

The Study of Porous TH Model of CO₂-EGS in ChingHsui, ILan Assessment

David T.W. Lin ^{1,*} and Kevin C.T. Tang ^{2,*}

^{1,2} Insitute of Mechatronic System Engineering, National University of Tainan, Tainan, 70005, Taiwan

^{1*}E-mail : david@mail.nutn.edu.tw

^{2*}Email : dada725_7@hotmail.com

Abstract

The re-utilization and activation of the abandon geothermal well was an economic concept for increasing the geothermal potential. The purpose of this study was to evaluate the feasibility of CO₂ enhanced geothermal systems (CO₂-EGS) based on the geothermal well HCL-2 and JY-1 and to estimate their capacity. A porous-fracture thermal-hydraulic model combined the fracture network, porous heat transfer model and Darcy's Law was established by finite element analysis. The temperature variation of the reservoir under different injected conditions and the total geothermal capacity of CO₂-EGS are discussed.

The results show that the higher the mass flow rate of injection, the higher the outer temperature of the production well, the higher the total EGS capacity. The temperature difference of the production well decreased as the injected mass flow rate increased. The reservoir temperature distribution could be affected by the injected fluid temperature slightly. In this study, the temperature of the production wellhead of CO₂-EGS increased about 21.5% when the injected mass flow rate was from 0.0005 ton/hr to 4 ton/hr. The specific capacity increased about 11.8%.

In future, this study can be combined with further in-situ tracer test data to estimate the capacity realistically, which can contribute to the activation of the abandon geothermal wells.

Keywords: CO₂-EGS, supercritical CO₂, Darcy's Law, porous heat transfer, porous-fracture thermal-hydraulic model

* Corresponding author:

david@mail.nutn.edu.tw, dada725_7@hotmail.com

DOI : 10.53106/222344892023041301006

宜蘭清水地區二氧化碳增強型地熱系統之孔隙熱水模型研究

林大偉，湯欽達

國立臺南大學機電系統工程研究所

摘要

本研究之目的為探討以超臨界二氧化碳 (supercritical CO₂) 為取熱流體之二氧化碳增強型地熱系統 (CO₂-EGS) 開發之可行性並預估其取熱產能以活化暫停開發之地熱井。為此，本研究以紅柴林 2 號井 (HCL-2) 與結元井 (JY-1) 為基礎，使用有限元素分析法建立了結合裂隙網路 (fracture network)、孔隙熱傳與達西流 (Darcy's law) 的孔隙-熱-水模型 (porous-thermal-hydraulic model)，並探討了儲集層於不同注入條件下的溫度變化趨勢及 CO₂-EGS 之總產能。

由本研究可知當注入質量流率愈大，注入井底溫度變化大，生產井產出溫度愈高，使得 EGS 總產能愈高；大的注入質量流率可有效降低工作流體沿生產井流出時的溫降；然注入流體溫度對儲集層溫度分布幾乎沒有影響，生產井溫度對之亦較不敏感。在本研究中，CO₂-EGS 在注入質量流率為 4 ton/hr 與 0.0005 ton/hr 之條件比較發現，生產井口溫度增加約 21.5%；溫降降低約 16.96%，僅為約 0.04%；總產能由 23.6 kW 增加到 219 MW。而流量為 4 ton/hr 之比產能為 571.4 kJ/kg，相較 0.0005 ton/hr 之比產能增加約 11.8%。

未來本研究可結合更進一步之現地示蹤劑試驗數據做產能預估，評估以此二井為基礎建立 CO₂-EGS 之產能與效益，可為活化已暫停開發之地熱井做出貢獻。

關鍵詞：二氧化碳增強型地熱系統、超臨界二氧化碳、達西流、多孔介質熱傳、孔隙-熱-水模型

1. 緒論

自工業時代以來，科學技術飛速發展，為人們的日常生活增添了許多色彩，也提供了諸多便利。然而在享受科技碩果的同時，人們賴以生存的地球也為此付出了巨大的代價。由於化石燃料的使用，大量二氧化碳（CO₂）和其他放射性活性氣體被排放到大氣中[1]。二氧化碳正是溫室氣體（GHGs）的主要成分（約占溫室氣體三分之二），而地球大氣中溫室氣體的濃度與全球平均溫度直接相關[2]。根據《排放差距報告》，我們正在失去把全球暖化程度維持在 1.5 攝氏度（°C）內的控制權[3]。若溫室氣體排放量持續無法得到有效控制，本世紀全球氣溫將上升 3 攝氏度以上，這遠高於《巴黎協定》所訂下的目標[4]。全球暖化導致冰川消融、海平面上升、霾害、極端氣候等[5-7]。這些將直接威脅動、植物棲息環境，甚至增加人類的死亡率[8-9]。為應對諸如此類之嚴重後果，聯合國氣候報告呼籲儘快擺脫碳密集型燃料，加速轉向再生能源的使用[10]。

再生能源是一種用之不竭的能源，「再生」是指補充和回收的能力。目前已廣泛使用的再生能源有太陽能、風能、水能、地熱能、潮汐能、生物質能等[11]。許多國家正在加快能源轉型的腳步，根據國際能源署（IEA）2020 年的一份報告預計，2019-2030 年能源需求將增長 12%。到 2030 年，再生能源可滿足全球電力需求增長的 80%。

地熱能是地球上最豐富的再生能源之一，具有巨大的開採潛力。與風能、太陽能相比，地熱能是一種更可靠的能源。它不受季節和天氣條件的影響，更穩定。這使得部分學者認為地熱能更適合替代化石燃料[12]。澳洲、法國、西班牙、冰島、紐西蘭、日本、中國等許多國家也都相繼評估地熱能的發展潛力[13-18]。義大利更是早在一百多年前就開始利用地熱能進行發電[19]。

近年來台灣高科技產業飛速發展，已逐漸成為全世界最重要的精密製造、加工中心之一，隨之而來的則是與日俱增的用電需求。據台灣電力公司統計，過去 39 年的用電需求呈上升趨勢。依此趨勢，可以預見台灣未來的用電需求將持續增長。需求增加，此為內憂；全球暖化以及自然資源的逐漸枯竭，此為外患。值此內憂外患之際，台灣再生能源的推展已經到了急切的地步。為順應能源轉型之趨勢，2025 年台灣電力結構為煤：氣：綠是 30：50：20，這是一條逐年增綠之路線。然而，據台電公開資料：109 年度總發購電量中綠電僅佔 5.8%，與「2025 年綠電佔比達 20%」之目標尚有較大差距。可見，綠電開發已緩不濟急，台灣急需更多地熱井以利用豐厚之地熱資源增加綠電產能，加快能源轉型的腳步。

隨著電腦模擬軟體的發展，如今許多對 EGS 的研究都是藉由數值模擬來完成。國外學者 Hofmann 等人在 2016 年提出：在 EGS 中，井距是一個重要的參數。注入、生產井之間的較小的間距會導致較低的生產率，較大的間距會導致較晚的熱突破[20]。2018 年 Bakar 與 Zarrouk 利用 TOUGH2 地熱儲集層模擬器建立模型進行模擬，並提出在將模型參數與現地數據進行匹配時，裂縫的滲透率至關重要；而裂縫長度、半徑和孔隙率則不會造成顯著的影響[21]。同年，Asai 等人參考美國猶他州 FORGE 儲集層現地數據建立模型，針對影響 EGS 性能的五個主要參數（井距、裂縫間距、井傾角、注入溫度和注入速率）進行了研究，模擬了這些參數在 30 年間對 EGS 的影響。研究表明：井距是影響總熱量輸出最為關鍵的參數，更大的井距能在規定的 30 年時間內造成更少的溫度損失；由於所取熱量是儲集層和循環流體之間溫差的函數，故低溫注入比高溫注入提取的熱量多；更大體積（流量）的流體有更大的取熱的能力，也因此更快地耗盡儲集層；更小的裂縫間距或更多的裂縫數量可以提供更多的熱傳面積，從而提高 EGS 的效率；井傾角則是較次要的參數[22]。2019 年 Samin 等人建立了 EGS 熱-水-力耦合模型，模擬結果顯示：裂縫帶滲透率越高，注液壓力越高，注入井距離越短，早期產熱能力越強。

然而，這些參數也會對熱壓降產生顯著影響，從而加速 EGS 儲集層的熱突破時間[23]。Yu 等人建立了 EGS 單井模型，模擬後發現較小的質量流量可以在生產井獲得較高的溫度。同時，基於成本考量，建議在注入井採用較小的注入壓力[24]。Zhang 等人建立 EGS 熱-水-力耦合模型對 HDR 儲集層的取熱過程進行模擬，得出結論：儲集層中裂縫密度的增加為 EGS 工作流體創造了更多的流動通道，從而提高了輸出質量流量。複雜的裂縫網路增強了彎曲裂縫周圍的流動，這為熱傳遞創造了良好的條件，並減緩了熱突破[25]。Chen 等人對 EGS 數值模型中儲集層的邊界條件設定進行了研究，對比了在補注 (re-charge) 和無流 (no-flow) 兩種邊界條件下 EGS 的性能。結果表明，與無流邊界條件下的儲集層相比，補注條件下的取熱潛力更大、利用效率更高。此外，EGS 在補注邊界條件下比在無流條件下具有更長的使用壽命[26]。2021 年 Li 等人建立了熱-水-力耦合模型研究 EGS，研究發現高滲透率和大孔徑的裂縫可導致儲集層早期熱突破[27]。同年，Shi 等人認為多邊井比傳統的雙井 EGS 具有更好的取熱性能，遂建立多井 CO₂-EGS 的熱-水-力耦合模型，以研究水平井幾何參數對 EGS 性能的影響。研究發現：隨著水平井長度的增加，更多的裂縫被連接起來，這使得工作流體能夠流經儲集層更多的區域。水平井越長，平均生產溫度越高，注入壓力越低，有利於改善 EGS 性能[28]。

在對 EGS 進行長達數十年暫態模擬時，電腦往往需要花費大量時間進行運算。因此，能否在保證模擬結果精確度的同時提高模擬的效率也成了部分學者研究的目標。2019 年 Asai 等人就如何更高效地對 EGS 進行數值模擬展開了研究。該研究指出：在模型的動態區域使用較精細的最佳尺寸網格對模擬結果的精確度非常重要；垂直於裂縫的方向對網格尺寸較不敏感；裂縫面對網格的大小非常敏感。因此，針對模型各區域的性質差異使用最合適的網格形式將使模擬在保持結果精確度的同時也能耗費更少的模擬時間。與單一化的網格設定相比，彈性化的網格設定可獲得 1.5-14.5 倍的時間效率[29]。

除了上述提到的井距、裂縫、網格等參數，工作流體的選用也對 EGS 的性能產生直接的影響。現今，得益於模擬軟體功能的日益完善，研究人員可以更方便地對不同工作流體的取熱性能進行驗證。Brown 在 2000 年提出以 CO₂ 作為增強型地熱系統之取熱流體，簡稱為 CO₂-EGS，其建立目的為水資源匱乏之增強型地熱帶來新的發展契機。CO₂-EGS 之概念為利用 CO₂ 作為熱媒介，於注入井內注入液態 CO₂ 至熱儲集層，CO₂ 吸熱後密度相對小於儲集層內流體，產生浮力效應，故生產井井底應高於注入井井底；密度變小之 CO₂ 經由生產井帶至地表發電利用。CO₂ 具有極大的熱膨脹性，其冷/熱 CO₂ 顯著的密度差所產生的浮力能有效減少流體循環系統電力的消耗，為井內 (Wellbore) 水力學提供了相當的優勢[30]。2014 年 Luo 等人研究發現使用 CO₂ 作為 EGS 工作流體的性能優於水；若在注入井和生產井周圍創建相對小尺寸的大滲透率裂縫，可以顯著降低工作流體通過儲集層的壓降[31]。2019 年 Guo 等人分別對水和二氧化碳作為 EGS 工作流體的性能進行了研究。結果表明二氧化碳黏度較低，吸收熱的能力強於水，採用二氧化碳作為 EGS 工作流體將大大提高 EGS 的產熱效率[32]。越來越多的研究顯示 CO₂ 的取熱性能優於水。更有甚者，還發現使用 CO₂ 作為 EGS 工作流體可以緩解日趨嚴重的溫室效應。2018 年 Sun 等人提出使用二氧化碳作為 EGS 取熱工作流體的三個優勢：利用二氧化碳在不同溫度下有密度差的特性，在注入井和生產井之間可利用浮力驅動二氧化碳；二氧化碳的密度與黏度的比值較大，這使得二氧化碳的流動性比水更高；二氧化碳流入地層中時可被密封於其中，這有利於緩解溫室效應[33]。2021 年 Bongole 等人建立熱-水-力模型對乍得 Bongor 盆地之 EGS 可行性進行評估時，同樣使用 CO₂ 作為工作流體。研究結果表明，CO₂ 作為工作流體的取熱效果明顯優於水。此外，大量二氧化碳可以封存到地層中，減少排放到大氣中的溫室氣體[34]。

台灣自 1981 年清水地熱試運轉以來已 40 年，各方面技術已臻成熟。亦吸引印尼、菲律賓及澳洲等國家前來尋求雙邊合作。40 年來的開發過程產生許多因水資源不足而停止開發之地熱井，其中不乏深度超過 2000 公尺之地熱井或具備增強型地熱系統 (Enhanced Geothermal System, EGS) 潛能之區域。綜合考量上述能源轉型之必要性以及地熱能之優勢與開採潛力，本研究擬以紅柴林 2 號井 (HCL-2) 與結元井 (JY-1) (圖 1) 此二井之現地示蹤劑研究結果為基礎，探討以超臨界二氧化碳為取熱流體之二氧化碳增強型地熱系統 (CO₂-EGS) 開發之可行性並預估其取熱產能以活化暫停開發之地熱井。以超臨界二氧化碳之取熱性能，結合 Darcy 模型為基礎之孔隙-熱-水模型 (porous TH model) 與裂縫網絡模擬技術探討注入二氧化碳經由儲集層之熱傳取熱結果。



圖 1 紅柴林二號井與結元井地理位置分布圖

2. 研究方法

2.1 統御方程式

EGS 主要包含注入井、生產井、儲集層等部分。其中，若儲集層內部存在裂縫，裂縫部分之熱質傳應考量為非孔隙介質 (即空管) 中之熱質傳，井內部亦然。因此，本研究以數值模擬方式探討多孔介質與非多孔介質中之熱質傳，其所建構的分析模型設定為流場與溫度場兩種模型之耦合類型，其數學模型包含連續方程、Darcy 動量方程、能量平衡方程等，非多孔介質之統御方程式如下所示：

連續方程式：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

動量平衡方程式：

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot \left[-pI + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot u)I \right] + F \quad (2)$$

式中 μ 為流體的黏度、 u 為流速、 ρ 為密度、 p 為壓力及 F 為強制力項。

流體能量平衡方程式：

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho_f C_{p,f} T_f] + \nabla \cdot (\rho_f C_{p,f} D T_f) - \nabla \cdot (k_f \nabla T_f) = 0 \quad (3)$$

多孔介質之統御方程式如下所示：

連續方程式：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon\rho_f) + \nabla \cdot (u\rho_f) = Q_{br} \quad (4)$$

動量平衡方程式：

$$u = -\frac{\kappa}{\mu}(\nabla p + \rho g \nabla D) \quad (5)$$

多孔介質熱傳之統御方程式係由平均體積法求得，使孔隙和介質之間能個別獲得固有的平均性質，在介質與流體之間的熱傳平衡方程式已被廣泛的用於分析多孔介質之熱傳。因此以傅立葉定律（Fourier's Law）描述在多孔介質中完全飽和之介質與流體，如下所示：

介質能量平衡方程式：

$$\frac{\partial}{\partial t}[(1-\varepsilon)\rho_p C_{p,p} T_p] - (1-\varepsilon)\nabla \cdot (k_p \nabla T_p) = 0 \quad (6)$$

流體能量平衡方程式：

$$\frac{\partial}{\partial t}[\varepsilon\rho_f C_{p,f} T_f] + \nabla \cdot (\rho_f C_{p,f} D T_f) - \varepsilon\nabla \cdot (k_f \nabla T_f) = 0 \quad (7)$$

式中 ρ 為密度、 u 為流體的流速、 Q_{br} 為質量力、 ε 為孔隙率、 μ 為流體的動力黏度、 κ 為滲透率、 F 為強制力項、 C_p 為常壓比熱及 k 為熱傳導係數。

2.2 模型建立與邊界設定

本研究所建構的分析模型之問題類型設定為流場與熱場兩種模型之耦合類型。首先，將用以分析流體流經孔隙介質時流場狀況之達西模型（Darcy's Law）與用以分析流體流經孔隙介質時熱場狀況之孔隙熱傳模型相耦合，得到孔隙-熱-水模型（porous TH model）；進而，將紅柴林 2 號井（HCL-2）、結元井（JY-1）之幾何參數以及現地地層性質等現地資料與孔隙-熱-水模型之模型參數擬合，得到符合現地狀況之孔隙-熱-水模型；最終，導入 NIST 美國國家標準機構資料庫之參數於 COMSOL 內建立超臨界二氧化碳材料，以超臨界二氧化碳作為模型之工作流體，完成二氧化碳增強型地熱系統（CO₂-EGS）模型之建立。

本研究依現地地質結構（圖 2）建立之模型中（圖 3），左側 HCL-2（注入井）之井口設為工作流體之入口，注入質量流率設為 1 ton/hr，注入流體溫度設為 303.15 K；右側 JY-1（生產井）之井口設為工作流體之出口。儲集層設有約 40 °C/km 之溫度梯度，四周壁面及頂部、底部設為無流（no-flow）。儲集層多孔介質為二氧化矽，其密度為 2650 kg/m³、熱傳導係數為 2.1 W/(m·K)、常壓熱容為 1000 J/(kg·K)以及孔隙率為 0.4；注入、生產井之井深分別為 2800 m 和 1500 m，井半徑為 0.1778 m（7 吋），二井間距 1500 m；井壁材質為銅；工作流體為超臨界 CO₂。

第一階段：工作流體從注入井之井口進入井後向下流動，進入地熱儲集層。

第二階段：工作流體在儲集層內經由岩層之孔隙向四周滲透擴散後逐漸朝生產井之井底方向匯聚，部分工作流體將通過裂隙網絡，地熱能之提取主要發生於此階段。

第三階段：工作流體從生產井之井底進入井後向上流動，將從儲集層吸收的熱量帶回地表。

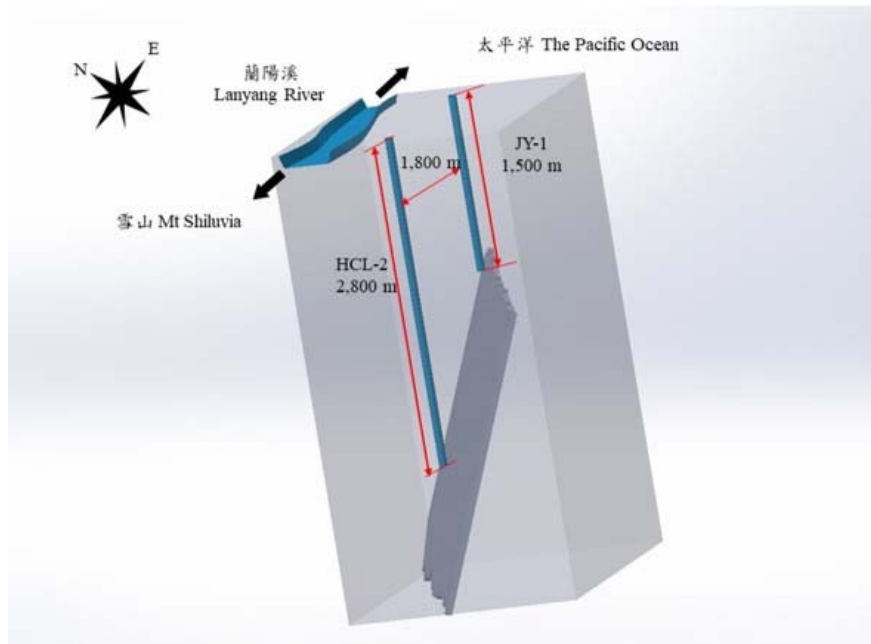


圖 2 基於 HCL-2 與 JY-1 之具裂隙網絡之 CO₂-EGS 示意圖

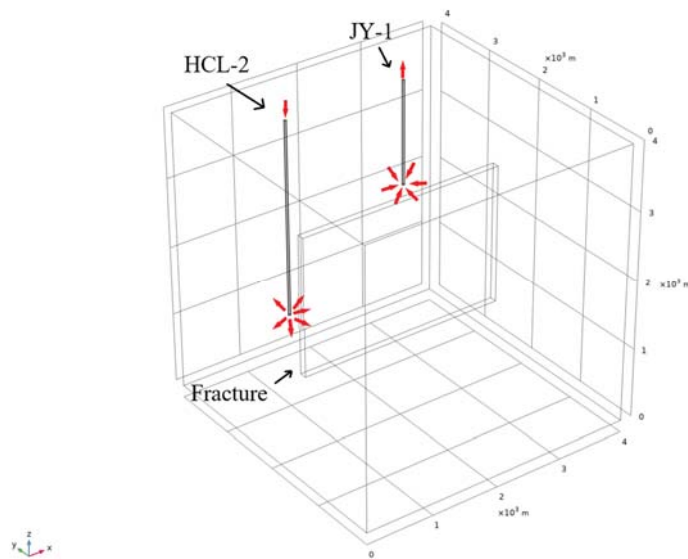


圖 3 基於 HCL-2 與 JY-1 之具裂隙網絡之 CO₂-EGS 模型

3. 結果與討論

本研究所建構的分析模型之問題類型為流場與熱場兩種模型之耦合類型。因此將分別討論於不同注入質量流率 (Injected Mass Flow Rate) 與不同注入溫度下觀察到的物理現象與其變化趨勢。

在以注入井注入質量流率為變數時，本研究分別以較大、較小兩組質量流率為注入條件進行了數值模擬並取得結果。較大質量流率為 0.5 ton/hr、1 ton/hr、2 ton/hr 與 4 ton/hr，較小質量流率為 0.0005 ton/hr、0.001 ton/hr、0.002 ton/hr、0.004 ton/hr。模擬結果之流線

圖 (圖 4) 顯示，圖 4(a) 流量為 0.0005 ton/hr，(b) 為 4 ton/hr。由圖可知工作流體沿注入井進入儲集層後，經由孔隙介質向生產井方向滲透（部分流體通過斷層），沿生產井流出。流場在儲集層中即便流量極小，亦會沿此趨勢流動。

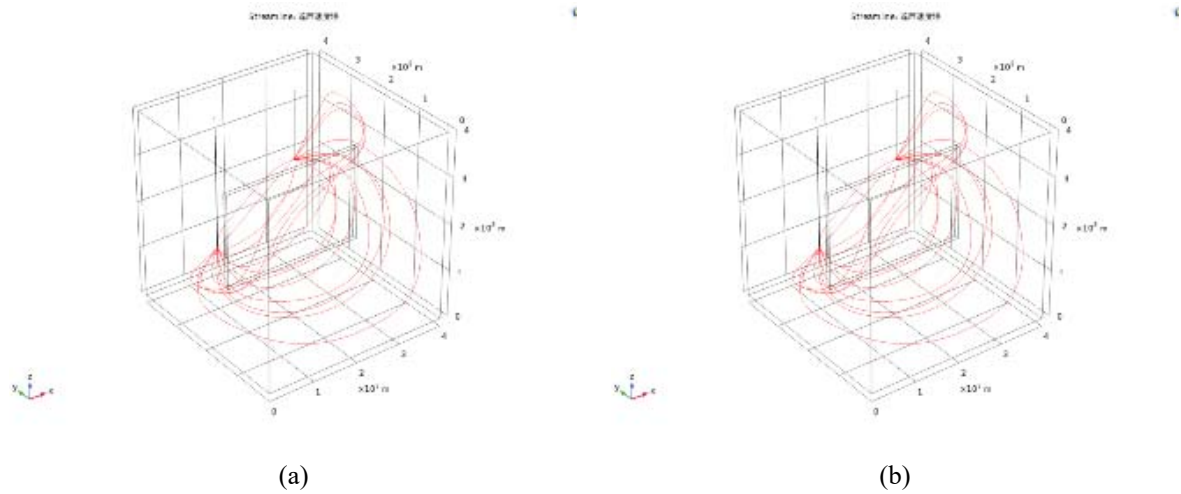


圖 4 CO₂-EGS 模型之流線圖，注入質量流率(a)0.0005 ton/hr；(b)4 ton/hr

模擬結果之溫度分布圖 (圖 5) 顯示，於小流量及大流量注入條件下，生產井口溫度隨著注入質量流率增加而增加，且於大範圍之儲集層中呈現相同之溫度分布。

進一步，在觀察於此八種注入條件下模擬結果之等溫圖 (圖 6) 時，可於注入井底附近觀察到較明顯之溫度變化。從圖 6 可觀察到，儲集層位於注入井底附近之等溫層呈向下凹陷趨勢。觀察溫度為 420.18 K 之等溫層可發現，於 0.5 ton/hr 一例中該等溫層於注入井底附近向下凹陷約 46 m；於 4 ton/hr 一例中相同位置凹陷約 210 m。經量測發現，於 0.004 ton/hr 時凹陷約 27 m，於 0.0005 ton/hr 時凹陷約 7 m。造成此現象（等溫層凹陷）之原因為，隨著注入質量流率的增加，單位時間內沿注入井進入儲集層之低溫工作流體總量增加，更多的低溫工作流體吸收了源自儲集層的熱量，導致儲集層位於注入井底處溫度顯著下降。此結果表明，工作流體之注入質量流率對低溫工作流體與高溫(相對)儲集層之「冷熱交界」處之溫降幅度影響較大，對儲集層其他部分之溫度變化趨勢則影響較小。

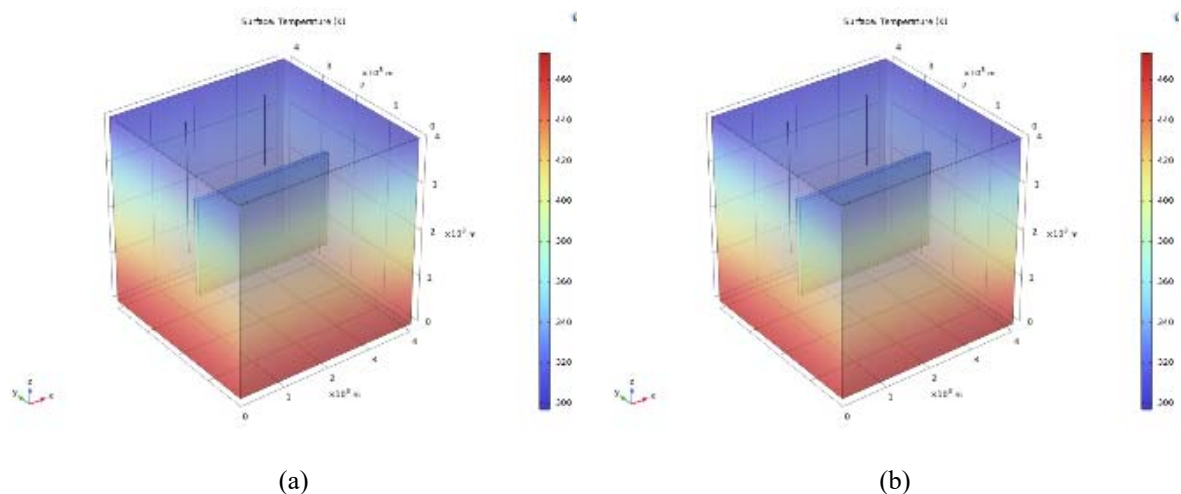


圖 5 CO₂-EGS 模型之溫度分布圖，注入質量流率(a)0.0005 ton/hr；(b)4 ton/hr

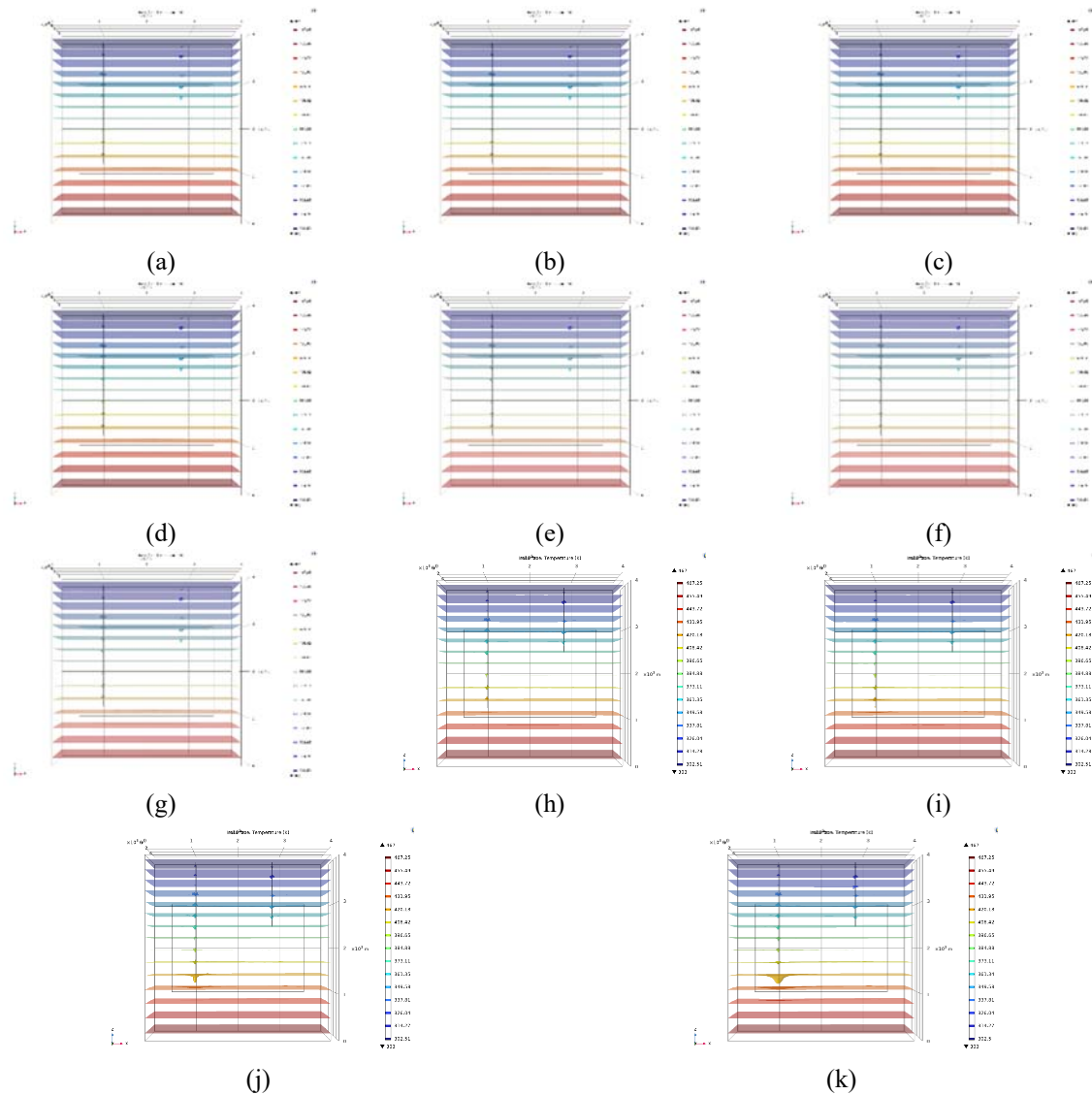


圖 6 CO₂-EGS 模型之等溫圖，注入質量流率(a)0.0005 ton/hr；(b)0.001 ton/hr；(c)0.002 ton/hr；(d)0.004 ton/hr；(e)0.05 ton/hr；(f)0.1 ton/hr；(g)0.25 ton/hr；(h)0.5 ton/hr；(i)1 ton/hr；(j)2 ton/hr；(k)4 ton/hr

繼而由圖 7 可以觀察到注入井由地面至井底 2800 m 深度沿井壁之溫度分布。當流量為 0.0005 ton/hr 時溫度由地面至井底逐漸由 303.15 K 線性上升至 433.15 K，而隨著流量之增加至 0.001 ton/hr、0.002 ton/hr、0.004 ton/hr，井之上端 500 m 深度內因流量較大而使溫度增加之趨勢較為緩和。此現象由流量為 0.5 ton/hr 至 4 ton/hr 可明顯看出因流量較大，熱傳較差而使溫度在井內較無明顯之上升。

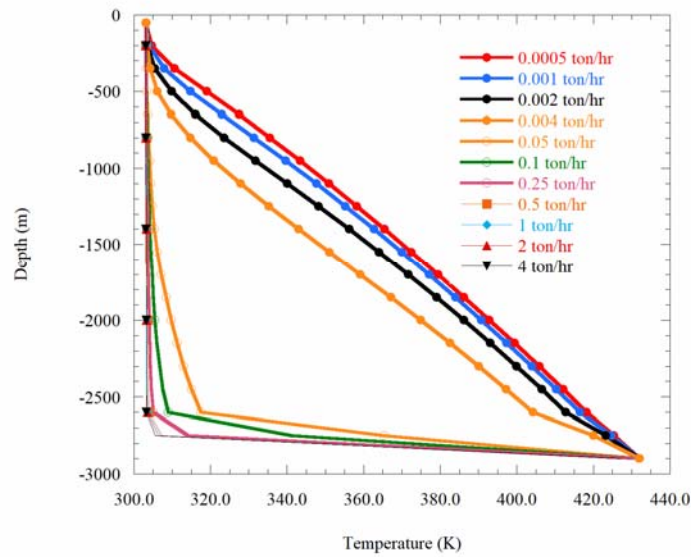


圖 7 於不同注入質量流率下注入井隨深度變化之垂直溫度分布

圖 8 為儲集層內濁水斷層裂縫 yz 面之流量，不論流量大或小均可觀察發現裂縫內流量隨著注入質量流率的增加而增加。

EGS 之應用原理係由注入井注入工作流體，流體沿注入井進入儲集層後吸收儲集層熱量，再由生產井流出，從儲集層取出之熱量得以被利用。因此，生產井產出之流體溫度對 EGS 之可用性至關重要，也是對 EGS 進行先期評估之重點，本研究亦代入前述八種注入條件對此展開討論。觀察於此八種注入條件下生產井隨深度變化之垂直溫度分布圖(圖 9)可發現，從最小注入質量流率(0.0005 ton/hr)到最大注入質量流率(4 ton/hr)，生產井底溫度僅增加約 0.8%；生產井產出溫度則顯著增加，增幅約為 21.5%。此結果表明，生產井生產過程於較小注入質量流率下有較大之溫降，在最小注入質量流率時生產井溫降約為 17%；於較大注入質量流率下溫降則極小，在最大注入質量流率時生產井溫降僅為約 0.04%。造成此現象之原因為於較小注入質量流率下工作流體流速較為緩慢，導致較大的溫降。

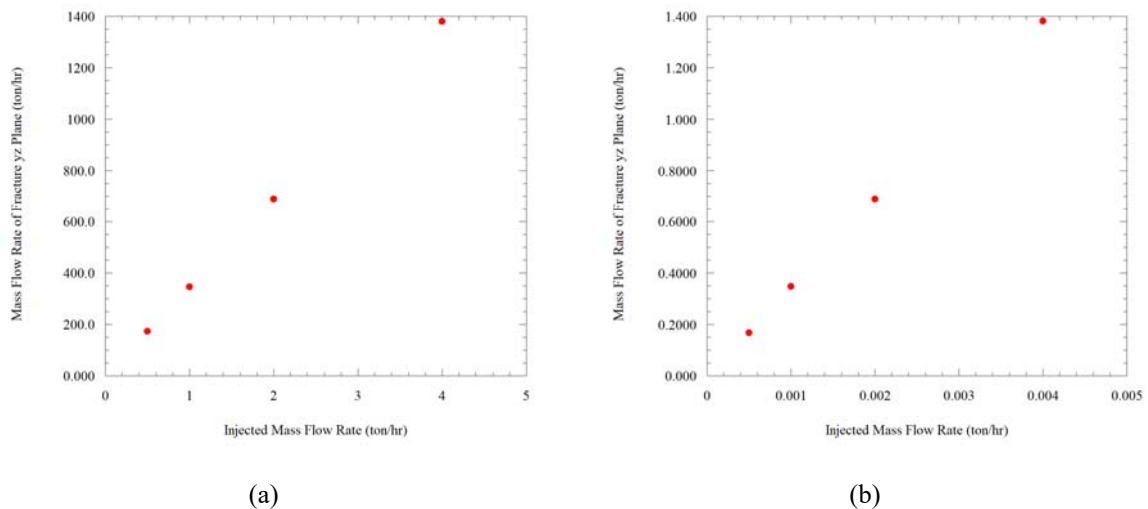


圖 8 儲集層內濁水斷層裂縫 yz 面流量(a)較大注入質量流率；(b)較小注入質量流率

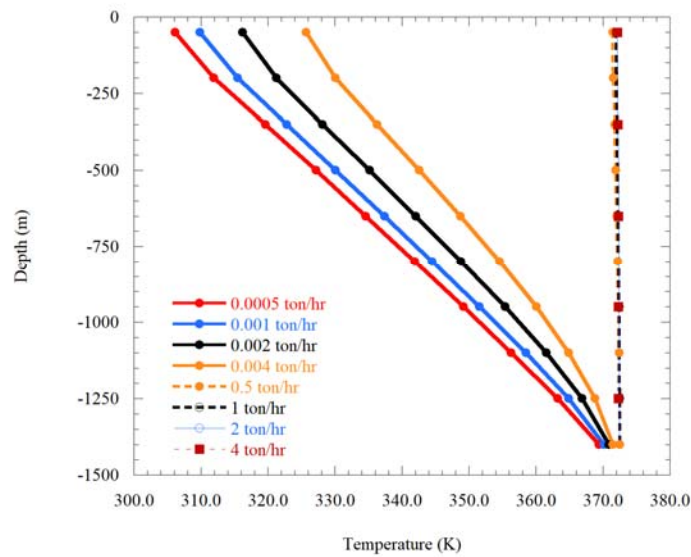


圖 9 於較小與較大注入質量流率下生產井隨深度變化之垂直溫度分布

「百萬瓦」(Megawatt, MW) 常被用來表示發電廠之發電能力，本文亦以此概念對 CO₂-EGS 模擬結果之「總產能」做討論。總產能計算方式如下：

$$P = \dot{m} \cdot h \quad (8)$$

式中 \dot{m} 和 h 分別為生產井出口質量流率和焓值。

從圖 10 可觀察到，隨著注入質量流率從 0.0005 ton/hr 增加到 4 ton/hr，生產井出口狀態之比焓從約 511.28 kJ/kg 增加到約 571.4 kJ/kg。從圖 11(a)可觀察到，隨著注入質量流率從 0.5 ton/hr 增加到 4 ton/hr，CO₂-EGS 之總產能從約 27.4 MW 增加到約 219 MW；從圖 11(b)可觀察到，隨著注入質量流率從 0.0005 ton/hr 增加到 0.004 ton/hr，CO₂-EGS 之總產能從約 23.6 kW 增加到約 202.37 kW，增幅皆呈線性之勢。

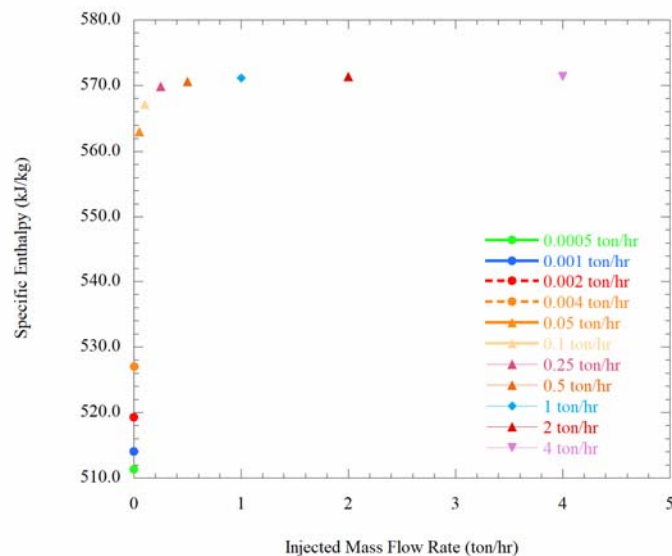


圖 10 於不同注入質量流率下生產井比產能

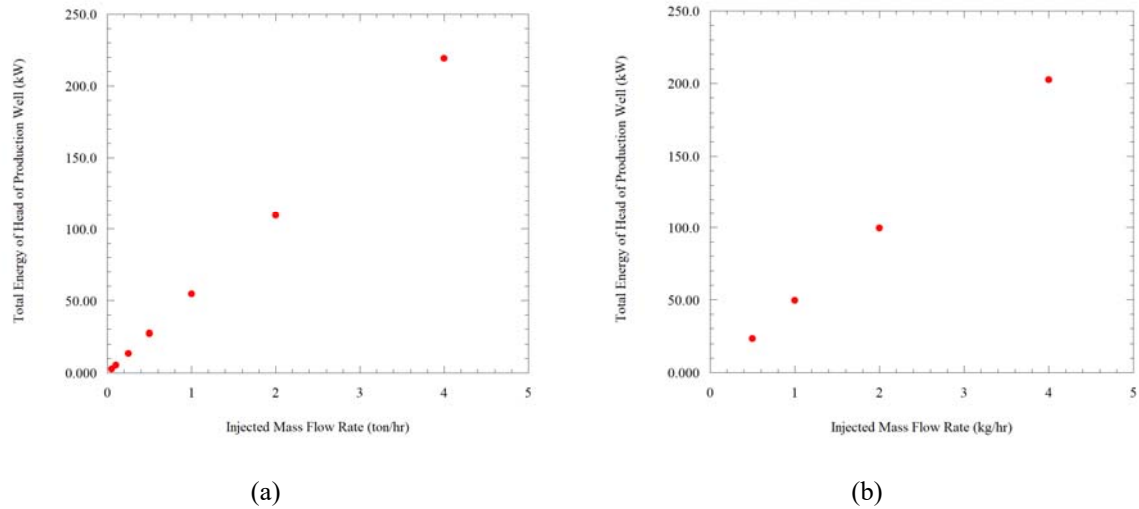


圖 11 EGS 產能(a)較大注入質量流率；(b)較小注入質量流率

除了以注入井注入質量流率作為變數外，本研究也討論了不同注入溫度對 CO₂-EGS 取熱的影響。本研究以注入質量流率 1 ton/hr，注入溫度分別為 293.15 K、298.15 K 和 303.15 K 為注入條件進行了數值模擬並取得結果。模擬結果之溫度分布圖（圖 12）顯示，於不同注入溫度下生產井產出溫度差異較不明顯。觀察於不同注入溫度下生產井隨深度變化之垂直溫度分布圖（圖 13）可發現，在最低注入溫度時（293.15 K），生產井底溫度為 372.5 K，生產井產出溫度為 371.96 K。隨著注入溫度的增加，生產井底與產出溫度均僅增加 0.01 K。在圖 14 中可觀察到相似的結果，在不同注入溫度下生產井出口狀態之比焓差異極小。於注入溫度 293.15 K 時生產井出口狀態之比焓約為 571.14 kJ/kg，隨著注入溫度的增加，比焓僅增加 0.01 kJ/kg。此結果表明，注入井注入溫度對 CO₂-EGS 取熱之影響較小。

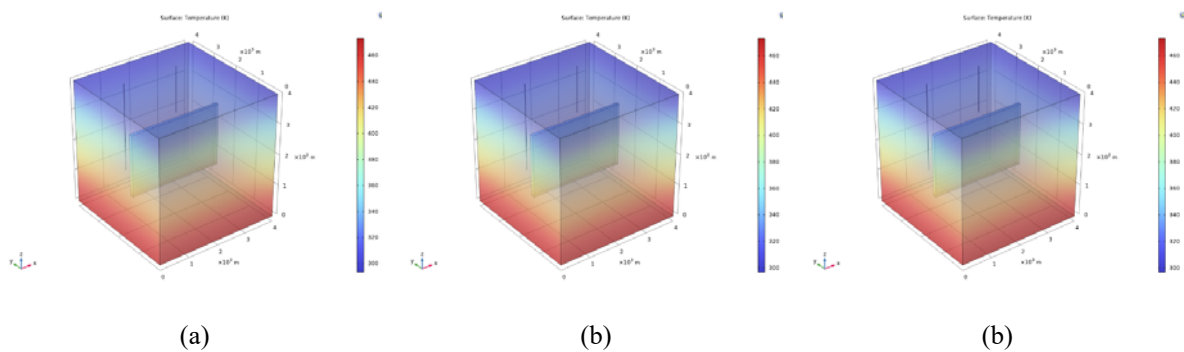


圖 12 CO₂-EGS 模型之溫度分布圖，注入流體溫度(a)293.15 K；(b)298.15 K；(c)303.15 K

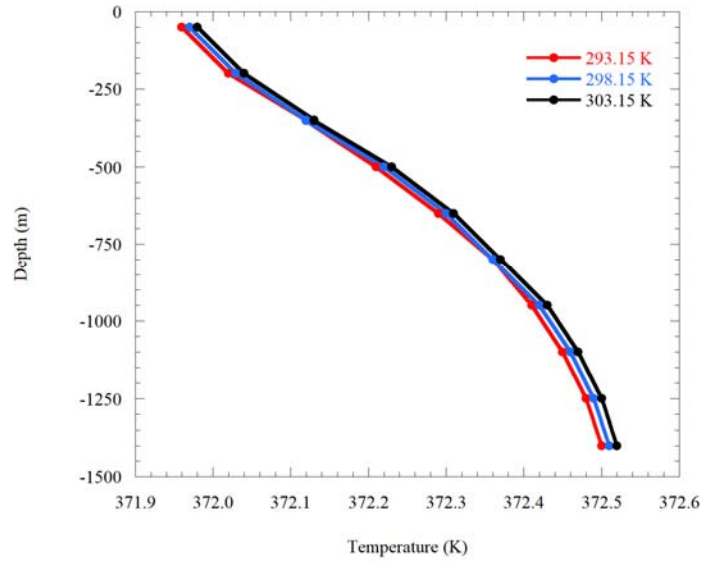


圖 13 於不同注入流體溫度下生產井隨深度變化之垂直溫度分布圖

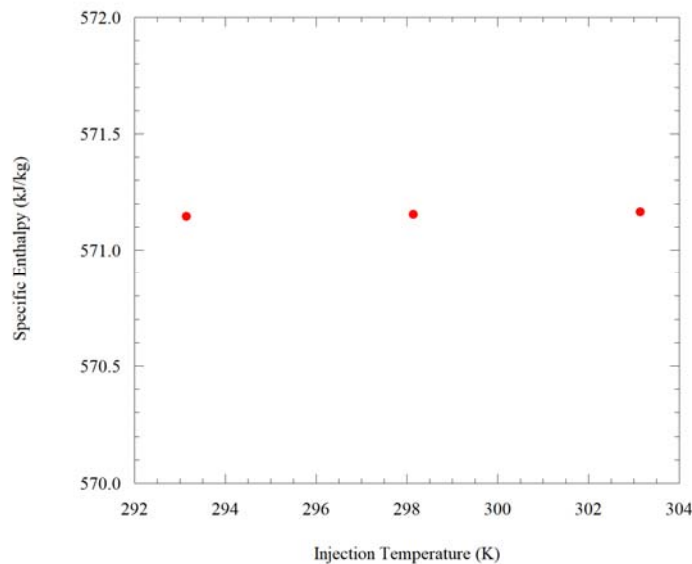


圖 14 於不同注入流體溫度下生產井比產能

4. 結論與未來展望

本研究以多重物理量分析軟體建立孔隙熱傳與達西流之耦合模型，並結合裂隙網路技術進行數值模擬，進而評估以台灣宜蘭紅柴林地區廢棄地熱井—紅柴林二號井與結元井為基礎，建立 CO₂-EGS 之可行性。本研究分別以注入質量流率、注入溫度作為變數，對比了不同注入條件下生產井產出溫度並討論溫度變化趨勢，並評估了 CO₂-EGS 之總產能，可歸納結論如下：

以注入質量流率作為變數之模擬結果表明：注入質量流率愈大，注入井底溫度變化愈明顯，生產井產出溫度愈高，使得 EGS 總產能愈高。同時，更大的注入質量流率使工作流體在沿生產井流出時具有更快的流速，這極大的減小了溫降，在注入質量流率 4 ton/hr 時生產井溫降僅為約 0.04%。

以注入流體溫度作為變數之模擬結果顯示：注入流體溫度對儲集層溫度分布幾乎沒有影響；生產井溫度對之亦較不敏感。

本研究已建立一可評估 CO₂-EGS 總產能之穩態模型，有望為台灣清水地熱開發提供參考。為了能模擬更實際之儲集層條件使評估結果更接近現地之地熱生產能力，也為了探討儲集層之長期變化，本研究在未來仍有繼續延伸、改進之空間與必要性。

2018 年底國家能源計畫地熱分項曾報告紅柴林 2 號井與結元井間有連通之現象，此為以此二井為基礎建立 EGS 之先決條件之一。未來研究需以該示蹤劑試驗之結果為依據，調節模型之取熱工作流體注入/產出之比例，使評估結果更接近現地之地熱生產能力。本研究建立之模型僅考量單一裂隙，用以表示現地之濁水斷層。未來研究可結合複雜裂隙模型以模擬更實際之儲集層條件。本研究建立之模型為孔隙-TH 穩態模型，模擬流體在多孔介質中之流場與熱傳效應。未來研究可進行孔隙-THM (Thermal-Hydraulic-Mechanical) 模型模擬並觀察暫態結果，討論水力壓裂現象對儲集層裂縫、取熱效率與熱突破等結果之影響。

5. 參考文獻

- [1] L. Chiari and A. Zecca, "Constraints of fossil fuels depletion on global warming projections", *Energy Policy*, 39, 5026, 2011.
- [2] T.M. Letcher, "1 - Global warming - a complex situation", *Climate Change (Third Edition)*, pp. 3-17, 2021
- [3] UNEP United Nations, Environment Programme, "Emissions Gap Report 2019", available online: <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2019>, 2019.
- [4] UNEP United Nations, Environment Programme, "Emissions Gap Report 2020", available online: <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2020>, 2020.
- [5] D. Notz and J. Stroeve, "Observed Arctic sea-ice loss directly follows anthropogenic CO₂ emission", *Science*, 354, 747, 2016.
- [6] L. Qiu, X. Yue, W. Hua, and Y.D. Lei, "Projection of weather potential for winter haze episodes in Beijing by 1.5 °C and 2.0 °C global warming", *Advances in Climate Change Research*, 11, 218, 2020.
- [7] S. Nangombe, T. Zhou, W. Zhang, B. Wu, S. Hu, L. Zou, and D. Li, "Record-breaking climate extremes in Africa under stabilized 1.5°C and 2°C global warming scenarios", *Nature Climate Change*, 8, 375, 2018.
- [8] E. Rodrigues, M.C.L. Cohen, K. Liu, L.C.R. Pessenda, Q. Yao, J. Ryu, D. Rossetti, A. Souza, and M. Dietz, "The effect of global warming on the establishment of mangroves in coastal Louisiana during the Holocene", *Geomorphology*, 381, 107648, 2021.
- [9] J. Calleja-Agius, K. England, and N. Calleja, "The effect of global warming on mortality", *Early Human Development*, 155, 105222, 2021.
- [10] IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change, "Climate Change 2014", available online: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf, 2014.
- [11] M.K.G. Deshmukh, M. Sameeroddin, D. Abdul, and M.A. Sattar, "Renewable energy in the 21st century: A review", *Materials Today: Proceedings*, Available online 2 June 2021.
- [12] T. Li, D. Han, F. Yang, J. Li, D. Wang, B. Yu, and J. Wei, "Modeling study of the thermal-hydraulic-mechanical coupling process for EGS based on the framework of EDFM and XFEM", *Geothermics*, 89, 101953, 2021.

- [13] M. Oreijah, A. Date, M. Bryson, and A. Akbarzadeh, "Expander modelling in binary cycle utilizing geothermal resources for generating green energy in Victoria, Australia", *Procedia Engineering*, 49, 316, 2012.
- [14] H.Æ. Sigurjónsson, D. Cook, D. Davíðsdóttir, and S.G. Bogason, "A life-cycle analysis of deep enhanced geothermal systems – The case studies of Reykjanes, Iceland and Vendenheim, France", *Renewable Energy*, 177, 1076, 2021.
- [15] A. Colmenar-Santos, E. Palomo-Torrejón, F. Mur-Pérez, and E. Rosales-Asensio, "Thermal desalination potential with parabolic trough collectors and geothermal energy in the Spanish southeast", *Applied Energy*, 262, 114433, 2020.
- [16] R. Shortall, B. Davidsdottir, and G. Axelsson, "A sustainability assessment framework for geothermal energy projects: Development in Iceland, New Zealand and Kenya", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 372, 2015.
- [17] R. Shortall and A. Kharrazi, "Cultural factors of sustainable energy development: A case study of geothermal energy in Iceland and Japan", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 101, 2017.
- [18] Y. Wang, Y. Liu, J. Dou, M. Li, and M. Zeng, "Geothermal energy in China: Status, challenges, and policy recommendations", *Utilities Policy*, 64, 101020, 2020.
- [19] A. Manzella, R. Bonciani, A. Allansdottir, S. Botteghi, A. Donato, S. Giamberini, M. Lenzi, A. Pellizzone, and D. Scrocca, "Environmental and social aspects of geothermal energy in Italy", *Geothermics*, 72, 232, 2018.
- [20] H. Hofmann, T. Babadagli, J. S. Yoon, G. Blöcher, and G. Zimmermann, "A hybrid discrete/finite element modeling study of complex hydraulic fracture development for enhanced geothermal systems (EGS) in granitic basements", *Geothermics*, 64, 362, 2016.
- [21] H. A. Bakar and S. J. Zarrouk, "Transient pressure analysis of geothermal wells fractured during well testing", *Geothermics*, 76, 26, 2018.
- [22] P. Asai, P. Panja, J. McLennan, and J. Moore, "Performance evaluation of enhanced geothermal system (EGS): Surrogate models, sensitivity study and ranking key parameters", *Renewable Energy*, 122, 184, 2018.
- [23] M. Y. Samin, A. Faramarzi, L. Jefferson, and O. Harireche, "A hybrid optimisation approach to improve long-term performance of enhanced geothermal system (EGS) reservoirs", *Renewable Energy*, 134, 379, 2019.
- [24] H. Yu, Q. Li, and F. Sun, "Numerical simulation of CO₂ circulating in a retrofitted geothermal well", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 172, 217, 2019.
- [25] W. Zhang, Z. Qu, T. Guo, and Z. Wang, "Study of the enhanced geothermal system (EGS) heat mining from variably fractured hot dry rock under thermal stress", *Renewable Energy*, 143, 855, 2019.
- [26] T. Chen, G. Liu, and S. Liao, "A comparison study of reservoir boundary conditions of Enhanced Geothermal Systems (EGS)", *Energy Procedia*, 160, 301, 2019.
- [27] T. Li, D. Han, F. Yang, J. Li, D. Wang, B. Yu, and J. Wei, "Modeling study of the thermal-hydraulic-mechanical coupling process for EGS based on the framework of EDFM and XFEM", *Geothermics*, 89, 101953, 2021.
- [28] Y. Shi, X. Song, and Y. Feng, "Effects of lateral-well geometries on multilateral-well EGS performance based on a thermal-hydraulic-mechanical coupling model", *Geothermics*, Vol. 89, 101939, 2021

- [29] P. Asai, P. Panja, J. McLennan, and J. Moore, “Efficient workflow for simulation of multifractured enhanced geothermal systems (EGS)”, *Renewable Energy*, 131, 763, 2019.
- [30] D. W. Brown, “A hot dry rock geothermal energy concept utilizing supercritical CO₂ instead of water”, *Proceedings of the 25th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, 233, 2000.
- [31] F. Luo, R. Xu, and P. Jiang, “Numerical investigation of fluid flow and heat transfer in a doublet enhanced geothermal system with CO₂ as the working fluid (CO₂-EGS)”, *Energy*, 64, 307, 2014.
- [32] 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”, *Applied Thermal Engineering*, 152, 215, 2019.
- [33] F. Sun, Y. Yao, G. Li, and X. Li, “Performance of geothermal energy extraction in a horizontal well by using CO₂ as the working fluid”, *Energy Conversion and Management*, 171, 1529, 2018.
- [34] K. Bongole, Z. Sun, and J. Yao, “Potential for geothermal heat mining by analysis of the numerical simulation parameters in proposing enhanced geothermal system at bongor basin, chad”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 107, 102218, 2021.