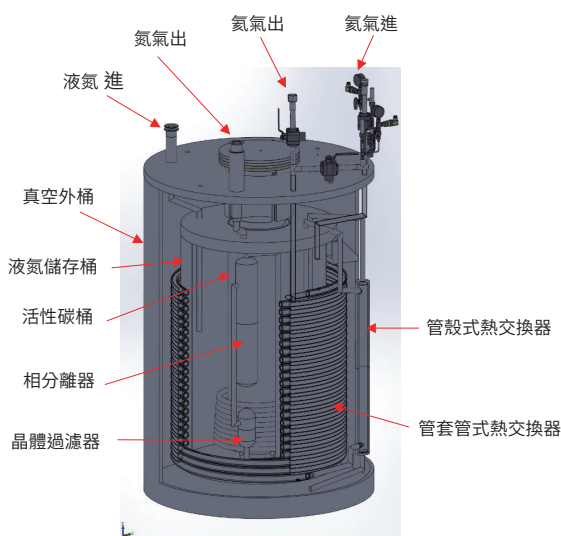


大型低溫氦氣純化系統開發及其在產業中的應用

莊秉勳博士

國家同步輻射研究中心低溫小組

現代科學研究和高科技產業對氦氣需求日益增加，其中氦氣的純度已成為影響各種精密應用的重要因素。高純度氦氣不僅在粒子物理和超導技術中扮演關鍵角色，在半導體製造、核磁共振成像 (MRI) 以及航空航天領域中也至關重要。



圖一 大型低溫純化器。

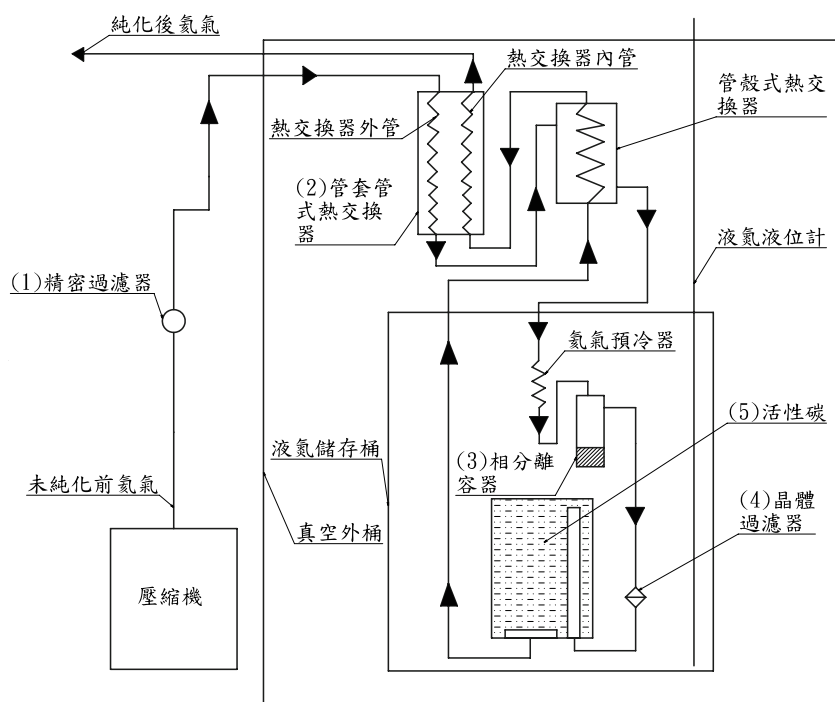
然而，天然氦氣通常含有一定比例的雜質，如氮氣、氧氣、水蒸氣和碳氫化合物，這些雜質對高端精密應用造成不利影響。為了滿足日益嚴格的純度要求，國輻中心開發了一套大型低溫氦氣純化系統（見圖一），該系統憑藉先進的低溫物理吸附技術、多層次吸附與過濾策略、以及高效的管套管式熱交換器設計，能夠將氦氣中的雜質濃度從 25,000 PPM 大幅降低到 2 PPM 以下，確保氦氣的極高純度。

氦氣的純化終極過程採用低溫物理吸附技術，這是一種基於物理吸附原理、通過降低溫度來強化吸附效果的技術。由於活性碳在接近 80 K 的低溫環境下對雜質具有極高的吸附能力，因此該系統利用活性碳作為主要吸附材料。當氦氣流過設計精良的吸附床時，水氣、氧氣、氮氣以及油氣等微量殘留雜質能被高效去除。這些雜質若不去除，將會在後端極低溫應用中引發結冰、堵塞以及設備損壞等問題。

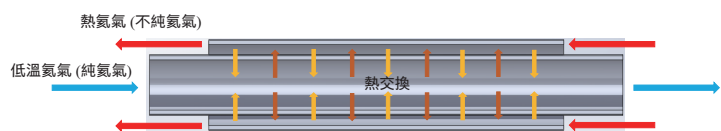
為了實現高流量但含高濃度雜質氦氣的純化，此系統引入了多層次的吸附與過濾策略，並結合終極低溫物理吸附技術，形成一個高效的複合純化流程，如圖二所示。首先，氦氣通過 (1) 外掛式精密過濾器，去除大顆粒雜質；隨後進入

純化器的 (2) 高效熱交換器，逐步降溫；接著進入 (3) 相分離容器，利用離心原理進一步分離微小顆粒；之後，氦氣經過 (4) 晶體過濾器，過濾出冰點在 80 K 以上的氣體雜質，以防止這些雜質在後續流程中結晶堵塞；最終，經過多層純化處理的氦氣進入 (5) 低溫活性碳吸附床，完成最終的雜質吸附，使氦氣純度達到極限。這種多層次吸附與過濾策略是本系統的核心特點，確保了系統在極端操作條件下依然能穩定、高效運行，並持續提供超高純度的氦氣。

高效熱交換是低溫氦氣純化過程中的核心要求。為了最大化回收氦氣殘餘的冷卻焓值，我們設計了如圖三所示的管套管式熱交換器。該熱交換器透過同軸布置的內外管實現流體間的熱量傳遞，其中內管中的低溫流體



圖二 大型低溫氦氣純化器純化流程圖。



圖三 管套管式熱交換器。

與外套管中的高溫流體通過金屬管壁進行熱交換，並利用金屬的傳導特性來傳遞熱能，且兩種流體互不接觸。此類熱交換器可以設計為逆流或順流模式，其中逆流設計由於流體間的溫差較大，熱交換效率更高。該熱交換器可使氮氣在進入低溫活性碳吸附床之前迅速降溫，並在經過吸附過程後，將超高純度的氮氣快速升溫至室溫。此設計不僅提升了系統的能源利用效率，還增強了操作穩定性和系統耐用性，並降低運行成本。此外，這種熱交換器設計在減少熱損失的同時，也顯著降低了系統內部的壓力波動，對維持氮氣純化過程的穩定輸出至關重要。憑藉其卓越性能，該低溫氮氣純化系統在長時間運行中能保持穩定的高純度氮氣供應，從而確保下游應用的可靠性和效益。

於科學研究範疇，特別是粒子物理和高能物理學研究領域，大型粒子加速器採用之超導體需要在極低溫下運行，以實現和保持超導狀態。這些系統對氮氣純度有極高要求，任何微量雜質都可能影響超導體性能和實驗結果。低溫氮氣純化系統能穩定提供高純度氮氣，確保粒子加速器和超導體在最佳狀態下運行。此外，核磁共振成像 (MRI) 也依賴超導磁體生成高強度磁場，這些磁體需在極低溫下維持超導性。來自氮氣中的微小雜質可能影響磁體穩定性，導致成像質量下降或設備故障。此系統能確保 MRI 設備在理想條件下運行，提高診斷精度，並延長設備使用壽命。

於工業應用範疇，半導體製造過程中特別依賴氣體純度，尤其是在晶圓製造、氣相沉積等工序中，雜質會導致良率下降。作為保護氣體或冷卻劑，氮氣純化系統能有效去除雜質，確保製程氣體的純度，提升產品良率和可靠性。此外，航空航天技術依賴高純度氮氣冷卻和儲存液體燃料，以確保其穩定性和安全性。此系統提供超高純度氮氣，增強火箭和航天器的發射成功率和運行安全性，對於商業航太及國防領域至關重要。

此大型低溫氮氣純化系統不僅在技術上實現含高濃度雜質氮氣之高流量純化，更在實際測試中展示其卓越效能。透過先進的低溫物理吸附技術、多層次吸附與過濾策略、以及高效的熱交換設計，成功地將傳統氮氣的雜質濃度降低一萬倍以下，滿足了對高純度氮氣日益增長的需求。無論是在粒子物理研究、醫療診斷、半導體製造、或航空航天領域，本系統都能為這些高端應用提供穩定可靠的技術支持。

用戶資訊

實驗計畫申請

■ 2025-1 期實驗計畫申請目前審核中
2025 年第一期 (2025 年 1-6 月) 實驗計畫申請目前正陸續進行初複審中，核定的光束線排程後續將於 12 月初公告於用戶入口網首頁。

■ 2025-2 期實驗申請預告
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.nsrc.org.tw/>) 提出申請 (新用戶須先完成註冊)。

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。

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 32A1 Tender X-ray Absorption Spectroscopy (柔 X 光吸收光譜)

近期台灣光源 (TLS) 退場光束線如下

- TLS 05B1 EPU - Soft X-ray Chemistry 和 TLS 09A1 U50 - SPEM 光束線將於 2025-1 期退場，不再開放申請。

其他資訊

- 為減少非實驗相關用戶隨意進出本中心設施，經參考國際光源設施做法，2025 年 1 月 1 日起，用戶卡的效期由三年改為一年。(2025/1/1 起，原效期剩餘大於一年者，到期日為 2025/12/31；原效期剩餘小於一年者，到期日不變。)
- 本中心將於 2025 年 1 月 1 日起全面實施網路實名制，每次效期為 24 小時，同一組電話帳號與驗證碼可重複登入於不同裝置。
- 若發生緊急狀況需要呼叫救護車時，請務必通報醫務室 (#8217)、警衛室 (#3333) 或控制室 (#8201)，告知正確位置、人員姓名…等資訊，並保持電話通暢。