

鑽穿九二一地震斷層：「台灣車籠埔斷層深井鑽探計畫」

中央大學地球科學系 蔡義本 王乾盈 馬國鳳 洪日豪
台灣大學地質科學系 宋聖榮

1999 年 9 月 21 日發生集集大地震（九二一地震），震矩規模 7.6，引發車籠埔斷層破裂，在北段之大甲溪南岸附近，地表錯動高達 8 公尺，地下破裂甚至更高，達 14 公尺（由全島 600 多站地震儀及 130 多站衛星定位站資料分析而得），如此巨量的錯動，世所罕見，引起國際科學界極大的重視。

在國科會的支持下，中央大學及台灣大學研究團隊，結合美日德學者共同合作，2004 年 1 月選定台中大坑，進行 2 公里車籠埔斷層深井鑽探計畫（Taiwan Chelungpu-fault Drilling Project, TCDP；圖一），經由鑽探取出之斷層帶岩心及井下量測，研究車籠埔斷層巨量錯動之原因。

鑽井場址先經過高解析度反射震測詳細測繪（圖二），預估在 1100 公尺會鑽遇斷層，並依

此設計鑽井程序。鑽井工程由豐宇及萬大鑽井公司聯合執行，這是台灣首次由本土鑽井公司進行的「公里級全程取岩心」之重大計畫，極具挑戰。

鑽井工程在鑽到 300 公尺深時，大量湧水，情況一度岌岌可危，故提前在 500 公尺下第一次套管保護井壁。到 1000 公尺開始出現目標層-錦水頁岩，接著分別在 1111 公尺、1153 公尺、1222 公尺、1243 公尺出現四個主要斷層帶，尤其重要的，取出的岩心極為完整，為這項計畫立下成功的基礎，也引起國際矚目（圖三）。到 1300 公尺下第二次套管，此深度以上將保留，作為日後長期觀測使用。

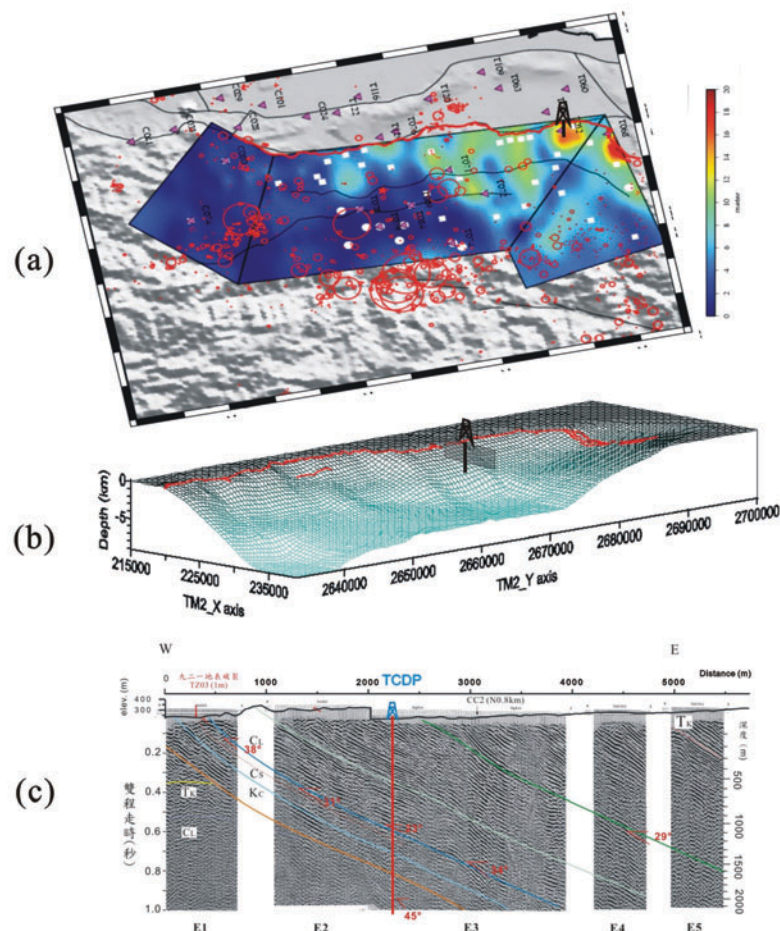
繼續往下鑽，到 1300 多公尺進入更下層之桂竹林層，出現古地震之斷層帶約五帶。更令人興奮的，在 1712 公尺附近鑽穿下面一條老斷層：三義斷層，進入年輕的卓蘭層。鑽穿三義斷層是本計畫另一項重要的目標，一舉能鑽穿兩條重要的斷層，算是相當的「夠本」，也代表本土地質科學研究已有相當基礎，對井程掌握，相當的稱職。本 A 井在 2003 公尺到達目標後停鑽。

現場取出岩心後，即刻進行網路登錄、岩心描述、掃描照相、封存裝箱，也同時進行：氣體分析、流體分析、溫度量測、應力量測、井底生物等分析工作。在下套管前，並委請中油及 Schlumberger 公司，進行井測，為裸露的井壁留下完整的紀錄，對地下岩層物理特性及岩性判斷極為重要。

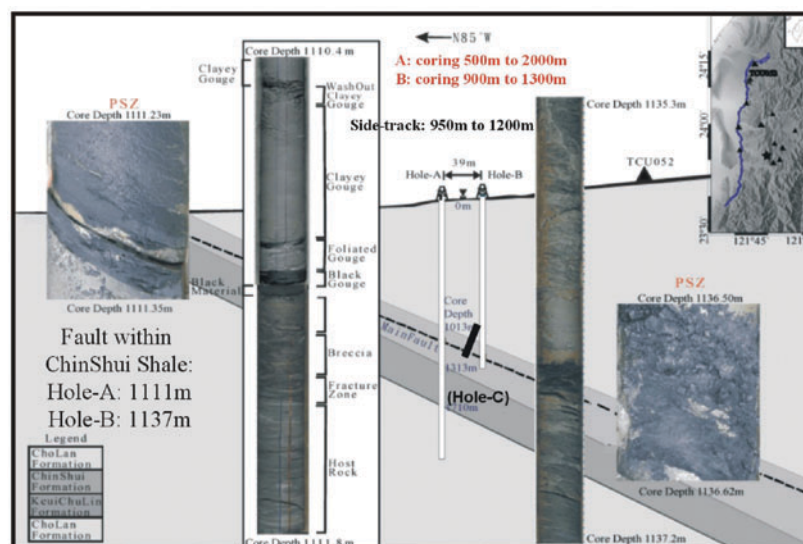
由於本次地震之斷層帶只有一個（1111 公尺），約 12 公分，相當珍貴，不敷各式研究所需，故在完成 2 公里的 A 井後，在距離 40 公尺處，繼續鑽鑿 1300 公尺深之 B 井，但只在 900 至 1300 公尺取岩心。更進一步的，B 井完成後，再做一段側鑽 C 井（1000-1300 公尺），取出第三段斷層帶岩心。也就是，一口井鑽成三口井，且保留兩口 1300 公尺的深井，為後來的「雙井實驗」留下伏筆，此為本計畫算是高明之處。



圖一 台灣車籠埔斷層 2 公里深井鑽探計畫 (TCDP)，深入地下，採集九二一地震斷層的岩心，探討車籠埔斷層巨量滑動的原因。（地點：台中大坑）



圖二 (a)利用周圍測站所觀測到的地震波資料，逆推地震時車籠埔斷層面上的錯動量，在大甲溪南岸，地下錯動量高達 14 公尺。(b)利用反射震測探勘，測繪車籠埔斷層之三維形貌。(c)經過 TCDP 井位之震測剖面，預估於 1110 公尺會鑽遇斷層



圖三 共完成 A 及 B 二井，相距 39 公尺，皆鑽穿主斷層帶。A 井之地層在 0~1000 公尺為砂頁岩互層之卓蘭層，1000~1300 公尺為細粒粉砂岩之錦水頁岩，1300~1710 公尺為以砂岩為主的桂竹林層，1710 公尺以下則為年輕之卓蘭層再次出現。共存在九個主要斷層帶，其中 1111 公尺為本次地震所觸動，1710 公尺則為一條老斷層：三義斷層

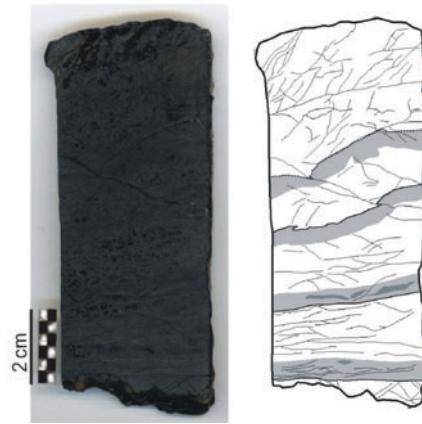
本鑽井計畫獲得國際陸地鑽探組織 (International Continental Drilling Project, ICDP) 協助，列入 ICDP 全球陸地科學鑽井群中，並由設於德國的總部提供：鑽井過程網路登錄系統，及岩心掃描儀。美國地質調查所提供許多技術及人員培訓之支援。日本學者更是絡繹於途，不斷有學者駐地研究。來自國際科學界無私的支持，是本計畫能順利進行的重要原因。

整個鑽井工程在 2005 年 10 月完成，接下來的後續研究包括：A 井一年之溫度測量，B 井之水力爆破實驗，雙井之水壓實驗，井下化學成份分析等。最重要的，在 2006 年七月安裝一串七個之井下地震儀，進行斷層帶微小地震（規模小於 0）四年長期觀測，探討大地震後，斷層面上殘留應力釋放之情形。在 2006 年十一月進行雙井流體灌入實驗，研究雙井間的滲透率、孔隙度等重要參數。

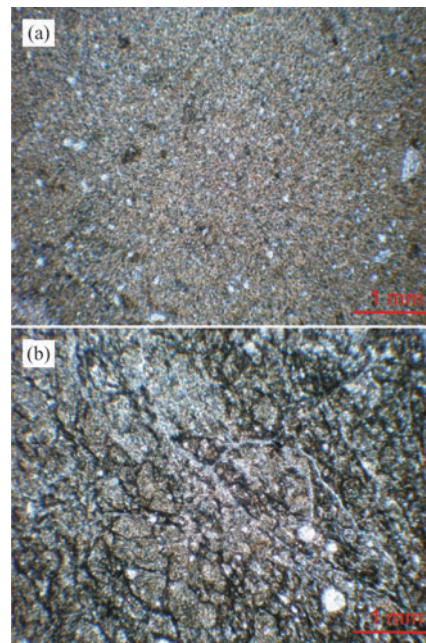
值得一提的，B 井之 400 公尺岩心在取出後，即封存裝櫃，送往日本高知大學岩心實驗室，進行詳細的分析，此實驗室是由建造新一代：地球號海洋鑽井船的 JAMSTEC（日本海洋鑽探研究機構）在陸地設立的對等岩心實驗室，擁有世界上最先進的岩心分析設備。本計畫派遣兩組科學家前往觀察及實習，對培養本國鑽井科技，相當有幫助。B 井之岩心分析完成後，已全數送回台灣。

本計畫已發表超過 10 篇 SCI 論文，其中最重要的是：馬國鳳教授領御的 Nature 論文（2006 年 11 月），述及十二公分厚的滑移帶至少滑過三十三次（圖四），且每一層都非常類似，代表地震行為是會重覆發生的，且由斷層泥顆粒大小算出：地震錯動變形只佔總能量 6%。另外的研究指出：由黏土礦物分析得知地震斷層發生時的溫度超過 1100 度，把斷層帶岩石熔融形成假玄武玻璃（圖五），及斷層泥滲透率比一般低 1 至 2 數量級，化石材料有分解現象等，顯示地震時有可能引發溫度遽增，造成超高壓流體暴增甚或汽化(thermal pressurization)，快速弱化斷層帶，導致巨量錯動。

本計畫取出之岩心總長 2200 公尺，連續且完整，紀載著台灣新期造山運動（蓬萊造山運動）從啓蒙到最興盛期的一套完整的歷史，相當的寶貴。中油公司台灣油礦探勘總處鼎力協助，處理



四 12cm 長的核心斷層帶是由多層次重複地震滑移面所組成，在每一層最下方為 5mm 厚的微細顆粒，最底下之一層為最平緩的滑移面，也就是九二一地震主要斷層滑移面（斷層泥）。利用電子顯微鏡可觀測斷層泥顆粒大小及數量，並據以估算地震破碎能。



圖五 (a)在偏光顯微鏡底下，斷層泥均質性超細粒磨碎岩之影像，相當均勻，代表該次地震所磨碎，內藏有假玄武玻璃。(b)非均質性磨碎岩之影像，有許多裂隙和變形的方解石，顯示為老的滑移帶。

岩心暫存、取樣，及化石鑑定，並在鑽井技術提供顧問意見。A 井完整岩心已移存中央地質調查所，做長期保存，B 井岩心存在台大，C 井岩心存在中大，歡迎各界索取，激發更多的研究。