

緻密岩層中透水斷層帶與地熱流體之關係：以中央山脈板岩帶北段之仁澤地熱區為例

陳炳誠^{1*} 黃緯誠¹ 陳思婷¹ 郭力維² 施輝煌³

摘 要

臺灣中央山脈板岩帶北段是一具地熱發電潛能的地質區。由於板岩帶岩層緻密，裂隙、斷層與斷層帶被認為是此區域的地熱流體通道。地下的開放裂隙與斷層帶等，都可作為流體的通道，但在地熱資源開採上，具良好透水能力的斷層帶應扮演主要的角色。依據中央山脈板岩帶北段內的仁澤地熱區的井測資料與露頭發現，岩層的透水通道多集中於少數的透水斷層帶附近，並非廣泛發育於地熱儲集層中。透水斷層帶與裂隙在仁澤地熱區有不同的作用。透水斷層帶是由破碎的斷層核芯及斷層破裂帶複合組成，為此地質區最良好的地熱流體通道；地熱儲集層中較廣泛存在的開放性裂隙面主要作用為增加流體與週圍高溫岩體間的熱交換速率，對於地熱流體的有效生產幫助較小。本研究結果發現，要在板岩區內形成透水斷層帶，控制因素包含適當的岩性、斷層活動方式及斷層活動史。因需這些適宜的地質條件皆同時存在，要在此地質區發育良好的透水斷層帶並不容易。也因為現有地質資料仍無法完全了解此地質區內斷層帶在地下的分布與透水品質，預測地下透水斷層帶的位置、品質與其在地下之延伸，目前為降低此區域地熱探勘與開發風險最關鍵的研究工作之一。

關鍵詞：斷層帶，裂隙，地熱流體，板岩帶

1. 簡 介

地熱能源目前主要藉由鑽井，生產地下高溫岩層中儲存的熱水汽進行利用。世界上地熱流體產於多樣的地質環境，有一部分生產自相對高孔隙率及高滲透率岩層之原生孔隙；也有一些地熱流體是生產於低孔隙率低滲透率的地質區(Moeck, 2014)。在低孔隙率及低滲透率的岩層中，地熱流體流動主要發生於岩層內的透水裂隙或斷層帶(Rowland and Sibson, 2004；Tong *et al.*, 2008；Yamada *et al.*, 2000)。由於緻密岩層地區的地下開放裂隙及斷層帶有時難以

直接由地表地質推測，如缺乏良好的地下地球物理、地質或鑽井資料，不易預測裂隙或斷層帶在地下的位置和特性，影響地熱能源的有效探勘與生產。

臺灣中央山脈板岩帶北段為緻密岩層地質區，目前主要有清水、土場及仁澤3個地熱區(圖1)。由清水地熱區的地球物理資料顯示，區域性的大型斷層帶可能扮演了運移或封阻地下流體的主要角色(Tong *et al.*, 2008; Chang *et al.*, 2014; Chiang *et al.*, 2015)。在西元1970-1980年代於上述三個地熱區有許多的地熱鑽井，但當時的地熱井多僅有低解析度之自然電位(SP)及

¹ 台灣中油公司探採事業部 地質師

² 國立中央大學地質科學系 副教授

³ 台灣中油公司探採事業部 處長

*通訊作者電話: 0988-328314, E-mail: cpc050881@gmail.com

收到日期: 2020年10月12日

修正日期: 2021年04月19日

接受日期: 2021年04月29日

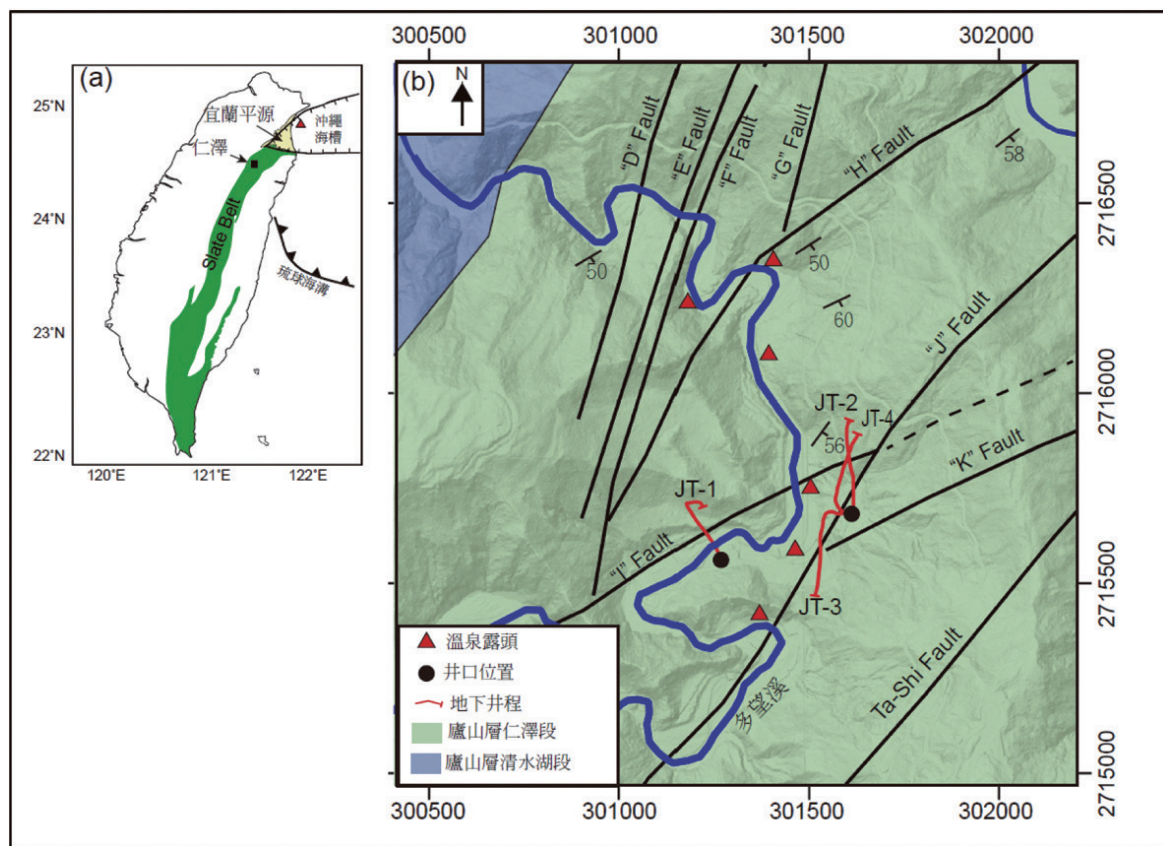


圖1 中央山脈板岩帶位置(a)與仁澤地熱區地質簡圖(修改自Chen *et al.*, 2021)

電阻電測資料，即便當時有鑽穿斷層帶或裂隙密集帶，以過去低解析度的測井資料無法高精度地確定斷層帶的特性。也由於缺乏良好的鑽井資料作驗證，由地球物理調查仍無法良好確認斷層系統的透水特性(例Tong *et al.*, 2008；Chang *et al.*, 2014)。

中油公司於2019年於仁澤地熱區完成2口地熱探勘井的鑽探(廖明威等，2019；廖啟岳等，2019)。本研究進行仁澤3號鑽井中的微電阻測井影像解釋及地表露頭調查並作比較，對本地區的地下裂隙及斷層的特性有較以往深入的了解。本研究發現此區域中單一一條大規模的透水斷層帶或斷層系統對於地熱水汽生產的重要性大於大量發育但規模較小的裂隙面。此現象是否為中央山脈北段各地熱區共有的現象值得進一步的研究，研究結果將有利於臺灣變質岩區內的地熱探勘和開發。

2. 研究背景

2.1 裂隙與斷層及斷層帶的定義與特性

本文頻繁的使用的「裂隙」、「斷層」及「斷層帶」等用詞，在本文中各有不同的含義。「裂隙」包含節理面、劈理面及斷層面的不連續面狀構造，此種面狀構造寬度相對很小，無複雜的內部結構(Zoback, 2007)。在地下承受岩石圍壓的情況下，開放裂隙寬度通常小於1公釐(Crain, 2013)。另依照裂隙面的兩側有無錯動，分為伸張型裂隙(例如：節理)或剪力型裂隙(例如：斷層)。「斷層」在本研究中亦為裂隙的一種，但斷層有小量的錯移量，但未形成具一定寬度的岩層破碎帶。依照裂隙是否透水，亦分為開放性透水裂隙和可能已被其它礦物填充的封閉性裂隙(岩脈)。

「斷層帶」在本文中指的是因岩層錯動，

造成一定寬度(數十公分或數公尺以上)，其兩側岩層有錯動的條帶狀構造。斷層帶內有時會發展成斷層核芯(fault core)及斷層破裂帶(damage zone)兩種不同的內部結構。斷層核芯通常剪切作用較為強烈，形成斷層角礫岩或斷層泥；斷層破裂帶則主要發育高密集度的裂隙面，沒有明顯的剪碎的斷層角礫岩或斷層泥發育(Caine *et al.*, 1996; Faulkner *et al.*, 2010)。一個斷層帶也可能由同時有數個斷層核芯與斷層破裂帶相鄰組成(圖2)。當構造活動量較大且地層錯動較為明顯時，會形成數個斷層帶，並密集排列出現或相互連接，成為由數個斷層帶組成的斷層系統。對地熱探勘生產來說，由數個透水斷層帶組成的透水斷層系統，為相當良好的探勘標的。

若斷層帶的核芯為具透水性的斷層角礫岩組成，且週圍的斷層破裂帶亦為透水的，則形成透水斷層帶。然而如果斷層核芯為不透水的斷層泥，則可能形成一阻水帶，限制流體的流動，使斷層帶之兩盤無法具有良好的連通性(Faulkner *et al.*, 2010)。故斷層帶與裂隙相同，依據透水性分為疏鬆透水的開放性斷層帶，以及緊密或已被後期填充物填滿而無良好透水性的封阻性斷層帶。

判定地下斷層帶發育的方式，除了岩層破

裂結構外，亦會有岩層錯動證據，例如岩層層面發生劇烈傾動或錯動。在僅數英吋的井孔尺度下，岩層的劇裂錯動亦可作為斷層帶發育的證據。

2.2 中央山脈北段之大地構造背景

臺灣以活躍的造山運動聞名。呂宋島弧與歐亞板塊的碰撞造成臺灣島的抬升造山，包含中央山脈和雪山山脈等。在臺灣北部，菲律賓海板塊隱沒於歐亞板塊下，於花蓮及宜蘭外海形成琉球島弧系統(圖1)，島弧系統包含於花蓮外海向北隱沒的琉球海溝、宜蘭外海的琉球火山島弧及沖繩海槽(鄧屬予等，2013)。沖繩海槽是琉球島弧的弧後盆地，從日本九州島西南部延伸到臺灣東北部的宜蘭平原。沖繩海槽西南部自更新世晚期以來發生正斷層拉張，造成臺灣東北部的張裂，形成宜蘭平原。此拉張作用也影響了位於宜蘭平原兩側的中央山脈北段與雪山山脈北段(Shyu *et al.*, 2005)。

中央山脈北段的高地熱潛能與上述的大地構造演化有關(鄧屬予等，2013)。原沉積於歐亞板塊邊緣的海相細粒砂泥岩，在造山過程中被深埋至10-15公里深的高溫高壓環境，經變質作用後，再快速抬升。快速抬升的岩層仍保留部分深埋時的溫度，所以有高地熱潛能。中

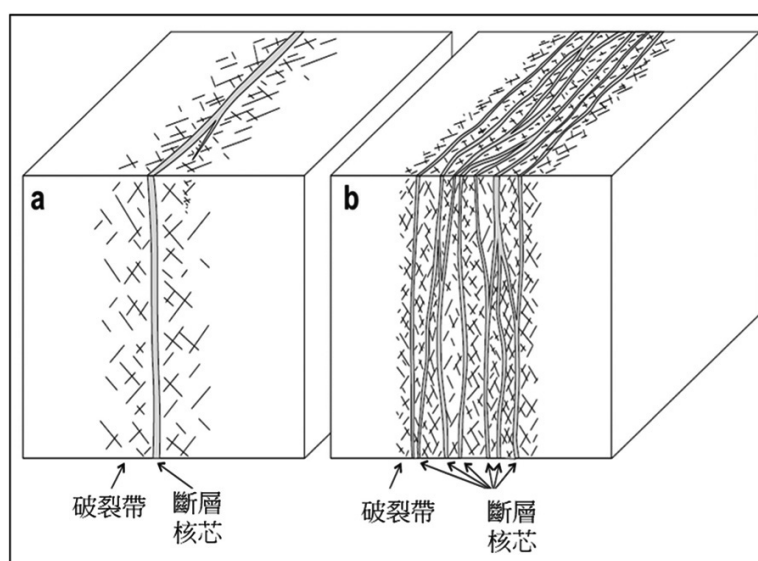


圖2 兩類不同內部結構組成的斷層帶(Faulkner *et al.*, 2010)

中央山脈北段相較於其中南段具有更高的地熱潛能，可能因中央山脈北段地殼減薄，軟流圈上湧所致，或有可能深部具高溫岩漿庫或火成岩體發育，而使中央山脈北段有異常高的地溫梯度(Liu *et al.*, 2015；Lu *et al.*, 2017)。

因為此地區的岩層本身非常緻密不易透水，深部高溫地熱流體上湧至地殼淺部或地表的過程中，區域性斷層系統或現今大地應力扮演形成流體通道的重要角色(Lu *et al.*, 2017)。然而，由於地下地質資料較缺乏，目前欲細部研究中央山脈北段的地質構造與地熱資源之間的關係仍有一定困難。

2.3 仁澤地熱區的地質構造

經本研究團隊及前人研究文獻之地表地質調查結果，仁澤地熱區近地表的地層與大多數的斷層帶皆為東北-西南走向，傾角趨近垂直或高角度朝東南傾斜。在仁澤區的多望溪畔可觀察到斷層帶的發育，寬度從小於1公尺寬至數十公尺寬不等(曾長生等，1977；詹永光等，1986)。本研究發現，地表觀察到的各個斷層帶露頭，斷層帶兩側的岩層幾乎無法觀察到錯距，主要由地層破裂程度及斷層擦痕發育與否，判斷是否有斷層帶發育(圖3(a)(b))。

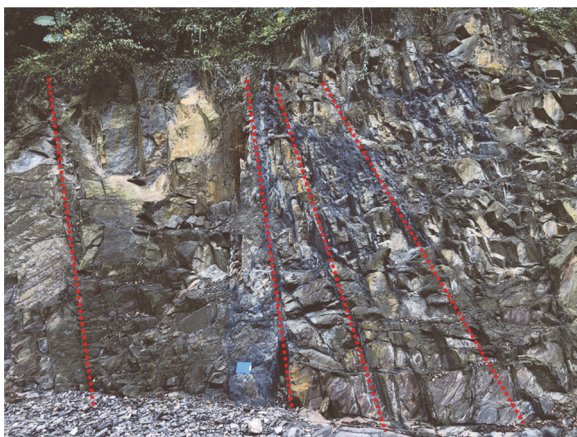


圖3(a) 仁澤地熱區多望溪畔的一斷層帶。在斷層帶的兩側雖難以觀察到明顯的地層錯動，但斷層帶內的裂隙發育明顯較多，且部分的裂隙面上可觀察到剪碎的斷層角礫，在裂隙面上也可觀察到較明顯的擦痕。(本研究攝製)

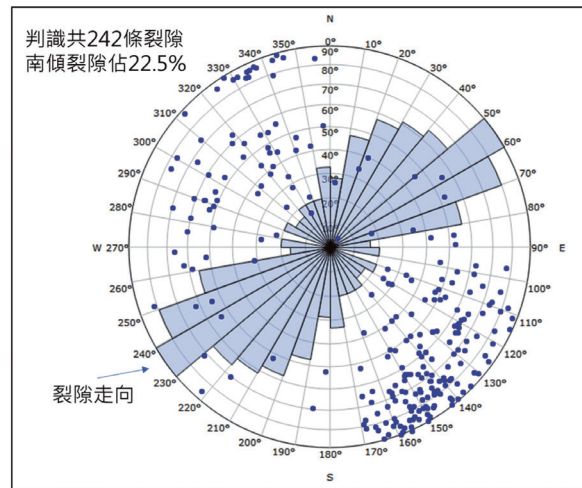


圖3(b) 仁澤地熱區某口地熱井深度800公尺至約1,500公尺區間之透水裂隙面位態統計。淺藍長條以每10度為一組的扇型為該走向裂隙所佔全部裂隙走向的相對數量比例。藍色圓點為裂隙面之下半球極點投影位態。由統計可看出主要的裂隙為東北-西南走向，分別向東南及西北大角度傾斜，且以向西北傾斜者為主。(本研究繪製)

除了斷層帶之外，常見的其它地質構造種類有劈理、節理、斷層、褶皺等。在地表可觀察到達5組不同位態的裂隙，包含節理及劈理等(曾長生等，1977；楊健一等，1979；詹永光等，1986)。在此區域地表觀察到的板岩劈理的產狀多為礦物無明顯順向排列之破劈理(fracture cleavage)，應是在近地表岩石圍壓降低後才會產生裂隙。由其它地層變質度的研究結果也可確認，仁澤出露之岩層變質度較中央山脈北段板岩帶的其它地區比是較低的(Chen *et al.*, 2019)。

2.4 仁澤地熱區的地層特性

仁澤地熱區地表出露的地層及地下地熱儲集層皆為廬山層，地表觀察之地層位態主要為東北-西南走向，向東南傾斜。主要出露岩性為黑色到深黑色的板岩和板岩及深灰色的變質砂岩互層。仁澤區出露的岩層變質砂岩比例高，故定名為仁澤段(曾長生等，1977)。仁澤地熱區地表出露岩層雖有劈理發育，但砂泥互層的層理及沉積構造仍然存在，仁澤段的板岩及變

質砂岩的地質特性近似緻密砂泥岩的互層(Chen *et al.*, 2021)。

仁澤段西側出露地層為廬山層的清水湖段，岩性主要以暗灰色至黑色板岩為主，劈理較仁澤段明顯。土地地熱區位於仁澤段與清水湖段的邊界附近，板岩比例較仁澤地熱區高。

3. 裂隙、斷層帶發育的觀察

3.1 裂隙的發育

由地表觀察到的裂隙調查，近地表的裂隙組數可高達5組(曾長生等，1977；楊健一等，1979；詹永光等，1986)。然而在地表下約800-900公尺之下，裂隙位態的組數開始變少，減少至1-2組(Chen *et al.*, 2021；廖明威等，2019；廖啟岳等，2019)。此外，裂隙也會開始聚集出現於特定區間，而非廣泛分布(圖4)。高密度

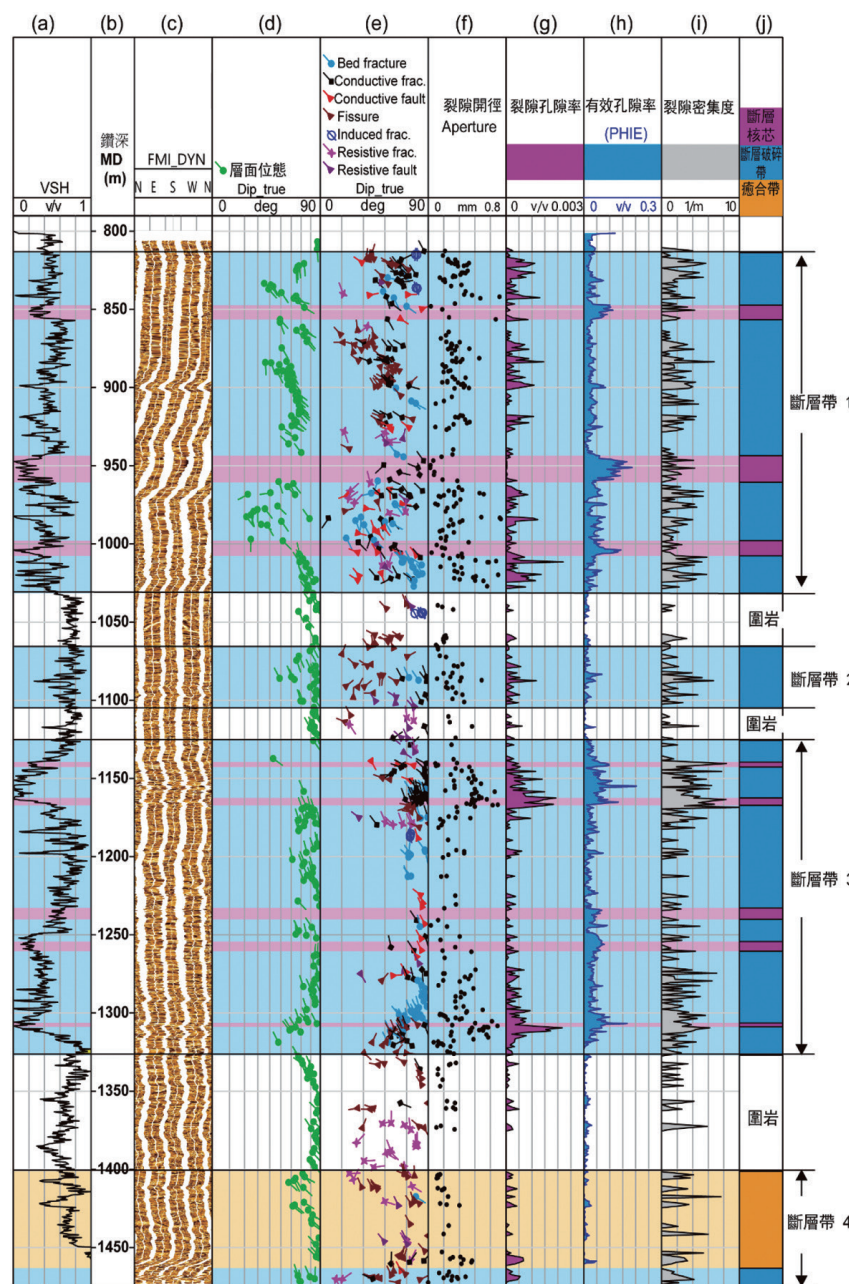


圖4 仁澤3號地熱井井下之測井解釋圖(修改自Chen *et al.*, 2021)。圖上(d)欄為地層之位態統計，可看出斷層帶內會有局部地層位態快速變化的情況。部分的斷層核芯部位，層面與裂隙面都難以辨視，故面狀構造在斷層核芯處的統計量較少。其它欄之數據解釋可參考Chen *et al.*, 2021。

裂隙發育帶之間是由一定寬度的緻密岩層相隔 (Chen *et al.*, 2021)。

仁澤地區裂隙走向大多為北60-80度東，裂隙走向皆約略平行該地區岩層層面的走向。裂隙的傾角，大多為高角度(大於60度)向西北或東南傾斜(圖3) (廖明威等，2019；廖啟岳等，2019)。

大部分在井下觀察到的裂隙為開放裂隙，由高電阻礦物填充的岩脈(封閉型裂隙)數量相對較少。封閉型裂隙會密集地出現於特定的層段，並非廣泛的發育。在井孔尺度可觀察到具數公釐至數公分等級微小錯動的斷層面，但其數量較純伸張無剪動位移的裂隙面少(圖4)，可能僅佔所有裂隙的五分之一至拾分之一(Chen *et al.*, 2021)。

3.2 斷層帶的發育

本研究使用數種不同的方式來確認鑽井是否有鑽穿斷層帶。首先，微電阻測井影像的岩層位態解釋發現到岩層層面有快速且劇烈的位態變化(圖4)；其次，由於斷層的錯動，岩層發育較密集的裂隙，故測井影像上的裂隙數量明顯增加(圖5(b))；最後，如岩層破碎程度更高，會使原始層面或裂隙面等結構遭到破壞，在測

井影像已難以觀察到層面與裂隙面的結構(圖5(c))。藉由上述各自獨立的解釋判斷出的地下斷層帶位置及內部結構搭配都可互相符合(圖4)，顯示斷層帶的存在位置有一定的可信賴度 (Chen *et al.*, 2021)。

井下鑽遇了數個斷層帶，有疏鬆透水的開放斷層帶，也有緊密或已被後期沉澱物或填充物填滿的封阻性斷層帶(圖4)。另外也有岩層有劇烈傾動現象，但岩層中僅由高密集度的裂隙聚集而無斷層角礫岩(斷層核芯)發育的小型斷層帶發育。依仁澤地熱區鑽井資料推估，透水斷層帶的寬度可能僅數公尺至數十公尺。如透水斷層帶密集出現，則進而形成良好的斷層系統(圖6)，在水平方向可能達100公尺寬(Chen *et al.*, 2021)。

透水斷層帶，主要是由一個至數個疏鬆的斷層角礫岩組成的斷層核芯，及數個透水裂隙密集發育的斷層破裂帶複合相夾發育組成。本研究發現各個透水斷層帶中的核芯，大部分由斷層角礫岩組成，並沒有發育明顯的緻密無法透水的斷層泥。在封阻性斷層帶內，斷層角礫岩的週圍以及裂隙已大多被高電阻的沉澱物填充而無法透水。如觀察一般測井曲線，可發現封阻性斷層帶之電阻、密度及聲波等數值與緻

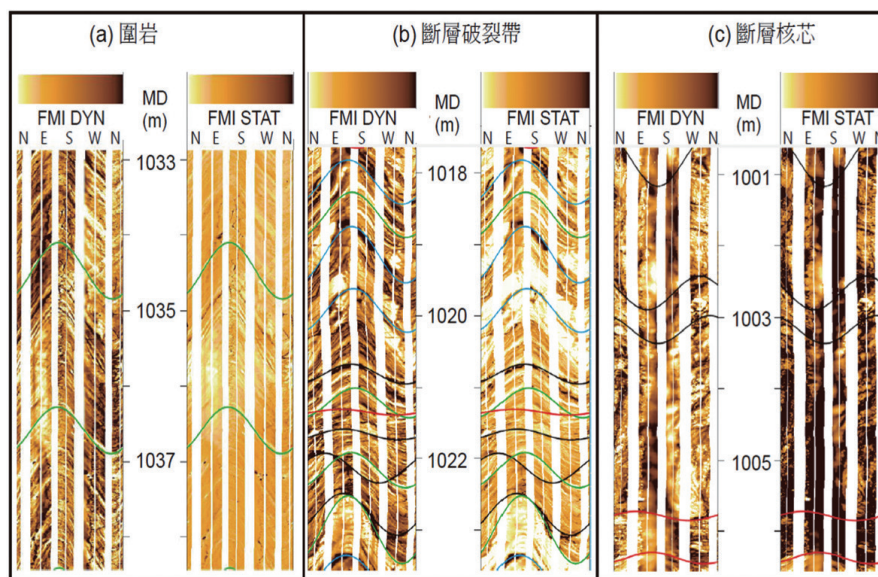


圖5 斷層帶及斷層帶外的圍岩的測井微電阻影像特色(綠色曲線：層面；黑色與藍色曲線：裂隙面；紅色曲線：斷層面)(Chen *et al.*, 2021)

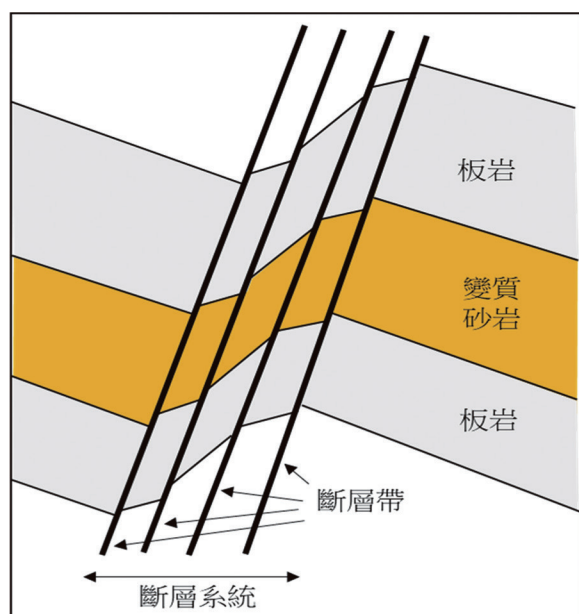


圖6 斷層系統的結構，包含數個斷層帶，並造成地層的傾動與錯動。斷層帶內部結構見圖2。(本研究繪製)

密圍岩相近，呈現低孔隙率及低滲透率的性質 (Chen *et al.*, 2021)。

斷層帶外之圍岩，開放或封閉裂隙的發育密度較低，可能平均每公尺僅有少於一條裂隙

面發育，本研究推測在地下深處主要的裂隙，包含透水及封閉裂隙，可能大多沿斷層帶附近發育。如遠離斷層帶，裂隙的發育密度將會低至平均每公尺1條左右。

4. 討 論

4.1 中央山脈板岩帶北段地熱儲集層的特性

本研究將「地熱儲集層」定義為常見之鑽井作業可商業鑽探及生產的深度範圍內(小於3,000公尺)，且有高地溫異常的地層範圍與體積。地熱儲集層的範圍是以是否有異常高溫作區分，因此包含無裂隙發育不透水的高溫岩層及有裂隙發育易於讓流體在其中流動的高溫岩層皆為地熱儲集層(圖7)。

在中央山脈板岩區，由於地熱儲集層的原生孔隙率極低，流體的流動主要依靠地下的開放裂隙及透水斷層帶。地表入滲之天水在流

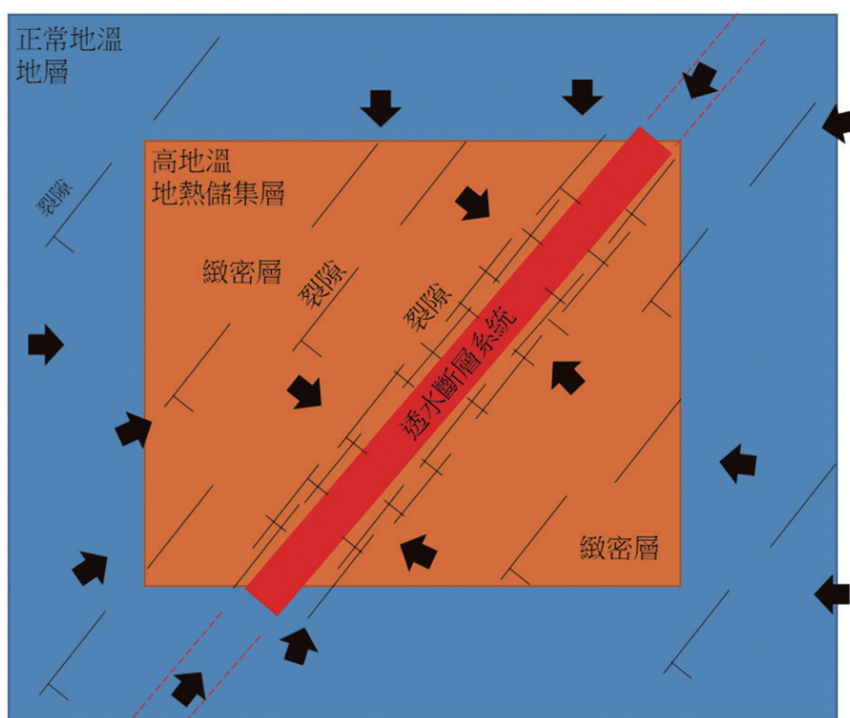


圖7 中央山脈北段板岩區可能的地熱儲集層中，流體流動概念平面圖。透水斷層系統及兩側鄰近處透水結構最為發達。當流體沿斷層斷層帶上湧時，週圍的流體也同時注入斷層系統中。(本研究繪製)

入地熱儲集層，吸收熱量後，大部分的流體由裂隙進入高滲透率之主要透水構造(透水斷層帶)，而上湧至裂隙高度發育的淺部地層及地表。因此裂隙的作用除了加速水的流動之外，也可加速熱能的傳遞。

由於地下的岩石圍壓很高，一個單純的透水裂隙面狀構造的開徑通常小於1公釐，且側向延展距離通常不長，故需要有多組不同位態之裂隙面互相截切，才有可能形成良好的透水岩體。由井測微電阻影像資料來看，仁澤地熱區的地下裂隙面的位態較為單調，一般來說只有兩組走向相同(東北-西南向)，傾向相反(西北傾或東南傾)的裂隙組，並非是複雜截切關係的裂隙網路(圖3與圖4)。地熱水汽在此種單調的裂隙網絡中流動及熱交換的效率不高，在板岩地熱區，此情況對於熱交換為水的流動是一個較不利的因素。

除了裂隙位態單調之外，板岩區的地下裂隙也並非廣泛的存在。大部分裂隙皆分布於狹窄的透水斷層帶中或附近。僅由地熱儲集層中的公釐寬度等級的裂隙面，難以產出可商業利用之熱水汽量。因此雖然中央山脈之板岩地熱區有面積大於數平方公里的高地溫地熱儲集層，但因透水斷層帶數量較少且其地下位置尚未明確，故目前尚無法全面且有效的進行地熱開發生產。

4.2 裂隙在板岩區地熱系統中的角色

在裂隙型地熱儲集層中，裂隙網路的主要功能為加速裂隙中的地下水與圍岩進行熱交換，同時也可增加儲集層的整體滲透率，使地下水可以更快速的流入地熱儲集層。然而緻密地熱儲集層中若僅靠天然原有的裂隙裂隙滲透率生產地熱水，其產量通常無法符合經濟效益。故現今也常採用工程方法來增加地熱儲集層中的裂隙數量，或須尋找良好的透水斷層帶作生產(Barton and Zoback, 2002)。

4.3 斷層帶在板岩區地熱系統中的角色

對緻密地熱儲集層來說，疏鬆透水斷層帶是相當良好的地熱水汽生產位置。若無鑽遇透水斷層帶，僅以裂隙儲集岩中天然裂隙的滲透率來生產，且不使用其它加強生產的工程作業，通常難以達到具經濟效益的地熱水汽生產(Houwens *et al.*, 2015)。

在緻密的地熱儲集岩中，完全無開放裂隙且無疏鬆斷層角礫岩的斷層帶(封阻性斷層帶)，其性質與圍岩相似。本研究認為在緻密板岩區中，無需將封阻性斷層帶視為流體的流動邊界，而應將其性質視為與緻密的圍岩相似，不需特別考慮其阻水性。而另一種情況是斷層核芯是不透水的斷層泥，但斷層核芯旁的斷層破裂帶則有透水裂隙發育，形成良好的裂隙儲集層(Wilson *et al.*, 2015)，此種情況會使斷層的一側或兩側形成良好的透水帶，但斷層兩側的流體相互阻隔而不連通。

4.4 板岩區中透水斷層帶的形成原因

本研究發現，透水斷層帶應為中央山脈板岩帶北段地熱探勘生產最重要的地質構造。依井下資料來看，要能在地下存在具完整內部結構的透水斷層帶，主要受地層原始特性及斷層活動特性及活動史所控制。

當岩層錯動初期，含石英成分較高的變質砂岩相較板岩更容易產生破碎的斷層角礫岩結構，然而如果破裂持續進行，斷層帶的位移逐漸加大，斷層角礫岩可能進一步磨碎為斷層泥，使斷層帶透水能力下降。因此斷層帶適宜的滑動量也是控制斷層帶透水結構發育的一個因素(Faulkner *et al.*, 2010；Zoback, 2007)。

如果斷層活動停止過久或有許多的化學物質沉澱於斷層帶的透水裂隙中，原透水的斷層帶可能會逐漸閉合或被沉澱物填充，使得原為透水的斷層帶無法透水。因此斷層帶停止活動過久或有易於產生沉澱的地下水體，也控制了原為透水的斷層帶是否會轉變為封阻性斷層帶(Zoback, 2007；Chen *et al.*, 2021)。

基於以上幾個因素，有透水的斷層角礫岩

結構發育，處於初期活動階段的斷層帶應為最佳之地熱水汽通道。但活動初期的斷層帶兩盤錯距、斷層帶的寬度及長度可能皆不明顯，物理性質與週圍的圍岩差異較小，不易以常用地球物理測勘方法探測發現。

在中央山脈板岩帶北段的地質環境背景下，透水斷層帶能夠在地下發育且維持的地質因素可以共同出現的機會不高。以岩性為例，廬山層主要岩性為板岩，變質砂岩含量較低，較不易形成斷層角礫岩。以構造活動性來說，目前正處於初始活動期且具有斷層角礫結構的透水斷層帶，相較於這個地區中早期造山抬升期形成的無透水能力的斷層相比，數量也較少，因此不易調查發現。

由大地構造及岩性狀況，在中央山脈板岩帶北段要發育大型透水斷層帶或斷層系統並不容易且要發現其在地方的位置也有相當的困難。這應該是目前在此地區尚未能有效的探勘生產地熱資源的原因。

5. 結 論

經由井測資料配合地表露頭情況，本研究分析中央山脈板岩帶北段仁澤地熱區地下透水斷層帶發育的特性，並探討其與地熱流體流動的關係。研究結果發現，地下的透水斷層帶為仁澤地熱區最佳且最重要的透水通道。地下的透水斷層帶內部結構包含透水的斷層角礫層組成的斷層核芯，以及發育密集透水裂隙的斷層破裂帶組成。

斷層帶的寬度約數公尺至數十公尺，密集的斷層帶可組成寬度約一百公尺左右或以下的斷層系統。在高溫的緻密地熱儲集層中，裂隙構造並非廣泛分布，僅集中於斷層帶附近。裂隙構造的主要作用為形成裂隙網路，使地下水可更有效率的與高溫岩體進行熱交換，但在仁澤地熱區裂隙的密集度難以產出達商業效益之熱水汽產量。

透水斷層帶的發育同時受控於岩性及斷層

的活動性，透水斷層帶於中央山脈北段的板岩區中，可能並未廣泛發育。目前探勘確認透水斷層帶在地下的發育情況及明確位置，為在板岩區地熱探勘最重要的工作，而以鑽井取得測井資料為目前了解地下透水斷層帶發育情況最有效的方法。

誌 謝

本研究感謝經濟部能源局、國營事業管理委員會及工業研究院綠能研究所等單位之協助及台灣中油公司探採事業部的支持。

參考文獻

- 曾長生、祁遵生、劉傳村與陳阿炳，1977。宜蘭縣清水、土場、銅山一帶地熱區地質調查報告。台灣中油公司內部報告，共25頁。
- 楊健一、周學良與李煥喜，1979。宜蘭縣清水、寒溪一帶地熱區地質核查報告。台灣中油公司內部報告，共14頁。
- 詹永光、李煥喜、楊家和、吳光宏與李錦雲，1986。宜蘭縣仁澤、土場地熱區地質調查報告。台灣中油公司內部報告，共24頁。
- 廖明威、廖啟岳、陳典男與許國玄，2019。宜蘭仁澤地熱區中油仁澤3號地熱井地下地質報告，共29頁。
- 廖啟岳、曾衡之、許國玄與詹德源，2019。宜蘭仁澤地熱區中油仁澤4號地熱井地下地質報告，共30頁。
- 鄧屬予、宋聖榮、葉恩肇、林殿順、劉佳玫與蔡宜伶，2013。從大地構造看臺灣地熱潛能。西太平洋地質科學，第13卷，第1-38頁。
- Barton, C. A. & M. D. Zoback, 2002. Discrimination of Natural Fractures From Drilling-Induced Wellbore Failures in Wellbore Image Data - Implications for Reservoir Permeability. *SPE*

- Reservoir Evaluation & Engineering*, 5(03), 249-254.
- Caine, Jonathan, S. Evans, P. James & Craig B. Forster, 1996. Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 24(11), 1025-1028.
- Chang, P. Y., W. Lo, S. R. Song, K. R. Ho, C. S. Wu, C. S. Chen & H. Y. Lu, 2014. Evaluating the Chingshui geothermal reservoir in northeast Taiwan with a 3D integrated geophysical visualization model. *Geothermics*, 50, 91-100.
- Chen, C. T., Y. C. Chan, O. Beyssac, C. Y. Lu, Y. G. Chen, J. Malavieille & H. C. Sun, 2019. Thermal History of the Northern Taiwanese Slate Belt and Implications for Wedge Growth During the Neogene Arc-Continent Collision. *Tectonics*, 38(9), 3335-3350.
- Chen, B.-C., T. Perdana & L. W. Kuo, 2021. Fluid flow and fault-related subsurface fractures in slate and metasandstone formations: A case study of the Jentse Geothermal Area, Taiwan. *Geothermics*, 89, 101986.
- Chiang, C. W., H. L. Hsu & C. C. Chen, 2015. An investigation of the 3D electrical resistivity structure in the Chingshui geothermal area, NE Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 26(3), 269-281.
- Crain, P.Eng., 2013. Crain's Petrophysical Handbook. <https://www.spec2000.net/00-publications.htm>.
- Faulkner, D. R., C. A. L. Jackson, R. J. Lunn, R. W. Schlische, Z. K. Shipton, C. A. J. Wibberley & M. O. Withjack, 2010. A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. *Journal of Structural Geology*, 32(11), 1557-1575.
- Houwens, M. E., L. J. Heijnen, A. Becker & R. Rijkers, 2015. A Workflow for the Estimation of Fault Zone Permeability for Geothermal Production A General Model Applied on the Roer Valley Graben in the Netherlands. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, (April), 9.
- Liu, C. M., S. R. Song & C. H. Kuo, 2015. Silica geothermometry applications in the Taiwan orogenic belt. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 26(4), 387-396.
- Lu, Y. C., S. R. Song, P. L. Wang, C. C. Wu, H. S. Mii, J. MacDonald & C. M. John, 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.
- Moeck, I. S., 2014. Catalog of geothermal play types based on geologic controls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 867-882.
- Rowland, J.V. & R. H. Sibson, 2004. Structural controls on hydrothermal flow in a segmented rift system, Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Geofluids*, 4(4), 259-283.
- Shyu, J. B. H., K. Sieh, Y. G. Chen & C. S. Liu, 2005. Neotectonic architecture of Taiwan and its implications for future large earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(8), 1-33.
- Tong, L. T., S. Ouyang, T. R. Guo, C. R. Lee, K. H. Hu, C. L. Lee & C. J. Wang, 2008. Insight into the geothermal structure in Chingshui, Ilan, Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 19(4), 413-424.
- Wilson, T. H., V. Smith & A. Brown, 2015. Developing a model discrete fracture network, drilling, and enhanced oil recovery strategy in an unconventional naturally fractured

- reservoir using integrated field, image log, and three-dimensional seismic data. *AAPG Bulletin*, 99(4), 735-762.
- Yamada, M., K. Iguchi, S. Nakanishi & N. Todaka, 2000. Reservoir characteristics and development plan of the Oguni geothermal field, Kyushu, Japan. *Geothermics*, 29(2), 151-169.
- Zoback, M. D., 2007. Reservoir Geomechanics. Reservoir Geomechanics. Cambridge: Cambridge University Press.

The Relations between Fault Zones and Geothermal Fluids in Tight Rocks: A Case Study in the Slate Belt of the Northern Central Range, Taiwan

Bing-Cheng Chen^{1*} Wei-Cheng Huang¹ Shi-Ting Chen¹
Li-Wei Kuo² Hui-Huang Shih³

ABSTRACT

The slate belt of the northern Central Range is a geological region with geothermal potential in Taiwan. Due to the low porosity and low permeability of the slate formations, conductive fractures, faults, and fault zones are considered important conduits for subsurface geothermal fluids in this area. Between permeable fracture networks and fault zones, permeable fault zones play a more important role than fractures for the production of geothermal fluid. According to the wireline-logging data of the geothermal wells in Jen-Tse, fault zones with porous fault breccia zones and high-density open fracture zones may be main geothermal fluid pathways in the slate belt of the northern Central Range. Based on the logging data, most fractures are clustered in the vicinity of the fault zones rather than widely-distributed in the geothermal reservoir. Permeable fault zones in the slate formation are few in number, narrow in width, and have minor offsets, making them difficult to be observed by surface geological surveys. Identifying the subsurface location and extension of conductive fault zones would be a major difficulty in geothermal exploration and production risks in the slate belt. This study suggests that the role of open fracture networks is to increase the heat exchange efficiency between the fluids in the fractures and the high-temperature host rocks in the slate belt. To acquire high geothermal fluid production for efficient power generation, fault zones with highly-permeable structures would be needed. The development of permeable fault zones in this area requires a combination of suitable lithology, faulting behaviors, and fault activities, which are not easy to occur in this geological setting. In the present, the most important studies to lower the risks of geothermal exploration and production of this area would correctly predict the locations, properties, and subsurface extensions of these rare permeable fault zones.

Keywords: fault zones, fractures, geothermal fluid, slate belt.

¹Geologist, Exploration and Production Division, CPC Corporation, Taiwan.

²Associate Professor, Department of Earth Sciences, National Central University.

³Director, Exploration and Production Division, CPC Corporation, Taiwan.

* Corresponding Author, Phone: +886-988-328314, E-mail: cpc050881@gmail.com

Received Date: October 12, 2020

Revised Date: April 19, 2021

Accepted Date: April 29, 2021