



# 溫泉資源 調查與評估

李振誥／國立成功大學資源工程學系 特聘教授

林宏奕\*／國立成功大學大地資源研究中心 研究員

龔文瑞／國立成功大學大地資源研究中心 研究員

臺灣獨特的水文及地質條件，孕育近 200 處溫泉徵兆。隨著國人對休閒生活的重視及溫泉觀光產業的發展，溫泉需求量日趨提高。為避免溫泉地區溫泉水位、泉溫及泉質劣化，以及未來溫泉資源之永續利用，建立溫泉資源評估程序，對於溫泉地區生產管理為相當重要之工作。本研究首先依據溫泉形成機制，建立淺層地下水、溫泉儲集層以及深部循環水概念，探討溫泉資源評估所需資料以及探查方式，包括溫泉井水位、溫度等資料，地球物理探查成果，最後以溫泉區水文地質數值模型為例，反推深層循環水量以了解溫泉資源來源及量能，作為溫泉資源運用與調控之重要依據。

## 前言

由於臺灣地區獨特之地質條件且雨量豐沛，地熱區加上充足之地下水造就眾多溫泉地區，在不同地質條件下造就不同型態溫泉類型，又具有溫泉取用便利之優勢，造成溫泉觀光產業之發達。然而久遠的開發利用歷史，造成部分知名溫泉地區之溫泉資源供不應求，尤在旅遊旺季及乾旱季節，包括溫泉井水位下降、泉溫、泉質之變化。在溫泉地區永續利用之觀點下，合理且適當之使用溫泉資源為溫泉地區管理最重要之課題，然現有溫泉地區可能已出現供不應求之情況，或是溫泉生產已對區域地下水造成極大影響，考慮總量管制之方法可有效調控溫泉資源之利用情況。

過去資料顯示溫泉開發、抽取、管理、監測與保育工作，皆必須有完整且可靠之溫泉資源評估作為依據。由於溫泉資源屬於地下水資源之部份，且溫泉產狀常為淺層水與深層水混合之結果，故在進行溫泉地區溫泉資源評估時，應進行從大區域集水區之整體地下水賦存與態勢評估，再進行小區域溫泉地區溫泉資源評估，方可了解整體溫泉資源情況，以便進行溫泉地區永續開發利用與經營管理。

\* 通訊作者，mariolin226@gmail.com

## 溫泉資源評估程序

由於溫泉地區具有較淺之地底熱源，而地下熱水透過構造上升至淺部地層後，與淺層地下水混合形成溫泉。但由於地下資料不易取得，故在溫泉相關研究中，估計地下溫泉資源具有相當之困難度。欲評估地下循環水資源量，須先了解淺層水來源及補注量，並探查溫泉儲集層產狀，以逆推模式反算地下熱能資源及分布<sup>[1-3]</sup>。Kiryukhin 等人<sup>[4]</sup>於俄羅斯 Kamchatka 之 Puzhetsky 地熱區進行地熱資源逆推模式研究指出，對於溫泉地區，由資源形成過程及產狀可區分為 (1) 補注層，由天水補注至淺層地下水層，(2) 混合層，為溫泉儲集層，由淺層水與深部循環水混合而成之溫泉水層，(3) 上升層，由熱源提供之熱能及上升水流區，如圖 1 所示。為完成此完整評估程序，須從集水區範圍評估天降水與淺層地下水關聯性，釐清地下水補注來源，並配合溫泉井監測資料，推估深層循環水以評定溫泉資源，了解溫泉地區水循環，最後以數值模式建立溫泉地區水文地質模型，用以評估溫泉可用資源量。

## 溫泉與水文地質調查步驟

溫泉地質調查步驟，應依各階段的特定需求，按一定的工作程序，有計劃的進行，依循測繪－勘探－

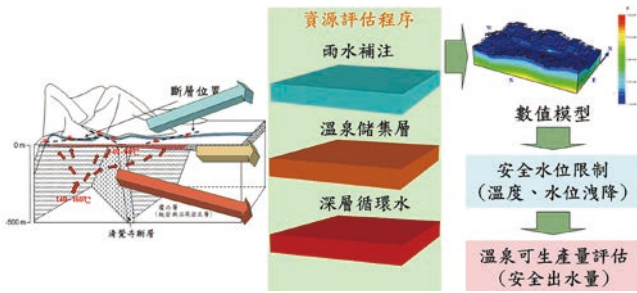


圖 1 溫泉資源評估程序圖

試驗 – 長期監測的順序循序辦理之，考慮不同階段皆之工作內容由淺入深、由簡單到複雜，逐層深化。

### 溫泉與水文地質調查內容

地質調查的內容應針對所規劃之調查項目、不同勘查階段及精度的要求等，進行調查內容與重點課題之觀察、描述和測量，以掌握調查區階段性的重點內容與重要議題，成果則應充分顯示流域及其影響範圍內之水文地質與溫泉地質特性。調查內容至少包括：

1. 基本氣象、水文與地質資料蒐集。
2. 區域地質調查分析。
3. 含水層與儲集層特性與形成條件調查。
4. 儲集層之補注範圍及深循環可能路徑、熱能來源。

### 地下含水層與溫泉儲集層介質調查

流域內之含水層與溫泉儲集層介質，因為地質條件的不同，大致可以分為三種不同的型態，包括未固結沉積岩孔隙介質、基岩裂隙介質和岩溶介質。不同含水層介質各具不同的特性，因此地下水勘探調查的內容或是使用的方法，也不盡相同。

### 溫泉與水文地質調查方法

有關水文地質與溫泉地質調查方法之主要內容，包括：

1. 遙感探測：通常使用航空照片及衛星影像，篩選合適資料，進行水文地質與溫泉地質特性的分析。
2. 地面地質調查：觀察並記錄在露頭位置所露出之岩石、土壤或地質構造、溫泉露頭等，必要時，也可採取合適之樣品，進行相關的實驗。
3. 溫泉地質探勘，主要包括地球物理探勘、地質鑽探、地化（同位素）組成分析。
4. 地下水試驗：可於現地進行或由取到之樣本在試驗室進行試驗，求取各項水力、力學、物理及化學等性質的資料。

5. 地下水與地溫觀測：觀測溫泉露頭、水井、鑽孔與地面水等，觀測位置之布置，應以掌握全調查區地下水與地溫之動態為原則。

### 溫泉資源評程序建置

溫泉資源評估應考慮利用水文地質理論與調查方法，來建置溫泉地質模式，完成區域調查而配合地下水模式進行模擬分析，以評估溫泉儲集層資源量或安全出水量之量化指標為原則。完整溫泉資源評估，須考慮：(1) 淺層地下水、(2) 儲集層熱與水平衡模式、(3) 深部地下水與 (4) 溫泉資源評估。

### 水文地質與溫泉概念模式建置

水文地質模式建置需依調查區域內之數值地形模型，劃分區域內地面水系分布與子集水區範圍，配合地形、地質構造與地層，結合水文、水文地質與溫泉資料，建立地下水文地質含水層分區、分層、溫泉儲集層位置以及水文地質邊界，將溫泉主要儲存地層劃設為溫泉儲集層。

### 深循環水評估

溫泉地區特異之地溫梯度為形成溫泉地區之主因，而此熱能為深層高溫水岩地質構造上湧，與淺層地下水混合後而形成溫泉儲集層。深層循環水評估不易，通常以能量平衡之觀點，由於溫泉儲集層以及淺層地下水概況可藉由地質探查得知，故深層循環水量可利用數值模式進行評估，評估方式為利用水文地質之逆推模式 (inverse method)，利用已建立數值模型，採率定方式推求深層循環水量。

### 溫泉資源計算方法

溫泉水水資源量在不同的條件下有不同的評估方法，常用的評估方法有資源平衡法、開採試驗法、試驗推斷法等。

1. 資源平衡法：根據計算開採條件擬定開採方案和需水量的大小，採用相應的穩定流計算公式，考慮出水溫度限制下計算該開採方案條件下的出水量，以進行調整開採方案或減小開採量重新評估。此法一般應用於儲集層分布較廣、厚度較大、補注來源充分的非受壓含水層，如沖積平原地區。
2. 開採試驗法：利用探勘開採孔或生產孔（單井或井

群)，進行接近於實際生產量（一般不小於實際需水量的 50%）的較長時間的穩定流抽水試驗，在這種定流量的較長時間的抽水試驗過程中，停止試驗後，觀測水位於自然靜水位與水溫相關性。此法常用於地質條件比較複雜，溫泉水的補注、排水條件不易查清，特別是對基岩裂隙水，此方法比較客觀實際且可靠性較強。

3. 試驗推斷法：通過修定流抽水試驗，利用三次以上降深試驗的資料，確定出抽水降深  $Sw$  與出水量  $Q$  的關係，在可接受水溫變化下根據  $Sw-Q$  關係曲線類型，用相應的出水量方程式外推設計降深的出水量，該出水量的計算值即可視為允許溫泉取用量。

## 溫泉數值模型建立

### 地下水數值模式建置原則

數值模式主要用來模擬地下水流場與熱流場，應具備與水文地質模式相對應性、模擬成果可預測性、模式具可回饋性等特性。地下水數值模式應在水文地質模式建置完成後進行，在所設有研擬方案下，模擬地下水流場，預測水位、水溫變化的空間分布與隨時間演變，以提供流域內水資源聯合調配、溫泉人工調蓄補注、溫泉生產管理與研究溫泉地質問題等之解決方案為原則。

模式建立方法及步驟：建置方法及步驟分為建立概念水文地質模式、驗證修改地下水數值模式及選用驗證後，利用地下水數值模式進行地下水水位與水量預測。步驟說明如下：

1. 建立水文地質模式：根據地層與地質構造條件，配合含水層與溫泉儲集層條件、地下水流動條件與邊界條件，如前述「水文地質模式建置」內容，來選擇相對應之地下水數值模式。
2. 率定修改數值模式：根據現地地下水壓力、溫度變化，或進行抽水試驗或開採後水位、水溫變動資料等進行模擬與率定，並進行回饋分析，調整到至少水文地質條件與地下水流場具合理性，以檢驗數值模式正確性。
3. 選用率定後地下水數值模式進行溫泉水位與水溫預測：驗證後模式，模擬分析應確定在邊界與補注排出條件，不隨氣候與水文條件變化時，方可進行，方可符合數值模式要求。

### 溫泉數值模型建立要點

地熱區模擬必須考慮熱能傳輸以及質量傳遞的耦合問題，同時介質的異質及異向性問題也必須考慮其中，而且還有相變、溶質傳輸之問題存在，形成極度複雜的模型，在地熱區模擬技術上，模型建立之過程必須包含：

1. 概念模型建立，根據收集之資料，將研究區劃分數個主要區域，及設定特殊構造之位置。
2. 重要地質結構之建立，根據地熱區之資料，設定主要通道帶之區域等，並依據模式假設或概念模式，給定各網格之參數設定。
3. 邊界條件設定，地熱模型中，必須設定水流流場與地熱場之邊界條件。
4. 模式律定 (calibration)，根據監測所得資料，調整細部模型參數以符合現場資料之變化，包括水流及地熱溫度都須符合現場資料。

## 溫泉資源評估案例 – 知本溫泉

### 研究區域與既有調查資料

知本溫泉區位於台東地區知本溪流域（圖 2），為變質岩溫泉沿知本溪岸出現，東起自知本溫泉橋，西至觀林吊橋止，全長約 3 公里，已知溫泉露頭有六處，溫泉水之地表溫度大致在  $30^{\circ}\text{C}$  至  $60^{\circ}\text{C}$  之間，屬於中溫溫泉。然而就地熱探勘知本熱水溫度高達  $150^{\circ}\text{C}$  以上。經濟部能源委員會<sup>[5]</sup>於（1984）在知本地區進行

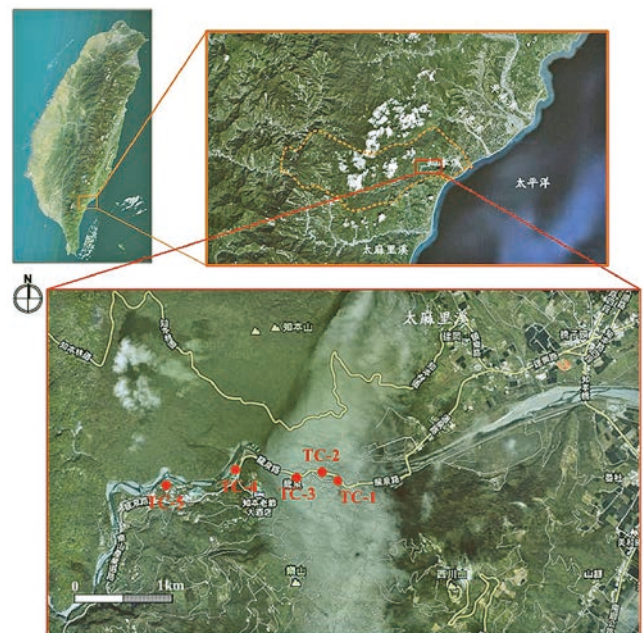


圖 2 研究區地理位位置及地熱區鑽探井之分布圖

地熱資源探勘計畫，於知本地熱區鑽了五口地質鑽探井，鑽井位置分佈如圖 2 所示，TC-1、TC-2、TC-3、TC-4 及 TC-5 分別為五口鑽探井的位置，井深度為 500 公尺，只有 TC-2 為 493 公尺，鑽井岩心資料顯示除了上層 10 至 30 公尺的沖積層外，整個地區的岩層幾乎都是暗灰色板岩和變質砂岩互層的地質組成。

前述 5 口鑽探井溫度剖面如圖 3 所示，圖中顯示 TC-1、TC-2、TC-3 鑽孔剖面圖溫度變化較為一致，地溫梯度約為 40°C/km，此範圍為知本外溫泉地區（龍泉路 43 巷附近）；TC-4、TC-5 鑽孔剖面圖溫度有較明顯的變化，地溫梯度約為 100°C/km，此範圍為知本內溫泉地區（知本森林公園入口前），比照知本地形、地質資料研判知本地區熱源是由清覺寺內溫泉地區底層供應，藉由斷層和破碎帶傳遞熱源。

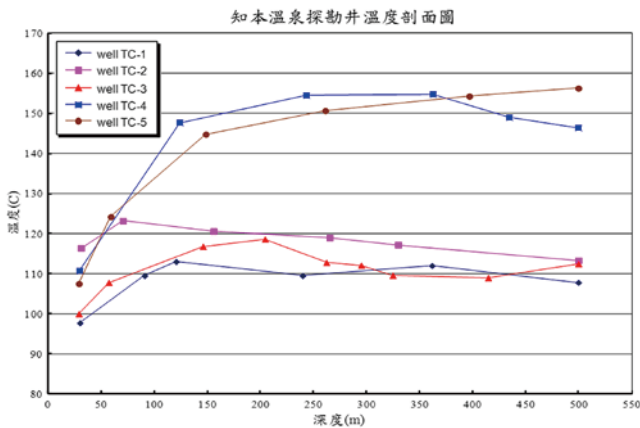


圖 3 知本溫泉探勘井溫度剖面圖 [6]

知本溫泉之成因主要由地下水受深部地熱作用而升高溫度，並將地層中礦物質溶解成為各種特性的溫泉或熱水流出地表，知本溫泉區廣義而言可歸類為中央山脈變質岩區，此類溫泉屬高山深谷溫泉。根據氫同位素水質分析，發現地熱水之氫同位素含量與海拔較高之溪水氫同位素是相當一致的，顯示地熱水主要來自高海拔地區，經過長距離的深循環，在適當的地質條件下，如斷層破碎帶、裂隙、地形等地質構造，提供了地下水之通路，進而湧出地表，在接近地表時遭遇到淺層地下水產生混合之情形，形成溫泉 [7]。經濟部水利署 [8] 推測知本溫泉可能來自西北-東南走向之高角度清覺寺斷層，切穿東北-西南走向之知本溪斷層，如圖 4 所示。知本溪上游沿知本溪斷層西延部分發育，至本段知本溪中游河谷受清覺寺斷層截切，再與地表地下水混合後，儲存在溫泉儲集層中，並沿斷層交錯裂隙帶上湧，溫泉露頭處沿著知本溪河谷蜿蜒。

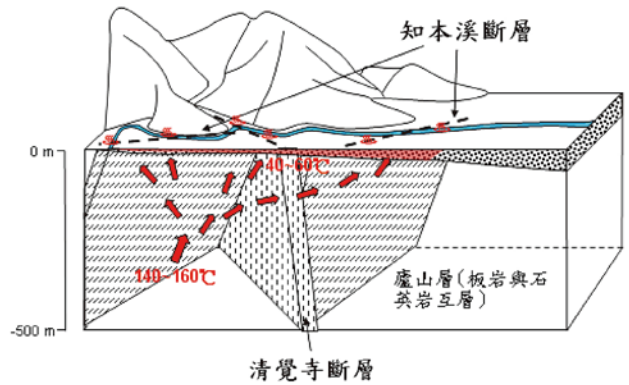


圖 4 知本溫泉形成機制示意圖 [8]

### 知本溫泉地區數值模型建立

O'Sullivan 等人 [9] 統整 1990 至 2001 年有關地熱區模擬之研究。地熱區之數值模擬一向應用於地熱開採造成之影響評估，及地熱區熱能資源開發估計，研究中統整 11 年間發表於各學術期刊之地熱模擬研究，總計 101 個研究中，採用 TOUGH/TOUGH2 之研究就有 56 個，佔了一半以上，足見此數值程式有足夠能力應用於地熱儲區之案例模擬。本研究應用 TOUGH2 數值模擬程式模擬地下水流與地熱溫度之分佈情形，以及求解注入井對地熱區地下水之影響。此程式由 Pruess *et al.* [10] 所撰寫完成，並使用積分式有限差分法 (Edwards [11]; Narasimhan and Witherspoon [12]) 模擬多維空間、多相流體在孔隙介質之質能傳輸。考慮地表水文邊界，劃定模擬範圍，並配合地質資料及水文地質參數，依知本溫泉地區地下水壓力溫度設定，完成溫泉區數值模型建立。

本研究溫泉數值模擬範圍以溫泉產業區為主，沿知本溪中下游劃定，模擬範圍南北為 3 公里東西向 4 公里如圖 5 所示。其中東側邊界知本溪溪谷範圍，設定為定水頭邊界，西側知本溪溪谷範圍，同為定水頭邊界，其餘邊界，北側為知本山區域，南邊為西川山，則由率定過程設為流量邊界。

數值模型網格大小為 100 公尺立方，根據地電阻探測成果，在深度高程為 -200 公尺（海拔）深度以下，地層為緻密砂岩層，故本數值模型深度設為 1,100 公尺（海拔 600 ~ -500 公尺），如圖 6 所示。在地質分層部分，在河谷地區自地表以下存在風化沖積層，深度約 50 ~ 100 公尺，故本數值模型於河谷地帶地表第一層設定為沖積層，而地球物理顯示自沖積層以下，約存在

100 ~ 200 公尺節理岩體，故河谷位置沖積層以下 200 公尺內設為破碎砂岩，以下為緻密砂岩，河谷以外區域則表層 200 公尺為破碎砂岩，以下為緻密砂岩，如圖 7 所示，地層介質參數設定如表 1 所示。

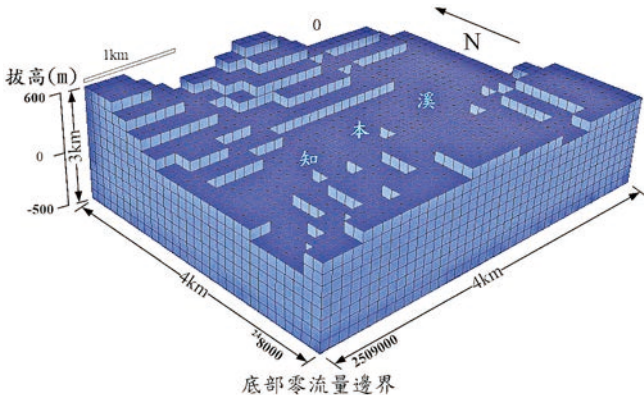


圖 5 知本溫泉模擬模型圖

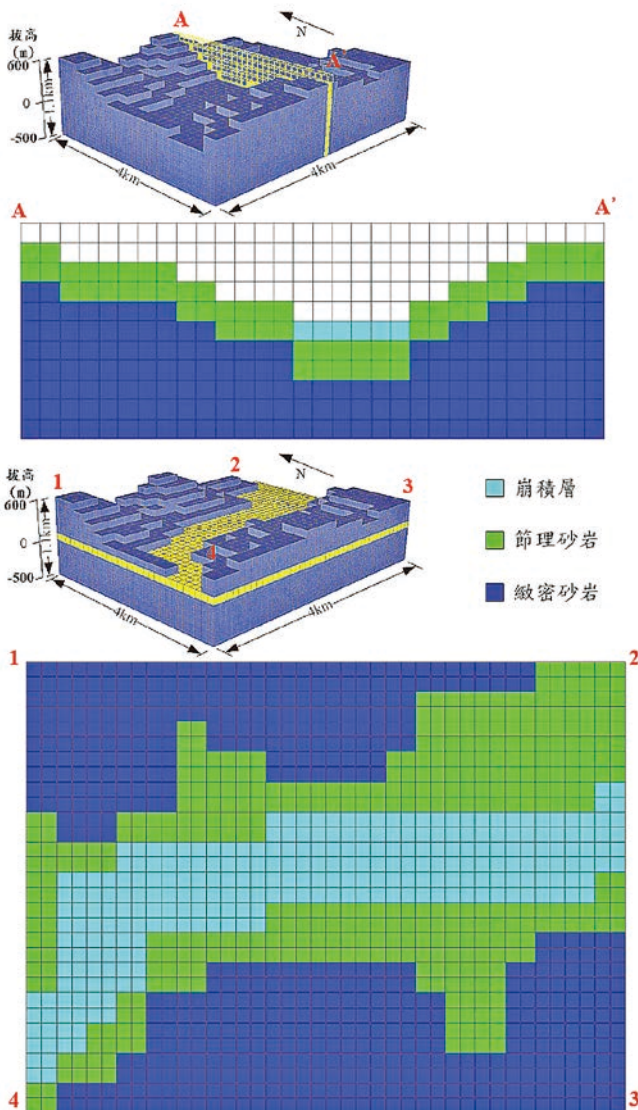


圖 6 數值模型地層設定圖

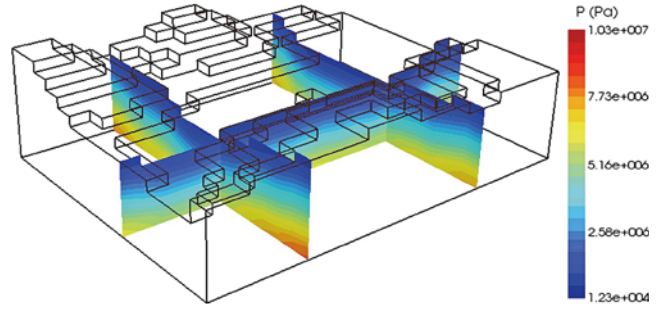


圖 7 知本溫泉數值模型初始水位設定

表 1 數值模型參數表

	沖積層	節理砂岩	變質砂岩
密度 ( $/\text{kg}/\text{m}^3$ )	1,500	2,600	2,600
孔隙率	0.3	0.1	0.1
滲透率 ( $\text{m}^2$ )	2.7E-13	6.00E-14	6.00E-16
熱傳係數 ( $\text{W}/\text{m}^2 - ^\circ\text{K}$ )	1.3	2.5	2.1
比熱 ( $\text{cal}/\text{kg} - ^\circ\text{C}$ )	800	730	710

### 評估溫泉水流路徑及深循環水量

以上述建立溫泉地區數值模型，由既有觀測資料設定初始地下水位，可得數值模型初始水位，約沿地表高層分布（圖 7）；在地溫設定部分，本研究利用已知地層溫度資料，採深循環水注入方式，利用現有資料率定地溫，以反求注入水量方式，推斷本區深循環水量。

本研究根據經濟部水利署<sup>[6]</sup>進行五口溫泉探勘井地溫測結果（如圖 1 所示），可得知本區地溫約可分為兩部分相對高溫區，本研究之數值模式則視此區具備兩處主要通道，並設定注入區域共三區（A、B 與 C）如圖 8 所示。注入位置為模型底層（海拔 -500 公尺），水溫則以前述探查所得 -500 公尺地溫作為注入水溫度，深循環水注入後數值模型溫度變化如圖 9 所示，並利用經濟部水利署<sup>[6]</sup>量測 TC-1 與 TC-5 兩口溫度進行率定，率定地溫結果如圖 10 所示。率定成果如表 2 所示，深循環水量 A 區總量為每年 66.6 萬噸，B 區每年 54.5 萬噸，C 區每年 9.1 萬噸，各區循環水溫度不同，故換算為熱焓量後，此區每年深循環水帶入熱焓為  $7.4 \times 10^{14}$  焦耳。

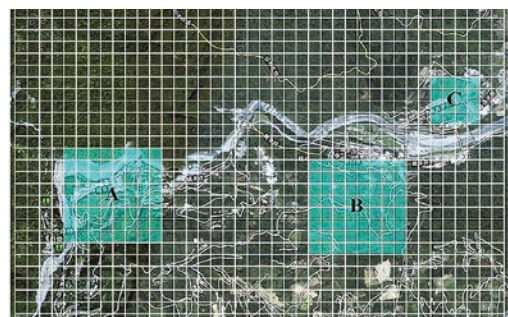
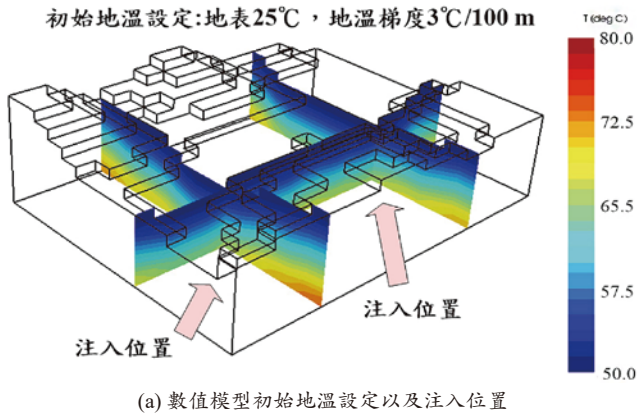
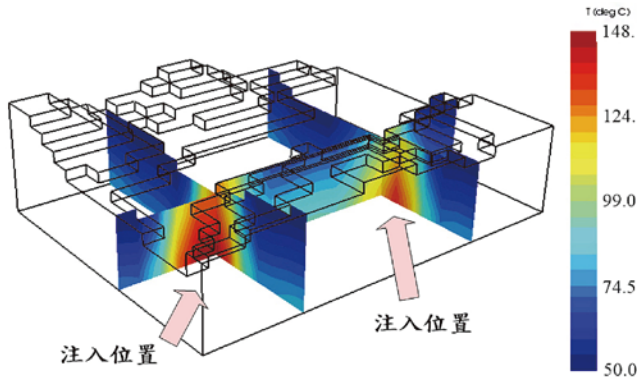


圖 8 知本溫泉地區深層水注入位置示意圖



(a) 數值模型初始地溫設定以及注入位置



(b) 數值模型注入深循環水後溫度分布  
圖 9 深循環水注入後數值模型溫度變化

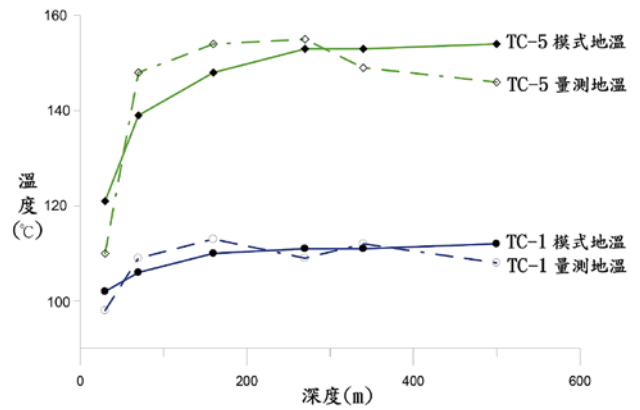


圖 10 TC-1 與 TC-5 地下溫度率定結果

表 2 深層循環水率定成果

注入區域	每網格循環水率定量 (kg/s)	深循環水溫 (°C)	補注網格數	網格層數	深循環水量 (噸/年)
A	0.11	150	64	3	666,040
B	0.09	120	64	3	544,942
C	0.06	110	16	3	90,824
小結					1,211,073
A 區熱焓		$4.2 \times 10^{14}$ 焦耳/年			
B 區熱焓		$2.7 \times 10^{14}$ 焦耳/年			
C 區熱焓		$4.2 \times 10^{13}$ 焦耳/年			
總熱焓		$7.4 \times 10^{14}$ 焦耳/年			
註：熱焓 = $4,200$ (焦耳/公斤-°C) × 水量 (公斤) × 水溫 (°C)					

### 溫泉資源潛能

由於台灣地區地下水豐沛，在特異地溫梯度區域型成溫泉資源，而決定溫泉資源豐富與否，則決定於由深部地層提供之熱能高低，若熱能豐富，則溫泉水溫度高，具有豐富溫泉資源且取用較易；反之熱能較低，溫泉水溫低，可能不符經濟成本，或是易受人工補注等因素影響溫泉品質，故溫泉儲集層所受熱能提供量，即可決定溫泉資源潛能之高低，本研究則定義溫泉資源潛能

為「下方地層提供給溫泉儲集層之熱流量大小」，溫泉儲集層之溫度與熱能高低，皆由下方熱源所提供，故將此熱流量大小，視為溫泉資源潛能，且由於溫泉取用位於儲集層，故將此溫泉資源潛能位置定為儲集層位置。

本研究將依上結果述方法，以數值模型模擬成果做為知本溫泉地區地熱資源潛能劃分基準，利用完成之數值模型，可得知模型中各位置熱流量資料如圖 11 所示。

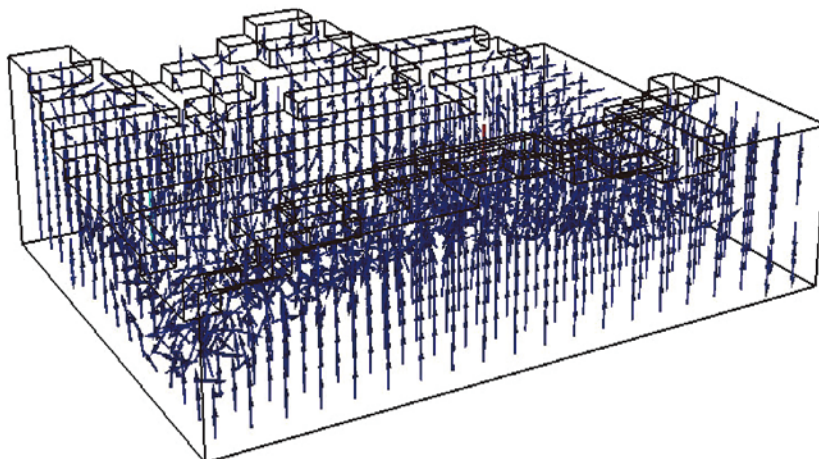


圖 11 數值模型熱流量方向及大小空間分佈圖

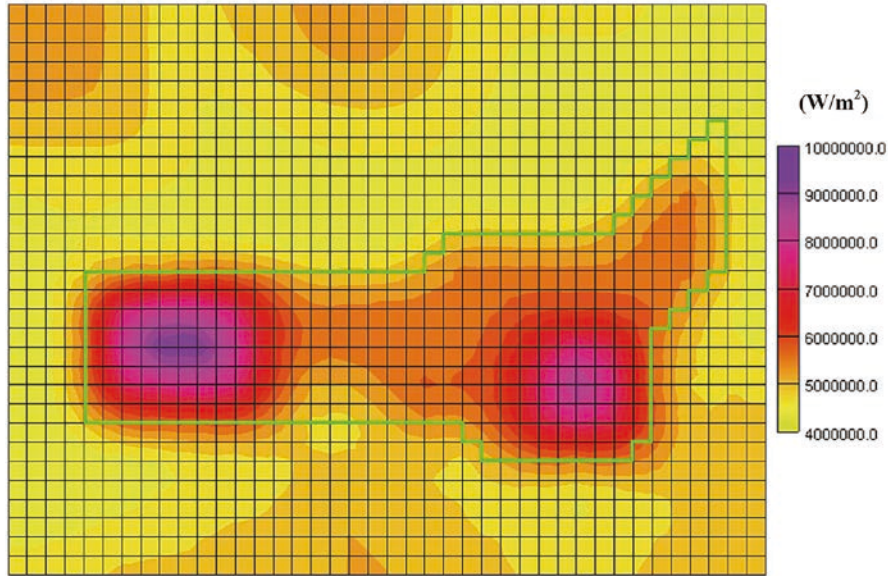


圖 12 知本溫泉地區溫泉儲集層熱流量等值圖

圖中顯示箭頭即為各網格之熱流量分佈情況與方向，向量長度即代表熱流量大小。本研究評估地熱資源潛能為地層提供給溫泉儲集層之熱流量，以模式剖面為例，本數值模型中，破碎砂岩層為知本溫泉地區全儲集層，故由數值模式中獲得各下部緻密砂岩提供給儲集層之熱流量。研究區溫泉資源潛能則如圖 12 所示，由圖中熱流量結果，可清楚瞭解知本溫泉資源潛能量值與分布情況。

## 結語

本研究是以區域之水文地質概念模型與溫泉儲集層形成條件為基礎，說明溫泉資源評估過程以及重要知深淺循環水概念，在有限之調查資料下，利用數值模擬方法，求解研究區域內之地下水流與熱流問題。利用溫泉地區資料建立溫泉地區數值模型，已為廣泛運用以及推估溫泉資源之方式，利用合乎需求之地下水與熱能耦合軟體，依地溫資料以及水文地質概念模型，可利用數值模型反推溫泉區深層循環水量以及熱能分布。以案例區知本溫泉為例，模擬結果顯示本區深循環水量總和為每年 121.1 萬噸，換算為熱焓量後，此區每年深循環水帶入熱焓為  $7.4 \times 10^{14}$  焦耳。本研究定義溫泉資源潛能為下部地層提供溫泉儲集層之熱流量大小，並根據數值模型計算知本溫泉地區儲集層溫泉潛能，結果顯示知本森林公園入口前與龍泉路 43 巷為此區溫泉資源潛勢最高區域，以此評估程序可瞭解知本溫泉區整體溫泉資源潛

能與分布，而後配合溫泉地區溫泉井監測資料，可架構溫泉區開發利用與經營管理準則，確保資源不致發生超限利用情況，維持資源永續。

## 參考文獻

1. 李振誥、林士哲、馬惠達、林宏奕 (2003), 「金崙溫泉資源之調查分析」, 台灣水利, 第 51 卷, 第 3 期, 第 58-68 頁。
2. 李振誥、李京霖、龔文瑞 (2007), 「陽明山馬槽地區溫泉資源調查分析之研究」, 台灣水利, 第 55 卷, 第 3 期, 第 46-53 頁。
3. 李振誥、陳尉平、龔文瑞、陳進發、林宏奕 (2008), 「溫泉可開發量推估及其應用於烏來溫泉區」, 台灣水利, 第 56 卷, 第 1 期, 第 60-68 頁。
4. Kiryukhin, A.V., Asaulova, N.P., and Finsterle, S. (2008). "Inverse modeling and forecasting for the exploitation of the Pauzhetsky geothermal field, Kamchatka, Russia." *Geothermics*, **37**, pp. 540-562.
5. 經濟部能源委員會 (1984), 台灣區地熱資源探勘評估報告。
6. 經濟部水利署 (2001), 台灣溫泉水資源之調查及開發利用 (2/4)。
7. 陳肇夏 (1982), 地熱地質與探勘, 貞觀出版社, 第 115 頁。
8. 經濟部水利署 (2008), 南區溫泉監測系統站址規劃設計。
9. O'Sullivan, M.J., Pruess, K., and Lippmann, M.J. (2001). "State of the art of geothermal reservoir simulation." *Geothermics*, **30**, pp. 395-429.
10. Pruess, K., Oldenburg, C., and Moridis, G. (1999). *TOUGH2 User's Guide*, Version 2.0, Lawrence Berkeley Lab. Rep. LBNL-43134 UC-400, Berkeley, CA.
11. Edwards, A.L. (1972). *TRUMP: A Computer Program for Transient and Steady State Temperature Distributions in Multidimensional Systems*, National Technical Information Service, National Bureau of Standards, Springfield, VA.
12. Narasimhan, T.N. and Witherspoon, P. A. (1976). "An integrated finite difference method for analyzing fluid flow in porous media." *Water Resources Research*, **12**(1), pp. 57-64. 