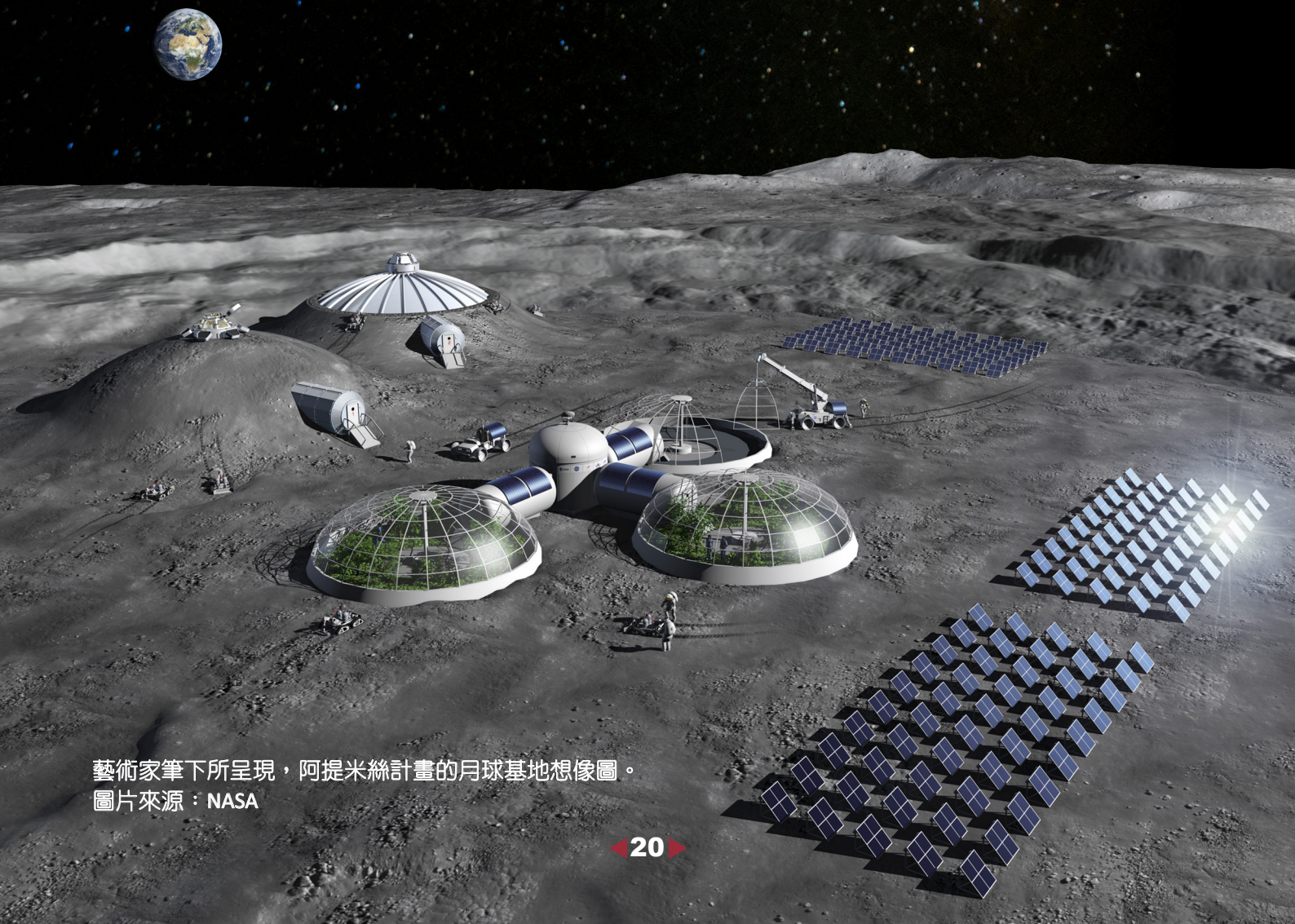


邁向太空殖民之路

月球上的資源運用

文／賴彥霖

隨著阿提米絲計畫推進，人類將再次踏上月球，這一次的目標將不只是插旗與短暫停留，而是要建立能長期運作的基地，如下示意圖。但問題在於地球與月球之間的距離與運輸成本極高，每公斤成本高達數萬美元，因此單靠從地球運送物資並不實際。若要在月球上達到真正「落地生根」，就必須善用當地的資源。因此「當地資源運用」(In-Situ Resource Utilization，簡稱ISRU)將成為未來月球探測與定居的重要技術。



藝術家筆下所呈現，阿提米絲計畫的月球基地想像圖。
圖片來源：NASA

月球資源概況

月球的環境與地球有如天壤之別，由於缺乏厚實大氣的保護，月球表面長期承受高能太陽輻射與宇宙射線的轟擊，再加上微隕石撞擊，岩石在這些作用下反覆被擊碎，瞬間熔融後又急速冷卻，最終形成大量含有玻璃質的微小顆粒。這些顆粒直徑多在數十微米以下，比地球沙粒細得多，形狀則尖銳而不規則。經過無數次循環堆積，整個月球表面被覆蓋上一層鬆散的灰色碎屑——我們稱之為「月壤」（Lunar soil），如圖1。

月壤是月球最容易取得的資源。其成分相當豐富，其中約有40%~45%的是氧元素，主要以各種氧化物的形式存在，例如二氧化矽（ SiO_2 ）、氧化鋁（ Al_2O_3 ）、氧化鐵（ FeO ）與氧化鎂（ MgO ）。若能收集並利用合適的技術將這些氧化物分解，除了氧氣可供人類呼吸之外，其餘矽、鐵、鎂和鋁之類的元素都是製造物品或建材的重要來源。

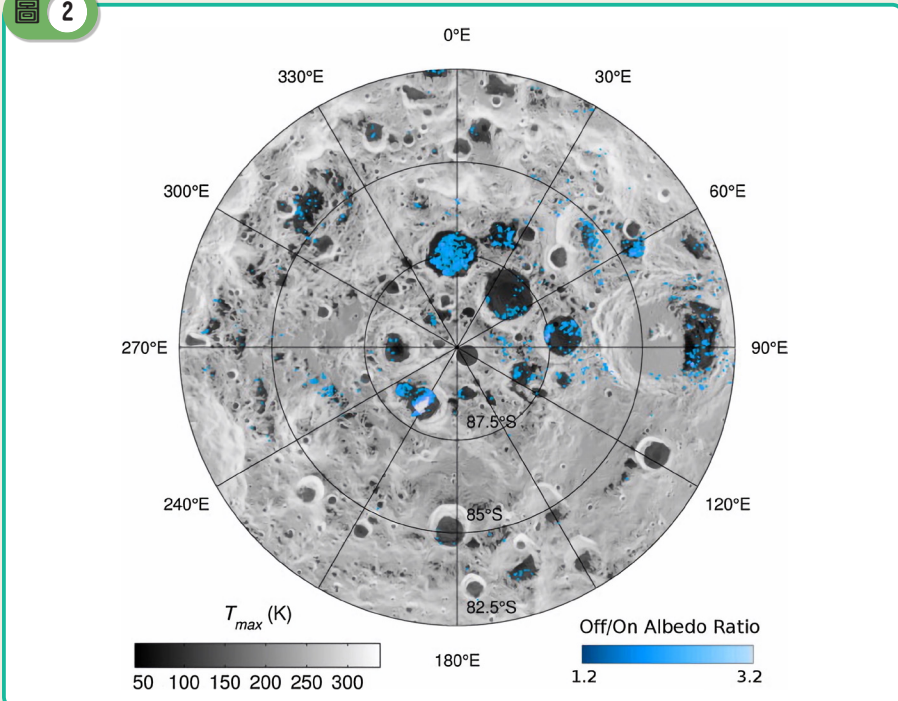
除了月壤之外，另一個重要的資源是月球上的水冰，如圖2。二十一世紀以來，多個探測任務已經確認，在月球極區的永久陰影區（Permanently

圖 1



月球表面的月壤。影像來源：www.sciencedirect.com

圖 2



月球勘測軌道飛行器在月球極區永久陰影區探測到水冰。影像來源：ars.els-cdn.com

Shadowed Regions，簡稱PSRs）中存在水冰，科學家推測，這些水冰可能源自兩大機制：彗星或小行星撞擊時帶來的揮發物，另一則是太陽風中的氫離子與月壤中的氧結合形成水分子。當這些水分子在月球表面或內部遷移時，如果進入那些從未受陽光照射、深陷坑谷的永久陰影區，便會因為長期低於零下150度的極端低溫而被穩定保存下來。這樣一來，月球極區的永久陰影區就成為天然的水冰冷凍庫，也為未來人類探索與資源利用提供了潛在的儲備。

資源與應用

空氣與水

可呼吸的空氣與水是人類在月球長期生存最基本、也是最重要的資源。極區永久陰影區中所保存的水冰，經過開採、萃取與淨化後，可直接供應人類飲用、清潔與農業栽培等用途。水也可以透過電解分解成氫氣與氧氣。氧氣能滿足人類呼吸需求，

並可用於基地維持穩定的生存環境。除了水冰之外，月壤本身也蘊含大量氧元素，可經過高溫熔融或化學還原，萃取出氧氣。根據估算，僅僅一立方公尺的月壤，就可能釋放出數百公斤的氧氣。

能源應用

月球表面因為無濃厚大氣且沒有雲層干擾，幾乎全天候能夠利用太陽能，尤其在極區高處的「永晝山」（Peaks of Eternal Light）可以長時間獲得日照，成為太陽能基地的理想地點。圖3為月球南極附近的沙克爾頓隕石坑（Shackleton），此隕石坑直徑約21公里，深度約4.2公里，由於位於高緯度地區，周圍高起的邊緣幾乎在任何時段都有日照，是一個設置太陽能發電極佳的候選地點。除了太陽能之外，月壤中含有氦-3（ ^3He ），這是一種被期待應用於未來核融合能源的同位素。若能大規模開採與利用，將可能成為地球與月球的重要能源來源。另一方面，極區水冰電解的氫與氧也能為基地提供能源，或作為火箭推進劑，應用於月球表面運輸與探索。



月球南極的沙克爾頓隕石坑，其邊緣地勢較高，幾乎在任何時段都能受到陽光照射。影像來源：ESA

建材

月球表面的月壤也可作為建築資源。透過高溫燒結或加入膠結劑，可製成「月磚」，用於建造牆體與防護設施。或是利用3D列印技術，直接將月壤加工為結構材料，快速製造居住模組、道路或設施。圖4是歐洲太空總署使用3D列印技術印製的月球中空建築結構，此結構約使用了1.5噸的材料。

金屬與稀土元素

月壤中蘊含多種金屬資源，例如鐵、鋁、鈦與鎂，這些金屬可透過熔融分離或化學還原提取，用於製造工具、結構件與電子設備。某些地區如靜海、風暴洋等還富含鈦鐵礦，提煉鈦金屬的重要來源。此外，月球風化層中可能存在少量稀土元素（rare earth elements，簡稱REEs），對於高科技產業非常重要。若能開發這些稀土資源，也可能成為地球工業供應鏈的一環。

挑戰與限制

月球資源利用雖然前景廣闊，但實際應用仍面臨諸多挑戰與限制。首先是月球的極端環境。表面溫度在白天可達攝氏120度，夜晚則可降至-170度，巨大的溫差對設備材料與能源管理構成嚴峻考驗。除此之外，月球表面缺乏厚大氣層保護，容易受到高能粒子輻射與微隕石轟擊，這些因素都可能造成機械損壞，縮短設備壽命。另一方面，月壤的細碎結構與高黏附性，對各類機械系統同樣帶來挑戰。微米級的尖銳顆粒會造成齒輪與軸承的磨損，並可能堵塞運動部件；同時，它們也可能附著在光學鏡面、太陽能板與散熱器上，降低效率並增加維護難度。這些問題若未妥善解決，將嚴重限制長期資源利用的可行性。

在工程面，如何在低重力環境下保持穩定挖掘是一項關鍵難題。由於重力僅為地球的六分之一，

圖 4



歐洲太空總署利用3D列印技術和月壤製作的建築結構。影像來源：ESA

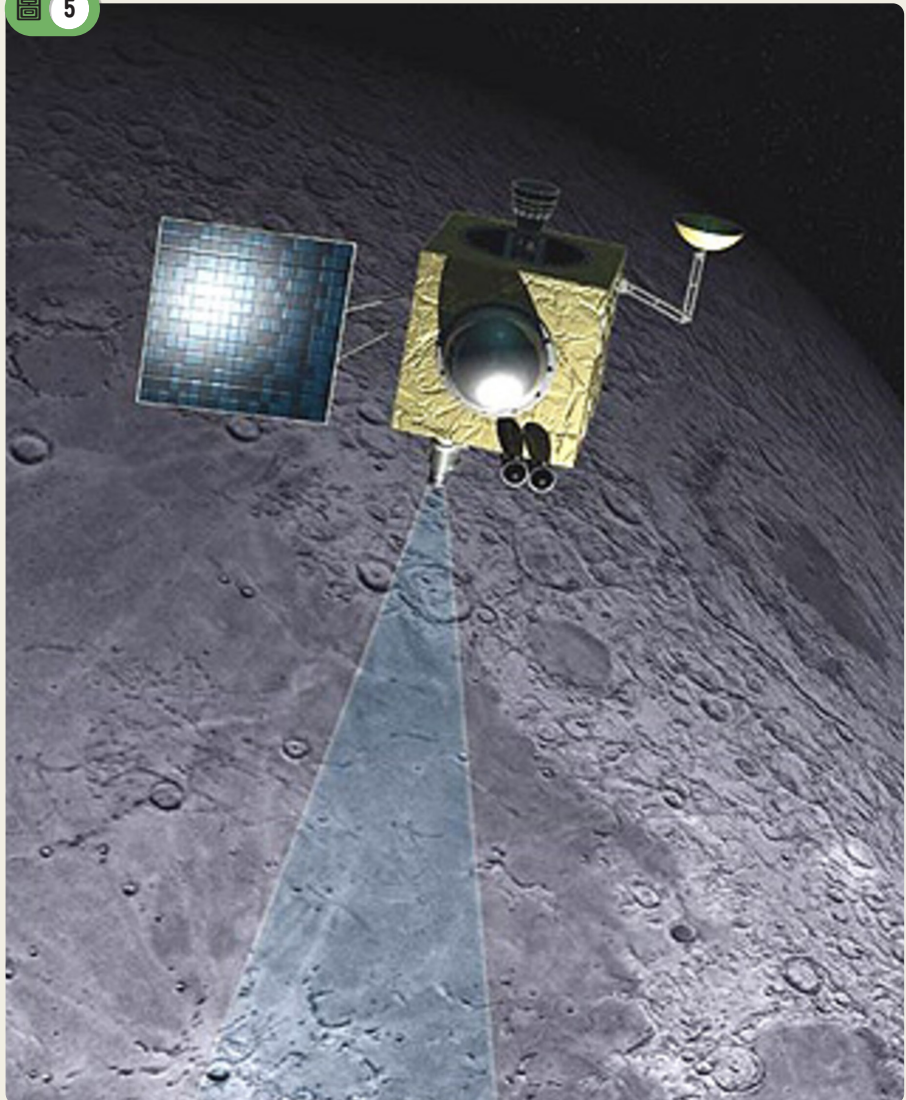
傳統的推進或壓實方式容易失效，需要特殊設計的機械結構來平衡挖掘反作用力。另一方面，能源供應同樣是挑戰。月球晝夜長達各14天，漫長的月夜意味著太陽能系統將經歷超過兩週的能源斷層，如何儲能或補能成為核心問題。至於建立自動化資源處理與生產線，則需要高度成熟的演算法、機械系統與可靠度，而相關技術目前仍處於研發階段。

最後是經濟與政策問題。即便技術可行，能否實際回收開採與運輸成本仍有疑問。國際合作與太空法規也尚未完善，關於月球資源的歸屬權、使用權與共享機制仍有待國際間協調。如何在避免衝突的前提下建立明確的法律框架，將決定未來月球資源開發的可持續性。

當地資源運用與相關任務

月球極區被認為蘊藏水冰資源，要進一步利用這些資源，首先必須尋找並確認其分布與含量。在過去二十多年裡，多項國際探測任務逐步建立了月球水冰存在的證據。1998年，美國太空總署月球探勘者號（Lunar Prospector）所搭載中子光譜儀，首次在月球南北極偵測到氫含量異常增強，顯示永久陰影區可能存在水冰。2008至2009年間，印度的月船一號（Chandrayaan-1）任務，如圖5，搭載美國太空總署的M³（Moon Mineralogy Mapper）光譜儀，在近紅外波段量測到月表水分子與羥基（-OH）的吸收特徵，確認了高緯度與陰影區存在水冰訊號。2009年，月球勘測軌道飛行器（Lunar

圖 5



執行月面探測任務的月船一號示意圖。圖片來源：ESA

Reconnaissance Orbiter, 簡稱LRO) 透過LEND中子偵測器與LAMP紫外光譜儀等儀器, 繪製出極區氫含量與揮發物的精細分布, 並對永久陰影區環境進行遙測, 顯示其中可能富含水冰與其他揮發物, 如圖6~圖8。同年, 月球坑觀測和傳感衛星

(Lunar Crater Observation and Sensing Satellite, 簡稱LCROSS) 以撞擊器撞擊南極的卡比厄斯環形山(Cabeus), 從噴出物中直接檢測到水冰與其他揮發性物質, 首次以實驗手段明確證實了永久陰影區內存在水冰。



圖 6 藝術家筆下的月球勘測軌道飛行器示意圖。圖片來源：NASA

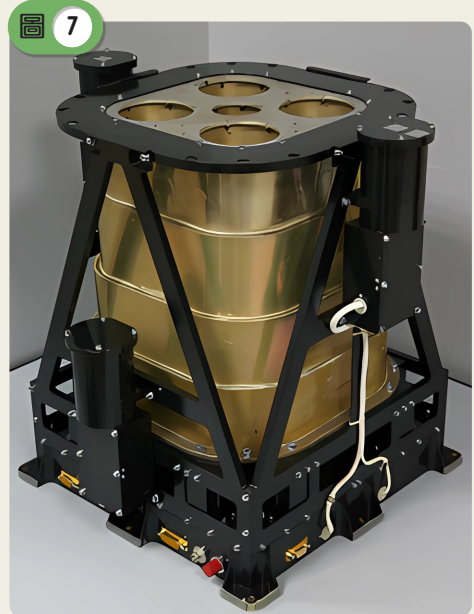


圖 7 LEND中子偵測器。圖片來源：NASA

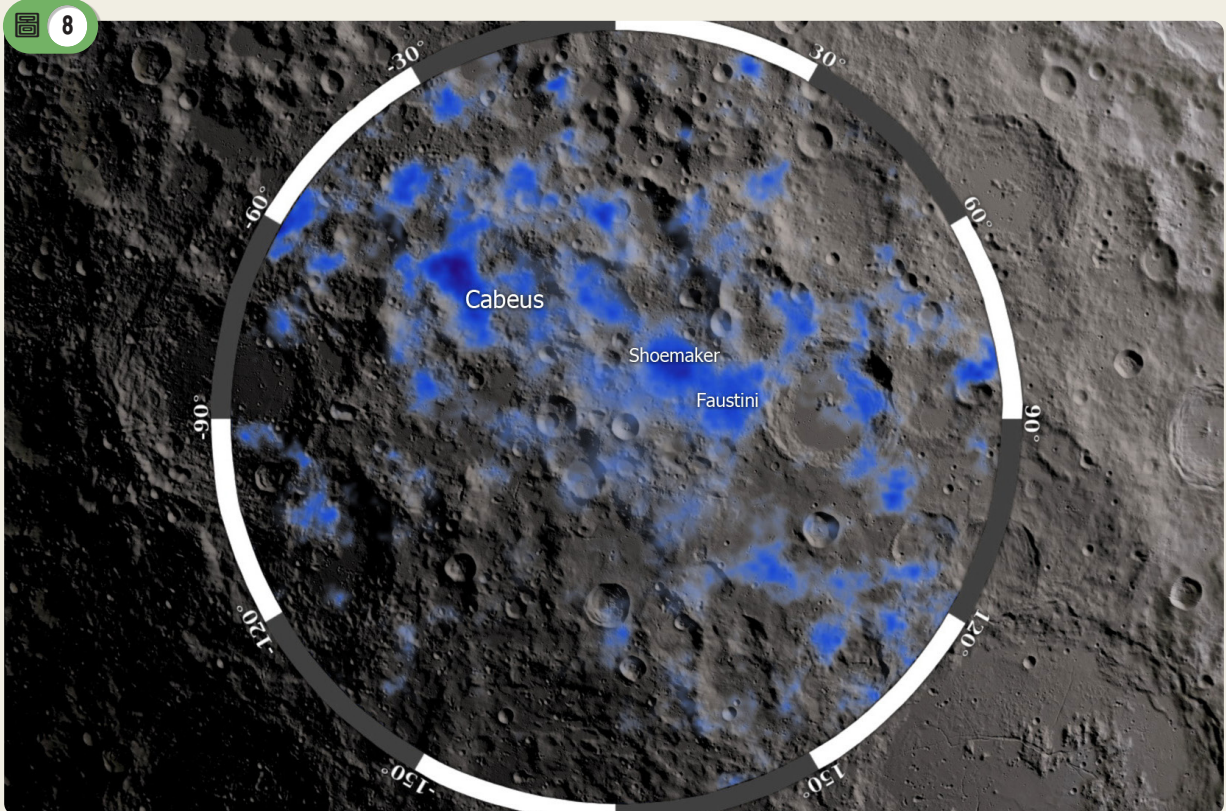


圖 8 月球勘測軌道飛行器探測月球南極, 獲得月面氫含量與揮發物質分布圖, 其中藍色部分的氫含量高, 顯示或許含有水冰。圖片來源：NASA

近年，美國太空總署的另一項任務，當地資源運用試驗挖掘機（ISRU Pilot Excavator，簡稱IPEX）是美國太空技術任務理事會（Space Technology Mission Directorate，簡稱STMD）「關鍵技術開發計畫」（Game Changing Development，簡稱GCD）的一部分，目標是研製一台機器人挖掘機，能夠在月球上展示最多10公噸月壤的挖掘能力，如圖9。IPEX的設計基礎來自甘迺迪太空中心所開發的先進月壤地表作業機器人，採用反向旋轉鏟斗滾筒的概念，用以平衡在低重力天體上挖掘時所產生的反作用力。為了充分利用這項反向旋轉滾筒的機制，目前正在開發新的自主挖掘策略與演算法。這些演算法將使IPEX在為期11天的任務中，能夠半自主地完成挖掘、移動以及輸送總量10公噸月壤的目標。由於頻寬與延遲的限制，人工遠端操作將儘可能減少，地面操作人員只會定期確認與驗證挖掘機的高階任務與運

作。目前進行的最佳化自動挖掘解決方案仍在研發當中。

從月球到火星

月球的當地資源運用研究，是阿提米絲計畫邁向月球長期基地的重要基礎，同時也是全人類開啓深空探索的試驗場。從月壤中萃取氧氣、利用水冰作為燃料與生命維持，到發展太陽能與核能供應，再到以3D列印方式打造建築結構，這些努力共同指向一個目標——減少對地球後勤補給的依賴，在太空環境建造自給自足的基地，如圖10。月球距離地球相對較近，通信延遲短，運輸成本雖高但仍可負擔，因此成為理想的太空殖民技術驗證基地。一旦相關技術在月球成熟，它們便能被應用到更遙遠、環境更嚴苛的星球。



當地資源運用試驗挖掘機。影像來源：ESA



太空人運用設計在月球環境使用的土木工程機具，進行月球基地的地基與道路鋪設工程示意圖。影像來源：NASA/ICON

從月球到火星是美國太空總署月球計畫的終極目標，如圖11，相較於月球，火星擁有稀薄大氣與相對豐富的揮發物資源，其中二氧化碳大氣和極區冰帽都是寶貴的可利用原料。以美國太空總署毅力號火星探測任務中的MOXIE實驗為例，已經成功從火星大氣中分離出氧氣，這正是當地資源運用在外星實地應用的先驅示範。未來若能放大這項技術的規模，便可為火星人類任務提供生命維持所需的呼吸氧氣，以及火箭推進所需的氧化劑，大幅降低從地球運送燃料的需求。同樣地，火星極區存在的冰凍水資源，也可能成為生活用水與能源的來源。

然而，火星的挑戰比月球更為嚴苛。通信延遲動輒數十分鐘，意味著自動化與人工智慧更為重要；加上極端的日照變化與頻繁的沙塵暴天氣，也是能源供應與設備維護的一大挑戰。因此，月球當地資源運用的試驗與突破，將直接決定人類能否把火星變成下一個探索前哨。在地球以外尋找並利用資源，將使人類真正成為跨行星文明，拓展我們的活動範圍與生存空間。當地資源運用不只是一項技術，更是一把鑰匙，開啓從月球到火星，乃至更遠太陽系邊疆的太空新時代。

賴彥霖：中央大學天文研究所博士後研究

圖 11



阿提米絲計畫的終極目標，是替未來的火星殖民任務預做準備。影像來源：NASA