

台灣光子源 (TPS) 真空系統建造與技術

Construction of the Vacuum Systems and the Technologies for the Taiwan Photon Source (TPS)

熊高鈺

Gao-Yu Hsiung

台灣光子源 (TPS) 為能量 30 億電子伏特的同步加速器光源，以產生最高亮度的軟 X 光與硬 X 光提供實驗研究。TPS 主體的電子儲存環為一座周長 518.4 米的超高真空系統，區分 24 個長直段 (7 米或 12 米) 與偏轉段 (14 米) 真空系統分段，電子束軌道真空腔以鋁合金材料製造為主。24 組 14 米偏轉段真空系統完全在無塵室中組合、銲接、組裝真空元件、真空烘烤達到超高真空後密封。在 TPS 隧道區內先吊運安裝 14 米偏轉段至支架上固定後再安裝中間長直段真空系統烘烤完成。本文將介紹 TPS 真空系統建造、元件製造與安裝技術。

Taiwan Photon Source (TPS) is an accelerator-synchrotron light source of 3 GeV in energy which delivers high brilliant Soft X-ray and Hard X-ray for experimental researches. The electron storage ring, major part of the TPS, is an ultrahigh vacuum (UHV) system of 518.4 m in circumference divided into 24 super-periods each contains a long-straight section, 7 m or 12 m in length, and a 14 m arc-cell section. Aluminum alloys were adopted for the electron beam ducts. All the 24 sets of 14 m arc-cell vacuum systems were entirely produced in-house in the clean room including the works in series of assembling, welding, installation of vacuum components, vacuum baking to the UHV, and sealed. Each arc-cell was transported to the TPS-tunnel and installed on the girder supports, and then the long straight sections be installed and baked to the UHV. Methodologies of the construction for the TPS vacuum systems, the components, and the installation techniques will be described in this article.

一、前言

台灣光子源 (Taiwan Photon Source, TPS) 為我國國家同步輻射研究中心在台灣自行興建的第二座同步加速器光源，以能量 30 億電子伏特 (3 GeV) 的電子儲存環引出同步輻射光能量 1–12 keV (特

徵波長約 0.1–1 nm) 附近的軟 X 光 (soft X-ray) 與硬 X 光 (Hard X-ray) 進行實驗研究。TPS 以電子儲存環週長 518.4 m 區分為 24 個雙轉彎段磁格 (24-double-bend-achromatic, 24 DBA, Lattice) 設計可達到 1.6 奈米徑度 (nm·rad) 之最小束流發散度 (emittance)，在國際間位居第三，僅次於瑞典

MAX IV ($0.5 \text{ nm} \cdot \text{rad}$) 及美國 NSLS II ($0.9 \text{ nm} \cdot \text{rad}$)；再配合高電流 (500 mA) 運轉及於各個長直段安裝插件磁鐵 (insertion device) 以獲取更高亮度的 X 光，將我國學術研究能力推升到最高國際水準並兼具世界競爭力⁽¹⁾。TPS 於 2007 年開始興建至 2014 年安裝完成展開試車於 2015 年初達到基本設計規格後，停機半年安裝 10 座插件磁鐵系統與 2 座超導高頻腔後再提升電流超越 500 mA 確定整體系統無大問題⁽²⁾，並於 2016 年陸續完成 7 座光束線與實驗站的建造試車後於 9 月 19 日開幕啟用隨後以 300 mA 的恆定電流 (top-off) 如連續充電一般地提供穩定光源正式開放用戶實驗⁽³⁾。

圖1為位於新竹市國家同步輻射研究中心 (NSRRC) 之兩座第三代同步加速器光源俯視衛星照片圖，包括：(a) 第一座於 1993 年開始運轉至今的 1.5 GeV 「台灣光源 (TLS)」外觀，與 (b) 第二座 3 GeV 「台灣光子源 (TPS)」之內部結構示意圖。在圖 1(b) 結構圖中，鋸齒狀輻射屏蔽牆內部為 (i) 加速器光源本體隧道區；牆外部為 (ii) 光束線實驗區。台灣光子源 (TPS) 產生同步輻射光原理示意圖如圖 2 所示，圖中由「(1) 電子槍」產生電子，經「(2) 直線加速器」形成電子束團並加速到 0.15 GeV 能量後注入「(3) 增能環」環繞，在環中藉「(4) 高頻腔 (BR)」提升能量到 3 GeV，再引出電

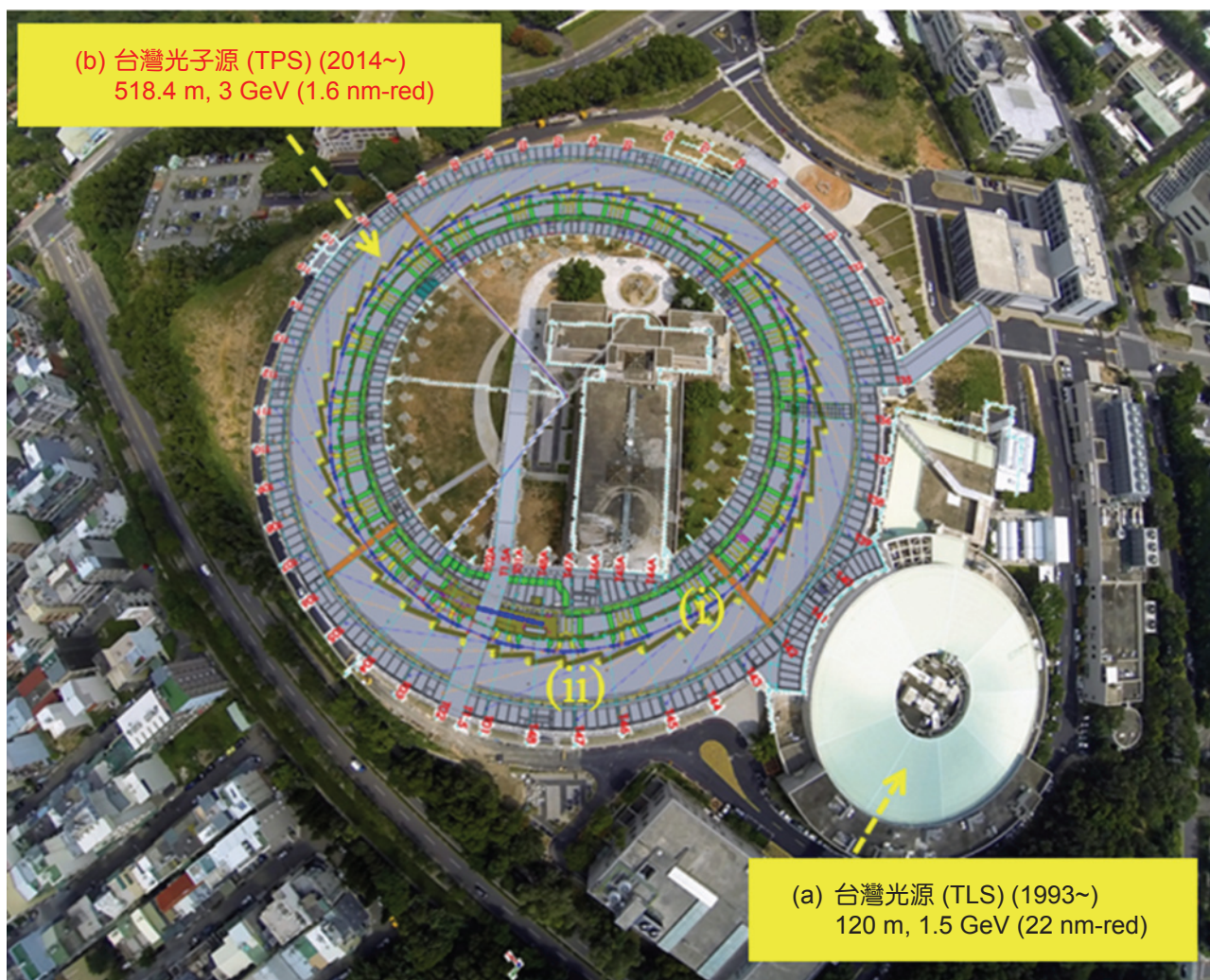


圖 1. 位於新竹市國家同步輻射研究中心 (NSRRC) 之兩座第三代同步加速器光源：(a) 台灣光源 (TLS) 與 (b) 台灣光子源 (TPS)。

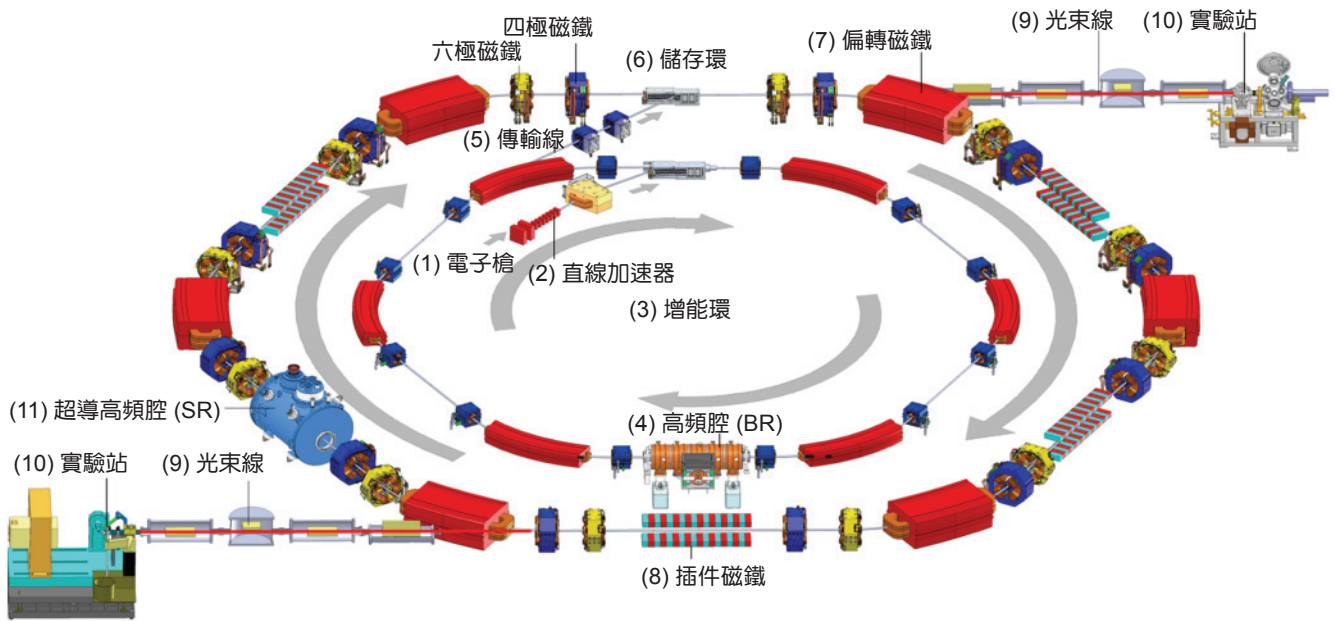


圖 2. 台灣光子源 (TPS) 產生同步輻射光原理示意圖。

子束團經「(5) 傳輸線」再注入到「(6) 儲存環」環繞。這個過程稱為全能量注射，再重複前述的步驟繼續由增能環注入電子束團到儲存環中提高儲存的電子束電流以提高同步輻射光的強(亮)度，當電子束經過「(7) 偏轉磁鐵」或「(8) 插件磁鐵」時皆會產生同步輻射光，再分別引出到「(9) 光束線」及「(10) 實驗站」進行實驗研究；而電子束發光所損耗的能量由「(11) 超導高頻腔 (SR)」補充。

當電子儲存環軌道真空腔 (Beam duct) 中的多團電子束持續以 3 GeV 能量趨近光速環繞運行，則真空腔內部必須維持氣壓低於 1×10^{-7} Pa (相當

於 1×10^{-12} 大氣壓或 $< 1 \times 10^{-9}$ Torr) 的「超高真空度 (ultrahigh vacuum, UHV)」，以減少電子束受到氣體分子散射導致束流損失 (beam loss) 或離子吸引 (ion trapping) 的不穩定性因素干擾造成引出的同步輻射光強度變化不定或震動偏移等不穩定品質，如圖 3 所示。此外，電子束軌道腔內部截面若有階梯或間隙 (> 0.5 mm) 等不平滑或不連續結構則會在電子束團經過時引發「回應電場 (wake field)」反過來干擾後續電子束團導致其運行不穩定，如圖 4 所示。因此，TPS 儲存環真空系統的電子束流軌道真空腔設計不只考慮腔內表面潔淨度須滿足超低

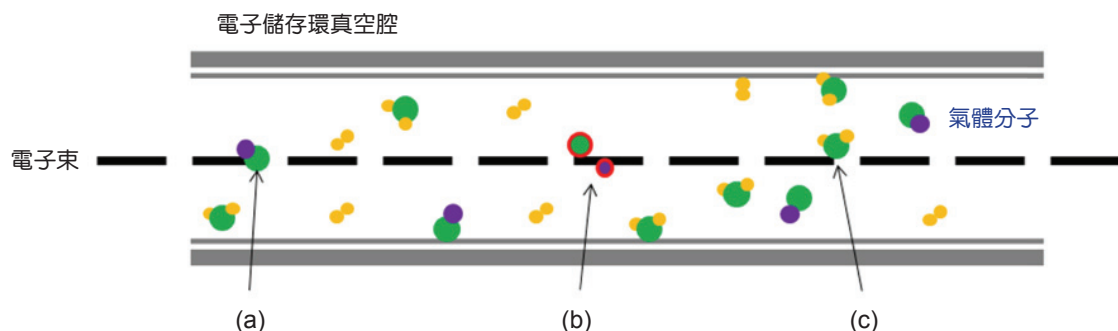


圖 3. 儲存環超高真空系統中殘留氣體分子對運行中電子束的影響，包括：(a) 電子束碰撞氣體分子導致電子散射而損失；(b) 氣體被游離成正離子，再被電子束吸引導致牽動不穩定；(c) 電子束與氣體分子非彈性碰撞導致電子散射損失並產生制動輻射線等。

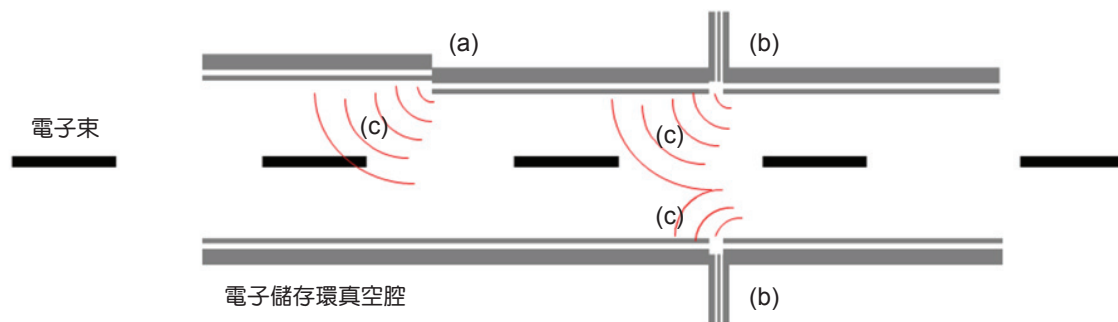


圖 4. 儲存環真空系統中真空腔不平滑對運行中電子束流的影響：真空腔內壁不平滑，有 (a) 階梯差或 (b) 間隙的角落在電子束團經過時產生 (c) 回電場 (Wake field) 干擾隨後跟上的電子束團導致其偏移之不穩定。

表面釋氣率 (q) $< 1 \times 10^{-13}$ Torr·L/(s·cm²) (相當於每平方公分的表面積每秒鐘仍釋放出三百多萬個氣體分子) 的超高真空度外，還得兼顧腔體內部截面的平滑連續性 (截面變異 Taper $< 10\%$ 、截面階梯/間隙 Step/Gap < 0.5 mm) 等原則。整體真空系統安裝固定在支架上的定位精度須在 < 0.1 mm 範圍內以利電子束運行軌道之調控，且系統的震動幅度須 < 0.1 μ m (為穩定光源之最大容忍誤差)。針對 TPS 真空系統的設計所進行的先期製造與測試，結果驗證鋁合金為製造 TPS 電子儲存環主體超高真空腔之最佳材料⁽⁴⁾，而如何設計建造 TPS 大型加速器光源主體的鋁合金超高真空腔與如何選用合適或特殊的真空元件便成為本計畫能否成功的關鍵要素，本文將介紹建造台灣光子源 (TPS) 真空系統所建立或運用到的相關技術以提供讀者認識與參考。

二、鋁合金無油酒精精密加工技術

酒精加工技術在本中心於 1988 年開始建造第一座同步加速器「台灣光源 (Taiwan Light Source, TLS)」的長約 1.6 m 鋁合金轉彎段真空腔時開始應用，主要有溫溼度控制的無塵室中利用無油潔淨的電腦數值控制 (CNC) 銑床加工鋁合金腔體板正反面同時以純酒精噴灑加工部位冷卻，經過粗加工、中加工並穿插時效處理之程序後達到設計規格的尺寸、最低變形量與精密度，然後在最後一道的精加工 (finishing) 步驟切削表面層約 50 μ m 後再立即裝入乾燥潔淨的鋁包裝袋中密封保存，這樣在鋁

合金腔體表面自然生成純淨的氧化層以得到低的表面釋氣率，並在 TLS 初期試車時展現優異的超高真空性能⁽⁵⁾。TPS 真空設計需要製造 48 組 4 m 長的轉彎段真空腔，因腔體結構複雜不能一體成型，仍需採用組合兩個半片腔體板材加工後對稱銲接成一組真空腔，若考慮加工難易度、變形量與精密度控制、最低表面釋氣率等因素，鋁合金材料比不銹鋼材料更適合。因此需將可加工 4 m 長工件的 CNC 銑床清除各部位油污使潔淨後再移進無塵室內，無塵室中需控制恆溫 25 ± 1 °C 以確保大型加工件維持微米級精密尺度，並藉室內低相對溼度 (RH) $< 50\%$ 的環境以減緩銑削後表面成長氧化層的速率。噴灑純酒精的壓縮空氣也須純化過濾無油並降低溼度到 -120 °C 的露點以避免將油污及溼氣帶到加工中的表面上造成污染。比照前述的 CNC 加工步驟概分為粗、中、精等三個加工階段施行，並就厚 50 mm 鋁合金板之內表 (裏) 面銑削電子軌道腔與鄰邊出光隧道腔以及外表 (背) 面銑削磁鐵心線圈佔用空間等部位，再配合輪番翻面反覆多次加工以維持厚鋁板平坦度與各部位尺寸精度，最後可達到 < 20 μ m 製造精度⁽⁶⁾。TPS 轉彎段 3 式鋁合金真空腔在無塵室中進行無油酒精 CNC 加工流程圖如圖 5 所示。事實上在後續完成 4 m 長轉彎段真空腔銲接測漏無誤後，仍需將腔體送回 CNC 加工無塵室中以酒精切削週邊要銲接法蘭 (flange) 或其他直段真空腔的垂直端面，並在機台上檢測整個腔體銲接後的整體平面度，如圖 6 所示，然後再密封包裝送回本中心銲接無塵室中繼續進行後段整

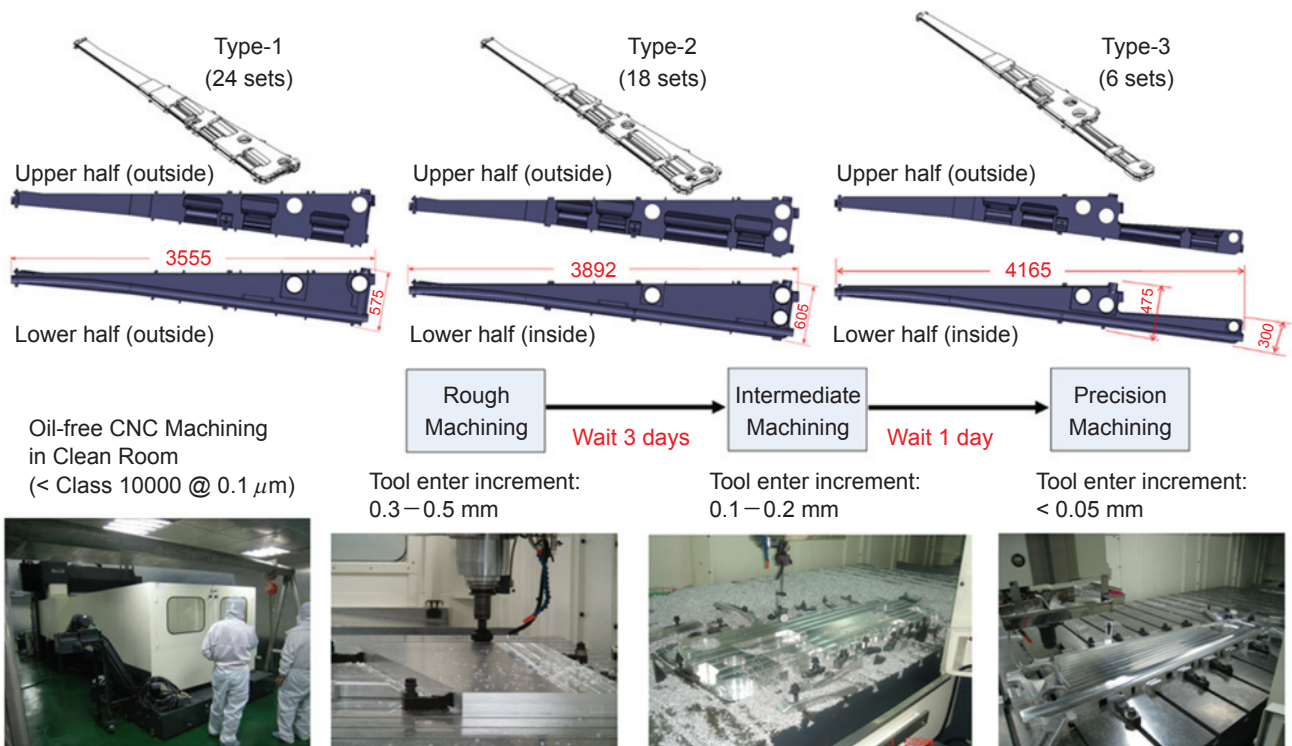


圖 5. TPS 轉彎段 3 式鋁合金真空腔在無塵室中進行無油酒精 CNC 加工流程圖。



圖 6. 轉彎段真空腔銲接完成後送回酒精加工無塵室 CNC 機台進行二次加工：(a) 加工前、(b) 充填乾燥氮氣、(c) 切除封板、(d) 加工週邊部位垂直端面；以及 (e) 測量真空腔平面度。

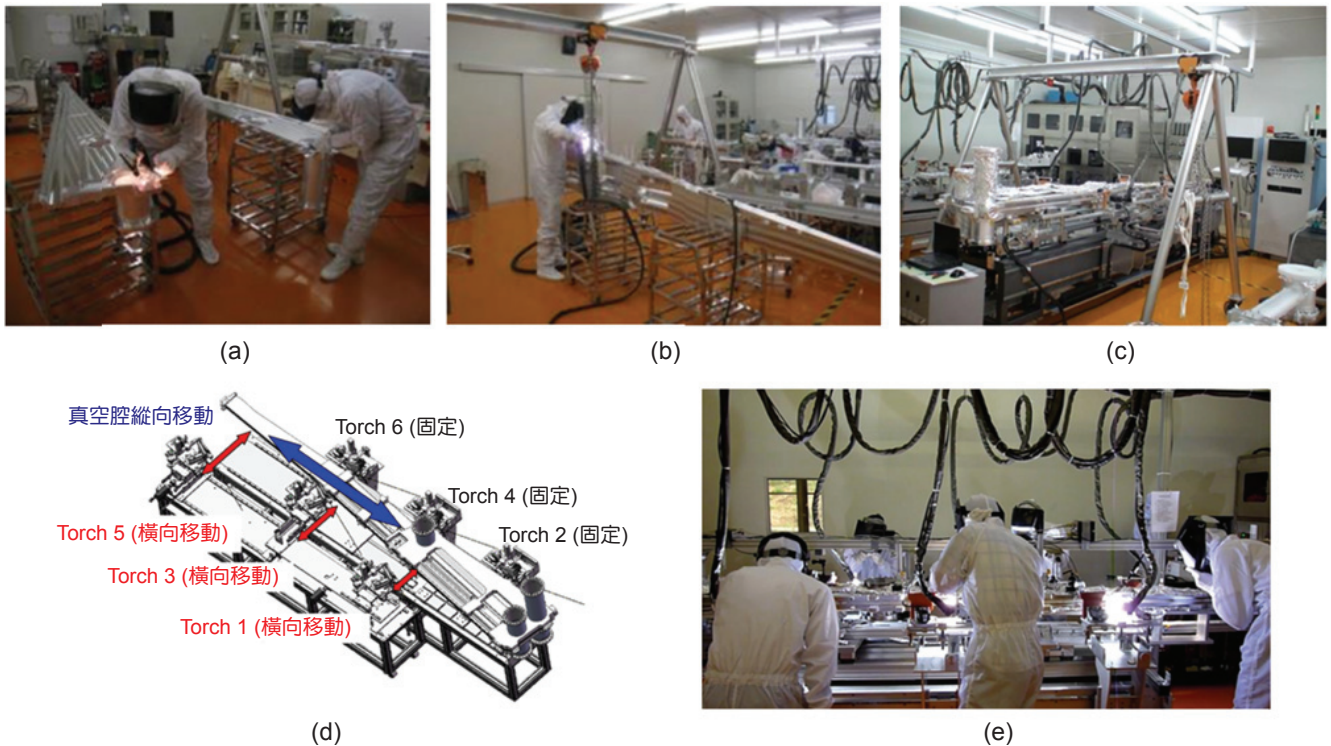


圖 7. 鋁合金轉彎段真空腔銲接流程圖：(a) 手工銲接抽氣腔、(b) 上下兩半腔體接合對位假銲、(c) 自動銲接前預熱、(d) 自動銲接示意圖、(e) 自動銲接腔體兩側邊。

體系統銲接與組裝作業，整個真空腔體往復加工與銲接的過程都只曝露在潔淨無油的無塵室環境中進行，可免除表面化學清洗除油污的繁複作業與其可能殘留的不良影響，顯示酒精加工的必要性。此酒精精密加工技術也應用到加速器其他結構較複雜的元件例如電子束流位置偵測器 (beam position monitor, BPM)、變異剖面 (taper) 的鋁合金真空腔以及光吸收體等腔體元件。

三、鋁合金腔體銲接技術

鋁合金材料因具有高熱導性不易銲接，且表面容易生成氧化鋁膜層其熔點高必須在銲接前先刮除，銲接過程必須維持真空腔裏外的表面潔淨度，且銲接後除了無漏氣以外，也必須兼顧最低變形量的品質。對於 4 m 大型鋁合金腔體的銲接仍以「鎢極惰性氣體 (tungsten inert gas, TIG)」俗稱「氬銲」的銲接方式最適合，即使是銲接兩片厚達 50 mm 的鋁腔體在銲接部位設計隔熱溝槽及接合點斜切導角等仍可完成 4 mm 全滲透 TIG 銲接達到密封

不漏氣的超高真空規格。但是要抑制銲接造成腔體的熱變形量，則以平面腔體對稱兩側邊同時銲接以造成對稱的熱變形相互抵銷效果，且銲接前先將組合的鋁腔體均勻預熱到 90 °C 可相對減少銲接後變形量。參考圖 7 之 TPS 鋁合金轉彎段真空腔銲接流程說明，本實驗室為此 4 m 大型鋁合金彎段真空腔設計一組自動銲接系統專門銲接腔體的兩側長邊，在沿著腔體縱向前、中、後段之兩側各設置三組「銲槍 (torch)」，共有六組銲槍可同時啟動定點銲接，而鋁腔體則沿著縱向緩慢移動，腔體不平行斜邊的三組銲槍 (圖 7(d) 中標示的 Torch 1, 3, 5) 同步配合進退移動以保持銲接時與腔體銲道的間距，銲接過程也配合不同結構厚度調整各銲槍的輸出功率電流，約十分鐘便可完成兩側各三道的銲接銲道，此種對稱自動銲接可以達到垂直方向平面度 < 0.1 mm 及橫向變形量 < 0.3 mm 的成果⁽⁷⁾。腔體其餘部位的銲接則以人工手銲方式完成填補。為了確保銲道內部無潛在的氣孔裂縫，整個銲接作業須在 25 ± 1 °C 恆溫空調及相對溼度 < 50% 的潔淨無塵室 (Class 1000) 內進行。因鋁合金真空腔在銲接後

不宜再化學清洗以免侵蝕銲道產生潛在漏氣的微細孔縫，故所有潔淨的腔體元件皆在無塵室中銲接可隨時維持表面潔淨度不受污染直到系統抽真空保存為原則。

四、BPM 製造技術

電子束流位置偵測器 (BPM) 為加速器最重要的元件，以非破壞性方式監測電子束運行軌道的位置偏移量，利用四個對稱的「電導引 (electric feedthrough)」其前端的「電極 (pickup electrode)」測量電子束通過時的感應電流來推算出電子束的橫向及垂直向的位移量。原理上雖然單純，但實際應用上卻不簡單。主因 BPM 本身位置必須非常穩固，無論真空系統震動或熱變形、甚至於地面震動傳達到 BPM 支架的位移量等影響 BPM 本體的位移皆須抑制到小於 $0.1 \mu\text{m}$ ，否則 BPM 無法精確測得電子束流的位移量。此外，加速器周遭的電子雜訊都會藉真空腔體導入到 BPM 的測量線路干擾

藉其驅動「軌道回饋 (orbit feedback)」系統即時調控電子束流軌道位置的功能。因此 BPM 的設計重點為結構上頭尾皆需符合 50Ω 的等效線路阻抗，以抑制因阻抗不匹配造成反射訊號的干擾與熱負載等問題。BPM 電導引本體的同軸電纜尺寸設計必須兼顧實際軌道真空腔截面大小限制及符合整體 50Ω 阻抗使反射訊號在 $< 5\%$ 範圍內的最佳化 (optimized) 設計⁽⁸⁾，並選用適合銲接的材料等包括 Kovar 中心導線、Ceramic 陶瓷絕緣體、Kovar 同軸電導引外殼、固定兩組電極的不銹鋼法蘭、及前端不銹鋼電極等，組合各元件銲接為一體之 BPM 法蘭，先後運用真空硬銲 (vacuum brazing) 及雷射銲接 (laser beam welding) 等技術。由於 TPS 加速器 BPM 電導引的客製化設計特殊規格無法由市面上取得現品，各元件製造流程需要往返於精密加工與銲接等相關廠家之間，因而在國內自行開發 BPM 的製造技術有其必要性。如圖 8 所示 TPS 之 BPM 法蘭與電導引電極設計製造圖，每兩個 BPM 法蘭上下對稱安裝合成一組完整的 BPM 包含 4 個

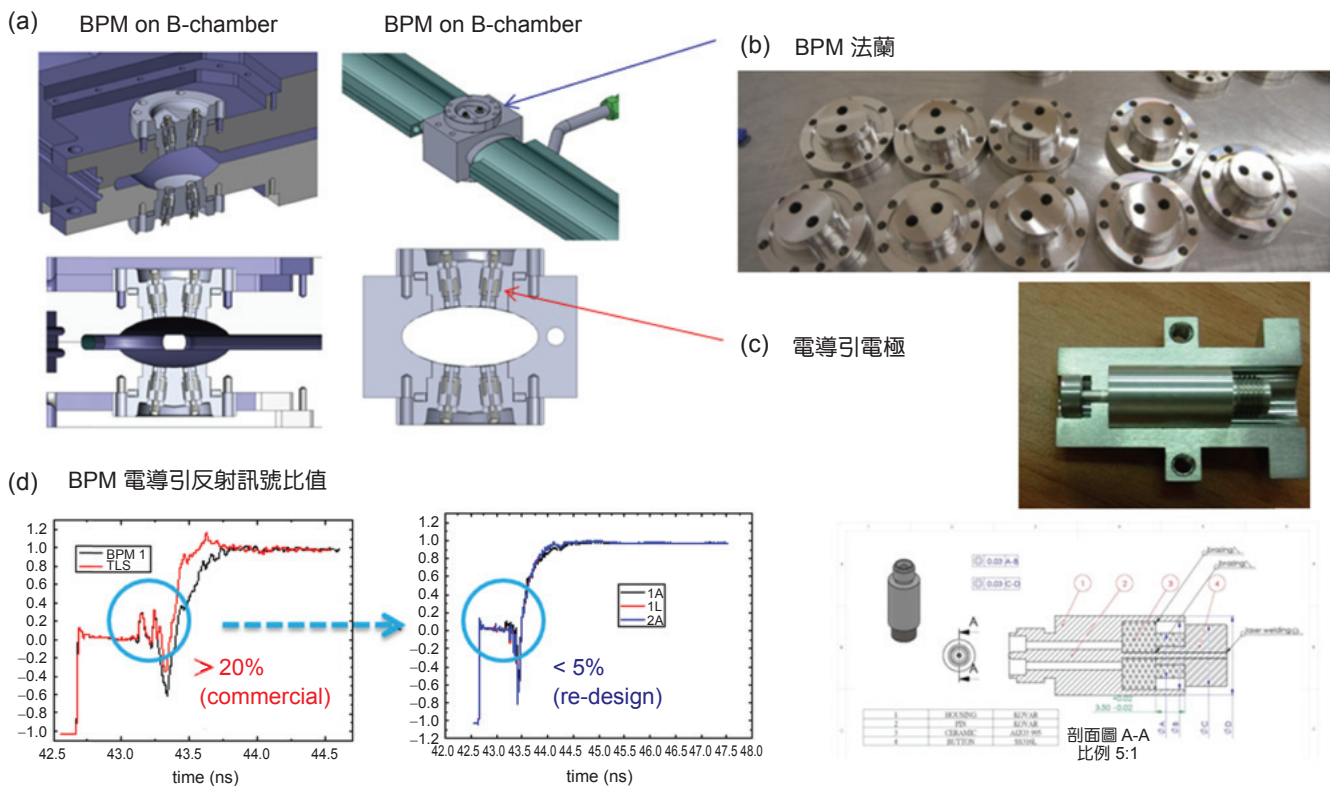


圖 8. TPS 之 BPM 法蘭與電導引電極設計製造圖：(a) TPS 真空腔之 BPM 組合圖、(b) BPM 法蘭元件、(c) BPM 電導引電極元件及設計圖、(d) BPM 電導引反射訊號測量值。

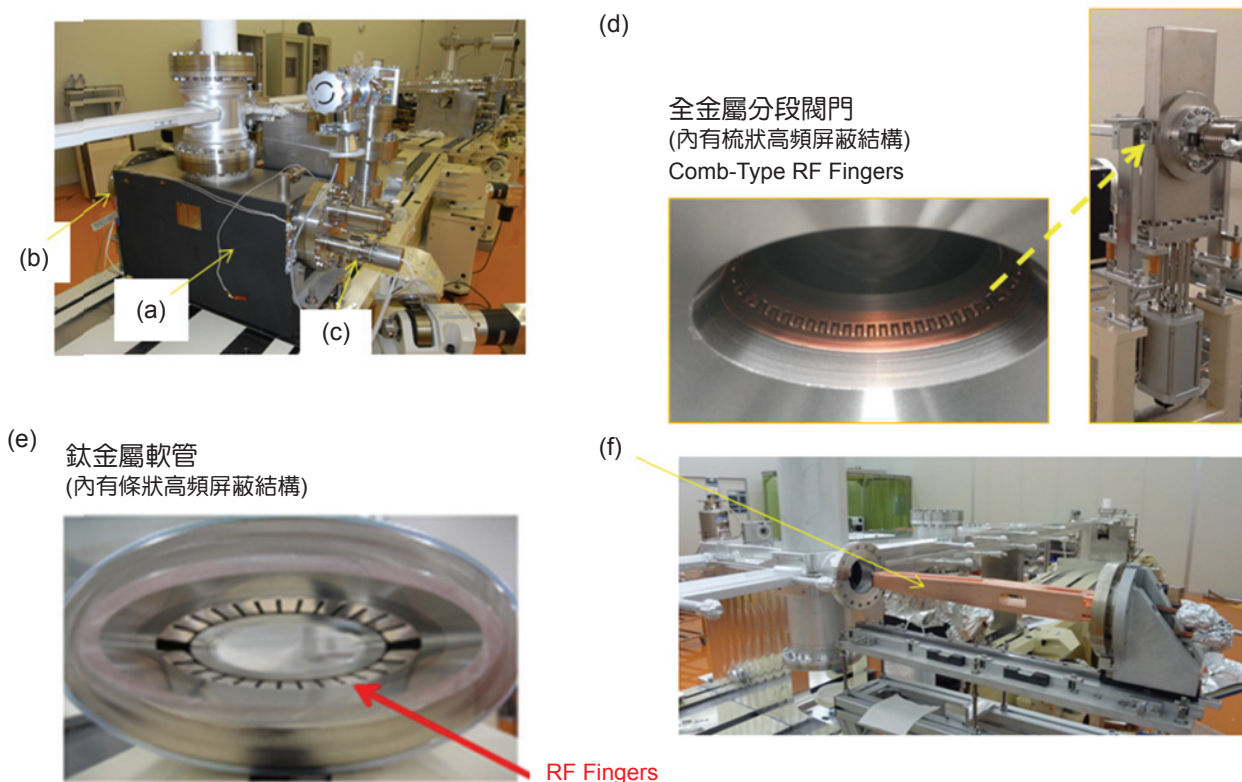


圖 9. TPS 真空系統周邊元件：(a) 離子幫浦、(b) NEG 幫浦、(c) 外收集式離子真空計、(d) 全金屬分段閥門、(e) 鈦金屬軟管、(f) 分岔光吸收器等。

電導引電極，在整個儲存環的 24 個磁格分段各安裝 7 組 BPM，合計 168 組 BPM 用於電子束流軌道之控制與回饋調節。所有 BPM 法蘭都先經過「熱衝擊(thermal shock)」測試，包括由室溫 (25 °C) 投入液態氮 (-196 °C) 往復 3 次及真空烘烤 (150 °C) 1 次後無漏氣者才選用安裝到儲存環真空腔。

五、長 14 m 彎段超高真空系統安裝定位技術

長 14 m 彎段超高真空系統 (vacuum cells) 共有 24 組，是主要的關鍵系統。除了主體鋁合金真空腔結合兩組 3 m 短直段「鋁擠型 (aluminum extrusion)」真空腔及兩組 4 m 轉彎段酒精 CNC 加工鋁合金真空腔在無塵室的支架上準直定位 (偏移量 < 0.1 mm) 後銲接成一體，同時安裝 5 組共 10 個 BPM 法蘭，再安裝周邊必要的真空元件，如圖 9 所示，包括：4 組客製設計的 Agilent Starcell

三極式離子幫浦 (IP, 200 L/s)、10 組 SAES C500 St707 型「非蒸發式結拖 (non-evaporable getter, NEG)」幫浦 (350 L/s)、3 個 Leybold 「外收集式離子真空計 (extractor ion gauge)」，2 個有特殊「梳狀高頻屏蔽 (comb-type RF shielding)」內裝的客製設計 VAT 「全金屬分段閥門 (sector gate valve, SGV, 100 CF)」，2 個內有「條狀高頻屏蔽 (RF fingers shielding)」的 MiraPro 「鈦金屬軟管 (Ti bellows)」等⁽⁹⁾；及周邊的 2 個連接前端區的 VAT 全金屬閥門 (front end valve, 100 CF)、2 對客製設計的 TOYAMA 銅製「分岔光吸收器 (crotch absorbers)」及銅製「光阻擋器 (photon stopper)」，2 個 Edwards 磁浮式渦輪分子幫浦 (TMP 400 L/s)、2 個隔離 TMP 的 VAT 全金屬閥門 (pumping gate valve, 150 CF) 等。其中 Agilent 的離子幫浦 (圖 9(a)) 在原廠先行將腔體置於真空爐中烘烤到 450 °C 維持 24 小時達到超高真空後密封；VAT 的 SGV 閥門 (圖 9(d)) 在原廠先行真空烘烤到 300 °C 維持 24 小

時達到超高真空後以氮氣封存。以上兩元件為配合本計畫之要求在製造廠家先完成高溫烘烤除氣的先期步驟後才包裝出貨運送到本中心到貨後直接安裝使用，以確保元件較低的表面釋氣率。

在完成 14 m 真空系統於無塵室內組裝完成後即抽真空測漏，確認無漏後便將整體安裝鋁合金夾治具固定，再以特製的大型工型樑吊具將整座 14 m 真空系統懸吊起來移至存放區潔淨室中的臨時立柱支架上固定。在完成 24 座 14 m 真空系統組裝後，開始進行各系統之烘烤作業，一次同時烘烤 3 座，每座真空系統皆烘烤到 150 °C 維持均溫 24 小時後達到超高真空，平均最低氣壓約 6.4×10^{-9} Pa ($\sim 5 \times 10^{-11}$ Torr)。不過約有半數的真空系統於烘烤後發現漏氣必須更換元件補漏後再度烘烤，有幾座甚至烘烤 3 次以上才達到超高真空無漏氣⁽¹⁰⁾。這也是本計畫的設計概念之一為將有高風險的烘烤作業先在實驗室進行直到確認達到超高真空規格無漏氣後，再利用吊裝系統將整體已密封的超高真空

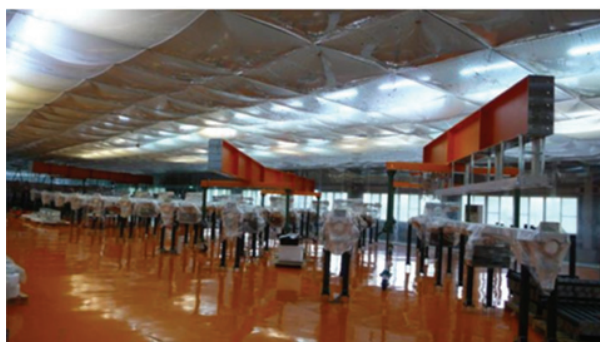
腔懸吊搬運到儲存環隧道區現場的支架上安裝固定完成，以避免在現場烘烤 (in-situ baking) 作業所冒產生漏氣與位置偏移等的風險及需消耗的人力工時等等變數。因此在隧道區內安裝的流程為先完成所有 24 座 14 m 彎段真空系統安裝定位，如圖 11 之安裝流程說明；再連接兩座彎段之間的長直段真空腔系統安裝抽氣並現場烘烤達到超高真空，畢竟長直段系統的元件較少較容易控制烘烤變數。圖 12 為安裝完成之一組儲存環 1/24 段包括長直段(已安裝插件磁鐵) 與 14 m 彎段真空系統。隧道區完成主體加速器真空系統安裝定位後，再連接周邊的機電系統包括：冷卻水管路系統、遙控供電與信號擷取電纜線、監測溫度纜線等，皆由隧道區的地下管道分別將水管與纜線引出到隧道屏蔽牆外側的水氣機電管路以及控制機房儀器架中的電源供應器、儀器控制器、真空安全連鎖控制系統、及數據擷取系統等，以利整體加速器運轉之自動化連鎖調控。



(a)



(b)



(c)



(d)

圖 10. 24 座 14 m 彎段真空系統於無塵室中陸續完成 (a) 銲接組裝測漏與真空保存後，(b) 以鋁製夾治具固定，再 (c) 以大吊具將系統懸吊移至存放區，並 (d) 進行真空烘烤。

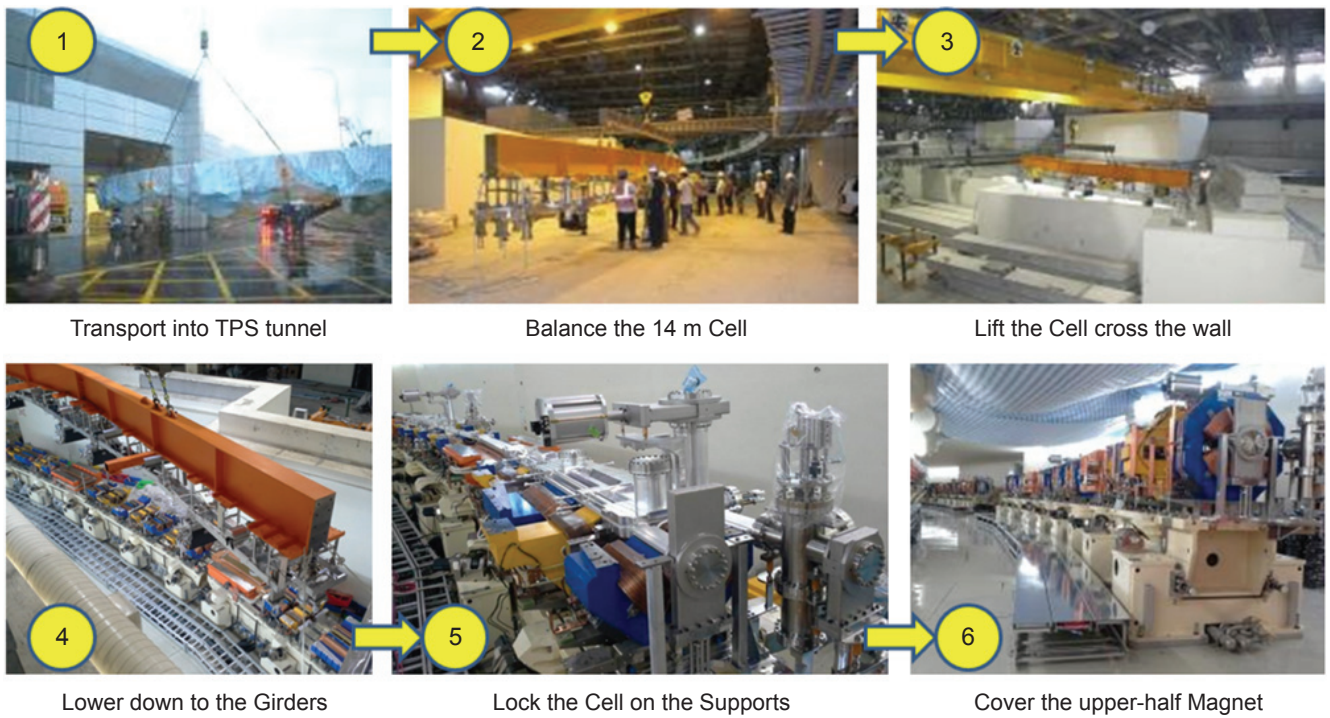


圖 11. 24 座 14 m Cell 真空系統現場安裝定位：(1) 載運至 TPS 儲存環館、(2) 移近位置牆外並配重平衡、(3) 以天車懸吊系統跨越屏蔽牆移入隧道區、(4) 移至磁鐵上方緩慢平衡下降至支架上定位、(5) 固定系統於支架上、(6) 移除夾治具後覆蓋磁鐵。每組 Cell 由載運到安裝定位完成 (步驟 1-5) 約 4 小時。



圖 12. TPS 隧道區內之儲存環 1/24 段，包括長直段 (已安裝一組插件磁鐵) 及 14 m 彎段真空系統。

六、結論

台灣光子源 (TPS) 真空系統為國人自行設計建造之大型加速器超高真空系統。光源主體之電子儲存環真空系統選用鋁合金材料為主，尤其是 24 座 14 m 彎段真空系統之製造須兼顧達到最低表面釋氣率及最低腔體阻抗之品質，因而須建立必要之關鍵技術，包括利用無油酒精 CNC 精密加工方式製造鋁合金電子束軌道真空腔，並在無塵室中完成腔體銲接、二次加工、元件組裝、真空測漏、烘烤等作業；此外，也自行設計製造低阻抗之 BPM 腔體元件、全金屬分隔閥門、真空軟管、光吸收器等。再建立能夠載運已密封之 14 m 超高真空系統整體至 TPS 儲存環館隧道區並懸吊安裝到現場支架定位的工具與技術，高效率完成複雜界面系統的安裝，再於現場銜接周邊長直段真空系統、真空烘烤；及連接電纜線、水氣管路等機電與控制系統。本文所敘述 TPS 光源儲存環主體真空系統之超高真空與低阻抗腔體設計邏輯並配合製造安裝的特殊設計流程等，可確實達成加速器光源所需之高穩定性、高可靠度與高精密度的最佳品質。

誌謝

作者特別感謝國家同步輻射研究中心真空小組同仁們參與 TPS 真空系統設計建造以及 TPS 加速器工程團隊分工合作共同建立關鍵技術並完成建造安裝之任務。此外，也誠摯感謝承包無油酒精精密加工鋁合金轉彎段真空腔與元件之勝欣精密工業公司、承包製造 BPM 法蘭電導引之宏碩系統公司、以及多家國內外廠家配合製造客製設計 TPS 的低阻抗高精密真空元件等，於此一併致謝。

參考文獻

1. 國家同步輻射研究中心台灣光子源簡介, <http://www.nsrcc.org.tw/chinese/tps.aspx>.
2. 國家同步輻射研究中心, Activity Report 2015, 67 (2016).
3. 國家同步輻射研究中心, 第 99 期簡訊, 2 (2016).
4. 熊高鈺、詹哲鎧、張進春、楊佳螢、陳慶隆、陳彥斌、許憲能、薛心白、陳俊榮, 真空科技季刊, **21 (3、4)**, 12 (2008).
5. G. Y. Hsiung, J. R. Huang, J. G. Shyy, D. J. Wang, J. R. Chen, and Y. C. Liu, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A12 (4)**, 1639 (1994).
6. G. Y. Hsiung, C. K. Chan, C. C. Chang, Y. B. Chen, H. P. Hsueh, C. L. Chen, C. Y. Yang, S. N. Shu, C. M. Cheng, C. K. Kuan, I. C. Sheng, and J. R. Chen, *Journal of Physics: Conference Series*, **100**, 092014 (2008).
7. J. R. Chen, G. Y. Hsiung, C. C. Chang, C. L. Chen, C. K. Chan, C. M. Cheng, C. Y. Yang, L. H. Wu, and H. P. Hsueh, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A28 (4)**, 942 (2010).
8. I. T. Huang, H. P. Hsueh, C. L. Chen, C. C. Chang, G. Y. Hsiung, and J. R. Chen, Proceedings of IPAC2011, San Sebastián, Spain, TUPS029, 1593 (2011).
9. G. Y. Hsiung, C. K. Chan, C. C. Chang, C. L. Chen, C. M. Cheng, Y. T. Cheng, S. N. Hsu, H. P. Hsueh, Yingtzu Huang, Albert Sheng, L. H. Wu, Y. C. Yang, and J. R. Chen, Proceedings of IPAC2012, New Orleans, USA, WEPPO21, (2012).
10. G. Y. Hsiung, H. P. Hsueh, Y. T. Huang, C. M. Cheng, Y. C. Yang, C. K. Chan, L. H. Wu, C. H. Chang, C. S. Huang, S. W. Chang, T. Y. Lee, Y. P. Chang, Z. W. Chen, Y. T. Cheng, S. N. Hsu, C. C. Chang, C. L. Chen, and J. R. Chen, Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China, THPFI077, 3472 (2013).



熊高鈺先生為國立清華大學物理研究所碩士，現任國家同步輻射研究中心研究員。

Gao-Yu Hsiung received his M.S. in department of physics from National Tsing Hua University. He is currently a research scientist at National Synchrotron Radiation Research Center (NSRRC).