

行政院國家科學委員會補助
大專學生參與專題研究計畫研究成果報告

* ***** *
* 計 畫 *
* : 醫用迴旋加速器之環境輻射評估 *
* 名 稱 *
* ***** *

執行計畫學生： 陳俊勛
學生計畫編號： NSC 98-2815-C-040-001-E
研究期間： 98年07月01日至99年02月28日止，計8個月
指導教授： 劉文山

處理方式： 本計畫可公開查詢

執行單位： 中山醫學大學醫學影像暨放射科學系

中華民國 99年03月30日

醫用迴旋加速器之環境輻射評估

Evaluations of Environmental Radiations at Medical Cyclotron

陳俊勛¹, 柯敏君^{2,3}, 李瑞萍^{1,2,3}, 劉文山⁴, 陳健懿^{1,4*}

¹醫學影像暨放射科學系, ²台灣新吉美碩公司, ³附設醫院迴旋加速器中心, ⁴附設醫院放射腫瘤科

中山醫學大學, 台中, 40201, 台灣

Chun-Hsun Chen¹, Mindy Ko^{2,3}, Jui-Ping Lee^{1,2,3}, Wen-Shan Liu⁴, Chien-Yi Chen^{1,4*}

¹School of Medical Imaging and Radiological Sciences, ²Global Medical Solutions, Taiwan, ³Cyclotron Center,

⁴Department of Radiation Oncology, Chung Shan Medical University Hospital, Taichung 402,

Chung Shan Medical University, Taichung 40201, Taiwan, ROC

*corresponding author, e-mail:ccy@csmu.edu.tw

摘要:

本次計畫是第一次利用熱發光劑量計(Thermoluminescent dosimeter, TLD)，進行醫學大學附設醫院迴旋加速器中心的長達一個月的 TLD-100 佈點，當做環境輻射評估，TLD-100 經由計讀儀得到的電荷量，在清華大學 Cs-137 校正場，測得各 TLD 均勻性及轉換毫西弗劑量的方程式。將未使用過的 TLD-100 被照射測量後，取用準確性、靈敏度校正誤差在 5% 以內的 TLD-100，利用二維空間分布，表示經過自我屏蔽設備洩漏的光子輻射，在靠近 $H_2^{18}O$ 靶處的光子輻射有顯著的變化，在運轉的一個月裡，迴旋加速器本體的輻射劑量結果範圍從 0.28 至 17.0 mSv。在醫院工作人員每一年內，所受到的額外的加馬劑量需低於 10 mSv，並小於 ICRP60 號報告，結果表示在迴旋加速器中心的辦公室工作範圍內，自我屏蔽系統具有保護人員的功能，並且符合法規規定值。最後並探討光子劑量的最小可偵測值(The minimum detectable limit, MDL)，驗證 TLD-100 測量結果的可信度。

關鍵詞: 熱發光劑量計、迴旋加速器、環境輻射、最小可測值

Abstract

This work is the first to evaluate environmental radiation in the facility of CTI RDS-111 cyclotron center with (Thermoluminescent dosimeter, TLD)-100 at Medical University Hospital during a month of operation. TLDs were calibrated using ^{137}Cs irradiated facility of National Tsing-Hua University. The accuracy, sensitivity and blank test of TLD-100 were also measured within 5%. Two dimensional environmental radiations were mapped, and indicated heavy leakage of photo dose through self-shielded blocks. These photo doses reveal strong variations among positions close to the H_2^{18}O target. The photo doses in the cyclotron room range from 0.28 to 17.0 mSv in one month study. The annual “extra” γ -ray for medical personal is less than 10 mSv at the highest of radiochemistry lab during a year of operation, below the recommended ICRP 60 limit. The results reveal that the self-shielded system adequately protects laboratory personnel. The minimum detectable limit (MDL) of photo dose was discussed herein to demonstrate the reliability of TLD-100 approach.

Keywords: cyclotron, Thermoluminescent dosimeter, Environmental radiations, Minimum detectable limit

前言:

惡性腫瘤可以說是國人的健康殺手，在國內也引進各種醫療精密的儀器來進行病灶檢查與治療，正子放射造影(Positron Emission Tomography, PET)是現今，最先進的醫療診斷器材。正子是帶正電荷的電子，必須由一種可以放射出正子的同位素藥物經 β^+ 衰變的過程而產生。目前在臨床上最常使用的正子同位素藥物是 ^{18}F -FDG(Fluorodeoxyglucose) 去氧葡萄糖，正子同位素是可由迴旋加速器產生。供應 PET 藥物的迴旋加速器中心(cyclotron)，製藥過程會衍生額外巨量輻射，造成工作人員多種輻射劑量，這包含屏蔽散漏出的中子、加馬射線以及加速器衍生的放射性氣體，本研究將對於中山醫學大學醫院附屬醫院(Chung Shan Medical University Hospital, CSMUH)迴旋加速器中心，進行環境輻射劑量評估。中山醫大附醫的迴旋加速器中心由1999年開始正式運轉，迴旋加速器是由CTI公司製造，型號為RDS 111，設計上質子的最大額定電流單靶50 μA ，雙靶80 μA ，實際運轉最大靶電流為38 μA ，迴旋加速器採用負離子設計，以氫氣作為離子源，給予電壓使氫氣成電漿狀態，再將帶負電氫離子引出，進入真空電磁場中以電極間的電位差加速帶電粒子，利用磁場使運動中的帶電粒子旋轉，最後以單一能量粒子束導出。加速器每日分二次運轉製藥，每次45分鐘到1小時，單靶1小時，雙靶2小時，每天平均工作運轉3小時，迴旋加速器共有兩射束出口，每一個射束口最多可配置八個靶，第一個射束配置F-18銀靶，另一個射束出口有F-18銀靶和N-13鋁靶，製藥時可依需要選擇單射束或是雙射束。本加速器主要以生產 ^{18}F -FDG為主，半衰期為109分鐘。每產生一個 ^{18}F 原子就會衍生一個中子伴隨產生，而中子活化產物與 ^{18}F 衰變時放出 β^+ 粒子及 γ 射線等，更是迴旋加速器輻射背景增加的主要原因[1,2]。

RDS 111座落於長為8.2公尺，寬為6.7公尺，高度為4公尺獨立空間的加速器本體內，天花板為1公尺厚的混凝土，地板為厚度為1.5公尺的混凝土的屏蔽。迴旋加速器機器到熱核實驗室的牆為0.5公尺，其餘三面牆

的厚度為 0.7 公尺。由熱核室的進入加速器本體的迷道長為 3.5 公尺，寬為 1.2 公尺，兩道電動門控制，電動門材質為 1 公分的鉛與 5 公分的聚乙烯，如圖 1 所示。輸送核藥進出口由鐵製成，長為 56 公分，寬為 51 公分，深度為 60 公分，厚度為 3 公分，輸送處最多可擺放 30 支核醫藥物鉛屏蔽柱。本加速器在自體屏蔽與電動門之間設有連鎖裝置，若自體屏蔽未完全密合及電動門(圖 1 佈點 5)則加速器變無法運轉，另有移動式鉛屏蔽，含鉛玻璃材質，移動式鉛屏蔽高為 1.5 公尺厚度為 0.06 公尺，藉此保障工作人員之輻射安全性[2,3]。

TLD-100 測得的環境劑量數值，以統計偏差 95%信賴區間(confidence level)表示由 TLD-100 在這研究所測得的環境劑量值，並經過演算後得到這方法的最小可偵測值(minimum detectable limit, MDL)，每個偵測點的輻射值與信賴區間的關連性，以 TLD-100 方法測量，並以 MDL 的觀念解釋。

本論文以工作人員的輻射安全，當為研究目的。在迴旋加速器中心進行環境輻射評估，以作為觀察工作範圍的輻射劑量變化，有助於定期維修人員的輻射防護，並可以擬定最適化的安全計畫，期可當為工作人員的安全，更確實的保護。

材料與方法:

熱發光劑量計(TLD-100)進行輻射劑量度量，因為由於TLD在環測上的方便性是最常被使用，常用的熱發光劑量計可分為四種，氟化鋰(LiF)、硼酸鋰(Li₂B₄O₇)、氟化鈣(CaF₂)及硫酸鈣(CaSO₄)，依據不同的化學性質，進行不同的環境與倫道假體(Rando, Alderson Radiation Therapy, Long Beach, Columbia, Canada)輻射偵測。在輻射度量最常用為氟化鋰的 TLD-100其中鋰成分為7.5%Li-6及92.5%Li-7，有效原子序為8.2，與人體軟組織有效原子序7.64和空氣的效原子序7.51相近，可以直接當為評估環境劑量及人體組織所受的劑量。TLD-100的能量依存性

低，最低可測限值5mR，重量為24mg，密度為 $3.12\text{g}/\text{cm}^3$ ，TLD-100的添加物，為當加入少量的元素如鎂(magnesium, Mg)與鈦(titanium, Ti)，形成能帶間，有許多的能隙存在，如電子身陷此能階陷阱，其處於一個介穩定態(metastable)，可以當為低能量輻射偵測劑[4]。200顆TLD， $0.9\text{mm} \times 3.2\text{mm} \times 3.2\text{mm}$ ，為了精確得知輻射劑量值，將TLD進行品質選擇與校正的過程，TLD經由清華大學原科中心保健物理組的輻射偵檢校正實驗室，以銫-137標準射源作為校正工具。這校正實驗室主要設備包含:a.照射器b.軌道床c.輻射度量儀器。校正方法依據ANSI N323(1979)規範執行，能量662keV，範圍為 $5\mu\text{Sv}/\text{h} \sim 20\mu\text{Sv}/\text{h}$ 。取得再現性優良的TLD，校正當中得到曲線，方程式為 $Y(\text{mSv}) = -0.08162 + 0.11371 \times (\text{nC})$ ，如圖2所示，確定TLD對輻射的靈敏度及轉換成劑量的關係式[5]。

佈點圖如圖1，佈下45袋的TLD(每一袋有三顆TLD當為加權平均用)，時間為期一個月(由2008年10月24日至11月24日)，圖3表示每日生產狀況，以加速器本體中心為(0,0)座標，佈點位在離地面1公尺的高度，並記錄迴旋加速器每天的運轉時間，收集當月份由委託計讀單位(輻射防護協會)之TLD背景劑量(圖1佈點4)，當為參考。辦公室為主要工作人平日辦公的地方，因此，當為本研究主要觀察處(圖1佈點1、2、3)。熱核室與加速器有管線結合輸送合成器，由於醫用迴旋加速器產生的放射性藥物為針劑需要無菌熱原，為了配合製藥環境需要在衛生署規定內將熱核室改為無塵室，並佈點在進出迴旋加速器中心的浴塵室門口(圖1佈點40、41)。佈點於實驗室為工作人員清洗與分裝的處(圖1佈點29、30、38)，在核醫藥物輸送的主要地帶出口(圖1佈點42、43)，另有侖道假體佈點(如圖1佈點1，編號33、34、35、36)。

經過一個月佈點測量後，進行TLD計讀，熱發光劑量計讀儀(TLD reader)為美國HARSHAW公司出產的Model 3500 TLD計讀儀。為利用熱電耦極反饋電路控制加熱板加熱TLD使其產生熱發光，經過一光學濾片過濾訊號，經由計讀儀內建的光電倍增管與放大器裝置，配合內建WinREMS軟體得到輝光曲線(glow curve)，並有選取目標的區域(region of interest, ROI)，分為ROI1、ROI2、ROI3及ROI4，為了提高計讀的精確

性，本以 ROI3 內研究選擇波峰下累積最大面積當作主要計讀。此回收的 TLD 要進行迴火的手續，以 Furnace 47900 型加熱爐加熱 400 度一小時後，冷卻室溫 10 分鐘再加熱攝氏 100 度兩小時，藉以消除殘留的輻射背景值[5]。

在辦公室(佈點)的侖道假體，是一個頭、頸、軀幹的擬人型假體，假體是填充似人體組織的物質而成，是目前臨床上用來驗證人體劑量的標準假體。假體和人體組織受有一樣的輻射作用，有效原子序、電子密度、質量密度與人體軟組織特性接近，軟組織替代物質為 Isocyanate rubber，肺組織替代物質為 Epoxy resin，骨骼為真人骨骼[4，6]。此假體是由固定厚度橫切片組合而成，總共有 35 片橫片，每片厚度約為 2.5 公分，每一橫切片中間兩兩相距 1.5 公分，鑽有大小為直徑 4.0 毫米的圓洞，可以擺置實驗的 TLD。將四袋 TLD 貼在假體在假體第十七切片(肺部)表面，當為工作人員在辦公室(圖 1 佈點 1)輻射劑量評估的觀察。

在劑量演算上，得到的計讀數據分析可以經由單尾法之最小可測值判斷，對於在加速器中心各地點得到的 TLD 劑量值以下圖 4 表示最小可偵測的輻射劑量[7]。

迴旋加速器量測的輻射劑量(每袋三個 TLD 的平均電量)，如圖 4 中表示由背景輻射(Background, B)之劑量值下，產生一個單尾面積 α ，由表 1 的 k_α 值，則圖 4 的樣本劑量(Sample, S)下產生一個單尾面積 β ，在整個數據判斷中，可以由表 1 中 α 值會取得的不同的信賴區間，最小可偵測輻射劑量公式，來評估由每 TLD 監測這一個月各佈點的環境輻射與背景輻射在統

計偏差上是否有顯著上的不同(significant difference)，如下式[7]:

$$\Delta_{nt} = \sqrt{B} \left(k_\alpha + \frac{k_\beta^2}{2\sqrt{B}} + k_\beta \sqrt{1 + \frac{k_\alpha}{\sqrt{B}} + \frac{k_\beta^2}{4B}} \right) \quad \{1\}$$

上式中 Δ_{nt} 表示每一袋佈值 TLD 的淨輻射劑量(net radiation dose)， k_α 表示圖 4 中背景輻射的標準誤差， k_β 表示

圖 4 中樣本的輻射劑量的標準誤差。

討論與結果:

由迴旋加速器經一個月運轉總時數達到 61 小時中，收集佈點的 45 袋 TLD 後，經由計讀儀量測，完成整個迴旋加速器中心背景輻射評估，透過由清華大學校正場得到的校正曲線轉換公式，得測得的一個月背景值約為 0.32 ± 0.20 毫西弗，在迴旋加速器中心量得劑量值，取常態分布中最有可能的誤差是等於 ± 1.645 標準差，表 2 為在不同 k_{α} 、 k_{β} 之下每一袋 TLD 得到的最小可偵測值如表 2 及圖 5 表示加速器本體內由 TLD-100 測得的二次空間劑量分布圖。

由統計偏差，觀察在面積 95% 的信賴區間，佈點(如圖 1 表示)42、43 演算得到劑量為 1.61 與 2.07 毫西弗相較於背景劑量(圖 1 佈點 4)約高出了 4 與 5 倍，每年仍少於法規每年不得大於 50 毫西弗的限值。經過一個月輻射的偵測後得到在加速器本體內各點的劑量如表 3 及表 4:

收集辦公室佈點的倫道假體在一個月內的監測，並經由 Harshaw 3500 計讀儀，得到數據，在 95% 信賴區間內，經由公式一計算後輻射劑量與背景值沒有顯著上不同，這表示在工作人員的辦公室並沒有額外的劑量，加速器主體內經過一個月運轉，衍生出來的輻射劑量，經過電動門及 0.7 公尺的混凝土牆阻擋後，額外輻射已經消失殆盡，這表示在辦公室工作室極為安全。

王文樺等人以中子偵檢器對國內核能研究所的迴旋加速器進行環境輻射評估，在使用質子射柱照靶時，量測同位素研究靶室屏蔽牆外側中子等效劑量率強度 $23 \mu\text{Sv/hr}$ ，加馬輻射 $5.8 \mu\text{Sv/hr}$ 為其餘均符合法規規定[1]，在迴旋加速器本體運轉時，因中子活化作用，被活化核種釋出各種能量的加馬輻射。在佈點的 42

與 43 位置結果顯示，在運送藥品的出入口，另者為執行樣本靶照射時，靶室屏蔽牆外側冷卻水管，兩者都有測量到輻射劑量略高於背景，這表示在每個輻射工作區，必須對環境輻射有更進一步檢測的重要性。

在迴旋加速器中心的操作人員，受到額外的輻射劑量，並沒有增加健康的危險性，透過這次計畫的精神，仍是少於國家法規及 ICRP 60 報告，希望可以在中山醫大附醫旁直線加速器與導航式光子刀進行環境輻射的測量，以提供主管機關輻射評估的卓參。

結論:

利用 TLD-100 為迴旋加速器中心環境輻射評估，在加速器運轉時，加速器本體其劑量值遠高於背景值，其餘地點的輻射劑量值均是在安全範圍之內，表示安全，但是仍有幾個佈點略高於背景劑量，經由計算在 95% 信賴區間，由於該地點為運送核醫藥物的出入地點，劑量會略高他處，而加速器本身的高輻射劑量是在合法的範圍，證明迴旋加速器中心是安全的。工作人員的輻射安全是在法規規定之內，在辦公室周圍得到的劑量值，也都符合要求，並沒有顯著的差異，但是因為工作人員由於作業流程，可能暴露較高輻射的工作區，進行維修、搬運核醫藥物、清洗等等工作，都會再受輻射的危險，因此有必要的定期為工作環境做評估檢查，以提供最適化的安排，依據合理抑低原則，盡可能降低輻射的暴露至最低，提供防護器具、工作人員輪班、加強輻射相關知識與教育訓練，達到輻射安全的效果減少不必要的擔心。

誌謝:

本實驗感謝中山醫大附醫迴旋加速器中心同仁，給予我們在學術研究上有效的支持與合作，以及行政院

國家科學委員會 No. 98-2815-C-040-001-E 給予部分的經費協助，使本實驗得以順利完成，特此誌謝。

參考文獻:

1. 王文樺，丁幹，核能研究所TR-30/15 迴旋加速器之輻射度量，中華放射期刊，Chin Radiol，2000;25:67-71
2. 中山醫學大學附屬醫院迴旋加速器中心安全評估報告，2005
3. Lee JP, Chen CY. Neutron Dose Rate in the Facility at Cyclotron Center of Chung Shan Medical University. J.Radiat.Res. 2008;49:147-151
4. 心導管手術劑量研究，碩士論文，高雄醫學大學醫學影像暨放射科學學系，2008，089KMC0059001
5. 許芳裕，清華大學銫-137劑量校正場之空間評估加馬，加馬，2006;37:35-44
6. Chiyo Kawaura, Takanhiko Aoyama, Shuji Koyama. Organ and effective dose evaluation in diagnostic radiology based on in-phantom dose measurements with novel photodiode -dosemeters. Radiation Protection Dosimetry. 2006;Vol.118(4):421-430
7. 朱鐵吉譯，原子、輻射、與輻射防護，台北市民全書局，2000:409-494

表1:標準常態分布由圖4z由 k_α 到 ∞ 所積分得到的單尾面積 α (Area)[7]

Area · α	k_α
0.5000	0.000
0.2500	0.675
0.1587	1.000
0.1000	1.282
0.0500	1.645
0.0250	1.960
0.0228	2.000
0.0100	2.326
0.0050	2.576
0.0013	3.000
0.0002	3.500

表 2:迴旋加速器中心不同的信賴區下的輻射劑量*

面積	k_{α}	k_{β}	Δ_{net}	加速器中心內佈點 (佈點對照圖 1)
95%	1.645	1.645	9.495	6.7.8.9.10.11.12.42.43
90%	1.282	1.282	6.934	6.7.8.9.10.11.12.42.43
84.13%	1	1	5.127	6.7.8.9.10.11.12.29.42.43
75%	0.675	0.675	3.241	6.7.8.9.10.11.12.29.37.38.39.40.41.42.43

*其餘各點小於最小可偵測值(Minimum Detectable Limit, MDL)

表 3:加速器本體內的輻射劑量

地點(佈點) 座標	劑量(mSv)/月
6 (0 , 2)	3.03
7 (2 ,-3.5)	3.67
8 (3 ,-1.5)	3.25
9 (-3 , 0)	5.67
10 (-4 , 2)	5.53
11 (-3 , 2)	16.95
12 (-1 , 3.5)	4.76

表 4: 加速器中心的輻射劑量

地點 (佈點編號)	劑量(mSv)
1 主任辦公桌	0.28
4 配章放置處	0.40
15 熱核室電腦桌	0.68
26 機械手臂	0.61
38 核醫藥物配裝處	0.89

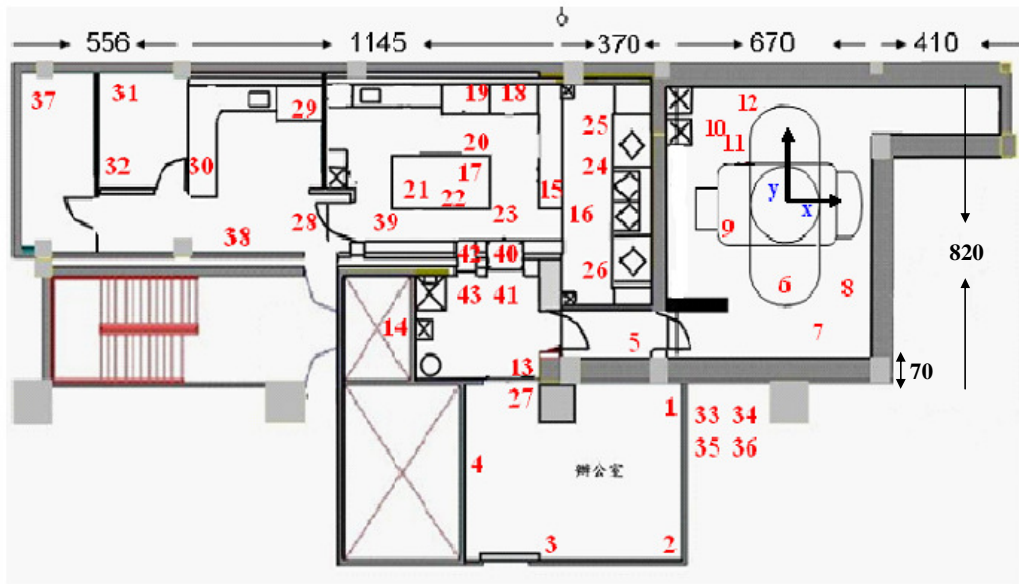


圖 1:迴旋加速器中心 TLD 佈點配置平面圖

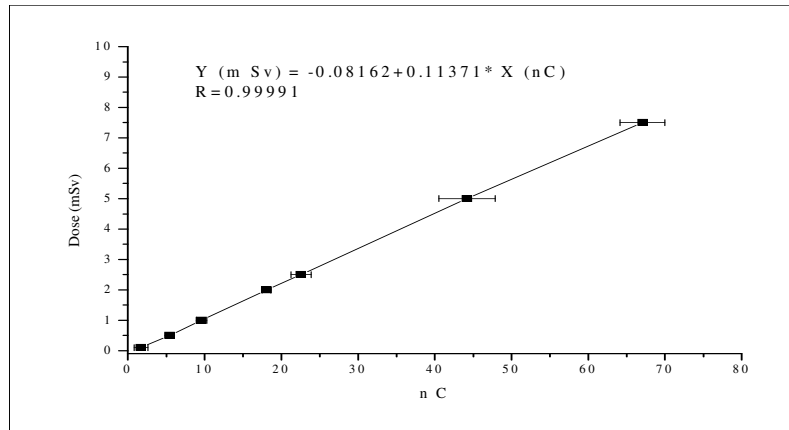


圖 2:校正曲線圖

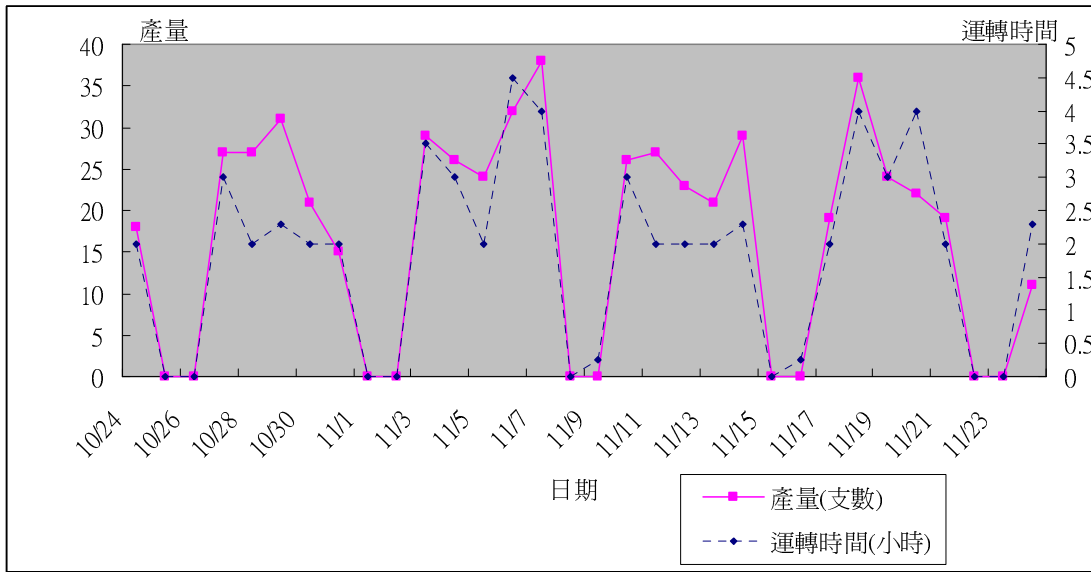


圖 3: 2008 年 10 月 24 日至 11 月 24 日中山醫學大學迴旋加速器每日運轉時間與生產狀況

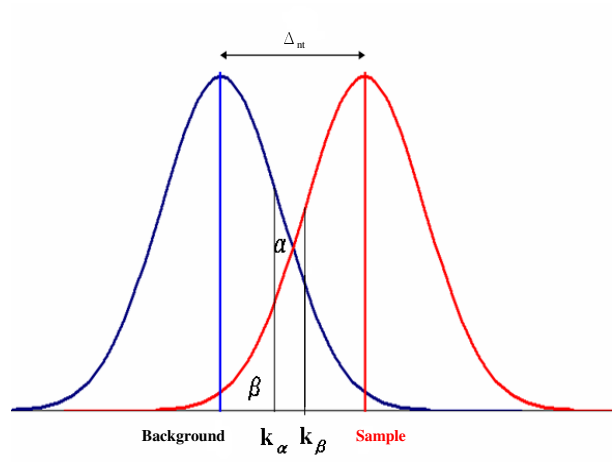


圖 4:最小可偵測的輻射劑量[7]

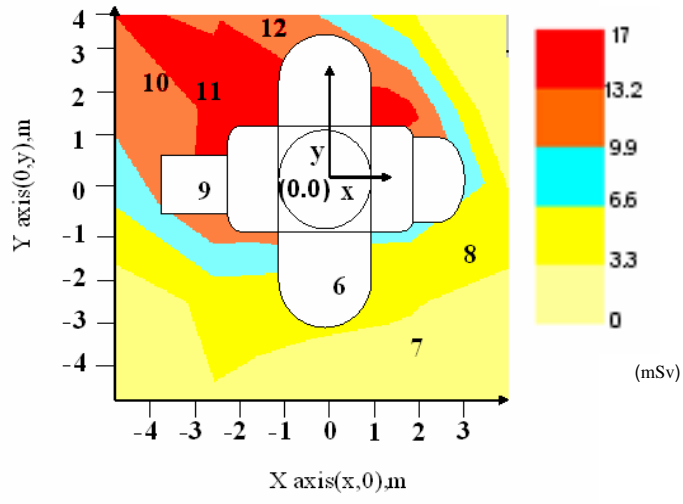


圖5:加速器本體內二次空間輻射劑量分布圖(佈點如圖1)