

# 光纖光柵井下地溫感測系統之開發與實測

周柏儀<sup>1</sup> 許世孟<sup>2</sup> 蔡美雯<sup>3</sup> 呂昱達<sup>4</sup> 俞旗文<sup>5</sup> 陳文山<sup>6</sup>

<sup>1</sup>中興工程顧問社大地工程研究中心

<sup>2</sup>中興工程顧問社大地工程研究中心

<sup>3</sup>三光科技有限公司

<sup>4</sup>中興工程顧問社大地工程研究中心

<sup>5</sup>中興工程顧問社大地工程研究中心

<sup>6</sup>國立台灣大學地質科學系

## 摘要

高溫高壓井下紀錄設備的開發是地熱發電主軸計畫中重要的專業技術之一。本研究主要介紹一套以光纖光柵掃描技術為基礎的井下地溫感測系統，現階段設計量測深度為1,500m，設計量測目標溫度為300°C，除了進行定速動態連續性量測，也可在固定深度進行長時量測，或是進行重複性井下溫度檢核，提供地熱探勘工作建立完整井下溫度剖面資料。

**關鍵字：**地溫梯度、靜態光纖光柵井溫感測器。

## 一、前言

### 1.1 井溫量測的重要性

參考現行國際加強型地熱示範計畫所發布的資訊可知，要充分了解並量化地熱儲集層的空間分佈，克服高溫高壓的條件限制相當重要；而在人工壓裂試驗和地熱發電前後，掌握地溫突增或間歇性熱脈衝等資訊也是不可忽視的工作。如何利用高精度溫度探測儀(Temperature Log)進行地溫量測，精準計算出場址地溫梯度剖面，並掌握地熱儲集層的原始溫度與環境狀態，是地熱探勘期相當關鍵的工作之一。

井溫量測對於地熱開發潛能評估和供給區位置(Feed zone)的優選能提供較為可靠的決策依據，如圖1所示為不同國家地熱場址的地溫剖面記錄，若以地熱發展指標性溫度250°C來看，包括法國Orléans、Soultz與美國新墨西哥州的Fenton Hill地熱場址所需開發深度皆超過3,000m，而包括菲律賓Bulalo、日本Kakkonda、美國加州Salton Sea、Geysers、義大利Larderello等地熱場址所需開發深度皆在1000m範圍內，差異頗大。由此可知，精準井溫量測對於開發深度的優選乃至於計畫成本的控管相當重要。

另一方面，透過雙井井溫量測的比對也能提供現地人員在儲集層地質構造的研判工作更多資訊，如圖2所示由上而下依序為地層出現高熱花崗岩塊(High heat producing granite)、地表絕熱覆蓋層(Insulating cover)、高溫岩漿庫(Magma reservoir)與熱液在淺層裂隙網絡連通(Hot fluids at shallow depths)狀況下的典型溫度剖面。

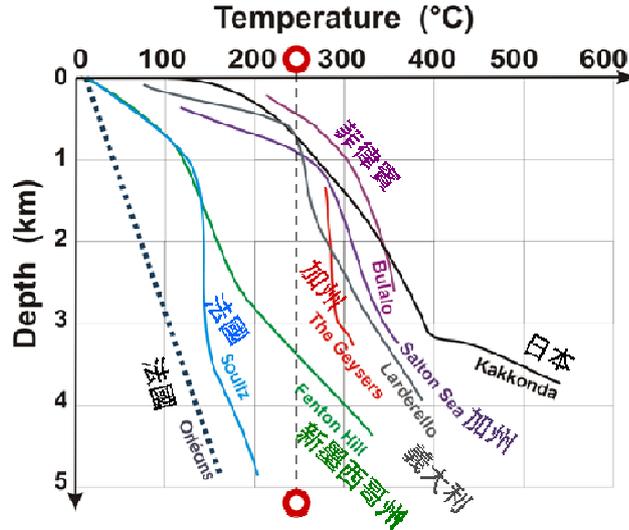


圖 1 各國地熱場址的地溫記錄(來源: Guillou-Frottier 2006)

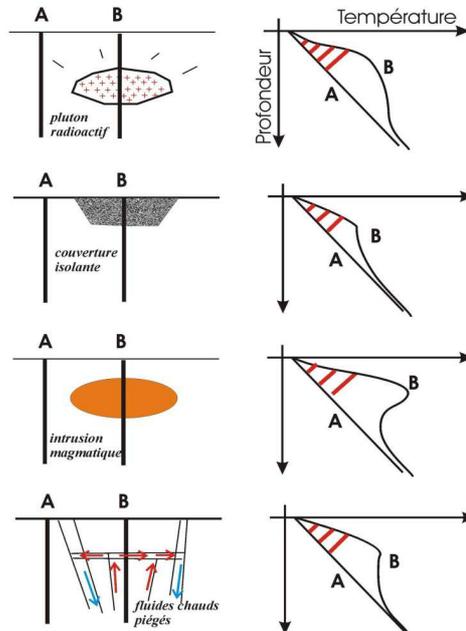


圖 2 儲集層特殊地質構造之雙井地溫剖面比對(來源: Guillou-Frottier 2006)

Axelsson and Franzson (2012)亦以一般常見的三種不同型態地熱系統與環境特徵所呈現的典型地溫梯度剖面(圖3)為例說明如何透過井溫量測進行地層環境狀態描述。圖3(上)顯示地層為一對流型裂隙控制系統(convective fracture controlled system)，熱量供給來自大地應力活動較頻繁的地殼熱點，藉由連通性裂隙形成熱岩流循環，所建構的熱流循環通道有可能綿延超過一公里，開發所需深度通常較淺，地溫梯度會呈現一滑順的陡降，其可在美國西南方與中國發現；圖3(中)則顯示冰島較常見的深層火成熔岩系統，與火山群(volcanic complexes)活動息息相關，多集中在火山口或噴發中心，可在我們熟知的太平洋火環帶(The Pacific Ring of Fire)諸國如紐西蘭、日本、菲律賓或中美洲等國發現；透水裂隙和斷層的出現是深層火成熔岩系統發展不可或缺的元素，因此在該型態系統中地溫梯度會通常會因分層岩性結構變化呈現多段轉折；圖3(下)則是一般沉積岩環境所建構的熱傳導系統，其仰賴地層深層連通區做為熱傳遞的媒介，地溫梯度大( $>30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ )且呈現趨於線性的發展。

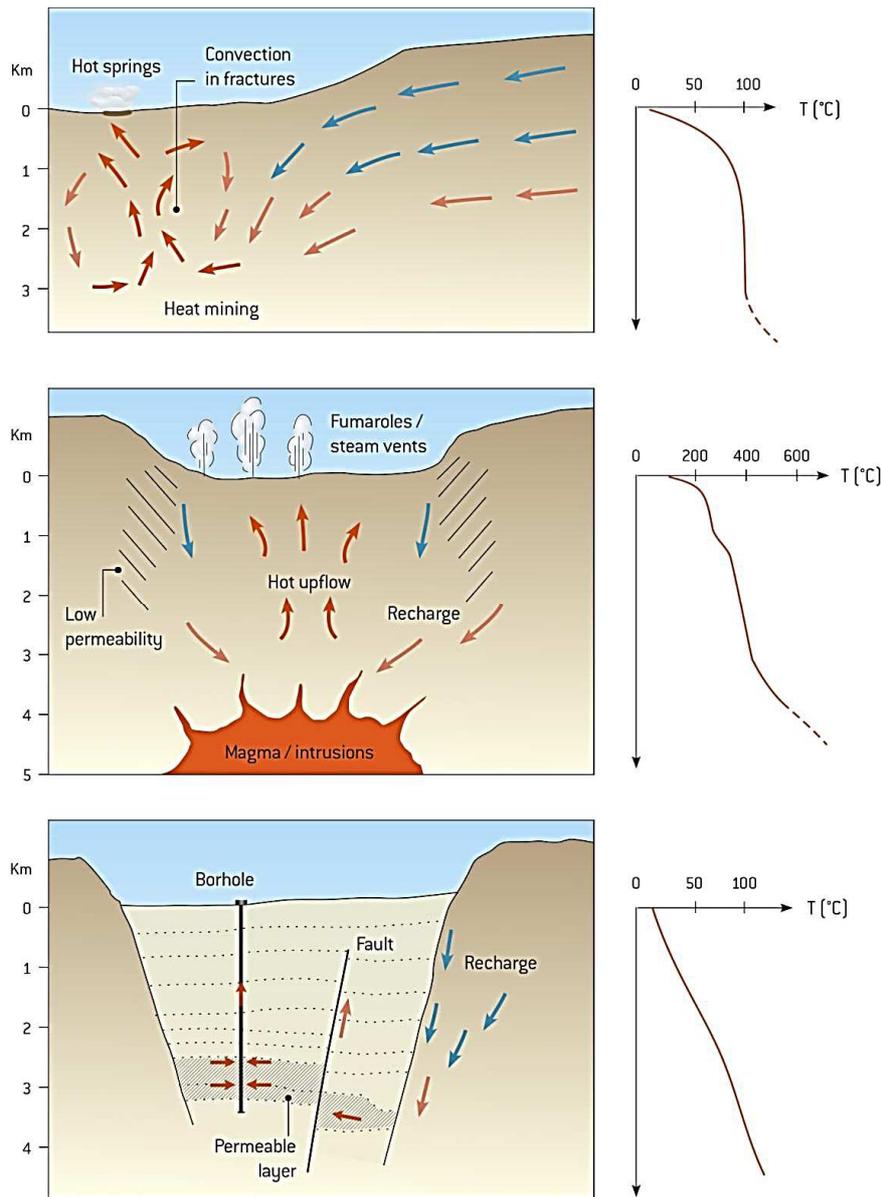


圖 3 不同型態的地熱系統所呈現的地溫梯度剖面(來源: Axelsson and Franzson 2012)

而從數值模擬的需求面來看，一個完整的地熱系統概念模型必須展現的功能性評估包括地熱循環系統容量的估計、系統熱源種類與型態的確認、熱流上湧區段(hot up-flow zone)位置的確認、冷水補注區段的描述、地熱儲集層系統內流體動態行為的掌握、儲集層系統二相流位置的判定、儲集層系統主要水力連通區(包括斷層、垂直裂隙、水平傳輸帶)的位置描述、儲集層系統阻流區段的判釋、儲集層系統蓋岩(cap-rock)封合範圍的確定...等，井溫量測因此提供地熱數值模型功能展現所需基本的參數需求。例如在熱儲層的岩石物性與化性統計與分析上，井溫量測將提供針對特定區段岩體反算比熱容和熱導率之所需；在熱儲層的流體狀態模擬與產能分析中，井溫量測將提供生產井溫度變化用於長期產能評估。Long (2008)提到，若無詳細井溫背景資料的量測，工作人員很難進一步了解地層深部岩石與水文系統的化學機制，亦無法確實掌握深層裂隙網絡水力連通性、儲集層流體滲漏、地熱生產過程非正常性壓降、以及礦物沉澱和結垢等的問題。

## 1.2 井溫量測的技術需求與發展

有別於傳統石油工業探勘所發展的相關井下電子讀取儀器通常以150至175°C為溫度設計上限，地熱能源開發探勘深度更深，其溫度設計考量以及技術需求面也更形複雜。國際以往許多地熱探勘工作主要採用電子式的測溫設備，常見者如熱電耦(Thermocouple)、白金電阻式溫度感測器(RTD)、熱敏電阻器(Thermistors)等傳統電子器材，其工作型式多半必須將感測器置放在井下一段時間，再取出以電腦讀出數據，並無法立即反應井下狀況；而若以一般真空夾層絕熱系統包覆，在300°C地熱井中僅能維持約4至12小時的運作時間，且容易受到系統內部的熱傳損耗程度的直接影響；再者，傳統電子器材容易被電磁雜訊及磁場干擾，且對於強腐蝕性、震動之影響也相當敏感；而目前國際主要電子式高溫量測設備公司的產品，例如盧森堡Advanced Logic Technology (ALT)的ABI高溫音射式成像儀、紐西蘭Tiger Energy Services的Standard PTS系統、美國Kuster公司的K10 Geothermal PT感測器等，雖多以克服高溫的環境，然其設備購置成本相當昂貴。

有鑒於此，國際現階段深層高溫量測技術逐漸轉向投入以光纖感測技術為發展主軸，用以克服傳統電子器材的使用限制。光纖技術的基本原理是當光波在光纖傳輸的過程中，會因受測介質溫度改變所造成的非彈性碰撞而散射，進而影響光波傳輸的速度。主要藉由量測光脈衝傳播時間(光時域反射分析)可反推介質的溫度變化。由於玻璃光纖與高分子材料的相容性佳，其比傳統壓電感測器更適合用於複合材料結構內部溫度之監測與分析(沈育霖, 2005)。表1所示為傳統電子式溫度感測器與光纖溫度感測器特性的比較，可知光纖溫度感測器則能克服傳統電子式溫度感測器許多應用之限制。

表1 傳統電子式溫度感測器與光纖溫度感測器特性的比較(修改自沈育霖, 2005)

類型	傳統電子式感測器	光纖式感測器
體積	大	小
抗電子雜訊干擾性	低	高
抗腐蝕性	低	高
穩定性與使用年限	低	高
感測器設定	單一感測點	可分波多工佈設
量測速度	慢	快
操作風險	觸電	較脆弱容易折損

早期拉曼光譜連續式光纖感測技術(Raman-spectra distributed temperature sensing, 簡稱DTS)的發展始自1980年代，DTS早期主要用於火災預警、管線滲漏以及其他工業製程應用監測(Dakin et al., 1985; Kurashima et al., 1990)，而到了1990年代中期開始出現在地熱井探勘與井溫量測的應用(Hurtig et al., 1994; Sakaguchi and Matsushima, 2000)，以及油氣田探勘 (Brown and Hartog, 2002; Nath et al., 2006)，由於井體溫度剖面會隨著流體的入侵、流出、交換而發生改變，加上地層滲透率、以及流體與岩層熱傳特性的影響，不同地層間的溫度變化也不盡相同，藉由DTS對於溫度剖面隨時間變化的監測即可進一步詮釋地層熱平衡的趨勢。因此DTS已有地熱流體流速剖面、電漿流、蒸汽流動預測的應用實例，且已廣為應用在水文環境系統的熱交換與循環研究 (Lane et al., 2008; Tyler et al., 2009)。然而，DTS連續式光纖感測系統需將光纜固定在套管中進行長時間的地溫量測，因此必須承受因應力作用造成斷裂和信號衰減的風險，加上購置經濟成本較高，較不適用於地熱計畫探勘初期的工作規劃。

相對地，靜態光纖光柵感測(Fiber Bragg Grating, 簡稱FBG)掃描技術的發展提供另一選擇。該技術之原理主要是在光纖芯中刻上光柵(Grating)，當外在環境溫度改變時，光柵反射的光波波長會因光柵折射率不同而改變。該技術即透過量測反射光波長變化之飄移值推估溫度分布。相對於DTS連續式光纖感測系統，FBG光纖光柵感測掃描技術開發成本較低，且穩定性高，材質可撓性高，更適合進行現地機動性量測，且因大地應力作用造成斷裂和信號衰減的風險也較低。

本研究因此擬以FBG系統的研製與引進做為工作主軸，探討應用FBG系統於目標地層地溫量測的可行性，以逐步掌握地熱儲集層的溫度與環境狀態，提供開發潛能評估和供給區位置(Feed zone)的決策依據，並希望能在完井實際量測過程中進行溫度重複性比對。

## 二、光纖井溫檢測硬體設備製作

光纖井溫檢測硬體設備最重要的核心元件是光纖光柵解調器，該設備係由美國Micron Optics(MOI)開發，可透過相當低的頻率同時在一根光纖上連接數個FBG感測器，並可擴展至十六個光學通道，相當適合應用於現地試驗與長期監測之使用。此外，本研究所規劃的光纖井溫檢測硬體設備建置流程如下：

- 一、感測器捲軸製作：包括捲軸繞線長度估算、規格尺寸確立、生產製作。
- 二、電動捲揚機籌備：包括電動捲揚機功能及型式確立、委外生產製作。
- 三、感測器製作：包括感測器光纖光柵規劃、寫入、光纖光纜封裝。
- 四、導入重錘製作：包括導入重錘規格尺寸確立與製作。
- 五、感測器 QC 作業：包括感測器光纖光柵波長檢測、線性烘烤、解析度分析。
- 六、感測器與重錘組裝：包括外側導入重錘組裝測試與封口焊接、內側端鎧裝線的製作。其中所謂鎧裝線意指內部結構有不銹鋼金屬管、凱伏拉絲及不銹鋼編織絲保護，可展現抗拉性，較一般聚氯乙烯 PVC 光纜強韌且安全。圖 4 所示為硬體設備的組成元件概況。



圖 4 光纖井溫檢測硬體設備

### 三、井溫量測流程與現地實測

本研究所規劃的井溫量測流程簡述如下：

- 一、佈放前置作業—將感測器的外側端透過張力計、深度計、固定滑輪佈放至工作平台。
- 二、感測器與重錘組裝—在工作平台上將感測器與導入重錘組裝。
- 三、訊號擷取設備建置—感測器鎧裝線端與光纖旋轉接頭連接，再接至靜態光纖感測掃描儀。
- 四、感測器佈放—將導入重錘與感測器放進防噴管內緩慢下放直至井底，進行定速動態連續性量測，並以 1Hz 頻率持續收集溫度資料。
- 五、光纖溫度訊號擷取—將感測器以定速方式向上拉升至特定深處時進行定點量測與重複性溫度檢核。
- 六、溫度檢測分析—完成溫度檢測分析。

本研究所開發之井下地溫感測系統目前已進行多次現地實測，本文係以宜蘭三星鄉大洲國小與紅柴林地熱探勘井兩處場址為例說明。

#### 3.1 宜蘭三星鄉大洲國小水文觀測井井溫量測

本研究在系統開發初期首先選擇宜蘭大洲國小(宜蘭縣三星鄉上將路二段 500 號)進行現地施測，該場址水井井深 49m，除了 0~6m 與 43~49m 為外其他深度皆開篩，因此孔內有周遭環境水流進入。現地在 2013 年七月中旬完成抽水試驗與洗井工程後即暫停任何人為之干擾，因此本研究於 2013 年十月初進行施測，以確實反映現地環境特徵。該井位於大洲國小校園西側音樂教室後方約 12 公尺處，井頂高程為 18.24 公尺，井口離地高度約 10 公分，井口直徑 25 公分。依據水利署水文年報(2012)統計結果可知該站地下水平均日水位為-1.78 公尺，全年地下水位變動幅度並不大。

量測系統架設如圖 5 所示，現地依序將固定深度計數顯示器並進行現地校正，並透過 UDS Port 2252 將深度訊號連接至電腦。再將光纖溫度計串聯鎧裝光纜捲軸，透過光纖旋轉接頭與感測掃描儀串聯，並透過電腦確認所擷取的訊號正常之後，將光纖溫度計加掛重錘導入井口，開始進行井下溫度量測。

#### 現地井溫量測系統架設

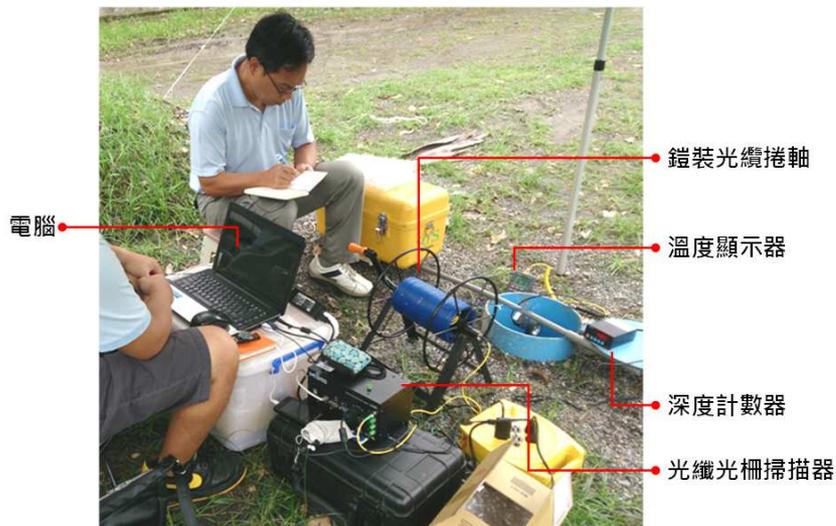


圖 5 現地井溫量測系統架設

在光纖井溫量測作業完成後，現地工作人員亦透過英國 Robertson Geologging (RG)公司生產的電子式溫度探測儀進行量測，以比對兩組技術的差異性。現地地溫量測成果如圖 6 所示。可觀察到光纖井溫量測與傳統電子式溫度探測儀之結果相當一致，在 24m 至 28m 處皆可觀察到井溫上昇 0.4°C 的現象，研判可能有較溫暖之地下水流在此深度進入孔內。本案因此進一步透過中央地質調查所水文地質資料庫之岩心影像資料，進一步確認地表下 24~28m 深度為較粗顆粒透水地層，佐證側向水流進入孔內之研判；以此區段來推估，該處地溫梯度約在 1.9~2.3°C /100m 之間。

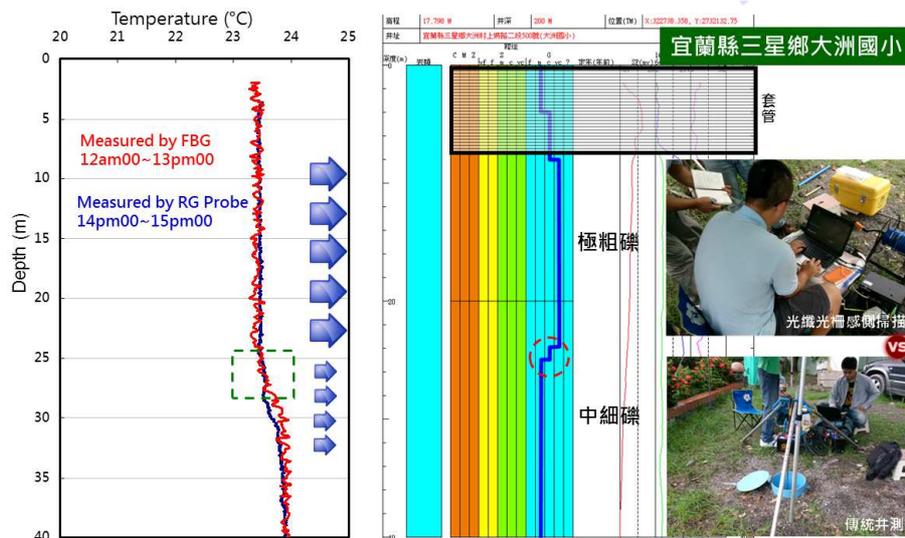


圖 6 光柵定速動態連續性井溫量測(紅)與電子式溫度探測儀(黑)量測結果比對

### 3.2 宜蘭三星鄉紅柴林地熱探勘井井溫量測

本系統開發完成後，配合紅柴林地熱探勘井鑽探進度於 2014 年 7 月進行首次量測，圖 7 所示為場址位置與井體示意圖。

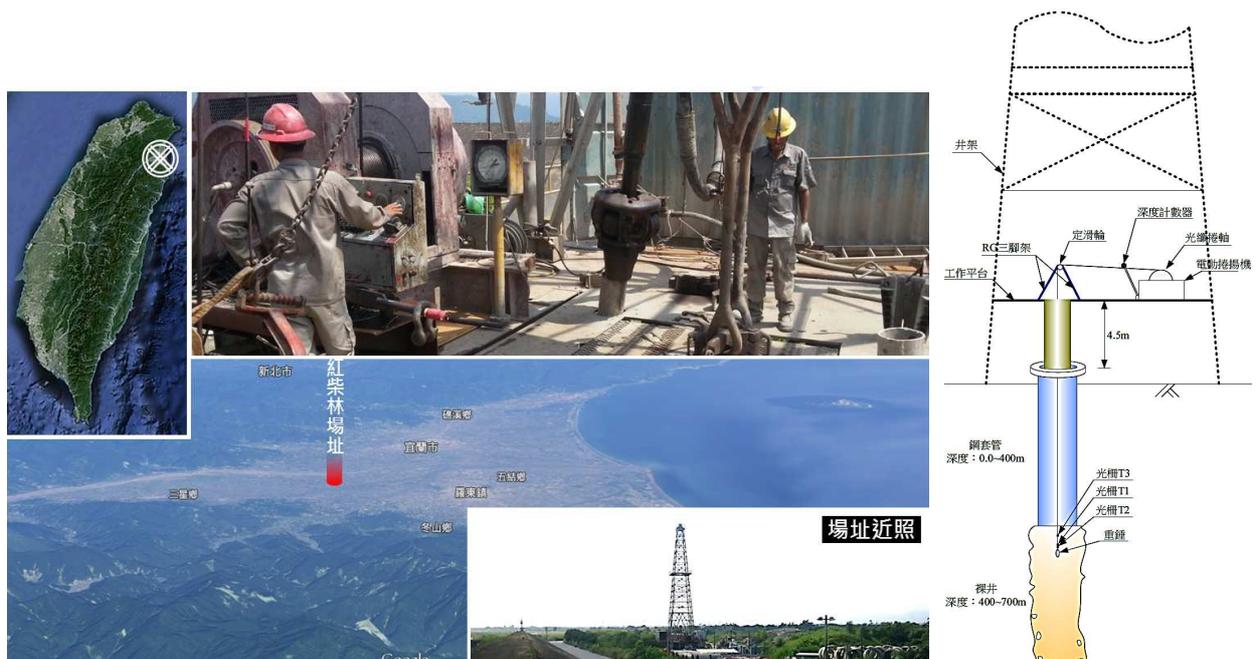


圖 7 宜蘭縣三星鄉紅柴林地熱探勘井位置與井體示意圖

本次量測 6.7m/min 速度定速佈放進行動態連續性量測，佈放過程以 1Hz 頻率持續收集溫度訊號，量測結束後亦於現地以接觸式溫度計進行溫度校驗。首次量測成果如圖 8 所示。

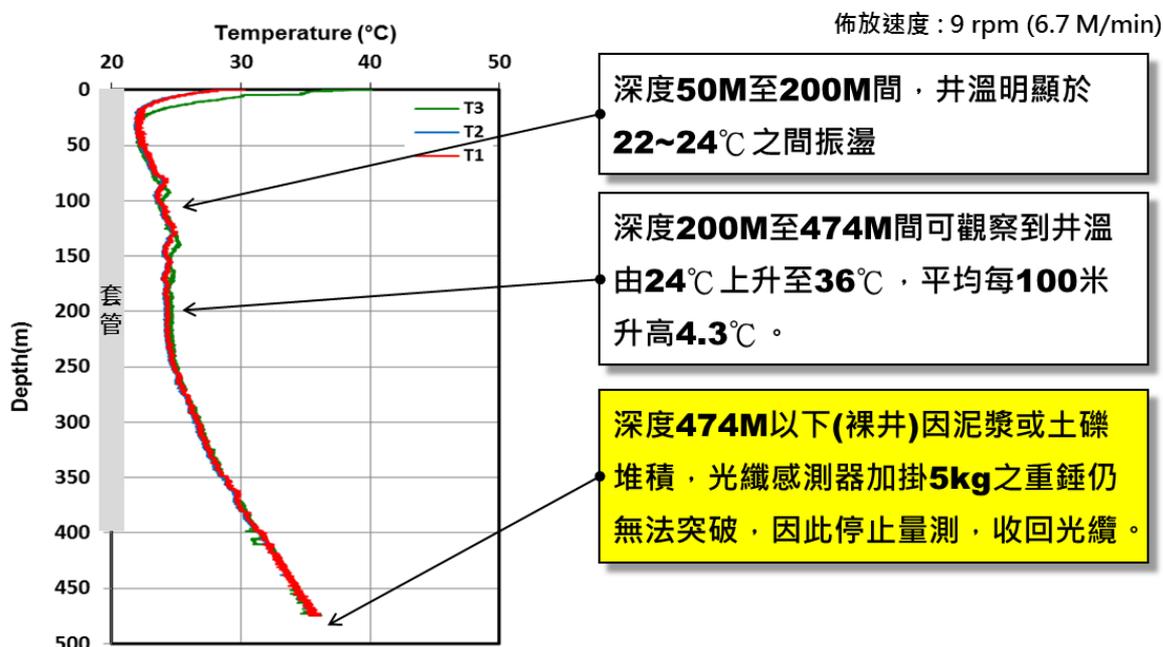


圖 8 宜蘭縣三星鄉紅柴林地熱探勘井 2014 年 7 月 14 日井溫量測結果

初步量測成果顯示紅柴林地熱場址在深度 50M 至 200M 間，井溫明顯於 22~24°C 之間振盪，其下深度 200M 至 474M 間則可觀察到井溫由 24°C 上升至 36°C，平均每 100 米升高 4.3°C；若以地熱發展指標性溫度 250°C 來看，初步推測宜蘭縣三星鄉紅柴林地熱場址鑽探深度達 1,700m 時即具備地熱開發潛能，後續研究應再搭配其它地物訊號與岩心化學分析之佐證來進行更縝密的判釋。此外，本次量測過程亦發現系統所設計之重錘容易因孔徑束縮與泥漿縮固而受阻，因此，包括導入重錘重量與形式的改良、感測器結構抗拉強度及耐彎曲度提升等皆是系統後續研發之重點。

#### 四、結論

地溫量測的準確性乃岩層熱學研究的核心工作，其能輔助計畫決策人員對於地熱場址開發深度優選、地質構造研判、深層壓裂監控等工作之掌握。有別於傳統電子式感測器易受電磁雜訊及磁場干擾的缺點，光纖感測器具備質輕體小、可撓性高、不受電磁輻射干擾、耐高溫環境等眾多特性，其比傳統應變計或壓電感測器更適合用於複合材料結構內部溫度之監測。綜觀現階段各國深層地熱開發技術之歷程，光纖感測器的研發佔有相當重要的角色；而著眼於台灣光纖產業快速興起，本研究之提出乃希望整合精密光學與地質科學之專業知識，強化跨領域技術創新的原動力，用以提升國內自產開發地熱能源之科研水平。

採用拉曼光譜連續式光纖感測技術雖可克服傳統電子式溫度感測設備之缺點，但其需將光纜隨套管一次性佈設於井中，除了需承擔因大地應力作用而造成光纜斷裂和信號衰減的風險，工作人員也無法透過數據重複性與再現性分析來確認量測品質。是故，本研究採用光纖光柵(FBG)感測技術來解決上述問題，研發一套操作更加輕便的地熱井溫現地測量與佈放裝置，主要特色是可長時間置放於高溫 300°C 環境，量測展距可調整(0.1~1500m)，且現地組裝

快速，可即時於地表讀取井下溫度訊號，也可在量測過程中進行溫度重複性比對。借鏡國際再生能源發展現況，展望國內未來深井探勘工作之需求，加速高溫高壓深層熱學的科研投入有其必要性。

## 五、致謝

本文承蒙科技部計畫經費補助始得以完成(計畫編號: NSC102-3113-P002-013)，特此致謝。

## 參考文獻

1. Axelsson G., Franzson H. (2012), Geothermal drilling targets and well siting. Short Course on Geothermal Development and Geothermal Wells, organized by UNU-GTP and LaGeo, in Santa Tecla, El Salvador, March 11-17, 2012.
2. Brown G.A., Hartog A. (2002), Optical Fiber Sensors in Upstream Oil & Gas. *Journal of petroleum technology*, 54(11), 63-65
3. Dakin J.P., Pratt D.J., Bibby G.W., Ross J.N. (1985), Distributed optical fiber Raman temperature sensor using a semiconductor light-source and detector. *Electronics Letters*, 21(13), 569-570.
4. Guillou-Frottier L. (2006), Temperature profiles in geothermal systems. Actes/Proceedings of the Engine Launching Conference, 12-15 February 2006, Orléans, France
5. Hurtig E., Großwig S., Jobmann M., Kühn K., Marschall P. (1994), Fibre-optic temperature measurements in shallow boreholes: experimental application for fluid logging. *Geothermics*, 23(4), 355-364.
6. Kurashima T., Horiguchi T., Tateda M. (1990), Distributed-temperature sensing using stimulated Brillouin-scattering in optical silica fibers, *Opt. Lett.*, 15(18), 1038-1040
7. Lane, J.W., Jr., Day-Lewis, F.D., Johnson, C.D., Dawson, C.B., Nelms, D.L., EddyMiller, C.A., Wheeler, J.D., Harvey, C.F., and Karam, H. (2008), Fiber-optic distributed temperature sensing: A new tool for assessment and monitoring of hydrologic processes, in Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, Philadelphia, Pennsylvania, Proceedings: Denver, Colorado, Environmental and Engineering Geophysical Society, 9 p.
8. Long A. (2008), Improving the economics of geothermal development through an oil and gas industry approach.
9. Nath D.K., Finley D.B., Kaura J.D. (2006), Real-Time Fiber-Optic Distributed Temperature Sensing (DTS): New Applications in the Oilfield. Paper SPE-103069 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, TX, 24-27 September.
10. Sakaguchi K., Matsushima, N. (2000), Temperature Logging by the Distributed Temperature Sensing Technique During Injection Tests. World Geothermal Congress 2000, Beppu - Morioka, Japan, 1657-1661
11. Tyler S.W., Selker J.S., Hausner M.B., Hatch C.E., Torgersen T, Thodal C.E., Schladow S.G. (2009), Environmental temperature sensing using Raman spectra DTS fiber-optic methods, *Water Resource Research*, 45, W00D23, doi:10.1029/2008WR007052
12. 沈育霖(2005)，光纖感測器簡介。勞工安全衛生簡訊第七十二期，頁 4~9。

## ABSTRACT

For the purpose of exploration of deep geothermal resources and evaluation of sites for enhanced geothermal system in Ilan, an own developed fiber optic grating measuring device for geothermal temperature measurement is introduced. The prototype is capable of reading real time underground temperature up to 300°C, and down to the depth of 1,500m (4,920 feet). The system can be easily setup in the field and the thermal profile (time-temperature data) can be established in a short time.

**Keywords:** geothermal resources, fiber optic grating, Ilan.