

核能安全委員會

委託研究計畫書

(案號：NSC11301008L)

輻射醫療應用計畫曝露情境潛在輻射風險評估
與劑量約束管理研究

---114 年度期末報告---

委託單位：核能安全委員會

執行單位：國立清華大學

中華民國 114 年 12 月

摘要

劑量約束管制理念之導入可落實輻射防護最適化管理之精神以及合理抑低人員劑量之目的。國內利用輻射於醫療之應用相當廣泛，涉及輻射種類及作業類型多樣，對人員曝露途徑也多元，因此可能對不同人員造成不同程度之輻射風險。考量未來劑量約束概念在醫療現場實務應用的推動，透過劑量評估研究找出具高曝露風險之輻射源和作業型態有其必要。另外，有鑑於 ICRP-103 報告已就劑量評估所須之輻射加權因數、組織加權因數和各種劑量轉換因數等提出更新建議，其與我國現行游離輻射防護安全標準所訂管限制值之基礎已有所不同，為配合劑量約束實務應用之需求，探討相關更新建議在劑量評估系統上之差異與影響亦相當重要。綜上考量，本研究分兩年期進行國內輻射醫療應用常見計畫曝露情境進行潛在輻射風險評估與劑量約束管理研究：第一年著重於劑量約束之實務應用研究，已順利完成生產設施放射性氣體排放對公眾曝露的劑量約束值建議，以及對核子醫學科非密封放射性物質作業高曝露風險類型進行了初步評估，並且對全國醫院不同科別給出了相應的劑量約束值建議；第二年(本年度)著重於輻射劑量評估之基礎精進研究，探討國際最新輻防建議對於特定醫用輻射作業劑量評估的影響，本計畫選擇三種情境進行深入探討，包括(1)螢光透視作業之劑量評估、(2)I-131 患者外釋後對照護者之劑量評估、以及(3)放射性藥物分裝工作人員手部劑量評估。兩年期計畫成果的產出與經驗，包括劑量約束值的設定和管理建議，有利於精進我國輻射劑量評估技術。

Abstract

The establishment of dose constraints for medical occupational and environmental exposures is an important aspect of practical radiation protection. The use of radiation in medical applications involves various types of radiation and scenarios, which may cause different levels of radiation risks to different people. Considering the future implementation of dose constraint in medical facilities, it is necessary to identify radiation sources and scenarios with high exposure risks in planned exposure situations. In addition, the radiation weighting factors, tissue weighting factors and various dose conversion factors required for dose assessment have been updated in the ICRP-103 report. How these new recommendations will affect the current radiation protection standards in Taiwan (based on ICRP-60) warrants further investigations. To address these issues, this project conducted a two-year study on potential radiation risk assessment and dose constraint management in common planned exposure scenarios for medical applications. The first-year work focused on determining the dose constraint of the public due to the release of radioactive gases from medical isotope production facilities. Additionally, we have estimated the doses received by nuclear medicine staff under various scenarios and derived the recommended dose constraint values for personnel in various departments of hospital. The second-year (this year) work focused on improving technologies related to radiation dose assessment, examining the differences in recommendations between ICRP-60 and ICRP-103 and how these differences may impact on the current radiation protection standards in Taiwan. Three scenarios of medical radiation exposure were examined in detail: (1) radiation exposure to physicians during fluoroscopy procedures, (2) radioactive I-131 patient release dose assessment, and (3) hand equivalent doses of nuclear medicine staff in distribution of radioisotopes. The results and experience gained from this project provide suggestions on appropriate dose constraint values for those exposure scenarios of interest, and also enhance dose assessment capabilities to be able to better protect the public and nuclear medicine staff from radiation.

目錄

| | |
|---|------|
| 目錄..... | iii |
| 表目錄..... | vi |
| 圖目錄..... | viii |
| 第一章、背景與目的..... | 1 |
| 第二章、預期完成之工作項目與時程規劃..... | 3 |
| 第三章、執行規劃、材料與方法..... | 6 |
| 3.1 輻防國際趨勢文獻研析..... | 6 |
| 3.1.1 ICRP-103 變更對輻射劑量評估之相關研究[Boetticher et al., 2008]..... | 6 |
| 3.1.2 I-131 劑量約束之相關研究[Han et al., 2014]..... | 8 |
| 3.1.3 I-131 劑量約束之相關研究[Kocovska et al., 2011]..... | 11 |
| 3.2 劑量評估所須基礎參數的比較..... | 15 |
| 3.2.1 新的輻射和組織加權因數於劑量轉換因子的影響..... | 15 |
| 3.2.2 我國現行輻防標準與國際最新輻防建議之差異比較..... | 18 |
| 3.3 劑量影響研究的案例分析..... | 20 |
| 3.3.1 螢光透視作業之劑量評估：ICRP-103 與 60 影響分析..... | 20 |
| 3.3.1.1 射源定義..... | 21 |
| 3.3.1.2 幾何與材質..... | 23 |
| 3.3.1.3 結果計數..... | 26 |
| 3.3.2 I-131 患者外釋對照護者之劑量評估..... | 27 |
| 3.3.2.1 射源定義..... | 29 |
| 3.3.2.2 結果計數..... | 30 |
| 3.3.3 放射性藥物分裝作業之人員劑量評估..... | 31 |
| 3.3.3.1 射源定義..... | 33 |
| 3.3.3.2 幾何與材質..... | 34 |
| 3.3.3.3 結果計數..... | 39 |
| 第四章、結果與討論..... | 41 |
| 4.1 案例分析一：介入性治療情節..... | 41 |

| | |
|---|----|
| 4.1.1 劑量率模擬結果 | 41 |
| 4.1.1.1 頭頸部對全身有效劑量率之影響($E_{H\&N}/E$)..... | 43 |
| 4.1.1.2 新增器官對全身有效劑量之影響(E_{Add}/E)..... | 44 |
| 4.1.2 ICRP-60、103 於透視攝影之劑量率差異 | 45 |
| 4.1.3 不同 C-arm 旋轉角度對劑量率之影響 | 46 |
| 4.1.3.1 有無鉛衣時之器官等價劑量率比較 | 47 |
| 4.1.3.2 有無鉛衣時之有效劑量率比較 | 50 |
| 4.1.3.3 頭頸部與新增器官之劑量率比較 | 51 |
| 4.1.4 假定操作情節下的有效劑量評估 | 52 |
| 4.2 案例分析二：I-131 患者外釋情節 | 53 |
| 4.2.1 劑量率模擬結果 | 53 |
| 4.2.2 假定情節下的有效劑量評估 | 55 |
| 4.2.2.1 HT 患者對照護者之劑量評估 | 55 |
| 4.2.2.2 DTC 患者對照護者之劑量評估 | 56 |
| 4.2.3 隔離天數建議 | 56 |
| 4.2.4 核子醫學輻射防護措施指引 | 57 |
| 4.2.5 70 與 50 $\mu\text{Sv/h}$ 之患者外釋標準於不同半衰期考量下的結果..... | 58 |
| 4.2.5.1 外釋患者對照護者之有效劑量評估：不考慮半衰期 | 59 |
| 4.2.5.2 外釋患者對照護者之有效劑量評估：考慮物理半衰期 | 61 |
| 4.2.5.3 外釋患者對照護者之有效劑量評估：考慮有效半衰期 | 64 |
| 4.2.5.4 照顧外釋病人曝露之時間標準建議 | 65 |
| 4.3 案例分析三：放射性藥物分裝作業之人員劑量評估..... | 67 |
| 4.3.1 劑量率模擬結果 | 67 |
| 4.3.1.1 乳房對全身有效劑量率之影響(E_{Breast}/E)..... | 69 |
| 4.3.1.2 新增器官對全身有效劑量之影響(E_{Add}/E)..... | 69 |
| 4.3.1.3 不同核種對劑量率之影響 | 71 |
| 4.3.2 假定操作情節下的有效劑量評估 | 73 |
| 4.3.2.1 ICRP-103 對有效劑量之影響 | 75 |
| 4.3.2.2 手部等價劑量之探討 | 76 |

| | |
|-------------------|----|
| 第五章、結論 | 78 |
| 附錄：教育訓練 | 81 |
| 參考文獻 | 88 |
| 產出量化值 (KPI) | 90 |

表目錄

| | |
|---|----|
| 表 3.1. ICRP-60 和 103 對不同性別所得到之胸部和冠狀動脈有效劑量 | 6 |
| 表 3.2. ICRP60 和 103 於不同輻射防護條件下的相對有效劑量 | 7 |
| 表 3.3. 接受 740 MBq (20 mCi) I-131 的甲狀腺功能亢進患者的總有效劑量 (mSv) 和放射後預防措施的持續時間[5] | 9 |
| 表 3.4. 接受 5550 MBq (150 mCi) I-131 的分化型甲狀腺癌患者的總有效劑量 (mSv) 和放射後預防措施的持續時間。[5] | 9 |
| 表 3.5. 接受 HT 或 DTC 治療的成年女性患者對新生兒和一歲兒童有效劑量[5] | 10 |
| 表 3.6. 曝露於接受甲亢治療的成年女性患者的家庭成員的劑量換算係數[5] | 11 |
| 表 3.7. 曝露於接受甲亢治療的成年女性患者的家庭成員的劑量換算係數[5] | 11 |
| 表 3.8. 甲狀腺癌患者家屬的有效劑量[6] | 13 |
| 表 3.9. 甲亢患者家屬的有效劑量[6] | 14 |
| 表 3.10. ICRP-60 輻射加權因數[2] | 15 |
| 表 3.11. ICRP-103 輻射加權因數[1] | 15 |
| 表 3.12. ICRP-60 及 103 之組織加權因數 | 16 |
| 表 3.13. ICRP-74 和 ICRP-116 針對體外曝露轉換係數計算之比較 | 17 |
| 表 3.14. 德國輻射工作人員職業曝露之劑量限值[9] | 19 |
| 表 3.15. 各項關節參數調整表 | 23 |
| 表 3.16. I-131 核種特性表 | 29 |
| 表 3.17. 活度隨藥物抽取時間衰變之參考表 | 32 |
| 表 3.18. 核種能量與特性表 | 34 |
| 表 3.19. 各項關節調整參數表 | 34 |
| 表 3.20. 模擬結果整理出之劑量率表 | 40 |
| 表 4.1. ICRP-60 及 103 之 $E_{H\&N}/E$ ：無鉛衣 | 43 |

| | |
|--|----|
| 表 4.2. ICRP-60 及 103 之 $E_{H\&N}/E$ ：有鉛衣..... | 44 |
| 表 4.3. ICRP-103 之 E_{Add}/E | 45 |
| 表 4.4. 不同管球角度下之器官劑量率表：有鉛衣..... | 49 |
| 表 4.5. 不同管球角度下之器官劑量率表：無鉛衣..... | 50 |
| 表 4.6. 平均後之 E/DAP 計算出之有效劑量..... | 52 |
| 表 4.7. ICRP-60 和 103 之全身有效劑量率表..... | 53 |
| 表 4.8. 射源於脖頸處器官劑量比例：北側距離 30 公分（左）vs 100 公分（右）..... | 54 |
| 表 4.9. 射源於腰腹處器官劑量比例：北側距離 30 公分（左）vs 100 公分（右）..... | 54 |
| 表 4.10. HT 及 DTC 患者在各條件下對照護者之劑量表..... | 57 |
| 表 4.11. 45 歲以下家屬允許照顧外釋患者曝露之時間標準..... | 58 |
| 表 4.12. 參考法規規範所得出之照護者劑量..... | 58 |
| 表 4.13. 各情節下患者外釋後一個物理半衰期內(8 天)對照護者的有效劑量..... | 66 |
| 表 4.14. 考量物理半衰期下，患者與周遭人所能相處之時間..... | 66 |
| 表 4.15. 母罐劑量率：情節 A(左)、情節 B(右)..... | 67 |
| 表 4.16. 裸針劑量率：情節 A(左)、情節 B(右)..... | 68 |
| 表 4.17. 針筒屏蔽劑量率：情節 A(左)、情節 B(右)..... | 68 |
| 表 4.18. 放射性藥物分裝 E_{Add} 、有效劑量 (E)、 E_{Add}/E 劑量率表..... | 70 |
| 表 4.19. 核種特性表..... | 71 |
| 表 4.20. 常用之六種核種劑量率表：情節 A..... | 72 |
| 表 4.21. 常用之六種核種劑量率表：情節 B..... | 73 |
| 表 4.22. 活度隨藥物抽取時間變化之試算表..... | 74 |
| 表 4.23. 有效劑量表..... | 76 |
| 表 4.24. 手部等價劑量表..... | 76 |

圖目錄

| | |
|---|----|
| 圖 3.1. 根據 BSS 劑量約束與甲狀腺癌患者親屬的有效劑量比較圖[6] | 13 |
| 圖 3.2. 根據 BSS 劑量約束與甲亢患者親屬的有效劑量比較圖[6] | 14 |
| 圖 3.3. 中子在 AP 方向的有效劑量轉換係數(男性) | 18 |
| 圖 3.4. 光子在 AP 方向的有效劑量轉換係數(男性) | 18 |
| 圖 3.5. 無鉛衣(左)和有鉛衣(右)之操作情境..... | 20 |
| 圖 3.6. 五種不同照射角度之模擬情節 | 21 |
| 圖 3.7. Spektr3.0 軟體介面示意圖 | 21 |
| 圖 3.8. Spektr3.0 所產生之 80、100、120kVp 能譜圖 | 22 |
| 圖 3.9. PIMAL 擬人假體透視攝影動作，正面(左)、側面(右) | 24 |
| 圖 3.10. Philip Azurion7 C-arm 示意圖 | 24 |
| 圖 3.11. 管球設計 | 24 |
| 圖 3.12. 影像接收器設計 | 25 |
| 圖 3.13. DAP meter 設計 | 25 |
| 圖 3.14. 研究模擬設備圖 | 25 |
| 圖 3.15. 操作條件示意圖 | 26 |
| 圖 3.16. 透視攝影之模擬流程圖 | 27 |
| 圖 3.17. 患者(紅)與其他人(灰)之距離及方位示意圖 | 28 |
| 圖 3.18. 模擬患者坐下(藍)及站立(黃)之兩種射源位置示意圖 | 29 |
| 圖 3.19. I-131 患者外釋之模擬流程圖 | 30 |
| 圖 3.20. A(左)、B(右)兩家醫院之自動分裝器 | 31 |
| 圖 3.21. A(左)、B(右)兩家醫院之針筒屏蔽 | 31 |
| 圖 3.22. A(左)、B(右)兩家醫院之母罐屏蔽 | 32 |
| 圖 3.23. 實際熱鉛室示意圖(左)和藥物分裝實際作業情境(右)..... | 32 |

| | |
|---|----|
| 圖 3.24. PIMAL 擬人假體放射性藥物分裝動作，正面(左)、側面(右) | 35 |
| 圖 3.25. 手部模型設計圖 | 35 |
| 圖 3.26. 分裝熱鉛室外觀(左)和熱鉛室模擬圖(右)..... | 36 |
| 圖 3.27. 情節 A 之分裝熱鉛室內部 | 37 |
| 圖 3.28. 情節 A 之母罐設計 | 37 |
| 圖 3.29. 情節 A、B 之塑膠針筒設計..... | 37 |
| 圖 3.30. 情節 A 之針筒屏蔽套設計 | 38 |
| 圖 3.31. 情節 B 之分裝熱鉛室內部 | 38 |
| 圖 3.32. 情節 B 之母罐設計 | 39 |
| 圖 3.33. 情節 B 之針筒屏蔽套設計 | 39 |
| 圖 3.34. 放射性藥物分裝之模擬流程 | 40 |
| 圖 4.1. ICRP-60、103 之器官劑量比例：無鉛衣(左)、有鉛衣(右)..... | 41 |
| 圖 4.2. 器官等價劑量率：無鉛衣 | 42 |
| 圖 4.3. 器官等價劑量率：有鉛衣 | 42 |
| 圖 4.4. ICRP-103 與 ICRP-60 組織加權因數比..... | 46 |
| 圖 4.5. 五種 C-arm 旋轉角度光子通量圖 | 46 |
| 圖 4.6. ICRP-60 器官劑量率：有鉛衣..... | 47 |
| 圖 4.7. ICRP-103 器官劑量率：有鉛衣..... | 47 |
| 圖 4.8. ICRP-60 器官劑量率：無鉛衣..... | 48 |
| 圖 4.9. ICRP-103 器官劑量率：無鉛衣..... | 48 |
| 圖 4.10. 不同管球角度下之 E(60)、E(103)：有鉛衣..... | 50 |
| 圖 4.11. 不同管球角度下之 E(60)、E(103)：無鉛衣..... | 51 |
| 圖 4.12. 不同管球角度下之 $E_{H\&N}$ 、 E_{Add} ：有鉛衣..... | 51 |
| 圖 4.13. 不同管球角度下之 $E_{H\&N}$ 、 E_{Add} ：無鉛衣..... | 52 |
| 圖 4.14. 某醫院 922 位患者體外 1 公尺處劑量率量測之平均值隨著時間的變化 | 59 |

| | |
|---|----|
| 圖 4.15. 考慮物理半衰期時患者劑量率隨著時間的變化(外釋標準：70 $\mu\text{Sv/h}$)..... | 62 |
| 圖 4.16. 考慮物理半衰期時患者劑量率隨著時間的變化(外釋標準：50 $\mu\text{Sv/h}$)..... | 63 |
| 圖 4.17. 考慮有效半衰期時患者劑量率隨著時間的變化(外釋標準：70 $\mu\text{Sv/h}$)..... | 64 |
| 圖 4.18. 考慮有效半衰期時患者劑量率隨著時間的變化(外釋標準：50 $\mu\text{Sv/h}$)..... | 65 |
| 圖 4.19. 母罐、裸針、針筒屏蔽之 E_{Breast} / E ：情節 A(左)、情節 B(右)..... | 69 |
| 圖 4.20. 母罐、裸針、針筒屏蔽之 E_{Add} / E ：情節 A(左)、情節 B(右)..... | 70 |
| 圖 6.1. 教育訓練時程表..... | 82 |
| 圖 6.2. 教育訓練簽到表..... | 83 |
| 圖 6.3. 許榮鈞教授進行開場以及 114 年度計劃的進度說明..... | 84 |
| 圖 6.4. 案例分析 1(生產設施氣體公眾曝露的劑量評估與劑量約束建議)..... | 85 |
| 圖 6.5. 案例分析 2 & 3 (醫療院所工作人員輻射曝露之劑量評估相關)..... | 86 |
| 圖 6.6. 綜合討論環節..... | 87 |

第一章、背景與目的

核能安全委員會(下稱核安會)游離輻射防護法修正草案(下稱輻防法草案)業於 111 年提請行政院審議中。輻防法草案已參考國際放射防護委員會(International Commission on Radiological Protection, ICRP)最新建議[1]，將輻射曝露情境及劑量約束等輻射防護管理概念納法，以接軌國際輻射防護管理趨勢。劑量約束管制理念之導入，係為落實輻射防護管理三原則之一——「最適化」管理精神，藉以達到合理抑低人員劑量之目的。

由於國內利用輻射源於醫療診斷和治療應用之情形相當廣泛，涉及輻射源種類及輻射作業類型相當多樣，對人員曝露途徑多元，因此可能對不同人員造成不同程度之輻射風險。考量未來劑量約束概念在實務應用與推動上能有所參考，故有必要先就國內輻射作業現況進行風險評估探討，俾確定出具高曝露風險之輻射源和輻射作業類型型態，以研訂相應之劑量約束值和相關管理措施，供國內參考實施。又基於考量輻射防護管理系統係以劑量評估技術為基礎，有鑑於 ICRP 第 103 號報告(ICRP-103)[1]已就劑量評估所須之輻射加權因數、組織加權因數和各種劑量轉換因數等提出更新建議，其與我國現行游離輻射防護安全標準所訂管制限值之基礎已有所不同，為配合劑量約束實務應用之需求，亦有必要先行了解我國法規標準與國際最新輻防建議在劑量評估系統上之差異與影響，藉以精進我國輻射劑量評估技術，使符合國際輻防發展趨勢。綜上考量，核安會提出本項研究計畫需求，擬對國內輻射醫療應用常見計畫曝露情境進行潛在輻射風險評估與劑量約束管理研究，以下簡述一些本計畫之背景、目的、重要性以及初步文獻回顧。

ICRP 所提出的關於輻射防護標準的建議一直是國際上公認最重要的參考依據，尤其於 1990 年 11 月所發行的 ICRP 第 60 號建議書 (ICRP-60)[2]時至今日乃是世界上多數國家輻射防護法規的基礎，台灣也不例外是依據 ICRP-60 修訂了輻射防護法規，以期能更好的實現輻射防護中 ALARA (As Low As Reasonably

Achievable) 的準則，期望在盡可能合理抑低的輻射劑量下獲得最大的輻射應用益處。考慮到近年放射科學與輻射生物學等各方面的進步[3]。在 2007 年，ICRP 推出了第 103 號建議書 (ICRP-103) 來取代 ICRP-60。在這份建議書中，許多輻射防護的建議標準都進行了更新。輻射曝露分為三類：計畫曝露、緊急曝露、以及既存曝露，針對各個類別 ICRP 分別提供了相對應的準則[1],[2]，目標著重於輻射防護的最佳化。為了達到輻射防護的最佳化，ICRP-103 建議於計畫曝露時使用劑量約束作為標準，而在緊急曝露以及既存曝露的時候則使用參考水平作為標準。

本計畫依招標規範分二年期來進行。計畫第一年著重於劑量約束之實務應用研究，研究對象包括醫院放射性物質生產設施及醫用非密封放射性物質及其輻射作業，分別就生產設施放射性氣體排放對公眾曝露，以及醫用非密封輻射作業高曝露風險類型對職業曝露之影響，進行潛在輻射風險影響及劑量約束管理研究，所有工作項目皆順利完成，計畫成果也研訂出相應之劑量約束值建議和管理措施建議。計畫第二年(本年度)則著重於輻射劑量評估之基礎精進研究，預期了解我國現行游離輻射防護安全標準所訂劑量評估相關標準值與國際輻射防護最新建議值之差異與劑量影響，同時藉以精進我國輻射劑量評估技術。

第二章、預期完成之工作項目與時程規劃

本計畫(輻射醫療應用計畫曝露情境潛在輻射風險評估與劑量約束管理研究)的研究目標有三項：

1. 了解國內放射性物質生產設施之放射性廢氣排放狀況，依此評估廢氣排放對公眾曝露造成之風險，進而提出可行之劑量約束管理建議。
2. 對國內醫院非密封放射性物質使用設施之職業曝露情境進行探討研究，確定醫用非密封輻射作業具高曝露風險之作業型態以及職業曝露風險影響，並提出相應可行之劑量約束管理建議。
3. 了解輻射劑量評估相關國際輻防建議及技術發展，並與我國游離輻射防護安全標準法規限值基礎進行差異影響比較研究，藉以精進我國輻射劑量評估技術。

為了順利達到計畫設定目標，本計畫分二年期進行，第一年(113 年度)分別進行國內放射性物質生產設施與醫用非密封放射性物質輻射作業之實務應用研究，第二年(114 年度)則進行輻射劑量評估之基礎精進研究。依據計畫招標規範，第一年(113 年度)完成之工作項目簡述如下：

- I. 針對國內放射性物質生產設施之實務應用研究：
 - (1). 完成生產設施放射性氣體排放輻射安全管理與劑量影響相關文獻研析。
 - (2). 完成調查國內生產設施氣體排放輻射安全防護設計相關資料，並實地訪查至少 3 家生產設施，精進生產設施放射性氣體排放之分析模式。
 - (3). 完成探討大氣擴散模式對公眾劑量評估的影響。
 - (4). 完成研提劑量約束在生產設施氣體排放造成公眾曝露之實務可推行建議。
- II. 針對醫用非密封放射性物質輻射作業之實務應用研究：
 - (5). 完成醫用非密封放射性物質輻射作業輻射安全管理與劑量影響相關文獻研析。
 - (6). 實地訪查 2 家醫院，完成醫用非密封輻射作業型態及劑量影響參數等示範調查，模擬不同輻射作業型態工作人員之職業曝露情形。
 - (7). 完成分析輻射作業型態與職業曝露劑量影響之關係，提出醫用非密封物質具高潛在曝露風險之輻射作業情境或型態。
 - (8). 完成研提劑量約束在醫用非密封物質具高潛在曝露風險之輻射作業情境或型態造成職業曝露之實務可推行建議。

本年度(114 年度)預期完成之工作項目簡述如下：

- (1). 輻防國際趨勢文獻研析：完成輻射防護劑量評估國際發展趨勢或最新建議等相關文獻研析。
- (2). 劑量評估所須基礎參數的比較：就劑量評估數值運算所須基礎參數（例如輻射加權因數、組織加權因數、體內/體外曝露劑量轉換因子等），完成我國現行游離輻射防護安全標準與國際最新輻防建議之差異比較。
- (3). 劑量影響研究的案例分析：探討國際最新輻防建議對於特定醫用輻射作業劑量評估的影響，本計畫選擇以下二種情境進行深入評估：1. 螢光透視作業之劑量評估、2. I-131 患者外釋照護者之劑量評估。
- (4). 輻射劑量評估模型的精進：根據上一年度醫院實地訪查與劑量評估結果，針對各式醫用非密封輻射作業型態，放射性藥物分裝工作人員的手部劑量是相對高曝露風險作業，本計畫將針對此一情節深入研析，精進劑量評估技術並探討降低輻射曝露的可能方案。

針對前述工作項目，本團隊預計以下表時程依序完成規劃中的各個項目：

| 年月 工作項目 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 備註 |
|---|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|----|
| | 輻防國際趨勢文獻研析 | | | * | | | | | | | | | |
| 劑量評估所須基礎參數的比較 | | | | | | * | | | | | | | |
| 劑量影響研究的案例分析 | | | | | | | | | * | | | | |
| 輻射劑量評估模型的精進 | | | | | | | | | | | | | |
| 研究成果彙整 | | | | | | | | | | | | * | |
| 工作進度估計百分比 (累積數) | 5% | 15% | 20% | 30% | 40% | 50% | 55% | 65% | 70% | 80% | 90% | 100% | |
| 預定查核點 | 第1季：文獻研析(期初規劃報告：114年3月15日) 第2季：劑量評估基礎參數的比較(期中進度報告：114年7月15日前) 第3季：劑量影響研究的案例分析 第4季：研究成果彙整(期末報告：114年12月6日前) | | | | | | | | | | | | |
| 說明：1. 工作項目請視計畫性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起迄日期。 2. 「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：(1) 工作天數，(2) 經費之分配，(3) 工作量之比重，(4) 擬達成目標之具體數字。 3. 每季之「預定查核點」，請在條形圖上標明※符號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。 | | | | | | | | | | | | | |

第三章、執行規劃、材料與方法

3.1 輻防國際趨勢文獻研析

ICRP 於 2007 年出版了 ICRP-103 號報告[1]，發布了一系列有關於輻射防護系統的新基本建議，在新報告中，根據輻射曝露生物學和物理學的最新科學資訊，更新了等價劑量和有效劑量的輻射加權因數及組織加權因數。此外，ICRP 決定引入性別特異性的體素假體來代表參考人男性和女性，用於計算劑量轉換係數。由於劑量評估數值運算所須基礎參數的改動，使各國開始因 ICRP-103 號報告對於劑量評估的影響進行各項研究分析，以下我們將回顧三篇國際期刊，藉此方便我們對於後續有更為深入探討。

3.1.1 ICRP-103 變更對輻射劑量評估之相關研究[Boetticher et al., 2008]

德國 Boetticher 等人(2008)[4]於研究中探討了新的劑量評估方式對於患者和醫療工作人員所帶來的影響。該研究根據 ICRP-60 和 ICRP-103 報告的加權因數分別計算且比較測量器官等價劑量和全身有效劑量。患者劑量的測量是透過用於胸部和冠狀動脈 CT 檢查的擬人假體所進行，得到不同性別的有效劑量，如表 3.1:

表3.1. ICRP-60 和 103 對不同性別所得到之胸部和冠狀動脈有效劑量

| thoracic-CT | ICRP 60 | ICRP 103 |
|------------------|-------------------|----------|
| effective dose E | 100% ¹ | 121% |
| E (female) | 113.4% | 151.7% |
| E (male) | 86.6% | 90.3% |
| coronary-CT | ICRP 60 | ICRP 103 |
| effective dose E | 100% ¹ | 131% |
| E (female) | 125.6% | 183% |
| E (male) | 74.2% | 56.1% |

上表的值為經 ICRP-60 得到的有效劑量做標準化後的結果。可見由於 ICRP-103 號報告將乳房的組織加權因數由 0.05 提升至 0.12，使得胸部和冠狀動

脈 CT 檢查得到的有效劑量皆高於 ICRP-60 號得到的結果。此外，ICRP-103 號對特定性別有效劑量的定義給出了額外的公式：

$$E = \sum_T w_T (0.5 [H_{T,male} + H_{T,female}])$$

在 ICRP 60 中對於假體沒有指定特定的模型，但在 ICRP 103 中假體則分成使用成年參考男性和成年參考女性的參考計算模型來計算器官和組織的等價劑量。其中 $H_{T,male}$ 和 $H_{T,female}$ 分別為男性和女性對於器官或組織的等價劑量。當男性群體的 $W_{breast, male}$ 為 0.00，女性群體的 $W_{breast, female}$ 為 0.24 時，在計算不同性別的有效劑量時，乳房加權因數的影響會最大。對於患者來說，除了有效劑量的增加，同時證明放射檢查時應合理考慮性別特異性影響，特別是在遇到會造成乳房曝露的情況。

工作人員的曝露量則是使用兩個擬人假體並根據不同輻射防護條件下血管攝影檢查的幾何形狀來進行測量。比較了有無甲狀腺防護、有無穿鉛衣以及穿上三種不同鉛當量的鉛衣時所得出的有效劑量，結果如表 3.2：

表3.2. ICRP60 和 103 於不同輻射防護條件下的相對有效劑量

| angiography (undertable X-ray tube) | ICRP 60 | | | ICRP 103 | | |
|--|--------------------------|---------|------|--------------------------|---------|------|
| | relative effective doses | | f | relative effective doses | | f |
| | without TP | with TP | | without TP | with TP | |
| without lead apron | 100.00% | – | – | 100.00% | – | – |
| lead apron 0,35 mm Pb | 9.78% | 5.90% | 1.66 | 12.08% | 8.16% | 1.48 |
| lead apron 0,50 mm Pb | 7.33% | 3.45% | 2.12 | 9.69% | 5.77% | 1.68 |
| lead apron 0,70 mm Pb | 5.80% | 1.93% | 3.01 | 8.2 % | 4.29% | 1.91 |
| lead apron 0,50 mm Pb + permanent lower protection | 5.85% | 1.98% | 2.95 | 8.71% | 4.80% | 1.81 |
| lead apron 0,50 mm Pb + permanent upper and lower protection | 1.87% | 0.87% | 2.15 | 2.48% | 1.52% | 1.64 |

其中 f 為無甲狀腺防護時的有效劑量和有甲狀腺防護時的有效劑量之比值，表中數值皆以相對有效劑量表示。根據 ICRP-60，有甲狀腺防護時人員的有效劑量降低了約 1.7-3.0 倍，但於 ICRP-103 僅降低 1.5-1.9 倍，這是由於 ICRP-103 雖然些微降低了甲狀腺的組織加權因數，但卻增加了大腦的加權因數，並且新增了頭頸部器官的組織因數，使得 ICRP-103 將在許多常規情況下導致明顯更高的有

效劑量。

ICRP-103 中的器官和組織以及相應的加權因數不會改變全身均勻照射情況下所得到的有效劑量。然而在放射治療過程中，因為身體沒有被鉛衣完全覆蓋，所以人員暴露在散射輻射下會導致曝露不均勻。因此，加權因數的調整對於那些不在防護衣下的器官尤其重要。此研究表明，ICRP-103 的實施將增加傳統鉛衣未保護到的頭頸部器官之相關性，使個人劑量的測量會系統性的低估有效劑量。因此應特別注意改善身體該部位的輻射防護，例如於頭頂懸掛屏蔽等。

3.1.2 I-131 劑量約束之相關研究[Han et al., 2014]

在這篇論文中[5]，Han 等人(2014)探討 I-131 治療患者出院後可能對家庭成員造成輻射曝露，但美國核管會 (USNRC) 的指南並未明確提供基於有效劑量的後續防護建議。本研究旨在為醫學物理師提供方法，幫助在日常臨床實踐中估算家庭成員的輻射劑量，如果計算出的 I-131 總衰變有效劑量高於 5 mSv，則針對 NRC 監管限值 (5 mSv) 內的不同方向和距離，估計特定年齡家庭成員的輻射預防措施持續時間。

此研究利用蒙地卡羅模擬技術計算患者與家庭成員在不同距離及姿勢下的有效劑量 ($\text{mSv MBq}^{-1} \text{s}^{-1}$)，考慮了四種曝露情境：(1)患者與家庭成員面對面站立、(2)患者與成年家庭成員並肩躺臥、(3)患者抱著新生兒、(4)一歲幼兒坐在患者膝上。模型參數則基於患者的疾病類型 (如甲狀腺功能亢進或分化型甲狀腺癌) 以及患者體內 I-131 的分佈。

表 3.3 和表 3.4 列出了分別在不同距離處給予 740 MBq I-131 的甲狀腺功能亢進(HT)成年女性患者和給予 5550 MBq I-131 的分化型甲狀腺癌(DTC)患者的特定年齡家庭成員有效劑量。根據 NRC 1 m 標準距離的劑量限值 (5 mSv)，患者是可以立即出院。然而，在較短距離的面對面照射場景中，總有效劑量可能高於 5 mSv。在這種情況下，輻射預防措施的持續時間會被計算，結果在下表

的括號中。如表 3.3 所示，甲狀腺功能亢進成年女性患者與 15 歲兒童的距離不應小於 50 cm，並保持距離在 100 cm 以上 6 天，同理與成人的距離應保持 7 天，而與面對面站立的一歲、五歲和十歲兒童，無需採取輻射預防措施。如表 3.4 所示，分化型甲狀腺癌成年女性患者與 5 歲、10 歲和 15 歲的兒童和成年人，患者與其距離不應小於 50 cm，並保持距離在 100 cm 以上各為 1 天、10 天、12 天和 9 天。

表3.3. 接受 740 MBq (20 mCi) I-131 的甲狀腺功能亢進患者的總有效劑量 (mSv) 和放射後預防措施的持續時間[5]

| Distance (cm) | 1-year old | 5-year old | 10-year old | 15-year old | Adult |
|---------------|------------|------------|-------------|----------------------------|----------------------------|
| 10 | 0.01 | 0.62 | 3.65 | 8.27 (6 days) ^a | 8.60 (7 days) ^a |
| 50 | 0.06 | 1.26 | 2.24 | 2.75 | 2.63 |
| 75 | 0.07 | 1.06 | 1.50 | 1.67 | 1.58 |
| 100 | 0.07 | 0.83 | 1.04 | 1.11 | 1.05 |
| 200 | 0.04 | 0.34 | 0.36 | 0.36 | 0.34 |

^aThe number in parentheses represents the duration of radiation protection in cases where the total effective dose is higher than 5 mSv.

表3.4. 接受 5550 MBq (150 mCi) I-131 的分化型甲狀腺癌患者的總有效劑量 (mSv) 和放射後預防措施的持續時間。[5]

| Distance (cm) | 1-year old | 5-year old | 10-year old | 15-year old | Adult |
|---------------|------------|--------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 10 | 0.25 | 7.68 (1 day) | 15.75 (10 days) | 16.40 (12 days) | 14.27 (9 days) |
| 50 | 0.25 | 3.32 | 4.35 | 4.36 | 3.95 |
| 75 | 0.18 | 2.18 | 2.55 | 2.54 | 2.33 |
| 100 | 0.15 | 1.50 | 1.69 | 1.66 | 1.53 |
| 200 | 0.06 | 0.52 | 0.55 | 0.52 | 0.49 |

成年男性與成年女性 HT 患者或 DTC 患者在 30 cm 處並排睡覺時所受到的總有效劑量分別為 0.643 mSv 及 1.508 mSv。對於這種特定的曝露情況，不需要採取輻射預防措施。然而，如果患者或伴侶恰好是側睡，則伴侶應與 HT 患者的肩部保持至少 50 cm 的距離，持續 10 天，DTC 患者的肩部保持 20 天。

表 3.5 列出了 HT 或 DTC 成年女性患者與其新生兒和一歲兒童的每單位時間積分活度的有效劑量、有效劑量和輻射預防持續時間。如表 3.5 所示，給予 740 MBq 之 I-131 的 HT 女性患者在 16 天內應避免將新生兒抱在胸前、DTC 患者至少 15 天內不應將新生兒抱在胸前，且在此期間，患者應與新生兒保持至少 100 公分的距離。

表3.5. 接受 HT 或 DTC 治療的成年女性患者對新生兒和一歲兒童有效劑量[5]

| Exposure scenario | Effective dose per time-integrated activity (mSv MBq ⁻¹ s ⁻¹) | Effective dose (mSv) | Duration of radiation precautions |
|-------------------------------|--|----------------------|-----------------------------------|
| Newborn with HT patient | 1.91×10^{-7} | 20.5 | 16 days at > 100 cm |
| Newborn with DTC patient | 1.44×10^{-7} | 29.6 | 15 days at > 100 cm |
| One-year old with HT patient | 2.78×10^{-7} | 3.0 | N/A |
| One-year old with DTC patient | 1.46×10^{-7} | 3.0 | N/A |

劑量轉換係數 (mSv/mSv h⁻¹) 針對 HT 和 DTC 的成年女性患者分別彙整於表 3.6 和表 3.7 中。當現場醫學物理師測量 I-131 治療後患者腹部中線處 100 cm 距離的劑量率後，可將測得的劑量率乘以表 3.6 和表 3.7 中的劑量轉換係數，來估算年齡相關的有效劑量。

表3.6. 曝露於接受甲亢治療的成年女性患者的家庭成員的劑量換算係數[5]

| | 1-year old | 5-year old | 10-year old | 15-year old | Adult |
|--------|------------|------------|-------------|-------------|--------|
| 10 cm | 0.32 | 20.11 | 117.66 | 266.56 | 277.18 |
| 50 cm | 1.92 | 40.45 | 72.30 | 88.57 | 84.57 |
| 75 cm | 2.32 | 34.06 | 48.19 | 53.81 | 50.91 |
| 100 cm | 2.30 | 26.89 | 33.58 | 35.86 | 33.87 |
| 200 cm | 1.13 | 10.80 | 11.72 | 11.68 | 10.99 |

表3.7. 曝露於接受甲亢治療的成年女性患者的家庭成員的劑量換算係數[5]

| | 1-year old | 5-year old | 10-year old | 15-year old | Adult |
|--------|------------|------------|-------------|-------------|-------|
| 10 cm | 0.96 | 30.09 | 61.68 | 64.25 | 55.90 |
| 50 cm | 0.98 | 13.00 | 17.04 | 17.09 | 15.45 |
| 75 cm | 0.72 | 8.54 | 9.99 | 9.97 | 9.15 |
| 100 cm | 0.57 | 5.87 | 6.63 | 6.51 | 6.00 |
| 200 cm | 0.23 | 2.03 | 2.17 | 2.04 | 1.91 |

本研究中，如果採用 ICRP 或 NCRP 最大允許劑量（1 mSv）作為嬰兒/兒童的劑量限值，而不是 5 mSv，則輻射防護持續時間可能會增加到建議的五倍。

3.1.3 I-131 劑量約束之相關研究[Kocovska et al., 2011]

在這篇 Kocovska 等人(2011)的論文中[6]，受 I-131 治療的患者會在一段時間內成為輻射源，因此對於其家人及密切接觸者的輻射防護至關重要。故該研究目的是評估接受 I-131 放射性治療的甲狀腺癌和甲亢患者的家庭成員所受到的

有效劑量，並將結果與國際放射防護委員會 (ICRP) 和國際原子能機構 (IAEA) 的基本安全標準 (BSS) 進行比較。此外，該研究也希望利用模擬出之劑量率結果來給出患者和旁人應保持之距離與其限制之相處時間，以確保患者家屬的輻射劑量符合 ICRP 和 IAEA BSS 所建議的劑量限制。

該研究共測量了 60 位患者的 60 位家庭成員，包含 30 名甲狀腺癌患者的家屬與 30 名甲亢患者的家屬，使用熱發光劑量計 (Model TLD 100 進行測量。甲狀腺癌患者住院三天，而甲亢患者則在門診接受治療。家庭成員佩戴 TLD 劑量計於軀幹前方持續七天。

其中甲狀腺癌患者之 I-131 給藥劑量範圍為 3700 MBq 至 5550 MBq，平均 3539 MBq，當患者在距離 2 公尺處的輻射劑量降至 $8 \mu\text{Sv/h}$ 時，患者才可出院。出院後，患者及其家屬獲得輻射安全指導，並被建議避免與兒童及孕婦密切接觸。甲亢患者之 I-131 給藥劑量範圍為 185 MBq 至 1295 MBq，平均 683 MBq，這些患者在接受治療 15 分鐘後即出院。

甲狀腺癌患者的家屬測量結果顯示，甲狀腺癌患者家屬的輻射劑量範圍為 0.02 - 0.51 mSv，平均為 0.21 mSv，所有家屬的輻射劑量均低於 BSS 建議的劑量約束值，在 BSS 的建議當中，對於 60 歲以下的成年人其劑量約束值為 3 mSv，60 歲以上則是 15 mSv。這顯示目前的住院 3 天隔離方案能有效減少家屬的輻射曝露，結果如表 3.8、圖 3.1 所示。甲亢患者的家屬測量結果顯示，甲亢患者的家屬中有 11 人的輻射劑量超過 1 mSv，而在此之中有 1 人達到 6.79 mSv，雖甲亢患者家屬所受劑量明顯較高，但整體來說仍低於 BSS 的劑量約束值。此現象可能是因為甲亢患者的 I-131 代謝較慢，且治療後未進行住院隔離，導致家屬曝露於較高的輻射劑量。統計分析顯示，甲亢患者家屬的輻射劑量顯著高於甲狀腺癌患者家屬 (Mann-Whitney U-Test, $p < 0.001$)，結果如表 3.9、圖 3.2 所示。

表3.8. 甲狀腺癌患者家屬的有效劑量[6]

| No. | EF (mSv) | Sex | Age (y) | No. | EF (mSv) | Sex | Age (y) |
|-----|----------|-----|---------|-------------|-------------|-----|---------|
| 1 | 0.05 | m | 28 | 16 | 0.40 | m | 40 |
| 2 | 0.00 | m | 35 | 17 | 0.51 | m | 70 |
| 3 | 0.00 | m | 26 | 18 | 0.08 | m | 40 |
| 4 | 0.27 | f | 38 | 19 | 0.43 | m | 40 |
| 5 | 0.00 | m | 46 | 20 | 0.06 | m | 41 |
| 6 | 0.16 | m | 35 | 21 | 0.33 | f | 60 |
| 7 | 0.02 | f | 50 | 22 | 0.02 | m | 41 |
| 8 | 0.43 | m | 35 | 23 | 0.15 | m | 61 |
| 9 | 0.32 | f | 33 | 24 | 0.20 | m | 65 |
| 10 | 0.23 | f | 73 | 25 | 0.41 | m | 40 |
| 11 | 0.31 | m | 32 | 26 | 0.17 | m | 38 |
| 12 | 0.25 | m | 70 | 27 | 0.23 | m | 56 |
| 13 | 0.17 | f | 60 | 28 | 0.37 | m | 60 |
| 14 | 0.20 | m | 44 | 29 | 0.02 | m | 58 |
| 15 | 0.15 | m | 40 | 30 | 0.35 | m | 48 |
| | | | | Mean | 0.21 | | |

圖3.1. 根據 BSS 劑量約束與甲狀腺癌患者親屬的有效劑量比較圖[6]

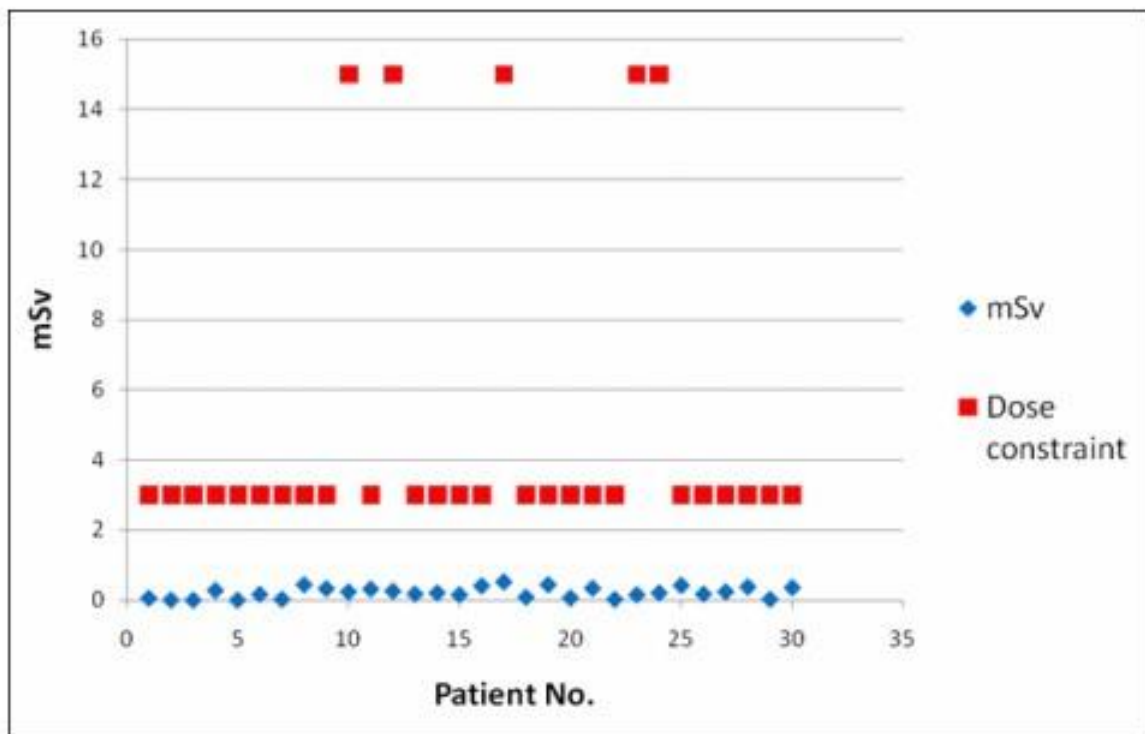
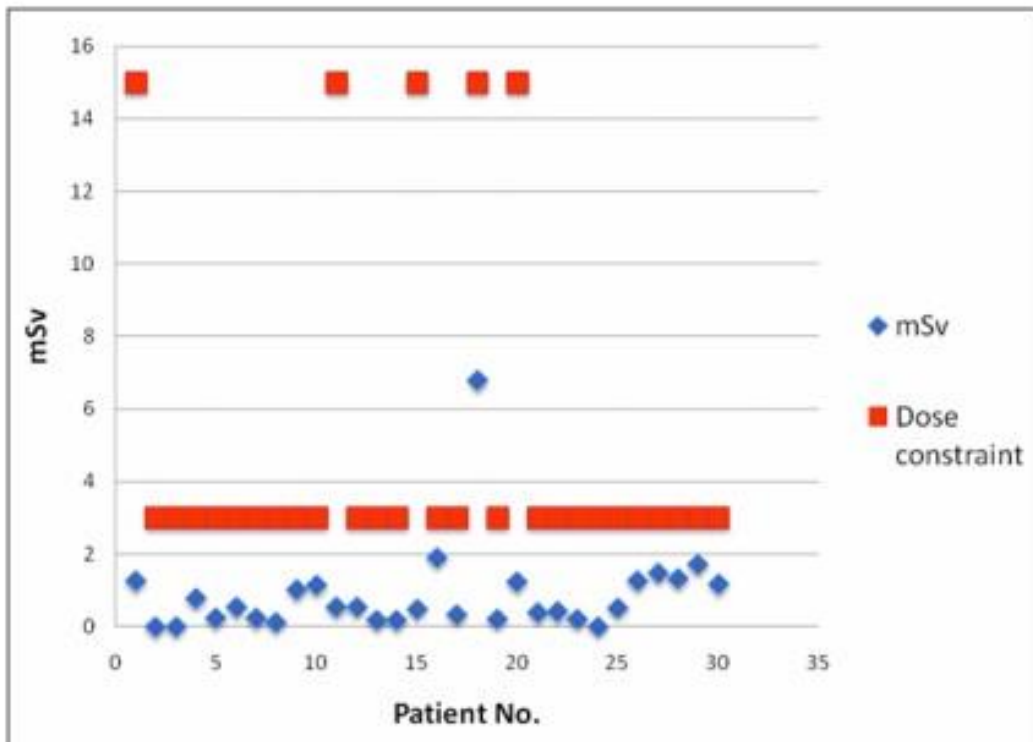


表3.9. 甲亢患者家屬的有效劑量[6]

| No. | EF (mSv) | Sex | Age (y) | No. | EF (mSv) | Sex | Age (y) |
|-------------|----------|-----|---------|-------------|----------|-----|---------|
| 1 | 1.25 | m | 63 | 16 | 1.90 | m | 55 |
| 2 | 0.00 | m | 40 | 17 | 0.33 | f | 52 |
| 3 | 0.00 | m | 29 | 18 | 6.79 | f | 69 |
| 4 | 0.78 | f | 44 | 19 | 0.21 | m | 56 |
| 5 | 0.23 | m | 45 | 20 | 1.23 | m | 66 |
| 6 | 0.52 | m | 41 | 21 | 0.38 | f | 33 |
| 7 | 0.23 | m | 52 | 22 | 0.40 | f | 44 |
| 8 | 0.12 | m | 39 | 23 | 0.21 | m | 57 |
| 9 | 1.2 | f | 44 | 24 | 0.00 | m | 40 |
| 10 | 1.14 | m | 58 | 25 | 0.51 | f | 43 |
| 11 | 0.52 | m | 80 | 26 | 1.25 | f | 57 |
| 12 | 0.54 | m | 40 | 27 | 1.48 | f | 50 |
| 13 | 0.17 | m | 32 | 28 | 1.32 | f | 42 |
| 14 | 0.16 | m | 56 | 29 | 1.70 | f | 47 |
| 15 | 0.48 | m | 70 | 30 | 1.17 | f | 60 |
| Mean | | | | 0.87 | | | |

圖3.2. 根據 BSS 劑量約束與甲亢患者親屬的有效劑量比較圖[6]



3.2 劑量評估所須基礎參數的比較

3.2.1 新的輻射和組織加權因數於劑量轉換因子的影響

ICRP-103 建議報告中更新了等價劑量和有效劑量的輻射加權因數及組織加權因數，如下表 3.10 所示：

表3.10. ICRP-60 輻射加權因數[2]

| Types of energy range of radiation | Radiation weighting factor, w_R |
|--|-----------------------------------|
| Photons, all energies | 1 |
| Electrons and muons, all energies ^b | 1 |
| Neutrons, energy | |
| < 10 keV | 5 |
| 10-100 keV | 10 |
| > 100 keV to 2 MeV | 20 |
| > 2-20 MeV | 10 |
| > 20 MeV | 5 |
| Protons, other than recoil protons, energy > 2 MeV | 5 |
| Alpha particles, fission fragments, heavy nuclei | 20 |

表3.11. ICRP-103 輻射加權因數[1]

| Radiation type* | Radiation weighting factor, w_R |
|--|---|
| Photons | 1 |
| Electrons and muons | 1 |
| Protons and charged pions | 2 |
| Alpha particles, fission fragments, heavy ions | 20 |
| Neutrons | A continuous curve as a function of neutron energy [see Fig. 2.1 and Eq. (2.8)] |

基於高能量質子的輻射生物學數據，質子及 π 介子的輻射加權因數由原本 ICRP-60 號報告中的 5 減少為 ICRP-103 號報告中的 2，以達到輻射防護的目的。另外，與 ICRP-60 號報告相比，ICRP-103 號對中子輻射加權因數被定義為以中子能量之連續函數來做計算使用：

$$f(x) = \begin{cases} 2.5 + 18.2e^{-\frac{[\ln E_n]^2}{6}} , & E_n < 1 \text{ MeV} \\ 5.0 + 17.0e^{-\frac{[\ln 2E_n]^2}{6}} , & 1 \text{ MeV} \leq E_n \leq 50 \text{ MeV} \\ 2.5 + 3.25e^{-\frac{[\ln 0.04E_n]^2}{6}} , & E_n > 50 \text{ MeV} \end{cases}$$

上為輻射加權因數和單能中子(E_n)之關係式，造成中子動能在 10keV 及 200MeV 以上時的輻射加權因數，與 ICRP-60 報告相比有明顯的下降。其中 ICRP-

60 及 ICRP-103 建議報告針對不同器官的組織加權因數如下表 3.12 所示：

表3.12. ICRP-60 及 103 之組織加權因數

| Organ | ICRP 60 | ICRP 103 |
|-----------------|---------|----------|
| Gonads | 0.2 | 0.08 |
| Breast | 0.05 | 0.12 |
| Red bone marrow | 0.12 | 0.12 |
| Lung | 0.12 | 0.12 |
| Thyroid | 0.05 | 0.04 |
| Bone surface | 0.01 | 0.01 |
| Colon | 0.12 | 0.12 |
| Stomach | 0.12 | 0.12 |
| Bladder | 0.05 | 0.04 |
| Oesophagus | 0.05 | 0.04 |
| Liver | 0.05 | 0.04 |
| Brain | - | 0.01 |
| Salivary Glands | - | 0.01 |
| Skin | 0.01 | 0.01 |
| Remainder | 0.05 | 0.12 |
| Whole body | 1.00 | 1.00 |

在 ICRP-103 報告中組織加權因數較大的兩個變動分別為將性腺的組織加權因數降低為 0.08 並且將乳房的組織加權因數提高為 0.12。另外，還首度新增了腦及唾液腺的組織加權因數，其餘器官的加權因數則如上表中所示。

由於輻射加權因數及組織加權因數在 ICRP-103 號報告的改動，ICRP 於 2010 更新了體外曝露轉換係數並且出版第 116 號報告[7]，與基於 ICRP-60 的 ICRP-74[8]號報告相比，該報告使用的劑量評估蒙地卡羅計算程式也有些許不同，輻射類型及能量範圍皆有所擴充，兩份報告評估架構的大致比較如下表 3.13 所示：

表3.13. ICRP-74 和 ICRP-116 針對體外曝露轉換係數計算之比較

| | ICRP-74 | ICRP-116 |
|------------------|--|--|
| 蒙地卡羅模擬程式 | DEEP、EGS4、ETRAN、 FANEUT、GSF、HL-PH、 HADRON、JEUNESSE、LAHET、 MCNP、SAM-CE、MORSE-CG、 PTB/BG | EGSnrc、MCNPX 2.5、MCNPX 2.6-CEM、GEANT4、PHITS、 FLUKA |
| 粒子類型及能量範圍 | 光子(10keV ~1MeV) 中子(0.001eV ~180MeV) 電子(100keV ~10MeV) | 光子(10keV~10GeV) 中子(0.001eV~10GeV) 正負電子(50keV~10GeV) 質子(1MeV~10GeV) 正負 π 介子(1MeV~200GeV) 正負 μ 子(1MeV~10GeV) 氦離子(1MeV/u~100GeV/u) |
| 輻射場 | AP、PA、LLAT、RLAT、ROT、ISO | |
| 假體 | 1. MIRD 雙性成年假體 (Snyder 等, 1969、1978 年) 2. 特定性別之假體-ADAM、 EVA (Kramer 等, 1982 年) 3. 特定年齡之假體(Cristy、 Eckerman 等, 1987 年) | ICRP-110 之體素假體 |
| 輻射加權因數 組織加權因數 | ICRP-60 | ICRP-103 |

若分別將光子和中子以 ICRP-60 和 ICRP-103 加權因數代入參考人假體之體外曝露轉換係數，可見中子在 AP 方向時的低能量及高能量區，使用 ICRP-60 得到的數值較 ICRP-103 號高出許多，如圖 3.3，此結果歸因於 ICRP-60 在這些能量區間的輻射加權因數大約為 ICRP-103 的兩倍。然而對於光子而言，由於輻射加權因數並無改變，因此各個能量區間所得的數值也並無顯著差異，如圖 3.4。

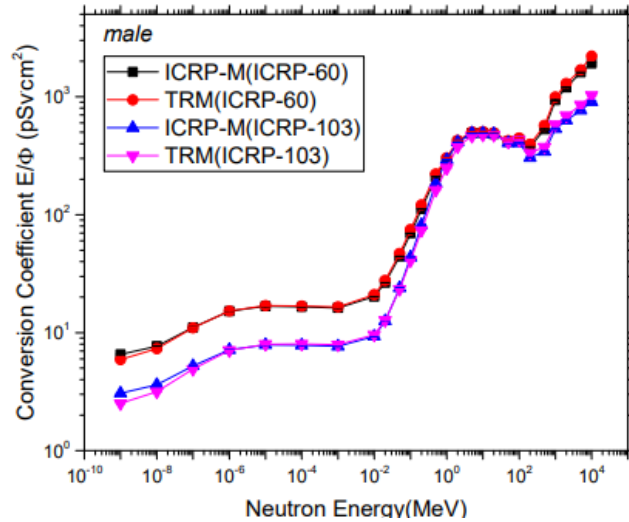


圖3.3. 中子在 AP 方向的有效劑量轉換係數(男性)

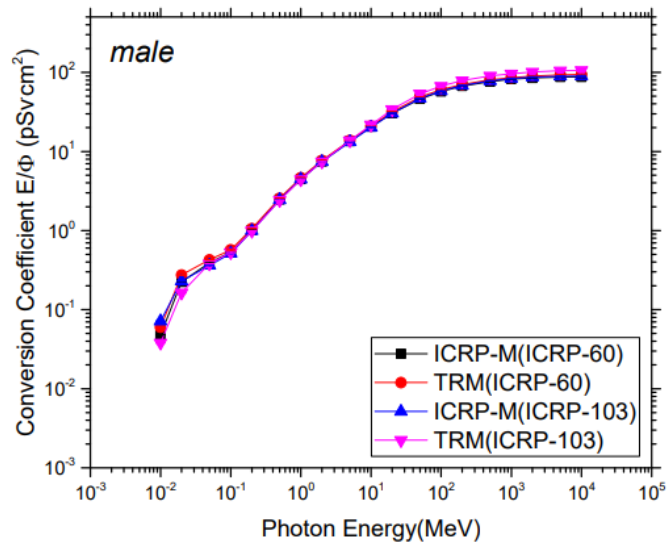


圖3.4. 光子在 AP 方向的有效劑量轉換係數(男性)

3.2.2 我國現行輻防標準與國際最新輻防建議之差異比較

我國現行輻防法是以 ICRP 於民國 79 年發布之第 60 號建議報告為訂定參考基礎。依我國游離輻射防護安全標準規定，輻射工作人員職業曝露之劑量限值每連續五年週期之有效劑量不得超過 100 mSv，且任何單 1 年內之有效劑量不得超過 50 mSv。眼球水晶體之等價劑量於 1 年內不得超過 150 mSv。皮膚或四肢之等價劑量於 1 年內不得超過 500 mSv。

前述研究介紹有提及到的德國則於 2017 年更新了最新的輻射防護法，且 Rühm, W 等人(2020) [9]也總結了對於這次德國放射防護委員會修法討論了目前有效劑量限值和工作人員劑量限制背後的原因，有關於德國輻射工作人員職業曝露之劑量限值如下表 3.14：

表3.14. 德國輻射工作人員職業曝露之劑量限值[9]

| | |
|------------|--|
| 有效劑量 | $\leq 20\text{mSv/y}$ 在少數情況下允許 $\leq 50\text{mSv/y}$ ，但有效劑量累積 5 年內不得超過 100mSv |
| 終身累積職業有效劑量 | $\leq 400\text{mSv}$ |
| 眼球水晶體等價劑量 | $\leq 20\text{mSv/y}$ |
| 皮膚或四肢等價劑量 | $\leq 500\text{mSv/y}$ |

與我國相比，德國最大的不同在於將終生職業劑量限制為累積有效劑量 400 mSv，但這不意味著任何超過此限制的人都會自動被禁止從事其專業工作，在這種情況下，相應的個人還是可以繼續從事其專業工作，不過前提是未來幾年內任何額外的有效劑量每年不超過 10 mSv，且需徵得個人和相應批准的醫生的同意。此外，ICRP 雖已定義了眼球水晶體等價劑量的限值，然而事實證明，引起眼球水晶體混濁的劑量閾值低於先前的假設，因此 ICRP-118 建議將任何一年的眼睛水晶體等價劑量限制降低至 50 mSv，並將 5 年期間平均等價劑量降低至 20 mSv，該值遠低於我國規定的 150 mSv 年度限值，而德國則是採用了最新建議以每年小於 20 mSv 作為眼球水晶體的劑量限值。

近年來，各國已陸續修訂其法規以跟進 ICRP 的最新輻防管制建議，我國輻防法亦已於 111 年提出修正草案，納入輻射曝露情境及劑量約束管理等管制概念，並送請審議中。此外，為了將來若需以 ICRP-103 號報告的建議更新我國輻防法，以下將探討 ICRP-60 號和 ICRP-103 號報告於劑量運算所需之基礎參數上的變動會對選定的幾個曝露情境帶來什麼樣的影響，而各國又是如何發展出新的劑量評估技術來因應這樣的改變。

3.3 劑量影響研究的案例分析

3.3.1 螢光透視作業之劑量評估：ICRP-103 與 60 影響分析

由前述內容可知，ICRP-103 中[1]，提高了剩餘器官(Remainder organs)的比例，並額外新增了攝護腺、唾液腺、胸腔外區域、心臟、膽囊、口腔內膜等六種器官。整體而言，頭頸部的組織加權因數增加，意味著其重要性提高。以現階段醫院作業，目前透視攝影中對外部曝露的個人監測經常使用佩戴在鉛衣下方身體上的個人劑量計進行，然而這種測量忽略了頭部和頸部區域未屏蔽器官的曝露，原因如第一段文獻回顧中所提及，由於 ICRP-103 增加了大腦的加權因數，並且新增了頭頸部器官的組織因數，在大多數情況下之有效劑量將被低估。

因此，本研究未來將針對醫院中高風險作業之一的透視攝影情節進行劑量模擬，且並比較在有無鉛衣之情境和研究所假設之五種照射角度下，如圖 3.5、圖 3.6。探討在操作者有無穿著鉛衣之情境下之全身有效劑量在代入 ICRP-60 和 103 之後所造成的差異，後續接著探討何種角度之照射情節會使代入 ICRP-60 及 103 報告之組織加權因數時產生最大劑量差異，並了解不同照射角度將帶給器官劑量何種變化。

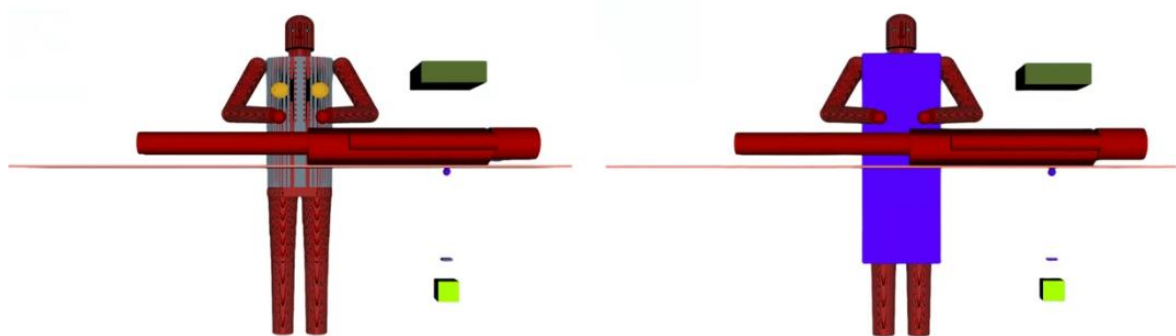


圖3.5. 無鉛衣(左)和有鉛衣(右)之操作情境

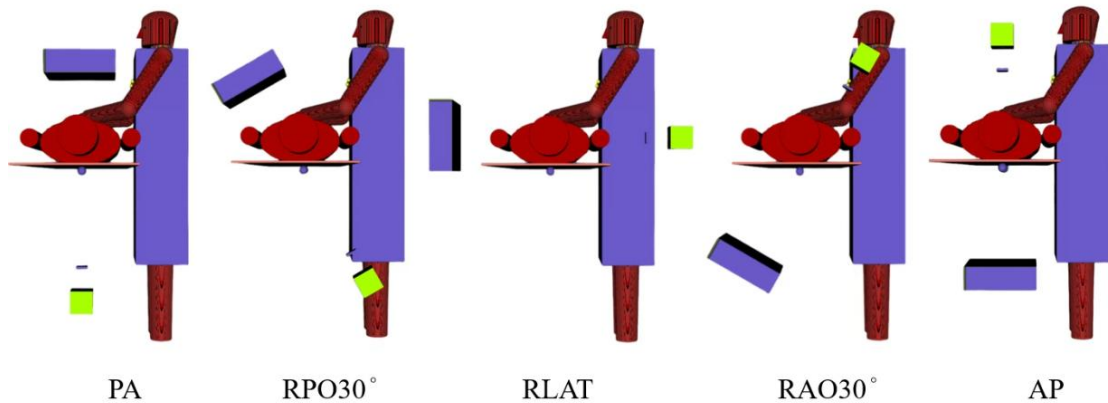


圖3.6. 五種不同照射角度之模擬情節

3.3.1.1 射源定義

為了模擬透視攝影中 X 光管所產生的光子能譜，本研究採用 SPEKTR 3.0[12] 軟體工具進行診斷能量範圍內的 X 光能譜生成。SPEKTR 3.0 為一基於 TASMICS (Tungsten Anode Spectral Model using Interpolating Cubic Splines) [13]模型所開發之 MATLAB 函式庫與圖形化介面工具 (圖 3.7)，可在指定陽極材料、靶角度、濾片厚度及 X 光管電壓條件下，模擬產生 1 keV 為間隔的高解析能譜。TASMICS 模型透過三次樣條插值取代早期的多項式擬合方法，進一步提升能譜準確度與能量解析度，避免量測時可能產生的系統性誤差。



圖3.7. Spektr3.0 軟體介面示意圖

本研究選用 80 和 120 kVp 兩種透視攝影會使用之 X 光管操作電壓，陽極材質設定為鎢，陽極靶角度設定為 12 度，並在等效 2.5 mm 鋁厚度的固有濾片條件下產生其對應之能譜 (圖 3.8)。產生之能譜數據以每 keV 為一 bin，包含 0.1 mAs 劑量條件下對應之單位能量光子通量，並將其轉換為 MCNP 格式 (SDEF cards) 作為模擬輸入射源。考量實際透視攝影 X 光機之幾何設計，本模擬亦將射源設定為錐狀向上發散，其發散角度對應於 $\cos\theta=0.75$ 的條件，以更真實地重現實際臨床輻射場的分布特性。

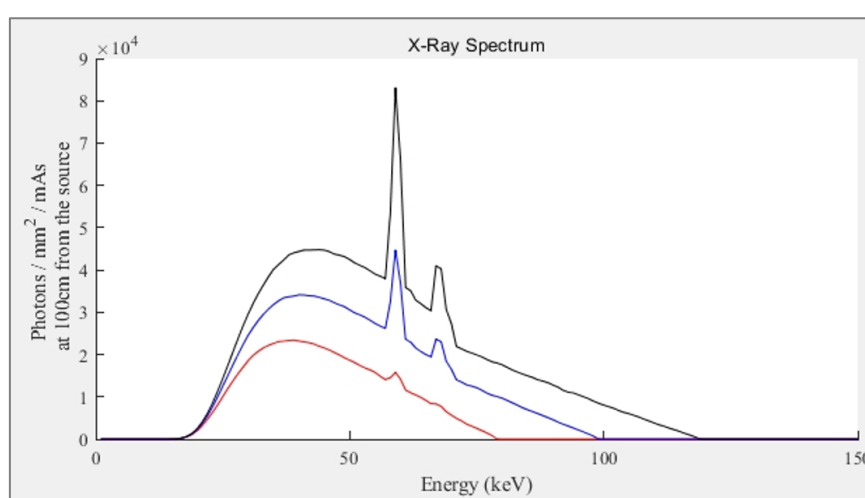


圖3.8. Spektr3.0 所產生之 80、100、120kVp 能譜圖

為將 SPEKTR 3.0 產生之能譜整合至 MCNP 模擬，本研究進一步將能譜轉換為 MCNP 所使用之能量分布格式，主要透過 SDEF (source definition)、SI (source energy bins) 與 SP (source energy probability) 卡進行定義。首先，SPEKTR 所輸出的每 keV 能量對應之單位光子數據，經歸一化處理後，作為 SP 卡中各能量 bin 之相對機率；而 SI 卡則依據能譜範圍設定對應之能量邊界值。此一模擬流程可有效結合 SPEKTR 所提供之高解析診斷能譜與 MCNP 強大的蒙地卡羅輻射遷移模擬能力，使得本研究對於醫療曝露情境下的劑量評估更具臨床真實性與精準性。

3.3.1.2 幾何與材質

本研究 PIMAL 擬人假體之動作參考了在透視攝影中操作者之姿勢，進行了關節參數調整（表 3.15），最後得到之假體設計如圖 3.9 所示。而治療室儀器參考飛利浦 Azurion 7 M20 之型號（圖 3.10），主要幾何模型設備含：(1) C-arm 之管球（圖 3.11），為長 10 公分、寬 10 公分、高 10 公分之正方體，材質為 1 公分的鉛外殼，其開口處為 1.667 公分；(2) 影像接收器（圖 3.12），為長 30 公分、寬 30 公分、高 10 公分之長方體，材質為 0.5 公分的 PP 外殼，且其影像接收面為 0.5 公分的碘化銫（Cesium Iodide, CSI）；(3) 治療床，為長 250 公分、寬 350 公分、高 1 公分之碳纖維(1.70 g/cm³)長方體。

為了以便後續對人員有效劑量做標準化。另增加長 5 公分、寬 5 公分、高 1 公分，總體積 25 立方公分的空氣腔且置於射源前方 15 公分之 DAP meter（圖 3.13）。此外，研究使用人體等效組織之材質建立出患者散射假體躺於治療床上，以更貼近現實中透視攝影治療之場景，整體模型設計如圖 3.14。

表3.15. 各項關節參數調整表

| Phantom parameter | Angles | |
|-------------------|--|--|
| | Right | Left |
| Shoulder Rotation | $\theta=25^\circ$; $\varphi=30^\circ$ | $\theta=25^\circ$; $\varphi=30^\circ$ |
| Elbow Rotation | $\theta=102^\circ$; $\varphi=135^\circ$ | $\theta=102^\circ$; $\varphi=135^\circ$ |
| Hip Rotation | $\theta=0^\circ$; $\varphi=0^\circ$ | $\theta=0^\circ$; $\varphi=0^\circ$ |
| Knee Rotation | $\theta=0^\circ$; $\varphi=0^\circ$ | $\theta=0^\circ$; $\varphi=0^\circ$ |

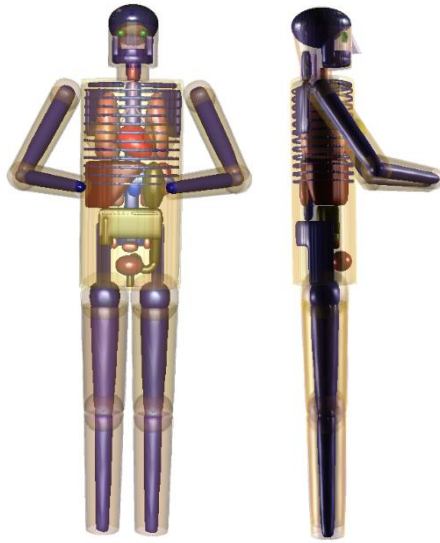


圖3.9. PIMAL 擬人假體透視攝影動作，正面(左)、側面(右)

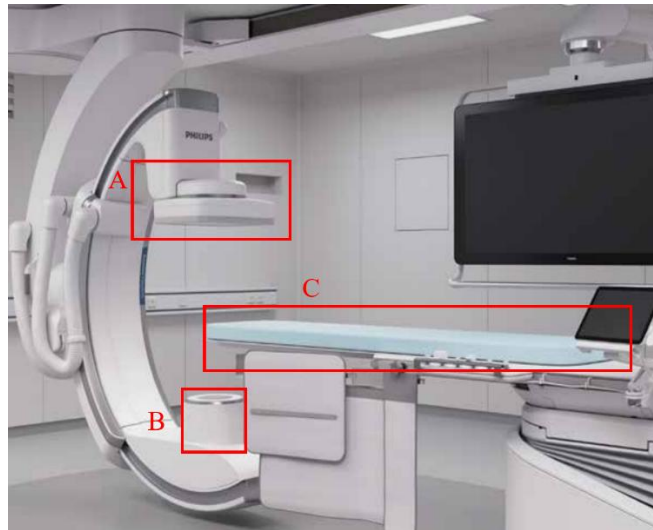


圖3.10. Philip Azurion7 C-arm 示意圖

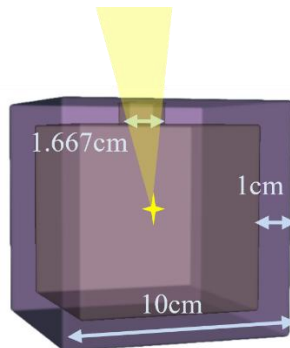


圖3.11. 管球設計

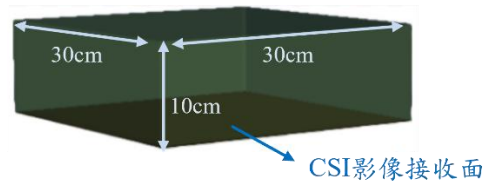


圖3.12. 影像接收器設計

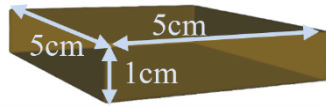


圖3.13. DAP meter 設計

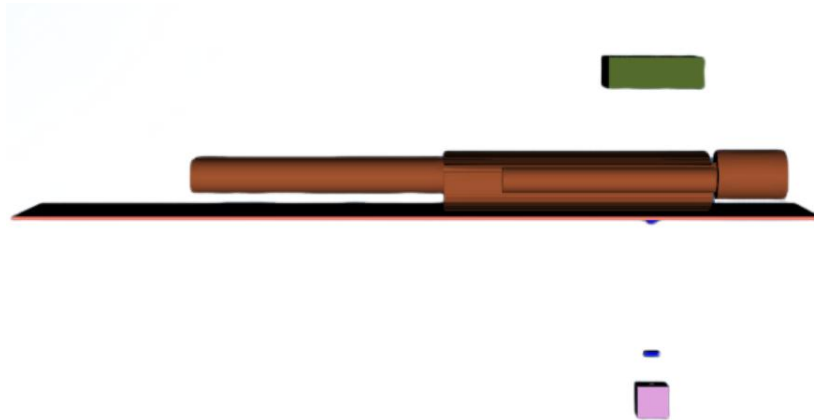


圖3.14. 研究模擬設備圖

有了上面介紹的基礎模型後，本研究額外探討操作者在有鉛衣和無鉛衣情形下執行透視攝影之劑量，鉛衣部分設計為長 39.5 公分、寬 27.4 公分、高 111.2 公分，且厚度 0.05 公分之鉛屏蔽。此外，研究所使用之照射條件為管電壓 80kVp、射源至影像距離（Source to Image Distance, SID）為 100 公分、射源至皮膚距離（Source to Skin Distance, SSD）為 60 公分、照野大小（Field of View, FOV）為 20 乘 20 平方公分，（圖 3.15）。

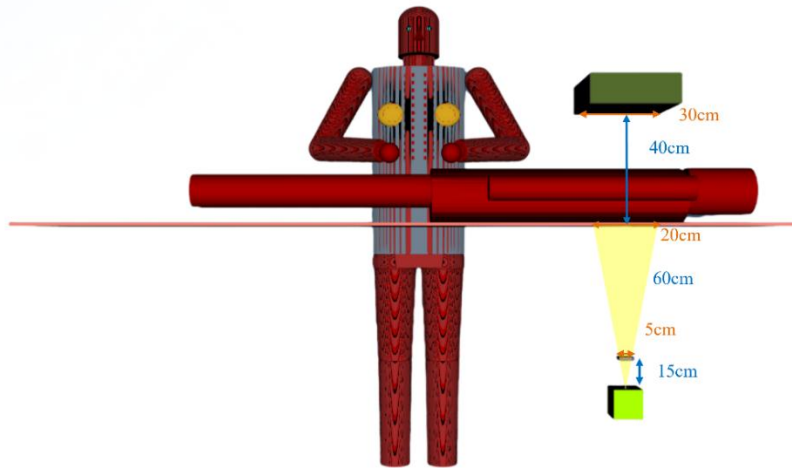


圖3.15. 操作條件示意圖

3.3.1.3 結果計數

在透視攝影案例中，根據先前文獻回顧可發現，水晶體累積的器官劑量可能接近或高於目前之年劑量限值，因此特別在 PIMAL 模型中眼球近前表面處增加一個短軸直徑為 0.34 公分，長軸長度為 0.78 公分的水晶體模型做劑量評估。研究分別考慮透視攝影時，操作者無穿著鉛衣和有穿著鉛衣兩種情節，並使用 MCNP6.2 進行模擬。每個案例運跑粒子數設定為 5×10^9 個，總共需 1 至 2 天完整結束運行，最後可得到 29 個器官和 DAP meter 中的 F6 tally 能量沉積之計數結果，將 DAP meter 中的空氣劑量乘上該深度的照野面積即可得到 DAP 值，其單位為 $\text{pGy} \cdot \text{cm}^2$ 。

若將計數結果乘上 ICRP-60 和 103 各別之組織加權因數，加總後可得到全身有效劑量值，單位為 $\text{pSv}/\text{particle}$ 。此外，由於蒙地卡羅模擬結果代表的是單一光子對人體造成的劑量貢獻，若直接使用模擬所得劑量值進行分析，將會受到實際 X 光管操作條件如管電流與總發射光子數的影響。因此，為排除這些變因並提升比較性，本研究將主要探討的劑量皆以劑量面積乘積 (DAP) 進行標準化，計算出 E/DAP，單位為 $\mu\text{Sv}/\text{Gy} \cdot \text{cm}^2$ 。透過此種比值的計算方式，後續僅需代入假定情節之 DAP 值，即可快速換算實際所接受的劑量，而不受管電流等不確定性因

素影響，整體模擬結果計算流程如圖 3.16 所示。

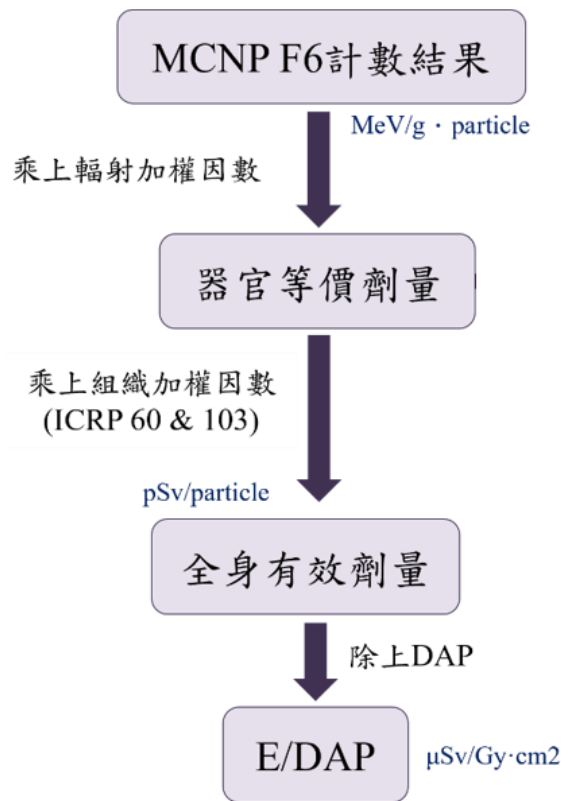


圖3.16. 透視攝影之模擬流程圖

3.3.2 I-131 患者外釋對照護者之劑量評估

研究第二部分將探討本國常見之核醫科 I-131 治療後之患者，出院後對於其照護者及公眾之劑量影響。根據最新相關研究之 ICRP-140[10]報告，報告內容提及 ICRP-94[11]號報告中建議：「幼兒和嬰兒以及不直接參與照護之訪客，應被視為公眾成員，並遵守每年 1 mSv 之公眾劑量限制」。此外，在醫療曝露中，輻射主要針對患者個人進行，但照護者及其他人也可能受到輻射曝露。這些其他人包括父母及其他通常為家庭成員或親密朋友的人，他們可能在患者接受放射性藥物後接近患者，而這些人而這些人在此曝露情境下的曝露將被視為醫療曝露。ICRP-94 號報告中建議：「對於直接參與照護和安慰患者的個人，每

次醫療事件的劑量約束為 5 mSv 是合理的」。

目前國內由於 I-131 治療是利提供患者吞服內含治療劑量的 I-131 膠囊。若 I-131 劑量大於 30 mCi，則患者需住院隔離直到體內劑量低於 30 mCi。I-131 治療原理主要是利用碘會被甲狀腺吸收之特異性，進而利用 β 衰變外釋出的電子來殺死甲狀腺腫瘤細胞，後續利用其 γ 射線進行影像掃描來追蹤治療情況。結合前述，研究將以碘特異性吸收之原理，於進行模擬時將射源簡化為聚集在人體脖頸處之碘射源。研究參考 Han 等人 2014 年之研究[5]，假設射源距離公眾或家中照護者之距離為 30 和 100 公分時，於東南西北等四個方位，如圖 3.17，對其所造成之有效劑量進行探討，並考慮射源分別在頸部和腹部高度時對於公眾或家中照護者所造成之劑量影響，藉由射源高度差異來模擬出患者坐下及站立時對於旁人造成之劑量差異性，如圖 3.18。此外，後續將藉著算出來之劑量率配合 ICRP-140 或 NCRP 報告中之劑量限值做更進一步之探討。在此我們必須強調一點，I-131 患者外釋對照護者之劑量評估不適合利用射源的 Γ -factor 與距離平方來估算劑量，因為此時二人之間距離相當近，無法清楚定義點射源與點偵檢器的位置，可靠的劑量評估需要考慮包含擬人假體的蒙地卡羅輻射遷移模擬。

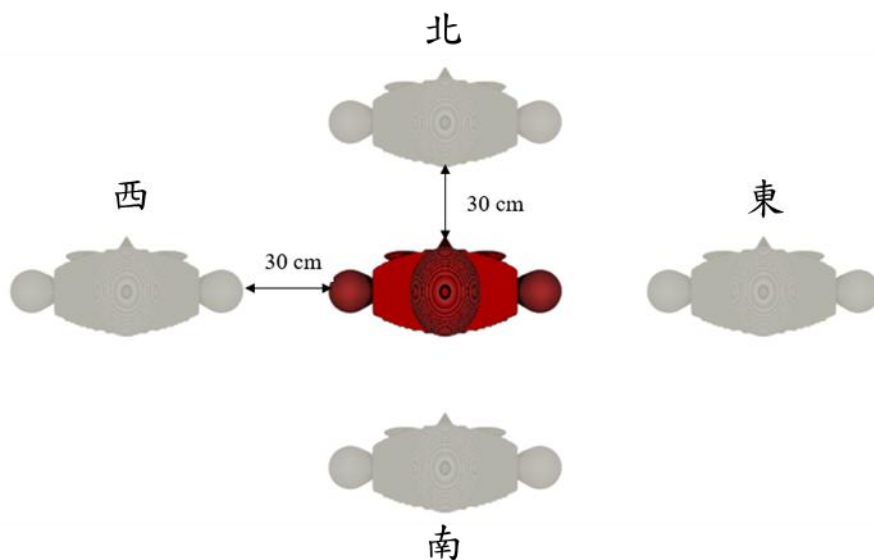


圖3.17. 患者(紅)與其他人(灰)之距離及方位示意圖

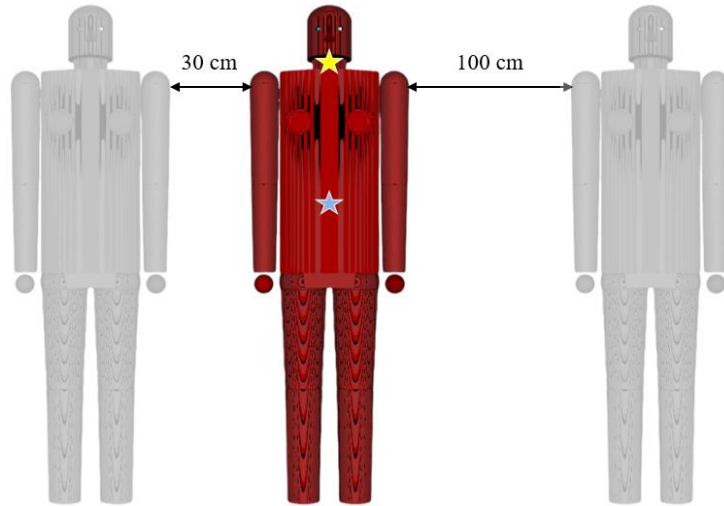


圖3.18. 模擬患者坐下(藍)及站立(黃)之兩種射源位置示意圖

3.3.2.1 射源定義

I-131 具有約 8.02 天的物理半衰期(表 3.16)。在核醫領域中，I-131 被廣泛應用於甲狀腺機能亢進與甲狀腺癌的診斷與治療，具有重要臨床價值。此核種同時外釋 β^- 粒子與 γ 射線，使其兼具治療與影像造影的功能。 β^- 輻射的最大能量約為 0.61 MeV，可在短距離內有效破壞病灶組織，適合作為放射線治療用途；而 γ 輻射的主要能量約為 364 keV，具有良好的穿透力，可被體外偵測設備接收，常用於 SPECT 成像，觀察碘的體內分佈。I-131 通常經口服方式給藥，碘會被甲狀腺細胞選擇性吸收，使放射線集中作用於目標組織。在治療甲狀腺癌時，若患者實務上接受高劑量 I-131 治療者，以住院隔離的方式進行管理，直到體內放射活度低於下列建議值：「活度 < 50 mCi，且距離 1 公尺處的輻射曝露率 < 11 mR/h」方可出院，該建議值出自 92 年廢除之核子醫學輻射防護措施指引。

表3.16. I-131 核種特性表

| Nuclide | Photon energy(MeV) | Branch ratio(%) | Mean energy(MeV) |
|---------------------|--------------------|-----------------|------------------|
| I-131 (8.0207 d) | 0.164 | 163.93 | 0.379 |
| | 0.284 | 6.14 | |
| | 0.364 | 81.7 | |
| | 0.637 | 7.17 | |

3.3.2.2 結果計數

在 I-131 患者外釋情節中，由於 I-131 藥物會聚集在甲狀腺的特異性，研究將患者視為點射源，探討其對周圍公眾人物或照護者造成之劑量影響。研究使用 MCNP6.2 進行模擬，每個案例運跑粒子數設定為 10^9 個，總共需 4 至 6 個小時完整結束運行，最後可得到 28 個器官的 F6 tally 能量沉積之計數結果，其單位為 MeV/g/particle。若將此結果乘上輻射加權因數，在 ICRP-60 或 103 中權重皆為 1，因此所得到之器官等價劑量維持不變，其單位為 pSv/particle。接著乘上 ICRP-60 和 103 各別之組織加權因數，將所有器官加總後可得到相對應的全身有效劑量值，單位為 pSv/particle。在計算相對誤差時，皆有考慮誤差傳遞。此外，研究所使用之 PIMAL 假體為男性，因此性腺部分所探討之器官為睪丸。整體模擬結果計算流程如圖 3.19 所示。

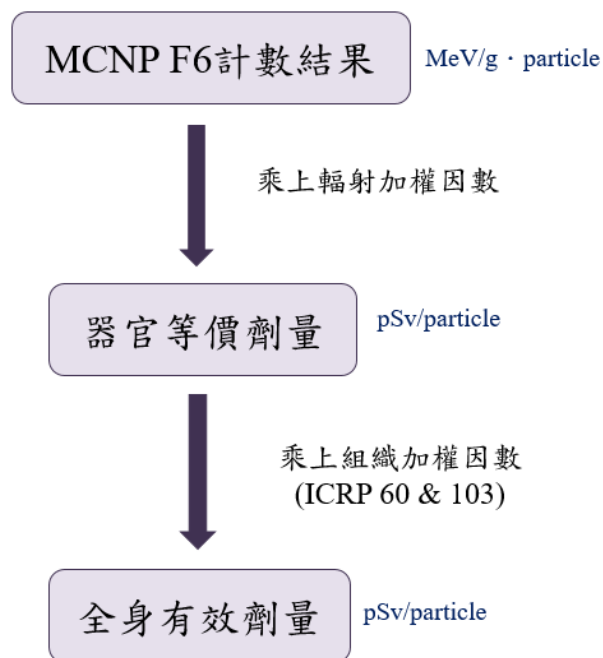


圖3.19. I-131 患者外釋之模擬流程圖

3.3.3 放射性藥物分裝作業之人員劑量評估

本研究將在此次計畫中，以最新參訪結果中所得之藥物分裝時所使用之自動分裝器和屏蔽工具做為模型，如圖 3.20、圖 3.21。研究將根據 A、B 兩家醫院所使用之兩種不同儀器而代入其相對應的操作情節，考量到藥物分裝時母罐中之高活度藥物，因此將在此次額外加入母罐模型，如圖 3.22，進行其活度對工作人員劑量之影響。其中母罐活度會考量到其隨著針劑抽取藥物時的變化，此部分是以安全分析報告做為參考，整體如表 3.17。此外，對於操作人員屏蔽之模型將以現場參訪所見之熱鉛室做為參考，以更貼近實際工作人員進行藥物分裝之情境，如圖 3.23，同時將探討 ICRP 更新之輻射加權因數與組織加權因數對手部等價劑量及全身有效劑量之影響，做更精進之劑量評估。



圖3.20. A(左)、B(右)兩家醫院之自動分裝器



圖3.21. A(左)、B(右)兩家醫院之針筒屏蔽



圖3.22. A(左)、B(右)兩家醫院之母罐屏蔽

表3.17. 活度隨藥物抽取時間衰變之參考表

| 藥劑 | F-18 活度 | 單位活度 | 1 |
|--------|---------|--------------|--------|
| | mCi | | |
| 單位活度 | 1 | 抽第 1 支時剩餘藥劑 | 1400 |
| 第 1 支 | 110 | 抽第 2 支時剩餘藥劑 | 1290.0 |
| 第 2 支 | 103.1 | 抽第 3 支時剩餘藥劑 | 1186.9 |
| 第 3 支 | 96.1 | 抽第 4 支時剩餘藥劑 | 1090.8 |
| 第 4 支 | 89.2 | 抽第 5 支時剩餘藥劑 | 1001.6 |
| 第 5 支 | 82.3 | 抽第 6 支時剩餘藥劑 | 919.3 |
| 第 6 支 | 75.4 | 抽第 7 支時剩餘藥劑 | 843.9 |
| 第 7 支 | 68.4 | 抽第 8 支時剩餘藥劑 | 775.5 |
| 第 8 支 | 61.5 | 抽第 9 支時剩餘藥劑 | 714.0 |
| 第 9 支 | 54.6 | 抽第 10 支時剩餘藥劑 | 659.4 |
| 第 10 支 | 47.6 | 抽第 11 支時剩餘藥劑 | 611.8 |
| 第 11 支 | 40.7 | 抽第 12 支時剩餘藥劑 | 571.1 |
| 第 12 支 | 33.8 | 抽第 13 支時剩餘藥劑 | 537.3 |
| 第 13 支 | 26.9 | 抽第 14 支時剩餘藥劑 | 510.4 |
| 第 14 支 | 19.9 | 抽第 15 支時剩餘藥劑 | 490.5 |
| 第 15 支 | 13.0 | | |



圖3.23. 實際熱鉛室示意圖(左)和藥物分裝實際作業情境(右)

3.3.3.1 射源定義

研究針對 F-18、Ga-68、Ga-67、Tl-201、I-123、In-111 等六種可經迴旋加速器製造出之核醫科常使用的核種進行放射性藥物分裝時所造成的劑量率變化進行探討 (表 3.18)。各核種因其不同的物理特性與放射性衰變型態，對應於特定的臨床診斷需求。F-18 主要應用於正子斷層掃描 (Positron Emission Tomography, PET)，其標記化合物如 F-18 FDG 廣泛用於腫瘤偵測、代謝評估、神經系統疾病與心肌灌注等多重影像診斷。Ga-68 亦屬於 PET 核種，常用於標記 DOTATATE 或 PSMA 等配體，分別用於神經內分泌腫瘤及攝護腺癌的精確定位。Ga-67 則多用於單光子電腦斷層掃描 (Single Photon Emission Computed Tomography, SPECT)，主要應用於慢性感染灶與淋巴瘤的診斷與療效監測。Tl-201 則為心肌灌注影像之常用核種，亦可應用於某些腫瘤之鑑別診斷。I-123 常見於甲狀腺功能與結構之評估，亦可透過標記特定配體應用於中樞神經系統或腎上腺腫瘤之診斷。而 In-111 則廣泛應用於白血球標記以進行感染灶追蹤，或標記 Octreotide 等胜肽類藥物用於神經內分泌腫瘤之影像檢查，亦可應用於體內藥物動態與分布研究。

由於上述核種於放射性藥物分裝與臨床操作過程中多涉及近距離之高風險輻射作業情境，其所產生之劑量率變化對操作人員潛在曝露風險不容忽視，故對其進行劑量評估與防護優化具有高度必要性。此外，由於射源衰變所產生的電子能量需要大於 550 keV 以上，才足以穿透厚度 2 mm 的塑膠針筒並造成人體劑量。因此本研究將只探討衰變所放出的光子作為模擬射源。

表3.18. 核種能量與特性表

| Nuclide | Photon energy(MeV) | Branch ratio | Mean energy(MeV) |
|---------|--------------------|--------------|------------------|
| F-18 | 0.511 | 194.00% | 0.511 |
| Ga-68 | 0.511 | 177.80% | 0.521 |
| | 1.077 | 3.24% | |
| Ga-67 | 0.091 | 3.37% | 152.540 |
| | 0.093 | 70.60% | |
| | 0.184 | 21.30% | |
| | 0.209 | 2.40% | |
| | 0.300 | 16.67% | |
| | 0.394 | 4.60% | |
| Tl-201 | 0.135 | 2.60% | 0.068 |
| | 0.167 | 10% | |
| | 0.011 | 30.0% | |
| | 0.069 | 22.0% | |
| | 0.071 | 38.0% | |
| | 0.080 | 13.0% | |
| | 0.081 | 17.0% | |
| | 0.083 | 3.7% | |
| I-123 | 0.159 | 83.25% | 0.159 |
| In-111 | 0.171 | 90.61% | 0.209 |
| | 0.245 | 94.12% | |

3.3.3.2 幾何與材質

本研究根據實際到 A 醫院和 B 醫院進行訪查時所觀察到之工作人在進行放射性藥物分裝時的動作，在 PIMAL5.0 程式中，將擬人假體各項關節參數調整如表 3.19 所示，以達到貼近真實工作情節之模擬效果（圖 3.24）。接著將調整好後將 PIMAL 檔案輸出為 MCNP 的輸入檔，以便進行後續模擬。

表3.19. 各項關節調整參數表

| Phantom parameter | Angles | |
|-------------------|---|--|
| | Right | Left |
| Shoulder Rotation | $\theta=3^\circ$; $\varphi=30^\circ$ | $\theta=3^\circ$; $\varphi=30^\circ$ |
| Elbow Rotation | $\theta=90^\circ$; $\varphi=122^\circ$ | $\theta=135^\circ$; $\varphi=132^\circ$ |
| Hip Rotation | $\theta=0^\circ$; $\varphi=0^\circ$ | $\theta=0^\circ$; $\varphi=0^\circ$ |
| Knee Rotation | $\theta=0^\circ$; $\varphi=0^\circ$ | $\theta=0^\circ$; $\varphi=0^\circ$ |

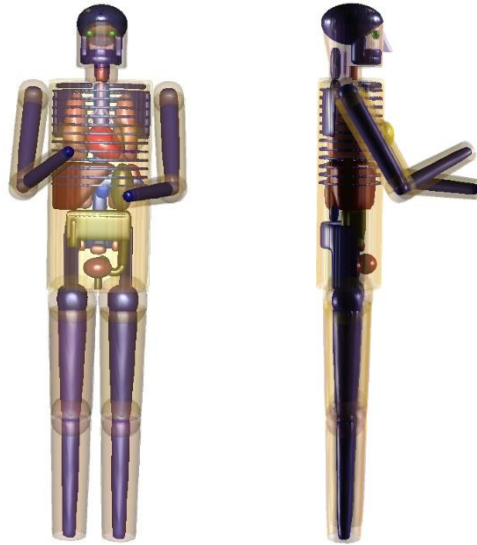


圖3.24. PIMAL 擬人假體放射性藥物分裝動作，正面(左)、側面(右)

除了 PIMAL 假體內建所包含的組織器官，由於放射性藥物分裝過程中，手部在整個分裝過程中將近距離間接觸到高活度藥物，屬高風險器官之一，因此研究還額外增加手部來進行這方面的劑量評估（圖 3.25），其中左右手部之設計為半徑 3.5 公分的球體，接於手臂末端，並定義球體表面下 0.06 至 0.08 毫米處的球殼為手部皮膚。

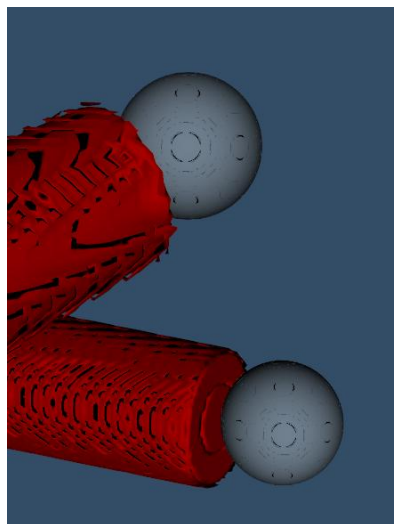


圖3.25. 手部模型設計圖

本研究參考實際放射性藥物分裝時之環境以及所使用之工具，並將劑量來源分為母罐、裸針、屏蔽針筒進行探討，射源位置皆設在前述三者之中心點處。其

中，A 和 B 醫院所使用之放射性藥物分裝器不同，因此後續將 A 和 B 兩家醫院分為情節 A 和情節 B 作探討。放射性藥物分裝作業整個過程將在熱鉛室內進行，對於分裝熱鉛室，其模型設計為外部尺寸長 115 公分、寬 110 公分、高 240 公分；內部尺寸長 86 公分、寬 64 公分、高 72 公分之長方型體（圖 3.26），鉛屏蔽厚度設計為正面 6 公分，其餘五面 5 公分。

情節 A 分裝熱鉛室內部（圖 3.27）所使用之材料為 304 不鏽鋼，且內壁厚為 1 公分。內部器材包含分裝器上的：(1) 母罐（圖 3.28），其材質為厚度 1.8 公分、高度 10.5 公分、內徑 1.9 公分、外徑 3.7 公分的鎢罐，且母罐位置是和半自動分裝器合併；(2) 塑膠針筒（圖 3.29），材質為 0.2 公分聚丙烯 (Polypropylene, PP)、高度 6 公分、內徑 0.6 公分、外徑 0.8 公分；(3) 針筒屏蔽套（圖 3.30），其為 0.9 公分厚、高度 6 公分、內徑 0.8 公分、外徑 1.7 公分的鎢套。

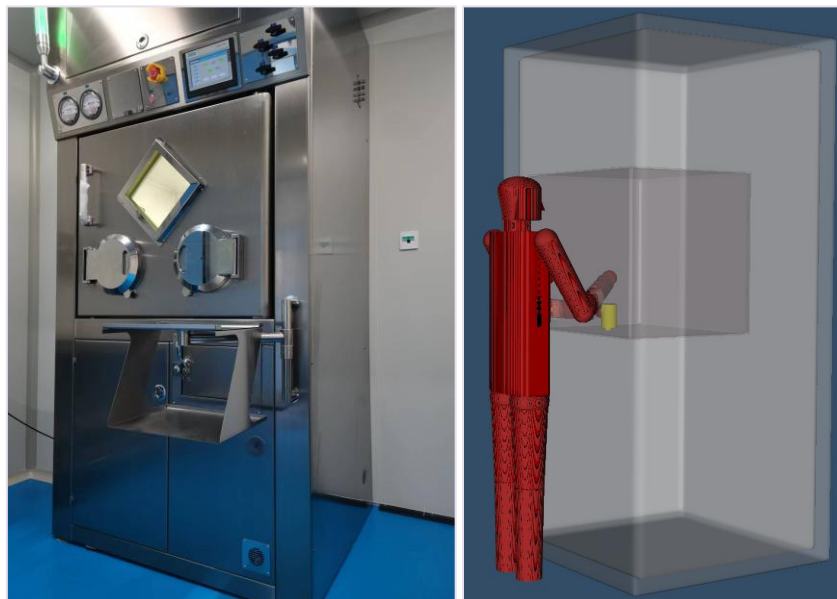


圖3.26. 分裝熱鉛室外觀(左)和熱鉛室模擬圖(右)

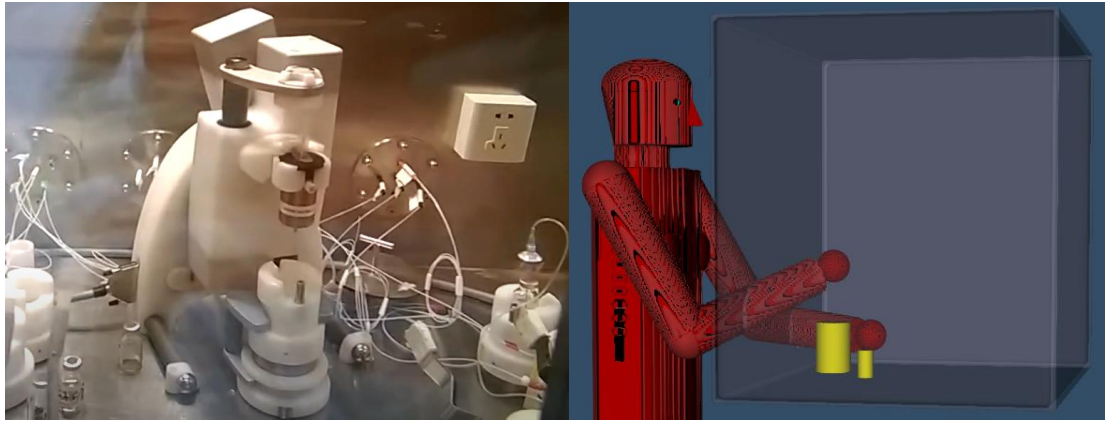


圖3.27. 情節 A 之分裝熱鉛室內部

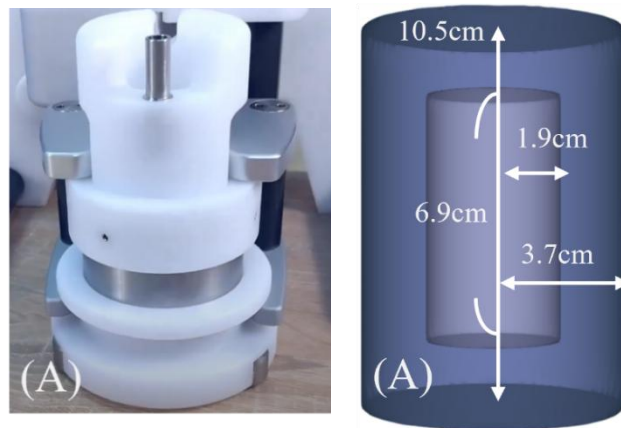


圖3.28. 情節 A 之母罐設計



圖3.29. 情節 A、B 之塑膠針筒設計

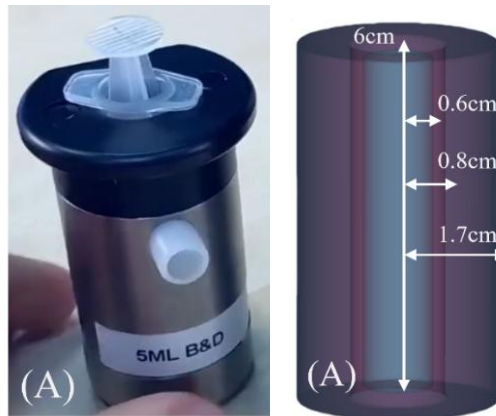


圖3.30. 情節 A 之針筒屏蔽套設計

情節 B 分裝熱鉛室內部 (圖 3.31) 所使用之材料同樣為 304 不鏽鋼，且內壁厚度為 1 公分。內部器材包含分裝器上的：(1) 母罐 (圖 3.32)，其材質為厚度 7 公分、高度 20 公分、內徑 2.5 公分、外徑 7 公分的鎢罐，且母罐位置是和半自動分裝器分離；(2) 塑膠針筒同情節 A 所使用；(3) 針筒屏蔽套 (圖 3.33)，其為 1.4 公分厚、高度 6 公分、內徑 0.8 公分、外徑 2.2 公分的鎢套。

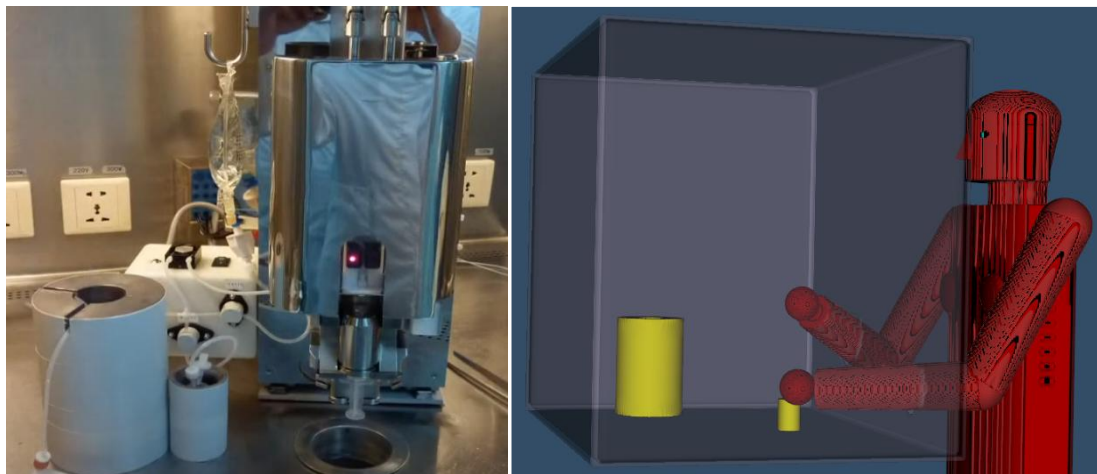


圖3.31. 情節 B 之分裝熱鉛室內部

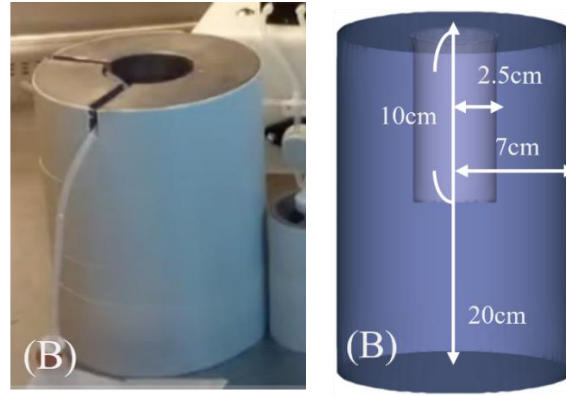


圖3.32. 情節 B 之母罐設計

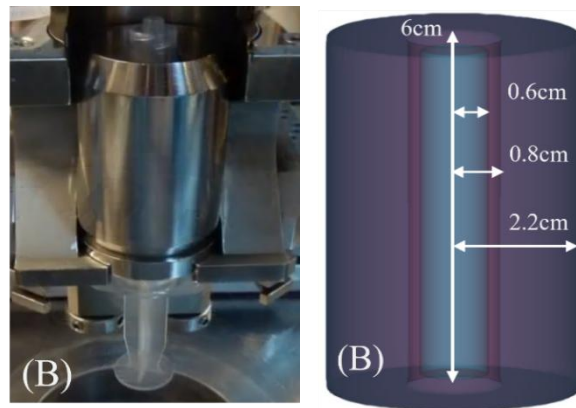


圖3.33. 情節 B 之針筒屏蔽套設計

3.3.3.3 結果計數

研究使用 MCNP6.2 進行模擬，每個案例運跑粒子數設定為 10^9 個，總共需 4 至 6 個小時完整結束運行，最後可得到 28 個器官的 F6 tally 能量沉積之計數結果，其單位為 MeV/g/particle。若將此結果乘上輻射加權因數，在 ICRP-60 或 103 中權重皆為 1，因此所得到之器官等價劑量維持不變，在此步驟可得到手部劑量，其單位為 pSv/particle。接著乘上 ICRP-60 和 103 各別之組織加權因數，將所有器官加總後可得到相對應的全身有效劑量值，單位同樣為 pSv/particle。在計算相對誤差時，皆有考慮誤差傳遞。此外，研究所使用之 PIMAL 假體為男性，因此性腺部分所探討之器官為睪丸。整體模擬結果計算流程如圖 3.34 所示，可得到如

表 3.20 之結果，而表中劑量率需再代入假定操作情節才可得到最終之有效劑量或手部等價劑量。

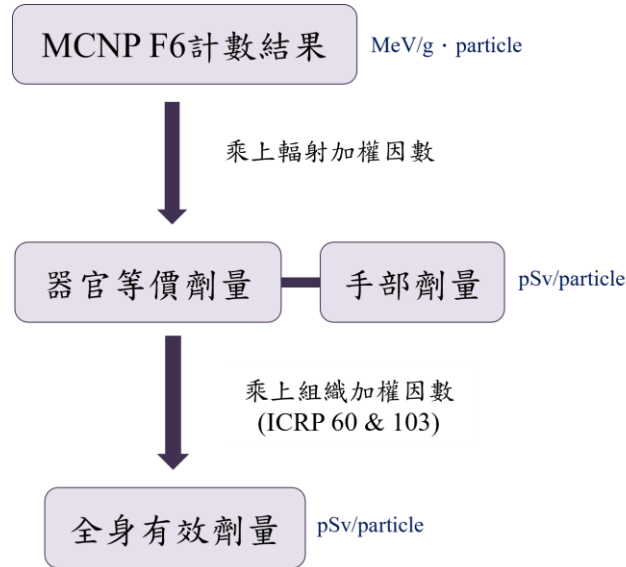


圖3.34. 放射性藥物分裝之模擬流程

表3.20. 模擬結果整理出之劑量率表

| ICRP 60 | ICRP 103 | | MeV/g · particle | re | ICRP 60 pSv/particle | ICRP 103 pSv/particle |
|---------|----------|-----------------------|------------------|--------|----------------------|-----------------------|
| 0.2 | 0.08 | testes | 4.47E-12 | 30.99% | 1.43E-10 | 5.72E-11 |
| 0.12 | 0.12 | bone marrow | 1.80E-11 | 2.05% | 3.46E-10 | 3.46E-10 |
| 0.12 | 0.12 | colon | 1.51E-11 | 5.22% | 2.91E-10 | 2.91E-10 |
| 0.12 | 0.12 | lungs | 3.37E-11 | 2.80% | 6.47E-10 | 6.47E-10 |
| 0.12 | 0.12 | stomach | 3.49E-11 | 5.31% | 6.69E-10 | 6.69E-10 |
| 0.05 | 0.04 | urinar bladder | 6.86E-12 | 14.24% | 5.49E-11 | 4.39E-11 |
| 0.05 | 0.12 | breast | 5.98E-11 | 4.69% | 4.79E-10 | 1.15E-09 |
| 0.05 | 0.04 | liver | 5.84E-11 | 2.52% | 4.67E-10 | 3.74E-10 |
| 0.05 | 0.04 | esophagus | 1.65E-11 | 11.07% | 1.32E-10 | 1.05E-10 |
| 0.05 | 0.04 | thyroid | 2.94E-12 | 38.30% | 2.35E-11 | 1.88E-11 |
| 0.01 | 0.01 | skin | 2.65E-11 | 1.86% | 4.23E-11 | 4.23E-11 |
| 0.01 | 0.01 | bone surface | 2.10E-11 | 2.11% | 3.37E-11 | 3.37E-11 |
| 0.0056 | 0.0086 | adrenals | 1.91E-11 | 17.40% | 1.71E-11 | 2.63E-11 |
| 0.0056 | 0.01 | brain | 2.14E-12 | 13.81% | 1.92E-12 | 3.43E-12 |
| NA | 0.0086 | ET | 2.95E-12 | 25.75% | 0 | 4.05E-12 |
| 0.0056 | 0.0086 | small intestine | 1.61E-11 | 5.07% | 1.45E-11 | 2.22E-11 |
| 0.0056 | 0.0086 | kidneys | 1.43E-11 | 7.03% | 1.29E-11 | 1.97E-11 |
| 0.0056 | 0.0086 | muscle | 1.87E-11 | 1.31% | 1.68E-11 | 2.57E-11 |
| 0.0056 | 0.0086 | pancreas | 2.71E-11 | 7.55% | 2.43E-11 | 3.73E-11 |
| 0.0056 | 0.0086 | spleen | 2.34E-11 | 8.75% | 2.10E-11 | 3.22E-11 |
| 0.0056 | 0.0086 | thymus | 1.76E-11 | 17.66% | 1.58E-11 | 2.42E-11 |
| NA | 0.0086 | prostate | 3.46E-12 | 35.26% | 0 | 4.76E-12 |
| NA | 0.0086 | heart | 2.79E-11 | 4.93% | 0 | 3.84E-11 |
| NA | 0.0086 | gall bladder | 3.63E-11 | 8.77% | 0 | 4.99E-11 |
| NA | 0.0086 | oral mucosa | 5.59E-12 | 13.99% | 0 | 7.69E-12 |
| 0.0056 | NA | upper large intestine | 2.15E-11 | 6.80% | 1.92E-11 | 0 |
| NA | 0.01 | salivary gland | 4.61E-12 | 18.58% | 0 | 7.38E-12 |
| | | effective dose | | | 3.47E-09 | 4.08E-09 |
| | | hands | 9.96E-08 | 0.15% | 1.59E-05 | |

第四章、結果與討論

4.1 案例分析一：介入性治療情節

4.1.1 劑量率模擬結果

代入 ICRP-103 之組織加權因數，睪丸劑量降低最為顯著 (0.4 倍)，其次為膀胱、肝臟、食道、甲狀腺。劑量增加最為明顯的為胸部 (2.4 倍)，其次為腦部、腎上腺、小腸、腎臟、肌肉、脾臟、胰臟、胸腺。大腸則是不被列為劑量考量器官 (圖 4.1)。互相抵銷後，全身有效劑量在無鉛衣和有鉛衣之情境下分別降為原劑量的 0.64 和 0.97 倍 (圖 4.2、圖 4.3)。

| | ICRP 60 | | ICRP 103 | | | ICRP 60 | | ICRP 103 | |
|-----------------------|--------------|----------|--------------|----------|-----------------------|--------------|----------|--------------|----------|
| | pSv/particle | re | pSv/particle | re | | pSv/particle | re | pSv/particle | re |
| bone marrow | 3.11E-09 | 5.58E-22 | 3.11E-09 | 5.58E-22 | bone marrow | 6.20E-10 | 2.28E-23 | 6.20E-10 | 2.28E-23 |
| colon | 1.05E-09 | 4.92E-22 | 1.05E-09 | 4.92E-22 | colon | 1.13E-11 | 9.17E-25 | 1.13E-11 | 9.17E-25 |
| lungs | 5.22E-10 | 1.24E-22 | 5.22E-10 | 1.24E-22 | lungs | 6.13E-12 | 2.43E-25 | 6.13E-12 | 2.43E-25 |
| stomach | 1.36E-09 | 1.70E-21 | 1.36E-09 | 1.70E-21 | stomach | 1.14E-11 | 2.19E-24 | 1.14E-11 | 2.19E-24 |
| testes | 1.51E-08 | 1.49E-19 | 6.03E-09 | 2.38E-20 | testes | 1.21E-10 | 2.30E-22 | 4.82E-11 | 3.67E-23 |
| skin | 2.58E-10 | 1.11E-24 | 2.58E-10 | 1.11E-24 | skin | 1.21E-11 | 7.32E-27 | 1.21E-11 | 7.32E-27 |
| bone surface | 1.60E-10 | 2.15E-24 | 1.60E-10 | 2.15E-24 | bone surface | 2.46E-12 | 8.27E-27 | 2.46E-12 | 8.27E-27 |
| breast | 3.67E-10 | 1.53E-22 | 8.80E-10 | 8.79E-22 | breast | 1.84E-12 | 1.35E-25 | 4.42E-12 | 7.79E-25 |
| urinary bladder | 8.41E-10 | 7.34E-22 | 6.73E-10 | 4.70E-22 | urinary bladder | 6.28E-12 | 7.64E-25 | 5.02E-12 | 4.89E-25 |
| liver | 9.31E-11 | 1.28E-23 | 7.45E-11 | 8.18E-24 | liver | 5.98E-13 | 1.36E-26 | 4.78E-13 | 8.72E-27 |
| esophagus | 1.02E-10 | 1.00E-22 | 8.13E-11 | 6.41E-23 | esophagus | 2.20E-12 | 4.10E-25 | 1.76E-12 | 2.63E-25 |
| thyroid | 2.01E-10 | 4.86E-22 | 1.61E-10 | 3.11E-22 | thyroid | 2.17E-11 | 1.06E-23 | 1.74E-11 | 6.78E-24 |
| brain | 4.44E-11 | 8.35E-25 | 7.92E-11 | 2.66E-24 | brain | 2.97E-11 | 1.11E-25 | 5.31E-11 | 3.54E-25 |
| adrenals | 1.01E-11 | 3.53E-24 | 1.55E-11 | 8.33E-24 | adrenals | 1.16E-13 | 2.11E-27 | 1.79E-13 | 4.98E-27 |
| small intestine | 4.02E-11 | 8.78E-25 | 6.18E-11 | 2.07E-24 | small intestine | 3.54E-13 | 1.32E-27 | 5.44E-13 | 3.11E-27 |
| kidneys | 1.79E-11 | 9.36E-25 | 2.75E-11 | 2.21E-24 | kidneys | 2.36E-13 | 1.95E-27 | 3.62E-13 | 4.60E-27 |
| muscle | 6.42E-11 | 6.93E-26 | 9.86E-11 | 1.63E-25 | muscle | 4.99E-13 | 1.12E-28 | 7.66E-13 | 2.63E-28 |
| pancreas | 3.12E-11 | 3.21E-24 | 4.80E-11 | 7.58E-24 | pancreas | 3.87E-13 | 5.40E-27 | 5.95E-13 | 1.27E-26 |
| spleen | 6.31E-11 | 6.93E-24 | 9.70E-11 | 1.63E-23 | spleen | 7.03E-13 | 1.19E-26 | 1.08E-12 | 2.80E-26 |
| thymus | 3.03E-11 | 8.52E-24 | 4.65E-11 | 2.01E-23 | thymus | 4.85E-13 | 4.09E-26 | 7.45E-13 | 9.64E-26 |
| upper large intestine | 3.35E-11 | 2.16E-24 | 0 | 0.00E+00 | upper large intestine | 3.72E-13 | 4.32E-27 | 0 | 0.00E+00 |
| prostate | 0 | 0.00E+00 | 1.30E-10 | 9.88E-27 | prostate | 0 | 0.00E+00 | 2.08E-12 | 2.45E-25 |
| salivary gland | 0 | 0.00E+00 | 7.74E-11 | 1.34E-23 | salivary gland | 0 | 0.00E+00 | 7.79E-12 | 2.81E-25 |
| ET | 0 | 0.00E+00 | 3.09E-11 | 7.68E-24 | ET | 0 | 0.00E+00 | 5.32E-12 | 2.22E-25 |
| heart | 0 | 0.00E+00 | 2.84E-11 | 1.51E-24 | heart | 0 | 0.00E+00 | 3.81E-13 | 6.47E-27 |
| gall bladder | 0 | 0.00E+00 | 2.51E-11 | 8.20E-24 | gall bladder | 0 | 0.00E+00 | 2.42E-13 | 1.05E-26 |
| oral mucosa | 0 | 0.00E+00 | 7.19E-11 | 5.95E-24 | oral mucosa | 0 | 0.00E+00 | 9.66E-12 | 1.60E-25 |
| effective dose | 2.35E-08 | 1.67% | 1.52E-08 | 1.11% | effective dose | 8.49E-10 | 1.93% | 8.23E-10 | 1.04% |

圖4.1. ICRP-60、103 之器官劑量比例：無鉛衣(左)、有鉛衣(右)

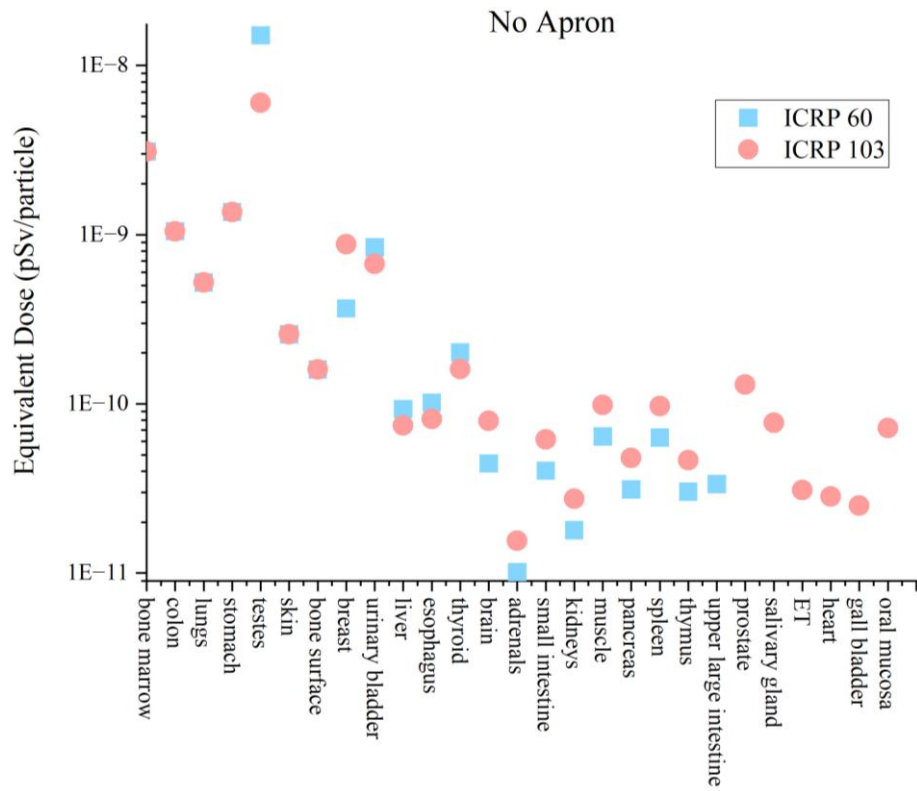


圖4.2. 器官等價劑量率：無鉛衣

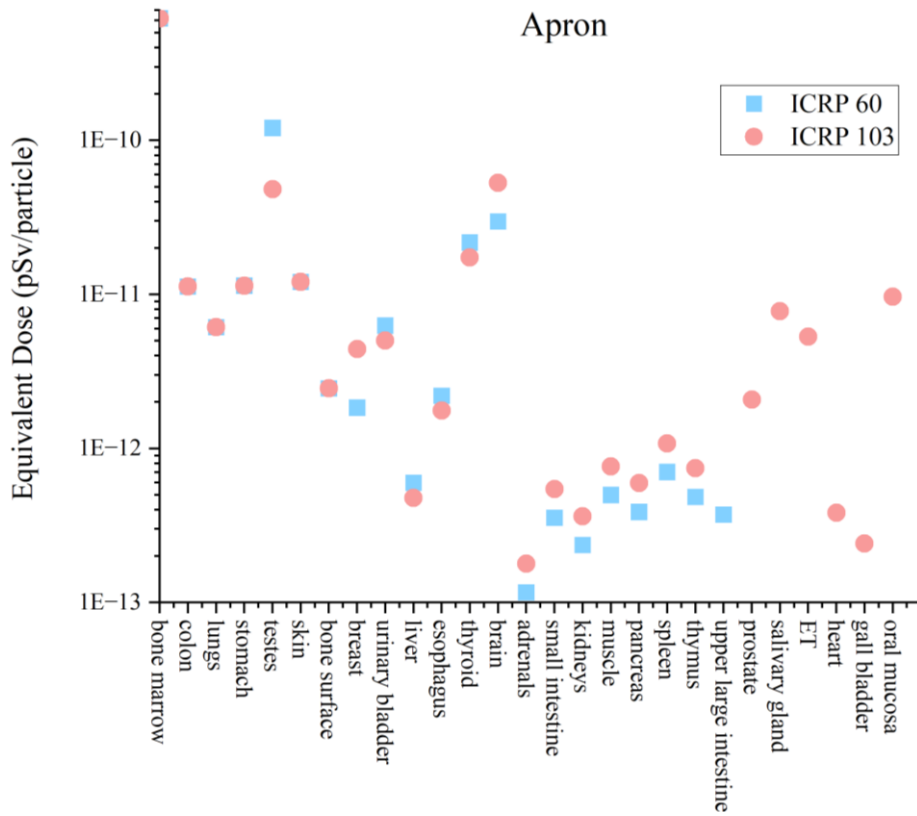


圖4.3. 器官等價劑量率：有鉛衣

4.1.1.1 頭頸部對全身有效劑量率之影響($E_{H\&N}/E$)

進一步探討 ICRP-103 與 ICRP-60 報告之差異，可發現 ICRP-103 報告中針對頭頸部區域新增了腮腺與口腔內膜等器官，儘管甲狀腺的組織加權因數有所降低，腦部的加權因數則明顯上升。此變動導致頭頸部區域的劑量貢獻較 ICRP-60 顯著增加，使頭頸部劑量提高約 1.6 至 1.7 倍，且頭頸部器官劑量與全身有效劑量之比值($E_{H\&N}/E$)提高，也顯示新報告對該區域之考量更加重視(表 4.1、表 4.2)。

在實際作業中，若工作人員穿戴鉛衣，由於鉛衣可有效遮蔽胸腹部等多數主要器官，使得未被防護的頭頸部成為主要接受輻射劑量之區域。因此，相較於未穿鉛衣的情境，頭頸部對於全身有效劑量的貢獻比例在穿鉛衣時顯著提高。此結果強調，在高風險操作中應更加重視頭頸部的劑量評估與防護策略，避免該區域累積過高之輻射曝露。

表4.1. ICRP-60 及 103 之 $E_{H\&N}/E$ ：無鉛衣

| No Apron | | ICRP 60 | ICRP 103 |
|-------------------------------|----------------|--------------|--------------|
| | | pSv/particle | pSv/particle |
| Head & Neck ($E_{H\&N}$) | thyroid | 2.01E-10 | 1.61E-10 |
| | salivary gland | 0 | 7.74E-11 |
| | oral mucosa | 0 | 7.19E-11 |
| | brain | 4.44E-11 | 7.92E-11 |
| $E_{H\&N}$ (Total) | | 2.45E-10 | 3.89E-10 |
| Effective dose (E) | | 2.35E-08 | 1.52E-08 |
| $E_{H\&N}/E$ | | 1.0% | 2.6% |

表4.2. ICRP-60 及 103 之 $E_{H\&N}/E$ ：有鉛衣

| Apron | | ICRP 60 | ICRP 103 |
|-------------------------------|----------------|--------------|--------------|
| | | pSv/particle | pSv/particle |
| Head & Neck ($E_{H\&N}$) | thyroid | 2.17E-11 | 1.74E-11 |
| | salivary gland | 0 | 7.79E-12 |
| | oral mucosa | 0 | 9.66E-12 |
| | brain | 2.97E-11 | 5.31E-11 |
| $E_{H\&N}$ (Total) | | 5.15E-11 | 8.80E-11 |
| Effective dose (E) | | 8.49E-10 | 8.23E-10 |
| $E_{H\&N}/E$ | | 6.1% | 10.7% |

4.1.1.2 新增器官對全身有效劑量之影響(E_{Add}/E)

此外，ICRP-103 報告亦對剩餘器官 (Remainder Organs) 之組織加權因數進行調整，其組織加權因數由原本 ICRP-60 中的 0.05 提升至 0.12，並額外納入攝護腺、唾液腺、胸腔外區域、心臟、膽囊與口腔內膜等六種器官，反映出對人體多樣性器官潛在風險的重視。

在本研究中，新增器官所帶來之額外有效劑量 (E_{Add}) 於無鉛衣的情境下相對較高 (表 4.3)，其相對於總有效劑量之比例 (E_{Add}/E) 達 2.4%。而在穿戴鉛衣的情況下，由於鉛衣主要遮蔽胸腹部，導致新增器官中未被遮蔽的部分 (如唾液腺、口腔內膜等) 貢獻較大，使得 E_{Add}/E 略為上升至 3.1%。此結果顯示，ICRP-103 對於新增器官劑量的考量在臨床實務防護評估中具一定影響，應納入考量以更準確掌握受曝露情形。

表4.3. ICRP-103 之 E_{Add}/E

| ICRP 103 | | No Apron | Apron |
|--------------------------------|---------------------------|--------------|--------------|
| | | pSv/particle | pSv/particle |
| Additional Organ (E_{Add}) | prostate | 1.30E-10 | 8.54E-13 |
| | salivary gland | 7.74E-11 | 6.51E-12 |
| | Extrathoracic (ET) region | 3.09E-11 | 5.05E-12 |
| | heart | 2.84E-11 | 2.01E-13 |
| | gall bladder | 2.51E-11 | 1.60E-13 |
| | oral mucosa | 7.19E-11 | 9.56E-12 |
| $E_{Add}(\text{Total})$ | | 3.63E-10 | 2.55E-11 |
| Effective dose (E) | | 1.52E-08 | 8.23E-10 |
| E_{Add}/E | | 2.4% | 3.1% |

4.1.2 ICRP-60、103 於透視攝影之劑量率差異

ICRP-103 之組織加權因數於 PA 投影，對無鉛衣和有鉛衣之有效劑量情形降低至 64%、97%。本研究進一步比較 ICRP-103 與 ICRP-60 組織加權因數差異對於特定部位劑量貢獻之影響（圖 4.4）。由於 ICRP-103 提高乳房與腦部等器官之加權因數，乳房劑量相較於 ICRP-60 提升約 2.4 倍，而腦部劑量亦有 1.8 倍之增幅。若進一步觀察頭頸部對全身有效劑量的貢獻 ($E_{H\&N}/E$)，在有鉛衣情境下，ICRP-60 與 ICRP-103 分別為 6.1%與 10.7%，顯示加權因數調整對未受屏蔽之頭頸部器官有明顯劑量影響。

此外，ICRP-103 新增器官於無鉛衣時對全身有效劑量的貢獻(E_{Add}/E)為 2.4%，而於有鉛衣情境下則因部分新增器官未被完全遮蔽，其 E_{Add}/E 略升至 3.1%。整體而言，儘管新增器官對總劑量之貢獻比例不高，只有在高風險作業與部分部位無遮蔽之情況下，其潛在劑量負擔仍值得關注。

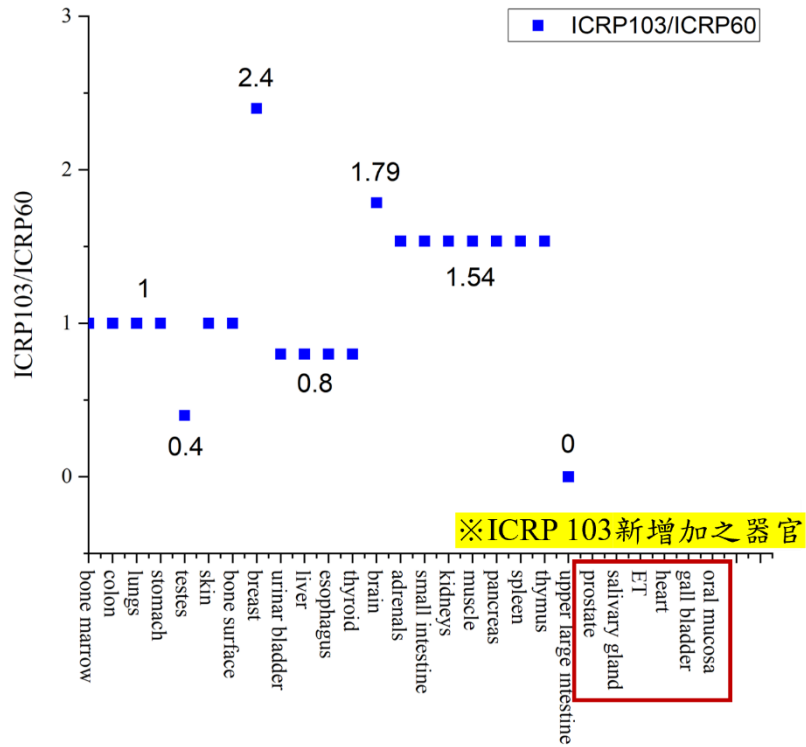


圖4.4. ICRP-103 與 ICRP-60 組織加權因數比

4.1.3 不同 C-arm 旋轉角度對劑量率之影響

研究代入 ICRP-60 和 103 加權因數，探討在五種不同 C-arm 旋轉角度下，對全身有效劑量造成的差異性，找出具有最大劑量差異之情形。圖 4.5 為五種不同 C-arm 旋轉角度下的光子通量分佈圖。

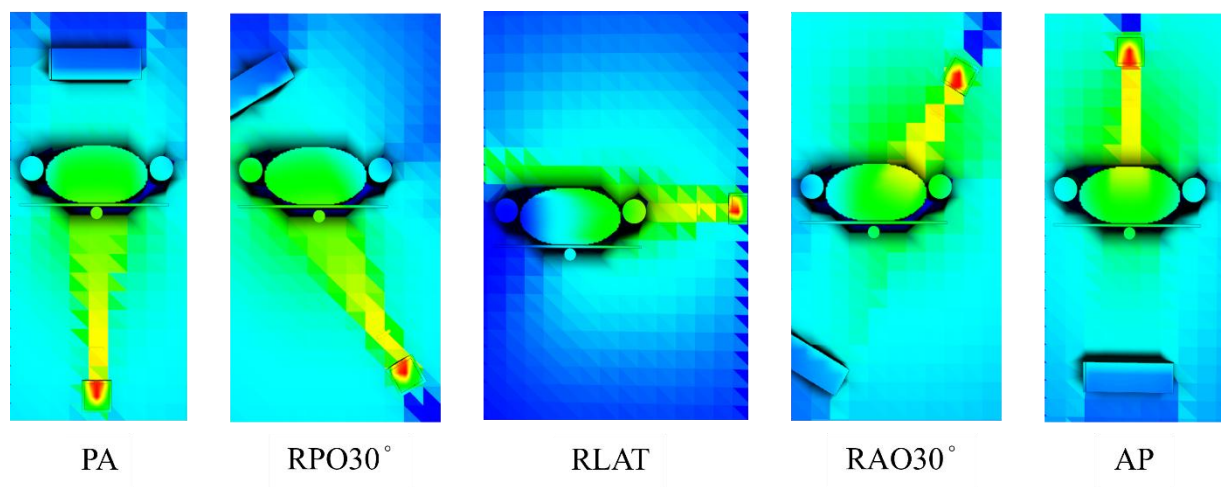


圖4.5. 五種 C-arm 旋轉角度光子通量圖

4.1.3.1 有無鉛衣時之器官等價劑量率比較

研究比較在 PA、RPO 30°、RLAT、RAO 30°、AP 五種照射角度下，每種器官的等價劑量變化，並代入 ICRP-60 和 103 兩種加權因數在分別有無鉛衣下去作探討(圖 4.6、圖 4.7、圖 4.8、圖 4.9)。

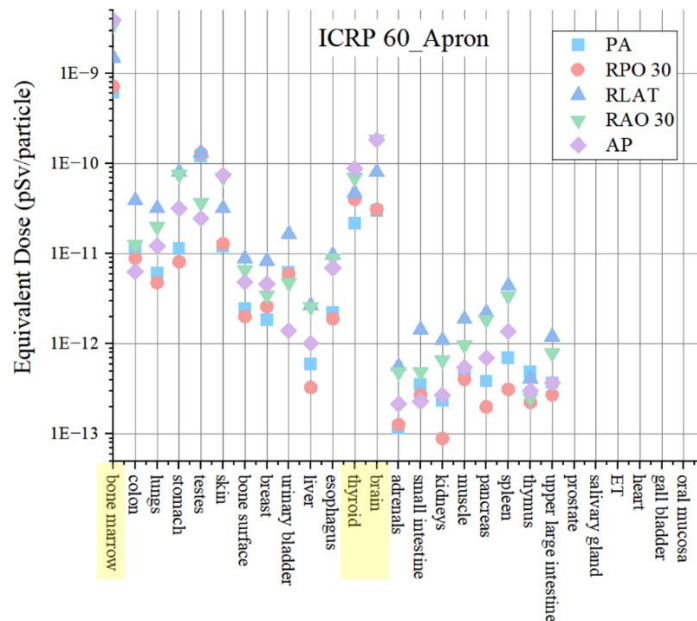


圖4.6. ICRP-60 器官劑量率：有鉛衣

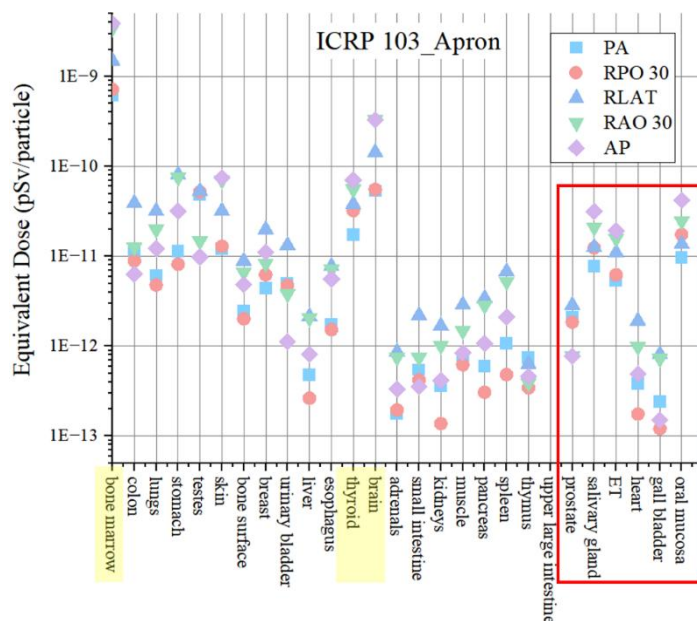


圖4.7. ICRP-103 器官劑量率：有鉛衣

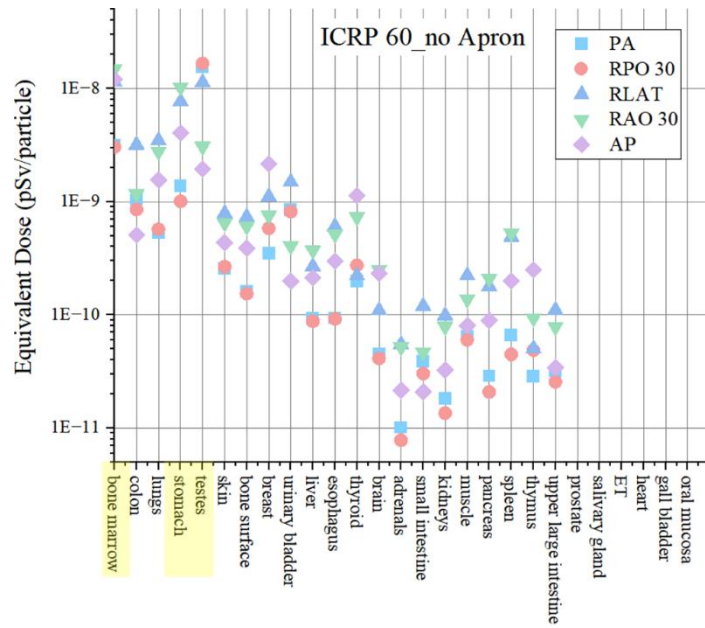


圖4.8. ICRP-60 器官劑量率：無鉛衣

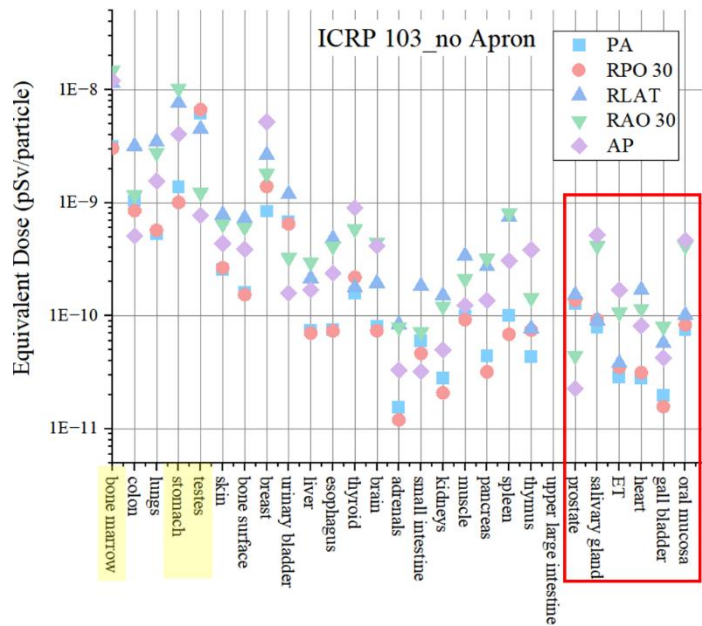


圖4.9. ICRP-103 器官劑量率：無鉛衣

表 4.4 可見當 X 光管球逐漸靠近頭部時，由於 ICRP-103 新增之頭頸部器官（如腦部、腮腺、口腔內膜等）未受到鉛衣屏蔽，導致其對全身有效劑量（E）的貢獻顯著提升，進而使 ICRP-103 所計算之有效劑量高於 ICRP-60。分析不同

射角下之照射結果可發現，ICRP-60 與 ICRP-103 皆在 AP 角度下產生最大有效劑量，顯示正面照射時對全身劑量影響最大。

此外，自 RPO 30° 角度開始，管球位置逐漸靠近頭部，ICRP-103 中腦部加權因數由 0.0056 上升至 0.01（此處腦部劑量並無超過表中 12 個特定加權因數之組織或器官中任一具最高劑量者，因此加權因數以 0.05 對 9 個剩餘器官做平分），使腦部對有效劑量的貢獻明顯增加，並於 RAO 30° 時達到最高劑量峰值，反映出頭頸部未受屏蔽器官在特定角度下的重要性。

表4.4. 不同管球角度下之器官劑量率表：有鉛衣

| Apron | | PA | RPO 30° | RLAT | RAO 30° | AP |
|---|----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Effective dose (E) | ICRP 60 | 8.49E-10 | 9.69E-10 | 3.26E-09 | 3.98E-09 | 4.36E-09 |
| | ICRP 103 | 8.23E-10 | 9.48E-10 | 3.37E-09 | 4.16E-09 | 4.57E-09 |
| Highest organ Equivalent dose | ICRP 60 | 6.20E-10 (bone marrow) | 7.18E-10 (bone marrow) | 2.53E-09 (bone marrow) | 3.47E-09 (bone marrow) | 3.91E-09 (bone marrow) |
| | ICRP 103 | 6.20E-10 (bone marrow) | 7.18E-10 (bone marrow) | 2.53E-09 (bone marrow) | 3.47E-08 (bone marrow) | 3.91E-09 (bone marrow) |
| 2 nd highest organ Equivalent dose | ICRP 60 | 1.21E-10 (testes) | 1.30E-10 (testes) | 1.95E-10 (testes) | 1.86E-10 (brain) | 1.84E-10 (brain) |
| | ICRP 103 | 4.82E-11 (testes) | 5.53E-11 (brain) | 2.20E-10 (brain) | 3.32E-10 (brain) | 3.28E-10 (brain) |

表 4.5 可見當 X 光照射角度為 RAO 30° 與 AP 時，由於 ICRP-103 對器官加權因數的調整，所計算出的有效劑量高於 ICRP-60，顯示在此角度下未受鉛衣屏蔽的器官對全身劑量貢獻增加。進一步比較各角度下的器官劑量發現，在 PA 與 RPO 30° 角度時，睪丸受到最高劑量照射；而在 RLAT、RAO 30° 與 AP 角度時，紅骨髓則為主要受曝露器官，顯示不同照射角度下器官所受劑量存在顯著差異。值得注意的是，在 RLAT 角度下，根據 ICRP-103 的加權因數，第二高劑量的器官由 ICRP 60 下的睪丸（權重由 0.2 下降至 0.08）轉變為胃；而在 AP 角度時，第二高劑量器官亦由胃轉變為乳房，其權重由 0.05 上升至 0.12，進一步反映出新報告建議中乳房在劑量計算上的相對重要性提升。

表4.5. 不同管球角度下之器官劑量率表：無鉛衣

| No Apron | | PA | RPO 30° | RLAT | RAO 30° | AP |
|---|---------------------------|----------|----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Effective dose (E) | ICRP 60 | 2.38E-08 | 2.46E-08 | 4.36E-08 | 3.76E-08 | 2.58E-08 |
| | ICRP 103 | 1.53E-08 | 1.58E-08 | 3.91E-08 | 3.84E-08 | 2.91E-08 |
| Highest organ Equivalent dose | ICRP 60 (testes) | 1.54E-08 | 1.66E-08 | 1.14E-08 (bone marrow) | 1.48E-08 (bone marrow) | 1.20E-08 (bone marrow) |
| | ICRP 103 (testes) | 6.20E-10 | 6.65E-09 | 1.14E-08 (bone marrow) | 1.48E-08 (bone marrow) | 1.20E-08 (bone marrow) |
| 2 nd highest organ Equivalent dose | ICRP 60 (bone marrow) | 3.13E-09 | 3.04E-09 | 1.13E-08 (testes) | 1.03E-08 (stomach) | 4.04E-09 (stomach) |
| | ICRP 103 (bone marrow) | 3.13E-09 | 3.04E-09 | 7.65E-09 (stomach) | 1.03E-08 (stomach) | 5.19E-09 (breast) |

4.1.3.2 有無鉛衣時之有效劑量率比較

不同射線入射角度亦對有效劑量 (E) 產生顯著影響。圖 4.10 可見有鉛衣防護時，當 X 光管球位置越靠近頭部，全身有效劑量呈上升趨勢，顯示頭頸部器官未被鉛衣遮蔽的貢獻明顯增加；此現象亦反映 ICRP-103 報告中對頭頸部加權因數提升後的影響。於有鉛衣情境下，自 RLAT 角度開始，E(103) 數值即超越 E(60)，顯示 ICRP-103 計算下的劑量更為保守。

圖 4.11 可見無鉛衣條件下，全身有效劑量最大值出現在 RLAT 角度，顯示該角度入射對整體器官的平均曝露最為嚴重。此情況下，E(103) 自 RAO 30° 角度後亦開始高於 E(60)，顯示 ICRP-103 對頭頸部與其他新增或加權因數提高器官的劑量影響逐步顯現，應於輻射防護評估中加以重視。

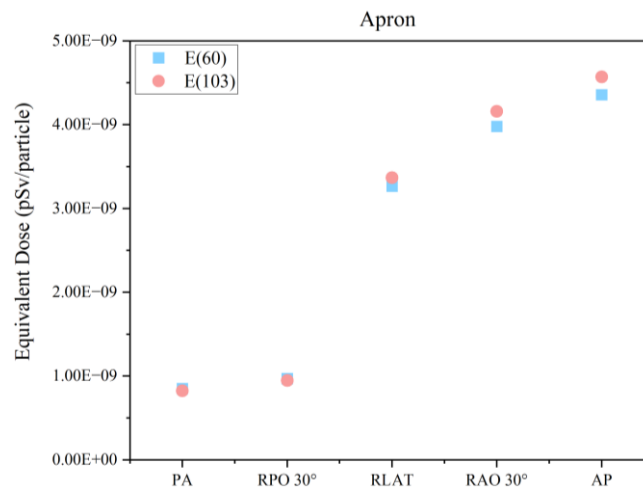


圖4.10. 不同管球角度下之 E(60)、E(103)：有鉛衣

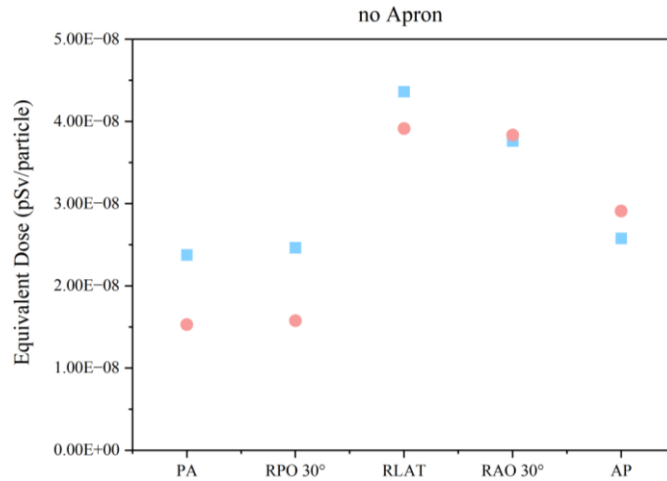


圖4.11. 不同管球角度下之 E(60)、E(103)：無鉛衣

4.1.3.3 頭頸部與新增器官之劑量率比較

由圖 4.12、圖 4.13 可見，隨著 X 光管球位置逐漸靠近頭部，頭頸部所吸收之劑量 ($E_{H\&N}$) 明顯上升，顯示該區域為主要受照器官。此趨勢在 ICRP-103 之組織加權因數設定下更為顯著，因該報告新增腮腺、口腔內膜等頭頸部相關器官，並調整原有器官權重，使頭頸部整體貢獻比例上升。

此外，ICRP-103 新增器官之劑量 (E_{Add}) 亦呈現與管球角度相關的變化。在無鉛衣情境下， E_{Add} 隨管球靠近頭部而有明顯上升趨勢，進一步強化了 ICRP-103 在該情境下對有效劑量評估之敏感度與完整性。

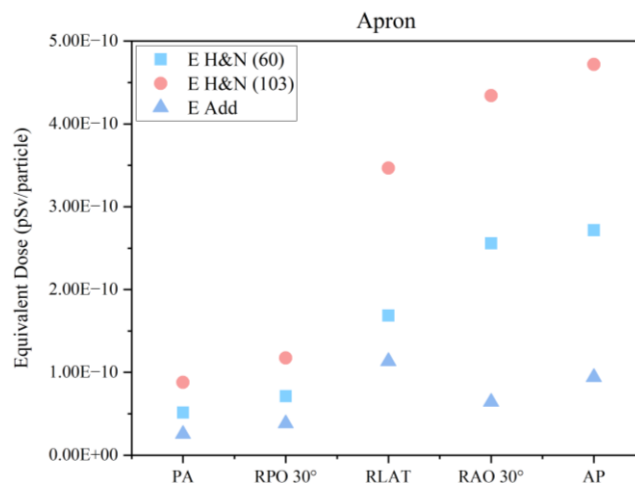


圖4.12. 不同管球角度下之 $E_{H\&N}$ 、 E_{Add} ：有鉛衣

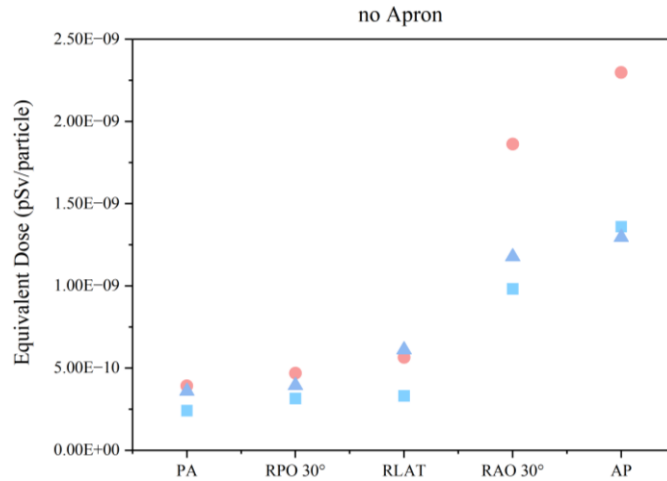


圖4.13. 不同管球角度下之 $E_{H\&N}$ 、 E_{Add} ：無鉛衣

4.1.4 假定操作情節下的有效劑量評估

根據 Pratt & Show (1993) 針對透視攝影之曝露參數進行的研究顯示，每次手術的劑量面積乘積 (DAP) 約為 $4400 \text{ cGy} \cdot \text{cm}^2$ ，照射時間介於 2 至 3 分鐘之間。本研究以每次手術照射時間 12 分鐘、每日進行 5 次手術、每月工作 22 天、一年 12 個月為基準，推估操作者在一年內的潛在輻射曝露情形。本研究參考其 DAP 值進行有效劑量計算，以評估操作者在透視攝影下之風險 (表 4.6)。

每年全身有效劑量：

$$\frac{E}{DAP} \left(\frac{\mu\text{Sv}}{\text{Gy} \cdot \text{cm}^2} \right) \times 4400 \left(\frac{\text{cGy} \cdot \text{cm}^2}{3 \text{min} \cdot \text{case}} \right) \times 12 (\text{min}) \times 5 \left(\frac{\text{case}}{\text{day}} \right) \times 22 \left(\frac{\text{day}}{\text{month}} \right) \times 12 \left(\frac{\text{month}}{\text{year}} \right) \times 10^{-5} \left(\frac{\text{m}}{\text{p} \cdot \mu} \right) = E \left(\frac{\text{mSv}}{\text{year}} \right)$$

表4.6. 平均後之 E/DAP 計算出之有效劑量

| 單位：($\mu\text{Sv}/\text{Gy} \cdot \text{cm}^2$) | | E/DAP (*avg.) | | E | | E_{103}/E_{60} |
|---|-----|---------------|----------|---------|----------|------------------|
| | | ICRP 60 | ICRP 103 | ICRP 60 | ICRP 103 | |
| 80kVp | 有鉛衣 | 4.70E-02 | 4.74E-02 | 10.9 | 11.0 | 1.01 |
| | 無鉛衣 | 9.52E-01 | 7.29E-01 | 221.2 | 169.3 | 0.77 |

* E/DAP 為 PA、RPO 30°、RLAT 三個角度平均。

4.2 案例分析二：I-131 患者外釋情節

4.2.1 劑量率模擬結果

根據模擬結果分析，在不同位置與距離下，受照射者的平均全身有效劑量率呈現明顯差異（表 4.7）。比較 ICRP-103 與 ICRP-60 的器官加權因數對結果的影響可發現，於脖頸處位置，採用 ICRP-103 標準所得之劑量率相對較高，約為 ICRP-60 的 1.05 至 1.16 倍；反之，在腰腹部位置則略低，約為 0.98 至 0.99 倍。此外，各方位之劑量率比較結果顯示，北側（患者與照護者面對面）位置劑量率最大，其次依序為南側、西側，最低則為東側。距離對劑量率之影響亦十分顯著，靠近射源之劑量率遠高於遠側，於脖頸處的近距離劑量率為遠距離的 3.2 至 5 倍，腰腹部則為 3.4 至 6 倍，顯示距離對輻射曝露評估具有重要影響性。

表4.7. ICRP-60 和 103 之全身有效劑量率表

| 單位：pSv/particle | | | 東 | 西 | 南 | 北 | 平均 | |
|-----------------|----|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 射源位置 | 脖頸 | 30 cm | ICRP 60 | 1.15E-05 | 1.23E-05 | 3.48E-05 | 4.99E-05 | 2.71E-05 |
| | | | ICRP 103 | 1.42E-05 | 1.51E-05 | 3.84E-05 | 5.78E-05 | 3.14E-05 |
| | | 100 cm | ICRP 60 | 3.49E-06 | 3.84E-06 | 7.91E-06 | 1.14E-05 | 6.66E-06 |
| | | | ICRP 103 | 3.78E-06 | 4.16E-06 | 8.33E-06 | 1.16E-05 | 6.96E-06 |
| | 腰腹 | 30 cm | ICRP 60 | 1.23E-05 | 1.42E-05 | 4.43E-05 | 7.69E-05 | 3.69E-05 |
| | | | ICRP 103 | 1.24E-05 | 1.46E-05 | 4.40E-05 | 7.03E-05 | 3.53E-05 |
| | | 100 cm | ICRP 60 | 3.63E-06 | 4.05E-06 | 8.83E-06 | 1.28E-05 | 7.33E-06 |
| | | | ICRP 103 | 3.58E-06 | 4.04E-06 | 8.85E-06 | 1.23E-05 | 7.18E-06 |

由上段可知，當患者與照護者面對面時的劑量率將最大，進一步深入探討其各器官之劑量比例。射源於脖頸處時之結果如表 4.8，可發現不論距離為 30 或 100 公分處，代入 ICRP-103 後由於乳房加權因數上升，其變為劑量率最高之器官。射源於腰腹處結果如表 4.9，代入 ICRP-103 後，距離 30 公分時胃部為劑量

率最高之器官，距離 100 公分時則乳房為劑量率最高之器官。

表4.8. 射源於脖頸處器官劑量比例：北側距離 30 公分（左）vs 100 公分（右）

| | ICRP 60 | | | ICRP 103 | | | ICRP 60 | | | ICRP 103 | |
|-----------------------|------------------|-----------------|----------|-----------------|----------|-----------------------|------------------|-----------------|----------|-----------------|----------|
| | MeV/g · particle | pSv/particle | re | pSv/particle | re | | MeV/g · particle | pSv/particle | re | pSv/particle | re |
| testes | 1.32E-07 | 4.23E-06 | 2.57E-17 | 1.69E-06 | 4.12E-18 | testes | 6.81E-08 | 2.18E-06 | 1.07E-17 | 8.72E-07 | 1.71E-18 |
| bone marrow | 3.73E-07 | 7.16E-06 | 5.12E-19 | 7.16E-06 | 5.12E-19 | bone marrow | 6.22E-08 | 1.19E-06 | 5.70E-20 | 1.19E-06 | 5.70E-20 |
| colon | 1.43E-07 | 2.74E-06 | 6.75E-19 | 2.74E-06 | 6.75E-19 | colon | 5.90E-08 | 1.13E-06 | 3.21E-19 | 1.13E-06 | 3.21E-19 |
| lungs | 4.18E-07 | 8.03E-06 | 6.45E-19 | 8.03E-06 | 6.45E-19 | lungs | 7.37E-08 | 1.42E-06 | 1.80E-19 | 1.42E-06 | 1.80E-19 |
| stomach | 3.51E-07 | 6.74E-06 | 4.08E-18 | 6.74E-06 | 4.08E-18 | stomach | 8.81E-08 | 1.69E-06 | 1.03E-18 | 1.69E-06 | 1.03E-18 |
| urinary bladder | 1.34E-07 | 1.07E-06 | 4.12E-19 | 8.55E-07 | 2.63E-19 | urinary bladder | 6.55E-08 | 5.24E-07 | 2.23E-19 | 4.19E-07 | 1.43E-19 |
| breast | 7.41E-07 | 5.92E-06 | 1.40E-18 | 1.42E-05 | 8.09E-18 | breast | 1.05E-07 | 8.39E-07 | 1.76E-19 | 2.01E-06 | 1.01E-18 |
| liver | 2.84E-07 | 2.27E-06 | 2.06E-19 | 1.82E-06 | 1.32E-19 | liver | 6.87E-08 | 5.50E-07 | 4.84E-20 | 4.40E-07 | 3.10E-20 |
| esophagus | 2.96E-07 | 2.37E-06 | 8.96E-19 | 1.89E-06 | 5.73E-19 | esophagus | 5.43E-08 | 4.35E-07 | 1.53E-19 | 3.48E-07 | 9.79E-20 |
| thyroid | 7.77E-07 | 6.21E-06 | 6.18E-18 | 4.97E-06 | 3.95E-18 | thyroid | 9.75E-08 | 7.80E-07 | 1.03E-18 | 6.24E-07 | 6.58E-19 |
| skin | 3.62E-07 | 5.79E-07 | 3.35E-21 | 5.79E-07 | 3.35E-21 | skin | 6.72E-08 | 1.07E-07 | 4.62E-22 | 1.07E-07 | 4.62E-22 |
| bone surface | 2.58E-07 | 4.14E-07 | 1.71E-21 | 4.14E-07 | 1.71E-21 | bone surface | 5.19E-08 | 8.30E-08 | 2.76E-22 | 8.30E-08 | 2.76E-22 |
| adrenals | 1.55E-07 | 1.39E-07 | 2.33E-20 | 2.13E-07 | 5.50E-20 | adrenals | 3.98E-08 | 3.57E-08 | 5.62E-21 | 5.48E-08 | 1.33E-20 |
| brain | 3.56E-07 | 3.19E-07 | 4.06E-21 | 5.69E-07 | 1.30E-20 | brain | 5.45E-08 | 4.88E-08 | 8.58E-22 | 8.72E-08 | 2.74E-21 |
| ET | 5.21E-07 | 0 | 0.00E+00 | 7.17E-07 | 8.22E-20 | ET | 7.02E-08 | 0 | 0.00E+00 | 9.66E-08 | 1.13E-20 |
| small intestine | 1.47E-07 | 1.32E-07 | 1.56E-21 | 2.02E-07 | 3.67E-21 | small intestine | 5.85E-08 | 5.24E-08 | 6.86E-22 | 8.04E-08 | 1.62E-21 |
| kidneys | 1.07E-07 | 9.57E-08 | 2.29E-21 | 1.47E-07 | 5.40E-21 | kidneys | 3.44E-08 | 3.08E-08 | 6.07E-22 | 4.73E-08 | 1.43E-21 |
| muscle | 2.41E-07 | 2.16E-07 | 4.66E-22 | 3.32E-07 | 1.10E-21 | muscle | 5.55E-08 | 4.97E-08 | 2.47E-23 | 7.64E-08 | 5.83E-23 |
| pancreas | 2.22E-07 | 1.99E-07 | 9.91E-21 | 3.06E-07 | 2.34E-20 | pancreas | 5.98E-08 | 5.35E-08 | 1.83E-21 | 8.22E-08 | 4.33E-21 |
| spleen | 1.85E-07 | 1.66E-07 | 6.85E-21 | 2.54E-07 | 1.62E-20 | spleen | 4.84E-08 | 4.34E-08 | 1.88E-21 | 6.66E-08 | 4.43E-21 |
| thymus | 8.17E-07 | 7.32E-07 | 8.57E-20 | 1.12E-06 | 2.02E-19 | thymus | 1.03E-07 | 9.21E-08 | 1.22E-20 | 1.41E-07 | 2.88E-20 |
| prostate | 8.61E-08 | 0 | 0.00E+00 | 1.18E-07 | 5.06E-20 | prostate | 5.33E-08 | 0 | 0.00E+00 | 7.34E-08 | 3.10E-20 |
| heart | 4.79E-07 | 0 | 0.00E+00 | 6.60E-07 | 1.74E-20 | heart | 8.08E-08 | 0 | 0.00E+00 | 1.11E-07 | 3.09E-21 |
| gall bladder | 2.43E-07 | 0 | 0.00E+00 | 3.35E-07 | 5.49E-20 | gall bladder | 7.09E-08 | 0 | 0.00E+00 | 9.76E-08 | 1.37E-20 |
| oral mucosa | 6.26E-07 | 0 | 0.00E+00 | 8.61E-07 | 6.67E-20 | oral mucosa | 7.68E-08 | 0 | 0.00E+00 | 1.06E-07 | 7.15E-21 |
| upper large intestine | 1.89E-07 | 1.69E-07 | 4.58E-21 | 0 | 0.00E+00 | upper large intestine | 6.57E-08 | 5.89E-08 | 1.70E-21 | 0 | 0.00E+00 |
| salivary gland | 5.52E-07 | 0 | 0.00E+00 | 8.83E-07 | 1.25E-19 | salivary gland | 7.03E-08 | 0 | 0.00E+00 | 1.12E-07 | 1.53E-20 |
| effective dose | | 4.99E-05 | 0.01% | 5.78E-05 | 0.01% | effective dose | | 1.14E-05 | 0.03% | 1.16E-05 | 0.02% |

表4.9. 射源於腰腹處器官劑量比例：北側距離 30 公分（左）vs 100 公分（右）

| | ICRP 60 | | | ICRP 103 | | | ICRP 60 | | | ICRP 103 | |
|-----------------------|------------------|-----------------|----------|-----------------|----------|-----------------------|------------------|-----------------|----------|-----------------|----------|
| | MeV/g · particle | pSv/particle | re | pSv/particle | re | | MeV/g · particle | pSv/particle | re | pSv/particle | re |
| testes | 6.99E-07 | 2.24E-05 | 1.25E-16 | 8.95E-06 | 2.00E-17 | testes | 1.02E-07 | 3.26E-06 | 1.53E-17 | 1.30E-06 | 2.45E-18 |
| bone marrow | 2.50E-07 | 4.81E-06 | 2.31E-19 | 4.81E-06 | 2.31E-19 | bone marrow | 5.79E-08 | 1.11E-06 | 4.95E-20 | 1.11E-06 | 4.95E-20 |
| colon | 5.63E-07 | 1.08E-05 | 1.17E-18 | 1.08E-05 | 1.17E-18 | colon | 7.74E-08 | 1.49E-06 | 3.54E-19 | 1.49E-06 | 3.54E-19 |
| lungs | 2.93E-07 | 5.63E-06 | 1.27E-18 | 5.63E-06 | 1.27E-18 | lungs | 6.96E-08 | 1.34E-06 | 1.60E-19 | 1.34E-06 | 1.60E-19 |
| stomach | 6.72E-07 | 1.29E-05 | 6.66E-18 | 1.29E-05 | 6.66E-18 | stomach | 9.85E-08 | 1.89E-06 | 1.29E-18 | 1.89E-06 | 1.29E-18 |
| urinary bladder | 7.31E-07 | 5.85E-06 | 3.08E-18 | 4.68E-06 | 1.97E-18 | urinary bladder | 9.33E-08 | 7.47E-07 | 2.73E-19 | 5.97E-07 | 1.75E-19 |
| breast | 5.26E-07 | 4.21E-06 | 1.59E-18 | 1.01E-05 | 9.17E-18 | breast | 9.93E-08 | 7.94E-07 | 1.58E-19 | 1.91E-06 | 9.08E-19 |
| liver | 4.60E-07 | 3.68E-06 | 5.43E-19 | 2.95E-06 | 3.47E-19 | liver | 7.45E-08 | 5.96E-07 | 5.68E-20 | 4.77E-07 | 3.64E-20 |
| esophagus | 2.19E-07 | 1.76E-06 | 7.70E-19 | 1.40E-06 | 4.93E-19 | esophagus | 5.10E-08 | 4.08E-07 | 1.67E-19 | 3.27E-07 | 1.07E-19 |
| thyroid | 1.25E-07 | 1.00E-06 | 1.70E-18 | 8.03E-07 | 1.09E-18 | thyroid | 6.12E-08 | 4.89E-07 | 6.13E-19 | 3.91E-07 | 3.92E-19 |
| skin | 3.77E-07 | 6.04E-07 | 3.65E-21 | 6.04E-07 | 3.65E-21 | skin | 6.80E-08 | 1.09E-07 | 1.19E-22 | 1.09E-07 | 1.19E-22 |
| bone surface | 2.63E-07 | 4.21E-07 | 1.77E-21 | 4.21E-07 | 1.77E-21 | bone surface | 5.34E-08 | 8.54E-08 | 2.92E-22 | 8.54E-08 | 2.92E-22 |
| adrenals | 2.23E-07 | 2.00E-07 | 3.23E-20 | 3.07E-07 | 7.62E-20 | adrenals | 4.23E-08 | 3.79E-08 | 5.75E-21 | 5.82E-08 | 1.36E-20 |
| brain | 6.61E-08 | 5.93E-08 | 5.62E-22 | 1.06E-07 | 1.79E-21 | brain | 3.66E-08 | 3.28E-08 | 5.28E-22 | 5.86E-08 | 1.68E-21 |
| ET | 9.34E-08 | 0 | 0.00E+00 | 1.28E-07 | 2.00E-20 | ET | 5.01E-08 | 0 | 0.00E+00 | 6.89E-08 | 8.03E-21 |
| small intestine | 5.65E-07 | 5.06E-07 | 2.56E-21 | 7.77E-07 | 6.04E-21 | small intestine | 7.53E-08 | 6.75E-08 | 7.29E-22 | 1.04E-07 | 1.72E-21 |
| kidneys | 2.31E-07 | 2.07E-07 | 3.85E-21 | 3.18E-07 | 9.09E-21 | kidneys | 4.03E-08 | 3.61E-08 | 6.39E-22 | 5.55E-08 | 1.51E-21 |
| muscle | 3.72E-07 | 3.33E-07 | 1.11E-21 | 5.12E-07 | 2.62E-21 | muscle | 6.25E-08 | 5.60E-08 | 3.13E-23 | 8.60E-08 | 7.39E-23 |
| pancreas | 4.09E-07 | 3.66E-07 | 1.21E-20 | 5.62E-07 | 2.85E-20 | pancreas | 6.68E-08 | 5.98E-08 | 2.29E-21 | 9.19E-08 | 5.40E-21 |
| spleen | 2.79E-07 | 2.50E-07 | 1.00E-20 | 3.84E-07 | 2.36E-20 | spleen | 5.28E-08 | 4.73E-08 | 1.82E-21 | 7.27E-08 | 4.28E-21 |
| thymus | 4.13E-07 | 3.70E-07 | 6.72E-20 | 5.69E-07 | 1.58E-19 | thymus | 9.28E-08 | 8.31E-08 | 1.17E-20 | 1.28E-07 | 2.75E-20 |
| prostate | 5.41E-07 | 0 | 0.00E+00 | 7.44E-07 | 3.54E-19 | prostate | 8.00E-08 | 0 | 0.00E+00 | 1.10E-07 | 4.85E-20 |
| heart | 3.93E-07 | 0 | 0.00E+00 | 5.40E-07 | 1.17E-20 | heart | 7.82E-08 | 0 | 0.00E+00 | 1.08E-07 | 4.17E-21 |
| gall bladder | 6.04E-07 | 0 | 0.00E+00 | 8.31E-07 | 1.11E-19 | gall bladder | 8.30E-08 | 0 | 0.00E+00 | 1.14E-07 | 1.58E-20 |
| oral mucosa | 1.64E-07 | 0 | 0.00E+00 | 2.26E-07 | 1.28E-20 | oral mucosa | 6.16E-08 | 0 | 0.00E+00 | 8.48E-08 | 4.60E-21 |
| upper large intestine | 6.15E-07 | 5.51E-07 | 1.21E-20 | 0 | 0.00E+00 | upper large intestine | 8.12E-08 | 7.28E-08 | 2.60E-21 | 0 | 0.00E+00 |
| salivary gland | 1.48E-07 | 0 | 0.00E+00 | 2.37E-07 | 2.75E-20 | salivary gland | 6.22E-08 | 0 | 0.00E+00 | 9.95E-08 | 1.20E-20 |
| effective dose | | 7.69E-05 | 0.02% | 7.03E-05 | 0.01% | effective dose | | 1.28E-05 | 0.03% | 1.23E-05 | 0.02% |

4.2.2 假定情節下的有效劑量評估

研究討論了甲狀腺亢進 (HT) 與分化型甲狀腺癌 (DTC) 患者接受 I-131 治療後，對於照護者所造成之有效劑量。其中，HT 患者給予之 I-131 治療藥物活度為 740 MBq，DTC 患者則為 5550 MBq，而 DTC 患者需住院至其活度降至 50 mCi，才可外釋。

情節假設選擇前述劑量率最高之方位，即患者面對照護者，且分別計算射源於脖頸處和腰腹處時，距離 30 公分和 100 公分下患者對照護者於 8 天內所造成之累積劑量，計算時參考 Eun Young Han (2014)[5] 等人之研究，給予前 8 小時占用因子為 0.75，往後至第一個半衰期(8 天)占用因子為 0.25。下方提供如何計算照護者全身有效劑量之例子。

4.2.2.1 HT 患者對照護者之劑量評估

一位接受 I-131 治療 (活度 740 MBq) 之 HT 患者，當患者面對照護者，射源位於脖頸處且距離 100 公分處之劑量率約為 1.08×10^{-5} pSv/Bq·s，是使用前段得出之劑量率表查表 (表 4.8)，即 1.14×10^{-5} Sv/particle，乘上該核種之分支比 (branch ratio) 而得，其中 I-131 之 branch ratio 為 0.95。為合理反映實際生活中之接觸情形，本研究採用分段占用因子進行估算：治療後前 8 小時視為密切照護期，乘以占用因子 0.75，其後至第一個物理半衰期 (約第 8 天) 則以占用因子 0.25 評估持續曝露情形。

前 8 小時全身有效劑量：

$$1.08 \times 10^{-5} \left(\frac{\text{pSv}}{\text{Bq}\cdot\text{s}} \right) \times 740(\text{MBq}) \times 10^{-3} \left(\frac{\text{m}}{\text{p}\cdot\text{M}} \right) \times 3600 \left(\frac{\text{s}}{\text{h}} \right) \times 8 (\text{h}) \times 0.75 = \\ 0.17(\text{mSv})$$

8 小時後至第 8 天全身有效劑量：

$$2.88 \times 10^{-2} \left(\frac{mSv}{h} \right) \times 184 (h) \times 0.25 = 1.33(mSv)$$

總全身有效劑量：

$$0.17 + 1.33 = 1.5(mSv)$$

4.2.2.2 DTC 患者對照護者之劑量評估

假設情節如同 HT 患者，但 DTC 患者（活度 5550 MBq）需等活度降至 50 mCi（活度 1850 MBq）方可出院，因此對照護者之劑量累積由出院後開始計算。

前 8 小時全身有效劑量：

$$1.08 \times 10^{-5} \left(\frac{pSv}{Bq \cdot s} \right) \times 1850(MBq) \times 10^{-3} \left(\frac{m}{p \cdot M} \right) \times 3600 \left(\frac{s}{h} \right) \times 8 (h) \times 0.75 =$$

$$0.43(mSv)$$

8 小時後至第 8 天全身有效劑量：

$$1.08 \times 10^{-5} \left(\frac{pSv}{Bq \cdot s} \right) \times 1850(MBq) \times 10^{-3} \left(\frac{m}{p \cdot M} \right) \times 3600 \left(\frac{s}{h} \right) \times 184 (h) \times 0.25$$

$$= 3.3(mSv)$$

總全身有效劑量：

$$0.43 + 3.3 = 3.73(mSv)$$

4.2.3 隔離天數建議

依據國際放射防護委員會（ICRP）與美國核能管制委員會（NRC）之建議，外釋患者對公眾與照護者的年有效劑量限制分別為 1 mSv 與 5 mSv，以保障周遭人員之輻射安全。本研究以 5 mSv 為限值配合所評估出之有效劑量，可得出下表 4.10，表中為代入假設情節後得到之照護者劑量，以及若超過 5 mSv，患者須在外釋後額外隔離之天數（括號中之紅字）。

接受 I-131 治療之 HT 患者在給藥後需隔離約 4 至 9 天，期間避免與他人近距離接觸，待體內放射活度降低後，方可在距離 30 公分處與照護者有較長時間的相處，而 1 公尺外的交談是沒問題的。相較之下，接受高劑量治療的 DTC 患者需待體內 I-131 活度降至 50 mCi 以下始得出院，且出院後仍需持續隔離約 16 至 18 天，才能在距離 30 公分處與照護者有長時間接觸之安全條件。

表4.10. HT 及 DTC 患者在各條件下對照護者之劑量表

| 照護者劑量(給藥後8天) | | | E (mSv) | |
|----------------------------|------|--------|--------------------|--------------------|
| 治療疾病 | 射源高度 | 距離 | ICRP 60 | ICRP 103 |
| HT (20 mCi) | 脖頸 | 30 cm | 6.57 → 4.64 (4天) | 7.61 → 4.93 (5天) |
| | | 100 cm | 1.50 | 1.52 |
| | 腰腹 | 30 cm | 10.12 → 4.64 (9天) | 9.25 → 4.63 (8天) |
| | | 100 cm | 1.69 | 1.61 |
| DTC (150 mCi→50 mCi 出院) | 脖頸 | 30 cm | 16.42 → 4.88 (14天) | 19.02 → 4.76 (16天) |
| | | 100 cm | 3.75 | 3.81 |
| | 腰腹 | 30 cm | 25.30 → 4.88 (19天) | 23.13 → 4.86 (18天) |
| | | 100 cm | 4.21 | 4.03 |

4.2.4 核子醫學輻射防護措施指引

本國核子醫學輻射防護措施指引中，針對 I-131 患者外釋給出下列建議：「患者家屬及所有可能接觸的人均超過四十五歲者：患者及其家屬應被告知除必須過程的短暫時期外，應使患者保持與其他人員一公尺以上的距離。」

若患者家中有任一家屬低於 45 歲，則參考表 4.11 中之規範，且 45 歲以下家屬不得超過 0.5 R/y (即 5 mSv/y)。

表4.11. 45歲以下家屬允許照顧外釋患者曝露之時間標準

| 核種 | 醫院外釋時1米處之曝露率 (mR/hr) | 外釋時之強度 (mCi) | 與病人接觸之種類 | | |
|-------|----------------------|--------------|-------------------|---------------------|--------------|
| | | | 不接觸 (大於2米之距離) (A) | 每天1米處半小時加2米處3小時 (B) | 每天1米處4小時 (C) |
| I-131 | 11 | 50 | 第1週 | 第2,3,4週 | 第5~8週 |

本研究將模擬出之劑量率代入表 4.11 中各條件下之允許曝露時間，藉以評估其建議之允許曝露時間所造成之有效劑量是否符合建議之 5 mSv 限值，得出之結果如表 4.12，表中總劑量為保守評估下的結果。以明確規範出距離和時間之 (B)、(C)情形(即第 2~8 週)所得出之劑量相加，無論是 HT 或 DTC 患者對照護者之劑量皆小於 5 mSv，因此研究建議，患者第一週與家屬保持二公尺以上的距離，且實際大部份時間應保持更大的距離。

此外，研究也討論了 ICRP-60 和 103 代入對照護者劑量所造成之差異，由表中可見，在此部分 ICRP-103 會使有效劑量變為原本之 1~1.01 倍，整體而言並無差異。

表4.12. 參考法規規範所得出之照護者劑量

| 治療疾病 | 外釋時之強度 (mCi) | 上述不同種類造成之劑量(mSv) | | | | | | | |
|------|--------------|------------------|----------|-----------|----------|-----------|----------|--------------|----------|
| | | (A) 第1週 | | (B) 第2~4週 | | (C) 第5~8週 | | Total (1~8週) | |
| | | ICRP 60 | ICRP 103 | ICRP 60 | ICRP 103 | ICRP 60 | ICRP 103 | ICRP 60 | ICRP 103 |
| HT | 20 | < 0.56 | < 0.56 | 0.80 | 0.81 | 1.09 | 1.10 | < 2.45 | < 2.47 |
| DTC | 50 | < 1.39 | < 1.41 | 2.01 | 2.03 | 2.72 | 2.75 | < 6.12 | < 6.19 |

※表中結果以脖頸和腰腹處兩者平均劑量率做計算：HT($6.64/6.72 \times 10^{-6}$)、DTC ($6.99/7.07 \times 10^{-6}$)

4.2.5 70 與 50 $\mu\text{Sv/h}$ 之患者外釋標準於不同半衰期考量下的結果

在前項中，患者外釋標準中我們僅針對 HT 以及 DTC 患者進行討論。根據 NRC 的建議，患者的外釋標準應在 70 $\mu\text{Sv/h}$ (1 公尺處)。該方法保守假設 I-131

患者為裸點射源，距其表面 1 公尺處以某初始劑量率呈物理半衰期 8.04 天指數衰減速率下降，再假設此處對主照顧者的情節為每天曝露 6 小時，若要造成主照顧者累積劑量達 5 mSv，則反推其初始劑量率之上限為每小時 70 $\mu\text{Sv/h}$ 。NRC 相比起其他亞洲國家的外釋標準來得較為寬鬆，因此本研究會考慮兩個外釋標準即 70 以及 50 $\mu\text{Sv/h}$ 結合前項模擬情境下，其中 50 $\mu\text{Sv/h}$ 為根據核子醫學輻射防護措施指引(目前已廢除)內中所訂定之外釋標準而來，患者外釋後一個物理半衰期內(8 天)對照顧者的有效劑量，以此提出照顧外釋患者曝露的時間標準建議。

本研究將會使用三種情節來進行劑量的計算，分別是：(1)不考慮半衰期；(2)考慮物理半衰期；(3)考慮有效半衰期。此處有效半衰期主要參考國內某醫院對 922 位患者住院期間實際量測的劑量衰減情形，如圖 4.14 所示。根據該圖資料，以 matlab 之 fit 函數可得出 I-131 患者的有效半衰期約為 9.1 小時。

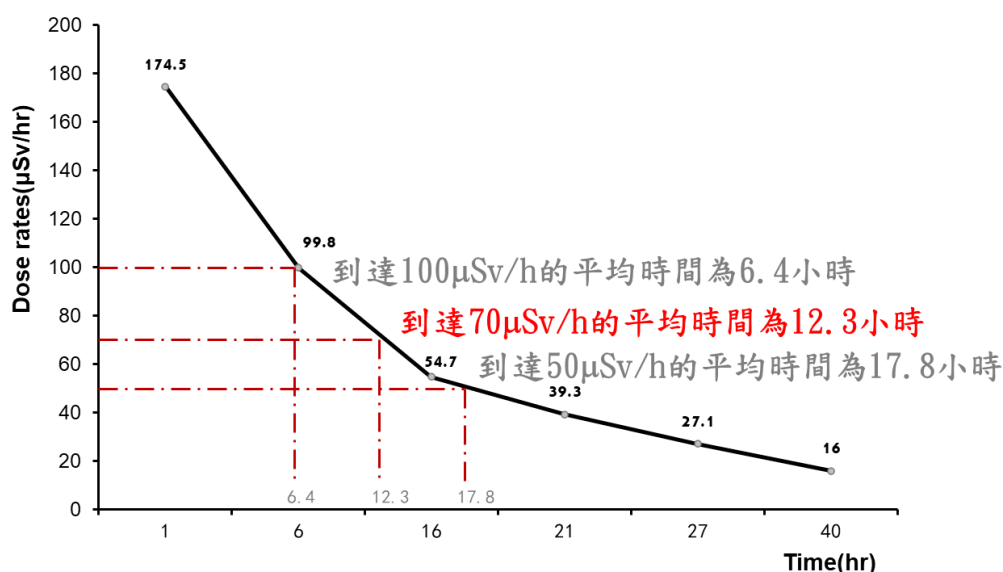


圖4.14. 某醫院 922 位患者體外 1 公尺處劑量率量測之平均值隨著時間的變化

4.2.5.1 外釋患者對照顧者之有效劑量評估：不考慮半衰期

情節假設如下，患者面對照顧者且射源位於脖頸處，使用前段得出之劑量率

表可得知該情況下劑量率為 1.14×10^{-5} (pSv/particle)。前 8 小時占用因子為 0.75，往後至第一個半衰期(8 天)之占用因子為 0.25。在不考慮半衰期的情況下照護者的劑量計算過程如下：

外釋標準：70 μSv/h

前 8 小時全身有效劑量：

$$1.14 \times 10^{-5} \left(\frac{pSv}{particle} \right) \times 0.95(particle) \times 1800(MBq) \times 10^{-3} \left(\frac{m}{p \cdot M} \right) \times 3600 \left(\frac{s}{h} \right) \times 8(h) \times 0.75 = 0.42(mSv)$$

8 小時後至第 8 天全身有效劑量：

$$1.14 \times 10^{-5} \left(\frac{pSv}{particle} \right) \times 0.95(particle) \times 1800(MBq) \times 10^{-3} \left(\frac{m}{p \cdot M} \right) \times 3600 \left(\frac{s}{h} \right) \times 184(h) \times 0.25 = 3.22(mSv)$$

總全身有效劑量：

$$0.42 + 3.22 = 3.64(mSv)$$

外釋標準：50 μSv/h

前 8 小時全身有效劑量：

$$1.14 \times 10^{-5} \left(\frac{pSv}{particle} \right) \times 0.95(particle) \times 1286(MBq) \times 10^{-3} \left(\frac{m}{p \cdot M} \right) \times 3600 \left(\frac{s}{h} \right) \times 8(h) \times 0.75 = 0.3(mSv)$$

8 小時後至第 8 天全身有效劑量：

$$1.14 \times 10^{-5} \left(\frac{pSv}{particle} \right) \times 0.95(particle) \times 1286(MBq) \times 10^{-3} \left(\frac{m}{p \cdot M} \right) \times 3600 \left(\frac{s}{h} \right) \times 184(h) \times 0.25 = 2.3(mSv)$$

總全身有效劑量：

$$0.3 + 2.3 = 2.6(mSv)$$

4.2.5.2 外釋患者對照護者之有效劑量評估：考慮物理半衰期

下為代入物理半衰期做有效劑量評估，研究透過對方程式進行積分進行計算。
相關方程式如下所示（圖 4.15、圖 4.16），其中物理半衰期為 8.02 天，各別計算

當外釋標準為 70 及 50 $\mu\text{Sv/h}$ 時，患者對於照護者於 8 天內之累積有效劑量。

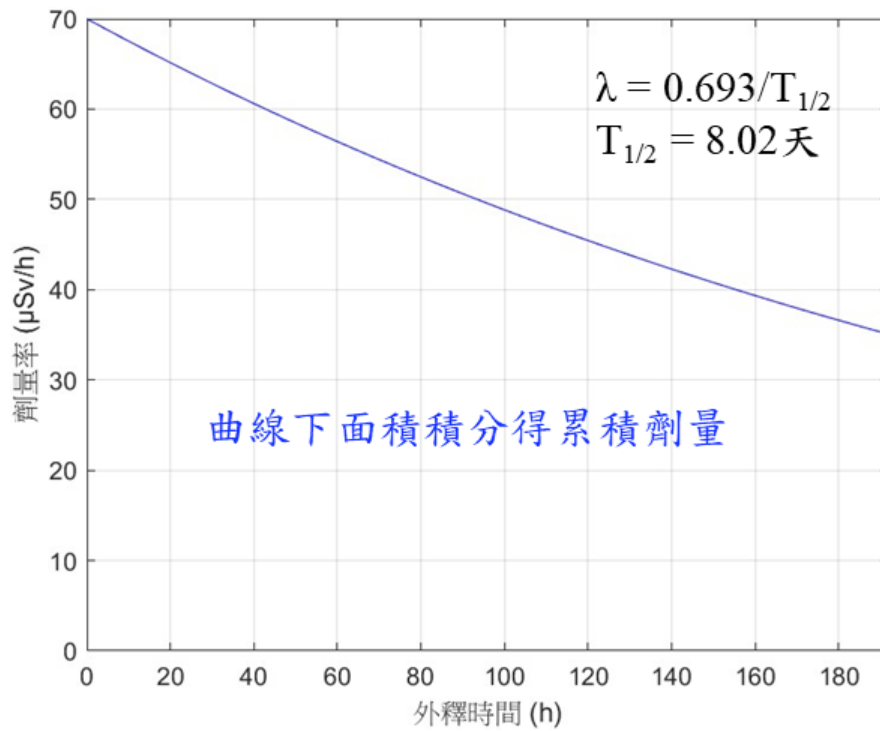


圖4.15. 考慮物理半衰期時患者劑量率隨著時間的變化(外釋標準：70 $\mu\text{Sv/h}$)

外釋標準：70 $\mu\text{Sv/h}$

$$f(t) = 70 \cdot \exp(-\lambda \cdot t)$$

考慮物理半衰期之總全身有效劑量：

$$\int_0^8 f(t) dt \times 0.75 + \int_8^{192} f(t) dt \times 0.25 = 2.7 (mSv)$$

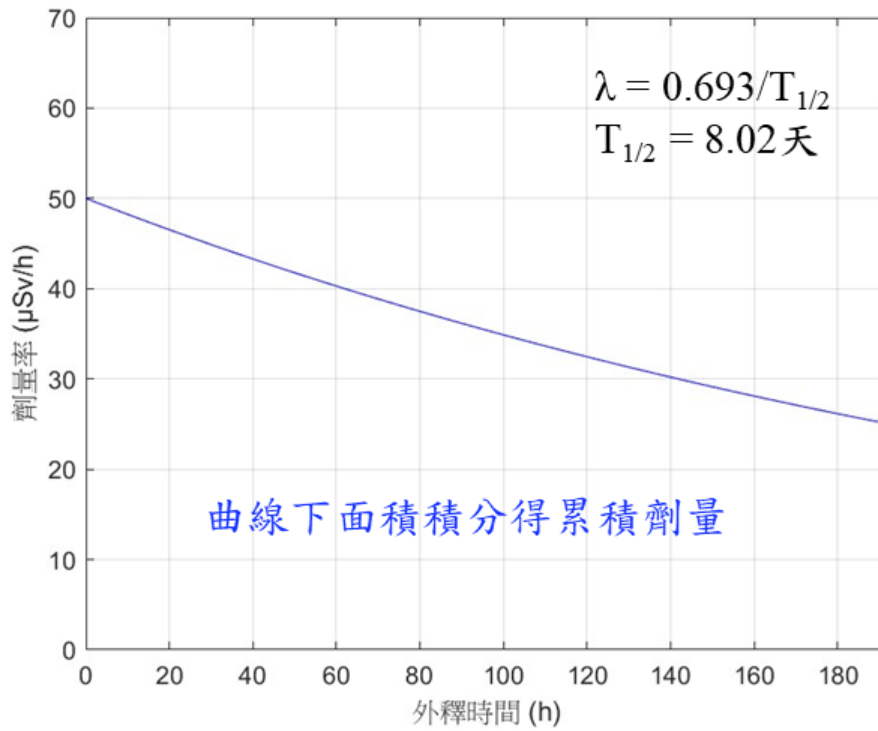


圖4.16. 考慮物理半衰期時患者劑量率隨著時間的變化(外釋標準：50 $\mu\text{Sv/h}$)

外釋標準：50 $\mu\text{Sv/h}$

$$f(t) = 50 \cdot \exp(-\lambda \cdot t)$$

考慮物理半衰期之總全身有效劑量：

$$\int_0^8 f(t) dt \times 0.75 + \int_8^{192} f(t) dt \times 0.25 = 1.93 (\text{mSv})$$

4.2.5.3 外釋患者對照護者之有效劑量評估：考慮有效半衰期

下為代入有效半衰期做有效劑量評估，計算方式同前段。相關方程式如下所示（圖 4.17、圖 4.18），其中有效半衰期為 9.106 小時，各別計算當外釋標準為 70 及 50 $\mu\text{Sv/h}$ 時，患者對於照護者於 8 天內之累積有效劑量。

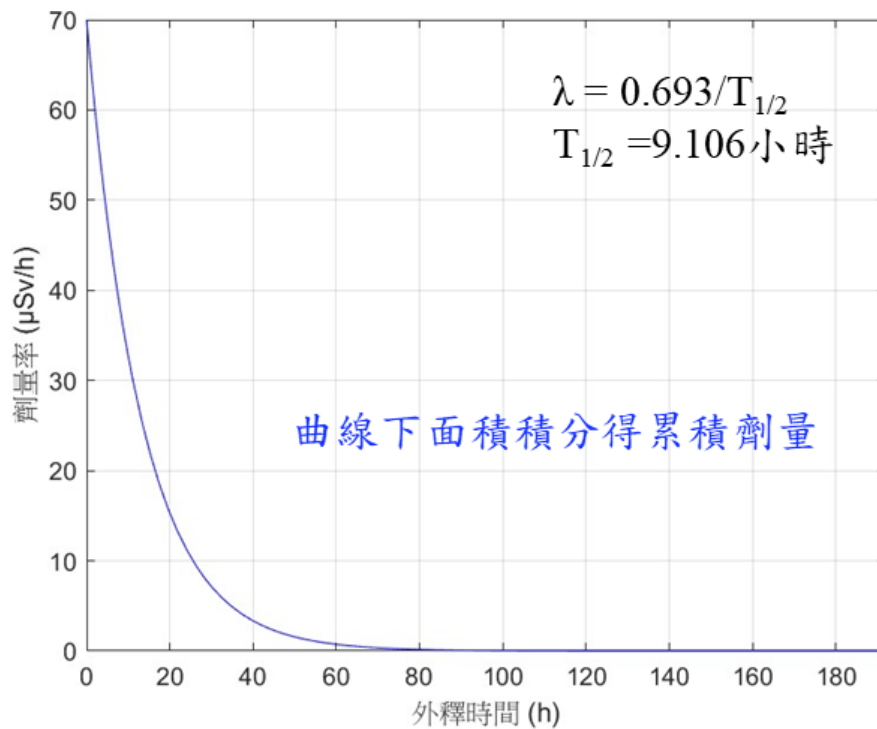


圖4.17. 考慮有效半衰期時患者劑量率隨著時間的變化(外釋標準：70 $\mu\text{Sv/h}$)

外釋標準：70 $\mu\text{Sv/h}$

$$f(t) = 70 \cdot \exp(-\lambda \cdot t)$$

考慮有效半衰期之總全身有效劑量：

$$\int_0^8 f(t) dt \times 0.75 + \int_8^{192} f(t) dt \times 0.25 = 0.92(\text{mSv})$$

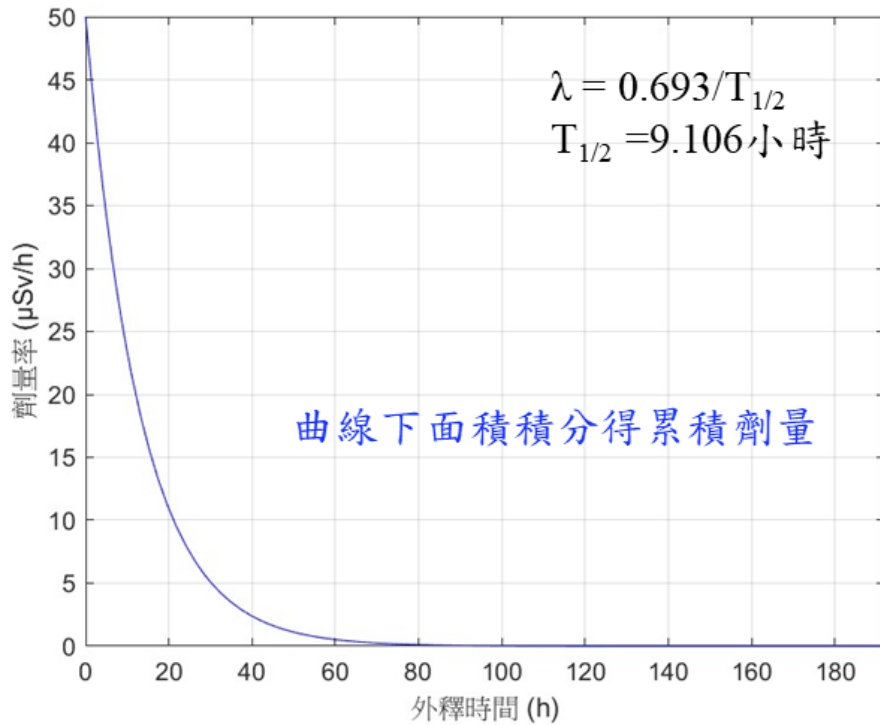


圖4.18. 考慮有效半衰期時患者劑量率隨著時間的變化(外釋標準：50 $\mu\text{Sv/h}$)

外釋標準：50 $\mu\text{Sv/h}$

$$f(t) = 50 \cdot \exp(-\lambda \cdot t)$$

考慮有效半衰期總全身有效劑量：

$$\int_0^8 f(t) dt \times 0.75 + \int_8^{192} f(t) dt \times 0.25 = 0.05 (\text{mSv})$$

4.2.5.4 照顧外釋病人曝露之時間標準建議

由表 4.13 中可見無論有無代入半衰期，外釋標準 70 或 50 $\mu\text{Sv/h}$ ，患者每次接受治療後對照護者之醫療曝露，皆會小於 5mSv。同時也可以看出若患者於住院服藥後期間遵守輻防衛教，例如多喝水、多排尿等，除了透過核種衰變(物理衰變)降低活度外，患者也可以透過結合生物性的加速排出，讓體內殘餘活度有效降低，對於照護者的劑量將會大幅降低。根據表 4.13 的結果，本研究建議之不同

情境種類下，患者外釋後 8 天內與周遭人在特定距離下所能相處之時間如表 4.14 所示。

對於照護者，每次治療的劑量約束值為 5mSv，不論外釋標準為 70 或 50 $\mu\text{Sv/h}$ ，建議其與患者於 8 天內之相處皆維持在 1 公尺以上之距離。對於非照護者，劑量限值為 1 mSv，當外釋標準為 70 $\mu\text{Sv/h}$ ，建議其於 8 天內，每天最多與患者相處 8 小時且相處皆維持在 1 公尺以上之距離；外釋標準為 50 $\mu\text{Sv/h}$ ，則每天與患者之相處時間可提升為 12 小時。最後，表中建議皆為以考量物理半衰期後所得出，若患者能夠遵守衛教多喝水，則更無需擔心照護者或非照護者會超過劑量約束值。

表4.13. 各情節下患者外釋後一個物理半衰期內(8 天)對照護者的有效劑量

| 患者於外釋後8天內 距1公尺時對照護者之劑量 | | 外釋標準 ($\mu\text{Sv/h}$) | |
|---------------------------|--------------------------------|------------------------------|------|
| | | 70 | 50 |
| 有效劑量 mSv/episode | 粗估計算(不考慮半衰期) | 3.64 | 2.60 |
| | 考慮物理半衰期($T_{1/2} = 8.02$ 天) | 2.70 | 1.93 |
| | 考慮有效半衰期($T_{1/2} = 9.106$ 小時) | 0.92 | 0.05 |

表4.14. 考量物理半衰期下，患者與周遭人所能相處之時間

| 醫院外釋1米處 之曝露率($\mu\text{Sv/h}$) | 醫療曝露 | 公眾曝露 |
|-------------------------------------|-------------------------------------|---|
| | 照護者(知情且同意之家人或親友) : 5 mSv/episode | 非照護者(家中孕婦、10歲以下未成年、 同事、返家途中接觸之民眾): 1 mSv |
| 70 | 8天內，每天需與患者保持 在1公尺以上之距離 | 8天內，每天最多與患者相處8小時 (需維持1公尺以上之距離) |
| 50 | 8天內，每天需與患者保持 在1公尺以上之距離 | 8天內，每天最多與患者相處12小時 (需維持1公尺以上之距離) |

4.3 案例分析三：放射性藥物分裝作業之人員劑量評估

4.3.1 劑量率模擬結果

研究將放射性藥物分裝依據兩家醫院所使用之分裝器差異，分為情節 A、B。並把劑量來源分為母罐、裸針、針筒屏蔽這三種進行人員劑量的探討，表 4.15、表 4.16、表 4.17 依序為情節 A 和 B 之母罐、裸針、針筒屏蔽之劑量率表，表中包括了各種器官在 ICRP-60、103 組織加權因數下之器官劑量率，而表的最下方為器官加總後得出之有效劑量率。其中紅色字樣之器官為分別於 ICRP-60、103 中第一和第二高劑量率之器官。

表4.15. 母罐劑量率：情節 A(左)、情節 B(右)

| (A) | MeV/g · particle | ICRP 60 | | | ICRP 103 | | (B) | MeV/g · particle | ICRP 60 | | | ICRP 103 | |
|-----------------------|------------------|--------------|----------|----------|--------------|-----------------------|----------|------------------|--------------|----------|--------------|----------|--|
| | | pSv/particle | re | | pSv/particle | re | | | pSv/particle | re | pSv/particle | re | |
| testes | 4.47E-12 | 1.43E-10 | 1.97E-21 | 5.72E-11 | 3.15E-22 | testes | 2.02E-13 | 6.46E-12 | 8.40E-24 | 2.58E-12 | 1.34E-24 | | |
| bone marrow | 1.80E-11 | 3.46E-10 | 5.04E-23 | 3.46E-10 | 5.04E-23 | bone marrow | 4.80E-13 | 9.22E-12 | 1.26E-25 | 9.22E-12 | 1.26E-25 | | |
| colon | 1.51E-11 | 2.91E-10 | 2.30E-22 | 2.91E-10 | 2.30E-22 | colon | 6.60E-13 | 1.27E-11 | 7.84E-25 | 1.27E-11 | 7.84E-25 | | |
| lungs | 3.37E-11 | 6.47E-10 | 3.29E-22 | 6.47E-10 | 3.29E-22 | lungs | 5.29E-13 | 1.02E-11 | 3.86E-25 | 1.02E-11 | 3.86E-25 | | |
| stomach | 3.49E-11 | 6.69E-10 | 1.26E-21 | 6.69E-10 | 1.26E-21 | stomach | 6.88E-13 | 1.32E-11 | 1.48E-24 | 1.32E-11 | 1.48E-24 | | |
| urinary bladder | 6.86E-12 | 5.49E-11 | 6.11E-23 | 4.39E-11 | 3.91E-23 | urinary bladder | 1.57E-13 | 1.26E-12 | 7.87E-26 | 1.01E-12 | 5.03E-26 | | |
| breast | 5.98E-11 | 4.79E-10 | 5.04E-22 | 1.15E-09 | 2.90E-21 | breast | 7.92E-13 | 6.34E-12 | 3.47E-25 | 1.52E-11 | 2.00E-24 | | |
| liver | 5.84E-11 | 4.67E-10 | 1.38E-22 | 3.74E-10 | 8.86E-23 | liver | 2.03E-12 | 1.62E-11 | 5.42E-25 | 1.30E-11 | 3.47E-25 | | |
| esophagus | 1.65E-11 | 1.32E-10 | 2.13E-22 | 1.05E-10 | 1.36E-22 | esophagus | 2.61E-13 | 2.09E-12 | 1.47E-25 | 1.67E-12 | 9.42E-26 | | |
| thyroid | 2.94E-12 | 2.35E-11 | 8.11E-23 | 1.88E-11 | 5.19E-23 | thyroid | 4.60E-14 | 3.68E-13 | 7.03E-26 | 2.94E-13 | 4.50E-26 | | |
| skin | 2.65E-11 | 4.23E-11 | 6.20E-25 | 4.23E-11 | 6.20E-25 | skin | 6.55E-13 | 1.05E-12 | 1.24E-27 | 1.05E-12 | 1.24E-27 | | |
| bone surface | 2.10E-11 | 3.37E-11 | 5.04E-25 | 3.37E-11 | 5.04E-25 | bone surface | 5.59E-13 | 8.94E-13 | 1.18E-27 | 8.94E-13 | 1.18E-27 | | |
| adrenals | 1.91E-11 | 1.71E-11 | 8.88E-24 | 2.63E-11 | 2.09E-23 | adrenals | 3.17E-13 | 2.84E-13 | 8.35E-27 | 4.37E-13 | 1.97E-26 | | |
| brain | 2.14E-12 | 1.92E-12 | 7.02E-26 | 3.43E-12 | 2.24E-25 | brain | 1.53E-14 | 1.37E-14 | 2.10E-29 | 2.44E-14 | 6.69E-29 | | |
| ET | 2.95E-12 | 0 | 0.00E+00 | 4.05E-12 | 1.09E-24 | ET | 4.22E-14 | 0 | 0.00E+00 | 5.80E-14 | 1.09E-27 | | |
| small intestine | 1.61E-11 | 1.45E-11 | 5.37E-25 | 2.22E-11 | 1.27E-24 | small intestine | 5.50E-13 | 4.93E-13 | 1.31E-27 | 7.57E-13 | 3.09E-27 | | |
| kidneys | 1.43E-11 | 1.29E-11 | 8.17E-25 | 1.97E-11 | 1.93E-24 | kidneys | 3.62E-13 | 3.25E-13 | 1.32E-27 | 4.99E-13 | 3.10E-27 | | |
| muscle | 1.87E-11 | 1.68E-11 | 4.82E-26 | 2.57E-11 | 1.14E-25 | muscle | 4.79E-13 | 4.29E-13 | 8.91E-29 | 6.59E-13 | 2.10E-28 | | |
| pancreas | 2.71E-11 | 2.43E-11 | 3.37E-24 | 3.73E-11 | 7.95E-24 | pancreas | 4.79E-13 | 4.30E-13 | 3.60E-27 | 6.60E-13 | 8.49E-27 | | |
| spleen | 2.34E-11 | 2.10E-11 | 3.37E-24 | 3.22E-11 | 7.95E-24 | spleen | 3.83E-13 | 3.43E-13 | 3.37E-27 | 5.27E-13 | 7.95E-27 | | |
| thymus | 1.76E-11 | 1.58E-11 | 7.77E-24 | 2.42E-11 | 1.83E-23 | thymus | 4.41E-13 | 3.95E-13 | 8.96E-27 | 6.07E-13 | 2.11E-26 | | |
| prostate | 3.46E-12 | 0 | 0.00E+00 | 4.76E-12 | 2.82E-24 | prostate | 4.95E-15 | 0 | 0.00E+00 | 6.81E-15 | 4.64E-29 | | |
| heart | 2.79E-11 | 0 | 0.00E+00 | 3.84E-11 | 3.59E-24 | heart | 4.99E-13 | 0 | 0.00E+00 | 6.87E-13 | 4.48E-27 | | |
| gall bladder | 3.63E-11 | 0 | 0.00E+00 | 4.99E-11 | 1.91E-23 | gall bladder | 1.12E-12 | 0 | 0.00E+00 | 1.54E-12 | 5.04E-26 | | |
| oral mucosa | 5.59E-12 | 0 | 0.00E+00 | 7.69E-12 | 1.16E-24 | oral mucosa | 4.59E-14 | 0 | 0.00E+00 | 6.31E-14 | 4.52E-28 | | |
| upper large intestine | 2.15E-11 | 1.92E-11 | 1.71E-24 | 0 | 0.00E+00 | upper large intestine | 8.26E-13 | 7.40E-13 | 5.40E-27 | 0 | 0.00E+00 | | |
| salivary gland | 4.61E-12 | 0 | 0.00E+00 | 7.38E-12 | 1.88E-24 | salivary gland | 7.12E-14 | 0 | 0.00E+00 | 1.14E-13 | 1.61E-27 | | |
| effective dose | | 3.47E-09 | 2.01% | 4.08E-09 | 1.82% | effective dose | | 8.34E-11 | 4.23% | 8.76E-11 | 2.98% | | |

表4.16. 裸針劑量率：情節 A(左)、情節 B(右)

| (A) | MeV/g · particle | ICRP 60 | | ICRP 103 | | (B) | MeV/g · particle | ICRP 60 | | ICRP 103 | |
|-----------------------|------------------|--------------|----------|--------------|----------|-----------------------|------------------|--------------|----------|--------------|----------|
| | | pSv/particle | re | pSv/particle | re | | | pSv/particle | re | pSv/particle | re |
| testes | 1.37E-10 | 4.37E-09 | 9.33E-21 | 1.75E-09 | 9.33E-21 | testes | 1.87E-10 | 5.99E-09 | 7.76E-20 | 2.40E-09 | 1.24E-20 |
| bone marrow | 4.43E-10 | 8.50E-09 | 1.33E-21 | 8.50E-09 | 1.33E-21 | bone marrow | 1.87E-10 | 1.34E-08 | 2.07E-21 | 1.34E-08 | 2.07E-21 |
| colon | 4.86E-10 | 9.33E-09 | 7.69E-21 | 9.33E-09 | 7.69E-21 | colon | 6.97E-10 | 1.34E-08 | 1.09E-20 | 1.34E-08 | 1.09E-20 |
| lungs | 6.84E-10 | 1.31E-08 | 6.42E-21 | 1.31E-08 | 6.42E-21 | lungs | 6.96E-10 | 2.26E-08 | 1.13E-20 | 2.26E-08 | 1.13E-20 |
| stomach | 2.35E-09 | 4.51E-08 | 9.41E-20 | 4.51E-08 | 9.41E-20 | stomach | 1.18E-09 | 4.85E-08 | 9.94E-20 | 4.85E-08 | 9.94E-20 |
| urinary bladder | 2.37E-10 | 1.89E-09 | 1.31E-21 | 1.52E-09 | 1.31E-21 | urinary bladder | 2.53E-09 | 2.60E-09 | 2.73E-21 | 2.08E-09 | 1.75E-21 |
| breast | 1.21E-09 | 9.68E-09 | 6.17E-20 | 2.32E-08 | 6.17E-20 | breast | 3.25E-10 | 1.66E-08 | 1.76E-20 | 3.98E-08 | 1.01E-19 |
| liver | 4.11E-10 | 3.29E-09 | 5.37E-22 | 2.63E-09 | 5.37E-22 | liver | 2.07E-09 | 1.15E-08 | 3.33E-21 | 9.23E-09 | 2.13E-21 |
| esophagus | 4.85E-10 | 3.88E-09 | 4.92E-21 | 3.10E-09 | 4.92E-21 | esophagus | 1.44E-09 | 5.74E-09 | 9.86E-21 | 4.59E-09 | 6.31E-21 |
| thyroid | 1.21E-10 | 9.67E-10 | 3.07E-21 | 7.74E-10 | 3.07E-21 | thyroid | 7.17E-10 | 1.53E-09 | 7.06E-21 | 1.22E-09 | 4.52E-21 |
| skin | 7.24E-10 | 1.16E-09 | 1.74E-23 | 1.16E-09 | 1.74E-23 | skin | 1.91E-10 | 1.76E-09 | 2.78E-23 | 1.76E-09 | 2.78E-23 |
| bone surface | 5.18E-10 | 8.29E-10 | 1.27E-23 | 8.29E-10 | 1.27E-23 | bone surface | 1.10E-09 | 1.31E-09 | 1.99E-23 | 1.31E-09 | 1.99E-23 |
| adrenals | 4.55E-10 | 4.07E-10 | 4.53E-22 | 6.26E-10 | 4.53E-22 | adrenals | 8.20E-10 | 6.14E-10 | 2.83E-22 | 9.43E-10 | 6.68E-22 |
| brain | 4.87E-11 | 4.37E-11 | 5.18E-24 | 7.80E-11 | 5.18E-24 | brain | 6.85E-10 | 6.72E-11 | 2.50E-24 | 1.20E-10 | 7.96E-24 |
| ET | 9.20E-11 | 0 | 4.38E-23 | 1.27E-10 | 4.38E-23 | ET | 7.50E-11 | 0 | 0.00E+00 | 2.06E-10 | 6.90E-23 |
| small intestine | 5.26E-10 | 4.71E-10 | 4.14E-23 | 7.23E-10 | 4.14E-23 | small intestine | 1.49E-10 | 6.55E-10 | 2.42E-23 | 1.01E-09 | 5.70E-23 |
| kidneys | 4.41E-10 | 3.95E-10 | 6.82E-23 | 6.07E-10 | 6.82E-23 | kidneys | 7.31E-10 | 5.88E-10 | 4.26E-23 | 9.03E-10 | 1.00E-22 |
| muscle | 5.48E-10 | 4.91E-10 | 3.84E-24 | 7.53E-10 | 3.84E-24 | muscle | 6.56E-10 | 7.16E-10 | 2.26E-24 | 1.10E-09 | 5.33E-24 |
| pancreas | 1.17E-09 | 1.05E-09 | 3.36E-22 | 1.61E-09 | 3.36E-22 | pancreas | 7.99E-10 | 1.24E-09 | 1.70E-22 | 1.91E-09 | 4.02E-22 |
| spleen | 1.53E-09 | 1.37E-09 | 5.54E-22 | 2.10E-09 | 5.54E-22 | spleen | 1.39E-09 | 1.43E-09 | 2.40E-22 | 2.20E-09 | 5.66E-22 |
| thymus | 5.27E-10 | 4.72E-10 | 5.77E-22 | 7.25E-10 | 5.77E-22 | thymus | 1.60E-09 | 7.36E-10 | 3.66E-22 | 1.13E-09 | 8.63E-22 |
| prostate | 1.62E-10 | 0 | 2.34E-22 | 2.23E-10 | 2.34E-22 | prostate | 8.21E-10 | 0 | 0.00E+00 | 3.06E-10 | 3.27E-22 |
| heart | 7.53E-10 | 0 | 1.12E-22 | 1.04E-09 | 1.12E-22 | heart | 2.23E-10 | 0 | 0.00E+00 | 1.54E-09 | 1.60E-22 |
| gall bladder | 5.41E-10 | 0 | 2.70E-22 | 7.44E-10 | 2.70E-22 | gall bladder | 1.12E-09 | 0 | 0.00E+00 | 1.53E-09 | 5.73E-22 |
| oral mucosa | 1.21E-10 | 0 | 2.83E-23 | 1.67E-10 | 2.83E-23 | oral mucosa | 1.11E-09 | 0 | 0.00E+00 | 2.52E-10 | 4.14E-23 |
| upper large intestine | 7.16E-10 | 6.42E-10 | 0.00E+00 | 0 | 0.00E+00 | upper large intestine | 1.83E-10 | 9.14E-10 | 8.87E-23 | 0 | 0.00E+00 |
| salivary gland | 1.09E-10 | 0 | 5.86E-23 | 1.75E-10 | 5.86E-23 | salivary gland | 1.02E-09 | 0 | 0.00E+00 | 2.65E-10 | 8.67E-23 |
| effective dose | | 1.07E-07 | 0.41% | 1.21E-07 | 0.36% | effective dose | 1.65E-10 | 1.52E-07 | 0.32% | 1.74E-07 | 0.29% |

表4.17. 針筒屏蔽劑量率：情節 A(左)、情節 B(右)

| (A) | MeV/g · particle | ICRP 60 | | ICRP 103 | | (B) | MeV/g · particle | ICRP 60 | | ICRP 103 | |
|-----------------------|------------------|--------------|----------|--------------|----------|-----------------------|------------------|--------------|----------|--------------|----------|
| | | pSv/particle | re | pSv/particle | re | | | pSv/particle | re | pSv/particle | re |
| testes | 1.59E-11 | 5.08E-10 | 5.19E-21 | 5.72E-11 | 8.30E-22 | testes | 8.48E-12 | 2.71E-10 | 2.85E-21 | 1.09E-10 | 4.57E-22 |
| bone marrow | 6.24E-11 | 1.20E-09 | 1.83E-22 | 3.46E-10 | 1.83E-22 | bone marrow | 2.94E-11 | 5.65E-10 | 8.26E-23 | 5.65E-10 | 8.26E-23 |
| colon | 6.53E-11 | 1.25E-09 | 1.06E-21 | 2.91E-10 | 1.06E-21 | colon | 3.05E-11 | 5.86E-10 | 4.77E-22 | 5.86E-10 | 4.77E-22 |
| lungs | 9.48E-11 | 1.82E-09 | 8.48E-22 | 6.47E-10 | 8.48E-22 | lungs | 4.97E-11 | 9.54E-10 | 4.53E-22 | 9.54E-10 | 4.53E-22 |
| stomach | 3.31E-10 | 6.36E-09 | 1.31E-20 | 6.69E-10 | 1.31E-20 | stomach | 1.14E-10 | 2.19E-09 | 4.36E-21 | 2.19E-09 | 4.36E-21 |
| urinary bladder | 3.20E-11 | 2.56E-10 | 2.68E-22 | 4.39E-11 | 1.72E-22 | urinary bladder | 1.56E-11 | 1.24E-10 | 1.26E-22 | 9.96E-11 | 8.09E-23 |
| breast | 1.72E-10 | 1.37E-09 | 1.50E-21 | 1.15E-09 | 8.63E-21 | breast | 8.78E-11 | 7.03E-10 | 7.35E-22 | 1.69E-09 | 4.24E-21 |
| liver | 5.63E-11 | 4.50E-10 | 1.15E-22 | 3.74E-10 | 7.35E-23 | liver | 6.06E-11 | 4.85E-10 | 1.35E-22 | 3.88E-10 | 8.66E-23 |
| esophagus | 6.75E-11 | 5.40E-10 | 1.04E-21 | 1.05E-10 | 6.64E-22 | esophagus | 3.31E-11 | 2.65E-10 | 5.66E-22 | 2.12E-10 | 3.62E-22 |
| thyroid | 1.23E-11 | 9.85E-11 | 3.51E-22 | 1.88E-11 | 2.24E-22 | thyroid | 8.24E-12 | 6.59E-11 | 3.51E-22 | 5.28E-11 | 2.25E-22 |
| skin | 1.01E-10 | 1.62E-10 | 2.48E-24 | 4.23E-11 | 2.48E-24 | skin | 4.73E-11 | 7.56E-11 | 1.17E-24 | 7.56E-11 | 1.17E-24 |
| bone surface | 7.25E-11 | 1.16E-10 | 1.75E-24 | 3.37E-11 | 1.75E-24 | bone surface | 3.47E-11 | 5.54E-11 | 8.27E-25 | 5.54E-11 | 8.27E-25 |
| adrenals | 5.96E-11 | 5.34E-11 | 2.07E-23 | 2.63E-11 | 4.88E-23 | adrenals | 2.83E-11 | 2.53E-11 | 9.74E-24 | 3.89E-11 | 2.30E-23 |
| brain | 7.18E-12 | 6.43E-12 | 2.71E-25 | 3.43E-12 | 8.63E-25 | brain | 3.45E-12 | 3.09E-12 | 1.29E-25 | 5.52E-12 | 4.12E-25 |
| ET | 1.03E-11 | 0 | 0.00E+00 | 4.05E-12 | 5.28E-24 | ET | 8.02E-12 | 0 | 0.00E+00 | 1.10E-11 | 4.90E-24 |
| small intestine | 7.20E-11 | 6.45E-11 | 2.35E-24 | 2.22E-11 | 5.55E-24 | small intestine | 3.24E-11 | 2.91E-11 | 1.05E-24 | 4.46E-11 | 2.48E-24 |
| kidneys | 6.12E-11 | 5.48E-11 | 3.96E-24 | 1.97E-11 | 9.33E-24 | kidneys | 2.64E-11 | 2.36E-11 | 1.60E-24 | 3.63E-11 | 3.78E-24 |
| muscle | 7.71E-11 | 6.91E-11 | 2.21E-25 | 2.57E-11 | 5.20E-25 | muscle | 3.46E-11 | 3.10E-11 | 9.41E-26 | 4.76E-11 | 2.22E-25 |
| pancreas | 1.54E-10 | 1.38E-10 | 1.73E-23 | 3.73E-11 | 4.07E-23 | pancreas | 5.43E-11 | 4.86E-11 | 5.96E-24 | 7.47E-11 | 1.41E-23 |
| spleen | 2.08E-10 | 1.86E-10 | 3.13E-23 | 3.22E-11 | 7.38E-23 | spleen | 7.09E-11 | 6.36E-11 | 1.08E-23 | 9.76E-11 | 2.54E-23 |
| thymus | 6.80E-11 | 6.09E-11 | 3.19E-23 | 2.42E-11 | 7.52E-23 | thymus | 3.17E-11 | 2.84E-11 | 1.41E-23 | 4.36E-11 | 3.32E-23 |
| prostate | 2.05E-11 | 0 | 0.00E+00 | 4.76E-12 | 2.55E-23 | prostate | 1.24E-11 | 0 | 0.00E+00 | 1.71E-11 | 1.60E-23 |
| heart | 1.06E-10 | 0 | 0.00E+00 | 3.84E-11 | 1.53E-23 | heart | 4.72E-11 | 0 | 0.00E+00 | 6.50E-11 | 6.33E-24 |
| gall bladder | 6.71E-11 | 0 | 0.00E+00 | 4.99E-11 | 3.11E-23 | gall bladder | 4.35E-11 | 0 | 0.00E+00 | 5.98E-11 | 2.03E-23 |
| oral mucosa | 1.80E-11 | 0 | 0.00E+00 | 7.69E-12 | 4.36E-24 | oral mucosa | 5.47E-12 | 0 | 0.00E+00 | 7.53E-12 | 1.14E-24 |
| upper large intestine | 9.58E-11 | 8.59E-11 | 8.57E-24 | 0 | 0.00E+00 | upper large intestine | 4.21E-11 | 3.78E-11 | 3.61E-24 | 0 | 0.00E+00 |
| salivary gland | 1.49E-11 | 0 | 0.00E+00 | 7.38E-12 | 8.09E-24 | salivary gland | 4.70E-12 | 0 | 0.00E+00 | 7.52E-12 | 1.86E-24 |
| effective dose | | 1.48E-08 | 1.04% | 4.08E-09 | 0.96% | effective dose | 6.63E-09 | 1.52% | 7.53E-09 | 1.39% | |

4.3.1.1 乳房對全身有效劑量率之影響(E_{Breast}/E)

在 ICRP-103 報告中，乳房的組織加權因數由原本的 0.05 提高至 0.12，顯著提升了乳房對整體有效劑量的貢獻。在本研究所模擬之兩種操作情節中，代入 ICRP-103 計算後，由圖 4.19 可見 E_{Breast}/E 的比值皆有明顯上升，顯示乳房器官對於有效劑量的影響在新權重下變得更加重要。

進一步分析顯示，在情節 A 中， E_{Breast}/E 的最大比值出現在母罐射源下；而在情節 B 中，則是裸針造成的輻射曝露對乳房貢獻最大。此結果亦反映出不同射源位置與距離，對乳房所受劑量的影響程度具有高度相關性。

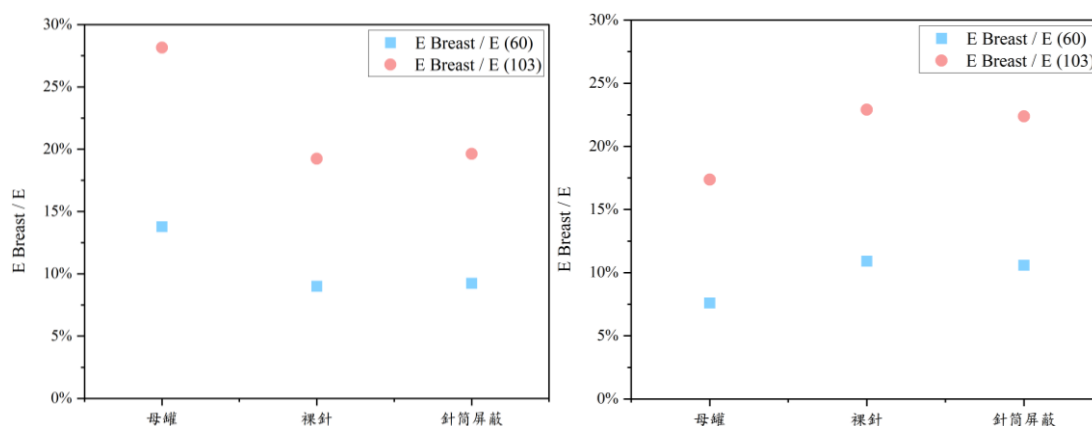


圖4.19. 母罐、裸針、針筒屏蔽之 E_{Breast}/E ：情節 A(左)、情節 B(右)

4.3.1.2 新增器官對全身有效劑量之影響(E_{Add}/E)

相較於 ICRP-60 報告，ICRP-103 在剩餘器官 (Remainder organs) 的定義上進行了擴充，新增納入攝護腺、心臟、膽囊與口腔內膜等器官，並將其加權因數自原先的 0.0056 提升至 0.0086，其中差異主要是因為剩餘器官的加權因數由 0.05 調整為 0.12，並且所考量的剩餘器官的數量由 10 增加至 14 個，這進一步反映了

這些器官在總體輻射風險評估中的重要性。此外，ICRP-103 亦新增了頭部與腮腺作為獨立考量的受照射器官，使整體器官涵蓋性更為完整。

模擬結果顯示圖 4.20，當以母罐作為主要射源時，其對新增器官所造成的有效劑量貢獻 (E_{Add}/E) 相較於其他射源更高，代表其輻射影響對於新納入器官的相對貢獻較大。雖然新增器官整體對有效劑量的影響比例不如主要器官顯著，然而在評估不同操作情境的劑量分布時，仍具有參考價值。有關情節 A、B 詳細之 E_{Add} 、有效劑量 (E)、 E_{Add}/E 和其所對應的三種劑量來源劑量率呈現在表 4.18 中。

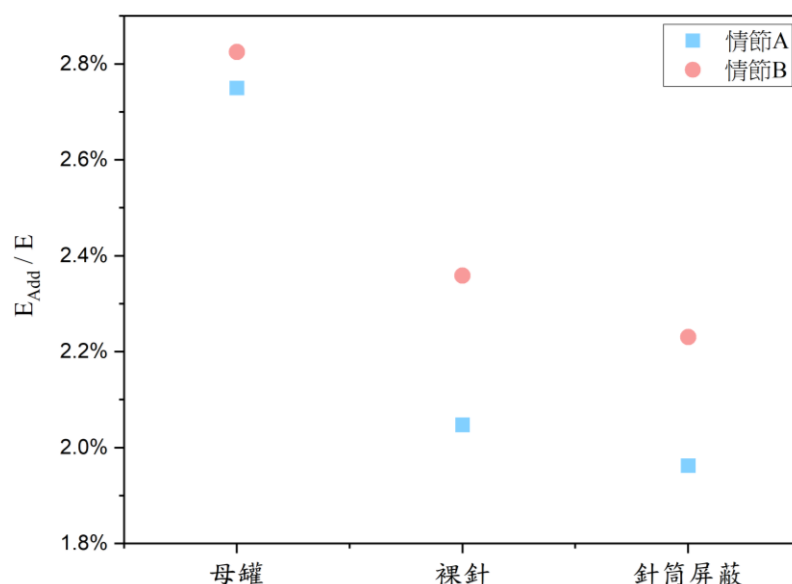


圖4.20. 母罐、裸針、針筒屏蔽之 E_{Add}/E ：情節 A(左)、情節 B(右)

表4.18. 放射性藥物分裝 E_{Add} 、有效劑量 (E)、 E_{Add}/E 劑量率表

| | | 母罐 | 裸針 | 針筒屏蔽 |
|-------------------------|-----|----------|----------|----------|
| $E_{Add}(\text{Total})$ | 情節A | 1.12E-10 | 2.47E-09 | 3.29E-10 |
| | 情節B | 2.47E-12 | 4.10E-09 | 1.68E-10 |
| Effective dose (E) | 情節A | 4.08E-09 | 1.21E-07 | 1.68E-08 |
| | 情節B | 8.76E-11 | 1.74E-07 | 7.53E-09 |
| E_{Add}/E | 情節A | 2.7% | 2.0% | 2.0% |
| | 情節B | 2.8% | 2.4% | 2.2% |

4.3.1.3 不同核種對劑量率之影響

表 4.19 皆為可經迴旋加速器所製造出之核種，研究針對 F-18、Ga-68、Ga-67、Tl-201、I-123、In-111 等六種核醫科常使用之核種進行放射性藥物分裝時所造成的劑量率變化進行探討。

表4.19. 核種特性表

| Nuclide | Photon energy(MeV) | Branch ratio | Mean energy(MeV) |
|---------|--------------------|--------------|------------------|
| F-18 | 0.511 | 194.00% | 0.511 |
| Ga-68 | 0.511 | 177.80% | 0.521 |
| | 1.077 | 3.24% | |
| Ga-67 | 0.091 | 3.37% | 152.540 |
| | 0.093 | 70.60% | |
| | 0.184 | 21.30% | |
| | 0.209 | 2.40% | |
| | 0.300 | 16.67% | |
| | 0.394 | 4.60% | |
| Tl-201 | 0.135 | 2.60% | 0.068 |
| | 0.167 | 10% | |
| | 0.011 | 30.0% | |
| | 0.069 | 22.0% | |
| | 0.071 | 38.0% | |
| | 0.080 | 13.0% | |
| | 0.081 | 17.0% | |
| | 0.083 | 3.7% | |
| I-123 | 0.159 | 83.25% | 0.159 |
| In-111 | 0.171 | 90.61% | 0.209 |
| | 0.245 | 94.12% | |

情節 A、B 下之六種核種得出的劑量率表如表 4.20、表 4.21 所示，劑量率單位為 pSv/Bq·s。情節 A 由於其使用的為加蓋封閉式母罐，對於 ^{201}Tl 、 ^{123}I 、 ^{111}In

等能量較低之核種，屏蔽效果非常明顯，除了 ^{111}In 有測得非常低之劑量率，其餘所造成之手部和全身劑量率皆為可忽略。針筒屏蔽的部分，由於情節 A 所使用之屏蔽較薄，因此其手部或全身劑量率皆較情節 B 高出不少。以最常使用之 ^{18}F 為例，手部劑量率高出約 2.9 倍；全身有效劑量率高出 2.2 倍。

情節 B 之母罐設計為未封蓋式的，因此不論核種能量高低，皆可測得手部及全身劑量率。裸針部分，因皆無屏蔽所以對手部造成之劑量率和情節 A 相同。然而由於兩種情節之裸針位置不同，因此對全身劑量率造成不一樣的貢獻，情節 B 之全身劑量率略大於情節 A。此外，不論何種情節，正子藥物比起其它核醫藥物對於手部和全身皆有更高的劑量率貢獻。

表4.20. 常用之六種核種劑量率表：情節 A

| 情節A | | 母罐 | | 裸針 | | 針筒屏蔽 | | |
|--------|----|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-------|
| | | Dose rate | re | Dose rate | re | Dose rate | re | |
| F-18 | 手部 | 3.09E-05 | 0.15% | 3.09E-03 | 0.01% | 1.84E-04 | 0.06% | |
| | 全身 | ICRP 60 | 6.74E-09 | 2.01% | 2.09E-07 | 0.41% | 2.88E-08 | 1.04% |
| | | ICRP 103 | 7.92E-09 | 1.82% | 2.34E-07 | 0.36% | 3.26E-08 | 0.96% |
| Ga-68 | 手部 | 4.58E-05 | 0.14% | 2.96E-03 | 0.01% | 2.16E-04 | 0.06% | |
| | 全身 | ICRP 60 | 2.35E-08 | 1.70% | 2.76E-07 | 0.53% | 5.90E-08 | 1.29% |
| | | ICRP 103 | 2.64E-08 | 1.40% | 3.01E-07 | 0.39% | 6.38E-08 | 0.94% |
| Ga-67 | 手部 | 7.07E-08 | 0.67% | 5.09E-04 | 0.02% | 3.54E-06 | 0.21% | |
| | 全身 | ICRP 60 | 1.43E-11 | 8.58% | 3.02E-08 | 0.69% | 2.71E-10 | 6.32% |
| | | ICRP 103 | 1.76E-11 | 8.99% | 3.33E-08 | 0.58% | 2.96E-10 | 6.25% |
| Tl-201 | 手部 | 0.00E+00 | 0.00% | 2.48E-04 | 0.02% | 1.56E-06 | 0.03% | |
| | 全身 | ICRP 60 | 0.00E+00 | 0.00% | 9.95E-09 | 1.12% | 4.23E-12 | 6.92% |
| | | ICRP 103 | 0.00E+00 | 0.00% | 1.08E-08 | 0.94% | 4.71E-12 | 6.93% |
| I-123 | 手部 | 0.00E+00 | 0.00% | 3.61E-04 | 0.01% | 1.50E-06 | 0.06% | |
| | 全身 | ICRP 60 | 0.00E+00 | 0.00% | 2.29E-08 | 0.59% | 1.60E-11 | 6.38% |
| | | ICRP 103 | 0.00E+00 | 0.00% | 2.52E-08 | 0.50% | 1.73E-11 | 5.72% |
| In-111 | 手部 | 3.86E-11 | 12.6% | 1.11E-03 | 0.01% | 4.26E-06 | 0.07% | |
| | 全身 | ICRP 60 | 6.95E-15 | 2.03% | 7.39E-08 | 0.53% | 8.64E-11 | 4.26% |
| | | ICRP 103 | 6.04E-15 | 3.86% | 8.14E-08 | 0.45% | 9.48E-11 | 3.78% |

表4.21. 常用之六種核種劑量率表：情節 B

| 情節B | | 母罐 | | 裸針 | | 針筒屏蔽 | | |
|--------|----|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-------|
| | | Dose rate | re | Dose rate | re | Dose rate | re | |
| F-18 | 手部 | 4.09E-07 | 0.24% | 3.10E-03 | 0.01% | 6.44E-05 | 0.09% | |
| | 全身 | ICRP 60 | 1.62E-10 | 4.23% | 2.95E-07 | 0.32% | 1.29E-08 | 1.52% |
| | | ICRP 103 | 1.70E-10 | 2.98% | 3.37E-07 | 0.29% | 1.46E-08 | 1.39% |
| Ga-68 | 手部 | 5.77E-07 | 0.95% | 2.98E-03 | 0.01% | 8.67E-05 | 0.09% | |
| | 全身 | ICRP 60 | 1.05E-09 | 5.18% | 3.58E-07 | 0.42% | 3.20E-08 | 1.83% |
| | | ICRP 103 | 1.08E-09 | 5.27% | 4.00E-07 | 0.31% | 3.44E-08 | 1.28% |
| Ga-67 | 手部 | 8.23E-08 | 0.14% | 5.11E-04 | 0.02% | 2.75E-06 | 0.07% | |
| | 全身 | ICRP 60 | 1.88E-11 | 2.39% | 4.52E-08 | 0.52% | 7.00E-11 | 3.95% |
| | | ICRP 103 | 2.07E-11 | 2.40% | 5.06E-08 | 0.45% | 7.66E-11 | 3.08% |
| Tl-201 | 手部 | 3.92E-08 | 0.14% | 2.48E-04 | 0.02% | 1.56E-06 | 0.02% | |
| | 全身 | ICRP 60 | 4.78E-12 | 3.97% | 1.51E-08 | 0.86% | 5.64E-12 | 3.93% |
| | | ICRP 103 | 5.20E-12 | 3.61% | 1.66E-08 | 0.71% | 6.44E-12 | 3.75% |
| I-123 | 手部 | 6.14E-08 | 0.29% | 3.63E-04 | 0.01% | 1.49E-06 | 0.06% | |
| | 全身 | ICRP 60 | 1.44E-11 | 4.64% | 3.45E-08 | 0.45% | 1.52E-11 | 5.23% |
| | | ICRP 103 | 1.59E-11 | 4.64% | 3.86E-08 | 0.38% | 1.68E-11 | 5.31% |
| In-111 | 手部 | 1.87E-07 | 0.27% | 1.12E-03 | 0.01% | 4.16E-06 | 0.07% | |
| | 全身 | ICRP 60 | 5.60E-11 | 4.42% | 1.09E-07 | 0.41% | 4.82E-11 | 4.01% |
| | | ICRP 103 | 6.06E-11 | 4.08% | 1.22E-07 | 0.35% | 5.69E-11 | 3.91% |

4.3.2 假定操作情節下的有效劑量評估

參考醫院訪視的記錄，以 ^{18}F 藥物分裝操作為例，母罐起始 ^{18}F 活度約為 1000 至 1400 mCi、每支針劑活度約為 10 至 110 mCi，單日最多抽取 15 支。保守假設操作人員每月執行分裝作業 22 工作天，每一天的流程為第 1 支 110 mCi，以等間隔減少活度至第 15 支為 13 mCi。表 4.22 為活度隨藥物抽取時間改變之試算表。以下將根據情節 A、B 不同之作業流程，提供相對應之全身有效劑量和手部

等價劑量計算過程做參考。

表4.22. 活度隨藥物抽取時間變化之試算表

| 藥劑 | F-18活度(mCi) | 剩餘藥劑 | F-18活度(mCi) |
|------|-------------|--------|-------------|
| 第1支 | 110 | 抽完第1支 | 1400 |
| 第2支 | 103.1 | 抽完第2支 | 1290.0 |
| 第3支 | 96.1 | 抽完第3支 | 1186.9 |
| 第4支 | 89.2 | 抽完第4支 | 1090.8 |
| 第5支 | 82.3 | 抽完第5支 | 1001.6 |
| 第6支 | 75.4 | 抽完第6支 | 919.3 |
| 第7支 | 68.4 | 抽完第7支 | 843.9 |
| 第8支 | 61.5 | 抽完第8支 | 775.5 |
| 第9支 | 54.6 | 抽完第9支 | 714.0 |
| 第10支 | 47.6 | 抽完第10支 | 659.4 |
| 第11支 | 40.7 | 抽完第11支 | 611.8 |
| 第12支 | 33.8 | 抽完第12支 | 571.1 |
| 第13支 | 26. | 抽完第13支 | 537.3 |
| 第14支 | 19.9 | 抽完第14支 | 510.4 |
| 第15支 | 13.0 | 抽完第15支 | 490.5 |
| 平均活度 | 61.5 | 平均活度 | 840 |

作業情節 A 流程：(1)自動分裝器抽取完成、(2)手拿錫罐取出裸針彈出氣泡後放進校正儀、(3)從校正儀取出裸針放入錫罐。假設接觸屏蔽針筒時間為 10 秒，接觸裸針花費 10 秒，受母罐影響之總時間為 20 秒。依此作業與假設，操作人員的劑量估計為：

每年全身有效劑量：

$$\left[7.92 \times 10^{-9} \left(\frac{pSv}{Bq \cdot sec} \right) \times 840(mCi) \times 20 \left(\frac{sec}{case} \right) + (2.34 \times 10^{-7} + 3.26 \times 10^{-8}) \times 61.5(mCi) \times 10 \left(\frac{sec}{case} \right) \right] \times 15 \left(\frac{case}{day} \right) \times 22 \left(\frac{day}{month} \right) \times 12 \left(\frac{month}{year} \right) \times 0.037 \left(\frac{Bq}{pCi} \right) = 0.044 \left(\frac{mSv}{year} \right)$$

每年手部等價劑量：

$$\left[3.09 \times 10^{-5} \left(\frac{pSv}{Bq \cdot sec} \right) \times 840(mCi) \times 20 \left(\frac{sec}{case} \right) + (3.09 \times 10^{-3} + 1.84 \times 10^{-5}) \times \right]$$

$$61.5(mCi) \times 10 \left(\frac{sec}{case} \right) \times 15 \left(\frac{case}{day} \right) \times 22 \left(\frac{day}{month} \right) \times 12 \left(\frac{month}{year} \right) \times 0.037 \left(\frac{Bq}{pCi} \right) = 371 \left(\frac{mSv}{year} \right)$$

作業情節 B 流程：(1)自動分裝器抽取完成會自動將鎢罐放進校正儀、(2)鎢罐自動從校正儀回到自動分裝器、(3)從自動分裝器手拿鎢罐取出裸針放入 PET pig 鎢罐。假設接觸屏蔽針筒時間為 10 秒，接觸裸針花費 5 秒，受母罐影響之總時間為 15 秒。依此作業與假設，操作人員的劑量估計為：

每年全身有效劑量：

$$\left[1.70 \times 10^{-10} \left(\frac{pSv}{Bq.sec} \right) \times 840(mCi) \times 15 \left(\frac{sec}{case} \right) + \left(7.92 \times 10^{-9} \times 10 \left(\frac{sec}{case} \right) + 2.34 \times 10^{-7} \times 5 \left(\frac{sec}{case} \right) \right) \times 61.5(mCi) \right] \times 15 \left(\frac{case}{day} \right) \times 22 \left(\frac{day}{month} \right) \times 12 \left(\frac{month}{year} \right) \times 0.037 \left(\frac{Bq}{pCi} \right) = 0.012 \left(\frac{mSv}{year} \right)$$

每年手部等價劑量：

$$\left[4.09 \times 10^{-7} \left(\frac{pSv}{Bq.sec} \right) \times 840(mCi) \times 15 \left(\frac{sec}{case} \right) + \left(6.44 \times 10^{-5} \times 10 \left(\frac{sec}{case} \right) + 3.10 \times 10^{-3} \times 5 \left(\frac{sec}{case} \right) \right) \times 61.5(mCi) \right] \times 15 \left(\frac{case}{day} \right) \times 22 \left(\frac{day}{month} \right) \times 12 \left(\frac{month}{year} \right) \times 0.037 \left(\frac{Bq}{pCi} \right) = 146 \left(\frac{mSv}{year} \right)$$

4.3.2.1 ICRP-103 對有效劑量之影響

進一步比較不同 ICRP 報告下的評估結果 (表 4.23)，代入 ICRP-103 報告之組織加權因數後，情節 A 與情節 B 之全身有效劑量分別由 0.038 mSv/y 上升至 0.044 mSv/y (增加約 1.15 倍)，以及由 0.015 mSv/y 上升至 0.017 mSv/y (增加約 1.13 倍)，有效劑量整體之增幅，依情節不同而有約 15% 及 13% 的提升。

表4.23. 有效劑量表

| | 母罐 | | 裸針 | | 針筒屏蔽 | | 總作業時間 | 全身有效劑量 (mSv/y) | |
|-----|-------|-----|---------|-----|-------|-----|-------|----------------|-------|
| | 材料(鎢) | 時間 | 材料(聚丙烯) | 時間 | 材料(鎢) | 時間 | | | |
| 情節A | 1.8公分 | 20秒 | 0.2公分 | 10秒 | 0.9公分 | 10秒 | 20秒 | ICRP 60 | 0.038 |
| | | | | | | | | ICRP 103 | 0.044 |
| 情節B | 7公分 | 15秒 | 0.2公分 | 5秒 | 1.4公分 | 10秒 | 15秒 | ICRP 60 | 0.015 |
| | | | | | | | | ICRP 103 | 0.017 |

4.3.2.2 手部等價劑量之探討

從模擬結果表 4.24 可觀察到，不同劑量來源對於手部劑量之貢獻程度依序為裸針、針筒屏蔽、母罐，且操作過程中直接曝露於裸針射源之階段，對人員造成的輻射影響最為顯著。情節 B 所使用之自動分裝器設計能夠免除工作人員將針劑手動放入校正儀之步驟，進一步減少其接觸裸針之時間，加上其所使用之母罐與針筒屏蔽厚度較大，因此能有效降低手部輻射曝露，提升作業安全性。

表4.24. 手部等價劑量表

| | 母罐 | | 裸針 | | 針筒屏蔽 | | 總作業時間 | 全身有效劑量 (mSv/y) |
|---------------------|-------|----------|---------|----------|-------|----------|-------|----------------|
| | 材料(鎢) | 時間 | 材料(聚丙烯) | 時間 | 材料(鎢) | 時間 | | |
| 情節A | 1.8公分 | 20秒 | 0.2公分 | 10秒 | 0.9公分 | 10秒 | 20秒 | 371 |
| 情節B | 7公分 | 15秒 | 0.2公分 | 5秒 | 1.4公分 | 10秒 | 15秒 | 146 |
| 手部劑量 (pSv/particle) | 情節A | 1.59E-05 | | 1.59E-03 | | 9.48E-05 | | |
| | 情節B | 2.11E-07 | | 1.60E-03 | | 3.32E-05 | | |

第五章、結論

透視攝影部分，若改採 ICRP-103 的組織加權因數標準，則於 80 kVp 下，有鉛衣與無鉛衣情況下之有效劑量分別增加至原本的 1.03 倍與 0.89 倍。整體而言，雖然全身有效劑量之變動幅度有限，但在特定情境下仍可能產生顯著影響。由於 ICRP-103 將頭頸部相關器官的組織加權因數提高，導致此部位之劑量相較於 ICRP-60 增加約 1.6 至 1.7 倍。當 X 光管球角度越接近頭部，且頭頸部未受鉛衣保護時，ICRP-103 所計算之有效劑量將可能超越 ICRP-60，需特別留意其潛在劑量低估的風險。

根據假定操作情節模擬所得之年有效劑量，於有鉛衣與無鉛衣防護下，分別為 10.9 (ICRP 60)和 11.0 (ICRP 103)及 221.2 (ICRP 60)和 169.3mSv/y ICRP (103)，顯示若缺乏適當防護，作業人員曝露於高劑量風險中。建議操作者應穿戴鉛衣並適當控管工作時數，以降低年劑量曝露。綜合而言，若未來輻射防護法規導入 ICRP-103 標準，針對頭頸部等未被鉛衣覆蓋且加權因數提高之器官，應特別重視其劑量評估與防護，避免低估實際之有效劑量，保障作業人員之職業安全。

I-131 患者外釋部分，本研究結果顯示，在將 ICRP-103 的器官加權因數代入後，射源位於脖頸處時，其有效劑量較 ICRP-60 提高約 1.02 至 1.16 倍，主要受乳房加權因數提高所致；於腰腹部位則觀察到有效劑量略有下降，約為 0.98 至 0.99 倍。從不同方位的模擬結果來看，劑量率呈現北側最大、依序為南側、西側、東側最小，顯示患者與照護者面對面時的曝露風險最高。此外，距離對劑量率具有顯著影響，30 公分處之劑量率遠高於 100 公分，脖頸處約為 3.2 至 5 倍，腰腹處則為 3.4 至 6 倍。

為符合美國核能管制委員會(NRC)所規範之公眾年劑量限制(<5 mSv/y)，建議 HT (甲狀腺機能亢進)以 ICRP 103 計算所得結果 (5 至 8 天)，DTC (分化型甲狀腺癌)患者則需隔離約 16 至 18 天。將模擬所得之劑量率代入現行法規所建議之照顧外釋患者曝露之時間標準後，保守估計 HT 與 DTC 患者對照護者

所造成之有效劑量分別約為 1.5 mSv 與 3.73 mSv。基於上述結果，建議實務上仍依核子醫學輻射防護措施指引執行輻射作業。倘若未來有意修改 5 mSv/y 之建議值，可參考本研究所建立之距離與劑量率關係表，進一步訂定患者與照護者於特定距離下之安全接觸時間。

根據研究後續的探討結果，無論是否考慮半衰期，且不論外釋標準為 70 或 50 $\mu\text{Sv/h}$ ，患者每次接受治療後對照護者造成之曝露皆低於劑量約束值 5mSv。若患者遵守衛教建議（多喝水、多排尿），可進一步降低殘餘活度，顯著減少對照護者的劑量（有效劑量 < 1 mSv）。且研究以物理半衰期保守估計之結果，建議照護者在外釋後 8 天內與患者保持至少 1 公尺距離；對於劑量限值為 1 mSv 的非照護者，外釋標準為 70 $\mu\text{Sv/h}$ 時，每日與患者相處時間建議不超過 8 小時，50 $\mu\text{Sv/h}$ 時可延長至 12 小時，且皆須保持 1 公尺以上距離。若患者能積極配合衛教措施，則更可確保不會超過相關劑量限制。

輻射劑量評估精進部分著重於放射性藥物分裝作業之人員劑量評估，以藥物分裝時所使用之自動分裝器和屏蔽工具做為模型，根據 A、B 兩家醫院使用之儀器不同代入其相對應的操作情節，同時將探討 ICRP 更新之輻射加權因數與組織加權因數對手部等價劑量及全身有效劑量之影響。

由於操作人員於放射性藥物分裝作業中全身受到熱鉛室的完整屏蔽保護，因此其全身有效劑量不易受到操作情節改變的顯著影響。若採用 ICRP-103 進行劑量計算，情節 A 與 B 之全身有效劑量分別增加至原本的 1.15 倍與 1.13 倍，這顯示了不同報告權重標準的使用，對於此類情境下的全身劑量有一定的影響。

ICRP-103 中對乳房的組織加權因數由原先的 0.05 提升至 0.12，增加了 2.4 倍，使得情節 A 與 B 中乳房劑量占有有效劑量的比例（ E_{Breast}/E ）皆明顯提高，約為原先的 2~2.3 倍，並進一步使整體有效劑量增加約 1.1 倍。

針對不同輻射來源之貢獻進行劑量率比較可得，其大小依序為裸針、針筒屏蔽、母罐，顯示裸針階段的輻射防護應特別重視。模擬結果顯示，藥物分裝情節

A 與 B 之手部年劑量分別為 371 mSv 與 146 mSv，皆屬於具有潛在輻射風險之作業。值得注意的是，若採用自動分裝器，可有效縮短操作者與裸針之接觸時間，進而使情節 B 手部劑量降至情節 A 的約 0.4 倍，防護效益顯著。

綜合上述結果可知，若未來輻防法規引入 ICRP-103 所提出之組織加權因數，對放射性藥物分裝作業人員的全身有效劑量估算會有一定的影響(上升約 1.13~1.15 倍)，因此可推測劑量限值部分在實務應用上應視情況進行調整。

附錄：教育訓練

為了將兩年期計劃成果與經驗分享給相關單位，本團隊在 114 年度 7 月 31 日於國立清華大學舉辦一場教育訓練，內容主要針對本計劃的 5 大項工作進行報告，分別是：

1. 放射性物質生產設施廢氣排放對公眾曝露的劑量評估與劑量約束建議
2. 國內醫療部門輻射作業職業曝露的劑量約束
3. 醫用非密封放射性物質作業高曝露風險情節的劑量評估
4. 螢光透視攝影對工作人員之輻射劑量評估
5. I-131 患者外釋對照護者之劑量評估

在當天的教育訓練中，本團隊除了分享各項工作執行的規劃、內容、成果及建議之外，也與現場參與人員進行許多討論，以此了解相關單位的需求以及考量重點，作為後續改善的參考方向，以期推動落實輻射防護最適化管理之精神以及合理抑低人員劑量之目的。

輻射醫療應用計畫曝露情境潛在輻射風險評估

與劑量約束管理研究

114 期中進度說明暨案例分析技術的教育訓練

時間：2025/7/31(四) 9:30-15:30

地點：國立清華大學綠能館 207 室

課程規劃：

| 時間 | 課程主題 |
|---------------|---|
| 09:30 – 10:00 | 報到 |
| 10:00 – 10:30 | 致詞與計畫成果簡介 講員：許榮鈞 |
| 10:30 – 11:00 | 114 年計畫期中進度說明 講員：許榮鈞 |
| 11:10 – 12:00 | 案例分析 1：放射性物質生產設施廢氣排放對公眾曝露的劑量評估與劑量約束建議 講員：黃淵 |
| 12:00 – 13:00 | 午餐 |
| 13:00 – 13:50 | 案例分析 2：醫用非密封放射性物質作業高曝露風險情節的劑量評估與國內醫療部門輻射作業職業曝露的劑量約束 講員：鄭晨熾 |
| 14:00 – 14:50 | 案例分析 3：ICRP-103 輻防建議對於特定醫用輻射作業劑量評估的影響：(1)螢光透視攝影對工作人員之輻射劑量評估與(2) I-131 病人外釋對照護者之劑量評估 講員：鄭晨熾 |
| 15:00 – 15:30 | 綜合討論 |

圖6.1. 教育訓練時程表

輻射醫療應用計畫曝露情境潛在輻射風險評估與劑量 約束管理研究

114 年期中進度說明暨案例分析技術教育訓練

時間：2025/7/31(四) 9:30-15:30

地點：國立清華大學綠能館 207 室

參訓人員：

| 單位 | 姓名 | 職稱 | 簽到 | 簽退 |
|------------|-----|------|-----|-----|
| 核能安全委員會 | 許雅娟 | 簡任技正 | 許雅娟 | 許雅娟 |
| | 黃茹絹 | 科長 | 黃茹絹 | 黃茹絹 |
| | 吳思穎 | 科長 | 吳思穎 | 吳思穎 |
| | 朱亦丹 | 科長 | 朱亦丹 | 朱亦丹 |
| | 王雅玲 | 科長 | 王雅玲 | 王雅玲 |
| | 蕭展之 | 技士 | 蕭展之 | 蕭展之 |
| | 簡于鈞 | 技士 | 簡于鈞 | 簡于鈞 |
| | 陳冠傑 | 技士 | 陳冠傑 | 陳冠傑 |
| | 呂雅萱 | 技士 | 呂雅萱 | 呂雅萱 |
| | 林士軒 | 技士 | 林士軒 | 林士軒 |
| 國家原子能科技研究院 | 林怡君 | 分組長 | 林怡君 | 林怡君 |
| | 廖英蘭 | 博士 | 廖英蘭 | 廖英蘭 |

許子潔 黃洲
蔡博丞 鄭晨熾
許子潔

圖6.2. 教育訓練簽到表



圖6.3. 許榮鈞教授進行開場以及 114 年度計劃的進度說明



圖6.4. 案例分析 1(生產設施氣體公眾曝露的劑量評估與劑量約束建議)



圖6.5. 案例分析 2 & 3 (醫療院所工作人員輻射曝露之劑量評估相關)



圖6.6. 綜合討論環節

参考文献

- [1] ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4).
- [2] ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3).
- [3] Park, J.C. and Pyo, S.J., Study of External Radiation Expose Dose on Hands of Nuclear Medicine Workers. Journal of the Korean Society of Radiological Technology, 2012. 35(2): p. 141-149.
- [4] Von Boetticher, H., Lachmund, J., Looe, H. K., Hoffmann, W., & Poppe, B. (2008, May). 2007 recommendations of the ICRP change basis for estimation of the effective dose: what is the impact on radiation dose assessment of patient and personnel?. In R Fo-Fortschritte auf dem Gebiet der R ntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren (Vol. 180, No. 05, pp. 391-395).   Georg Thieme Verlag KG Stuttgart· New York.
- [5] Han EY, Lee C, Mcguire L, Bolch WE. A practical guideline for the release of patients treated by I-131 based on Monte Carlo dose calculations for family members. J Radiol Prot. 2014 Jun;34(2):N7-17. Piwowarska-Bilska, H., et al., The practical considerations of dose constraints in diagnostic medical departments using ionizing radiation. Radioprotection, 2014. 49(1): p. 23-25.
- [6] Kocovska MZ, Vaskova O, Majstorov V, Kuzmanovska S, Gjorceva DP, Jokic VS. Effective doses to family members of patients treated with radioiodine-131. 2011 J Phys Conf Ser 317:12–12
- [7] ICRP, 2010. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. ICRP Publication 116, Ann. ICRP 40(2-5).
- [8] ICRP, 1996. Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74. Ann. ICRP 26 (3-4).
- [9] R hm, W., Breckow, J., Dietze, G., Friedl, A., Greinert, R., Jacob, P., ... & Weiss, W. (2020). Dose limits for occupational exposure to ionising radiation and genotoxic carcinogens: a German perspective. Radiation and Environmental Biophysics, 59, 9-27.
- [10] Yonekura, Y., Mattsson, S., Flux, G., Bolch, W. E., Dauer, L. T., Fisher, D. R., ... & Zanzonico, P. (2019). ICRP publication 140: radiological protection in therapy with radiopharmaceuticals. Annals of the ICRP, 48(1), 5-95.
- [11] ICRP, V. J. (2004). Release of patients after therapy with unsealed radionuclides. ICRP Publication, 94.

- [12] J. Punnoose, J. Xu, A. Sisniega, W. Zbijewski, J. H. Siewerdsen, “Technical Note: spektr 3.0—A computational tool for x-ray spectrum modeling and analysis”, *Med. Phys.*, 43(8) p4711-4717, 2016.
- [13] A. M. Hernandez, J. M. Boone, “Tungsten anode spectral model using interpolating cubic splines: Unfiltered x-ray spectra from 20 kV to 640 kV”, *Medical Physics*, 042101, 2014

產出量化值 (KPI)

本計畫的產出量化值 (KPI) 已完成事項如下：

1. 計畫全程完成論文投稿 2 篇：

P.W. Fang, R.J. Sheu, “A Numerical Investigation and Comparison of 26 Types of Concrete for Shielding in Proton Therapy Facilities”, Transactions of the American Nuclear Society, vol. 131 (Proceedings volume 3364), pp. 120-123 (2024).

P.W. Fang, R.J. Sheu*, “Correction Factors for Induced Radioactivity: Comparing Simplified Continuous and Periodic Irradiation Scenarios in Medical Cyclotron Decommissioning”, Radiation Protection Dosimetry, vol. 200, pp. 1398-1403 (2024).

2. 計畫全程培育博碩士生共 3 人：

博 x1：房博文、碩 x2：鄭晨嫻、黃淵

3. 辦理教育訓練或研討會共 1 場