

工程報導

全陽地熱金崙電廠開發案例介紹

黃峻彬¹

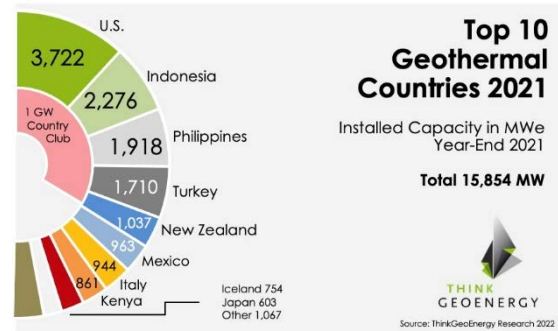
一、前言

地熱發電在國際上已經是發展超過百年的產業，全球第一個地熱發電廠是於1904年由義大利科學家Piero Ginori Conti發明建構，從那以後各國陸續發展，根據ThinkGeoEnergy網站的統計，到2021年底，全球地熱發電機組裝置容量已經來到15,854MWe(圖一)。前三大地熱發電國家分別是美國(3,722MWe)、印尼(2,276MWe)，及菲律賓(1,918MWe)。其中比較值得一提的是第四名的土耳其，在2016年底的裝置容量還只有775MWe，5年之中增加了將近1GWe的裝置容量。

隨著國際上地熱發電技術日趨進步，以及再生能源成為國際能源產業的趨勢，地熱發電近幾年在國內再度獲得關注，公部門方面，能源局因應產業的需求，於2017年設立了地熱發電資訊網，將中油及工研院過去地熱鑽探的資料以及申辦地熱發電所需相關資訊提供給有意投資地熱發電的企業參考。經濟部則於2022年6月成立「地熱發電單一服務窗口」，展現全力推動地熱發電的決心。民間企業方面，除了宜蘭清水地熱電廠的復修案已於2021年11月併聯啟用外，本公司的金崙地熱電廠也已於2022年1月開始併聯試運轉，其他還有多家公司在臺東太麻里金崙、臺東延平紅葉、花蓮萬榮紅葉，以及金山周邊陸續展開地熱發電的建置或規畫。

二、申辦開發

本案於2017年開始進行第三型再生能源地熱發電申辦時，由於是全臺第一個民營公司從自力探勘鑽井到建廠併聯電網完整流程的地熱



圖一 國際地熱發電裝置容量前十名國家

發電申請案，無論是中央的能源局及相關部會，還是地方臺東縣政府的各局處，對於申辦程序都相當陌生，因此在申辦程序中遇到不少各單位認知不同之處，經歷了一些波折。透過多次跟各單位的當面溝通及公文往返，才使申辦程序逐漸在各單位間取得共識，最終得以完成申辦程序(表一)。

三、地熱井工程

2018年第二季初，本案開始就鑽井工程開始進行訪商議價，兩口井併案發包，於6月初決標，7月開始動工。發包的鑽井商雖然過去有多次鑽鑿高溫溫泉井的經驗，但因地熱井的規格要求較高，因此一開始有不少事情需要磨合調整，鑽進進度也就比預期遲緩。2018年12月中，鑽鑿深度達到600公尺目標，工研院開始進場執行恢復試驗，以耐高溫溫度偵測探棒下放入井，測量井下不同深度對應的溫度，再以溫度的變化決定哪些深度的井管要開槽接收地熱水。經過測量，發現從井深50公尺以後溫度就可達到攝氏100度以上，雖然全井最高溫可達將近150度，但最低溫卻也有低到未滿120度。整體來說，這樣的溫度數據不算很好，攝氏120度的低溫區若是入水量太大，可能使生產井整

¹全陽地熱股份有限公司

表一 申請第三型地熱發電的主要法規及申請程序

臺電	併聯審查、初步協商、細部協商、簽訂躉購合約、報竣、併聯試運轉
能源局	同意備案、設備認定(於2018年將第三型改由地方政府辦理) 申請地熱發電示範獎勵
臺東縣府	非都市土地使用管制規則 – 土地容許使用或變更編定 本案租用的是非都市土地山坡地保育區一般農牧用地，若要做地熱發電線能使用，一是要申請容許使用，且使用面積不能超過660平方公尺，不然就要申請變更編定為特定目的事業用地。我們選擇走申請容許使用程序，不過在與縣府農業處溝通的過程中遇到一些認知差異，因此這部分申請耗費一年多才完成。
	水土保持法 – 水土保持或簡易水保 本案土地本在山坡地管制範圍，若建築面積在500平方公尺以下，可申請簡易水保，若是建築面積超過500平方公尺，就必須提交水保計畫。不過2019年底恰好臺東縣府將6000多公頃坡度平緩的土地從山坡地解編，本案土地也包括在其中，因此就不再須要進行簡易水保計畫。
	水利法 – 地熱井探勘鑿井許可、地下冷水井水權申請 溫泉法 – 溫泉開發許可及水權申請 過去的溫泉開發許可申請程序主要是規範有實際取水的溫泉業者，但地熱發電若尾水完全注入回注井，事實上並未實質取用溫泉水，因此無論是水利署、縣府、縣府委外的審查委員，還是我們委託的技師，對於這種新運用樣態的理解是相當紛歧的，即使到現在我們已經拿到溫泉開發許可及水權，我相信這個理解紛歧的狀況應該還是沒有太多改善。「取水量」到底要怎麼定義?從生產井出來的水量嗎?還是生產井出水量減去回注井入水量的淨額叫做取水量?問題是地熱生產井的出水絕大部分是混和了蒸氣、二氧化碳以及液態水的兩相流，除非用非常昂貴的流量計，不然無法量測流量，那到底要怎麼去定義與量測地熱發電的「取水量」呢?
	建築法 – 建照及使用照
環保署	開發行為應實施環境影響評估細目及範圍認定標準 現行規定，地熱發電裝置容量不及10MW者無須環評
原民會	原住民族基本法 本案乃租用私有原住民保留地，根據原民會函釋，原基法21條有關部落會議的踐行僅規範公有原保地，因此私有原保地開發行為尚無需經部落會議同意。

體出水溫度偏低，但另一方面來說，若整體水量充沛，仍是可以有不錯的發電量。於是在這樣的不確定性下，還是於2018年底下放井管，把一號井工程完成，交由工研院執行進一步的產能測試，包括噴流試驗(水量水溫測試)及水質檢驗。

由於一號井完成下管及洗井之後，發現並無自湧現象，懷疑是鑽井過程泥漿比重過重，造成儲集層裂隙堵塞，因此決定採用空壓機打氣汲水的方式，企圖透過大量的汲水將儲集層裂隙洗通，改善一號井的出水狀況。經過三個月多次洗井及產能測試，雖然一號井開始能夠自湧，但無論是自湧還是以空壓機汲水，出水量及水溫都很不理想，經過換算，最佳狀況下只能產生不到200kW的電能，完全沒有任何經濟效益可言。

然而在工研院的產能測試中包括了一項壓力回升試驗，用來「評估生產井現有井況(滲透率、膚表效應)，作為生產井是否具有利用價值及可否透過維護而能獲得改善之判斷依據」(這裡及以下括號內的文字皆引用自工研院的產能測試報告)，測試結果可獲得儲集層流動

係數kh值、滲透率k值、膚表效應的Sskin值，以及地熱井產率係數FE值。綜合一號井的這些數值來看，可以得到兩個結論：

1. 底下的儲集層「可歸屬於具有良好之流體生產通道之地熱儲集層」。
2. 一號井的膚表因子甚高，產率係數甚低，顯示其「遠低於良好之生產井況之產率係數1」。

所以，儲集層是有熱有水，但我們完成的一號井狀況是不佳的，以致於完井後的產能很可能遠低於一般良好設計及適切施工的地熱井所能發揮的產能。

經過與工研院深入的檢討與討論，公司決定繼續鑽鑿二號井，並且採用工研院的建議，著手訪商採購耐高溫井下泵浦作為輔助取水設備。而依據工研院提供的資料，再深一點的地層應有另一區高溫儲集層，因此決定將井深加到1000公尺。另外，由一號井的經驗，我們研判井管設計施工可能有問題，因此另向金屬中心及中鴻鋼鐵取經，由中鴻提供優化設計的井管供二號井使用(圖二)。

二號井於2019年7月投入施作，於2020年

3月中鑽抵1000公尺預定深度，交由工研院進行恢復試驗(溫度vs深度量測)，結果顯示600公尺以下推估溫度介於攝氏130度到150度，是適合生產發電的溫度(圖三)。3月底完井後，4月初進行洗井及產能測試作業，測試結果顯示，光是以空壓機打氣汲水，就有超過每小時100噸的地熱水流量(圖四)，超過500kW機組發電所需的量，證實從一號井獲得的經驗對於優化二號井提升產能發揮了顯著的效果。



圖二 中鴻地熱井管啟用典禮



圖三 鑽井團隊下放井管



圖四 產能測試團隊留影

由於二號井的產能遠高於一號井，原本依一號井資料推估而準備向Schlumberger公司訂購的耐高溫井下泵浦必須提升規格，改採用更大產能的機種。相關的規格與合約於2020年7月初變更完成後，約定於2021年2月底前完成交貨與安裝。然而，時值covid-19在全球到處肆虐，各國因應疫病而實施的管制措施，使得國際間採購設備變成一件曠日費時的事，加上2021年3月長賜輪於蘇伊士運河擱淺的事件造成全球貨運大亂，使得井下泵浦所有組件遲至2021年5月才到齊。同時，國內爆發了covid-19本土疫情，防疫警戒提升為三級，原訂要來臺安裝的原廠技師無法入境，一直到7月下旬降為二級後，才有機會著手探詢專案申請國外技師來臺。最後技師終於在2021年10月底抵臺，完成14天隔離管制後，11月中開始進場準備作業，實際組裝及下放的施工過程僅為期兩天(圖五)，在11月21日夜間23:50分左右完成電纜連接，井下泵浦安裝工程完工(圖六)。



圖五 原廠技師進行安裝作業



圖六 井下泵浦安裝完工

11月22日開始進行多日的井下泵浦產能測試(圖七)，實測結果最高出水量達到每小時150噸，井下溫度達到150度，泵浦耗電也低於預期，宣告井下泵浦達成預定效益，整個地熱井工程也到此告一段落。

四、電廠規劃、設計、建設及啟動試運轉

2018年本案開始鑽井前，為了讓專案能夠快速完成，各主要工作的規劃是平行同步進行的，電廠的規劃當然也不例外，早在2018年中取得幾項基本申辦程序許可函前，我們就著手進行電廠規劃，當時心裡雖然抱持著對鑽井成果不確定性的不安，但還是盡量將主架構付諸設計。原始架構是兩部發電機各有250kW的發電量，一號井鑽完成效不如預期，改為考慮只採購一部發電機，2020年初，二號井鑽完，成效大幅超出預期，但ORC發電機廠商認為考慮地熱水質成分，需變更熱交換器設計，因此整個發電機規格又重新來過，最終拍板改採一部500kW的機組。待發電機調整設計，確認圖面後，電廠建物、配電、配管的規劃設計才能接著做相應的調整變更，之後才能完成發包資料進行發包。終於在2021年7月，電廠主要設備安裝及硬體建設開始動工，9月底整廠建設就已大致完成，進入設備測試及收尾作業階段，以及，等待國外技師來臺安裝井下泵浦。

2021年12月井下泵浦安裝測試完成，開始將地熱水導入發電機進行測試，這時又陸續發現一些發電機與周邊設備配適的問題，試運轉發電效能很不理想，於是又投入了3個月的時間研究改善系統適配的措施，到3月中才開始發出接近目標的電能，後續繼續執行幾項效能優化作業，終於可以穩定發出將近350kW~400kW的電力(圖八)，撇開幾次臺電電壓不穩造成發電機跳停的事件，金崙地熱電廠已經可以24小時連續運轉兩三個月的時間，展現了地熱發電基載電力的特性(圖九)。

五、心得分享

地熱井工程無疑是地熱發電開發過程中



圖七 井下泵浦安裝團隊留影



圖八 儀電及監控系統團隊留影



圖九 全陽地熱金崙電廠一景

最重要的工程，兩個風險須於規劃與施作時特別注意：

1. 井噴：地熱井鑽進過程可能噴發高溫水，輕則延遲鑽進速度，嚴重時也可能影響人員的工作安全，因此承包商必須有適切的防噴設備防止噴發，而萬一噴發了，也要能有適切的導噴壓井經驗與措施，以盡速中斷井噴，避免進一步的危害。

2. 斷桿卡鑽：鑽進過程可能發生斷桿、卡鑽等問題，必須進行打撈作業，打撈作業短則數天，長則數月，若是打撈失敗，要不就以特定的設備從斷桿處岔開續鑽，要不就棄井移地重鑽，因此承包商在防止斷桿、卡鑽，以及萬一斷桿卡鑽後的打撈處理經驗，對於地熱井

工程的時程與成本都有很大的影響。

產業發展方面有兩項工法需盡快引進：

1. 欠平衡/負壓鑽井：地熱井講究地底裂隙暢通，讓地熱水能夠順暢地進入地熱井。傳統的泥漿鑽井工法雖然比較能防止井噴，但因比重過重的泥漿往往會流入地層裂隙，甚至將鑽進產生的岩屑帶入裂隙，造成地熱水通道堵塞，因此並不是很適合作為地熱井的工法。國外其實已有成熟的欠平衡/負壓鑽井工法，避免鑽井液與岩屑進入地熱水通道造成堵塞，但是國內並未有廠商引進，也因此國內以泥漿工法施作的地熱井完井後往往膚表因子較高，產率係數偏低，無法完全發揮地熱井集水的能力，使單井產能偏低。

2. 定向鑽井技術：國內地狹人稠，大部分地方土地所有權相當零碎分散，如果要將回注井拉遠以避免回注冷水影響生產井溫度，所面臨的土地整合幾乎可說是不可能的任務。因此，國內要發展地熱發電產業，最重要的是要有能夠施作定向井的鑽井承包商，以便在面積有限的土地上將回注井與生產井盡量拉開距離，避免產生回注冷水干擾生產井的問題。以現況來說，定向鑽井只有中油能夠做到，其他鑽井廠商都尚未投資引進這個關鍵工法，這將造成地熱發電產業的發展阻礙。

在專案推展流程方面，規劃最根本的資訊就是鑽好的地熱井到底有多少發電潛能？水質會不會影響熱交換器的選材？這些數字與資訊沒有獲得之前，大部分電廠地面設備的規劃設計都無法定案。由於現行幾個主要申辦程序都會要廠商提出預定發電裝置容量以及初步規劃，然而在井沒鑽完前，要出具這些資料基本上只能胡亂猜測，以我們的案子為例，一號井的產能只有百餘kWe，但距離不到100公尺的二號井，產能卻有機會上看800kWe到1MWe，如此大的差異，在鑽井未完成，什麼數據都沒有的情況下，要怎麼提出裝置容量預估值呢？若是勉強預估，且據以提早進行電廠規劃設計平行作業的結果，就是事後做申請量/計畫變更及設計變更，造成很多重複工作，增加專案人力與費用的成本。因此在申辦過程未變之前，實務上最好的做法變成直接最大程度超額預留饋線容

量，比如說最極端的作法就是，第三型再生能源一律申請2MWe，第一型再生能源就申請饋線當下所剩的最大容量，行政申辦時以最少的成本提交計畫，在地熱井完工獲得地熱水資訊之前，周邊環境與設備的規劃設計都心存這個不確定性，預留最大的彈性，待地熱資源確定後再做細部規劃設計。雖說這是投入業者的最佳作法，但這樣最大程度申佔饋線，實質上就對後續要進入的業者造成了阻礙，其實對地熱發電產業推展也是沒有什麼好處的。

關於發電機的部分，目前所知業界大部分專案是採用感應式發電機，感應式發電機有即時反應電網斷電同步跳停的效果，這雖然能夠避免孤島效應對人員及設備的衝擊，但若特定區域感應式發電機比例過高，是否容易造成連鎖跳停，反而讓供電系統變得脆弱？此外，感應式發電機一般狀況下不做獨立發電的規劃，只要電網斷電就無法發電，某種程度上是有點背離分散式能源規劃以及避免偏鄉在天災時長期停電的期待，這些都可能會是地熱產業在後續開發推展時必須面對研究的課題。

六、結論

以上一些粗略心得與大家分享，主要是為地熱發電在臺灣再起步的其中一個重要案例留下歷史記錄，透過我們的經驗，希望有助於政府機關擬定更有效率的開發申辦程序，也讓有意投入這個產業的從業人員對地熱專案的進程有個初步的瞭解。

在全陽地熱金崙電廠建設期間以及併聯發電後，已有許多關心再生能源轉型的產官學各界先進前來參訪(圖十、圖十一)，也對我們的專案提出很多協助與寶貴的意見，我們看到各界對於地熱發電作為再生能源的生力軍是寄予熱切的期待的，而以目前我們先導電廠的運作狀況，確實可以證明地熱發電值得各界期待的幾個優點：

1. 24小時穩定運轉，受天候影響很小(氣溫低時發電效率較佳)
2. 啟停快速，15~30分鐘內可從停機到全載發電。



圖十 吳銜晉董事長與臺電王耀庭總經理



圖十一 工研院綠能所鄭名山副所長到訪

3. 輸出功率有彈性，發電機可在20~110%熱源狀態下運轉，透過適當的組合可達成快速調節電力輸出的效果。

4. 發電尾水可全數回注，不損耗地層水，所需用地小，對環境影響非常低。

5. 如果地熱井工程品質良好，可耐用30年~50年，當地熱井成本在10到20年攤提完畢後，後續運轉所生產的電能將會非常便宜。

地熱發電在國際上已是相當成熟的產業，雖然總裝置容量還不大，但是考量臺灣確實蘊藏豐富的地熱資源，且目前只靠太陽光電及風電的再生能源組合仍有不夠穩定，須以儲能系統搭配的挑戰，因此地熱這種能夠穩定7-24(一周7天，一天24小時)連續運轉輸出的能源，確實值得國內產官學界大力推廣，讓我國能源轉型的路能推展得更加順利。

誌謝

全陽地熱股份有限公司是在李長榮集團李謀偉總裁的大力支持下成立的，董事會成

員包括吳銜晉董事長、陳志復董事、陳希聖董事、蕭宜峯董事、楊賽芬董事、李啟志董事、柯賢達董事，以及已故李國壽前董事都以很大的熱忱與耐心推動這個專案，若非李總裁及董事會全體成員對推展再生能源的堅持，這個地熱電廠專案無法成功併聯發電。其次必須感謝金崙村及週邊諸多部落領袖與鄉親願意花時間來瞭解地熱發電這個產業，很多人從一開始的滿懷質疑，經過我們多次誠懇說明與溝通之後，轉變為樂觀其成的祝福，對這個專案來說，這絕對是最重要的支持力量。感謝臺東縣府及太麻里鄉公所大力協助釐清申辦程序，讓本案的申辦順利。感謝工研院地熱團隊郭泰融博士、韓吟龍博士及范愷軍博士、金屬中心施威任博士、中鴻鋼鐵徐正恩處長及張培騰工程師、中威工程顧問公司的蔡明仁副總以及陳章貴經理，各位在本案提供了重要的技術支援能量，也給我很多寶貴的指導。感謝漢力能源科技郭啟榮總經理，在發電機調適的過程中耐心地配合與協助。感謝戴明雄(Sakinu Tepiq)牧師一路上對再生能源及這個專案的相挺。感謝黃漢淞、吳漢強、黃士育幾位夥伴，你們不分晝夜的辛勞付出，才能讓這個電廠順利完成。諸多協力廠商及各界先進在專案進行過程中提供寶貴的協助，礙於篇幅無法一一道謝，但沒有大家一起努力，臺灣的地熱產業無法跨出這個重要的一步。