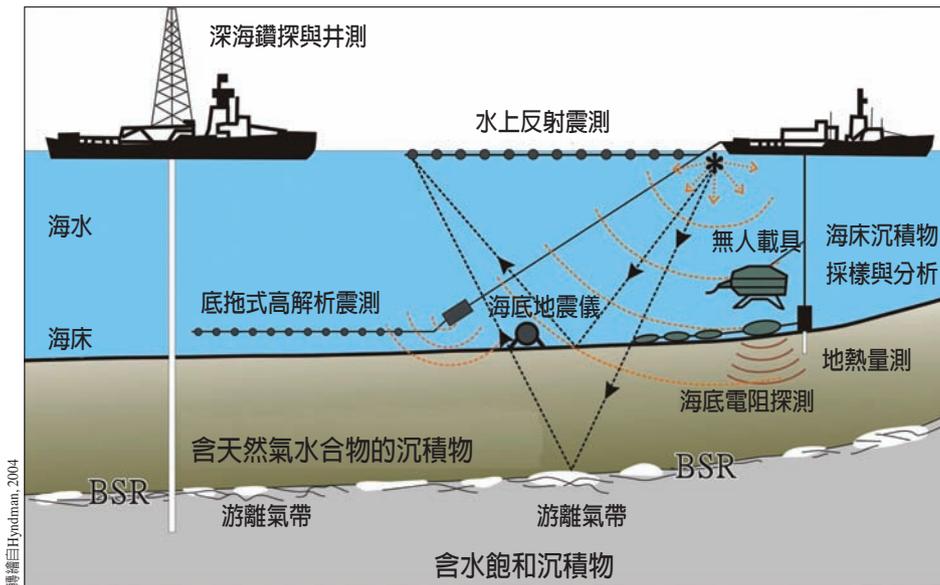


天然氣水合物 探勘技術

天然氣水合物極可能成為 21 世紀的新能源，
具有極高的經濟潛力及學術研究價值。

■陳松春 王詠絢



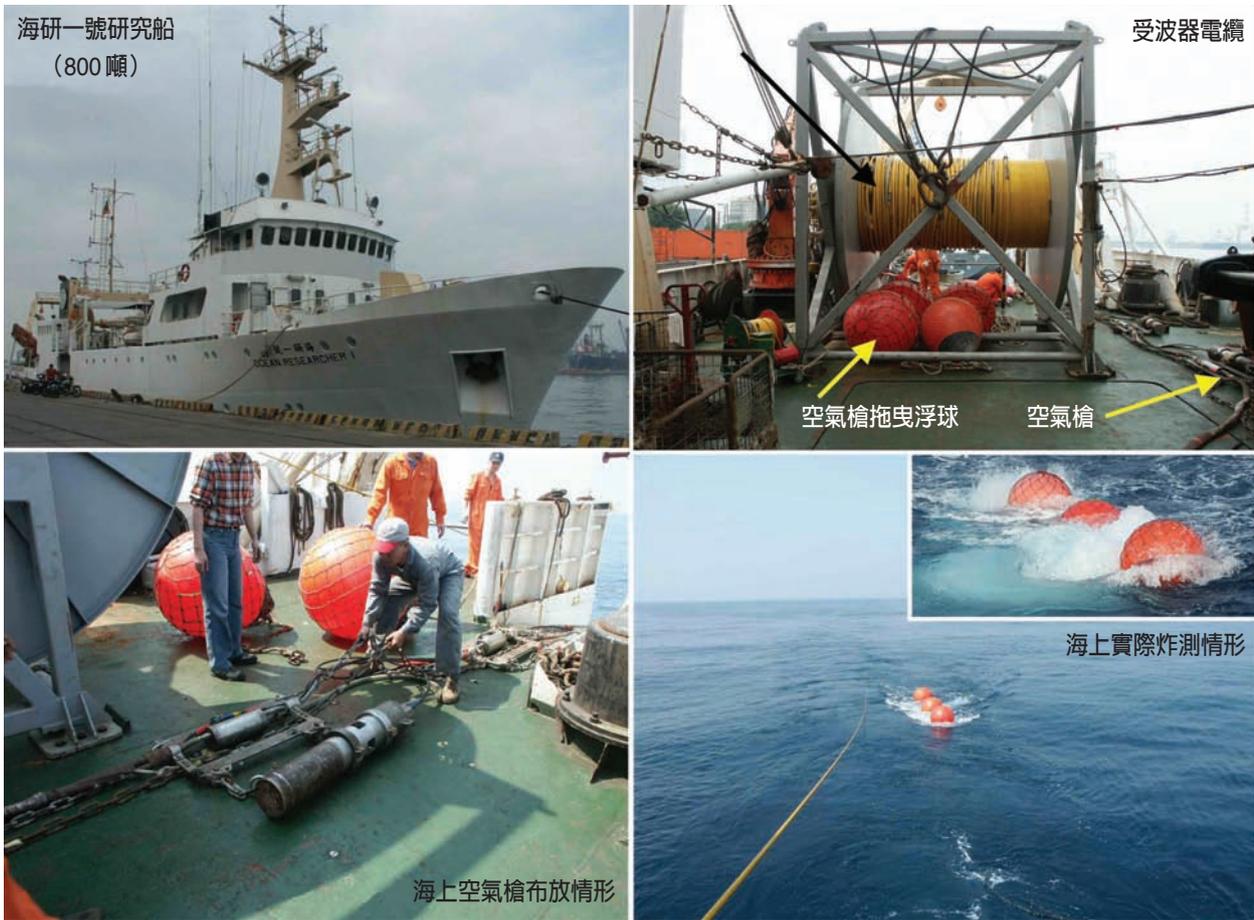
用於探測天然氣水合物的各種方法示意圖，包括反射震測、海底地震儀探測、海底電阻探測、地熱量測、海床沉積物採樣分析、海底照相或無人載具的海床觀測、深海鑽探與井測等。

海底天然氣水合物的探測一般是先使用地球物理方法，包括反射震測、海底地震儀、海底地電阻等，分析海床下的地層特性，辨識賦存天然氣水合物的特徵。另一方面，經由量測地熱可推估天然氣水合物穩定存在於海床下的深度，繼而進行海床沉積物及底水樣本的地球化學分析。

探勘天然氣水合物時，研究人員會先在地球化學顯著異常的位置，配合海底照相系統

或無人載具進行海床觀測，看看海床有無賦存天然氣水合物的表面特徵，如碳酸鹽礁、筒狀噴氣口、貝塚等，最後才選定最具潛力的場址進行深海鑽探，直接鑽取岩心觀察，並在鑽探同時或之後進行井孔內的儀器量測，測錄地層各項物理特性隨深度變化的情形，輔助研判天然氣水合物賦存飽和度、賦存層分布位置及深度範圍。

經濟部中央地質調查所從 2002 年至 2007 年期間，負責執行台灣西南海域天然氣水合物調查研究計畫，其中地球物理調查分項委請由台大海研所籌組的團隊，包含台大海研所、海洋大學應用地科所及中央大學地物所，負責執行。所使用的探測設備及方法，計有水上反射震測、海底地震儀探測、海底聲納迴聲剖面探測、地熱量測、重力、磁力探測，以及震測地層與地質構造分析，並配合海底照相觀測系統進行海床特徵觀測。

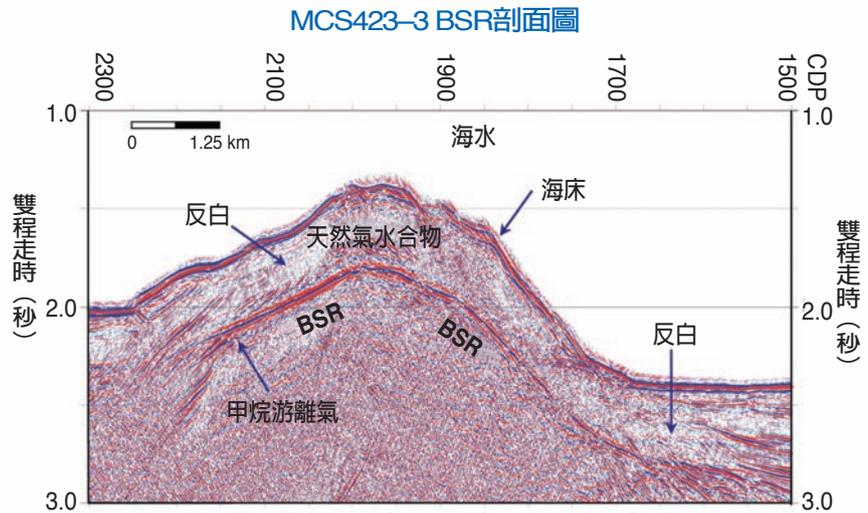


海研一號於後甲板配備的震測系統及海上的炸測作業

反射震測

天然氣水合物的探勘，初步是以反射震測進行普查，國內的震測設備是傳統的水上反射震測。反射震測系統是由受波器電纜、震源（高壓空氣槍）及資料貯存系統（震測儀）等3部分組成。炸測時利用空氣壓縮機把空氣壓縮後輸送至高壓空氣槍，系統擊發時高壓空氣經由空氣槍釋放產生聲源。聲波傳遞至海底地層後反射的訊號，再經由拖曳於船尾的受波器電纜接收，回收訊號經多頻道震測儀處理後儲存在磁帶上。現場炸測時可選定某一頻道的震波訊號即時顯示在繪圖紀錄器上，以監測炸測品質。

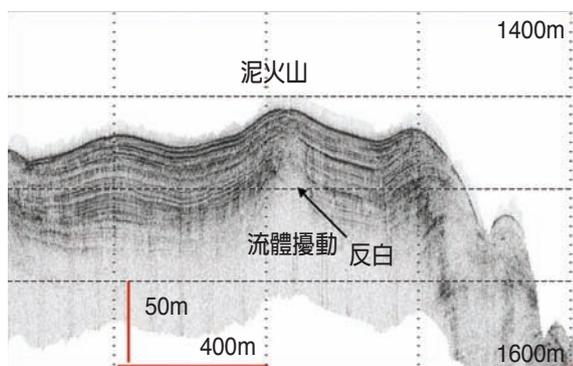
反射震測剖面上如有海底仿擬反射（bottom simulating reflector, BSR）的強反射信號，表示有天然氣水合物賦



震測剖面中如有海底仿擬反射的強反射信號，則表示有天然氣水合物賦存。BSR上方是天然氣水合物固體的穩定帶，下方則是甲烷游離氣，天然氣水合物是均質固體，無明顯反射層，因此會有反白現象。反白程度及範圍越大，表示天然氣水合物分布的飽和度及範圍越大。



台灣西南海域探測所使用的海底地震儀，是法國製造的 Micro-OBS，外觀體積大小是 60（高）×48（長）×48（寬）公分，重量是 39 公斤（地震儀球體是 19 公斤，固定鐵架是 20 公斤）。左圖是海底地震儀佈放情形，右圖是海底地震儀完成資料蒐集浮出水面後的回收打撈情形。



利用海底聲納迴聲剖面探測研究海床淺部構造，判釋出流體擾動及泥火山構造，這些大都伴隨有甲烷氣噴出。

存。BSR 是天然氣水合物生成的最大深度，在 BSR 上方是天然氣水合物固體的穩定帶，下方則是甲烷游離氣。

BSR 的辨識有 4 大特徵：（1）BSR 一般都平行於海床；（2）BSR 上方在震測剖面上會有反白現象，因為天然氣水合物是均質固體，無明顯反射層，因此在震測剖面上會呈反白現象，反白程度及範圍越大，顯示天然氣水合物分布的飽和度及範圍越大；（3）BSR 的反射相位和海床的相位相反，因為 BSR 上方天然氣水合物固體的震波速度較 BSR 下方的游離氣層大，海床的反射面是由低速的海水進入高速的天然氣水合物層，而 BSR 反射面是高速的天然氣水合物層進入低速的游離氣層，因此兩者的反射相位相反；（4）BSR 一般都與地層斜交。

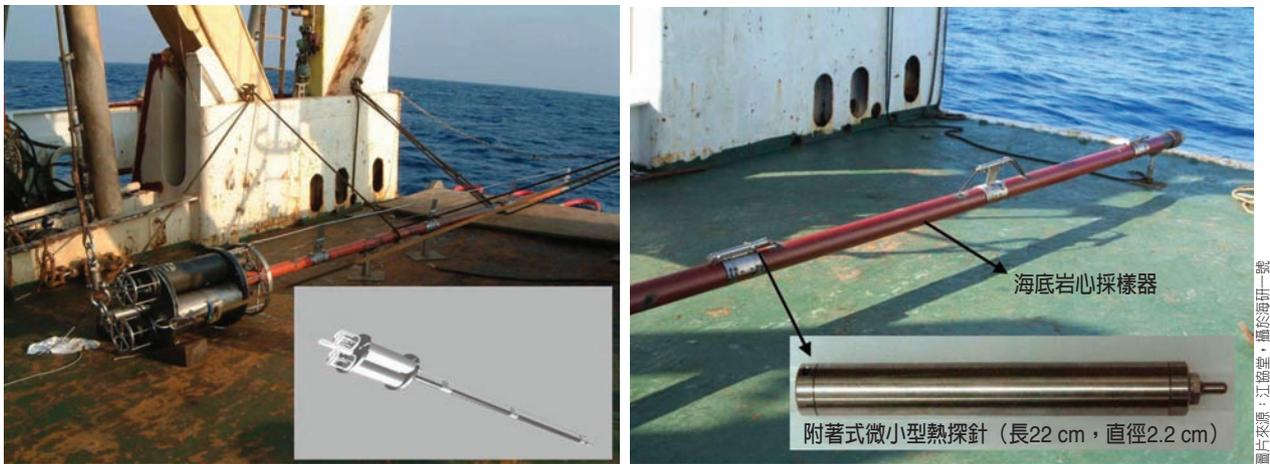
海底地震儀探測

海底地震儀（ocean bottom seismometer, OBS）可有效解析地層中震波的速度，彌補震測支距短對地層中震波速度解析不足的缺失（國內反射震測是 48 頻道的短支距，國外工業用震測則是 160 頻道的長支距）。理論上利用 BSR 上方是高速層，下方是低速層的特性，由 OBS 解析出的速度剖面，可判斷出高速的天然氣水合物及低速的游離氣的分布範圍。此外，利用 OBS 探測技術也可推估地層的孔隙率，這是估算天然氣水合物儲存量不可或缺的重要參數。

利用 OBS 探測時必須配合反射震測一起施測，一般是以單船施測，先佈放 OBS 再進行反射震測。但在台灣西南海域施測時，為節省作業時間，採取海研一號與海研三號雙船作業的方式，海研三號先佈放 OBS，然後海研一號再進行反射震測的炸測。炸測完成後，海研三號回收 OBS，把資料下載至電腦後，再佈放另一測線，直至所有規劃的測線完成。

海底聲納迴聲剖面探測

海研一號研究船配備有 3.5 KHz 的海底聲納迴聲剖面探測儀，在進行反射震測時，可



台大海研所徐春田教授自行研發製造的海底熱流測量設備。左圖是李斯特型地熱探針，最深可穿透海床以下7公尺，整體設備重量約350公斤。右圖是新研發的附著式微小型熱探針，長僅22公分，直徑是2公分有餘，可附著在岩心採樣器上，隨岩心採樣深度進行地溫量測。

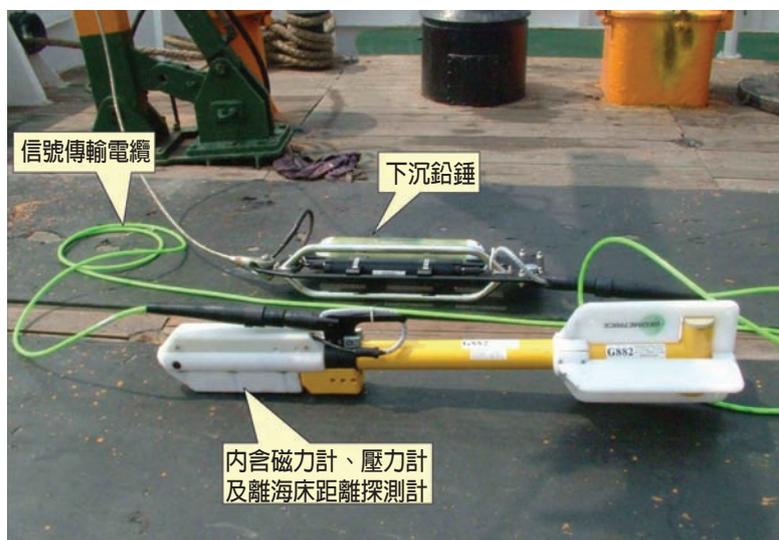
同時蒐集海底聲納迴聲剖面資料，對海床淺部深度100公尺內的構造有很好的解析。台灣西南海域的調查就是利用海底聲納迴聲剖面，判釋出流體擾動及泥火山構造。因為泥火山構造普遍伴隨有甲烷氣的噴出，因此研究海床淺部構造的泥火山有助於天然氣水合物的調查。

地熱測量

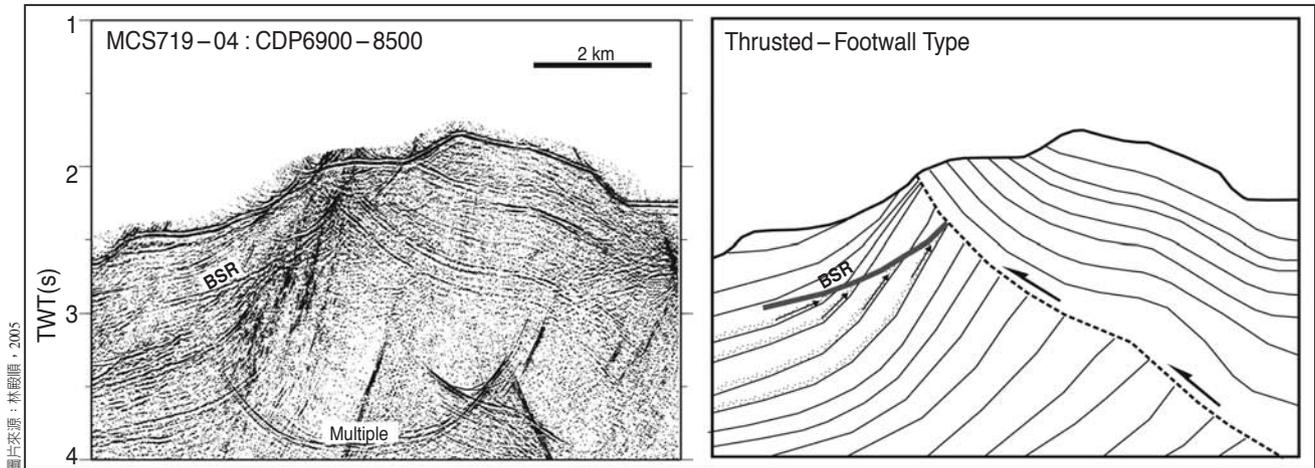
本期第7頁的甲烷水合物溫度—壓力平衡圖顯示，量測地溫梯度可推估天然氣水合物的穩定基底深度，地溫梯度與天然氣水合物溫壓平衡曲線的交點就是天然氣水合物的穩定基底深度，交點以上是天然氣水合物穩定帶，以下則以甲烷游離氣型態存在，同時可推估得到天然氣水合物生成時的平衡溫度。理論上震測剖面的BSR就是天然氣水合物的穩定基底深度面，但因地層震波速度掌握不易、地溫梯度量測誤差等原因，會造成兩者的推估深度有不一致的情形。

目前國際間對海域天然氣水合物賦存區的海底地熱測量方法，普遍採用李斯特型的海底探針，其海床穿透深度可達4~5公尺，台大海研所也自行研發出可穿透7公尺深的高解析度海底地熱探針。但就台灣西南海域快速的沉積速率而言，李斯特型地熱探針最深只能穿透海床以下7公尺，如此淺層的穿透可能無法反應地層深部的地溫梯度，導致地溫梯度的低估，而天然氣水合物的基底深度會因此被高估。

為改善這項缺失，台大進一步研發並成功製作了「附著式微小型熱探針」，可附著於岩心採樣器上，隨著採樣深度量測地溫。傳統活塞岩心採樣深度最大僅達4~5公尺，中央地質調查所於2005年購得長岩心取樣設備（15

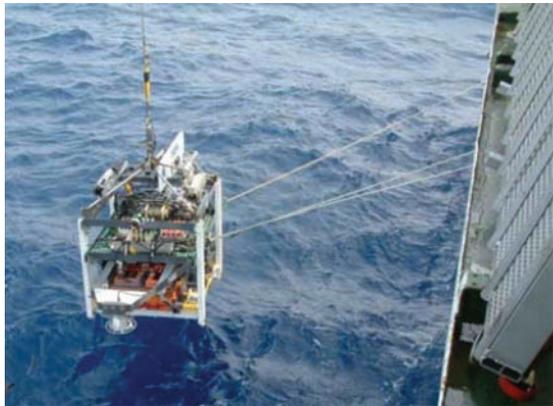


台大海研所貴儀中心於2005年底採購的高解析度底拖式磁力儀，最大壓力顯示是水深680公尺（2006年已進行更換為可深達1,400公尺水深的壓力計），離海床有效探測距離是100公尺。



圖片來源：林聰順，2005

左圖是原始震測剖面，右圖是從左圖震測剖面解釋的BSR、地層及斷層構造等。



圖片來源：Dr. Fovman，攝於海研一號

2005年9月海研一號第768航次，利用美國木洞海洋研究中心研發的海底照相觀測系統，首度在台灣西南海域進行海底照相觀測，成功拍得一萬多張的海床相片。

~18公尺)，突破了國內海底岩心採樣長度的瓶頸，成功取得10公尺左右的長岩心。未來附著式微小型熱探針將配合長岩心採樣，進行更深的海底地溫梯度量測。

重力及磁力探測分析

重力及磁力探測可提供大尺度地殼構造分析，做為研究天然氣水合物賦存區甲烷氣體生成的來源、移棲路徑及富集儲存模式的參考。海床如有甲烷氣溢出，會把海底沉積物中高磁性的磁鐵礦還原成低磁性的硫複鐵礦，或無磁性的黃鐵礦，因此進行磁力探測時可能會發現有磁力異常低的區域。

根據國外研究，加拿大溫哥華外海的天然氣水合物賦存區，經岩心取樣發現確有天然氣水合物。而且含天然氣水合物的岩心中發現有黃鐵礦增生，岩心磁感率相當低，不含天然氣水合物的岩心中磁感率則相對較高。可見利用磁力特性確可進行是否有甲烷氣溢出的調查。

台灣西南海域天然氣水合物賦存區的水深約為500~3,000公尺，傳統磁力探測的解析度無法解析小區域的甲烷氣溢出。為提高磁力探測的解析度，台大海研所於2005年採購了高解析度的底拖式磁力儀，最大壓力顯示是水深680公尺，離海床有效探測距離是100公尺。日後在擇定天然氣水合物高潛能區域時，將可進行高解析度的磁力探測。

地層震測及地質構造分析

震測剖面是把海上蒐集的震測資料，經處理分析後所呈現出來的地層反射剖面特徵。經進一步分析，可描繪出地層層序、地質構造、海底仿擬反射信號或其他反射特徵。綜整各震測剖面解釋的結果，建立震測地層的地質構造模式後，可用來推估天然氣水合物生成來源、移棲路徑、富集儲存等的模式。

傳統震測資料的解釋分析，都是以目測方式進行，不僅耗時，且最後的結果會因解釋者的經驗及主觀意識而異。中央地質調查所於2004年採購了國外石油工業用的震測解釋軟體 Petrel，可進行震測剖面反射層自動對比分析及二維或三維全方位展示對比，快速協助震測資料的解釋分析。

海底照相系統

海床下的地層如有天然氣水合物賦存，因甲烷氣溢出提供了食物源，海床表面會有特殊生物群體聚集及逸氣構造特徵。

中央地質調查所於2005年與美國木洞海洋研究中心合作，利用木洞海洋研究中心自行研發的 TowCam 海底照相系統，在台灣西南海域水深約1千公尺的海底，成功拍攝到自生性碳酸鹽岩礁、二枚貝塚及菌叢等化學自養性生物群落，這些特殊的海床表徵都與天然氣水合物的賦存密切相關。中央地質調查所已採購了 TowCam 海底照相系統，未來將繼續進行海底攝影觀測，探尋更直接的天然氣水合物賦存證據。

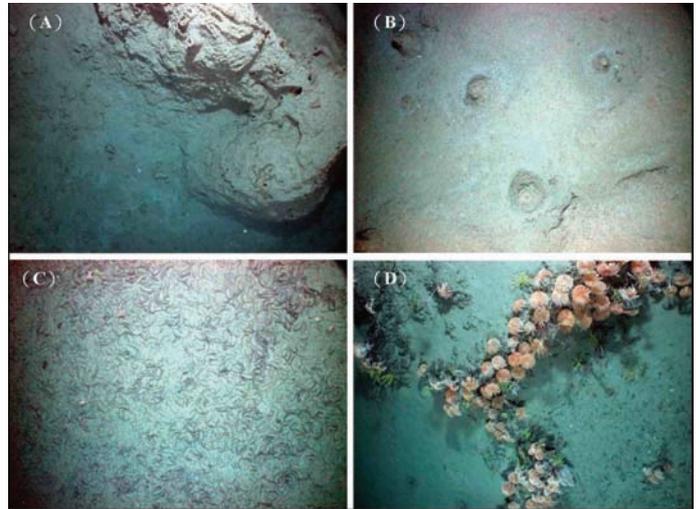
應積極提升探測能力

國內既有的海洋地球物理探勘設備，與國際間相關的研究設備相較，實顯遜色。例如海域調查研究船不足，無2千噸級以上且高續航力的專屬研究船，缺乏高解析度的探測設備，如底拖震測、3D震測、長支距震測、底拖側掃聲納、深海無人載具海床觀測設備等。所謂工欲善其事，必先利其器，為提升天然氣水合物的探測能力，趕上國際腳步，增購相關設備已是刻不容緩的事。

儘管硬體設備及人力不足，國內海洋團隊仍然共同努力進行調查研究，兩年多來各項地球物理、地球化學、海底觀測等調查結果，都顯示台灣西南海域有豐富的天然氣水合物賦存。除在國內召開二次國際研討會外，並在國外的研討會中陸續發表調查研究成果，深受國際矚目。

台灣西南海域有機會成為國際天然氣水合物調查研究的重點地區之一。

天然氣水合物極可能成為21世紀的新能源，有極高的經濟潛力及學術研究價值。美國於1982年就開始調查研究，並規劃於2015年進行開發利用。反觀國內受限於經費短缺、人力物力及調查研究設備嚴重不足等因素，目前尚在初期研究階段。在能源日漸短缺的大環境下，台灣西南海域有豐沛的天然氣水合物蘊藏，國內產、官、學界有必要積極進行相關的調查研究，並尋求國際合作機會，吸取國外經驗，以提升國內能力。一旦開採技術成熟後，將可立即進行海域天然氣水合物的開發利用。



利用海底照相觀測系統於台灣西南海域水深約1千公尺拍得的海底實景照片，(A)、(B)、(C)及(D)分別是出露的碳酸鹽礁、筒狀噴氣口、二枚貝塚及活體海百合生物群。其成因都與海床有富含甲烷的流體（冷泉）逸出有關，而這些流體可能源自天然氣水合物的分解。相片(A)的長邊範圍約為2.6公尺、(B)的長邊範圍約為3.8公尺、(C)及(D)的長邊範圍約為5公尺。

經過國內海洋團隊兩年多來的努力，各項地球物理、地球化學、海底觀測等調查結果，都顯示台灣西南海域有豐富的天然氣水合物賦存，有機會成為國際天然氣水合物調查研究的重點地區之一。

陳松春 王詠綸

經濟部中央地質調查所