

淺談地熱發電與花蓮地區地熱資源探勘實例簡介

楊智豪 財團法人中興工程顧問社 / 副研究員
 譚志豪 財團法人中興工程顧問社 / 博士、組長
 俞旗文 財團法人中興工程顧問社 / 副主任
 李建成 中央研究院地球科學所 / 研究員
 宋聖榮 國立臺灣大學地質科學系 / 教授
 姜智文 國立臺灣海洋大學地球科學所 / 助理教授
 陳致言 經濟部中央地質調查所 / 技正
 陳棋炫 經濟部中央地質調查所 / 科長
 陳勉銘 經濟部中央地質調查所 / 組長

摘要

因應全球氣候變遷，政府推動能源轉型與 2050 淨零排放之政策，於前瞻基礎建設計畫項下規劃「加強全面性地熱資源探查及資訊供應計畫」，目的即為達到能源轉型，打造國家未來需要之綠色能源、促進環境永續的綠能基礎建設；而 2050 淨零排放則規劃於 2050 年，其再生能源占比為總電力之 60% ~ 70%。短期目標為達成低碳，減少能源使用與非能源使用碳排放，透過能源轉型增加綠能，包含布局地熱；長期目標朝零碳發展，布局長期淨零規劃，調整能源、產業結構與社會生活型態。因此可以做為基載電力的地熱發電，在未來將扮演重要的角色。

地熱電廠開發流程包含了：初步調查、資源探勘、鑽井調查、可行性評估、場址開發、電廠興建以及電廠運轉與維護。現階段中央地質調查所進行我國地熱潛能區之基礎探勘，利用新興科技擴大探勘範圍及深度，以掌握地熱資源的基礎地質資訊，並彙整國內各單位進行的地熱探勘資料，為地熱潛能區探勘資訊整合平台。提供有意投入地熱開發者能掌握地下地質資訊，以降低地熱開發前期之探勘風險，及縮短地熱開發時程。於 110 ~ 111 年度，在花蓮地區多處具有地熱潛能的區域，篩選出一處重點調查區域「瑞林-紅葉地區」進行進一步探勘調查，包含：地表地質調查、大地電磁探測以及地球化學分析等調查方法。整合蒐集過去文獻資料與本計畫的調查資料，初步提出瑞林-紅葉地區的地熱地質概念模型。

一、地熱能

地熱能是地球內部產生的熱量，是一種可以供人類取用的資源。地核位於地表下 2,900

公里是地球最熱的部分。地核的熱量來自 46 億年前地球誕生時形成的摩擦和引力以及地核中的放射性同位素（如鉀-40 和鈾-232）衰變所

產生。這些放射性元素持續的衰變，使得地核的溫度超過 5,000°C。由於來自地核的熱量不斷向外輻射，使得地層中的岩石、水、氣體逐漸被加溫。當深部岩層被加溫到 700 ~ 1,300°C 的時候會形成岩漿，岩漿是被氣體或氣泡滲透的熔融或部分熔融的岩石。岩漿會加熱附近的岩石以及地下含水層，被加熱的熱水或蒸汽會由間歇泉、溫泉、噴氣孔或是海底熱泉流出。前述被加熱的岩石、水、氣體皆為地熱能源，它們的熱量可以直接取用。然而大部分的地熱能不會以岩漿、熱水、蒸汽等形式冒出至地表，而是存在於地函與地殼之中，以緩慢的速度向外輻射。瞭解地熱能的特性後得知，只要掌握地熱流體或是熱源傳遞的方式，便能有效利用其熱能作為發電使用，是一種穩定輸出的基載電力。

1.1 地熱能取熱類型

地熱能傳遞到近地表處，根據熱交換發電的類型區分，大致上可分為四大類，分述如下：

(1) 傳統水熱型地熱資源 (Conventional hydro-thermal resources)

在少數特定的地區，地層內的地下水被熱源加熱成熱水或蒸汽。這些地熱流體從地層深部上湧，被不透水的蓋層所阻擋，儲存在具有較高孔隙率的砂岩層或是充滿裂隙的岩石等滲透率較高的地熱儲集層間。這些地熱儲集層內的受壓熱水經常出露地表為噴氣孔或溫泉露頭。一旦找到具有地熱潛能的場址，便可開始進行地質調查作業以及鑽探作業，尋找可以作為生產井的位置。從生產井生產出來的地熱流體至地熱電廠經熱交換後，流體就會冷卻，並利用注入井回注至下方地層，以保持地層壓力。

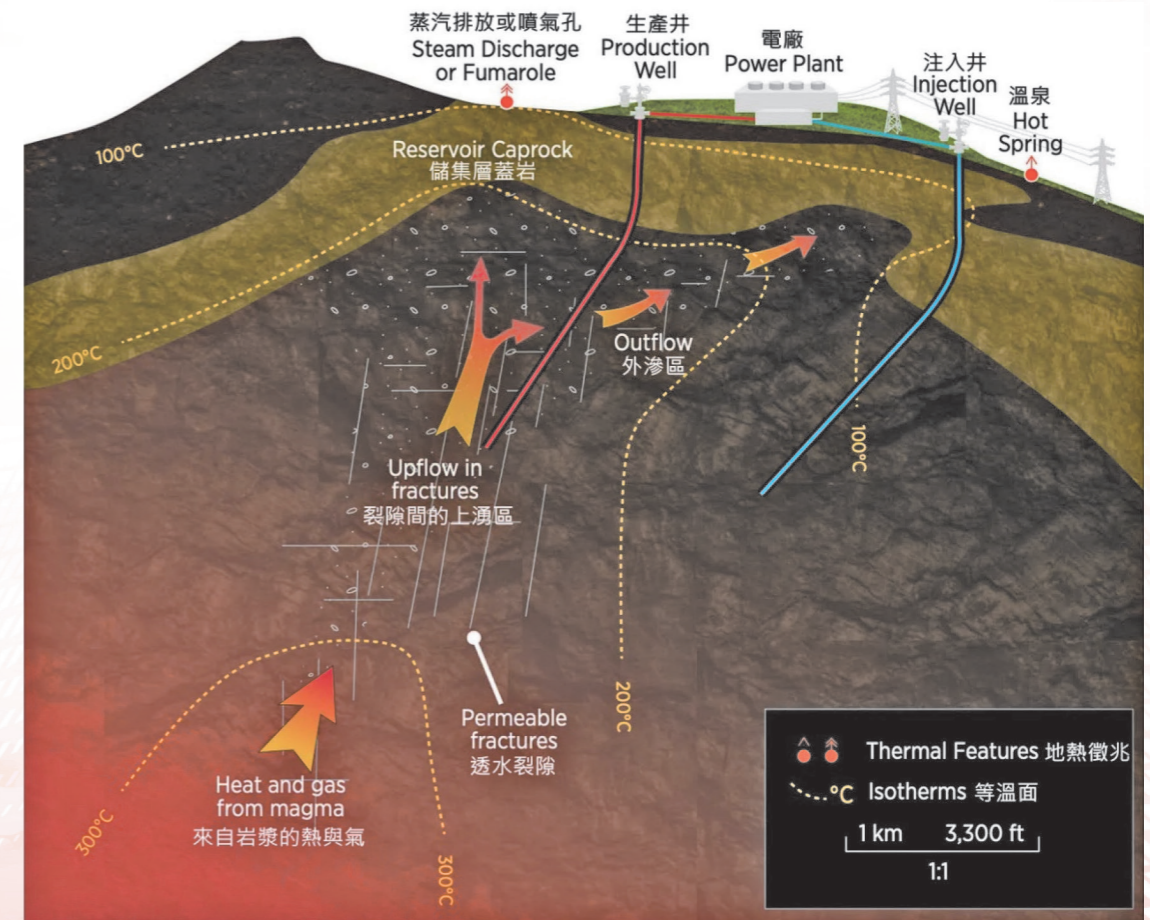


圖1 傳統水熱型地熱系統 (改編自 US DOE, 2019)

(2) EGS 增強型地熱系統 (Enhanced Geothermal System)

傳統水熱型地熱資源僅限於熱能、水和岩石孔隙同時存在的特殊區域。然而對於有大量的熱能蘊藏在堅硬、孔隙率極低的深部岩層中時。地熱開發商借用油氣工業開發頁岩氣的技術，鑽井至地層深部具有熱能的岩層，並注入高壓水，以水力破裂的方法人工致裂地層深部岩石，人為方式創產生裂隙形成儲集層，採用一口井注入冷水，另一口井收集被深部地層加熱的熱水進入地熱電廠，如圖 2 所示。愈深的地層具有愈高的溫度，但孔隙也愈少，因此要獲得深部地層熱能的工程難度也隨之增加。

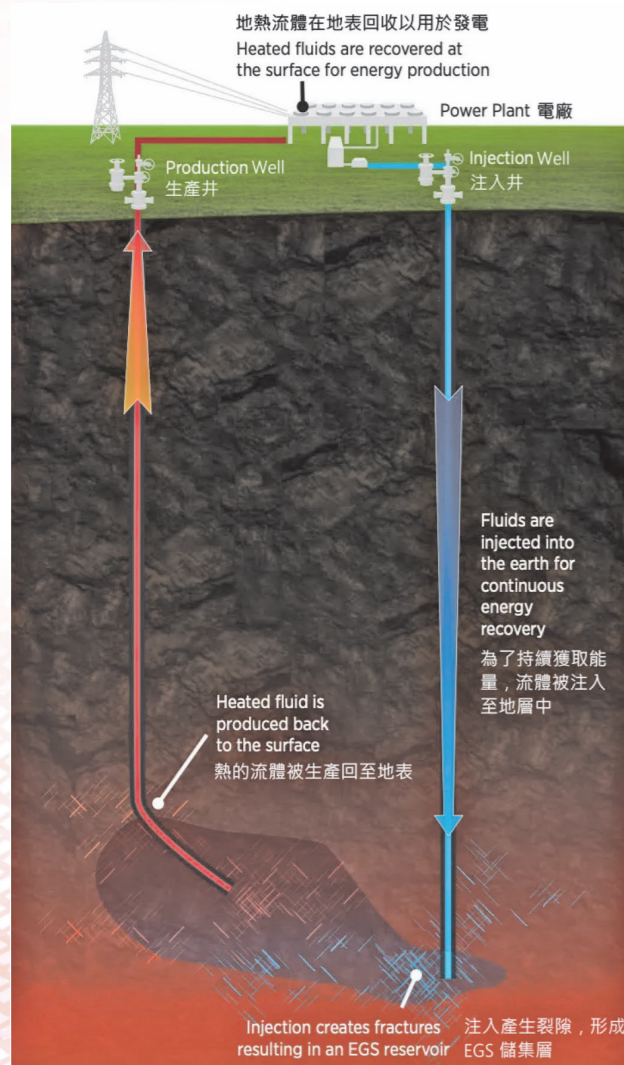


圖 2 增強型地熱系統(改繪自 US DOE., 2019)

EGS 在發展過程中遇到的反對意見是會誘發地震，例如 2007 年瑞士 Basal 地熱 EGS 計畫誘發規模 3.4 的地震；2017 年韓國浦項地區開發 EGS 執行注水作業所誘發規模 5.5 的地震。針對 EGS 誘發地震的議題，2014 年美國 FORGE 計畫及 2015 年瑞士後 Basal 計畫，均提出高溫水平鑽井及小規模可控的液裂來解決誘發地震的問題 (台灣科技媒體中心，2018)。

(3) SGS 超臨界地熱系統 (Supercritical Geothermal System)

SGS 是鑽井至更深部地層、溫度更高的 EGS。水在溫度大於 374°C、壓力大於 221bar 的環境下會進入超臨界態。超臨界條件經常出現在以火山為主體的熱液系統的根部，在美國的 Geysers 和 Salton sea、日本的 Kakkonda、義大利的 Larderello、冰島的 Krafla 以及墨西哥的 Los Humeros 的鑽井都遇到井溫超過 374°C (Dobson et al. 2017)。在超臨界態下的水，其熱焓比液態水或蒸汽高的多，代表超臨界水單位質量的能量高出液態水或蒸汽 4~10 倍。因此利用超臨界水轉換成電能的效率也大大提升。目前尚未有任何井利用超臨界水發電，而目前發展的瓶頸是需要開發創新的鑽井和完井技術來應對極端高溫 and 腐蝕性流體。

(4) AGS 先進地熱系統 (Advanced Geothermal System)

AGS 是一種閉迴路系統，不會抽取任何地層間的地熱流體。發電所使用的工作流體在地下密閉的管道或鑽孔內循環，利用熱傳導的方式吸收地下岩層的熱量，並循環帶回地表。近期有數家新創業者利用 AGS 的概念發展其自有技術，下列簡略介紹 Eavor 以及 Greenfire 兩家公司的技術。

Eavor 公司首先在加拿大 Albert 省進行 Eavor-Lite 示範計畫，以證明基本概念和技術可行。設置兩口相距約 2,500 公尺的垂直井，在地層深部以一系列的垂直井對接，採用類似散熱器的設計。取熱方式是以熱傳導的形式，以最大化

表面積的方式，使井內的工作流體盡可能的吸收熱量。由於迴路是封閉的，因此一側的冷水下沉，而另一側的熱水上升，會產生熱虹吸效應，使水自然循環，無需使用泵浦。試驗結果表示，水平井可以精確定位以及熱虹吸效應起作用的技術可行性，並且可以精確評估工廠的成本和產量。以 Eavor-Lite 的試驗為基礎，提出 Eavor-Loop 1.0 技術。Eavor-Loop 1.0 中，只需要一個鑽井場址，在鑽井到達目標深度後，轉向約 90°，並且分散為多條井組。目的是增加與岩石接觸的熱交換面積以及整體效率。透過鑽井技術的提升，後續又提出了 Eavor-Loop 2.0，井體轉向角度較小，但井深較深。意味著在同一個鑽井場址，轉向不同的井組是可以堆疊的，因此以可獲得更多的熱能，Eavor-Loop 1.0 及 Eavor-Loop 2.0 詳圖 3 所示。

Greenfire 公司提出了 GreenLoop 技術，一種開放循環與封閉循環混合的技術。一口深鑽井下半部的套管開篩，能使地熱流體進入井內 (開放循環)，井內另安裝一組管中管 (封閉循環)，

熱能以傳導方式由開放循環傳遞至封閉循環如圖 4。工作流體在井中的封閉循環內收集深處的熱能，傳輸至地表的熱交換器進行熱交換，以提供熱能推動發電機，經熱交換過後的工作流體再由泵浦推動回至管中管深部，完成封閉循環；外層的開放循環則會讓地層間的地熱流體經過井體的開篩段進井內，地熱流體透過熱傳導的方式與封閉循環進行熱交換，與封閉循環熱交換過後的流體則由井底回注至地層中，為開放循環。此項技術可以根據特定資源和現有基礎設施進行客製設計，包含：視需要選擇工作流體 (例如超臨界二氧化碳、水)、工作流體流速、地面設施配置等。

1.2 地熱發電技術

地熱發電原理為探勘取得地層內被熱源加熱後的高溫流體；或是在封閉循環內，工作流體在管內循環時經過熱儲層時進行熱交換。這些高溫流體或工作流體直接或經過熱交換之後推動渦輪機發電。地熱發電模式依熱源條件的不同可分為乾蒸汽系統 (Dry steam)、閃發系統 (Single/Double

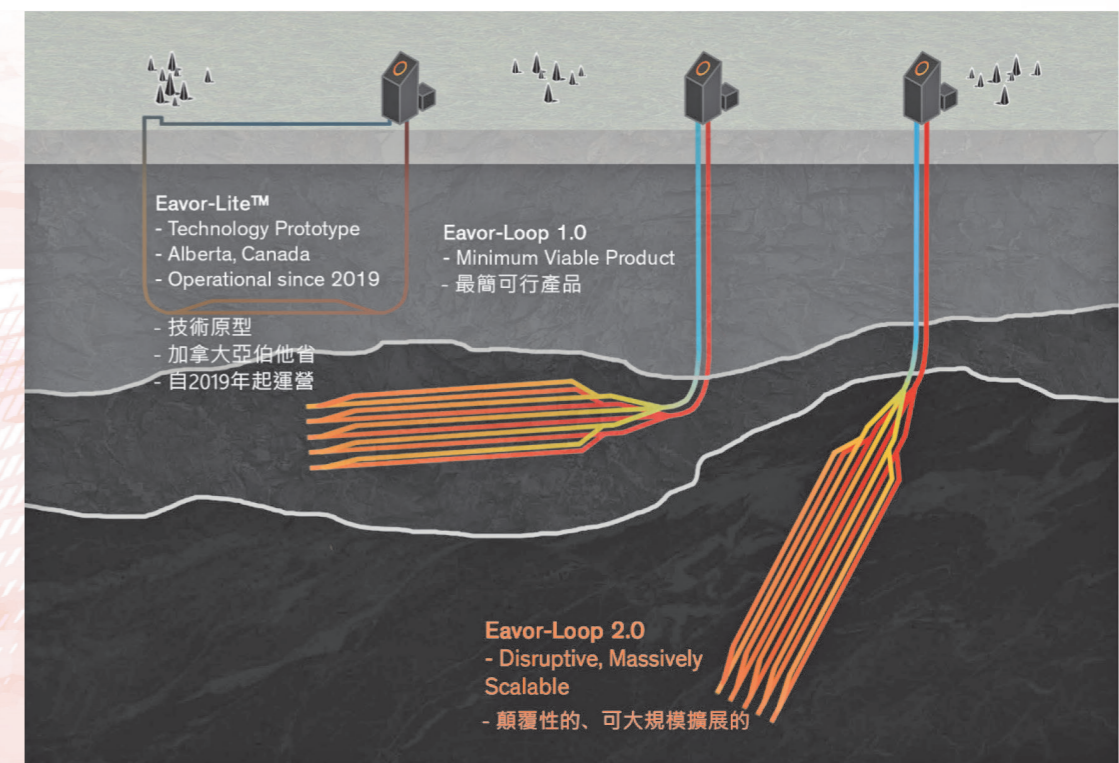


圖 3 Eavor 公司 Eavor-Loop 技術示意圖 (改繪自 Eavor)

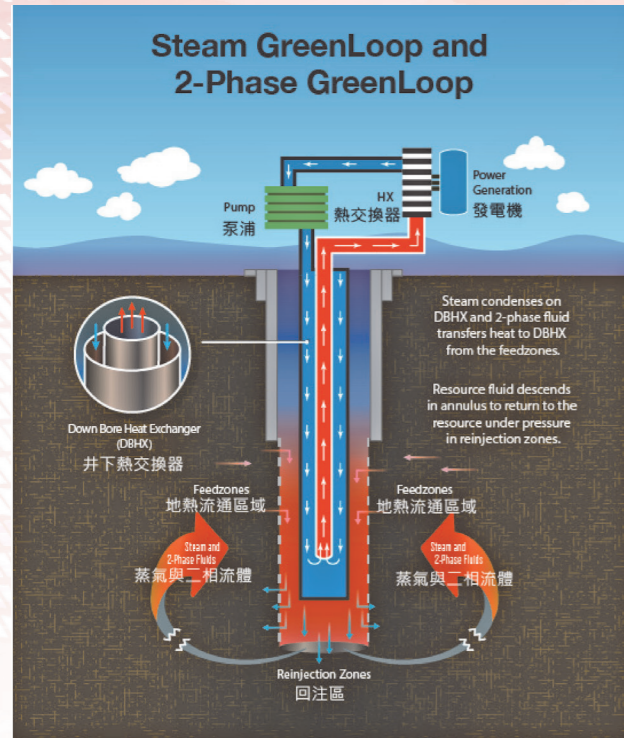


圖 4 Greenfire 公司 GreenLoop 技術示意圖 (改繪自 Greenfire)

flash) 及雙循環系統 (Binary cycle) 三大類，圖 5 為不同地熱發電模式之示意圖 (Geothermal Communities, 2010) 發電模式簡單說明如下。

(1) 乾蒸汽系統：

適用於溫度大於 180°C 以上之乾蒸汽熱源條件，由井頭生產乾蒸汽並直接推動蒸汽渦輪機。幾乎所有的乾蒸汽都包含 2% ~ 10% 的不凝結氣體，需使用噴射器來去除不凝結氣體。蒸汽渦輪出口處的蒸汽不直接排放到大氣中，而是進入一個保持恆定溫度的冷凝器，通常為 35 ~ 45°C。由於冷凝器中的壓力低於大氣壓，蒸汽會膨脹到更大的比容，提供了更大的機械能給渦輪葉片。

(2) 閃發系統：

適用於溫度大於 180°C 以上熱源條件。閃發為從地熱井生產至井頭的熱水因壓力突然降低而汽化產生蒸汽的現象，閃發後經過氣水分離，

可利用閃發後的蒸汽推動氣渦輪機，發電後的尾水與冷凝蒸汽回注至儲集層中，以維持地層的壓力，閃發系統可分為單閃發系統及雙閃發系統，分述如下：

單閃發系統，儲層中的地熱流體以蒸汽和鹽水的混合物形式到達地表。通過垂直分離器中的旋風效應或水平分離器中的重力將蒸汽與鹽水分離。乾蒸汽被引導至蒸汽渦輪，蒸汽渦輪與發電機相連以發電，離開渦輪的蒸汽被引導至在真空壓力下運轉的冷凝器。冷凝器中的低真空壓力可以增加渦輪機中的焓差以及增加設備的功率輸出。冷凝器為直接接觸式冷卻塔的冷卻水通常噴灑在冷凝器頂部，將蒸汽冷凝回液態。然後將冷凝水和冷卻水的混合物泵送到冷卻塔的頂部，以向環境散熱。

雙閃發系統則將地熱流體進行兩階段級分離，因此在蒸汽渦輪處有兩個蒸汽進氣壓力。首先，來自井的地熱流體在相對較高的壓力下閃發，蒸汽和鹽水在分離器中分離。在分離過程中，產生的高壓蒸汽被引導到高壓渦輪機，分離後的鹽水仍然含有相當高的焓，被節流並引導到低壓分離器以產生額外的蒸汽。來自高壓渦輪的蒸汽與來自低壓分離器的蒸汽混合，然後被引導至低壓渦輪以產生額外的動力。再將來自低壓分離器的鹽水通過管道輸送到回注井。

對於相同的地熱流體條件，雙閃發系統循環可以比單閃發系統多產生 15% ~ 25% 的功率輸出 (DiPippo, 2007)。閃發系統為國際上的主流，惟相對運轉率平均值約 73%。

(3) 雙循環系統：

適用於溫度介於 100 ~ 200°C 熱源條件 (甚至更低溫)，透過熱水的熱量來加溫工作流體，通常是低沸點的有機化合物。工作流體在熱交換器中蒸發並用以推動渦輪機。地熱流體和工作流體被限制在封閉循環中，因此不會排放到空氣中。

由於低溫水的蘊藏資源比高溫水豐富得多，因此雙循環系統適用性較廣，也較適合台灣潛在於地熱區之熱源條件。雖其熱轉換效率較前兩

者差，但其運轉率 (可達 95%) 較高。目前國際發展趨勢上，符合閃發系統之地熱田在運轉率的考量下，逐漸採用雙循環系統，或是複合式系統 (結合閃發與雙循環系統)。

二、花蓮地區地熱資源探勘實例

地熱電廠開發流程包含了：初步調查、資源探勘、鑽井調查、可行性評估、場址開發、電廠興建以及電廠運轉與維護 (IGA Service GmbH, 2014)。為吸引更多開發業者投入地熱產業，因此經濟部中央地質調查所便大量投入公部門資源於前期案場的地質調查。地調所的「區域地熱探勘與重點潛能評估」計畫，主要是針對傳統水熱型地熱，於 110 ~ 111 年度，分別在花蓮與臺東兩大區域進行地熱資源探勘，其中花蓮地區針對南橫以北 (富源 - 紅葉) 地區，辦理區域地熱地質調查。藉由盤點與分析既有大範圍資料，從數個地熱潛能區中選定瑞林 - 紅葉地區，作為重點潛能評估的目標。辦理地熱地質調查大地電磁探測與地球化學水質分析，並進行場址尺度的調查探勘工作 (包含進行小孔徑鑽井驗證)，以釐清並建立重點地熱潛能區之地熱構造系統與地熱概念模型 (經濟部中央地質調查所, 2021)。

2.1 地熱地質調查

進行野外地熱地質調查前，需先蒐集相關文獻，掌握調查範圍內前人的既有、調查成果，包含：大區域的地質圖，乃至於既有地熱井溫資料等。作為現地調查的基礎，最後再根據新的調查結果提出修正。

瑞林 - 紅葉地區的玉里帶，主要可以分為三個岩性單元，包括 (1) 基性、超基性岩塊，(2) 石英雲母片岩，(3) 基性岩周遭 (前兩者交互作用或混雜而成) 的變質角閃片岩透鏡體。這三個岩性單元暗示了在不同地體構造位置及單元，經過深埋、隱沒、碰撞、掘升，這一系列岩石循環，伴隨的變質及變形作用，孕育而生的複雜變質岩的組合。

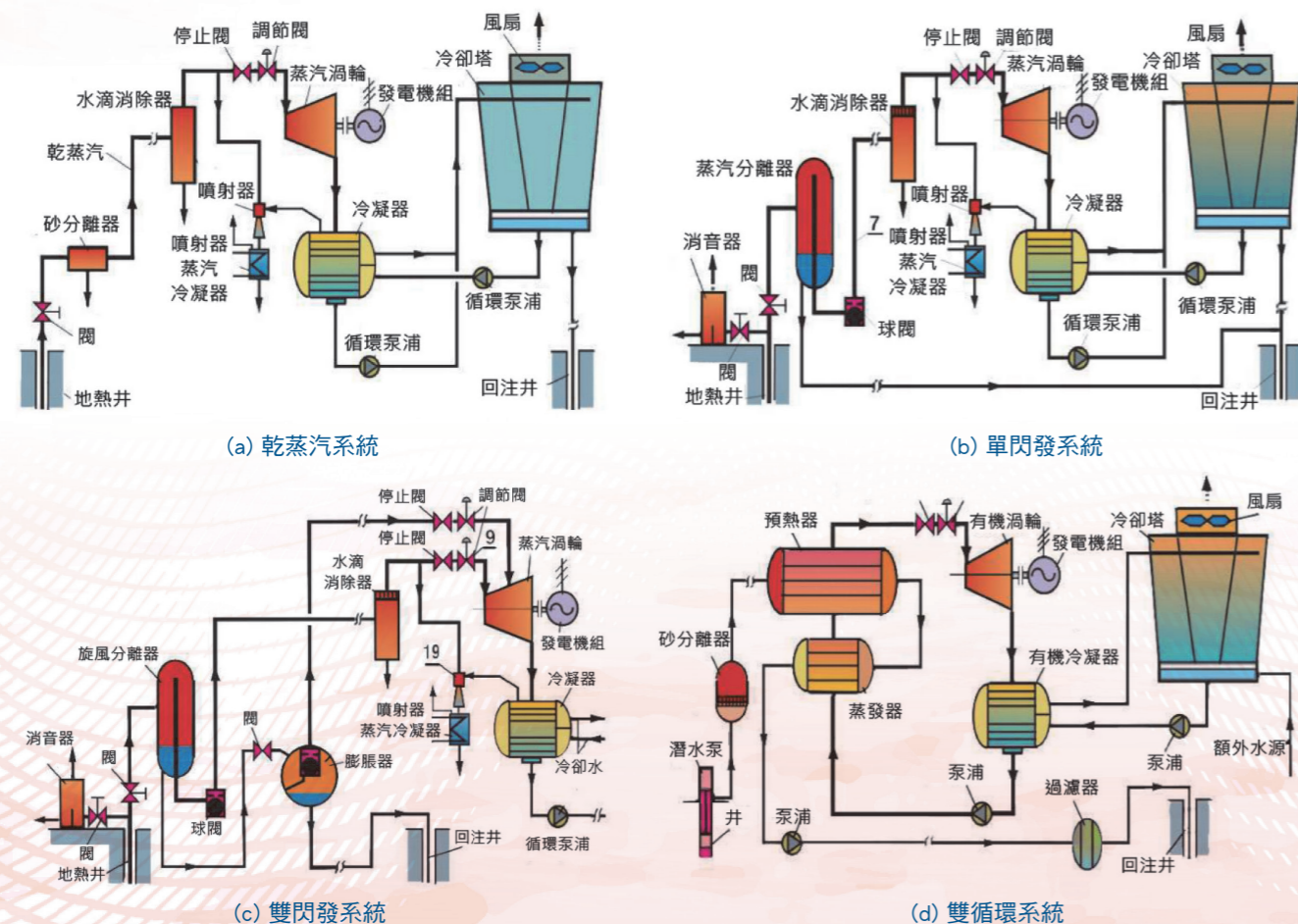


圖 5 地熱發電模式示意圖 (改繪自 Geothermal Communities, 2010)

調查工作首先利用高解析度數值地形多向陰影圖進行人工判讀線型構造，線型判釋結果顯示主要三組方向的線型，分別是東西走向 (~090)、西北-東南走向 (140~150) 與北北東-南南西 (~020) 如圖 6 所示。其中北北東-南南西 (~020) 為整個區域穿透性最強的線型。在野外工作部分，透過觀察野外露頭得知瑞林-紅葉地區節理主要有三組，將紅葉流域區域綜合統計節理位態，可見西北-東南走向 (270~330) 為最主要的張裂縫節理，走向大致垂直於大地張應力 (東北-西南伸張)，可能是提供天水 (淺部循環) 以及溫泉水 (淺部及深部循環) 流通的重要管道。

2.2 大地電磁探測

大地電磁法是利用自 0.001 Hz (來自電離層) 至 100 Hz (來自全球雷暴活動) 寬頻率範圍內大地自然電場和磁場的起伏變化測勘地層深部之電性構造，獲得地下深部岩石的電阻特性，為常用於溫泉及地熱資源探勘方法之一。在調查區域找尋位置恰當、雜訊干擾少的優良施測地點，盡量避開人文活動區為主要考量。大地電磁探測儀器主要分成三大部份：主機、電場感測器以及磁場感測器，儀器配置如圖 7 所示。現地收集的大地電磁探測資料經過適當的資料處理，包含：時頻轉換、遠端參考修正、張量分析以及逆推分析，最後獲得電阻率三維逆推模型，如圖 8 所示 (暖色系為低電阻，冷色系為高電阻)。

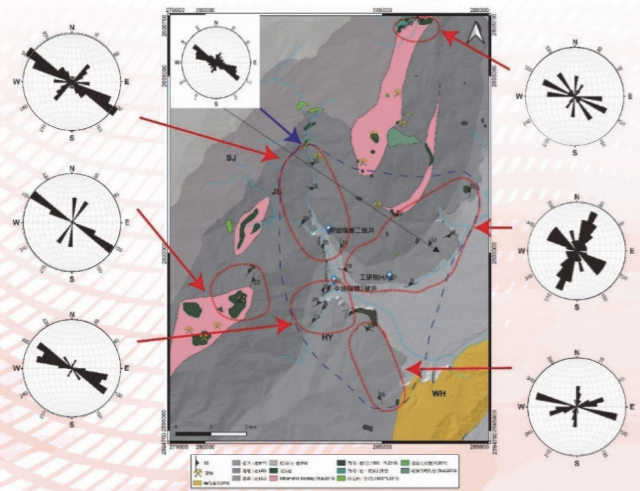


圖 6 瑞林-紅葉地區節理走向玫瑰圖

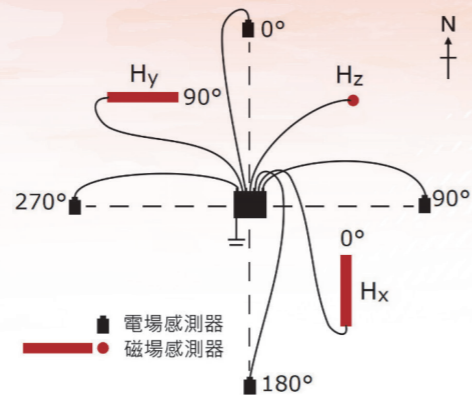


圖 7 大地電磁測站布設示意圖

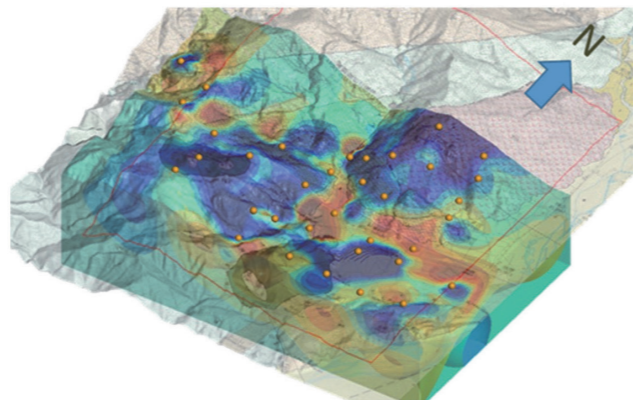


圖 8 大地電磁三維逆推結果

2.3 地球化學水質分析

透過地球化學水質分析可以提供熱液來源、平衡溫度、反應溫度、路徑、混合、作用等相關訊息。當地下水流經這些高溫的地層，會被加熱而形成高溫的熱水，這些熱水有機會蘊藏豐富的地熱潛能。變質岩區的地熱流體在地表常以溫泉或噴泉的形式呈現。因此，地表溫泉或噴泉可作為探討地熱活動的媒介，藉由溫泉水質和同位素性質等地球化學資料解析探討地熱流體之化學特性、來源和溫度，可作為地熱發電發展評估參考資訊。在調查範圍內採集內溫泉區之紅葉兩處溫泉水、外溫泉區之七處溫泉、鄰近之山泉、溪水與水渠、地下水進行水樣基本性質量測、陰離子分析、陽離子分析與氫氧同位素分析。

根據水質分析結果，可將調查區域區分為內溫泉 (瑞林溫泉、紅葉溫泉) 與外溫泉 (瑞穗溫泉)。內溫泉屬碳酸氫鈉泉，其特色為離子濃度低，鈉離子濃度遠高於對應之氯離子濃度，幾

乎無水岩反應。推測補注區域為尊古安地塊，來自較高程但為淺循環。不易產生結垢，但容易面臨無水的情況。外溫泉屬氯化鈉泉，其特色為離子濃度高，氯離子與鈉離子濃度皆高，水岩反應強烈。推測補注區為打馬燕地塊與中央山脈，為深循環與淺循環。易產生方解石與霏石沉澱。推測有較大的量體與潛能。

2.4 地熱地質模型建立

綜合上述地熱地質調查、大地電磁探測、地球化學水質分析的成果，提出初步的調查場址的地熱概念模型，並試作本區域之地熱地質草圖，如圖 9 所示。推測瑞林-紅葉地區的熱源為板塊隱沒沉積物深埋變質後，快速掘升至地表的餘熱。調查結果顯示，本區域沒有明顯的地質單元或區段具有高裂隙、高孔隙率的岩體，推測本區域以黑色片岩為主要的乾熱儲集層，而節理是熱液傳輸的主要構造。根據地球化學分析結果，天水為地表溫泉的補注來源。熱液循環部分：內溫泉 (瑞林溫泉、紅葉溫泉) 為淺循環；外溫泉 (瑞穗溫泉) 具有淺循環以及深循環。後續工作為執行鑽井驗證，以鑽井資料驗證並修正既有地熱地質概念模型。

三、結論

地熱資源蘊藏量豐富，但要如何有效率的

開採，乃至於發電機的選用，都需要專業的知識。取熱的技術有許多種，應配合地質調查、地球物理、地球化學等調查成果，釐清資源蘊藏的情況 (溫度條件、地熱流體產量、儲集層深度等等)，選用適合的開採技術。最後再依據地熱流體的特徵 (氣水比例、流體溫度、流體流量等等)，搭配適合的發電機組。

參考文獻

1. Geothermal Technologies Office, US DOE. (2019). GeoVision: Harnessing the Heat Beneath Our Feet - Analysis Inputs and Results. United States. <https://doi.org/10.15121/1572361>
2. 台灣科技媒體中心 (2018), <https://smctw.tw/3586/>。
3. Dobson, P., Asanuma, H., Huenges, E., Poletto, F., Reinsch, T., & Sanjuan, B. (2017). Supercritical geothermal systems-a review of past studies and ongoing research activities. In 42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering.
4. <https://www.eavor.com/>
5. <https://www.greenfireenergy.com/>
6. Geothermal Communities (2010) Geothermal system and technologies
7. DiPippo, R. (2007). Geothermal power plants: principles, applications, case studies and environmental impact. Butterworth-Heinemann.
8. IGA Service GmbH (2014) Best Practices Guide for Geothermal Exploration.
9. 經濟部中央地質調查所 (2021), 「區域地熱探勘與重點潛能評估-花蓮地區」期中報告。

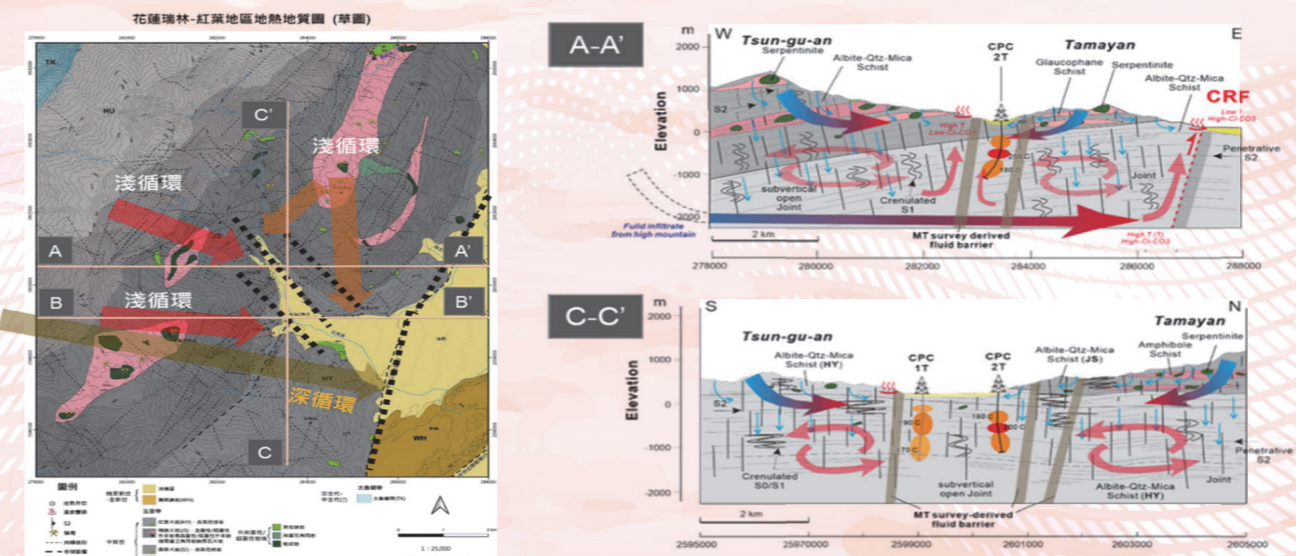


圖 9 地熱地質草圖及剖面圖