

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

低放射性廢棄物活度量測追溯管制
技術研究

計畫編號：103FCMA008

報告編號：103FCMA008-05

執行單位：核能研究所

計畫主持人：張淑君

子項工作負責人：張淑君

報告作者：黃坪吉、葉俊賢、邱鎧盛

報告日期：中華民國 103 年 12 月

(本頁空白)

Proficiency Test for Low-Level Radioactive Waste Drum Measurement

By

Ping-Ji Huang, Chin-Hsien Yeh, Huang-Sheng Chiu

Abstract

The National Radiation Standard Laboratory (NRSL) organized a comparison test by offering 9 different low-level activity samples for six laboratories in Taiwan to measure known and unknown activities with measuring instruments using HPGe detector. Uniform metal and heterogeneous nonmetal of drum-type were used to measure the gamma activity of the radionuclide of ^{137}Cs or ^{60}Co .

Keywords: Proficiency test, Low-level radioactive waste

低放射性廢棄物活度量測追溯管制技術研究

黃珮吉、葉俊賢、邱鎧盛

摘 要

國家游離輻射標準實驗室(NRSL)舉辦的低放射性活度量測比對，國內 6 部純鍺偵檢器加馬能譜定性定量系統參加，模擬放射性廢棄物將測試桶分成活度非均勻分布金屬桶 5 桶，與已知標準值比較 ^{137}Cs 及 ^{60}Co 最大差異為-65 % 及-62 %。另一模擬放射性廢棄物整桶活度均勻分布的非金屬桶 4 桶，與全體參與偵檢器的平均值比較 ^{137}Cs 及 ^{60}Co 最大差異為 25 % 及 33 %。

關鍵字：能力試驗、低放射性廢棄物

目 錄

1. 前言	1
1.1 研究目的	1
1.2 研究內容	1
1.3 報告架構	1
2. 低放射性廢棄物整桶活度量測能力試驗	2
2.1 量測系統	4
2.2 測試桶製作	12
2.3 結果與討論	18
2.4 量測結果總結	22
3. 低放射性廢棄物整桶量測技術規範	29
4. 結論	30
4.1 研究結論	30
4.2 成果效益	30
參考文獻	32
附錄：低放射性廢棄物整桶量測技術規範(草案)	34
附件一：加馬核種整桶量測系統計測效率擬合曲線範例	49

附件二：加馬核種整桶量測系統不確定度評估範例..... 50

(本頁空白)

1. 前言

1.1 研究目的

基於管制業務技術研發需求，行政院原子能委員會放射性物料管理局爰委託核能研究所執行「103 年度精進放射性物料安全管理技術發展」計畫(103FCMA008)。本報告「低放射性廢棄物活度量測追溯管制技術研究」即為該計畫所屬子項計畫「核子反應器設施除役技術安全評估研究」之研究工作成果。

1.2 研究內容

子項計畫「核子反應器設施除役技術安全評估研究」於 103 年規劃完成「低放射性廢棄物活度量測追溯管制技術研究」報告一冊。研究內容包含：

- (1)衡量國內低放射性廢棄物產生、處理、貯存情形，並藉現代化量測儀器建立相關量測技術，以及舉辦國內低放射性廢物整桶活度量測能力試驗與技術研討會。
- (2)為確保低放射性廢棄物中，加馬核種分析與活度量測結果的準確性及量測結果具有追溯性，建立低放射性廢棄物整桶量測技術規範草案。

1.3 報告架構

報告內容第 1 章說明研究目的、研究內容與報告架構；第 2 章說明低放射性廢棄物整桶活度量測能力試驗研究；第 3 章撰擬低放射性廢棄物整桶活度量測技術規範；第 4 章對研究成果總結說明，並提出建議。另外，增列附錄為「低放射性廢棄物整桶活度量測技術規範(草案)」提供參考。

2. 低放射性廢棄物整桶活度量測能力試驗

因應我國核一廠一號機自民國 67 年 12 月 10 日開始商業運轉迄今已接近設計的 40 年運轉年限，核一廠將依「核子反應器設施管制法」第 23 條由台電公司檢附除役計畫，向主管機關提出除役申請，並依該法施行細則第 16 條以拆除方式於取得主管機關核發之除役許可後二十五年內完成除役。本計畫研究重點於低放射性廢棄物整桶活度量測能力試驗技術研究，藉以厚實主管機關執行除役審查之技術。

因此，為整合國內低放射性廢棄物整桶加馬活度量測能力，並促進核設施間廢棄物量測能力技術交流，去年(102 年)低放射性廢棄物活度量測追溯管制技術研究計畫，已邀請國內相關核設施進行低放射性廢棄物整桶加馬活度量測能力試運轉活動，計有 6 間實驗室、9 部量測儀器參加 6 桶 55 加侖校正桶整桶加馬活度量測比對。

今年(103 年)，同樣規劃邀請相關實驗室參與低放射性廢棄物整桶加馬活度正式量測比對活動。活動時程規劃如下：

- ✚ 1~3 月：規劃籌備桶型低放射性廢棄物整桶加馬活度量測比對活動，及量測比對樣品(55 加侖廢樹脂桶與廢金屬桶)整備；
- ✚ 4-6 月：舉辦低放射性廢棄物整桶加馬活度量測說明會；
- ✚ 7-9 月：進行低放射性廢棄物整桶加馬活度量測比對；
- ✚ 10-12 月：量測比對結果彙整分析，並舉行低放射性廢棄物整桶加馬活度量測技術研討會。

參加 103 年低放射性活度比對之機構的純鍺偵檢加馬能譜定性定量系統共 6 部，分別為台電公司核二廠之廢料處理組 2 部、台電公司核三廠之廢料處理組 1 部、核能研究所化學分析組 1 部及核能研究所保健物理組 2 部(含解除管制量測實驗室 1 部)，其中核三廠定性定量系統無 55 加侖桶旋轉座。參加廢棄物活度量測比對儀器如表 1。

表 1：參加廢棄物活度量測比對儀器

機構	代碼	廠牌	型號	偵檢器×個	型式	分析程式
核二廠	A	Canberra	ISOCS	HPGe ×1	移動	Genius2000
核三廠	B	Canberra	ISOCS	HPGe ×1	固定	Genius2000
化學分析組	C	Canberra	ISOCS	HPGe ×1	移動	Genius2000
核二廠	D	Canberra	ISOCS	HPGe ×1	移動	Genius2000
保健物理組	E	Canberra	Q2	HPGe ×3	固定	Genius2000
保健物理組	F	ORTEC	ISOCART	HPGe ×1	移動	GammaVision

2.1 量測系統

由於國際的核能電廠及核能相關研究機構等，主要使用純鍍偵檢加馬能譜定性定量系統量測 55 加侖桶之桶型廢棄物之活度，系統的加馬光子偵檢效率皆假設整桶活度為均勻分布建立，一為使用點射源理論計算方法，另一為使用體射源實驗數據得到各種能量的校正效率。

代碼 A 及代碼 D 量測系統為移動式純鍍偵檢器 1 部及固定型旋轉座如圖 1、代碼 B 量測系統為固定式純鍍偵檢器 1 部無旋轉座如圖 2、代碼 C 量測系統為移動式純鍍偵檢器 1 部及固定型旋轉座如圖 3、代碼 E 量測系統為固定式純鍍偵檢器 3 部組合及固定型旋轉座如圖 4、代碼 F 量測系統為移動式純鍍偵檢器 1 部及固定型旋轉座如圖 5。

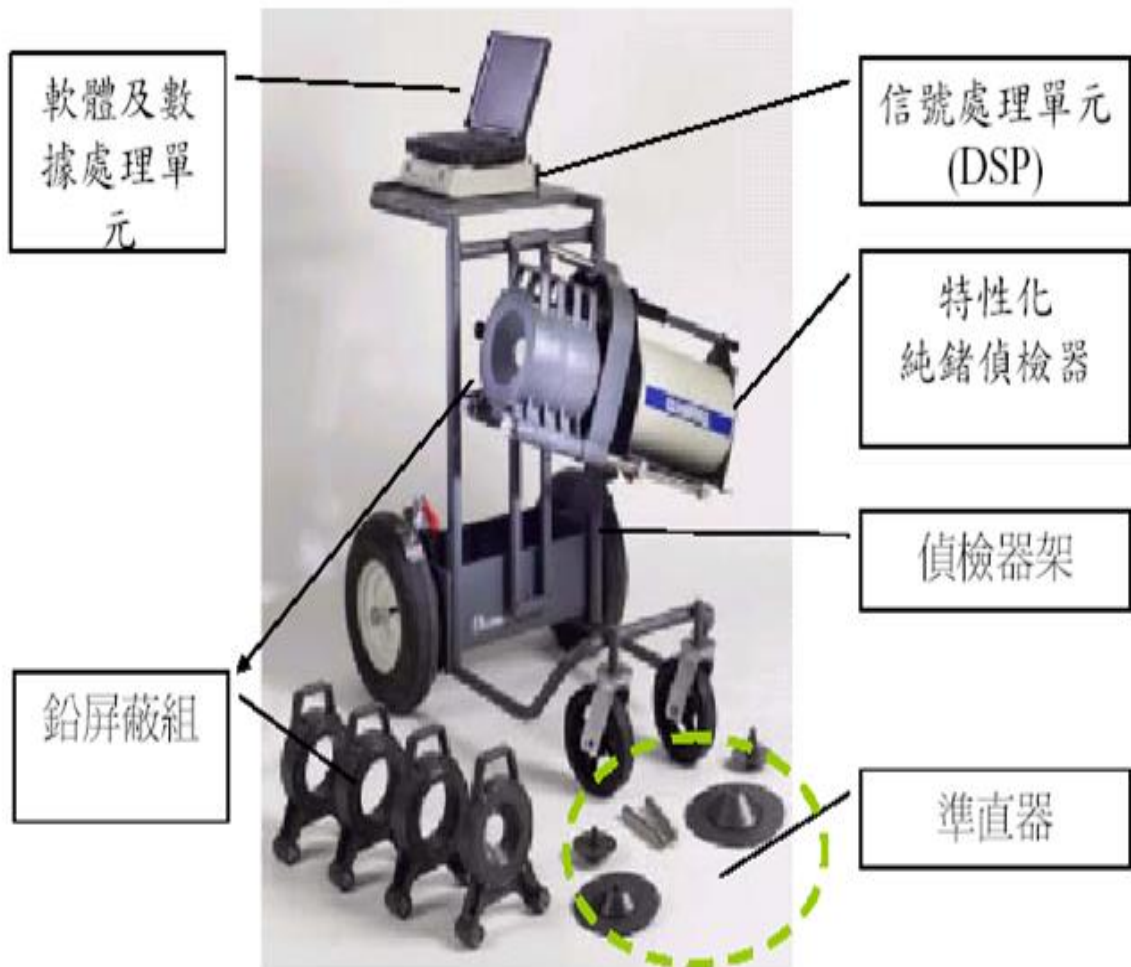


圖 1：代碼 A 及代碼 D 移動式量測系統



圖 2：代碼 B 固定式量測系統及輸送帶



圖 3：代碼 C 移動式量測系統

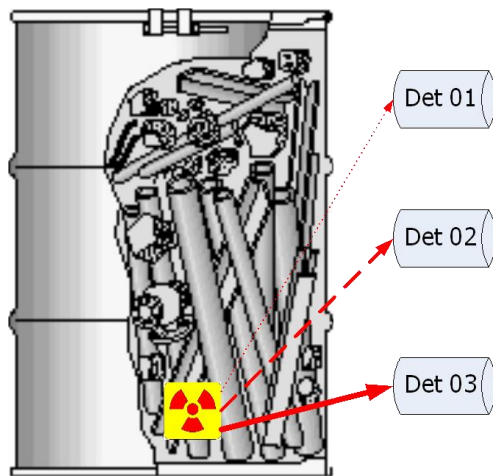


圖 4：代碼 E 固定式量測系統及 3 部組合偵檢器

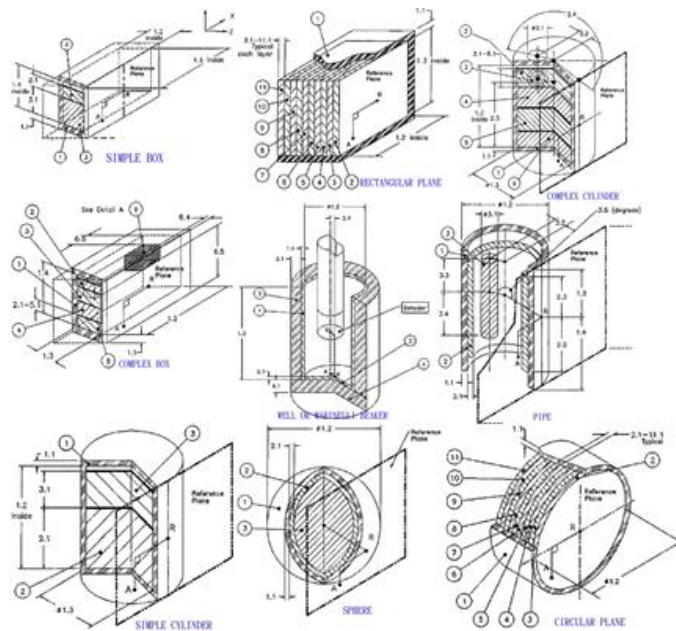


圖 5：代碼 F 移動式量測系統及幾何模板

參加廢棄物活度量測比對儀器 6 部，主要製造廠為 ORTEC 公司及 Canberra 公司二種，ORTEC 公司的 ORTEC-ISOCART 樣品量測方法為如下：

1. 建立 PBC (Peak Background Correction) :選擇核種資料庫及量測空桶。
2. 設定物件參數 (Isotopic Supervisor): 選擇量測樣品幾何形狀包括輸入物件幾何與相關物理參數(長寬高、直徑或填充物質密度)、輸入偵檢器相關參數(高度、與量測物件距離等)及選擇能量效率與 PBC 校正檔。
3. 開始量測 (Isotopic Operator)。
4. 定性定量分析: 量測系統計測效率如圖 6。

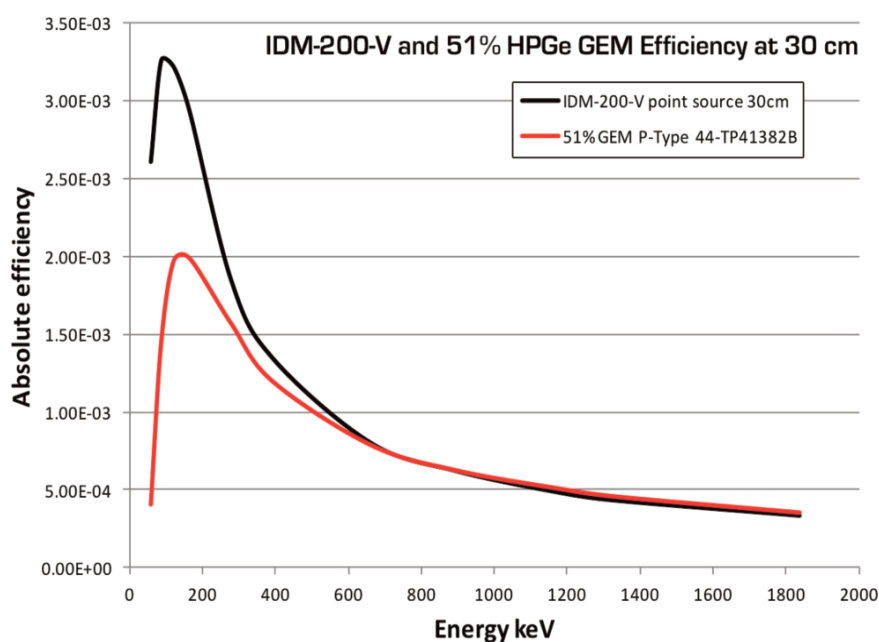


圖 6：ORTEC-ISOCART 量測系統計測效率

Canberra 公司的 Canberra-ISOCS 樣品量測方法為如下:

1. 輸入 ISOCS 量測偵檢器的固定參數，桶幾何圖形：高度、直徑、材質、厚度。
2. 輸入 ISOCS 量測偵檢器的可變參數，廢棄物試樣：距離、密度、高度(填充率)。
3. 輸入 Genius 2000 加馬能譜分析程式的可變參數：計測時間、容量、屏蔽。
4. 開始量測：例行作業(限定參數)或非例行作業(可變參數)。
5. 定性定量分析:利用蒙地卡羅程式(MCNP-Characterized) 校正及特性化計測效率如圖 7。

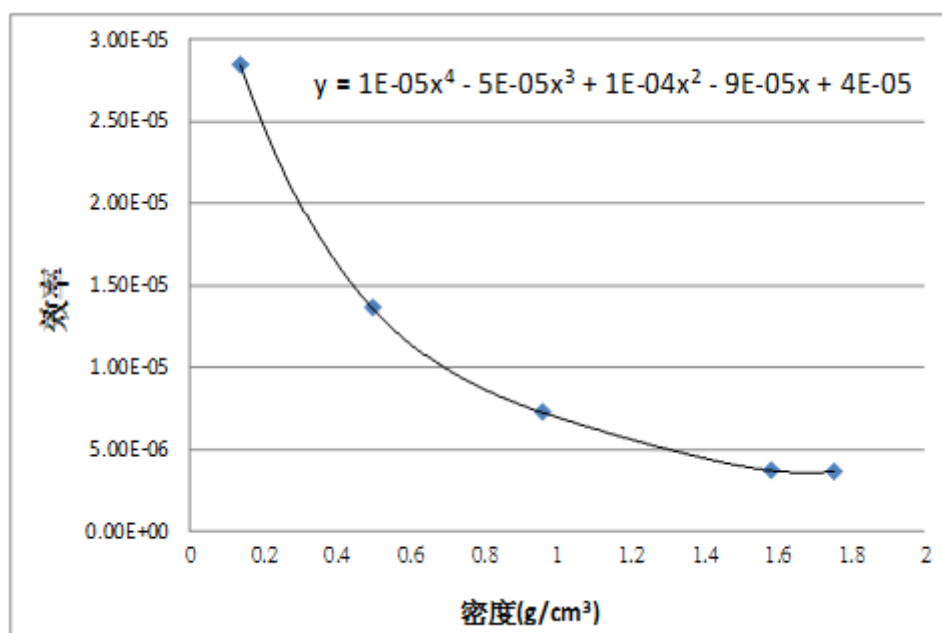


圖 7：Canberra-ISOCS 量測系統計測效率

2.2 測試桶製作

活度量測比對的測試桶共 9 桶，主要分成整桶活度均勻分布桶樹脂、過濾器活性碳、水泥及水溶液(450 g 罐 x 360 個)等 4 桶，如圖 8~圖 11；與整桶活度非均勻分布桶(射源水平分布 3 桶及射源垂直分布 2 桶)等 5 桶，如圖 12~圖 15 等二類。其中水平分布的直徑 40 公分面射源， ^{137}Cs 與 ^{60}Co 活度約 89 kBq 與 33 kBq，如圖 13；及垂直分布的直徑 1.5 cm × 長 60 cm 棒射源， ^{137}Cs 與 ^{60}Co 活度約 86 kBq 與 78 kBq，如圖 15，二者射源活度皆追溯國家游離輻射標準其標準不確定度皆小於 0.8 %。



圖 8：整桶樹脂(充填率 96%)



圖 9：整桶過濾器活性炭(充填率 90%)



圖 10：整桶水泥(充填率 100%)



圖 11：整桶水溶液(充填率 100%)

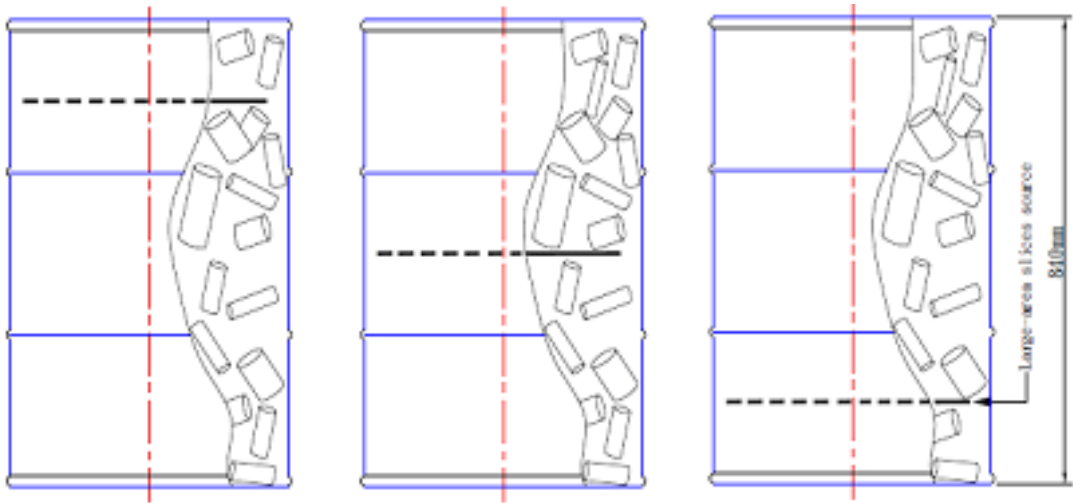


圖 12：面射源放置金屬桶內水平軸之上、中、下層位置

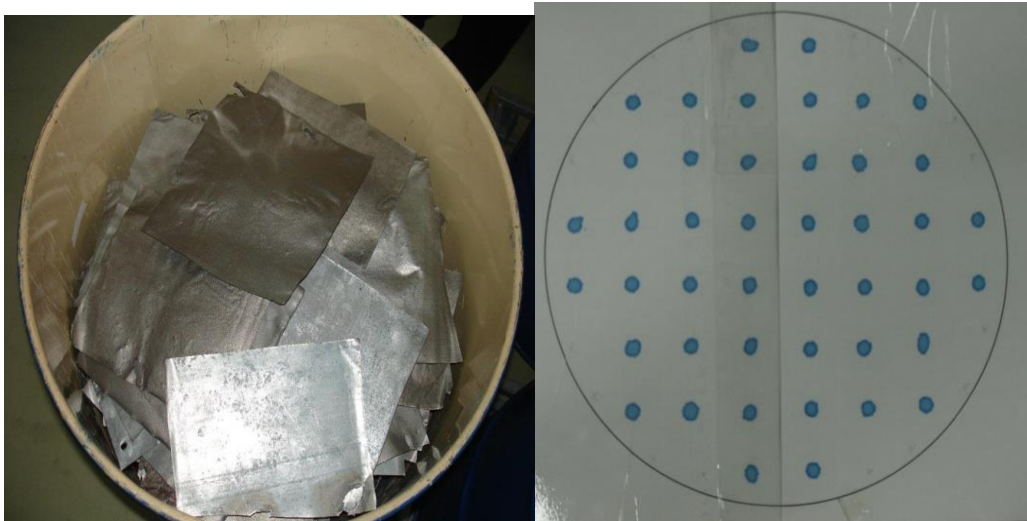


圖 13：整桶鐵片及直徑 40 公分圓形面射源

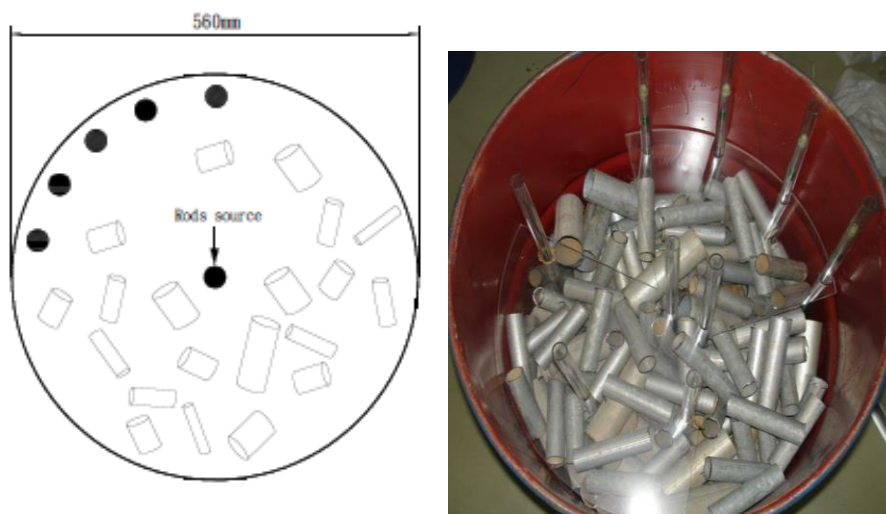


圖 14：金屬桶內射源棒放置偏單邊或集中中心位置

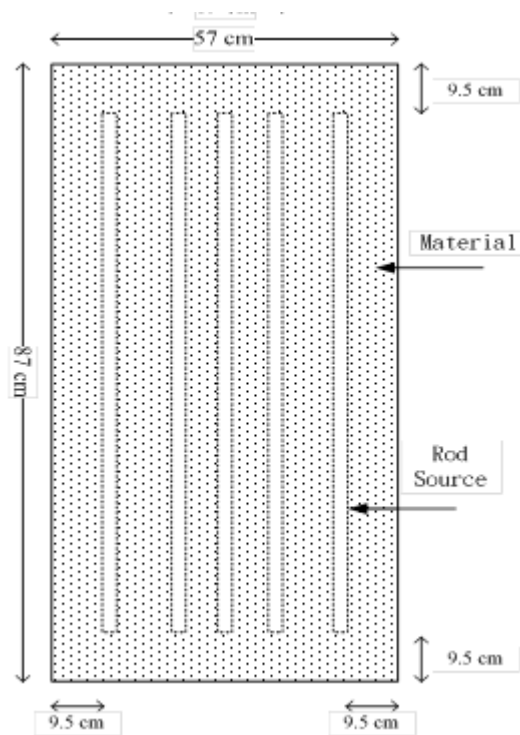


圖 15：液態棒狀射源及桶內棒狀射源放置

比對之測試桶一為整桶活度非均勻分布金屬桶 5 桶，將面射源放置水平軸之上層(upper- levels)、中層(center- levels)、下層(lower -levels)位置及將射源棒放置偏單邊(side- rods)或集中中心(center- rods)位置等；另一為整桶活度均勻分布非金屬桶 4 桶，溶液(solution)、水泥(concrete)、樹脂(resin)及過濾器活性碳(active carbon)等，比對之測試桶共 9 桶的規格如表 2。

表 2：活度量測比對之測試桶規格

測試桶	填充材	填充率 (%)	密度 (g/cm ³)	容器厚度	容器高度 (外徑)	容器直徑 (外徑)
Upper- levels	鐵	100	0.76	2 mm	86 cm	56 cm
Center- levels	鐵	100	0.95	2 mm	86 cm	56 cm
lower -levels	鐵	100	0.84	2 mm	86 cm	56 cm
Center- rods	鐵	100	0.96	2 mm	86 cm	56 cm
Side- rods	鐵	100	0.54	2 mm	86 cm	56 cm
active carbon	活性碳	90	0.97	3 mm	86 cm	56 cm
concrete	水泥	100	1.90	3 mm	86 cm	56 cm
solution	溶液	100	0.96	3 mm	86 cm	56 cm
Resin	樹脂	96	0.85	3 mm	86 cm	56 m

2.3 結果與討論

參加比對之 9 桶測試桶的 6 部偵檢系統的定性定量量測結果，非均勻分布金屬桶 5 桶之活度差異(%)是與已知活度之面射源與棒射源的標準值比較結果如圖 16 與圖 17，當熱點集中在某個方位的 5 桶中，6 部偵檢器能譜分析結果與已知標準值間差異最大者，皆為位置在桶中間的垂直棒，因自屏蔽效應大，關鍵核種 ^{137}Cs 與 ^{60}Co 的最大差異為-65%與-62%，而 6 部偵檢器能譜分析結果與已知標準值間差異最小者，為位置在桶中間層的面射源，因定性定量系統的純鍺偵檢器皆放置在整桶的中間量測，其距離偵檢器最近提高放射性靈敏度差異會較小。在 6 部偵檢系統中唯一由 3 部純鍺偵檢器組合的代碼 E 量測系統效率較高，整桶全體廢棄物的放射性皆被均勻偵檢得到其量測效果較佳，因此量測整桶活度非均勻分布的 5 桶的結果差異皆較小，除了在桶中間位置的垂直棒外，其餘 4 種活度非均勻分布的差異約為 20%。

另外，均勻分布非金屬桶 4 桶之活度差異(%)是與 6 部偵檢器之平均值比較結果如圖 18 與圖 19，其中整桶水溶液活度是追溯國家游離輻射標準，核種 ^{137}Cs 與 ^{60}Co 為 390 kBq 與 350 kBq，為確認 6 部偵檢器之量測水準，先行驗證水溶液桶其核種 ^{137}Cs 與 ^{60}Co 的最大差異為 15%與 16%，其餘 3 桶之非金屬桶核種 ^{137}Cs 與 ^{60}Co 的最大差異為 32%與 33%，但是這 6 部偵檢器之核種 ^{137}Cs 與 ^{60}Co 各 18 個量測值中的活度最大差異約為 20%。

量測系統皆假設整桶活度均勻分布建立加馬光子偵檢效率，如果將活度非均勻分布 5 桶的熱點位置的相關幾何因素輸入，重新分析比較核種 ^{137}Cs 與 ^{60}Co 活度的結果則差異明顯降低甚多如表 3。

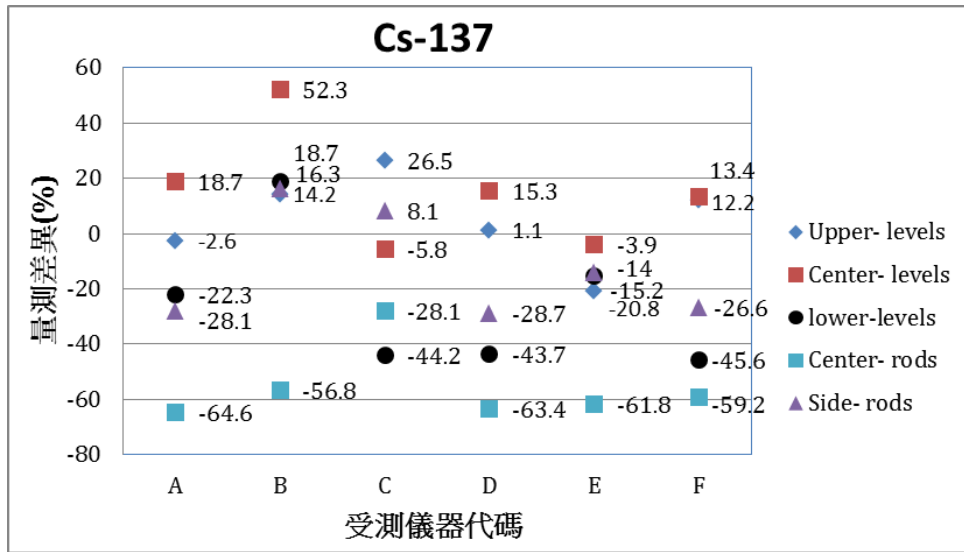


圖 16：非均勻分布桶 ¹³⁷Cs 量測活度差異

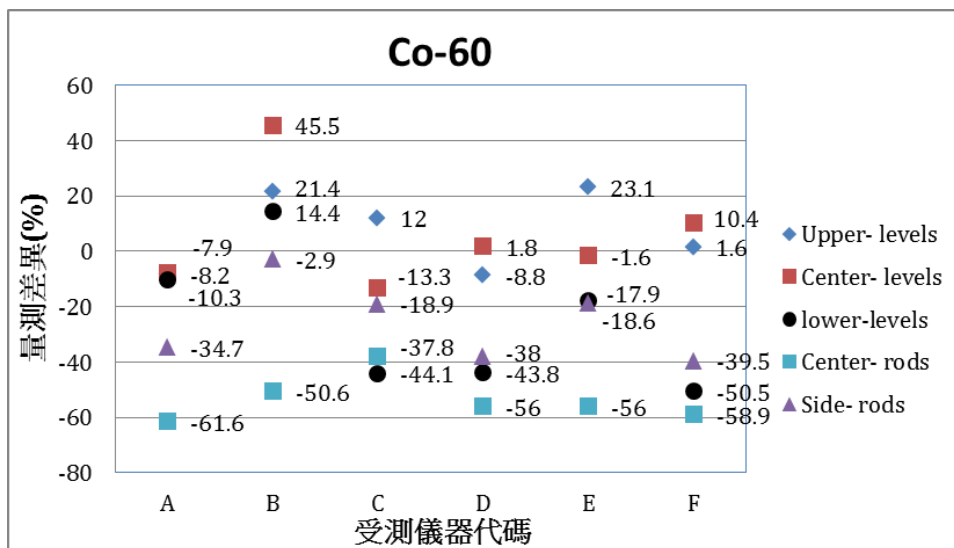


圖 17：非均勻分布桶 ⁶⁰Co 量測活度差異

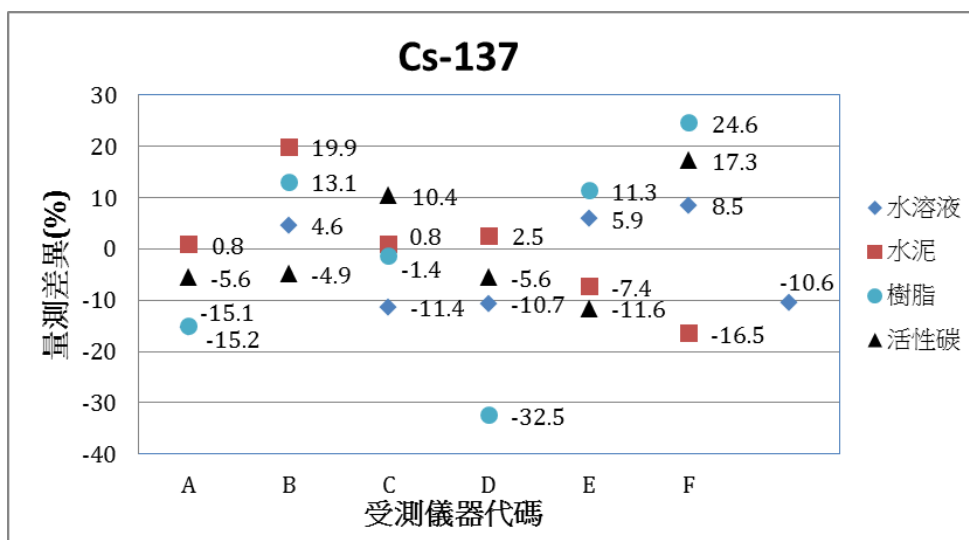


圖 18：均勻分布桶 ^{137}Cs 量測活度差異

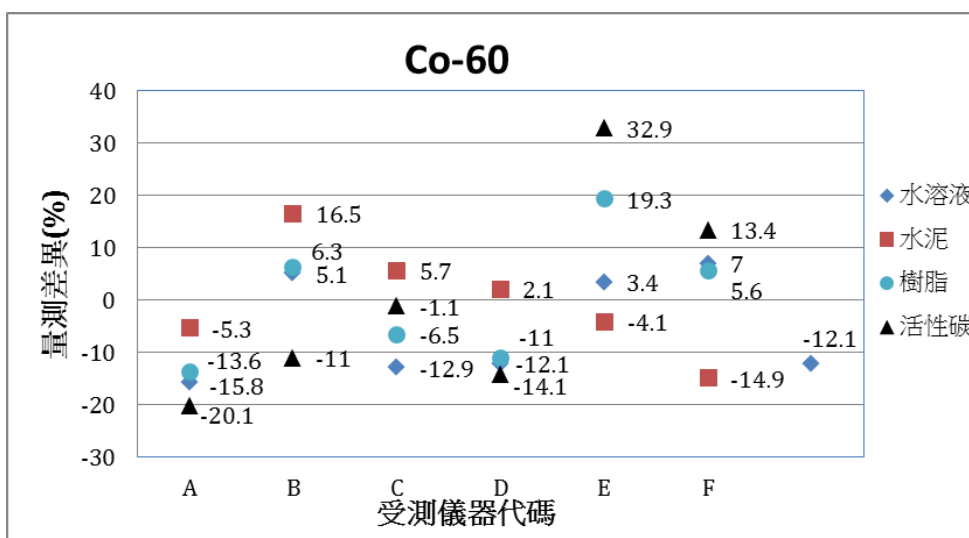


圖 19：均勻分布桶 ^{60}Co 量測活度差異

表 3：C 量測系統之假設均勻分布與已知熱點分布比較

C 量測系統	假設均 勻分布	已知熱 點分布	假設均 勻分布	已知熱 點分布
測試桶	^{137}Cs	差異(%)	^{60}Co	差異(%)
Upper- levels	26.5	17.6	12	5.1
Center- levels	-5.8	-15.1	-13.3	-20.9
lower -levels	-44.2	-22.8	-44.1	-12.4
Center- rods	-28.1	11.9	-37.8	-6.5
Side- rods	8.1	7.7	-18.9	-14.4

2.4 量測結果總結

1. 整桶活度均勻分布桶 4 桶的 6 部偵檢器能譜分析結果與平均值間的差異，最大為樹脂及活性碳其 ^{137}Cs 及 ^{60}Co 為 25% 及 33%。
2. 整桶活度非均勻分布且熱點集中某個方位的 5 桶，6 部偵檢器假設整桶活度均勻分布的能譜分析結果與已知標準值間的差異，最大位置在桶中間的垂直棒，因射源的自屏蔽效應較大其 ^{137}Cs 及 ^{60}Co 為 -65% 及 -62%。
3. 整桶活度非均勻分布，但已知熱點分布的幾何因素，則 5 桶的活度重新分析結果， ^{137}Cs 及 ^{60}Co 差異降低為 23% 及 21%。
4. 代碼 B 固定式量測系統由於未使用旋轉台進行量測，故取自 4 個不同角度 (0° 、 90° 、 180° 與 270°) 之活度平均值作為各個測試桶最終量測結果。其中 4 桶均勻分布桶量測結果，與 6 部偵檢器量測結果平均值進行比較，皆以水泥桶之量測差異最大，分別為 ^{137}Cs (19.9%) 及 ^{60}Co (16.5%)；5 桶非均勻分布桶量測結果與標準值進行比較，皆以射源棒置於中心之測試桶 (Center-rods) 量測差異最大，分別為 ^{137}Cs (-56.8%) 及 ^{60}Co (-50.6%)。

附件

表 4：代碼 A 移動是量測系統活度比對結果

非均勻分布桶	密度 (g/cm ³)	¹³⁷ Cs (Bq)	差異 (%)	⁶⁰ Co (Bq)	差異 (%)
Upper- levels	0.76	87000	-2.6	30400	-8.2
Center- levels	0.95	106000	18.7	30500	-7.9
lower -levels	0.84	45200	-49.4	19800	-40.2
Center- rods	0.96	30700	-64.6	29900	-61.6
Side- rods	0.54	62300	-28.1	50800	-34.7
均勻分布桶					
活性碳	0.97	12400000	-5.6	105000	-20.1
混凝土	1.90	121000	0.8	103000	-5.3
水溶液	0.96	338000	-15.2	295000	-15.8
樹脂	0.85	22900	-15.1	230000	-13.6

註：非均勻分布桶之差異(%), 與標準值比較。

均勻分布桶之差異(%), 與 6 部偵檢器平均值比較。

表 5: 代碼 B 固定式量測系統活度比對結果

非均勻分布桶	密度 (g/cm ³)	¹³⁷ Cs (Bq)	差異 (%)	⁶⁰ Co (Bq)	差異 (%)
Upper- levels	0.76	102000	14.2	40200	21.4
Center- levels	0.95	136000	52.3	48200	45.5
lower -levels	0.84	106000	18.7	37900	14.4
Center- rods	0.96	37400	-56.8	38400	-50.6
Side- rods	0.54	100825	16.3	75500	-2.9
均勻分布桶					
活性碳	0.97	12500000	-4.9	117000	-11.0
混凝土	1.90	143925	19.9	126700	16.5
水溶液	0.96	417000	4.6	368000	5.1
樹脂	0.85	30500	13.1	283000	6.3

註: 非均勻分布桶之差異(%), 與標準值比較。

均勻分布桶之差異(%), 與 6 部偵檢器平均值比較。

表 6: 代碼 C 固定式量測系統活度比對結果

非均勻分布桶	密度 (g/cm ³)	¹³⁷ Cs (Bq)	差異 (%)	⁶⁰ Co (Bq)	差異 (%)
Upper- levels	0.76	113000	26.5	37100	12.0
Center- levels	0.95	84100	-5.8	28700	-13.3
lower -levels	0.84	49800	-44.2	18500	-44.1
Center- rods	0.96	62300	-28.1	48400	-37.8
Side- rods	0.54	93700	8.1	63100	-18.9
均勻分布桶					
活性碳	0.97	14500000	10.4	130000	-1.1
混凝土	1.90	121000	0.8	115000	5.7
水溶液	0.96	353000	-11.4	305000	-12.9
樹脂	0.85	26600	-1.4	249000	-6.5

註: 非均勻分布桶之差異(%), 與標準值比較。

均勻分布桶之差異(%), 與 6 部偵檢器平均值比較。

表 7: 代碼 D 固定式量測系統活度比對結果

非均勻分布桶	密度 (g/cm ³)	¹³⁷ Cs (Bq)	差異 (%)	⁶⁰ Co (Bq)	差異 (%)
Upper- levels	0.76	90300	1.1	30200	-8.8
Center- levels	0.95	103000	15.3	33700	1.8
lower -levels	0.84	50300	-43.7	18600	-43.8
Center- rods	0.96	31700	-63.4	34200	-56.0
Side- rods	0.54	61800	-28.7	48200	-38.0
均勻分布桶					
活性碳	0.97	12400000	-5.6	113000	-14.1
混凝土	1.90	123000	2.5	111000	2.1
水溶液	0.96	356000	-10.7	308000	-12.1
樹脂	0.85	18200	-32.5	237000	-11.0

註: 非均勻分布桶之差異(%), 與標準值比較。

均勻分布桶之差異(%), 與 6 部偵檢器平均值比較。

表 8: 代碼 E 固定式量測系統活度比對結果

非均勻分布桶	密度 (g/cm ³)	¹³⁷ Cs (Bq)	差異 (%)	⁶⁰ Co (Bq)	差異 (%)
Upper- levels	0.76	70680	-20.8	40780	23.1
Center- levels	0.95	85840	-3.9	32600	-1.6
lower -levels	0.84	75700	-15.2	27180	-17.9
Center- rods	0.96	33080	-61.8	34250	-56.0
Side- rods	0.54	74500	-14.0	63290	-18.6
均勻分布桶					
活性碳	0.97	11620000	-11.6	174700	32.9
混凝土	1.90	111100	-7.4	104300	-4.1
水溶液	0.96	421900	5.9	362100	3.4
樹脂	0.85	30010	11.3	317600	19.3

註: 非均勻分布桶之差異(%), 與標準值比較。

均勻分布桶之差異(%), 與 6 部偵檢器平均值比較。

表 9: 代碼 F 固定式量測系統活度比對結果

非均勻分布桶	密度 (g/cm ³)	¹³⁷ Cs (Bq)	差異 (%)	⁶⁰ Co (Bq)	差異 (%)
Upper- levels	0.76	100160	12.2	33648	1.6
Center- levels	0.95	101269	13.4	36559	10.4
lower -levels	0.84	48580	-45.6	16396	-50.5
Center- rods	0.96	35353	-59.2	31995	-58.9
Side- rods	0.54	63603	-26.6	47064	-39.5
均勻分布桶					
活性碳	0.97	15405600	17.3	149144	13.4
混凝土	1.90	100200	-16.5	92600	-14.9
水溶液	0.96	432400	8.5	374600	7.0
樹脂	0.85	33614	24.6	281260	5.6

註: 非均勻分布桶之差異(%), 與標準值比較。

均勻分布桶之差異(%), 與 6 部偵檢器平均值比較。

3. 低放射性廢棄物整桶量測技術規範

依據「放射性物料管理法」第二十一條，所訂定之「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」第三章，規定低放射性廢棄物處置、貯存，必須述明廢棄物來源、核種與活度，並依核種與活度分為 A、B、C 與超 C 類，再依類別處置。

由此可知廢棄物之核種與活度，為廢棄物分類之重要依據，而核種活度量測技術之可靠度與量測數據精確度，有賴良好認證制度之運作維持。放射性廢棄物量測之追溯與認證，對於廢棄物產生單位量測能力與公信力的展現、主管機關之有效管制及民眾對於廢棄物處置之接受度，扮演舉足輕重的角色，因此在國際上也漸漸重視相關的認證追溯制度。

由於各國法規制度及社會民情不同，對於低放射性廢棄物核種與活度量測品質，及認證追溯之要求也不盡相同，因此如何配合我國現有量測標準追溯體系，建立符合本土化之追溯鏈，以確保量測結果之公信力，則有賴制定統一且合理可行，低放射性廢棄物活度量測之例行校正與量測比對技術規範，提供國內主管機關及各核設施做為參考之依據。

4. 結論

舉行低放射性廢棄物整桶活度量測試驗，可藉以了解國內核設施或研究機關，量測低放射性廢棄物整桶加馬活度之能力，並進一步整合國內量測技術與建立放射性廢棄物量測認證制度，以提升國內低放射性廢棄物量測技術能力達國際水平。另完成低放射性廢棄物整桶量測技術規範草案，說明如何配合我國現有量測標準追溯體系，建立符合本土化之追溯鏈，以確保量測結果之公信力，並提供國內主管機關及各核設施做為參考之依據。

4.1 研究結論

(1) 舉行低放射性廢棄物整桶活度量測能力試驗

103 年低放射性廢棄物整桶活度量測能力試驗結果顯示，4 桶活度均勻分布測試桶，6 部偵檢器能譜分析結果與平均值間的差異，最大為廢樹脂桶及活性碳桶，其相對偏差分別為 25 %(^{137}Cs)及 33 %(^{60}Co)；5 桶活度非均勻分布測試桶，6 部偵檢器假設整桶活度均勻分布進行能譜分析，量測結果與已知標準值間的差異，偏差最大為射源垂直放置於桶中間的測試桶，其相對偏差分別為-65 %(^{137}Cs)及-62 %(^{60}Co)。

(2) 建立低放射性廢棄物整桶量測技術規範

本研究完成低放射性廢棄物整桶量測技術規範草案，說明如何配合我國現有量測標準追溯體系，建立符合本土化之追溯鏈，以確保量測結果之公信力，並提供國內主管機關及各核設施做為參考之依據。

4.2 成果效益

本研究具有下列效益：

- (1)學術成就：完成專業研究報告一冊。另彙整 103 年低放射性廢棄物整桶活度量測能力試驗結果，投稿第 20 屆國際放射性核種量測與應用研討會(International Conference on Radionuclide Metrology and its Applications, ICRM 2015)，透過參與國際相關技術研討會，促進國際交流與提昇我國低放射性廢棄物整桶活度量測技術與世界同步。
- (2)技術創新：舉辦「低放射性廢棄物加馬活度量測比對說明會」，邀請國內相關量測實驗室，參與桶型加馬活度量測比對活動。對整合國內低放射性廢棄物整桶加馬活度量測能力，並促進核設施間廢棄物量測能力技術交流具有實質成效。
- (3)社會影響：邀請國內與低放射性廢棄物量測相關實驗室，參與桶型加馬活度量測比對活動。藉由比對成果與技術精進，可以提升公眾對於我國各單位低放射性廢棄物活度量測結果的信心。
- (4)非研究類成就：完成低放射性廢棄物整桶量測技術規範草案一份，說明如何配合我國現有量測標準追溯體系，建立符合本土化之追溯鏈，以確保量測結果之公信力，透過制定統一且合理可行，低放射性廢棄物活度量測之例行校正與量測比對技術規範，提供國內主管機關及各核設施做為參考之依據。
- (5)經濟效益：低放射性廢棄物整桶活度量測能力之建立，透過精確量測放射性廢棄物中核種的活度與組成，做為廢棄物分類之重要依據，除可我國相關法規之要求，更可減少廢棄物處置之成本。

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. 林國禎, “SWAM-3 量測系統操作說明書”, INER-SOP-0162R, 2009
6. “Hardware Reference Manual for Taiwan-INER Q2 system”, Document#37677 rev.A”, Canberra Inc., 2004.
7. CNS 17025：測試與校正實驗室能力一般要求，經濟部標準檢驗局，民國九十年三月。
8. ISO/IEC 17025：General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.
9. ISO/IEC 17025：2005，測試與校正實驗室能力一般要求之實驗室認證規範，財團法人全國認證基金會，TAF-CNLA-R01(2)，2005。
10. International Organization for Standardization, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, ISO, Switzerland, 1995.
11. 財團法人全國認證基金會，測試結果量測不確定度評估指引 TAF-CNLA-G03(1)，2005。

12. 一定活度或比活度以下放射性廢棄物管理辦法，中華民國 93 年 12 月 29 日，會物字第 0930047668 號函發文實施，2004。
13. “Minimum Detectable Concentrations with Typical Radiation Survey Instruments for Various Contaminants and Field Conditions.” NUREG-1507, 1998.
14. 財團法人全國認證基金會，測試領域環境試樣放射性核種技術規範，TAF-CNLA-T09(1)，2004。
15. ANSI, American national standard traceability of radioactive sources to NIST and associated instrument quality control. N42.22-1995, American National Standards Institute, New York, 1995.

附錄：低放射性廢棄物整桶量測技術規範(草案)

目錄

前言

第1章：名詞與定義

第2章：管理要求

第3章：技術要求

第4章：量測系統校正要求

第5章：量測不確定度評估

第6章：能力試驗要求

參考文獻

附件一：加馬核種整桶量測系統計測效率擬合曲線範例

附件二：加馬核種整桶量測系統不確定度評估範例

前言

本文件提供我國低放射性廢棄物處置單位，使用桶型(55 加侖桶)之加馬核種比活度計測系統，執行低放射性廢棄物加馬核種與活度量測作業，及舉辦相關量測能力試驗時之技術參考。

第1章：名詞與定義

◆ 活度(activity)

指一定量之放射性核種，在一段時間內發生自發衰變之數目，活度單位為貝克(Bq)。

◆ 比活度(specific activity)

指單位質量之活度，比活度之單位為貝克/克(Bq/g)。

◆ 加馬總比活度(gamma total specific activity)

指單位質量之加馬總活度，加馬總比活度之單位為貝克/克(Bq/g)。

◆ 加馬核種比活度(gamma-nuclide specific activity)

指單位質量單一加馬核種之活度，加馬核種比活度之單位為貝克/克(Bq/g)。

◆ 背景(background)

儀器度量時，與預測試樣中放射性核種含量無關之信號反應。

◆ 待測核種(analyte)

待測定的放射性核種。

◆ 適宜空白試樣(appropriate blank sample)

與待分析之試樣，有相同物理與化學組成，但不含待測放射性核種之試樣。

◆ 最小可測活度(minimum detectable activity, MDA)

在無其他放射性核種干擾下，試樣所含放射性核種有 95% 之機率，可被偵測出的最小活度。

◆ **可接受最小可測活度(acceptable minimum detectable activity, AMDA)**

好的操作及要求下，可被接受的最小可測活度。

◆ **校正(calibration)**

在特定條件下，為確立量測儀器或量測系統的量測值(或實物量具、參考物質所代表的值)，與對應的計量標準所實現的量值(參考值)之間關係的一組操作。

◆ **參考值(reference value)**

受測量於嚴謹定義下的最佳估計值。

◆ **校正因子(calibration factor)**

參考值與儀器量測值的比值。

◆ **誤差(error)**

量測值與受測量之值(真值)的差異。

◆ **(量測的)不確定度[uncertainty (of measurement)]**

與量測結果有關的參數，用來表示量測結果的離散程度。

◆ **標準不確定度(standard uncertainty, u_i)**

量測結果的不確定度，以一倍標準差表示。

◆ **(標準不確定度之)A 類評估方法[Type A evaluation (of standard uncertainty)]**

藉由一系列觀測值的統計分析，計算標準不確定度之方法。

◆ **A 類標準不確定度(Type A standard uncertainty)**

以 A 類評估方法所得之不確定度。

◆ **(標準不確定度之)B 類評估方法[Type B evaluation (of standard uncertainty)]**

藉由一系列觀測值的統計分析以外之其他方式，計算標準不確定度之方法。

◆ **B 類標準不確定度(Type B standard uncertainty)**

以 B 類評估方法所得之不確定度。

◆ **組合標準不確定度(combined standard uncertainty, u_c)**

所有變異數或共變數分量，與其加權值乘積總和之正平方根。

◆ **相對組合標準不確定度(relative combined standard uncertainty)**

組合標準不確定度 $u_c(y)$ 與量測值 (y) 之比值，以百分比表示，亦即 $u_c(y)/y \times 100\%$ 。

◆ **擴充不確定度(expanded uncertainty, U)**

定義量測結果區間的量，期望合理賦予量測值有較高的信賴水準，為組合標準不確定度與涵蓋因子之乘積。

◆ **涵蓋因子(coverage factor, k)**

為組合標準不確定度乘數之因子，用以獲得擴充不確定度，通常涵蓋因子 k 在 2~3 之間。

第2章：管理要求^(1~3)

◆ 組織

量測實驗室內由實驗室主管，綜理整理測試(校正)之管理，且應：

- (1) 制定符合 ISO 或全國認證基金會(TAF)，測試領域之品質手冊、品質文件及標準操作程序書。
- (2) 確保每一測試(校正)，均依既定之標準操作程序執行，其輻安、工安及環保皆符合相關法令之要求。

◆ 品質系統

品質手冊及相關之品質文件，或作業程序尚應包含下列各項：

- (1) 敘述實驗室量測系統追溯標準及程序。
- (2) 敘述實驗室測試或校正的服務範圍。
- (3) 敘述使用的主要量測設備，及校正與維護程序。
- (4) 敘述校正或測試之方法。

◆ 文件管制

依實驗室品質手冊，及相關作業程序書之規定辦理。

◆ 要求、標單及合約之審查

依實驗室品質手冊，及相關作業程序書之規定辦理。

◆ 試驗與校正之外包

依實驗室品質手冊，及相關作業程序書之規定辦理。

◆ 服務與供應品之採購

依實驗室品質手冊，及相關作業程序書之規定辦理。

◆ 客戶服務

依實驗室品質手冊，及相關作業程序書之規定辦理。

◆ **抱怨**

依實驗室品質手冊，及相關作業程序書之規定辦理。

◆ **不符合測試與(或)校正工作之管制**

依實驗室品質手冊，及相關作業程序書之規定辦理。

◆ **矯正措施**

依實驗室品質手冊，及相關作業程序書之規定辦理。

◆ **預防措施**

依實驗室品質手冊，及相關作業程序書之規定辦理。

◆ **紀錄**

實驗室管理、儀器校正與量測測試產生之所有原始資料、報告應予保存，保存期限應符合主管機關或全國認證基金會(TAF)之規定。

◆ **內部稽核**

依實驗室品質手冊，及相關作業程序書之規定辦理。

◆ **管理審查**

依實驗室品質手冊，及相關作業程序書之規定辦理。

第 3 章：技術要求^(1~3)

◆ 概述(無特定要求)

◆ 人員

- ▶ 實驗室人員應定期接受在職訓練，項目包含放射性物質操作、輻射防護、輻射度量、污染處理、放射性廢棄物處理等，可視人員工作實務需求選項訓練。
- ▶ 實驗室內從事放射性工作之人員資格及各項作業，需符合游離輻射防護法、放射性物料管理法及其相關子法之規定。
- ▶ 實驗室人員必須遵守實驗室輻射安全之相關規定。

◆ 設施與環境條件

- ▶ 實驗室的配置應做適當規劃或安排，使校正(測試)作業得以順利執行，並符合各項安全的要求。
- ▶ 實驗室之輻射安全與工業衛生安全均應兼顧，備有清楚輻射示警標誌，與一般安全警示標誌及適當放射性污染管制措施，對於放射性廢棄物之接收與處理，均應有特定的貯存區域。
- ▶ 實驗室應備有偵檢與去除實驗室環境，及量測系統放射性污染之設備與作業能力。
- ▶ 校正用射源、參考物質、放射源、放射性廢棄物(固體)等，均應收存於特定場所，並須符合輻射安全規定，必要時加上屏蔽以維護人員安全。
- ▶ 放射性廢棄物於實驗室之暫貯，除須依輻射安全規定外，尚須考量以不干擾測試過程之準確性及量測能力為原則。
- ▶ 實驗室負責人應負責實驗室內，及其外圍之輻射安全。

➤實驗室應有適當的措施，使工作人員所接受的輻射曝露符合合理抑低 (ALARA)原則。

◆ **試驗與校正方法及方法確認**

實驗室所採用的試驗與校正方法，須為公認的標準方法或經過驗證確認合理可行的方法。

◆ **設備**

實驗室各項量測設備必須定期進行校正與品管/品保作業，確認量測時在儀器的校正有效期限內，且其性能及功能正常。

◆ **量測追溯性**

實驗室的量測結果必須評估其不確定度，且可追溯至國家標準或國際標準。

◆ **抽樣(無特定要求)**

低放射性廢棄物整桶活度量測能力試驗之標準桶，係由舉辦能力試驗單位提供，故無抽樣之要求。

◆ **試驗與校正件之處理**

試驗與校正件之處理，必須符合實驗室品質手冊、品質文件及標準作業程序書之規定。

◆ **試驗與校正結果品質之保證**

試驗與校正結果品質之保證，必須符合相關法規及實驗室品質手冊之規定。

◆ **結果報告**

測試報告內容應包含：

- (1) 標題
- (2) 測試單位與受測單位之名稱、住址。
- (3) 測試項目。
- (4) 計測日期。
- (5) 計測過程中所產生數據之完整記錄。
- (6) 分析數據所用之統計方法或演算公式。
- (7) 測試結果與量測不確定度。

第 4 章：量測系統校正要求

- ◆ 量測實驗室每年應至少進行一次，量測系統之計測效率校正及能量校正：加馬能量範圍應至少涵蓋 50 keV 至 1400 keV。
- ◆ 計測效率須考慮密度-效率修正，密度修正範圍至少涵蓋 0.6 g/cm^3 至 1.2 g/cm^3 。計測效率校正方法，得使用電腦程式或標準校正假體來進行。
- ◆ 各類量測系統之計測效率擬合曲線，參考範例如附錄一。
- ◆ 廢棄物秤重裝置須定期進行校正或查驗，秤重範圍在 50 kg 至 300 kg 之間，其誤差不得大於 $\pm 10\%$ ($k=1$)。

第 5 章：量測不確定度評估

- ◆ 實驗室應對所產出的測試結果，評估其量測不確定度，不確定度之評估方法，必須符合 ISO⁽⁴⁾及全國認證基金會(TAF)⁽⁵⁾之定義及規定。
- ◆ 量測不確定度的來源組成，應至少包含系統穩定性、淨計數、偵測效率、活度均勻性及樣品重量等項目。
- ◆ 不確定度之評估結果，應依其評估方式區分為 A 類標準不確定度與 B 類標準不確定度，並據以計算組合不確定及擴充不確定度。
- ◆ 擴充不確定度採用具 95%信賴區間之擴充係數($k = 2$)來表示。
- ◆ 量測不確定度評估結果，範例如附錄二所示。

第6章：能力試驗要求

- ◆ 接受分析測試之能力試驗項目：桶型(55加侖)。測試樣內所含之放射性核種，為加馬輻射放射形式，各實驗室依其需要，可選擇適當的時機參加測試，每三年至少應參加測試一次。
- ◆ 實驗室分析測試能力，其最小可測活度(MDA)須小於「一定活度或比活度以下放射性廢棄物管理辦法」外釋限值⁽⁶⁾，其能力試驗結果必須符合偏差值及追溯性之要求。
- ◆ 最小可測活度(MDA)之計算方法如下⁽⁹⁾：

$$MDA = \frac{(4.65S_B + 2.71)}{60 \times E \times R \times V \times T}$$

單位=Bq/g

T：適宜空白試樣之計數時間(分)。

SB：一組得自適宜空白試樣計數值之標準差。適宜空白試樣之化學處理程序、計測方法、計測時間及幾何形狀，均與待分析試樣相同。

E：待測核種之計數效率。

R：化學回收率。

V：試樣重。以質量(g)為單位。

- ◆ 每一組測試類別中，第 i 個測定值 V_i 對於真值 V_s (利用添加參考物質或射源)之偏差值(B_i)，定義如下⁽⁸⁾：

$$B_i = \frac{V_i - V_s}{V_s}$$

式中

V_i ：某一類測試之第 i 個測定值。

V_s ：測試樣所含之確實量，即添加量。

- ◆ B_i 在 -0.30 至 +0.30 之間，則測試結果之偏差值符合能力試驗之要求。
- ◆ 每一組測試類別中，第 i 個測定值 V_i 對於真值 V_s (利用添加參考物質或射源) 之追溯性(Traceability)，以 E_n 值來定義⁽⁹⁾：

$$E_n = \left| \frac{V_i - V_s}{3 \times \sqrt{u_{c_i}^2 + u_{c_s}^2}} \right|$$

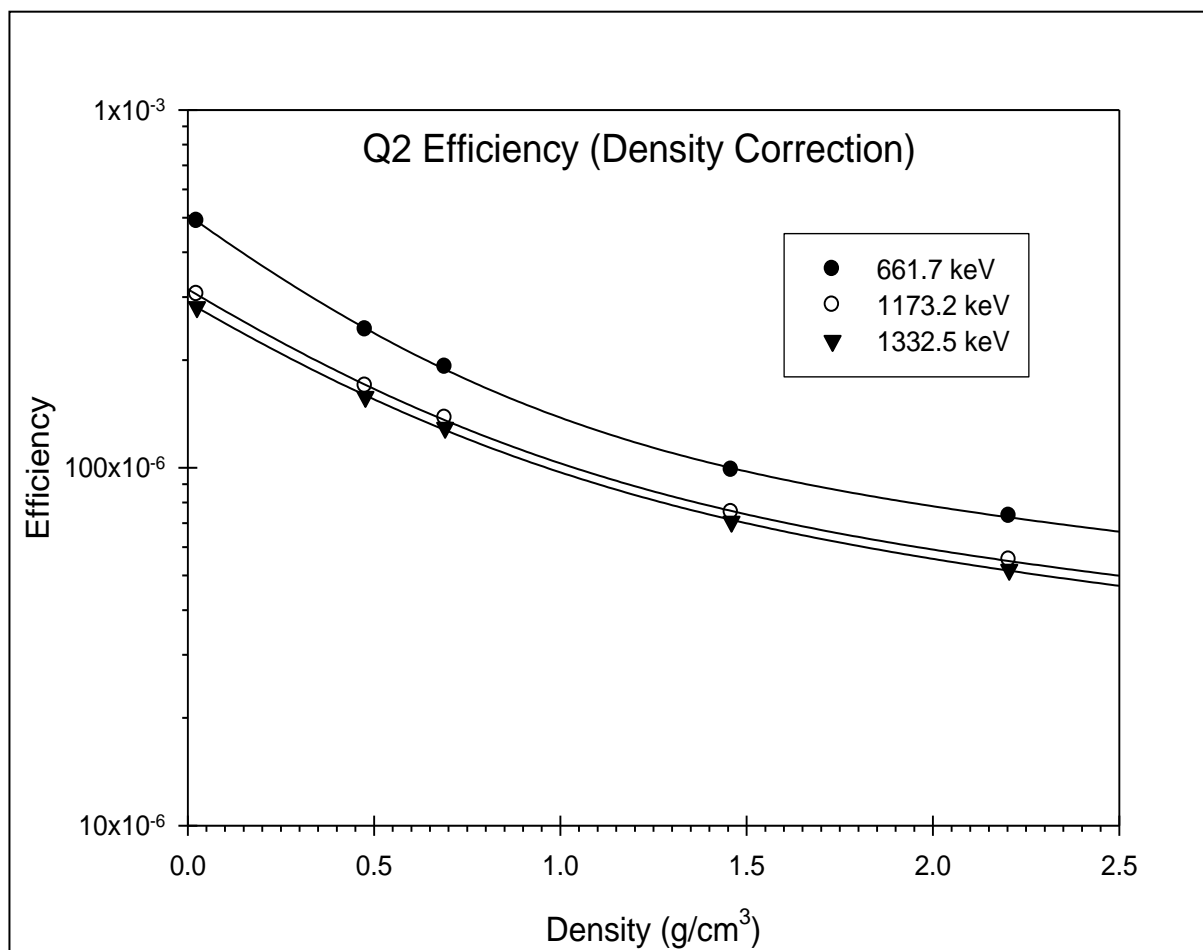
式中

u_{c_i} ：某一類測試之第 i 個測定值之組合不確定度。

u_{c_s} ：測試樣所含之確實量(即添加量)之組合不確定度。

- ◆ E_n 值 ≤ 1 且 $u_{c_i} \leq 15\%$ ，則測試結果符合能力試驗追溯性之要求。
- ◆ 實驗室應對認證測試之試樣，向能力試驗執行機構提出下列報告：
 - (1) 測試類別
 - (2) 採用背景(值)。
 - (3) 分析測得或經衰變修正後之比活度。
 - (4) 度量時間。
 - (5) 簡要說明分析設備及度量儀器之性能。
 - (6) 計測效率及校正方法。
 - (7) 量測不確定度($k = 2$)。
 - (8) 最低可測活度(MDA)。
- ◆ 能力試驗執行機構應對實驗室之測試結果，是否符合本章所訂可接受最小可測活度(AMDA)、偏差值(B_i)及追溯性之要求做決定，並告知測試單位。
- ◆ 實驗室應至少每三年接受一次能力試驗。

附件一：加馬核種整桶量測系統計測效率擬合曲線範例



附件二：加馬核種整桶量測系統不確定度評估範例

分析項目		相對標準不確定度 (%)	
		A 類	B 類
系統穩定性	^{137}Cs	3.48	/
	【^{60}Co】	【1.06】	
淨計數：	^{137}Cs	3.38	/
	【^{60}Co】	【1.04】	
偵測效率：	標準射源	/	3
	^{137}Cs 擬合曲線	/	3.13
	【^{60}Co 擬合曲線】		【2.15】
活度均勻性		/	7.97
樣品重量		0.5	/
計測時間		/	0.002
相對標準不確定度		4.88 【1.57】	9.09 【8.78】
組合不確定度		10.32	【8.92】
擴充不確定度 k=2		20.63	【17.84】