

宜蘭仁澤地熱發電規劃評估

劉家成¹、雷世璋²、李孟綸¹、林億宇¹、林永川¹、李文彬¹、蔡英聖¹

¹台灣電力股份有限公司 再生能源處、²中興工程顧問社

摘要

地熱一向被認為是優質的基載型再生能源，為配合政府 2025 年達成地熱發電 200MW 之推廣目標，本公司與中油公司合作，由中油公司進行選址探勘及鑽井，本公司負責電廠規劃、建置及營運等工作，並以宜蘭仁澤及土場區為探勘開發場址。本文針對此區域過去地質攤勘、中油新鑽仁澤 3、4 號井探勘資料、地熱發電機組國際發展現況等項目進行探討，初步評估仁澤地區可建置 0.9~1.4MW 的地熱電廠。

一、前言與背景介紹

二十一世紀後全球氣候變遷與溫室效應日益顯著，對人類生活與地球環境造成嚴重威脅，於是思考能源永續發展與綠色科技就變得非常重要。我國依據 COP20 之建議遞交 INDC 協議承諾書，設定 2030 年溫室氣體排放量為依現況發展趨勢推估情境減量 50%。另政府依據「永續能源政策綱領」及「環境基本法」全面速推動包含節能、創儲能及智慧系統整合之能源轉型，提高再生能源發電量占比至 20%。爰此，「2016 年能源產業技術白皮書」（能源局，2016）中設定 2020 年以前，以傳統地熱發電為目標（150MW），

2020~2025 年則配合國際深層地熱技術發展及引進，再提升 50MW。

自 1993 年台電公司宜蘭清水地熱發電廠結束運轉後，國內地熱界實質發展停滯進入休眠期。其後宜蘭縣政府接手清水地熱區，於 2002 年開始規劃民間參與的地熱多目標之利用，惟未見具體成果；2012 年改以 ROT 案（整建、營運、移轉案）推動，雖民間有意願參與，但未有實質進展。直至 2016 年宜蘭縣政府改以 BOT+ROT（新建、增建、改建、修建、營運及移轉案）推動成功，目前已簽約由開發商進行開發，預定 2021 年完成第一階段的地熱發電。此外目前本島其它地熱好景區，如北部大屯火山地區、台東金崙地區、台電的綠島地熱案，亦有若干地熱探勘活動與示範計畫正在推動進行中。具體而言，1993 年至今 35 年來，國內新一代的地熱發電，仍為萌芽階段，目前僅有清水地熱 300kW 民間設置之第三型地熱發電設備，仍未有新設商轉電廠成功案例。

地熱一向被學界認為是優質的基載型再生能源，政府積極推展綠能，設定 2025 年地熱發電的推廣目標為 200MW，近年來太陽光電與離岸風力獲得熱烈迴響，但地熱方面成果卻付之闕如，引起關心能源安全的立法委

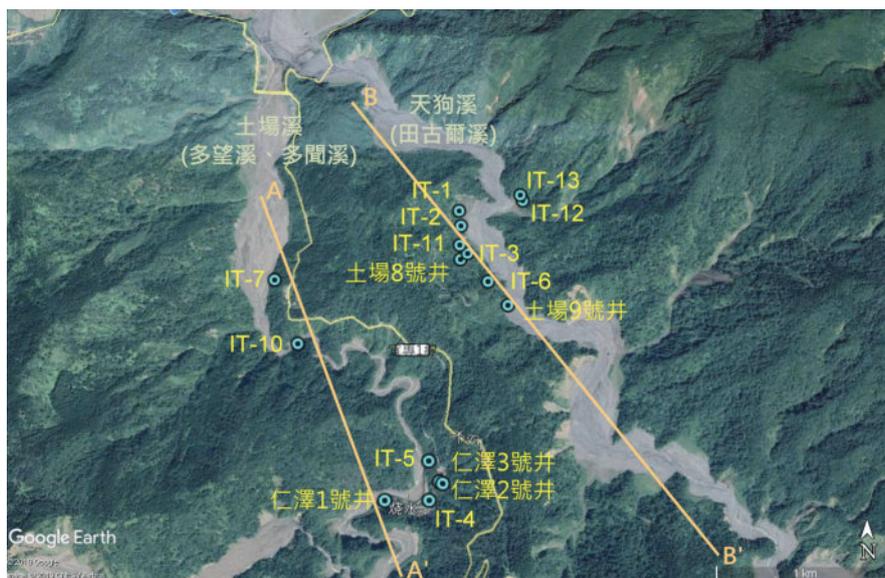
員頻頻關切，除催促政府應儘速提出有效對策，並要求經濟部能有效整合產、官、學、研各界，共同組成國家地熱發電團隊，由中油公司及台電公司擔任主要執行單位。奉經濟部交付國家地熱發電團隊之職責，台電公司經與中油公司多次共同研商，爰於 2018 年 3 月 28 日與中油公司簽訂合作意向書，合意共同開發臺灣地熱發電，由中油公司負責探勘及鑽井，台電公司負責電廠規劃、建置及營運等工作，並以宜蘭仁澤及土場地熱區為優先開發場址，預計分三期完成 6 口地熱探勘井鑽探，共開發 8MW 之地熱發電廠。本文將以第一期發電規劃進行探討。

本計畫位置宜蘭仁澤－土場地熱區，第一期開發場址緊鄰林務局羅東林管處自營之鳩之澤溫泉區。在本計畫之前，羅東林管處曾邀集台電公司與中油公司商討仁澤 2 號井

熱源再利用之可能性。惟 2 號井因年久失修，部分井頭閥門組已無法操作，在考量修井、更換井頭閥門組之費用不斐，因此中油評估規劃於 2 號井周邊，新鑽仁澤 3、4 號井並探明其發電潛能，作為後續發電規劃之參考。

二、研究區域過去地熱探勘成果

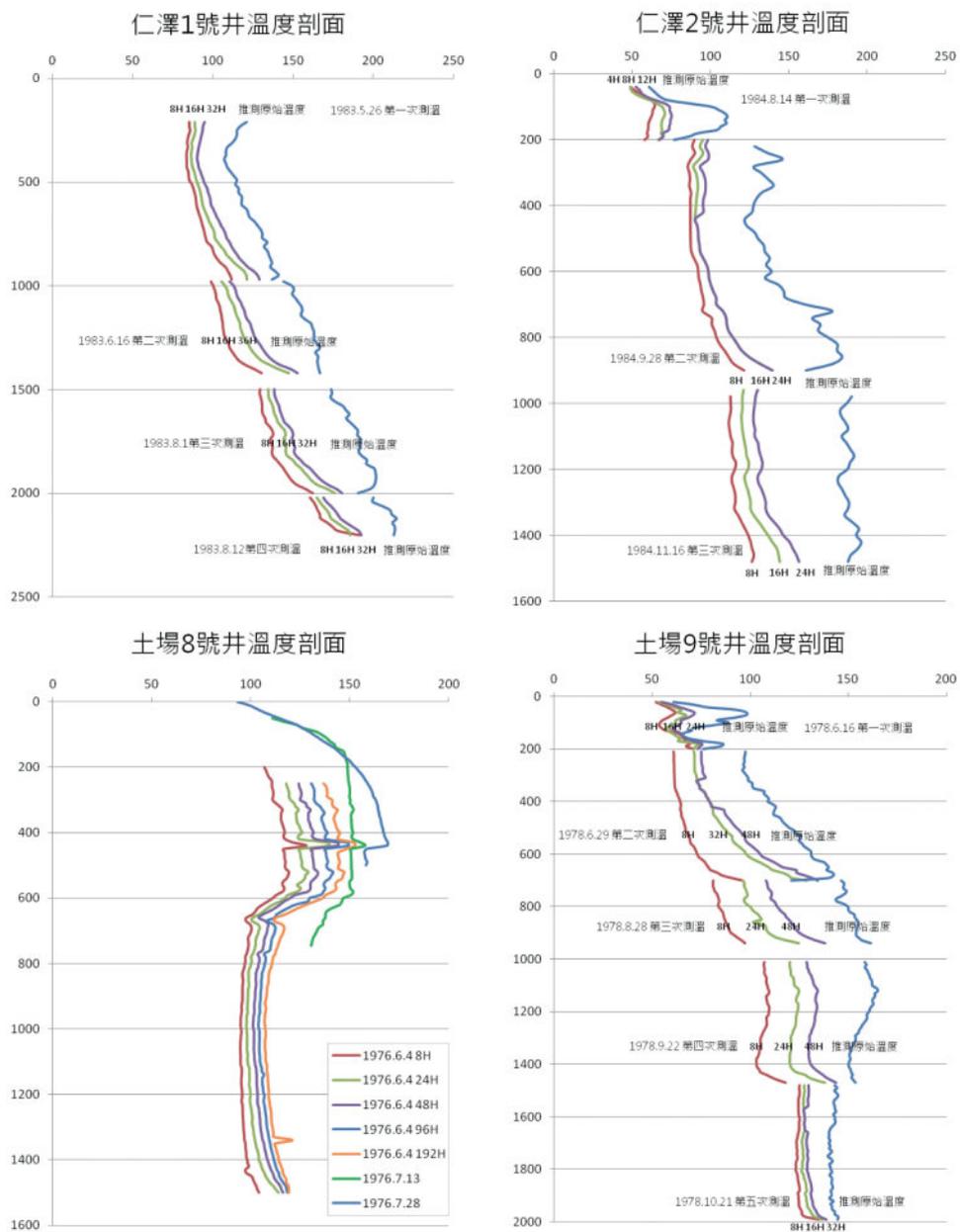
在 1976 年至 1984 年間，中油公司在仁澤－土場地熱區一共鑽鑿了四口深井（鑽井報告：1976，1978，1983，1984），如圖一、表一所示，鑽井作業亦包含岩屑、岩心採樣、井下溫度量測、電測、試汽等作業，四口深井的溫度剖面圖二所示。而在試汽部分，土場 8 號井為間歇自噴，井口最高壓力為 $1.3\text{kg}/\text{cm}^2$ ；土場 9 號井亦為間歇自噴，自噴溫度約為 $80\sim 90^\circ\text{C}$ ；仁澤 1、2 號井生產試驗成果如表二所示。



圖一 仁澤－土場地熱井位置示意圖

表一 仁澤－土場地區中油公司深井資料表

井名	開鑽日期	井深	地層	最高測溫	試汽	現況
土場 8 號井	1976.02.19	1,503m	廬山層清水湖段	169.2°C	間歇自噴	停用
土場 9 號井	1978.05.28	2,000m	廬山層仁澤段	143.9°C	間歇自噴	廢井
仁澤 1 號井	1983.04.17	2,200m	廬山層仁澤段	214.7°C	連續生產	停用
仁澤 2 號井	1984.08.02	2,277m	廬山層仁澤段	219.5°C	連續生產	供溫泉使用



圖二 仁澤－土場地區中油公司鑽井溫度剖面圖

表二 仁澤－土場地區工研院地熱探查井資料表

井名	完井日期	井深 (m)	最高測溫 (°C)	閉井壓力 (kg/cm ²)	流量 (t/h)	備註
IT-1	1973/12/28	161	163	7.7	5	
IT-2	1974/04/14	239	171	6.5	10	
IT-3	1974/06/03	445	173	8.2	25	
IT-4	1974/06/28	280	144	6.6	40	
IT-5	1975/03/14	311	133	3.2	17	
IT-6	1975/01/10	543	151	-	-	無產能
IT-7	1975/06/14	400	73	-	-	無產能
IT-10	1983/02/07	185	125	-	-	無產能
IT-11	1984/03/12	525	175	9.8	63	供應 260kW 電廠
IT-12	1985/05/26	505	160	-	42	
IT-13	1986/05/22	556	171	-	45	

表三 仁澤－土場地區 IT-11 號井生產特性

分類	項目	測值
井口噴流狀態	壓力	4.4kg/cm ²
	溫度	146°C
不凝結氣體分析	不凝結氣體含量	9.1%
	CO ₂	99.1%
	H ₂ S	0.11%
	Residue	0.8%
噴流特性	總流量	66.7t/h
	蒸汽	4.3t/h
	熱水	62.4t/h
	蒸汽百分比	6.5%
	熱焓	753kJ/kg

工研院於 1973 年 ~1986 年間，在仁澤－土場地區共鑽了 11 口地熱探勘井，井深介於 161~556 公尺，相關地熱探勘井資料如圖一、表二所示（台電公司，2013）。

1985 年，能源局（前為能源委員會）委託工研院在土場地熱區建置 260 kW 雙循環式發電試驗系統，利用土場地區地熱流體之熱能，並進行二氧化碳副產品回收、地熱生產與防垢技術之研究，以及地熱直接利用研究與示範。以 IT-11 號井的熱水供應土場發電廠



圖三 昔日宜蘭土場地熱電廠（260kW 雙循環發電機）

使用，IT-11 號井產能測試結果如表三所示。土場地熱電廠（如圖三所示）經數年運轉試驗證實雙循環發電系統之實用性頗佳，且地熱產能在適當調節控制下並無衰減現象，1994 年由於該計畫已完成階段性任務而終止（土場試驗計畫資訊摘自：地熱發電資訊網）。

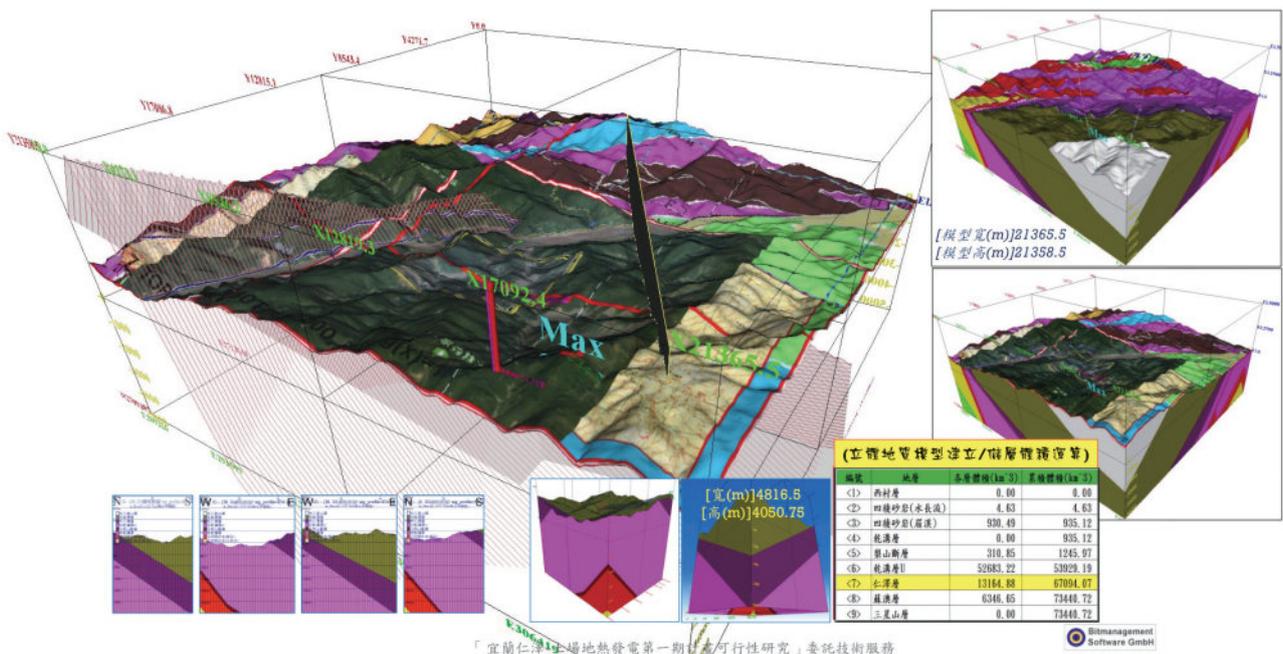
三、地質概念模式

（一）三維地質模型

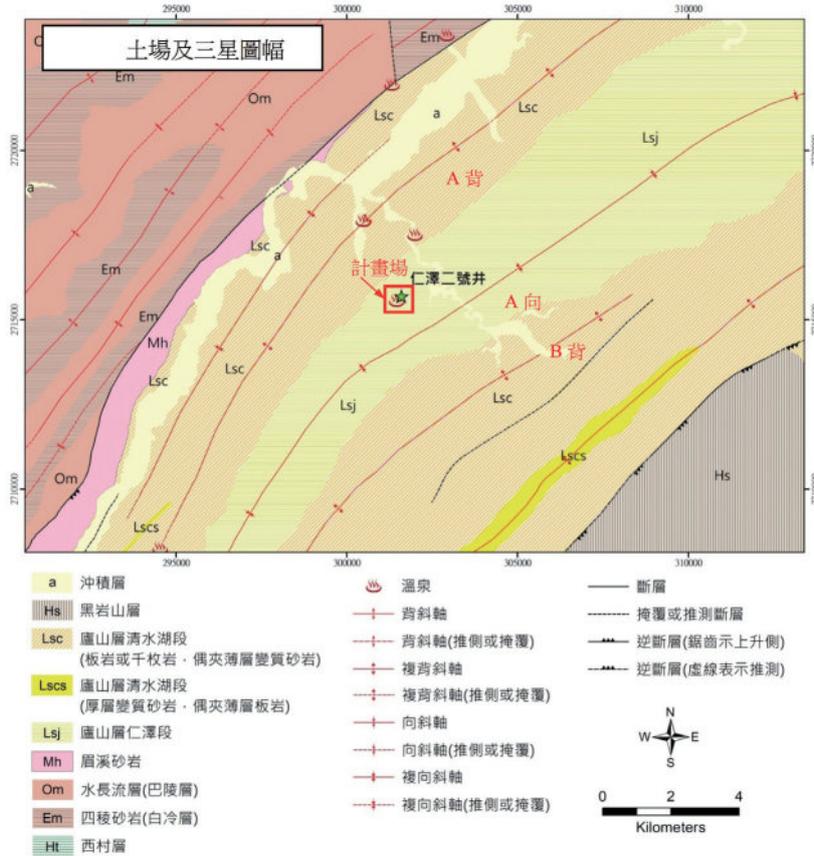
一般地熱評估前，須先建立地質概念模式，以初步評估地熱來源、儲集層分布改況、熱水可能通道等資訊。故本案首先建立仁澤—土場地熱區初步地質概念模式，以通盤瞭解區域地熱地質概況，評估地熱區之發電潛能，擬定後續電廠用地。再針對初步蒐集計畫範

圍內之地形、地質等資訊後，建立三維地質模型，如圖四所示。

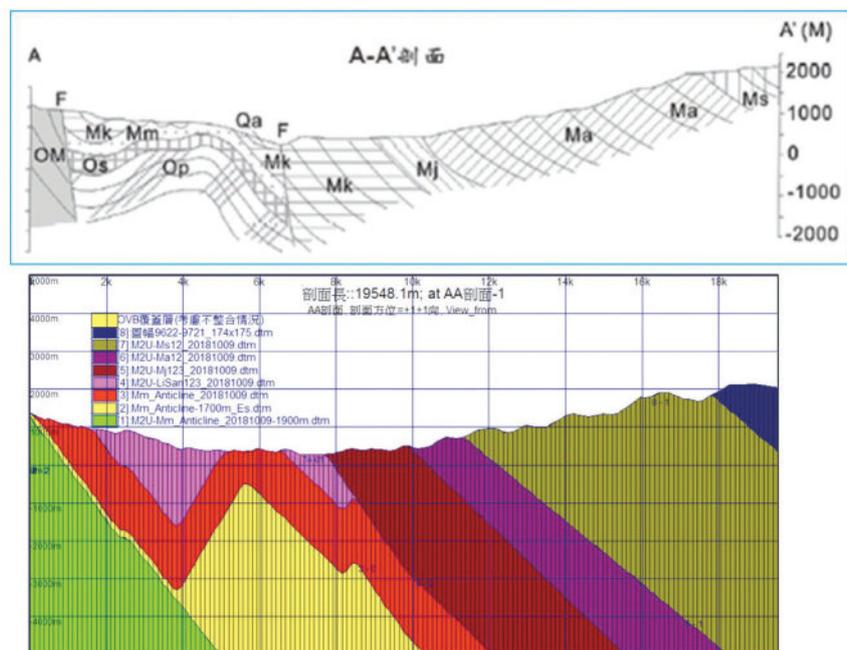
本計畫模型面積 21 公里 × 21 公里，深度 5 公里，並考慮地表高程之初步三維地熱地質概念模式，為參考地調所區域地質圖與相關文獻（圖五）平面地質圖、岩層剖面後建構而成，模型範圍內包含三星山層、蘇澳層、仁澤層、乾溝層、四稜砂岩與西村層，並計有兩條斷層及兩組背斜構造存在，其中斷層包含一東北 - 西南走向之梨山斷層及一南北向之仁澤斷層，背斜構造包含中嶺背斜及另一平行中嶺背斜背斜軸之背斜構造。模型也大致吻合盧等人建議之 A-A' 剖面地層分布情況，如圖六。



圖四 仁澤—土場地熱區三維地質模型



圖五 宜蘭仁澤—土場地區地質圖
(林啟文、林偉雄，1995)



圖六 三維地質模型與文獻 A-A' 剖面之比較圖

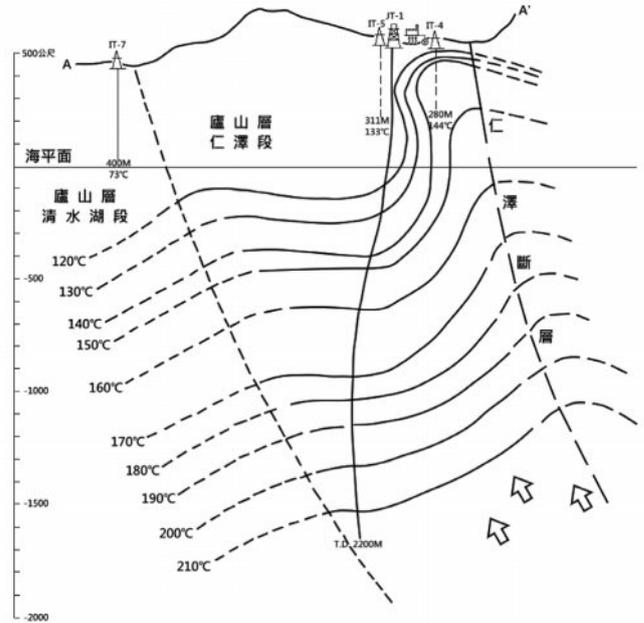
airiti

(二) 三維溫度場

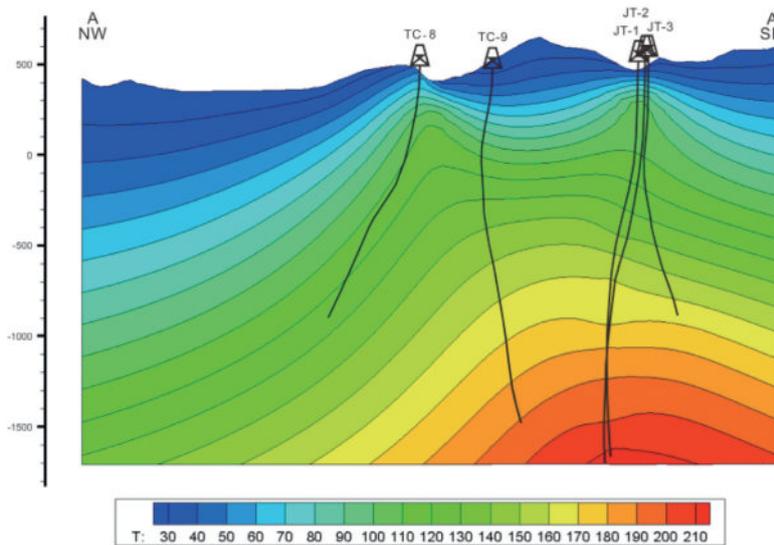
在地熱田調查程序中，透過淺層鑽井調查、採水／氣樣分析、地球物理探勘後，接著進行地熱探勘井 (Slim Well) 的探查，一般先以 3 口井為單位以界定地下溫度場之範圍。本計畫範圍過去曾辦理 4 口深鑽，以及 11 口淺層調查井，以及中油公司於 108 年完成之仁澤 3 號井的探查。因此，本節將綜整上述之溫度資料，包括恢復試驗推估平衡溫度剖面、井底量測最高溫度值與地表溫泉露頭量測值等數據，建立數值分析模型，初步先以數據內插之方式，推估研究範圍之三維溫度場。三維溫度場說明如後。

1. 仁澤地熱區：圖七為中油公司仁澤 1 號井周圍溫度場，剖面位置為圖一中的 A-A' 剖面，圖中顯示熱源沿著仁澤斷層向上傳輸至地表。圖八為本次繪製仁澤一土場三維溫度

場南北向剖面（剖面位置：E 301500m），溫度分佈場大致上與中油公司早期探勘成果相似。



圖七 中油公司仁澤地熱區溫度場
(改繪自：中油公司，1983)



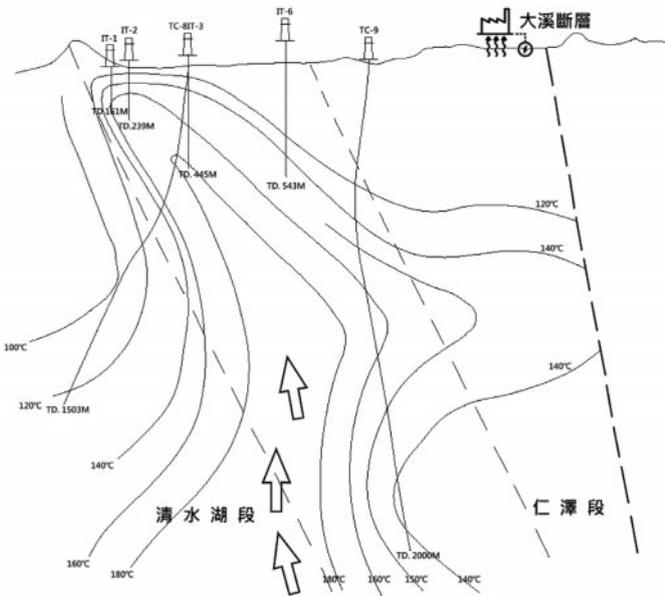
圖八 仁澤一土場三維溫度場南北向剖面（剖面位置：E 301500m）



2. 土場地熱區：圖九為中油公司土場 8、9 號井周圍溫度場，剖面位置為圖一中的 B-B' 剖面，圖中顯示熱源沿著廬山層青草湖段內之可能裂隙通道向上至地表。圖十為仁

澤－土場三維溫度場南北向剖面（剖面位置：E 302000m），溫度分佈場大致上與中油公司成果相似。

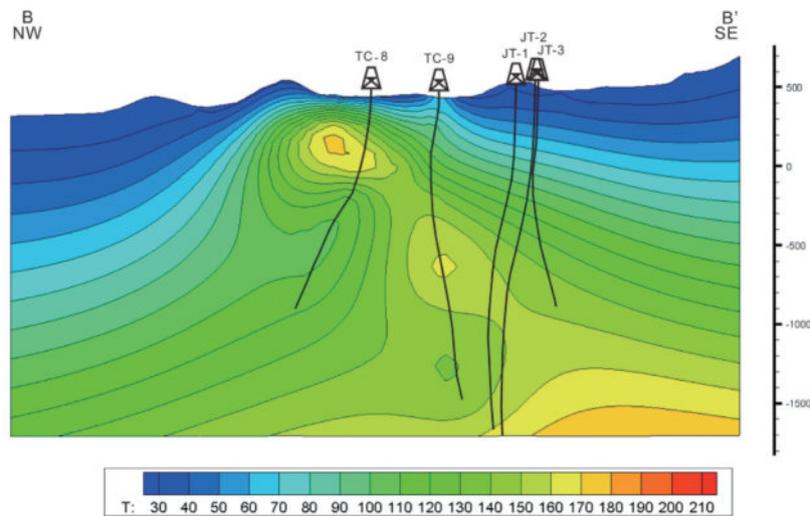
3. 溫度等值圖：圖十一為仁澤－土場地熱區不同深度溫度等值圖。圖 (a)~(d) 分別為以仁澤 3 號井場下方 900、1,350、1,700 及 2,050 公尺之溫度等值圖。圖中顯示，以本研究預定電廠下方為高溫區，仁澤 1、2 號井皆測得最高溫 214.7°C 及 219.5°C。



圖九 中油公司土場地熱區溫度場
(改繪自：中油公司，1983)

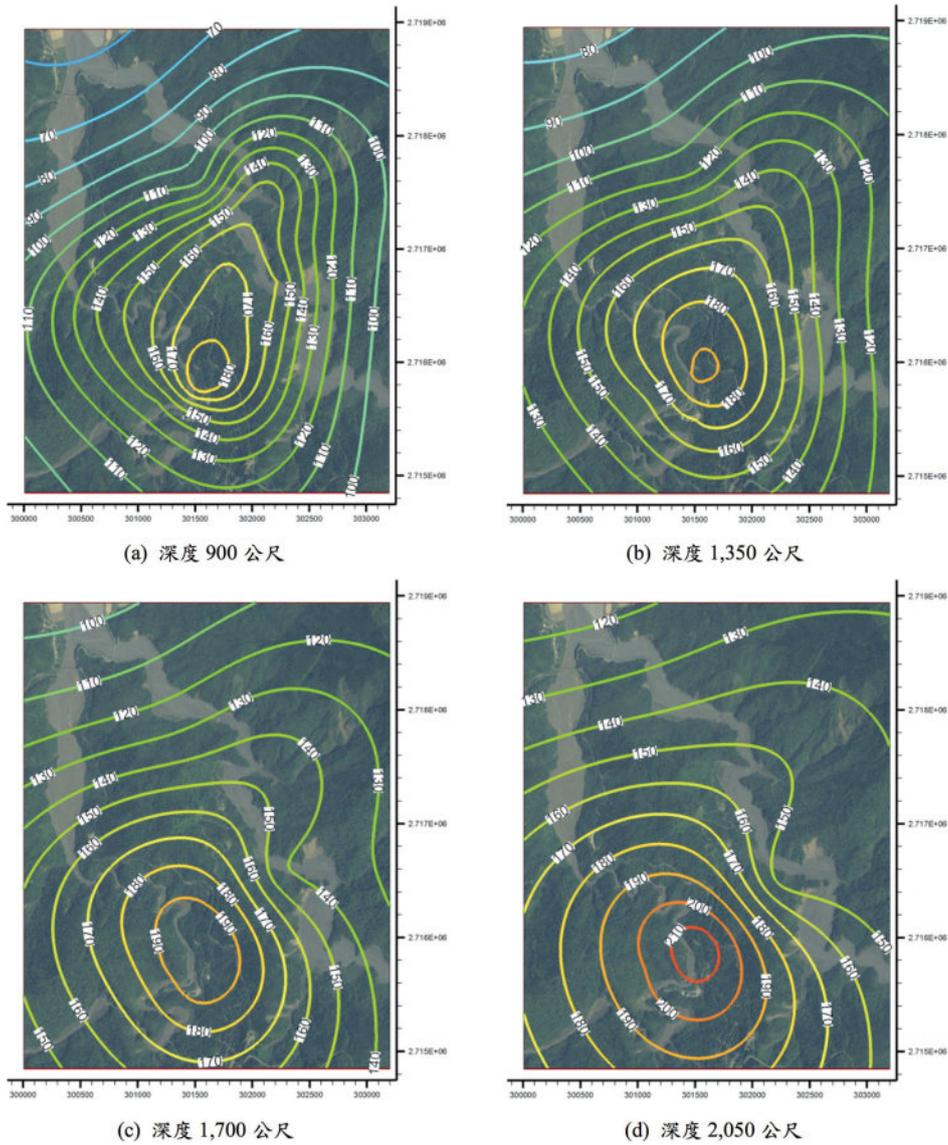
四、仁澤 3、4 號井探勘成果

考量地形因素，適當的鑽井區域有限，所以選擇在仁澤 2 號井之平坦區域（仁澤段 53 地號）以定向鑽井技術分別鑽鑿 3、4 號井（鑽井實況如圖十二）。經參考當地地質及過去探勘資料，規劃仁澤 3 號井井深 1,475 公尺，井程向西南方偏斜；仁澤 4 號井井深 1,500 公尺，井程向北方偏斜（各井程如圖



圖十 仁澤－土場三維溫度場南北向剖面（剖面位置：E 302000m）

airiti



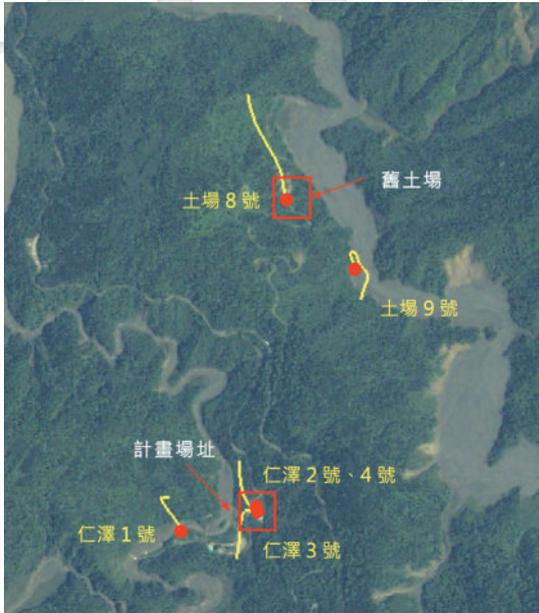
圖十一 仁澤一土地熱區不同深度溫度等值圖



圖十二 仁澤 4 號井井場現況 (2019/3/27 攝)

十三)。中油公司於 107 年 11 月份開鑽，並於兩口井完井後，從 108 年 4 月份進行產能測試。

地熱井產能測試目的係獲取包括井口熱液產量、蒸氣產量、熱產量等生產特性；地層之破碎帶、導水率、膚表因子等水力傳導特性；以及熱液之地球化學特性等資訊。試驗項目可包括恢復試驗、PTS 井測、生產試

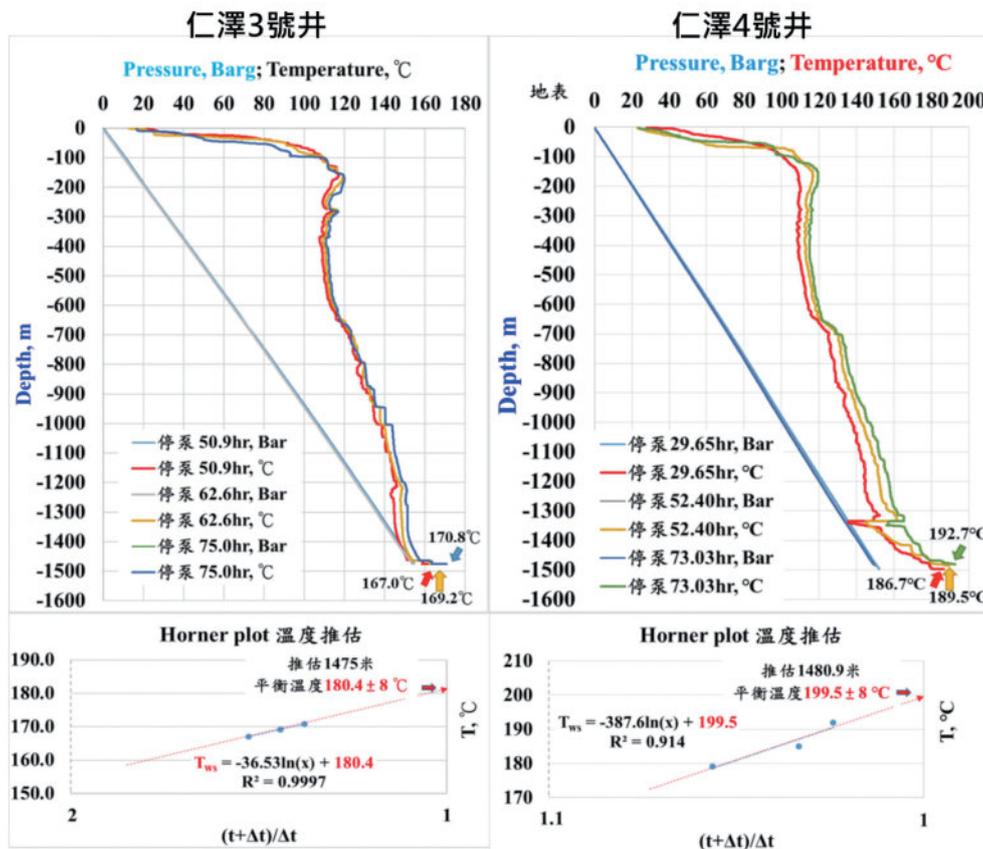


圖十三 仁澤—土場之中油公司深井井程平面圖

驗、壓力回升試驗、注水試驗、壓力洩降試驗、干擾試驗與地熱流體組成分析等。其中生產試驗（Production Test）數據為評估單井發電潛能之重要參數，其評析結果將決定發電機組選擇與調校之重要參數，故本文僅針對恢復試驗及生產試驗進行討論。

（一）恢復試驗

恢復試驗安排於鑽進抵達鑽孔目標深度，鑽桿拉出井口且井孔內尚未清洗前進行。試驗目的為獲得地熱井井口至井底之壓力、溫度變化曲線，利用溫度變化曲線初步推估地



圖十四 仁澤 3、4 號井恢復試驗
(引用中油公司，2019)



層最終平衡溫度及壓力、溫度異常帶的深度位置。通常於停泵後 3 天內完成至少 3 次的測試，以獲得較佳的壓力、溫度變化曲線。綜合仁澤 3、4 號井恢復試驗剖面圖（圖十四）可知，破碎帶可能位於深度 1,200~1,500 公尺範圍內，推估熱儲層原始溫度於此深度範圍約為 180°C 至 200°C。

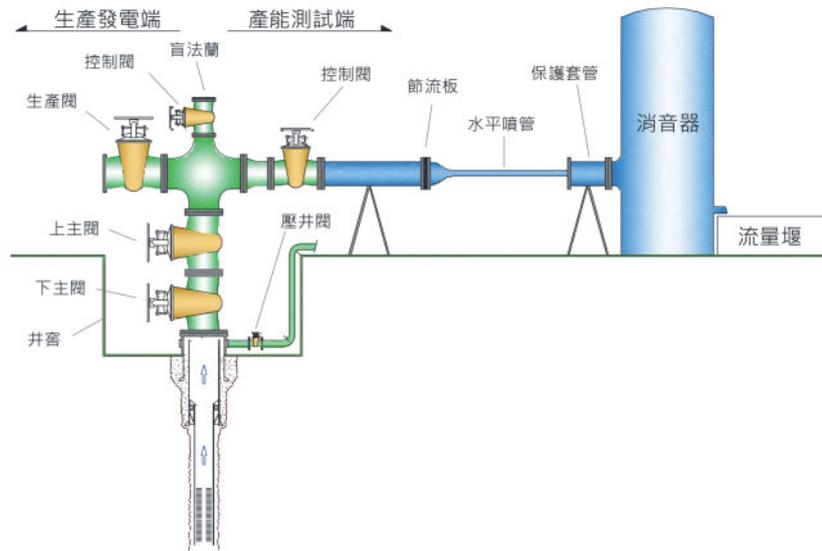
（二）生產試驗

生產試驗一般採用 James 唇壓力法，試驗設備如圖十五所示，係採用不同噴流管徑以控制不同井頭壓力、噴流量之生產條件，監

測地熱井生產的熱流壓力、溫度、蒸氣流量、熱水流量，並以 James 經驗公式（式 1）推估地熱井總熱焓值。仁澤 3、4 號井之生產驗成果如表四所示。

$$\frac{W \times H^{1.102}}{A \times P_{lip}^{0.96}} = 184 \quad (1)$$

其中 W 為總質量流量（Total Mass Flow, kg/s）、H 為流體總熱焓（Total Fluid Enthalpy, J/kg）、A 為水平噴管的面積（cm²），P_{lip} 為唇壓力（Lip Pressure, Bar）。



圖十五 James 唇壓力法設備配置示意圖

表四 仁澤 3、4 號井產能測試結果（摘自中油公司，2019）

井名	生產狀態	噴流管徑 (inch)	井口溫度 (°C)	井口壓力 (kg/cm ²)	熱水產率 (t/hr)	蒸氣產率 (t/hr)	總產率 (t/hr)	蒸氣比 (%)	總熱焓 (kJ/kg)
仁澤 3 號井	自湧	3	145.6	3.9	37.5	2.1	39.6	5.4	728.2
仁澤 4 號井	自湧	4	142.3	3.3	51.0	4.5	55.5	8.1	773.5

註：此表僅列出長期（13 天）噴流試驗達穩定之噴流管徑結果

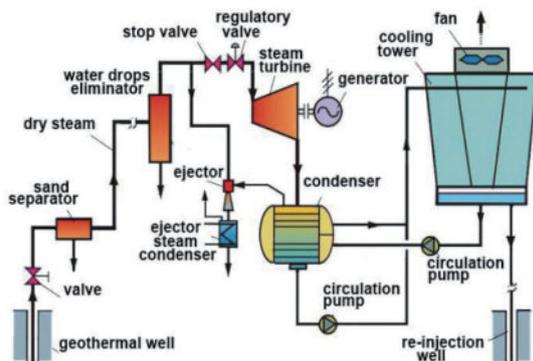
五、發電規劃

(一) 地熱發電技術發展現況

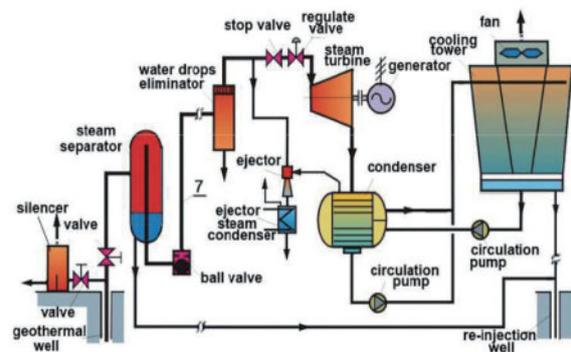
地熱發電原理為探勘取得地層內被熱源加溫後的高溫流體，這些高溫流體直接或經過熱交換之後推動渦輪機發電。經過利用後之尾水再注回地層中，以維持地層內之水資源。地熱發電模式依熱源條件的不同可分為乾蒸汽系統 (Dry steam)、閃發系統 (Single/ Duple Flash) 及雙循環系統 (Binary Cycle) 三

大類，其發電模式簡單說明如下，圖十六為不同地熱發電模式之示意圖。

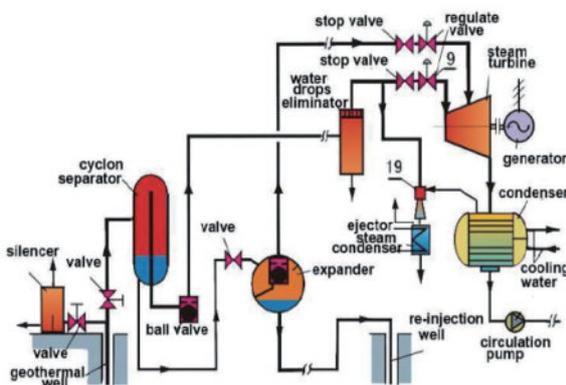
1. 乾蒸汽系統：適用於溫度大於 180°C 以上之乾蒸汽熱源條件，由井頭生產乾蒸汽並直接推動氣渦輪機。其具低成本優勢，但可直接生產乾蒸汽之地熱田較少。
2. 閃發系統：適用於溫度大於 180°C 以上熱源條件，井頭地熱流體先進行閃發及汽水分離後，再利用閃發後的蒸汽推動氣渦輪機，該生產模式為目前國際上的主流。



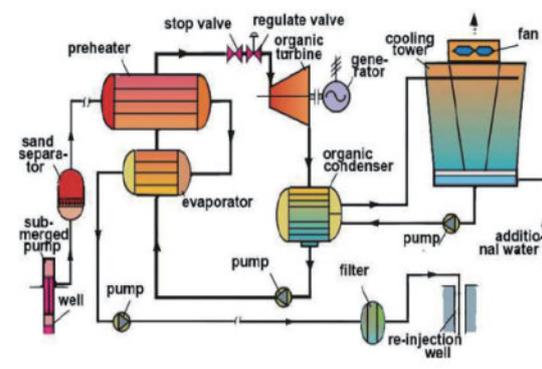
(A) 乾蒸汽系統



(B) 單閃發系統



(C) 雙閃發系統



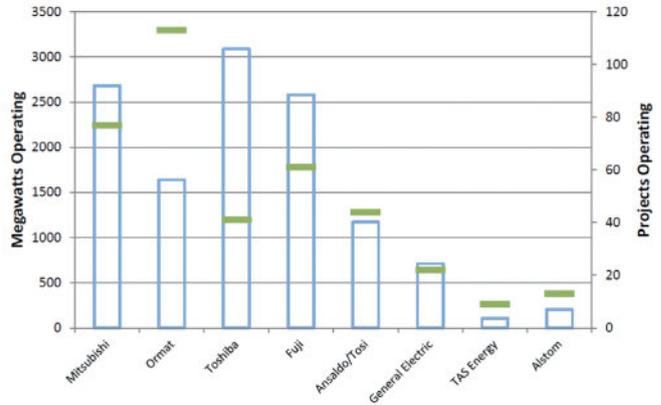
(D) 雙循環系統

圖十六 地熱發電模式示意圖 (Geothermal Communities)

airiti

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），透過熱交換加工作流體以推動渦輪機。該發電模式適用性較廣，較適合目前臺灣潛在地熱區之熱源條件。雖其熱轉換效率較前兩者差，但其容量因數（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容量因數的考量下，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）。

美國及全球地熱發電年報（Geothermal Energy Association, GEA, 2015）指出，閃發系統佔全球市場約 58%、乾蒸汽系統約佔 26%、雙循環系統約 15%，各類型發電系統過去之發展趨勢如圖十七所示。其中全球主要地熱發電機組供應商裝置容量如圖十八所示，市場佔比依序為 Toshiba（24%）、Mitsubishi（21%）、Fuji（20%）及 Ormat（13%）。在美國及歐洲地區建置中的地熱電廠將以雙循環系統為主，而東非及南太平洋地區以閃發



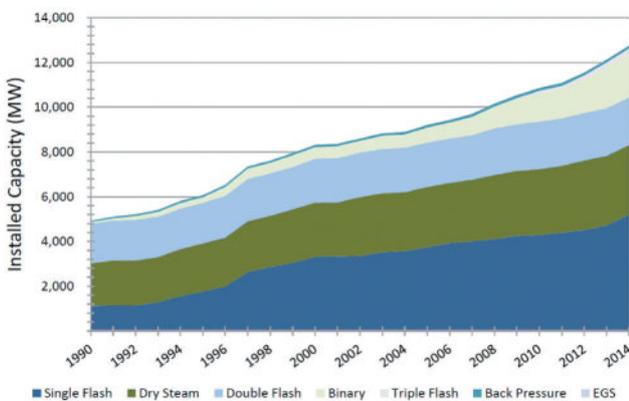
圖十八 全球主要地熱發電機組供應商裝置容量 (資料來源：GEA, 2015)

及乾蒸汽系統為主，中南美洲則正著手進行地熱資源調查，其發電系統預計採複合式系統。整體而言，GEA 預測雙循環系統的市場佔比將大幅成長。

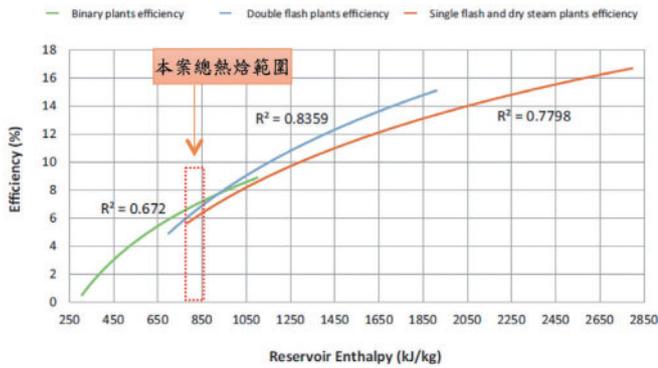
(二) 發電模式評析

1981年，本國曾於清水地熱區建置 3.0MW 地熱電廠，併網發電約 12 年半後關廠。該電廠採用閃發系統，由蒸汽推動汽渦輪機 (Steam Turbine) 後即排放至大氣中，同時分離後的熱水亦未進行回注。使得熱儲集層經過長時間生產，地層壓力下降、水源補注不及，造成結垢阻塞而降低產能。由於仁澤地熱區與清水地熱區同屬非火山型地熱，相關的規劃經驗應納入考量。

依據 Zarrouk and Moon (2014) 整理國際上已裝置之地熱發電機組發電效率與總熱焓之關係圖，如圖十九所示。美國 Geothermal Resources Council 依地熱田地溫梯度與深度建議發電型式如圖二十所示。因此，依仁澤地



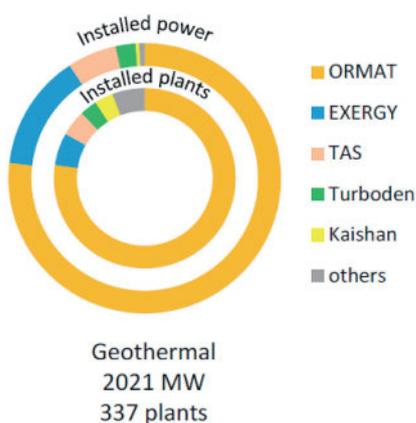
圖十七 各類地熱發電模式發展趨勢 (資料來源：GEA, 2015)



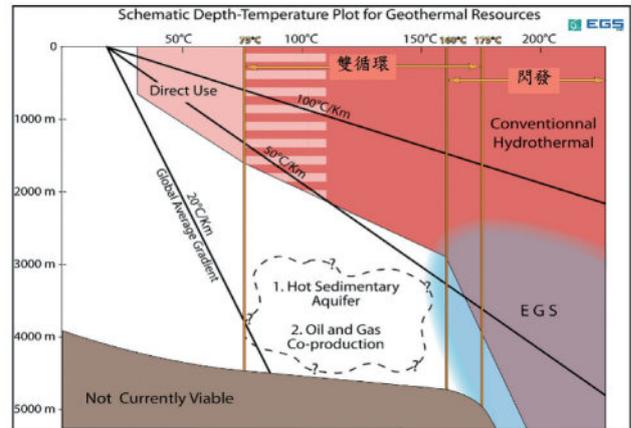
圖十九 不同類型發電機組之發電效率
(資料來源：Zarrouk and Moon, 2014)

熱井探勘成果，頭溫度介於 140~150°C，總熱焓值介於 700~800 kJ/kg，進行發電系統的選擇，採用雙循環系統較閃發系統更為有效率。

雙循環系統中又以有機朗肯循環 (Organic Rankine Cycle, ORC) 為主要機種。目前全球 ORC 裝置容量 (2,701 MW) 佔比中，地熱發電廠佔 74.8%，地熱電廠中前三大供應商分別為 Ormat (75%)、EXERGY (13%)



圖二十一 全世界 ORC 設備商裝置容量市佔率
(資料來源：Tartière and Astolfi, 2017)



圖二十 發電機組選擇與地溫條件之關係
(資料來源：GRC 官網)

及 TAS (6%)，詳圖二十一裝置容量市佔率 (Tartière and Astolfi, 2017)。未來本計畫進入發電機組採購階段時，評選設備供應商應從 (1) 熱轉換效率、(2) 電廠用電率、(3) 容量因數、(4) 每瓦設備成本及 (5) 每瓦年化維護成本等因子進行評比，以選擇最佳之設備供應商。

(三) 電廠開發規模

電廠開發規模係與地熱井產能相關，本節依中油公司鑽鑿仁澤 3、4 號井之產能來評估地熱生產量。此外，回注水溫度亦為評估發電量之重要參數，回注溫度越低，則發電量越高，惟回注溫度尚需考量熱儲層熱源補充率，否則大量且快速取熱後，熱儲層易衰竭。常見回注溫度介於 80~100°C，本研究以 80°C 估算。

中油公司初期生產規劃係以兩口新井產能較佳的作為生產井，另一口則作為回注井。經生產試驗評估仁澤 4 號井產能較 3 號井佳，

故將以現階段（情境一）及未來建議（情境二）分為兩種開發情境。

1. 開發規模情境一：以仁澤 4 號井生產、3 號井回注，並預設熱交換後之尾水溫度為 80℃；熱轉換效率約為 13~14%，保守取 13.3%。經計算後發電潛能約為 0.9MW，評估結果詳表 5。
2. 開發規模情境二：仁澤 3、4 號井共同生產，並另鑿回注井，其他條件與情境一相同。經計算後發電潛能約為 1.47MW，評估結果詳表五。

綜合上述，現階段將採用仁澤 3、4 號井，一產一注方式規劃電廠規模約 0.9MW，待下

表五 開發規模潛能估算表

情境一：4 號井生產		
總流量 (t/hr)	55.5	
蒸汽含量 (%)	8.1	
總流體熱焓 (kJ/kg)	773.5	
回注溫度 (°C)	80	
回注流體熱焓 (kJ/kg)	334.9	
機組熱效率 (註)	13.3	
裝置容量 (MW)	0.9	
情境二：3、4 號井生產		
各井總流量 (t/hr)	3 號井	4 號井
	39.6	55.5
蒸汽含量 (%)	5.4	8.1
總流體熱焓 (kJ/kg)	728.2	773.5
回注溫度 (°C)	80	
回注流體熱焓 (kJ/kg)	334.9	
機組熱效率 (註)	13.3	
裝置容量 (MW)	1.47	

註：機組熱效率係參考國際設備商評估本案條件所提供資訊

一階段擇定適合回注井後，可將電廠規模提升至 1.47MW。此外，該區域尚有仁澤 1、2 號井，目前為林務局經營供鳩之澤溫泉使用，未來亦可整合進行地熱發電整體規劃。

六、結論與未來展望

本研究以早期地質調查探勘資訊及中油新鑽仁澤 3、4 號井探勘資料進行發電潛能評估，並參考國際地熱機組市場資訊，規劃 0.9~1.4MW 之仁澤地熱發電廠，未來尚有擴充之可能。目前中油在土場地區進行第二期探勘，已初步獲得成果，後續將納入開發場址。

地熱資源的評估及開採為相當專業之技術，涉及地質、地物、地化、鑽井工程、儲集層管理等多項專業，在前期探勘到生產，須逐步蒐集資料，降低不確定性。大規模地熱前期探勘在國際上多由政府帶頭，陸續引入民間資源，才能使地熱發電逐步展開。本研究仁澤 3、4 號井的成功，亦仰賴政府早期投入探勘的成果，雖然歷經約 30 年的地熱空窗期，但相信在政府能源轉型政策的推力下，由政府及民間共同努力，期待未來 10 年間能看到地熱發電遍地開花之成果。■

【參考文獻】

- [1] 地熱發電資訊網：<https://www.geothermal-taiwan.org.tw/>
- [2] Geothermal Communities：<https://geothermal-communities.eu/>
- [3] Geothermal Resources Council：<https://geothermal.org/what.html>

- [4] 中國石油公司（1976），宜蘭縣土場地熱區中油土場八號地熱探井地下地質報告。
- [5] 中國石油公司（1978），宜蘭縣土場地熱區中油土場九號地熱井地下地質報告。
- [6] 中國石油公司（1983），宜蘭縣仁澤地熱區中油仁澤一號地熱探井地下地質報告。
- [7] 中國石油公司（1984），宜蘭縣仁澤地熱區中油仁澤二號地熱探井鑽井地質簡報。
- [8] 台電（2013），委託財團法人環境與發展基金會辦理「台灣地熱發電潛能廠址研究計畫」成果報告。
- [9] 林啟文與林偉雄（1995），三星圖幅，五萬分之一台灣地質圖及說明書（第十五號），經濟部中央地質調查所，共 56 頁。
- [10] 中油（2019），仁澤 3 號地熱井產能測試報告。
- [11] 中油（2019），仁澤 4 號地熱井產能測試報告。
- [12] Zarrouk, S. J., Moon, H. (2014), Efficiency of Geothermal Power Plants: A Worldwide Review, *Geothermics*, 51, July, pp. 142-153
- [13] Tartiere T., Astolfi M. (2017), A World Overview of the Organic Rankine Cycle Market, *Energy Procedia Energy Procedia*, Volume 129, 2-9