



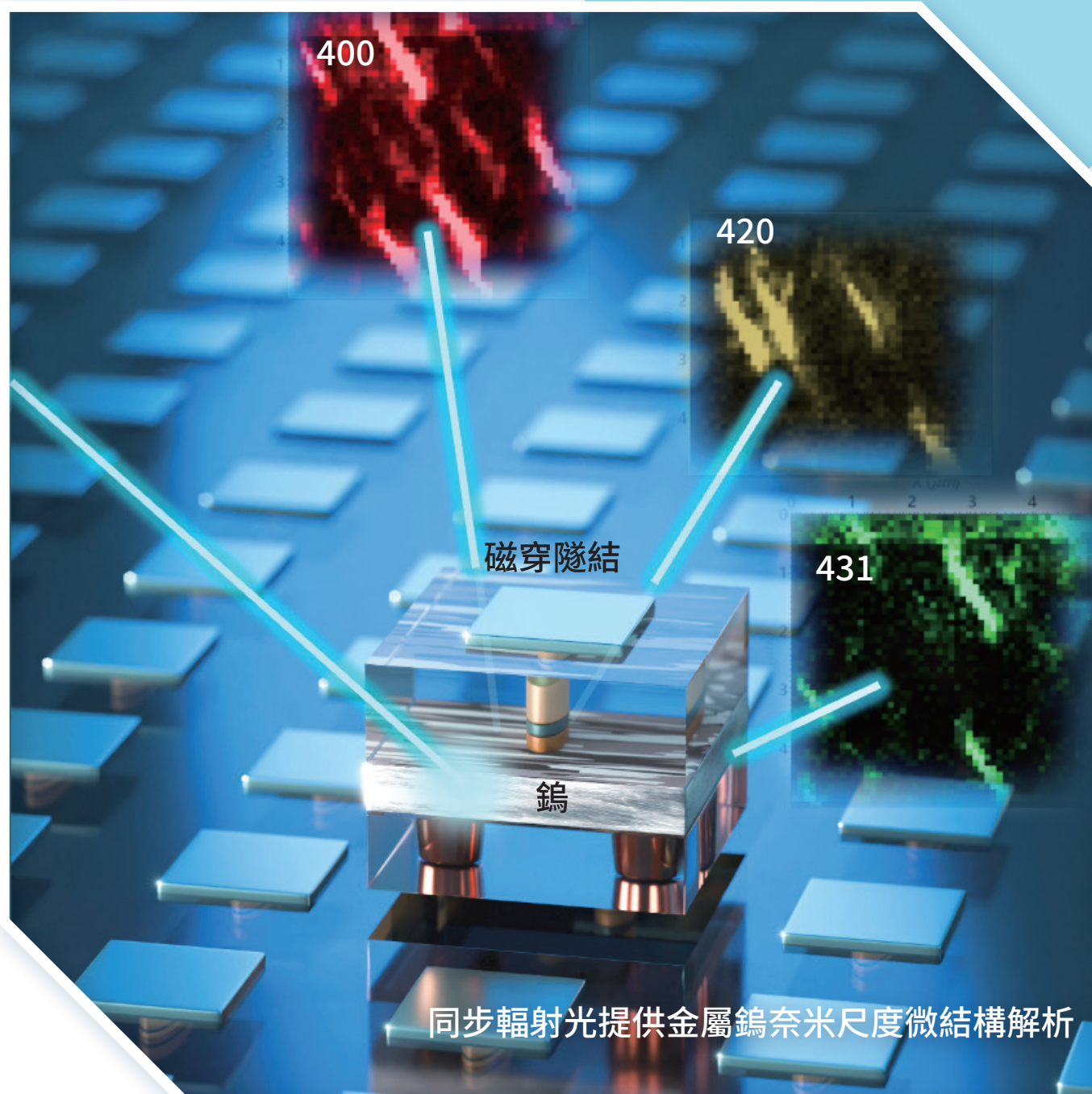
NSRRC Newsletter

國家同步輻射研究中心簡訊

NO. **137**
2026/07

研究專文

奈米繞射解析鎢
從材料相穩定到磁性記憶體



主任的話

科研成果的擴散應用並對社會產生實質貢獻，始終是各界對科研機構的重要期待。中心的研究活動以基礎科學研究為核心，涵蓋材料本質特性的探索、反應機制的釐清，以及新理論與新現象的發現，屬於創新鏈中由知識創造邁向價值實現的上游環節。長期以來，中心累積的核心優勢在於尖端實驗技術的開發與應用，以及實驗設施的建置、整合與運作能力。這些關鍵能量不僅支撐尖端科學研究的持續突破，也能協助產業解析關鍵問題、優化製程並提升產值。一般對中心產業應用成果的認識，多聚焦於中心同仁直接與企業合作所提供的服務；然而，眾多用戶運用中心設施所取得

的研究成果，進一步衍生的技術創新、產品開發及經濟效益，同樣是中心科研能量對產業與社會的重要貢獻。

本期簡訊特別專訪榮獲 114 年國家產學大師獎的中心資深用戶黃炳照特聘教授。黃教授分享其在鋰電池與產氫技術等能源領域的豐碩成果，並以跨越學研與產業界的豐富經驗，闡述科研成果落地應用的關鍵歷程。如何找到科研能量服務產業的著力點，並建立彼此理解與信任的合作關係，有賴於深厚的專業基礎與長期投入。黃教授的成功案例，也彰顯了同步輻射設施在推動產業創新上的重要價值。



時逢端午佳節，今年由同仁及眷屬組成的光子特攻龍舟隊，再次挑戰新竹市龍舟競賽。去年的參賽經驗讓大家深刻體會到「要同步才會贏」的道理；今年團隊秉持「同步、同向、同心」的精神，全力以赴，再創佳績。中心的發展亦然，期許大家持續以「三同」精神攜手前行，凝聚力量，共創新高峰。

近況報導

- 本中心與加拿大多倫多大學、美國哈佛大學、澳洲中子散射中心及中國吉林大學所組成的跨國研究團隊，在古生物演化領域取得重大突破！成功解析距今約 2.89 億年前、早二疊紀時期的爬蟲類「大鼻龍 (Captorhinus)」木乃伊化石，不僅揭開早期羊膜動物 (Amniotes) 呼吸系統演化的重要線索，更刷新目前已知最古老的軟組織與蛋白質保存紀錄，研究成果已於 4 月 8 日刊登於國際頂尖科學期刊《自然》(Nature)。
- 隨著全球積極推動綠色能源與環境永續，如何將廢水中的硝酸鹽有效轉化為高價值的氨 (NH₃)，已成為科學界的重要研究課題。本中心攜手澳洲科廷大學 (Curtin University) 所組成的跨國研究團隊，成功開發出一種新型催化劑「反鈣鈦礦結構之三元銅鈷氮 (Cu₂NCo₃)」，大幅提升硝酸鹽轉換成綠氨的效率與穩定性，為廢水治理與綠色氨能源轉型帶來重大突破，研究成果於 2 月 12 日發表國際頂尖期刊《先進材料》(Advanced Materials)。

- 繼專研臨場 X 光實驗技術與電催化能源材料的林彥谷研究員於 2024 年獲選英國皇家化學學會會士 (Fellow Member of the Royal Society of Chemistry) 後，恭賀本中心研究員 TLS 03A1 及 TLS 21A2 光束線發言人吳宇中博士當選會士。吳博士於分子光譜與光化學、量子化學計算及星際化學等領域的研究成果深獲國際肯定。
- 本中心於 5 月 12 日舉辦「Interactive Solution Scattering and MD Simulations」微型研討會，特別邀請德國薩爾蘭大學 (Saarland University) Jochen Hub 教授蒞臨演講，並與國內研究人員就結構生物學最新研究成果與技術發展進行深度交流。
- 美國物理學會 (APS) 主席 Prof. Brad Marston 與陽明交通大學仲崇厚特聘教授於 6 月 23 日來訪，雙方交流目前發展現況與探討未來合作研究與技術交流之可能性。
- NASA Ames 中心主任 Dr. Eugene L. Tu 和中原大學太空科技研究中心孫維新主任於 5 月 28 日來訪，雙方深化於太空科學及相關研究領域之交流與合作。

以X光奈米繞射解析 β -W： 從材料科學到可量產磁性記憶體

黃彥霖助理教授

陽明交通大學材料與科學工程學系



陽明交通大學黃彥霖（後排右一）及其研究團隊。

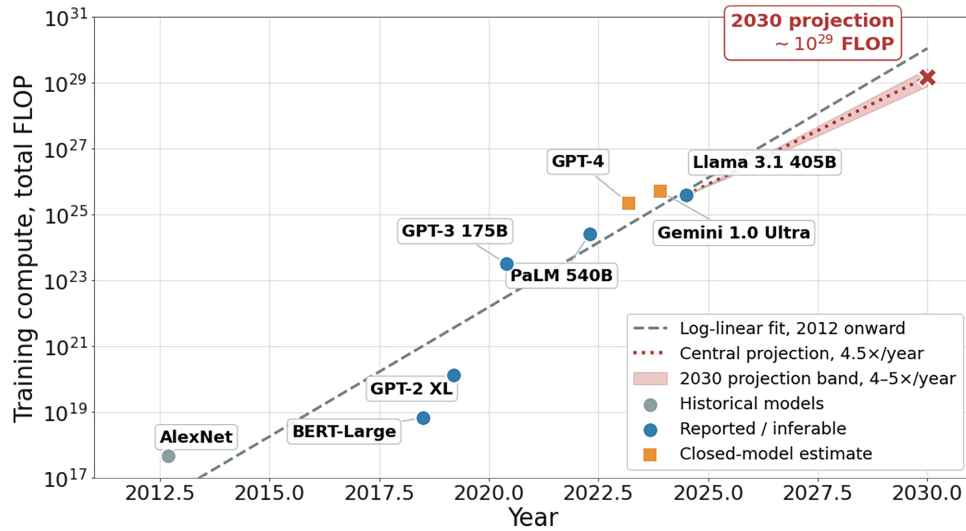
隨著人工智慧 (AI)、邊緣運算 (edge computing) 與高效能運算等資料密集型應用的快速發展，運算需求正呈現前所未有的指數型成長。如圖一所示，代表性 AI 模型的訓練運算量已從 AlexNet 時代的 10^{17} FLOP (floating-point operations) 等級，快速上升至 GPT-4、Gemini 1.0 Ultra 與 Llama 3.1 405B 等最新大型語言模型所需的 10^{25} - 10^{26} FLOP 等級。若依照近期每年約 4 - 5 倍的成長趨勢推估，至 2030 年大語言模型訓練需求可能逼近 $\sim 10^{29}$ FLOP [1,2]。這樣的成長不只是單純的運算量增加，更代表模型權重、活化值與梯度必須在記憶體與處理器之間進行更大規模、更高頻率的資料搬移。因此，AI 硬體的主要瓶頸正逐漸從運算單元本身，轉向記憶體頻寬、資料搬移能耗與系統架構效率等。

為突破上述瓶頸，業界開始將目光轉向新興的非揮發性記憶體。其中，磁性記憶體 (MRAM) 因具備非揮發性 (斷電不遺失資料，可實現零待機功耗)、抗輻射、高速寫入以及與標準 CMOS 後段製程 (BEOL) 高度相容等優勢，成為備受矚目的候選技術。然而，目前已商用的自旋轉移矩磁性記憶體 (STT-MRAM) 屬於雙端點 (2-terminal) 元件，其讀取與寫入共用同一電流路徑，容易引發讀取干擾 (read distur-

bance) 的風險，且寫入速度與元件壽命仍受限於穿隧氧化層的損耗。

在此背景下，基於自旋軌道矩 (spin-orbit torque) 效應的 SOT-MRAM 應運而生。SOT-MRAM 採用創新的三端點 (3-terminal) 結構，成功將寫入路徑與讀取路徑完全分離。這種架構不僅徹底消除了讀取干擾的隱患，更允許使用較大電流進行次奈秒 (sub-nanosecond) 等級的超高速寫入，同時賦予元件近乎無限的讀寫壽命 (endurance)。憑藉這些突破性的物理特性，SOT-MRAM 被學界與產業界寄予厚望，視為未來最有機會取代現有高功耗的快取記憶體 (cache-level SRAM) 或高階嵌入式記憶體 (embedded memory) 的終極解決方案，進一步實現極低功耗常關型運算 (normally-off computing) 的未來願景。

SOT-MRAM 的核心在於利用具有強自旋軌道耦合效應 (Spin-Orbit Coupling, SOC) 的重金屬層，將電荷電流轉換為自旋流，再透過切換磁穿隧結 (magnetic tunnel junction) 中自由層的磁化方向。換句話說，SOT-MRAM 的效能不只取決於磁性穿隧界面本身，也高度仰賴底部 SOC 材料的品質、相穩定性與製程相容性。在眾多候選材料中，鎢 (W)



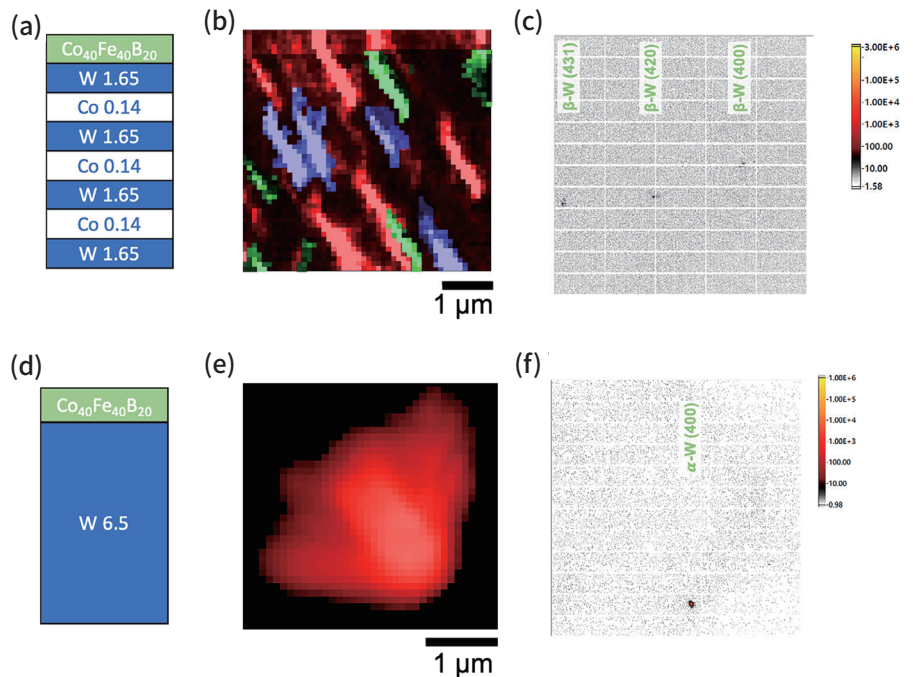
圖一 AI 訓練運算量與資料搬移負擔的快速成長。代表性 AI 模型的訓練需求已由 AlexNet 時代的 10^{17} FLOP 上升至前瞻大型語言模型的 10^{25} - 10^{26} FLOP。若維持每年約 4 - 5 倍的成長趨勢，2030 年可能逼近 $\sim 10^{29}$ FLOP，進一步加劇記憶體頻寬與資料搬移能耗瓶頸。

特別受到重視，因為其 β -phase 具有大的 spin-Hall angle，可有效產生自旋流並降低 SOT switching 所需電流。然而， β -W 相卻是屬於熱力學上不穩定的存在 (metastable phase)；當 W 膜厚增加，或經過後段製程常見的熱處理條件時， β -W 容易轉變為熱力學上較穩定的 α -W。這個相變對 SOT 元件是致命的，因為 α -W 的 spin-Hall angle 遠低於 β -W，會直接增加 SOT 元件成功寫入的電流密度，甚至會因為所需電流太高而導致元件失效。同時，BEOL 製程通常要求材料能承受約 400°C 的熱預算，因此如何在製程條件下穩定 β -W，成為 SOT-MRAM 從材料展示走向陣列整合的關鍵問題。(注：文獻普遍指出 β -W 的 spin-Hall angle 約可達 -0.4 至 -0.6 ，而 α -W 約只有 -0.01)

本研究提出的解法，是在 W 層中引入極薄的 Co insertion layers，形成 composite-W 結構 [3]。如圖二所示，研究團隊將 W 分成多段堆疊，並在 W 層之間插入約 0.14 nm 的 Co 層，形成 W/Co/W/Co/W/Co/W 的複合結構。這樣的設計有兩個重要目的：第一， 0.14 nm 的 Co 可作為擴散阻礙層，抑制熱處理過程中由擴散驅動的 β -to- α 相變化；第二，透過維持足夠厚度的 W 層，仍可保有後續定義磁穿隧結大小所需的蝕刻製程窗口。此舉帶來的不僅僅是追求維持 β -W 的 spin-Hall angle，而且同時須考慮整體熱

穩定性與後段製程乃至於黃光蝕刻的整合式材料設計與製造性。

在這此研究中，國輻中心 (NSRRC) TPS 21A X-ray nanodiffraction 扮演了關鍵角色。對於這類奈米厚度的多層膜結構，傳統電子穿隧顯微鏡可以提供局部截面或是平面的晶格與繞射資訊，低角度 X-ray 繞射 (GIXRD) 則能提供較大面



圖二 複合 W 薄膜與單層 W 薄膜的結構與結晶相量測。(a) 複合 W 薄膜結構示意圖，其中包含三層厚度為 0.14 nm 的 Co 插入層 (圖中數字表示各層厚度，單位為奈米)，W 的厚度為 6.6 nm 。(b) β -W 相的 X 光奈米繞射空間分佈圖。其中，來自 (400)、(420) 與 (431) 晶面的貢獻分別以紅色、藍色與綠色表示。(c) β -W 特徵峰繞射點。(d) 單層 W 薄膜結構示意圖，W 的厚度為 6.5 nm 。(e) α -W 相的 X 光奈米繞射空間分佈圖。(f) α -W 特徵峰繞射點 [3]，數據擷取自 TPS 21A。

積的平均相結構。然而，在 SOT-MRAM 中 SOC 的材料問題不僅是確認平均的材料相，更重要的是其微結構的分佈。這正是 TPS 21A 的貢獻所在。透過同步輻射 X-ray nanodiffraction，研究團隊能以約 $90 \times 90 \text{ nm}^2$ 的聚焦 X-ray 光束，在場發射掃描式電子顯微鏡輔助定位下，對相同觀察區域進行空間解析繞射二維掃描 (mapping)；並根據不同 W 相的繞射條件，選用 $1.6316 \text{ \AA}$ 與 $1.5215 \text{ \AA}$ 的波長，分別量測 composite-W 與 single-layer-W 薄膜的空間繞射圖譜，如圖二所示。

這項量測的核心意義在於：TPS 21A 並非只是輔助確認晶相，而是將原本平均化的結構判讀，轉化具有空間解析度 phase-stability map。研究結果顯示，在 composite-W 樣品中， β -W 並非隨機或均勻地存在，而是形成具條紋狀特徵的 β -W 結晶疇。這些條紋狀的結構進一步沿著退火時外加磁場方向排列，破壞了膜面內的空間對稱性。另一方面，在沒有放入 Co 的 single-layer W 對照樣品中，nanodiffraction map 顯示的是較均勻分布的 α -W 繞射訊號，說明單層 W 在相同熱處理條件下已經轉變為熱力學穩定的 α -phase。這個對比非常關鍵：它不只證明 Co 插入層可以穩定 β -W，也顯示此穩定化效應具有可被同步輻射奈米繞射直接觀察的空間結構特徵。

從 NSRRR 用戶的角度來看，這項研究清楚展現 TPS 21A 在先進半導體材料研究中不可取代的角色。傳統材料分析手段多半著重於平均晶格常數的量測，或侷限於電子顯微鏡所提供的局部結構資訊；相較之下，TPS 21A 提供的空間解析 X 光奈米繞射，能進一步揭露薄膜中晶相分布、取向分布與局部結晶特徵。這些資訊對於理解材料結構如何從奈

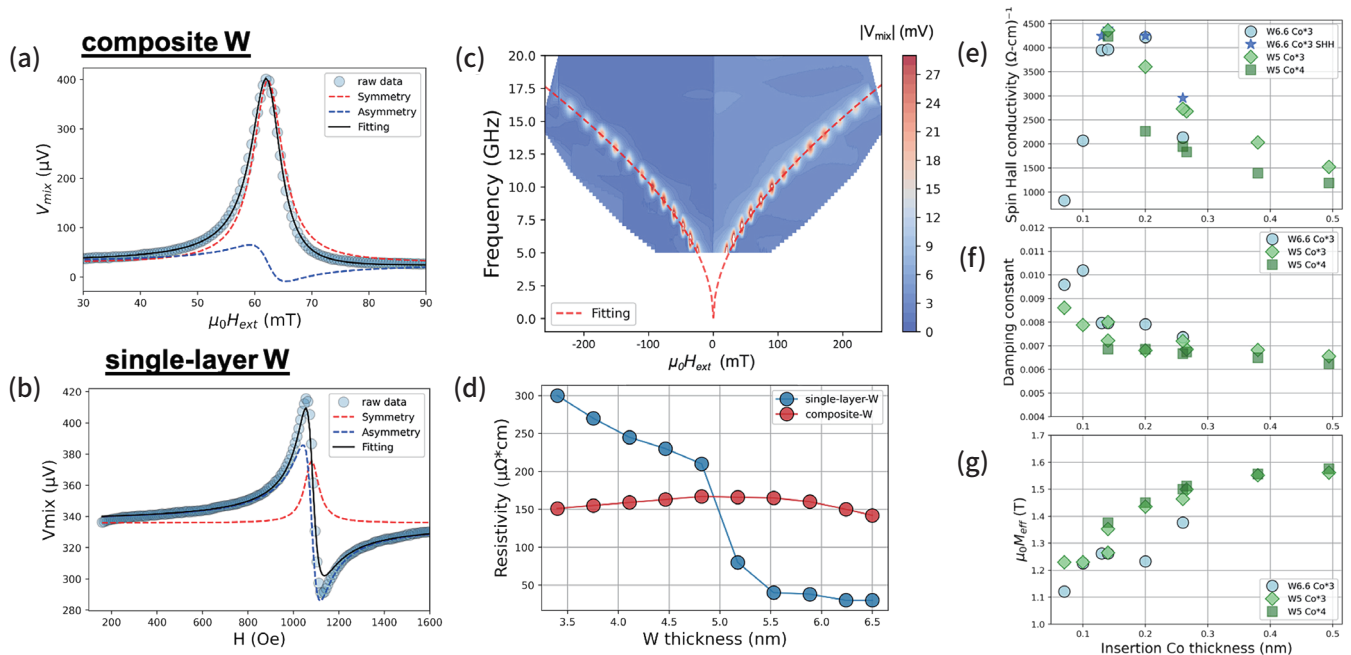
米尺度延伸至微米尺度，並最終影響元件性能，具有關鍵價值。

在熱穩定性方面，研究團隊進一步比較 composite-W 與 single-layer W 在 BEOL thermal budget 下的相穩定度。結果顯示，composite-W 可在 400°C 長時間退火後仍保持 β -W diffraction pattern，甚至可承受更嚴苛的 700°C 短時間熱處理；相對地，single-layer W 在 400°C 短時間退火後即發生 β -to- α 相變化。

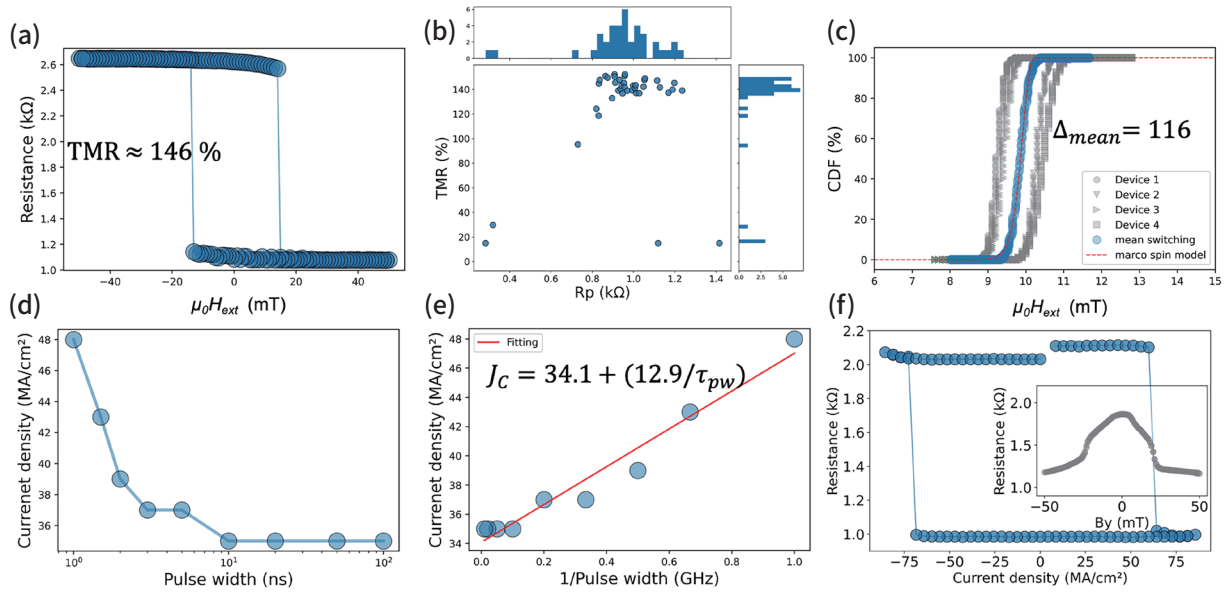
在確認相穩定性後，研究團隊進一步透過 ST-FMR 與 harmonic Hall measurements 量化 composite-W 的 SOT 效率，如圖三所示。最佳 Co insertion 厚度約為 0.14 nm ，composite-W 的自旋霍爾導電度 (spin Hall conductivity) 可達約 $4,500 \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ，並維持約 0.007 的低 damping constant。這代表 Co insertion 的穩相策略並未犧牲 W 作為 spin-current source 的基本功能，且在熱穩定性與 SOT 效率之間取得有效平衡。

最終，這套 composite-W 薄膜製程被導入 64-kb SOT-MRAM 陣列整合，結果如圖四所示。元件展示 1 ns SOT switching、146% 穿隧磁阻變化，以及大於 10 年的資料保存能力。

圖五進一步將本研究與具代表性的既有 SOT-MRAM 展示成果進行基準比較，包括 TSRI 2023 IEDM [4]、Tohoku 2019 IEDM [5] 與 imec 2019 VLSI [6]。雷達圖中的各項性能指標皆以比較對象中的最佳報導值進行正規化，半徑越大代表相對性能越佳。結果顯示，本研究並非只在單一指



圖三 ST-FMR 頻譜以對稱與反對稱 Lorentzian 分量進行分析，用以獲取 spin-orbit torque 響應。(a) 複合 W 薄膜呈現更穩定的外加磁場依賴訊號，顯示 Co 插入層可穩定 β -W 結構，同時維持有效的 spin-orbit torque 產生能力。(b) 單層 W 薄膜則明顯呈現較差的 spin Hall 效率。(c) 複合 W 薄膜 ST-FMR 頻譜。(d) 電阻對 W 薄膜厚度圖。(e-g) Co 插入層厚度對於 spin Hall 效率影響。[3]



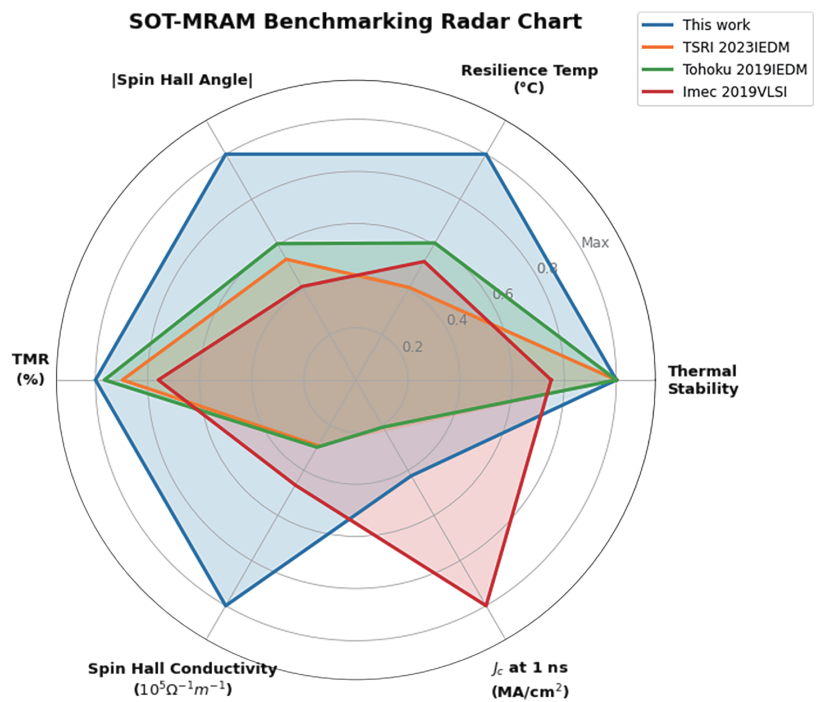
圖四 SOT-MRAM 元件切換特性。(a) 6.6 nm 複合 W 層上完整 MTJ 的磁場誘發磁阻切換，TMR 約 146%。(b) Type-Y 記憶單元的 TMR 與平行態電阻。(c) 切換 CDF 隨外加磁場變化，用於萃取資料保留 (data retention)；藍點為四個元件平均值，紅虛線為 macrospin model 擬合。(d, e) SOT 切換電流密度與臨界電流密度 J_C 對脈衝寬度的依賴關係，量測範圍為 100 ns 至 1 ns；每點代表 64-kb SOT-MRAM 晶片 8,000 個 MTJ 的平均值。(f) Type-X MTJ 的電流誘發磁阻切換，展示 6.6 nm 複合 W 層可實現無外加磁場切換。[3]

標上取得突破，而是在多個關鍵面向呈現更均衡的性能表現，包括高速 SOT 切換、高 TMR、良好的資料保持能力、BEOL 熱穩定性，以及 64-kb 陣列層級整合。這樣的綜合表現說明，Co-inserted composite-W 的價值不僅在於穩定 β -W 相，更在於能將材料層級的相穩定性轉化為可量測、可整合且具製程相容性的 SOT-MRAM 元件性能。

這篇工作的核心貢獻為展示 SOT-MRAM 的性能，並且結合同步輻射材料解析特色幫助研究者了解更基礎的材料科學，TPS 21A X-ray nanodiffraction 直接幫助此研究具象化 Co-inserted W 的 β -phase 空間分布，提供超越一般 XRD 與微觀電子顯微鏡局限。這項證據支持 composite-W 可作為無外加磁場 Type-X SOT 翻轉，並進一步支撐 64-kb SOT-MRAM 的陣列級展示，是一個工程能力結合基礎科學的經典合作。

參考文獻：

1. K. Pilz *et al.*, RAND Corporation, 28 (2025).
2. K. F. Pilz *et al.*, arXiv preprint arXiv:2504.16026 (2025).
3. Y. L. Huang *et al.*, Nature Electronics **8**, 794 (2025).
4. K. S. Li *et al.*, 2023 International Electron Devices Meeting (IEDM), 1 (2023).
5. H. Honjo *et al.*, 2019 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 28.25. 21 (2019).
6. S. Couet *et al.*, 2021 Symposium on VLSI Technology, 1 (2021).



圖五 SOT-MRAM 性能指標之基準比較。此雷達圖比較本研究與具代表性的既有 SOT-MRAM 展示成果，包括 TSRI 2023 IEDM [4]，Tohoku 2019 IEDM [5] 與 imec 2019 VLSI [6]。各項指標皆以比較對象中的最佳報導值進行正規化；雷達圖中半徑越大，代表相對性能越佳。本研究在多項關鍵指標上呈現更均衡的性能表現，突顯其在元件微縮性、切換性能、資料保持 / 可靠性，以及陣列層級整合方面的綜合優勢。[3]

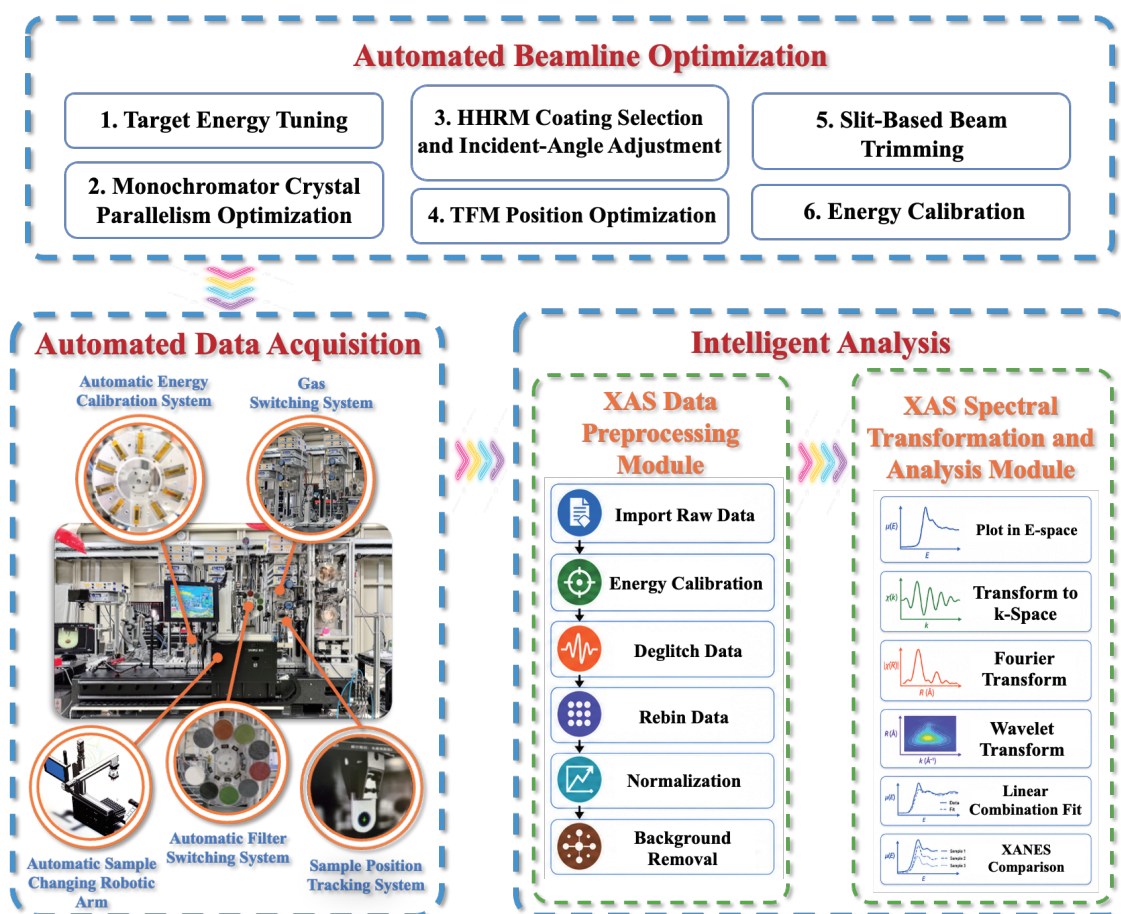
TPS 32A 柔X光吸收光譜光束線： 自動化量測與智慧分析系統之開發

盧英睿、彭柏洋、陳啓亮、梁成志
國家同步輻射研究中心實驗設施組

得益於同步輻射光源可提供高亮度且能量連續可調的 X 光光源，X 光吸收光譜已成為探測材料電子結構與局域結構的重要技術。其中，X 光吸收近邊緣結構 (XANES) 可解析氧化價數與局域結構對稱性；延伸 X 光吸收精細結構 (EXAFS) 則可提供配位原子的種類、配位數、鍵長與亂度等資訊。由於此技術具有元素選擇性，且待測樣品可為晶體、非晶體、粉末、薄膜、液體甚至氣體，因此已被廣泛應用於化學、催化、能源材料、環境科學及凝態物理等領域。

TPS 32A 為一座柔 X 光吸收光譜光束線，建置目的在於銜接軟 X 光與硬 X 光光束線經常不易兼顧的能量區間。其操作能量範圍為 1.7 - 11 keV，涵蓋 Si 至 Zn 等元素的 K-edge、4d 元素與鐳系元素的 L-edge。TPS 32A 採用偏轉磁鐵光源，並以水冷式雙晶單色儀作為分光核心，其中配置

InSb(111) 與 Si(111) 晶體，以兼顧低能量可及性與能量解析度需求。然而，對 XAS 實驗而言，光束線具備合適的光學架構僅是取得優質數據的基礎；實際進行量測時，如何在每一次掃描前將光束線光源狀態調整至最佳條件，乃是取得可靠實驗數據的關鍵。TPS 32A 實驗站目前已導入快掃模式 (fly-scan)，透過單色儀連續掃描與偵測器同步收集訊號，取代傳統逐點停留的步進掃描模式 (step-scan)，可大幅縮短量測時間，將原本在 TLS 16A 約 40 分鐘的量測有效加速；其中，穿透模式約可於 1 分鐘內完成，螢光模式約需 8 分鐘，且數據品質仍可維持與傳統掃描相近。也正因 fly-scan 大幅提升了單次光譜掃描速度，在相同的光束線時段內，使用者便能安排更多樣品，因而更常需要進行樣品更換，並依不同待測元素重新最佳化光源條件；同時，後續需要進行分析的數據量也隨之增加。



圖一 TPS 32A 自動化與智慧化 XAS 光束線系統示意圖，整合自動化調光、自動化量測系統與智慧化數據分析。

基於上述需求，TPS 32A 已進一步建置涵蓋自動化調光、自動化量測與智慧化分析三個層面的整合式工作流程（圖一）。換言之，光束線硬體的建置與快速掃描能力提供了基礎，而真正能降低用戶操作光束線的學習門檻，並減少操作疏漏的關鍵，則是將這些繁瑣卻關鍵的實驗步驟轉化為可重複執行的自動化流程。TPS 32A 的自動化調光系統，可根據用戶選擇的待測元素，完成目標能量移動、單色儀晶體平行度最佳化、高諧波抑制鏡 (HHRM) 之鍍膜與入射角調整、超環面聚焦鏡 (TFM) 位置最佳化、狹縫砍光，以及能量校正等程序。自動調光完成後，接續要整合的便是實驗站端的自動化量測流程。整套自動化量測系統整合了游離腔體切換裝置、標準樣品切換裝置、機械手臂、螢光偵測器濾片切換裝置與樣品位置定位系統。其中，游離腔切換裝置可依待測元素的能量選擇合適的游離腔；標準樣品切換裝置則可在量測不同元素時自動切換至對應標準品，以利能量校正；螢光濾片切換裝置則依待測元素切換合適濾片，以降低彈性散射背景。另一方面，自動樣品交換系統可將多達 100 個樣品預先安裝於樣品盤中，再由機械手臂依照量測清單順序送至量測位置，並配合影像定位系統自動完成光點與樣品的對位。此架構串接自動化調光與量測系統，並結合 fly-scan，有助於實現高通量連續量測。

在完成自動化調光與量測後，第三個關鍵則是智慧化分析。快速掃描雖然能在短時間內產生大量光譜，但若後續仍完全仰賴人工逐一進行數據處理，將會消耗大量時間。基於此考量，TPS 32A 將整合式光譜分析平台納入後續工作流程之中，除了一般的能量校正、壞點移除與背景處理外，亦包含小波轉換分析、XANES 光譜資料庫比對與線性組合擬合等功能。至於 EXAFS 結構解析，其困難之處往往不僅在於取得振盪訊號，而是如何將光譜與合理的結構模型連結並進行擬合。為此 TPS 32A 未來計畫朝向更完整的智慧化結構分析流程發展，逐步導入晶體結構資訊檔 (CIF) 搜尋、散射路徑計算產生、候選模型篩選以及機器學習輔助結構擬合等功能。當候選模型數量眾多，或擬合參數空間過於龐雜時，透過機器學習輔助方法可協助搜尋合理的參數組合與模型選擇，進而縮短由原始光譜走向結構判讀所需的時間，並讓使用者在面對複雜 EXAFS 擬合問題時，能以更有效率且更一致的方式探索可能的結構。

對使用者而言，一座光束線的價值不僅在於具備足夠的光通量、符合實驗需求的能量解析度與乾淨的入射光，也包括能否將這些光源優勢有效轉化為高效率、高通量的量測流程。TPS 32A 光束線藉由整合自動化光束線控制、自動化量測系統、fly-scan 與智慧化數據分析平台，推動 XAS 光束線朝自動化、智慧化與高通量量測方向發展，協助使用者以更有效率方式取得可靠光譜，並快速解析其中的電子結構資訊。藉此，研究人員能從繁瑣的操作與耗時的分析中解放，專注於前瞻科學的探索與突破。

用戶資訊

實驗計畫申請

2027-1 期實驗開放申請

2027 年第一期 (2027 年 1 - 6 月) 光束線使用於 2026 年 7 月初開放申請，截止日期為 2026 年 8 月 17 日 (一)，歡迎計畫主持人踴躍上網申請。

會議/課程

- 第十五屆 X 光科學暑期學校 (8 月 18 日至 21 日)
- X 光斷層掃描與三維資料分析工作坊 (8 月 24 日)
- 第三十二屆用戶年會暨研討會 (8 月 25 日至 27 日)
- X 光吸收光譜暑期訓練營 (8 月 28 日)
- 2026 蛋白質結晶學訓練課程 (8 月 31 日至 9 月 4 日)
- 2026 年薄膜 X 光散射訓練課程 (9 月 1 日至 3 日)
- 2026 小分子單晶結晶學暑期學校 (9 月 8 日至 9 日)
- 2026 台灣創新技術博覽會 (未來科技館) (9 月 17 日至 19 日)
- 2026 國際材料研究學會亞洲會議暨中國材料科學學會年會之同步輻射論壇 (10 月 31 日至 11 月 5 日)
- NSRRC Open House (11 月 7 日)
- 2026 台灣化學工程學會年會之同步輻射論壇 (12 月 5 日至 6 日)

※ 上述資訊僅供參考，請以網頁正式公告為主。

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

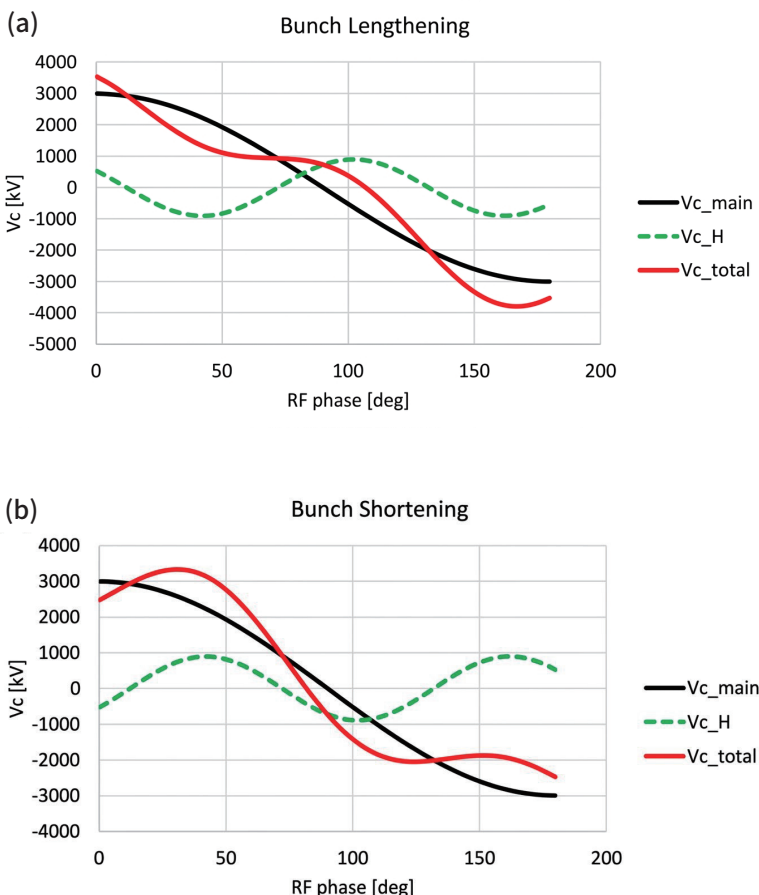
諧波共振腔 (Harmonic Cavity) 是共振頻率為加速器主要射頻頻率之高次諧波的共振腔，其功能在於改變電子束團看見之等效加速場的分佈 (其示意圖如圖一所示)。根據操作條件，可以控制電子束團縱向方向的長度。當運轉在拉伸的模式，可藉由減少電子束團的電荷密度，進而提升束流壽命、降低各類加速器元件因電子束團感應所產生的熱損。同時，由於諧波共振腔改變了縱向射頻勢能，使得同步振盪頻率 (synchrotron frequency) 的分佈變寬，引入了 Landau damping 的效應，可以壓抑各類不穩定性。由於以上的優點，在粒子加速器中，許多設施為了提升儲存電流 (透過 Landau damping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

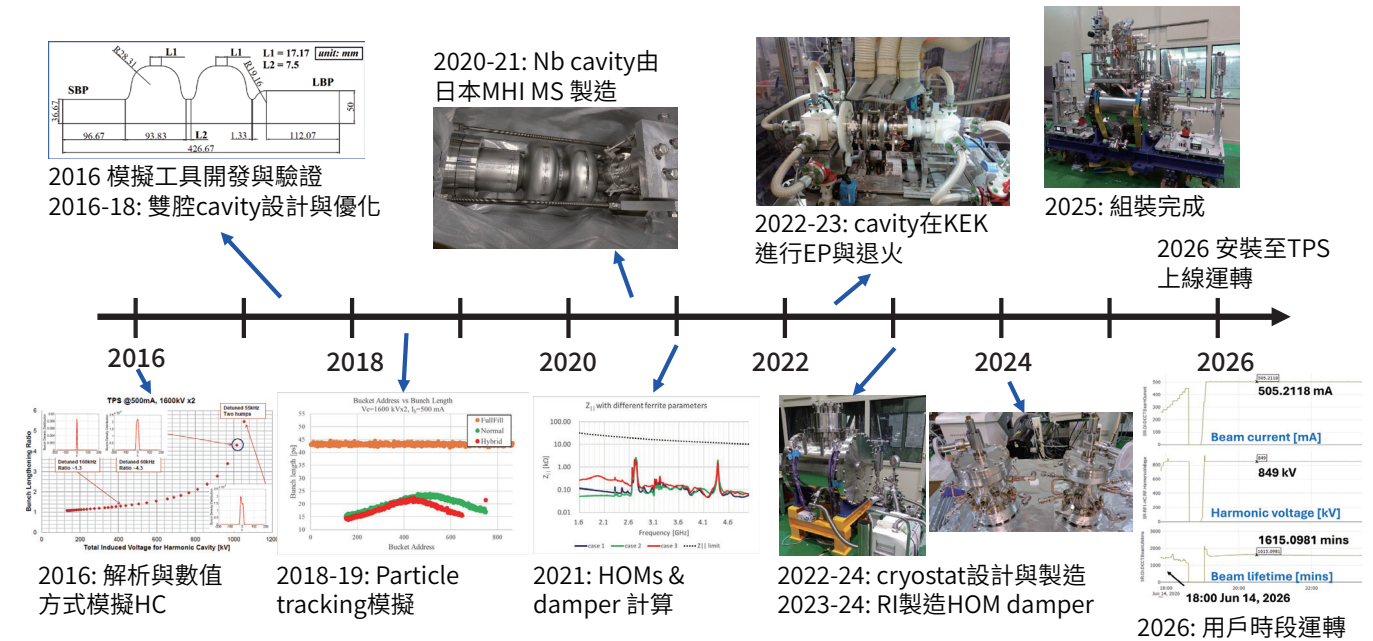
RI (Research Instruments) 公司進行最終的細節設計與製造。超導模組的低溫槽則由中心設計、台灣廠商進行製作，最終於 2025 年完成整體的模組組裝，順利完成模組在低溫下的高功率水平測試。測試結果如下頁圖三，腔體的品質因子在加速場強達 7 MV/m (相當於加速電壓為 1.4 MV) 時仍優於 3×10^8 ，且在 4.2 K 的溫度時此低溫槽含共振腔體的整體靜態熱損只有 7.2 W，顯示高頻團隊在超導模組於無塵室的組裝以及低溫槽設計上，與國際上其他超導設施的技術水準不相上下。

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。

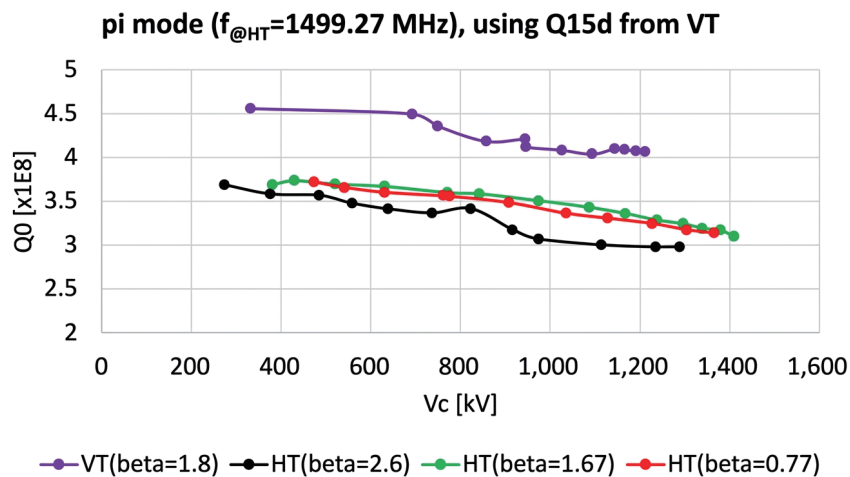
此諧波共振腔於 2026 年 1 月安裝至 TPS，在 2 月初完成降溫後進行初步的測試。許多的運轉議題，如熱效應、工作頻率飄移、危險的頻率區間等，一一在測試期間出現。經過多次的測試與工作點調整，以及改善頻率控制系統後，我們最終克服了前



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：

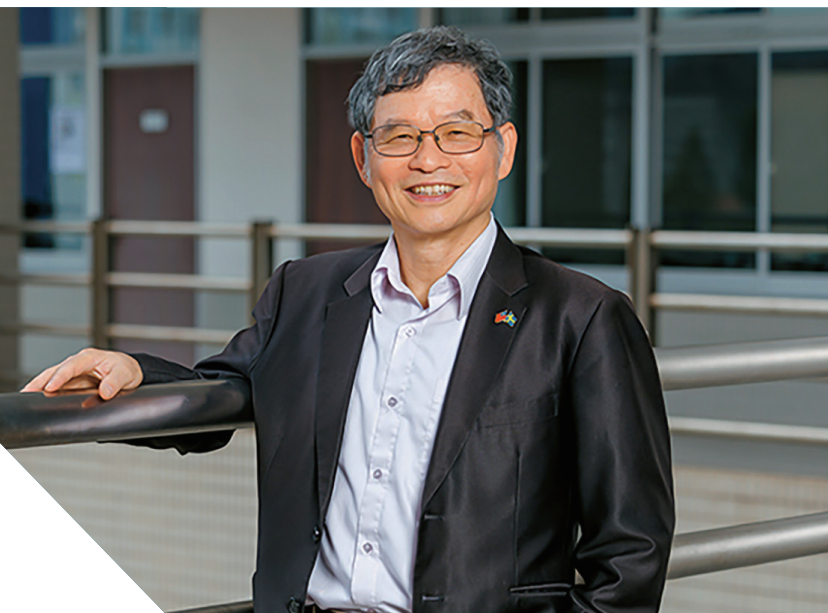
1. Z.-K. Liu *et al.*, International Particle Accelerator Conference (IPAC), 2237, Busan, Korea (2016).
2. Z.-K. Liu *et al.*, IEEE T. Appl. Supercon. **29**, 3500505 (2019).
3. Y.-C. Hsu *et al.*, IEEE T. Appl. Supercon. **29**, 3500205 (2019).

人物報導

114年國家產學大師獎得主

黃炳照講座教授

採訪 / 整理 王俊杰、李宛萍、劉若亞



Q 首先恭喜您榮獲「國家產學大師獎」。身為學術界重量級學者，卻也在產業界獲得如此崇高的肯定，請問您得知獲獎時的感想為何？

我一直思考如何將基礎研究與實際應用結合。一般產學獎多半肯定工程應用端的成果，但我的研究同時深耕基礎科學與產業應用，因此能獲得這項殊榮，讓我感到十分欣慰。對我而言，應用技術的突破必須建立在扎實的基礎研究之上，這也是我投入研究的初衷。

Q 這份「跨越產學界線」的榮耀，對您個人及研究團隊有什麼特別意義？

近年來我們在「無陽極鋰電池」領域投入許多心力。這類電池省去負極設計，具備高能量密度與製造簡單的優勢，目前在國際上具有相當競爭力，並逐步朝固態電池及無人機應用發展。另一項重要成果是「高質化產氫技術」。傳統水電解受到熱力學限制，需要較高能耗；我們改以碘化物、生物質等替代氧化反應，可大幅降低電壓需求達到節能的目的，產生的副產物也具有高附加價值。這份榮譽不只是對我個人的肯定，更是對研究團隊以及同步輻射中心的肯定。透過基礎研究帶動技術創新，才能在淨零碳排等未來議題上產生真正影響力。

Q 您認為哪些關鍵信念或研究轉折，讓團隊能成功將學術成果轉化為產業應用？

學術界與產業界各有不同優勢。實驗室擅長探索新概念與技術創新，企業則具備產品開發與量產能力，唯有雙方緊密合作，才能真正將研究成果轉化為產業價值。以我們投入多年的無陽極鋰電池技術為例，團隊後來成立衍生新創公司，經過五、六年的持續研發與驗證，目前已逐步導入無人

機等應用領域。這個過程也讓我深刻體會到，從實驗室中的研究成果到實際產品落地，往往需要長時間投入，以及產學雙方共同努力。在產學合作過程中，最大的挑戰其實是彼此理解與建立互信。企業通常希望盡快看到成果，但許多基礎研究，尤其是同步輻射相關分析，需要較長時間才能深入釐清問題；另一方面，企業基於商業機密考量，也未必能完整揭露真正的技術瓶頸。因此，如何建立良好的溝通機制，讓雙方充分理解彼此需求，是合作成功的重要關鍵。很幸運的是，我們長期獲得國科會攻頂計畫及國輻中心的支持，讓團隊能夠持續深入研究產業所提出的關鍵問題。我相信，唯有讓產業界理解基礎研究的價值，並建立長期互信關係，才能促成更多具影響力的創新成果，真正實現學術與產業的雙贏。

Q 貴團隊研發的鋰電池與市售鋰電池相比，性能差距有多大？

目前市售鋰電池能量密度約在 250 Wh/kg 左右，350 Wh/kg 已相當困難，而我們開發的無陽極鋰電池可達 450 Wh/kg。這代表原本只能飛行 30 分鐘的無人機，續航力有機會提升至 45 分鐘以上，對任務執行與安全性都有明顯助益。此外，由於不需負極材料，製造成本也更具優勢。目前最大的挑戰仍是循環壽命，因此我們持續透過同步輻射研究鋰與界面的反應機制，希望進一步提升電池穩定性。

Q 面對全球淨零碳排趨勢與快速變動的能源市場，您如何看待未來十年能源材料的發展？

氫能與儲能電池，將是實現淨零碳排最重要的兩大技術方向。而現代電池與觸媒研究，若沒有同步輻射的協助，很多關鍵問題其實無法被真正理解。以固態電池為例，目前最大的挑戰在於電解質與電極之間的固-固介面穩定性。我們

利用同步輻射的臨場分析技術，包括高壓原位量測、X 光影像與光譜分析等方法，深入研究其反應機制。這也是我第二期攻頂計畫的重要主軸。雖然這是一個極具挑戰性的研究領域，但我們希望透過持續投入，為下一世代能源技術奠定基礎。

Q 您如何兼顧研究、專利與創業？

其實這不是一個人完成的工作，而是團隊合作的成果。另外，研究本身就是我的興趣，所以並不覺得特別辛苦。至於論文與專利，兩者邏輯完全不同。論文強調以數據驗證事實；專利則著重於技術布局與保護範圍。簡單來說，論文是說明「已知的事」，專利則是保護「可能發展的事」。

Q 您的研究歷程中是否曾面臨重大瓶頸？如何帶領團隊突破？

因為研究本身就是我的興趣，所以我很少有所謂的低潮。我認為最重要的是不要把論文數量或指標當成人生唯一目標。研究需要長期規劃與穩定累積，如果每天都朝著目標前進一點點，壓力自然會小很多。科學研究本來就不可能完美。我們早期發展臨場 X 光吸收光譜技術時，也是不斷在有限條件下尋找突破的方法。與其等待完美，不如持續前進，從每一次不完美中創造新的可能。

Q 您如何兼顧實驗室管理與創新推動？帶領跨產學團隊最重要的管理哲學是什麼？

我常跟學生說：「比用功，你們很難超過我；但比成功，你們未來一定有機會超越我。」除了研究能力之外，我也很重視學生的思考能力與做人處世。我們訓練學生閱讀論文時，不只是吸收知識，更要學會分析問題、抓住核心重點。AI 可以協助整理資訊，但無法取代真正的理解與執行能力。另外，我始終相信「學生是吃鼓勵的，不是吃責罵的」。研究最重要的是培養追根究柢的能力，找出問題背後真正的原因。這樣的能力，才是學生未來最重要的競爭力。多年來許多學生在產業界與創業領域都有優異表現，也證明基礎研究訓練能夠轉化為高價值的產業能力。

Q 您對於 AI 技術在未來的研究有什麼期許？

AI 對材料研究帶來非常大的改變。首先是在材料設計與篩選方面，大幅提升計算與模擬效率；其次是在同步輻射的大量數據分析上，AI 能快速完成影像辨識與特徵萃取，大幅縮短研究時間。此外，AI 也非常適合應用於設備維護與異常預警。透過感測器與數據分析，可以提前掌握設備老化或故障風險，提高運轉穩定性。未來無論是研究、設備管理或人才培育，AI 都將扮演關鍵角色。對年輕研究人員而言，學習 AI 已經不是選項，而是必要能力。

Q 身為國輻中心董事，您對中心未來發展有哪些期許？

同步輻射中心是國內重要的大型科研設施，基礎設施的持續升級對國家科研發展至關重要。我認為未來除了持續深耕基礎科學，也應該更積極與產業界連結。同步輻射擁有世界級的分析能力，若能聚焦產業真正需要解決的問題，將能創造更大的社會影響力。此外，中心也應建立更多跨領域交流平台，讓研究人員、學界與產業界共同合作。當更多人了解同步輻射技術的能力與價值，就能激發更多創新應用與合作機會。

Q 對剛踏入能源材料或同步輻射研究領域的年輕學者，您想給大家的勉勵是什麼？

我最想說的是：「自己要投入。」不要只追求短期成果，而忽略基礎科學的重要性。許多改變世界的突破，往往來自長期而扎實的累積。研究路上一定會遇到挫折與瓶頸，但不要害怕失敗。每一次困難，都可能成為下一次突破的起點。只要持續投入、保持好奇心，就有機會做出真正有影響力的研究。

發行人 / 徐嘉鴻

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 劉若亞 鄭澄懋 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.nsrc.org.tw>