



# 地質資源 開發分析評估與 現地應力

潘啟平\* / 財團法人工業技術研究院綠能與環境研究所 副研究員

陳麒任 / 國家原子能科技研究院 副研究員

董家鈞 / 國立中央大學應用地質研究所 教授

柳志錫 / 財團法人工業技術研究院綠能與環境研究所 技術副組長

地質資源是指來自地殼的各種天然資源（固體、氣體、液體元素）與空間資源<sup>[1]</sup>，天然資源如岩石、金屬、寶石、石油、天然氣、地熱能或地下水等，空間資源如儲氣窖、二氧化碳地質封存（geologic carbon sequestration）、核廢料最終處置（nuclear waste final disposal）或壓縮空氣儲能等。隨著全球人口持續增加與工業技術發展，人類對於空間與天然資源的開發、利用的需求逐步增加。

隨著人類活動與化石能源開發與應用，大量溫室氣體排放至大氣中，造成全球暖化增溫、氣候變遷與海平面上升等嚴重影響。有鑑於此，各國陸續提出「2050淨零排放」的宣示與行動。使用綠能（如地熱能）、減少二氧化碳排放量、趨緩全球暖化和氣候變遷已是全球所應負之重要責任。2050淨零轉型是全世界的目標，也是臺灣的目標。另一方面，核廢料選址與安全性問題受社會大眾關注。核廢料是使用核能後衍生的必然產物，在我國努力朝向非核家園政策的同時，如何將其進行完善的處置亦是一項重要課題。

「臺灣2050淨零排放路徑及策略總說明」所提出之12項戰略中，其中包含以地熱為發展重點之「前瞻能源」以及「碳捕捉利用及封存」。而無論是能增加臺灣地熱產能之增強型地熱系統（Enhanced Geothermal System, EGS）抑或是被國際能源署（International Energy Agency, IEA）列為重要減碳項目的二氧化碳地質封存，皆涉及岩盤受高壓灌注後之穩定性問題。核廢料最終處置之場址，需確保不會對生態圈造成輻射影響，與上述兩項資源工程，均涉及岩盤中流體移棲以及傳輸行為。而現地應力，影響岩盤水力-力學特性，控制土木與資源工程規劃、設計與施工，也是安全評估的關鍵。本篇文章將藉由說明現地應力對地質資源開發的影響、介紹現地應力量測方法與實施策略、及國內外之資源工程量測現地應力之案例與應用，探討現地應力對地質資源開發之重要性。

關鍵詞：現地應力、地熱、碳封存、水力-力學特性

## 現地應力對地質資源開發的影響

「現地應力」用於描述地下岩體的現今應力狀態，應力張量為二階張量，包含9個分量，其中共計6個為獨立分量。現地應力為地層荷重、板塊運動、地溫梯度、地表剝蝕作用與人為因素的綜合結果，可影響岩盤（岩石與裂隙）之強度、變形性與滲透性等水力-力學特性及行為。此外，地質資源開發無可避免地將

擾動地下岩體，並進一步改變現地應力，如何評估現地應力與可能改變對地質資源工程規劃、設計、施工與營運管理之影響至關重要。這個章節我們將會藉由二氧化碳地質封存、增強型地熱系統與核廢料處置的角度，說明現地應力對於地質資源開發的重要性。

## 二氧化碳地質封存

二氧化碳地質封存是利用岩石圈的儲集層（reservoir）孔隙儲存二氧化碳，以蓋層（caprock）

\* 通訊作者，ChiPingPan@itri.org.tw

封閉，目前全球已有 30 個以上商轉場址。適合作為二氧化碳地質封存的地質環境需具備許多條件，但不外乎都是必須使二氧化碳能安全且穩定地待在可控範圍內。而其中現地應力對與二氧化碳封存的影响主要在於以下兩點：

1. 二氧化碳洩漏的可能性 [2,3]；
2. 造成誘發地震的可能性 [2,4]。

關於洩漏問題，二氧化碳地質封存的在初步選址時應盡可能避開斷層或自然裂隙，而當有弱面存在時必須證明其具有很低的滲透性或為關閉的狀態 [5]。受現地應力控制的洩漏途徑如圖 1 所示，其中包含：

1. 不規則井壁 (enlarged borehole) 條件下的固井 (cement) 不良施作：在鑽井期間，岩體的剪力降伏可能會造成鑽鑿之不規則井壁。若在蓋岩中產生此現象，可能會在套管與井壁間形成洩漏途徑。此現象與現地應力大小、岩石抗壓強度及泥漿密度有直接關係 [6]。因此，確定現地應力大小可設計較合適的鑽井計畫，或評估場地現存鑽井之洩漏風險 [5]。
2. 既有斷層與裂隙的再活動或再張開：鑽井隨二氧化碳的注入造成孔隙壓力上升，當作用在裂隙面上的應力克服裂隙的剪力強度或張力強度時，原先已關閉的斷層與裂隙可能再度張開或再活動。而斷層與裂隙的再活動、生成及破壞機制取決於孔隙水壓、位態與所受應力大小及方向 [3,5,7]。
3. 水力破裂：流體的注入造成孔底壓力上升，當孔隙壓力過大，便會產生新裂隙。若新裂隙延伸超過原定的注入區間，可能會成為二氧化碳的洩漏通道 [5]。

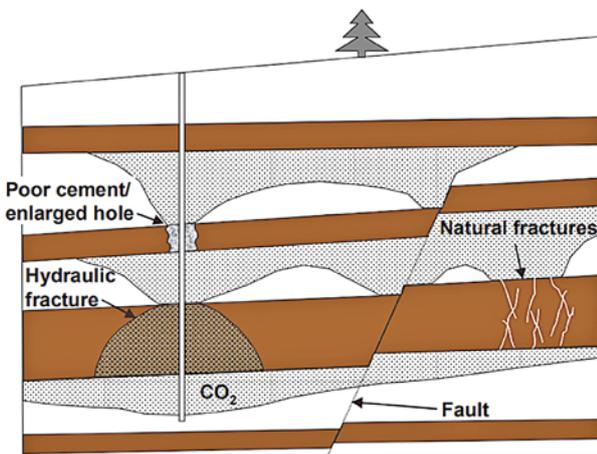


圖 1 二氧化碳地質封存的主要洩漏途徑 [5]

基於以上三點可以說明我們需對潛在二氧化碳地質封存場址之現地應力有充分之瞭解，包含注入前的調查，注入階段與注入後階段的監測。

關於灌注壓力誘發地震問題，與上述水力破裂相關。地震的發生意味著在地殼中的有效應力超過強度 [8,9]，即脆性地殼的臨界應力性質 (critically stressed nature) [10]。因這項特性，當我們將流體注入深井時，勢必會改變岩盤之有效應力狀態。當斷層面上的摩擦阻力被克服，使得早已儲存在岩體內的彈性能量得以釋放，造成誘發地震的可能性 [2,4]。過去的研究亦顯示出即使是微小的地震也具有影響封存構造完整性的可能性 [2]。而在現實中，應力的量測結果不僅證實了在地殼內部的臨界應力性質，同時也能針對對目標場址訂定流體注入之壓力與速率規範，以防止誘發地震的發生 [2]。

另外，現地應力也影響儲存量估計以及灌注之二氧化碳移棲 (影響孔隙體積與水力傳導特性)。

### 增強型地熱系統

具有經濟效益的地熱系統需要岩體充滿裂隙且具有良好的滲透性、裂隙密度、足夠的裂隙面積和地下水源。當地具有高溫但不具有充足的地下水及良好的滲透性以建立傳統地熱系統時，可藉由人為加壓的方式激發岩體的滲透性，使經地層加熱的流體進入生產井，這類方法被稱為增強型地熱系統。現地應力對與增強型地熱系統的影響在於以下幾點：

1. 岩層中的裂隙是否能成為導水裂隙 [11,12]；
2. 水力壓裂策略與設計 [13]；
3. 岩體破壞，注水可能引發微震 [14]。

在增強型地熱系統項目中，自然裂隙的幾何形貌和水文特性與現地應力狀態相關，裂隙導水能力為影響熱田產能之關鍵參數之一。於低滲透性岩體的取熱效率受控於裂隙位態與使裂隙滑動或張裂的臨界壓力 [15-17]。在相同的岩石應力張量環境底下，裂隙位態決定作用在裂隙上之正向應力。換言之，裂隙導水能力好壞受裂隙自身位態與現地應力張量影響。

現地應力對於計畫和評估水力壓裂施行策略至關重要。水力壓裂為將水注入井孔中，使岩層產生新裂隙或使既有裂隙滑動，藉此增強岩層滲透性的方法。其中使岩體發生破壞進而產生裂隙的壓力，可以透過

現地應力與岩石的張裂強度進行計算。而使既有裂隙剪脹產生流體通道，所需壓力亦受作用於既有裂隙上之正向應力影響。了解現地應力就可以評估在進行水力壓裂時需施加多少的壓力能使裂隙張開或產生滑動，以維持地熱儲集層的滲透性<sup>[18-21]</sup>。

增強型地熱系統將流體注入岩體內的過程可能會伴隨微地震活動。機制之一與二氧化碳封存中可能造成誘發地震的機制類似，為注入所造成的超額孔隙水壓使作用在裂隙上的有效正向應力下降所造成的裂隙/斷層滑動<sup>[22,23]</sup>，其二為注入之冷水與高溫儲集層的溫差所導致熱應力影響導致裂隙破壞<sup>[24]</sup>。現地應力場是評估裂隙滑動的關鍵需求<sup>[14]</sup>。由此可知在誘發地震方面，現地應力對理解地熱候選場址產生誘發地震的潛能與注入行為的執行策略，也扮演不可或缺的角色。

## 核廢料最終處置

核廢料最終處置的目標是將這些廢料永久地隔離和封存，以防止核輻射對人類和生態系統造成危害。國際間普遍認為地質處置是較為可行的處置方式。核廢料最終處置需尋求長期穩定、低滲透性的岩石做為「天然障壁系統」，其隔離與遲滯被視為處置場的重要功能之一，是多重障壁系統不可或缺的部分，這類地質條件必須經過篩選。而其中，現地應力即為地質條件評選的要素之一。現地應力環境資訊對核廢料最終處置之影響如下：

1. 對母岩滲透特性之影響<sup>[25]</sup>；
2. 開挖損傷區的形成評估；
3. 地下處置設施之空間規劃與配置、處置母岩之開挖與支撐工法選定、處置坑道之結構穩定性與功能性<sup>[26-28]</sup>。

前兩項與安全評估息息相關。對於需要良好密封性的核廢料處置場址而言，母岩的滲透性在性能評估中扮演著重要的角色<sup>[25]</sup>。處置場之母岩通常會選用低滲透性的岩類，由裂隙的滲透性主導母岩的滲透性。研究認為，應力變化導致的裂隙閉合、開啟或剪脹是改變滲透性的主要原因<sup>[29,30]</sup>，因而需要現地應力以評估裂隙水力-力學特性。

核廢料最終處置需要在地底深處進行地下處置設施與處置隧道的開挖，而現地應力控制了開挖面周圍應力場的分布。開挖所造成的岩體損傷將導致岩體強

度、變形性與滲透性等工程性質的改變，進而影響圍岩阻絕與遲滯核種向外釋放與遷移的功能<sup>[26]</sup>。根據研究，深層坑道相較於淺層坑道而言，相對較高的現地應力可能引發剝落破壞（stress-induced spalling）。坑道周圍之穩定性與破壞模式取決於現地應力主應力之大小、方向與岩石之單壓強度<sup>[31]</sup>。

最後，岩體的力學特性及其所處的現地應力環境資訊，可用以預測處置隧道規劃與設計。如地下處置設施之空間規劃與配置、處置母岩之開挖與支撐工法選定、處置坑道之結構穩定性與功能性<sup>[27]</sup>。現地應力場資訊亦可以應用在建立處置系統之安全功能指標、廢棄物罐的抗壓性能、處置隧道開挖過程的應力擾動、處置隧道設計之方向、工程障壁的穩定性（應力重新分布造成的岩體應變）、長期潛變效應...等等，可說是不可或缺的分析因子之一。

## 現地應力量測方法與施測策略

由前一章節我們已經知曉現地應力對地質資源開發之重要性，現地應力資訊必須納入探勘、設計與監測項目中。現地應力量測方法五花八門，每個方法都各自有其優缺點與限制。因此選擇合適的量測方法，並訂定完整的現地應力特徵化策略。

當我們進行場址調查，對地下工程場址或區域特性進行特徵化/描述，目標是建立一個包含地形、土壤、岩石、構造、水文地質、地球化學和（熱）力學特性的三維工程地質模型，而當中也包含了現地應力。欲建立一個完整的三維應力模型，或稱最終岩石應力模型（final rock stress model），我們可以分為三個階段：(1) 建立最佳預估應力模型（best estimate stress model）；(2) 現地應力量測；(3) 建立整合應力判定（integrated stress determination），進而完成最終岩石應力模型<sup>[32]</sup>，如圖 2。

## 建立最佳預估應力模型

在進行應力量測之前，藉由蒐集可取得之資料，瞭解場址所處的應力場、構造地質環境，以確立量測項目之目標。蒐集的資料包含板塊尺度的世界應力圖資料庫、地貌地形、地殼變形，逐漸向場址處縮小尺度進入斷層尺度，如地質構造等等。再透過既有鑽井與岩心中觀察的現象，如既有井孔中的岩層的穩定

最佳預估應力模型 (Best estimate stress model)		應力量測方法 (stress measurement methods)		整合應力判定 (Integrated stress determination)		最終岩石應力模型 (Final rock stress model)
萃取資料	預測之應力種類	孔內量測方法	水力破裂法 既存裂隙水力法 套管致裂法 孔內應力釋放法 孔內破壞	判定應力模型	水力破裂法 既存裂隙水力法 套鑽法 震源機制解 斷層滑移分析 其他	尺度關係
	世界應力圖資料庫					
地貌地質資料	地貌 地形 冰河效應 抬升 沉降	基於岩心之量測方法	非彈性應變回復法 差應變取錄分析法 異向波速法 岩芯解裂 音射效應	數值模型	岩石力學 參數 邊界條件 幾何形態 使用之軟體特性(邊界元素法、離散元素法、有限元素法)	
	地層 岩石種類 延伸 邊界 真向性					
	地質構造 斷層 礦物脈 岩脈 裂隙帶 節理					
鑽井和岩芯資料	鑽井資料 穩定性 井孔破壞 斷層擦痕分析 岩石品質 地下水	地震	開採誘發地震 流體誘發地震 水庫誘發地震			
	岩芯資料 岩芯解裂 斷層擦痕分析					
現有資料		新資料		整合資料		最終資料

圖 2 建立最終岩石應力模型之步驟 (翻譯自 Stephansson and Zang<sup>[32]</sup>)

性、井孔破壞、裂隙分布、地下水資訊，或岩心是否有發生餅裂現象等等，推估場址尺度的可能現地應力資訊。藉由統整這些資訊，以確立量測項目的目標及訂定及合適的現地應力量測方法<sup>[32]</sup>。

在建立現地應力量測策略時，首先需確立量測目標。如：僅量測主應力方向、量測一個或多個主應力分量大小、量測完整的應力張量、監測場址內應力狀態的變化。再如參數的給定是利用過去資料推估還是實際測量、量測數值與場址環境的解釋相容性、準確度、評估量測結果不確定性和可能之空間變異性。另外尚包括施作程序確認、是否需多種不同的量測方法來交互驗證、數值模擬的支持、品質管控等等<sup>[33]</sup>。

應力評估策略中亦不能僅依賴單一組測量數據，結合在不同位置及深度進行的測量數據可以使資訊更加完整。當各種測量結果是在應力變化明顯的不同位置進行時，必須提出合理的內插方法及規則，並確定內插方法涉及之假設的可靠度。若欲將結果外插到範圍更大的區域，應確定外插的信心水準。地形、地質和岩性變化都可能影響應力張量，因而只有直接進行現地應力量測才能確定。由於這些因素對岩石力學和水文地質學性質至關重要，因此它們應該在最終岩石應力模型報告中詳細說明<sup>[33]</sup>。

### 現地應力量測

在進行現地應力量測前，ISRM 建議先建立最佳預估應力模型，可以用於選擇合適的現地應力量測方法。不同種類的現地應力量測方法都有其優勢與限制，舉凡施測深度、量測結果的維度、數值精度、與施測位置等<sup>[34]</sup>。以最為廣泛應用的套鑽法 (overcoring) 與水力破裂法 (hydraulic fracturing) 為例，分別說明於下：

套鑽法的原理是利用地下受壓之岩層，再解壓後會產生膨脹性應變，利用應變計加以量測，再進行分析岩盤中現地應力之大小、方向及分布情形。在欲量測的位置鑽鑿先導孔，並將應變計放置於先導孔內，施作流程如圖 3 所示。當實施套鑽時，岩石因解壓產生的應變便會由應變計記錄下來。此方法可以藉由一個點量測到現地應力資訊，然而套鑽法須要既有坑道，若遇到岩盤變形涉及非彈性的行為時，此方法也不適用，此外，套鑽法對於細小的變形行為格外敏感，量測獲得的數值經常較為發散<sup>[34,35]</sup>。

水力破裂法的原理是在井內利用上下封塞 (straddle packer) 孤立一個區段，以流體注入至該區段內 (通常是水) 加壓使岩層中產生新裂隙。在井壁上生成新的裂隙必須克服作用於井壁上之最小切向應力，裂隙持續延伸則須克服生成之裂隙面上之正向應力<sup>[34,36]</sup>，施作原理

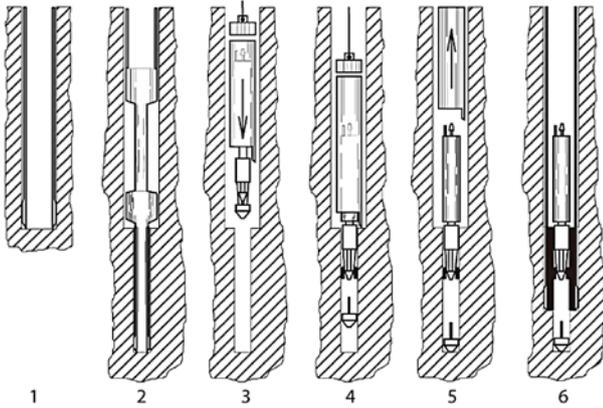


圖 3 套鑽法的實施步驟示意圖 [35]

如圖 4(a)。利用量測裂隙關閉時的壓力及彈性力學的解 (Kirsch solution)，推求現地應力場 [37]。此方法所量測到的現地應力準確度高，但其要求垂直應力不可為最小主應力，且僅能推求水平主應力，可與其他應力量測方法結合，例如觀察井孔破裂。

既存裂隙水力法 (Hydraulic Test of Pre-exist Fracture, HTPF) [34,36] 將施加壓力的目標更改為井孔內的既存裂隙，藉由量測作用於裂隙上的正向應力推求完整的應力張量，施作原理如圖 4(b)。此方法得以克服水力破裂法的垂直應力不能為最小主應力之限制，但必須找到 6 個以上不同位態的既存裂隙，所花的時間較長，通常會作為水力破裂法無法施行時之備用方案。此外水力破裂法的試驗段內不得有既存裂隙存在，而既存裂隙水力法的試驗段則僅能有一個裂隙存在，由於試驗將注入流體，因此會影響鑽孔周圍的水化學環境 [34,36]。

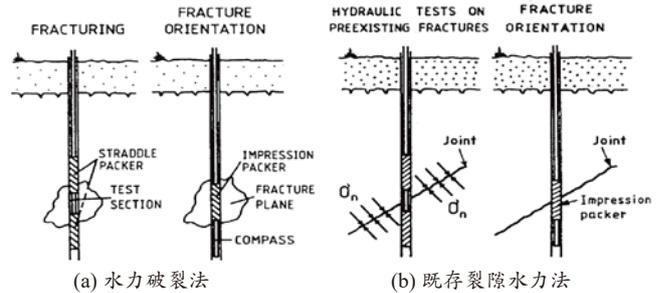


圖 4 井下現地應力量測原理示意圖 [36]

其它方法如門止法 (doorstopper) 與隧道反算法 (back analysis) 需有既有坑道；岩心餅裂 (core discing)、非彈性應變回復法 (anelastic strain recovery) 等均僅能作為定性評估或僅為概略性之估計方法，井孔破裂 (borehole breakout) 通常要深井且只能得到水平主應力方向 ... 等等 [34]。表 1 中將常見方法的優缺點逐一列舉。不同種類的現地應力量測方法有其合適的項目及用途，在建立場址的完整現地應力資訊時，應考慮多項量測或評估方法之數據，進行綜合分析並相互驗證比對 [34]。

### 建立整合應力判定

建立最終岩石應力模型的最後階段，為整合不同應力量測方法的數據。整合工作可以避免單個量測方法缺點與限制造成量測結果偏離現實，相互比對亦可以提升量測結果的可靠度。整合數據的方式有不同的演算法，然而最廣泛使用的仍屬最小平方法 [32]。

除整合應力量測結果之外，亦可以數值模擬技術對現地應力場進行研判和解釋，或是描述現地應力對

表 1 不同現地應力量測方法之優缺點 (翻譯自 Ljunggren et al. [34])

方法	2D/3D	優勢	限制	適合使用於
套鑽法	2D/3D	理論和實務上發展最為成熟的技術	由於涉及的岩體體積小而引起的數據分散；需要鑽機	量測至深度約 1,000 公尺處
門止法	2D	在具有裂隙或高壓的岩石內可以施作	只能提供二維數據；需要鑽機	軟弱或高壓的岩石
水力破裂法	2D	在既存的鑽井中實施量測；數據集中；涉及相當大的岩體體積；快速	只能提供二維數據；在理論上無法量測最大水平主應力；擾動水化學	淺部至深部；取得應力剖面
既存裂隙水力法	2D/3D	在既存的鑽井中實施量測，可以施作於高壓岩石且水力破裂法與套鑽法皆失敗時	耗時；在鑽井中需有不同位態	在應力評估的早期階段，當水力破裂法及套鑽法皆失敗時（由於此方法耗時）
岩心餅裂	2D	在鑽井時就可以獲得的資訊	僅有質化量測	在應力評估的早期階段
井孔破裂	2D	在早期就可以獲得的資訊，相對快速	僅限於方向資訊。理論上需要進一步發展以推斷應力大小	通常發生於深井
震源機制解	2D	可用於相當深深度的應力評估	僅有非常深處的資訊	
凱瑟效應	2D/3D	能夠輕易量測	相對不高的可信度	粗略的評估
黏彈性應變回復法 / 差應變曲線分析法 / 岩石樣本之異向性特性 (RACOS)	2D/3D	可在相當深的深度使用	對微觀尺度進行複雜的測量，對多個因素敏感。	在相當深的深度評估應力狀態
反算法	2D	快速且簡單，因涉及的岩體體積大具高度確定性	理論上不具唯一解	僅可以使用於建造隧道時
分析地質資料	2D/3D	花費較少	非常粗糙的預估，可信度低	在計畫的早期

現地環境的影響 [38,39]，如圖 5。在對於斷層帶或破碎帶等具有較低岩石品質、應力變化快速而不容易進行直接量測的區域，數值建模能夠提供現地應力大小和方向的預測，並呈現最終岩石應力模型之不確定性。

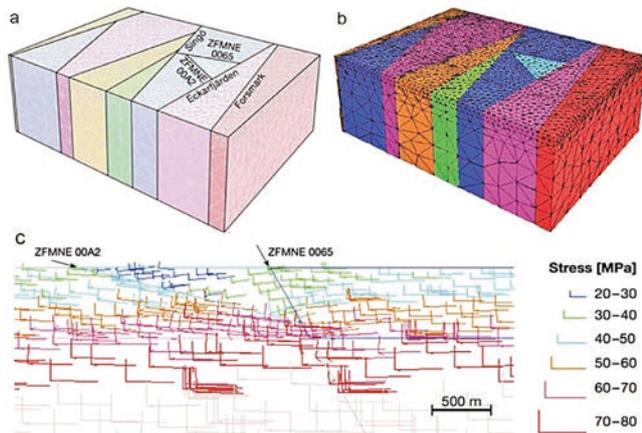


圖 5 使用離散元素法 3DEC 進行應力場數值模擬。(a) 瑞典 Forsmark 核廢料處置場主要變形帶位置；(b) 3DEC 模型；(c) 數值分析獲得之主要變形帶 (ZFMNE) 上方和下方的主應力 (大小與方向) 分布 [40]。

### 現地應力量測之案例與應用

現地應力是涉及大地工程與地質資源開發項目不可或缺的資訊，針對各類現地應力量測方法已有諸多參考文獻值得參考 [35,36,41-43]，且國、內外已有許多施作案例與應用，本文整理數個實際案例，包括場址應力特性、設施設計、合適的量測方法、災害風險評估，以提供我國於推動大型資源開發邁入實作階段時參考。

### 現地應力量測於國內之發展

台灣現地應力量測，早期為岩盤隧道工程與採礦工程之應用，陳錦清與俞旗文曾在雪山隧道進行水力破裂試驗 [44]；採礦工程的部分，石作珉等人，在花蓮聯峯石礦場以套鑽法進行對現地應力變形量測的研究 [45]；接續為放射性廢棄物處置應用，台灣 H 區與 K 區在潛在處置母岩特性調查與評估階段進行了一些現地應力量測工作 [46]，H 區與 K 區現地應力量測結果如圖 6 所示。

H 區根據非彈性應變回復法進行現地應力量測。顯示 H 區所在位置之現地應力環境，正處於正斷層的應力環境 [47]。並透過地質探勘孔之岩心、地表露頭的裂隙類型及裂隙面理搭配定年分析結果推斷古應立場隨時間的變化。由於 H 區未能順利進行水力破裂法之現地應力量測法，採用岩心的非彈性應變回復法推估現地應力數值，應用時需慎重考量數據的不確定性 [46]。

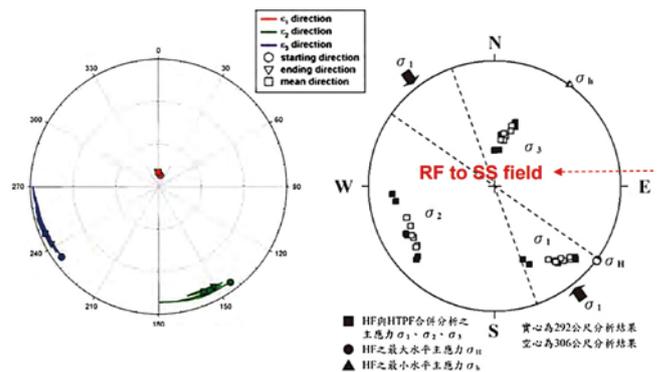


圖 6 左圖為 H 區之非彈性主應變方向投影圖 [47]，右圖為 K 區現地應力量測結果 [48]。

K 區於 KMBH01 鑽孔使用水力破裂法與既存裂隙水力法量測現地應力，施測深度分別為 238 m、292 m、300 m、306 m 和 430 m，300 m 使用既存裂隙水力法，量測結果顯示為走滑斷層或逆衝斷層應力場；其他深度使用水力破裂法，量測結果卻顯示現代應力場是走滑斷層應力場，反映出現地應力隨深度的異質異向性。此外，現地應力之試驗結果，需考量下列不確定性：(1) 水力破裂法或既存裂隙水力法之試驗位置非常靠近區域構造，可能導致現地應力量測值的偏差；(2) 水力破裂法假設現地應力其中之一主應力方向與鑽孔軸平行 [46]。

在進行高放規劃設計時，上述現地應力之量測數據於下列項目起到了關鍵的作用。設計廢棄物罐圍壓需求時，考慮現地應力之大小確保廢棄物罐的抗壓能力符合需求，同時以數值模擬求得各分段的抗壓性能。在處置隧道設計時考慮現地應力及應力方向，因處置隧道長軸與最大水平主應力方向相同或小於 5 正負 30 度之內，對於降低處置隧道及處置孔剝落有顯著效果 [49]，將處置隧道與最大水平主應力夾角 16.4 度。未來仍可藉由現地應力資訊，考慮隧道岩體潛應變。

近期台灣於封存與地熱，亦進行了一些現地應力量測 / 評估工作。增強型地熱系統的部分，江俞萱以水力破裂法量測之資訊進行宜蘭地區斷層再活動之評估工作 [50]、孫天祥利用非彈性應變回復法 (anelastic strain recovery) 評估宜蘭清水現地應力狀態 [11]，高子恩結合岩心中視構造分析，探討紅柴林地下構造與應力之關係 [12]；此外汪蘭君利用水力破裂法結合裸孔伸張寬度進行鐵砧山現地應力場與斷層再活動分析 [51]，Heidbach 等人利用震源機制反算繪製台灣應力地圖 [52]。

## 現地應力量測於國外之發展

### 二氧化碳封存案例：北極光（挪威）

北極光是法國道達爾能源（TotalEnergies）、荷蘭皇家殼牌石油公司（Shell）及挪威國家石油公司（Equinor）所推出之碳捕捉及封存計畫。北極光案場以 XLOT（extend leak-off test）試驗方法測得最小主應力（XLOT 以水力破裂法為基礎，惟 XLOT 注重於岩層破裂之壓力以確保井孔鑽鑿之穩定性），利用 Kirsch model 結合岩層之彈性常數與鑽井引起的裂隙（drilling induced fracture）發生之條件，限制最大主應力可能的分布區間<sup>[53]</sup>。

藉由北極光案場現地應力量測資訊，了解應力方向和大小。將垂直應力（ $\sim 25\text{MPa}$ ）以及可能之最大、最小水平主應力（SH、Sh）組合，繪製摩爾圓並與破壞包絡線（2 種強度參數組合），如圖 7 所示，根據現地應力與破壞包絡線，即可進行現況以及各種灌注壓力下之安全係數計算。同時透過現地應力之量測結果結合岩層之礦物組成分析繪製水平應力剖面，建立井周圍的應力分布與裂隙發展模擬<sup>[53]</sup>，如圖 8 所示。

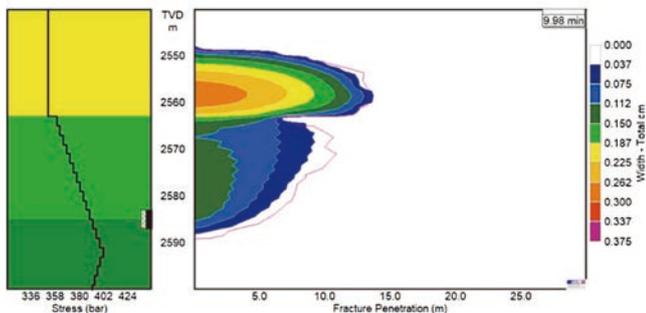


圖 7 XLOT 試驗裂隙生成 3D 模擬。左圖以不同顏色呈現地層分布，以黑線呈現現地應力資訊，黑色方框為 XLOT 試驗的實施位置。右圖為 XLOT 所造成的裂隙分布，不同顏色表示其寬度<sup>[53]</sup>。

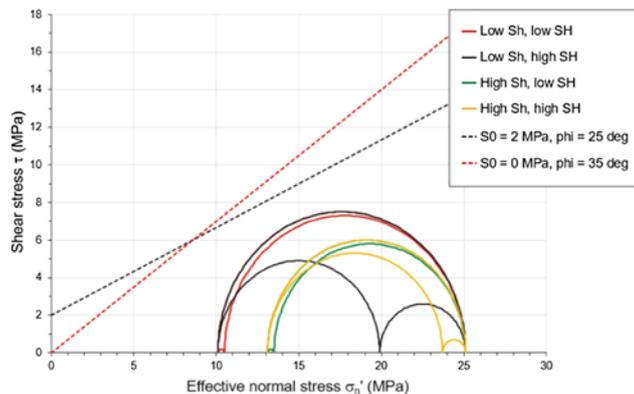


圖 8 以莫爾圓呈現不同條件下之岩層應力狀態，包含鄰近斷層的破壞包絡線<sup>[53]</sup>。

### 增強型地熱系統：The Geysers（美國）— 灌注流體誘發地震推估有效主應力方向變化與破裂機制改變

The Geysers 位於美國加州，屬乾熱蒸氣型地熱田。該地熱區自 1960 年起開始生產，商業運轉至今已超過 50 年，總裝置容量可達 1.6 GWe，為美國最重要的地熱區。然而該地區經常性的發生地震，其中也不乏因地熱開發活動注水所引起的誘發地震。注入期間無法直接量測現地應力時使用應力推估方法，Martinez-Garzón 等人及 Boyd 等人使用地聲感測器（geophone）和地震儀（seismometer）蒐集注入過程之地震資訊，利用地震矩張量（moment tensor）反演現地應力，如圖 9 所示。得知液體注入地層所造成的應力場變化。與觀測之地震活動相結合，探討液體注入與誘發地震之關係與推斷儲集層特性。研究結果中表明了隨著注水的過程，應力場會發生旋轉。隨注入體積的增加，應力狀態往走向滑移的方向發展，可能是由於岩石冷卻和產生的伸張應變所造成<sup>[54,55]</sup>。

### 一種新型態現地應力量測方法

既存裂隙間的複雜交互作用主導了岩層潛在的不穩定性<sup>[56]</sup>。岩盤工程的穩定性分析及監測中常見的做法是利用現地應力量測結果與岩石試驗數據對岩石與裂隙的水力-力學參數進行推估。然而持續存在的問題在於，如何在現地環境下以合適的尺度取得裂隙之現地特性<sup>[57]</sup>。用於現地裂隙特性的逐步注入法（Step-rate Injection Method for Fracture in-situ properties, SIMFIP）可進行包含注入前的現地應力與岩石水力-力學參數之調查、注入階段與注入後階段的三維變形量監測。同時也能夠結合數值模型推估現地應力張量<sup>[57]</sup>。

SIMFIP 為一套在對既存裂隙進行水力破裂的同時監測裂隙位移量、水壓、水流流速、溫度與壓力的系統<sup>[58]</sup>，其系統設置如圖 10。其裂隙位移量的量測方法為將兩個金屬環固定於施測裂隙的上下盤，以脈衝及階段式兩種方式注入水壓，並利用應變計紀錄兩個金屬環之相對位移。依據位移量、水壓、水流流速推估裂隙在現地環境下的水力-力學特性與行為。

SIMFIP 亦可以做為現地應力推估之方法。G 依據施測區域內的裂隙位態、孔隙水壓與材料參數（完整岩石、裂隙與流體的水力-力學參數）建立 SIMFIP 施測區間的數值模型，如圖 11。現地應力場作為唯一可變動的邊界條件，將數值模型模擬之試驗數據與真實試

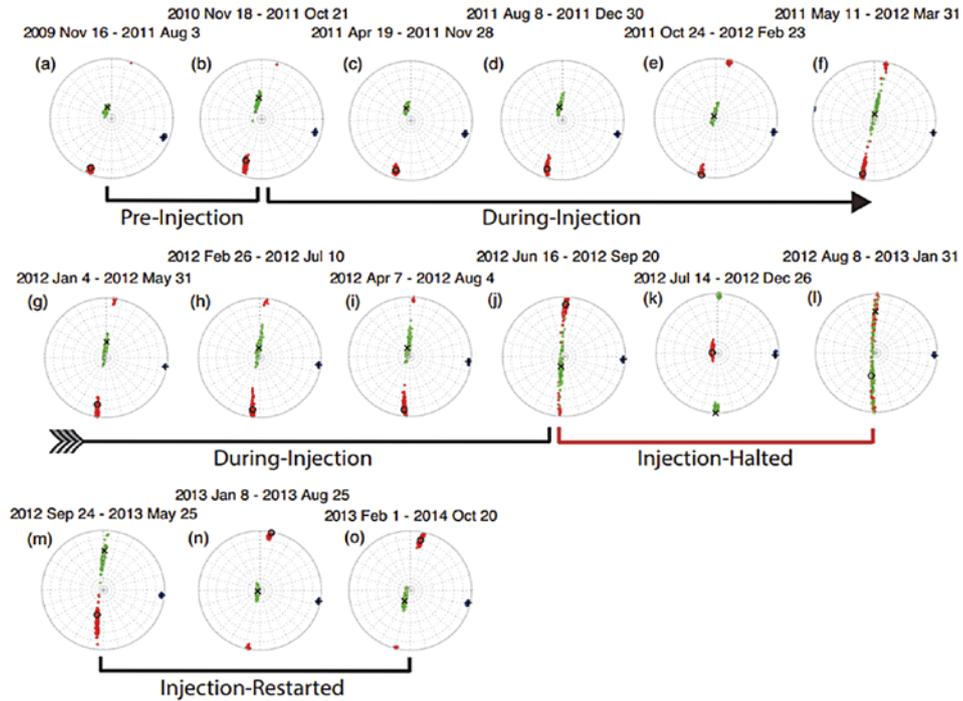


圖 9 使用 STRESSINVERSE [58] 在 15 個重疊時間段內獲得的主應力方向 [55]

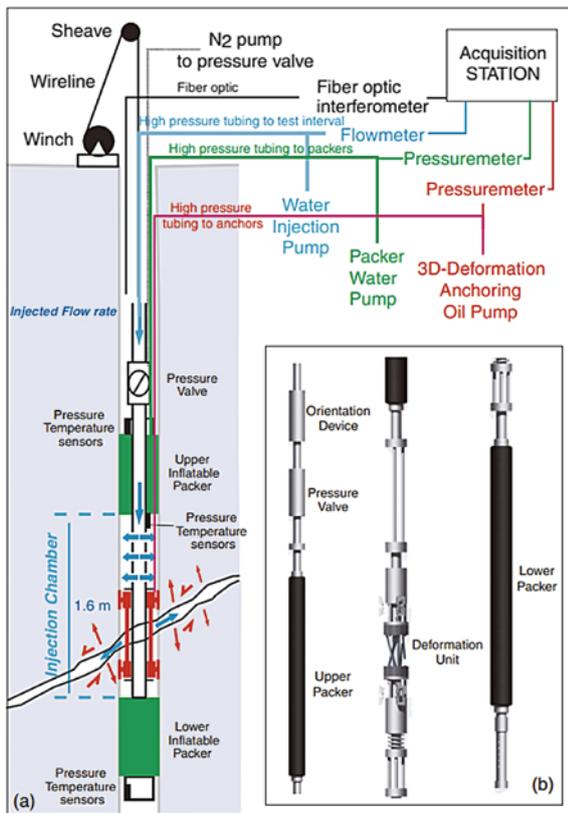


圖 10 (a) SIMFIP 試驗的設備設置；(b) 井下探管組成 [57]。

驗數據進行比對，推估可能的現地應力場 [59]。其結果貼合該區域過去文獻所描述之應力張量，顯示 SIMFIP 同時具備量測裂隙現地參數與現地應力推估的能力。

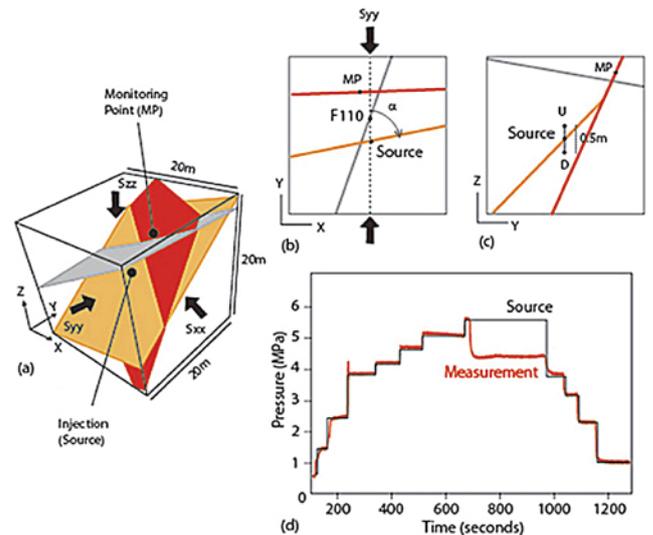


圖 11 (a) 利用 3DEC 建立之 SIMFIP 施測區間之數值模型；(b) 數值模型之水平剖面；(c) 數值模型之垂直剖面；(d) 試驗之壓力與時間關係圖 [59]。

### 結論

現地應力與深地層資源開發工程息息相關，包含二氧化碳封存、增強型地熱系統與核廢料最終處置等均必定需要應力場資料以進行開發可行性、生產控管與衍伸之風險等評估，其結果更會影響開發標的之經濟效益與安全性等，因此必須被視為開發流程重要的一環。

現地應力的量測方法雖然有不同的方式，但為能建立精準且完整之應力場特徵，建議遵循 ISRM 之建議方法 (suggestion method)，參考以下程序：(1) 現地應力量測目標、(2) 建立最佳預估應力模型、(3) 選定合適的應力量測方法、(4) 將資料彙整為整合應力判定模型並建立、(5) 最終岩石應力模型。

現地應力量測方法已發展多年已相當成熟，但隨著科技發展，精密度及穩定性更高之應力應變感測儀器已被開發應用（如光纖感測元件等），因此未來如何導入高精密度儀器並應用之孔內觀測，是一個值得評估及發展的方向。

## 誌謝

本文承經濟部能源局契約編號 112-E0216「碳捕存再利用整合示範計畫」與台灣電力股份有限公司「用過核子燃料最終處置計畫—潛在處置母岩特性調查與評估階段—104 ~ 107 年度計畫」和「前瞻地熱技術—焱子坪、深澳及禮樂地區之地熱初探」經費上的支持及所有參與人員的專業與努力，特此致上最高感謝之意。

## 參考文獻

- Kaminskaite, I., Piazzolo, S., Emery, A.R., Shaw, N., and Fisher, Q.J. (2022). "The importance of physiochemical processes in decarbonisation technology applications utilizing the subsurface: A review." *Earth Science, Systems and Society*, **2**, 10043.
- Zoback, M.D. and Gorelick, S.M. (2012). "Earthquake triggering and large-scale geologic storage of carbon dioxide." *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **109**(26), 10164-10168.
- Song, J. and Zhang, D. (2013). "Comprehensive review of caprock-sealing mechanisms for geologic carbon sequestration." *Environmental Science and Technology*, **47**(1), 9-22.
- 鍾明劍、譚志豪 (2016)。「二氧化碳地質封存誘發地震之定量風險評估」，中興工程，第 113 期，第 3-14 頁。
- Hawkes, C.D., Bachu, S., Haug, K., and Thompson, A.W. (2005). "Analysis of in-situ stress regime in the Alberta Basin, Canada, for performance assessment of CO<sub>2</sub> geological sequestration sites." *Proceedings of the Fourth Annual Conference on Carbon Capture And Sequestration*, DOE/NETL, 22.
- Hawkes, C. and McLellan, P. (1999). "A new model for predicting time-dependent failure of shales: Theory and application." *Journal of Canadian Petroleum Technology*, **38**(12), 49-55.
- Streit, J.E. and Watson, M.N. (2004). "Estimating rates of potential CO<sub>2</sub> loss from geological storage sites for risk and uncertainty analysis." *Proceedings of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*, Vancouver, Canada.
- Zoback, M.L. and Zoback, M. (1980). "State of stress in the conterminous United States." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **85**(B11), 6113-6156.
- Zoback, M.L. (1992). "First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: The world stress map project." *Journal of Geophysical Research*, **97**(B8), 11, 703-11, 728.
- Zoback, M.D., Townend, J., and Grollmund, B. (2002). "Steady-state failure equilibrium and deformation of intraplate lithosphere." *International Geology Review*, **44**(5), 383-401.
- 孫天祥 (2014)，臺灣宜蘭清水地熱區之應力狀態研究，國立臺灣師範大學地球科學系，碩士論文，共 66 頁。
- 高子恩 (2016)，宜蘭紅柴林地區現地應力與導水裂隙關係之研究，國立臺灣師範大學地球科學系，碩士論文，共 109 頁。
- Massachusetts Institute of Technology (2006). *The Future of Geothermal Energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Jeanne, P., Rutqvist, J., Dobson, P.F., Walters, M., Hartline, C., and Garcia, J. (2014). "The impacts of mechanical stress transfers caused by hydromechanical and thermal processes on fault stability during hydraulic stimulation in a deep geothermal reservoir." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **72**, 149-163.
- Barton, C.A., Zoback, M.D., and Moos, D. (1995). "Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock," *Geology*, **23**(8), 683-686.
- Ito, T. and Zoback, M.D. (2000). "Fracture permeability and in situ stress to 7 km depth in the KTB scientific drillhole." *Geophysical Research Letters*, **27**, 1045-1048.
- Townend, J. and Zoback, M.D. (2000). "How faulting keeps the crust strong." *Geology*, **28**, 399-402.
- Barton, C.A., Hickman, S.H., Morin, R., Zoback, M.D., and Benoit, D. (1998). *Reservoir-Scale Fracture Permeability in the Dixie Valley, Nevada, Geothermal Field*. SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering, SPE-47371.
- Hickman, S., Zoback, M., and Benoit, R. (1998). *Tectonic Controls on Fault-Zone Permeability in a Geothermal Reservoir at Dixie Valley, Nevada*. SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering. SPE-47213.
- Hickman, S.H., Zoback, M.D., Barton, C.A., Benoit, R., Svitek, J., and Summers, R. (1999). *Stress and Permeability Heterogeneity within the Dixie Valley Geothermal Reservoir: Recent Results from Well 82-5*. USDOE Idaho Operations Office, Idaho Falls, ID; Oxbow Geothermal Corporation (US). DOE/ID/13762.
- Hickman, S.H. and Davatzes, N.C. (2010). "In-situ stress and fracture characterization for planning of an EGS stimulation in the Desert Peak Geothermal Field, Nevada." *Proceedings of the Thirty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University.
- Shapiro, S.A., Patzig, R., Rothert, E., and Rindschwentner, J. (2003). "Triggering of seismicity by pore-pressure perturbations: Permeability-related signatures of the phenomenon." *Thermo-Hydro-Mechanical Coupling in Fractured Rock*, 1051-1066.
- Rutqvist, J., Dobson, P.F., Garcia, J., Hartline, C., Jeanne, P., Oldenburg, C.M., Vasco, D.W., and Walters, M. (2015). "The northwest Geysers EGS demonstration project, California: Pre-stimulation modeling and interpretation of the stimulation." *Mathematical Geosciences*, **47**, 3-29.
- Alam, A.B., Fujii, Y., Dipu, N.H., Sophea, B., and Rahim, A.B. (2023). "Importance of stress and temperature-dependent permeability of rocks and its application in underground nuclear waste disposal." *MIST International Journal of Science and Technology*, **11**,

- 39-49.
25. Majer, E.L. and Peterson, J.E. (2007). "The impact of injection on seismicity at the Geysers, California Geothermal Field." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **44**(8), 1079-1090.
  26. 楊長義、李宏輝 (2020), 低放射性廢棄物處置現地應力對處置坑道結構穩定影響研析, 行政院原子能委員會核能研究所。
  27. 楊長義、李宏輝 (2021), 低放射性廢棄物處置現地應力量測影響因子研析, 行政院原子能委員會核能研究所。
  28. Christiansson, R. and Janson, T. (2003). "A test of different stress measurement methods in two orthogonal bore holes in Äspö Hard Rock Laboratory (HRL), Sweden." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **40**(7-8), 1161-1172.
  29. Pusch, R. (1989). "Alteration of the hydraulic conductivity of rock by tunnel excavation." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, **26**, 79-83.
  30. Kelsall, P.C., Case, J.B., and Chabannes, C.R. (1984). "Evaluation of excavation induced changes in rock permeability." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, **21**(3), 123-35.
  31. Hoek, E. and Brown, E.T. (1980). "Empirical strength criterion for rock masses." *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, **106**(9), 1013-1035.
  32. Stephansson, O. and Zang, A. (2012). "ISRM suggested methods for rock stress estimation—Part 5: Establishing a model for the in situ stress at a given site." *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **45**, 995-969.
  33. Hudson, J.A., Cornet, F.H., and Christiansson, R. I. S. R. M. (2003). "ISRM suggested methods for rock stress estimation—Part 1: Strategy for rock stress estimation." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **40**(7-8), 991-998.
  34. Ljunggren, C., Chang, Y., Janson, T., and Christiansson, R. (2003). "An overview of rock stress measurement methods." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **40**(7-8), 975-989.
  35. Sjöberg, J., Christiansson, R., and Hudson, J.A. (2003). "ISRM suggested methods for rock stress estimation—Part 2: Overcoring methods." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **40**(7-8), 999-1010.
  36. Haimson, B.C. and Cornet, F.H. (2003). "ISRM suggested methods for rock stress estimation—Part 3: Hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF)." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **40**(7-8), 1011-1020.
  37. Kirsch, (1898). "Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre." *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure*, **42**, 797-807.
  38. Sturgul, J.R., Scheidegger, A.E., and Grinshpan, Z. (1976). "Finite-element model of a mountain massif." *Geology*, **4**(7), 439-442.
  39. te Kamp, L., Konietzky, H., and Blümling, P. (2020). *Three-Dimensional Modeling of the Planned Wellenberg Repository Site in Switzerland*. Numerical Models in Geomechanics, CRC Press, 385-390.
  40. Hakami, H. (2006). *Numerical Studies on Spatial Variation of the In Situ Stress Field at Forsmark—A Further Step. Site Descriptive Modelling Forsmark-Stage 2.1*. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, R-06-124.
  41. 施國欽、孫荔珍 (1994), 「岩體現地試驗之簡介」, 地工技術雜誌, 第 46 期, 第 5-21 頁。
  42. 楊明宗、歐陽湘、柳志錫、吳建宏 (2004), 「水力破裂法現地應力量測及破壞準則探討」, 地工技術雜誌, 第 99 期, 第 5-14 頁。
  43. 俞旗文 (2007), 「利用取樣岩心量測岩石現地應力的技術」, 中興工程, 第 94 期, 第 11-18 頁。
  44. 陳錦清、俞旗文 (1994), 「坪林隧道沿線水力破裂法現地應力量測」, 地工技術雜誌, 第 46 期, 第 35-46 頁。
  45. 石作珉、鄧博維、劉振維 (1994), 「利用套鑽法量測現地應力之研究」, 地工技術雜誌, 第 46 期, 第 23-34 頁。
  46. 台灣電力公司 (2019), 用過核子燃料最終處置計畫潛在處置母岩特性調查與評估階段我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告, SNFD2017。
  47. 葉恩肇、李偉誠、孫天祥、林為人、林蔚、林鎮國、陳文山 (2012), 「花蓮和平地區非彈性應變回復法之現地應力量測」, 地工技術, 第 131 期, 第 23-34 頁。
  48. 時振梁、環文林、張裕明、戴聯琦、陶壽福、丁國瑜、常向東、李小軍、汪素雲、金巖、李洪訓、楊玉林、張政治、丁鍾鼎、王守業、張志中、張曉東、潘華、陳昌斌、宋昭儀、吳宣 (2004), 核電廠地震安全性評價中的地震構造研究, 中國電力出版社, 共 351 頁。
  49. SKB (2009). *Underground Design Forsmark Layout D2*, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, Sweden, R- 08-116.
  50. 江俞萱 (2014), 宜蘭三星清水地區現地應力與斷層再活動分析, 國立中央大學地球科學系碩士論文, 共 130 頁。
  51. 汪蘭君 (2009), 鐵砧山現地應力與斷層再活動分析, 國立中央大學應用地質研究所碩士論文, 共 81 頁。
  52. Heidbach, O., Liang, W.T., Morawietz, S., von Specht, S., and Ma, K.F. (2022). *Stress Map of Taiwan 2022*. GFZ German Research Center for Geosciences.
  53. Thompson, N., Andrews, J.S., Wu, L., and Meneguolo, R. (2022). "Characterization of the in-situ stress on the Horda platform—A study from the Northern Lights Eos well." *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **114**, 103580.
  54. Martínez-Garzón, P., Bohnhoff, M., Kwiatek, G., and Dresen, G. (2013). "Stress tensor changes related to fluid injection at the Geysers Geothermal Field, California." *Geophysical Research Letters*, **40**, 2596-2601.
  55. Boyd, O.S., Dreger, D.S., Gritto R., and Garcia J. (2018). "Analysis of seismic moment tensors and in situ stress during Enhanced Geothermal System development at The Geysers Geothermal Field, California." *Geophysical Journal International*, **215**, 1483-1500.
  56. Hoek, E. and Bray, J. (1974). *Rock Slope Engineering*. Institution of Mining and Metallurgy, London.
  57. Guglielmi, Y., Cappa, F., Laçon, H., Janowczyk, J.B., Rutqvist, J., Tsang, C. and Wang, J.S. (2013). "ISRM suggested method for step-rate injection method for fracture in-situ properties (SIMFIP): Using a 3-components borehole deformation sensor." *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **47**, 303-311.
  58. Vavryčuk, V. (2014). "Iterative joint inversion for stress and fault orientations from focal mechanisms." *Geophysical Journal International*, **199**(1), 69-77.
  59. Guglielmi, Y., Nussbaum, C., Rutqvist, J., Cappa, F., Jeanne, P., and Birkholzer, J. (2020). "Estimating perturbed stress from 3-D borehole displacements induced by fluid injection in fractured or faulted shales." *Geophysical Journal International*, **221**(3), 1684-1695. 