

我國地熱能環境效益潛能及近年國際成功策略比較

王守誠^{1*} 陳永松² 張忠誠³ 李篤華⁴ 莊慶達⁵ 李昭興⁶

摘要

地熱能是再生能源中的基載電力(Base-load power)選項之一，目前普遍型地熱系統(Conventional Geothermal System, CGS)¹對環境生態影響(Ecosystem impacts)及人體健康影響(Human health impacts)是所有綠色能源中最低者，並兼具分散式發電(Distributed generation)及基載電力的特性，是國內「能源轉型」極佳的替代能源選項。初步評估臺灣的地質條件，僅有北部大屯火山群具有容易探勘的火山型地熱(Volcanic field type)，在其他地質條件的地熱區則須引進適當探勘技術降低風險，國內在技術經驗階段，可從國際成功經驗學習有效的步驟策略。在2010到2015年間，全球地熱發電有快速的成長，有多國5年內成長超過300 MWe，表示我國規劃2025年成長至600 MWe為可行目標。德國至今發展地熱發電近10年，無任何計畫造成環境或法律爭議，因此地熱發電計畫未進行環境影響評估。以國內艱鉅的「非核家園」目標而言，應盡早與國際資訊接軌擬訂可行策略，例如參考先進國家優先建立科學管理專法、公開地熱探勘資料庫、躉售電價多元設計等規範。短期而言可吸引國際級專業團隊與國內企業合作發展地熱發電產業，活絡外商投資及能源產業發展，以降低環境風險較高的進口能源使用比例；長期而言可促進臺灣社會資本投入「低碳經濟」的友善環境建設，以地熱多元利用的「循環經濟」方式降低氣候變遷調適的社會成本。

關鍵詞：普遍型地熱系統、能源轉型、非核家園、推動策略、環境效益

1. 地熱能的特點及優勢

1.1 越來越快速的發展腳步

2015年底巴黎舉行聯合國《氣候變化綱要公約》第21屆締約國大會(UNFCCC COP21)，國際再生能源總署(IRENA, International

Renewable Energy Agency)推動38個國家與20個業界夥伴成立「全球地熱聯盟」(Global Geothermal Alliance)，目標在2030年前達成全球地熱裝置發電容量增加5倍，由目前的13 GWe增加至超過65 Gwe。原先國際地熱發電計畫的預定裝置容量共2,277.5 MWe，但在2016年的「地熱能最新國際市場報告」中(GEA,

¹ 國立臺灣海洋大學應用地球科學所 博士生

² 國立宜蘭大學生物技術與動物科學系 助理教授

³ 國立臺灣海洋大學電機工程學系教授暨海洋能源與政策研究中心 主任

⁴ 國立臺灣海洋大學海洋觀光管理系暨應用經濟研究所 合聘教授

⁵ 國立臺灣海洋大學海洋事務與資源管理研究所 榮譽教授

⁶ 國立臺灣海洋大學應用地球科學所 榮譽教授

*通訊作者, 電話: 02-24631811, E-mail: singerproncku@gmail.com

收到日期: 2016年10月03日

修正日期: 2016年10月20日

接受日期: 2016年11月11日

¹ 普遍型地熱系統(CGS, Conventional Geothermal System)是指目前國際公認已成熟運轉的地熱資源開發系統，利用天然裂隙、生產井及回注井組成地熱系統，與EGS (Enhanced Geothermal System)不同之處在於不需要額外製造人工裂隙。在CGS成熟之前，1970-1980年代的地熱電廠規劃，是利用天然裂隙、天然入滲補注、生產井形成地熱系統，例如清水地熱電廠、坊地熱電廠(泰國)、羊八井地熱電廠(中國西藏)，常常受限於滲透補注的不足而難以達到經濟規模，因此目前新地熱電廠均以CGS為主，少部份地質條件缺乏天然裂隙則以EGS開發。

Geothermal Energy Association, 2016)，2016年3月至9月這半年，全球有23個國家提出共44個地熱發電計畫，規劃裝置容量達1,562.5 MWe，包含我國科技部在宜蘭三星的地熱發電計畫亦列入其中。近半年提出的地熱發電規劃較原規劃成長2倍以上，顯示國際合作推動地熱發電的確越來越快速。其中土耳其及肯亞是成長快速的適當範例，土耳其2010~2015年地熱發電容量從91 MWe成長至397 MWe，2023年要達到1,500 MWe，也就是8年內要增加約1,100 MWe；肯亞2010~2015年地熱發電容量從202 MWe成長至594 MWe地熱發電容量，在聯合國及世界銀行的協助下，政府宣示2030年要達到5,000 MWe，也就是15年內要增加約4,600 MWe，從表1的比較可見未來地熱能發展的速度將越來越快。

相對於我國新政府宣示2025年達到600 MWe地熱發電目標，或經濟部規劃2025年達200 MWe地熱發電目標而言，國際目前成功的推動經驗都顯示我國推動目標具有合理性。

1.2 多元化的低碳產業鏈結

地熱能是儲存在地球內部的熱能，全球可開發的地熱能可達到40,000 GW規模，相對全球能源需求量約為15,000 GW的3倍。地球內部中有99%體積的溫度超過攝氏1,000°C，只有不到0.1%的體積是小於100°C，但是在地表廣布的熱能卻只有偏低的能量密度(約0.1 W/m²，太陽輻射能卻可達300~500 W/m²)，因此可供利用的地熱能只有出現在地質活動的區域，而不易在一般地表取得。地熱資源是指儲存在地球內部岩石、氣相或液相流體、超臨界流體的熱能，這類資源可以直接用於溫泉、暖房、溫室種植、食品加工等，但大部分地熱能用於地熱發電等非直接利用方式。

1.3 良好的環境及健康效益

在MIT能源倡議中心2006年出版的《The Future of Geothermal Energy》(地熱能的未來)中，將地熱發電與核能、火力發電等「骯髒能源」做比較，在排放的汙染氣體及使用土地等

表1 世界地熱發電規模成長比較(資料修改自Bertani, 2015)

COUNTRY	Installed in 2010/MWe	Increase % past	Installed in 2015/MWe	Increase % future	Forecast for 2020/MWe
AUSTRALIA	0.1	1000%	1.1	1718%	20
AUSTRIA	1.4	-14%	1.2	400%	6
CHINA	24	13%	27	270%	100
COSTA RICA	166	25%	207	26%	260
El SALVADOR	204	0%	204	47%	300
ETHIOPIA	7.3	0%	7.3	585%	50
FRANCE	16	0%	16	150%	40
GERMANY	6.6	309%	27	122%	60
GUATEMALA	52	0%	52	169%	140
ICELAND	575	16%	665	95%	1,300
INDONESIA	1,197	12%	1,340	161%	3,500
ITALY	843	9%	916	9%	1,000
JAPAN	536	-3%	519	10%	570
KENYA	202	194%	594	153%	1,500
MEXICO	958	6%	1,017	38%	1,400
NEW ZEALAND	762	32%	1,005	34%	1,350
NICARAGUA	88	81%	159	26%	200
PAPUA-NEW GUINEA	56	-11%	50	40%	70
PHILIPPINES	1,904	-2%	1,870	34%	2,500
PORTUGAL	29	0%	29	107%	60
RUSSIA	82	0%	82	132%	190
THAILAND	0.3	0%	0.3	233%	1
TURKEY	91	336%	397	51%	600
USA	3,098	11%	3,450	62%	5,600

資料上，地熱能源是極低汙染、極高土地使用效益的基載能源。聯合國環境規劃署(UNEP)在2015年出版的《GREEN ENERGY CHOICES》(綠色能源選擇)中指出，地熱發電對於生態

環境衝擊(ecosystem impacts)及人體健康衝擊(human health impacts)均是所有能源中最低的(圖1及圖2)。

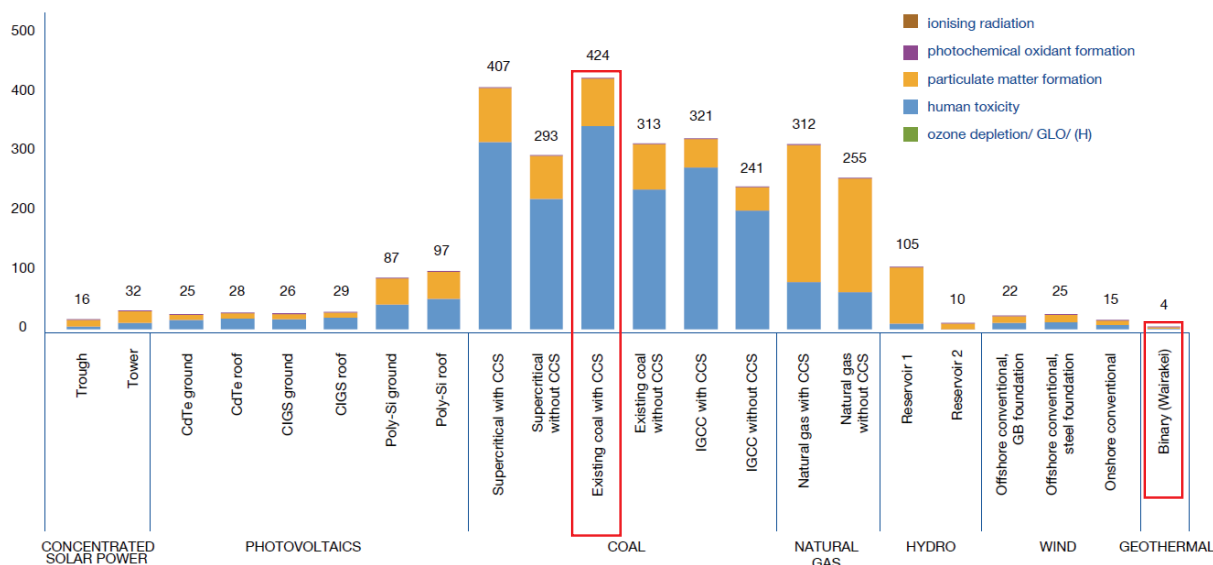


圖1 各種發電方式對人體健康影響的比較(主要根據五種參數，最主要是懸浮微粒(particulate matter)及對人體毒性(human toxicity)，地熱發電位於最右欄，為所有發電技術中最低，最高為現有燃煤電廠加裝碳捕捉設備(Existing coal with CCS, Carbon Capture and Storage)，兩者相差106倍)

資料來源：UNEP, 2015

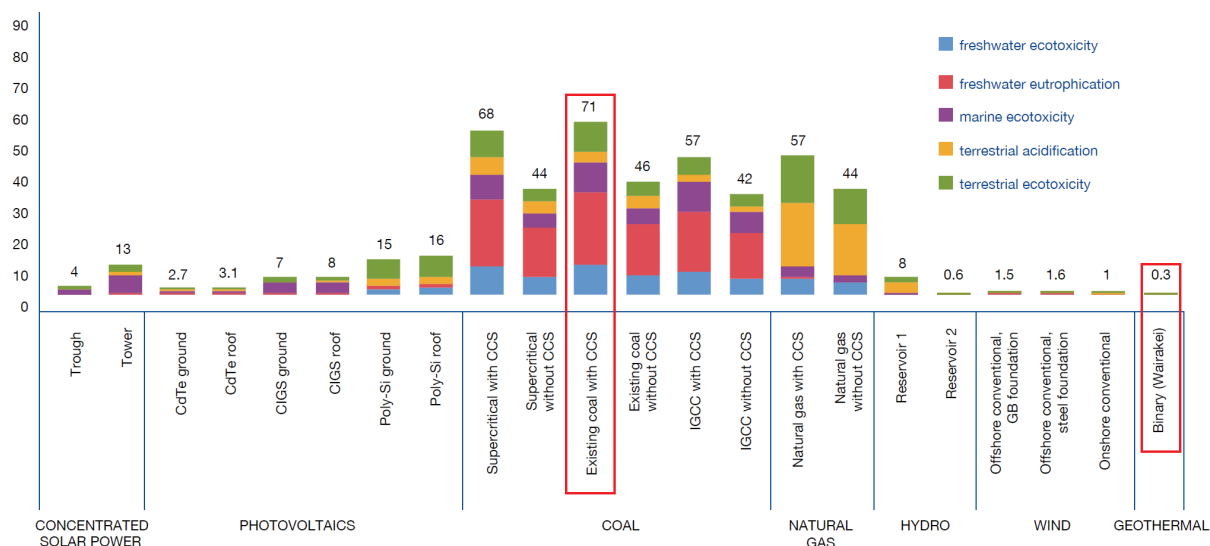


圖2 各種發電方式對環境生態影響的比較(主要根據五種參數，最主要是淡水生態毒性(freshwater ecotoxicity)、淡水優養化(freshwater eutrophication)、海洋生態毒性(marine ecotoxicity)、陸域土壤酸化(terrestrial acidification)、陸域生態毒性(terrestrial ecotoxicity)，地熱發電位於最右欄，為所有發電技術中最低，最高為現有燃煤電廠加裝碳捕捉設備(Existing coal with CCS)，兩者相差237倍)

資料來源：UNEP, 2015

1.4 相關環境影響參數

另由表2可瞭解地熱發電對環境影響的相關參數及說明，綜合目前地熱能使用現況及分析(表3)，顯示地熱發電對環境的低衝擊性是建立在成熟的技術，可因應不同條件的地質環境設計適當的管理程序。德國從2007年發展地熱發電至今已有42 MWe，尚未針對地熱開採及發電計畫進行環境影響評估，主要原因是地熱資源利用並未顯現特殊環境衝擊，廢熱水回注及水裂工法尚無重大環境衝擊事件發生，也無廢滷水排放的法律爭議(簡慧貞等，2016)，皆

為地熱發電對於環境影響極微的證據。參考郭佳韋(2016)分析日本促進地熱發電的過程，短期內我國應適度放寬國家公園及保護區地熱開發限制，對自然景觀影響輕微的小規模開發或是從保護區外鑽斜井，可以個案審查允許。同時除地質敏感區外，簡化或免除小規模地熱發電地環評程序，以免冗長的審核時程延誤發展，實施標準上可仿效日本10 MWe以下地熱發電廠不須執行環評的做法。此外，德國及日本之小規模地熱電廠常位於住宅區，提供就近的基載電力，並克服土地利用及噪音問題。住宅區之再生水及回收水也可做為地熱回注使用及

表2 地熱能對環境影響的各項參數(修改自UNEP, 2015)

項目	說明
土地利用	土地利用的程度差異為200-30,000 m ² /MW (每百萬瓦所需平方公尺)，相當於0.04-6 m ² a/MWh。
地質災害	地熱能生產牽涉到大區域或局部下深層及淺層範圍的操作管理，地質流體或蒸氣被抽取到地表及循環至地底。岩體崩落、地表沉降、裂隙發育、天然地震的發生或頻率改變可能與地熱發電廠有關。
噪音	較高的噪音程度與鑽井及產能測試有關。
廢熱效應	以廢熱形式消失的能量大約是電能生產的4-10倍，較同規模化石燃料電廠稍高。
大氣排放	地質流體攜帶的成分可能會對一般環境具有毒性，可能排放到大氣的污染物有硫化氫、二氧化碳、甲烷，這些氣體相對於可凝結於渦輪機出口端的蒸汽而言，屬於不會凝結的不凝結氣體(NCG)，主要是由閃發式(flash-steam)或乾蒸汽(dry-steam)電廠排放。此外微量的汞、氨氣、氫氣、硼也可能從地熱流體中分離排放到大氣。
固體廢棄物及廢水排放	以液體為主的高溫地熱區可能造成大量的地熱流體浪費；蒸汽排放的關鍵污染物質，除了液體溶解的汞、氨氣、氫氣、硼等成分外，也有金屬元素如砷、鉛、鎘、鐵、鋅、銻、鋰、鉬、鋁等。
用水程度	地熱能開發及發電過程會廣泛使用水，特別在鑽井工程、冷卻系統及蒸汽製造的輔助設備，冷卻系統的用水量與使用的技術有關；空氣冷卻系統可使用非常少的冷卻水，但效率較差，使用的能源也較多。

表3 地熱能對環境影響的分析結論(修改自UNEP, 2015)

氣候影響	人體健康	生態健全	資源使用
<ul style="list-style-type: none"> ● 低化石來源溫室氣體(+/-) ● 部分情況具有地質來源溫室氣體(=+) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 部分地點有地質流體造成的空氣及水污染(=-) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 水域棲息地改變或污染(+=) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 冷卻水使用量大(+=)
標示			
符標一	(+)各方面研究成果一致性高	(=)中等的一致性	(-)較低的一致性
符標二	(+)有大量案例	(=)中等的案例	(-)有限的案例

冷卻之用，大幅節省水資源。

2. 與環境共融的地熱電廠規劃

2.1 達到環境共融的可行技術

固然解決地熱利用衍生的環境問題需要先進科技輔助，但環境共融是地熱電廠永續發展的關鍵，以下為相關實例。菲律賓Upper Mahiao使用蒸汽迴圈與雙迴圈聯合125 MWe地熱電廠的設計，為使整體電廠融合於環境，採用許多先進技術，例如系統維持地熱流體壓力高於大氣壓力，不必使用真空泵和抽氣器引出不凝氣體，避免排放不凝結氣體排放到大氣；使用空氣凝汽器，使發電設備的安裝高度降低，不必另外消耗冷卻水，亦不必使用化學藥物；所有用過的地熱流體全部回灌入地底。此外，在外觀設計上，義大利Valle Secolo地熱電廠以改善建築外形及隱蔽式輸送管，貼近鄰近鄉村環境的建築風格。

2.2 充分利用的最佳模式

地熱能充分利用的最佳方式是綜合利用加上廢水回灌，主要作法可根據地熱流體的焓值和溫度，把發電結合供暖、乾燥、溫室、沐浴及水產養殖等加熱需求組合起來，可將排放的廢熱減至最小(王守誠等，2013)；根據聯合國《糧食和農業領域地熱能的利用》的報告，在一些發展中經濟體，多達一半的糧食損失發生在收穫後階段，部分原因在於缺乏獲取能源的經濟能力，從而無法對糧食進行加工。這種情況使得利用地熱能進行糧食烘乾、奶類的巴氏殺菌以及產品消毒等，對發展中國家來說特別有吸引力。通過促進糧食加工，有助於增強發展中經濟體的糧食安全。地熱能還可作為溫室、土壤和養殖用水的主要加熱來源。溫室使用地熱供暖能夠減少真菌感染，並降低燃料成本高達80%，有助於節省附加產業的營運成本。

目前多數地熱田把利用後的餘熱水(分離後濃度較高的地熱流體和蒸汽凝結水)經過處理後回注至熱儲集層，使廢水和地表環境隔絕，阻止對地表植物、土壤和水體產生水質污染和熱污染。餘水回灌措施也解決地面沉降和水位下降等現象。水位下降會造成不同含水層的水質混合，改變淺層地下水的微量成分，影響灌溉引用的地下水資源。火山型地熱更富含重金屬元素，任意排放餘熱水會造成環境汙染，現行作法是將富含重金屬礦物質的餘熱水回注至儲集層，即可避免水汙染及熱汙染。地熱發電抽取過量熱水可能會引起地表水沿破碎帶快速入滲，造成地熱流體的溫度和化學成分出現變化，以冰島Hrisesey地熱田5號生產井為例，由於地表冷水混入使得溫度下降導致碳酸鈣高度過飽和而造成結垢，目前已可以透過地熱概念模型(Geothermal Conceptual Model)預防類似情況發生。

2.3 汙染物質蒐集及利用

對於地熱流體所含氣體汙染物質，主要為二氧化碳(CO_2)及硫化氫(H_2S)等不凝結氣體，已有多種脫除科技，過去大多採用Stretford法(又稱為蒽醌二磺酸鈉法或ADA法)把 H_2S 轉換為元素硫產品。美國CAI Energy的COSO地熱電站在1994年裝備了LO-CAT系統達到硫化氫排放量高標準管理，並且生產農用級硫磺粉，脫硫相關技術在化工業仍不斷大幅改良進步。受到關注的二氧化碳可採用物理吸收和化學吸收兩種技術去除，去除硫化氫並純化後的二氧化碳可以代替工業級二氧化碳，用於提高溫室內的二氧化碳濃度，以刺激溫室內的作物增產；紐西蘭Kawerau地熱電廠是一座100 MWe地熱電廠(Horie, 2010)，曾設置總面積5,000平方公尺的地熱溫室，將地熱流體分離出來的二氧化碳用於提高溫室彩椒產量。以上會排放二氧化碳的地熱電廠都是利用閃發蒸汽直接推動渦輪機，以冰島最大的303 MWe Hellisheiði地熱電廠而言，二氧化碳排放量只有同規模燃煤電廠

的5%，且成為第一個試驗成功具有商業化條件的二氧化碳捕捉回注(CCS)廠址(Rosenbauer, 2012)；而使用有機朗肯循環(Organic Rankine Cycle)的雙循環(Binary system)地熱電廠則幾乎不會排放二氧化碳，與水力發電相近(圖3)。

對於地熱流體所含的重金屬汙染物質，美國加州Salton Sea地熱電廠在2008年裝置一套由高含鹽地熱流體純化鋅元素的試驗設備(FC-RC)，也可設計純化其他重金屬元素；紐西蘭Wairakei地熱電廠從餘熱廢水試驗純化鋰元素(Lithium)的電解反應器系統(PCCell)，評估每小時可生產250公克的鋰(Mroczek *et al.*, 2015)，此類火山型地熱擁有豐富的蘊藏，個別化設計的操作單元雖然增加地熱電廠的建廠成本，但可大幅降低對環境的影響及增進利用效率。

地熱直接利用可提升附加產業的能源使用效率，降低排放汙染物質及溫室氣體排放量，因此可提供轉型為低碳經濟及循環經濟的能源條件。

3. 地熱發電推動策略成功關鍵

豐富的地熱資源是發展地熱發電的首要條

件，根據我國科技部國家能源型計畫第一期成果，臺灣地熱潛能在地底4,000公尺可開發的規模可達159.6 GWe，集中於宜蘭地區、大屯火山群、花東地熱區、廬山地熱區等四大潛力區域，根據Moeck (2014)的分類方式，僅有大屯火山群屬於火山型地熱(Volcanic field type)，曾在馬槽有鑽探至293°C的紀錄，屬於高溫地熱(230~300°C)，每口生產井甚至可達25 MWe的發電產能其餘花東地熱區與廬山地熱都是屬於造山帶地區的深層岩型地熱(Plutonic type)，過去鑽探紀錄曾有195~214°C高溫的紀錄，屬於中溫地熱(190~230°C)，每口生產井具有3~12 MWe的發電產能，宜蘭平原屬於構造拉張盆地(Pull-apart basin)的伸張區域型地熱(Extensional domain type)是目前科技部主要的研究地區，鄰近的清水地熱及土場曾有223°C高溫的紀錄，以上的鑽探成果資料一般人難以查詢，資料來源為「臺灣石油探勘紀要再續編」一書。美國地質調查所(USGS)曾估算美國的地熱發電潛力(Williams *et al.*, 2008)，已探勘加上未探勘地熱區及低滲透率地熱區共有556.9 GWe發電潛能。美國是全世界地熱發電裝置容量最高的國家，2010-2015年地熱發電裝置容量從3,098 MWe

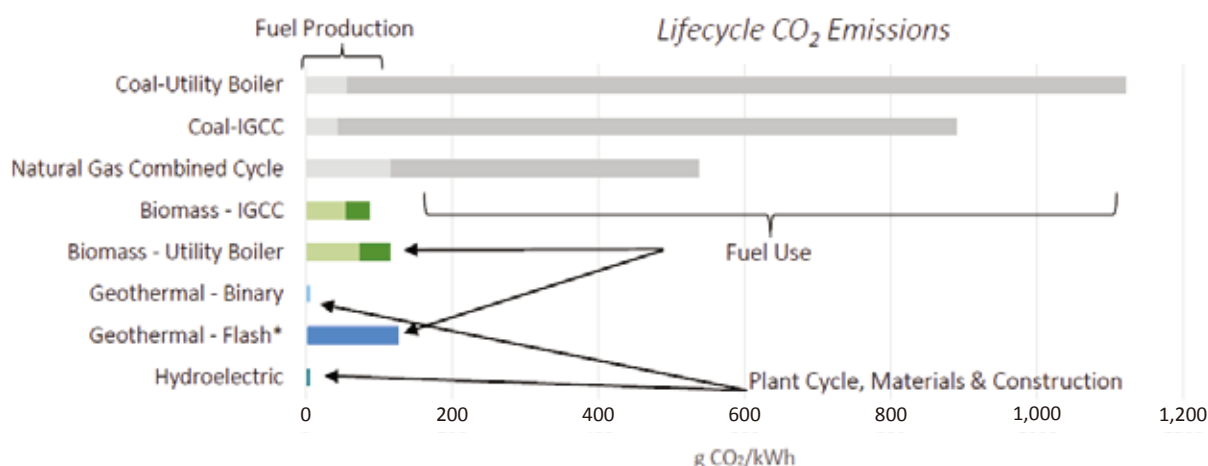


圖3 基載型再生能源與火力電廠碳排放比較表

灰色部分表示三種石化燃料發電類型，在燃料生產及使用階段分別排放的二氧化碳；綠色表示二種生質燃料發電類型，亦分為燃料生產及使用階段；地熱發電分為雙循環(Binary)及閃發(Flash)兩種發電類型，雙循環與水力發電的碳排放主要是電廠興建使用的材料、施工及維護，閃發發電的碳排放來自於地熱流體所含的二氧化碳。

資料來源：Sullivan & Wang, 2013

提升到3,450 MWe，臺灣的陸域面積為美國的0.8%，但臺灣的地熱潛力可達美國的28.6%，大約為159.6 GWe (Yang *et al.*, 2015)。有朝一日，臺灣努力發展綠色能源，可以達到自足的佳境。

各國對於快速發展的推動策略雖然不同，但主要模式都是以合理利潤來吸引國際團隊，並且扶植在地團隊的專業化，縮短廠址探勘及開發的時程，已由過去10年左右(莊怡芳等，2013)縮短至2~3年，對於產業降低開發成本形成正向循環。以下是三個推動策略主軸：

策略一、管理法規科學化

地熱開發的基礎是符合科學的資源管理，地熱資源管理與地球科學密切相關，包含地球化學、地球物理學、水文地質學、構造地質學、岩石礦物學等，因此地熱資源管理法規須根據地球科學研究為基礎，確保地熱資源的永續利用。

現今以地熱發電為主要電力的國家，如紐西蘭、冰島、菲律賓、美國等都是在地熱專法為地熱發展的基礎，例如紐西蘭第一座地熱電廠始於1958年，1961年開始即以《1961年地熱能源規定》專法管理，後續由《1991年資源管理法》規範地熱的環境影響要求，這些積極管理措施使得紐西蘭穩定開發再生能源，目前最高有80.8%的能源為再生能源，地熱發電佔全國能源比重從2007年的14%增加到2015年的22% (MBIE, Ministry of Business, Innovation & Employment, 2016)。

美國第一座地熱電廠始於1960年，地熱政策發展已有50多年，參考周韋慧(2015)及蔡岳勳與蔡玉薰(2016)相關分析，美國最早由《1967年加州地熱法案》及《1970年聯邦地熱蒸汽法案》確立了地熱定義及其所有權問題，之後《1974年地熱能研究和開發法案》、《1975年能源安全法案》、《1979年公用事業管制政策法案》、「地熱貸款擔保計畫和商業投資抵免政策」等一系列法案都加大了對地

熱勘探、地熱鑽井、地熱開發利用等方面的投入。對於地熱開發造成環境影響評估，以《1969年國家環境政策法案》及能源部頒布「地熱開發專案環境報告書編寫準則」做為企業進行環境評估的基準。同時，政策面上提供研究開發經費、示範補貼、減免稅款、發放貸款等許多優惠措施，鼓勵私人投資地熱發電。因此美國掀起了地熱利用高峰，許多地熱電廠擴建運轉。2000年後，《美國西部地熱電力計畫》、《可再生資源發電配額制度》、《2007年能源獨立與安全法案》、《2009年美國地熱資源恢復再投資法案》和《2007年先進地熱能研究與開發法案》等法案對以往的各项法案進行了必要檢討修訂，增強了其現代商業模式的適應性，並將技術研究開發與綠能經濟、環境政策聯結。

臺灣與菲律賓同在1970年代開始探勘地熱，菲律賓至1977年代興建第一座地熱電廠，《1978年地熱法》為地熱開發及管理的法規，由於已有適當的法規，從1978年至1984年6年間透過BOT (build-operate-transfer)制度吸引國外廠商投資，使地熱發電快速成長至894 MWe，但在1999年後地熱裝置容量就停留在1,900 MWe左右，產業界積極呼籲菲律賓政府提出新的再生能源法規(Edvin, 2005)。菲律賓能源部推出《2008年再生能源法》，成為菲律賓積極推動地熱發電的利器，改善菲律賓再生能源的投資環境，提升菲國再生能源產業的發展(許峻賓，2012)，目前已有42個接受再生能源法補助的地熱發電合約，從1977年至2013年共為菲律賓省下177億美金的外匯(Fronda, *et al.*, 2015)。

相較於地熱大國肯亞，坦尚尼亞(Tanzania)也是東非裂谷鄰近國家，粗估有5,000 MWe的潛能，地熱能目標是2025年內完成100 MWe，並由國家成立坦尚尼亞地熱發展公司(Tanzania Geothermal Development Company, TGDC)主導，但該國缺乏地熱專用法規或政策，被認為是發展遲緩的原因之一(GEA, 2016)。

我國曾將地熱與其他不可再生資源同列

於《礦業法》，《溫泉法》與《礦業法》在地熱開發上有重疊，因此《礦業法》在2003年刪除地熱礦後，目前地熱資源由水利署依據《溫泉法》管理，但《溫泉法》僅針對溫泉開發及觀光需求立法管理，因此國內地熱開發尚無法規可依循科學管理及保障開發者權益。雖然行政院可依據《礦業法》第三條第六十一款指定地熱(蒸氣)為礦種，但《礦業法》未考量再生資源的特性，國內法規僅《水利法》針對再生資源設計的管理法規，《再生能源條例》僅獎勵地熱能源使用但未規範地熱資源的使用及管理，使得任何地熱發電計畫均受到其他不合時宜的管理法規拘束。

因此顯見國內推動「能源轉型」的過程中，應參考國外成功經驗，優先制定《再生能源條例之地熱專章》。待地熱示範電廠運轉累積相關經驗後，再參考科學研究成果制訂《地熱專法》，做為我國推動及管理地熱能源之主要法令。

策略二、地熱資料庫公開化

國際上有許多國家雖然缺乏火山型地熱資源，但積極研發先進技術降低開發門檻，例如德國、瑞士、澳洲，相關探勘成果資料也公開傳播，以吸引國內外廠商投資地熱資源豐富的地區。德國從2007年開始進行地熱發電研究，在2010年已有7 MWe，至2016年則已有42 MWe，6年間增加近6倍，主要推手之一是GEOTIS地熱資料庫，由聯邦環境部(BMU)補助應用地球物理研究所(the Leibniz Institute for Applied Geophysics, LIAG)設立，任何人可免費授權由資料庫網頁查詢探勘成果資料、鑽井資料、地熱電廠技術及規格，政府花費預算執行的探勘調查成果公開展示，提供投資評估地熱潛能最具可信度的參考資料，請參考其網站：<https://www.geotis.de>。德國地熱蘊藏條件雖然遠低於我國，發展時程也晚於我國，但目前地熱工程技術已形成國際上具有競爭力的團隊。

美國推行地熱發電已有50餘年，仍不斷

研發加強型地熱系統(Enhanced Geothermal System, EGS)增加產業競爭力，近年美國能源部與亞利桑那州地質調查所等合作設置國家地熱資料系統(National Geothermal Data System, NGDS)，廣泛收集研究機構、州地質調查所、民間企業等的探勘資料，提供地熱領域最新的數據(地質背景、斷層、熱流、溫度、地熱井特性等)，向地熱發電項目開發者提供必要資訊，謀求縮短開發時間、降低鑽井成本。加上2012年100萬筆油、氣、水、地熱井鑽孔資料，至2013年末蒐集的數據資料量達300萬筆以上，並且每年在地熱產業年會上積極宣傳此資料庫平台，吸引國際廠商研究探勘資料及投資評估，請參考其網站：<http://www.geothermaldata.org>。

我國從1970年代始由經濟部能礦所(工研院前身)及中油公司已裁撤的地熱處開始全臺的地熱潛能探勘，至近5年國科會/科技部主軸計畫第一期及第二期探勘成果，我國已有40多年的地熱調查資料，加上中油公司的油氣探勘井資料及民間溫泉井資料，相關資料都分散於公部門或國營企業。依照《地質資料蒐集管理辦法》規定，受政府補助或獎勵的地質調查，及政府機關或國營企業辦理地質調查，中央主管機關(目前為中央地質調查所)應通知資料所有人提送原始地質資料。若依法要求相關單位提供過去探勘資料，整合於現有「地質資料整合查詢系統」(<http://gis.moeacgs.gov.tw>)，即可大幅度改善現況。若民間企業只能從科普文章中瞭解我國地熱調查的蛛絲馬跡，即無法進一步評估地熱開發的風險及經濟效益。

國內在1993年結束清水地熱電廠後，目前仍在缺乏地熱基礎產業及關鍵人才的發展初期階段，而土耳其能源部的礦產測勘總局(General Directorate of the Mine Detection and Search; MDS)，已完成總面積328,711平方公尺的資源調查工作，所發現的576座地熱區中，其中有227座存在可利用並可取得的地熱資源，總含量估計達4,900 MWe (經濟部駐土耳其代表處經濟組，2015)；日本在2015年開始由「石油天然

氣和金屬礦物資源機構」(JOGMEC, Japan Oil, Gas and Metals National Corporation)使用空中電磁磁力探勘法(HeliTEM)及空中重力偏差法探勘法(AGG, Airborne Gravity Gradient)針對地熱資源進行普查，因此民間投入地熱開發的風險已大幅降低。這種進行全面性初步探勘，再提供資料給民間開發單位自行進行細部探勘，可節省公務經費並增加企業投入的誘因。

此外，2016年的「地熱能最新國際市場報告」(2016 Geothermal Power: International Market Update)中顯示臺灣目前僅有一處宜蘭三星的地熱電廠規劃，且無任何預定目標(圖4)，與實際我國預定2025年600 MWe目標及現有2處BOT地熱電廠規劃、1處環評中地熱電廠規畫差距甚大，亦顯示國內地熱相關資料及規劃無法傳遞到國際社群，使得國內的地熱發電規劃及需求已被邊緣化。

策略三、獎勵制度及風險管理國際化

許多第三世界國家雖然具有地熱資源豐富但缺乏技術團隊，例如東非國家肯亞、伊索比

亞等，他們主要策略是建立合理的獎勵制度，鼓勵國際團隊協助當地建立技術團隊，這也是大部分國家模仿的策略(如表4)，但其彈性差異相當大。東非裂谷鄰近12國於2012年開始組織跨國聯盟，利用世界銀行及慕尼黑銀行的資金建立跨國地熱補助的機制，稱之為地熱風險降低基金(Geothermal Risk Mitigation Facility, GRMF)，兼具經濟部《地熱探勘補助要點》及《石油基金》的性質，並搭配上慕尼黑再保險公司(Munich Re Group)的地熱鑽井保險(Geothermal Drilling Insurance)，使得缺乏探勘資料的地熱資源處女地，仍吸引國際專業團隊進行調查、探勘、開發，取得合理的報酬並有適當保險機制處理高風險的資金問題。由於地熱開發過程必須要修築道路及開發水資源，因此東非裂谷周遭貧困國家可利用地熱電廠解決偏遠地區交通、水、電不足的問題。

臺灣2016年地熱能躉售電價補助(Fit In Tariff, FIT)根據「均化發電成本」估算為新臺幣4.9428元/度(未加計離島補助)，相當於美金0.154元/度。雖然經濟部已提供地熱能發展可

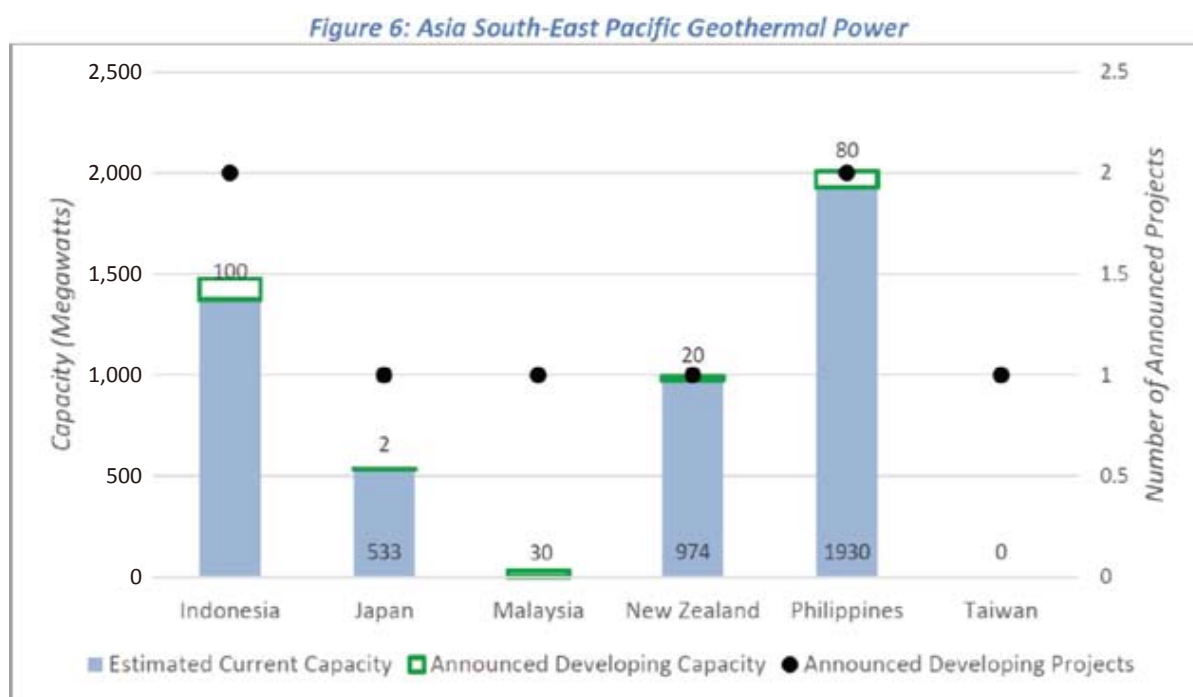


圖4 2016年9月止亞洲及西南太平洋地區的地熱發電現況(藍色方塊表示已開發的地熱裝置容量，綠色方框表示宣示地熱發電規模，黑點表示現有開發計畫數量)。
資料來源：GEA, 2016

表4 各國地熱FIT獎勵制度比較表(本研究整理)

全球地熱躉售電價摘要表			
國家	躉售年限	補助費用(USD/kWh)	補助費用(NTD/kWh)
台灣	20	0.154	4.94
離島補助		0.023	0.74
日本	15		
<15MW		0.220	7.04
>15MW		0.340	10.88
德國	20		
<10MW		0.226	7.23
>10MW		0.148	4.74
2016年前安裝獎勵		0.056	1.79
區域供熱獎勵		0.042	1.34
乾熱岩新技術獎勵		0.056	1.79
法國			
內陸區域<12MW	15	0.288	9.22
餘熱使用總效率			
<30% 效率		0	
		線性增加	
>70% 效率		0.115	3.68
海外領地<12MW	15	0.187	5.98
餘熱使用總效率			
<30% 效率		0	
		線性增加	
>70% 效率		0.043	1.38
希臘	20		
陸地		0.117	3.74
島嶼		0.14	4.48
義大利 <1MW	15	0.288	9.22
西班牙 <50MW	20	0.102	3.26
	>20	0.097	3.10
斯洛伐克	12	0.282	9.02
斯洛維尼亞	15	0.219	7.01
瑞士	20		
<5MW		0.445	14.24
<10MW		0.401	12.83
<20MW		0.312	9.98
>20MW		0.253	8.10
克羅地亞	12	0.25	8.00
捷克	15	0.227	7.26
肯亞 <70MW	20	0.085	2.72
塞爾維亞	12	0.108	3.46
土耳其	10	0.105	3.36
關鍵設備自產補助			
蒸氣渦輪		0.013	0.42
發電機		0.07	2.24
蒸氣回注設備		0.077	2.46

靠的補助制度，國際上也有成熟的地熱發電技術可引進，但臺灣至今卻僅有清水地熱的失敗案例，導致現有再生能源政策及政府資源偏重於離岸風力及太陽能，在2015年「全國能源會

議」上，民國119年度(2030年)，15年的規劃目標量僅200 MWe，與肯亞近5年內增加392 MW相比(Bertani, 2015)，約僅達肯亞實際發展現況的1/6。

根據「105年度再生能源電能躉購費率審定會」會議公開資料，地熱發電的平均建廠成本為每千瓦(kW)新臺幣24萬元，為所有再生能源中最高者，相較於核四廠的建置成本相當於每千瓦新臺幣11.2萬元，顯示在國內地熱發電發展初期，政府必須提供較高的誘因鼓勵民間投入，且深切檢討無業者申請的原因。

與各國地熱發電補助策略相較(表4)，國內提供的獎勵誘因僅有單一條件(另外《離島建設條例》可增加15%獎勵金額)，國外各位重視地熱發電具有基載及分散式電源的特性，因此德國提供額外獎勵給小規模的地熱電廠(<10 MW)、新技術乾熱岩電熱(Hot Dry Rock)及快速裝置獎勵(2016年前安裝)；法國提供額外獎勵給高能源使用效率(>70%)的地熱電廠；瑞士(<5 MW)及義大利(<1 MW)、日本(<15 MW)對於小規模地熱電廠的補助更高，與德國採行的策略相同；土耳其另外鼓勵獎勵土耳其自行製造的地熱發電關鍵組件。整體而言，土耳其僅提供10年的躉售年限及中低程度的躉售電價，應該是市場最不容易發展的國家，卻成為全世界地熱發展最快速的國家之一，而臺灣的地熱躉售電價位於中高程度，理應具有吸引國外專業技術及投資的條件，但卻無任何國際團隊投入臺灣的地熱計畫。

結 論

世界第一座商業化增強型地熱系統(Enhanced Geothermal System, EGS)電廠位於德國Landau，雖然國內近年來均強調國際上對於EGS的研發成果及期待(李伯亨等，2014)，目前尚在宜蘭平原驗證EGS廠址，但普遍型地熱系統(Conventional Geothermal System, CGS)，已有完整的“生產-回注-循環”的技術，是非常乾淨的分散式電力，且商業化開發後成本與傳統能源相當。過去探勘資料顯示臺灣具有豐富的地熱資源，因此地熱能源對於「能源轉型」的需求及「非核家園」的目標是具有良好的

成效的。

政府的再生能源策略均須考慮投資者對於風險的顧慮，在我國缺乏《地熱專法》或《再生能源地熱專章》現況下，地熱開發易受到其他法規的不合理限制，呈現出國內的地熱發電政策及行政風險過高，無法估計政策及風險成本；缺乏透明公開的「探勘成果資料庫」，則商業電廠開發計畫難以評估開發風險及投資效益，因此雖有補助政策卻無法達到預期成效，以上兩點已導致國際專業團隊難以將重心放在臺灣的地熱開發計畫，應利用產-官-學合作機制盡快彌補改善此缺口。

吸引外資投入國內地熱發電是成效最顯著的規劃原則，但須要先建立必要的法規管理及資源調查等基礎工作，以協助國內外業者可依據資料及法規評估風險，否則國際團隊仍優先考慮有良好制度可高效率發展的國家為主要發展市場。若我國能健全吸引外資的基礎工作，加上鼓勵分散式電力及國產自有技術的躉售電價補助策略，則臺灣的地熱發電規模將可如土耳其現況大幅增加。

短期而言，良好的地熱產業環境可吸引國際級專業團隊與國內企業合作發展，活絡外商投資及能源產業發展，降低環境風險較高的進口能源使用比例；長期而言，當地熱產業的環境效益及經濟效益得到社會認同，社會資本將更樂於投入「低碳經濟」的友善環境建設，並活用廢餘熱創造「循環經濟」，將可使「氣候調適」所需的社會成本大幅降低。

誌 謝

感謝科技部地熱主軸計畫補助海洋大學「宜蘭利澤地區深層地熱發電研究」(MOST 105-3113-M-019-001)，本研究部分為第二年計畫環境影響評估子計畫及招商策略子計畫之成果。

參考文獻

- 王守誠、李昭興、高成炎、李世勛、高宏明、董雲樵，2013。臺灣智慧型地熱能源系統，科技報導，391期：http://scitechreports.blogspot.tw/2014/07/blog-post_22.html。
- 李伯亨、柳志錫、劉力維、謝瑞青、郭泰融、王俊堯，2014。增強型地熱系統發展分析與探討，臺灣能源期刊，第一卷(第三期)：325-348。
- 周韋慧，2015。美國地熱發電現狀與政府的推進政策，當代石油石化，第10期：41-46。
- 許峻賓，2012。菲律賓再生能源發展，能源報導，2012年07月：<http://energymonthly.tier.org.tw/outdatecontent.asp?ReportIssue=201207&Page=28>。
- 莊怡芳、施清芳、陳中舜，核能研究所，2013。地熱發電技術展現況、趨勢與瓶頸，能源資訊平臺能源簡析。
- 簡慧貞、呂慶慧、敖家綱、曾湘捷、陳俊佑、彭毓之、鄭如琇，2016。臺灣地熱發電減碳潛能與環境衝擊管理芻議，環境工程會刊，民國105年06月。
- 郭佳韋，核能研究所，2016。淺談臺灣地熱發電法規問題，能源資訊電子月刊第五期
- 經濟部駐土耳其代表處經濟組，2015。土耳其發展再生能源作法：地熱能：<http://info.taiwantrade.com/CH/bizsearchdetail/7869523>。
- 蔡岳勳、蔡玉薰，2016。美國地熱能源法規與政策發展，臺灣能源期刊，第三卷(第一期)：41-54。
- Bertani, Ruggero, “Geothermal Power Generation in the World 2010-2014 Update Report”, Proceedings World Geothermal Congress 2015.
- Edvin, D. Butiu, “A New Law for the Geothermal Industry in the Philippines”, Proceedings World Geothermal Congress 2005.
- Fronza, Ariel D., Mario C. Marasigan and Vanessa S. Lazaro, “Geothermal Development in the Philippines: The Country Update”, Proceedings World Geothermal Congress 2015.
- GEA(Geothermal Energy Association), 2016 Geothermal Power: International Market Update, 2016 Oct.
- Horie, Tadao, Toshie Muto and Tony Gray, Technical Features of Kawerau Geothermal Power Station, New Zealand, 2010.
- MBIE (Ministry of Business, Innovation & Employment), “Energy in New Zealand 2016”, 2016 Sep.
- Moeck, I. S., “Catalog of Geothermal Play Types Based on Geologic Controls”, Renewable and Sustainable Energy Reviews , 37 (2014): 867-882.
- Mroczek, Ed, Gaetano Dedual, Duncan Graham and Lew Bacon, “Lithium Extraction from Wairakei Geothermal Fluid using Electrodialysis”, Proceedings World Geothermal Congress 2015.
- Rosenbauer, Robert J., Burt Thomas, James L. Bischoff, James Palandri, “Carbon sequestration via reaction with basaltic rocks: Geochemical modeling and experimental results”, Geochimica et Cosmochimica Acta 89 (2012) 116-133.
- Sullivan, J. L., and M. Q. Wang. “Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Geothermal Electricity Production.” Journal of Renewable and Sustainable Energy 5.6, 2013: 63122.
- UNEP, 2015, GREEN ENERGY CHOICES-The Benefits, Risks and Trade-Offs of Low-Carbon Technologies for Electricity Production, 2015.
- Williams, Colin F., Marshall J. Reed, and Robert H.

Mariner, “A Review of Methods Applied by the U.S. Geological Survey in the Assessment of Identified Geothermal Resources”, USGS, 2008.

Yang, Tsanyao Frank and Geothermal Energy

Research Teams of Taiwan, “Introduction to the Geothermal Energy Program in Taiwan”, Proceedings World Geothermal Congress 2015.

An Evaluation of Green Geothermal Energy and the Comparison with Recent Successful Cases in the World

Shou-Cheng Wang^{1*} Yung-Song Chen² Chung-Cheng Chang³
Duu-Hwa Lee⁴ Ching-Ta Chuang⁵ Chao-Shing Lee⁶

ABSTRACT

Geothermal power is one of the base-load renewable energy and is not affected by weather. For green energy choices, conventional geothermal system (CGS) has become the most friendly one as for ecosystem impacts and human health impacts, and also demonstrates as distributed generation resource which display a critical alternative for upcoming “Energy Transition” in Taiwan. The recent exploration and assessment of geothermal resources present that Tatun volcanic area is approachable volcanic field type, the other non-volcanic field type areas where advanced technologies and professional teamwork are essential for mitigating risks. Taiwan is wandering in the initial stage of geothermal development, therefore, it’s important to learn from other successful cases is the world. Especially, 600 MWe of geothermal power before 2025 is a proven goal for Taiwan. There are a few boosting cases grow more than 300 MWe during 2010-2015; in German, more than 5 times geothermal power from 2010 to 2016, and no environment dispute happened thus no necessity for environment impact assessment (EIA). To reach the destination of “nuclear-free state”, we must bridge the gap of strategy and information in geothermal energy as soon as possible. Establishing regulations based on scientific consensus, free-accessible database of geothermal exploration, multi-objective financial support system are the most efficient strategies to mitigate risks and boost the market as well as strengthen the local technology and experience. It can be forecasted that triggering geothermal power will attract foreign and local investment to energy infrastructure in short term, decrease imported energy dependence and reduce environment risks. For long term benefits, it will improve social capitals to involve environmental-friendly infrastructure and build up “low-carbon economy”. For climate change adaptation issue, geothermal utilization will keep the social cost down drastically with “circular economy”.

Keywords: conventional geothermal system, energy transition, nuclear free homeland, push strategy, environmental benefit

¹ Doctoral Student, National Taiwan Ocean University, Institute of Applied Geosciences.

² Assistant Professor, National Ilan University, Department of Biotechnology and Animal Sciences.

³ Professor, National Taiwan Ocean University, Department of Electrical Engineering & Director, Research Center for Ocean Energy and Strategies.

⁴ Professor, National Taiwan Ocean University, Department of Ocean Tourism Management & Institute of Applied Economics.

⁵ Emeritus Professor, National Taiwan Ocean University, Institute of Marine Affairs and Resource Management.

⁶ Emeritus Professor, National Taiwan Ocean University, Institute of Applied Geosciences.

*Corresponding Author, Phone: +886-2-24631811, E-mail: singerproncku@gmail.com

Received Date: October 3, 2016

Revised Date: October 20, 2016

Accepted Date: November 11, 2016