



環境部環境管理署

112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

以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行 場址地下水流速與流向高解析度調查

期末報告(定稿)

主辦單位：  環境部環境管理署
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 教授
專案執行期間： 112 年 12 月 15 日起至
113 年 11 月 29 日止

中 華 民 國 113 年 12 月 印製



專案名稱 以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查
主持人 邱永嘉教授
期末報告 定稿



112年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗申請計畫書

一、專案基本資料表

申請編號：(由本署填寫)

專案性質	☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質		專案技術編碼	LAB-S-I-C1-P (如非實驗性質含氣溶劑之生物整治模場為 NLAB-S-R-C1-B，填寫請參考附件1-4)	
專案類別(單選)	☐ 先導型 ☐ 研究型 ☒ 模場型		研究主題	☐ 整治 ☒ 調查 ☐ 政策類或其他	
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	教授	
協同主持人	董天行		職等/職稱	經理	
專案名稱	中文	以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查			
	英文	High-resolution investigation of groundwater flow and direction at the site using fiber-optic distributed temperature sensor combined with well sealing materials			
	關鍵字	光纖溫度感測器、封井材料、地下水流速、地下水流向、高解析度調查			
執行期程	自 民國 113 年 12 月 15 日 起 至 民國 114 年 11 月 29 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	
	姓名：劉承瀚	E-mail：hles0428@gmail.com	專線：02-2462-2192#6516	手機：0931696878	
經費分析總表 (僅模場試驗專案需填寫兩年度金額)	專案預估總經費		第一年變更後經費	第二年申請經費	編列說明
	1.	人事費用	626,210	853,515	(1-5項相加之50%為限)
	2.	設備使用含維護費	0	0	(與計畫實驗相關)
	3.	耗材與主要費用	1,557,226	1,525,375	(與計畫主體相關)
	4.	其它研究相關費用	281,358	419,745	(含差旅與租賃費用)
	5.	行政管理費	220,206	401,365	(1-5項相加之15%為限)
	6.	自籌款	0	0	(申請單位自行籌備款項)
	申請補助經費(1-5項)		2,685,000	3,200,000	總金額：5,885,000
	計畫總經費(1-6項)		2,685,000	3,200,000	總金額：5,885,000

說明：
1. 本署以部份補助為原則，得指定不補助項目，不補助項目應為自籌款項，應自行核銷不得申請。
2. 非實驗性質之專案，若第一項費用編列金額超出比率，須於申請公文內向本署說明，俾利審查。
3. 補助專案經費編列自申請起經專案核准後，經費編列中各項費用單價與需求只可減少與下修。

專案主持人： 教授邱永嘉 (簽名或蓋章) 日期：113.12.3

(定稿本請蓋上申請單位大小章)



土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

112 年度專案成果績效自評表

填表日期：112 年 10 月 14 日

一、專案基本資料

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		
執行機構	國立臺灣海洋大學 地球科學所	專案主持人	邱永嘉 教授
專案名稱	以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查		
專案執行期程	☐ 申請階段 ☐ 期中 ☒ 期末		

二、成果績效自評表

「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	成果 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	1		
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1	0	0		
		(2)國際研討會 論文發表	1	0	0		
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告					
		(2)研究報告	1	1	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						
	(2)技術平台						
7.技術獎項(項數)							
B 人才 培育	8.研發人員 (人數)	(1)碩士	2	1	1		
		(2)博士					
	9.研究團隊	(1)跨領域團隊					



項目 \ 目標達成程度			申請 預估數	期中 達成數	成果 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)
	(個數)	(2)跨機構團隊	1	1	1		
		(3)形成研究中心					
		(4)形成實驗室					
10.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

(二) 產業面

目標達成程度			申請 預估數	期中 達成數	成果 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)
項目							
A 智慧 財產權	1.專利 (件數)	已發明					
		核准新型/設計					
		合計					
		申請發明					
		中新型/設計	2	0	0		
		合計	2	0	0		
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)					

(三) 政策面

目標達成程度 項目			申請預 估數	期中 達成數	成果 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 政策 推動	3.協助政府推動 (件數)	(1)政策					
		(2)法規					
C 技術 效益	4.整治技術提升(%)						
	5.整治成本降低(%)						
	6.提升能源效率(%)						
7.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

三、 請依前述學術面、產業面、政策面等預期量化成果，具體敘明研究成果對本署政策推動之助益。（200 字為限）

學術面(如國內外研討會、期刊投稿件數、或人才培育碩博士生說明)
1.參與人員可學習分散式光纖溫度感測器的操作技巧及原理，瞭解孔隙介質中熱傳輸與溶質傳輸之基礎知識。
2.預計包含2篇國內外研討會論文、1篇國際期刊論文及1篇國際期刊發表、研究報告撰寫、研究團隊養成、2位碩士生培育。

**產業面(如合作研發產業、申請專利、洽談技術移轉廠商件數說明)**

- 1.研究成果可提供產業界創新量測技術在水文地質調查上的應用
- 2.進一步瞭解複雜的水文地質環境，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。
3. 預計申請2項新型專利。

政策面(如整治費用降低、特定污染物整治效益提升、或提供政府作為監測/管制標準、污染查核、場址管理等政策及法規研訂之參考)

- 1.此創新技術可應用於地下水污染場址之現地調查，在既有監測井有限的情形下，獲取最多的地下水相關資訊，大幅降低設置監測井之成本。



專案執行自評表

專案主持人	邱永嘉	專案名稱	以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查			
專案類型	☐ 先導型 ☐ 研究型 ☒ 模場型		專案主題	☒ 調查 ☐ 整治 ☐ 其他		
項次	類別	缺失點數	自評項目	執行單位檢核		本署審核
				是	否	
一	計畫書核定修正	1點	依規定期限內備文提送	☒	☐	
		1點	書面資料完整且無補件情況	☒	☐	
		1點	報告依格式規定撰寫	☒	☐	
		1點	依規定期限內上傳電子檔	☒	☐	
		1點	系統資料依規定期限內登錄且資料登錄完整（含本署 SRFS 系統與國科會 GRB 系統）	☒	☐	
二	期中及期末	1點	依規定期限內備文提送	☒	☐	
		1點	書面資料完整且無補件情況	☒	☐	
		1點	報告依格式規定撰寫	☒	☐	
		1點	依規定期限內上傳電子檔	☒	☐	
		1點	系統資料依規定期限內登錄且資料登錄完整（含本署 SRFS 系統與國科會 GRB 系統）	☒	☐	
三	結案及核銷	2點	依規定期限至本署 BAF 系統上傳支用單據	☒	☐	
		3點	結案上傳支用單據及相關資料完整	☒	☐	
四	其他	4點	計畫主持人配合出席本專案成果發表活動（或指定代理人如協同主持人、同專業且為助理研究員以上職等）	☒	☐	
		1點	計畫執行者於執行期間與單位內各處室溝通良好，行政作業效率良好。	☒	☐	
合計		20點		20		

註：執行單位於計畫執行期間進行缺失檢核於期中及期末送本署審核，並於期末統一計算。
未依實況登錄者，由本署補登依各階段執行紀錄進行缺失點數扣款。
缺失扣款機制：

1. 依結案標準，於專案執行期間，視各執行單位行政作業配合度，依「專案執行自評表」（[附件17](#)）進行績效缺失記點，缺失點數達扣款規定者，依核定總金額按比例扣款（或追繳）。
2. 缺失點數達5點者總金額款項扣1.5%，缺失點數達7點者總金額款項扣3%，缺失點數達7點以上者每增加缺失1點，加扣總金額款項1%。



主要研究人力

請依照「專案主持人」、「協同主持人」、「專任人員」及「兼任人員」等類別之順序分別填寫

姓名	服務機構/系所	職稱	在本研究專案內擔任之具體工作性質、項目及範圍	*每月平均投入 工作日數比率(%)
邱永嘉	國立臺灣海洋大學 地球科學研究所	教授	指導本研究之試驗規劃。計畫 理及執行、理論分析與評估、 資料分析與解釋、發表論文及 撰寫。	50
董天行	霖昌工程有限公司	經理	協調整治單位與安排施測時 間，依現場環境建議實驗配置 計畫。	30
吳承翰	國立臺灣海洋大學地 球科學研究所	計畫專員	協助現地試驗執行、資料蒐集 與分析、報告撰寫、行政事務 處理	50
劉承瀚	國立臺灣海洋大學地 球科學研究所	碩士生	協助現地試驗執行、資料蒐 集	30

註：表格不敷使用時，請自行增列。



環境部環境管理署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐構想書 ☐申請計畫書 ☒期中報告 ☐修正計畫書 ☐成果報告 **審查意見回覆對照表**

計畫年度	112 年度	計畫類型	☐ 先導型 ☐ 研究型 ☒ 模場型
計畫類別	☒ 調查 ☐ 整治 ☐ 其他		主持人：邱永嘉 NO：B5
計畫名稱	以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查		
審查意見		執行單位回覆	
委員一		委員一	
1. 已完成期中進度規劃的現地監測井與單井測試，唯部分實驗遭遇問題（TV-DTS 感測光纖與中心加熱光纖的距離偏差、FLUTe 佈設深度不如預期、洩氣過多等），應在成果報告說明解決/改善方式與成果。		感謝委員指教，本計畫遭遇之部分困境已提出相應之解決方案並進行試驗，並撰寫於報告之中，像 TV-DTS 的光纖距離偏差，本團隊透過使用不同的光纖進行，中心加熱光纖同樣使用質地較硬的光纖，提供其穩定性，外側的感測光纖則使用較軟，具備柔韌性的材質，使其受到重力影響可自行繃緊，使其不易受到外在因素產生位置偏移。部分困境仍在探討階段，預計下年度進行相關試驗，以呈現相關之成果。	
2. 目前地下水流的測試結果與現地用傳統地下水流量測方式所得結果相似，建議於期末報告中強化本技術的適用性、與現行技術的主要差異與實務應用時的關鍵選擇考量。		感謝委員建議。關於收集相關的調查資料與結果，本團隊將進行收集與彙整，並於後續的報告中提出其適用性或差異等比對。	
3. 請補充說明現地添加 PAM 作為「暫時性」封井材料，之後的處置方式（例如以何種方式移除？若在現地留置的環境分解性？對地下水流的影響時間等，及其吸水膨脹後吸熱對量測的影響等。		除了 PAM 的試驗成效外，其在現地佈置與後續處置同樣是本團隊的關注重點，根據前人文獻，本計畫預計透過襪套式套管進行 PAM 的井下佈置，試驗結束時，透過器具或人力將其拉起，並將其統一集中管理。目前設想之方法仍處於規劃階段，後續將透過實際測試確認其操作上的可行性。	
4. p.12「參照錯誤」應修正。		感謝委員指正，參照錯誤的部分已修正於期末報告定稿中。	



委員二 1. 本計畫「以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查」主要針對 TV-DTS、FLUTe 封井材料及 PAM 封井材料進行測試，第一年期中報告已完成室內測試，並於現地模場中完成井 T00571 與井 T00239（雙井）的 TV-DTS 試驗；井 T00239 與井 T00226 的單井加熱試驗；井 T00571 井與井 T00483 的 FLUTe 等現地測試，所獲致之成果已詳列於本次期中報告。 2. 研究團隊已依據原訂計畫期程、項目及工作規劃，於污染場址完成相關地下水流速與流向監測等多項工作，其結果與場址前期檢測結果相符，顯示本案感測器於實場具高度應用性，相關細節亦已於本次期中報告中說明。 3. 本計畫期中報告所示之執行成果與進度符合預定期程。 4. 本計畫期中報告已針對目前研發工作所遭遇之困難，分析干擾因素排除等進行探討，後續工作將以持續 TV-DTS 結構優化，提升地下水流速與流向之精準度等為重點項目，應可如期進行下半年度研發工作，並有效提升設備與技術之品質。 5. 依據本計畫期中報告報告所呈現之成果，本研究團隊開發中的「以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查」已具實場應用之價值，並可大幅提升地下水水文調查之效益。	委員二 感謝委員肯定。 感謝委員肯定。 感謝委員肯定。 感謝委員肯定。 感謝委員肯定。
委員三 1. 本專案計畫選定於屏東潮州新埤鄉的地下水污染場址設置之監測井測試地下水流速與流向，建議試驗值與該區域長期監測報告比對。本次期中報告僅簡單敘述流向「大致符合前人試驗觀測結果」，建議詳	委員三 感謝委員建議。本計畫所推估的地下水流速結果，已嘗試與所獲得的岩芯記錄進行比較分析。整體而言，加熱試驗結果所初步判斷之透水性與岩性分佈大致上吻合，然而在部分深度呈現與岩性不一致的情形。依據過往的許多文獻指出，以



細說明探討。

岩芯判斷透水性之差異會有一定程度上的誤判，需透過其它量測技術(包括：井測、示蹤劑試驗)，方能確認地層透水性之分布，而本計畫主要以加熱溫度剖面的方式獲得高解析度的透水性分布變化。本團隊已於期末報告截止日前向相關單位詢問歷年的調查報告與監測資料(包括水位、井測等)，然而由於資料較為敏感，目前仍在溝通當中，且持續彙整與分析所搜集到的資料，一但資料搜集與彙整完成，將立即進行深入分析，提供全面且具體的比較與評估。上述文字將補充於期末報告定稿中。

2. 圖 33-38 TVDTS 在東西南北向有些深度溫差值無明顯差異(例如圖 33)，但深度往下 1m (圖 34)東、北與西、南向溫差差約 0.5℃，原因?差異數值是否會影響解析精度?

感謝委員建議。由於 TV-DTS 是透過四個方向之光纖接受中心光纖加熱產生之熱訊號，因此四個方位的光纖是否與中心呈現等距將會影響接收到的溫度資訊。由於量測過程是透過人工下放 TV-DTS，下放過程造成的井壁摩擦可能導致光纖的位置偏移，使得量測到的溫度有所不同。因此，本團隊已針對 TV-DTS 進行改良，重透過選用不同的光纖材質、觀測與加熱光纖之間的距離固定器及溫度訊號的校正，確認四個方位光纖所量測到的溫度之準確性。由於方向的判讀是依據溫度大小最為依據，只要各方位上的溫度差距大於儀器或雜訊所造成的誤差，便可用於判斷地下水的流向。

3. 建議圖 43、44 ADTS toolbox 分析結果不同深度之 q 與 λ 與地質資料比對。

感謝委員建議。本計畫所推估的地下水流速與熱傳導係數之結果，已嘗試與所獲得的岩芯記錄進行比較分析。整體而言，加熱試驗結果所初步判斷之透水性與岩性分佈大致上吻合，然而在部分深度呈現與岩性不一致的情形。依據過往的許多文獻指出，以岩芯判斷透水性之差異會有一定程度上的誤判，需透過其它量測技術(包括：井測、示蹤劑試驗)，方能確認地層透水性之分布，而本計畫主要以加熱溫度剖面



4. 模式推估流速不確定性範圍 5.16×10^{-8} - 1.76×10^{-6} m/day(p46)，2 個 order 的差異範圍是否會影響解析精度？	的方式獲得高解析度的透水性分布變化。上述文字將補充於期末報告定稿中。 感謝委員建議。根據流速分析之結果，整體流速分布介於 0.04~0.3m/d 之間，而每個資料點位的流速結果皆有不同的不確定性範圍，內文撰寫之值為整口井內的最大與最小值，並非代表單一位置的不確定性。本團隊於報告中的論述方式導致呈現結果有所誤會，已修正於期末報告定稿中。
委員四 1. 本計畫霖昌公司參與執行，建議研究方法與流程中增加工作分配表，說明參與內容與比例。且同時霖昌公司也參與 112 年度其他補助研究與模場試驗專案計畫，兩案之間是否有相關聯繫補充說明。 2. 第四章研究方法與流程內容分別說明各項使用的儀器、解析模式，建議提出研究設計，及研究流程，方能呈現整體研究方法。 3. 第六章結果與討論，初步成果內容豐富，建議每小節進行的各項試驗，摘要彙整初步成果與後續方向，有利於對照第七章初步成果與後續工作內容的參照。	委員四 霖昌公司長期與本團隊有建教合作，在本計畫中主要提供模場相關的觀測與試驗資訊。此外，本團隊亦透過聯繫，與負責執行模場相關計劃的裕山環境工程顧問公司，煩請他們提供最新的現地情形。本計畫其餘的技術研發及現地量測試驗之部分，皆由本團隊負責處理並實施，因此分工明確且單純。至於霖昌公司所參與 112 年度其他補助研究與模場試驗專案計畫則與本計畫無關聯性。 感謝委員建議。相關的研究設計及流程已補充於期末報告定稿中，請參照。 感謝委員肯定與建議。各小節的初步結果彙整與後續方向已補充說明於期末報告定稿中，請參照。



環境部環境管理署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐構想書 ☐申請計畫書 ☐期中報告 ☐修正計畫書 ☒成果報告 審查意見回覆對照表

計畫年度	112 年度	計畫類型	☐ 先導型 ☐ 研究型 ☒ 模場型
計畫類別	☒ 調查 ☐ 整治 ☐ 其他	主持人：邱永嘉 NO：B5	
計畫名稱	以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查		
審查意見		執行單位回覆	
委員一 1. 國內外投稿、研發人員、及專利申請成果未達預期，其餘項目均達標。 2. 請補上歷次審查意見與回覆情況、執行進度與查核點、專案成果績效自評表等文件。 3. 針對四口井進行 TV-DTS 與單井加熱之試驗並進行流速分析及 FLUTe 與 PAM 的室內測試，瞭解模場四口井的地下水流速情況。建議可與其他技術的量測結果進行比較，以驗證技術的適用性與適用範圍。		委員一 感謝委員指教。由於計畫執行第一年度著重於技術之測試、研發及野外現地試驗，在國內外投稿、研發人員、及專利申請方面仍在積極進行當中，預計將在第二年度計畫執行結束前達到所設定之目標。 感謝委員建議。歷次審查意見與回覆情況、執行進度與查核點、專案成果績效自評表等文件，已補充於期末報告定稿中。 感謝委員建議。本團隊非常同意委員之建議，將本計畫所獲得之成果與其他量測技術進行比較，為驗證技術之適用性過程中非常重要的一環。本團隊已於期末報告截止日前向相關單位詢問歷年的調查報告與監測資料，然而由於資料較為敏感，目前仍在溝通當中，且持續彙整與分析所搜集到的資料，一但資料搜集與彙整完成，將立即進行深入分析，提供全面且具體的比較與評估。	
委員二 6. 本計畫「以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查」主要針對 TV-DTS、FLUTE 封井材料及 PAM 封井材料進行測試，第一年成果報告已完成室內測試，並成四口井 (T00571、T00567、T00239 與 T00226) 的單井加熱與 TV-DTS 之試驗與分析，所獲致之成果已詳列於本成果報告。		委員二 感謝委員肯定。	



7. 本計畫成果報告所示之執行成果與進度符合預定期程。 8. 本專案計畫選定屏東潮州新埤鄉的地下水污染場址，藉助分散式光纖溫度感測器在空間與時間上的高解析度連續性量測優勢，進行土壤及地下水污染場址的水文地質調查。並持續進行單井加熱試驗，透過自製的單井流速與流向光纖溫度測定儀(TV-DTS)，於單井內進行 TV-DTS 加熱試驗，以推估垂直方向上的高解析流速分布，同時解析該地區的地下水流向資訊。所獲致之研發成果豐碩，有助於後續 TV-DTS 結構優化，提升地下水流速與流向之精準度等目標之達成。 9. 本成果報告亦已研提明年度工作項目與重點，提出明確可行之後續工作計畫。 10. 建議本計畫研發團隊評估並提出研發設備-單井流速與流向光纖溫度測定儀(TV-DTS)及相關量測技術成果申請專利之時程與規劃，供補助單位參考。	感謝委員肯定。 感謝委員肯定。 感謝委員肯定。 感謝委員建議。本團隊所研發的 TV-DTS 已於 112 年度獲得發明之專利（發明第 I820721 號）。本團隊預計在第二年度執行結束前，針對 TV-DTS 之修正與優化再次提請新型專利之申請。
委員三 5. 本年度成果符合計畫書執行內容與進度。 6. 今年度成果顯示四口井分別在不同深度有不同透水性，建議比對當時設井之 well log 進行透水性、流速與地質之相關性討論。	委員三 感謝委員肯定。 感謝委員建議。由於 T00239 與 T00226 並無岩心資料，故無法進行比對，僅針對 T00571 與 T00567 進行比對，T00571 的岩芯紀錄顯示，深度 56 公尺以上為礫石砂夾粉土，以下為灰色黏土夾礫石砂及棕色粉土/土&中細砂夾礫石；T00567 的岩芯紀錄顯示，則以礫石砂夾粉土/棕色黏土為主，並參雜些許的中細沙夾棕色粉黏土及灰色黏土夾礫石砂。整體而言，兩口井以加熱試驗結果所初步判斷之透水性與岩性分佈大致上吻合，然而 T00571 在深度 56~80 公尺與 T00567 在深度 80~97 公尺與岩性呈現不一致的情形。依據過往的許多文獻指出，以岩芯判斷透水性之差異會有一定程度上的誤判，需透過其它量測技術（包括：



	井測、示蹤劑試驗)，方能確認地層透水性之分布，而本計畫主要以加熱溫度剖面的方式獲得高解析度的透水性分布變化。 經詢問相關單位，由於當初觀測井設置時並未進行井測，故無相關的 well log 資料可提供進行比對。 本團隊非常同意委員之建議，認為量測結果與其他量測技術進行比較有其必要性，因此，本團隊已於期末報告截止日前向相關單位詢問歷年的調查報告與監測資料，然而由於資料較為敏感，目前仍在溝通當中，且持續彙整與分析所搜集到的資料，一但資料搜集與彙整完成，將立即進行深入分析，提供全面且具體的比較與評估。上述文字將補充於期末報告定稿中。
委員四 4. 第六章結果與討論，建議說明以期中完成的工作進一步達成的成果，與研究發現，例如 6-1「單井加熱試驗溫度面量測結果」分析流速、熱傳導係數等，建議增加小節說明其溫度變化與實驗應證結果。其他小節同樣的文字編輯較能呈現成果。	委員四 感謝委員建議。單井加熱試驗所產生之溫度變化，均會受到地下水流速及熱傳導係數之影響，熱傳導係數（熱傳導）的影響主要發生加熱試驗之開始初期，而地下水流速（熱對流）則發生在試驗的後半期。本計畫已利用單井加熱試驗結果進行熱傳導係數與地下水流速量化分析，並同時將單井加熱試驗結果與 TV-DTS 試驗結果進行比較分析，在流速方面具有一致性。流速分析之結果亦與鑽探時的岩芯紀錄進行比較分析，整體而言，加熱試驗結果所初步判斷之透水性與岩性分佈大致上吻合。部分不一致的情形，依據過往的許多文獻指出，以岩芯判斷透水性之差異會有一定程度上的誤判，需透過其它量測技術（包括：井測、示蹤劑試驗），方能確認地層透水性之分布，而本計畫主要以加熱溫度剖面的方式獲得高解析度的透水性分布變化。本團隊將持續彙整與分析所搜集到的調查報告與監測資料，進行深入分析，提供全面且具體的比較與評估。上述文字將補充於期末報告定稿中。 感謝委員建議。本研究透過單井加熱試驗及 TV-



5. 本期結論(7-1)請綜合摘要說明因受地下水文資料影響對整治的條件分析，以及可能影響，建議也可說明以此能源效率的優劣。	DTS 進行流速與流向分析，主要之目的為方法論之驗證與適用性評估。地下水流速與流向為後續整治工作的參考依據之一，然而，建置水文地質概念模型並非本計畫規劃之工作項目，且整治工作之條件分析除水文地質條件外，仍需考量許多其他因素，因此，本計畫目前所獲得之成果尚無法針對整治之條件進行分析，並提出整治策略擬定之建議。 本計畫所選用的加熱試驗方法，可在 24-48 小時內完成 1 口井之測定，所使用之電源供應主要為一般的發電機，因此，在能源效率上有其優勢；然而，能源耗損或二氧化碳排放之量化分析尚未納入本計畫之工作項目，未來若欲將此調查技術進行技術轉移，相關之分析將有其必要性。
6. 請具體說明結論與建議。	感謝委員建議。結論與建議已重新修正，使其更加具體與清晰，修正後之結論與建議已補充於期末報告定稿中。
7. 明年工作規劃，請說明以今年成果為基礎預期完成的工作內容與成效。	感謝委員建議。明年度之工作規劃包括：完成 4 口 TV-DTS 的測定，以及封井材料 FLUTe 與 PAM 的現地測試。TV-DTS 之試驗將基於第一年度之試驗結果進行優化，並嘗試應用不同井況或地質條件之觀測井（例如：新/舊井、高/低流速）。針對不同條件，進行 TV-DTS 的改善，延伸其現地應用範圍。FLUTe 與 PAM 的現地測試則是基於第一年度室內實驗室試驗之結果，實際應用於現地，針對現地實際之安裝、試驗過程及收回進行一系列之測試，確認其在現地量測應用上之可行性。上述文字將補充於期末報告定稿中。



中文摘要

傳統的水文地質調查方法主要針對大區域進行試驗，然而在地下含水層極為複雜的情況下，由於現場資料的空間解析度不足，往往難以準確掌握水文地質狀況，這可能導致對含水層透水區段及地下水流速、流向的誤判。近年來，利用熱能作為地下水流的示蹤劑，並結合創新的分散式光纖溫度感測器（fiber-optic distributed temperature sensor, FO-DTS）量測技術，已被證明適用於多種水文地質環境的調查工作。有鑒於此，本專案計畫選定屏東潮州新埤鄉的地下水污染場址，藉助分散式光纖溫度感測器在空間與時間上提供的高解析度連續性量測優勢，進行土壤及地下水污染場址的水文地質調查。本計劃今年度將持續進行單井加熱試驗，此外，透過自製的單井流速與流向光纖溫度測定儀（稱為 thermal vector DTS, TV-DTS），於單井內進行 TV-DTS 加熱試驗，以推估垂直方向上的高解析流速分布，同時解析該地區的地下水流向資訊。今年度已完成四口井（T00571、T00567、T00239 與 T00226）的單井加熱與 TV-DTS 之試驗與分析。

單井加熱試驗結果顯示，四口井皆有明顯透水及不透水的區段，井 T00571 位於深度 47.5-75 公尺有著較佳的透水性，深度 12.5-22.5 公尺具有較差的透水性，井 T00567 於深度 50、71-72 及 75-77 公尺有著較高之透水性，而深度 80-90 公尺則有著較差的透水性，井 T00239 於深度 77.5~80.48 公尺為最透水區段，深度 76~80 公尺則為最不透水，井 T00226 則是深度 37~44 和 57~60 公尺透水性較佳，深度 61~69 公尺透水性最差。進一步利用單井加熱之溫度資料配合 A-DTS Toolbox（Simon et al., 2021）得以推估測量點周圍地層材質之熱傳導係數和地下水流速，結果顯示 T00571 之流速與熱傳導係數隨著深度有著明顯差異，深度 44-75 公尺為較高流速帶，10-20 公尺為較低流速帶；熱傳導係數方面，整體有著明顯差異，深度 10-20 公尺呈現較低值，深度 42~80 公尺熱傳導率係數較高。T00567 之流速與熱傳導係數隨著深度同樣有著明顯差異，整體流速可以觀察到深度 63~70、80~100 公尺區間的低流速帶，以及深度 31~50 區間的較高流速分佈；熱傳導係數方面，深度 25~70 公尺區間出現較高值，深度 80~100 公尺以下熱傳導率係數開始下降。T00239 的整體流速可以觀察到深度 30-37、51~55、69-74 公尺區間的低流速帶，以及深度 26-29、40-47.5、60-67.5 公尺區間的較高流速分佈；熱傳導係數方面，深度 24~29 公尺區間出現較高值，深度 40~75 公尺以下係數逐漸趨於穩定，深度 78~80 公尺區間再次出現較高係數。T00226 的整體流速可以觀察到深度 20~32、47~56、60~75 公尺區間的低流速帶，以及深度 36~43、56~59 公尺區間的較高流速分佈；熱傳導係數方面，深度 20~30 公尺區間出現較低值，深度 30 公尺以下開始增加，至深度 36 公尺以下係數逐漸趨於穩定。

地下水流向則透過 TV-DTS 進行量測，試驗結果顯示 T00571 的地下水流向主要為往 E 方位流動，且些微的偏向 S 方位；井 T00239-1 則主要往 N 方位流動，深部位置則為 S 偏 W 的方位流動；井 T00239-2 往 N 偏 W 的方位流動，與前人檢測結果大致相符。井 T00226-2 整體地下水流向為往西方流動，結果非常一致；井 T00567 則因為各方位間的溫度差異不



明顯，無法有效判讀。進一步量化 TV-DTS 之試驗結果，以 T00239 及 T00226 進行，其結果顯示，T00239 於深度 74-76 公尺擬合之方位有所偏差，分別是為 35-60° 方位 (東偏北) 及 200° 方位 (西偏南)，流速方面則差異不大，約為 0.08-0.12m/d。T00226 方面，深度 38-40 公尺流向方位角度十分接近，約為 170-210° 方位 (偏西)，流速約為 0.17m/d。

本計劃亦針對柔性襯管(Flexible Liner Underground Technologies, FLUTe)與聚丙烯醯胺(polyacrylamide, PAM)進行室內試驗，測試結果顯示，兩者在阻隔垂直對流的封井成效良好有效降低對流產生的水體混合，改善試驗中的溫度量測。此外，裂隙造成的潛在水流造成的流速差異得以透過 FLUTe 之設置強化其產生之溫度回饋，顯示明顯的低溫帶狀區間，有助於現地試驗的量測優化。

明年度的工作計劃預計將進外選取四口井，進行 TV-DTS 試驗，用於分析其地下水之流向與流速，並選取兩口井進行單井加熱試驗，除了分析井內的流速及地層的熱傳導係數之分佈情形之外，將用於驗證 TV-DTS 試驗之結果。本計畫透過所提出之創新方法，研析區域內的含水層透水區段與地下水流向及流速資訊。研究成果所產出的高精度資料可提供後續污染場址調查與整治工作之參考依據。此創新量測方法的精進與應用，冀望未來能對於土壤與地下水污染調查及整治帶來新的契機。

關鍵詞：地下水污染、熱示蹤劑、光纖溫度感測器、地下水流速、地下水流向



英文摘要

Traditional hydrogeological survey methods primarily focus on large geographical areas. However, in cases where underground aquifers are particularly complex, the insufficient spatial resolution of field data often leads to significant misjudgments regarding the conditions of the aquifers, including permeable sections and the dynamics of groundwater flow. In recent years, the innovative use of thermal energy as a tracer for groundwater flow, combined with fiber-optic distributed temperature sensing (FO-DTS) technology, has demonstrated effectiveness in a variety of hydrogeological environments. Accordingly, this project selected a groundwater contamination site located in Xinpi Township, Chaozhou, Pingtung to demonstrate the proposed methods. The purpose of this study aimed to conduct comprehensive hydrogeological investigations of soil and groundwater contamination by using the high-resolution continuous measurement capabilities of FO-DTS. This year, we conducted the single-well heating tests, and developed a thermal vector DTS (TV-DTS) device to perform heating experiments within the same selected wells. TV-DTS enables us to estimate vertical flow rate distributions and analyze groundwater flow directions simultaneously. To date, we have completed tests and analyses for four wells, i.e., Wells of T00571, T00567, T00239, and T00226.

Results from the single-well heating tests indicated that the permeable and impermeable sections in all four wells can be distinguished. Well T00571, at depths of 47.5-75 m, exhibits better permeability, while depths of 12.5-22.5 m show poorer permeability. Well T00567 displays higher permeability at depths of 50, 71-72, and 75-77 m, while depths of 80-90 m exhibit lower permeability. Well T00239 shows the most permeable section at depths of 77.5-80.48 m, while the depths of 76-80 m are the least permeable. Well T00226 has better permeability at depths of 37-44 and 57-60 m, with the worst permeability at depths of 61-69 m. Further analysis of temperature data from the single-well heating tests, combined with the A-DTS Toolbox (Simon et al., 2021), allows us to estimate thermal conductivity coefficients and groundwater flow rates around the measurement points. The results showed that Well T00571 exhibits significant different characteristics in flow rates and thermal conductivity coefficients which were varied with depths. The depth range of 44-75 m corresponded to a higher flow rate zone, while 10-20 m indicated a lower flow rate zone. In terms of thermal conductivity coefficients, there were notable differences overall, with lower values at depths of 10-20 m and higher coefficients at depths of 42-80 m. Similarly, Well T00567 showed clear variations in flow rates and thermal conductivity coefficients with depth, with lower flow rates observed in the ranges of 63-70 and 80-100 m, and higher flow rates in the 31-50 m. The thermal conductivity coefficients are higher between depths of 25-70 m, decreasing below 80-100 m. For Well T00239, low flow rate zones are observed at depths of 30-37, 51-55, and 69-74 m, with higher flow rate distributions at depths of 26-29, 40-47.5, and 60-67.5 m. The thermal conductivity coefficients show higher values at depths of 24-29 m, stabilizing



below 40-75 meters, with another increase at depths of 78-80 m. For Well T00226, low flow rate zones are evident at depths of 20-32, 47-56, and 60-75 m, with higher flow rate distributions at depths of 36-43 and 56-59 m. The thermal conductivity coefficients show lower values at depths of 20-30 m, increasing below 30 meters and stabilizing below 36 m.

Groundwater flow directions were measured using TV-DTS, revealing that Well T00571 primarily flowed eastward with a slight inclination toward the south. Well T00239-1 flowed mainly northward, with deeper locations showing a south-southwest direction. Well T00239-2 flowed northwest, aligning with previous detection results. Well T00226-2 showed a consistent westward flow direction, while T00567 exhibited insufficient temperature differences between directions, hindering effective interpretation. Further quantification of TV-DTS results using the analytical solution was conducted for Wells of T00239 and T00226. The results indicated that flow direction at Well T00239 at depths of 74-76 m has a direction corresponding to $35-60^\circ$ (east-north) and 200° (west-south) orientations, with the flow rates of approximately 0.08-0.12 m/d. For Well T00226 at depths of 38-40 m, the flow direction was very similar, around $170-210^\circ$ (west), with a flow rate of approximately 0.17 m/d.

In addition to field tests, we conducted laboratory experiments on Flexible Liner Underground Technologies (FLUTe) and polyacrylamide (PAM). The results demonstrated that both methods effectively reduce vertical convection, thereby minimizing water mixing and improving the accuracy of temperature measurements. This enhancement is crucial for understanding the thermal dynamics within the aquifer.

The future work will focus on selecting additional four wells for TV-DTS testing, two of which will be conducted single-well heating tests for verification, to further analyze groundwater flow directions and rates next year. Through these innovative methods, we aim to provide high-precision data that will inform future investigations and remediation efforts at contaminated sites. The insights gained from this research are expected to significantly enhance our understanding of groundwater dynamics and contribute to more effective management and remediation strategies for soil and groundwater contamination.

Keywords: groundwater contamination, heat tracer, fiber-optic distributed temperature sensor, flow velocity, flow direction



目錄

一、 前言	1
二、 研究目的	2
三、 文獻回顧	3
四、 研究方法與流程	7
4-1 分散式光纖溫度感測器量測原理	7
4-1-1 分散式光纖溫度感測器儀器	8
4-1-2 光纖纜線配置	11
4-2 TV-DTS 流速與流向測定儀	11
4-3 TV-DTS 熱傳輸解析解	13
4-4 光纖纜線材質、熱傳輸參數及流速解析	15
4-5 FLUTe 封井材料	17
4-6 PAM 封井材料	18
4-7 研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖）	20
五、 試驗場址概況	22
5-1 場址背景	22
5-2 試驗井介紹	23
六、 結果與討論	25
6-1 單井加熱試驗溫度剖面量測結果	25
6-1-1 期中報告已完成工作項目	25
6-1-2 現地試驗設計	26
6-1-3 T00571 現地試驗結果	26
6-1-4 T00567 現地試驗結果	28
6-2 單井流速推估結果	31
6-3 TV-DTS 試驗結果	35
6-3-1 期中報告已完成工作項目	35
6-3-2 現地試驗設計	37
6-3-3 T00567 試驗結果	38



6-3-4 T00226 試驗結果.....	40
6-3-5 地下水流向與流速推估結果	43
6-4 單井加熱試驗與 TV-DTS 試驗之比較分析	54
6-5 FLUTe 試驗結果	56
6-5-1 室內試驗	56
6-6 PAM 試驗結果	59
6-6-1 室內試驗-底部加熱.....	59
6-7-1 室內試驗-線性源加熱.....	61
七、 結論與建議.....	63
7-1 本期結論	63
7-2 後續工作	66
八、 明年度工作規劃.....	67
九、 參考文獻.....	68



圖次

圖 1 分散式光纖溫度感測器示意圖	4
圖 2 主動式 FO-DTS 量測方式(a)thermal advection test , (b)hybrid cable flow logging , (c)heat pulse test(摘自 Bense et al., 2016)	4
圖 3 (a)TVP 示意圖(b)TVP 儀器照片(摘自 Pehme et al., 2014)	5
圖 4 DTS 搭配柔性襯管地下技術於井下分析之現地配置：(a)FLUTE 安裝與水流示意圖，(b)分散式溫度感測器與主動加熱系統(摘自 Coleman et al., 2015)	6
圖 5 聚丙烯醯胺凝膠(PAG)實驗室溫度阻絕試驗結果(摘自 Klepikova et al., 2018)	6
圖 6 散射訊號之頻率圖譜式意圖(摘自 Selker et al., 2006)	8
圖 7 (a)雷射脈衝分析儀主機 Ultima, Silixa Ltd , (b) 合式光纖纜線剖面示意圖(祥林科技，台灣)	9
圖 8 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	10
圖 9 現地分散式光纖溫度感測器佈設示意圖	11
圖 10 TV-DTS 設計概念圖：(a)TV-DTS 固定圓盤 (b) TV-DTS 支架(c)光纖固定於聚四氟乙烯支架之示意圖	12
圖 11 TV-DTS 不同方位之溫度變化(摘自 Zlotnik et al., 2017)	12
圖 12 座標轉換：(a)點熱源(實線與虛線分別為 (x,y,z) 與 (x',y',z') 正交座標系統。變化後的 z 方向指向達西通量(藍色箭頭)。座標系統的轉換主要透過兩次座標軸旋轉所完成，(1)沿著 z 軸逆時針選轉角度 ψ ，將 (x,y,z) 座標系統轉換為 (x',y',z') ，(2)沿著 y' 軸逆時針選轉角度 θ ，並以向量 q 對齊新 z' 軸。其中， x,z 與 z 軸坐落於同一平面，座標軸原點為點熱源)，(b)線性熱源(長度 l 的線性熱源沿著 z 方向坐落於座標系統 (x,y,z) 中， $(z = -l/2, z = l/2)$ ，在座標系統 (x',y',z') 中，連接原點兩端的點為 $(-l/2\sin\theta, 0, l/2\cos\theta)$ 與 $(l/2\sin\theta, 0, -l/2\cos\theta)$) (摘自 Zlotnik and Tartakovsky, 2018)	15
圖 13 溫度反應曲線(點位 $x=0.03, y=0, z=0.03$)，(a)達西通量為 10^{-6} m/s，(b) 達西通量為 10^{-5} m/s(摘自 Zlotnik and Tartakovsky, 2018)	15
圖 14 主動式光纖溫度感測器(ADTS)測量期間的熱反應曲線(黑線)(摘自 Simon et al., 2021)	17
圖 15 FLUTE 安裝示意圖(Keller et al., 2013)	18



圖 16 (a)PAM 顆粒，(b)PAG	19
圖 17 污染場址監測井分布圖(摘自屏東縣政府環境保護局)	22
圖 18 地質剖面圖(摘自屏東縣政府環境保護局)	23
圖 19 岩芯紀錄：(a)井 T00571、(b)井 T00483	24
圖 20 T00239 加熱試驗溫度上升與回復過程	25
圖 21 T00226 加熱試驗溫度上升與回復過程	26
圖 22 T00571 於單井加熱試驗溫度上升與回復過程	27
圖 23 T00571 單井加熱期間溫度變化	28
圖 24 T00567 於單井加熱試驗溫度上升與回復過程	29
圖 25 T00567 單井加熱期間溫度變化	30
圖 26 岩芯紀錄：(a)井 T00571、(b)井 T00567	30
圖 27 T00226 之 ADTS-Toolbox 分析結果：(a)流速，(b)熱傳導係數	32
圖 28 T00239 之 ADTS-Toolbox 分析結果：(a)流速，(b)熱傳導係數	32
圖 29 T00571 之 ADTS-Toolbox 分析結果：(a) 流速，(b) 熱傳導係數	34
圖 30 T00567 之 ADTS-Toolbox 分析結果：(a) 流速，(b) 熱傳導係數	35
圖 31 TV-DTS 試驗儀器設置：(a)T00567 現地試驗規劃示意圖，(b) T00226-2 現 地試驗規劃示意圖	38
圖 32 T00567 試驗深度 15-16 公尺各方位溫差	39
圖 33 T00567 試驗深度 16-17 公尺各方位溫差	40
圖 34 T00226 試驗深度 38-39 公尺各方位溫差	42
圖 35 T00226 試驗深度 39-40 公尺各方位溫差	42
圖 36 T00226 深度 38-39 公尺各方位擬合之結果	45
圖 37 T00226 深度 39-40 公尺各方位擬合之結果	46
圖 38 T00239 深度 74 公尺各方位擬合之結果	49
圖 39 T00239 深度 75 公尺各方位擬合之結果	49
圖 40 T00239 深度 76 公尺各方位擬合之結果	50
圖 41 T00239 深度 34 公尺各方位擬合之結果	52
圖 42 T00239 深度 35 公尺各方位擬合之結果	53
圖 43 T00239 深度 36 公尺各方位擬合之結果	53



圖 44	ADTS-Toolbox 流速分析結果：(a)T00226，(b)T00239.....	56
圖 45	FLUTe 室內加熱試驗示意圖.....	57
圖 46	FLUTe 室內加熱試驗結果：(a) 未設置 FLUTe (b) 設置 FLUTe58	
圖 47	PAM 室內底部加熱試驗示意圖.....	60
圖 48	PAM 室內底部加熱試驗結果：(a)沒有 PAM，(b)有 PAM.....	60
圖 49	PAM 室內線性源加熱試驗示意圖.....	62
圖 50	PAM 室內線性源加熱試驗結果：(a)實驗一，(b)實驗二，(c)實驗三，(d)實驗四	63



表次

表 1	T00571 試驗 74-76m 各方位最大溫差(°C).....	36
表 2	T00239-1 試驗 74-76m 各方位最大溫差(°C).....	36
表 3	T00239-2 試驗 34-36m 各方位最大溫差(°C).....	37
表 4	T00571 試驗 15-17m 各方位最大溫差(°C).....	40
表 5	T00571 試驗 15-17m 各方位累積溫度(°C).....	40
表 6	T00226 試驗 38-40m 各方位最大溫差(°C).....	43
表 7	T00226 試驗 38-40m 各方位累積溫度(°C).....	43
表 8	流速與流向解析之相關參數設定	45
表 9	T00226 模擬 38-40m 各方位最大溫差(°C).....	46
表 10	T00226 模擬 38-40m 各方位累積溫度(°C).....	46
表 11	T00226 試驗 38-40m 最佳擬合地下水流向方位角度與流速....	47
表 12	T00239 模擬 74-76m 各方位最大溫差(°C).....	50
表 13	T00239 模擬 74-76m 各方位累積溫度(°C).....	50
表 14	T00239 試驗 74-76m 最佳擬合地下水流向方位角度與流速 ...	50
表 15	T00239 模擬 34-36m 各方位最大溫差(°C).....	54
表 16	T00239 模擬 34-36m 各方位累積溫度(°C).....	54
表 17	T00239 試驗 34-36m 最佳擬合地下水流向方位角度與流速 ...	54
表 18	T00239 和 T00226 擬合地下水流速結果	56
表 19	室內試驗相關條件設定與配置	62



前言

一、前言

隨著人類文明的發展演進，人類對於環境產生顯著的影響，各式工廠與畜牧業排放之農、商業廢水從地表入滲至地下水之中，汙染物隨著地下水流開始擴散，加劇環境汙染的範圍，使得生態環境產生劇烈變化，甚至影響當地民生用水，為了有效改善與整治，了解地下水的可能流向與流速有其必要性，然而水文地質環境的異質性(heterogeneity)使得含水層的結構非常複雜，導致水文地質狀況掌握不易，對於地下含水層之透水區段及地下水流速、流向產生判釋上的困難。上述情形在進行土壤與地下水汙染場址調查時將更加顯著，土壤與地下水汙染場址調查時，往往需要高精度(高解析度)的資料搜集，方能對現地水文地質環境準確的掌握，過往許多土壤及地下水汙染的研究指出，地下水流向與流速的準確調查與判釋為後續整治工作成敗的關鍵控制因素(Dagan, 1989)。

傳統上僅透過既有的岩芯鑽探資料，往往無法真實反應地底下的透水情形，現有的水文地質調查方式，花費許多的時間、人力成本，亦無法獲得完整的調查結果，在現地資料空間解析度的不足，將導致水文地質狀況掌握不易，產生含水層透水區段及地下水流速、流向推估上的誤判，進而影響汙染物於地下水含水層中之分布與流動情況的推估。因此若能提供地下環境細部分層狀況的進一步評析，未來土壤與地下水汙染場址在水文地質調查、甚至汙染整治成效評估之參考依據。欲更加瞭解複雜多變的水文地質狀況，因此在研究區域的空間解析度上，從過往公尺等級已大幅提昇至公分等級的調查。然而，受限於人力、經費及時間的成本考量之下，仰賴傳統的水文地質調查方式，僅能針對大區域的環境進行試驗及監測，其調查結果已無法滿足研究上之所需，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在進行水文地質調查的主要趨勢。



以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查

二、 研究目的

本專案計畫以創新的分散式光纖溫度感測器量測技術為基礎，藉由其在時、空上的高解析度優勢，經由複合式光纖的設計組合與主動式加熱的應用，以及現地試驗方法的精進，延伸其應用範圍，提昇此創新技術在土壤與地下水污染調查時的解析能力。本計畫欲透過單井流速與流向光纖溫度測定儀(稱之為 thermal vector DTS, TV-DTS)的自製研發，於單井內進行 TV-DTS 加熱試驗，不僅能推估高解析在垂向上的流速分佈，同時解析地區性的地下水流向資訊，克服現地觀測井數量不足或井位分佈不均之限制。此外，透過柔性襯管(FLUTe)與聚丙烯醯胺凝膠(PAG)兩種暫時性封井材料的研析，除探討兩種材料於封井後，對於垂直熱對流效應抑制與流速推估準確度的提升之外，亦針對封井後的單井分層水壓監測之可行性進行評估，預期此封井技術將突破過往分層觀測井設置之限制性，大幅節省調查之成本。本計畫選定之試驗模場為的屏東潮州新埤鄉的地下水污染場址，冀望透過本計畫所提出之創新方法，研析區域內的含水層透水區段與地下水流向及流速資訊，嘗試建構此區域內的水文地質架構模型。研究成果所產出的高精度資料可提供後續污染場址調查與整治工作之參考依據。此創新量測方法的精進與應用，冀望未來能對於土壤與地下水污染調查及整治帶來新的契機。



三、 文獻回顧

以熱能為地下水流示蹤劑(groundwater tracer)並非一項新的調查技術，透過現地溫度量測與解析，可準確的追蹤地下水的流動方向與速度。以熱傳輸數學模式為基礎進行地下水流之解析始於 1960 年代(Suzuki, 1960; Stallman, 1963, 1965; Bredehoeft and Papadopoulos, 1965)，然而受限於量測儀器的精準度，大部分的研究仍以理論發展或實驗室試驗為主，現地實測的應用案例極少。近年來透過量測儀器的改進、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，大量的現地研究應用確立了以熱能做為水文示蹤劑的可行性(Anderson, 2005)。常見的應用包括：探討地表地下水交互作用(Doussan et al., 1994)、分析氣候變遷(Freifeld et al., 2008)或是特徵化主要優勢水流與裂隙(Leaf et al., 2012; Pehme et al., 2013)。目前在熱示蹤劑技術應用於井下有幾個主要方向：在地下水層中主動加熱並建立裂隙介質中之傳熱概念模型(Klepikova et al., 2016)；對裂隙岩層中熱傳輸建立解析解(de La Bernardie et al., 2018)；建立更精密之溫度感測方式來量取溫度資料提高特徵化含水層之解析度(Maldaner et al., 2019; Lee et al., 2020)；或是藉由製造不同流場進行導水裂隙之溫度變化分析(Munn et al., 2020)。

為了有效量測連續性溫度資料，分散式溫度感測器(fiber optical distributed temperature sensor, FO-DTS)被發展用來監測長時間之瞬態溫度變化(Selker et al., 2006; Briggs et al., 2016)。FO-DTS 的原理(圖 1)主要透過光纖雷射激發後所產生的散射訊號(scatter)而獲得環境中的感測溫度，提供時間與空間上的連續性資料。FO-DTS 已成為一種創新的量測技術，並逐漸受到重視，並大量的應用於水文環境上之調查(Selker et al., 2006; Westhoff et al., 2007; Tyler et al., 2009; Vogt et al., 2010; Read et al., 2013, 2015; Klepikova et al., 2018)。FO-DTS 的主要優勢在於提供空間上與時間上的連續性量測，以 10,000 公尺長的光纖為例，在空間上的解析度可達到每 0.125 公尺一個量測點，而在時間上的解析度則為每 1 秒可獲得一筆量測資料，溫度量測的準確度高達 0.1°C 。除了被動式的針對環境溫度進行監測之外，透過複合式光纖纜線(銅線與光纖複合)的主動式加熱，依據加熱升溫與停止加熱後的回溫過程，量化分析井下不同深度的溫度變化，進而判釋地下含水層的透水區段(圖 2)，提昇地下水流在空間偵測上之解析度(Bense et al., 2016)。



以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查

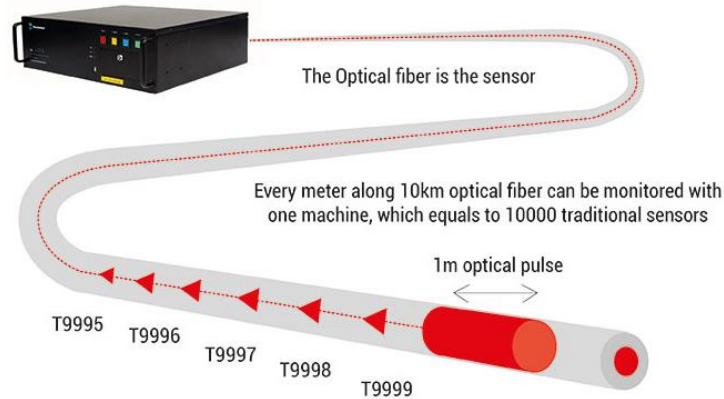


圖 1 分散式光纖溫度感測器示意圖

(摘自 <https://www.bandweaver.com/technology/distributed-temperature-sensing/>)

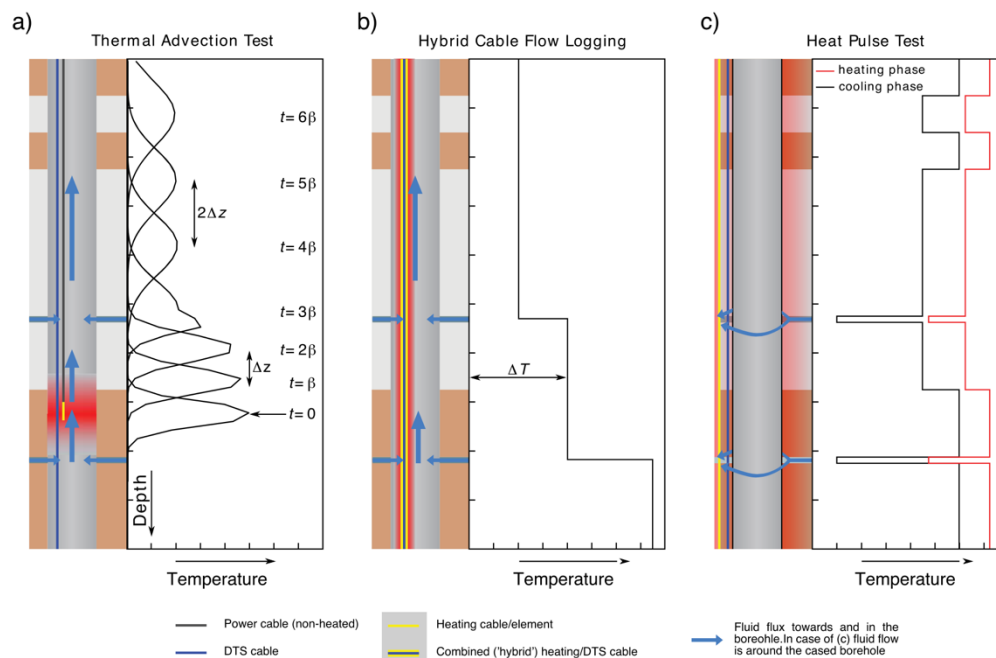


圖 2 主動式 FO-DTS 量測方式(a)thermal advection test，(b)hybrid cable flow logging，(c)heat pulse test(摘自 Bense et al., 2016)

現今 FO-DTS 試驗主流方式為井內主動式加熱 (Pehme et al., 2013; Coleman et al., 2015)。如 Bakker 等人(2015)於自然梯度之上游井進行全井加熱，使熱水於自然流場中移動，並於下游觀測井進行觀測溫度異常值，並進行數值分析於岩層中之熱衰減效應。或是如 Coleman 等人(2015)於加拿大安大略貴湖(Guelph, Ontario)試驗場址之單口試驗 100 公尺深井使用主動式加熱線源(active line source, ALS)搭配 DTS 進行熱示蹤試驗，在此進行了加熱與冷卻試驗。藉此比較分析比較特徵化透水裂隙之差異。而被動式試驗中，並不會在外部進行加熱，如 Klepikova 等人(2011)為藉由於法國布列塔尼(Ploemeur, Bretagne)試驗場址之系列試驗井分別進



文獻回顧

行定流量抽水，藉由抽水改變地下水原始流場，與地溫梯度以進行被動式熱示蹤試驗，以各深度之溫度變化特徵化試驗井內之透水裂隙位置與其導水係數(transmissivity)並進行數值分析運算。Klepikova 等人(2014)於此進一步建立裂隙岩層跨井連通裂隙之傳熱模型。

在地下水污染場址調查時，地下水的流向扮演極為重要的角色，其對於後續的污染物調查與整治規劃影響甚劇，尤其在調查初期階段，如何在鑽井數量有限且距離分散的情形下，準確的判斷地下水流向將是一大挑戰。Pehme et al. (2013)設計一 thermal vector probe (TVP)，於 TVP 的中心設置加熱器，並於四周等距之位置裝設三個溫度感應器，透過中心加熱器的加熱及周圍溫度感測器之溫度量測，可針對井內特定深度之地下水流向與流速進行推估(圖 3)。由於 TVP 的概念僅能針對特定深度位置的地下水流向與流速進行量測，若將此概念應用於光纖溫度感測器，同時搭配複合式光纖的主動式加熱，將可同時獲得井下連續性的流向與流速資料，延伸光纖溫度感測器之應用範圍。

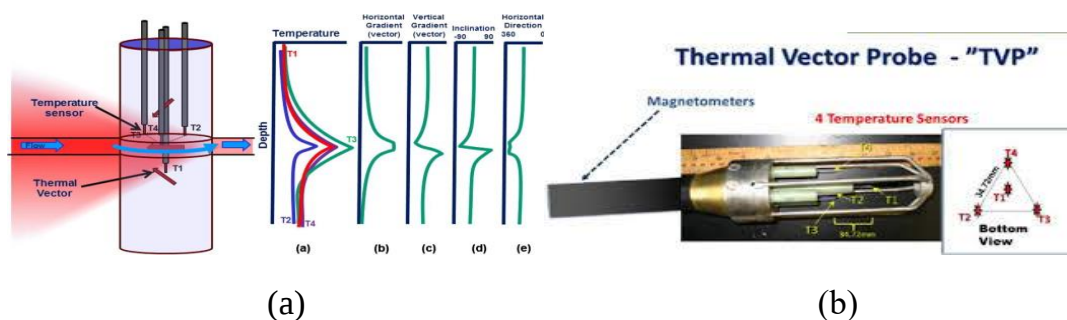


圖 3 (a)TVP 示意圖(b)TVP 儀器照片(摘自 Pehme et al., 2014)

不論是被動式或主動式的光纖量測方式，大部分的試驗均在裸孔的情形下進行，因為監測井貫穿多個含水層或裂隙，每個含水層內之地下水位不同，將導致井內產生垂向上的水流，水位形成一個混合的結果，進而造成透水區段的誤判(Sterling et al., 2005)，此外，若以主動式的光纖量測方式，井內溫度上升所產生的自然熱對流(free convection)亦將無法避免。雖然地下水監測井非裸孔狀態，但受限於經費，在監測井數量有限的情形下，往往在單一口井內設置長開篩，亦會造成上述之問題。為克服裸孔或長開篩所造成量測上之限制，往往以封塞之方式(雙封塞或單封塞)進行量測，然而，傳統的封塞方法需要重機械及人力的配合，且曠日費時。有鑑於此，Coleman et al.(2015)針對井下水流流向進行分析，參照不透水襯砌布之設定，提出柔性襯管地下技術(Flexible Liner Underground Technologies, FLUTE)，將井體內部進行封篩，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(圖 4)。

近年來，一種新興的材料，稱之為聚丙烯醯胺凝膠 (polyacrylamide gel, PAG)，



以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查開始嘗試用於井下封塞。依據 MacMinn et al.(2015)和 Hewitt et al.(2016)的研究顯示，聚丙烯酰胺的凝膠材料可承受適度的外部壓縮應力，調節凝膠材料的形狀和體積，從而降低孔隙率，從而降低填料的滲透性。PAG 在受到外部壓縮應力時，滲透率可大幅度降低至 10^{-16} m^2 ，(Grattoni et al., 2001; Oyen et al., 2014)。Klepikova et al.(2018)在實驗室進行砂箱實驗，以 PAG 混合水之後灌入模擬的井中，並以高精度溫度計量測溫度變化，其結果顯示，灌入 PAG 之後的井體，可有效的阻隔熱對流(圖 5)。綜合上述，若能將 FLUTE 與 PAG 兩種新興封井方式進行測試，經由實驗室測試與現地試驗確認其可行性與適用性，並優化封井方式與流程，廣泛的運用於土壤與地下水污染場址調查，將有助於之水文地質調查的解析能力。

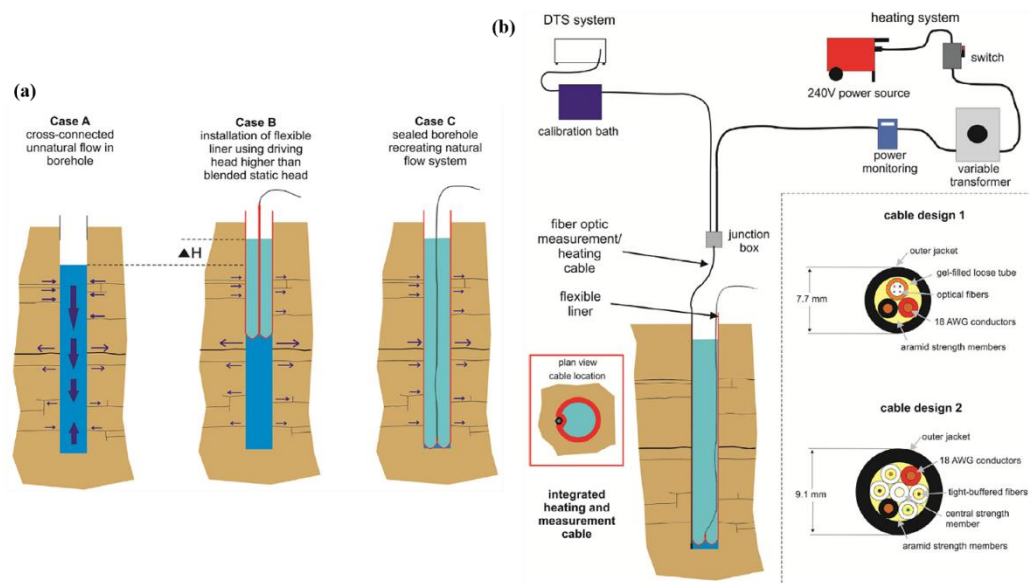


圖 4 DTS 搭配柔性襯管地下技術於井下分析之現地配置：(a)FLUTE 安裝與水流示意圖，(b)分散式溫度感測器與主動加熱系統(摘自 Coleman et al., 2015)

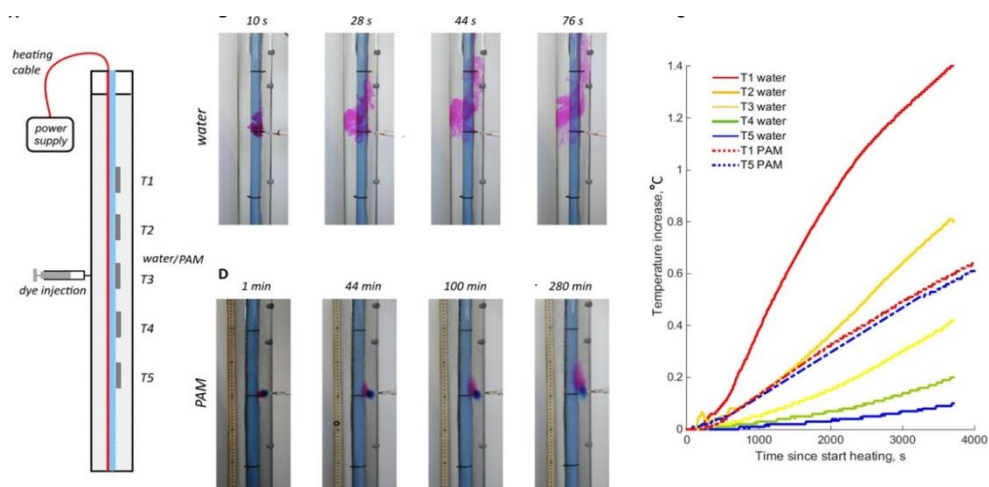


圖 5 聚丙烯醯胺凝膠(PAG)實驗室溫度阻絕試驗結果(摘自 Klepikova et al., 2018)



四、 研究方法與流程

4-1 分散式光纖溫度感測器量測原理

由於水文地質環境的非均質性，對於瞭解其複雜的水文循環與交互作用過程而言，研究區域在空間解析度上的需求已從數公分的尺度延伸至數百公尺，甚至數公里。然而，考量經費限制，依賴傳統感測器進行現地環境監測無法滿足研究需求。因此，尋找或研發能夠因應上述需求並滿足現地條件的環境感測器，將成為未來的主要趨勢之一。近年來，分散式光纖溫度感測器，全名為 fiber optical distributed temperature sensor (FO-DTS)，為一創新的量測技術，分散式光纖溫度感測器量測溫度的原理主要由雷射脈衝分析儀主機激發雷射光束傳遞至光纖纜線後，接收傳遞過程產生之散射訊號，進而估算沿著光纖的溫度分布。雷射光於光纖纜線內部傳遞時，多數雷射光在傳遞的過程中，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轉換 (其反射光子可能接收能量或喪失能量)，能階改變導致反射訊號產生散射 (scattering)。其主要有三種不同的散射：雷氏散射 (Rayleigh scattering)、布里元散射 (Brillouin 散射) 以及拉曼散射 (Raman scattering effect)。其中，雷氏散射的波長與入射光的波長相比並沒有改變；而布里元散射及拉曼散射則會有波長的變化 (圖 6)。

其中布里元散射為雷射光通過時的電磁力 (electromagnetic forces) 產生微妙的密度偏移所造成。這些密度變化以聲波 (acoustic waves) 或聲子 (phonons) 傳播，引起強烈的共振現象 (resonant phenomenon)。經由散射光的波長位移 (wave length shift) 與光纖纜線的聲速成比例，其中光纖纜線的聲速為光纖纜線密度的函數。因此，測量密度可用於確定溫度或應力的變化。而拉曼散射則為一種光子的非彈性散射現象，當反射頻率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)，當散射後頻率變低之訊號稱為史托克散射 (Stokes scattering)；散射後頻率變高之訊號則為反史托克散射 (Anti-stokes scattering)。史托克散射訊號與入射光強度之間具有線性關係；而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，可獲得光纖纜線在空間特定位置中所感測的環境溫度。假如以光纖纜線自雷射脈衝分析儀主機出發點為原點 ($z=0$)，在 t 時間下，光纖纜線在空間中距原點 z 之位置，其所感測之溫度計算如下：



以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查

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

式 1 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 $\gamma = \hbar \frac{\Omega}{k}$ [K]， $\hbar$ 為普郎克常數 (Planck's constant)， Ω 為史托克散射與入射雷射之頻率差， k 為波茲曼常數 (Boltzmann's constant)。 $\ln\left(\frac{P_s(z, t)}{P_{as}(z, t)}\right)$ 為史托克散射與反史托克散射訊號強度的比值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，隨著傳遞距離越長，能量衰減程度越高，此參數與光纖纜線本身品質有關，良好光纖纜線具有較小之衰減值。

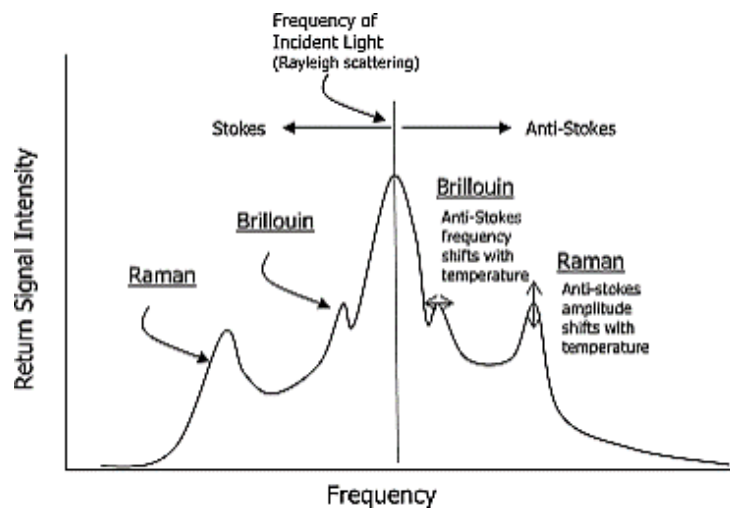


圖 6 散射訊號之頻率圖譜示意圖(摘自 Selker et al., 2006)

4-1-1 分散式光纖溫度感測器儀器

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，本研究選用 Silixa Ltd 所出產的 ULTIMATM-SDTS(圖 7)。其主機面板包括：光纖纜線跳線連接口、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纜線所反射的訊號，其工作溫度約為 +5°C~+40°C，量測最大距離可達 5 公里，溫度解析度達 0.01 度，空間解析度最小為 0.125 公尺，量測間隔為每 1 秒鐘可獲得一筆量測資料，於現地量測溫度時，外接置螢幕後，可即時觀看量測資料。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



研究方法與流程

置纜線長度為 2 公尺；量測溫度範圍為 $-50^{\circ}\text{C} \sim +250^{\circ}\text{C}$ ；溫度解析度則為 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ，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。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 $-5^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ ，溫度精準度為 $\pm 0.002^{\circ}\text{C}$ ；量測解析度則為 $< 0.00005^{\circ}\text{C}$ ；量測間隔可於 1 秒內量測 2 筆資料(2Hz)，精準度越高的外部獨立溫度計可以增加 DTS 溫度率定之可靠性。

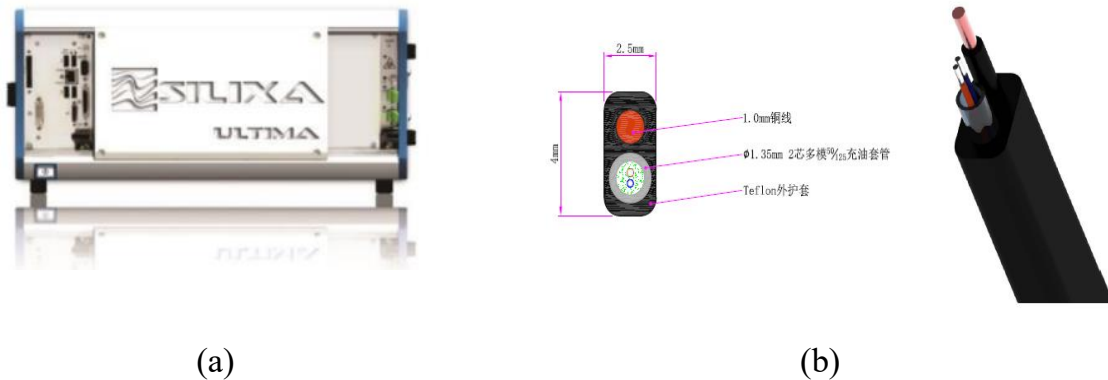
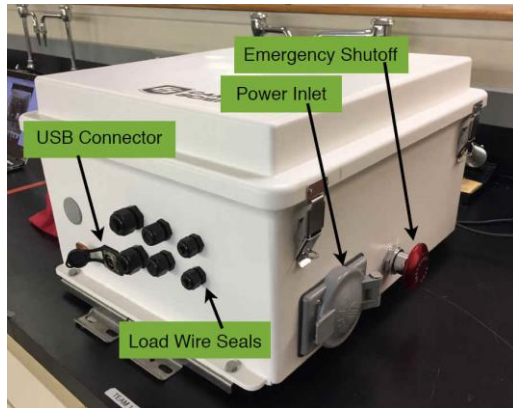


圖 7 (a)雷射脈衝分析儀主機 Ultima, Silixa Ltd，(b) 合式光纖纜線剖面示意圖（祥林科技，台灣）

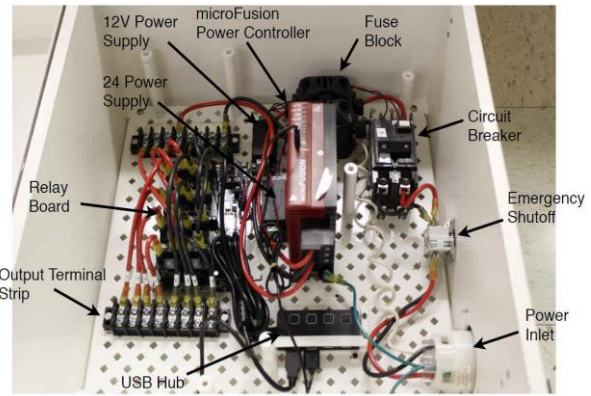
主動式光纖溫度感測器主要是將雷射脈衝分析儀主機搭配加熱控制系統(heating pulse controller, HPC，圖 8)一併進行試驗。光纖加熱控制系統主要是透過一般的電纜線與複合式光纖(如圖 8b 所示，光纖與銅線一起包覆在纜線內)進行連接，加熱控制系統由單相矽控整流器電源控制器、斷路器、保險絲匣、12V 及 24V 電源供應器、繼電器模組、輸出端子板等元件組成，而所有的元件都安裝於可攜式的防水箱子中，其主要通過控制信號輸入控制串在迴路中的矽控整流器模組，經由改變迴路中電壓的導通或阻斷，由此達到調節電壓或功率。當 HPC 啟動後，通電的複合式光纖即形成一線性熱源透過串接在輸出端子板的加熱銅線與光纖電纜內的銅線的連接通電產生熱能。HPC 可依據不同的量測環境設定不同的加熱功率與加熱時間，亦可針對複合式光纖之特定區段進行通電加熱，在使用上具有非常大的彈性。



以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查



(a)



(b)

圖 8 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



研究方法與流程

4-1-2 光纖纜線配置

使用分散式光纖溫度感測器在現地井下進行量測時，使用配置如圖 9 所示。雷射脈衝分析儀主機經由 E-2000/APC 接頭連接光纖纜線後，將兩段相同長度（至少為單一量測點之 10 倍為基準）之纜線繞圈網綁後，分別置入於兩個不同溫度的保溫桶中，整個測量過程中溫度需維持恆溫的狀態，而兩個保溫桶內分別置入冰塊水（cold bath）及熱水（warm bath），將保溫桶內的溫度保持在約 0°C 及 40°C （高於現地量測溫度範圍即可），纜線在離開保溫桶後，依據現地井（或規劃量測）的深度，將纜線垂直置入於井中直到觸碰到井底再繞回來形成一個迴圈的方式，之後，將離開井中的纜線尾端取與前面兩保溫桶內相同長度之纜線繞圈網綁後置入第三個保溫桶內，桶內水為則環境溫度（ambient bath）即可，最後將熔接過後的尾端放入盒中保護，以免於現地試驗時受到損壞。而佈設時雷射脈衝分析儀主機另含有兩組外部連接 PT100 溫度感測器，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。為求更精準之溫度量測資料以增加率定精確度，額外搭配外部獨立溫度計，如微型水溫量測儀（RBRsolo³T），精準度越高的實體溫度計可增加率定 FO-DTS 量測溫度之可靠性。

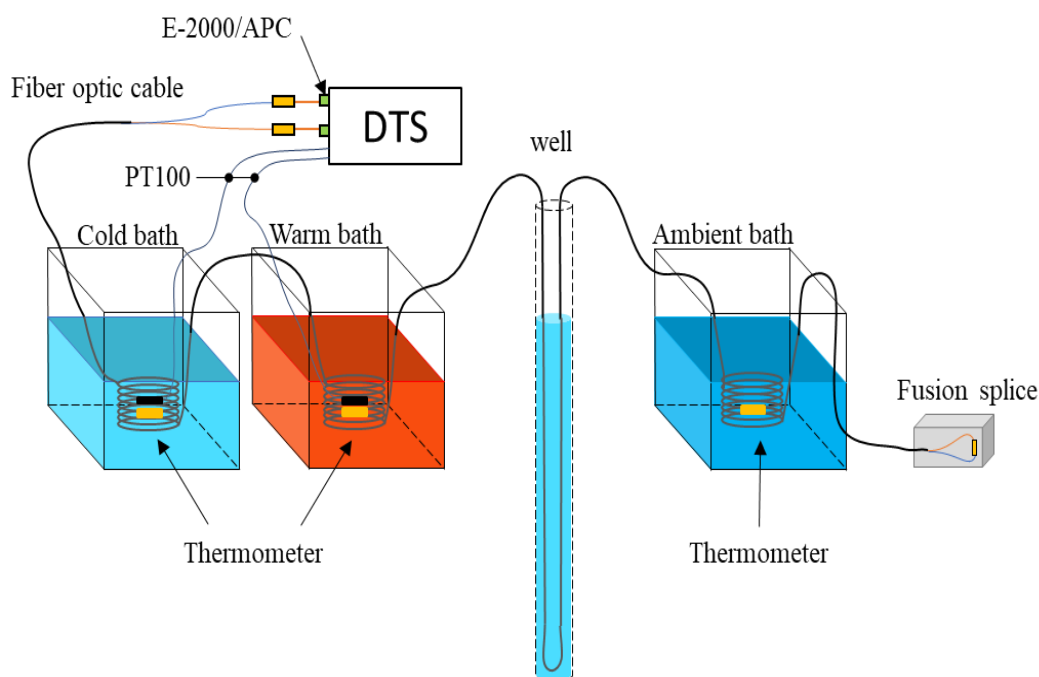


圖 9 現地分散式光纖溫度感測器佈設示意圖

4-2 TV-DTS 流速與流向測定儀

受限於現地監測井數量之限制，往往無法於特定地點進行跨孔熱示蹤劑試驗，因而導致無法直接確認地下水流向，使得後續污染物調查或整治上之困境。為克服此一難題，並進一步獲得地下水流向資訊，本研究針對主動式加熱 DTS 進行改



以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查

良，自製研發設計單井流速與流向光纖溫度測定儀(稱之為 thermal vector – DTS, TV-DTS，已獲得發明專利：發明第 1820721 號)。TV-DTS 以光纖取代傳統溫度感測器，搭配線性熱源的加熱與熱源周遭的光纖佈設，僅利用單一口監測井，即同時獲得井下特定深度之流速與流向。TV-DTS 的設計如圖 10 所示：垂直條設於中心點的為複合式光纖，可同時進行井內水溫加熱與溫度量測，距複合式光纖四周相同的距離則佈設一般光纖，依據實驗需求與井徑大小，垂直佈設 4 條光纖。

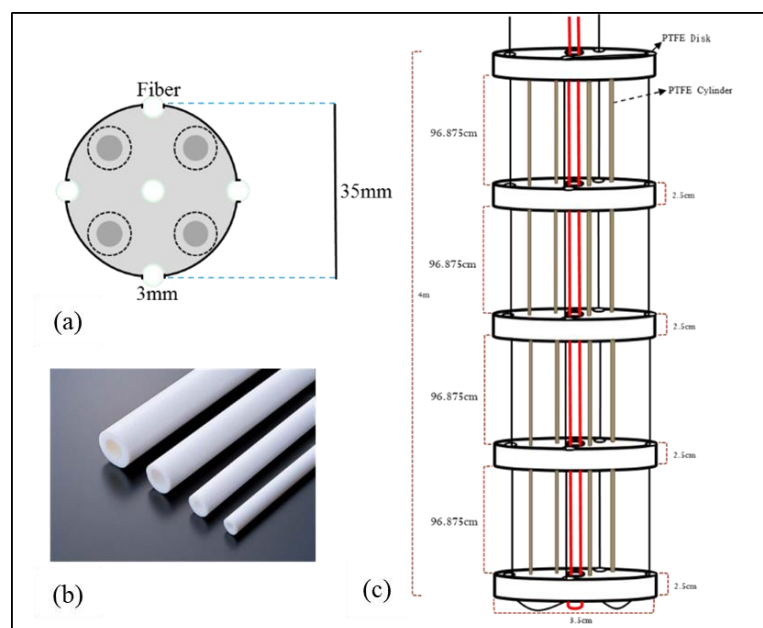


圖 10 TV-DTS 設計概念圖：(a)TV-DTS 固定圓盤 (b) TV-DTS 支架(c)光纖固定於聚四氟乙烯支架之示意圖

將整個 TV-DTS 置放於監測井中，當中心位置之複合式光纖加熱釋放熱能時，周遭不同位置之光纖因地下水流向與流速之差異，導致所接收到之熱能不同，而反應在光纖所量測到之溫度變化亦不相同，根據溫度差異可進一步推不同深度位置之地下水流速與確切之地下水流向，量測結果如圖 11 所示。

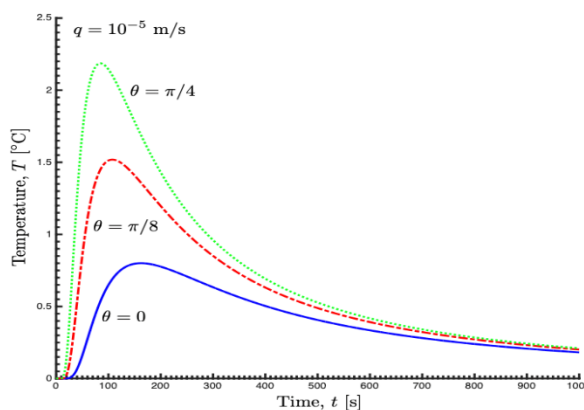


圖 11 TV-DTS 不同方位之溫度變化(摘自 Zlotnik et al., 2017)



4-3 TV-DTS 熱傳輸解析解

在進行 TV-DTS 的單井流速與流向解析時，藉由熱-水流傳輸解析公式(Bakker et al., 2015)可用以表示熱水在含水層內傳輸時與地下水流速之關係。本計畫採用 Zlotnik and Tartakovsky(2018)所提出的解析進行分析，假設一水平向延伸的地層中，含水層呈現垂直分布，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(Anderson, 2005；Bear, 1972；Ciriello et al., 2015；Ingebritsen et al., 2006；Kluitenberg and Warrick, 2001):

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k\nabla T) - c_w\rho_w q \cdot \nabla T + F \quad \text{式 2}$$

式 2 中， $T(x,t)$ 為 $x=(x,y,z)^T$ 處之溫度，時間為 t ， k 為熱傳導係數， c_w 為水之比熱容， ρ_w 為水之密度，整體熱容以 ρc 統一綜合計算(Bear, 1972)，如式 3 所示：

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

式 3 中， c 為整體熱容， ρ 為整體密度， n 為孔隙率。其中 c_s 為水之比熱容， ρ_s 為水之密度。在式 2 中 $F(x,t)$ 為設定之熱源通量，而 $q=(q_x, q_y, q_z)^T = -K\nabla h$ 為達西流速，其中 K 和 h 分別為地下水層之水力傳導係數與水頭高。為方便計算以進行後續的座標轉換，將式 2 簡明列式為：

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (D\nabla T) - V \cdot \nabla T + f \quad \text{式 4}$$

其中：

$$D = \frac{k}{c\rho} = \frac{nk_w + (1-n)k_s}{nc_w\rho_w + (1-n)c_s\rho_s} \quad \text{式 5a}$$

$$V = \frac{c_w\rho_w}{c\rho} q \quad \text{式 5b}$$

$$f = \frac{F}{c\rho} \quad \text{式 5c}$$

式 5 中， D 為熱延散係數，其代表了熱在水層中不同方向的沿散情形：水平向與垂直向的沿散量，分別由 α_T 以及 α_L 表示。而在飽和含水層中沒有流動的情形下含水層的熱傳導係數(k_0)與岩層的熱傳導係數(k_s)以及水的熱傳導係數(k_w)有關：若 $k_0 = k_w^{1-n}k_s^n$ ，則 $D_0 = k_0/c\rho$ 。以上熱傳導係數或熱延散量源自於含水層中的熱對流和熱延散之物理特性，且這些水文參數的參數計算值可由試驗獲得。

Zlotnik and Tartakovsky(2018)透過座標轉換與 Green's function，將熱延散視



以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查

為一張量，在不同的熱源條件下，推導解析解公式。為了設定加熱點和感測點位置，將其置於笛卡爾座標系中進行計算，將該座標系的 z 軸設定指向上方。由於達西流速向量通常不會與垂直方向對齊，因此熱傳導係數為全張量，顯示其存在於一個主座標系。其中熱延散張量 $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ 的所有非對角分量皆為零，該坐標係是通過將坐標 $\tilde{z}$ 與流向對其所獲得之，因此 $q = (0, 0, q)^T$ 。在此坐標系中，熱延散張量 D 的座標形式為：

$$D = \begin{pmatrix} D_T & 0 & 0 \\ 0 & D_T & 0 \\ 0 & 0 & D_L \end{pmatrix}, D_T \equiv \frac{K_T}{c\rho} = D_0 + \alpha_T V, D_L \equiv \frac{K_L}{c\rho} = D_0 + \alpha_L V, V = \frac{c_w \rho_w}{c\rho} q \quad \text{式 6}$$

若帶入式 2 進行簡化則為：

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D_T \left(\frac{\partial^2 T}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial \tilde{y}^2} \right) + D_L \frac{\partial^2 T}{\partial \tilde{z}^2} - V \frac{\partial T}{\partial \tilde{z}} + f \quad \text{式 7}$$

此方程式比式 2 更容易解析求解(Cardiff et al., 2010 ; Zlotnik et al., 2017)。為確認現地系統的水流方向，需要在這兩個座標系統之間建立場座標系 (x, y, z) 到主座標系 $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ 轉換關係(圖 12)：

$$\begin{pmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ \tilde{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta (x \cos \varphi + y \sin \varphi) - z \sin \theta \\ -x \sin \theta + y \cos \varphi \\ \sin \theta (x \cos \varphi + y \sin \varphi) + z \cos \theta \end{pmatrix} \quad \text{式 8}$$

另一方面，Zlotnik and Tartakovsky(2018)透過笛卡爾坐標系統將 z 座標垂直定向後，將熱延散視為一張量，在設定固定點熱源(E)及有限的加熱時間期限(t_p)推算其溫度分佈的解析解：

$$T(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, t) = \begin{cases} T_p(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, t) & 0 \leq t \leq t_p \\ T_p(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, t) - T_p(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, t - t_p) & t \geq t_p \end{cases} \quad \text{式 9a}$$

而在有限的加熱時間之溫度變化 T_p 為：

$$T_p(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, t) = \frac{E/(\rho c)}{8\pi D_T t_p R} e \tilde{z} [e^{-\bar{R}} \operatorname{erfc}(\frac{R-Vt}{2\sqrt{D_L t}}) + e R^{-} \operatorname{erfc}(\frac{R+Vt}{2\sqrt{D_L t}})] \quad \text{式 9b}$$

其中 R ：

$$R = \sqrt{\frac{D_L}{D_T} (\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2) + \tilde{z}^2}, \bar{z} = \frac{\tilde{z}V}{2D_L}, \bar{R} = \frac{RV}{2D_L} \quad \text{式 9c}$$

在線性熱源及瞬間的加熱條件下(instantaneous line source)，其溫度分佈的解析解如下，同時在推估不同達西流速情形下，所獲得不同方位的溫度反應曲線如圖 13(所示)。



研究方法與流程

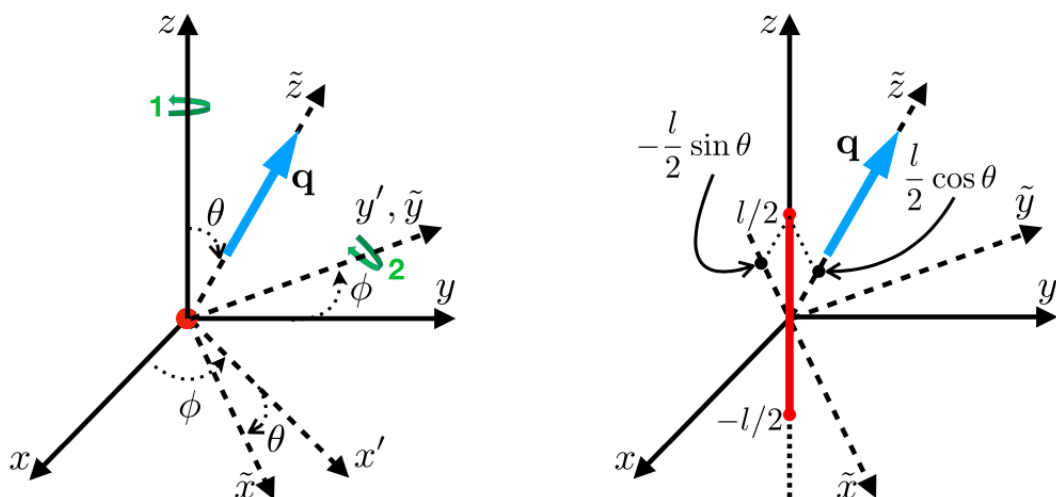


圖 12 座標轉換：(a)點熱源(實線與虛線分別為 (x,y,z) 與 $(\tilde{x},\tilde{y},\tilde{z})$ 正交座標系統。變化後的 $\tilde{z}$ 方向指向達西通量(藍色箭頭)。座標系統的轉換主要透過兩次座標軸旋轉所完成，(1)沿著 z 軸逆時針旋轉角度 ψ ，將 (x,y,z) 座標系統轉換為 (x',y',z') ，(2)沿著 y' 軸逆時針旋轉角度 θ ，並以向量 q 對齊新 z' 軸。其中， $\tilde{x},\tilde{z}$ 與 z 軸坐落於同一平面，座標軸原點為點熱源)，(b)線性熱源(長度 l 的線性熱源沿著 z 方向坐落於座標系統 (x,y,z) 中， $(z = -l/2, z = l/2)$ ，在座標系統 (x',y',z') 中，連接原點兩端的點為 $(-l/2\sin\theta, 0, l/2\cos\theta)$ 與 $(l/2\sin\theta, 0, -l/2\cos\theta)$) (摘自 Zlotnik and Tartakovsky, 2018)

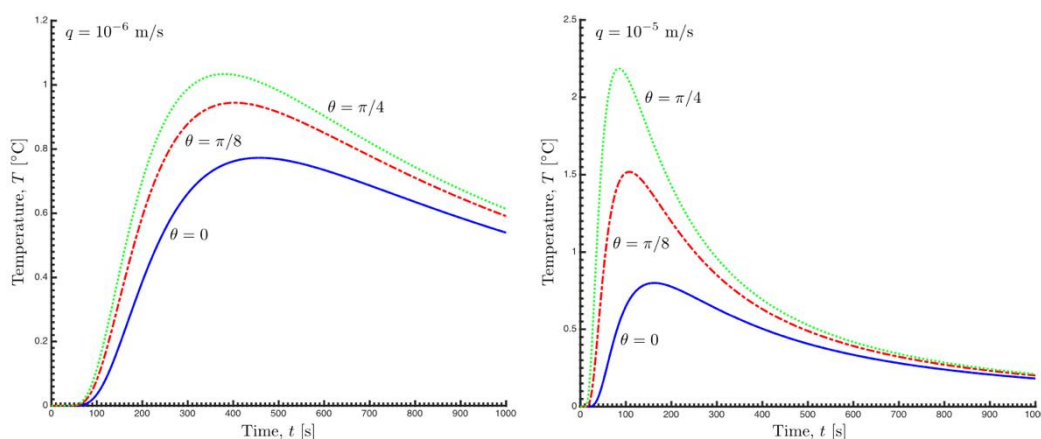


圖 13 溫度反應曲線(點位 $x=0.03, y=0, z=0.03$)，(a)達西通量為 10^{-6} m/s，(b) 達西通量為 10^{-5} m/s(摘自 Zlotnik and Tartakovsky, 2018)

4-4 光纖纜線材質、熱傳輸參數及流速解析

除前一小節之解析解量化地下水流速與流向之外，本計畫更進一步採用主動式分散式溫度感測工具箱(Active distributed temperature sensing toolbox, A-DTS Toolbox)同步進行分析。A-DTS Toolbox 是由 Simon 和 Bour (2022)所建置開發，



以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查可去除光纖纜線批覆層的熱傳導效應，並同時針對井下各深度的熱傳導係數及水流速度進行推估，以及進行參數的不確定性分析。

圖 14 為光纖加熱期間某特定位置之典型熱反應曲線(thermal response curve)，溫度變化(ΔT)隨時間的演變(黑線)及其對時間導數(黑色虛線)均以對數圖表示。試驗初期所測得的溫度變化(ΔT_{FO})取決於加熱光纖纜線批覆層的熱傳輸特性，由於產生的熱能存儲在光纖纜線內，導致溫度大幅升高(Simon et al., 2021)，在分析過程中應該予以濾除。一旦熱能自光纖纜線內傳遞至光纖纜線周圍的地質材料時，含水層的多孔介質將開始主導熱能傳輸，並以熱傳導為主(conduction affected)，因此，在熱傳導主導影響期間，溫度變化同時受到纜線中的儲熱以及多孔介質中熱傳輸的影響。

當 $t > t_c$ 時，加熱光纖纜線本身的儲熱不再影響溫度變化，此時，溫度上升(ΔT_{PM})完全由多孔介質中的熱傳導(conduction)和平流(advection)主導。溫度上升可分為兩個不同的階段：第一階段自 $t=t_c$ 到 $t=t_d$ 之間，以熱傳導主導 (conduction-dominant)，在此階段可以觀察到溫度逐漸升高(圖 14)，溫度升高與地下水流量無關，完全由多孔介質的熱傳導係數所主導。第二階段自 $t > t_d$ ，以熱平流主導 (advection-dominant)，溫度上升偏離熱傳導時的狀態，溫度上升斜率逐漸下降，表示熱平流主導階段的開始。隨著加熱時間的持續，熱平流限制了溫度上升幅度，導致後期溫度變化逐漸穩定，在溫度穩定並達到最大值 ΔT (具有斜率為 0 之 s_3 的直線)上，表示主動加熱所注入的額外熱能已透過平流完全達到平衡(穩態條件)，此時，地下水流速的快慢主導了平衡時溫度的高低。對於固定熱能供給及給定的熱傳導係數中，較高的 ΔT 值可能與較低的地下水通量有關聯，反之亦然(Simon et al., 2021)。

由於 ΔT_{FO} 在 $t > t_c$ 的階段是處於穩定狀態，僅受光纖加熱熱能與光纖纜線特性影響，因此 ΔT_{FO} 數值可以在 ΔT_{PM} 演變出來前利用數學方法先估計出來，一旦設定 ΔT_{FO} 之後，就可以使用移動瞬時線性熱源 (Moving Instantaneous Line Source, MILS) 模型(Jaeger 和 Carslaw, 1959)，通過考慮初始熱平衡 T_0 ，以及沿著 x-y 方向上加熱光纖線性熱源之熱反應 $\Delta T_{PM}(\Delta T=T-T_0)$ 獲得以下方程式：

$$\Delta T_{PM}(x, y) = \frac{Q}{4\pi\lambda} \exp \left[\frac{qx}{2D_t} \frac{c_w \rho_w}{c\rho} \right] \quad \text{式 10}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp \left[-\psi - \left(\frac{x^2+y^2}{D_t} \right) \frac{q^2}{16D_t\psi} \frac{c_w^2 \rho_w^2}{c^2 \rho^2} \right] d\psi}{4tD_t} \quad \text{式 11}$$

式中， q 為是給定位置的 x 方向地下水通量(或特定流量)(m/s)； Q 是恆定加熱速率功率(W/m)；坐標 x 和 y 對應於距熱源的距離，而熱源位於 $x=0$ 和 $y=0$ 處；



研究方法與流程

$c\rho$ 為含水層之體積熱容($\text{J}/\text{m}^3/\text{K}$)而 $c_w\rho_w$ 為水之體積熱容($\text{J}/\text{m}^3/\text{K}$)； D_t 為熱延散係數(m^2/s)； λ 為體積熱傳導係數($\text{W}/\text{m}/\text{K}$)； Ψ 為變量。

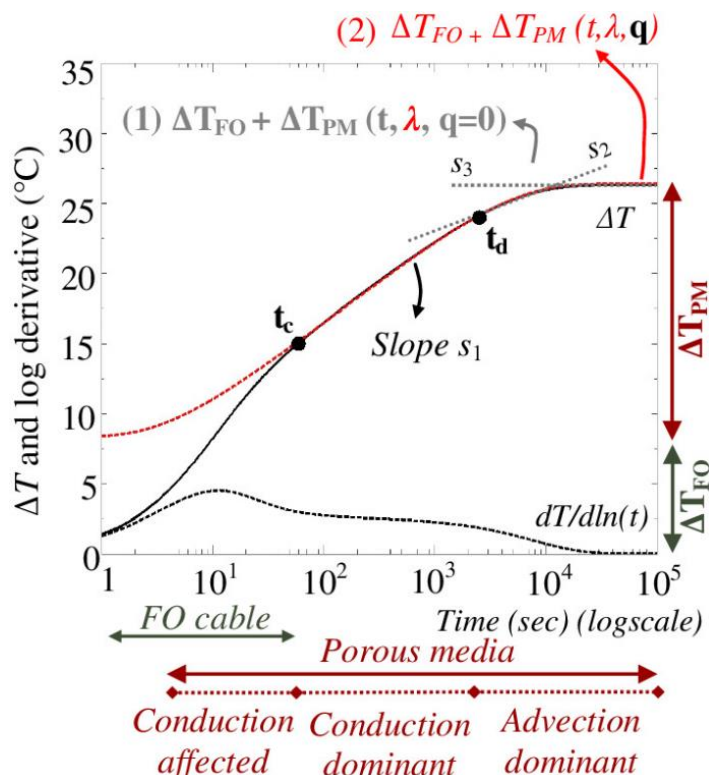


圖 14 主動式光纖溫度感測器(ADTS)測量期間的熱反應曲線(黑線)(摘自 Simon et al., 2021)

4-5 FLUTe 封井材料

FLUTe 全名為柔性襯管地下技術(Flexible Liner Underground Technologies, FLUTe)，使得井下封塞技術的現地執行更加簡易，選擇性更加多元，改善傳統的封塞技術中遇到的限制與困難。柔性襯管的安裝示意圖如圖 15 所示，將柔性襯管推入井中，同時伴隨著水體的注入，透過水體的重量將襯管的向下推擠，使得向下佈置的過程較為簡易。襯管用於裸孔封塞時，利用管內外所產生的壓力差進行封井，使得柔性襯管可緊密的貼合於井壁，防止不同含水層水頭差異所造成的交叉混層，以達分辨不同深度的地下水含水層之間的差異 (Pehme et al., 2010；Klepikova et al., 2011)。

柔性襯管搭配主動式加熱光纖一同安裝於井內，由於襯管的封塞效果，使得光纖與井壁緊密貼合，同時避免了井內的垂直對流，此外，加熱試驗進行時產生的自然對流(free convection)或垂直水流導致的量測誤差同樣因襯管的緊密貼合而有效的阻絕此現象。Coleman et al. (2015)以加熱方式在裸孔下進行試驗，並同時使用 FLUTe，比較使用前後之差異，研究結果顯示，在使用 FLUTe



以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查

的情形下，可有效的判釋出細微的構造。以 FLUTe 進行封塞後，光纖所量測到之溫度更能反應特定深度含水層中地下水流經光纖時所感測之地層溫度變化，而柔性襯管與主動式光纖的合併應用，將有助於大幅增進量測溫度之代表性與準確性，提昇地下水流速之解析能力與透水區段之判釋能力 (Pehme et al., 2013)。

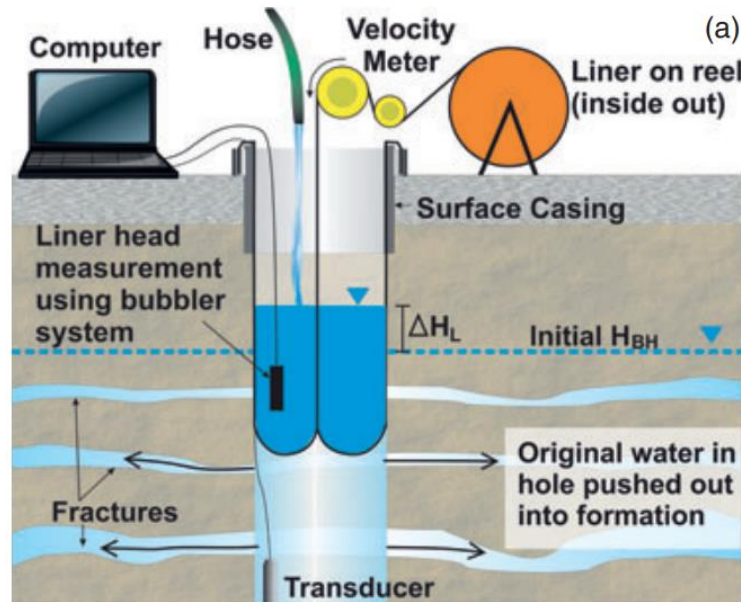


圖 15 FLUTe 安裝示意圖(Keller et al., 2013)

4-6 PAM 封井材料

PAM 的全名為聚丙烯醯胺(polyacrylamide, PAM)，是一種無色無味且無毒的高吸水性聚合物(圖 16 a)，在大量吸水分後，進而形成聚丙烯醯胺凝膠(polyacrylamide gel, PAG)，同樣為透明無色(圖 16 b)，其最大的特色為具有親水性很高的官能基，例如： $-\text{COOH}$ 、 $-\text{OH}$ 、 $-\text{CONH}_2$ 等，能與水產生氫鍵，使得此類型聚合物對水的吸收能力相當良好，可吸收量可達本身重量的 200 至 500 倍(Bhardwaj et al., 2007)。此類化合物的用途極為廣泛，食品工業中可作為保水添加劑使用，在建築方面能用於固化建築材料，在醫學方面用於醫學美容、組織工程學及藥物輸送，在農業方面用於土壤灌溉(Wei and Durian, 2014)，幫助土壤的水分儲存，利於農作物的生長。此外，其還廣泛用於石油和天然氣工業中，能在鑽井時密封全部或部分導水裂縫(Chauveteau et al., 2000; Elsharafi and Bai, 2016; Simjoo and Koohi, 2009)。

此化學材質的密度與水極為相近，設置於井中時，不會受到重力影響而向井的深處堆積導致阻塞，此外，當 PAM 吸收了水份，其熱傳導係數會近似於水的熱傳導係數(Davidson and Sherar, 2003; Zhang et al., 2011)。PAM 在未被施加外部壓力時，其滲透性類似於礫石，導水性佳，流體可自由流動；當適當

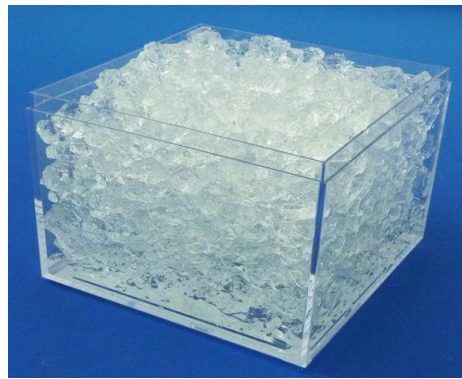


研究方法與流程

對其施加壓力的情況下，其孔隙率將大幅度下降，導致滲透性(permeability)亦迅速降低(Klepikova et al., 2018)，而滲透性的降低將抑制井內的自由對流，以達到封井的效果。將 PAM 結合主動式加熱光纖進行封井加熱試驗，其效果與 FLUTe 相似，能夠有效降低監測井中產生垂直水流在不同透水區間的交叉水流及因加熱所造成的自然對流(free convection)，進而影響溫度變化上之解析，造成透水區段之錯誤判釋。



(a)



(b)

圖 16 (a)PAM 顆粒，(b)PAG

(資料來源: <https://www.indiamart.com/proddetail/acrylamide-polyacrylamide-15419531197.html> ;

<https://www.homesciencetools.com/product/polyacrylamide-waterless-crystals/>)



以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查

4-7 研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖）

工作項目	年月	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	備註
模場地質與水文資料蒐集與彙整，並進行現勘與試驗規劃														
選取至少四口不同特性之監測井，進行 TV-DTS 試驗							※			※				
單井之熱傳輸解析解分析井下流速與流向							※				※			
研析光纖材質與岩層熱傳輸參數對於流速推估之影響														
優化光纖佈設方式、加熱時間、加熱功率與加熱影響半徑分析														
優化 TV-DTS 現地試驗之流程												※		
進行柔性襯管 FLUTe 封井材料室內實驗，評估其可行性							※					※		
進行聚丙烯醯胺凝膠 PAG 封井材料室內實驗，評估其可行性							※					※		
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. 完成二口不同特性監測井進行 TV-DTS 試驗 2. 完成二口單井之熱傳輸解析解分析井下流速與流向 3. 完成柔性襯管 FLUTe 封井材料室內實驗設置 4. 完成聚丙烯醯胺凝膠 PAG 封井材料室內實驗設置												



研究方法與流程

	成果	1. 完成四口不同特性監測井進行 TV-DTS 試驗 2. 完成四口單井之熱傳輸解析解分析井下流速與流向 3. 優化 TV-DTS 現地試驗之流程 4. 完成柔性襯管 FLUTe 封井材料室內實驗評估可行性 5. 完成聚丙烯醯胺凝膠 PAG 封井材料室內實驗評估可行性 6. 撰寫第一年期末報告
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。 4、以12個月作規劃，其中期中報告書初稿提送要件需達計畫執行進度50%以上，成果報告書初稿需於計畫結束前1.5個月提送。		



以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查

五、試驗場址概況

5-1 場址背景

本研究計畫所選定之地下水污染場址位於屏東潮州新埤鄉萬隆段，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，污染物包括：1,1-二氯乙烯、四氯乙烯、三氯乙烯及 1,1,2-三氯乙烷等污染物。此場址於 94 年 1 月 1 日公告地下水受污染使用限制地區。

歷年於此研究地區(新開寮地區)調查計畫中(圖 17)，自民國 89 年開始設置監測井，並逐步向外延伸，直至民國 109 年，於區域內的 34 個位置設置監測井，其中 10 個點位為雙井管之設置，總共有 44 口地下水監測井，井深介於 40-120m。本計畫預計使用民國 99 年與 100 年設置之雙井(T00226 與 T00239)及民國 106 年至民國 109 年所設置之監測井。區域內台糖各農場之水文地質資料可知(圖 18)，林邊溪北岸地質由東向西主要由礫石層偶夾黏土層組成，至南岸農場之後開始於地表下 10 餘公尺處出現較明顯之灰色黏土層並往西逐漸開始區分為第一及第二含水層，此地質現象與場址區域地質調查結果相同；而在場內農場之灰色粉土質黏土之厚度約 60 公尺左右，往西逐漸遞減，於三西和農場及東港間逐漸變為砂層與黃泥夾黃色黏土互層。依據鑽井資料顯示地表下 50 公尺地質主要以礫石層為主，場址東南方之礫石層粒徑較大逐漸往西北方向延伸變小，較明顯之黏土層主要出現於場址之西北側，深度約地表下 20 公尺左右，依據林邊溪北岸地質資料研判，本計畫場址區域極可能為林邊溪沖積扇第一及第二含水層之區分點。

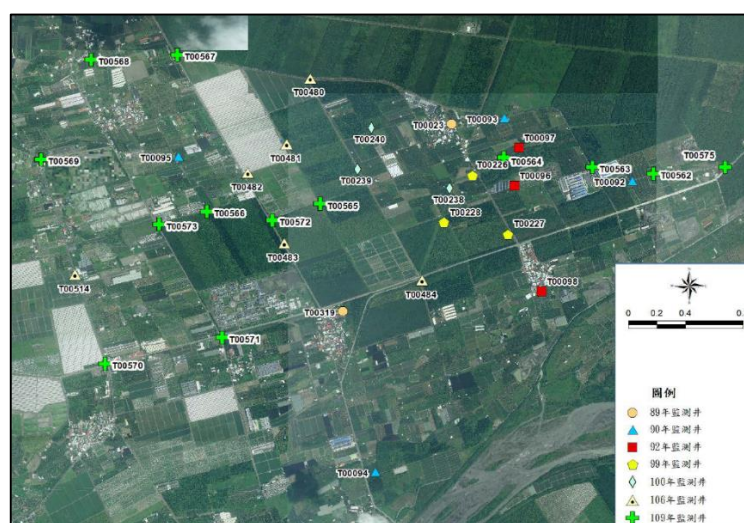
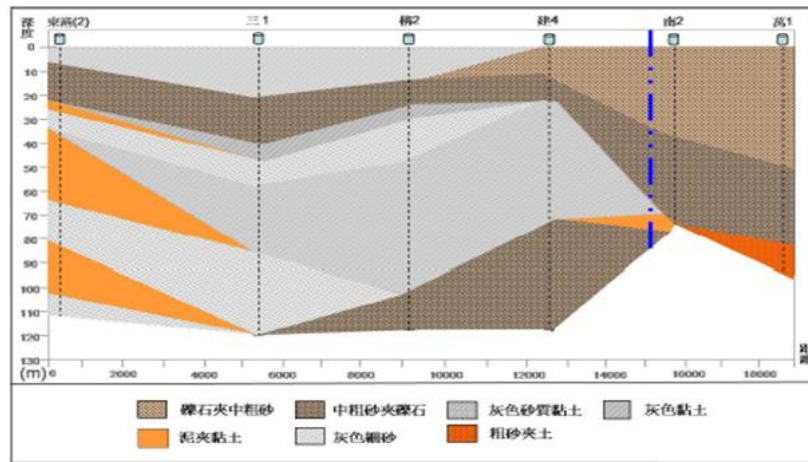


圖 17 污染場址監測井分布圖(摘自屏東縣政府環境保護局)



試驗場址概況



備註：本圖由右至左代表萬隆、南岸、建興、橋內、三西和農場至東港。

圖 18 地質剖面圖(摘自屏東縣政府環境保護局)

5-2 試驗井介紹

本計畫預計於潮州之汙染整治場址進行，針對當地的觀測井進行流速流向之推估，並進行 FLUTE 的相關測試，目前本計畫已針對井 T00226，井 T00239（雙井設計），井 T00483 以及井 T00571 進行試驗，四口井皆為 2 吋之水井。T00226 之井深為 81.1 公尺，開篩段位於 75.1-81.1 公尺，根據地層調查結果確認此井之水力傳導係數為 1.17×10^{-4} 公尺/秒；T00239 井深為 80.48 公尺，開篩位置位於底部的 71.48-80.48 公尺，水力傳導係數為 1.173×10^{-4} 公尺/秒；T00483 井深為 80.55 公尺，開篩位置從 20.55-80.55 公尺，水力傳導係數為 6.1×10^{-6} 公尺/秒，T00571 井深為 89.335 公尺，開篩位置從 0.9-89.33 公尺，水力傳導係數為 2.681×10^{-6} 公尺/秒。

試驗井中 T00571 的岩心組成如圖 19，井深 56 公尺以上由大範圍礫石沙夾粉土組成，56 公尺至 80 公尺間為灰色黏土夾礫石砂構成，80-88.93 公尺則由棕色粉土/黏土&中細沙夾礫石組成；井 T00483 的岩心組成中，深度 25 公尺以上、27-34.5 公尺以及 39-63 公尺皆為礫石夾中細沙&粉土組成，25-27 公尺及 63-80.6 公尺為黃色黏土與礫石互層，井的中段位置存在小範圍的黃棕色黏土。由於井 T00226 與井 T00239 缺乏岩芯紀錄，故無提供相關資訊。

本計畫已完成井 T00571 與井 T00239（雙井）的 TV-DTS 試驗；井 T00239 與井 T00226 的單井加熱試驗；井 T00571 井與井 T00483 的 FLUTE 現地測試。下一章節將針對室內測試與現地試驗結果進行說明。



以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查

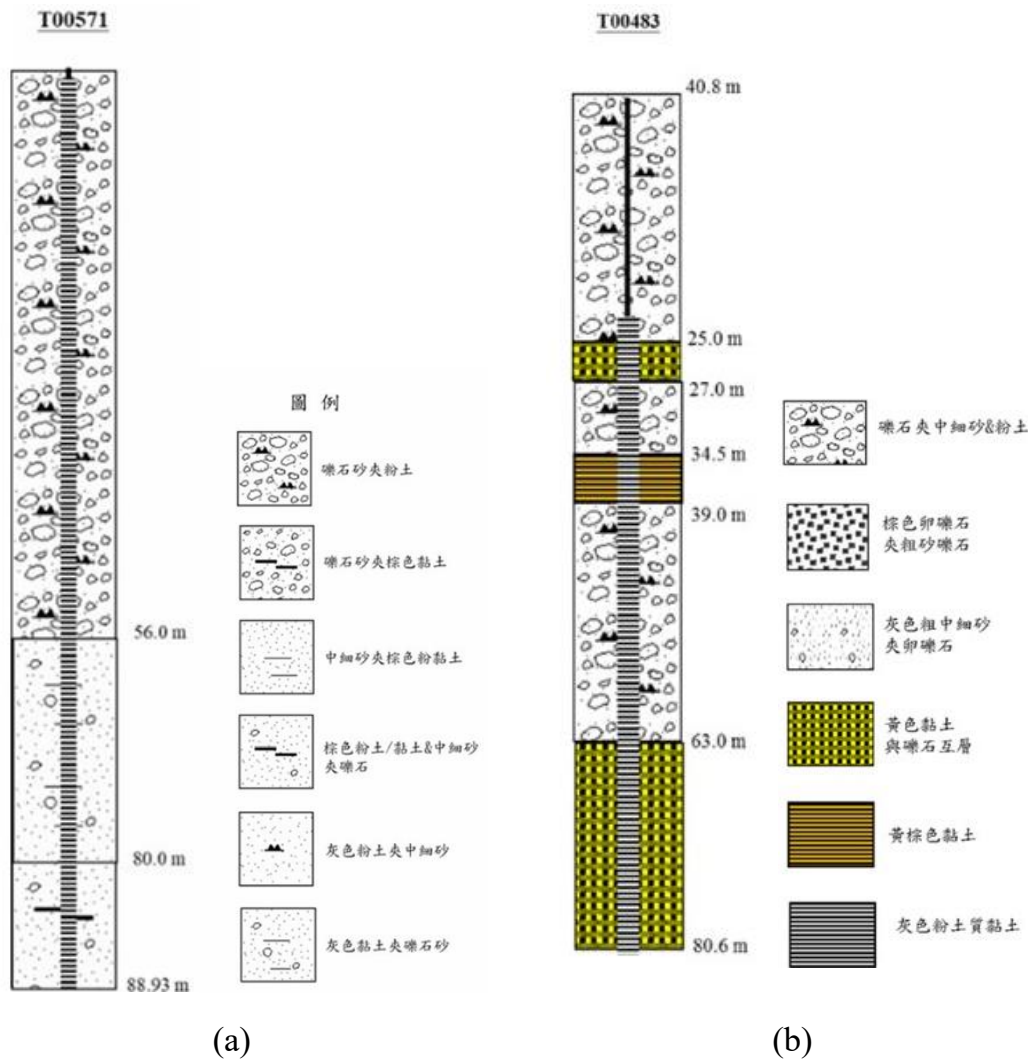


圖 19 岩芯紀錄： (a)井 T00571、(b)井 T00483



六、 結果與討論

6-1 單井加熱試驗溫度剖面量測結果

6-1-1 期中報告已完成工作項目

本計畫上半年已進行 T00239 及 T00226 之單井加熱試驗，根據分析結果顯示，較高透水性的地層，地下水流速較快，會使得熱量不易累積，溫度上升緩慢；於回復過程中，較快的流速會使溫度回復速度加快；T00239 的試驗結果顯示，深度 77.5~80.48 公尺溫度上升緩慢，為最透水之區段；在深度 76~80 公尺則為最不透水區段，熱能較易累積，因此升溫過程較快速、且升溫幅度也較大(圖 20)。T00226 監測井的試驗結果顯示，深度 37~44 和 57~60 公尺在試驗中呈現較為緩慢的升溫，有著較高之透水性；而深度 61~69 公尺透水性最差，其次為 45~54 公尺，在試驗中具有較高的升溫表現，透水性差因此受到地下水流影響較小，造成明顯的升溫結果(圖 21)，詳細之說明分析請參見期中報告第 6 章的結果與討論。

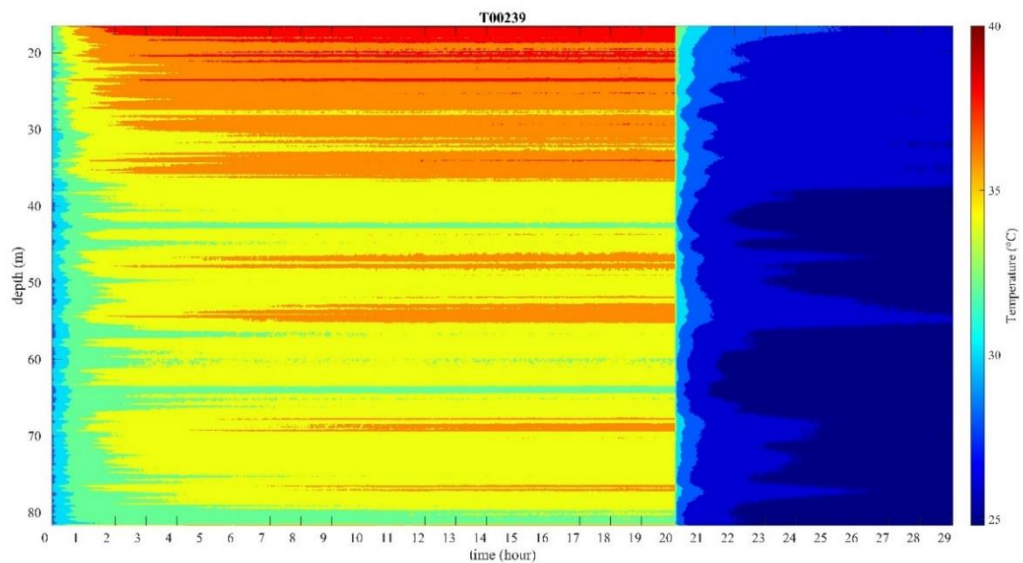


圖 20 T00239 加熱試驗溫度上升與回復過程



以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查

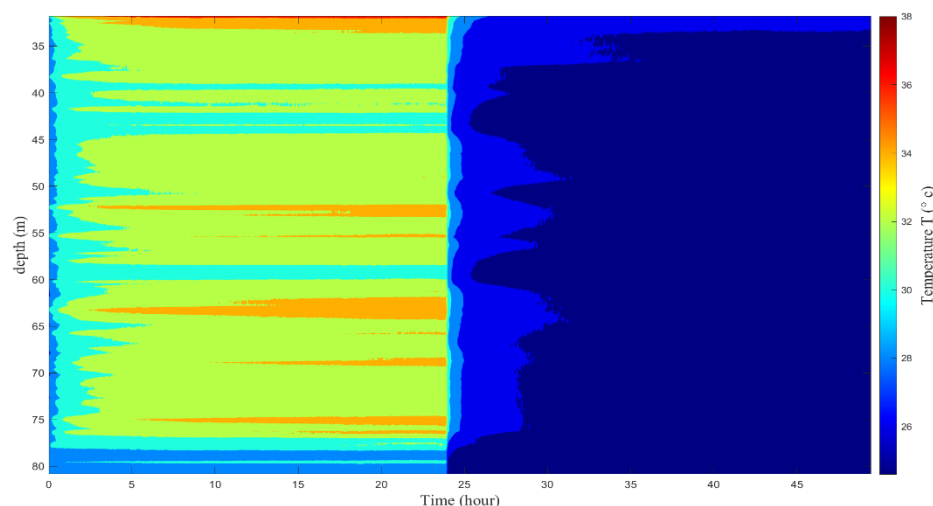


圖 21 T00226 加熱試驗溫度上升與回復過程

6-1-2 現地試驗設計

單井加熱試驗是透過加熱脈衝控制器連接銅線進行加熱，透過控制器調節整體所需之加熱功率，觀測井內水體對於溫度之反饋。當一地層的水體流動並無明顯差異，並且每公尺的加熱功率相同時，產生的溫度升幅應當相同，但當地層存在著較為快速之水流，會使得熱量不易累積，使其在相同的功率及加熱時長下，呈現較為低溫的趨勢，利用此特性即可判斷潛在的透水或不透水層區域。本計畫已於上半年完成 T00226 與 T00239 之單井加熱試驗，本次報告內容的 T00571 與 T00567 同樣以相同的配置進行試驗。T00571 位於本試驗場址西南側，井深深度約為 89.33 公尺，濾水管開設於井下 30.04-81.04 公尺的位置。試驗開始前量測之地下水位為地表下 9.6 公尺。以量測頻率 1 分鐘，使用功率每公尺 14 瓦特進行加熱 8.5-9 小時試驗及回復時間 4 小時，T00567 位於本試驗場址北側，井深深度約為 107.1 公尺，濾水井管開設於井下 1.8~107.1 公尺的位置。量測頻率為 1 分鐘，使用每公尺 10 瓦特之功率進行加熱 12 小時試驗及回復時間 7 小時。

6-1-3 T00571 現地試驗結果

所得絕對溫度對深度隨時間變化之量測結果如圖 22，經由背景量測的溫度與加熱後之溫度差異變化，繪製成不同深度隨時間的溫度變化圖，於加熱期間溫度對深度隨時間變化（如圖 23），初始加熱時地下水之背景溫度約 25°C 左右，在深度 30 公尺以上，升溫幅度最大，開始加熱後，溫度變化約為 6°C，直至加熱結束未有更高溫度變化；在深度 27.5-70 公尺，開始加熱後，溫度變化為 3-4°C，至加熱結束溫度維持上升 3-4°C，於深度 70 公尺至井底，溫度變化約為 5°C，與其他深度大致相同，至加熱結束溫度維持不變。依據溫度對深度隨時間的變化結



結果與討論

果顯示，深度 50-70 公尺在加熱過程中，因周圍地層屬於較透水區段，使得地下水流動十分快速，加熱過程中釋放的熱源被不斷湧入且溫度較低的地下水流冷卻，導致熱能散失較快，使得光纖在對地下水流加熱時溫度上升較為緩慢。而在深度 17.5-22.5 與 27.5-30 公尺的地層透水性較差，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，熱能較易累積，因此升溫過程較快速、且升溫幅度也較大；同樣，當停止加熱後溫度對深度隨時間變化(如圖 22)，在溫度回復的過程中，除淺部受空氣加熱影響較為明顯，井內各深度溫度回復情況大致相同，停止加熱後立即回復至背景溫度。經由加熱試驗的溫度變化，可判定深度 47.5-75 公尺透水性較高，其次為深度 30-45 公尺；而深度 12.5-22.5 公尺透水性最差，其次為 80 公尺至井底。

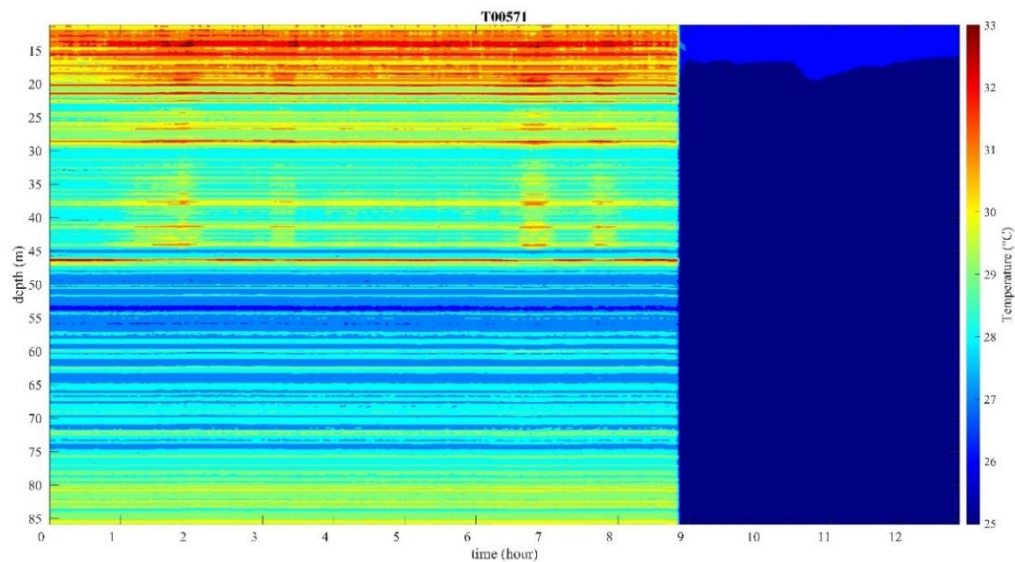


圖 22 T00571 於單井加熱試驗溫度上升與回復過程



以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查

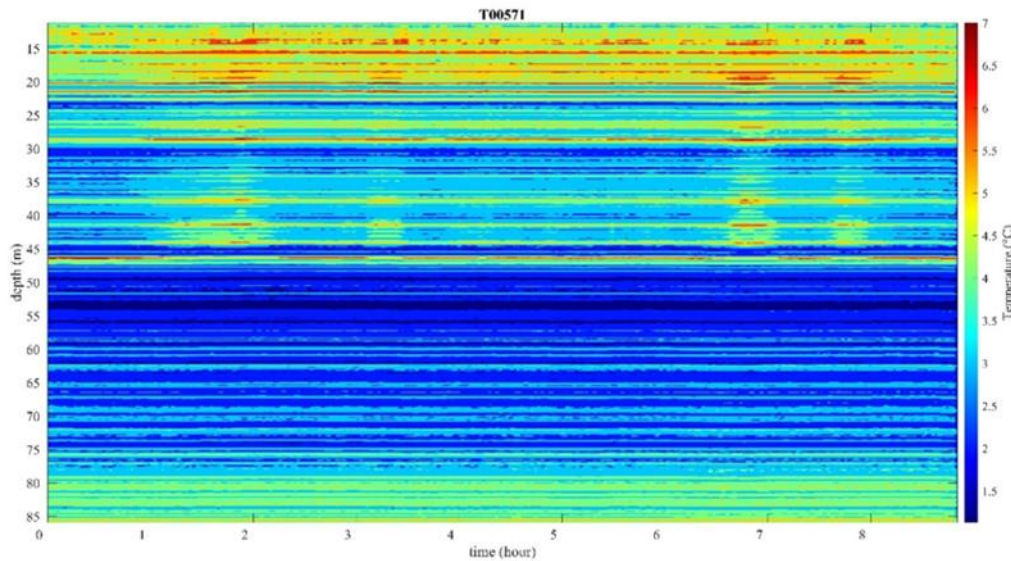


圖 23 T00571 單井加熱期間溫度變化

6-1-4 T00567 現地試驗結果

所得絕對溫度對深度隨時間變化之量測結果如圖 24，經由背景量測的溫度與加熱後之溫度差異變化，繪製成深度隨時間的溫度變化圖，於加熱期間溫度對深度隨時間變化（如圖 25），初始加熱時地下水之背景溫度約 25°C 左右，在深度 80~90 公尺之間，升溫幅度最大，開始加熱後至第 12 個小時，溫度上升至 2.5°C，直至加熱結束並未有更高溫度變化；在深度 65~70 公尺和 73~75 公尺、78~80 公尺，開始加熱後，溫度變化為 1.5°C~1.8°C，至加熱結束溫度維持上升 1.5°C~1.8°C。依據溫度對深度隨時間的變化結果顯示，深度 50 和 71~72 公尺以及 75~77 公尺在加熱過程中，因周圍地層屬於較透水區段，使得地下水流動十分快速，加熱過程中釋放的熱源被不斷湧入且溫度較低的地下水流冷卻，導致熱能較易散失，使得光纖在進行單井加熱時溫度上升較為緩慢。而在深度 80~90 公尺與 65~70 公尺的地層透水性較差，地下水流流動較為緩慢，在加熱的過程中，熱能較易累積，不易受到周圍較低溫之地下水流冷卻，因此升溫過程較快速、且升溫幅度也較大；同樣，當停止加熱後溫度對深度隨時間變化(如圖 24)，在溫度回復的過程中，可以觀察到除淺部受空氣加熱影響較為明顯，井內各深度溫度回復情況大致相同，停止加熱後立即回復至背景溫度。經由加熱試驗的溫度變化，可判定深度 50 和 71~72 公尺以及 75~77 公尺透水性較高；而深度 80~90 公尺透水性最差，其次為 65~70 公尺。



結果與討論

將加熱試驗結果與岩芯紀錄相互比對，井 T00571 和井 T00567 的岩芯紀錄如圖 26 所示，T00571 的岩芯紀錄顯示，深度 56 公尺以上為礫石砂夾粉土，以下為灰色黏土夾礫石砂及棕色粉土/土&中細砂夾礫石；T00567 的岩芯紀錄顯示，則以礫石砂夾粉土/棕色黏土為主，並參雜些許的中細沙夾棕色粉黏土及灰色黏土夾礫石砂。整體而言，兩口井以加熱試驗結果所初步判斷之透水性與岩性分佈大致上吻合，然而 T00571 在深度 56~80 公尺與 T00567 在深度 80~97 公尺與岩性呈現不一致的情形。依據過往的許多文獻指出，以岩芯判斷透水性之差異會有一定程度上的誤判，需透過其它量測技術(包括：井測、示蹤劑試驗)，方能確認地層透水性之分布，而本計畫主要以加熱溫度剖面的方式獲得高解析度的透水性分布變化。經詢問相關單位，由於當初觀測井設置時並未進行井測，故無相關的 well log 資料可提供進行比對。

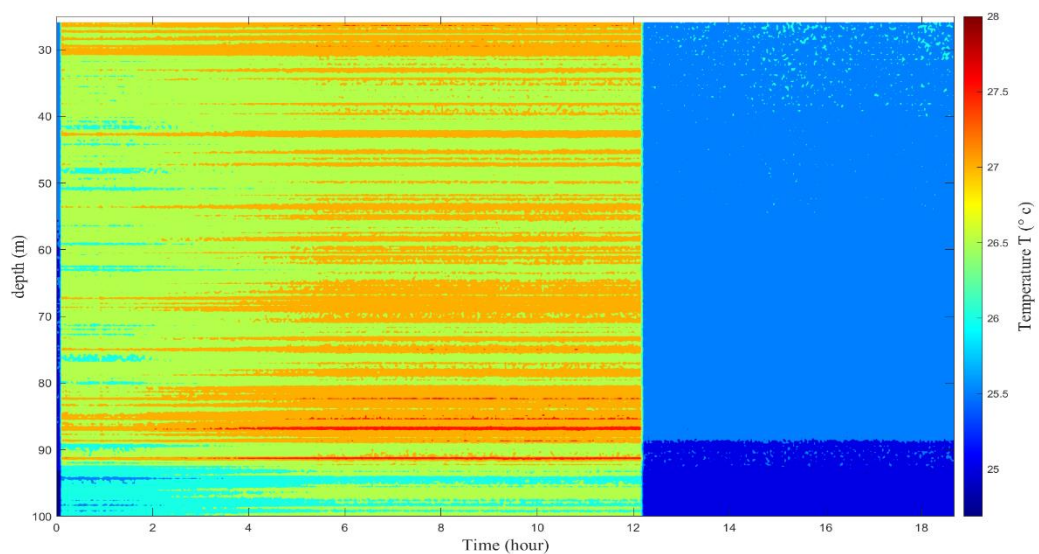


圖 24 T00567 於單井加熱試驗溫度上升與回復過程



以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查

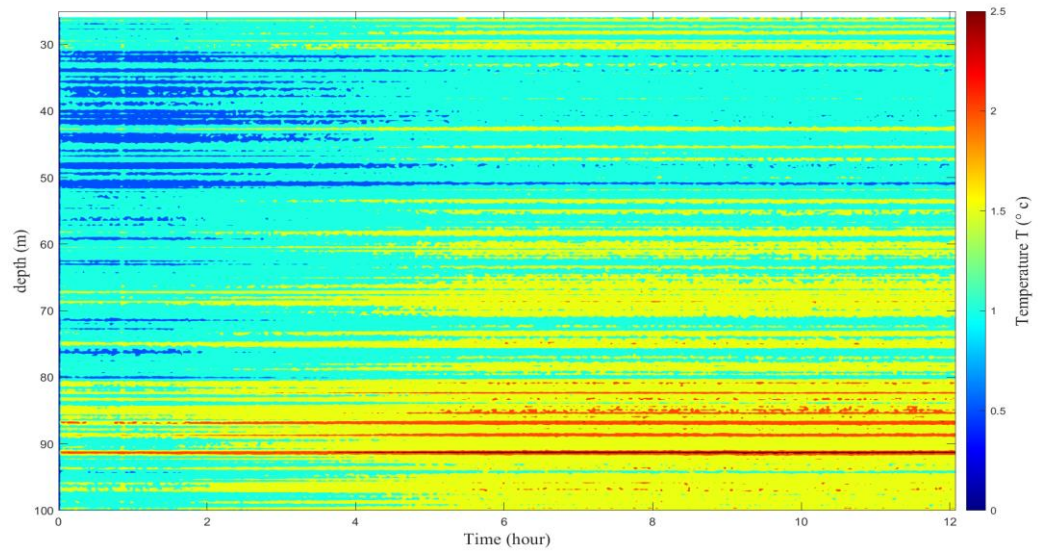


圖 25 T00567 單井加熱期間溫度變化

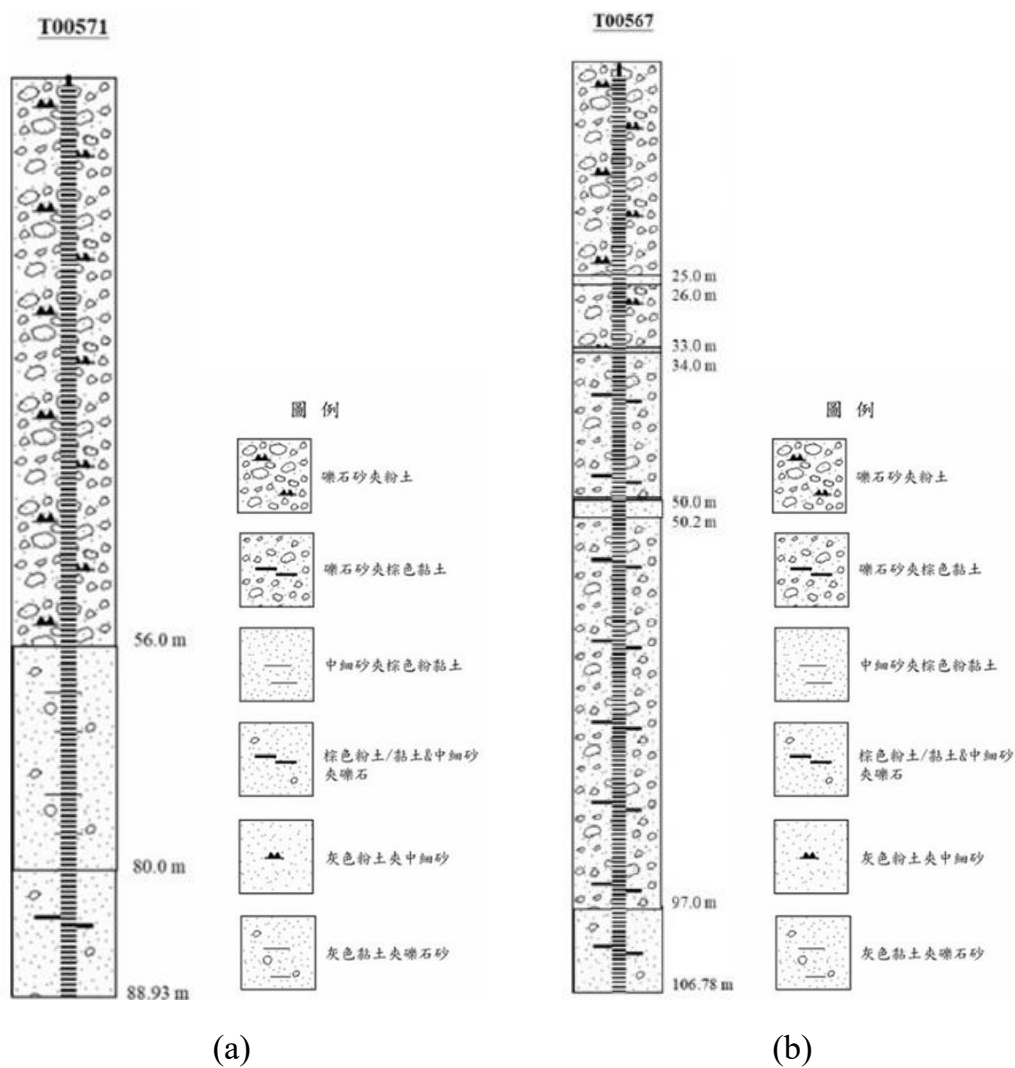


圖 26 岩芯紀錄：(a)井 T00571、(b)井 T00567



6-2 單井流速推估結果

6-2-1-1 期中報告已完成工作項目

本計畫上半年已進行 T00239 及 T00226 之單井流速分析，結果顯示整體含水層的流速分佈有明顯差異，圖 27(a)為 T00226 之流速分析結果，在深度 20 至 30 公尺之間，流速約為 0.04 至 0.22 m/d。隨著深度增加至 34 至 38 公尺，流速開始逐漸上升，範圍從 0.06 m/d 增至 0.37 m/d。在深度 38 至 40 公尺的區間內，流速維持在 0.27 至 0.37 m/d 之間。進一步分析深度 40 至 43 公尺，流速範圍為 0.25 至 0.36 m/d。然而，當深度超過 44 公尺時，流速顯著下降，從 0.36 m/d 減少至 0.06 m/d。在深度 46 至 56 公尺之間，流速保持在 0.06 至 0.16 m/d 之間。隨後，在深度 56 至 59 公尺的區間內，流速又顯著增加，從 0.06 m/d 增至 0.3 m/d。最後，在深度 60 至 75 公尺之間，流速則呈現低流速，維持在 0.05 至 0.06 m/d 之間。

圖 27(b)為 T00226 之熱傳導係數分佈結果，整體含水層的熱傳導係數顯示出明顯的差異性。在深度 20 至 30 公尺的區間內，熱傳導係數相對較低，範圍約為 0.34 至 1.54 W/m/K。當深度超過 30 公尺時，熱傳導率係數開始增加，從 0.65 W/m/K 逐漸上升至 2.05 W/m/K。進一步分析深度 36 至 60 公尺的區間，熱傳導係數逐漸趨於穩定，並在 1.6 至 2.8 W/m/K 之間變動。這一趨勢顯示出隨著深度增加，含水層的熱傳導特性變得更加一致。

圖 28(a)為 T00239-1 之流速分析結果，在深度 17 至 20 公尺之間，流速約為 0.23 至 0.36 m/d。隨著深度增加至 20 至 26 公尺，流速變化較為劇烈，範圍為 0.02 至 0.43 m/d。在深度 26 至 28 公尺的區間，流速開始逐漸增加，從 0.23 m/d 上升至 0.53 m/d。進一步分析深度 28 至 36 公尺的區間，流速維持在 0.02 至 0.31 m/d 之間。當深度達到 36 至 43 公尺時，流速逐漸增加，範圍從 0.15 m/d 上升至 0.52 m/d。在深度 43 至 53 公尺，流速約為 0.02 至 0.41 m/d。隨後，在深度 55 至 64 公尺的區間，流速大幅增加，範圍為 0.02 至 0.57 m/d。而在深度 64 至 80 公尺之間，流速則逐漸減少，範圍為 0.02 至 0.45 m/d。

圖 28(b)為 T00239-1 之熱傳導係數分佈結果，整體含水層的熱傳導係數顯示出明顯的差異性。在深度 17 至 24 公尺之間，熱傳導係數範圍約為 1.12 至 1.82 W/m/K。當深度增加至 24 至 29 公尺時，觀察到較高的熱傳導率係數，範圍為 2.04 至 3.08 W/m/K。在深度 30 至 38 公尺的區間，熱傳導率係數則相對穩定，約為 1.39 至 1.99 W/m/K。隨著深度進一步增加至 40 至 75 公尺，熱傳導係數逐漸趨於穩



以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查定，變動範圍在 1.3 至 2.0 W/m/K 之間。最後，在深度 78 至 80 公尺的區間，熱傳導係數再次出現較高的值，範圍為 1.75 至 2.44 W/m/K。詳細之說明分析請參見期中報告之第 6 章結果與討論。

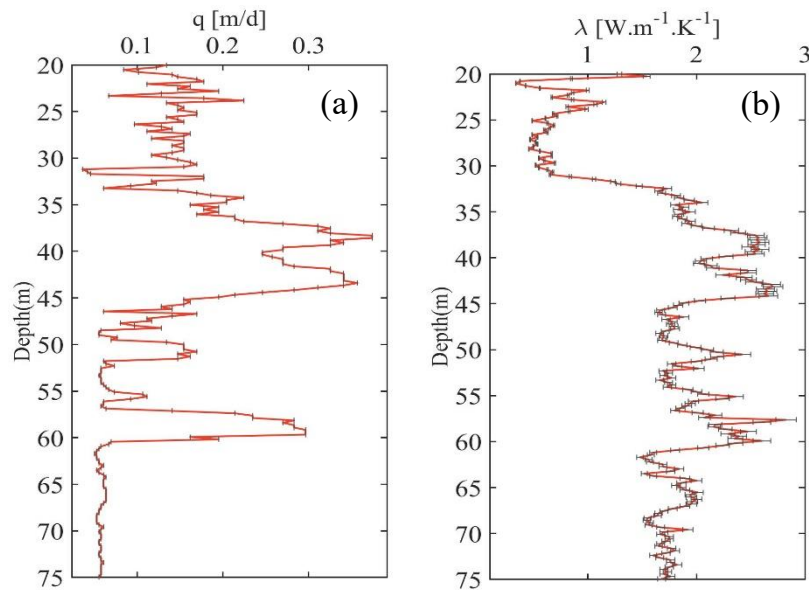


圖 27 T00226 之 ADTS-Toolbox 分析結果：(a)流速，(b)熱傳導係數

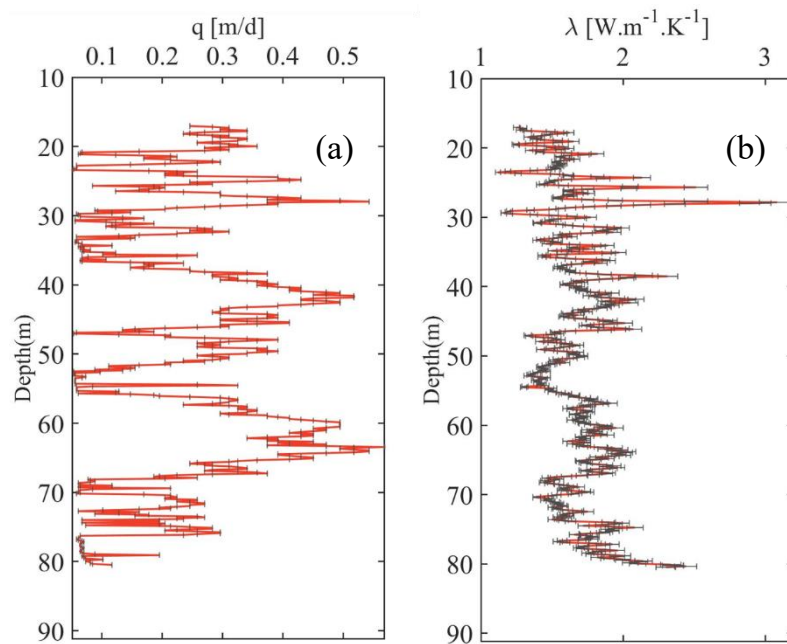


圖 28 T00239 之 ADTS-Toolbox 分析結果：(a)流速，(b)熱傳導係數

6-2-1-2 T00571 單井流速分析結果 (ADTS-Toolbox 分析)

本研究將 T00571 之單井試驗結果，利用 ADTS-Toolbox (Simon et al., 2021)，推估各個測量點周圍地層材質之熱傳導係數和地下水流速，在進行量化分析時，假設多孔隙介質與水之體積比熱容為一定值，分別設定為 $2.5 \times 10^6 \text{ J/Km}^3$ 與



結果與討論

$4.1 \times 10^6 \text{ J/Km}^3$ 。輸出功率則依照試驗設定約為每公尺 10 瓦特。在進行熱傳導係數和地下水流速推估時，首先針對光纖纜線批覆層所影響的熱傳輸效應進行濾除，經過資料的篩選與反覆測試，最佳的 ΔT_{FO} 為 0.3°C 。在去除光纖纜線批覆層的效應後，圖 29 為此試驗流速與熱傳導係數之分析結果。分析結果顯示，整體含水層的流速分佈有明顯的差異性，圖 29(a)為試驗流速結果，深度 10~20 公尺流速約為 0.2~4.3m/d，深度 30~31 公尺流速開始逐漸增加，流速約從 2 m/d 上升至 8 m/d，深度 20 公尺以下流速增加至 8.6 m/d，深度 20~40 公尺以下流速在 0.28~8.64m/d 之間變化，深度 44 公尺~75 公尺流速達到所設定的最大值 8.64 m/d（實際流速可能大於 8.64 m/d），深度 75 公尺以下流速在 4.3~8.64m/d 之間變化。模式推估流速之不確定性範圍介於 $1.542 \times 10^{-5} \sim 9.53 \times 10^{-5} \text{ m/d}$ （每個資料點位的流速結果皆有不同的不確定性範圍，此數值為整口井內的最大與最小值，並非代表單一位置的不確定性），整體流速可以觀察到深度 45~75 公尺區間的較高流速帶，以及深度 10~20 區間的較低流速分佈。

圖 29(b)為 T00567 試驗熱傳導係數分佈結果，顯示整體含水層的熱傳導係數分佈有明顯的差異性：深度 10 ~20 公尺區間出現較低值，係數約為 4.03~10W/m/K，深度 30~40 公尺以下熱導率係數在 5.4~10W/m/K 之間變化，深度 42~80 公尺熱導率係數為 10W/m/K（由於此區間的流速已大於模式所能夠推估的極大值，因此，也間接造成所推估的熱傳導係數值有偏大的趨勢，偏離理論值）。模式推估熱傳導係數之不確定性範圍介於 0.16 ~0.87W/m/K，此試驗的係數擬合結果，均方根誤差介於 $0.11 \sim 1.1^\circ\text{C}$ 之間。



以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查

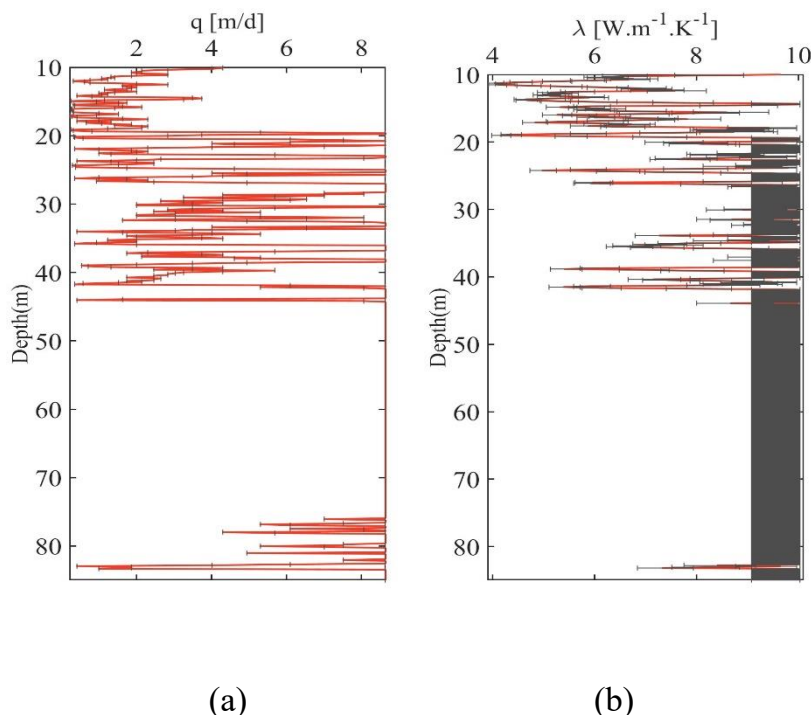


圖 29 T00571 之 ADTS-Toolbox 分析結果：(a) 流速，(b) 熱傳導係數

6-2-1-3 T00567 單井流速分析結果（ADTS-Toolbox 分析）

本研究將 T00567 之單井試驗結果，利用 ADTS-Toolbox (Simon et al., 2021)，推估各個測量點周圍地層材質之熱傳導係數和地下水流速，在進行量化分析時，假設多孔隙介質與水之體積比熱容為一定值，分別設定為 $2.5 \times 10^6 \text{ J/Km}^3$ 與 $4.1 \times 10^6 \text{ J/Km}^3$ 。輸出功率則依照試驗設定約為每公尺 10 瓦特。在進行熱傳導係數和地下水流速推估時，首先針對光纖纜線批覆層所影響的熱傳輸效應進行濾除，經過資料的篩選與反覆測試，最佳的 ΔT_{FO} 為 0.3°C 。在去除光纖纜線批覆層的效應後，圖 30 為此試驗流速與熱傳導係數之分析結果。分析結果顯示，整體含水層的流速分佈有明顯的差異性，圖 30 (a) 為試驗流速結果，深度 25~30 公尺流速約為 0.3~2 m/d，深度 30~31 公尺流速開始逐漸增加，流速約從 2 m/d 上升至 8 m/d，深度 32~50 公尺區間流速約為 0.2~6.5 m/d 之間變化，深度 50~51 公尺流速增加至 8.6 m/d，深度 52 公尺以下流速大幅下降，流速約從 8.6 m/d 下降至 0.8 m/d，深度 54 公尺~100 公尺流速保持在 0.19~2.64 m/d 之間。模式推估流速之不確定性範圍介於 $2.01 \times 10^{-5} \sim 9.54 \times 10^{-5} \text{ m/d}$ （每個資料點位的流速結果皆有不同的不確定性範圍，此部分撰寫之值為整口井內的最大與最小值，並非代表單一位置的不確定性），最大值位於深度 31 公尺和 51 公尺，而最小值則位於深度 83 公尺。整體



結果與討論

流速可以觀察到深度 63~70、80~100 公尺區間的低流速帶，以及深度 31~50 區間的較高流速分佈。

圖 30 (b)為 T00567 試驗熱傳導係數分佈結果，顯示整體含水層的熱傳導係數分佈有明顯的差異性：深度 25 ~70 公尺區間出現較高值，係數約為 5.5~10W/m/K，深度 80~100 公尺以下熱導率係數開始下降，下降至 3.51~9.79W/m/K。由於此口井的流速較快，因此，也間接造成所推估的熱傳導係數值有偏大的趨勢，偏離理論值。模式推估熱傳導係數之不確定性範圍介於 $5.52 \times 10^{-2} \sim 1.09 \text{W/m/K}$ ，最大值位於深度 31~50 公尺，而最小值則位於深度 91 公尺。此試驗的係數擬合結果，均方根誤差介於 0.05~0.42°C 之間，擬合的最大與最小誤差分別為深度 31、36、40、50、75 公尺與 64.2 公尺。

整體而言，加熱試驗結果所初步判斷之透水性與岩性分佈大致上吻合，然而在部分深度呈現與岩性不一致的情形。依據過往的許多文獻指出，以岩芯判斷透水性之差異會有一定程度上的誤判，需透過其它量測技術（包括：井測、示蹤劑試驗），方能確認地層透水性之分布，而本計畫主要以加熱溫度剖面的方式獲得高解析度的透水性分布變化。

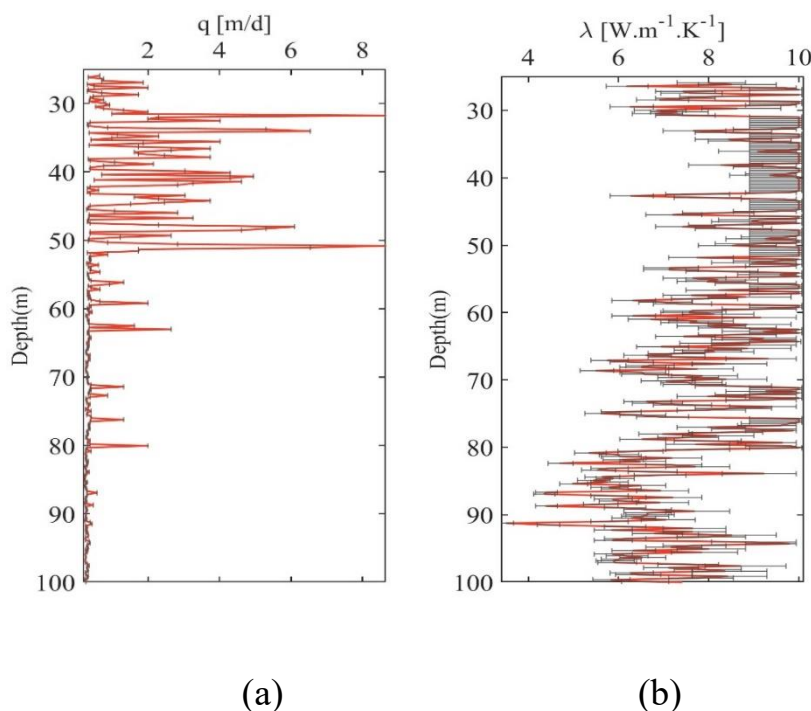


圖 30 T00567 之 ADTS-Toolbox 分析結果：(a) 流速，(b) 熱傳導係數

6-3 TV-DTS 試驗結果

6-3-1 期中報告已完成工作項目



以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查

本計畫上半年已進行 T00571 及 T00239 之流向資訊分析，使用自製研發設計的 TV-DTS 進行地下水之流向探測，TV-DTS 置放於監測井中，當中心位置之複合式光纖加熱釋放熱能時，周遭不同位置之光纖因地下水流向與流速之差異，導致所接收到之熱能不同，而反應在光纖所量測到之溫度變化亦不相同，根據溫度差異可進一步推不同深度位置之地下水流速與確切之地下水流向，試驗結果如表 1，表 2 所示，根據溫度差異，T00571 於深度 66 至 68 公尺的地下水流向主要往 90° 方位(E)方位流動，且些微的偏向 180° 方位(S); 井 T00239-1 深度 74 至 75 公尺深度的地下水流向主要往 0° 方位(N)方位流動，深度 76 公尺主要往 180° 方位(S)偏 270°(W)的方位流動;井 T00239-2 深度 34 公尺主要為往 0° 方位(N)偏 270°(W)的方位流動;深度 35 至 36 公尺深度的地下水流向主要為往 270° 方位(W)偏 0°(N)方位流動，與前人檢測結果大致相符。詳細之說明分析請參見期中報告之第 6 章結果與討論。

表 1 T00571 試驗 74-76m 各方位最大溫差(°C)

	66公尺	67公尺	68公尺
0°(N)	0.18	0.20	0.21
90°(E)	0.20	0.20	0.19
180°(S)	0.20	0.22	0.20
270°(W)	0.18	0.19	0.20

表 2 T00239-1 試驗 74-76m 各方位最大溫差(°C)

	74公尺	75公尺	76公尺
0°(N)	3.87	3.66	3.57
90°(E)	3.83	3.74	3.43
180°(S)	3.66	3.44	3.64
270°(W)	3.69	3.47	3.76



結果與討論

表 3 T00239-2 試驗 34-36m 各方位最大溫差(°C)

	34公尺	35公尺	36公尺
0°(N)	5.87	5.40	5.23
90°(E)	5.80	5.26	5.18
180°(S)	5.84	5.31	4.82
270°(W)	6.31	5.38	5.01

6-3-2 現地試驗設計

本專案先前已在 T00571 (井深為 89.33 公尺)、T00239-1 (井深為 80.48 公尺) 及 T00239-2 (井深為 40.47 公尺) 三口井進行 TV-DTS 裝置之試驗，以判斷此試驗場址中淺層和深層的地下水流向。為了與先前試驗之結果相互對照，本次試驗使用 TV-DTS 裝置配合單井加熱試驗進行，分別選定 T00226-2 (井深為 44 公尺)、T00567 (井深為 107.1 公尺)) 兩口井進行 TV-DTS 裝置之試驗，每口井皆進行一次試驗，總計 2 次 TV-DTS 試驗，以瞭解不同含水層之流向。

為判斷深層的地下水流向，本次試驗首先選定 T00567 (井深為 107.1 公尺) 為試驗井進行 TV-DTS 裝置之加熱試驗。圖 31 為 TV-DTS 試驗於 T00567 及 T00226-2 之佈設示意圖。TV-DTS 裝置總長為 2 公尺，原先試驗規劃是放置於 T00567 深度 40 至 50 尺處，但實際設置過程中，發生卡井的狀況，推斷可能因裝置本身尺寸與井管較為接近，當井管有些微變形之狀況，便有機率導致類似情形發生，故將 TV-DTS 裝置放置在 T00567 深度 15 至 17 尺處，以主動式加熱光纖進行加熱，以每公尺 11 瓦的功率進行 60 分鐘的加熱試驗，試驗過程使用 Ultima DTS 蒐集光纖溫度變化，DTS 之量測頻率為 3 分鐘記錄一筆資料，記錄升溫與降溫曲線，並以 0.124 公尺作為取樣間隔。TV-DTS 裝置上所安裝的部分光纖纜線皆放置於參照水體(reference bath，冷水桶、熱水桶與環境溫度水桶)中，並於資料分析前進行溫度之校正，以去除試驗中在進行量測時所產生的誤差。

完成井 T00567 之試驗後，選定具有雙井設計之觀測井 T00226 進行試驗。井 T00226 構造分別含有深井 (T00226-1) 與淺井 (T00226-2)，井深分別為 81.1 公尺與 44 公尺，開篩位置分別位於井下 75.1~81.1 公尺與 38~44 公尺。根據前人研究顯示，此處地下水流向為自淺井 (T00226-2) 位置往深井 (T00226-1) 位置流動，對應當地實際方位則約為往西方流動。為判斷此處的地下水流向，針對淺井 (T00226-2) 為試驗井進行 TV-DTS 裝置之加熱試驗。圖 31 (b) 為 TV-DTS 試驗於 T00226-2 之佈設示意圖，TV-DTS 裝置總長為 2 公尺，將其放置在 T00226-2 深度 38 至 40 尺處 (開篩處)，以主動式加熱光纖進行加熱，以每公尺 11 瓦的功率進行 60 分鐘的加熱試驗。試驗過程使用 Ultima DTS 蒐集光纖溫



以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查度變化，DTS 之量測頻率為 1 分鐘記錄一筆資料，完整記錄升溫與降溫曲線，並以 0.124 公尺作為取樣間隔。TV-DTS 裝置上所安裝的部分光纖纜線同樣皆放置於參照水體(reference bath, 冷水桶、熱水桶與環境溫度水桶)中，並於資料分析前進行溫度之校正，以去除試驗中在進行量測時所產生的誤差。

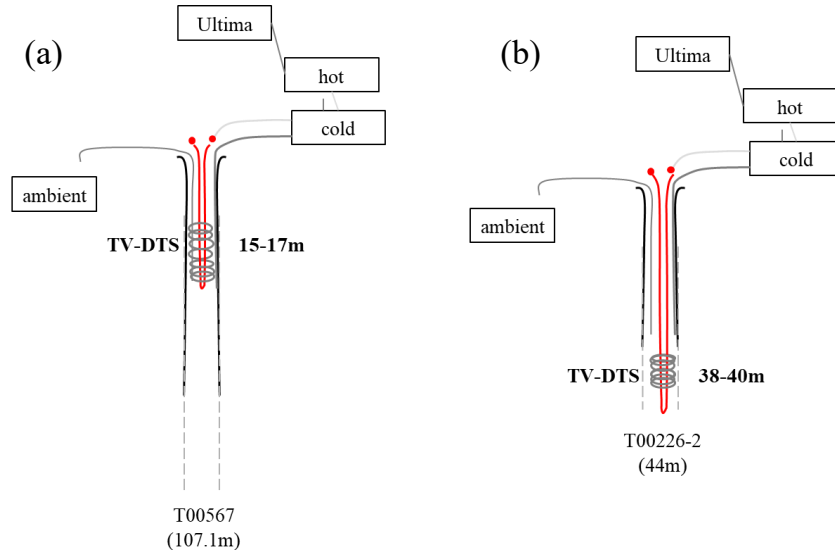


圖 31 TV-DTS 試驗儀器設置：(a)T00567 現地試驗規劃示意圖，(b) T00226-2 現地試驗規劃示意圖

6-3-3 T00567 試驗結果

以 TV-DTS 針對 T00567 進行單井的加熱試驗，主要目的為判斷淺層的地下水流向。在量測溫度資料處理上，將 TV-DTS 裝置所量測到的資料點，以每 8 個資料點進行平均後，代表每一公尺所量測到之溫度訊號。同時為了獲得更為準確的溫度變化結果，計算四個方位的感測光纖在加熱過程中的溫度變化值(ΔT)。

T00567 於深度 15 至 17 公尺之試驗結果如圖 32 與圖 33，結果顯示，每公尺 11 瓦的加熱功率下，監測光纖的溫度有上升的變化。圖 32 為深度 15-16 公尺加熱期間各方向監測光纖溫度上升的情況，加熱開始後可以觀察到 0° 方位(N)的監測光纖出現變化，大約為在 0.11°C 左右，累積溫度為 0.44°C ； 90° 方位(E)的監測光纖上升接近 0.11°C ，累積溫度為 0.4°C ； 180° 方位(S)的監測光纖則上升至接近 0.12°C ，累積溫度 0.37°C ； 270° 方位(W)的監測光纖變化至 0.1°C ，累積溫度為 0.31°C 。

圖 33 為深度 16-17 公尺加熱期間各方向監測光纖之溫度變化，加熱開始後可以觀察到四個方位的監測光纖皆有溫度上升的情況， 0° 方位(N)的監測光纖上升至 0.08°C 左右，累積溫度為 0.3°C ； 90° 方位(E)的監測光纖上升至接近 0.15°



結果與討論

C，累積溫度為 0.61°C ； 180° 方位(S)的監測光纖則上升至接近 0.09°C ，累積溫度為 0.32°C ； 270° 方位(W)的監測光纖上升至接近 0.06°C ，累積溫度為 0.19°C 。

根據四個方位監測光纖的溫度結果，可以觀察到在深度 15-17 公尺的地下水中，雖然四個方位監測光纖的溫度皆有上升，約 $0.11\text{-}0.12^{\circ}\text{C}$ ，但各方位間的溫度差異不明顯，溫差約在 $0.01^{\circ}\text{C} - 0.02^{\circ}\text{C}$ 之間。在進行加熱試驗前，先行量測井 T00567 的環境溫度變化，整體變化約為正負 0.1°C 之間，和四個方位監測光纖在加熱試驗期間之溫度變化相差不大，可能在誤差範圍之內，因此無法判斷在加熱期間的溫度訊號是否為水流造成，進而無法透過此次試驗中，四個方位監測光纖之變化辨識地下水流向。目前推測由於井 T00567 之地下水流速較快，導致熱能散失較快不易累積，在加熱功率不足或加熱時間過短的情形下，使得四個方位監測光纖無法量測到水流流向造成之溫度訊號。未來需要考量地下水流速對溫度量測的影響，並根據不同流速使用適合之加熱功率及加熱時間，以便更精準地判斷地下水流方向。

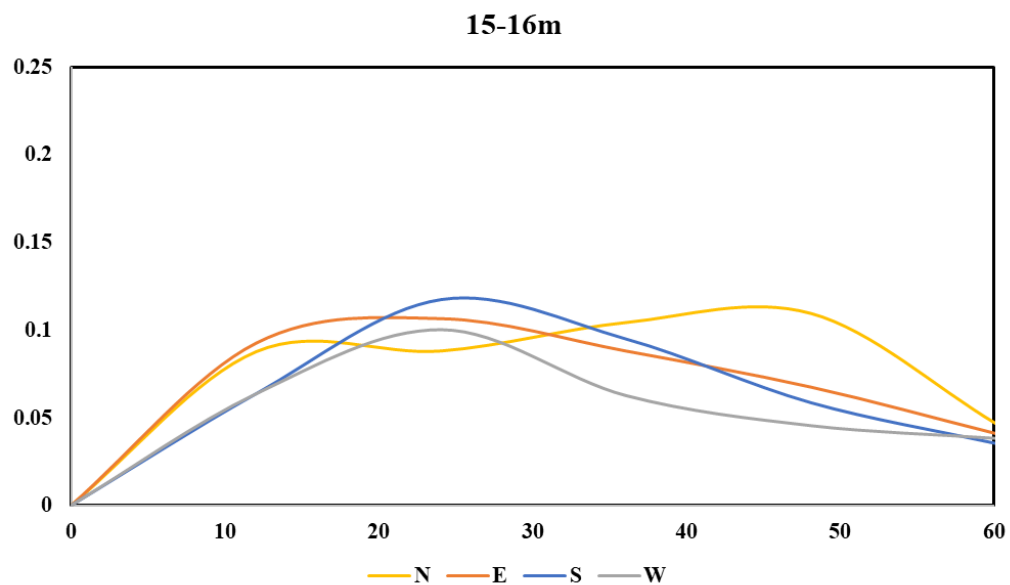


圖 32 T00567 試驗深度 15-16 公尺各方位溫差



以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查

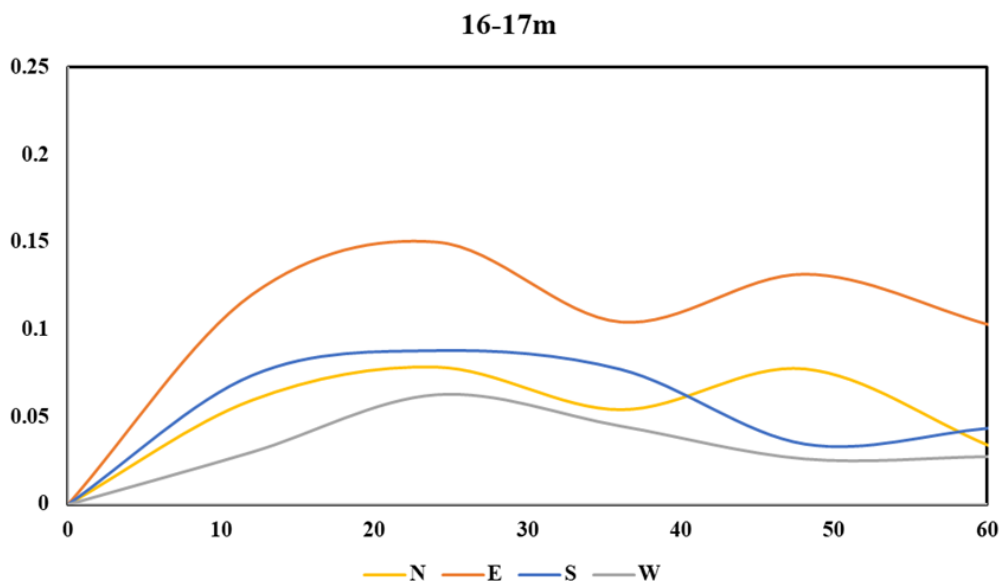


圖 33 T00567 試驗深度 16-17 公尺各方位溫差

表 4 T00571 試驗 15-17m 各方位最大溫差(°C)

	15-16公尺	16-17公尺
0°(N)	0.11	0.08
90°(E)	0.11	0.15
180°(S)	0.12	0.09
270°(W)	0.10	0.06

表 5 T00571 試驗 15-17m 各方位累積溫度(°C)

	15-16公尺	16-17公尺
0°(N)	0.44	0.30
90°(E)	0.40	0.61
180°(S)	0.37	0.32
270°(W)	0.31	0.19

6-3-4 T00226 試驗結果

以 TV-DTS 針對 T00226-2 進行單井的加熱試驗，主要目的為判斷淺層的地下水流向，使用主動式加熱光纖進行加熱，以每公尺 11 瓦的功率進行 30 分鐘的加熱試驗。在量測溫度資料處理上，將 TV-DTS 裝置所量測到的資料點，以每 8 個資料點進行平均後，代表每一公尺所量測到之溫度訊號。同時為了獲得更為準



結果與討論

確的溫度變化結果，計算四個方位的感測光纖在加熱過程中的溫度變化值(ΔT)。

T00226-2 於深度 38 至 40 公尺之試驗結果如圖 34 至圖 35，由試驗結果顯示，在每公尺 11 瓦的加熱功率下，監測光纖的溫度皆有明顯的變化。圖 34 為深度 38-39 公尺加熱期間各方向監測光纖溫度上升的情況，加熱開始後可以觀察到 0° 方位(N)的監測光纖出現變化，大約為在 2.25°C 左右，累積溫度為 12.35°C ； 90° 方位(E)的監測光纖上升接近 2.21°C ，累積溫度為 11.7°C ； 180° 方位(S)的監測光纖則上升至接近 2.62°C ，累積溫度 13.73°C ； 270° 方位(W)的監測光纖上升至 2.77°C ，累積溫度為 15.04°C 。

圖 35 為深度 39-40 公尺加熱期間各方向監測光纖之溫度變化，加熱開始後可以觀察到四個方位的監測光纖皆有溫度上升的情況， 0° 方位(N)的監測光纖上升至 2.46°C 左右，累積溫度為 14.59°C ； 90° 方位(E)的監測光纖上升至接近 2.35°C ，累積溫度為 13.74°C ； 180° 方位(S)的監測光纖則上升至接近 2.31°C ，累積溫度為 12.46°C ； 270° 方位(W)的監測光纖上升至接近 2.32°C ，累積溫度為 12.57°C 。

觀察四個方位監測光纖的溫度結果可以發現，整體 34-36 公尺其溫度變化在整個試驗期間介於 0°C – 3°C 之間，四個方位監測光纖的溫度訊號則有顯著的差異，尤其在深度 39-40 公尺。表 6 與表 7 分別為各方位之最大溫差與累積溫度。綜合以上結果得知，井 T00226-2 深度 38 至 40 公尺之最大溫差與累積溫度有一致的變化趨勢：深度 38-39 公尺位置的升溫之最大溫差與累積溫度為 270° 方位(W)方位，次高溫為 0° 方位(N) 和 180° (S)方位，而溫差最小的則是 90° (E)；深度 39-40 公尺位置的升溫之最大溫差與累積溫度為 270° 方位(W)，次高溫為 0° 方位(N) 和 180° (S)方位，而溫差最小的則是 90° (E)。因此藉由升溫幅度可以初步判斷，井 T00226-2 深度 38 至 39 公尺的地下水流向主要為由 90° (E)方位向 270° (W)的方位流動；深度 39 至 40 公尺深度的地下水流向亦主要由往 90° (E)方位向 270° (W)的方位流動，整體來說地下水流向為往西方流動，結果非常一致。



以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查

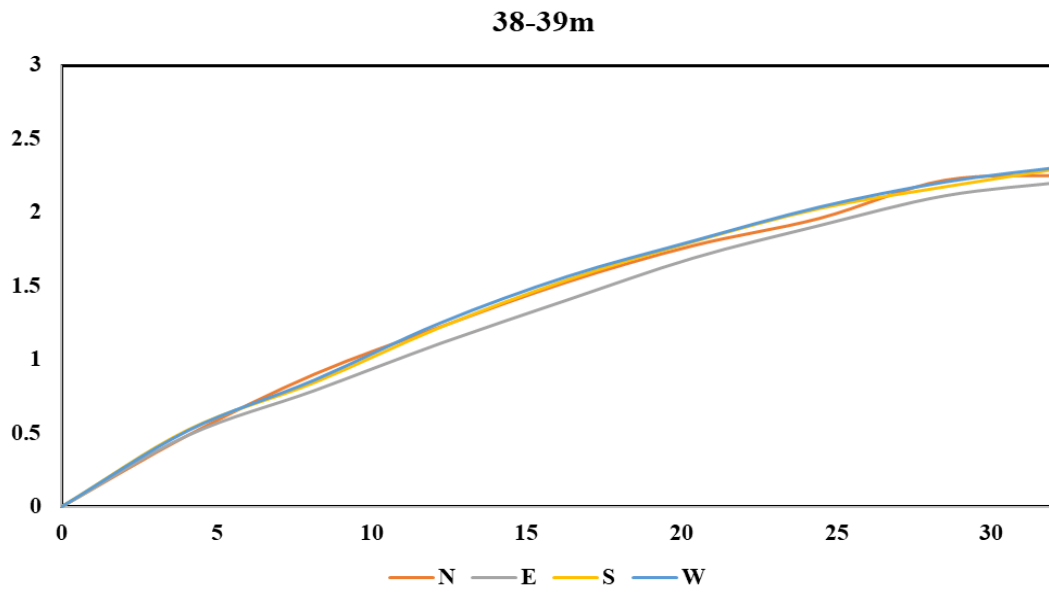


圖 34 T00226 試驗深度 38-39 公尺各方位溫差

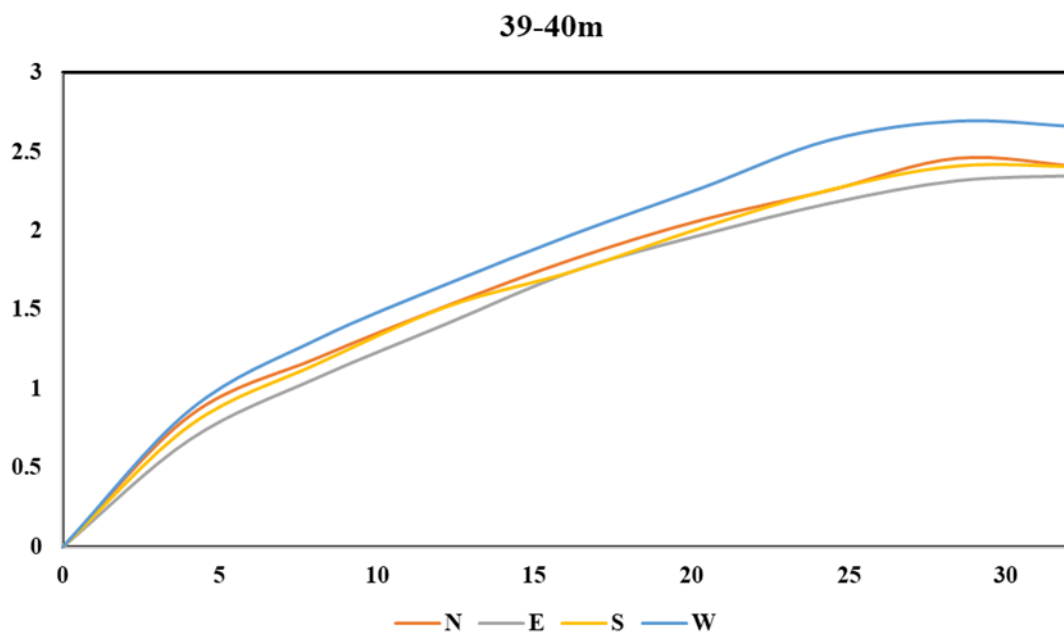


圖 35 T00226 試驗深度 39-40 公尺各方位溫差



結果與討論

表 6 T00226 試驗 38-40m 各方位最大溫差(°C)

	38-39公尺	39-40公尺
0°(N)	2.25	2.46
90°(E)	2.21	2.35
180°(S)	2.31	2.41
270°(W)	2.32	2.69

表 7 T00226 試驗 38-40m 各方位累積溫度(°C)

	38-39公尺	39-40公尺
0°(N)	12.35	14.59
90°(E)	11.70	13.74
180°(S)	12.46	14.28
270°(W)	12.57	16.02

6-3-5 地下水流向與流速推估結果

為進一步量化不同深度位置之地下水流向與流速，本研究利用 Zlotnik and Tartakovsky (2018) 之座標轉換公式，以點熱源及有限的加熱時間下溫度分佈的解析解，推估三維空間地下含水層的地下水流向與達西流速。利用章節 4-3 所述，首先設定模式所需相關之參數，包含加熱時間、加熱功率、孔隙率，水和地層材質之密度、熱容量、熱傳導係數及極角度 ψ (假設水流為水平)，並以式 9 的座標轉換，所有參數於擬合過程中均予以固定。四個觀測點位於加熱點源之東南西北四個方位，皆與加熱點相距約 0.02 公尺，並將此數值設定為觀測點與加熱線間之距離。所有參數設定彙整於表 6-3-5-1。

模型建立完畢後，本研究嘗試利用試誤法，試圖獲得最佳之 ϕ 方位角之流向角度，以及地下水流之流速，藉由調整此兩個參數所產生的溫度變化擬合所觀測的溫度，以判斷出最佳之流向角度與流速組合。由於 T00571 與 T00567 兩口井的地下水流速太快，所觀測到的溫度變化在誤差範圍之內，所擬合出之結果其不確定甚高，因此不納入流速與流向分析之中。本次分析僅利用 T00239-1 與 T00226 兩口井的單井 TV-DTS 加熱試驗結果進行擬合。T00239-1 與 T00226 分別處於淺層與深層含水層，並且 TV-DTS 加熱試驗使用每公尺 11 瓦特的功率，分別進行 60 分鐘和 30 分鐘的加熱，具有較明顯之溫度差異，較利於模型擬合。

6-3-5-1 TV-DTS T00226 擬合結果



以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查

井 T00226 的擬合結果如圖 36 至圖圖 37 所示，顯示井 T00226 深度 38 至 40 公尺加熱之擬合結果，擬合結果顯示，監測光纖的溫度皆有明顯變化。觀察四個方位監測光纖的溫度結果可以發現，整體 38-40 公尺其溫度變化在整個試驗期間介於 0°C – 2.5°C 之間，四個方位監測光纖的溫度訊號則可以觀察到四個方位有顯著的差異。表 9 與表 10 分別為各方位之最大溫差與累積溫度。圖 36 為 T00226 深度 38-39 公尺各方位擬合之結果，T00226 深度 38-39 公尺四個方位的溫度變化趨勢皆可予正確描繪，觀測值之破透曲線與模擬值的破透曲線雖在加熱試驗初期稍有落差，但整體溫度變化趨勢相似，在加熱試驗後期，觀測值之破透曲線與模擬值的破透曲線趨於相同，顯示觀測值的最高溫度可準確推估。各方位擬合之最大溫差與累積溫度結果分別列於表 9 與表 10。模式中 0° 方位 (N) 擬合之最大溫差為 2.22°C ，累積溫度為 13.9°C ，觀測值和模擬值之最大誤差為 0.07°C ，均方根誤差 (RMSE) 為 0.067 ； 90° 方位 (E) 擬合出最大溫差為 2.18°C ，累積溫度為 13.64°C ，觀測值和模擬值之最大誤差為 0.03°C ，均方根誤差為 (RMSE) 0.095°C ； 180° 方位 (S) 擬合出最大溫差為 2.34°C 累積溫度為 14.65°C ，觀測值和模擬值之最大誤差為 -0.027°C ，均方根誤差 (RMSE) 為 0.104°C ； 270° 方位 (W) 的擬合出最大溫差為 2.39°C ，累積溫度為 14.93°C ，觀測值和模擬值之最大誤差為 -0.066°C ，均方根誤差 (RMSE) 為 0.114°C 。以上結果顯示西方溫度最高，東方最低，四個方位溫度擬合結果良好。擬合結果顯示，此深度流向方位角度與流速最佳組合分別為 210° 方位 (西偏南) 以及 0.172 m/d 。

圖 37 為 T00226 深度 39-40 公尺各方位擬合之結果，由圖觀察可知，T00226 深度 39-40 公尺四個方位的溫度變化趨勢皆可予正確描繪，觀測值之破透曲線與模擬值的破透曲線在加熱試驗前段以及後段近乎一致，在加熱試驗中段則有些許差距，顯示觀測值的最高溫度可準確推估。各方位擬合之最大溫差與累積溫度結果分別列於表 8 與表 10：模式中 0° 方位 (N) 擬合出最大溫差為 2.54°C ，累積溫度為 15.59°C ，觀測值和模擬值之最大誤差為 0.051°C ，均方根誤差 (RMSE) 為 0.027°C ； 90° 方位 (E) 擬合出最大溫差為 2.37°C ，累積溫度為 14.55°C ，觀測值和模擬值之最大誤差為 0.031°C ，均方根誤差 (RMSE) 為 0.021 ； 180° 方位 (S) 擬合出最大溫差為 2.49°C ，累積溫度為 15.27°C ，觀測值和模擬值之最大誤差為 0.008°C ，均方根誤差 (RMSE) 為 0.026°C ； 270° 方位 (W) 的擬合出最大溫差為 2.66°C ，累積溫度為 16.36°C ，觀測值和模擬值之最大誤差為 0.121°C ，均方根誤差 (RMSE) 為 0.017°C 。以上結果顯示西方溫度最高，東方最低。四個方位溫度擬合結果良好。擬合結果顯示，此深度流向方位角度與流速最佳組合分別為 170° 方位 (西偏北) 以及 0.172 m/d 。根據前人之試驗報告，井 T00226 之地下水流向約往西側流動，符合前人之研究結果。



結果與討論

表 8 流速與流向解析之相關參數設定

加熱時間	120 分鐘
加熱功率	11W/m
孔隙率	0.3
密度 (水)	998 kg/m ³
比熱 (水)	4184 J/(kg·K)
熱傳導係數	0.6 W/(m·K)
縱向熱分散率	0.03 J/(kg·K)
橫向熱分散率	0.03 J/(kg·K)
極角度 ψ	90°

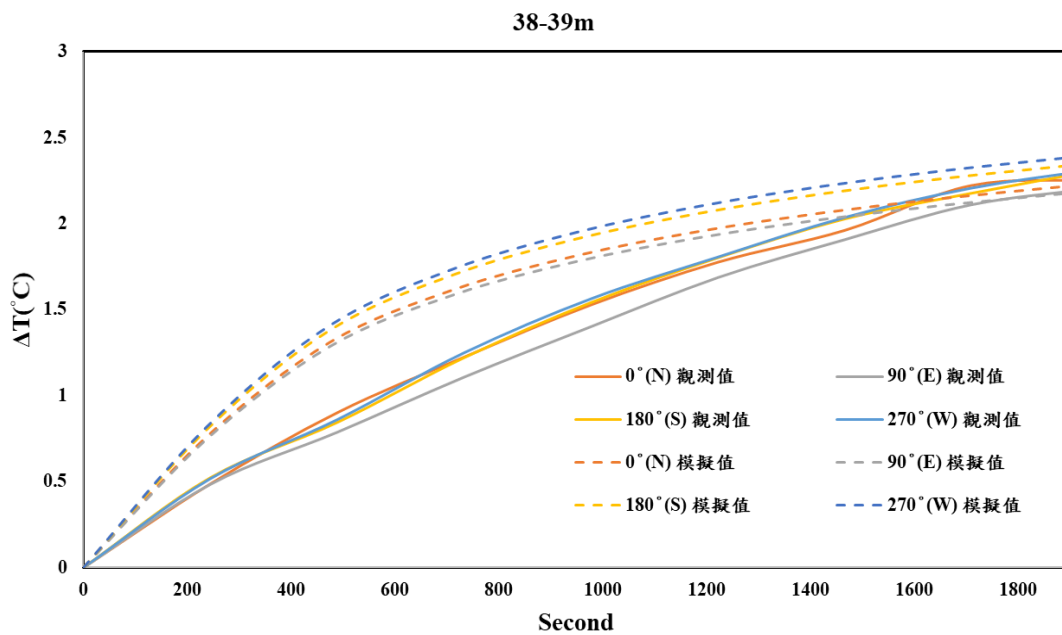


圖 36 T00226 深度 38-39 公尺各方位擬合之結果



以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查

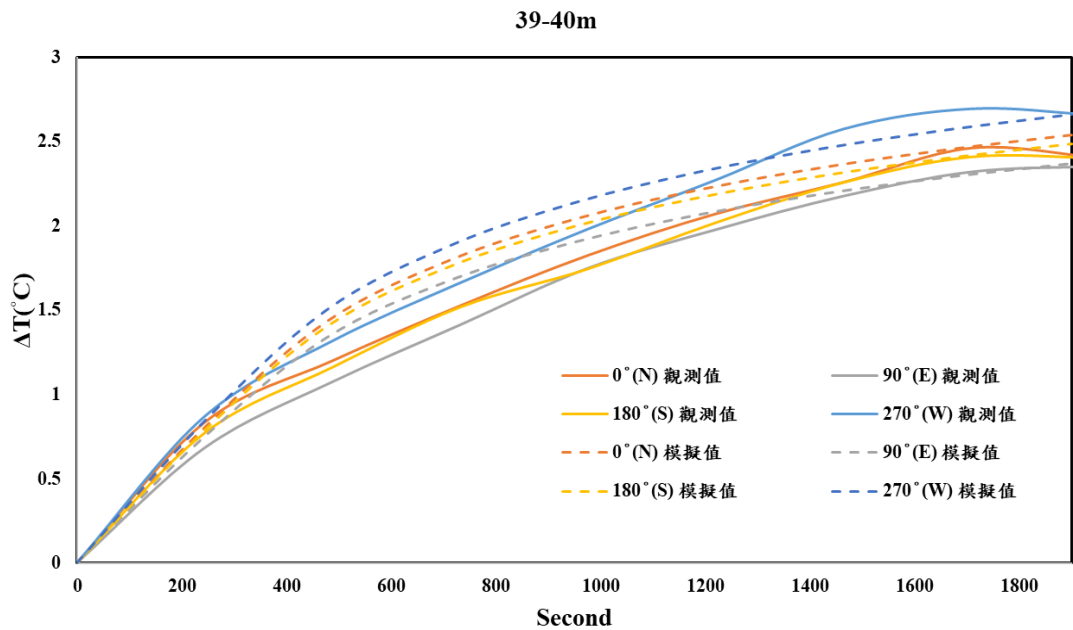


圖 37 T00226 深度 39-40 公尺各方位擬合之結果

表 9 T00226 模擬 38-40m 各方位最大溫差(°C)

	38-39公尺	39-40公尺
0°(N)	2.22	2.54
90°(E)	2.18	2.37
180°(S)	2.34	2.49
270°(W)	2.39	2.66

表 10 T00226 模擬 38-40m 各方位累積溫度(°C)

	38-39公尺	39-40公尺
0°(N)	13.90	15.59
90°(E)	13.64	14.55
180°(S)	14.65	15.27
270°(W)	14.93	16.36



結果與討論

表 11 T00226 試驗 38-40m 最佳擬合地下水流向方位角度與流速

	38-39公尺	39-40公尺
方位角	210°	170°
流速(m/d)	0.17	0.17

6-3-5-2 TV-DTS T00239 擬合結果

T00239 的擬合結果如圖 38 至圖 40，顯示井 T00239 深度 74 至 76 公尺加熱之擬合結果，試驗結果顯示，監測光纖的溫度皆有明顯的變化。觀察四個方位監測光纖的溫度結果可以發現，整體 38-40 公尺其溫度變化在整個試驗期間介於 0°C - 4°C 之間，四個方位監測光纖的溫度訊號則可以觀察到四個方位有顯著的差異。表 12 與表 13 分別為各方位之最大溫差與累積溫度。圖 38 為 T00239 深度 74 公尺各方位擬合之結果，由圖觀察可知 T00239 深度 74 公尺四個方位的溫度變化趨勢皆可予正確描繪，觀測值之破透曲線與模擬值的破透曲線雖在加熱試驗初期稍有落差，但整體溫度變化趨勢相似，在加熱試驗後期，觀測值之破透曲線與模擬值的破透曲線趨於相同，顯示觀測值的最高溫度可準確推估。各方位擬合之最大溫差與累積溫度結果分別列於表 12 與表 13：模式中 0° 方位 (N) 擬合出最大溫差為 3.86 °C，累積溫度為 100.29°C，觀測值和模擬值之最大誤差為 1.110°C，均方根誤差 (RMSE) 為 0.572°C；90° 方位 (E) 擬合出最大溫差為 3.79 °C，累積溫度為 98.64°C，觀測值和模擬值之最大誤差為 1.178°C，均方根誤差 (RMSE) 為 0.646°C；180° 方位 (S) 擬合出最大溫差為 3.57°C，累積溫度為 92.74 °C，觀測值和模擬值之最大誤差為 0.981°C，均方根誤差 (RMSE) 為 0.522°C；270° 方位 (W) 的擬合出最大溫差為 3.63°C，累積溫度為 94.29 °C，觀測值和模擬值之最大誤差為 0.926°C，均方根誤差 (RMSE) 為 0.512°C，以上結果顯示北方溫度最高，東方次之。四個方位溫度擬合結果良好。擬合結果顯示，此深度流向方位角度與流速最佳組合分別為 60° 方位 (東偏北) 以及 0.12m/d。

圖 39 為 T00239 深度 75 公尺各方位擬合之結果，由圖觀察可知 T00239 深度 75 公尺四個方位的溫度變化趨勢皆可予正確描繪，觀測值之破透曲線與模擬值的破透曲線雖在加熱試驗初期稍有落差，但整體溫度變化趨勢相似，在加熱試驗後期，觀測值之破透曲線與模擬值的破透曲線趨於相同，顯示觀測值的最高溫度可準確推估。表 12 與表 13 同樣呈現深度 75 公尺之各方位擬合之最大溫差與累積溫度結果：模式中 0° 方位 (N) 擬合出最大溫差為 3.64 °C，累積溫度為 95.10°C，觀測值和模擬值之最大誤差為 0.996°C，均方根誤差 (RMSE) 為 0.534°C；90° 方位 (E) 擬合出最大溫差為 3.67 °C，累積溫度為 95.78°C，觀測值和模擬值



以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查

之最大誤差為 1.013°C ，均方根(RMSE)誤差為 0.552°C ； 180° 方位 (S) 擬合出最大溫差為 3.52°C ，累積溫度為 92.01°C ，觀測值和模擬值之最大誤差為 1.154°C ，均方根誤差為 0.638°C ； 270° 方位 (W)的擬合出最大溫差為 3.50°C ，累積溫度為 91.36°C ，觀測值和模擬值之最大誤差為 1.112°C ，均方根誤差為 0.627°C ，以上結果顯示東方溫度最高，北方次之。擬合結果顯示，此深度流向方位角度與流速最佳組合分別為 35° 方位 (東北偏東)以及 0.08m/d 。

圖 40 為 T00239 深度 76 公尺各方位擬合之結果，由圖觀察可知 T00239 深度 76 公尺四個方位的溫度變化趨勢皆可予正確描繪，觀測值之破透曲線與模擬值的破透曲線雖在加熱試驗初期稍有落差，但整體溫度變化趨勢相似，在加熱試驗後期，觀測值之破透曲線與模擬值的破透曲線趨於相同，顯示觀測值的最高溫度可準確推估。表 12 與表 13 呈現 76 公尺的各方位擬合之最大溫差與累積溫度結果：模式中 0° 方位(N)擬合出最大溫差為 3.59°C ，累積溫度為 93.57°C ，觀測值和模擬值之最大誤差為 1.136°C ，均方根誤差 (RMSE)為 0.659°C ； 90° 方位 (E) 擬合出最大溫差為 3.53°C ，累積溫度為 91.95°C ，觀測值和模擬值之最大誤差為 1.162°C ，均方根誤差(RMSE)為 0.655°C ； 180° 方位 (S) 擬合出最大溫差為 3.66°C ，累積溫度為 95.46°C ，觀測值和模擬值之最大誤差為 1.118°C ，均方根誤差(RMSE)為 0.604°C ； 270° 方位 (W)的擬合出最大溫差為 3.72°C ，累積溫度為 97.15°C ，觀測值和模擬值之最大誤差為 1.059°C ，均方根誤差(RMSE)為 0.564°C ，以上結果顯示西方溫度最高，南方次之。四個方位溫度擬合結果良好。擬合結果顯示，此深度流向方位角度與流速最佳組合分別為 200° 方位 (西偏南)以及 0.08m/d 。綜合以上結果，顯示 T00239 深度 74-75 公尺流向方位角度十分接近，約為 $35-60^{\circ}$ 方位 (東偏北)，流速約為 $0.08-0.12\text{m/d}$ ；而深度 76 公尺流向方位角度為 200° 方位(西偏南)，流速約為 0.08m/d 。



結果與討論

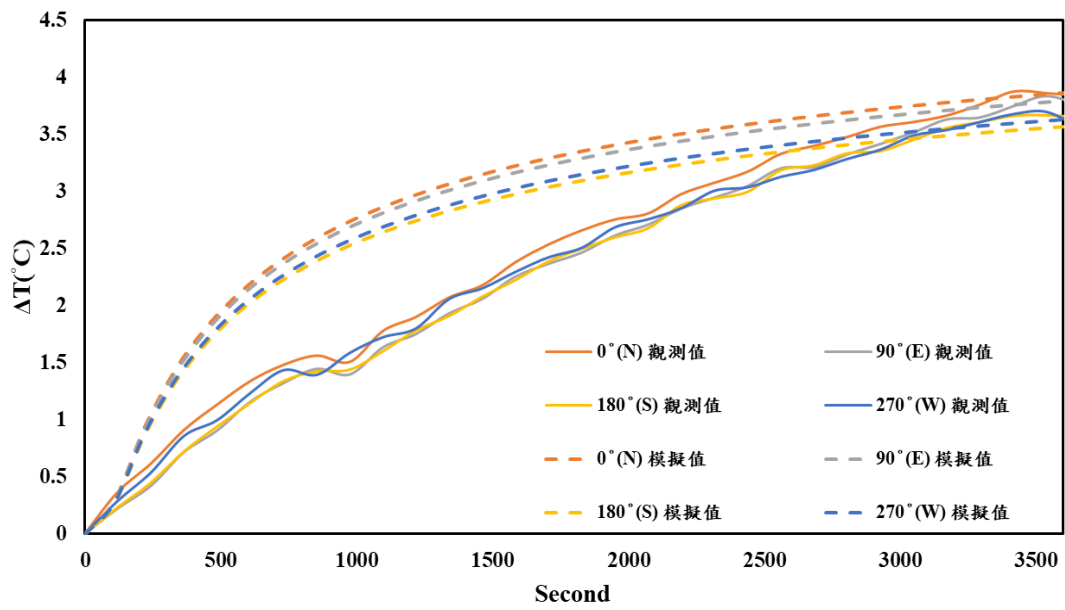


圖 38 T00239 深度 74 公尺各方位擬合之結果

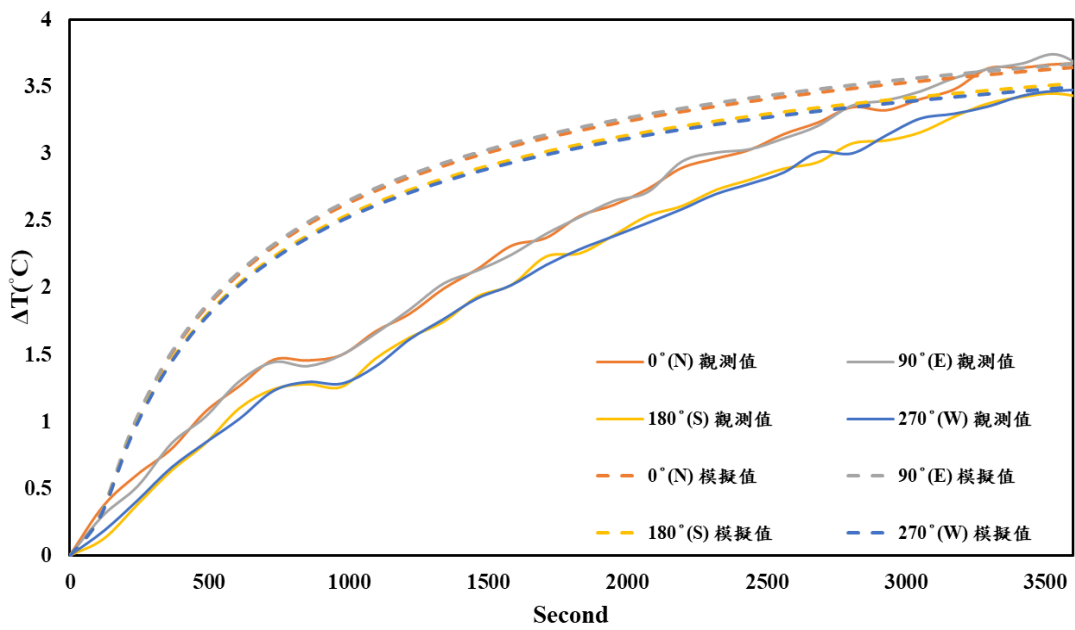


圖 39 T00239 深度 75 公尺各方位擬合之結果



以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查

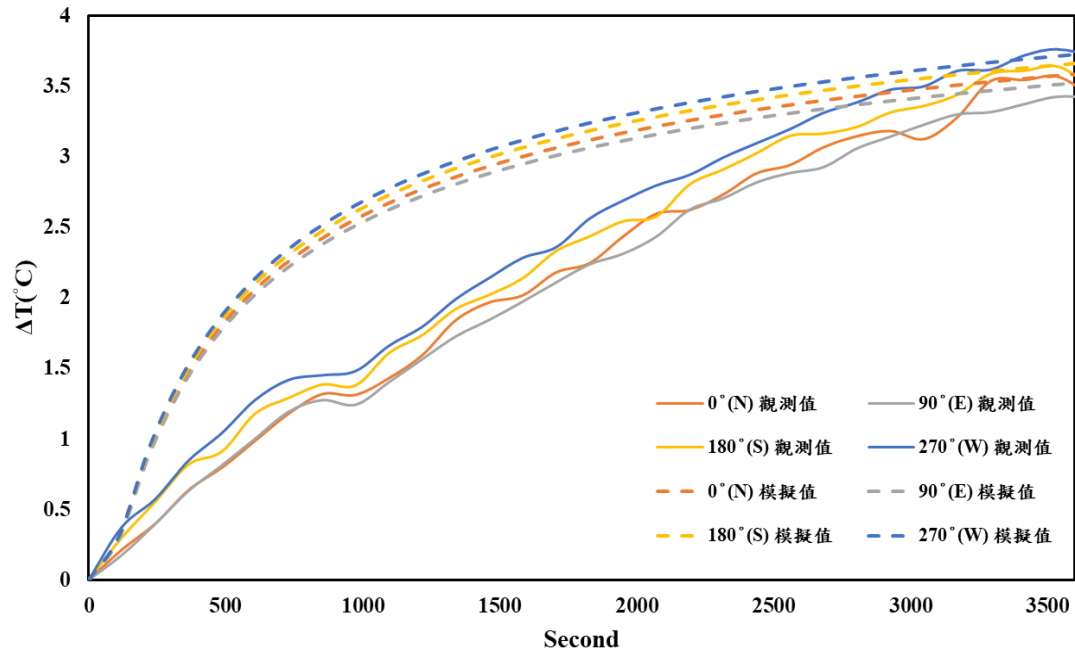


圖 40 T00239 深度 76 公尺各方位擬合之結果

表 12 T00239 模擬 74-76m 各方位最大溫差(°C)

	74公尺	75公尺	76公尺
0°(N)	3.86	3.64	3.59
90°(E)	3.79	3.67	3.53
180°(S)	3.57	3.52	3.66
270°(W)	3.63	3.50	3.72

表 13 T00239 模擬 74-76m 各方位累積溫度(°C)

	74公尺	75公尺	76公尺
0°(N)	100.29	95.10	93.57
90°(E)	98.64	95.78	91.95
180°(S)	92.74	92.01	95.46
270°(W)	94.29	91.36	97.15

表 14 T00239 試驗 74-76m 最佳擬合地下水流向方位角度與流速

	74公尺	75公尺	76公尺
方位角	60°	35°	200°
流速(m/d)	0.12	0.08	0.08



結果與討論

6-3-5-3 T00239-2 擬合結果

井 T00239-2 的擬合結果如圖 41 至圖 43，顯示井 T00239-2 深度 34 至 36 公尺加熱之擬合結果，整體試驗結果顯示，監測光纖的溫度皆有明顯的變化。觀察四個方位監測光纖的溫度結果可以發現整體 34-36 公尺其溫度變化在整個試驗期間介於 0°C – 6°C 之間，四個方位監測光纖的溫度訊號則可以觀察到四個方位有顯著的差異。表 6-3-6-1 與表 6-3-6-2 分別為各方位之最大溫差與累積溫度。圖 41 為 T00239 深度 34 公尺各方位擬合之結果，由圖觀察可知 T00239 深度 34 公尺四個方位的溫度變化趨勢皆可予正確描繪，觀測值之破透曲線與模擬值的破透曲線雖在加熱試驗初期稍有落差，但整體溫度變化趨勢相似，在加熱試驗後期，觀測值之破透曲線與模擬值的破透曲線趨於相同，顯示觀測值的最高溫度可準確推估。各方位擬合之最大溫差與累積溫度結果分別列於表 15 與表 16：模式中 0° 方位 (N) 擬合出最大溫差為 6.06°C ，累積溫度為 146.53°C ，觀測值和模擬值之最大誤差為 1.716°C ，均方根誤差 (RMSE) 為 0.969°C ； 90° 方位 (E) 擬合出最大溫差為 5.75°C ，累積溫度為 139.06°C ，觀測值和模擬值之最大誤差為 1.508°C ，均方根誤差 (RMSE) 為 0.851°C ； 180° 方位 (S) 擬合出最大溫差為 5.97°C ，累積溫度為 144.25°C ，觀測值和模擬值之最大誤差為 0.891°C ，均方根誤差 (RMSE) 為 0.891°C ； 270° 方位 (W) 的擬合出最大溫差為 6.29°C ，累積溫度為 151.99°C ，觀測值和模擬值之最大誤差為 1.573°C ，均方根誤差 (RMSE) 為 0.822°C ，以上結果顯示西方溫度最高，北方次之，四個方位溫度擬合結果良好。擬合結果顯示，此深度流向方位角度與流速最佳組合分別為 170° 方位 (西偏北) 以及 0.12m/d 。

圖 42 T00239 深度 35 公尺各方位擬合之結果為 T00239 深度 35 公尺各方位擬合之結果，由圖觀察可知 T00239 深度 35 公尺四個方位的溫度變化趨勢皆可予正確描繪，觀測值之破透曲線與模擬值的破透曲線在加熱試驗中稍有落差，但整體溫度變化趨勢相似，顯示觀測值的最高溫度可準確推估。各方位擬合之最大溫差與累積溫度結果分別列於表 6-3-6-1 與表 6-3-6-2：模式中 0° 方位 (N) 擬合出最大溫差為 6.17°C ，累積溫度為 161.46°C ，觀測值和模擬值之最大誤差為 2.06°C ，均方根誤差 (RMSE) 為 1.354°C ； 90° 方位 (E) 擬合出最大溫差為 5.94°C ，累積溫度為 151.95°C ，觀測值和模擬值之最大誤差為 1.794°C ，均方根 (RMSE) 誤差為 1.123°C ； 180° 方位 (S) 擬合出最大溫差為 6.08°C ，累積溫度為 153.8°C ，觀測值和模擬值之最大誤差為 1.748°C ，均方根誤差為 1.16°C ； 270° 方位 (W) 的擬合出最大溫差為 6.3°C ，累積溫度為 163.42°C ，觀測值和模擬值之最大誤差為 2.064°C ，均方根誤差為 1.404°C ，以上結果顯示 西方溫度最高，北方次之。四個方位溫度擬合結果較 T00239-1 差。擬合結果顯示，此深度流向方位角度與流速最佳組合分別為 145° 方位 (西北偏西) 以及 0.08m/d 。



以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查

圖 43 T00239 深度 36 公尺各方位擬合之結果為 T00239-2 深度 36 公尺各方位擬合之結果，由圖觀察可知 T00239-2 深度 36 公尺四個方位的溫度變化趨勢皆可予正確描繪，觀測值之破透曲線與模擬值的破透曲線雖在加熱試驗初期稍有落差，但整體溫度變化趨勢相似，在加熱試驗後期，觀測值之破透曲線與模擬值的破透曲線趨於相同，顯示觀測值的最高溫度可準確推估。各方位擬合之最大溫差與累積溫度結果分別列於表 6-3-6-1 與表 6-3-6-2：模式中 0° 方位(N)擬合出最大溫差為 6.04°C ，累積溫度為 148.6°C ，觀測值和模擬值之最大誤差為 1.759°C ，均方根誤差 (RMSE) 為 1.223°C ； 90° 方位 (E) 擬合出最大溫差為 5.94°C ，累積溫度為 146.12°C ，觀測值和模擬值之最大誤差為 1.752°C ，均方根誤差(RMSE)為 1.183°C ； 180° 方位 (S) 擬合出最大溫差為 4.9°C ，累積溫度為 120.61°C ，觀測值和模擬值之最大誤差為 1.365°C ，均方根誤差(RMSE)為 0.744°C ； 270° 方位 (W) 的擬合出最大溫差為 4.98°C ，累積溫度為 122.65°C ，觀測值和模擬值之最大誤差為 1.206°C ，均方根誤差(RMSE)為 0.666°C ，以上結果顯示北方溫度最高，東方次之。 180° 方位 (S)和 270° 方位 (W)溫度擬合結果較好。擬合結果顯示，此深度流向方位角度與流速最佳組合分別為 200° 方位 (西偏南)以及 0.08m/d 。綜合以上結果，顯示 T00239 深度 34-35 公尺流向方位角度十分接近，約為 $145\text{-}170^\circ$ 方位 (西偏北)，流速約為 $0.08\text{-}0.12\text{m/d}$ ；而深度 36 公尺流向方位角度為 50° 方位 (東偏北)，流速約為 0.43m/d 。

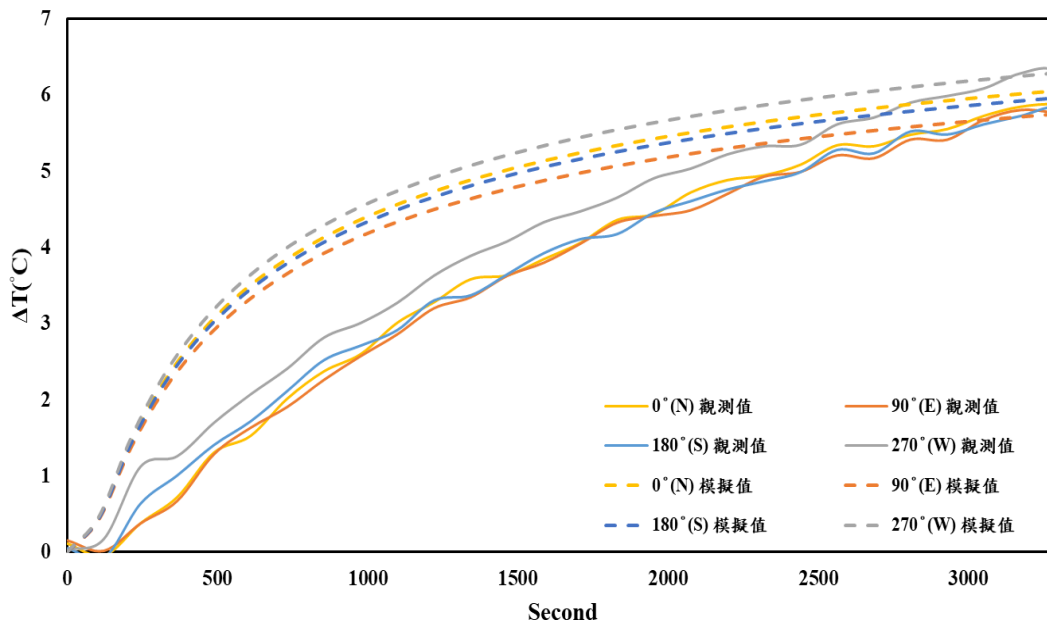


圖 41 T00239 深度 34 公尺各方位擬合之結果



結果與討論

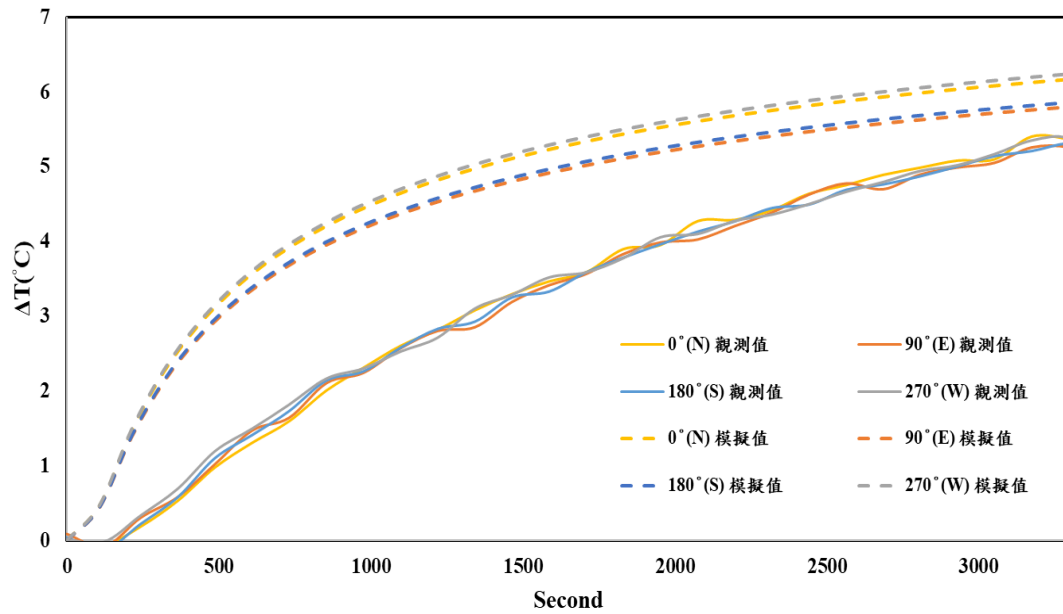


圖 42 T00239 深度 35 公尺各方位擬合之結果

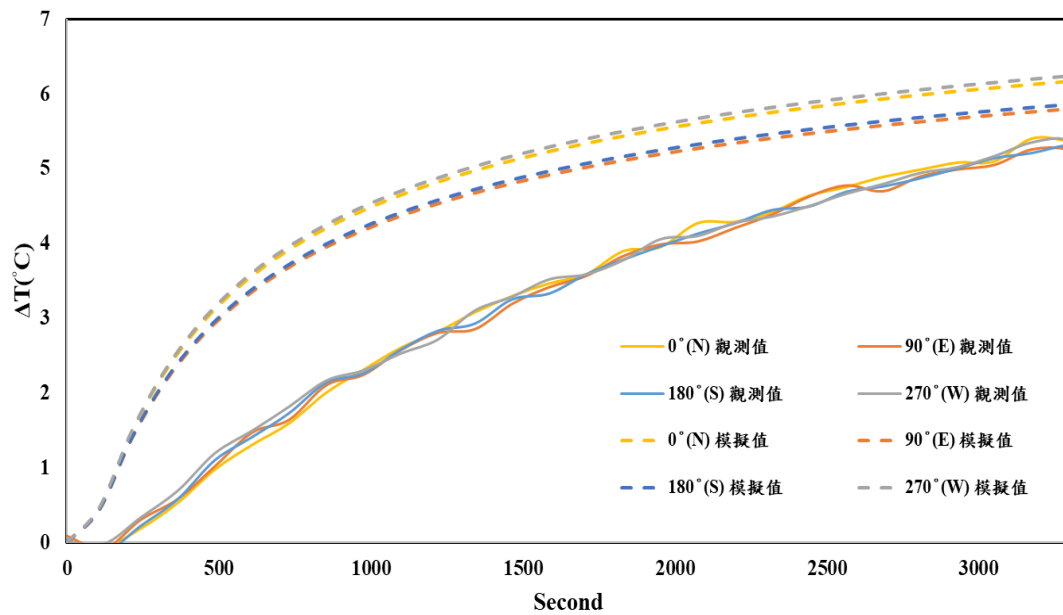


圖 43 T00239 深度 36 公尺各方位擬合之結果



以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查

表 15 T00239 模擬 34-36m 各方位最大溫差($^{\circ}\text{C}$)

	34公尺	35公尺	36公尺
$0^{\circ}(\text{N})$	6.06	6.17	6.04
$90^{\circ}(\text{E})$	5.75	5.94	5.94
$180^{\circ}(\text{S})$	5.97	6.08	4.90
$270^{\circ}(\text{W})$	6.29	6.30	4.98

表 16 T00239 模擬 34-36m 各方位累積溫度($^{\circ}\text{C}$)

	34公尺	35公尺	36公尺
$0^{\circ}(\text{N})$	146.53	161.46	148.60
$90^{\circ}(\text{E})$	139.06	151.95	146.12
$180^{\circ}(\text{S})$	144.25	153.80	120.61
$270^{\circ}(\text{W})$	151.99	163.42	122.65

表 17 T00239 試驗 34-36m 最佳擬合地下水流向方位角度與流速

	34公尺	35公尺	36公尺
方位角	170°	145°	50°
流速(m/d)	0.12	0.08	0.43

6-4 單井加熱試驗與 TV-DTS 試驗之比較分析

在前述章節中，以 Zlotnik and Tartakovsky (2018) 之座標轉換公式，利用點熱源及有限的加熱時間下溫度分佈的解析解，推估三維空間地下含水層的地下水流向與達西流速，以及 A-DTS toolbox(Simon et al., 2021)分別針對單井加熱之試驗結果和 TV-DTS 試驗結果進行流速分析。藉由圖 44 和表 18 之比較可得知，熱傳輸流向解析公式與 ADTS Toolbox 在相同深度下所估計之地下水流速值大致相同。井 T00239 在深度 74~76 公尺藉由 A-DTS Toolbox 所計算流速為 0.08~0.26m/d，Zlotnik and Tartakovsky (2018) 的熱傳輸流向解析公式所計算之地下水流速為 0.08~0.12 m/d；井 T00226 在深度 38~40 公尺藉由 ADTS Toolbox 所計算流速為 0.25~0.35m/d，Zlotnik and Tartakovsky (2018) 的熱傳輸流向解析公式所計算之地下水流速為 0.17 m/d。從以上結果可得知，在井 T00239 在深度 74~76 公尺，兩種分析方式所獲得地下水流速值相同；在井 T00226 深度 38~40 公尺，兩種分析方式所獲得地下水流速值雖有些微的低估，但屬於同個數量級。兩種不同方式的擬合結果有高度的一致性，亦能夠準確反應含水層之相對流速。



結果與討論

為能更了解兩者在使用上的差異與功能，在此章節中嘗試討論其使用方式與結果比較。兩者的程式設計目的皆為加熱光纖所使用之單井加熱溫度訊號，藉由熱能在地下含水層的流動與傳遞，針對每個深度區間的溫度變化進行溫度擬合進行加熱溫度之擬合，獲得地下水之流速。熱傳輸解析公式在模式上有一個前提為：觀測井設定在同一含水層且岩性組成變化變異性不大的假設下，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，必須先行輸入各個參數以進行擬合。其中 Zlotnik and Tartakovsky (2018) 的熱傳輸流向解析公式，可進行水平方向上的二維模擬，並可對各深度間距之水流速度進行推估。A-DTS Toolbox 之計算公式亦可進行單井流速分析，其特點是可以去除光纖纜線批覆層的熱傳導效應，並同時針對井下各深度的熱傳導係數及水流速度進行推估，獲得更為細微之流速變化資料。模式在進行設定時僅需輸入多孔隙介質與水之體積比熱容，因此在模式設定與計算上更為便利。相較於 Zlotnik and Tartakovsky (2018) 的流向解析公式，進行單一深度水平方向上的流向模擬，A-DTS Toolbox 能針對沿著光纖纜線上量測點的水平流速進行推估，對於井下之地下水流速能夠有更全面的瞭解。

藉由圖 44 和表 18 之比較可得知，熱傳輸流向解析公式與 ADTS-Toolbox 在相同深度下所估計之地下水流速值大致相同。井 T00239-1 在深度 74~76 公尺藉由 ADTS-Toolbox 所計算流速為 0.08~0.26m/d，熱傳輸流向解析公式所計算之地下水流速為 0.08~0.12 m/d；井 T00239-2 在深度 34~36 公尺藉由 ADTS-Toolbox 所計算流速為 0.06~0.21m/d，熱傳輸流向解析公式所計算之地下水流速為 0.08~0.43 m/d；井 T00226 在深度 38~40 公尺藉由 ADTS-Toolbox 所計算流速為 0.25~0.35m/d，熱傳輸流向解析公式所計算之地下水流速為 0.17 m/d。從以上結果可得知，在井 T00239-1 在深度 74~76 公尺，兩種分析方式所獲得地下水流速值相同；在井 T00239-2 深度 34~36 公尺以及井 T00226 深度 38~40 公尺，兩種分析方式所獲得地下水流速值雖有些微差距，但仍屬於同個數量級。



以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查

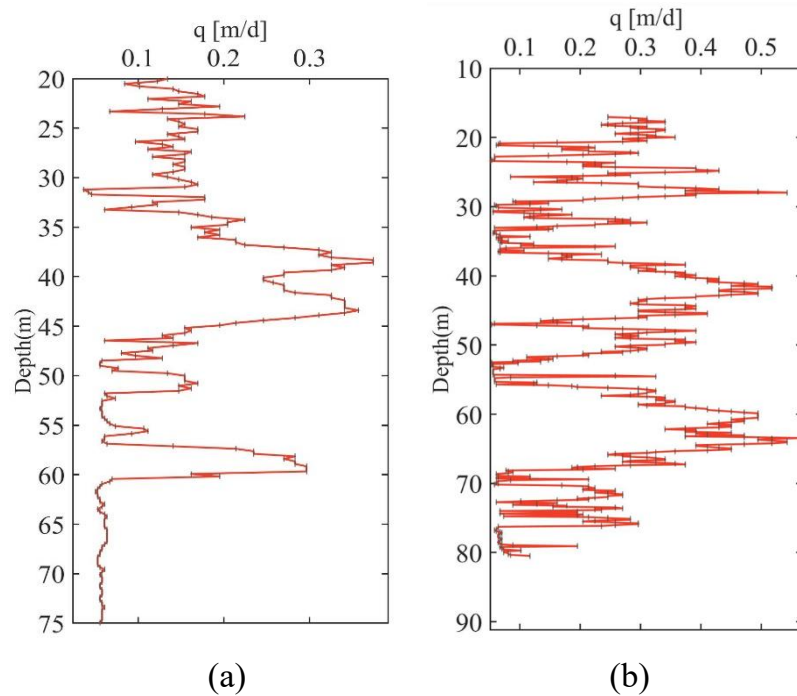


圖 44 ADTS-Toolbox 流速分析結果：(a)T00226，(b)T00239

表 18 T00239 和 T00226 擬合地下水流速結果

	T00226 38-40公尺	T00239-1 74-76公尺	T00239-2 34-36公尺
流速(m/d)	0.17	0.08~0.12	0.08~0.43

6-5 FLUTe 試驗結果

FLUTe 的封井技術為本計畫的創新之一，因此，在進行現地試驗之後，需進行一系列的相關測試，評估此方法之可行性，找出實際應用上可能的挑戰與困難，進而克服並優化各式的操作流程。

6-5-1 室內試驗

期中報告已透過相關的試驗驗證了 FLUTe 的熱對流與垂直對流的抑制能力，並於現地應用之結果呈現其使用成效，為更加了解其對於地層存在的快速水流是否能夠明確顯現，進行了一室內試驗，室內試驗的配置如圖 45，於一圓形水槽內放置長 1 公尺之兩吋開篩管，並於管內設置光纖，利用 DTS 連接光纖連續性溫度量測，頻率為每分鐘一筆，空間解析度為 0.127 公尺，光纖內同時配置銅線，透過加熱脈衝控制器進行每公尺 15 瓦的功率進行加熱，長達 2 個半小時，於圓形水槽的一側設有兩個出水口，分別位於深度 15 及 75 公分，營造出流速的差異。試驗結果為圖 6-5-1-2 所示，圖 46(a)為沒有設置 FLUTE 的加熱結果，Y 軸的藍色箭頭為出水口之位置，深度 0.15 公尺以上的位置有著較高的升溫幅度，可能是



結果與討論

因其較靠近空氣段所導致，0.15 公尺以下的溫度變化在 28 到 29 度之間，整體的溫度受到加熱及水體的紊流影響，使得位於深度 0.15 及 0.75 公尺的出水口的流速差異對於溫度回饋並不明顯，無法觀察到高流速導致的熱量散失。圖 46(b)為設置 FLUTe 的加熱結果，可以明顯看到深度 0.15 公尺以上的高溫有所降低，此外整體的溫度更加的一致，位於深度 0.75 公尺的出水口位置可以明顯觀察到低溫訊號，顯示此區段的強水流加速帶走熱能，使其熱量累積不易，得以區分不同水流造成之差異，深度 0.15 公尺同樣設有出水口，但從圖上並未看到明顯的低溫訊號，此外在 0.2 公尺左右卻呈現一高溫的帶狀變化，淺層的異常變化可能來自於 FLUTe 的密封不完全，於試驗結束抽出 FLUTe 時，發現上方 15-20 公分有著漏水的現象，顯示井管內的水是直接穿過淺層的 FLUTe，並非呈現類似封井之情形，導致此處的溫度異常。後續將持續於實驗室進行 FLUTe 的精進改良，預計於明年度的計劃中，實際應用於現地試驗。

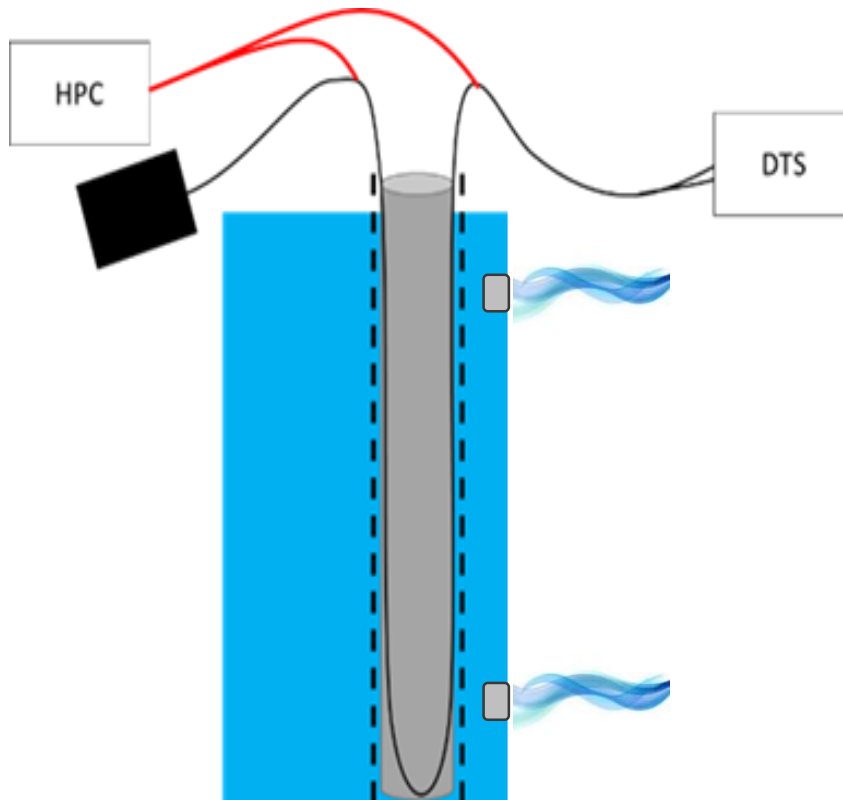


圖 45 FLUTe 室內加熱試驗示意圖



以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查

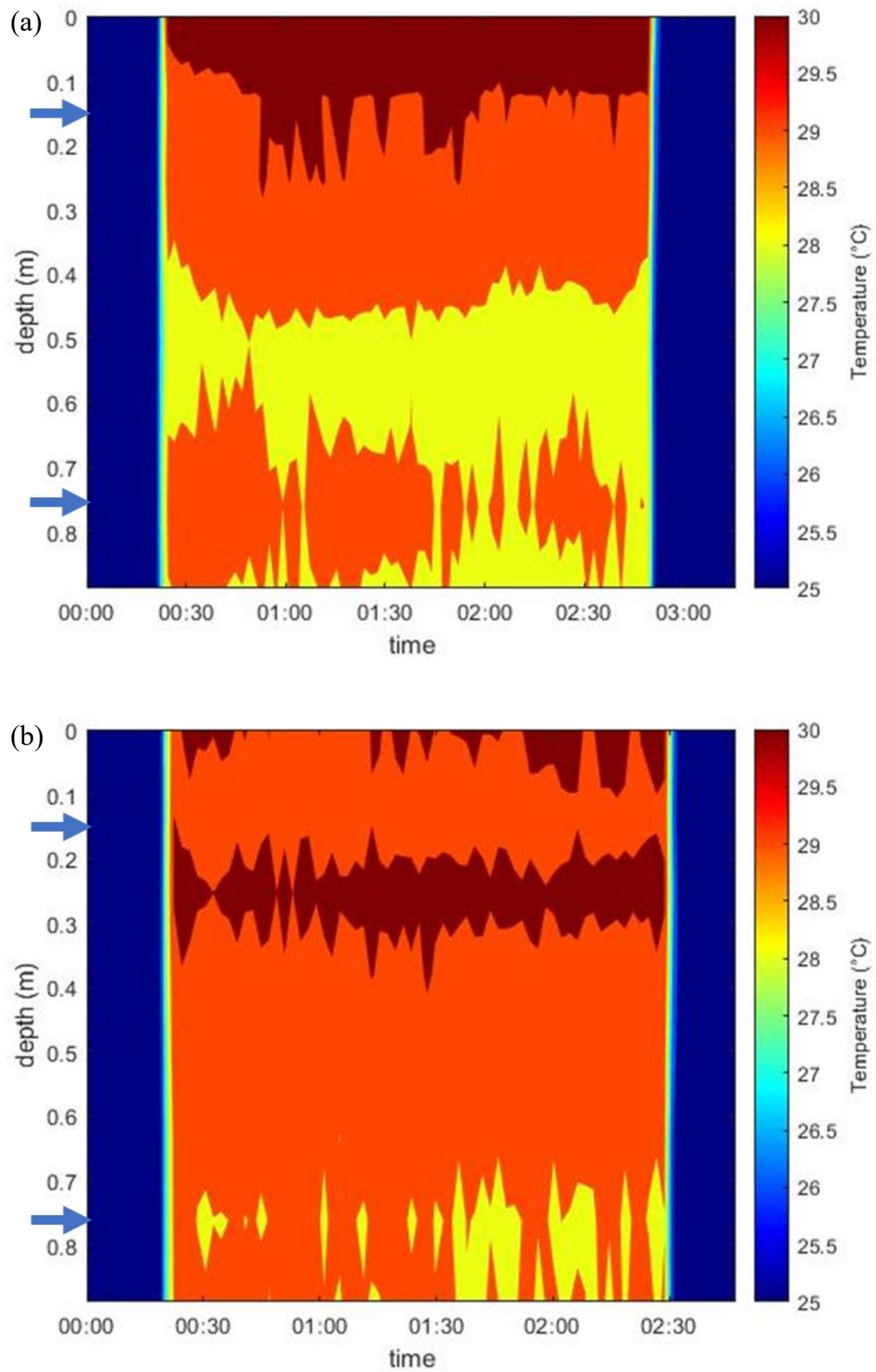


圖 46 FLUTe 室內加熱試驗結果：(a) 未設置 FLUTe (b) 設置 FLUTe



6-6 PAM 試驗結果

PAM 的封井技術亦為本計畫的創新之一，PAM 與 FLUTe 的設計有著相同的目的，均為了達到抑制井內垂直水流，然而，由於本質上的差異，在實際運用的層面上可能遭遇跟 FLUTe 完全不同的挑戰限制，本計畫先行針對其特性及設置進行相關室內試驗，確認可能存在的問題，進一步針對困難處進行改進，以及後續現地試驗流程的優化研析。

6-6-1 室內試驗-底部加熱

PAM 為一高吸水性聚合物，根據不同目的其形狀也有所不同，透過將其浸泡使其膨脹，並於室內進行相關的測試，了解其再抑制垂直或熱對流之成效。圖 47 為測試 PAM 抑制熱對流成效之實驗設計，將一公尺長的 2 吋 PVC 管放入相同長度之 3 吋 PVC 管內，利用水管蓋封住底部，並將水灌入其中，使其內部充滿水體，模擬水井之情況，進一步透過底部的加熱金屬板進行加熱，使水體產生溫度分層，形成垂直向上的熱對流，加熱的同時利用佈設之光纖(黑色線)量測管內不同位置的溫度變化，觀察有無 PAM 之情況下水體的溫度變化。圖 48 顯示了兩種不同條件下的試驗結果，皆呈現井內 30 公分到 90 公分的溫度變化，位於表層的 10 及 20 公分容易受到空氣溫度影響，故排除比對，圖 48(a)為沒有加入 PAM 的量測結果，隨著底部加熱開始，位於深部 89 公分的水體溫度快速上升，緊接著 38 至 76 公分之位置也隨之上升，隨著加熱的持續進行，最終各深度的水體溫度介於 25.2 到 26 之間，不同深度的溫度差距甚微，顯示熱對流使水體混合，對於水體溫度有所影響。圖 48(b)為置入 PAM 之加熱試驗，與圖 48(a)相似，最深部 89 公分之位置產生水溫的快速上升，隨著熱量的持續累積，最終來到 27.3 度；其餘深度同樣有溫度上升之情形，但與圖 48(a)有著明顯差異，深度 76 公分從 22.3 度上升至 26.3 度，深度 64 公分從 22.3 度上升至 25.04 度，深度 51 公分從 22.3 度至 24.01 度，深度 38 公分從 22.3 上升至 23.78 度，各深度的升溫幅度有著明顯差異，由於加熱是由底部進行熱量的提供，使得深部有著顯著的溫度上升，但井內置入之 PAM 提供類似封井之效用，降低了加熱產生之熱對流造成的水體混合，有效的將不同區域進行分隔。



以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查

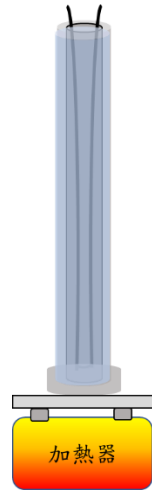


圖 47 PAM 室內底部加熱試驗示意圖

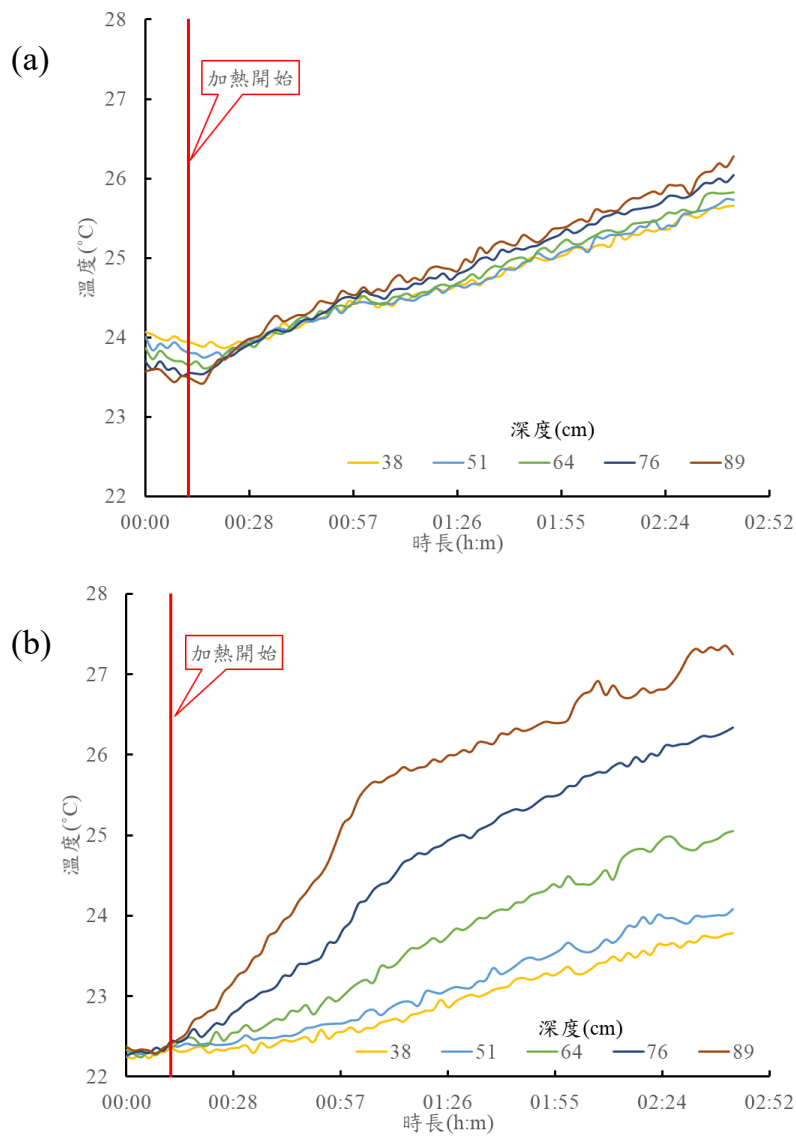


圖 48 PAM 室內底部加熱試驗結果：(a)沒有 PAM，(b)有 PAM



結果與討論

6-7-1 室內試驗-線性源加熱

根據室內底部加熱試驗證明了 PAM 對於垂直熱對流的抑制有著顯著的成效，為進一步呈現現地實際的狀況，透過室內線性源的加熱試驗，模擬 PAM 在現地加熱試驗時的對流抑制成效，圖 49 為此室內試驗之示意圖。光纖量測長 1 公尺，佈設於 2 吋開篩管內，光纖內部之銅線作為加熱之功用，開篩管底部佈設一抽水幫浦，為試驗提供強烈的垂直對流作為試驗的其中一項控制條件。為測試 PAM 的成效，設置對照組，測試在沒有 PAM 與置入 PAM 之情況下的差異進行比對。本試驗一共分成四種情況進行，如表 18 所示。圖 50(a)與圖 50(b)為沒有 PAM 之加熱試驗結果，兩者差別在於幫浦是否開啟，圖 50(a)為幫浦開啟時的試驗結果，可以看到各深度受到幫浦產生的垂直對流以及加熱之熱對流影響，水體溫度呈現均勻混合，均為 28 度左右，位於淺部之光纖位置容易受到環境溫度影響而有所偏差，故排除比較。圖 50(b)為沒有幫浦開啟時之加熱結果，雖說移除了強烈的垂直對流，仍舊受到加熱之熱對流影響，水體溫度產生混合之現象，深度 0.5 公尺到 0.89 間的溫度變化差異不大，最高溫約為 31.3 度，最低溫約為 30.5 度，相差最大約為 0.8 度，顯示加熱所產生的自然熱對流對井內水體有所影響。圖 50(c)與圖 50(d)為置入 PAM 之加熱結果，兩者差異同樣為幫浦是否開啟，圖 50(c)為幫浦開啟之狀態，可以發現由於 PAM 於井內吸水膨脹，填滿井內空間，達到類封井之效果，與圖 50(a)相比，不同深度的溫度區分相當明顯，整體區域的最高與最低溫相差 4 度之多，進一步分析單點深度的溫度變化，最深部 89 公分溫度升幅最小，大約 4 度的變化，隨著深度減少，溫度上升越大，深度 51 公分時來到了 6 度的溫差，此結果顯示加熱及垂直強對流的雙重影響下，PAM 依然可以發揮其成效，並未使得水體互相混合，各區段僅受到該段的加熱熱量影響，使其溫度升幅有所差異。圖 50(d)為沒有開啟幫浦時之加熱結果，同樣的可以看到由於 PAM 的置入，降低了熱對流對於水體混合的影響，不同深度之溫度有著明顯區分，與圖 50(b)相比，整體區域的溫度差異更加明顯，相差約為 4 度，不同位置間的溫度差異同樣有著明顯落差，可以明顯區分不同深度之加熱差異，深度 89 公分從 21 升溫至 35 度左右，隨著深度減少，溫度上升越少，深度 51 公分時從 21 度升至 31 度左右。根據四次不同條件下的試驗驗證了 PAM 在抑制熱與垂直對流的影響有著明顯的幫助，有助於現地加熱試驗的資料分析與判斷。

以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查

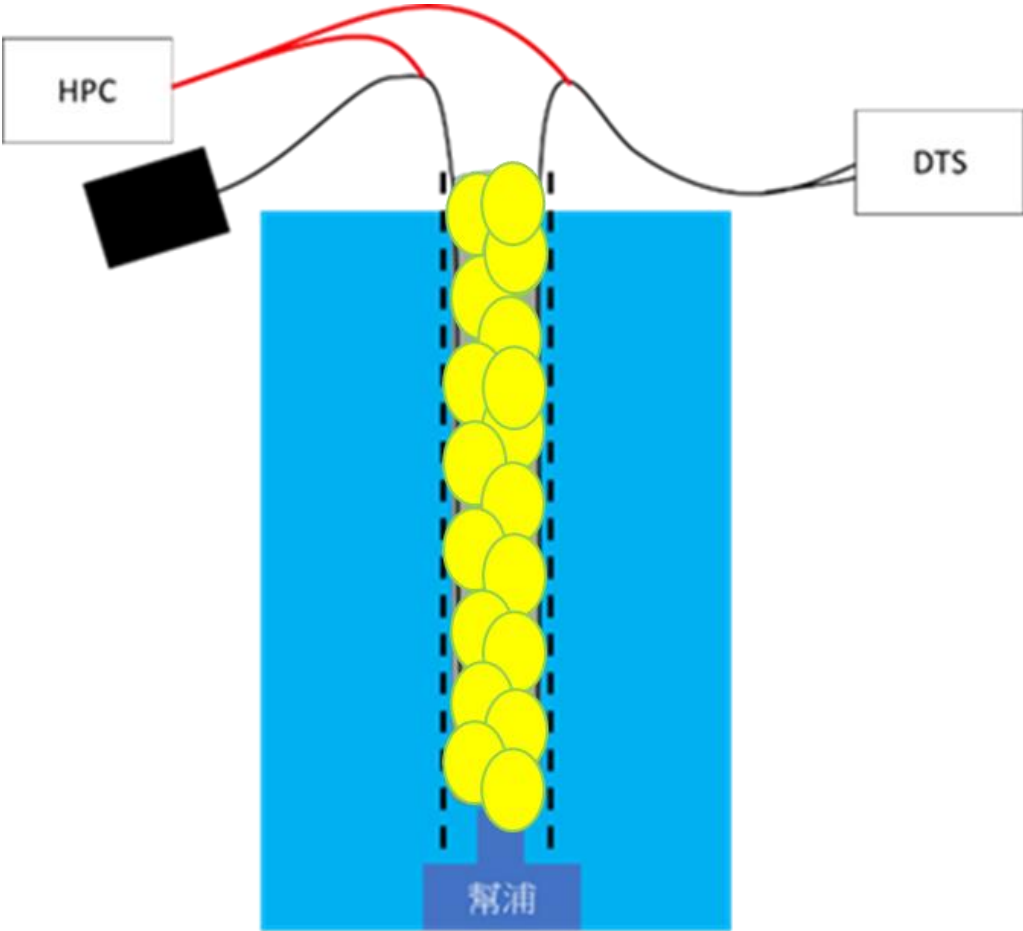


圖 49 PAM 室內線性源加熱試驗示意圖

表 19 PAM 室內線性源加熱試驗相關條件設定與配置

實驗	幫浦開啟	PAM 使用	加熱功率 (瓦/公尺)	加熱時長 (分鐘)
1	是	否	20	40
2	否	否		
3	是	是		
4	否	是		



結論與建議

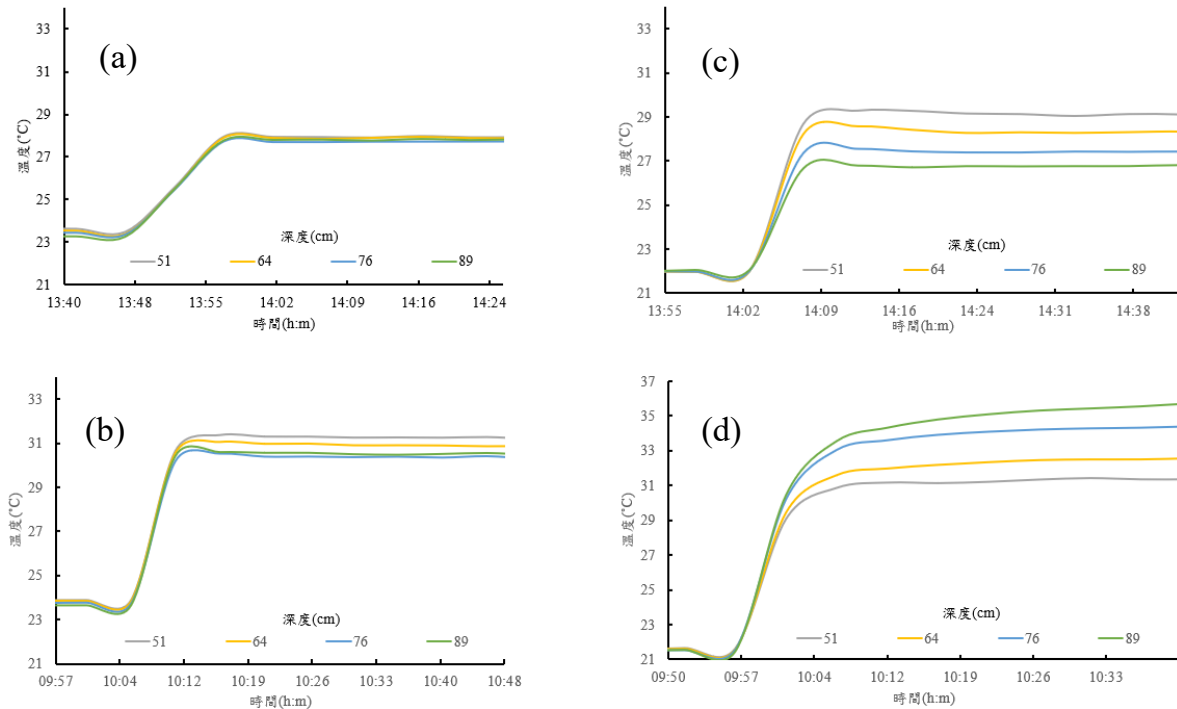


圖 50 PAM 室內線性源加熱試驗結果：(a)實驗一，(b)實驗二，(c)實驗三，
(d)實驗四

七、 結論與建議

7-1 本期結論

今年度已針對四口井進行 TV-DTS 與單井加熱之試驗，並進行了流速分析，分別是 T00571、T00567、T00239 與 T00226，此外進行了 FLUTE 與 PAM 的室內測試，以下為截至本年度之成果所獲得之初步結論：

- 根據單井加熱試驗分析結果顯示，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為緩慢；在回復過程中，若地下水流流速較快，會使得溫度回復速度較快。根據監測井試驗所得到的溫度剖面結果，可明顯的判斷出透水層和較不透水層的分布情形。
 - T00239 監測井深度 77.5~80.48 公尺溫度上升較為緩慢，為最為透水之區段；深度 53~90 公尺周圍的地層相對較不透水；在深度 76~80 公尺則為最不透水區段，熱能較易累積，因此升溫過程較快速、且升溫幅度也較大。
 - T00226 監測井深度 37~44 和 57~60 公尺在試驗中呈現較為緩慢的升溫，透水性較高；而深度 61~69 公尺透水性最差，其次為 45~54 公



以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查

尺，在試驗中具有較高的升溫表現，透水性差因此受到地下水流影響較小，造成明顯的升溫結果。

- T00567 監測井深度 50 和 71~72 公尺以及 75~77 公尺透水性較高，在試驗中具有較高的升溫表現；而深度 80~90 公尺透水性最差，其次為 65~70 公尺。
 - T00571 監測井深度 47.5-75 公尺透水性較高，其次為深度 30-45 公尺；而深度 12.5-22.5 公尺透水性最差，其次為 80 公尺至井底。
2. 將單井試驗之結果以 A-DTS Toolbox 軟體進行井下地下水流速分析，可去除光纖電纜本身之熱傳導效應影響，可準確地進行量化推估井下各深度的熱傳導係數及水流速度，獲得更為小尺度之流速變化資料，對於探討細微的水文地質特性將有所助益。綜合四口地下水流速分析之結果：
- 試驗結果皆可明顯判斷出高低流速分布與流速值。不過井 T00567 以及井 T00571 之地下水分析結果，雖然流速趨勢和單井加熱之結果可以相互吻合，但可以觀察到在流速值的估計上較不精確，需再進行後續分析。
 - 推測原因為井 T00567 以及井 T00571 之地下水流速過快，根據單井加熱試驗可以觀察到升溫情況不如井 T00226 以及井 T00239 來得顯著，顯示井 T00567 以及井 T00571 具有較快的地下水流速，導致超越了 A-DTS Toolbox 軟體所能估計的地下水流速範圍。
3. 為進一步判斷地下水流向資訊，針對主動式加熱 DTS 進行改良，自製研發設計 TV-DTS：設計目的為在單口井內同時放入加熱光纖與不同方向之感測光纖，透過不同方位之感測光纖所接收到的加熱溫度訊號差異，判斷地下水之流向。本研究透過四口監測井搭配 TV-DTS 之試驗：



結論與建議

- T00571 深度 66 至 68 公尺深度的地下水流向主要為往東方流動，且些微的偏向南方。
 - 井 T00239-1 深度 74 至 75 公尺深度的地下水流向主要為往北方流動，而深度 76 公尺主要為往西南方流動。
 - 井 T00239-2 深度 34 公尺主要為往北偏西的方位流動;深度 35 至 36 公尺深度的地下水流向主要為往西偏北的方位流動。
 - 井 T00226-2 深度 38 至 40 公尺的地下水流向主要為由東向西流動。
 - 整體來說地下水流向為往西方流動，結果非常一致；不過在某些井試驗中，由於監測光纖固定不足，導致結果略有偏差，無法透過此次試驗中，四個方位監測光纖之溫度變化辨識地下水流向。
4. 為進一步量化 TV-DTS 之試驗結果，以 Zlotnik and Tartakovsky (2018) 的解析解進行流向與流速量化分析，驗證了地下水流向與流速的特徵分布。其結果顯示：
- 井 T00226 深度 38-40 公尺流向方位角度與流速最佳組合分別為 170° 方位(西偏北)以及 0.172 m/d，地下水流向約往西側流動。
 - 井 T00239-2 深度 34-35 公尺流向方位角度十分接近，約為 $145-170^{\circ}$ 方位 (西偏北)，流速約為 0.08-0.12m/d；而深度 36 公尺流向方位角度為 50° 方位(東偏北)，流速約為 0.43m/d，地下水流向為往西北方流動。
 - 井 T00239-1 深度 74-75 公尺流向方位角度十分接近，約為 $35-60^{\circ}$ 方位 (東偏北)，流速約為 0.08-0.12m/d；而深度 76 公尺流向方位角度



以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查
為 200° 方位(西偏南)，流速約為 0.08m/d。

- 井 T00239-1 的 TV-DTS 試驗結果和流向與流速量化分析可觀察到有流向不一致的問題產生，目前推測為在進行井 T00239 下放 TV-DTS，並沒有將監測光纖固定完全，導致監測光纖和加熱光纖之間距離有所不同，使得在進行流向與流速量化分析時有所差異。
5. 根據室內試驗結果顯示，FLUTe 在阻隔垂直對流的封井成效良好有效降低對流產生的水體混合，改善試驗中的溫度量測，以利觀測到不同水層的溫度變化，此外，裂隙造成的潛在水流造成的流速差異得以透過 FLUTe 之設置強化其產生之溫度回饋，顯示明顯的低溫帶狀區間，有助於現地試驗的量測優化，並改善後續的資料分析與判讀。
 6. PAM 根據多次的室內試驗顯示，其吸水膨脹之特性能夠達成類似封井之成效，在抑制垂直或熱對流對於水體溫度的影響有著良好成效，不論是類似地熱梯度的底部加熱試驗或是加熱試驗產生的線性熱源皆能有效阻絕其熱對流，同時加上底部的幫浦產生之強烈垂直對流同樣有效抑制其影響，有助於現地的長期加熱試驗的溫度呈現，利於後續相關之資料分析。

7-2 後續工作

1. 將持續針對 TV-DTS 結構進行調整，避免再度出現感測光纖與中心加熱光纖所產生之距離偏差，以及 TV-DTS 裝置上所安裝光纖之穩定性，持續對於其設計結構進行優化，使得四個方位之感測光纖在加熱試驗中，能夠呈現差異更為明顯、更為準確的溫度訊號，以利於增加 TV-DTS 量測準確度。
2. 針對在地下水流速較快的區域中，設計出相對應之 TV-DTS 試驗設計，以克服流速過快所造成在溫度訊號上的誤判，使得 TV-DTS 裝置在低流速和高流速的狀況下皆能有良好的量測準確性，提高其通用性。
3. 針對 FLUTe 的設計進行更多探討與優化，預計使用不同材質進行 FLUTe 之設計與製作，以克服現行版本於現地利用之困境，並透過穿線器等外部設備改善 FLUTe 的架設與回收流程，使其應用更為便利，優化其應用



明年度工作規劃

之成果。

4. 針對 PAM 的現地佈設及回收進行更多的探討，評估此方法於現地應用之可行性，像是透過類似防蟲網的網狀布料做成袋狀結構並將 PAM 置入其中，放入水井之中會由於結構本身的透水但不吸水之特性，使得 PAM 可與井內水體直接接觸，進而吸收膨脹，由於袋狀結構本身不具備吸水之特性，減少額外的重量，利於回收流程的進行，此外，確認此方法對於現地加熱試驗的溫度量測是否具備良好之效益，利於後續的相關分析及判讀。
5. 將本計畫之量測結果與其他量測技術進行比較有其必要性，因此，本團隊已於期末報告截止日前向相關單位詢問歷年的調查報告與監測資料，然而由於資料較為敏感，目前仍在溝通當中，且持續彙整與分析所搜集到的資料，一但資料搜集與彙整完成，將立即進行深入分析，提供全面且具體的比較與評估。

八、 明年度工作規劃

1. 完成 4 口 TV-DTS 的測定進行另外四口井的 TV-DTS 試驗，用於分析其地下水之流向
2. TV-DTS 之試驗將基於第一年度之試驗結果進行優化，並嘗試應用不同井況或地質條件之觀測井（例如：新/舊井、高/低流速）。針對不同條件，進行 TV-DTS 的改善，延伸其現地應用範圍。
3. 完成至少兩口井的單井加熱試驗，用於分析井內的流速及地層的熱傳導係數之分佈情形
4. 進行並完成柔性襯管 FLUTe 與聚丙烯醯胺凝膠 PAG 封井材料的現地試驗，從中優化各式的施作流程以及其材料上的選擇，並透過 COMSOL 模式模擬與驗證兩種材料之適用性。
5. FLUTe 與 PAM 的現地測試則是基於第一年度室內實驗室試驗之結果，實際應用於現地，針對現地實際之安裝、試驗過程及收回進行一系列之測試，確認其在現地量測應用上之可行性。



以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查

九、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.
- Bear, J. (1972). *Dynamics of fluids in porous media*. New York: Elsevier.
- Bense, V.F., Read, T., Bour, O., Le Borgne, T., Coleman, T., Krause, S., Chalar, 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.
- Bhardwaj A, Miller E, Rothstein JP (2007) Filament stretching and capillary breakup extensional rheometry measurements of viscoelastic wormlike micelle solutions. *J Rheol* (in press).
- 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., Buckley, S. F., Bagtzoglou, A. C., Werkema, D. D., & Lane, J. W. (2016). Actively heated high-resolution fiber-optic-distributed temperature sensing to quantify streambed flow dynamics in zones of strong groundwater upwelling. *Water Resources Research*, 52(7), 5179-5194.
- Cardiff, M., Liu, X., Kitanidis, P. K., Parker, J. C., & Kim, U. (2010). Cost optimization of DNAPL source and plume remediation under uncertainty using a semi-analytic model. *Journal of Contaminant Hydrology*, 113(1–4), 25–43.
- Chauveteau, G., Omari, A., Tabary, R., Renard, M., and Rose, J. (2000). Controlling gelation time and microgel size for water shutoff. *Society of Petroleum Engineers*. <https://doi.org/10.2118/59317-MS>
- 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.
- Dagan G., *Flow and Transport in Porous Formations*, Springer-Verlag, New York, 1989.
- Davidson, S. R., and Sherar, M. D. (2003). Measurement of the thermal conductivity of polyacrylamide tissue-equivalent material. *International Journal of Hyperthermia*, 19(5), 551–562.
- de La Bernardie, J., Bour, O., Le Borgne, T., Guihéneuf, N., Chatton, E., Labasque, T., . . . Gerard, M. F. (Eds.). (2018). Thermal attenuation and lag time in fractured rock: theory and field measurements from joint heat and solute tracer tests (Vol. 54).
- Doussan, C., Toma, A., Paris, B., Poitevin, G., Ledoux, E., & Detay, M. (1994). Coupled use of thermal and hydraulic head data to characterize river-groundwater exchanges. *Journal of hydrology*, 153(1-4), 215-229.



參考文獻

- Elsharafi, M. O., and Bai, B. (2016). Influence of strong preformed particle gels on low permeable formations in mature reservoirs. *Petroleum Science*, 13(1), 77–90.
- Freifeld, B. M., Finsterle, S., Onstott, T. C., Toole, P., & Pratt, L. M. (2008). Ground surface temperature reconstructions: Using in situ estimates for thermal conductivity acquired with a fiber-optic distributed thermal perturbation sensor. *Geophysical Research Letters*, 35(14).
- Grattoni, C. A., Al-Sharji, H. H., Yang, C., Muggeridge, A. H., and Zimmerman, R. W. (2001). Rheology and permeability of crosslinked polyacrylamide gel. *Journal of Colloid and Interface Science*, 240(2), 601–607.
- Hewitt, D. R., Nijjer, J. S., Worster, M. G., and Neufeld, J. A. (2016). Flow-induced compaction of a deformable porous medium. *Physical Review E*, 93(2), 1–11.
- Ingebritsen, Steven E., Ward E. Sanford, and Christopher E. Neuzil. *Groundwater in geologic processes*. Cambridge University Press, 2006.
- Jaeger, J. C., and Carslaw, H. S. (1959). *Conduction of heat in solids*. Oxford, United Kingdom: Clarendon P.
- Keller C.E., Cherry J.A., and Parker B.L. 2014. New method for continuous transmissivity profiling in fractured rock. *Groundwater*, 52(3): 352–367.
- Klepikova, M. V., Le Borgne, T., Bour, O., and Davy, P. (2011). A methodology for using borehole temperature-depth profiles under ambient, single and cross-borehole pumping conditions to estimate fracture hydraulic properties. *Journal of Hydrology*, 407, 145-152.
- Klepikova, M. V., Le Borgne, T., Bour, O., Dentz, M., Hochreutener, R., & Lavenant, N. (2016). Heat as a tracer for understanding transport processes in fractured media: Theory and field assessment from multiscale thermal push-pull tracer tests. *Water Resources Research*, 52(7), 5442-5457.
- Klepikova, M. V., Roques, C., Loew, S., and Selker, J. (2018). Improved characterization of groundwater flow in heterogeneous aquifers using granular polyacrylamide (PAM) gel as temporary grout. *Water Resources Research*, 54, 1410– 1419.
- Kluitenberg, G. J., and A. W. Warrick (2001), Improved evaluation procedure for heat-pulse soil water flux density method, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65, 320–323.
- Leaf, A. T., Hart, D. J., & Bahr, J. M. (2012). Active thermal tracer tests for improved hydrostratigraphic characterization. *Groundwater*, 50(5), 726-735.
- Lee, C., Bour, O., Ballard, J.-M., Simon, N., de la Bernardie, J., Paradis, D., . . . Lefebvre, R. (2020). Inferring high-resolution aquifer hydraulic conductivity and groundwater fluxes by active heat tracer using direct push fiber optics. Paper presented at the European Geosciences



以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查

Union General Assembly.

- MacMinn, C. W., Dufresne, E. R., and Wettlaufer, J. S. (2015). Fluid-driven deformation of a soft granular material. *Physical Review X*, 5(1), 011020.
- Maldaner, C. H., Munn, J. D., Coleman, T. I., Molson, J. W., & Parker, B. L. (2019). Groundwater flow quantification in fractured rock boreholes using active distributed temperature sensing under natural gradient conditions. *Water Resources Research*, 55(4), 3285-3306.
- Munn, J., Maldaner, C., Coleman, T., & Parker, B. (2020). Measuring Fracture Flow Changes in a Bedrock Aquifer Due to Open Hole and Pumped Conditions Using Active Distributed Temperature Sensing. *Water Resources Research*, 56(10), e2020WR027229.
- Oyen, M. L. (2014). Mechanical characterisation of hydrogel materials. *International Materials Reviews*, 59(1), 44–59.
- 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.
- Pehme, P.E., Parker, B.L., Cherry, J.A., Greenhouse, J.P., 2010. Improved resolution of ambient flow through fractured rock with temperature logs. *Ground Water* 48 (2), 191–211.
- Pehme, P.E., Parker, B.L., Cherry, J.A., Molson, J.W., and Greenhouse, J.P., (2010). Enhanced detection of hydraulically active fractures by temperature profiling in lined heated bedrock boreholes. *Journal of Hydrology*, 484, 1–15.
- Read, T., O. Bour, V. Bense, T. Le Borgne, P. Goderniaux, M. Klepikova, R. Hochreutener, N. Lavenant, and V. Boschero (2013), Characterizing groundwater flow and heat transport in fractured rock using fiber-optic distributed temperature sensing, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 2055–2059, doi:10.1002/grl.50397.
- 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.
- 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.
- Simjoo, M., and Koohi, A. D. (2009). Water shut-off in a fractured system using a robust polymer gel. Paper SPE 122280 presented at the SPE European Formation Damage Conference held in Scheveningen, The Netherlands, 27–29 May.
- Simon, Nataline, and Olivier Bour. "An ADTS Toolbox for Automatically Interpreting Active Distributed Temperature Sensing Measurements." *Groundwater* (2022).
- Simon, N., Bour, O., Lavenant, N., Porel, G., Nauleau, B., Pouladi, B., ... and Crave, A. (2021). Numerical and experimental validation of the applicability of active-DTS experiments to



參考文獻

- estimate thermal conductivity and groundwater flux in porous media. *Water Resources Research*, 57(1), e2020WR028078.
- 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.
- Sterling, S.N., Parker, B.L., Cherry, J.A., Williams, J.H., Lane Jr., J.W., Haeni, F.P., 2005. Vertical cross contamination of trichloroethylene in a borehole in fractured sandstone. *Ground Water* 43 (4), 557–573.
- Suzuki, S. (1960). Percolation measurements based on heat flow through soil with special reference to paddy fields, *Journal of Geophysical Research*, 65, 2883-2885.
- Tyler, S.W., Selker, J.S., Hausner, M.B., Hatch, C.E., Torgersen, T., Thodal, C.E., and Schladow, S.G. (2009). Environmental temperature sensing using Raman spectra DTS fiber-optic methods, *Water Resources Research*, 45, W000D23, doi:10.1029/2008WR007052.
- 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.
- Zhang, M., Che, Z., Chen, J., Zhao, H., Yang, L., Zhong, Z., Lu, J. (2011). Experimental determination of thermal conductivity of water-agar gel at different concentrations and temperatures. *Journal of Chemical and Engineering*, 56(4), 859–864.
- Zlotnik, V., and Tartakovsky, D.M. (2018), Interpretation of heat-pulse tracer tests for characterization of three-dimensional velocity fields in hyporheic zone, *Water Resources Research*, 54(6), 4028 – 4039.
- 屏東縣政府環境保護局，2001，辦理潮州鎮新開寮地區疑似遭非法棄置掩埋場污染地下水調查監測計畫。
- 屏東縣政府環境保護局，2003，新開寮地區地下水調查監測計畫書。
- 屏東縣政府環境保護局，2018，屏東縣土壤及地下水污染調查及查證工作計畫。
- 屏東縣政府環境保護局，2019，屏東縣土壤及地下水污染調查及查證工作計畫。