

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

國內電子與質子源誘發高能中子
之特性和評估

Characteristics and evaluation of high-energy
neutrons at electron and proton accelerator
facilities in Taiwan

計畫編號：NL1070706

受委託機關(構)：國立清華大學核子工程與科學研究所

計畫主持人：許榮鈞 教授

聯絡電話：03-5742377

E-mail address：rjsheu@mx.nthu.edu.tw

核研所聯絡人員：朱葦翰

報告日期： 107 年 12 月 6 日

目錄

目錄.....	I
圖目錄.....	II
表目錄.....	IV
摘要.....	V
Abstract.....	VI
壹、計畫目的.....	7
貳、研究方法.....	9
參、結果與討論.....	16
一、235 MeV 質子加速器引發中子輻射場之分析.....	16
二、3 GeV 電子加速器引發中子輻射場之分析.....	21
三、235 MeV 質子加速器與 3 GeV 電子加速器中子輻射場比較..	26
四、3 GeV 電子加速器主體屏蔽外中子量測與能譜解析.....	28
五、傳統中子偵檢器的高能中子劑量低估修正案例分析.....	40
肆、結論與未來方向.....	44
伍、參考文獻.....	45

圖目錄

圖 1：235 MeV 質子加速器[長庚官網]	8
圖 2：國家同步輻射研究中心 3 GeV 電子加速器	8
圖 3：長庚 235 MeV 質子加速器結構示意圖	13
圖 4：國家同步輻射研究中心 3 GeV 電子加速器結構示意圖	13
圖 5：中子通率-劑量轉換因子隨中子能量的變化	14
圖 6：波那圓柱中子能譜儀	14
圖 7：高能中子輻射場劑量修正步驟流程圖	15
圖 8：本報告建議之能譜修正因子與修正因子曲線，左圖適用於中子能譜已知，右圖適用於中子能譜未知	15
圖 9：長庚質子加速器的簡化計算模型(單位為公分)，其中◇是加速器出口的位置、□是治療室噴嘴的位置、☆是假體的位置	17
圖 10：假設全部的質子束損耗於迴旋加速器出口呈現的劑量分佈	18
圖 11：假設全部的質子束損耗於迴旋加速器出口，五個不同位置之中子能譜	18
圖 12：假設全部的質子束損耗於治療室噴嘴呈現的劑量分佈	19
圖 13：假設全部的質子束損耗於治療室噴嘴，五個不同位置之中子能譜	19
圖 14：假設全部的質子束損耗於 PMMA 假體呈現的劑量分佈	20
圖 15：假設全部的質子束損耗於 PMMA 假體，五個不同位置之中子能譜	20
圖 16：3 GeV 電子加速器射束棄置位置與局部屏蔽擺設示意圖	22
圖 17：3 GeV 電子加速器局部屏蔽安裝前的 FLUKA 計算結果	23
圖 18：3 GeV 電子加速器局部屏蔽安裝後的 FLUKA 計算結果	23
圖 19：3 GeV 電子加速器局部屏蔽安裝前的側邊能譜	24
圖 20：3 GeV 電子加速器局部屏蔽安裝後的側邊能譜	24
圖 21：235 MeV 質子加速器與 3 GeV 電子加速器中子能譜	26

圖 22：MCNPX 模擬程式計算之 Isotropic 響應函數.....	31
圖 23：MCNPX 模擬程式計算之 Parallel 響應函數.....	31
圖 24：量測圓柱與量測參考	32
圖 25：增能環電流(藍線)，與量測參考之中子計數(紅線).....	32
圖 26：局部屏蔽安裝前的中子計數與修正後的結果	33
圖 27：局部屏蔽安裝後的中子計數與修正後的結果	33
圖 28：局部屏蔽安裝前之中子計數	34
圖 29：局部屏蔽安裝後之中子計數	34
圖 30：局部屏蔽安裝前之 Unfolding 結果.....	35
圖 31：局部屏蔽安裝後之 Unfolding 結果.....	35
圖 32：局部屏蔽安裝前之 Unfolding 結果與響應函數 Folding，再與 原始量測計數進行比較	36
圖 33：局部屏蔽安裝後之 Unfolding 結果與響應函數 Folding，再與 原始量測計數進行比較	36
圖 34：PE 波那圓柱之能譜修正因子與高能中子比例之關係	42
圖 35：PE 波那圓柱之能譜修正因子與 PE+Pb 和 PE 波那圓柱的讀值 比之關係.....	42

表目錄

表 1：3 GeV 電子加速器局部屏蔽安裝前後中子通量與中子劑量之能量分佈.....	25
表 2：3GeV 電子加速器與 235MeV 質子加速器之中子通量與劑量率能量分佈.....	27
表 3：局部屏蔽安裝前的中子計數與修正後的結果(Corrected results : Measurements normailized to 6.5cm).....	37
表 4：局部屏蔽安裝後的中子計數與修正後的結果(Corrected results : Measurements normailized to 6.5cm).....	37
表 5：局部屏蔽安裝前-Unfolding 後中子通量與中子劑量之能量分佈.....	38
表 6：局部屏蔽安裝後-Unfolding 後中子通量與中子劑量之能量分佈.....	38
表 7：局部屏蔽安裝前之 Unfolding 結果與響應函數 Folding，與原始量測計數之差值與修正率	39
表 8：局部屏蔽安裝後之 Unfolding 結果與響應函數 Folding，與原始量測計數之差值與修正率	39
表 9：局部屏蔽安裝前後劑量率相關修正參數	43

摘要

國內大型加速器的應用日益蓬勃發展，高能加速器的運轉不可避免產生大量二次中子，其中高能中子(>10 MeV)的穿透力強、不易測量，但可能是設施屏蔽外輻射劑量的主要貢獻來源。為了因應相關設施產生的此一特殊輻射防護問題，本研究同時針對國內現有指標型的高能加速器設施的輻射場進行深入探討與比較，包括 235 MeV 醫用質子加速器與國家同步輻射研究中心 3 GeV 電子加速器。根據不同類型加速器引發高能中子機制的差異，建立加速器設施正確的高能中子劑量評估技術，本計畫完成下列工作，包括(1)探討質子源設施之中子輻射場特性；(2)探討電子源設施之中子輻射場特性；(3)比較二種類型加速器設施的中子輻射場差異；(4)完整量測國家同步輻射研究中心 3 GeV 電子加速器主體屏蔽外的中子能譜；最後，根據去年研究結果(5)進行傳統中子偵檢器的高能中子劑量低估修正案例分析。本研究成果明顯提升國內中子輻射場的分析與測量能力，相關資訊亦可供國內加速器設施應用或主管機關管制參考。

Abstract

Accelerator applications in Taiwan have become more and more popular and the relevant technology has made rapid development. Two major facilities were built in past few years: one is a 235-MeV proton therapy cyclotron in Linkou Chang Gung Memorial Hospital and the other is the 3 GeV electron light source in National Synchrotron Radiation Research Center. The two accelerators differ in many aspects and their operations inevitably produce intense secondary radiation including high-energy neutrons that are penetrative and usually cause dose underestimation in conventional neutron detectors. These concerns must be carefully evaluated to ensure radiation safety. This study systematically compared the characteristics of neutron fields at the two facilities and established relevant technologies for proper dose evaluation and neutron measurement. The objectives of this study were achieved by successfully performing the following analyses: (1) investigate the radiation field around a 3 GeV electron source; (2) investigate the radiation field around a 235 MeV proton source; (3) study and compare the characteristics of neutron fields at the two facilities; (4) measure neutron spectrum at one of the facilities by using the homemade multi-cylinder spectrometer; (5) conduct a case study to test the appropriateness of the correction scheme developed in our previous study. The results and experience obtained in this study can provide useful information for regulatory bodies or for those performing similar analyses.

壹、計畫目的

近年來國內加速器的應用蓬勃發展，高能加速器運轉時不可避免的會產生大量二次中子並引發物質活化問題，輻射場中能量高於 10 MeV 的高能中子穿透力強、不易測量，但確是主體屏蔽外輻射劑量的主要貢獻來源。為了因應相關設施產生的特殊輻射防護問題，本研究將同時針對國內現有指標型的高能設施輻射場進行深入探討與比較，包括 235 MeV 醫用質子加速器(圖 1)與國家同步輻射研究中心 3 GeV 電子加速器(圖 2)，以期瞭解不同種類設施中子輻射場的差異，並建立加速器設施正確的高能中子劑量評估技術。

當帶電粒子加速器運轉時，不論是刻意導引主射束撞擊靶體或是意外損失的射束撞擊周遭物質，包括射束棄置器或其他加速器組件及屏蔽材料時，結果都將伴隨產生複雜的二次輻射場。本計畫最有興趣的兩座加速器(235 MeV 醫用質子加速器與 3 GeV 電子加速器)，皆有產生大量二次中子的機會，特別是高於 10 MeV 的高能中子，這是探討的重點。本團隊於過往研究計畫[1,2]執行過程中，建立了高能加速器中子輻射劑量分析、能譜測量技術、高能中子指標量測程序與劑量低估修正等技術能力，已累積相當多關於中子模擬分析與度量實驗的實務經驗。本計畫整合先前的相關資訊[1,2]，有系統的比較兩座設施二次中子輻射場的基本差異，並針對國家同步輻射研究中心 3 GeV 電子加速器的中子能譜進行詳細測量，最後應用測量結果檢視高能中子劑量低估修正技術的可行性與準確度。



圖 1：235 MeV 質子加速器[長庚官網]



圖 2：國家同步輻射研究中心 3 GeV 電子加速器[同步輻射官網]

貳、研究方法

質子加速器設施產生中子的機制為：當質子與原子核內質子或中子發生所謂強子串級(Hadronic Cascade)現象，依入射粒子能量不同包含了 Intranuclear cascade、Extranuclear cascade、Pre-equilibrium reaction、Evaporation reaction 以及 De-excitation 這幾種機制。在這些過程中會因直接撞擊而擊出高能中子或後續原子核能量重新分配而蒸發出低能中子，中子不帶電，因此穿透力強，經強子串級造成之二次中子對質子加速器輻射屏蔽可能是重要的挑戰。另一方面，電子加速器設施產生中子機制為：高能電子經電磁串級(Electromagnetic Cascade)產生大量高能加馬射線，再由加馬射線與物質作用以光核反應(Photonuclear Reaction)產生二次中子；光核反應依入射光子能量分為三種主要機制，分別為 Giant resonance、Quasi-deuteron effect、High-energy Photospallation。雖然光核反應較其它光子反應機制(Photoelectric effect、Compton scattering、Pair production)而言作用截面相當小，約略百倍以下，且對大多數物質，此反應有很高的能量閾值。但光核反應產生的高能量中子相當具有穿透力，極可能是加速器主體屏蔽牆外主要的輻射劑量貢獻者。

知名的三維通用蒙地卡羅輻射遷移程式有 FLUKA[3]或是 MCNPX[4]等，它們被廣泛應用在核子物理、醫學物理、保健物理及其它相關領域，可用來模擬複雜的幾何條件下粒子與物質作用細節，包括強子串級與電磁串級效應，並進一步追蹤後續二次輻射的反應，可以估計包含中子通量、中子能譜、劑量分布、物質活化與其特性等輻射防護所需資訊。但相較於傳統核工領域處理的中子能量而言，高能加速器產生的中子能量更高，遠高於核工領域常見的 20 MeV 上限，甚至可接近主射束的能量；一般反應器中子能量範圍

的中子截面資料庫並未涵蓋如此高能量區間，蒙地卡羅遷移程式只能以核子物理模型預測其反應機率與後續產物行為，由於各種核子物理模型都有其適用範圍與理論限制，使用者需要妥善評估與驗證計算結果的可靠與否。先期計畫曾分別使用 FLUKA 與 MCNPX 探討過 256 MeV 的質子撞擊鐵靶[5]與 2.04 GeV 的電子撞擊銅靶[6]引發中子產率的驗證，兩種計算機程式的計算結果相當一致，因此本計畫於執行過程中選擇 FLUKA 程式進行輻射場與能譜的模擬分析。

235 MeV 醫用質子癌症治療加速器(圖 3)，整體可區分為：迴旋加速器系統(Cyclotron system)、能量選擇系統(Energy selection system)、射束傳導系統(Beam transport system)、旋轉基座系統(Gantry system)、射束形成系統(Beam deliver system)、病患定位系統(Patient position system)；國家同步輻射研究中心 3 GeV 同步電子加速器重要的組件包含了(圖 4)：線型加速器(LINAC)、線型加速器/增能環間的傳輸線(LTB)、增能環(Booster ring)、增能環/儲存環間的傳輸線(BTS)，以及儲存環(Storage ring)[7]。本研究合理假設 230 MeV 質子射束射束主要損失位置有(1)迴旋加速器的出口、(2)治療室的噴嘴(Nozzle)以及(3)模擬假體 PMMA 等三處，利用 FLUKA 程式進行輻射場的模擬分析，完成後針對三個損失位置進行探討，並選擇五個感興趣的位置作為能譜輸出位置；3 GeV 的同步電子加速器射束損失位置則透過關閉儲存環 Septum 電源，強制射束損失於儲存環間的注射段下游，主體屏蔽牆外 90°方向作為能譜輸出位置[8,9]。

模擬計算完成的能譜，需再透過中子偵檢器進行能譜量測後，才能進一步比較與調整。目前一般常見的中子偵檢器是在熱中子偵檢頭外圍包覆適當中子緩速體(Moderator)，讓中子先與緩速體作用減速成熱中子後再與熱中子偵檢頭反應留下訊號，原則上越厚的緩

速體可以緩速越高能量的中子，讓中子偵檢器的能量響應函數往中子能量較高的方向移動；但同時緩速體也降低了熱中子抵達中心偵檢頭的機率，因此在達到一定厚度後即會抵銷加厚中子緩速體的正效應，使得在 20 MeV 以上的中子偵測效率極低，而傳統中子偵檢器的運作建立在「中子能量響應函數」與「中子通率-劑量轉換因子」(圖 5)二者對中子能量曲線的相似性上[10]，當入射中子能量超過 20 MeV 時，中子偵檢效率會隨著能量上升而降低，相反地，中子通率-劑量轉換因子卻是隨能量增加而上升，因此對於高能中子劑量需要更謹慎的評估與修正。

本計畫使用先期計畫[1,2]所自行開發之波那圓柱中子能譜儀(Bonner Cylinder Spectrometer)進行能譜量測(圖 6)，此套能譜量測儀器與商用型的波那球中子能譜儀(Bonner Sphere Spectrometer)屬相同原理。波那球中子能譜儀開發始於 1960 年代，原設計主要針對核電廠產生的中子源進行能譜量測，其後則因高能加速器之發展，於 2000 年開始發展延伸能量波那球中子能譜儀(Extended range Bonner sphere spectrometer)，並將中子能譜量測範圍的幅度提升至 GeV 等級[11]。波那圓柱中子能譜儀除了保有波那球能譜儀概念，同時提升波那球能譜儀系統靈敏度較低之缺點，其量測核心主要由兩組件構成，分別為(1)Reuter-Stokes 之 He-3 比例計數器；以及(2)Precision Data Technology (PDT)之 100B 模組，比例計數器之有效長度(Active length)為 45.72 公分，圓柱直徑為 2.54 公分，管壁由 0.5 公厘之不鏽鋼(SS-304)組成，內填充 99.9% 以上之高純度 He-3 氣體，壓力為 4 大氣壓，該比例計數器對熱中子量測效率為 54 cps/nv，此數值約為一般中子偵檢器之 10 倍以上，主要因其具有較大有效體積(213.78 立方公分)以及較高氣壓；而高靈敏度正是波那圓柱最大的量測優勢，因其可應用於中子通量較弱或變動較大之中子輻射場，非常適合使用於厚屏

蔽牆外或是輻射場變化快速的加速器廠區。

除了波那圓柱系統的能譜量測外，本研究也利用先期計畫[1,2]所建立的高能中子劑量低估修正研究結果，執行測量案例分析，測試高能中子劑量低估修正建議的可行性。根據先前的研究結果分析，能譜修正因子適用於大部分傳統緩速型中子劑量計，而非緩速體形式之中子偵檢器或是劑量計，因其設計目的以及原理與傳統緩速體形式的劑量計不同，能量響應差異太大，因此套用能譜修正因子會有顯著的誤差或是不合理的情形發生，不建議使用。若是使用延伸能量型波那球，或是以類似原理設計的延伸能量型緩速劑量計，根據先前的研究顯示，並不需要再進行劑量的修正。本計畫使用一組 PE 與 PE+Pb 進行中子輻射場的量測，並透過修正流程進行相關輻射劑量修正。

如圖 7 所示，一個輻射工作場的劑量修正流程可分成三個步驟：(1)要能夠定義出該輻射工作場的高能中子含量，若是該輻射工作場的中子能譜已知，可以直接計算所含的高能中子比例，若是一個中子能譜未知的輻射工作場，可以利用高能中子能譜指標來確認該輻射工作場所所含的高能中子數量；(2)利用高能中子比例或是高能中子能譜指標，從本研究建議的能譜修正因子圖表(圖 8)，計算該輻射工作場適用之能譜修正因子；(3)以經過 ^{252}Cf 校正的傳統緩速體型式的劑量計進行該輻射工作場的輻射劑量量測，並將結果與能譜修正因子相乘，即可計算修正後的劑量。

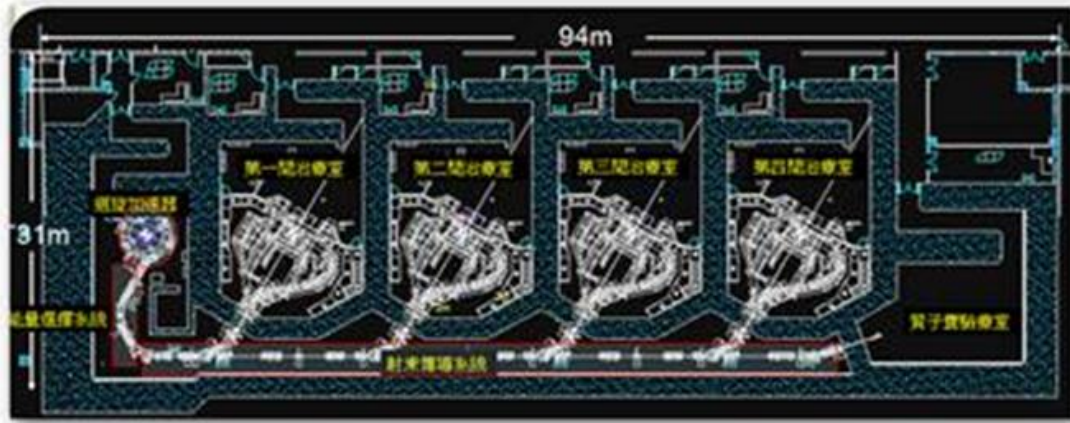


圖 3：長庚 235 MeV 質子加速器結構示意圖[長庚官網]

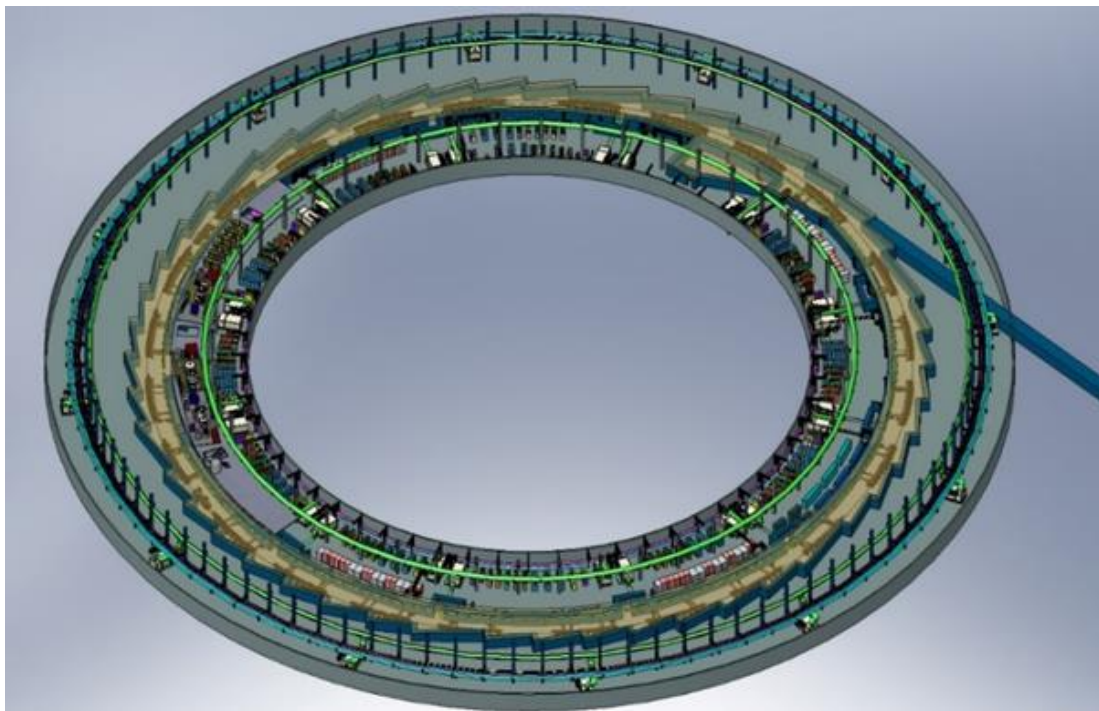


圖 4：國家同步輻射研究中心 3 GeV 電子加速器結構示意圖[7]

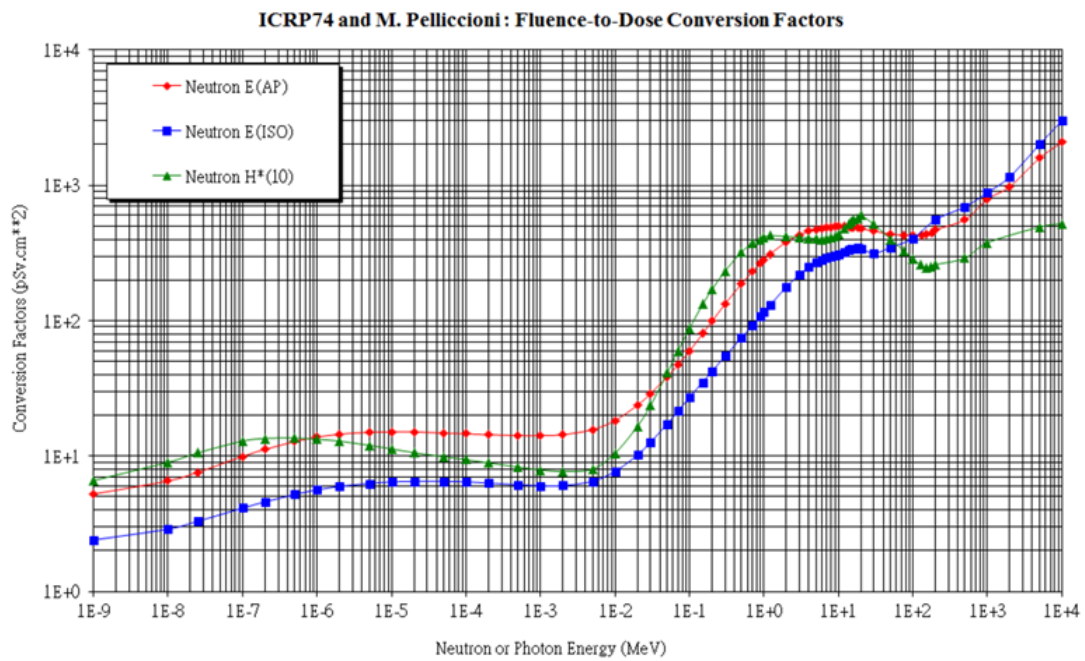


圖 5：中子通率-劑量轉換因子隨中子能量的變化



圖 6：波那圓柱中子能譜儀

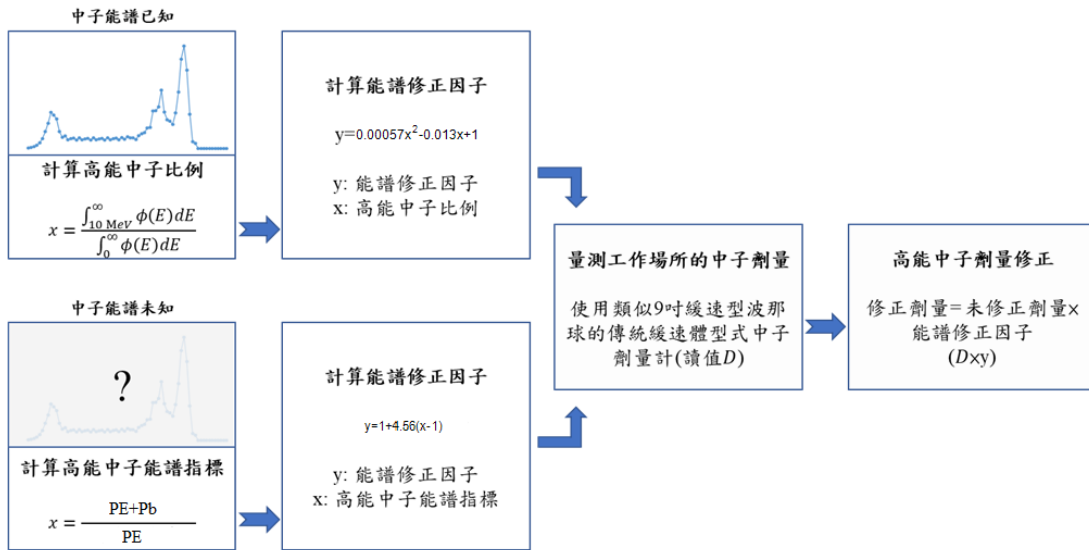


圖 7：高能中子輻射場劑量修正步驟流程圖[2]

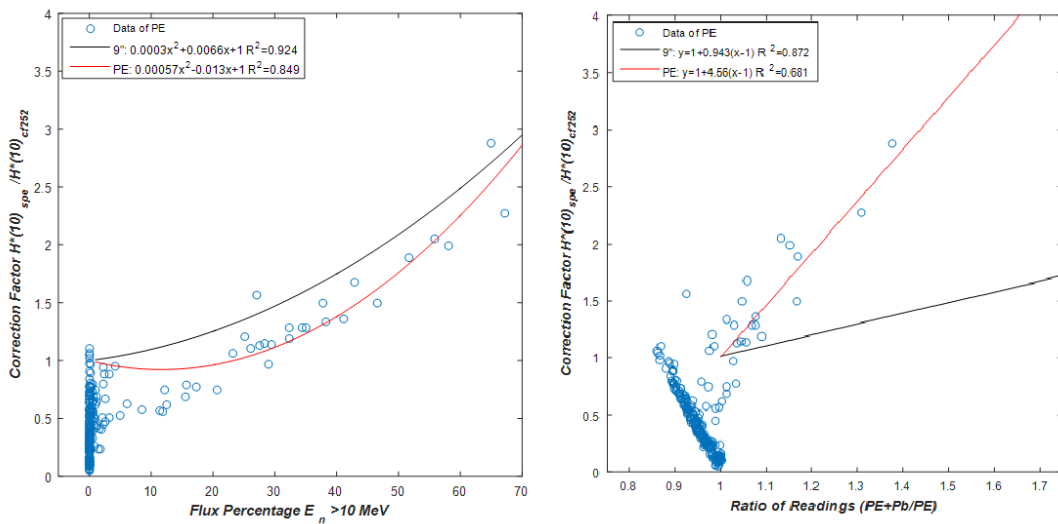


圖 8：本報告建議之能譜修正因子與修正因子曲線(9吋球使用黑色線條，6.5cm 波那圓柱使用紅色線條)，左圖適用於中子能譜已知，右圖適用於中子能譜未知[2]

參、結果與討論

一、235 MeV 質子加速器引發中子輻射場之分析

長庚紀念醫院質子暨放射治療中心是台灣第一座質子治療中心，整體系統可以大致區分為：迴旋加速器系統、能量選擇系統、射束傳導系統、旋轉基座系統、射束形成系統、病患定位系統等，其中，迴旋加速器系統為一產生固定 230 MeV 之質子迴旋加速器，損耗的質子束有機會產生可觀的高能二次中子。

延續先前計畫[2]的經驗與設定，FLUKA 計算模型是根據長庚質子治療中心設施的大致現場格局所建立。整個質子加速器運轉時，質子束有機會在隨機的位置以隨機的比例損耗於路徑上，為了使模擬的結果更加易於分析，本計畫根據可能的情況，分別模擬 230 MeV 之筆型質子射束(1)全部作用於迴旋加速器的出口、(2)全部作用於治療室的噴嘴、以及(3)全部作用於模擬假體 PMMA 三種情況；並計算(1)加速器室迷道口、(2)加速器室入口、(3)控制室走道、(4)走道轉角以及(5)治療室入口等五處中子能譜。由於 4 間治療室大小以及室內擺設大致相似，為縮短計算時間以及簡化模型複雜度，本研究模擬時僅以迴旋加速器室以及第一治療室作為代表，其計算模型如圖 9 所示。FLUKA 計算模型中的重要參數設定包含：使用 230 MeV 之筆型質子射束、假體 PMMA 尺寸為 $30 \times 30 \times 40 \text{ cm}^3$ ，密度 1.19 g/cm^3 、質子傳導系統的真空管半徑 2.5 cm，管壁厚 0.5 cm、假設磁鐵組成為 90%鐵混合 10%銅、混凝土的密度為 2.34 g/cm^3 ，其他詳細材料組成可參考輸入檔案的設定。蒙地卡羅遷移計算程式 FLUKA 使用 USRBIN 指令來紀錄設定範圍內的中子通率以及劑量率分布，計數考量體積為 $20 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ 之長方體，並使用 ICRP-74 通率劑量轉換

係數[10]作為中子通量與劑量的轉換因子。

質子束從產生、加速、傳導，一直到照射病人，過程中會有機會隨機與物質作用並損失能量，而在那個位置損失多少電流或是多少能量是模擬計算過程中無法確定的，實際運轉情況的射束損耗情節應是上述三種情節的混合結果，其確切比例會與實際運轉條件有關。延續先前計畫[2]在蒙地卡羅遷移程式 FLUKA 的設定，假設三個最有可能的射束損耗情況，並分析五處最感興趣的位置能譜。圖 10 到圖 15 分別顯示了上述三種射束損耗情節計算結果與五個不同位置的中子能譜。

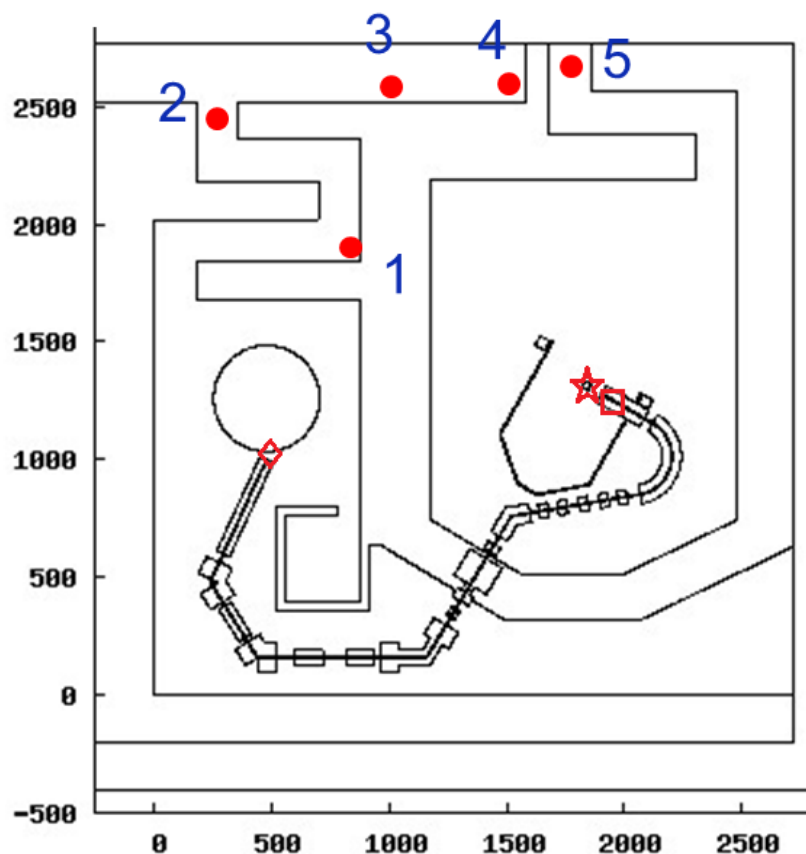


圖 9：長庚質子加速器的簡化計算模型[2] (單位為公分)，其中◇是加速器出口的位置、□是治療室噴嘴的位置、☆是假體的位置

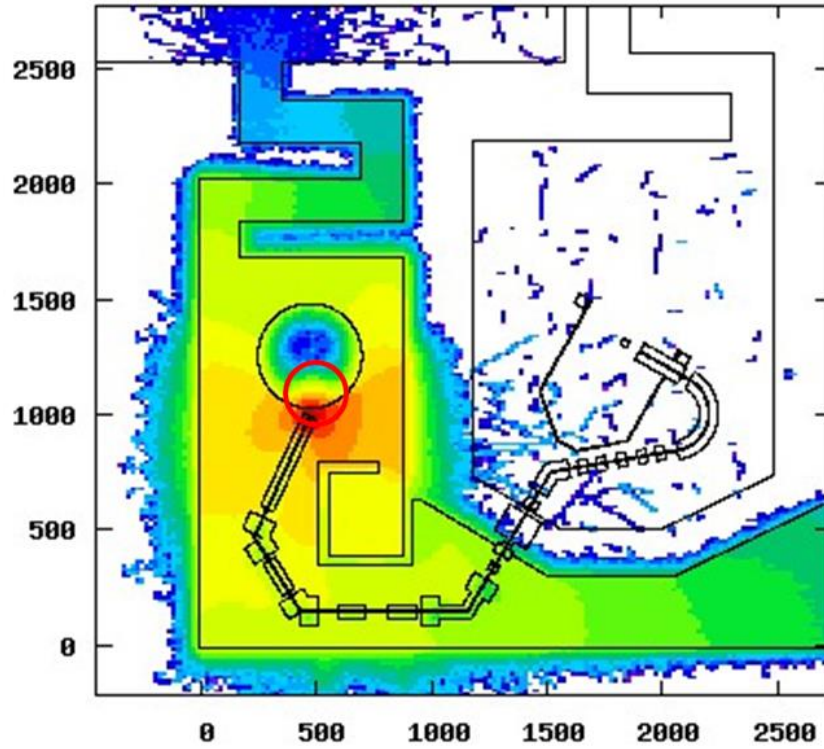


圖 10：假設全部的質子束損耗於迴旋加速器出口呈現的劑量分佈[2]

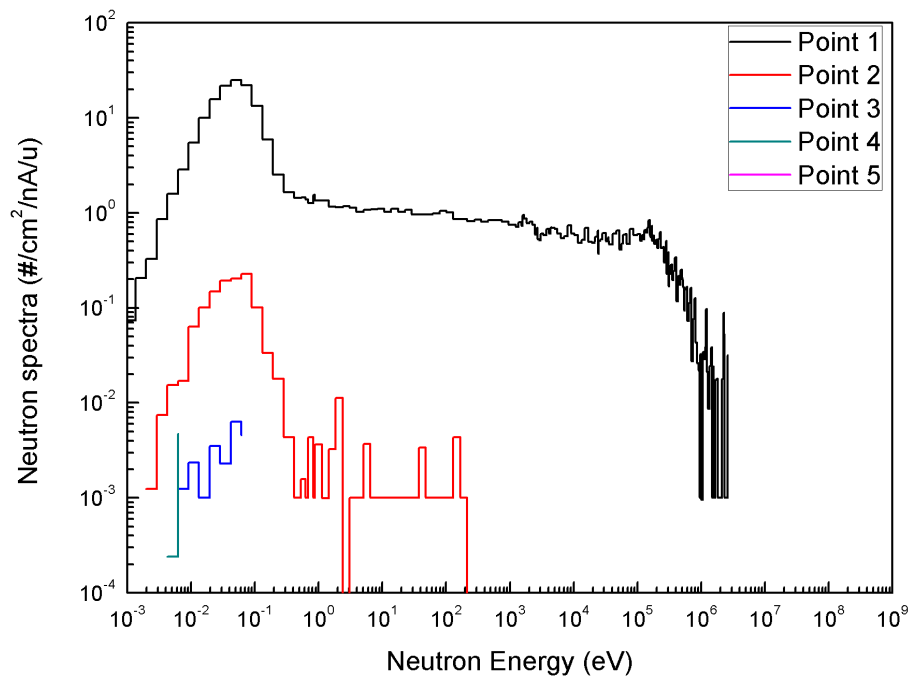


圖 11：假設全部的質子束損耗於迴旋加速器出口，五個不同位置之

中子能譜[2]

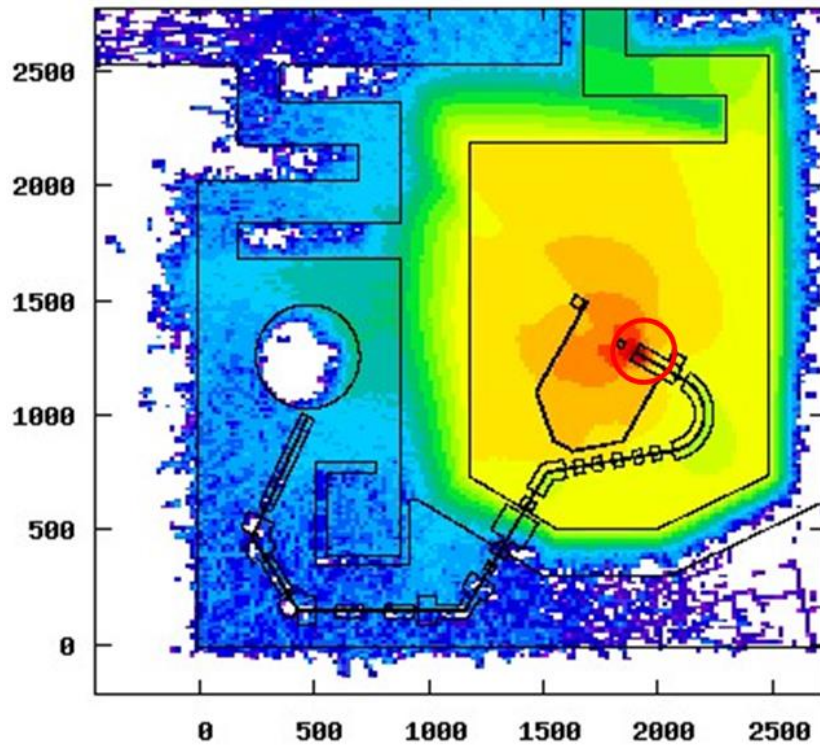


圖 12：假設全部的質子束損耗於治療室噴嘴呈現的劑量分佈[2]

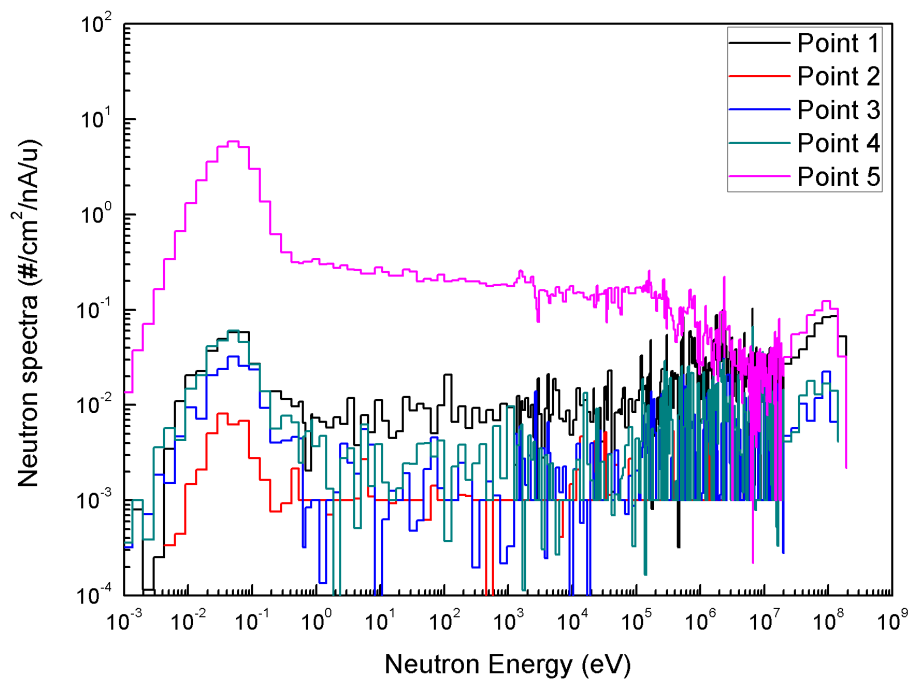


圖 13：假設全部的質子束損耗於治療室噴嘴，五個不同位置之中子能譜[2]

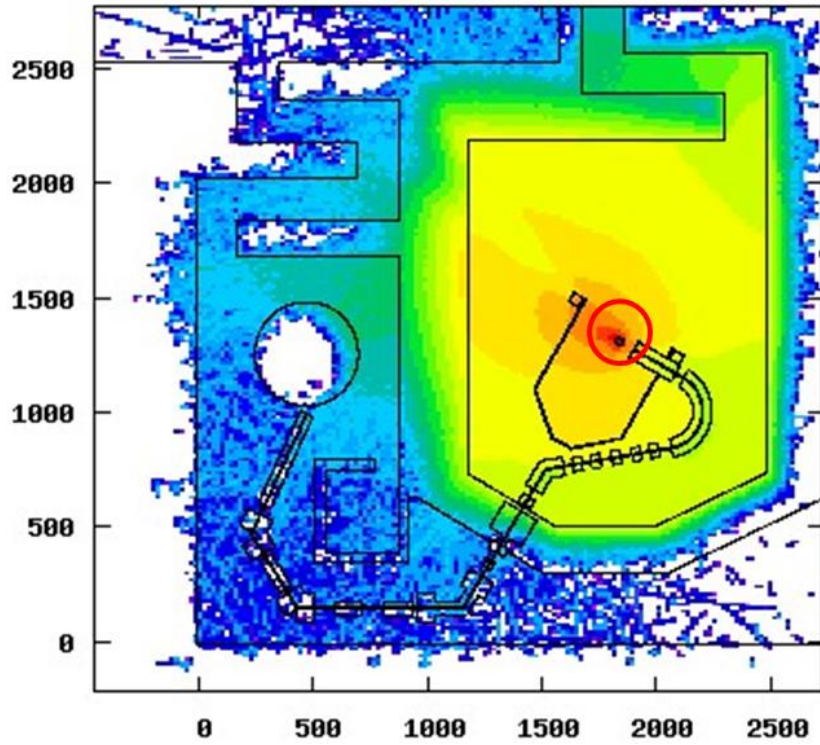


圖 14：假設全部的質子束損耗於 PMMA 假體呈現的劑量分佈[2]

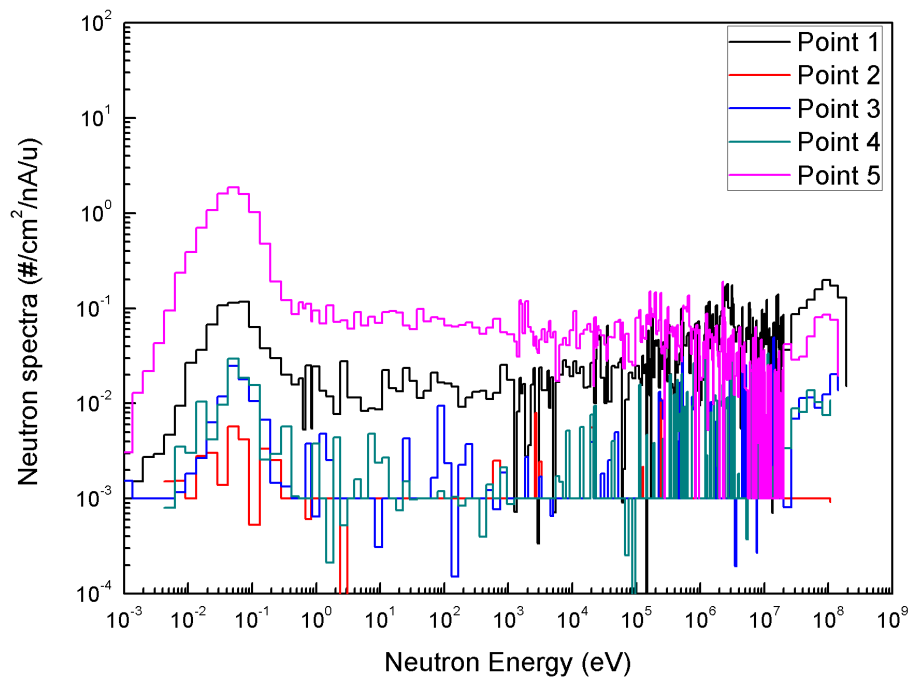


圖 15：假設全部的質子束損耗於 PMMA 假體，五個不同位置之中子能譜[2]

二、3 GeV 電子加速器引發中子輻射場之分析

國家同步輻射研究中心 3 GeV 同步電子加速器的重要的組件包含 150 MeV 線型加速器、線型加速器/增能環間的傳輸線、3 GeV 增能環、增能環/儲存環間的傳輸線，以及 3 GeV 電子儲存環。針對射束損失情節的假設，本計畫選取最可能發生的地方，同時也是最容易控制量的位置上，其位置為增能環/儲存環間的傳輸線(BTS)正下游，因為這邊是射束較易損失的地方，此外，能通過 BTS 的電子亦能確保為 3GeV 之電子，於射束損失位置的 90°方向主體屏蔽牆外作為能譜計算與測量的位置。

基於本實驗先前測量研究的成果[8,9]，本計畫已瞭解射束損失位置在無其他局部屏蔽下的輻射場與能譜狀態。目前 TPS 設施的實際現場狀況，為了減少射束損失或棄置時的輻射衝擊，射束損失位置已增設適當之局部屏蔽，以減少該處的輻射劑量。在局部屏蔽安裝前與局部屏蔽安裝後資料皆可完掌握的情況下，透過兩次獨立的模擬分析，配合實地的能譜量測，將可得到局部屏蔽安裝前與局部屏蔽安裝後兩次具有實驗驗證的完整結果，相關結果除了可以相互比較外，同時也可瞭解局部屏蔽帶來的屏蔽效果。射束棄置的位置位於圖 16 紅色爆炸處，目前設置的主要局部屏蔽以灰色方塊來進行示意，其中 0°方向的深灰局部屏蔽為 20 公分的鉛，側邊 90°次灰局部屏蔽為 10 公分的鉛加上 10 公分的聚乙烯，上方 90°方向淺灰局部屏蔽為 5 公分的鉛加上 5 公分的聚乙烯。

將局部屏蔽安裝前與局部屏蔽安裝後的計算結果分別以 H*(10) 顯示於圖 17 與圖 18，於射束棄置位置側邊 90°方向各擷取 100×20×100 cm³ 與 50×20×45 cm³ 之立方體進行劑量計算與能譜分析，局部屏蔽安裝前之加馬劑量率為 0.03±6.95% μSv/h，中子劑量率

為 $0.465 \pm 1.13\% \mu\text{Sv/h}$ ；局部屏蔽安裝後之加馬劑量率為 $0.0084 \pm 3.58\% \mu\text{Sv/h}$ ，中子劑量率為 $0.356 \pm 0.70\% \mu\text{Sv/h}$ ，此結果顯示，局部屏蔽(主要材料為鉛)安裝後加馬劑量顯著下降，中子劑量雖有下降，但並不顯著。圖 19 與圖 20 分別為局部屏蔽安裝前與局部屏蔽安裝後的側邊能譜，綠色的加馬通量在局部屏蔽安裝後大量減少，與前述劑量率顯著下降相呼應。若將中子通量與中子劑量依特定能量進行區分，則可整理如表 1 所示，其中” Old” 代表局部屏蔽安裝前，” New” 代表局部屏蔽安裝後。由此表可觀察出，大於 10MeV 之中子通量佔了總量之三成以上，若考慮劑量轉換因子後的中子劑量，不論局部屏蔽安裝前或局部屏蔽安裝後，都佔了整體中子劑量的一半以上，而局部屏蔽安裝前後不同中子能量的比例無太大改變，配合能譜圖(圖 19、圖 20)之藍線中子能譜，更易觀察出整體總量皆有下降，但不同能量下降比例都很接近，整個中子能譜形狀變化不大。

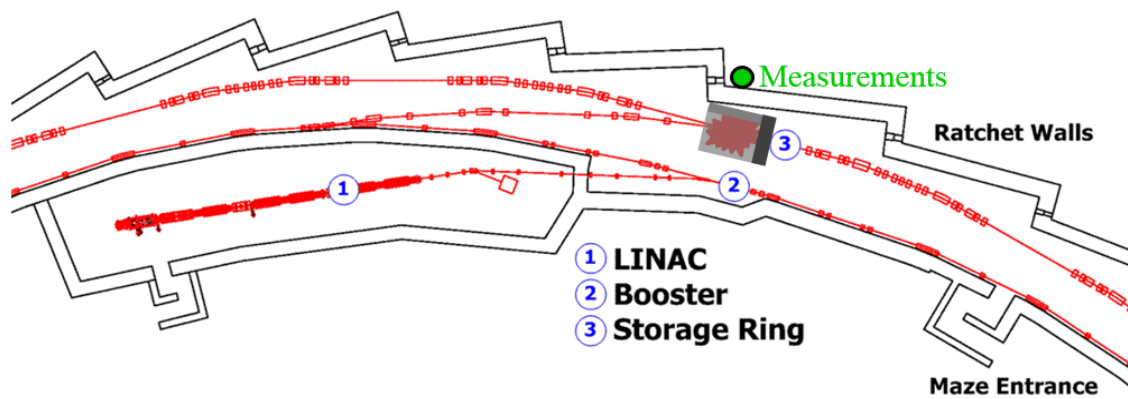


圖 16：3 GeV 電子加速器射束棄置位置與局部屏蔽擺設示意圖[7]

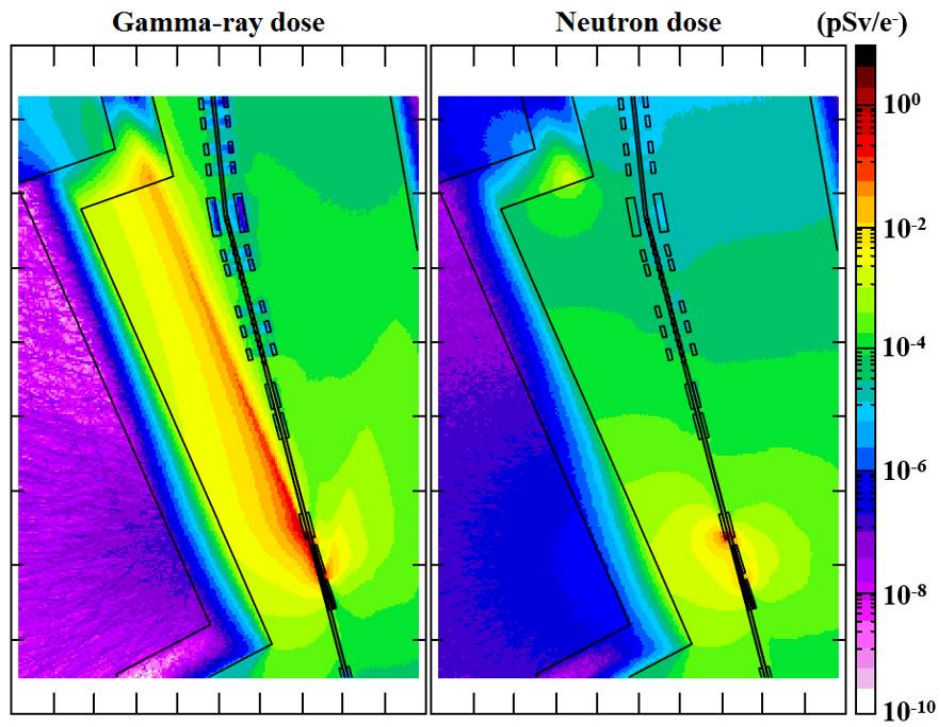


圖 17：3 GeV 電子加速器局部屏蔽安裝前的 FLUKA 計算結果

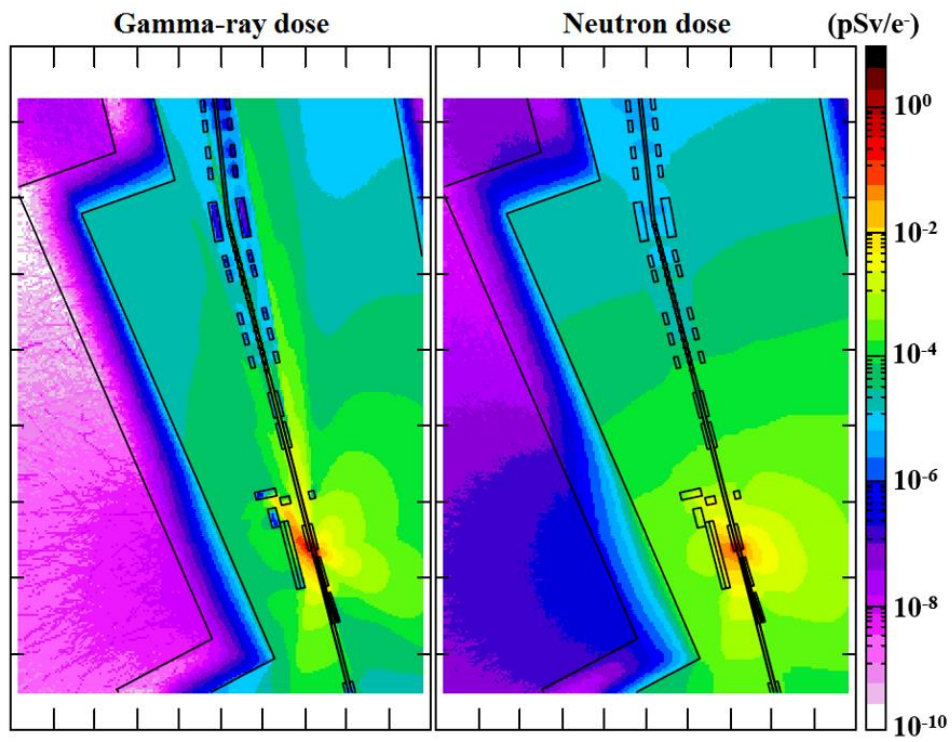


圖 18：3 GeV 電子加速器局部屏蔽安裝後的 FLUKA 計算結果

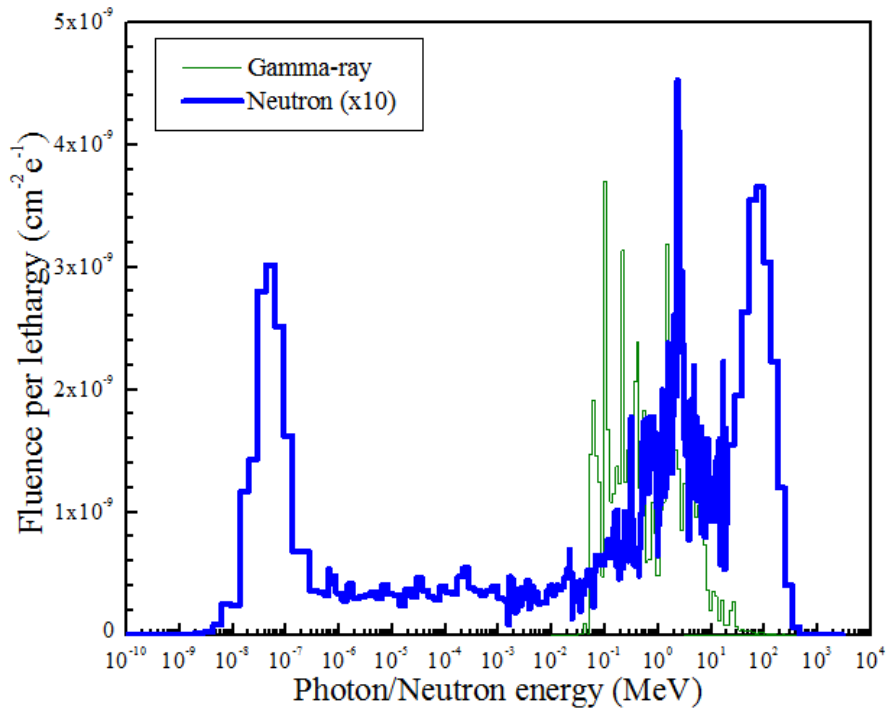


圖 19：3 GeV 電子加速器局部屏蔽安裝前的側邊能譜

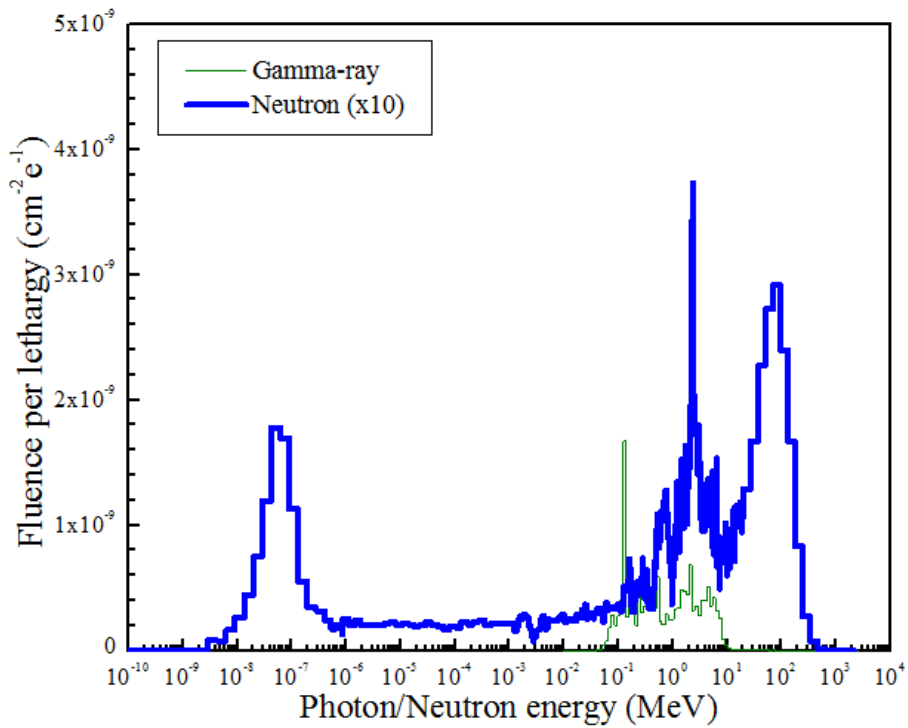


圖 20：3 GeV 電子加速器局部屏蔽安裝後的側邊能譜

表 1：3 GeV 電子加速器局部屏蔽安裝前後中子通量與中子劑量之能量分佈

Neutron			Total	$E_n < 0.5 \text{ eV}$	$0.5 \text{ eV} < E_n < 10 \text{ keV}$	$10 \text{ keV} < E_n < 10 \text{ MeV}$	$E_n > 10 \text{ MeV}$
Flux	$(\text{cm}^{-2} \text{ e}^{-1})$	Old	2.35E-09	24.6%	14.6%	30.4%	30.4%
		New	1.62E-09	21.1%	12.9%	30.6%	35.4%
Ratio	(Old/New)		1.45	1.69	1.64	1.44	1.25
H*(10)	(pSv e^{-1})	Old	5.16E-07	1.1%	0.9%	44.3%	53.8%
		New	3.95E-07	0.8%	0.7%	41.3%	57.2%
Ratio	(Old/New)		1.31	1.70	1.63	1.40	1.23

三、235 MeV 質子加速器與 3 GeV 電子加速器中子輻射場比較

圖 21 比較 235 MeV 質子加速器(損耗於假體之 Point5)與 3 GeV 電子加速器(損失於注射段之 90° 位置)中子能譜，兩設施在 10⁻⁷ MeV 處皆會產生一波峰；而在 100 MeV 中子能量附近，3 GeV 電子加速器有一明顯波峰產生，235 MeV 質子加速器雖微有起伏，但並不顯著。此現象表示，235 MeV 質子治療室迷道出口處雖有產生 >10MeV 之高能中子，但數量很少；而 3GeV 電子加速器注射段屏蔽外，除了中低能量的中子外，在 100 MeV 之高能中子相當顯著，在劑量評估方面，若使用傳統的中子劑量計，可能會有低估的現象，需審慎使用與評估。細部觀察每損失一個 3 GeV 電子與損失一個 235 MeV 質子的情況下，如表 2 所示，3GeV 電子加速器相較於 235MeV 質子加速器，除在 <0.5 eV 熱中子能群有較少中子通量外，其他各能量區間均有較多的中子通量。

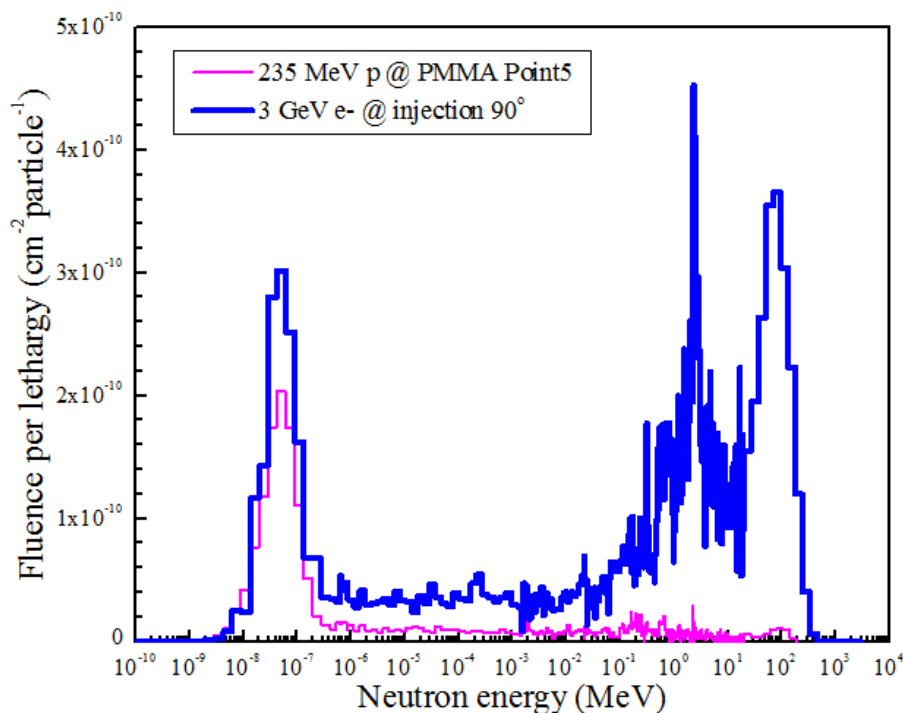


圖 21：235 MeV 質子加速器與 3 GeV 電子加速器中子能譜

表 2：3GeV 電子加速器與 235MeV 質子加速器中子通量與劑量之能量分佈

			Total	E_n < 0.5 eV	0.5 eV < E_n < 10 keV	10 keV < E_n < 10 MeV	E_n > 10 MeV
3 GeV e- (per electron)	Neutron fluence	cm ⁻² e ⁻¹	1.62E-09	3.42E-10	2.09E-10	4.96E-10	5.72E-10
	Ratio	%	100.0%	21.1%	12.9%	30.6%	35.4%
	Neutron dose	pSv e ⁻¹	3.95E-07	3.30E-09	2.71E-09	1.63E-07	2.26E-07
	Ratio	%	100.0%	0.8%	0.7%	41.3%	57.2%
235 MeV p (per proton)	Neutron fluence	cm ⁻² p ⁻¹	7.72E-10	5.80E-10	1.13E-10	5.57E-11	2.35E-11
	Ratio	%	100.0%	75.1%	14.6%	7.2%	3.0%
	Neutron dose	pSv p ⁻¹	2.56E-08	5.81E-09	1.56E-09	1.05E-08	7.66E-09
	Ratio	%	100.0%	22.7%	6.1%	41.2%	30.0%

四、3 GeV 電子加速器主體屏蔽外中子量測與能譜解析

依先期計畫“高能加速器中子輻射劑量分析”的經驗可瞭解，本計畫使用波那圓柱(Bonner Sphere)中子能譜儀於同步輻射研究中心進行實地量測(圖 6)，主要是考量其高靈敏度；波那圓柱相較於波那球中子能譜儀而言，具有較大有效體積及較高氣壓，適合量測低通量且變動率較大中子來源；而波那圓柱亦有其缺點，主要是方向性不完全對稱，因此在實驗過程中需掌握中子來源，降低輻射來源對量測結果的影響。

波那圓柱能譜儀系統之核心組件為 He-3 比例計數器以及 PDT-100B 模組，其餘部分則是密度為 0.946 g/cm^3 之不同厚度的聚乙烯緩速體；圓柱形聚乙烯厚度採用的是公制單位，本計畫一共使用了 0 公分(Bare)、1.5 公分、2 公分、2.5 公分、3 公分、3.5 公分、4 公分、5 公分、6.5 公分、8 公分、9 公分、與 10 公分等 12 種不同厚度之聚乙烯，此外，另於 4 組聚乙烯緩速體內加入重金屬(2C2.5_6.5、2P2.5_6.5、2P3_6.5、3P4_6.5，其中 C 為銅，P 為鉛；金屬前後的數字表示由最內圈聚乙烯位置朝外圈算起的距離，兩者的數值差距為重金屬厚度，後方的 6.5 表示緩速體最大厚度。以 3P4_6.5 為例，在厚度為 6.5 公分的聚乙烯內，距離最內圈聚乙烯位置朝外算起 3~4 公分的地方將聚乙烯取代為重金屬鉛，此設計為藉由高能中子與重金屬發生的中子生成反應，提升高能中子之偵測效率。在現場量測過程中，中子以不規則方式入射波那圓柱系統，因此入射中子需考量到 Isotropic 與 Parallel 兩種入射模式，無法以單一模式完整呈現，圖 22 與圖 23 是“高能加速器中子輻射劑量分析與能譜測量技術建立”，透過 MCNPX 模擬程式計算出不同緩速體厚度之波那圓柱系統對中子反應之響應函數，其中圖 22 為中子以 Isotropic 模式入射波那圓柱系統；圖 23 為中子以 Parallel 模式入射波那圓柱

系統。

實驗進行過程中，藉由持續更換不同厚度的圓柱(A Bonner cylinder)，以擷取不同緩速體可測得的中子計數，同時於旁邊擺放一組量測參考(The reference neutron detector)，可作為量測過程中輻射強度變動的校正參考(6.5 cm PE)，量測結束後，亦可針對更換圓柱進行 Normalize，現場的量測狀況如圖 24 所示，兩組偵測圓柱中心位置為 Beam level 高度(135 cm)。圖 25 顯示實驗當日的增能環電流(藍線)，與量測參考的中子計數(紅線)，實驗過程中電流皆穩定保持在 0.04mA，量測參考的中子計數約穩定保持在 6.2 cps，測試當日的儲存環電流背景值約為 0.015 mA，因此實際注射電流應為 0.025 mA，換算後輸入電量約為 40 pC(約 2.5×10^8 個電子的電量)。註：固定電量在進入增能環時，會以光速繞行，需考慮光速與繞行周長： $<4 \times 10^{-11} \text{ C}> \times <3 \times 10^8 \text{ m/s}> / <480 \text{ m}> = 0.025 \text{ mA}$ 。

過往的研究[8]已量測過局部屏蔽安裝前的中子計數如圖 26 與表 3 所示，今年量測局部屏蔽安裝後的中子計數如圖 27 與表 4 所示，兩者的原始量測計數由虛線表示，藉由 Reference 來 Normalize 至兩次實驗的 6.5 cm 波那圓柱後，顯示為兩圖之實線(Corrected results)。將先前 FLUKA 模擬結果，與相對應之響應函數進行 Folding 後，即可獲得模擬的中子計數，如圖 28 與圖 29 所示，把 Corrected results(標示為 Measurements)與模擬獲得之計數畫在一起，即可觀察其趨勢與差異。

將圖 19 與圖 20 的中子能譜作為 Unfolding 的初始條件，分別把局部屏蔽安裝前與局部屏蔽安裝後的 Corrected results 作為中子計數，配合圖 22 與圖 23 Isotropic 與 Parallel 兩種不同的響應函數，可

獲得 Unfolding 結果如圖 30 與圖 31 所示。此結果即為透過實驗進行修正之能譜，新能譜若再分別與相對應之響應函數進行 Folding，則可與 Corrected results 再次進行比較，繪於圖 32 與圖 33，可直觀的瞭解其差異，由其結果可觀察出，Unfolding 後的能譜再次 Folding 後，其趨勢與原始量測計數相當一致，但略有修正。

若將圖 30、圖 31 Unfolding 後中子通量與中子劑量依能量進行區隔(0.5 eV、10 keV、10 MeV)，可將整個中子通量與中子劑量分為四個區間，分別為熱中子($<0.5\text{eV}$)、超熱中子($0.5\text{eV}\sim 10\text{keV}$)、快中子($10\text{keV}\sim 10\text{MeV}$)與高能中子($>10\text{MeV}$)，如表 5 與表 6 所示，深入觀察可發現，Unfolding 前後的中子通量分佈變化不大(表示計算模擬的結果相當有代表性)，局部屏蔽安裝前與局部屏蔽安裝後皆是，大於 10 MeV 之高能中子在各種情況都約略佔了整體中子通量的三成左右，但若考慮劑量轉換因子後的中子劑量，則幾乎全部的比例都在大於 10 keV 的能量以上，若僅看大於 10 MeV 的高能中子，各種情況的劑量比例在大於 10 MeV 時都超過整體劑量的一半以上。

將 Unfolding 後的能譜再與響應函數進行 Folding 一次，可得到修正後的中子計數，若將此計數與原始量測計數進行比較，可瞭解其修正比例與幅度，表 7 與表 8 分別列出局部屏蔽安裝前與局部屏蔽安裝後 Isotropic 響應函數與 Parallel 響應函數的計數差與其修正率，由兩表可觀察出，Isotropic 的修正率，在局部屏蔽安裝前後皆大於 Parallel，雖然中子的真實入射情況無法用單一用 Isotropic 或 Parallel 表示，但若以此結果觀察，Parallel 相對較小的修正率，應較符合現場的中子真實入射情況。此外，幾乎所有的 Unfolding 結果皆將能譜通量向上提升，但整體趨勢變化不大，顯示 FLUKA 模擬結果與能譜量測實驗後的修正存在著一致性，間接證明了原始 FLUKA

模擬結果的正確性，但 FLUKA 模擬結果相較於量測實驗皆有稍微
 低估的現象。

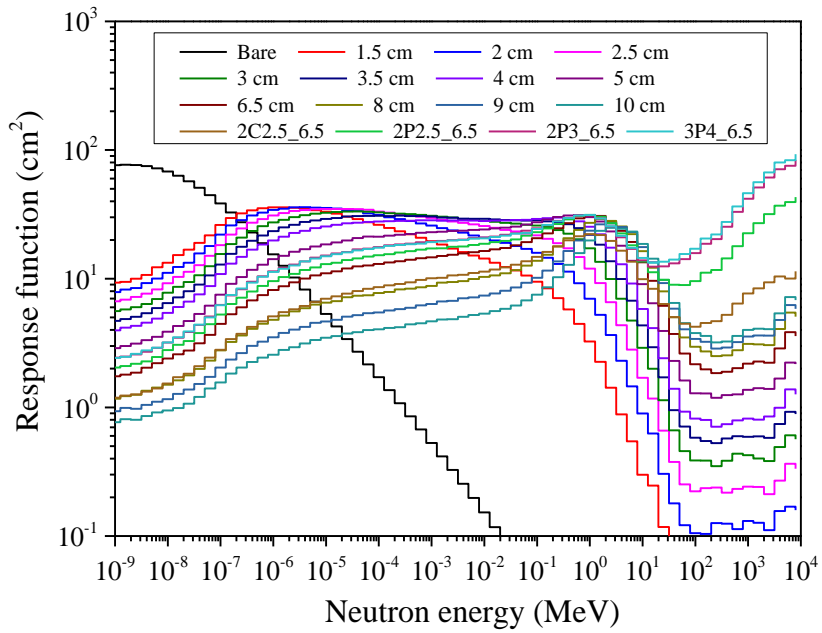


圖 22：MCNPX 模擬程式計算之 Isotropic 響應函數[2]

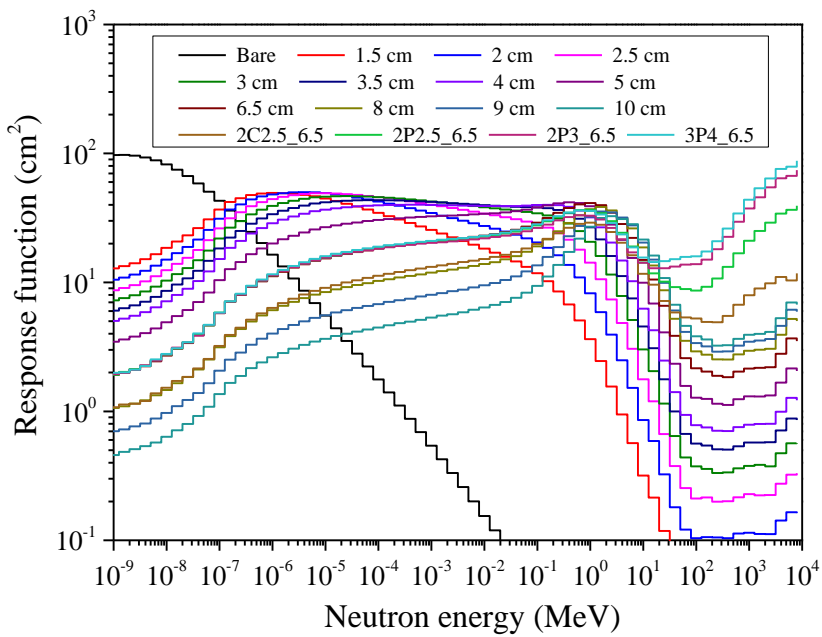


圖 23：MCNPX 模擬程式計算之 Parallel 響應函數[2]

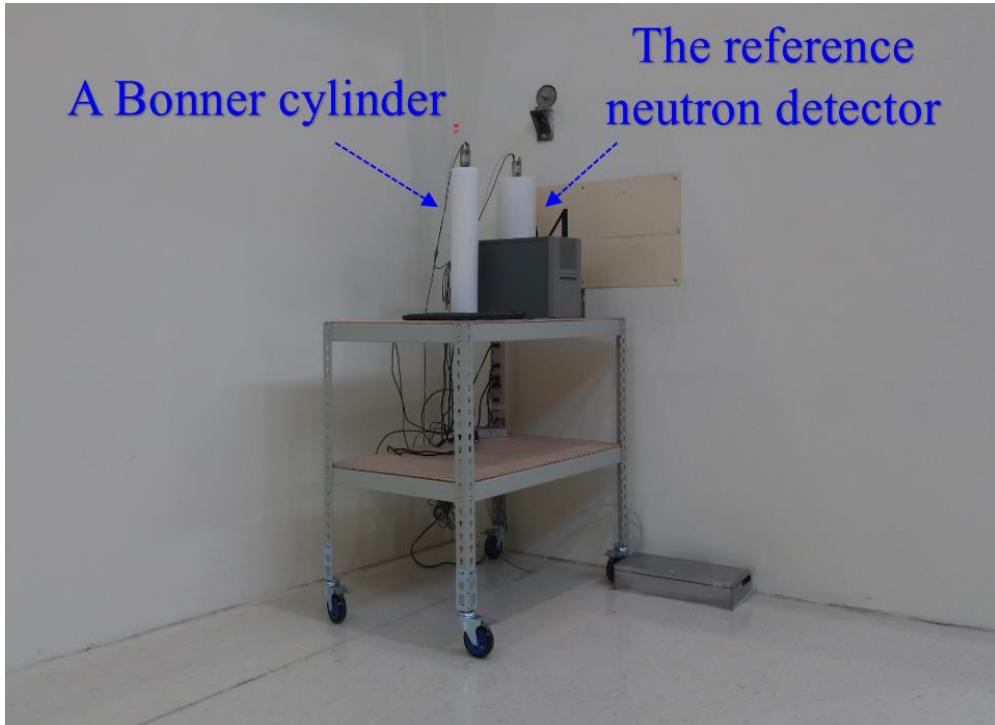


圖 24：量測圓柱與量測參考

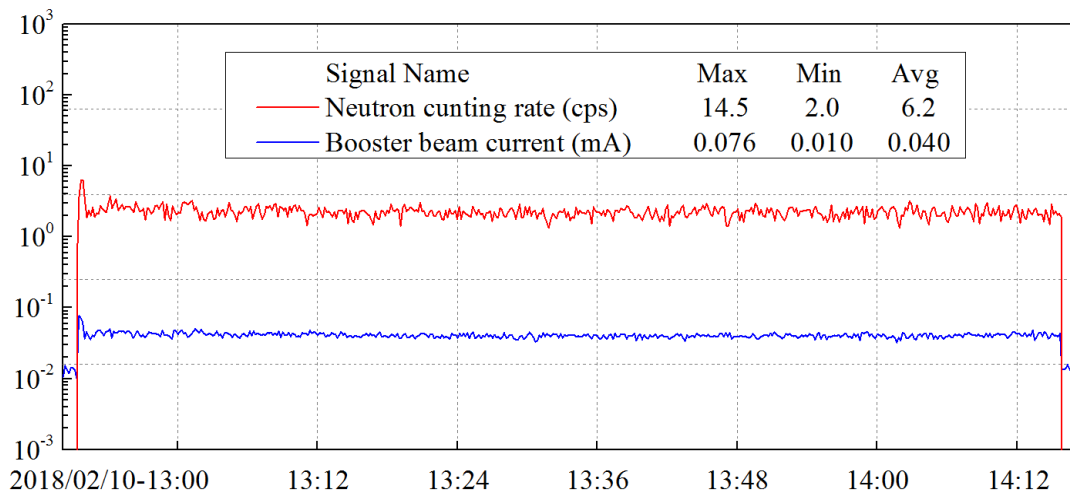


圖 25：增能環電流(藍線)，與量測參考之中子計數(紅線)

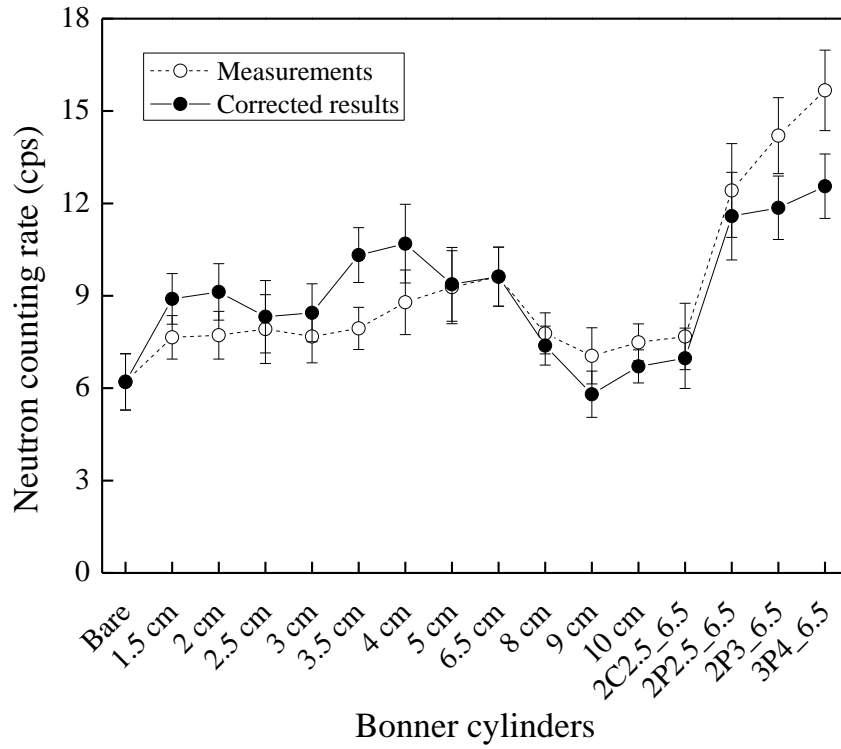


圖 26：局部屏蔽安裝前的中子計數與修正後的結果

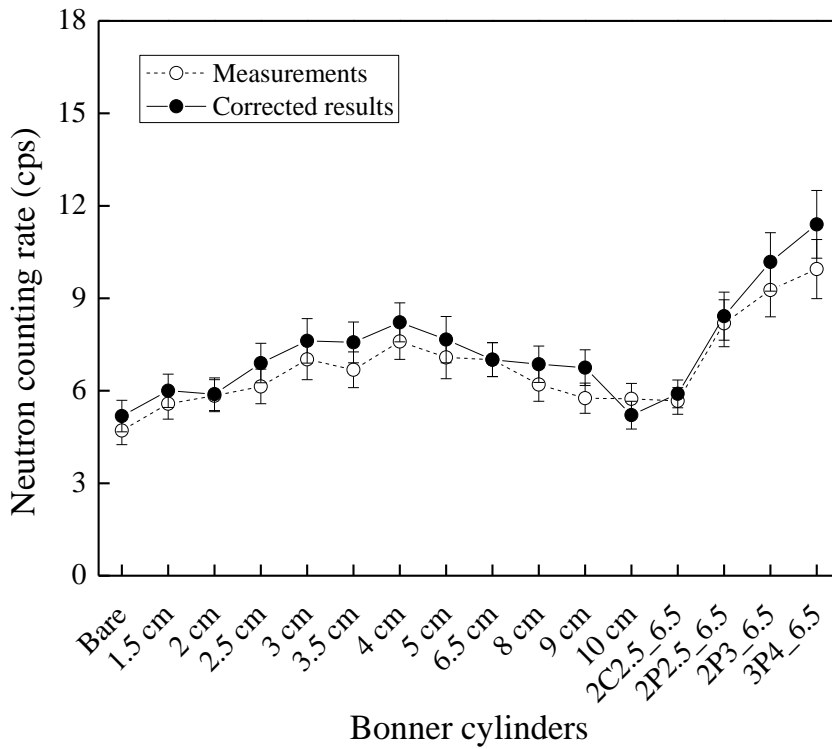


圖 27：局部屏蔽安裝後的中子計數與修正後的結果

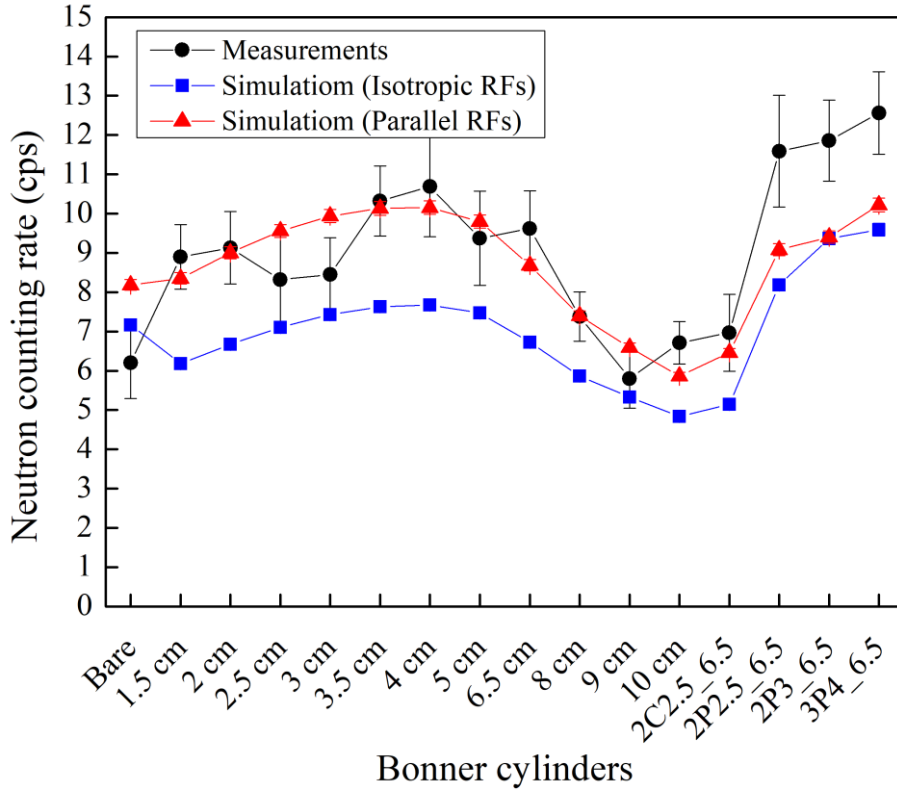


圖 28：局部屏蔽安裝前之中子計數

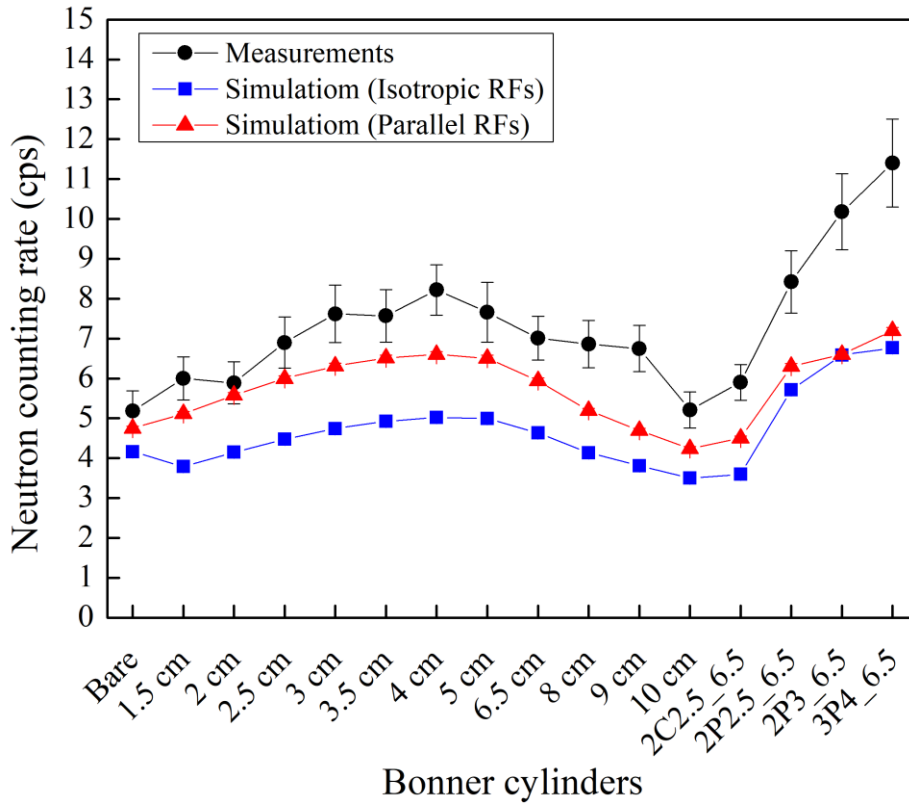


圖 29：局部屏蔽安裝後之中子計數

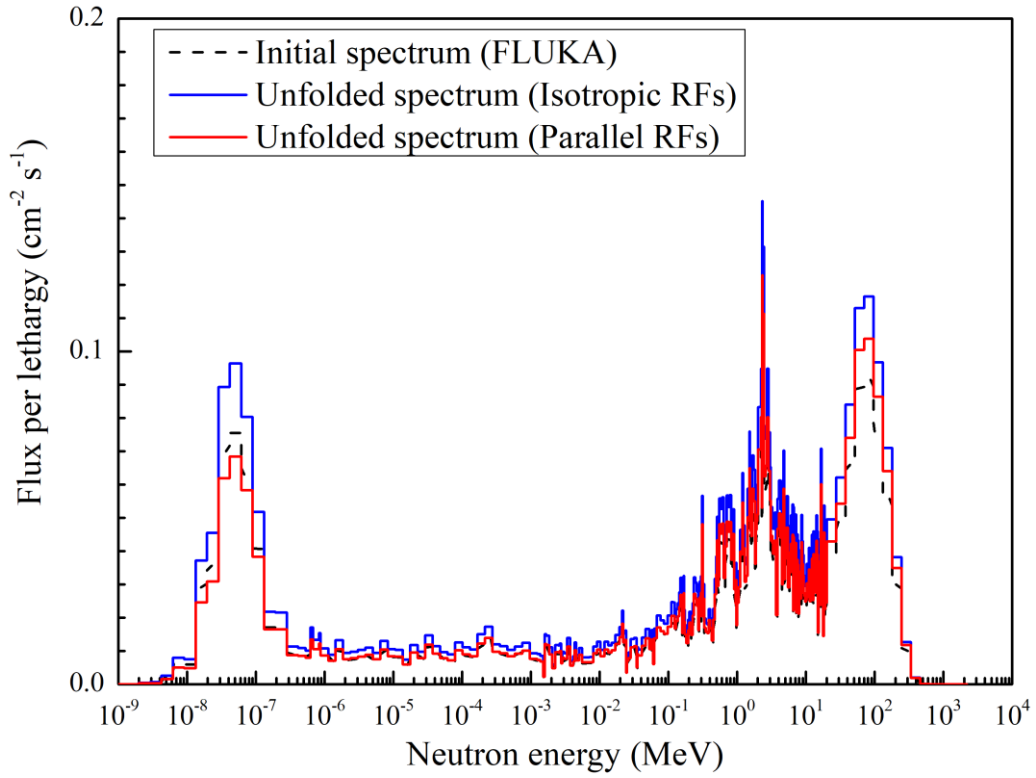


圖 30：局部屏蔽安裝前之 Unfolding 結果

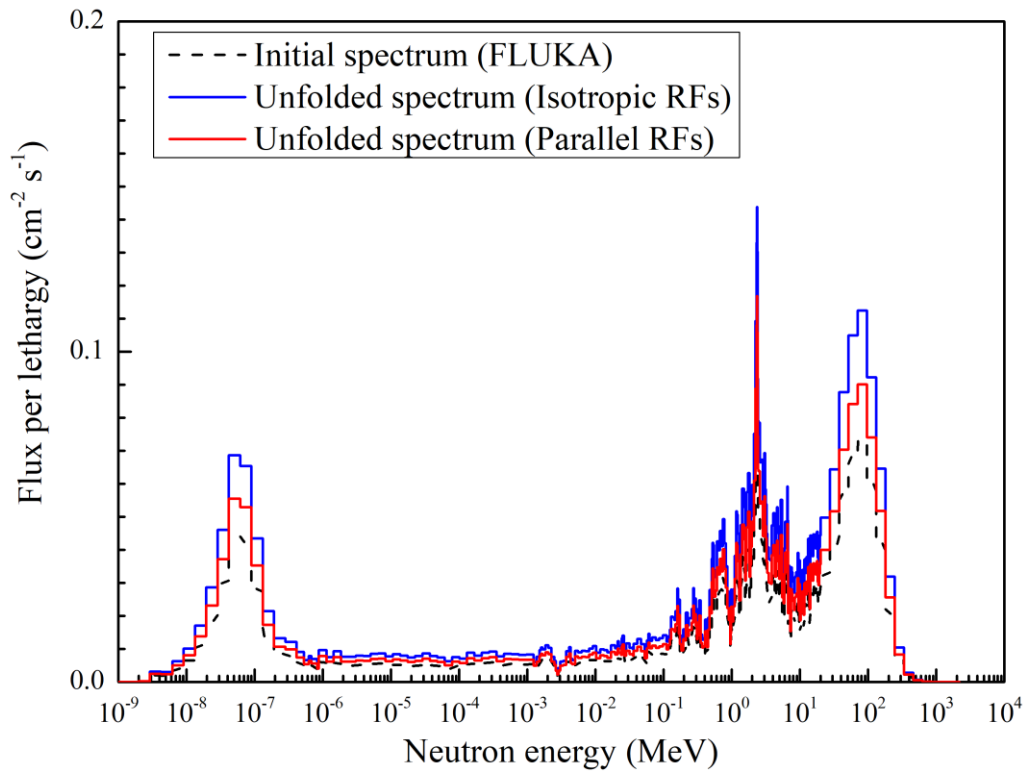


圖 31：局部屏蔽安裝後之 Unfolding 結果

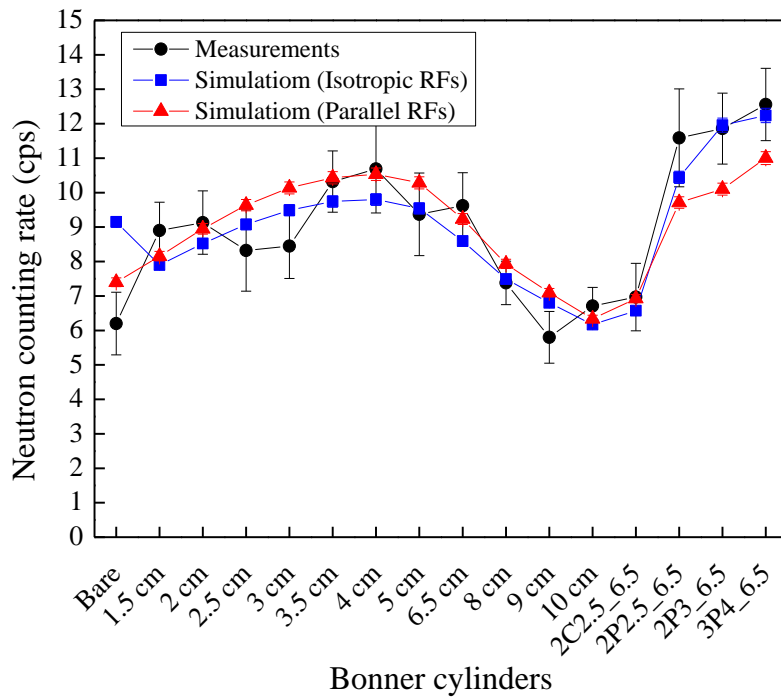


圖 32：局部屏蔽安裝前之 Unfolding 結果與響應函數 Folding，再與
原始量測計數進行比較

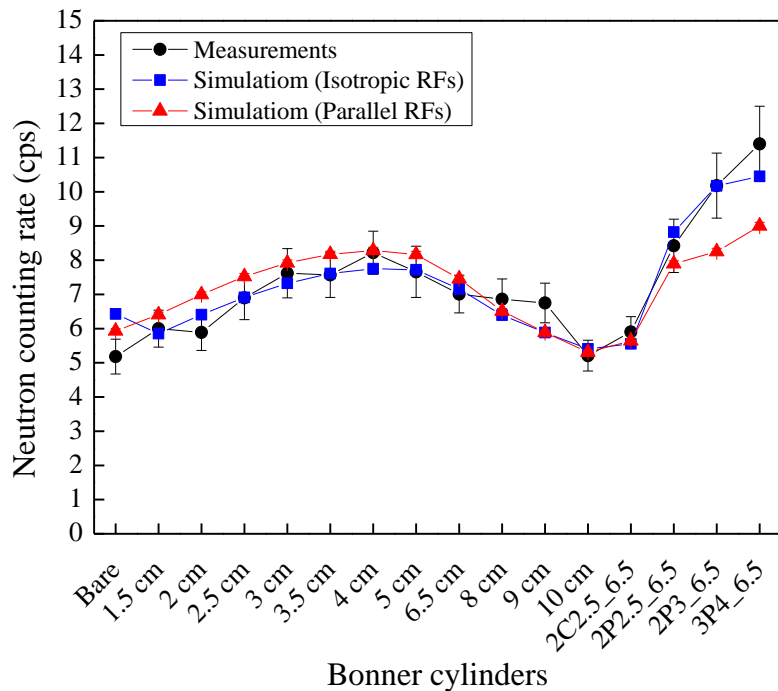


圖 33：局部屏蔽安裝後之 Unfolding 結果與響應函數 Folding，再與
原始量測計數進行比較

表 3：局部屏蔽安裝前的中子計數與修正後的結果(Corrected results：Measurements normalized to 6.5cm)

Unit：cps	Bare	1.5cm	2cm	2.5cm	3cm	3.5cm	4cm	5cm	6.5cm	8cm	9cm	10cm	2C2.5_6.5	2P2.5_6.5	2P3_6.5	3P4_6.5
Measurements	6.21	7.65	7.72	7.92	7.68	7.94	8.79	9.28	9.62	7.78	7.05	7.49	7.68	12.42	14.20	15.67
Error(%)	14.75	9.25	10.05	14.13	11.13	8.63	11.94	12.78	9.97	8.56	12.92	8.02	14.06	12.27	8.69	8.34
Corrected results	6.20	8.90	9.13	8.32	8.45	10.32	10.69	9.37	9.62	7.38	5.80	6.71	6.97	11.59	11.86	12.56
Error(%)	14.75	9.25	10.05	14.13	11.13	8.63	11.94	12.78	9.97	8.56	12.92	8.02	14.06	12.27	8.69	8.34

表 4：局部屏蔽安裝後的中子計數與修正後的結果(Corrected results：Measurements normalized to 6.5cm)

Unit：cps	Bare	1.5cm	2cm	2.5cm	3cm	3.5cm	4cm	5cm	6.5cm	8cm	9cm	10cm	2C2.5_6.5	2P2.5_6.5	2P3_6.5	3P4_6.5
Measurements	4.71	5.58	5.84	6.14	7.02	6.68	7.6	7.08	7.01	6.20	5.76	5.74	5.67	8.19	9.27	9.95
Error(%)	9.88	9.05	8.99	9.28	9.49	8.72	7.75	9.80	7.91	8.73	8.67	8.81	7.76	9.31	9.41	9.68
Corrected results	5.18	6	5.89	6.9	7.62	7.57	8.22	7.66	7.01	6.86	6.75	5.21	5.9	8.42	10.18	11.4
Error(%)	9.88	9.05	8.99	9.28	9.49	8.72	7.75	9.80	7.91	8.73	8.67	8.81	7.76	9.31	9.41	9.68

表 5：局部屏蔽安裝前-Unfolding 後中子通量與中子劑量之能量分佈

Neutron		Total	$E_n < 0.5 \text{ eV}$	$0.5 \text{ eV} < E_n < 10 \text{ keV}$	$10 \text{ keV} < E_n < 10 \text{ MeV}$	$E_n > 10 \text{ MeV}$
Flux ($\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Initial	5.87E-01	24.6%	14.6%	30.4%	30.4%
	ISO	7.49E-01	24.6%	14.6%	30.4%	30.4%
	PAR	6.13E-01	21.4%	14.4%	31.4%	32.9%
H*(10) ($\mu\text{Sv h}^{-1}$)	Initial	4.65E-01	1.1%	0.9%	44.3%	53.8%
	ISO	5.93E-01	1.1%	0.9%	44.4%	53.7%
	PAR	5.12E-01	0.9%	0.8%	43.5%	54.8%

表 6：局部屏蔽安裝後-Unfolding 後中子通量與中子劑量之能量分佈

Neutron		Total	$E_n < 0.5 \text{ eV}$	$0.5 \text{ eV} < E_n < 10 \text{ keV}$	$10 \text{ keV} < E_n < 10 \text{ MeV}$	$E_n > 10 \text{ MeV}$
Flux ($\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Initial	4.05E-01	21.1%	12.9%	30.7%	35.3%
	ISO	6.24E-01	21.1%	12.9%	30.7%	35.3%
	PAR	5.05E-01	21.1%	13.0%	30.8%	35.1%
H*(10) ($\mu\text{Sv h}^{-1}$)	Initial	3.56E-01	0.8%	0.7%	41.3%	57.2%
	ISO	5.49E-01	0.8%	0.7%	41.3%	57.2%
	PAR	4.43E-01	0.8%	0.7%	41.6%	56.8%

表 7：局部屏蔽安裝前之 Unfolding 結果與響應函數 Folding，與原始量測計數之差值與修正率

NO shielding	Bare	1.5cm	2cm	2.5cm	3cm	3.5cm	4cm	5cm	6.5cm	8cm	9cm	10cm	2C2.5_6.5	2P2.5_6.5	2P3_6.5	3P4_6.5
ISO 計數差	1.98	1.71	1.85	1.97	2.06	2.12	2.13	2.07	1.87	1.63	1.48	1.34	1.43	2.26	2.59	2.65
修正率	27.7%	27.7%	27.7%	27.7%	27.8%	27.8%	27.8%	27.8%	27.7%	27.7%	27.7%	27.7%	27.7%	27.7%	27.6%	27.6%
PAR 計數差	-0.79	-0.20	-0.05	0.08	0.20	0.30	0.38	0.49	0.55	0.53	0.51	0.47	0.47	0.63	0.70	0.78
修正率	-9.6%	-2.4%	-0.6%	0.8%	2.0%	3.0%	3.7%	5.0%	6.3%	7.2%	7.7%	8.0%	7.2%	6.9%	7.4%	7.6%

表 8：局部屏蔽安裝後之 Unfolding 結果與響應函數 Folding，與原始量測計數之差值與修正率

NO shielding	Bare	1.5cm	2cm	2.5cm	3cm	3.5cm	4cm	5cm	6.5cm	8cm	9cm	10cm	2C2.5_6.5	2P2.5_6.5	2P3_6.5	3P4_6.5
ISO 計數差	2.27	2.06	2.26	2.44	2.58	2.68	2.73	2.72	2.53	2.26	2.08	1.91	1.96	3.11	3.59	3.68
修正率	54.5%	54.5%	54.4%	54.5%	54.5%	54.5%	54.5%	54.5%	54.5%	54.5%	54.5%	54.5%	54.5%	54.5%	54.4%	54.4%
PAR 計數差	1.18	1.29	1.42	1.52	1.61	1.66	1.68	1.66	1.51	1.32	1.19	1.07	1.14	1.59	1.65	1.80
修正率	24.8%	25.3%	25.4%	25.4%	25.5%	25.5%	25.5%	25.5%	25.5%	25.4%	25.3%	25.2%	25.3%	25.2%	25.1%	25.0%

五、傳統中子偵檢器的高能中子劑量低估修正案例分析

由先期計畫”高能中子指標量測程序與劑量低估修正的實際案例分析[2]”中，已計算出 PE 波那圓柱(本計畫名為 6.5 cm)與 PE+Pb 波那圓柱(本計畫名為 2P2.5_6.5)在 245 個輻射工作場的能譜修正因子，並分別以高能中子比例(圖 34)以及 PE+Pb 波那圓柱與 PE 波那圓柱的讀值比(圖 35)作出高能中子能譜指標作圖。

假設在能譜未知的情況下，PE 波那圓柱在經過 Cf-252 校正射源校正後的偵檢器校正因子為 $0.0427 \mu\text{Sv/h/cps}$ ，如表 3、表 4 所示，本計畫於局部屏蔽安裝前的 PE 計數為 9.62 cps，PE+Pb 的計數為 12.42 cps；局部屏蔽安裝後的 PE 計數為 7.01 cps，PE+Pb 的計數為 8.19 cps，因此量測劑量率(PE 計數 \times 校正因子)分別為局部屏蔽安裝前 PE： $0.411 \mu\text{Sv/hr}$ ，局部屏蔽安裝後 PE： $0.299 \mu\text{Sv/h}$ 。高能中子指標方面(PE+Pb / PE)，局部屏蔽安裝前為 1.291；局部屏蔽安裝後為 1.168，透過圖 35 的修正因子公式可獲得局部屏蔽安裝前的修正因子為 2.327；局部屏蔽安裝後的修正因子為 1.766，因此，在量測位置點若使用 PE 波那圓柱作為劑量計時，局部屏蔽安裝前劑量率應修正為 $0.956 \mu\text{Sv/h}$ ；局部屏蔽安裝後劑量率應修正為 $0.528 \mu\text{Sv/h}$ (表 9)。

在能譜已知的情況下，選擇原始計算能譜來計算高能中子比例，可獲得局部屏蔽安裝前高能中子比例為 53.8%；局部屏蔽安裝後高能中子比例為 57.2%，透過圖 34 的修正因子公式可獲得局部屏蔽安裝前的修正因子為 1.950；局部屏蔽安裝後的修正因子為 2.121，因此，在量測位置點若使用 PE 波那圓柱作為劑量計時，局部屏蔽安裝前劑量率應修正為 $0.801 \mu\text{Sv/h}$ ；局部屏蔽安裝後劑量率應修正為 $0.634 \mu\text{Sv/h}$ (表 9)。

在模擬分析方面，將計算所得之原始能譜與中子劑量轉換因子進行 Folding，可得知量測位置之劑量率，如表 4 與表 5 所示，在局部屏蔽安裝前的中子劑量率為 0.465 $\mu\text{Sv/h}$ ；在局部屏蔽安裝前的中子劑量率為 0.356 $\mu\text{Sv/h}$ (表 9)。

不論是已知或未知能譜的情況下，透過修正因子修正後的 PE 劑量率皆向上調整(大約 2 倍)，主要就是因為 PE 偵檢器對於高能中子(>10MeV)的偵測能力不佳，修正後與修正前的劑量差幾乎就是高能中子的部分。在未知能譜的劑量修正過程中，因 PE 與 PE+Pb 之間的反應函數在小於 10 MeV 的部分幾乎雷同，所以上修的部分主要在大於 10 MeV 的響應函數上；在已知能譜的劑量修正過程中，利用大於 10 MeV 的已知劑量比例來修正原本沒有考慮到大於 10 MeV 的部分，此亦為加入考量高能中子後的結果。最後結果整理：(1)局部屏蔽安裝前，PE 圓柱(Cf-252 校正)量測的劑量率為 0.411 $\mu\text{Sv/h}$ ，利用未知能譜的劑量修正技術則上升為 0.956 $\mu\text{Sv/h}$ ；利用已知能譜的劑量修正技術則上升為 0.801 $\mu\text{Sv/h}$ 。相較之下，直接由模擬計算預期的劑量率為 0.465 $\mu\text{Sv/h}$ ，經由能譜測量換算成劑量率則為 0.512-0.593 $\mu\text{Sv/h}$ 。(2)局部屏蔽安裝後，PE 圓柱(Cf-252 校正)量測的劑量率為 0.299 $\mu\text{Sv/h}$ ，利用未知能譜的劑量修正技術則上升為 0.528 $\mu\text{Sv/h}$ ；利用已知能譜的劑量修正技術則上升為 0.634 $\mu\text{Sv/h}$ 。相較之下，直接由模擬計算預期的劑量率為 0.356 $\mu\text{Sv/h}$ ，經由能譜測量換算成劑量率則為 0.443-0.549 $\mu\text{Sv/h}$ 。二案例皆顯示高能中子修正是有效的，修正後 PE 圓柱(Cf-252 校正)量測的結果不再有低估現場真正中子劑量(模擬或測量)的情況，也間接證明了先期計畫”高能中子指標量測程序與劑量低估修正的實際案例分析[2]”，在傳統偵檢器的劑量修正部分仍有相當程度的可靠度，以及整個計畫於量測與分析上的準確性。

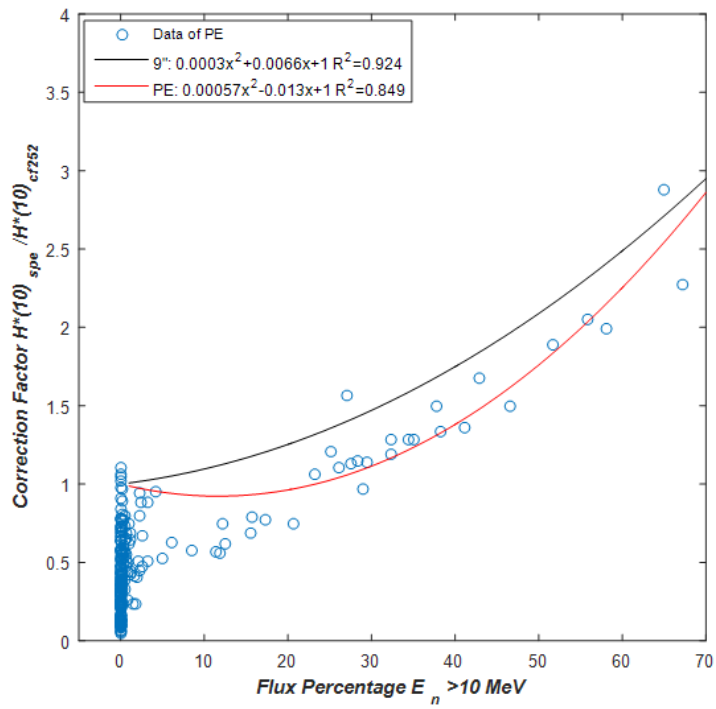


圖 34：PE 波那圓柱之能譜修正因子與高能中子比例之關係[2]

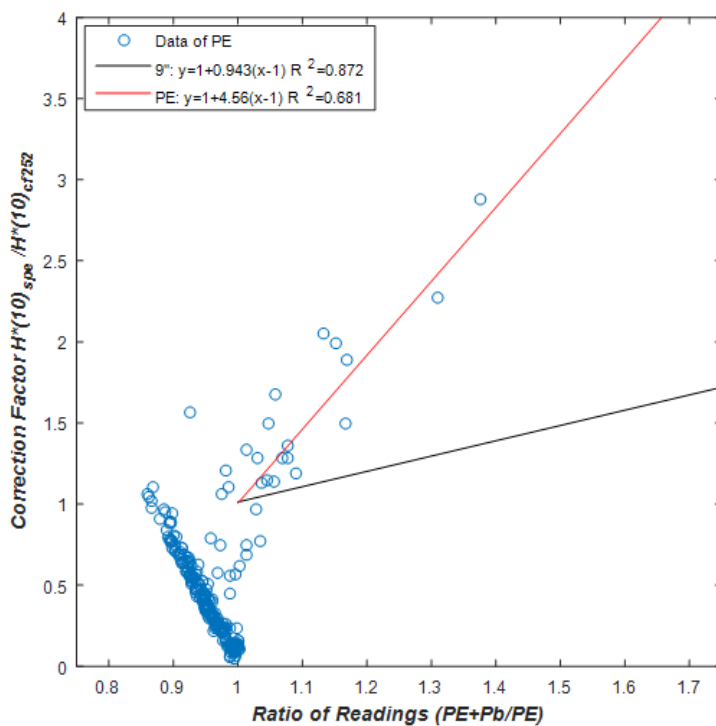


圖 35：PE 波那圓柱之能譜修正因子與 PE+Pb 和 PE 波那圓柱的讀值比之關係[2]

表 9：局部屏蔽安裝前後劑量率相關修正參數

	局部屏蔽安裝前	局部屏蔽安裝後
(a) PE 計數(cps)	9.62	7.01
(b) PE 量測計量率($\mu\text{Sv/h}$)	0.411	0.299
(c)未知能譜之 PE+Pb / PE 高能中子能譜指標(x)	1.291	1.168
(d)未知能譜之修正因子(y)	2.327	1.766
(e)未知能譜劑量率修正($\mu\text{Sv/h}$)	0.956	0.528
(f)已知能譜之高能中子比例(x)	53.8	57.2
(g)已知能譜之修正因子(y)	1.950	2.121
(h)已知能譜劑量率修正($\mu\text{Sv/h}$)	0.801	0.634
(i)模擬分析所得之劑量率($\mu\text{Sv/h}$)	0.465	0.356
(j)能譜量測所得之劑量率($\mu\text{Sv/h}$)	0.512-0.593	0.443-0.549

肆、結論與未來方向

本次計畫以按合約完成(1)235 MeV 質子源設施之中子輻射場分析；(2) 3 GeV 電子源設施之中子輻射場分析；(3)比較二種類型加速器設施的中子輻射場差異；(4)進行 3 GeV 電子源設施之主體屏蔽外中子能譜量測；(5)傳統中子偵檢器的高能中子劑量低估修正案例分析。

在 3 GeV 電子源設施中，理論模擬計算與實驗量測吻合度高，結果亦顯示高能中子不可忽略，且可能在整個劑量分析上佔據一半以上的劑量貢獻，其能譜分析顯示，3 GeV 電子源設施屏蔽外產生的中子在數百 MeV 的能量範圍相當顯著，是輻射防護的重點，在熱中子能量附近雖一樣有峰值，但考量劑量轉換因子後，並非主要劑量來源。在 235 MeV 質子源設施中，亦有機會產生高能中子 (>10MeV)，但其量在治療室迷道外並不顯著，至於主體屏蔽牆外的高能中子是否真的如模擬分析所展現的少量，未來仍可透過分析模型的改良或實地量測進行深入探討。

本計畫經由兩項設施之分析能譜瞭解其差異，並透過 3 GeV 電子源設施之主體屏蔽外中子能譜量測進行原始模擬能譜的調整，結果顯示，使用 Parallel 的響應函數比 Isotropic 的更能貼近真實的中子入射狀態，但現場真實入設角度分布應介於二種極端情況之間。透過傳統中子偵檢器的高能中子劑量低估修正，可確認先期計畫”高能中子指標量測程序與劑量低估修正的實際案例分析[2]”，在傳統偵檢器的劑量修正部分仍有相當程度的可靠度，同時，將模擬分析所得之量測位置劑量率與前述兩者相比，亦相當接近，此結果表示本研究不論是實驗或模擬方面皆可互相驗證，並具有準確性。

伍、參考文獻

1. 原能會核能研究所委託研究計劃(NL1050775)：“質子治療設施與其它高能輻射場的中子監測器劑量修正研究”期末報告(2016)。
2. 原能會核能研究所委託研究計劃(NL1060551)：“高能中子指標量測程序與劑量低估修正的實際案例分析”期末報告(2017)。
3. Ferrari, A., Sala, P.R., Fassò, A., Ranft, J., (2005). “FLUKA: a Multi-particle Transport Code”, CERN 2005-10, INFN/TC_05/11, SLAC-R-773.
4. Pelowitz, D.B., (Ed.), 2005, “MCNPX User’s Manual, Version 2.5.0”, LA-CP-05-0369, Los Alamos National Laboratory.
5. Meier, M.M., Goulding, C.A., Morgan, G.L., Ullmann, J.L., (1990). “Neutron Yields from Stopping-Length and Near-Stopping-Length Targets for 256-MeV Protons”, Nucl. Sci. Eng. 104, 339-363.
6. Lee, H.S., Ban, S., Sanami, T., Takahashi, K., Sato, T., Shin, K., Chung, C., (2005). “Angular Distribution Measurements of Photo-Neutron Yields Produced by 2.0 GeV Electrons Incident on Thick Targets”, Radiat. Prot. Dosim. 116, 653-657.
7. NSRRC, Taiwan Photon Source (TPS) Design Handbook (2009).
8. Y.C. Lin, A.Y. Chen, Joseph Liu, K.W. Lee, R.J. Sheu, “Determination of neutron spectrum outside the lateral shielding of Taiwan Photon Source using high-sensitivity Bonner cylinders”, EPJ Web of Conferences, Vol. 153 (2017).
9. Y.C. Lin, R.J. Sheu, A.Y. Chen, “Responses of Conventional and Extended-Range Neutron Detectors in Mixed Radiation Fields around a 150-MeV Electron LINAC”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Vol. 770, pp. 57-63 (2015).
10. ICRP, “ICRP Publication 74: Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation”, Annals of the ICRP Volume 26/3, International Commission on Radiological Protection (1997).
11. A. Mitaroff, PhD Thesis, “Design, calibration and tests of an extended range Bonner sphere spectrometer,” CERN. (2002).