



環境部環境管理署

113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： 113 年 12 月 13 日起至
114 年 11 月 30 日止

中 華 民 國 114 年 10 月 印製



一、專案基本資料表

申請編號： (由本署填寫)

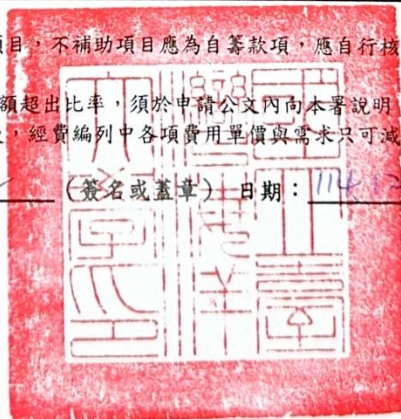
專案性質	☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質		專案技術編碼	LAB-S-I-C1-P (如非實驗性質含氬溶劑之生物整治模場為 NLAB-S-R-C1-B，填寫請參考附件1-4)	
專案類別(單選)	☐ 先導型 ☐ 研究型 ☒ 模場型		研究主題	☐ 整治 ☒ 調查 ☐ 政策類或其他	
申請機構系所	國立臺灣海洋大學地球科學研究所				
機構地址	基隆市中正區北寧路2號				
專案主持人	邱永嘉	職等/職稱	教授		
協同主持人	董天行	職等/職稱	經理		
專案名稱	中文	以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查			
	英文	High-resolution investigation 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			
執行日程	自 民 國 1 1 3 年 1 2 月 1 3 日 起 至 民 國 1 1 4 年 1 1 月 3 0 日 止				
專案主持人	姓名：邱永嘉	E-mail： ycchiu@mail.ntou.edu.tw	專線：02-2462-2192#6515	手機：0988612599	
專/兼任人員	姓名：吳承翰	E-mail： roywu990412@gmail.com	專線：02-2462-2192#6516	手機：0956015016	
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		第一年申請經費	第二年變更後經費	編列說明
	1.	人事費用	626,210	609,635	(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	1,291,158	(與計畫主體相關)
	4.	其它研究相關費用	281,358	275,321	(含差旅與租賃費用)
	5.	行政管理費	220,206	213,886	(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	2,390,000	總金額：5,075,000
	計畫總經費(1~6項)		2,685,000	2,390,000	總金額：5,075,000

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：

(簽名或蓋章) 日期：114.12.15



(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

113 年度專案成果績效自評表

填表日期：113 年 10 月 20 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	2		
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1	0	0		期刊論文需待所有現地試驗結果彙整分析完成後方能開始進行撰寫。
		(2)國際研討會 論文發表	1	1	1		
	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)						



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)
B 人才 培育	8.研發人員 (人數)	(1)碩士	2	1	2		
		(2)博士					
	9.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊					
		(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

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 (說明未達成原因或專利、技術轉移相關詳細資料)
A 智慧 財產權	1.專利 (件數)	已核准	發明				
			新型/設計				
			合計				
		申請中	發明				
			新型/設計	2	0	0	預計申請專利之儀器與試驗方法持續在修正中，一旦完成所有測試後，將開始著手專利申請之程序。
			合計	2	0	0	同上。
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

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	碩士生	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
陳立祐	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	113 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：
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.本計畫於期末階段已基本達成研究目標，展現分散式光纖溫度感測技術於地下水調查之可行性，並完成封井材料測試與初步模擬驗證。技術成熟度、數據完整性與報告架構均顯著優於期中成果。惟在學術論文產出、專利申請與政策應用化三方面仍顯不足，建議於結案後半年內完成補強，方能充分發揮本技術對土壤及地下水調查體系之推進價值。		1.感謝委員肯定與指正。針對學術論文產出、專利申請及政策應用化等建議，本團隊已納入後續成果推廣之重要參考指標，並著手盤點相關數據與技術亮點，規劃於結案後持續深化研究內容，以期將本技術之應用價值轉化為具體學術與實務貢獻，進一步提升對土壤及地下水調查之效益。	
委員二 1.本研究案採行光纖感測，研究方法具創新性，實地運作亦達預期效果，研究計畫值得肯定。 2.建議將目前研究成果，模擬繪製污染場址的地下水流向與流速地圖，後續並收集污染場址地下水檢測資料，進一步判定模型推估後與實際採樣檢測的結果，以利管理單位全面掌握污染場址的地下水污染情況。		1.感謝委員肯定。 2.感謝委員建議。依據本計畫之分析結果，污染場址地下水流向大致上與過往之調查結果相符，然而在流速方面則無相關的資料可進行佐證。後續如果能與檢測資料進行比對與驗證，確實有助於強化本技術於實務管理層面的應用。本計畫主要著重於量測技術與解析方法之建立與驗證，相關於實際污染場址長期監測與管理決策之整合應用，將列為後續研究與實務推廣之重要參考方向。	



委員三

1. 開發新型地下水流速量測技術，宜補充說明與使用傳統貝勒管等分析結果的比較性、及本技術的解析度與適用範圍。

1. 感謝委員建議。本計畫使用之技術，其理論核心係基於地下水體對於熱的溫度響應來推估地下水流速與流向，旨在獲取高時空解析度的地下水「物理流場」資訊。此方法與傳統貝勒管用於定點特定深度所採集水樣以進行「化學分析」之目的與範疇均有所不同。因此，本研究之重點在於驗證此物理量測技術本身的可靠度與解析能力，而非與水質採樣工具進行比較。

委員四

1. 本研究利用光纖溫度感測器調查地下水流速與流向，研究方向具創新性且值得肯定。本計畫亦聚焦於封井材料之評估，但目前封井填充料的測試結果僅呈現於單一圖（圖 41），其尺寸、膨脹性與充填密度等重要參數並未進行量化或實驗測試。

1. 感謝委員肯定本研究方向之創新性與寶貴建議。本計畫中封井填充料之試驗，主要定位於配合光纖溫度感測技術之初步可行性與適用性評估，故本期工作重點並未放在填充材料各項物、化性質之系統性量化分析。封井材料之尺寸、膨脹性與充填密度等參數確實有助於日後技術優化與標準化，更深入之研究試驗與分析將有其必要性，相關建議將作為未來實務應用與後續相關研究規畫之重要參考。



中文摘要

傳統的水文地質調查方法多以大尺度試驗為主，雖能掌握區域性地下水分布特徵，但在地層構造複雜、含水層非均質性高的場址中，因現地資料空間解析度不足，常導致透水層位置及地下水流速、流向推估的不確定性，進而影響水文地質判釋之準確度。近年來，熱示蹤技術（Thermal Tracing）結合分散式光纖溫度感測系統（Fiber-Optic Distributed Temperature Sensing, FO-DTS）已被證實可於多種水文地質條件下有效解析地下水流動特性。此技術具備高時間與空間解析度、可連續量測及高穩定性等優勢，已成為傳統水文調查方法的重要補充工具。

本研究即以此為基礎，利用 FO-DTS 技術進行地下水流動與熱傳特性之分析，並自製研發單井流速與流向光纖溫度測定儀（Thermal Vector DTS, TV-DTS）。該系統可於單井內同時設置加熱光纖與多方位感測光纖，透過不同方向溫度訊號的差異，不僅能推估井內垂向流速分佈，亦能解析地下水流向，克服現地觀測井數量不足或井位分佈不均之限制。此外，為降低井內垂直熱對流所造成的溫度混合效應，本計畫同步研析兩種暫時性封井材料——柔性襯管（Flexible Liner Underground Technologies, FLUTe）與聚丙烯醯胺凝膠（Polyacrylamide Gel, PAG），以提升加熱試驗之穩定性與流速推估準確度，並評估其於分層水壓監測上的可行性。

本計畫選定屏東潮州新埤地區地下水污染場址為試驗區。截至期末報告截止前，已於兩口監測井（T00483、T00484）完成單井主動加熱試驗，並配合 ADTS 軟體進行流速與熱傳導係數反演，建立垂向流速與熱性質剖面；另以 COMSOL 進行不同封井條件下的數值模擬，並於 T00567 進行 FLUTe 與 PAG 的現地加熱試驗。試驗結果顯示，T00483 井深度 31–43 m 為最透水區段，深度 64–80 m 為低透水層；T00484 則在深度 45–50 m 及 70–80 m 為高透水帶，深度 40–45 m 及 55–65 m 為低透水帶。ADTS 反演結果指出，T00483 深度 34–39 m 為高流速區，深度 50–80 m 為低流速區；其 RMSE 約 0.2–0.6 °C，顯示模型可合理重現溫度變化。T00484 之流速亦隨深度呈明顯變化，低流速區對應於熱傳導係數較高的位置，RMSE 多介於 0.2–0.6 °C，局部升高至 0.8 °C，顯示該區可能存在細部岩性變化或局部異質性。

COMSOL 模擬顯示，僅有水平流動時，低流速層熱量易累積、溫升對比明顯；若井內存在垂直熱對流，熱量混合使溫度場趨於均質，削弱原本由水平流速差主導的分層結構；當加入封井材料（FLUTe 或 PAG）後，垂直對流被有效抑制，熱量重新集中於低流速區，恢復清晰的溫度分層與穩定的時間變化趨勢。此結果證實，垂直對流是造成單井加熱訊號失真與分辨率下降的主因，而封井設計能在低功率輸入下有效提升熱場對比與可解釋性。



根據 FLUTe 與 PAG 的現地加熱試驗結果可知，兩者皆能明顯改善井內溫度穩定性並抑制垂直對流。FLUTe 試驗顯示，封井後雖整體升溫幅度略低，但高、低溫分帶更清楚，熱能主要受地層導熱與局部流速差控制；試驗中期出現的高溫柱狀區為補水維壓之暫時性現象，與地層水流無直接關聯。PAG 試驗中，封井層（深度 5–7 m）形成穩定分層，深度 6 m 附近溫度上升約 3°C，顯示其能有效降低對流擾動，使溫度變化更能反映地層導熱特性。整體而言，FLUTe 與 PAG 均可顯著提升加熱試驗訊號的清晰度與可靠度，證實封井技術對改善垂直流動干擾、真實反映地下水流動與地層異質性具有明顯成效。

本研究透過 FO-DTS 技術結合單井加熱、數值模擬及封井應用，成功建立高解析度之地下水流速與熱性質剖面，並驗證封井材料於現地試驗的可行性。研究成果可作為污染場址水文地質特性評估與整治規劃的重要依據，亦為未來地下水監測技術之精進與應用提供新的方向與契機。

關鍵詞：數值模擬、熱示蹤劑、光纖溫度感測器、地下水流速、井下封井材料



英文摘要

Traditional hydrogeological investigation methods are generally conducted at a large spatial scale. Although these methods can delineate regional groundwater characteristics, they often lack the spatial resolution required to accurately describe complex and heterogeneous aquifer systems. As a result, uncertainties frequently arise in identifying permeable layers and estimating groundwater flow velocity and direction. In recent years, thermal tracing combined with Fiber-Optic Distributed Temperature Sensing (FO-DTS) has proven to be an effective approach for characterizing groundwater flow under various hydrogeological conditions. This technology provides continuous, high-resolution temperature measurements in both space and time, offering a valuable complement to conventional hydrogeological investigation techniques.

In this study, FO-DTS technology was applied to analyze groundwater flow and heat transport processes. A self-developed Thermal Vector DTS (TV-DTS) system was designed to simultaneously install heating and multi-directional sensing fibers within a single well, allowing the estimation of vertical flow velocity distribution and the determination of groundwater flow direction. To minimize vertical thermal convection and improve the reliability of temperature measurements, two temporary sealing materials—Flexible Liner Underground Technologies (FLUTe) and Polyacrylamide Gel (PAG)—were also evaluated. These materials effectively suppress vertical flow and enhance the accuracy of flow estimation while enabling potential applications for multi-level pressure monitoring.

The experimental site is located in Chaozhou, Pingtung, southern Taiwan. By the end of this reporting period, single-well active heating tests were completed in two monitoring wells (T00483 and T00484), and the ADTS software was used to invert flow velocity and thermal conductivity profiles. Additionally, a COMSOL model was established to simulate the influence of different sealing conditions, and field-scale heating tests using FLUTe and PAG were conducted in well T00567. Results show that well T00483 exhibits high permeability between the depth of 31–43 m and low permeability below the depth of 64–80 m, while well T00484 has higher permeability zones at the depth of 45–50 m and 70–80 m. The ADTS inversion results indicate consistent trends with temperature data, and RMSE values mostly ranged from 0.2–0.6 °C, confirming good model agreement.

COMSOL simulations further demonstrate that, in cases of purely horizontal flow, low-velocity zones exhibit significant heat accumulation and clear vertical stratification. When vertical convection is present, temperature profiles become homogenized, reducing signal



contrast. After applying sealing materials (FLUTe or PAG), vertical convection is effectively suppressed, heat accumulates locally, and stratified temperature structures are restored. These findings confirm that vertical convection is the main cause of signal distortion in single-well heating tests, while sealing designs greatly improve thermal contrast and interpretability even under low-power heating conditions.

Field tests with FLUTe and PAG further validate the simulation results. FLUTe reduced vertical convection and clarified temperature layering, while the temporary vertical thermal anomaly observed was attributed to pressure maintenance during operation. PAG formed a stable stratified structure in the depth of 5–7 m section, showing temperature increases of approximately 3°C near the depth of 6 m depth, effectively stabilizing the thermal field. Both sealing materials improved temperature signal clarity and reliability, demonstrating their capability to reduce vertical flow interference and to reflect groundwater flow and aquifer heterogeneity more accurately.

In conclusion, by integrating FO-DTS with single-well active heating, numerical simulation, and sealing techniques, this study successfully established a high-resolution characterization of groundwater flow velocity and thermal properties. The findings provide a reliable foundation for hydrogeological assessment and groundwater remediation planning, and present new opportunities for the advancement and application of innovative groundwater monitoring technologies.

Keywords: Numerical Simulation, Thermal Tracer, Fiber-Optic Distributed Temperature Sensor (FO-DTS), Groundwater Flow Velocity, Borehole Sealing Materials



內容

中文摘要	XI
英文摘要	XIII
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	10
4-2 TV-DTS 流速與流向測定儀	11
4-3 TV-DTS 熱傳輸解析解	12
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 封井材料－聚丙烯醯胺凝膠（PAG）	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 現地試驗設計	25
6-1-2 T00483 現地試驗結果	25
6-1-3 T00484 現地試驗結果	26
6-2 單井加熱試驗流速推估結果	27

6-3	封井材料試驗結果-FLUTE	32
6-3-1	模型模擬	32
6-3-2	封井材料設計	43
6-3-3	現地試驗設計	44
6-3-4	T00567 試驗結果	46
6-4-1	封井材料設計	48
6-4-2	現地試驗設計	50
6-4-3	現地試驗結果	51
七、	結論與建議	53
7-1	結論	53
7-2	建議	54
八、	參考文獻	54



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).....	7
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 T00484、(b)井 T00483、(c)井 T00567	24
圖 20 T00483 單井加熱期間溫度變化	26
圖 21 T00484 單井加熱期間溫度變化	27
圖 22 T00483 之 ADTS-Toolbox 分析結果：(a) 流速，(b) 熱傳導係數	29
圖 23 T00483 之 ADTS-Toolbox 分析結果 RMSE：(a)流速，(b)熱傳導係數	29
圖 24 T00484 之 ADTS-Toolbox 分析結果：(a) 流速，(b) 熱傳導係數	31
圖 25 T00484 之 ADTS-Toolbox 分析結果 RMSE：(a)流速，(b)熱傳導係數	31
圖 26 COMSOL 模型中所使用的物理模組與邊界條件設定	33
圖 27 模型網格劃分結果：(a)上視圖，(b)側視圖	34
圖 28 地層流速場分佈圖(側視圖)	35
圖 29 理想狀態下地層流速差異對加熱溫度分佈的影響	36
圖 30 垂直流影響之加熱溫度分佈	37
圖 31 封井之加熱溫度分佈	38
圖 32 高流速區域不同情境下之溫度變化曲線：	40
圖 33 低流速區域不同情境下之溫度變化曲線：	42
圖 34 封井材料 FLUTe 設置示意圖	43
圖 35 封井材料 FLUTe 實際照片	44
圖 36 (a) FLUTe 現地試驗佈置，(b) 支撐線纜	45
圖 37 不同條件下加熱試驗期間溫度變化之比較：(a) 未封井，(b) FLUTe 設置	47

圖 38 (a)封井材料 PAG，(b)套管 49

圖 39 封井材料 PAG 示意圖 49

圖 40 (a)PAG 現地試驗佈置，(b) 支撐線纜 50

圖 41 不同條件下加熱試驗期間溫度變化之比較：(a) 未封井，(b) PAG 設置
(位於深度 5-7m)..... 52

表次

表 1 模型中砂岩與頁岩層之主要物理參數設定 33





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

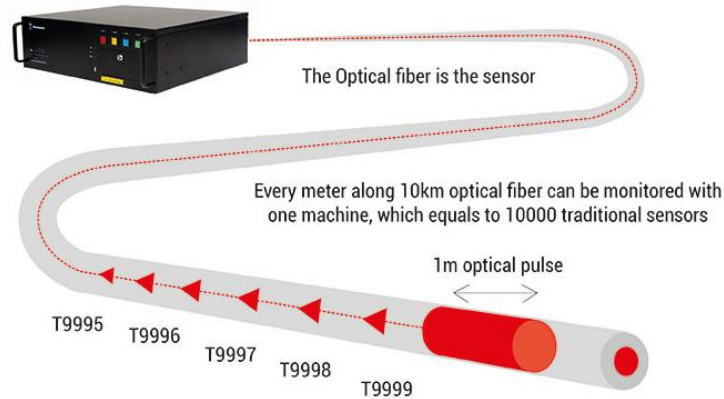


圖 1 分散式光纖溫度感測器示意圖

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

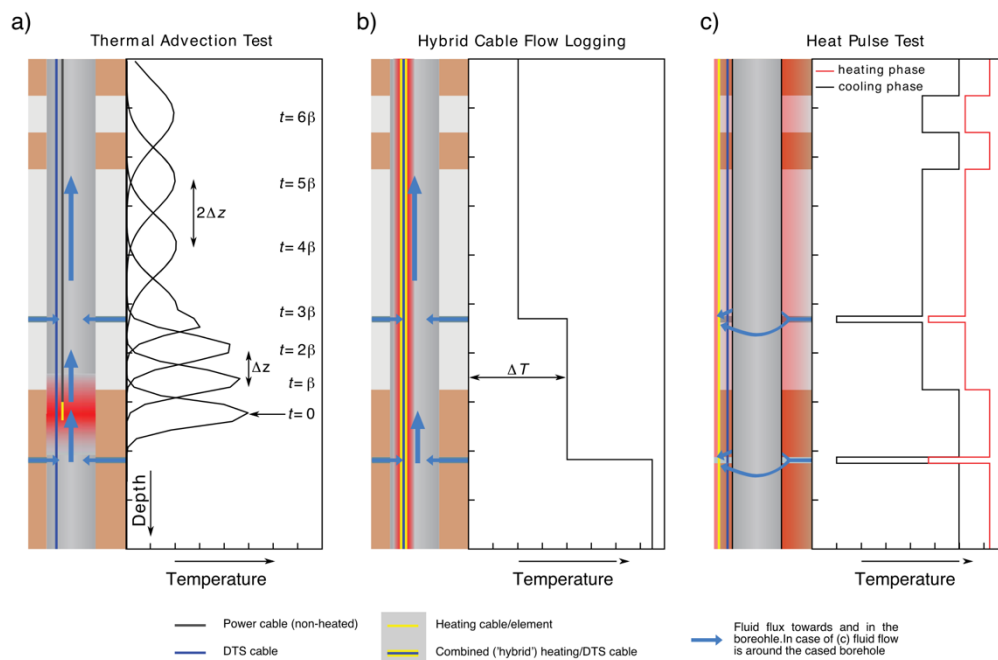


圖 2 主動式 FO-DTS 量測方式(a)thermal advection test，(b)hybrid cable flow logging，(c)heat pulse test(摘自 Bense et al., 2016)

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，



文獻回顧

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。

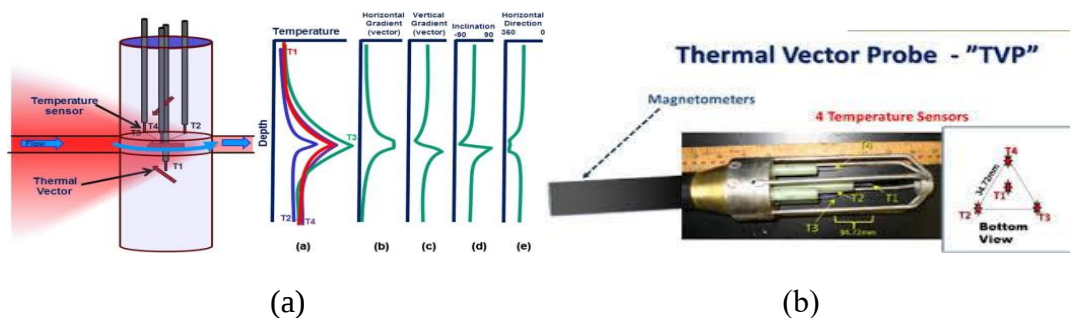


圖 3 (a)TVP 示意圖(b)TVP 儀器照片(摘自 Pehme et al., 2014)

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)。



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

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

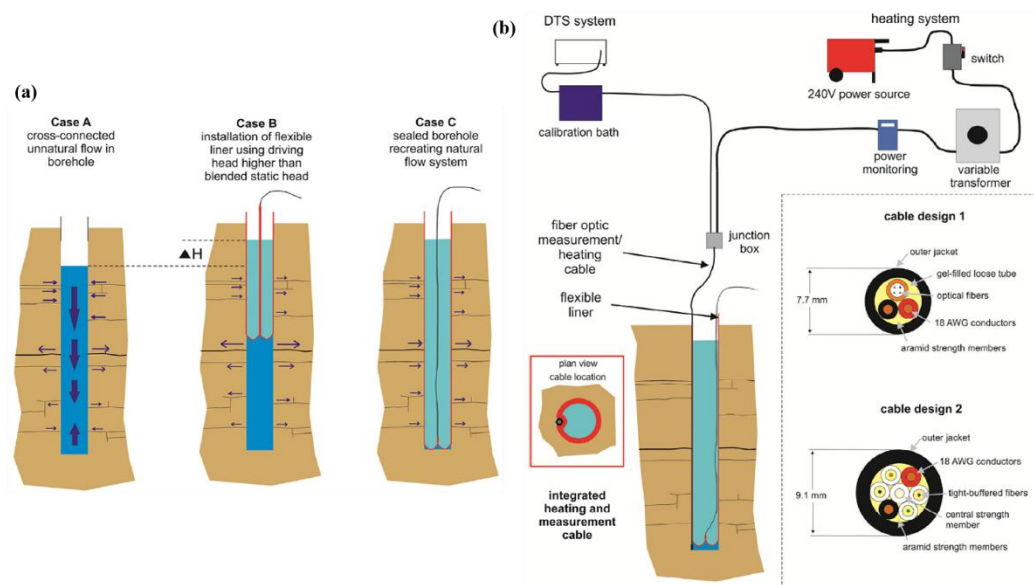


圖 4 DTS 搭配柔性襯管地下技術於井下分析之現地配置：(a)FLUTE 安裝與水流示意圖，(b)分散式溫度感測器與主動加熱系統(摘自 Coleman et al., 2015)



研究方法與流程

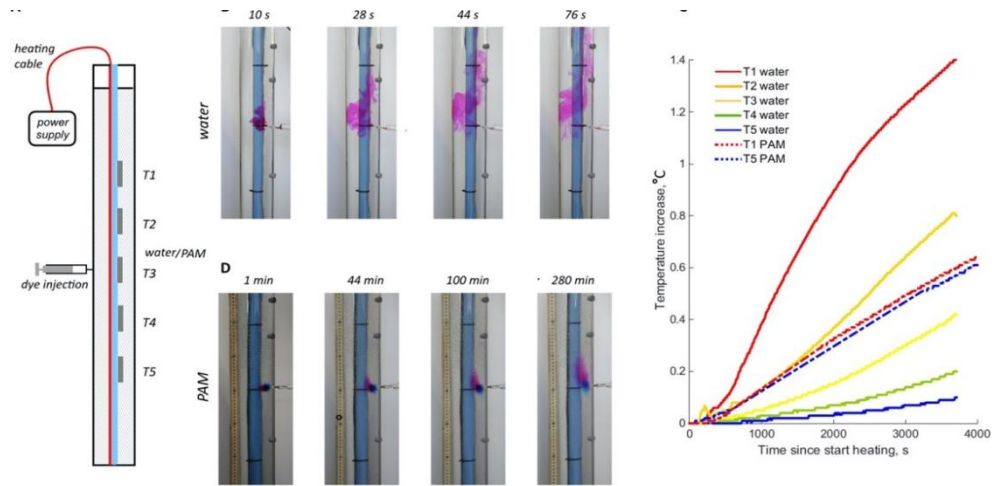


圖 5 聚丙烯醯胺凝膠(PAG)實驗室溫度阻絕試驗結果(摘自 Klepikova et al., 2018)

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



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

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：

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

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 $\gamma = \hat{h} \frac{\Omega}{k}$ [K]， $\hat{h}$ 為普朗克常數（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。

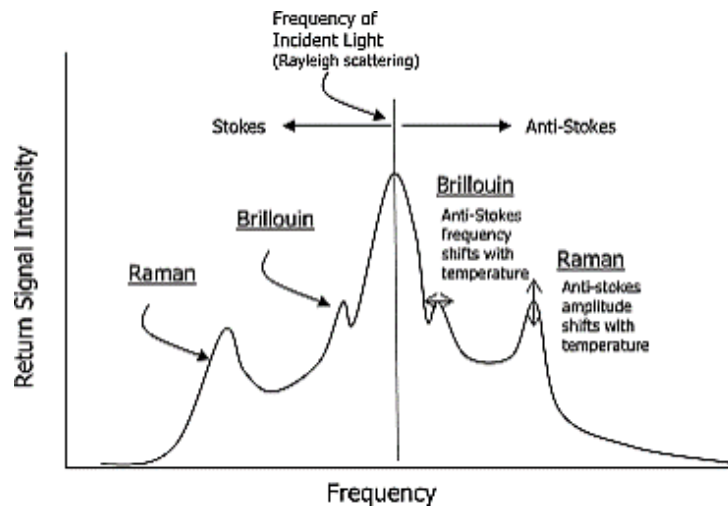


圖 6 散射訊號之頻率圖譜式意圖(摘自 Selker et al., 2006)

4-1-1 分散式光纖溫度感測器儀器



研究方法與流程

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 $+5^{\circ}\text{C}$ ~ $+40^{\circ}\text{C}$ ，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)，配置纜線長度為 2 公尺；量測溫度範圍為 -50°C ~ $+250^{\circ}\text{C}$ ；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°C ~ 35°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。

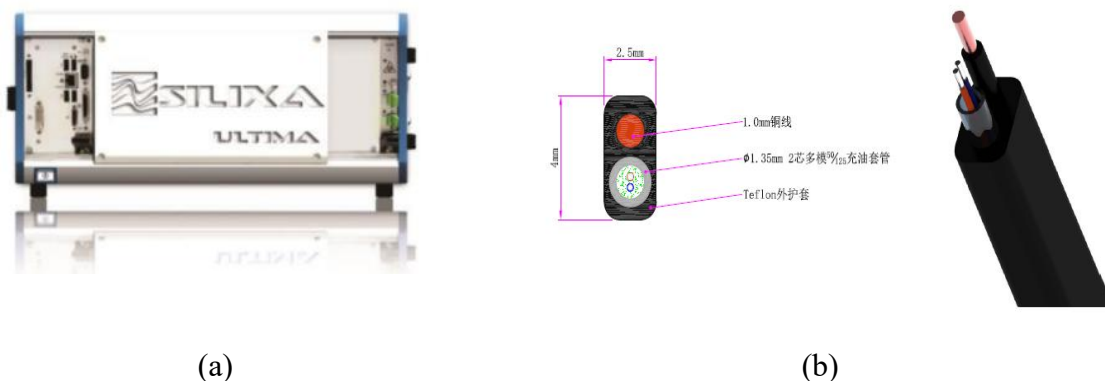
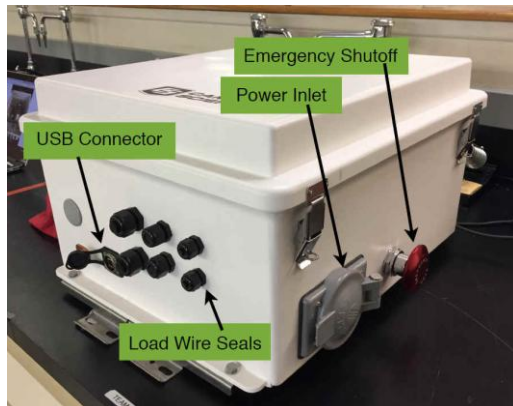


圖 7 (a)雷射脈衝分析儀主機 Ultima, Silixa Ltd, (b) 合式光纖纜線剖面示意圖
(祥林科技，台灣)

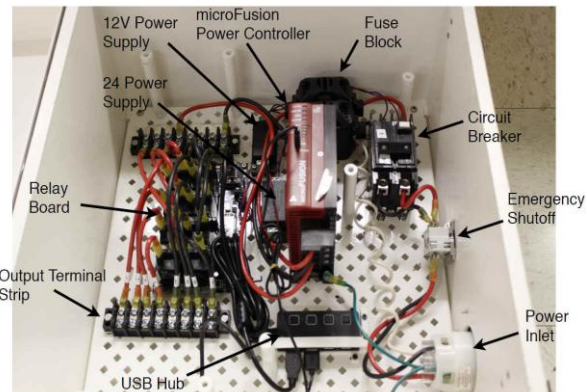
主動式光纖溫度感測器主要是將雷射脈衝分析儀主機搭配加熱控制系統(heating pulse controller, HPC, 圖 8)一併進行試驗。光纖加熱控制系統主要是透過一般的電纜線與複合式光纖(如圖 8b 所示，光纖與銅線一起包覆在纜線內)進行連接，加熱控制系統由單相矽控整流器電源控制器、斷路器、保險絲匣、12V 及 24V 電源供應器、繼電器模組、輸出端子板等元件組成，而所有的元件都安裝於可攜式的防水箱子中，其主要通過控制信號輸入控制串在迴路中的矽控整流器模組，經由改變迴路中電壓的導通或阻斷，由此達到調節電壓或功率。當 HPC 啟動後，通電的複合式光纖即形成一線性熱源透過串接在輸出端子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



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
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。



(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

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。



研究方法與流程

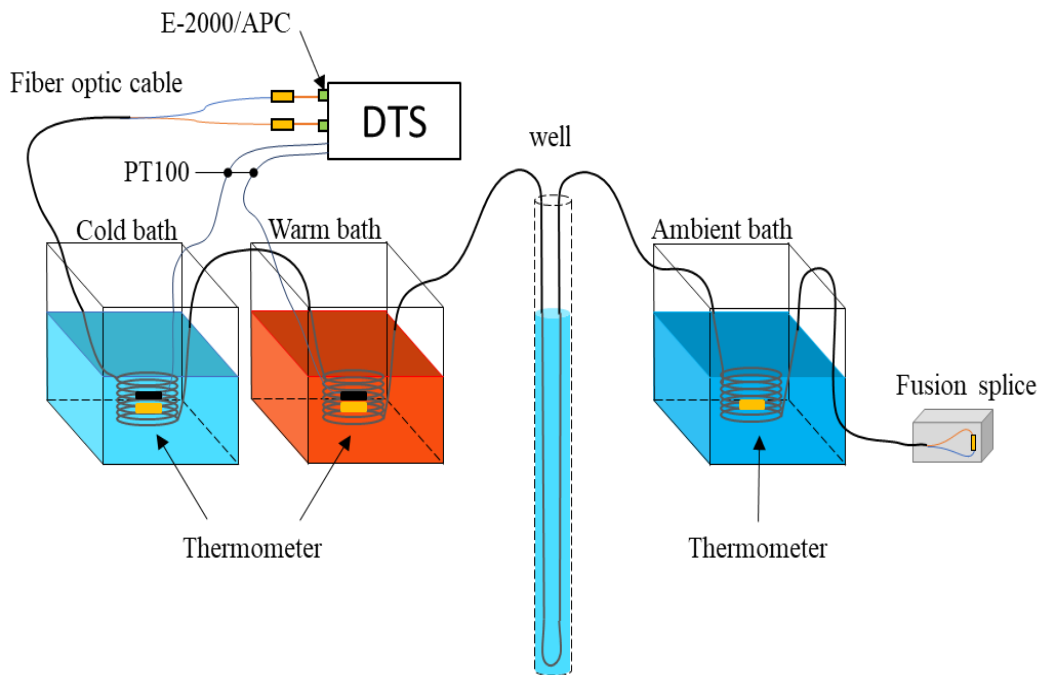


圖 9 現地分散式光纖溫度感測器佈設示意圖

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 I820721 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：垂直佈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。



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

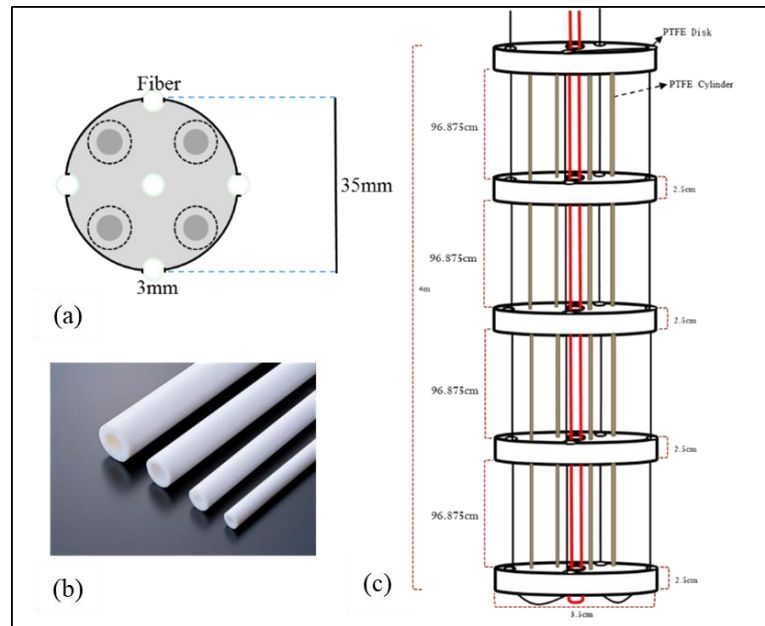


圖 10 TV-DTS 設計概念圖：(a)TV-DTS 固定圓盤 (b)TV-DTS 支架(c)光纖固定於聚四氟乙烯支架之示意圖

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。

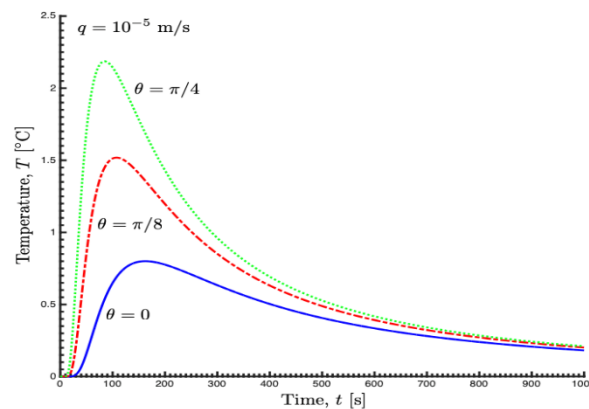


圖 11 TV-DTS 不同方位之溫度變化(摘自 Zlotnik et al., 2017)

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



研究方法與流程

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：



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

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

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：

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

其中 R ：

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

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

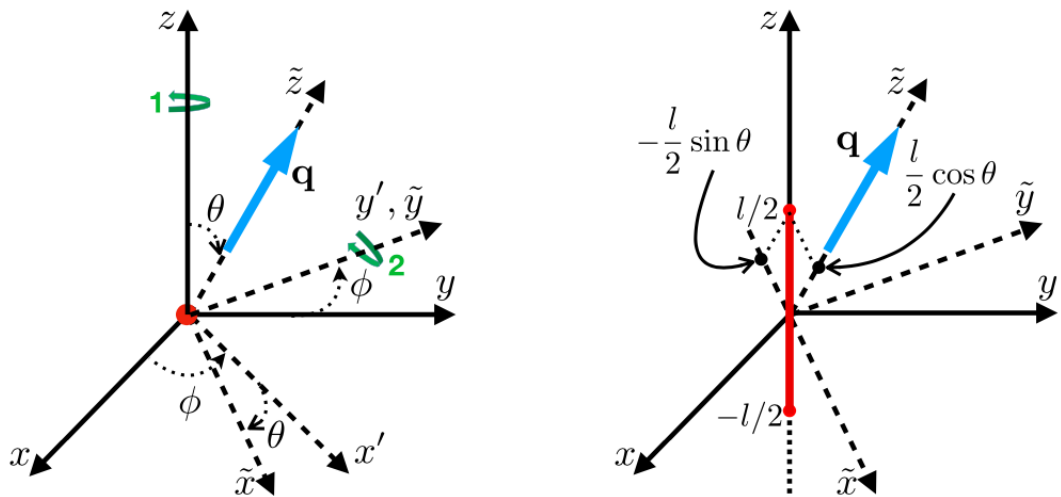


圖 12 座標轉換：(a)點熱源(實線與虛線分別為 (x,y,z) 與 $(\tilde{x},\tilde{y},\tilde{z})$ 正交座標系統。變化後的 $\tilde{z}$ 方向指向達西通量(藍色箭頭)。座標系統的轉換主要透過兩次座標軸旋轉所完成，(1)沿著 z 軸逆時針選轉角度 ψ ，將 (x,y,z) 座標系統轉換為 (x',y',z') ，(2)沿著 y' 軸逆時針選轉角度 θ ，並以向量 q 對齊新 z' 軸。其中， $\tilde{x},\tilde{z}$ 與 z 軸坐落於同一平面，座標軸原點為點熱源)，(b)線性熱源(長度 l 的線性熱源沿著 z 方向坐落於座標系統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

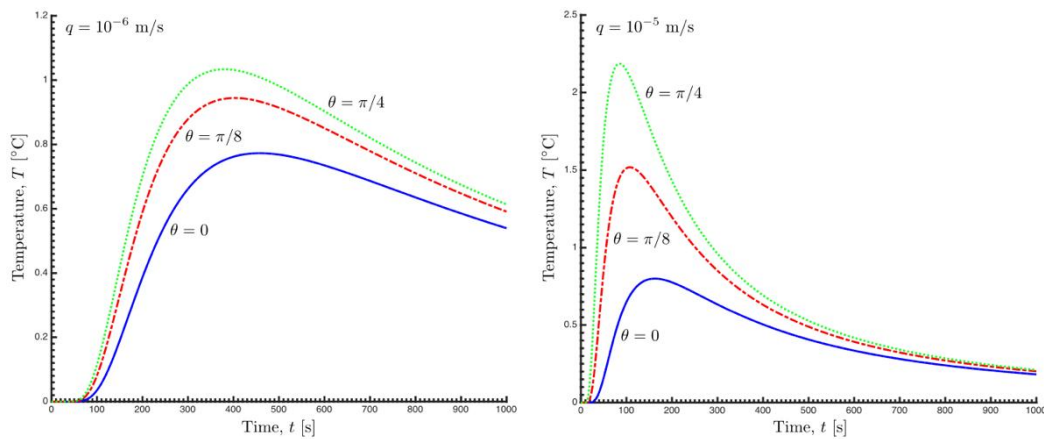


圖 13 溫度反應曲線(點位 $x=0.03, y=0, z=0.03$)，(a)達西通量為 10^{-6} m/s，(b)達西通量為 10^{-5} m/s(摘自 Zlotnik and Tartakovsky, 2018)

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



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分析。A-DTS Toolbox 是由 Simon 和 Bour (2022) 所建置開發，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； $c\rho$ 為含水



研究方法與流程

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

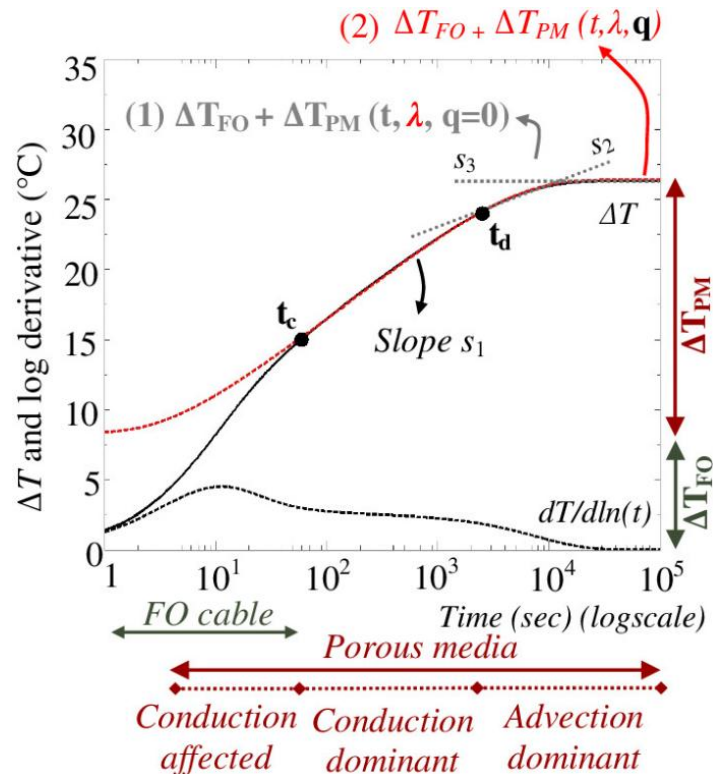


圖 14 主動式光纖溫度感測器(ADTS)測量期間的熱反應曲線(黑線)(摘自 Simon et al., 2021)

4-5 FLUTe 封井材料

於井下進行水文地質調查時，往往是於裸孔的條件下進行試驗，然而，由於井內的垂向水流，導致現地試驗之準確性受到影響，即使在裝設套管後之監測井，單一地區能夠設置監測井的數量有限，無法透過大量設置不同開篩深度之地下水監測井，僅能在單一監測井內進行長開篩，然而，往往因開篩長度過長或開篩長度貫穿一個以上的含水層，造成混合水位或污染物傳輸至另一含水層的情形。為避免上述之情形發生，並準確的量測特定區段之水文地質相關參數，傳統上常以封塞的方式進行試驗(例如：雙封塞試驗，double packer)，然而封塞試驗受限於試驗耗時且成本較高。

近年來，一種新的封塞技術，稱之為柔性襯管地下技術(Flexible Liner Underground Technologies, FLUTe)，使得井下封塞技術更容易於現地執行，選擇性也更多。柔性襯管的安裝如圖 16 所示，透過將柔軟的內襯套管推進至井內，襯管在推進的同時，一邊往內注水，使得襯管逐漸往井下推進。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



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）。

另將柔性襯管若搭配主動式光纖一同安裝於井下，使得光纖與井壁緊密貼合，柔性襯管的封塞效果，可避免井內的垂直水流，在複合式光纖進行加熱時，可避免因加熱所形成的井內自然對流(free convection)或垂直水流，導致量測上的誤判。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 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）。

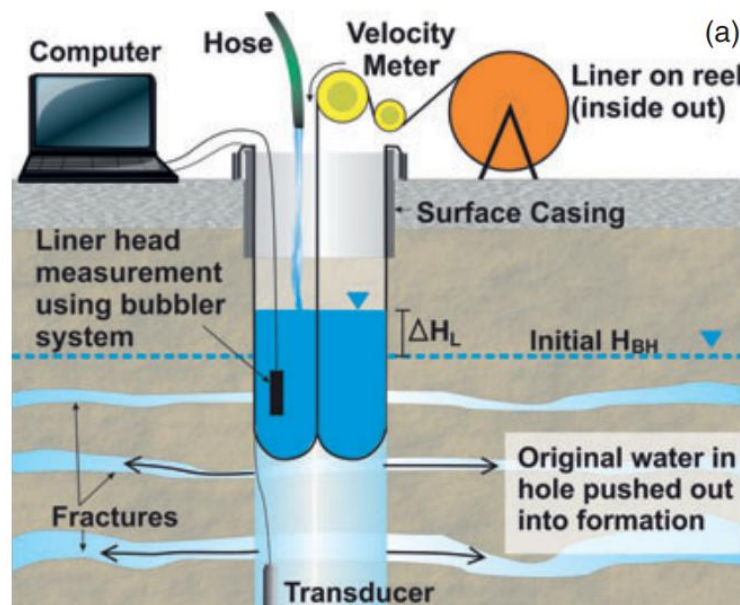


圖 15 FLUTe 安裝示意圖(Keller et al., 2013)

4-6 封井材料 – 聚丙烯醯胺凝膠（PAG）

除了上述的 FLUTe 封井材料之外，近年來有一創新的封井材料「聚丙烯醯胺 (polyacrylamide, PAM, 圖 17a)」開始應用於井下封塞。PAM 顏色透明無毒，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 17b)。PAG 聚合物凝膠，又稱水凝膠或是吸水性高分子聚合物，其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量可達本身重量的 200 至 500 倍 (Bhardwaj et al., 2007)。聚合物凝膠的用途極為廣泛，在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



研究方法與流程

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)，能幫助土壤儲存水分。凝膠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 Koochi, 2009)。

PAG 的顆粒密度非常接近水，若將其置入井中，可以排除凝膠顆粒在水中受重力影響的可能性。此外，由於水凝膠主要由水組成，因此其熱導率等於或略低於純水的熱傳導係數(Davidson and Sherar, 2003; Zhang et al., 2011)。PAG 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；當適當對 PAG 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。

若將 PAG 搭配主動式光纖進行單井井下加熱試驗，其效果與 FLUTE 相似，將有助於避免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。此外，若將 PAG 加入一長開篩的監測井中，並對其施加一外部壓力，搭配水位計的安裝與量測，將可準確的獲得不同含水層之水位變化，有助於提升地下透水區段之判釋能力。



(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）

年月 工作項目	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	備 註
選取至少四口不同特性之監測井，進行TV-DTS 試驗						※							
單井之熱傳輸解析分析井下流速與流向						※							
柔性襯管 FLUTe 封井材料現地規劃與試驗						※			※				
評估 FLUTe 對於垂直水流與自然熱對流之抑制效益													
聚丙烯醯胺凝膠 PAG 封井材料現地規劃與試驗						※					※		
研析 PAG 對於抑制熱傳導效應與井下分層水壓量測之影響													
以 COMSOL 數值模式模擬與驗證兩種封井材料之適用性											※		
優化 FLUTe 與 PAG 封井材料於現地應用之流程											※		
彙整兩年之試驗成果，建構區域性的水文地質模													
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%	



研究方法與流程

預定查核點	期中	1. 完成四口不同特性之監測井進行 TV-DTS 試驗 2. 完成至少二口單井之熱傳輸解析解分析井下流速與流向 3. 進行柔性襯管 FLUTe 封井材料現地試驗 4. 進行聚丙烯醯胺凝膠 PAG 封井材料現地試驗
	成果	1. 完成柔性襯管 FLUTe 封井材料現地試驗 2. 完成聚丙烯醯胺凝膠 PAG 封井材料現地試驗 3. 完成 COMSOL 模式模擬與驗證兩種封井材料之適用性 4. 優化 FLUTe 與 PAG 封井材料於現地應用之流程 5. 完成區域性的水文地質模型建構 6. 撰寫第二年期末報告

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。

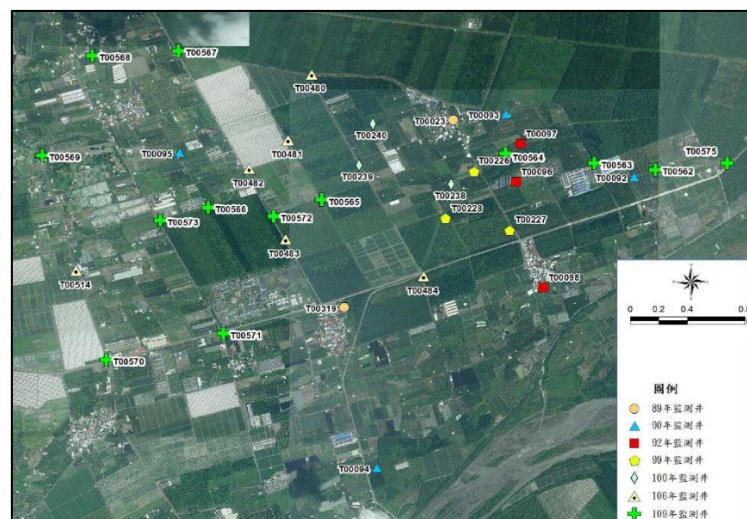
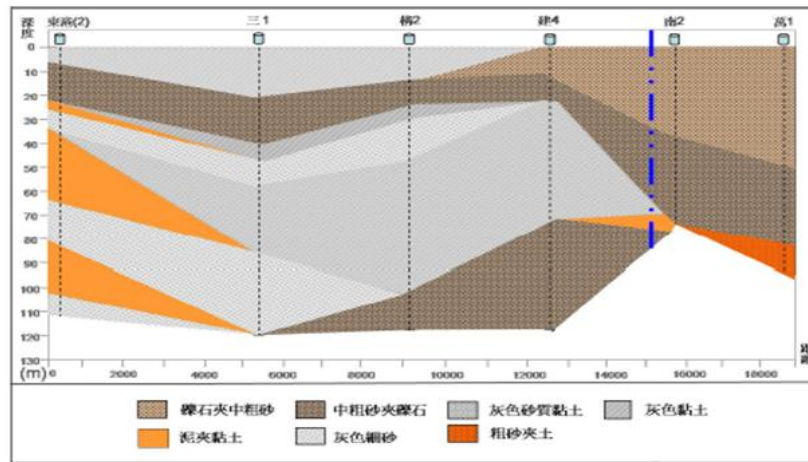


圖 17 污染場址監測井分布圖(摘自屏東縣政府環境保護局)



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)

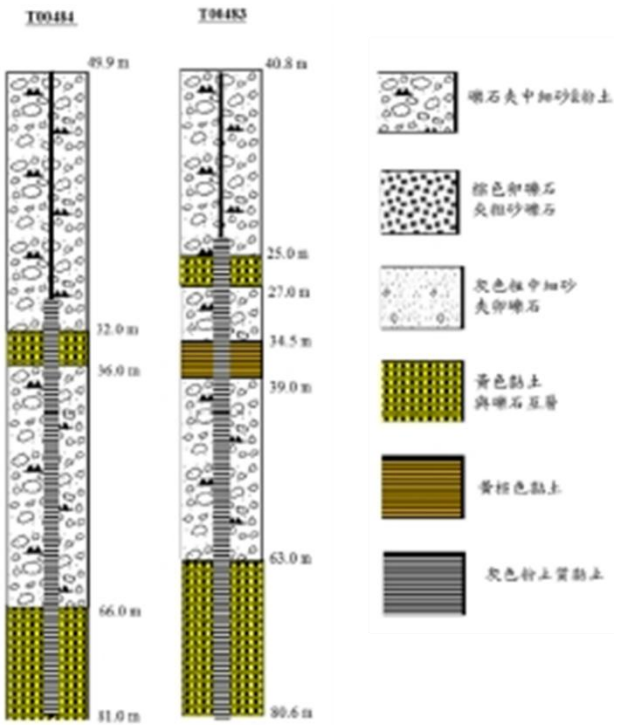
5-2 試驗井介紹

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，並進行封井材料的相關測試，本計畫選定井 T00483，井 T00484，以及井 T00567 進行試驗，三口井皆為 2 吋之水井。T00483 井深為 80.55 公尺，開篩位置從 20.55-80.55 公尺，根據地層調查結果確認此井水力傳導係數為 6.1×10^{-6} 公尺/秒；T00484 之井深為 81.04 公尺，開篩段位於 30.04-81.04 公尺，水力傳導係數為 7.44×10^{-4} 公尺/秒；。

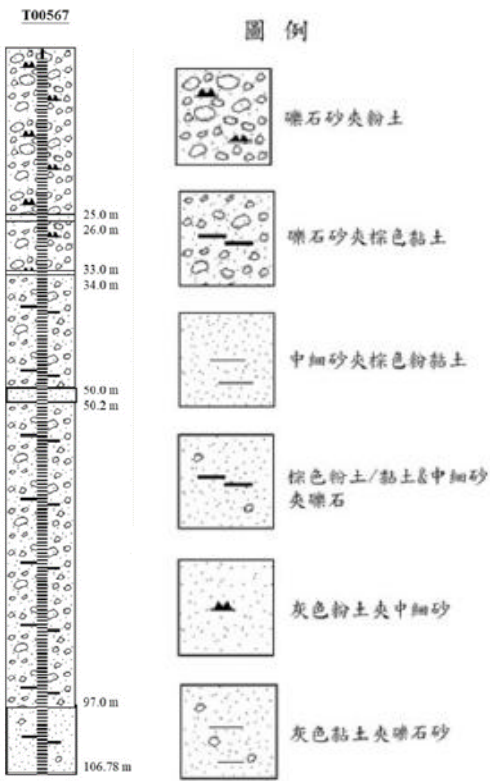
試驗井中 T00483 的岩心組成如圖 19(b)，深度 25 公尺以上、27-34.5 公尺以及 39-63 公尺皆為礫石夾中細沙&粉土組成，25-27 公尺及 63-80.6 公尺為黃色黏土與礫石互層，井的中段位置存在小範圍的黃棕色黏土。井 T00484 的岩心組成如圖 19(a)，深度 32 公尺以上、36-66 公尺皆為礫石夾中細沙&粉土組成，32-36 公尺及 66-81 公尺為黃色黏土與礫石互層。井 T00567 的岩心組成如圖 19(c)，自地表至 106.78 公尺深度範圍內，岩心主要由礫石砂層及粉土層交互組成。於深度 0-25 公尺及 34-97 公尺區間，地層以礫石砂夾粉土為主，顯示孔隙發達、滲透性高；25-34 公尺及 97-106.78 公尺則可見棕色黏土與粉質黏土層，局部夾細砂，為具阻水性的層段。

本計畫已完成井 T00483、井 T00484 的單井加熱試驗及井 T00567 的封井材料試驗。下一章節將針對現地試驗設計與結果進行說明。

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



(a) (b)



(c)

圖 19 岩芯紀錄： (a)井 T00484、(b)井 T00483、(c)井 T00567



六、結果與討論

6-1 單井加熱試驗溫度剖面量測結果

期中報告前已完成 TV-DTS 的試驗，本計畫亦針對現地 2 口監測井進行單井加熱試驗，其目的為獲得井下不同深度之水平流速。試驗流程如下，首先分別針對 2 口監測井進行溫度剖面量測及單井的主動式加熱試驗，並分析地下水位面以下之井溫之量測結果，並以深度對時間的溫度剖面圖進行探討，分析量測溫度差異隨時間之演變，判斷井下透水區段分佈。以下針對所選取 2 口井之單井主動式加熱現地設計與試驗結果（T00483 和 T00484）進行分析與討論。

6-1-1 現地試驗設計

單井加熱試驗係利用加熱脈衝控制器連接銅線進行加熱，並透過控制器調整所需功率，以觀測井內水體之溫度反應。當地層內水體流動均一且各深度加熱功率相同時，理論上溫度升幅應保持一致。然而，若局部地層中存在較高流速之地下水，熱量將較難累積，導致在相同加熱條件下溫升幅度較低。依此原理，可藉由溫度變化特徵判別地層中之透水與不透水層分佈。

試驗井 T00483 位於試驗場址中心偏北側，井深約 80.55 公尺，濾水管開設於井下 20.55 至 80.55 公尺。試驗前量測之地下水位約為地表下 32 公尺。試驗採每公尺加熱功率 10 W，量測頻率 1 分鐘，加熱時間 12 小時，回復觀測時間 6 小時。試驗井 T00484 位於試驗場址東南側，井深約 81.04 公尺，濾水管設於井下 30.04 至 81.04 公尺。試驗採每公尺加熱功率 13 W，量測頻率 1 分鐘，加熱時間 7 小時，回復觀測時間 2 小時。

6-1-2 T00483 現地試驗結果

根據背景量測與加熱後溫度差異，繪製出不同深度隨時間之溫度變化分布如圖 20 所示。試驗初期，地下水背景溫度約為 25 °C。於加熱期間，深度 30–50 m 區段之升溫幅度最小，溫度變化約介於 0.9–1.1 °C，至加熱結束時仍無明顯上升；深度 65–80 m 區段則出現顯著升溫反應，溫度變化介於 1.4–1.7 °C；在深度 80 m 處升溫幅度最高，約為 2.0–2.2 °C。

整體而言，深度 30–45 m 區段於加熱過程中升溫幅度較小，顯示該層地層透水性較高、地下水流速較快，使加熱過程釋放之熱能迅速被流動水體帶走，致升溫反應有限。相對地，深度 65–80 m 區段升溫顯著，顯示其透水性較低、流動速率緩慢，熱能得以累積，故產生較大的溫度上升幅度。



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

綜合井 T00483 之加熱試驗結果可知，深度 31–43 m 為透水性最高區段，其次為深度 48 m；而深度 51 m 及 64–80 m 為透水性最低區段，深度 52–63 m 次之。此結果顯示加熱試驗可有效辨識不同深度地層之透水特性，並提供後續流速與水力參數推估之依據。

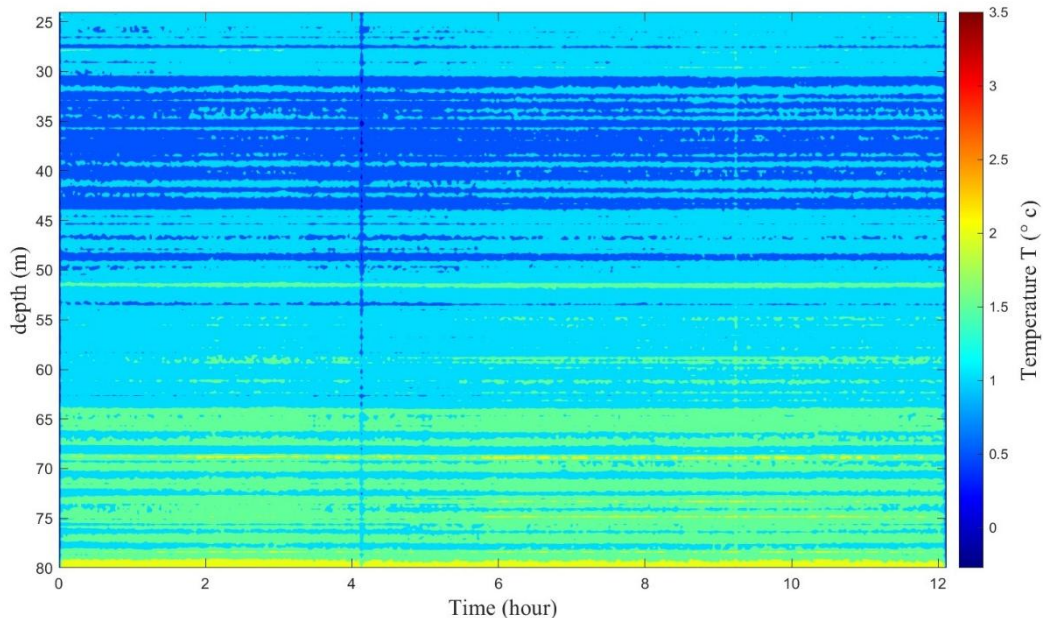


圖 20 T00483 單井加熱期間溫度變化

6-1-3 T00484 現地試驗結果

由背景溫度與加熱後溫度差異可繪製不同深度隨時間之溫度變化分布如圖 21。於加熱期間（約 6 小時），地下水初始背景溫度約 30 °C，整體溫度變化呈現明顯的垂向差異。

在深度 40 至 45 公尺間可觀察到最明顯的升溫現象，約於加熱 2 小時後溫度上升 2–2.5 °C，且於加熱結束時不再顯著增加，顯示該層地層透水性較低、熱能易於累積。相對地，於 45–50 公尺處，溫度變化呈現持續下降趨勢，變化幅度約 -0.5 至 -1 °C，顯示該深度區段透水性較高，地下水流動速率大，使加熱過程所釋放之熱能快速被流入之低溫水流帶走，導致溫度無法升高。

在深度 50–80 公尺深度範圍內，溫度上升幅度約 0.5 °C，亦屬於相對透水區段，顯示地下水流動較為顯著，熱能傳遞效率高，致使溫度升幅有限。綜合而言，深度 45–50 公尺處為最具透水性之區段，其次為深度 70–80 公尺；而深度 40–45 公尺區段透水性



結果與討論

最差，其次為深度 55–65 公尺。

整體結果顯示，透過單井主動加熱試驗可有效辨識不同深度地層之透水性差異，其中溫度升幅與熱能累積速率可作為地下水流動快慢之指標。

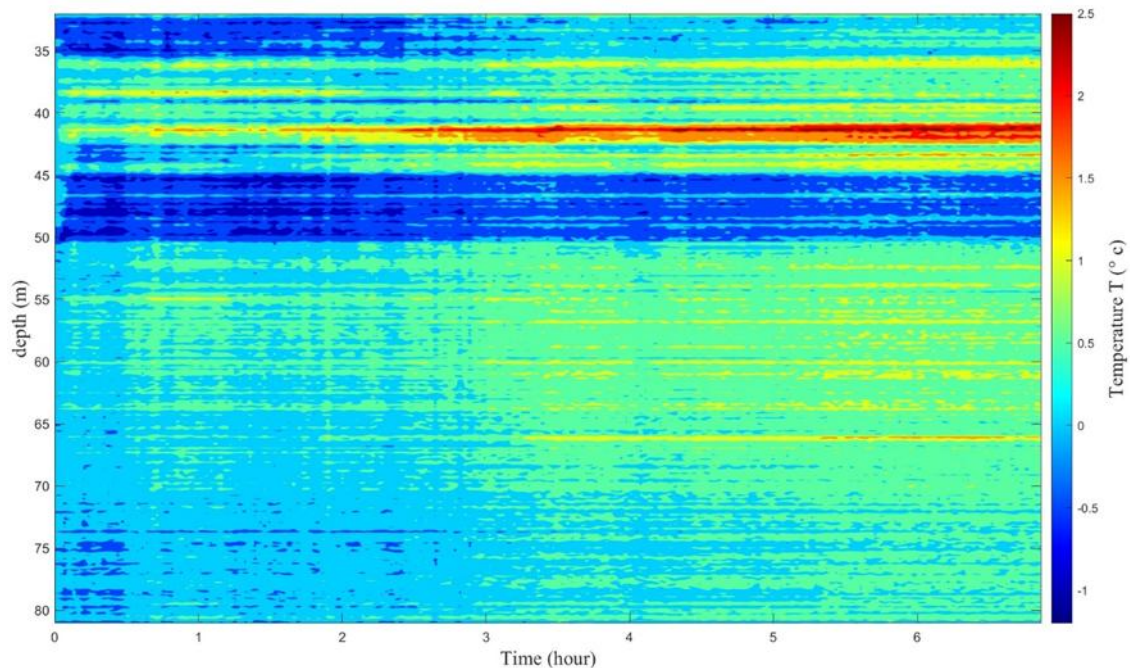


圖 21 T00484 單井加熱期間溫度變化

6-2 單井加熱試驗流速推估結果

6-2-1-1 T00483 單井流速分析結果（ADTS-Toolbox 分析）

本研究針對 T00483 井之單井加熱試驗結果，使用 ADTS Toolbox (Simon et al., 2021) 進行地下水流速與地層熱傳導係數之推估分析。在進行量化模擬時，假設多孔隙介質與水之體積比熱容為常數，分別設定為 $2.5 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ 與 $4.1 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ 。加熱輸出功率依試驗設定為每公尺 10 W。

於進行熱傳導與流速反演之前，先針對光纖纜線外層包覆材料所造成之熱傳輸效應進行濾除。經多次資料篩選與反覆測試後，確定最佳 ΔT_{FO} 為 0°C 。於消除包覆層影響後，圖 22 顯示本試驗所得流速與熱傳導係數之分析結果。

圖 22(a) 為流速分布結果。整體含水層內流速具有明顯深度差異：深度 24–30 m 處流速約為 $0.95 \times 10^{-5} \sim 2.9 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ；深度 34–43 m 間流速快速上升，範圍介於 $1.2 \times 10^{-5} \sim 9.7 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ；自深度 44 m 以下則逐漸下降，至約 $1.6 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ，深度 44–80



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

m 間流速約介於 $0.95 \times 10^{-5} \sim 2.4 \times 10^{-5}$ m/s。整體而言，於深度 34–39 m 可觀察到高流速帶，而深度 50–80 m 則呈現較低流速分布。

圖 22(b) 為熱傳導係數 (λ) 分布結果。整體含水層內 λ 值隨深度變化顯著：深度 30–50 m 區段熱傳導係數較高，約為 $4.7\text{--}8.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ，部分深度甚至達模式設定上限 ($8.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)。此現象可能由於該區段流速超過模式可解析之極值，導致熱導率估算值出現偏高情形。深度 50–80 m 區段之 λ 值則由約 $7.2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 逐漸下降至約 $3.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

為評估推估結果的準確性與可靠度，本報告分析不同深度之 RMSE (Root Mean Square Error) 分佈。RMSE 代表實際量測溫度曲線與模型模擬結果之間的偏差程度，其數值大小可反映模型對溫度變化的擬合品質。當 RMSE 值較低時，表示該深度的物理參數（如地下水流速或熱傳導係數）能有效重現加熱與冷卻過程中的溫度變化；反之，若 RMSE 偏高，則意味著該深度之熱響應行為較為複雜，模型假設未能充分描述當地熱傳與流動機制。

圖 23(a) 為流速推估所對應的 RMSE 剖面，整體而言，流速反演對應之 RMSE 在 20–80 m 深度範圍內大多維持在約 $0.2\text{--}0.6^\circ\text{C}$ 之間，屬於相對可接受的配適誤差範圍，顯示模型以單一水平流速加上熱傳對流機制，能合理描述此深度範圍內的溫度響應。此結果表示井中主要量測區段的溫度變化行為，可以用穩定的地下水流通量（即水平流速或等效流通量）來解釋，代表該區段的地下水移流效應明顯且相對一致。在深度 20 m 以淺位置，可見 RMSE 出現相對偏大的段落，局部值可接近 0.8°C 。此現象說明，在井上部區段，僅以單一水平流速假設來描述溫度場的方式較難完全重現量測到的溫度變化。相較之下，30–80 m 深度範圍內的 RMSE 變動較小，並維持在約 $0.3\text{--}0.5^\circ\text{C}$ 左右，屬於狀態穩定的區段，但可見局部小幅度振盪。

圖 23(b) 為 λ 之反演結果所對應的 RMSE，整體來看，熱傳導係數的 RMSE 剖面表現出與流速 RMSE 不完全相同的垂向行為。首先，在淺層深度 20 m 以內，RMSE 明顯偏高，接近甚至超過 1°C 。進入約深度 30–80 m 的區段後，熱傳導係數 RMSE 顯著下降並趨於穩定，數值多集中於約 $0.6\text{--}1.0^\circ\text{C}$ 左右（相對於淺層已明顯改善）。

整體而言，深度 30–80 m 間的流速震盪尚無法歸因於單一機制，其可能為地層異質性、熱傳導差異、或反演參數耦合等多重因素共同影響所致。未來若需進一步確認，可配合地層岩性資料、熱傳導係數剖面或模擬試驗結果進行交叉比對，以提高解釋之可靠度。



結果與討論

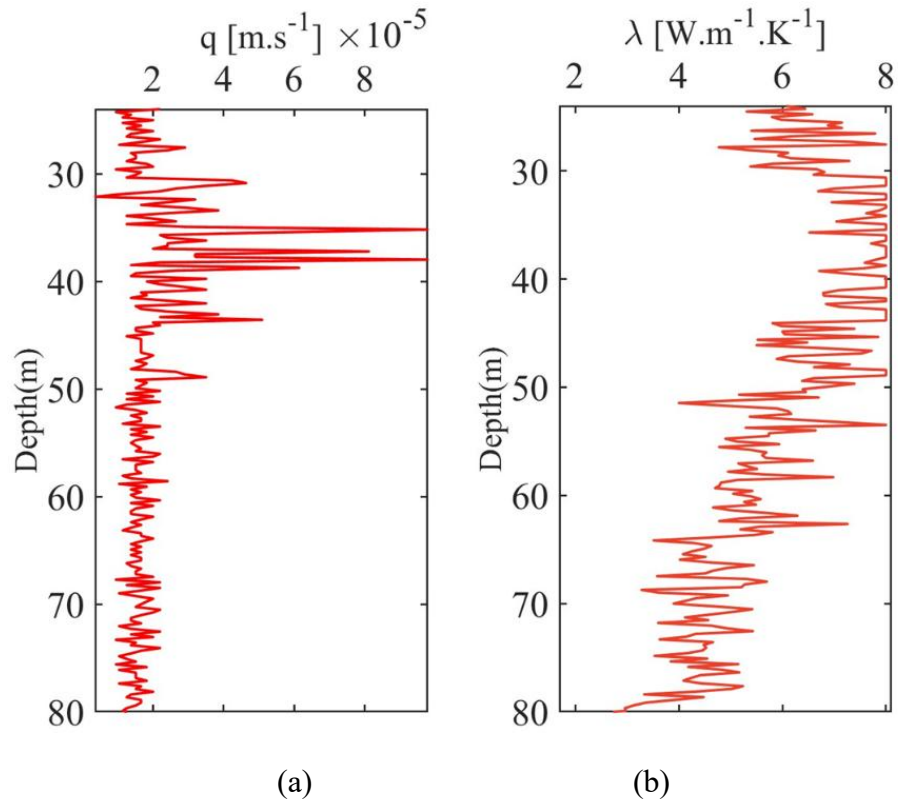


圖 22 T00483 之 ADTS-Toolbox 分析結果：(a) 流速，(b) 熱傳導係數

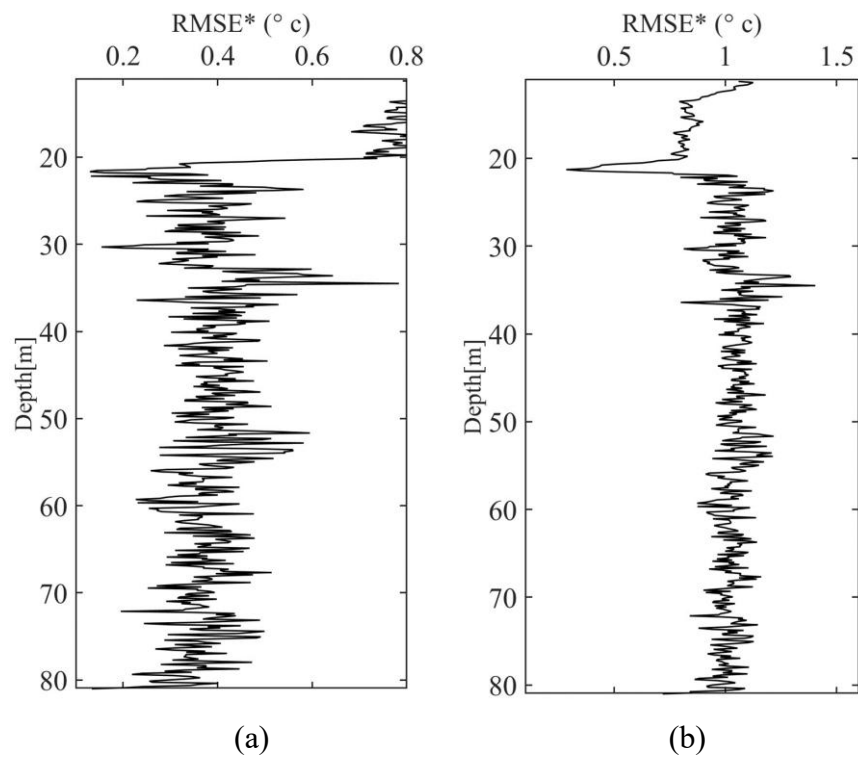


圖 23 T00483 之 ADTS-Toolbox 分析結果 RMSE：(a)流速，(b)熱傳導係數



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

6-2-1-2 T00484 單井流速分析結果 (ADTS-Toolbox 分析)

本研究將 T00484 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，如同井 T00483，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 13 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°C 。在去除光纖纜線批覆層的效應後，圖 24 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 24 (a) 為試驗流速結果，深度 32~45 公尺流速約為 $10^{-4} \sim 5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 之間，深度 45~50 公尺流速迅速增加，流速約從 $3 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 上升至 $5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ，深度 50 以下流速大幅度下降，至深度 70 公尺區間流速約為 $2 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 之間，深度 70 公尺以下流速逐漸增加至 $5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ，至井底深度 80 公尺之間，流速在 $5 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 之間變化。整體推估流速可以觀察到深度 32~35、45~50 公尺區間的高流速帶，以及深度 40~45、55~70 公尺區間的低流速分佈。

圖 24 (b) 為井 T00484 加熱試驗熱傳導係數分佈結果，由於此口井的流速較快，除了深度 40~45 公尺之間升溫幅度較大，其餘深度升溫幅度小，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，且呈現一定值（後續 6.5 章節將針對此一結果進行分析討論）。

圖 25(a) 為流速反演所對應的 RMSE 剖面。整體而言，RMSE 值於深度 30~80 m 深度範圍內多介於 $0.2\text{--}0.6^\circ\text{C}$ 之間，屬於良好擬合區段，顯示模型能合理描述該範圍內的溫度響應，反演結果可信度較高。相較之下，深度 35~55 m 區間的 RMSE 略有上升，局部接近 0.8°C ，表示模型在此深度擬合程度稍降，可能與地層細部變化或局部異質性相關。

圖 25(b) λ 反演結果所對應之 RMSE 剖面。整體趨勢與流速 RMSE 不完全一致，於深度 30 m 以上的區段 RMSE 明顯偏高，約為 $1\text{--}2^\circ\text{C}$ ，顯示模型難以完全重現該區段的熱傳行為。進入深度 40~80 m 深度後，RMSE 顯著下降並趨於穩定，集中於 $0.5\text{--}1.5^\circ\text{C}$ 之間，顯示該深度地層熱性質較為均一，模型擬合表現良好。

綜合兩項結果可知，RMSE 的值於深度 40~80 m 深度範圍相對較低且穩定，代表此段測點的資料品質及模型擬合度較高，推估之物理參數相對可信。至於 RMSE 的局部震盪，尚難歸因於單一因素，可能與地層異質性、熱傳導差異、封井貼合狀況或參數耦合效應等多重因素共同影響有關。未來若需進一步驗證，可配合地層岩性剖面、熱傳



結果與討論

導係數變化趨勢或模擬試驗進行交叉比對，以提高詮釋之可靠度。

綜合兩口井的試驗結果，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。

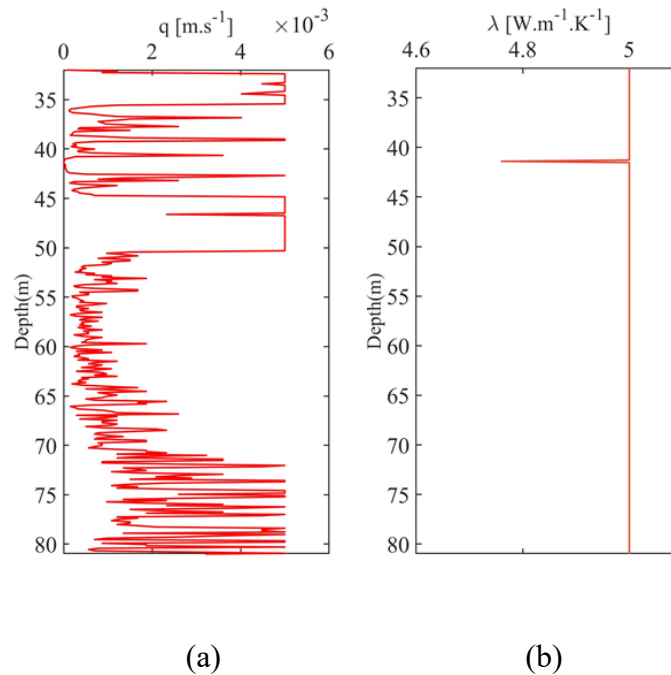


圖 24 T00484 之 ADTS-Toolbox 分析結果：(a) 流速，(b) 熱傳導係數

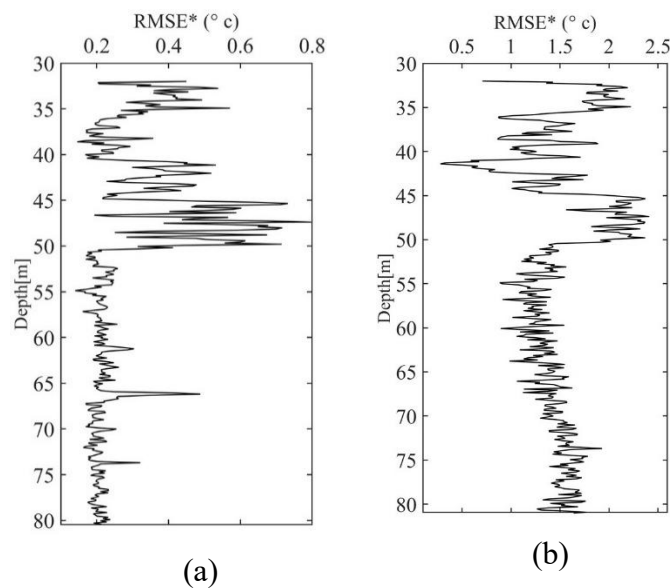


圖 25 T00484 之 ADTS-Toolbox 分析結果 RMSE：(a)流速，(b)熱傳導係數



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

6-3 封井材料試驗結果-FLUTE

6-3-1 模型模擬

為評估封井材料 FLUTE 對地下水流動阻隔效果及加熱試驗的影響，本研究首先利用數值模擬進行其可行性評估。以下針對數值模型之建立、設定及結果進行分析與討論。

6-3-1-1 模型建立與參數設定

為評估不同封井材料對地下水流動阻隔效果及加熱試驗的影響，本研究利用 COMSOL Multiphysics 建立三維封井模擬模型，模擬封井對井內流動與熱傳輸行為之影響，以作為後續封井試驗設計與材料選用之依據。

模型採用 COMSOL 3D 模組建立，以軸對稱方式進行簡化，以利全面分析水流與熱傳輸特性。整體模擬域尺寸設定為長 2 m、寬 1 m、高 2 m，並將地層垂向分為三層，分別為上層 0.8 m、中層 0.4 m 及下層 0.8 m，以模擬不同滲透性地層間的流速差異。地層中央設置一根直徑 2 吋之圓柱體，以代表實際地下水井；井內再配置一根直徑 1.9 吋的圓柱體，用以模擬封井材料填充後之情境(圖 26)。

為準確描述封井材料對抑制垂向流動之成效，模型中耦合多組物理場，包括層流與流體熱傳 (Laminar Flow、Heat Transfer in Fluids)、未飽和介質的達西定律與多孔介質熱傳 (Darcy's Law、Heat Transfer in Porous Media)，以及自由流與多孔介質耦合 (Free and Porous Media Flow) 等多重物理模組。此耦合可同時模擬地層水流進入井內並與井水混合的過程；此外，非等溫流 (Non-Isothermal Flow) 模組用以模擬加熱試驗中因溫差所引發之熱對流效應。

材料設定部分，上、下兩層地層採用模型內建之砂岩參數，中層則設定為頁岩，以模擬不同滲透性地層造成的流速變化。砂岩與頁岩在水力傳導係數 K 值上存在明顯差異，產生上下層流速較快、中層較慢的地下水流動特性。熱傳導係數與比熱容等熱力學參數皆採用模型內建之預設值。地層與井內流體均設定為純水，其物理性質同樣採用內建參數，主要參數可見表 1。

為模擬現地加熱試驗條件，模型中於井內加熱區施加線性熱源功率 15 W/m，持續加熱時間為 100 分鐘。此設定模擬現地試驗中因溫度上升導致垂直對流加劇，使得不同區間的地下水流相互混合而無法有效判讀流速差異所產生的溫度變化，藉此分析封井材料在此情境下對熱傳行為的影響。

邊界條件設定方面，為模擬現地地下水自然流入井內的情形，2 吋圓柱體外圍邊界設定為開放邊界，使水體可自由進出並進行熱交換。流場建立上，地層兩側分別設定為定水頭邊界(圖 26 之右圖的藍色區塊)，一側為 1 m，另一側為 0 m，以形成由右向左之自然流場；其餘邊界皆設為封閉邊界，以避免水流與熱量逸散。

為確保數值計算的穩定性與精度，本研究模型採用 COMSOL Multiphysics 自動產



結果與討論

生之自由四面體網格 (Free Tetrahedral Mesh)。整體網格劃分採階層式設計，於井壁及封井材料區域進行局部加密，以捕捉井內及井周圍流速與溫度梯度的劇烈變化。地層外圍區域則維持較粗之網格，以兼顧計算效率與精度。

模型總體網格數為 1100 單元，井內封井區域的單元邊長範圍介於 1.4-7.5 公分，地層單元的邊長範圍則為 14-20 公分。此配置可有效解析井內細部流場及熱傳行為，同時維持合理的計算負載。

圖 27 中可見，模型垂直方向上區分為三層不同滲透性地層，並於中央建立直徑 2 吋的井體與內部封井區域。由網格劃分結果可確認井周邊區域的加密層完整覆蓋，能確保封井材料與地層交界之熱流與流速梯度得以正確模擬。

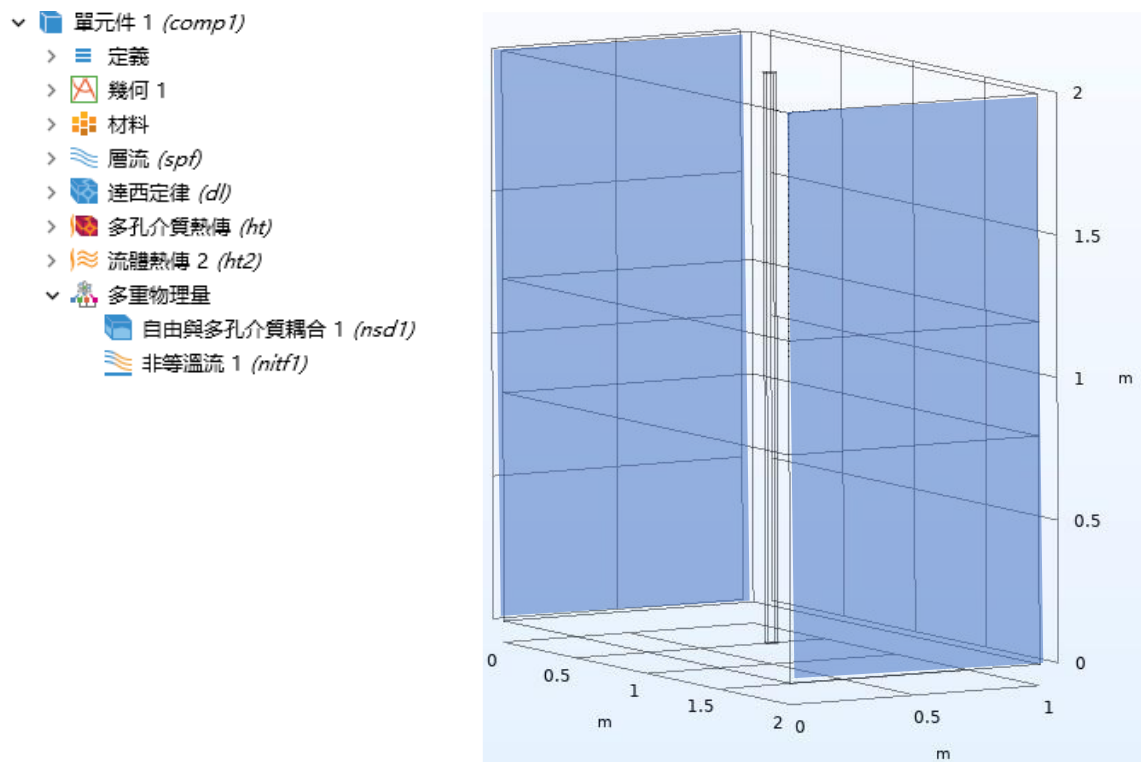


圖 26 COMSOL 模型中所使用的物理模組與邊界條件設定

表 1 模型中砂岩與頁岩層之主要物理參數設定

	砂岩	頁岩
孔隙率(-)	0.5	0.3
水力傳導係數(m/s)	10^{-4}	10^{-8}
熱傳導係數(W/(m·K))	4.4	2.5
體積熱容量(J/(kg·K))	800	800
密度(kg/m ³)	2600	2240



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

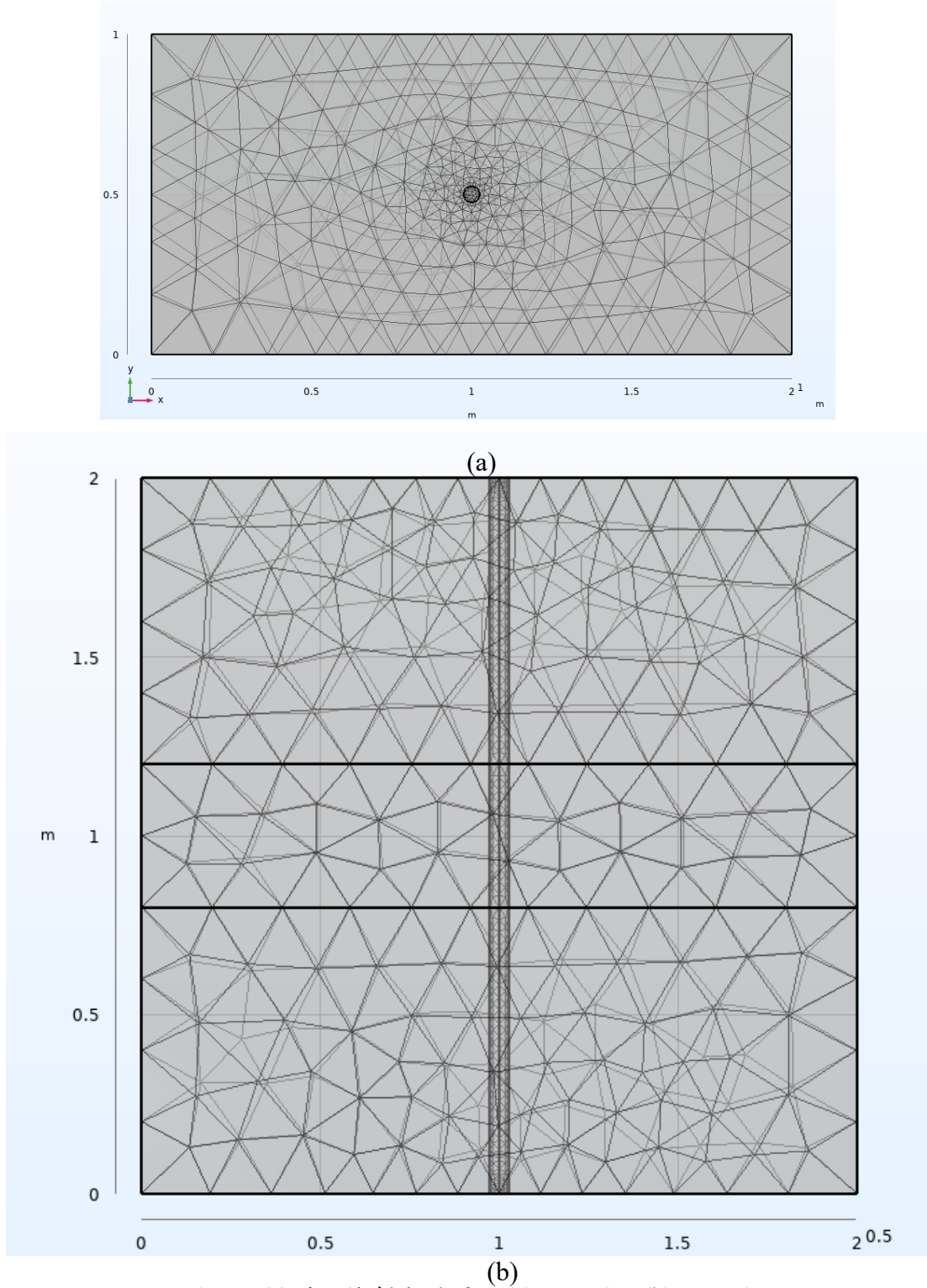


圖 27 模型網格劃分結果：(a)上視圖，(b)側視圖



結果與討論

6-3-1-2 模擬結果

為驗證封井材料在低功率加熱試驗條件下能否改善溫度分辨率不佳的問題，本研究利用 COMSOL Multiphysics 進行三維數值模擬，模擬封井與未封井情境下的熱傳與流動行為。現地試驗曾因加熱功率不足導致升溫幅度有限，使得溫度差異不明顯、判釋困難。透過封井材料的設置，可望減少井內水體對流混合、強化局部熱累積，進而提升溫度量測的對比度與解析度。

本節將分別說明封井與未封井兩種情境下的模擬結果，包括溫度場變化與加熱期間溫升曲線，藉此比較封井材料對熱傳與流體擾動之抑制效果，並評估其在低功率輸入條件下對加熱試驗可判釋性的改善程度。

根據前一小節的模型建置，圖 28 顯示模型在設置條件下之地層流速場分佈結果，整體流場自右向左流動，為模型所設定之自然定水頭邊界所產生。中層地層（頁岩層）因水力傳導係數 K 為較低的 10^{-8}m/s ，流速為 10^{-6}m/s ，明顯小於上下兩層砂岩層的 $4.5 \times 10^{-5} \sim 5.5 \times 10^{-5}$ ($K=10^{-4}\text{m/s}$)，呈現上下層快、中層慢的分佈特徵。

該模擬流場結果作為後續比較的基礎條件，將用以探討三種情境下的差異：(1) 無垂直流的未封井理想狀態；(2) 存在垂直流的未封井實際情形；(3) 具垂直流且進行封井之狀態。透過對比三者的溫度變化，可更明確評估封井材料在低功率加熱條件下對熱傳行為與溫度分辨率改善之實際效益。

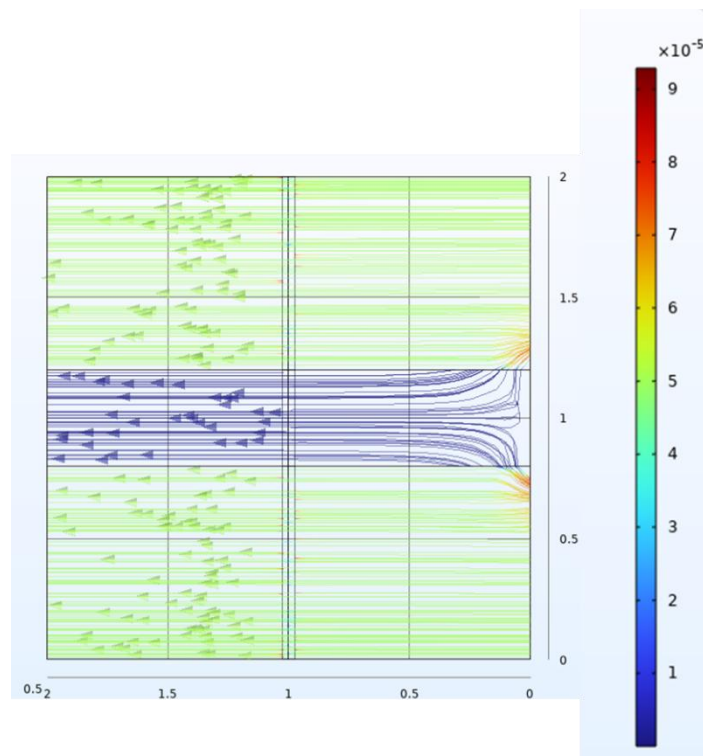


圖 28 地層流速場分佈圖(側視圖)



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

為釐清地層流速差異對加熱試驗溫度分佈的影響，本研究首先建立僅具水平流動且無垂直流之理想化模型。此設定可消除垂向對流對溫度變化所造成的干擾，使得溫度變化僅反映地層內水平流速差異對熱傳行為的控制效果。

模擬結果顯示如圖 29，加熱後的溫度場可明顯觀察到中層 0.8-1.2m 的溫差變化最大來到 14°C，而上下層溫升相對較低，溫差約為 0.2-2°C 不等。此現象說明在水平方向流速較慢的區域，熱量傳導主導且散失速率較低，能量累積效果明顯，導致溫度上升幅度較大；反之，流速較快的層位中，對流散熱效應增加，熱量易被流動水帶走，使得溫升幅度受到抑制。

此結果驗證了「地層內的水平流速差異」對加熱試驗溫度分佈具有關鍵影響。因此，此理想情境的模擬可作為後續情境（有垂直流動與封井條件）的參考基準，用以分析垂直流動或封井行為如何改變這種由水平流速主導的熱傳特徵。

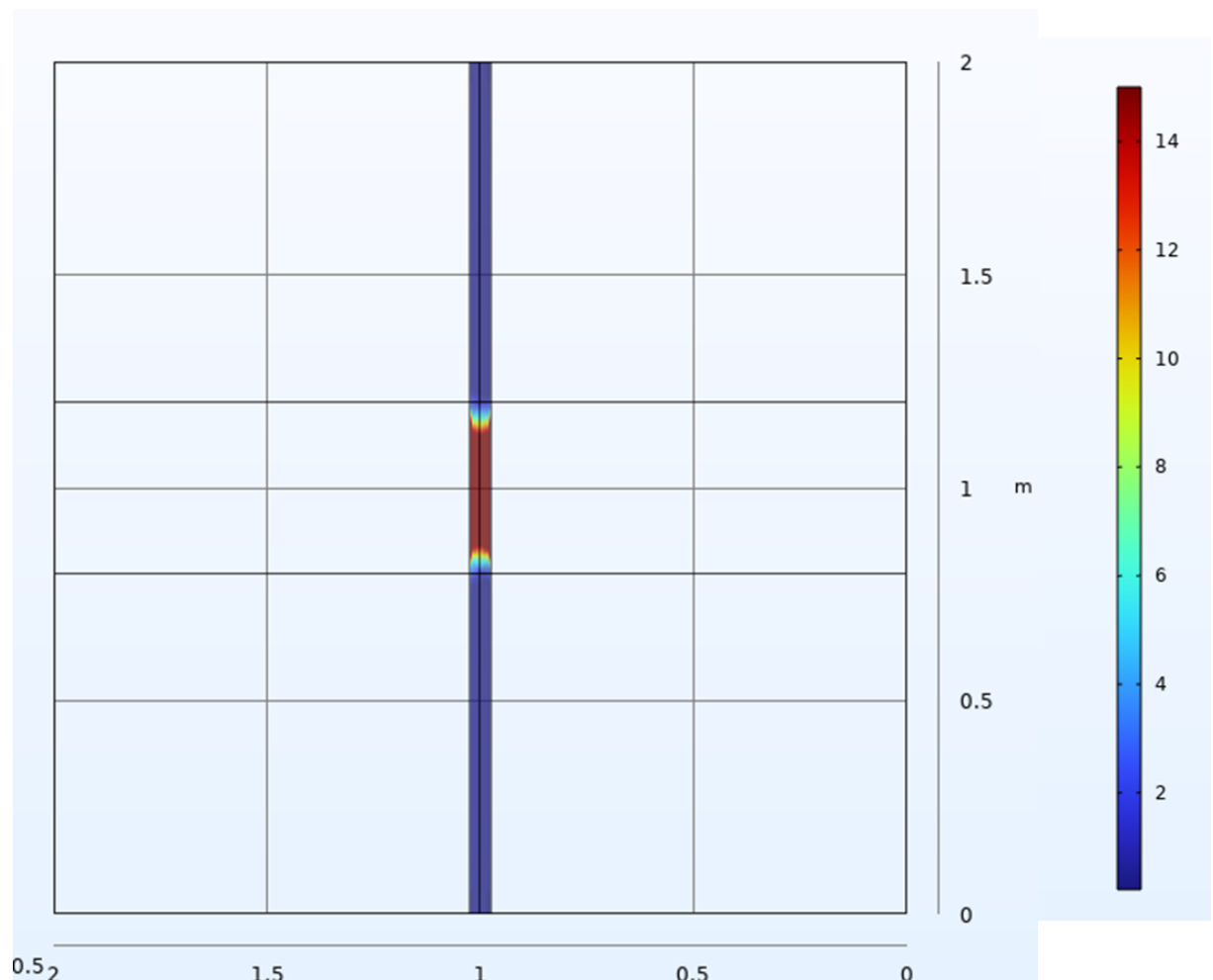


圖 29 理想狀態下地層流速差異對加熱溫度分佈的影響



結果與討論

圖 30 顯示當引入垂直流動後之溫度場分佈結果，該情境模擬未封井實際狀況下井內水體受垂直對流影響的情形。與理想狀態（僅水平流）相比，溫度場呈現明顯不同的分佈特徵：原本集中於中層低流速區的高溫區域消失，整體溫度趨於均勻，不論是低或高流速區間，其溫差僅有 $0.5\text{--}2^{\circ}\text{C}$ 之間，顯示井內產生了顯著的熱對流與水體混合現象。

由於垂直流動可使加熱產生的熱量快速向上下傳遞，使得局部溫度梯度大幅降低。此現象反映出井內水體已形成對流循環，導致加熱能量被稀釋並分散於更廣的垂向範圍內。換言之，垂直對流的存在會破壞原先由地層水平流速差主導的溫度差異，使溫度場趨於平滑且缺乏深度分辨性。

模擬結果顯示，在此非理想條件下，即使持續施加相同的加熱功率，溫度上升的空間分佈仍受垂直流的主導影響。垂直流越強，水體混合程度越高，熱傳導與熱累積效應越難顯現。此結果充分反映了未封井實際狀況中常見的問題：當井內存在垂直流動時，熱脈衝訊號易被混合擴散，使溫度解析度顯著降低，進而造成加熱試驗結果難以判釋的情形。

綜合上述比較可知，在未封井情況下，垂直流動會明顯干擾井內熱傳行為，使得溫度訊號均化並喪失垂向解析度。為改善此現象，後續模擬將探討在相同垂直流條件下引入封井材料後，井內對流行為與熱分佈的變化情形，以評估封井設計對溫度穩定性與可判釋性的改善效果。

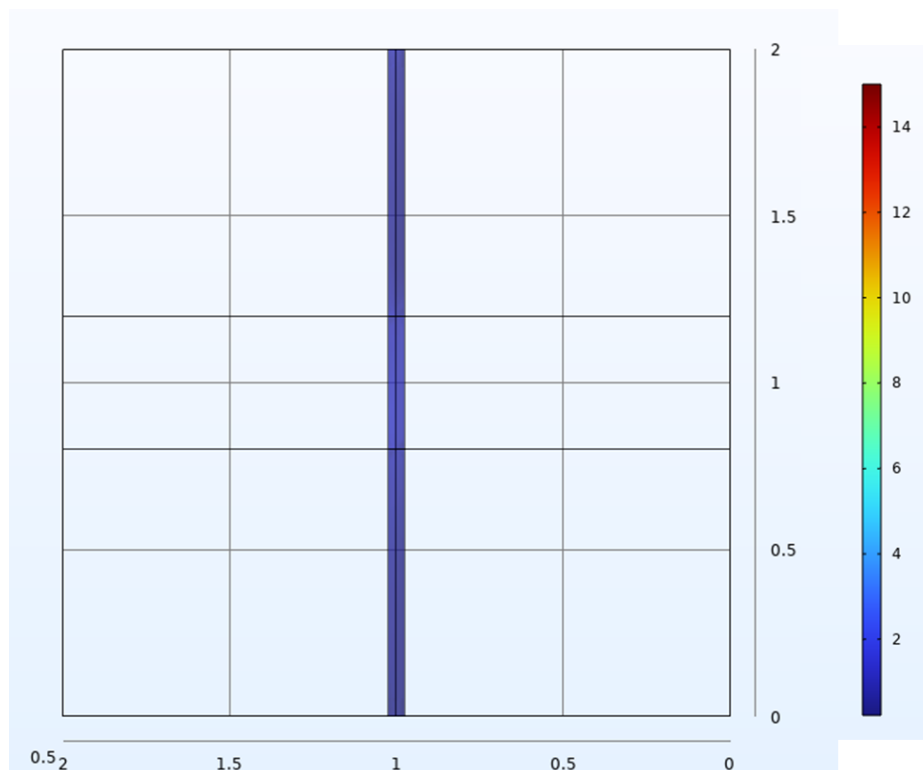


圖 30 垂直流影響之加熱溫度分佈



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 31 顯示在地層中存在垂直流動的條件下，於井內設置封井材料後之模擬結果。相比未封井的垂直流情境，可明顯觀察到封井層對井內流動與溫度分佈的抑制效果。原本均勻分布的溫度重新集中於中段的低流速區域，出現明顯的高溫區（紅色區域），溫度上升達到 14°C ，顯示垂直對流被有效削弱，熱量得以明顯累積。

封井材料其主要作用機制為阻隔井內垂直水流的通道，降低對流交換與熱量稀釋的速率。模擬結果顯示，垂直對流路徑被大幅壓縮，使得熱量僅能以水平流方式傳遞。由於熱能不再被持續混合，低流速區域的溫升幅度較未封井狀況明顯，溫度梯度亦更為集中。

此結果證明，在存在垂直流動的非理想條件下，封井材料可顯著改善水體混合造成的溫度均化問題。藉由降低井內流動性與強化局部熱累積，封井設計可恢復溫度分佈的深度差異，提升低功率加熱試驗下的訊號對比度與可解釋性。

綜合三種情境（理想水平流、未封井垂直流、有封井垂直流）之比較可知，垂直流動是造成加熱試驗溫度訊號不穩定與分辨率下降的主因，而封井材料則能有效抑制此現象，使井內溫場回復至以地層流速差為主導的穩定狀態，達到改善量測精度與訊號清晰度的目的。

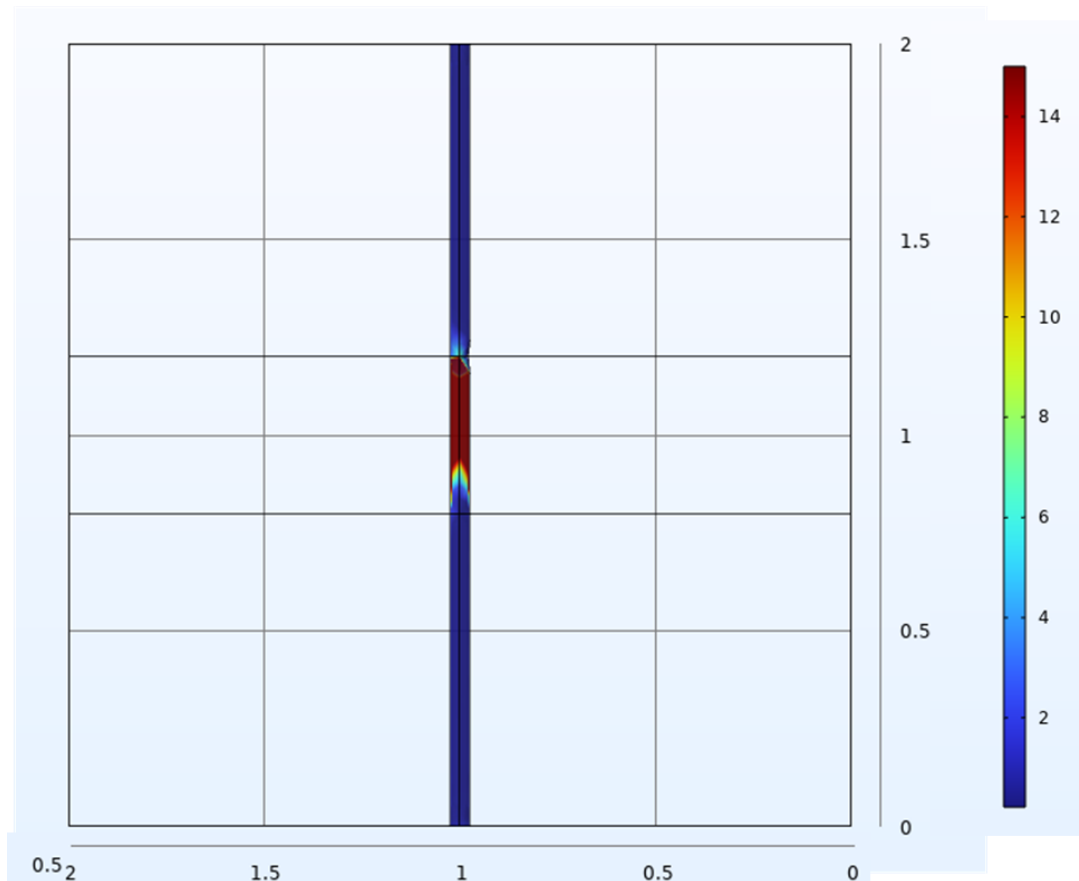


圖 31 封井之加熱溫度分佈



結果與討論

為進一步分析不同封井條件與流場狀態下的溫度變化特性，根據 COMSOL 模擬結果，取不同深度位置的溫度隨時間變化曲線，如圖 32 與圖 33 所示，各情境分別對應於理想狀態（僅水平流動）、存在垂直流動之未封井狀態，以及設置封井材料後的情況。

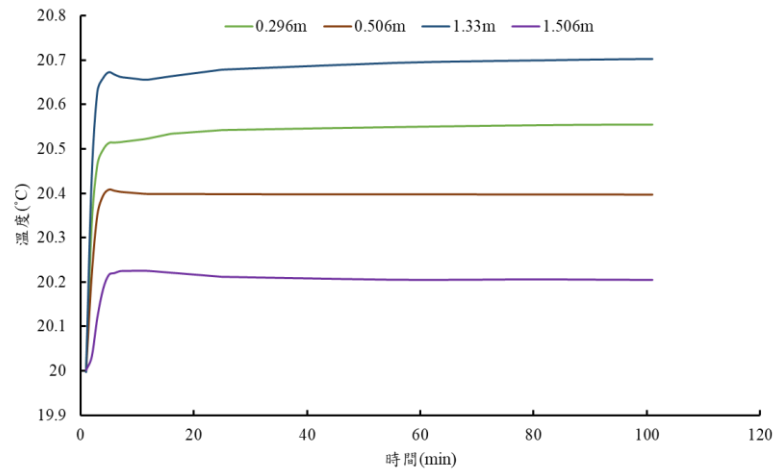
圖 32(a) 為高流速區域在理想狀態下之加熱溫度變化曲線。由圖可見，不同深度的溫度上升趨勢穩定且無明顯波動，隨時間逐漸達到穩態，不同深度的溫差變化差異僅約 $0.2-0.7^{\circ}\text{C}$ 。由於僅存在水平流動，各深度溫升差異主要反映地層流速差異所致：流速較慢之區域熱量累積較多，溫升幅度相對較大；流速較快區域則因對流散熱較強，溫升幅度較低，各溫度曲線之深度位置位於流速較快之區域，故溫度上升的幅度小。

圖 32(b) 為高流速區域在引入垂直流動後的未封井情境。相較於理想狀態，曲線在加熱中後期（約 40–60 分鐘）出現明顯波動與突升現象，顯示井內水體受垂直對流影響而產生混合，使熱量在垂向方向重新分佈，各深度的溫度差異並不顯著，皆在 0.5°C 以內。此現象導致溫度梯度減弱，深度間溫升差異縮小，反映出垂直流動對井內溫度變化的穩定性與解析度的擾動效應。

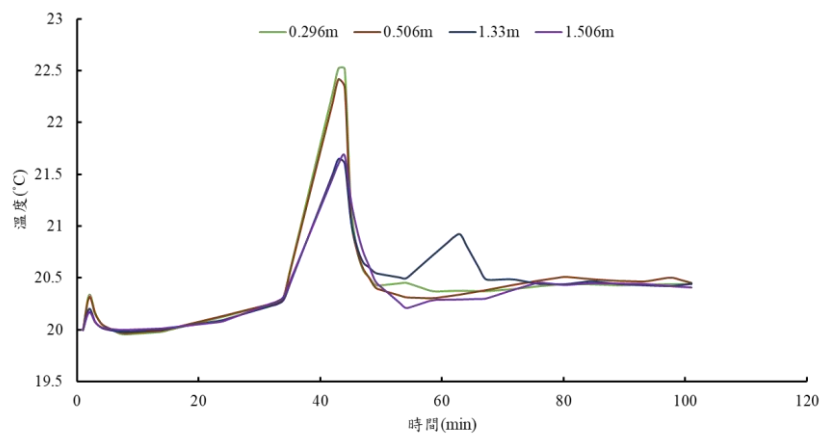
圖 32(c) 為於設置封井材料後的模擬結果。可見整體曲線形態與理想狀態相近。封井層有效抑制垂直流動，使井內熱傳以水平流為主，各深度因流速差異造成的溫差變化相較於圖 32(b) 有明顯改善，溫差達到 $0.8-1.4^{\circ}\text{C}$ 。此結果顯示封井設計可顯著改善水體混合所造成的溫度擾動，使其回復至近似理想狀態的特徵。



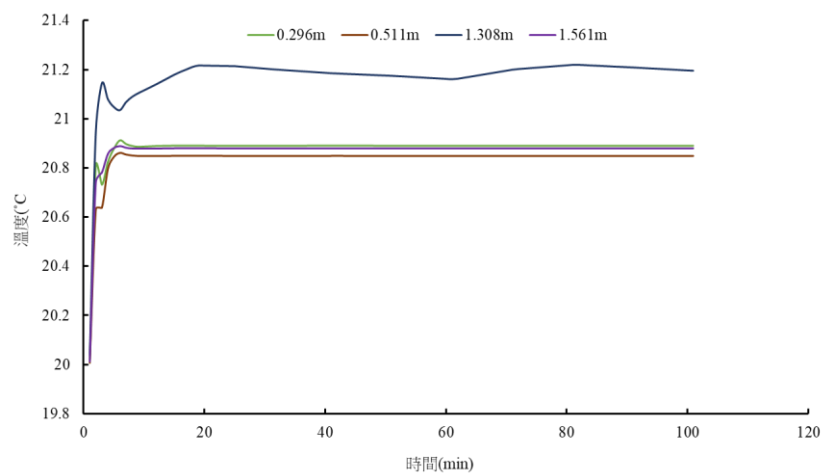
以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查



(a)



(b)



(c)

圖 32 高流速區域不同情境下之溫度變化曲線：

(a)理想狀態-無垂直對流，(b)實際狀態-垂直對流，(c)封井狀態



結果與討論

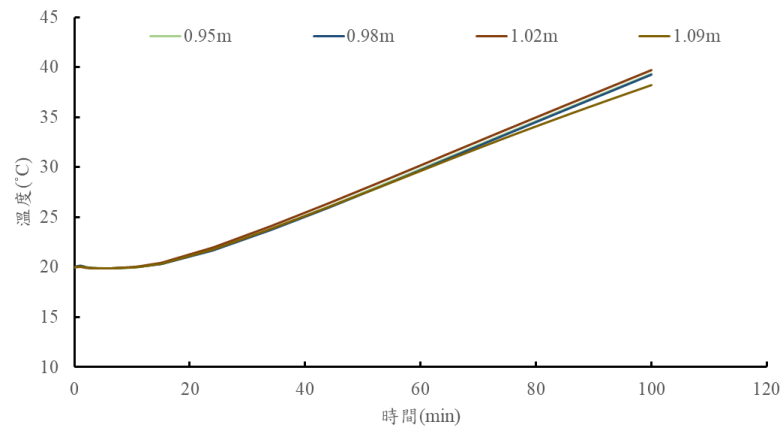
除高流速區域外，低流速區域亦呈現相似的行為特徵。圖 33 為模型的低流速區域於不同情境下之溫度變化曲線。整體而言，相較於高流速層，低流速區域中水體流動緩慢，熱量散失速率較低，因此整體溫升幅度較高。

在理想狀態下，溫度曲線隨時間穩定上升，溫差至少 25°C ，但與高流速區域不同，曲線間難以分辨由細微流速差異所造成的溫度分層現象，推測可能由於模擬加熱時長不足，使流速差異的熱響應尚未充分顯現（圖 33(a)）。當模型中產生垂直對流時，各深度間出現明顯的溫度波動，顯示井內水體產生混合，整體溫差僅有 $0.1\text{-}0.2^{\circ}\text{C}$ ，差異範圍落在溫度校正之誤差範圍內，使得溫度訊號判釋上更加不確定（圖 33(b)）。在設置封井材料後，溫度曲線則呈現明顯分層，各深度間的溫度上升差異重新出現，最大溫差來到 72°C ，位於深度 1.09m ；最低溫差也有 12°C ，位於 0.95m ，顯示封井材料有效抑制垂直水流，恢復以水平流速差為主導的特性（圖 33(c)）。

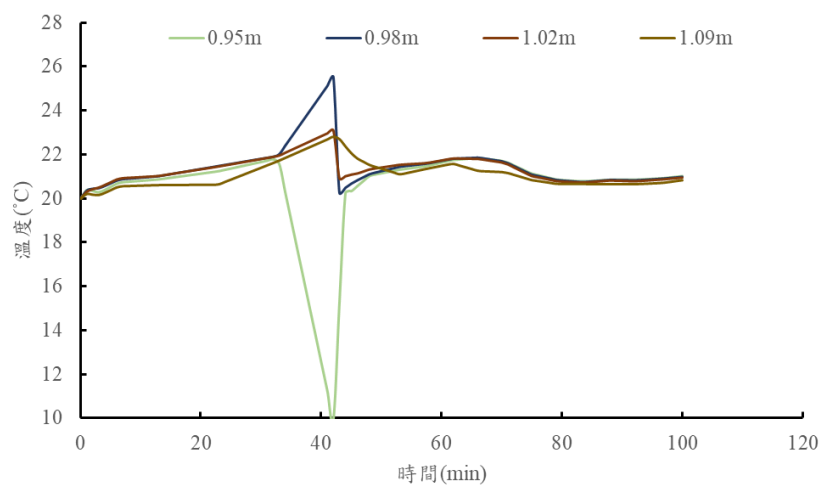
綜合上述結果可知，不論在高或低流速區域，封井材料的設置皆能使不同深度之溫度變化趨於穩定，並形成清晰的分層特徵，顯示封井設計可普遍改善垂直對流造成的熱場不穩定現象，使井內溫度分佈回復至以地層流速差控制為主的穩定狀態。



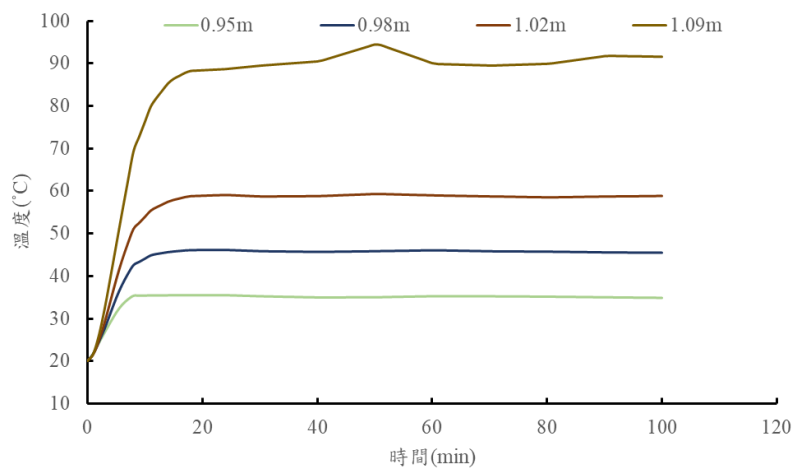
以分散式光纖溫度感測器結合封井材料進行場址地下水流速與流向高解析度調查



(a)



(b)



(c)

圖 33 低流速區域不同情境下之溫度變化曲線：

(a)理想狀態-無垂直對流，(b)實際狀態-垂直對流，(c)封井狀態



6-3-2 封井材料設計

為避免井內垂直熱對流及水體混合現象干擾加熱光纖試驗之溫度量測，本研究設計並製作一套專用之封井材料 FLUTe，用以形成封閉式井內環境，使溫度變化主要反映地層橫向流動與熱傳導特性。此設計的核心概念為透過內部灌水膨脹的封閉結構，使光纖纜線緊貼井壁，並消除井內自由水體的垂直流動空間(圖 34)。

在開放井環境中，當加熱過程產生溫度梯度時，井內水體密度差異會引起垂直熱對流，使溫度場混合且擾動顯著，難以反映地層真實之橫向流動特性。為避免此問題，本研究採用水封式膨脹結構，於封井材料內注入定量水體，使其受內壓膨脹並緊貼井壁，將光纖纜線固定於井壁表面。此設計不僅封閉了井內垂直流動通道，亦使溫度傳遞主要以導熱與水平滲流形式進行，達到抑制垂直對流的效果。

FLUTe 設計為總長 15m，直徑 2 吋的套管，材質採用 TPU 塗層尼龍布，厚度約 0.3–0.5 mm，兼具延展性與防水性，並可藉熱封製程達到完全氣密。外層尼龍織物提供機械強度與抗撕裂性，內層 TPU 則具良好防滲漏效果(圖 35)。

本研究開發之水封式封井材料具備可重複使用、輕量化及現地快速安裝特性，可作為加熱光纖試驗中的標準化邊界控制裝置。其膨脹式結構不僅能穩定光纖與井壁的熱接觸條件，亦能排除井內垂直流動所造成的誤差，提升地下水流速與熱傳參數推估之準確性。未來可依不同井徑等需求調整封井層厚度與填充壓力，擴大其於地下水領域之應用潛力。

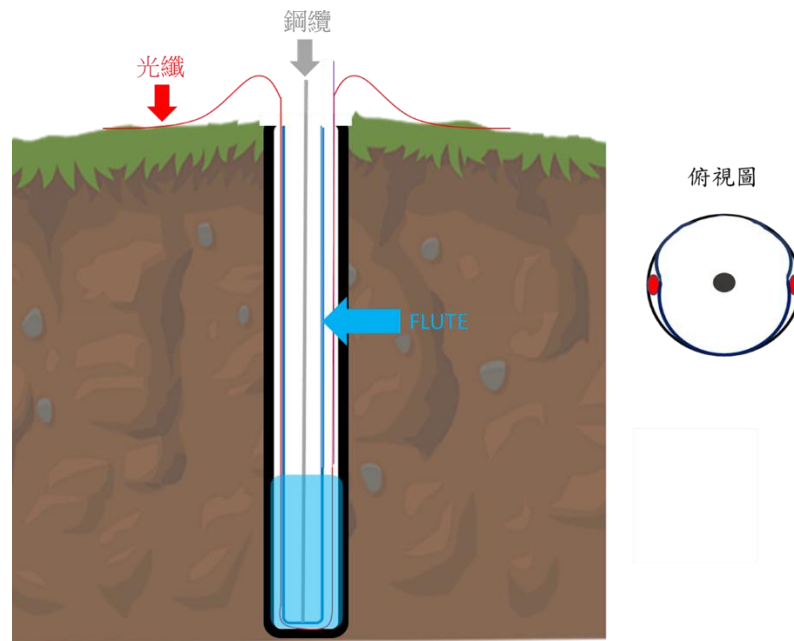


圖 34 封井材料 FLUTe 設置示意圖



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 35 封井材料 FLUTE 實際照片

6-3-3 現地試驗設計

本研究於現地井內進行封井式加熱光纖試驗。試驗設計的主要目標為建立穩定的加熱與量測環境，使溫度變化主要反映地層橫向流動並評估不同封井介質對溫度變化的影響。本研究選定井 T00567 進行現地加熱光纖試驗。選擇該井的主要原因在於其井體幾乎全開篩的設計，使得井內水體與地層間具有高度連通性，能有效反映實際的水流情況，適合安裝本研究所設計的封井材料。

現地佈置情形如圖 36 所示，在封井材料與光纖纜線一同下放的過程中，若操作速度不均或井內摩擦阻力過大，容易造成材料扭曲、凹折，甚至導致卡井等問題。為確保下放過程穩定，本研究於封井結構外側增設一條黃色支撐線纜，作為導向與拉力傳遞介面。此線纜固定於封井材料底端，並與地面線軸連接，使 FLUTE 或穿孔管套在下放過程中能沿井壁平穩滑動，避免因重力不均而產生旋轉或彎折。該設計除顯著降低卡井發生次數外，也能確保光纖與加熱導線在井下維持筆直排列，提升整體安裝一致性與量測可靠度。

經過多次測試，FLUTE 封井材料成功完成下放作業，最終安裝深度達 14 公尺。完成安裝後，便開始標準的加熱試驗作業流程，加熱功率設定為每公尺 6–7 W，總加熱時間為 6 小時。整段加熱期間，溫度變化透過分佈式溫度量測 (DTS) 連續監測，並記錄沿深度方向之溫度變化。



結果與討論



(a)



(b)

圖 36 (a) FLUTe 現地試驗佈置，(b) 支撐線纜



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

6-3-4 T00567 試驗結果

為評估封井材料於現地應用的可行性，本研究選擇 T00567 試驗井進行加熱測試。加熱功率設定為 6–7 W/m，持續加熱 6 小時，以觀測地下水體在不同封井條件下的溫度響應。除 FLUTe 封井條件外，另進行一組未封井的標準單井加熱試驗，其加熱功率與時長均與封井試驗相同，以作為比較基準。兩種條件下的加熱試驗結果如圖 37 所示。

在單井加熱試驗（圖 37(a)）中，加熱深度來到水位面以下 7m 的位置，溫度變化隨時間呈均勻上升，特別於深度約 1–2 m 處形成明顯的高溫帶，溫升幅度達 3–4 °C，隨著深度增加，溫差逐漸減少。此現象顯示在未封井條件下，井內水體能自由循環，熱量於垂向方向傳遞快速，使整體溫度分佈趨於均勻。由於對流作用主導熱傳過程，各深度間的溫度差異不明顯。

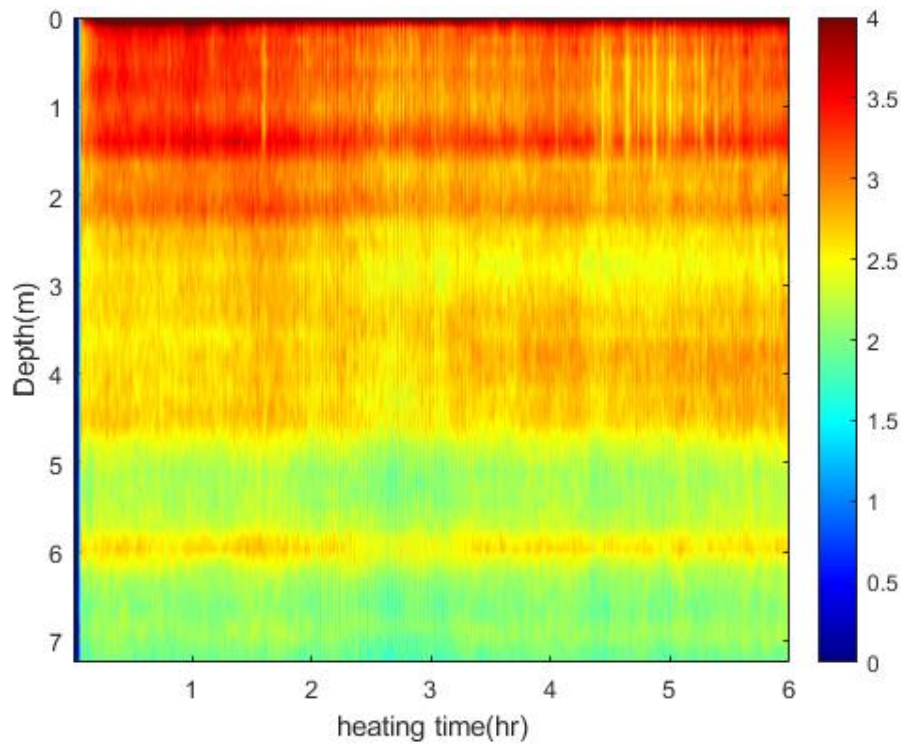
FLUTe 封井加熱試驗（圖 37(b)）的溫度分佈則呈現明顯不同的特徵。整體 ΔT 值普遍較小，僅在部分區域出現局部高溫，例如深度 0.8–1.2 m、2.0–2.5 m 及 3.5–4.0 m 處；而低溫區則主要分佈於深度 0.2–0.8 m、2.5–3.5 m 及 4.0–5.0 m 之間。此結果顯示封井後熱量傳遞受限制，熱能主要集中於特定區段，反映地層導熱與局部流速差異。

在加熱約 2–3 小時期間，於深度約 2–3 m 間可觀察到一條垂向高溫柱狀帶。根據現地紀錄，該現象並非地層水流或自然熱傳所造成，而係由補水操作引發的 FLUTe 膨脹效應所致。由於 FLUTe 系統於試驗中出現微量滲水情形，需外部補水以維持內部壓力，該操作導致材料於該區段過度膨脹、緊密貼合加熱光纖，使熱量短時間內集中、累積，形成局部的高溫柱狀帶。此現象可視為封井操作過程中產生的暫時性人工效應，與地層流動特性無直接關聯。

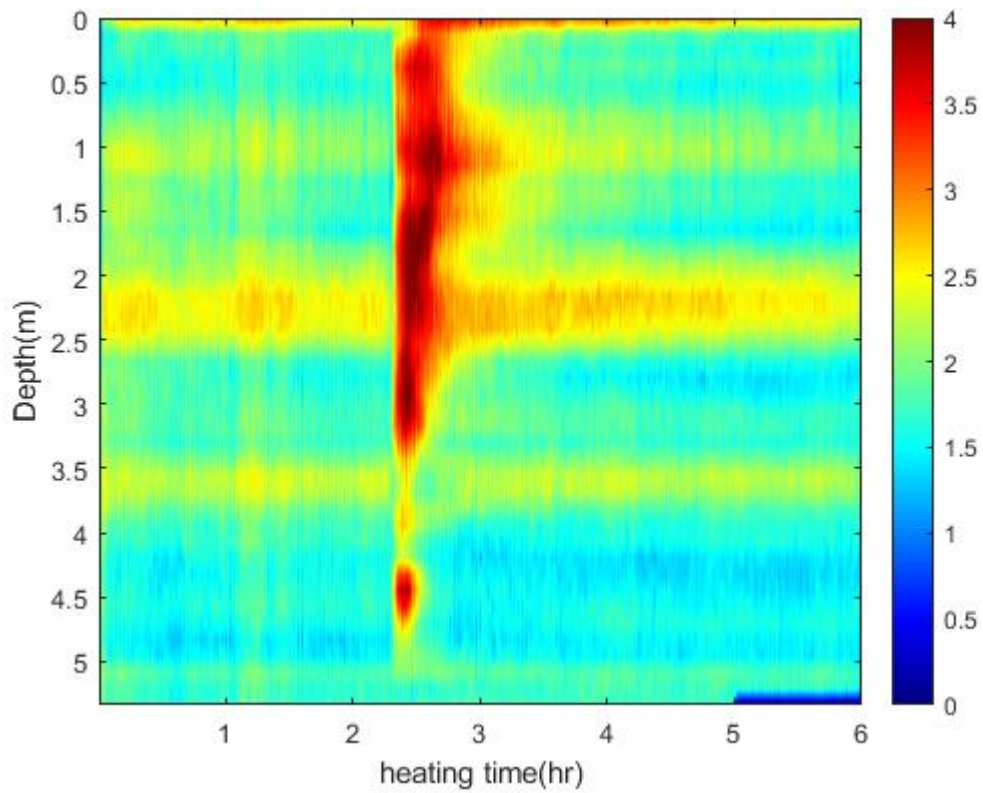
撇除補水導致的短暫高溫事件後，整體結果顯示 FLUTe 膨脹後能有效抑制井內垂向對流，使加熱產生的熱能主要侷限於局部區域，溫度分佈更受地層導熱性與局部流速差異控制。與單井加熱試驗相比，FLUTe 封井條件下的熱場表現更能反映地層原生的水流異質性與熱傳導特性。



結果與討論



(a)



(b)

圖 37 不同條件下加熱試驗期間溫度變化之比較：(a) 未封井，(b) FLUTe 設置



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

6-4-1 封井材料設計

本研究除採用水封式 FLUTE 薄膜結構外，亦使用魔晶土作為封井之填充材料，模擬自然地層的孔隙性結構。此材料具備可吸水膨脹、可重複使用及可控制孔隙率的特性，能在實驗井中形成具代表性的多孔介質環境，同時有效抑制井內垂直熱對流。

魔晶土是一種高吸水性聚合物（通常為聚丙烯酸鈉，Polyacrylamide Gel, PAG），能在吸水後迅速膨脹，體積可增加數十倍(圖 38)。當乾燥顆粒倒入井中並吸收水分後，會膨脹並彼此緊密接觸，形成一層具有孔隙結構的飽和介質。這樣的結構一方面能阻擋井內自由水柱的垂直接流動（減少對流現象），另一方面能讓熱量透過顆粒間的水分與接觸面傳導，使熱傳行為更接近天然含水層的狀態。

為避免其直接填充井孔後無法完全取出，導致井體受損或產生殘留污染問題，特別設計一種可回收式塑膠布管套，作為封裝與載體結構。此管套以具彈性之透明塑膠布製成，長度約 2 m，外徑略小於井徑。於其表面平均分布多個小孔，使地下水可由孔隙滲入套管內部，提供魔晶土吸水膨脹所需之水源(圖 39)。

魔晶土在吸水膨脹後，於管套內形成均勻分布的飽和顆粒層，其顆粒間水體能傳導熱能，模擬地層中多孔介質的導熱與滲流行為。由於外層塑膠套可完整包覆並限制其移動空間，使封井結構穩定且不會外逸，同時保留內部孔隙。

試驗結束後，可利用繫於套管頂端的吊環或尼龍繩，將整組管套連同膨脹後的 PAG 一併取出，達到完全回收的目的。此設計不僅能避免井體損傷與殘留物堵塞，亦可確保封井材料的重複使用性，兼顧環境保護與操作便利性。

以高吸水性聚合物為基材的封井材料具備操作簡易、成本低廉以及可重複使用等優點，特別適合應用於短期或實驗性質之加熱光纖試驗中。由於此材料在吸水膨脹後可形成飽和的多孔結構，能同時模擬地層孔隙中的導熱與滲流特性，亦能有效消除井內自由水柱所造成的垂直熱對流。

此外，水晶寶寶的顆粒尺寸、膨脹倍率及填充密度皆可依據試驗需求進行調整，成為極具彈性的多孔介質模擬材料。在加熱試驗的應用上，其封井不僅可作為臨時性封閉介質，用以隔絕井內對流、穩定光纖定位，亦能提供可重現的導熱環境以利熱傳參數校正與模型驗證。未來若能針對顆粒粒徑分佈、壓實程度及含水量控制進行系統化測試，將可進一步提升其在地層條件下的模擬精度。



結果與討論



(a)



(b)

圖 38 (a)封井材料 PAG，(b)套管

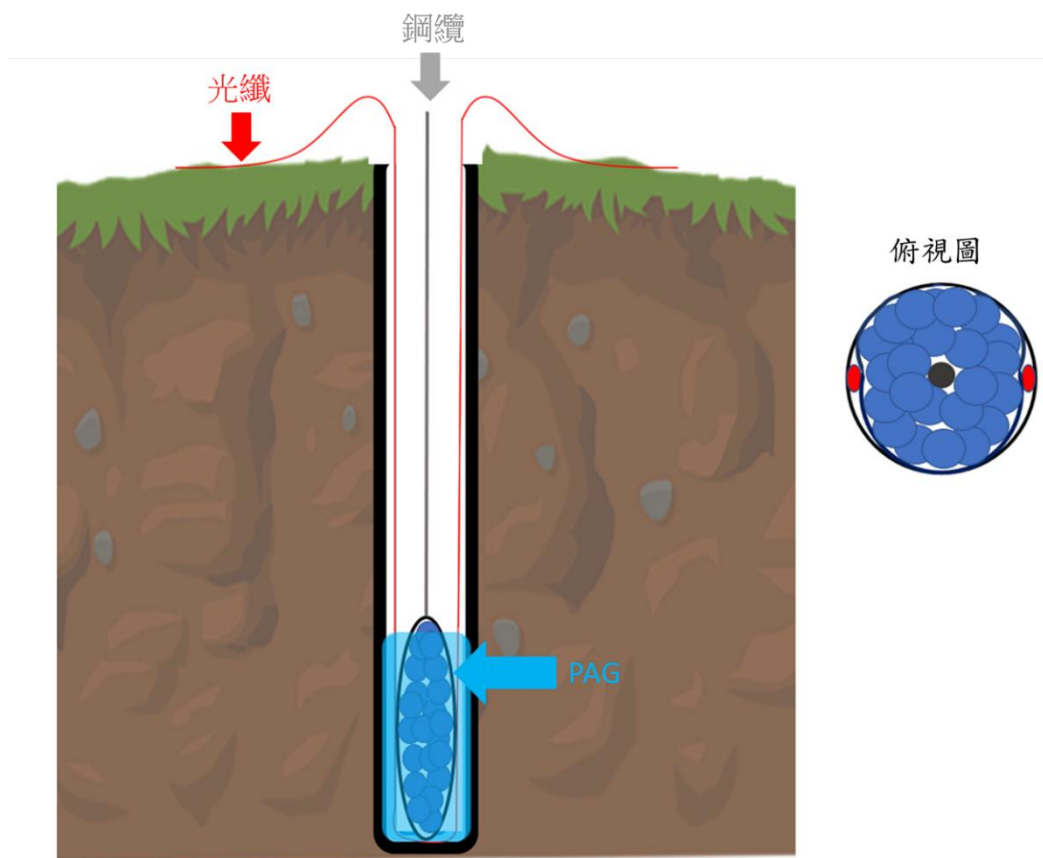


圖 39 封井材料 PAG 示意圖



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

6-4-2 現地試驗設計

與 FLUTe 佈設方式相似，於同樣試驗井中採用聚丙烯醯胺凝膠（PAG）作為封井介質。於現地作業時，先將預先填充 PAG 的套管與光纖纜線一同下放至井內目標深度，並以黃色支撐線纜(圖 40 (b))作為導向輔助。該線纜能在下放過程中提供拉力控制與定位作用，確保套管沿井壁平穩滑動，減少因纜線扭曲、材料偏移或摩擦不均所造成的卡井與局部厚度變化問題。

完成下放後，封井結構於現地靜置超過 12 小時，以提供充分時間使 PAG 凝膠吸水膨脹並達到穩定狀態。經過膨脹的 PAG 在井內形成緻密且均勻的封閉層，使光纖與井壁間保持穩定熱接觸，同時有效封閉井內垂直流動通道，確保加熱試驗期間的溫度變化主要反映地層的導熱與水平流動行為。

經過多次測試，PAG 封井材料成功完成下放作業，最終安裝深度達 14 -16 公尺。完成安裝後，便開始標準的加熱試驗作業流程，加熱功率設定為每公尺 6-7 W，總加熱時間為 6 小時。整段加熱期間，溫度變化透過分佈式溫度感測器進行連續監測，並記錄沿深度方向之溫度變化。



(a)



(b)

圖 40 (a)PAG 現地試驗佈置，(b) 支撐線纜



6-4-3 現地試驗結果

為評估聚丙烯醯胺凝膠 (PAG) 作為封井材料的適用性，本研究於 T00567 試驗井 5–7 m 深度設置 PAG，並以 6–7 W/m 功率進行 6 小時的加熱試驗，觀測井內溫度隨時間與深度之變化行為。除 PAG 封井條件外，另進行一組未封井的標準單井加熱試驗，其加熱功率與時長均與封井試驗相同，以作為比較基準。兩種條件下的加熱試驗結果如圖 41 所示。

在單井加熱試驗 (圖 41(a)) 中，溫度隨時間均勻上升，於深度 1–2 m 形成明顯高溫帶，溫升可達 3–4 °C。此結果顯示，在未封井條件下，井內水體可自由循環，熱量沿垂向方向快速傳遞，使整體溫度分佈呈現對流主導特性。

PAG 封井加熱試驗 (圖 41(b)) 的溫度變化則呈現出不同的分佈特徵。在設置區段 (深度 5–7 m) 內，整體 ΔT 值略低於上部未封井區。於加熱中後期 (約 3–6 hr)，封井層內的溫度變化趨於穩定，呈現較明顯的分層結構，深度 6m 附近有著明顯的溫度上升，約為 3 °C，強化了原本單井加熱的溫度效應。此結果說明 PAG 封井層可有效調節井內熱能的垂向擴散，使加熱過程中的溫度響應主要由導熱控制。

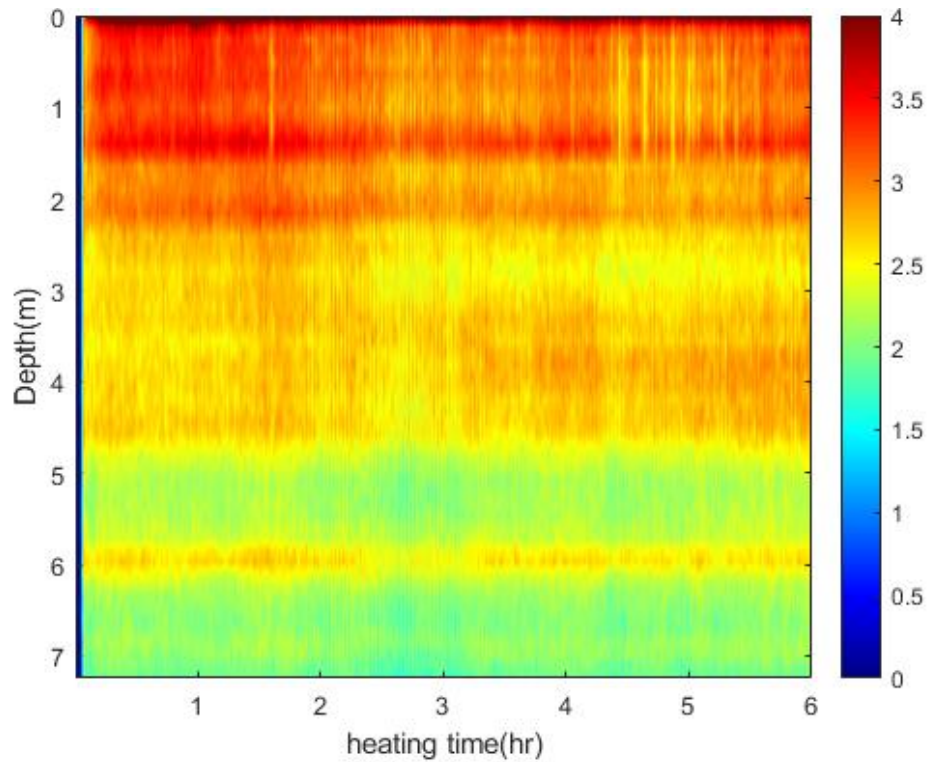
根據現地觀察，PAG 材料於試驗可能尚未達到完全膨脹狀態，在此條件下，部分水體可能仍可在封井層內緩慢流動，使熱傳導與微弱對流並存。儘管封井效果尚屬初步階段，但試驗結果仍顯示 PAG 材料具有降低對流強度、促進熱傳導穩定化的潛力。

值得注意的是，雖然深度 0–5 m 區段並未設置封井層，理論上應與單井加熱結果相近，但實際觀察仍存在溫度變化差異。此現象可能與加熱光纖及支撐構件的幾何配置有關。於 PAG 試驗佈設過程中，加熱光纖、鋼纜與黃色支撐線在淺部深度間可能局部接觸或貼附，導致局部熱傳行為受到干擾。若光纖貼近導熱性較高的金屬纜線，其散熱條件將與周圍水體不同，使得量測到的 ΔT 反映部分接觸效應而非純流體對流。此區段之溫度差異因此應視為受安裝條件影響的結果，而非封井材料效應。

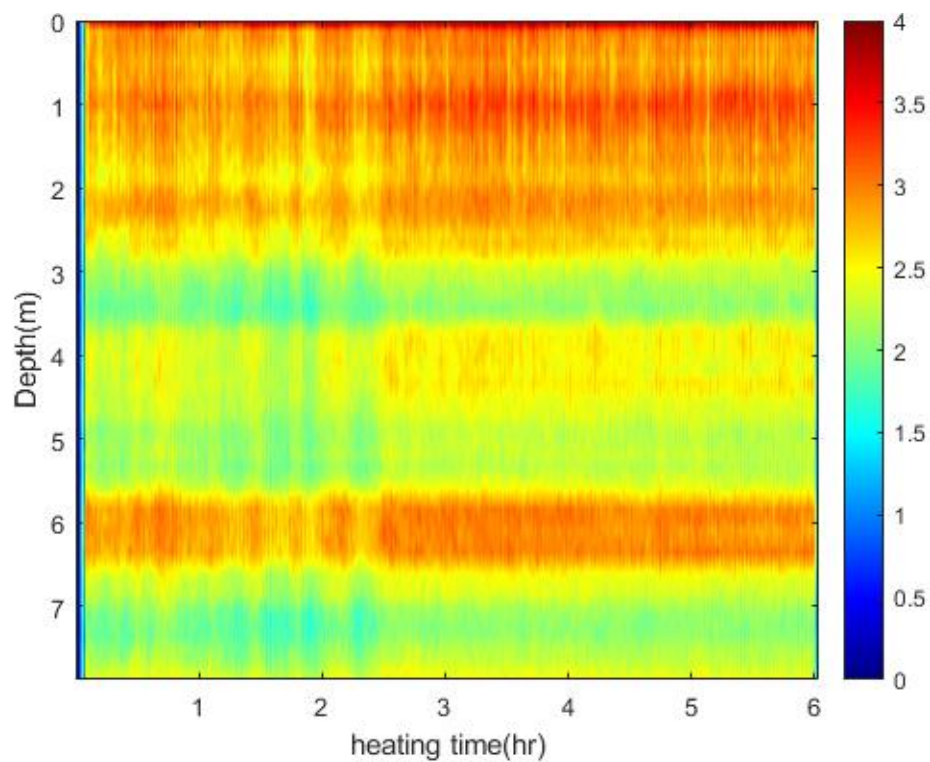
整體而言，PAG 封井試驗顯示，其於設置區段內可顯著降低井內垂向對流，使其溫度變化為水平流主導，溫度變化趨於穩定分層。封井材料的行為在現地條件下仍受到水化時間與井內幾何配置影響，但其對於熱場穩定化與局部熱擴散抑制的效果已初步展現。此結果說明 PAG 具備作為柔性封井介質的可行性與改良潛力，未來若能優化水化過程與佈設方式，將有助於提升其封井完整性與熱響應表現。



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 41 不同條件下加熱試驗期間溫度變化之比較：(a) 未封井，(b) PAG 設置(位於深度 5-7m)



七、結論與建議

7-1 結論

本年度已完成兩口監測井(T00483、T00484)之單井主動加熱試驗與 ADTS 量化推估，建立垂向流速與熱傳參數的初步框架，以及完成四口監測井(T00483、T00484、T00565、T00566)的 TV-DTS 的流向分析；同時完成暫時性封井材料 (FLUTe、PAG) 之現地原型測試與三維數值模擬 (COMSOL)，評估封井對抑制垂直對流與提升訊號可解釋性的成效，達成今年度的預計工作進度。

加熱期間，若地層較為透水、水平流速較快，熱量較難累積，升溫幅度偏小；回復期間則因對流散熱較強，降溫較快。反之，低透水或流速較慢之層位，升溫幅度較大、回復較緩。據此可由溫度變化圖辨識高／低透水分佈，並以 ADTS 推估流速與熱傳導係數，同步檢視 RMSE 以確保推估品質。

T00483 的加熱結果顯示，深度 30–50 m 區段升溫較小（約 0.9–1.1 °C），深度 65–80 m 區段升溫較為明顯（約 1.4–1.7 °C），80 m 附近最高可至約 2.0–2.2 °C。據此判讀，深度 31–43 m 與 48 m 為相對高透水帶；深度 51 m 及 64–80 m 為相對低透水帶。ADTS 流速推估進一步顯示 深度 34–39 m 為高流速帶（約 10^{-5} – 10^{-4} m/s），深度 44 m 以下逐步降低，深度 50–80 m 為相對低流速區；RMSE (q) 多落於約 0.2–0.6 °C，推估品質穩定。深度 30–50 m 的 λ 偏高（局部觸及模型上限 $8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ），推測與高流速段之參數耦合與上限設定有關。

T00484 整體升溫偏小（加熱 7 hr、 $13 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$ ），顯示流速較快；ADTS 推估結果顯示深度 32–35 m 與 45–50 m 為高流速帶，深度 40–45 m 與 55–70 m 為低流速帶。RMSE (q) 多為約 0.2–0.6 °C（局部近 0.8 °C），RMSE (λ) 於 深度 40–80 m 約 0.5–1.5 °C，整體可接受。惟因升溫幅度有限， λ 易受上限與耦合影響而呈「拉平」，本井以流速結果作為主要診斷較為穩健， λ 解讀需搭配邊界與上限調整。

數值模擬 COMSOL 三情境比較顯示：僅水平流時，低速層熱累積顯著、分層明確；一旦存在垂直對流，井內對流混合作用使溫度場趨於均化、分層消失；導入封井材料後，垂直對流受抑，熱量回到局部累積，溫度分佈恢復由水平流速差主導的深度差異。此結果與現地觀測相符，證實封井對提升訊號對比與解釋穩健度之必要性。

FLUTe 與 PAG 之現地結果顯示，在相同功率（約 6–7 W/m）與加熱時長（6 hr）下，未封井時溫度沿深度趨於均勻上升，由於各深度之溫差小於溫度校正之誤差，造成在流速判釋上的不確定性；封井後整體 ΔT 下降但高低溫分帶更清楚，顯示對流受抑、水平對流主導。FLUTe 試驗中期出現的垂向高溫柱可回溯為維持內壓之補水操作造成的暫態效應，與地層流動無直接關聯；剔除該時段後，分層特徵清晰。PAG 於深度 5–7 m 區段形成穩定分層，深度 6 m 附近升溫約 3 °C，證實其抑制對流與穩定熱響應之潛力；深度 0–5 m 的差異主要源於加熱纖維與鋼纜／支撐線局部接觸的散熱影響。



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

綜合兩口井之單井加熱與流速推估；T00484 因高流速致升溫有限， λ 推估易受上限與耦合影響，但以流速為主的解讀仍具一致性與可信度。數值模擬與 T00567 現地原型封井材料試驗一致指出：垂直對流為訊號去分層之主因，暫時性的封井材料（FLUTe、PAG）能有效抑制其影響並提升可判釋性。整體而言，本年度已完成預計目標，後續將可在功率設定、冷卻窗長度、材料貼壁度與參數上限等面向精緻化，以進一步收斂不確定性並強化對優勢水流路徑之辨識能力。

7-2 建議

1.強化高流速環境之試驗設計，以避免升溫幅度過小造成誤判。亦可結合封井結構輔助，使熱量更集中於局部區段，增強溫度對比度，改善高流速環境下的量測準確性。

2.持續改進單井加熱與流速推估流程，以提升不同深度溫度變化的可辨識度。同時可針對 ADTS 推估時所需設定之參數（如熱傳導係數、比熱容）進行採樣與實驗室量測，以提高流速推估的穩定性與精度。

3.提升封井材料之現地應用與結構設計，持續改良 FLUTe 的材質與壓力控制方式，建立預充壓力與貼壁度之關係，減少試驗中補水的需求；同時可透過穿線器或導向繩具簡化安裝與回收流程。對於 PAG 材料，建議採用網袋式結構以方便回收，並調整其含水率與顆粒分布，以確保水化膨脹後的穩定性與可重複使用性。

4.建立標準化試驗與資料分析流程，整合本計畫所得經驗，建立一套標準化的「光纖加熱試驗作業與資料解析流程」，內容可包含現地佈設方式、加熱功率設定、封井材料選用、ADTS 流速推估步驟與評估方式。尤其在傳統水力試驗無法進行之場域，提供另一現地調查方法，以提升地下水資料調查與評估之解析能力。

八、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., Chalari, A., Monsanos, M., Ciocca, F., and Selker, J.S. (2016). Distributed temperature sensing as a downhole tool in hydrogeology, *Water Resources Research*, 52, 12, 9259-9273.
- Bhardwaj A, Miller E, Rothstein JP (2007) Filament stretching and capillary breakup extensional rheometry measurements of viscoelastic wormlike micelle solutions. *J Rheol* (in press).



參考文獻

- 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.
- 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*



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

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 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.



參考文獻

- 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 Koochi, 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 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.



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

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。