

放射性元素鈾 210 之危害及檢測與分析方法

作者簡介

作者劉衛蒼少校，中正理工學院正 56 期、化校正規班 96-1 期、國立中央大學統計研究所畢業，具原能會輻射防護師證照，歷任排長、副連長、毒化組組長、工儀組組長，現職為陸軍化學兵學校核生化防護研究中心輻射檢測組組長。

提要

- 一、西元 2006 年 11 月，俄羅斯間諜因攝入鈾 210 而死亡，引發各界對鈾 210 的興趣。本文詳細介紹鈾 210 的特性與防護方法，提供國軍與相關人員參考。
- 二、鈾-210 屬於極毒性核種，人體的傷害主要是藉由吸入或攝入所造成，也可能經由傷口侵入，造成體內曝露，長期滯留於骨、肺、腎和肝中，微小劑量就足以致命，引發有機體一系列嚴重的生物效應，被人體吸收後非常難發現，尤其傳播快速，幾小時內體內重要器官就被感染。
- 三、由鈾 210 毒殺俄羅斯間諜案件來看，在未來恐怖份子可能使用此放射性物質布毒，將造成人心惶恐，嚴重影響社會秩序，配合國家反恐應變機制，國軍化學兵部隊擔任「核生化防衛、反恐、救災」任務，在原有的技術能力下增建更專業輻射能譜分析檢測技術，目前本軍僅建立污染計數方法及加馬能譜分析技術，對於其它類核種分析能力須再精進，建立環境放射性核種分析檢測實驗室，可大幅提昇本軍化學兵專業檢測技術。

壹、前言

自從十九世紀中葉，德國科學家倫琴(Wilhelm Conrad Roentgen, 1845-1923)發現游離輻射的存在後，開啟了放射性元素的研究發展。1896 年法國科學家貝克勒爾(Antonie Henri Becquerel, 1852-1908)發現天然的鈾化合物會產生游離輻射。兩年後，1898 年居里夫人在分離瀝青鈾礦渣的過程中，發現一種新元素，為紀念她的祖國波蘭，將該元素命名為鈾(Polonium)。在 2006 年 11 月發生俄羅斯聯邦安全局前特務李維寧科(Alexander Litvinenko)之鈾中毒事件，因此聲名大噪一時。

鈾 210 屬極毒類放射性核種，放射核種毒性分類，如表 1 所示，大致以核種衰變型式及半衰期長短來劃分毒性。而鈾 210 衰變時釋放出 (α) 阿伐粒子及半衰期大於 30 天，為極毒類放射性元素，放射性毒性所產生之危害遠大於化學毒性所產生之危害，僅須微小劑量就足以致命，尤其傳播快速，幾小時內體內重要器官就會被感染。

美國在 2000 年 5 月已於西雅圖舉行反恐輻射彈演習，演練時間長達 5 天，如圖 1 所示，反觀我國為確保國土安全及「反恐」的考量下，恐怖份子可能散布此類放射性元素或製成輻射彈攻擊，來破壞社會秩序，若因此造成人員體內曝露，則將危害人體健康，甚至是危及生命，而輻射防護是化學兵部隊所執行

的任務之一，官兵應了解鈾 210 對人體所產生之嚴重危害性，並知悉其傳播方式，以達到有效防護。本文將簡介鈾的基本特性、偵檢儀器及相關防護方法。

放射毒性	放射核種
第一類 (極毒)	α 放射核種； $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$
第二類 (高毒)	半衰期 30 天以上的放射核種(但不含 α 核種 ^3H 、 ^7Be 、 ^{14}C 、 ^{35}S 、 ^{55}Fe 、 ^{59}Fe 、 ^{90}Sr)
第三類 (中毒)	半衰期 30 天以內的放射核種(但不含 α 核種 ^{18}F 、 ^{51}Cr 、 ^{71}Ge 、 ^{291}Tl)
第四類 (低毒)	^3H 、 ^7Be 、 ^{14}C 、 ^{18}F 、 ^{51}Cr 、 ^{71}Ge 、 ^{291}Tl ，天然 U 及 Th

表 1 放射核種毒性分類(註¹)

資料來源：IAEA Safety, No 1, Handling of Radionuclides, 1973



圖 1 輻射彈事件處置演習(註2, 3)

貳、鈾 210 的簡介

鈾 210 在自然界存量非常稀微，天然的鈾 210 是來自於泥土中所含極微量的放射性元素釷或鐳(^{226}Ra)，其中釷 238 衰變後會產生鈾 210，如圖 2 所示。其他自然界鈾 210 來自於火山爆發、燃燒、化石燃料燃燒、海鹽移動。人造鈾乃利用氧化釷作靶材料，在核子反應器內用中子照射可產生鈾 210。目前全世界鈾的產量很少，估計每年只約生產 100 公克而已，非常稀有。由於天然界鈾 210 含量稀少，加上需要特殊核種配合專業的研究設備才能合成出鈾 210，因此，一般人不容易接觸到較大量(大於數毫克)的鈾 210。台灣至今未曾生產鈾 210。

註1 IAEA Safety, No 1, Handling of Radionuclides, 1973

註2 http://www.millennium-ark.net/NEWS/06_Terror/06_Terror_Pics/060129.dirty_bomb.jpg

註3 <http://www.npr.org/templates/story/story.php?storyId=3623230>

鈾 210 是固體，可以溶解於水（如表 2），釋放出極少量光子，主要是釋放出阿伐粒子。目前鈾已知的同位素放射物質共有 25 種，其質量數介於 192 至 218，而其中，質量數 208、209 與 210 之鈾原子其半衰期均大於一天。鈾 210 半化期為 138.376 ± 0.002 天，其應用於工業用途主要在於消除靜電與產生中子。鈾 210 的基本物性資料如表 3 所示。

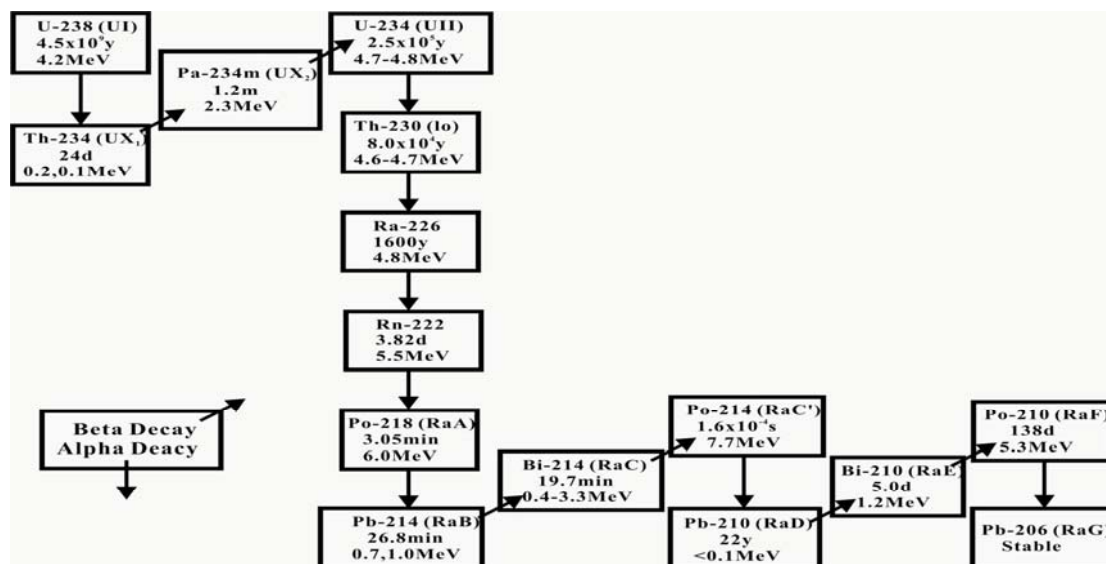


圖 2 U-238 放射性核種衰變（註4）

資料來源：<http://www.lnf.infn.it/lnfadmin/radiation/radioattivitatanaturale.html>

種類	分率	能量(MeV)
阿伐粒子	0.000011	4.524000
阿伐粒子	0.999990	5.304500
光子	0.000011	0.803100

表 2 鈾 210 衰變所產生之輻射種類

中文名稱	鈾	英文名	Polonium
縮寫	Po	質量數	210
原子序	84	原子量	209 g mol^{-1}
族系	6A	外觀	揮發性之銀色固體
熔點	254°C	電子組態	$[\text{Xe}]4f^{14}5d^{10}6s^26p^4$

註4 <http://www.lnf.infn.it/lnfadmin/radiation/radioattivitatanaturale.html>

沸點	962 °C	密度	9.32 g cm ⁻³
蒸發熱	102.9 kJ mol ⁻¹	燃燒熱	約 13 kJ mol ⁻¹
比活度	166 TBq/g	比加馬常數	1.424×E-09 (mSv/h)/MBq
放射半衰期	138.380 天	豁免管制量	10000 貝克

表 3 鈾 210 的基本資料 (註5, 6, 7)

日常生活中，在動物內臟方面，鈾 210 會經由牧草進入動物而集積於內臟，尤其是腎。國人有嗜食動物內臟習慣，依原子能委員會輻射偵測中心化驗牛、羊、豬、雞、鴨內臟，其平均鈾 210 活度約為 0.7 貝克/公斤。假設每天吃 20 克動物內臟，則每年約會造成 0.0024 毫西弗的輻射劑量。根據 Eisenbud 等人的報告 (註8)，居住於北極圈或寒帶的人民常食用馴鹿肉，然而這些馴鹿攝取的食物中包含地衣，地衣中存在鈾 210。因此，食入馴鹿肉將會使人體接觸到更多的鈾 210。此外，在抽煙方面，香菸中存有微量的天然鈾 210，主要是來自土壤及菸葉作物使用的磷肥。原子能委員會輻射偵測中心(註9)曾進行國產及進口香菸中的鈾 210 含量調查，經分析每吸食一支菸約攝入 0.0022 貝克的鈾 210。Eisenbud 指出，抽煙者其肺組織與骨頭內之鈾 210 含量與鉛 210 較高，Skwarzec(註10)等人指出，在許多國家，抽煙是鈾 210 與鉛 210 進入人體的主要途徑。

參、鈾 210 之毒性與產生之人體效應

在西元 2006 年發生以鈾 210 毒殺俄羅斯間諜案件，此事件是目前唯一鈾 210 中毒案例。由於殺人手法高明，至今仍無法確定殺手是誰，其如何取得鈾 210，以及為什麼要用鈾 210 殺人。事件發生過程如下：2006 年 11 月俄羅斯間諜李維寧科在英國因為接觸大量放射性物質鈾 210，即使在英國醫療團隊全力搶救下，最後仍無可救藥，不敵致命放射性物質鈾 210 的毒殺，於當月 23 日死於英國倫敦，中毒前後身體狀況如圖 3 所示。李維寧科生前曾在倫敦知名日本壽司店用餐，警方懷疑很有可能就是殺手在食物上噴灑放射性元素鈾 210 的地點。消息一出，李維寧科發病前待過的旅館與生前住所全被封鎖。英國當局調查可能的放射性污染範圍不斷擴大，英國警方發現至少有 5 架民航機，遭到放射性元素

註5 <http://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E9%92%8B&variant=zh-tw>

註6 行政院原子能委員會，《游離輻射防護法規彙編》，中華民國 95 年 12 月。

註7 財團法人中華民國輻射防護協會，《輻射防護技術手冊》，中華民國 84 年 1 月。

註8 Eisenbud, M., 1973. Environmental Radioactivity. Academic Press, New York.

註9 行政院原子能委員會輻射偵測中心，《臺灣地區核能設施環境輻射監測季報》，2007 年 11 月。

註10 Skwarzec, B., Ulatowski, J., Struminska, D.I., Borylo, A., 2001. J. Environ. Radioactiv. 57, 221-230.

鈾 210 的污染，另外還有大約 12 個地點也出現輻射蹤跡。鈾 210 是地球存量極少的物質，一般人於日常生活中不可能接觸到，取得難度極高。此次的謀殺案件，倫敦大學化學系講師塞勒博士(Dr. Andrea Sella)表示這是一樁職業殺手殺人事件(註11)。在 1991 年至 2002 年期間，約有 40 公斤可用於武器的鈾，從前蘇聯的核設施中被盜走，另外亦有數宗未獲證實的鈾 210 盜竊案，令人懷疑毒殺李維寧科的鈾 210 劇毒可能是從黑市購得的賊贓。數據顯示，全球在過去 4 年約有 300 宗走私放射性物料的案件，其中大部分來自俄羅斯。



圖 3 俄羅斯間諜李維寧科(左圖)正常情況；(右圖)鈾中毒後¹²

資料來源：新華社網站，2006 年 11 月 27 日照片

鈾 210 產生的游離輻射幾乎為阿伐粒子。阿伐粒子穿透力很差，無法穿透紙張，連人體皮膚都穿不過去，若經由吞、飲、注射等方式進入人體，造成體內曝露，因為阿伐粒子能量極強大，能量達 5.3 百萬電子伏特，再者鈾-210 半化期只有 138.4 天，所以單位時間內釋放出阿伐粒子的量當然就很大，這是鈾 210 毒性強的原因。會造成與其接觸的細胞產生極大的病變，這也就是鈾對人體傷害性嚴重的原因。鈾 210 進入人體後，多累積於脾臟、淋巴結、骨髓組織、肝、腎臟內，極易傷害組織細胞。每克鈾 210 可產生 166 TBq，亦即每秒產生 1.66×10^{14} 次衰變，若是攝入 50 奈克(ng, 10⁻⁹g)或吸入 10 奈克(ng, 10⁻⁹g)即可達到半致死劑量，也就是中毒者在 30 天內死亡的機率為 50%，換句話說，每克的鈾 210 可能造成一億人致死，五千萬人以上死亡。鈾 210 在人體中之生物半化期介於 30 天至 50 天，因此實際上每克的鈾並不會造成這麼多人傷亡。其原因是鈾在自然界中其會持續產生放射線並衰變，降低其被人體吸入後所產生的輻射劑量。

註11 <http://blog.yam.com/pegasi/article>. 新浪新聞網，2006 年 11 月 20 日至 11 月 27 日。

註12 新華社網站，2006 年 11 月 27 日。

由質量來看，鈾 210 的毒性比劇毒氫氰酸毒性高達五百萬倍以上。(由生物半致死計量 LD₅₀ 來估算，鈾 210 只需 50 奈克而氫氰酸則需要 250 毫克，毒性比較如圖 4 所示)。一克的鈾於室溫空氣中將會升溫自 500°C，即使只是處理數毫克的鈾 210 仍相當危險，必須在特殊設備下才能進行。雖然鈾 210 所釋放的阿伐粒子穿透力極弱，若皮膚接觸到鈾 210 也並不會對人體造成傷害，但若不慎吸入或食入，則會對人體造成嚴重危害，因此，處理鈾 210 須相當小心謹慎。

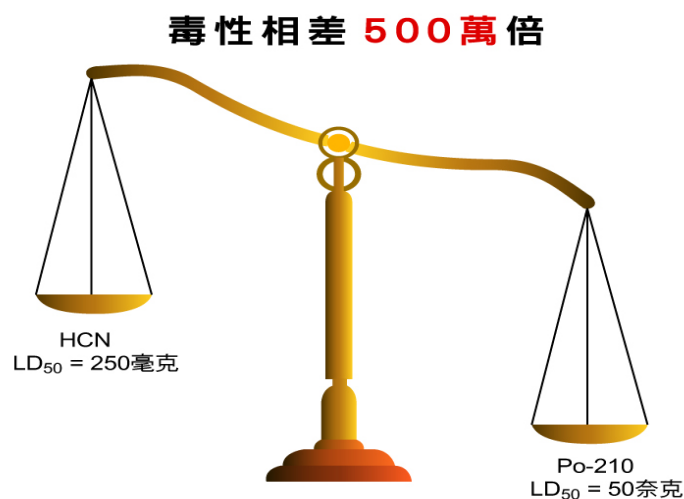


圖 4 Po-210 與 HCN 毒性比較圖

評估輻射物質對人體的傷害程度可用等價劑量 (HT)來描述。針對不同種類的輻射訂出射質因素，如表 4 所示。等價劑量(HT)(單位為西弗，Sv)的值等於人體組織或器官的吸收劑量(D)(單位為戈雷，Gy)與輻射加權因素(WR)之乘積。表 4 為不同種類物質的輻射加權因數，由表中可知，如果人體器官接觸到阿伐粒子，每接受 1 戈雷劑量，則會產生 20 西弗的等價劑量(HT)，亦即損害程度相當大。

輻射種類與能量區間	輻射加權因數 W_R
所有能量之光子	1
所有能量之電子及 μ 介子	1
中子(4)能量<10 千電子伏(keV)	5
10 千電子伏(keV)—100 千電子伏(keV)	10
>100 千電子伏(keV)—2 百萬電子伏(MeV)	20
>2 百萬電子伏(MeV)—20 百萬電子伏(MeV)	10
>20 百萬電子伏(MeV)	5
質子(回跳質子除外)能量>2 百萬電子伏(MeV)	5

α 粒子，分裂碎片，重核

20

表 4 輻射加權因數

資料來源：游離輻射安全標準

參、鈾 210 之輻射偵測

現有偵測輻射之儀器種類有相當多，依照偵測原理可分為游離式、激發式偵檢器、化學劑量計、熱卡計與核反應偵測器。對於不同核種與放射線之輻射物質，常用污染偵測儀如下：

- 蓋格管偵檢器(GM； β 、 γ 、 χ)如圖 5 所示。
- 氣流比例式偵檢器(低背景 α 、 β 計數儀)如圖 6 所示。
- 密封型比例式偵檢器(α 、 β 污染偵測)如圖 7 所示
- 閃爍偵檢器(ZnS α 偵測、塑膠閃爍體 β/γ 偵測) 如圖 8 所示



圖 5 蓋格管偵檢器

圖片來源：作者拍攝

圖 6 低背景 α/β 計測系統

圖片來源：儀器產品型錄



圖 7 比例式偵檢器

圖片來源：儀器產品型錄

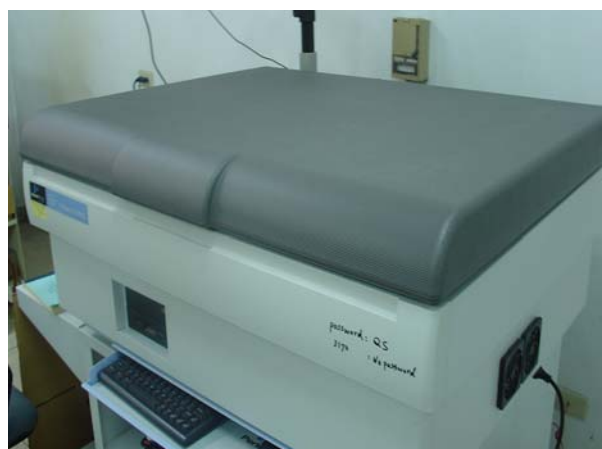


圖 8 閃爍偵檢器

圖片來源：作者拍攝

一、阿伐粒子光譜計測系統

阿伐粒子光譜是最常用來測定鈾 210 的方式。典型阿伐粒子光譜計測系統包含偵測器(detector)、前段擴大器(preamplifier)、高解析度線性擴大器(high-resolution linear amplifier)、多頻道分析與資料收集器(multi-channel analyzer and data acquisition unit)，如圖 9 所示。一般對於環境樣品偵測鈾 210 含量需要高解析度，故偵測器與放射線來源置於真空腔中可以調節壓力並遮擋可見光。典型的阿伐粒子光譜系統，若偵測範圍為 450 平方毫米，解析度介於 25-30 仟電子伏特(註¹³)。圖 10 為典型阿伐粒子光譜圖。波峰的解析度取決於許多因素，例如偵測器性能、兩個波峰能量的差異、放射線來源與偵測器距離、偵測視窗大小、腔體氣壓、放射線來源厚度。其分析檢測方法如下：

- (一)阿伐能譜分析前處理，電鍍為阿伐能譜分析射源準備的常用方法，此技術簡單並可得到非常薄的沉積物，對波峰的高解析度相當重要。利用短射程和高能量的特性為阿伐粒子的優點，藉著阿伐粒子所游離的氣體能夠集中作用在一個小體積內，而不像 β 與 γ 射線，有較長的射程及低能量。
- (二)能譜校正利用標準射源實施能量、波形及效率校正。
- (三)將欲分析且包裝好的試樣，置於偵檢器頂端的固定位置。其放置位置應與所使用之校正射源所放置位置相同。
- (四)計測作業執行前，應先設定包括計測時間等計測條件參數。
- (五)當 MCA 顯示計測完畢，即將量得能譜資料傳至個人電腦內，由能譜分析軟體分析核種及其活度。
- (六)依據所存檔案分析核種並產出報告。

目前國軍尚無阿伐能譜計測系統，可於未來添購此項裝備，以提昇本軍輻射偵測技術。

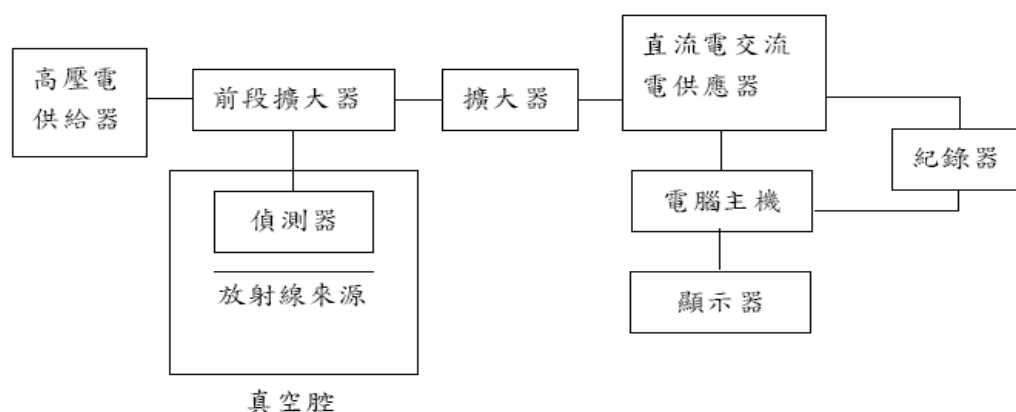


圖 9 典型的阿伐粒子光譜系統（圖片來源：作者自繪）

註13 Sill, C.W., Olson, D.G., 1970. Sources and prevention of recoil contamination of solid-state alpha detectors. Anal. Chem. 42, 1596-1607.

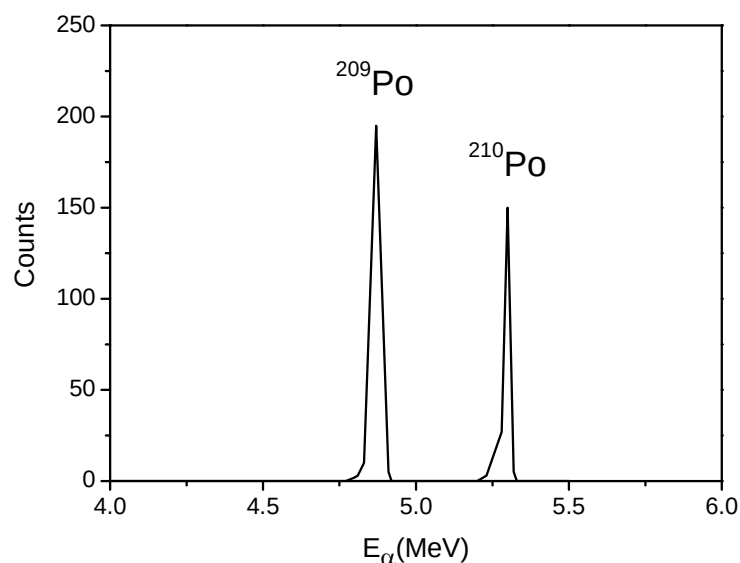


圖 10 典型的阿伐粒子光譜圖

資料來源：如註¹⁴。

二、粒子放射性污染計數儀器

(一)本軍化學兵專業部隊之偵測儀器

本軍化學兵透過歷年參加核安演習之實兵演練機會，添購放射性污染計數器，可針對穿透力較弱之放射性粒子實施偵測，彌補一般蓋革偵測器量測加馬劑量率之缺點，目前已取得較靈敏的 CoMo170 輻射偵測儀器，如圖 11 所示，此儀器採用微處理控制器技術，量測原理為隨着放射性核種的衰變而放出的輻射，例如使用偵檢器測量光子時，將量測結果轉換為電子式的訊號，如圖 12 所示。這些訊號透過整合於探測頭中的放大器放大後，轉換為可顯示的單位，作為計算、處理和顯示之用。所有測量資料均可顯示於 LCD 螢幕上純文字的顯示，可幫助沒經驗的使用者進行污染監測。使用閃爍偵檢器系統，只須在同一個偵檢器上即可測量阿伐、貝他放射性污染及加馬輻射劑量等，不用更換偵檢器。可同步選擇阿伐及貝他/加馬污染測量及輻射劑量，測量系統可自動檢知現場的阿伐粒子，並顯示阿伐讀值示警訊號。此款偵測器非充氣式、比例式偵檢器或氣流偵檢器，不須供應氣體，使用上更為方便。

註14 Matthews, K.M., Kim, C.-K., 2007. Martin, P. Determination of ²¹⁰Po in environmental materials: A review of analytical methodology. Appl. Rad. Isot. 65, 267-279.



圖 11 表面輻射污染偵測儀(型號 CoMo170)

圖片來源：儀器產品型錄

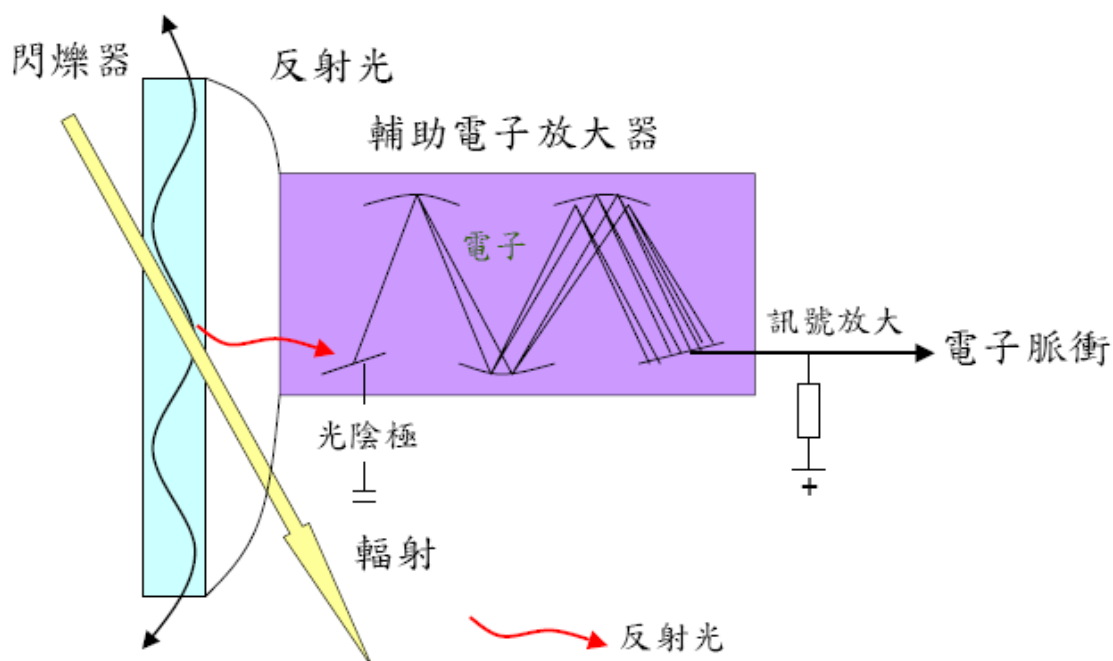


圖 12 操作原理示意圖

圖片來源：儀器操作手冊

(二)本軍輻射防護偵測業務認證之單位

陸軍化學兵學校核生化防護研究中心長期致力於研究核生化防護技術，針對輻射防護偵測目前已通過原能會認證(輻防偵字第 00029 號)，具有放射性物質相關輻射偵測技術，對於阿伐粒子之量測，有兩種可攜式輻射污染計數器，如圖 13 與圖 14 所示，惟僅可量測阿伐及貝他粒子污染讀值，無法鑑別核種，建議可建立阿伐能譜偵測技術，有助於提昇化學兵專業輻射檢測技術。



左圖 13 輻射污染計數器(型號 SC105) (圖片來源：作者拍攝)



右圖 14 輻射污染計數器(型號 Thermo HandECount) (圖片來源：產品型錄)

肆、鈾 210 之防護原則

由於鈾 210 對人體的傷害主要是藉由吸入或攝入所造成，為了防護此種產生阿伐粒子之核種所產生的危害，可採用體內曝露的輻射防護方式。此方式與體外曝露的輻射防護方式不同，體外輻射曝露是由於體外照射輻射所產生，並無直接與輻射源接觸，因此當人體遠離輻射源後，即停止曝露。體外輻射曝露劑量較容易估算，然而體內輻射曝露所產生的危害則較難推估。其原因是來自於即使受污染者離開被污染處，也繼續受到照射而體內污染的排除隨核種而異，預估體內曝露的危害就相對困難。(註15)

放射性物質侵入體內的途徑除了藉由吸入或攝入外，也可能經由傷口侵入，少部分放射性物質也可能從皮膚的毛孔侵入。若是放射性物質用於暗殺，因為此種類物質致死濃度極低，不易於外觀察覺，加上所產生的輻射能量幾乎為阿伐粒子，能量極大但擴散範圍極小，因此不易偵測，著實防不勝防。以下就部隊應變措施及實驗室操作提出相關防護措施：

一、部隊應變方法：

- (一)限制不相關人員進入污染現場，劃定管制區，避免增加人員輻射污染。
- (二)選派國軍化學兵專業部隊偵檢人員，穿著適當口罩、手套、防護衣、個人劑量警報器、攜帶輻射偵測器、污染計數器及空浮採樣器，進行劑量率量測及污染計數作業。
- (三)若污染區輻射劑量過高時，應儘快完成採樣並離開現場，以免接受過多輻射劑量。
- (四)可能經由口沫傳染，因此必須將遭污染之人員進行隔離治療，避免其他人員遭受感染。

二、實驗室防護原則：

註15 財團法人中華民國輻射防護協會編，《實用游離輻射防護 A》，新竹，2003。

在實驗室方面，防護原則可針對環境、人員與輻射源管制(註16)等三個方面著手：

(一)環境方面：

- 1、使用抽氣設備，安裝過濾層。
- 2、使用單獨廢水槽，管制廢水排放濃度。
- 3、操作檯與地板使用不易滲漏及易除污材料。
- 4、儲存放射性物質的地方應有適當的屏蔽與抽氣設備。
- 5、放射性廢料桶應採用腳踏式。
- 6、於實驗室入口與盛裝放射性物質的容器張貼輻射示警標示。
- 7、裝置輻射偵檢器，定期監測工作場所的劑量率並確實紀錄。

(二)人員方面：

- 1、工作人員應確實穿戴防護衣具，如防護衣、手套、面具與人員劑量計等。
- 2、嚴禁於實驗室飲食、抽煙。
- 3、有外傷的工作人員應儘量避免操作非密封輻射源，如須操作，應將傷口作良好包紮。

(三)輻射源管制

- 1、輻射源流出、流入與存放皆須確實紀錄，所有更動，包含輸入、輸出、轉讓、廢棄、生產、停用及恢復使用，均須經過相關單位核可。
- 2、輻射源的接收、儲存、使用、轉讓、運送與廢棄等皆須有詳細的紀錄，由專人負責以防止失竊及不當使用。

伍、結語

鈾 210 屬於極毒性核種，人體的傷害主要是藉由吸入或攝入所造成，也可能經由傷口侵入，造成體內曝露，能長期滯留於骨、肺、腎和肝中，微小劑量就足以引發有機體一系列嚴重的生物效應，甚至致命，被人體吸收後非常難發現，尤其傳播快速，幾小時內體內重要器官就被感染。

鈾 210 中毒無藥可救，與化學毒劑中毒不同，若是氰中毒，還可以施以藥物救治，改變氰化物分子結構來減輕或去掉毒性。而鈾 210 中毒是因輻射傷害而非毒物作用，所以即使吃下會和鈾 210 結合的物質，把鈾 210 從元素變成化合物，放射性依然存在。

由國際間發生鈾 210 毒殺俄羅斯間諜案件來看，在未來恐怖份子可能使用此放射性物質布毒，將造成人心惶恐，嚴重影響社會秩序，配合國家反恐應變

註16 財團法人中華民國輻射防護協會編印，《游離輻射防護彙萃》，新竹，2007。

機制國軍化學兵部隊擔任「核生化防衛、反恐、救災」任務，在原有的技術能量下，增建更專業輻射能譜分析檢測技術，目前本軍核生化防護研究中心僅建立污染計數及加馬能譜分析技術，對於其它類核種分析能力須再精進。建立環境放射性核種分析檢測實驗室，並通過國內相關實驗室認證規範，建立專業輻射檢測實驗室，將可大幅提昇本軍化學兵專業輻射檢測技術分析。

陸、參考資料

- 一、朱鐵吉博士譯，《原子、輻射、與輻射防護》，民全書局，第2版。
- 二、陸軍總司令部譯印，《美陸軍部小冊--放射線手冊》，1961年8月。
- 三、財團法人中華民國輻射防護協會編印，《游離輻射防護彙萃》，新竹，2007。
- 四、財團法人中華民國輻射防護協會編印，《實用游離輻射防護A》，新竹，2003。
- 五、行政院原子能委員會輻射偵測中心編印，《臺灣地區核能設施環境輻射監測季報》，2007年11月。
- 六、劉衛蒼，「M8A1毒氣警報器人員劑量評估與輻射安全作法」，《核生化防護半年刊》，第79期，2005。
- 七、IAEA Safety, No 1, Handling of Radionuclides, 1973.
- 八、Miura, T., Kawabe, K., Kirita, H., 2000. Determination of ^{210}Po in reagent samples by alpha-ray spectrometry using extraction chromatographic resin. J. Radioanal. Nucl. Chem. 246, 327-330.
- 九、Chen, Q., Hou, X., Dahlgaard, H., Nielsen, S.P., Aarkrog, A., 2001. A rapid method for the separation of ^{210}Po from ^{210}Pb by TIOA extraction. J. Radioanal. Nucl. Chem. 249, 587-593.
- 十、Smith, J.D., Hamilton, T.F., 1984. Improved technique for recovery and measurement of polonium-210 from environmental materials. Anal. Chim. Acta 160, 69-77.
- 十一、Ordonez-Regil, E., Iturbe, J.L., 1993. Isolation and electroplating of ^{210}Po . J. Radioanal. Nucl. Chem. 175, 47-53.
- 十二、Bagnall, K.W., 1957. Chemistry of the Rare Radioelements: Polonium-Actinium. Butterworths Scientific Publications, London, p177.
- 十三、Eisenbud, M., 1973. Environmental Radioactivity. Academic Press, New York.
- 十四、Skwarzec, B., Ulatowski, J., Struminska, D.I., Borylo, A., 2001. J. Environ. Radioactiv. 57, 221-230.
- 十五、Sill, C.W., Olson, D.G., 1970. Sources and prevention of recoil contamination of solid-state alpha detectors. Anal. Chem. 42, 1596-1607.
- 十六、Matthews, K.M., Kim, C.-K., 2007. Martin, P. Determination of ^{210}Po in environmental materials: A review of analytical methodology. Appl. Rad. Isot. 65, 267-279.