



# 以工程觀點評析 台灣地熱 能源開發的 現在與未來

謝秉志\* / 國立成功大學資源工程學系 教授

地熱是一種基載的可再生能源，不受天氣影響可以穩定供應電力。地熱不僅具有儲能特性也可進行靈活調控，可以良好的與其他電力能源做搭配使用，也是台灣邁向淨零的一項重要戰略工具。在過去，台灣是全世界第 14 個利用地熱能源發電的國家，但早期因為儲集層管理及管線結垢等問題影響導致了地熱電廠的關閉。現今因應台灣對於綠電的需求，地熱發電已在 2021 年重啟，目前也有至少 4 座地熱電廠商轉而為台灣提供無碳電力。在未來，在台灣淨零的關鍵戰略目標之下，地熱開發將在 2050 年達到數十億瓦 (GW) 等級，這一個目標的達成需要仰賴創新技術的佈局。在以工程觀點評析台灣地熱能源開發的未來部分，本文盤點了目前利用傳統水熱型地熱系統可能遭遇的挑戰，再進一步針對增進熱電轉換效率、增強熱液產量、尋找超高溫儲集層以及產出更多的地下可用熱量的面向，逐一介紹地熱發電效率的提升方式、增強型地熱系統、超臨界型地熱系統、先進型地熱系統以及沉積岩地熱系統的技術應用性。在地熱發展的未來，透過地熱開發技術的研發創新，可以用工程方法有效的從地層岩石中取出更多的熱能，轉換為電能並為台灣提供無碳的再生能源電力。台灣可以充分的應用這一個存在於腳底下的豐沛熱能以達成淨零目標。

## 前言

現在地熱的緩慢進展跟 19 世紀中期的石油工業發展非常類似。19 世紀中期的石油工業僅僅在地表明顯的有油氣跡象的地區，使用當時存在的開發技術，進行少少的油氣資源開發。這種情況跟現在的地熱的發展很像。目前只有在一些地表有熱泉、蒸汽等明顯的具有地熱地表跡象的地方才有地熱開發。換言之，利用石油工程的 150 年開發經驗，地熱是可以有很好的未來，而且速度可以更加快。

地熱與石油都是一種地球地質能源 (Geo-energy)，但地熱與石油是有本質上的不同。地熱是一種可再生、永續、且零碳的綠色能源、而石油是不可再生、會耗竭、高排碳的化石能源。這個本質上的不同會造

成這兩者地質能源在零碳的未來上會有不同的命運。台灣身處於能源轉型及追求淨零碳排的時代，由目前的高度依賴石油天然氣及煤等化石燃料能，將逐漸轉變為高度的使用，甚至是要 100% 使用，像地熱這種的可再生能源。在這個過程中需要有根本性的觀念轉變。

對使用化石燃料能來說，台灣確實是能源貧乏國家，能源進口依存度高達 98%，這確實是現況。但目前台灣已經走上能源轉型，未來對使用可再生能源來說，台灣絕對會變成能源大國。一個台灣自己有、而且在未來也需要的「零碳、自主、再生」能源，沒有理由不做極大的開發。在這樣的情境下，政府的角色極其重要，而台灣地熱能源的開發就是檢驗政府對於自己是否認定我們是能源大國這一個根本性觀念建立的最好證明。

\* 通訊作者，bzhsieh@mail.ncku.edu.tw

## 什麼是地熱能 (Geothermal energy) ?

地熱是一種可再生能源，是一種來自於您我腳底下地層內的熱能，我們稱它是一種地球地質能源。基本上，地熱是在腳下地層中所能夠發現的所有熱能。這個熱能儲存於地層的岩石中、以及地層孔隙（或裂隙）內的流體（熱水或蒸氣）之中。

地熱也是一種潔淨能源，它不受天氣影響而具有穩定供應特性，所以地熱不是一種間歇性的再生能源；它自帶儲能系統而具有成為基載能源的特性，因為地球內部就是一個自然且巨大的儲能裝置；它也可以靈活的開/關而具有可調控特性，使得地熱能源可以良好的與其他電力能源做搭配使用。地熱也可以同時有電應用及熱應用，可以產出電力或是提供熱能供暖，也可以作為能源儲存使用。

## 地熱能源開發的獨特之處

地熱能源埋藏於地下地層中，如果在地表沒有明顯的熱徵（例如：高溫溫泉或蒸氣噴口），一般在地表不容易聯想到地熱就藏在腳底下地層深處。所以在開發前需要使用特別的探勘技術來進行地熱資源探查。地熱能源開發的獨特之處之一，就是地熱能源的經濟性開發確認是需要利用深鑽井進行探勘，同時也需要進行儲集層評估以瞭解產能及水質。另一個地熱能源開發的獨特之處是考慮水資源永續循環。透過生產井（開發井）將地熱有效的從地下深處帶到地表後，需要規劃回注井將帶出地熱的水再注回地下去，以達成水資源循環，並讓地熱能源可以永續被使用。

## 地熱能源開發系統

簡單來說，地熱能源的開發有三大單元系統，分別為取熱系統、發電系統以及回注系統（如圖 1）。在取熱系統來說，目前最有利於進行地熱能源開發的環境是同時在地下地層具備有「熱源、裂隙、流體」的完美組合環境，這一個良好的儲集層環境也稱為傳統水熱型地熱系統。

而在取熱系統中，最重要的工程建設就是地熱生產井。生產井是地下熱能能被帶到地表的必要基礎設施。而通常地熱熱能被帶出的方式，常是隨著地熱水被生產到地上。因此在取熱系統中，水是「載體」，而我們需要的是「熱」。

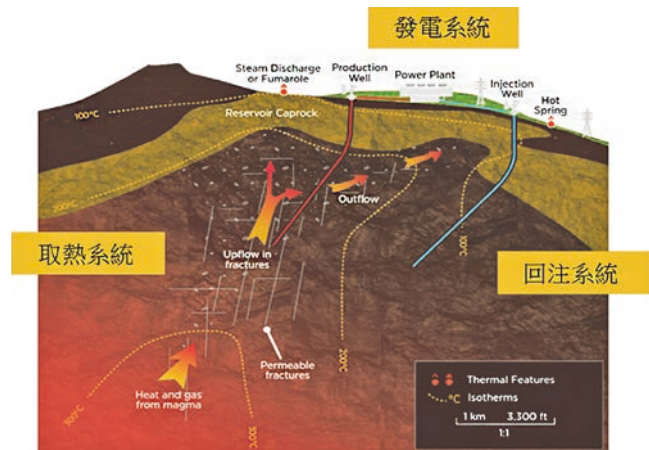


圖 1 地熱能源開發三大單元系統：取熱系統、發電系統、回注系統（修改自 Grant and Bixley<sup>[1]</sup>）

我們通常依靠地層中的自然壓力能量讓地熱水自噴湧出地表。如果遇到地熱水無法自噴的情形時，也可以使用注氣法或是使用井底潛式幫浦將地熱水引出。這兩種方法是將地熱取出至地表的常用的人工提舉方法。

地熱能源開發的第二個系統是發電系統。以前地熱電廠多使用乾蒸氣方式（Dry steam）直接發電，也常使用閃發式（Flash）進行發電，而目前則多應用雙循環式（Binary）作為發電。這一個發電方式的演進的目的就是希望能盡量擴充可用的地熱能源範圍，從以往只針對高溫流體（大約攝氏 200 度以上）到現在擴展到中溫流體（攝氏 100 度以上）就可以進行發電。

地熱能源開發的第三個系統是回注系統。回注系統是維持地熱能源可以永續發展的重要關鍵。地熱水是將地熱能源帶出地表的載體，當熱能在地表經由發電系統達成熱電轉換的工作之後，所生產的地熱水應該要盡量注回地層，以保持地熱儲集層的壓力穩定，避免地層壓力的能量有太多喪失。因此，有良好的回注系統設計是進行儲集層管理的重要方法。若能設計好回注系統，則可以在維持地層壓力的同時，也避免所注回地層的低溫流體流到生產井而影響生產井的產能。

## 台灣地熱能源開發

台灣很早就進行地熱能源的調查及開發。最早在 1965 年左右，政府即針對大屯火山群（Tatun Volcano Group, TVG）進行地熱資源調查，也鑽鑿數口探勘井確認地熱資源。但因為地熱流體的酸性問題而無法在當時進行開發生產。

1973 年的石油危機之後，台灣進行了更廣域的地熱

能源探查。針對一些高溫的溫泉徵兆區，包括宜蘭、南投、台東等地都進行地熱資源調查。而當時以宜蘭清水選定為第一優先開發場域。所以在 1977 年啟動台灣第一個地熱發電廠計畫：宜蘭清水地熱計畫。1981 年，清水地熱發電廠正式商轉。所產出的高溫流體，由閃發式（Flash）發電裝置進行發電。當初所設計的發電容量是 3 MW，而這也是全世界第 14 個地熱發電廠。電廠運行 12 年之後，因為沒有做好儲集層管理，也因為管線結垢問題影響產能，所以在 1993 年電廠關閉。

在清水電廠的運轉期間，於 1985 年，台灣同時啟動了第二個地熱發電廠計畫：宜蘭土場地熱計畫。1986 年完成土場地熱發電廠建置，這是台灣第一個雙循環式（Binary）地熱發電系統，當初所設置的裝置容量是 0.26 MW（260 kW）。土場地熱計畫是一個成功的地熱發電計畫，1994 年因為計畫期限到期而將地熱電廠關閉。

到了 2006 年，政府重新啟動地熱資源探查及開發計畫。首先是清水地熱的重啟計畫，工研院與能源局在清水地熱場域進行修井與新鑽井，並進行有機朗肯循環（ORC）發電系統開發與測試，在 2018 年建置了 300 kW ORC 發電系統，作為地熱示範電廠。政府也針對大屯火山群（TVG）再度進行地熱資源調查評估，進行地球物理調查、建立地熱概念模型、也進行一口探勘井鑽鑿。能源局也規劃並公布了大屯山區域的地熱潛力開發區（T1-T5）以刺激業者投入進行地熱資源開發。

到了 2021 年清水地熱電廠透過宜蘭縣政府的 BOT 案招標方式而正式商轉。目前的清水地熱電廠裝置容量是 4.2 MW，採用 ORC 系統進行發電，是目前台灣正式商轉的 MW 等級的地熱電廠。除了宜蘭之外，台東金崙也有 0.5 MW 的地熱商轉電廠正式上線。在今年（2023 年）台電公司的宜蘭仁澤 0.84 MW 地熱電廠、金山四磺子坪 1 MW 地熱電廠，明年（2024 年）台灣中油公司的宜蘭土場地熱電廠都陸續商轉為台灣提供地熱電力。

## 地熱創新技術展望

台灣已經開始有地熱發電的實績，開發案場也逐一出現，國家單位（例如地調所）也投入更多的資源進行地熱資源調查，這些都主要著重於傳統水熱型地熱環境內。台灣傳統水熱型的地熱開發量經評估約在 1 GW 之下，到今年（2023 年）止，只有開出大約 7 MW 左右的裝置容量。而在政府的目標中，在 2025 年可能只達到 20 MW，到 2030 年也可能達成最低 56 MW 或最高

192 MW 的開發量。地熱能源對台灣的綠能及淨零未來來說是一項硬需求，因此需要盡力尋求技術突破，努力開發出台灣地下的地熱資源。

我們在期待台灣地熱發電的發展時，也需要展望技術未來。地熱的開發未來需要的是創新技術，而我們可以期待的技術發展可歸納為四個層面，分別是：(1) 增進熱電轉換效率、(2) 增強熱液產量、(3) 找到更高溫的儲集層、以及 (4) 找到更多量的地下可用熱。這些可以由地熱開發的發電願景以及地熱開發的取熱願景來看。

在地熱開發的發電願景技術中，地熱電廠一開始使用乾蒸氣（Dry steam）直接發電，之後使用閃蒸（Flash）型式發電，目前多應用的是雙循環式（Binary）發電。為了更求效率提升，現在也有複合式（Combined-cycle）發電及混合式（Hybrid）發電，希望能在取出同樣的熱能條件下，可以透過更高的熱電轉換效率而產出更多的電力。

而在地熱開發的取熱願景技術中，主要都是要解決傳統水熱型地熱的難以標準化及擴展化的挑戰問題，所以目前研發出多種不同的地熱系統技術。傳統水熱型地熱系統備有「熱源 / 裂隙 / 流體」的完美組合，且在地表常有明顯的地熱熱徵（例如：溫泉或是高溫噴氣）可以讓我們知道地下地層中可能具有高壓且高溫的地熱流體。也因此，傳統水熱型地熱常常是高品質的地熱資源。但傳統水熱型地熱的挑戰問題是目前大型又好發現的地熱田已經都開發了，而且雖然透過地表熱徵可以輕易的發現它，但探勘新礦區的花費及風險還是高。傳統水熱型地熱也常屬於區域限定，只有在特定的地方才有。因此，難以標準化及擴展化形成了目前傳統水熱型地熱的挑戰問題。但地熱除了儲存於裂隙流體中之外，真正儲存最多地熱熱能的物體是地層的岩石本體。如果可以有好的工程技術可以將地層岩石的熱用工程方法取出，則可以解決需要豐富的地熱流體才能作為發電的問題。

因此，目前第一個地熱開發的取熱願景技術就是增強型地熱（Enhanced geothermal systems, EGS）（如圖 2）。增強型地熱主要應用於具有岩石熱源但較缺乏裂隙流體的地層（意即，乾熱岩型式）。在這個系統中不是依賴自然的地下流體將地熱熱能帶出，而是利用工程方式（或人工方式）建立一個良好的儲集層流體流動環境，並利用人工注入冷溫流體使之與地層熱岩接觸後造成溫度上升成為熱液，然後再由生產井產出進行發電應用。發電後的尾水熱度降低，重新利用注入井注回地層，創造一個取熱循環。

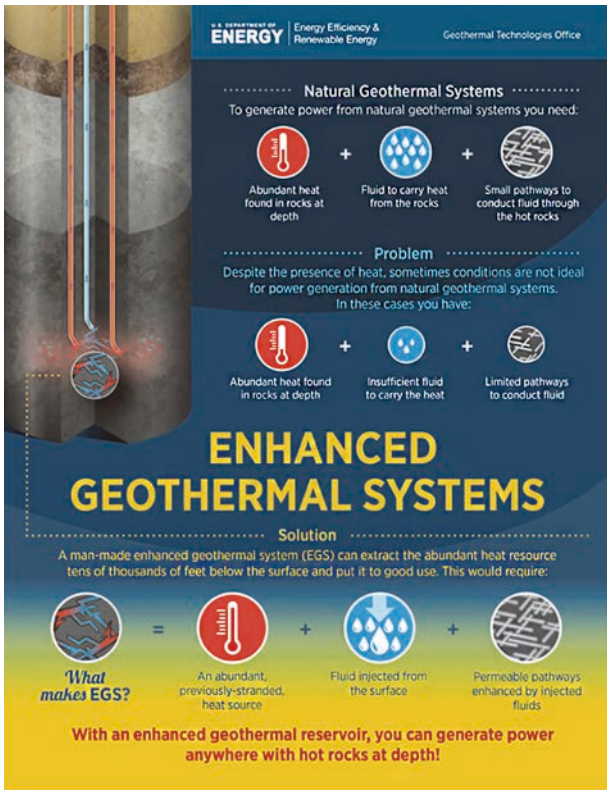


圖 2 增強型地熱 (EGS) (US DOE [2])

理論上，增強型地熱可以應用在世界各處。在市場有綠電需要，加上油氣工業鑽井及注產技術的應用之下，增強型地熱有很好的發展未來性。美國因為有頁岩油氣的工程技術，所以對增強型地熱的技術研發相當積極。目前在美國最有名的增強型地熱系統 (EGS) 計畫即為 FORGE 計畫 [3]。

地熱發電注重的是儲集層的熱度，如果可以找到某一地熱儲集層其地層溫度非常高的話，將有助於提升單井發電產能。因此，第二個地熱開發的取熱願景技術就是超臨界型地熱 (Supercritical geothermal system, SGS)。

當水溫超過 373°C 及壓力超過 220 bars 時，水將形成超臨界態 (Supercritical)。超臨界水的熱焓非常高，因此，若使用超臨界水之生產井進行發電應用，其發電能力將比傳統水熱型地熱的生產井高上數倍。另一個常見的比較案例說明，在一個 400°C 的地熱儲集層中使用 3 口井 (包含生產井與注入井) 將如同在一個 200°C 的增強型地熱 (EGS) 的儲集層中使用 42 口井 (包含所有的生產井與注入井)，由此可見超臨界地熱的單井高產能的潛力 (圖 3)。

超臨界型地熱目前在冰島、紐西蘭、日本等國家都正在進行技術研究，其中，冰島因其獨特的地熱地

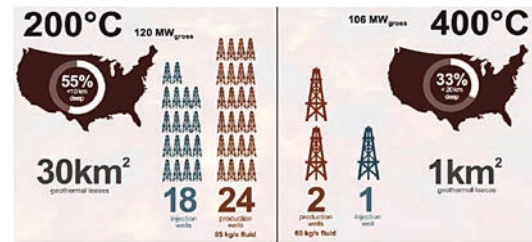


圖 3 超臨界型地熱與增強型地熱的所需井數相比 (US DOE [2])

質優勢，已經進行了超臨界井的鑽井測試。紐西蘭也將超臨界型地熱視為未來該國地熱發展的重要走向。

因為超臨界型地熱的單井高產能的吸引力，也促使一些新創公司投入技術研究。其中最受到注目的是美國的 Quaise 公司 [4]。這一家超臨界型地熱新創公司著重於深鑽井技術，他們目前正研發可以讓鑽井深度達到 10 ~ 20 公里的鑽井設備及技術。一般來說，當井深度達到 10 公里時，溫度已經超過 300°C，更深的地層高溫可以讓注產循環的地熱流體達到超臨界狀態而帶出非常高的單井發電產能。

第三個地熱開發的取熱願景技術是「取熱不取水」的科技，我們稱為先進型地熱系統 (Advanced geothermal systems, AGS)。先進型地熱系統 (AGS) 也可稱為 “closed loop” system (閉迴路系統)。先進型地熱系統 (AGS) 是真正的取熱不取水，它不採地層裡的流體，只採地層的熱。這些採收的熱可以作為熱應用及電應用。先進型地熱系統 (AGS) 與熱泵 (Heat pump) 的技術原理相似，但熱泵 (Heat pump) 較屬於近地表的工作範圍，且其應用多為熱應用，所以先進型地熱系統 (AGS) 與熱泵 (Heat pump) 是以不同類別進行區分。

先進型地熱系統 (AGS) 這一個新穎地熱技術類型也有許多地熱新創公司進行技術研發投入。其中，最有名的公司就是加拿大 Eavor 公司 [5] 所發展的 “Eavor-Loop”。Eavor 第一階段的技術概念設計是 “Eavor-Lite”，這一個示範計畫在加拿大 Alberta 進行試驗 (圖 4)。此試驗獲得成功且吸引了多家公司 (包含石油公司) 的資金投資益注。Eavor 目前在德國及日本都有技術開發的發電計畫正在進行中。

除了 “Eavor-Loop”，還有 “Green-Loop” (GreenFire Energy 公司 [6])，他們進行的是井下熱交換系統的技術研發。另外也有 “HeatRoots” Sage Geosystem 公司 [7]，他們結合單井閉迴路系統及創新的井激勵設計，形成一個複合型的「閉迴路 / 增強型地熱系統」。

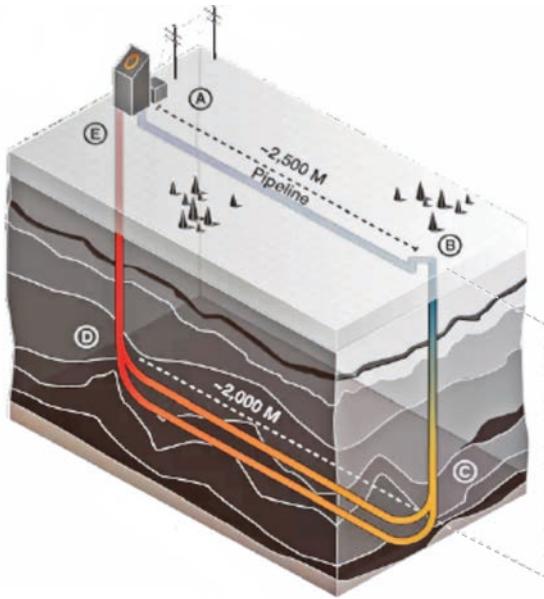


圖 4 加拿大 Eavor 公司之 Eavor-Lite 試驗計畫

第四個地熱開發的取熱技術則是著重在沉積岩地層，這是一個直接應用石油工程開發技術且使用在石油工程熟悉的地質環境（沉積岩）中的地熱能源開發工程。與前面所敘述的增強型與先進型地熱開發系統較適用的地質環境不同，前述的地熱創新技術主要是針對乾熱岩體系或是裂隙體系的火成岩或變質岩地層進行地熱開發，而這一個完全使用石油工程開發技術進行地熱能源開發的方法則是針對具有廣泛孔隙空間及分布特性的沉積岩進行地熱開發。

沉積岩地熱儲集層的溫度梯度，一般來說在 3~4°C/100 m 之間，台灣也有一些具有較高溫 5°C/100 m 的地區，但老實來說，與一般所想像的火成岩或變質岩的 10~15°C/100 m 高地溫梯度環境來說，沉積岩地熱儲集層的溫度不會是一開始進行地熱發展時所想要追逐的選項。但地熱發電的真正意涵是要先將大量的地下熱量拿到（生產到）地表來才有機會進行熱電轉換並獲得電力。沉積岩儲集層的溫度雖然不是最高，但沉積岩環境是一種孔隙連通環境，沉積岩的面積區域也相當廣泛，這導致可以從沉積岩地層中採出比火成岩或變質岩地層更多的流體。溫度不是最佳的條件但可以用最佳的產熱水率來彌補，在這種因素組合之下，從沉積岩地熱儲集層中可以採出的地下熱量總量也可以很高。

國際中進行沉積岩地熱開發的值得關注的公司就是加拿大的 DEEP 計畫（DEEP Earth Energy Production Corp.<sup>[8]</sup>），在今年（2023 年）9 月該計畫正式通過第三方技術審查，確認其第一期利用 2 口生產井及 2 口注

入井可達成 5 MW 的發電能力，以及第二期可以擴大到 25 MW 的發電能力。DEEP 計畫的最終目標是要開發出 180 MW 的地熱裝置容量電力。

對台灣來說，沉積岩廣泛的分布於台灣西部、此區域的電網建設充足、也因著孔隙空間廣泛分布的特性，可被評估的沉積岩區域比東部裂隙帶區域更多。在沉積岩區域進行地熱開發，可以達到規模化及可擴展化。若能善用石油工程的鑽井及開採技術，尤其是水平井鑽井技術引入更可以增加台灣更多地熱能源開發的機會。

## 結語

台灣需要再生能源，更需要基載電力，地熱能源將是這個需求的最重要解方。而目前，世界上的地熱發電技術與取熱技術一直在進行技術研發創新，其目標就是利用各種工程方式，有效的從地層岩石中取出更多的熱能，並且轉換為電能提供為無碳的再生能源電力。若我們著眼於技術的研發，就可以大量產出台灣地下的地熱能以轉換為電力供應。

台灣地下的地熱能源蘊藏豐富無庸置疑，但要進行地熱能源「開發」之前，仍需要經過「探勘」過程。探勘即帶有不確定性，在台灣地熱發展的萌芽階段，若政府沒有直接幫忙有心投入於地熱發展的產業界做好地熱探勘，則可以想像的是地熱發展速度將非常緩慢。讓地熱探勘的風險性消失，後續的地熱開發工作就可以加速進行。

除了探勘風險性的層面之外，另一個地熱開發的商業發展核心就是「可擴展性（Scalability）」。如何應用技術讓台灣各處的地下地熱都有機會被開發應用，若政府及企業可以從可擴展性的這一個層面思考，台灣的地熱能源發展會更有未來。

## 參考文獻

1. Grant, M. and Bixley, P. (2011). *Geothermal Reservoir Engineering*. Academic Press. 378pp.
2. US DOE (2023). <https://www.energy.gov/eere/forge/enhanced-geothermal-systems>
3. FORGE (2023). <https://www.energy.gov/eere/forge/forge-home>
4. Quaise (2023). <https://www.quoise.energy/>
5. Eavor (2023). <https://www.eavor.com/>
6. GreenFire Energy (2023). <https://www.greenfireenergy.com/>
7. Sage Geosystem (2023). <https://www.sagegeosystems.com/>
8. DEEP Earth Energy Production Corp. (2023). <https://deepcorp.ca/>