

巧奪下一代資源的科技——頁岩氣的開發

地球上傳統的油氣資源在過去短短一百五十年內大量消耗，大自然原本要留給後代子孫而隱藏在頁岩中豐富的油氣，近年來在新科技的發展下又要被這一代預支使用。

■ 黃武良、劉淑蓉

許多人都有個疑問：地球上油氣可供人類使用多久？上世紀 70 年代能源危機時，各能源機構預估頂多 50 年。然而 40 年後今日的預估還是 50 年，甚或更多，究竟原因何在？

過去幾十年來，美國石油進口的比率逐年上升，最高達 60%，為了掌握油源，美國不惜代價維持中東產油地區的和平穩定。但最近世界最大天然氣生產國俄羅斯的龍頭已悄悄地被美國取代，美國也期望朝向「能源自給」的目標邁進。是什麼原因逆轉了美國石油能源供需的趨勢？

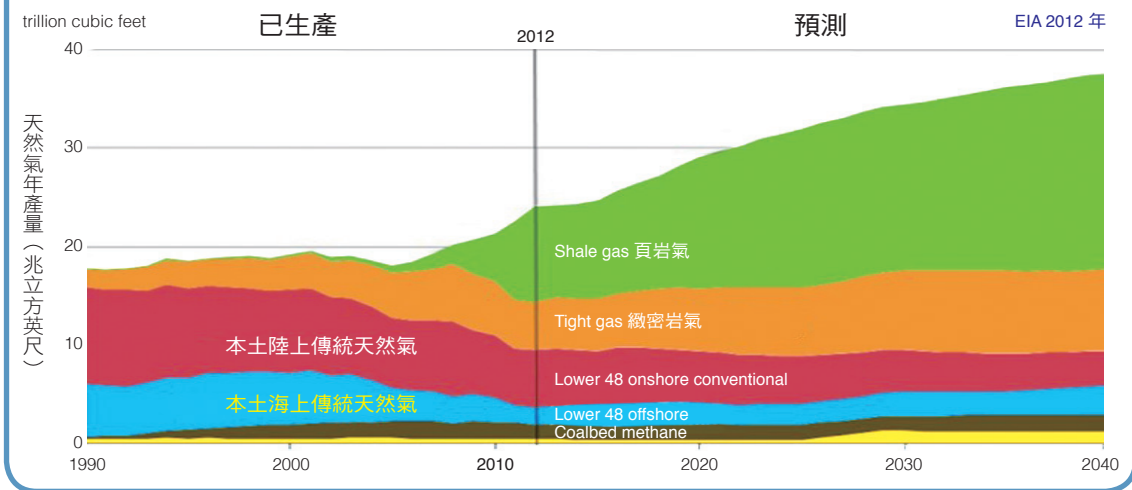
回顧全球石油供需的歷史，每當世界石油生產接近高峰時，人類就竭盡所能利用各種新科技探尋更多的油氣，延續人類對石油依賴的時限。油氣探勘的區域也不斷地更新擴展，由陸上而海上，由淺海到深海，由溫帶而極區。拜探採創新科技之賜，嶄新的石油探勘領域經常及時出現，彌補全球即將下降的儲量。



鳥瞰美國賓州開發中的馬賽勒斯頁岩氣井（圖片來源：courtesy of the U.S. Geological Survey）

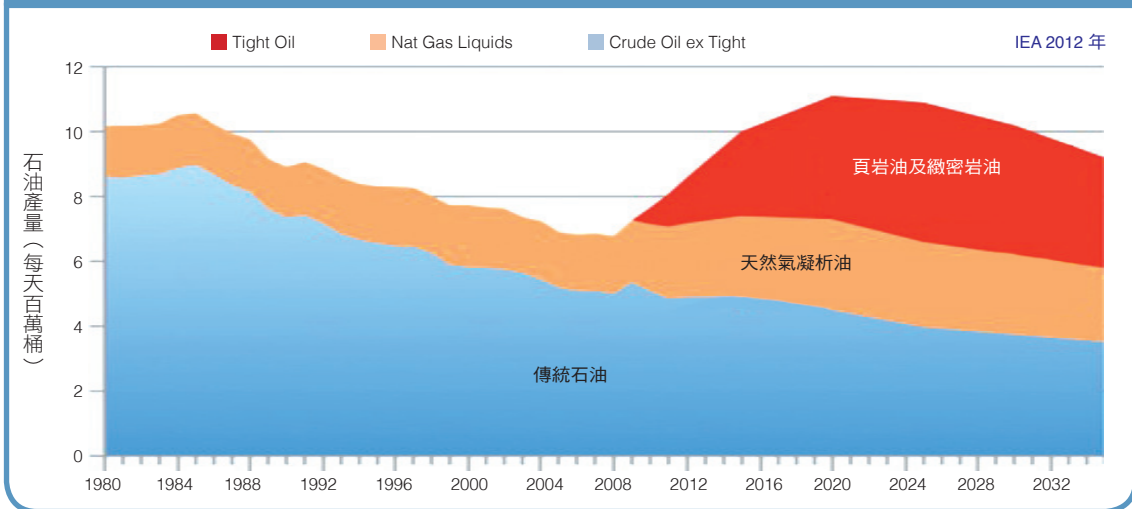
頁岩氣的大量生產衝擊世界天然氣市場，甚至阻礙了再生能源及減碳的永續發展。

頁岩氣讓美國天然氣總產量的趨勢反轉



美國天然氣生產量過去及未來預估趨勢圖，顯示頁岩氣生產量從 2008 年大增，致使天然氣總產量逆轉上升。
 (資料來源：美國能源資訊局，EIA)

頁岩油的開發使美國石油生產大增



美國石油產量過去及未來預估趨勢圖。頁岩油及緻密岩油的開發將造就美國石油生產的新高峰。(圖片來源：國際能源資訊署，IEA)

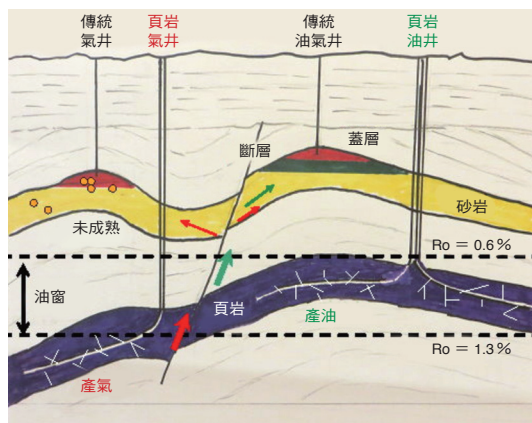
近十年來所謂非傳統油氣資源的頁岩氣 (shale gas) 和頁岩油 (shale oil)，又掀起一股全球油氣浪潮。根據 2012 年美國能源資訊局 (EIA) 的資訊，美國原本下滑的天然氣總生產量，由於頁岩氣的開發於 2008 年開始逆轉上升，預估 2035 年頁岩氣生產量將占天然氣總生產量的一半。而全球頁岩氣的可採蘊藏量將占全球天然氣總量的 32%，這預估量逐年增加，似乎預告全球頁岩氣時代的來臨。

美國無論在頁岩氣和頁岩油的儲量或開發技術上，都居領先地位，造就美國近年來油氣生產的高峰。由於頁岩氣的大量生產導致美國天然氣價格低迷，也衝擊世界天然氣市場，甚至阻礙了再生能源及減碳的永續發展。日本、南韓、台灣等都不約而同準備由美國進口較低價的天然氣。

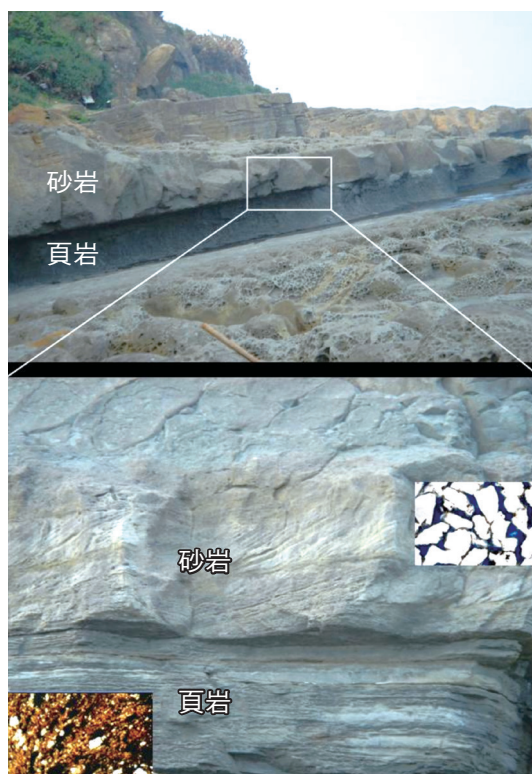
最近頁岩氣 (油) 成為人們最常談論的能源議題，其中持疑慮的有所謂商業投機論、曇花一現說、陰謀論、生態浩劫論等。但頁岩氣未來會影響每個人的生活無可置疑，台灣有關頁岩氣的文章甚少從科技及環保的層面去介紹，本文因而由這角度來探究，拋磚引玉期能有助讀者的了解。

頁岩氣革命

頁岩氣 (油) 發展過程中關鍵的里程碑可回溯至 2008 年，美國艾克森美孚 (ExxonMobil) 石油公司以 350 億美元併購天然氣公司 XTO Energy Inc.。隨後，其他大石油公司爭先恐後跟進併購，全美許多頁岩氣開發公司因此水漲船高，引發全球開發頁岩氣的熱潮，甚或冠以「頁岩氣革命」之稱，也使得頁岩氣探勘開發技術更上一層樓。其中最具有潛力的，包括東北部的馬賽勒斯 (Marcellus) 頁岩和德州的巴納特 (Barnett) 頁岩。



地下油氣在地層中的分布。傳統油氣儲存於砂岩而且局限於特定的油氣藏，例如在背斜封閉區域。頁岩氣或頁岩油則儲存於頁岩中不需封閉，但頁岩中的油母質必須達到成熟 (產油氣) 或過成熟 (產油)。註：紅色及綠色分別表示天然氣和油。



東北角龍洞岸邊露出地表的砂岩及頁岩。內插圖分別是顯微鏡下的砂岩及頁岩。

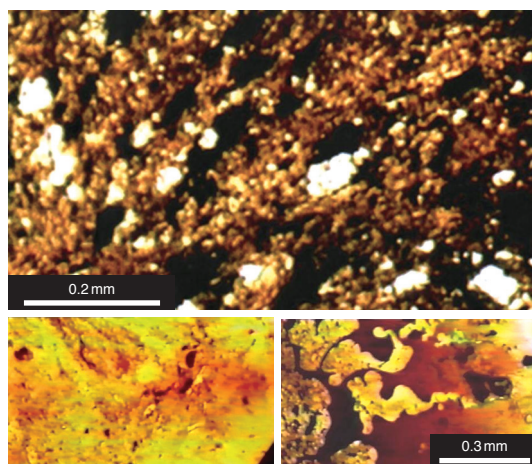
曾是巴納特頁岩氣開發的先驅，被尊稱為「頁岩氣之父」的石油工程師，也是石油大亨喬治·米歇爾（George Mitchell），在 2009 年 90 歲時接受富比士雜誌（Forbes）專訪時回憶開發巴納特頁岩氣的艱辛。他從 1981 年開始測試，歷經無數次失敗，連工程師都勸他放棄，堅持十年才有成。他的公司在 2002 年以 35 億美金賣給 Devon 公司。

頁岩油在這股熱潮中似乎被大眾所忽略；的確，液態的頁岩油比頁岩氣不易生產，但也有一些開發十分成功的頁岩油田。例如 2008 年起推動美國西部新的淘（黑）金熱潮的北達科他州巴肯（Bakken）頁岩，如今成為美國除墨西哥灣外最活躍的產油區。近來德州的鷹灘（Eagle Ford）頁岩油有迎頭趕上之勢。頁岩油以及其開發技術進一步應用於傳統油田的更生，造就美國近年來石油生產的高峰。

認識頁岩氣

頁岩氣（油）與傳統油氣的不同 兩者主要不同在於儲油氣的地層。傳統油田的油氣幾乎多數從砂岩或碳酸岩的地層鑽採出來，這類岩層的孔隙率高，可容納許多油氣，更重要的是滲透率佳，油氣在生產過程中容易從儲油氣地層中滲出而進入油井中。不過，傳統油氣局限於特定的油氣藏，例如在背斜或斷層等封閉地帶，容量有限。

地下另一種常見的地層頁岩就大異其趣，它的孔隙率不低，同樣可容納不少油氣。但這種頁岩的孔隙比傳統油田的岩層小，滲透率很低，油氣不易流動，因而可以殘留在頁岩中廣泛分布而不局限在特定的封閉空間。問題是鑽井後即使經過許多年也無法從油氣井溢出或抽出，似乎是大自然有意隱藏留給後代子孫的資源。過去這類儲存在頁岩孔隙中的油（頁岩油）或天然氣（頁岩氣）被傳統油氣探採業所忽視，近年來靠最新的科技才能開採。



顯微鏡下含暗色的有機物頁岩（上圖）以及從中分離出的油母質（左下圖），油母質加熱會生成油氣（右下圖）。

頁岩的特性 頁岩的特性大異於儲存傳統油氣的砂岩。地質上兩者同是沉積岩，但形成過程不同。陸上的岩盤及土壤經由風化、侵蝕和河流搬運沉積到湖海，砂粒多數沉積在河道、海濱或近岸形成沙灘，經地殼變動下沉掩埋後固結成為砂岩。

顆粒較小的細泥則多數懸浮而漂到外海，下沉掩埋後成為泥岩，再深埋就固結成頁岩。頁岩除含有顆粒小於 60 微米的石英、長石、碳酸鹽等沙粒外，有近半是極細小於 2 微米高嶺土等黏土的礦物及有機物。在電子顯微鏡下頁岩呈現無數約 750 奈米以下的孔隙，有些有微裂隙，因此孔隙的總表面積非常大，可吸附的油氣相當多，不輸給在孔隙中間的游離油氣。

頁岩氣（油）的身世 頁岩氣（或油）與傳統的油氣在出身上並無兩樣，其來源已有許多文章介紹。簡單說是由生油岩（主要是頁岩）中的生物殘骸先轉化成油母質，再隨著盆地下沉深埋至地表下約 5,000 公尺以上，地熱溫度達到約攝氏 80 ~ 120 度左右的地方，經過千百萬年油母質成熟後可生出石油和天然氣。

傳統油氣的儲集地層（砂岩或碳酸岩）本身並不生油，其中的油氣是因頁岩地層成熟生油後經由幾百萬年緩慢移棲過來。油氣從頁岩移出後，部分仍然留在頁岩的孔隙中。做個比喻：砂岩若是石油盛宴的餐廳，頁岩就是石油美食的廚房；如今，石油餐廳的美食快吃完，貪食無厭的客人乾脆直接到廚房取用。這些留在頁岩中的油氣若以天然氣為主就稱為頁岩氣，如果含石油較多就稱為頁岩油。頁岩是地球上最多的沉積岩層，因此成為熱門的油氣探勘處女地。

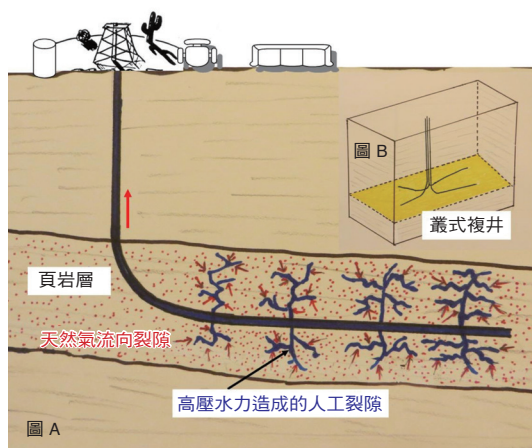
不過並非所有天然氣都是地熱加熱產生的，有些未成熟的頁岩也儲存幾乎是純甲烷的天然氣，是泥岩中的有機物經由厭氧微生物的作用生成的，與沼氣的成因雷同。台灣許多伴隨泥火山存在的天然氣也是如此生成的。

開採技術

水力壓裂技術 上世紀 70 年代末，石油業者發現美國德州一些含有大量天然氣的緻密砂岩和緻密碳酸岩層因為孔隙間相通不佳，滲透率低，以正常的採油技術很難生產出油氣，唯有在某些部位具有天然的裂隙，油氣才可以順利生產。

天然裂隙的發現讓石油工程師想起 1947 年就已發明的高壓水力壓裂岩石的技術，經過測試壓裂，果然可以在緻密岩層產生人工裂隙。1976 年，當年 24 歲目前擔任美國最大石油公司（艾克森美孚）總裁的 Rex W. Tillerson，就是當時在西德州測試這項技術的先驅工程師之一。這技術在 1979 年首次用於測試頁岩氣的生產。

這技術是從井裡灌注大約 500 到 1,000 大氣壓的水到岩層中，使地下岩層破裂產生大小不等的人工裂隙，貫通原本含油氣的孔隙或天然的微裂隙。這使得岩層中油

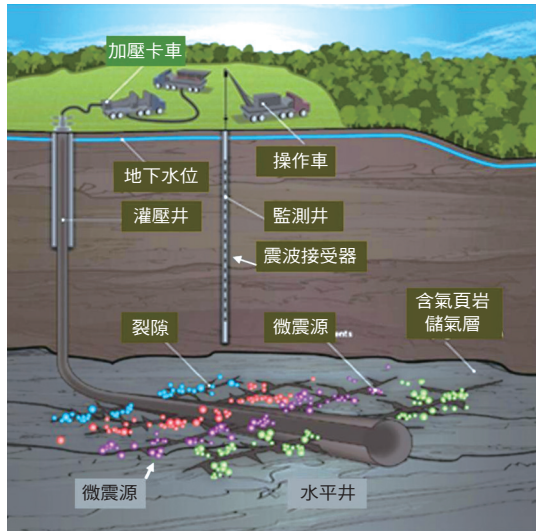


結合水力壓裂與水平鑽井技術，油藏工程師成功地從頁岩層中生產大量油氣（圖 A）。目前發展到叢式複井（圖 B），可從一鑽井平台鑽數口密集垂直井，到底部各井再以斜井或水平井分散開，就像樹根伸展四方以吸取養分。

氣可以流入裂隙中，再匯入井中而生產。壓裂液除水外，添加少量（0.2 ~ 1%）的無毒或低毒性的化學藥劑，用以洗淨、除垢、防菌、防腐蝕、潤滑、增加黏度等。為了避免裂隙的再閉合，壓裂液也摻加砂粒以支撐裂隙的張口。近年來更發展出多階段或重複壓裂的方法，用以促進效果或保持生產時油氣流量的暢通。

這看似不錯的技術的經濟效率並不理想，因為人工裂隙只發生在井壁周圍，再加上多數含油氣地層的垂直厚度不大（< 100 米），以垂直鑽探，井壁與油氣地層的接觸短，能夠匯集的油氣的範圍有限。為了能夠採集向水平側面延展的遼闊油氣層（方圓 1,000 ~ 3,000 米），水平鑽井技術很自然成為第一選項，這也是造就頁岩氣革命的另一功臣。

水平鑽井技術 「油井鑽歪斜了」曾經是工程師的惡夢，早期因鑽斜到隔鄰他人油田下的油層，引起的訴訟層出不窮。鑽井工程師從嘗試更正歪斜的方向及角度，發展至能夠自如地控制方向，如今進一步



先進的微震技術可以監測在岩層破裂所產生人工裂隙的影像，以了解裂隙的幾何態勢（大小、分布、方向）以及延展情況。（圖片來源：Engineering Seismology Group (ESG) Solution, www.esgsolution.com）。

可以從上部垂直井在深處轉向水平鑽鑿。1929年美國工程人員曾在德州鑽鑿世界上第一口水平井，但一直到80年代初期創新技術的發明，水平井才開始廣為應用。他們是如何做到的呢？

要鑽斜井或水平井，讀者可能已經想到幾個關鍵問題必須解決：如何讓鑽頭在地下所要的深度改變斜度及方位？在地下無法使用GPS下如何判定方位？硬直的鑽桿如何彎曲？要如何轉動在地下幾千米彎曲鑽桿？在地面上看不到地下的情況下如何遙控鑽頭方位？

工程師就是針對這幾個關鍵性問題研發特別技術：以特定傾斜角度的楔型錐體改變鑽頭的斜度及方位，利用這原理設計可操控方向的鑽頭馬達；使用陀螺羅盤儀引導操控鑽頭方位；整支幾千公尺的鑽桿是由許多相對非常短的硬直鑽桿銜接起來的，因此在大弧度的轉彎下可彎曲；使用由循環泥漿帶動的井底馬達轉動鑽頭，使得鑽鑿由垂直轉

向水平時，比傳統由地面鑽桿帶動鑽頭要順利有效；發展智慧型的隨鑽測井技術以便鑽井時同步蒐集井底的即時資訊，讓水平鑽井可以更精確地定位及遙控。

水平鑽井技術目前已發展到可從一鑽井平台鑽鑿不同方向的多分支斜井或水平井，就像樹根伸展四方以吸取養分。另一常用的技術稱為叢式複井，是在一井址上鑽數口密集垂直井，到底部時各井再以斜井或水平井分散開。例如生產外海的油氣田，就常以叢式井在海上平台上以少數的鑽井鑽探深處大面積下分散的油田。

近年來叢式水平井的方式結合水力壓裂技術已經成功地應用在頁岩氣（油）的開發上，這等設計能提高鑽機設備的使用率和鑽井效率，降低開發成本及環境衝擊，不但是未來頁岩氣發展的趨勢，也是傳統油氣田增產或老油田更生的契機。目前水平井已十分普及，油氣生產工程師已不再問：「為何需要鑽水平井？」反而問：「為何不鑽水平井？」

三合一技術的整合 工程師於90年代起結合水力壓裂與水平鑽井技術，配合以往對頁岩特性的了解，為頁岩氣、頁岩油的開發奠立了基礎。這三合一開發技術多年來已累積開採幾十萬口井的經驗，並在雄厚經費下研發及引進相關的科技，大大增加頁岩氣（油）的生產效率。

為獲得最佳的生產效率，地質學家及石油工程師先從地質構造學研究，輔以震波穿過地層的技術尋找可能有天然裂隙存在的部位。再佐以大地應力學、岩石力學，並參考該區地震的資料，勘定該地的大地應力場，來判斷水平井應該鑽探的數量、井距及方向，以產生最有效的人工裂隙。

工程師使用各種方法了解人工裂隙的幾何態勢（大小、分布、方向），以及延展情況，其中最先進有效的是監測在岩層破裂時所產生的微震。在壓裂時，利用裝置

研發經濟有效的廢水處理，甚或使用（有待發明的）全無毒性的壓裂水，是未來永續開發大量地球頁岩氣的重要課題。

在附近監測井內類似地震儀的數位震波接受器即時接收微震波，再經過資料處理後，以三維（3D）甚或 4D 呈現裂隙影像。人工裂隙的幾何態勢是頁岩氣生產效率的關鍵資訊，例如裂隙的延伸是否涵蓋所期待的氣藏，是否穿入會讓氣體逃逸的通道（斷層或高滲率地層）。

近年來油藏工程師在開鑽前經常以電腦模擬鑽探、水力壓裂、井間距，以及油氣生產過程等變項，來幫助選擇最佳的井網設計方案和操作方式以降低成本。最近，進一步使用各種激勵採收石油的方法更是大大提高了油氣的採收率。

對生態環境的衝擊

水火同源的水龍頭 如果你家的自來水龍頭打開後，水流能被打火機點燃，你會是什麼心情？2011 年獲奧斯卡提名的紀錄片〈天然氣之地〉，控訴頁岩氣開發造成的環境衝擊，引起大眾對開發頁岩氣的疑慮。美國能源部前部長朱棣文曾說「我們需要開發它，但我們也需要在對環境負責的前提下去開發」，而且「我們在許多技術上都有專家」。

開發頁岩氣最令人擔心的，是天然氣或壓裂水中所含化學劑的汙染。開發的頁岩地層多數離地面相當深（2,000 ~ 4,000 米），從地質的觀點來說，氣體或化學劑滲逸進入地下淡水層（< 300 米）的機率低，最可能的汙染是來自接近地面的井管壁因施工不良或腐蝕造成的逸漏。因此如何防止在頁岩氣井的生產期時油氣井管的腐蝕，是未來的一大挑戰。

頁岩壓裂後部分返排的廢水，除了原有的化學添加劑外，也會從頁岩中溶出一些重金屬或放射性成分。目前的處理方法一般是由附近鑿井再把廢水注入，儲存在遠離地下水的深部地層。美國在工業廢水及傳統油田廢水處理上累積很多實際經驗，技術上安全無慮。然而，大量的廢水注入而破壞地質的穩定是前所未有的經驗，難以預料它的後遺症。另外，在缺水地區的最佳選項是廢水經處理後回收，但經濟效益是個重要考量。

開發頁岩氣需要大量的壓裂水，一口頁岩氣井所需的總水量通常是 1,000 ~ 9,000 萬公升，相當於台灣 100 ~ 1,000 人每年的用水量。這在水資源日益短缺的地球來說是嚴重的耗費，在能源與水資源之間如何取得平衡，正考驗人類的智慧。研發經濟有效的廢水處理，甚或使用（有待發明的）全無毒性的壓裂水，是未來永續開發大量地球頁岩氣的重要課題。

頁岩氣開發會觸動地震嗎 國內媒體曾對 2012 年在中國大陸發生的四川雅安大地震與近年四川開發頁岩氣是否有關聯產生疑慮。水力壓裂地層時會產生微地震，但其強度並沒有安全的顧慮，倒是有文獻指出廢水注入深部地層後有可能引發較大的地震。

例如 2013 年國際權威期刊《地質》刊出，2011 年美國俄亥俄州規模 4 的地震，以及奧克拉荷馬州規模 5.7 的地震，經哥倫比亞大學等地震學家研究，確定地震與開發頁岩氣的廢水注入深部地層儲存有關。可能原因是該地附近斷層的孔隙水壓增加後，降低了原來施於斷層面的應力，因此改變斷層面的摩擦力而造成錯動。

地下的小壓力變動竟然會引發地殼的大規模震動，是否意味我們低估了地質作用的「蝴蝶效應」？雖然，這是美國鑽探過幾十萬口頁岩氣井的少數特殊例子，美國國家科學院已開始關注開發頁岩氣與地震的關聯。

頁岩氣開發的重要前提 人類對自然環境的保護是能源發展的重要前提，萬萬輕忽不得。開發頁岩氣對生態環境的衝擊也因地而異，接近都會區與偏遠地區不可相提並論，紐約州通過暫緩開發可為該州帶來許多工作機會的馬賽勒斯頁岩氣是個例子。

全球有許多國家頁岩氣的儲量不亞於美國，但目前並不是每個地區都值得開發，應視該地區是否有完善的天然氣基礎設施以及生態環境控管能力而定。換言之，頁岩氣的開發必須在生產層深遠離地下水層或生活水源，但又接近有工業用水的地區，而且不與其他用途爭水，並有適當安全的廢水注入地層，而非有蘊藏量就可開採。

同理，世界各國地緣政治、環保法規和控管能力不一，造成的生態環境的衝擊也不同。開發操作上是否確實遵循法規，以及意外發生時如何做危機處理以降低衝擊是重要關鍵。美國經過兩次大漏油事件

的慘痛經驗後，工業界在操作上多數小心翼翼嚴格控管，大大降低意外的機率。令人擔憂的是公司良莠不齊，在競爭壓力下難免違規操作或因人為疏忽造成災害。IEA最近建議全球石油業者使用一致而負責任的操作步驟來生產頁岩氣，雖然預估成本會增加約7%，但應該是可以接受的。

人類在生態環境衝擊的疑慮下仍然搶著開發頁岩氣（油），是否是明智之舉，見仁見智。但油氣用於能源上，對目前的人類而言雖然便宜卻很浪費，對於下一代則是奢侈。油氣最大的用途應是做為化工的材料，而且這材料不應只被當代人類獨享，應該是未來世世代代人類都可享用的珍寶。現今頁岩氣（油）的開發對於人類是福是禍尚難預料，但可確定的是剝奪了下一代子孫可貴的資源。

黃武良

臺灣大學地質科學系（已退休）

劉淑蓉

臺灣大學師資培育中心（已退休）

深度閱讀資料

「非傳統油氣資源」專題報導（民 102），科學發展，**490**，4-11。

伊原賢（民 102），石油之後，主導人類未來 100 年命運的新能源霸主：頁岩氣（莊雅琇譯），臉譜出版社，台北。

「黑黝黝的液體黃金」專題報導（民 93），科學發展，**382**，4-35。

頁岩氣開發：<http://www.youtube.com/watch?v=qjP-K1Va1k> 和 <http://www.youtube.com/watch?v=VY34PQUiwOQ>。

對生態環境的衝擊：<http://www.youtube.com/watch?v=sq0LFhw-kIM> 和 <http://www.youtube.com/watch?v=4LBjSXWQRV8>。