

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

高能中子指標量測程序與
劑量低估修正的實際案例分析

Determination of high-energy neutron indexes and case studies of
spectral correction factors for conventional neutron dose meters

期末報告

計畫編號：NL1060551

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：0937883286

E-mail address：rjsheu@mx.nthu.edu.tw

研究期程：中華民國 106 年 5 月至 106 年 12 月

核研所聯絡人員：朱葦翰

報告日期：106 年 11 月 30 日

目 錄

目 錄.....	I
中文摘要.....	1
ABSTRACT	2
壹、計畫緣起與目的.....	3
1. 計畫緣起.....	3
2. 研究目的.....	9
貳、研究方法與過程.....	13
1. 精進自動化分析程式	13
2. 能譜修正因子的影響分析	14
3. 高能中子劑量低估的修正指引	15
4. 案例能譜與修正分析	15
5. 預計可能遭遇之困難和解決的方法	15
參、主要發現與結論.....	17
1. 結果與討論.....	17
1.1 精進自動化分析程式.....	17
1.2 能譜修正因子的影響分析.....	18
1.3 高能中子劑量低估的修正指引	38
1.4 案例能譜與修正分析.....	45
2. 結論與未來方向	83
肆、參考文獻.....	86

中文摘要

具有高能中子(> 10 MeV)存在的輻射場劑量評估與測量是一重要且困難的議題，由於傳統緩速型中子偵檢器的先天特性，通率劑量轉換係數和偵測效率在高能中子區域有相反的趨勢，直接射源校正使用會導致中子劑量測量結果的嚴重低估。為彌補此一低估問題，先期研究考慮針對不同輻射場特性給予相對應之校正修正因子，逐一探討 IAEA-TRS-403 報告中超過 200 多種的工作場所中子能譜，藉由比較 Cf-252 射源校正的劑量響應與由通率劑量轉換因子直接得到的結果，據此建立修正偵檢器中子劑量低估的模型。為精進及測試針對傳統中子偵檢器 9” 球所建立的能譜修正因子，本研究完成下列工作，包括 (1)精進自動化分析程式，持續改進程式功能與可靠性，快速有系統地探討可能影響修正的因素；(2)彙整能譜修正因子的影響分析，進行各種不同型式中子偵檢器對應的能譜修正因子的比較研究；(3)針對 INER Cf-252 中子校正場的設備，針對傳統型式中子偵檢器在高能輻射場的劑量低估問題，建立高能中子劑量低估修正的參考規範；(4)實際案例的能譜計算與修正分析，測試檢驗這套修正辦法的有效性，以利未來 INER 推廣技術服務。本研究的成果可提供國內高能加速器設施與主管機關參考，協助提升核能研究所中子校正技術水準。

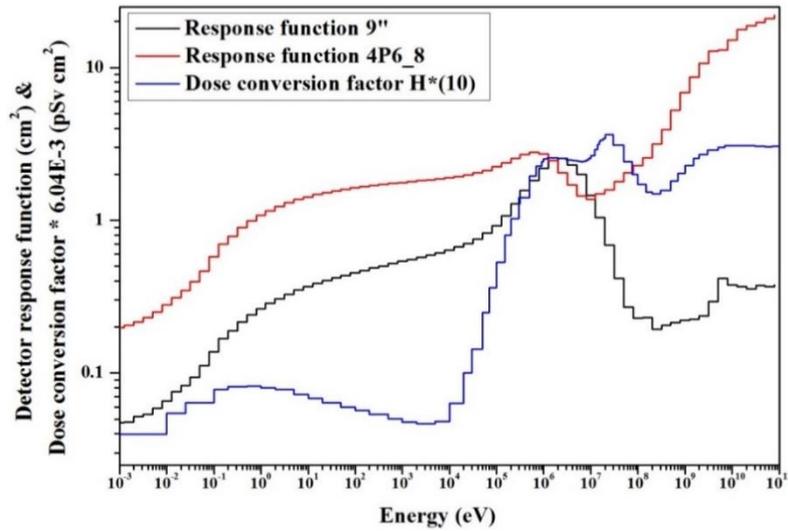
Abstract

This study aimed at formalizing the procedure for correcting the responses of conventional neutron dose meters used in environments with high-energy neutrons ($E > 10$ MeV) and performing a case study for demonstration. Conventional moderated-type neutron dose meters tend to underestimate the dose contribution of high-energy neutrons because of the opposite trends of dose conversion coefficients and detection efficiencies as the neutron energy increases. A practical correction scheme was proposed based on analysis of hundreds of neutron spectra in the IAEA-TRS-403 report. By comparing Cf-252-calibrated dose responses with reference values derived from fluence-to-dose conversion coefficients, we have provided recommendations for neutron field characterization and the corresponding dose correction factors. Base on the previous results, this study successfully achieved its objectives by performing the following analyses. (1) Improve the functionality and reliability of our analysis software; (2) Examine possible factors affecting the proposed spectral correction factors, especially when using different types of neutron detectors; (3) Establish a suitable correction procedure for neutron detectors calibrated in INER; (4) Conduct a case study to test the appropriateness of the correction procedure. The results provide useful information and guidelines for correcting the dose underestimation of conventional moderated-type neutron detectors, which are calibrated with Cf-252 or similar neutron sources and used somewhere with high-energy neutrons in radiation field.

壹、計畫緣起與目的

1. 計畫緣起

近年來國內加速器的應用日益蓬勃發展，帶電粒子能量越來越高，設施規模也越來越大，加速器運轉產生的二次中子能量相較於傳統射源與核反應器環境來得高，因此高能中子(>10 MeV)的劑量評估與度量問題日益重要。傳統的緩速型中子偵檢器(Moderated-Type Neutron Detectors)應用非常廣泛，但是有一嚴重缺陷，其對高能中子響應函數低，偵測效率不佳，且高能中子的通率劑量轉換因子貢獻大(圖一)，導致嚴重的劑量低估問題。所以，該如何準確地度量與評估這些加速器環境的高能中子劑量是一個困難但是重要的輻射防護問題。傳統中子偵檢器一般採 BF₃ 或 He-3 比例計數器當熱中子偵測核心，外加適當尺寸的中子緩速體，例如常見的 9 吋波那球(9" Bonner Sphere)，其設計原理希望偵檢器的能量響應函數與中子劑量轉換因子的曲線能有合理的一致性。如圖一所示，針對 9 吋波那球能量響應函數與中子劑量轉換因子的比較，在快中子與熱中子能量範圍，二者趨勢相當一致，超熱中子區域則偵檢器響應明顯高估，因此透過適當校正，偵檢器整體反應在沒有高能中子時至少是保守安全的，目前大部分的緩速型中子偵檢器常以 9 吋波那球為參考再加以微調改進，應用非常普遍。



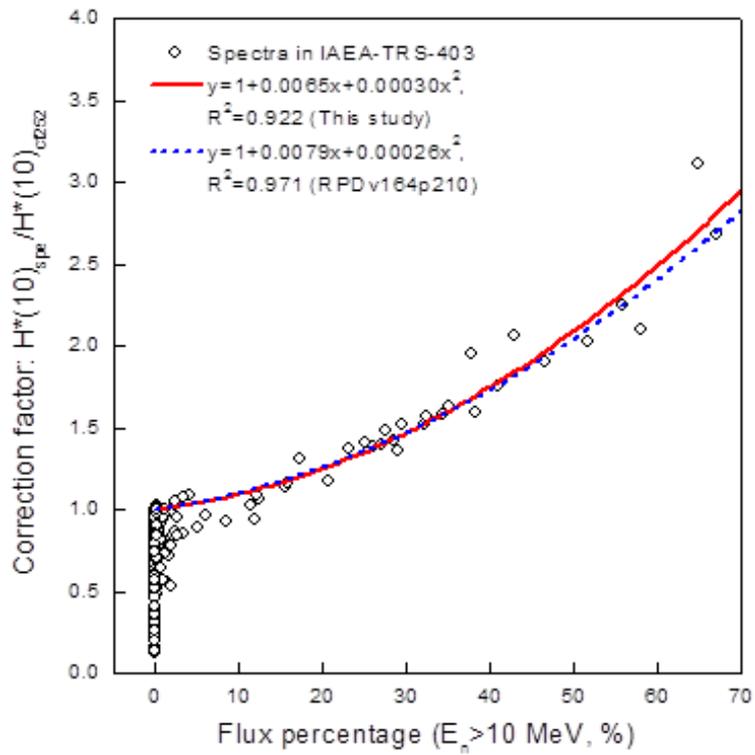
圖一：9吋傳統波那球與4P6_8延伸能量波那球的能量響應函數，及其與中子通率劑量 $H^*(10)$ 轉換因子的比較。

為了改善高能中子劑量低估的問題，近年來文獻中有許多關於延伸能量波那球(Extended-range Bonner Spheres)的研究與商用產品[1,2]，藉由在中子緩速體中嵌入重金屬，利用高能中子的(n,xn)反應來增加偵檢器對於高能中子的偵測效率。圖一的4P6_8波那球就是一個類似設計的延伸能量中子偵測器。但是這樣的偵檢器較為昂貴也變得非常笨重不易攜帶移動。國外許多學者也有提出傳統偵檢器於高能中子場的低估問題，例如根據美國史丹福直線加速器中心(SLAC)的研究結果[3]，若比較高能電子加速器屏蔽設施外之中子劑量，可發現當高能中子場內能量大於20 MeV中子所占比例逐漸提高時，採用Cf-252、AmBe射源校正之AB remmeter將造成約70%的低估情形；實務上史丹福直線加速器中心將AB remmeter之劑量讀值簡單直接乘以2倍，以彌補由

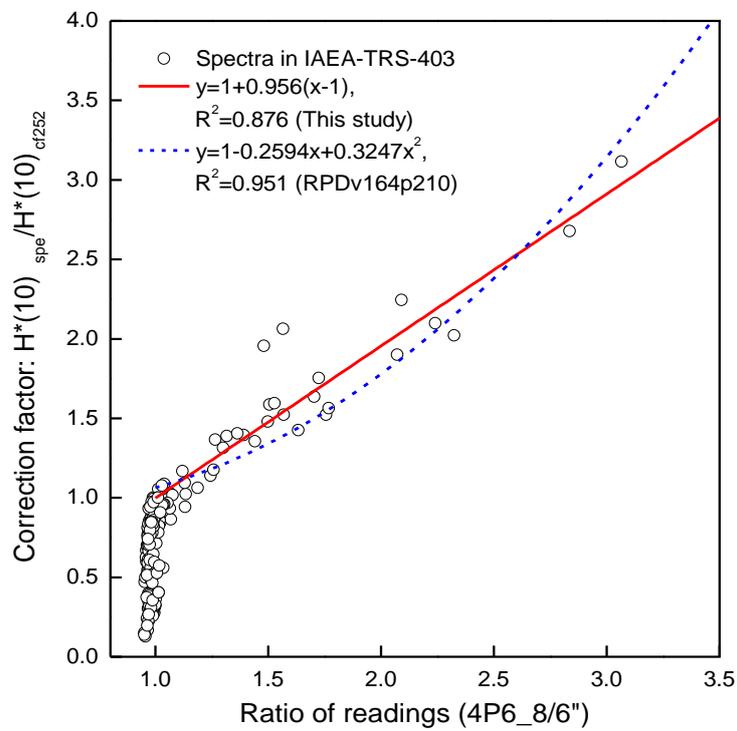
於校正射源並非高能中子源所造成的誤差。由 Klett 等作者[2]於 2007 年在歐洲核子研究組織(CERN)的研究亦發現，對於能量達到數百 MeV 之中子輻射場，傳統校正之中子劑量監測系統將有約 30%~40%的劑量低估情形。針對此一問題，Olsher 等人[1]為了提升偵檢器的響應範圍，使用改進的中子雷姆偵檢器 WENDI，能量響應可以到達 5 GeV；Klett 等人[2]亦提出改良型式的 LB 6411 中子偵檢器，其能量響應可延伸至 GeV 水平的中子。Roberto 作者[4]在 2011 年的回顧文章中更明確指出，若待測工作場所之中子能譜與校正室中子能譜存在明顯差異時，則必須隨待測輻射場的變化有相對應之劑量修正因子。另外，Naismith[5]與 Tanner[6]等作者，蒐集一系列 20 MeV 以下之輻射場能譜，提出以不同校正射源校正之區域監測器以及個人劑量計，在不同待測能譜硬度下之量測結果差異分析與歸納，亦對本研究有相當參考價值。

綜合以上文獻敘述可以發現，針對射源能譜特性可能對校正結果所造成的影響，多數是針對 20 MeV 能量以下中子場；至於高能中子場之區域偵檢器與個人劑量計結果差異比較，則多著重於單一輻射場內的特性探討，缺乏多種可能輻射場間的綜合比較。另外，目前大部分輻射場所配有的中子偵檢器也還是傳統型式的偵檢器居多，因此本團隊期望針對傳統波那球建立一套高能中子劑量的修正方式，避免中子劑量的低估，同時確認延伸能量中子偵測器的適用範圍，相關成果應可提升國內在高能中子輻射場的劑量測量技術水準。

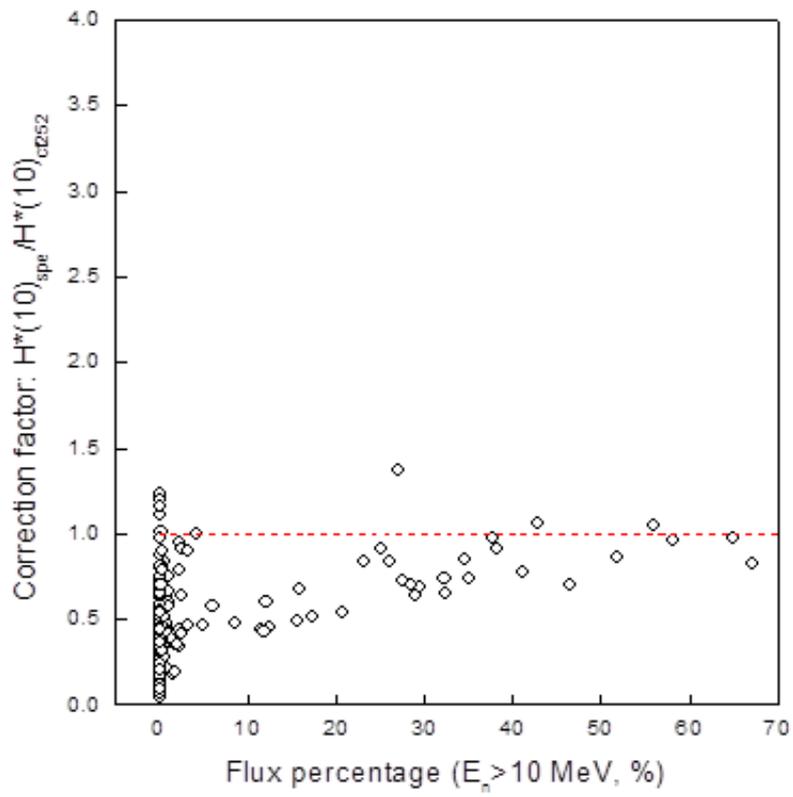
本團隊去年的研究藉由使用包含了大量中子工作場能譜的 IAEA-TRS-403[7]技術報告，建立一套自動化程式進行一系列的分析，驗證延伸能量型波那球，確實改善高能中子劑量低估的問題。針對傳統緩速型中子偵檢器應用於高能中子輻射場的劑量修正方法，本研究提供一套修正建議如圖二與圖三所示。其中圖二是偵檢器能譜修正因子對高能中子比例作圖，圖三為偵檢器能譜修正因子對高能中子指標作圖。比較圖二與圖三，兩者所擬合出的曲線有相似的行為，代表我們利用 4P6_8 延伸能量型波那球與 6 吋波那球建立出的高能中子指標是可行的，假若今天無法得知中子輻射場之中子能譜，可以簡單的利用 4P6_8 延伸能量型波那球與 6 吋波那球之讀值比，簡單快速的計算偵檢器能譜修正因子。另外，圖四為以 4P6_8 延伸能量型波那球所計算出來之偵檢器能譜修正因子。由計算顯示偵檢器能譜修正因子大多都在 1 附近，可以驗證延伸能量型波那球對於高能中子的量測比起傳統緩速型波那球要改善許多，基本上可以良好的解決高能中子劑量低估的問題。



圖二：9 吋波那球之偵檢器能譜修正因子對高能中子比例作圖。



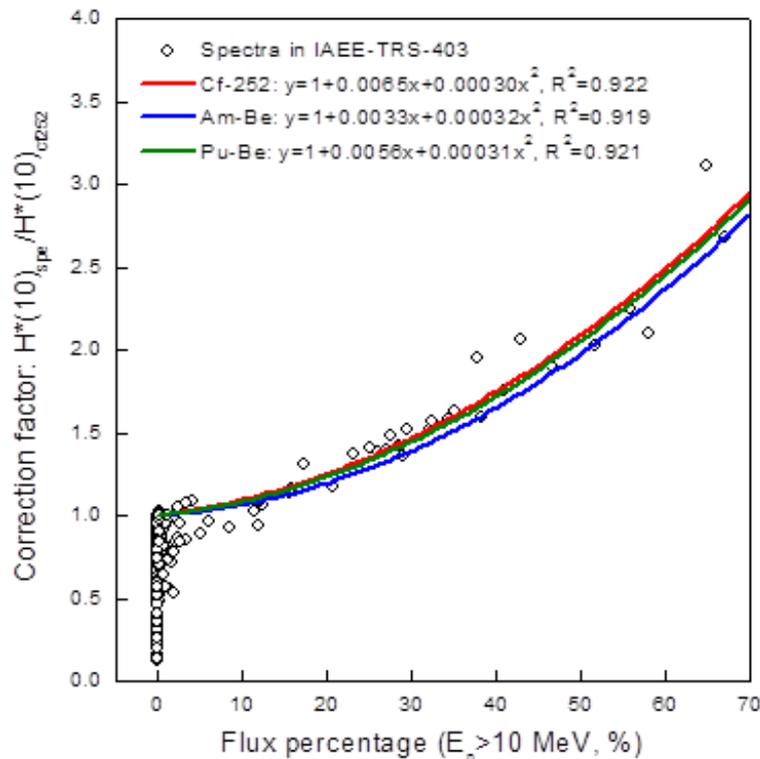
圖三：9 吋波那球之偵檢器能譜修正因子對 4P6_8 延伸能量波那球與 6 吋波那球之讀值比作圖。



圖四：4P6_8 延伸能量型波那球之偵檢器能譜修正因子，證實沒有高能中子劑量低估問題。

2. 研究目的

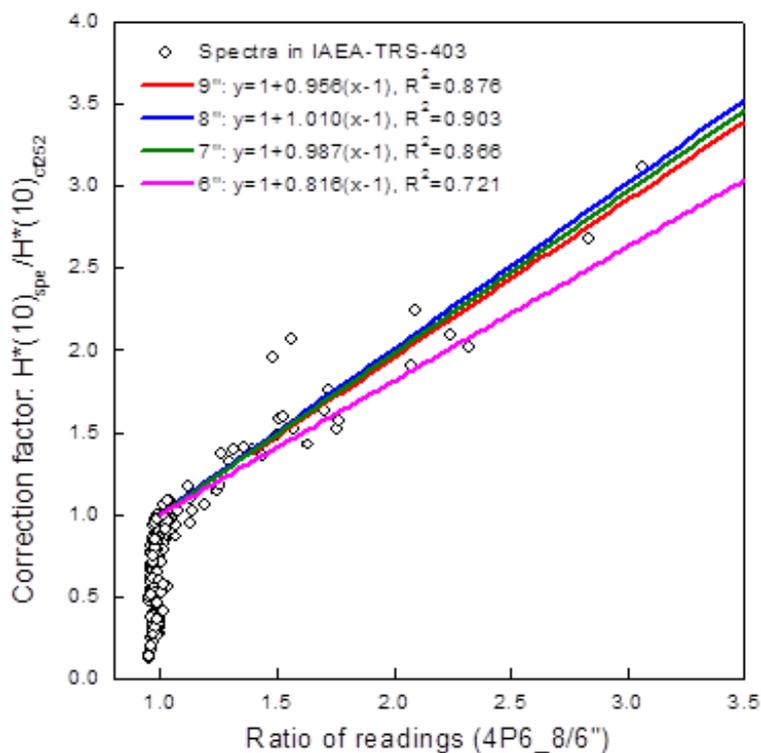
前述圖二與圖三所得之偵檢器能譜修正因子，都是使用經由 Cf-252 校正射源校正的 9 吋波那球響應函數計算出來的。自發性分裂的 Cf-252 射源，能譜大致可以用峰值在 2 MeV 之馬克士威-波茲曼分布表示。²⁴¹Am-Be 和 ²³⁹Pu-Be 也是經常被用來校正偵檢器之標準射源，然而，因為 Be 會產生(α, n)反應，因此相較於 Cf-252 有著更複雜的能譜，在約 3.5 MeV、5 MeV 及 8 MeV 有峰值，平均能量也比 Cf-252 高，大約在 3 到 4 MeV 之間。因此我們必須探討前面所計算的偵檢器能譜修正因子，是否能在使用不同校正射源的偵檢器上面。為了得到這個問題的答案，我們重複前面的步驟，不同的是，將偵檢器的校正射源分別改為 ²⁴¹Am-Be 和 ²³⁹Pu-Be。同樣使用九吋標準波那球為例，圖五標示三條分別利用 Cf-252、²⁴¹Am-Be 與 ²³⁹Pu-Be 作為校正射源的偵檢器所計算出的偵檢器能譜修正因子擬合曲線，結果可知偵檢器能譜修正因子對於選用的校正射源並不是那麼的敏感，相較之下，反而與中子輻射場的特性比較有關，這樣的結果對於偵檢器能譜修正因子的應用是非常正面的，因為我們不需要去擔心選用的校正射源的不同，會影響需要套用的偵檢器能譜修正因子。



圖五：不同校正射源(Cf-252、Am-Be、Pu-Be)對偵檢器能譜修正因子影響不大。

此外，本研究去年亦探討不同尺寸波那球的影響。前述圖二與圖三得到的中子偵檢器能譜修正因子，均利用 9 吋的標準波那球計算出來的。然而，市面上或是一般工作場所常見的商用緩速型中子偵檢器種類繁多，當今天使用一個響應函數與 9 吋標準波那球不同的偵檢器時，圖二與圖三所提供之偵檢器能譜修正因子是否還適用？這是我們必須去探討的。除了原本的 9 吋標準波那球之外，我們另外選擇尺寸較小的三個標準波那球(6 吋、7 吋及 8 吋)，以探討當不同的偵檢器響應函數對於偵檢器能譜修正因子的影響。計算結果如圖六，將偵檢器能譜修正因子對不同輻射場的高能中子指標作圖，並分別畫出四個結果(6 吋、7 吋、8 吋及 9 吋標準波那球)的擬合曲線。結果顯示四條擬合曲線都有

著同樣的趨勢，偵檢器能譜修正因子接隨著高能中子指標的上升而變大，斜率大約在 0.816 至 1.010 之間。除了 6 吋球，其他 7 吋、8 吋及 9 吋波那球的偵檢器能譜修正因子都非常接近。再從整體偵檢器能譜修正因子對於修正後的劑量數值來看，這些偵檢器能譜修正因子的差異是相對不顯著的。舉例來說，最極端的 6 吋與 9 吋波那球，在中子場高能中子指標為 3.0 時，或是說高能中子比例在 65% 的情況下，僅有大約 10% 的差異。這些偵檢器能譜修正因子的擬合曲線結果，在某種程度上證實了，偵檢器能譜修正因子是一種由中子輻射場的高能中子比例、高能中子指標，即輻射場的特性，所決定的一種參數，與校正射源的種類還有偵檢器的類型比較沒有直接相關。



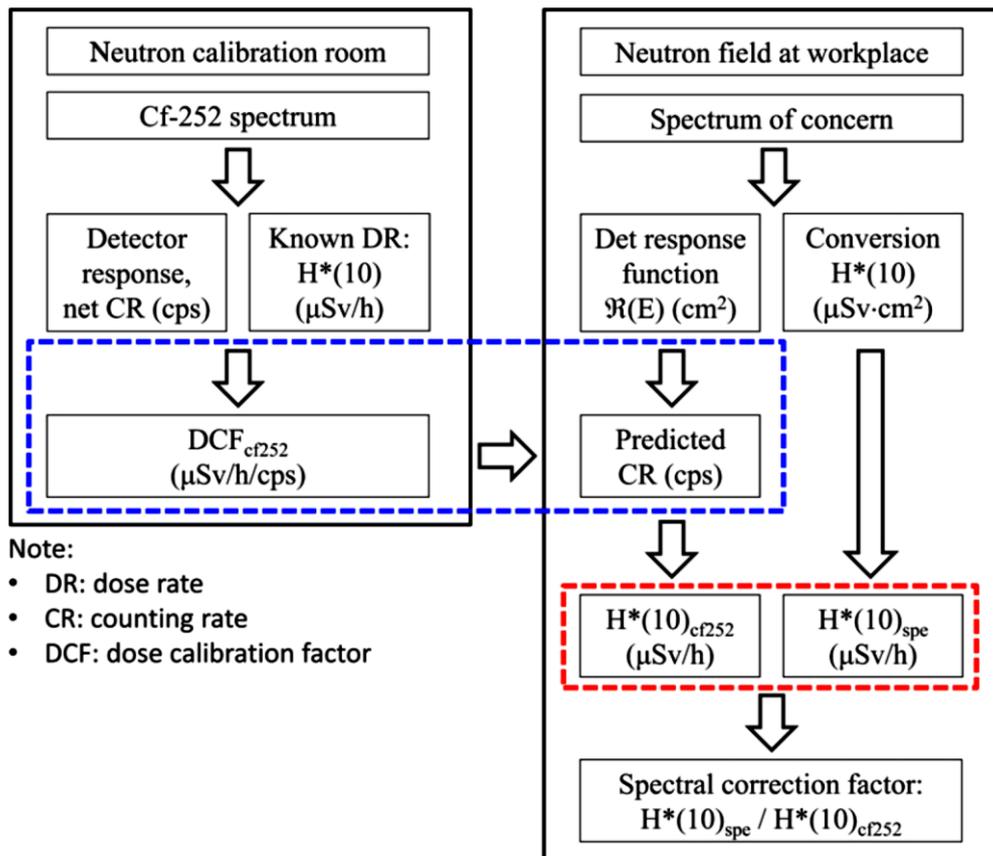
圖六：不同尺寸波那球(6 吋、7 吋、8 吋、9 吋)對偵檢器能譜修正因子影響不大。

然而，除了前面研究使用之 ^3He 熱中子核心波那球型式中子偵檢器之外，還有許多使用不同種類熱中子核心(^6LiI 、 BF_3 等)之中子偵檢器，以及許多常見而設計不同、原理不同之商用中子偵檢器，若今天使用不同核心之傳統波那球中子偵檢器或是其他設計的商用中子偵檢器，對中子偵檢器能譜修正因子有什麼影響？為了讓這套中子劑量修正方法有更多的應用範圍，這樣的探討是必須的。此外，國內先進的高能加速器也持續的發展，包含新竹同步輻射台灣光子源之 3 GeV 電子加速器、林口長庚醫院質子治療中心之 230 MeV 質子加速器，還有其他重粒子癌症治療設備高達 400 MeV/A 之碳離子加速器等慢慢在商轉中，本研究提供的中子偵檢器能譜修正因子也是因應這些設備日益增多而建立的。因此，本研究以長庚質子治療中心之 230 MeV 質子加速器為實際案例，藉由實地量測以及蒙地卡羅模擬，分析屏蔽外各處的完整中子能譜，並嘗試套用這套中子偵檢器能譜修正因子，以驗證此修正方法於實際應用上之可行性。最後，整理研究結果與可能遇到之問題的解決，提出修正指引供主管機關及各機構參考，期望本修正方法可以成為實際被應用之劑量修正技術準則。

貳、研究方法與過程

1. 精進自動化分析程式

圖七是本研究建立中子偵檢器能譜修正因子之分析流程與基本架構，關於中子能譜的選擇，除了一開始主觀選擇的十種代表性中子能譜之外，後續研究也加入所有在 IAEA-TRS-403 報告的 240 餘種工作場所的中子能譜一起分析，甚至包含上千種組合中子能譜。另外，本期研究增加不同型式中子偵檢器的影響分析，必須納入大量中子偵檢器響應函數。由於中子能譜和中子偵檢器響應函數之組合數量龐大，分析流程繁複，本期計畫一開始將檢視上期計畫開發的自動化分析模組，加以精進改善，新增必要功能，方便未來分析工作。該程式原則上僅須提供中子校正射源能譜、劑量轉換係數、中子偵檢器響應函數、以及有興趣的工作場所中子能譜，即可快速正確地得到中子能譜修正因子，並分別對應到二種工作場所的高能中子指標：輻射場中高能中子的通率比例與 4P6_8/6” 測量讀值的比例。



圖七：建立中子偵檢器的能譜修正因子之分析流程與基本架構。

2. 中子能譜修正因子的影響分析

上述分析涵蓋多種輸入資訊，本計畫將彙整過往研究結果並加以驗證，有系統整理中子能譜修正因子的影響，包括使用不同的中子射源來校正中子偵檢器、比較不同尺寸波那球中子劑量計的中子能譜修正因子的變化，以及本期重點之一：進行各種不同型式中子偵檢器(不同中子偵檢器核心或不同設計)對應的中子能譜修正因子的比較研究。

3. 高能中子劑量低估的修正指引

針對核能研究所(INER) Cf-252 中子校正場的設備，針對傳統型式中子偵檢器在高能中子輻射場的劑量低估問題，彙整研究經驗與建議，建立高能中子劑量低估修正的參考規範。

4. 案例中子能譜與修正分析

以長庚質子治療加速器為例，實際計算有興趣位置的中子能譜，以高能中子指標決定劑量修正因子，測試檢驗這套修正辦法的有效性，以利未來 INER 推廣技術服務。

5. 預計可能遭遇之困難和解決的方法

本研究實際案例分析時需要設施單位有意願協助，國內具有高能中子輻射環境的設施大致只有長庚醫院質子治療加速器(質子能量 235 MeV)與國家同步輻射研究中心(電子能量 3 GeV)。本研究規劃擇一案例實際分析與測試研究結果，若有設施單位實務配合上的困難，我們規劃將進行深入文獻調查，參考國外設施運轉報告，合理假設分析所需資料，以利計畫順利進行。

本研究案例分析需進行大量高能粒子引發輻射場的遷移計算，電腦計算效率預期可能是很大的挑戰，效率解決方法可能有二大方向，一是利用高速電腦中心的資源或是加強實驗室 Linux Cluster 平行計

算的技術，應該可以對於本研究的進度有不小的幫助；二是我們必須加強蒙地卡羅變異數降低技術使用的研究，從根本的物理特性與靈敏度分析找出減少計算次數的改進方向。基於過往研究的經驗，本團隊對於此二方向的發展已有相當認識，應該可以克服。

參、主要發現與結論

1. 結果與討論

1.1 精進自動化分析程式

上期研究使用 EXCEL 針對感興趣的中子偵檢器進行中子能譜修正因子的分析與修正曲線的繪製。本期若以同樣的方式執行 IAEA-TRS-403 報告中 240 餘種工作場所的中子能譜分析與繪製，將是一個費工又耗時的程序，且過程中易出錯。

為此，本研究採用 Matlab 商業數學軟體建立一套自動化分析程式，相較於上期使用 EXCEL 的分析方式，可以更快速地得到中子偵檢器能譜修正因子與修正曲線的繪製。比對 Matlab 與 EXCEL 的分析結果，發現後者分析的數百個結果之中確實有少部分的資料點出現人為操作錯誤，錯誤對整體影響不大，卻足以證明採用 Matlab 建立的自動化分析程式的可行性，並改善人為操作錯誤的缺陷及提升分析效率。更重要的是，此自動化程式能夠對中子偵檢器能譜修正因子進行靈敏度分析，這是之前僅以 EXCEL 執行人為分析而言，非常難以辦到的一件事。藉由自動化程式的建立，能夠更加地確認本研究的中子偵檢器能譜修正因子的應用範圍。

1.2 中子能譜修正因子的影響分析

不同尺寸的緩速型波那球並不能代表所有型式的中子偵檢器，僅代表緩速型式或設計理念類似的中子偵檢器。先前使用傳統緩速型波那球進行一系列的討論與分析，對於中子偵檢器能譜修正因子的應用非常全面，經驗證顯示 4P6_8 延伸能量型波那球改善傳統緩速型中子偵檢器對高能中子劑量低估的問題。然而，市面上的中子偵檢器種類繁多、設計理念亦不相同，且並非所有中子偵檢器都用於劑量的量測。若以 9 吋緩速型波那球的中子能量響應函數做為參考基準，市面上的中子偵檢器對中子能譜修正因子又會有什麼影響？IAEA-TRS-403 報告中提供八類的中子偵檢器，而本研究探討其中兩類中子偵檢器：

(1)寬能域多球體能譜儀(multisphere spectrometers)

(2)中子監測儀器(survey instruments)

剩下的六類分別是：

(3)熱中子與超熱中子偵檢器(thermal and epithermal neutron detectors)

(4)游離腔型偵檢器(chamber type detectors)

(5)核徑跡探測器(track etch detectors)

(6)氣泡型偵檢器(bubble detectors)

(7)熱發光反照率中子偵檢器(TL albedo detectors)

(8)半導體電子式偵檢器(electronic detectors)

基於設計原理的差異及使用目的不同，剩餘六類的中子偵檢器響應函數與 9 吋緩速型波那球中子偵檢器的差異非常大，預期這些中子偵檢器的能譜修正因子分析結果與 9 吋緩速型波那球中子偵檢器有明顯的差異，因此不建議使用這些類型的中子偵檢器。

1.2.1 寬能域多球體能譜儀(multisphere spectrometers)

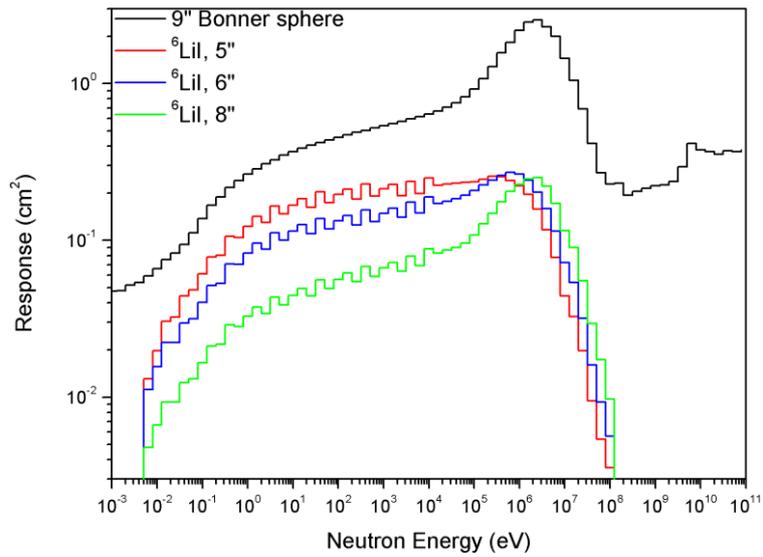
寬能域多球體能譜儀是由數個緩速體型式波那球所組成，IAEA-TRS-403 報告提供一些不同尺寸的緩速型波那球搭配以 ^3He 及 ^6Li 作為熱中子偵測核心的中子能量響應函數，由於前面我們選擇9吋緩速型波那球中子偵檢器是搭配 ^3He 比例計數器作為熱中子核心，因此，本節選擇以 ^6Li 閃爍體偵檢器為熱中子核心的三個不同尺寸(5吋、6吋與8吋)緩速型波那球進行分析。

比較兩者的反應截面， $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$ 反應之熱中子截面高達5330 barns，而 $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$ 的熱中子反應截面僅937 barns，由圖八可以看出 ^6Li 核心之緩速型波那球的中子能量響應函數比起使用 ^3He 比例計數器之9吋傳統緩速型波那球來得小一些。

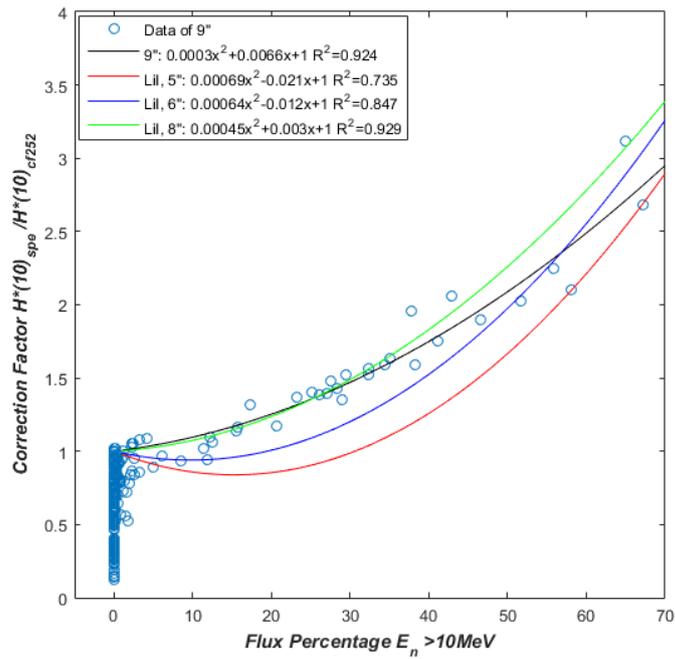
接著比較四個不同尺寸波那球的中子能量響應函數(圖九)，8吋的 ^6Li 緩速型波那球中子能量響應函數經過歸一化後之趨勢與9吋緩速型波那球相似，因此其中子偵檢器能譜修正曲線與9吋緩速型波那球的修正曲線相近，而在高能中子比例較高時偵檢器能譜修正因子值較高的原因是因為IAEA-TRS-403報告中所提供之偵檢器響應函數僅到 10^8 eV，造成更高能量的中子在我們的計算中會沒有貢獻，因此量得的劑量會偏低一些。

另外，5吋以及6吋的 ^6Li 波那球響應函數整體來說更為平坦，與9吋波那球之響應函數差異較大，大概可以預期計算得到

的偵檢器能譜修正曲線會有不太準確的地方，不過總結來說，經由9吋緩速型波那球所計算出來的偵檢器能譜修正曲線在使用上依然保守，影響並不是太顯著。



圖八： ${}^6\text{LiI}$ 核心之緩速型波那球的能量響應函數與 9 吋標準緩速型波那球比較。



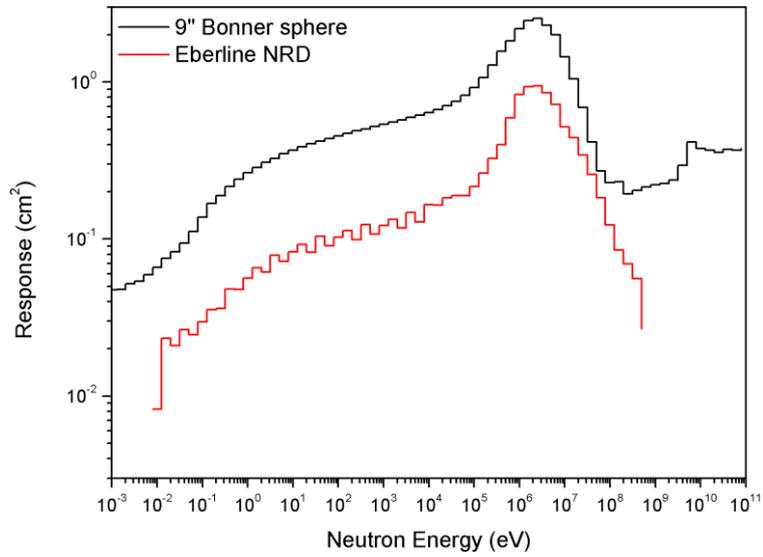
圖九： ${}^6\text{LiI}$ 核心之緩速型波那球所計算出的偵檢器能譜修正因子與 9 吋標準緩速型波那球比較。

1.2.2 中子監測儀器(survey instruments)

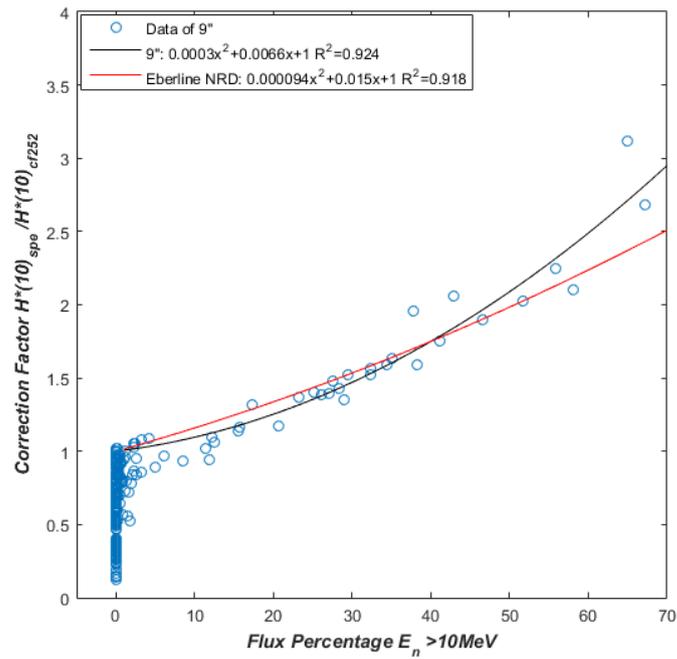
i. Eberline NRD 中子劑量計

Eberline NRD 手持式中子劑量計是一種專門用在環境劑量監測的中子劑量計，其設計的原理也與傳統緩速體波那球類似，使用 BF_3 比例計數器搭配 9 吋的聚乙烯緩速體進行中子劑量測量。另外，Eberline NRD 中子劑量計特別在聚乙烯緩速體中加入鎘(Cd)作為熱中子吸收體，可以有效的過濾輻射場中 γ 射線所產生之熱中子。

在 BF_3 的 $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ 反應中，熱中子截面為 3840 barns，比 ^3He 之 $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$ 反應之熱中子截面 5330 barns 小一些，因此 Eberline NRD 中子劑量計的中子能量響應函數(圖十)比 9 吋波那球小一些，而歸一化後之中子能量響應函數圖形與 9 吋波那球之響應函數相近，但在 10 MeV 以上稍微高了一些，這樣的結果讓兩者的偵檢器能譜修正曲線有相近的結果(圖十一)，而在高能中子比例較高時，Eberline NRD 的校正曲線稍微低一些。不過整體而言，兩者差異依然不大，9 吋緩速型波那球的中子偵檢器能譜修正因子對於 Eberline NRD 還是可以使用的。



圖十：Eberline NRD 中子劑量計的能量響應函數與 9 吋標準緩速型波那球比較。

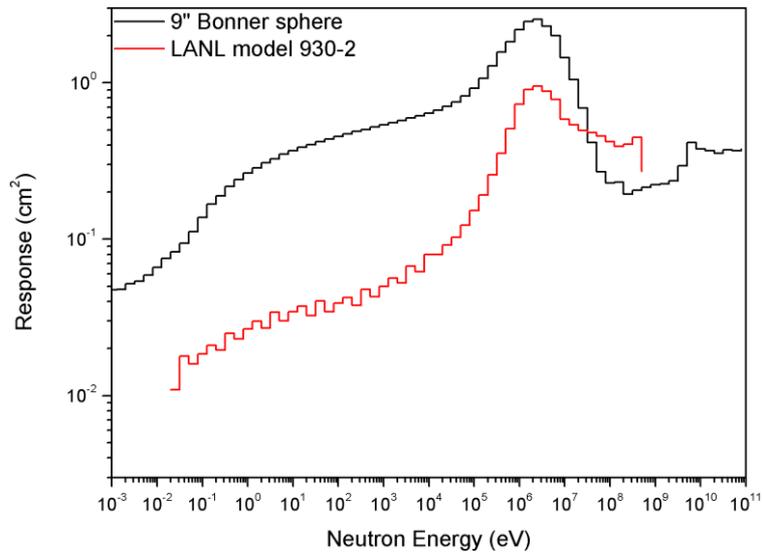


圖十一：Eberline NRD 中子劑量計所計算出的偵檢器能譜修正因子與 9 吋標準緩速型波那球比較。

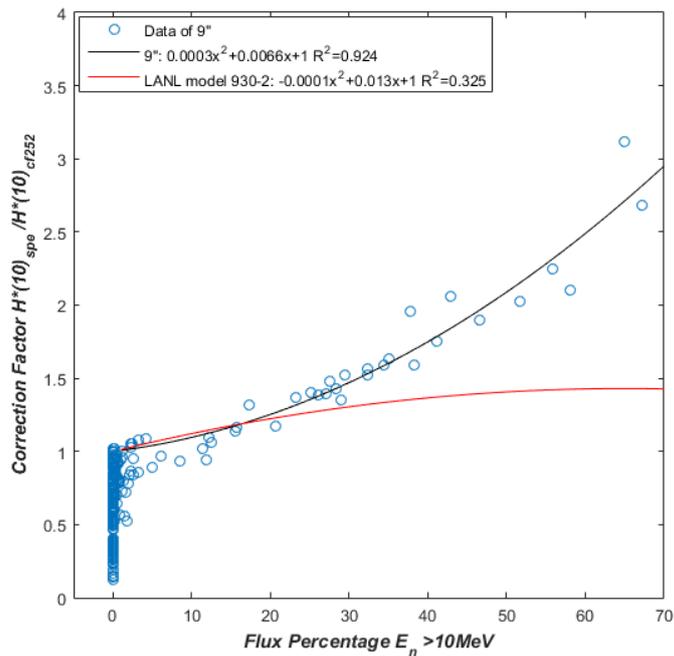
ii. LANL model 930-2 中子劑量計

LANL model 930-2 是美國 Los Alamos 國家實驗室(Los Alamos National Lab)所設計，基於緩速體型式中子劑量計並改良高能中子能量低估問題的緩速型中子劑量計。

LANL model 930-2 使用 BF_3 比例計數器作為熱中子探測核心，搭配聚乙烯緩速體，並在聚乙烯緩速體中嵌入碳化鎢(WC)產生(n,xn)反應，以增加偵檢器對高能中子的響應。從 LANL model 930-2 的中子能量響應函數來看(圖十二)，基本上與 9 吋波那球有著相似的圖形，但因為加入了碳化鎢，在 10 MeV 以上中子能量響應函數明顯提高。因此結果如同預期，由於其已經考量過高能中子對於傳統緩速型中子偵檢器劑量低估的問題，其偵檢器能譜修正因子曲線非常平滑(圖十三)，數值都非常接近 1，表示一定程度的改善了高能中子劑量低估的問題，可以不需要做劑量的修正。



圖十二：LANL model 930-2 中子劑量計的能量響應函數與 9 吋標準緩速型波那球比較。



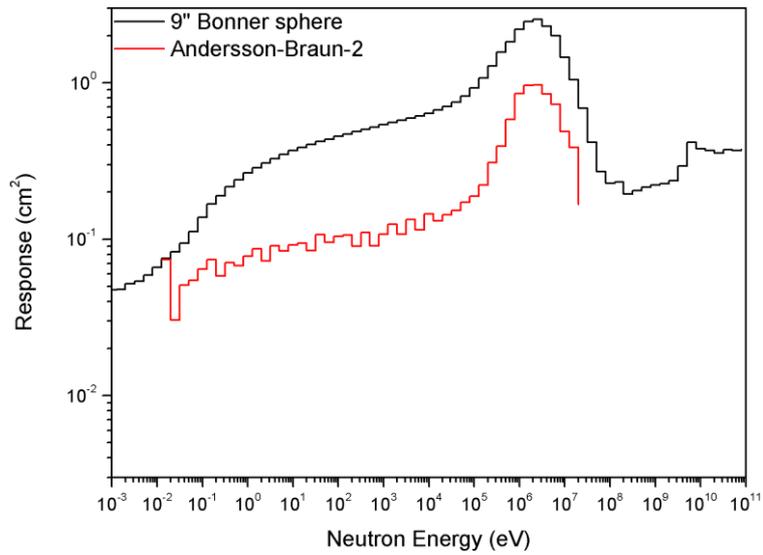
圖十三：LANL model 930-2 中子劑量計所計算出的偵檢器能譜修正因子與 9 吋標準緩速型波那球比較。

iii. Andersson–Braun-2 中子劑量計

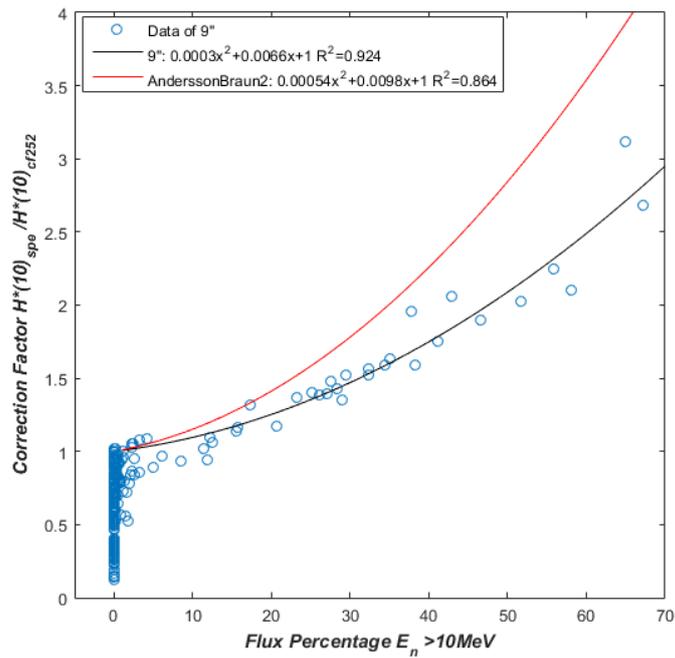
Andersson–Braun-2 中子劑量計同樣是常見的緩速體型式中子劑量計，使用 BF_3 比例計數器作為其熱中子偵測核心，並用聚乙烯作為其緩速體。

Andersson–Braun-2 中子劑量計設計目的最初是為了量測 20 MeV 以下之中子劑量，因此其能量響應函數在 20 MeV 以上相對來得低(圖十四)，然而，IAEA-TRS-403 報告中提供的偵檢器能量響應數，大多是收集各個研究文獻上的結果，因此數據未必百分之百準確或是完整。以 Andersson–Braun 中子劑量計的能量響應函數來說，不至於在 20 MeV 以上完全沒有響應，這導致在計算中子偵檢器能譜修正因子時，此中子偵檢器對高於 20 MeV 之中子是完全沒有紀錄的，也因此對於高能中子的劑量低估會更為顯著，中子偵檢器能譜修正因子的擬合曲線才會比較高一些(圖十五)。

另外，Andersson–Braun 中子劑量計的設計與其他緩速型中子劑量計也有些不同，是使用圓柱而非球體，因此對於輻射源的方向性較敏感，也許這也是影響中子能量響應函數的原因之一。



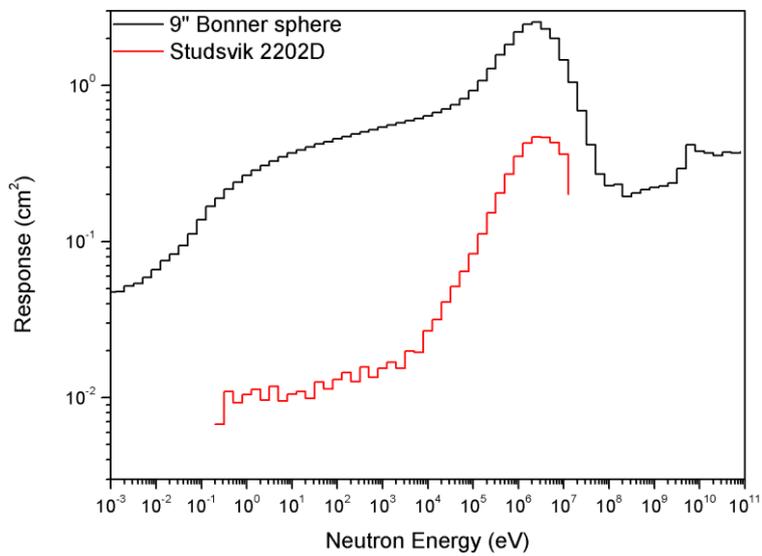
圖十四：Andersson-Braun-2 中子劑量計的能量響應函數與 9 吋標準緩速型波那球比較。



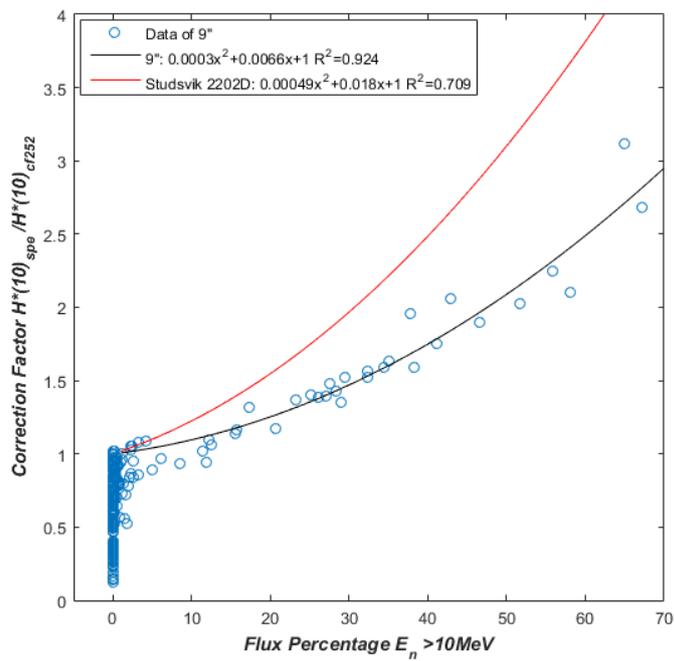
圖十五：Andersson-Braun-2 中子劑量計所計算出的偵檢器能譜修正因子與 9 吋標準緩速型波那球比較。

iv. Studsvik 2202D 中子劑量計

Studsvik 2202D 中子劑量計與前面的 Andersson–Braun-2 中子劑量計類似，同樣是使用 BF_3 比例計數器搭配聚乙烯緩速體，也同樣是採圓柱體的設計方式。兩者的計算結果也非常相似，從能量響應函數來看(圖十六)，除了高於 20 MeV 沒有響應的問題之外，Studsvik 2202D 中子劑量計的能量響應函數在中低能量區間特別低，這也造成與 9 吋緩速型波那球相比在量測的劑量值上會比較低一些，計算出來的中子偵檢器能譜修正因子就會比較高(圖十七)，與原本適用於 9 吋緩速型波那球的中子偵檢器能譜修正因子相比，差異就大一些。



圖十六：Studsvik 2202D 中子劑量計的能量響應函數與 9 吋標準緩速型波那球比較。

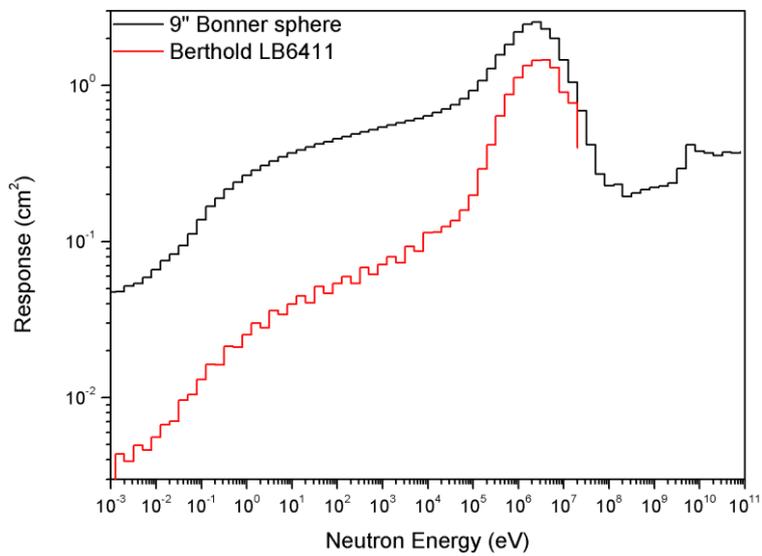


圖十七：Studsvik 2202D 中子劑量計所計算出的偵檢器能譜修正因子與 9 吋標準緩速型波那球比較。

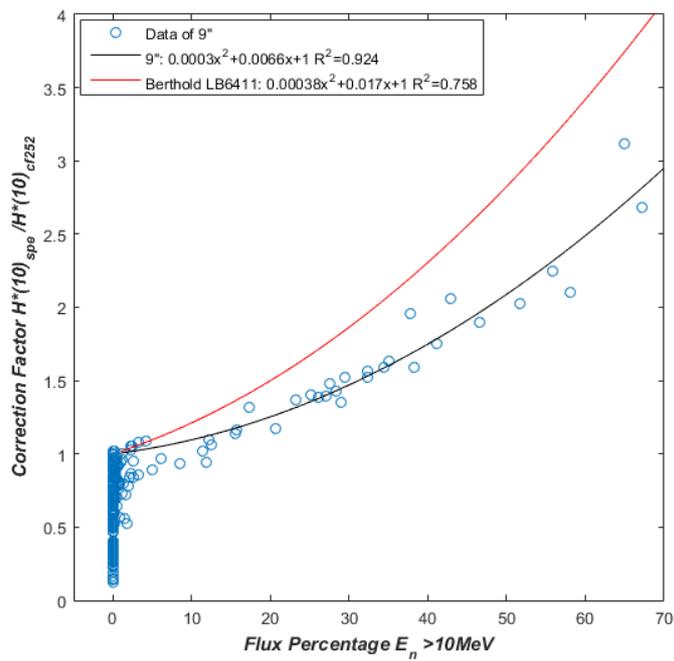
v. Berthold LB6411 中子劑量計

Berthold LB6411 為 ^3He 比例計數器搭配約 9 吋的聚乙烯球形緩速體中子劑量計，由 BERTHOLD 公司和 Karlsruhe GmbH 研究中心共同開發。Berthold LB6411 的設計使它有著良好的偵測效率，可以測量熱中子至 20 MeV 能量的中子，靈敏度高達 3 counts/nSv。

從中子能量響應函數可以看到使用 ^3He 比例計數器的劑量計確實響應函數較高(圖十八)，不過 Berthold LB6411 的響應函數只到 20 MeV 確實相比 9 吋緩速型波那球來得少，且響應函數的高點(約 MeV 附近)，與中低能量的響應函數差異大，因此與 9 吋緩速型波那球相比量測讀值會低一些， Berthold LB6411 的中子偵檢器能譜修正因子也會大一些(圖十九)，與 9 吋波那球的中子偵檢器能譜修正因子在高中子比例有大約 40% 的差異。



圖十八：Berthold LB6411 中子劑量計的能量響應函數與 9 吋標準緩速型波那球比較。

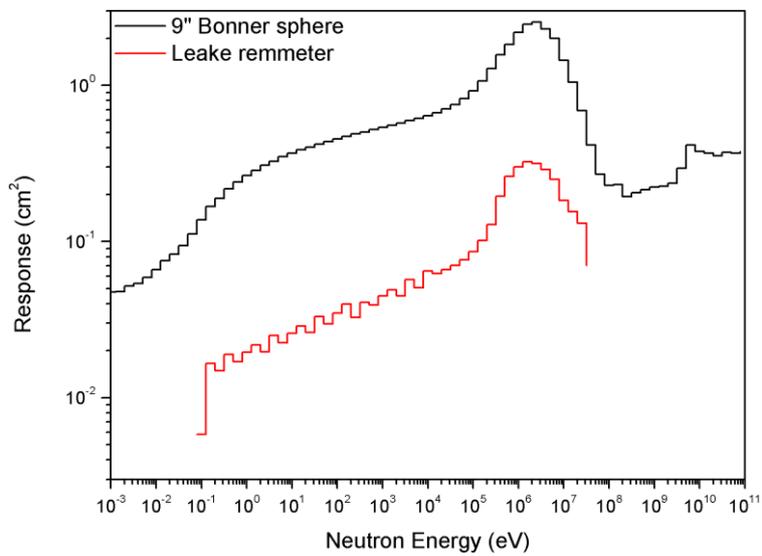


圖十九：Berthold LB6411 中子劑量計所計算出的偵檢器能譜修正因子與 9 吋標準緩速型波那球比較。

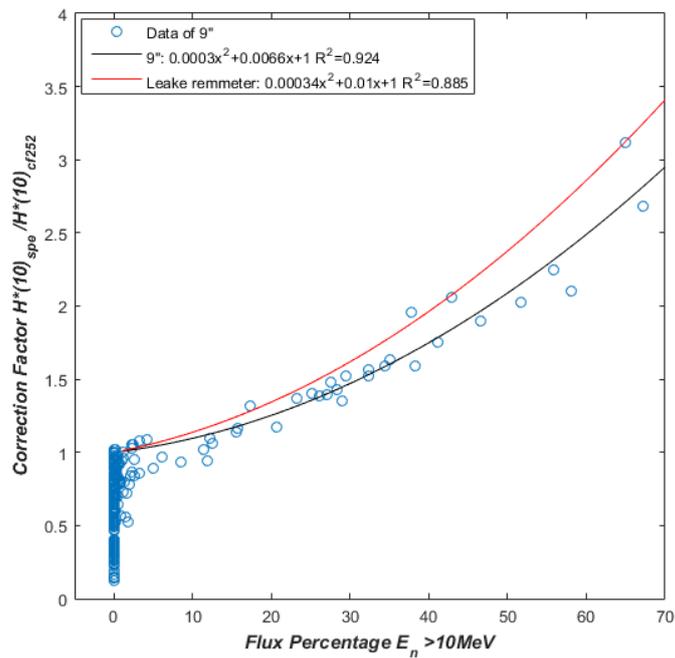
vi. Leake remmeter

Leake remmeter 也是一種緩速體型式的商用中子劑量計，與前面幾種有一個很大的不同是其熱中子核心是使用 ${}^6\text{LiI}$ 閃爍體中子偵檢器，因此與 ${}^6\text{LiI}$ 緩速型波那球有接近的能量響應函數(圖二十)。另外，Leake remmeter 使用 8.2 吋的聚乙烯緩速體並搭配鎘作為熱中子吸收體，降低背景 γ 射線對量測結果的影響。

因為響應函數整體偏低的緣故，Leake remmeter 的中子偵檢器能譜修正因子(圖二十一)比 9 吋緩速型波那球稍稍高一些，且與 ${}^6\text{LiI}$ 緩速型波那球相近，算是相當吻合的結果。



圖二十：Leake remmeter 的能量響應函數與 9 吋標準緩速型波那球比較。

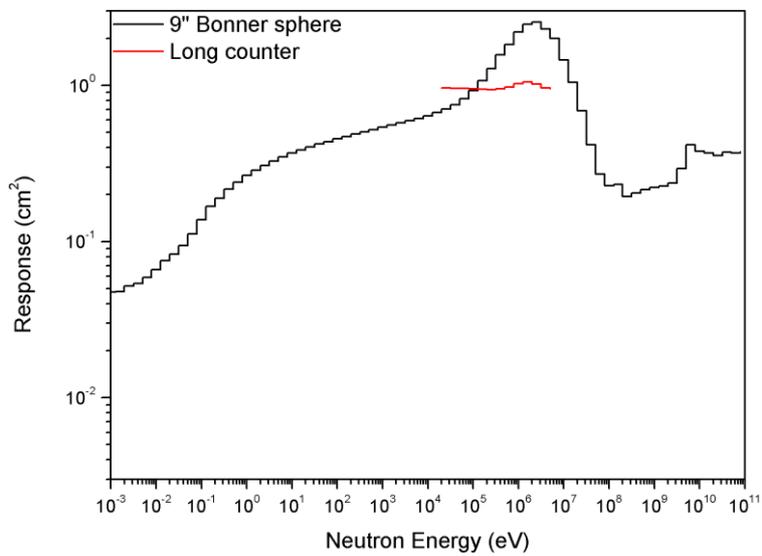


圖二十一：Leake remmeter 所計算出的偵檢器能譜修正因子與 9 吋標準緩速型波那球比較。

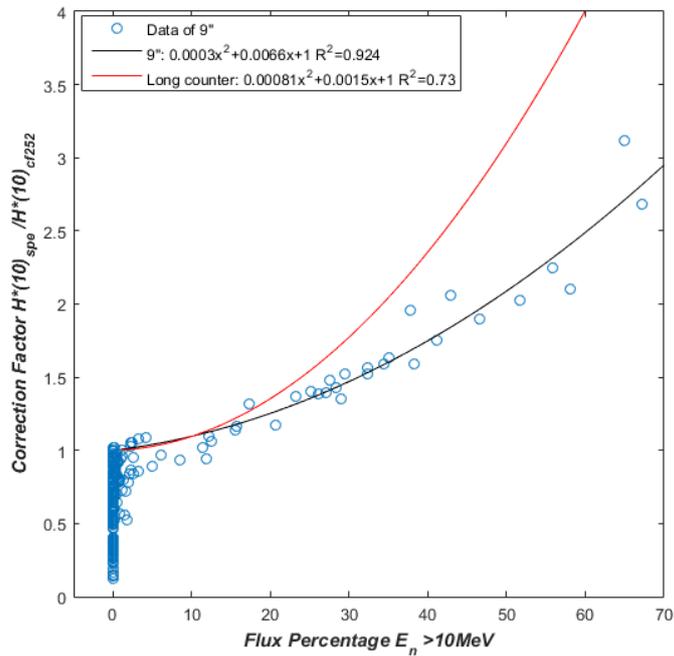
vii. 廣域計數器(Long counter)

廣域計數器並不像前面一些中子劑量計是拿來量測中子劑量的儀器，而有其特別的用途。從廣域計數器的能量響應函數來看(圖二十二)，它在某一個寬廣的能量區間之內有著非常接近常數的中子能量響應函數，一般被實驗室用來校正未知的中子同位素射源或是拿來量化不同加速器所產生之單能中子產量，而不是用在中子劑量的測量上。同時，由於廣域計數器的中子能量響應函數之能量區間比 9 吋波那球小許多，可以預期若是使用廣域計數器來做中子偵檢器能譜修正因子的分析，修正曲線會比 9 吋波那球高(圖二十三)。

不過，由與廣域計數器的用途不同，不管中子偵檢器能譜修正因子是好是壞，也沒有太大的意義存在，因為我們並不會使用廣域計數器來量測中子劑量。



圖二十二：廣域計數器的能量響應函數與9吋標準緩速型波那球比較。



圖二十三：廣域計數器所計算出的偵檢器能譜修正因子與9吋標準緩速型波那球比較。

從這些類型商用中子偵檢器的分析結果，可以發現與 9 吋緩速波那球有類似設計的中子偵檢器，在中子偵檢器能譜修正因子上都有相當的趨勢，隨著高能中子含量增加，需要的中子劑量修正因子就越高，雖然部分緩速體中子劑量計的所需的修正值與 9 吋緩速波那球的修正值相比有些差異，不過即便如此，在套用本研究建議的偵檢器能修正因子的情況之下，依然能改善一定程度的高能中子劑量低估問題。另外，若是非用於中子劑量測量的中子偵檢器，分析得到的中子偵檢器能譜修正因子結果並不好，且因為並非劑量測量用途，我們不建議使用。

1.3 高能中子劑量低估的修正指引

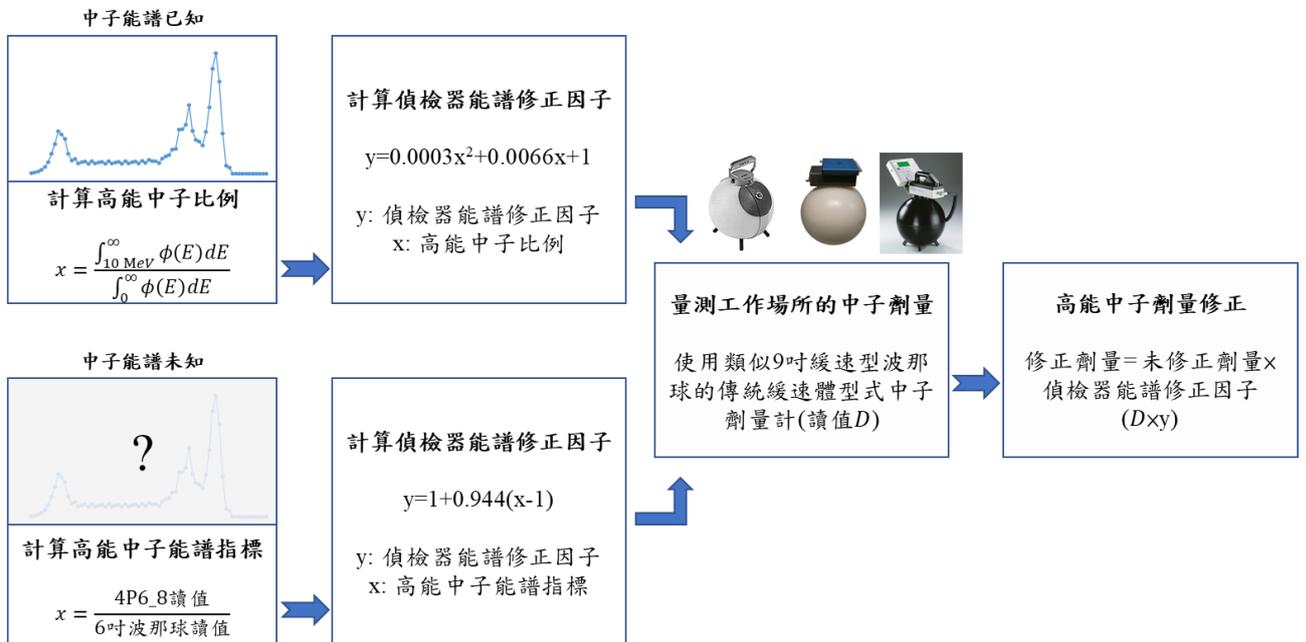
經由前面介紹中子偵檢器能譜修正因子的原理以及探討其適用的範圍後，如何在一個輻射工作場中使用中子偵檢器能譜修正因子，才是本研究最主要的目的。

在進行中子劑量的修正之前，我們必須先判斷使用的儀器適不適合應用於中子偵檢器能譜修正因子。首先，根據研究結果分析，中子偵檢器能譜修正因子適用於大部分傳統緩速型的中子劑量計，然而非緩速體形式之中子偵檢器或劑量計，由於設計目的以及原理與傳統緩速體形式的劑量計不同，中子能量響應差異太大，因此套用中子偵檢器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。另外，若是使用 4P6_8 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，那麼根據我們的研究結果顯示，並不需要再進行中子劑量的修正。

本研究建議使用 9 吋緩速型波那球，或是與其類似設計，以不同尺寸的緩速體搭配一個熱中子偵測核心的中子劑量計，進行中子輻射工作場的劑量測量。接著，將一個輻射工作場的中子劑量修正流程分成三個步驟，如圖二十四。1. 要能夠定義出該輻射工作場的高能中子比例，若該輻射工作場的中子能譜已知，可以直接計算其高能中子比例，若是一個中子能譜未知的輻射工作場，可以透過高能中子能譜指標來確認該輻射工作場中高能中子的比例；2. 利用

高能中子比例或是高能中子能譜指標，從本研究建議的中子偵檢器能譜修正因子圖表(圖二十六與圖二十七)，計算該輻射工作場適用之中子偵檢器能譜修正因子；3. 以經過 Cf-252 校正的傳統緩速體型式的中子劑量計進行該輻射工作場的中子劑量測量，並將結果與中子偵檢器能譜修正因子相乘，即可簡單計算修正後的中子劑量。

詳細的中子劑量修正流程與說明如下：



圖二十四：高能中子輻射場劑量修正步驟流程圖。

1.3.1 定義輻射工作場的高能中子比例

(1) 輻射工作場中子能譜已知

直接利用中子通率計算能譜中高能中子佔整個能譜多少比例。

$$\text{高能中子比例} = \frac{\int_{10 \text{ MeV}}^{\infty} \phi(E) dE}{\int_0^{\infty} \phi(E) dE}$$

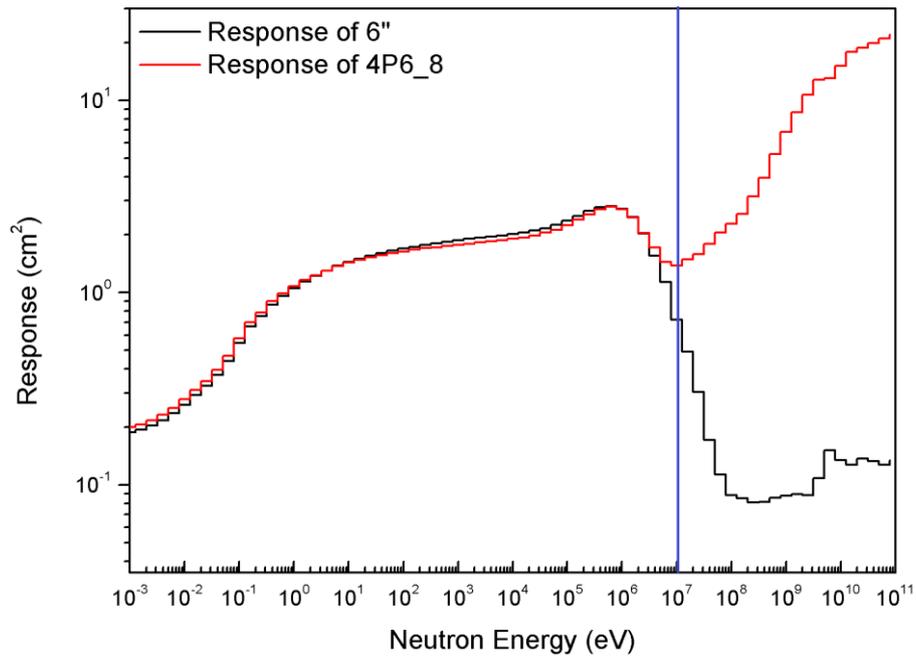
(2) 輻射工作場中子能譜未知

分別利用 4P6_8 延伸能量型波那球，以及 6" 標準緩速型波那球，量測得到該輻射場劑量讀值，計算高能中子能譜指標。

$$\text{高能中子能譜指標} = \frac{\text{4P6_8 延伸能量型波那球讀值}}{\text{6" 標準緩速型波那球讀值}}$$

藉由比較 4P6_8 延伸能量型波那球與 6 吋緩速型波那球的能量響應函數(圖二十五)，可以發現由於兩者在 10 MeV 以下有著幾乎相同的中子能量響應函數，而在約 10 MeV 以上開始不同，4P6_8 延伸能量型波那球的中子能量響應函數比 6 吋緩速型波那球大，因此兩者的讀值比基本上可以表示輻射工作場的高能中子數量的多寡，也因此高能中子能譜指標是一個 ≥ 1.0 的值。

另外，此高能中子能譜指標是一個與該輻射工作場能譜有關的數值，在此輻射工作場所的設備、屏蔽等影響中子劑量率之因素未經變動時，此步驟僅需做一次，並可作為日後同一個輻射工作場使用中子偵檢器能譜修正因子的依據。



圖二十五：4P6_8 延伸能量型波那球的響應函數與 6 吋緩速型波那球的響應函數比較。

1.3.2 計算中子偵檢器能譜修正因子

(1) 輻射工作場中子能譜已知

在輻射工作場能譜已知的情況下，適用於該輻射場的中子偵檢器能譜修正因子可以直接透過步驟 1 計算得到輻射場的高能中子比例，對照圖二十六得到；亦或是透過公式：

$$y = 0.0003x^2 + 0.0066x + 1$$

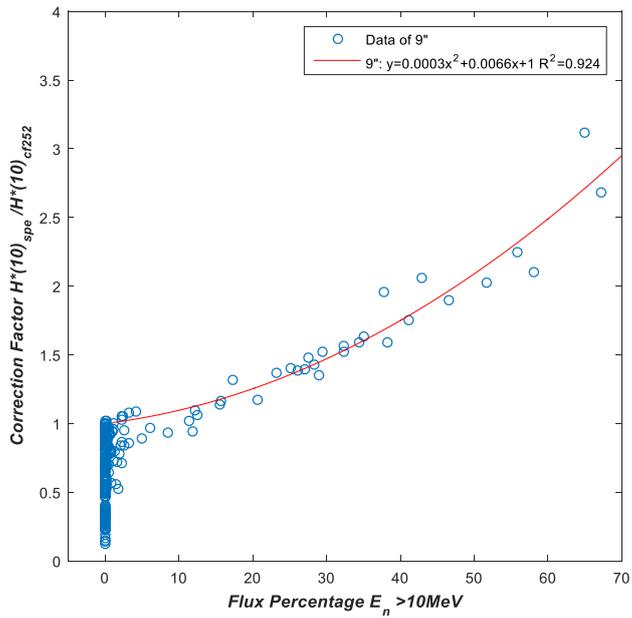
計算得到。其中 y 是中子偵檢器能譜修正因子，而 x 是高能中子比例。

(2) 輻射工作場中子能譜未知

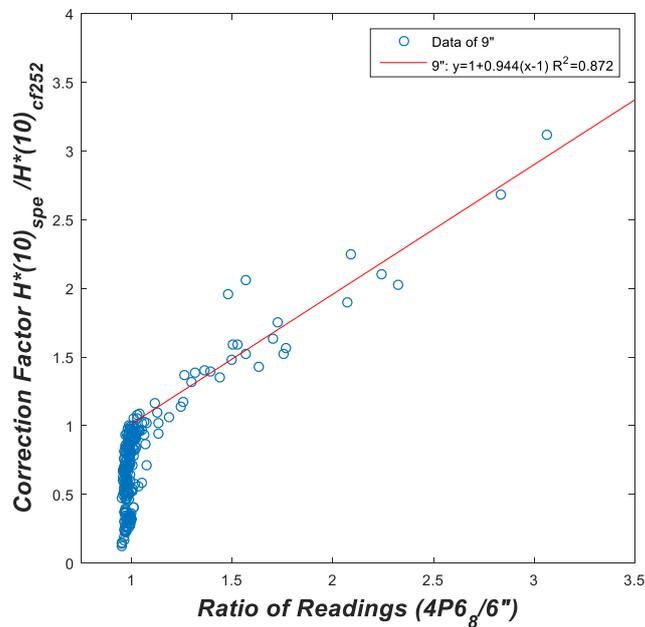
在輻射工作場能譜未知的情況下，適用於該輻射場的中子偵檢器能譜修正因子必須透過步驟 1 計算得到的輻射場的高能中子能譜指標，對照圖二十七得到；或是使用圖表內的公式：

$$y = 1 + 0.944(x - 1)$$

計算得到。其中 y 為中子偵檢器能譜修正因子， x 為高能中子能譜指標。



圖二十六：本研究建議之偵檢器能譜修正因子與修正曲線(中子能譜已知)，使用高能中子比例。



圖二十七：本研究建議之偵檢器能譜修正因子與修正曲線(中子能譜未知)，使用高能中子能譜指標。

1.3.3 量測與計算輻射場中子劑量率

先使用本研究推薦的 9 吋標準緩速型波那球，或是其他類似設計，以不同尺寸的緩速體搭配一個熱中子偵測核心的中子劑量計，並以一般的標準量測步驟測量該輻射場所之中子劑量率。此劑量率為未修正之中子劑量率。

最後，將步驟 2 計算或查表得到的中子偵檢器能譜修正因子與未修正的中子劑量率相乘，便能得到該輻射工作場修正後、改善高能中子能量低估問題的中子劑量率，並以此修正後之中子劑量率作為輻射防護用途的參考依據。

此中子偵檢器能譜修正因子與高能中子能譜指標一樣，是一個與特定輻射工作場中子能譜有關的數值，在此輻射工作場所的設備、屏蔽等影響劑量率之因素未經變動時，不需要重新計算中子偵檢器能譜修正因子，可作為日後同一個輻射工作場中子劑量修正的依據。

1.4 案例能譜與修正分析

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。質子治療設施整體系統可以區分為：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)。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，如此高能量的質子與物質作用會產生顯著數量的高能二次中子。



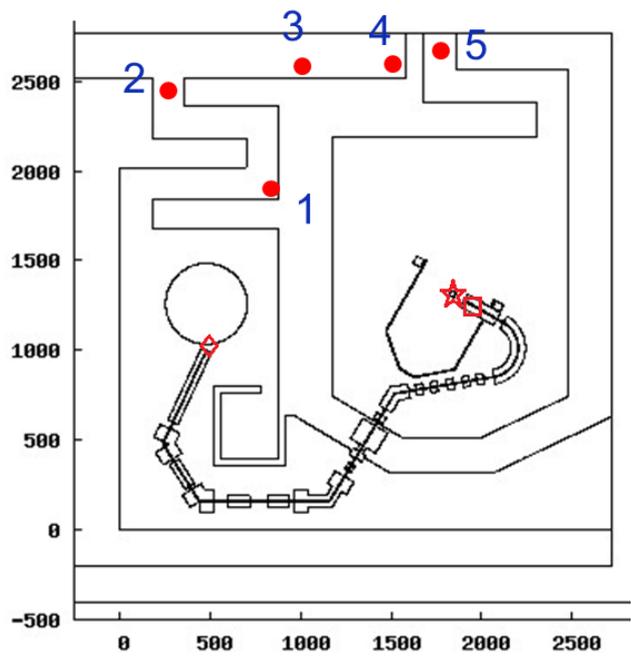
圖二十八：林口長庚醫院—質子暨放射治療中心設施布局示意圖 [長庚官網]。

此案例分為兩個部分進行析分，首先，利用蒙地卡羅粒子遷移

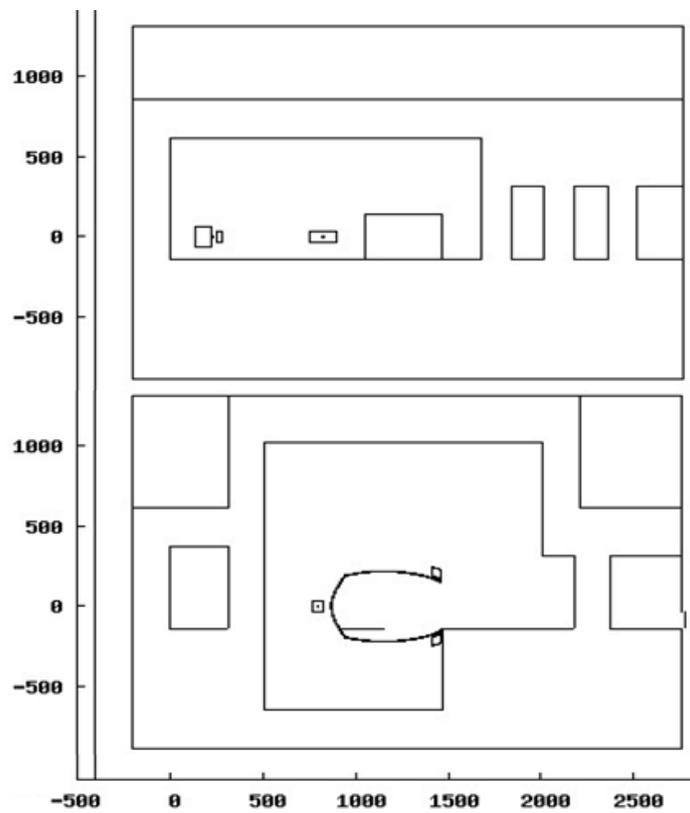
程式 FLUKA 計算長庚質子治療中心的中子能譜以及其劑量，再以實地量測來評估模擬結果的可靠性；接著將計算得到的質子治療中心中子能譜套用前面的中子能譜修正因子，來確認實際應用之情形以及探討可能會遇到的問題。

1.4.1 幾何模型、粒子射束與材料組成

FLUKA 計算模型的建立是根據長庚質子治療中心設施的布局去假設迷道大小、牆壁厚度及設施內各個裝置的位置。然而，實際運轉時，質子束在加速、運輸乃至照射病人時，會在隨機的位置以及隨機的比例與路徑上的物質發生作用，為了使模擬的結果盡可能地與實際情形吻合，我們根據可能的情況分別模擬 230 MeV 之筆型質子射束(1)全部於迴旋加速器的出口作用、(2)全部於治療室的噴嘴(nozzle)作用以及(3)全部與模擬假體 PMMA 作用三種情況，最後依不同的比重來組合三種情形的結果，來表示與實際情況較符合的中子計算模擬結果；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)治療室入口等五處的劑量、中子通率及中子能譜。另外，由於所有的治療室大小以及室內擺設基本一致，為縮短計算時間以及簡化模型複雜度，模擬僅以迴旋加速器室以及第一治療室作為代表。計算模型如圖二十九及圖三十所示，x座標範圍從-440 cm 到 2720 cm、y 座標從-205 cm 到 2765 cm、z 座標從-885 cm 到 1305 cm。



圖二十九：長庚質子治療中心計算模型俯視圖，座標單位為公分，其中◇是加速器出口、□是治療室噴嘴、☆是假體 PMMA。



圖三十：模型加速器室剖視圖(上)與模型治療室剖視圖(下)，座標單位為公分。

FLUKA 計算模型中比較重要的一些參數為：

- 使用 230 MeV 之筆型(pencil beam)質子射束
- 模擬假體 PMMA 尺寸為 $30 \times 30 \times 40 \text{ cm}^3$ ，且密度為 1.19 g/cm^3
- 質子傳導系統使用的真空管半徑為 2.5 cm，管壁厚 0.5 cm 且磁鐵材質為 90%鐵混合 10%Cu
- 混凝土的密度為 2.34 g/cm^3
- 使用的中子偵檢器尺寸為 $100 \times 100 \times 100 \text{ cm}^3$

比較詳細的材料組成以表一為主：

表一：蒙地卡羅中子遷移計算程式 FLUKA 中使用的材料組成

材料	元素	重量比例(%)
空氣(Air) 密度=0.001205 g/cm ³	C	0.0124
	N	75.5267
	O	23.1781
	Ar	1.2827
混凝土(Concrete) 密度=2.34 g/cm ³	H	1
	C	0.1
	O	52.9107
	Na	1.6
	Mg	0.2
	Al	3.3872
	Si	33.7021
	K	1.3
	Ca	4.4
	Fe	1.4
磁鐵(Magnet)	C	10
	Fe	90
SS304 不鏽鋼 密度=7.90 g/cm ³	C	0.08
	Mg	2.0
	P	0.045
	S	0.03
	Si	1.0
	Cr	19.0
	Ni	10.0
	Fe	67.85
PMMA 密度=1.19 g/cm ³	H	8.0538
	C	59.9848
	O	31.9614

1.4.2 FLUKA 計算結果

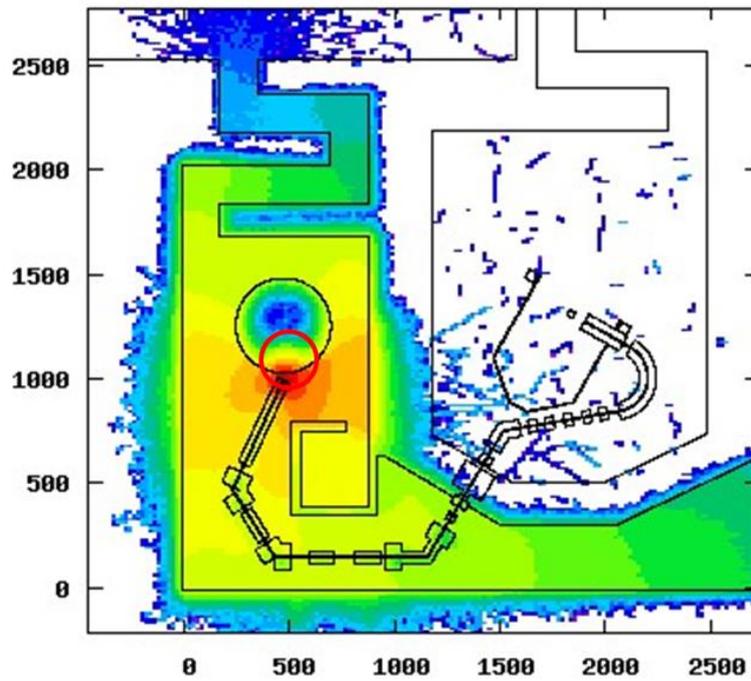
由於質子束從產生經由加速、傳導，一直到照射病人時，會在過程中隨機的與物質作用以及損失能量，而在哪個位置損失多少電流或是多少能量是我們無從知曉，因此，在蒙地卡羅中子遷移程式 FLUKA 中，假設四個可能的情形作為案例計算，每一個案例都使用 10^9 個 230 MeV 的筆型質子射束進行模擬。四個案例分別為：(1)質子射束在迴旋加速器中進行加速並離開加速器的同時，所有的質子在加速器出口的位置作用產生中子；(2)質子在射束傳導系統中以及通過治療室噴嘴離開時雖然也會跟周遭設備進行反應，其中我們假設全部的質子束在離開射束傳導系統時，與噴嘴的地方作用產生中子，不過這樣的質子束數量相對少許多，最後組合的結果比重會相對低一些；(3)質子治療設施最主要的中子輻射場能譜是由質子與人體作用產生，因此這邊假設所有的質子束與假體作用產生中子。在我們的模擬中使用 PMMA 作為人體假體來測試；(4)由於質子束並不會在單一位置完全與物質作用，因此我們根據長庚質子放射治療設施之輻射安全評估報告及其他參考文獻中典型的質子束與物質作用位置，依合理的比例組合呈現可能的中子輻射場能譜來分析。

蒙地卡羅粒子遷移程式 FLUKA 計算結果使用的 USRBIN 指令作計數(scoring)，紀錄空間中一個方塊體積內的中子通率及其

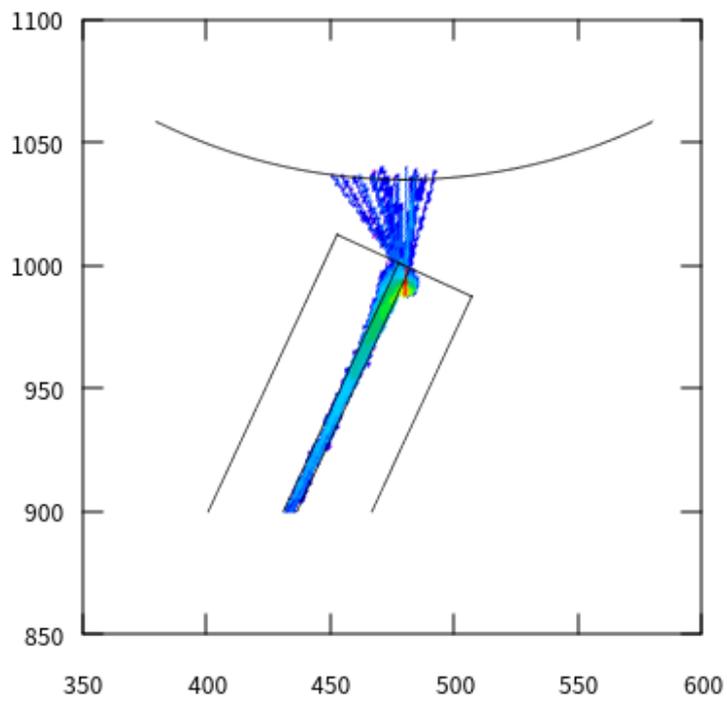
劑量率，計數用方塊為體積 $20 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ 之長方體。劑量率計數使用的通率劑量轉換係數為 FLUKA 程式預設的 AMB74 資料庫(Ambient dose equivalent from ICRP-74 and Pelliccioni data)。

(1) 假設全部的質子束於迴旋加速器出口作用產生中子

假設全部的質子束於迴旋加速器出口作用產生中子的計算結果如表二。加速器室迷道口(Point 1)因為離加速器射源距離最近，因此中子通率最高，約為 $61.4 \text{ (#/cm}^2\text{/s/nA)}$ ，換算得到的劑量率為 $3.11 \text{ (}\mu\text{Sv/h/nA)}$ ；加速器室入口(Point 2)的中子通率及劑量率因為經過迷道的散射以及水泥牆的屏蔽，中子通率與劑量率已經大幅降低；其他如控制室走道(Point 3)、走道轉角(Point 4)以及治療室入口(Point 5)的與加速器室入口(Point 2)相比已經降到 1% 以下，也因為計算出來的中子通率與劑量率數值很低，且從劑量分布圖(圖三十一)來看劑量的分布也非常不均勻，因此相對誤差也較大，控制室走道(Point 3)的誤差達到 40%、走道轉角(Point 4)達 99%。對於這個案例來說，控制室走道(Point 3)至治療室入口(Point 5)的結果相對於加速器室迷道口(Point 1)與加速器室入口(Point 2)來說並不是很重要。



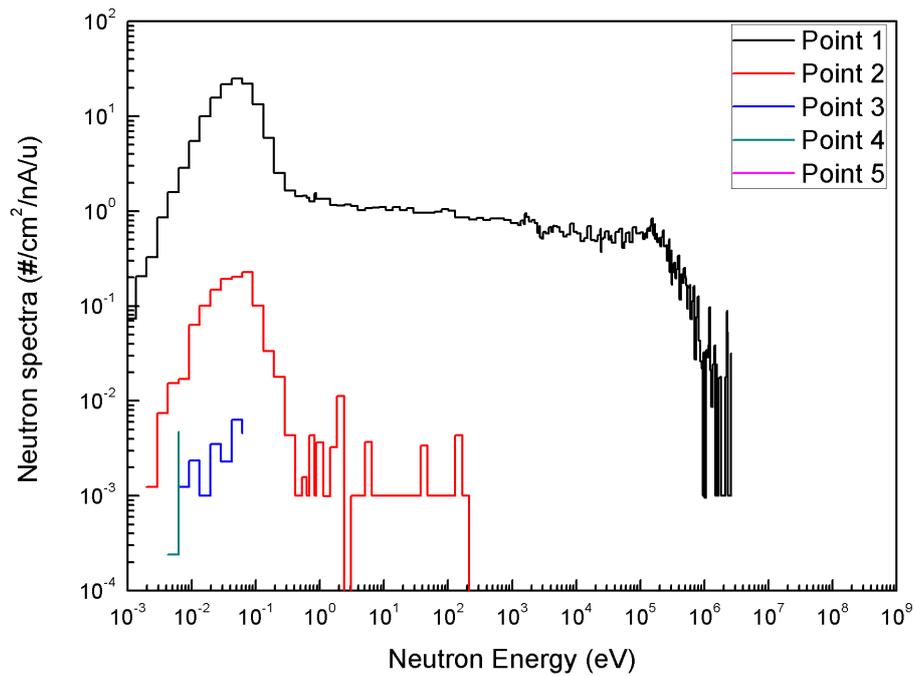
圖三十一：假設全部的質子束於迴旋加速器出口作用產生中子時的劑量分布圖，
座標單位公分



圖三十二：質子束於迴旋加速器出口作用示意圖

表二：假設全部的質子束於迴旋加速器出口作用產生中子時的中子通率與劑量率
計算結果

假設質子束全部損失於迴旋加速器出口	中子通率		劑量率	
	#/cm ² /s/nA	relative error (%)	μSv/h/nA	relative error (%)
Point 1	6.14E+01	0.52	3.11E+00	0.98
Point 2	4.43E-01	4.86	1.81E-02	4.81
Point 3	7.76E-03	40.34	3.10E-04	42.11
Point 4	1.91E-03	99.00	5.95E-05	99.00
Point 5	0.00E+00	0.00	0.00E+00	0.00

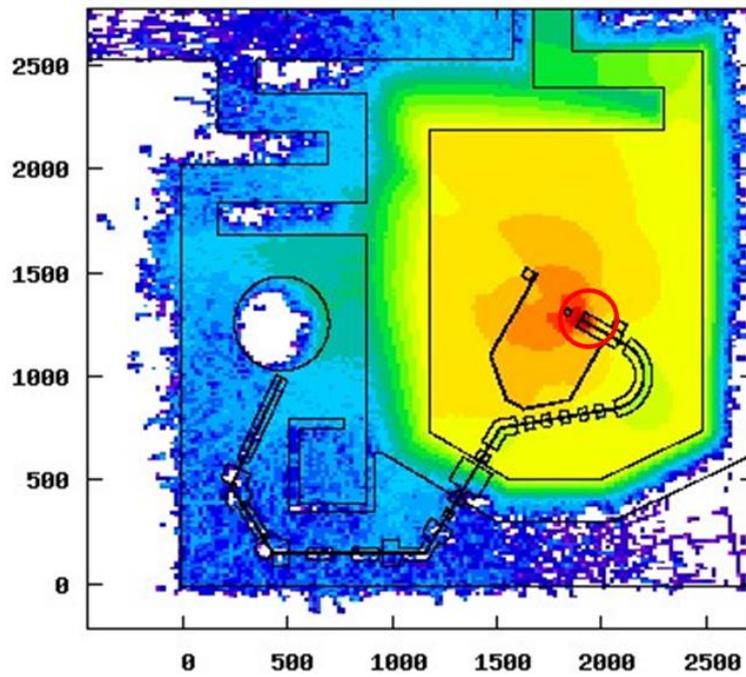


圖三十三：假設全部的質子束於迴旋加速器出口作用產生中子時計算得到的五個位置的中子能譜

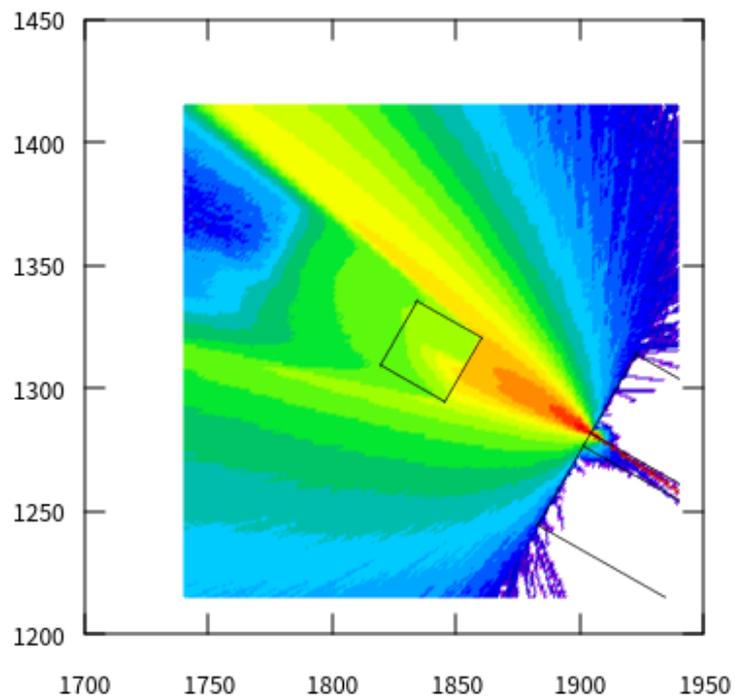
(2) 假設全部的質子束於治療室噴嘴(nozzle)作用產生中子

假設全部的質子束於治療室噴嘴(nozzle)作用產生中子的計算結果如表三。在這個案例下，最高的中子通率以及劑量率出現在治療室入口(Point 5)，這是因為中子經過迷道散射所降低的能量較少，且經過的水泥牆屏蔽也比較薄所致。加速器室迷道口(Point 1)、加速器室入口(Point 2)、控制室走道(Point 3)與走道轉角(Point 4)的中子通率及劑量率因為經過一定厚度的水泥牆屏蔽，中子通率與劑量率已經大幅降低，是加速器室入口(Point 5)的 1% 以下。

這個案例中雖然與前面假設所有質子射束損失在加速器出口時的情況類似，都是質子束打在鐵與銅組成的材質上，但由於兩個案例射束的方向幾乎可以說是相反的，損失在加速器出口的質子射束方向往下，而損失在治療室噴嘴則是接近往上，也造成兩個案例的計算結果數量級的不同。另外，因為質子治療主要是質子束大量損失在病人體內，質子束損失在治療室噴嘴的比例其實是相當少的，大約在總質子束數量的 2%~5%。



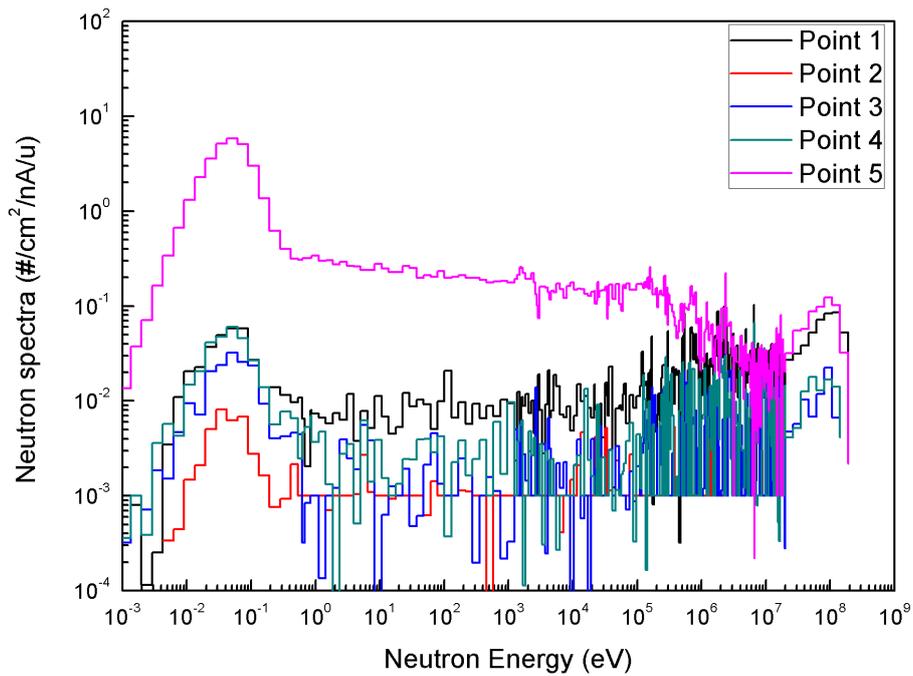
圖三十四：假設全部的質子束於治療室噴嘴(nozzle)作用產生中子時的劑量分布圖，座標單位公分



圖三十五：質子束於治療室噴嘴(nozzle)作用示意圖

表三：假設全部的質子束於治療室噴嘴(nozzle)作用產生中子時的中子通率與劑量率計算結果

假設質子束 全部損失於 治療室噴嘴	中子通率		劑量率	
	#/cm ² /s/nA	relative error (%)	μSv/h/nA	relative error (%)
Point 1	4.79E-01	3.59	3.30E-01	4.30
Point 2	2.20E-02	13.80	3.49E-03	29.79
Point 3	1.29E-01	5.95	6.20E-02	7.94
Point 4	2.15E-01	5.03	9.48E-02	7.43
Point 5	1.46E+01	0.49	1.20E+00	1.29

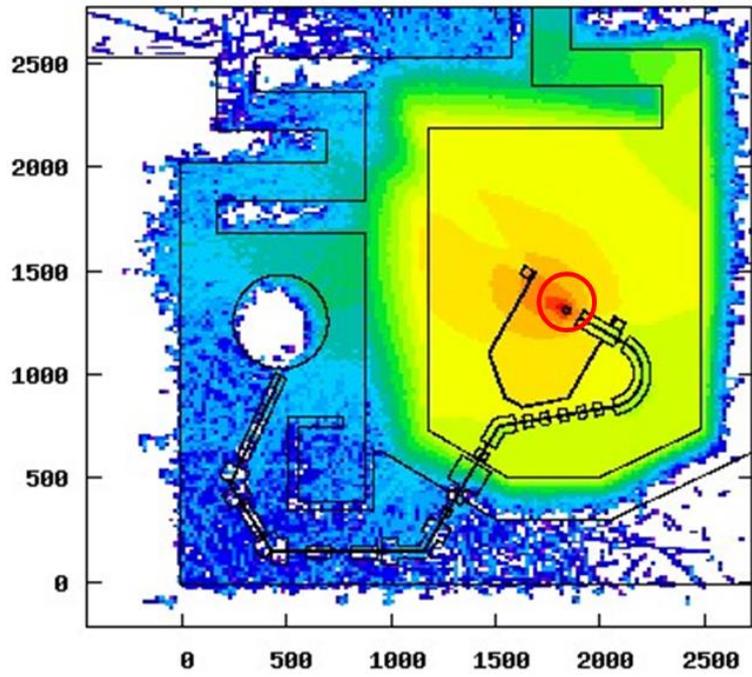


圖三十六：假設全部的質子束於治療室噴嘴(nozzle)作用產生中子時計算得到的五個位置的中子能譜

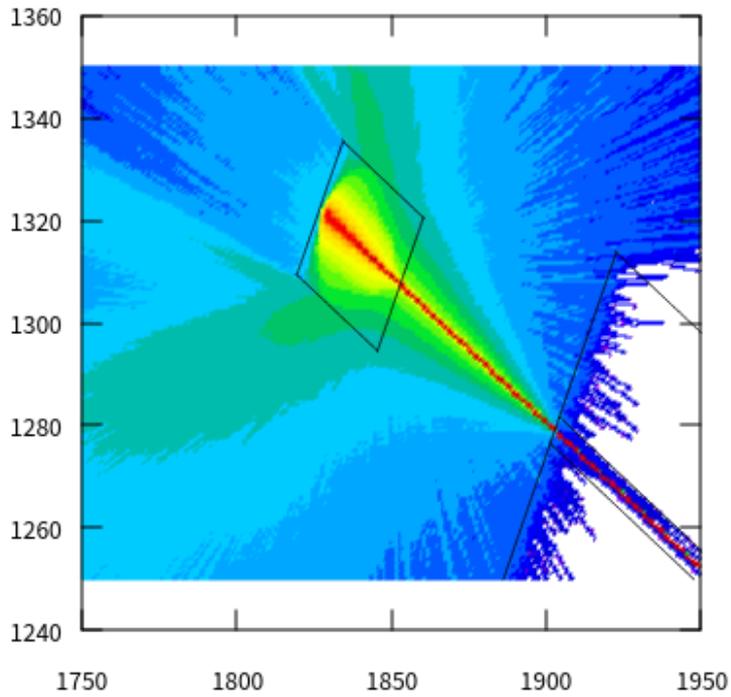
(3) 假設全部的質子束於模擬假體 PMMA 作用產生中子

假設全部的質子束於模擬假體 PMMA 作用產生中子的計算結果如表四。這個情形是佔實際的工作場輻射比例最高的一個案例。因為在質子治療上，大多數的質子束都是被使用在治療上面，會損失在人體，也因此與質子束損失在模擬假體 PMMA 最為相關。

與質子束損失於治療室噴嘴的計算結果相比，同樣在治療室入口(Point 5)有最高的中子通率以及劑量率，並且加速器室迷道口(Point 1)至走道轉角(Point 4)的中子通率與其劑量率則相對較低，不過兩個案例每一個點的差異大約一個數量級，最主要相似的原因是因為質子射束的方向是一樣的，因此所產生的中子經過散射與屏蔽路徑基本上是相去不遠的，然而質子與治療室噴嘴等較高原子序的材料如鐵和銅反應產生的中子數量相對較多，而與假體 PMMA 等低原子序的物質反應的中子產量相對較低，導致兩個案例的計算數值有比較大的差異。



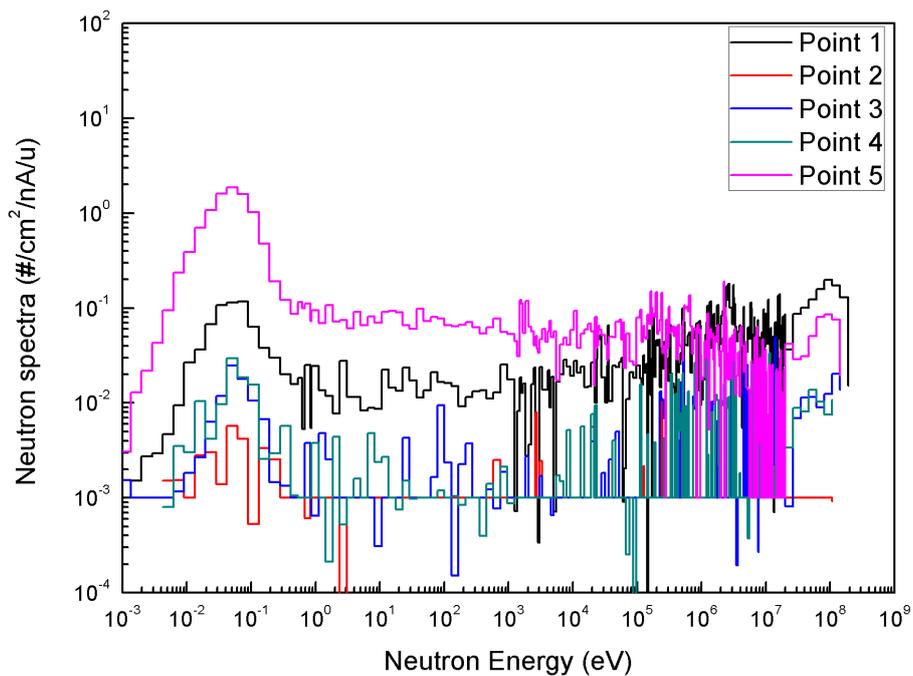
圖三十七：假設全部的質子束於模擬假體 PMMA 作用產生中子時的劑量分布圖，座標單位公分



圖三十八：質子束於模擬假體 PMMA 作用示意圖

表四：假設全部的質子束於模擬假體 PMMA 作用產生中子時的中子通率與劑量率計算結果

假設質子束全部損失於模擬假體 PMMA	中子通率		劑量率	
	#/cm ² /s/nA	relative error (%)	μSv/h/nA	relative error (%)
Point 1	9.96E-01	3.16	7.41E-01	3.51
Point 2	1.44E-02	23.52	3.01E-03	36.14
Point 3	8.20E-02	10.08	4.76E-02	13.09
Point 4	9.14E-02	11.64	5.55E-02	15.59
Point 5	4.80E+00	1.27	5.91E-01	3.06



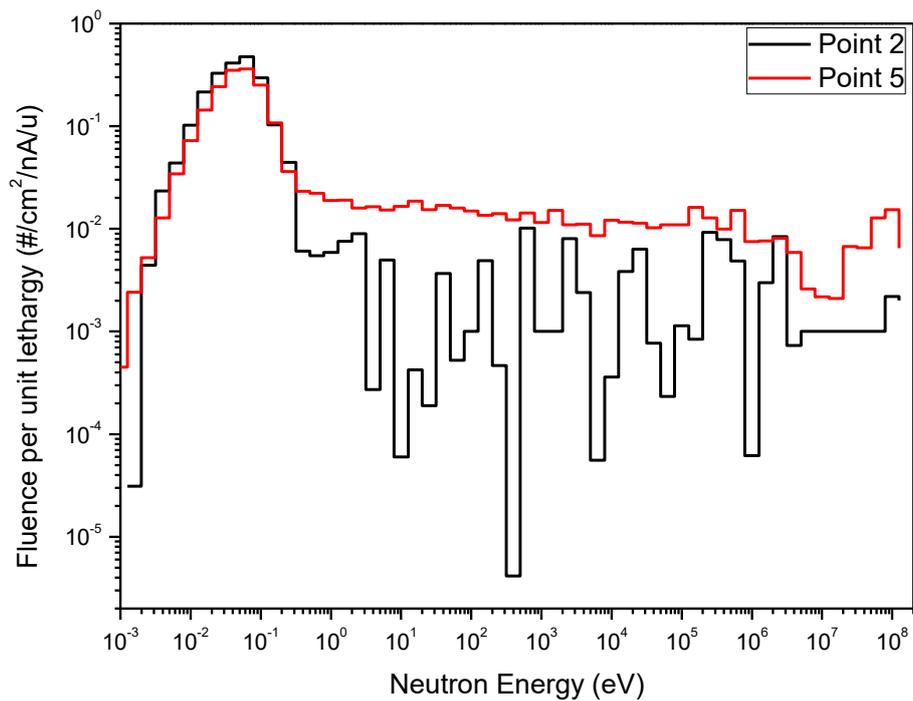
圖三十九：假設全部的質子束於模擬假體 PMMA 作用產生中子時計算得到的五個位置的中子能譜

加速器室迷道口(Point 1)在三個案例中，計算得到的劑量率都相對來得高，但是迷道的功能之一就是要利用散射降低中子的通量以及能量，一般在加速器運轉時是不會有人員在裡面的。治療室入

口(Point 5)在模型的建立上其實與實際的情況也有所不同，在長庚質子治療中心實際上是有門做屏蔽的，也因此在這點計算得到的偏高的劑量率也在可接受的範圍。

(4) 依合理的比例組合呈現可能的中子輻射場能譜

根據長庚質子放射治療設施之輻射安全評估報告，約有 20% 之質子束會損失在迴旋加速器質子束出口位置，5% 之質子束損失於質子運輸系統，剩下 50%~75% 的質子束會用於病人的治療，進入病人體內。因此，我們將前述三種情形之計算結果，分別依 20%、5% 以及 75% 的比例，加總三個計算結果作為中子輻射場能譜，進行分析。由於長庚質子治療中心案例的中子量測僅量加速器室入口 (Point 2) 及治療室入口 (Point 5)，為配合量測，我們計算此兩點的中子能譜如圖四十，並分四個能群來表示該中子輻射場的特性(表五)。由表五，計算出來的加速器室入口 (Point 2) 與治療室入口 (Point 5) 兩個位置的中子還是以低能量的熱中子與超熱中子為主，並含有少量快中子與高能中子。



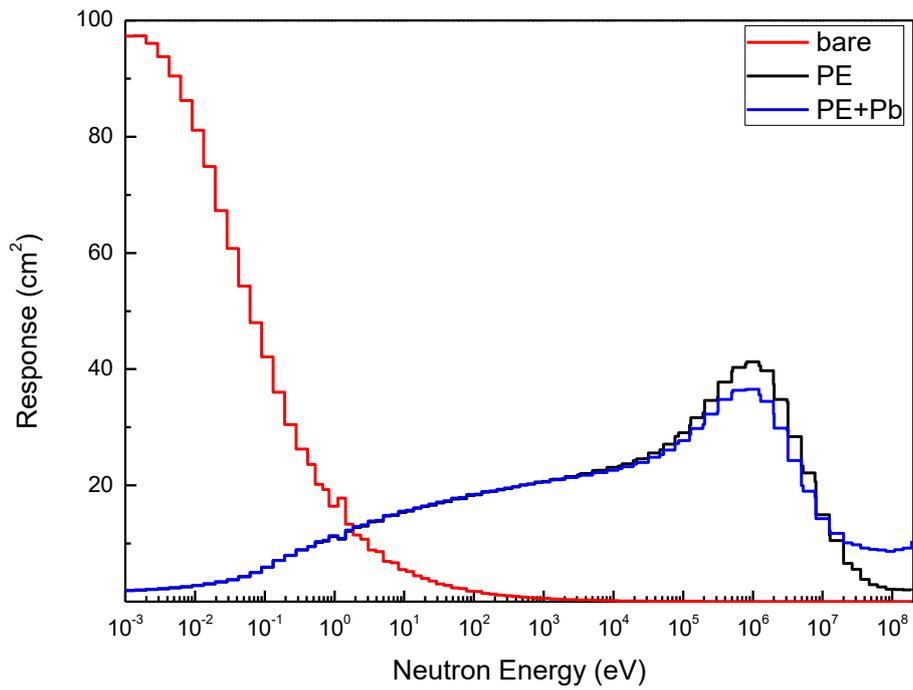
圖四十：FLUKA 計算之長庚質子放射治療設施中，加速器室入口(Point 2)及治療室入口(Point 5)的中子能譜

表五：加速器室入口(Point 2)與治療室入口(Point 5)的中子輻射場特性，依能量分為四個能群(熱中子、超熱中子、快中子與高能中子)

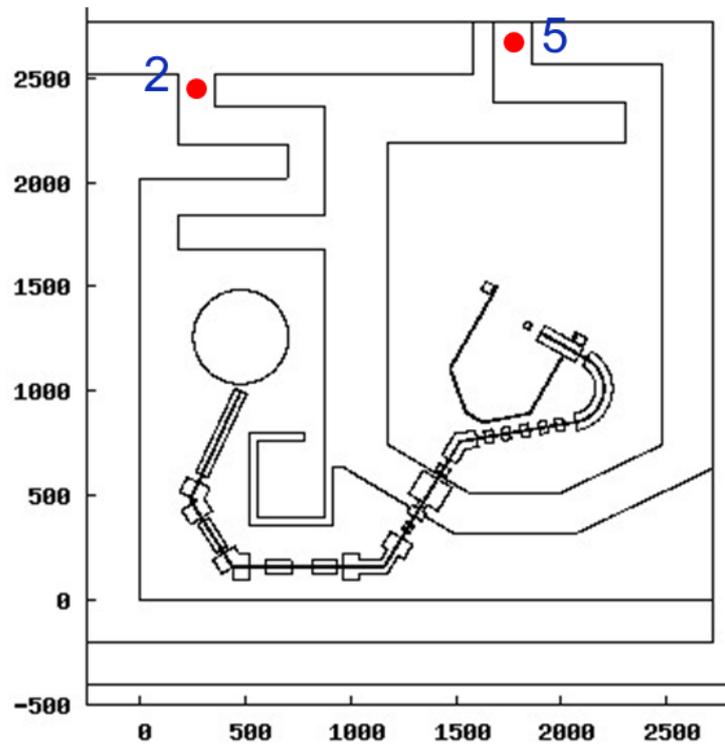
輻射場位置	熱中子 $E_n < 1 \text{ eV}$ (%)	超熱中子 $1 \text{ eV} < E_n < 10 \text{ keV}$ (%)	快中子 $10 \text{ keV} < E_n < 10 \text{ MeV}$ (%)	高能中子 $E_n > 10 \text{ MeV}$ (%)
Point 2	95.19	2.44	2.17	0.19
Point 5	77.81	13.30	6.59	2.30

1.4.3 中子量測結果

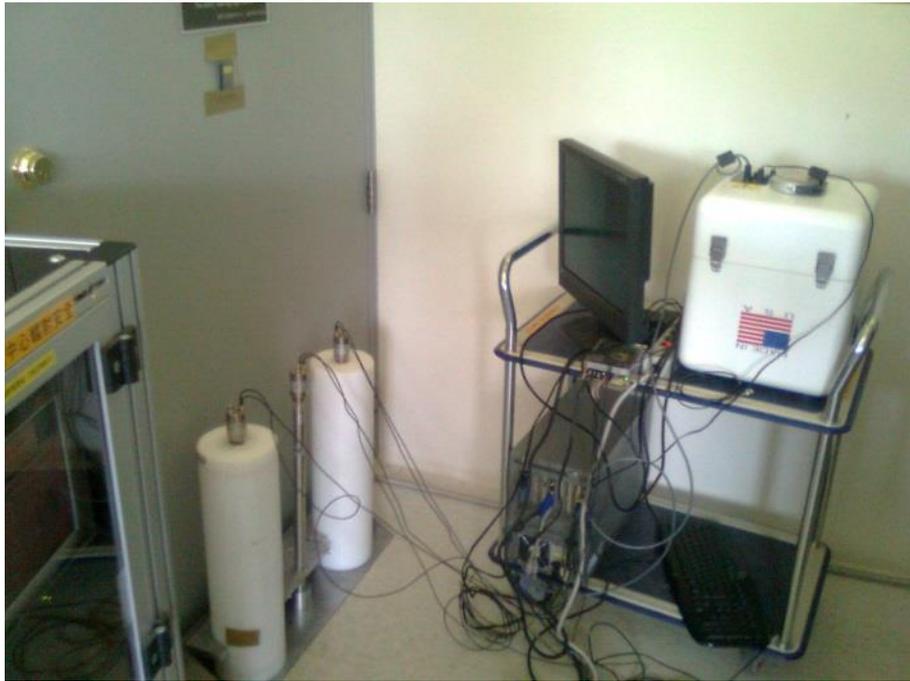
由於輻射場的中子強度不高，若是使用緩速型波那球如 9 吋波那球或是 6 吋波那球等偵檢效率較低的中子偵檢器所需量測時間長，因此在本案例中的中子量測使用三個不同的波那圓柱，分別為裸圓柱(bare)，用來量測熱中子；包覆聚乙烯緩速體之波那圓柱(PE)，量測快中子；以及聚乙烯緩速體中嵌入鉛之波那圓柱(PE+Pb)，其中 PE 波那圓柱與 PE+Pb 波那圓柱的直徑是一樣的，PE+Pb 波那圓柱是將其中半徑一公分的 PE 材質以 Pb 取代以提高高能中子響應(4P6_8 延伸能量型波那球為 1.27 公分的鉛)，可以量得更高能量之高能中子，三個波那圓柱的能量響應函數如圖四十一。加速器室迷道口(Point 1)是高強度的輻射場，因此在安全的考量之下，無法進入測量。而控制室走道(Point 3)以及走道轉角(Point 4)則是因為時間上的限制而沒有進行測量，因此僅量測加速器室入口(Point 2)以及治療室入口(Point 5)之劑量，如圖四十二所示。而圖四十三與圖四十四為現場量測時儀器架設的照片。



圖四十一：量測使用的三種波那圓柱的偵檢器能量響應函數



圖四十二：長庚質子治療中心劑量量測位置示意圖



圖四十三：長庚質子治療中心劑量測量，於加速器室入口(Point 2)



圖四十四：長庚質子治療中心劑量測量，於治療室入口(Point 5)

量測除了使用三種不同的圓柱型中子偵檢器之外，還依電流大小分成三個不同的運轉條件進行，分別為 10 nA、100 nA 以及全功率 300 nA (加速器室入口(point 2)因 100 nA 的條件之下誤差百分率已經足夠低，因此在時間的考量下此位置僅量測 10 nA 及 100 nA 的情況)，此運轉條件的電流計置於加速器質子束出口位置，每 10 秒做一次紀錄，並量測 100 秒，詳細的量測數據如表六至表八。

運轉在 10 nA 時，治療室入口(Point 5)的量測數據的平均值依 Bare、PE、PE+Pb 三種波那圓柱的結果分別為 632.9、103.6、139.7；而加速器室入口(Point 2)的量測數據的平均值依 Bare、PE、PE+Pb 三種波那圓柱的結果分別為 41、3.3、4.3。從這個量測的結果來看，因為 Bare 波那圓柱的計數比起 PE 與 PE+Pb 兩種波那圓柱來得高許多，顯示這兩點輻射場的中子大多是低能量的中子，而 PE+Pb 波那圓柱的計數比起 PE 波那圓柱來得高一些，顯示這兩點含有部分的高能中子。運轉在 100 nA 以及 300 nA 的結果也與此吻合。

從平均值來看，可以發現運轉條件為 100 nA 時的計算結果，並非運轉條件 10 nA 時的計算結果的十倍；運轉條件為 300 nA 時的計算結果也並非運轉條件為 100 nA 時的三倍或是運轉條件 10 nA 時的三十倍，這樣的結果看似不合理但的確是可能發生的，

如同前面所提過，質子束從加速一直到照射人體的過程中會在不同的位置以不同的比例與周遭的物質產生作用，在不同的運轉條件之下，作用的位置以及比例也會有很大的不同，且運轉條件所使用的電流計放置在加速器的出口，我們無從得知質子束在電流計之後不同位置的質子數量與損失情形，這會嚴重影響到最後輻射場的中子分布情況，導致量測的結果有所差異。

另外，在運轉條件為 10 nA 時，由於照射的電流小，產生的中子數量也相對較少，因此量測得到的誤差也比較大，尤其在加速器室入口(Point 2)，誤差甚至可以高達 50%。隨著運轉的電流提升，量測的誤差也慢慢降低，在運轉電流在 300 nA 時，加速器室入口(Point 2)的量測數據誤差降到了大約 5% 左右，結果大致上穩定，是一個可以被信賴的量測結果。

表六：治療室入口(Point 5)與加速器室入口(Point 2)於運轉條件為 10 nA 時的量測

數據，單位為次數

運轉條件: 10 nA							
治療室入口				加速器室入口			
	Bare	PE	PE+Pb		Bare	PE	PE+Pb
時間	counts/10s	counts/10s	counts/10s	時間	counts/10s	counts/10s	counts/10s
18:02:25	677	96	141	19:07:18	45	3	2
18:02:35	655	99	147	19:07:28	47	1	1
18:02:45	605	101	164	19:07:38	47	5	2
18:02:55	659	84	153	19:07:48	35	4	7
18:03:05	518	87	107	19:07:58	44	1	3
18:03:15	635	106	129	19:08:08	38	5	7
18:03:25	633	125	139	19:08:18	40	2	5
18:03:35	658	125	140	19:08:28	46	3	7
18:03:45	612	102	147	19:08:38	33	5	6
18:03:55	677	111	130	19:08:48	35	4	3
總數	6329	1036	1397	總數	410	33	43
平均	632.9	103.6	139.7	平均	41	3.3	4.3
標準差	47.271	13.842	15.471	標準差	5.457	1.567	2.359
誤差百分率 (%)	7.469	13.361	11.074	誤差百分率 (%)	13.310	47.485	54.869

表七：治療室入口(Point 5)與加速器室入口(Point 2)於運轉條件為 100 nA 時的量測數據，單位為次數

運轉條件: 100 nA							
治療室入口				加速器室入口			
	Bare	PE	PE+Pb		Bare	PE	PE+Pb
時間	counts/10s	counts/10s	counts/10s	時間	counts/10s	counts/10s	counts/10s
18:06:45	8300	1325	1783	19:00:47	583	40	50
18:06:55	8319	1314	1773	19:00:57	547	54	55
18:07:05	8101	1283	1781	19:01:07	559	39	54
18:07:15	8417	1284	1775	19:01:17	538	39	43
18:07:25	7824	1357	1708	19:01:27	518	30	47
18:07:35	7620	1264	1764	19:01:37	498	40	63
18:07:45	8297	1341	1798	19:01:47	504	52	62
18:07:55	7960	1290	1777	19:01:57	506	34	54
18:08:05	7690	1296	1738	19:02:07	527	40	42
18:08:15	7934	1375	1648	19:02:17	522	26	48
總數	80462	13129	17545	總數	5302	394	518
平均	8046.2	1312.9	1754.5	平均	530.2	39.4	51.8
標準差	282.872	36.008	45.390	標準差	26.865	8.631	7.177
誤差百分率 (%)	3.516	2.743	2.587	誤差百分率 (%)	5.067	21.905	13.855

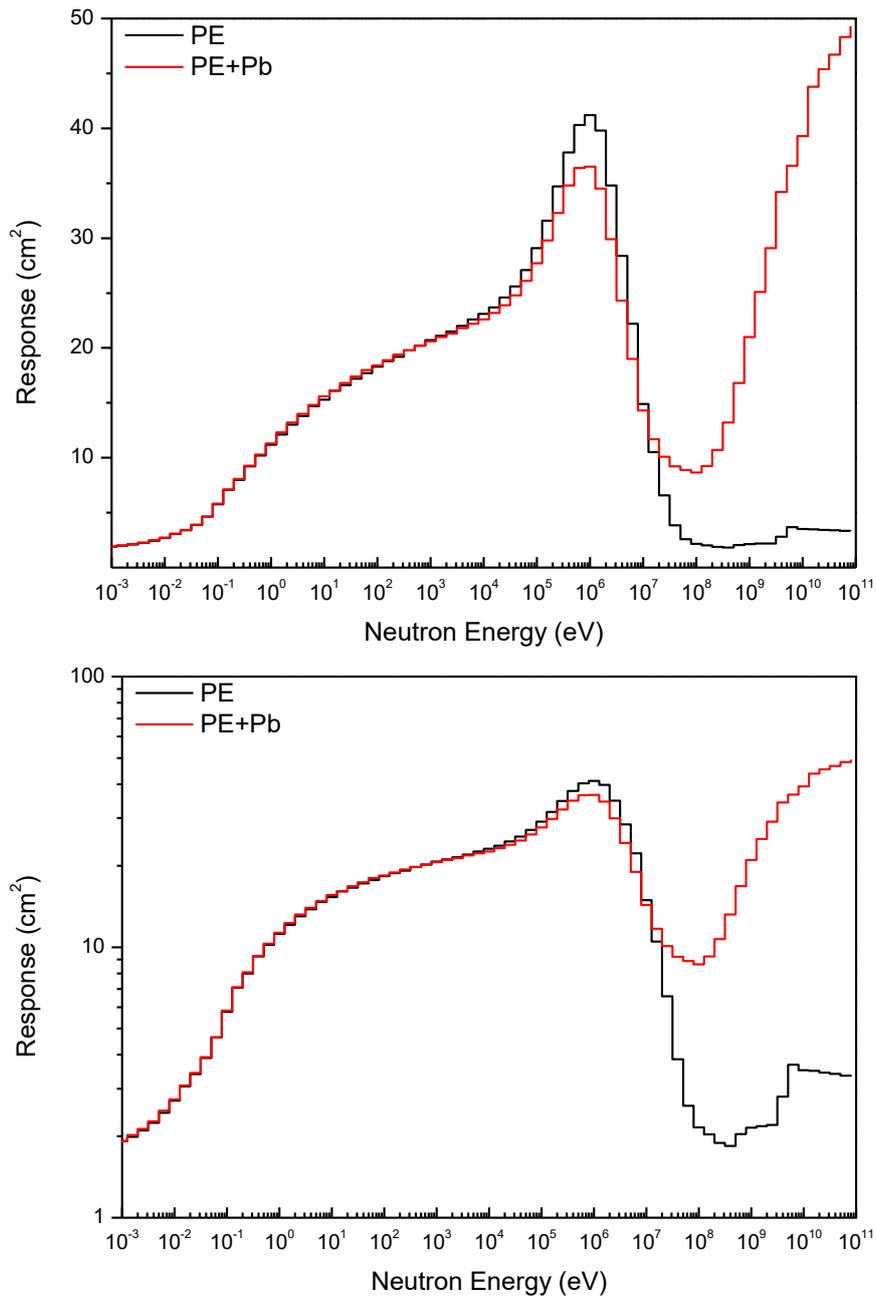
表八：治療室入口(Point 5)於運轉條件為 300 nA 時的量測數據，單位為次數

運轉條件: 300 nA			
治療室入口			
	Bare	PE	PE+Pb
時間	counts/10s	counts/10s	counts/10s
18:12:06	23207	3745	5017
18:12:16	22767	3613	5011
18:12:26	21762	3506	4831
18:12:36	22034	3656	4949
18:12:46	22243	3640	4956
18:12:56	17624	2943	3842
18:13:06	21841	3679	4899
18:13:16	21389	3664	4832
18:13:26	21029	3696	4784
18:13:36	19805	3503	4578
總數	213701	35645	47699
平均	21370.1	3564.5	4769.9
標準差	1616.000	231.607	350.900
誤差百分率(%)	7.562	6.498	7.357

1.4.4 以 PE 和 PE+Pb 波那圓柱作為中子劑量計的探討

我們在前面所使用的中子量測儀器為波那圓柱，這種類型的中子偵檢器原理和 9 吋波那球是相同的，使用緩速體搭配熱中子偵檢核心，除了用作能譜儀之外，也可以做為中子劑量計使用，而圓柱的設計使得偵檢器體積與使用的氣體工作壓力相較於球形時來得大，波那圓柱的偵測效率可以比波那球來得高許多。然而需要注意的地方是，因為波那圓柱系統在幾何形狀上有明顯的長、寬比差異，響應函數與中子的入射方向有相當的依存性。

嵌有重金屬的 PE+Pb 波那圓柱與 4P6_8 延伸能量型波那球類似，同樣有提升高能中子響應的效果，因此預期 PE+Pb 與 PE 波那圓柱的組合，也能利用量測讀值比作為高能中子能譜指標。圖四十五是 PE 波那圓柱與 PE+Pb 波那圓柱的響應函數比較，可以看到在 10^5 eV 以下有幾乎一樣的響應函數，然而，PE+Pb 波那圓柱在 10 MeV 以上的高能中子區域有著較好的響應函數，但在 10 keV 到 10 MeV 之間的響應函數比起 PE 波那圓柱來得低的，這部分是因為 PE+Pb 波那圓柱的聚乙烯緩速層比 PE 波那圓柱少一公分所致，因此可預期拿來作為高能中子能譜指標的表現會比 4P6_8 延伸能量型波那球與 6 吋波那球的組合差。



圖四十五：(a) PE 波那圓柱與 PE+Pb 波那圓柱的響應函數(線性尺度)
 (b) PE 波那圓柱與 PE+Pb 波那圓柱的響應函數(對數尺度)

以 PE 波那圓柱和 PE+Pb 波那圓柱重作圖二至圖四內容，使用圖七的計算流程圖計算 PE 波那圓柱與 PE+Pb 波那圓柱在 245 個輻射工作場的能譜修正因子，並分別以高能中子比例以及

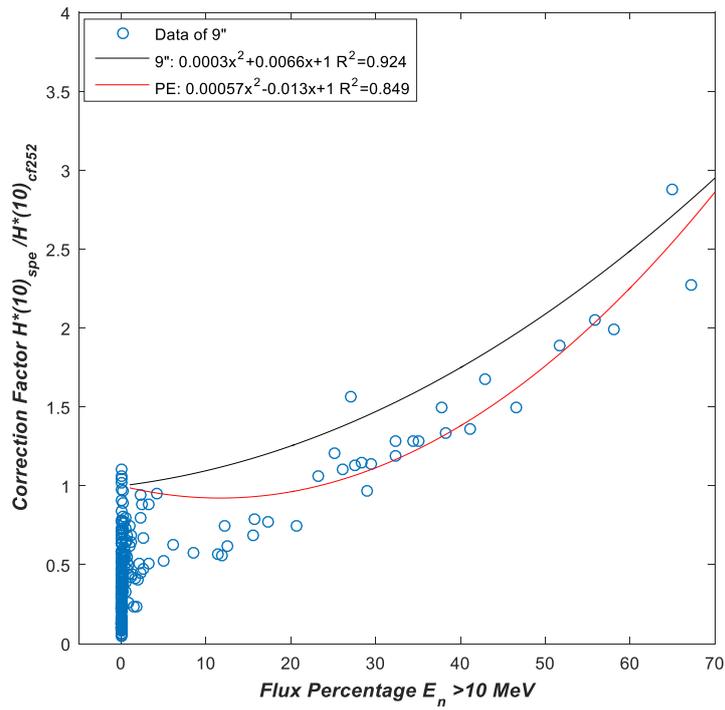
PE+Pb 波那圓柱與 PE 波那圓柱的讀值比作為組合的高能中子能譜指標作圖，得到以下能譜修正因子圖表(圖四十六至圖四十八)。

首先，在圖四十六中可以發現，隨著高能中子比例上升，PE 波那圓柱的能譜修正因子也有上升的趨勢，並且與 9 吋波那球的能譜修正因子有接近的結果，這部分是符合我們預期的，因為在我們前面的結論中，使用與 9 吋波那球類似的緩速體型式中子劑量計，都會有相近的能譜修正因子；而以 PE+Pb 波那圓柱與 PE 波那圓柱的讀值比作為高能中子能譜指標時(圖四十七)，能譜修正因子也有隨著讀值比越來越大的趨勢，也是符合我們在圖四的結果的。然而有很大一部份的能譜修正因子落在讀值比為 1.0 以下，甚至接近 0.8 的區域，與圖三的結果有很大的不同，這是因為前面所使用的 6 吋波那球與 4P6_8 延伸能量型波那球的響應函數在中子能量 10 MeV 以下幾乎是一樣的，而 PE 波那圓柱和 PE+Pb 波那圓柱在中子能量 10^5 eV 至 10^7 eV 有著明顯的差異，因此若是在一個有很大比例中子能量落在這個區域的中子場使用 PE 波那圓柱以及 PE+Pb 波那圓柱，PE+Pb 波那圓柱所量測得到的讀值可能會比 PE 波那圓柱來得低所導致。

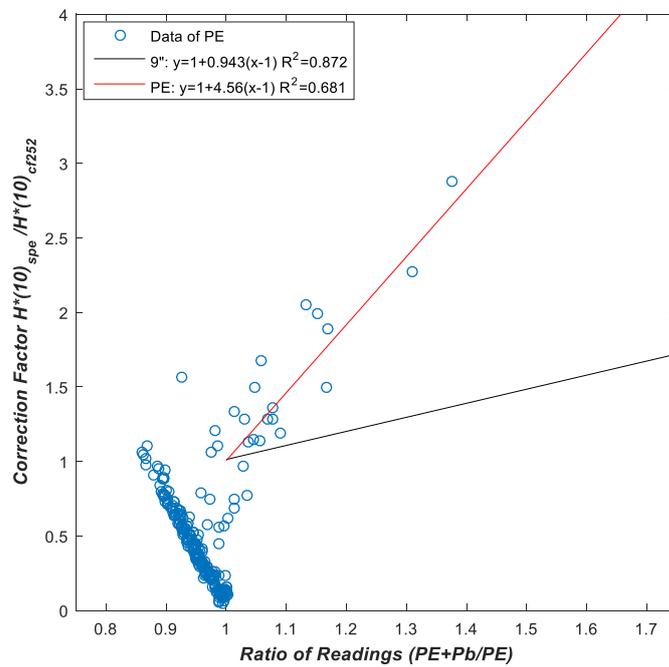
單以 PE+Pb 波那圓柱作為中子劑量計時的能譜修正因子如圖四十八，與 4P6_8 延伸能量型波那球的能譜修正因子結果類似，嵌入了重金屬的緩速體波那圓柱也可以一定程度的改善了高能

中子能量低估的問題，所需的能譜修正因子值也較低。不過 PE+Pb 波那圓柱所嵌入的鉛厚度並沒有 4P6_8 延伸能量型波那球來得厚，在中子能量為 10^6 eV 至 10^8 eV 時的響應函數掉落程度比 4P6_8 延伸能量型波那球來得嚴重許多，也因此表現並沒有像 4P6_8 延伸能量型波那球來的優秀。

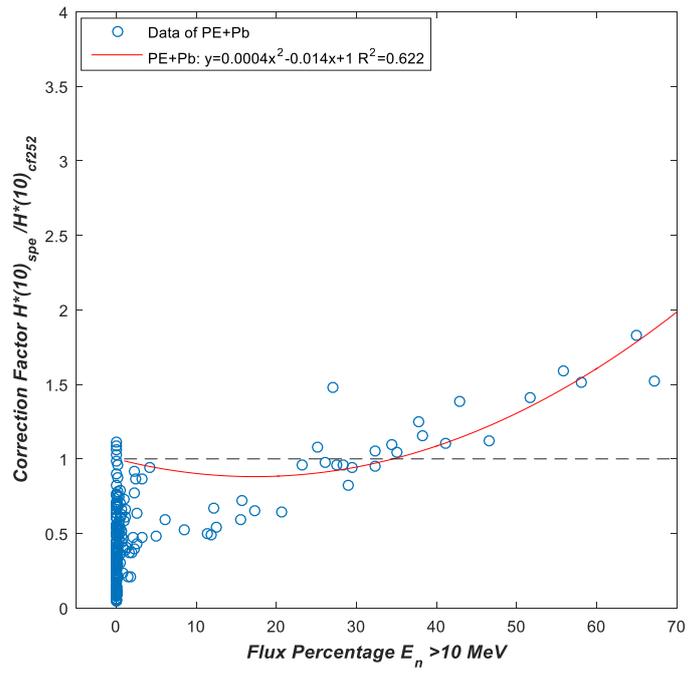
雖然 PE 波那圓柱與 PE+Pb 波那圓柱作為高能中子能譜指標量測的組合，結果並沒有前面 4P6_8 延伸能量型波那球與 6 吋波那球的組合來得適合，不過在計算的結果圖表上顯示，依然呈現相同的趨勢，且在這個案例中僅有 PE 波那圓柱以及 PE+Pb 波那圓柱的量測結果的情況下，加上波那圓柱高靈敏度的優勢是無法被取代的，因此 PE 波那圓柱與 PE+Pb 波那圓柱做為中子劑量計也是可以接受的。



圖四十六：PE 波那圓柱之能譜修正因子對高能中子比例作圖



圖四十七：PE 波那圓柱之能譜修正因子對 PE+Pb 波那圓柱與 PE 波那圓柱的讀值
比作圖



圖四十八：PE+Pb 波那圓柱之能譜修正因子對高能中子比例作圖

1.4.5 計算與測量比較分析

配合量測的結果，我們將長庚質子放射治療設施中加速器室入口門(Point 2)與治療室入口門(Point 5)的計算結果透過偵檢器響應函數換成中子讀數的形式做比較，詳細內容記錄於表九。

表九：長庚質子放射治療設施中加速器室入口(Point 2)與治療室入口(Point 5)的計算結果與量測結果比較，單位為每十秒計數(counts/10s)

運轉條件: 10 nA	加速器室入口			治療室入口		
	bare	PE	PE+Pb	bare	PE	PE+Pb
量測	41.00	3.30	4.30	632.90	103.60	139.70
計算	55.61	5.30	5.28	1904.31	350.07	350.39

運轉條件: 100 nA	加速器室入口			治療室入口		
	bare	PE	PE+Pb	bare	PE	PE+Pb
量測	530.20	39.40	51.80	8046.20	1312.90	1754.50
計算	556.06	53.01	52.83	19043.06	3500.69	3503.88

運轉條件: 300 nA	加速器室入口			治療室入口		
	bare	PE	PE+Pb	bare	PE	PE+Pb
量測	n.a.	n.a.	n.a.	21370.10	3564.50	4769.90
計算	1668.19	159.04	158.49	57129.19	10502.08	10511.65

觀察表九中，不同運轉條件下的量測值並沒有隨著質子束的電流而有倍數關係，這個問題就是我們在前面中子量測結果裡提到的，由於運轉條件的質子束電流計是放置在加速器的質子束出

口，而質子束在傳輸的過程中會在不同的位置與不同的物質發生作用產生中子，在不同的運轉條件之下，質子束在不同位置的損失比例也無法確定，這也是導致量測值並沒有隨著運轉條件而有倍數關係的最大原因，這個問題目前尚未完全解決。

接著，觀察表九中的量測結果，含重金屬鉛之 PE+Pb 緩速體波那圓柱的計數明顯比一般的 PE 緩速體波那圓柱來的高許多，表示長庚質子放射治療設施的輻射場確實含有一定程度的高能中子；可是僅從表九中的計算結果來看的話，PE+Pb 緩速體波那圓柱的計數與 PE 緩速體波那圓柱的計數是差不多的，表示 FLUKA 計算的中子能譜並沒有顯著高能中子存在。然而，這樣的結果似乎與我們預期的不同，因為依照理論來看，長庚質子治療設施所使用的 230 MeV 質子迴旋加速器應當產生一定比例的高能中子，但是從計算的中子能譜來看，不管是在加速器室入口 (Point 2) 或是治療室入口 (Point 5) 的高能中子 (> 10 MeV) 含量都在 5% 以下。這個問題最可能的原因就是 FLUKA 對於質子損耗情節與位置模擬的可信度，值得未來深入研究。

在本應用分析案例中，FLUKA 的計算結果顯然與事實相去較大，因此使用現場實際中子量測的結果來作探討是比較合理的。由於本案例的量測是使用 PE+Pb 波那圓柱以及 PE 波那圓柱，因此這邊使用的是 PE+Pb 波那圓柱與 PE 波那圓柱為組合的高能中

子能譜指標還有對應的能譜修正因子曲線(圖四十七)。

根據計算，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 $0.0427 \mu\text{Sv/hr/cps}$ ；PE+Pb 波那圓柱的為 $0.0488 \mu\text{Sv/hr/cps}$ ，因此加速器室入口(Point 2)在運轉條件 10 nA 以及 100 nA 之下的量測劑量率應為 $0.014 \mu\text{Sv/hr}$ 及 $0.168 \mu\text{Sv/hr}$ ；而在治療室入口(Point 5)在運轉條件為 10 nA、100 nA 以及 300 nA 之下的量測劑量率為 $0.442 \mu\text{Sv/hr}$ 、 $5.606 \mu\text{Sv/hr}$ 及 $15.220 \mu\text{Sv/hr}$ 。表九中，加速器室入口(Point 2)在運轉條件 10 nA 以及 100 nA 之下的高能中子能譜指標(PE+Pb 波那圓柱與 PE 波那圓柱的讀值比)分別為 1.303 以及 1.315；而治療室入口(Point 5)在運轉條件為 10 nA、100 nA 以及 300 nA 之下的高能中子能譜指標分別為 1.348、1.336 和 1.338，可以看出在同個位置之下的高能中子能譜指標都是差異不大的，此時對照 3.3.4 節提供的能譜修正因子曲線(圖四十七)得到所需的能譜修正因子大約在 2.382 至 2.587 之間，表示在使用 PE 波那圓柱作為劑量計時，在這兩個位置所量測得到的劑量大約需要兩倍的修正，也就是說，當長庚質子治療中心在最大電流 300 nA 運轉條件之下，最顯著的輻射場治療室入口在經過修正之後的劑量為 $39.374 \mu\text{Sv/hr}$ 。這個結果顯示本研究的重要性，以及傳統緩速型中子劑量計確實有不少的劑量低估空間需要被修正。

長庚醫院質子治療中心案例的 FLUKA 計算與中子劑量測量結果比較整理如表十，在本研究的分析之中，同樣一個位置可以有三種方法得到劑量率，第一種是使用 FLUKA 計算模擬的中子能譜，透過與中子偵檢器響應函數積分的方式得到的劑量率；第二種是使用 PE 波那圓柱的量測讀值乘上對應的劑量校正因子，再透過能譜修正因子方法所計算出來的結果；第三種是直接以 PE+Pb 波那圓柱量測讀值乘上對應的劑量校正因子的結果。需要注意的地方是，FLUKA 計算結果與中子量測的結果處在不同的條件之下，FLUKA 計算結果是基於依比例組合的中子能譜所計算出來的；而中子量測是依據現場真實情況的中子能譜。在本案例中，第二種方法使用 PE 波那圓柱量測得到的劑量率應該是最值得信賴的，因為第一種方法的 FLUKA 計算能譜並沒有高能中子存在，並不符合理論情形，很明顯是個錯誤的結果；而第三種方法使用 PE+Pb 波那圓柱的量測值稍微低一些應該是存在著些許的高能中子劑量低估，這也可以從圖四十八看得出來，僅一公分的重金屬層還不足以完全反應高能中子的貢獻，尤其在高能中子比例顯著的輻射場中會更顯現出來。

未來在其他的案例中或著是實際的應用上，依然還是建議 4P6_8 延伸能量型波那球與 6 吋波那球的組合建立高能中子能譜指標，由於此兩種中子偵檢器在中子能量響應函數的差異分野非

常明顯，因此得到的結果會是更為準確可靠的。

表十：長庚醫院質子治療中心案例的 FLUKA 計算與中子劑量量測結果比較

nA		H*(10) μ Sv/hr			
		加速器室入口(Point 2)		治療室入口(Point 5)	
10	計算	0.92		1.56	
	量測 (PE 修正/PE+Pb)	0.03	0.02	1.14	0.68
100	計算	9.20		15.60	
	量測 (PE 修正/PE+Pb)	0.41	0.25	14.19	8.56
300	計算	27.60		46.80	
	量測 (PE 修正/PE+Pb)	n.a.	n.a.	38.67	23.28

2. 結論與未來方向

針對輻射防護的目的，中子偵檢器通常經由如 Cf-252 等標準射源校正之後，就被使用在各個不同的輻射工作場所。值得注意的是，不同工作場所通常有不同的中子能譜，若是工作場所的中子能譜與校正場中子能譜有明顯差異，量測的結果就可能有所偏差，使用者必須特別注意。關於傳統的緩速型中子劑量計在高中子存在的輻射場使用時，容易低估中子劑量的問題，主要原因為其在高能區具有較低的響應函數，但高中子對於劑量的貢獻反而相對重要。國外也有一些研究已經提出改善方案，但是大都針對特定的中子偵檢器或是特定的設施環境，並沒有一個完整有系統的分析。本研究提供一種簡單有效的中子能譜修正因子概念，用來修正傳統緩速型中子劑量計在高中子輻射場使用時的劑量低估問題。研究成果並驗證了延伸能量型的中子劑量計可改善傳統緩速型中子劑量計的問題，正確反應高中子的劑量貢獻。當沒有使用延伸能量型的中子劑量計時，在高中子存在輻射場的劑量修正是非常必要的，研究成果顯示修正前後差值可以達數倍之多。要得到正確的中子能譜修正因子，必須先了解工作場所輻射場的特性，在中子能譜已知的情況下，本研究建議使用能譜中高能中子所佔的比例；若在中子能譜未知時，本研究建議使用 4P6_8 延伸能量型波那球與 6 吋緩速型波那球量測的讀值比。這兩個高能中子指標皆可用來有效表示高中子對於該輻射場的重要性，並據此得到適當的中子能譜修正因子。

本研究提供了經 Cf-252 校正的 9 吋標準緩速型波那球的中子能譜修正因子，分別對輻射場高能中子比例以及 4P6_8 延伸能量波那球與 6 吋標準波那球的讀值比(高能中子能譜指標)作圖，相關圖表的使用簡單有效。

除了根據已有資料庫推導獲得中子能譜修正因子之外，為了更符合實際工作場所使用，本研究也回答了三個重要的問題：(1)若使用不同的中子校正射源、(2)若使用不同尺寸的緩速型中子劑量計，(3)甚至是若使用不同型式的中子偵檢器的情況下，本研究所得之中子能譜修正因子是否也能夠被合理的使用。本研究進行的一系列靈敏度分析發現，大多數的校正射源，對於能譜修正因子的影響不大，少數用途特殊的校正射源則避免使用；在合理範圍內選擇不同尺寸的緩速型波那球，對於中子能譜修正因子的影響也不顯著；不同的中子偵檢器因為原理及用途差異非常大，在中子能譜修正因子的使用上，應使用與 9 吋傳統緩速型波那球類似設計原理的緩速型式中子劑量計。一系列靈敏度分析的結果間接證實本研究所建議的能譜修正因子較類似一個中子輻射場的特性參數，而與所使用緩速型中子劑量計的廠牌或性質沒有明顯關係。總而言之，本研究的結果提供了一套實際可行的高能中子劑量修正方法，相關資訊與應用可供主管機關參考，以及應用於具有高能中子輻射場的工作環境。

質子與重粒子的癌症治療以及其他高能加速器的應用在國內逐漸

多樣發展，相對應的高能中子輻射場也越來越多，除了可以使用較貴較重的延伸能量型中子劑量計之外，工作場常常也還有許多傳統型式的緩速型中子劑量計。有鑑於此，我們在研究中也朝實務應用面來探討，以林口長庚醫院的質子加速器工作環境，測試本研究結果應用於國內相關案例的成效，該醫院已興建運轉了全台第一座質子治療中心，使用了高達 230 MeV 的質子加速器，預期工作場所會有不可忽視的高能中子貢獻，儘管模擬與測量的結果和預期有些許落差，不過在能譜修正因子的使用上依然與理論計算相符。在長庚質子治療中心的實際分析案例中，因為傳統多球體偵檢器的偵測效率限制問題，本研究以 PE+Pb 波那圓柱與 PE 波那圓柱分別取代 4P6_8 延伸能量波那球與 6 吋標準波那球的使用，當作環境高能中子能譜指標的應用。唯在 FLUKA 計算中子能譜的部分還存在著不足，考慮不同質子束損失比例組合的情況，依然沒能計算出實驗中明顯出現的高能中子貢獻，可能是模型的建立考慮不夠周詳，也可能是在射源的描述上有遺漏的部分，這些都是未來可以改善也值得深入探討的部分。

肆、参考文献

- [1] Olsher, R. H., Hsu, H. H., Beverding, A., Kleck, J. H., Casson, W. H., Vasilik, D. G. and Devine, R. T. *WENDI: an improved neutron rem meter*. Health Phys, 79, 170-181 (2000).
- [2] Klett, A., Mayer, S., Theis, C. and Vincke, H. *A neutron dose rate monitor for high energies*. Rad. Meas, 41, S279-S282 (2007).
- [3] Fassò, A., Liu, J. C. and Rokni, S. H. *Neutron spectra and dosimetric quantities outside typical concrete shielding of synchrotron facilities*. ICRS-12 & RPSD-2012, Nara, Japan, 2-7 September 2012, paper ID 2C-21.
- [4] Bedogni, R. *Neutron spectrometry with Bonner Spheres for area monitoring in particle accelerators*. Radiation Protection Dosimetry, 146 (2011) 383-394.
- [5] Naismith, O. F. and Siebert, B. R. *A Database of Neutron Spectra, Instrument Response Functions, and Dosimetric Conversion Factors for Radiation Protection Applications*. Radiat. Prot. Dosim. 70(1-4) 241-245 (1997).

- [6] Tanner, R. J. Thomas, D. J. Bartlett, D. T., et al. *Effect of the energy dependence of response of neutron personal dosimeters routinely used in the UK on the accuracy of dose estimation*. NRPB-W25 (2002).
- [7] International Atomic Energy Agency. *Compendium of neutron spectra and detector responses for radiation protection purposes*. Technical Reports Series No. 403. IAEA (2001).