

利用光刺激發光劑量計對操作預警裝備之人員劑量評估



作者簡介

作者徐鵬勛上尉，畢業於國防大學理工學院化材系 100 年班、化訓中心規班 105-1 期，曾任 36 群煙幕營排長、群部排排長，現任化生放核防護研究中心放射安全官。

提要

- 一、國軍現役 M8A1 毒氣警報器及 GID-3 化學警報器兩種預警裝備皆運用放射性物質偵檢化學毒劑，考量放射性物質自發衰變伴隨產生的游離輻射是否對操作人員有影響，故進行劑量評估，以確保操作人員作業安全。
- 二、在預警裝備表面、裝備庫房等處使用光刺激發光劑量計(OSLD)進行劑量評估作業，測量年法定工時 2000 小時的輻射曝露量，同時與部隊操作預警裝備時數進行分析，計算操作預警裝備人員的輻射曝露程度。
- 三、評估後操作預警裝備人員無需進行個別劑量監測及游離輻射作業體檢，但依法仍須接受以訓練取代輻射安全證書之訓練，因此可大幅降低國軍在劑量監測上的經費支出及體檢作業時間，使部隊有更多時間致力於戰備及訓練本務。

關鍵字：劑量評估、光刺激發光劑量計、毒氣警報器、化學警報器

前言

素有「窮人的原子彈」稱號的化學武器，較容易取得及製造，由於考量敵人可能使用化武威脅，國軍先於 1983 年購入美製 M8A1 毒氣警報器，後因需求龐大，於 1986 年起由國家中山科學研究院化學所仿製 M8A1 毒氣警報器配賦於部隊使用¹，用於指揮所、防禦陣地、集結地區等位置的化武預警裝備，新型態之化學戰不再只是侷限於單一化學戰劑種類，國軍參考美軍裝步戰鬥車配賦之預警裝備，自民國 101 年起採購 GID-3 化學警報器配賦於甲車及各連級單位，取代部分老舊 M8A1 毒氣警報器以因應新型態威脅，GID-3 化學警報器除可偵測神經性戰劑外，亦可偵測血液、糜爛、窒息戰劑及多種工業毒性化學物質等，不再只是單一的神經性戰劑偵測功能，可達早期預警之功效，惟上述二種毒氣警報器內含有放射性物質，如 M8A1 毒氣警報器內含有銩-241 (^{241}Am)、GID-3 化學警報器內則含有鎳-63 (^{63}Ni) 放射性物質，然放射性物質可經由自發性核變

1. 莊孝感，〈核生化防護研發回顧〉《化生放核防護半年刊》（桃園），第 106 期，2018 年。

化釋出游離輻射，因此需考量游離輻射對人體是否造成危害。

要防範游離輻射產生的危害，必須先瞭解裝備上放射性物質產生的輻射曝露多寡，才能採取適當的防護措施，當然使用屏蔽材料可以有效的防護，但卻會因為厚重的防護裝備，導致人員行動及裝備操作不方便，遲滯人員反應速度，進而使部隊須具備的迅速、敏捷特性喪失，於是在權衡使用輻射源裝備與輻射產生的危害就需進行劑量評估，包含輻射源強度、屏蔽材料、操作時數等影響對人員曝露因素，以保證在合理狀態下使用，不會曝露過量的輻射。

目前我國人員輻射劑量評定機構使用的方式主要為熱發光劑量計和光刺激發光劑量計二類，其中光刺激發光劑量計具有可重複計讀、不易受環境溫度影響而使訊號逸散、成本低、計讀快速等特性，近年來已逐漸取代熱發光劑量計，現多已運用於放射治療劑量評估、環境輻射評估上，故運用光刺激發光劑量計對操作預警裝備的人員實施劑量評估。

M8A1 毒氣警報器與 GID-3 化學警報器二種裝備因含有放射性物質，該放射性物質出廠時標定活度皆超過我國《輻射源豁免管制標準》，依據《放射性物質與可發生游離輻射設備及其作業管理辦法》第十六條，上述裝備屬第五類密封放射性物質，應向主管機關申請登記備查，而操作此類裝備人員需接受至少 18 小時以上之輻射安全訓練方具資格操作，且輻射工作人員依法須實施個別劑量監測及定期健康檢查，確保人員在輻射作業期間的曝露量對健康產生影響，故藉由實驗設計，評估國軍操作 M8A1 毒氣警報器及 GID-3 化學警報器人員於正規訓練時數期間實際接受輻射曝露，若評估結果與一般人員之曝露程度相當，則能減少輻射工作人員之個別劑量監測及定期之游離輻射作業健康檢查等繁複管制作業。

因作者服務單位持有 microSTAR™ 光刺激發光劑量計(OSLD)系統，此系統與國立清華大學原科中心使用系統相同，期能藉由本次實驗驗證本方法之可行性，後續將系統與原科中心進行能力試驗比對後數據將更具公正性，即為一份正式輻射安全評估報告。

放射性物質分析及劑量限度探討

一、放射性物質分析

M8A1 毒氣警報器中含有 0.25mCi 銻-241，GID-3 化學警報器中含有 10 mCi 鎳-63，其放射性物質種類及活度如表 1 所示，根據《放射性物質與可發生游離輻射設備及其輻射作業管理辦法》第十六條規定：「使用下列放射性物質者，應向主管機關申請登記備查：

110-8 利用光刺激發光劑量計對操作預警裝備之人員劑量評估

- (一)附表一所列第四類及第五類密封放射性物質者。
- (二)放射性物質在儀器或製品內形成一組件，其活度為豁免管制量一千倍以下，在正常使用狀況下，其可接近表面五公分處劑量率為每小時五微西弗以下者。
- (三)前二款以外之放射性物質活度為豁免管制量一百倍以下者。

表 1 預警裝備射源活度與豁免管制標準比較表

裝備種類	射源種類	出廠標定活度	單位轉換 Bq/Ci	豁免管制標準	豁免管制標準倍數	許可標準
M8A1	^{241}Am	0.25 mCi	9.25×10^6 Bq	1×10^4 Bq	925	6×10^{10} Bq
GID-3	^{63}Ni	10 mCi	370×10^6 Bq	1×10^8 Bq	3.7	6×10^{13} Bq

資料來源：作者自行整理

M8A1 所含放射性物質 ^{241}Am 活度為 9.25×10^6 Bq 是該核種豁免管制標準的 925 倍，GID-3 所含放射性物質 ^{63}Ni 活度為 370×10^6 Bq 是該核種豁免管制標準的 3.7 倍，皆已逾法定豁免管制標準但未達許可類之標準，同時亦符合該條法規第二項之在儀器或製品內形成一組件，且活度為豁免管制量一千倍以下，表面五公分處的劑量率也在每小時五微西弗以下，故此二種預警裝備應向主管機關登記備查。

操作輻射裝備的人員依法須經輻射防護訓練，就登記備查類裝備而言，至少須接受 18 小時以上的輻射防護訓練，而許可類裝備更須接受 36 小時以上的訓練，並經測驗取得輻射安全證書方能操作。

鑑此，當前國軍部隊被任命為預警裝備操作人員或裝備管理人員均須接受至少 18 小時以上的「以訓練取代輻射安全證書」之訓練，使操作人員除了符合法規要求之外，同時瞭解輻射的危害及自我防護的措施，期能在安全的狀態下操作裝備，並可在發生意外事件時，保護自己避免遭受輻射曝露的危害。

M8A1 毒氣警報器中的放射性物質 ^{241}Am ，半衰期長達 432.2 年，在衰變過程中僅會產生 α 粒子及 γ 射線（如式 1）， ^4_2He 即為帶正電之 α 粒子， ^{241}Am 除了在毒氣警報器中使用，日常生活中的煙幕偵測器亦使用 ^{241}Am 作為游離電子之輻射源。



GID-3 化學警報器中的放射性物質 ^{63}Ni 在衰變過程中會產生 β 粒子($^0_{-1}e$)，(如式 2)，帶負電電子即為 β 粒子， ^{63}Ni 半衰期為 96 年，常見於氣相層析儀、化學偵檢器及核反應爐產物中。



含有放射性物質裝備除須向主管機關登記備查外，依《放射性物質與可發生游離輻射設備及其輻射作業管理辦法》第五十四條：「設施經營者使用、停用或持有密封放射性物質，應依第三項規定時間，實施密封放射性物質擦拭測試，並留存紀錄備查。」其中第三項規定時間：「毒氣偵檢器中所含之銻-241 或鎳-63 為每三年實施一次」，擦拭測試主要目的為檢測裝備中的密封放射性物質是否釋出 α 、 β 粒子，導致輻射污染可能，方能確保操作人員輻射安全以及避免環境污染之可能。

二、劑量限度探討

參考國外軍事用途操作相關規範，以美國陸軍來說，在針對含有乏鈾及放射性物質管理計畫裡亦提及 M43A1 偵測器總成及 M88 化學偵測器（即 GID-3 化學警報器）因含有放射性物質，屬於規範中的具放射污染裝備（radiologically contaminated equipment, RCE），必須依照聯邦、州政府、外駐國家及陸軍相關輻射防護法律規範、管理章程實施相關管制與操作限制，同時裝備亦須取得美國核能管理委員會（Nuclear Regulatory Commission, NRC）的執照方能操作²，顯與我國主管機關之發行的許可證、登記備查等相同。

參考美國陸軍《輻射安全計畫》中規範到輻射作業對於一般人之年有效劑量（total effective dose equivalent, TEDE）不得超過 1 毫西弗³，美國海軍的《輻射健康保護手冊》亦規範輻射作業對一般人年有效劑量不超過 1 毫西弗⁴，可見各國規範輻射限度僅定義在輻射作業所接受的劑量限度，是因為一般狀況下，人類無法避免環境中的背景輻射的曝露，背景輻射來自於宇宙射線、天然岩石地殼中、天然存在動植物體內等，可能經食入、嚥入或在各種環境中接觸，人類都會受到天然放射性物質、宇宙射線或核子試爆所產生之全球落塵等無可避免

2 U.S. Department of Defense, Management of equipment contaminated with depleted uranium or radioactive commodities, Army Regulation 700-48, (2002)

3 U.S. Department of the Army, The army radiation safety program (2015)

4 U.S. Department of the Navy, Radiation health protection manual, NAVMED P-5055, (2018)

的輻射曝露，且醫療行為中所受到之輻射如照射 X 光、放射治療等，亦不計入年劑量限度計算，否則可能因為達到劑量限度而無法接受治療，也因此有主管機關亦有訂定輻射醫療曝露品質保證標準，確保醫療過程中使用最低的輻射劑量達到最有效的輻射醫療效果。

再參考英國的輻射規章第 20(1) 條規範受雇從事輻射工作人員年有效劑量為 20 毫西弗，第 20(2) 條規範連續 5 年有效劑量限度為 100 毫西弗，單一年最大有效劑量為 50 毫西弗⁵；德國的游離輻射防護條例第 80 條規範一般人年有效劑量限度為 1 毫西弗，第 78 條規範職業曝露 1 年有效劑量限度為 20 毫西弗，職業曝露有效劑量最大為一年 50 毫西弗，後連續 5 年不可超過 100 毫西弗⁶；澳洲的計畫曝露情況下輻射防護規範第 3.1.2 條規範連續 5 年之平均有效劑量限度為 20 毫西弗，公眾年有效劑量限度為 1 毫西弗⁷，顯各國之劑量限度多皆與我國《游離輻射防護安全標準》相同，各國劑量限度對照如表 2 所示。

表 2 各國輻射作業對人員有效劑量限度對照表

國家	一般人年劑量限度	輻射工作人員年劑量限度
我國	1 mSv	單一年最高不超過 50 mSv，連續 5 年不超過 100 mSv
英國	1 mSv	1 年不超過 20 mSv，最高不超過 50 mSv，連續 5 年不超過 100 mSv
德國	1 mSv	1 年不超過 20 mSv，最高不超過 50 mSv，連續 5 年不超過 100 mSv
澳洲	1 mSv	連續 5 年平均 20 mSv

資料來源：作者自行整理

就 1 毫西弗的輻射劑量之大小而言，參考原能會公開資訊一般體檢所照射 1 次的胸腔 X 光接受的劑量為 0.02 毫西弗，搭乘飛機從台北往返美國西岸一趟所接受到的背景輻射的劑量約 0.09 毫西弗，而台灣人 1 年平均接受的背景輻射約 1.6 毫西弗，接受 1 次胸部斷層掃描為 7 毫西弗，根據 2013 年芬蘭政府針對北歐國家空服人員所做的宇宙輻射職業曝露研究，空服人員每年平均接受的輻射劑量約 3.2 毫西弗⁸，由此可知相較於職業曝露而言，輻射作業對於一般人

5 HSE, The ionising radiation regulations 2017, Health and Safety Executive (2017)

6 BfS, Radiation protection ordinance, Bundesamt für Strahlenschutz (2018)

7 ARPANSA, Code for radiation protection in planned exposure situations radiation protection series C-1, Australian Radiation Protection Nuclear Safety Agency publications, (2020)

8 行政院原子能委員會網站，「有關媒體報導『長期曝露於宇宙輻射，易增加致癌風險』之說

之年劑量限度 1 毫西弗實屬非常嚴謹的限制範圍。

輻射劑量監測

一、劑量計應用實例

早期輻射劑量評估作業僅有膠片與熱發光劑量計技術，其中又以熱發光劑量計較佳，故以熱發光劑量計技術為主，近年來因光刺激發光劑量計技術發展已臻成熟，部分輻射劑量評估已採用光刺激發光系統實施，熱發光劑量計中的晶體材質為 LiF，有效原子序為 8.2，其中鋰成分有 7.5%的 ^6Li 及 92.5%的 ^7Li ，與人體軟組織有效原子序 7.64 和空氣的有效原子序 7.51 相近，可以直接當為評估環境劑量及人體組織所受的劑量⁹。

因光刺激發光的晶體材質為 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ ，有效原子序為 11.2，因光刺激發光劑量計的有效原子序較高，其靈敏度亦較高於熱發光劑量計，故光刺激發光系統偵測低限劑量值較低，適合用在短期曝露或低劑量之輻射偵測，光刺激發光劑量計已可取代熱發光劑量計應用於人員、環境及放射診斷等領域之輻射劑量評估¹⁰，現代商業模式下的熱發光及光刺激發光的劑量計之劑量評估結果，誤差皆於 5%之內，皆可做為評估輻射劑量的重要工具¹¹。

光刺激發光劑量計系統具有輕量化與便攜性，在福島核子事故發生前，日本於 2001~2002 年間已有使用光刺激發光劑量計作為日本全國之背景輻射劑量監測，監測結果如圖 1 所示，因背景輻射可能因地殼岩層、海拔等因素影響而有不同的劑量，於日本福島核災期間，曾投入超過 10 套系統作為福島周遭的環境區域劑量監測¹²。

明」，2014 年，<https://www.aec.gov.tw/newsdetail/headline/3182.html>。

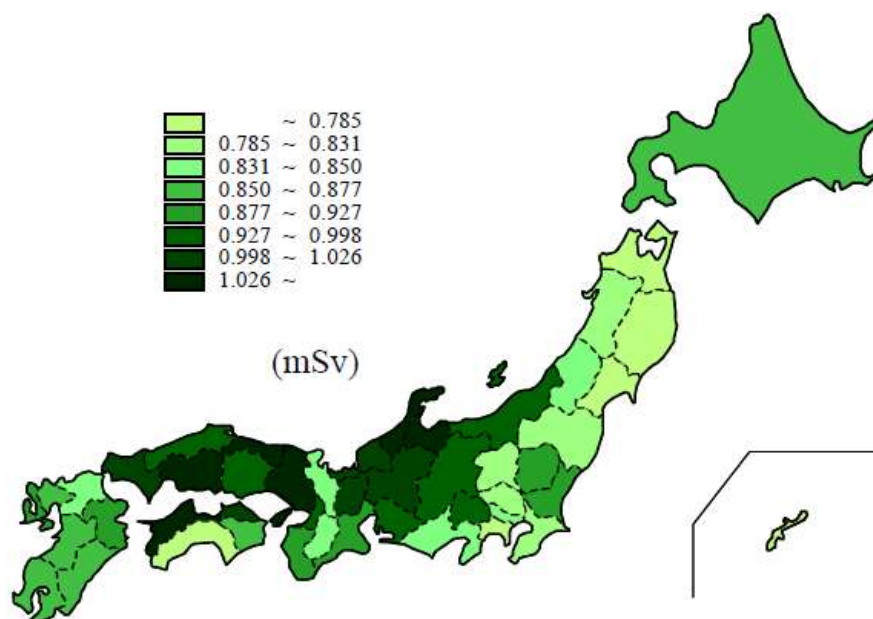
9陳俊勛，柯敏君，李瑞萍，劉文山，陳健懿，醫用迴旋加速器之環境輻射評估，行政院國家科學委員會補助大專學生參與專題研究計畫研究成果報告。

10高紫綾，葉善宏，「光激發光劑量計與氟化鋰熱發光劑量計輻射偵測特性之研究比較」，臺灣應用輻射與同位素雜誌，第 8 卷，第 4 期，頁 411-418。

11鄭偉鏘，許芳裕，游澄清，「利用光刺激發光劑量計及自製計讀儀進行放射治療之劑量評估的可行性評估」，台灣應用輻射與同位素雜誌，第 12 卷，第 2 期，頁 1275-1279。

12 Kobayashi, I., Okazaki, T., Yajima, K., & Yasuda, H, Environmental radiation dosimetry by the small OSL reader, NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 3, pp 79-81.

圖 1 日本地區 2001 年間背景輻射劑量分布圖



資料來源：Environmental radiation dosimetry by the small OSL reader¹³

二、預警裝備劑量監測

M8A1 毒氣警報器與 GID-3 化學警報器二種裝備因含有放射性物質，該放射性物質出廠時標定活度皆超過我國《輻射源豁免管制標準》，依據《放射性物質與可發生游離輻射設備及其作業管理辦法》第十六條，上述裝備屬第五類密封放射性物質，應向主管機關申請登記備查，而操作此類裝備人員需接受至少 18 小時以上之輻射安全訓練方具資格操作，且輻射工作人員依法須實施個別劑量監測及定期健康檢查，確保人員在輻射作業期間的曝露量對健康產生影響，透過以下實驗設計，評估國軍操作預警裝備人員輻射曝露程度，期能減少輻射工作人員之個別劑量監測及定期健康檢查等繁複管制作業。

(一)將劑量計安裝於預警裝備表面，進行長時間監測

以一年法定正常工時每日 8 小時，每週 5 日計 40 小時，每年工作 50 週為計算基準，實施連續 2000 小時之背景輻射及預警裝備的表面輻射劑量監測，計算輻射累積劑量，並換算其平均劑量率。

(二)分析當前部隊運作型態，計算操作時數：

分析官兵如演習、訓練及裝備保養等訓練操課時數，計算部隊正規操課期間操作預警裝備最大的使用時數。

(三)評估操作預警裝備人員每年的輻射曝露：

13 同註 12。

藉以上監測結果評估每年曝露是否達法定劑量限度，若達劑量限度則需執行個別劑量監測並且實施游離輻射作業勞工特殊體格及健康檢查，並執行輻射防護作為以降低輻射曝露，使操作該裝備人員接受到的輻射曝露不超過法定劑量限度，以達到合理抑低¹⁴原則。

為使評估結果最佳化，應以在一般操作狀況下，可能曝露的最高輻射劑量作為劑量計監測的安裝位置，故在安裝劑量計之前，先使用AT1121偵檢器測量出每部毒氣警報器輻射劑量有最高值之位置，因《放射性物質與可發生游離輻射設備及其輻射作業管理辦法》第十六條第二項：放射性物質在儀器或製品內形成一組件，其活度為豁免管制量一千倍以下，在正常使用狀況下，其可接近表面五公分處劑量率為每小時五微西弗以下者須登記備查，所以每個位置除測量表面劑量率外，再測量距表面 5公分處的劑量率。

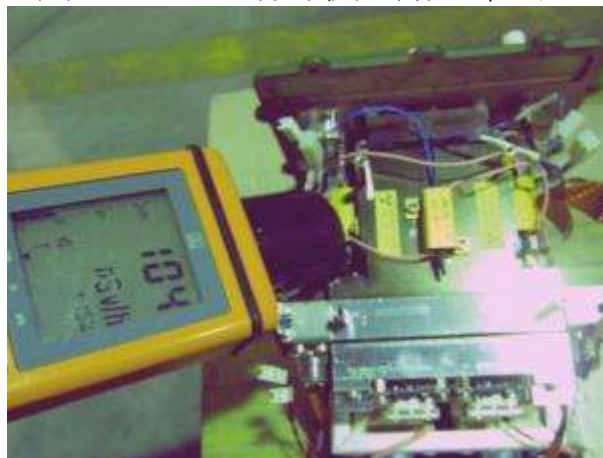
為釐清裝備機殼對放射性物質屏蔽的影響，使用AT1121偵檢器靠近裝備的射源模組進行測量，測量現況如圖 2、圖 3所示，M8A1毒氣警報器的射源模組表面以右側有最高的輻射劑量，正面次之，GID-3化學警報器的射源模組表面劑量率幾與背景值相近；再與有機殼屏蔽的正常狀態，也是一般部隊操作人員使用的狀態模式進行表面劑量率測量，測量現況如圖 4、圖 5所示，測量結果顯示M8A1有些微的差異，GID-3二者劑量率相近，進一步分析，因M8A1機殼為塑鋼材質，研判對於 γ 射線的屏蔽效用不大，主要外部測量結果較低是因為距離因素；而GID-3有機殼與無機殼二種測量結果皆與背景輻射相近，明顯證明 β 粒子已被完全阻隔於射源模組內部。

圖 2 M8A1 射源模組劑量率測量



資料來源：作者自行拍攝。

圖 3 GID-3 射源模組劑量率測量



資料來源：作者自行拍攝。

14合理抑低：指盡一切合理之努力，以維持輻射曝露在實際上遠低於《游離輻射防護安全標準》之劑量限度。

110-8 利用光刺激發光劑量計對操作預警裝備之人員劑量評估

圖 4 M8A1 裝備表面劑量率測量



圖 5 GID-3 裝備表面劑量率測



資料來源：作者自行拍攝。

資料來源：作者自行拍攝量。

運用多部預警裝備進行測量，教學用 M8A1 有 12 具，GID-3 有 16 具，分別賦予編號，以利整合實驗數據，測量結果如表 3、表 4 所示，M8A1 毒氣警報器在射源模組外部的相對位置，即裝備右側有較高劑量率平均為 $0.40 \mu\text{Sv/h}$ ，該處距表面 5 公分處劑量率平均為 $0.21 \mu\text{Sv/h}$ ；GID-3 化學警報器則每一側測量數值相近，以正面較高平均為 $0.13 \mu\text{Sv/h}$ ，面 5 公分處劑量率平均為 $0.12 \mu\text{Sv/h}$ ，其與背景輻射相近。

表 3 M8A1 毒氣警報器表面劑量率位置對照表

位置 代號	左 側		正 面		右 側		後 面	
	0 公分	5 公分	0 公分	5 公分	0 公分	5 公分	0 公分	5 公分
M01	0.12	0.12	0.35	0.23	0.46	0.21	0.13	0.12
M02	0.12	0.12	0.32	0.19	0.42	0.20	0.13	0.12
M03	0.12	0.12	0.35	0.19	0.45	0.20	0.13	0.11
M04	0.12	0.11	0.39	0.23	0.46	0.21	0.14	0.12
M05	0.12	0.12	0.35	0.23	0.42	0.22	0.11	0.11
M06	0.14	0.13	0.38	0.24	0.45	0.29	0.15	0.15
M07	0.13	0.12	0.35	0.20	0.41	0.21	0.14	0.13
M08	0.13	0.12	0.32	0.19	0.42	0.22	0.14	0.12
M09	0.12	0.11	0.37	0.19	0.45	0.25	0.13	0.11
M10	0.13	0.12	0.35	0.19	0.43	0.20	0.13	0.12
M11	0.13	0.12	0.33	0.17	0.37	0.19	0.14	0.13

化生放核防護半年刊

M12	0.11	0.11	0.12	0.11	0.15	0.12	0.12	0.11
平均	0.12	0.12	0.33	0.20	0.40	0.21	0.13	0.12
單位： $\mu\text{Sv/h}$ ，背景輻射： $0.11\ \mu\text{Sv/h}$ ，粗體數值為平均最高值。								

資料來源：作者自行實驗整理。

表 4 GID-3 化學警報器表面劑量率位置對照表

位置 代號	左 側		正 面		右 側		後 面	
	0 公分	5 公分	0 公分	5 公分	0 公分	5 公分	0 公分	5 公分
G01	0.13	0.11	0.12	0.11	0.12	0.11	0.12	0.12
G02	0.13	0.11	0.13	0.13	0.12	0.11	0.13	0.12
G03	0.12	0.11	0.12	0.11	0.12	0.12	0.13	0.11
G04	0.12	0.11	0.12	0.11	0.12	0.12	0.13	0.11
G05	0.12	0.11	0.13	0.12	0.12	0.12	0.12	0.11
G06	0.11	0.11	0.14	0.11	0.12	0.11	0.12	0.11
G07	0.13	0.11	0.12	0.12	0.13	0.11	0.12	0.12
G08	0.12	0.11	0.13	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
G09	0.12	0.11	0.12	0.12	0.13	0.12	0.12	0.12
G10	0.13	0.12	0.12	0.12	0.13	0.11	0.13	0.11
G11	0.13	0.11	0.14	0.11	0.13	0.12	0.13	0.11
G12	0.12	0.12	0.12	0.11	0.12	0.11	0.12	0.12
G13	0.12	0.12	0.12	0.12	0.11	0.11	0.12	0.11
G14	0.12	0.11	0.12	0.12	0.12	0.11	0.12	0.11
G15	0.12	0.11	0.14	0.12	0.13	0.12	0.13	0.12
G16	0.12	0.11	0.12	0.11	0.12	0.11	0.12	0.12
平均	0.12	0.11	0.13	0.12	0.12	0.11	0.12	0.12

資料來源：作者自行實驗整理。

使用 AT1121 測量裝備各面向之表面劑量率後，將劑量計安裝於表面劑量率最高位置，安裝狀況如圖 6、圖 7 所示，安裝後持率曝露 1000 小時、2000 小時之設定時間期滿後取下計讀，每片劑量計使用 microSTAR™ 計讀 3 次後取其平均值，作為本次之數據分析資料。

圖 6 M8A1 劑量計安裝圖



資料來源：作者自行拍攝。

圖 7 GID-3 劑量計安裝圖

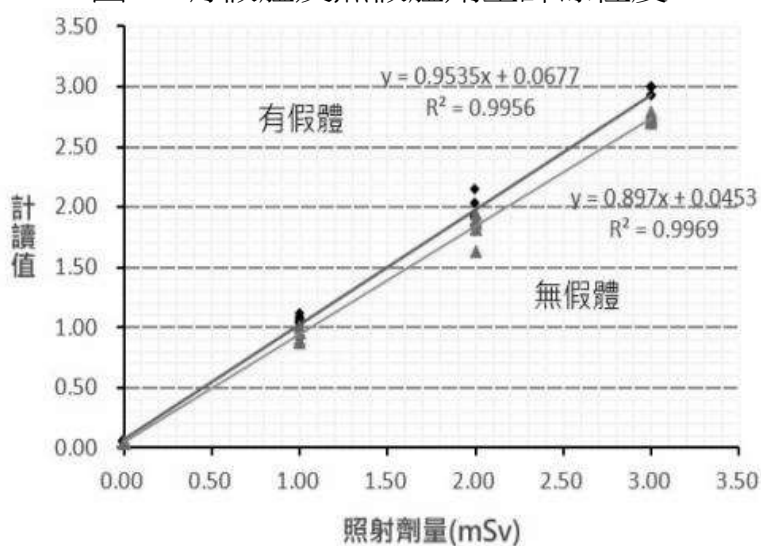


資料來源：作者自行拍攝。

測量結果中M8A1毒氣警報器在射源模組外部的相對位置，即裝備右側有較高劑量率，平均為 $0.40 \mu\text{Sv/h}$ ，該處距表面 5公分處劑量率平均為 $0.21 \mu\text{Sv/h}$ ；GID-3化學警報器則每一側測量數值相近，以正面較高平均為 $0.13 \mu\text{Sv/h}$ ，後面 5公分處劑量率平均為 $0.12 \mu\text{Sv/h}$ ，與背景輻射相近。

另針對系統實施再現性試驗照射，劑量範圍從背景輻射及1 mSv到3 mSv之間共3個劑量點照射，每個劑量點 2枚劑量計，每個劑量計將計讀 3次共 6組數據，再加入背景無照射共 14組數據，以Microsoft Excel軟體計算有假體與無假體的 OSLD計讀值和照射劑量間的特性曲線，二者線性回歸如圖 8所示，兩組實驗的決定係數 (coefficient of determination, R^2) 分別為 0.9956及 0.9969，其顯著性檢定(T Test) p值為 0.00969，具明顯線性關係，無假體的斜率較小，顯示因無回散射的影響，其計讀結果較有假體的結果偏低。

圖 8 有假體及無假體劑量計線性度



資料來源：作者自行繪製。

於實驗對象上分別掛載 2枚光刺激發光劑量計實施監測，在實施連續監測前先完成回火歸零作業，因光刺激發光劑量計特性，回火歸零後仍有部分殘餘劑量，在達該累積時間後，將劑量計從裝備上卸除，每片劑量計予以計讀3次後的平均值，將照射讀值減去回火歸零後的殘餘劑量值即為表內之淨劑量值，將 1000、2000小時統計分析結果整理如表 5所示，選取兩種裝備的4組數據中最大值，換算劑量率後，M8A1平均劑量率最大值為 $0.59\pm0.02 \mu\text{Sv/h}$ ，GID-3平均劑量率最大值為 $0.12\pm0.01 \mu\text{Sv/h}$ 。

表 5 劑量統計分析

裝備 曝露時間	M8A1	GID-3
1000 小時	$0.53\pm0.02 \text{ mSv}$	$0.12\pm0.02 \text{ mSv}$
2000 小時	$1.18\pm0.04 \text{ mSv}$	$0.20\pm0.02 \text{ mSv}$
劑量率最大值	$0.59\pm0.02 \mu\text{Sv/h}$	$0.12\pm0.01 \mu\text{Sv/h}$
備註	1. M8A1 劑量皆減去背景輻射 $0.26\pm0.01 \text{ mSv}$。 2. GID-3 與背景輻射相近，係因無 γ 射線所致，故未減去背景輻射，逕行與操作時數分析。 3. 粗體數據為累積劑量之最大值，將其換算劑量率後與操作時數計算，進行曝露評估。	

資料來源：作者自行實驗整理

三、操作時數分析

根據國軍部隊訓練實施計畫，區分為駐地訓練及基地訓練，駐地訓練中，每月第 1、2、5 週為專業專長訓練，依照單兵建置武器、任務執掌予以相對應專業專長訓練、射擊訓練、多人武器如戰車、野砲等操作的組合訓練及體能戰技訓練如 500 公尺障礙、刺槍術等，每個月的第 4 週為裝備保養週併同主官裝備檢查，目的是將前三週操課之下的各式裝備的機件實施徹底檢查、潤滑及保養等作為，並由單位主官親自檢查，以確保裝備的妥善，含勤前教育、裝備陳列、裝備檢查、妥善率鑑定、動力測試及裝備復原等課程，計算上述各類型課表操課時數，每月操作時數依第一週至第五週分別為 1550、1550、1550、1200、1550 分鐘，戰備任務訓練每週為 2760 分鐘，每季實施 1 次，全年計 4 週，基地測考每週為 1800 分鐘，年度基地測考為期 4 週，全年操作裝備最大時數達 82590

110-8 利用光刺激發光劑量計對操作預警裝備之人員劑量評估

分鐘，換算為 1376.5 小時，統計如表 6 所示。

表 6 操課時數分析對照表

型態	駐地訓練	裝備保養暨連主檢	戰備任務	基地測考
時數(分鐘)	1550	1200	2760	1800
每年(週次)	33	11	4	4
合計(分鐘)	51150	13200	11040	7200
總計	82590 分鐘 (1376.5 小時)			

資料來源：作者參考陸軍部隊訓練計畫整理

四、體外輻射劑量分析

本評估主要探討部隊操作毒氣警報器人員可能受到輻射曝露，旨在驗證預警裝備對官兵產生之有效劑量有無可能超出一般人每年的法定劑量限度 1 mSv，根據劑量計數據分析結果 M8A1 毒氣警報器 2000 小時減去背景輻射後的累積劑量為 1180 μ Sv，換算劑量率為 $0.59 \pm 0.02 \mu$ Sv/h，再與計畫中不計休假日計算之年操課時數 1376.5 小時合併計算，官兵操作毒氣警報器的年累積劑量約為 $812.1 \pm 24.6 \mu$ Sv，若加計再現性試驗中無假體實驗組的計讀結果與照射劑量誤差，則 M8A1 的年累積劑量 $905.3 \pm 27.4 \mu$ Sv。

GID-3 化學警報器 2000 小時累積劑量為 204 μ Sv，換算劑量率為 $0.10 \pm 0.01 \mu$ Sv/h，與 1000 小時換算結果 $0.12 \pm 0.01 \mu$ Sv/h 兩者比較取較大值，再與較長時數即不計休假日計算之年操課時數 1376.5 小時合併計算，官兵操作毒氣警報器的年累積劑量約為 $165.2 \pm 14.3 \mu$ Sv，加上再現性試驗中無假體與照射劑量的誤差，則 GID-3 的年累積劑量為 $184.1 \pm 15.9 \mu$ Sv，經整理對照如表 7 所示，包含誤差皆於法定劑量限度 1000 μ Sv 以內。

表 7 監測劑量與工作時數對照表

裝備	表面劑量率 最大值 μ Sv/h	乘操作時數後 累積劑量 μ Sv	計算無假體誤差後 累積劑量 ^註 μ Sv
M8A1	0.59 ± 0.02	812.1 ± 24.6	905.3 ± 27.4
GID-3	0.12 ± 0.01	165.2 ± 14.3	184.1 ± 15.9

備註	無假體與照射劑量線性回歸方程式 $y = 0.897x + 0.0453$ 。
----	---

資料來源：作者自行整理。

結語

以光刺激發光劑量計(OSLDs)對警報器進行表面劑量監測，經監測及計讀結果 M8A1 毒氣警器 2000 小時連續曝露之累積劑量為 $1.18 \pm 0.04 \text{ mSv}$ ，表面劑量率平均為 $0.59 \pm 0.02 \mu \text{ Sv/h}$ ；GID-3 化學警報器 2000 小時連續曝露之累積劑量為 $0.20 \pm 0.02 \text{ mSv}$ ，表面劑量率平均為 $0.12 \pm 0.01 \mu \text{ Sv/h}$ 。

依部隊訓練實施計畫，分析操作警報器人員於駐地訓練、基地測考、演習等正規訓練等各種可能操作警報器的時數，計算出每年操作警報器時數最高達 1376.5 小時。

利用測得之裝備表面劑量率及操作最大時數即可評估出操作人員年累積劑量，操作 M8A1 毒氣警報器人員之年累積劑量達 $905.3 \mu \text{ Sv}$ ，操作 GID-3 化學警報器人員之年累積劑量達 $184.1 \mu \text{ Sv}$ 。

實驗對象中之 M03 其劑量率達 $1.03 \mu \text{ Sv/h}$ ，評估年累積劑量為 $1417.8 \mu \text{ Sv}$ ，已超過法定輻射作業對一般人的劑量限度 $1000 \mu \text{ Sv}$ ，若以 AT1121 偵檢器直接測量該裝備距表面 5 公分處劑量率最大值為 $0.29 \mu \text{ Sv/h}$ ，計算其年累積劑量僅 $399.2 \mu \text{ Sv}$ 並未逾法定劑量限度，係劑量計安裝於裝備表面，且裝備依法須集中存放管制，會因距離過近使輻射對劑量計互相干擾而影響評估結果。

以部隊現況而論，操作 M8A1 毒氣警報器或 GID-3 化學警報器人員，僅在領取裝備、架設裝備、撤收作業及保養裝備期間會近距離接觸裝備，據此現況結合實驗結果評估後顯已無額外的輻射曝露，鑒此，操作人員無須實施個別劑量監測及游離輻射特殊作業體檢，惟仍須秉持輻射合理抑低原則，在合理範圍內盡可能地減少輻射曝露的時間與強度，不啻是最好的輻射防護。

參考文獻

一、官方文件

- (一) Australian Radiation Protection Nuclear Safety Agency, 〈Code for radiation protection in planned exposure situations radiation protection series C-1〉, 2020年。
- (二) Bundesamt für Strahlenschutz, 〈Radiation protection ordinance〉, 2018年。

- (三)UK Health and Safety Executive, 〈The ionising radiation regulations 2017〉, 2017年。
- (四)U.S. Department of the Army, 《The army radiation safety program》, 2015年。
- (五)U.S. Department of Defense, 〈Management of equipment contaminated with depleted uranium or radioactive commodities〉 《Army Regulation 700-48》, 2002年。
- (六)U.S. Department of the Navy, 〈Radiation health protection manual〉, 《NAVMED P-5055》, 2018年。
- (七)陳俊勛, 柯敏君, 李瑞萍, 劉文山, 陳健懿, 〈醫用迴旋加速器之環境輻射評估〉, 《行政院國家科學委員會補助大專學生參與專題研究計畫研究成果報告》, 2010年。

二、書籍

- (一)國防部陸軍司令部, 《陸軍GID-3化學警報器操作手冊》, 2014年。
- (二)行政院原子能委員會, 《游離輻射防護法規彙編》, 2017年。
- (三)陸軍化學兵學校, 《M8A1化學戰劑自動警報器二級保養維修手冊》, 1999年。

三、期刊

- (一)莊孝感, 〈核生化防護研發回顧〉《化生放核防護半年刊》, 第106期, 2018年。
- (二)黃韶鈞, 〈OWL化學警報器簡介〉《化生放核防護半年刊》, 第103期, 2017年。
- (三)劉衛蒼, 〈M8A1毒氣警報器人員劑量評估與輻射安全作法〉《化核生化防護半年刊》, 第79期, 2013年。

四、網路

- (一)行政院原子能委員會網站, 〈有關媒體報導『長期曝露於宇宙輻射, 易增加致癌風險』之說明〉 <https://www.aec.gov.tw/newsdetail/headline/3182.html>, 檢索日期, 2020年4月10日。