

行政院原子能委員會  
委託研究計畫研究報告

核子醫學診療輻射劑量評估研究 與  
蒙地卡羅加速計算方法開發

**Dose assessment of diagnostic / therapeutic nuclear  
medicine and development of efficient Monte  
Carlo calculation method**

計畫編號：1032001INER009

受委託機關(構)：國立清華大學

計畫主持人：薛燕婉

聯絡電話：(03)5742669

E-mail address：ywhliu@ess.nthu.edu.tw

核研所聯絡人員：張淑君

報告日期： 104 年 02 月 24 日

## 目 錄

目錄.....	i
中文摘要.....	1
英文摘要.....	3
壹、計畫緣起與目的.....	5
貳、研究方法與過程.....	6
一、體內劑量體素幾何描述與劑量計數方式.....	6
(一)幾何描述模式.....	6
(二)劑量計數 .....	6
二、Re-188、Y-90 射源用於肝癌治療之劑量評估計算.....	8
參、主要發現與結論.....	9
一、肝臟腫瘤平均劑量計算.....	9
二、肝臟腫瘤劑量分布計算.....	11
(一)Multiple entries 多筆 cell tally 劑量計數.....	11
(二)採 mesh tally 劑量分布結果.....	11
(三)Mesh tally 計數方法之劑量分布之 S 值資料分 析.....	13
三、肝臟腫瘤及腫瘤附近區域之體內劑量分布圖.....	13
四、均質化幾何描述下之 mesh tally 劑量分布結果.....	14
結論.....	15
肆、參考文獻.....	15

# 核子醫學診療輻射劑量評估研究與蒙地卡羅加速計算方法開發

國立清華大學核子工程與科學研究所

薛燕婉 朱惠珍

計畫編號：1032001INER009

## 中文摘要

本研究針對以蒙地卡羅法計算核醫藥物體內劑量的體素幾何描述與劑量計數方式進行最佳化分析研究。並以 Re-188、Y-90 射源用於肝癌治療之劑量評估計算為例。

以病人電腦斷層掃描影像像素大小為詳細體素模型能提供最真實的幾何描述及射源設定，但必須採用 MCNP 特殊的 repeated structure 來建構幾何模型。在劑量分布計算的計數方式，相較於 cell tally，使用立方體的 mesh tally 將網格的大小設定為與幾何模型體素大小相同或其整倍數進行網格劑量計數，可大幅下降計算所需時間。

研究結果顯示，將計數網格大小由詳細體素尺寸 1x1 增至 2x2 倍進行 tally 是較佳的選擇；其計算結果與參考值的差異小於 2%，當使用  $10^8$  個模擬粒子數，統計誤差可小於 1.5%，相較於 1x1 tally 可節省 70% 的計算時間；用六核的單機電腦執行計算，約需 10 小時，使用 60 核的 PC cluster 可降至 1 小時。本研究亦採用 MCNP 的 repeated structure 來建構 2x2 均質化體素模型作為蒙地卡羅計算的幾何描述，在採用 2x2 mesh tally 的計算結果及時間與詳細體素模型相同。顯示影響 MCNP 的計算時

間取決於 tally 的大小，而與幾何模型是否均質化關聯不大。本研究結果有助於臨床上腫瘤治療劑量與療效之關聯性建立，作為醫生進而調整給予核醫藥物藥量之依據。

關鍵字: 核醫藥物、體內劑量、蒙地卡羅計算

**Dose assessment of diagnostic / therapeutic nuclear medicine and  
development of efficient Monte Carlo calculation method**

**Yen-Wan Hsueh Liu and Hui-Chen Chu**

Institute of Nuclear Engineering and Science, National Tsing Hua University

**Abstract**

The purpose of this study is to investigate the optimum way of internal dose calculation while using Monte Carlo Method. Issues needed to be considered include geometry description, way of tally and tally size. The study is conducted through the internal dose calculation of nuclear medicines Re-188 and Y-90 for liver cancer treatment.

The most realistic way of geometry description for dose calculation is to use the pixel information of patient's CT image to build the detailed voxel geometry, which can be realized by using the special feature of repeated structure of MCNP input option. The source region can then be assigned accurately. As for the dose distribution calculation, the use of mesh tally can drastically reduce the CPU time requirement compared to cell tally.

The analysis shows that the optimum tally size is 2x2, 4 times the voxel size of CT image. The results can be calculated to within 2% error, and the calculation can be done in reasonable computing time. A 2x2 homogeneous model was also setup by using repeated structure. The results and efficiency

were the same as the detailed voxel model as 2x2 tally size was used.

The results of this study will be helpful for the establishment of the relationship between tumor dose delivered and the efficacy of internal medicine therapy, which can be used for future adjustment of dose delivery.

**Keywords:** Nuclear Medicine, Internal Dose, Monte Carlo Calculation

## 壹、計畫緣起與目的

惡性腫瘤在 102 年十大死因中排名第一。而十大癌症死因中肝癌高居第二。在肝癌的治療上，除了早期診斷、早期外科手術切除外，幾乎無痊癒的可能。針對無法以手術切除的肝癌，現今在歐美研究中利用核醫藥物治療腫瘤已具初步顯性的療效。

以放射性同位素治療肝癌的藥物有 Lipiodol Re-188(銻 Rhenium-188)<sup>1</sup>、Re-188 liposome<sup>2</sup>、Y-90(釷 Yttrium-90) 微球體<sup>3</sup> 等。利用 Re-188 及 Y-90 半衰期短的特性，使用含放射性同位素的藥物藉由動靜脈注射至腫瘤吸收，在放射性同位素衰變過程中釋放出能量適中且射程短的放射線，可於近距離釋出能量抑制癌細胞，同時降低對正常細胞的傷害。德國於 2007 發表動脈注射高活性 Re-188 microsphere 於肝腫瘤的臨床試驗結果<sup>4</sup>；2011 發表靜脈注射 Re-188 microsphere 於老鼠肝腫瘤的肺功能影響評估報告<sup>5</sup>。美國於 2007 發表以蒙地卡羅計算評估比較使用 Y-90 與 I-131 的治癌潛力<sup>6</sup>。台北榮總外科目前進行 Y-90 治療肝癌的臨床試驗；亦使用核能研究所自行研發的 Re-188 liposome 針對多發性轉移病人進行第零期人體試驗<sup>7</sup>。

本實驗室 101 年度利用均質化方法建立病患 CT 均質化模型。102 年度建立大鼠 CT 影像轉成蒙地卡羅計算體素的技術，佐以詳細體素模式計算結果作為參考值。

本研究延續之前的核醫藥物體內劑量評估研究<sup>8</sup>，進行以 Re-188 與 Y-90 肝癌治療藥物作為射源的病人腫瘤劑量計算。針對蒙地卡羅程式在幾何描述的選項與劑量計數方法做進一步探討，在可接受的電腦計算時間下找出合適可行的模擬計算方式。有助於未來應用在 Re-188 及 Y-90 的臨床治療劑量評估。

## 貳、研究方法與過程

本研究使用的電腦斷層掃描影像像素為 512 x 512，影像解析度大小為 0.067578 x 0.067578 x 0.5 cm<sup>3</sup>。體內劑量計算採蒙地卡羅方法，使用 MCNPX 2.6.0。MCNPX 具有涵蓋電子的 mesh tally 優點，適用於 Re-188 和 Y-90 衰變出的高能貝他電子體內劑量計算。計算所用的電腦 CPU 為 I7-3770 3.4 GHz，16G 記憶體、六核。

### 一、體內劑量體素幾何描述與劑量計數方式

#### (一)幾何描述模式

蒙地卡羅計算幾何描述的方式有詳細體素模式與均質化模式兩種。詳細體素模式(detailed voxel model)能正確模擬病患電腦斷層掃描影像的每一個像素。但需運用 MCNP 特殊的 repeated structure 方式來建構詳細體素模型，也才能正確方便地設定射源的位置。

另外，均質化模式亦可運用 MCNP 特殊的 repeated structure 方式來建構幾何描述，可選擇使用 2x2, 4x4 或 8x8 的體素倍數大小，將其體素大小的材質先做均質化處理。然而在體內射源的設定上須克服如何辨識出哪些均質化後的材質是來自原先腫瘤區的材質，進而設定體內射源。故本研究以詳細體素模式為優先評估對象，再針對均質化模式進行準確性與計算速度評估。

#### (二)劑量計數方式

蒙地卡羅計算的計數方法有 cell tally 與 mesh tally 兩種。腫瘤平均劑量計算可採用 cell tally；劑量分布計算則需採用 mesh tally。劑量分布計算若使用多筆 cell by cell 的計數，優點是可知其相對應



的體素位置，缺點是需大量記憶體，若要計數整個腫瘤區域內的每一體素的劑量，電腦硬體無法負荷，且計算時間是採 mesh tally 的 25 倍。因此除了腫瘤平均劑量使用 cell tally 外，劑量分布計算則需採用 mesh tally。

Cell tally 可使用 F6(MeV/g) 或 \*F8 (total energy deposition, MeV);而 mesh tally (type3)得到的計數是總能量沉積除以單位網格體積(MeV/cm<sup>3</sup>)。蒙地卡羅計算結果均歸一為單一射源。

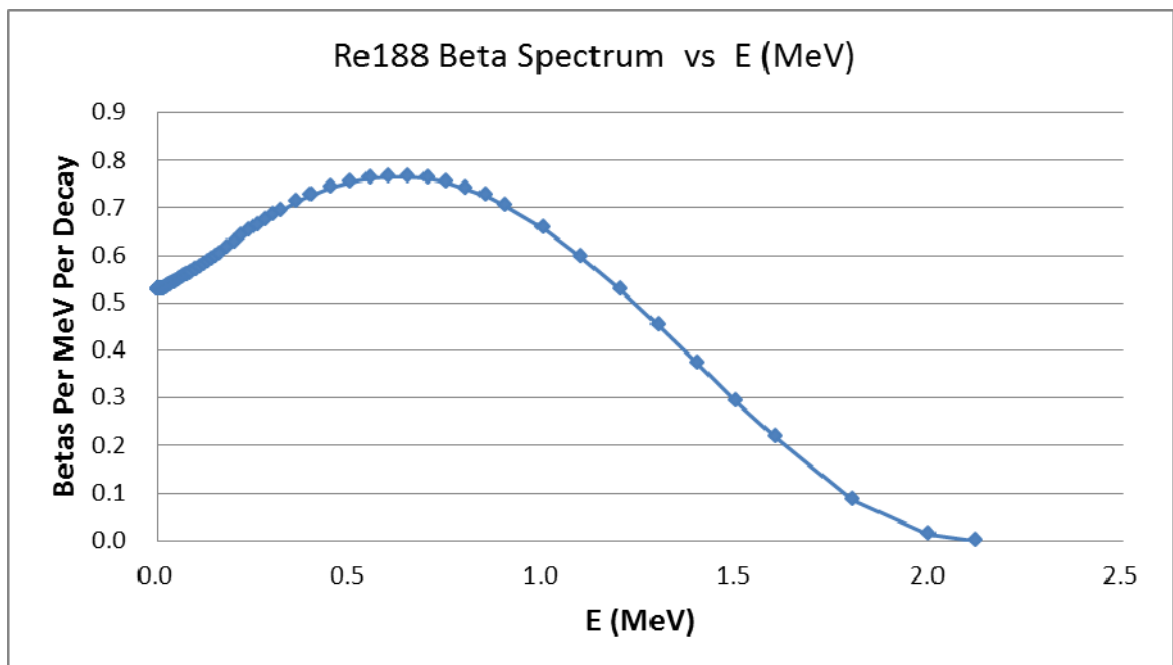
核醫藥物體內劑量評估一般需計算 S 值，為射源均勻分布在源器官時核種每次衰變發射之游離輻射對靶器官造成的平均吸收劑量。由 \*F8 計數換算為 S 的公式是

$$S(\text{mGy/MBq-s}) = \text{Total energy deposition (MeV)} / (\text{tumor total mass, g}) \\ \times 1.602 \times 10^{-13} (\text{Joule/MeV}) \times 10^3 (\text{g/kg}) \times 10^3 (\text{mGy/Gy}) \\ \times 1 (\text{Bq-s})^{-1} \times 10^6 (\text{Bq-s/MBq-s})$$

劑量分布計算採立方體 mesh tally，將計數網格(mesh)的大小設定與幾何體素(voxel)大小相同或其倍數，進行每一網格的劑量計數。相較於 cell tally，其優點是可以大幅下降所需計算時間，缺點是每一網格的劑量輸出並無相對應的網格座標，亦不易獲知腫瘤的相對應網格位置。這些問題都須經後置處理克服之。本研究針對幾何描述與計數方法選項的組合，找出準確度夠且計算時間合理的最佳模擬計算方式。

## 二、Re-188、Y-90 射源用於肝癌治療之劑量評估計算

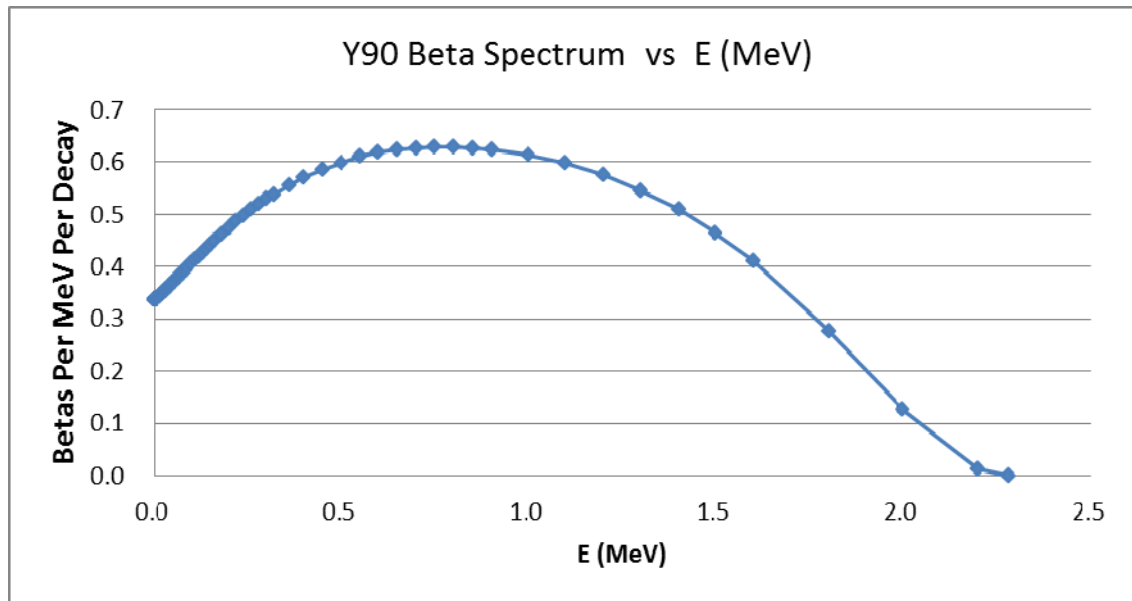
Re-188 為適用於治療的放射性同位素，它的核種半衰期是 16.9 小時，釋出的貝他( $\beta^-$ )粒子能譜如圖一，能量最大值為 2.12 MeV，在軟組織內的射程約 11 公釐(mm)；平均能量為 0.765 MeV，在軟組織內的射程約 3.5 公釐，可在近距離內殺死癌細胞。另外，伴隨釋放出 155 keV 的伽馬( $\gamma$ )射線佔 15%，可用於核醫單光子放射斷層掃描(SPECT)的造影。因此，Re-188 係一種兼具治療及造影功能的同位素。



圖一、 Re-188  $\beta^-$ 粒子能譜 (資料來源: MIRD-07)

另一種具治療性的同位素是 Y-90，半衰期為 64 小時，僅釋出貝他( $\beta^-$ )粒子，能譜如圖二，其能量最大值為 2.28 MeV，在軟組織內的射程約 11 公釐；平均能量為 0.934 MeV，在軟組織內的射程約 3.8 公釐。因為 Y-90 衰變未伴隨可供核醫造影用伽馬射線，通常在 Y-90 治療一段時間後，再使用核磁共振造影(MRI)或正子斷層掃描(PET)或電腦斷層掃

描(CT)做觀察。



圖二、 Y-90  $\beta^-$  粒子能譜 (資料來源: MIRD-07)

本研究使用 MCNPX 的 repeated structure 建構詳細體素假體，以 cell tally 及 mesh tally 進行 Re-188 及 Y-90 體內劑量計算，射源皆設定於腫瘤區。

## 參、主要發現與結論

### 一、 肝臟腫瘤平均劑量計算

表一和表二為使用 Re-188 及 Y-90 核醫藥物的腫瘤平均劑量計算結果。追蹤粒子數 Nps 為  $10^4$ 、 $10^6$  和  $10^8$ ，將腫瘤區視為一區做 \*F8 cell tally。本研究所採用之 CT 影像的像素為  $0.067578 \times 0.067578 \text{ cm}^2$ ，每 0.5 cm 掃描一張電腦斷層影像，在蒙地卡羅的幾何描述中使用 Repeated

Structure 的概念，將單位體素大小設定與影像的像素大小相同，即  $0.067578 \times 0.067578 \times 0.5 \text{ cm}^3$ ，而軟體組織的密度是  $1.05 \text{ g/cm}^3$ ，所以每單位體素的質量是  $0.002398 \text{ g}$ 。而腫瘤區共佔 121958 個體素，故推算出腫瘤區的體積佔  $278.5 \text{ cm}^3$  (其中腫瘤 X 方向最大的尺寸約 8 cm; Y 方向最大的尺寸約 7 cm; Z 方向最大的尺寸約 8 cm)。Tumor 總質量為

$$0.067578 \times 0.067578 \times 0.5 \times 1.05 (\text{density}) \times 121958 (\text{total voxel counts}) \\ = 2.4 \text{ mg} \times 121958 = 292.4 \text{ g}。$$

結果如表一、表二。模擬粒子數  $10^4$ 、 $10^6$  和  $10^8$  所得的 \*F8 cell tally，其統計誤差皆在 1% 以內。亦即將腫瘤區僅視為一區做 tally 其追蹤粒子數  $10^4$  就足夠。由於蒙地卡羅計算結果為歸一至單一射源，總能量沉積接近原單一射源的平均能量 (Re-188 射源  $0.765 \text{ MeV}$ ；Y-90 射源  $0.935 \text{ MeV}$ )，分別為  $0.7539 \text{ MeV}$ 、 $0.9112 \text{ MeV}$ ，符合預期。此結果可作為後續 mesh tally 計算劑量分布的參考值。

另外由 Re-188 伴隨的伽馬射線釋出所造成的劑量貢獻僅為貝他 ( $\beta$ -) 粒子的 0.5%。因此往後在 Re-188 的射源劑量計算上將不納入此伽馬射線釋出的部分。表中優數 FOM (Figure of Merit) 常用來評估計算效率為

$$\text{FOM} = 1 / [(1\sigma)^2 \times \text{CPU Time}(\text{min})]$$

其中  $\sigma^2$  是計算結果的變異數而 T 為計算時間，當標準差相同時 FOM 與計算時間成反比。計算係使用 6 cores 的 CPU 執行，故 Clock Time 為 CPU Time 的 1/6。

## 二、 肝臟腫瘤劑量分布計算

### (一) Multiple entries 多筆 cell tally 劑量計數

為得知肝臟腫瘤區之體內劑量之詳細分布概況，採用蒙地卡羅的多筆 cell by cell 的計數。當模擬粒子數為  $10^6$  就必需耗費大量的記憶體，佔 CPU time 3632 min (近 2.5 天)，就算使用 6 core 做計算也需將近半天的時程，所需的耗費的 CPU 時間是採 1x1 mesh tally 的 25 倍，甚至是採 2x2 mesh tally 的 100 倍，更遑論模擬粒子數達  $10^8$  情況。且在 Nps 僅  $10^6$  下，單一 cell 的 tally 誤差極大，皆大於 3%，需增加 Nps 至  $10^8$ 。多方考量下，此 multiple entries 多筆 cell tally 在硬體及時間上，目前是不可行。但此法的優點為可提供每一個項 tally 的劑量其所相對應的 cell 位置，則可依據此對應關係畫出 3D 的劑量分布圖。

### (二) 採 mesh tally 劑量分布結果

為得知肝臟腫瘤區劑量之詳細分布，採 MCNPX 立方體網格計數方法。將 mesh 大小由 1x1 體素尺寸增至 2x2、4x4、8x8 進行 tally，在 tally 的結果與參考值在允許誤差範圍內，嘗試大量減低所需耗費的 CPU 時間。當 mesh tally size 為 1x1 時的體積大小為  $0.067578 \times 0.067578 \times 0.5 = 0.00226 \text{ cm}^3$  (總數 125260)。依此類推: 2x2 為  $0.00902 \text{ cm}^3$  (總數 32168); 4x4 為  $0.03610 \text{ cm}^3$  (總數 8482); 8x8 為  $0.14439 \text{ cm}^3$

(總數 2355)。

Mesh tally 僅依據所設定的 mesh 大小進行 tally，並不知此 mesh 所對應的材質為何，所以須藉由後製處理去判斷哪些 mesh 是腫瘤區或非腫瘤區。本研究是以相同的 MCNPX 輸入檔，再額外執行僅將電子能量設定 10 KeV 情況下，比對出原有的 mesh 哪些是腫瘤區。因為 10 KeV 電子的穿透距離僅 2.5 um (Bolch et al,1994)，小於單一 mesh 的 size 0.067578 cm，足可判定不會越過到鄰近的 mesh。所以 10 KeV 的電子若 tally 出劑量的 mesh，即代表帶有射源的腫瘤區。

在詳細體素模型下，模擬粒子數為  $10^8$ ，進行射源為 Re-188 和 Y-90 的腫瘤劑量分布計算。在統計誤差可接受的範圍內，採不同的 mesh tally size 的計算結果其平均劑量與參考值(以 cell tally 計算的平均劑量) 相差在 3%以內的有 tally size 為 1x1、2x2 和 4x4。當 tally size 由 1x1 增為 2x2 時，CPU 時間可大幅減少為原來的 30%；由 1x1 改為 4x4 時，CPU 時間可減少為原來的 20%，但與參考值的差異較大 (~3%)。Tally size 採 2x2 的計算結果與參考值相差 < 2%，使用  $10^8$  的模擬粒子數之統計誤差 < 1.5%，用 6 cores 的單機進行計算約需 10 小時。使用 60 核的 PC cluster 可降至 1 小時。綜合以上各點，mesh tally size 2x2 是較佳的選擇，它與參考值相差 < 2%，且統計誤差 < 1.5%，又可節省 70%的 CPU 時間。

### (三) Mesh tally 計數方法之劑量分布之 S 值資料分析

對於採不同的 mesh 大小所造成的 tally 計算結果影響為何？本段以 Re-188 和 Y-90 射源、模擬粒子數  $10^8$ ，採用不同的 mesh tally size，將眾多組網格的 mesh tally 結果 ( $\text{MeV}/\text{cm}^3$ ) 直接輸出數據，轉換為 S value ( $\text{mGy}/\text{MBq}\cdot\text{s}$ ) 做資料分析。

表三、表四為腫瘤單位網格之 S value 分布百分位結果，可看出 tally 大小愈大(例如 8x8)，在較低的百分位分布上與 1x1 tally size 的結果的差異亦愈大。從平均值、20%百分位和 80%百分位來看，採用 2x2 tally size 與 1x1 tally size 的差異皆在 2%內。而採用 4x4 及 8x8 tally sizes 從平均值來看，與 1x1 tally size 的差異皆大於 5%。這是因為採 8x8 tally size 在腫瘤區邊界容易涵蓋單位體積之能量沉積較低的非腫瘤區的材質所致。

### 三、 肝臟腫瘤及腫瘤附近區域之體內劑量分布圖

本計畫使用 EXCEL 功能將 mesh tally 的 m 檔案數據，依據蒙地卡羅內定的輸出順序額外賦予座標，即先固定 Y 軸和 Z 軸座標，X 軸依序輸出；然後是 Y 軸依序輸出，最後是 Z 軸。例如: X=2, Y=3, Z=2 的矩陣，則輸出座標依序為: (1,1,1)、(2,1,1)、(1,2,1)、(2,2,1)、(1,3,1)、(2,3,1)、(1,1,2)、(2,1,2)、(1,2,2)、(2,2,2)、(1,3,2)、(2,3,2)。依此 mesh 座標可畫出單位網格之 S value 分布 3D 圖。射源 Re-188、模擬粒子數  $10^8$ 、mesh tally 2x2 的腫瘤及腫瘤附近區域單位網格之 S value 分布如圖三。射源 Y-90、模

擬粒子數  $10^8$ 、mesh tally 2x2 的腫瘤及腫瘤附近區域單位網格之 S value 分布如圖四。

#### 四、均質化幾何描述下之 mesh tally 劑量分布結果

本節採用 MCNP 的 repeated structure 建構均質化(2x2)體素模型進行蒙地卡羅計算，並克服體內射源設定於腫瘤區的困難，模擬粒子數為  $10^8$ ，射源為 Re-188 和 Y-90 的腫瘤劑量分布計算。採用 2x2 mesh tally 的計算結果與詳細體素模型相同，所需耗費的 CPU 時間亦相近。顯示影響 MCNP 的計算時間取決於 tally 的大小，而與幾何模型是否均質化似無關聯。

因為無法得知均質化後的新材質是否來自於腫瘤區，在克服體內射源設定於腫瘤區的困難上，是先將腫瘤區的某一成分元素(例如:磷, P-31)提高至 1000 倍，方便在檢視均質化後的新材質成分時，即可辨識出含腫瘤的新材質編號，藉以設定體內射源於腫瘤區。再將腫瘤區的此一成分元素恢復為原始值。此均質化模型的體內射源設定是以符合 2x2 的體素下皆來自於腫瘤區，期與詳細體素模型的體內射源設定相同。而所忽略因與其他材質混和的腫瘤材質僅佔 2.5%的腫瘤體積。

表五、表六為均質化(2x2)體素模型下，腫瘤單位網格之 S value 分布百分位結果。在均質化(2x2)體素模型下採 2x2 tally size，從平均值、20%百分位和 80%百分位來看，與詳細體素模型下採 2x2 tally size 的計



算結果非常接近，與 1x1 tally size 的差異亦皆在 2%內。

## 結論

本研究採用 MCNP 的 repeated structure 建構詳細體素假體作為蒙地卡羅計算的幾何描述。射源分別為 Re-188 和 Y-90，皆設定於腫瘤區。腫瘤區平均劑量使用 \*F8 計數求得。劑量分布計算則採 mesh tally。以準確度和計算時間來看，tally 之 mesh size 採 2x2 是較佳的選擇；計算結果與參考值的差異小於 2%，使用  $10^8$  的模擬粒子數，統計誤差小於 1.5%。此外，8x8 的 mesh tally size 有較佳的精度(precision)，而 1x1 的 mesh tally size 有較佳的準度(accuracy)，而 2x2 mesh tally size 是在可容許信賴的精度下有與參考值較接近的準度。使用六核的單機個人電腦計算時間約需 10 hrs。改用具跨 node 能力的 MPI 版 MCNP 2.7.0，使用 60 cores (5 nodes、3 CPU/node、4 core/CPU)的 PC-cluster 進行計算，時間可降至 1 hr。

為因應多筆 cell by cell tally 在硬體及時間上的不可行性，本研究使用 mesh tally 方式加上進行數據後置處理，使每一單位 mesh tally 的劑量可提供其所相對應的 mesh 位置，並區分腫瘤區與非腫瘤區，可畫出 3D 的劑量分布圖。

本研究的成果有助於臨床上腫瘤核醫藥物治療劑量與療效的關聯性建立，作為醫生調整給予核醫藥物藥量的依據。

## 肆、參考文獻

1. 王信二、羅彩月、李潤川等，Therapeutic of  $^{188}\text{Re}$ -MN-16ET/Lipiodol and  $^{90}\text{Y}$ -microspheres in hepatocellular carcinoma animal model，102 年原子能委員會委託研究計畫成果發表會，2013 年 12 月。(計畫編號 1022001INER052)
2. 藍耿立、王世禎、施易昇、李佳哲，Establishment of metastatic animal tumor models and their application in internal radiotherapy，102 年原子能委員會委託研究計畫成果發表會，2013 年 12 月。(計畫編號 1022001INER049)
3. 陳健弘，Design for the clinical trial of therapeutic radio-pharmaceuticals，102 年原子能委員會委託研究計畫成果發表會，2013 年 12 月。(計畫編號 1022001INER053)
4. Liepe, Knut, et al. , "Feasibility of high activity rhenium-188-microsphere in hepatic Radioembolization, " Japanese J. of Clinical Oncology, 37(12) , 942-950, 2007.
5. Liepe, Knut, et al. "Radiation Pneumopathy in the Rat After Intravenous Application of Re-188 Labeled Microspheres, " International Journal of Radiation Oncology Biology Physics 81(2), 529-536, 2011.
6. Song, Hong, et al. "Therapeutic potential of Y-90 and I-131 labeled anti-cd20 monoclonal antibody in treating non-hodgkin's lymphoma with pulmonary involvement: A Monte Carlo-based dosimetric Analysis," Journal of Nuclear Medicine 48.(1) , 150-157, 2007.
7. 王世禎、顏上惠、藍耿立、李德偉，Re-188-liposome nanoparticle human clinical trial，102 年原子能委員會委託研究計畫成果發表會，2013 年 12 月。(計畫編號 1022001INER050)
8. 吳晉暉、薛燕婉，核子醫學診療輻射劑量評估研究與蒙地卡羅加速計算方法開發，102 年度原子能委員會委託研究計畫成果發表會，2013 年 12 月。(計畫編號 1022001INER054)