

拉長電子束團的關鍵技術： 超導三階諧波共振腔

劉宗凱

國家同步輻射研究中心光源組

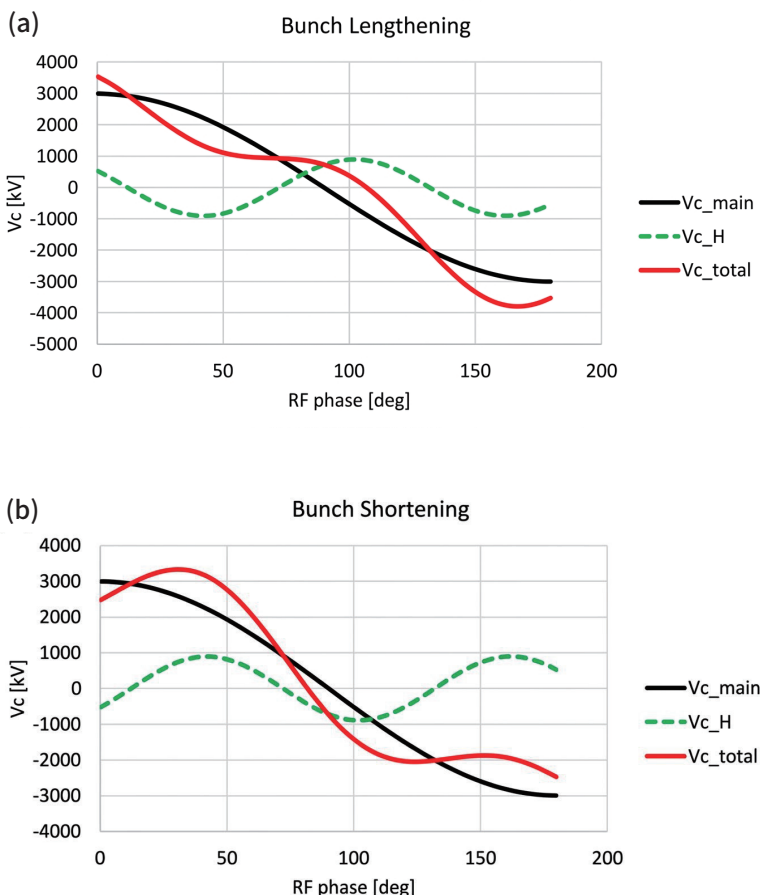
諧波共振腔 (Harmonic Cavity) 是共振頻率為加速器主要射頻頻率之高次諧波的共振腔，其功能在於改變電子束團看見之等效加速場的分佈 (其示意圖如圖一所示)。根據操作條件，可以控制電子束團縱向方向的長度。當運轉在拉伸的模式，可藉由減少電子束團的電荷密度，進而提升束流壽命、降低各類加速器元件因電子束團感應所產生的熱損。同時，由於諧波共振腔改變了縱向射頻勢能，使得同步振盪頻率 (synchrotron frequency) 的分佈變寬，引入了 Landau damping 的效應，可以壓抑各類不穩定性。由於以上的優點，在粒子加速器中，許多設施為了提升儲存電流 (透過 Landau damping 壓抑集體不穩定性) 或是提升束流壽命的目的，安裝了諧波共振腔。特別在第四代光源中，由於束流壽命偏短，諧波共振腔幾乎是標準配備。

下頁圖二為國輻中心發展諧波共振腔的歷程，自 2015 年起針對 TPS 陸續進行諧波共振腔的評估工作，以主要射頻頻率 500 MHz 的 3 倍頻為目標，研究在 TPS 安裝 1.5 GHz、超導三階諧波共振腔的效益。高頻團隊在 2018 年完成被動式雙腔型超導三階諧波共振腔的設計與優化，同時也透過粒子軌跡追蹤的模擬計算，根據填充模式的不同，預期可將電子束團長度拉伸約 1.6 至 4 倍，降低插件磁鐵的熱損與提升束流壽命。後續此超導三階諧波共振腔委託日本三菱重工製造，於 KEK 進行相關之表面處理程序，最後於 2024 年在中心完成共振腔之垂直測試。高次模吸收器的部分，則由我們進行初期的概念設計與參數優化，同時計算在 500 mA 運轉電流下的高次模臨界阻抗，確認此共振腔的高次模對運轉不會激發不穩定性。此高次模吸收器後續則由德國

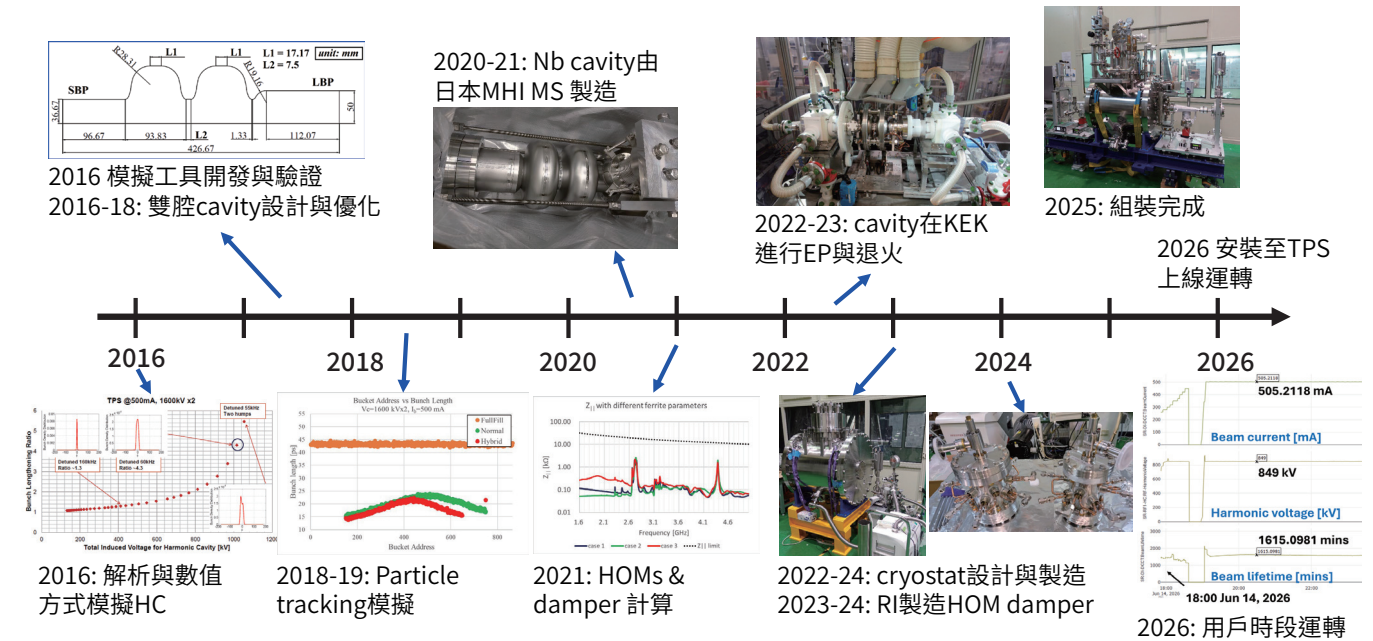
RI (Research Instruments) 公司進行最終的細節設計與製造。超導模組的低溫槽則由中心設計、台灣廠商進行製作，最終於 2025 年完成整體的模組組裝，順利完成模組在低溫下的高功率水平測試。測試結果如下頁圖三，腔體的品質因子在加速場強達 7 MV/m (相當於加速電壓為 1.4 MV) 時仍優於 3×10^8 ，且在 4.2 K 的溫度時此低溫槽含共振腔體的整體靜態熱損只有 7.2 W，顯示高頻團隊在超導模組於無塵室的組裝以及低溫槽設計上，與國際上其他超導設施的技術水準不相上下。

此超導諧波共振腔採用被動式操作，其加速場強由電子束團所激發，不須額外的高功率微波源。我們可以利用調頻裝置控制共振腔的頻率，進一步調整電子束團看見的等效加速場分佈，而達到所需的最適工作條件。由於此超導諧波共振腔為被動式元件，在連鎖保護的部分則須透過切斷 500 MHz 系統的功率源使射束終止，達到保護系統的目的。另外，我們以 TPS 500 MHz 超導模組系統的設計為基礎，建造了包含電子、低溫與真空、資料擷取以及支援的水與氣等周邊支援的系統。

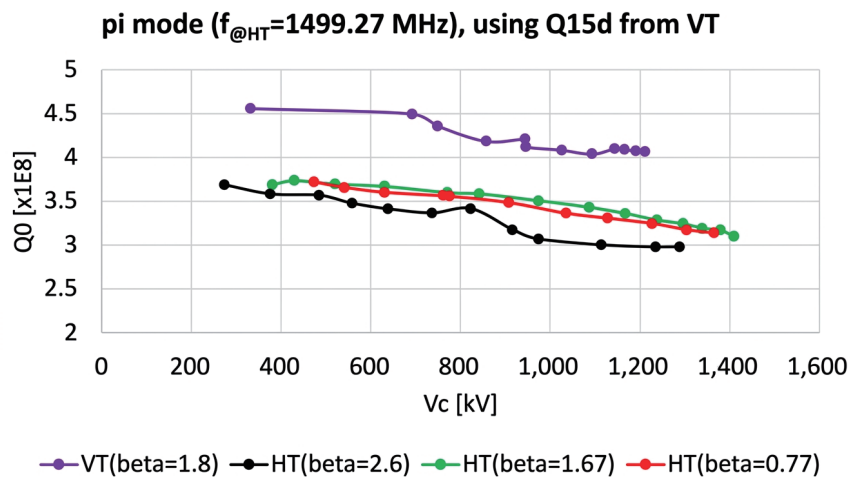
此諧波共振腔於 2026 年 1 月安裝至 TPS，在 2 月初完成降溫後進行初步的測試。許多的運轉議題，如熱效應、工作頻率飄移、危險的頻率區間等，一一在測試期間出現。經過多次的測試與工作點調整，以及改善頻率控制系統後，我們最終克服了前



圖一 超導諧波共振腔的功能示意圖：藉由改變電子束團看見之等效加速場的分佈，進而達到電子束團長度 (a) 拉長或 (b) 縮短的目的。



圖二 國輻中心發展超導諧波共振腔的歷程。



圖三 超導諧波共振腔垂直測試 (VT) 與水平測試 (HT) 的結果。

述的運轉議題，並成功於 2026 年 3 月底在用戶時段進行試運轉。目前在均勻填充模式 (uniform filling mode) 與混合填充模式 (hybrid mode) 下，啟用此超導三階諧波共振腔時，電子束團長度可拉長約 2 倍，並大幅降低各真空元件的熱損與提升束流壽命。如 electron beam position monitor (eBPM) 的溫度，在啟用超導三階諧波共振腔後，約可降低 10 度、直流電流感測器 (DC Current Transformer) 的溫度也由 83 度降為 53 度，在束流壽命的部分，如運轉在均勻填充模式，更可長達約 20 小時以上。

目前此超導三階諧波共振腔已達到初步設計的需求，但仍有許多課題尚待研究。例如：在混合填充模式下，不同電子束團的相位差異會被拉大，這對於加速器的性能會

造成一定的影響，需要進一步的分析與改善。針對均勻填充模式，電子束團長度拉伸量也尚未達最佳化。另外，我們也可以藉由調整電子束團的填充模式，進一步達到最佳的拉伸效果。未來我們也將持續於機器研究時段進行系統與參數的優化，進一步提升此超導諧波共振腔之效能與可靠度。

參考文獻：

1. Z.-K. Liu *et al.*, International Particle Accelerator Conference (IPAC), 2237, Busan, Korea (2016).
2. Z.-K. Liu *et al.*, IEEE T. Appl. Supercon. **29**, 3500505 (2019).
3. Y.-C. Hsu *et al.*, IEEE T. Appl. Supercon. **29**, 3500205 (2019).