

Department of Geosciences College of Science National Taiwan University Master Thesis

利用示蹤劑研究清水地熱區儲集層裂隙特性 Applying Tracer Test to Study Fracture Characteristics of Reservoir on the Chingshui Geothermal Field

吳彥德

Yen-Te Wu

指導教授: 宋聖榮 博士

Advisor: Sheng-Rong Song, Ph.D.

中華民國 111 年 9 月

September, 2022

誌謝

能在僅兩年的研究生生涯中完成這篇論文,首先我要感謝我的指導教授宋聖 榮教授還有盧乙嘉學姊的提攜,有了教授的實驗場所及實驗室的支援還有對論文 的指導才能讓這篇論文順利產出。

另外也要感謝豐宇綠能股份有限公司的林總、宣良還有駐地地質師的偉誠以 及嘉偉,有你們在現地的幫助以及水樣的採取協助才能讓我在現地充滿希望以及 慰藉完整。

也要感謝實驗室的每一位成員對我的支持與鼓勵,謝謝家晧以及家綸不遺餘 力地陪我在現地待了兩天,謝謝大家。

中文摘要

近年來因應氣候變遷和溫室氣體的排放,政府規劃和發布 2050 年淨零排放的 路徑。其中,綠色能源為重要的選項,而地熱能可當基載電力且用地小的特性,為 重要的綠色能源選項之一。宜蘭清水地熱區為台灣開發最早的地熱區,位於中新世 廬山層,主要由透水性差之板岩所組成。工業技術研究院和中國石油公司於 1972 年開始進行探勘研究,期間共鑽井 19 口,發現產能佳並在 1981 年建置了 3MWe 的地熱示範電廠,但最終因生產過程降壓熱水不足和管線結垢,而在1993年停止 運轉。清水地熱電廠在2021年重新啟用,並綜合前人在野外地質、地球物理及地 球化學上的調查結果,規劃利於電廠持續運作的措施。其中尾水回注為一項維持儲 集層壓力以及補注儲集層熱水的重要技術。要確定回注井的佈置,其中一項直接且 有用的技術為地化示蹤劑試驗。示蹤劑試驗是了解地下儲集層各種特性的簡單方 法之一,提供傳統調查方法無法獲得的優勢流體流動網絡。鑽井擠注適量化學混合 物的水體作為示蹤劑,進入地下後於其他生產井定時收取水體,並分析水體中所含 示蹤劑的量,然後綜合地質背景建立地質模型以獲得地下流體及儲集層參數。本研 究選用 2.6-萘二磺酸鈉,萘磺酸類常用於地熱示蹤劑,其符合熱穩定性佳、低偵測 極限、低自然背景濃度、無吸收率、無毒性及低成本,適合用於清水地熱區的研究。 採集之水樣利用高效液相層析儀進行分析,獲得示蹤劑濃度對時間的變化圖。利用 示蹤劑突破曲線之特性包含峰值的位置、數量和突破時間等等形貌上的特徵進行 定性分析,再使用動差分析法,估算其在裂隙介質中流體的平均滯留時間、掃略體 積以及流動容量儲存容量圖等,並綜合兩分析方法特性了解清水地熱區之井間裂 隙連通性,包含裂隙破碎程度與管道連通性。同時提供清水地區更為精確的井間裂 隙參數,如異質性參數。並進一步綜合前人地質模型可以提供清水地熱區更高解析 度的裂隙密度分布。結果顯示,各點位與IC-09 井間連通性以往北及往西最低,往 東南方向則有較好的連通性,綜合前人之裂隙量測與研究可發現點位連通性之方 位大致與導水裂隙相符,且可提供更精細的導水裂隙延伸性。

關鍵字:地熱探勘、地化示蹤劑、儲集層模型、地熱發電

ii

ABSTRACT

Geothermal energy is regarded as an important green energy in terms of it's characteristics of base load power and small land occupy. The Chingshui geothermal field was built the first geothermal power plant which is located in south-west of Yilan Plain, Taiwan. Itis predominantly composed of slate, which is poor permeable. The Industrial Technology Research Institute (ITRI) and Taiwan CPC, drilled 19 wells with depths ranging from few hundreds to over three thousands meters and constructed a 3 MW geothermal power plant. It operated 12.5 years and shut down in 1993 due to pressure drop and scaling quickly in the wells. After re-evaluated by new data of geology, geophysics, geochemistry and well testing, this geothermal field constructed and operated a new geothermal power plantin 2021 However, to recharge fluid for maintaining pressure in reservoir for long term operations, the reinjection is an important technique. To understand reinjection efficiency and fluid circulation in fractures between wells, the tracer test is a relatively simple and useable method. In this research, use 2, 6-NDS chemicals as tracer to conduct a test in shallow wells, the R1, R5 and R3, deep well, the IC-19 & 21 as production wells, and the IC-09 as injection well in the Chingshui geothermal field. Then use the instrument, the high performance liquid chromatography (HPLC) to analyze the concentrations of tracer in samples and construct a breakthrough curve for every wells and outcrop. Meanwhile, use qualitative analysis to understand relationships between peaks in breakthrough curves and possible fracture connectivity; and quantitative analysis to understand the swept volume, flow geometry and heterogeneity. Finally, we combine all results to construct a fracture distribution conceptual model This conceptual model provides detailed fracture connectivity between wells and more information for the future deploy of reinjection well locations in the Chingshui geothermal field.

Key Words: geothermal exploration, Tracer test, Reservoir conceptual model. Geothermal power plant

口試委員審定書



國立臺灣大學碩士學位論文 口試委員會審定書 MASTER'S THESIS ACCEPTANCE CERTIFICATE NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY

清水地熱示蹤試驗儲集層裂隙特性分析

Analysis of Reservoir Characterization Using Tracer Test in The Chingshui Geothermal Field

本論文係<u>吴彦德</u><u>R09224210</u>(學號)在國立臺灣大學<u>地質科學</u> <u>系研究所</u>完成之碩士學位論文,於民國<u>111</u>年<u>08</u>月<u>17</u>日承下列 考試委員審查通過及口試及格,特此證明。

The undersigned, appointed by the Department of <u>Geosciences</u> on <u>08/17</u> <u>2022</u> (year) have examined a Master's thesis entitled above presented by <u>YEN-TE, WU</u> <u>R09224210</u> (student ID) candidate and hereby certify that it is worthy of acceptance.

口試委員 Oral examination committee: 23278 指 教授 Advisor: 宋聖榮教授 Sec. Z

系主任/所長 Director:__

目錄

日録
誌謝i
中文摘要ii
ABSTRACT iii
口試委員審定書v
目錄vi
圖目錄viii
表目錄x
第一章、前言1
第二章、清水地熱區地質背景3
地質背景3
清水地熱區區域地質3
現地裂隙量測與解釋5
地球物理解釋6
大地電磁法判釋6
微震以及二氧化碳含量模擬7
地球化學解釋7
熱水地球化學7
地球物理與地球化學小結8
井間測試8
井干擾測試
示蹤劑試驗12
第三章、示蹤劑試驗方法、原理和施作14
示蹤劑試驗設計14
示蹤劑試驗目的14
示蹤劑選用14
示蹤劑投入量預估17

示蹤劑試驗施作18
現地實驗流程規劃18
採樣方法
示蹤劑試驗化學分析
高效液相層析儀(HPLC)24
示蹤劑試驗資料解析(tracer interpretation)
示蹤劑試驗定性分析(Tracer data qualitative interpretation)
示蹤劑試驗定量分析(Tracer data quantitative interpretation)
動差分析法(Method of Moment)
第四章、示蹤資料分析結果46
示蹤劑現地實驗執行46
採樣地點與現地記錄46
化學分析結果
示蹤劑試驗資料分析結果48
示蹤劑試驗定性分析結果48
示蹤劑試驗定量分析結果53
第五章、討論
示蹤劑產生多波峰突破曲線之解釋55
示蹤劑突破曲線與點位間裂隙的關係57
井間裂隙通道之複雜程度62
清水地熱區井間裂隙模式64
第六章、 結論
第七章、參考文獻
附錄75

圖目錄

		圖目錄
圖	2-1	清水地熱區 1/30000 地質圖(羅偉, 2012)
圖	2-2	清水地熱概念模型
圖	2-3	清水地熱概念模型及流體流向(Chang et al., 2014)
圖	2-4	(a)南北向電阻剖面,(b)東西向電阻剖面。藍色箭頭為冷水補助方向,紅
		色箭頭為熱水上湧方向(Chiang et al., 2015)6
圖	2-5	清水地熱區補注與熱水上湧路徑(Lu et al., 2020)
圖	2-6	清水地熱區井干擾測試之井位與 1500 深度下之等溫曲線分布(Chang
		and Ramey, 1979)11
圖	2-7	清水地熱區井位圖(ITRI, 2010)13
圖	3-1	示蹤劑分類(Chrysikopoulos, 1997)16
圖	3-2	第一次實驗清水地熱區注入及採樣點位19
圖	3-3	第二次實驗清水地熱區注入及採樣點位19
圖	3-4	清水地熱區井體結構圖(豐宇綠能股份有限公司;李清瑞等人,2016;工
		業技術研究院, 2015)21
圖	3-5	高效液相層析儀部件及運作流程(HPLC apparatus — WIKIMEDIA)25
圖	3-6	六相閥運作及連接
圖	3-7	HPLC 結果轉換流程
圖	3-8	HPLC 標準品之檢量線
圖	3-9	影響示蹤劑突破曲線的三個要素,(a)流體速度、(b)裂隙通道寬度、和(c)
		裂隙通道長度
圖	3-10	多通道模型的(a)2-D、(b)3-D 剖面和對應的(c)示蹤劑突破曲線(Sheng et
		al., 2021)
圖	3-11	(a)水流速度在不同深度不均等;(b)水流速度在每個深度相似時的示蹤
		劑突破曲線和在不同的垂直連通性下的變化,紅色虛線為高垂直連通性
		時的示蹤劑突破曲線,藍色實線為低垂直連通性下的示蹤劑突破曲線
		(Pérez et al., 2020)
啚	3-12	裂隙數值模擬的種類(Jing et al., 2022)

		AND A REAL PROPERTY AND A REAL PROPERTY.
圖	3-13	距離與沿散的關係,沿散會影響示蹤劑突破曲線的峰值(Field., 1999) 34
圖	3-14	利用自然對數擬合示蹤劑衰減對比真實示蹤劑資料,以IC-19&21點位
		為何
圖	3-15	流徑中的流線做降冪排列,藍色長條代表其體積容量的大小,綠色長條
		代表未被掃略到的流線部分42
圖	3-16	F-Φ 曲線所代表的含意43
圖	3-17	內華達州迪克西谷地熱區之 F-Φ 曲線,紅色線代表完全均質的流徑43
圖	3-18	F-Φ曲線的做圖與其斜率代表的意義44
圖	3-19	利用 F-Φ 曲線決定層透水率之範例44
圖	3-20	勞倫斯常數之代表含意,淺綠色部分代表 F-Φ 曲線與對角線之間面積
圖	4-1	各點位未經標準化之突破曲線50
圖	4-2	各點位經標準化之突破曲線
圖	4-3	各井之示蹤劑原始突破曲線51
圖	4-4	各井之示蹤劑標準化突破曲線52
圖	4-5	各點位之流動容量-儲存容量圖
圖	5-1	各地點示蹤劑試驗之示蹤劑突破曲線
圖	5-2	清水地熱區 IC-21 與 IC-19 之井間示蹤劑突破曲線(陳亭潔, 2019)57
圖	5-3	典型示蹤劑突破曲線在快、中、慢速下的形貌(Axelsson et al., 2005)58
圖	5-4	氦、氖及溴作為示蹤劑之突破曲線
圖	5-5	各點位與回注井之水力裂隙連通關係,點位旁標註數字為井底深度61
圖	5-6	兩名詞綜合描述透水性差異63
圖	5-8	清水溪沿岸溫泉露頭裂隙位態(羅偉, 2012)65
圖	5-7	IC-21 600-800 公尺岩芯裂隙位態(孫天祥與葉恩肇, 2014)66
圖	5-9	清水地熱區之井間連通裂隙模式

ix

661610101010

表目錄

	表目錄
表 2-1	清水地熱井干擾試驗結果(Modified from Chang and Ramey, 1979)10
表 2-2	逕向流流向下清水地熱之儲集層參數(修改自 Chang and Ramey, 1979
	Fan et al., 2005)
表 2-3	線性流流向下清水地熱之儲集層參數(修改自 Fan et al., 2005)11
表 2-4	IC-19 作為生產井與 IC-21 做為回注井之井間水文參數(修改自陳亭潔,
	2019)12
表 3-1	Naphthalene-2,6-disulfonic acid 特性(DrugBank Online)17
表 3-2	清水地熱井資訊
表 3-3	2021/03/06 現地數據
表 3-4	2021/08/25 現地數據
表 3-5	HPLC 之各項分析條件
表 3-6	HPLC 分析 2,6-NDS 之平均濃度與標準差
表 3-7	HPLC 檢量線數據
表 3-8	裂隙參數對示蹤劑突破曲線的影響(整理自 Shook and Mitshell., 2009;
	Sheng et al., 2021)
表 3-9	於裂隙儲集層中不同型態之示蹤劑突破曲線特徵(Jing et al., 2022)35
表 4-1	第一次示蹤劑試驗採樣時間表46
表 4-2	第二次示蹤劑試驗採樣時間表47
表 4-3	各點位之標準化所使用流量及來源49
表 4-4	各點位之平均滯留時間、掃略體積、回收率和平均流量
表 4-5	各點位之勞倫斯常數53
表 5-1	各示蹤劑試驗之條件與類型56

第一章、前言

近年來綠色能源之意識在全球逐漸高漲,使得其發展漸受重視,而綠色能源中 的地熱能可當基載且對環境的衝擊、用地面積的要求,以及整體成本較其他能源低 使得其在開發應用與研究更受重視。現在全球已經有22個國家在使用地熱能源發 電,且總體裝置容量仍在持續上升中。

台灣地熱發電從 1964 年礦研所在大屯火山群地熱區的探勘工作開始算起,至 今經歷了近 50 年的發展,期間對宜蘭地區、大屯火山群和花東地區等進行了詳細 的調查,包含野外地質調查、地球物理探勘(大地電磁、重力、磁力、熱流、微震 分析.....等)、地球化學探勘(氫氧同位素、氦同位素、示蹤劑實驗.....等),和鑽井 探勘(岩芯應變分析、岩屑.....等)。

宜蘭清水地熱區由工研院和中油公司於 1972 年開始進行探勘開發,期間共鑽 井 19 口,發現產能佳並在 1981 年建置了 3MWe 的地熱示範發電廠,但最終因生 產過程降壓導致管線結垢和未做尾水回注,而在 1993 年停止運轉。造成降壓的原 因通常是因地熱系統的儲集層缺乏或補注較慢,使得在生產過程中儲集層的流體 逐漸變少而使得壓力下降,進而影響到生產效率及產能(Axelsson, 2003)。

清水地熱電廠在 2021 年七月重新啟用,目前以 IC-13、IC-05、IC06,以及由 豐字鑽井公司新鑽的兩口 R5 和 R1 作為生產井,而將發電後的廢水回注至 IC-09、 R3 和 R2 三口井中。尾水回注為使儲集層壓力維持穩定而不會在生產過程中造成 降壓而使得熱水或蒸氣不足的方法之一。將發電後產生的廢水重新回注至地底下, 可以處理廢水排放外也可以維持儲集層壓力,除了保持地熱產能也能使地熱能源 達到永續利用的效果(Bodvarsson et al., 1988; Chrysikopoulos, 1993)。

尾水回注技術在 1997 年時已經被 44 個地熱田所使用(Stefansson, 1997),但卻 有以下幾個問題:如誘發地震和回注冷水導致生產井溫度下降的問題等 (Chrysikopoulos, 1993),因此在開始完整的實行尾水回注前需要先進行詳細的儲集 層構造和潛在流體流動路徑(flow path)調查是非常重要的。

示蹤劑試驗(tracer test)為了解地下地質特徵的簡單方法之一,提供了傳統地質、 地球物理和地球化學調查方法無法提供的優勢流體流動網絡(preferential path networks)。而在研究地熱儲集層中,示蹤劑帶給我們地下流體的流動路徑、井間的 裂隙連通性或是對於尾水回注的降溫效果預測,都是十分重要的。 示蹤劑的選用需要考慮的點有以下幾個,分別是1.不會因儲集層的高溫而產生 熱裂解,也就是說需要熱穩定。2.在儲集層中不存在或是濃度遠低於儀器偵測極限。 3.不會與圍岩發生反應。4.價格便宜。5.分析容易。6.不具有毒性或是不對環境產生 傷害。

前人在清水地熱區所進行之示蹤劑試驗利用 TRINV 和 TRCOOL 程序進行模擬後,顯示 IC-09、IC-19&IC-21 等井,以及遠處之清水溪露頭之連通性不佳(ITRI, 2010),而 IC-19&IC-21 具有良好連通性(陳亭潔, 2019)。近年有新鑽之三口淺井分別位於 IC-09 西北方的 R3;位於 IC-09 東南方的 R5 和 R1,三口井中以 R5 和 R1 具有相當的產能,因應清水地熱電廠之建廠需求,需要了解新井與舊井間之連通性,以確保日後之回注井設立位置參考。因此,需要更加了解清水地熱區在小於 1,000 公尺之深度的井間裂隙連通。

本研究探討並預估清水地熱區之新井與舊井在 300-1,000 公尺之間的裂隙連通 性和異質性,在目前作為回注井之一的 IC-09 投注 2,6-NDS 做為示蹤劑,並在做為 生產井的 R3、R1、R5、IC-19 & IC-21 收取,利用收取到的示蹤劑突破曲線資料進 行定性及定量分析,以得到清水地熱區於 300-1,000 公尺間各井間的異質性參數, 再綜合前人於清水地熱區的現地裂隙研究建立清水地熱區井場尺度的井間裂隙分 布,提供日後離散裂隙網路模擬時的重要對比與參考。

第二章、清水地熱區地質背景

地質背景

清水地熱區區域地質

清水地熱區位於宜蘭縣三星鄉和大同鄉的交界,蘭陽平原西南方的清水溪中 游處。此區為中央山脈西翼地質區的脊樑山脈帶,地層根據中央地質調查所出版的 三星圖幅來看為中新世廬山層,此地層可依岩性再分為兩段,分別是年代較老的清 水湖段和較年輕的仁澤段。其中清水湖段岩性為板岩或千枚岩,偶夾薄層變質砂岩; 仁澤段則為硬頁岩及硬頁岩與變質砂岩之薄互層(林啟文和林偉雄,1995)。

清水地熱區所在的仁澤段又可被分為四個單位:Lsj(a)、Lsj(b)、Lsj(c)、Lsj(d)(圖 2-1),將地質圖與井位置疊圖可發現大部分井位落在 Lsj(b),此段岩性主要由淺灰 色至灰色硬頁岩,或硬頁岩、板岩和變質砂岩互層所組成(羅偉,2012),在本段中 部及上部且可發現多期石英脈相互截切或與劈理面截切。

此區位於清水溪南側,向斜軸東西向的複向斜—小南澳向斜中的北側,該向斜之傾向為向南約50度,被走向為西北-東南向的右移斷層--清水溪斷層(林啟文和林 偉雄,1995;曾長生,1978)、走向大致為東西向的正斷層--小南澳斷層(曾長生, 1978),以及同為東西走向的G斷層三條斷層所截切,以下為三條斷層的詳細描述:

小南澳斷層:位於清水地熱區的南側,為東西走向、向南傾之高角度正斷層, 在赤鹿坑溪沿線可見斷層泥或斷層角礫岩,而斷層帶中常可見黑色遭剪碎之板岩 (羅偉,2012)。其中在小南澳斷層與清水溪斷層交界以東可發現許多尚未被命名的 正斷層(Lu et al., 2017)。清水溪斷層:為大致與清水溪河谷平行的西北--東南走向 之斷層,沿清水溪可見多處斷層露頭,而部分有小型崩塌,再往南到赤鹿坑溪則未 見到斷層露頭,推測在此中止。依照露頭推斷此斷層為一右移斷層,切過清水湖段 和大部分的仁澤段(曾長生,1978)。



現地裂隙量測與解釋

板岩層中若無開放裂隙(open cracks)則其為不透水且具低孔隙率(Song and Lu, 2018)。一般而言,硬頁岩、變質砂岩和板岩之孔隙率不高於 2%到 3%,且裂隙在 清水地熱區扮演了熱水通道和儲集層連通的重要角色 (曾長生,1978;蕭寶宗等人, 1979),因此了解清水地熱區之裂隙是相當重要的。

本區之板劈理位態為 N80°W, 向南傾 69-70°(Lu et al., 2018), 而其他裂隙經由 野外調查溫泉露頭及地表出露的節理面,將其統整後可以了解區域內主要導水裂 隙位態,此區之節理位態可被分成兩個系統,分別為 N25-40°W, 向東傾 60-80°以 及 N10-45°E, 向東傾 80-90°(曾長生, 1979), 而羅偉等人(2012)在此基礎下進行了 更精細的地質調查後並重新整理裂隙和其內含的方解石、石英脈後,認為此區最有 可能的兩組破裂面為 N10-15°W、向東傾 60-80°, 和在清水溪斷層沿線最為明顯 的 N10-30°E、向西傾 10-30°。

孫天祥與葉恩肇(2014)人利用 IC-21 之 600-800 公尺岩芯進行斷層擦痕微電阻 井壁影像分析,得出清水地熱區最年輕一期之應力場為 NE-SW 向擠壓、NW-SE 向 伸張,清水地熱區目前為 N30°E 擠壓與 N60°W 伸張,而曾經或現在有熱液通過的 裂隙是因為其地下流體壓力之規模曾大於最小應力,而造成現今擠壓方向夾低角 度之裂隙出現流體流過而沉澱之礦脈(孫天祥與葉恩肇,2014)。

Lu et al. (2018)利用分析 IC-21 之 600-800 公尺岩芯裂隙中的開口裂隙(Open fracture),和填充之方解石的δO¹⁸值與方解石產狀推斷,N10-20°E 且高角度向東 傾之裂隙填充之方解石脈及 G 斷層,可能為近期較淺部之熱流體通道。綜合推估 清水地熱區之導水裂隙為高傾角且隨深度會有破碎程度的不同,而使得裂隙的位 態具有不同程度的複雜度,在地表溫泉露頭調查有兩組之節理位態,而在 600-800 公尺深的部分則以一組位態為主要導水裂隙,而 G 斷層形成的破裂帶則也有可能 為清水地熱區之導水裂隙(Lu et al., 2018)。

地球物理解釋

大地電磁法判釋

在清水地區共進行了兩次的 MT 佈站,分別為 2008 年以及 2014 年。由 2008 年的資料進行反演推斷清水地熱儲集層南北寬度約為 1.5 公里長、向南傾斜,以G 斷層及小南澳斷層為界,並認為清水溪斷層的破碎帶位於泥質蓋層下,由地表至深 部(15 公里)傾角變緩(錯誤! 找不到參照來源。)(Tong et al., 2008)。Chang et al.(2014) 重新在清水溪沿岸進行 MT 及綜合溫度剖面(李柏亨等人,2013)後,認為除了清水 溪斷層外,小南澳斷層亦為主要熱水上湧之通道(圖 2-3)。Chiang(2015)將 2008 年 之 MT 資料重新進行電腦數值計算後建立電阻剖面(圖 2-6)。認為清水地熱電廠之 西南方有一與小南澳斷層有關之破碎帶,而地表冷水由清水地熱區北邊之沖積層 補注,部分儲存在小南澳斷層之破碎帶,部分沿清水溪斷層或是破裂帶上湧至地表。



(Tong et al., 2008)



圖 2-3 清水地熱概念模型及流體流 向(Chang et al., 2014)



圖 2-4 (a)南北向電阻剖面,(b)東西向電阻剖面。藍色箭頭為冷水補助方向,紅 色箭頭為熱水上湧方向(Chiang et al., 2015)

微震以及二氧化碳含量模擬

除了 MT 的結果和推斷外,微震事件也可以提供地下儲集層之可能裂隙及熱水 儲集位置。劉瀚方(2013)利用臨時地震測站測定清水地熱區微震分布,並與大地電 磁研究剖面做對比,認為清水地熱區在東方和南方深 3-5 公里處具有深部循環。此 外,李柏亨(2013)利用二氧化碳在熱水中溶解度不同的特性進行清水地熱區溫度模 擬,得到清水地熱區之最高溫達 240℃,且高溫區集中在 G 斷層以及清水溪斷層 周圍。

地球化學解釋

熱水地球化學

Lu et al.(2020)利用氫氧同位素、亞氯酸鹽濃度和二氧化矽地質溫度計於清水地 熱電廠啟用與停用階段了解其自然補注及上湧途徑為何,並提出主要平均位態為 N10-20E 之裂隙和 G 斷層為主要導水裂隙(圖 2-5)。



圖 2-5 清水地熱區補注與熱水上湧路徑(Lu et al., 2020)

地球物理與地球化學小結

由上述可知,無論利用地球物理方法進行模擬,或是利用地球化學方式進行水 樣分析,僅推測出可能自然流場循環之來源在清水地熱區南部(IC-5、IC-14、IC-16), 可能為較深部之流體沿主要導水裂隙進行循環。而北部(IC-9、IC-13)除了主要導水 裂隙以外,還有周圍高山提供之天水由 G 斷層進行較淺循環,但並沒有辦法確認 在清水地熱區之井間裂隙分布,因此需要其他方法來了解井間裂隙連通性及分布 為何。

井間測試

井干擾測試

選定一口井作為干擾井(Active well),在干擾井進行擾動,如注水或是抽水, 藉此擾動儲集層,並在觀測井(Observation well)觀測在試驗期間的井壓力、溫度或 是化學性質的變化,進而了解推估干擾井及觀測井之間傳導係數(kh)、儲集層容積 係數(Øh)等評估地熱潛能之重要數據(Fan et al., 2005)。但井干擾試驗可能因壓力差 距不明顯而無法推算井間裂隙連通或是其他水文參數。

1979 由中油與美國合作於清水進行了井下干擾試驗,其中以 IC-16 作為生產 井,IC-4、IC-5、IC-9、IC-12、IC13 和 IC14 作為觀察井,藉由觀察井頭來監測水 位和壓力是否有變化,圖 2-6 為當時進行井下干擾試驗之井位圖,測試期間為 11 天,但試驗當下 IC-13 和 IC-05 出現機械故障因而無法記錄壓力或是紀錄出現問 題,表 2-1 為干擾試驗結果,生產井之流量介於每小時 80-84 噸之間(Chang et al., 1979)。

Ahmed.(2019)提出儲集層之幾何(reservoir geometry)是影響流動行為的關鍵,並 且將儲集層之幾何利用數學公式的描述分為三種類型,分別為徑向流(radial flow)、 線性流(Linear flow)和圓形及半圓形流(Spherical and hemispherical flow)。進一步再 將所得結果(表 2-1),透過雙對數典型曲線(log-log type curve)分析得到儲集層參數, 包含儲集層容積係數(Øh)和傳導係數(kh)。Chang et al.(1979)利用徑向流流動模式 來計算,得到儲集層參數整合於表 2-2,而 Fan et al.(2005)則將 1979 年之數據利用 徑向流流動模式和線性流流動模式,重新進行雙對數典型曲線之分析,發現清水地 熱區的地下流場模式近似於線性流流動模式(表 2-3),其所算出的儲集層容積參數 剃除儀器故障之 IC-05後,可利用此參數假設一儲集層厚度,算出其有效孔隙率之



											4	A
	Observ	ation	well							1010	Producti	ion well
	IC-04		IC-05		IC-09		IC-12		IC-14		IC-16	
Δt	WHP	Δp	WHP	Δp	WHP	Δp	WHP	Δp	WHP	Δp	WHP	Δp
Hours	psi	psi	psi	psi	psi	psi	psi	psi	psi	psi	psi	psi
0	172		194	5	138		187		133		258	
18.5	171	1	189	14	137	1	185	2	133	0	69	24
42.5	168	4	180	14	135	3	162	5	130	3	58	83.5
66.5	166	6	180	14	133	5	182	5	125	8	56	83.1
90.5	166	6	180	14	130	8	180	7	125	8	56	83.1
114.5	165	7	180	14	130	8	179	8	123	10	56	82
138.5	164	8	180	14	130	8	178	9	121	12	56	82.4
162.5	164	8	180	14	129	9	177	10	120	13	54	82.4
186.5	163	9	180	14	128	10	176	11	119	14	54	82
210.5	162	10	180	14	127	11	175	12	119	15	53	80
234.5	162	10	180	14	127	11	175	12	117	16	52	80
258.5	161	11	180	14	126	12	175	12	115	18	52	80
	1											

表 2-1 清水地熱井干擾試驗結果(Modified from Chang and Ramey, 1979)

表 2-2 逕向流流向下清水地熱之儲集層參數(修改自 Chang and Ramey, 1979 Fan

et al., 2005)

Radial flow	Observation well										
model	IC-	IC-	IC-	IC-	IC-	IC-	IC-	IC-	IC-	IC-	
moder	04a	04b	05a	05b	09a	09b	12a	12b	14a	14b	
Distance from	175		213		300		90		330		
IC-16											
kh, Darcy-	0.24	8.8	ΝΔ	2.5	7 /0	78	7 50	88	1 18	13	
meter	9.24	0.0	INA	2.5	7.49	7.0	1.59	0.0	4.10	4.5	
Øh m	425	160	NA	790	185	60	165	120	120	200	
çii, ili	125	100	1 1 1 1	, 70	105	00	0	120	120	200	

a 來自 Fan et al., 2005, b 來自 Chang and Ramey, 1979。

Linear flow model	Observation well							
	IC-04	IC-09	IC-12	IC-14				
Distance from IC-16	175	300	90	330				
kh, Darcy-meter	85.5	48.9	26.6	47.1				
Øh, m	452	383	924	270				

表 2-3 線性流流向下清水地熱之儲集層參數(修改自 Fan et al., 2005)



布(Chang and Ramey, 1979)

示蹤劑試驗

工業技術研究院(ITRI)(2010)利用氚示蹤劑於 IC-9 注入,希望在較南邊之井位 IC-16、IC-13、IC-5 和清水溪露頭取得高於偵測極限之氚活度。各井井位置如圖 2-7 所示。採樣頻率為一個禮拜內每天一次,而後改成每月一次的採樣頻率,但持續兩 年皆未獲得高於偵測限度之氚活度之水樣。

結果可能原因有三:(1)回注井和生產井(露頭)之連通性差(示蹤劑回收率低) 或是未連通;(2)流體通道實際截面積大;(3)回注流量和生產流量低,以至於氚 水活度突破點尚未出現,故需延長示蹤劑試驗時間來持續監測(此原因再經由長達 兩年之監測已經確定為不可能)(ITRI,2011)。個人認為可能為灌入示蹤劑後注入 水量太少,使得示蹤劑並未完全擠注至裂隙中,或者是示蹤劑擠注量不夠,導致在 裂隙移動中不斷被稀釋使得在生產井無法測到高於偵測極限之示蹤劑,又或者是 採樣頻率太低導致無法獲得偵測極限。

陳亭潔(2019)以苯甲酸鈉作為示蹤劑灌入 IC-21(北),並在 IC-19(北)、IC-05、 IC-13、IC-16(南)、清水溪露頭與山腰露頭收取樣本,但只在 IC-19 收到高於儀器 偵測限度(5ppb)的苯甲酸鈉量,其他收取點皆未測得苯甲酸鈉。她初步推論可能是 因為通道為間接或是過長而無法收取到足夠偵測量,利用井溫圖找到兩井井下可 能裂隙密集帶後,假設流體從不同裂隙密集帶流出且為一維線性流動模式,模擬出 可能的兩井之間裂隙通道位置、流體流速、流體通道體積、AØ等重要水文參數如 表 2-4。

表 2-4 IC-19 作為生產井與 IC-21 做為回注井之井間水文參數(修改自陳亭潔,

7	n	1	a	١
4	υ	Т	2	J

結論	Flow channels number	IC-21 to IC-19 flow channels(m)	Channel length(m)	Flow velocity(m /s)	Aø	Volume of the channel(m^3)	Flow rate(kg/s)
	Ch1	605-1150	547	0.0196	0.0074	4.0612	0.1342
	Ch2	605-750	154	0.0007	0.0993	15.2928	0.0603

綜合先前示蹤劑試驗結果,前人研究中 IC-09 與各深井連通性不佳,而距離較近的 IC-19&IC-21 具有良好的連通性,且北邊的井位與南邊的井位皆無觀察到連通的結果。



圖 2-7 清水地熱區井位圖(ITRI, 2010)

第三章、示蹤劑試驗方法、原理和施作

示蹤劑試驗設計

示蹤劑試驗目的

示蹤劑試驗(tracer test)為一直接了解地下特徵的簡單方法,其提供了傳統調查 方法無法提供的優勢流體流動網(preferential path networks),可以回答與儲集層中 的孔隙性質相關的問題,像是示蹤劑流過的平均裂隙體積(Shook, 2005)。通常為將 化合物(也可以是能量、病毒等可被追蹤識別的物質)加入注入井的流體中,隨之一 同注入地下利用示蹤劑在時間與空間的變化研究估計流體在地下的流動。為了要 得知地下儲集層之流體的流動性質,示蹤劑試驗分為兩大種類:第一種為單井實驗 (single-well),利用在井中注入額外的水體中所含的示蹤劑或是監測原本存在於水 體中的化學成分做注入時,以及一段時間後收取的水體相互比較,得到示蹤劑或是 化學藥品與圍岩交互作用的資訊,進而了解儲集層之構造、自然流體流向和注入流 體與圍岩的熱傳遞機制。第二種則為多井實驗,在由一口到多口注入井擠注適含量 化學混合物的水體作為示蹤劑進入地下後,於一口或多口生產井定時收取水體/並 經由不同的測試檢測水體中所含示蹤劑的量,以獲得平均滯留時間並推估掃略體 積。若有多口生產井的示蹤劑資料則可以建立掃略體積在不同方位上的分布差異 進而建立裂隙中流體流動幾何分布模型,通常應用於核廢料儲存、石油工程、地下 水汙染問題或是地熱儲集層之流體行為。而在研究地熱儲集層中,示蹤劑帶給我們 地下流體的流動路徑、井間的裂隙連通性或是對於尾水回注的降溫效果預測,都是 十分重要的(Bodvarsson et al., 1988; Chrysikopoulos, 1993)。

最常見的示蹤劑試驗方式為在一井投入示蹤劑並在多處生產井進行樣品回收, 藉此得到示蹤劑突破曲線,再利用此資訊了解生產井與注入井間的儲集層性質。 透過示蹤劑試驗得到的井間儲集層掃略體積、連通性以及流動幾何分布等儲集層 參數,便可以更好地對地熱區儲集層進行後續的管理像是回注井的設立、注水水量 的控制以及產能的控管。

示蹤劑選用

示蹤劑可以分成天然示蹤劑(natural tracers)和人工示蹤劑(artificial tracers)(圖 3-1)。天然示蹤劑為原先就存在於自然系統中的穩定或是放射性元素,用途做為地

14 doi:10.6342/NTU202204005 熱儲集層條件的指示,像是地熱流體的年代、流體來源、混合過程、流體與儲集層 岩石的反應、儲集層溫度變化和儲集層熱力學性質,最常使用的有環境同位素 (environmental isotopes)和放射性高貴氣體(radiogenic noble gases)。根據試驗目的的 不同所應用的試驗方式也會不同,但皆是測定示蹤劑濃度隨時間變化所得之曲線, 也就是突破曲線(breakthrough curve)。藉由不同的數值運算或是模擬估算得水文地 質之參數,以推斷地下裂隙構造或是流體流速。

根據 Chrysikopoulos (1997)的分類,分類如圖 3-1 所示。示蹤劑種類可以分成 天然示蹤劑和人工示蹤劑,其中若要了解儲集層當中的流動特性則傾向於使用人 工示蹤劑。人工示蹤劑之優點在邊界條件的決定上較天然示蹤劑簡單,且可以決定 注入時的訊號為可分辨的,再者還有較天然示蹤劑容易被識別;缺點則為其試驗時 長不能超過一年,且若沒辦法確定邊界條件的情況下無法使用,像是在沒有注入井 的情況下(Leibundgut, 2011)。

人工示蹤劑則可以被分成放射性型、穩定型、和反應型三種類型。放射型為使 用具有放射性且半衰期的時間為儲集層預期水力滯留時間三到五倍的元素,如氚, 利用偵測元素因衰變而產生的 gamma 或是 beta ray 了解儲集層特性。反應型則是 利用化學物質在不同相中皆具有的親和力,在與穩定型一同投放後,因為反應型示 蹤劑會出現在兩相之中,相較於穩定型示蹤劑只會出現在一相中,因此通常反應型 示蹤劑的平均滯留時間會較穩定型示蹤劑來得久。利用兩種示蹤劑的滯留時間差 值便能夠得到另一相的飽和度以及量值,又因為反應型示蹤劑有可能跟圍岩發生 吸附作用等反應而造成示蹤劑的消耗,利用這樣的性質也能估算含示蹤劑流體經 過的裂隙表面積性質。穩定型又稱為保守型,使用在流動時並不會與其他流體或是 其他介質(像是圍岩)發生反應的化合物並只會待在一相中,利用其不予任何物質發 生反應且不改變注入流體的性質條件下,在其他井收取樣本分析後,以了解地下性 質相是經過裂隙體積或是流徑的分布。



圖 3-1 示蹤劑分類(Chrysikopoulos, 1997)

示蹤劑的選用需要考慮的點有以下幾個,分別是在地熱條件下的 1. 化學穩定 性、2. 熱穩定性、3. 分析方法的偵測極限 (detection limit)、4. 自然背景值、5. 對生態環境之影響、6. 分析方法與價格等(Carleton et al., 1999; Shook et al., 2004)

- 化學穩定所考量的即是該物種是否因地熱流體的 pH 值而有所改變,同時 是否會與流體中其他離子、化合物和圍岩發生化學反應。
- 熱穩定性所考量的即是該物種的熱力學性質,其濃度在不同溫度條件下的 衰減程度,決定是否可作為穩定型的示蹤劑。
- 分析方法的偵測極限即考量分析該物種的方法所能得到的最小濃度值,同時也影響該物種作為示蹤劑時所估計的使用量。
- 自然背景值即考量該物種在儲集層中是否因自然條件而存在特定濃度,若 存在則可能影響分析結果。

對生態環境的影響即考量該物種是否致癌、是否汙染環境、對多數生物是否存 在致命毒性等。

茶磺酸類(Naphthalene disulfonate)常用作於地熱示蹤劑。本次實驗選用的是 2,6 -茶二磺酸鈉(2,6-Naphthalenedisulfonic Acid Disodium Salt),其詳細資料如表 3-1, 其符合熱穩定性佳、低偵測極限、低自然背景濃度、無吸收率(non-absorptivity)、 無毒性及低成本(Rose et al., 2001),因此適合這次的實驗。

表 3-1	Naphthalene-2,6-disulf	onic acid 特性(DrugBank	Online)
PROPERTY		VALUE	SOURCE
Water Solubility		0.341 mg/mL	ALOGPS
logP		-1.8	ALOGPS AL
logP		1.32	Chemitikon
logS		-2.9	ALOGPS AN ALOGPS
pKa (Strongest Acidic)		-2.8	ChemAxon
Physiological Charge		-2	ChemAxon
Hydrogen Acceptor Count		6	ChemAxon
Hydrogen Donor Count		2	ChemAxon
Polar Surface Area		108.74 Å ²	ChemAxon
Rotatable Bond Count		2	ChemAxon
Refractivity		63.75 m ³ ·mol ⁻¹	ChemAxon
Polarizability		26.03 Å ³	ChemAxon
Number of Rings		2	ChemAxon
Bioavailability		1	ChemAxon
Rule of Five		Yes	ChemAxon
Ghose Filter		Yes	ChemAxon
Veber's Rule		No	ChemAxon
MDDR-like Rule		No	ChemAxon

茶磺酸鹽類也有在國外實際使用的案例,像是美國的 Dixie valley、紐西蘭的 Ngatamarki 和菲律賓的 Mahanagdong 地熱田等。Rose(1998)實驗得到茶磺酸鹽類在 一個禮拜內於 300℃ 高溫環境下熱衰變量<5%,而清水地熱區最高溫為 225℃,因此 2.6 - 萘二磺酸鈉是適合此地熱區實行示蹤劑試驗。

示蹤劑投入量預估

第一次示蹤實驗(2021/03/05)所需最少示蹤劑量預估

本次預計投放示蹤劑的地點為宜蘭清水地熱區,圖 3-2 為本次實驗宜蘭清水 地熱井位置,由IC-9投放,IC-R1、IC-R5、IC-19、IC-21和清水溪露頭收取,深 度和井底溫度如表 3-2 所示。

在示蹤劑現地實驗設計(field -test design)中,分成兩個部分,第一部分為示蹤 劑部分,第二部分為資料分析部分。在第一部分中,需要考慮四項因素,分別為(1) 選擇示蹤劑種類、(2)估計所需示蹤劑的劑量、(3)符合法規要求、和(4)計畫如何灌 注及收取示蹤劑。

一般來說,注入示蹤劑的量越少越好,以減少(1)環境、(2)汙染物和(3)花費等問題,而2,6 NDS 並不會對環境造成影響,也不具毒性,價錢便宜,因此在量的控制上會比較彈性。

關於現地注入井中示蹤劑的量傳統上來說,有兩個方法可以決定需要多少示蹤劑才能量測到高於背景值,而獲得突破(breakthrough)的示蹤劑反饋(response)。

第一個方法為利用數值模擬的方式來進行灌注測試(injection test),第二個方法 為利用簡單分析等式(simple analytical equation),來預估在灌注井到生產井間儲集 層的掃掠體積(swept volume),利用此掃掠體積方法計算最少需要的示蹤劑量。其 計算式如下所示:

 $C_{min} = \frac{m_{inj}}{1.076D^2h\phi} \quad (\text{Admas et al., 1993})$

其中, $C_{min} = 示蹤劑最小濃度 \begin{pmatrix} 10^{3}kg \\ m^{3} \end{pmatrix}$, $m_{inj} = 最少所需示蹤劑重量$ (10³kg),D = 兩井間(觀測井到注入井)的距離(m),h = 儲集層厚度 = Σ 生產區域 (m), Ø = 孔隙率

參數部分Øh參考 Cheng et al.(2010)。為了計算清水地熱儲集層現地流體體積而 由干擾試驗資料所計算出的含水層的孔隙率-厚度乘積Øh = 3.8m(由井干擾實驗所 算出的,是由四口觀察井算出的Øh 平均而得的數值(IC-4, IC-9, IC-12, IC-14)) (Cheng et al., 2010), C_{min}則以 2, 6-NDS 的偵測極限的 2 倍 2ppb, D 的部分取 IC-9 到各井及露頭之距離分別算出最少所需示蹤劑重量後,加總可得最少所需示蹤劑 重量為 1.09kg。

第二次示蹤實驗(2021/08/25)所需最少示蹤劑的預估量

本次預計投放示蹤劑的地點為宜蘭清水地熱區,圖 3-3 為本次宜蘭清水地熱井 位置, 由 IC-9 投放, R1、R3、R5、IC-19、IC-21、清水溪露頭、IC-16、IC-13、 IC-05 收取,深度及井底溫度如表 3-2 所示。

同樣利用簡單分析等式(simple analytical equation),來預估灌注井到生產井間儲 集層的掃掠體積(swept volume), C_{min}因深度加深改取儀器偵測極限100倍100ppb, D的部分取 IC-9 到最遠的露頭之距離,最少所需示蹤劑重量後可得最少所需示蹤 劑重量為約27.64kg。

示蹤劑試驗施作

現地實驗流程規劃

估算示蹤劑質量需要先了解本次試驗目的為何,基於本次試驗是為了瞭解在 清水地熱區淺部(<1,000m)的井間裂隙連通性,因此在採樣時長、採樣頻率、採樣

> 18 doi:10.6342/NTU202204005

點位等部分會較其他較大型的地熱區有所不同。參考前人在清水地熱區的示蹤劑 試驗現地條件與實驗設計後詳細規劃如下:

示蹤劑試驗之採樣點位規劃與井深本次試驗所使用的所有點位位置如圖 3-2 所示, 而各點位之井深與洗井深度如圖 3-2 所示,各點位詳細資訊如表 3-2 所示,圖 3-2 中藍色框為注入井位置,紅色框為採樣位置,在選擇注入示蹤劑的位置時希望能在 注水點位之各方向皆有收取點,因此選擇在 IC-09 注入示蹤劑。



圖 3-2 第一次實驗清水地熱區注入及採樣點位



圖 3-3 第二次實驗清水地熱區注入及採樣點位

ID	緯度(北)	經度(東)	高程(m)	Azimuth	Dip	原始井深(m)	加深後深度(m)	洗井深度(m)	開篩襯管頂深度(m)
IC-09	24°36'48.78000"	121°38'13.36001"	320.67	0	-90	2079		1420	490
IC-16	24°36'31.97000"	121°38'19.19001"	329.54	0	-90	3000		1167	830
IC-13	24°36'30.17001"	121°38'19.41999"	309.54	99.567	-88.26	2020		1250	505
IC-05	24°36'29.21998"	121°38'19.81999"	329.42	99.567	-88.26	2005		1500	493
IC-19	24°36'44.42000"	121°38'12.27998"	300.5	0	-90	902	1227.46(2007)	891	200
IC-21	24°36'42.97000"	121°38'12.05001"	300.5	0	-90	1200			658
R1	24°36'46.65259"	121°38'14.39331"				337			120
R3	24°36'51.00332"	121°38'13.48027"				337			160
R5	24°36'48.12787"	121°38'14.28936"				500			160
清水溪露頭	24°36'46.839"	121°38'3.55989"							



圖 3-4 清水地熱區井體結構圖(豐宇綠能股份有限公司;李清瑞等人,2016;工業技術研究院,2015)

此次實驗為了解清水地熱井新鑽淺井(R1、R3、R5)和舊井間之淺層連通性,因此在 IC-09 號井洗井至 700 公尺時進行實驗。

在現地壓入示蹤劑前先在 IC-R5、IC-R1、IC-19、IC-21 和清水溪露頭採樣以進 行背景分析,而後先將預估 1.09kg(實際可投入 1.8kg)之 2-6 NDS 溶為 200ppm(所 需水量約為 9 立方公尺約 9000L),以 1.93kg/s(5ton/3day)之注水速率壓入含示蹤劑 之溶液,並由 IC-9 之管內體積*3 倍之水量將含示蹤劑之溶液壓入地層中。

在示蹤劑注入後1小時開始每一小時採一次水樣,預計以每小時一次的採樣頻 率連續採樣12小時後放緩採樣頻率,示蹤劑注入後第二、三天以每8小時的採樣 頻率採樣,第四、五天以每12小時的採樣頻率採樣兩第六、七天以每24小時的採 樣頻率採樣,總採樣時長為七天。

實驗所需的注水量、注水速率以及預計投放及收取地點等數據如表 3-3 所示, 此次預計做 IC-09 附近的淺井(<=1,000m),預計 2021/03/06 九點開始施作。預計投 放地點: IC-9,洗井到 700m 左右的深度,在 490m 以下皆有開篩孔。預計收取地 點: IC-19、R1、R3、R5 和清水溪露頭。IC-19&IC-21 已經連在一起,且考慮到於 IC-9 的北邊,在原先的規畫中並無收取點,因此決定將 IC-21 改為 IC-R3 以能夠將 所有方位皆有收取點。

在開始實驗前須於 tank、IC-19 、IC-21、R1、R3、R5 和清水溪露頭採樣一次, 以確定背景值。

鑽桿內徑(cm)	8
鑽桿體積(700m)(m^3)	3.518584
注水速率(ton/hr)	50
注水速率(ton/s)	0.013889
預計注入水量(ton)	10.55575
預計注水時間(min)	12.6669
所需 2-6NDS 濃度(ppm)	200
所需 tank 大小(m^3)	9

表 3-3 2021/03/06 現地數據

此次實驗於井深及採水點位皆有變化,為了解清水地熱區在深井上的連通性,因此在 IC-09 號井洗井至 1,420m 時規劃第二次示蹤劑試驗,以了解深井(>1,000m) 之井間連通性。

實驗所需的注水量、注水速率和預計投放及收取地點等現地資訊如表 3-4 所示,此次預計做 IC-9 和周圍的淺井,預計九點開始施作。

示蹤劑注入後第1小時開始每1小時採樣頻率採樣,六小時後以每2小時採 樣頻率採樣,12小時後放緩採樣頻率,示蹤劑注入後第二、三天以每8小時的採 樣頻率採樣,第四、五天以每12小時的採樣頻率採樣兩第六、七天以每24小時的 採樣頻率採樣,總採樣時長為七天,。

需容量大於井體積的水桶以利將含示蹤劑的水溶液順利推入地層而不殘留在 井中,注水量、注水速率以及預計投放及收取地點等數據如表 3-4 所示。

預計投放地點:IC-9,目前洗井深度為1,420m。

預計收取地點:IC-19&21、R1、R3、R5和清水溪露頭。目前 IC-19和 IC-21 的取 樣水已分開,所有方位皆有收取點。

在開始實驗前須於 tank、IC-19、IC-21、R1、R3、R5 和清水溪露頭採樣一次,以確定背景值。

鑽桿內徑(cm)	8
九號井內徑	3.518584
九號井體積(1420m)(m3)	50
鑽桿體積(1420m)(m ³)	0.013889
加壓系統注水速率(ton/hr)	10.55575
回注井注水速率(ton/hr)	12.6669
預計注入水量(ton)	200
預計注水時間(min)	9
所需 tank 大小(m^3)	10(底部抽不到)

表 3-4 2021/08/25 現地數據

採樣方法

野外採水方法

1. 將採水勺舀水並倒掉重複三次



利用兩台儀器(pH 儀及 TDS 儀)將探頭放入舀出的水中進行量測並記錄(若沒 有時間或無儀器可忽略)。

2. 將裝水樣的瓶子利用麥克筆寫上地點及時間(年/月/日/時/分)。

3. 將採水勺中的水樣倒入濾瓶上方的空間並開啟開關使用 20µm 之濾紙將水樣過 濾。

4. 過濾後將水倒掉後再重複4.

5. 將濾瓶中濾好的水樣倒入一點至裝水樣的瓶子中進行潤洗,重複三次。

6. 將濾瓶中的水樣倒入採水的瓶子中密封並保存。

示蹤劑試驗化學分析

高效液相層析儀(HPLC)

在野外收集完水樣後,需要進入實驗室進行水樣分析以確認水樣中的示蹤劑 濃度。現今的分析方法根據其使用儀器偵測極限已經可以達到 ppb 等級。

針對有機鹽類示蹤劑的濃度分析方法以萘磺酸鹽來說,根據 Rose(2001)適用 於高效液相層析儀(high-performance liquid chromatography, HPLC),所使用的方法 為逆向層析法,以下將詳細介紹:

原理

我們所使用的高效液相層析儀型號為 Knauer Optimas,自動進樣器型號為 Smartline 1050,螢光偵測器型號為 RF-20A,管柱型號為 KNAUER Eurospher II 100-5 C8 逆向管柱,用以分析可被激發之有機化合物,其偵測極限可達 1ppb。高效液 相層析儀為一利用樣品溶液在隨流動相流經固定相時,因兩者對於樣品的作用力 不同造成不同滯留時間而能分離不同樣品,被沖提出來經由檢測器形成峰值記錄 到電腦中。

各部件原理與操作方法

本實驗所使用之管柱為 KNAUER Eurospher II 100-5 C8 逆向管柱,使用之溶 劑為 100% 甲醇(methanol)與純水(pure water)作為移動相進行沖堤,其梯度如表 3-5 所示,藉由 2,6 萘磺酸鈉對於移動相及固定相之分配程度不同將其分離出來。 典型之 HPLC 分析系統所含部件為幫浦、進樣器、管柱以及偵測器。運作順序如圖 3-5 所示,以下將介紹各部件功能:

(1) 幫浦:

提供溶劑進入系統的驅動力,其要求為需要能提供穩定且連續的輸送動 力且不能出現脈衝現象,流速應控制在 0.1-10mL/min,過高會造成管柱損 毀。其材質通常為抗腐蝕性材料(不鏽鋼),本 HPLC 分析系統使用活塞式幫 浦。



圖 3-5 高效液相層析儀部件及運作流程(HPLC apparatus - WIKIMEDIA)

(2) 進樣器:

將樣品與溶劑混合後輸送進管柱的部件,分為手動與自動式,本系統使



用為自動式,使用六相閥(圖 3-6)將樣品與溶 劑混和後送入管柱,分為兩部分。第一部分為 載入樣品(黑色段),此階段溶劑會藉由幫浦之 驅動力進入六相閥內,樣品也會由自動進樣器 之針頭抽取進入六相閥的循環區(loop)中;第 二部分為將溶劑與樣品混和後送入管柱內。
(3) 管柱:

樣品通過管柱的分離模式主要有 4 種,分別是逆相層析、正相與吸附層 析、離子交換層析、空間排阻層析。其中大多數的分析使用逆相層析模式 (reversed-phase chromatography, RPC),該模式所使用的管柱充填非極性 物質,流動相則多為水的緩衝液加上水與有機溶劑混溶的溶液,相對高極性。 藉由分析物中各成分化合物在兩者之間的分布係數差異產生分離的效果。 極性較小者因與固定相的親和力較強而滯留時間較長,反之極性較大者因 與流動相親和力較強而滯留時間較短,故其分離的效果取決於兩相所選用 的物質。

(4) 偵測器:

一般常用的者為 UV 偵測器,此次欲分析之 2,6-NDS 具有螢光性,則可使用螢光偵測器,因其具激發(excitation)與放射(emission)兩種特徵光 譜故選擇性強,且分析濃度可達極低的微量層級(ppb)。

螢光光譜分析的原理主要與分子在不同狀態下的振動能階有關,在基態 與激發態中均包含不同振動能階,當物質從基態吸收能量至激發態中任一 個振動能階後,會與其他分子碰撞並逐次降至激發態中的最低振動能階,而 後繼續降低至基態振動能階的過程中便會放射螢光,在濃度較低的條件下, 螢光強度與濃度成正比關係,故可藉由螢光的偵測量化溶液中物種的分析 濃度。 繪製突破曲線

經由偵測器偵測到水樣中可被螢光激發產生訊號後,便會產生一峰值,將水 樣中的峰值與之前製作的標準品進行對比後便可以確定所要的目標峰值。因為在 濃度低的條件下,螢光強度與濃度會成正比關係,因此可以利用已知濃度之標準品 繪製檢量線後,計算而得到訊號強度所對應的濃度為多少。將每瓶水樣之採樣時間 對應到水樣中示蹤劑濃度後,繪製成圖,便可得到突破曲線,流程如圖 3-7 所示。



圖 3-7 HPLC 結果轉換流程

臺

HPLC 分析條件及分析方法

儀器分析方法依據先前經由標準品測試後,確定在其管柱條件下包含目標物流 過時間和目標物流過後的清洗時間,加總決定總時長後決定,清洗以純水做清洗, 而後回到初始條件達穩定以進行下一樣品分析,詳細如表 3-5 所示:

表 3-5 HPLC 之各項分析條件

	KNAUER Eurospher II 100-5 C8 逆向管柱				
管柱	長度 x (mm)	寬度	150x4		
滚 劑	移動相	溶劑A	溶劑 A 509		%甲醇
		溶劑 B		50%	%純水
	時間(min	n)	溶劑 A		溶劑 B
	0		50		50
	3		50		50
方法	3.02		0		100
	12		0		100
	12.02		50		50
	15		50		50
流速(mL/min)	0.7				
様品體積(μL)	20				
螢光偵測器波	吸收波	342			
長	長	572			
(nm)(Rose,	激發波	228			
1998)	長	220			

HPLC 對於 2,6-NDS 之測量平均數值與標準差

在高效液相層析儀中,2,6-NDS 是以螢光激發的能量型式被偵測到,所以最後計算時必須將訊號強度經由換算,才能代表清水地熱區中各點位水樣中的濃度 含量。高效液相層析儀的檢量線校正方面,本研究使用含有2,6-NDS的標準品, 濃度各為1、10、20、25 和 50 ppb。同樣以面積和濃度作圖,可以得到一檢量線。 在每次的流洗液更新時會重新做一次檢量線的校正。 表 3-6 為 HPLC 之實際分析之平均濃度與測量標準差,其中平均濃度的計算, 將標準品進入儀器分析三次後所得的結果,本研究因 2,6-NDS 之濃度極低,因此 在備置標準品時以1、10、20、25、50ppb 的濃度作為標準品。

藥品名稱	實際配置濃度 (ppb)	測量平均濃度 (ppb)	測量值標準差
	1	1.11	0.265
	10	10.67	0.399
2,6-NDS	20	20.66	0.497
	25	24.56	0.367
	50	49.20	0.616

表 3-6 HPLC 分析 2,6-NDS 之平均濃度與標準差

檢量線製作

分別調配不同濃度之 2,6-奈磺酸鈉之標準品(1、10、20、25、50、100μg/L), 並使用 HPLC 建立標準品之峰面積,再利用已知標準品之峰面積與濃度關係作圖, 檢測是否呈線性關係,結果如圖 3-8 所示,數據於附表 3-7,具有良好的線性關係, 因此使用其作為帶測品之檢量線。

表 3-7 HPLC 檢量線數據

標準品	訊號峰面積	濃度
編號	(a.u)	(µg/L)
1	0.207	1
2	2.19	10
3	4.36	20
4	5.32	25
5	10.6	50
相關係	0.000	
數(R ²)	0.222	



圖 3-8 HPLC 標準品之檢量線

示蹤劑試驗資料解析(tracer interpretation)

示蹤劑試驗定性分析(Tracer data qualitative interpretation)

示蹤劑定性分析目的為調查整體的形貌以及趨勢,依據示蹤劑突破曲線的特徵,包含峰值的位置、數量和突破時間等等,推斷(1)井間高透水性的通道、阻水層 (barrier)以及裂隙的存在、(2)不同層間的連結性以,和(3)流動速度差異,其中並不 包含任何儲集層參數項是掃略體積或是透水性的計算。

因每口生產井之流量並不相同,因此在進行各點位的示蹤劑突破曲線之比較前, 須將各點位之示蹤突破曲線資料進行標準化,標準化方法在動差分析方法會有詳 細說明。經標準化後的濃度經過修正後所呈現之相對濃度 E(t)才可以相互比較。利 用經標準化的示蹤劑突破曲線可更精準地對生產井與回注井間的裂隙分佈有,更 好的相關性和比較。

接著是為何會有多波峰的情形出現,在大多數的示蹤劑試驗中,具有連通性的示蹤劑突破曲線並不會產生多波峰的現象,而是一單純峰值。

Sheng et al.(2021)透過數值模擬的方式建立在裂隙主導物質傳輸中,裂隙的幾 何性質對於示蹤劑突破曲線的變化。以不同的流體流速、裂隙寬度和裂隙長度等, 進行模擬後得到三個不同的結果如圖 3-9 所示。其分別為流體流速對於示蹤劑突 破曲線的示蹤劑濃度、峰值、示蹤劑突破時間和峰寬皆有影響(圖 3-9a),流速越快 則獲得示蹤劑濃度越高、峰值越高、突破時間越早但峰寬越窄。裂隙通道寬度對於 示蹤劑突破曲線的獲得示蹤劑濃度、峰值和峰寬有影響(圖 3-9b),寬度越大則獲得 示蹤劑濃度越小、峰值越低且峰寬越寬;通道長度對於示蹤劑突破曲線的示蹤劑濃 度、峰值、示蹤劑突破時間和峰寬皆有影響(圖 3-9c),通道長度越長則示蹤劑濃度 越低、峰值越低、突破時間較晚且峰寬較寬。三者中以裂隙通道寬度的影響最不明 顯。

三者影響的結果如表 3-8 所示。當流速降低、裂隙通道寬度以及長度增加時, 示蹤劑濃度便會降低,連帶影響峰值和峰寬。除此之外,流速和裂隙通道長度也會 影響突破時間。

裂隙通道體積和裂隙通道的多寡分別會影響對應示蹤劑突破曲線的峰值和峰 數量, 而裂隙通道本身的阻力會影響示蹤劑峰的到達時間。在井間具有三個通道的 裂隙模型如圖 3-10 所示,所對應的示蹤劑突破曲線便會出現三個峰值,且各裂隙 通道的體積會影響峰值的高低。

Pérez et al.(2020)討論在 2-D 剖面且採樣頻率足夠密集的情況下,具有高度垂 直連通性的儲集層,所獲得的示蹤劑突破曲線會具有峰值數量少,且峰值受延散影 響較大而較為圓潤如圖 3-11 (a)中的紅色虛線所示。但在相同剖面但垂直連通性差 的儲集層,則會具有較多波峰代表不同流動通道中間具有流動障礙(flow barrier)如 圖 3-11(a)的藍色實線所示。圖 3-11(b)顯示了在具有速度差的情形下高垂直連通 性和低垂直連通性的示蹤劑突破曲線之差異。圖 3-11(b)藍色曲線呈現了多波峰且 每個峰值之間的連接性差,代表具有多個相互垂直連通性極差的通道存在,而紅色 虛線則是各通道之相互連通性極好的情況下可把各通道視為一個通道,而因總體 通道因合併造成寬度增大,便會使水流速度降低,其受到沿散影響較大,而呈現一 個鐘型的峰形貌。

Jing et al.(2022)透過數值模擬的方式對不同裂隙,如具有寬度和高度的平板狀 裂隙、管狀裂隙和孔洞狀裂隙(圖 3-12)等,利用對應的流速公式進行多裂隙連通與 否相應的示蹤劑突破曲線數值模擬,得到了如表 3-9 的示蹤劑突破曲線與可能裂 隙型態結果。其結果顯示示蹤劑的多波峰現象除了代表垂直剖面上的不同通道連 通性好壞外,也有可能是因為多條不連通通道之流速差造成不同多個峰值是否相 連,不同通道間的流速差異越大,則會使示蹤劑突破曲線的峰越分離,且裂隙形貌 若不為平板或是管狀也就是裂隙的截面積會出現改變則會造成峰尾端形成拖尾現 象(trailing phenomenon)。

總合而論,在定性分析中峰型貌包含獲得示蹤劑濃度、峰值、峰面積很大程度 的反映出井間流徑的複雜程度,這樣的複雜程度可能是由井間不同裂隙的流速差 異、裂隙形貌(主要為裂隙通道長度及裂隙通道體積)或是裂隙間連通性(透水率)所 提供。此外,水流藉由裂隙傳播越遠或是通道寬度增大則會受到延散作用的影響更 大,而造成突破曲線的峰延展呈現鐘型的峰形貌,如圖 3-13 所示。

表 3-8 裂隙參數對示蹤劑突破曲線的影響(整理自 Shook and Mitshell., 2009; Sheng et al., 2021)

-				
調整參數	獲得示蹤劑濃度	峰值	峰寬	突破時間
增加流體流速	+	+	-	· · 平 · · · · · · · · · · · · · · · · ·
增加通道長度	-	-	+	-
增加通道寬度	-	-	+	不影響
減少通道體積				_





裂隙通道長度



圖 3-10 多通道模型的(a)2-D、(b)3-D 剖面和對應的(c)示蹤劑突破曲線(Sheng et al., 2021)



圖 3-11 (a)水流速度在不同深度不均等;(b)水流速度在每個深度相似時的示蹤劑 突破曲線和在不同的垂直連通性下的變化,紅色虛線為高垂直連通性時的示蹤劑 突破曲線,藍色實線為低垂直連通性下的示蹤劑突破曲線(Pérez et al., 2020)



圖 3-12 裂隙數值模擬的種類(Jing et al., 2022)



圖 3-13 距離與沿散的關係,沿散會影響示蹤劑突破曲線的峰值(Field., 1999)

表 3-9 於裂隙儲集層中不同型態之示蹤劑突破曲線特徵(Jing et al., 2022)					
種類編號	峰型態(peak pattern)	峰數量	峰兩翼型態	裂隙與孔洞型裂隙結合	突破曲線範例
1	單一間瑞峰型態	1	兩翼對稱	單一平板狀裂隙或管狀裂隙	
2	單一緩降峰型態	1	峰左翼較鈄俏 峰右翼較平緩 具有明顯拖尾 (trailing phenomenon)	單一孔洞狀裂隙 平板狀裂隙或管狀裂隙結合 孔洞型裂隙	
3 多峰型態			各峰兩翼對稱	教大流速差之多平行平板狀 或管狀裂隙	
	<i>御<i>山</i>夕峰</i>	各峰左翼較陡峭 各峰右翼較平緩 各峰峰寬加寬	較大流速差之多孔洞狀裂隙		
	古庙夕收	各峰上半部兩翼對稱	較小流速差之多平行平板狀 裂隙或管狀裂隙		
	建 續多峰	各峰右翼具拖尾連接下一峰且峰寬加寬	較小流速差之多孔洞狀裂隙		

专 20 认到以做住屈力工习刑能力二呲剩灾地出的性

1919

滋臺

示蹤劑試驗定量分析(Tracer data quantitative interpretation)

示蹤資料定量分析相較於定性分析需要一系列對於灌注示蹤劑、流體流動和 儲集層狀態的假設,再藉由示蹤劑的時間歷史(time history)進行分析計算,進而得 到對儲集層的特性,如孔隙體積(pore volume)(Rose et al., 2004)或透水率異向性 (permeability anisotropy)(Gunderson et al., 2002),藉著這些參數建立井間儲集層中 的流動狀態下的連通體積,以及流徑的不均質度,以確立兩井在注水時的水力連通 狀況。

計算平均滯留時間與警間儲集層所掃略的體積之方法為動差分析方法,此方 法為依據示蹤劑突破曲線進行計算,將會在下一章節詳述。

至於儲集層之透水率異向性則可以透過滯留時間分布(Residence time distribution analysis)進行計算分析。Shook.(2003)和 Ahmed.(2019)提到在裂隙儲集層中,示蹤劑突破曲線的分布是因為經過的流徑中,具有不同的流線而會產生不同的突破時間,因此又將此分布稱為 Tracer response curve。利用突破曲線資料建立流動容量和儲存容量圖,以了解並描述兩井間連接的儲集層中,流線間在滲透率、 孔隙率和厚度等綜合影響流動的結果,也就是所謂不均質度,進而建立井間儲集層 間不同流線的快慢差異,也就是 Flow geometry,最後再計算勞倫斯常數,來比較 各點位與 IC-09 之間的流動通道之不均質程度,勞倫斯常數為一量化數值用來代表 井間儲集層的不均質程度,這項常數也可用在後續的滲透率分佈模型與真實示蹤 資料的對比(Fanchi, 2010),或是提供數值模型建立通道的分散性(Shook., 2004)。

動差分析法(Method of Moment)

動差分析法又稱 moment analysis,為利用示蹤劑濃度隨時間變化曲線(tracer response curve,又稱為突破曲線),進行估算在裂隙介質中流體的平均滯留時間和 掃略孔隙體積 (Shook and Forsmann, 2005),以了解示蹤劑粒子在儲集層中的滯留 時間,以及流體在儲集層中在不同流線中流動的差異,進而去描述並了解井間儲集 層連通體積和流動之幾合型貌。

此法最初被運用在示蹤劑描述流體在緊密堆疊層狀(packed-bed)和相連的反應 容器中之流動行為(Danckwerts, 1958),於反應容器的起點以脈衝方式或是持續注 入示蹤劑,並在終點收取含示蹤劑水樣,獲得示蹤劑隨時間的變化後,用以分析反 映容器中的流體流動行為,而後被廣泛運用在石油、地熱資源之示蹤劑試驗資料分析上。

其假設如下:

1. 注水(抽水)量為穩態(steady-state):

為了估算後續儲集層參數不會成為隨時間變化的函數而是固定的數值,因此注水(抽水)必須保持固定速率,進而保持流場為穩態。

2. 示蹤劑為理想且守恆(conservative)的流體:

因為估算儲集層參數的基礎為示蹤劑濃度,因此若示蹤劑會有其他原因像 是因圍岩的吸附作用而導致減少的話,便會產生低估儲集層參數的問題,因 此示蹤劑必須不影響流動性質(密度、黏滯度)且守恆。

3. 示蹤劑並不會被回注進儲集層中:

示蹤劑只能在一開始以極快的速度注入,使注入示蹤劑為脈衝之訊號,此假 設會在動差分析方法執行步驟與理論做詳細說明。

在進行示蹤劑突破曲線分析時會利用突破曲線的動差(moment),來建立可能的 流動模型。任何分布曲線的零級動差代表曲線下面積,應用於突破曲線則代表示蹤 劑回收量如 Eq.1 所示。一級動差代表的涵義為其整體分佈的平均為何,因此應用 到突破曲線上則代表井間的平均滯留時間。

$$\int_{0}^{\infty} E(t)dt = 1 \ (Eq. 1)$$

動差分析方法執行步驟與理論如下:

- 熱衰變(thermal decay)修正:示蹤劑本身若會產生熱衰變則需要進行此修正, 但因 2, 6-萘磺酸鈉的特性在清水地熱區並不會產生熱衰變(Rose et al., 2001), 因此不用進行此修正。
- 濃度標準化:此標準化函數由 Danckwerts(1958)所提出,為將示蹤劑濃度轉為 經過標準化的數值,又被稱為時間分布函數(age distribution function),以E(t) 表示經過單位轉換後得 Eq.2。

$$E(t) = \frac{C(t)q_{pro}}{M} = \frac{24 \cdot C(t)q_{pro}}{10^9 \cdot M} (Eq.2)$$

其中 E(t)單位為 1/day, C(t)代表在 t 時間所收到的原始示蹤劑濃度,單位為 mg/L, q_{pro}代表重量生產速率,單位為 ton/hr, 而 M 代表總注入示蹤劑重量,單位為 ton。

將濃度標準化有以下優點:

- (1) 解迴旋的前置準備:在進行示蹤劑試驗時會希望能以脈衝(pulse)訊號的方式注入示蹤劑,而標準化後的示蹤劑資料能夠將現地注入示蹤劑時的人為 誤差進行修正。
- (2)相同基準點:經過標準化後的示蹤劑資料可以將各井收到的資料在相同基 準點上,方便直接做比較。

若將標準化後的示蹤劑突破曲線進行積分則可得示蹤劑於該井之回收率,如 Eq.3 所示(Axelsson et al., 2005)。

$$recovery \, rate = \frac{\int_0^\infty q_{pro} \cdot c(t)dt}{M} = \int_0^\infty q_{pro} \cdot E(t)dt \cong q_{pro} \sum_{i=0}^\infty E(t) \cdot \Delta t \, (Eq.3)$$

其中 E(t)單位為 1/day, C(t)代表在 t 時間所收到的原始示蹤劑濃度,單位為 mg/L, t 的單位為 day, q_{pro}代表重量生產速率,單位為 ton/hr, 而 M 代表總注入 示蹤劑重量,單位為 ton。

3. 示蹤劑歷史解迴旋(Deconvolving the tracer history):此步驟目的為若回注井注 入的水體為由回注槽而來的話,可能會混染到其他井回傳的示蹤劑而產生示 蹤劑回注(tracer recycling)的現象,造成所採集到的示蹤劑濃度除了一開始收到 的示蹤劑外,還有因回注而重新出現的示蹤劑,而 moment analysis 的計算是 建立在塊狀(slug)示蹤劑注入的情況,因此需要將示蹤劑回注的因素所去除, 此步驟稱為示蹤劑歷史解迴旋。

我們所測量到的示蹤劑濃度數據為一開始的訊號加上回注的流體中含有的示蹤劑訊號迴旋而成,如 Eq.4 所示(Levenspiel, 1972)

$$\int_{0}^{t} E_{in}(t-\tau)E(\tau)d\tau = E_{app}(t) (Eq. 4)$$

由現地收取之示蹤濃度曲線分布 Eapp,為由回注之示蹤劑 Ein 和我們所需要的 真實示蹤劑濃度 E(t)所組成,根據 Robinson and Tester(1984)所述, Eapp= 收取 到的示蹤劑濃度經過標準化轉換的結果,而 Ein 則為回注含有示蹤劑的濃度, 由 Dirac delta function(瞬時以脈衝訊號注入的示蹤劑)和被注入水稀釋後的示 蹤劑所組成,floss代表稀釋係數,其為因注水和生產速率不同造成回注的示蹤 劑濃度上升的修正係數,如 Eq.11 所示。若沒有示蹤劑回注則設為 0,將 Eq.5 帶入 Eq.4 可得出 Eq.7,根據 Dirac delta function 積分後並重新整理 Eq.7 可得 Eq.8,便可由此式計算出我們所需要的真實示蹤劑濃度 E(t)。

$$E_{app}(t) = \frac{C(t)\rho q}{M_{inj}} (Eq.5a)$$

$$E_{in}(t) = \delta(t) + \frac{1}{1 - f_{loss}} \frac{C(t)\rho q}{M_{inj}} (Eq.5b)$$

$$f_{loss} = \frac{Q_p - Q_i}{Q_p} (Eq.6)$$

$$E_{app}(t) = \int_0^t \left\{ \delta(t) + \frac{1}{1 - f_{loss}} E_{app}(t - \tau) \right\} E(\tau) d\tau (Eq.7)$$

$$E(t) = E_{app}(t) - \frac{1}{1 - f_{loss}} \int_0^t E_{app}(t - \tau) E(\tau) d\tau (Eq.8)$$

其中 Eapp 單位為 1/day, E(t)單位為 1/day,

我們所獲得的示蹤劑濃度資料並不是連續的,因此在真實計算上將 Eq.8 離散化成 Eq.9,其中 i 等於第 i 個時間段,並用 excel 進行計算。

$$E(t) = E_{app}(t) - \frac{1}{1 - f_{loss}} \sum_{k=1}^{i=1} E_{app}(i - k)E(i) \cdot \Delta t \ (Eq.9)$$

若沒有示蹤劑回注,也就是說沒有將生產井的回收水進行回注,或是注水時間遠小於示蹤劑的滯留時間,而使得注入示蹤劑的訊號維持 Dirac delta function,便不需要進行此步驟。

但若在此方法中的 q 是在示蹤劑回收率約等於 100%時,便皆可代入注入 示蹤劑時的流量,若示蹤劑回收率不為 100%時,代表所投入之保守型示蹤劑 可能因為沿儲集層方向的層間流動(cross-flow),或是往鄰近於人工流場的停滯 區域(stagnant zone)擴散,因此在計算上會使用的是生產井的流量 qpro,而不是 注水的流量 qinj。

 4. 推算平均滞留時間:示蹤劑試驗不一定會像本次試驗於採樣時間內,獲得示蹤 劑歸零的時間。基於我們所需要的示蹤劑一次動差所代表的物理意義為一段 時間內的平均濃度,若沒有包含到未採集到但濃度不為零的資料,則有可能會低估後續的平均滯留時間,以及孔隙體積的預估計算。因此在採樣時間內未獲 得示蹤劑歸零或等同於背景值時,則需要對何時示蹤劑濃度歸零和其間所獲 得示蹤劑量值進行推算。

平均滯留時間為 Danckwerts(1958)提出的概念,如 Eq.10 所示,利用統計 學中的一次動差(first-order moment)方法和示蹤劑濃度來估算其值,用來描述 流體中不同示蹤劑粒子在井間儲集層中滯留的時間,同時其數值也是對之後 的井間儲集層之連通裂隙體積,和相關的流動幾何計算中的重要參數。

Eq.10 之分子與分母皆可以利用示蹤劑濃度開始降低的時間 t_b,分成 0-t_b 以及 t_b-∞兩個區段,如 Eq.11 所示,而示蹤劑濃度的降低通常呈現指數型遞減(Shook, 2005),因此又可以將示蹤劑濃度隨時間降低的關係視為一指數函數,如 Eq.12 所 示,a及b 皆為常數。將 Eq.12 進行一次微分後可得 Eq.13,將 Eq.12a 以及 Eq.12b 代入 Eq.11 後,便可以得到理論平均滯留時間為何,如 Eq.13 所示。

The mean residence time:
$$t^* = \frac{\int_0^\infty t \cdot cdt}{\int_0^\infty cdt}$$
 (Eq. 10)
 t^* with exponential fitting $= \frac{\int_0^\infty E(t)t \, dt}{\int_0^\infty E(t) dt} = \frac{\int_0^{t_b} E(t)t \, dt + \int_{t_b}^\infty E(t)t \, dt}{\int_0^{t_b} E(t) \, dt + \int_{t_b}^\infty E(t) \, dt}$ (Eq. 11)
 $\int_{t_b}^\infty E(t) \, dt = \frac{b}{a} e^{-at_b}$ (Eq. 12a)
 $\int_{t_b}^\infty E(t)t \, dt = \frac{b}{a^2} e^{-at_b} (1 + at_b)$ (Eq. 12b)
 $t^* = \frac{\int_0^{t_b} E(t)t \, dt + \frac{b}{a^2} e^{-at_b} (1 + at_b)}{\int_0^{t_b} E(t) \, dt + \frac{b}{a} e^{-at_b}}$ (Eq. 13)
 t^* with discrete data $= \frac{\sum_{i=0}^t E(t_i) \cdot t_i \cdot \Delta t}{\sum_{i=0}^t E(t_i) \cdot \Delta t}$ (Eq. 14)

其中 t^{*}單位為 day

利用 excel 將理論示蹤劑濃度隨時間降低的指數函數線與實際資料進行擬合後 便可以得知 a 以及 b 的數值。綜合前面資料便可計算出實際之平均滯留時間。 但此方法須確定實際示蹤劑資料在衰減時並不會有其他峰值產生,否則擬合結 果會與實際資料差異甚大,高估平均滯留時間,因此在多波峰的示蹤劑突破曲線上 並不適用自然對數型衰減的擬合。圖 3-14 為利用最小平方法擬合的理論示蹤劑突 破曲線之衰減值,其與真實示蹤劑突破曲線的相關係數只有 0.281,幾乎毫無關聯。 因此在此部分計算選擇使用示蹤劑原始資料離散化加總,如 Eq.14 所示。

5. 計算含示蹤劑流體流經之孔隙體積:含示蹤劑流體流經之孔隙體積計算可由 平均滯留時間計算轉換得到(Levenspiel, 1972)。而若是在開放的系統也就是同時有多口生產井或是注入示蹤劑並沒有被完全回收的情況下,含示蹤劑流體 的掃掠體積如 Eq.15a 所示(Pope et al., 1994),其中 m/Minj 代表一井的回收重量 比,可透過積分 E(t)所獲得,q代表各井的重量流量,ρ為流體之密度,兩者相 除可得各井的體積流量。將公式離散化後如 Eq.15b。





料,以IC-19 & 21 點位為例

$$V_p = \frac{m}{M_{inj}} \cdot \frac{q}{\rho} t^* = \int_0^\infty E(t) dt \cdot \frac{q}{\rho} t^* \text{ (Eq. 15a)}$$
$$V_p = \int_0^\infty E(t) dt \cdot \frac{q}{\rho} t^* = \sum_{i=0}^t E(t_i) \cdot t_i \cdot \Delta t \cdot \frac{q}{\rho} t^* \text{ (Eq. 15b)}$$

其中 V_P 單位為 m^3 , q 單位為 ton/hr, ρ 單位為 kg/m³

6. 計算流動幾何形貌:流動容量 - 儲存容量的概念在石油開採的書籍與文章中 已經被應用(Stiles, 1949; Schmalz and Rahme, 1950; Lake, 1989)來估算注入流體 後,能夠取得多少蘊藏於層面中的油藏,而後被應用於了解 2-D 垂直剖面上

> 41 doi:10.6342/NTU202204005

之裂隙中的流動幾何,提供儲集層中水流的潛在喜好流徑,進而推斷透水性好壞。利用流動與儲存的關係(flow vs. storage)描述儲集層的幾何特性,也就是說不同流速流動路徑占整體流動路徑的比例為何。例如流動的 60%只佔了孔隙 體積量的 5%代表說相對均質孔隙流速較快的流動路徑很少。

藉由估算儲集層中裂隙的幾何形貌包含儲存容量(Storage capacity, Eq.19)和 流動容量(Flow capacity, Eq.20)來建立流動容量 - 儲存容量圖。

所謂的幾何形貌可以想像成在 2-D 垂直剖面上之一獨立的流徑(Flow path), 流徑中含有多條具有相同長度但不同透水率、孔隙率、截面積和寬度,且均質 又彼此不相交的流線(streamline),而每條流線的流動速度與流線中流體體積和 流線長度成正比,這樣的關係可以由達西定律所描述如 Eq.16 所示。將每條流 線依據體積容量(Volumetric capacity,所被掃略到的流體體積)做降冪排列後可 以得到一個順序如圖 3-15 所示,而累積流動容量 Fi 便是排列後的流線中速度 比第 i 個還快的所有流線之速度總合/總速度合如 Eq.17 所示,而相應之累積儲 存容量 D i 則為比第 i 個還快的所有流線之孔隙體積/總孔隙體積如 Eq.18 所示。



圖 3-15 流徑中的流線做降冪排列,藍色長條代表其體積容量的大小,綠色長 條代表未被掃略到的流線部分

因此,由上述兩項參數所建立的 F-Φ diagram 之意義即為針對某一裂隙而 言,有多少比例的流體流量通過多少比例的裂隙孔隙體積,若兩者比值(斜率) 等於 1 時,即代表流體通過裂隙的比例均勻,反之不為 1 時則代表不均勻。

Darcy's law for single phase: $q_i = \frac{k_i A_i}{\mu} \frac{\Delta P}{L_i}$ (Eq. 16)

The incremental flow capacity of the *i*th fracture: $f_i = \frac{\sum_{i=1}^{j} k_i A_i / L_i}{\sum_{i=1}^{N} k_i A_i / L_i}$ (Eq. 17)

The incremental storage capacity of the *i*th fracture: $\Phi_i = \frac{\sum_{i=1}^{j} V_{pi}}{\sum_{i=1}^{N} V_{pi}}$ (Eq. 18)

42 doi:10.6342/NTU202204005 在示蹤劑試驗中,裂隙網路中的累積孔隙體積是與示蹤劑的平均滯留時間 (mean residence time)成比例的,其中平均孔隙體積便是利用平均滯留時間的關 係式所算出(Eq.15),因此儲存容量於示蹤劑的計算可改寫根據孔隙體積和平 均滯留時間之間的關係改寫為 Eq.19,代表在時間 t 時之流體流經裂隙孔隙體 積佔總流體流經裂隙孔隙體積的比例,而流動容量則可以用示蹤劑隨時間累 計的量,也就是示蹤劑的累積回收率來表示如 Eq.20 所示,代表有多少的示蹤 劑經由裂隙孔隙體積傳輸至生產井。利用流動容量為縱軸,儲存容量為橫軸便 可建立兩井間之流動容量-儲存流量圖,其範例如圖 3-17 所示。

The storage capacity:
$$\Phi(t) = \frac{t^* \text{ at time } t}{t^* \text{ at time infinity}} \cong \frac{\int_0^t \tau \cdot c d\tau}{\int_0^\infty t \cdot c dt}$$
 (Eq. 19)
The flow capacity in time t: $F(t) = \frac{\int_0^t c d\tau}{\int_0^\infty c dt}$ (Eq. 20)

流動容量-儲存流量圖的建立為立用先前所提到的不同流線依照其體積容 量做降冪排列後,每條流線皆會具有一組(F,Φ),又每條流線皆為均質,因此 每點間的流線中速度對相對應的儲存容量之增加量應為定值,將這些點依照 降冪排列相同順序放到以流動容量為縱軸,儲存容量為橫軸的圖中做圖,便可 以得到 F-Φ 曲線。

F-Φ 曲線的曲度代表了流徑中的流線之體積容量差距,也表示了其流徑不 均質的程度,曲度越大則代表越不均質,如圖 3-16 所示。





圖 3-19 利用 F-Φ 曲線決定層透水率之範例



圖 3-18 F-Φ 曲線的做圖與其斜率代表的意義

而流動容量根據 Eq.17 的定義為滲透係數乘以層厚的比值,而儲存容量根據 Eq.18 則可定義為層厚的比值,因此 F-Φ 曲線在之後的數值模擬中不同厚度層 便可以用來決定計算每一厚度之滲透率如圖 3-19 所示。

因此我們可以透過 F-Φ 圖了解不同流速(不同滲透率)裂隙佔整體流體流經 孔隙之比例,進而找出整體裂隙網路的幾何形貌與異質程度(degree of heterogeneity)如圖 3-18 所示。

 估計不均質度:建立 F-Φ 曲線後並無法直接進行比較,因此需要量化儲集層 之不均質度,其中常見之方法為計算勞倫斯常數(Lorenz coefficient)。 勞倫斯常數:此方法一開始為 Schmalz and Rahme(1950)修改並運用在石油 工程中建立勞倫斯曲線,用以表示隨儲集層厚度上升而累積的流動容量的變化。 Lake(1989)利用勞倫斯曲線定義曲線下與對角線之面積兩倍為勞倫斯常數; Shook(2005)將其常數之定義運用在 F-Φ 曲線,如 Eq.21 所示,以量化流徑之不 均質度,如圖 3-20 所示。流徑若不為均質則 F-Φ 曲線不為對角線(代表完全均 質之流徑),而介於 F-Φ 曲線以及對角線之間的面積兩倍則定義為勞倫斯常數,



圖 3-20 勞倫斯常數之代表含意,淺綠色部分 代表 F-Φ曲線與對角線之間面積

用以代表流徑之不均質度,若勞 倫斯常數越靠近1,則代表其流徑 越不均質,也就是說在這個流徑 中的流動極大部分來自於非常少 部分的流線,而為0則代表流徑 為均質,也就是說在這個流徑中 的流動是隨著孔隙增加而平均增 加的。

$$L_{c} = 2\left(\int_{0}^{1} F \, d\Phi - \frac{1}{2}\right) = 2 \cdot \left(\sum_{i=0}^{1} F_{i} \cdot \Phi_{i} - \frac{1}{2}\right) \, (Eq. \, 21)$$

此方法已經成功在 Rotokawa 地熱區(Addison et al., 2015)和 Ngatamariki 地熱區(Buscarlet et al., 2015)運用。

第四章、示蹤資料分析結果

示蹤劑現地實驗執行

採樣地點與現地記錄

第一次示蹤劑試驗(2021/03/06)採樣地點與現地記錄

當日 9:05 分將約 2.6kg 之示蹤劑放入裝水約 9.4 噸的水槽溶解後濃度約 277ppm,以注水速率每小時 47.2 噸灌入 IC-9 號井後,便不間斷以每小時約 50 噸 之注水速率持續由 IC-09 灌入。

詳細日程時段如表 4-1 所示:

表 4-1 第一次示蹤劑試驗採樣時間表

工作事項	時間
將 2,6NDS 倒入裝有 9.4 噸水的水槽內	9:30
以藍色塑膠管接上抽水馬達(兩組)代替攪拌棒循環 10 分鐘	9:36
將調製完成濃度約為 277ppm 之溶液以每小時 47.18 噸之速率開始灌入 IC-9 號井	9:46
示蹤劑溶液完全灌入,開始重新注水準備 chaser	9:58
開始以相同注水速率注入 chaser	10:15
開始第一次採樣	11:00
(11:14 R5 \ 11:19 R1 \ 11:25 IC-19 & 21 \ 11:48 R3)	11 • 00
開始第二次採樣	12:00
(12:14 R5、12:21 R1、12:23 山露頭、12:25 IC-19 & 21、12:48 R3)	12 • 00
開始第三次採樣	
(13:14 R5、13:21 R1(山露頭因蒸氣太大無法採取)、13:25 IC-19 & 21、13:	13:00
48 R3)	
開始第四次採樣	14:00
(14:14 R5、14:18 R1、14:25 山露頭、14:28 IC-19 & 21、14:48 R3)	11 00
第五次採樣	15:00
第六次採樣	16:00
第七次採樣	17:00
第八次採樣	18:00
第九次採樣(山露頭因為夜色加上蒸氣而無法採取)	19:00
第十次採樣	20:00
第十一次採樣	21:00
第十二次採樣	22:00



第二次示蹤劑試驗(2021/08/25)採樣地點與現地記錄

當日 9:05 分將約 30kg 之示蹤劑放入裝水約 10 噸的水槽溶解後濃度約 3*10⁶ppm 以注水速率每小時 7.7 噸灌入 IC-9 號井後其後便不間斷以每小時約 20 噸之注水速率持續由 IC-09 灌入。

詳細日程時段如表 4-2 所示:

表 4-2 第二次示蹤劑試驗採樣時間表

工作事項	時間
將九號井周圍積水抽走	7:06
開啟另一加壓系統準備灌入示蹤劑	7:30
將九號井回注閥門關閉,注入開始	7:32
注水完畢,重新開啟九號井回注閥門	8:50
R1(12:24) \ R5(12:32) \ IC-19(12:10) \ IC-21(12:04)	12:00
R5(13:03) \ R1(13:09)	13:00
R1(14:07)、R5(14:01)、IC-19(14:24)、IC-21(14:30)(有下雨)	14:00
R1(15:07) \cdot R5(15:01) \cdot IC-19(14:24) \cdot IC-21(14:30)	15:00
IC-05(15:31) \ IC-13(15:27) \ IC-16(15:20)	
清水溪露頭因雨太大無法採樣	
R1(16:11) \ R5(16:05) \ IC-19(16:17) \ IC-21(16:20)	16:00
R5(17:12) \cdot R1(17:05)	17:00
R1(17:59) \cdot R5(18:05) \cdot IC-19(18:15) \cdot IC-21(18:18)	18:00
IC-05(18:31) \ IC-13(18:28) \ IC-16(18:23)	
清水溪露頭因溪水太高無法採樣	
R1(20:05) \cdot R5(20:00) \cdot IC-19(20:12) \cdot IC-21(20:14)	20:00
IC-05(21:06) \ IC-13(21:02) \ IC-16(21:00)	21:00
R1(22:03) \cdot R5(22:00) \cdot IC-19(22:10) \cdot IC-21(22:12)	22:00

化學分析結果

將所有水樣進行分樣,進樣後經 HPLC 得到各水樣之訊號強度如附錄一所示,經由檢量線計算後可得各點位之突破曲線如圖 4-1 所示,各點位分別之突破曲線 如圖 4-3 所示。

示蹤劑試驗資料分析結果

示蹤劑試驗定性分析結果

根據化學分析結果所繪製的突破曲線如圖 4-1 所示,可發現經標準化之前的 各點位,第一次獲得突破偵測限度訊號分別為 R5:1.27 小時、R1:2.38 小時、IC-19 & 21:1.45 小時、R3:1.83 小時和清水溪露頭:4.03 小時;經標準化之後的各 點位(圖 4-2)第一次獲得突破偵測限度訊號時間則與經標準化之前之時間相同。

各點位經標準化之前與經標準化之後之數值分別以圖 4-3 和圖 4-4 所示,標 準化所使用之各點位平均流量如表 4-3 各點位之標準化所使用流量及來源所示。 經標準化之前各點位之峰值數量、對應出現時間和濃度值分別為 R5:出現四個峰 值,分別在第3.27、6.27、9.27和34.23小時,其所對應原始濃度為14.09、20.08、 29.54 和 8.11µg/L; R1:出現六個峰值,分別在 4.33、6.33、9.33、12.33、34.45 和 58.20 小時,其所對應濃度為 7.91、9.27、6.18、6.76、8.49 和 3.91µg/L; IC-19 & 21:出現4個峰值,分別在第5.5、8.50、11.5和28.63小時,其所對應之濃度為 7.24、20.85、6.08 和 4.83µg/L;清水溪露頭:出現5 個峰值,分別在 4.03、6.03、 8.03、10.03 和 35.22 小時,其對應之濃度為 7.53、19.11、17.37、10.33 和 7.63µg/L; R3:出現4個峰值,分別在2.83、7.78、12.78和27.98小時,對應之濃度為9.27、 12.84、19.01 和 7.72µg/L。在此部分經標準化後之峰值數量與出現時間與經標準化 之前皆相同,但在濃度值則有所不同,經標準化後的峰值相對濃度分別為 R5: 0.00369、0.00526、0.00773 [‡] 0.00212(1/day); R1 : 0.00307、0.00360、0.00240、 0.00262、0.00330 和 0.00152(1/day); IC-19 & 21:0.00166、0.00477、0.00139 和 0.00110(1/day);清水溪露頭:0.00051、0.00131、0.00119、0.00071和 0.00052(1/day); R3:0.00086、0.00118、0.00176 和 0.00071(1/day)。

可以發現經過標準化後各點位之相對濃度大小產生了改變,R5依然整體濃度 最高,R3與清水溪露頭整體濃度降到全部點位的最低,而R1則整體濃度變大, IC-19& IC-21 則與 R5 的差距加大,而由第二天的峰值能夠更明顯的看出上述的改變,因此若是用未經標準化之濃度進行定性解釋可能會產生相對流體流速以及裂隙通道形貌上的誤解,而因裂隙通道對示蹤劑突破曲線的影響並沒有流體流速以及流體長度來得大,因此在此忽略只討論流體流速以及流體長度的部分。

整體而言,各點位皆出現多個峰值,且峰值數量與突破時間相似,惟峰值具 有差異,若注入示蹤劑的速率相對於採樣時段為一脈衝訊號的話,代表各點位與 IC-09號井間之流體通道並不為一簡單通道,且部分通道可能位於相同深度之透水 層。

峰值部分:各點位在第一天的各峰形貌除R3以外皆呈快速的上升及下降,整 體峰值大小R5>R1>IC-19&21>R3>清水溪露頭。第二天峰值大小R1>R5>IC-19& 21>R3>清水溪露頭。經標準化後的清水溪露頭峰值顯著降低。

峰寬部分:各點位除 R3 外在第一天並無被拉寬的現象產生。R3 則有峰寬較寬 且有些微拖尾。各點位在第二天出現峰的峰寬均相同,且波動沒有第一天明顯。

突破時間:各點位峰初次突破時間分別為R5:1.27、5.27、7.27和22.88小時; R1:1.35、5.33、8.33、11.33、23.18和47.42小時; IC-19&IC-21:4.50、6.50、 10.50和23.28小時;清水溪露頭:3.03、5.03、7.03、9.03和12.03小時;R3:1.83、 6.78、11.78和22.75小時。各點位之峰突破時間在第一天皆相似,IC-19&IC-21最 晚出現峰突破時間,而R3在最後一個峰的初次突破時間最早。

	Qpro(ton/hr)	P. S.	Reference
清水溪露頭	7.40		ITRI, 2012
IC-19 & 21	24.80	IC-19+IC-21	陳亭潔,2019;李清瑞等人,2016
R5	28.36		豐宇綠能股份有限公司
R1	42.07		豐宇綠能股份有限公司
R3	10.00		豐宇綠能股份有限公司

表 4-3 各點位之標準化所使用流量及來源



圖 4-1 各點位未經標準化之突破曲線



圖 4-2 各點位經標準化之突破曲線

50











圖 4-3 各井之示蹤劑原始突破曲線

doi:10.6342/NTU202204005





圖 4-4 各井之示蹤劑標準化突破曲線

doi:10.6342/NTU202204005

示蹤劑試驗定量分析結果

將第一次示蹤劑試驗之突破曲線資料進行動差分析方法分析,因本次示蹤劑 試驗並無持續回注含示蹤劑之流體,且示蹤劑在清水地熱區之溫度下不會產生熱 衰變(Rose et al., 2001),因此只有進行對各井之示蹤資料進行流量修正及標準化, 並依照動差分析方法實行步驟與理論中的步驟計算示蹤劑之平均滯留時間、掃略 孔隙體積、建立 F-Ф 圖和推算不均質度。平均滯留時間、相應的掃略孔隙體積和 各點位所使用的平均流量資料來源如表 4-4 所示, IC-19 & IC-21 因在採樣時無法 分離各井之水樣,因此一起討論。

點位編號	t*(hr)	Vp (m^3)	Qpro(ton/hr)	Recovery(%)	Qpro Ref.
清水溪露頭	23.8	0.0990	7.40	0.414	ITRI, 2012
			24.80	3 17	陳亭潔,2019;李清瑞等
IC-19 and 21	18.7	0.652	24.00	5.47	人,2016
R5	20.1	1.22	28.36	6.07	豐宇綠能股份有限公司
R1	29.6	4.75	42.07	16.01	豐宇綠能股份有限公司
R3	19.2	0.195	10.00	1.01	豐宇綠能股份有限公司

表 4-4 各點位之平均滞留時間、掃略體積、回收率和平均流量

將各點位每點採收到的示蹤劑濃度對時間點進行流動幾何形貌地計算後,可 得到各點位之流動容量-儲存容量圖,也就是 F-Φ 曲線如圖 4-5 各點位之流動容 量-儲存容量圖所示。由於 F-Φ 曲線是計算各點的累積量值,因此資料點的密度會 影響曲線的曲度,在圖表中可以看出在一開始具有較多資料點的情況下其曲度較 為明顯,而在 Φ=0.2 之後因為採樣頻率放緩而使得資料點密度不同,導致曲線之

表 4-5 各點位之勞倫斯常數

	Lc
清水溪露頭	0.263
IC-19 and IC-21	0.327
R5	0.353
R1	0.329
R3	0.259

曲度並不如一開始明顯。

勞倫斯常數為量化 F-Φ 曲線的方式之一, 利用勞倫斯常數可以簡單地將各點位之曲 線進行不均值程度的比較。將各點位之 F-Φ 曲線進行勞倫斯常數計算後結果如表 4-5所 示。由表 4-5可得知各點位之不均質程度為: R5>R1>IC-19 & IC-21>清水溪露頭>R3。



圖 4-5 各點位之流動容量-儲存容量圖

第五章、討論

示蹤劑產生多波峰突破曲線之解釋



產生多波峰的可能性在示蹤劑試驗定性分析方法章節討論過。總結而言,裂隙 儲集層的示蹤劑試驗中使示蹤劑突破曲線產生多波峰之原因,為具有多條互不影 響或影響甚小之裂隙通道,使得含示蹤劑流體沿不同通道到達產生多個突破時間 及波峰,而使示蹤劑突破曲線呈現多波峰的現象。

本次示蹤劑試驗產生多波峰的另一原因可能為試驗規模的差異,下表為各示蹤 劑試驗之井間距離和採樣頻率,可以發現各示蹤劑試驗從井間距離到採樣頻率皆 與本論文不同且差距甚大,同樣都是裂隙為主要導水介質,但從圖 5-1 各地點示 蹤劑試驗之示蹤劑突破曲線可以發現隨著尺度不同,所呈現的示蹤劑突破曲線也 有所不同,距離越遠則曲線中的起伏與峰間的間隔便越不明顯,此現象可能為因採 樣頻率不同而使得所獲得的資料解析度不同所導致。採樣頻率越高,則能獲得的資 料解析度便越高,所呈現的曲線中起伏便有可能因為解析度的提高而被呈現出來 不被平滑化。

在操作部分若在注入示蹤劑時能夠以瞬時注入的方式,也就是說注入示蹤劑的時間遠低於採樣頻率,則也可以被視為瞬時注入,可以忽略注入示蹤劑的時間誤差 (Rose et al., 2004; Shook., 2005)。

除了距離與採樣頻率外,井深也有可能會影響示蹤劑突破曲線多波峰的情形, 圖 5-2 清水地熱區 IC-21 與 IC-19 之井間示蹤劑突破曲線(陳亭潔,2019)。陳亭 潔於 2019 年在清水地熱區以 IC-21 為注入井,IC-19 為生產井之示蹤劑突破曲線, 其以數值模擬方式推測其連通區域位於 600 公尺以下。本次試驗之深度範圍落在 600 公尺以上的淺井之示蹤劑突破曲線,與深度較深之點位和陳亭潔所得之示蹤劑 突破曲線之複雜程度有所不同,在採樣頻率和井間距離相似的情形下,可以發現深 度越深則示蹤劑突破曲線有相對峰值較單純的情形產生,推測可能是因為淺部之 破碎程度大於深部而導致裂隙通道單純化的結果。

綜合而論,示蹤劑突破曲線產生多波峰的原因可能為傳輸含示蹤劑流體的通道 不為一簡單通道。而會影響多波峰的可能原因有井間距離、採樣頻率和深度,其會 影響井間連通裂隙的多寡與示蹤資料本身的解析度。

表 5-1 各示蹤劑試驗之條件與類型						
地點	導水介質類型	井間最大距離(m)	採樣頻率	參考資料		
Underground Research Laboratory in Canada	裂隙型	約 400	1天到25天	Frost and Davison, 1995		
Dixie Valley	裂隙型	1010	2天到125天	Reed, 2007		
Beowawe	裂隙型	2300	2天到125天	Rose et al., 2004		





Underground Research Laboratory in

Canada 之示蹤劑突破曲線

(Frost and Davison, 1995)



Dixie Valley 之示蹤劑突破曲線 (Reed, 2007)



Beowawe 之示蹤劑突破曲線

(Rose et al., 2004)

圖 5-1 各地點示蹤劑試驗之示蹤劑

突破曲線



圖 5-2 清水地熱區 IC-21 與 IC-19 之井間示蹤劑突破曲線(陳亭潔, 2019)

示蹤劑突破曲線與點位間裂隙的關係

示蹤劑突破曲線的形貌告訴了我們含示蹤劑的水體在井間通道流動時因構造 和岩層水文性質相互影響下的資訊。因此,在最一開始的示蹤劑突破曲線形貌描述 與分析可以讓我們獲得井間儲集層的構造和透水性等基本概念。

示蹤劑突破曲線為在一生產井於不同時間進行回收後所獲得的濃度隨時間變 化線,在具有直接通道的情況下(具有單一透水率的均質層),示蹤劑突破曲線的形 貌和相對應代表的時間如圖 5-3 所示,而其可分成初次突破時間、峰值出現時間 和示蹤劑突破曲線寬度,分別代表最大流體速率、平均流體速率和流徑之沿散影響。 但若是在裂隙介質的情況下便會出現許多波峰的情形,如圖 5-4 所示。其示蹤劑 突破曲線之形貌所代表之意義便與單一峰值類型之示蹤劑突破曲線有所不同。



圖 5-3 典型示蹤劑突破曲線在快、中、慢速下的形貌(Axelsson et al., 2005)



58 doi:10.6342/NTU202204005

Süß (2005)利用數值模擬的方式首先建立三種類型的裂隙模型,分別為:塊狀 裂隙模型、單條裂隙模型和系統性分布裂隙模型後,設定流向、給定裂隙和基岩之 透水率後,進行模擬得到若流徑中的裂隙通道和流向所夾之角度,並不會對示蹤劑 突破曲線之形貌有太大影響。

Sheng et al.(2021)、Pérez et al.(2020)和 Jing et al.(2022)對示蹤劑突破曲線利用 模擬的方式得到影響示蹤劑突破曲線形貌(峰值、峰寬和示蹤劑突破時間)的因素, 包括有裂隙的流速差異、裂隙形貌(主要為裂隙通道長度及裂隙通道體積)或是裂隙 間連通性(透水率)。

由上述可知,示蹤劑突破曲線在裂隙介質中並不會只呈現單一波峰,而是會出 現多波峰的情形,且透過示蹤劑突破曲線可以帶給我們對於地下儲集層點位間裂 隙特性的資訊。

以下將由峰值、峰寬和示蹤劑突破時間討論示蹤劑突破曲線與點位間裂隙的關 係。

峰值部分:各點位皆呈現多波峰的情形。而各點位峰值以R5最大,其次為R1; IC-19&IC-21具有一個峰值較R1整體來得大,其餘則皆小於R1;R3則僅次於清 水溪露頭;清水溪露頭最小。依照峰值來看符合各點位與注入點,也就是IC-09的 距離分布,最遠的清水溪露頭具有最小的峰值,但距離與井深相近的R5及R3卻 具有不同的峰值差異,且距離較遠的R1及IC-19&IC-21與R3相比峰值卻是前二 者較高,說明含示蹤劑流體主要流向並不是往R3方向,而是往IC-19&IC-21、R5 及R1方向,而清水溪露頭因為距離過遠而獲得最少的示蹤劑。

峰寬部分:各點位除 R3 外在第一天並無被拉寬的現象產生,代表 R1、R5、 IC-19&IC-21 和清水溪露頭受到延散的影響程度很低。R3 則有峰寬較寬且有些微 拖尾,代表其裂隙通道中寬度相較其他點位可能較大或是傳輸距離較遠,而受延散 影響程度較大。此差別表示 IC-09 和 R3 之間的裂隙通道相較於其他點位的裂隙通 道較長或是寬度較寬。而在第二天後因傳輸距離較遠各點位之出現峰,皆有受到沿 散影響而出現較峰寬較寬的現象

示蹤劑突破時間:各點位之示蹤劑突破時間除清水溪露頭外,基本上都接近注 入井,但 IC-19 & IC-21 在初次出現示蹤劑訊號後並沒有顯著峰值出現,可能是受 到採樣地點的限制導致示蹤劑訊號不明顯所致。其中又以 R5、R3 以及 R1 的各峰 值突破時間相似程度高,惟 R1 在第二天後多又有另兩點位一峰的突破時間, R5 少

59

了 12.84 小時和另兩點位出現峰的突破時間,R3 少了 4.8 小時和另兩點位出現峰 的突破時間。可能代表三淺井對於 IC-09 而言,走的裂隙通道有些差異。但到達三 淺井的速度並無太大差異;主要含示蹤劑流體到達 IC-19 & IC-21 所需要的時間, 則長於到達三淺井的時間,甚至長於到達清水溪露頭的時間。

回收率也是檢驗各點位與注入點之連通性的一個直接證據。各點位的示蹤劑 回收率皆低,最大到最小分別為 R1>R5>IC-19 & IC-21>R3>清水溪露頭。而這樣的 低回收率在裂隙型儲集層中,通常與開放連通裂隙面積(open connected fracture)有 關,Kumar et al. (2018)提到開放連通裂隙面積越小,則出現的示蹤劑突破曲線會出 現多波峰不規則的情形,且回收率也會隨之降低。也就是說由回收率來看,各點位 間的連通性為 R1>R5> IC-19 & IC-21>R3>清水溪露頭。

綜合而論,各點位間皆具有多條傳輸含示蹤劑流體的裂隙通道,包含第一天的 峰群和各點位皆有出現的第二天受沿散影響較大的峰,R1 則在第二天後還有一峰 出現,示蹤劑突破時間則可以分成三組,分別為 R1、R3、R5 一組、IC-19&IC-21 為一組與清水溪露頭。淺井的突破時間早於深井的突破時間,清水溪露頭則最晚出 現突破時間,代表整體含示蹤劑流體流向可能更偏向往淺部移動。由峰值則可推斷 整體含示蹤劑流體流向以往東南而非往北。其中以 R1 擁有最好的與 IC-09 之連通 性,且整體示蹤劑突破曲線之形貌也顯示了 R1 具有較多元的裂隙通道,可以傳輸 含示蹤劑流體,整體各峰並沒有顯著的高低起伏,代表傳輸流體的各裂隙通道並沒 有太大的透水性差異。R5 則擁有各點位間第二好和 IC-09 井間連通性,其第一天 峰值皆大於 R1, 第二天的峰值小於 R1, 綜合示蹤劑突破曲線之形貌來看, 其主要 傳輸流體之裂隙通道較 R1 來得集中,且各裂隙通道間具有較 R1 來的大的透水性 差異,因此各峰峰值才會出現落差。IC-19&IC-21 擁有各點位間第三好與 IC-09 井 間連通性,且其示蹤劑突破曲線之形貌為所有點位中最為單純的,且具有最大的峰 值差距,最高峰值大於 R1,代表 IC-19&IC-21 與 IC-09 之裂隙通道間具有大的透 水性差異,可能存在主要的裂隙通道,但其通道相較於淺井點位來說依舊較小,也 就是說 IC-19& IC-21 與 IC-09 間存在較為單純之裂隙通道,但整體而言含示蹤劑 流體並不以往南向深度流動為主要路徑。R3 則僅有比清水溪露頭還要高與 IC-09 之井間裂隙連通性,且其示蹤劑突破曲線之形貌為僅次於 IC-19 & IC-21 的單純, 第一天之峰與峰間的間隔較其他點位大,且峰值差距不明顯,綜合示蹤劑突破曲線 型貌來看,其裂隙通道雖沒有明顯的透水性差距,但除了與清水溪露頭以外的點位

60

相比較不直接,連通性以井的點位而言來得最差。清水溪露頭具有最差與 IC-09 間 的連通性,其示蹤劑突破曲線之形貌之複雜程度僅次於 R1,且可能因為距離因素 使得各峰值皆小,因而差異不明顯,綜合示蹤劑突破曲線型貌來看其裂隙通道能極 小,幾乎沒有連通。

總結來看,可將上述的性質綜合繪製出各點位與回注井之水力連通關係如圖 5-5,圖中點位旁標註之數字為井底深度。各點位中以 R1 與 IC-09 之間有最佳的井 間連通性,且其裂隙通道相較於其他點位來說出現最多波峰的情形,代表可能具有 多條相似透水性的裂隙通道,能夠傳遞大量的含示蹤劑的流體。R5 則因距離最近 且與 R1 對 IC-09 同向的關係,同樣也具有較好的連通性,其裂隙通道間呈現了較 大的透水性差異,但皆能傳輸相對於其他點位較多的含示蹤劑流體。IC-19 & IC-21 則具有比 R5、R1 還要差的與 IC-09 之間的裂隙連通性,其裂隙通道也呈現較大的 透水性差異,且整體形貌相對單純,代表 IC-09 在傳輸流體選擇的通道上深井較淺 井單純。又因整體回收量較 R1 低,而 R1、IC-19 & IC-21 兩者與 IC-09 之距離相 近,推測含示蹤劑流體之流向偏好往淺部流動。R3 與 R5 及 R1 皆為淺井,但 R3 的連通性與另外兩井之落差大,推測含示蹤劑流體之流向偏好向南流動。清水溪露 頭推測因與 IC-09 距離較其他點位遠,且之間還有斷層經過,使得其回收率極低且 示蹤劑突破曲線之峰值普遍偏低。



圖 5-5 各點位與回注井之水力裂隙連通關係,點位旁標註數字為井底深度
井間裂隙通道之複雜程度

井間裂隙通道的連通性除了透過示蹤劑突破曲線的型貌外,還可以透過量化的 方式獲得井間的聯通情況,如掃略體積和井間流體流動的不均質度,以了解井間裂 隙通道的特性(Shook, 2005; Shook, 2009)。

本次試驗所得之示蹤劑突破曲線為具有多波峰的情況,因此在進行動差分析的 計算時需修正,詳細如 3.4.3 章節所述。經過計算所得結果如 4.3 章節所述,可以 發現各點位在掃略體積上具有明顯差距,且其大小之排序與回收率排序相同,也就 是說掃略體積所指示的現象與回收率相同,皆是對於連通性好壞的描述,掃略體積 則更直接的表示了井間的連通裂隙的總量有多少。(三淺井中距離最近的 R5 和 R3 皆不是擁有最大的掃略體積,反而是距離較遠的 R1 獲得最大的掃略體積,)

而除了井間連通裂隙總體積外,動差分析方法還提供了井間裂隙之複雜程度, 也就是不均質度的計算,不均質度的參數提供了井間儲集層中的流動系統非常好 的了解(Anyiam et al., 2018)。

F-Φ 曲線為描述井間裂隙通道之不均質度的方法,利用流徑中多條流線累積之 速度和累積孔隙體積作圖,以了解井間連通裂隙之流動關係。又因各流線可視為一 條獨立之連通裂隙,將流線視為相對應之連通裂隙,則 F-Φ 曲線便可以直接表示 井間連通裂隙之流動與所需要的裂隙體積,進而理解井間流動的系統。

五個點位的 F-Φ 曲線結果如圖 4-5 所示,可以發現各點位之曲線型貌差異並 不是很大,將各點位之曲線面積量化為勞倫斯常數後如表 4-5 所示,得到各點位 之不均質度確實沒有太大的差距,整體介於 0.259-0.353,以 0.3 作為分界可以分 成兩大群,分別是勞倫斯常數高於 0.3 的 IC-19 & IC-21、R5、R1 以及低於 0.3 的 R3、清水溪露頭。兩群在方位上勞倫斯常數高於 0.3 皆位在注入井的東南方,低 於 0.3 則位於西方以及北方。 Ingebritsen and Sanford (1999)提到描述層間不均質度的兩個名詞分別為異質 性(Heterogeneity)和異向性(Anisotropy),前者為描述不同點的透水性差異,後者 則為描述不同方向的透水性差異,兩者綜合可以對透水性差異有很好的描述,如 圖 5-6 所示,可以看出就算是同一方向也可能具有透水性差異,此現象也符合在 裂隙系統中透水性的差異,因此利用異質性來描述裂隙儲集層的透水性差異是比 用異向性的描述還要更合適的。



圖 5-6 兩名詞綜合描述透水性差異

裂隙儲集層中若異質性越大代表在不同點間的透水性差異越大,根據 Shook and Forsmann (2005),異質性的大小也代表了流徑中流線間的透水性差異,其值越 大代表每條流線之透水性差異越大。而這樣的透水性差異也可以從示蹤劑突破曲 線看出,五個點位中 R1、R5 及 IC-19 & IC-21,相比於 R3 和清水溪露頭在示蹤劑 突破曲線中的峰值差或是峰突破時間的差異都是較大的,表示 R1、R5 和 IC-19 & IC-21 之連通裂隙通道具有較大之透水性差異,而此現象也與表 4-5 結果相符合。 在 5.2 章節提到推測往深井之連通裂隙較往淺井之連通裂隙單純,但此現象並沒有 在勞倫斯常數上體現出差異,可能是因為影響勞倫斯常數的因素為示蹤劑突破曲 線之整體形貌複雜度,也就是說除突破時間外還有峰值差異的影響,而 IC-19 &IC-21 之峰值差相較於 R5 或是 R1 都還要來得大,縱使峰數量較少還是使勞倫斯常數 值增大,而R3在淺井中甚至與深井相比的勞倫斯常數較小,可能原因為其示蹤劑 突破曲線在經由流量修正後之峰值差值太小,因此對勞倫斯常數的值影響降低,使 得其值與示蹤劑突破曲線分析之結果不同。

因此總結來說,F-Ф 曲線與勞倫斯常數確實可以直接顯示各點位間的不均質 性,且因其考慮的方面為整體示蹤劑突破曲線形貌包含峰數量、峰值差異和突破 時間,因此最後計算得到的勞倫斯常數會與僅觀察示蹤劑突破曲線結果有所不 同。

清水地熱區井間裂隙模式

綜合前述討論清水地熱區之井間連通裂隙可以發現各點位回收率、掃略體積、 勞倫斯常數等數值,皆具有於 R1、R5 及 IC-19 & IC21 皆大於 R3 和清水溪露頭, 表示在清水地熱區 IC-09 於井深 700 公尺與各點位之連通性來說,往東南方較往西 方及北方還要來得好,其中又以 R1 的連通性最佳,R5 次之,IC-19 & IC21 為三者 中最小;R1、R5 和 IC-19 & IC-21 皆具有較複雜的連通裂隙系統,而綜合示蹤劑 突破曲線來看 R1、R5 和 IC-19 & IC-21 的連通裂隙系統不同處,在於 R1 為較多 的裂隙通道,而 R5 和 IC-19 & IC-21 則屬於具有裂隙通道間較大透水性差異部分; 淺井部分的 R1、R5 和 R3 則出現相比於 IC-19 & IC-21 較多波峰的狀況,推測可 能由 IC-09 往淺井方向具有較豐富的連通裂隙通道。

綜合在 2.1.2 章節所提到的清水地熱區現地裂隙系統,清水地熱區現行有兩種 現地區域裂隙量測方法,分別是地表線型及溫泉露頭裂隙量測,其結果如圖 5-7(曾 長生,1979;羅偉,2012)和岩芯量測,如孫天祥與葉恩肇,2014;Luetal.,2018。 地表線型與溫泉露頭量測結果共有兩組破裂面為 N10-15°W、向東傾 60-80° 和在 清水溪斷層沿線最為明顯的 N10-30°E、向西傾 10-30°。岩心量測的結果則為 N10-20°E,高角度向東傾之裂隙可能為近期的導水裂隙。地表線型與溫泉露頭裂隙量測 的優點見為在深度上有良好的控制點位,缺點則是成本較大,較難獲得數據而確定 延伸性。將上述兩種量測方法所得到的結果與本次示蹤劑試驗,所得出之清水地熱 區之井間連通裂隙綜合討論,其結果如圖 5-9 所示,可發現在淺井的部分具有較 好的連通性,其方位點位與注入點之方位較符合地表線型與溫泉露頭裂隙量測 實與兩種量測方式獲得之位態結果不同。位於 IC-09 西南方之 IC-19 & IC-21 點位 則也有較好的連通性,其方位同時符合地表線型與溫泉露頭裂隙量測與岩心量測 的結果。深井與淺井具有的回收率差異,從兩種不同的裂隙量測結果也可以看出, 地表線型與溫泉露頭裂隙量測具有較多組裂隙,但岩心裂隙量測在 600-800 公尺間 卻較單純,代表在淺部到地表的部分較為破碎,而到了較深的位置則導水裂隙變得 相對單純,也就是說熱水在深部傳遞時的裂隙通道較為單純,但往淺部則可能因較 為破碎而使得熱水通道變得較為複雜,也因此 IC-19 & 21 所獲得的示蹤劑回收率 和示蹤劑突破曲線複雜度低於 R1 和 R5。

IC-09 和 R3 的低連通性可能原因有 1. 破碎程度不夠高、2. 存在流動障礙或 是 3. 採樣問題。而 1. 可以由圖 5-7 和圖 5-8 看出清水地熱區之地表及井下裂隙 皆是豐富的,而 3. 採樣問題可能導致的像是因流量較低引起的濃度稀釋問題可 以透過標準化來進行修正。因而推測在 IC-09 和 R3 之間可能因為具有流動障礙 的存在而導致連通性低,這個障礙可能是岩層破碎但破碎裂隙間並未連通,或是 兩者之間有近乎垂直於兩者方向的構造阻隔,像是劈理。

IC-09 與清水溪露頭的低連通性可能原因為1. 兩點距離較遠以及河水稀釋或 是2.G 斷層的破碎帶並無經過兩點。IC-09 到清水溪露頭間經過清水溪,可能導 致含示蹤劑水體在往淺部移動時遭到大量河水稀釋,且清水溪流量在所有點位中 為最低,使得示蹤劑濃度降低最為顯著,而使得結果呈現連通性差。另一可能為 兩點之間並無明顯的破碎帶存在,而首次在中國石油公司地熱井地下地質報告出 現的G斷層的破碎帶並未連接兩點位,因而導致兩點間的低連通性。



圖 5-7 清水溪沿岸溫泉露頭裂隙位態(羅偉, 2012)



圖 5-8 IC-21 600-800 公尺岩芯裂隙位態(孫天祥與葉恩肇, 2014)



圖 5-9 清水地熱區之井間連通裂隙模式

第六章、結論

本研究透過於清水地熱區以 2,6-NDS 作為示蹤劑,於 IC-09 灌入,於 R1、R3、 R5、IC-19 & IC-21 和清水溪露頭實行示蹤劑試驗。根據示蹤劑突破曲線結果進行 定性及定量分析後,與前人之現地裂隙量測比較,綜合討論得到以下清水地熱區淺 部(<1,000 公尺)之井間裂隙連通性如下所述:

- 清水地熱區淺部之井間連通裂隙整體較為複雜,其中IC-09 往東南方之連通性 大於往西或是往北之連通性,而點位中淺井部分相比,於深井部分連通性要為 更好。
- F-Φ曲線與勞倫斯常數體現了 IC-09 在往東南方向的連通裂隙複雜程度大於往 北與往西。
- 綜合前人之現地裂隙量測基本點位與灌注點之方位皆吻合,而示蹤劑試驗則提供更進一步的淺井與深井之連通裂隙之特性。
- 综合而言,示蹤劑試驗提供了較井測與地質調查等方法更詳細的井間裂隙連通 資訊,未來進行清水地熱區之裂隙系統模擬時提供實際且良好的數據可供參考, 建置更為精確的連通裂隙系統,以利日後之電廠之回注井設置及管理有更好的 參考。

第七章、參考文獻

- Adams, M., Moore, J., Benoit, W., Doughty, C., & Bodvarsson, G. (1993). Chemical tracer test at the Dixie Valley geothermal field, Nevada. Geothermal Reservoir Technology research program.
- Addison, S., Winick, J., Mountain, B., & Siega, F. (2015). Rotokawa reservoir tracer test history. Proc. NZ Geothermal Workshop,
- Ahmed, T. (2019). Chapter 4 Fundamentals of Rock Properties. In T. Ahmed (Ed.), Reservoir Engineering Handbook (Fifth Edition) (pp. 167-281). Gulf Professional Publishing. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813649-2.00004-9
- Axelsson, G., Björnsson, G., & Montalvo, F. (2005). Quantitative interpretation of tracer test data. Proceedings world geothermal Congress,
- Axelsson, G., Stefánsson, V., & Xu, Y. (2003). Sustainable management of geothermal resources. Proceedings of the International Geothermal Conference,
- Bodvarsson, G. S., & Stefansson, V. (1988). Reinjection into geothermal reservoirs. In Geothermal Reservoir Engineering (pp. 103-120). Springer.
- Buscarlet, E., Moon, H., Wallis, I., & Quinao, J. (2015). Reservoir tracer test at the Ngatamariki geothermal field. Proceedings 37th New Zealand Geothermal Workshop,
- Carleton, G. B., Welty, C., & Buxton, H. T. (1999). Design and analysis of tracer tests to determine effective porosity and dispersivity in fractured sedimentary rocks, Newark Basin, New Jersey (Vol. 98). US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Chang, C. R., Ramey Jr, H., & Kruger, P. (1979). Well interference test in the Chingshui geothermal field.
- Chang, P.-Y., Lo, W., Song, S.-R., Ho, K.-R., Wu, C.-S., Chen, C.-S., Lai, Y.-C., Chen, H.-F., & Lu, H.-Y. (2014). Evaluating the Chingshui geothermal reservoir in

northeast Taiwan with a 3D integrated geophysical visualization model. Geothermics, 50, 91-100.

- Chen, C.-Y., & Sanyal, S. K. (2006). Power generation potential at Chingshui geothermal field, Taiwan. Proceedings of Thirty-first Workshop on Geothermal Reservoir Engineering,
- Cheng, W., Kuo, T., Su, C., Chen, C., Fan, K., Liang, H., & Han, Y. (2010). Evaluation of natural recharge of Chingshui geothermal reservoir using tritium as a tracer. Radiation measurements, 45(1), 110-117.
- Chiang, C.-W., Hsu, H.-L., & Chen, C.-C. (2015). An investigation of the 3D electrical resistivity structure in the Chingshui geothermal area, NE Taiwan. TAO: Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 26(3), 269.
- Chrysikopoulos, C. (1993). Artificial tracers for geothermal reservoir studies. Environmental Geology, 22(1), 60-70.
- Chrysikopoulos, C. (1993). Artificial tracers for geothermal reservoir studies. Environmental Geology, 22(1), 60-70.
- Danckwerts, P. (1958). The effect of incomplete mixing on homogeneous reactions. Chemical Engineering Science, 8(1-2), 93-102.
- Fan, K. C., Kuo, M. T., Liang, K. F., Lee, C. S., & Chiang, S. C. (2005). Interpretation of a well interference test at the Chingshui geothermal field, Taiwan. Geothermics, 34(1), 99-118.
- Fanchi, J. R. (2010). 4 Porosity and Permeability. In J. R. Fanchi (Ed.), Integrated Reservoir Asset Management (pp. 49-69). Gulf Professional Publishing. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382088-4.00004-9

- Field, M. S. (1999). The QTRACER program for tracer-breakthrough curve analysis for karst and fractured-rock aquifers (Vol. 98). National Center for Environmental Assessment--Washington Office, Office of
- Frost, L., & Davison, C. (1995). Summary of the fracture zone 3 groundwater tracer test program at the Underground Research Laboratory.
- Gunderson, R., Parini, M., & Sirad-Azwar, L. (2002). Fluorescein and naphthalene sulfonate liquid tracer results at the Awibengkok geothermal field, West Java, Indonesia. Proceedings, 27th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, California, January 28,
- Ingebritsen, S. E., & Sanford, W. E. (1999). Groundwater in geologic processes. Cambridge University Press.
- Jing, C., Zhang, S., Li, L., Wang, J., Chen, B., Tian, B., Dai, Z., & Gao, L. Rapid identification of interwell fracture-cavity combination structure in fracture-cavity reservoir based on tracer-curve morphological characteristics. Frontiers in Energy Research, 544.
- Jing, C., Zhang, S., Li, L., Wang, J., Chen, B., Tian, B., Dai, Z., & Gao, L. (2022). Rapid identification of interwell fracture-cavity combination structure in fracture-cavity reservoir based on tracer-curve morphological characteristics. Frontiers in Energy Research, 544.
- Kumar, A., & Sharma, M. M. (2018). Diagnosing fracture-wellbore connectivity using chemical tracer flowback data. SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference,
- Lake, L. W. (1989). Enhanced oil recovery.
- Leibundgut, C., & Seibert, J. (2011). Tracer Hydrology. In (Vol. 2, pp. 215-236). https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53199-5.00036-1

- Levenspiel, O. (1972). Experimental search for a simple rate equation to describe deactivating porous catalyst particles. Journal of Catalysis, 25(2), 265-272.
- Lu, Y.-C., Song, S.-R., Lin, P.-H., Taguchi, S., Wang, C., Lai, Y.-M., Peng, T.-R., & Lee,
 H.-F. (2020). Thermal Fluid Changes after Operating a Geothermal System: A Case
 Study of the Chingshui Geothermal Field, Taiwan. Geothermics, 87, 101878.
- Lu, Y.-C., Song, S.-R., Taguchi, S., Wang, P.-L., Yeh, E.-C., Lin, Y.-J., MacDonald, J., & John, C. M. (2018). Evolution of hot fluids in the Chingshui geothermal field inferred from crystal morphology and geochemical vein data. Geothermics, 74, 305-318.
- Lu, Y.-C., Song, S.-R., Wang, P.-L., Wu, C.-C., Mii, H.-S., MacDonald, J., Shen, C.-C., & John, C. M. (2017). Magmatic-like fluid source of the Chingshui geothermal field, NE Taiwan evidenced by carbonate clumped-isotope paleothermometry. Journal of Asian Earth Sciences, 149, 124-133.
- Pérez-Romero, R.-A., Espinosa-Leon, C., Pinto-Rambaúth, K.-T., & Gutierrez-Benavides, M. (2020). Practical methodology for interwell tracer applications. CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro, 10(2), 27-38.
- Reed, M. J. (2007). An investigation of the Dixie Valley Geothermal Field, Nevada, using temporal moment analysis of tracer tests. Proceedings, 32nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering,
- Reed, M. J. (2007). An investigation of the Dixie Valley Geothermal Field, Nevada, using temporal moment analysis of tracer tests. Proceedings, 32nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering,
- Rose, P. (1998). The use of polyaromatic sulfonates as tracers in high temperature geothermal reservoirs. Proceedings,

- Rose, P. E., Benoit, W. R., & Kilbourn, P. M. (2001). The application of the polyaromatic sulfonates as tracers in geothermal reservoirs. Geothermics, 30(6), 617-640.
- Rose, P. E., Mella, M., Kasteler, C., & Johnson, S. D. (2004). The estimation of reservoir pore volume from tracer data. Proceedings,
- Schmalz, J., & Rahme, H. (1950). The variation of waterflood performance with variation in permeability profile. Prod. Monthly, 15(9), 9-12.
- Sheng, S., Duan, Y., Wei, M., Yue, T., Wu, Z., & Tan, L. (2021). Analysis of Interwell Connectivity of Tracer Monitoring in Carbonate Fracture-Vuggy Reservoir: Taking T-Well Group of Tahe Oilfield as an Example. Geofluids, 2021.
- Sheng, S., Duan, Y., Wei, M., Yue, T., Wu, Z., & Tan, L. (2021). Analysis of Interwell Connectivity of Tracer Monitoring in Carbonate Fracture-Vuggy Reservoir: Taking T-Well Group of Tahe Oilfield as an Example. Geofluids, 2021.
- Shook, G. M. (2003). A simple, fast method of estimating fractured reservoir geometry from tracer tests. Geothermal Resources Council Transactions, 27, 407-411.
- Shook, G. M., Ansley, S. L., & Wylie, A. (2004). Tracers and tracer testing: design, implementation, and interpretation methods. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory Bechtel BWXT Idaho, LLC.
- Shook, G. M., & Forsmann, J. H. (2005). Tracer interpretation using temporal moments on a spreadsheet.
- Shook, G. M., & Mitchell, K. M. (2009). A Robust Measure of Heterogeneity for Ranking Earth Models: The F-PHI Curve and Dynamic Lorenz Coefficient SPE Annual Technical Conference and Exhibition, https://doi.org/10.2118/124625-MS
- Shook, G. M., Pope, G. A., & Asakawa, K. (2009). Determining Reservoir Properties and Flood Performance From Tracer Test Analysis. SPE Annual Technical Conference and Exhibition,

Song, S.-R., & Lu, Y.-C. (2018). Geothermal Explorations on the Slate Formation of Taiwan. In. https://doi.org/10.5772/intechopen.81157

Stefansson, V.-d. (1997). Geothermal reinjection experience. Geothermics, 26(1), 99-139.

- Stiles, W. E. (1949). Use of permeability distribution in water flood calculations. Journal of Petroleum Technology, 1(01), 9-13.
- Süß, M. (2005). Analysis of the influence of structures and boundaries on flow and transport processes in fractured porous media.
- Tong, L., Ouyang, S., Guo, T., Lee, C., Hu, K., Lee, C., & Wang, C. (2008). Insight into the geothermal structure in Chingshui. In: Ilan.
- 工業技術研究院(2010)地熱能源永續利用及深層地熱發電技術開發計畫。經濟部 能源局委辦。
- 工業技術研究院(2012)地熱能源永續利用及深層地熱發電技術開發計畫。經濟部 能源局委辦。
- 工業技術研究院(2015)宜蘭縣清水地熱區 IC-9、IC-13、IC19 地熱井修井後產能 測試成果摘要。經濟部能源局委辦。
- 中國石油公司(1976-1986)宜蘭縣清水地熱區中油清水地熱井地下地質報告。台 灣油礦探勘總處。
- 宋聖榮、葉恩肇、張竝瑜、劉聰桂、吳逸民、陳洲生、羅偉(2011)宜蘭清水地熱 能源研究:探勘技術平台的建立與深層地熱-宜蘭清水地熱能源研究:探勘技 術平台的建立與深層地熱(Ⅱ).
- 林啟文、林偉雄(1995)五萬分之一臺灣地質圖說明書,圖幅第十五號三星。經濟 部中央地質調查所出版。
- 李伯亨、凌璐璐、張可霓、王洋、郭泰融、柳志錫、歐陽湘(2013) 宜蘭清水地熱 儲集層數值模型與生產模擬研究。臺灣鑛業,65(4),1-12。
- 李清瑞、江道義、韓吟龍、王俊堯(2016)清水 IC21 地熱探勘井產能測試研究。 臺灣鑛業,68(1),1-12.
- 孫天祥(2014)臺灣宜蘭清水地熱區之應力狀態研究。國立臺灣師範大學。台北市。 https://hdl.handle.net/11296/nebh58

陳亭潔(2019)清水地熱儲集層示蹤劑試驗分析之研究。國立成功大學。台南市。 曾長生(1978)宜蘭縣清水及土場區地質及地熱產狀。台灣石油地質,第15號, 第11-23頁。

- 劉瀚方(2013)清水地熱地區之微震與震波走時層析成像。臺灣大學地質科學研究 所學位論文,1-57。
- 羅偉(2012)宜蘭清水和鄰近地熱區地質圖測製和地質構造分析。行政院國家科學 委員會能源型國家科技計畫。
- 蕭寶宗、江新春 (1979), Geology and Geothermal System of the Chingshui-Tuchang Geothermal Area, Ilan, Taiwan,臺灣石油地質, 16卷頁 205-213。

附錄



附錄一:第一次示蹤劑試驗經 HPLC 得到各水樣之訊號強度

P5		
KJ		此到昙(ug/I)
裡週时间(III) 1 97	經過时间(DAI) 0.05	权 <u>利里(µg/L)</u> 1 83/
2.27	0.00	1.034 8.011
2.21	0.14	14 002
J. 21	0.14	5 115
4.21	0.10	0.110 9.419
0.21 6.97	0.22	2.410
0.27	0.20	20.076
1. Z1	0.30	0.000
8.27	0.34	1.432
9.27	0.39	29. 535
10.27	0.43	6.660
11.27	0.47	1.351
12.27	0.51	0.000
22.88	0.95	0.000
28.18	1.17	4.150
34.23	1.43	8.108
47.20	1.97	0.000
58.05	2.42	0.000
70.55	2.94	0.000
82.07	3.42	0.000
94.87	3.95	0.000
127.32	5.30	0.000
147.85	6.16	0.000
R1		
經過時間(hr)	經過時間(Day)	收到量(µg/L)
1.35	0.06	0.965
2.38	0.10	2.316
3. 38	0.14	3.668
4.33	0.18	7.914
5.33	0.22	2.703
6.33	0.26	9.266
7.33	0.31	3. 282
8.33	0.35	2.413
9.33	0.39	6.177
10.33	0.43	5.115
11.33	0.47	0.000
12.33	0.51	6.756
23.18	0.97	0.000

28.50	1.19	4.730
34.45	1.44	8.494
47.42	1.98	0.000
58.20	2.43	3.909
70.75	2.95	0.000
82.20	3. 43	0.000
95.02	3.96	0.000
127.40	5. 31	0.000
IC-19 & 21		
經過時間(hr)	經過時間(Day)	收到量(µg/L)
1.45	0.06	1.641
2.45	0.10	1.834
3.45	0.14	1.930
4.50	0.19	1.737
5.50	0.23	7.239
6.50	0.27	0.000
7.50	0.31	1.062
8.50	0.35	20.848
9.50	0.40	11.775
10.50	0.44	4.922
11.50	0.48	6.081
12.50	0.52	4.826
23.28	0.97	0.000
28.63	1.19	4.826
34.77	1.45	3. 378
47.72	1.99	0.000
58.28	2.43	0.000
70.85	2.95	0.000
82.27	3.43	0.000
95.22	3.97	0.000
127.58	5.32	0.000
148.13	6.17	0.000
R3		
經過時間(hr)	經過時間(day)	收到量(µg/L)
1.83	0.08	2.9
2.83	0.12	9.3
3.83	0.16	3.3
4.83	0.20	0.0
5.83	0.24	1.1
6.78	0.28	0.0
7.78	0.32	12.8
8.78	0.37	4.6



9.78	0.41	3.9
10.78	0.45	2.1
11.78	0.49	0.0
12.78	0.53	19.0
22.75	0.95	4.3
27.98	1.17	7.7
34.12	1.42	4.6
47.02	1.96	0.0
58.68	2.45	0.0
70.40	2.93	0.0
81.98	3.42	0.0
94.70	3.95	0.0
127.22	5.30	0.0
148.58	6.19	0.0
清水溪露頭		
經過時間(hr)	經過時間(day)	收到量(µg/L)
1.03	0.04	0.0
2.03	0.08	0.0
3.03	0.13	0.0
4.03	0.17	7.5
5.03	0.21	0.0
6.03	0.25	19.1
7.03	0.29	5.1
8.03	0.33	17.4
9.03	0.38	1.0
10.03	0.42	10.3
11.03	0.46	0.0
12.03	0.50	0.0
23.77	0.99	3.3
28.93	1.21	6.3
$35.2\overline{2}$	1.47	7.6
47.97	2.00	0.0
58.45	2. 44	0.0
71.22	2.97	0.0
82.43	3. 43	0.0
96.57	4.02	0.0
127.82	5.33	0.0
148.37	6.18	0.0

