

113年度氣候變遷創意實作競賽

決賽作品說明書

隊伍編號	020
隊伍名稱	地心探險隊
作品中文名稱	解鎖岩漿庫
作品英文名稱	Unlocking the Magma Reservoir

參賽學校：國立勤益科技大學

指導老師：謝瑞青

團隊成員：林均翰、胡世彥、陳業彤

目錄

一、 動機及設計構想	4
(一)動機及目的	4
(二)設計構想	5
1. 雙循環地熱電廠運作原理	5
2. 作品創意說明	6
二、 作品說明	7
(一)地熱儲集層模型建立	7
(二)地熱雙循環系統熱力模型建立	9
(三)渦輪模型系統建立	11
(四)類神經網絡模型建立	12
(五)作品數據分析	13
三、 作品創意說明	18
四、 作品應用範圍及發展潛能	18
(一) 應用範圍	18
(二) 發展潛能	19
五、 工作分配	20
六、 參考資料	21

摘要

地熱電廠運作過程中，因結垢或儲集層問題使地熱水之流量或溫度下降，影響系統性能與經濟性。為能準確預測電廠運轉期間發電量準確性，本研究耦合多種物理模型，如儲集層、熱力、渦輪及經濟等，並對電廠進行經濟評估。

Abstract

During the operation of a geothermal power plant, a decrease in the flow rate and temperature of geothermal water due to scaling and reservoir issues can affect system performance and economics. To accurately predict the electricity generation of the power plant, this study couples various physical models, including reservoir, thermodynamic, turbine, and economic models, to conduct performance and economic evaluations of the power plant.

一、動機及設計構想

(一)動機及目的

近年來全球人口不斷增加，工業、民生及畜牧產業蓬勃發展，人們對於能源的需求與日俱增並且引發許多環境汙染議題，如溫室氣體、工業廢熱、民生及工業廢水等汙染源。目前，全球組織已經提出改進方法，其中之一是 2015 年提出的「巴黎協定」，該協定要求簽署國努力避免全球平均溫度超過 2°C，並限制溫度上升超過 1.5°C。為了達成上述協議，許多國家已提出減少溫室氣體排放和碳捕獲技術的政策，以實現碳中和。最終，在 COP26 上通過了「格拉斯哥氣候協定」，提議全球各國逐步減少煤炭能源。

上述提及之種種因素促使各國政府不斷提倡利用再生能源替代現今使用的化石燃料，再生能源係一種具有恢復性之能源，可不斷產生、重複利用並且可以減少環境的破壞，其中地熱分布較為廣泛，再加上其較具備持續性及穩定性等優點，因此受到許多關注。Stltan 等人[1]對發電廠的CO₂排放和經濟進行了比較，結果顯示地熱發電廠的碳排放約為化石燃料的十分之一，同時其電力成本 LCOE 的數值也較低。Anderson 等人[2]整理了 1995 年至 2020 年的地熱能源技術信息。研究發現，地熱能源的發電容量持續增加，已達到全球發電容量的 8.3%。

台灣位處環太平洋火環帶上，如圖 1 所示。遍布著許多地熱現象如溫泉和間歇泉，尤其是台灣北部的大屯火山群，火山活動提供了優良的地熱資源，占台灣潛在地熱能源的一半以上[3]。地熱對比其他再生能源擁有佔地面積小、供電穩定、不受氣候影響且運轉效率高等優勢，如圖 2 所示，並且我國於 2022 年提出「台灣 2050 年淨零排放路徑及策略總說明」其中提到使用 EGS、AGS 等先進地熱發電技術，達到淨零排放的目標[4]。



圖 1 全球地熱熱點分布圖[5]



圖 2 再生能源比較圖[6]

COP28 氣候大會在 2023 年末於杜拜正式完成決議，會議中提到 2025 年前全球碳排放將達到最高峰，承諾進行能源系統轉型、脫離化石燃料，並且會議首次提到甲烷減量，共有 155 個國家政府同意減少甲烷排放以遏止升溫。會議最後近 200 個國家承諾在 2050 年前實現淨零排放，並致力於能源系統轉型。台灣雖然非聯合國締約國，但我國身為高度仰賴燃料進口的國家，如何在能源政策方面做出更具野心的改變，以配合全球的氣候目標，為目前面臨的一大挑戰。我國位於太平洋火環帶，因此地熱資源豐富，當我們參與指導教授謝瑞青老師之計畫時(國科會計畫：THM 儲集層模型整合新型動力循環系統之壽命與經濟性研究)，發現地熱電廠能夠不受天候所影響，持續 24 小時發電可作為基載電力，興建地熱電廠實現能源轉型是迫在眉睫的議題，但如何加速開發地熱資源是我國最重要的課題。

地熱電廠發展目前遇到一些較難解決的問題，如地熱資源探勘、投資成本與風險高及地

溫梯度小等，其中鑽井成本就占整體投資成本的 50%[7]，且根據美國康乃爾大學(Cornell University)的研究團隊於 2013 年發表估計，地熱井深度及鑽井成本為正關係，如圖 3 所示。隨深度增加鑽井成本大幅上升[8]。Kubota 等人[9]發現地熱井在運行階段還存在熱源衰減的風險，因此關鍵在於對於儲集層的評估及產能測試，確保地熱電廠在運轉期間都能穩定供電，Barbier[10]研究顯示做好儲集層的管理可以確保地熱穩定供應數十年。Rybach[11]研究發現隨著時間的推移，生產溫度會顯著下降，降低的生產溫度需要對等的時間才能恢復至最初的生產溫度[12]，如圖 4 所示。

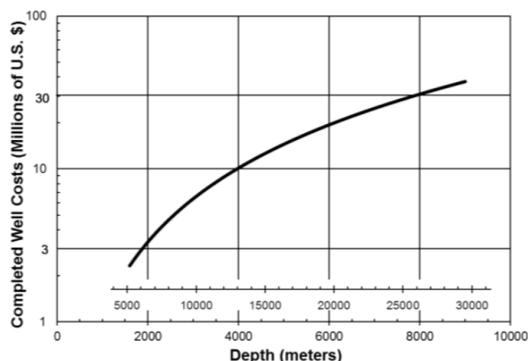


圖 3 地熱井深和鑽井成本關係圖[8]

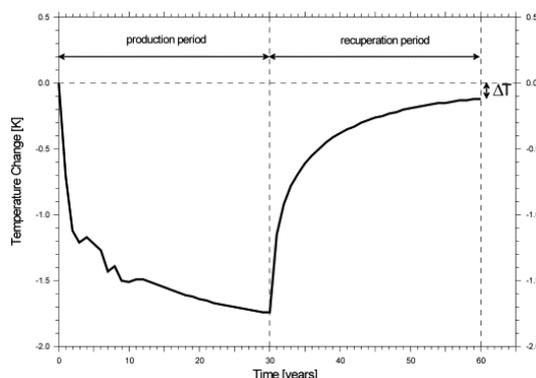


圖 4 生產溫度隨運轉時間下降及溫度恢復圖[12]

地熱發電系統的設計條件係利用探勘及產能測試結果，如同上述文獻所述，生產溫度會隨著系統運轉時間的增加而下降，而目前工程及文獻只能使用探勘及產能測試的結果設計地熱電廠，但是並沒有考慮長時間運轉下儲集層之生產溫度衰退狀況對電廠性能的影響[13]。

(二)設計構想

1. 雙循環地熱電廠運作原理

本企劃主要以雙循環地熱電廠為主軸(例如台灣清水地熱電廠，2021 年商轉)，系統示意圖如圖 5 所示。首先，生產井高溫地熱水進入雙循環系統，經過取熱發電後較低溫地熱水透過回注井，注回儲集層提取高溫岩層裂隙中的熱能，該流體經由生產井再回流至地表上的雙循環發電系統，作為熱源進行發電，在儲集層中形成一閉迴路循環。但由於台灣地熱資源開發較完整的地區屬宜蘭清水地熱，根據謝教授於工研院服務期間發現，清水地熱水焓值約為 800kJ/kg，乾度約為 10%，這代表要利用水蒸氣發電效率不佳。在 1980 年代台灣曾經有建置一 3MW 閃發型地熱電廠，只利用蒸氣發電，其中有 90%流量之地熱水又送回儲集層，但由於效率不佳且結垢問題，最後面臨關廠命運。

雙循環發電系統部分，能將液態水或水蒸氣皆能夠有效的利用，其內部低溫低壓的工作流體(通常為環保冷媒)經由泵加壓後，運送至蒸發器與高溫地熱水進行熱交換。在此過程中，液態工作流體轉變為氣態，接著將高溫高壓工作流體送至渦輪膨脹機推動發電機發電，經過膨脹後的低壓氣體被輸送至冷凝器進行冷凝，最後氣態工作流體冷凝成液態，完成發電系統的工作流體閉循環。

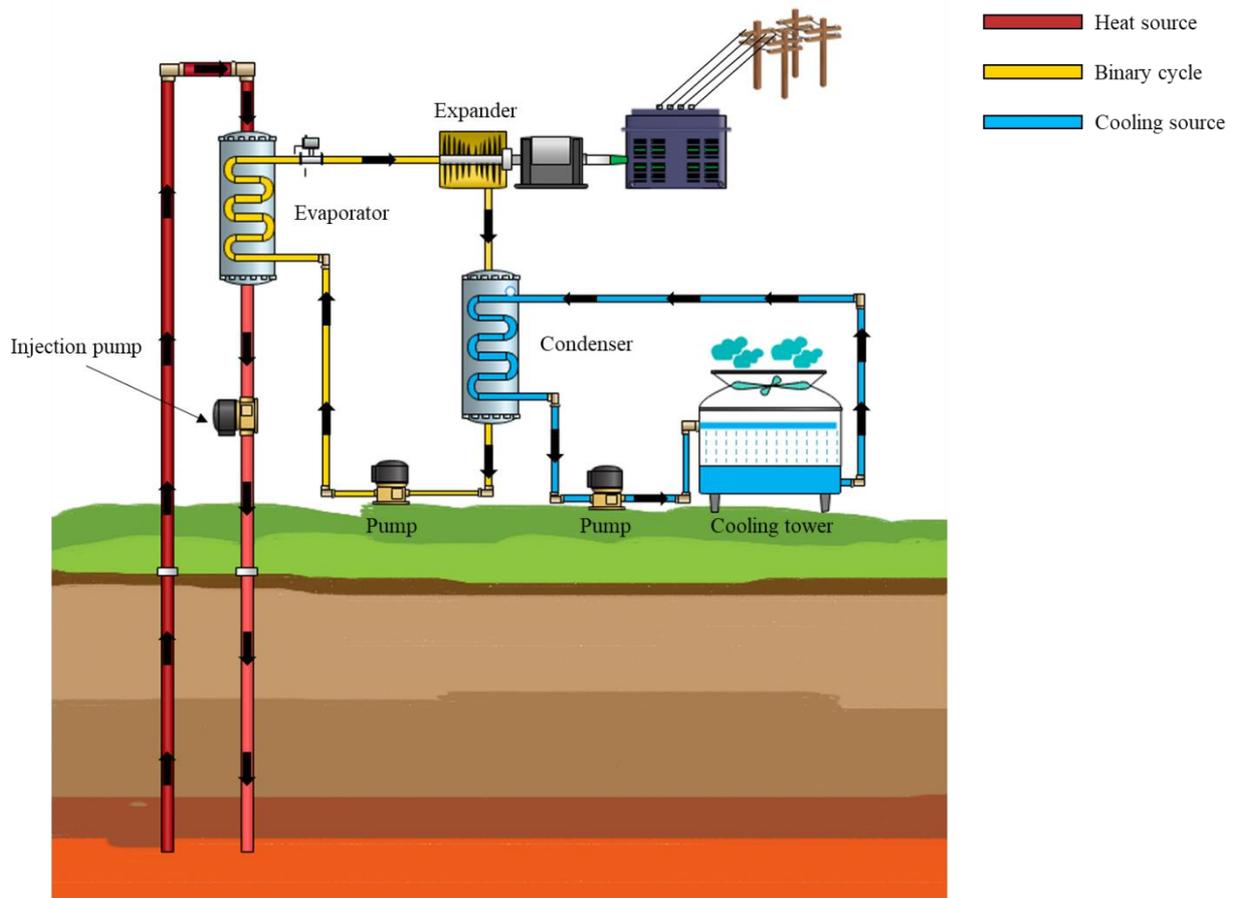


圖 5 雙循環地熱電廠示意圖

2. 作品創意說明

本企劃係利用達西定律、傅立葉定律、虎克定律來描述儲集層，達西定律用來描述流體於地下岩層中緩慢流動的現象，傅立葉定律則用來描述於於達西速度場中流體熱傳現象，而虎克定律用來描述岩石變形的現象。接著使用 COMSOL Multiphysics [14]建置地熱儲集層數值模型，利用熱、水力、機械(Thermo-Hydro-Mechanical, THM)模型分析運轉時間與生產溫度的關係，並以此生產溫度作為雙循環系統之熱源條件，並將雙循環熱力模型建置於 MATLAB 中[15]，除了可計算系統內各元件(例如蒸發器、冷凝器及泵)的設計條件外，同時也獲得渦輪膨脹機入口溫壓及出口壓力，最後依上述條件進行尺寸設計並計算成本。

本企劃耦合地熱儲集層之 THM 模型、渦輪膨脹器之 CFD (ANSYS CFX[16])數值模型與雙循環熱力模型，目的是為了瞭解生產溫度下降過程中，儲集層及雙循環系統在長時間運作下性能衰退情形，由於雙循環系統之操作條件隨著生產溫度改變，因此渦輪膨脹機之等熵效率及蒸發器有效度將會受到影響，進一步影響系統性能。此外，為了節省 CFD 計算時間及耦合，本企劃單獨對渦輪膨脹機之 CFD 模型進行離點測試，並利用離點測試結果對類神經網絡法(Artificial neural network, ANN)模型訓練，使 ANN 模型能預測渦輪離點時之冷媒流量、等熵效率及軸功，本研究將 ANN、雙循環熱力與經濟模型及地熱儲集層三者耦合，以建構儲集層之生產溫度或流量下降時，預測整體電廠系統性能與經濟之方法，詳細之分析方法如圖 6 所示。

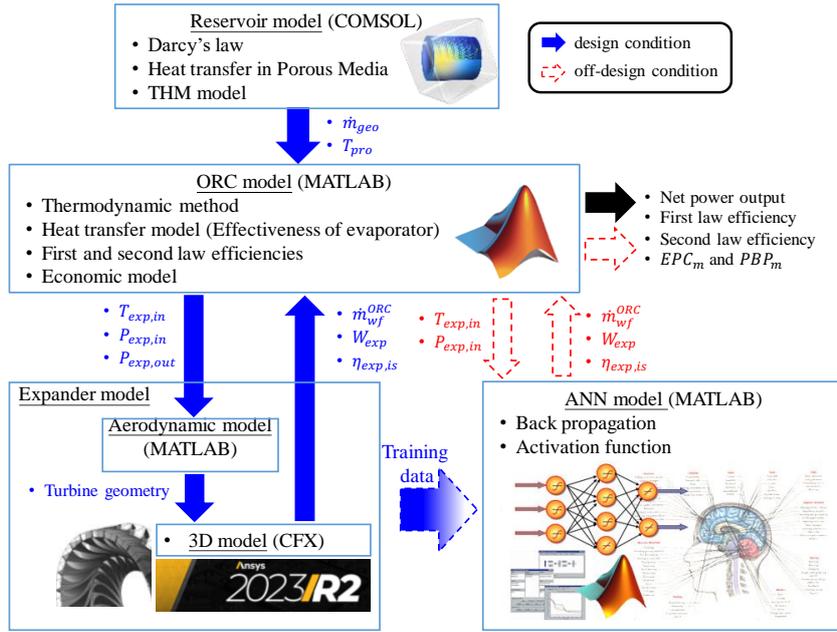


圖 6 系統分析方塊圖

二、作品說明

(一)地熱儲集層模型建立

本企劃將地熱儲集層透過 COMSOL 以數值模擬方式建立 THM 模型，如圖 7 所示，探討地熱儲集層隨運轉時間之生產溫度變化，如圖 8 所示，其模擬模型所建構設定為流場、溫度場及應力場三種物理量之耦合，本研究之基本定律是質量、能量和動量守恆，其各自的統御方程式為達西定律、傅立葉定律和虎克定律[17]。

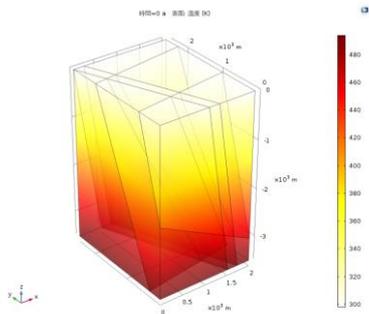


圖 7 地熱儲集層示意圖

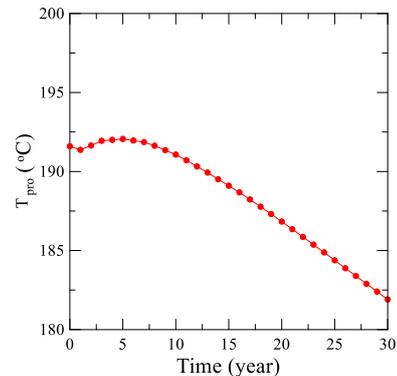


圖 8 儲集層生產溫度隨時間變化圖

1. 流場之統御方程式(Fluid flow governing equations)：

本研究採用達西定律(Darcy's law)描述儲集層流場，並計算流場的速度及壓力，結合了連續方程式與動量平衡方程式，其中連續方程式表示為[17]：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_L \epsilon_r) + \nabla \cdot (\rho_L v_r) = Q_m \quad (1)$$

$$v_r = -\frac{\lambda_r}{\mu} \nabla \rho_L \quad (2)$$

其中 ρ_L 為流體密度， ϵ_r 為儲集層孔隙率， Q_m 為總流量， v_r 為儲集層內之達西速度場(Darcy's field velocity)。

2. 熱傳之統御方程式(Heat transport governing equations)：

本研究採用多孔介質熱傳(Porous heat transfer model)描述儲集層溫度場，假設介質與流體在空間與時間上任何一點之溫度皆相等，其熱傳平衡方程式已有效被廣泛的使用在分析多孔介質的熱傳，表示為[19]：

$$(\rho C_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_L C_{p,L} v_r \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-k_r \nabla T) = Q \quad (3)$$

其中 $C_{p,L}$ 為流體比熱， T 為溫度， k_r 為儲集層熱傳導係數， Q 為熱量， ρC_p 為等效體積熱容(Effective volume heat capacity)，，等效體積熱容表示為[20]：

$$(\rho C_p)_{eff} = \epsilon_r \rho_S C_{p,S} + (1 - \epsilon_r) \rho_L C_{p,L} \quad (4)$$

其中 ρ_S 為固體密度， $C_{p,S}$ 為固體比熱。

3. 應力變形之統御方程式(Mechanical deformation equations)：

本研究採用固體力學(Solid mechanics)描述儲集層岩石變形(Rock deformation)，對多孔介質使用線性動量守恆(Conservation of linear momentum)，通過假設線性、彈性、均勻和各向同性的材料行為，其平衡方程式表示為[20]：

$$\nabla \sigma_{ij} + F = 0 \quad (5)$$

其中 σ_{ij} 是總應力(Total stress tensor)， F 是體積作用的力(Body force)。應變與位移關係表示為[20]：

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{ij} + u_{ji}) \quad (6)$$

其中 ϵ_{ij} 是總應變(Total strain tensor)， u 是位移分量(Displacement componet)。變形矩陣(Deformed matrix)之本構關係(Constitutive relationship)表示為[20]：

$$\sigma_{ij} = 2G\epsilon_{ij} + x\epsilon_{kk}\delta_{ij} - \frac{\alpha E \Delta T}{1-2\nu} \delta_{ij} \quad (7)$$

其中 G 為剪切模量 (Shear modulus)， x 為拉梅常數(Lame constant)， δ_{ij} 克羅內克函數(Kronecker delta)， α 為熱膨脹係數(Thermal expansion coefficient)， E 為楊氏模數(Young's modulus)， ΔT 為儲集層溫度變化， ν 為蒲松比(Poisson's ratio)。

為了驗證地熱系統建立方法的正確性，模擬結果與 Song 等人[21]在相同假設條件上的模擬結果進行比較。模擬結果與 Song[21]等人在相同假設條件下的模擬結果進行比較。結果如圖 9 所示。

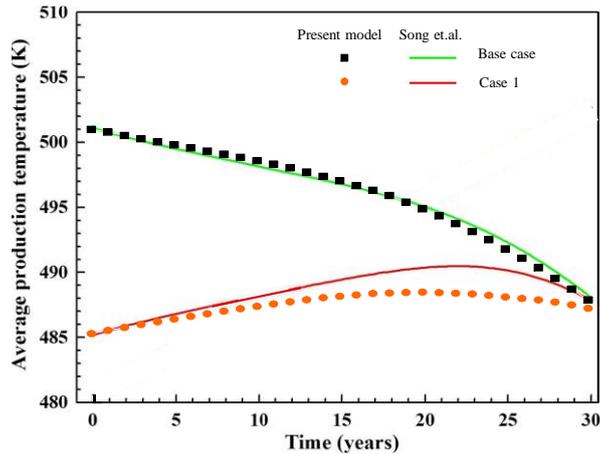


圖 9 地熱儲集層系統驗證圖

(二)地熱雙循環系統熱力模型建立

地熱雙循環系統係將工作流體加壓並吸收地熱水之熱量汽化成過熱蒸汽，之後進入膨脹機將熱能釋放轉換成機械能，並帶動發電機轉換成電能。本研究使用 NIST Refprop 9.0[22]資料庫獲取工作流體性質，分析上則是以計算不同狀態點之性能表現，繪製圖 10 之 T-s 圖。另外，地熱雙循環系統之假設條件如下：

- I. 系統運行過程中為穩態且絕熱[23]。
- II. 忽略位能及動能的變化[24]。
- III. 忽略地熱雙循環系統內部管路之壓損[25]。

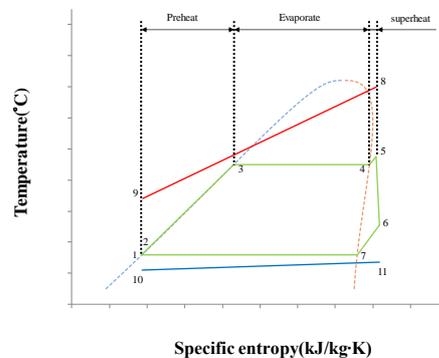


圖 10 地熱雙循環 T-s 圖

根據圖 10 之 T-s 圖，系統內的工作流體會從站點 1 透過泵加壓至站點 2 送入蒸發器，站點 2 至站點 5 液態工作流體於蒸發器內吸收熱源(由地熱水提供)後成為過熱氣體(或飽和氣體)後傳送至膨脹機，此時站點 5 至站點 6 的高溫、高壓氣態工作流體於膨脹機內降壓、降溫膨脹，將壓力差轉換為膨脹機轉子的旋轉動能，再帶動發電機轉換為電力輸出。站點 6 至站點 1 將做功後的低壓氣態工作流體傳送至冷凝器，將氣態工作流體放熱成液態後，輸送至泵浦，完成熱力循環。表 1 為地熱雙循環系統輸入條件，表 2 為地熱雙循環系統分析模型。

表 1 地熱雙循環之設計條件

Parameters	Values
η_{pump}	0.85
η_{exp}	0.9
$T_{Env} (^{\circ}C)$	32
$T_{out,cs} (^{\circ}C)$	37
$T_{pp,hs} (^{\circ}C)$	5
$T_{pp,cs} (^{\circ}C)$	5
$T_{eva} (^{\circ}C)$	100
$T_{in,hs} (^{\circ}C)$	160
$T_{superheat} (^{\circ}C)$	5
$\dot{m}_{hs} (kg/s)$	30
Working fluid	R245fa

表 2 地熱雙循環之熱力模型

泵耗電量計算	$W_{p,elec} = \frac{W_p}{\eta_{gen}} = \frac{\dot{m}_{wf} \times (h_{p,out} - h_{p,in})}{\eta_{gen}}$
蒸發器熱交換量	$Q_{eva} = \dot{m}_{wf} (h_{eva,out} - h_{eva,in})$
渦輪膨脹機作功量	$W_{exp} = \dot{m}_{wf} (h_{exp,in} - h_{exp,out}) = \frac{W_{elec}}{\eta_{gen}}$
回注泵耗電量計算	$W_{inj,elec} = \frac{W_{inj,p}}{\eta_{gen}} = \frac{\dot{m}_{geo} \times (h_{p,out} - h_{p,in})}{\eta_{gen}}$
系統淨輸出功及效率	$W_{net} = W_{exp} - W_p - W_{inj,p}$ $\eta_{net} = \frac{W_{net}}{Q_{eva}}$

為確保地熱雙循環之熱力模型具有可性度，因此本模型與 Kheiri 等人[27]在相同的工作條件下進行地熱雙循環熱力學分析，如表 3 所示。結果顯示本系統與 Kheriri 等人十分吻合。

表 3 地熱雙循環系統之驗證模型

Parameters	Present study	Kheiri et al.[27]	Deviation (%)
$\dot{m}_{wf} (kg/s)$	61.05	61.1	-0.08
$\dot{W}_{net} (kW)$	1480.9	1521	-2.64
η_I (%)	10.94	11.1	-1.49

(三)渦輪模型系統建立

進行渦輪膨脹機設計之前，需先針對渦輪膨脹機之型式進行選型，透過地熱雙循環系統之熱力分析模型取得渦輪機本設計條件，並對渦輪膨脹機之基本設計參數進行假設，如流動係數、負載係數、反動度、轉速及等熵效率，將上述之設計條件，利用下列方程式計算渦輪膨脹機之比速度[28]及比直徑[29]。

比速度：

$$\omega_s = \frac{\omega \dot{Q}_{wf}^{1/2}}{\Delta h_{is}^{3/4}} \quad (8)$$

比直徑：

$$D_s = \frac{D \Delta h_{is}^{1/4}}{\dot{Q}_{wf}^{1/2}} \quad (9)$$

其中 D 為特徵直徑， ω 、 \dot{Q}_{wf} 及 Δh_{is} 分別為角速度、工作流體體積流率及等熵狀態下入出口之焓差。

根據方程式(9)的計算結果與參考文獻[28]中所提供的流體機械選型圖表，本文所探討的操作工況適合採用軸向渦輪膨脹機。進一步考量方程式(9)，並透過軸向渦輪之比速度和比直徑及效率關係圖[28]來預估渦輪膨脹機的理論效率。

本研究根據設計條件選用之渦輪膨脹機為軸流式渦輪機，完成渦輪膨脹機之初步選型之後，給定負載係數和流動係數，並假設軸向速度恆定的條件下，透過 Matlab 求解渦輪膨脹機的質量、能量平衡方程式及動量方程式，獲得渦輪膨脹機的幾何特徵與流動特徵。質量、能量平衡方程式及流動動量方程式之計算方程描述如下：

質量守恆定律[16]：

$$\dot{m}_{wf} = \rho_1 A_1 C_{1x} = \rho_2 A_2 C_{2x} = \rho_3 A_3 C_{3x} \quad (10)$$

能量守恆定律[16]：

$$Q - \dot{W} = \dot{m}_{wf} \left[(h_3 - h_1) + \frac{1}{2} (C_3^2 - V_1^2) + g(Z_3 - Z_1) \right] \quad (11)$$

流動動量方程式[16]：

$$\sum F_x = \dot{m} (C_{x2} - C_{x1}) \quad (12)$$

其中 U_m 為葉片之平均旋轉速度，C 為絕對速度，下標 1、3 及 θ 分別為入口、出口及切向。

在完成渦輪一維設計後，本研究將前述提及利用熱力學取得分析條件並利用質量、能量平衡方程式及動量方程式進行幾何尺寸的計算，設計完成之渦輪葉形與流道，利用 ANSYS CFX 求解三維穩態(Reynolds-averaged Navier-Stokes equations, RANS)進行流場分析及渦輪軸功的計算，確保所設計之渦輪葉形與流道皆符合設計點下的操作特性，其中空間離散格式在連續方程式、動量方程式及能量方程式採用高解析離散格式(High Resolution Scheme)，另外紊流分析是使用 Shear stress transport (SST)湍流模型進行分析，在計算流體力學方面，於渦輪入口處給定壓力與溫度條件，出口處給定壓力，在靜子和轉子交界面上採用 Stage (Mixing-plate)進行連接，網格部份則是使用通用網格介面(General Grid Interface, GGI)進行連接。

CFD 求解器採用有限體積法和二階空間精度等級求解下列的三維 Navier-Stokes 方程式

[16] :

連續方程式 :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho U) = 0 \quad (13)$$

動量方程式 :

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla(\rho U \cdot U) = -\nabla p + \nabla \tau \quad (14)$$

能量方程式 :

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla(\rho U h_{tot}) = \nabla(\lambda \nabla T) + \nabla(U \tau) \quad (15)$$

其中 τ 及 h_{tot} 分別壓力張量(Stress tensor)及總焓(Total enthalpy)。

(四)類神經網絡模型建立

本企劃渦輪膨脹機設計透過 ANSYS CFX 求解如工作流體流量、渦輪軸功和渦輪等熵效率，雖能夠計算出詳細的流場數值解，但必須耗費龐大的計算資源及時間，若能透過統計的方法來預測渦輪膨脹機性能，將可以大幅的提高計算效率。

本研究使用類神經網絡法(Artificial neural network, ANN)，ANN 有著大量相互連結的人工神經元，通常以平行方式處理並放置在網路架構中，主要架構分為輸入層(input layer)、隱藏層(hidden layer)及輸出層(output layer)，其中每個神經元都代表一特定的函數輸出，稱為激活函數(activation function)，其中兩個連結的神經元都擁有一加權數(weight value)，假設把神經元以 i 表示，ANN 的模型輸出可以表示為[30]：

$$y = f(\sum_j \omega_{ij} x_j + b_j) \quad (16)$$

其中 f 為激活函數、 ω_{ij} 為第 i 個神經元與第 j 個輸入值的權重連結值、 x_j 為神經元的輸入信號及 b_j 為偏權值。

本企劃使用膨脹機入口溫度及入口壓力來作為 ANN 模型的輸入，如圖 11 所示。選擇此兩參數係因膨脹機入口溫度對膨脹機軸功及等熵效率影響非常大，而膨脹機入口壓力會隨著溫度而變化，工作流體流量則受入口壓力影響，因此使用入口壓力及溫度作為輸入參數。

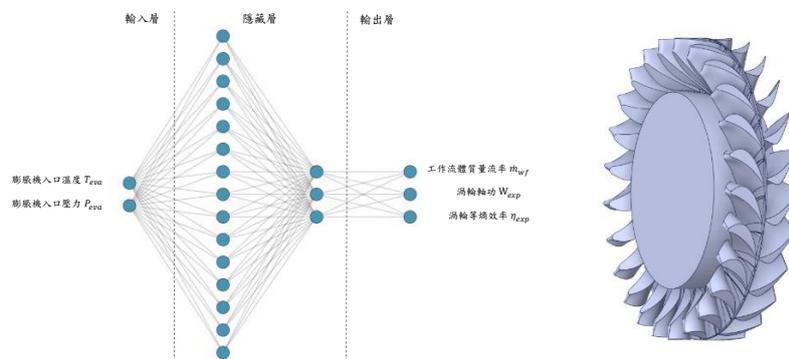


圖 11 ANN 模型結構圖與渦輪膨脹機

本企劃使用 ANN 代替 ANSYS-CFX 計算渦輪效率，其優點是可節省時間且容易與其他模型耦合，但訓練後之 ANN 模型需要原始數據(來自 ANSYS-CFX 結果)比對才能確定模型的準確性。從圖 12 結果發現 ANN 模型與 ANSYS-CFX 之原始數據比較相當吻合，顯示 ANN

模型準確度相當高。

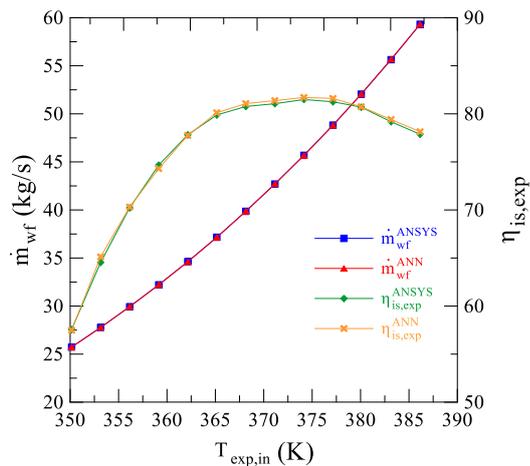


圖 12 ANN 及 ANSYS 軟體計算渦輪等熵效率之比較

(五) 作品數據分析

如圖 6 所述，本企劃先建立一儲集層數值模型，獲得其生產溫度、壓力等數據後輸出至地熱雙循環系統，計算其在上述生產溫度下之發電容量、發電成本(EPC)及回收年限(PBP)，其中雙循環系統之發電量係以 ANN 模型輸出之渦輪膨脹機軸功進行換算，並不需要大量時間及資源計算。

圖 13 為本企劃之詳細運作流程，首先輸入儲集層的參數後可獲得其生產溫度、地熱水質量流率後，輸入至地熱雙循環熱力系統進行系統設計，接著計算熱力系統各部件之額定容量成本，最後以總成本計算 EPC 及 PBP 後輸出資料及完成，設計結果如表 4 所示。

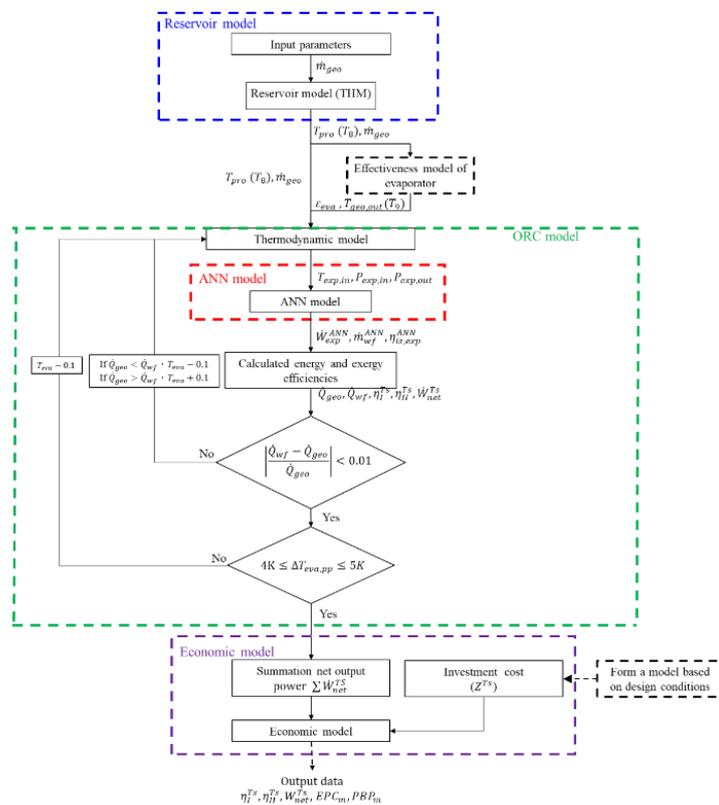


圖 13 整體系統分析之流程圖

表 4 地熱雙循環之熱力系統設計結果 (以清水地熱儲集層為例)

額定發電量(kW)		1321	
系統效率(%)		11.97	
淨發電量(kW)		1262	
淨系統效率(%)		10.37	
熱源參數設定		冷源參數設定	
熱源介質	水	冷源介質	水
流量(kg/s)	30	流量(kg/s)	476.53
入口溫度	160	入口溫度	32
出口溫度	72.03	出口溫度	37
供熱量(kW)	11100	排熱量(kW)	9936
蒸發器工作流體參數		冷凝器工作流體參數	
工作流體	R245fa	工作流體	R245fa
蒸發溫度(°C)	100	冷凝溫度(°C)	42
蒸發壓力(kPa)	1264	入口溫度(°C)	61.08
入口溫度(°C)	42.7	出口溫度(°C)	42
出口溫度(°C)	105	冷凝壓力(kPa)	267.40
流量(kg/s)	49.89	泵耗功(kPa)	59.22

從表 4 可看出此系統在設計階段，其淨電廠發電容量為 1262kW，若從目前文獻及常見的工程方法得知，系統運轉 30 年的發電量為 1262kW×7460 小時/年×30 年，但是從實際來看發現發電量不可能固定在 1262kW，因此若以這個設計值估算 30 年發電量，確實會與實際運轉發電量有極大的差異。

如前所述，生產溫度會隨著地熱電廠運作而下降，其實還有其他因素會影響系統性能與經濟性，因此本企劃進行了地熱水質量流率的變動分析，並同時觀察生產溫度的變化。圖 14 是根據台灣清水地熱之儲集層條件並利用數值軟體 COMSOL 進行生產溫度分析，根據圖 14 的結果顯示地熱水溫度隨著運轉時間增加而下降，且隨著地熱水質量流率增加，生產溫度下降的幅度也增加，這是因為提高地熱水質量流率導致更多的地熱水從儲集層中提取熱量，使生產溫度也急遽下降。

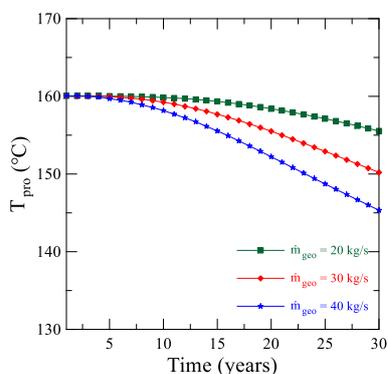


圖 14 地熱水質量對於生產溫度的影響

生產溫度不僅影響地熱電廠的運轉年限，同時也影響地熱電廠中重要元件渦輪膨脹機的作功。隨著生產溫度下降，雙循環中之渦輪膨脹機可能進入離點狀態，進而使其性能下降。如圖 15 所示，提高渦輪膨脹機入口溫度能夠產生較高的作功。反之，隨著生產溫度逐年下降，渦輪膨脹機入口溫度也會下降，發電功率也隨之降低。

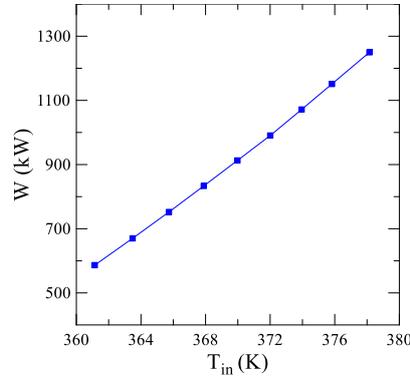


圖 15 膨脹機入口溫度對其軸功之影響

圖 16 為地熱電廠運作過程中，生產條件對膨脹機等熵效率影響，當系統於較低的质量流率下，渦輪膨脹機效率因生產溫度下降，使膨脹機入口溫度逐漸進入離點導致其等熵效率大幅下降。而較高質量流率時(高於設計點)因第一年就處於離點狀態，系統運轉之後因生產溫度下降，使膨脹機入口溫度接近設計點，導致其效率逐漸提升。

圖 17 為渦輪膨脹機轉速對其軸功之影響，在雙循環系統中不論是地熱水生產溫度或是流量皆會影響系統中之工作流體，因此在電廠運轉過程中，工作流體質量流率也隨著地熱水溫度與流量的降低而降低，本作品除了可預測地熱水溫度與壓力下降之性能外，同時透過 ANN 模型可對該系統進行最佳化。圖 17 顯示當工作流體下降時，渦輪膨脹機轉速也應該同時下降，以獲得最大輸出功率。

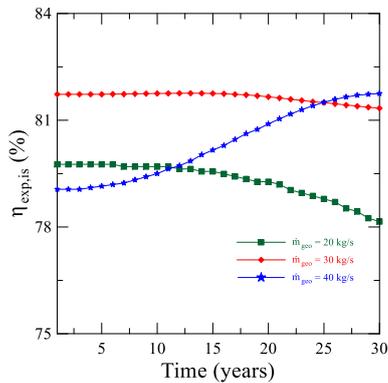


圖 16 生產溫度對於渦輪膨脹機效率之影響

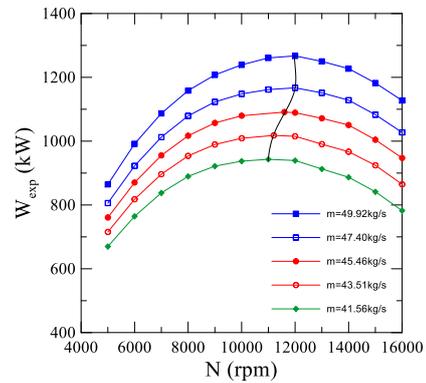


圖 17 轉速對軸功之影響

圖 18 為地熱水質量流率對整體系統性能的影響，較高的質量流率可以使地熱電廠發電量增加，但需要注意的是，較大的質量流率使得發電量衰退幅度增加(因生產溫度下降幅度變大，如圖 14 所示)。因此，在這種狀況下，地熱生產溫度下降過大，使得生產溫度不足以提供電廠運轉，有可能提早結束電廠壽命。

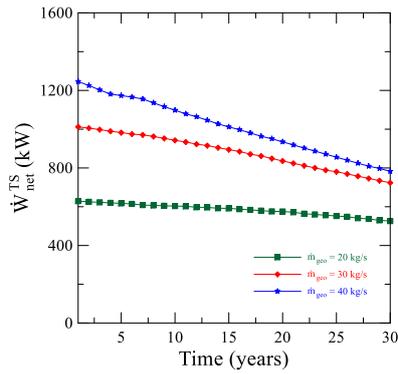


圖 18 地熱水質量流率對於系統發電量之影響

本企劃透過計算各個部件的效率及其成本，並進一步計算 EPC 及 PBP，如圖 19 所示。質量流率是影響 EPC 及 PBP 的重要參數，從結果可看出地熱水流量越大，EPC 與 PBP 下降幅度增加(顯示地熱水流量增加對經濟性有正面影響)，因為較高的質量流率會帶來更高的發電量，雖說從圖 18 可看出高地熱水質量流率下之發電量衰退幅度較大，但對 EPC 及 PBP 而言卻有正面的影響。

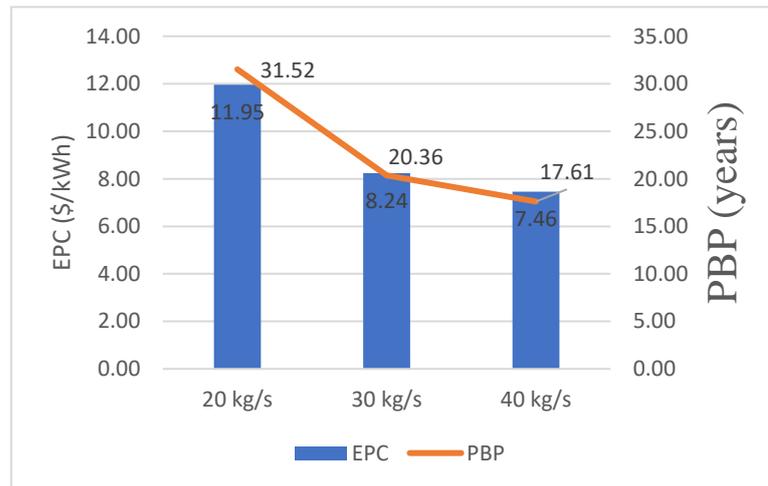


圖 19 地熱水質量流率對於 EPC 及 PBP 之影響

地熱電廠在運轉過程中，地熱水溫度會隨著電廠運作時間衰退。此外地熱水流量也會因結垢變小，導致機組性能下降。本計畫透過降低熱源質量流率模擬結垢，地熱水流量變化如所示表 5，結垢對生產溫度的影響如圖 20 所示，發現結垢使質量流率下降，從而減少了發電系統從儲集層中獲取的热量，使地熱水溫度較高，而一般業者不考慮流量及地熱水溫度衰退。

表 5 不同情境的質量流率變化表

Scenario	$\Delta \dot{m}_{geo} (kg/s)$	Start year
0	0	0
1	0	0
2	1	10
3	1.5	10

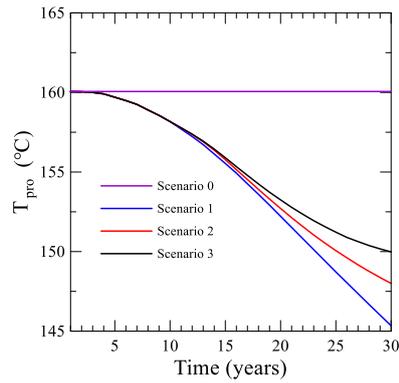


圖 20 地熱水流量衰退對生產溫度的影響

圖 21 為地熱水流量衰退對發電系統之影響，由於發電系統從儲集層獲取的熱量減少，進而影響工作流體質量流率，使發電量大幅下降。地熱水質量流率下降對於系統有著顯著的影響，可能會導致儲集層提早結束壽命，例如 Scenario 3 在第 27 年系統已經無法運作。

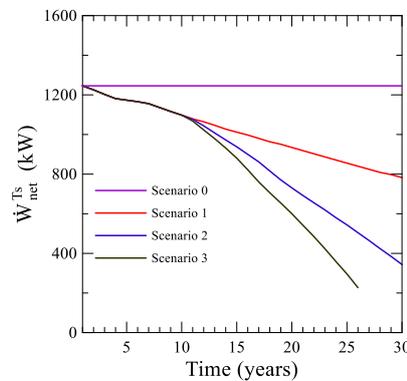


圖 21 地熱水流量衰退對發電量之影響

圖 22 為地熱水流量衰退對 EPC 及 PBP 之影響，結果顯示地熱水質量流率衰退導致 EPC 及 PBP 增加，這是因為發電量大幅下降緣故(如圖 21 所示)。

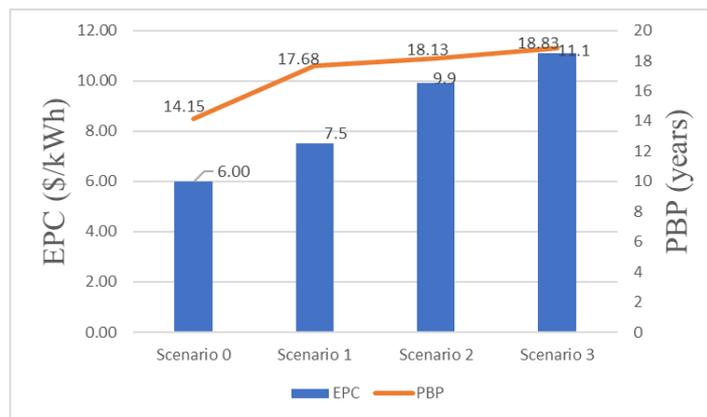


圖 22 地熱水流量衰退對 EPC 及 PBP 之影響

本企劃結合地熱儲集層、電廠熱力和渦輪膨脹機等模型，並建立一地熱雙循環系統探討地熱生產溫度對系統之影響，其中地熱電廠熱力模型之性能及渦輪膨脹機之 CFD 計算結果準確度較高，上述兩模型同時也與國外文獻比較，因此可證明其可信度。但儲存層模型部分雖然與國外文獻的數據相差不大，不過儲存層的部分有幾個問題會影響其準確度，1.未知的斷層及裂隙存在、2.地層均質性問題、3.運轉過程的地球化學變化等皆會影響，因此本作品後續

需要與商轉之電廠進行比較與分析，以逐步改善系統的完整性與準確性。

三、作品創意說明

地熱電廠雖然具有許多優勢，但同時也面臨著數個尚未解決的難題，其中之一是儲集層生產溫度隨著電廠運作時間逐漸下降，而且這種溫度變化對電廠的運作產生著不可忽視的影響。儲集層溫度的變化受到多種因素的影響，並直接影響電廠的整體性能，儘管在探勘階段已對儲集層進行了產能試驗，但其產能仍然受到各種因素的影響，無法完全保證穩定性。這種不穩定性將導致電廠發電量的不確定性，對經濟效益可能產生負面影響。此外，電廠的評估僅考慮第一年的生產溫度計算發電量，然而其他運轉時間可能因生產溫度下降而導致系統進入離點狀態。考慮到地熱電廠建造成本極高，單純以第一年的發電量來評估是否值得興建及投資，顯然是不夠全面的，上述的評估方式難以準確計算出回收成本的年限(PBP)及電力成本(EPC)，若發電量無法準確評估，對於投資者或是融資銀行而言缺少開發電廠價值之科學證據，因此需要更完整的物理模型才能得出準確的評估結果。在這種情況下，以下幾點為本企劃之創新特點：

(一) 考慮生產溫度及流量衰退的情況

建造地熱電廠的成本高昂，通常動輒數億元台幣。然而，儘管初期以產能測試結果設計且評估電廠的發電量，但實際上電廠運作後，由於生產溫度及流量降低，發電量也會逐年減少，這將導致預估的電力成本與實際情況存在差距。

目前儲集層、熱力系統及渦輪膨脹機的相關研究已相當豐富，但對於將這三者耦合且深入研究其熱力系統受外部熱源影響的文獻卻相對有限。因此，本企劃將結合儲集層、熱力系統及渦輪膨脹機，模擬實際地熱電廠長時間的發電情形，並考慮因生產溫度及流量衰退而導致系統性能下降的情況，這將有助於計算出更準確的發電量，將計算得出的發電量和經濟模型結合，以得出電力成本及成本回收年限，進而獲得詳細且準確的評估報告。

(二) 客製化設計電廠

由於各個儲集層性能有所不同，讓每個儲集層適合的電廠配置有所不同，因此，本企劃可根據儲集層之產能測試結果設計雙循環系統，其中包含渦輪膨脹機的設計，並且依據儲集層之參數(例如滲透率、孔隙率及裂隙位置)分析其生產溫度及流量率退情形，再根據生產溫度流量對雙循環系統進行離點分析。

(三) 多重系統耦合

正如上所述鮮少人研究多重系統耦合對於熱力系統的影響，而本企劃將多個系統耦合後可獲得各個系統的優勢並且減少多個系統切換後操作誤差及時間。地熱系統有著快速及精準的優勢，傳統地熱測試需經過恢復試驗和生產試驗後才可得知其地熱儲集層之生產溫度及壓力，需經過大量時間才可得知結果。而本企劃之地熱系統通過探勘數據即可快速模擬出生產溫度及壓力，然後就能透過熱力學循環進行系統設計，即可獲得精準的發電量評估，而不是透過經驗公式評估發電量。此外，更值得注意的是，本作品利用 Ansys 的 CFX 渦輪膨脹機模型結果訓練 ANN，並使用 ANN 進行離點預測、最佳化及耦合，在學術文獻上無類似的方法。

四、作品應用範圍及發展潛能

(一) 應用範圍

如前述台灣位於太平洋環帶上，尤其北部與東部遍布著地熱徵兆。據評估，全臺地熱發電潛能高達 32GWe，圖 23 為目前具有地熱發電潛力，包括深層地熱 31GWe 和淺層地熱

0.73GWe[32]，但目前地熱發電容量僅有 7.2MWe，這表示台灣巨大的地熱資源還未被使用，而本計畫即可幫助加速台灣地熱發展。



圖 23 熱發電潛力分布圖[31]

(二) 發展潛能

本企劃透過一全新方法評估地熱電廠興建之經濟效益，包含儲集層生產溫度模擬，用來模擬儲集層是否能長期運作，利用儲集層生產溫度(地熱產能)設計熱力學循環系統，依照每個部件之額定容量計算部件成本，並透過渦輪膨脹機之軸功計算發電量，以發電量計算出 EPC 和 PBP 以評估電廠經濟性，提供科學分析證據藉以提高投資者和融資銀行對於投資地熱電廠的信心。本企劃規劃一商業模式，首先確定目標客群，例如政府機構(制定政策)及融資銀行(投資單位)對於是否投資地熱電廠感到疑慮，因為目前地熱開發業者無法準確評估地熱電廠性能，鎖定目標客群後，本企劃將說明價值主張，希望解決與滿足客戶之問題與需求，當接收到投資者向本企劃進行委託後，說明本企劃服務之收費狀況，使投資者了解本企劃的計費模式，雙方有共識之後，將利用我們的人力資源去針對投資者的需求進行設計與分析，設計會針對業者預計投資地熱場域進行分析，利用本企劃之技術預測其地熱場域之性能表現，再來會對根據其表現設計一適合之熱力循環作為其地熱電廠，當初步預測結果出爐後，本企劃會建立一通路，提供客戶售後服務與基本概念教育。表 6 為本企劃之商業模式協助。

表 6 本企劃商業模式



五、工作分配

組員姓名	工作事項
林均翰	模型設計與製作，包含電廠、渦輪、儲集層等模型及電路設計
胡世彥	影片編輯，其中包含素材製作及文稿撰寫
陳業彤	說明書撰寫，含數據分析、數據圖、流程圖、文稿撰寫等

六、參考資料

- [1] M. Soltani, F. M. Kashkooli, M. Souri, B. Rafiei, M. Jabarifar, K. Gharali and J. S. Nathwani. “Environmental, economic, and social impacts of geothermal energy systems,” *Renew Sustain Energy Rev*, vol. 140, 110750, Apr. 2021.
- [2] A. Anderson and B. Rezaie. “Geothermal technology: Trends and potential role in a sustainable future,” *Applied Energy*, vol. 248, pp.18-34, Aug. 2019.
- [3] Wang, C., Lu, Y., & Song, S. (2023). Geothermal feasibility analysis inside Yangmingshan National Park, Taiwan. *Geothermics*, 116, 102834.
- [4] 臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明
- [5] https://energyeducation.ca/encyclopedia/Geothermal_energy
- [6] <https://today.line.me/tw/v2/article/ZaJ3v1O>
- [7] Bu, X., Ma, W., & Li, H. (2012). Geothermal energy production utilizing abandoned oil and gas wells. *Renewable Energy*, 41, 80-85.
- [8] Beckers, K. F., Lukawski, M. Z., Reber, T. J., Anderson, B. J., Moore, M. C., & Tester, J. W. (2013, February). Introducing GEOPHIRES v1. 0: Software package for estimating levelized cost of electricity and/or heat from enhanced geothermal systems. In *Proceedings, Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California (Vol. 11).
- [9] Kubota, H., Hondo, H., Hienuki, S., & Kaieda, H. (2013). Determining barriers to developing geothermal power generation in Japan: Societal acceptance by stakeholders involved in hot springs. *Energy Policy*, 61, 1079-1087.
- [10] Barbier, E. (2001). Geothermal energy technology and current status: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(1-2), 3-65.
- [11] Rybach, L. (2007, September). Geothermal sustainability. In *Proceedings European Geothermal Congress* (Vol. 5).
- [12] Rybach, L. (2003). Geothermal energy: sustainability and the environment. *Geothermics*, 32(4-6), 463-470.
- [13] Budisulistyo, D., Wong, C. S., & Krumdieck, S. (2017). Lifetime design strategy for binary geothermal plants considering degradation of geothermal resource productivity. *Energy Conversion and Management*, 132, 1-13.
- [14] Introduction to COMSOL Multiphysics, [Online]. Available: <https://cdn.comsol.com/doc/5.5/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.pdf>
- [15] J.M.D. Baez-Lopez and D.A.B. Villegas, “MATLAB® Handbook with Applications to Mathematics, Science, Engineering, and Finance,” 1st ed, Chapman and Hall/CRC.
- [16] ANSYS CFX-Solver Theory Guide, [Online]. https://www.researchgate.net/publication/321628826_Study_on_Design_of_Pressure_Chamber_in_a_Linear-

[Jet Type Air Curtain System for Prevention of Smoke Spread/fulltext/5a29ec470f7e9b63e5353c2d/Study-on-Design-of-Pressure-Chamber-in-a-Linear-Jet-Type-Air-Curtain-System-for-Prevention-of-Smoke-Spread.pdf](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621000003)

- [17] M.D. Aliyu., and R.A. Archer, “Numerical simulation of multifracture HDR geothermal reservoirs,” *Renewable Energy*, vol. 164, pp. 541-555, Feb. 2021.
- [18] M.D. Aliyu, “Hot Dry Rock Reservoir Modelling,” University of Greenwich ,2018.
- [19] D.A. Nield and A. Bejan, “Convection in porous media,” Berlin: Springer, 108 ,2006.
- [20] T. Guo, F. Gong, X. Wang, Q. Lin, Z. Qu and W. Zhang. “Performance of enhanced geothermal system (EGS) in fractured geothermal reservoirs with CO₂ as working fluid,” *Appl Therm Eng*, vol. 152, pp. 215-230, Apr. 2019.
- [21] Song X., Shi Y., Li G., Yang R., Wang G., Zheng R., Lin J. and Lyu Z. Numerical simulation of heat extraction performance in enhanced geothermal system with multilateral wells. *Appl Energy* 2018;218;325-37.
- [22] E. Lemmon, M.L. Huber, and M.O. McLinden, “NIST standard reference database 23: reference fluid thermodynamic and transport properties-REFPROP version 9.0,” National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program, Gaithersburg, USA, 2010.
- [23] Song J., Li X. S., Ren X. D. and Gu C. W. Performance analysis and parametric optimization of supercritical carbon dioxide (S-CO₂) cycle with bottoming Organic Rankine Cycle (ORC). *Energy* 2018;143;406-16.
- [24] Fallah M., Mohammadi Z., and Mahmoudi S. S. Advanced exergy analysis of the combined S-CO₂/ORC system. *Energy* 2022;241;122870.
- [25] Song J., Gu C. W. and Ren X. Influence of the radial-inflow turbine efficiency prediction on the design and analysis of the Organic Rankine Cycle (ORC) system. *Energ Convers Manage* 2016;123;308-16.
- [26] Song J. and Gu C. W. Parametric analysis of a dual loop Organic Rankine Cycle (ORC) system for engine waste heat recovery. *Energ Convers Manage* 2015;105;995-1005.
- [27] Kheiri A., Feidt M. and Pelloux-Prayer S. Thermodynamic and economic optimizations of a waste heat to power plant driven by a subcritical ORC (Organic Rankine Cycle) using pure or zeotropic working fluid. *Energy* 2014;78;622-38.
- [28] S.L. Dixon, B. Eng and C.A. Hall, “Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery,” 7 th ed. Published by Elsevier Inc, 2013.
- [29] G. Macro and M. Vellini, “Turbomachinery Fundamentals, Selection and Preliminary Design,” 1 st ed, 2020.
- [30] D. Ziviani, N. A. James, F. A. Accorsi, J. E. Braun and E. A. Groll. “Experimental and numerical analyses of a 5 kWe oil-free open-drive scroll expander for small-scale organic Rankine cycle (ORC) applications,” *Appl Energy*, vol. 230, pp. 1140-1156, Nov. 2018.
- [31] <https://scitechvista.nat.gov.tw/Article/C000003/detail?ID=0a6dae8d-649c-49a2-9253-38ebdb1a7640>

[32] https://www.itri.org.tw/ListStyle.aspx?DisplayStyle=18_content&SiteID=1&MmmID=1036452026061075714&MGID=654256506036016162