

第四代儲存環光源於台灣光子源升級之可行性研究：加速器磁格設計的挑戰與展望

黃暖雅

國家同步輻射研究中心光源組

前言

台灣光子源 (Taiwan Photon Source, TPS) 自 2016 年正式啟用以來，今年邁入第十年，期間為學研界促成許多重要研究成果，不僅孕育出豐碩的頂尖科研成果，奠定台灣在先進光源的關鍵地位，更曾享有世界最亮神燈之美譽。著眼於國際間第四代繞射極限儲存環光源 (4GSR 也稱 DLSR) 的快速演進，如歐洲 ESRF-EBS、美國 APS-U 與瑞士 SLS 2.0 等。為確保永續的科研競爭力，國輻中心正持續針對未來潛在的升級方案展開各項關鍵技術評估，積極儲備下一階段的科研動能。

目標與挑戰

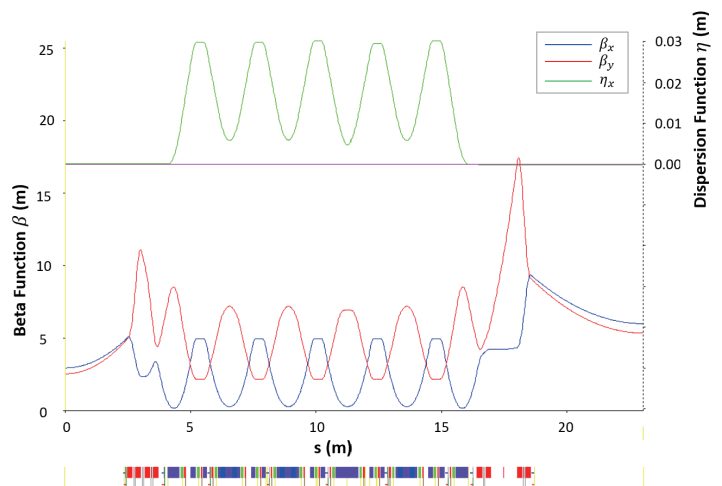
4GSR 的核心目標，透過將電子束的空間發射度 (emittance) 大幅降低，使插件磁鐵輻射光源可以更集中在光子之繞射極限相位空間，因此光源不只更亮，在空間同調性 (spatial coherence) 的表現也更高。此特性有望為同調繞射造影 (coherent diffraction imaging)、顯微影像 (microscopy imaging) 等相干性驅動的科學實驗，帶來跨越性的突破，大幅縮短實驗採樣時間，並提高有效實驗數據吞吐量。同時，透過技術的全面升級，節能永續也是全世界加速器光源發展往 4GSR 邁進的一大動力。

然而，TPS 的磁格升級面臨眾多的工程限制。在原址升級的考量下，雖然 TPS 的周長達 518.4 米，但是其高佔比的直線段空間，相對地可用之轉彎段空間非常有限。在緊緻的磁格空間配置下，由於磁鐵的間距排列大幅度靠近，需要的四極和多極磁場強度隨之提升，縮小的磁鐵半徑 (bore radius) 雖然有助於增加磁場強度，但也對真空工程帶來挑戰；得益於真空技術的進展，NEG 鍍膜在小口徑真空環境下有效提升了分佈式抽氣能力；多項關鍵元件的工藝進展與有效整合，使得更低空間發散度的電子束有機會實現。然而，在空間中越高密度分布的電子束，其內部射束散射 (Intra Beam Scattering, IBS) 的效應越加顯著，如何在此物理瓶頸下，有效提升繞射極限光源的品質與穩定度，是 TPS 升級的一大關鍵挑戰。

邁向穩健的核心方案：6BA 磁格的戰略選擇

在兼顧工程可行性、物理極限權衡，並維持既有光束線的切線角度下，國輻中心的射束動力小組提出 6BA 磁格的候選方案 [1]。其磁格空間配置與光學函數分佈如圖一，轉彎段之間的二極及複合二極磁鐵規劃採用永久磁鐵，搭配彎段內穿插配置的複合電磁鐵，達到線性光學參數可調整的功能。透過光學函數 (β , α 與 η 函數) 與磁場空間分佈的綜合調整與精準匹配，此磁格成功將自然發射度 (natural emittance) 從 1.6 nm-rad 降低至 67 pm-rad，這使電子束尺寸在轉彎段處由原本的 $40 \mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$ 顯著縮減至 $7 \mu\text{m} \times 6.8 \mu\text{m}$ ，在直線段處亦由原本的 $120 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ 縮減至 $15 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ ，光束輪廓亦將從扁平狀收斂為近乎圓形的極小光斑，插件磁鐵 (Insertion Device, ID) 輻射在硬 X 光源的空間同調性提升至少一個數量級，亮度更可推進至近 10^{22} photons/s/mm²/mrad²/0.1%B.W. 的水準。特別的是，此 6BA 磁格可在無需配置諧波六極磁鐵 (harmonic sextupole) 的情況下運行，有效消除第一階的幾何非線性項。此優異特性，不僅簡化了非線性光學的調整，亦使得相鄰直線段的四極磁鐵，在插件磁鐵作動時，可以有效保留其調整彈性，進一步大幅降低機器在實際運轉的操作複雜。

我們針對此 6BA 磁格進行初步的模擬試車 (commissioning simulation) 與容錯度分析，在模擬中加入各項可能的機器誤差，包含元件對準誤差、磁鐵場強誤差以及電子儀器雜訊等。透過軌道校正、射束參考對位校正 (Beam



圖一 串聯短直段與長直段之 6BA 候選磁格空間配置與光學函數分佈。下方色塊示意：藍色為二極磁鐵、紫色為複合式二極磁鐵、紅色為四極磁鐵，綠色為六極磁鐵。

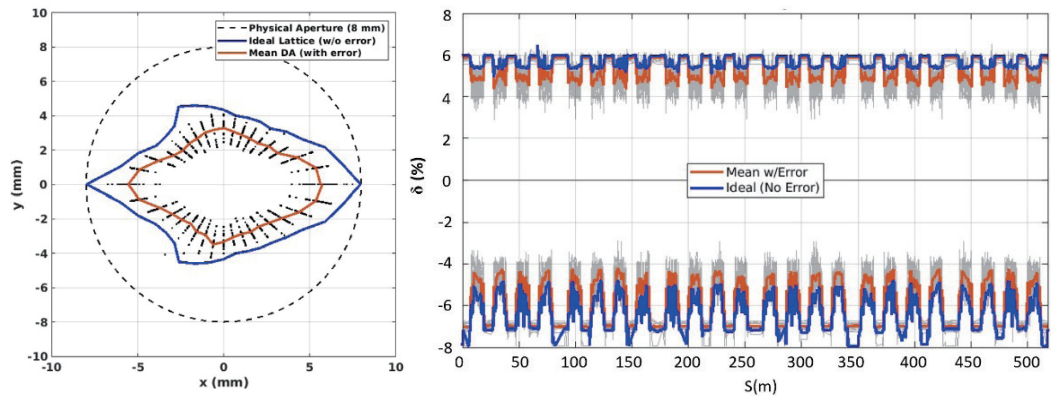
Based Alignment, BBA) 與封閉軌道之線性光學參數修正 (Linear Optics Correction from Closed Orbit, LOCO) 程序，系統能將光學函數的誤差 (Beta-beating) 成功抑制在 2 % 以下，殘餘軌道誤差小於 50 μm 。分析結果如圖二，射束的平均動力孔徑 (dynamic aperture，指電子束在橫向空間可以安全運行的有效範圍)，可維持大於 5 mm 的優異表現；即使在最惡劣的誤差條件下 (the worst error seed)，動量接受度 (momentum acceptance，指電子束可以接受的能量偏差容忍範圍) 接近 $\pm 4\%$ ，此外在單團射束電量 1.04 nC，10% 耦合係數，並包含諧波共振腔效應的情況下，評估 Touschek 壽命可達 12.6 小時，符合 500 mA 恆定電流充填 (Top-up) 運轉的輻射安全與穩定性需求。這證明了 6BA 磁格設計具備良好的強健性 (robustness)。

未來展望

國際上的儲存環升級正朝向超低發射度與高同調性之繞射極限光源邁進，目前 TPS-II 6BA 的磁格設計，有效地將射束的空間發射度降低為 TPS 的二十分之一，代表 TPS-II 的研發之路正與世界加速器開發趨勢接軌，其表現也將為相同尺度之儲存環光源中，空間發射度最小。然而，從物理設計走向工程實現，眼前仍有眾多高山需要團隊共同跨越。如複合永久磁鐵之機械定位與安裝的整合調校技術、注射機制的系統優化、小真空口徑與高電流伴隨之束流集體不穩定效應、插件磁鐵作動時的即時射束及光源回饋控制、以及更高精密診斷與控制系統的導入。我們將持續深入跨小組整合溝通，除了建立更完整的模擬試車驗證平台，導入注射機制及耦合控制系統，也將納入整合之複合式磁鐵以及插件磁鐵的磁場模型於射束動力分析，以達更健全的誤差分析及系統優化；以使用者需求為優先導向的聚焦下，持續向更亮、更好的同步輻射光源邁進，打造下一世代的台灣之光。

參考文獻：

1. N.Y. Huang *et al.*, in Proceedings of IPAC'26, Deauville, France.



圖二 初步模擬試車在不同誤差種子 (灰色線) 之射束動力孔徑 (左圖) 與動量接受度 (右圖)。

用戶資訊

實驗計畫申請

2027-1 期實驗計畫申請目前審核中

2027 年第一期 (2027 年 1-6 月) 實驗計畫申請目前正陸續進行初複審中，核定的光束線排程後續將於 12 月下旬公告於用戶入口網頁。

2027-2 期實驗申請預告

2027 年第二期 (2027 年 7-12 月) 光束線使用預計 2027 年 1 月初開放申請，截止日期為 2027 年 2 月 15 日 (一)。歡迎計畫主持人踴躍上網 (<http://tpsportal.nsrrc.org.tw/>) 提出申請 (新用戶須先完成註冊)。

近期光束線將退場 / 搬遷如下

- TLS 01C2 SWLS – X-ray Powder Diffraction 光束線將於 2027-1 期退場，用戶可依實驗屬性轉至 TPS 19A1 或 TPS 20A1 進行實驗。
- TLS 13B2 Beamline for Interdisciplinary Energy Research 光束線將於 2027-1 期退場。
- TLS 17B1 W200 – X-ray Scattering 光束線將於 2027-1 期退場，用戶可移轉至 TPS 09A1 進行實驗。
- TPS 25A2 Coherent Diffraction Imaging 實驗站設施調整規劃，故於 2027-1 期暫停服務。

發行人 / 羅夢凡
總編輯 / 王俊杰
編輯委員 / 黃彥霖 王嘉興 李安平 林宜燕 林彥谷
黃駿翔 鄭澄懋 劉若亞 蘇慧容
執行編輯 / 李宛萍

國家同步輻射研究中心 版權所有
National Synchrotron Radiation Research Center
300092 新竹市東區新安路101號
TEL: +886-3-578-0281 FAX: +886-3-578-9816
<https://www.nsrrc.org.tw>