

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

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

**Spectral correction factors for conventional neutron dose meters
used in proton therapy facilities and other high-energy neutron
environments**

計畫編號：NL1050775 (BRA0191)

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

協同主持人：

研究期程：中華民國 105 年 6 月至 105 年 12 月

研究經費：新臺幣 54 萬元

核研所聯絡人員：朱葦翰

報告日期：105 年 12 月 15 日

目 錄

中文摘要	1
ABSTRACT	2
壹、計畫緣起與目的	3
一、 計畫緣起	3
二、 研究目的	5
貳、研究方法與過程	7
一、 文獻探討	7
二、 研究方法	8
參、主要發現與結論	13
一、 結果與討論	13
(一) 自動化的程式開發	13
(二) 高能中子能譜指標	13
(三) 偵檢器能譜修正因子	15
(四) 不同校正射源的影響	18
(五) 不同中子偵檢器的影響	19
(六) 偵檢器能譜修正因子的驗證	21
二、 結論與未來方向	23
肆、參考文獻	26
附錄：程式碼	28

中文摘要

質子治療設施與其他高能輻射環境的中子偵測是一個重要且困難的問題。由於傳統緩速型中子偵檢器的原理特性，通率劑量轉換係數與偵檢器的偵測效率在高能中子區域(> 10 MeV)有著相反的趨勢，若直接應用會嚴重低估中子劑量的測量結果。為了彌補此一低估的問題，本報告藉由研究 IAEA-TRS-403 報告中超過 200 種的工作場所中子能譜，建立用來表示能譜特性的高能中子指標，再比較利用 ^{252}Cf 射源校正之偵檢器響應函數所計算出來的劑量，以及直接利用通率劑量轉換係數得到的劑量，建立用於校正傳統緩速型偵檢器的偵檢器能譜修正因子。為了改進以及延伸此偵檢器能譜修正因子的應用範圍，本報告亦進行一系列的靈敏度分析，包括：(1)探討使用不同的偵檢器校正射源(^{252}Cf , $^{241}\text{Am-Be}$, $^{239}\text{Pu-Be}$)對於偵檢器能譜修正因子的影響、(2)探討使用不同尺寸之中子偵檢器(6”至 9”波那球)對於偵檢器能譜修正因子的影響、(3)探討如何建立簡易實用的工作場高能中子指標，以利偵檢器能譜修正因子的實務應用。本報告的成果可提供國內高能加速器設施與主管機關參考，提升國內在高能中子輻射場所的劑量測量技術水準。

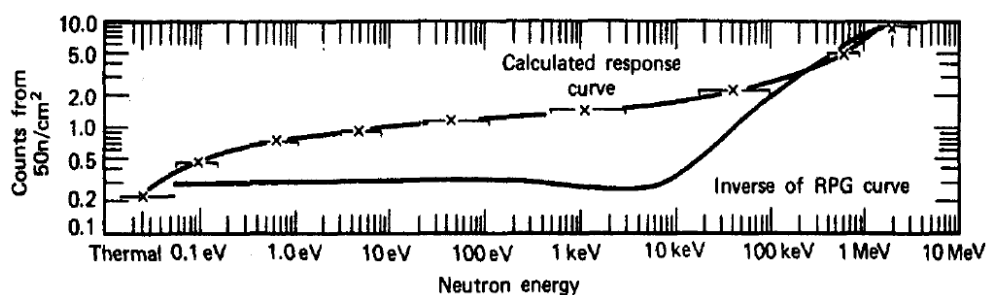
Abstract

This study aimed at improving and extending results of our previous study on corrections for conventional neutron dose meters used in environments with high-energy neutrons ($E > 10$ MeV). 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 has been proposed based on analysis of hundreds of neutron spectra in the IAEA-TRS-403 report. By comparing ^{252}Cf -calibrated dose responses with reference values derived from fluence-to-dose conversion coefficients, this study provided recommendations for neutron field characterization and the corresponding dose correction factors. Further sensitivity studies addressed three important issues. (1) If the spectral correction factors are independent of the selection of three commonly used calibration sources: ^{252}Cf , $^{241}\text{Am-Be}$ and $^{239}\text{Pu-Be}$? (2) If the derived correction factors for different neutron dose meters, such as Bonner spheres of various sizes (6" to 9"), are similar in trend? (3) How to establish practical high-energy neutron indexes based on measurements to facilitate the application of these correction factors in workplaces?

壹、計畫緣起與目的

一、計畫緣起

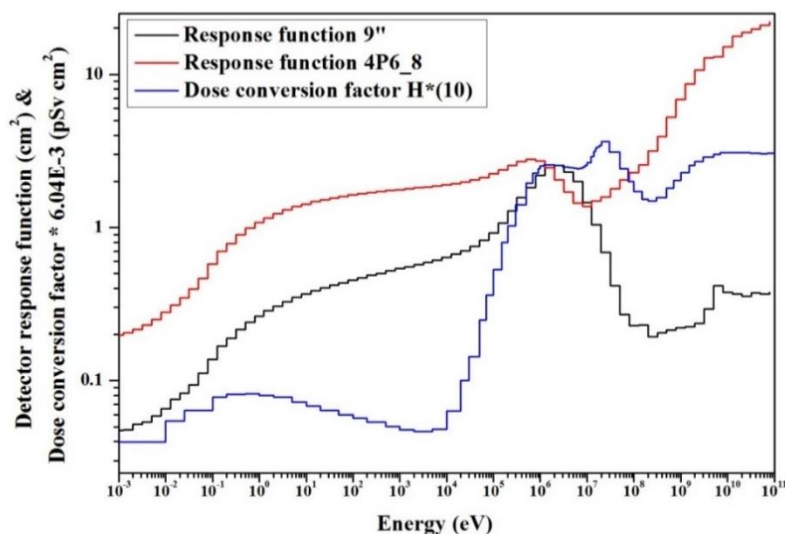
近年來，國內加速器的應用日益蓬勃發展，加速器的能量越來越高，設施規模也越來越大，所產生的中子能量範圍相較於傳統射源與反應器環境來得大，因此對於高能中子(> 10 MeV)的輻射防護與度量問題日益重要。高能中子與物質作用的數值模擬相當複雜，加上高能中子的通率劑量轉換係數貢獻大，但偵檢器的偵測效率在高能區域非常低，因此如何準確地度量與評估這些加速器環境的高能中子造成的劑量，是一個困難但是重要的輻射防護問題。傳統的中子偵檢器一般採用 BF_3 或 ^3He 比例計數器當作熱中子偵測核心，外加適當尺寸的中子緩速體，例如常見的 9 吋波那球(9" Bonner Sphere)，其基本設計原理希望偵檢器的能量響應函數與中子劑量轉換係數的曲線能有相當的一致性，如圖一，Hankins [1]的研究結果。目前大多數的緩速型中子偵檢器都是以 9 吋波那球為基本設計形式再加以微調改進。



圖一 傳統波那球的能量響應函數與中子通率劑量轉換係數的比較[1]。

然而，如圖二所示，傳統緩速型中子偵檢器的基本設計原理在中子能量高於 10 MeV 時會出現問題，中子通率劑量轉換係數

隨著中子能量的上升而上升，但是偵檢器的偵測效率在能量超過 10 MeV 時急速下降，甚至無法測量，因此若直接以偵檢器的測量結果作為中子劑量結果，會有嚴重低估高能中子貢獻的情況發生。傳統的反應器或其他的輻射源應用環境，鮮少有超過 10 MeV 的中子產生，因此問題並不大，但由於現今高能電子或質子加速器的應用越來越普遍，對於天然輻射環境的宇宙射線中子也越來越重視，因此相關工作環境中會有相當比例的高能中子存在，需要對高能中子進行正確的度量及劑量的評估，以達到輻射防護的目的。針對此一問題，雖然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 [2, 3]，其設計理念主要是在原本的中子緩速體中嵌入重金屬，利用(n, 2n)反應，增加偵檢器對高能中子的反應，改善高能區域偵測效率差的問題。圖二的 4P6_8 波那球就是一個類似設計的延伸能量中子偵檢器。但是這樣的偵檢器較為昂貴，且相較於傳統偵檢器來得笨重，不易攜帶移動，加上目前大多數的輻射工作場配備的中子偵檢器還是以傳統型式的偵檢器為主，因此本報告期望針對傳統的波那球，建立一套高能中子劑量的修正方式，避免中子劑量的低估，同時還能確認延伸能量中子偵檢器的適用範圍，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。



圖二 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 $H^*(10)$ 轉換係數的比較。

二、 研究目的

不論採用何種偵檢器或量測方法，都必須事前進行相關偵檢設備的性能測試與校正，以其該偵檢器之測量結果具有一定程度的可信度。本報告的主要工具為 PTB 所開發的 NEMUS 能譜儀 [4]，整套中子偵檢器包括 16 個不同尺寸的波那球，其中 12 個為傳統緩速體型式，4 個是延伸能量的設計。圖三是使用 MCNPX [5] 針對 NEMUS 能譜儀不同組態所計算得到的能量響應函數。標準中子場則提供中子偵檢器校正之用，國家標準實驗室利用量測與模擬的方式，對標準中子場之空間劑量率/通量率分布進行完整分析，藉此提出相對於標準中子場之偵檢器能譜修正因子予使用者，提供具有可追溯性且具公信力之準確中子劑量測量結果。核能研究所標準中子輻射場接受經濟部標準檢驗局委託，為國內唯一的中子標準建立及維持單位 [6]。然而，國內目前所提供之中子校正服務，主要是採用平均能量為 2

MeV 之 ^{252}Cf 自發分裂中子源。經由 ^{252}Cf 射源校正後之中子偵檢器，是否可如常應用於國內目前正蓬勃發展的高能加速器誘發中子輻射場？前述所指之高能中子劑量低估效應與修正有待進一步地釐清，這也是本報告的主要目的。

貳、研究方法與過程

一、 文獻探討

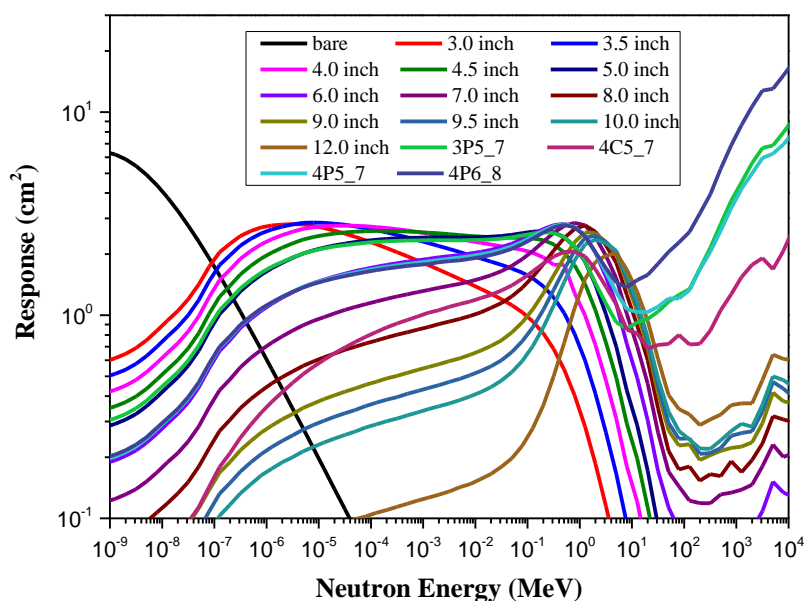
國外許多學者也有提出傳統偵檢器於高能中子場的劑量低估問題，例如美國史丹佛直線加速器中心(SLAC)的研究結果 [7]，若比較高能電子加速器屏蔽設施外之中子劑量，可發現當高能中子場內能量大於 20 MeV 中子所占比例逐漸提高時，採用 ^{252}Cf 或 $^{241}\text{Am-Be}$ 校正之 AB remmeter 將造成約 70% 的低估；實務上，史丹佛直線加速器中心直接將 AB remmeter 所得到的劑量值乘以兩倍，以彌補由於校正射源並非高能中子源所造成的誤差。而 Klett 等作者 [3] 於 2007 年在歐洲核子研究組織(CERN)的研究亦發現，對於能量達數百 MeV 之中子輻射場，傳統射源校正之中子劑量監測系統也有大約 30%~40% 的劑量低估。針對此一問題，Olsher 等人 [2] 為了提升偵檢器的響應範圍，使用了改進的中子 remmeter WENDI，響應函數可以到 5 GeV，Klett 等人 [3] 也提出了改量型式的 LB 6411 中子偵檢器，將響應函數延升至 GeV 的範圍。Roberto 作者 [8] 在 2011 年的回顧文章中更明確的指出，若待測工作場所之中子能譜與校正室中子能譜有明顯差異時，必須隨著待測輻射場的能譜不同，而必須有相對應的劑量修正因子。另外，Naismith [9] 與 Tanner [10] 等作者，則蒐集了一系列 20 MeV 以下之輻射場能譜，提出以不同校正射源校正的環境偵檢器以及個人劑量計，在不同待測能譜硬度下之量測結果的差異分析與歸納，對本報告有相當的參考價值。

綜合上述可以發現，射源能譜的特性可能對校正結果造成的影響，多針對能量 20 MeV 以下之中子場；至於高能中子場之環

境偵檢器與個人劑量計的結果差異比較，則多著重於單一輻射場的特性進行探討，缺乏多個輻射場間的綜合比較。有鑑於此，本報告將利用核研所的標準中子場，對波那球中子能溥儀系統進行校正，並針對過內現有或國際間重要的高能中子場進行分析，探討利用 ^{252}Cf 射源進行中子度量設備的校正過程中，可能引發的低估情形。除分析中子場之能量分布對於劑量低估情形的影響之外，另針對不同尺寸之波那球以及輻射場的特性，提出相對應之中子偵檢器能譜修正因子。

二、 研究方法

若是中子能譜已知，正確的評估劑量是一件相對簡單的工作。實際應用上，使用者通常很難知道工作環境中的中子能譜，更何況知道高能中子所佔的比例。參考 Naismith 與 Siebert 的研究結果 [9]，他們使用兩種不同尺寸的波那球(9"與 3")的讀值比值做為現場中子能譜軟硬的指標，同時對不同能譜的指標描繪校正曲線。此研究結果相當不錯，其理念對本報告有相當的參考價值，但是由於偵檢器本身的條件限制，相關校正因子僅適用於比較 10 MeV 以下的中子能譜差異。在 Wiegel 與 Alevera 的研究中 [4]可以發現，6 吋的傳統波那球與 4P6_8 延伸能量波那球在較低的能量區間，有相當類似的偵檢器響應函數，但是在中子能量大約 10 MeV 以上時，兩者的反應呈現相反的趨勢，如圖三所示，6 吋波那球的響應函數快速降低，而 4P6_8 延伸能量波那球的響應函數逐漸上升，因此本報告擬利用這兩種偵檢器的讀值比做為現場中子能譜的指標，嘗試區分輻射場中高能中子的貢獻，據此給予適當的偵檢器能譜修正因子。



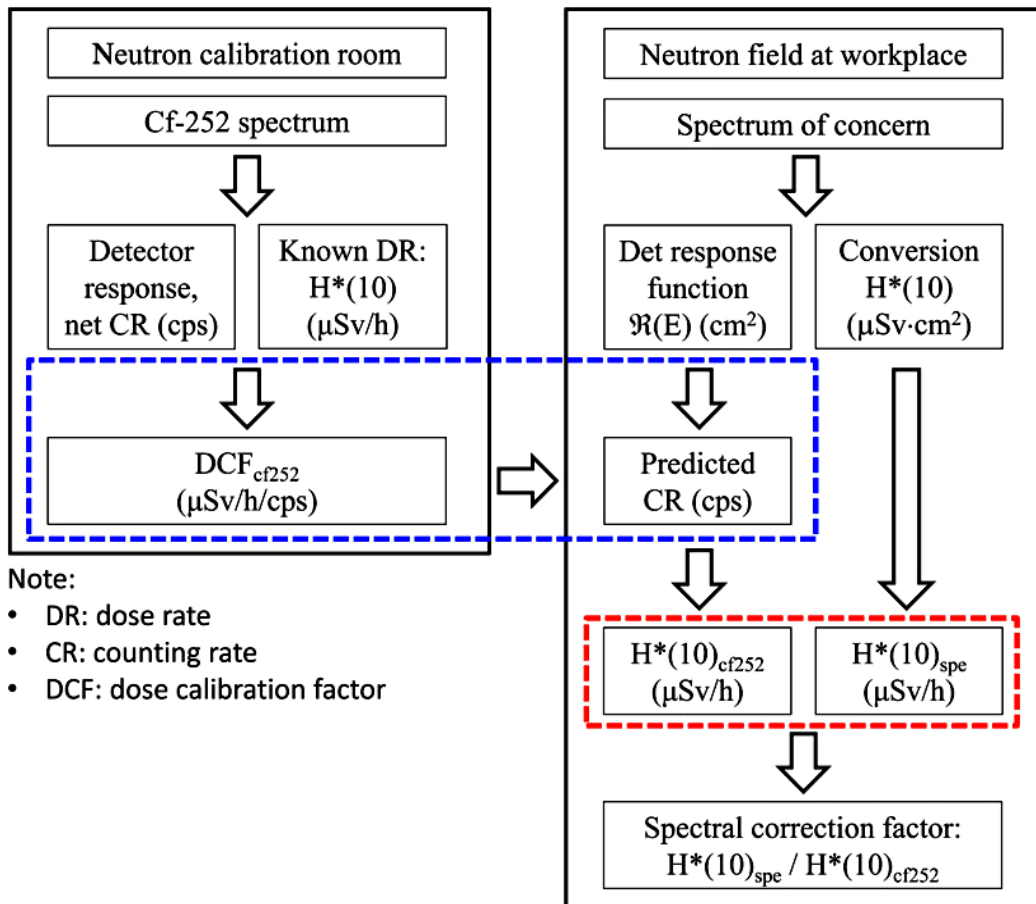
圖三 針對 PTB NEMUS 能譜儀，不同尺寸波那球之能量響應函數。

本報告預定要分析大量的中子能譜，並從中萃取相關趨勢。目前針對工作環境的中子能譜，最好的參考文獻是 IAEA-TRS-403 [11] 技術報告，其中包含了數百個各類工作環境的中子能譜，有核子反應器設施、用過核燃料處理與儲存場，更重要的是還包含許多具有高能中子環境的加速器設施。本報告期望利用這些能譜的分析結果，改善傳統中子偵檢器對於劑量低估的情形，未來可以供國內各醫療與研究設施還有各種高能中子輻射場做為參考，提升國內高能中子的度量與劑量評估能力，使輻射防護的工作更加完善。除此之外，我們也要延續高能中子輻射場的輻射偵檢器能譜修正因子研究，在原有的理論基礎上，進行四項精進探討。首先是建立自動化的分析程式，以快速進行大量的能譜分析，並減少計算上面的錯誤，以利後續研究進行。其次，本報告提供的偵檢器能譜修正因子，是以經 ^{252}Cf 校正之 9 吋波那球作為標準中子偵檢器經過一連串的計

算過程得到，為了擴展未來的應用範圍，我們必須驗證此偵檢器能譜修正因子，與校正射源及偵檢器的選擇關係不大。另外，如何利用簡易的現場量測，建立可靠的高能中子指標，是執行劑量低估修正的關鍵之一。本報告藉由上述方法，針對個別的輻射場計算出相對應的偵檢器能譜修正因子，用以彌補儀器校正過程中可能造成的劑量低估，期能提供相關結果與結論，給國內的醫療院所、加速器設施及主管機關參考，提升國內在高能中子輻射場劑量量測之技術水平，並提供輻射防護管制的需求參考。

本報告針對國內可能遇見，或國際間具有代表性的中子輻射場，進行一系列校正射源對偵檢器讀值的影響作探討以及分析，目的在於建立一套嚴謹的方式，將國內現存或未來數年內可能面臨之中子輻射場，以系統性的方式進行比較；另外，針對不同中子場域之能量分布特性，利用現存的量測誤差進行量化，提出實務的，對工作人員以及主管機關都通用的偵檢器能譜修正因子。圖四總結本報告計算偵檢器能譜修正因子的方法與評估流程，分為兩個步驟。首先，將感興趣的波那球中子偵檢器，以 ^{252}Cf 射源進行 ISO-8529-2 建議之標準程序校正，獲得該尺寸波那球在選定場域之偵檢器能譜修正因子，再利用蒙地卡羅計算機程式計算該波那球隊中子的能量響應函數，輻射場能譜與響應函數的積分結果可以做為偵檢器讀值的驗證。接著，將選定的工作場中子能譜與偵檢器的能量響應函數作積分，如圖四所示，進行偵檢器讀值的預估，並將其結果與前述以 ^{252}Cf 射源完成校正之結果進行比較，觀察利用 ^{252}Cf 作為校正

射源可能造成劑量低估的情形。



圖四 能譜修正因子計算評估之流程圖。

總結圖四的過程，本研究將 IAEA-TRS-403 報告中的能譜，分別對經由核研所校正之波那球響應函數及劑量轉換係數積分，得到經由 ^{252}Cf 校正的偵檢器測量的周遭環境劑量 $H^*(10)_{\text{cf252}}$ 以及透過計算的特定工作場中子能譜的周遭環境劑量 $H^*(10)_{\text{spe}}$ ，將計算與測量的結果相除得到之比值，即為本報告所需的偵檢器能譜修正因子，可以用來評估特定工作場所中子劑量的測量誤差。同樣的，能譜對有效劑量轉換係數積分可以得到有效劑量。綜合以上資訊，將各個能譜的偵檢器能譜修正因子作以下分析：(1)將響應函數與劑量轉換係數相近的 9 吋波那

球的偵檢器能譜修正因子，對各能譜高能中子比例作圖，並畫出一次與二次擬合曲線。(2)將具有良好高能中子響應函數的4P6_8延伸能量波那球之偵檢器能譜修正因子，對各能譜的高能中子比例作圖，畫出一次與二次擬和曲線。(3)以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吋波那球的比值作圖，對讀值比大於1之數據點作一次或二次擬合曲線。另外，中子能譜選擇，除了之前所選的十個輻射場能譜，本報告也加入了IAEA-TRS-403報告中240餘種工作場所中子能譜進行研究。由於能譜數量龐大，本報告針對圖四之偵檢器能譜修正因子分析流程與基本架構，建立MATLAB自動化分析程式，爾後類似的分析僅須提供校正射源之能譜、劑量轉換係數、偵檢器的響應函數，以及我們感興趣的工作場中子能譜，即可快速且正確地得到能譜修正因子，並進行誤差傳遞分析與靈敏度、不確定性等分析。

參、主要發現與結論

一、 結果與討論

(一)自動化的程式開發

我們建立了一個使用 Matlab 作為開發軟體的程式，可以直接萃取 excel 檔中偵檢器響應函數、輻射工作場中子能譜、劑量轉換係數等等參數，並直接作如圖四的流程計算，得出我們所關心的一系列偵檢器能譜修正因子分析，以及靈敏度分析，即圖五至圖十二，加速我們計算分析的速度，以及減少人工計算時所造成的錯誤。詳細的程式碼如附錄所示。

(二)高能中子能譜指標

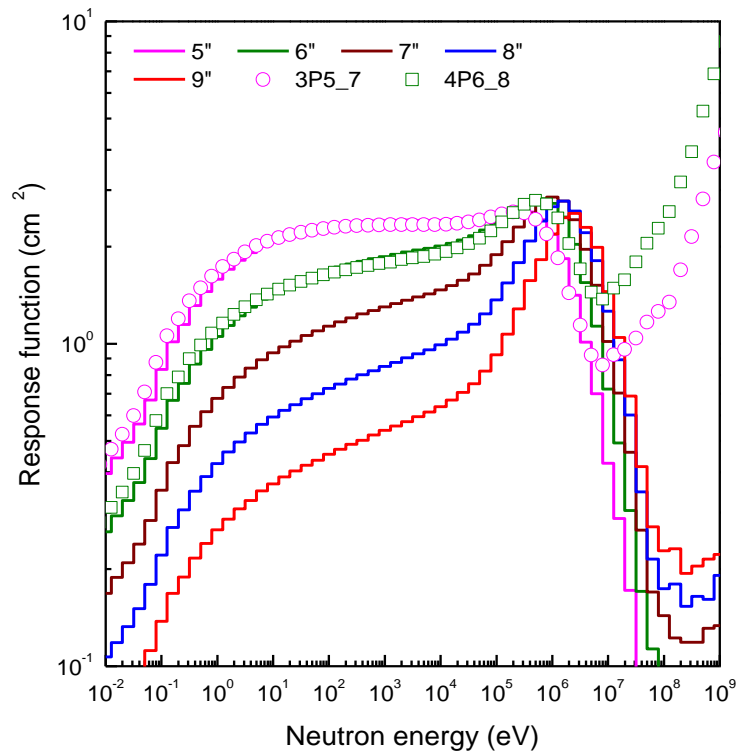
本報告的目的在於提供合適的偵檢器能譜修正因子，讓傳統的中子偵檢器也能被應用在高能中子環境中，而偵檢器能譜修正因子與輻射場中子能量的分佈有很大的關係。我們以偵檢器的響應函數與中子場的特性作為基礎，進行不同輻射工作場的分析，嘗試利用高能中子在輻射場中的比例，去描述中子輻射場的特性，去合理的解釋為什麼傳統的中子偵檢器沒有辦法反映出高能中子對劑量的貢獻。假如輻射場的中子能譜已知，我們可以很直接地計算出高能中子($E > 10 \text{ MeV}$)在輻射場所佔的比例。但是在大多數的情況下，我們並不清楚輻射場的中子能量分布，此時，我們必須依賴現場的量測數據，給我們一些有關中子能量分布的訊息。我們藉由量測的數據建立高能中子指標，來表示高能中子在輻射場中的比例。

在過去的研究中，我們選用 4P6_8 延伸能量波那球與 6 吋波

那球作為組合來建立高能中子指標，表示高能中子在輻射場的重要性。之所以選擇這兩個波那球，是因為他們在低能量區有著幾乎相同的響應函數，且在 10 MeV 以上的能量範圍有明顯的差異，4P6_8 延伸能量波那球的響應函數大幅上升，而 6 吋波那球的響應函數則大幅降低，如圖五所示，由此可知，兩者的讀值差異幾乎由高能中子的貢獻所導致。在觀察所有的波那球響應函數之後，發現延伸能量波那球 3P5_7 與 5 吋波那球也有類似的結果。因此，這樣一組波那球的讀值比，可以很合理的被用來表示高能中子在輻射場所佔比例的多寡。

我們另外對所有可用的 NEMUS 能譜儀做進一步的分析，歸納出三個結論，可以用來幫助選擇偵檢器的組合，得到高能中子指標。第一，延伸能量波那球的聚乙烯層厚度，必須跟搭配的標準波那球尺寸一致，確保兩者在低於 10 MeV 的能量區間有一致的響應函數；第二，嵌入金屬鉛的延伸能量波那球比起嵌入金屬銅的延伸能量波那球是更好的，因為鉛有較好的中子增值能力，對於高能中子的響應會比較好，而銅並不是一個能夠良好的反應高能中子貢獻的嵌入材料。這部分可以藉由比較圖五中，嵌入鉛與嵌入銅的延伸能量波那球響應函數得知。良好的中子增值能力可以有效提升高能中子的偵測效率之外，在高能區的響應函數若與標準波那球的差異越大，越能夠得到顯著的高能中子場特徵，即高能中子指標；第三，嵌入的金屬層厚度不能太薄，根據我們的實驗結果，大約 1 吋的金屬層厚度是最合適的，可以提供足夠的高能中子響應函數。不論是 4P6_8/6 吋或是 3P5_7/5 吋的波那球組合，都符合以上三點要求，因此都

符合這篇報告的功能訴求，至於其他的波那球組合就不是那麼建議了。



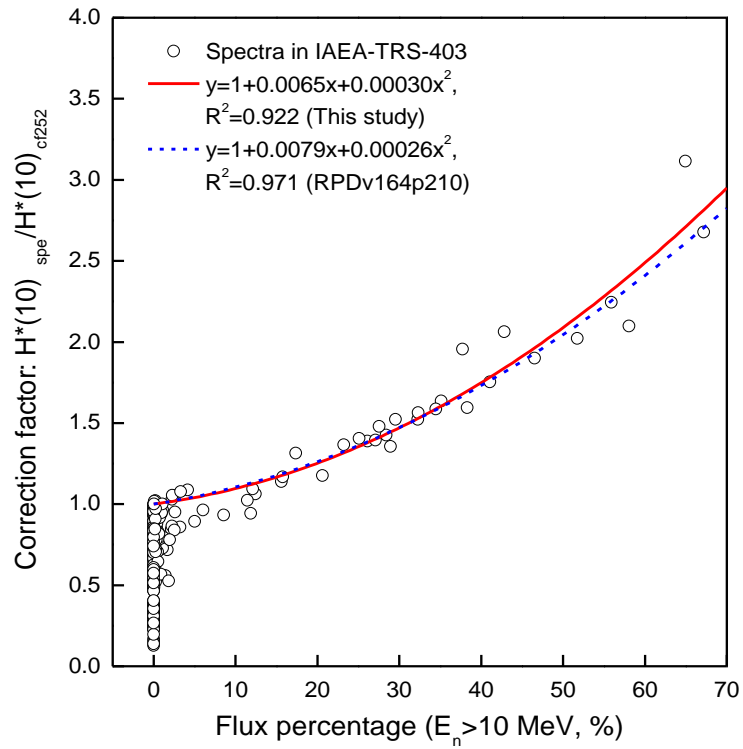
圖五 不同偵檢器之能量響應函數。

(三)偵檢器能譜修正因子

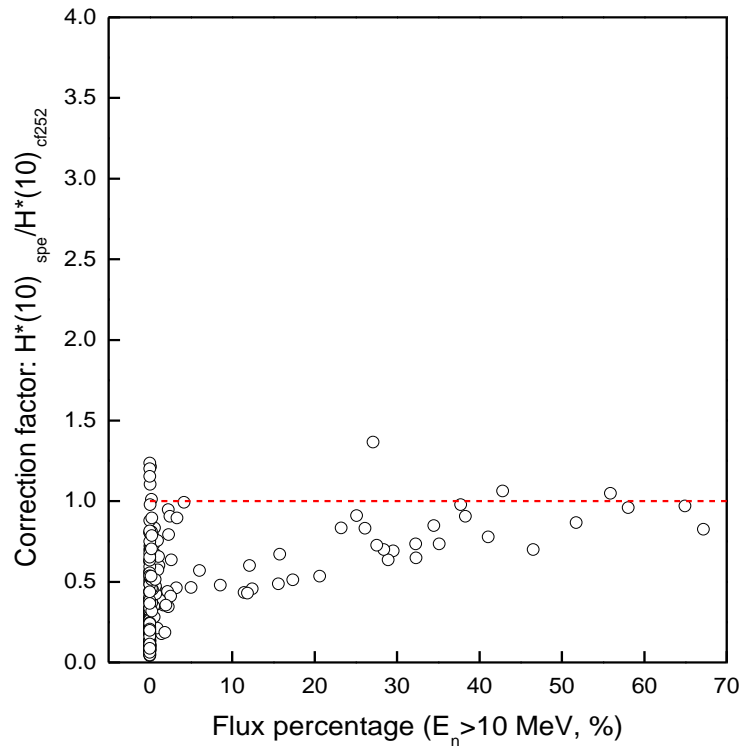
圖六與圖八即為我們所求，以九吋波那球為例子計算出的偵檢器能譜修正因子，也是本報告所提供之偵檢器能譜修正因子建議值。其中圖六是偵檢器能譜修正因子對高能中子比例作圖，圖八為偵檢器能譜修正因子對高能中子指標作圖。

比較圖六與圖八，兩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。

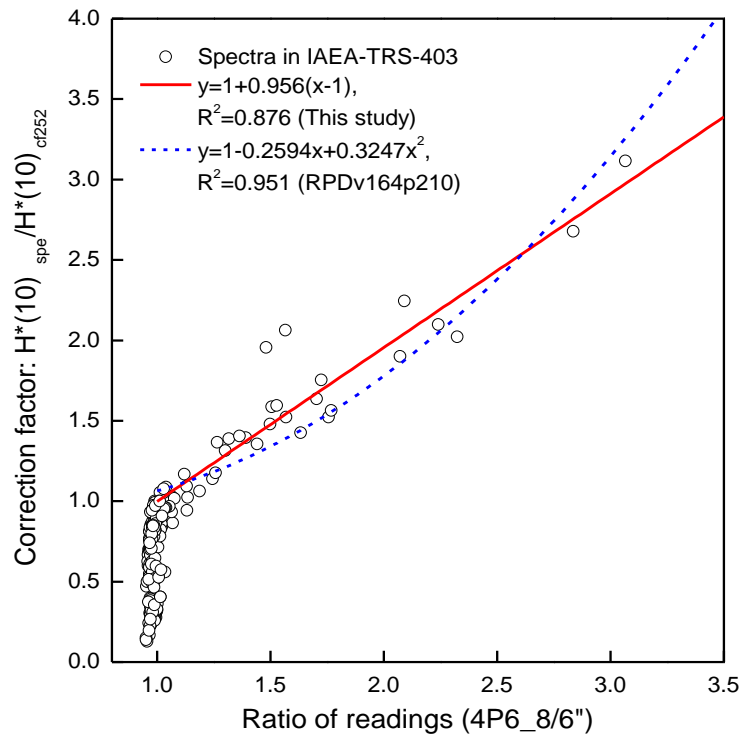
圖七為以 4P6_8 延伸能量型波那球所計算出來之偵檢器能譜修正因子。由計算顯示之偵檢器能譜修正因子大多都在 1 附近，可以驗證延伸能量型波那球對於高能中子的量測比起傳統緩速型波那球要改善許多，基本上可以良好的解決高能中子劑量低估的問題。



圖六 9 吋波那球之偵檢器能譜修正因子對高能中子比例作圖。



圖七 4P6_8 延伸能量波那球之偵檢器能譜修正因子對高能中子比例作圖。

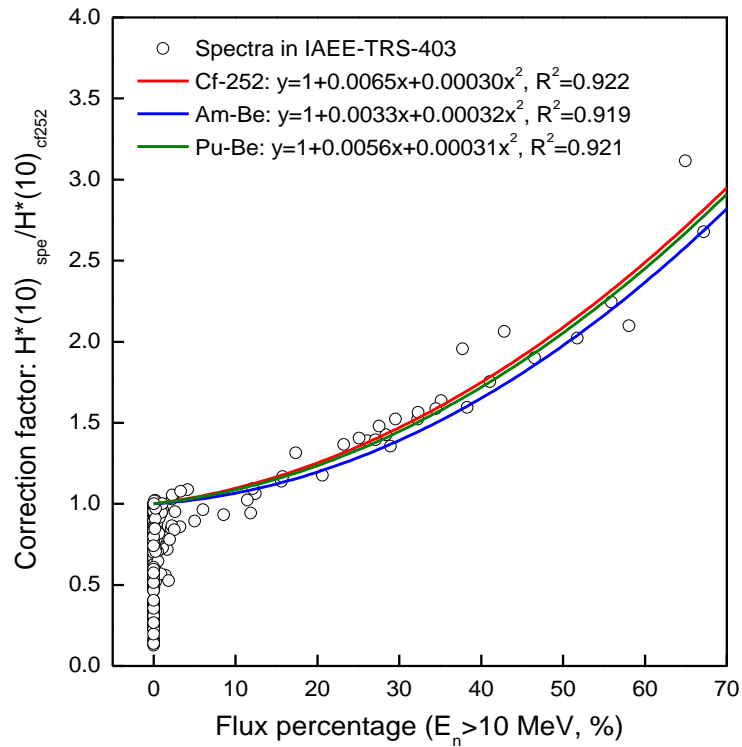


圖八 9 吋波那球之偵檢器能譜修正因子對 4P6_8 延伸能量波那球與 6 吋波那球之讀值比作圖。

(四)不同校正射源的影響

圖六與圖八所得到之偵檢器能譜修正因子，都是使用經由 ^{252}Cf 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 ^{252}Cf 射源，能譜大致可以用峰值在2 MeV之馬克士威-波茲曼分布來表示。 $^{241}\text{Am-Be}$ 和 $^{239}\text{Pu-Be}$ 也是經常被用來校正偵檢器之標準射源，而因為Be會產生 (α, n) 反應，因此相較於 ^{252}Cf 有著更複雜的能譜，在約3.5 MeV、5 MeV及8 MeV有峰值，平均能量也較 ^{252}Cf 來得高，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，是否能用在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 $^{241}\text{Am-Be}$ 和 $^{239}\text{Pu-Be}$ 。同樣使用九吋標準波那球為例，圖九標示了三條分別利用 ^{252}Cf 、 $^{241}\text{Am-Be}$ 與 $^{239}\text{Pu-Be}$ 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。而圖中的資料點僅以 ^{252}Cf 為校正射源之偵檢器所計算出的結果作為代表繪出，讓圖表更為整潔。由圖九的結果可以得知，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，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。



圖九 經由三種不同校正射源校正之 9 吋波那球之偵檢器能譜修正因子對高能中子比例作圖。

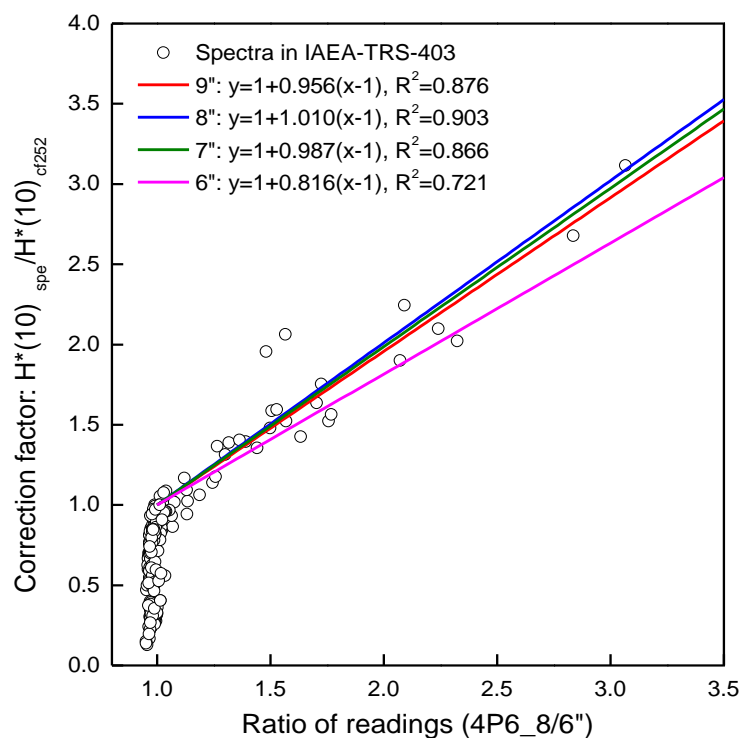
(五)不同中子偵檢器的影響

圖六與圖八所得到的偵檢器能譜修正因子，都是利用 9 吋的標準波那球所計算出來的。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，圖六與圖八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，我們另外取尺寸較小的三個標準波那球(6 吋、7 吋及 8 吋)，用來探討當不同的偵檢器響應函數(如圖五所示)，對於偵檢器能譜修正因子的影響。計算結果如圖十，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。為了畫面整潔，資料點同樣以 9 吋波那球所計算的結果表示。

圖十中，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。

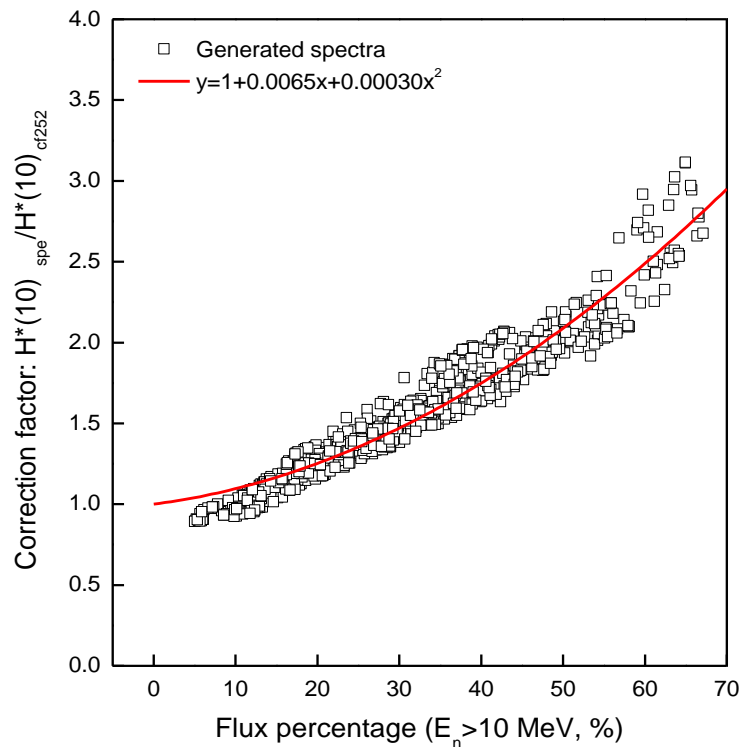


圖十 不同尺寸之波那球之偵檢器能譜修正因子對 4P6_8 延伸能量波那球與 6 吋波那球之讀值比作圖。

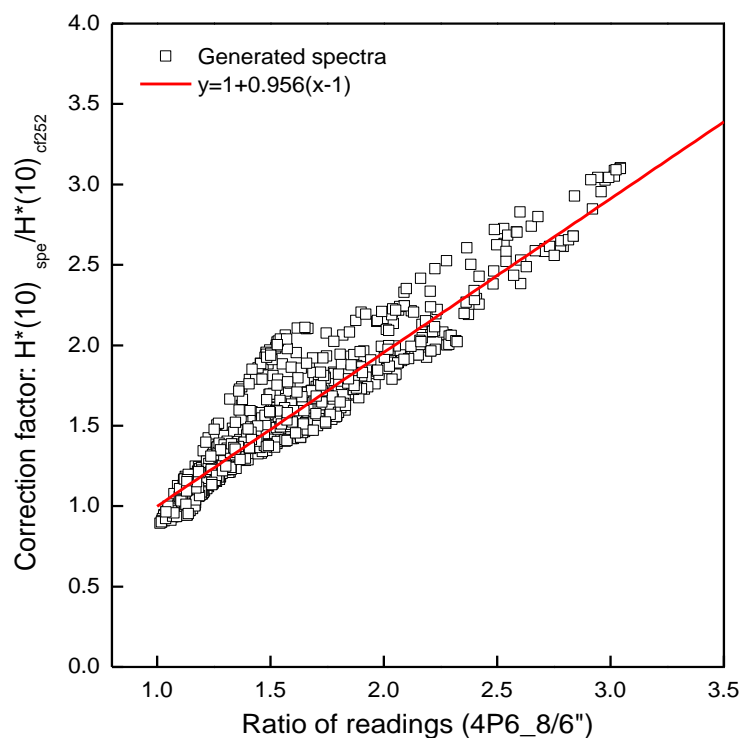
(六) 偵檢器能譜修正因子的驗證

雖然 IAEA-TRS-403 報告已經包含了大量來自各個輻射工作場域以及許多文獻所提供的中子能譜，但還是不能用來代表所有的工作場中子能譜。為了去驗證我們所提供的偵檢器能譜修正因子的可行性，我們利用演算法產生人造的能譜，來計算偵檢器能譜修正因子。這個人造能譜是利用任意兩的 IAEA-TRS-403 報告中，含有足夠高能中子(高能中子比例大於 10%)的中子能譜，先歸一化後，以亂數產生一組權重，將兩個歸一化後的能譜利用此權重來疊加產生。如此產生的人造能譜，在物理上是有意義的，非常適合用來測試我們所計算出的偵檢器能譜修正因子的實用性。

圖十一與圖十二分別是圖六與圖八的驗證。圖十一與圖十二的兩條偵檢器能譜修正因子擬合曲線，是前面計算出來的結果，而資料點都是由隨機產生的 1000 個人造中子能譜，搭配 9 吋標準波那球所計算出來的。我們可以從圖中很明顯地看出，預測的曲線和我們利用人造能譜得出的偵檢器能譜修正因子有非常一致的趨勢，圖十一有 90% 的數據誤差在 10% 以內，圖十二誤差稍微大一些，在 15% 之內。由此可以總結，前面所建議的偵檢器能譜修正因子圖表(圖六與圖八)對於我們的研究目的，還有假設，都設可以被接受與使用的。



圖十一 利用隨機產生之中子能譜所計算出來的偵檢器能譜修正因子對高能中子比例作圖。



圖十二 利用隨機產生之中子能譜所計算出來的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。

二、 結論與未來方向

對於輻射防護的用途，一般中子偵檢器都會先經由如 ^{252}Cf 等標準射源校正之後，才被使用在各個工作場所。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，使用者必須注意可能導致的誤差。關於傳統的緩速型中子偵檢器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，但高能中子對於劑量的貢獻非常重要。本報告提供一個可以實際被應用的中子偵檢器能譜修正因子，用來修正這些傳統的緩速型中子偵檢器在高中子輻射場的劑量低估問題，本研究並驗證了延伸能量型的中子偵檢器在

高能輻射場中有著令人滿意的表現。當有高能中子存在的輻射場中，劑量的修正是非常必要且重要的，修正前後差值可以達數倍之多。而要得到中子偵檢器能譜修正因子，必須先了解工作場所輻射場的特性，尤其是估計高能中子所佔的比例，亦或是經由量測得到本研究建議的高能中子指標，二者皆用來表示高能中子對於該輻射場的重要性，並據此得到適當的能譜修正因子。本報告提供了經 ^{252}Cf 校正的 9 吋標準波那球的偵檢器能譜修正因子，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(高能中子指標)做圖。

除此建議能譜修正因子之外，為了得到更真實的擬合曲線，我們收集了大量的中子能譜，也提出並回答了兩個實際應用上的問題，在使用不同的偵檢器校正射源或是不同的中子偵檢器的情況下，偵檢器能譜修正因子是否也能夠被合理的使用。後續進行的一系列靈敏度分析發現，在選擇不同的校正射源，對於偵檢器能譜修正因子的影響不大；選擇不同尺寸的標準波那球，對偵檢器能譜修正因子的影響也不顯著，這樣的結果間接證實本研究建議的能譜修正因子較類似一個中子輻射場的特性參數，而與所使用緩速型偵檢器的廠牌或性質沒有明顯關係。總而言之，本報告建議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。

本研究的能譜修正因子從理論計算與文獻案例證實是合理且可行的，但是尚未直接應用於國內實際的輻射工作場所。質子與重粒子的癌症治療以及其他高能加速器應用在國內正逐漸

發展，相對應的高能中子輻射場也越來越普遍，除了建議盡量使用較貴重的延伸能量型中子偵檢器之外，工作場常常也還有許多傳統型式的緩速型中子偵檢器。有鑑於此，我們建議未來研究方向可朝實務應用面來探討，測試本研究結果應用於國內相關案例的成效，例如林口長庚醫院的質子加速器工作環境，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。我們希望未來能夠實際在該醫院應用本報告所提出的偵檢器中子能譜修正方法，嚴謹檢驗本報告所提供的偵檢器能譜修正因子於實際加速器高能中子輻射場的應用情形，並探討各種可能造成差異的因素，以及改善的方式，使本報告所提出的偵檢器能譜修正因子能達到最完善的應用。

肆、参考文献

1. Hankins, D. E. Determination of the Neutron Contribution to the Rem Dose. USAEC Report LA-DC-7323, Los Alamos Scientific Laboratory (1965).
2. Olsher, R.H., Hsu, H.H., Beverding, A., Kleck, J.H., Casson, W.H., Vasilik, D.G., Devine, R.T. WENDI: an improved neutron rem meter. *Health Phys.* 79, 170-181 (2000).
3. Klett, A., Mayer, S., Theis, C., Vincke, H. A neutron dose rate monitor for high energies. *Rad. Meas.* 41, S279-S282 (2007).
4. Wiegel, B. and Alevera, A.V. NEMUS-the PTB neutron multisphere spectrometer: Bonner spheres and more. *Nucl. Instrum. Method A* 476, 36-42 (2002).
5. Pelowitz, D.B. (Ed.) MCNPX user's manual, Version 2.7.0, LA-CP-11-00438, Los Alamos National Laboratory (Los Alamos, NM, USA) (2011).
6. Reference Neutron Radiations—Part 1: Characteristics and methods of product. International Organization for Standardization, ISO 8529-1 (2001).
7. Fassò, A., Liu, J.C., 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.
8. Roberto Bedogni., Neutron spectrometry with Bonner Spheres for area monitoring in particle accelerators, *Radiation Protection Dosimetry*, 146 (2011) 383-394.
9. 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).

10. R. J. Tanner., D. J. Thomas., D. T. Bartlett., 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).
11. International Atomic Energy Agency. Compendium of neutron spectra and detector responses for radiation protection purposes. Technical Reports Series No. 403. IAEA (2001).

附錄：程式碼

在同目錄下放入原始資料 excel 檔以及所有其他函式之.m 檔，並執行 MainProgram.m，即可得到本報告中圖五至圖十二的分析圖檔。未來若要加入其他能譜作分析，僅需在 excel 檔加入對應之資料，並修改 MainProgram.m 中粗體部分的讀檔範圍，即可快速完成分析。

MainProgram.m

```
clc
clear

%% extract data from file
DetectorResponseFunction=xlread('Data4SpectralCorrectionFactors.xlsx','DetRF&Src','C2:I73');
Energy=xlread('Data4SpectralCorrectionFactors.xlsx','DetRF&Src','B3:B73');
H10=xlread('Data4SpectralCorrectionFactors.xlsx','CF_H(10)','C3:C73');
NeutronSpectrum=xlread('Data4SpectralCorrectionFactors.xlsx','NSpe245','C5:IM75');

%% counting rate
CountingRate=fCountingRate(DetectorResponseFunction,NeutronSpectrum);

%% dose calibration factor
DoseCalibrationFactor=(1/3600)*[0.733,0.592,0.544,0.567,0.637,0.776,0.615;...
    0.775, 0.608,0.561,0.572,0.637,0.759,0.601;...
    1.157,0.833,0.706,0.663,0.671,1.051,0.763;...
    1.091,0.803,0.684,0.641,0.647,1.006,0.746
];

%% spectral correction factor
SpectralCorrectionFactor=fSpectralCorrectionFactor(NeutronSpectrum,H10,DoseCalibrationFactor,CountingRate);

%% high energy neutron percentage
HighEnergyPercentage=sum(NeutronSpectrum(52:end,:),1)./sum(NeutronSpectrum(1:end,:))*100;
```

```

%% Generate new Spectrum

Nsamples=1000;

NewSpectrum=fGenerateNewSpectrum(NeutronSpectrum,HighEnergyPercentage,Nsamples);

CountingRate_new=fCountingRate(DetectorResponseFunction,NewSpectrum);

SpectralCorrectionFactor_new=fSpectralCorrectionFactor(NewSpectrum,H10,DoseCalibrationFactor,CountingRate_new);

HighEnergyPercentage_new=sum(NewSpectrum(52:end,:),1)./sum(NewSpectrum(1:end,:))*100;

%% fig 5 Detector Response Function vs Energy

figure

stairs(Energy,DetectorResponseFunction(:,1),'bx-')

hold on

stairs(Energy,DetectorResponseFunction(:,2),'rx-')

hold on

stairs(Energy,DetectorResponseFunction(:,3),'gx-')

hold on

stairs(Energy,DetectorResponseFunction(:,4),'ro-')

hold on

stairs(Energy,DetectorResponseFunction(:,5),'mx-')

hold on

stairs(Energy,DetectorResponseFunction(:,6),'cx-')

hold on

stairs(Energy,DetectorResponseFunction(:,7),'kx-')

set(gca,'XScale','log')

set(gca,'YScale','log')

axis square

axis([10^-2, 10^9,10^-1,10]);

xlabel_figs5={'Neutron Energy (eV)'};

ylabel_figs5={'Response Function (cm^2)'};

xlabel(Xlabel_figs5,'FontWeight','bold','FontSize',16,'FontAngle','italic')

```

```

ylabel(YLabel_fig5,'FontWeight','bold','FontSize',16,'FontAngle','italic')
legend('5"', '6"', '7"', '8"', '9"', '3P5_7', '4P6_8', 'Location', 'BestOutside')

%% fig 6 Spectral Correction Factor (9") vs High Energy Percentage
figure
XAxis_fig6=HighEnergyPercentage;
YAxis_fig6=SpectralCorrectionFactor(1, :, 5);
XAxis_HighEnergy_fig6=XAxis_fig6(HighEnergyPercentage>10);
Yaxis_HighEnergy_fig6=YAxis_fig6(HighEnergyPercentage>10);
[fitobject_fig6,gof_fig6]=fit_fig6(XAxis_HighEnergy_fig6,Yaxis_HighEnergy_fig6,XAxis_fig6,YAxis_fig6);

%% fig 7 Spectral Correction Factor (4P6_8) vs High Energy Percentage
figure
XAxis_fig7=HighEnergyPercentage;
YAxis_fig7=SpectralCorrectionFactor(1, :, 7);
scatter(XAxis_fig7,YAxis_fig7)
x_fig7=linspace(1,100,500);
line(x_fig7,ones(1,length(x_fig7)),'LineStyle','--','Color','r')
XLabel_fig7={'Flux Percentage E_n >10MeV'};
YLabel_fig7={'Correction Factor H*(10)_{spe} /H*(10)_{cf252}'};
xlabel(XLabel_fig7,'FontWeight','bold','FontSize',16,'FontAngle','italic')
ylabel(YLabel_fig7,'FontWeight','bold','FontSize',16,'FontAngle','italic')
axis square
axis([0,70,0,4.5])

%% fig 8 Spectral Correction Factor (9") vs High Energy Neutron Index
figure
XAxis_fig8=CountingRate(:, : , 7)./CountingRate(:, : , 2);
YAxis_fig8=SpectralCorrectionFactor(1, :, 5);
XAxis_HighEnergy_fig8=XAxis_fig8(HighEnergyPercentage>10);

```



```

Yaxis_HighEnergy_fig8=YAxis_fig8(HighEnergyPercentage>10);
[fitobject_fig8,gof_fig8]=fit_fig8(XAxis_HighEnergy_fig8,Yaxis_HighEnergy_fig8,XAxis_fig8,YAxis_fig8);

%% fig 9 Spectral Correction Factor (Cf/Am-Be/Pu-Be) vs High Energy Percentage
XAxis_fig9=HighEnergyPercentage;
XAxis_HighEnergy_fig9=XAxis_fig9(HighEnergyPercentage>10);
YAxis_CfMeas=SpectralCorrectionFactor(1,.,5);
YAxis_HighEnergy_CfMeas=YAxis_CfMeas(HighEnergyPercentage>10);
YAxis_CfCalc=SpectralCorrectionFactor(2,.,5);
YAxis_HighEnergy_CfCalc=YAxis_CfCalc(HighEnergyPercentage>10);
YAxis_AmBe=SpectralCorrectionFactor(3,.,5);
YAxis_HighEnergy_AmBe=YAxis_AmBe(HighEnergyPercentage>10);
YAxis_PuBe=SpectralCorrectionFactor(4,.,5);
YAxis_HighEnergy_PuBe=YAxis_PuBe(HighEnergyPercentage>10);
[fitobject_CfMeas,gof_CfMeas]=fit_fig9(XAxis_HighEnergy_fig9,YAxis_HighEnergy_CfMeas);
[fitobject_CfCalc,gof_CfCalc]=fit_fig9(XAxis_HighEnergy_fig9,YAxis_HighEnergy_CfCalc);
[fitobject_AmBe,gof_AmBe]=fit_fig9(XAxis_HighEnergy_fig9,YAxis_HighEnergy_AmBe);
[fitobject_PuBe,gof_PuBe]=fit_fig9(XAxis_HighEnergy_fig9,YAxis_HighEnergy_PuBe);
figure
scatter(XAxis_fig9,YAxis_CfMeas);
x_fig9=linspace(1,80,200);
y_Cf=fitobject_CfMeas.p1*(x_fig9.^2)+(fitobject_CfMeas.p2*x_fig9)+fitobject_CfMeas.p3;
p1_Cf=num2str(fitobject_CfMeas.p1,4);
p2_Cf=num2str(fitobject_CfMeas.p2,4);
p3_Cf=num2str(fitobject_CfMeas.p3);
Rs_Cf=num2str(gof_CfMeas.rsquare,4);
Equation_Cf=[p1_Cf,'x^2+',p2_Cf,'x+',p3_Cf,' R^2=',Rs_Cf];
y_AmBe=fitobject_AmBe.p1*(x_fig9.^2)+(fitobject_AmBe.p2*x_fig9)+fitobject_AmBe.p3;
p1_AmBe=num2str(fitobject_AmBe.p1,4);
p2_AmBe=num2str(fitobject_AmBe.p2,4);

```

```

p3_AmBe=num2str(fitobject_AmBe.p3);
Rs_AmBe=num2str(gof_AmBe.rsquare,4);
Equation_AmBe=[p1_AmBe,'x^2+',p2_AmBe,'x+',p3_AmBe,' R^2=',Rs_AmBe];
y_PuBe=fitobject_PuBe.p1*(x_fig9.^2)+(fitobject_PuBe.p2*x_fig9)+fitobject_PuBe.p3;
p1_PuBe=num2str(fitobject_PuBe.p1,4);
p2_PuBe=num2str(fitobject_PuBe.p2,4);
p3_PuBe=num2str(fitobject_PuBe.p3);
Rs_PuBe=num2str(gof_PuBe.rsquare,4);
Equation_PuBe=[p1_PuBe,'x^2+',p2_PuBe,'x+',p3_PuBe,' R^2=',Rs_PuBe];
hold on
plot(x_fig9,y_Cf,'r')
hold on
plot(x_fig9,y_AmBe,'b')
hold on
plot(x_fig9,y_PuBe,'g')
XLabel_fig9={'Flux Percentage E_n >10MeV'};
YLabel_fig9={'Correction Factor H*(10)_{spe} /H*(10)_{cf252}'};
xlabel(XLabel_fig9,'FontWeight','bold','FontSize',16,'FontAngle','italic')
ylabel(YLabel_fig9,'FontWeight','bold','FontSize',16,'FontAngle','italic')
legend('Data',['Cf-252 ' Equation_Cf],[ 'Am-Be ' Equation_AmBe],[ 'Pu-Be ' Equation_PuBe],'Location','NorthWest');
axis square
axis([0,70,0,4])

%% fig 10 Spectral Correction Factor (6"/7"/8"/9") vs High Energy Neutron Index
XAxis_fig10=CountingRate(:,7)./CountingRate(:,2);
YAxis_9=SpectralCorrectionFactor(1,5);
YAxis_8=SpectralCorrectionFactor(1,4);
YAxis_7=SpectralCorrectionFactor(1,3);
YAxis_6=SpectralCorrectionFactor(1,2);
YAxis_HighEnergy_9=YAxis_9(YAxis_9>1);

```

```

XAxis_HighEnergy_9=XAxis_fig10(YAxis_9>1);
YAxis_HighEnergy_8=YAxis_8(YAxis_8>1);
XAxis_HighEnergy_8=XAxis_fig10(YAxis_8>1);
YAxis_HighEnergy_7=YAxis_7(YAxis_7>1);
XAxis_HighEnergy_7=XAxis_fig10(YAxis_7>1);
YAxis_HighEnergy_6=YAxis_6(YAxis_6>1);
XAxis_HighEnergy_6=XAxis_fig10(YAxis_6>1);
[fitobject_9,gof_9]=fit_fig10(XAxis_HighEnergy_9,YAxis_HighEnergy_9);
[fitobject_8,gof_8]=fit_fig10(XAxis_HighEnergy_8,YAxis_HighEnergy_8);
[fitobject_7,gof_7]=fit_fig10(XAxis_HighEnergy_7,YAxis_HighEnergy_7);
[fitobject_6,gof_6]=fit_fig10(XAxis_HighEnergy_6,YAxis_HighEnergy_6);
figure
scatter(XAxis_fig10,YAxis_9)
x_fig10=linspace(1,6,100);
y_9=fitobject_9.p1*x_fig10+fitobject_9.p2;
p1_9=num2str(fitobject_9.p1,4);
p2_9=num2str(fitobject_9.p2,4);
Rs_9=num2str(gof_9.rsquare,4);
Equation_9=[p1_9,'x+',p2_9,' R^2=',Rs_9];
y_8=fitobject_8.p1*x_fig10+fitobject_8.p2;
p1_8=num2str(fitobject_8.p1,4);
p2_8=num2str(fitobject_8.p2,4);
Rs_8=num2str(gof_8.rsquare,4);
Equation_8=[p1_8,'x+',p2_8,' R^2=',Rs_8];
y_7=fitobject_7.p1*x_fig10+fitobject_7.p2;
p1_7=num2str(fitobject_7.p1,4);
p2_7=num2str(fitobject_7.p2,4);
Rs_7=num2str(gof_7.rsquare,4);
Equation_7=[p1_7,'x+',p2_7,' R^2=',Rs_7];
y_6=fitobject_6.p1*x_fig10+fitobject_6.p2;

```

```

p1_6=num2str(fitobject_6.p1,4);
p2_6=num2str(fitobject_6.p2,4);
Rs_6=num2str(gof_6.rsquare,4);
Equation_6=[p1_6,'x+',p2_6,' R^2=',Rs_6];
hold on
plot(x_fig10,y_9,'r')
hold on
plot(x_fig10,y_8,'c')
hold on
plot(x_fig10,y_7,'b')
hold on
plot(x_fig10,y_6,'g')
legend('Data', ['9" ' Equation_9],[ '8" ' Equation_8],...
       ['7" ' Equation_7],[ '6" ' Equation_6], 'Location','NorthWest' );
XLabel_fig10={'Ratio of Readings (4P6_{8}/6")'};
YLabel_fig10={'Correction Factor H*(10)_{spe} /H*(10)_{cf252}'};
xlabel(XLabel_fig10,'FontWeight','bold','FontSize',16,'FontAngle','italic')
ylabel(YLabel_fig10,'FontWeight','bold','FontSize',16,'FontAngle','italic')
axis square
axis([0,3.5,0,4])

%% fig 11
figure
XAxis_new_fig11=HighEnergyPercentage_new;
YAxis_new_fig11=SpectralCorrectionFactor_new(1, :,5);
XAxis_HighEnergy_fig11=HighEnergyPercentage(HighEnergyPercentage>10);
YAxis_HighEnergy_fig11=YAxis_fig11(HighEnergyPercentage>10);
XAxis_fig11=HighEnergyPercentage;
YAxis_fig11=SpectralCorrectionFactor(1, :,5);
[fitobject_fig11,gof_fig11]=fit_fig11(XAxis_HighEnergy_fig11,YAxis_HighEnergy_fig11,XAxis_new_fig11,YAxis_new_f

```

```

%% fig 12
figure
XAxis_fig12=CountingRate(:,7)./CountingRate(:,2);
YAxis_fig12=SpectralCorrectionFactor(1,5);
XAxis_HighEnergy_fig12=XAxis_fig12(HighEnergyPercentage>10);
YAxis_HighEnergy_fig12=YAxis_fig12(HighEnergyPercentage>10);
XAxis_new_fig12=CountingRate_new(:,7)./CountingRate_new(:,2);
YAxis_new_fig12=SpectralCorrectionFactor_new(1,5);
[fitobject_fig12,gof_fig12]=fit_fig12(XAxis_HighEnergy_fig12,YAxis_HighEnergy_fig12,XAxis_new_fig12,YAxis_new_

```

fCountingRate.m

```

function out=fCountingRate(DetectorResponseFunction,NeutronSpectrum)

    for i=1:size(DetectorResponseFunction,2) % 偵檢器數量 7 個
        for j=1:size(NeutronSpectrum,2) % 能譜數量 245 個

            CountingRatebyEnergy(:,j,i)=DetectorResponseFunction(:,i).*NeutronSpectrum(:,j);

        end
    end

    out=sum(CountingRatebyEnergy(1:end, :, 1));

end

```

fSpectralCorrectionFactor.m

```

function
out=fSpectralCorrectionFactor(NeutronSpectrum,H10,DoseCalibrationFactor,CountingRate)

    for i=1:size(NeutronSpectrum,2) % 能譜數量 245 個

        H10byEnergy(:,i)=10^-6*H10.*NeutronSpectrum(:,i);

    end

    H10spe=sum(H10byEnergy(1:end, :, 1));

```

```

for j=1:size(DoseCalibrationFactor,1) % DoseCalibrationFactor 校正射源數量 4 種
    for k=1:size(DoseCalibrationFactor,2) %DoseCalibrationFactor 偵檢器數量 7 個
        H10cf252(j,:,k)=DoseCalibrationFactor(j,k)*CountingRate(:,k);
        out(j,:,k)=H10spe./H10cf252(j,:,k);
    end
end
end
end

```

fGenerateNewSpectrum.m

```

function out=fGenerateNewSpectrum(NeutronSpectrum,HighEnergyPercentage,Nsamples)

HighEnergySpectrum=NeutronSpectrum(:,HighEnergyPercentage>5);
HighEnergyPercentage(HighEnergyPercentage<5)=[];

Min=1;
Max=size(HighEnergyPercentage,2);

for i=1:Nsamples
    alpha=rand(); % randomize weights
    beta=1-alpha;
    y=rand(1,2);
    RandNumber=ceil((Max-Min).*y+Min);

out(:,i)=(alpha*HighEnergySpectrum(:,RandNumber(1)))+(beta*HighEnergySpectrum(:,RandNumber(2)));
end
end

```

fit_fig6.m.m

```

function [fitobject,gof] = fit_fig6(XAxis_HighEnergy,Yaxis_HighEnergy,XAxis,YAxis)

%% data to fit

[XOut,YOut] = prepareCurveData(XAxis_HighEnergy,Yaxis_HighEnergy);

```

```

%% set up fitype and options
aFitype = fitype('poly2');
newOptions = fitoptions('Method','LinearLeastSquares');
newOptions.Lower = [-Inf -Inf 1];
newOptions.Upper = [Inf Inf 1];

%% fit model
[fitobject,gof] = fit(XOut,YOut,aFitype,newOptions);

%% print out the fitting result
x=linspace(1,100,500);
y1=fitobject.p1*(x.^2)+(fitobject.p2*x)+fitobject.p3; % my result
p1=num2str(fitobject.p1,2);
p2=num2str(fitobject.p2,2);
p3=num2str(fitobject.p3);
Rs=num2str(gof.rsquare,3);
Equation=[p1,'x^2+',p2,'x+',p3,' R^2=',Rs];
y2=0.00026*(x.^2)+(0.0079*x)+1; % published result
plot(x,y1,'r');
hold on
plot(x,y2,'g');
hold on
scatter(XAxis,YAxis)
legend(Equation,'0.00026x^2+0.0079x+1 R^2=0.971','Data','Location','NorthWest');
XLabel={'Flux Percentage E_n >10MeV'};
YLabel={'Correction Factor H*(10)_{spe} /H*(10)_{cf252}'};
xlabel(XLabel,'FontWeight','bold','FontSize',16,'FontAngle','italic')
ylabel(YLabel,'FontWeight','bold','FontSize',16,'FontAngle','italic')
axis square

```

```
axis([0,70,0,4])
```

fit_fig8.m

```
function [fitobject,gof]=fit_fig8(XAxis_HighEnergy,Yaxis_HighEnergy,XAxis,YAxis)

%% data to fit
[XOut,YOut] = prepareCurveData(XAxis_HighEnergy,Yaxis_HighEnergy);

%% set up fittype and options
aFittype = fittype('poly1');
newOptions = fitoptions('Method','LinearLeastSquares');

%% fit model
[fitobject,gof] = fit(XOut,YOut,aFittype,newOptions);

%% print out the fitting result
scatter(XAxis,YAxis);
x=linspace(1,6,100);
y1=fitobject.p1*x+fitobject.p2; % my result
p1=num2str(fitobject.p1,4);
p2=num2str(fitobject.p2,4);
Rs=num2str(gof.rsquare,3);
Equation=[p1,'x'+p2,' R^2=',Rs];
y2=1-0.2594*x+0.3247*x.^2; % published result
hold on
plot(x,y1,'r')
hold on
plot(x,y2,'g')
legend('Data',Equation,'0.3247x^2-0.2594x+1 R^2=0.951','Location','NorthWest');
```



```

% Label axes
XLabel={'Ratio of Readings (4P6_{8}/6)'};
YLabel={'Correction Factor H*(10)_{spe} /H*(10)_{cf252}'};
xlabel(XLabel,'FontWeight','bold','FontSize',16,'FontAngle','italic')
ylabel(YLabel,'FontWeight','bold','FontSize',16,'FontAngle','italic')
axis square
axis([0.75,3.5,0,4])

```

fit_fig9.m

```

function [fitobject,gof] = fit_fig9(XAxis_HighEnergy,Yaxis_HighEnergy)

%% data to fit
[XOut,YOut] = prepareCurveData(XAxis_HighEnergy,Yaxis_HighEnergy);

%% set up fitype and options
aFitype = fitype('poly2');
newOptions = fitoptions('Method','LinearLeastSquares');
newOptions.Lower = [-Inf -Inf 1];
newOptions.Upper = [Inf Inf 1];

%% fit model
[fitobject,gof] = fit(XOut,YOut,aFitype,newOptions);

```

fit_fig10.m

```

function [fitobject,gof]=fit_fig10(XAxis_HighEnergy,Yaxis_HighEnergy)

%% data to fit
[XOut,YOut] = prepareCurveData(XAxis_HighEnergy,Yaxis_HighEnergy);

```

```

%% set up fitype and options
aFitype = fitype('poly1');
newOptions = fitoptions('Method','LinearLeastSquares');

%% fit model
[fitobject,gof] = fit(XOut,YOut,aFitype,newOptions);

```

fit_fig11.m

```

function [fitobject,gof] = fit_fig11(XAxis_HighEnergy,Yaxis_HighEnergy,XAxis,YAxis)

%% data to fit
[XOut,YOut] = prepareCurveData(XAxis_HighEnergy,Yaxis_HighEnergy);

%% set up fitype and options
aFitype = fitype('poly2');
newOptions = fitoptions('Method','LinearLeastSquares');
newOptions.Lower = [-Inf -Inf 1];
newOptions.Upper = [Inf Inf 1];

%% fit model
[fitobject,gof] = fit(XOut,YOut,aFitype,newOptions);

%% print out the fitting result
x=linspace(1,100,500);
y1=fitobject.p1*(x.^2)+(fitobject.p2*x)+fitobject.p3; % my result
p1=num2str(fitobject.p1,3);
p2=num2str(fitobject.p2,3);
p3=num2str(fitobject.p3);
Rs=num2str(gof.rsquare,4);

```

```

Equation=[p1,'x^2+',p2,'x+',p3,' R^2=',Rs];
plot(x,y1,'r');
hold on
scatter(XAxis,YAxis)
legend(Equation,'NewSpectrum','Location','NorthWest');
XLabel={'Flux Percentage E_n >10MeV'};
YLabel={'Correction Factor H*(10)_{spe} /H*(10)_{cf252}'};
xlabel(XLabel,'FontWeight','bold','FontSize',16,'FontAngle','italic')
ylabel(YLabel,'FontWeight','bold','FontSize',16,'FontAngle','italic')
axis square
axis([0,70,0,4])

```

fit_fig12.m

```

function [fitobject,gof] = fit_fig12(XAxis_HighEnergy,Yaxis_HighEnergy,XAxis,YAxis)

%% data to fit
[XOut,YOut] = prepareCurveData(XAxis_HighEnergy,Yaxis_HighEnergy);

%% set up fitype and options
aFitype = fitype('poly1');
newOptions = fitoptions('Method','LinearLeastSquares');

%% fit model
[fitobject,gof] = fit(XOut,YOut,aFitype,newOptions);

%% print out the fitting result
scatter(XAxis,YAxis);
x=linspace(1,6,100);
y=fitobject.p1*x+fitobject.p2;

```

```

p1=num2str(fitobject.p1,3);
p2=num2str(fitobject.p2,3);
Rs=num2str(gof.rsquare,4);
Equation=[p1,'x+',p2,' R^2=',Rs];
hold on
plot(x,y,'r')
legend('NewSpectrumData',Equation,'Location','NorthWest' );
XLabel={'Ratio of Readings (4P6_{8}/6)'};
YLabel={'Correction Factor H*(10)_{spe} /H*(10)_{cf252}'};
xlabel(XLabel,'FontWeight','bold','FontSize',16,'FontAngle','italic')
ylabel(YLabel,'FontWeight','bold','FontSize',16,'FontAngle','italic')
axis square
axis([0.75,3.5,0,4])

```