

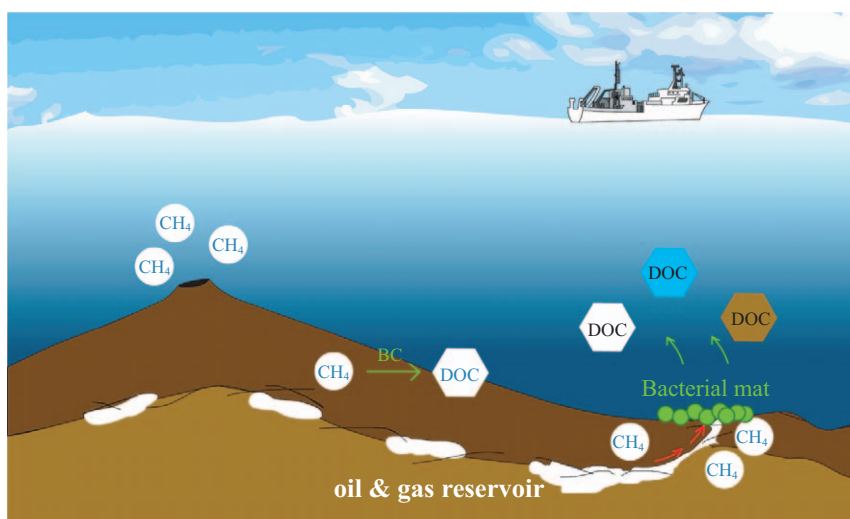
深海甲烷水合物探測設備之開發

國立中山大學海下科技研究所 王兆璋 陳信宏 邱永盛
 國立台灣大學工程科學暨海洋工程系 陳琪芳 郭振華
 國立成功大學光電科學與工程系 曾碩彥
 大同大學化工系 林正裕

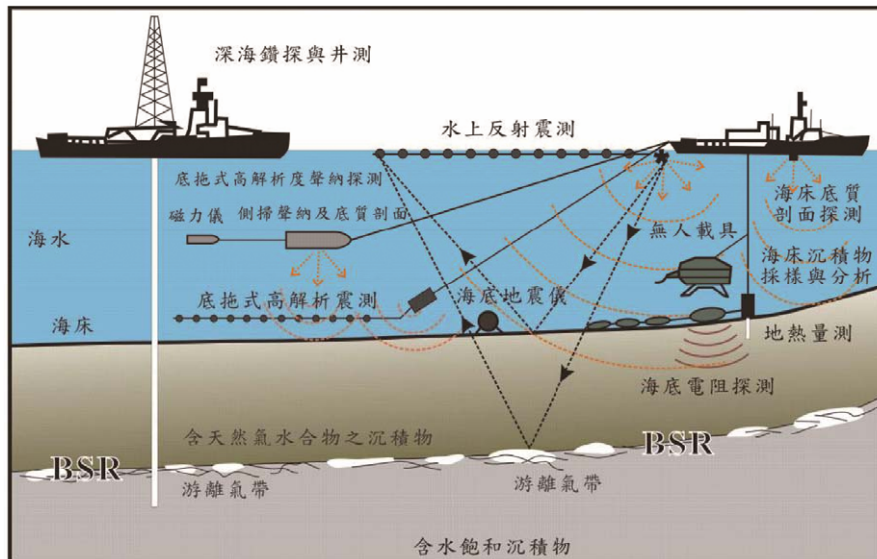
背景

甲烷水合物(gas hydrate)是在適當的溫度與壓力條件下，水結成冰晶時在晶格中可以包絡甲烷分子。當溫度與壓力條件改變後，冰晶融化便可釋出甲烷氣。因外觀看起來像冰塊，點火即可燃燒，也俗稱為「可燃冰」(參見 <http://www.methanegashydrates.org/galleries/4>)。適合甲烷水合物存在的溫壓條件分佈在高緯度或高海拔永凍原及大陸邊緣海域海床之下。海床下甲烷水合物的穩定賦存除了要有甲烷氣的生成之外，還要搭配適當的壓力與溫度環境條件。高壓有助於水合物穩定存在，而溫度則是越低越有利。一般在高緯度永凍層之甲烷水合物賦存深度約地表下 150~2,000 公尺，在海域甲烷水合物之水深條件至少為 300~500 公尺，賦存深度約在海床下 1,000 公尺內。在高緯度低溫海域，壓力條件水深僅需約 300~500 公尺；然而在亞熱帶的海域則須更大

的壓力條件，在臺灣西南海域水深至少要 550~600 公尺才足以生成甲烷水合物(陳松春等，2012)。深海環境由於沒有陽光照射，在一、兩千多公尺水深處終年溫度都在攝氏四、五度左右，但並非冰點。不過這溫壓條件已足夠形成甲烷水合物。甲烷水合物賦存在海床下地層內，其賦存厚度會隨著水深增加呈楔型加厚；然而海床以下地熱溫度逐漸升高，超過某一深度甲烷水合物也無法穩定存在，而是以甲烷游離氣存在。這深度界面就是甲烷水合物生成的下界。由於含水合物地層的聲波阻抗(密度×聲波傳遞速度)與上層沉積物及下層含游離氣沈積物有明顯差異，在探底聲納的反射訊號特徵上出現一個類似海床但又與海床平行的強反射結構，稱之為海底仿擬反射(bottom simulating reflector, BSR)。BSR 即為甲烷水合物賦存之最下界，以上為甲烷水合物賦存帶，下方則為游離氣(如圖一所示)。所以可以利用聲納、震測或測量海底地電阻的方式



圖一 甲烷水合物海床下 BSR 與海床表面特徵。



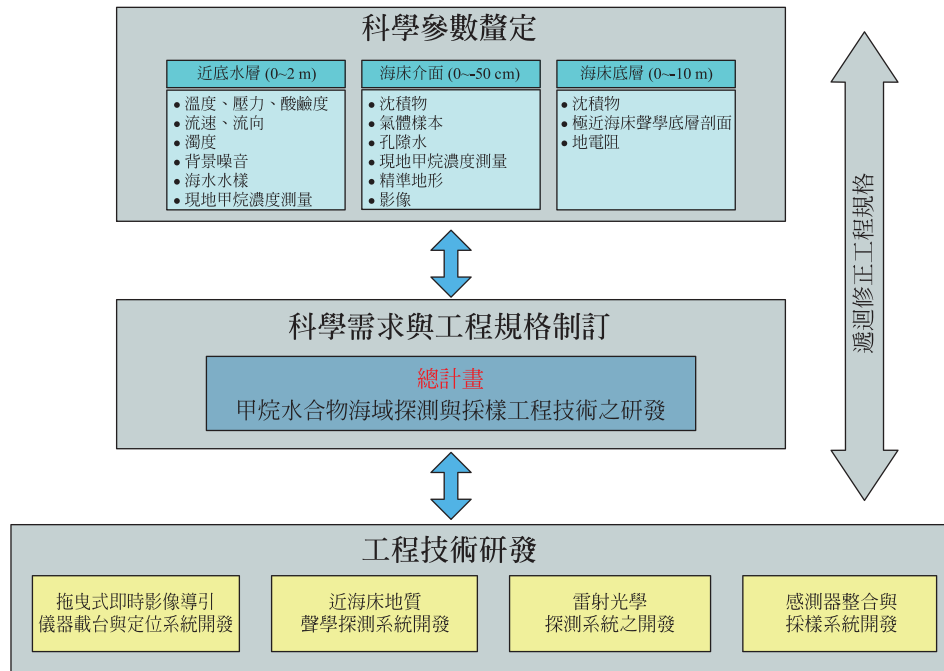
圖二 水合物賦藏於海床下一定深度，與海床起伏同步變化。在地層結構出現斷層處，水合物會冒出海床，特定生物群聚後產生海床地貌特徵。(本圖由中央地質調查所提供)

來搜尋具有這個海床下是否有 BSR 特徵(地物原理)。另一方面，亦可經由量測地熱溫度梯度推估甲烷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(地化原理)。探勘甲烷水合物時，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，看看海床有無賦存甲烷水合物的表面特徵，如碳酸鹽礁、筒狀噴氣口、貝塚等(生物原理)。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，輔助研判甲烷水合物賦存飽和度、賦存層分布位置及深度範圍。這些探測方法綜合搭配運用如圖二所示。

海域調查工具

自 2003 起經濟部中央地質調所主導下進行了一系列精密調查。調查工具包括多頻道反射震測(multi-channel seismic reflection, MCS)、海底地震儀(ocean bottom seismometer, OBS)、地熱量測(heat flow measurement)、深水型側掃聲納(sidescan sonar)與底質剖面儀(subbottom profiler)及海底地電阻(resistivity)等勘查區域內淺層結構、地形、地貌與底質；也採集海底沉積物岩心及水體樣品瞭解各區域甲烷濃度、硫酸鹽-甲烷界面(Sulfate-Methane Interface, SMI)、氯離子濃度、

礦物組成及磁性礦物等可以佐證甲烷水合物存在的化學特徵；深水底拖照相機及水下遙控載具也用來觀察床表面影像上的流體噴出構造、化學自養性生物群落及甲烷礁分布等。然而這些調查所使用的設備或工具多是以學術合作模式自國外海洋研究先進單位引進或購買國外商用產品。這些引入的工具固然加速國內在相關深海探勘上的進程，但因為是外來移入產品缺乏細部資訊可以自主掌握後續發展。2012 年起甲烷水合物資源的探勘正式納入「能源國家型科技計畫」中，繼續進行系統性海域調查，朝生產開發之目標邁進。在這個新的階段我們幾個長期在海下科技有所投入的學術單位整合成工程研發團隊並檢視「能源國家型計畫-甲烷水合物主軸」所揭櫫的 11 項可能以「添購或與國外機構共同發展的儀器」的技術需求。我們評估其工程技術的內涵後，具體提出國內團隊經整合後即可依「科學需求急切」及「開發時程較短」的幾個項目進行研製。除了可以強化國內海洋科學探勘能力與深化工程開發技術之目標，也希望藉由國內潛力業者的配合投入(投資)，開拓國內海洋產業的技術與視野。我們在「能源國家型科技計畫-地熱及甲烷水合物主軸」支持下執行「甲烷水合物海域探測與採樣工程技術之研發」。我們以規劃開發設備的特性組成四個研發小組，在架構上是以科學需求作導向，由總計畫負責科學家與工程技術人員



圖三 本計畫各研發子題與研發概念架構

之間溝通協調的工作。科學需求上可描述如下：

- 海床表面及淺層甲烷水合物特徵之搜尋與定位
 - 目的：要進一步鑽探之前，必須根據海床表面與底層之影像、地形起伏特徵定出精確位置。
 - 工具：即時影像導引儀器平台+多音束測高聲納(multibeam echo sounder)+超短基線定位系統(ultra-short baseline positioning system) +極近底海床聲學剖面儀(ultra-close acoustic seafloor bottom profiler)
- 水體微量甲烷濃度之即時偵測
 - 目的：除了前述影像、地貌等直接證據，還可以利用甲烷水中濃度測量找出分佈梯度(gradient)以研判環境中甲烷噴冒之處，縮小搜尋區域。
 - 工具：即時影像導引儀器平台+水下拉曼散射吸收光譜儀(Raman spectrometer) + 超短基線定位系統(ultra-short baseline)；
- 海床表面及淺層之採樣
 - 目的：當發現有甲烷水合物裸露在海床表面時，可以抓取或淺鑽沉積物樣本以

及海床水樣，進一步做分析。

- 工具：即時影像導引儀器平台+採樣抓斗(grabber)

這個架構的運作可由圖三進一步說明。在下文中我們介紹本計畫幾項已經完成開發並交付科學團隊使用的設備。

深海雙絞線儀器拖曳平台 ATIS (Abyss Twist-Pair Imaging System)

甲烷逸出在海床上時會有甲烷氣泡、雙枚貝叢聚、自生碳酸鹽、菌叢等影像特徵出現。因此海床光學攝影對於甲烷探查能夠提供許多第一手資訊。海床直接觀測影像對於瞭解當地的物理、化學、生物運作程序相當重要，包括深海生態豐富性、中洋脊熔岩流、以及熱泉噴發的證據等等 (Hersey, 1967; Heezen and Hollister, 1971; Ballard and Moore, 1977; Lonsdale, 1977)。執行即時深海影像觀測時需要有一條訊號纜繩(tether cable)將深海的資訊傳遞至水面上的支援船隻，最典型的設備是 ROV (remotely operated vehicle)。然而對於深海操作而言，所需的訊號纜繩長達數千公尺，需要搭配特殊重型絞機才能運作。因此深海 ROV 任務所需要的後勤支援代價相當昂



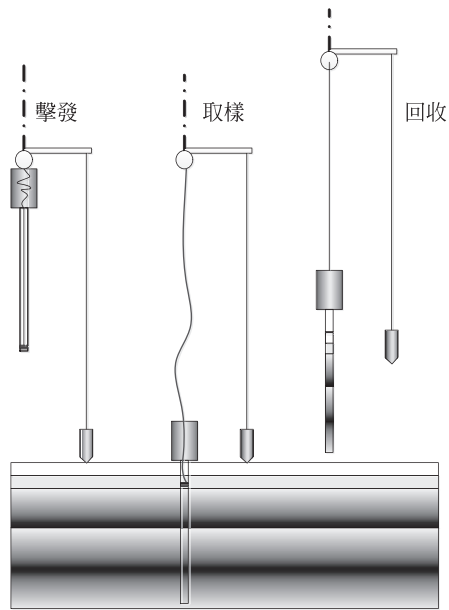
圖四 ATIS 之佈放 (左)；所拍攝各種深海景物 (右)。

貴。在西元 2000 年左右，美國基於海洋學界的研究需求，希望能夠建立一套深海數位照相系統，而且此系統必須可以架設在任何 UNOLS (University National Oceanographic Laboratory System) 的船隻上，或是可以架設在任何配備標準 CTD 絞機與電纜的船隻上。因此，Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI) 的工程師於 2002 年與 DeepSea Power and Light (DSPL) 民間儀器公司的工程師合作，共同開發了一套深海照相與岩心採樣系統 (Towed Digital Camera and Multi-rock Coring System)，簡稱 TowCam (Fornari, 2003)。WHOI TowCam 系統主要包含自記式數位照相系統、火山熔岩玻璃採樣器、以及 CTD 採樣器。其影像觀測是由靜態照相機與閃光燈組成，可以提供高解析度 (300 萬畫像素) 的海床影像，有利於輔助辨識海床目標物特徵。但因受限於其拖曳電纜規格，僅能傳送少量資料如載具深度或離底高度。觀測結果必須等到系統回收之後才能取得影像檔案。基於突破上述限制，我們與國內安全監視系統業者合作取得長距離網路通訊機 (DSL modem)，可以在 8000 m 長的 CTD 同軸電纜或雙絞線即可傳送 3 Mbps 的數據。這個數據通訊能力讓我們可以在所有台灣海域將深海高畫質影像 (1920 × 1080, 每秒 30 幀) 即時回傳至水面。這樣流暢的畫質讓操作人員可以立即判斷深海的狀況是否屬於甲烷賦存的區域，或是有值得多停留觀察的目標，大幅提升觀測效率。為了讓攝影機可以在深海無光的環境下看清楚海床，我們與國內業者共同開發高效率深海 LED 燈具裝置在系統四周，以達到明亮且突

顯海床特徵物之照明條件。由於 CTD 電纜無法供電，因此系統必須自行裝配電池。我們使用智慧型鋰電池組，約可讓系統持續運作六個小時，而且電量可以隨時監控避免損傷電池。科學團隊已多次利用這個設備進行很多觀測，拍攝到很多甲烷賦存海域的特殊底質與生物景觀 (參見圖四)，相關影像資料亦可在以下網址觀看：
https://www.youtube.com/watch?v=mcHc8ZFJDYw&list=PLEp4ZX5pxW-KJya__j6LSmJrZtyB6Tu8A&index=7

影像導引多管岩心採樣器 V-Core (Video-Guided Multi-Core)

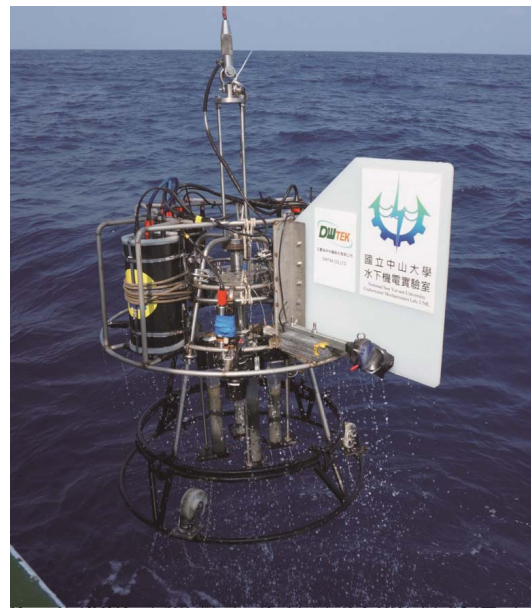
前述的資訊與影像傳輸設備是一個基礎架構 (infrastructure)，只要加上不同元件或感應器便可改變系統功能。例如傳統岩心採樣設備並不提供資訊或影像的功能，原因是在傳統海洋地質研究上，精確採樣點位並不重要。兩個採樣點位差距幾百公尺，在海洋尺度下是沒有變化的。但是以甲烷水合物研究來說，僅有數公尺差距，採樣地點可能是在一般沈積物底質、在海底泥火山冒口旁、雙枚貝群落，抑或在自生碳酸鹽區。得到的結果不但迥然不同，甚是誤擊自生碳酸鹽區會導致岩心管彎曲卡在海底無法回收。除了設備可能損壞的代價之外，在海上操作時間成本也相當昂貴。船期一天要數十萬元，而一次採樣設備的下放與回收要耗費數個小時。換言之，一次成功與失敗的採樣任務，時間都變成固定成本。但是有些科學議題是採樣點必須緊鄰著特定目標物旁，因此要提高採樣成功率必須從慎選點



圖五 活塞式重力岩心採樣器

位做起。一般而言這一類精準採樣是透過 ROV 執行。雖然科學家可以透過即時影像選擇所要採集的樣本，確保任務成功。但是出動一套深海型 ROV 工作，其運作成本與所需的工作母船更遠遠超過前述的費用。因此比較常見的作法是使用岩心管採集。

岩心採樣器有多種形式，主要有重力衝擊式、重力活塞式與多管岩心式。重力式是依靠操作者以鋼纜下放置海床表面數十或上百公尺上方時，絞機以全速放出鋼纜讓數百公斤的配重加速前進推採樣管衝擊穿透海床取得沈積物。採樣管口離底高度是依靠測深資料與已放出鋼纜長度推算，並非準確數據。估算不足時會有鋼纜繃斷回彈的危險，估算太多時會造成採樣器無法垂直穿透海床。因為其不確定性重力岩心採樣成功率一般來說差強人意。為了改善這個問題，活塞式岩心採樣器加了一個信錘(trigger weight)在岩心管上方與釋放機構連動。信錘以一條鍊繩垂掛，位置大約在採樣管口前方數十公尺處。因此信錘接觸海床觸動釋放配重帶動採樣管衝刺是經過計算的安全距離(如圖五)。不過由於信錘在施放過程中可能受洋流干擾纏繞、或是採樣管衝刺過程中無法保持垂直穿透等因素，成功率無法接近百分之百。多管岩心採樣器是以一般鋼纜下放，當採樣管觸及海底時閉合機構會進入待命模式。接下來當鋼纜繼續下放時，採樣管上方

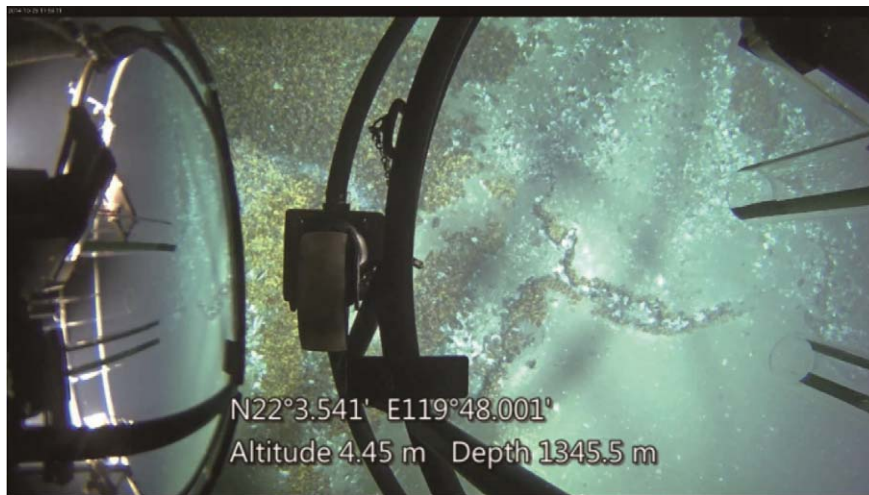


圖六 V-core 之佈放(下方為 45 cm 採樣管)

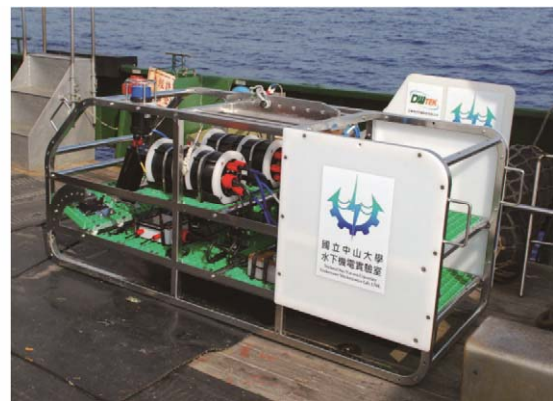
數百公斤的配重會將採樣管擠壓深入海床的沈積層達數十公分。鋼纜上收時閉合機構會在採樣管口一離開海床即封閉管底以免樣本流失。這些過程都依靠一連的機械機構執行。當海況不佳時，採樣器常會因為湧浪將其瞬間拉動，造成慣性力誤觸閉合機構等現象而失敗，也且必須等採樣器回收後才得知失敗。有了 ATIS 即時資訊與影像系統架構，我們將之整合在相對體積比較小的，而且運作原理相對容易的多管岩心採樣器，形成一個更方便使用的影像導引多管岩心採樣器，簡稱 V-Core (Video Guided Multi-Core)，如圖六所示。操作上將系統下放置目標海域後搭配超短基線水下定位系統(Ultra-Short Base Line)，從三到五公尺的離底高度觀察目標區域海底。除了對沉積物有興趣的地質學家之外，沿探測路線所觀察到的景象對海洋生物生態研究的學者也非常有助益。當觀察到目標區有適合樣本採集的地方時再下放機構完成採樣。由圖七可瞭解到在甲烷賦存區的海床表面差異很大。

深海拖曳式光纖探測系統 FITS (Fiber-optical Instrumentation Towed System)

ATIS 雖然容易操作，對於單純的影像觀測任務也很有效率。但是受限於電池組的容量與每次佈放與回收所需要的時間，更有效的施作方式是採用光纖電力複合纜來拖曳儀器平台。換言之



圖七 V-Core 採樣時到觀察適當底質才取樣。左邊鏡中影像為觀察採樣管口是否提早觸發。



圖八 FITS 3D 設計圖 (左) ; FITS 實體出海測試 (右)。

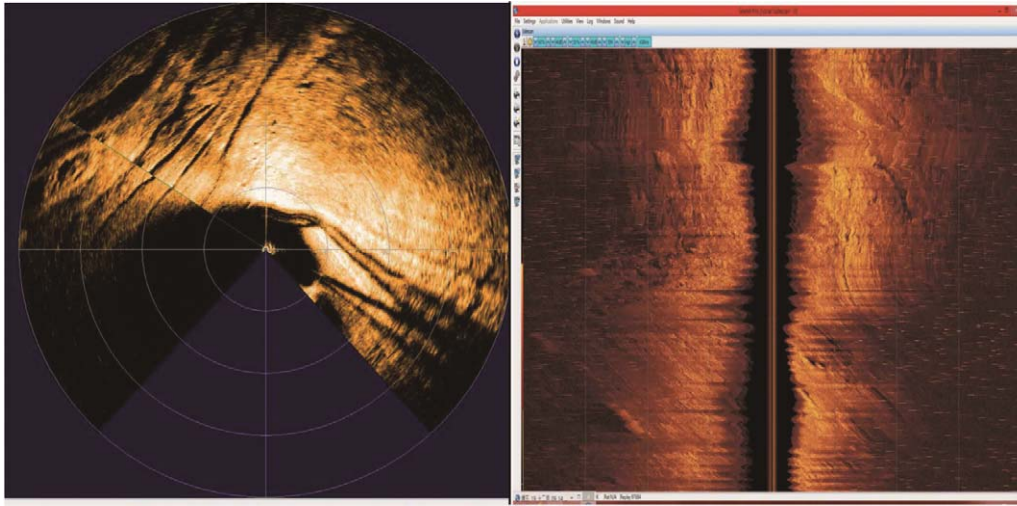
除了源源不斷的電源可以供應水下拖曳載台，更高頻寬的通訊可以將 HD 畫質的影像回傳。拖曳式即時影像引導儀器載台除了可以執行即時海床影像觀測之外，亦可作為搭載其他開發之甲烷水合物探勘儀器的平台，包括深海拉曼散射吸收光譜儀、海洋電磁探測儀、視訊抓斗、連續變頻聲納海床淺層剖面儀、側掃聲納、多音束測深儀等。藉由多重儀器同時探測達到多重探測資訊數據之交叉比對與驗證，提高甲烷水合物探測結果的可信度。除了動態影像之外，拖曳式即時影像引導儀器載台將另外搭載數位單眼照相系統，將靜態海床影像解析度提升至 2000 萬畫像素以上。支援工作船配備水下定位系統，可以達成水下載台精確定位之功能。一旦發現甲烷水合物目標特徵，便可立即取得當下之載台精確定位資訊，以利後續重複進行探勘與採樣。

FITS 的 3D 設計圖與實體如圖八；搭配的環場聲納與側掃聲納提供周遭海床地貌如圖九。FITS 在海研三號上施測時雖然沒有動態定位系統的輔助，但在操船人員細心調整下也能讓深海下載具近乎停滯，取得理想影像。(https://www.youtube.com/watch?v=Hq9i-W4OSpo).

限於篇幅有關雷射拉曼散射儀、近底底質剖面聲納、電磁探測將於後續撰文描述。

結論

本計畫除了提供海洋科學研究團隊幾項重要的關鍵工具外，計畫之執行也陸續培養國內在水下機電整合工程技術研發與應用之相關人才。本計畫乃是一個結合學理與實務應用的系統整合研究，從問題定義到解決問題都有明確的研究方法、學理依據、以及執行步驟，所以對於參



圖九 FITS 環場聲納 (左) 與側掃聲納 (右) 對環境之探測。

與此計畫之人員均獲得紮實訓練。此外，參與研究之人員參與實海域實驗作業，學習到許多實驗儀器佈放與資料收集之實務經驗。過程中與國內業者共同討論，也帶動了國內投入海洋儀器設備開發的發展，是一個成功結合學官產的計畫。

致謝

本計畫感謝國家能源計畫 NEPII、國研院海洋中心及玉豐海洋科儀之支持與協助。悼念台大地質系楊燦堯教授。

參考文獻

- [1] Chen, S.C., Hsu, S.K., Tsai, C.H., Ku, C.Y., Yeh, Y.C., and Wang, Y., "Gas seepage, pockmarks and mud volcanoes in the near shore of SW Taiwan," *Marine Geophysics Research*, Vol. 31, pp. 133-147, 2010.
- [2] Fornari, D.J., "A New Deep-sea Towed Digital Camera and Multi-rock Coring System," *EOS*, Vol. 84, No. 8, pp. 69-76, 2003.
- [3] IPCC, *Changes in Atmospheric Constituent-sand in Radiative Forcing*, Cambridge, UK: Cambridge University, 2007.
- [4] Lin, S., Hsieh, W.C., Lim, Y.C., Yang, T.F., Liu, C.S., and Wang, Y., "Methane Migration and Its Influence on Sulfate Reduction in the Good Weather Ridge Region, South China Sea Continental Margin Sediment," *Terrestrial, Atmospheric and Ocean Science*, Vol. 17, No. 4, pp.883-902, 2006.
- [5] Lonsdale, P., Deep-tow Observations at the Mounds Abyssal Hydrothermal Field, Galapagos Rift, *Earth Planet. Sci., Lett.*, Vol. 36, pp. 91-110, 1977.
- [6] Ballard, R.D. and J.G. Moore, *Photographic Atlas of the Mid-Atlantic Ridge Rift Valley*, pp. 114, Springer-Verlag, New York, 1977.
- [7] Chen, H.H., "In-Situ Alignment Calibration of Attitude and Ultra Short Baseline Sensors for Precision Underwater Positioning," *Ocean Engineering*, Vol. 35, Nos. 14-15, pp. 1448-1462, 2008.
- [8] Chen, H.H. and Wang, C.C., "Accuracy Assessment of GPS/Acoustic Positioning Using a Seafloor Acoustic Transponder System," *Ocean Engineering*, Vol. 38, No. 13, pp. 1472-1479, 2011.
- [9] Chen, S.C., Hsu, S.K., Tsai, C.H., Ku, C.Y., Yeh, Y.C., and Wang, Y., "Gas seepage, pockmarks and mud volcanoes in the near shore of SW Taiwan," *Marine Geophysics Research*, Vol. 31, pp. 133-147, 2010.
- [10] Fornari, D.J., "A New Deep-sea Towed Digital Camera and Multi-rock Coring System," *EOS*, Vol. 84, No. 8, pp. 69-76, 2003.
- [11] Heezen, B. C. and C.D. Hollister, *The Face of*

- the Deep, pp. 659, Oxford University Press, New York, 1971.
- [12] Hersey, J.B., Deep-Sea Photography, pp. 309, The Johns Hopkins Press, Baltimore, Md., 1967.
- [13] Lin, S., Hsieh, W.C., Lim, Y.C., Yang, T.F., Liu, C.S., and Wang, Y., "Methane Migration and Its Influence on Sulfate Reduction in the Good Weather Ridge Region, South China Sea Continental Margin Sediment," *Terrestrial, Atmospheric and Ocean Science*, Vol. 17, No. 4, pp.883-902, 2006.
- [14] Lonsdale, P., Deep-tow Observations at the Mounds Abyssal Hydrothermal Field, Galapagos Rift, *Earth Planet. Sci., Lett.*, Vol. 36, pp. 91-110, 1977.
- [15] 黃國銘、林曉武、林裕程，底拖式照相系統應用在台灣深海探測，第 33 屆海洋工程研討會，高雄，2011 年。
- [16] 林殿順，台灣西南海域新興能源-甲烷水合物資源調查與評估：震測及地熱調查（4/4）含甲烷水合物地層的構造與沉積特徵研究。經濟部中央地質調查所報告第 100-24-F 號，共 229 頁，2011。
- [17] 陳松春、許樹坤、王詠綸、鐘三雄、陳柏淳、劉家瑄、楊燦堯，沉睡海底下的寶藏—「甲烷水合物」。前瞻科技與管理 第 2 卷 2 期，第 107-134 頁，2012。
- [18] 黃國銘、林曉武、林裕程，底拖式照相系統應用在台灣深海探測，第 33 屆海洋工程研討會，高雄，2011 年。
- [19] 劉家瑄，台灣西南海域新興能源-甲烷水合物資源潛能調查：震測、地熱及地球化報告第 101-22-A 號，共 143 頁，2012。學調查研究（1/4）-反射震測與海床聲納迴聲剖面調查研究。經濟部中央地質調查所