

恆定電流累加注射運轉的 輻射安全分析與防護

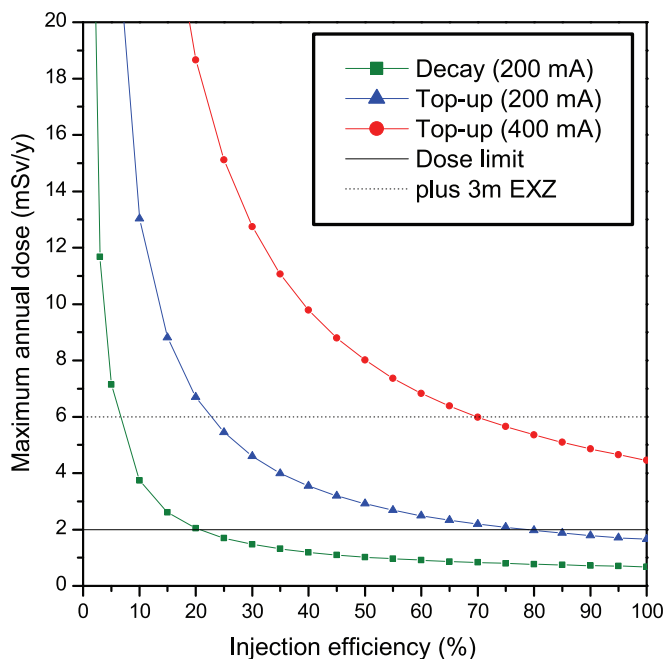
國家同步輻射研究中心第七十二次安全委員會議於94年10月6日正式同意恆定電流累加注射運轉小組所提出之運轉規劃與輻射防護措施，在輻射安全連鎖系統的保護下開始於用戶時段試行恆定電流累加注射運轉模式。本文就恆定電流累加注射運轉下輻射安全相關的分析與防護措施做一簡短說明。

輻射安全分析

恆定電流累加注射是第三代同步輻射運轉之極致目標，於此運轉模式下對各項加速器元件均有相當嚴苛之要求。因儲存電流維持不變，熱負載亦保持恆定狀態，對於儲存環與光束線的穩定運轉有很多的好處，同時能夠提供實驗用戶更高通量且穩定的同步輻射光源。因為高能電子損耗數目會增加，產生的輻射源將比傳統的電流衰減運轉模式更多，為了確保實驗用戶在儲存環恆定電流累加注射運轉模式下的輻射安全，必要提高加速器的運轉效率與加強輻射防護措施，目標是在不提高本中心年劑量設計目標的情況下，確保恆定電流累加注射模式運轉下的安全度。根據輻射安全分析的結果顯示，除了必要的基本安全連鎖系統保護裝置之外，注射效率是恆定電流累加注射運轉的一個關鍵因素，直接影響儲存環內輻射劑量，其影響如圖一所示。若以過往儲存環平均約30%的注射效率來看，200 mA衰減模式造成的最大可能年劑量約為1.47 mSv，低於本中心的劑量限值2 mSv，200 mA和400 mA恆定電流累加注射運轉對應的最高年劑量預期為4.60和12.74 mSv，雖然這兩個數值屬於法規允許的範圍之內（每年不超過20 mSv），但是依目前國際上類似同步輻射設施盡可能降低輻射暴露的潮流來看，顯然中心必須採取積極的輻射防護措施，要求提升注射效率以降低輻射來源，並加強輻射屏蔽與管制措施，以將人員劑量控制在本中心劑量限值之內。

輻射屏蔽與管制措施

根據輻射防護的三原則，想要降低人員所受之輻射的強度，除了增加屏蔽之外，也可以從拉長與輻射源的距離或者減少人員停留的時間來考慮。雖然增加屏蔽是阻擋輻射最可靠有效的方法，但是以目前中心儲存環的實際環境來說，內有日益複雜的加速器元件，外有越來越多的光束線與實驗站，要全面大幅改善主屏蔽體的功能有實際空間與時間上的限制，為了因應機器性能提升所帶來輻射源的增加，實際執行上也必須從其他方向來考慮，以符合本中心所制定的人員年輻射劑量限值的規定。首先，經過仔細評估，我們已在下列最可能發生電子局部損耗的區域加強屏蔽，包括第一直段注射點附近的內外牆、第四直段超導共振腔與SW6插件磁鐵附近區域、Wide Range光束線前端區域、還有IR光束線實驗站前方。至於其他區域則必須藉由加速器運轉效率的提升、配合人員管制範圍的擴大來降低輻射的可能影響。根據理論分析與實際測量的結果顯示，儲存環的電子損耗位置絕大多數發生於長直段的插件磁鐵附近，對於第一段的插件磁鐵WLS和第四段的SW6所引出之 X-ray 光束線，因為原來就有輻射屏蔽屋的設計，所以它們對儲存環轉



圖一：不同運轉模式下，儲存環實驗區人員所受之年輻射劑量與注射效率的關係。

換成恆定電流累加注射運轉模式所受的影響不大，至於其他插件磁鐵（EPU、U5、W20和U9）所引出的VUV光束線，上游電子損耗產生的制動輻射可能會沿光束線出口一起被引出，為了降低注射時局部電子損耗產生之制動輻射於光束線組件附近造成的二次散射，我們擴大了原有設計的光束線禁止進入區。

至於整個儲存環實驗區的部分，原來輻射安全評估的基準點是指最靠近主屏蔽牆的位置，也就是假設可能有人長時間貼近屏蔽牆邊工作。當然實際上不太可能發生這種情形，而是作一個保守的假設。根據模擬計算的結果顯示，若以儲存環主屏蔽牆的表面為比較基準，輻射強度隨距離稀釋衰減的效果約為：在1 m的位置降為原來的59%、在2 m的位置降為原來的43%、在3 m的位置降為原來的33%、在4 m的位置降為原來的26%，這些結果可以幫助我們規劃人員管制區域的範圍與相對應要求的注射效率。另外我們也將嚴格執行輻射工作場所的管制措施，所有進入實驗區的工作人員必須佩帶TLD人員劑量計，除了當作個人資料保存外，也可以提供給輻射及操作安全組作為推動相關輻射安全措施的改進方向。至於非輻射工作人員、非實驗人員、及一般訪客，在初步試行階段，僅能沿著實驗區管制之參觀區域活動，而且必須有中心同仁全程陪同，禁止在恆定電流累加注射運轉模式時自行進入儲存環實驗區域。

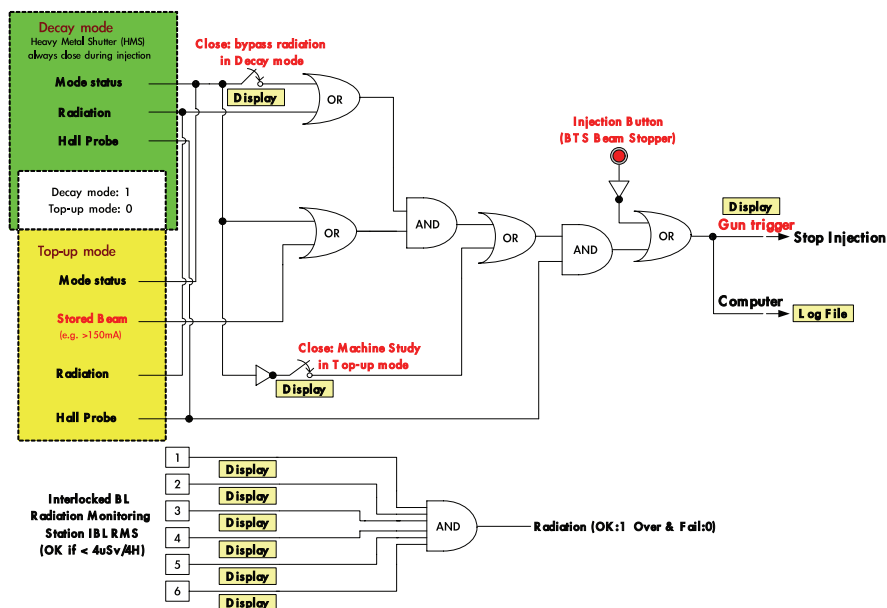
輻射監測與連鎖系統

因為恆定電流累加注射運轉模式與傳統的電流衰減運轉模式有些不同的輻射安全考量，因此必須修改原先設計的輻射安全連鎖邏輯。恆定電流累加注射運轉最重要的安全措施是為了防範注射電子沿光束線出口越出主屏蔽體，因此必須在安全連鎖系統邏輯中加入新的限制條件，只有在儲存環設定一切正常之下，才允許在光束線安全遮門打開的情況下進行累加注射。因此我們將儲存環的電流讀值加入恆定電流累加注射運轉的安全連鎖系統，成為允許累加注射的必要條件之一，更進一步為了保守起見，因為儲存環所有二極磁鐵的電源是串接的，我們另外增加一個獨立的二極磁鐵磁場測量設備在BM1的位置，以確保儲存環二極磁鐵的設定是正常的，至少有足夠的磁場強度偏轉注射電子軌道，防止注射電子沿軌道切線方向直射進入光束線。至於原來電流衰減模式下的完整或補充注射還是維持在光束線安全遮門關閉的情況下進行，只有允許補充少許電流的累加注射可以打開光束線安全遮門，以防止嚴重意外發生的機率並降低來自注射損耗電子產生之制動輻射的洩漏。

現階段儲存環的注射效率是影響人員所受輻射劑量最重要的參數，又因為恆定電流累加注射運轉模式對實驗用戶來說並無明顯注射與儲存時期之分，無法利用減少人員佔用因子以降低主要來自注射時期的輻射劑量，因而更凸顯提高注射效率的重要性，因此有必要在恆定電流累加注射運轉之時持續監控注射效率的變化，一旦注射效率變差能夠即時提醒運轉人員採取適當的行動。根據輻射安全分析報告的結果，若以屏蔽牆邊作為人員可能最靠近的位置，200 mA恆定電流累加注射運轉可接受的平均注射效率應該是75%以上，這樣可以確保人員年劑量不會超過本中心的規定限值。但是若將劑量評估點外拉至離牆約3米的位置，模擬計算的結果告訴我們該處輻射劑量會降為原來屏蔽牆邊的三分之一左右，則根據圖一的結果顯示，200 mA恆定電流累加注射運轉可接受的最低平均注射效率應該可調降至25%左右，若儲存電流要提升至400 mA，即使配合上已有的3米圍籬區，注射效率還是一樣要提升至75%以上才可以滿足本中心人員年劑量限值的要求。

如果能將注射效率的要求直接納入恆定電流累加注射運轉連鎖系統之中應該是非常理想的，但是考慮到目前我們儲存環注射效率的變動性與控制性，直接納入以繼電器為基礎的硬體連鎖系統有實際執行的困難，因此我們建議將注射效率的要求交由電腦的恆定電流累加注射運轉控制程式來處理，輻射安全連鎖系統的部分改由以現場輻射度量的結果作為判斷基準，一旦現場輻射劑量超過預先設定值，連鎖系統將觸發立即停止注射程序，儲存環運轉模式馬上由恆定電流累加注射切換回電流衰減模式，在電流衰減模式下，一方面輻射劑量率會立即降至與天然背景相當的水準，一方面光束線用戶也可以不受影響繼續他們的實驗。因此我們在儲存環六長直段對應的插件磁鐵光束

Logic Design of Top-Up Radiation Safety Interlock



圖二：恆定電流累加注射運轉模式的輻射安全連鎖系統邏輯圖

線前端光學組件附近安裝了六台具有累積劑量與連鎖功能的輻射偵測站，我們將本中心2 mSv的年劑量限值保守地除以每年2000工作小時，然後以每4個小時為一個計時單位，也就是說4個小時的累積輻射劑量不得超過4 μ Sv，一旦不到4小時就累積超過該數值，儲存環的注射程序將自動停止，以控制現場輻射劑量不再繼續累積，必須等到下一個4個小時時段開始時，才能重新開啓儲存環的注射程序，這樣一來就能確保不會有人的年累積輻射劑量可能超過中心的規定。恆定電流累加注射運轉模式的輻射安全連鎖系統邏輯總結如圖二所示。

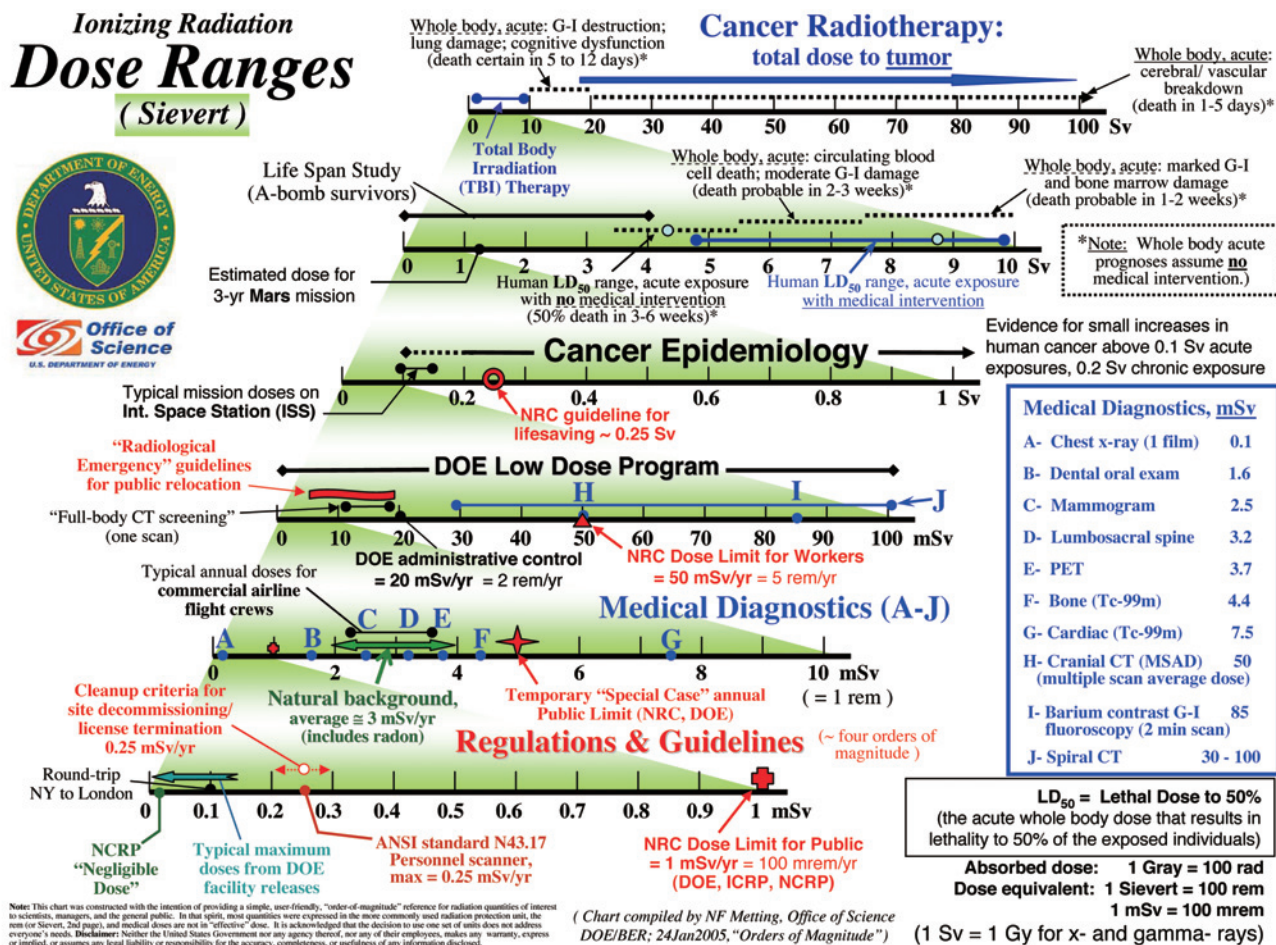
根據輻射安全分析的結果顯示，若儲存環的注射效率可以達到上述建議的標準，則連鎖式光束線輻射監測站應該不至於會測量到超過4個小時4 μ Sv的限值，除非有任何特別原因導致儲存環射束損耗模式變成非常地局部損耗，此時若是無法透過加速器參數調整與優化來改進，則必須另外為該區域光束線的前端光學組件設計簡易輻射屏蔽屋以加強局部輻射屏蔽效果。除了新增之連鎖式光束線輻射監測站，本中心原來就有一套即時輻射監測系統一直在運作中，它會隨時反應本中心各地的輻射劑量率分布情況。另外，為方便管制起見與協助實驗用戶簡單了解他們所處區域的情況，輻射及操作安全組也會每月定期度量並公佈所有光束線前中後三個區域附近的月累積輻射劑量作為參考，一旦有異常情形發生，輻射及操作安全組會立即調查原因並採取適當措施。

結論

針對恆定電流累加注射運轉模式的輻射安全總結來說，除了上述輻射屏蔽與管制區域的加強之外，對於如何防止注射電子束被意外引出至主屏蔽體外的嚴重事故，我們有兩道獨立的連鎖裝置來保護；對於預期局部損耗電子所造成的輻射，我們有連鎖式光束線輻射監測站來確保人員輻射安全；對於整體加速器的運轉表現，我們有電腦控制軟體隨時監測注射效率的變化以採取適當的反應措施，再加上第二層的輻射度量硬體連鎖系

統來確保達到最低要求；最後再配合上輻射及操作安全組原有例行的輻射監測措施：包括即時輻射監測系統、定期所有光束線的月累積輻射監測與每個人自己所佩帶的TLD輻射劑量計讀。在上述輻射防護措施的保護下，我們有信心維持原有之年劑量限值管制目標，並安全地操作恆定電流累加注射運轉模式。根據最近這一個月來儲存環運轉恆定電流累加注射模式所收集的資訊來看，由於注射效率的提升配合輻射防護措施的改善，儲存環實驗區的整體輻射劑量甚至比之前運轉在電流衰減模式時更低，顯示上述運轉規劃與防護措施確實發揮效果。我們同時

要強調，本中心的年輻射劑量限值2 mSv/y只有法律規定的十分之一而已，其大小約略等同於台灣地區一年自然背景輻射的強度，在如此低的輻射劑量下，中心同仁與外來實驗用戶不需要擔憂輻射對人體的影響。圖三中，我們引用美國能源部所製作的資料，詳細介紹了各種天然與人為輻射來源強度的比較，非常具有參考價值。當然，基於輻射防護所謂合理抑低的原則下，持續改進加速器性能以減少電子損耗與加強輻射防護措施是必須的項目之一。



圖三：各種天然與人為輻射來源強度的比較

參考文獻：

- [1] 恆定電流累加注射運轉模式輻射安全分析報告，國家同步輻射研究中心內部報告(2005)。
- [2] 有關圖三來源，請參考http://iowdose.tricity.wsu.edu/radiobio_resources.htm