流速流向、岩心結果比較

圖 63 為本計畫於今年度所執行三次現地試驗所推估之地下水流速與霖昌公司提供兩次多深度流速流向試驗之結果比較。圖上所標示紅色菱形為 2015 年多深度流速流向試驗之結果。深度 6.7、8.6、11、12.5、14.5 公尺所測得之流速分別為 54.4、1.728、23.3、302.4、6.04 m/day，黑色菱形為 2020 年多深度流速流向試驗之結果，其中，黑色垂直虛線為量測儀器所能測得的最低流速（4.32 m/day），實心標記則為儀器所測得之流速，空心標記為未能測得有效數據(ND)。在 2020 年的量測結果顯示，僅在深度 10、13 公尺能夠測得流速，分別為 4.32、5.184 m/day。由上述結果可發現，兩次多深度流速流向試驗結果差距十分大。以量測值而言，2015 年多深度流速流向試驗測得之流速值明顯偏大且不同深度量測值差異極大；同樣可觀察到 2020 年多深度流速流向試驗測得之流速值雖然差異變化不大，然而量測之流速因受到儀器量測限制影響，僅能量測到深度 10、13 公尺之流速。若以定性化的角度分析，2015 年整體的地下水流速明顯的高低於 2020 年的地下水流速，以流速隨深度變化趨勢而言，2015 年多深度流速流向試驗在深度 12.5 公尺具有最快流速，深度 8.6 公尺則最慢；2020 年多深度流速流向試驗在深度 13 公尺測得之流速最快。

由於兩次多深度流速流向試驗的量測值相差 1 個數量級以上，同時受到儀器量測極限之限制等因素，因此僅能以定性化之方式進行比較分析。本研究所推估的地下水流速，在三次試驗中，由逐漸下降的趨勢，此結果與多深度流速向試驗所呈現的結果一致，而地下水流速隨深度增加由逐漸降低的趨勢，亦與 2015 年的多深度流速向試驗結果吻合。若進一步將地下水流速與鑽井岩心紀錄進行比較可發現，深度 3.7~7.5 公尺地層之岩性屬於礫石夾砂，判斷為較透水之區段，相對應之流速應該較大。對比三次試驗中深度 7.5 公尺所量測之流速皆為流速快之區段。深度 7.5~15 公尺地層之岩性屬於砂夾礫石，相較於淺部地層，透水性可能略差。深度大於 15 公尺之地層則以黏土為主，應屬於儲水層，由流速推估結果可發現，底層流速確實較慢。



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

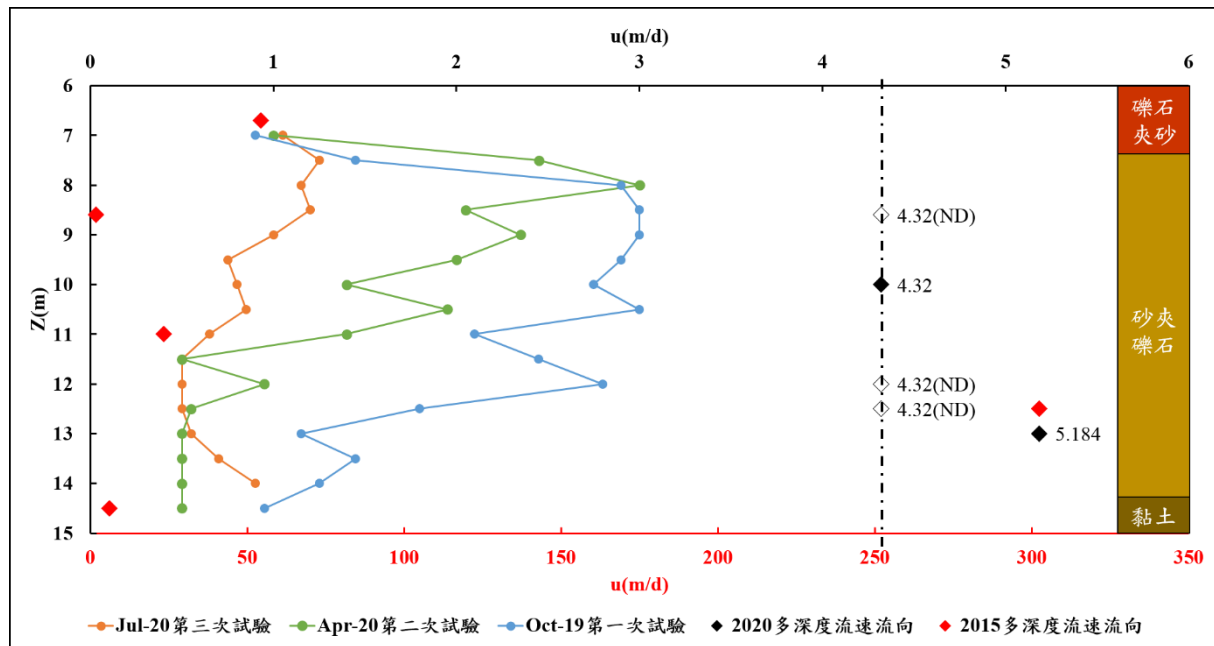


圖 63 解析解擬合之地下水流速與多深度流速流向及地層岩心描述之比較

5.4.2 與第一年度注熱水結果比較

圖 64 為今年度所執行三次現地主動式加熱試驗所推估之地下水流速與第一年度注熱水試驗透水性分布結果比較圖。三次試驗所推估之流速僅針對井 E-01 與第一年度注熱水試驗結果進行比較，整體而言，三次試驗所推估之流速分布顯示深度 7~9.5 公尺為流速較快的區段，中段深度 10.5 公尺亦為流速快的區段；深度 12.5~14.5 公尺則為流速較慢的區段。注熱水試驗結果顯示，除了井 E-04 之外，其餘監測井在深度 6~9 公尺均為較透水的區段，其次為深度 11~15 公尺，深度 9~11 公尺之透水性最差。綜合兩個結果可發現，廠區的地下水上游區，淺層深度 7~9 公尺具有最好的透水性，地下水流速亦最快；中段深度 9~11 公尺應該為透水性較差的區段，地下水流速相對較慢；深部深度 11~15 公尺的地下水流速隨深度呈現遞減的趨勢，然而在注熱水試驗中則判釋為透水性次好的區段，兩者間的差異可能由於注熱水試驗的透水性為一區段平均後之結果，此等效的透水性（equivalent hydraulic conductivity）並未真實反應垂向細部的水文地質參數的變化。整體而言，兩種不同加熱方式所獲得垂向的井下透水性分佈相當一致，應具有一定之可信度，也再次驗證以熱為示蹤劑進行井下水文地質調查之可行性。

三次現地試驗結果顯示，所推估之地下水流速有逐漸變緩的趨勢。試驗前均會以水位尺測量井深與地下水位，三次試驗之水位差異不大，因此可初步排除水



位差異對於地下水流速之影響。在三次試驗期間，場址亦同時進行多次的生物注藥整治工作，整治過程有可能改變監測井狀況與井內的環，。初步推測流速的減緩可能與生物注藥整治導致井篩阻塞有關，然而，由於缺乏井下攝影資料，無法進一步確認。

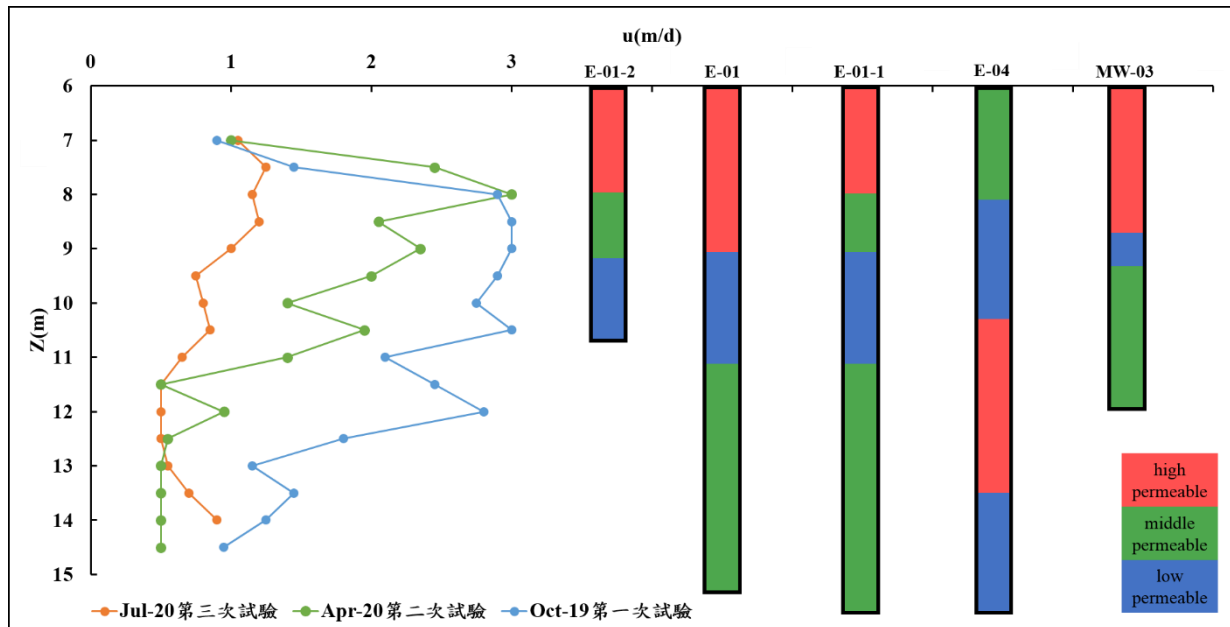


圖 64 解析地下水流速與第一年度注入熱水之透水性分佈比較

5.4.3 參數敏感度分析

以線性熱傳輸解析解析溫度資料可有效的擬合加熱與降溫之溫度變化並推估各深度流速，因此，流速對溫度變化的敏感度在擬合過程中扮演極為關鍵的角色。隨著加熱時間的變化，流速對溫度的敏感度亦不相同。圖 65 為兩種不同流速在加熱與回復過程中對溫度變化的敏感度分析，假設加熱時間為 2 天，溫度回復時間為 8 天，單位長度光纖加熱功率為 20 W/m。圖中藍色為流速差 0.6 m/day 的結果，黑色為流速差 0.3 m/day 的結果。由圖上可觀察到，不論流速差大小，對於加熱與回復的敏感度變化極為相似，在初始加熱時，溫度變化的敏感度較小，隨著加熱時間的增加，敏感度逐漸增加，在加熱時間約 1.5 天時，敏感度達到最大值，加熱時間 1.5–2.0 天之間，敏感度維持在最大值。停止加熱後，敏感度快速變低，在停止加熱後 0.5 天（加熱開始後 2.5 天），敏感度將降至 0。經由此敏感度分析可以得知，即便在流速差異較小的狀態下，只要加熱時間超過 1.0 天，均可準確的解析不同深度之地下水流速。此外，完成單一口井的加熱與回復試驗，約需 2 天的時間，為了準確推估不同深度的地下水流速，在實驗設計上，建議加



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

熱時間至少需長於 1.5 天（36 小時），若以溫度回復進行模式驗證，僅需利用停止加熱後的 0.5 天資料即可獲得準確之推估結果。

第一次試驗至第三次試驗即不同加熱時間之試驗，而根據試驗結果與敏感度分析可得知加熱時間短於 1.0 天時，敏感度較小，流速在判釋上的不確定性較大，相較於第三次試驗，前兩次試驗在升溫過程之擬合結果相對較差。加熱功率設定時，主要需考量單位長度所承受之熱能。若加熱功率過小，則升溫變化不顯著，可能需要較長的加熱時間；若加熱功率過大，井內的水會因為自然對流之關係產生垂直水流，進而影響溫度量測。如何設定適切的加熱功率，依現地地質環境與光纖纜線材質均有密切關係，在試驗進行前，需於實驗室先行測試，方可於現地達到最佳之加熱效果。本計畫所進行的三次試驗，其加熱所設定之功率（20w/m）皆是經過實驗室測試後所設定之最佳功率。

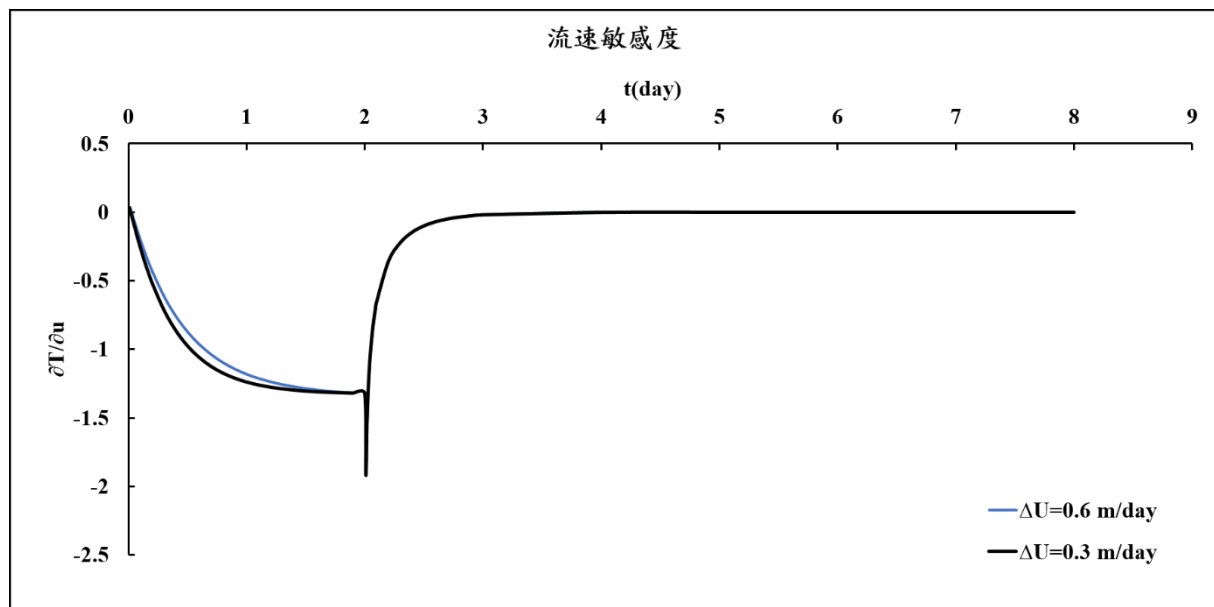


圖 65 流速隨時間敏感度變化

(六) 結論

本專案計畫以分散式光纖溫度感測器搭配主動式加熱法進行三次現地試驗，藉由升溫與降溫的過程中判識井下透水與不透水區段，研究結果顯示，在升溫過程中，若地層之透水性較高，地下水流流速較快會使得加熱過程中溫度上升較慢；在降溫過程中，若地下水流流速較快，會使得溫度回復較快。第一次試驗為 2019 年 10 月，於井 E-01 進行單井加熱試驗，根據量測結果顯示井 E-01 在深度 6.5~10



公尺透水性較高，其次為深度 10~13 公尺、深度 13 公尺至井底。第二次現地試驗為 2020 年 4 月，於上游井 E-01、井 E-01-1、井 E-01-2 進行加熱，並同時監測下游井之溫度變化。研究結果顯示井 E-01 在深度 7.5~8.5 公尺與深度 9.8、10.5、11.5 公尺透水性較佳，深度 10、11、12~14 公尺周圍透水性較差。井 E-01-1 在深度 7~9 公尺透水性較高，其次為深度 13~14 公尺、深度 10~13 公尺。井 E-01-2 在深度 6.8~8.5 公尺之透水性較高，其次為深度 8.5~9 公尺。深度 9~10 公尺透水性較差，深度 10~10.5 公尺之透水性最低。井 E-04 與下游監測井 OE-2、OE-5、OE-1、OE-3 在加熱期間，可獲取溫度上升之訊號。第三次試驗為 2020 年 7 月，於井 E-01 進行單井加熱試驗並觀察上游與下游監測井之溫度變化。研究結果顯示井 E-01 在深度 7~10 公尺透水性最高，其次為深度 13~14 公尺、深度 11~12.5 公尺。

根據 5.3.1，以線性熱傳輸解析解公式可解析加熱與降溫過程之溫度變化，並推估地下水流速。本研究以三次試驗中井 E-01 之溫度量測結果進行擬合，以每 0.5 公尺一個區間，經由窮舉法求取最小均方根誤差，推估各深度流速。研究結果顯示，解析解公式不僅可以完整的描繪加熱前後之溫度變化，並可同時求得流速隨深度變化之關係。根據三次試驗結果可發現，由第一次試驗到第三次試驗，流速隨深度變化整體趨勢為逐漸變慢，第一次試驗所推估之流速變化主要集中在 2~3 m/day，其中，流速最快為深度 8~9.5 公尺，流速最慢為深度 13~14.5 公尺。第二次試驗推估之流速變化主要集中在 1.5~2.5 m/day，其中，流速最快為深度 7.5~9 公尺，流速最慢為深度 13~14.5 公尺。第三次試驗流速變化主要分布於 0.8~1.2 m/day，其中，流速最快為深度 7.5~8.5 公尺，最慢則是深度 11~13 公尺。

本研究於地下水污染廠址以分散式光纖溫度感測技術搭配加熱控制系統進行兩年期模場試驗專案計畫，由第一年度背景溫度的量測並以熱水注入監測井製造溫度差異，在溫度回復的過程判釋不同深度之透水性。同時，搭配地下水數值模式輔以佐證量測結果。第二年度專案計畫是以主動式加熱法針對整口井進行加熱，並在升溫與降溫過程中判釋井下透水區段，此外，藉由線性熱源之熱傳輸解析解分析溫度量測資料，並推估不同深度之地下水流速。由於跨孔的加熱試驗過程中，監測井周圍及下游監測井並未接收到溫度上升之訊號，也導致無法準確獲得地下水流向資訊。為克服此一問題，後續可考慮透過多條光纖之排列組合設計，僅利用單井之方式，判釋地下水流方向。

本研究所產出之量測結果主要提供井下解析度達 0.5m 的地下水流速分佈，不僅可用於地下水污染場址之水文地質調查，亦可提供場址在進行改善或整治上重要的參考依據。整治策略可根據井下各深度透水情況與流速變化進行評估，採用不同的策略。例如：針對低透水區段、流速較慢之深度是否需要加強進行整治。



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

本專案計畫提供之創新量測技術在不擾動地下水流的情況下可避免污染物因注水或其它外力而造成污染範圍擴大，有效進行高解析度水文地質調查。專案計畫產出之高解析度量測資料可提供地下水污染廠址改善上一重要評估，進而提升調查能力與整治效率。



(七) 參考文獻

- Anderson, M.P. (2005). Heat as a ground water tracer, *Ground Water*, 43, 951-968.
- Bakker, M., R. Calj_e, F. Schaars, K.-J. van der Made, and S. de Haas (2015), An active heat tracer experiment to determine groundwater velocities using fiber optic cables installed with direct push equipment, *Water Resour. Res.*, 51, 2760 – 2772, doi:10.1002/2014WR016632.
- 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., Papadopulos, 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.
- 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. Su_arez, 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.
- 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-



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

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.

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：109 年 12 月 10 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	2	1	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	0	1		
	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	1	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	2	2		
		(2)跨機構團隊	2	2	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 審查中
			新型/設計	2	1	2		
			合計	3	1	2		
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)						
9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)						



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

(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。



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

六、專利申請

新型專利申請(1)



中華民國專利證書

新型第 M597406 號

新 型 名 稱：光纖置中裝置

專 利 權 人：國立臺灣海洋大學

新 型 創 作 人：邱永嘉、劉慶怡

專利權期間：自2020年6月21日至2030年3月23日止

上開新型業依專利法規定通過形式審查取得專利權
行使專利權如未提示新型專利技術報告不得進行警告

經濟部智慧財產局 局長

洪淑敏

中華民國 109 年 6 月 21 日





新型專利申請(2)



中華民國專利證書

新型第 M600341 號

新 型 名 稱：熱能示蹤劑試驗之沉水式加熱與控溫系統

專 利 權 人：國立臺灣海洋大學

新 型 創 作 人：邱永嘉、馬嵩哲

專利權期間：自 2020 年 8 月 21 日至 2030 年 3 月 23 日止

上開新型業依專利法規定通過形式審查取得專利權
行使專利權如未提示新型專利技術報告不得進行警告

經濟部智慧財產局 局長

洪淑敏


中華民國 109 年 8 月 21 日



注意：專利權人未依法繳納年費者，其專利權自原繳費期限屆滿後消滅。