西太平洋地質科學, 第 11 卷, 第 31-48 頁, 2011 年 12 月 WESTERN PACIFIC EARTH SCIENCES, Vol.11, P.31-48, December, 2011

PROSPECTS OF GEOTHERMAL RESOURCES IN TAIWAN ON THE BASE OF SURFACE SILICA HEAT FLOW

CHIA-MEI LIU^{1,2}, SHENG-RONG SONG¹ AND YI-CHIA LU¹

Department of Geosciences, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, R.O.C.
Department of Geology, Chinese Culture University, Taipei, Taiwan, R.O.C.

ABSTRACT

Taiwan is located at the margin of young orogenic belt which the Philippine Sea plate collides with Asian continental margin. It is characteristic that the geothermal and hot springs are widely distributed in this island. This study used the silica geothermometry to measure the concentrations of silica in hot springs for calculating the surface heat flow distributed in the Taiwan region. The results show that two anomalous high of surface heat flow occurred in the Chinshui area, Ilan and Chippen area, Taitung. The values are as higher as 160 mW/m², which is higher than the well-developed geothermal countries such as USA and Australia. It, therefore, indicates that the Taiwan region has great potential to explore and develop the geothermal heat for power plant.

Key words: silica geothermometry, geothermal energy, surface heat flow, Taiwan

^{1.} Chia-Mei Liu, e-mail: pollynismo@gmail.com

由台灣二氧化矽地熱流看地熱能源前景

劉佳玫^{1,2}、宋聖榮¹、盧乙嘉¹

1.國立台灣大學地質科學系暨研究所
2.中國文化大學地質學系

摘要

台灣位於太平洋火環帶,且屬於年輕的造山帶,溫泉地熱相 當豐富。本研究利用二氧化矽地質溫度計的方法,分析溫泉水中 的二氧化矽濃度,然後計算溫泉水在儲集層中平衡時的溫度,並 進一步的獲得台灣地區地表的熱流分布圖。結果顯示除了台灣北 部大屯火山群高熱區外,東北部的清水地區和東南部的知本-金崙 地區,都有相當高的地表熱流量,其值可達160 mW/m²以上,不 遜於美國西部和澳洲東南部現有的地熱開發區,顯示台灣地區的 地熱蘊藏豐富,值得大力投入開發與利用。

關鍵詞:二氧化矽地質溫度計、地熱能源、地表熱流、台灣

1、緒 論

由於人口的快速增加,以及對於經濟發展的需求,致使對能源的需求量大增。另 外,因全球溫度逐漸增高、溫室效應明顯增加所引發的種種環境問題,使得尋求乾淨 且可再生的能源,和抑制二氧化碳的排放,成為全球追尋的目標,也是對全人類的一 種巨大挑戰,而地熱能源(geothermal energy)則是解決此種挑戰的可能重要答案之一。 因為地熱能源具有廣泛的分布、對環境友善和獨特性、不受氣候和其他能源發展的影響、與土地息息相關、有多方面的應用效能、以及具有永續發展等特性,符合現今再 生能源的發展趨勢,是一種極具開發潛力、應用於發電和直接利用(包括熱泵、空間加 熱、溫室加熱、水產養殖、農產品乾燥加工、泡湯和家用冷卻和加溫等)的再生能源。

地球為一個巨大的散熱體,時時刻刻散出豐富的地熱,類似於來自太陽的太陽 能,源源不斷。其表面每年散失的熱量高達2.4×10¹⁷千卡(Verhoogen *et al.*, 1970), 約相當於燃燒1.68×10¹⁰桶石油的熱當量。其中,所放出潛在可供使用的熱量約為 205 EJ_{th}/y,相當於全世界一年所消耗能源的43% (2005年全世界所消耗的能源約為 479 EJ_{th} (IEA, 2007)),也相當於一天24小時都在使用、全年所耗費的電力能源。另 外,地熱能源是乾淨能源之一,對於環境污染程度相較於石化能源小,如此的地熱 能源特性相當符合現今再生能源的發展趨勢。另外,目前世界上在地熱資源,有32% (約65 EJ_{th})的地熱溫度高於130℃,可直接用於發電;另外的68% (約140 EJ_{th})的地熱溫 度低於130℃,部分可考慮用於低溫發電,但大部分可直接利用。

台灣自產能源不豐,對進口能源供給依賴甚重,進口能源依存度超過90%以上; 能源供給結構以化石能源為主,其中碳排放量較高之煤炭與石油占83.25%,低碳能源 僅占16.75%。面對國內外對溫室氣體減量的日增壓力下,如繼續維持高碳能源結構將 使減量目標的達成愈形困難。長遠來看地球石化能源日漸匱乏,市場價格波動大且呈 盤高趨勢,對國際經濟成長已造成劇烈衝擊,尤其我國能源進口依賴度極高,因此積 極尋求可行的再生能源或永續能源是國家現階段的重要政策方針。

目前政府相關主管機關研擬的策略之一,便是積極發展無碳再生能源,有效運用 再生能源開發潛力,希望於2025年能占發電系統的8%。地熱發電由於不受天候影響, 運轉率高又可作為基載電力,因此近年來繼再生能源的風力、太陽光電之後,受到國 際間更多的重視。相對於傳統淺層地熱能之利用,蘊藏於更深部地層(3,000-10,000公尺) 之熱能更是龐大(MIT, 2006),且較不受地域限制。根據1989年美國MIT Prof. Tester等 人的估計(Tester *et al.*, 1989),全球深層地熱發電潛能約為地球石化燃料發電潛能的 300倍;因此並倡議使用Enhanced Geothermal Systems (又稱為Engineered Geothermal Systems)觀念,擴大傳統地熱的規模,開採利用3,000公尺以下或更深層的地熱能源。 如此,便能提供適足的能源需求,以部分取代快速耗竭的石化能源。

2、地熱的現況

台灣在60-70年代曾經嘗試探勘和開發地熱資源,因而獲得相當豐富的台灣地區 地熱資料和成果。據過去的評估顯示,大屯火山群潛在可用於地熱發電的量可能有50 萬千瓦,中央山脈變質岩區也可能有20萬千瓦(陳肇夏,1994);同時也在清水和土場設 立兩座的試驗電廠,進行地熱發電實驗,是全球第14個成功利用地熱發電的國家。民 國69年即在宜蘭清水地熱區籌建一座3 MW先驅試驗發電廠。發電廠採用單閃發蒸汽 發電方式,於民國70年7月17日正式運轉發電併聯台電系統;同年9月交由台電公司運 轉試驗,地熱生產井與管線輸送部分則由中油公司負責。由於清水地區之地熱特性為 熱水型地熱田,熱水多蒸汽少,而單閃發蒸汽發電機組僅利用地熱流體中10-20%之 蒸汽,大量的高溫熱水則直接排放而未作為回注之用。加以輸入電廠渦輪機之蒸汽壓 力、流量等條件均未能滿足發電機規格,故自始發電效率偏低。隨後因地熱井產量逐 年衰減以致發電效率更低,而於民國82年11月停止發電試驗。自此之後,國內地熱能 源調查開發利用的研究即停滯不前,相關產業也未能建立。一直到民國94年,經濟部 能源局重新開始投入一些經費在地熱能源領域。

過去三十年,隨著材料和技術的進步,世界各國的地熱資源卻發展的相當快, 尤其是GIA (Geothermal Implementing Agreement)的國家,約增加6-7倍(從1,300增長至 9,450 MWe),且持續在增加中。地熱發電由於不受天候影響,運轉率高又可作為基載 電力,更能有效降低對石化能源的依賴,因此近年來受到國際間更多的重視。美國能 源部於公元2000年便開始推動Geopowering the West的計畫,近期設定的目標預計於 2020年地熱能的利用能達到20,000 MWe;德國2004年修訂的再生能源法案也將地熱 明列為獎勵的項目,積極推動發電與熱能利用;歐盟其他國家也為降低二氧化碳的排 放,紛紛尋求使用如地熱的替代能源。2006年美國MIT的團隊發表了一份研究報告: The Future of Geothermal Energy – Impact of Enhanced Geothermal Systems【EGS】 on the United States in the 21st Century,認為採用EGS的觀念擴大傳統地熱的規模,加上 開採利用3,000公尺以下的深層地熱能源,便能提供適足的能源需求。

相關的前瞻研究包括:歐盟的HDR (Hot Dry Rock)計畫、澳洲的HFR (Hot Fractured Rock)計畫、美國能源部的EGS (Enhanced Geothermal Systems)計畫、冰島深鑽計畫 (IDDP)、以及瑞士的Heat Mining計畫等。整體來看,地熱能源的開發利用儼然成為繼 風力、太陽能之後的一個新興再生能源產業。而我們鄰近的菲律賓,在美國的技術和 資金的支助下,積極的開發地熱資源,目前為止已經裝載了1,931百萬瓦(MWe)的發電 量(佔該國總發電量的13%),僅次於美國為世界第二大地熱發電的國家。菲律賓估計 其地熱發電潛能可達4,335百萬瓦(MWe),故其又提出相當大的探勘和開發計畫,擬在 未來的十年內廣增設發電機組,可能超越美國成為世界上最大的地熱發電國家。

另外,日本也曾經因地熱開發不如預期,於1997年在其國家型『尋求新能源』的計畫種類中,把地熱資源刪除。但有鑑於現今減低二氧化碳排放量和尋找新再生能源的世界趨勢中,且探勘和開發技術的突發猛進,日本政府自然資源和能源署(Agency for Natural Resources and Energy, ANRE)和經濟、貿易和工業部 (Ministry of Economy, Trade and Industry, METI),於2006年重新把地熱資源恢復於『尋求新能源』的計畫種類中,且積極從事於地熱資源的探勘和開發研究。

我們鄰近的韓國,其地熱資源潛力遜於台灣甚多,也於近年來大力投資於地熱的 探勘和開發,並加入GIA成為正式的加盟國(GIA,2006)。歐洲的德國,其地質為老的 地塊、地熱資源相當貧乏,但為了尋求乾淨且可再生的能源,於80年代開始積極探勘 深部地熱資源,發展地球深部鑽探技術,全面探勘深度超過3-4千公尺的熱且乾的岩 體(Hot Dry Rock, HDR),期望未來的地熱能源能佔全國能源的10-20%。目前全世界有 25個國家擁有地熱發電廠,2005年全世界地熱發電裝置容量已達8,912 MWe,每年發 電總量達56,831 GWe。英國石油公司網站的2006年統計資料顯示,全世界地熱發電裝 置容量已達9,584 MWe。在美國、菲律賓、墨西哥、印尼、日本、紐西蘭、冰島等地 熱發電先進國家,其發電裝置容量均有相當規模,發電成本甚具競爭力。由此可見, 地熱發電無論是在技術上或是商業運轉上都已具備可行性。

西太平洋地質科學,第11卷 Western Pacific Earth Sciences, Vol.11

臺灣位處環太平洋構造帶,火山活動與板塊擠壓,造成國內豐富的地熱蘊藏資 源,根據1980年以前之探勘及普查資料估算,全島淺層地熱預計有近1,000 MWe之發 電潛能;相對於傳統淺層地熱能之利用,蘊藏於更深部地層(3,000-5,000公尺)之熱能 更是龐大,如能善加利用,不僅可減少對傳統化石能源的依賴,更有益於能源開發應 用之多元化與自主性。一地的地熱探勘、開發與利用,首先須了解當地的地表熱流 量,故本篇文章利用二氧化矽(石英)地質溫度計,計算台灣地區的區域熱流分布,然 後分析台灣未來的地熱開發潛能。

3、採樣及研究方法

本篇文章共採集了超過130個溫泉標本。根據前人文獻紀錄和詢問溫泉業者溫泉 源頭位置,經實地勘查選擇從岩壁中、且遠離河床的溫泉採取之,並且在採樣現場 用0.2 µm的濾紙,將所採的溫泉過濾。回來到室內後將已過濾的溫泉分裝成兩瓶,一 瓶拿來做分析,另一瓶保存。將溫泉水樣及釔(Yttrium)以1:1的比例混合,添加釔的 目的是作為內部標準元素(Internal standards),以克服儀器穩定度不夠的缺陷。經過過 濾、加入內部標準元素的溫泉水樣就可上機,以感應耦合電漿—原子發射光譜儀來分 析溫泉水樣中的矽(Si⁴⁺)濃度等,並換算為二氧化矽含量。

以泉水中二氧化矽含量作為地熱儲集層中的溫度指標始於1956年(White *et al.*, 1956);於1960年(Bodvarson, 1960)將此觀念應用於冰島地區地下熱水系統的溫度; 而Sigvaldason (1966)認為利用泉水中二氧化矽含量估算地熱儲集層溫度,其泉水中 二氧化矽含量主要與石英的溶解度有關。之後,陸續有許多學者(Truesdell, 1976; Swanberg and Morgan, 1978, 1980, 1985; Rybach and Muffler, 1981)利用泉水中二氧化矽 含量當做地質溫度計。由於以二氧化矽(石英)地質溫度計估算地熱儲集層溫度的方法 相當簡單而且準確,目前已經被廣泛的使用在世界各地地熱探勘上。

二氧化砂(石英)地質溫度計是根據泉水中二氧化砂濃度來估算地熱儲集層中的溫度。由於地熱儲集層中二氧化砂的礦物相以石英為主(火成岩區除外),所以從泉水中量測得到的二氧化矽含量,即表示泉水在某一深度下與石英達到平衡的濃度。然而, 根據石英與其他二氧化砂礦物或非晶質二氧化矽的溫度與溶解度之關係圖(圖一)可知 當地下熱水上升到地表或接近地表時,雖然熱水溫度降低,熱水中的二氧化矽濃度



圖一、二氧化矽溶解度與溫度的關係圖。(採自Fournier and Row, 1966) Figure 1. The solubility curves for amorphous silica, cristobalite, chalcedony and quartz (Modified from Fournier and Row, 1966).

超過石英的溶解度,但不會產生沉澱(Hitchen, 1935; Kennedy, 1950; Kitahara, 1960; Morey *et al.*, 1962; Fournier and Rowe, 1962, 1966)。故量測熱水中二氧化砂(石英)可獲得熱水在地下深處與圍岩達平衡的溫度。

在使用二氧化砂(石英)地質溫度計估算地熱儲集層的溫度時,必需符合幾項條件 (Chandler *et al.*, 1980):1.水與岩石達到熱和化學平衡;2.溫泉或冷泉從地下儲水層處 到達地表時,沒有二氧化矽沉澱也沒有地表水的混入;3.地下儲水層內的岩層,有足 夠的二氧化矽礦物,使地下水與石英能達到平衡;4.觀察地下熱水上升到地表是否有 汽化現象。

利用石英或非晶質二氧化矽溶解度與溫度之間的關係,可推導出下列計算公式 (Truesdell, 1976),下列公式中SiO₂為泉水中二氧化矽的濃度(ppm):

 若地下熱水上升到地表時,有汽化現象發生,二氧化矽地質溫度的計算公式如(1) 式,此公式的有效溫度範圍為0-250℃之間,此時的濃度比真正的石英溶解度大。

 $T_{SiO_2}(^{\circ}C) = (1533.5 / (5.768 - logSiO_2)) - 273.15 \dots (1)$

 2. 若地下熱水上升到地表時,未發生汽化現象,二氧化矽地質溫度的計算公式如(2) 式,此公式的有效溫度範圍為0-250℃之間,此時的濃度與石英溶解度相似。

 $T_{SiO_2}(^{\circ}C) = (1315 / (5.205 - logSiO_2)) - 273.15 \dots (2)$

再者,Swanberg和Morgan於1978年提出以二氧化矽(石英)溫度與熱流之間的關係 繪製了美國的熱流分佈圖。其關係式為 $T_{SiO_2} = mq + T_0$ 。其中q為熱流值(mW/m^2); T_0 為地表年平均溫度(°C);m是一常數為0.68。且本公式之回歸值為0.956 (Swanberg and Morgan, 1980)。

使用二氧化砂(石英)溫度與熱流間關係式計算區域熱流時,必須先將研究區域區 分成許多小區塊,小區塊內的二氧化矽溫度之標準偏差必須小於25°C,然後再計算區 域熱流(Blackwell, 1971)。若要利用二氧化矽(石英)地質溫度計計算區域熱流,其流程 如圖二所示。



圖二、二氧化砂(石英)地質溫度計計算區域熱流之流程圖。

Figure 2. Flow chart showing the process how to calculate the regional heat flow using silica geothermometry.

38

4、結果和討論

4.1 二氧化矽地質溫度計的適用條件

正如前面所提到的,要使用二氧化矽地質溫度計,必須符合三個基本假設:1.水 與岩石達到熱和化學平衡。因為若沒有達到水-岩石的平衡,水中的離子濃度就無法 反應地下的溫度,也就無法利用二氧化矽地質溫度計來計算地下熱水的溫度。2.溫泉 或冷泉從地下儲水層處到達地表時,沒有二氧化矽沉澱也沒有地表水的混入。當地底 下平衡的熱水上升至地表時,若有二氧化矽沉澱,表示地下熱水平衡時所溶解的二氧 化矽,高於地表熱水與非晶質二氧化矽平衡的濃度,此時量測熱水所得到的二氧化矽 濃度會比實際的低,則利用二氧化矽地質溫度計所計算出來的地下溫度,會明顯的低 於實際的地下溫度。若地下熱水上升的過程中,有地表水的混入,會降低熱水中的二 氧化矽濃度,此時量測得到的二氧化矽濃度,也會比實際在地底下平衡時的為低,所 計算出來的地下溫度也會偏低。3.地下儲水層有足夠的石英礦物,使地下熱水能與石 英達到平衡,反映地底下熱水儲存層的溫度(Chandler *et al.*, 1980)。

本研究利用"Geochemist's Workbench"軟體計算地殼深處儲藏層的水與石英達 平衡所需的時間,結果發現地殼深處儲藏層的水與石英只要50天左右即可達到平衡 (圖三)。從氚同位素的資料可知,研究區內的溫泉水至少已經存在儲藏層40年以上 (劉聰桂,未發表的資料),因此顯示台灣地區的溫泉水可與儲藏層的石英達到熱和化學 平衡。

本研究利用X光繞射分析和測量溶解溫泉出露點周圍沉澱物,並沒有晶質和非晶 質二氧化矽的反應,顯示地下熱水在上升到地表的過程中,並沒有二氧化矽的沉澱。 本研究所採集的溫泉水,送至本系碳十四同位素實驗室,量測氚同位素,結果並沒有 氚同位素的反應(劉聰桂,未發表的資料),表示採集的溫泉水並沒有受到地表水的影響。

本研究區溫泉出露點都在變質岩和沉積岩區,一般而言其石英含量都接近或超過 50%,顯示地下儲水層的岩層有足夠的石英能與溫泉水達到反應平衡。

綜合上述,本研究區所採的溫泉水和冷泉水,皆能符合二氧化矽地質溫度計的條件,可利用於計算地下熱水的溫度,以及估計地表的熱流量。



圖三、利用"Geochemist's Workbench"軟體計算岩層中石英與地下熱水平衡時所需的時間。 Figure 3. Calculating equilibrium time of quartz and geothermal fluid using the software "Geochemist's Workbench".

4.2 二氧化矽熱流量的估計

利用二氧化矽地質溫度法計算熱流量時,需考慮地下熱水可能來自於不同深度儲水層,否則所計算出來的熱流量會有很大的偏差。為了消除來自於不同深處熱水所造成的誤差,Blackwell (1971)統計美國境內所有利用二氧化矽地質溫度計法所計算出來的熱流值,發現若把研究區域區分成許多小區塊,當這些小區塊內的二氧化矽溫度之標準偏差小於25℃,就可得到精確二氧化矽熱流值。

在本研究中以24 Km×24 Km為一區塊,在此區塊間的溫泉二氧化矽溫度標準偏差 大部份小於25℃,有少數二氧化矽溫度標準偏差在25℃左右,符合利用二氧化矽地質 溫度計法計算地表熱流值的考慮因素(劉佳玟,2011)。

4.3 二氧化矽熱流值與已發表熱流值的比較

李清瑞和鄭文哲(Lee and Cheng, 1986)所發表的熱流分佈圖(圖四)是台灣截至目前 為止僅有的一篇熱流資料,其熱流控制點分別取自中油在麓山帶和海岸平原的鑽井資



圖四、台灣地區的地表熱流分布圖。(Lee and Cheng, 1986)

Figure 4. Regional surface heat flow of Taiwan made by conventional borehole measurements (Lee and Cheng, 1986).

料,以及工研院利用鑽井方式在中央山脈鑽取22個資料點,共有85個資料點,這些資 料點數值為0.54至14.1個熱流單位。然而,這些資料大於4個熱流單位和小於0.8個熱流 單位者可能是受到地熱水循環的影響,所以有代表性的資料點只有69筆。

台灣地區溫泉的分佈密度相當高,本研究將利用此優點,以二氧化矽地質溫度法,量測至少130個溫泉的二氧化矽含量,然後進一步估算熱水地下平衡的溫度,以及地表的熱流值,並繪製出台灣二氧化矽熱流分佈圖(如圖五)。此方法雖然是以地球化學的觀點所計算出的區域熱流,但被應用在各種不同的地質區和構造區,同時,與一般鑽井所獲得的熱流結果相當一致,顯示此方法足以做為區域熱流值的估計(Swanberg and Morgan, 1980, 1985; Vugrinovich, 1987; Wan, 1988; Wan *et al.*, 1989; Ilkisik, 1995)。

圖四(Lee and Cheng, 1986)及圖五(本研究)這兩張圖的熱流分佈趨勢及其數值高低 有很大的差異性。圖四中最高的熱流值約為126 mW/m²,各別分佈於中央山脈和台灣 南部的麓山帶及海岸山脈,最低熱流值約為41.9 mW/m²,大多分布於西部平原區; 然而,圖五最高熱流值約為190 mW/m²分佈於中央山脈東翼片岩區轆轆地區和台東知 本、太麻里地區,最低熱流值為80 mW/m²,分布於西部平原區。圖四與圖五之間熱流 分佈趨勢的差異性,與兩者之間資料點的分佈有很大關係,由於圖四的資料點大多分 佈於麓山帶和海岸平原,所以無法呈現出詳細的熱流分佈;且因圖四的資料點深度大 多為100-200公尺的溫泉區,較容易受到地下熱水循環影響,而無法量測得到較精確的 溫度。

4.4 台灣地熱發電的潛力

自從1904年義大利在拉德瑞羅(Larderello)地熱區首次地熱發電試驗成功、1913年 第一座250 kW發電廠開試運轉後,開啟人類地熱發電的利用。但由於腐蝕、結垢和對 於儲集層的了解不足,以至於其發展相當緩慢,一直到1970年代後才開始增快腳步, 每年以9%的速率增長。至2008年為止,全球地熱發電的總裝機容量約為8,800 MW, 預計2020年達到30-40 GW (30,000-40,000 MWe)的裝機容量。

世界上地熱發電量最大的國家為美國,地熱電廠主要是集中在西部的加州和內達 華州等。過去30年美國的地熱發電量,從1970年代約100 MWe進展到約3,000 MWe,



圖五、台灣地區的二氧化矽地表熱流分布圖(本研究)。 Figure 5. Regional surface silica heat flow of Taiwan (this study).



圖六、美國大陸地表熱流分布圖。(資料來自Geological Society of America (GSA), 1992) Figure 6. Regional surface heat flow of USA's continent (Courtesy of Geological Society of America (GSA), 1992).



- 圖七、澳洲大陸地表熱流分布圖。(資料來自http://peakenergy.blogspot.tw/2007/11/geothermia-revisited.html)
- Figure 7. Regional surface heat flow of Australian continent (Courtesy of http://peakenergy.blogspot. tw/2007/11/geothermia-revisited.html).

劉佳玟等:由台灣二氧化矽地熱流看地熱能源前景 Liu et al.: Prospects of geothermal resources in Taiwan on the base of surface silica heat flow **45**

增長了約30倍。圖六為美國地表熱流量的分布圖,顯示其地表熱流量最高值約為 150-170 mW/m²。圖七為澳洲大陸的地表熱流量分布圖,圖中顯示全澳洲高地表熱流 量主要分布於南澳至東南澳地區,其最高值約為160 mW/m²。澳洲至2008年為止並沒 有地熱電廠的建立,但過去十年澳洲當局積極地從事地熱探勘,結果相當樂觀。預定 從2010年至2018年,每年最少建造50 MW以上的地熱發電廠;直至2018年後,澳洲整 體地熱發電量可達450 MWe。從台灣地表的熱流量分布(圖五),顯示在台灣東北部宜 蘭的清水地區和東南部的知本-金崙地區,兩者的地表熱流量最高值都達180 mW/m²以 上,都比美國和澳洲兩國的地表熱流量還高,故其地熱發電潛力應該很高,相當值得 探勘與開發。另外,台灣北部的大屯火山群,其地表地熱徵兆和地溫梯度都比清水地 區和知本-金崙地區還更高,顯示其潛力更是無窮,更值得大力投入探勘與開發。至於 這些地方的實際地熱發電量多寡,則須未來更精確的探勘與評估才可知。

誌 謝

本研究感謝林義貴先生協助溫泉水的採集,同時也感謝國科會國家型科技計畫(計畫編號:NSC 98-3114-M-002-001)經費的支持。

參考文獻

陳肇夏 (1994) 大地的氣息。陽明山國家公園管理處,共308頁。

- 劉佳玫 (2011) 台灣造山帶二氧化矽地表熱流及其隱示。 國立台灣大學地質科學研究 所博士論文,共138頁。
- Blackwell, D.D. (1971) The thermal structure of the continental crust, in the Structure and Physical Properties of the Earth's Crust: *Geophysical Monograph*, vol. 14, p. 169-184.
- Bodvarson, G. (1960) Exploration and exploitation of natural heat in Iceland: *Bulletin of Volcanology*, vol. 23, p. 241-250.
- Chandler, A., Swanberg, C.A. and Morgan, P. (1980) The silica heat flow interpretation technique: Assumptions and applications: *Journal of Geophysical Research*, vol. 85, no. B12, p. 7206-7214.

- Fournier, R.O. and Rowe, J.J. (1962) The solubility of cristobalite along the three-phase curve, gas plus liquid plus cristobalite: *American Mineralogist*, vol. 47, p. 897-902.
- Fournier, R.O. and Rowe, J.J. (1966) Estimation of underground temperatures from the silica content of water from hot springs and wet-steam wells: *American Journal of Science*, vol. 264, p. 685-697.
- GIA (2006) IEA Geothermal Energy. Annual Report, 2006: http://www.iea-gia.org/. (accessed March 9, 2011)
- Hitchen, C.S. (1935) A method for the experimental investigation of hydrothermal solutions, with notes on its application to the solubility of silica: *Institution Mining and Metallurgy Transactions*, vol. 44, p. 255-280.
- IEA (2007) Key World Energy Statistics 2007. http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2007/ key stats 2007.pdf (accessed March 9, 2011)
- Ilkisik, O.M. (1995) Regional heat flow in western Anatolia using silica temperature estimates from thermal springs: *Tectonophysics*, vol. 244, p. 175-184.
- Kennedy, G.C. (1950) A portion of the system silica-water: *Economic Geology*, vol. 45, p. 629-653.
- Kitahara, S. (1960) Solubility of quartz in the aqueous sodium chloride solutions at high temperatures and high pressure: *Review of Physical Chemistry of Japan*, vol. 30, p. 115-121.
- Lee, C.R. and Cheng, W.T. (1986) Preliminary heat flow measurements in Taiwan, in Proceedings, 4th Circum-Pacific Energy and Mineral Resources Conference, August 17-22, Singapore, 1-9.
- MIT (2006) The Future of Geothermal Energy (MIT-2006). http://geothermal.inel.gov/ publications/future_of_geothermal_energy.pdf (accessed March 9, 2011)
- Morey, G.W., Fournier, R.O. and Rowe, J.J. (1962) The solubility of quartz in water in the temperature interval from 29°C to 300°C: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 26, p. 1029-1043.
- Rybach, L. and Muffler, L.P.J. (1981) Geothermal systems: Principles and case history. John

Willy, New York, 359 p.

- Sigvaldason, G.E. (1966) Chemistry of thermal waters and gases in Iceland: *Bulletin of Volcanologique*, vol. 29, p. 589-604.
- Swanberg, C.A. and Morgan, P. (1978) The linear relation between temperatures based on the silica content of groundwater and regional heat flow: A new heat flow map of the United States: *Pure and Applied Geophysics*, vol. 117, p. 227-241.
- Swanberg, C.A. and Morgan, P. (1980) The Silica Heat Flow Interpretation Technique: Assumptions and Applications: *Journal of Geophysical Research*, vol. 85, no. B12, p. 7206-7214.
- Swanberg, C.A. and Morgan, P. (1985) Silica heat flow estimates and heat flow in the Colorado Plateau and adjacent areas: *Journal of Geodynamics*, vol. 3, p. 65-85.
- Tester, J.W., Murphy, H.D., Grigsby, C.O., Potter, R.M. and Robinson, B.A. (1989) Fractured Geothermal Reservoir Growth Induced by Heat Extraction: *SPE Reservoir Engineering*, vol. 3, p. 97-104.
- Truesdell, A.H. (1976) Summary of Section III, Geochemical techniques in exploration. In 2nd U.N. Sympysium On the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco, California, USA, 20-29 May 1975 (Edited by U.S. Energy Research and Development Administration), p 685-844, U.S. Energy Research and Development Administration, Washington, USA.
- Verhoogen, J., Turner, F.J., Weiss, L.E., Wahrhaftig, C. and Fyfe, W.S. (1970). The Earth: an Introduction to Physical Geology. Holt, Rinehart and Winston, New York, 748 p.
- Vugrinovich, R. (1987) Regional heat flow variations in the northern Michigan and Lake Superior region determined using the silica heat flow estimator: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 34, p. 15-24.
- Wan, T. (1988) Silica heat flow in South China: Chinese Science Bulletin, vol. 33, p. 655-657.
- Wan, T., Uongfu, T. and Zheng, W. (1989). Thermal structure of the lithosphere in Fujian, China: *Journal of Geophysical Research*, vol. 94, no. B2, p. 1888-1894.

White, D.E., Brannock, W.W. and Murara, K.J. (1956) Silica in hot-spring waters: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 10, p. 27-59.