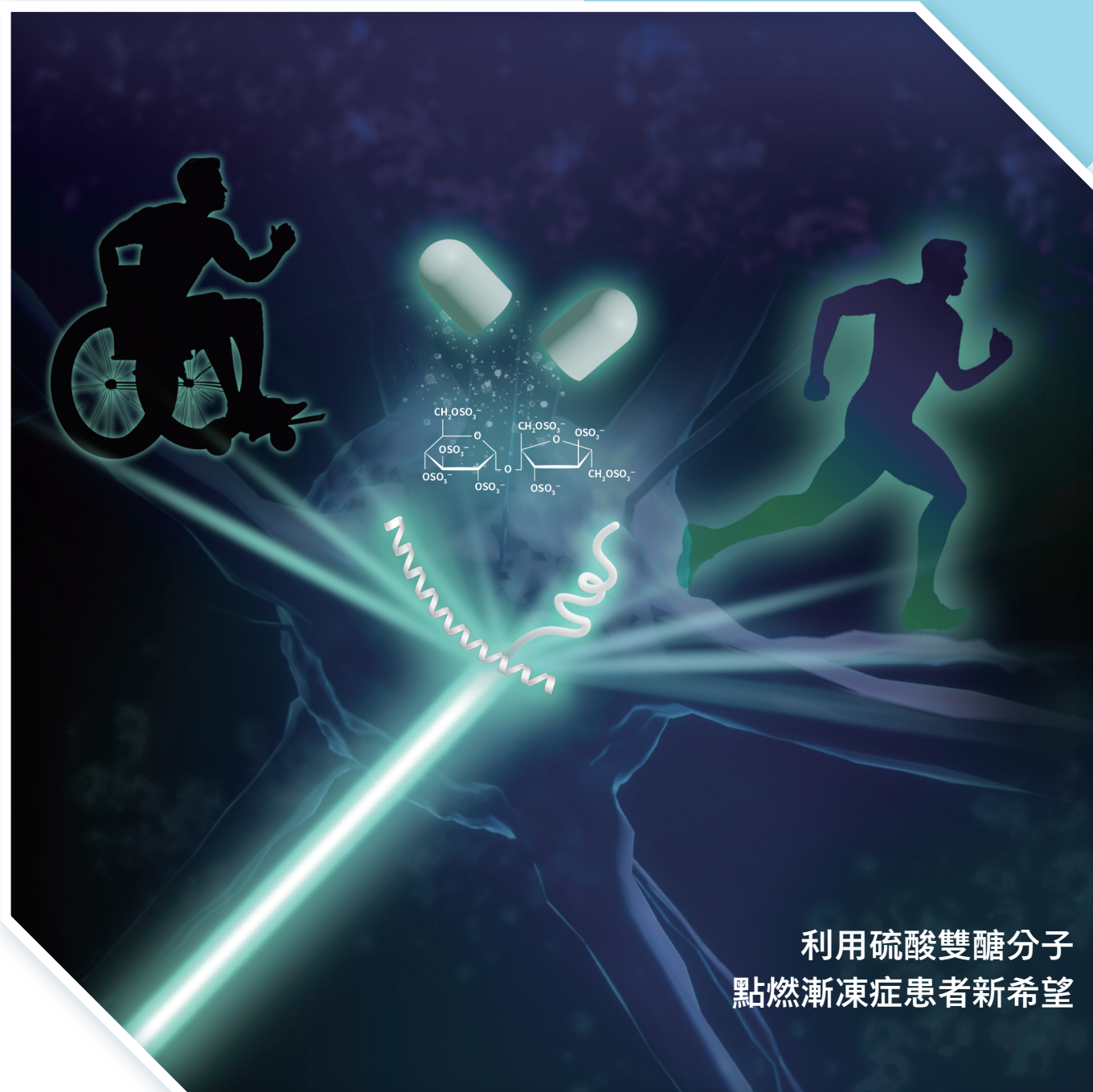




研究專文

硫酸雙醣分子 漸凍人治療新思路



利用硫酸雙醣分子
點燃漸凍症患者新希望

主任的話

科學研究猶如逆水行舟，不進則退，尤其近年來 AI 突飛猛進，帶動了各領域的加速發展。中心除了針對加速器技術及實驗技術不斷精進，也持續建置新的實驗設施，發展新的實驗技術和數據解析方法與流程，我們努力的目標不僅是數據的取得，進一步要轉化數據成有用資訊以解決問題。

過去一年裡，我們有三座實驗設施開放：TPS 15A 微米晶體結構解析光束線、TPS 27A 軟 X 光奈米顯微術光束線和 TPS 32A 柔 X 光吸收光譜光束線；其中 TPS 15A 的單晶繞射和 TPS 32A 的吸收光譜是相對成熟的實驗技術，但是高解析度、高度自動化和多樣化的實驗環境開拓了科學研究的新契機，就等用戶們來充分運用。由淡江大學和中心合作建造的 TPS 27A1 掃描穿透 X 光顯微鏡實驗站擁有奈米級的空間解析度，提供樣品的元素及化學影像資訊，再結合可臨場量測的實驗裝置，對能源、半導體、生醫研究都是如虎添翼。除此之外，中心也積極地往自動化和智慧化推進，提升實驗的效率和精確度，並且整合數據分析的方法學和軟硬體，希望用戶們的每一分力氣都能產生有用的數據，發揮解決問題的作用。這些努力都在默默地持續地進行中。

配合 TPS 光束線的逐步開放，部分 TLS 光束線已開始逐年降載（減少開放時段）或關閉，用戶們宜儘早轉移實驗的重心到 TPS 的實驗設施。從 TLS 到 TPS，雖然實驗技術可能類似，但設施的使用和實驗策略都需要學習和調整。中心籌辦各種研討會和訓練課程，協助用戶平順的轉移並且掌握更廣闊和新穎的研究課題；克服初期的不習慣，迎來的將是更強大的研究能量。去年的用戶年會很遺憾因為颱風而停辦，失去了大家面對面交流的機會，中心會持續辦理各種課程和研討會，學術和技術的交流不會因一次的颱風而延宕。

此外，我要藉此機會感謝甫卸任的 UEC 主席陳浩銘教授和所有委員們的投入，積極扮演橋樑的角色；另外也感謝 PEC 委員們除了針對實驗計畫的審查，同時對實驗時程安排的原則與中心一起研擬改善精進的作法。誠如陳浩銘主席所言，用戶和中心之間的理解和信任是推動中心前進的力量，大家共同的目標就是創造耀眼科學研究成果，而中心是用戶們最好的科研伙伴。

最後，在此一年開始之際，敬祝大家
事事如意，平安喜樂，科研成果收穫滿滿。

重要事務

- 本中心與淡江大學物理系研究團隊於 12 月 20 日共同舉辦「台灣光子源 TPS 27A1 奈米顯微光束線暨掃描穿透 X 光顯微鏡 (STXM) 實驗站啟用典禮」，TPS 27A1 實驗站在國科會支持下，由淡江大學物理系與本中心共同規劃、設計並合力建造，即將提供高品質的軟 X 光光源及具奈米級解析度的化學元素影像功能。啟用典禮首先由本中心徐嘉鴻主任致歡迎詞，隨後淡江大學董事長張家宜博士等貴賓及本中心督導主管進行致詞及揭幕儀式，這一先進實驗設施將為國內外研究者在能源、半導體、磁學及環境科學等多元領域提供重要研究量能。
- 本中心設立的「光環論文獎」，2024 年度由臺灣大學化學系劉如熹特聘教授獲頒第四屆光環論文獎（應用科學領域），該團隊運用同步輻射光源研究「光轉化近紅外線發光二極體」，經過層層評選後，在眾多優秀研究論文中脫穎而出。在國科會與教育部的長期支持下，劉教授多年來專注於材料化學核心技术中的「光轉換光」、「光轉換電」及「光轉換熱」之配方、合成、分析與應用，廣泛應用在光電科技、

安全防偽、農業技術、生醫影像與奈米材料等眾多產業，並獲得多項發明專利與技轉。

- 本中心產業應用組憑藉其「加速器光源設施產業應用服務平台與推動」的卓越策劃、推動與執行成效，參選中華民國科技管理學會第二十六屆科技管理獎，並榮獲「2024 年科技管理學研團隊獎」。為因應來自產業界使用同步加速器光源及相關技術需求，本中心於 2021 年成立「產業應用組」，下轄「產業企劃室」與「產業推動小組」，分別推動產業應用策略發展與執行產業應用計畫，落實以國家大型加速器光源技術為基礎，齊力突破關鍵產業瓶頸。
- 由本中心主辦的第 19 屆國際小角度散射會議 (SAS2024) 於 2024 年 11 月 3 日至 8 日在台北國際會議中心 (TICC) 盛大舉辦，詳見第 10 頁報導。
- 科睿唯安 (Clarivate Analytics) 近期公佈 2024 年度「全球高被引學者」(Highly Cited Researchers) 名錄，臺灣共有 12 名研究人員上榜，包含本中心用戶臺灣大學化學系陳浩銘特聘教授及陽明交通大學應用化學系洪崧富助理教授入選「化學」領域項目、臺灣科技大學化學工程系黃炳照講座教授入選「跨領域」項目。

硫酸雙醣分子可修復蛋白質增益毒性 漸凍人治療新思路

陳韻如研究員 / 張育仁博士
中央研究院基因體研究中心



中央研究院基因體研究中心陳韻如研究員暨副主任（前排左六）、張育仁博士（前排右二）與研究團隊。

肌萎縮性側索硬化症，俗稱漸凍症（Amyotrophic Lateral Sclerosis，簡稱 ALS），是一種罕見但致命的運動神經元退化性疾病。雖然說是罕見疾病，但是實際案例常常在生活周遭被提及。這種病症會逐漸削弱患者的肌肉控制能力，導致行動、說話、吞嚥甚至呼吸的困難，嚴重影響了患者生活的各個層面。隨著病情進展，它殘酷地奪走了患者控制自己身體的能力，卻又讓他們頭腦清晰地意識到這一切的發生，最終生命沉沒在一場凍結的悲劇之中。本文將簡介有關漸凍症的成因、病徵、與治療現狀，以及本團隊在這一領域的最新研究進展。

揭開漸凍症的神秘面紗

漸凍症是一種影響運動神經元的神經退化性疾病。運動神經元是負責傳遞大腦指令至身體肌肉的神經細胞，這些細胞的損失會直接導致肌肉的無力與萎縮。這意味著患者的每一個動作，甚至每一次呼吸，都可能變成奢侈。而根據受影響的神經元位置，這種病症的進展速度因人而異。但一般來說，患者在出現症狀後的存活期約為 2 至 5 年。然而，也有部分患者，例如著名物理學家史蒂芬·霍金能存活超過 10 年甚至更久。

漸凍症的病理特徵

蛋白質因錯誤折疊而產生的異常堆積是眾多神經退化疾

病（neurodegenerative diseases）的病理特徵。在漸凍症中，異常堆積的 TDP-43 蛋白會損害神經細胞的正常功能，進而導致神經元死亡。此外，氧化壓力、粒線體功能障礙以及細胞內鈣離子失衡也都是科學家們探討的病理機制。然而，目前漸凍症尚無有效的治療方法，只有一些藥物可以些微緩解症狀並延緩病情進展，例如銳力得（Riluzole）。它是一種抑制氫氨酸釋放的藥物，可減少神經的興奮性毒性，但也只能稍微延長患者 3-6 個月的壽命。另一種藥物為依達拉奉（Edaravone），它是藉由減少細胞的氧化壓力來減緩神經元損傷。在支持性療法方面，可以利用物理治療來改善肌肉狀況，減輕病人發生痙攣的情形。或是日常生活中患者利用輔具改善生活條件，以及隨著呼吸相關肌肉的衰退，氣切手術及呼吸維持器的使用，都有助於患者維持呼吸的正常功能，但也同時大大加重了患者的負擔以及照護的困難度。因此，漸凍症急需新穎藥物的開發，其藥物市場仍有著相當大未被滿足的醫療需求（unmet medical need）。

然而，漸凍症的成因至今仍未完全被解開，科學家們也面臨著巨大的挑戰。目前的研究顯示，大於 90% 以上的漸凍症病例為偶發型，意即沒有明顯的家族遺傳病史，使其致病機制更為複雜。也意味著疾病的觸發可能涉及多種環境和基因交互作用，病理特徵上明顯表現出異質性。且目前尚缺乏合適的動物模型和細胞模型來進行研究，這種種的原因使得對於漸凍症的理解和治療進展產生極大的挑戰。雖然大約

只有小於 10% 的漸凍症病例具有家族遺傳性 (familial ALS)，但家族型漸凍症的病因通常與已知的基因突變密切相關。這些基因的異常提供了明確的切入點，幫助研究者深入了解疾病的分子機制。在家族型漸凍症中最常見的基因突變是 C9ORF72 基因的異常，其他相關基因也包括 SOD1、TARDBP 和 FUS 等。此次研究中，本團隊即是針對 C9ORF72 這個基因突變來進行漸凍症的相關研究。

C9ORF72 基因突變與漸凍症的關聯

C9ORF72 基因突變是目前已知於漸凍症最常見的遺傳因素之一，在家族型漸凍症的案例中佔比高達 40%。此基因位於人類第 9 號染色體 (9p21.2)，其正常功能包括參與細胞內運輸、自噬作用和免疫調節功能。在 2011 年，研究首度發現 C9ORF72 基因中的六核苷酸重複擴增 (GGG-GCC, G4C2) 與 ALS 呈現顯著相關 [1, 2]，成為家族型漸凍症的主要致病因子之一。在正常情況下，健康個體的 G4C2 重複數量通常小於 20 次。然而在 C9ORF72 相關家族型漸凍症患者中，重複數量可達數百至數千次，導致基因表達和細胞功能的異常。關於精確會造成病理現象的 G4C2 重複次數目前仍尚待更多的人類基因體定序研究，然而可以發現到重複次數的增加會提高患病的風險，而 C9ORF72 基因突變的病理機制可能主要藉由三種病理途徑來產生。其一，G4C2 在 C9ORF72 基因中的重複擴增可能導致基因本身的表達下降或喪失，對神經元造成損傷。其二，G4C2 重複擴增的 RNA 轉錄後會形成異常的二級結構，這些結構能捕捉 RNA 結合蛋白，干擾正常的 RNA 代謝和細胞功能。其三，也是目前學界普遍認為的主因，G4C2 重複擴增會觸發一種非典型的蛋白質轉譯過程 (RAN translation)，因而產生五種異常的雙勝肽重複序列 (Dipeptide Repeats, DPRs)，包括了聚甘胺酸 - 丙胺酸 (poly-glycine-alanine, poly-GA)、聚甘胺酸 - 精胺酸 (poly-glycine-arginine, poly-GR)、聚甘胺酸 - 脯胺酸 (poly-glycine-proline, poly-GP)、聚脯胺酸 - 精胺酸 (poly-proline-arginine, poly-PR) 和聚脯胺酸 - 丙胺酸 (poly-proline-alanine, poly-PA)。在 C9ORF72 相關家族型漸凍症患者的海馬迴、額葉和運動皮質層、脊髓和小腦中，都可發現這些雙勝肽重複序列所造成的蛋白質異常堆積。先前，本團隊與國輻中心鄭有舜研究員合作 (TLS 23A1 BioSAXS/WAXS 光束線)，發現 poly-GA 會形成具有毒的類澱粉蛋白質纖維，而 poly-GA 的纖維化聚集會在細胞之間進行傳遞及擴散，這是首度發現 poly-GA 具有類澱粉蛋白的性質，為神經退化性疾病提供了一項有關蛋白質錯誤折疊的佐證，此論文已於 2016 發表在國際期刊 Journal of Biological Chemistry [3]。除了 poly-GA 之外，poly-GR 和 poly-PR 這兩種富含精胺酸的雙勝肽重複序列，被認為是最具毒性的兩種雙勝肽重複序列。目前有關於 poly-GR 和 poly-PR 的毒性機制仍在積極研究中，可能的機制包括引起核仁壓力、阻塞核仁孔的運輸、破壞核醣體與 RNA 的合成、降低粒線體功能和抑

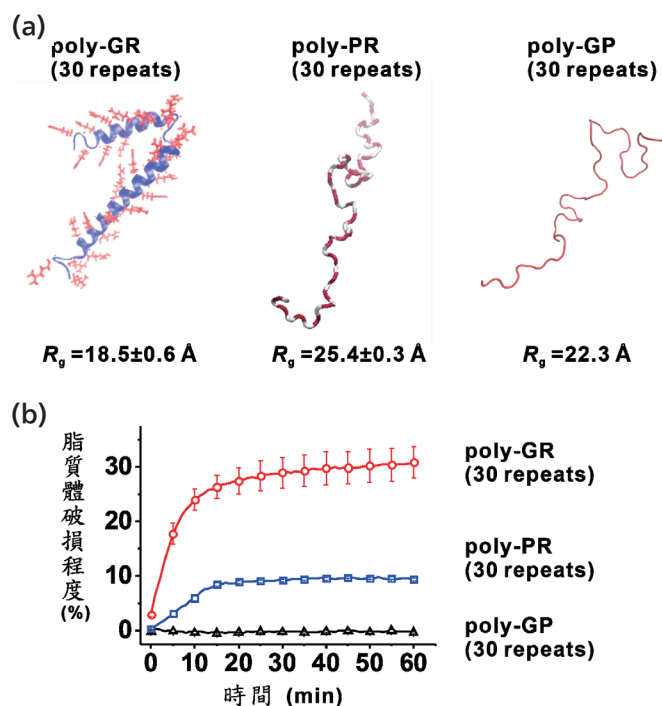
制蛋白質轉譯。然而關於 poly-GR 和 poly-PR 的長度與其細胞毒性之間的關聯也尚待釐清。

與國輻中心合作，解析雙勝肽重複序列的基本結構

為了闡明雙勝肽重複序列的毒理機制，本團隊在這次的研究中，使用化學合成的雙勝肽重複序列來檢驗 poly-GR 和 poly-PR 產生細胞毒性所需的最小長度。我們並再次與國輻中心鄭有舜研究員攜手合作，利用圓二色譜光譜和小角度 X 光散射 (SAXS) 結合分子模擬技術，首次發現了 poly-GR 在水溶液中產生了螺旋結構，而 poly-PR 的結構相較為之鬆散且不規則 (圖一)，由於 poly-GR 和 poly-PR 在胺基酸組成上高度重複，其結構的資訊更顯得來不易。並且 poly-GR 的螺旋結構暗示了其對於生物膜的穿透作用，於是本團隊利用脂質體泄漏 (liposome leakage) 和鈣流入 (Calcium influx) 兩項實驗證實了 poly-GR 對於細胞膜和核膜的破壞。此外，我們也進一步研究了 poly-GR 和 poly-PR 對 DNA 複製、RNA 轉錄或蛋白質轉譯的抑制以及在細胞中核質運輸的破壞。

成功篩選出可中和雙勝肽重複序列的硫酸雙醣分子

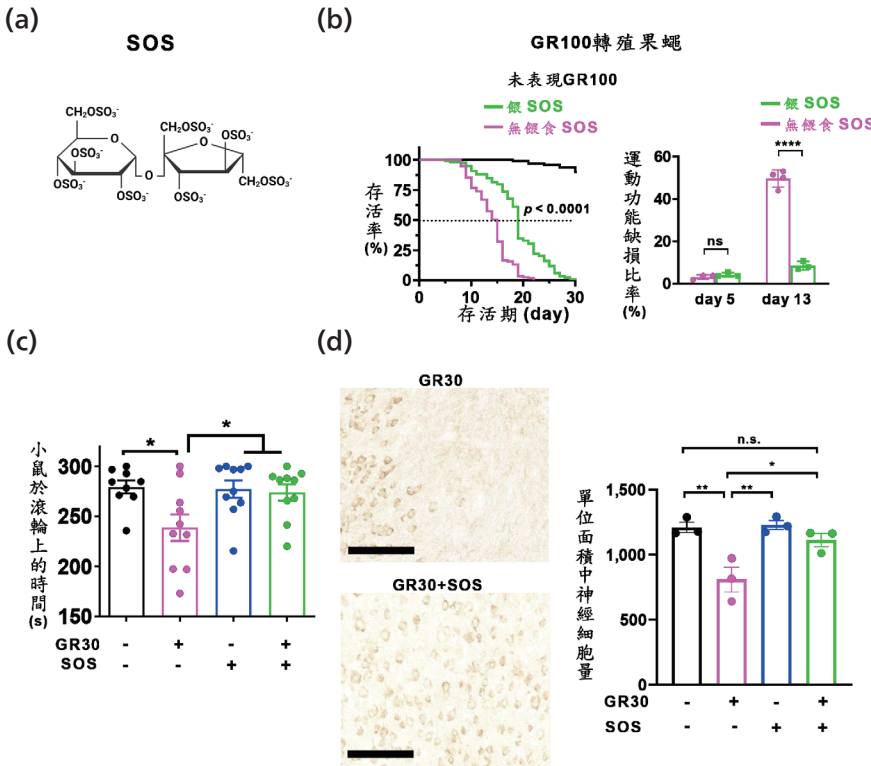
接著，本團隊利用中研院基因體中心洪上程特聘研究員獨有的雙醣分子庫及外購雙醣分子，篩選出了一種具硫酸化的雙醣可以中和上述提到的毒性，並在不同層級的生物模式



圖一 Poly-GR、poly-PR 及 poly-GP 以小角度 X 光散射結合分子模擬技術所得的結構與其破壞脂質膜的程度。(a) Poly-GR 於水溶液中呈現鬆散螺旋狀，相較於 poly-PR 及 poly-GP 的不規則的構型，可反應在 (b) 破壞脂質體的程度。[4]

中都證實這個硫酸化雙糖在醫藥方面的可能性，例如我們自漸凍症病人身上取得的多功能幹細胞分化而成的運動神經元，發現這個硫酸雙糖分子可以增加此類神經元存活率。我們在具有 poly-GR 和 poly-PR 基因轉殖的果蠅模型上，發

現這個硫酸雙糖分子可以延長其壽命和改善其運動功能（圖二）。最後，若我們在小鼠腦部運動皮層注射 poly-GR 會看到小鼠運動功能的退化，利用共同注射這個硫酸雙糖分子我們亦可以中和這個現象（圖三）。



圖二 硫酸雙糖分子 SOS 可延長果蠅壽命、改善果蠅和小鼠的運動功能。(a) 硫酸雙糖分子 SOS 的化學結構式。(b) SOS 可延長 poly-GR100 轉殖果蠅的壽命，並且改善因 poly-GR 所受損的運動功能。(c) SOS 可維持小鼠因注射 poly-GR 於腦部而受損的運動功能。(d) SOS 可保護小鼠因注射 poly-GR 於腦部而受損的神經細胞。[4]



圖四 陳韻如研究員（右）與國家同步輻射研究中心鄭有舜研究員（左）合影。

未來展望

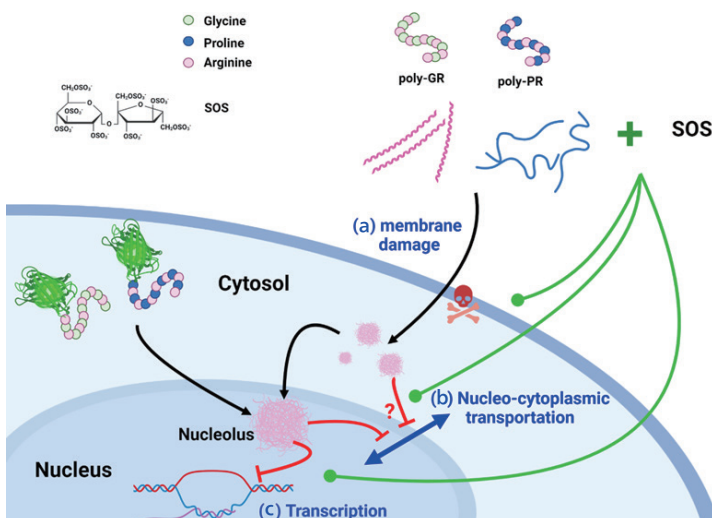
目前團隊正積極研發新穎硫酸醣分子，並改善疾病小鼠模式。我們期待更多的科學研究能為漸凍症帶來真正的突破，也為日後藥物的發展找尋契機，讓備受煎熬的漸凍症患者看到長久以來難得的曙光，也期許更多青年學子可以加入我們的行列。本研究成果已於 2024 年發表於國際頂尖期刊 Science Advances [4]。

致謝

我們衷心感謝國輻中心鄭有舜研究員及團隊，提供卓越精良的 TPS 13A 及 TLS 23A1 生物結構小角度 X 光散射 (SAXS) 光束線實驗站，以及在實驗站優秀的人員，包括林楷泰先生、施怡之博士、葉奕琪博士、廖桂芬小姐、林典樟先生、張哲璋博士及蘇群仁博士，一路以來在實驗及數據分析上給我們各項協助及指導，希望這樣的合作能持續產生新的火花，為造福神經退化性疾病的患者盡一份心力。

相關文獻

1. M. DeJesus-Hernandez *et al.*, *Neuron* **72**, 245 (2011).
2. A. E. Renton *et al.*, *Neuron* **72**, 257 (2011).
3. Y. J. Chang *et al.*, *J. Biol. Chem.* **291**, 4903 (2016).
4. Y. J. Chang *et al.*, *Sci. Adv.* **10**, eadj0347 (2024).



圖三 Poly-GR、poly-PR 致病機制與硫酸雙糖分子藥物作用。Poly-GR 和 poly-PR 皆顯示會 (a) 破壞細胞膜，其中長鏈的 poly-GR 具螺旋狀構型，更增強此效應。進入細胞後，將 (b) 抑制核 - 質之間的運輸機制。poly-GR 和 poly-PR 最終會進入細胞核，尤其在核仁可看到大量 poly-GR 和 poly-PR，進而 (c) 抑制轉錄作用。而在加入硫酸雙糖分子 SOS 後，細胞毒性會因為 SOS 與 poly-GR/-PR 的結合而降低，增加細胞的存活率。

反向部分螢光產率技術於軟X光吸收光譜之應用

何樹智博士

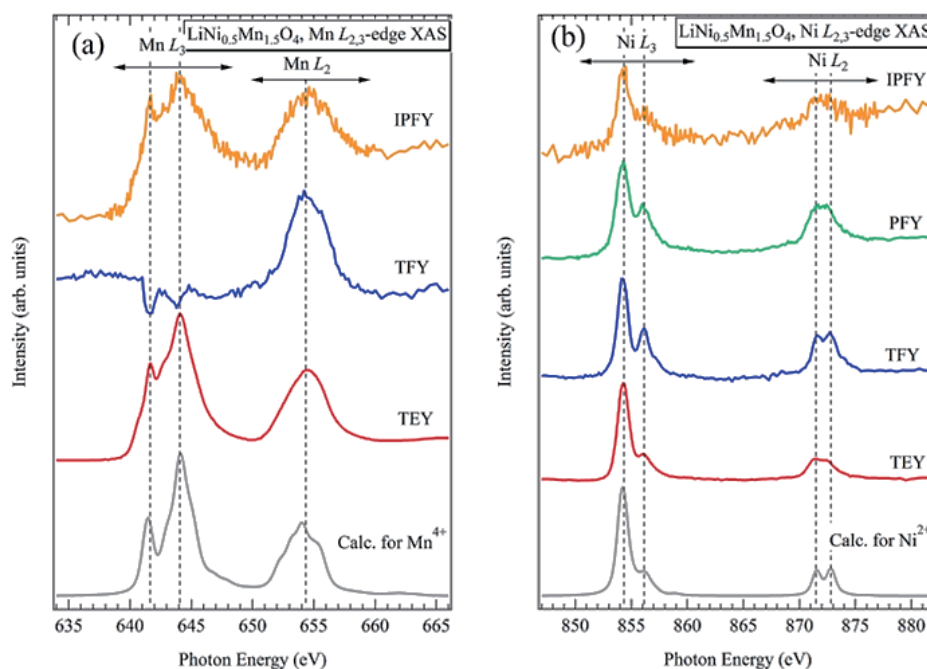
國家同步輻射研究中心奈米科學小組

X光吸收光譜 (X-ray Absorption Spectroscopy, XAS) 中的 X 光吸收近邊結構 (XANES) 已廣泛應用於生物學、材料科學和表面科學，主要用於研究樣品中特定元素的電子結構和局域對稱性。XAS 的數據收集方式主要有穿透、螢光產率 (Fluorescence Yield, FY) 和電子產率 (Electron Yield, EY) 模式。穿透模式雖為最直接的測量方法，但由於軟 X 光 (100 - 3000 eV) 在材料中的快速衰減，限制了可測量樣品的厚度 (約 100 奈米)，因此較少使用於軟 X 光吸收研究中。EY 訊號主要來自材料表面，其靈敏度約為 2 - 20 奈米，而 FY 訊號則對材料內部更為敏感，其靈敏度受入射和放射光子的穿透深度影響 (約 100 奈米)。雖然 FY 模式具有較高的訊雜比，但由於自吸收效應限制了其應用範圍。

軟 X 光吸收實驗通常利用微通道偵測器 (Multi-Channel Plate, MCP) 測量總螢光產率 (Total Fluorescence Yield, TFY) 和利用電錶測量總電子產率 (Total Electron Yield, TEY)，是測量 FY 和 EY 吸收訊號的簡單有效方法。TEY 訊號包括由 X 光激發後釋放的二次電子、歐傑電子和光電子所組成。當 X 光照射樣品時，內層電子被激發後形成的空位會被較高能階電子填補，並伴隨螢光 X 光的釋放，

螢光 X 光的強度與入射 X 光的吸收量成正比。在 TFY 模式下，MCP 偵測器收集由樣品中原子產生的所有螢光 X 光。然而，入射 X 光的吸收和放射螢光 X 光的再吸收會導致 MCP 測得的螢光數量與吸收係數之間呈現非線性關係，此稱為自吸收效應 [1-5]。自吸收效應通常會使吸收光譜形狀偏離理想狀況，從而影響對鍵結狀態和局域結構的定量分析。

鋰離子電池 (LIBs) 的電極材料電子結構分析對於研究其充放電特性並提升電池性能至關重要。LIBs 的正極材料通常由 3d 過渡金屬 (TM) 氧化物或磷酸鹽構成，鋰離子在材料中的嵌入與遷移行為決定了電極的電化學性能。因此，活性元素的電子結構分析是 LIBs 研究的核心。然而，由於電極片表面易受污染，利用對表面態敏感的 TEY 吸收訊號來全面了解正極材料的電子結構存在挑戰。為此，穿透深度較大的 TFY 吸收訊號成為有效的分析方法，但必須克服自吸收效應才能獲得準確的光譜。以 $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ 電極材料為例 (圖一)，在 Ni $L_{2,3}$ -edge 和 Mn $L_{2,3}$ -edge 的 XAS 中，Ni L_{3} -edge (圖一 (b)) 的 TFY 吸收峰相對強度與 TEY 存在顯著差異，甚至在 Mn L_{3} -edge (圖一 (a)) 的情況下 TFY 會出現負吸收強度的現象。這些現象由自吸收效應引起，導致

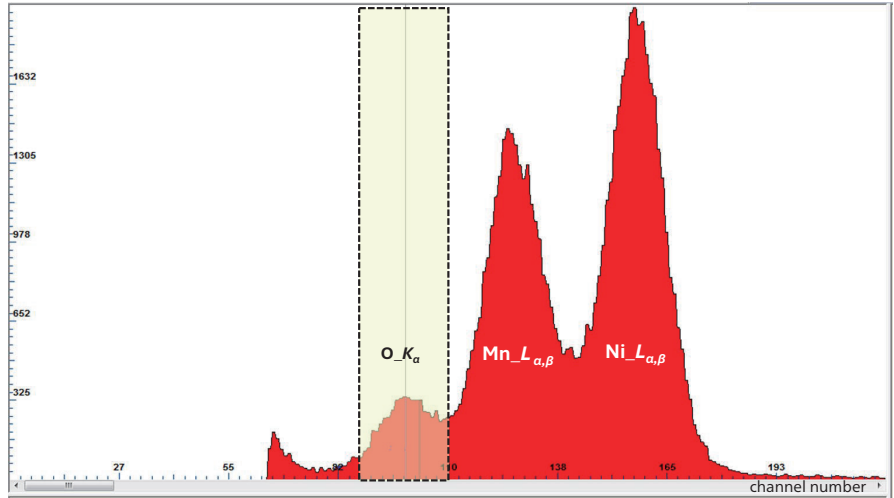


圖一 $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ 電極材料的研究，透過不同偵測模式 (TEY、TFY、PFY、IPFY) 所取得的 (a) Mn $L_{2,3}$ -edge 和 (b) Ni $L_{2,3}$ -edge XAS。[3]

(a) Experimental setup for IPFY mode@TLS 20A beamline



(b) Example of X-ray emission lines from a compound containing O, Mn, and Ni, detected using an SDD



圖二 (a) 在光束線 TLS 20A 利用 SDD 收集 PFY 吸收光譜的實驗設置圖；(b) SDD 所收集到來自待偵測材料中所有元素的 X 光放射圖譜。

無法準確分析活性元素在材料體態中的電子結構。此外，PFY 模式是通過矽漂移探測器 (Silicon Drift Detector, SDD) 選擇性地測量來自同一吸收元素所釋放的放射 X 光 (Resonant X-ray Emission, RXE) 強度隨入射光能量的變化。但由於共振吸收效應，PFY 模式也會受到自吸收效應的影響。圖一 (b) 中，Ni L_{3} -edge 的 PFY 吸收峰相對強度與 TEY 相比，顯示出明顯的差異。

為消除自吸收效應，FY 模式下可採用反向部分螢光產率 (Inverse Partial Fluorescence Yield, IPFY) 技術 [2,4]。圖二 (a) 顯示了光束線 TLS 20A 利用 SDD 收集 PFY 吸收光譜的實驗設置。在 IPFY 模式下，SDD 偵測器同樣用於測量吸收光譜，但與 PFY 不同的是，IPFY 是測量待測材料中非共振放射 X 光 (Normal X-ray Emission, NXE) 強度隨著入射光能量的變化。舉例而言，若欲測量含鎳錳過渡金屬氧化物中的 Ni $L_{2,3}$ -edge IPFY 訊號，可利用 SDD 鎖定 O 的 K_{α} 放射線能量，並測量其強度隨入射光能量的變化 (如圖二 (b) 所示)。另外，對於單原子材料，如 3d TM 的 K -edge IPFY 訊號，可以通過 SDD 鎖定其 $L_{\alpha,\beta}$ 放射線能量並測量其強度隨入射光能量的變化。NXE 訊號的倒數即為 IPFY，並且與 X 光的線性衰減係數有關，這一函數關係可表示為方程式 (1)。

$$IPFY = A(\mu(E_i) + B) \quad (1)$$

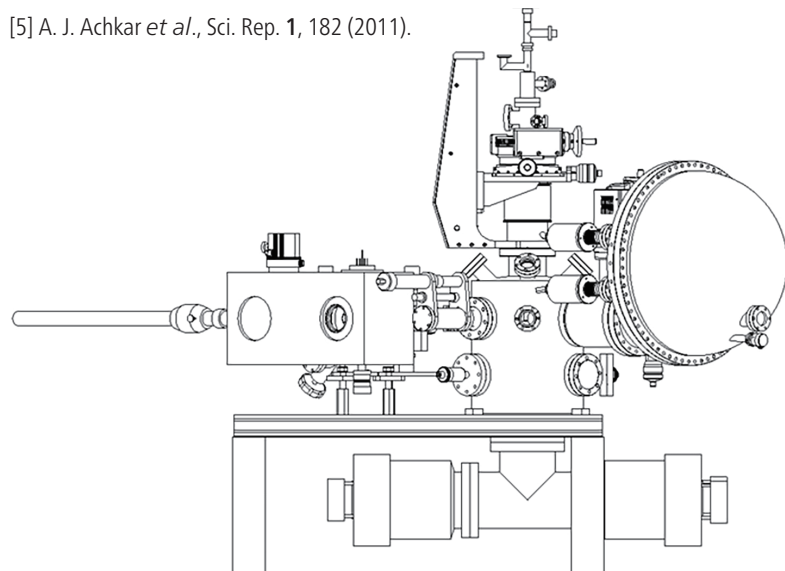
其中 $A = 4\pi / [\eta(E_f)\Omega\omega_y(E_f)\mu_y(E_i)]$ ， $B = \mu(E_f) \cdot \sin\alpha/\sin\beta$ ， y 為內層電子， A 和 B 可近似為常數； E_i 和 E_f 各為入射光和放射光能量， α 和 β 各為入射光和放射光與樣品間夾角， Ω 和 $\eta(E_f)$ 為 SDD 偵測器之立體角和偵檢效益， $\mu_y(E_i)$ 為來自

核電子 y 對總線性吸收係數的貢獻， $\omega_y(E_f)$ 為電子填補原空缺 y 時於能量 E_f 發生螢光的機率。

透過 IPFY 技術，不僅能成功收集 3d TM $L_{2,3}$ 吸收邊的螢光訊號，進而獲取其在材料體態中的電子結構信息。若同時收集對材料表面態敏感的 TEY 訊號，則能深入探討 TM 元素在材料表面與內部的電子結構演變行為。目前，雖然 TLS 20A 已導入 IPFY 技術，但由於受限於現有超高真空實驗腔體的設計及較弱的入射光強度，尚未能提供用戶便捷操作和訊號最佳化的理想使用環境。然而，IPFY 技術預計將成為未來 TPS 35A 開放給用戶的關鍵技術之一。

參考文獻

- [1] K. Yamanaka. *et al.*, *Electrochemistry* **86**, 128 (2018).
- [2] H. Wadati *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **100**, 193906 (2012).
- [3] D. Asakura *et al.*, *AIP Adv.* **6**, 035105 (2016).
- [4] A. J. Achkar *et al.*, *Phys. Rev. B* **83**, 129901 (2011).
- [5] A. J. Achkar *et al.*, *Sci. Rep.* **1**, 182 (2011).



毫米波地熱鑽探計畫(上)

張嘉君博士 / 歐懿中博士
國家同步輻射研究中心高頻小組

編者按：運用加速器技術加速電子可以產生同步輻射光，加速器技術也可以運用在許多領域，例如：磁鐵技術運用在半導體離子佈植機和醫學重離子治療。接續兩期的加速器專欄，我們將介紹運用加速器毫米波技術來進行地熱鑽探計畫，本期說明台灣地熱優勢和傳統開採方法，下一期接續介紹運用毫米波鑽探技術的優勢與挑戰。

台灣地熱能源的崛起與傳統開採技術解析

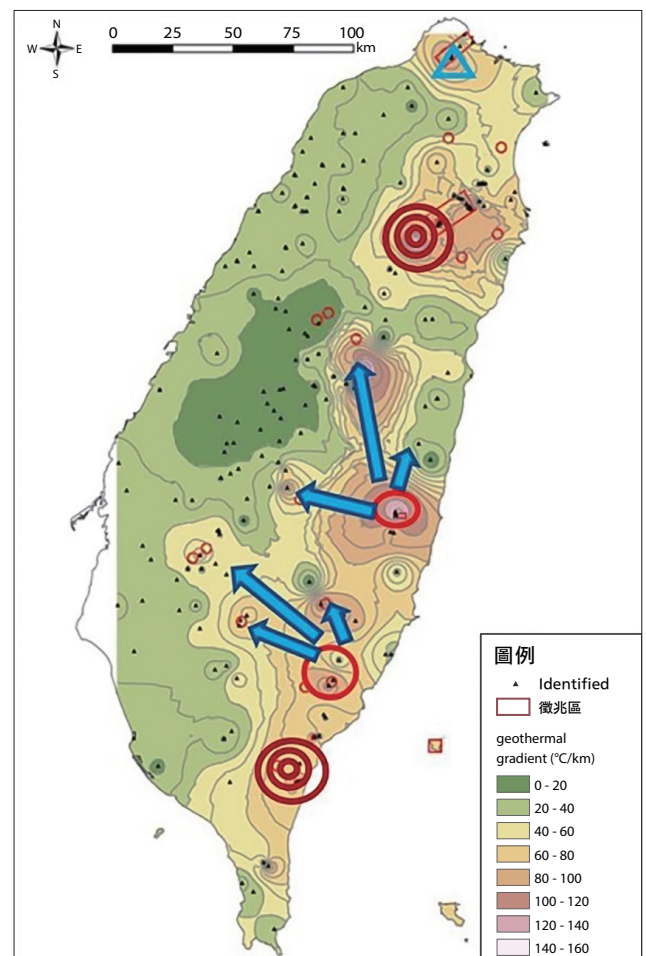
台灣位於環太平洋火山帶，地質活動頻繁，火山及板塊運動讓我們得以坐擁豐沛的地熱資源。大屯山、宜蘭、花東和廬山等地，不僅是潛力無窮的地熱發電場域（圖一），更是享譽盛名的溫泉勝地。據過去研究，台灣的地熱開發潛力高達 33.6 GW [1]（十億瓦）（核三全運轉發電量為 1.9 GW [2]），若考量土地開發之可行性，亦有 6 GW 的潛能 [1]。地熱作為一種乾淨的再生能源，不只能有效降低溫室氣體的排放，且相較於太陽能與風力發電，地熱發電較不受氣候的影響，對環境的衝擊也更低，同時還能提高能源的自主性，對於目前高度仰賴進口能源的台灣而言，更是意義深遠（2023 年度進口的能源占比高達 96.7% [3]）。

然而，台灣乃至於全球的地熱發電總量仍舊微不足道，究其原因，主要是技術層面上的掣肘。傳統的地熱開採技術雖然已十分成熟，但仍有鑽探成本高、效率低、以及地質條件複雜與誘發淺層地震等問題，這讓地熱在與其他能源的競爭中明顯位居劣勢。但隨著科技的日益進步，科學家們努力探索新的鑽探方法，以提升地熱的開採效率和降低成本，期待地熱能在未來的能源版圖中佔有一席之地。

地熱的來源是地球內部的高溫熔岩，這些源源不絕的熱能可以透過技術以蒸氣的形式被帶到地表，驅動渦輪發電機發電供大眾使用。平均而言，地表每下探 1 公里，溫度升高約 25 °C。因此，若要取得更豐沛的地熱資源，我們需要挖更深的井，將探索能源的雙手深入地下的高溫區域。

「非知之艱，行之惟艱」，挖深井以汲取深層地熱正是如此。傳統的地熱開採方式需要利用鑽頭穿透地表岩層，到達地下的高溫區域，這些區域通常位於數千米的深度。隨著鑽探深入，岩層硬度不斷增加，因此鑽探高硬度岩層無疑成為此過程中的一大技術挑戰。傳統的鑽探方式一般使用金屬製的可旋轉鑽頭，一邊旋轉的同時一邊將岩石切割破碎，如

同調理機一般將堅硬的岩石打成較小的碎片，接著再用配重後的循環泥漿（通常由水、黏土、化學添加劑和其他材料組成）將岩石碎屑帶出井口。然而，當鑽頭遇到更為堅硬的岩層時，這種方式往往力不從心，不但大幅拖慢鑽探速度，還會使鑽頭嚴重磨損。此外，地下深處的高溫高壓對於器械和設備亦是一大損害，不但使金屬鑽頭軟化加速磨損，還會讓監測設備失效，影響地質數據的採集。若遇到強酸氣體溶於水中形成的酸性地下水 [4]，那更是為這場挑戰雪上加霜。長時間接觸不但會腐蝕器械，令其耗損加劇，進一步推高維護成本。因此，如何突破技術瓶頸，提升鑽探效率，成為深層地熱開發領域中亟待破解的關鍵。

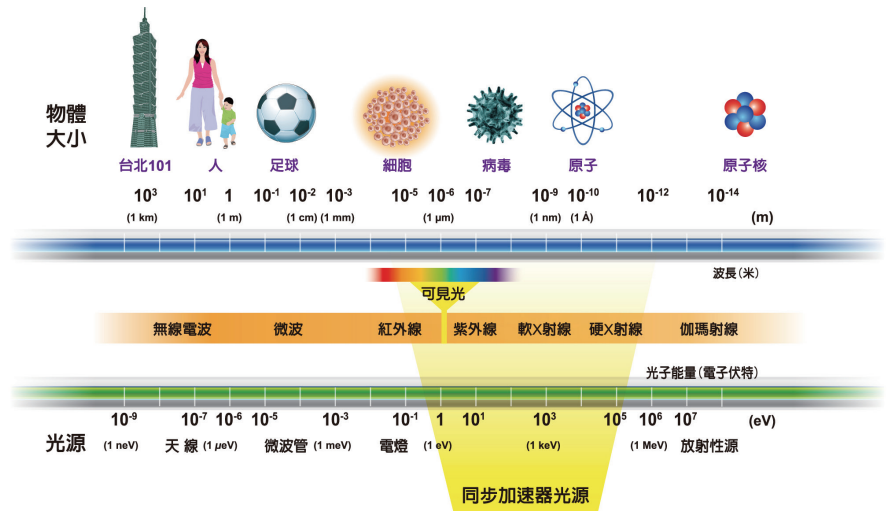


圖一 台灣地溫梯度分布。紅圈：現有地熱潛能探勘場域；藍色箭頭：擴展至其他地區；紅色同心圓：配合現有開發場址擴增 [1]。

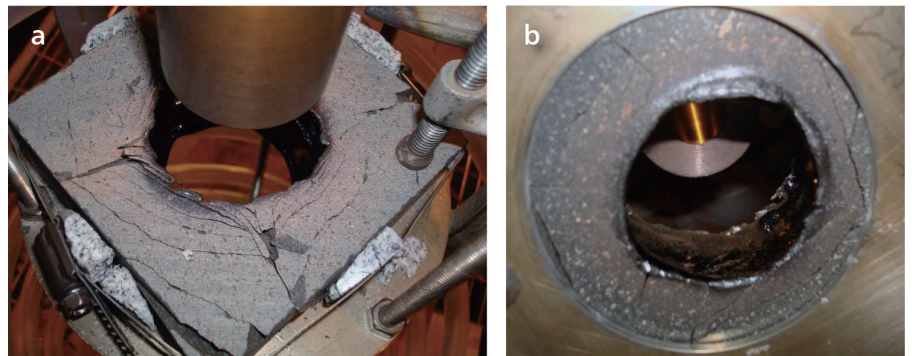
毫米波的生成機制及在地熱開採上的應用

跳脫傳統鑽探模式，或許可以得到解方。Quaise Energy 是一家美國新創的能源公司，致力於地熱開採的革新技術－毫米波鑽井技術，旨在突破傳統開採方法的限制。這項創新技術源於麻省理工學院的研究 [5]，並由該校的專家團隊將其商業化。毫米波鑽井技術利用磁旋管 (gyrotron) 生成毫米波，通過非接觸的方式鑽鑿地熱深井，以開發地表深處的高溫地熱資源。磁旋管是一種特別的裝置，可產生高頻率、短波長及高能量密度的連續 (Continuous Wave, CW) 毫米波。毫米波是波長介於 1 毫米至 10 毫米之間的電磁波，若換算成頻率，其範圍為 300 GHz 至 30 GHz，屬於微波 (頻率 300GHz 至 300MHz) 頻譜中的高頻部分 (圖二)。毫米波的頻率低於紅外線和可見光，高於無線電波。因其高頻率和高能量密度的特性，毫米波在智能家居、醫療診斷、自動駕駛、通訊技術和科學研究等領域都有著廣泛的應用。而在地熱鑽探領域中，毫米波的波長範圍十分理想，因為它的波長夠長，較不會被環境中漂浮的灰塵所遮蔽和散射；而它的波長又夠短，可顯著提高表面岩層加熱的功率密度。因此，高平均功率的毫米波源有望成為一種新型的鑽探技術。

磁旋管的結構主要由五個部分組成：磁控管電子槍、共振腔體、電子束收集器、高斯波束發射器以及磁鐵 (用來產生直流軸向的磁場)，其工作原理是利用「電子回旋共振效應」產生電磁波。毫米波在磁旋管腔體內形成後，需要通過導波管進行傳輸。導波管是一種專門用來傳送電磁波的裝置，它能有效地傳輸與隔離電磁波，並減少在傳輸過程中的能量損耗。在地熱鑽探的應用中，導波管可將高功率的毫米波長距離傳輸至鑽鑿的井底，照射目標岩層，避免毫米波在空間中發散 (圖三)。而當岩層吸收毫米波時，會迅速升溫；而如果毫米波束的功率夠高，便可氣化岩石，達成向下鑽探的目的。



圖二 毫米波是波長介於 1 毫米至 10 毫米之間的電磁波，屬於微波頻譜中的高頻部分。



圖三 實驗中 28 GHz 的磁旋管毫米波束經由孔徑為 20 毫米的銅製導波管照射至岩石表面 (距發射口 35 毫米)，穿透了 10 公分見方、厚度達 3.1 公分的玄武岩樣品。光束功率從 1.6 千瓦增加到 4.5 千瓦，歷經 41 分鐘。左：樣品俯瞰圖顯示燒蝕孔徑為 52×49 毫米；右：底部蝕出孔徑稍小，為 45×43 毫米。該實驗預先在岩石樣品中央鑽一個直徑 12.7 毫米的洩漏孔，讓熔融的岩石得以順利流出 [5]。

參考文獻

1. 經濟部中央地質調查所「地熱潛力區塊發展條件評估及區域調查資訊擴建計畫」(2022).
2. 台灣電力公司核能營運現況與績效。
3. 經濟部能源局 112 年能源供給概況。
4. Bernt S. Aadnøy, Modern Well Design, 2nd Edition, CRC Press, 141 (2010).
5. K. D. Oglesby et al., Impact Technologies LLC (2014).

第19屆國際小角度散射會議(SAS2024)

鄭有舜博士 / 施怡之博士
國家同步輻射研究中心軟物質科學小組



SAS2024 與會人員合影。

由國家同步輻射研究中心 (以下簡稱 NSRRC) 主辦的第 19 屆國際小角度散射會議 (XIX International Small-Angle Scattering Conference, SAS2024)，於 2024 年 11 月 3 日至 8 日在台北國際會議中心 (TICC) 盛大舉辦。該會議自 1965 年起，每三年舉辦一次，為該領域最大型且最重要的會議之一。本屆會議由主席鄭有舜研究員，科學議程主席莊偉綜副研究員，以及會議事務主席施怡之副研究員聯合中心各組同仁共同籌畫。會議開場由 NSRRC 徐嘉鴻主任致詞，會中並特別邀請蔡明道、林本堅、與牟中原三位院士分別在生物結構、半導體、與生醫等台灣特色研究領域發表主軸演講。本屆會議共有 508 名來自全球 33 國家的與會者，總計 240 場演講與 200 多篇壁報，內容涵括小角散射技術的最新進展及該技術在各個科學領域的廣泛應用。集結與會者成果的會議論文集將刊登於應用結晶學期刊 (Journal of Applied Crystallography)。會中亦規劃陳守信院士追思會，緬懷他在台灣核子科學發展中的開創性貢獻，並邀請「2024 陳守信院士中子科技與應用榮譽講座」得獎人 Prof. Sung-Min Choi 發表講座演講。11 月 6 日下午舉行 Guinier Prize 的頒獎典禮，此獎項自 2002 年開始頒發，授予在小角散射領域中取得終身成就、重大突破或卓越貢獻的學者。本屆由日本京都大學的橋本竹治教授獲得該獎項，並於會中分享得獎演說。隨後進行第 21 屆 SAS 會議的主辦權競標活動，由印度與韓國分別進行競標演講。11 月 7 日下午則安排 200 多名國外與會者參觀 NSRRC 的台灣光子源與台灣光源，兩個小時的參訪行程導覽小角度 X 光散射、軟、硬 X 光影像、同調 X 光散射等相關的 TPS 13A、24A、25A、31A 以及 TLS 23A 等光束線實驗站，使與會

者充分感受這些先進的實驗設施在國際同類設施中的優質競爭力。在參觀行程後隨即前往晚宴會場—故宮晶華，在精采的扯鈴表演與由 NSRRC 同仁組成的貓樂團開場後拉開晚宴的序幕。晚宴中大會宣佈 SAS2030 的得標國為南韓，並和與會者以各國語言輪唱野玫瑰及各國名曲，盡興於文化與科學的融合。11 月 8 日在最後的大會演講之後舉行頒獎典禮與閉幕儀式，將 SAS 會議舉辦信物「接力棒」交給下一屆 (SAS2027) 主辦單位，由瑞典的 MAX IV 同步輻射設施 (MAX IV Laboratory) 與歐洲跨國中子源設施 ESS 共同舉辦。最後 SAS2024 在與會者的掌聲中圓滿落幕。當天下午主辦單位為國外與會者安排了幾項經典觀光行程 (包含陽明山國家公園、九份、野柳 / 北海岸、宜蘭二日遊等四種不同行程)，此活動吸引了約 80 名與會者參與，實際體驗台灣的人文與風貌。

SAS2024 國際研討會所邀請的國外講員皆為國際間知名的專家學者，對於 SAS 最新現況及未來的發展趨勢、課題都有非常深入的討論。此會議不僅增進國際間 SAS 社群的互動，同時也帶動了國內外研究學者的相互認識。藉由會議科學議程的共同籌畫，更擴大加深 NSRRC 與國內 SAS 跨領域用戶的互動與合作。SAS2024 也在會前結合日本北九州大學教授 Kazuo Sakurai 籌畫的 SAS2024 衛星會議 - CeSMS2024 (10 月 29 日至 30 日)，共同互相提攜提升區域性的合作關係，以增加吸引國際學者與會的動力。除此之外，會議主辦團隊亦於 11 月 1 日安排小型會議，並邀請三位 SAS2024 國外講員進行深度交流。用戶會議的前一日 (11 月 3 日) 也安排了 SAS 課程，並邀請了國外知名的 SAS 專家學者來台授課，當天也與美國 NIST 學者 Paul Butler 平行舉辦為期一日的第 14 屆 canSAS meeting。本次藉由主辦 SAS2024 會議結合各周邊議程與活動，以期能統合綜效的大力推廣及提升國內學者及學生在 SAS 技術及研究領域上的認識與應用深度及廣度，讓更多的相關學者有機會認識及投入 SAS 相關的跨領域合作研究，開拓新的研究能量，進而提升台灣在 SAS 技術及研究應用發展的國際貢獻。本會議結束後，收到相當多國內外與會人士對 NSRRC 的設施、國內的 SAS 科學成果、台灣的豐美人文景觀上給了相當高的回饋評價及喜愛，直接反應本次會議實質提升了本中心在國際同步輻射設施及 SAS 社群組織中的評價及能見度，也為台灣帶來不少國際的親善友誼。

用戶執行委員會主席的話



光陰荏苒，轉眼間已經到了我的主席任期尾聲。很榮幸能夠在 2024 年擔任國家同步輻射研究中心用戶執行委員會主席，與中心的團隊以及各位用戶共同努力，見證了中心持續推動科研創新與用戶服務的進步。在這一年中，也因為參與光束線科學計畫審議的緣故，使我更深入了解用戶、行政與科學組之間的緊密關聯性，這三方角色在不同面向中各自發揮效益，但同時也存在矛盾與合作的挑戰。作為橋樑，我試著將用戶的真實經驗帶入中心，希望委員了解計畫主持人在執行實驗時的困難與優勢，期許用戶和中心之間的互動建立更多的理解與信任。

今年，用戶執行委員會為了進一步提升用戶年會的品質，首次嘗試對年會參與者收取註冊費。在做出這項決定前，我們內心充滿不安，擔心此舉可能會降低用戶參加年會的意願。然而，最終的結果卻超出預期，參加人數依然踴躍，充分展現了用戶對年會和同步輻射中心的高度支持。這份支持令人深受感動，更讓我們堅信，大家共同努力的方向是正確的。我要藉此機會，向所有國內用戶表達最誠摯的感謝—感謝你們的理解、參與與信任，讓我們能夠攜手為台灣同步輻射中心的發展創造更光明的未來。

同時，我也要特別感謝中心許紘璋博士對年度用戶年會籌辦工作的卓越貢獻。他在活動的規劃、細節安排及促進用戶參與方面投入了大量心力，其專業與投入對於提升年會品質以及用戶的整體參與發揮了關鍵作用。正是因為有他的努力，這次用戶年會即使面臨挑戰，仍能獲得廣泛支持與高度肯定。然而，令人遺憾的是，原定於 2024 年舉行的年度用戶年會因受颱風影響不得不中止，這是基於確保所有參與者安全的前提下做出的決定，但年會無法如期舉行仍讓人深感不捨。雖然如此，中心將積極尋找其他形式來推進中心用戶間的交流，延續用戶間的合作與學術分享，確保研究的順利進行。

回顧這一年，用戶執行委員會肩負著協調用戶與中心之間溝通的重要角色，努力聆聽用戶的需求，並推動光束線技術與實驗環境的改進。我們也看到，用戶對次世代材料分析技術的需求逐漸增加，中心為此積極投入設備升級與新技術的引入，以滿足科研發展的需要。同時，中心在跨領域合作方面取得了顯著進展，進一步開創了更多合作的可能性。這段期間，我深刻感受到同步輻射研究中心作為國際級研究機

構的責任與價值。即便面對天災與挑戰，用戶的熱情與支持依然未減，這是我們持續向前的重要動力。

最後，我要感謝用戶執行委員會的所有成員，以及中心的每一位研究人員與職員，為用戶提供了專業且高效的 support。展望未來，我相信同步輻射研究中心將繼續引領台灣科學研究的潮流，並在學術與產業的結合上開創更多可能性。在此，誠摯祝願中心以及所有用戶研究順利、身體健康、闔家平安！

陳浩鈞

國家同步輻射研究中心
2024 年用戶執行委員會 主席
2025 年 1 月 15 日

會議/課程

■ 第十六屆國際粒子加速器研討會 (IPAC'25) (6 月 1 日至 6 日)

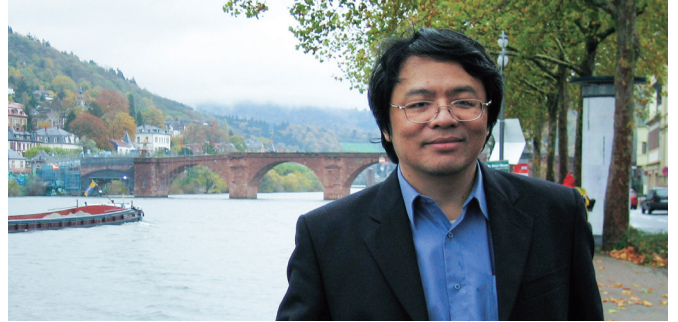
本中心將於台北國際會議中心暨台北世貿中心主辦第十六屆國際粒子加速器研討會 (IPAC'25)，此為全球粒子加速器界的年度最大型會議，將吸引世界各地的頂尖科學家、工程師和產業領袖參與，會議中將探討國際粒子加速器現況、技術突破、未來發展等課題，另規劃展覽以連結國內外廠商與科研機構，促進合作機會，推動技術創新和產業發展。



※ 上述資訊僅供參考，請以網頁正式公告為主。

人物報導

羅國輝前主任專訪



羅國輝前主任

編者按：羅國輝前主任在本中心服務逾三十年，從 TLS 的初期建設至 TPS 的圓滿完成，投入了巨大的心力和熱情。他在加速器建設領域的貢獻卓著，不單局限於 TLS 和 TPS，他的豐富經驗亦經常被世界各國所借重，以解決加速器建造過程中的各種挑戰，對全球加速器的發展做出了重要貢獻。在羅前主任的領導下，本中心不僅科技發展蓬勃，他還積極推動各項科普活動，如促成《追光之旅》專書的出版、科普動畫電影《阿卡的冒險》的製作、IC 之音「光耀台灣專題系列」的專訪，以及與國立自然科學博物館的學術交流和科研合作，使本中心被教育部評選為 20 大科普教育基地之一。此外，羅前主任在本中心產業應用制度規劃與推廣上也不遺餘力。感謝羅前主任透過本期專訪，與我們分享他這三十年來的寶貴見解和經驗，以啟發後輩持續前進。

1. 您當初自美國威斯康辛大學完成學業，立即返國投入台灣光源的建造，能否請您談談當初進入同步輻射研究中心的因緣際會？

就如你所提到的我是從威斯康辛大學取得電機碩士及博士學位，而在這所大學也曾經是擁有全世界第一座同步輻射研究專用的加速器中心 SRC，曾經運作過 Tantalus 及 Aladdin 加速器。國輻中心第一座同步輻射加速器 TLS 在初期的設計階段所採用的磁格，就是參照 Aladdin 的磁格，而且有多位 NSRRC 的第一批學員到此大學接受同步輻射相關實驗技術的培訓。閻愛德前主任及許貞雄教授也曾經在我就學期間到訪考察 SRC 設施及訪視、慰勞受訓學員，這也許開啟了我與國輻中心專業生涯緣份的重要契機。



閻愛德前主任 (右一)、許貞雄教授 (左三)、張秋男教授 (右四) 等人拜訪 UW-Madison 及 SRC。

我的博、碩士論文研究方向，主要與百萬瓦高頻高功率的微波系統相關，主要用於托克馬 (Tokamak) 電漿融合實驗相關及軍艦酬載的脈衝電磁波系統，而在同步輻射電子加速器中也同樣需要用到高功率的微波系統，這也串起來了另一部分的淵源。

回國之前曾與朱國瑞教授聯繫，希望能繼續進行與高頻高功率相關的系統研究，然而在因緣際會之下臺灣大學詹國楨教授提供了一個絕佳的機會，進入了國輻中心儀控小組，主要因為大學物理的專業背景加上研究所電機工程的訓練，對於加速器系統中射束診斷與物理模擬及現象的整合能夠更快速的進入狀況。

2. 早期台灣光源籌建過程中，台灣從完全不懂加速器到決定自建，從無到有，您以電機博士的專業串聯起 TLS 加速器各部門，協調不同子系統，這期間是否有特別難忘的經驗？

台灣光源 TLS 硬體的建造安裝工程，在我進入中心之時，儲存環已接近最後安裝完成階段，同時傳輸線正在進行試車中。在詹國楨教授及劉遠中前主任 (當時為副主任兼技術組長) 的安排之下，直接參與 TLS 儲存環的試車任務，並擔任試車協調的工作。

在試車成功之後，TLS 逐步由加速器的測試優化工作進入運轉的階段，經劉遠中主任指派籌組運轉的工作，繼而成立了運轉小組。也正因為 TLS 是我國自行設計、建造的首座加速器，對於各子系統的穩定度以及介面間的銜接欠缺足夠的經驗，TLS 第一年的加速器可靠度僅勉強達到 ~65%，也算勉強達到及格標準，但是距離世界上其他同步輻射研究設施的可靠度而言，遠遠沒有達標。電子束的穩定度以及用戶等待做實驗的時間都遠低於水準，中心用戶只能耐心等待，加速器同仁則費盡心力的修復系統。畢竟當時全中心共同努力的同仁，充滿了年輕的熱血，並沒有因為經常半夜當機以及不定時的被請到控制室，有所抱怨，而是更認真的想辦法快速修復各個子系統。TLS 在設計建造時即以可置入插件磁鐵的第三代同步輻射設施為設計目標，當時全球只有歐洲 ESRF 及美洲的 ALS 有此全新世代的加速器設計，我們經過 2 年的努力，用戶可用的百分比終於提升到比較穩定的 90% 左右，又經過了 3 年，可用的百分比終於提高到 95% 以上，與世界上其他的同步設施比較毫不遜色。加速器所有同仁的共同努力從無到有，雖然是第三代同步輻射中能量最低的儲存環，但也在世界上佔有一席之地。在這個過程中，經歷立法院大幅度刪減預算，國科會縮減人力，中心

挺過來了，共同的努力及後來用戶快速成長，科學成果逐漸展現。

3 您自 2007 年起擔任 TPS 建造計畫副總主持人，領導加速器計畫的管理、建造及試車等工作，成功引領台灣光子源成為世界最亮光源。您在加速器領域的專業知識、堅毅的個人特質及領導風格，對台灣光子源計畫的成功，有著關鍵性的影響，也因此於 2016 年榮獲國際加速器界最高榮譽西川哲也獎的肯定。請您談談台灣光子源建造過程的酸甜苦辣。

在我們談到 TPS 之前，應該再稍微說明一下 TLS 穩定運轉後，因陳建德院士擔任主任期間，積極爭取經費，進行一系列的直線段插件磁鐵的安裝、儲存環電子束能量提升、全能量注射、恆定電流注射、電子軌道及亮度穩定、儲存電流以及超導高頻共振腔等升級，力求超越世界水平。這一系列的加速器發展，奠基了中心在世界加速器領域能夠站穩腳步的重要過程與里程，坐實 TLS 雖然能量較低、但也是名符其實的第三代同步輻射光源，更向政府證明了中心有能力再往前邁步。TPS 計畫在設計階段即以必須在 X 光能譜範圍，將其發光亮度推向全球同步輻射光源亮度的領先群，這目標均奠基於 TLS 各項紮實的技術研發。

在 TPS 興建計畫向董事會提案討論時，經費以及建造場地二個重大議題，經過激烈的討論，以及銅鑼園區與竹北璞玉計畫場址現地的會勘，加上國科會所能提供的經費並不如預期的寬裕，會勘後李遠哲董事長強烈希望能在原地規劃，以維持與竹科以及清華、交大兩所重點大學研發能量的互動。陳建德院士銜命於卸任主任之前與國科會達成共識，總經費的上限以不超過 70 億台幣為目標，進行設計，其中土木及機電二子項計畫經費需由經建會另行籌措提供。

個人在擔任 TLS 運轉小組長期間，一直希望能有機會從素地、設計階段開始規劃建造一座新的加速器光源，將那些 TLS 運轉初期的種種問題，在新的加速器上能夠先行預防及解決，在 TPS 計畫被政府同意的那一刻，我知道夢想已經逐漸成型，可以在曾任職或帶領參加的計畫，例如：儀控小組、運轉小組、射束動力小組、能量提升計畫、恆定電流注射計畫及超導高頻腔建置計畫等，再加上在秘書室主任或行政組長累積的長期工作與行政經驗，將夢想逐步實現。

但對於董事會在原地興建 TPS 的決定，確實非常具有挑戰性的思維，場域的限制、TLS 運作不能中斷、各個小組研發預製的所有加速器元件空間的安排及日常行政的不受干擾，均影響著建造的時程進度。陳建德院士靈光閃現之際，峰迴路轉、絕處逢生，在僅拆除舊有餐廳及通道的最少障礙之下，我們有足夠的空間，將 TPS 環館圍繞研光及舊行政大樓，解決原廠址空地有限的困難，而又不需犧牲加速器的相關參數，(例如：周長大小及電子的束散度等)。在竹東



國科會朱敬一主委(左五)等一行主管視察 TPS 計畫竹東廠房(攝於 2012 年 5 月 16 日)。

我們也同時找到了旭光公司即將拆除的舊廠房，當成我們的磁鐵、真空、支架、前端區等系統研製組裝之廠房。

加速器磁格以及週長也曾因為現址以及建物的種種限制，從將近 500 米降為 300 多米，再回復到 518.4 米，幾經波折終於確定了目前 TPS 周長及磁格的最優化設計。丘陵地形的限制，讓我們必須在靠近 TLS 環館附近深挖達 12 米，又必須維持 TLS 的正常運轉，在深挖的過程中又碰到軟爛土層，種種先天的挑戰，只能想方設法一一克服。也許上天有憐，深挖施工的一年多中，一個個颱風閃過新竹地區，只帶來稍微的雨量，否則難以想像在深挖、軟土、若再加上狂風暴雨，若要恢復工地，工程不延宕也難，這也許也佐證了天助自助之人。

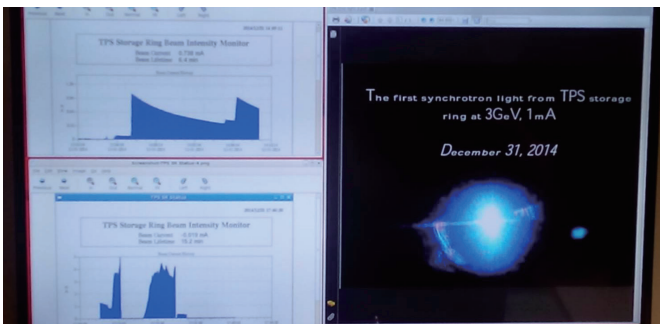
加速器各子系統的設計能力，雖然經過了 TLS 的驗證，但是光源的亮度增加 3 到 5 個數量級，讓各子系統的製造規格及精度大幅提升，有些廠商在樣機的製作過程中就打了退堂鼓；有些製作廠商，在出廠前的量測規格未能達標，最後由中心建立標準的量測設備以及程序，方能順利解決問題；有廠商負責人在合約執行階段病逝，整廠合約另轉他國；也有廠商為節約成本，進用未能符合功能、規格產品，只能拆除、購置新品、重新安裝；為盡力扶持國內廠商，也為提高廠商的技術能力，合約執行階段問題重重，只能秉持「關關難過、關關過」共同面對問題、攜手解決。

而在增能環試車的過程，更具挑戰，在 TLS 時期因為人力的限制以及技術發展考量，將增能環以統包方式購置，中心只具有參與試車及運轉的經驗，並不具有設計、建造及系統整合的能力。TPS 增能環是我們首次的挑戰，從設計、製作、系統整合到試車，而且注入儲存環的電子束散度要比 TLS 增能環再小一個數量級以上。我們在試車初期就碰到了挑戰，首先是電源供應器過載，觸動警報系統。在調束過程亦是艱辛萬苦，電子束的莫名消失，困惑了在控制室調束的所有人。因為管徑很小，強化準直工作持續進行，一直到磁鐵小組的詹智全博士，發現不鏽鋼管壁似乎並沒有進行完全的去磁工作，導致電子束看到的磁鐵強度與理論設計值或量測值間具有相當程度的差異。經過與多位國際專家的諮詢，

均不得要領，最後決定將所有真空腔拆解，進行高溫去磁退火的工作。安裝經過高溫去磁的所有真空腔後，電子束能夠快速的增加能量，達到設計的引出值 30 億電子伏特，也終於在 2014 年 12 月底，在儲存環成功的看到第一道同步輻射光。與當初預計的建造時程，以如期、如質達成 TPS 建造計畫的預定階段目標，歷經 2,500 個日子，同仁在運作 TLS 的同時，也完成 TPS 的設計、建造、整合試車的工作。如果有任何與 TPS 加速器的相關榮耀，都屬於這群共同努力，挑戰極限的工作同仁所共有，包含了 2016 年被全球加速器界認可的西川哲志獎。



TPS 增能環電子束能量達 3 GeV 試車成功慶祝 (攝於 2014 年 12 月 16 日)。



TPS 第一道同步輻射光 (攝於 2014 年 12 月 31 日)。

在興建、試車的過程中，還有許多軼文趣事、心酸苦處，也等著其他同仁一一訴說。試車後的 5 年，回首看 TPS 的統計資料，與加速器技術先進大國相較，我們試車的達標速度、設計目標達成、運轉穩定度及平均當機時間間隔，均優於英國 Diamond 及美國 NSLS-II，套一句陳良基前部長的話：「千萬不要“起了個大早、趕了個晚集”。」。

4. 您曾擔任 KBSI 韓國第四代光源、PAL 韓國浦項光源、HEPS 北方光源、ILSF 伊朗光源及日本 KEK Super-KEKB 國際技術審查委員會等多個國際光源諮詢委員成員，也曾擔任亞太同步輻射研究論壇 AOFSTR 主席，協助推動亞太加速器技術的進步，在參與的過程中是否有可以借鏡中心參考的建議能與我們分享。

雖然已經退休，目前仍然擔任 5 個亞洲國家實驗室的國際加速器及科學諮詢委員會的委員，其中三個為新建同步加速器、一個成熟運轉委員會、以及一個升級計畫臨時性的諮詢委員會。委員會的成員，在各個領域都有特殊的專長，組成委員會後，委員會的主席會依照個人的興趣與專長對於實驗室報告的相關運作、成果、及展望，分組提供諮詢建議。比較挑戰的部分，需要在各實驗室的報告之後，很快速地完成一份綜合性的報告及對各個分組討論的細部報告。因為委員會都是來自全球各知名實驗室的專家、學者，在綜合結論閉門會議過程中，有許多的經驗交流，也可以了解全球科學重要議題研究的走向以及可能需要的研究設備，而總結提供給予的建議常具有非常挑戰以及宏觀的思維。建議中心同仁若有機會受邀參加各種不同的科學諮詢委員會議，應該積極的參與，除了可以提供個人的研發經驗，亦可以得到許多意想不到的收穫。

在 AOFSTR 任職及擔任主席期間，由中心承擔亞太地區同步輻射研究設施的相關實驗技術訓練，也在亞太物理年會中舉辦亞太地區同步輻射研討會議。以及推動亞太地區同步輻射實驗儀器技術會議 AOSRI 的舉辦，首屆在日本東北大學舉辦，希望未來每 3 年一次的全球 SRI 會議，能夠逐漸的改變每年舉辦一次，由歐、亞、美三大洲輪流舉辦，以加速同步輻射研究相關儀器的研發推動。

以中心過往均秉持著「遠來的和尚會念經」的理念，不管在加速器的國際諮詢委員會或國際科學委員會議，均以國外的專家學者組成，在國內經過 30 多年的經驗累積，應該可以逐漸少量納入國內的專家學者共同組成，讓國內學者加速國際化，並善用國內的資源。

5. 您自 2018 年起出任中心第五任主任，在推動加速器技術，以及協助國內產業技術升級，是否曾遇到甚麼困難？未來中心在推動加速器技術升級與產業應用擴展上，您是否有甚麼建議？

在 TPS 計畫尚未正式推動前，加速器技術在產業應用的推動，就已經持續的列於個人研發關注重要項目，總覺得中心使用了國家大量的經費，建造了 TLS 加速器，也研發了相關技術，有機會就應當積極回饋於社會。其中，質子或重離子加速器在癌症醫療上的應用，更與我們的技術專長息息相關。最先進行接觸的就是張榮發基金會及林口長庚醫院，就長庚醫院而言，當時先協助他們分析迴旋加速器與同步加速器在醫院運作的優缺點，並且在物理年會中特別安排醫療加速器的議題，並邀請國外的專家學者到台灣演講，以提升質子及重離子加速器在台灣醫療的應用與發展，之後也陸續協助錫安生醫、台北榮總等相關醫療院所的技術訓練以及人才的培養。另外也協助磁鐵小組將研發成熟的超導插件磁鐵技術在國際推廣，進而促成了與泰國光源的國際合作，為他們製作超導多極移頻磁鐵。在擔任主任之後，以前面所

提到的產業計畫主持累積的經驗與曾面對執行層面的困難，希望能逐步改變，進一步的推廣中心產業的應用。從而對於產業應用相關的要點辦法進行修改，放寬及獎勵同仁參與產業計畫，希望能夠實質的回饋給真正執行產業計畫的同仁。另外也希望將產業應用小組在中心的整體位階提升，第一步將產業應用小組長納入行政會報的成員，希望其他各大組長能了解產業計畫的執行績效與狀況及需要的協助，也讓產業小組能夠利用行政會議，更深入的了解其他各組的技術研發狀況。此外也敦促當時的產業應用小組小組長許博淵博士完成各項說帖，準備將位階由小組提升為中心的大組，並積極遊說國科會與董事會，進行組織的變革，希望產業應用能夠因為位階的提升而有更大的影響層面。在主任卸任之前，董事會同意產業應用組設立，國科會亦同意組織變革的備查。

除了在行政層面上的位階提升，在技術面，也積極的協助產業小組在光束線上光源時間需求及應變產業須快速釋疑的問題，並收回部分因為功能不彰的光束線時間。另設立產業專用的光束線，並提供經費將實驗站自動化，能快速變換量測儀器，終極目標希望能夠將量測的數據也能夠自動化的分析，以面對業界大量樣品分析的需求；對於需要快速解決問題的樣品，也設立快速樣品分析通道，並訂立另外的收費標準。這一系列的工作在主任卸任之前，已可常規化的執行，希望能對於產業界有更大的助益，同時也極大化中心在產業應用上的收益，以不負納稅人的心血。在整個的推動過程中，要感謝產業應用組同仁的積極配合，以及國科會主管單位能夠積極的接受我們的說帖及所規劃之願景。

對於中心產業應用的長程發展，相信只要將產業需求常放研究人員心中，拿出每位研發同仁的 5-10% 的時間，再配合中心行政作業要點的放寬與獎勵措施，產業界研發量能的提昇必然受益於中心的推動。如若可能、或許可以整合退休同仁的經驗，組織一個以中心為核心的研發服務推廣顧問公司，專業推廣及解決產業與同步輻射相關的研發議題。一切事在人為，有心者無事不克，無心者萬事皆難。

6 您曾說過「傳承，是最重要的事」，回顧過去與展望未來，您覺得中心下一步該如何才能再創輝煌？該如何讓經驗傳承並訓練年輕人在現有基礎上來開創？

公司若要能夠長期生存於非常競爭的環境，需要有核心的價值，私人的公司如此，研發機構也是如此。就中心而言，前輩筆路藍縷爭取了機會以及經費建造了 TLS，從無到有，其中的艱辛可想而知。在我們這個世代，將 TLS 推向低能量第三代同步輻射光源的極致（六個直線段，安裝九個插件磁鐵，其中五個是超導插件磁鐵，光通量與原設計相較至少成長一倍）。從 TLS 到 TPS 算是這個世代向前輩們的致敬，感謝前輩提供了我們一個在世界同步輻射領域發揮的舞台，老兵逐漸地凋零，攜手傳承新的舞台給年輕的一輩，一定要站穩風頭浪尖的腳跟。也期待願意承擔傳承的高階經理人，

能大肚容忍年輕人謹慎的嘗試錯誤，真知灼見來自於國際間頻繁的互動，相互協助、勝於閉門造車的單打獨鬥。

用戶資訊

實驗計畫申請

■ 2025-2 期實驗申請

2025 年第二期 (2025 年 7 - 12 月) 光束線使用預計 2025 年 1 月初開放申請，截止日期為 2025 年 2 月 17 日 (一)，歡迎計畫主持人踴躍上網 (<http://tpsportal.nsrrc.org.tw/>) 提出計畫申請 (新用戶須先完成註冊)。

■ 實驗計畫申請注意事項

- 每件實驗計畫可申請多條光束線，但須針對個別光束線分別說明實驗需求。勿以相同內容另提計畫申請光束線時程，若經查核屬實，該期不核定時段數。
- 實驗計畫申請為一年兩期，每期 6 個月，計畫有效週期為兩年，請於規定期限內上網申請計畫。(詳請參閱「第 118 期簡訊」或「用戶入口網」：如何寫實驗申請計畫書)

近期開放光束線如下

- TPS 09A2 Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy for Semiconductor (高能 X 光光電子發射能譜 - 前瞻半導體)
- TPS 15A1 Micro-crystal X-ray Diffraction (微米晶體結構解析)
- TPS 25A2 Coherent Diffraction Imaging (同調 X 光影像)
- TPS 27A1 Soft X-ray Nanoscopy (軟 X 光奈米顯微術)
- TPS 32A1 Tender X-ray Absorption Spectroscopy (柔 X 光吸收光譜)

其他資訊

- 配合政府政策，本中心招待所將於 2025 年 1 月 1 日轉型為實驗及公務宿舍 (以下簡稱宿舍)，提供用戶至本中心實驗時休憩場所。敬請於預訂宿舍前先行詳閱新版「宿舍須知」，並使用「宿舍申請系統」預訂。如有任何疑問，請洽宿舍承辦人員 (03-5780281 #4130; dorm@nsrrc.org.tw)。

學生用戶

清華大學物理所
高于晟

高于晟是清華大學物理所吳國安教授的博士班學生，同時也是本中心產業應用組吳品鈞博士的共同指導學生。高同學於 2019 年成為本中心用戶，曾於 2023 年歐洲材料學會秋季會議獲頒青年學者獎，同年亦於本中心第二十九屆用戶年會中榮獲材料科學組「台灣之光」獎。

Q 您是本中心 2023 年用戶年會材料科學組「台灣之光」獎獲獎者，請您分享當時獲獎的研究內容。

當時我的報告內容主要是關於我在博班期間研究的特殊材料，一種具有鐵電性質的摻銦二氧化鈾薄膜 (Hafnium-Zirconium Oxide, HZO)。我們利用 TLS 07A 光束線分別進行 X 光散射以及吸收光譜的實驗，從而分析不同製程條件下 HZO 的晶相組成、晶粒大小、環境配位數以及殘餘應變等性質。最後我們於 2022 年整理並歸納出 HZO 晶相組成 - 殘餘應變的通用關聯特性 (universal phase-strain relation)，此一項發現最近已陸續被 NaMLab 等國際知名研究機構成功驗證。很幸運獲得評審委員的肯定與青睞，希望我們的努力能為這個領域帶來振奮人心的研究方向。

Q 您在中心進行實驗時，是否有遭遇過什麼困難？您如何解決？

我在博士班時其中一項研究工作包含協助吳品鈞博士設計並建造一套臨場監控式的快速升溫退火系統 (in-situ Rapid Thermal Annealing, RTA)，其中快速升溫退火技術常被歸類於半導體四大模組製程中的擴散 (Diffusion) 製程，

其對於熱氧化層 (thermal oxide) 的成長、材料的結晶 (crystallization) 與再結晶 (recrystallization) 以及離子佈植的活化 (dopant activation) 有著不可或缺的重要性。相較於傳統的爐管退火 (furnace anneal)，由於 RTA 能大幅微縮加熱時間，因此對半導體製程熱預算 (thermal budget) 的降低以及製程生產效率 (wafer per hour) 的提升皆有顯著的優勢。我們所設計的 in-situ RTA 系統搭配同步輻射 X 光散射技術，可觀察材料在退火過程中的晶相組成、晶粒大小以及殘餘應力的即時變化，期許未來能協助產學界更加釐清及優化 RTA 製程。由於中心過去沒有類似的設備，加上國內具有相關技術的廠商較少，因此我們前後共耗費約四年的時間，直到去年六月才完成。而能夠順利克服種種困難並完成 in-situ RTA 系統，主要是歸功於國輻中心的研究人員以及眾多合作廠商的幫忙。

Q 您對同步輻射中心有什麼期待嗎？對於有意想進入同步輻射領域的學生是否有什麼建議？

希望中心能夠更全面性地栽培對於同步輻射有興趣的人才，並鼓勵這些人才與業界接觸及推廣同步輻射技術，促使更多產學合作的機會，期許有朝一日中心能成為如同台積電一樣家喻戶曉的護國神山。對於新進學生的建議是努力將學校教的基礎物理、近代物理以及材料分析知識的根基扎穩，並且把握機會參與中心舉辦的課程及會議，以及多與中心的研究人員進行學術交流。

發行人 / 徐嘉鴻
總編輯 / 王俊杰
編輯委員 / 康敦彥 王嘉興 林彥谷 鄭澄懋 劉振霖
鍾廷翊 鄧碧雲 蘇慧容
執行編輯 / 李宛萍 姜凱文

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>

