

臺灣地熱能源發展的現況、展望與困境

宋聖榮

國立台灣大學地質科學系教授

摘要

地熱為一種乾淨可再生的能源、可當基載發電、電廠使用土地面積小、價格便宜和抗天災能力強等特性，故發展潛力強且為世界各國所矚目。台灣位於環太平洋火環地熱蘊藏豐富的地區，淺層地熱能的發電裝置容量約有989 MW、而深層地熱能更高達33,640 MW，若能大量開發使用，不僅可節省大量的能源進口費用，也可提高能源自主和國家安全。故建議新政府應該積極投入地熱的探勘和開發。具體的作法在地熱資源開發方面包括：發展原住民部落的地熱產業、短期5年內加速開發及建造淺層地熱電廠、政府應投入資源精確調查台灣深層地熱的儲藏量和建造小型示範電廠、推動地基型熱泵制冷以減低台北都會區的熱島效應、以及開發深層和水平高溫鑽井和液裂技術等。在地熱開發獎勵和修法方面包括：政策獎勵並引導台灣地熱的快速發展、修法使地熱資源回歸礦業法來規範、制定適宜的法律，創造有利於地熱開發的環境、設立地熱園區、建立政策環評和5 MW規模內的地熱電廠免環評、以及修改電業法改善地熱輸電線路的成本。

關鍵詞：地熱能源、加強型地熱系統、高溫水平鑽井、地基型熱泵、躉購費率。

一、前言

由於人口增加和經濟發展，對能源的需求量大增，加上全球溫室效應所引發的種種環境問題，使得尋求乾淨且再生的能源，和減少二氧化碳的排放，成為現今巨大的挑戰，而地熱能源(Geothermal energy)則是解決此種挑戰的可能重要答案之一。

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 3.16×10^{18} 千卡(Sclator et al., 1980)，約相當於燃燒2,210億桶石油的熱當量。其中，所放出潛在可供使用的熱量約為 $205 \text{ EJ}_{\text{th}}/\text{y}$ ，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 $479 \text{ EJ}_{\text{th}}$ (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能源。

地熱的應用可分為發電和直接利用，目前世界上在地熱資源的利用中，有32%(約 $65 \text{ EJ}_{\text{th}}$)的地熱溫度高於 130°C ，可直接用於發電；另外的68%(約 $140 \text{ EJ}_{\text{th}}$)的地熱溫度低於 130°C ，部分可考慮用於低溫發電，但大部分可直接利用，包括地熱唧筒、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(圖1)。

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97%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%。面對巴黎COP21聯合國氣候峰會對溫室氣體減量的要求，如繼續維持高碳能源結構將使減量目標的達成愈形困難。另外，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，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，並倡議使用加強型地熱系統(Enhanced Geothermal Systems，又稱為Engineered Geothermal Systems, EGS)觀念，擴大傳統地熱的規模，加上開採利用3,000公尺以下或更深層的地熱能源，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。

二、世界地熱發展

地熱發電由於不受天候影響，運轉率高(通常高於90%以上)又可作為基載電力。因此世界各國不論是位於板塊邊界地熱富集區之國家，如美國、紐西蘭、日本、冰島、菲律賓和印尼等，或是地熱資源較不豐富的國家，如法國、德國、澳洲和韓國等，都積極的投入地熱能源之探勘與開發。網路巨人Google公司也加入地熱能源方面的投資，向Alta Rock和Potter Drilling兩家地熱公司各投資625萬和400萬美元。據Emerging Energy Research的統計(圖2)，至2008年全球的地熱發電總量約為10.5GW；預估至2020年時，全球的地熱發電總量將增加3~4倍之多，達到31.5GW至40.5GW之間；預估至2050年時，全球的地熱發電總量將增加到200GW之間。對於地熱發電之所以如此樂觀的原因有二，是低溫(80~160℃)地熱水利用雙循環發電系統的技術突破，和加強型地熱系統的發展成功和規模擴大，尤其以後者的技術突破最為重要。

加強型地熱系統(EGS)主要是針對有高熱流卻沒有足夠的蒸氣或熱水以及孔隙率低或孔隙不連通的區域，用工程的方法製造裂隙，或是使原本已經存在的裂隙張開，而在高溫岩層中創造大規模的熱交換區(儲集層)，再將載體(通常是水)由注入井灌入到地底熱交換區，再由生產



圖1 地熱能在不同溫度下的利用

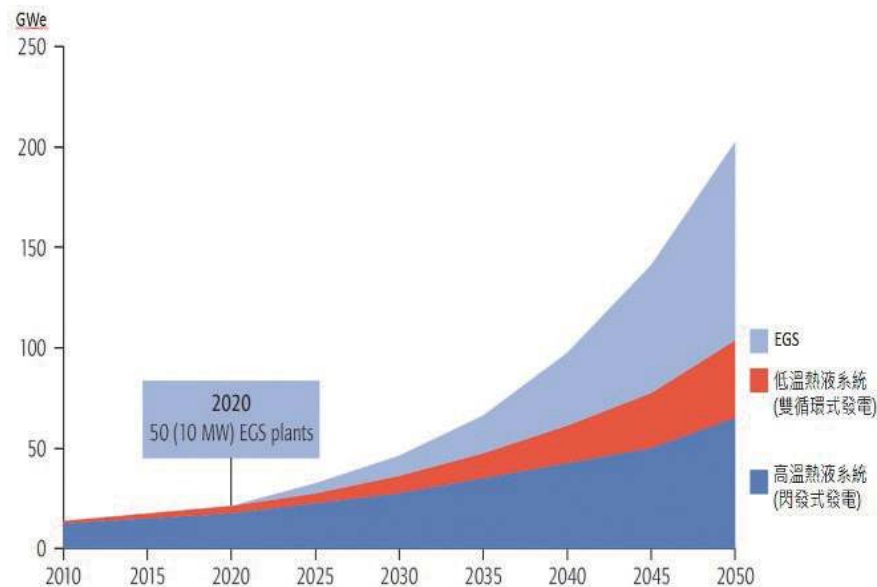


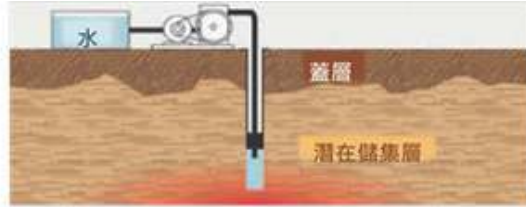
圖2 至2050年全世界地熱發電增長的變化圖 (修改自OECD/IEA, 2011)

井將熱水抽取出到地熱發電廠中，將熱能轉為動能推動發電機來發電。詳細的加強型地熱系統發電開發圖如圖3所示：

根據2006年美國麻省理工團隊 (MIT, 2006) 發表的研究報告：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，便足夠提供全人類的能源需求。目前全世界EGS發展最好的是

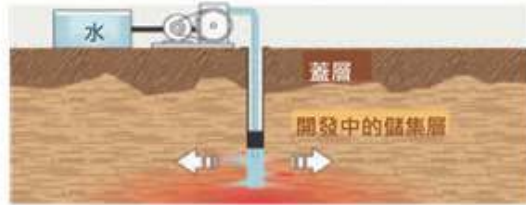
1. 灌注井

將灌注井鑽至乾熱岩基盤中，且低於假想的水位線，一般來說深度大於1.5公里。



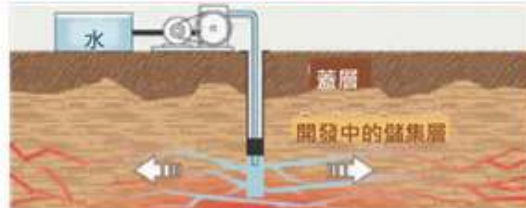
2. 灌水

用足夠的水壓在乾熱岩基盤製造裂隙，或將已經存在的裂隙撐開，以製造儲集層。



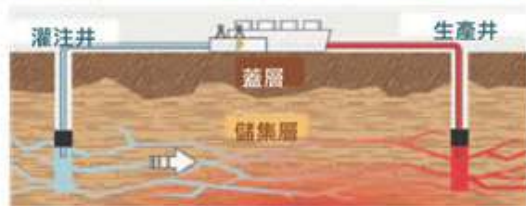
3. 水力裂隙

將水持續灌注到乾熱岩基盤中，製造並撐開更大範圍的裂隙至整個開發中的儲集層，這是整個 EGS 開發中最關鍵的階段。



4. 生產井

將生產井鑽至先前開發的裂隙系統，並將水由灌注井打入孔隙率已高的儲集層，再由生產井抽出熱水汲取地底熱能。



4. 更多的生產井

可鑽更多的生產井至儲集層，汲取更大量的熱能來達到預先設定的發電量。如此一座兼具環保的地熱發電廠即完成。

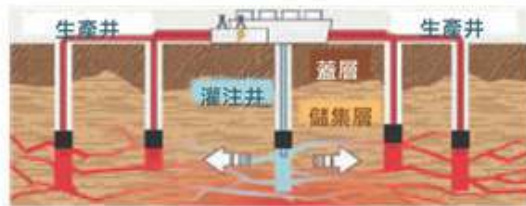


圖3 加強型地熱發電開發圖

(修改自OECD/IEA, 2011)

坐落在法國的Soulitz-sous-Forêts 1.5MWe科學先導型地熱發電廠，2011年光是在歐洲就有20個EGS計畫正在進行或是在歐盟各國間洽談中，其他像是美國、加拿大、澳洲、中國、印度、日本等國，也都有EGS的計畫正在進行。

除此之外，最早地熱開發多使用單閃式發電機組，以蒸氣推動渦輪機的葉片來發電，若溫度未達蒸氣而只是熱水的地熱田則發電效能大減。而近30年來，發展出的雙循環式發電系統(如圖4所示)，則使用兩套迴路，將冷水由灌注井打入儲集層，再由生產井將熱水抽出，通過熱交換器，此時另一迴路中填充低沸點、高膨脹性的流體在流經熱交換器時，便被另一迴路的熱水加熱，而快速達到汽化變成氣態推動渦輪機發電，再經冷卻系統重新至熱交換中心，如此在封閉系統中循環不已。雙循環式地熱發電系統使得低溫熱液系統的發電變成可行。

全世界不管是位於板塊邊緣、地熱豐富的國家，或是位於大陸內部古老地殼、地溫梯度低的地區，對於利用來自於地球深部地熱的EGS發電寄予厚望。但截至目前為止，深層地熱EGS成功的案例少之又少且發電規模都不大，主要的原因有二：水破液裂(hydraulic fracturing)地層引發地震(induced seismicity)和注水回收率不高的問題。前者最典型的例子發生於瑞士「巴塞爾深層地熱能探勘工程」(Basel-EGS)計畫(Wyss and Rybach, 2010)。，於2001年至2006年在瑞士西北部巴塞爾城市邦(Basel-Stadt)進行EGS注水液裂工程，結果在2006年12月8日誘發了芮氏規模3.4級地震，餘震甚至持續至2007年2月，當時地震造成了數百萬瑞士法郎的損害，故瑞士政府最後決定停止該計畫。後者則發生於大部分的EGS計畫，因利用注水液裂使岩層產生裂隙和熱水儲存層，所形成的裂隙可能往四面八方散布，注入的水往各個方向流動，以至於

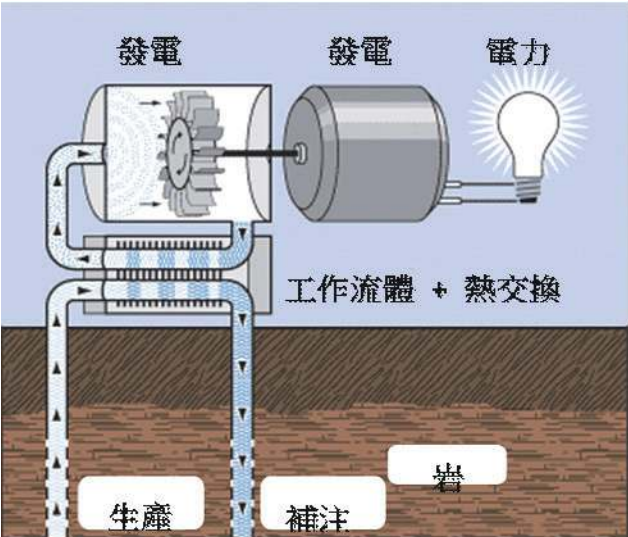


圖4 地熱雙循環發電系統示意圖

(修改自DOE EERE 2012的圖)

抽取用於發電的熱水回收率偏低(一般低於50-60%)，大大的提高注水取熱發電的成本，也使EGS發電規模無法提高。

針對克服上述兩個EGS所面對的難題，Base I-EGS計畫於2015年提出高溫水平鑽井、小規模注水液裂和密迴路灌水取熱計畫(圖5)。過去的EGS液裂要產生 4km^2 的裂隙，是先鑽一口深井到高溫的地層深度，然後高壓灌注大量的水使地層產生理想儲集層的破裂面積，此一方式常常施加過量的水壓、造成較大的地震。目前的方法則是進行水平鑽井，再分段進行小規模注水液裂工程形成 4km^2 的裂隙，然後建造密迴路的注水取熱以供發電。此一新穎的EGS液裂工程改良技術，不僅不會造成具破壞性的地震，也改善了注水回收率低的問題。另外，幾乎同一時間美國能源部地熱技術辦公室(DOE-GTO)也於2014(FORGE, 2014)年提出『地熱能源研究新領域實驗室(Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy (FORGE))』(<http://energy.gov/eere/forg/forg-home>)，針對目前EGS所面臨的問題，整合所有的地質、地球物理、地球化學、水文地質和工程等技術，發展高溫水平鑽井和小規模注水液裂工程(圖6)，希望克服開發EGS引發地震和注水回收率低的問題，使美國的地熱發電規模達100 GW以上，供給美國一億個家庭的電源使用。

三、台灣地熱潛能與現況

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989 MW之發電潛能(柳志錫等，2012)。相對於傳統淺層地熱能之利用，蘊藏於更深部地層(3,000-6,000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，更有益於能源之多元化與自主性。台灣在民國69年於宜蘭清水地熱區建造一座3 MW先驅試驗發電廠，是全球第14個成功利用地熱發電的國家。但由於清水地熱區熱水多、蒸汽少，當時設立的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尾水回注之用。加以輸入電廠渦輪機之蒸汽壓力與流量等條件均未能滿足發電機組規格，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

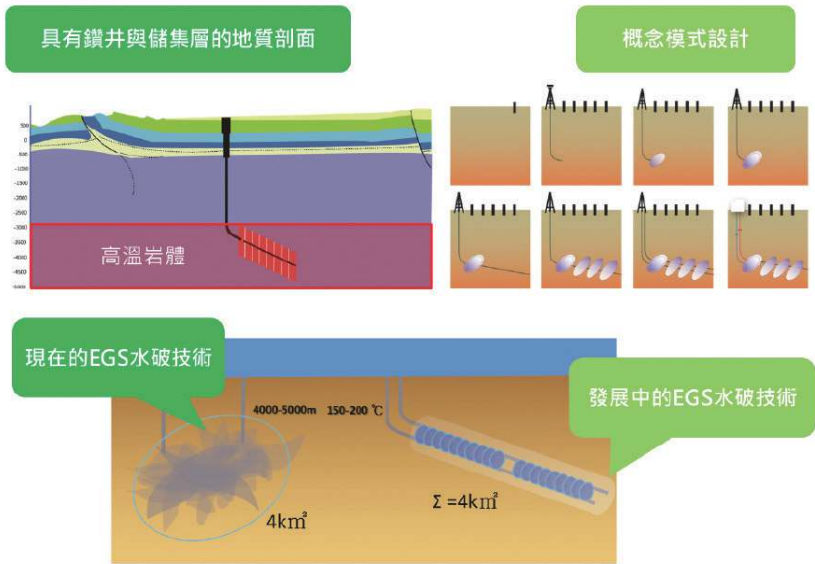


圖5 瑞士Base I -EGS計畫改良後的水破液裂技術示意圖

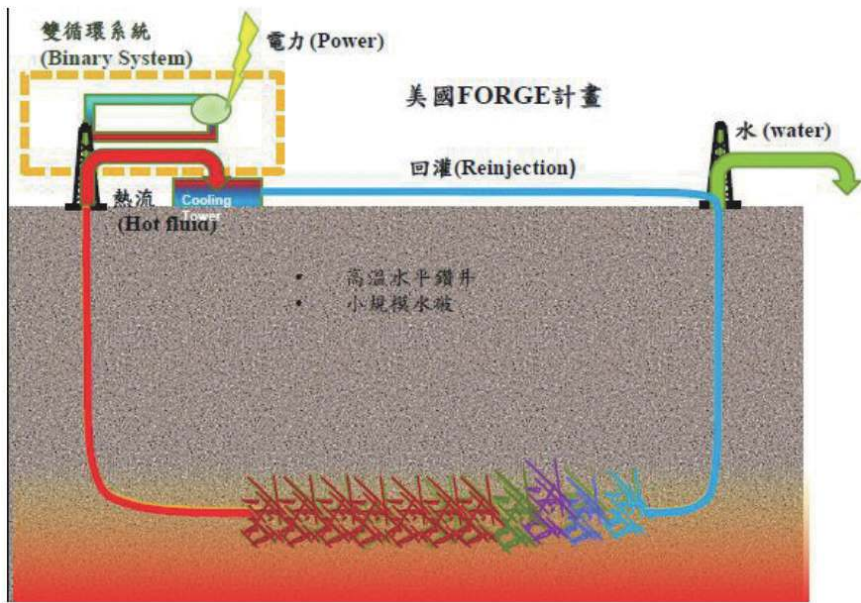


圖6 美國FORGE -EGS計畫的水破液裂技術示意圖

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。截至目前為止台灣還未有任何的地熱發電設立，主要原因為清水地熱示範電廠失敗的陰影所致。

台灣位於環太平洋火環地熱豐富的板塊邊緣，地熱蘊藏豐富。故2005年經濟部能源局基於化石能源價格高漲、以及二氧化碳排放量的問題，而鼓勵發展再生能源，再次投入經費委託工研院能環所在地熱能源相關領域的研究。但投入之經費相當少，前兩年只能就現有的清水地熱井重新開啟，於2010和2011進行改善結垢和尾水回注問題；規畫在2010年鑽一口1500公尺的探勘生產井，預計於2012年重新建造一座3MW的地熱發電示範廠，以建立地熱發電的相關技術，並以ROT或BOT方式移轉給民間，但因種種因素以至於到目前為止宜蘭清水地熱區還未建造任何的地熱發電廠。

我國2008年出爐之能源國家型科技計畫規劃報告，明訂地熱能為再生能源的重要成員，預計地熱能源在未來有7.15 GW(相當於2.6座核四廠)的發電裝置；至2050年可減低我國二氧化碳總排放量5.1%，高於太陽能光電的2.0%和風力發電的1.7%。台灣雖位處於地熱蘊藏豐富的板塊邊界，全島地熱徵兆多，可號稱為『地熱寶島』，但台灣目前沒有任何地熱發電機組之裝置。地熱探勘與開發已停頓的一段長時間，若現在不積極投入研究、探勘和開發，並從國外引進新技術，則勢必無法達到規劃中所訂定的目標。

過去幾年在國科會(科技部的前身)支持下，利用過去地溫資料和最近發表的二氧化矽地表熱流量(圖7)，評估計算出台灣四個區域：大屯火山群、宜蘭地區、廬山地區和花東地區，高度在1,000公尺之下、地下4,000公尺以內的區域內，地熱發電蘊藏量可高達33.64 GW(圖8)。然而，地熱蘊藏量的估算到實際開發其實還有許多困難需要克服，過去所做的地熱探勘屬於大規模且粗略的調查，若要實際落實地熱發電，則需要更多、更精細的調查，並做開發成本評估和評選出最經濟的地點，才能有所成。

利用國際慣用的地熱蘊藏體積法，來估計台灣地區可能之地熱蘊藏量。儲存層的體積和熱水或岩體的溫度是計算地熱蘊藏量及可開發量的重要數據。地溫計算(全台，但不包括大屯火山群)是由劉佳枚(2011)過去的研究成果-二氧化矽溫度計所獲得的台灣地區地表熱流分布圖所換算之地溫梯度分布(圖7)。儲存層的體積則是依據本團隊所

開發出來、結合基本地質和地球物理資料的3D視覺化平台來計算。大屯火山群的數據則是參考60-70年代在此地區的地熱探勘結果來計算。

經過計算後台灣地區高溫地熱（地下4公里深度內、地溫超過175℃的範圍）資源大致可以分為四個區域，包括(1)宜蘭地熱區、(2)花東地熱區、(3)大屯火山群地熱區、及(4)廬山地熱區。利用現有台灣地溫梯度資料計算四大地熱地區在深度4,000公尺以內約具有159 GWe (159,606 MWe)之潛在發電容量，各海拔區間潛在地熱發電容量如表一所示。以下對此四大地熱區的概況略做說明。

1. 宜蘭地熱區

宜蘭地熱區的範圍約有532km²，地下4,000公尺以內之地熱原始蘊藏發電容量約有36,923 MWe。考慮不同海拔高程以下(2,000公尺、1,500公尺、1,000公尺、500公尺)的潛在發電容量，分別為6,704 MWe、6,691 MWe、6,235 MWe和4,135 MWe等。

2. 大屯火山地熱區

大屯火山地熱區的範圍約有88km²，地下4,000公尺以內之地熱原始蘊藏發電容量約有2,886 MWe。考慮本區位於國家公園內法令的限制，其在國家公園內和國家公園外的潛在發電容量，分別為1,405 MWe和1,481 MWe，可合法開採百分比為51.32%。

3. 花東地熱區

花東地熱區的範圍約有5,403km²，地下4,000公尺以內之地熱原始蘊藏發電容量約有100,431 MWe。考慮不同海拔高程以下(2,000公尺、1,500公尺、1,000公尺、500公尺)的潛在發電容量，分別為84,531 MWe、41,197 MWe、25,754 MWe和12,874 MWe 等。

4. 南投廬山地熱區

南投廬山地熱區的範圍約有954km²，地下4,000公尺以內之地原始蘊藏發電容量約有19,366 MWe。考慮不同海拔高程以下(2,000公尺、1,500公尺、1,000公尺、500公尺)的潛在發電容量，分別為9,223 MWe、4,029 MWe、170 MWe和0 MWe 等。

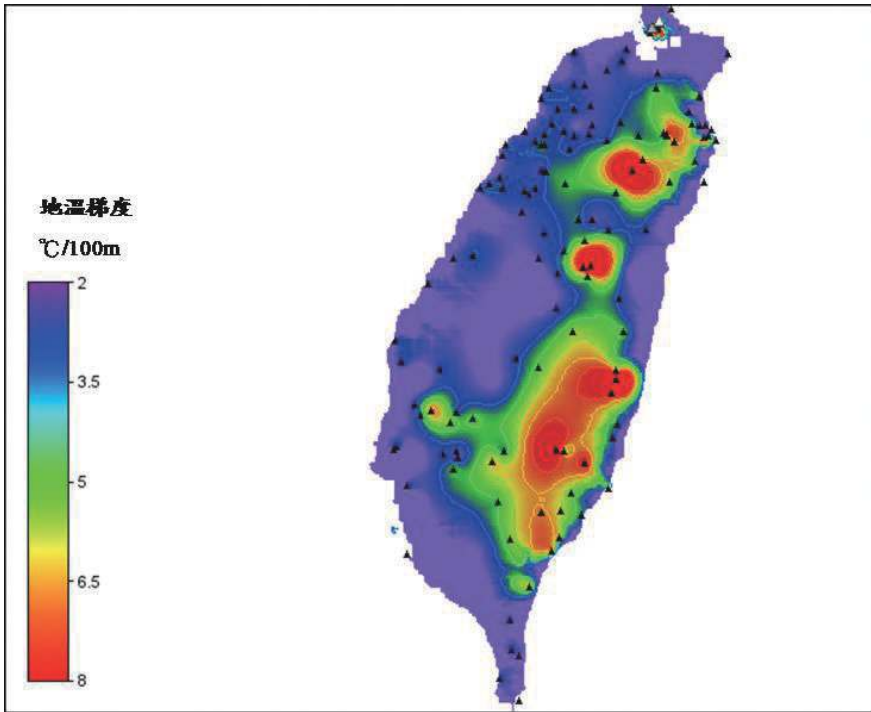


圖7 台灣地區地溫梯度分布圖

(劉佳玫，2011)

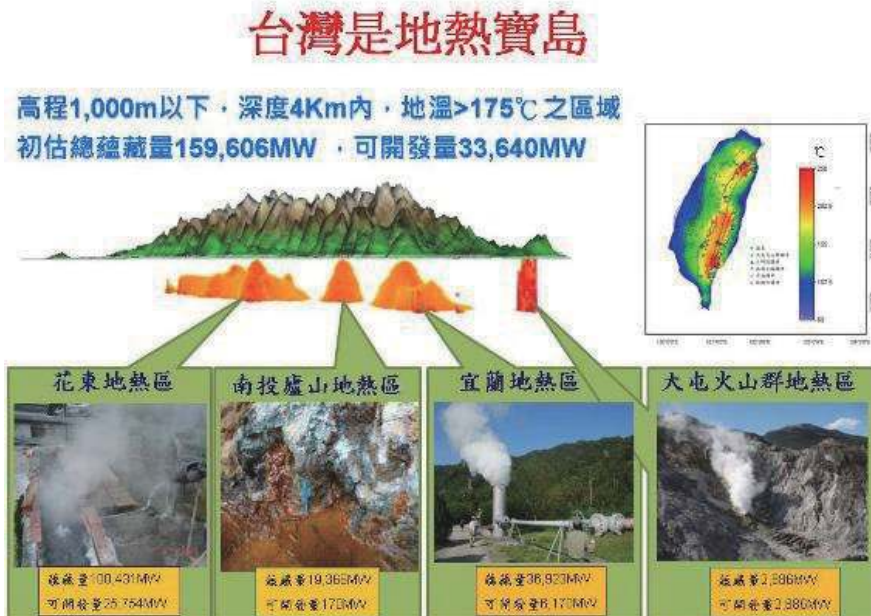


圖8 台灣四個主要地熱區分布圖和地熱蘊藏量和可開發量

目前僅考慮全台法令限制與海拔限制等條件，將可開發情境設定為海拔高程1,000公尺以下，則全台可開發地熱潛在發電容量約為33,640MWe（已扣除法令限制開發區，約佔四大地熱區21.08%），詳細數據如表1所示。

本研究中僅由地溫梯度資料估算宜蘭、大屯火山群、花東地區和南投廬山等地區的地熱蘊藏（皆以潛在發電容量（單位為MWe或GWe）表示），僅表示可能潛在之發電容量，並不代表實際之發電裝置容量（GeothermEX, Inc., 2005）。而實際之可發電裝置容量估算，必需藉由現地詳細地質、地球物理和地球化學等的詳細評估，以及鑽井進行水力抽灌與熱交換等試驗，得到各項工程參數後，精算實際之可裝置發電容量方能得到。另外尚須考量到電廠設置地點、交通等環境與經濟因素。

表1 台灣四大地熱地區深度小於4,000m、地溫超過175℃之地熱原始蘊藏發電容量 (MWe)

地區	涵蓋總面積 (km2)	原始地熱發電容量 (MWe)	所佔比率 (%)	各海拔區間地熱蘊藏發電容量(MWe)				
				天然條件限制開發			天然條件較可開發	
				>2,000m	1,500m 2,000m	1,000m 1,500m	500m 1,000m	<500m
宜蘭地區	532	36,923	23.13%	30,219	13	456	2,100	4,135
大屯火山群地區	88	2,886	1.81%	0	0	0	716	2,170
花東地熱區	5,403	100,431	62.92%	15,900	43,334	15,443	12,880	12,874
南投廬山地熱區	954	19,366	12.13%	10,143	5,194	3,859	170	0
四大高溫地熱區總計 (所佔比率%)	6,977	159,606		56,262 (35.25%)	48,541 (30.41%)	19,758 (12.38%)	15,866 (9.94%)	19,179 (12.02%)
可開發條件 (海拔1,000m以下，扣除位於陽明山公園內法令不可開發約1,405MWe)								
潛在在地熱發電容量(MWe)								33,640

基於台灣有豐富的地熱資源且是乾淨可再生和當作基載的能源，2014年能源國家型科技二期計畫把地熱納入為六個主軸計畫之一，其總目標有六，為(1)現有地熱田的檢討和再評估；(2)精確調查台灣地區的地熱資源特性和潛能；(3)擴展台灣淺層地熱發電廠至150 MWe；(4)研發開採深層地熱的關鍵技術；(5)設立10 MWe深層地熱發電示範電廠；

(6) 技術轉移民間以發展地熱產業。而近程地熱計畫實施策略為在淺層地熱部分：(a) 從事地熱發電可開發量重新評估，並著手淺層地熱區域的開發，以及扶植地熱發電相關產業。(b) 期望在最短的時間內建造台灣第一座地熱發電廠，至2015年時地熱發電裝置容量能達4-5 MWe，減低碳排放量每年約40萬噸。(c) 評估綠島地熱潛能、設立地熱發電廠的可能性和規模大小，以及協助其成為低碳島的政策目標。深層地熱部分：(a) 著重『加強型地熱系統(EGS)』的調查評估全台蘊藏量及可開發量，並進行關鍵技術的開發研究。(b) 將著重於調查資料較為豐富的宜蘭平原地區為目標，逐年進行地質、地球物理及地球化學等基礎調查，以瞭解該地區之地溫梯度分布與地下地質，並完成地熱可發電量的評估報告、並設立一座1 Mwe 的加強型地熱系統的先導發電廠。至2025年對於地熱發電的推動進程(road map)如(圖9)所示。目前的工作重點為宜蘭地區從事深層地熱的開發和技術發展，以及大屯火山群淺層地熱的電廠建造。

四、台灣的地熱展望與建議

承上所述，台灣有豐富的地熱資源，2011年日本東北發生大地震和海嘯引發核電廠事故後，造成台灣社會對於核能發電安全的疑慮，而致核四電廠封存不再興建，且台灣三座運轉中的核電廠已老舊，將陸續於未來十年關閉(核一廠預定於2018-2019；核二廠預定於2021-2023；核三廠預定於2024-2025)。而三座核電廠的裝置發電量約佔台灣總發電量的18.61%(圖10)，未來如何尋求乾淨、穩定的發電種類以補電源缺口，是新政府不得不面臨的問題。以下是筆者對於台灣地熱的了解和現況所提出的淺見供參考及討論。可分為近程(少於5年)和中長程(多於5年)的地熱發展。

(一) 近程地熱發展 (< 5 年)：

1. 發展原民部落地熱產業

溫泉是地熱在地表的徵兆，也是地熱探勘重要的選擇標的。溫泉不僅可用於泡湯，高溫的溫泉還可用於小型地熱電廠發電以供應小區域

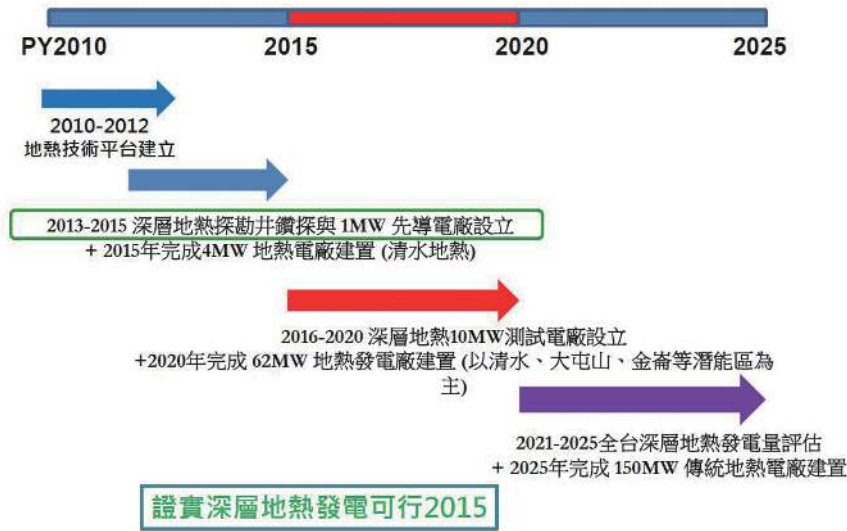


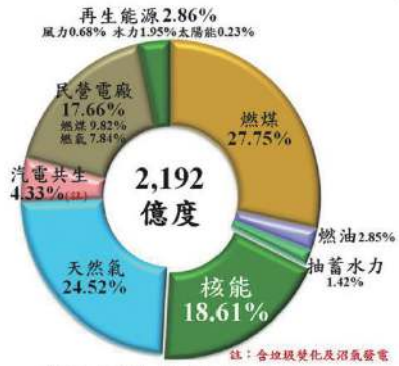
圖9 台灣能源國家型地熱主軸計畫之發電開發推動進程

用電，可穩定供給山區或偏遠地區的用電。一般而言，偏遠山區為輸電網絡的末端，常是風災斷電的首要地區，若能設立自給自足的發電廠，不僅可減少風災斷電的不便和搶修的危險性外，還可節省長距離輸電的能源耗損。另外，小型地熱發電的溫泉溫度常為100℃或以上，此溫度發電後的尾水還有50℃以上，不僅可作為泡湯的溫泉觀光，還可用於魚類或蟹的養殖和溫泉蔬菜的種植等(圖11)。

台灣中央山脈和雪山山脈遍布溫泉，顯示此兩山脈地底下有豐富的地熱，且鄰近溫泉區有相當多的原住民部落分布，是發展原民部落地熱產業的良好地點。在台灣山區有高溫溫泉分布的原民部落區，從事地熱地質的調查和鑽井，尋獲溫度在100-150℃的熱水，建造小型地熱發電廠，自給自足供應原民部落的用電，高溫尾水可供給建造溫泉泡湯休閒場所或觀光旅館，且多餘的尾水還可從事養殖和種植等相關事業的用水，建立原民部落地熱產業。其優點包括發展綠能減低碳排放、節省輸電線路電能耗損、可自給自足穩定供給電能、發展地熱產業提供就業機會等。另外，可建立模組化溫泉地熱發電向國外輸出技術。



103年裝置容量占比圖



103年發電量占比圖

圖10 台灣目前電力裝置容量和發電量所占百分比 (資料來自台灣電力公司, 2013)

2. 淺層地熱區電廠開發(<10 MW)

1960~1970年代，台灣在聯合國的資助下進行廣泛的地熱地質調查和全島淺層地熱的評估，估計地熱發電潛能約有989 MWe (柳志錫等，2012)，如能開發利用，不僅可減少對傳統化石能源的依賴和減少碳排放量，更有益於我國能源應用之多元化與自主性。

表2是台灣在60年代較詳細從事地熱調查、具代表性的地熱區域，每個區域都經過較詳細的地熱潛能評估，顯示這些區域的地熱潛能都超過10MW。另外，經濟部能源局推動和規劃我國再生能源未來裝置容量推動目標如表3。其中，地熱能源到2020年的發電裝置容量需達100 MW。但截至目前為止台灣地熱發電的裝置容量為0，若不盡快投資開發，則

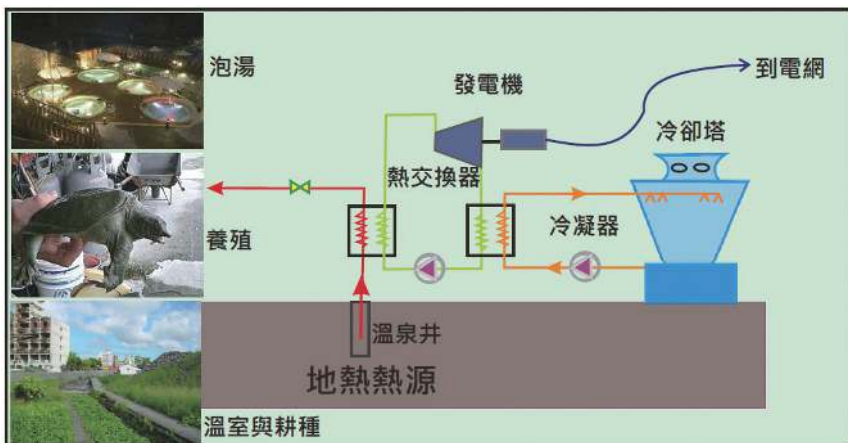


圖11 小型溫泉地熱發電廠和相關產業

2020年要達到地熱發電裝置目標比登天還難。另因台灣地熱發電開發和探勘已停滯約30年了，故建議現階段從事台灣地熱淺層發電開發的規模小於10 MW，以建立本土地熱發電的技術和累積經驗，以因應未來擴大地熱發電規模的技術需求。

表2 台灣重要地熱區的儲集層溫度、蘊藏體積和發電潛能

地區	溫度(C°)	蘊藏體積(km³)	儲集熱能(X10 ¹⁸ J)	發電潛能(GWe)
大屯火山	245	40.0	24.3	514
清水	200	6.0	2.9	62
土場	170	3.0	1.2	26
廬山	180	4.5	1.9	41
知本	170	3.0	1.2	26
金崙	160	6.0	2.3	48

資料來源：工研院整理，2013年12月

表3 經濟部能源局公佈之我國擴大各類型再生能源推廣目標-裝置容量(單位：MW)

能源別	2015年	2020年	2025年	2030年
陸域風力	737	1,200	1,200	1,200
離岸風力	0	520	2,000	4,000
水力	2,089	2,100	2,150	2,200
太陽光電	1,115	3,615	6,200	8,700
地熱能	0	100	150	200
生質能	741	768	813	950
合計	4,682	8,303	12,513	17,250

3. 深層地熱潛能調查

儲存於地殼深處的地熱相當豐富，根據目前的理論估計，蘊藏在地殼10km內的熱能約為 1.3×10^{27} 焦耳(Lund, 2007)，若以2012年全球能源消耗量約 6.0×10^{20} 焦耳/年來計算(BP p. l. c., 2013)，則可供應全球能源使用約217萬年。但對於地殼深處的熱源的開採，需使用加強型地熱發電系統(EGS)的技術。截至目前為止雖有EGS的地熱電廠在運作，但因引發地震和注水回收率低的因素，其規模較小和電廠設置個數有限。故美國能源部地熱技術辦公室(DOE-GTO)提出知FORGE計畫和瑞士Basel-EGS計畫，都在整合和提升高溫水平鑽井和液裂技術以突破EGS目前的困境。台灣的熱發展技術的資源有限，故建議在EGS大規模地熱電廠開發技術還未成熟之際，著重於台灣地區深層地熱蘊藏量和廠址地下地質的精確調查，以因應一旦國際間EGS技術成熟之際，可立即投入開

發地熱能發電供國內使用。若等EGS技術成熟再投入深層地熱場址和可開發量的調查研究，以及深層地熱電廠的建造，則不僅曠日廢時，還影響我國能源自主和國家安全。另外，地質法中規定主管機關經濟部中央地質調查所需對於國土內的地質和資源從事詳細的調查，且每五年需重新檢討，故建議中央地質調查所應積極的投入台灣地區地熱資源的地質調查。

4. 制冷減低熱島效應 - 台北

都市環境由於綠地不足、地表不透水化、人工發散熱大、地表高蓄熱化，使都市有如一座發熱的島嶼，其發熱量在都心區域產生上昇氣流，再由四周郊區留入冷流補充氣流，使都心區呈現日漸高溫化的現象，稱為都市的「熱島效應 (heat island effect)」。日本東京大都會地區過去30年因熱島效應夏季溫度平均比過去上升3-5度以上，為了減少都市熱島效應以減少能源用於冷卻的消耗，2015年提出利用地基型熱泵 (ground base heat pump) (圖12) 在地底下一定的深度，尋找溫度介於18-20℃的恆溫層，然後建造制冷的冷卻系統把地表上的熱能，藉由地下水帶走以降低東京市的溫度。

依據中研院環變中心的研究分析 (Liu et al., 2009)，台北自1960年以後，每年出現36度以上極端高溫天氣逐年增加；1960年每年4到5天，現在每年10天，50年來增加1倍。研究團隊認為，這種現象並非受到全球暖化影響，而是跟都市熱島效應有關。若能學習日本東京市採用地基型熱泵制冷以減低台北市的熱島效應，還能節省能源和降低夏季用電高峰。

(二) 中長程地熱發展 (> 5 年)

1. 擴大淺層地熱電廠規模 (> 10 MW)

如前所述，近程地熱發展中期盼淺層地熱區能在5年內有小於10 MW電廠開發出來，至2020年最少有100 MW的地熱裝置容量建造並發電。對於中長程地熱發展在淺層地熱區的建議，是擴大地熱發電的規模至大於10 MW的電廠，至2025年最少有150 MW、2030年最少有200 MW的地熱裝置容量建造並發電，甚至超過目前能源局的規劃目標。

2. 深層地熱電廠的建造

如前所述，近程地熱發展中對於深層地熱區的建議，是委由經濟部中央地質調查所從事台灣地區深層地熱蘊藏量和廠址地質的精確調查。對於中長程地熱發展在深層地熱區的建議，是開始建造EGS的地熱電廠，規模由小至大，且發展地熱深鑽和高溫水平鑽探能力、大規模液水裂技術的建立、以及國外交流並引進技術，期盼至2050年以後，台灣

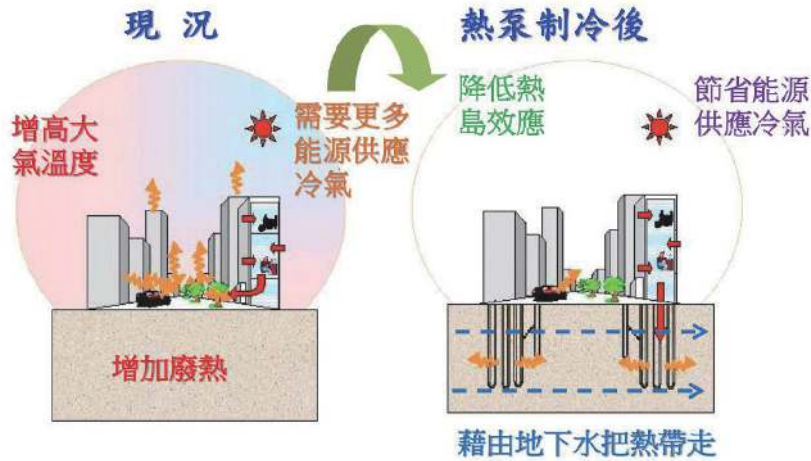


圖12 都市熱島效應的發生和利用地基型熱泵冷卻圖

的地熱電廠有2,000 MW以上的地熱裝置容量建造並發電，發展如紐西蘭所提的New Zealand Geopower 10,000MW，而提出Taiwan Geopower 2,000MW地熱裝置容量建造並發電。

五、台灣地熱的發展困境

台灣位於地質板塊邊緣有很好的地熱資源，且是全世界第十四個設立地熱發電廠的國家，但因種種因素以至於截至目前為止並未有任何的商業地熱電廠的建造與運轉。依筆者的觀察與了解，主要有以下5種因素造成台灣地熱發展的困境：

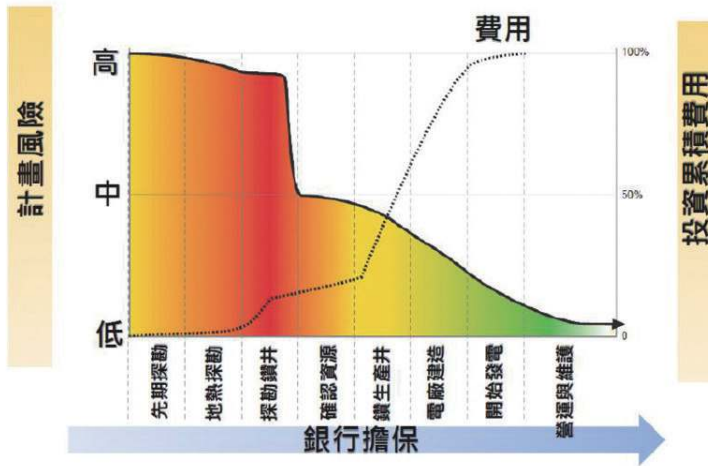


圖13 地熱開發計畫風險和投資累積費用圖

(一) 政府的獎勵措施不足

地熱開發投資的風險極高，尤其是在初期階段(圖13)，故目前地熱開發使用較高的國家如菲律賓、印尼和日本等，都在初期採獎勵和立法保障的措施。例如，日本在2011年東北大地震和海嘯引發福島核事故後，大量的獎勵開發地熱發電，作法包括：1. 補助地熱業者50%的探勘鑽井費用；2. 100%補助私人地熱發電廠舉辦各種公共說明會以促成地熱電廠的建造；3. 大量投資R&D在EGS的探勘與技術發展費用；4. 實施躉購費率(Feed in Tariff (FIT))高價收購地熱電廠所發的電，如電廠規模大於15 MW每度電價為27.3日圓(相當於台幣8元)且保證收購15年；如電廠規模小於15 MW每度電價為42日圓(相當於台幣12.3元)且保證收購15年等。另外也修改相關法令可在國家公園內從事地熱探勘和建造電廠。

台灣對於再生能源的獎勵也採取躉購費率(FIT)保障收購電價，目前地熱發電的FIT是一度4.9428元、獎勵20年。此一制度已實施多年，但截至目前為止還未有任何地熱電廠的建造，顯示FIT價錢對於在台灣的地熱發電市場無任何的誘因，應大幅提高地熱發電的費率，以獎勵有興趣的業者投入，讓地熱電廠能快速的在台灣落地生根，等到市場成熟後再回歸正常的費率。另外，政府也要大幅的投資地熱探勘和鑽井，以降低業者在初期投資的風險，然後用稅收以回補所投入的資金。

(二)法令問題

按相關地熱發電的法規主要涉及1. 電業與再生能源、2. 土地使用、3. 環境保護、與4. 地熱取得等四領域。

地熱資源大都分布在較偏遠的山區，發完電後需有完善的電網供併聯輸出。但併聯的成本高且技術相關規範被台電所掌握，因為併聯是由台電所訂，對再生能源業者相當不合理，尤其是小規模私人發電將很難推動。故須由政府拿出魄力修改電業法，使之對小型再生能源業者有合理的併聯系統。

因地熱資源大都分布於山區等原住民保留區，或是森林保育區的土地。而對於這些地區只允許太陽能發電和風力發電等綠色能源進入開發使用，但卻不允許使用土地面積更小的地熱發電進入，有點不合理。故應修改相關土地使用規範，允許地熱業者進入上述土地管制區域從事開發。另外也需學習日本的做法，檢討國家公園相關規定，允許地熱業者進入國家公園內開發地熱。

地熱開發利用是取深層高溫的地熱水，對淺層地下水的影響幾乎可忽略，且對周遭環境的影響也小，尤其小規模的開發行為。目前德國和日本對於地熱的開發採取無須環評的作法。因地熱電廠本身乃占用一定空間之設施，故環保團體仍強烈的要求辦理環評之必要性。因台灣過去未有地熱電廠的建造，對於如何從事地熱開發的環評，還未有一定的步驟和相關制度，以至於對於有興趣投入地熱電廠建造的業者造成一定的困擾。故建議環保署應快速建立相關地熱開發的環評程序，或是在地熱豐富的區域劃設地熱園區並進行政策環評，讓業者有遵循的依據。另外，因小規模地熱電廠對環境的衝擊相當小、且是屬於乾淨無污染的再生能源，可否考慮類似電業法中對於水力發電在20 MW內(建議地熱電廠為5 MW)不用環評，也適用於地熱發電。

目前地熱發電會牽涉到溫泉使用費收取的問題，依目前溫泉法的規定取用一度溫泉水須收取9元的溫泉使用費，地熱發電需使用大量的熱水，若比照溫泉法收取溫泉使用費，則將扼殺開發地熱發電的可能性。雖然目前水利署對於取用地熱水用於發電有減免機制，但還是會造

成業者的卻步，故建議把地熱回歸為一種礦業資源，依據礦權的作法來規範地熱的開發。

六、結論與建議

地熱為乾淨且可再生的能源，台灣位於環太平洋火環地熱蘊藏豐富，若能大量開發使用，不僅可節省大量的能源進口費用，也可提高能源自主和國家安全。故建議新政府應該積極投入地熱的探勘和開發。具體的作法在地熱資源開發方面：1. 發展原住民部落的地熱產業；2. 短期5年內加速開發及建造淺層地熱電廠；3. 政府應投入資源精確調查台灣深層地熱的儲藏量和建造小型示範電廠；4. 推動地基型熱泵制冷以減低台北都會區的熱島效應；5. 開發深層和水平高溫鑽井和液裂技術等。在地熱開發獎勵和修法方面：1. 政策獎勵並引導台灣地熱的快速發展；2. 修法使地熱資源回歸礦業法來規範；3. 制定適宜的法律，創造有利於地熱開發的環境；4. 設立地熱園區從事政策環評和5 MW規模內的地熱電廠不用環評；5. 修改電業法改善地熱輸電線路的成本。

參考文獻

1. Aduinet, P. (2014), Global Geothermal Development Plan, Clean Energy Program Team Leader, ESMAP – World Bank, http://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/ESMAP_Paris_Geothermal_Energy_KEF_Optimized.pdf
2. BP p.l.c, (2013) , BP Statistical Review of World Energy June 2013, p.45.
3. DOE EERE (2012), Binary Cycle Power Plant http://en.openei.org/wiki/Binary_Cycle_Power_Plant
4. Duchane, D. and Brown, D.W. (2002) Hot dry rock (HDR) geothermal energy research and development at Fenton Hill, New Mexico: GHC Bulletin Dec. 2002, pp13-319.

5. GeothermEX, Inc., (2005) Assessment of energy reserves and costs of geothermal resources in Hawaii for The State of Hawaii, Department of Business, Economics Development and Tourism, Honolulu, Hawaii, Richmond, California.
6. FORGE (2014) <http://energy.gov/eere/forge/forge-home>.
7. IEA (2007) Key World Energy Statistics 2007: http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2007/key_stats_2007.pdf
8. Liu, s. C. C. Fu, C.-J. Shiu, J.-P. Chen, and F. Wu, (2009) Temperature dependence of global precipitation extremes, *Geophysical Research Letters*, 36, L17702, doi:10.1029/2009GL040218.
9. Lund, J. W., “Characteristics, Development and utilization of geothermal resources,” *Geo-Heat Centre Quarterly Bulletin*, Vol. 28, No. 2, pp. 1-9, 2007.
10. Meier, P.M., Rodríguez, A.A. and Bethmann, F. (2015) Lessons Learned from Basel: New EGS Projects in Switzerland Using Multistage Stimulation and a Probabilistic Traffic Light System for the Reduction of Seismic Risk: *Proceedings World Geothermal Congress 2015 Melbourne, Australia*, 19-25.
11. MIT (2006) The Future of Geothermal Energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century: <http://geothermal.inel.gov> and http://www1.eere.energy.gov/geothermal/egs_technology.html
12. OECD/IEA (2011), *Technology Roadmap- Geothermal Heat and Power*.
13. Sclater, J. G., Jaupart, C. and Galson, D. (1980) The heat flow through oceanic and continental crust and the heat loss of the Earth, *Rev. Geophys.*, 18(1), 269–311.
14. Tester, J.W., Brown, D.W. and Potter, R.M.(1989) —Hot Dry Rock Geothermal Energy – A New Energy Agenda for the 21th Century: Los Alamos National Laboratory Report LA-11514-MS.
15. Wyss, R., and Rybach, L., “Rybach, Developing Deep Geothermal Resources in Switzerland,” *Proceedings of the 2010 World Geothermal Congress, Bali, Indonesia*, p.4, 2010.

16. 劉佳玫(2011)用二氧化矽地質溫度計估算台灣熱流及探討異常熱流之控制因素: 國立台灣大學地質科學研究所博士論文, 共134 頁。
17. 柳志錫、郭泰融、李清瑞、李伯亨、韓吟龍、劉力維、王俊堯, 2012, 「地熱發電發展現況與未來方向」, 第八十五卷, 第四期, 頁 114-129。