

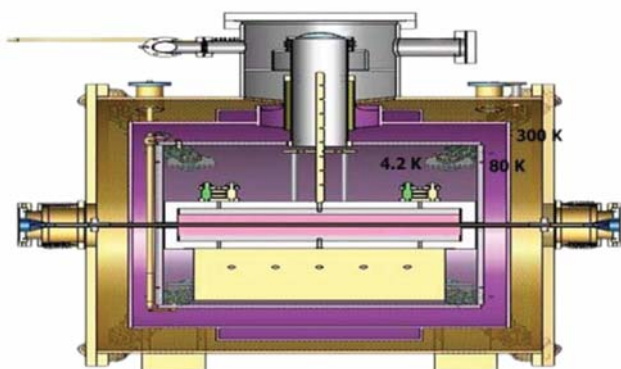
超導增頻磁鐵液氦自動傳輸系統

超導增頻磁鐵（Superconducting Wiggler, SW）為基因體醫學國家型計畫「同步輻射蛋白質結晶設施之興建與使用」X光核心設施，已於1月時安裝入儲存環第四長直段超導高頻共振腔下游位置。而經由中心低溫供應系統所供應的液氦及液氮，也於4月底時，以自動傳輸供給液氦及液氮方式測試完成。本文旨在描述此套自動傳輸系統架構及控制邏輯，以及測試結果。

林富源（儀發組）

低溫腔架構

超導磁鐵的操作條件不同於電磁鐵，磁鐵線圈的溫度需維持於液氦低溫下才能維持其超導態。所以，低溫腔設計在超導磁鐵系統佔很重要部分。圖一為SW低溫腔3D剖面圖，從內而外分成4.2 K、80 K及300 K三層。



圖一 超導增頻磁鐵低溫腔3D剖面圖

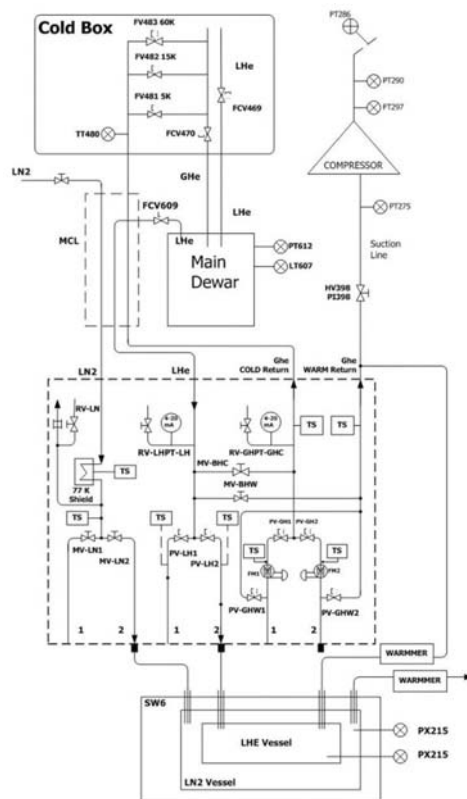
4.2 K層為容量約200公升不銹鋼材質桶槽，用來存放液氦，超導磁鐵線圈浸泡於此^[1]。液氦入口及氮氣出口分別在桶槽前後位置，並在300 K層氮氣出口處，設置有6psig洩壓閥（relief valve）及25 psi暴破盤（burst disk）以保護4.2 K桶槽，防止壓力過大時而造成損壞。

80 K層為容量約60公升鋁質桶槽，用來存放液氮。除了隔絕熱輻射傳遞外，還做為電子束通過磁鐵時冷卻電子束真空腔。液氮入口及氮氣出口分別在桶槽同一位置左右，300 K層氮氣出口處，設置有6 psig洩壓閥保護桶槽。300 K層與80 K層之間與80 K層與4.2 K層之間，除了以真空絕緣外，還外加三十層超絕緣材料，以隔絕外界熱的輻射源。

液氦及液氮供應系統架構

SW運轉時所需的液氦，是由中心液氦工廠供應系統所提供，其制冷能力450 W @ 4.5 K及液化能力每小時100升^[2]。系統是由法商Air Liquid公司建造，採用Claude循環產生液氦。液氮供應系統在中心考量建造及維護成本後，以向廠商租用液氮槽，並一星期提供液氮一次的作法進行。

SW液氦及液氮供應系統迴路架構如圖二，分為液氦及液氮兩個迴路，以下就個別迴路做說明：首先是液氦迴路，由液氦系統所產生的液氦，先儲存於2000升液氦桶，在經閥箱分配給超導高頻共振腔



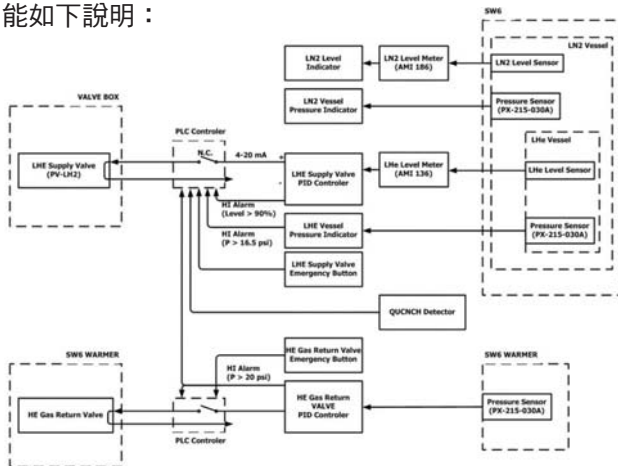
圖二 SW液氦及液氮供應系統迴路示意圖

(SRF) 及SW使用。從閥箱至SW，以一條六米長真空隔熱傳輸管來傳輸液氮。進入SW液氮槽後，液氮冷卻線圈後會蒸發成氮氣，同樣的以真空隔熱傳輸管先連接至外部的回溫器，再連接至中心的氮氣回收管，由氮氣儲存槽回收再生液氮循環使用。

再來是液氮迴路，由中心液氮槽先傳輸至閥箱後，分配給SRF及SW使用。以一條九米長真空隔熱傳輸管傳輸液氮至SW液氮槽，蒸發後的氮氣，經真空隔熱傳輸管連接至回溫器後，再連接至中心的氮氣回收管排放至大氣。

自動傳輸系統架構

自動傳輸系統架構如圖三，所使用到的儀器及功能如下說明：



圖三 自動傳輸系統架構圖

- (1) 液位計：有液氮及液氮兩種，顯示目前液氮及液氮液位讀值。液位值可轉換為0-10 V類比信號輸出，以做為PID控制器輸入。控制器根據此值與設定值做一比較後，決定是否補充液氮及液氮。
- (2) 壓力計：採用電子式壓力計，輸出信號範圍為4-20 mA，壓力範圍為0-30 psi。分別位於液氮槽、液氮槽及氮氣回溫器後。轉換後的輸出信號接至PID控制器，由控制器設定警報值，以做為閥門是否開啟依據。
- (3) PID控制器：為系統主要核心，內建處理器，可顯示輸入信號目前讀值外，還具有類比信號輸出及乾接點輸出，以做為閥門開度控制。
- (4) PLC控制器：整合系統所有警報信號，包括液位過高、桶壓過高、磁鐵失超及緊急停機等，

以做為閥門是否開啟判斷。

- (5) 閥門：閥門有兩個，安裝位置及功能說明如下：
 - I. 閥箱內的液氮閥 (PV-LH2)。目前所使用的閥箱，是根據SRF所需來設計，所以，液氮迴路是電子式閥門，而液氮迴路是手動閥門。
 - II. 氮氣回溫器後的電磁閥。從SW氮氣出口到氮氣回收壓縮機路徑下，只設一道手動閥門。考慮到SW操作失超時，瞬間產生的壓力不至於影響SRF及氮氣回收壓縮機運轉，以及氮氣回收壓縮機重新啟動時，瞬間所產生的壓力對SW影響等因素。所以，在SW氮氣回溫器後加上電磁閥及電子式壓力計做為偵測及保護用。

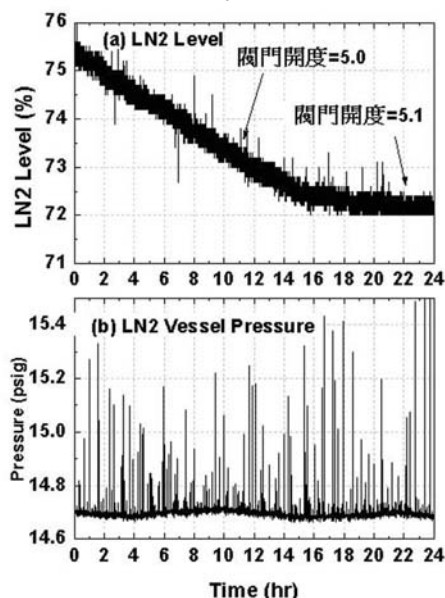
自動傳輸系統邏輯

自動傳輸系統操作邏輯如下說明：

- (1) 液氮傳輸：由於閥門為手動式閥門，故無法以自動傳輸方式補充。目前作法是依據液氮的消耗率，以固定閥門開度值讓液位維持在75%±1%。另外在補充時，需注意桶槽壓力，以不超過17 psi為原則。
- (2) 液氮傳輸：控制閥門開度模式有手動及自動模式兩種。手動模式使用時機為SW在預冷狀態時。此時磁鐵溫度遠大於4.2 K，液氮進入桶槽隨即蒸發為氮氣，桶壓變化較大，以手動模式操作比較安全。自動模式使用時機則正常運轉時，此時磁鐵溫度已達4.2 K，液氮消耗量較少。系統可以此模式維持液位準位。自動模式又分為PID及ON/OFF兩種模式。PID模式是將液位維持於設定值附近，區間約為±0.5%。ON/OFF模式則是液位在較大區間來回補充，區間約為±1%。不論以何種模式進行補充時，當桶槽壓力大於16.5 psi時，系統產生中斷關閉液氮閥門，無法進行傳輸。須待壓力小於此值後，才繼續傳輸工作。另一種情況是磁鐵失超時，系統一樣會關閉閥門，不進行傳輸動作。
- (3) 氮氣出口電磁閥：當氮氣出口壓力計在回溫器端的壓力大於20 psi時，系統產生中斷關閉電磁閥。

試車結果

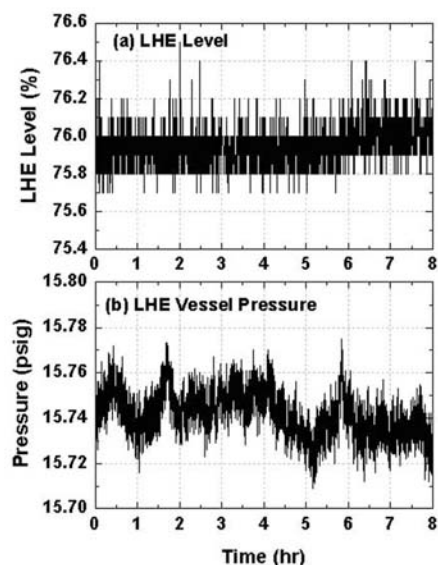
- (1) 液氮傳輸：液氮閥門為手動閥，雖無法以自動傳輸方式補充，在經測試後發現，當手動閥開度設在刻度5.1時，液氮消耗及補充速率可達平衡，如圖四為液氮液位變化與桶槽壓力關係。桶壓於 14.79 ± 0.02 psi間變化。



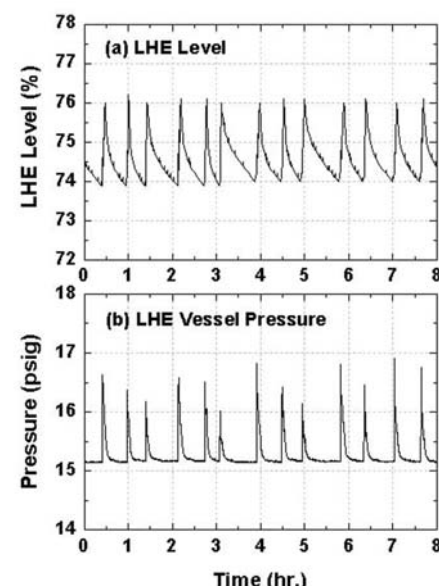
圖四 在不同閥門開度時，液氮液位消耗速率，
(a) 液氮液位，(b)液氮桶槽壓力。

- (2) 液氮傳輸：PID模式控制液氮，液位變化與桶槽壓力關係如圖五。在正常運轉下，液氮消耗量較少，液位維持於 $76\% \pm 0.25\%$ ，桶槽壓力為 15.75 ± 0.025 psi。當磁鐵失超時，液氮消耗量急速增加，減少3.5%左右。桶槽壓力急速上升，系統先關閉液氮閥，待壓力上升至20 psi時，關閉氮氣出口閥門，最後所有壓力由洩壓閥排放至大氣。以此模式操作時，雖能將液位維持於設定值，相對的液氮消耗量增加。原因是傳輸管、閥箱內管線及接頭等熱損所造成。所以才嘗試以ON/OFF模式來做控制。

ON/OFF模式控制液氮，液位變化與桶槽壓力關係如圖六。在正常運轉下，液位維持於74% - 76%。補充時間約三分鐘，2%液氮可維持二十分鐘左右。當液氮補充時，傳輸管先被液氮冷卻產生壓力，進入液氮桶槽，桶壓達16.25 psi。此模式操作時，因液氮傳輸時間變短，液氮消耗量也可減少。但所設定的區間不可過大，以免造成剛開始補充液氮，因桶壓變化關係造成液氮閥在開及關間震盪。



圖五 PID模式控制液氮液位，液位變化與桶槽壓力關係，(a) 液氮液位，(b)液氮桶槽壓力。



圖六 ON/OFF模式控制液氮液位，液位變化與桶槽壓力關係，(a) 液氮液位，(b)液氮桶槽壓力。

結語

未來中心已規劃另一組閥箱，主要供給超導磁鐵使用。根據此次經驗，閥箱內閥門全部以電子式方式控制，並增加液氣分離器（phase separator），讓氣體直接回氣體回收管線而不進入磁鐵，以減少桶槽內原有低溫液體的消耗。感謝磁鐵小組同仁的分工合作，也謝謝高頻小組林明泉、葉孟書及鍾福財熱心幫忙。

參考文獻

- [1] C. S. Hwang, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 13 (2), 1209 (2003)。
- [2] 蕭豐祜、李興傑、金自強、張盛雄、陳俊榮，同步輻射研究中心簡訊53期，14 (2003)。