

通往深空宇宙的月之門

# 阿提米絲的探索藍圖

文／許仁愷

「我的一小步是人類的一大步。」五十多年前，阿波羅計畫首次把人類送上月球，尼爾·阿姆斯壯（Neil Armstrong）的話成為了世紀經典。自從1972年的阿波羅17號登月之後，人類便再也沒有踏上月球。這段空白的半個世紀裡，太空探索的焦點轉向了國際太空站的營運、對火星的探測，以及木星與土星等深空世界的任務。

如今，人類為什麼要再一次踏上月球？原因不是單純的懷舊或紀念，而是因為我們正準備邁向更遙遠的目標。月球被視為前往火星甚至更深空的前哨站。在這裡，我們可以驗證長期駐留的可能性，嘗試利用月球上的水冰與土壤資源，稱為現地資源利用（In-Situ Resource Utilization，簡稱ISRU），並逐步建立下一代的太空基礎設施。推動這一切的，是由美國航空暨太空總署（NASA）主導的阿提米絲計畫（Artemis Program）。任務的重點不再是單純的登月，而是要打造一個能長期運作的月球基地與探索架構，並透過多項核心技術與配套計畫相互支撐。



由美國太空總署規畫的阿提米絲任務想像圖，太空人在月球南極收集樣本並進行科學實驗。圖片來源：NASA

## 阿提米絲計畫的架構

要讓人類真正重返月球，只靠一枚火箭或一艘太空船是不夠的。阿提米絲計畫就像一幅龐大的拼圖，需要各種載具、太空站和配套系統互相配合，才能完成從地球出發、繞月飛行、登陸、駐留基地到返回地球的整個流程。

## 獵戶座太空船 Orion

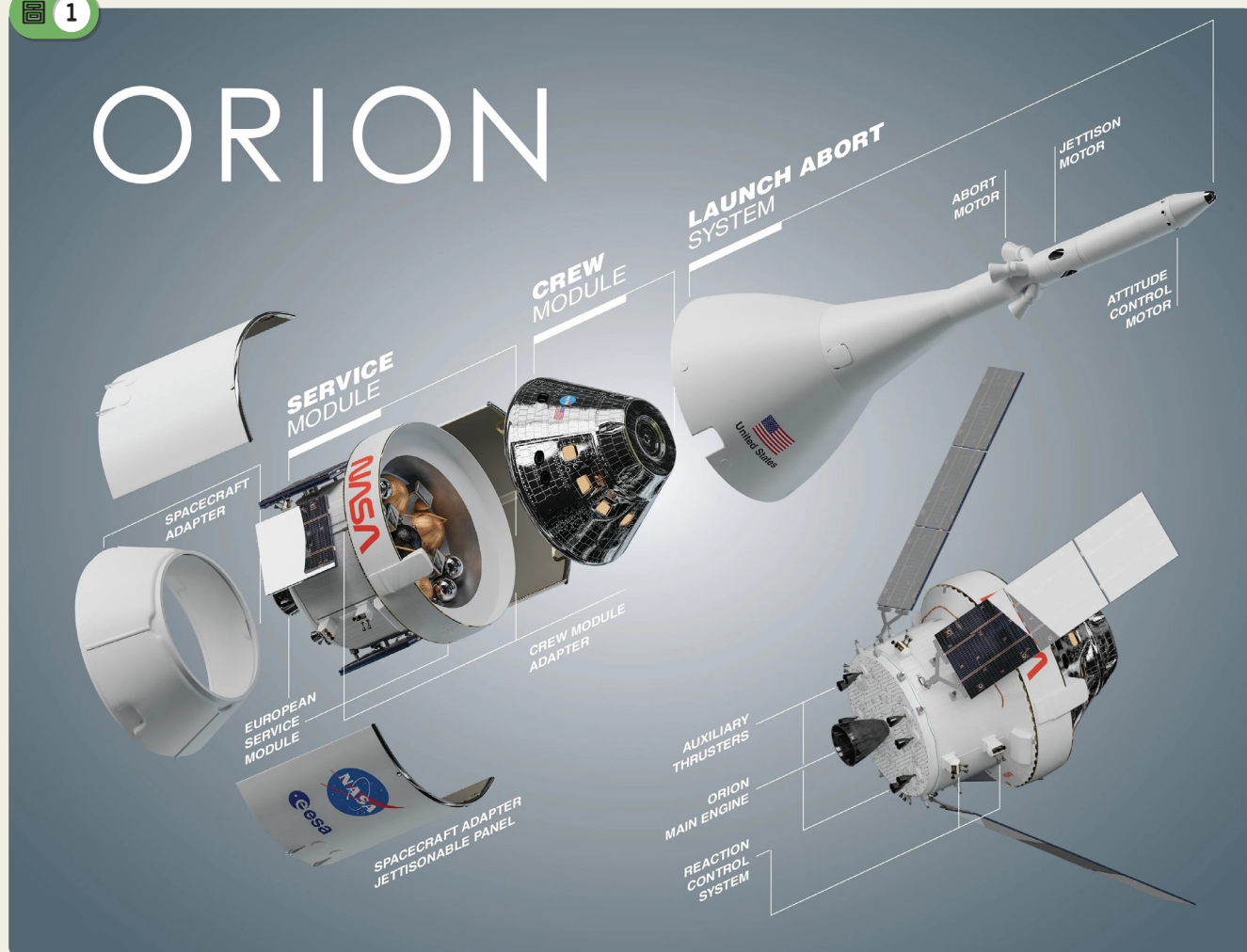
獵戶座太空船是阿提米絲計畫的核心載具，由美國太空總署主導研發，並搭配歐洲太空總署（ESA）提供的服務模組。它的設計目標，是支援人類在深空中長時間活動，尤其針對月球甚至更遠的任務。目前，獵戶座是唯一能載人飛離近地軌道，並在高速重返大氣層時安全返回地球的

太空船。

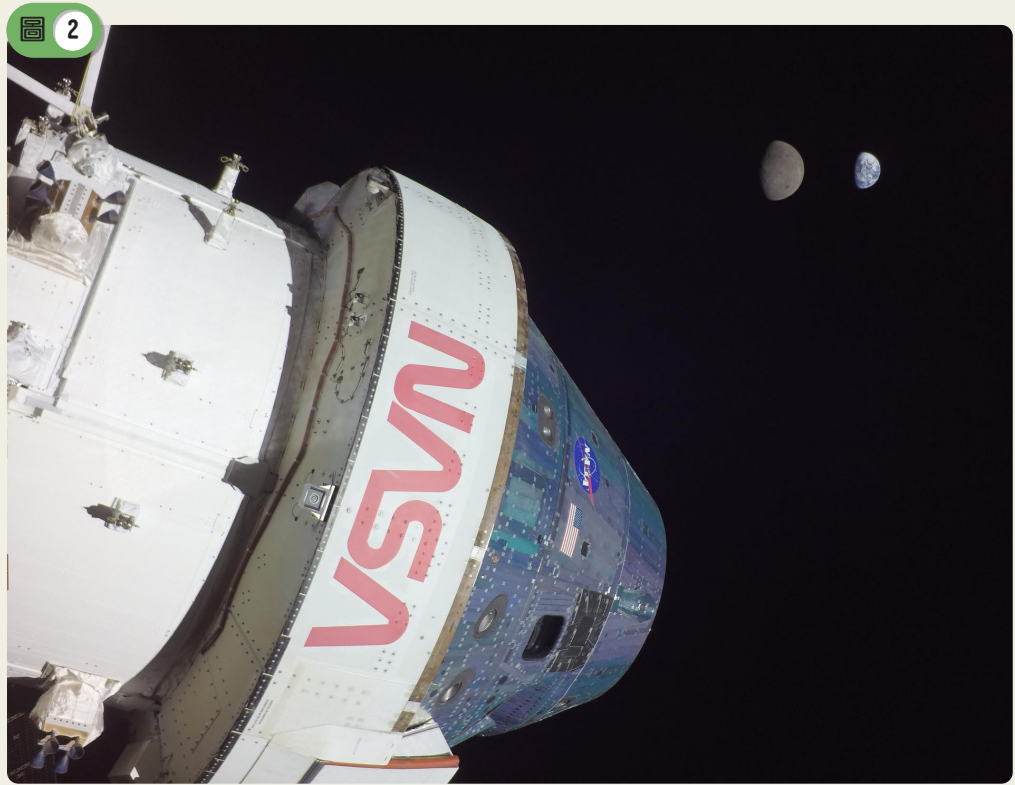
乘員艙最多可容納四名太空人，設計上能支援長達21天的任務。艙體配有改良型隔熱罩，可抵擋返回地球時高達攝氏2,700度的高溫，並具備輻射與微流星體的防護。生命維持系統則能自動監控與調節氧氣、氮氣、溫度與濕度，讓太空人在深空環境中維持穩定狀態，如圖1。

與乘員艙相連的歐洲服務模組（European Service Module，簡稱ESM）由空中巴士公司（Airbus）建造，負責推進、能源供應與資源補給。模組上的四片太陽能板展開後總長約19公尺，可產生11千瓦電力，相當於兩戶家庭的用電量。推進系統採用一具改裝自太空梭的OMS-E主引擎，推力約6,000磅，並搭配多組輔助推進器，確保太空船在深空中能進行操作與姿態控制。

圖 1



獵戶座太空船的主要組成，包括乘員艙、歐洲服務模組、太空船接合器，以及發射逃逸系統。圖片來源：NASA



2022年11月28日，Artemis I 任務第13天，獵戶座太空船航行至到距離地球約43萬公里處，在影像背景中可以同時看到地球與月球。影像來源：NASA

2022年，Artemis I 無人試航成功，如圖2，驗證了獵戶座太空船從發射、繞月到重返地球的整套流程。下一步的Artemis II 將進行首次載人繞月航行，四名太空人會親自測試體驗這艘太空船在深空環境中的表現。

## 太空發射系統火箭 SLS

要把獵戶座太空船送上月球軌道，需要一枚能提供強大推力的火箭。這就是太空發射系統火箭（Space Launch System，簡稱SLS），是美國自阿波羅時代的農神五型火箭（Saturn V）以來，首次打造的超重型運載火箭，如圖3。

太空發射系統的設計融合了太空梭的經驗與新一代技術。核心部分由波音公司建造，高度約64公尺，能裝填近200萬公升液態氫與74萬公升液態氧，總質量約1,000公噸。推進力來自四具由太空梭升級的RS-25引擎，可在短時間內達109%的輸出功率，每具推力超過50萬磅。火箭兩側配置由諾斯洛普·格魯曼公司（Northrop Grumman）製造的固態輔助火箭，由四節式延伸成五節式，單枚輔助火箭最大

推力約360萬磅，燃燒時間約兩分鐘。

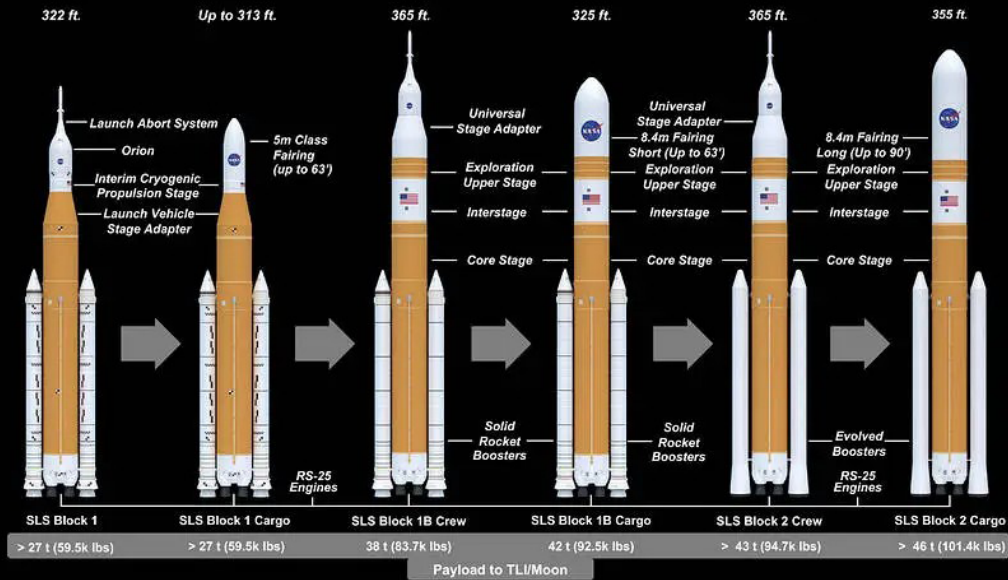
在Block 1 模組的配置下，SLS全高98公尺，發射時總重量約2,600公噸，起飛推力達880萬磅（3.91萬千牛頓）。這個推力相當於30架波音747客機同時起飛的總和，能夠將95公噸的酬載物體送入近地軌道（Low Earth Orbit，簡稱LEO），或將27公噸的酬載物體送入月地轉移軌道（Trans-Lunar Injection，簡稱TLI）。火箭上級為「臨時低溫推進段」（Interim Cryogenic Propulsion Stage，簡稱ICPS），沿用了與Delta IV 重型火箭上級相同的技術，搭載一具RL10引擎，負責執行最後的軌道變換，將獵戶座太空船推向奔月軌道。

2022年底，太空發射系統火箭在Artemis I 任務中首次升空，如圖4，順利將獵戶座太空船送上繞月航程，驗證了火箭的整體性能。接下來的Artemis II 與Artemis III 將繼續使用Block 1 模組；後續的Block 1B 計畫換裝EUS（Exploration Upper Stage），讓太空發射系統火箭的酬載能力提升至38公噸；最終的Block 2 模組則會搭配運用新一代複合材質的輔助火箭，進一步提升運載能力，甚至可以支援火星任務。

3

# SLS EVOLVABILITY

## FOUNDATION FOR A GENERATION OF DEEP SPACE EXPLORATION



太空發射系統火箭（SLS）的演進設計。從最初的Block 1模組，到更強大的Block 1B與Block 2模組，能將越來越重的酬載送往月球，支援未來的載人與貨運任務。圖片來源：NASA/MSFC

4



2022年11月16日，搭載獵戶座太空船的太空發射系統火箭，從甘迺迪太空中心39B發射台升空，執行Artemis I 測試任務。這是美國太空總署首次整合深空探索系統進行的試飛。影像來源：NASA/Joel Kowsky

## 月球門戶太空站 Gateway

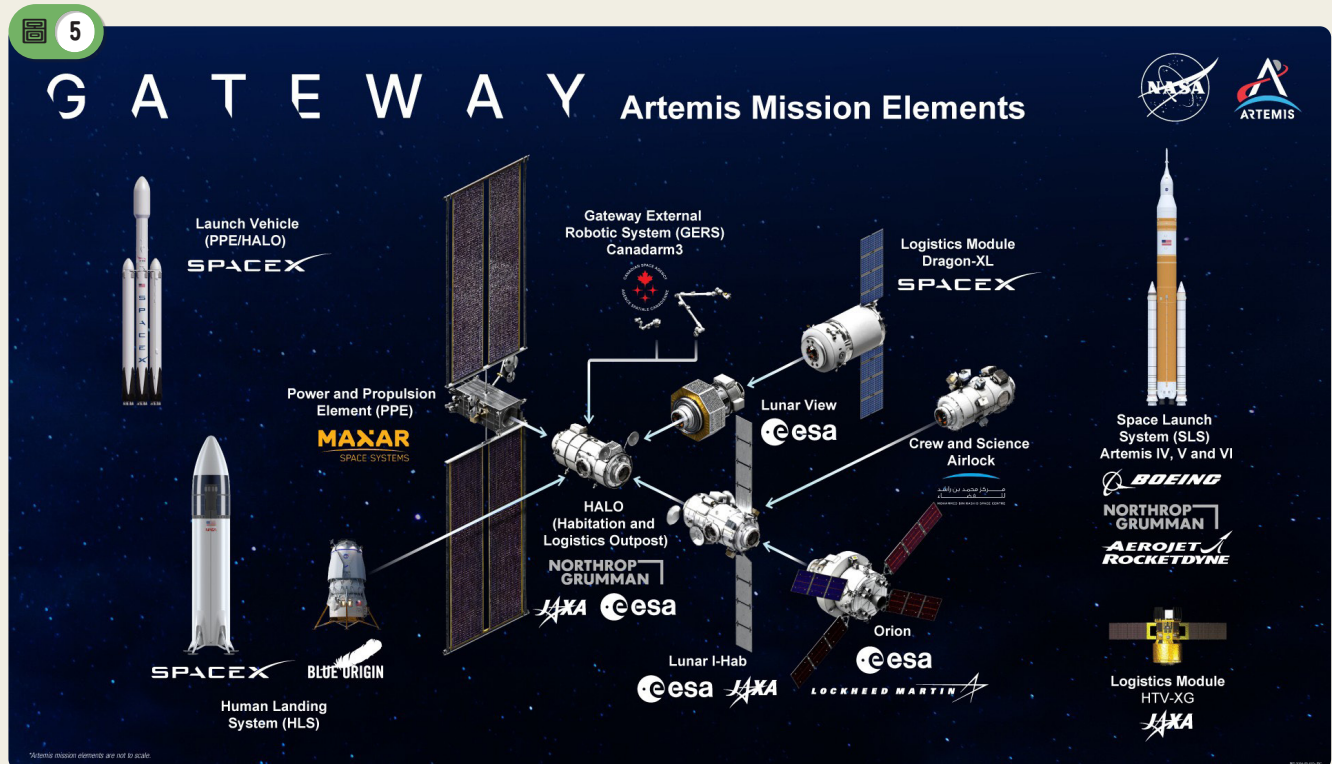
阿波羅任務是一去一回的短暫停留，而阿提米絲的目標則是建立能長期探索、開發月球的運作與物流機制。為了支援長期探索開發，NASA規劃在月球軌道建造一座太空站「月球門戶」（Lunar Gateway）。這將是人類第一座繞月球運行的太空站，位於「暈輪軌道」（Near-Rectilinear Halo Orbit，簡稱NRHO）。這條軌道形狀類似一個狹長的橢圓，距離月球最近時約3,000公里，最遠時約6.4萬~7萬公里，繞行一圈約七天。這個獨特的軌道能讓月球門戶太空站保持穩定運行，並與地球維持良好通訊、大幅節省燃料，使其成為理想的地月航行中繼站，用來人員休整、物資補給與物流轉運，並支援更長期的月球探索活動。

月球門戶太空站採模組化設計，壽命規劃至少十五年，如圖5。最初由兩個核心單元組成：電力與推進模組（Power and Propulsion Element，簡稱PPE），提供能源、姿態控制與通訊；居住與後勤前哨艙（Habitation and Logistics Outpost，簡稱HALO），內含睡眠、備餐與運動空間，並具備指

揮與分配功能。隨後將逐步加入更多模組，由歐洲與日本合作的I-Hab，提供完整的生命維持與研究環境；歐洲建造的Lunar View，能進行燃料補給並設有觀測窗；阿聯酋提供的Crew and Science Airlock，讓太空人與科學設備能進出艙外；加拿大則貢獻新一代機械臂Canadarm 3，能支援維修與自動化操作。

物流補給則由商業與國際夥伴負責，包括Space X公司的貨運系統與日本的HTV-XG補給太空船，定期將物資、實驗設備與燃料送往月球門戶太空站。根據規劃，PPE與HALO預計於2027年由獵鷹重型火箭發射，並花約一年時間進入NRHO。Artemis IV 太空人將首次進駐太空站，並接上I-Hab 模組艙；隨後Artemis V 與Artemis VI 會接上Lunar View 與Airlock 模組，逐步完成太空站的整體架構。

月球門戶太空站的模組由不同國際夥伴提供，各自貢獻核心技術，使這座太空站成為阿提米絲計畫中真正的國際合作成果。



月球門戶太空站（Gateway）是美國、歐洲、日本、加拿大與阿聯酋等國際夥伴共同建造的太空站，將作為阿提米絲計畫的核心節點，除了支援月球的長期探索，也將為接下來的火星任務做準備。圖片來源：NASA

## 人類登月系統 HLS

在人類重返月球的規劃中，獵戶座太空船負責把太空人送上月球軌道，但真正將他們載往月面的，則是「人類登月系統」（Human Landing System，簡稱HLS）。這是一種專為登月設計的載具，負責完成最後一段旅程，並在任務結束後將太空人送回軌道，與獵戶座太空船會合再返回地球。

美國太空總署採取多廠商合作的策略，目前同時與Space X公司和Blue Origin公司開發不同版本的人類登月系統。Space X以「星艦」（Starship）為基礎，打造出星艦人類登月系統（Starship HLS），如圖6 a。在Artemis III階段，它將在月球軌道與獵戶座太空船對接，把兩名太空人送往月球南極，並停

留約一週進行科學探索。到Artemis IV，這款載具將升級至能與月球門戶太空站對接，並攜帶更多設備到月面。Blue Origin則主導研發「藍月登月艇」（Blue Moon HLS），如圖6 b，計畫在Artemis V任務中投入使用，由新一代的大型火箭New Glenn發射。它的設計方向與登月星艦類似，同樣具備與月球門戶太空站對接、多酬載能力與部分重複使用性。

任務初期，這些登月載具除了交通功能外，還能暫時作為居住艙，讓太空人休整，並支援樣本採集、環境監測與技術測試。未來，美國太空總署和業界也將開發貨運版本，能將月球車、棲息艙或其他大型基礎設施送上月面。這種與商業公司合作的模式，讓美國太空總署能分攤研發成本，同時促進整個航太產業的成長。

圖 6



a Space X公司與 b Blue Origin公司提出的人類登月系統概念圖。未來它們可將加壓型月球車、月球基地等基礎設施送上月球表面，每次約能運載15公噸設備。圖片來源：Space X/Blue Origin/NASA

## 月球南極與未來展望

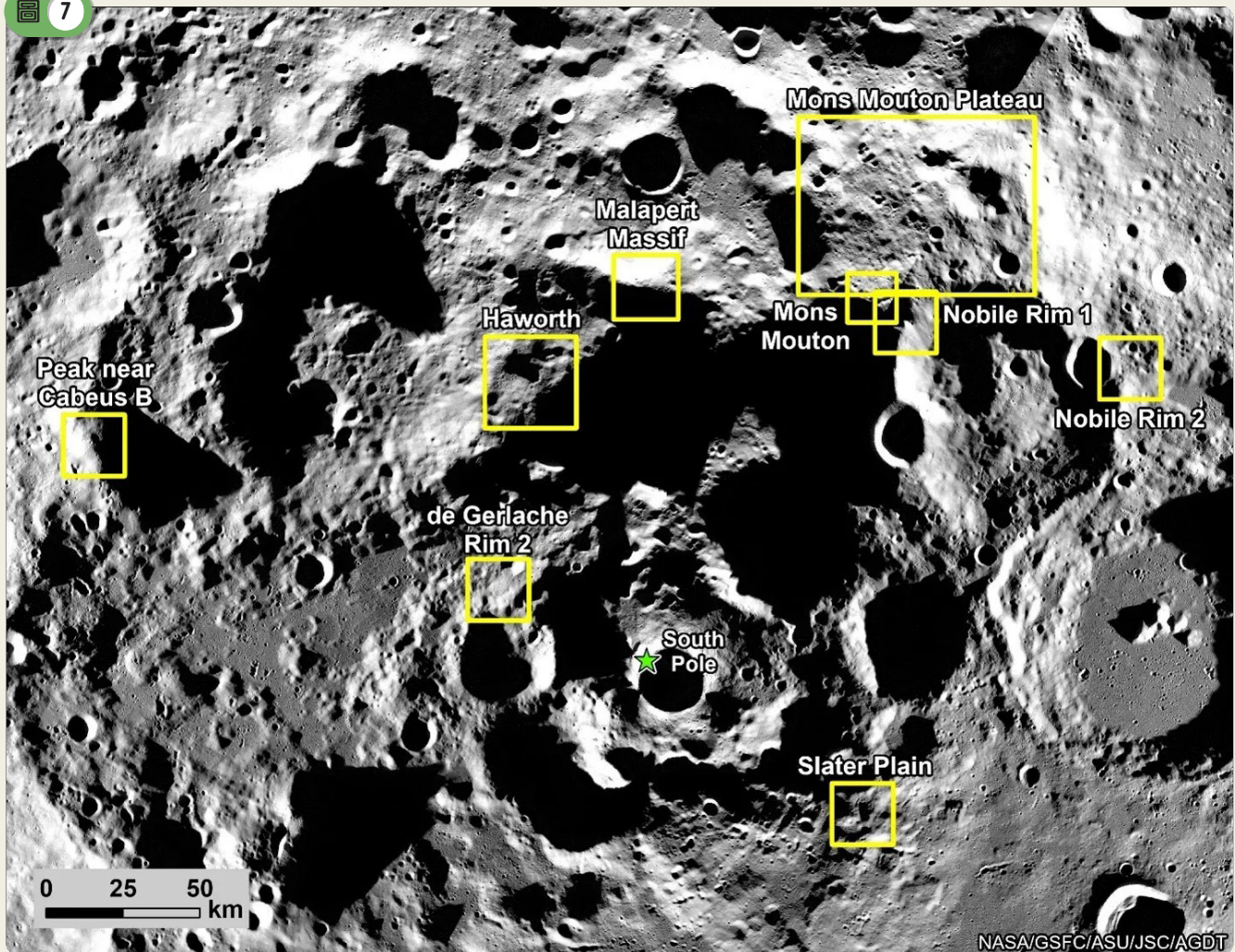
阿提米絲計畫裡，最引人注目的就是登陸月球南極，如圖7。與阿波羅任務的登陸地點在赤道附近不同，南極擁有特殊的地理與資源條件。部分地形長年不見陽光，氣溫低至攝氏零下200度，且探測數據顯示地下可能蘊藏大量水冰。這些水冰能轉化為飲用水與氧氣，滿足太空人生存需求；透過現地資源利用技術，水分子中的氫與氧還能製成火箭燃料。如果能在月球就地生產這些資源，未來的月球基地將更具自主性，甚至有機會成為火星探險的補給站，徹底改變深空探索的模式。

不過，南極環境同時也充滿挑戰。永久陰影

區的嚴寒和複雜地形對設備與人員都是嚴峻考驗，地勢更可能影響通訊品質。為此，美國太空總署計畫先透過商業月球酬載服務（Commercial Lunar Payload Services，簡稱CLPS）的登陸器與探測儀器，進行詳細測量與環境監測，以支援後續的載人登月任務。

展望未來，美國太空總署已經不再把登月視為單一次來回的任務，而是採取分階段推進的方式。前期以短期停留與基礎建設為主；接下來會陸續部署更多設備，包括月球地形車（LTV）、加壓型月球車（Pressurized Rover）和初始月球棲息地（Initial Surface Habitat），逐步建立能支持長期駐留月球的基礎。隨著這些要素到位，人類在月球上的活動將

圖 7



Artemis III 分布在月球南極的九個候選登陸區域，每個區域內都有多個可能的登陸點。影像中的地形來自LRO廣角相機的拼裝成果。影像來源：NASA

會從短期任務進展為長期駐留。

## 結語

從阿波羅到阿提米絲計畫，人類對月球的想像與追尋已經跨越半個世紀。阿波羅計畫實現了劃時代的首次登月，而阿提米絲則在此基礎上更進一步，嘗試讓人類能在月球上長期生活與工作，如圖

8，使月球成為深空探索的實驗基地與中繼站，並推動我們邁向火星的步伐。

或許不久的將來，當人們仰望夜空時，會明白月球上早已有人類踏足，甚至還有基地在運行。那一刻起，月球已不再只是遙遠的天體，而是人類邁向太空之路的起點。

許仁愷：中央大學天文研究所博士後研究

圖 8



美國太空總署在休士頓的中性浮力實驗室模擬月球南極的昏暗光照環境，為未來阿提米絲太空人的月面行走訓練做準備。  
影像來源：NASA /Lauren Maples