

出國報告（出國類別：實習）

## 赴法國巴黎中央理工學院工業工程實驗室實習

服務機關：核能研究所

姓名職稱：王正寧 副工程師

派赴國家：法國

出國期間：103年11月26日~103年12月7日

報告日期：104年1月7日



## 摘要

本次公差係赴法國巴黎中央理工學院工業工程實驗室實習，為期 12 日。巴黎中央理工學院位於法國近郊的上塞納省，在能源、環境與風險、生物工程、奈米科學、資訊系統等領域均有專業研究。其中工業工程實驗室下之系統科學及能源挑戰組主要的研究項目為系統可靠度評估，包含複雜系統依存性、系統穩定性、不確定度分析等。本次實習主要針對不確定度評估的新概念—機率箱進行瞭解，並受邀就蒙地卡羅法變異數降低的部分進行使用經驗及技術交流。期能對本所蒙地卡羅法之評估技術與分析能力有所提升。

# 目 次

摘要.....	i
目次.....	ii
一、目的.....	1
二、過程.....	3
(一)、機率箱.....	4
(二)、變異數降低.....	8
(三)、我方簡報.....	18
1、硼中子捕獲治療有效劑量評估 .....	18
2、乾式貯存設施屏蔽分析 .....	21
三、心得.....	24
四、建議事項.....	26
五、參考文獻.....	30

# 一、目的

巴黎中央理工學院 (École Centrale Paris) 於 1829 年設立，位於法國上塞納省 (Hauts-de-Seine) 的沙特奈馬拉布里鎮 (Châtenay-Malabry)，圖 1 為學院大門。巴黎中央理工學院設立的目的為培養在工業與科學領域均能兼具專業之工程師，學院並無設立大學部，為一研究型學校，僅授與工程師 (相當於國內之碩士) 與博士學位。巴黎中央理工學院在能源、環境與風險、生物工程、奈米科學、資訊系統等領域均相當著名，共包含六個研究實驗室與兩個研究小組，分別為分子與宏觀能源和燃燒實驗室 (Laboratoire Énergétique Moléculaire et Macroscopique, Combustion)、結構特性與固體模型實驗室 (Laboratoire Structures, Propriétés et Modélisation des Solides)、土木與材料結構實驗室 (Laboratoire Mécanique des Sols, Structures et Matériaux)、材料加工工程實驗室 (Laboratoire de Génie des procédés et matériaux)、應用數學與系統實驗室 (Laboratoire Mathématiques Appliquées aux Systèmes)、工業工程實驗室 (Laboratoire Génie Industriel)，以及量子光電與分子物理小組 (Équipe du Laboratoire de Photonique Quantique et Moléculaire) 和數位視覺中心 (Centre pour la Vision Numérique)。其中工業工程實驗室下之系統科學及能源挑戰組 (Chaire Science des Systèmes et Défi Énergétique) 在系統可靠度領域，包含複雜系統依存性、系統穩定性、不確定度分析等部分均有專業研究。本次實習為該組之 Yanfu Li 教授邀請，學習其不確定度評估方法，並進行蒙地卡羅法 (Monte Carlo method) 之技術交流。

蒙地卡羅計算法在核醫藥物研發上為重要的評估分析工具之一，舉凡核醫藥物於體內之劑量分析、亦或是病患對環境之輻射影響等，蒙地卡羅法均能夠提供精確的評估結果。蒙地卡羅法為以機率與統計為基礎之評估方法，其計算結果具不確定度 (uncertainty)，該不確定度會大幅影響蒙地卡羅計算結果之可靠度。因此不確定度分析為蒙地卡羅計算法重要的關鍵技術之一。此外，使用蒙地卡羅法

計算機程式時往往需要藉由各種變異數降低（variance reduction）方法之輔助，方能獲得收斂且準確的計算結果，對蒙地卡羅法之計算效率有重要的影響。而變異數降低方法之使用亦有諸多需要留意考量因素，以免產生偏差（over-biased）的計算結果，影響其正確性。本次藉由赴法國巴黎中央理工學院工業工程實驗室實習，主要目的即為與工業工程實驗室進行蒙地卡羅計算法之技術交流，並針對蒙地卡羅法使用上最重要的不確定度評估分析技術做進一步學習，以提升國內蒙地卡羅法評估技術之能力。



圖 1 巴黎中央理工學院

## 二、過程

本次實習時程為 12 天，實習日程如表 1 所示：

表 1 實習日程表

行程	公差地點	工作內容	備考
103/11/26 (三)	台北→巴黎	去程	飛機
103/11/27 (四)	台北→巴黎	去程	飛機+地鐵
103/11/28 (五)	巴黎中央理工	可靠度評估研習	
103/11/29 (六)	巴黎中央理工		
103/11/30 (日)	巴黎中央理工		
103/12/1 (一)	巴黎中央理工	蒙地卡羅法應用簡報	
103/12/2 (二)	巴黎中央理工	蒙地卡羅法技術交流	
103/12/3 (三)	巴黎中央理工		
103/12/4 (四)	巴黎中央理工		
103/12/5 (五)	巴黎中央理工		
103/12/6 (六)	巴黎→台北	回程	地鐵+飛機
103/12/7 (日)	巴黎→台北	回程	飛機

此次實習主要分為兩階段，第一階段主要針對工業工程實驗室的系統科學及能源挑戰組目前正在研究的新領域機率箱 (probability box) 進行瞭解與學習[1]。第二階段為經驗及技術交流，我方準備兩份有關蒙地卡羅法的應用案例簡報，一份為硼中子捕獲治療有效劑量評估 (Effective dose evaluation for BNCT brain tumor treatment based on voxel phantoms) [2]，主要內容為利用體素假體 (voxel phantom) 以及蒙地卡羅法計算機程式，進行輻射防護量的評估與探討。另一份為乾式貯存設施屏蔽分析 (Shielding analysis of an ISFSI facility) [3]，主要內容

為利用蒙地卡羅法計算機程式進行用過核子燃料乾式貯存設施（spent fuel dry storage facility）之屏蔽分析，以及廠界劑量計算，並就所使用之變異數降低方法做一簡介（如圖 2）。其後便針對彼此所使用之蒙地卡羅法中關於變異數降低之技術及應用方式進行討論與交流。以下即針對此兩部分以及我方簡報內容分別做一說明。

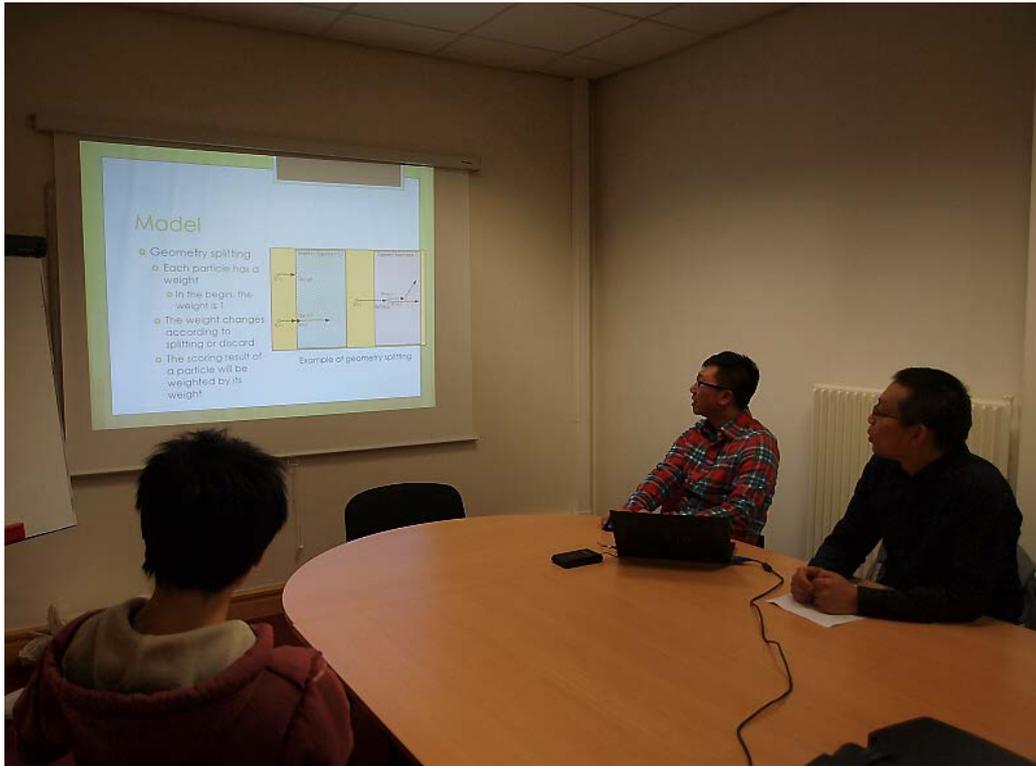


圖 2 蒙地卡羅法應用簡報

### （一）、機率箱

可靠度評估主要應用於核能電廠的安全度評估（Probabilistic Risk Assessment，PRA），是一種以系統化的方式，如事件樹的建立與分析，以及設施組件的失效風險，來計算核能電廠爐心受到損壞及放射性物質外釋事故發生機率的技術。換句話說，可靠度評估即為評估核能電廠風險的技術，目前亦廣泛的應用到工業界。

傳統的可靠度評估利用 Gamma 分佈描述組件的失效機率與其標準差，並藉由電廠實際運轉情況逐步修正其機率與標準差。進行可靠度評估時取樣採用由機率密度函數 (probability density function, PDF) 轉化成累進分佈函數 (cumulative distribution function, CDF) 進行取樣，如圖 3 為一典型的累進分佈函數。

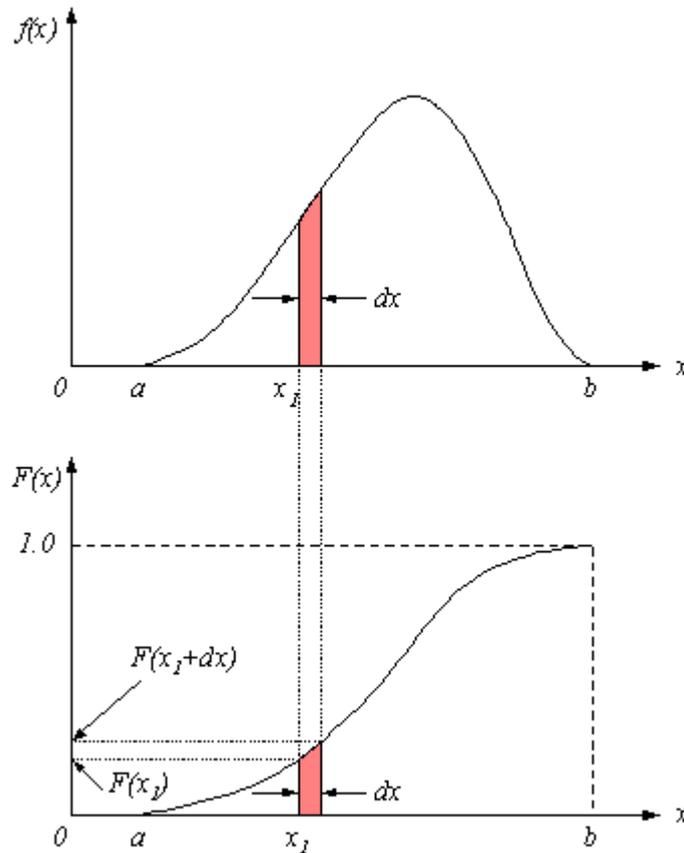


圖 3 典型的機率密度函數及其累進分佈函數

藉由累進分佈函數，即可由亂數產生器對該函數進行隨機取樣，這也是蒙地卡羅法在進行模擬計算時之基礎。以蒙地卡羅法進行輻射粒子之遷移計算為例，當對粒子進行遷移計算時，不論是取樣粒子的遷移距離，或是與屏蔽介質間的作用，均使用累進分佈函數做為取樣依據。例如式(1)為一典型之粒子遷移距離機率密度函數：

$$f(x) = \mu e^{-\mu x} \dots\dots\dots(1)$$

其中  $x$  為距離， $\mu$  該粒子於介質中之衰減係數 (attenuation coefficient)。式(1)之累進分佈函數如式(2)所示：

$$F(x) = 1 - e^{-\mu x} \dots\dots\dots(2)$$

藉由亂數產生器對  $F(x)$  取樣，即可由式(2)推得粒子之遷移距離。

累進分佈函數可以就使用者之需要，進行各類參數之取樣。但是傳統的方式卻無法將累進分佈函數本身之不確定度加以考慮。例如以蒙地卡羅法進行輻射粒子之遷移計算時，粒子與屏蔽物質作用方式之取樣依據為核截面資料庫 (cross section library)。然傳統上蒙地卡羅法計算機程式所得出之計算結果的不確定度，僅為遷移計算本身產生之統計誤差，核截面資料庫之誤差並未代入。機率箱即為一新概念，目前仍主要應用於電廠可靠度評估。其最初之主要概念及用途為將電廠組件之失效風險的期望值與不確定度展開成為一二維之機率分佈。

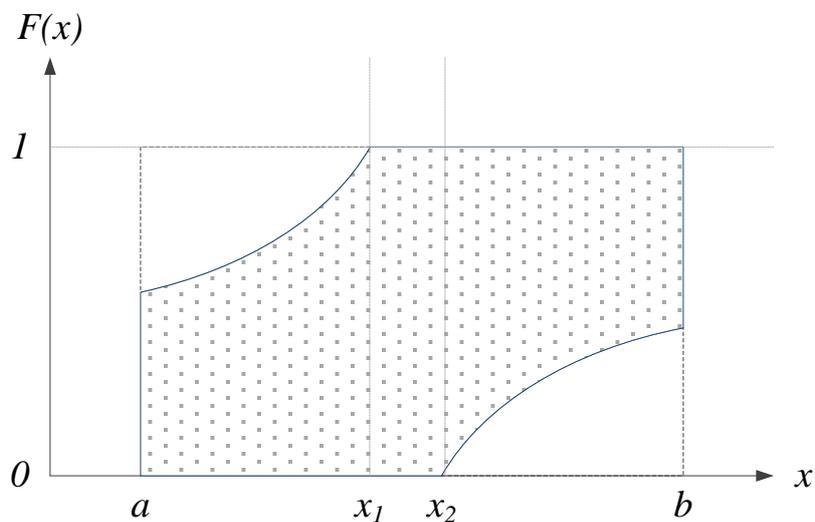


圖 4 機率箱範圍選定示意圖

當給定一參數之平均值與其不確定度時，可以先藉由該參數之平均值與其範圍劃定一累進分佈函數區域，此一區域即稱為機率箱。劃定範圍的同時可依據平均值與範圍之關係，即可先剔除不可能出現之情況並訂定機率箱之初始範圍，如

圖 4 所示。

圖 4 中雖然已將不可能之組合排除以縮小範圍，卻尚未將範圍內之累進分佈函數之分佈加以考慮。因此下一步驟即為利用蒙地卡羅法，配合該參數之不確定度以特定程序對該區域內每一條可能之累進分佈函數進行取樣。在大量取樣之過程中，除機率箱之形狀與範圍將更加收斂外，同時亦可獲得機率箱內累進分佈函數曲線之分佈資訊，如圖 5 所示。

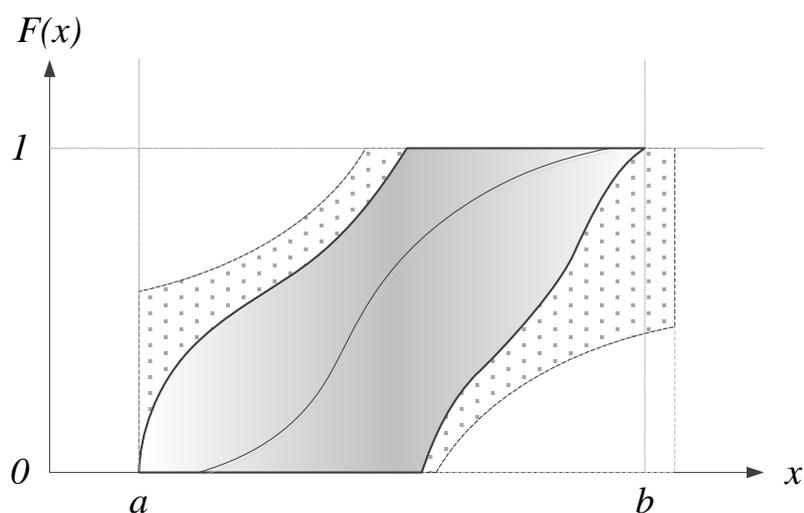


圖 5 機率箱收斂示意圖

機率箱收斂完成後，即可做為未來進行蒙地卡羅模擬計算時取樣之依據。在取樣時先以亂數產生器對累進分佈函數之  $F(x)$  值進行取樣。此時  $F(x)$  值並非如先前圖 3 或式(2)中之單一累進分佈函數，僅對應到唯一的  $x$  值，而是對應到一  $x$  值的分佈，其區間落於  $x_1$  與  $x_2$  之間，如圖 6 所示。

此時再針對  $x_1$  與  $x_2$  區間中之  $x$  值再度進行取樣。 $x$  值於  $x_1$  與  $x_2$  區間中取樣之依據即為圖 6 中單位長度中通過該處之累進分佈函數曲線之數目。如此便完成  $x$  值之取樣。此一作法與傳統之單一累進分佈函數取樣方式最大之不同在於，機率箱可將累進機率函數本身之不確定度納入評估結果的不確定度，因此可以考慮更全面之系統誤差。蒙地卡羅法計算結果的誤差與計算結果本身同為重要之輸出

資訊，若能以機率箱的概念應用於蒙地卡羅法計算機程式之運跑，將可對計算結果的準確度有更加的掌握。圖 7 即為實際製作機率箱時之運跑範例結果。

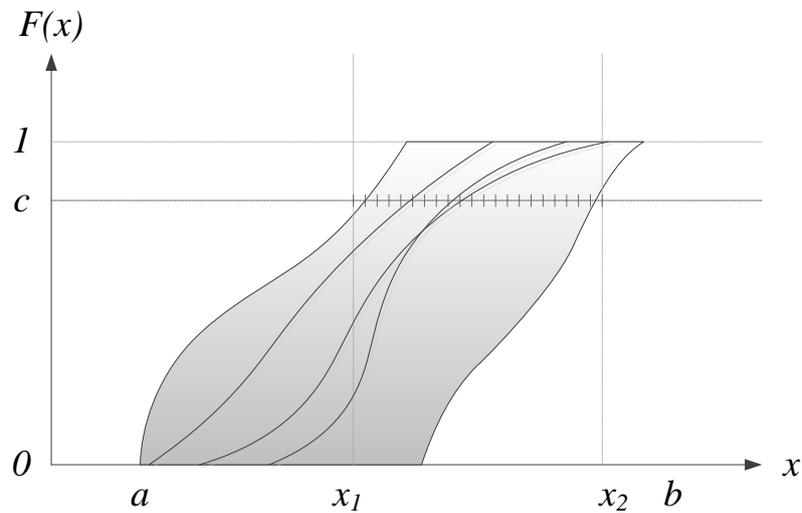


圖 6 機率箱取樣示意圖

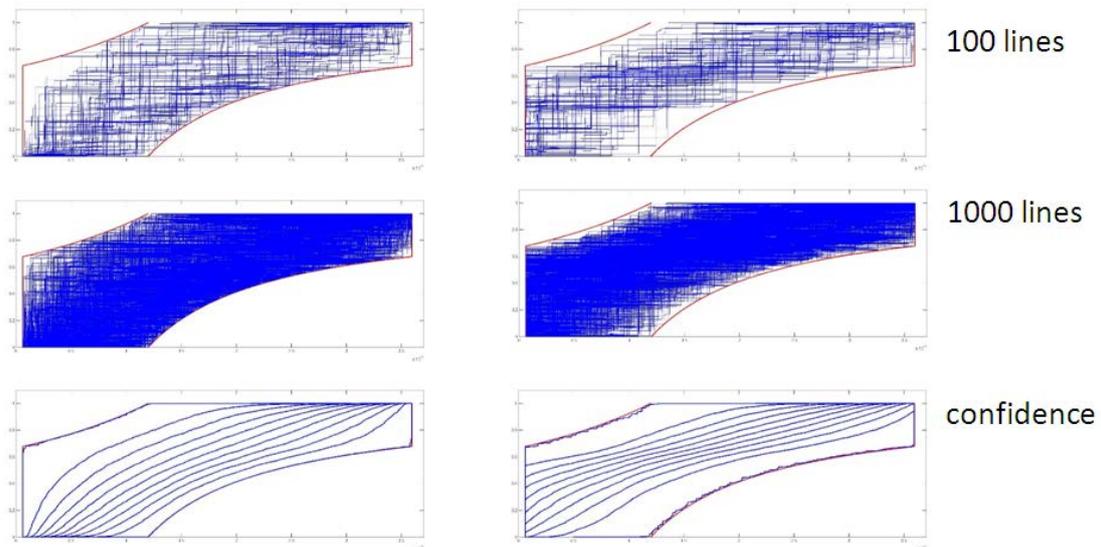


圖 7 機率箱實際運跑範例

## (二)、變異數降低

在實習過程中，我方與工業工程實驗室的研究人員針對蒙地卡羅法在變異數降低技術方面，亦進行使用經驗的交流。蒙地卡羅法雖然能夠詳細進行模擬計算，但由於其包含統計與機率的特性，使得其計算結果帶有一不確定度。而為了

獲得較為精確的計算結果，蒙地卡羅法往往必須藉由大量的運跑歷程（**history**），來降低不確定度，並且經常需要藉由變異數降低方法，使計算結果更有效率地加速收斂，或是在某些案例中能夠收斂。例如在屏蔽分析或是劑量評估的案例中，若遇到深穿透（**deep penetration**）的情況，就必須使用變異數降低方法，否則計算結果往往會具有很大的不確定度，或是需要耗費非常龐大的計算資源才能獲得收斂的結果。

在蒙地卡羅計算中，變異數降低有數種方式，例如俄羅斯輪盤（**Russian roulette**）、粒子分裂（**splitting**）、權重篩選窗（**weight window**）等等。在一般屏蔽分析或是劑量評估計算中，最常用到的是結合俄羅斯輪盤與粒子分裂兩種方式的幾何分裂（**geometry splitting**）。其方式主要是依據使用者想要獲得計算模型中何處之計算結果來設定該幾何模型中每個區域的重要度（**importance**），之後當程式運跑時，便會依據區域的重要度，來決定輻射粒子在遷移過程中，需要進行俄羅斯輪盤或是分裂，並以此決定粒子的權重變化。圖 8 即為使用蒙地卡羅法進行粒子遷移計算時執行幾何分裂之示意圖。

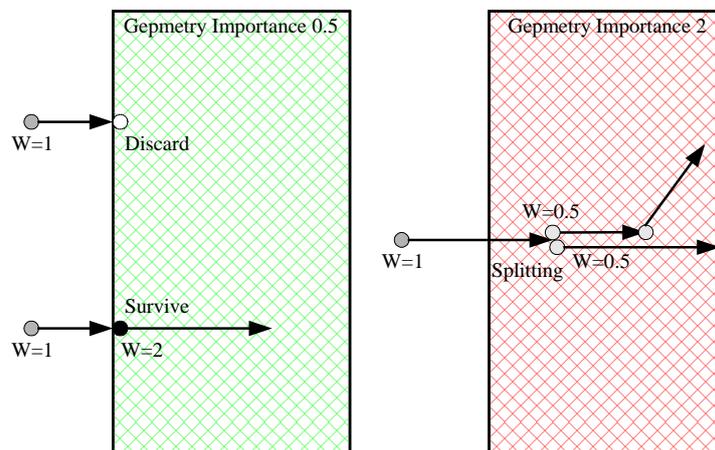


圖 8 幾何分裂示意圖

工業工程實驗室的系統科學及能源挑戰組諸多研究中的其中一項為系統可靠度分析（**system reliability analysis**），也常用到蒙地卡羅法計算機程式進行設施與事件樹之可靠度計算。與屏蔽分析相類似的是，以蒙地卡羅法進行系統可靠度

分析仍然會在計算結果上有收斂的問題，需要以變異數降低方法輔助增加計算效率。但在遇到問題的類型與變異數降低方法使用上與屏蔽分析有蠻大的差異。

系統可靠度評估常用到馬可夫可靠度模型（Markov reliability model），馬可夫可靠度模型由一連串系統機率狀態所組成，其組件之變遷時間為指數分佈，且其變遷率維持常數[4,5]。馬可夫模型可以適度簡化複雜的系統模型，因此常被用來描述系統狀態變遷之模型，如式(3)為一連續時間之馬可夫程序方程式：

$$\frac{d}{dt} p_i(t) = -p_i(t) \sum_j \lambda_{ij} + \sum_j p_j(t) \lambda_{ji} \dots\dots\dots (3)$$

其中  $\lambda_{ij}$  為狀態  $i$  與狀態  $j$  間之變遷率； $p(t)$  為時間  $t$  時之系統機率向量；經由初始條件的帶入，式(3)可改寫為式(4)：

$$\frac{d}{dt} p_i(t) = -p_i(t) \lambda_i + \sum_j q(i|j) \lambda_j p_j(t) \dots\dots\dots (4)$$

其中

$$\lambda_i = \sum_{j \neq i} \lambda_{ij} \dots\dots\dots (5)$$

$$q(i|j) = \lambda_{ji} / \lambda_j \dots\dots\dots (6)$$

分別為離開狀態  $i$  之變遷率，以及離開狀態  $j$  但下一個狀態為  $i$  之變遷條件機率。式(4)對等號兩邊同乘以  $\exp(-\lambda_i t)$  並對其積分，即可得到描述系統狀態之可靠度方程式(5)：

$$p_i(t) = \delta_{i1} \exp(-\lambda_i t) + \int_0^t \exp[-\lambda_i(t-t')] \sum_j q(i|j) \lambda_j p_j(t') dt' \dots\dots\dots (7)$$

其中

$$\delta_{i1} = \begin{cases} 1, & \text{if } i = 1 \\ 0, & \text{if } else \end{cases} \dots\dots\dots(8)$$

與屏蔽分析或劑量評估所遇到的深穿透難題不同，在系統可靠度分析中主要造成蒙地卡羅法無法收斂的主要難題在於系統組件極低的失效風險（failure probability）。由於安全上的考量，系統組件在設計上均朝低失效機率發展，以蒙地卡羅在模擬系統可靠度時需要運跑極大數量的歷程才能遇到一次失效事件，且其失效風險之計算結果亦會具相當大的不準確度。因此變異數降低方法的使用在系統可靠度評估中相當重要。在系統可靠度分析中最常用的變異數降低方法為強迫變遷（forced transition），主要藉由調整失效機率（同時亦隨之調整事件之權重）來增加模擬效率。將失效機率調高，即可獲得較多數量的失效事件，而可靠度評估結果即可有較低的不準確度。在調整失效機率的同時，亦以失效事件權重的調控來平衡計算結果以避免產生偏差的計算結果。

以下以一簡單案例說明使用強迫變遷方法對可靠度評估計算結果收斂程度的影響。圖 9 為一簡化迷你電廠模型，模型中包含基本組件 A 以及兩平行子系統組件（C1、C2、D1、D2）與 E1~E8。除 C2 組件外，每一組件均包含兩種狀態：正常運轉與失效。C2 組件平時為待機狀態，在 C1 組件失效時才啟動運轉。各組件之容量（capacity）亦標於圖中。在 E 子系統組件中，只要 E1 至 E8 等 8 個組件中有 6 個維持正常運轉即可，若 E 子系統組件總輸出容量小於 90 %時即視為失效。

為簡化問題，假設該迷你電廠無維修數量限制，只要某一組件轉變為失效狀態，即立刻啟動該組件之維修。且組件失效及維修前之時間採指數分佈。表 2 列出各組件之平均恢復時間（mean time to recover, MTTR）、平均失效時間（mean time to failure, MTTF）、以及容量等基本參數資料。表 3 則列出各組件之失效機率。

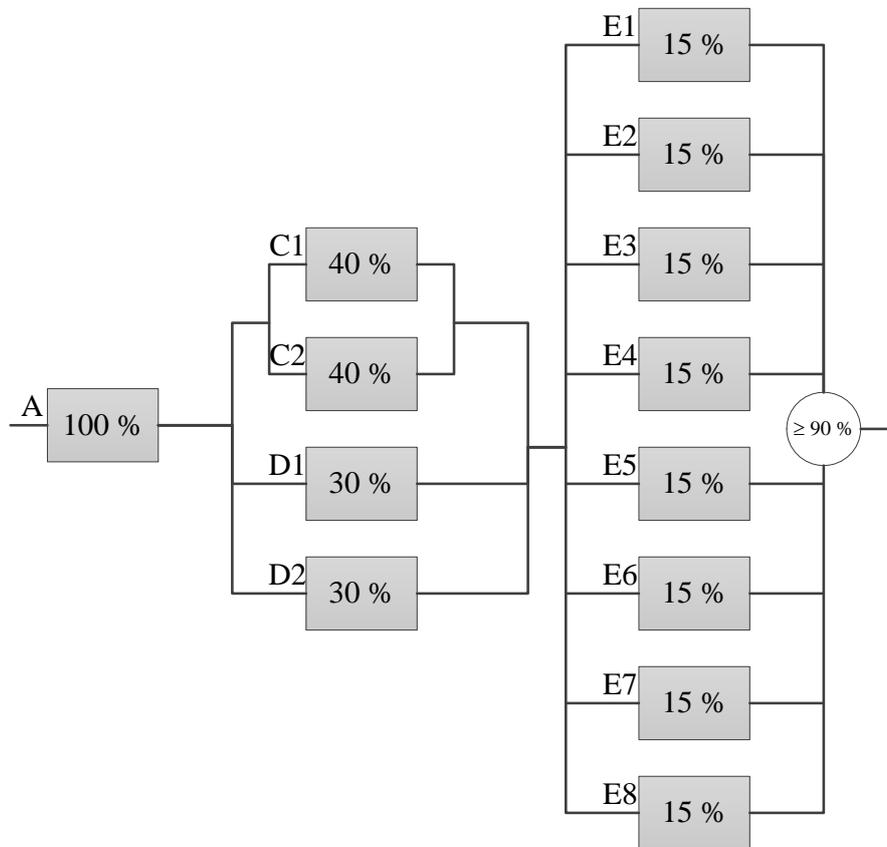


圖 9 迷你電廠模型示意圖

表 2 迷你電廠各組件參數

組件	平均失效時間 (h)	平均恢復時間 (h)	容量 (%)
A	50,000	200	100
C1、C2	10,000	500	40
D1、D2	1,000	10	30
E1, E2, ...E8	5,000	100	15

表 3 迷你電廠各組件失效機率

組件	失效機率
A	$200/(200+50,000)$
C1C2	$1.190 \times 10^{-3}$
D1、D2	$500/(500+10,000)$
E1, E2, ...E8	$100/(100+5,000)$

經蒙地卡羅計算機程式模擬該迷你電廠案例之可靠度評估後，若完全不使用強迫變遷方法進行運跑，其電廠失效機率之評估結果為  $4.38 \times 10^{-3}$ 。本案例即以此值做為比較之標準。表 4 分別列出不使用與使用強迫變遷方法進行蒙地卡羅法計算機程式運跑迷你電廠案例之計算結果。其中組件 A、C、D 失效風險調整係數為 50，組件 E 之失效風險調整係數為 10。由表中可知，強迫變遷方法大幅增進了蒙地卡羅計算機程式的運跑效率。當不使用強迫變遷方法時，程式需運跑 1,000,00 次以上之歷程方能得出較為收斂的結果，而使用強迫變遷方法後，僅需運跑約 10,000 歷程即可得出收斂且具準確度之結果。由此即可看出變異數降低方法對蒙地卡羅計算之重要性。

表 4 強迫變遷方法對蒙地卡羅計算機程式計算效率之影響

方法	運跑歷程 數目	處理器運 跑時間	失效機率	差異	信心區間
不使用強迫 變遷方法	100	100ms	$3.00 \times 10^{-2}$	584.93 %	$3.34 \times 10^{-2}$
	10,000	3s757ms	$4.00 \times 10^{-3}$	-8.68 %	$1.24 \times 10^{-3}$
	100,000	38s138ms	$4.30 \times 10^{-3}$	-1.83 %	$4.06 \times 10^{-4}$
	1,000,000	6min22s	$4.38 \times 10^{-3}$	0.00 %	$1.29 \times 10^{-4}$
使用強迫變 遷方法	100	101ms	$3.90 \times 10^{-3}$	-10.96 %	$1.51 \times 10^{-3}$
	10,000	3s88ms	$4.16 \times 10^{-3}$	-5.02 %	$1.54 \times 10^{-4}$

前述之強迫變遷方法亦能夠應用於在某些非馬可夫模型的情況，以下以另一案例做一說明。該案例為一具有保護機制之電力傳輸系統，如圖 10 所示：

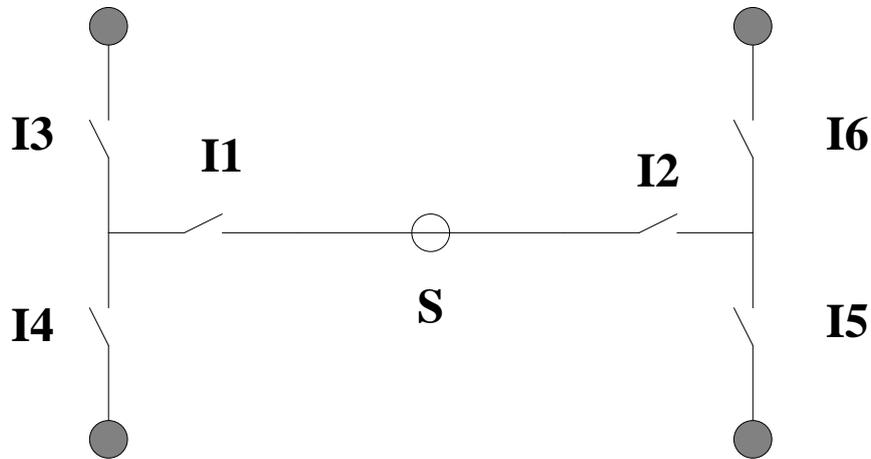


圖 10 電力傳輸系統案例示意圖

該電力傳輸系統共有六個斷路器保護，如圖 10 中之 I1~I6，其目的為避免 S 點產生短路之現象。保護機制之作用程序為：在 T1 時間後，系統會嘗試打開 I1 與 I2 處之斷路器，若 I1 之斷路器失效，則在 T2 時間後系統會嘗試打開 I3 與 I4 兩斷路器。同樣的，若 I2 之斷路器失效，系統亦會於 T2 時間後嘗試打開 I5 與 I6 兩斷路器。當與 S 連接之四個接點均打開後，電力傳輸系統將處於安全狀態。每一個斷路器失效的機率假設為 0.01，T1 與 T2 時間則設定為 10 ms。本案例之目的即在於評估該電力傳輸系統之可靠度。

本案例可藉由解析計算得到其失效機率為  $3.98 \times 10^{-4}$ ，此值即為蒙地卡羅計算之比對標準。表 5 為使用未使用強迫變遷方法與使用強迫變遷方法兩種情況下，以蒙地卡羅法評估上述電力傳輸系統可靠度之結果與比較。各斷路器之失效風險調整係數為 10。表列結果再度顯示強迫變遷方法大幅增進了蒙地卡羅計算機程式的運跑效率。當不使用強迫變遷方法時，程式需運跑 1,000,000 次以上之歷程方能得出較為收斂的結果，而使用強迫變遷方法後，僅需運跑約 10,000 歷程即可得出收斂且具準確度之結果。

表 5 蒙地卡羅計算模擬結果

方法	運跑歷程	處理器運 跑時間	失效機率	差異	信心區間
不使用強迫 變遷方法	1,000	115ms	$1.00 \times 10^{-3}$	151.26 %	$1.96 \times 10^{-3}$
	100,000	6s504ms	$4.20 \times 10^{-4}$	5.53 %	$1.27 \times 10^{-4}$
	1,000,000	1min9s	$4.07 \times 10^{-4}$	2.26 %	$3.95 \times 10^{-5}$
使用強迫變 遷方法	1,000	127ms	$5.14 \times 10^{-4}$	29.15 %	$1.50 \times 10^{-4}$
	10,000	837ms	$4.17 \times 10^{-4}$	4.77 %	$4.31 \times 10^{-5}$

對於動態系統，強迫變遷亦能發揮效果。圖 11 為一簡單的動態系統示意圖。該動態系統包含兩個不可維修之主要組件 A、B，以及 K1~K5 五個開關作為系統保護與狀態調控之用。動態系統共有兩種狀態，以下分別為兩種狀態之描述：

狀態 1：

- 狀態 1 的持續時間  $T_1$  為其平均值  $E(T_1) = 1/\lambda_1$  的指數分佈， $T_1$  平均值為 100 小時。
- K1~K4 開關在狀態 1 通常為關閉狀態，開關 K5 則通常為打開狀態。
- 在狀態 1 中組件 A 與組件 B 為並聯運作。當 S 與 T 之間呈現短路狀態時組件 A 與組件 B 即視為失效，其失效率為  $\lambda_A = \lambda_B = 10^{-4}$  1/h。
- 當系統處於失效狀態時，某些開關會打開以避免系統處於短路狀態。組件 A 失效時 K2 與 K4 會打開，組件 B 失效時則 K1 與 K3 會打開。各開關之失效率為  $5 \times 10^{-3}$ 。
- 開關有可能因人為意外被打開，其機率為  $\lambda_S = 10^{-4}$  1/h。

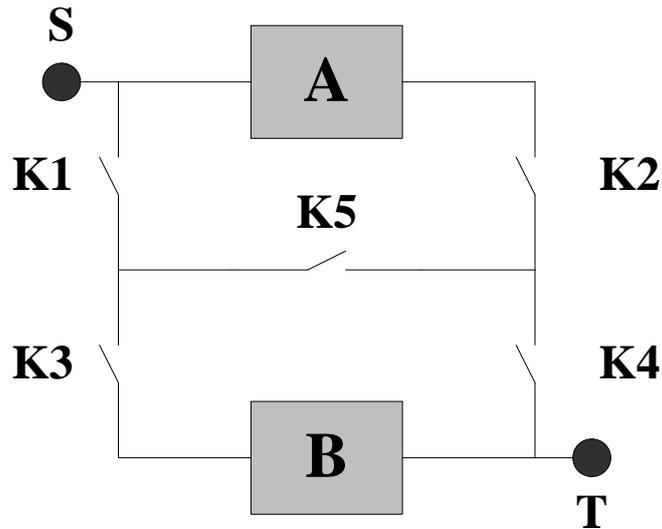


圖 11 動態系統模型示意圖

狀態 2：

- 狀態 2 的持續時間  $T_2$  為其平均值  $E(T_2) = 1/\lambda_2$  的指數分佈， $T_2$  平均值為 50 小時。
- 狀態啓始時，組件 A 與組件 B 為串聯運作。此時部分開關的狀態會進行調整，K1 與 K4 會打開，K5 則會關閉。但在狀態 1 中若 K1 或 K4 失效時，系統將不會進入狀態 2。

表 6 蒙地卡羅模擬計算結果

方法	運跑歷程	處理器運 跑時間	失效機率	差異	信心區間
不使用強迫	100	100ms	$4.00 \times 10^{-2}$	35.14 %	$3.84 \times 10^{-2}$
變遷方法	10,000	1s946ms	$3.25 \times 10^{-2}$	9.80 %	$3.47 \times 10^{-3}$
使用強迫變	1,00	101ms	$3.21 \times 10^{-2}$	8.45 %	$3.11 \times 10^{-2}$
遷方法	10,000	1s851ms	$2.84 \times 10^{-2}$	-4.05 %	$2.93 \times 10^{-3}$

經評估軟體計算後，該動態系統在運作超過 100 小時候之不可靠度為

0.0296。此即為蒙地卡羅計算之比較依據。表 6 則為蒙地卡羅計算結果。表列結果顯示出即使在複雜的動態系統中，儘管幅度並不大，但強迫變遷方法仍然可降低蒙地卡羅計算機程式運跑結果的信心區間，增加收斂的速度。

另外，雖然使用機會較少，但除強迫變遷方法外，可靠度評估亦可以使用事件樹分裂方法來讓電廠事件樹朝著使用者想要的趨勢演變，增加計算效率。其使用方式為當電廠之事件樹朝向可能發生失效的趨勢演變時，即將該次歷程進行分裂並調整權重，用以增加發生失效的機率。若事件樹有較大的機率朝安全之趨勢演變，則執行俄羅斯輪盤方法將事件樹剔除，以避免不必要的計算資源浪費。

經由實習期間的蒙地卡羅技術交流，對於變異數降低方法在蒙地卡羅計算上的應用有更深入的了解，而彼此交流運跑經驗也可互補不足並學習各種新的概念，對於未來研究與計畫執行實有相當大的裨益。

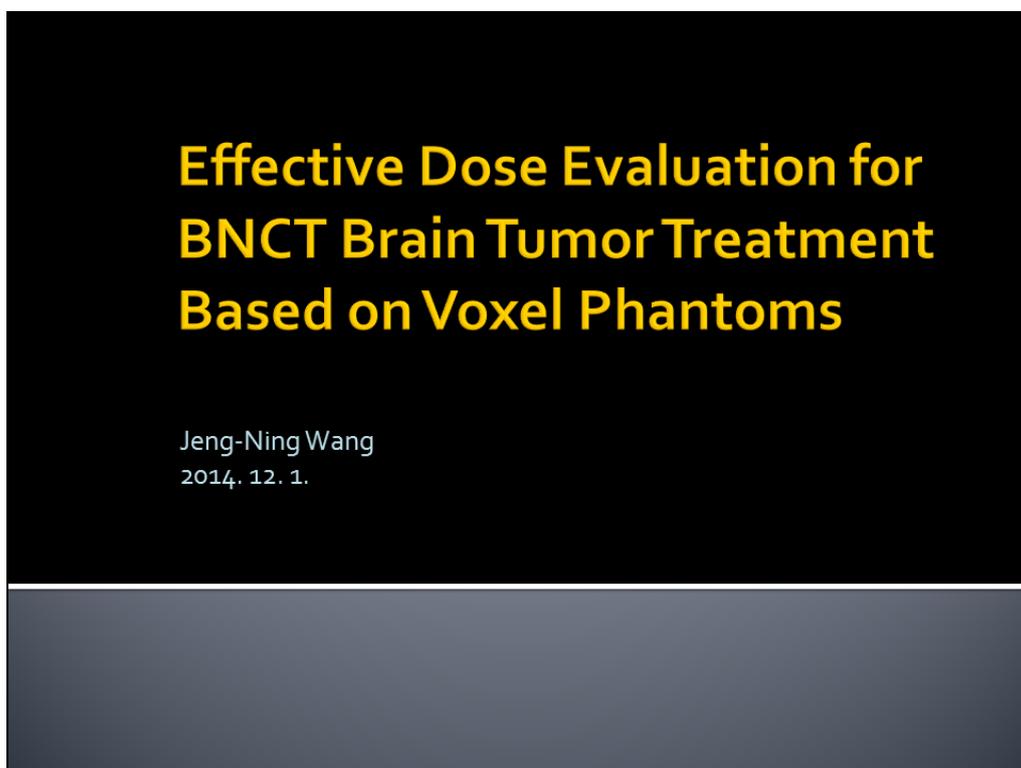


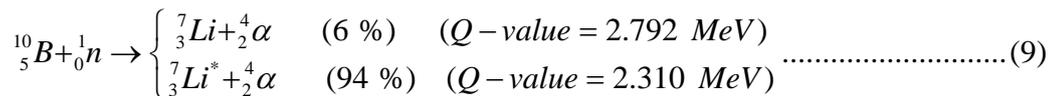
圖 12 硼中子捕獲治療有效劑量評估簡報

### (三)、我方簡報

我方簡報標題為硼中子捕獲治療有效劑量評估與乾式貯存設施屏蔽分析(如圖 12 與圖 15)，以下及分別對兩份簡報內容做一說明。

#### 1、硼中子捕獲治療有效劑量評估

放射性治療主要利用輻射與物質的作用，藉由給予腫瘤細胞致死性的破壞，達到癌症治療的效果。中子捕獲治療 (neutron capture therapy) 主要的原理為，利用同位素捕獲中子後放出重離子 (heavy ion) 的特性，來達成破壞腫瘤細胞的目的。而硼中子捕獲治療 (以下簡稱 BNCT) 即是使用硼的同位素  $^{10}\text{B}$  作為中子捕獲反應的作用介質。其反應式為：



現今仍活躍執行臨床試驗治療的 BNCT 設施主要為日本京都大學的 KUR 和國內清華大學的 THOR。

除了治療區域的腫瘤劑量外，由於使用反應器產生之中子射束進行硼中子捕獲的觸發，因此除  $^{10}\text{B}$  所產生之  $^7\text{Li}$  與  $\alpha$  粒子對非腫瘤區域組織器官造成之劑量外，中子射束本身對其他正常組織器官的劑量風險也需要做評估。使用蒙地卡羅法配合體素假體的應用，可以針對人體各器官組織之吸收劑量以及等價劑量進行評估，進而對 BNCT 治療造成之有效劑量做一探討。

簡報中除對 BNCT 做一簡介外，主要是針對蒙地卡羅法於體素假體上的應用做一說明。其內容包含：

- 劑量評估之定義與計算方式 – 針對輻防領域及核醫領域常用之輻射防護量定義與演進做一簡介。例如吸收劑量、等效劑量、有效劑量之沿革，

以及其所使用之輻射加權因數與組織加權因數隨著不同 ICRP 報告版本之改變與差異等。

- 計算工具程式簡介 – 介紹所使用之蒙地卡羅計算機程式 MCNP 及其特性。蒙地卡羅法計算機程式 MCNP 乃利用亂數產生器進行隨機性的粒子遷移模擬。同時配合核截面資料庫的取樣過程，以及三維幾何模型的處理，來獲得複雜情況之最終統計結果。
- 輻射粒子遷移模擬說明 – 針對不同領域之專家簡單說明模擬輻射粒子遷移時所考量之參數與狀況，如粒子能量、遷移距離與遷移方向的取樣方式、與物質作用之機制、能量沈積等。並說明為何蒙地卡羅法適合做為粒子遷移模擬之用。
- 蒙地卡羅法計算流程 – 介紹在蒙地卡羅法應用於模擬輻射粒子遷移時之程式流程。包含從射源項的能量、位置、角度、權重的取樣開始，經過與介質進行各種作用，直至輻射粒子在介質中能量沈積，遷移過程結束為止。
- 計算模型建立 – 針對幾何模型與各項程式運跑參數做一說明。如 BNCT 照射方式、遷移粒子歷程設定、計算結果紀錄方式等。
- 射源項設定 – 介紹所使用之 BNCT 中子射束。射束共包含四個部分，分別為熱中子、超熱中子、快中子、以及光子。其中超熱中子即為 BNCT 治療最主要的部分。圖 13 即為 THOR 產生之中子射束能譜。
- 體素假體介紹 – 簡介劑量評估時所使用之體素假體，以及其應用於劑量計算上之特色。體素假體由許多不同材質設定之微小體素堆積而成，可以模擬詳細的人體器官組織形狀、重量與尺寸。ICRP-110 報告提出的參考人體素假體為輻射防護量的計算提供了更精準的對象。圖 14 即

為該體素假體之示意圖。

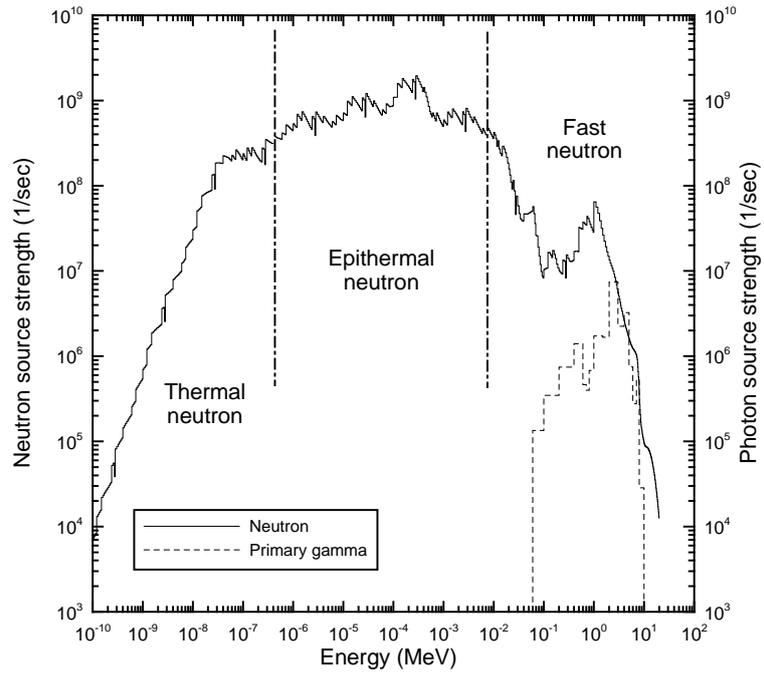


圖 13 清華大學 THOR 產生之 BNCT 治療射束能譜

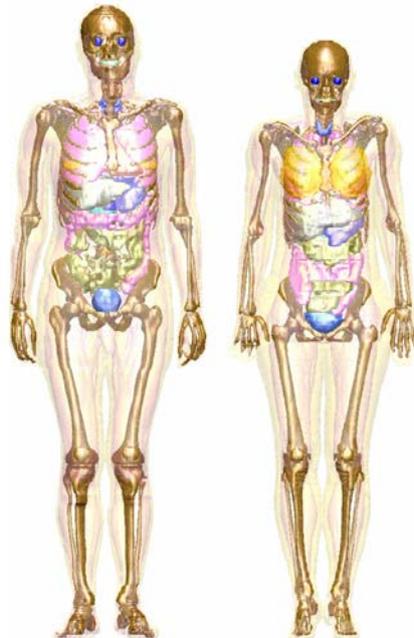


圖 14 國際輻射防護委員會於 ICRP-110 號報告提出之參考人體素假體

- 計算結果與討論 – 針對劑量評估結果做一介紹，並探討劑量定義與加權因數對評估結果的影響。

此外，除對蒙地卡羅計算的說明外，也針對計算所得之吸收劑量、等價劑量與有效劑量在不同輻射防護的定義中的變化趨勢以及其對計算結果之影響作一探討。同時亦針對 BNCT 射束對劑量之各項貢獻，如中子、一次光子、二次光子與  $^{10}\text{B}$  產生之重粒子等做一分析與說明。此一簡報之目的在於與巴黎中央理工工業工程實驗室之團隊交流蒙地卡羅法於不同領域中之應用方式。

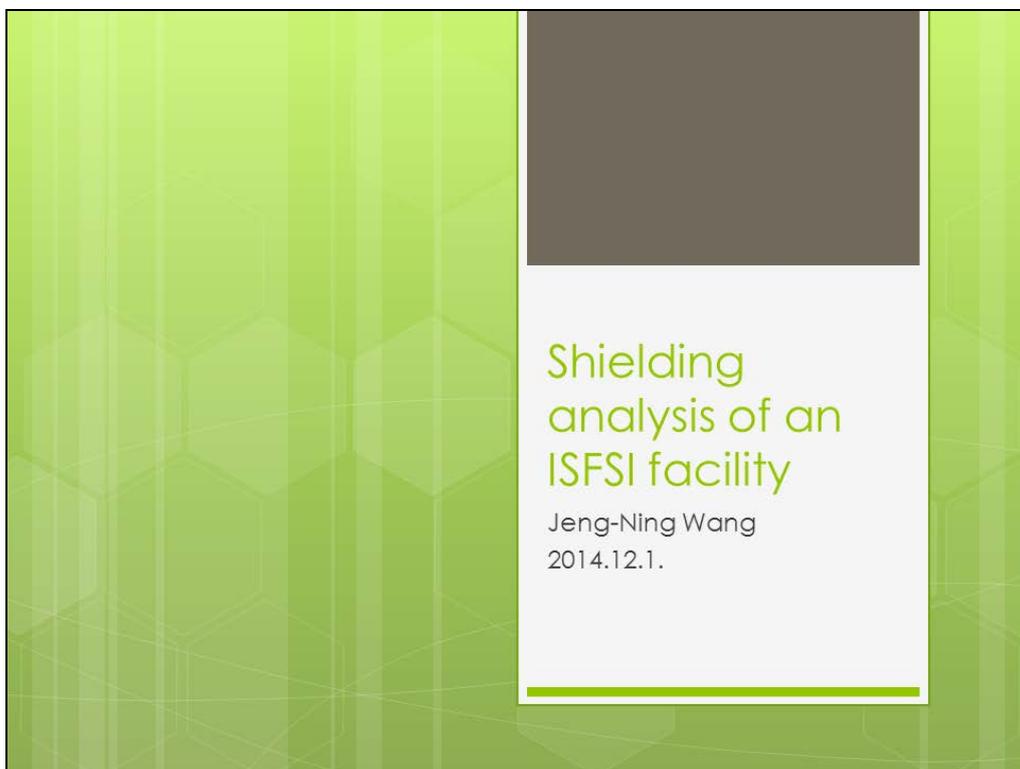


圖 15 乾式貯存設施屏蔽分析簡報

## 2、乾式貯存設施屏蔽分析

本簡報主要是介紹蒙地卡羅法於乾式貯存屏蔽分析，以及廠界輻射劑量率評估之應用方式。除蒙地卡羅之應用外，簡報之重點主要放在變異數降低方法之使用經驗，以及應用技術之交流。乾式貯存設施之屏蔽分析為深穿透類型之蒙地卡羅計算，而其廠界輻射劑量率之評估均為長遷移距離之模擬，因此在蒙地卡羅計

算中，兩者評估均需要考量其計算結果收斂的優劣。由於計算結果的不確定度攸關評估的準確度，因此如何正確且適當地選用合適的低變異數降低方法做為蒙地卡羅計算的輔助工具，是所有蒙地卡羅法使用者均需特別注意的部分。此外，在使用變異數降低方法時，要如何避免造成過度偏壓（over-biased）的情況導致計算結果大幅偏離真實值（truth value）也是必須仔細加以考量的地方。

在第（二）節中曾述及工業工程實驗室亦因其所模擬的案例亦遭遇到蒙地卡羅計算效率與收斂的問題，且其所使用之變異數降低方法與一般輻射防護領域常用之變異數降低方法大相逕庭。故在本簡報中兩方即針對彼此所使用之變異數降低技術進行討論與經驗交流。同時也對不同領域間蒙地卡羅法應用上之差異進行討論。

本簡報主要內容為：

- 乾式貯存設施簡介 – 簡單介紹乾式貯存設施，包含其設置目的、安全評估項目、輻射屏蔽條件，以及在輻射防護項目上之評估目的與需考量的要點，如貯存設施造成之劑量風險等。
- 評估工具介紹 – 介紹所使用之蒙地卡羅計算機程式 MCNP。除 MCNP 程式之原理及運跑流程之外，亦針對進行乾式貯存設施進行屏蔽分析所使用到的程式功能作一說明。如程式分段接續運跑、貯存粒子資訊之功能。
- 計算模型 – 說明乾式貯存設施在進行屏蔽分析時所建立之幾何模型，包含屏蔽厚度、材質設定、模型簡化考量因素、設施配置之額外屏蔽考量等。
- 射源項說明 – 針對計算時所使用之射源項特性，如射源能量分佈、空間分佈、與射源強度做一說明。乾貯設施屏蔽分析時將射源項分為三

類，分別為用過核子燃料束產生之燃料中子、燃料光子、以及用過核子燃料束中之其他金屬結構物經過反應爐中子活化後，所產生之活化光子。

- 評估模式建立 – 介紹乾式貯存設施屏蔽分析與劑量計算時所使用之各項參數，以及進行模擬計算時針對深穿透情況之考量。亦針對程式所記錄之結果與其後續處理做一說明。
- 變異數降低方法 – 針對在進行蒙地卡羅法輻射粒子遷移計算時所使用之變異數降低方法進行說明，包含幾何分裂方法與強迫碰撞方法等。並就其所使用之時機做一探討。
- 結果與討論 – 針對屏蔽分析與劑量評估之結果做一說明。

### 三、心得

本次赴法國巴黎中央理工學院工業工程實驗室實習，雖然實習日程不長，但成果豐碩。除接觸到有關不確定度評估的新概念外，對於不同領域間的蒙地卡羅應用面也進行了經驗與技術交流。

蒙地卡羅法由於其統計與機率的特性，其計算結果均帶有一不確定度。蒙地卡羅計算之不確定度的重要性與計算結果相當。即便以程式運跑出結果，若其不確定度過大，該計算結果仍不具代表性與參考價值，甚至可能會誤導後續之評估。因此如何準確評估蒙地卡羅計算結果之不確定度，一直是重要的研究方向。機率箱為一新的概念，與傳統的蒙地卡羅計算流程有很大的不同。傳統的蒙地卡羅計算無法將取樣依據的不確定度帶入計算中加以評估，因此其計算結果之標準差僅代表計算過程中的統計誤差，無法做更全面的考量。機率箱則跳脫傳統的蒙地卡羅計算思維，將取樣依據（於電廠可靠度評估，即為失效機率，於屏蔽分析或劑量評估，即為核截面資料庫）本身所帶有的不確定度亦納入蒙地卡羅計算中。因此計算結果除計算過程的統計誤差外，也包含了取樣依據的誤差，因此考量機率箱時其計算結果之不確定度將更接近系統整體的誤差值。儘管機率箱為一尚在發展中之新概念，但已有期刊論文發表，也實具應用價值，值得做更深入的探討與研究，亦期望未來能應用於輻射防護、屏蔽分析、劑量評估、核醫藥物研發等蒙地卡羅計算。機率箱的理論概念，尤其與輻射防護領域中核截面資料庫的邏輯相類似，未來若有機會，或可與建立核截面資料庫的布魯克海文國家實驗室（Brookhaven National Laboratory, BNL）、勞倫斯立佛摩爾國家實驗室（Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL），以及洛斯阿拉摩士國家實驗室進行交流，研究機率箱應用於核截面資料庫不確定度評估之可行性。此舉應可使蒙地卡羅法之計算結果於輻射防護與核醫藥物領域更具有說服力。

蒙地卡羅法為一強大的評估工具，可針對各種模型進行詳細之模擬與計算，

其計算結果亦廣為學術界與業界所接受。如同前段所述，蒙地卡羅法計算結果之不確定度與計算結果同等重要。因此要如何有效率且正確的降低計算結果的不確定度，讓程式運跑順利收斂，亦為蒙地卡羅計算之重要課題。在諸多加速收斂的方式中，變異數降低方法為一強大的輔助工具。在輻射防護與屏蔽分析領域上，主要使用幾何分裂之變異數降低方法，來增加計算效率。但在電廠可靠度評估時卻相反，主要使用強迫變遷方法來增加協助收斂。此次與巴黎中央理工學院工業工程實驗室進行蒙地卡羅技術交流與經驗分享，除對彼此較常用且拿手之變異數降低方法做更進一步的瞭解與討論外，同時也截長補短，對變異數降低方法在蒙地卡羅計算中之應用有更全面性的瞭解。此外，不同領域之間要如何使用共通的變異數降低概念來針對該領域進行特定問題的分析與應用，也是這次實習很大的收穫之一。

本次實習最大之收穫，除獲取新知外，在不同研究文化的環境中與各種領域的研究人員相互交流，視野也因此更加廣闊。同時亦感謝本所駐法進修的羅崇功先生的大力協助，使得此次赴巴黎中央理工學院實習能夠順利完成。期望能將實習所學，應用於未來的研究工作，對我國輻射防護與核醫藥物開發等相關領域有所裨益。

## 四、建議事項

根據此次赴巴黎中央理工學院工業工程實驗室實習的心得，冀望提供拙見，協助本所提升研究水準，今歸納如下

- (一) 巴黎中央理工學院為法國著名學校，在能源與環境、生物工程、奈米科學、資訊系統等諸多領域均有專業之研究。此次赴工業工程實驗室學習新知與技術交流，深覺與各種專業領域的研究人員討論與交換意見，往往能夠在原有的專業領域中激盪出新的想法與概念。本所應持續派員與巴黎中央理工學院繼續維持學術交流。除可提升本所國際視野，與先進國家的專家學者建立良好的關係與互動，在未來亦能有助於尋求雙方在學術上與技術上合作的機會，增加本所在國際上的能見度。
- (二) 機率箱為一新的概念與思考方向，對於蒙地卡羅計算中的不確定度評估有更深入的探討。礙於此次實習日程較短，只能管中窺豹，但深覺機率箱在未來應能解決輻射防護領域中有關核截面資料庫不確定度評估的問題。不確定度在蒙地卡羅計算中為關鍵性的資訊，代表了評估結果的準確度。本所應持續關注此一新領域的研究與發展現況，應能提升本所未來在輻射防護上的技術與能力。
- (三) 我國習慣於講求立竿見影之效，期望在最短的時間內有效率的獲得成果或改進，往往只著眼於眼前的問題。其優勢在於機動性強，對於突發的狀況或問題能夠快速的應變並提出解決之道。但相對的較為欠缺長程規劃的眼光。基礎的學術研究往往無法於短期即看到績效，需要長時間投入人力物力，才能獲得相對應的成果。本所為國內引領高階技術之國家實驗室，應以培育具深度及廣度思考能力之研究人才為己任，並持續與國際趨勢與發展接軌，以提升國內領先科技的水準。

(四) 本所在輻射防護、屏蔽分析與劑量評估領域，已以蒙地卡羅技術建立精準且純熟之應用技術。輔以變異數降低方法以及平行運算技術，本所已可針對大部分常見的屏蔽案例進行分析與評估。但在兩類劑量評估領域上，本所應可再將蒙地卡羅技術加以精進。其一為高能物理領域，另一為微劑量領域。現今較常遇到的屏蔽分析或劑量評估案例均為中子、光子與電子射源，其射源能量也僅至數十 MeV。但在較高能量（如能量為 GeV 等級）或是中子、光子、電子射源外之輻射粒子，如高能中子、質子、微中子等，本所仍缺乏足夠的技術進行評估與計算。高能輻射對於電荷粒子加速器的設計、宇宙射線屏蔽與偵測、材料工程研究、乃至於核子醫學應用等均有其重要性。目前輻射相關的高能物理領域以歐洲核子研究組織（CERN）最為有名，其研究如反物質、希格波瑟粒子、重粒子對撞機等均相當具前瞻性，而其中輻射偵測、評估與防護均在這些領域中佔有一席之地。目前我國國家同步輻射中心亦有高能射束方面的研究與應用，未來若本所有相關領域的研究規劃，亦可與國家同步輻射中心進行技術交流，並進一步洽談合作。在微劑量領域方面，目前所內之輻射劑量評估均以巨觀量為主，即國際輻射防護委員會所定義之各種輻射防護量，如吸收劑量、等價劑量、有效劑量等。巨觀定義的輻射防護量為計算輻射粒子與介質作用之平均行為的結果，亦可以劑量期望值稱之。在現今所遇到的屏蔽分析案例，其尺度均為公尺或公分，以巨觀定義的輻射防護量作為評估依據已綽綽有餘。然輻射粒子與物質作用原本即為機率性而非定值，在巨觀尺度下或可忽略其機率性質，以平均值或期望值的概念進行輻射劑量評估，但在微觀尺度，如微米（ $10^{-6}$  m）甚至是奈米（ $10^{-9}$  m）尺度時，輻射粒子與物質作用的機率性便不可被忽略。生物細胞即為微米尺度、而去氧核糖核酸即位於奈米尺度。圖 16 即顯示出各種不同線性能量轉移之輻射粒子在不同尺度下的能量沈積情形。由圖中可知，在微米尺度以下、大部分的輻射粒

子其劑量沈積均有極大的擾動範圍，無法以平均值或期望值的概念加以評估。微劑量學便是針對此一現象所發展，其目的即為還原微小尺度下，原本為巨觀量所忽略的輻射粒子與物質作用之機率特性。此一特性的評估在標記短射程、高線性能量轉移的同位素之核醫藥物至為重要。由於此類核醫藥物目的為利用超短射程之輻射粒子（如 $\alpha$ 粒子、慢速電子、重荷電粒子等）進行局部的腫瘤細胞治療，並同時降低鄰近正常組織細胞之傷害，

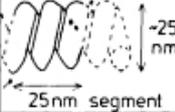
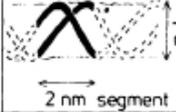
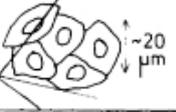
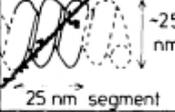
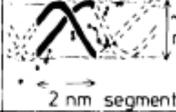
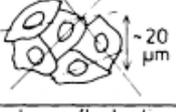
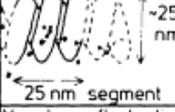
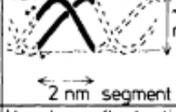
	Whole tissue	Individual cells	Chromatin fibre (total ~5 $\mu$ m per cell)	DNA (total ~2 $\mu$ m per cell)	Mean number lethal lesions per cell
<b>External <math>\gamma</math> rays</b>					~0.001
Dose uniformity	Uniform Dose = 1 cGy	~ Uniform Dose = 1 cGy	Very large fluctuations Doses = 0 to $\sim 10^3$ Gy	Very large fluctuations Doses = 0 to $\sim 10^6$ Gy	
Mean number of tracks	$\sim 10^9$ gram $^{-1}$	$\sim 50$ cell $^{-1}$ No cells unirradiated	$\sim 10^{-6}$ segment $^{-1}$ $\sim 20$ segments hit cell $^{-1}$	$\sim 10^{-8}$ segment $^{-1}$ $\sim 10$ segments hit cell $^{-1}$	
<b>Internal <math>^{220}\text{Rn}</math> (3 <math>\alpha</math>'s)</b>					~0.01
Dose uniformity	Variable Doses = 0 to 2 cGy	Large fluctuations Doses = 0 to $\sim 30$ cGy	Very large fluctuations Doses = 0 to $\sim 10^4$ Gy	Very large fluctuations Doses = 0 to $\sim 2 \times 10^6$ Gy	
Mean number of tracks	$\sim 10^7$ gram $^{-1}$	$\sim 0.1$ cell $^{-1}$ $\sim 90\%$ of cells unirrad.	$\sim 6 \times 10^{-7}$ segment $^{-1}$ $\sim 1$ segment hit cell $^{-1}$	$\sim 10^{-8}$ segment $^{-1}$ $\sim 10$ segments hit cell $^{-1}$	
<b>External 10 MeV neutrons</b>					~0.005
Dose uniformity	Uniform Dose = 1 cGy	Large fluctuations Doses = 0 to $\sim 5$ cGy	Very large fluctuations Doses = 0 to $\sim 5 \times 10^3$ Gy	Very large fluctuations Doses = 0 to $\sim 10^6$ Gy	
Mean number of tracks	$\sim 10^7$ gram $^{-1}$	$\sim 1$ cell $^{-1}$ $\sim 37\%$ of cells unirrad.	$\sim 4 \times 10^{-6}$ segment $^{-1}$ $\sim 8$ segments hit cell $^{-1}$	$\sim 10^{-8}$ segment $^{-1}$ $\sim 10$ segments hit cell $^{-1}$	

圖 16 各種輻射粒子於不同尺度下的能量沈積行為

因此其劑量沈積均為微米以下之尺度。此時該核醫藥物對腫瘤細胞造成之劑量便須以微劑量學的觀點來進行評估，以達到精準治療之目的。微劑量學之概念與數學模型發展的相當早，但因受限於硬體與軟體設備的缺乏，其度量與評估計算的技術發展相當緩慢。直至現今拜電腦科技進步之賜，微劑量評估可以蒙特卡羅技術加以模擬與計算，國際上關於微劑量學的諸多研究也仍位於初步階段。以上所述之輻射高能物理以及微劑量兩領域目

前國內的研究尚相當缺乏，本所若欲精進蒙地卡羅技術於輻射防護與劑量評估的應用與研究，此兩領域或許可為本所未來高端輻射評估技術的規劃參考。

## 五、參考文獻

1. Chung-Kung Lo, N. Pedroni, E. Zio., “Bayesian probabilistic analysis of a nuclear power plant small loss of coolant event tree model with possibilistic parameters,” ESREL 2013, Amsterdam, Netherlands, 3321-3328 (Sep 2013).
2. Jeng-Ning Wang, Kuo-Wei Lee, Shiang-Hwei Jiang, “Effective dose evaluation for BNCT brain tumor treatment based on voxel phantoms,” *Appl. Radiat. Isot.*, Vol. **88**, 55-58 (2014).
3. Jeng-Ning Wang, Chung-Hsin Lu, Kuo-Wei Lee, Wei-Tyng Lin, Shiang-Huei Jiang, “Study of the site dose rate for the ISFSI facility with Monte Carlo and Deterministic Methods,” *Nucl. Technol.*, Vol. **168**, 101-107 (2009).
4. Yanhui Lin, Marc Bouissou, “Monte Carlo simulation acceleration techniques,” EDF draft report (2012).
5. E. E. Lewis and F. Böhm, “Monte Carlo simulation of Markov unreliability models,” *Nucl. Eng. Des.* Vol. **77**, 49-62 (1984).