台灣光子源周邊實驗設施建置概況

李凱弟（實驗設施組）

本中心台灣光源 (TLS) 自 1994 年春開放給用戶使用至今已歷經二十年，為充分展現第三代同步加速器光源強調插件磁鐵的特質，本中心殫精竭慮，在 TLS 六個長直段皆安裝了插件磁鐵，包含超導高頻共振腔及連接增能環與儲存環注射處的兩個長直段；不僅如此，本中心也在三個短直段安裝了插件磁鐵，總計在圓周 120 公尺的儲存環安裝了九座插件磁鐵，其密度之高堪稱世界之最。

TLS 儲存環內的九座插件磁鐵中有五座是超導磁鐵，可以提供日益增長的硬 X 光實驗需求，即使如此，本中心盱衡全球加速器光源倚重高亮度硬 X 光來開展多項尖端研究的趨勢，認為 TLS 光束線已經飽和，而且超高亮度所需的極小電子束散度已超越 TLS 所能提供的狀況下，為使本中心光源競爭力不致流失，遂規劃建造一座具有極小電子束散度、超高亮度的台灣光子源 (TPS)，結合 TLS 與 TPS 兩座光源設施的特性將可提供用戶硬 X 光至紅外線光能範圍之光源。TPS 儲存環的重要參數簡列如下表一：

表一　TPS 儲存環參數簡表

名　稱（單位）	數　值
電子能量 (GeV)	3.0
電子束流量 (mA)	500
儲存環周長 (m)	518.4
儲存環電子束諧波數	864
儲存環電子束團長度 (mm)	2.86
自然束散度 (nm•rad)	1.6
磁格結構	24-cell DBA
磁格超週期數目	6
高頻波頻率 (MHz)	499.654
直段	12 m x 6；7 m x 18
二極磁鐵數目	48
二極磁鐵光源之臨界光能 (keV)	7.12

如表一所示，TPS 儲存環是由 24 個二彎轉消色散 (Double-bend Achromat, DBA) 單元所構成，每一單元中有一個長直段及兩座二極偏轉磁鐵，每 4 單元中有 3 個單元具有 7 公尺的長直段、1 個單元具有 12 公尺的長直段，因為這種 4 單元的週期結構，使得 24 個二彎轉消色散單元形成一個具有 6 週期的磁格結構。TPS 儲存環的自然束散度為 1.6 nm•rad，約為 TLS 自然束散度 (25 nm•rad) 的十六分之一，名列世界加速器光源之前茅，為超高亮度的光源設施打下一個良好的基礎。此外，TPS 儲存環的「心臟」採用兩套超導高頻共振腔 (其功能為補充電子因放光所耗損的能量)，因而能避免常溫共振腔的高次模 (high order mode) 激發的不穩定性，進而提升電子束的穩定度及存活期。

台灣光子源第一期周邊實驗設施計畫將興建七座光束線，每座光束線都將座落在長直段出光口，以聚頻磁鐵 (undulator) 為其光源；每座光束線將建置一座專屬實驗站，這七座實驗站分別致力於蛋白質微結晶學 (protein microcrystallography)、共振軟 X 光散射 (resonant soft X-ray scattering)、次微米軟X光光譜 (submicron soft X-ray spectroscopy)、同調 X 光散射 (coherent X-ray scattering)、次微米 X 光繞射 (submicron X-ray diffraction)、X 光奈米探測 (X-ray nanoprobe) 及時間同調X光繞射 (temporally coherent X-ray diffraction) 等 7 種實驗技術的應用。

TPS 第一期七座周邊實驗設施主要可用以進行物理、化學、生命科學等領域的基礎研究，以及在醫學、材料科學、環境與能源科學及半導體產業等領域的應用研究，以下是各實驗設施的扼要功能說明：蛋白質微結晶學實驗站基於其光圍窄、光發散度低及光通量高的特性，將可用以解析膜蛋白、大蛋白質複合體及病毒等晶粒微小、多晶間齊平度低的巨生物分子結構；此外基於其高速與自動化的數據採集系統，此實驗站也適宜對藥物候選分子群進行快速的結構解析與篩選。共振軟 X 光散射實驗站將能探測強電子關聯物質在電荷、電子自旋、電子軌域及晶格之交互影響下的電子激發、磁激發及電子與音子間的互動，此外，利用 X 光同調性應用於失序結構所產生的動態散射亮斑，可觀察電子自旋、電荷、電子軌域排序下的區域波動。次微米軟 X 光光譜實驗站將可探測微粒單晶或大晶體中特選均勻區塊的超細能帶結構及進行能帶中費米邊緣的研究。同調 X 光散射實驗站利用動態散射亮斑技術將可研究膠體擴散、複雜液體、混合聚合物、蛋白質與其他生物分子或結構之互動，及高分子聚合物之相變、結晶、玻璃態變等行為；此外其小角度 X 光散射技術可被用以研究天然失序蛋白質、高分子聚合物、生物系統及奈米粒子之靜態結構。次微米 X 光繞射實驗站將以其微差開口 X 光三維顯微

術來探究積體電路封裝材料、金屬氧化物及奈米材料等之變形、薄膜在成長或退火處理中的即時結構資料，以及多晶矽太陽電池中金屬雜質對其功能的不良影響等課題。X 光奈米探測實驗站以其數十奈米的解析度特性，將能研究半導體、氧化物及磷光體等所形成的奈米晶體、量子點及量子線之電子結構，以及其吸收 X 光後放出可見光的能態轉變機制，並能對微機電及奈米機電裝置進行材料鑑定。時間同調 X 光繞射實驗站將運用物質受雷射激發後以 X 光探測其後續動態的時間解析方式，研究諸如半導體在雷射激發後的晶格運動等涉及電子、磁性與原子結構間互動的現象，並獲取具有數十皮秒時間解析度的動態晶格資料；此外該實驗站亦將以 X 光磁散射現象來研究多鐵序物質中磁性與電子互動現象、薄膜與多層膜之界面磁性結構、超導現象與電荷密度波及電子自旋密度波之間的關聯性等課題。

各實驗站研究標的之光束特性要求，諸如光能範圍、聚焦光點大小、光能解析度、光亮度、光之同調性等等，就決定了其插件磁鐵之規範及其所應配置的光束線光學系統。七座實驗站中共振軟 X 光散射實驗設施仰仗高光通量為其成功的要素之一，同調 X 光散射及時間同調 X 光繞射則須倚靠高亮度光源才能實踐其技術，所以這三座實驗站皆分別配置兩座首尾相連的聚頻磁鐵模組為其光源，因為聚頻磁鐵之光通量跟磁鐵週期數的平方成正比，週期數越大的聚頻磁鐵其光通量與光亮度也就越大。

台灣光子源第一期七座周邊實驗設施中共振軟 X 光散射實驗站及次微米軟 X 光光譜實驗站使用橢圓偏振聚頻磁鐵，另外次微米 X 光繞射實驗站使用具有斜張功能的聚頻磁鐵。表二列出台灣光子源第一期周邊實驗設施各光束線所配置的插件磁鐵之主要參數，由該表可知，7 座光束線共需使用兩座 EPU48、一座 EPU46、一座 3.08 公尺長的 IUT22、四座 3.08 公尺長的 IU22 及兩座 2.09 公尺長的 IU22，這些聚頻磁鐵的光通量及亮度如下頁圖一所示 (IUT22 之磁極間隙在電子束上下游等距時，其光通量及亮度與 IU22 相同)。

「斜張 (taper)」是指聚頻磁鐵之磁極間隙沿著電子束行進方向逐漸加大的幾何排列，其目的是將各倍頻波的光強度分散至峰谷，使光強度的光頻分布趨向扁平化，以利勞厄 (Laue) 繞射影像之取得。

表二　TPS 第一期周邊實驗設施之插件磁鐵一覽表

光束線編號	實驗設施名稱	插件磁鐵								
		類型	數量	有效長度 [a] (m)	磁鐵週期 (mm)	有效磁鐵週期數目	最小磁極間隙 (mm)	最大磁場 [b] (T)	最大偏轉參數	光能範圍 [c] (keV)
05A	Protein Microcrystallography	IU22	1	3.08	22	140	7†	0.76	1.56	5.7 - 20
41A	Resonant Soft X-ray Scattering	EPU48	2	3.22	48	67	13	0.83 (V) 0.55 (H)	3.72 (V) 2.47 (H)	0.40 - 1.50
45A	Submicron Soft X-ray Spectroscopy	EPU46	1	3.77	46	82	15‡	0.73 (V) 0.47 (H)	3.14 (V) 2.02 (H)	0.35 - 1.50
25A	Coherent X-ray Scattering	IU22	2	3.08 2.09	22	140 95	7†	0.76 0.74	1.56 1.52	5 - 20
21A	Submicron X-ray Diffraction	IUT22	1	3.08	22	140	7† taper allowed	0.76	1.56	7 - 25
23A	X-ray Nano-probe	IU22	1	3.08	22	140	7†	0.76	1.56	4 - 15
09A	Temporally Coherent X-ray Diffraction	IU22	2	3.08 2.09	22	140 95	7†	0.76 0.74	1.56 1.52	5.6 - 25

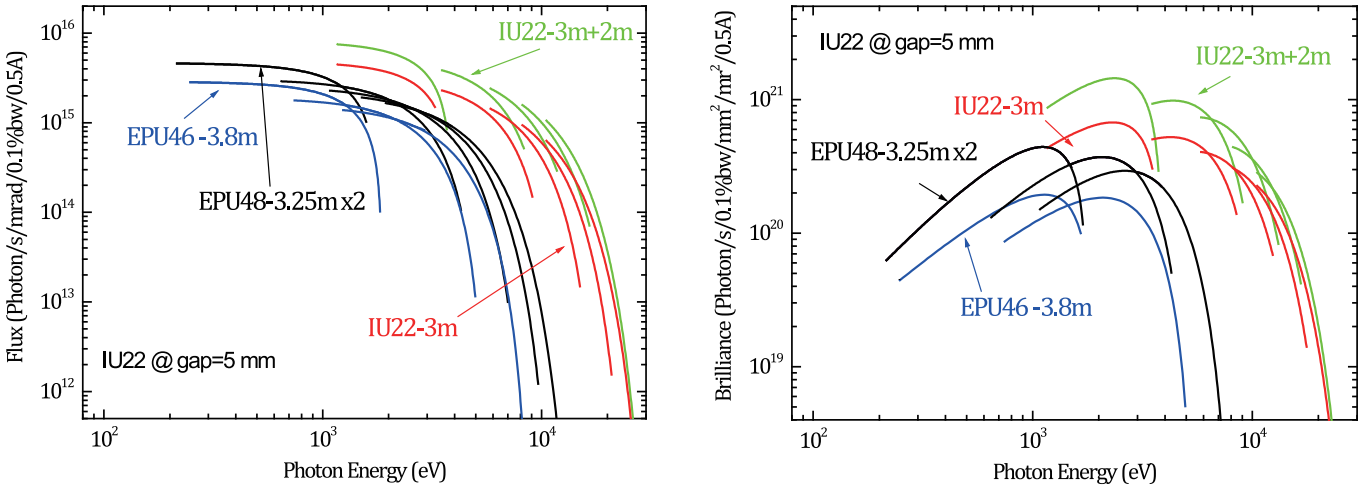
[a] 不含未達有效磁場之磁區及磁鐵陣列首尾之屏蔽，亦非 IU 插件磁鐵的真空腔縱長

[b] 實際量測值

[c] 通過光束線分光系統後之光能範圍

† 最終目標為 5 mm

‡ 最終目標為 13.5 mm

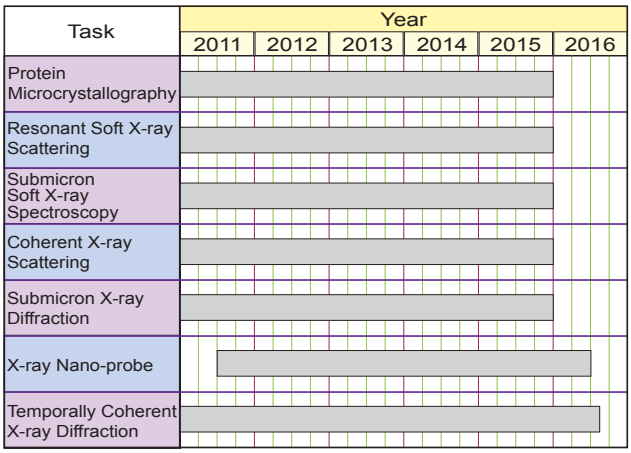


圖一　台灣光子源第一期周邊實驗設施使用之聚頻磁鐵的光通量 (左) 及光亮度 (右)。

台灣光子源第一期周邊實驗設施使用之插件磁鐵 EPU48 其中一座已建造並測試完成，另一座將於今年底前完成磁場量測及磁塊加墊調適作業，EPU46、兩座 2.09 公尺長的 IU22 與 3.08 公尺長的 IUT22 已建造並完成測試。四座 3.08 公尺長的 IU22 已完成其中一座的建造與測試，第二座將在今年 8 月底前完成建造與測試，第三、四座則將在 2015 年 1 月底前完成建造與測試，所有聚頻磁鐵將於 2015 年 2 - 4 月安裝至儲存環。

TPS 土木與機電工程已於 2013 年陸續竣工，加速器本體即將完成組裝，預計今年 8 月開始進行加速器試俥，此階段試俥將以常溫共振腔進行。第一階段試俥時，因聚頻磁鐵尚未安裝於儲存環，電子束運行軌道自然不受聚頻磁鐵之磁極間隙的限制，得以在較大的運行空間中進行軌道優化，並避免在軌道優化前電子束對聚頻磁鐵造成不當的損害。當第一階段試俥成功，達到預定的電子束流量及存活期後，TPS 加速器預計將自 2015 年 2 - 6 月停機 5 個月，此期間將安裝所有聚頻磁鐵 (共 10 座)，卸除常導共振腔、改安裝兩座超導高頻共振腔取代之，並進行液氦低溫系統及共振腔高頻電磁波負載之測試。2015 年 7 月起，TPS 加速器將進入第二階段試俥，此階段聚頻磁鐵之磁極間隙將調整為該光束線光能範圍所需的間隙大小，待獲得第二階段預定的電子束流量及存活期後，即可進行光束線及實驗站之試俥。

台灣光子源第一期七座周邊實驗設施預計於 2015 年 12 月底將有 5 座實驗設施完成試俥，X 光奈米探測及時間同調 X 光繞射兩實驗設施則將在 2016 年 8 月中旬前完成試俥，未來將可提供國內外用戶進行各項尖端新穎的科學實驗。(註：各光束線及實驗站預估試俥完成時點如圖二所示。)



圖二　台灣光子源第一期周邊實驗設施各光束線及其聚頻磁鐵與實驗站之設計、建造、安裝與試俥總歷時圖。

※ 感謝黃迪靖副主任、建造主持人 (簡玉成博士、鍾世俊組長、林宏基博士、黃玉山博士、李信義博士、湯茂竹博士、徐嘉鴻博士)、黃清鄉組長，以及參與 TPS 聚頻磁鐵研製之磁鐵小組同仁、參與台灣光子源第一期光束線與實驗站設計建造的實驗設施組與科學研究組多位同仁，提供資料撰寫本報導。