探索內太空——從郵票看深海潛航的百年演進

文／李孟陽

法國作家凡爾納（Jules Verne）於 1870 年完成《海底兩萬里》這部膾炙人口的科幻小說，引領我們登上尼莫船長的「鸚鵡螺號」潛艇，遨遊於深邃海洋的遼闊想像空間（圖 1,2）。書中描述採用電力驅動的鸚鵡螺號，能夠潛入一萬六千公尺的大洋底部，使用照相機與水下照明拍攝海底地貌，不可思議的預見未來深潛科技的發展趨勢。1959 年，率先潛航抵達北極點的美國核子潛艇「鸚鵡螺號」就是以本書為命名由，「現代科學不過是將凡爾納的預言付諸實現的過程而已」（圖 3）。

圖 1. 凡爾納逝世五十周年紀念（摩洛哥，1955）

圖 2. 凡爾納《海底兩萬里》原書插畫（法國，1982）

圖 3. 世界第一艘服役的核子潛艇鸚鵡螺號（美國，1959）

深海是地球上最大的生態系，然而這個「內太空」的嚴酷環境令人望而卻步，迄今仍是充滿神秘、亟待探索的一處未知領域。從早年列強爭相競逐深潛紀錄，到近年深海熱泉調查、海底地形測繪，乃至水下工程及水下救援，各類型的深海載具不時成為郵票發行的主題。這一枚枚設計精美的郵票，展現歷來深海探險家的冒險事蹟、深海探勘的傑出成就、深海技術的創新突破以及海洋科學的重大發現，承載著人類探索這顆藍色星球的共同記憶，本文試圖以此勾勒出百年來深海潛航的發展脈絡。

潛入深邃恆暗的內太空

1930 年 6 月 11 日，畢比（William Beebe）與巴頓（Otis Barton）於大西洋的百慕達海域進入深海潛水球（bathysphere），這個造型獨特的潛水載具是由美國富豪巴頓設計與出資建造，並由國家地理學會贊助這趟探險遠征。鋼製球體留有做為潛水人員進出的圓形孔洞，另一側從球體伸出的三個觀景窗，當厚重艙門以十枚巨大的螺帽拴緊固定後，由絞機吊置於船身外緣，將鋼纜緩緩下放至水深 440 公尺處，完成人類首度潛入海洋無光帶的創舉（圖 4）。

圖 4. [左] 深海潛水球的施放作業 (百慕達，1976)
圖 5. [右] 畢比置身於海洋無光帶，觀察深海生物的習性 （百慕達，1976）

畢比是著名的海洋生態學家，在他出版的探險記述中，總是以饒富詩意的文字，與讀者分享身歷其境的新奇感受，強調置身海底的沉浸式體驗，絕無任何其他方法可以替代。在此之前，海洋生物調查依靠拖網採集深海魚類，打撈上來的都是失去生命力的標本，網中罕見體型大、活動敏捷的種類。畢比堅信，將深海觀察與採集結果相比，兩者存在根本性差異，海洋物種的多樣性遠非拖網所能一窺全貌。往後數年，畢比持續運用深海潛水球進行調查，一再刷新先前締造的潛深紀錄，於 1934 年潛至水深 923 公尺（圖 5）。

繫纜式的潛水球，終究難以克服下潛深度增加所面臨的設計瓶頸。潛得越深，周遭的水壓更大，球壁必須增加厚度，延伸的鋼索又會增加額外的重量，絞機拖曳力必須更強，水面上的母船就得更大。此外，潛水球無法自主移動，不管是水平或垂直方向的移動，完全依賴水面船隻操作，無法進行複雜地形或大範圍的調查。依照海洋深度的劃分，巴頓的深海潛水球只來到中層帶，在此之下還有深層帶、深淵帶以及超深淵帶，若想潛入超過六千公尺的超深淵帶，深潛載具勢必出現設計觀念上的典範轉移。

航向挑戰者深淵

就在畢比展開深海探索之際，出生於瑞士的奧古斯特・皮卡爾（Auguste Piccard），乘坐自己設計的高空氦氣球 FNRS-1 穿越了對流層，打破熱氣球上升高度的紀錄，成為進入平流層的第一人（圖 6）。這位曾經與愛因斯坦共同研究宇宙射線的物理奇才，構想

出前往海洋最深處的可行方案。他靈活地應用浮力的原理，將汽油取代氦氣來充填氣囊，設計出毋須繫纜就能從深海返航的「水中熱氣球」，讓兒子賈克・皮卡爾（Jacques Piccard）成為首批抵達馬里亞納海溝的人類（圖 7）。

圖 6. 高空氦氣球 FNRS-1 於 1931 年進入平流層（比利時，1932）

早在 1940 年代，皮卡爾向比利時國家科學研究基金會（FNRS）提出建造深海潛航器（bathyscaphe）的計畫，這個構想是將承受高壓的球形座艙安置於大型浮力槽之下，讓海水提供的浮力與整組潛航器的重量中和抵消。由於先前設計的熱氣球裝置取名為 FNRS-1，因此將它命名為 FNRS-2。浮力槽為橄欖球形狀的巨大結構體，內部注滿密度小於海水的汽油，下方留有開口讓海水自由進出，以調節內外壓力的均衡。若要下沉，駕駛員就讓海水灌入空氣槽；若要向上移動，電磁鐵將吸附成團的壓艙小鋼珠釋放，便能夠減輕重量，讓海水浮力成為深海潛航器返回海面的推動力。

1948 年，船隻拖著 FNRS-2 駛離非洲進入大西洋，在沒有搭載人員的測試階段，這具無須繫纜的潛航器抵達 1372 公尺，成功超越當時的深潛紀錄。然而海況轉趨惡劣，滿載汽油的潛航器無法收回至母船，只能在滔天巨浪的撞擊下顛簸前行，返回港口後，浮力槽嚴重受損，資金用罄，載人潛水任務只能無限期延宕。法國見證新型潛水技術的雄厚潛力，便向比利時收購，然後將壓力球拆下，固定於自行設計的浮力槽，改名為 FNRS-3。1953 年 8 月，法國於地中海的測試締造 2112 公尺的佳績，隔年在大西洋再度寫下 4053 公尺的新紀錄。

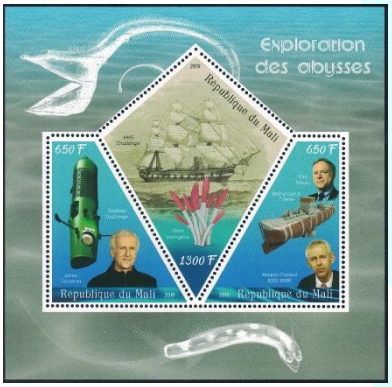
與此同時，皮卡爾另起爐灶，打造出強度超過鑄鋼的合金球體。這個抗壓艙直徑約兩百公分，壁厚八公分，重十噸；觀景窗採用樹脂玻璃，以避免石英玻璃易碎的安全疑慮。巨大的鋼製浮力槽，有一座瞭望塔似的小室，潛艇漂浮於水面時，用來阻擋海浪沖擊人員進出抗壓艙入口的通道。1953 年 9 月，全新打造的「第里亞斯特號（Trieste）」進行深潛，隨即創下 3167 公尺的新記錄，但礙於經費短缺而滯留於地中海，讓這場與法國的競賽，再度失去先機。

圖 7. 奧古斯特・皮卡爾設計上天下海的載具，挑戰人類夢想的極限 (瑞士，1994)

1956 年，賈克・皮卡爾走訪美國各

地的海洋研究機構，宣揚深海載具對於海洋探勘與研究的重要，獲得科學界的一致認同。隔年蘇聯成功發射首枚人造衛星，在太空競爭失去先機的美國，隨即表達購賣意願，希望在深海探險事業能夠拔得頭籌。深海潛航器於是來到加州聖地牙哥的海軍基地，與太平洋彼端的馬里亞納海溝遙遙相望。為了達成這個終極挑戰，皮卡爾監造新的壓力球，建造更大的浮力槽。1960 年 1 月 23 日，賈克・皮卡爾與美國海軍軍官華許（Don Walsh）登上第里雅斯特號，五個多小時過後，抵達挑戰者深淵（Challenger Deep）的底部，深度計此刻的讀數是 10916 公尺（圖 8,9）。

在當時，法國是美國開發深潛技術的主要競爭對象，緊隨著第里亞斯特號成功抵達挑戰者深淵的腳步，法籍「阿基米德號（Archimède）」於隔年建造完成（圖 10）。1962 年，阿基米德號在千島-勘察加海溝締造了 9560 公尺的紀錄，在日本海溝也深潛至 9300 公尺。此後，這兩個深海潛航器的紀錄維持近半個世紀之久。直到 2012 年，執導鐵達尼號而締造全球影史票房紀錄的卡麥隆（James Cameron），隻身搭乘「深海挑戰者號（Deepsea Challenger）」前往海洋最深處，成為造訪挑戰者深淵的第三人（圖 8）。



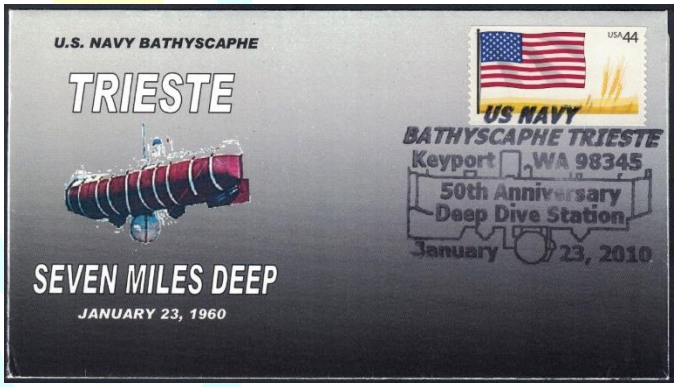


圖 8. [左圖] 賈克・皮卡爾和華許搭乘第里雅斯特號(右)，以及卡麥隆搭乘深海挑戰者號(左)，先後抵達英國挑戰者號(中)發現的挑戰者深淵 (馬利，2019)

圖 9. [右圖] 第里亞斯特號抵達挑戰者深淵五十周年紀念 (美國，2010)

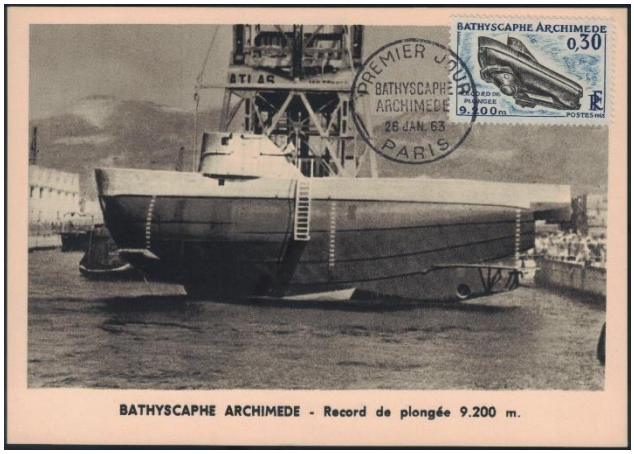


圖 10. 法國阿基米德號 (法國，1963)

中洋脊的聯合探勘

1960 年代初期，板塊構造學說由地質學家狄亞茲（Robert Dietz）與海斯（Harry Hess）兩人分別提出，爾後引發一場影響深遠的地球科學革命。他們指出中洋脊是海洋地殼產生的地帶，岩漿持續自裂谷底部的隙縫冒出，冷卻凝固形成玄武岩質的海洋地殼，而分布於洋盆邊緣的海溝，則為海洋板塊隱沒的位置。儘管往後地磁、震測和地形觀測等地球物理探勘資料也都支持這個論點，海洋地質學家執意前往中洋脊實地考察，親眼目睹海洋地殼形成過程。

法美中洋海底研究計畫（Project FAMOUS）經多方奔走而具體成形，這個跨國合作最令人矚目之處，在於投入三艘深海潛航器參與探勘任務，規劃使用載人潛艇勘察中洋脊裂谷。1973 年，法國地球物理學家皮雍（Xavier Le Pichon）搭乘「阿基米德號」下潛，近距離觀察甫形成不久的海洋地殼，年輕的枕狀熔岩尚無沉積物覆蓋，顯示玄武岩不久前才自地底岩漿庫流出。翌年，法籍「賽亞娜號（Cyana）」與美籍「亞爾文號（Alvin）」深海潛艇陸續加入調查行列，這兩艘新式潛艇具有靈敏的操控力，附有照明系統的影像拍攝裝置，運用機械手臂採集標本，能夠大幅提升水下作業的效率與品質（圖 11,12）。這些性能上的顯著提升，宣告體積龐大、機動性差的阿基米德號將被取代。

新式深海潛航器能夠大幅縮減體積、減輕重量並增加機動性，關鍵技術在於複合微球泡棉（syntactic foam）的問世。這種塑膠泡棉內含無以數計的空心小玻璃球，外徑不大於 300 微米，微球直徑越小，耐壓能力越強；將這些微球混入熱塑性的環氧樹脂中固化，即使在超過一萬公尺的深度也不會被壓碎，為潛艇設計帶來關鍵性的突破。現代深海潛艇採用輕量化的浮性材料，產生的浮力足以中和抵銷抗壓艙及其他輔助系統的總重，從而將厚重的抗壓艙包覆在小型潛艇之內。新式潛航器的輕巧特質，得以讓母船回收安置於甲板之上，快速前往世界各地，執行下一趟探勘任務。

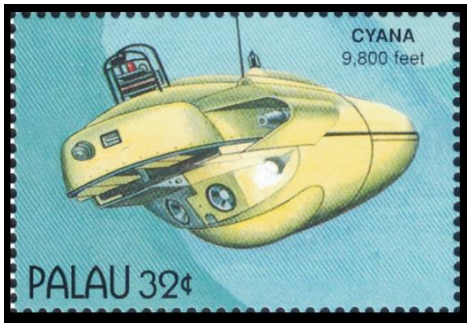


圖 11. [左] 賽亞納號（帛琉，1995）

圖 12. [右] 亞爾文號（剛果，1993）

深海生命綠洲

隸屬於美國伍茲霍爾（Woods Hole）研究所的亞爾文號，是全球使用次數最多、頻率最高的深海潛水器，啟用至今已執行超過五千次的潛水任務 （圖 13）。第一代的亞爾文號於 1964 年建造完成，歷經幾次的性能提升，目前作業深度可達 6500 公尺。半個世紀以來，亞爾文號積極參與各種深海調查任務，研發並改進探勘技術，對於海洋地質學、海洋生物學的發展產生巨大的貢獻，尤以深海熱泉生物群的發現，被譽為 20 世紀深海生物學的最大發現。

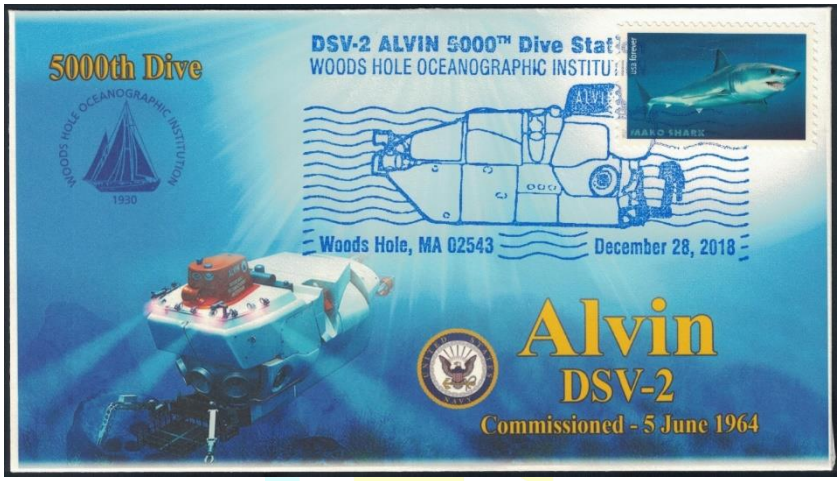


圖 13. 亞爾文號達成五千次潛水任務紀念 （美國，2018）

1977 年，海洋地質學家前往東太平洋尋找海底熱泉存在的證據。此行規劃先由研究船實施深海拖曳系統的大範圍調查，從溫度資料判讀出異常的徵兆，再派遣深海潛艇予以確認。當亞爾文號潛入目標區域，科學家眼前浮現一幕奇異景象，因熱氣而晃動不已的熱水從黑煙囪往上噴出，夾帶著各種礦物質形成黑色煙幕，溫度高達三百五十度；熱水中的重金屬和硫化物遇冷沉澱堆成柱狀的煙囪，周遭佈滿著奇特多樣的熱泉生物群，包括巨型管蟲、貽貝、蛤蚌、蝦、蟹等，都是生物學家全然不知的深海新物種（圖 14）。然而僅僅幾公尺之外，竟又回復一片冰冷單調、荒涼死寂的火山熔岩地形。

這些置身於永恆黑暗的深海居民，並非經由植物進行光合作用來獲得能量，而是利用細菌進行化學合成作用（chemosynthesis）。寄居在蛤蚌和管蟲體內的細菌，位於食物鏈的最底層，它們利用黑煙囪釋出的硫化氫產生能量，提供整個深海熱泉聚落使用（圖 15）。科學家認為這些細菌可能出自地球初期的早期生命，揭露地球生命起源的重要線索。而上方的厚層海水形成阻隔外界衝擊的緩衝帶，庇護脆弱生命免於遭受隕石撞擊或其他災變所影響，讓這處深海綠洲成為地球最古老的生態系。

圖 14. 亞爾文號與深海管蟲 (圭亞那，1996)

圖 15. 深海熱泉維繫周遭生命的能量源頭 (亞述群島，2006)

鐵達尼號的發現

1912 年 4 月，「鐵達尼號（Titanic）」這艘建造之初宣稱不可能沉沒的豪華巨輪，在橫越北大西洋的首航途中撞擊冰山，船首多個隔水艙破損進水，短短不到三個小時，就已沉入冰冷海面之下，導致超過一千五百人罹難，為近代史上最大規模的船難事件。多年來，尋找這艘傳奇巨輪的最終安息處，並不隨著時間的流逝而為人淡忘，發現鐵達尼號的確切位置，成為各國深海探勘團隊垂涎卻又望而興嘆的誘惑。

圖 16. 巴拉德與第三代亞爾文號 (密克羅尼西亞，1997)

美國伍茲霍爾研究所的巴拉德（Robert Ballard）深知小型載人潛艇擁有優異的水下操作能力（圖 16），卻無法適用於廣大海域的搜尋任務。他的團隊致力研發遠端操作的繫纜式遙控水下載具（Remotely Operated Vehicle），為這次行動帶來成功的契機。這套拖曳式深海探勘系統包含用於大區域調查的「亞哥號（Argo） 」，以及目標物探索的「傑森號（Jason） 」。前者配有回聲測深儀，側掃聲納系統，高感光度的數位攝影機，可透過電子元件將捕捉光線的亮度放大，彌補人類視覺之不足；後者配備攝影機和機械臂，用以採集具有科學意義的樣本（圖 17,18）。

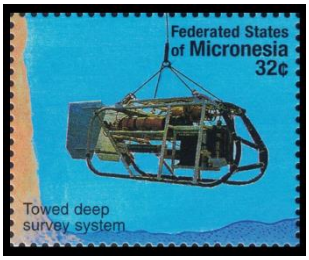


圖 17. 拖曳式深海調查系統 (密克羅尼西亞，1998)

圖 18. 遙控水下載具「傑森號」 (圭亞那，1996)

1985 年，巴拉德的工作團隊和法國海洋開發研究所展開合作，共同搜尋鐵達尼號的下落。雙方擬定使用高解析度的側掃聲納拖曳在海床上方，標定出可疑目標，再下放深海探勘系

統擷取影像加以研判。幾天過後，巴拉德體認單獨使用聲納尋找殘骸的不足之處，便重新擬定策略。依據過往調查水下失事船艦的經驗，物品在沉落至海底的過程會受到海流影響而呈現帶狀分布，因此在海床發現人造物體就有很大機會找到船體，於是改由亞哥號執行海底即時影像回傳的任務。研究團隊輪班盯著攝影機，尋找任何殘骸碎片的跡象，就在搜索航次即將結束前，一些看似金屬碎片的人造物體出現在屏幕上，其中之一被辨認出是鍋爐，順著越來越多的碎片，鐵達尼號殘骸主體於隔天被發現。

隔年夏天，巴拉德指揮亞特蘭提斯號研究船重返失事地點，亞爾文號先後執行十多次的載人潛水任務，對於殘骸內外進行詳盡檢視。只見鐵達尼號船身斷裂成兩半，前半截平躺於海床之上，船首埋入深約二十公尺的灰泥中，船身中央部分已消失，船尾旋轉了一百八十度，掉落在與船首距離約 600 公尺的遠方。亞爾文號上的操作員引導「小傑森號（Jason Junior）」進入船身，行動靈巧的穿行於各層甲板，透過彩色攝影機可見到船艙內部的木質裝潢依舊完好保存，只是增添歲月刻畫的痕跡（圖 19）。

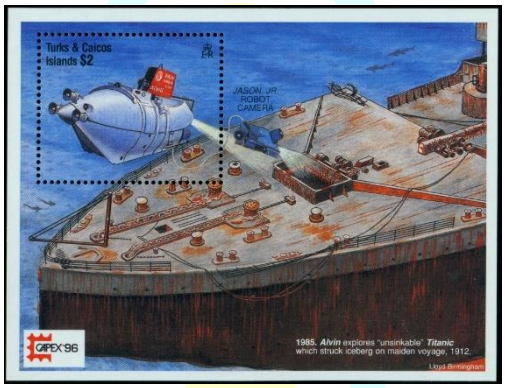


圖 19. 亞爾文號利用「小傑森」進入鐵達尼號船艙檢視（土克凱可群島，1996)

此後，長眠於大西洋底的鐵達尼號不得安寧，頻頻誘引不同動機的遠征隊前往探勘、研究、拍片與觀光，甚至從殘骸現場打撈失事物件。由於鐵達尼號的殘骸散佈於三千八百公尺的水深，能夠勝任這些任務的深海潛航器屈指可數，加拿大導演卡麥隆曾經多次搭乘俄羅斯「和平號」下潛，拍攝的畫面成為電影和紀錄片的重要素材（圖 20）；法國「鸚鵡螺號」則參與備受爭議的商業打撈行動（圖 21），數以百計的物品出現於拍賣市場，淪為收藏家緬懷鐵達尼號的另類選擇。

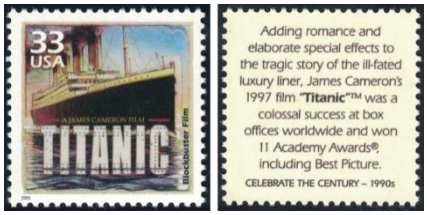


圖 20. 卡麥隆多次潛入北大西洋拍攝鐵達尼號（美國，2000)

圖 21. 法國「鸚鵡螺號」深海潛艇與母船（皮特肯群島，2010)

探索內太空的未來

深海探險先驅發明各種探索內太空的可行方法，將人類塞入中空的壓力艙，然後送入冰冷漆黑的幽冥深海之中。從巴頓的深海潛水球、皮卡爾的深海潛航器以及亞爾文號的新式潛艇，展現不同世代設計觀念上的典範轉移。然而載人潛艇往返於海面和海底之間的必要性逐漸受到質疑，隨著虛擬實境技術的進步與普及，許多危險的水下任務改由海下機器人執行，以減低人員執勤所面臨的風險。當深海無人載具成功地尋獲鐵達尼號藏身之處，也同時揭示新科技將再度改變內太空探索的方式。

多年來，國內外學術界與產業界已打造出種類繁多、性能互異的無人深海載具，包含較為人所熟知的繫纜式遙控水下載具，以及能在海中自動航行、無須繫纜的自主式無人載具（Autonomous Underwater Vehicle）。根據不同調查項目，水下載具可以配備多種感測器，量測水中各項物理、化學、地質與生物相關的水文參數。繫纜式的遙控水下載具，可以將深海載具所感測的海下環境，即時的方式呈現給海面上的科學家，透過虛擬實境技術，讓工作人員在水面操作，卻也擁有乘坐潛艇在海下觀測的臨場感（圖 22,23）。自主式水下載具在海洋科學也有廣泛的應用，可幫助海洋化學與地球物理調查不同深度的大範圍水域及水下地形。透過定時浮出水面發送訊號，經由人造衛星的傳送，科學家不出門即可掌握千里之外的資訊（圖 24）。

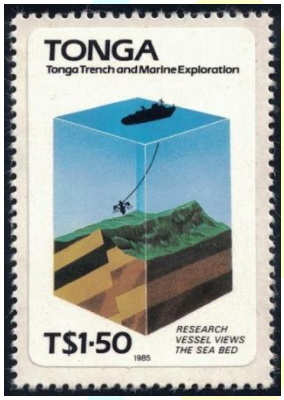


圖 22. [左] 遙控式水下載具 (法屬南極，2008)
圖 23. [右] 拖曳式深海攝影技術 (東加，1985)

臺灣四面環海，專屬經濟海域面積是陸地面積的十五倍大，藍色國土蘊藏極具潛力的地質資源。近年在中央地質調查所的整體規劃下，國內海洋地質學家和地球物理學家積極投入能源與礦產資源探勘，在台灣西南部外海進行天然氣水合物的調查，在台灣東北部外海的沖繩海槽從事深海熱泉的探勘，接連不斷地傳出令人振奮的新發現。國研院海洋中心購有 Triton XLX56 型工作級水下無人遙控載具，於 2018 年「勵進號」研究船啟用後進行系統整合，可以在三千公尺的深海進行作業。不久之前，這套系統成功地從數千公尺深的海床傳回清晰的影像，並利用機械臂採集樣本，顯示我國深海探勘的能力已步入新階段。未來若能提升國內水下技術自主研發的能量，必有助於海洋科學更深入地的研究、調查與開發。

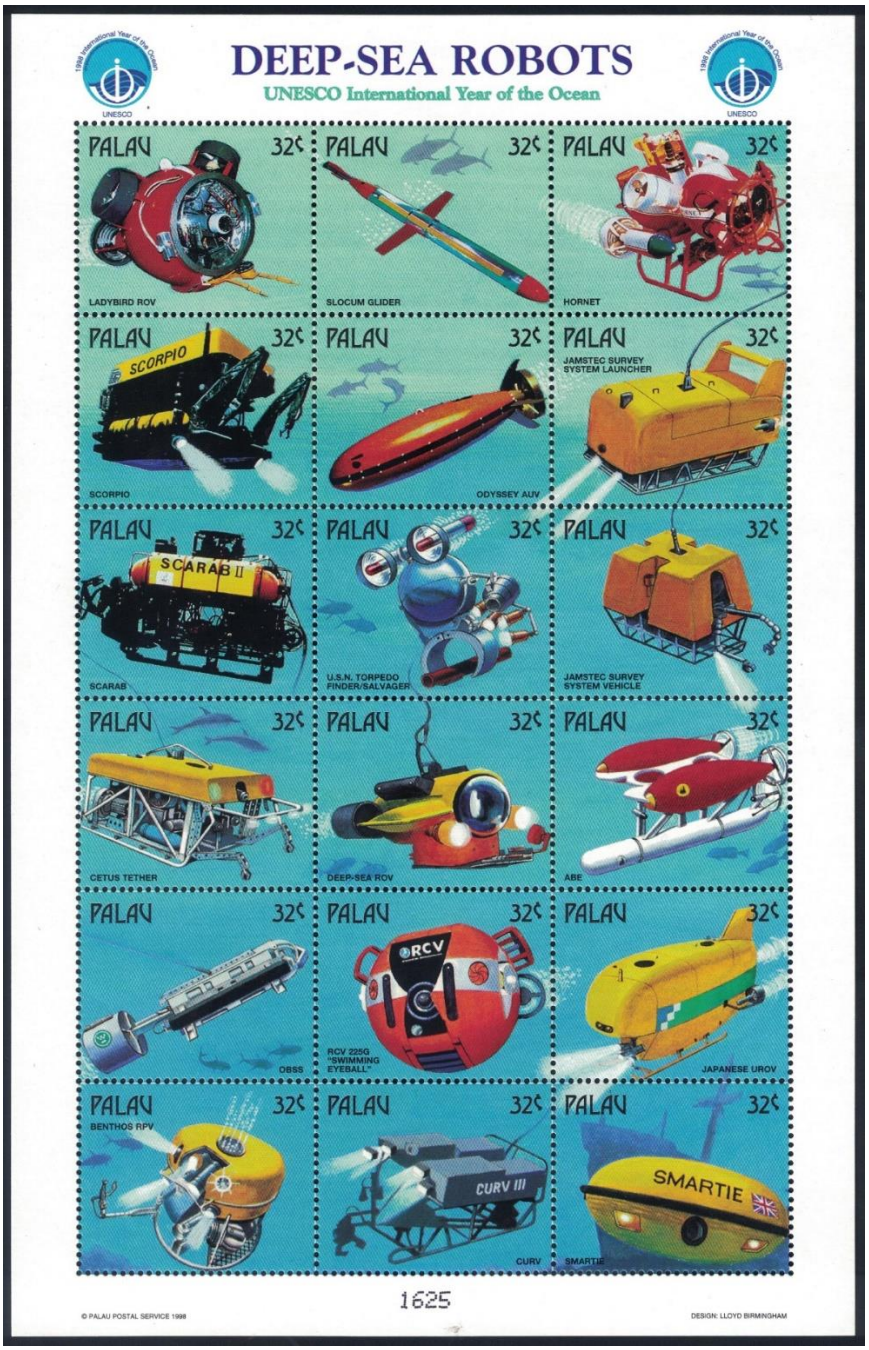


圖 24. 各國研發的遙控式與主動式水下載具 (帛琉，1998)

李孟陽

臺北市立大學地球環境暨生物資源學系助理教授