

恆定電流累加注射運轉模式 對輻射安全的影響評估

為了降低熱導對光學元件的影響，提供用戶更好更強的同步輻射光源，本中心預定於明(2005)年中試行運轉恆定電流累加注射的運轉模式 (Top-up mode)。相較於目前的運轉模式，累加注射期間光束線安全遮門將打開，注射頻率與儲存電流也將增加，預期儲存環實驗區域輻射劑量將明顯增加，因此有必要針對此一重大改變進行輻射影響評估並提出解決方案，以確保研究與工作人員之輻射安全。

許榮鈞、王昭平 (輻射及操作安全組)

基本參數與假設

目前本中心用戶時段的運轉模式為200 mA衰減模式 (Decay mode)，儲存環每天會有一次完整的注射(Full injection)，將儲存電流提升至200 mA，經射束調整之後隨即開放用戶使用；約經八個小時儲存電流衰減至120 mA時，運轉人員會進行一次補充注射 (Re-fill injection)，將儲存電流補足至200 mA後再開放用戶使用；到深夜12點用戶時段結束時，儲存環內殘餘的電流120 mA將留供機器研究 (Machine study) 使用或踢除 (Beam dump)。轉換成恆定電流累加注射運轉模式後，儲存環每天一樣會有一次完整的注射，儲存的電流則可能提升至400 mA；待開放用戶使用後，儲存電流每衰減1或3 mA即展開一次累加注射 (Top-up injection)，將儲存電流維持在200 mA或400 mA附近，且累加注射期間光束線安全遮門是打開的；到用戶時段結束時，儲存環內的電流一樣將留供機器研究使用或踢除。詳細的運轉時程如表一所示，衰減模式以八小時為一時段，累加注射的周期固定為120秒。

在正常注射條件下，增能環傳輸線尾端輸出的電

表一 不同運轉模式下，儲存環每日用戶時段的運轉時程

Decay mode (200 mA)	Top-up mode (200 mA)	Top-up mode (400 mA)
1. Full injection (0→200 mA)	1. Full injection (0→200 mA)	1. Full injection (0→400 mA)
2. Beam decay in a shift (200→120 mA)	2. Beam decay in a period (200→199 mA)	2. Beam decay in a period (400→397 mA)
3. Re-fill injection (120→200 mA)	3. Top-up injection (199→200 mA)	3. Top-up injection (397→400 mA)
4. Beam decay in a shift (200→120 mA)	4. Repeats 2nd and 3rd step 480 times in 16 hours	4. Repeats 2nd and 3rd step 480 times in 16 hours
5. Beam dump (120→0 mA)	5. Beam dump (199→0 mA)	5. Beam dump (397→0 mA)

子數目約為 2×10^9 electron/s (相當於2.16 W)。給定不同的儲存環注射效率時，注射期間未被儲存環捕獲的電子假設有一半局部損耗於注射點附近，另一半則假設和儲存衰減期間的電子損耗模式一樣，均勻損耗於周長120 m的環狀真空腔內。在工作量 (Work load) 方面，本評估報告採保守估算，假設儲存環運轉全年無休，研究人員每人每年工作時數為2000小時，工作地點則位於插件磁鐵光束線的前端光學組件附近。

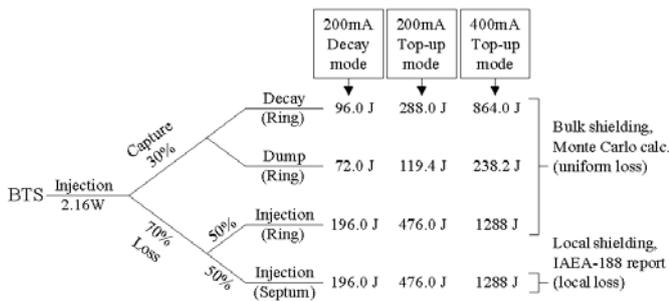
輻射劑量的評估

恆定電流累加注射運轉模式之輻射安全評估主要考量的問題有下列兩項，它們直接來自恆定電流累加注射運轉與目前衰減模式之間的差異：

1. 電子損耗數量的增加對儲存環實驗區工作人員造成的影響。
2. 在光束線安全遮門打開的情況下進行累加注射可能產生的問題。

在本中心工作接收到的輻射劑量皆源自於加速器運轉損耗的高能電子。恆定電流累加注射運轉所增加的電子損耗數量與儲存環的注射效率息息相關，以

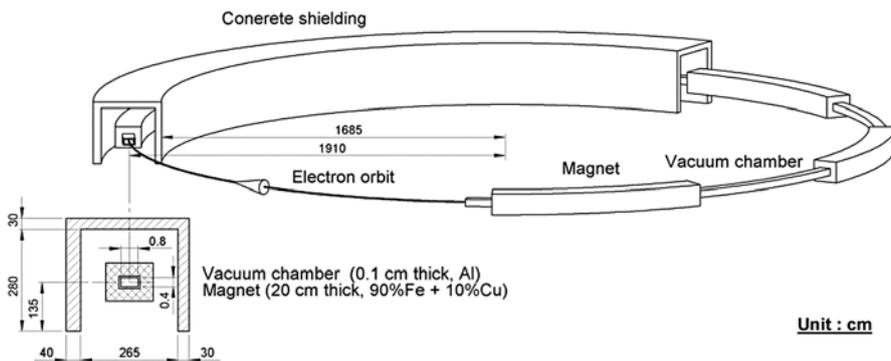
30%的注射效率為例，我們可以根據表一的運轉時程推導出不同運轉模式下的電子損耗數量，結果如圖一所示。很明顯地，恆定電流累加注射運轉造成的電子損耗數量比目前的衰減模式大幅增加數倍，尤其當注射效率不佳時，情況更為嚴重。



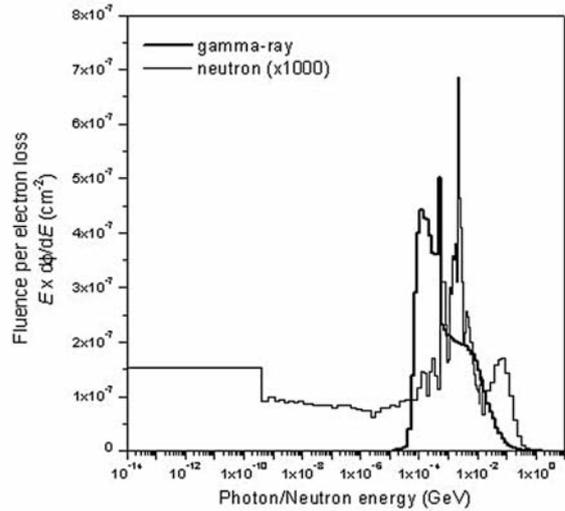
圖一 不同運轉模式下每日電子損耗的情節

人員劑量的評估分成兩部分進行，對於局部損耗的電子，我們引用文獻中的解析公式^[1]，對於均勻損耗的電子，我們利用三維蒙特卡羅程式FLUKA來模擬，計算所用之簡化儲存環幾何結構如圖二所示，計算所得之儲存環主屏蔽體外的加馬與中子能譜如圖三所示，加馬與中子能譜再乘上劑量轉換因子即可得到人員劑量。我們模擬計算所得的劑量數值和實際測量結果的比較大致符合，顯示這個評估的方式正確可行。

恆定電流累加注射運轉除了增加電子損耗之外，累加注射期間打開光束線安全遮門也讓實驗用戶面對另一種輻射來源，這個輻射來源包括意外引出的高能電子和制動輻射（bremsstrahlung）撞擊光束線組件引發的散射輻射。原則上，恆定電流累加注射運轉是絕對不允許發生將注射電子意外引出至儲存環主屏蔽體外，這部分必須靠連鎖系統來阻絕，至於制動輻射造成之散射輻射則要靠加大光束線圍籬區（Exclusion zone）和增設輻射屏蔽屋（Hutch）來解決。散射輻射一定會對實驗用戶產生影響，圖四是最近的測量結果，在安全遮門打開的情況下，零度方向的制動輻射非常強，絕對不允許有人介入圍籬區，至於它們經光束線組件散射造成的二次輻射，我們可以利用測量結果搭配文獻建議的辦法來評估^[2]。特別要說明的是



圖二 FLUKA模擬計算所使用之儲存環幾何結構



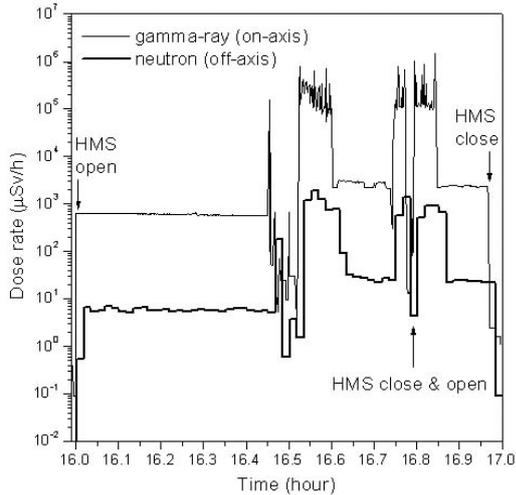
圖三 儲存環主屏蔽體外的加馬射線與中子能譜圖

注射效率越差，損耗電子數目越多，光束線安全遮門打開造成的問題就越嚴重。

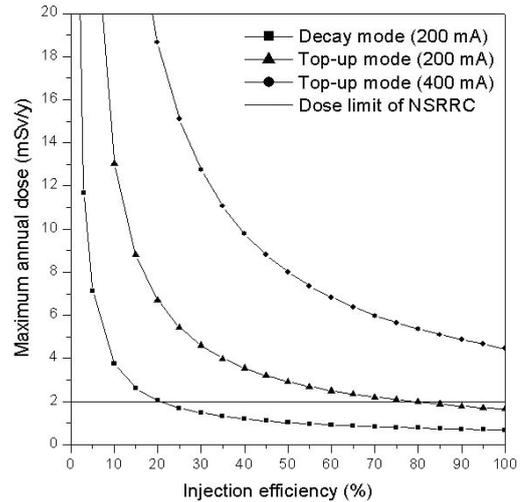
結果與討論

考慮前面所提的兩種輻射來源，在各種不同的注射效率下，儲存環實驗區工作人員所受之最大年輻射劑量評估結果如圖五所示，清楚可見儲存環注射效率的重要性^[3]。以目前儲存環約30%的注射效率來看，200 mA衰減模式造成的年劑量約為1.47毫西弗（mSv），還在本中心的劑量設計目標（每年不得超過2 mSv）之內，200 mA和400 mA恆定電流累加注射運轉對應的年劑量則為4.60和12.74 mSv，雖然這兩個數值還在法規允許的範圍之內（每年不超過20 mSv），但依目前國際上盡可能降低輻射暴露的潮流來看，顯然必須採取積極的輻射防護措施，強力要求提升注射效率並加裝適當輻射屏蔽，將人員劑量控制在劑量設計目標之內才能允許恆定電流累加注射運轉。

從輻射安全的角度來看，儲存環要由目前的運轉模式切換到恆定電流累加注射模式，最大的問題在於注射效率與機器穩定度能否大幅提升，若儲存電流要進一步提升至400 mA，光是注射效率的提升是不夠的，儲存環主屏蔽體與實驗區的管制措施也需進一步加強，才能符合目前的劑量



圖四 在光束線安全遮門打開的情況下，測量注射段零度方向的制動輻射與九十度方向的中子輻射。



圖五 不同運轉模式下，儲存環工作人員所受之年輻射劑量與注射效率的關係圖。

管制標準。有鑑於此，為了確保實驗用戶在恆定電流累加注射運轉模式的輻射安全，我們提出以下措施以為因應：

1. 為了防範注射電子跑出主屏蔽體，必須加入新的連鎖系統邏輯，只有在儲存環設定一切正常並有相當高的儲存電流之下，才允許在光束線安全遮門打開的情況下進行累加注射。另外也考慮把注射效率和輻射監測納入儲存環運轉的連鎖系統。
2. 要減少儲存環運轉產生的輻射問題，提高注射效率與束束生命期是最有效的方式，由圖五可以明顯看出，當儲存環的注射效率欠佳時，工作人員所受之輻射劑量是相當大的。
3. 由於注射過程損耗電子最多，注射段的外牆屏蔽體需要再加強，我們已經排定今年底停機時進行施工，完成後該段週遭的輻射強度將與儲存環其他位置相當。另外，原有光束線的輻射屏蔽設計也必須逐條重新檢視，一些長直段光束線的前端光學組件需要設計簡易輻射屏蔽屋，以減少制動輻射散射造成的影響。
4. 重新劃分輻射管制區並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。

要降低人員所受之輻射劑量，除了減少輻射源的強度之外，還要注意加強屏蔽、拉長距離與縮短時間三要點，我們希望在不提高中心年劑量設計目標的情況下，能夠安全運轉恆定電流累加注射模式，因此不

論在加速器性能提升與屏蔽改善方面都還有相當多的工作要進行。

參考文獻

- 【1】 W. P. Swanson, IAEA Technical Reports No. 188 (1979).
- 【2】 J. C. Liu, and V. Vylet, Radiat. Prot. Dosim. 96, 345 (2001).
- 【3】 R. J. Sheu, J. P. Wang, J. Liu, C. R. Chen, and F. D. Chang, NSRRC/SA/IM/2004-01 (2004).

同步輻射相關活動

August 23 - 25, 2004, ESRF, Grenoble, France
4th Conference on Synchrotron Radiation in Materials Science
<http://www.esrf.fr/Conferences/SRMS-4/>

September 19 - 4, 2004, APS, Argonne, U. S. A.
Fifth International Conference in Inelastic X-ray Scattering
<http://www.ixs04.aps.anl.gov/>

September 27 - 29, 2004, MAX-lab, Lund, Sweden
Workshop on 'Our Future Light Source'
<http://www2.maxlab.lu.se/meeting/m4/index.jsp>

November 1 - 13, 2004, EMBL, Heidelberg, Germany
Conference on Structures in Biology
<http://www.embl-heidelberg.de/>

November 17 - 19, 2004, SPring-8, Hyogo, Japan
The 3rd Int'l Workshop on Radiation Safety on Synchrotron Radiation Sources
<http://radsynch04.spring8.or.jp/>