

2.4 地熱能

摘要

地熱為我國少數可自產再生能源之一，且可作為基載電力，若能供電足夠比例，將可提升電網穩定性，因此，地熱資源是邁向 2050 淨零排放路徑上，不容忽視的零碳電力選項。我國有淺層地熱潛能 0.986 GW，深層地熱潛能 31.8 GW，地熱成功與否取決於精細探測(mapping)及探勘取熱(drilling)技術，此二技術近年皆有長足發展，必須加速投入研發與布建，盡快找出適合發展地熱之場址。策略上，全球淺層地熱發電行之有年，技術已經非常成熟，我國應加速開發；此外，深層地熱技術預計在 2030 年時更為成熟，我國更應積極擴展深層地熱之開發，使深層地熱成為我國地熱發電的主力。而且前期淺層地熱開發過程所累積的地質資料，將來可以應用在深層地熱的開發上。本政策建議書有下列幾點建議：

1. 加速推動我國淺層與深層地熱資源之精細探測及探勘取熱技術，深入了解我國地熱資源之分布，並緊盯全球最新深層鑽探取熱技術發展，適時引入最新技術。
2. 強化推動誘因，制定地熱專法、明文規範主管機關，以簡化開發行為審查，保護探勘權益，加速產業發展。
3. 以增加淺層地熱電廠裝置容量為短期目標，深層地熱電廠裝置容量為長期目標。預計 2050 年我國地熱裝置容量達到 8.13~12.88 GW，發電量 468.29~741.89 億度，平均發電量為 605.09 億度。

2.4.1 前言

隨著經濟發展及全面電氣化的影響，2050 年我國電力需求將大幅成長。地熱發電相對穩定，可做基載電力，如果可以充分利用，則可降低再生能源不穩定性的衝擊。臺灣深層地熱潛力大於 30 GW，若大幅提升深層地熱對我國發電量的貢獻，對 2050 淨零排放目標應有極大助益。地熱系統依據開採之型態可分為傳

統熱液型地熱系統(Hydrothermal System)及增強型地熱系統(Enhanced Geothermal System, 簡稱 EGS)。傳統地熱生產井之鑽鑿深度一般不超過 3,000 公尺,屬於淺層的地熱開發;EGS 開發深度通常大於 3000 公尺,又稱為深層地熱,目前技術與成本問題尚限制了 EGS 的發展。雖然全球淺層地熱技術已非常成熟,但臺灣的淺層地熱潛力不到 1 GW,對我國 2050 淨零排放目標幫助有限。但從現在到 2050 年還有近 30 年的時間,可預見 EGS 產業應可達到規模經濟,幫助臺灣達到 2050 淨零排放目標。

我國應該選擇發展地熱發電產業的原因,除了臺灣自產地熱資源豐富這項以外,地熱發電為基載電力也非常關鍵。依據台灣電力公司統計資料顯示,2020 年臺灣各地太陽能的容量因數(capacity factor)約在 9~15%之間,相當於一年有超過 85%的時間無法發電¹,2020 年陸域風電的容量因數約在 26~30%之間,離岸風電容量因數雖較高,但不同月份之間變化非常大²;相反的,地熱不受天候影響,容量因數的世界平均值高於 80%,在某些獨立電廠甚至可高於 90%³,可以作為基載電力,在未來淨零排放大趨勢下,具間歇性、非基載電力的風電與光電比例逐漸提高的趨勢下,地熱可以協助提供臺灣穩定的電力,來發揮其重要的影響力。

2.4.2 國際發展現況

目前全球商轉中的 EGS 電廠僅有德國的 Insheim 電廠(4.8 MW)⁴與 Landau 電廠(3.8 MW)⁵、美國內華達州的 Desert Peak 電廠(1.7 MW)⁶、法國的 Soultz 電廠

¹ 台灣電力公司(2021) 109 年各縣市太陽光電容量因數。

<https://www.taipower.com.tw/tc/page.aspx?mid=207&cid=165&cchk=a83cd635-a792-4660-9f02-f71d5d925911#b04>

² 台灣電力公司(2021) 再生能源發電概況—風力發電。

<https://www.taipower.com.tw/tc/page.aspx?mid=204&cid=1581&cchk=82fb957e-2fe8-49b6-90a9-b750387de936>

³ International Renewable Energy Agency (IRENA) (2017) Geothermal Power - Technology Brief.

<https://www.irena.org/publications/2017/Aug/Geothermal-power-Technology-brief>

⁴ BESTEC (2012) The Insheim Geothermal Project. <https://www.bestec-for-nature.com/index.php/en/projects-en/insheim-en>

⁵ BESTEC (2007) The Landau Geothermal Power Plant. <https://www.bestec-for-nature.com/index.php/en/projects-en/landau-en>

⁶ POWER (2013) U.S. EGS Project Adds 1.7 MW Grid-Connected Output.

<https://www.powermag.com/u-s-egs-project-adds-1-7-mw-grid-connected-output/>

(1.5 MW)⁷等，全球應不超過十座，目前主要是技術與成本問題限制了 EGS 的發展，所以歐盟 EUGENE 協會結合了 35 個歐盟內外團隊，目標讓 EGS 的探勘成本、鑽井成本各下降 20%，熱電轉換效率提升 20%⁸。美國的能源部以地熱能研究前沿觀測站(Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy, FORGE)計畫專用於 EGS 的技術開發，並集結產官學研，補助 47~70%研究基金，目標是在 2030 年將 EGS 成本降至 0.06 美元/kWh (約新臺幣 1.8 元/kWh；目前地熱的均化能源成本落在新臺幣 1.68~2.79 元/kWh 之間)，在 2050 年達到全國 100 GW 的裝置容量。

加拿大薩斯喀徹溫省(Saskatchewan)是北美第六大的石油產地，經年累積了大量的當地地質資訊，如今這些地質資訊被應用在地熱能的發展上。加拿大自然資源部(Natural Resources Canada)首先在 2014 年投入 100 萬加幣進行先期研究，接著又加碼 52.5 萬加幣進行測試鑽探；該地熱開發由 DEEP Earth Energy Production 公司執行，總經費為 5,130 萬加幣。2019 年 1 月，加國政府進一步投入 2,560 萬加幣 (約新臺幣 5.87 億元) 建造裝置容量 5 MW 的電廠⁹。依照 DEEP 公司的設計，裝置容量 20 MW 僅需 3.5 公里深的注水井 4 座、取水井 6 座¹⁰，如此設計所需的水力壓裂(hydraulic fracturing)範圍小，不易引發人可感知的地震(例如韓國 Pohang 在 2017 年發生的 EGS 疑似相關事件¹¹)，也更適用於我國的地理環境。

2020 年全球地熱發電裝置容量最高的十個國家分別為美國(3.714 GW)、印尼(2.133 GW)、菲律賓(1.918 GW)、土耳其(1.688 GW)、紐西蘭(1.005 GW)、墨西哥

⁷ Lu, S. M. (2018) A global review of enhanced geothermal system (EGS). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2902-2921. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.097>

⁸ 李伯亨、柳志錫、劉力維、謝瑞青、郭泰融、王俊堯 (2014 年 6 月) 增強型地熱系統發展分析與探討。臺灣能源期刊。1(3)，325-348。

⁹ DEEP (2019) Prime Minister announces support for Canada's first geothermal power facility. <https://deepcorp.ca/prime-minister-announces-support-for-canadas-first-geothermal-power-facility/>

¹⁰ DEEP (2021) Saskatchewan is Ready for Final Geothermal Power Feasibility Engineering – 53 Day Large Volume Production and Injection Test Successful – First in Canada. <https://deepcorp.ca/saskatchewan-is-ready-for-final-geothermal-power-feasibility-engineering-53-day-large-volume-production-and-injection-test-successful-first-in-canada/>

¹¹ Mark Zastrow (2019) South Korea accepts geothermal plant probably caused destructive quake. <https://www.nature.com/articles/d41586-019-00959-4>

(0.963 GW)、義大利(0.944 GW)、肯亞(0.861 GW)¹²。2008 年至 2018 年間，新增裝置容量第 1 名的土耳其就增加了 1.317 GW，等於 10 年間成長了 44 倍；2008 年至 2018 年間新增裝置容量第 2 至第 5 名還包括了印尼(0.956 GW)、美國(0.599 GW)、肯亞(0.509 GW)，和紐西蘭(0.421 GW)¹³。

臺灣發展地熱發電的經驗不足與鑽探的高成本，是遲遲未能推展的原因，裝置容量高達 861 MW 的肯亞經驗或許可成為借鏡。肯亞的人均 GDP 不到 2000 美金，只有臺灣的大約 6.3%，但至少超過 75% 的地熱發電廠，都是由肯亞本土的 Kenya Electricity Generating Company 所建設完成¹⁴。2008 年至 2018 年間新增裝置容量第 1 名的土耳其也是一個典範，土耳其每度電的躉購（政府用特定的保證金額來收購綠電，Feed-in Tariff, FiT）費率只有 10.5 美分（大約為台灣電力公司電價），雖然保證躉購期只有十年，卻已足夠培植國產關鍵基礎設備，來支撐國家的地熱能發展¹⁵。

2.4.3 我國發展地熱能之現況問題分析

我國 2020 年地熱發電裝置容量僅約 0.3 MW，發電量約 200 萬度，此發展現況對於位於火環帶的臺灣而言實在偏低，也應有長足成長空間。臺灣發展地熱發電較緩慢的主要原因在於早期失敗的經驗，早期清水地熱發電廠在 1981 年至 1993 年間，運轉僅十餘年即以失敗收場，讓我國政府在往後的二十餘年都對地熱發電技術的投資裹足不前，不甚成熟的技術往往因一次失敗而裹足不前，使技術的發展長期落入所謂「死亡之谷(Valley of Death)」，而忽視了其應有的潛能，

¹² Richter, A. (2021) ThinkGeoEnergy's Top 10 Geothermal Countries 2020 – installed power generation capacity (MWe) . <https://www.thinkgeoenergy.com/thinkgeoenergys-top-10-geothermal-countries-2020-installed-power-generation-capacity-mwe/>

¹³ Richter, A. (2021) Global geothermal power generation capacity reaches 14,600 MW at year end 2018. <https://www.thinkgeoenergy.com/global-geothermal-power-generation-capacity-reaches-14600-mw-at-year-end-2018/>

¹⁴ Macharia, M. W., Gachari, M. K., Kuria, D. N., & Mariita, N. O. (2017) Low cost geothermal energy indicators and exploration methods in Kenya. *Journal of Geography and Regional Planning*. 10 (9), 254-265. <https://academicjournals.org/journal/JGRP/article-abstract/4C7023B65573>

¹⁵ 國立臺灣大學社會科學院風險社會與政策研究中心（2019 年 2 月 23 日）公投養綠：發展地熱能源的必要知識。 <https://rsprc.ntu.edu.tw/zh-tw/m01-3/en-trans/1112-green-nuclear-vote-necessary-knowledge.html>

也未能與國際發展同步，此點在未來淨零碳科技的研發上不可不慎。直到近期政府開始有示範獎勵以及法規放寬措施，2018 年後開發申請案件才逐漸增加，目前這些小型淺層地熱發電廠多位於我國東部地區，目前在 2023 年可商轉的地熱發電裝置容量預計可達 35 MW（附錄 2E）。目前我國發展地熱的問題包括：

1. **高精細地熱探勘工作發展落後，缺乏較新高解析度地質資料：**目前我國地熱潛能區域之評估源於早期能源科技國家型計畫之地熱資源資料，但近期探勘技術已逐漸發展成熟，若能取得高解析度地質資料技術，儘速啟動精細地熱探勘工作，同時與國際合作，獲得深層地熱潛在地區的位置，將可降低後續鑽探成本與風險。
2. **深層地熱取熱技術發展落後：**國際上已開始有深層地熱 EGS 電廠的案例，技術發展迅速，例如：水平鑽探(horizontal drilling)技術，我國地熱發電技術尚未布局整合。
3. **初期鑽探風險較高，缺乏廠商投入誘因：**全球約有 40%的地熱井鑽探會以失敗收場，而無法找到具商轉價值的熱源¹⁶。廠商投資風險過高時，則須倚靠政府的政策獎勵措施加以協助。
4. **多部門法令政策限制，行政流程繁雜¹⁷：**目前我國雖有「地熱能發電示範獎勵辦法」，但申請案獎勵金總額不得超過地熱能探勘費用之 50%，且以新臺幣一億元為上限；2018 年公佈的「開發行為應實施環境影響評估細目及範圍認定標準」，雖將地熱發電裝置容量免環評的門檻放寬到 10MW，但地熱裝置容量規模與開發範圍並無直接關係，這也影響廠商投入具商業規模、大裝置容量之開發案意願；其他法令政策方面，電業法第 18 條雖述及「輸配電業對於發電業或自用發電設備設置者要求與其電力網互聯時，不得拒絕；再生能源發電業應優先併網。」但實務上還須克服與台灣電力公司之間的協調合作問題。日本

¹⁶ Bill Gates (2021) How to Avoid a Climate Disaster.
<https://www.penguinrandomhouse.com/books/633968/how-to-avoid-a-climate-disaster-by-bill-gates/>

¹⁷ 劉光瑩(2021)《獨家直擊》臺灣地小人稠的痛點，為何被比爾蓋茲、貝佐斯投資的公司看上？天下雜誌。<https://www.cw.com.tw/article/5114679>

在 311 大地震引發的福島核災（2011 年）後，就曾大舉獎勵發展地熱發電¹⁸，表 2.4.1 是臺、日在地熱發電法令政策措施的比較。

表 2.4.1 臺、日地熱發電法令政策措施比較

政策/措施	日本	臺灣
投資增強型地熱系統技術研發	積極	相對不明顯
補助 50% 的地熱探勘鑽井費用	○	○*
100% 補助開發商公開說明會，以促成地熱電廠建造	○	×
躉購措施	電廠規模大於 15 MW 者每度電價為 27.3 日圓，小於 15 MW 者每度電價為 42 日圓	每度電新臺幣 5.1956 元**
修改法令以允許在國家公園內從事探勘建廠	○	***

*地熱能發電示範獎勵辦法；2022 年 5 月 20 日發布

**110 年度再生能源電能躉購費率

***開發行為應實施環境影響評估細目及範圍認定標準；地熱電廠 10 MW 以下免環評

2.4.4 我國發展地熱能之潛能與限制評估

根據早期地熱潛能評估，我國總蘊藏量約 159.6 GW，但可開發量約 20~22%，淺層地熱潛能預估僅約 0.986 GW（表 2.4.2），而臺灣 EGS 潛能可達 31.8 GW（表 2.4.3），故臺灣 2050 淨零排放目標有賴 EGS 產業的形成。在發展 EGS 技術的同時，臺灣應加速進行好景區地下的精細地熱探勘。越為仔細的探勘，開發時鑽井的風險就越低，且探勘資訊未來隨時可將用之於深層地熱評估以建立 EGS 電廠，如此才能在 2050 年前，使地熱發電逐年增加對總體發電量有的實質貢獻。例如前瞻基礎建設計畫中已核定「加速全面性地熱資源探查及資訊供應計畫」，於 2020 年、2021 年將分別投入至少新臺幣 7,000 萬元，執行地熱資源的探查，此一工作似已起步，不過仍期盼有長期且穩定支持才能有立竿見影的效果。

¹⁸ 宋聖榮(2015) 臺灣地熱能源發展的現況、展望與困境。石油季刊，61-82。

表 2.4.2 臺灣淺層地熱潛能評估¹⁹

地區	溫度範圍(°C)	儲集層體積(km ³)	發電潛能(MW)
大屯山	200~290	40.0	514
清水	180~220	6.0	61
土場	160~180	3.0	25
廬山	150~210	4.5	41
知本	140~200	3.0	25
金崙	140~180	6.0	48
瑞穗	140~180	2.0	16
紅葉	130~190	1.5	12
寶來	110~160	2.0	14
富源	80~160	1.5	9
霧鹿	150~210	2.0	18
東埔	120~180	2.0	16
樂樂	120~140	1.5	9
谷關	130~180	2.0	15
馬陵	130~170	1.5	11
紅香	130~170	1.5	11
四區	140~210	2.0	18
五區	150~210	2.0	18
臭乾	135~185	2.0	16
茂邊	170~210	2.0	19
烏來	150~200	1.5	13
關仔嶺	120~190	1.5	11
中崙	120~185	1.5	11
礁溪	100~160	1.5	9
桃林	150~210	1.5	14
比魯	130~190	1.5	12
合計			986

¹⁹ 環境與發展基金會(2013) 臺灣地熱發電潛能廠址研究計畫期末報告。

表 2.4.3 臺灣深層地熱潛能評估²⁰

地區	面積(km ²)	平均溫度(°C)	蘊藏熱能 (10 ¹⁸ J)	發電潛能 (GW)
大屯山	278	236	252	2.7
清水、土場	909	223	760	7.8
廬山	279	210	209	2.0
瑞穗、安通	467	195	297	2.6
霧鹿、紅葉	571	196	366	3.3
知本、金崙	701	214	545	5.4
寶來	476	205	336	3.1
關仔嶺	510	197	334	3.0
新竹、苗栗	343	192	209	1.8
合計	4,532	208	3,307	31.8

以近兩年的數據可略知目前我國淺層地熱開發能量一年可增加約 17 MW 淺層地熱，至 2025 年可能可達 51 MW，若能在 2026 年開始擴增開發能量至一年 25~35 MW，在淺層地熱方面，預計在 2050 年約可增加 625~875 MW 的裝置容量，整體約可達 676~926 MW；而在深層地熱方面，目標設定在 2035 年起每年開發 500MW-800MW，預計在 2050 年約可有 7.5~12 GW 的裝置容量；因此，在 2050 年地熱裝置容量約可達到 8.13~12.88 GW，以 80%容量因數及一年運轉天數約 300 天做計算，發電量約可達到 468.29~741.89 億度，平均發電量為 605.09 億度。

2.4.5 政策建議

陽光或風力資源，可以在地表上觀察得到，選址來建設發電機組似相較容易；相對之下，地熱資源在地底下，鑽井探勘具有技術門檻，失敗的風險因此也相對高。2020 年臺灣太陽光電的容量因數平均只有 14.44%²¹，風電也只有 29.56%²²，

²⁰ 經濟部能源局(2014) 2014 年能源產業技術白皮書。

²¹ 台灣電力公司(2022) 110 年各縣市太陽光電容量因數。

<https://www.taipower.com.tw/tc/page.aspx?mid=207&cid=165&cchk=a83cd635-a792-4660-9f02-f71d5d925911#b04>

²² 台灣電力公司(2022) 台電風力發電裝置情形。

而地熱高於 80%。所以不受天候影響的地熱發電成為穩定電力供應的關鍵選項。

本政策建議書提出以下政策建議：

1. 加速推動我國淺層與深層地熱資源之精細探測及探勘取熱技術，深入了解我國地熱資源之分布，並緊盯全球最新深層鑽探取熱技術發展，適時引入最新技術

鑽探風險使得地熱產業鏈的形成更需要政府的推動，應積極投資提升地質資訊解析度的技術（如大地電磁法、地震網速度構造逆推法），建立高解析度的地下地質資料庫。況且淺層地熱發電已是非常成熟的技術，如加州的 The Geysers 發電園區建廠時間早在 1960 年，整區的裝置容量超過 0.8 GW²³；而且酸蝕²⁴、結垢等技術問題都已有解決方案。臺灣有將近 1 GW²⁵的淺層地熱發電潛能，雖不若深層 EGS 來的豐富，但藉其推動建立產業鏈與培養人才，未來可以在淺層地熱的基礎上，再朝資源更為豐富的 EGS 邁進。人均 GDP 僅臺灣約 6%的肯亞都已經有 0.861 GW 的裝置容量²⁶，以臺灣的科技發展高度，開發的風險必然相對較低，應儘速提升臺灣淺層地熱發電之裝置容量。

地熱開發技術方面，可以石油鑽探產業作為借鏡，石油鑽探同樣存在著找不到油源的風險，但是一旦形成規模經濟，原油也可以變便宜。相信地熱發電產業也會依循類似的軌跡，隨著將來地熱發電廠數量的增加，開發商的成本也會大幅降低。在淨零排放的情境下，當油井鑽探受限，原來石油鑽探公司也會轉型，將鑽探技術轉而應用在地熱上，不論是傳統探測或水平鑽探(horizontal drilling)技術，都能對 EGS 發電的實現有很大的幫助。

<https://www.taipower.com.tw/tc/page.aspx?mid=204&cid=1581&cchk=82fb957e-2fe8-49b6-90a9-b750387de936>

²³ California Energy Commission (2021) California Geothermal Energy Statistics and Data. from https://ww2.energy.ca.gov/almanac/renewables_data/geothermal/index_cms.php

²⁴ 彭筱涓(2021) 國際酸性地熱系統開發案例分析。

<https://km.twenergy.org.tw/ReadFile/?p=KLBase&n=20210609172327.pdf>

²⁵ 同前揭註 19。

²⁶ Alexander Richter (2021) Global geothermal power generation capacity stood at 15,608 MW at the year-end 2020. The current pandemic situation clearly slowed down development with limited growth reported. Turkey represents nearly all geothermal generation capacity added in 2020. <https://www.thinkgeoenergy.com/thinkgeoenergys-top-10-geothermal-countries-2020-installed-power-generation-capacity-mwe/>

2. 強化推動誘因，制定地熱專法、明文規範主管機關，以簡化開發行為審查，保護探勘權益，加速產業發展

法規配套改善方面，我國尚無地熱專法，沒有明文規範主管機關，作為單一窗口來保護探勘權益、簡化開發審查流程²⁷、協助產業界投入。這導致長期以來國內外企業投入探勘或開發的意願不高，主要推動的地熱開發工作只有公營事業執行被指派的任務。近期不論是前瞻基礎建設的投資、地熱能發電系統示範獎勵辦法（2020 年 12 月 31 日廢止）、地熱能發電示範獎勵辦法（2022 年 5 月 20 日發布）、或是在國家公園等保護區的開發限制放寬²⁸等，對國際相關制度的仿效已有一些成果。但臺灣地熱資源豐富，與地熱發電裝置容量最高的十幾個國家比起來，發展速度確實過於緩慢，政府應加速地熱專法制定，積極協助廠商與在地居民溝通協調，創造在地就業機會，獎勵國外專業鑽探團隊來臺，才能儘早讓臺灣的地熱產業快速發展。

3. 以增加淺層地熱電廠裝置容量為短期目標，深層地熱電廠裝置容量為長期目標。預計 2050 年我國地熱裝置容量達到 8.13~12.88 GW，發電量 468.29~741.89 億度

目前淺層地熱技術已十分成熟，環太平洋「火環帶」的國家已有多國總裝置容量達到 1 GW 以上，我國應強化國際合作儘速投入探勘開發，儘速使我國與國際技術發展同步，其中精細地質探勘工作更應全面展開，來獲得我國地熱潛在地區高精度地下 3D 地質資訊，除極大化淺層地熱開發應用之外，也可用以探測深層地熱在地下深處的傳導形貌，為未來深層地熱開發做好準備。我國淺層地熱能如果自 2025 年起每年可開發 25~35 MW，而深層地熱自 2035 年起每年可開發 500~800 MW，2050 年時我國地熱裝置容量可達 8.13~12.88 GW，若以 80% 容量因數及每年運轉 300 天計算，發電量約可達到 468.29~741.89 億度。

²⁷ 林瑞珠、管中微、沈政雄、朱丹丹(2019) 我國發展地熱發電之探勘階段法規調適研究。
https://km.twenergy.org.tw/Publication/thesis_down?id=220

²⁸ 全國法規資料庫(2020) 開發行為應實施環境影響評估細目及範圍認定標準。
<https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?pcode=O0090012>