

行政院原子能委員會放射性物料管理局  
委託研究計畫研究報告

建立低放射性廢棄物常用核種  
活度標準

計畫編號：101FCMA006

報告編號：101FCMA006-04

執行單位：核能研究所

計畫主持人：周鼎

子項工作負責人：武及蘭

報告作者：葉俊賢、袁明程

報告日期：中華民國 101 年 12 月



# Establishing Radioactivity Standards for Frequently Used Sources of Low-Level Radioactive Waste

Chin-Hsien Yeh , Ming-Chen Yuan

## ABSTRACT

To establish the radioactivity standards of frequently used sources for low-level radioactive waste, the National Radiation Standard Laboratory (NRSL) made 16 rod-type volume sources using the single radionuclides of  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{54}\text{Mn}$  and  $^{60}\text{Co}$  for the plastic scintillation detectors and also 9 rod-type volume sources using the single radionuclide of  $^{152}\text{Eu}$  for the HPGe detector. The greatest differences of the measurement results of the standard solution with 16 rods in it (of  $1\text{ g/cm}^3$  density) conducted by the scintillation detector were 11.1 % for  $^{137}\text{Cs}$  , 12.8 % for  $^{54}\text{Mn}$  and 8.0 % for  $^{60}\text{Co}$ . All the rod-type volume sources were suitable for radioactivity measurement of the barrel-type samples of low-level radioactive waste.

Keyword: rod-type volume source; low-level radioactive waste; radioactivity standards.

Health Physics Division  
Institute of Nuclear Energy Research

# 建立低放射性廢棄物常用核種活度標準

葉俊賢、袁明程

## 摘 要

國家游離輻射標準實驗室(NRSL),採用單一核種 $^{57}\text{Co}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{54}\text{Mn}$ 及 $^{60}\text{Co}$ ,製作塑膠閃爍體偵檢器使用之16支棒狀體射源及採用單一核種 $^{152}\text{Eu}$ 製作純鍺偵檢器使用之9支棒體射源,建立低放射性廢棄物常用核種活度標準;閃爍體偵檢器量測整桶16支棒標準溶液(密度 $1\text{g/cm}^3$ )活度最大差異,核種 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{54}\text{Mn}$ 及 $^{60}\text{Co}$ 分別為11.1%、12.8%及8.0%,這二類型的體射源適用於低放射性廢棄物的桶型試樣的活度量測。

關鍵字：棒狀體射源、低放射性廢棄物、活度標準

核能研究所 保健物理組

# 目 錄

1、前言 .....	1
2、實驗方法 .....	2
2.1 校正用假體製作 .....	2
2.2 棒射源製作 .....	4
2.3 量測儀器 .....	8
3、結果與驗證 .....	9
3.1 密度與效率 .....	9
3.2 活度驗證 .....	12
4、結論 .....	17
參考文獻 .....	18

## 圖 目 錄

圖 1、核種 Co-57、Cs-137、Mn-54 及 Co-60 液態棒狀射源 .....	5
圖 2、閃爍體偵檢器測試個別棒狀射源活度 .....	5
圖 3、16 支棒射源 $^{57}\text{Co}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{54}\text{Mn}$ 活度均勻性測試 .....	6
圖 4、16 支棒射源 $^{60}\text{Co}$ 活度均勻性測試 .....	7
圖 5、9 支棒射源 $^{152}\text{Eu}$ 活度均勻性測試 .....	7
圖 6、INER 自製 SWAM 2 及 SWAM3 塑膠閃爍體偵檢器量測系統 .....	8
圖 7、Canberra/Q2 純鍺偵檢器組合量測系統 .....	8
圖 8、SWAM2 桶型塑膠閃爍體偵檢器的效率關係曲線 .....	10
圖 9、SWAM 3 桶型塑膠閃爍體偵檢器的效率關係曲線 .....	11
圖 10、桶型純鍺偵檢器 Q2 的效率關係曲線 .....	12
圖 11、桶型 9 支棒水溶液體射源 .....	16
圖 12、桶型 16 支棒水溶液體射源 .....	16

## 表 目 錄

表 1、閃爍體偵檢器使用的均勻狀 16 支棒之密度假體規格 .....	3
表 2、純鍺偵檢器使用的 9 支棒之密度假體規格.....	3
表 3、Excel 與 Sigmaplot 擬合效率量測整桶溶液的活度差異 .....	14
表 4、密度效率量測整桶均勻與 16 支棒溶液的活度差異.....	14
表 5、Q2 系統密度效率量測整桶均勻混合溶液的活度差異.....	14
表 6、Q2 系統密度效率比較 9 支棒溶液的活度差異.....	15
表 7、Q2 系統密度效率比較 16 支棒溶液的活度差異.....	15





## 1、前言

原能會於民國 97 年 10 月 22 日發布「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」，其中以重要核種的濃度值作為放射性廢棄物分類的依據。放射性廢棄物核種類別與活度的量測，實務上不僅牽涉廢棄物的分類，更為重要的是影響廢棄物能否被處置設施接收以及處置後的長期安全。為解決核反應器相關設施除役及核能電廠營運多年來之低活度放射性廢棄物。由於國內核能電廠及研究機構等，大多使用桶型偵檢系統量測解除管制試樣比之活度，國家游離輻射標準實驗室(NRSL)建置低放射性廢棄物量測追溯及驗證技術，提升國內廢棄物量測技術水準，確保人員與環境輻射安全。

本文分別採用核種  $^{57}\text{Co}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{54}\text{Mn}$  及  $^{60}\text{Co}$  製作 4 組射源，每一組射源由 16 支棒狀體射源組成且僅含 1 種核種，使適合於塑膠閃爍體偵檢器使用，量測儀器及資料處理係採用本所自製 INER/SWAM2 系統<sup>(4)</sup>。依據過去製作桶型體射源<sup>(2)</sup>之經驗，並參考 Canberra 公司利用殼狀模型發展之校正桶。本報告採用單一  $^{152}\text{Eu}$  核種，利用殼狀模型製作內含 9 支棒狀體射源且適用於純鍺偵檢器校正之標準校正桶。

## 2、實驗方法

### 2.1 校正用假體製作

校正用標準桶之製作分為兩部分，一是製作不同密度的假體，另一是製作要放入假體中的射源。用於塑膠閃爍體偵測器校正的標準桶的假體製作，是使用體積為 205 L 的 55 加侖圓柱桶，製作出平均密度分別為  $0.13 \text{ g/cm}^3$ 、 $0.53 \text{ g/cm}^3$ 、 $0.97 \text{ g/cm}^3$ 、 $1.55 \text{ g/cm}^3$  及  $1.97 \text{ g/cm}^3$  的假體，五種密度假體規格如表 1。

另外，用於純鍍偵檢器校正的標準桶假體製作，亦與塑膠閃爍體偵測校正用的假體類似，但平均密度略有不同，此時材質為紙板、木板、塑膠粒、水泥或小彈珠製作之假體，其平均密度分別為  $0.13 \text{ g/cm}^3$ 、 $0.52 \text{ g/cm}^3$ 、 $0.98 \text{ g/cm}^3$ 、 $1.61 \text{ g/cm}^3$  及  $1.79 \text{ g/cm}^3$ ，五種密度假體規格如表 2。

表 1、閃爍體偵檢器使用的均勻狀 16 支棒之密度假體規格

材質	淨重(g)	密度(g/cm <sup>3</sup> )
紙板	27,200	0.13
木板	108,600	0.53
塑膠	199,000	0.97
水泥	318,600	1.55
玻璃	403,000	1.97

表 2、純鍺偵檢器使用的 9 支棒之密度假體規格

材質	淨重(g)	密度(g/cm <sup>3</sup> )
紙板	27,200	0.13
木板	108,600	0.52
塑膠	199,000	0.98
水泥	318,600	1.61
玻璃	403,000	1.79

## 2.2 棒射源製作

分別採用單一核種  $^{57}\text{Co}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{54}\text{Mn}$  及  $^{60}\text{Co}$ ，製作適用於塑膠閃爍體偵檢器使用之射源 4 組，每組使用 1 種核種，16 支棒狀射源為一組。每一棒狀射源由外部直徑 1.5 cm、長 80 cm、厚度 5 mm 塑膠管棒裝滿 60 mL 液態射源密封後，再放入外部直徑 2.0 cm、厚度 5 mm 塑膠管中密封完成。其中  $^{57}\text{Co}$  棒狀射源組的總活度為 336.0 kBq、 $^{137}\text{Cs}$  棒狀射源組的總活度為 326.3 kBq、 $^{54}\text{Mn}$  棒狀射源組的總活度為 64.2 kBq 及  $^{60}\text{Co}$  棒狀射源組的總活度為 364.2 kBq，其標準不確定度皆小於 0.8 %。另外，採用單一核種  $^{152}\text{Eu}$  製作適用於純鍺偵檢器使用 9 支棒狀射源組，是使用直徑 1.5 cm、長 86 cm、厚度 5mm 的塑膠管內裝滿 60 mL 的  $^{152}\text{Eu}$  液態射源密封後，再放入直徑 2.0 cm、厚度 5mm 的塑膠管中密封完成，60 mL 的  $^{152}\text{Eu}$  液態射源活度為 886.0 kBq 其標準不確定度 < 1.8 %。液態射源棒的組合包括追溯國家游離輻射標準射源、鹽酸及載體等如圖 1，並使用微電腦自動分注器分別注入射源棒中。

使用直徑 3 cm 閃爍體偵檢器測試製作完成的棒狀射源的均勻度的裝置如圖 2，受測的棒狀射源每 5cm 量測一次，每支棒量測 15 個位置，在核種  $^{57}\text{Co}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{60}\text{Co}$  及  $^{152}\text{Eu}$  棒射源組中，各別抽樣 3 支作均勻度測試的結果分別如圖 3、圖 4 及圖 5，而相對平均值的標準差分別為 7.1 %、8.9 %、14 %、6.1 % 及 8.5 %，其中  $^{54}\text{Mn}$  的活度較弱因此標準差較大。



圖 1、核種 Co-57、Cs-137、Mn-54 及 Co-60 液態棒狀射源



圖 2、閃爍體偵檢器測試個別棒狀射源活度

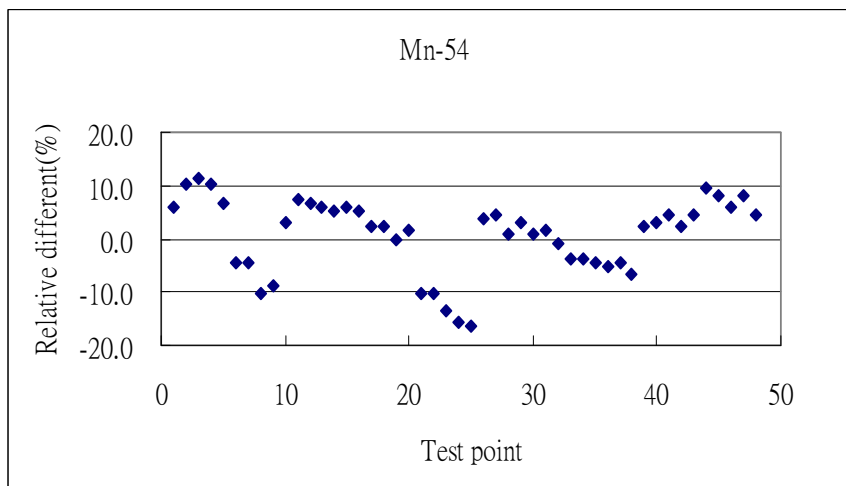
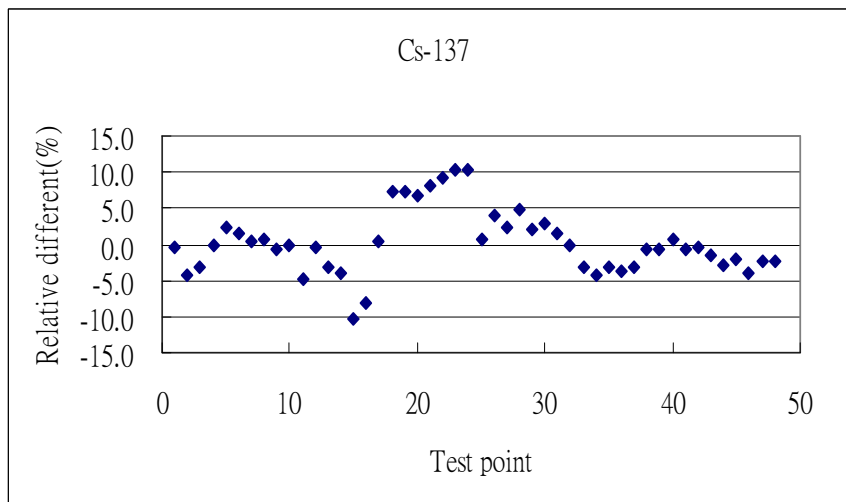
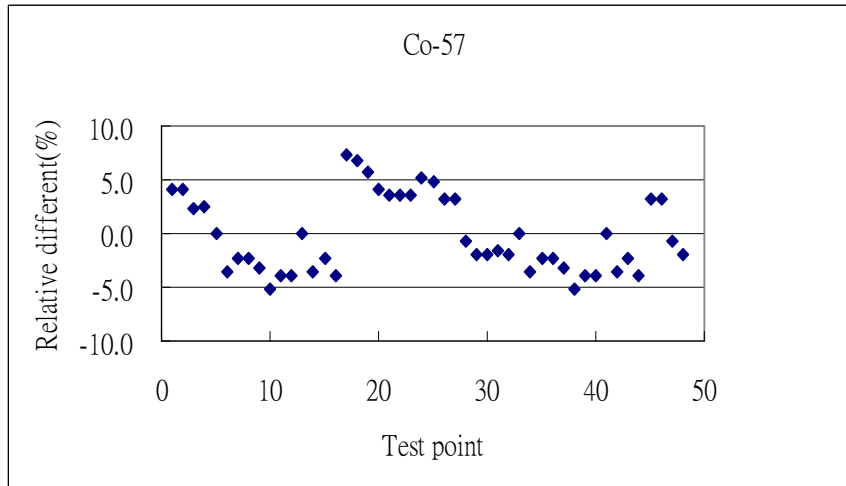


圖 3、16 支棒射源  $^{57}\text{Co}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{54}\text{Mn}$  活度均勻性測試

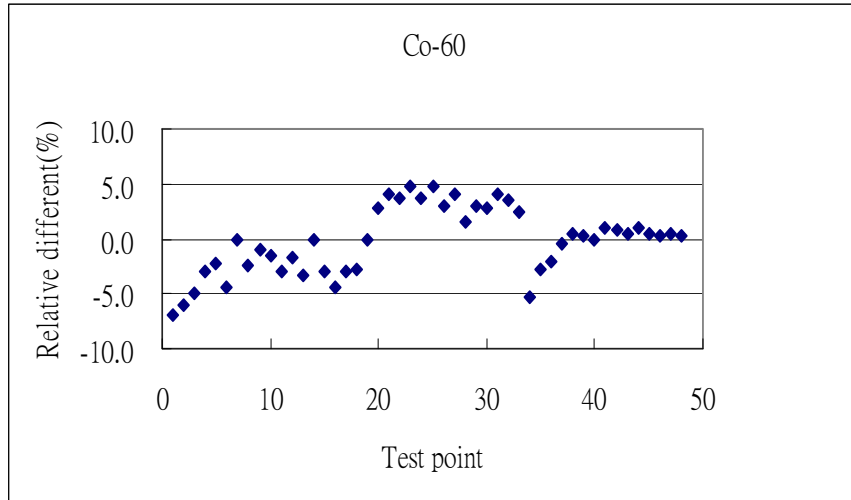


圖 4、16 支棒射源  $^{60}\text{Co}$  活度均勻性測試

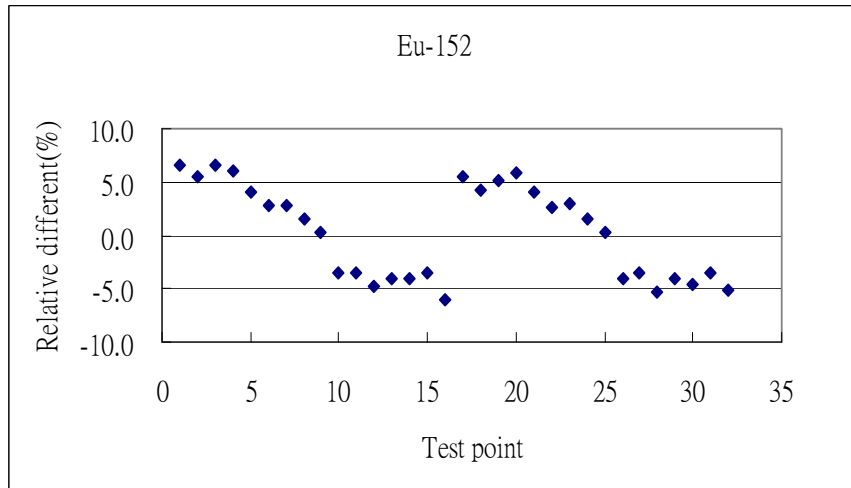


圖 5、9 支棒射源  $^{152}\text{Eu}$  活度均勻性測試

## 2.3 量測儀器

考量國內核能設施之廢棄物加馬活度量測現況，本實驗室的 2 部桶型偵檢器種類為使用六面體塑膠閃爍體偵檢器(PSC)製成的 INER-SWAM2 系統及 INER-SWAM3 系統，如圖 6；另一是使用 3 組純鍺偵檢器(HPGe)及附屬 360° 旋轉盤組合而成的 Canberra-Q2 系統，如圖 7。

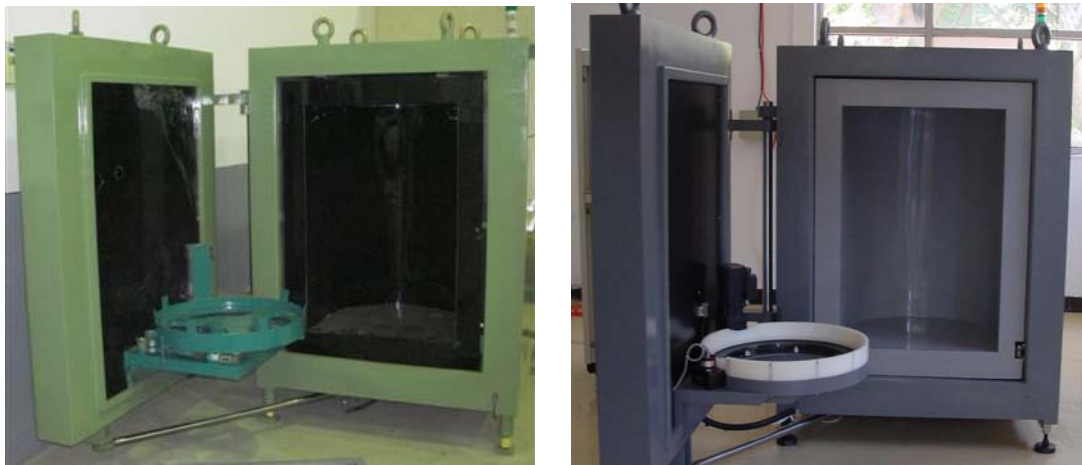


圖 6、INER 自製 SWAM 2 及 SWAM3 塑膠閃爍體偵檢器量測系統



圖 7、Canberra/Q2 純鍺偵檢器組合量測系統



### 3、結果與驗證

#### 3.1 密度與效率

使用塑膠閃爍體偵檢器的桶型 16 支棒體射源，評估 SWAM2 偵檢器的核種計測效率與密度的關係曲線，在 5 種低至高密度  $0.13 \text{ g/cm}^3 \sim 1.97 \text{ g/cm}^3$  的  $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{54}\text{Mn}$  及  $^{60}\text{Co}$  效率分別為 14.4 % ~ 3.3 %、19.4 % ~ 5.5 % 及 41.5 % ~ 14.5 % 如圖 8；而用於評估 SWAM3 偵檢器時分別為 18.9 % ~ 4.8 %、23.0 % ~ 6.8 % 及 46.7 % ~ 17.6 % 如圖 9。

使用於純鍺偵檢器的桶型 9 支棒體射源的  $^{152}\text{Eu}$  核種計測效率與密度的關係曲線如圖 10，5 種低至高密度  $0.13 \text{ g/cm}^3 \sim 1.79 \text{ g/cm}^3$  的 122 keV 及 1408 keV 的計測效率為 0.099 % ~ 0.017 % 及 0.023 % ~ 0.007 %。

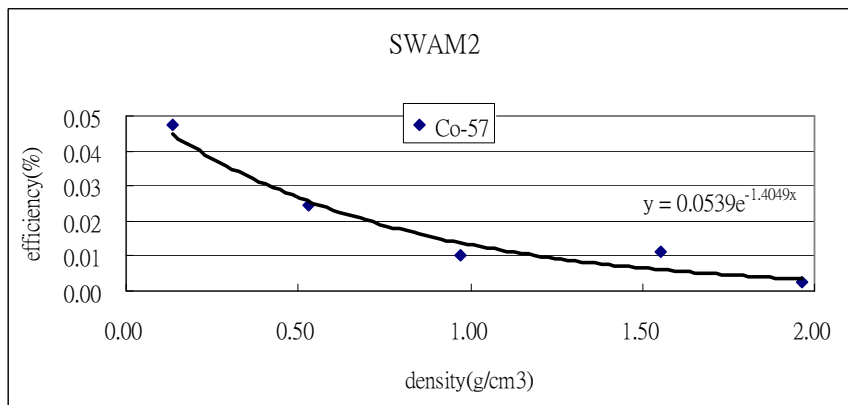
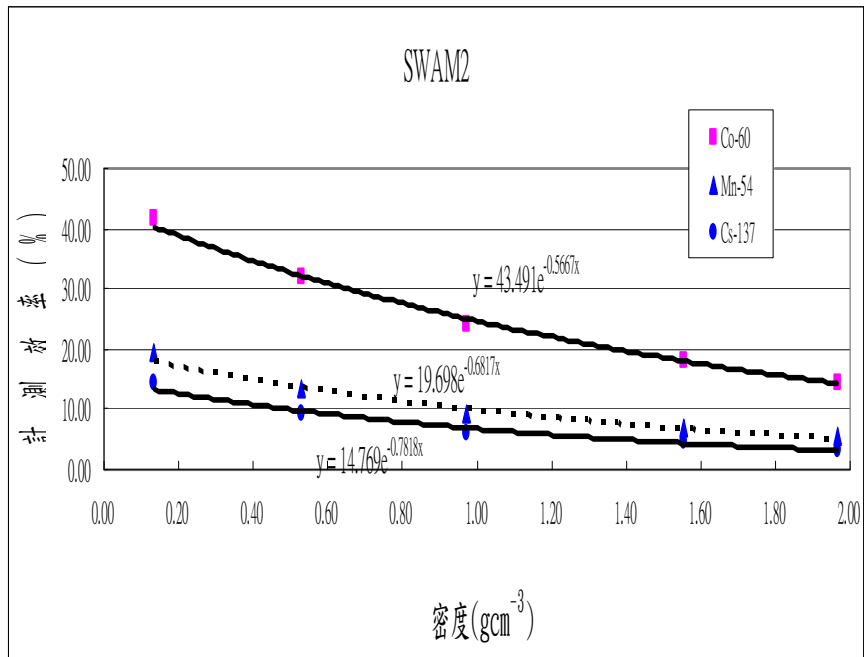


圖 8、SWAM2 桶型塑膠閃爍體偵檢器的效率關係曲線

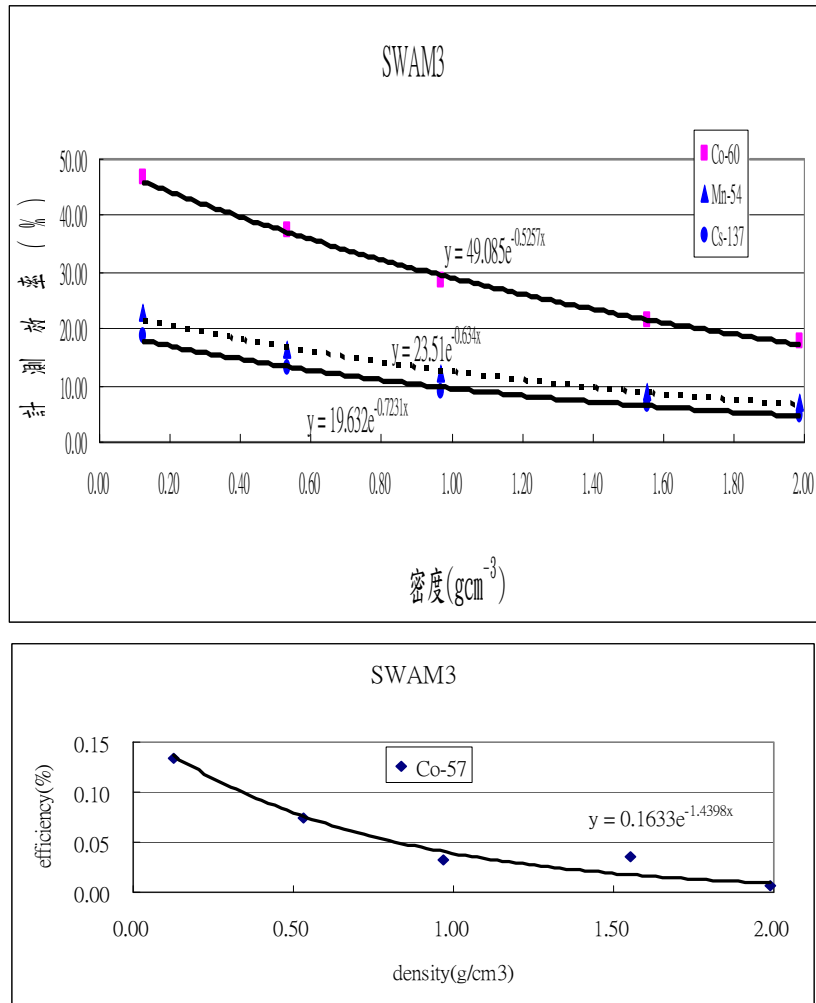


圖 9、SWAM 3 桶型塑膠閃爍體偵檢器的效率關係曲線

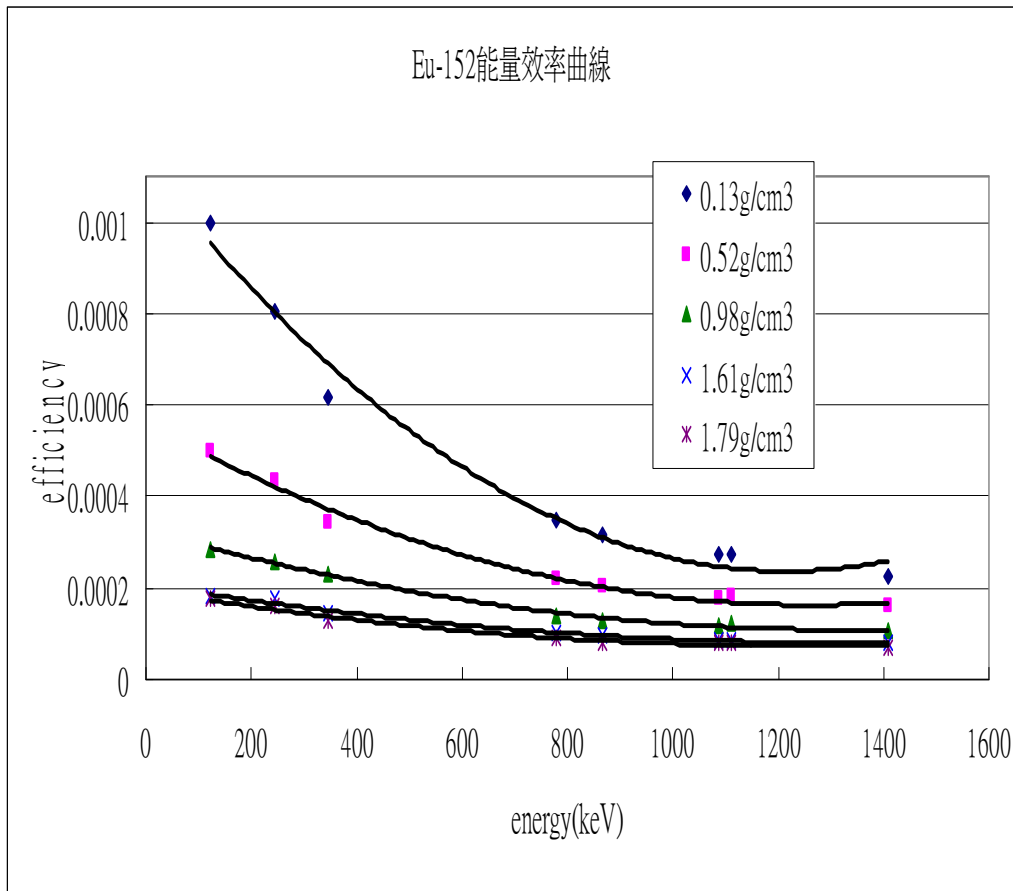


圖 10、桶型純鍺偵檢器 Q2 的效率關係曲線

### 3.2 活度驗證

比較 Excel 與 Sigmaplot 計算擬合密度與效率關係量測整桶標準溶液的活度差異如表 3，2 部閃爍體偵檢器 SWAM2 與 SWAM3 的整桶標準溶液活度最大差異，Excel 的  $^{137}\text{Cs}$  及  $^{60}\text{Co}$  分別為 16.2 % 及 17.7 %，而 Sigmaplot 的  $^{137}\text{Cs}$  及  $^{60}\text{Co}$  分別為 5.3 % 及 -19.3 %，SWAM3 偵檢器的偵檢腔較小，因此差異較小。使用建立桶型 16 支棒密度體射源的核種計測效率，量測 2 部閃爍體偵檢器 SWAM2 與 SWAM3 的整桶標準溶液活度最大差異， $^{137}\text{Cs}$  及

$^{60}\text{Co}$  分別為 5.3 % 及 6.6 % ; 而使用建立 5 種密度桶型 16 支棒的體射源核種計測效率, 量測 2 部閃爍體偵檢器的整桶 16 支棒標準水溶液(密度  $1.0\text{ g/cm}^3$ ) , 如圖 11 其活度最大的差異,  $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{54}\text{Mn}$  及  $^{60}\text{Co}$  分別為 11.1 %、12.8 % 及 8.0 % , 如表 4。

另外, 比較 Canberra Q2 系統之純鍺偵檢器使用的 INER 本實驗室自製與 Canberra 公司製造的桶型五種密度  $0.03\text{ g/cm}^3\sim 2.20\text{ g/cm}^3$  的效率, INER 密度  $0.48\text{ g/cm}^3$  及 Canberra 密度  $0.52\text{ g/cm}^3$  的差異小, 122 keV 及 1408 keV 為 0.0037 % 及 0.0003 %。建立的密度效率量測整桶均勻密度混合溶液的活度差異,  $^{137}\text{Cs}$  及  $^{60}\text{Co}$  分別為 3.4 % 及 6.6 % , 如表 5; 比較 5 種材質的 9 支棒  $^{152}\text{Eu}$  水溶液的活度 886000 Bq, 如圖 12 其相對最大差異為 15.5 % , 如表 6。比較 4 種材質的 16 支棒溶液的相對最大差異  $^{137}\text{Cs}$  及  $^{60}\text{Co}$  分別為 10.7 % 及 10.2 % , 如表 7。

表 3、Excel 與 Sigmaplot 擬合效率量測整桶溶液的活度差異

量測儀器	閃爍體偵檢器	SWAM2	SWAM3
<b>Excel 效率</b>	<b>標準(Bq)</b>	<b>差異(%)</b>	<b>差異(%)</b>
Cs-137	18647	12.3	16.2
Co-60	13228	15.4	17.7
<b>Sigmaplot 效率</b>			
Cs-137	18647	3.4	5.3
Co-60	13228	-19.3	-2.0

表 4、密度效率量測整桶均勻與 16 支棒溶液的活度差異

量測儀器	閃爍體偵檢器	SWAM2	SWAM3
<b>整桶均勻溶液</b>	<b>標準(Bq)</b>	<b>差異(%)</b>	<b>差異(%)</b>
Cs-137	18647	3.4	5.3
Co-60	3440	6.6	5.8
<b>整桶 16 支棒溶液</b>			
Cs-137	326308	9.5	11.1
Mn-54	62800	12.2	12.8
Co-60	364215	8.0	7.8

表 5、Q2 系統密度效率量測整桶均勻混合溶液的活度差異

核種代碼	能量(keV)	標準(Bq)	差異(%)
Cs1	662	9907	-10.8
Cs2	662	10285	-6.8
Co1	1173	19565	-7.6
Co1	1332	19565	-5.4
Co2	1173	11310	-1.4
Co2	1332	11310	-1.8

表 6、Q2 系統密度效率比較 9 支棒溶液的活度差異

材質	Eu-152(Bq)	相對差異(%)
紙板	941100	-6.2
木板	901100	-1.7
塑膠	854000	3.6
混凝土	784900	11.4
玻璃	748700	15.5

表 7、Q2 系統密度效率比較 16 支棒溶液的活度差異

材質	Cs-137(Bq)	相對偏差(%)	Co-60(Bq)	相對偏差(%)
棒射源	315990		303010	
木材	302700	4.2	274944	-9.3
塑膠	318265	0.7	295172	-2.6
玻璃	312565	1.1	289725	-4.4
混凝土	281873	10.7	271988	-10.2

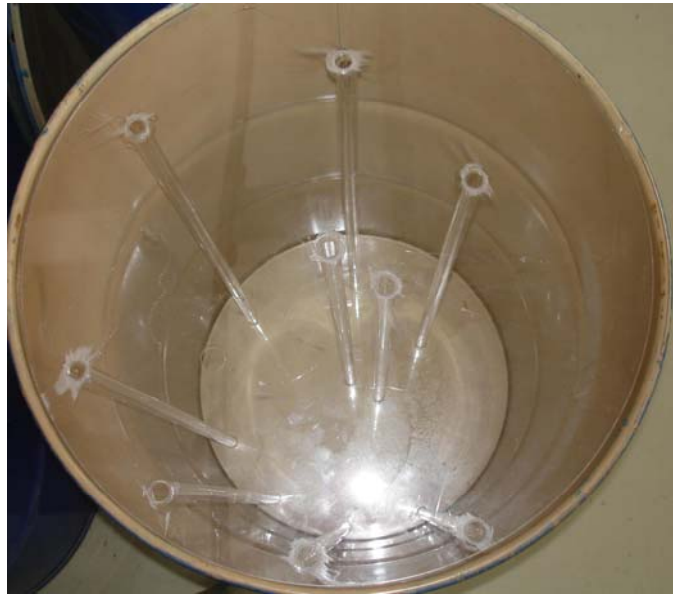


圖 11、桶型 9 支棒水溶液體射源



圖 12、桶型 16 支棒水溶液體射源



## 4、結論

1. 製作完成塑膠閃爍體偵檢器使用之 16 支棒狀體射源，以及採用單一核種  $^{152}\text{Eu}$  製作純鍺偵檢器使用之 9 支棒體射源，適用於閃爍體偵檢器與純鍺偵檢器量測解除管制試樣的比活度。。
2. 驗證製作桶型 16 支棒密度體射源的核種計測效率，量測 2 部閃爍體偵檢器的整桶標準溶液活度最大差異，核種  $^{137}\text{Cs}$  及  $^{60}\text{Co}$  分別為 5.3 % 及 6.6 %。
3. 驗證製作桶型 16 支棒的 5 種密度體射源的核種計測效率，量測 2 部閃爍體偵檢器的整桶 16 支棒標準溶液(密度  $1\text{g/cm}^3$ )活度最大差異，核種  $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{54}\text{Mn}$  及  $^{60}\text{Co}$  分別為 11.1 %、12.8 % 及 8.0 %。

## 參考文獻

1. “Application of the Concepts of Exemption and Clearance”, IAEA RS-G-17, 2004.
2. 葉俊賢,袁明程“桶型加馬活度計測系統之校正方法”,INER-5068R,2007.
3. 葉俊賢,袁明程“解除管制試樣量測分析之能力試驗總結報告”, INER-6960, 2010.
4. 林崇智,“SWAM-2 加馬活度計測系統”, INER-3506, 2007
5. “Hardware Reference Manual for Taiwan-INER Q2 system”, Document#37677 rev.A”, Canberra Inc.,2004.