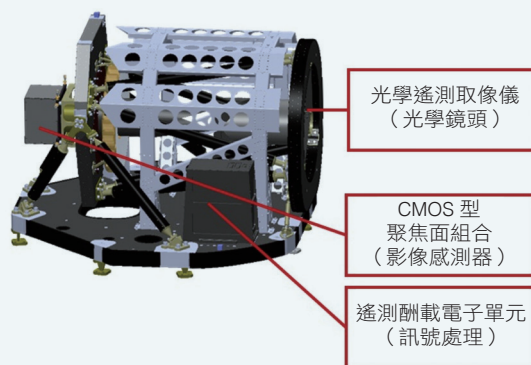


太空飛行體的研發管理

張志立

太空飛行體運作於極端環境，需要一定的壽命且有無法維修的特性，和其他產品相較，對於高科技的突破與太空品質的要求更為嚴格。因此，太空飛行體的研發管理有其複雜度與嚴謹性，其祕訣是：徹底做好對的事。

福衛五號衛星光學遙測酬載飛行體及其關鍵元件，從設計到製造組裝都由國內團隊包辦。這是我國極具指標性的太空飛行體研發團隊，由國家實驗研究院的3個中心聯合，並與國內多個研究單位與廠商共同組成，打造第一具國產光學遙測酬載，開啟了我國自主發展遙測儀器及其關鍵元件的新紀元，建立國人自製高解析度光學酬載的技術能量。



光學遙測酬載包括光學遙測取像儀及遙測酬載電子單元

光學遙測取像儀

執行對地觀測任務的福衛五號遙測衛星，所搭載的光學遙測酬載由光學遙測取像儀及遙測酬載電子單元兩部分構成。前者採用折反射式的卡賽格林式望遠鏡，基本上就是一具從太空對地觀看的望遠鏡，由光學元件、結構體（含熱控元件）及互補式金屬氧化物半導體（complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS）型聚焦面組合所構成。

光學元件的研製包括主鏡片與次鏡片的拋光、檢測與鍍膜、透鏡研磨與鍍膜，以及帶通濾光片鍍膜。反射主鏡面直徑 45 公分、光學系統焦長 3.6 公尺，實際長度 1 公尺。其中反射主鏡面部分，突破了大口徑非球面鏡關鍵技術，並透過精密修正拋光使精度提升到奈米等級，只有幾個分子大小的誤差。這些元件還須通過太空嚴苛環境的考驗，如劇烈的高低溫度變化，



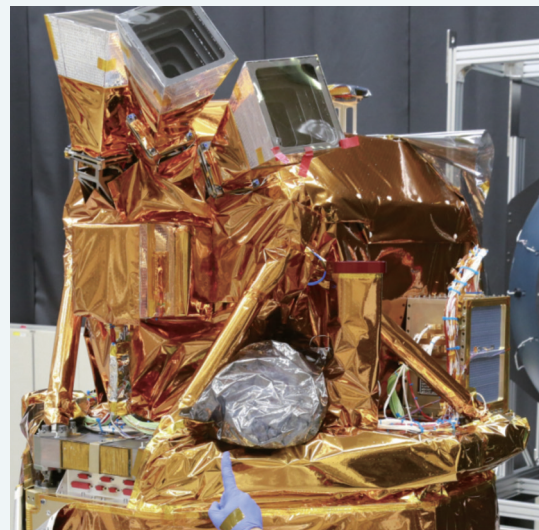
直徑 45 公分的
超大反射主鏡面

可接受相當於地表 7.5 萬年的高能粒子輻射量，也要承受發射升空時劇烈的震動。

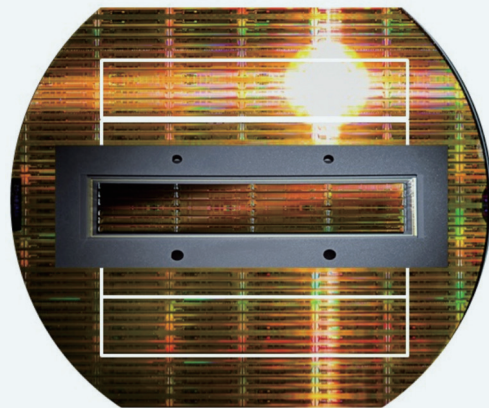
結構體使用先進的碳纖複合材料，具有高強度、低吸溼、高穩定度、可吸收溫差且遭到溼度變形時不會影響成像品質等特性，產生的應力也不能導致鏡面變形而影響光學性能，並需通過火箭發射動態環境及適應太空環境的需求。鏡面操作溫度範圍設定在攝氏 18 ~ 22 度間，工作時溫度則有賴熱控元件（如多層熱絕緣材、溫感器、電熱器與散熱片）以閉迴路控制。

CMOS 型聚焦面組合是光學遙測取像儀的影像感測器，由國研院太空中心與微像科技合作研發設計。它的核心是一互補式金屬氧化物半導體感測器，這樣的感測晶片從 1 片 8 英寸晶圓中只能切割出 5 片。

CMOS 感測器的長寬分別是 12 公分與 2.4 公分，含有 5 條長達 12 公分的線型感測器，搭配多光譜濾光片與處理電子電路後，可同時感測 5 個不同光譜波段的影像所產生的各種光譜組合，以滿足不同的遙測應用。這是全球第一顆成功應用於太空對地遙測的最大尺寸線型 CMOS 影像感測器，值得國人驕傲。



外表包覆特殊多層絕熱膜的光學遙測酬載

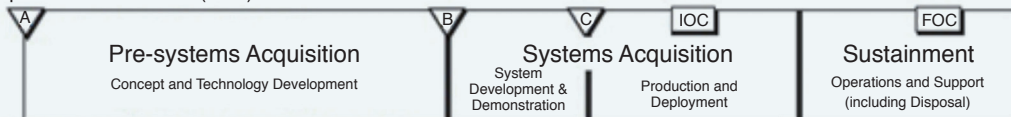


CMOS 感測器取自 8 英寸晶圓的感測晶片

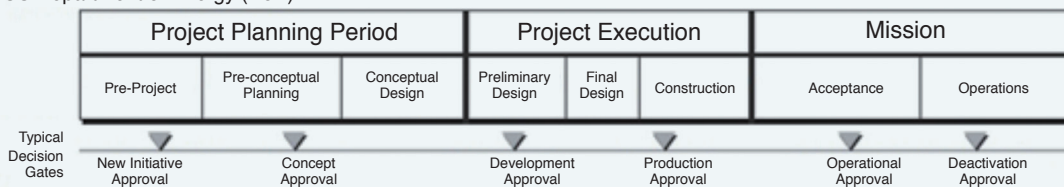
美國航空暨太空總署

Pre-Phase A	Phase A	Phase B	Phase C	Phase D	Phase E	Phase F
概念研究	概念及技術發展	初步設計	最後設計及製造	系統組裝、測試與發射	運作及持續	結束

US Department of Defense (DoD) 5000.2



US Department of Energy (DoE)



美國航空暨太空總署、國防部及能源部使用的系統壽命周期圖。

飛行體系統壽命周期

系統壽命周期依美國航空暨太空總署的規範可分成六個階段：（一）概念研究 / 概念及技術發展，（二）初步設計，（三）最後設計及製造，（四）系統組裝、測試與發射，（五）運作及持續，（六）結束。實際作業時，同時遵循我國科技部專案計畫管考作業的規定辦理。

自 2008 年以來，這個案子成立「遙測酬載技術研發整合型計畫」以前，以遙測酬載計畫管理會議與遙測酬載技術討論會議的方式共舉行 69 次，密集進行技術可行性探索，這是概念研究階段。

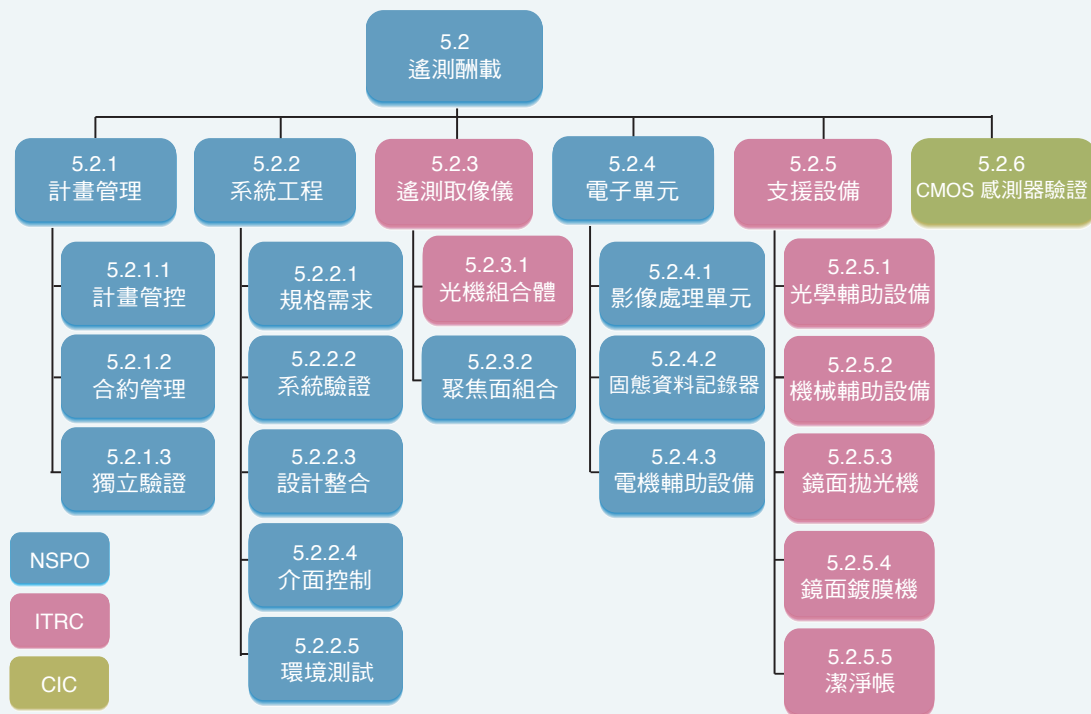
關鍵元件部分，也經歷了國研院「太空級 CMOS 影像感知器研發」計畫（2005 年 7 月～2009 年 12 月）先期研究後，分別於 2009 年 6 月通過「福衛五號國內研製 CMOS 感知器可行性評估」會議及 8 月通過「福衛五號國內自主發展遙測酬載可行

性評估」會議。本案如此慎重投入可行性的研究，是為了提高後續計畫的成功率並達成任務。

2010 年開始，這計畫正式成立，進入階段（一）與階段（二），至 2015 年 3 月底，完成階段（三）的最後設計及製造後，飛行體已經遞交福衛五號遙測衛星。這一過程每周都由計畫室舉行計畫管理會議，檢討進度，討論問題，精進計畫的管理與技術，至研製完成遞交飛行體為止，五年多以來共舉行二百多次。

其他各整合工作團隊（integrated product / process team, IPT）也定期舉行技術討論會議，解決所遭遇的問題，如光學遙測取像儀整合工作團隊於研製期間就舉行了二百多次技術討論會。

接著，福衛五號計畫會繼續其階段（四），直到階段（六）結束。



遙測酬載專案的工作架構

矩陣組織

這個案子屬於國研院的整合型計畫，責成太空中心主持，其他中心包括儀器科技研究中心及晶片中心共同參與，共分成遙測酬載系統、遙測取像儀與 CMOS 感測器驗證 3 個分項計畫。

遙測酬載系統分項計畫工作分為系統工程、電子單元、聚焦面組合、結構與熱控發展、計畫管理 5 部分。其中，電子單元由鑫豪科技股份有限公司負責研發固態記錄器及中山科學研究院負責研製遙測酬載電子單元飛行體，聚焦面組合由微像科技股份有限公司負責研製 CMOS 型聚焦面組合，結構與熱控發展由漢翔航空工業股份有限公司負責研製結構體。

遙測取像儀分項計畫工作分為遙測取像儀、鏡面與透鏡、支援設備 3 部分，CMOS 感測器驗證分項計畫的工作則是 CMOS 感測器驗證。

本計畫的推動有賴各工作架構分別進行，同屬福衛五號衛星計畫總工作架構項次 5.2，這項次的工作架構下分計畫管理、系統工程、遙測取像儀、電子單元、支援設備、CMOS 感測器驗證等。

工作架構著重於作業流程、系統、服務或產品的產出，相關專業因工作需要組成臨時任務編組；計畫架構則側重於人力、經費及進度的規劃，分項計畫多分屬常設單位，組織學上稱為矩陣組織。意即，每一分項工作架構都需由各分項計畫完成，反之，計畫架構下各單位負責的內容也可

在分項工作中對應出來。矩陣組織管理，就單位而言，能保持組織穩定的精進與成長，就計畫而言，可以獲得專業技術、人力與設備的完整支援。

整合型計畫管理

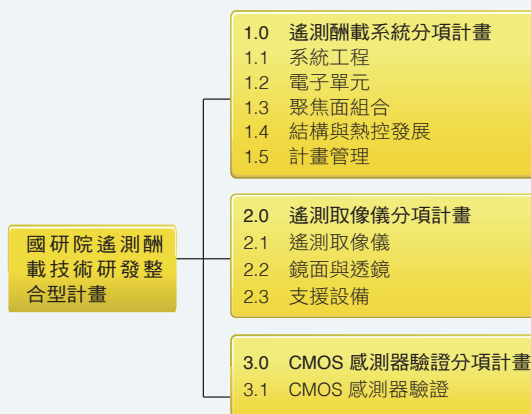
整合型計畫的管理審查會議除計畫內部舉行定期會議，檢討技術問題與進度之外，中心主任並親自監督，而計畫主持人每季需向院部作進度報告，對外接受科技部與研考會管制。

國家太空中心負責本計畫的推動，是依「福爾摩沙衛星五號計畫管理方案」作業規定進行計畫管理，所有元件、材料、飛行體成品都需置於太空環境中，通過功能與性能驗證，不能有任何不符規格的项目。除例行性計畫經費與進度管理之外，管控重點還包括系統工程、合約管理、獨立驗證等，以下另闢章節分別說明。

關於階段性成果審查，依中心的計畫審查手冊規定，於重大階段完成時，由計畫或分項計畫主持人召集中心內外專家組成審查委員會，進行審查及技術稽核會議。目前已經完成辦理包括併入福五計畫的任務設計 / 系統需求聯合審查，系統設計審查、初步設計審查、細部設計審查、整合測試備便審查、技術稽核等會議則獨立完成，運送前審查與結案審查也將再併入福五計畫中進行。

所有改善項目都存在品保資訊網的待辦事項紀錄中，並逐項追蹤至問題解決，相關會議簡報、技術文件也存入品保資訊網文件管理系統中。

由於衛星科技是各先進國家列為技術輸出管制的項目，因此研發過程若出現障礙，往往必須自行克服。例如，光學反射



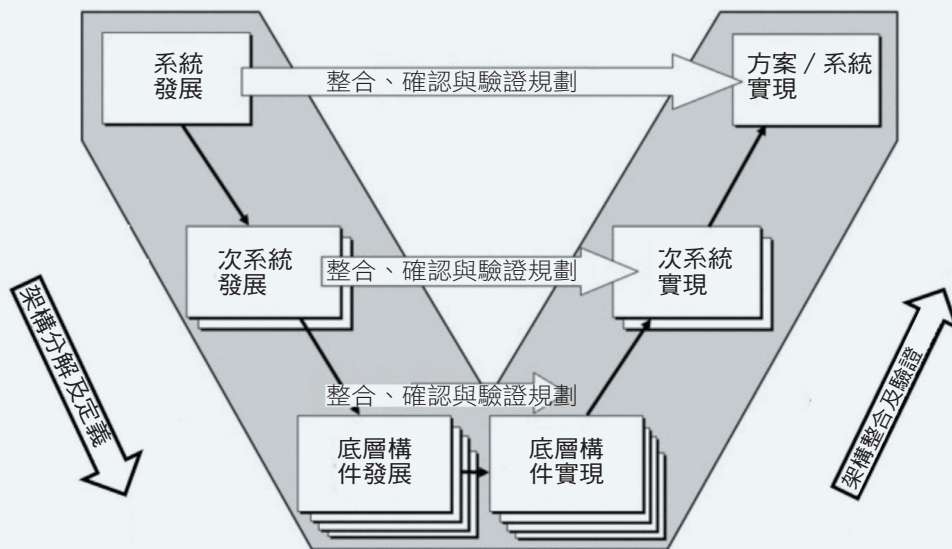
遙測酬載專案的計畫架構

主鏡面固定裝置就曾經讓團隊足足困住半年之久，因為固定的鏡面需承受火箭發射時最大值 25G 的加速度，同時反射主鏡面與結構體膠合後加諸在鏡面的力量也不能影響鏡面精度。

剛開始不管是黏膠或鎖螺絲都會導致鏡面變形，光機組裝團隊於是陸續設計、測試、修改，直到第六次製程設計出特殊膠合技術才克服這問題。反射主鏡面變形量從起始的 2 微米、0.1 微米一直降到小於 10 奈米，終於確認鏡面固定的應力影響鏡面的變形量可被接受。

系統工程

配合系統壽命周期，系統工程發展出不同的系統活動展現方式，其中 Vee 系統工程模型包括很有效的二階段作業流程，並廣為人熟知。階段一，由上往下，從系統發展、次系統發展，進入底層構件發展，進行架構分解與定義作業流程；階段二，由下往上，從底層構件實現、次系統實現，進入方案 / 系統實現，進行整合測試元件與系統作業流程，以整合、確認與驗證系統符合原始需求。



Vee 系統工程模型

Vee 系統工程模型的作業流程分別對應系統壽命周期從概念研究階段的可行性概念、概念及技術發展階段的頂層架構、初步設計及技術完成階段的功能基準、最後設計及製造階段的配置基準與產品基準，最後經歷系統組裝、整合與測試發射階段與確保運作及持續支援等階段，確認都符合產品基準，完成部署基準，直到結束階段。

合約管理

這計畫主要外包的關鍵元件包括 CMOS 型聚焦面組合與遙測酬載電子單元，合約管理都依科學技術基本法第六條第四項及科學技術研究發展採購監督管理辦法辦理招標、簽約、履約、驗收、保固等。在品質管理作為上，由技術與品保人員遵循合約文件的產品保證計畫書規定，在過程中進行品質與成果審查，隨時發掘問題、監督重要檢驗點、檢討改進與確保產品符

合需求，最後驗收成品（包括飛行體）與相關文件。

上述每一件外包合約的執行過程（包括品保作為）都經過非常嚴謹的履約管理，並在遞交合約文件中詳實記錄。以 CMOS 型聚焦面組合外包合約為例，其中一份合約遞交文件「福爾摩沙衛星五號 CMOS 型聚焦面組合（FPA）研製案成品資料集」共計九百餘頁。藉由外包或外購獲取的任何元件、材料、加工、零件等，其品質都不容許有任何疏失，才能確保整體任務的成功。

獨立驗證

本中心所有任務型計畫，包括本計畫，都由品保組派駐品質保證小組進行獨立驗證，同時向品保組長與計畫主持人負責。依國際 ISO9001 品質系統規定，採用品質管理循環 Plan-Do-Check-Action（PDCA）手法，按規劃（plan）、執行（do）、查核

(check)與修正(action)，建置與推展 ISO 9001 品質管理系統。每年並藉由一次自我的內部品質稽查，以及認證公司的外部品質稽查，出具管理系統證書的稽查總報告，以確保本中心 ISO 品質管理系統的有效性。

品質管理循環 PDCA 適用本中心各整合工作團隊所負責程序（如整合測試、科技專案計畫管理、系統工程、型態管理、文件管理等）與系統（或產品，如光學遙測酬載、遙測取像儀、電子單元等）的管理活動。

以程序管理活動而言，本研發計畫管理的進行，由計畫室與各工作團隊協力於各級管理階層的監督管理下，都依科技部核定的年度細部計畫書進行。每周福五計畫室及各整合工作團隊都舉行工作討論會議，檢討進度，討論及解決遭遇問題。每 1～2 月由主任主持中心科技專案管理會議，每季院部會派員參與季管理會議，以協助各中心的協調工作。

計畫室並定期彙整向研考會（施政管理系統）繳交每季計畫執行情形、期中（年

度）報告、當年度科技計畫成果效益報告等書面資料。如主要預算及時程變更時，則需獲得院部同意及科技部核定後辦理。計畫預算由立法院審議，當接獲監察院監督的質詢時，於期限內也必詳實回覆。

總結

搭載於福衛五號衛星的光學遙測酬載飛行體已經完成研發及遞交，預計 2016 年起，會飛行於 720 公里高的太陽同步軌道，台灣地區定點最快兩天內就可拍到 2 米對地解析度的衛星影像。本案飛行體首次由國人自主完成研發，除了突破各項高科技的障礙外，所累積的太空級飛行體研製管理經驗彌足珍貴。

張志立

國家實驗研究院國家太空中心
