

毫米波地熱鑽探計畫（下）

張嘉君博士 / 歐懿中博士
國家同步輻射研究中心高頻小組

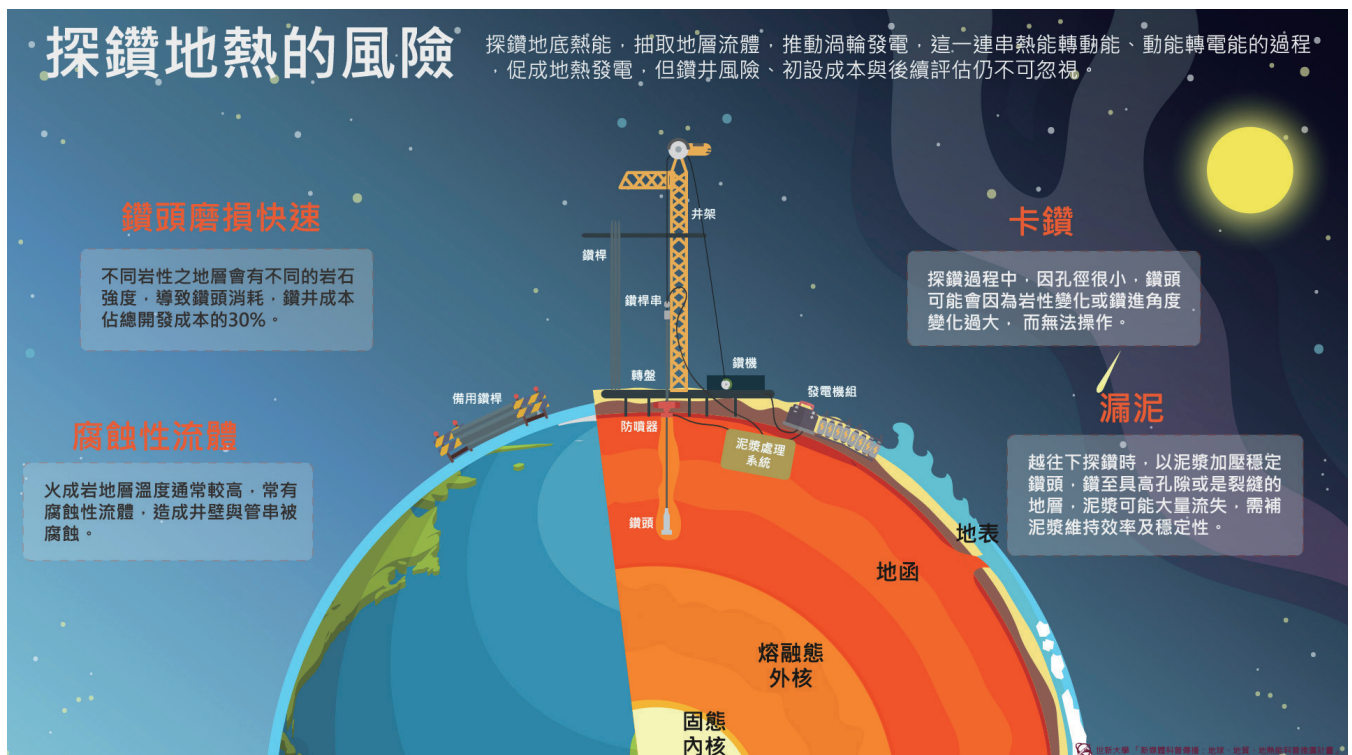
編者按：上一期簡訊中已介紹運用加速器毫米波技術來進行地熱鑽探計畫，說明台灣地熱優勢和傳統開採方法，本期接續介紹運用毫米波鑽探技術的優勢與挑戰。

毫米波鑽探地熱深井的優勢與挑戰

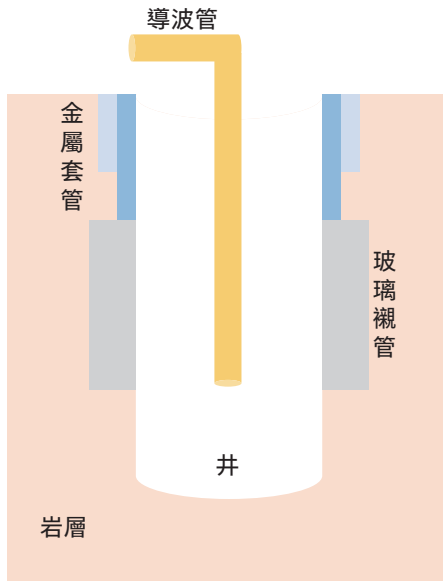
毫米波鑽探技術的原理在於它藉由能量（高功率毫米波）與物質（岩石）的交互作用，取代鑽頭和井內的監控裝置等，因此避免了機械鑽鑿的磨損。傳統鑽頭總是和岩石硬碰硬，當遇到高溫高壓、高硬度岩層、酸性地下水等險峻的地質環境時，器械和設備經常磨損不斷甚至腐蝕，有時還因此中斷工作徒增成本，如圖一所示 [1]。相較之下，毫米波藉由直接加熱並氣化岩石的方式將其結構破壞，不需接觸岩石就可以往下鑽探。這種非接觸式地移除岩層避免了機具的磨損和經常更換，降低維護成本，進而大幅縮短鑽探時間，提升效率。

為確保地熱井結構穩固，傳統鑽井技術每鑽進一定深度時，即需要下放金屬套管，以防止井孔因壓力不平衡造成坍塌或破裂。這項工作不但耗時又繁瑣，還需付出高昂的成本。相對而言，毫米波的技術提供一種更新穎的解決方案。這項技術的構想是利用毫米波將井底的岩石氣化的同時，由地面向井內提供高壓氣體，迫使高溫的岩石氣體滲入周圍岩壁的縫隙中。當周圍的岩壁被高溫岩石氣體入侵後，便會吸收其熱量，隨之逐漸升溫融化，最後冷卻形成玻璃化的結構 [2]。這種結構如同在井壁周圍安裝了一層玻璃製的套管一般，有機會達到維持井孔穩定的效果。這種鑽鑿與固井同步進行的方式將有望顯著提升鑽井效率，將費時費力且耗資甚鉅的下套管工程化為一氣呵成的高效操作（圖二）。

在開採地熱能源的過程中，毫米波技術也展現出它的優勢。由於地層深處的高溫高壓（例如地下 16 公里深處可達 400 °C，壓力可達 392 百萬帕）使水處於超臨界狀態，若將超臨界狀態的水當作工作流體使用，引導到地面成為高焓值的過熱蒸汽，將可以進行高效的電力轉換，類似目前正在使用的渦輪發電機；如果地熱井就在發電廠內，經由適當的改造現有的發電機組和電網，可以節省重建相關設備的費用和時間，避免資源浪費。



圖一 傳統地熱鑽探技術雖十分成熟，但鑽探過程可能遇到的風險和高昂的成本仍不可忽視。[1]



圖二 高功率毫米波束由導波管傳輸至目標岩層後，藉由直接氣化岩石向下鑽探地熱深井，可使用複合式固井方式，即淺層部份使用傳統金屬套管，較深處利用高溫岩石氣體向井壁滲透後形成的玻璃化結構，即為玻璃襯管 (glass liner)。

然而，這項想法目前正面臨一系列嚴峻的技術考驗。首先，毫米波技術對於操作環境的要求十分嚴格，從磁旋管和導波管的設計，到冷卻和熱管理系統，再至井下壓力控制和高溫岩石氣體排開等，每個環節都須精確掌握，才能確保能量得以有效傳遞。若這些高溫岩石氣體未能如預期地清除，可能導致鑽井速率降低；若冷卻系統的設計或操作有誤，或者井孔內壓力失控，導致磁旋管或導波管的毀壞，將損失慘重。此外，自然生成的玻璃襯管在固井上是否真的耐久可靠？厚度和抗壓強度是否足夠？這些都需要仔細計算評估與實驗驗證。另外，製作高功率的磁旋管和導波管所需的資金也相當可觀，這對整體的投資報酬與風險管控無疑是一大挑戰。雖然這項技術在長期運行中有望降低成本，但初期投入的高昂費用仍然是亟需克服的難題。再者，這項技術的應用需要較廣的專業知識和操作經驗，因此對於相關技術人員的培訓和設備操作要求也比較高。

總體而言，毫米波地熱鑽探是一項革新想法，它能藉由提高毫米波的功率密度提升鑽探效率，並應對困難的地質條件。相較於傳統鑽探技術，毫米波技術有機會可以鑽得更快更深，獲取更深處的地熱能源。儘管目前仍有許多山頭需要攻克，但若有更多人力及研究資源投入，這些問題有望逐步解決。

談地熱資源的公平性及全球影響

地熱資源具有全球普適性，無論是先進或發展中國家，其下深處的地層都儲存著源源不絕的熱能。透過毫米波地熱開採技術的引進，即使是天然資源較為匱乏的地區，也有機

會開發過去無法觸及的深層地熱，實現能源自主和經濟發展，進而提升生活和教育水準，為全球能源轉型與永續發展提供新的契機。

參考文獻

1. 世新大學新媒體科普傳播：地球、地質、地熱能科普推廣計畫
2. K. D. Oglesby *et al.*, Impact Technologies LLC (2014).

用戶資訊

實驗計畫申請

- 2025-2 期實驗計畫申請目前審核中
2025 年第二期 (2025 年 7 - 12 月) 實驗計畫申請目前正陸續進行初複審中，核定的光束線排程後續將於 6 月初公告於用戶入口網頁。
- 2026-1 期實驗申請預告
2026 年第一期 (2026 年 1 - 6 月) 光束線使用預計 2025 年 7 月初開放申請，截止日期為 2025 年 8 月 15 日 (五)，歡迎計畫主持人踴躍上網申請。

近期開放光束線如下

- TPS 09A2 Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy for Semiconductor (高能 X 光光電子發射能譜 - 前瞻半導體)
- TPS 15A1 Micro-crystal X-ray Diffraction (微米晶體結構解析)
- TPS 25A2 Coherent Diffraction Imaging (同調 X 光影像)
- TPS 27A1 Soft X-ray Nanoscopy (軟 X 光奈米顯微術)
- TPS 32A1 Tender X-ray Absorption Spectroscopy (柔 X 光吸收光譜)

其他資訊

- 實驗排程期間，實驗成員若需住宿本中心宿舍，請完成以下流程：
 1. 計畫主持人須先於「實驗安全核可表」勾選實驗成員。
 2. 住宿者務必於實驗開始 3 個工作日前完成線上預訂，逾期無法受理。
 3. 本中心宿舍申請及使用採實名制。