

新一代電子注射技術在加速器中的發展

張進春博士

國家同步輻射研究中心真空小組

台灣光子源 (Taiwan Photon Source, TPS) 的儲存環，電子束的穩定注入是確保實驗光源穩定的重要步驟。為了讓注入過程更精準、更不干擾儲存環電流，本中心開發一種全新的裝置—非線性真空型偏踢磁鐵 (Nonlinear In-vacuum Kicker, NIK)。這項創新技術的核心理念，是利用非線性磁場分佈控制電子注入的軌跡，使得儲存環電流在注入時幾乎不受影響。這樣的設計不僅可提高注入效率，也能提升儲存環的穩定性與運作效率。

一、設計概念與結構組成

NIK 預定安裝於 TPS 直線段的注射區 [1]，未來將取代原本由四個非真空型的偏踢磁鐵所負責的注射工作，這將讓直線段有空間安裝新的插件磁鐵光源。配置於直線段空間以防止上游處同步輻射光的照射，NIK 的上游特別設計了僅 7.5 mm 高的光吸收腔體，如圖一所示，來吸收上游二極磁鐵的輻射光。

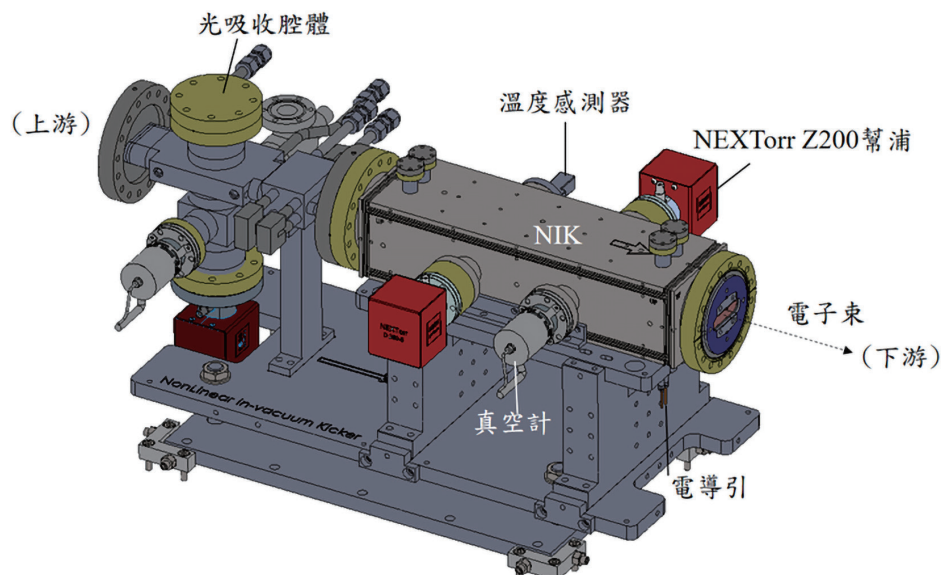
NIK 的整體裝置主要由三大部分組成，包括：(一) 鈦金屬真空腔體，此腔體負責維持超高真空環境。(二) 陶瓷基板與支撐結構，支撐銅線圈並提供電子導电路徑。(三) 銅錐 (copper taper) 與陶瓷端板，此結構位於 NIK 兩端，協助 NIK 的間隙和兩端的真空腔可以平順過渡並吸收熱膨

脹。鈦金屬之所以被選為主要材料，是因為它具有低氣體釋放率、無磁性與輕量化的優點。腔體全長 520 mm，開口尺寸約為 103 mm × 82 mm，兩側設有多個法蘭孔，用於安裝溫度感測器、真空計與 NEX Torr Z200 幫浦等設備，如圖一所示。

二、陶瓷與銅線圈的設計

在腔體內部，設置一組由上、下陶瓷基板組成的核心結構。每片基板上都有凹槽，可精準安放八條直徑 2 mm 的銅線圈。這些線圈由陶瓷夾塊與鈦螺絲固定，確保間距穩定且彼此絕緣。為了讓電子束在陶瓷表面上能順利通過，基板靠近電子束的一側鍍上厚度 5 μm 的鈦薄膜。這層鍍膜兼具導電功能，使得電子束通過 NIK 時，感應的鏡像電流 (image current) 可以順利通過。

陶瓷基板經過精密加工與研磨，表面高低起伏的平均值小於 100 nm，基板尺寸誤差控制在 $\pm 10 \mu\text{m}$ 內，組裝後的電子束通道開口尺寸 68 mm × 8 mm。陶瓷端板則負責固定結構、導通銅套筒、隔離銅錐與線圈，並確保電極接點精確對齊。整體組件組合後安裝於陶瓷支撐底座上，構成 NIK 的核心架構。



圖一 非線性真空型偏踢磁鐵 (NIK) 組成與配置。

三、銅錐與熱膨脹設計

在 NIK 兩端的上下游位置，各裝有一個銅錐，用來讓電子束通道從寬逐漸過渡到窄，避免電子束受到斷面突變的干擾。由於內部運轉時會產生熱，使陶瓷略有膨脹，因此銅錐設計了梳齒狀結構 (comb-type teeth) 與彈簧片 (crown spring)，讓其可在長度方向微量伸縮 (約 1 mm)，吸收熱應力。此外，外側還加裝不鏽鋼支架與鉍銅接觸指簧片 (contact finger)，確保導電與機械接觸穩定，即使在長時間運作下仍能保持結構完整。

四、溫度與鍍層控制

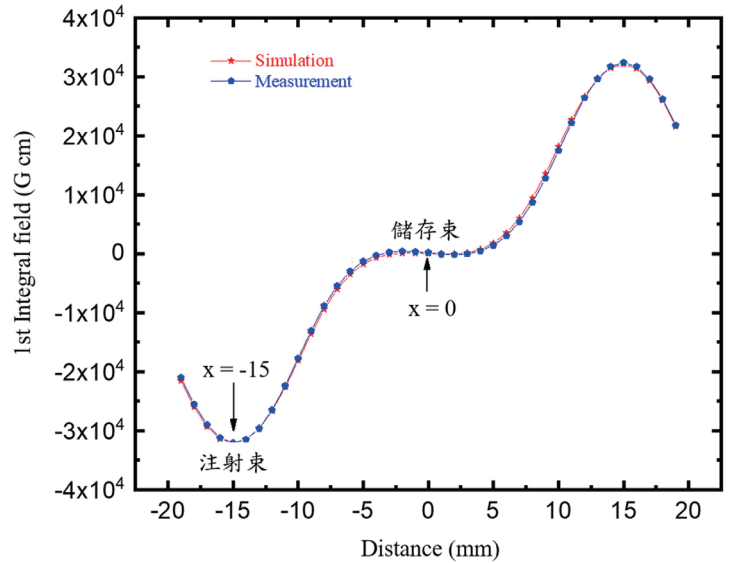
為監測運作時的溫度變化，設計四組 K 型熱電偶，固定在上層陶瓷基板上，透過側壁的導線孔引出，可隨時量測腔體內溫度。

鈦鍍層的厚度也必須仔細設計，若鍍層太厚，雖能降低電阻熱，但會引起渦電流 (Eddy current) 效應，導致磁場衰減變慢；若太薄，則導電不足、容易發熱。經多次模擬後，最終選定 5 μm 厚度，作為導電性與磁場反應速度的最佳工作點。

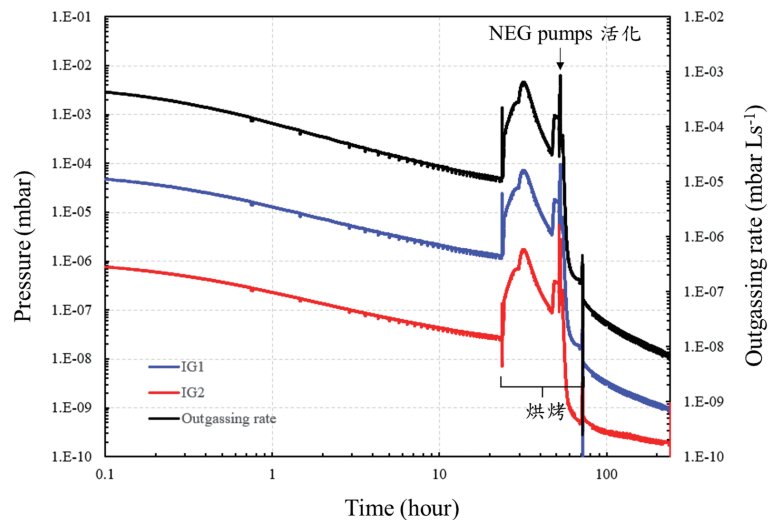
五、實驗測試結果

研究團隊自行開發一套磁場量測系統，利用訊號產生器與示波器，配合感測線圈與積分電路，量測脈衝磁場的空間和時間的分佈情況。實驗量測結果顯示，在中心軌道位置磁場積分接近理論值，偏差僅約 250 G·cm；在偏軸 15 mm 處，模擬與量測的差異不到 0.13%，精準度極高，如圖二所示，這說明磁鐵的整體組裝非常的精準。磁場的時間分布上，為了提升脈衝磁場的反應速度，線圈路徑經特別設計來降低電感，最終量測結果為 1.56 μH ，此規格符合電源供應器提供 TPS 運轉之需求。

NIK 需要在真空環境內操作，才能提供較強的磁場，所以真空與釋氣測試須滿足儲存環的超高真空要求。由於 NIK 結構複雜且由多種材料組成，包含：陶瓷、鈦、銅、不鏽鋼等，測試釋氣量便十分關鍵。經 120 小時抽氣與 150 $^{\circ}\text{C}$ 烘烤 24 小時後，測得釋氣率約 1.9×10^{-8} mbar·L/s，這釋氣率可藉由安裝合適的幫浦進行抽氣。此系統安裝兩台 NEX-Torr Z200 幫浦並啟動 NEG 吸氣元件後，腔體壓力小於 10^{-9} mbar，如圖三所示，這量測結果完全符合 TPS 儲存環運轉需求。



圖二 NIK 之磁場分佈量測。



圖三 NIK 之真空與釋氣量測。

六、展望

這項非線性真空型偏踢磁鐵的研發，不僅展現本中心在真空與磁場整合設計上的技術實力，也象徵台灣同步輻射設施進入更高層次的注入技術階段。

參考文獻：

1. C. C. Chang *et al.*, Vacuum **239**, 114356 (2025).