

行政院原子能委員會
委託研究計畫期末研究報告

核設施除役之輻射安全技術研究
**Radiation safety techniques for nuclear facilities
decommissioning**

計畫編號：

受委託機關(構)：原子能委員會核能研究所

計畫主持人：黃珮吉

聯絡電話：(03)4711400 ext.7972

計畫參與人員：黃文治、李碧芬、葉俊賢、袁明程

聯絡人：簡秀鳳

報告日期：105 年 12 月 23 日

目 錄

目 錄.....	iii
中文摘要.....	iv
英文摘要.....	v
壹、 前言(計畫緣起).....	6
貳、 研究目的.....	7
參、 研究方法與過程.....	8
肆、 主要發現與討論.....	10
伍、 結論與建議.....	37
陸、 參考文獻.....	38

中文摘要

本計畫係配合核設施除役輻射防護管制業務需求所提出的四年期科技發展計畫，著重在建立及精進核設施除役之輻射偵檢儀器與人員、環境劑量管制所需的校正評估技術，以建構完整的輻射防護管制體系。本年度研究成果為：(1) 探討以背景輻射劑量率或建廠前背景中核種活度兩種方法，做為除役場址清潔標準適切性研究；(2) 進行除役場址核種外釋活度標準之參數靈敏度分析；(3) 完成 567 部手提式劑量率偵檢器、225 部污染偵檢器校正結果統計分析；(4) 完成稻米及乳品環境核種分析儀器校正用參考物質製備與均勻度測試。

關鍵字：核設施除役、手提式偵檢器、參考物質

英文摘要

This project is a four-year scientific development project proposed for radiation protection management of nuclear power plant decommissioning. It aims to establish and improve the calibration and evaluation techniques required in controlling radiation detectors, personnel and environmental doses concerning nuclear facility decommissioning to construct a complete radiation protection control system. The results of this year's research are as follow: (1) Investigated the feasibility of using the background doses or radionuclide concentrations as a criterion for decommissioning. (2) Analyzed the parameter sensitivity by using RESRAD-onsite codes. (3) Analyzed the calibrated results of 567 portable dose rate survey meters and 225 contamination survey meters. (4) Preparation of two kinds of reference materials (rice and milk powder) and homogeneity testing.

Keyword : nuclear facilities decommissioning; portable survey meters;
reference materials

壹、前言(計畫緣起)

『核設施除役之輻射安全研究』計畫係依據105年2月1日原能會『會輻字第1050001811號』函，委請本核能研究所於105年度協助辦理，本計畫係考量除役後之場址，需依據除役後廠址環境輻射偵測報告導則予以管制，以確保除役後廠址環境輻射造成民眾的劑量符合法規限值要求；且配合除役之廠址環境特性及相關參數分析，應建立除役場址土壤導出濃度指引水平(DCGL)推導技術，以確保環境、民眾、工作人員之安全。此外為提供核設施除役輻防管制作業之參考依據，須確認各種型式除役輻射偵測儀器之使用功能、適用範圍及最佳偵測條件等基本特性，並建立最適化之儀器校正技術、標準測試源與性能評估技術，並依據國際標準規範，建立除役之輻射偵測儀器校正系統與量測技術程序，建構完整的儀器檢校追溯體系，確保除役輻射量測之準確度與公信力。

貳、 研究目的

我國目前三座進行商業運轉之核能電廠，以40年運轉執照效期估算，均將陸續於十年內達運轉年限而需面臨除役；因此，本計畫自102年起則開始致力於發展除役作業人員、環境與生物體劑量評估模式研究，以確保環境、民眾、工作人員之安全；同時為提供核設施除役輻防管制作業之參考依據，除確認各種型式除役輻射偵測儀器之使用功能、適用範圍及最佳偵測條件等基本特性之外，並建立最適化之儀器校正技術、標準測試源與性能評估技術，以確保除役輻射量測之準確度與公信力。

本計畫於除役輻防管制法規研究與技術發展方面，參考美國核管會NUREG-1501號報告，探討以背景輻射劑量做為場址除役清潔標準之可行性與正當性，以供主管機關制定相關法規之參考；並進行場址內土壤殘餘輻射劑量評估程式(RESRAD-ONSITE)參數靈敏度分析，找出可能顯著影響劑量評估結果之關鍵參數，以完備除役輻射劑量評估技術；此外，透過研製環境核種分析儀器校正用參考物質，確保加馬能譜量測結果準確性與可追溯性，並針對國內常用手提式輻射偵檢器之種類、特性與適用範圍等進行彙整，進而分析各類型偵檢器的準確度範圍，以建構完整的儀器檢校追溯體系與量測技術程序，提昇除役輻射量測之準確度與可靠度。

參、研究方法與過程

一、核設施除役之場址背景輻射影響之探討

(a) 除役場址清潔標準選定研究探討

對於規劃作為綠地使用之除役場址，一般皆期望場址之殘餘輻射能降低至背景輻射之水平，以確保環境及民眾之安全，因此就產生以背景輻射劑量作為場址除役清潔標準之想法。然而由於背景輻射因為空間、時間不同，有顯著差異之特性，以及利用背景輻射劑量作為場址除役清潔標準，將得到過高輻射風險評估結果，使得以背景輻射水平作為場址除役清潔標準之概念，值得進一步探討其可行性與正當性。本年度參考美國核管會 NUREG-1501 號報告，探討以背景輻射水平作為場址除役清潔標準之適切性，俾供主管機關制定除役輻防管制法規之參考。

(b) 除役場址核種外釋活度推導技術之建立與精進

核電廠除役工作可否順利推行，其中關鍵技術之一，在於建立除役場址核種外釋活度推導(Derived Concentration Guideline Level, DCGL)技術，本計畫已先後在 103 年及 104 年，利用美國阿崗國家實驗室(Argonne National Laboratory, ANL)所開發 RESRAD-ONSITE 與 RESRAD-OFFSITE 程式，完成除役後場址土壤之 DCGL 推導程序與技術建立。然而，如何在程式眾多內建參數中，找出可能顯著影響劑量評估結果之參數，本年度利用場址內殘餘輻射劑量評估程式(RESRAD-ONSITE)，進程式內建參數靈敏度分析，藉此精進除役後場址土壤 DCGL 推導技術。

二、國內常用手提式輻射偵檢器於量測環境輻射準確度研究

環境背景輻射常依地域和季節不同而有所變動，在低劑量率

環境輻射量測上，常因使用儀器種類及特性上差異，而有不同量測結果。為了解各單位使用手提式輻射偵檢器之概況，本年度針對國內通過全國認證基金會(TAF)認證之校正實驗室，依據偵檢器種類、特性與適用範圍等進行資料彙整，進而分析各類型偵檢器的準確度範圍，並與相關國際規範進行比較分析。

三、研製環境核種分析儀器校正用參考物質(稻米、乳品)

財團法人全國認證基金會(TAF)，目前開放環境試樣放射性核種分析測試實驗室申請認證的測試項目，共計有：土壤、水樣、植物樣、肉樣、空浮濾紙樣、牛乳樣、米樣、菇類、人工尿樣及人工糞樣等十種環境試樣，103年及104年本團隊已於『提升輻射安全管制技術之研究』計畫，完成土壤、水樣、植物樣與肉樣四種環境試樣參考物質之製備，本年度則完成米樣與牛乳樣環境試樣參考物質之製備，並依據ISO GUIDE 34、35之技術需求，完成參考物質均勻度測試與添加核種不確定度評估。

肆、主要發現與討論

一、核設施除役之場址背景輻射影響之探討

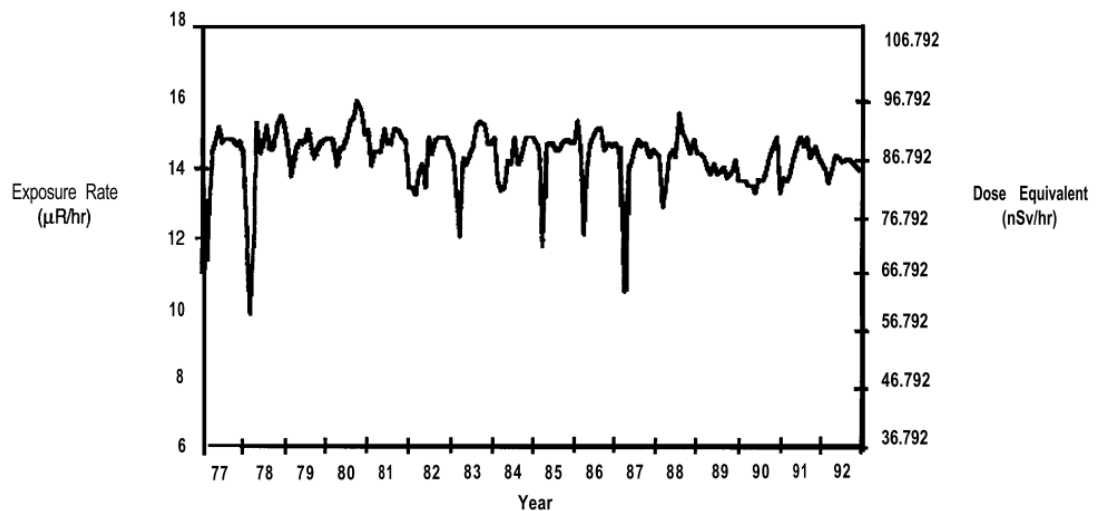
(a) 除役場址清潔標準選定研究探討

未來十年內，國內三座核能電廠將陸續達運轉年限，而可能需面臨除役，目前國內除役後場址輻射劑量之管制，係由核子反應器設施管制法第二十二條規定來加以規範，而此規範亦與美國現行管制法規內容相近(10 CFR 20 subpart E)。然而在美國訂定相關管制法規初期，許多民眾或環保團體曾提出以背景輻射水平，做為除役後場址容許殘餘輻射之管制依據，因此美國核管會透過 NUREG-1501 號報告，說明以背景輻射水平做為除役場址清潔標準概念之可行性與正當性。

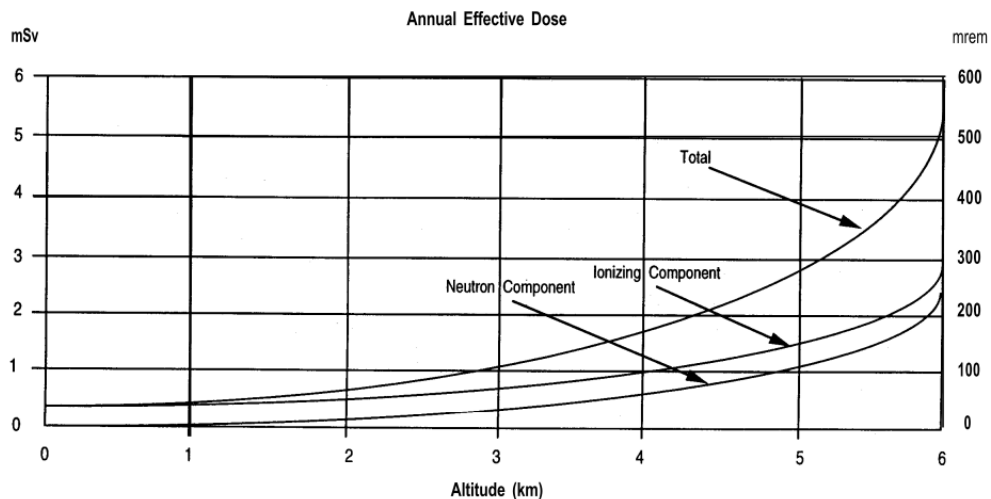
NUREG-1501 號報告中，提出兩種以背景輻射水平做為除役場址清潔標準之方法。第一種方法為使用天然背景輻射劑量率；另一種方法為使用建廠前背景中天然放射性核種活度。因此，首先需要了解背景輻射之定義，依據游離輻射防護法第二條中規定，所謂背景輻射一般包含(一)宇宙射線、(二)天然存在於地殼或大氣中之天然放射性物質釋出之游離輻射、(三)一般人體組織中所含天然放射性物質釋出之游離輻射，及(四)因核子試爆或其他原因而造成含放射性物質之全球落塵釋出之游離輻射。

考量天然背景輻射隨時間(圖一)與空間(圖二)不同而有變異之特性，以美國為例，一般民眾年接受背景輻射劑量為 1 至 10 mSv，平均接受背景輻射劑量約為 3.0 mSv，包含吸入氫氣之衰變子核(2.0 mSv)、吸入非氫氣之放射性氣體及吸入污染食物所造成體內曝露(0.4 mSv)、地表加馬體外曝露(0.28 mSv)、宇宙射線

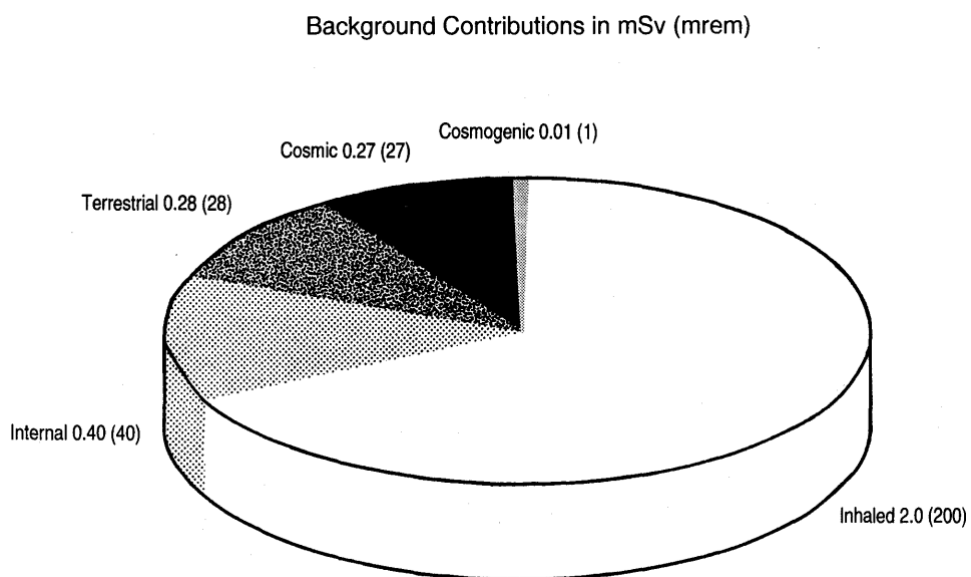
所造成體外曝露(0.27 mSv)及二次宇宙射線造成體外曝露(0.01 mSv)，劑量貢獻比例如圖三所示。若以天然背景輻射劑量做為除役場址清潔標準，除了較難以訂定單一管制值，另一方面，若以上述平均年劑量(3.0 mSv)做為除役場址之清潔標準，代表除役場址中殘餘輻射未來對民眾所造成之劑量，可能已超過美國聯想法規 10 CFR 20 Subpart D 中輻射作業對一般民眾之劑量限值(1.0 mSv，不包含背景輻射劑量)，若以背景輻射平均年劑量做為除役場址清潔標準，可能無法有效保障未來民眾或環境之輻射安全。



圖一、長期監測(16年)美國某場址戶外背景輻射曝露率變化



圖二、美國地區宇宙射線造成背景輻射劑量隨高度變化



圖三、美國各類型背景輻射劑量貢獻比例

因此，則浮現出另一種可行替代方案，係透過輻射對人體所造成之健康危害風險，做為管制之指標，在美國，因輻射曝露所造成健康危害風險，管制機關一般設定可接受值為 10^{-4} ，此風險值則相當於 0.03 mSv 之年輻射劑量。為了能夠評估除役場址殘

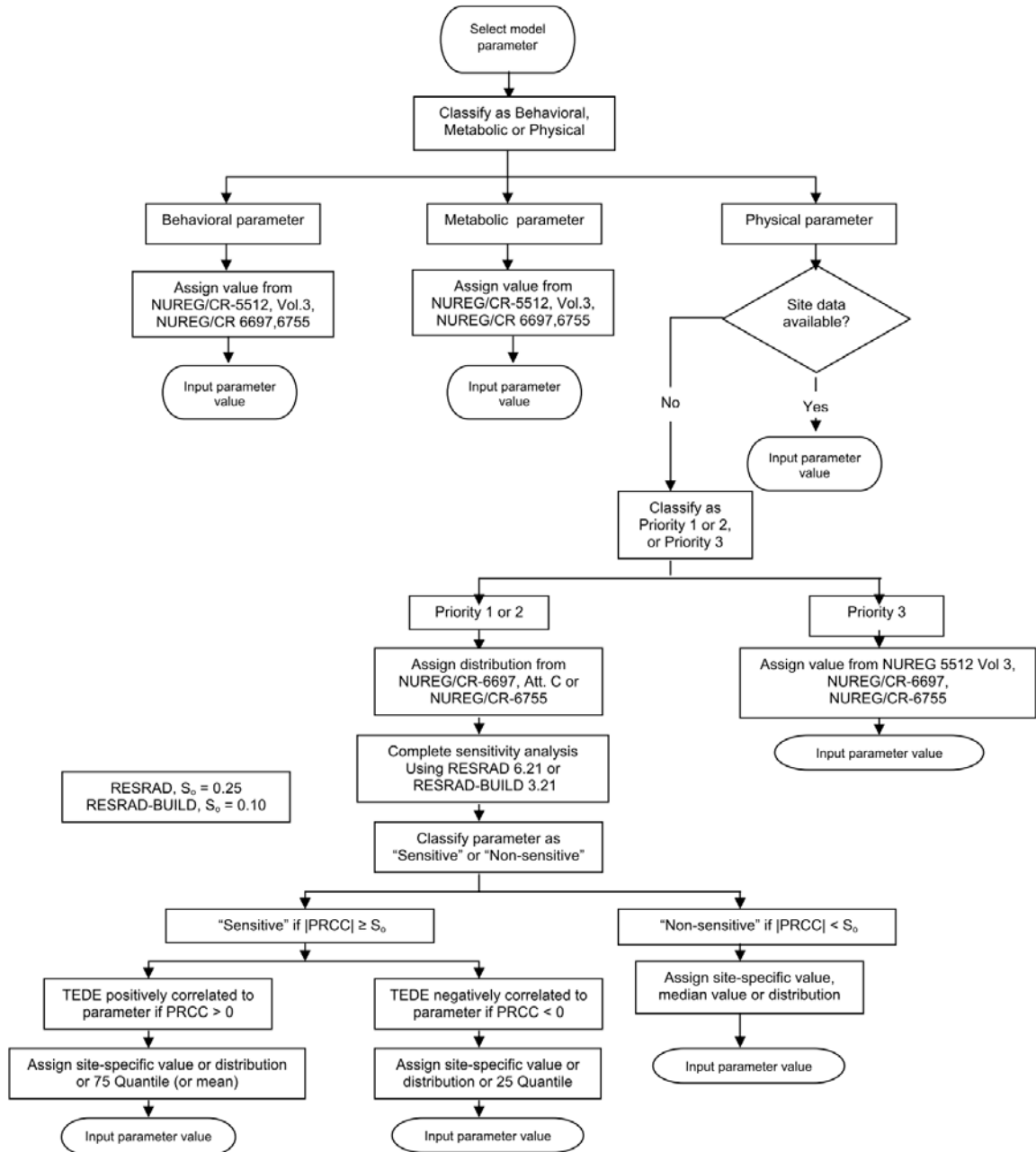
餘輻射對民眾所造成健康危害風險，則需透過量測背景中天然放射性核種活度來加以評估，也就是此篇報告中所提到以建廠前背景中天然放射性核種活度做為除役場址清潔標準，其中又可分為(i)除役場址殘餘放射性核種存在於天然環境中，及(ii)除役場址殘餘放射性核種不存在於天然環境中(如： ^{60}Co)。

若除役場址殘餘放射性核種存在於天然環境中(例如：鈾及鈾)，則可透過量測分析，以鑑別出除役場址中天然放射性核種及場址殘餘放射性核種各自所占比例，經由劑量評估並轉換成風險，以判別除役場址中殘餘放射性核種所造成健康風險，相較於該場址中天然放射性核種所造成健康風險，是否為合理可接受。另一種可能狀況，若除役場址殘餘放射性核種不存在於天然環境中(如： ^{60}Co)，同樣係透過劑量模擬評估，計算出所對應的輻射劑量(轉換成健康風險)，以判別是否超過上述建議風險管制限值(10^{-4})。

(b) 除役場址核種外釋活度推導技術之建立與精進

本年度以美國 Humboldt Bay 核電廠，於發展除役場址土壤導出濃度指引水平(Derived concentration guideline levels, DCGLs)過程中，所進行場址內殘餘輻射劑量評估程式(RESRAD-ONSITE)參數靈敏度分析研究為範例，以了解RESRAD 程式眾多內建參數中，那些輸入參數值之改變，將對劑量評估結果造成顯著影響。此模擬運算方法可分為兩個主軸：(i)輸入參數選定、(ii)執行 RESRAD-ONSITE 模擬運算。第一階段輸入參數選定流程，係依據 NUREG/CR-6697、NUREG/CR-6676 及 NUREG/CR-6692 報告所提供指引而建立(圖

四)；此外，選定過程中包含內建參數分類與排序，以及輸入參數數值之選定，最後，為利用 RESRAD-ONSITE 內建模組進行參數靈敏度分析。



圖四、RESRAD 程式輸入參數選定流程

a. 參數分類

6.0 版 RESRAD-ONSITE 劑量評估軟體中，共有 145 個程式內建參數，其中 130 個屬與核種特性不相關參數、10 個屬與核種特性相關參數以及 5 個與元素特性相關參數，並進一步區分為物理型(89 個)、行為型(16 個)及代謝型參數(10 個)；此外，另有 27 個屬複合型參數，與 3 個未分類參數。

b. 參數排序

145 個 RESRAD 內建參數，將依據下列四個指標積分總和，排序為：1(高度優先)、2(中度優先)與 3(低度優先)。

(1) 劑量評估相關性：用來選擇數學運算模式之參數，屬於非相關參數，給定評分 9；其餘與劑量評估相關參數，給定評分 0。

(2) 影響劑量評估結果程度：以下述計算公式，衡量參數改變對劑量評估結果影響之程度，並給予 1(最靈敏)至 7(最不靈敏)不同之評分。(1: $NDD > 1,000$; 2: $300 < NDD \leq 1,000$; 3: $100 < NDD \leq 300$; 4: $50 < NDD \leq 100$; 5: $10 < NDD \leq 50$; 6: $3 < NDD \leq 10$; 7: $NDD \leq 3$)

$$NDD = (D_{high} - D_{low}) / D_{base} \times 100\%$$

其中，

D_{high} ：將參數設定為最大值時，所獲得峰值劑量；

D_{low} ：將參數設定為最小值時，所獲得峰值劑量；

D_{base} ：將參數設定為初始設定值時，所獲得峰值劑量。

(3) 參數類型：依據參數類型不同，分別給予 1(物理型)、5(行為型)或 9(代謝型)之評分；此外，對於複合型參數，

則以較低評分為準。

- (4) 數據可取得性：依據文獻蒐集結果，決定數據之可取得性，並給予 1(較高可取得性)、3(較低可取得性)或 5(最低可取得性)之評分；此外，對於需場址特定數據之參數，給予 5 之評分。

若四個指標評分總和介於 3 至 6 之間，排序為 1(高度優先)；評分總和介於 7 至 10 之間，排序為 2(中度優先)；評分總和大於 10，則排序為 3(低度優先)。總計 145 個 RESRAD 內建參數中，10 個參數排序為高度優先、39 個參數排序為中度優先及 96 個參數排序為低度優先。詳細參數排序分類如表一所示。

表一、RESRAD-ONSITE 程式內建參數排序表

Priority 1	Priority 2	Priority 3
Distribution coefficient	Nuclide concentration	Number of unsaturated zone
Density of cover material	Area of contaminated zone	Time since placement of material
Density of contaminated zone	Thickness of contaminated zone	Groundwater concentration
Density of saturated zone	Length parallel to aquifer flow	Leach rate
Saturated zone total porosity	Cover depth	Solubility limit
Saturated zone effective porosity	Cover erosion rate	Use plant/soil ratio
Saturated zone hydraulic conductivity	Contaminated zone total porosity	Basic radiation dose limit
Unsaturated zone thickness	Contaminated zone erosion rate	Time for calculations
Depth of roots	Contaminated zone hydraulic conductivity	Contaminated zone field capacity
Transfer factors for plant	Contaminated zone b parameter	Humidity in air
	Evapotranspiration coefficient	Irrigation mode
	Wind speed	Irrigation rate
	Precipitation rate	Watershed area for nearby stream or pond
	Runoff coefficient	Accuracy for water soil computation
	Saturated zone hydraulic gradient	Saturated zone field capacity
	Saturated zone b parameter	Water table drop rate
	Well pump intake depth	Model: nondispersion or mass-balance
	Well pumping rate	Unsaturated zone field capacity
	Unsaturated zone density	Inhalation rate
	Unsaturated zone total porosity	Exposure duration
	Unsaturated effective porosity	Indoor time fraction
	Unsaturated zone soil-b parameter	Outdoor time fraction
	Unsaturated zone hydraulic conductivity	Shape of the contaminated zone (shape factor flag)
	Mass loading for inhalation	Leafy vegetable consumption
	Indoor dust filtration factor	Meat and poultry consumption
	External gamma shielding factor	Fish consumption
	Fruit, vegetables, and grain consumption	Other seafood consumption
	Milk consumption	Drinking water contaminated fraction
	Soil ingestion rate	Household water contaminated fraction
	Drinking water ingestion rate	Livestock water contaminated fraction

	<p>Aquatic food contaminated fraction Depth of soil mixing layer Wet-weight crop yields for non-leafy vegetables Weathering removal constant Wet foliar interception fraction for leafy vegetables C-14 evasion layer thickness in soil Transfer factors for meat Transfer factors for milk Bioaccumulation factors for fish</p>	<p>Irrigation water contaminated fraction Plant food contaminated fraction Meat contaminated fraction Milk contaminated fraction Livestock water intake for meat Livestock fodder intake for meat Livestock fodder intake for milk Livestock water intake for milk Livestock intake of soil Mass loading for foliar deposition Groundwater fractional usage for household water Groundwater fractional usage for livestock water Groundwater fractional usage for irrigation water Groundwater fractional usage for drinking water Wet-weight crop yields for leafy vegetables Wet-weight crop yields for fodder Length of growing season for non-leafy vegetables Length of growing season for leafy vegetables Length of growing season for fodder Translocation factor for non-leafy vegetables Translocation factor for leafy vegetables Translocation factor for fodder Wet foliar interception fraction for non-leafy vegetables Wet foliar interception fraction for fodder Dry foliar interception fraction for non-leafy vegetables Dry foliar interception fraction for leafy vegetables Dry foliar interception fraction for fodder Cover total porosity Cover volumetric water content Cover radon diffusion coefficient Building foundation thickness Building foundation density Building foundation total porosity Building foundation volumetric water content Building foundation radon diffusion coefficient Contamination radon diffusion coefficient Building indoor area factor Radon vertical dimension of mixing Buildino air exchange rate Building height Foundation depth below ground surface Radon-222 emanation coefficient Radon-220 emanation coefficient Storage times for fruits, non-leafy vegetables, and grain Storage times for leafy vegetables Storage times for milk Storage times for meat Storage times for fish Storage times for cnistacea and mollusks Storage times for well water Storage times for surface water Storage times for livestock fodder C-12 concentration in local water C-12 concentration in contamination soil Fraction of vegetation carbon absorbed from soil Fraction of vegetation carbon adsorbed from air C-14 evasion flux rate from soil C-12 evasion flux rate from soil Grain fraction in livestock feed for beef cattle Grain fraction in livestock feed for milk cow Inhalation dose conversion factors Ingestion dose conversion factors Slope factor - inhalation Slope factor - ingestion Slope factors - extemal Bioaccum</p>
--	--	--

RESRAD 程式內建機率式運算模組(probabilistic modules)，可供使用者執行參數靈敏度分析，以確認那些參數數值之改變，將顯著影響劑量評估之結果；此外，相較於使用單一數值之確定式(deterministic)劑量評估方式，機率式運算模組可使用參數分布值進行劑量評估。RESRAD 程式係使用蒙地卡羅(Monte Carlo)模擬運算，搭配拉丁超立體取樣(Latin Hypercube Sampling, LHS)技術，以產生輸入參數之運算向量。其餘進行機率式運算所需參數設定，則參考 NUREG/CR-6697 報告之建議。

Humboldt Bay 核電廠選用 NUREG/CR-5512 第 3 卷報告中，農場居民情節(Residential Farmer Scenario)進行參數靈敏度分析，該情節中關鍵群體之平均成員(average member of the critical group)為農場居民，並假設該成員居住於污染場址上、由該污染場址所取得全部或部分生活所需飲食，以及將場址內地下水做為飲水來源。土壤中殘餘輻射對該名成員所造成輻射劑量，係由直接體外曝露、吸入粉塵曝露、嚥入污染植物、肉類、奶類與海產、飲水、嚥入污染土壤所造成體內曝露，及吸入氬氣造成體內曝露途徑計算而得。

美國核管會 NUREG/CR-6697 報告中建議，當輸入和輸出資料呈現非線性關係、廣大全異尺度(widely disparate scales)或長尾巴分布時，適合使用部分排序相關係數(partial ranked correlation coefficient, PRCC)做為參數不確定度分析結果；若輸入和輸出資料呈現線性關係時，則以線性迴歸(linear regression)係數做為參數不確定度分析結果。由於使用 PRCC 做為參數不確定度分析結果具較高正確性，故一般選用 PRCC 來進行參數

不確定度分析。依據輸入參數與平均劑量峰值(peak of mean dose)之絕對值之大小，對於農場居民情節，若 PRCC 絕對值大於 0.25，則歸類為靈敏參數，若 PRCC 絕對值小於或等於 0.25，則屬於非靈敏參數。

完成程式運跑後，選擇【View】→【Text output】→【Uncertainty Report】，即可查得各個分析參數與輸出劑量之 PRCC 數值。以 H-3 核種為例，Uncertainty Report 中 Probabilistic Input 頁面，則條列出所有進行靈敏度分析參數之名稱、分布種類與使用分布值，以及進行靈敏度分析參數與平均劑量峰值之相關係數模擬結果，如圖五與圖六所示。由圖六中 PRCC 數值之排序可知，影響平均劑量峰值最為顯著之靈敏參數前 3 名分別為：Thickness of contaminated zone、Depth of roots 及 K_d of ^3H in contaminated zone，其 PRCC 數值分別為 0.93、-0.64 及 -0.27。

RESRAD, Version 6.5 T4 Limit = 30 days 05/06/2016 13:09 Page 2
 Probabilistic results summary : RESRAD Default Parameters
 File : C:\RESRAD_FAMILY\RESRAD\6.5\USERFILES\1050401_HUMBOLDT_BAY_H-3.RAD

Probabilistic Input

Number of Sample Runs: 2000

Number	Name	Distribution	Parameters			
1	THICK0	UNIFORM	.15	3.51		
2	DENSCZ	BOUNDED NORMAL	1.5635	.2385	.827	2.3
3	TPCZ	BOUNDED NORMAL	.41	.09	.1319	.6881
4	HCCZ	BOUNDED LOGNORMAL-N	1.36	2.17	.00478	3190
5	BCZ	BOUNDED LOGNORMAL-N	1.73	.323	2.08	15.3
6	EVAPTR	UNIFORM	.5	.75		
7	RI	UNIFORM	.36	.76		
8	DENSAQ	BOUNDED NORMAL	1.5105	.1855	.937	2.084
9	TPSZ	BOUNDED NORMAL	.43	.0699	.214	.646
10	EPSZ	BOUNDED NORMAL	.342	.0705	.124	.56
11	HCSZ	BOUNDED LOGNORMAL-N	.362	1.59	.0106	195
12	BSZ	BOUNDED LOGNORMAL-N	1.96	.265	3.02	15.5
13	DWIBWT	TRIANGULAR	6	10	30	
14	UW	UNIFORM	1173	1973		
15	H(1)	UNIFORM	0	8.08		
16	DENSUZ(1)	BOUNDED NORMAL	1.5635	.2385	.827	2.3
17	TPUZ(1)	BOUNDED NORMAL	.41	.09	.1319	.6881
18	EPUZ(1)	BOUNDED NORMAL	.315	.0905	.0349	.594
19	HCUZ(1)	BOUNDED LOGNORMAL-N	1.36	2.17	.00478	3190
20	BUZ(1)	BOUNDED LOGNORMAL-N	1.73	.323	2.08	15.3
21	MLINH	CONTINUOUS LINEAR	8	0	0	.00000E
22	SHF3	UNIFORM	.15	.95		
23	SHF1	BOUNDED LOGNORMAL-N	-1.3	.59	.044	1
24	DM	TRIANGULAR	0	.15	.6	
25	DROOT	UNIFORM	.3	4		
26	YV(1)	TRUNCATED LOGNORMAL-N	.56	.48	.001	.999
27	WLAM	TRIANGULAR	5.1	18	84	
28	RWET(2)	TRIANGULAR	.06	.67	.95	
29	DCACTC(1)	TRUNCATED LOGNORMAL-N	-2.81	.5	.001	.999
30	DCACTU1(1)	TRUNCATED LOGNORMAL-N	-2.81	.5	.001	.999
31	DCACTS(1)	TRUNCATED LOGNORMAL-N	-2.81	.5	.001	.999
32	BRTF(1,1)	TRUNCATED LOGNORMAL-N	1.57	1.1	.001	.999
33	BRTF(1,2)	TRUNCATED LOGNORMAL-N	-4.45	1	.001	.999
34	BRTF(1,3)	TRUNCATED LOGNORMAL-N	-4.6	.9	.001	.999
35	BBIO(1,1)	LOGNORMAL-N	0	.1		

圖五、³H核種進行靈敏度分析之參數列表

RESRAD Regression and Correlation output 05/06/16 13:11 Page: Coef 1
 Title : RESRAD Default Parameters
 Input File : C:\RESRAD_FAMILY\RESRAD\6.5\USERFILES\1050401_HUMBOLDT_BAY_H-3.RAD

Coefficients for peak of mean dose time Dose	Repetition =			
	PCC 1	SRC 1	PRCC 1	SRRC 1
Description of Probabilistic Variable	Sig Coeff	Sig Coeff	Sig Coeff	Sig Coeff
Thickness of contaminated zone	1 0.92	1 0.80	1 0.93	1 0.83
Density of contaminated zone	12 0.05	10 0.12	6 0.06	10 0.14
Contaminated zone total porosity	5 -0.10	8 -0.25	5 -0.08	7 -0.19
Contaminated zone hydraulic conductivity	4 0.14	13 0.05	4 0.22	12 0.08
Contaminated zone b parameter	8 -0.06	15 -0.02	14 -0.04	19 -0.01
Evapotranspiration coefficient	6 0.06	14 0.02	9 0.05	16 0.02
Irrigation	7 -0.06	12 -0.07	16 -0.03	14 -0.04
Density of saturated zone	13 0.05	2 0.55	20 0.03	3 0.31
Saturated zone total porosity	11 0.05	4 0.29	19 0.03	8 0.16
Saturated zone effective porosity	15 0.04	7 0.26	21 0.03	9 0.16
Saturated zone hydraulic conductivity	26 0.01	27 0.00	18 0.03	21 0.01
Saturated zone b parameter	10 -0.05	17 -0.02	12 -0.04	17 -0.01
Well pump intake depth	27 -0.01	28 0.00	27 -0.02	27 -0.01
Well pumping rate	32 -0.01	24 -0.01	15 -0.03	13 -0.04
Thickness of Unsaturated zone 1	35 0.00	35 0.00	33 0.01	33 0.00
Density of Unsaturated zone 1	16 0.04	3 0.48	10 0.05	2 0.54
Total Porosity of Unsaturated zone 1	14 0.05	5 0.27	7 0.05	4 0.29
Effective Porosity of Unsaturated zone 1	17 0.04	9 0.24	11 0.05	6 0.26
Hydraulic Conductivity of Unsaturated zone 1	34 0.00	34 0.00	23 0.03	23 0.01
b Parameter of Unsaturated zone 1	20 -0.04	20 -0.01	24 -0.02	24 -0.01
Mass loading for inhalation	22 0.02	22 0.01	26 0.02	26 0.01
Indoor dust filtration factor	25 0.01	26 0.00	35 0.01	35 0.00
External gamma shielding factor	19 -0.04	19 -0.01	13 -0.04	18 -0.01
Depth of soil mixing layer	23 0.02	23 0.01	31 0.01	31 0.00
Depth of roots	2 -0.61	6 -0.27	2 -0.64	5 -0.28
Wet weight crop yield of fruit, grain and non-leafy vegetables	21 0.03	21 0.01	34 0.01	34 0.00
Weathering removal constant of all vegetation	9 0.05	16 0.02	8 0.05	15 0.02
Wet foliar interception fraction of leafy vegetables	29 -0.01	30 0.00	28 -0.02	28 -0.01
Kd of H-3 in Contaminated Zone	3 -0.31	11 -0.11	3 -0.27	11 -0.09
Kd of H-3 in Unsaturated Zone 1	18 0.04	18 0.01	25 0.02	25 0.01
Kd of H-3 in Saturated Zone	33 0.00	33 0.00	30 -0.02	30 -0.01
Plant transfer factor for H	24 0.02	25 0.01	17 0.03	20 0.01
Meat transfer factor for H	30 -0.01	31 0.00	29 0.02	29 0.01
Milk transfer factor for H	31 -0.01	32 0.00	32 -0.01	32 0.00
Fish transfer factor for H	28 0.01	29 0.00	22 0.03	22 0.01
R-SQUARE	0.88	0.88	0.88	0.89

-Rank is set to zero if the dose is zero or the correlation matrix is singular.
 -R-SQUARE varies between 0 and 1 and is called the coefficient of determination; it provides a measure of the variation in the dependent variable (Dose) explained by regression on the independent variables.

圖六、³H核種靈敏度分析參數與平均劑量峰值之相關係數

接著個別分析其餘 19 個核種之參數靈敏度，可將 Humboldt Bay 核電廠 20 個關鍵核種之輸入參數與平均劑量峰值靈敏度分析結果，整理成表二。

表二、機率式運算參數設定

核種	靈敏參數	PRCC
²⁴¹ Am	Plant transfer factor for Am	0.93
	Thickness of contaminated zone	0.79
	Depth of roots	-0.59
¹⁴ C	Thickness of contaminated zone	0.98
	Depth of roots	-0.76
	Thickness of evasion layer for ¹⁴ C in soil	0.35
²⁴³ Cm	Plant transfer factor for Cm	0.91
	Thickness of contaminated zone	0.73
	External gamma shielding factor	0.60
	Depth of roots	-0.56
²⁴⁴ Cm	Plant transfer factor for Cm	0.92
	Thickness of contaminated zone	0.78
	Depth of roots	-0.60
²⁴⁵ Cm	Plant transfer factor for Cm	0.84
	Thickness of contaminated zone	0.80
	Depth of roots	-0.54
²⁴⁶ Cm	Plant transfer factor for Cm	0.92
	Thickness of contaminated zone	0.79
	Depth of roots	-0.60
⁶⁰ Co	External gamma shielding factor	0.95
	Plant transfer factor for Co	0.65
	Thickness of contaminated zone	0.39
	Meat transfer factor for Co	0.35
¹³⁷ Cs	Plant transfer factor for Cs	0.86
	External gamma shielding factor	0.76
	Thickness of contaminated zone	0.58
	Milk transfer factor for Cs	0.39
	Depth of roots	-0.35
	Meat transfer factor for Cs	0.28
¹⁵² Eu	External gamma shielding factor	1.00
	Kd of ¹⁵² Eu in contaminated zone	0.26

¹⁵⁴ Eu	External gamma shielding factor	0.99
³ H	Thickness of contaminated zone	0.93
	Depth of roots	-0.64
	Kd of ³ H in contaminated zone	-0.27
¹²⁹ I	Plant transfer factor for I	0.89
	Thickness of contaminated zone	0.75
	Milk transfer factor for I	0.60
	Depth of roots	-0.49
	Meat transfer factor for I	0.44
⁹⁴ Nb	External gamma shielding factor	0.99
	Kd of ⁹⁴ Nb in contaminated zone	0.32
⁵⁹ Ni	Plant transfer factor for Ni	0.90
	Milk transfer factor for Ni	0.81
	Thickness of contaminated zone	0.74
	Depth of roots	-0.54
⁶³ Ni	Plant transfer factor for Ni	0.90
	Milk transfer factor for Ni	0.81
	Thickness of contaminated zone	0.74
	Depth of roots	-0.53
²³⁷ Np	Plant transfer factor for Np	0.92
	Thickness of contaminated zone	0.79
	Depth of roots	-0.60
²³⁸ Pu	Plant transfer factor for Pu	0.92
	Thickness of contaminated zone	0.79
	Depth of roots	-0.62
²³⁹ Pu	Plant transfer factor for Pu	0.93
	Thickness of contaminated zone	0.79
	Depth of roots	-0.60
²⁴⁰ Pu	Plant transfer factor for Pu	0.92
	Thickness of contaminated zone	0.79
	Depth of roots	-0.60
²⁴¹ Pu	Plant transfer factor for Am	0.84
	Thickness of contaminated zone	0.75
	Depth of roots	-0.51
	Kd of ²⁴¹ Pu in contaminated zone	0.25
⁹⁰ Sr	Plant transfer factor for Sr	0.93
	Thickness of contaminated zone	0.78
	Depth of roots	-0.58
⁹⁹ Tc	Plant transfer factor for Tc	0.91
	Thickness of contaminated zone	0.80

	Depth of roots	-0.54
	Kd of Tc-99 in contaminated zone	0.26

若輸入參數與平均劑量峰值之 $|PRCC| \geq 0.25$ ，則屬於對評估劑量結果影響較為顯著的靈敏參數，其中若某靈敏參數之 PRCC 值大於 0，則以該參數分佈之第 75 百分位數做為 DCGL 推導之輸入值；反之，若某靈敏參數之 PRCC 值小於 0，則以該參數分佈之第 25 百分位數做為 DCGL 推導之輸入值。

RESRAD 程式中，取得某參數之第 25 或 75 百分位數之方法如下：

1. 於 RESRAD navigator 視窗中，點選【View Interactive Output】標籤，並開啟參數靈敏度分析運算後所產生“*.MCO”檔案；
2. 點選【Results】標籤；
3. 點選【Graphics】標籤；
4. 於左方【Primary Object】中，選擇【input vector】；
5. 於【Input Parameter】中，選擇欲分析參數；
6. 於右方 cumulative probability graph 中，按下滑鼠右鍵，選擇【Edit Chart Data】；
7. 於 column C2 中選擇參數分佈百分位數(第 25 百分位或第 75 百分位)，column C1 即為對應百分位數值。

經由上述流程，可取得 Humboldt Bay 核電廠各個核種相對應靈敏參數之輸入值(第 25 或 75 百分位數)，如表三所示。

表三、靈敏參數之第 25 或 75 百分位數

靈敏參數	影響核種	RESRAD 百分位數值	
		25 th	75 th
Thickness of contaminated zone (m)	²⁴¹ Am, ¹⁴ C, ²⁴³⁻²⁴⁶ Cm, ⁶⁰ Co, ¹³⁷ Cs, ³ H, ¹²⁹ I, ⁵⁹ Ni, ⁶³ Ni, ²³⁷ Np, ²³⁸⁻²⁴¹ Pu, ⁹⁰ Sr, ⁹⁹ Tc		2.67E+00
Depth of roots (m)	²⁴¹ Am, ¹⁴ C, ²⁴³⁻²⁴⁶ Cm, ⁶⁰ Co, ¹³⁷ Cs, ³ H, ¹²⁹ I, ⁵⁹ Ni, ⁶³ Ni, ²³⁷ Np, ²³⁸⁻²⁴¹ Pu, ⁹⁰ Sr, ⁹⁹ Tc	1.22E+00	
External shielding factor	²⁴³ Cm, ⁶⁰ Co, ¹³⁷ Cs, ¹⁵² Eu, ¹⁵⁴ Eu, ⁹⁴ Nb		3.98E-01
Thickness of evasion layer (m)	¹⁴ C		4.27E-01
Plant transfer factor (pCi/g plant per pCi/g soil)	²⁴¹ Am (the plant transfer factor was also found sensitive for the ²⁴¹ Am as a daughter product for ²⁴¹ Pu) ²⁴³⁻²⁴⁶ Cm ⁶⁰ Co ¹³⁷ Cs ¹²⁹ I ⁵⁹ · ⁶³ Ni ²³⁷ Np ²³⁸⁻²⁴⁰ Pu ⁹⁰ Sr ⁹⁹ Tc		1.83E-03 1.83E-03 1.46E-01 7.82E-02 3.67E-02 9.12E-02 3.67E-02 1.83E-03 5.90E-01 9.16E+00
Meat transfer factor (pCi/kg per pCi/d)	⁶⁰ Co ¹³⁷ Cs ¹²⁹ I		5.86E-02 6.52E-02 5.23E-02
Milk transfer factor (pCi/L per pCi/d)	¹³⁷ Cs ¹²⁹ I ⁵⁹ · ⁶³ Ni		1.39E-02 1.39E-02 3.21E-02
Kd in contaminated zone(cm ³ /g)	²⁴¹ Am (as daughter product for ²⁴¹ Pu) ¹⁵² Eu ³ H ⁹⁴ Nb ⁹⁹ Tc	4.30E-02	1.20E+04 7.22E+03 3.56E+03 4.28E+00

若輸入參數與平均劑量峰值之|PRCC|<0.25，則屬於對評估劑量結果影響較不顯著之參數，其輸入參數值可選用場址特定

參數，或參考相關文獻之數值分布做為 DCGL 推導之輸入值。

一旦完成上述機率式模擬運算程序後，便可取得運算除役場址土壤之 DCGL 所需輸入參數值(定值)，隨後再透過確定性模擬運算，則可得到各個核種之除役土壤 DCGL 值。

因此，可應用此技術進行核一廠場址環境參數靈敏度分析評估。首先，由核一廠除役計畫第 17 章(廠房及土地再利用規劃)中可知，核一廠除役後廠址內可能有 29 個殘留核種，其中包含 16 個易測核種(^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{54}Mn 、 ^{51}Cr 、 ^{57}Co 、 ^{58}Co 、 ^{59}Fe 、 ^{65}Zn 、 ^{95}Zr 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{113}Sn 、 ^{123}I 、 ^{124}Sb 、 ^{125}Sb 、 ^{134}Cs 與 ^{144}Ce)與 13 個難測核種(^3H 、 ^{14}C 、 ^{63}Ni 、 ^{90}Sr 、 ^{99}Tc 、 ^{129}I 、 ^{241}Pu 、 ^{242}Cm 、 ^{55}Fe 、 ^{238}Pu 、 ^{239}Pu 、 ^{241}Am 與 ^{244}Cm)；此外，核一廠未來完成除役後之廠址輻射劑量，將採用非限制性使用標準(不含保留區域)，即對一般人造成之年有效等效劑量不超過 0.25 mSv。

此外，考量 2 種人類未來於除役場址可能生活模式，分別為農場居民及工作人員，其可能接收曝露途徑種類如下表四所示，並以 7.0 版 RESRAD-ONSITE 程式進行核一廠除役環境參數靈敏度分析。其餘程式輸入參數如附錄二所示。

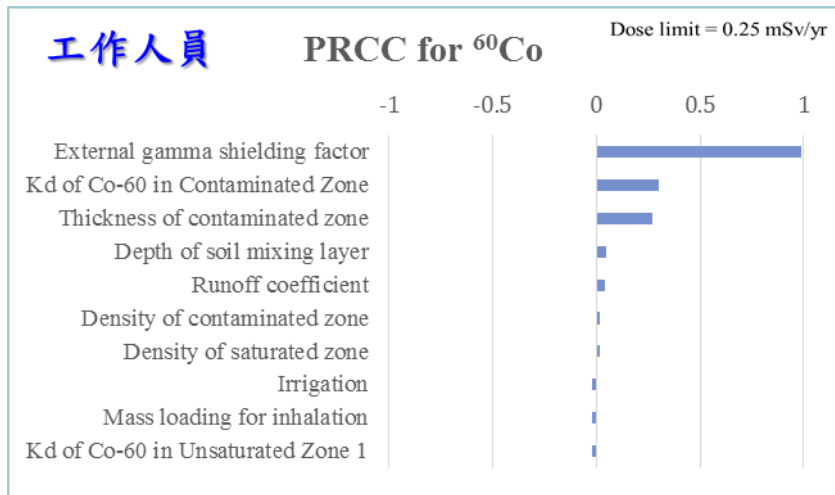
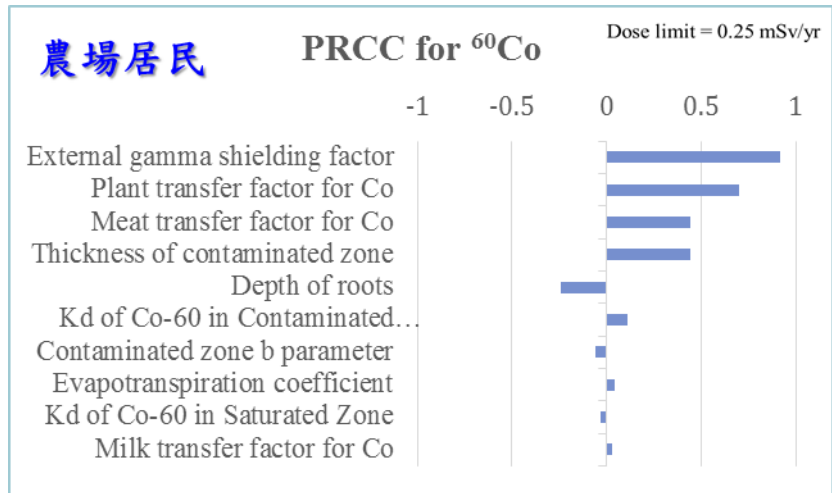
圖七與圖八分別為 ^{60}Co 及 ^{137}Cs 核種針對農場居民及工作人員情節，所評估得到參數靈敏度分析結果，以 Partial Rank Correlation Coefficient(PRCC)來表示。若 PRCC 為正值，代表此參數之改變，將正向影響劑量評估結果；反之，若 PRCC 為負值，代表此參數之改變，將負向影響劑量評估結果。以 ^{60}Co 核種為例，在兩個情節中，最顯著影響劑量評估結果之參數皆為體外加馬屏蔽因子(External gamma shielding factor)，主要原因為

^{60}Co 屬發射加馬射線之核種，因此加馬射線之屏蔽效應，將直接影響體外曝露劑量結果。此外，由 PRCC 數值大小可知，影響程度僅次於體外加馬屏蔽因子之參數，在農場居民情節中為鈷自土壤至植物(plant transfer factor)及植物至肉類(meat transfer factor)之核種遷移係數，而在工作人員情節中為 ^{60}Co 於污染帶中 Kd 值(Kd of ^{60}Co in contaminated zone)及污染帶厚度(thickness of contaminated zone)，造成此差異主要原因在於 2 種情節所採用曝露途徑不同有關。由於農場居民情節較工作人員情節多出攝食食物曝露途徑(嚥入植物、肉類、奶類及魚類)，因此農場居民情節中，影響劑量評估結果較顯著之參數為與攝食相關之參數，即上述土壤至植物及植物至肉類之核種遷移係數，而在工作人員情節中，影響劑量評估結果較顯著之參數為非直接與攝食相關之參數，此處為 ^{60}Co 核種於污染帶中 Kd 值及污染帶厚度。

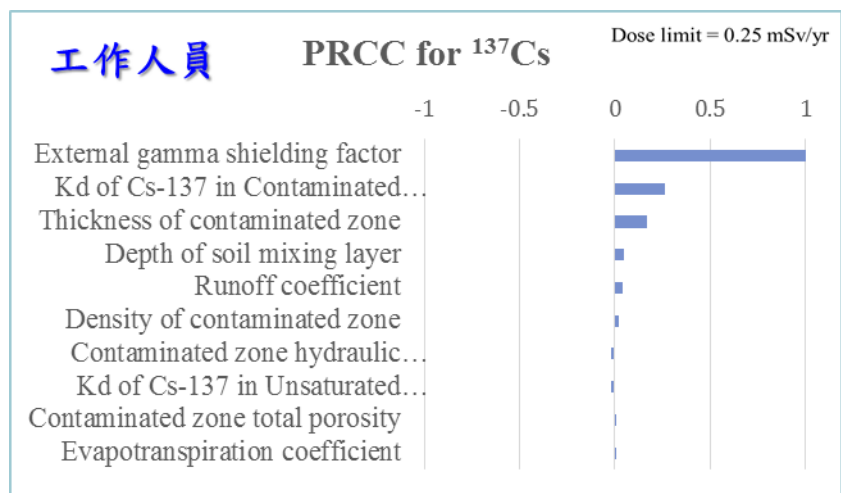
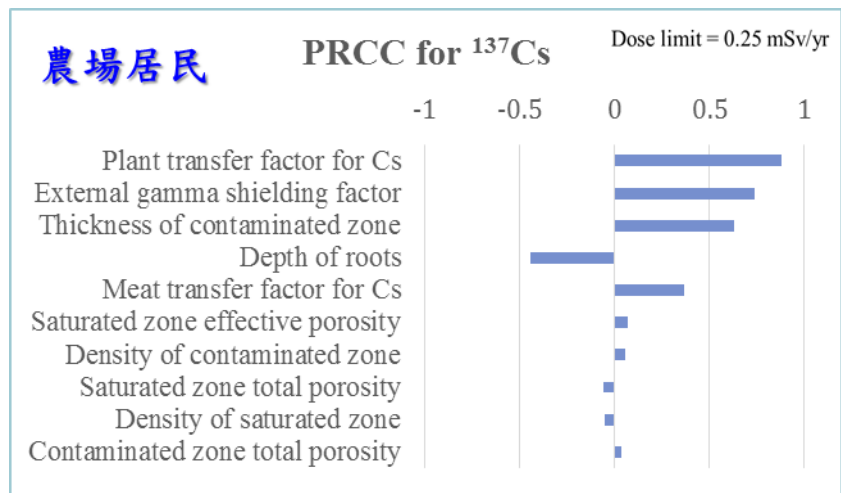
^{137}Cs 核種參數靈敏度分析結果亦與 ^{60}Co 核種相似，即體外加馬屏蔽因子於 2 種情節中皆為影響劑量評估結果重要參數，此外，與攝食曝露途徑相關參數(土壤至植物之核種遷移係數)，亦為響劑量評估結果重要參數。

表四、農場居民與工作人員曝露途徑比較

曝露途徑	農場居民	工作人員
體外曝露	V	V
吸入粉塵	V	V
吸入氬氣	-	-
嚥入植物	V	-
嚥入肉類	V	-
嚥入奶類	V	-
嚥入魚類	V	-
嚥入土壤	V	V



圖七、 ^{60}Co 核種農場居民與工作人員情節之參數靈敏度分析結果



圖八、 ^{137}Cs 核種農場居民與工作人員情節之參數靈敏度分析結果

二、國內常用手提式輻射偵檢器於量測環境輻射準確度研究

我國用於量測環境輻射之手提式輻射偵檢器種類繁多，104年核能研究所輻射度量儀器校正實驗室(屬 TAF 認可之輻射領域校正實驗室)之手提式輻射偵檢器年校正總量為 790 部、廠牌總數為 65 種，其中手提式劑量率偵檢器佔 567 部、廠牌數量為 39 種(如表五)；污染偵檢器佔 223 部、廠牌數量為 26 種(如表六)。若

依偵檢器種類進行分類，則統計如表七及表八所示。附錄一及附錄二則各列舉出 10 種常用手提式劑量偵檢器及污染偵檢器之規格說明及外觀圖示。

表五、核研所手提式劑量率偵檢器年校正數量-依廠牌

廠牌	數量	廠牌	數量	廠牌	數量
ALOKA	1	FLIR	5	S.E.	58
ATMOTEX	134	FLUKE	4	S.E.A.	1
AUTOMESS	42	GE	2	SAPHYMO	7
BICRON	1	GRAETZ	6	TA CP	1
C.E.	1	IDENTIFINDER	20	TARGET	1
CANBERRA	10	INER	39	TELETECTOR	3
CARDINAL	1	INOVISION	5	TENMARS	2
CUJ JT	7	LUDLUM	8	THERMO	101
CYPHER	2	MINI	9	VICTOREEN	10
EBERLINE	6	NDS	2	宇○	11
ECOTEST	1	NOVELEC	17	保○	14
ESM	1	POLIMASTER	7		
EXPLORANIUM	2	RADOS	1		
FAG / FHZ 140	14	ROTEM	10	合計	567

表六、核研所手提式污染偵檢器年校正數量-依廠牌

廠牌	數量	廠牌	數量	廠牌	數量
APTEC	2	F&J	1	S.E.	33
ATOMTEX	5	FAG	2	S.E.A.	37
AUTOMESS	11	FLUKE	3	SAPHYMO	4
BERLINE	1	INER	1	SOUTHERN SCIENTIFIC	8
BERTHOLD	19	LUDLUM	20	SPECTECH	4
BICRON	2	M.E.D.	4	THERMO	52
BLADEWERX	1	MORGAN	1	TSA	1
BqSv	2	RADHOUND	1	VICTOREEN	6
EBERLINE	3	RADOS	1	合計	225

表七、核研所手提式劑量率偵檢器年校正數量-依種類

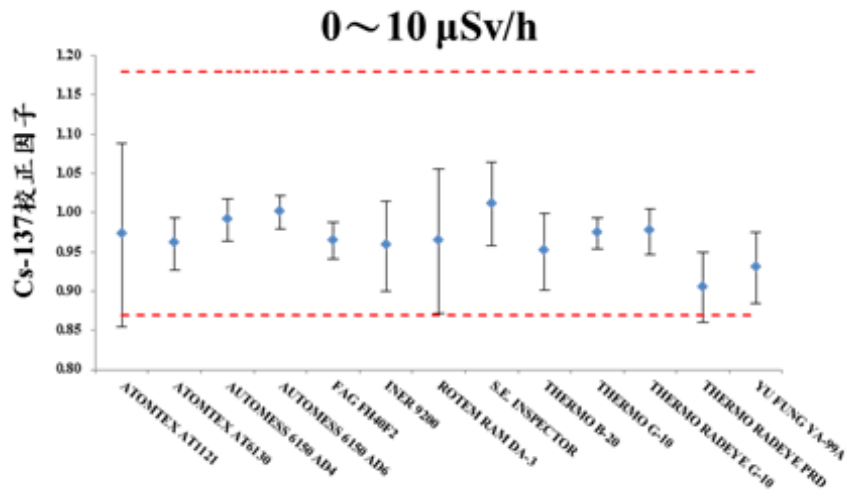
種類	數量	百分比(%)
蓋革	370	65.3
閃爍體	143	25.2
碘化鈉	41	7.2
游離腔	6	1.1
蓋革/碘化鈉	5	0.9
比例型	1	0.2
矽晶體	1	0.2
總計	567	100

表八、核研所手提式污染偵檢器年校正數量-依種類

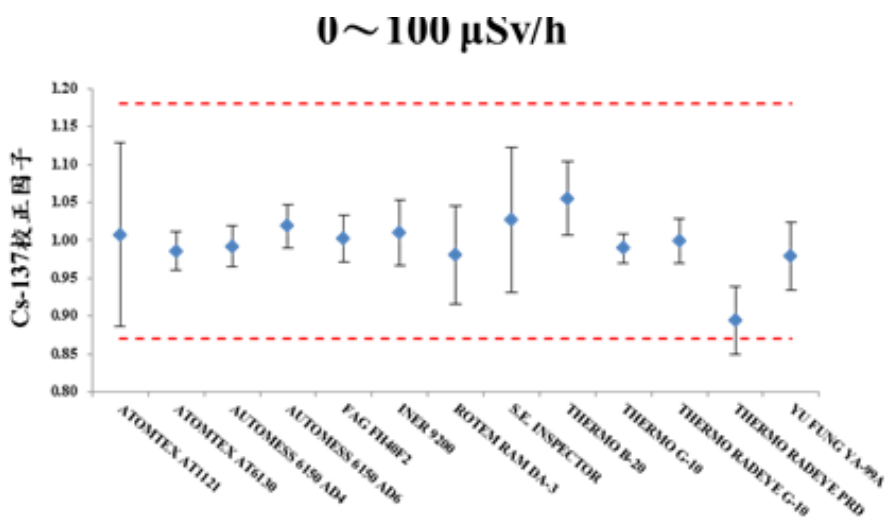
種類	數量	百分比(%)
蓋革	138	61.3
閃爍體	83	36.9
比例型	3	1.3
矽晶體	1	0.4
總計	225	100

由於核研所年校正手提式劑量率與污染偵檢器之廠牌型號種類眾多，因此以年校正總量超過 10 部之廠牌做為代表，統計分析其準確度範圍，並與相關國際規範進行比較。

圖九及圖十分別為 13 家代表廠牌劑量率偵檢器，於兩種劑量率下(0~10 $\mu\text{Sv/h}$ 及 0~100 $\mu\text{Sv/h}$)校正結果，依據美國 ANSI-N323A 對於劑量率輻射偵檢器之準確度要求($\pm 15\%$)，將其換算成校正因子為 0.87~1.18，則由圖中可知，上述 13 家廠牌偵檢器校正結果之準確度，均符合美國 ANSI-N323A 規範之要求。

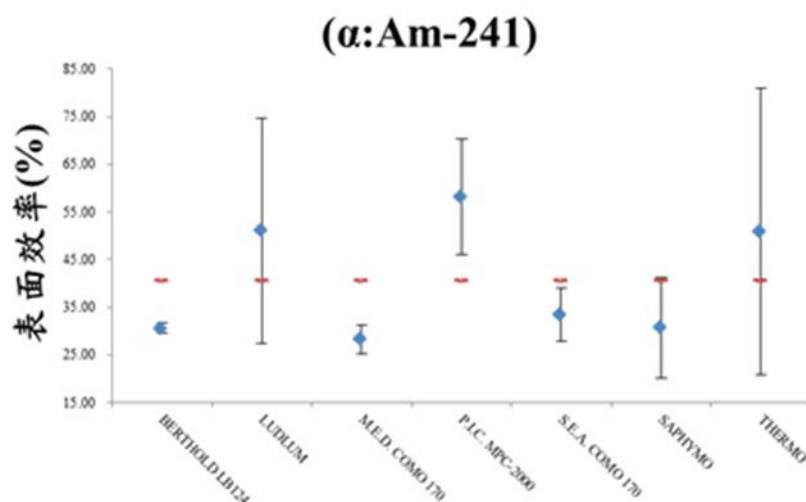


圖九、13 家代表廠牌輻射劑量率偵檢器校正結果(0~10 μSv/h)

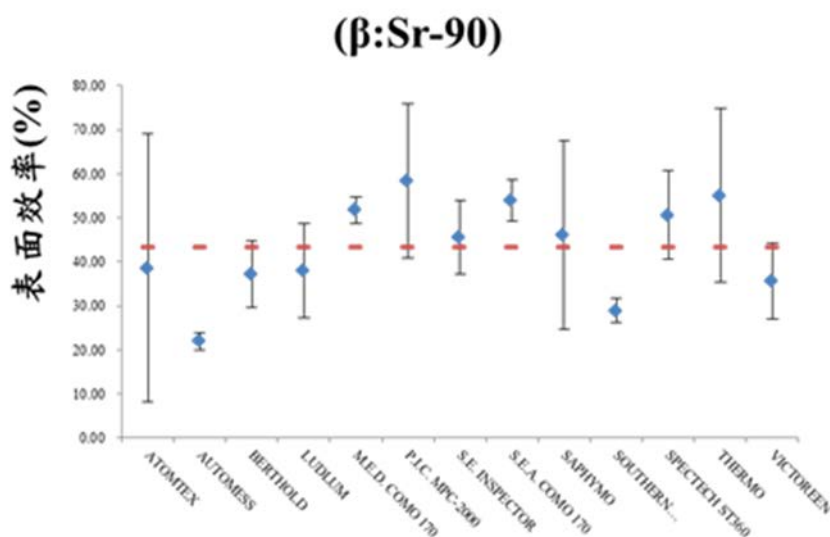


圖十、13 家代表廠牌輻射劑量率偵檢器校正結果(0~100 μSv/h)

此外，針對年校正數量 5 部以上之廠牌，統計其對阿伐 (Am-241)及貝他(Sr-90)之表面效率，結果如圖十一及圖十二所示。



圖十一、7 家代表廠牌輻射污染偵檢器之阿伐表面效率統計



圖十二、13 家代表廠牌輻射污染偵檢器之貝他表面效率統計

三、研製環境核種分析儀器校正用參考物質(稻米、乳品)

參考物質之生產，依照 ISO GUIDE 34、35 要求，需透過組織性管理建立適當之製作設計程序，其中包含定義參考物質、設計取樣程序、設計樣品準備程序、選擇適當均勻度和穩定度量測

方法、參考物質特性描述、取樣與樣品準備、選擇適當特性描述方法、均勻度與穩定度測試、特性描述結果、估算量測不確定度與認證證書設計等程序。

依據財團法人全國認證基金會(TAF) 測試領域環境試樣放射性核種技術規範(文件編號：TAF-CNLA-T09)中，米樣及牛乳樣可接受最小可測量(AMDA)值之 10-100 倍活度範圍，添加可追溯至國家標準實驗室之標準射源(如表九)，並利用溶劑使其均勻化，以 55°C 烘乾後均勻化再進行分裝。

接著根據 ISO GUIDE 35 要求，進行均勻度測試。首先進行取樣工作，取樣工作可分為隨機取樣(random sampling)、分層取樣(stratified random sampling)或系統取樣(systematic sampling)，且必須在可重複的條件下進行，量測的重複性標準偏差要小，量測樣品要隨機化。

表九、標準射源配製活度與不確定度評估

核種	原始射源活度 (Bq/g)	±	不確定度 (%) (k=1)	實際 射源量 (g)	實際 配製量 (g)	實際 比活度 (Bq/g)	±	不確定度 (%) (k=1)
¹³⁷ Cs	4532.36	±	0.90%	8.95655	250.32	155.00	±	0.90%
⁶⁰ Co	4525.24	±	0.60%	9.05428	250.29	126.57	±	0.60%
¹³⁴ Cs	40729.58	±	0.90%	0.98052	250.29	82.62	±	0.90%
⁸⁵ Sr	7864766.21	±	0.90%	0.85277	49.83	65.19	±	0.90%
⁹⁰ Sr	4059264.26	±	0.90%	0.10362	249.73	1606.81	±	0.90%

此處任意隨機選取 10 瓶樣品進行 between-bottle 整瓶重複性量測 3 次，稻米及乳品以 300 g 樣品為單位，每瓶樣品使用同一

分析方法決定計數值；再藉由 one way ANOVA(單因子變異數分析)公式算出 between-bottle 的重複性標準偏差及標準偏差，其各組間均勻度測試結果皆在±5.0%以內(如表十、表十一所示)。

表十、稻米均勻度測試結果

核種	⁶⁰ Co	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	⁸⁵ Sr	⁹⁰ Sr
δ the repeatability	0.91%	0.58%	0.37%	0.56%	0.56%
δ the between-bottle	4.86%	4.04%	3.39%	4.30%	4.30%
均勻度測試	4.86%	4.04%	3.39%	4.30%	4.30%

表十一、乳品均勻度測試結果

核種	⁶⁰ Co	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	⁸⁵ Sr	⁹⁰ Sr
δ the repeatability	1.26%	2.10%	0.67%	0.34%	0.34%
δ the between-bottle	3.70%	4.70%	4.20%	2.90%	2.90%
均勻度測試	3.70%	4.70%	4.20%	2.90%	2.90%

評估本次米樣參考物質配製結果，各配製核種之不確定度(k=1)分別為 ⁶⁰Co：4.90%、¹³⁴Cs：4.14%、¹³⁷Cs：3.51%、⁸⁵Sr：4.39%、⁹⁰Sr：2.68%；牛乳樣參考物質配製結果，各配製核種之不確定度(k=1)分別為 ⁶⁰Co：3.75%、¹³⁴Cs：4.79%、¹³⁷Cs：4.30%、⁸⁵Sr：3.04%、⁹⁰Sr：2.29%，表示核研所在配製台灣地區米樣、牛乳樣參考物質能力與國際上販售之參考物質一致，足以提供作為國內各實驗室之標準參考試樣。

伍、 結論與建議

一、核設施除役之場址背景輻射影響之探討

1. 本計畫參考美國核管會 NUREG-1501 號報告，探討以背景輻射水平做為除役廠址清潔標準概念之適切性，俾供輻防處協助物管局進行相關審查工作之參考。
2. 透過執行參數靈敏度分析，可鑑別除役場址中可能對輻射劑量評估結果造成顯著影響之關鍵參數，以進一步規劃後續本土參數之取得及資料庫建置，以完備除役場址殘餘輻射劑量評估技術。

二、國內常用手提式輻射偵檢器於量測環境輻射準確度研究

常用廠牌劑量率輻射偵檢器之校正結果，大多符合美國 ANSI-N323A 之準確度要求($\pm 15\%$)，換算成校正因子為 0.87~1.18；另最大擴充不確定度($k=2$)分別為 6.1%($\sim 10 \mu\text{Sv/h}$)及 3.8%($\sim 100 \mu\text{Sv/h}$)。另一方面，常用廠牌阿伐貝他污染偵檢器，對阿伐核種(Am-241)之偵測效率為 28.3%~58.1%、貝他核種(Sr-90)之偵測效率為 22.0%~58.3%；另最大擴充不確定度($k=2$)分別為 2.1%(阿伐)及 3.8%(貝他)。

三、研製環境核種分析儀器校正用參考物質(稻米、乳品)

完成稻米、乳品環境核種分析儀器校正用參考物質製備，並依據 ISO Guide34、35 之技術需求，完成樣品均勻度測試及添加核種不確定度評估。

陸、 參考文獻

1. 行政院原子能委員會，游離輻射防護法，中華民國 91 年。
2. 行政院原子能委員會，核子反應器設施管制法，中華民國 92 年。
3. 行政院原子能委員會，環境輻射監測規範，中華民國 98 年。
4. 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)，中華民國 94 年 1 月 13 日。
5. 財團法人全國認證基金會，量測追溯政策(TAF-CNLA-R04)，中華民國 98 年 3 月 24 日。
6. 財團法人全國認證基金會，有關量測不確定度的政策 (TAF-CNLA-R06)，中華民國 100 年 12 月 23 日。
7. 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)，中華民國 101 年 2 月 29 日。
8. 核子科學第三十卷第一期，不同密度環境試樣對加馬計測效率的影響，中華民國 82 年 2 月。
9. ANSI N42.17A , American National Standard for Performance Specifications for Health Physics Instrumentation – Portable Instrumentation for Use in Normal Environmental Conditions, 2003.
10. ANSI N323A, Radiation Protection Instrumentation Test and Calibration, 1997.
11. Barlett Engineering ENG-HB-001, RESRAD Input Parameter Sensitivity Analysis-Humboldt Bay, 2012.
12. E.-C. Peng, J.-J. Wang “A study of production of radioactive environmental reference materials used for proficiency testing

- program in Taiwan,” *Applied Radiation Isotopes*, Vol. 81, p.14-20, 2013.
13. HBPP-TBD-001, Site-Specific Suite of Radionuclides, August 2007.
 14. Humboldt Bay Power Plant, SAFSTOR Environmental Report, July 1984.
 15. Humboldt Bay Power Plant, Historical Site Assessment, September 2008.
 16. International Organization for Standardization, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, 1995.
 17. ISO Guide 34, General requirements for the competence of reference material producers, International Organization for Standardization, 2000.
 18. ISO Guide 35, Reference materials – General and statistical principles for certification, International Organization for Standardization, 2006.
 19. ISO 7503-1, Evaluation of Surface Contamination-Part 1 : Beta-emitters (Maximum Beta Energy Greater than 0.15 MeV) and Alpha-emitters, 1998.
 20. ISO 8769-1, Reference Sources for the Calibration of Surface Contamination monitors- Beta-emitters (Maximum Beta Energy Greater than 0.15 MeV) and Alpha- emitters, 1998.
 21. National Council on Radiation Protection and Measurement, NCRP report 93, Ionization Radiation Exposure of the Population of the United States, 1987.
 22. U.S. Department of Energy - Argonne National Laboratory, ANL/EAD-4, User’s Manual for RESRAD Version 6, July 2001.

23. U.S. Department of Energy - Argonne National Laboratory, ANL/EAIS-8, Data Collection Handbook to Support Modeling the Impacts of Radioactive Material in Soil, April 1993.
24. U.S. Nuclear Regulatory Commission Guidance, NUREG-1501 , Background as a Residual Radioactivity Criterion for Decommissioning , Appendix A to the Generic Environmental Impact Statement in Support of Rulemaking on Radiological Criteria for Decommissioning of NRC-Licensed Nuclear Facilities, August 1994.
25. U.S. Nuclear Regulatory Commission – Pacific Northwest National Laboratory, NUREG/CR-5512 Vol. 3, Residual Radioactive Contamination from Decommissioning/Parameter Analysis, October 1999.
26. U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-6676, Probabilistic Dose Analysis Using Parameter Distributions Developed for RESRAD and RESRAD-Build Codes, May 2000.
27. U.S. Nuclear Regulatory Commission - Argonne National Laboratory, NUREG/CR-6692, Probabilistic Modules for the RESRAD 6.0 and RESRAD-BUILD 3.0 Computer Codes, November 2000.
28. U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-6697, Development of Probabilistic RESRAD 6.0 and RESRAD-BUILD 3.0 Computer Codes, December 2000.
29. Z.-Y. Wu, K. G. W. Inn, Z.-C. Lin and C. A. McMahon, “Traceability of performance evaluation materials,” Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol.248, pp. 155-161, 2001.

30. Z.-Y. Wu, K.G.W. Inn, Z.-C. Lin, C. A. McMahon, and L. R. Karam, NIST radiochemistry intercomparison program: a summary of four-year performance evaluation study, *Applied Radiation and Isotopes*, Vol.56, p.379-385, 2002.

附錄一、常用手提式輻射劑量率偵檢器規格及圖示

常用手提式輻射劑量率偵檢器規格表

廠牌	型號	形式	能量範圍 MeV	量測範圍 mSv/h
FAG	FH 40F2	蓋革式	0.06~1.3	~1.0
Victoreen	440RFD	游離腔	0.04~1.3	~1.0
ROTEM	RI-02	游離腔	0.04~2.0	~1.0
INER	99A	蓋革式	0.06~1.3	~1.0
S.E.	Inspector	蓋革式	0.06~1.3	~1.0
Thermo	identiF 2	碘化鈉	0.06~1.3	~1.0
Eberline	FH40G	蓋革式	0.06~1.3	~1.0
Thermo	RadEye PRD	碘化鈉	0.06~1.3	~1.0
ATOMTEX	AT1121	閃爍體	0.04~2.0	~1.0
GRAETZ	X5C	蓋革式	0.06~1.3	~1.0



圖 1、輻射劑量率偵檢器 (FAG / FH 40F2)



圖 2、輻射劑量率偵檢器 (Victoreen / 440RFD)



圖 3、輻射劑量率偵檢器 (ROTEM RI-02 / BAK-3745)



圖 4、輻射劑量率偵檢器 (INER /-99A)



圖 5、輻射劑量率偵檢器 (ATOMTEX / AT1121)

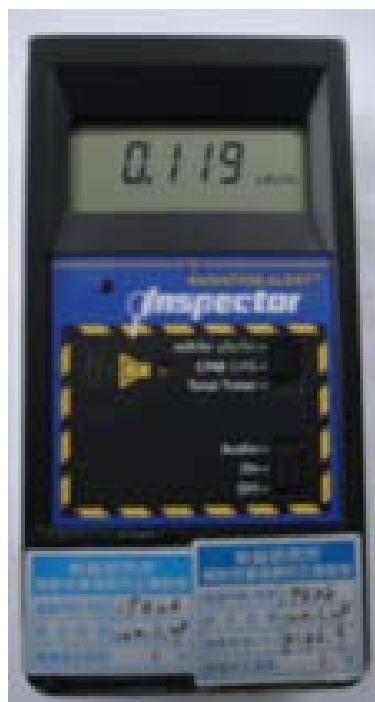


圖 6、輻射劑量率偵檢器 (S. E. / Inspector)



圖 7、輻射劑量率偵檢器 (GRAETZ /18529CE)



圖 8、輻射劑量率偵檢器 (Automess / Telepolehr)

附錄二、常用手提式輻射污染偵檢器規格及圖示

常用手提式輻射污染偵檢器規格表

廠牌	型號	形式	偵檢窗面積	量測射線	量測範圍
Thermo	RADEYE-B20	閃爍體	19.6 cm ²	α、β	999 cps
S. E.	Inspector	蓋格式	15.9 cm ²	β、γ	5.0 kcps
Syphymo GmbH	miniTRACE β C10	蓋格式	15.2 cm ²	β、γ	9.9 kcps
Thermo ESM	FH40G	閃爍體	15.5 cm ²	β、γ	9.9 kcps
FLUKE	190F-SI	蓋格式	16.6 cm ²	β、γ	99 kcpm
Southern Sci.	RADHOUND	閃爍體	18.1 cm ²	α、β	999 cps
Thermo	RADEYE-AB100	閃爍體	102 cm ²	α、β	100 kcps
Ludlum	3	蓋格式	100 cm ²	β、γ	9.9 kcpm
S.E.A.	COMO170	閃爍體	150 cm ²	α、β	9.9 kcps
Berthold	LB123	閃爍體	228 cm ²	β、γ	9.9 kcps



圖 9、輻射污染偵檢器 (Thermo / RADEYE-B20)



圖 10、輻射污染偵檢器 (S. E. / Inspector)



圖 11、輻射污染偵檢器 (Syphymo GmbH / miniTRACE β C10)



圖 12、輻射污染偵檢器 (RAM / GENE-1)



圖 13、輻射污染偵檢器 (Thermo ESM / FH40G)



圖 14、輻射污染偵檢器 (FLUKE /190D-SI)



圖 15、輻射污染偵檢器 (Southern Sci. / RADHOUND)



圖 16、輻射污染偵檢器 (Berthold / LB123)

附錄二、核一廠除役場址環境輸入參數

參數	數值/分布	單位	參考文獻	統計分布				平均值
一般型參數								
劑量限值	0.25	mSv/y	核一廠除役計畫第 17 章					
污染帶參數								
污染帶面積	10,000	m ²	RESRAD default					
污染帶厚度	2	m	RESRAD default					
污染帶平行地下水流流向之長度	100	m	RESRAD default					
未飽和帶參數								
未飽和帶厚度	bounded lognormal-n	m	NUREG/CR-6697, Att C, p3-21.	2.296	1.276	0.18	320	4
未飽和帶土壤密度	Truncated lognormal	g/cm ³	NUREG/CR-6697, Att C, Table 3.1-1. Generic soil type.	1.52	0.23	0.001	0.999	1.5
未飽和帶土壤總孔隙率	Truncated lognormal	-	NUREG/CR-6697, Att C, p3-5. Generic soil type.	0.425	0.867	0.001	0.999	0.4
未飽和帶土壤有效孔隙率	Truncated lognormal	-	NUREG/CR-6697, Att C, p3-8. Generic soil type.	0.355	0.0906	0.001	0.999	0.2
未飽和帶田野容積	0.2	-	RESRAD default Field capacity=總孔隙率-有效孔隙率	-	-	-	-	

未飽和帶水力傳導度	bounded lognormal-n	m/y	NUREG/CR-6697, Att C, p3-11. Generic soil type.	2.3	2.11	0.004	9250	10
未飽和帶水力梯度	bounded lognormal-n	-	NUREG/CR-6697, Att C, p3-18. Generic soil type.	-5.11	1.77	0.00007	0.5	0.02
飽和帶參數								
飽和帶土壤密度	Truncated lognormal	g/cm ³	NUREG/CR-6697, Att C, Table 3.1-1. Generic soil type.	1.52	0.23	0.001	0.999	1.5
飽和帶土壤總孔隙率	Truncated lognormal	-	NUREG/CR-6697, Att C, p3-5. Generic soil type.	0.425	0.867	0.001	0.999	0.4
飽和帶土壤有效孔隙率	Truncated lognormal	-	NUREG/CR-6697, Att C, p3-8. Generic soil type.	0.355	0.0906	0.001	0.999	0.2
飽和帶田野容積	0.2	-	RESRAD default Ffield capacity=總孔隙率-有效孔隙率	-	-	-	-	-
飽和帶水力傳導度	bounded lognormal-n	m/y	NUREG/CR-6697, Att C, p3-11. Generic soil type.	2.3	2.11	0.004	9250	10
飽和帶水力梯度	bounded lognormal-n	-	NUREG/CR-6697, Att C, p3-18. Generic soil type.	-5.11	1.77	0.00007	0.5	0.02
飽和帶 b 參數	bounded lognormal-n	-	NUREG/CR-6697, Att C, p3-15. Generic soil type.	1.06	0.66	0.5	30	5.3

地下水位下降速率	0.001	m/y	RESRAD default	-	-	-	-	
抽取地下水深度	Triangular	meters below water table.	NUREG/CR-6697, Att C, p3-40.	6	10	30		10
地下水傳輸參數模型	Nondispersion	-	污染面積>1,000 m ²	-	-	-	-	
井水抽取速率	Uniform	m ³ /y	計算如 NUREG/CR-6697, Att C, section 3.10. 建議以加總受曝露群體一年當中總用水量，作為井年抽水率。	1173	1973	-	-	250
覆蓋物/水文								
覆蓋物厚度	0	m	RESRAD default	-	-	-	-	
污染帶密度	Truncated lognormal	g/cm ³	NUREG/CR-6697, Att C, Table 3.1-1. Generic soil type.	1.52	0.23	0.001	0.999	1.5
污染帶侵蝕速率	0.001	m/y	RESRAD default	-	-	-	-	
污染帶土壤總孔隙率	Truncated lognormal	-	NUREG/CR-6697, Att C, p3-5. Generic soil type.	0.425	0.867	0.001	0.999	0.4
污染帶田野容積	0.2	-	RESRAD default. Field capacity=總孔隙率-有效孔隙率	-	-	-	-	
污染帶水力傳導度	bounded lognormal-n	m/y	NUREG/CR-6697, Att C, p3-11. Generic soil type.	2.3	2.11	0.004	9250	10

污染帶 b 參數	bounded lognormal-n	-	NUREG/CR-6697, Att C, p3-15. Generic soil type.	1.06	0.66	0.5	30	5.3
空氣中濕度	8	g/m ³	RESRAD default	-	-	-	-	
蒸散係數	Uniform	-	NUREG/CR-6697, Att C, Ref. 4	0.5	0.75	-	-	0.5
風速	11	m/s	核一廠除役計畫第 2 章。基隆、台北、淡水三地近十年平均月最大十分鐘風風速平均。	-	-	-	-	
降雨	1	m/y	RESRAD default	-	-	-	-	
灌溉	Uniform	m/y	NUREG/CR-6697, Att C. 由計算而得	0.36	0.76	-	-	0.2
逕流係數	Uniform	-	NUREG/CR-6697, Att C, Section 4.2. 逕流係數=逕流量/降雨量；逕流量=降雨量-土壤入滲量(infiltration)-蒸散量(Evapotranspiration)	0.1	0.8	-	-	0.2
鄰近河流及池塘水體體積	1,000,000	m ³	RESRAD default	-	-	-	-	
佔用因子								
呼吸速率	8,400	m ³ /y	RESRAD default	-	-	-	-	
質量沉積因子	continuous with linear interpolation	g/m ³	NUREG/CR-6697, Att C, p4-15.	-	-	-	-	0.0001
曝露時間	30	y	RESRAD default	-	-	-	-	-

室內粉塵過濾率	Uniform	-	NUREG/CR-6697, Att C, p7-1.	0.15	0.95	-	-	0.4
體外加馬屏蔽因子	bounded lognormal-n	-	NUREG/CR-6697, Att C, p7-35.	-1.3	0.59	0.044	1	0.7
室內佔用因子	0.5	-	RESRAD default	-	-	-	-	-
室外佔用因子	0.25	-	RESRAD default	-	-	-	-	-
飲食參數								
蔬果與穀類攝食率	279	kg/y	農委會糧食平衡表	-	-	-	-	-
葉菜類攝食率	63.4	kg/y	農委會糧食平衡表	-	-	-	-	-
牛奶攝食率	15.6	l/y	農委會糧食平衡表	-	-	-	-	-
肉類及家禽攝食率	93	kg/y	農委會糧食平衡表	-	-	-	-	-
魚類攝食率	18.4	kg/y	農委會糧食平衡表	-	-	-	-	-
其他海產攝食率	13.862	kg/y	農委會糧食平衡表	-	-	-	-	-
攝食土壤	37	g/y	日本 H12 報告	-	-	-	-	-
飲用水	610	l/y	日本 H12 報告	-	-	-	-	-
飲用水污染比例	1	-	全部水假設都污染	-	-	-	-	-
家用水污染比例	1	-	全部水假設都污染	-	-	-	-	-
牲畜飲水污染比例	1	-	全部水假設都污染	-	-	-	-	-
灌溉水污染比例	1	-	全部水假設都污染	-	-	-	-	-
海產污染比例	0.5	-	NUREG/CR-5512, vol 3.	-	-	-	-	-
植物類食物污染比例	-1	-	NUREG/CR-5512, vol 3.	-	-	-	-	-
肉類污染比例	-1	-	NUREG/CR-5512, vol 3.	-	-	-	-	-
牛奶污染比例	-1	-	NUREG/CR-5512, vol 3.	-	-	-	-	-
非飲食參數								

產肉牲畜穀類攝食量	60	kg/day	NUREG/CR-5512, vol 3. table 6.87	-	-	-	-	-
產奶牲畜穀類攝食量	55	kg/day	NUREG/CR-5512, vol 3. table 6.87	-	-	-	-	-
產肉牲畜飲水量	50	l/day	NUREG/CR-5512, vol 3. table 6.87	-	-	-	-	-
產奶牲畜飲水量	160	l/day	NUREG/CR-5512, vol 3. table 6.87	-	-	-	-	-
牲畜土壤攝食量	0.5	kg/day	RESRAD default	-	-	-	-	-
葉片沉積因子	0.0001	g/m ³	NUREG/CR-5512, vol 3. table 6.87	-	-	-	-	-
土壤混和深度	Triangular	m	NUREG/CR-6697, Att C	0	0.15	0.6	-	0.15
植物根深度	Uniform	m	NUREG/CR-6697, Att C	0.3	4	-	-	0.9
地下水用於人類飲用之比例	1	-	全部水假設皆由地下水供應	-	-	-	-	-
地下水用於牲畜飲用之比例	1	-	全部水假設皆由地下水供應	-	-	-	-	-
地下水用於灌溉之比例	1	-	全部水假設皆由地下水供應	-	-	-	-	-