

毫米波地熱鑽探計畫(上)

張嘉君博士 / 歐懿中博士
國家同步輻射研究中心高頻小組

編者按：運用加速器技術加速電子可以產生同步輻射光，加速器技術也可以運用在許多領域，例如：磁鐵技術運用在半導體離子佈植機和醫學重離子治療。接續兩期的加速器專欄，我們將介紹運用加速器毫米波技術來進行地熱鑽探計畫，本期說明台灣地熱優勢和傳統開採方法，下一期接續介紹運用毫米波鑽探技術的優勢與挑戰。

台灣地熱能源的崛起與傳統開採技術解析

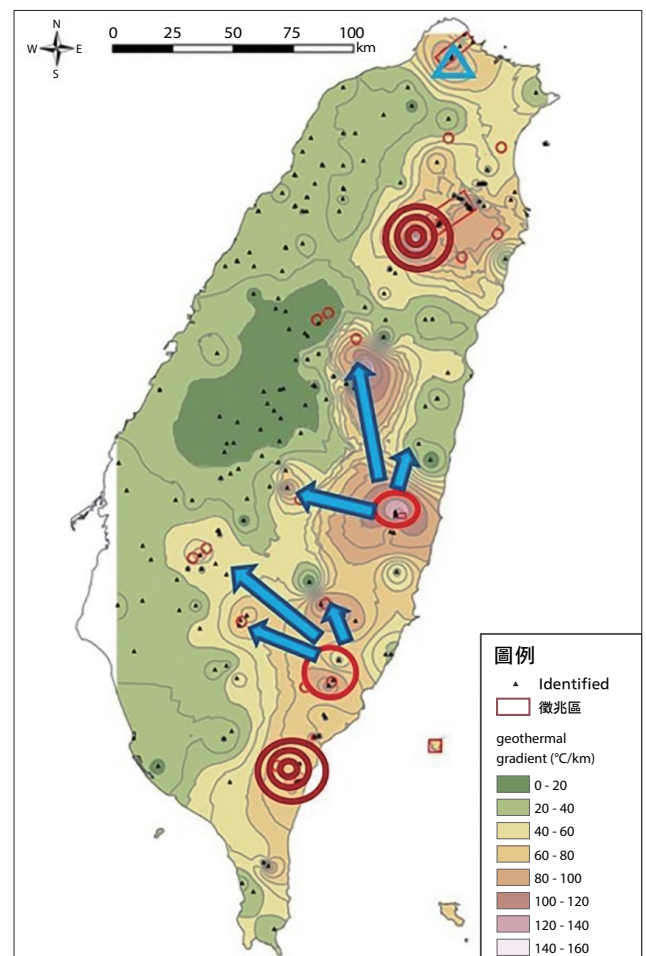
台灣位於環太平洋火山帶，地質活動頻繁，火山及板塊運動讓我們得以坐擁豐沛的地熱資源。大屯山、宜蘭、花東和廬山等地，不僅是潛力無窮的地熱發電場域（圖一），更是享譽盛名的溫泉勝地。據過去研究，台灣的地熱開發潛力高達 33.6 GW [1]（十億瓦）（核三全運轉發電量為 1.9 GW [2]），若考量土地開發之可行性，亦有 6 GW 的潛能 [1]。地熱作為一種乾淨的再生能源，不只能有效降低溫室氣體的排放，且相較於太陽能與風力發電，地熱發電較不受氣候的影響，對環境的衝擊也更低，同時還能提高能源的自主性，對於目前高度仰賴進口能源的台灣而言，更是意義深遠（2023 年度進口的能源占比高達 96.7%[3]）。

然而，台灣乃至於全球的地熱發電總量仍舊微不足道，究其原因，主要是技術層面上的掣肘。傳統的地熱開採技術雖然已十分成熟，但仍有鑽探成本高、效率低、以及地質條件複雜與誘發淺層地震等問題，這讓地熱在與其他能源的競爭中明顯位居劣勢。但隨著科技的日益進步，科學家們努力探索新的鑽探方法，以提升地熱的開採效率和降低成本，期待地熱能在未來的能源版圖中佔有一席之地。

地熱的來源是地球內部的高溫熔岩，這些源源不絕的熱能可以透過技術以蒸氣的形式被帶到地表，驅動渦輪發電機發電供大眾使用。平均而言，地表每下探 1 公里，溫度升高約 25 °C。因此，若要取得更豐沛的地熱資源，我們需要挖更深的井，將探索能源的雙手深入地下的高溫區域。

「非知之艱，行之惟艱」，挖深井以汲取深層地熱正是如此。傳統的地熱開採方式需要利用鑽頭穿透地表岩層，到達地下的高溫區域，這些區域通常位於數千米的深度。隨著鑽探深入，岩層硬度不斷增加，因此鑽探高硬度岩層無疑成為此過程中的一大技術挑戰。傳統的鑽探方式一般使用金屬製的可旋轉鑽頭，一邊旋轉的同時一邊將岩石切割破碎，如

同調理機一般將堅硬的岩石打成較小的碎片，接著再用配重後的循環泥漿（通常由水、黏土、化學添加劑和其他材料組成）將岩石碎屑帶出井口。然而，當鑽頭遇到更為堅硬的岩層時，這種方式往往力不從心，不但大幅拖慢鑽探速度，還會使鑽頭嚴重磨損。此外，地下深處的高溫高壓對於器械和設備亦是一大損害，不但使金屬鑽頭軟化加速磨損，還會讓監測設備失效，影響地質數據的採集。若遇到強酸氣體溶於水中形成的酸性地下水 [4]，那更是為這場挑戰雪上加霜。長時間接觸不但會腐蝕器械，令其耗損加劇，進一步推高維護成本。因此，如何突破技術瓶頸，提升鑽探效率，成為深層地熱開發領域中亟待破解的關鍵。

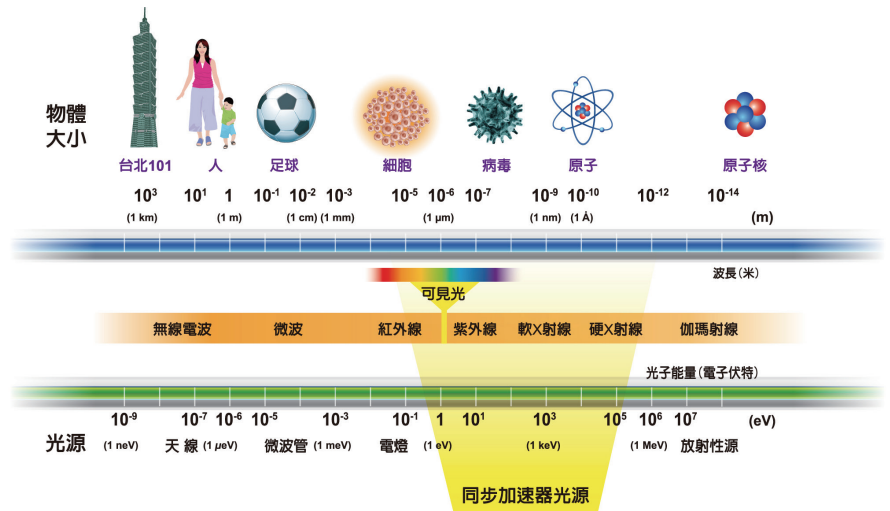


圖一 台灣地溫梯度分布。紅圈：現有地熱潛能探勘場域；藍色箭頭：擴展至其他地區；紅色同心圓：配合現有開發場址擴增 [1]。

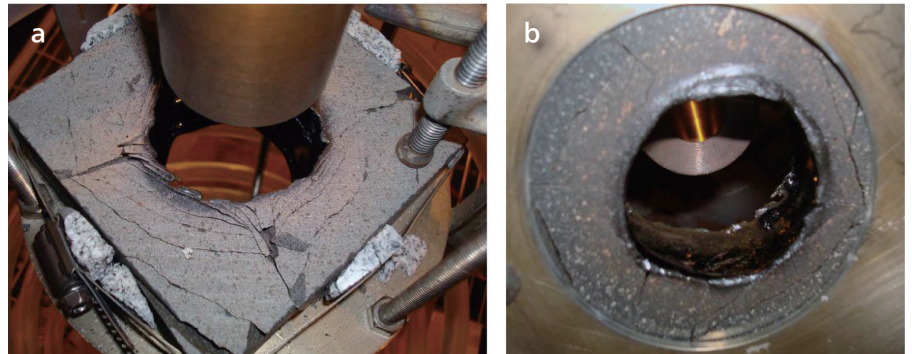
毫米波的生成機制及在地熱開採上的應用

跳脫傳統鑽探模式，或許可以得到解方。Quaise Energy 是一家美國新創的能源公司，致力於地熱開採的革新技術－毫米波鑽井技術，旨在突破傳統開採方法的限制。這項創新技術源於麻省理工學院的研究 [5]，並由該校的專家團隊將其商業化。毫米波鑽井技術利用磁旋管 (gyrotron) 生成毫米波，通過非接觸的方式鑽鑿地熱深井，以開發地表深處的高溫地熱資源。磁旋管是一種特別的裝置，可產生高頻率、短波長及高能量密度的連續 (Continuous Wave, CW) 毫米波。毫米波是波長介於 1 毫米至 10 毫米之間的電磁波，若換算成頻率，其範圍為 300 GHz 至 30 GHz，屬於微波 (頻率 300GHz 至 300MHz) 頻譜中的高頻部分 (圖二)。毫米波的頻率低於紅外線和可見光，高於無線電波。因其高頻率和高能量密度的特性，毫米波在智能家居、醫療診斷、自動駕駛、通訊技術和科學研究等領域都有著廣泛的應用。而在地熱鑽探領域中，毫米波的波長範圍十分理想，因為它的波長夠長，較不會被環境中漂浮的灰塵所遮蔽和散射；而它的波長又夠短，可顯著提高表面岩層加热的功率密度。因此，高平均功率的毫米波源有望成為一種新型的鑽探技術。

磁旋管的結構主要由五個部分組成：磁控管電子槍、共振腔體、電子束收集器、高斯波束發射器以及磁鐵 (用來產生直流軸向的磁場)，其工作原理是利用「電子回旋共振效應」產生電磁波。毫米波在磁旋管腔體內形成後，需要通過導波管進行傳輸。導波管是一種專門用來傳送電磁波的裝置，它能有效地傳輸與隔離電磁波，並減少在傳輸過程中的能量損耗。在地熱鑽探的應用中，導波管可將高功率的毫米波長距離傳輸至鑽鑿的井底，照射目標岩層，避免毫米波在空間中發散 (圖三)。而當岩層吸收毫米波時，會迅速升溫；而如果毫米波束的功率夠高，便可氣化岩石，達成向下鑽探的目的。



圖二 毫米波是波長介於 1 毫米至 10 毫米之間的電磁波，屬於微波頻譜中的高頻部分。



圖三 實驗中 28 GHz 的磁旋管毫米波束經由孔徑為 20 毫米的銅製導波管照射至岩石表面 (距發射口 35 毫米)，穿透了 10 公分見方、厚度達 3.1 公分的玄武岩樣品。光束功率從 1.6 千瓦增加到 4.5 千瓦，歷經 41 分鐘。左：樣品俯視圖顯示燒蝕孔徑為 52 x 49 毫米；右：底部蝕出孔徑稍小，為 45 x 43 毫米。該實驗預先在岩石樣品中央鑽一個直徑 12.7 毫米的洩漏孔，讓熔融的岩石得以順利流出 [5]。

參考文獻

1. 經濟部中央地質調查所「地熱潛力區塊發展條件評估及區域調查資訊擴建計畫」(2022).
2. 台灣電力公司核能營運現況與績效。
3. 經濟部能源局 112 年能源供給概況。
4. Bernt S. Aadnøy, Modern Well Design, 2nd Edition, CRC Press, 141 (2010).
5. K. D. Oglesby et al., Impact Technologies LLC (2014).