

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫

成果報告

期中進度報告

國人參考人假體與即時化蒙地卡羅劑量評估系統之建立

計畫類別： 個別型計畫  整合型計畫

計畫編號：NSC 97-2320-B-166-001-MY3

執行期間：97年08月01日至100年07月31日

計畫主持人：吳杰

共同主持人：莊濬超、田雨生

計畫參與人員：施政廷、張智凱、陳若嵐、陳雅筑

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告  完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：中臺科技大學 放射技術系

中山醫學大學 醫學影像暨放射科學系

中華民國 99 年 05 月 31 日

## 一、中文摘要

在輻射防護的領域中，參考人假體（reference man）已廣泛的應用於體外曝露與體內曝露的劑量評估上，該假體利用不同的幾何方程式建立出符合人體器官形態之模型，搭配蒙地卡羅運算技術可評估各個器官之吸收劑量。蒙地卡羅運算技術可模擬輻射與物質作用時產生之各種作用，而對於各種輻射而言，其能量沈積將受到介質特性的影響，而目前對於參考人假體中的各種器官多半以軟組織或水的特性取代各種器官之組成，然而，不同組織器官的元素組成與密度可能有相當大的差異，利用水所求得的輻射劑量勢必產生誤差，因此，我們針對組織器官之元素組成與特性進行最佳化研究。第二年以化學劑量校準法（stoichiometric calibration）對各個組織器官的電腦斷層（Computed Tomography, CT）影像進行分析，並利用化學劑量校準法，以求得最佳化的器官元素組成與密度資料，進而提昇劑量評估的準確性。

關鍵字：蒙地卡羅模擬、化學劑量校準、電腦斷層

## 二、英文摘要

In the field of radiation protection, the reference man has been widely used in external and internal dose evaluations. It is constructed using different geometric formulas to conform to the real human morphology. By cooperation of the Monte Carlo simulation technique, the absorbed dose for each organ can be evaluated. Monte Carlo simulation technique simulates the interaction between radiation and matter. The amount of energy deposition by radiation is depending on the characteristic of matter. The tissue parameters such as element composition and density of most organs in the reference man are replaced by water or soft-tissue. However, these tissue parameters from different organs usually have a large variance, which will cause the simulation result with some error. Therefore, the optimization of tissue parameters of organs in the reference man is important. In the second year, we analyze computed tomography (CT) images. By stoichiometric calibration, the optimized elemental composition and physics density for each organ can be found. Thus, the accuracy of dose evaluation can be increased.

Key words : Monte Carlo simulation, stoichiometric calibration, computed tomography

### 三、前言

人體接受體外或體內曝露時都會造成組織器官之輻射吸收劑量，國際輻射防護委員會（International Commission on Radiological Protection, ICRP）為了劑量評估的需求，分別於 1975 年與 2003 年以西歐人的統計資料為基準發表參考人假體規範[1-2]。然而，人體組織器官之特性會因為生活習慣、飲食作息以及環境條件而有所不同，國際原子能總署（International Atomic Energy Agency, IAEA）於 1998 年針對亞洲人發佈器官生理解剖與新陳代謝特性報告[3]，其中指出亞洲人組織器官之質量較西歐人小，而聯合國報告亦統計，全世界人口中白種人約佔 20%，黃種人人口逾 50% [4]。因此，ICRP 之參考人假體並不適用於大部分人種的劑量評估，實有需依人種分類建置相關參考人假體。即使在亞洲國家之中，平均身高體重之統計資料亦有明顯之差異。因此，就輻射防護的角度而言，各個國家應進行地域性之平均人種特性調查，並建立專屬之參考人假體，以增進劑量評估之準確性。然而，就在亞洲各國逐步開始進行地域性參考人假體相關研究的同時，我國在這方面的研究仍付之闕如。

### 四、研究目的

本研究之目的即利用醫學影像建構專屬於台灣地區之參考人假體，以提升體內與體外劑量評估的準確性。除了組織器官的質量外，輻射能量之沈積亦受到介質特性的影響[5-6]。目前來說，不論將參考人假體應用於診斷、治療、核醫或是輻防的劑量評估上，多半以軟組織或水的特性取代各種器官之組成[7]；然而，不同組織器官的元素組成與密度可能有相當大的差異，利用水所求得的輻射劑量勢必產生誤差。除此之外，某些器官之組成也因為其代謝功能與生理狀態而有所不同，例如：甲狀腺攝取碘之能力，將造成其元素比重之改變[8]；不同年齡之女性乳房組成差異頗大等等[9]；我們實在有必要針對組織器官之元素組成與特性進行最佳化研究，並且引入台灣參考人假體之中。

### 五、文獻探討

以化學計量校準法（stoichiometric calibration）計算組織之密度與成份主要應用於放射治療劑量計算上，1981 年 Shrimpton[10]曾以小型康普吞散射偵測儀測量 10 種真實人體組織之電子密度，並與理論計算值比較。1992 年，Constantinou 等人[11]利用 CT 對電子校準假體進行掃描，並使用最小平方擬合法找出組織 CT 值相對於水電子密度的關係，用以修正組織不均

勻效應，以增進治療計畫之準確性。在 1996 年，Schneider[12]以六種已知組成及密度的化合物代替人體組織，藉由 CT 掃描找出 CT 值與組成元素及密度的關係式，並藉由此關係式對 ICRP23 號報告[1]與 44 號報告[13]中人體組織參數之量測值進行比較分析。

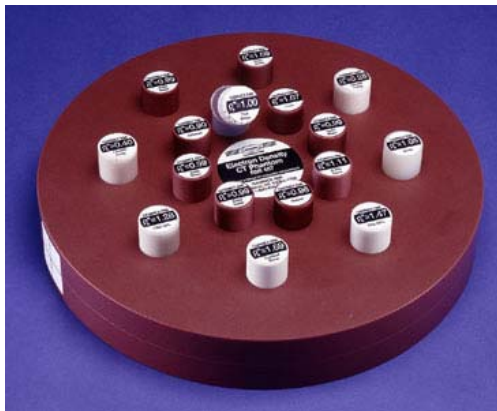
2000 年 Schneider 等人[5]改進化學劑量校準法，一旦找出標準樣品參數與 CT 值之關連性後，只需利用 CT 量測值內插即可獲得人體組織參數。2007 年，Vanderstraeten 等人[6]便利用此方法，將 CT 值從-900~1450 分為 14 個等分，每個範圍皆對應到不同的元素組成及密度，並針對九位癌症病人進行蒙地卡羅治療計畫模擬，以比較傳統分為五組組織參數的治療計畫在劑量分布上的差異，結果顯示引入不同的組織參數將能改善劑量評估的準確性。

## 六、研究方法

### 1. 台灣參考人假體器官特性最佳化（第二年）

#### 1.1 RMI 系列標準假體

在化學劑量校準法（stoichiometric calibration）的執行上，我們採用 Gammex RMI 系列標準假體（GAMMEX RMI 467 Tissue Characterization Phantom, WI, USA），此假體常用於電子密度校準之用（圖一），其材質相關參數如表一。我們將利用此系列假體中的固態水、脂肪、皮質骨、髓質骨、肺臟、肝臟、腦及乳房等材質進行 CT 掃描，以獲得 X 光能譜參數以及材質特性與 CT 值之關連性，進而計算人體組織器官之元素成份與密度。



圖一、GAMMEX RMI 467 標準組織等效假體

表一、GAMMEX RMI 467 標準組織等效假體參數。

材質	相對水之電子密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	物理密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
Lung (LN-300)	0.28	0.3
Lung (LN-450)	0.4	0.45
Adipose (AP6)	0.9	0.92
Breast	0.96	0.99
CT Solid Water	0.99	1.02
Brain	1.05	1.05
Liver (LV1)	1.07	1.08
Inner Bone	1.09	1.12
Bone (B200)	1.11	1.15
Bone (CB2-30% Mineral)	1.28	1.34
Bone (CB2-50% Mineral)	1.47	1.56
Cortical Bone (SB3)	1.69	1.82
True Water	1	1

## 1.2 衰減係數與 CT 值之關係

CT 影像是藉由 X 射線穿透人體後的投影值 (projection values) 經過反投影而重組。其中 X 射線為 50~130 keV 之連續能譜，此範圍的電磁輻射與物質作用後，主要產生三種作用：光電吸收 (photoelectric absorption)、合調散射 (coherent scattering) 以及非合調散射 (incoherent scattering)，其作用截面分別為  $\sigma^{\text{ph}}$ 、 $\sigma^{\text{coh}}$  與  $\sigma^{\text{icoh}}$ ，總截面為  $\sigma_e = \sigma_e^{\text{ph}} + \sigma_e^{\text{coh}} + \sigma_e^{\text{icoh}}$ 。物質之衰減係數可利用下列公式求得：

$$\mu_e(E) = \rho N_A \sum_{e=1}^n \left( \frac{w_e}{A_e} \sigma_e(E) \right) \quad (1)$$

其中  $\mu(E)$  為物質在能量  $E$  下的衰減係數、 $\rho$  為物質之密度 ( $\text{g cm}^{-3}$ )、 $N_A$  為亞佛加厥常數、 $w_e$  為元素  $e$  之比重、 $\sigma_e$  為總截面、 $A_e$  為原子量。對於 CT 所發出之連續 X 光能譜  $f(E)$ ，由於隨著射束穿透深度的不同，其能譜也會有所改變  $f'(E)$ ，因此組織之平均衰減係數  $\bar{\mu}$  可經由下列公式求得：

$$\bar{\mu}(s) = \frac{\int f'(E) \mu(E, s) dE}{\int f'(E) dE} \quad (2)$$

在 CT 影像中，組織衰減係數與 CT 值的關係如下：

$$H = \left( \frac{\bar{\mu}}{\bar{\mu}_{\text{H}_2\text{O}}} - 1 \right) 1000 \quad (3)$$

$$\frac{\bar{\mu}}{\bar{\mu}_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{H}{1000} + 1 \quad (4)$$

其中  $H$  為 CT number， $\bar{\mu}$  為組織之平均衰減係數，而  $\bar{\mu}_{\text{H}_2\text{O}}$  為水的平均衰減係數。藉由上述公式，即可利用 CT 影像求得組織之平均衰減係數，並與組織密度與元素組成產生交互的關連性。

## 1.3 RMI 假體掃描與 CT 特性評估

理論上我們可以藉由公式 (2) 計算得到組織的衰減係數，但在實際情況下，我們無法求得不同位置之 X 光能譜，因此組織之作用截面也無法得到。然而，我們根據 Rutherford 等人[14]所提出的經驗公式，可以計算元素作用截面之近似值，其公式如下：

$$\sigma_e(E) = Z_e K^{\text{KN}}(E) + Z_e^{2.86} K^{\text{sca}}(E) + Z_e^{4.62} K^{\text{ph}}(E) \quad (5)$$

其中， $\sigma_e(E)$  為元素  $e$  之作用截面、 $Z_e$  為原子序、 $K^{\text{KN}}$  為 Klein–Nishina 之加權因數， $K^{\text{sca}}$  為合調散射之加權係數， $K^{\text{ph}}$  為光電吸收之加權因數。將此作用截面公式帶入公式 (2)，可以得到下列公式：

$$\bar{\mu} = \rho N_A \sum_{e=1}^n \left( \frac{w_e}{A_e} \left( Z_e \bar{K}^{\text{KN}} + Z_e^{2.86} \bar{K}^{\text{sca}} + Z_e^{4.62} \bar{K}^{\text{ph}} \right) \right) \quad (6)$$

因此， $\bar{\mu} / \bar{\mu}_{\text{H}_2\text{O}}$  可由下列公式計算求得：

$$\frac{\bar{\mu}}{\bar{\mu}_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{\rho}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \frac{\sum_{e=1}^n (w_e / A_e) (Z_e + Z_e^{2.86} k_1 + Z_e^{4.62} k_2)}{(w_{\text{H}} / A_{\text{H}}) (1 + k_1 + k_2) + (w_{\text{O}} / A_{\text{O}}) (8 + 8^{2.86} k_1 + 8^{4.62} k_2)} \quad (7)$$

$$k_1 \equiv \frac{\bar{K}^{\text{sca}}}{\bar{K}^{\text{KN}}}, \quad k_2 \equiv \frac{\bar{K}^{\text{ph}}}{\bar{K}^{\text{KN}}}$$

為了求得  $k_1$ 、 $k_2$  之值，將對已知元素組成及密度的 RMI 假體執行 CT 掃描，以求得 CT 造影儀之特性參數，由於不同的 X 光管所發射出之 X 光能譜不盡相同，使得  $k_1$ 、 $k_2$  值也不相同，因此所有掃描必須在同一台 CT 上執行。隨後將 RMI 假體之組成元素、密度以及掃描後獲得之 CT 值代入公式 (8)，經由最小平方擬合法 (least square fitting)，可求得  $k_1$ 、 $k_2$  值，其公式如下：

$$\sum_{n=1}^N \left[ \left( \frac{\bar{\mu}}{\bar{\mu}_{\text{H}_2\text{O}}} (k_1, k_2) \right)_n - \left( \frac{H(\text{meas.})}{1000} + 1 \right)_n \right]^2 \quad (8)$$

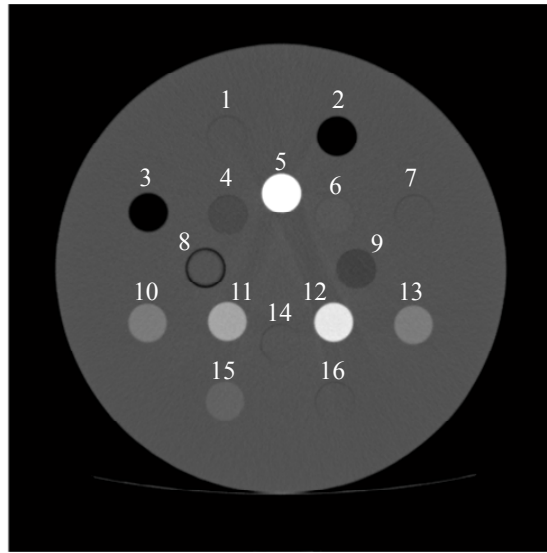
其中  $H(\text{meas.})$  為測量到的 CT 值。求出  $k_1$ 、 $k_2$  值後，我們將利用 ICRP 23 號報告[1]中已知組成元素與密度之標準組織，與  $k_1$ 、 $k_2$  值帶入公式 (7)，進而獲得該標準組織之 CT 值。



## 七、結果

圖二為 RMI 467 假體經 CT 掃描後產生之影像，並標示了每個區域所含之組織，我們將針對每個區域圈選 ROI，以獲得特定標準組織之平均 CT 值。表二則顯示於  $k_1$ 、 $k_2$  值內插計算中使用的每個標準組織之有效原子序、密度、各組成元素之比重及平均 CT 值，而利用上述參數並搭配公式 (8) 擬合後，求得之  $k_1$ 、 $k_2$  值分別為 -0.00044 及 0.00003。

1. Solid water
2. LN-300 (Lung)
3. LN-450 (Lung)
4. Breast
5. Cortical Bone
6. Brain
7. Solid Water
8. True Water
9. Adipose
10. B-200 Bone
11. CB2-30%
12. CB2-50%
13. Inner Bone
14. Solid Water
15. Liver
16. Solid water



圖二、RMI 467 假體之 CT 影像及每個標準材質棒所代表之組織

表二、標準組織之有效原子序、密度、各組成元素之比重及平均 CT 值

Tissue	Z	$\rho$ (g cm <sup>-3</sup> )	Element weight									CTN meas.
			H	C	N	O	Mg	Si	P	Cl	Ca	
LN-300 (Lung)	7.86	0.30	8.5	59.4	2	18.1	11.2	0.8	0	0.1	0	-743.52
LN-450 (Lung)	7.84	0.45	8.5	59.6	2	18.1	11.2	0.6	0	0.1	0	-552.80
Breast	7.24	0.98	8.6	70.1	2.3	17.9	0	0	0	0.1	1	-59.68
Cortical bone	14.14	1.82	3.4	31.4	1.8	36.5	0	0	0	0	26.8	1262.91
Brain	6.31	1.05	10.8	72.5	1.7	14.9	0	0	0	0.1	0	12.21
Adipose	6.40	0.92	9.1	72.3	2.3	16.3	0	0	0	0	0	-108.15
B-200 bone mineral	10.90	1.15	6.6	55.5	2	23.6	0	0	3.2	0.1	8.9	219.51
CB2-30%	11.39	1.34	6.7	53.5	2.1	25.6	0	0	0	0.1	12	469.70
CB2-50%	12.98	1.56	4.8	41.6	1.5	32	0	0	0	0.1	20	855.67
Inner bone	10.90	1.13	6.7	55.6	2	23.5	0	0	3.2	0.1	8.9	226.19
Liver	8.11	1.04	8.1	67	2.5	20	0	0	0	0.1	2.3	78.40
Solid water	8.11	1.02	8	67.3	2.4	19.9	0	0	0	0.1	2.3	-10.58

在獲得  $k_1$ 、 $k_2$  值後，我們接著利用公式 (7) 計算表二中各標準組織之 CT 值，其計算結果與實際量測之差異顯示於表三，可發現計算之 CT 值與實際量測相當接近，而計算與實際量測之 CT 值其線性擬合之  $r^2$  值為 0.9984，由此可知，利用公式 (7) 計算各組織之 CT 值之準確性相當高，而利用 ICRP 23 號報告提供之各種人體組織組成參數與  $k_1$ 、 $k_2$  值帶入公式 (7) 計算之 CT 值之結果顯示於表四。

表三、各標準組織實際量測及利用公式 (7) 計算獲得之 CT 值

Tissue	CTN meas.	CTN calc.
LN-300 (Lung)	-743.52	-705.73
LN-450 (Lung)	-552.80	-558.87
Breast	-59.68	-45.99
Cortical bone	1262.91	1275.60
Brain	12.21	27.14
Adipose	-108.15	-112.75
B-200 bone mineral	219.51	221.00
CB2-30%	469.70	467.44
CB2-50%	855.67	839.67
Inner bone	226.19	210.15
Liver	78.40	24.26
Solid water	-10.58	-0.30

表四、ICRP 23 號報告提供之各種人體組織組成參數及計算獲得之 CT 值

Tissue	$\rho(\text{g cm}^{-3})$	Element weight													H(calc.)
		H	C	N	O	Ca	P	Na	Mg	S	Cl	K	Fe	I	
Adipose tissue	0.95	11.4	59.8	0.7	27.8	0	0	0.1	0	0.1	0.1	0	0	0	-61.41
Blood	1.06	10.2	11	3.3	74.5	0	0.1	0.1	0	0.2	0.3	0.2	0.1	0	56.36
Brain	1.04	10.7	14.5	2.2	71.2	0	0.4	0.2	0	0.2	0.3	0.3	0	0	39.01
Breast	1.02	10.6	33.2	3	52.7	0	0.1	0.1	0	0.2	0.1	0	0	0	8.17
Cell nucleus	1	10.6	9	3.2	74.2	0	2.6	0	0	0.4	0	0	0	0	3.36
Eye lens	1.07	9.6	19.5	5.7	64.6	0	0.1	0.1	0	0.3	0.1	0	0	0	52.41
GI tract	1.03	10.6	11.5	2.2	75.1	0	0.1	0.1	0	0.1	0.2	0.1	0	0	24.76
Heart	1.06	10.3	12.1	3.2	73.4	0	0.1	0.1	0	0.2	0.3	0.2	0.1	0	56.97
Kidney	1.05	10.3	13.2	3	72.4	0.1	0.2	0.2	0	0.2	0.2	0.2	0	0	44.67
Liver	1.06	10.2	13.9	3	71.6	0	0.3	0.2	0	0.3	0.2	0.3	0	0	54.17
Lung (deflated)	1.05	10.3	10.5	3.1	74.9	0	0.2	0.2	0	0.3	0.3	0.2	0	0	45.22
Lymph	1.03	10.8	4.1	1.1	83.2	0	0	0.3	0	0.1	0.4	0	0	0	28.49
Muscle	1.05	10.2	14.3	3.4	71	0	0.2	0.1	0	0.3	0.1	0.4	0	0	44.02
Ovary	1.05	10.5	9.3	2.4	76.8	0	0.2	0.2	0	0.2	0.2	0.2	0	0	46.25
Pancreas	1.04	10.6	16.9	2.2	69.4	0	0.2	0.2	0	0.1	0.2	0.2	0	0	34.71
Cartilage	1.1	9.6	9.9	2.2	74.4	0	0.2	0.5	0	0.9	0.3	0	0	0	70.34
Red marrow	1.03	10.5	41.4	3.4	43.9	0	0.1	0	0	0.2	0.2	0.2	0.1	0	20.63
Spongiosa	1.18	8.5	40.4	2.8	36.7	7.4	3.4	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0	268.39
Yellow marrow	0.98	11.5	64.4	0.7	23.1	0	0	0.1	0	0.1	0.1	0	0	0	-32.07
Skin	1.09	10	20.4	4.2	64.5	0	0.1	0.2	0	0.2	0.3	0.1	0	0	77.51
Spleen	1.06	10.3	11.3	3.2	74.1	0	0.3	0.1	0	0.2	0.2	0.3	0	0	55.11
Testis	1.04	10.6	9.9	2	76.6	0	0.1	0.2	0	0.2	0.2	0.2	0	0	36.70
Thyroid	1.05	10.4	11.9	2.4	74.5	0	0.1	0.2	0	0.1	0.2	0.1	0	0.1	82.35
Cortical bone	1.92	3.4	15.5	4.2	43.5	22.5	10.3	0.1	0.2	0.3	0	0	0	0	1382.28
Cranium	1.61	5	21.2	4	43.5	17.6	8.1	0.1	0.2	0.3	0	0	0	0	909.01
Femur	1.33	7	34.5	2.8	36.8	12.9	5.5	0.1	0.1	0.2	0.1	0	0	0	507.25
Humerus	1.46	6	31.4	3.1	36.9	15.2	7	0.1	0.1	0.2	0	0	0	0	690.89
Mandible	1.68	4.6	19.9	4.1	43.5	18.7	8.6	0.1	0.2	0.3	0	0	0	0	1012.23
Ribs (2nd, 6th)	1.41	6.4	26.3	3.9	43.6	13.1	6	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	0	0	601.38
Ribs (10th)	1.52	5.6	23.5	4	43.4	15.6	7.2	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	0	0	769.58
Sacrum	1.29	7.4	30.2	3.7	43.8	9.8	4.5	0	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0	419.51
Spongiosa	1.18	8.5	40.4	2.8	36.7	7.4	3.4	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0	268.39
Vertebral (C4)	1.42	6.3	26.1	3.9	43.6	13.3	6.1	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0	621.11
Vertebral (D6, L3)	1.33	7	28.7	3.8	43.7	11.1	5.1	0	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0	483.28

## 八、参考文献

- [1] “International Commission on Radiological Protection. Report of the task group on reference man,” *ICRP Publication 23*, 1975.
- [2] “International Commission on Radiological Protection. Basic anatomical and physiological data for use in radio-logical protection: reference values,” *ICRP Publication 89*, 2003.
- [3] “International Atomic Energy Agency. Compilation of anatomical, physiological and metabolic characteristics for a Reference Asian Man,” *IAEA Publication IAEA-TECDOC-1005*, 1998.
- [4] “United Nations Organization. World urbanization prospects. The Revision,” 2001.
- [5] W. Schneider, and et al., “Correlation between CT numbers and tissue parameters needed for Monte Carlo simulations of clinical dose distributions,” *Physics in Medicine and Biology*, vol. 45, no. 2, pp. 459, 2000.
- [6] B. Vanderstraeten, and et al., “Conversion of CT numbers into tissue parameters for Monte Carlo dose calculations: a multi-centre study,” *Physics in Medicine and Biology*, vol. 52, no. 3, pp. 539, 2007.
- [7] M. Cristy and K. Eckerman, “Specific Absorbed Fractions of Energy at Various Ages from Internal Photon Sources,” *ORNL Report ORNL/TM-8381/V1*, 1987.
- [8] “International Commission on Radiological Protection. Report of the task group on reference man,” *ICRP Publication 53*, 1988.
- [9] J. R. Beckett, and C. J. Kotre, “Dosimetric implications of age related glandular changes in screening mammography,” *Physics in Medicine and Biology*, vol. 45, no. 3, pp. 801, 2000.
- [10] P. C. Shrimpton, “Electron density values of various human tissues: in vitro Compton scatter measurements and calculated ranges,” *Physics in Medicine and Biology*, vol. 26, no. 5, pp. 907, 1981.
- [11] C. Constantinou, J. C. Harrington, and L. A. DeWerd, “An electron density calibration phantom for CT-based treatment planning computers,” *Medical Physics*, vol. 19, no. 2, pp. 325-327, 1992.
- [12] U. Schneider, and et al., “The calibration of CT Hounsfield units for radiotherapy treatment planning,” *Physics in Medicine and Biology*, vol. 41, no. 1, pp. 111, 1996.
- [13] “International Commission on Radiological Protection. Report of the task group on reference man,” *ICRP Publication 44*, 1985.
- [14] R. A. Rutherford, B. R. Pullan, and I. Isherwood, “Measurement of effective atomic number and electron density using an EMI scanner,” *Neuroradiology*, vol. 11, no. 1, pp. 15-21, 1976.