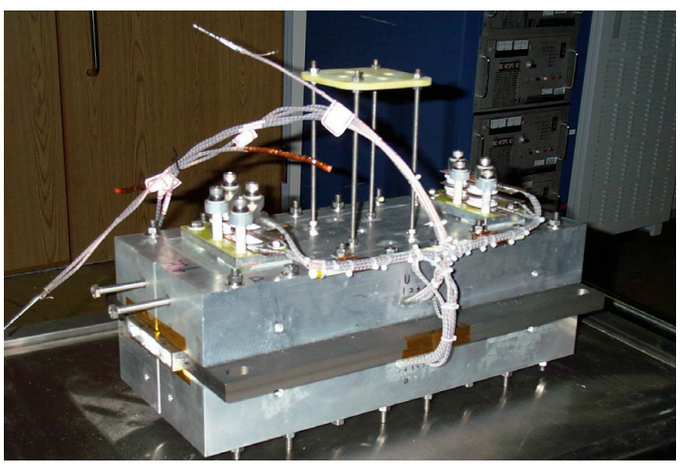
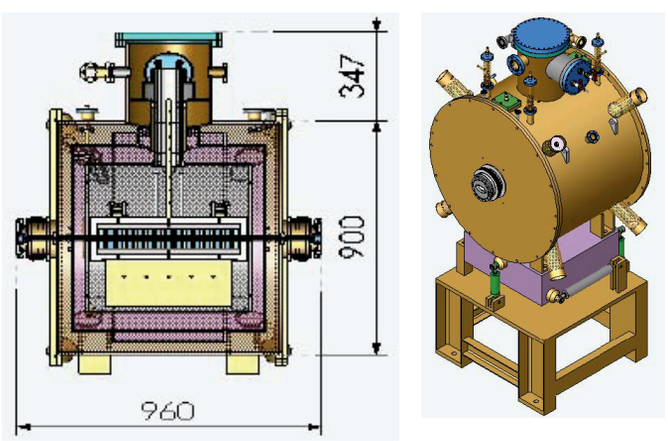
彎段超導增頻磁鐵之建造

彎段超導增頻磁鐵之緣起

國家同步輻射研究中心（NSRRC）現有1.5 GeV的同步輻射光源，主要爲產生VUV和軟X光而設計建造的。但是，近年來，由於X光用戶在硬X光方面的需求，NSRRC開始設計建造具有高磁場的超導增頻磁鐵（SuperConducting Wiggler，SW），將光子源的能量擴展到10-20 keV的硬X光範圍，並增加光通量。一般放置插件磁鐵的做法，是將插件磁鐵放置在儲存環的長直段中，但是在台灣光源（TLS）原設計的四個直線段中，目前都已經沒有直線段的空間可以使用，因此， NSRRC著手開始研究將較短的插件磁鐵放入轉彎段的可能性，這類超導增頻磁鐵稱爲In-Achromatic Superconducting Wiggler，簡稱IASW。



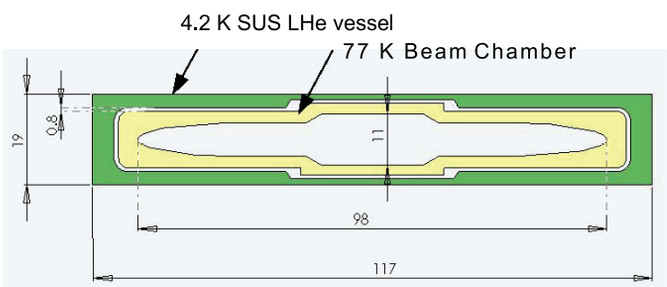
圖一 超導增頻磁鐵的16極結構



圖二 超導增頻磁鐵的2-D剖面圖和3-D結構概要圖

彎段超導增頻磁鐵之結構設計

此超導增頻磁鐵的設計共有16個磁極（圖一），週期長度爲61 mm，整體總長度爲0.96 m(圖二)，其中內部主要的磁鐵爲500 mm長、214 mm寬和167 mm高，且磁場強度最大可以達到3.1 T。此設計將水平孔徑98 mm和垂直孔徑11 mm的眞空腔放入19 mm的垂直間距裡，圖三中展示眞空腔的尺寸規格。由於電子束在超導增頻磁鐵的眞空腔中會在水平方向改變路徑，爲了防止電子束撞到眞空腔，因此，在眞空腔的內部至少要有98 mm的寬度。另一方面，爲了減少電子束以及二極磁鐵的輻射源在眞空腔中產生的熱源影響到磁鐵線圈的溫度，因此在溫度4.2 K的液氦腔和100 K的電子束眞空腔之間留有0.8 mm的空隙以防止熱源傳導到線圈。爲維持眞空腔在100 K，我們利用銅片把77 K的溫度從液氮腔體引到眞空腔。此外，當所設計的液氦腔可以承受210 Mpa的最大壓力時，會產生0.5 mm的最大變形，但不會產生永久變形。



圖三 77 K的光束眞空腔和4.2 K的液氦腔的橫截面概要圖

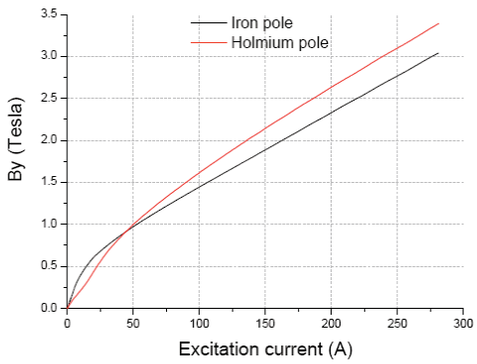
此磁鐵的每個超導軌道型線圈是用直徑0.64 mm的NbTi金屬線繞473圈來製作。由於當最大的磁場強度爲3.1 T時，磁極呈現完全飽和的狀態，因而增加線圈上的磁場強度，所以，爲了降低線圈上的磁場強度，嘗試在線圈和磁極之間的留下空隙，結果發現，當超導線圈和磁極沒有緊密的相接時，超導線圈上的磁場有顯著的下降。因此，在磁極和線圈之間，在直線段留下0.1 mm的空隙，而彎段留下2 mm的空隙，在空隙中充填塑膠材質的材料，此作法將有效的降低線圈上的最大磁場。

彎段超導增頻磁鐵之製作、量測和安裝的過程

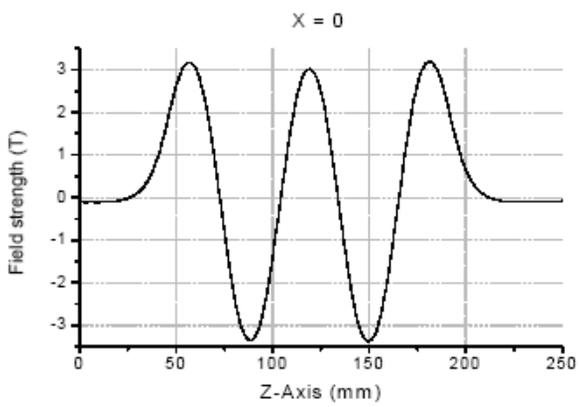
在建造超導增頻磁鐵時，NSRRC的磁鐵小組是以一個5極的原型磁鐵設計開始著手，利用這個5極的原型磁鐵來研究機械上和繞線與所採用的超導結線是否可行。利用低溫腔以及低溫的霍耳探針（Hall Probe）來量測垂直方向的磁場，結果量測到，使用鈥（Holmium）材料的磁極會比原來使用的低碳1006材料的磁極產生更高的磁場，圖四爲這兩種材料在不同的電流之下的磁場強度，使用鈥材料的磁極產生的磁場大約比低碳

李宛萍（行政組），黃清鄉（儀發組）

1006材料的磁極產生的磁場高約0.3 T。接著，利用中間磁極的線圈電流可以將磁場調整到最佳的磁場大小，另一方面，利用兩端的最後磁極的線圈電流可以將整個增頻磁鐵的一次與二次積分值調到零，圖五爲沿著長軸方向量測到的磁場的圖示。因此，可以從這個5極的原型磁鐵來驗證所設計的磁鐵結構和磁場大小是正確而且是可以接受的。



圖四 超導增頻磁鐵使用不同的磁極材料，在不同的電流下的磁場強度。



圖五 超導增頻磁鐵沿長軸方向的磁場強度

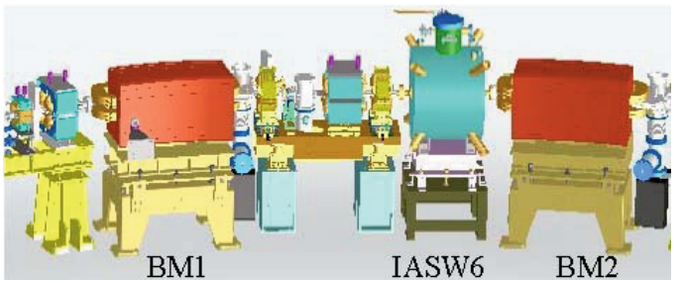
爲了減少超導繞線的連接處，磁鐵小組設計一條連續且足夠繞完16個磁極的繞線。在磁極完成繞線後，將繞好的線圈的磁極和磁極裝配到鋁製的模子裡，在50 ℃的高溫下，將鋁製模子填滿低溫用的環氧樹脂來與超導線圈黏合。當磁鐵冷卻下來後，將鋁製模子鉗緊以防止線圈移動。最後，利用重複的訓練磁鐵，可以得到當電流爲270 A時，可達到最大的磁場3.2 T，另外，若將中間的磁極電流增加到285 A，則結果會使得磁場達到3.35 T。

彎段超導增頻磁鐵之建造時程與未來展望

在表一中，列出了超導增頻磁鐵從設計、製造到安裝完成的建造時程。目前，這座超導增頻磁鐵被放在儲存環中的第六段中，靠近第二座二極磁鐵的地方，如圖六。這是第一座由國人自行建造完成的超導增頻磁鐵，未來，NSRRC也將陸續建造第二、三座的超導增頻磁鐵，預計將安裝於儲存環第二、四段的BM1與BM2之間，以產生高通量的硬X光，滿足用戶對X光的需求。

表一 超導增頻磁鐵建造時程表

2003年6月：	完成超導增頻磁鐵的磁路設計以及磁力磁能的分析
2004年3月：	完成超導增頻磁鐵工程圖
12月：	完成超導增頻磁鐵 (5極) 原型磁鐵的製造與測試，測試結果已符合規格3.1 T
2005年7月：	完成第一個自製超導增頻磁鐵的製造與並測試
12月：	完成超導增頻磁鐵儲存環的安裝



圖六 超導增頻磁鐵安裝於儲存環轉彎段中的位置概要圖

參考文獻：

[1] C. H. Chang, *et al.,* “Construction of an in-achromatic superconducting wiggler”, NSRRC Acitivity Report 2004/2005, P.100.

[2] C. H. Chang, *et al.,* “Design of an in achromatic superconducting wiggler at NSRRC”, Proceeding of EPAC 2004, P.425.