

行政院原子能委員會委託研究計畫期末報告

計畫名稱：

「核能電廠除役與室內乾貯安全審查技術之研究」有關除役部分之研究

計畫編號：AEC10612052L

執行單位：國立清華大學

計畫主持人：裴晉哲

報告日期：中華民國 107 年 12 月

行政院原子能委員會委託研究計畫期末報告

計畫名稱：

「核能電廠除役與室內乾貯安全審查技術之研究」
有關除役部分之研究

子項計畫一：

除役廠址輻射物質外洩途徑與環境影響程度分析
技術研究

計畫編號：AEC10612052L

執行單位：國立清華大學

計畫主持人：裴晉哲

子項計畫一主持人：白寶實

報告作者：白寶實、謝懷恩、王文豫、喬康豪、劉
彥呈

報告日期：中華民國 107 年 12 月

子項計畫一：

除役廠址輻射物質外洩途徑與環境影響程度分析

技術研究

摘要

本子項計畫一之研究目的為應用 RESRAD-OFFSITE 程式於除役核電廠之輻射安全評估、輻射曝露途徑分析、殘留放射性污染之模擬與計算。本研究可提供 RESRAD-OFFSITE 程式之模擬流程、參數設計、分析成果，以及除役核電廠對於廠址外居民健康與生物環境影響之輻射安全評估。本研究可作為應用 RESRAD-OFFSITE 程式於輻射污染建築物、除役核電廠、低放射性廢棄物貯存設施之輻射安全評估與程式驗證技術研究之參考。

ABSTRACT

The purposes of this study are using the RESRAD-OFFSITE computer code for the radiological safety assessment of decommissioning nuclear power plants, the analysis of radiation exposure pathways, and the simulation of residual radioactive contamination. This study can provide the process of simulation, the design of parameters, the result of analysis, and the radiological safety assessment of humans and environments in using the RESRAD-OFFSITE computer code. The results of this study can also provide the simulation methodologies and verification techniques with using the RESRAD-OFFSITE computer code for the radioactive contaminated buildings, the decommissioning nuclear power plants, and the radioactive waste storage facilities.

目錄

摘要	i
ABSTRACT.....	ii
目錄	iii
圖目錄	vi
表目錄	viii
第一章 計畫背景	1
第二章 計畫目的與執行方法	3
2.1 計畫目的	3
2.2 執行方法	3
第三章 蒐集與研析國際核能先進國家核能電廠除役過程中廠址輻射物質外洩途徑與環境影響程度之相關資料	6
3.1 RESRAD-OFFSITE 程式使用者手冊	7
3.2 美國除役核電廠 Yankee Rowe 執照終止計畫書	11
第四章 以 RESRAD 模式進行除役廠址輻射物質外洩可能之路徑與環境影響程度分析與驗證	15
4.1 參數說明	15
4.1.1 污染區、農牧區、飲水區、住宅區的位置分布.....	15

4.1.2 土壤放射性核種濃度	19
4.1.3 釋出	20
4.1.4 分佈係數	21
4.1.5 沉積速度	22
4.1.6 轉換因子	22
4.1.7 地理土壤與水文特性	25
4.1.8 大氣傳輸	37
4.1.9 非飽和區	39
4.1.10 飽和區	40
4.1.11 水利用	44
4.1.12 表面水體	49
4.1.13 地下水傳輸	49
4.1.14 攝取率	52
4.1.15 牲畜攝取	54
4.1.16 植物因子	56
4.1.17 牲畜飼養因子	59
4.1.18 吸入及體外Gamma.....	60
4.1.19 形狀因子	61
4.1.20 居住率	64

4.2 參數靈敏性測試	65
4.2.1 模型設置	65
4.2.2 廠址佈局測試	67
4.2.3 參數測試	70
4.2.4 大範圍參數測試	73
第五章 建立建物與廠址解除管制評估之審查重點與接受準則	78
5.1 RESRAD-OFFSITE 程式參數審查重點	78
5.1.1 美國除役電廠 Yankee Row 參數分類流程.....	78
5.1.2 參數重要度分析	82
5.2 利用 RESRAD 程式導出 DCGL.....	106
5.3 研析台灣核電廠除役之法規	110
5.3.1 最終處置場之關鍵核種	112
5.3.2 低放廢棄物之關鍵核種	113
第六章 結論與建議	115
參考資料.....	120

圖目錄

圖 2-1 本研究計畫之執行甘特圖	5
圖 3-1 RESRAD 家族程式	8
圖 3-2 RESRAD-ONSITE 和 RESRAD-OFFSITE 程式模擬輻射污染情 境	8
圖 3-3 RESRAD-OFFSITE 程式模擬結果呈現於圖表檢視器，並可輸 出詳細數據於 Excel 程式	10
圖 3-4 RESRAD-OFFSITE 程式參數靈敏度分析功能，幫助找出影響 模擬結果之關鍵參數與輻射曝露途徑	11
圖 3-5 除役前之美國 Yankee Rowe 核電廠，圖片出處為美國 Yankee Rowe 核電廠官方網頁(http://www.yankeerowe.com/)。	12
圖 3-6 美國除役核電廠 Yankee Rowe 之 RESRAD 程式模擬分析架構	13
圖 4-1 預設廠址佈局	66
圖 4-2 基準模型分析結果	67
圖 4-3 廠址佈局 1	68
圖 4-4 廠址佈局 2	69
圖 4-5 廠址佈局 1 分析結果	69
圖 4-6 廠址佈局 2 分析結果	70

圖 4-7 參數計數與偏移量	71
圖 5-1 RESRAD 程式輸入參數選擇程序	80
圖 5-2 RESRAD 程式輸入參數選擇程序(中文)	81
圖 5-3 Ni-63 之 DSR	108
圖 5-4 H-3 之 DSR	108
圖 5-5 Cs-137 之 DSR	109
圖 5-6 Co-60 之 DSR	109
圖 5-7 台灣除役管制法規	111

表目錄

表 3-1 國際間研發與應用之生物圈輻射劑量及風險評估程式	6
表 3-2 美國除役核電廠 Yankee Rowe 之結合不同介質類型 DCGLs 結論	14
表 4-1 污染區、農牧區、飲水區、住宅區的位置分布說明	15
表 4-2 土壤放射性核種濃度說明	20
表 4-3 釋出率參數說明	20
表 4-4 分佈係數說明	21
表 4-5 沉積速度說明	22
表 4-6 轉換因子說明	23
表 4-7 地理土壤與水文特性參數說明	25
表 4-8 大氣傳輸參數說明	37
表 4-9 非飽和區參數說明	39
表 4-10 飽和區參數說明	41
表 4-11 水利用參數說明	44
表 4-12 表面水體參數說明	49
表 4-13 地下水傳輸參數說明	50
表 4-14 攝取率參數說明	52

表 4-15 牲畜攝取參數說明	54
表 4-16 植物因子參數說明	56
表 4-17 牲畜飼養因子參數說明	59
表 4-18 吸入及體外 Gamma	60
表 4-19 形狀因子參數說明	61
表 4-20 居住率參數說明	64
表 4-21 土壤初始污染濃度	67
表 4-22 參數統計表	71
表 4-23 高偏移量參數統計表	72
表 4-24 大範圍參數分析	73
表 5-1 參數重要性評估	82
表 5-2 汙染核種所佔之比例	107
表 5-3 低放射性廢棄物關鍵核種列表	113
表 5-4 一定活度或比活度以下放射性廢棄物管理辦法重要核種...	114

第一章 計畫背景

本研究主要利用 RESRAD-OFFSITE 廠外劑量分析軟體來評估核電廠除役過程中，其產出之放射性核種外釋途徑與其對於周遭動植物影響程度之計算模擬。目的用來評估土壤殘餘輻射劑量是否合乎管制限值的指標，其係根據所有可能的放射性核種傳輸途徑進行評估，在確保外界環境與動植物於可接受之等效劑量在限值內的情況下，將劑量推算並比較相對應之土壤核種濃度限值。而除役後廠址最終輻射偵測(即 MARSSIM 所指之「最終狀態偵測(Final Status Survey)」)之規劃，係針對廠區外部環境如空氣、土地、水源及動植物生態...等，推算其「導出濃度指引水平(Derived Concentration Guideline Level, DCGL)(或稱為：推算濃度基準限值)」。藉此可對區域內細部的偵檢單元進行受輻射影響程度的分級，進而有助於規劃量測位置、取樣密度等作業細節。目前美國除役核電廠 DCGL 之推導，主採用美國阿岡國家實驗室(Argonne National Lab, ANL)所開發的 RESRAD 程式。目前國際上亦有許多廠址特性評估程式被提出用以進行此項濃度限值的計算，而 RESRAD 程式為公開且被認為具有公信力的計算程式，本計畫也將根據此程式中的計算方式及概念，針對各類放射性核種之可能外釋途徑進行分析，並將概略地評估各項分析所對應的重要分析參數，且提供各參數較保守或

通用的數值，以利未來進行除役工作之核電廠廠外劑量分析及其相關審查與驗證工作時的參考。

第二章 計畫目的與執行方法

2.1 計畫目的

本計畫將著重於核電廠除役過程可能產出放射性核種之外釋途徑與其對於周遭動植物影響程度分析評估之審查與驗證方法進行深入研究。計畫亦將參考國外已成功除役電廠之執行經驗與評估方法，主要以研究美國阿岡國家實驗室開發的放射性核種殘留風險與劑量評估分析軟體系統 RESRAD-OFFSITE 為重點，該分析程式可依廠內所量測出之各種核種活度數據及可能外釋途徑進行外界環境所接受之劑量估算如空氣、水文、土壤及動植物...等。研究成果將提供給國內核能管制單位做為未來國內除役核電廠廠外環境劑量分析及限値之審查與驗證之參考依據。本計畫將依據圖 2-1 之甘特圖進行研究的時間分配。

2.2 執行方法

我國廠址使用劑量標準的單位為劑量值，為便於執行廠址復原及解除管制作業，廠址使用劑量標準將透過曝露途徑模式，轉換成以活度濃度為單位的導出濃度指引水平(DCGL)(或稱為：推算濃度基準限値)。經由偵測及取樣分析作業，評估偵檢區域殘餘之輻射水平；最後，利用統計方法，判定廠址能否釋出。廠址於外釋後，因劑量太低以致於難以直接量測，因此外釋限値

(如 DCGL 或 DCGLs)之訂定係以電腦劑量模型推估。台灣電力公司準備將核一廠廠址 DCGL 的推導，採用美國阿岡國家實驗室(Argonne National Laboratory, ANL)所開發的 RESRAD 程式集群。本計畫將研究分析各國廠址如何使用 RESRAD-OFFSITE 程式進行廠外劑量與導出濃度指引水平(DCGL)(或稱為：推算濃度基準限值)之分析。以下為主要執行之工作項目：

- (1) 蒐集與研析國際核能先進國家核能電廠除役過程中廠址輻射物質外洩途徑與環境影響程度之相關資料。
- (2) 以 RESRAD 模式進行除役廠址輻射物質外洩可能之路徑與環境影響程度分析與驗證。
- (3) 建立建物與廠址解除管制評估之審查重點與接受準則。(*附註)

*第(3)項主要以 RESRAD-OFFSITE 之 DCGL 分析相關審查重點與接受準則為研究主軸。

子計畫一：除役廠址輻射物質外洩途徑與環境影響程度分析技術研究

六、預定進度：													
年月	107 1	107 2	107 3	107 4	107 5	107 6	107 7	107 8	107 9	107 10	107 11	107 12	備 註
收集與研析國際核能先進國家核能電廠除役過程中廠址輻射物質外洩途徑與環境影響程度之相關資料			※										
以 RESRAD 模式進行除役廠址輻射物質外洩可能之路徑與環境影響程度分析與驗證						※							查核點： 6/15 期中報告
建立建物與廠址解除管制評估之審查重點與接受準則，主要以 RESRAD-OFFSITE 之 DCGL 分析相關審查重點與接受準則為研究主軸。（*附註）								※					
完成期末報告，提出審查與驗證的建議											※		查核點： 11/15 期末報告
工作進度估計百分比 （累積數）		12%	24%	32%	40%	48%	56%	64%	72%	80%	90%	100%	
預定查核點	第一季：收集與研析國際核能先進國家核能電廠除役過程中廠址輻射物質外洩途徑與環境影響程度之相關資料。 第二季：以 RESRAD 模式進行除役廠址輻射物質外洩可能之路徑與環境影響程度分析與驗證。 第三季：建立建物與廠址解除管制評估之審查重點與接受準則。（*附註） *第三季主要以 RESRAD-OFFSITE 之 DCGL 分析相關審查重點與接受準則為研究主軸。 第四季：完成期末報告，提出審查與驗證的建議，11 月 15 日前提出研究成果期末報告初稿，12 月底前完成計畫報告。												
說明：	1. 工作項目請視計畫性質及需要自行訂定，預定進度以粗線表示其起迄日期。 2. 「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：（1）工作天數，（2）經費之分配，（3）工作量之比重，（4）擬達成目標之具體數字。 3. 每季之「預定查核點」，請在條形圖上標明※符號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。												

圖 2-1 本研究計畫之執行甘特圖

第三章 蒐集與研析國際核能先進國家核能電廠除役過程中廠址 輻射物質外洩途徑與環境影響程度之相關資料

本章節將蒐集與研析國際核能先進國家核能電廠除役過程中，廠址輻射物質外洩途徑與環境影響程度之相關資料，並研析如何應用 RESRAD-OFFSITE 程式於除役核電廠之輻射安全評估、輻射物質外洩途徑分析、殘餘輻射模擬與計算、廠址居民健康與生物環境影響之輻射安全評估。

本章節亦列舉數個美國和國際間研發與應用之生物圈輻射劑量及風險評估程式(如表 3-1 所示)，主要研析電腦程式於實際除役核電廠之適用性，以及了解國際間除役廠址與建築物解除管制之評估及驗證作法。

表 3-1 國際間研發與應用之生物圈輻射劑量及風險評估程式

生物圈之輻射劑量及風險評估程式			
程式名稱	管理維護單位	最新程式版本(新→舊)	備註
RESRAD-ONSITE	美國NRC	2016年07月 Version 7.2	<ul style="list-style-type: none"> 美國除役核電廠： (1) Maine Yankee (2) Yankee Rowe
RESRAD-OFFSITE	美國NRC	2016年06月 Version 3.2	
MILDOS-AREA	美國NRC	2016年03月 Version 4	<ul style="list-style-type: none"> 美國RAMP計畫 適用於Uranium Recovery Facility
GENII	美國NRC	2012年09月 Version 2	<ul style="list-style-type: none"> 美國RAMP計畫 義大利除役核電廠： (1) Latina (2) Trino (3) Caorso
DandD	美國NRC	2001年04月 Version 2.1	<ul style="list-style-type: none"> 美國RAMP計畫 風險評估較保守
Pc-CREAM	英國NRPB (國家放射防護委員會)	1997年	<ul style="list-style-type: none"> 輔助驗證VADOSCA程式模擬結果 適用於歐洲核電廠
VADOSCA	義大利ENEL (國家電力公司)	1993年	<ul style="list-style-type: none"> 義大利除役核電廠： (1) Garigliano

3.1 RESRAD-OFFSITE 程式使用者手冊

美國阿岡國家實驗室(Argonne National Laboratory, ANL)為有效評估核種在廠內與廠外傳輸之曝露劑量與風險，開發 RESRAD (全名為 RESidual RADioactive) 家族程式以評估殘餘輻射，家族程式內含有九個子項程式(圖 3-1 所示)，使用者依據不同模擬情境需求，主要操作其中三個子項程式：RESRAD-BUILD (計算建築物輻射污染之一般人有效劑量)、RESRAD-ONSITE (計算廠址內之一般人有效劑量)、RESRAD-OFFSITE (計算廠址外之一般人有效劑量)。

RESRAD-ONSITE 和 RESRAD-OFFSITE 程式具有部分相同或相似之模型分析(圖 3-2 所示)，例如：地下水釋出模型、表層土壤混合模型、塵埃釋出模型(此概念於 RESRAD-OFFSITE 程式延伸發展為大氣傳輸模型)、曝露模型(包含直接體外輻射、塵埃和氬氣之吸入，以及蔬菜、肉品、牛奶、水生生物之攝食)、平流地下水傳輸模型。更多關於 RESRAD-ONSITE 和 RESRAD-OFFSITE 程式之間細節差異，可參考文件「Benchmarking of RESRAD-OFFSITE (Yu et al. 2006)」。

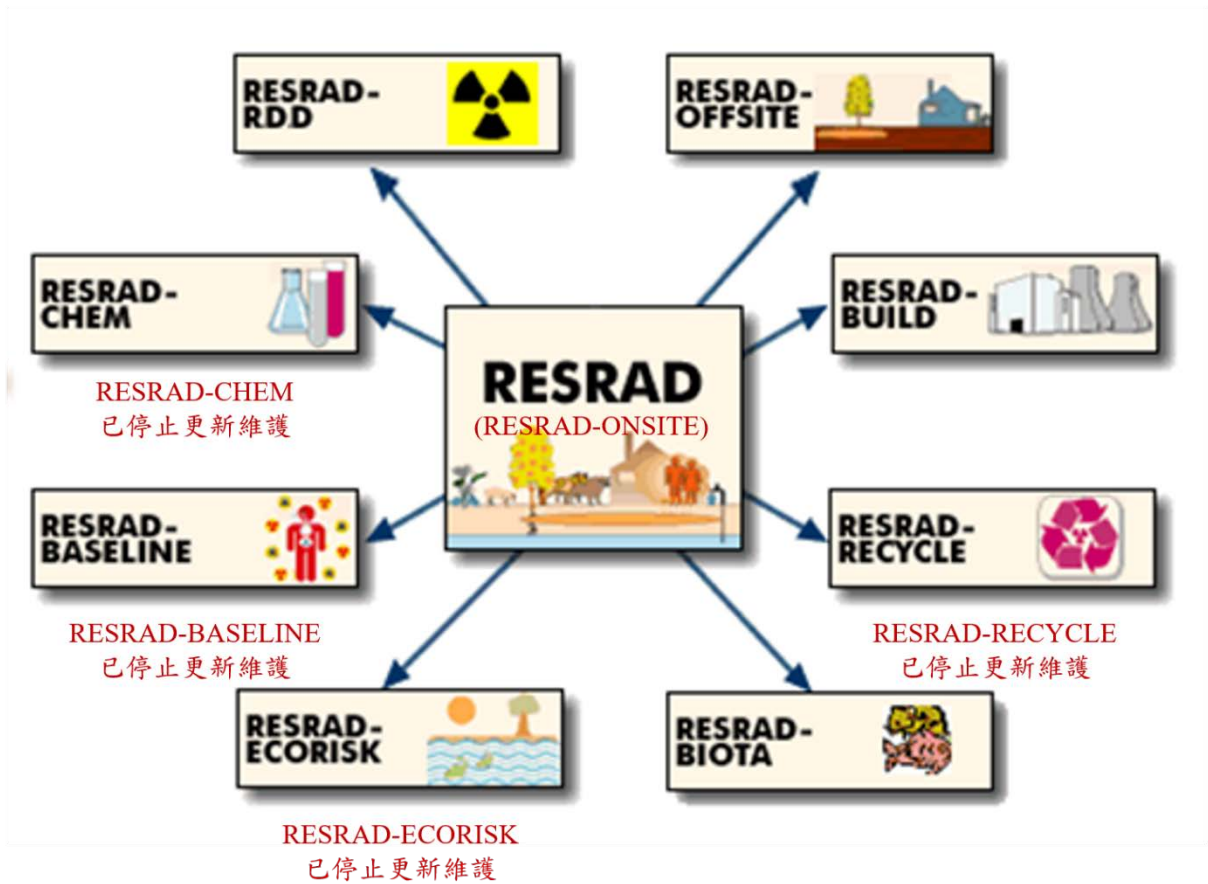


圖 3-1 RESRAD 家族程式

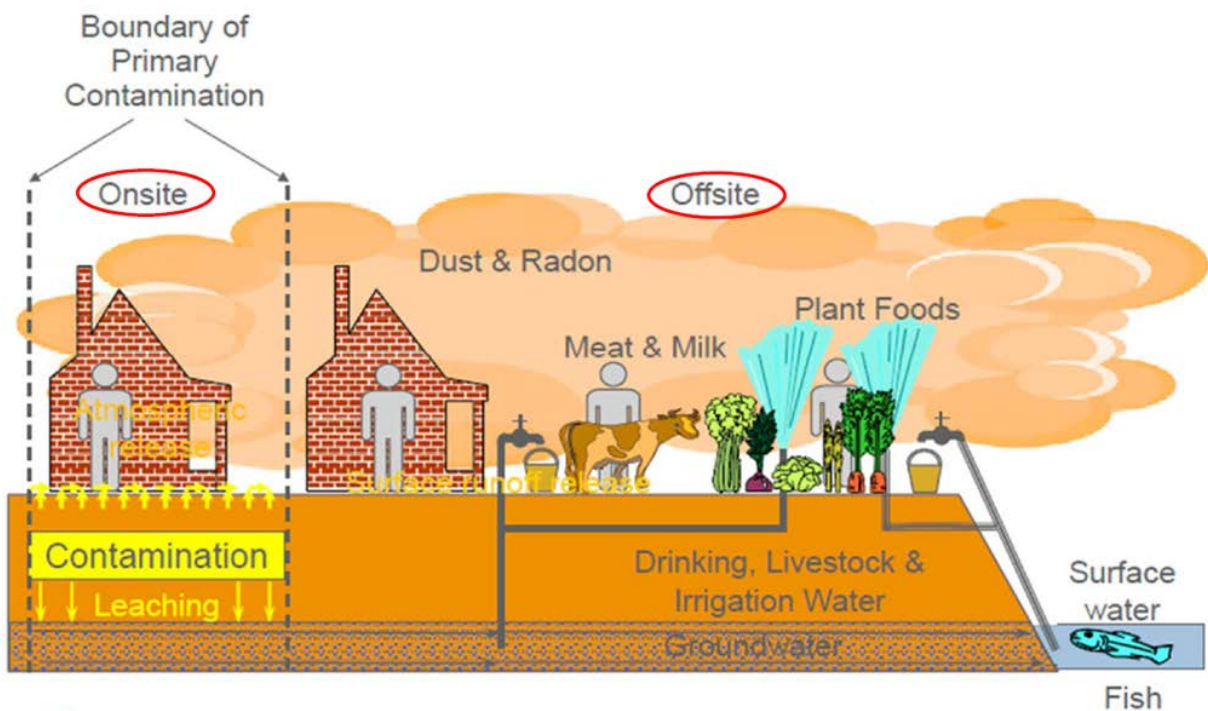


圖 3-2 RESRAD-ONSITE 和 RESRAD-OFFSITE 程式模擬輻射污染情境

RESRAD-OFFSITE 程式之模擬結果(圖 3-3 所示)，可提供分析每個核種與輻射曝露途徑(例如：直接體外輻射、塵埃和氬氣之吸入，以及蔬菜、肉品、牛奶、水生生物之攝食)所造成之輻射劑量、核種濃度、劑量與射源比率(Dose/Source Ratio, DSR)、癌症風險。運用 RESRAD-OFFSITE 程式計算單一核種之劑量與射源比率(DSR)，可進而推算該單一核種之導出濃度指引水平(DCGL)，作為除役廠址輻射安全評估之參考。

本研究對於 RESRAD 程式設計之研析，為參考美國阿岡國家實驗室(ANL)與 RESRAD 程式開發團隊所撰寫之 RESRAD-ONSITE、RESRAD-OFFSITE、RESRAD-BUILD 程式使用者手冊為研析主軸，進而了解 RESRAD 程式之情境設定、模擬流程、輻射曝露途徑、參數設計、參數靈敏度分析(圖 3-4 所示)、核種活度與輻射劑量計算模式。本章節以 RESRAD-OFFSITE 程式為研究範例，RESRAD-OFFSITE 程式為 RESRAD-ONSITE 程式之延伸與精進，程式核種資料庫使用國際放射防護委員會(International Commission on Radiological Protection, ICRP)之 ICRP 107 與 ICRP 38 號報告，也可讓程式使用者自行編輯新的劑量轉換因子(Dose Conversion Factor, DCF)資料庫。RESRAD-OFFSITE 程式使用者手冊中(User's Manual for RESRAD-OFFSITE Version 2 (Yu et al. 2007))，附錄 A 含有程式操作教學和

模擬流程說明；附錄 B 含有程式參數之預設值設計和統計分布；附錄 C 含有如何縮短程式操作時間與不準度分析之討論。

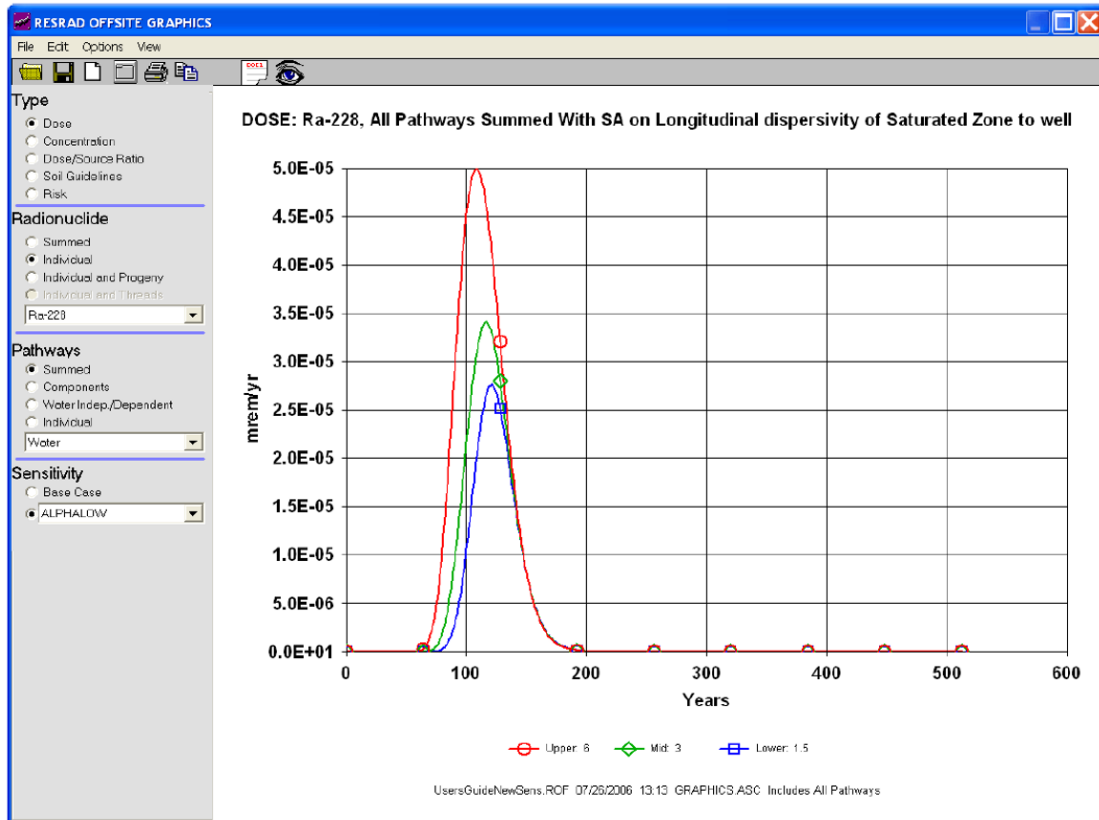


圖 3-3 RESRAD-OFFSITE 程式模擬結果呈現於圖表檢視器，ALPHALOW 即表示靈敏度的變數名稱，並可輸出詳細數據於 Excel 程式

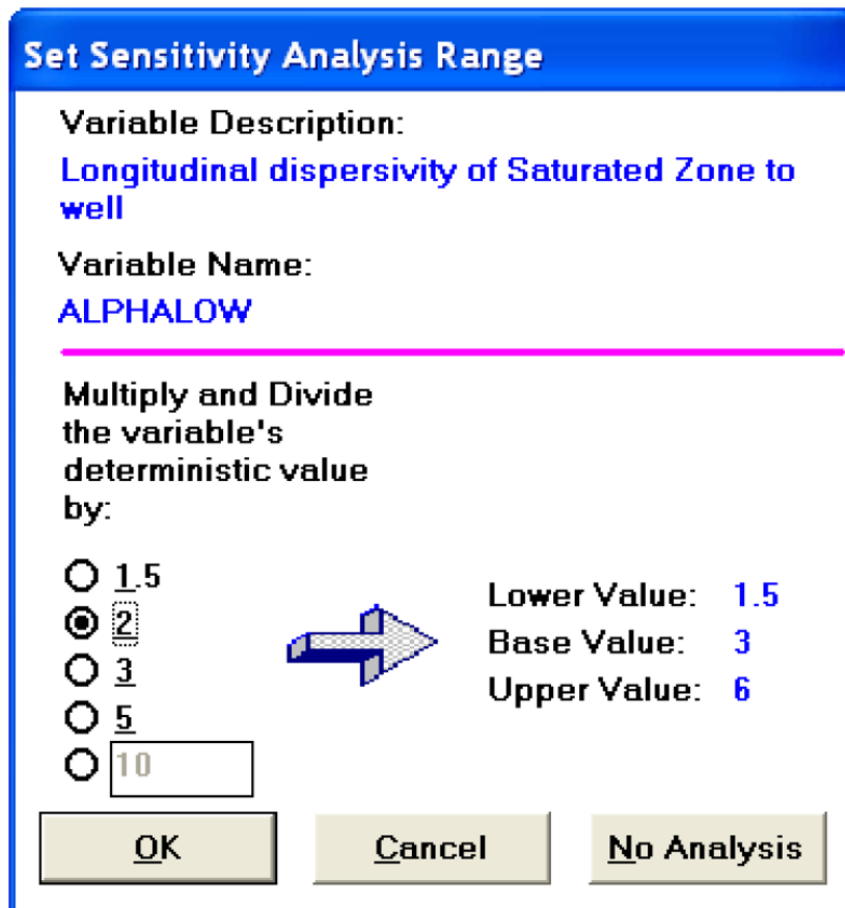


圖 3-4 RESRAD-OFFSITE 程式參數靈敏度分析功能，幫助找出影響模擬結果之關鍵參數與輻射曝露途徑

3.2 美國除役核電廠 Yankee Rowe 執照終止計畫書

美國 Yankee Rowe 核電廠(或稱為 Yankee Nuclear Power Station，YNPS)位於美國麻薩諸塞州富蘭克林郡(YNPS is located at 49 Yankee Road, Rowe, in Franklin County, Massachusetts)，如圖 3-6 所示。執照終止計畫(License Termination Plan，LTP)為描述除役核電廠如何符合美國核能管制委員會

(Nuclear Regulatory Commission, NRC)對於執照終止和廠址釋放之標準。2003年11月24日，Yankee Rowe 核電廠提交執照終止計畫給NRC。2005年7月，NRC正式同意執照終止計畫。從2000年2月開始至2003年6月止，完成所有用過核子燃料從用過核子燃料穴(Spent Fuel Pit)轉移到用過核子燃料獨立貯存設施(Independent Spent Fuel Storage Installation, ISFSI)。

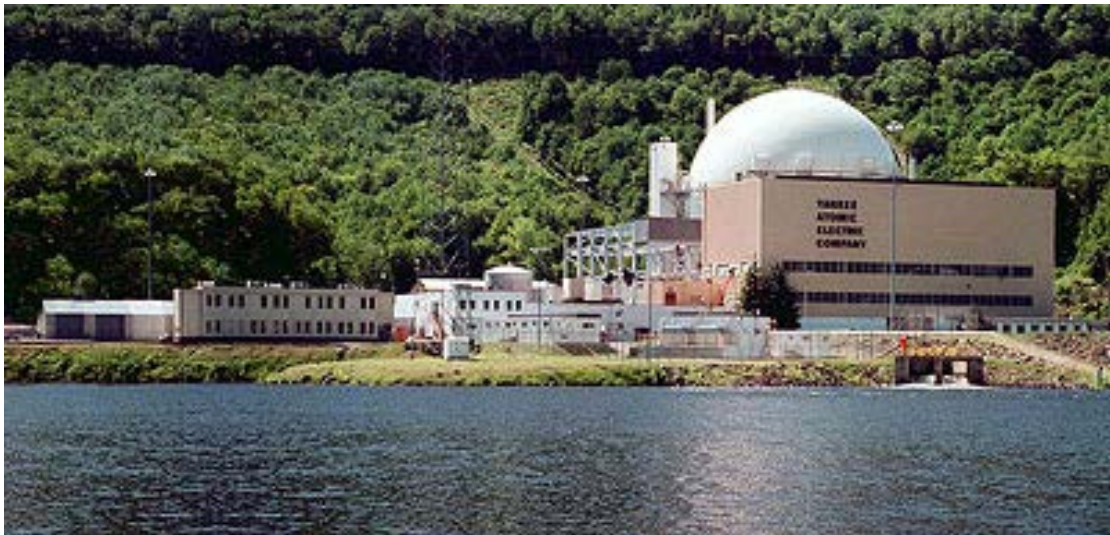


圖 3-5 除役前之美國 Yankee Rowe 核電廠，圖片出處為美國 Yankee Rowe 核電廠官方網頁(<http://www.yankeerowe.com/>)。

本章節研析美國 Yankee Rowe 核電廠(YNPS)的執照終止計畫(LTP)，以及研析執照終止放射標準，彙整 RESRAD 程式之模擬分析架構(圖 3-7 所示)、輸入參數選擇程序、導出濃度指引水平(DCGL)和劑量轉換因子(DCF)之計算結果(表 3-2 所示)。表 3-2 各類核種(i 核種)在各種介質(j 介質)的量測

活度 A_{ij} 除以其 $DCGL_{ij}$ 之總和必須小於 1，即 $\sum_i \sum_j \frac{A_{ij}}{DCGL_{ij}} \leq 1$ ，廠址才可無限

制使用。

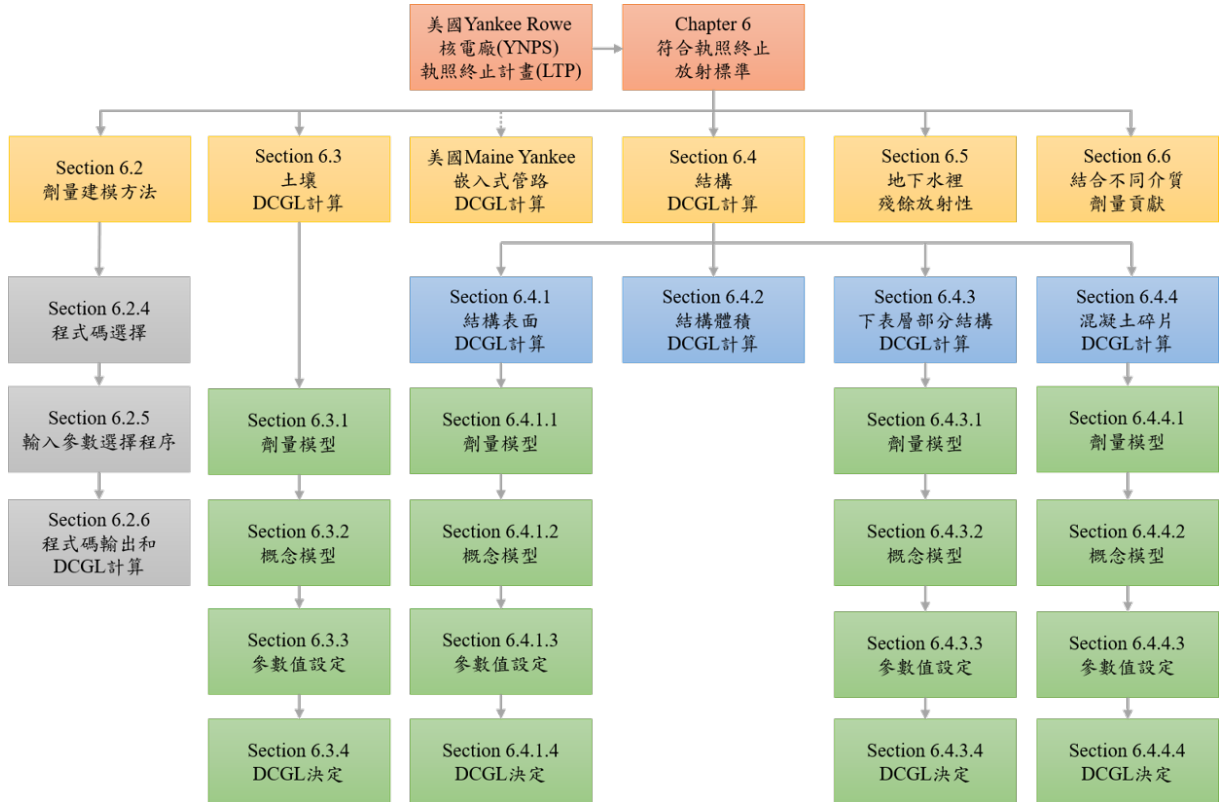


圖 3-6 美國除役核電廠 Yankee Rowe 之 RESRAD 程式模擬分析架構

表 3-2 美國除役核電廠 Yankee Rowe 之結合不同介質類型 DCGLs 結論

不同介質類型之 DCGLs 結論

Summary of DCGLs for Different Media Types

Radionuclide	Soil (pCi/g) [†]	Building Surface (dpm/100 cm ²) [‡]	Subsurface Partial Structures (pCi/g) [§]	Concrete Debris [†] (pCi/g)
H-3	3.5E+02	3.4E+08	1.35E+02	9.5E+01 (cellar holes) 2.8E+02 (grading)
C-14	5.2E+00	1.0E+07	2.34E+03	7.2E+00
Fe-55	2.8E+04	4.0E+07	-	1.4E+02
Co-60	3.8E+00	1.8E+04	3.45E+03	4.3E+00
Ni-63	7.7E+02	3.7E+07	6.16E+04	1.0E+02
Sr-90	1.6E+00	1.4E+05	1.39E+01	7.6E-01
Nb-94	6.8E+00	2.6E+04	-	7.0E+00
Tc-99	1.3E+01	1.4E+07	-	6.1E+01
Ag-108m	6.9E+00	2.5E+04	-	7.0E+00
Sb-125	3.0E+01	1.0E+05	-	3.1E+01
Cs-134	4.7E+00	2.9E+04	-	4.7E+00
Cs-137	8.2E+00	6.3E+04	1.45E+03	6.7E+00
Eu-152	9.5E+00	3.7E+04	-	9.5E+00
Eu-154	9.0E+00	3.4E+04	-	9.1E+00
Eu-155	3.8E+02	6.5E+05	-	3.8E+02
Pu-238	3.1E+01	5.7E+03	-	9.5E+00
Pu-239	2.8E+01	5.1E+03	-	8.8E+00
Pu-241	9.3E+02	2.5E+05	-	1.4E+02
Am-241	2.8E+01	5.0E+03	-	4.1E+00
Cm-243	3.0E+01	7.2E+03	-	4.7E+00

[†] Represents a dose of 23.73 mrem/yr

[‡] Represents a dose of 25 mrem/yr

[§] Represents a dose of 0.5 mrem/yr, radionuclides based upon those found in concrete samples as discussed in Reference 6-11

第四章 以 RESRAD 模式進行除役廠址輻射物質外洩可能之 徑與環境影響程度分析與驗證

4.1 參數說明

RESRAD OFFSITE 中所需要輸入的參數數量相當多，主要可以分成廠址佈局、土壤放射性核種濃度、釋出、分佈係數、沉積速度、轉換因子、物理及水文、大氣傳輸、非飽和區、飽和區、水利用、表面水體、地下水傳輸、攝取率、牲畜攝取，植物因子、牲畜飼養因子、吸入及體外 Gamma、形狀因子、居住率等區塊，此小節將針對這些區塊的參數進行說明。

4.1.1 污染區、農牧區、飲水區、住宅區的位置分布

此區塊為設定主要污染區域、遠廠住宅區、水果穀物非葉菜類蔬菜區、葉菜類蔬菜區、穀物區、放牧區等相對位置，用來設定廠址及周圍的地理、水文等環境，參數名稱及說明於表 4-1 所示。

表 4-1 污染區、農牧區、飲水區、住宅區的位置分布說明

參數英文名稱	參數中文名稱	單位	範圍	預設值	說明
X dimension of primary contamination	X 方向主要污染	m	-80,000 ~ +80,000	100	來自大氣釋放及傳輸計算的主要污染用一個矩形來模擬，矩形個邊的長度用來定義大氣傳輸計算矩形的區域，在左下角相交的兩邊用來定義其他接收區域的座標位置。

Y dimension of primary contamination	Y 方向主要污染	m	-80,000 ~ +80,000	100	同上。
Smaller x coordinate of the fruit, grain, nonleafy vegetables plot	水果、穀物、非葉類蔬菜區的較小 x 座標	m	-80,000 ~ +80,000	34.375	大氣傳輸模型中，水果、穀類、非葉類蔬菜區域、葉類蔬菜區域、牧場及青儲飼料生長區、家畜食用飼料區及住宅區都用一個矩形近似。這些矩形的邊必須平行於主要污染邊界。這些矩形區域的位置及大小由代碼中由兩個對角的坐標指定。座標由相對於主要污染區左下角的卡式坐標系決定，這塊區域由兩個垂直維度的乘積產生。這些接收區域的位置及大小也可以從地圖介面來指定。
Larger x coordinate of the fruit, grain, nonleafy vegetables plot	水果、穀物、非葉類蔬菜區的較大 x 座標	m	-80,000 ~ +80,000	65.625	同上。
Smaller y coordinate of the	水果、穀物、非葉類蔬菜區的較小 y 座標	m	-80,000 ~ +80,000	234	同上。

fruit, grain, nonleafy vegetables plot					
Larger y coordinate of the fruit, grain, nonleafy vegetables plot	水果、穀物、非葉類蔬菜區的較大 y 座標	m	-80,000 ~ +80,000	266	同上。
Smaller x coordinate of the Leafy vegetables plot	葉菜類蔬菜區的較小 x 座標	m	-80,000 ~ +80,000	34.375	同上。
Larger x coordinate of the leafy vegetables plot	葉菜類蔬菜區的較大 x 座標	m	-80,000 ~ +80,000	65.625	同上。
Smaller y coordinate of the Leafy vegetables plot	葉菜類蔬菜區的較小 y 座標	m	-80,000 ~ +80,000	268	同上。
Larger y coordinate of the leafy vegetables plot	葉菜類蔬菜區的較大 y 座標	m	-80,000 ~ +80,000	300	同上。
Smaller x coordinate of the	牧場及青儲飼料生長區較小 x 座標	m	-80,000 ~ +80,000	0	同上。

pasture, silage growing area					
Larger x coordinate of the pasture, silage growing area	牧場及青儲飼料生長區較大 x 座標	m	-80,000 ~ +80,000	100	同上。
Smaller y coordinate of the pasture, silage growing area	牧場及青儲飼料生長區較小 y 座標	m	-80,000 ~ +80,000	450	同上。
Larger y coordinate of the pasture, silage growing area	牧場及青儲飼料生長區較大 y 座標	m	-80,000 ~ +80,000	550	同上。
Smaller x coordinate of the grain fields	穀物區較小 x 座標	m	-80,000 ~ +80,000	0	同上。
Larger x coordinate of the grain fields	穀物區較大 x 座標	m	-80,000 ~ +80,000	100	同上。
Smaller y coordinate of the grain fields	穀物區較小 y 座標	m	-80,000 ~ +80,000	300	同上。
Larger y coordinate of the grain fields	穀物區較大 y 座標	m	-80,000 ~ +80,000	400	同上。
Smaller x coordinate of the dwelling site	住宅區較小 x 座標	m	-80,000 ~ +80,000	34.375	同上。

Larger x coordinate of the dwelling site	住宅區較大 x 座標	m	-80,000 ~ +80,000	65.625	同上。
Smaller y coordinate of the dwelling site	住宅區較小 y 座標	m	-80,000 ~ +80,000	134	同上。
Larger y coordinate of the dwelling site	住宅區較大 y 座標	m	-80,000 ~ +80,000	166	同上。
Smaller x coordinate of the surface-water body	表面水體較小 x 座標	m	-80,000 ~ +80,000	-100	同上。
Larger x coordinate of the surface-water body	表面水體較大 x 座標	m	-80,000 ~ +80,000	200	同上。
Smaller y coordinate of the surface-water body	表面水體較小 y 座標	m	-80,000 ~ +80,000	550	同上。
Larger y coordinate of the surface-water body	表面水體較大 y 座標	m	-80,000 ~ +80,000	850	同上。

4.1.2 土壤放射性核種濃度

此區塊為受污染區域放射性核種初始濃度等參數設定，污染區域內的放射線核種濃度，在污染區域內視為單一放射線核種均勻分布。RESRAD 資料庫已建立約 209 個核種資料庫，參數名稱及說明於表 4-2 所示。

表 4-2 土壤放射性核種濃度說明

參數英文名稱	參數中文名稱	單位	範圍	預設值	說明
Nuclide concentration	核種濃度	pCi/g	0~ 1E+34	100	污染區域內的放射線核種濃度，在污染區域內視為單一放射線核種均勻分布。

4.1.3 釋出

當核種釋出速率不為零時，一階釋出率公式用於計算處置廠址核種釋出至地下水浸出率。參數名稱及說明於表 4-3 所示。

$$\text{一階釋出率 } Ri(t) = Li \rho_b^{(cz)} A T(t) Si(t)$$

Li = leach rate for radionuclide i (yr^{-1})

$\rho_b^{(cz)}$ = bulk density of the contaminated zone (kg/m^3)

A = area of the contaminated zone (m^2)

$T(t)$ = thickness of the contaminated zone at time t (m)

$Si(t)$ = average concentration of the i th principal radionuclide in the contaminated zone available for leaching at time t (Bq/kg or pCi/kg).

表 4-3 釋出率參數說明

參數英文名稱	參數中文名稱	單位	範圍	預設值	說明
Release to groundwater, leach rate	釋出到地下水浸出率	1/yr	0 ~ 1E+34	0	單位時間可用放射性核種從污染區域浸出的比例。

4.1.4 分佈係數

是核種於九個區域(1.污染區域 2.未飽和區域 3.飽和區域 4.表面水體沉積物 5.水果、穀物、非葉菜類區域 6.葉菜類區域 7.牧草、青貯飼料種植區 8.牲畜飼料餵養區 9.居住區)之分佈係數設定輸入視窗。分佈係數是土壤吸附核種的質量濃度對溶液中核種的體積濃度之比值。各核種都有預設之分佈係數，參數名稱及說明於表 4-4 所示。

表 4-4 分佈係數說明

參數英文名稱	參數中文名稱	單位	範圍	預設值	說明
Contaminated zone	受污染區	cm ³ /g	0 ~ 1E+34	與核種有關	核種吸附於土壤質量對溶質於溶液中質量之比值，單位為 cm ³ /g。
Unsaturated zone	非飽和區	cm ³ /g	0 ~ 1E+34	與核種有關	
Saturated zone	飽和區	cm ³ /g	0 ~ 1E+34	與核種有關	
Sediment in surface water body	表面水體沉積物	cm ³ /g	0 ~ 1E+34	與核種有關	
Fruit, grain, nonleafy fields	水果、穀物、非葉菜類區域	cm ³ /g	0 ~ 1E+34	與核種有關	
Leafy vegetable fields	葉類蔬菜區	cm ³ /g	0 ~ 1E+34	與核種有關	

Pasture, silage growing areas	牧草、青貯飼料生長區域	cm ³ /g	0 ~ 1E+34	與核種有關	
Livestock feed grain fields	家畜餵食穀物區	cm ³ /g	0 ~ 1E+34	與核種有關	
Offsite dwelling site	場外住宅區	cm ³ /g	0 ~ 1E+34	與核種有關	

4.1.5 沉積速度

大氣沉降速度參數輸入後，程式將根據大氣傳輸，計算遠廠地區核種沉降速率，參數名稱及說明於表 4-5 所示。

表 4-5 沉積速度說明

參數英文名稱	參數中文名稱	單位	範圍	預設值	說明
Deposition velocity	沉積速率	m/s	0 ~ 1E+34	0.001 0.01 (Cl, I) 0 (Xe)	由污染的塵土傳輸的核種，塵土落下的速率。如果核種是由氣體傳輸，其值為 0。

4.1.6 轉換因子

本參數係為放射性核種在廠址不同介質間傳輸之轉換因子，轉移因子與核種元素有關。我們亦將根據計畫所提出的 11 個 RESRAD-OFFSITE 重要參數，標示出較為重要的轉換因子(*)供原能會參考，參數名稱及說明於表 4-6 所示

表 4-6 轉換因子說明

參數英文名稱	參數中文名稱	單位	範圍	預設值	說明
External dose conversion factors	體外劑量轉換因子	(mrem/yr) per (pCi/g)	與核種有關	與核種有關	FRG-12 的放射性核種特定值，不允許使用者修改。
*Inhalation dose conversion factors	吸入劑量轉換因子	mrem/pCi	與核種有關	與核種有關	FGR-11 的放射性核種特定值，列出了三種分類 D、W、Y 的停留時間分別對應到小於 10 天、10~100 天、大於 100 天。對於一些氣體的放射性核種，例如：H-3、C-14、Ni-59、Ni-63 也分別列出。預設值為最保守的轉換因子，如果知道化學式或是有更合適的數據可以自行更改。
*Ingestion dose conversion factors	嚥入劑量轉換因子	mrem/pCi	與核種有關	與核種有關	FGR-11 的放射性核種特定值，攝取劑量轉換因子與化學式有關，決定進入腸胃道到達體液的比例，代碼根據劑量轉換因子列出了這些比例，預設值為最保守的劑量轉換因子，如果知道化學式，或是有更適當的數據，可以去改變這個值。
*Slope factor -- external	外部斜率因子	(risk/yr) per (pCi/g)	與核種有關	與核種有關	每年癌症風險對放射性濃度比率，使用者可以從 FGR-13 morbidity/mortality、HEAST 1995、HEAST 2001 morbidity 選取斜率因子。FGR-13 對於嚥入水及食物有不
*Slope factor -- inhalation	吸入斜率因子	risk/pCi	與核種有關	與核種有關	

*Slope factor – food ingestion	嚥入食物斜率因子	risk/pCi	與核種有關	與核種有關	同的斜率因子。HEAST 2001 對於嚥入食物、水、土壤有不同的斜率因子。
*Slope factor – water ingestion	嚥入水斜率因子	risk/pCi	與核種有關	與核種有關	
*Slope factor – soil ingestion	嚥入土壤斜率因子	risk/pCi	與核種有關	與核種有關	
*Fruit, grain, nonleafy vegetables transfer factor	水果、穀物、非葉類蔬菜轉換因子	(pCi/kg)/ (pCi/kg)	與核種有關	與核種有關	土壤對植物轉換因子是可食部分植物在收成期及乾早期的放射性核種濃度比率。
Leafy vegetables transfer factor	葉菜類蔬菜轉換因子	(pCi/kg)/ (pCi/kg)	與核種有關	與核種有關	同上。
*Pasture and silage transfer factor	牧草及青貯飼料轉換因子	(pCi/kg)/ (pCi/kg)	與核種有關	與核種有關	同上。
*Livestock feed grain transfer factor	牲畜飼料穀物轉換因子	(pCi/kg)/ (pCi/kg)	與核種有關	與核種有關	同上。
*Meat transfer factor	肉類轉換因子	(pCi/kg)/ (pCi/d)	與核種有關	與核種有關	家畜每天嚥入牧草的核種活度，產生肉類含核種的活度濃度
*Milk transfer factor	牛奶轉換因子	(pCi/L)/ (pCi/d)	與核種有關	與核種有關	牛奶含核種的活度濃度
Bioaccumulation factor for fish	魚類生物累積轉換因子	(pCi/kg)/ (pCi/L)	與核種有關	與核種有關	生物累積轉換因子是放射性核種濃度在魚類食物跟水的比例。

Bioaccumulation factor for crustacea and mollusks	甲殼類動物及軟體動物累積轉換因子	(pCi/kg)/ (pCi/L)	與核種有關	與核種有關	生物累積轉換因子是放射性核種濃度在甲殼類及軟體類食物跟水的比例。
---	------------------	----------------------	-------	-------	----------------------------------

4.1.7 地理土壤與水文特性

可輸入降雨參數，為廠址之年均降雨量，程式以此計算非飽和含水層入滲率、所有地區的滲出率及氫的蒸發散量。滲出率用來計算主要污染區域、農地、牧場與住宅區的土壤污染濃度。而入滲率會影響非飽和層的傳輸速率。內部又分為主要污染區、農業區、牲畜飼養區、遠廠住宅區四個子區塊，參數名稱及說明於表 4-7 所示。

表 4-7 地理土壤與水文特性參數說明

參數英文名稱	參數中文名稱	單位	範圍	預設值	說明
Precipitation	降水	m/yr	0 ~ 10	1	單位時間落入單位面積水(雨水，雪，冰雹)的平均體積。用來計算：(1)從污染區浸出的放射性核種。(2)農業區及牧場的累積污染。應該使用特定區域的資料。
Area of primary contamination	主要污染區	m ²	Calculated	10,000	廠區全部面積為均勻污染，由程式根據輸入主污染區域的 x, y 維度來計算而不是由使用者輸入。
Length of contamination parallel to aquifer flow	平行含水層流的污染長度	m	1E-4 ~ 1E+6	100	兩條垂直於含水層流方向的平行直線之間的距離。一條在污染區上方梯度，另一條在污染區下方梯度。

Depth of soil mixing layer	土壤混合層深度	m	0 ~ 1	0.15	假設因為人為及自然過程隨著時間均勻的混和，表面土壤的厚度。用來計算廠址內吸入粉塵及土壤攝入途徑及釋出到大氣的深度因子，深度因子是在表面被污染的可重複使用土壤粒子的比例，是假設土壤混合發生在表面計算而來。
Deposition velocity of dust	塵土沉積速率	m/s	0 ~ 0.01	0.001	塵土落入污染區的平均速率，用來計算釋出到大氣。
Irrigation applied per year	每年施加灌溉	m/yr	0 ~ 10	0.2	主污染區內全年平均灌溉率，一個用來污染區放射性核種浸出的參數。應該使用特定的資料。
Evapotranspiration coefficient	蒸散係數	--	0 ~ 0.999	0.5	降水及灌溉水滲入表土時蒸發到大氣中與被植物吸收的比例。為用來污染區放射性核種浸出的其中一個參數。
Runoff coefficient	逕流係數	--	0 ~ 1	0.2	全年平均滲透比率，其中不包括滲入土壤及因蒸發返回大氣。逕流係數為計算用來污染區放射性核種浸出的其中一個參數。
Rainfall and runoff	降雨和逕流	--	0 ~ 1,000	160	也稱為降雨侵蝕因子，測量降雨的能量來得到，這個值用來計算所有位置的侵蝕率。
Slope-length-steepness factor	斜率-長度-陡度因子	--	0 ~ 10	0.4	針對不同地形剖面侵蝕率因子。
Cover and management factor	覆蓋及管理因子	--	0 ~ 1	0.003	這個因子針對植被，覆蓋等侵蝕率效應。
Support practice factor	支持實踐因子	--	0 ~ 1	1	這個因素考慮了關於侵蝕率的保護措施，例如：梯田等。

Thickness of contaminated zone	受污染區厚度	m	1E-5 ~ 1,000	2	放射性濃度明顯高於背景的取樣土壤最上層與最下層的距離。
Total porosity of contaminated zone	受污染區總多孔性	--	1E-5 ~ 1	0.4	受污染區有孔隙體積與總體積的比例。
Dry bulk density of contaminated zone	受污染區乾容積密度	g/cm ³	1E-3 ~ 22.5	1.5	受污染區的容積密度。
Soil erodibility factor of contaminated zone	受污染區土壤可蝕性因子	tons/acre	0 ~ 0.5	0.4	這個值量化了土壤對侵蝕的敏感性。
Field capacity of contaminated zone	受污染區容量	--	1E-5 ~ 1	0.3	受重力引導土壤濕氣含量，為對抗重力保留在一系列土壤中的濕氣數量，區域容量為一個水文地質參數用來計算經過未飽和土壤的水轉換。
Soil b parameter of contaminated zone	受污染區土壤 b 參數	--	0 ~ 15	5.3	一個根據稱為導電率的土壤特性函數而來經驗及無維度參數，用來計算土壤的飽和比例。
Hydraulic conductivity of contaminated zone	受污染區水力傳導率	m/yr	1E-3 ~ 1E+10	10	測量土壤傳輸水的能力，與水力梯度有關。水力傳導率取決於土壤顆粒大小，土壤基質的結構，土壤流體類型和土壤流體的相對量(飽和度)。

Thickness of clean cover	清潔涵蓋區厚度	m	0 ~ 100	0	地表與受污染區的距離。
Total porosity of clean cover	清潔涵蓋區總孔隙度	--	1E-5 ~ 1	0.4	液體與氣體所佔土壤體積比率。總孔隙為一個水利參數用來計算水轉換次數。
Dry bulk density of clean cover	清潔涵蓋區堆密度	g/cm ³	1E-3 ~ 22.5	1.5	覆蓋材料的堆密度。
Soil erodibility factor of clean cover	清潔涵蓋區土壤可蝕性因子	tons/ac re	0 ~ 0.5	0.4	參見受污染區愈土壤可蝕性因子。
Volumetric water content of clean cover	清潔涵蓋區體積含水量	--	0 ~ 1	0.05	多孔介質內體積含水量，用來表示多孔性介質被水佔據的比例。這個值應該小於介質內的總孔隙。
Area for fruit, grain, and nonleafy vegetables field	水果、穀物及非葉菜類蔬菜地區面積	m ²	Calculated	1,000	由水果，穀物及非葉菜類蔬菜地區 x, y 座標計算得到，而不是使用者輸入。
Fraction of area directly over primary contamination for fruit, grain, and nonleafy vegetables field	水果、穀物及非葉菜類蔬菜地區直接污染比例	--	0 ~ 1	0	直接受污染成長區面積比例。

Irrigation applied per year for fruit, grain, and nonleafy vegetables field	水果、穀物及非葉菜類蔬菜地區年灌溉率	m/yr	0 ~ 10	0.2	見主污染區灌溉。
Evapotranspiration coefficient for fruit, grain, and nonleafy vegetables field	水果、穀物及非葉菜類蔬菜地區蒸散係數	--	0 ~ 0.999	0.5	見主污染區蒸散係數。
Runoff coefficient for fruit, grain, and nonleafy vegetables field	水果、穀物及非葉菜類蔬菜地區逕流係數	--	0 ~ 1	0.2	見主污染區逕流係數。
Depth of soil mixing layer or plow layer for fruit, grain, and nonleafy vegetables field	水果、穀物及非葉菜類蔬菜地區混合土壤層耕地層深度	m	0 ~ 1	0.15	見主污染區土壤混合層參數。
Volumetric water content for fruit, grain, and nonleafy vegetables field	水果、穀物及非葉菜類蔬菜地區體積含水量	--	1E-5 ~ 1	0.3	多孔介質被水佔據的體積比率，這個值不能超過介質的總多孔性。

Dry bulk density of soil for fruit, grain, and nonleafy vegetables field	水果、穀物及非葉菜類蔬菜地區土壤乾體積密度	g/cm ³	1E-3 ~ 22.5	1.5	見主污染區土壤乾體積密度。
Soil erodibility factor for fruit, grain, and nonleafy vegetables field	水果、穀物及非葉菜類蔬菜地區土壤可蝕性因子	tons/acre	0 ~ 0.5	0.4	見主污染區土壤可蝕性因子。
Slope-length-steepness factor for fruit, grain, and nonleafy vegetables field	水果、穀物及非葉菜類蔬菜地區斜率-長度-陡度因子	--	0 ~ 10	0.4	見主污染區斜率-長度-陡度因子。
Cover and management factor for fruit, grain, and nonleafy vegetables field	水果、穀物及非葉菜類蔬菜地區覆蓋及管理因子	--	0 ~ 1	0.003	見主污染區覆蓋及管理因子。
Support practice factor for fruit, grain, and nonleafy vegetables field	水果、穀物及非葉菜類蔬菜地區支持實踐因子	--	0 ~ 1	1	見主污染區支持實踐因子。

nonleafy vegetables field					
Area for leafy vegetable field	葉菜類蔬菜區 面積	m ²	Calculated	1,000	由葉菜類蔬菜區 x, y 座標計算 得到，而不是使用者輸入。
Fraction of area directly over primary contamination for leafy vegetable field	葉菜類蔬菜區 直接受污染面 積比例	--	0 ~ 1	0	直接受污染成長區面積比例。
Irrigation applied per year for leafy vegetable field	葉菜類蔬菜區 年灌溉率	m/yr	0 ~ 10	0.2	見主污染區灌溉。
Evapotranspiration coefficient for leafy vegetable field	葉菜類蔬菜區 蒸散係數	--	0 ~ 0.999	0.5	見主污染區蒸散係數。
Runoff coefficient for leafy vegetable field	葉菜類蔬菜區 逕流係數	--	0 ~ 1	0.2	見主污染區逕流係數。
Depth of soil mixing layer or plow layer for leafy vegetable field	葉菜類蔬菜區 土壤混合層或 耕地層深度	m	0 ~ 1	0.15	見主污染區土壤混合層參數。

Volumetric water content for leafy vegetable field	葉菜類蔬菜區 水體積密度	--	1E-5 ~ 1	0.3	見水果、穀物、非葉菜類蔬菜區體積含水量參數。
Dry bulk density of soil for leafy vegetable field	葉菜類蔬菜區 土壤乾體積密度	g/cm ³	1E-3 ~ 22.5	1.5	見主污染區土壤乾體積密度。
Soil erodibility factor for leafy vegetable field	葉菜類蔬菜區 土壤可蝕性因子	tons/acre	0 ~ 0.5	0.4	見主污染區土壤可蝕性因子。
Slope-length-steepness factor for leafy vegetable field	葉菜類蔬菜區 斜率-長度-陡度因子	--	0 ~ 10	0.4	見主污染區斜率 - 長度 - 陡度因子。
Cover and management factor for leafy vegetable field	葉菜類蔬菜區 覆蓋及管理因子	--	0 ~ 1	0.003	見主污染區覆蓋及管理因子。
Support practice factor for leafy vegetable field	葉菜類蔬菜區 支持實踐因子	--	0 ~ 1	1	見主污染區支持實踐因子。
Area for pasture and silage field	牧草和青貯區 面積	m ²	Calculated	10,000	由牧草和青貯區 x, y 座標計算得到，而不是使用者輸入。
Fraction of area directly over primary	牧草和青貯區 直接受污染面積比例	--	0 ~ 1	0	直接受污染成長區面積比例。

contamination for pasture and silage field					
Irrigation applied per year for pasture and silage field	牧草和青貯區面積年灌溉率	m/yr	0 ~ 10	0.2	見主污染區灌溉。
Evapotranspiration coefficient for pasture and silage field	牧草和青貯區面積蒸散係數	--	0 ~ 0.999	0.5	見主污染區蒸散係數。
Runoff coefficient for pasture and silage field	牧草和青貯區面積逕流係數	--	0 ~ 1	0.2	見主污染區逕流係數。
Depth of soil mixing layer or plow layer for pasture and silage field	牧草和青貯土壤混合層或耕地層深度	m	0 ~ 1	0.15	見主污染區土壤混合層參數。
Volumetric water content for pasture and silage field	牧草和青貯區水體積密度	--	1E-5 ~ 1	0.3	見體積含水量參數。
Dry bulk density of soil for pasture and silage field	牧草和青貯區土壤乾體積密度	g/cm ³	1E-3 ~ 22.5	1.5	見主污染區土壤乾體積密度。

Soil erodibility factor for pasture and silage field	牧草和青貯區土壤可蝕性因子	tons/acre	0 ~ 0.5	0.4	見主污染區土壤可蝕性因子。
Slope-length-steepness factor for pasture and silage field	牧草和青貯區斜率-長度-陡度因子	--	0 ~ 10	0.4	見主污染區斜率-長度-陡度因子。
Cover and management factor for pasture and silage field	牧草和青貯區覆蓋及管理因子	--	0 ~ 1	0.003	見主污染區覆蓋及管理因子。
Support practice factor for pasture and silage field	牧草和青貯區支持實踐因子	--	0 ~ 1	1	見主污染區支持實踐因子。
Area for grain field	穀類區面積	m ²	Calculated	10,000	由穀類區 x, y 座標計算得到，而不是使用者輸入。
Fraction of area directly over primary contamination for grain field	穀類區直接受污染面積比例	--	0 ~ 1	0	直接受污染成長區面積比例。
Irrigation applied per year for grain field	穀類區面積年灌溉率	m/yr	0 ~ 10	0.2	見主污染區灌溉。

Evapotranspiration coefficient for grain field	穀類區面積蒸散係數	--	0 ~ 0.999	0.5	見主污染區蒸散係數。
Runoff coefficient for grain field	穀類區面積逕流係數	--	0 ~ 1	0.2	見主污染區逕流係數。
Depth of soil mixing layer or plow layer for grain field	穀類土壤混合層或耕地層深度	m	0 ~ 1	0.15	見主污染區土壤混合層參數。
Volumetric water content for grain field	穀類區水體積密度	--	1E-5 ~ 1	0.3	見體積含水量參數。
Dry bulk density of soil for grain field	穀類區土壤乾體積密度	g/cm ³	1E-3 ~ 22.5	1.5	見主污染區土壤乾體積密度。
Soil erodibility factor for grain field	穀類區土壤可蝕性因子	tons/acre	0 ~ 0.5	0.4	見主污染區土壤可蝕性因子。
Slope-length-steepness factor for grain field	穀類區斜率-長度-陡度因子	--	0 ~ 10	0.4	見主污染區斜率-長度-陡度因子。
Cover and management factor for grain field	穀類區覆蓋及管理因子	--	0 ~ 1	0.003	見主污染區覆蓋及管理因子。

Support practice factor for grain field	穀類區支持實踐因子	--	0 ~ 1	1	見主污染區支持實踐因子。
Area of offsite dwelling site	場外住宅區面積	m ²	Calculated	1,000	由場外住宅區 x, y 座標計算得到，而不是使用者輸入。
Irrigation applied per year to home garden or lawn	家庭花園或草坪年灌溉率	m/yr	0 ~ 10	0.2	見主污染區灌溉。
Evapotranspiration coefficient for dwelling site	場外住宅區面積蒸散係數	--	0 ~ 0.999	0.5	見主污染區蒸散係數。
Runoff coefficient for dwelling site	場外住宅區面積逕流係數	--	0 ~ 1	0.2	見主污染區逕流係數。
Depth of soil mixing layer for dwelling site	場外住宅區土壤混合層或耕地層深度	m	0 ~ 1	0.15	見主污染區土壤混合層參數。
Volumetric water content for dwelling site	場外住宅區水體積密度	--	1E-5 ~ 1	0.3	見體積含水量參數。
Dry bulk density of soil for dwelling site	場外住宅區土壤乾體積密度	g/cm ³	1E-3 ~ 22.5	1.5	見主污染區土壤乾體積密度。
Soil erodibility factor for dwelling site	場外住宅區土壤可蝕性因子	tons/acre	0 ~ 0.5	0	見主污染區土壤可蝕性因子。

Slope-length-steepness factor for dwelling site	場外住宅區斜率-長度-陡度因子	--	0 ~ 10	0.4	見主污染區斜率-長度-陡度因子。
Cover and management factor for dwelling site	場外住宅區覆蓋及管理因子	--	0 ~ 1	0.003	見主污染區覆蓋及管理因子。
Support practice factor for dwelling site	場外住宅區支持實踐因子	--	0 ~ 1	1	見主污染區支持實踐因子。

4.1.8 大氣傳輸

包括釋出高度、釋出熱通量、風速計高度、環境溫度、AM/PM 大氣混合高度、分散係數模式、風速地形、場外高程(與主要污染之地表的相對高程)、區域整合網格間距、讀取氣象 STAR 檔案、風速、聯合頻率(風速、風向及穩定等級)等，參數名稱及說明於表 4-8 所示。

表 4-8 大氣傳輸參數說明

參數英文名稱	參數中文名稱	單位	範圍	預設值	說明
Release height	釋出高度	m	0 ~ 100	0	外逸物質的物理釋出高度。
Release heat flux	釋出熱通量	cal/s	0 ~ 1E+10	0	(無)
Anemometer height	風速計高度	m	0 ~ 100	10	量測風速的高度。

Ambient temperature	環境溫度	K	250 ~ 320	285	風速表溫度用來計算外逸物質的羽流上升。
AM atmospheric mixing height	上午大氣混合高度	m	0 ~ 3,000	400	年平均早晨混合高度，年平均早晨混合高度及年平均下午混合高度用來決定不同混合高度的帕斯奎爾穩定性。
PM atmospheric mixing height	下午大氣混合高度	m	0 ~ 3,000	1,600	年平均下午混合高度。
Dispersion model coefficients	分散模型係數	--	Briggs rural/urban, Pasquill-Gifford	Pasquill-Gifford	分散係數用來計算羽流分散，帕斯奎爾-吉福德係數應用於地表附近的釋出。
Windspeed Terrain	風速地形	--	Rural, urban	Rural	用於選擇適合的風速高度地形。
Fruit, grain, nonleafy vegetable plot	水果、穀物、非葉類蔬菜圃	m	0 ~ 100	10	水果、穀物、非葉類蔬菜相對於主污染區海拔。
Leafy vegetable plot	葉菜類蔬菜圃	m	0 ~ 100	12	葉菜類蔬菜相對於主污染區海拔。
Pasture, silage growing area	牧場、青貯飼料生長區	m	0 ~ 100	20	牧場、青貯飼料生長區相對於主污染區海拔。
Grain fields	穀物區	m	0 ~ 100	14	穀物區相對於主污染區海拔。
Dwelling site	住宅區	m	0 ~ 100	6	住宅區相對於主污染區海拔。
Surface water body	表面水體	m	0 ~ 100	26	表面水體相對於主污染區海拔。

Grid spacing for areal integration	分佈積分網格空間	m	0 ~ 500	100	模擬大氣傳輸時，主污染區及場外接收區假設為矩形，而不是用從污染源中心到接受體的單一距離。程式提供可將污染源及受體面積分割為更小的正方形或矩形的選項，會個別計算每個切割後的區域再加總起來得到更佳的大氣傳輸預測。
Joint frequency of wind speed and stability class for a 16 sector windrose	風速共同頻率及穩定性	--	0 ~ 1	1 (S to N)	在特定扇形區風速區間和穩定性種類的組合的大氣條件下的一小段時間。
Wind speed	風速	m/s	0.001 ~ 20	0.89, 2.46, 4.47, 6.93, 9.61, 12.52	用於共同頻率數據。

4.1.9 未飽和區

用於未飽和含水層之參數設定，參數名稱及說明於表 4-9 所示。

表 4-9 未飽和區參數說明

參數英文名稱	參數中文名稱	單位	範圍	預設值	說明
Unsaturated zone thickness	未飽和區厚度	m	0.01 ~ 10,000	4	非飽和區厚度。

Unsaturated zone dry bulk density	未飽和區乾容積密度	g/cm ³	1E-3 ~ 22.5	1.5	見受污染區乾容積密度。
Unsaturated zone total porosity	未飽和區總多孔性	--	1E-5 ~ 1	0.4	見清除覆蓋多孔性參數。
Unsaturated zone effective porosity	未飽和區有效孔隙度	--	1E-5 ~ 1	0.2	水可以圍繞在非飽和區的孔隙體積比率，和其他的水文參數用來計算水傳輸突破次數。
Unsaturated zone field capacity	未飽和區容量	--	1E-5 ~ 1	0.3	見受污染區容量參數。
Unsaturated zone hydraulic conductivity	未飽和區水力傳導率	m/yr	1E-3 ~ 1E+6	10	見受污染區水力傳導率參數。
Unsaturated zone soil b parameter	未飽和區土壤 b 參數	--	0 ~ 15	5.3	見受污染區土壤 b 參數。
Unsaturated zone longitudinal dispersivity	未飽和區縱向分散性	m	0 ~ 100	0.1	非飽和區縱向分散性和孔隙水速度的比率，這個參數與區域的厚度有關。

4.1.10 飽和區

飽和含水層之參數設定，參數名稱及說明於表 4-10 所示。

表 4-10 飽和區參數說明

參數英文名稱	參數中文名稱	單位	範圍	預設值	說明
Thickness of saturated zone	飽和區厚度	m	0 ~ 1,000	100	飽和區厚度, 用來模擬飽和區垂直方向分散性。
Dry bulk density of saturated zone	飽和區乾容積密度	g/cm ³	1E-3 ~ 22.5	1.5	見受污染區乾容積密度參數。
Saturated zone total porosity	飽和區總多孔性	--	1E-5 ~ 1	0.4	見清除涵蓋總多孔性參數。
Saturated zone effective porosity	飽和區等效多孔性	--	1E-5 ~ 1	0.2	見非飽和區等效多孔性參數。
Saturated zone hydraulic conductivity	飽和區水力傳導率	m/yr	1E-3 ~ 1E+10	100	見受污染區水力傳導率參數。
Saturated zone hydraulic gradient to well	飽和區對水井水力梯度	--	1E-10 ~ 10	0.02	地下水面的斜率, 水力梯度是水文參數的其中一個用來計算水傳輸。
Saturated zone longitudinal dispersivity to well	飽和區對水井縱向分散性	m	0 ~ 1,000	3	見非飽和區縱向分散性參數。
Saturated zone horizontal lateral dispersivity to well	飽和區對水井水平橫向分散性	m	0 ~ 1,000	0.4	水平縱向分佈性係數和孔隙水速度間的比率, 這個參數通常是縱向分散性的 1/10 到 1/30。
Saturated zone vertical lateral dispersivity to well	飽和區對水井垂直橫向分散性	m	0 ~ 1,000	0.02	垂直縱向分佈性係數和孔隙水速度間的比率。

Irrigation rate (value averaged over length of saturated zone) contributing to well	對水井灌溉率 貢獻	m/yr	0 ~ 10	0.2	見主污染區灌溉率參數。
Evapotranspiration coefficient (value averaged over length of saturated zone) contributing to well	對水井蒸散係 數貢獻	--	0 ~ 0.999	0.5	見主污染區蒸散係數參數。
Runoff coefficient (value averaged over length of saturated zone) contributing to well	對水井逕流係 數貢獻	--	0 ~ 1	0.2	見主污染區逕流係數參數。
Depth of aquifer contributing to well	對水井含水層 深度貢獻	m	1E-4 ~ 1,000	10	假定水井完全從地下水面篩選到 指定的井屏深度。
Saturated zone hydraulic gradient to surface water body	飽和區對表面 水體水力梯度	--	1E-10 ~ 10	0.02	地下水面的斜率，水力梯度是水文 參數的其中一個用來計算水傳輸。

Saturated zone longitudinal dispersivity to surface water body	飽和區對表面水體縱向分散性	m	0 ~ 1,000	10	見非飽和區縱向分散性參數。
Saturated zone horizontal lateral dispersivity to surface water body	飽和區對表面水體水平縱向分散性	m	0 ~ 1,000	1	水平縱向分佈性係數和孔隙水速度間的比率，這個參數通常是縱向分散性的 1/10 到 1/30。
Saturated zone vertical lateral dispersivity to surface water body	飽和區對表面水體垂直縱向分散性	m	0 ~ 1,000	0.06	垂直縱向分佈性係數和孔隙水速度間的比率。
Irrigation rate (value averaged over length of saturated zone) contributing to surface water body	對表面水體灌溉率貢獻	m/yr	0 ~ 10	0.2	見主要污染區灌溉率參數。
Evapotranspiration coefficient body	對表面水體蒸散係數貢獻	--	0 ~ 0.999	0.5	見主要污染區蒸散係數參數。
Runoff coefficient (value averaged over length of saturated zone)	對表面水體逕流係數貢獻	--	0 ~ 1	0.2	見主要污染區逕流係數參數。

contributing to surface water body					
Depth of aquifer contributing to surface water body	對表面水體含水層深度貢獻	m	0 ~ 1,000	10	含水層流入表面水體深度,如果水流的方向是反方向,深度則為0,這個深度用來計算含水層污染到達表面水體通量。

4.1.11 水利用

用於設定人類、牲畜對水的需求及用於灌溉的水的比例,每組比例總和不能超過 1, 參數名稱及說明於表 4-11 所示。

表 4-11 水利用參數說明

參數英文名稱	參數中文名稱	單位	範圍	預設值	說明
Quantity of water consumed by an individual	個人消耗水量	L/yr	0 ~ 1,000	510	個人消耗水的總量,包含製造食物所用的消耗。
Fraction of water from surface body for human consumption	人類消耗表面水體比例	--	0 ~ 1	0	人類消耗表面水體比例。
Fraction of water from well for human consumption	人類消耗井水比例	--	0 ~ 1	1	人類消耗井水比例。

Number of household individuals consuming and using water	家庭消耗及使用水的個人數目	--	0 ~ 1,000	4	家庭個人消耗及使用水。
Quantity of water for use indoors of dwelling per individual	室內個人使用水量	L/d	0 ~ 1,000	225	個人室內使用的總水量，像是洗澡、洗衣、清洗等。這個值用來預測滿足這些需求需要從井水提取多少水量。
Fraction of water from surface body for use indoors of dwelling	室內個人使用表面水體水量比例	--	0 ~ 1	0	室內個人使用表面水體水量比例，這個值用來計算室內氬氣。
Fraction of water from well for use indoors of dwelling	室內個人使用井水水量比例	--	0 ~ 1	1	室內個人使用井水水量比例，這個值用來計算室內氬氣。
Quantity of water for beef cattle	肉牛使用水量	L/d	0 ~ 500	50	肉牛使用的總水量，用來預測滿足這些需求需要提取多少體積的井水。
Fraction of water from surface body	肉牛使用表面水體比例	--	0 ~ 1	0	肉牛使用表面水體比例。

surface body for beef cattle					
Fraction of water from well for beef cattle	肉牛使用井水 比例	--	0 ~ 1	1	肉牛使用井水比例。
Number of cattle for beef cattle	肉牛數量	--	0 ~ 10	2	肉牛數量，用來計算使用多少水。
Quantity of water for dairy cows	乳牛使用水量	L/d	0 ~ 1,000	100	乳牛使用的總水量，用來預測滿足 這些需求需要提取多少體積的井 水。
Fraction of water from surface body for dairy cows	乳牛使用表面 水體比例。	--	0 ~ 1	0	乳牛使用表面水體比例。
Fraction of water from well for dairy cows	乳牛使用井水 比例	--	0 ~ 1	1	乳牛使用井水比例。
Number of cows for dairy cows	乳牛數量	--	0 ~ 10	2	乳牛數量，用來計算使用多少水。
Fraction of water from surface body for fruit, grain,	表面水用於水 果、穀類、非葉 菜類蔬菜的比 例	--	0 ~ 1	0	使用表面水體灌溉水果、穀類、非 葉菜類蔬菜的比例。

and nonleafy vegetables					
Fraction of water from well for fruit, grain, and nonleafy vegetables	井水用於水果、穀類、非葉菜類蔬菜的比例	--	0 ~ 1	1	使用水井灌溉水果、穀類、非葉菜類蔬菜的比例。
Fraction of water from surface body for leafy vegetables	葉菜類蔬菜的表面水體比例	--	0 ~ 1	0	使用表面水體灌溉葉菜類蔬菜的比例。
Fraction of water from well for leafy vegetables	井水用於葉菜類蔬菜的比例	--	0 ~ 1	1	使用井水灌溉葉菜類蔬菜的比例。
Fraction of water from surface body for pasture and silage	表面水用於牧草與青貯飼料的的比例	--	0 ~ 1	0	使用表面水體灌溉牧草和青貯的比例。
Fraction of water from well for pasture and silage	井水用於牧草與青貯飼料的的比例	--	0 ~ 1	1	使用井水灌溉牧草和青貯的比例。

Fraction of water from surface body for livestock feed grain	表面水用於家畜飼料穀物的比例	--	0 ~ 1	0	使用表面水體灌溉家畜飼料穀的比例。
Fraction of water from well for livestock feed grain	井水用於家畜飼料穀物的比例	--	0 ~ 1	1	使用井水灌溉家畜飼料穀的比例。
Fraction of water from surface body for offsite dwelling site	場外住宅區表面水體比例	--	0 ~ 1	0	場外住宅區使用表面水體的比例。
Fraction of water from well for offsite dwelling site	場外住宅區井水比例	--	0 ~ 1	1	場外住宅區使用井水的比例。
Well pumping rate	井水抽取率	m ³ /yr	0 ~ 100,000	5,100	因為任何需要從井中抽取的總水量，用來預測井水甚麼時候發生乾枯。
Well pumping rate needed to specified water use for	井水用於家畜飼料穀物所需的抽取率	m ³ /yr	Calculated	5,084.17	(無)。

livestock feed grain					
-------------------------	--	--	--	--	--

4.1.12 表面水體

設定地表水沉積傳輸率、體積等參數，參數名稱及說明於表 4-12 所示。

表 4-12 表面水體參數說明

參數英文名稱	參數中文名稱	單位	範圍	預設值	說明
Sediment delivery ratio	沉積傳輸率	--	0 ~ 1	1	受污染土壤的比例，為受到到達表面水體的受污染區侵蝕的土壤。
Volume of surface water body	表面水體體積	m ³	1 ~ 1E+34	150,000	表面水體體積。
Mean residence time of water in surface water body	表面水體的平 均停留時間	yr	1E-4 ~ 1E+34	1	每年從表面水體抽取的體積除上表面水體體積。

4.1.13 地下水傳輸

設定地下水傳輸參數，此區塊之參數與非飽和區，飽和區，水利用，表面水體這四個區塊參數有關，參數名稱及說明於表 4-13 所示。

表 4-13 地下水傳輸參數說明

參數英文名稱	參數中文名稱	單位	範圍	預設值	說明
Well in the direction parallel to aquifer flow	井平行於含水層	m	-16,000 ~ +16,000	100	兩條垂直含水層流動方向的平行線距離，一條在受污染區下端邊緣，其餘的在井的位置。
Surface water body in the direction parallel to aquifer flow	表面水體平行於含水層	m	-16,000 ~ +16,000	600	兩條垂直含水層流動方向的平行線距離，一條在受污染區下端邊緣，其餘的在最靠近表面水體的點。
Well in the direction perpendicular to aquifer flow	井垂直於含水層	m	-16,000 ~ +16,000	0	兩條平行含水層流動方向的平行線距離，一條通過受污染區的中心，其餘的在井的位置。
Near edge of surface water body in the direction perpendicular to aquifer flow	垂直於含水層並靠近表面水體的邊界	m	-16,000 ~ +16,000	-150	兩條平行含水層流動方向的平行線距離，一條通過受污染區的中心，其餘的在最靠近表面水體的點。
Far edge of surface water body in the direction perpendicular to aquifer flow	垂直於含水層並遠離表面水體的邊界	m	-16,000 ~ +16,000	150	兩條平行含水層流動方向的平行線距離，一條通過受污染區的中心，其餘的在最遠離表面水體的點。

Convergence criterion (fractional accuracy desired)	收斂條件	--	0 ~ 0.1	0.001	Romberg 積分的精度要求，用來計算地下水的污染通量或濃度。
Main subzones in saturated zone	飽和區主子區	--	1 ~ 1,024	1	飽和區可以劃分為多個子區來增進後代核種傳輸預測。
Main subzones in each partially saturated zone	每個部份飽和區的主子區	--	1 ~ 1,024	1	每個部份飽和區可以劃分為多個子區來增進後代核種傳輸預測。
Nuclide-specific retardation in all subzones, longitudinal dispersion in all but the subzone of transformation	所有子區內特定核種延遲，所有子區內縱向分散性變換	--	Yes/No	Yes	考慮在子區內原子經過了一次變換，當層被切分後，必須選擇縱向分散性或是特定核種延遲。
Longitudinal dispersion in all subzones, nuclide-specific retardation in all but the subzone of transformation, parent retardation	所有子區內縱向分散性，所有子區內特定何種延遲變換，所有子區內父核種延遲變換	--	Yes/No	No	同上。

in zone of transformation					
Longitudinal dispersion in all subzones, nuclide-specific retardation in all but the subzone of transformation, progeny retardation in zone of transformation	所有子區內縱向分散性，所有子區內特定核種延遲變換，所有子區內子核種延遲變換	--	Yes/No	No	同上。

4.1.14 攝取率

飲用水及食物的攝取率，其中包含魚類、蔬菜，肉類及土壤等途徑，參數名稱及說明於表 4-14 所示。

表 4-14 攝取率參數說明

參數英文名稱	參數中文名稱	單位	範圍	預設值	說明
Drinking water intake	攝入飲水量	L/yr	0 ~ 1,000	510	每人每年消耗的飲水量。
Fish consumption	魚類消耗	kg/yr	0 ~ 1,000	5.4	每人每年消耗魚類所占的權重。
Other aquatic food consumption	其餘海鮮類食物消耗	kg/yr	0 ~ 100	0.9	每人每年消耗其餘海鮮類食物所占的權重。

Fruit, grain, nonleafy vegetables consumption	水果、穀物、非葉菜類蔬菜消耗	kg/yr	0 ~ 1,000	160	每人每年消耗水果、穀物、非葉菜類蔬菜所占的權重。
Leafy vegetables consumption	葉菜類蔬菜消耗	kg/yr	0 ~ 100	14	每人每年消耗葉菜類蔬菜所占的權重。
Meat consumption	肉類消耗	kg/yr	0 ~ 300	63	每人每年消耗肉類所占的權重。
Milk consumption	牛奶消耗	L/yr	0 ~ 1,000	92	每人每年消耗牛奶所占的權重。
Soil (incidental) ingestion rate	土壤攝取率	g/yr	0 ~ 10,000	36.5	每人每年土壤攝取率。
Drinking water intake from affected area	受影響區域攝入飲用水	--	0 ~ 1	1	受污染區每人消耗飲用水的比例。
Fish consumption from affected area	受影響區域魚類消耗	--	0 ~ 1	0.5	受污染表面水體每人消耗魚類的比例。
Other aquatic food consumption from affected area	受影響區域其餘海鮮類食物消耗	--	0 ~ 1	0.5	受污染表面水體每人消耗其餘海鮮類食物的比例。

Fruit, grain, nonleafy vegetables consumption from affected area	受影響區域水果、穀物、非葉菜類蔬菜消耗	--	0 ~ 1	0.5	受污染農業區每人消耗水果、穀物、非葉菜類蔬菜的比例。
Leafy vegetables consumption from affected area	受影響區域葉菜類蔬菜消耗	--	0 ~ 1	0.5	受污染農業區每人消耗葉菜類蔬菜的比例。
Meat consumption from affected area	受影響區域肉類消耗	--	0 ~ 1	1	每人消耗使用受污染的飼料及水所生產的肉品的比例。
Milk consumption from affected area	受影響區域牛奶消耗	--	0 ~ 1	1	每人消耗使用受污染的飼料及水所生產的牛奶的比例。

4.1.15 牲畜攝取

牲畜的飲用水及食物的攝取率，參數名稱及說明於表 4-15 所示。

表 4-15 牲畜攝取參數說明

參數英文名稱	參數中文名稱	單位	範圍	預設值	說明
--------	--------	----	----	-----	----

Water intake for beef cattle	肉牛攝入水量	L/day	0 ~ 500	50	肉牛維持肉品生產每日攝入水量。
Pasture and silage intake for beef cattle	肉牛對牧草與青貯飼料的日攝入量	kg/day	0 ~ 300	14	肉牛維持肉品生產每日牧草或青貯攝入量。
Grain intake for beef cattle	肉牛對穀物的攝入量	kg/day	0 ~ 300	54	肉牛維持肉品生產每日穀物攝入量。
Soil from pasture and silage intake for beef cattle	肉牛對來自牧草和青貯的土壤攝入量	kg/day	0 ~ 10	0.1	肉牛維持肉品生產每日從牧草和青貯的土壤攝入量。
Soil from grain intake for beef cattle	肉牛對來自穀物的土壤攝入量	kg/day	0 ~ 10	0.4	肉牛維持肉品生產每日從穀物上的土壤攝入量。
Water intake for dairy cows	乳牛攝入水量	L/d	0 ~ 500	160	乳牛維持肉品生產每日攝入水量。
Pasture and silage intake for dairy cows	乳牛對牧草和青貯的攝入量	kg/d	0 ~ 300	44	乳牛維持肉品生產每日牧草或青貯攝入量。
Grain intake for dairy cows	乳牛對穀物的攝入量	kg/d	0 ~ 300	11	乳牛維持肉品生產每日穀物攝入量。
Soil from pasture and silage intake for dairy cows	乳牛對來自牧草和青貯的土壤攝入量	kg/d	0 ~ 10	0.4	乳牛維持肉品生產每日從牧草和青貯的土壤攝入量。

Soil from grain intake for dairy cows	乳牛對穀物的土壤攝入量	kg/d	0 ~ 10	0.1	乳牛維持肉品生產每日從穀物上的土壤攝入量。
---------------------------------------	-------------	------	--------	-----	-----------------------

4.1.16 植物因子

植物受污染的途徑主要與生長及污染轉移相關，本區塊為相關因子的參數設定，參數名稱及說明於表 4-16 所示。

表 4-16 植物因子參數說明

參數英文名稱	參數中文名稱	單位	範圍	預設值	說明
Wet weight crop yield of fruit, grain, and nonleafy vegetables	水果、穀類及非葉菜類蔬菜的濕重產量	kg/m ²	0.01 ~ 3	0.7	單位面積水果、穀類及非葉菜類蔬菜可食部分的質量。
Duration of growing season of fruit, grain, and nonleafy vegetables	生長季節的水果、穀類及非葉菜類蔬菜	yr	0.01 ~ 1	0.17	水果、穀類及非葉菜類蔬菜因葉片沉積和根部吸收而暴露在受污染區的時間。
Foliage to food transfer coefficient of fruit, grain, and nonleafy vegetables	水果、穀類及非葉菜類蔬菜葉子到食物的轉換係數	--	0 ~ 1	0.1	受污染的葉子到食物轉換係數。牧草和青貯一部分的污染停留在水果、穀類及非葉菜類蔬菜的葉片上，將會被吸收轉換成可食用部分。

Weathering removal constant of fruit, grain, and nonleafy vegetables	水果、穀類及葉菜類蔬菜的風化移除常數	1/yr	1 ~ 40	20	水果、穀類及非葉菜類蔬菜葉片上的污染會因風化過程而移除，這個過程可以用一個移除常數及葉片上污染隨時間呈指數衰減來表示。
Foliar interception factor for irrigation of fruit, grain, and nonleafy vegetables	水果、穀類及葉菜類蔬菜的灌溉葉面截取因子	--	0 ~ 1	0.25	因為灌溉而停留在水果、穀類及非葉菜類蔬菜葉片上的沉積放射性核種比例。
Foliar interception factor for dust of fruit, grain, and nonleafy vegetables	水果、穀類及葉菜類蔬菜的灰塵葉面截取因子	--	0 ~ 1	0.25	因為質量負載而停留在水果、穀類及非葉菜類蔬菜葉片上的沉積放射性核種比例。
Root depth of fruit, grain, and nonleafy vegetables	水果、穀類及葉菜類蔬菜的根部深度	m	0 ~ 10	1.2	水果、穀類及非葉菜類蔬菜根部最大深度。

Wet weight crop yield of leafy vegetables	葉菜類蔬菜的濕重產量	kg/m ²	0.01 ~ 3	1.5	單位面積葉菜類蔬菜可食部分的質量。
Duration of growing season of leafy vegetables	生長季節的葉菜類蔬菜	yr	0.01 ~ 1	0.25	葉菜類蔬菜因葉片沉積和根部吸收而暴露在受污染區的時間。
Foliage to food transfer coefficient of leafy vegetables	葉菜類蔬菜葉子到食物的轉換係數	--	0 ~ 1	1	受污染的葉子到食物轉換係數。牧草和青貯一部分的污染停留在葉菜類蔬菜的葉片上，將會被吸收轉換成可食用部分。
Weathering removal constant of leafy vegetables	葉菜類蔬菜的風化移除常數	1/yr	1 ~ 40	20	葉菜類蔬菜葉片上的污染會因風化過程而移除，這個過程可以用一個移除常數及葉片上污染隨時間呈指數衰減來表示。
Foliar interception factor for irrigation of leafy vegetables	葉菜類蔬菜的灌溉葉面截取因子	--	0 ~ 1	0.25	因為灌溉而停留在葉菜類蔬菜葉片上的沉積放射性核種比例。
Foliar interception factor for dust of leafy vegetables	葉菜類蔬菜的灰塵葉面截取因子	--	0 ~ 1	0.25	因為質量負載而停留在葉菜類蔬菜葉片上的沉積放射性核種比例。

Root depth of leafy vegetables	葉菜類蔬菜的根部深度	m	0 ~ 3	0.9	葉菜類蔬菜根部最大深度。
--------------------------------	------------	---	-------	-----	--------------

4.1.17 牲畜飼養因子

牲畜食用植物的相關因子設定，參數名稱及說明於表 4-17 所示。

表 4-17 牲畜飼養因子參數說明

參數英文名稱	參數中文名稱	單位	範圍	預設值	說明
Wet weight crop yield of pasture and silage	牧草與青貯飼料的濕重產量	kg/m ²	0.01 ~ 1	1.1	單位面積牧草和青貯可食部分的質量。
Duration of growing season of pasture and silage	生長季節的牧草和青貯	yr	0.01 ~ 1	0.08	牧草和青貯因葉片沉積和根部吸收而暴露在受污染區的時間。
Foliage to food transfer coefficient of pasture and silage	牧草和青貯葉子到食物的轉換係數	--	0 ~ 1	1	受污染的葉子到食物轉換係數。牧草和青貯一部分的污染停留在葉菜類蔬菜的葉片上，將會被吸收轉換成可食用部分。
Weathering removal constant of pasture and silage	牧草和青貯的風化移除常數	1/yr	1 ~ 40	20	牧草和青貯葉片上的污染會因風化過程而移除，這個過程可以用一個移除常數及葉片上污染隨時間呈指數衰減來表示。

Foliar interception factor for irrigation of pasture and silage	牧草和青貯的灌溉葉面截取因子	--	0 ~ 1	0.25	因為灌溉而停留在牧草和青貯葉片上的沉積放射性核種比例。
Foliar interception factor for dust of pasture and silage	牧草和青貯的灰塵葉面截取因子	--	0 ~ 1	0.25	因為質量負載而停留在牧草和青貯葉片上的沉積放射性核種比例。
Root depth of pasture and silage	牧草和青貯的根部深度	m	0 ~ 3	0.9	牧草和青貯根部最大深度。

4.1.18 吸入及體外 Gamma

因為呼吸及照射所造成的劑量，本區塊為相關參數設定，參數名稱及說明於表 4-18 所示。

表 4-18 吸入及體外 Gamma

參數英文名稱	參數中文名稱	單位	範圍	預設值	說明
Inhalation rate	吸入率	m ³ /yr	0 ~ 20,000	8,400	每年空氣吸入體積。
Mass loading for inhalation	吸入質量負載	g/m ³	0 ~ 2	0.0001	空氣中受污染土壤粒子質量負載。

Mean onsite mass loading	平均場內質量負載	g/m ³	0 ~ 2	0.0001	主污染區上方空氣中受污染土壤粒子平均質量負載。用來預測到大氣的污染釋出率。
Indoor dust filtration factor (indoor to outdoor dust concentration)	室內灰塵過濾因子	--	0 ~ 1	0.4	室內灰塵過濾因子用來描述在室內受污染灰塵高度的建築物結構，這個因子是室外受污染灰塵的一部分。
External gamma shielding factor (penetration)	體外 Gamma 屏蔽因子	--	0 ~ 1	0.7	體外 Gamma 屏蔽因子用來描述在室內受 gamma 射線照射高度的建築物結構，這個因子是室外 gamma 射線的一部分。

4.1.19 形狀因子

設定住宅區與污染區交會的範圍，參數名稱及說明於表 4-19 所示。

表 4-19 形狀因子參數說明

參數英文名稱	參數中文名稱	單位	範圍	預設值	說明
Dwelling location	住宅位置	--	Onsite or offsite	Offsite	住宅位置可以在污染區內或廠址外。
Scale	尺寸	m	>0 ~ 32,000	200	用來設置正方形邊的長度，將會繪製主污染區。尺寸應該要整個環繞主污染區，如果滑鼠用來指定住宅的位置，尺寸應該要讓污染區及住宅區落在繪製範圍內。

Dwelling location coordinate in X-direction	住宅位置 X 座標	m	-16,000 ~ +16,000	100	可以點擊圖示或是輸入座標來指定廠址內外住宅區的座標。首先選擇對應到住宅區位置的表，在輸入欄中輸入住宅座標，輸入每個住宅座標後，點擊計算半徑及分率按鈕來計算半徑及分率。
Dwelling location coordinate in Y-direction	住宅位置 Y 座標	m	-16,000 ~ +16,000	0	同上。
Radius	半徑	m	Calculated	13.25 26.5 39.75 53.0 66.25 79.5 92.75 106 119.25 132.5 145.75 159	程式使用 12 個同心圓來計算半徑及分率，最外層圓的半徑涵蓋了整個住宅，最內層圓的半徑為最外層的 1/12，剩下 10 個圓的面積為在兩個圓之間的等差數列，介面會預估主污染區內每個圓環的比例並在圖表中顯示，主污染區內 12 個同心圓的半徑及每個圓環的面積比例顯示在對應受體位置 12 個半徑及比率輸入表中，如果有可用的半徑及分率訊息使用者可以直接輸入。
Fraction	比例	--	Calculated	0 0 0	同上。

				0.024 0.19 0.24 0.2 0.17 0.15 0.13 0.12 0.052	
Shape of the primary contamination	主污染區形狀	--	Circular or polygonal	Polygonal	定義主污染區形狀。
X coordinate of the vertices of polygon of the primary contamination	主污染區多邊形頂點 X 座標	m	-16,000 ~ +16,000	none	如果使用者有更多主污染區形狀資訊，可以清除先前的形狀來繪製正確的多邊形，或是輸入多邊形的 x,y 頂點座標。 多邊形可使以用滑鼠根據表單中黃色區域內的繪製說明來繪製，或者可根據綠色說明框來輸入多邊形頂點的座標。
Y coordinate of the vertices of polygon of the primary contamination	主污染區多邊形頂點 Y 座標	m	-16,000 ~ +16,000	none	同上。

4.1.20 居住率

設定在各污染區內室內、室外的時間比例，參數名稱及說明於表 4-20 所示。

表 4-20 居住率參數說明

參數英文名稱	參數中文名稱	單位	範圍	預設值	說明
Indoor time fraction on primary contamination	主污染區室內時間比例	--	0 ~ 1	0	主污染區每人停留在上方建築物平均時間比率。
Outdoor time fraction on primary contamination	主污染區室外時間比例	--	0 ~ 1	0	主污染區人停留在室外平均時間比率，如果有部分養殖區域在主污染區內，時間比率應該包含主污染區及養殖區，因此總占用可以超過 1，但不能超過 2。
Indoor time fraction on offsite dwelling site	場外住宅區室內時間比例	--	0 ~ 1	0.5	受污染區在室內平均時間比例。
Outdoor time fraction on offsite dwelling site	場外住宅區室外時間比例	--	0 ~ 1	0.1	場外住宅區平均一天一人停留在室外的時間比例。
Time fraction in fruit, grain, and	水果、穀物、非葉菜類蔬菜時間比例	--	0 ~ 1	0.1	一天中在農場的平均時間比例，如果農場區有一部分落在主污染區

nonleafy vegetable fields					內，這地區的時間比例應該分為主污染區及農業區兩個部分。
Time fraction in leafy vegetable fields	葉菜類蔬菜時間比例	--	0 ~ 1	0.1	
Time fraction in pasture and silage fields	牧草和青貯區時間比例	--	0 ~ 1	0.1	
Time fraction in livestock grain fields	家畜穀物區時間比例	--	0 ~ 1	0.1	

4.2 參數靈敏性測試

本節將對設置一個作為分析基準的模型，並改變模型之廠址佈局及其餘區塊參數進行參數之靈敏性測試，藉此測試找出重要性高之參數。

4.2.1 模型設置

圖 4-1 為程式預設之廠址佈局，最下方黃色區塊為主要受污染區，面積為 10,000 平方公尺，依次往上為：

1. 遠廠住宅區，面積為 992 平方公尺。
2. 水果、穀物及非葉菜類蔬菜區，面積為 992 平方公尺。
3. 葉菜類蔬菜區，面積為 992 平方公尺。

4. 穀物區，面積為 10,000 平方公尺。

5. 放牧區，面積為 10,000 平方公尺。

污染區土壤核種初始濃度的部分，則參考美國除役電廠 Yankee Rowe 資料，分析的核種種類如表 4-21。除了農業區、牲畜飼養區、遠廠住宅區等區塊有做些微調整，其餘參數如轉換因子、物理及水文.....等大部分參數皆使用程式之預設值，以此模型進行分析，獲得的年劑量於圖 4-2，並以此分析結果作為參數靈敏性測試之比較基準。

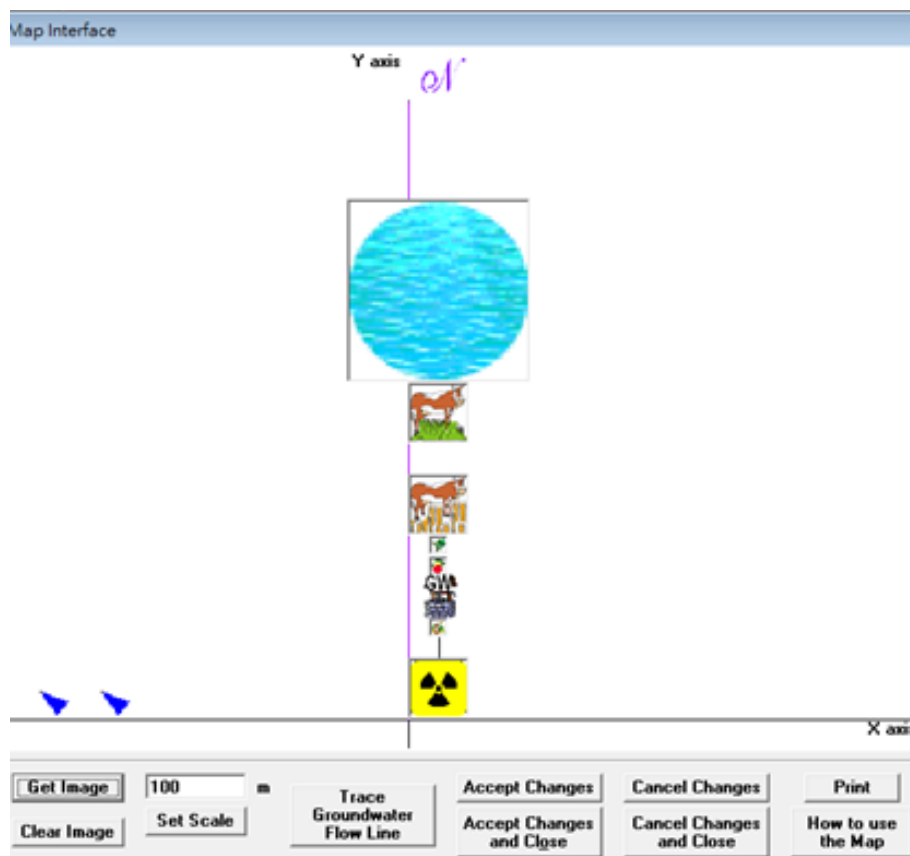


圖 4-1 預設廠址佈局

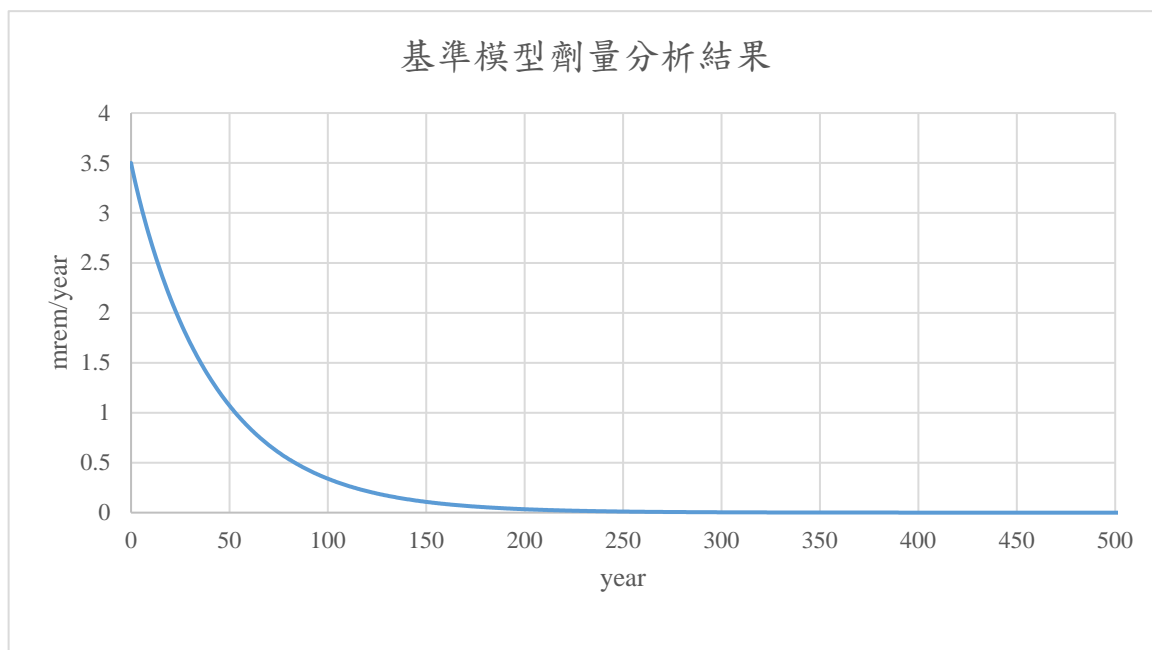


圖 4-2 基準模型分析結果

表 4-21 土壤初始污染濃度

核種名稱	濃度(pCi/g)	比例(%)
Cs-137	4.3	89
Co-60	0.0434	0.89
H-3	0.256	5.3
Ni-63	0.232	4.8

4.2.2 廠址佈局測試

由於實際廠址附近地理環境可能會有多個水源、農林漁牧業等分佈，而在 RESRAD OFFSITE 程式中只能設定單一水源，單一穀物，單一放牧區等，無法將所有真實環境考量進去，因此藉由隨機的廠址佈局設置來進行測試，

在固定農業區、放牧區等區域之面積之下，將這些區域做相對位置的調整，來觀察不同地理位置對程式分析結果的影響。在此隨機選取了兩組環境地理位置，設置如圖 4-3 及圖 4-4；分析結果如圖 4-5 及圖 4-6。與程式預設之廠址佈局比對，相比最後之劑量差異約為 38%，因此針對實際環境要選取哪些代表性的環境分佈應為一重要考量之因素。

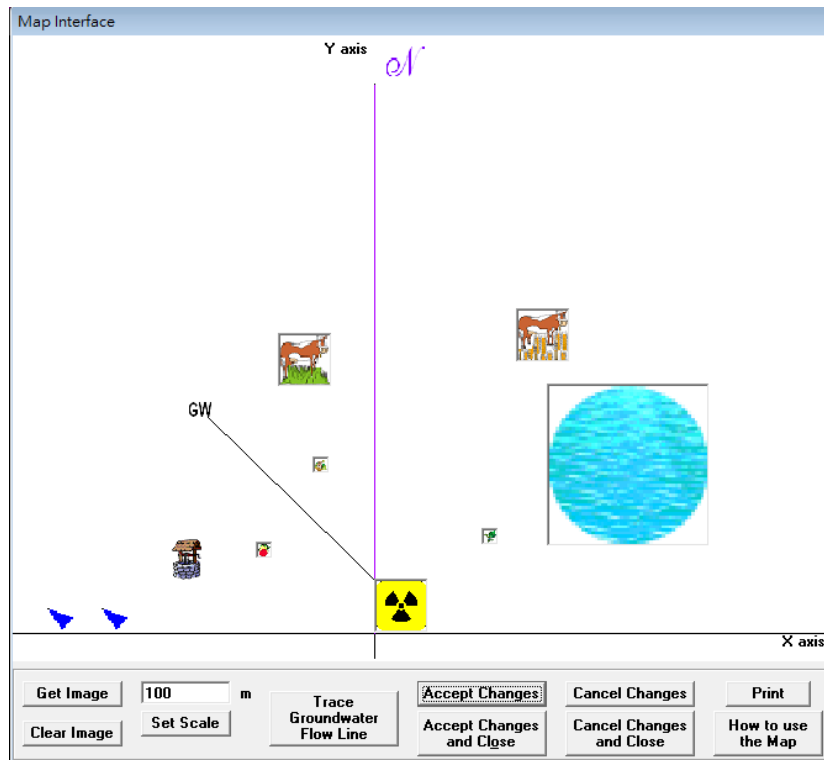


圖 4-3 廠址佈局 1

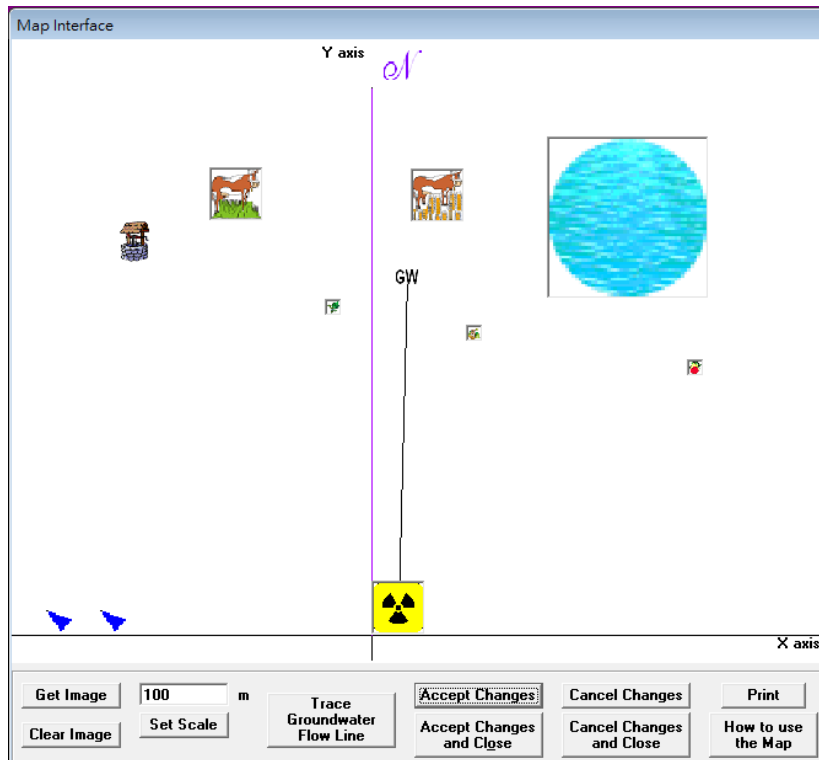


圖 4-4 廠址佈局 2

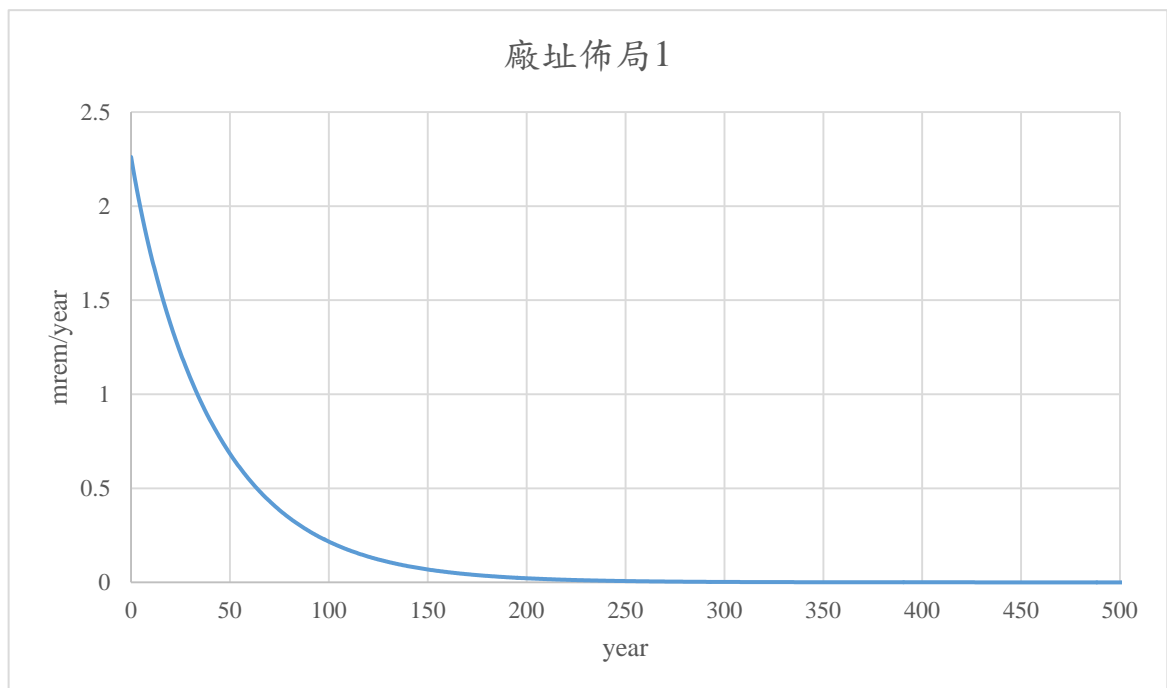


圖 4-5 廠址佈局 1 分析結果

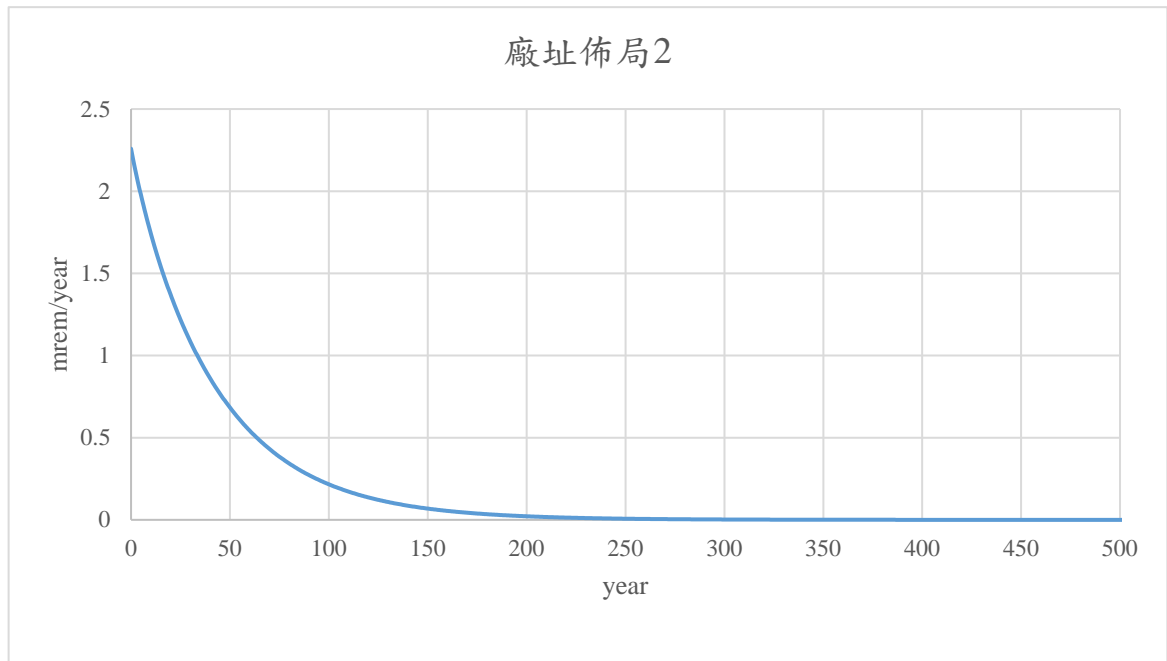


圖 4-6 廠址佈局 2 分析結果

4.2.3 參數測試

以模型之輸入參數做為基值，將基值乘上一個靈敏性因子，以獲得輸入參數之上限值與下限值，在參考 RESRAD-OFFSITE 使用者手冊及多次測試後，靈敏性因子取值為 2 及 0.5 為一合理的選擇，故本研究以這兩個靈敏性因子進行單一參數之靈敏性分析。分別以上限值及下限值參數獲得最高劑量，以這兩組最高劑量與基準模型之最高劑量相對差異的百分比的總和，作為參數靈敏性高低的依據。分析之參數總數為 233，分析結果統計於圖 4-7 與表 4-22。分析結果顯示，在此模型之下，大部分之參數對於最後的接收劑量影響非常小，只有少數參數對結果有較大的影響，影響較大的參數整理於表 4-23。

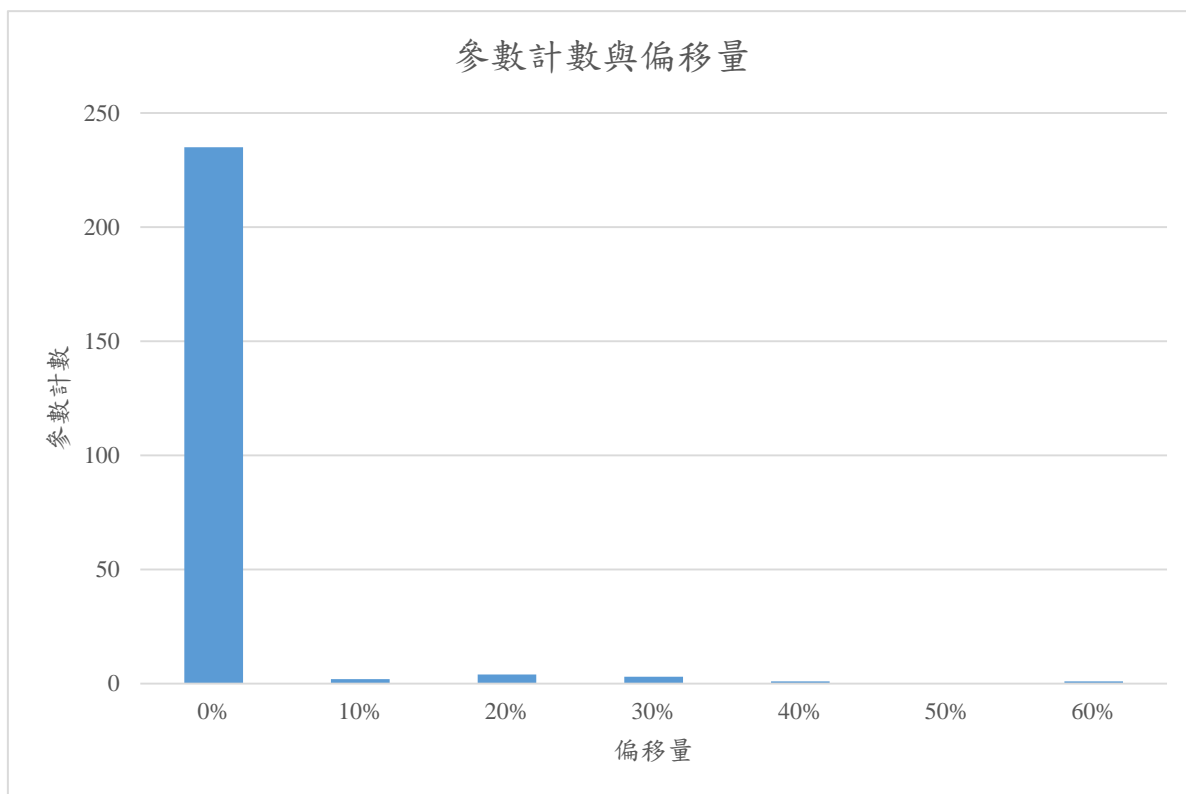


圖 4-7 參數計數與偏移量

表 4-22 參數統計表

偏移區間(%)	參數計數
0~1	222
1~10	2
11~20	4
21~30	3
31~40	1
41~50	0
51~60	1

表 4-23 高偏移量參數統計表

參數英文名稱	參數中文名稱	下限值 最高劑量 (mrem/year)	上限值 最高劑量 (mrem/year)	下限值 誤差(%)	上限值 誤差(%)	總誤差 (%)
External gamma shielding (penetration) factor	體外 Gamma 屏蔽因子	3.03269	3.90103	13.35815	11.44972	24.8078
Fraction of area directly over primary contamination for fruit, grain, and nonleafy vegetables field	水果、穀物、非葉菜類蔬菜地區直接污染比例	3.32955	3.84101	4.877066	9.734991	14.6120
Fraction of area directly over primary contamination for grain field	穀類區直接受污染面積比例	3.22445	4.05078	7.8797	15.72797	23.6076
Fraction of area directly over primary contamination for pasture and silage field	牧草和青貯區直接受污染面積比例	3.35068	3.79882	4.273397	8.529652	12.8030
Fruit, grain, nonleafy vegetables consumption from affected area	受影響區域水果、穀物、非葉菜類蔬菜消耗	3.32955	3.8417	4.877066	9.754704	14.6317
Grain intake for beef cattle	肉牛穀物攝入量	3.28528	3.92994	6.141829	12.27566	18.4174

Indoor time fraction on primary contamination	主污染區室內時間比例	3.03533	4.43011	13.28273	26.56517	39.8479
Meat consumption	受影響區域肉類消耗	3.18992	4.14128	8.866199	18.3135	27.1797
Milk consumption	受影響區域牛奶消耗	3.49949	3.71001	0.021998	5.992412	6.01441
Outdoor time fraction on primary contamination	主污染區室外時間比例	2.83632	4.82815	18.96831	37.9369	56.9052
Pasture and silage intake for beef cattle	肉牛來自牧草和青貯的土壤攝入量	3.44456	3.61166	1.59131	3.182621	4.77393

4.2.4 大範圍參數測試

在 RESRAD-OFFSITE 程式眾多參數中，有些上限值與下限值差距橫跨了好幾個數量級。在前一小節之參數測試中，分析了參數預設值乘上兩倍的情形，進一步考慮可能參數主要影響的區間可能高過預設值好幾個數量級，因此對這些上下限差異非常大之參數，以 100 倍的預設值進行測試，分析結果如表 4-24，結果顯示這些參數乘上 100 倍做為輸入，對於最後劑量的影響都小於 2% 之內，因此判斷並沒有在更高數量級之下有明顯影響之參數。

表 4-24 大範圍參數分析

參數英文名稱	參數中文名稱	單位	範圍	預設值	總誤差
Length of contamination parallel to aquifer flow	平行含水層流的污染長度	m	1E-4 ~ 1E+6	100	< 1%

Cover and management factor	覆蓋及管理因子	--	0 ~ 1	0.003	< 1%
Thickness of contaminated zone	受污染區厚度	m	1E-5 ~ 1,000	2	< 1%
Hydraulic conductivity of contaminated zone	受污染區水力傳導率	m/yr	1E-3 ~ 1E+10	10	< 1%
Cover and management factor for fruit, grain, and nonleafy vegetables field	水果、穀物及非葉菜類蔬菜地區覆蓋及管理因子	--	0 ~ 1	0.003	< 1%
Cover and management factor for leafy vegetable field	葉菜類蔬菜區覆蓋及管理因子	--	0 ~ 1	0.003	< 1%
Cover and management factor for pasture and silage field	牧草和青貯區覆蓋及管理因子	--	0 ~ 1	0.003	< 1%
Cover and management factor for grain field	穀類區覆蓋及管理因子	--	0 ~ 1	0.003	< 1%
Cover and management factor for dwelling site	場外住宅區覆蓋及管理因子	--	0 ~ 1	0.003	< 1%
Saturated zone hydraulic conductivity	飽和區水力傳導率	m/yr	1E-3 ~ 1E+10	100	< 1%
Saturated zone hydraulic gradient to well	飽和區對水井水力梯度	--	1E-10 ~ 10	0.02	< 1%

Saturated zone longitudinal dispersivity to well	飽和區對水井縱向分散性	m	0 ~ 1,000	3	< 1%
Saturated zone horizontal lateral dispersivity to well	飽和區對水井水平橫向分散性	m	0 ~ 1,000	0.4	< 1%
Saturated zone vertical lateral dispersivity to well	飽和區對水井垂直橫向分散性	m	0 ~ 1,000	0.02	< 1%
Depth of aquifer contributing to surface water body	對表面水體含水層深度貢獻	m	0 ~ 1,000	10	< 1%
Number of household individuals consuming and using water	家庭個人消耗及使用水	--	0 ~ 1,000	4	< 1%
Well pumping rate	井水抽取率	m ³ /yr	0 ~ 100,000	5,100	< 1%
Volume of surface water body	表面水體體積	m ³	1 ~ 1E+34	150,000	< 1%
Mean residence time of water in surface water body	表面水體平均停留時間	yr	1E-4 ~ 1E+34	1	< 1%
Well in the direction parallel to aquifer flow	平行於含水層方向的井	m	-16,000 ~ +16,000	100	< 1%
Surface water body in the direction parallel to aquifer flow	平行於含水層方向的表面水體	m	-16,000 ~ +16,000	600	< 1%

Near edge of surface water body in the direction perpendicular to aquifer flow	垂直於含水層方向靠近表面水體的邊界	m	-16,000 ~ +16,000	-150	< 1%
Far edge of surface water body in the direction perpendicular to aquifer flow	垂直於含水層方向遠離表面水體的邊界	m	-16,000 ~ +16,000	150	< 1%
Convergence criterion (fractional accuracy desired)	收斂條件	--	0 ~ 0.1	0.001	< 1%
Fish consumption	魚類消耗	kg/yr	0 ~ 1,000	5.4	< 1%
Other aquatic food consumption	其餘海鮮類食物消耗	kg/yr	0 ~ 100	0.9	< 1%
Soil (incidental) ingestion rate	土壤攝取率	g/yr	0 ~ 10,000	36.5	< 1%
Soil from pasture and silage intake for beef cattle	肉牛來自牧草和青貯的土壤攝入量	kg/day	0 ~ 10	0.1	< 1%
Soil from grain intake for beef cattle	肉牛來自穀物的土壤攝入量	kg/day	0 ~ 10	0.4	< 1%
Duration of growing season of pasture and silage	生長季節持續生長的牧草和青貯	yr	0.01 ~ 1	0.08	< 1%

Mass loading for inhalation	吸入質量負載	g/m ³	0 ~ 2	0.0001	< 1%
-----------------------------	--------	------------------	-------	--------	------

第五章 建立建物與廠址解除管制評估之審查重點與接受準則

5.1 RESRAD-OFFSITE 程式參數審查重點

RESRAD-OFFSITE 模組之參數使用分為三類：物理性(Physical)、行為性(Behavioral)或新陳代謝性(Metabolic)皆於表 5-1 所示。

- (1) 物理性參數(P)：不同受體下任何參數值均不改變稱為物理性參數。物理性參數的決定由來源位置和場址地質特性。
- (2) 行為性參數(B)：受不同受體之行為和情境改變而改變之參數稱為行為參數。以相同之受體而言，情境改變其參數隨之改變。
- (3) 新陳代謝性參數(M)：參數代表受體之代謝特性並且不受情境影響即可歸類為代謝參數。

5.1.1 美國除役電廠 Yankee Row 參數分類流程

輸入參數之分類：行為、新陳代謝、物理，並皆與 NUREG/CR-6697 相同。行為參數取決於受體行為和情境設定。新陳代謝參數為表示受體新陳代謝特徵，並且無關情境設定。物理參數則無關不同受體之影響而改變。

參數依照 NUREG/CR-6697 之重要度優先順序處理，優先基礎為：

1. 劑量計算裡之相關參數。
2. 由於參數值改變而導致劑量之變異性。

3. 參數型式。
4. 特定參數資料之可用性。

優先參數 1、2、3 分別表示為高、中、低階優先順序。

取決於參數型式、優先順序、廠址資料之可用性，以及劑量計算裡之相關參數，參數處理可分為「確定性」或「隨機性」。程式碼之「確定性」模組使用單一數值為輸入參數，並且產生單一數值為劑量。程式碼之「隨機性」模組使用機率分布為隨機輸入參數，並且產生範圍數值為劑量。

行為參數、新陳代謝參數皆可處理為「確定性」，並且數值取決於 NUREG/CR-5512 (Volume 3)、NUREG/CR-6697，或者應用程式碼預設值之資料庫。對於有特定廠址資料可供使用與量化的物理參數，也可處理為「確定性」。

對於沒有特定廠址資料可供使用與量化的物理參數，可分類為優先順序 1、2 或 3。其中，優先順序 1、2 之物理參數可處理為「隨機性」，並且機率分布取決於 NUREG/CR-6697。優先順序 3 之物理參數可處理為「確定性」，並且數值取決於 NUREG/CR-5512 (Volume 3)、NUREG/CR-6697，或者應用程式碼預設值之資料庫。

Parameter Selection Process

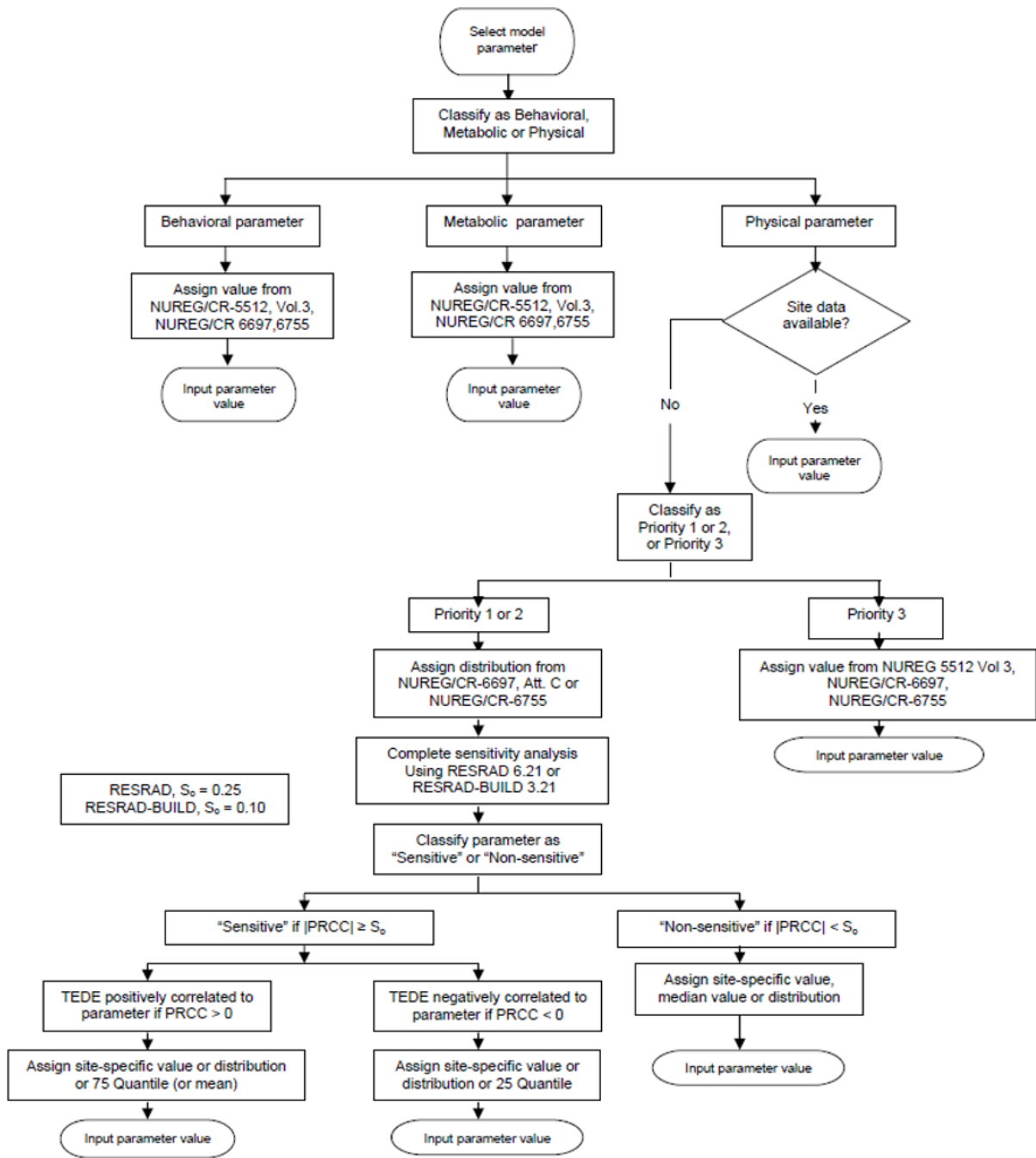


圖 5-1 RESRAD 程式輸入參數選擇程序

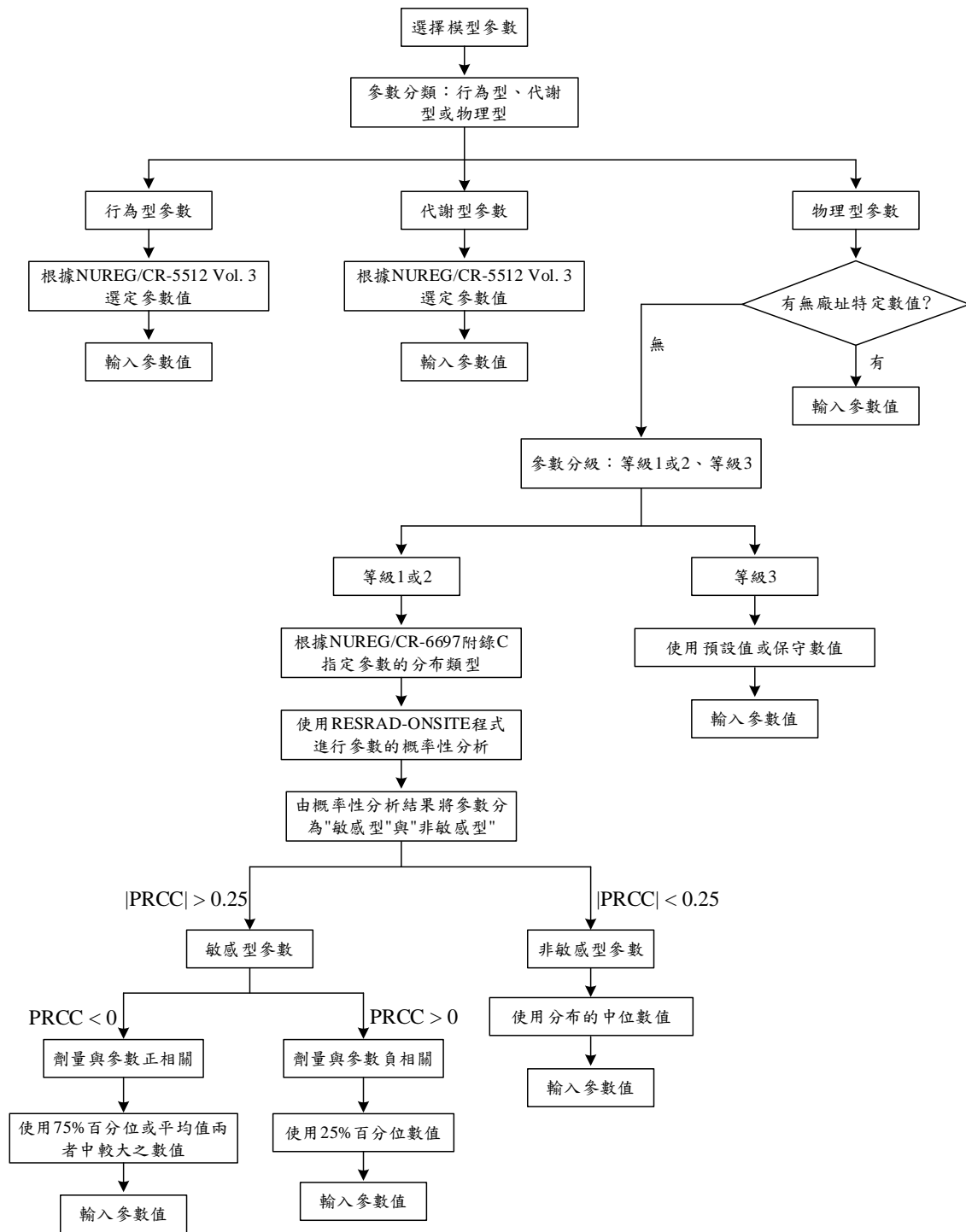


圖 5-2 RESRAD 程式輸入參數選擇程序(中文)

5.1.2 參數重要度分析

於前一章的分析結果中，在本研究之模型條件下，極大多數參數對於劑量的影響非常小，只有少部分參數有顯著的影響，本小節將自行定義與前一章所進行的參數靈敏性分析結果，對參數的重要度做一個評估，結果列於表 5-1 中。

重要度定義：

等級 1:於前一章節中靈敏性測試大於 10%，在此皆列為等級 1 之參數，為重要參數，共 9 個。

等級 2:於前一章節中靈敏性測試介於 1%到 10%，在此列為等級 2 之參數，共 2 個。

等級 3:於前一章節中靈敏性測試<1%，在此列為等級 3 之參數，共 222 個。

表 5-1 參數重要性評估

參數名稱 (中文)	參數名稱(英文)	參數 類型	靈敏性測試區間	重要度
降水	Precipitation	P	<1%	3
主要污染區	Area of primary contamination	P	<1%	3
平行含水層流的長度	Length of contamination parallel to aquifer flow	P	<1%	3
土壤混合層深度	Depth of soil mixing layer	P, B	<1%	3

塵土沉積 速率	Deposition velocity of dust	P	<1%	3
每年施加 灌溉	Irrigation applied per year	B	<1%	3
蒸散係數	Evapotranspirati on coefficient	P	<1%	3
逕流係數	Runoff coefficient	P	<1%	3
降雨和逕 流	Rainfall and runoff	P	<1%	3
斜率-長度 -陡度因子	Slope-length- steepness factor	P	<1%	3
覆蓋及管 理因子	Cover and management factor	B, P	<1%	3
支持實踐 因子	Support practice factor	B, P	<1%	3
受汙染區 厚度	Thickness of contaminated zone	P	<1%	3
受汙染區 總多孔性	Total porosity of contaminated zone	P	<1%	3
受汙染區 乾容積密 度	Dry bulk density of contaminated zone	P	<1%	3
受汙染區 土壤可蝕 性因子	Soil erodibility factor of contaminated zone	P	<1%	3
受汙染區 容量	Field capacity of contaminated zone	P	<1%	3
受汙染區 土壤 b 參 數	Soil b parameter of contaminated zone	P	<1%	3

受污染區 水力傳導 率	Hydraulic conductivity of contaminated zone	P	<1%	3
清潔涵蓋 區厚度	Thickness of clean cover	P	<1%	3
清潔涵蓋 區總孔隙 度	Total porosity of clean cover	P	<1%	3
清潔涵蓋 區堆密度	Dry bulk density of clean cover	P	<1%	3
清潔涵蓋 區土壤可 蝕性因子	Soil erodibility factor of clean cover	P	<1%	3
清潔涵蓋 區體積含 水量	Volumetric water content of clean cover	P	<1%	3
水果，穀 物及非葉 菜類蔬菜 地區面積	Area for fruit, grain, and nonleafy vegetables field	B	<1%	3
水果，穀 物及非葉 菜類蔬菜 地區直接 污染比例	Fraction of area directly over primary contamination for fruit, grain, and nonleafy vegetables field	B, P	11~20%	1
水果，穀 物及非葉 菜類蔬菜 地區年灌 溉率	Irrigation applied per year for fruit, grain, and nonleafy vegetables field	B	<1%	3
水果，穀 物及非葉 菜類蔬菜 地區蒸散 係數	Evapotranspirati on coefficient for fruit, grain, and nonleafy vegetables field	P	<1%	3

水果，穀物及非葉菜類蔬菜地區逕流係數	Runoff coefficient for fruit, grain, and nonleafy vegetables field	P	<1%	3
水果，穀物及非葉菜類蔬菜地區混和土壤層耕地層深度	Depth of soil mixing layer or plow layer for fruit, grain, and nonleafy vegetables field	P, B	<1%	3
水果，穀物及非葉菜類蔬菜地區體積含水量	Volumetric water content for fruit, grain, and nonleafy vegetables field	P	<1%	3
水果，穀物及非葉菜類蔬菜地區土壤乾體積密度	Dry bulk density of soil for fruit, grain, and nonleafy vegetables field	P	<1%	3
水果，穀物及非葉菜類蔬菜地區土壤可蝕性因子	Soil erodibility factor for fruit, grain, and nonleafy vegetables field	P	<1%	3
水果，穀物及非葉菜類蔬菜地區斜率-長度-陡度因子	Slope-length-steepness factor for fruit, grain, and nonleafy vegetables field	P	<1%	3
水果，穀物及非葉菜類蔬菜地區覆蓋	Cover and management factor for fruit, grain, and	B, P	<1%	3

及管理因子	nonleafy vegetables field			
水果，穀物及非葉菜類蔬菜地區支持實踐因子	Support practice factor for fruit, grain, and nonleafy vegetables field	B, P	<1%	3
葉菜類蔬菜區面積	NA	B	<1%	3
葉菜類蔬菜區直接受污染面積比例	NA	B, P	<1%	3
葉菜類蔬菜區年灌溉率	NA	B	<1%	3
葉菜類蔬菜區蒸散係數	NA	P	<1%	3
葉菜類蔬菜區逕流係數	NA	P	<1%	3
葉菜類蔬菜區土壤混和層或耕地層深度	NA	P, B	<1%	3
葉菜類蔬菜區水體積密度	NA	P	<1%	3
葉菜類蔬菜區土壤乾體積密度	NA	P	<1%	3
葉菜類蔬菜區土壤蒸散因子	NA	P	<1%	3

葉菜類蔬菜區斜率-長度-陡度因子	NA	P	<1%	3
葉菜類蔬菜區覆蓋及管理因子	NA	B, P	<1%	3
葉菜類蔬菜區支持實踐因子	NA	B, P	<1%	3
牧草和青貯區面積	Area for pasture and silage field	B	<1%	3
牧草和青貯區直接受汙染面積比例	Fraction of area directly over primary contamination for pasture and silage field	B, P	11~20%	1
牧草和青貯區面積年灌溉率	Irrigation applied per year for pasture and silage field	B	<1%	3
牧草和青貯區面積蒸散係數	Evapotranspiration coefficient for pasture and silage field	P	<1%	3
牧草和青貯區面積逕流係數	Runoff coefficient for pasture and silage field	P	<1%	3
牧草和青貯土壤混和層或耕地層深度	Depth of soil mixing layer or plow layer for pasture and silage field	P, B	<1%	3

牧草和青貯區水體積密度	Volumetric water content for pasture and silage field	P	<1%	3
牧草和青貯區土壤乾體積密度	Dry bulk density of soil for pasture and silage field	P	<1%	3
牧草和青貯區土壤蒸散因子	Soil erodibility factor for pasture and silage field	P	<1%	3
牧草和青貯區斜率-長度-陡度因子	Slope-length-steepness factor for pasture and silage field	P	<1%	3
牧草和青貯區覆蓋及管理因子	Cover and management factor for pasture and silage field	B, P	<1%	3
牧草和青貯區支持實踐因子	Support practice factor for pasture and silage field	B, P	<1%	3
穀類區面積	Area for grain field	B	<1%	3
穀類區直接受污染面積比例	Fraction of area directly over primary contamination for grain field	B, P	21~30%	1
穀類區面積年灌溉率	Irrigation applied per year for grain field	B	<1%	3
穀類區面積蒸散係數	Evapotranspiration coefficient for grain field	P	<1%	3

穀類區面積逕流係數	Runoff coefficient for grain field	P	<1%	3
穀類土壤混和層或耕地層深度	Depth of soil mixing layer or plow layer for grain field	P, B	<1%	3
穀類區水體積密度	Volumetric water content for grain field	P	<1%	3
穀類區土壤乾體積密度	Dry bulk density of soil for grain field	P	<1%	3
穀類區土壤蒸散因子	Soil erodibility factor for grain field	P	<1%	3
穀類區斜率-長度-陡度因子	Slope-length-steepness factor for grain field	P	<1%	3
穀類區覆蓋及管理因子	Cover and management factor for grain field	B, P	<1%	3
穀類區支持實踐因子	Support practice factor for grain field	B, P	<1%	3
場外住宅區面積	Area of offsite dwelling site	B	<1%	3
家庭花園或草坪年灌溉率	Irrigation applied per year to home garden or lawn	B	<1%	3
場外住宅區面積蒸散係數	Evapotranspiration coefficient for dwelling site	P	<1%	3
場外住宅區面積逕流係數	Runoff coefficient for dwelling site	P	<1%	3

場外住宅區土壤混和層或耕地層深度	Depth of soil mixing layer for dwelling site	P, B	<1%	3
場外住宅區水體積密度	Volumetric water content for dwelling site	P	<1%	3
場外住宅區土壤乾體積密度	Dry bulk density of soil for dwelling site	P	<1%	3
場外住宅區土壤蒸散因子	Soil erodibility factor for dwelling site	P	<1%	3
場外住宅區斜率-長度-陡度因子	Slope-length-steepness factor for dwelling site	P	<1%	3
場外住宅區覆蓋及管理因子	Cover and management factor for dwelling site	B, P	<1%	3
場外住宅區支持實踐因子	Support practice factor for dwelling site	B, P	<1%	3
釋出高度	Release height	P	<1%	3
釋出熱通量	Release heat flux	P	<1%	3
風速計高度	Anemometer height	P	<1%	3
風速表溫度	Ambient temperature	P	<1%	3
上午大氣混和高度	AM atmospheric mixing height	P	<1%	3
下午大氣混和高度	PM atmospheric mixing height	P	<1%	3
分散模型係數	Dispersion model coefficients	P	<1%	3

風速地形	Windspeed Terrain	P	<1%	3
水果，穀物，非葉類蔬菜圃	Fruit, grain, nonleafy vegetable plot	P	<1%	3
葉菜類蔬菜圃	Leafy vegetable plot	P	<1%	3
牧場，青貯飼料生長區	Pasture, silage growing area	P	<1%	3
穀物區	Grain fields	P	<1%	3
住宅區	Dwelling site	P	<1%	3
表面水體	Surface water body	P	<1%	3
分佈積分 網格空間	Grid spacing for areal integration	P	<1%	3
風速共同 頻率及穩定性	Joint frequency of wind speed and stability class for a 16 sector windrose	P	<1%	3
風速	Wind speed	P	<1%	3
非飽和區 厚度	Unsaturated zone thickness	P	<1%	3
非飽和區 乾容積密度	Unsaturated zone dry bulk density	P	<1%	3
非飽和區 總多孔性	Unsaturated zone total porosity	P	<1%	3
非飽和區 有效孔隙度	Unsaturated zone effective porosity	P	<1%	3
非飽和區 容量	Unsaturated zone field capacity	P	<1%	3

非飽和區 水力傳導 率	Unsaturated zone hydraulic conductivity	P	<1%	3
非飽和區 土壤 b 參 數	Unsaturated zone soil b parameter	P	<1%	3
非飽和區 縱向分散 性	Unsaturated zone longitudinal dispersivity	P	<1%	3
飽和區厚 度	Thickness of saturated zone	P	<1%	3
飽和區乾 容積密度	Dry bulk density of saturated zone	P	<1%	3
飽和區總 多孔性	Saturated zone total porosity	P	<1%	3
飽和區等 效多孔性	Saturated zone effective porosity	P	<1%	3
飽和區水 力傳導率	Saturated zone hydraulic conductivity	P	<1%	3
飽和區對 水井水力 梯度	Saturated zone hydraulic gradient to well	P	<1%	3
飽和區對 水井縱向 分散性	Saturated zone longitudinal dispersivity to well	P	<1%	3
飽和區對 水井水平 橫向分散 性	Saturated zone horizontal lateral dispersivity to well	P	<1%	3
飽和區對 水井垂直	Saturated zone vertical lateral	P	<1%	3

橫向分散性	dispersivity to well			
對水井灌溉率貢獻	Irrigation rate (value averaged over length of saturated zone) contributing to well	B	<1%	3
對水井蒸散係數貢獻	Evapotranspiration coefficient (value averaged over length of saturated zone) contributing to well	P	<1%	3
對水井逕流係數貢獻	Runoff coefficient (value averaged over length of saturated zone) contributing to well	P	<1%	3
對水井含水層深度貢獻	Depth of aquifer contributing to well	P	<1%	3
飽和區對表面水體水力梯度	Saturated zone hydraulic gradient to surface water body	P	<1%	3
飽和區對表面水體縱向分散性	Saturated zone longitudinal dispersivity to surface water body	P	<1%	3
飽和區對表面水體	Saturated zone horizontal lateral	P	<1%	3

水平縱向 分散性	dispersivity to surface water body			
飽和區對 表面水體 垂直縱向 分散性	Saturated zone vertical lateral dispersivity to surface water body	P	<1%	3
對表面水 體灌溉率 貢獻	Irrigation rate (value averaged over length of saturated zone) contributing to surface water body	B	<1%	3
對表面水 體蒸散係 數貢獻	Evapotranspirati on coefficient body	P	<1%	3
對表面水 體逕流係 數貢獻	Runoff coefficient (value averaged over length of saturated zone) contributing to surface water body	P	<1%	3
對表面水 體含水層 深度貢獻	Depth of aquifer contributing to surface water body	P	<1%	3
沉澱傳輸 率	Sediment delivery ratio	P	<1%	3
表面水體 體積	Volume of surface water body	P	<1%	3
表面水體 平均住宅 時間	Mean residence time of water in	P	<1%	3

	surface water body			
平行於含水層方向的井	Well in the direction parallel to aquifer flow	P, B	<1%	3
平行於含水層方向的表面水體	Surface water body in the direction parallel to aquifer flow	P	<1%	3
垂直於含水層方向的井	Well in the direction perpendicular to aquifer flow	P, B	<1%	3
垂直於含水層方向靠近表面水體的邊界	Near edge of surface water body in the direction perpendicular to aquifer flow	P	<1%	3
垂直於含水層方向遠離表面水體的邊界	Far edge of surface water body in the direction perpendicular to aquifer flow	P	<1%	3
收斂條件	Convergence criterion(fractional accuracy desired)	P	<1%	3
飽和區主子區	Main subzones in saturated zone	NA	<1%	3
每個部份飽和區主子區	Main subzones in each partially saturated zone	NA	<1%	3
所有子區內特定核	Nuclide-specific retardation in all	NA	<1%	3

種延遲， 所有子區 內縱向分 散性變換	subzones, longitudinal dispersion in all but the subzone of transformation?			
所有子區 內縱向分 散性，所 有子區內 特定何種 延遲變 換，所有 子區內父 核種延遲 變換	Longitudinal dispersion in all subzones, nuclidespecific retardation in all but the subzone of transformation, parent retardation in zone of transformation?	NA	<1%	3
所有子區 內縱向分 散性，所 有子區內 特定何種 延遲變 換，所有 子區內子 核種延遲 變換	Longitudinal dispersion in all subzones, nuclidespecific retardation in all but the subzone of transformation, progeny retardation in zone of transformation?	NA	<1%	3
個人消耗 水量	Quantity of water consumed by an individual	M,B	<1%	3
人類消耗 表面水體 比例	Fraction of water from surface body for human consumption	B, P	<1%	3

人類消耗井水比例	Fraction of water from well for human consumption	B, P	<1%	3
家庭個人消耗及使用水	Number of household individuals consuming and using water	B	<1%	3
室內個人使用水量	Quantity of water for use indoors of dwelling per individual	M,B	<1%	3
室內個人使用表面水體水量比例	Fraction of water from surface body for use indoors of dwelling	B, P	<1%	3
室內個人使用井水水量比例	Fraction of water from well for use indoors of dwelling	B, P	<1%	3
肉牛使用水量	Quantity of water for beef cattle	M,B	<1%	3
肉牛使用表面水體比例	Fraction of water from surface body for beef cattle	B, P	<1%	3
肉牛使用井水比例	Fraction of water from well for beef cattle	B, P	<1%	3
肉牛數量	Number of cattle for beef cattle	B	<1%	3
乳牛使用水量	Quantity of water for dairy cows	M,B	<1%	3

乳牛使用表面水體比例。	Fraction of water from surface body for dairy cows	B, P	<1%	3
乳牛使用井水比例	Fraction of water from well for dairy cows	B, P	<1%	3
乳牛數量	Number of cows for dairy cows	B	<1%	3
水果，穀類，非葉菜類蔬菜表面水體比例	Fraction of water from surface body for fruit, grain, and nonleafy vegetables	B, P	<1%	3
水果，穀類，非葉菜類蔬菜井水比例	Fraction of water from well for fruit, grain, and nonleafy vegetables	B, P	<1%	3
葉菜類蔬菜表面水體比例	Fraction of water from surface body for leafy vegetables	B, P	<1%	3
葉菜類蔬菜井水比例	Fraction of water from well for leafy vegetables	B, P	<1%	3
牧草和青貯表面水體比例	Fraction of water from surface body for pasture and silage	B, P	<1%	3
牧草和青貯井水比例	Fraction of water from well for pasture and silage	B, P	<1%	3

家畜飼料 穀物表面 水體比例	Fraction of water from surface body for livestock feed grain	B, P	<1%	3
家畜飼料 穀物井水 比例	Fraction of water from well for livestock feed grain	B, P	<1%	3
場外住宅 區表面水 體比例	Fraction of water from surface body for offsite dwelling site	B, P	<1%	3
場外住宅 區井水比 例	Fraction of water from well for offsite dwelling site	B, P	<1%	3
井水抽取 率	Well pumping rate	B, P	<1%	3
家畜飼料 穀物所需 井水抽取 率	Well pumping rate needed to specified water use for livestock feed grain	B, P	<1%	3
攝入飲水 量	Drinking water intake	M,B	<1%	3
魚類消耗	Fish consumption	M,B	<1%	3
其餘海鮮 類食物消 耗	Other aquatic food consumption	M,B	<1%	3
水果，穀 物，非葉 菜類蔬菜 消耗	Fruit, grain, nonleafy vegetables consumption	M,B	<1%	3

葉菜類蔬菜消耗	Leafy vegetables consumption	M,B	<1%	3
肉類消耗	Meat consumption	M,B	21~30%	1
牛奶消耗	Milk consumption	M,B	1~10%	2
土壤攝入率	Soil (incidental) ingestion rate	M,B	<1%	3
受影響區域攝入飲用水	Drinking water intake from affected area	B, P	<1%	3
受影響區域魚類消耗	Fish consumption from affected area	B, P	<1%	3
受影響區域其餘海鮮類食物消耗	Other aquatic food consumption from affected area	B, P	<1%	3
受影響區域水果，穀物，非葉菜類蔬菜消耗	Fruit, grain, nonleafy vegetables consumption from affected area	B, P	11~20%	1
受影響區域葉菜類蔬菜消耗	Leafy vegetables consumption from affected area	B, P	<1%	3
受影響區域肉類消耗	Meat consumption from affected area	B, P	<1%	3

受影響區域牛奶消耗	Milk consumption from affected area	B, P	<1%	3
家畜攝入				
黃牛攝入水量	Water intake for beef cattle	M	<1%	3
黃牛牧草和青貯攝入量	Pasture and silage intake for beef cattle	M	1~10%	2
黃牛穀物攝入量	Grain intake for beef cattle	M	11~20%	1
黃牛來自牧草和青貯的土壤攝入量	Soil from pasture and silage intake for beef cattle	M	<1%	3
黃牛來自穀物的土壤攝入量	Soil from grain intake for beef cattle	M	<1%	3
乳牛攝入水量	Water intake for dairy cows	M	<1%	3
乳牛牧草和青貯攝入量	Pasture and silage intake for dairy cows	M	<1%	3
乳牛穀物攝入量	Grain intake for dairy cows	M	<1%	3
乳牛來自牧草和青貯的土壤攝入量	Soil from pasture and silage intake for dairy cows	M	<1%	3
乳牛來自穀物的土壤攝入量	Soil from grain intake for dairy cows	M	<1%	3
牧草和青貯的濕重產量	Wet weight crop yield of pasture and silage	P	<1%	3
生長季節持續生長	Duration of growing season	P	<1%	3

的牧草和青貯	of pasture and silage			
牧草和青貯葉子到食物轉換係數	Foliage to food transfer coefficient of pasture and silage	P	<1%	3
牧草和青貯風化移除常數	Weathering removal constant of pasture and silage	P	<1%	3
牧草和青貯灌溉葉面截取因子	Foliar interception factor for irrigation of pasture and silage	P	<1%	3
牧草和青貯灰塵葉面截取因子	Foliar interception factor for dust of pasture and silage	P	<1%	3
牧草和青貯根部深度	Root depth of pasture and silage	P	<1%	3
水果，穀類及非葉菜類蔬菜的濕重產量	Wet weight crop yield of fruit, grain, and nonleafy vegetables	P	<1%	3
生長季節持續生長的水果，穀類及非葉菜類蔬菜	Duration of growing season of fruit, grain, and nonleafy vegetables	P	<1%	3

水果，穀類及葉菜類蔬菜葉子到食物轉換係數	Foliage to food transfer coefficient of fruit, grain, and nonleafy vegetables	P	<1%	3
水果，穀類及葉菜類蔬菜風化移除常數	Weathering removal constant of fruit, grain, and nonleafy vegetables	P	<1%	3
水果，穀類及葉菜類蔬菜灌溉葉面截取因子	Foliar interception factor for irrigation of fruit, grain, and nonleafy vegetables	P	<1%	3
水果，穀類及葉菜類蔬菜灰塵葉面截取因子	Foliar interception factor for dust of fruit, grain, and nonleafy vegetables	P	<1%	3
水果，穀類及葉菜類蔬菜根部深度	Root depth of fruit, grain, and nonleafy vegetables	P	<1%	3
葉菜類蔬菜的濕重產量	Wet weight crop yield of leafy vegetables	P	<1%	3
生長季節持續生長的葉菜類蔬菜	Duration of growing season of leafy vegetables	P	<1%	3
葉菜類蔬菜葉子到	Foliage to food transfer	P	<1%	3

食物轉換係數	coefficient of leafy vegetables			
葉菜類蔬菜風化移除常數	Weathering removal constant of leafy vegetables	P	<1%	3
葉菜類蔬菜灌溉葉面截取因子	Foliar interception factor for irrigation of leafy vegetables	P	<1%	3
葉菜類蔬菜灰塵葉面截取因子	Foliar interception factor for dust of leafy vegetables	P	<1%	3
葉菜類蔬菜根部深度	Root depth of leafy vegetables	P	<1%	3
吸入率	Inhalation rate	M,B	<1%	3
吸入質量負載	Mass loading for inhalation	P, B	<1%	3
平均場內質量負載	Mean onsite mass loading	P, B	<1%	3
室內灰塵過濾因子	Indoor dust filtration factor (indoor to outdoor dust concentration)	P, B	<1%	3
外部 gamma 屏蔽因子	External gamma shielding (penetration) factor	P	21~30%	1
住宅位置	Dwelling location	P	<1%	3
尺寸	Scale	P	<1%	3
住宅位置 x 座標	Dwelling location	P	<1%	3

	coordinate in X-direction			
住宅位置 y 座標	Dwelling location coordinate in y-direction	P	<1%	3
半徑	Radius	P	<1%	3
比例	Fraction	P	<1%	3
主汙染區 形狀	Shape of the primary contamination	P	<1%	3
主汙染區 多邊形頂 點 x 座標	X coordinate of the vertices of polygon of the primary contamination	P	<1%	3
主汙染區 多邊形頂 點 y 座標	Y coordinate of the vertices of polygon of the primary contamination	P	<1%	3
居住因子				
主汙染區 室內時間 比例	Indoor time fraction on primary contamination	B	31~40%	1
主汙染區 室外時間 比例	Outdoor time fraction on primary contamination	B	51~60%	1
場外住宅 區室內時 間比例	Indoor time fraction on offsite dwelling site	B	<1%	3
場外住宅 區室外時 間比例	Outdoor time fraction on offsite dwelling site	B	<1%	3

水果，穀物，非葉菜類蔬菜時間比例	Time fraction in fruit, grain, and nonleafy vegetable fields	B	<1%	3
葉菜類蔬菜時間比例	Time fraction in leafy vegetable fields	B	<1%	3
牧草和青貯區時間比例	Time fraction in pasture and silage fields	B	<1%	3
家畜穀物區時間比例	Time fraction in livestock grain fields	B	<1%	3

5.2 利用 RESRAD 程式導出 DCGL

本章節參考 Maine Yankee DCGL 分析之流程，並利用 RESRAD 程式所分析之 DSR，來進行 DCGL 之推算。利用 RESRAD OFFSITE 程式所計算出之 DSR 於圖 5-3 至圖 5-6，再利用公式

$$DCGL \text{ (pCi/g)} = \frac{25 \text{ (mrem/yr)}}{DSR \left[\frac{\text{(mrem/yr)}}{\text{(pCi/g)}} \right]}$$

(式 5.1)

即可推算出特定核種之 DCGL。本分析案例所使用的核種為 Cs-137、Co-60、H-3 及 Ni-63，屬於多核種混合，因此計算 DCGL 時，需要乘上污染核種之

初始比例，各核種佔之比例於表 5-2，由此可推算本分析案例各核種之 DCGL，

計算結果如下：

$$\text{Cs-137: } 0.89 \times 25 / 4.3 = 5.17(\text{pCi/g}) = 0.19(\text{Bq/g})$$

$$\text{Co-60: } 0.0089 \times 25 / 0.0434 = 5.13(\text{pCi/g}) = 0.19(\text{Bq/g})$$

$$\text{H-3: } 0.053 \times 25 / 0.256 = 5.18(\text{pCi/g}) = 0.19(\text{Bq/g})$$

$$\text{Ni-63: } 0.048 \times 25 / 0.232 = 5.17(\text{pCi/g}) = 0.19(\text{Bq/g})$$

$$(1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq})$$

表 5-2 汙染核種所佔之比例

核種名稱	半衰期(年)	濃度(pCi/g)	濃度(貝克/克)	比例(%)
Cs-137	30.2	4.3	0.159	89
Co-60	5.3	0.0434	0.0016	0.89
H-3	12.4	0.256	0.0095	5.3
Ni-63	100.1	0.232	0.0086	4.8

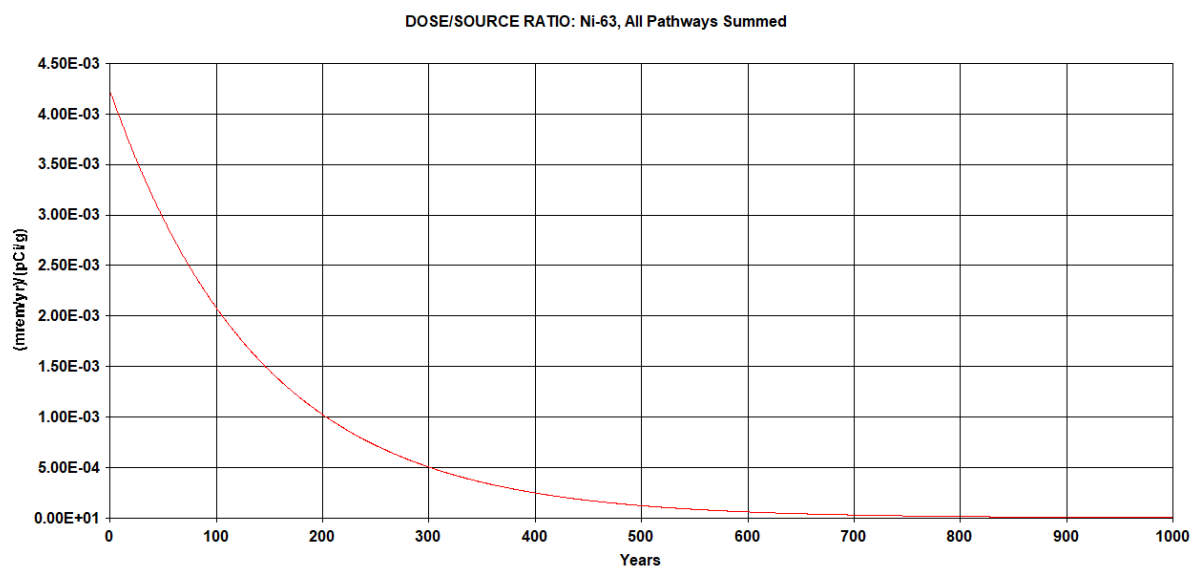


圖 5-3 Ni-63 之 DSR

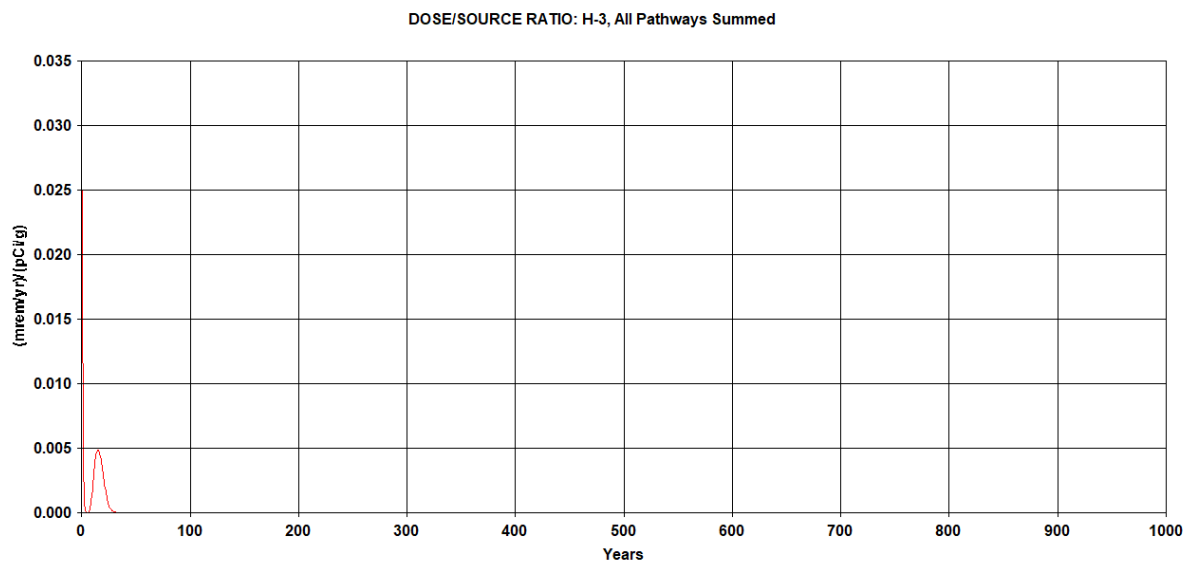


圖 5-4 H-3 之 DSR

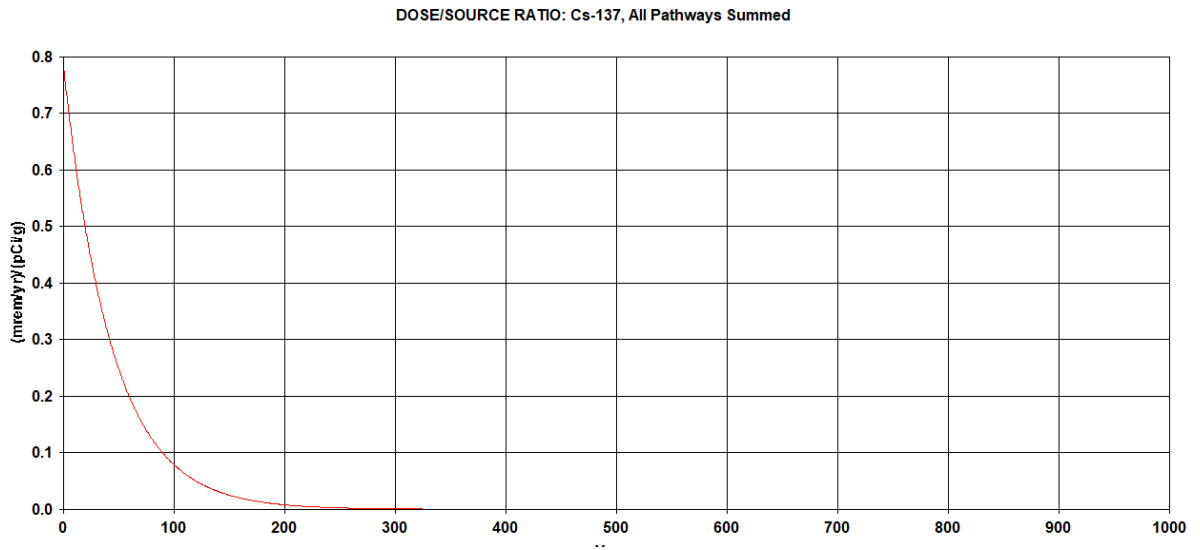


圖 5-5 Cs-137 之 DSR

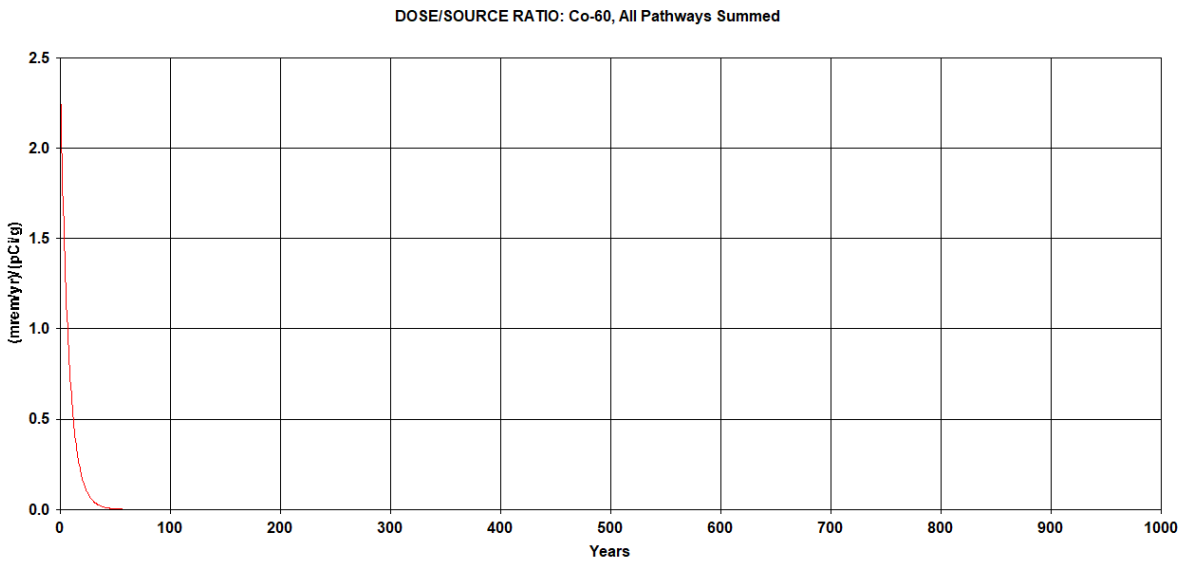


圖 5-6 Co-60 之 DSR

5.3 研析台灣核電廠除役之法規

全世界絕大多數國家的原子能法規已經發展了數十年以訂立核能電廠的安全規範，確保在發電過程中是最安全的。例如在加拿大和英國，主要的核電技術不是基於輕水式的反應爐，而是重水冷卻而且還是二氧化碳冷卻，每個國家的原子能法規對於其主導核電技術的設計和運行都是以安全為第一考量。隨著時間變遷，不同的監管機構也在隨著國家政府和立法機關意見的改變而不斷演化。世界上主要核子事故（三哩島和福島）對未來的影響也具有重大意義。

這種國際重大的核子事故也使人們注意到核能安全不單單是某一個國家的問題，核子事故的後果在生理和心理上影響著全世界。1994年由國際原子能機構組織的核能安全公約 CNS(Convention on Nuclear Safety)致力於建立一個核能安全的國際基礎來解決一些核能問題。這個公約有幾個目標：

1. 通過增強國際措施和包括技術安全相關的國際合作，在世界範圍內實現和維持高的核電安全水準。
2. 在核子設施中建立和維持有效的防護，以防止潛在核子設施的放射性危害對個人、社會和環境造成傷害。
3. 預防放射性事故的發生，同時緩和這類事故造成的後果。

這些高水準的目標為貫徹國際原子能總署（IAEA）對於核電廠安全的基礎原則（International Nuclear Safety Advisory Group 1999）所付出的努力，使

得不同國家的法規得到發展，同時也加強了國際核能法規和核能安全的責任。

在這一章節，我們也將彙整台灣的法規如圖 5-7 以及國內的研究報告，來讓日後原能會在審查除役及乾式儲存場的過程中，能夠有所本的參照本計畫所提供的重要核種及靈敏度參數，讓台灣核電廠在除役的過程中能夠順利。

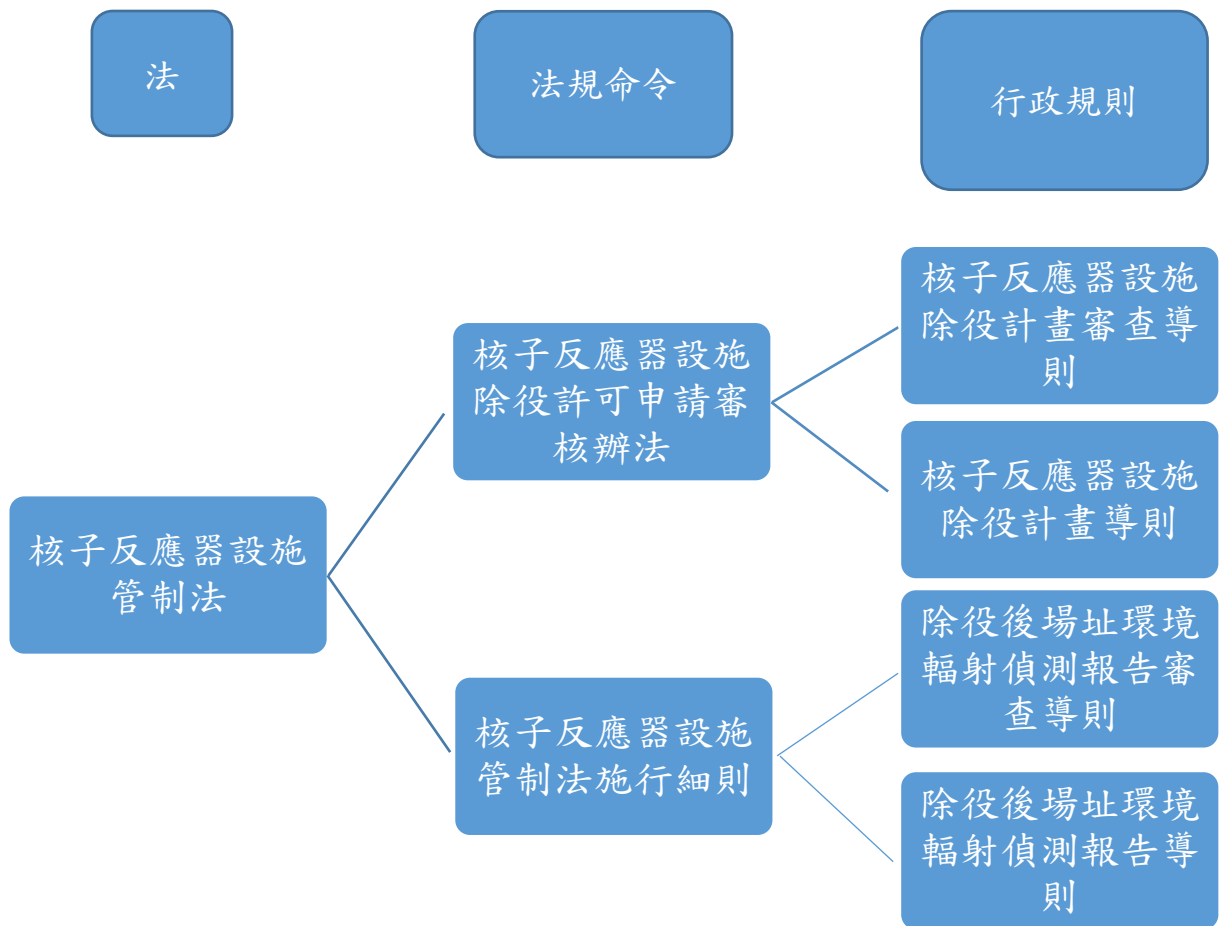


圖 5-7 台灣除役管制法規

5.3.1 最終處置場之關鍵核種

台灣低放射性廢棄物最終處置場計畫接收廢棄物之來源，包含：核一、二、三及核四廠運轉廢棄物以及除役廢棄物、核能研究所運轉廢棄物及該所接收全國同位素應用業界所產生之廢棄物。考量各產源之核種存量、濃度、半衰期與溶解度，以飲水情節分析其對關鍵群體的有效劑量，選取高於 0.25mSv/yr 之核種共計 14 種如表 5-3 所列。但因為最終處置場的評估時程可能高達數十萬年，Co-60 已衰減殆盡，不列關鍵核種，才因而沒有被放到表 5-3 中。但美國核電廠除役 Yankee Rowe 以及 Maine Yankee 的執照終止計畫書 LTP 中都將 Co-60 納入重要核種，所以我們建議將此放射性核種納入除役的重要參考指標之一。

表 5-3 低放射性廢棄物關鍵核種列表(計畫整理台電公司,2010)

最終處置場廢棄物關鍵核種			
核種	半衰期(年)	活度(Bq)	比活度 (Bq/g)
C-14	5730	2.32E+13	9.10E-5
Ni-59	7.6E+4	4.00E+12	1.57E-5
Ni-63	100	4.74E+14	1.86E-3
Sr-90	28.9	1.21E+13	4.74E-5
Mo-93	3.5E+3	4.22E+09	1.65E-8
Nb-94	2E+4	1.10E+10	4.31E-8
Tc-99	2.13E+5	5.92E+11	2.32E-6
I-129	1.57E+7	4.48E+11	1.76E-6
Cs-137	30	1.65E+14	6.47E-4
Np-237	2.14E+6	1.91E+07	7.49E-11
Pu-238	86.4	4.26E+10	1.67E-7
Pu-239	2.4E+4	1.47E+12	5.76E-6
Pu-240	6580	1.22E+12	4.78E-6
Am-241	432.2	9.66E+11	3.79E-6

5.3.2 低放廢棄物之關鍵核種

台灣核電廠除役需符合「核管法施行細則」標準之規定，即對一般人造成之有效等效劑量不得超過 0.25 mSv/yr 之要求外，計畫中整理「一定活度或比活度以下放射性廢棄物管理辦法」之核種外釋的限值，全部規範的核種有近 250 個，但本計畫整理較為重要的核種如表 5-4 所列，若於除役過程中產生放射性廢棄物需進行外釋時，主管機關可以依據此表進行審查。

表 5-4 一定活度或比活度以下放射性廢棄物管理辦法重要核種

核種 \ 限值	每年外釋廢棄物活度限值 (貝克)	每年外釋超過一公噸之廢棄物比活度限值 (貝克/克)	每年外釋一公噸以下之廢棄物比活度限值 (貝克/克)
H-3	1.E+9	1.E+2	1.E+6
C-14	1.E+7	1.E+0	1.E+4
P-32	1.E+5	1.E+3	1.E+3
Co-60	1.E+5	1.E-1	1.E+1
Ni-63	1.E+8	1.E+2	1.E+5
Sr-90	1.E+4	1.E+0	1.E+2
I-129	1.E+5	1.E-1	1.E+2
Cs-137	1.E+4	1.E-1	1.E+1
U-233	1.E+4	1.E+0	1.E+1
U-235	1.E+4	1.E+0	1.E+1
Pu-238	1.E+4	1.E-1	1.E+0

若廢棄物含有多核種時，應符合下列公式之要求

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_{i,o}} \leq 1$$

C_i : 第 i 核種之活度或比活度。

$C_{i,o}$: 第 i 核種之活度限值或比活度限值。

n : 所含核種的數目

第六章 結論與建議

本研究計畫主要是研析 RESRAD-OFFSITE 的使用手冊以及美國已除役電廠的 LTP。程式中所需要輸入的參數數量非常多，我們將分類為多個區塊(4.1 節)，並針對這些區塊的參數進行說明。除此之外，我們針對程式內建的 233 個參數進行靈敏度的測試，挑出較為重要的 11 個參數(表 4-23)供原能會審查。我們還做了大範圍參數的測試，並將所有參數做重要度的分級(表 5-1)。本計畫蒐集國際核能先進國家的 LTP，選定美國已除役核電廠案例 YANKEE ROWE 及 MAINE YANKEE 並利用 RESRAD-OFFSITE 程式進行 DCGL 的驗證計算，得到的結果也證明 RESRAD 程式具有相當的準確性。在未來的除役研究，希望能夠將 RESRAD-OFFSITE 及 RESRAD-ONSITE 做整合，並將所有參數本土化。未來計畫的內容還可以針對台灣需除役的核電廠廠址特性去做 RESRAD 程式的設定及分析，這對未來台灣的除役工作非常有幫助。計畫如期完成甘特圖所預期的目標，完成的工作項目及研究成果如下：

1. 研析美國和國際間研發與應用之生物圈輻射劑量及風險評估程式，評估電腦程式於實際除役核電廠之適用性，以及了解國際間除役廠址與建築物解除管制之評估及驗證作法。

2. 建立除役核電廠建物與廠址解除管制之審查重點與接受準則，提出相關管路、建物、結構物的導出濃度指引水平(DCGL)和劑量轉換因子(DCF)，供管制單位參考。
3. 研析美國除役核電廠 Yankee Rowe 和 Maine Yankee 的執照終止計畫書(LTP)，以及研析執照終止放射標準，彙整 RESRAD 程式之模擬分析架構、輸入參數選擇程序、導出濃度指引水平(DCGL)和劑量轉換因子(DCF)之計算結果。
4. 完成操作 RESRAD 程式之模擬流程與模型設計，未來將深入了解各項環境參數之設計特性，以及研析欲評估廠址之環境參數與情境設定，進而應用 RESRAD 程式於除役核電廠、建築物輻射汙染、低放射性廢棄物處置廠址之輻射安全評估。
5. 研析 RESRAD-OFFSITE 程式之情境設定、模擬流程、輻射曝露途徑、參數設計、參數靈敏度分析、核種活度與輻射劑量計算模式，以及除役核電廠對於廠址居民健康與生物環境影響之輻射安全評估。
6. RESRAD-OFFSITE 程式之模擬結果，可提供分析每個核種與輻射曝露途徑(例如：直接體外輻射、塵埃和氬氣之吸入，以及蔬菜、肉品、牛奶、

水生生物之攝食)所造成之輻射劑量、核種濃度、劑量與射源比率 (Dose/Source Ratio, DSR)、癌症風險。

7. 研析 RESRAD-OFFSITE 程式之整體參數設計，並參照程式內建之參數靈敏度測試功能，將單一參數同時放大和縮小至數倍，測試該單一參數對於程式模擬結果之人體輻射劑量的影響程度，進而找出關鍵參數和輻射曝露途徑分析。參數靈敏度分析結果顯示，大部分參數對於程式模擬結果之人體輻射劑量的影響程度非常小，只有少數參數對於模擬結果有較大的影響，本研究也將影響模擬結果較大之關鍵參數彙整於表格說明並且將 RESRAD-OFFSITE 全部的核種做重要度的分級。

8. 在 RESRAD OFFSITE 程式內建靈敏度參數測試中，233 個參數中有 11 個較為重要的參數，將列在下面：

External gamma shielding (penetration) factor、Fraction of area directly over primary contamination for fruit, grain, and nonleafy vegetables field、Fraction of area directly over primary contamination for grain field、Fraction of area directly over primary contamination for pasture and silage field、Fruit, grain, nonleafy vegetables consumption from affected area、Grain intake for beef cattle、Indoor time fraction on primary contamination、Meat consumption、Milk consumption、Outdoor time

fraction on primary contamination、Pasture and silage intake for beef

cattle，這項工作是本計畫的主要重點之一，也希望在未來的計劃中能夠有本土化的調查值。

9. 在表 4.6 轉換因子中，依據 RESRAD OFFSITE 程式測試出來較為靈敏的 11 個參數，標記出轉換因子中需要本土化的調查值，將列在下面：

Inhalation dose conversion factors、Ingestion dose conversion factors、

Slope factor external、Slope factor inhalation、Slope factor – food

ingestion、Slope factor – water ingestion、Slope factor – soil ingestion、

Fruit, grain, nonleafy vegetables transfer factor、Pasture and silage

transfer factor、Livestock feed grain transfer factor、Meat transfer

factor、Milk transfer factor。

10. RESRAD-OFFSITE 程式對於不同的廠址情境模擬，會計算出不同的劑量與射源比率(DSR)，以及導出濃度指引水平(DCGL)。運用 RESRAD-OFFSITE 程式計算單一核種之劑量與射源比率(DSR)，可進而推算該單一核種之導出濃度指引水平(DCGL)，並符合法規限值之每年人體輻射劑量 25 mrem/yr，其計算方程式如下所示：

$$\text{DCGL (pCi/g)} = \frac{25 \text{ (mrem/yr)}}{\text{DSR} \left[\frac{\text{(mrem/yr)}}{\text{(pCi/g)}} \right]}$$

或

$$\text{DCGL (pCi/m}^2\text{)} = \frac{25 \text{ (mrem/yr)}}{\text{DSR} \left[\frac{\text{(mrem/yr)}}{\text{(pCi/m}^2\text{)}} \right]}$$

11. 本研究可作為應用 RESRAD-OFFSITE 程式於輻射污染建築物、除役核電廠、低放射性廢棄物貯存設施之輻射安全評估與程式驗證技術研究之參考。

12. 整理國內的法規以及研究報告，讓日後原能會在審查除役計畫時能夠參考。

參考資料

1. Yu, C., et al., User's Manual for RESRAD-OFFSITE Version 2, ANL/EVS/TM/07-1, DOE/HS-0005, NUREG/CR-6937, Argonne National Laboratory, Argonne, Ill., June 2007.
2. Yu, C., et al., User's Manual for RESRAD-BUILD Version 3, ANL/EAD-4, Argonne National Laboratory, Argonne, Ill., June 2003.
3. Yu, C., et al., User's Manual for RESRAD Version 6, ANL/EAD/03-1, Argonne National Laboratory, Argonne, Ill., July 2001.
4. B.M. Biwer, S. Kamboj, J. Arnish, C. Yu, and S.Y. Chen, Technical Basis for Calculating Radiation Doses for the Building Occupancy Scenario Using the Probabilistic RESRAD-BUILD 3.0 Code, NUREG/CR-6755, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research, Washington, D.C., February 2002.
5. Sang Bum Hong, Doo Seoung Hwang, Bum Kyung Seo, Jei Kwon Moon, 2013. Practical application of the MARSSIM process to the site release of a Uranium Conversion Plant following decommissioning, *Annals of Nuclear Energy* 65 (2014) 241–246.
6. Amr Abdelhady and T. Mongy, Dose and Risk Calculations for Decontamination of a Hot Cell, *Arab Journal of Nuclear Science and Applications*, 47(4), (100-106) 2014.
7. Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual (MARSSIM), NUREG-1575, Rev. 1, August 2000.
8. Yankee Nuclear Plant Station License Termination Plan, Rev. 1, Yankee Atomic Electric Company, July 2005.
9. 林文勝，「低放射性廢棄物處置輻射劑量評估安全審查模式之研究」，

國立臺灣大學，民國 102 年。

10. 趙得勝、翁韶澤、吳尚謙、梁正宏，「除役核電廠廠址特性與環境輻射分析之審查技術研究」，國立清華大學，民國 107 年。
11. 趙得勝、王振安、吳尚謙、梁正宏，「除役核電廠廠址特性與環境輻射分析之審查技術研究」，國立清華大學，民國 104 年。
12. 劉鴻鳴，「國立清華大學生物科技館南館拆除工程報告」，國立清華大學原子科學技術發展中心，民國 103 年。
13. 武及蘭，「MARSSIM 簡介」，核能研究所，民國 105 年。
14. License Termination Plan Revision 4, Maine Yankee Atomic Power Company, February 2005.
15. B.M. Biwer, D.J. LePoire, S. Kamboj, and Y.S. Chang, Technical Manual and User's Guide for MILDOS-AREA Version 4, ANL/EVS-15/9, NUREG/CR-7212, Argonne National Laboratory, April 2016.
16. B.A. Napier, GENII User's Guide Version 2, PNNL-14583, Rev. 4, Pacific Northwest National Laboratory, September 2012.
17. K. McFadden, D.A. Brosseau, W.E. Beyeler, and C.D. Updegraff, User's Manual DandD Version 2.1, SAND2001-0822P, NUREG/CR-5512, Vol. 2, Sandia National Laboratory, April 2001.
18. Sullivan, T.M., "DUST-MS - Disposal Unit Source Term- Multiple Species: Data Input Guide," Brookhaven National Laboratory, 1997.
19. YA-CALC-00-003-04, "Assessment of radionuclide release from contaminated concrete at the Yankee Rowe Nuclear Power Plant," dated August 2004.

20. YA-REPT-00-003-04, "Estimate of Dose Due to Tritium in Groundwater at EPA's Maximum Contaminant Levels," dated April 2004.Haddam Neck Plant License Termination Plan, Rev. 1a, dated October
21. The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World
AN INTERDISCIPLINARY MIT STUDY
22. 核子反應器設施除役計畫導則
23. 游離輻射防護法

行政院原子能委員會委託研究計畫期末報告

計畫名稱：

「核能電廠除役與室內乾貯安全審查技術之研究」
有關除役部分之研究

子項計畫二：

除役核能電廠物質與設備之處置偵檢驗證技術研究

計畫編號： AEC10612052L

執行單位：國立清華大學

計畫主持人：裴晉哲

子項計畫二主持人：蔣安忠

報告作者：蔣安忠、林宇捷、張煒堃

報告日期：中華民國107年12月

子項計畫二：

除役核能電廠物質與設備之處置偵檢驗證技術研究

摘要

美國多部會輻射偵測與廠址調查手冊 (Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual, MARSSIM) 與多部會物質與設備輻射偵檢與評估手冊 (Multi-Agency Radiation Survey and Assessment of Materials and Equipment Manual, MARSAME) 為目前國際上被應用於確定除役廠址可符合以輻射劑量或風險基準為標準值的重要指引，近年已被廣泛用於物質與設備之偵檢分類及外釋解除管制，MARSAME 是 MARSSIM 的補充報告，與其相關之規範也見於 ANSI 和 NUREG 等相關文件當中。本子項計畫二之研究目的即希望根據上述相關文件，對物質與設備的偵檢分類、解除管制評估方法與外釋條件進行研析，藉由本項研究的研析結果，提供核能電廠除役過程物質與設備之處置及偵檢驗證策略，並提供管制方面之建議。

本研究之具體研究內容包括：文件與導則研析、計算範例分析、驗證程序探究、解除管制調查方法及應用範例、對核一廠除役計畫與相關評估報告進行研析。

ABSTRACT

MARSAME is a supplementary report of MARSSIM. The relevant regulations and specifications are also found in related documents such as ANSI and NUREG. The purpose of this subproject is to study the classification and deregulation assessment method and clearance conditions for materials and equipment according to the above-mentioned documents. According to the study and analysis results, we can provide inspection verification strategies and regulatory advices to decommission of nuclear power plants. The specific research content includes: analysis of documents and guidelines, calculation example analysis, verification program design, deregulation investigation methods and application examples, and studying the decommission plan and related assessment reports of Chinshan Nuclear Power Plant.

目錄

摘要	i
ABSTRACT.....	ii
目錄	iii
圖目錄	v
表目錄	vii
第一章 計畫背景	1
第二章 計畫目的與執行方法	3
第三章 期中進度概述	5
3.1 MARSAME 之重點內容彙整	5
3.1.1 MARSAME 的目的、範圍與使用	5
3.1.2 MARSAME 的細部說明及其與 MARSSIM 的關聯性	8
3.1.3 MARSAME 資料品質目標的執行步驟和範例分析	18
3.2 NUREG-1761 之物件分類與偵檢單元	24
3.3 美國國家標準協會 ANSI/HPS N13.12 簡述	33
3.4 物質與設備等固體廢棄物之估算程序	37
第四章 國際案例與相關計算範例分析	40
4.1 Humboldt Bay 發電廠及其 MARSAME 調查程序之策略	40

4.2 Humboldt Bay 發電廠的 MARSAME 偵檢包案例研析與計算 範例.....	46
4.3 MARSAME 數值範例的研析	66
第五章 台電核一廠除役計畫與相關評估報告之研析	69
5.1 國際除役計畫之相關探討	69
5.1.1 Humboldt Bay 3 號機 PSDAR 的概述.....	70
5.1.2 Humboldt Bay 3 號機 LTP 的概述.....	74
5.1.3 Yankee Rowe 核能電廠 LTP 的概述	77
5.2 台電核一廠除役計畫與相關評估報告之研析	82
第六章 結論與建議事項	86
參考資料.....	90

圖目錄

圖 2.1 計畫預定進度甘特圖。	4
圖 3.1 MARSAME(2009)的封面。	6
圖 3.2 MARSAME 處置偵檢的資料生命週期流程圖。	16
圖 3.3 MARSAME 的章節構成。	17
圖 3.4 成堆放置等待外釋調查之拆除物件。	26
圖 3.5 進行外釋偵檢的混凝土樓板。	27
圖 3.6 被截斷進行外釋偵檢的大口徑管道。	28
圖 3.7 使用容器裝盛的銅碎片。	29
圖 3.8 準備量測作為回收使用的變壓器。	30
圖 3.9 準備進行量測的廢金屬堆。	31
圖 3.10 外釋前可能需要拆卸的馬達轉子。	32
圖 3.11 輻射曝露來源的進(Entry to)、出(Exit from)與跳過(Bypass)管 制。	34
圖 4.1 美國 Humboldt Bay 發電廠。	40
圖 4.2 定點掃描最小可測濃度的推算流程圖。	59
圖 4.3 掃描偵檢流程圖。	63
圖 4.4 美國 Humboldt Bay 發電廠材料鋼的 MARSAME 偵檢表格。	66

圖 5-1 美國核能電廠的除役作業時程。69

圖 5-2 美國 Humboldt Bay 3 號機的 PSDAR 目錄。70

表目錄

表 3.1 描述被調查物質與設備的物理特徵時應處理之屬性。.....	10
表 3.2 描述被調查物質與設備的輻射特徵時應處理之屬性。.....	11
表 3.3 典型固體物質偵檢單元之大小(NUREG 1761 Table 4.2)。.....	33
表 3.4 ANSI N13.12-2013 的篩選水平。.....	36
表 3-5 ANSI N13.12-2013 的篩選水平(以新式單位呈現)。.....	37
表 4.1 讀數高於 MDC 的特徵資料(單位為 dpm/100 cm ²)。.....	47
表 4.2 HBPP 結構鋼的物理特徵描述。.....	49
表 4.3 HBPP 結構鋼的輻射特徵描述。.....	49
表 4.4 表面掃描偵檢(進行回收)的行動基準。.....	53
表 4.5 表面掃描偵檢(送往美國生態公司掩埋)的行動基準。.....	53
表 4.6 MDCR 值。.....	55
表 4.7 回收調查的掃描 MDC 值。.....	56
表 4.8 背景值與相關參數的計算結果。.....	58

第一章 計畫背景

美國多部會輻射偵測與廠址調查手冊 (Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual, MARSSIM) 與多部會物質與設備輻射偵檢與評估手冊 (Multi-Agency Radiation Survey and Assessment of Materials and Equipment Manual, MARSAME) 為目前國際上被應用於確定除役廠址可符合以輻射劑量或風險基準為標準值的重要指引。MARSSIM 主要針對建築物與土壤的輻射偵檢規劃驗證程序，而 MARSAME 則是提供物質與設備之處置偵檢的規劃、執行、評估、偵檢等技術資訊，並鼓勵資源利用，使解除管制作業之調查與偵檢技術更趨完善，近年已被廣泛用於物質與設備之偵檢分類及外釋解除管制，其應用範圍包含金屬、混凝土、工具、設備、管路、水管、傢俱、垃圾、碎石、瓦礫、屋頂材料、爛泥、沉澱物等，也包含各式盛裝容器、鋼瓶、封存材料等。

在 106 年度行政院原子能委員會委託之研究計畫中，清華大學針對輻射特性調查評估之審查與驗證進行研究，對台電與放射性物料評估與處置相關的三份評估報告，以 MARSSIM 的角度與觀點進行驗證分析，對土地與建築物部分多有著墨，然而其中物質與設備的處置偵檢相關技術與規範內容十分廣泛，MARSAME 對此方面有更為深入的處置建議，值得更進一步進行探究。

在核電廠的除役過程中，會產生大量受到輻射影響的物質與設備，需要進行妥善的分析、評估及偵檢，台電公司已完成核一廠除役計畫並提送主管機關審查。未來永久停止運轉後，仍須進行更精確的詳細調查與評估。為審查驗證現階段除役計畫中各項物質與設備之處置決策與分析評估作業之正確性與合理性，擬進行本項研究，依據 MARSAME 規範的指引方針，提出管制建議與驗證策略，並供作未來詳細調查與評估結果之審查參考。

第二章 計畫目的與執行方法

MARSAME 是 MARSSIM 的補充報告，是除役核能電廠物質與設備之外釋與解除管制的主要導引準則，其他的相關規範也見於 ANSI 和 NUREG 等相關文件當中，國際間數座已完成除役的核能電廠也有相關資訊可供參考，我們希望根據這些資料，對固體物質與設備的解除管制評估方法與外釋條件進行研析，藉由本項研究的研析結果，提供驗證策略與管制方面之建議。以下為本研究之主要執行方法與工作項目：

1. 針對 MARSAME、ANSI/HPS N13.12、NUREG-1761、外釋導則與條件等文件之重點研析。
2. 固體物質與設備的分類與偵檢單元分析。
3. 物質外釋與 MDCs 之考量與計算範例分析。
4. 物質與設備偵檢方法之研析與應用範例。
5. 台電除役計畫與相關評估報告之研析。
6. 提出驗證策略與管制方面之建議。

本研究執行狀況十分順利，總體進度依照計畫書之甘特圖(圖 2.1)進行，藉由現有之資料進行分析研讀，進行歸納整理，達成計畫書預定之目標。

工作項目	年月												備註
	107 1	107 2	107 3	107 4	107 5	107 6	107 7	107 8	107 9	107 10	107 11	107 12	
對 MARSAME 及相關文件之重點研析			※										
固體物質與設備的分類與偵檢單元分析													
國際案例與相關計算範例分析						※							查核點： 6/15 期中報告
利用 MARSAME 研析核一廠除役計畫與相關評估報告之分析方法及評估結果									※				
提出驗證策略與管制方面之建議，並完成期末報告											※		查核點： 11/15 期末報告
工作進度估計百分比 (累積數)	8 %	16 %	24 %	32 %	40 %	48 %	56 %	64 %	72 %	80 %	90 %	100 %	
預定查核點	<p>第一季：完成對 MARSAME 及相關文件之重點研析與分類偵檢分析。</p> <p>第二季：完成國際案例與相關計算範例分析。6 月 15 日前完成期中報告。</p> <p>第三季：利用 MARSAME 研析核一廠除役計畫與相關評估報告之分析方法及評估結果。</p> <p>第四季：提出驗證策略與管制方面之建議，11 月 15 日前提供期末報告初稿，12 月底完成期末報告。</p>												
<p>說明：1.工作項目請視計畫性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起迄日期。</p> <p>2.「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：(1)工作天數，(2)經費之分配，(3)工作量之比重，(4)擬達成目標之具體數字。</p> <p>3.每季之「預定查核點」，請在條形圖上標明※符號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。</p>													

圖 2.1 計畫預定進度甘特圖。

第三章 期中進度概述

3.1 MARSAME 之重點內容彙整

3.1.1 MARSAME 的目的、範圍與使用

美國多部會輻射偵測與廠址調查手冊 (Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual, MARSSIM) 與多部會物質與設備輻射偵檢與評估手冊 (Multi-Agency Radiation Survey and Assessment of Materials and Equipment Manual, MARSAME) 為目前國際上被廣泛用於確定除役廠址可符合以輻射劑量或風險基準為標準值的重要指引。

MARSAME 是 MARSSIM 的補充文件，與 MARSSIM 相同，也是由美國國防部(Department of Defense, DOD)、能源部(Department of Energy, DOE)、環保署(Environment Protection Agency, EPA)與核管會(Nuclear Regulatory Commission, NRC)四部會合作編撰，在其封面頁上就明確標示了這四個部會(如圖 3.1)，尚結合了美國多部會放射實驗室分析協議手冊(Multi-Agency Radiological Laboratory Analytical Protocols manual, MARLAP)中輻射量測的資訊。針對物質與設備的處置(開始、維護、移除、或運送至其他權責單位)，MARSAME 提供技術性偵檢的規劃及執行的相關資訊，換句話說，MARSAME 提供規劃、執行、分析及文件審查等程序的技術性資訊，以決定物質與設備的適當處置方式，是為其主要之目的。

NUREG-1575, Supp. 1
EPA 402-R-09-001
DOE/HS-0004

MULTI-AGENCY RADIATION SURVEY AND ASSESSMENT OF MATERIALS AND EQUIPMENT MANUAL (MARSAME)



Final

January 2009

圖 3.1 MARSAME(2009)的封面。

物質與設備包含金屬(metals)、混凝土(concrete)、工具(tools)、設備(equipment)、管路(piping)、水管(conduit)、家具(furniture)及可分散的大塊物質(dispersible bulk materials)，例如垃圾(trash)、瓦礫(rubble)、屋頂材料(roofing materials)及污泥(sludge)等。存在容器中的液體、氣體及固體，例如盛裝液體的圓桶(liquids in drums)、氣體壓力鋼瓶(pressurized gas cylinders)、封裝的土壤(containerized soil)，也包括在 MARSAME 的範圍中。

MARSAME 可供具有保健物理知識與了解統計的人員以及具有輻射防護經驗的人員研讀，其使用者可以是主管機關或地方政府之管制人員、承包商、或其他單位(例如：取得擁有及使用放射性物質的機構)，要能理解更多實務上的資料可能需要具備儀器或量測方法的專業知識以及輻射防護偵檢的規劃、驗證與執行的經驗，有必要時仍需洽詢專業輻防人員或統計專家，才能清楚了解這些規範的意義，需要強調的是即使專業性不足的人員，仍可應用 MARSAME 大部分的指引，而且 MARSAME 附錄 B (Sources of Background Radioactivity)、C (Examples of Common Radionuclides)、D (Instrumentation and Measurement Techniques)提供非常有用的資訊給較無經驗的使用者參考，若能同時獲得專業人士的協助，則可獲得更佳的應用效果。

總的來說，MARSAME 並不是要建立或取代法規、執照的要求，主管機關對於人員規劃、執行與處置偵檢可能有不同的要求，但 MARSAME 作為

一個有序的科學步驟，有助於放射性物質與設備的系統化評估與管理，從而決定較佳的處置方式，並具有彈性調整的特性。

3.1.2 MARSAME 的細部說明及其與 MARSSIM 的關聯性

MARSAME 作為 MARSSIM 之補充文件，二者在各方面均有一致性的主張與描述，MARSAME 討論偵檢物質與設備的要求，係基於級數法(graded approach)的使用，根據殘餘輻射量的多寡來評估使用輻射偵檢資源的投入，與 MARSSIM 一致，受影響區(impacted)及未受影響(non-impacted)之定義亦對應於 MARSSIM，然而由於 MARSAME 係應用於物質與設備，在 MARSSIM 中定義之外釋標準(release criterion)、導出濃度指引水平(或稱推算濃度基準限值，Derived Concentration Guideline Levels, DCGLs)、最終狀態輻射偵檢(final status survey)三個術語，在 MARSAME 中則被對應於適用物質與設備之處置標準(disposition criterion)、行動基準(action level)和處置偵檢(disposition survey)替代。二者也都是採用資料品質目標程序(Data Quality Objectives (DQOs) process)設計技術性可行之偵檢方法對目標物件提供決策依據，總體而言，二者對於受影響區與不受影響區的判斷、分級、操作上的彈性、統計技巧的應用等乃至於偵檢單元(survey unit)的設定，都有互相對應的參數與執行方法。

然而物質與設備畢竟與土壤與建物的本質上有一定的差異性，由於物質與設備的複雜程度大於土壤與建物，描述上將需要更仔細且多面向的敘述，於此同時，我們也可以預期並能理解 MARSAME 在處置面向的規範勢必多於 MARSSIM。

首先在物質與設備的描述方面，MARSAME 在 2.4 節有詳細的說明，經由目視檢查(visual inspection)、歷史紀錄審視(historical records reviews)、程序知識評估(process knowledge evaluations)方法對物質與設備進行初步物理特徵之描述，並能據此界定偵檢單元之邊界(MARSAME 3.6.1 節)而建立處置決策(MARSAME 3.7 節)。表 3.1 列出了描述被調查物質與設備的物理特徵時應該處理的四個屬性：尺寸(dimensions)、複雜性(complexity)、可接近性(accessibility)和其固有價值(inherent value)。

除了物理特徵的描述之外，還必須對物質與設備進行輻射特徵的描述，關於輻射特徵的描述，MARSAME 在其 2.4.2 節中也有詳細描述，應提供四個屬性：核種(nuclides)、活度(activity)、分佈(distribution)和位置(location)，其詳細內容如表 3.2 所示。

表 3.1 描述被調查物質與設備的物理特徵時應處理之屬性。

屬性 (Attributes)	底限資訊 (Minimal Information)	考慮的問題 (Questions for Consideration)
尺寸 (Dimensions)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 大小(總重) ➤ 形狀(總表面積) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 該物件的尺寸和形狀是否會對處置方式造成影響?
複雜性 (Complexity)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 物質與設備可能需要進行隔離來設計技術上可行之處置偵檢。 ➤ 物質與設備可能會被組合成類似的群組，並且仍然允許進行技術上可行的處置偵檢。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 是否存在隔離(例如：拆卸)可能影響該物件有用性的情形? ✓ 是否存在隔離(例如：拆卸)可能導致放射性或危險化學品釋放到非受影響地區的情況? ✓ 是否需要工程控制來防止放射性或危險化學品洩漏到非受影響區域? ✓ 是否存在固有放射性或受其化學性質改變的成分材料? ✓ 物件中是否有多種成分材料?
可接近性 (Accessibility)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 指出可使用傳統手持式測量的受影響的、難以測量的區域。 ➤ 已知或潛在的放射性核種活度或可接近和難以測量地區的放射性之間的關係。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 是否存在限制可接近性的大小或形狀問題(例如：大型龐大物體的底部)? ✓ 是否有可滲透放射性的多孔表面? ✓ 是否存在接縫、破裂或腐蝕區域等類型放射性可能滲透之難以測量的區域?
固有價值 (Inherent Value)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 正被調查的物質與設備的固有價值。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 可被重複使用或循環使用嗎? ✓ 可以被修復或整治嗎? ✓ 其替代和處置成本是多少?

表 3.2 描述被調查物質與設備的輻射特徵時應處理之屬性。

屬性 (Attributes)	底限資訊 (Minimal Information)	考慮的問題 (Questions for Consideration)
核種 (Nuclides)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 潛在關注的放射性核種清單，包括主要輻射和能量。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 放射性進入物質與設備的潛在來源和機制是什麼？
活度 (Activity)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 與物質與設備相關的預期放射性核種活度或放射性(例如平均值、範圍、變異性)清單。 ➤ 有關放射性核種活度(例如活化和腐蝕產物、分裂產物、自然衰變系列)之間已知和潛在關聯的清單。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 預期的放射性核種活度或放射性的基礎是什麼？ ✓ 已知和潛在關聯的基礎是什麼(例如：類似來源的程序知識，平衡條件的測量)？
分佈 (Distribution)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 放射性均勻分佈的區域列表。 ➤ 放射性叢集分佈的區域列表。 ➤ 分佈未知的區域列表。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 物質與設備可以分為放射性分佈均勻的部分嗎？ ✓ 是否有小區域活度增加情形？
位置 (Location)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 說明放射性是表面的、體積的還是兩者皆有。 ➤ 說明表面放射性是固定的還是可移除的。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 體積活度是否均勻分佈？ ✓ 是否存在梯度？ ✓ 是隨機或叢集性的活動？

在進行任何初步調查後，應準備物質與設備的最終描述。對於物質與設備的描述應該考慮表 3-1 和表 3-2 中的資訊，並提供足夠的資訊來設計處置偵檢。

物質與設備的處置是設計處置偵檢的關鍵因素。MARSAME 廣泛地考慮了兩種處置選項：外釋 (維持、移除、管制下轉移)和封鎖(加強輻射管制

或決定不接受來自另一單位的輻射管制物品)，也描述其各自對應之偵檢。外釋偵檢用於確定放射性控制是否可以減少、取消、或保持在當前等級，還是轉移給其他合格的使用者；封鎖偵檢用於啟動放射性控制，或決定當前的放射性控制是否足夠。藉由偵檢結果來決定處置方式。

MARSAME 在 2.5 節中提供了 9 個外釋處置的範例：

1. Reuse in a controlled environment
2. Reuse without radiological controls (i.e., clearance)
3. Recycle for use in a controlled environment (i.e., authorized disposition)
4. Recycle without radiological controls
5. Disposal as industrial or municipal waste
6. Disposal as low-level radioactive waste
7. Disposal as high-level radioactive waste
8. Disposal as transuranic (TRU) waste
9. Maintain current radiological controls

若是採用封鎖處置，MARSAME 則提供了 4 個範例：

1. Remove M&E from general commerce and initiate radiological controls
2. Decide to accept M&E for a specific application
3. Decide NOT to accept M&E for a specific application
4. Continue unrestricted use of M&E (no action)

處置選項的選擇應基於初始評估(initial assessment, IA)結束時所提供的各種資訊，處置選項也定義了行動基準(MARSAME 3.3 節)，將與物質與設備相關的預期放射性核種活度或放射性水平與行動基準進行比較，以確定

經過處置偵檢後的物質與設備是否將被控制(controlled)或不受控制(uncontrolled)。相較之下，MARSSIM 僅包含有(或無)條件外釋或不能外釋，相對單純得多。

MARSAME 經過初始評估蒐集現有的物件資訊並進行研究分析，此步驟對應於 MARSSIM 的廠址歷史評估(Historical Site Assessment, HSA)，提供物質與設備初始之分類為受影響區及未受影響區。

而在 MARSAME 的 IA 程序中，有針對特定目地在一關鍵位置進行量測的特殊行為，稱之警戒量測(sentinel measurement)，其主要目的是蒐集額外的資訊，作為考量並執行進一步行動的決策依據，驗證程序知識的假設，提供判別物質與設備是受影響或未受影響額外的證據，以及分辨一般商品中的天然放射性物質(例如：肥料、磷酸鹽、爆破砂的砂礫)的違法或因疏忽而導致的運送。這種額外的偵檢行為，在 MARSSIM 中則並未提及。

對於物質與設備的適當處置方式，MARSAME 應用資料生命週期(Data Life Cycle)作為物質與設備處置偵檢之設計，提供規劃(planning, MARSAME 第 2、3、4 章)、執行(implementation, MARSAME 第 5 章)、評估及決定(data assessment and decision making, MARSAME 第 6 章)等階段程序的具體技術性資訊，決定是否外釋(包含解除管制)或進行封鎖。

此外，MARSAME 在第 5.5 至 5.8 節中討論建立不確定度、可偵測性、以及定量性(Measurement Quality Objective, MQOs)以檢驗量測方法能符合

已經建立的成效目標，若掃描偵檢(Scan-only Surveys)或現場偵檢(*In-situ* Surveys)符合 MQOs，物質與設備可依據其結果進行處置，MARSAME 陳述「MQOs 可被視為整體計畫 DQOs 的量測部分」，而 MQOs 為「符合偵檢目標所需要的量測方法的特徵」，在系列導則和文獻中是一個新的詞彙，MARSSIM 對此並無相關描述。其中的關鍵詞是「量測方法(measurement method)」，因為這直接關係於處置偵檢設計的成功發展，而在 MARSAME 中，量測方法係指儀器(例如：蓋格計數器、碘化鈉偵檢器)與量測技術的結合(例如：掃描(scan)偵檢、場區內(*in situ*)偵檢、樣本蒐集等)，獨立的實驗室分析也是很重要的後續過程。而良好的 MQOs 建立於六個重點：(1) 量測方法的不確定度(Measurement Method Uncertainty); (2) 偵測能力(Detection Capability)/MDC; (3) 合格能力(Qualification Capability)/MQC; (4) 範圍(Range); (5) 特異性(Specificity); (6) 耐用性(Ruggedness)，詳細說明可參閱 MARSAME 第 5 章。

MARSAME 第 6 章提供評估與決策階段的方法，其內容為審查既有的數據、計算統計量、數據繪圖(6.2 節)，以利使用者進行分析；個別項目的處置依據個別量測的數據與灰色區間上限(the Upper Boundary of the Grey Region, UBGR)比較結果(6.3 節)；6.4 節說明信心水平；6.5 至 6.7 節說明統計檢定，此部分和 MARSSIM 均有雷同之處；6.8 節說明依據偵測結果如何

做出處置決策；以及若選擇的處置選項判定為「不接受」時應如何處理(6.9 節)；最後提到決策證據(資料)的文件化(6.10 節)。

MARSAME 第 7 章詳細討論 MQOs、量測不確定度、最低可測濃度 (Minimum Detectable Concentrations, MDCs) 以及最低可定量濃度等有關偵檢設計基本的統計概念與假設檢定，此部分需要一些基本統計知識才能徹底理解。也有對掃描之 MDCs 計算之詳細說明，這些計算將有助於理解介紹實際範例之第 8 章，該章中之實際範例包括有物質、設備、核種、與處置選項。

整個 MARSAME 導則的詳細內容，可視為一個完整的 DQOs 過程，其流程示意圖如圖 3.2 所示。

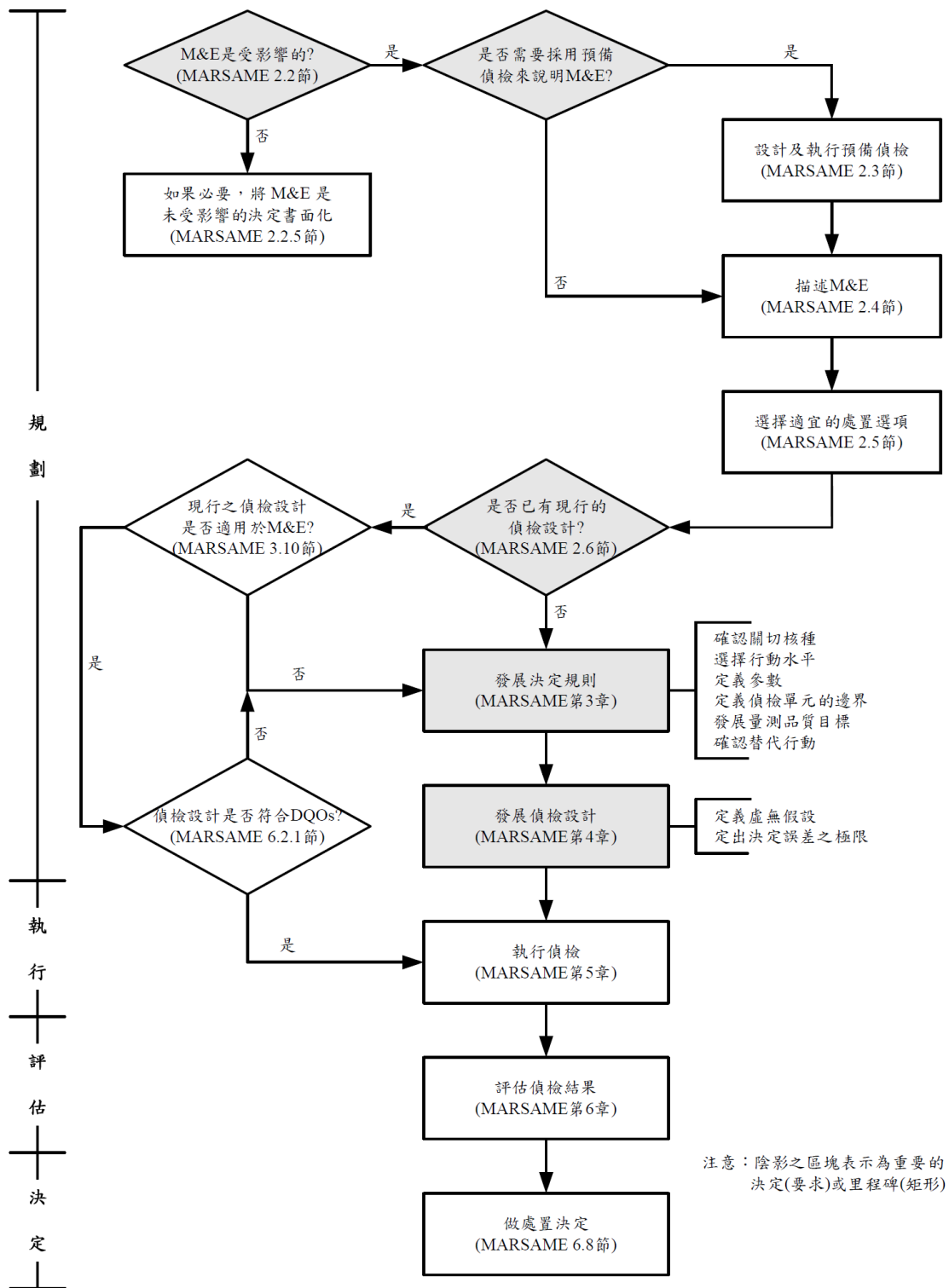


圖 3.2 MARSAME 處置偵檢的資料生命週期流程圖。(武及蘭，「物質及設備的處置偵檢與評估簡介」，台電核能月刊，101 年 1 月)

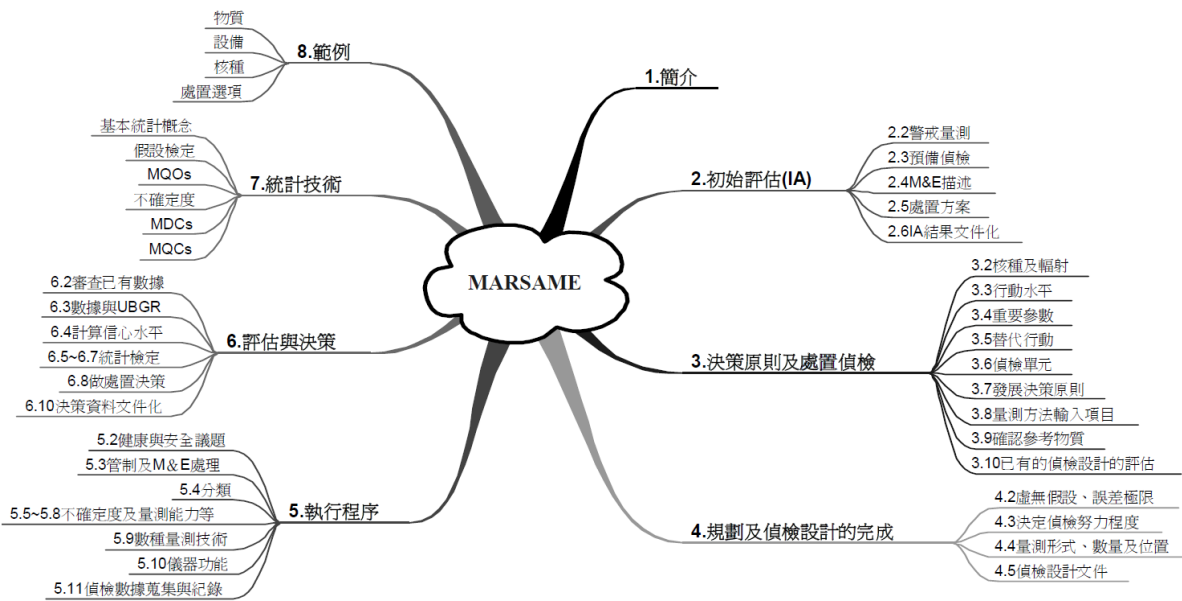


圖 3.3 MARSAME 的章節構成。(武及蘭，「物質及設備的處置偵檢與評估簡介」，台電核能月刊，101 年 1 月)

MARSAME 在本文的 8 個章節外(如圖 3.3 所示)，尚有 5 項附錄，其中 B、C、D 三個附錄在前面有提到是給較無經驗的使用者參考的基本背景知識，附錄 A 是 MARSAME 所需的統計表，附錄 E 則說明物質與設備處置準則相關的行動基準來源列表。MARSAME 各章節的構成如下：

- | | |
|-----------|---|
| Chapter 1 | Introduction and Overview |
| Chapter 2 | Initial Assessment of Materials and Equipment |
| Chapter 3 | Identify Inputs to the Decision |
| Chapter 4 | Develop a Survey Design |
| Chapter 5 | Implement the Survey Design |
| Chapter 6 | Evaluate the Survey Results |
| Chapter 7 | Statistic Basis for MARSAME Surveys |
| Chapter 8 | Illustrative Examples |

Appendix A	Statistics Tables
Appendix B	Sources of Background Radioactivity
Appendix C	Examples of Common Radionuclides
Appendix D	Instrumentation and Measurement Techniques
Appendix E	Disposition Criteria

3.1.3 MARSAME 資料品質目標的執行步驟和範例分析

MARSAME 多年來被用於物質與設備的外釋管制，雖然沒有像 MARSSIM 那樣受歡迎，但它是設計和進行物質與設備外釋偵檢的參考，任何參與計畫與執行外釋偵檢的人員都需要對其進行詳細研讀，然而 MARSAME 的本身卻如同一具甚為複雜的機械結構，若要妥善使用，必須確實理解其在第 1 章(Introduction and Overview)所提供之各種路線圖與流程圖。

物質外釋有下列幾項主要活動與考量：

1. 確認有足夠的偵測靈敏度(與外釋條件相比)。
2. 需考慮物質的來源(經由程序知識)。
3. 有受過訓練的技術人員，依循經過核可的調查步驟。
4. 評估對應於外釋條件的調查資料。
5. 將調查外釋的過程和結果進行文件存檔(須包含物質最終是如何處置及送往何處)。

MARSAME 並非如 MARSSIM 那樣泛用，因其對象為多樣種類的物質與設備，並未有一致的外釋規則，在 MARSAME 第 3 章介紹的 DQOs 程序是固體物質外釋偵檢的基礎，在許多種調查方式中使用各種量測技術和儀器，DQOs 程序為決定基於釋放固體物質最適合的調查協定、可用的儀器設備、以及合適的外釋標準提供了策略基礎，有效的調查設計考慮固體物質的可用程序知識，舉例來說，物質可能有難以接近的表面或是位於難以接近的區域，影響該固體物質外釋的相關特性便包含材料的物理描述、污染的可能性、該污染的性質以及難以到達的區域的程度。總體的目標是就外釋調查策略的選擇和正確應用提供指引的方針。

MARSSIM 在制定調查策略時所依循的 DQOs 程序主要分為七個步驟：

1. State the Problem (陳述問題)
2. Identify the Goal of the Study (指出研究目標)
3. Identify Information Inputs (指出資訊的輸入條件)
4. Define the Boundaries of the Study (定義研究邊界)
5. Develop the Analytic Approach (發展決策規則與執行方式)
6. Specify Performance or Acceptance Criteria (指定性能或驗收標準)
7. Develop the Detailed Plan for Obtaining Data (開發獲取資料的詳細計畫)

MARSAME 依循的 DQOs 程序和 MARSSIM 相似，以下藉由一個案例來探討 MARSAME DQOs 程序的步驟和應用。

該案例描述使用 DQOs 程序來設計對於一棟建築物基於廢棄物處理考量的特性調查。這棟建築「含有數個熱室且計畫將要進行拆除」，建築的拆除過程中需要考慮「輻射外釋的最小化並維持熱室結構的完整性」，因此「輻射源必須適當加以分析調查，然後加以移除或穩定化，以達到最小環境外釋與適當的廢棄物處理認證」。

透過特性調查資料評估而得的危害，可以了解與該建築物相關的物理，化學和放射性危害，這些都是必要的評估，並透過 DQOs 程序，該棟建築物特性調查計畫的設計步驟如下：

Step 1: State the Problem 陳述問題

需求數據準備拆除計畫、評估個人防護設備要求、分離廢棄物、符合化學和放射性標準，並確保滿足處置場所的適當廢棄物接收標準。

Step 2: Identify the Decisions 指出決策

本案例中的決定側重於必要的放射性數據，以確定在拆除前需要拆除或封裝的區域和組件，以及放射性/化學數據以製定在拆除和處置場廢棄物集散期間可能釋放的估計源項。可能需要的決定如下：

1. 是否有任何結構表面或系統組件需要整治，以符合廢棄物接受條件 (Waste Acceptance Criteria, WAC) 限值？
2. 拆除的碎片是否可以適當地隔離以進行廢棄物處理？
3. 結構碎片和系統組件的廢物數量有多少？

4. 結構表面及系統組件內部殘餘的污染能否被穩定控制? (拆除作業能否進行或需要額外的整治措施?)
5. 每種決定需要多少樣本分析?
6. 需要擬定多階段的特性調查計畫嗎?

Step 3: Identify Input to Decisions 指出對決策的輸入條件

1. 廠址歷史評估(Historical Site Assessment, HSA)與來自現有調查的範圍調查(scoping survey)數據產生的結果，提供了有關污染物的信息，包括濃度和分佈。
2. 放射性、化學、含石棉等物質的 WAC 限值。
3. 結構表面和系統組件能否被進行特性調查和(或)整治; 拆除後的狀況; 無法進行特性調查與整治區域的性質條件。
4. 熱室結構完整性及拆除前後是否能進行整治措施。
5. 基於放射性物質的可能釋出的模型，計算空浮濃度的行動基準(action level)，此行動基準係針對露天拆除時對人體和環境防護。

Step 4: Define the Study Boundaries 定義研究邊界

調查單位(survey unit)或基於程序知識(process knowledge)的區域分組(area grouping); 具有類似性質和污染程度的區域; 根據運營歷史，結構條件/完整性; 通風管道、污水管路系統。

Step 5: Develop a Decision Rule 建立決策規則

如果建物表面與(或)系統組件具有廣泛污染等級大於 WAC，則計畫執行整治與(或)穩定化污染物，否則就準備不經除污與拆除(D&D)的處置。

如果估計總源小於 5 Ci (1.85×10^{11} Bq)，則計畫使用霧化/噴灑進行露天拆除以控制排放；否則考慮使用穩定技術來固定污染物，並在裝有 HEPA 過濾的密閉結構或外殼內進行拆除作業。

Step 6: Specify Decision Errors 指定決策誤差

決策誤差是基於 WAC 現值。DQOs 小組決定在 WAC 限制的 20%範圍內是可以接受的，並有 50%的可能性超出估計值的上限或下限。對常態分佈的樣本空間而言，引用 Walpole 與 Myers 合著之 Probability and Statistics for Engineers and Scientists(1985)中的公式可以計算為：

$$n = \frac{z^2 s^2}{d^2} = \frac{(0.67)^2 (1.6^2)}{(20\%)^2} = 29 \quad (1)$$

n: 樣本數(number of samples)

z: 對應於給定機率的標準常態變數(standard normal deviate corresponding to given probability, 0.67 for 50%)

s: 樣本標準差(sample standard deviation, 1.6 for example)

d: 信心水準(confidence level, 20%)

團隊就露天拆除的總源項的決策錯誤進行討論，最終同意根據其設定的決策誤差計算出的最小樣本數足以計算總源項。

Step 7: Optimize the Survey Design 優化調查設計

安排多個 DQOs 會議貫穿整個過程並制定特性調查計劃。決議將該棟建築的特性調查計劃分兩階段進行。

PHASE 1：拆除決策(露天或非露天)

1. 建物可接近性(accessibility)評估
2. 對應建物輻射等級的輻射劑量率量測
3. 進行系統掃描以確定所關注的殘留放射性沉積物
4. 擦拭或以其他方式取樣以確定超鈾和其他污染物
5. 目視檢查多氯聯苯、鉛和石棉等物質

PHASE 2：處置決策(WAC 條件)

1. 將建物碎片分散到受控制的放置區域中的廢物場
2. 對建物碎片進行掃描與表面活度測量以決定放射性活度等級與濃度
3. 如果需要的話，進行擦拭或以其他方式的取樣
4. 為化學品取樣以確保鈹、多氯聯苯、鉛和石棉符合 WAC 標準

這是一個相當初步的特性調查設計步驟，實際進行前須經過多次 DQOs 程序討論會議，才能將整個特性調查計畫完整制定，尤其對於核能電廠這類型龐大且複雜的設施，其複雜程度遠遠超過拆除上述案例之單純建築物，更需多方討論，妥善評估，以科學及統計的技巧增進特性調查計畫的準確性。

3.2 NUREG-1761 之物件分類與偵檢單元

在本報告 3.1.2 節中有提到固體物質的特徵描述(對應於 MARSAME 第 2 章)，其中包括物理特徵和輻射特徵兩種描述，材料的物理特徵是指材料的大小和材料組成等屬性，它會直接影響處理問題以及外釋調查方法的選擇和偵檢單元邊界的確立，尤其物質與設備並不像建築物與土壤可以直接以面積或表面積劃分偵檢單元，主要還是以物理特徵相似之物件進行分類，然後依據其特性使用不同的偵檢方法，舉例來說，大片的金屬可以使用傳統手持式偵檢儀器，較小的固體物質(含有很多小而規則的碎片)可能較適用於輸送帶量測或進行 *In-toto* 量測(係指對偵檢單元中全部的物質與設備進行量測，優點是可取得一個代表性的平均值，相對缺點是無法對可能的熱點進行分辨)，而混凝土樓板這類型物件則適合使用大面積氣體比例計數器進行表面掃描，另外還有許多物件分類則必須進行代表性樣本之取樣並送交實驗室分析，因此物件分類對於物質與設備的外釋偵檢是非常重要的步驟。

固體材料可被視為由以下類別之一所組成：(1) 許多小而規則的碎片；(2) 獨立、大片的設備或金屬；(3) 可置放於托盤中的中型尺寸物品或物質。

在某些情形下對物質進行一些前處理有益於調查作業的進行，固體物質經過熔融、斬碎、切割等處理後會變得更為均勻，例如銅線經過切碎後放在輸送帶上量測會比直接使用未處理的銅線要來得更適合。在物件的處理過

程中若能配合除污技術(熔融或噴砂)，那麼物件本身除了更均勻之外，其潛在的放射性也會降低。

對於物質外釋調查作業，偵檢單元的定義是一項技術性的挑戰，外釋調查的統計設計是以偵檢單元為核心，在 MARSSIM 裡面很單純的針對土壤與建物的面積或表面積來表示其偵檢單元，但對物質與設備來說，偵檢單元可能是該項設備的表面積、大塊物體的體積、小物品的數量、管線的長度等等，如同 MARSSIM 的偵檢單元概念，必須堅持介於偵檢單元與輸入模型以建立 DCGLs 的關係。

對於物質與設備的偵檢單元通常也以批量(batch)來表示，若以輸送帶進行外釋偵檢，偵檢單元也可以單位掃描速度下物件的數量加以表示(例如：kg/s)，另外像是少量大型的金屬設備，偵檢單元就可以簡單以該設備本身作為一個偵檢單元(例如大型電子控制面板)，其呈現方式視物件分類方式與偵檢方式而有所不同，完全基於 DQOs 程序如何進行，並考慮物質的特性、外釋調查技術的選用、以及其潛在污染。



圖 3.4 成堆放置等待外釋調查之拆除物件。圖中為裁切為特定長度的大口徑管道，調整至指定大小置放於托盤或棧板整齊擺放。(Eric. W. Abelquist, Decommissioning Health Physics: A Handbook for MARSSIM Users, 2nd edition)

圖 3.4 所示為一成堆放置等待外釋調查之拆除物件，各物件被切割或以適當工法調整至指定大小，置放於托盤或棧板上整齊擺放，明確標示該物件之編號或屬性，等待偵檢人員進行量測。

NUREG-1761 將各種固體物質的組成成分以及偵檢單元尺寸類型納入考量，描述了常見的有外釋考量的物質與設備，為設計與執行外釋調查提供一個非常有用的導則，這些物質與設備的相關說明如下：

1. Concrete rubble (混凝土瓦礫)：來自拆除建築與結構，具有土壤般一致性的破碎混凝土，強化鋼筋已被移除。
2. Concrete slab (混凝土樓板)：如圖 3.5，厚度 30 cm 的中密度(2.4 g/cm^3)混凝土樓板，表面尺寸為 $1.2 \text{ m} \times 1.8 \text{ m}$ ，若預期有內部污染，需要進一步外釋調查技術，例如鑽心取樣等技術。



圖 3.5 進行外釋偵檢的混凝土樓板。

3. Small-bore pipe (小口徑管道)：直徑小於 6 cm，來自於管路系統與電路導管，假定被截斷為長度 1.2 - 1.8 m，管道內部不可為傳統量測儀器進入。

對於直徑 6 cm、長度 1.5 m 的小口徑管道，偵檢單元之外部管道表面積為 17 m²。

4. Large-bore pipe (大口徑管道)：如圖 3.6，直徑大於 6 cm，來自管路系統，假定被截斷為長度 1.2 - 1.8 m，管道內部可為傳統量測儀器進入。對於直徑 30 cm、長度 1.5 m 的大口徑管道，偵檢單元之外部管道表面積為 72 m²。



圖 3.6 被截斷進行外釋偵檢的大口徑管道。

5. Structural steel (結構鋼)：輕重不等之鋼材，可能需要調整大小以放入一個邊長 1.2 – 1.8 m 的托盤，包含 I 型鋼、結構鋼、平台、管道、鋼槽或其他容器的結構材料。
6. Copper wire (銅線)：包含絕緣或未絕緣線(直徑大於 0.6 cm)、銅線圈、電力母線等。重量 0.75 公噸，可使用 *In-toto* 量測(對偵檢單元中全部的物質與設備進行量測)，進行解除管制偵檢。
7. Copper ingots (銅錠)：減容後的銅塊，整堆攤開至 5 cm 高之後的的總面積為 15 m²。可使用容器裝盛，如圖 3.7 所示。



圖 3.7 使用容器裝盛的銅碎片。

8. Soil (土壤)：土壤或類似土壤的物質，細分網格狀堆置，攤開至 15 cm 高後的總表面積為 50 m²。
9. Large items for reuse (大型回收物)：變壓器(如圖 3.8 所示)、特殊儀器、大型設備、電子控制板面以及其他整體系統，需要拆卸以接近其內部表面，但是需要考慮這些設備的功能價值，因此通常不進行切割，這些大型物件的一般重量為 1.5 公噸。



圖 3.8 準備量測作為回收使用的變壓器。

10.Scrap metal pile (廢金屬堆)：如圖 3.9，非一般組態的混雜金屬，可調整大小置放於托盤內，一般重量假設為 1 公噸，表面積為 10 m²。



圖 3.9 準備進行量測的廢金屬堆。

11.Scrap equipment and small items for reuse (廢儀器與小型回收物)：包含小型幫浦、馬達轉子(如圖 3.10 所示)、手工具、電動工具、鷹架等物品，通常是可操作使用的外釋，內部表面需要經過拆卸過程才能接近，每個偵檢單元為 1.5 公噸。



圖 3.10 外釋前可能需要拆卸的馬達轉子。

無論如何，偵檢單元的選擇必須考慮物質的特性、外釋調查技術的選用、以及任何偵檢單元大小與 DCGLs 模型建立的關係，物質偵檢單元的大小是物件分類的函數，也就是說包含 class-1 偵檢單元的物質數量會小於 class-2 或 class-3 偵檢單元，NUREG 1761 的 Table 4.2(如表 3.3 所示)中舉例了數種典型固體物質偵檢單元大小，對於塊狀物體(Bulk materials)，偵檢單元大小介於 1 至 7.5 m³；其他大型儀器和物質，其偵檢單元即為自己本身的大小；小型可裝盛物體的偵檢單元大小則介於 10 至 100 m²，其單位與塊狀物體不同，是用表面積作為單位。

表 3.3 典型固體物質偵檢單元之大小(NUREG 1761 Table 4.2)。

Solid Materials	Examples	Survey Unit Sizes
Bulk materials	soil, concrete rubble, copper ingots	1 to 7.5 m ³ (smaller for CSMs)
Few, large pieces of equipment and material	concrete slabs, large items	item itself
Small items on a pallet	small- and large-bore pipe sections, structural steel, equipment, scrap metal, copper wire	10 to 100 m ²

3.3 美國國家標準協會 ANSI/HPS N13.12 簡述

美國國家標準協會(the American National Standards Institute , ANSI)批准了一項外釋殘留放射性物質材料的標準 ANSI/HPS N13.12 (1999), “Surface and Volume Radioactivity Standards for Clearance”, 是解除管制標準的另一參考資料。該標準中所使用的「解除管制(Clearance)」是指材料從管制單位的控制轉移到沒有任何其他管制控制的使用或處置。為了更進一步了解解除管制，我們必須考慮輻射物質進入(Entry to)管制領域、離開(Exit from)管制領域、以及跳過(Bypass)管制領域，其詳細流程如圖 3.11。

其中輻射作業(Practice)並未定義在 ANSI 標準中，但該詞為國際放射防護委員會(International Commission on Radiological Protection, ICRP)引進並進行修訂，根據國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)的說法，輻射作業被定義為「任何人類活動，會引入額外曝露源或曝露途徑、或將曝露源延伸至更多人、或改變來自既存曝露源的曝露途徑網路，以增加

曝露或造成曝露增加或曝露人數增加的可能性(IAEA 1996b)」，例如：核能發電、使用 X 光做醫學診斷、或使用在煙霧偵檢器中使用放射性核種。

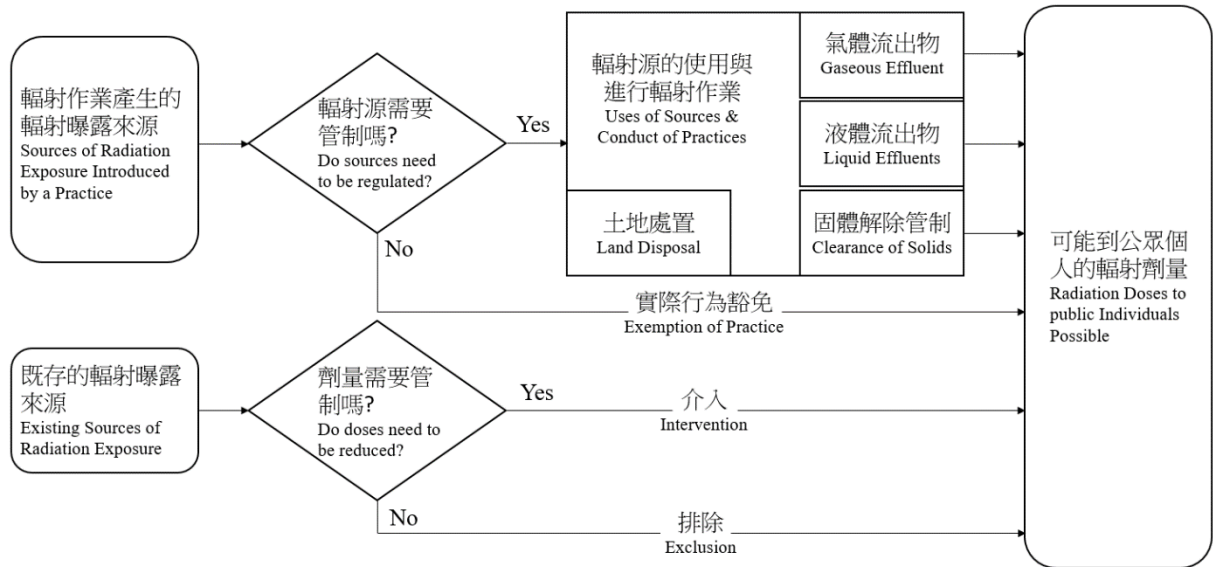


圖 3.11 輻射曝露來源的進(Entry to)、出(Exit from)與跳過(Bypass)管制。

豁免(Exemption)是「由管制權責單位指定放射性物質或輻射源的特定使用可不受監管控制，因其所造成之輻射對個人的風險與集體放射性影響足夠低」。豁免的實際行為可以進行規範，但權責單位選擇不這樣做，例如在製造假牙後不控制搪瓷過程中的鈾元素，因其影響很低。

排除(Exclusion)在 ANSI 標準中被定義為「由監管當局指定接觸的程度或可能性基本上不可控制」。其給出的例子是地表宇宙輻射、體內 K-40 的輻射、和原料中的天然放射性核種。

另外對於背景(Background)，ANSI 標準中定義為「環境中的自然輻射或放射性物質」，但不包括「使用技術增強的天然放射性物質(naturally

occurring radioactive material that has been technologically enhanced)」，DOE Code of Federal Regulations 10 CFR 835 中採用正面表述的方式定義背景包含「未被技術增強的天然放射性物質(naturally occurring radioactive materials which have not been technologically enhanced)」，二者略有差異。

ANSI 標準給出了 50 種核種的導出篩選水平(Derived Screening Levels, DSLs)，單位為 Bq/g 或 Bq/cm²，殘留在 DSL 以下的表面和體積放射性等級的物品或材料可以被外釋，管理上可以不考慮它們的殘留放射性。

該標準確定了 10 μ Sv/y (1 mrem/y)總有效劑量(total effective dose, TED)高於背景的主要劑量條件；使用這個條件，該標準分別將 50 個放射性核種指派給 4 個群組(分別為體積和表面 DSL 的 0.1, 1, 10 或 100 Bq/g 和 Bq/cm²)之一。這個分組作法是在保守但不是最壞情況的基礎上進行的，並且考慮了可檢測性和合理抑低原則。DSL 還以 pCi/g 和 dpm/100 cm² 的傳統單位呈現，並四捨五入為一個有效數字。

美國能源部 DOE 使用 ANSI/HPS N13.12 的 DSL 值替換 10 CFR 835 附錄 D 中「職業輻射防護(Occupational Radiation Protection)」和 DOE Order 5400.5 圖 IV-1 「公眾輻射防護(Radiation Protection of the Public and the Environment)」中的數值，這種作法是取其合理、謹慎和成本效益，可確保 DOE 運作的操作和環境輻射防護計劃的一致性。ANSI 所列的 TED 不是絕對的限制，該標準允許更高級別的物质外釋，在經過個案處理(case-by-case)

的基礎上可以合理進行調整，當可以確保在暴露於多種來源的情況下，依照合理抑低原則提供足夠的安全邊界，低於公眾劑量限值 1 mSv/y (100 mrem/y) TED，這種彈性調整的特性，同樣也是 MARSAME 強調的重點。

ANSI/HPS N13.12 最初於 1999 年制定，於 2013 年進行了更新，2013 版的內容修訂主要基於 IAEA-RS-G-1.7 (2004)，採納了 IAEA 體積濃度的活度濃度值(源自於放射性核種活度(Bq/g)的暴露途徑分析，沒有評估表面污染)，並將它們擴展到表面積-質量比為 1:1(cm²/g)的表面污染物，並指出當表面積-質量比超過 1 時，篩選水平應進一步降低(ANSI 建議相較於片狀物品應降低 5 倍)，指定限值 0.1、1 和 10 Bq/cm² 分別對應超鈾、β-γ和提議難測授權限制的授權限值。ANSI/HPS N13.12-2013 為特定分組的放射性核種的表面篩選水平與體積篩選水平，指出其外釋限值，如表 3.4 所示。

表 3.4 ANSI N13.12-2013 的篩選水平。

(核種群組)	(表面篩選水平)	(體積篩選水平)
Radionuclide Group	Surface SL (dpm / 100 cm²)	Volume SL (pCi/g)
Group 1: High-energy gamma, radium, thorium, transuranics, and mobile beta-gamma emitters (e.g., ²² Na, ⁴⁶ Sc, ⁵⁴ Mn, ⁵⁶ Co, ⁶⁰ Co, ⁶⁵ Zn, ¹²⁵ Sb, ¹³⁴ Cs, ¹⁵² Eu, ¹⁵⁴ Eu)	600	3
Group 2: uranium and selected beta-gamma emitters (e.g., ⁵⁷ Co, ⁵⁸ Co, ⁵⁹ Fe, ¹¹³ Sn, ¹²⁴ Sb)	6,000	30
Group 3: General beta-gamma emitters (e.g., ⁷ Be)	60,000	300
Group 4: Low-energy beta-gamma Emitters (e.g., ³ H, ⁴⁵ Ca, ⁶³ Ni)	600,000	3,000
Group 5: Low-energy beta emitters (e.g., ⁵⁵ Fe)	600,000	30,000

若依我國法規所使用之單位進行呈現(1 pCi = 0.037 Bq, 1 dpm = 1/60 Bq) , 並取一位有效數字表示, 可將表 3.4 進行中譯並改寫為表 3.5。需要注意的是群組 4 和群組 5 的體積篩選水平相差 10 倍, 但表面篩選水平相同。

表 3-5 ANSI N13.12-2013 的篩選水平(以新式單位呈現)。

核種群組	表面篩選水平 (Bg/cm ²)	體積篩選水平 (Bg/g)
群組 1 ：高能 γ 、鐳、釷、超鈾元素、移動 β - γ 射源 (例如： ²² Na, ⁴⁶ Sc, ⁵⁴ Mn, ⁵⁶ Co, ⁶⁰ Co, ⁶⁵ Zn, ¹²⁵ Sb, ¹²⁹ I, ¹³⁴ Cs, ¹³⁷ Cs, ¹⁵² Eu, ¹⁵⁴ Eu)	0.1	0.1
群組 2 ：鈾與選定 β - γ 射源 (例如： ¹⁴ C, ⁵⁷ Co, ⁵⁸ Co, ⁵⁹ Fe, ¹¹³ Sn, ¹²⁴ Sb)	1	1
群組 3 ：一般 β - γ 射源 (例如： ⁷ Be)	10	10
群組 4 ：低能量 β - γ 射源 (例如： ³ H, ⁴⁵ Ca, ⁶³ Ni)	100	100
群組 5 ：低能量 β 射源 (例如： ⁵⁵ Fe)	100	1,000

3.4 物質與設備等固體廢棄物之估算程序

經過 MARSAME 的各項評估程序, 設計特性調查與外釋調查程序, 所產生的後續資料可供細部分析, 作為廢棄物數量的估算依據, 若各項量測方法未能給予廢棄物估算程序正確的輸入, 則廢棄物估算將與實際結果產生較大誤差, 影響後續廢棄物處置方式的設計。

除役核能電廠放射性廢棄物的估算有一定程序, 首先應先界定放射性廢棄的範圍, 係指電廠永久停機後除役期間所產生之放射性廢棄物, 不包括永久停機前產生的例行運轉廢棄物與用過核子燃料, 然後針對可能受輻射污

染系統、除役可能產生放射性廢棄物與衍生之二次廢棄物，進行廢棄物活度與總量之估算，需要預備校正合格且性能正常之輻射偵測與計測儀器、紀錄圖表，並要求人員須遵照輻射防護相關程序書與規定，於此前提之下進行放射性廢棄物產之估算。

依據作業程序書進行廠址輻射特性調查，是廢棄物估算之主要依據。藉由偵檢包分類量測，針對不同區域、建築物與設備、廠界內山區道路(廠房外部環境)、受影響與不受影響之系統管線進行偵測，偵測項目包括:直接輻射偵測、表面污染偵測、總 β/γ 掃描、系統管線液體及環境水土壤等樣品取樣，偵檢單元之分類與大小則依 MARSSIM/MARSAME 導則加以評估，藉由統計方法來確定是否有足夠的採樣。

對於不同廢棄物種類，建立不同類別廢棄物 γ 核種與 β/α 核種成分關聯性，透過廠址特性調查，由不同廢棄物源取得代表性樣品，進行個別核種放射化學分析，得到核種放射性活度分析結果，並依結果計算相同廢棄物源之相關核種比例因數，建立比例因數資料庫，然後針對廢棄物進行 γ 能譜儀計測，得到關鍵核種 Co-60、Cs-137 之活度，據以計算完整之活度資訊。

當電廠仍處於運轉狀態時，可以池水淨化樹脂之放射化學分析數據，以獲得淨化系統之比例因數，再對照參考電廠之比例因數，利用其淨化系統與其他比例因數間之關係，轉換為其餘廢棄物源之比例因數。

若於電廠停止運轉後，抽樣進行資料修正與比對，則可獲取更精確之廢棄物產量估算。

針對廠房內之系統、結構、組件，輔以廠區布置圖，進行物質與設備之盤點，其調查範圍包括：廠區內之機組廠房、廢棄物貯存庫及任何可能受輻射污染之區域，相關參考資料可為最終安全分析報告、竣工報告、歷年大修紀錄、管線閥件設備清單、各類圖面、3D 模型等。

利用計算機程式進行廢棄物尺寸模擬，建立各系統污染組件接觸劑量率與內部表面污染程度的關係，利用輻射特性調查所量測之劑量率推估並換算內表面的污染程度，再乘以表面積取得放射性活度，然後透過完成建置之不同廢棄物種類比例因數，推算不同廢棄物之核種活度與組成。

對於爐心活化組件，以計算機程式模擬中子通量與核種遷移，進行中子活化放射性廢棄物活度分析，再依照活度估算結果，將放射性廢棄物分類。

最後再彙整廢棄物盤點與污染廢棄物活度估算結果，加總得到不同種類放射性廢棄物總量，以桶為表示單位，完成放射性廢棄物總量推估，並與參考電廠比較。

在文件管理與保存方面，應詳實填寫廢棄物數量盤點資料庫，作為日後比較分析與查核，並依品保程序要求制定文件保存期限。

第四章 國際案例與相關計算範例分析

4.1 Humboldt Bay 發電廠及其 MARSAME 調查程序之策略



圖 4.1 美國 Humboldt Bay 發電廠。

在位於美國加州 Eureka 的 Humboldt Bay 發電廠(Humboldt Bay Power Plant, HBPP)(圖 4.1)的除役程序中，有很多方面都應用了 MARSAME 的方法，該過程針對特定廢物流進行定制，並提供更一致的分級方法來確定物料的處置方式。處置選項包括廢棄物外釋的再使用、回收和多種廢棄物處理替代方案，這些替代方案經優化後可以更好地管理項目成本。該過程已成功應用於建築拆除碎片，鋼材回收，混凝土，土壤等常見的物質和設備。

HBPP 有一座 63 MWe 的自然循環式沸水式反應器，運轉時間在 1963 至 1976 年，這座反應器是 HBPP 的 3 號機，其 1 號機和 2 號機為傳統石化燃料發電廠，其功率分別為 52 及 53 MWe，另外還有兩座功率 15 MW、裝載於拖車上的移動式緊急發電機。

北加州的能源供應計畫中要求關閉 HBPP 的兩個石化燃料機組關閉並移除，且將核能機組除役在安全貯存(SAFSTOR)的狀態(1986 年)，現今 HBPP 的發電功能已由 Humboldt Generating Station (HBGS)取代，這是一座擁有 10 部機組的天然氣發電站。

在長達 30 年以上的 SAFSTOR 和除役先期作業的各項調查作業完成後，2009 年五月起開始進行 3 號機的全面除役，前述所提之 1 號機和 2 號機則已於 2010-2011 年進行拆除，HBPP 的汽機建築於 2012-2013 年間拆除。負責拆除的 Pacific Gas and Electric (PG&E)公司於 2013 年 7 月授與一項大型合約，將於 2014 年間由系統移除階段(System Removal Phase)轉換至土木工程計畫(Civil Works Projects Phase)，其工作範圍亦如同 1 號機和 2 號機的拆除計畫一樣受到完整的界定。這項授權合約中指出四項主要工作範圍：(1)核子設施拆除與開始挖掘；(2)進出口運河修復；(3)辦公設施復原；(4)最終廠址恢復，授與一個單一承包商，土木工程計畫階段包括：一個單一土木承包商，可以協調混凝土的除污、用過燃料池及襯管拆除、上下結構的清除。PG&E 公司拆除反應器壓力槽組件、移除電廠系統、拆除汽機建築、以及從

業主自我執行工作過渡至監督主要土木工程承包商的實際經驗，應是值得台電對核能電廠除役拆除作業的參考。

在 MARSAME 的應用方面，HBPP 有一套標準作業流程程序書(HBAP RCP-6Q)，並據以設計一份制式化的文件表格，對各項物質與設備的外釋作業進行評估。這份 PG&E 程序文件在 2010 年 3 月提出，有經過美國 NRC 核備，其標題為「MARSAME Disposition of Materials and Equipment」，其內容是一份對 MARSAME 程序的說明及執行時應注意的事項，對各個要項有簡潔說明，以下摘要翻譯該文件的相關內容。

1.0 範圍(SCOPE)

說明本程序描述使用 MARSAME 來處理物質與設備的電廠計畫。指出 MARSAME 的範圍是受放射性影響的材料和設備，包括金屬，混凝土，工具，設備，管道，導管，家具和可分散的散裝材料，如垃圾，瓦礫，屋頂材料和污泥。該程序代表了決定物質與設備處置的方法學，如 NUREG-1575 補充文件 1(即 MARSSIM)。

2.0 討論(DISCUSSION)

進一步說明 NUREG-1575 補充文件 1(MARSSIM)所提供的項目，包括用於規劃，實施，評估和記錄調查的技術訊息，以決定物質與設備的正確處置。MARSAME 增加的彈性來自其複雜性，MARSAME 路線圖的目標是協助 MARSAME 用戶協商 MARSAME 中的信息，並確定需要在特定項目的

基礎上做出重要的決策，MARSAME 處置分析的記錄、以及支援調查和文件必須被保留。該程序提供了一個正式的流程，用於記錄從現場釋放潛在放射性受影響的材料和設備的評估，包括放射控制區域外釋固體材料。

3.0 責任(RESPONSIBILITIES)

指出與輻射防護相關的事項，輻射防護主管必須對物質與設備的處置相關的紀錄負有維護的責任，合格的輻射防護技術人員需負責為支援 MARSAME 物質與設備處置而進行的調查作業。

4.0 指引(INSTRUCTIONS)

此部分明確指出應用 MARSAME 方法的各項細節指引，開宗明義地提到經批准的標準程序或經批准的物質與設備特定工作包或工作計劃應控制 MARSAME 外釋調查。批准的標準程序或批准的工作包/計劃應包括下面幾項計劃要素：初始評估(Initial Assessment, IA)、分類(Categorization)、分級(Classification)、資料品質目標(Data quality objectives, DQOs)、量測品質目標(Measurement quality objectives, MQOs)。

初始評估 IA 須包含審視相關的操作與維護紀錄、審視之前的調查結果、審視輻射事件報告、使用目視檢查；在目視檢查時指出潛在安全事項與需要的準備活動(物質與設備相關)，警戒量測(sentinel measurements)是在關鍵位置執行的有偏差測量(biased measurements)，以提供特定於 IA 目標的資訊，即收集足夠的資訊以支持分類決策。須確保在 IA 期間收集足夠的訊息，以

清楚地描述物質與設備並支持其分類決策和潛在的處置決策(例如外釋或掩埋)。

關於分類，該程序文件先說明在 MARSAME 文件中所謂的「未受影響(non-impacted)」係指其中沒有合理的可能存在放射性高於背景，而「受影響(impacted)」指的是具有合理的放射性污染潛力，或者沒有足夠的資訊來支持其可能屬於未受影響的分類決策，在此定義之下，基於 IA 所提供的資訊將物質與設備進行分類，若分類為未受影響物質與設備，則不需要額外的調查，但可能需要附上決定其為未受影響的佐證文件。

分級是基於 IA，將受影響的物質與設備依其高於行動基準的潛在放射性程度分類為 class 1、2、3。MARSSIM 和 MARSAME 是類似的方式。

資料品質目標(DQOs)應用於計畫物質與設備處置輻射調查，該文件再次重複了 MARSSIM 和 MARSAME 中對 DQOs 步驟的說明，也列出量測品質標(MQOs)建立過程中所應注重的項目，關於標準差、最小可測濃度、量測範圍、量測方法的特異性和穩定度等，以確保量測品質。

初步調查是指在 MARSAME 調查之前的調查，用以收集需要用來決定處置偵檢的資訊，如果資料正確，便不需要額外的資料收集。根據 IA 的資訊，可以決定是否需要使用初步調查(preliminary surveys)來填補資料的缺口，必要時，按照適用的標準程序進行初步調查，或使用前述五項計劃要素來制定初步調查計劃，否則便執行處置偵檢。

處置偵檢設計包含掃描、統計量測、或兩者組合，用以支援處置決策。按照適用的批准標準程序進行處置偵檢，或使用前述五項計劃要素制定處置偵檢包，該文件提供一份偵檢包的範例表格供使用，偵檢包文件應包含的項目為：偵檢設計、行動基準、操作決定規則、物質與設備的分類、量測數量和型式、量測的品質要求，處置偵檢的執行和紀錄需要依據批准的標準程序來進行。

評估結果的方法是使用資料品質評估(DQA)程序，其工作包含確認 DQOs 符合調查、審視 QA 和 QC 相關報告、確認 MDC 和 MQOs 符合、確認有收集適當數量的量測結果。然後進行初步資料的審視，如果可以的話使用圖表審視資料，以電腦處理統計參數，比較調查結果和外釋條件，從資料中做出結論，從而決定處置方法。

所有文件(包含 IA、初步調查、緊戒量測、處置偵檢、處置決策等)都要被永久歸檔保存。

該文件的附錄 1 為處置偵檢包的空白範例文件，HBPP 對各項物質與設備的外釋，均有依照此份文件進行一致化的處置偵檢與結果分析。接下來我們將針對 HBPP 1 號機與 2 號機拆除的結構鋼(Structural Steel)之偵檢包 HBPP-SS-001，進行研析。

4.2 Humboldt Bay 發電廠的 MARSAME 偵檢包案例研析與計算範例

HBPP-SS-001 是一份完整的 MARSAME 處置偵檢文件，係以 HBPP 1 號機與 2 號機的結構鋼為主要物件進行處置偵檢，因其鄰近 HBPP 3 號機，故將之視為可能受影響的區域進行偵檢，內容完整依據前述的範例文件，區分為數個主要標題，下面依序進行中文簡譯並對其內容進行研析：

1.0 OBJECTIVE:

明確說明本項處置偵檢的對象，係為 HBPP 1 號機及 2 號機的結構鋼。

2.0 BACKGROUND:

說明 1 號機的結構鋼的組成成分是由各種不同大尺寸的鋼樑組成，該結構包括 8 個高度，大部分上部 6 個高度向環境開放。2 號機結構實際上是 1 號機結構的副本。本文件涉及 1 號機和 2 號機中存在的結構鋼。本處置偵檢是基於 HBAP RCP-6Q 程序書(如前節所述)與 MARSAME。

3.0 INITIAL ASSESSMENT

這邊提到 1 號機和 2 號機的目視檢查完成的時間為 2009 年 11 月 3 日，結構外觀狀態良好，目視檢查之後進行文件審視，包括 HBAP D-500(安全貯存時期的場址輻射污染相關文件)、HBPP 3 號機的安全貯存除役計畫、安全貯存環境報告、023BS2 文件(1 號機結構特性)。

在初始評估中評估了由放射性氣態流出物排放沉積對結構鋼的潛在影響，而歷史氣象數據表明大約 55% 的時間，HBPP 站點的盛行風向為北風，

大約從 320° 到 20°，大約 25% 的時間氣態流出物被排放到相對平靜的空氣中，導致其活度均勻沉降分佈於廠址，因而可能影響結構鋼，風向和潛在的沉積和沖洗(washout)有可能影響暴露在環境中的那些鋼，而對封閉部分的影響要小得多。(此部分說明了目標物件可能受影響的原因)

特性調查執行的時間為 2008 年 6 月 24 日至 2008 年 8 月 19 日，包含了對結構鋼的 beta 掃描與定點量測，在鋼的保護區域(protected area)中進行的大多數測量均低於 MDC。將讀數高於 MDC 的測量值(在測量的統計變化範圍內)製表列出，並提供平均值、中位數、標準差(如表 4.1 所示)，謹慎地假設結構鋼的外表面屬於受影響區。(說明特性調查的執行狀況和初步假設)

表 4.1 讀數高於 MDC 的特徵資料(單位為 dpm/100 cm²)。

189	212	189
345	282	283
366	542	298
40	211	199
171	153	377
269	263	234
211	226	
516	223	
305	159	
293	235	
263	412	
272	189	
351	327	
281	339	
198	298	
Mean	270	
Median	266	
Std Dev	98	

4.0 CATEGORIZATION

藉由上述 IA 的結果研析，將結構鋼組件分類為受影響區。(1 號機、2 號機雖為燃油發電機系統，卻因鄰近 3 號核能機組，仍以受影響區處理)

5.0 CLASSIFICATION

預計結構鋼組件的外表面不會含有超過背景水平的廠址相關放射性，因此被歸類為 class 3 物質與設備。

6.0 DESCRIPTION

本部分是關於物件的屬性與描述，根據 MARSAME 2.4 節，提供物理特徵(表 4.2)與輻射特徵(表 4.3)的描述。

在物理特徵描述中，說明結構鋼的數量大約每個單位 1.5×10^6 磅，在複雜性一欄說明部分鋼材較小而不適於調查(在文件後面有附實際照片佐證)；就可接近性來說，大部分鋼材必須等待拆除完成後才能進行調查；關於這些結構鋼的固有價值評估方面，表格內容提到大部分可以進行回收，上層、內部區塊可能需要整治，但也提到大規模整治可能並不經濟的相關補充說明。

在輻射特徵描述裡面，也是依照 MARSAME 2.4 的指引，將核種、活度、分布、和位置分欄進行描述，其主要的放射性核種為 Cs-137 (為 gamma 射源、能量 0.661 MeV)，初步跡象表明總表面活動測量值接近背景水平，預期的背景範圍是 20-270 cpm、活度(如果存在)將均勻分佈在組件的頂部表面上，而不是在側面上分佈，並且固定於自然界中。根據輻射特徵的描述，可

知這些結構鋼適於設計處置偵檢。(輻射特徵描述的四個欄位都有明確指出並無資料缺口或只進行簡短說明，以彰顯該描述的可信度與正確性)

表 4.2 HBPP 結構鋼的物理特徵描述。

屬性(Attribute)	描述(Description)
體積 (Volume)	每單位約有不同尺寸鋼材 1.5×10^6 磅。
複雜性 (Complexity)	某些鋼材區段較小而無法進行偵檢(提供鋼材的實際照片)。
可接近性 (Accessibility)	多數鋼材目前無法接近，須待拆除後方能進行偵檢。
固有價值 (Inherent value)	大部分鋼材可進行回收，上層、內部區段的鋼材外釋前需要整治，然而大規模的整治措施可能較不經濟。

表 4.3 HBPP 結構鋼的輻射特徵描述。

屬性(Attribute)	描述(Description)			資料空缺(Data Gaps)
放射性核種 (Radionuclide)	核種	輻射種類	發射能量 (MeV)	無資料空缺。 如果放射性存在的話，可能是透過來自煙囪的放射性氣體與組件接觸所造成。
	Cs-137	加馬(γ)	0.661	
活度 (Activity)	初步的量測顯示表面活度接近背景值。預期背景值約 20-270 cpm。			因背景值由一系列量測過程取得，故無資料空缺。
分佈 (Distribution)	放射性活度若存在，組件各表面的活度分佈均勻，但頂部與側面不同。			無資料空缺。
位置 (Location)	放射性活度若存在，組件頂部的活度高於側面的活度，並且固定於自然界中。			無資料空缺。

7.0 PRELIMINARY SURVEYS

因為有了足夠的資訊，故不需要進行初步偵檢。

8.0 DISPOSITION OPTIONS

對於結構鋼的處置方式，有兩種選擇：回收(recycle)與丟棄(disposal)，低層的鋼材被指定進行回收處置。如果符合回收條件，便會被送至回收設施，如果表面活度超過回收條件，則相關組件將被評估進行簡單的除污，接著再重新調查是否符合回收條件；如果整治後的活度仍超過回收條件或是決定不進行整治，對鋼構件進行豁免標準評估，由美國生態公司(US Ecology, Inc)進行掩埋處理。高層的鋼材將在拆除時進行隔離，並予以調查，如果符合豁免條件，那麼就送至美國生態公司進行掩埋，如果超過豁免條件，則送至Clive 進行掩埋(註：Clive Disposal Facility 係為 *ENERGYSOLUTIONS* 公司的廢棄物處置設施，<http://www.energysolutions.com/clive-disposal-facility/>)。(本段落按照程序書中的建議，使用如果(If)... 則(then)...的方式進行撰寫，說明回收與丟棄的決定條件)

9.0 SURVEY DESIGN

偵檢設計是物質與設備處置調查最複雜的部份，列於其下的子標題也多達 10 餘項，這部分是處置偵檢設計的主要評估工作，利用科學方法做為決策依據。

9.1 Null Hypothesis

1 號機與 2 號機的結構鋼含有與廠房相關的放射性大於等於行動基準。(MARSSIM/MARSAME 的調查/處置偵檢均作如此假定。)

9.2 Limits on Decision Errors

Type I: 在掃描時發生 Type I 決策錯誤的後果是「低層結構鋼活度等級超過回收條件卻被運送至回收設施」或是「高層結構鋼達到豁免要求時而被送至美國生態公司進行掩埋」，這裡選用 5 % Type I 錯誤率作為掃描調查。(這邊指出發生決策錯誤的後果，其中錯誤率值的設定並未明確規定於任何指引文件中，視個案條件自行決定。)

Type II: 發生此種決策錯誤的後果包括「需要進行調查以確定讀值升高的原因」或「增加物質掩埋的費用」，在此選用 25 % Type II 決策錯誤率。(相較於 Type I 誤差，因為其後果是處置成本的增加而不會影響到個體或環境，因此這裡的容錯率可以提升，數值同樣視個案條件自行決定)

9.3 Decision Rule

如果所有結構鋼外部表面的掃描顯示殘餘的放射性並未超過行動基準，那就跳脫 null hypothesis，這些物件符合回收條件或美國生態公司掩埋豁免條件。如果結構鋼外部表面的掃描顯示殘餘的放射性超過行動基準，那就適用 null hypothesis。(這邊也是使用如果(If)... 則(then)...的方式進行，說明適用於 null hypothesis 的條件判斷)

9.4 Alternative Actions

回收處置選項的替代行動是在美國生態公司丟棄。對於上層內部鋼，丟棄於美國生態公司的處置行動的替代行動是丟棄於 Clive 掩埋場，如果調查結果指出結構鋼的某段區塊或區塊群超過主要處置選項的行動基準，那麼

對於上面引用的替代處置，可以將這些區塊(群)分開或隔離處理。(指出替代行動的適用條件)

9.5 Radionuclide-of-Concern

藉由應用 HBPP 3 號機鋼材的特性數據，選擇 Cs-137 作為關注的放射性核種。(明確指出所關注的放射性核種為何)

9.6 Action Levels

表面掃描偵檢(進行回收)的行動基準是從輻射管制區域外釋物品的可測性要求，如表 4.4。表中所指的 beta 濃度值係參照 MARSSIM，而掃描 MDC 被設定為偵檢結構鋼表面的行動基準(註：各項行動基準以及後續儀器 MDC 值所使用的單位仍為舊式單位，在撰寫本研究報告時，為真實呈現該數值範例，並未將之轉換為新式單位)。表 4-4 和表 4.5 分別表示回收結構鋼與上層內部鋼組件送往美國生態公司的行動基準。(依據 MARSSIM 訂出決策的行動基準)

實際的回收偵檢的掃描行動基準與 1 號機及 2 號機結構鋼組件所在地量測時的背景輻射值有關，任何超過測量時存在之背景輻射等級的掃描 MDC 值的測量將超過行動基準。(意旨回收調查作業時應注意量測時的背景輻射值)

表 4.4 表面掃描偵檢(進行回收)的行動基準。

放射性核種 Radionuclide	Beta 污染可測性需求* Detectability Requirements for Beta Contamination, (dpm/100 cm ²)	掃描行動基準 Scan Action Level (dpm/100 cm ²)
Cs-137	5000 (總和) 1000 (可移除)	掃描最小可測濃度 (Scan MDC)

*參照美國環保署規定

表 4.5 表面掃描偵檢(送往美國生態公司掩埋)的行動基準。

放射性核種 Radionuclide	廢棄限值 ^a Waste Limit (pCi/g)	掃描行動基準 ^b Scan Action Level (dpm/100 cm ²)
Cs-137	15.0	130,000

^a 參照 PG&E 文件 HBL-10-003 表 1。

^b 基於 2 吋厚的鋼材(密度 7.86 g/cm³)所換算的值，取 2 位有效數字。

這項偵檢的行動基準等於 UBGR(upper bound of grey region)。

9.7 Discrimination Limit

鑑別限值(Discrimination Limit, DL)是透過執行測量可以可靠地鑑別行動基準的活度等級。對於根據該計劃進行的所有調查，DL 是背景輻射等級。所有調查技術必須能夠識別超過調查時存在的背景輻射的輻射等級。

這個調查的 DL 等同於 LBGR(lower bound of grey region)。(LBGR 可以決定偏移參數及相對偏移，配合 type I 和 type II 誤差值的選定，可以計算所需要的取樣點數。)

9.8 Survey Type

9.8.1 Measurement Techniques

先指出所使用的量測技術，說明掃描測量設計輔以定點測量，是調查結構鋼的首選方法。該調查設計要求測量方法能夠在鑑別限值(即背景輻射等級)下檢測放射性。掃描調查將確定放射性升高的區域。記錄個別掃描的結果並與行動基準進行比較。

9.8.2 Measurement Quality Options (MQO)

Measurement Uncertainty

HBPP 結構鋼特性調查使用 Ludium 43-68 偵檢器，該偵測器也應用於背景量測。結構鋼區域中環境背景測量的預期範圍約為 20 cpm 至 270 cpm，在量測品質的保證上，指出對測量不準度(μ_{MR})的一般要求為小於或等於 $\sigma/3$ 。

Detection Capability

- 掃描最小可測計數率(Scan Minimum Detectable Count Rate)

應用 MARSSIM 6-9 式定義 Ludium 43-68 偵測器的掃描最小可測計數率(Scan Minimum Detectable Count Rate)為

$$MDCR = d' \sqrt{b_i} \left(\frac{60}{i} \right) \quad (2)$$

其中

MDCR: 最小可測計數率, cpm

b_i : 背景觀察時段的平均計數

i : 觀察時段長度 = 2.3 秒

d' NUREG-1507 表 6.1 可偵測性係數，選用 1.38，正確偵測率(True positive detection rate, or sensitivity)95%、錯誤偵測率(false positive detection rate, or false alarm rate)60%。

假設背景計數率為 20 cpm，則 $b_i = 20 \times (2.3 / 60) = 0.77$ counts。帶入 MDCR 的計算公式可得 $MDCR_{20\text{ cpm}} = 1.38 \times (0.77)^{0.5} \times (60/2.3) = 31$ 。對應不同的背景計數率，算出的掃描 MDCR 如表 4.6 所示。

表 4.6 MDCR 值。

背景計數率 Background Count Rate (cpm)	掃描最小可測計數率 Scan MDCR (cpm)
20 ^a	31
70	59
120	77
170	92
220	104
270 ^b	116

^a 約為預期背景範圍的下限。

^b 約為預期背景範圍的上限。

- 掃描最小可測濃度(Scan Minimum Detectable Concentration)

掃描最小可測濃度 Scan Minimum Detectable Concentration (MDC) 由 MARSSIM 6-10 式定義如下：

$$\text{Scan MDC} = \frac{\text{MDCR}}{\frac{A}{100} \sqrt{p\varepsilon_i\varepsilon_s}} \quad (3)$$

其中

MDCR: 最小可測濃度 (cpm)

p: 小於完美測量的效率，依據 NUREG-1507，其值為 0.5 至 0.75，這邊保守選擇 0.5。

A: Ludium 43-68 探針面積，126 cm²。

$\epsilon_i \epsilon_s$: 總加權效率係數，0.12 c/d (Ludium 43-68)。

再將前述 MDCR 值依次帶入計算，則可得應用於回收調查的掃描 MDC 值，表列如表 4.7。

表 4.7 回收調查的掃描 MDC 值。

最小可測計數率 MDCR (cpm)	掃描最小可測濃度 Scan MDC (dpm/100 cm ²)
31 ^a	31
59	59
77	77
92	92
104	104
116 ^b	116

^a 預期背景範圍下限的 MDCR。

^b 預期背景範圍上限的 MDCR。

Detection Capability for Fixed-Point Measurements

- 臨界值(Critical Value)

臨界值(critical value, or critical level, or decision level) 定義了淨儀器信號(計數)的最低值，是可能錯誤地將測量系統背景值識別為「大於背景」的

等級，高於此級別的任何儀器響應都被視為大於背景。MARSAME 表 7.5 中

給出臨界值的計算公式如下：

$$S_c = Z_{1-\alpha} \sqrt{N_B \frac{t_s}{t_B} \left[1 + \frac{t_s}{t_B} \right]} \quad (4)$$

其中

N_B : 背景計數。

t_s : 樣品計數時間，1 分。

t_B : 背景計數時間，1 分。

$Z_{1-\alpha}$: $(1-\alpha)$ 標準常態分布的百分率值 = 1.645, $\alpha=5\%$ 。

(在 MARSAME 第 7 章有提到臨界值 S_c 可以使用 $\sqrt{N_B}$ 來表示，例如當 $\alpha=5\%$ 、

$t_s=t_B$ 時， $S_c=2.33\sqrt{N_B}$ ，是最為人所熟知的表示式。)

- 淨儀器信號的最小可測值(Minimum detectable value of net instrument signal)

對於淨儀器信號的最小可測值 S_D ，MARSAME 表 7.6 給出的計算公式如下：

$$S_D = S_C + \frac{z_{1-\beta}^2}{2} + z_{1-\beta} \sqrt{\frac{z_{1-\beta}^2}{4} + S_C + R_B t_S \left(1 + \frac{t_S}{t_B} \right)} \quad (5)$$

其中

S_C : 臨界值(計數)。

R_B : 空白平均計數率， $R_B = \frac{N_B}{t_B}$ 。

N_B : 背景計數。

t_s : 樣品計數時間，1 分。

t_B : 背景計數時間，1 分。

$Z_{1-\beta}$: $(1-\beta)$ 標準常態分布的百分率值 = 0.6745， $\beta = 25\%$ 。

定點測量的最小可測濃度 MDC(以 y_D 表示)為 S_D 值除以 0.12 c/d 的加權總效率常數，再經過探針面積因數($1/(126/100)=0.7937$)的調整後可獲得定點測量最小可測濃度 $\text{dpm}/100 \text{ cm}^2$)。計算結果如表 4.8 所示。

表 4.8 背景值與相關參數的計算結果。

N_B (counts)	S_C (counts)	S_D (counts)	y_D (dpm)	探針面積校正後的 y_D (dpm/100cm ²)
20	10	15	128	102
70	19	28	235	187
120	25	37	306	243
170	30	43	363	288
220	35	49	412	327
270	38	55	455	361

這些 MDC 值的計算顯示在背景值範圍 20-270 cpm 的偵檢中，使用這種儀器進行量測時可以指出高於背景值的量測結果，隨後在偵檢報告內容中也提及量測儀器的耐用度並非主要考量，只須注意避免在雨天進行偵檢，以免損壞量測儀器的靈敏電子零件。

總結以上最小可測濃度的推算流程，如圖 4.2 所示。

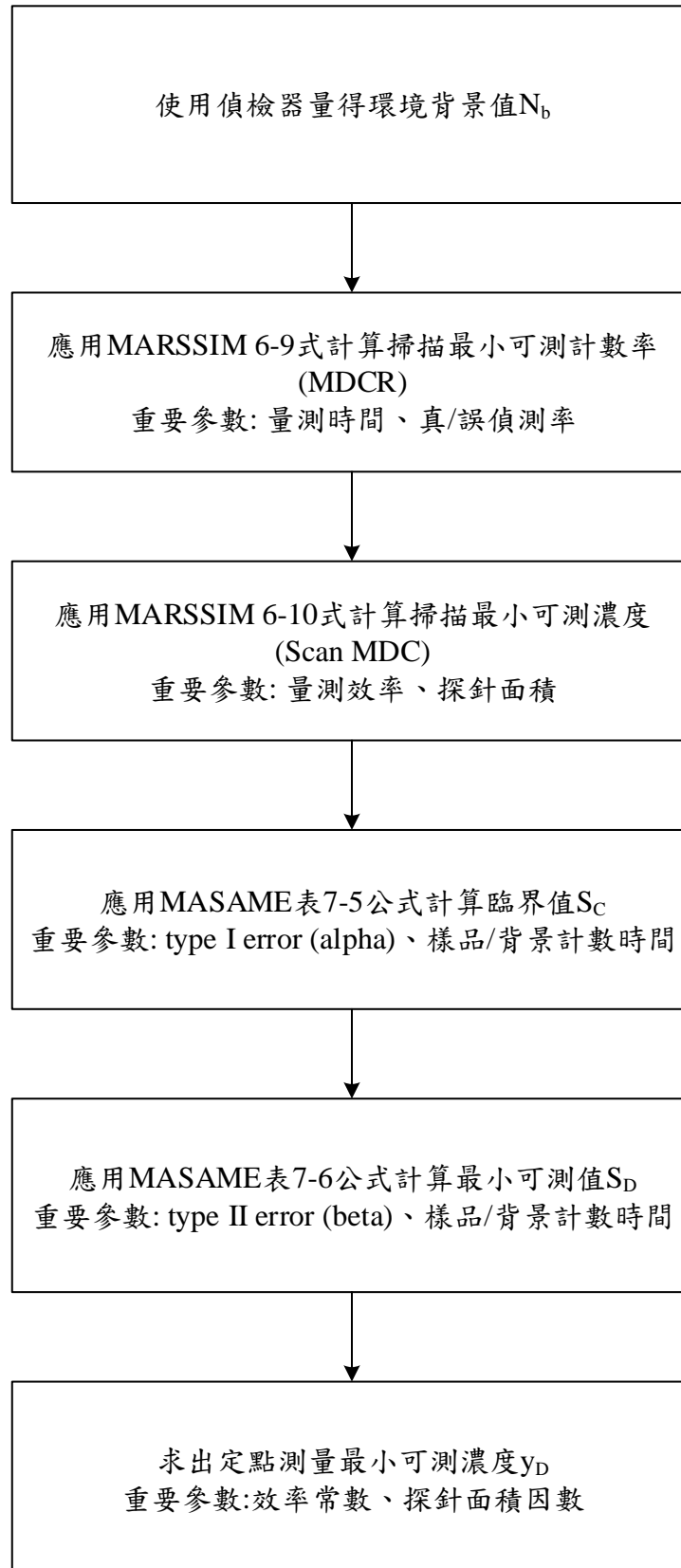


圖 4.2 定點掃描最小可測濃度的推算流程圖。

9.9 Survey Boundaries

說明偵檢邊界限定於結構鋼材料的外表面。

9.10 Preparation and Special Instructions

這邊段落的內容指出進行偵檢的現場主管必須確認技術人員堅持探測速度和與射源距離的各種要求，並且在進行作業前有評估相關的職業風險，作業前簡報必須納入安全事項及特殊安全規則。

執行掃描偵檢應遵循：

1. 開始偵檢前確認偵檢設備是否可正常操作。
2. 在待測區域進行 5 次 1 分鐘的背景計數，偵測器離任何表面都超過 1 公尺。
 - a. 算出五次測量的平均值。
 - b. 利用前面提到的背景值-MDCR-MDC 的計算結果(表 4-6 及 4-7)，選定適當的 MDC 值，並記錄於相關表格中。
 - c. 選定臨界值 S_C 並記錄於表格。

(這邊有提到一個注意事項，若平均背景值超過 230 cpm，則將掃描速度由 2 inch/s 降低至 1 inch/s)
3. 使用耳機聲音功能，進行物質與設備的掃描偵檢。(避免環境噪音影響判斷)
 - a. 調查時，維持偵測器至表面距離為 0.5 inch。

- b. 用恆定的速度移動偵測器，速度不超過 2 inch/s。
4. 當聲音指示放射性增高時(大於 MDC 值)，便停下來重新掃描該區域，對聲音指示進行確認。
 - a. 如果最初的聲音指示信號無法被重現，則繼續進行掃描。
 - b. 如果最初的聲音指示信號可以被重現，
 - (1) 將掃描期間觀察到的最高儀器反應值與背景值進行比較。
 - (2) 如果儀器反應大於背景，掃描該區域以確定放射性增高區域的邊界。
 - (3) 將邊界標示出來(或用任何方式將之指出)，以便日後進行除污或進行再偵檢。
 - (4) 在讀數最高處，收集 1 分鐘的定點量測資料，記錄於調查表格。
 - (5) 將定點測量的淨計數值與前面所選定的臨界值 S_C 比較。
 - ◆ 如果淨計數值小於 S_C ，紀錄並繼續掃描調查。
 - ◆ 如果淨計數值大於 S_C ，紀錄並通知輻射防護主管來確認升高的放射性。
5. 對放射性污染可能累積的區域進行判斷掃描。如果掃描結果需要、或通過判斷、或輻射防護主管的指示確定，收集 1 分鐘的定點測量和/或從這些區域進行擦拭測試。
 - a. 在調查地圖上紀錄判斷掃描與定點/擦拭測量的位置。

- b. 若進行擦拭量測，確認樣本有清楚標誌且經過 beta-gamma 污染評估。
 - c. 若進行 1 分鐘定點量測，將量測結果和 S_C 進行比較。
 - ◆ 如果淨計數值小於 S_C ，紀錄並繼續掃描調查。
 - ◆ 如果淨計數值大於 S_C ，紀錄並通知輻射防護指導者來確認升高的放射性。
 - ◆ 如果淨計數值超過 $5000 \text{ dpm}/100 \text{ cm}^2$ ($0.83 \text{ Bq}/\text{cm}^2$)，尋求輻射防護主管進一步之指示。(此數值即為表 4.4 中美國環保署規定的表面偵檢掃描行動基準)
6. 確認所有調查結果都有依照輻射防護程序書進行文件紀錄。
 7. 在調查完畢之後，依照程序書進行「使用後」儀器的功能確認。
(這裡提供了一個完整的偵檢流程，且經過偵檢最佳化處理。整個掃描偵檢的流程可歸納如圖 4.3 所示。)

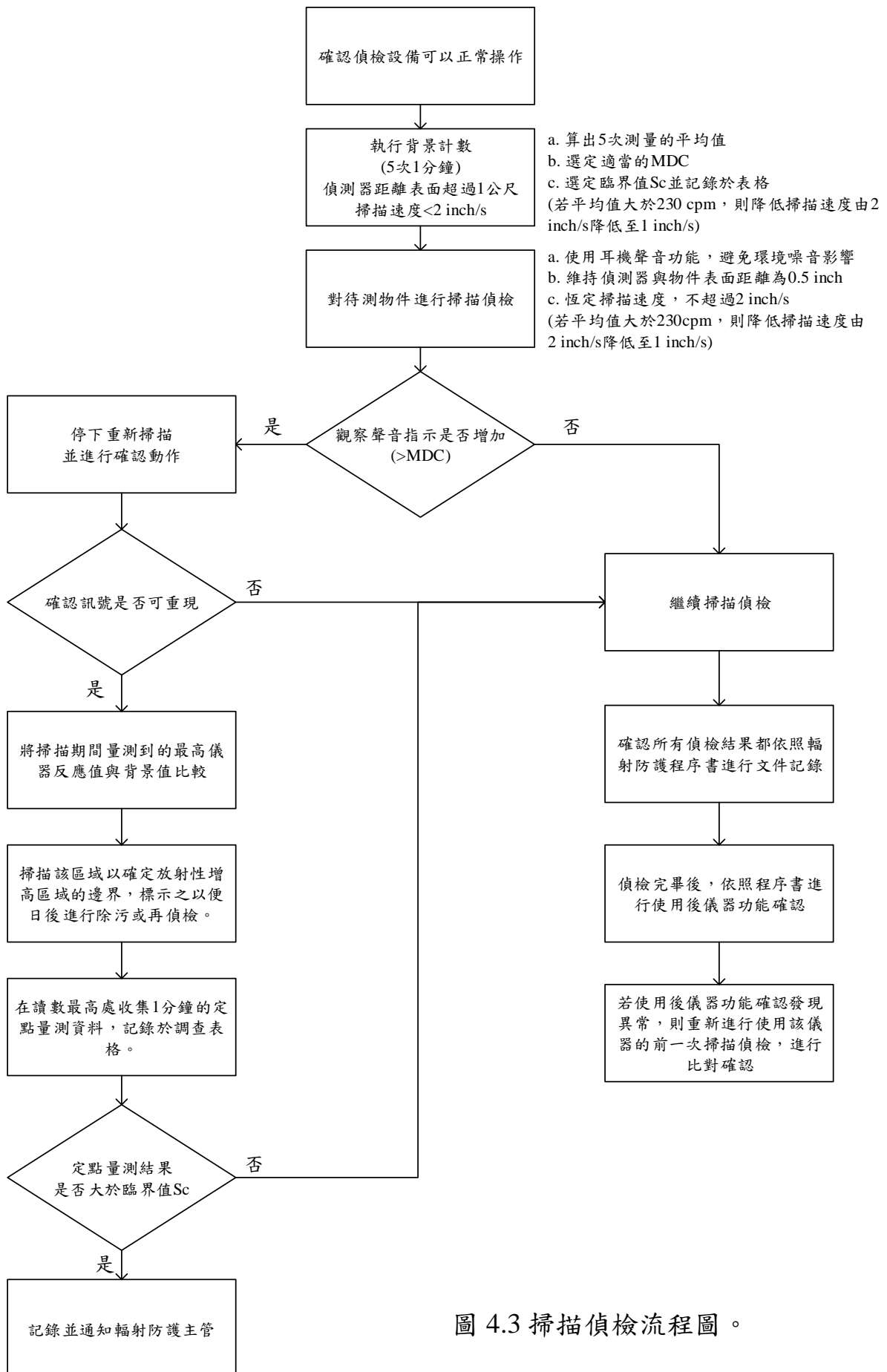


圖 4.3 掃描偵檢流程圖。

9.11 QA Requirement

儀器和偵測器需經過校正，每天使用前也需要經過射源檢測，如果某件儀器未通過測試，那麼前一次通過測試後進行的調查偵檢的正確性需要被重新評估。射源測試應依照格式進行紀錄，並維持管制圖(control charts)以追蹤儀器的表現。(針對儀器和偵測器能否正常工作做出品保要求)

9.12 Survey Units

單一偵檢單元由結構鋼材料組成。(指出偵檢單元)

9.13 Inputs for the Selection of Provisional Measurement Methods

選擇的測量方法的低限要求為能夠檢測出處於或低於行動基準的放射性核種活度。

9.14 Reference Area

與偵檢單元相關的材料預期並不會包含可觀數量的天然放射性，故不需要選定參考區域。

9.15 Optimization of the Survey Design

描寫調查設計的最佳化事項，除了依照前述調查步驟進行之外，也強調技術人員的專業性、以及量測時與 MDC 參考等級進行比較時應進行的事項。(這段落提到的最佳化方針已經納入前述偵檢流程的步驟中)

9.16 Documentation of the Survey Design

偵檢設計會被歸檔於偵檢包，送交輻射防護主管。

10.0 SURVEY IMPLEMENTATION

在偵檢的執行上，需要進行職業風險分析，如前所述會包含在作業前簡報的內容中，相關主管人員需要在進行偵檢之前，確認所有必要的預防措施都已到位。

11.0 SURVEY RESULTS

偵檢結果應紀錄於制式表格，偵檢資料須依照程序書進行審視、評估、並進行歸檔。

12.0 DECISION

對於目標物件(結構鋼)的處置決策都是依照偵檢資料的評估結果。

所有關於結構鋼計劃處置方案的決定都將基於數據評估結果並得到其支持。(強調各項決定的依據。)

13.0 REFERENCES

列出參考資料、程序書等。

14.0 圖表、附件

照片、相關圖表列在文件最後，其附件中並有空白調查表格供參考(如圖 4.4 所示)。

Structural Steel		HBPP-SS-001			
MARSAME Package Number:		Date:	Surveyor:		
Survey Instrument (type):		Pre-survey Check	Sat	Unsat	
Instrument Serial Number		Post-survey Check	Sat	Unsat	
Cal due date:					
	Scan Area	Max Scan cpm	Static cpm	Smear results dpm/100 cm2	Coments
Beta Background Measurements					
Location:					
	cpm				
1					
2					
3					
4					
5					
Average					
Surveyor Signature: _____		Date: _____			
Reviewed by: _____		Date: _____			

圖 4.4 美國 Humboldt Bay 發電廠材料鋼的 MARSAME 偵檢表格。

4.3 MARSAME 數值範例的研析

在 MARSAME 第八章中也列有幾個數值範例可供參考，其中包括了礦物加工設施的混凝土瓦礫、礦物加工設施租用設備及其處置偵檢等三個範例。混凝土瓦礫的輻射特性最為複雜，其中包括鈾系和釷系的數十種放射性核種，也含有 alpha、beta、gamma 的各種射源，擷取樣品針對 U-234(alpha)、Th-232(alpha)、Bi-214(gamma)、Ac-228(gamma)進行量測，作為 IA 資訊，經評估過後認為 U-238、U-234、Th-232、Ra-226 是四個需要考量的核種，由於處置決策是將混凝土瓦礫放行外釋作為路基使用，故依照 NUREG-1640 表 I1.13(“Normalized effective dose equivalents from all pathways: Driving

on road [$\mu\text{Sv/y per Bq/g}$])，將表中所列之單位換算為 Bg/kg，為四個核種分別訂出行動基準。對 U-238 來說 NUREG-1640 指出的有效劑量為 $0.26 \mu\text{Sv/y per Bq/g}$ (在馬路上)，在計算以 Bg/kg 為單位的行動基準時，將 0.26 的倒數乘以劑量限值 0.01 mSv/y ，再乘以 1000 g/kg 與 $1000 \mu\text{Sv/mSv}$ ，可得

$$\frac{1 \text{ Bg/g}}{0.26 \mu\text{Sv/y}} \times 0.01 \text{ mSv/y} \times 10^6 = 38,000 \text{ Bq/kg} \quad (6)$$

對 U-234、Th-232、Ra-226，行動基準分別被計算為 12,000,000、330、450 Bq/kg。接著依照歸一法則(Unity Rule) 用來判斷含有不同放射性核種組成的量測樣本，是否具有較高的放射性成分：

$$\text{The Unity Rule} = \frac{C_1}{AL_1} + \frac{C_2}{AL_2} + \dots + \frac{C_n}{AL_n} \leq 1 \quad (7)$$

其中 C_1 、 C_2 、 \dots 、 C_n 表示各核種的活度， AL_1 、 AL_2 、 \dots 、 AL_n 表示各核種的行動基準。除了歸一法則之外，尚須評估各核種是否有超過各自的行動基準，作為處置決策的額外考量。

偵檢結果的評估經過資料品質評估及 Wilcoxon Rank Test，每個偵檢單元都有經過適當的量測數量收集，根據偵檢結果的評估，處置決策為「所有的混凝土都可以被放行」。

MARSAME 第八章的第二個案例是評估礦產加工設施租用的推土機是否能夠進入廠址進行作業，其決策條件很單純的就是「若表面活度大於背景值，則推土機不得進入作業，反之則可」。其中受關注的核種選擇天然鈾和

天然鈾，根據偵檢設計收集來自前推土機調查的數據，並提供所收集數據的完整記錄；在偵檢期間，有 37 個地點被標記為使用 1 分鐘測量的偵檢，測量結果均未超過臨界值。之後經過資料品質評估、初步資料審視，並進行了統計測試。最後的結果給定的結論是「推土機不具有超過背景值的放射性而可以被允許進入廠區作業」。

MARSAME 第 8 章第三個案例與第二個案例非常相似，其目的是在確定推土機在不需使用後，可被放行並交還給原租賃公司，最後的決策也是同意放行。二個案例的物質與設備相同，設計的調查計畫也相同，旨在針對相同的物件但不同的 Scenario 及用途進行評估，讓 MARSAME 使用者參考比較，檢視其中之異同處。

第五章 台電核一廠除役計畫與相關評估報告之研析

5.1 國際除役計畫之相關探討

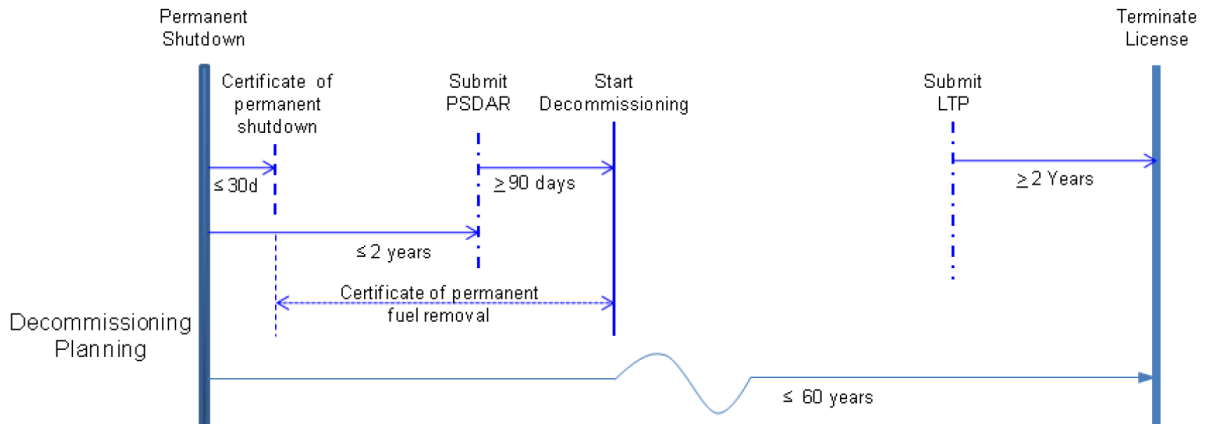


圖 5-1 美國核能電廠的除役作業時程。

一般國際上核電廠係於機組永久停機並移除用過核子燃料後，始進行除役作業。美國核能電廠採二階段除役作業(如圖 5-1 所示)，第一階段主要是設施經營者的作業，於提交永久停止運轉意願書後 2 年內，須向美國 NRC 提出停止運轉後除役活動報告(Post Shut Down Activities Report, PSDAR)，著重於硬體設備之移除與處理，以及人員與環境保護相關事項，是一份初步的評估報告，內容並未詳細說明除役計畫之執行細節，美國 NRC 接到 PSDAR 後 90 天，在無具體核准的情況下，設施經營者可開始主要除役活動，這與其他國家的除役計畫須先經主管機關審查核准有所不同，而美國核管會已提出法規修正案，改採 PSDAR 須先經 NRC 審查核准後才能開始除役活動，以強化對核電廠除役的管制作業。除役作業最後須提出執照終止計畫(License Termination Plan, LTP)，此部分主要為美國 NRC 之作業，著重軟

體評估作業，在於使廠址得以釋出再利用，並著重長期人員及環境保護，使用執照終止後，除役作業才算大功告成。

5.1.1 Humboldt Bay 3 號機 PSDAR 的概述

以 Humboldt Bay 3 號核能機組的 PSDAR 來說，其內文含參考資料明細只有短短六頁，分六個章節，其目錄如圖 5-2 所示。

TABLE OF CONTENTS

<u>Section Title</u>	<u>Page No.</u>
1.0 INTRODUCTION	1
2.0 BACKGROUND	1
3.0 DESCRIPTION & SCHEDULE OF PLANNED DECOMMISSIONING ACTIVITIES	2
4.0 ESTIMATE OF EXPECTED DECOMMISSIONING COSTS	4
5.0 ENVIRONMENTAL IMPACTS	4
6.0 REFERENCES	5

圖 5-2 美國 Humboldt Bay 3 號機的 PSDAR 目錄。

在簡介(Introduction)部分，簡單說明該份 PSDAR 的內容及根據的相關法規(主要是 10 CFR 50.82(a)(4)(i))，描述近程除役活動的規劃，以及一些附屬系統與設備的拆除與變更等，用過核子燃料移至用過核子燃料中期貯存設施(Independent spent fuel storage installation, ISFSI)之後的除役作業規畫與

預定工作期程，並提供預計費用的估計，對周邊環境的影響(依據 NUREG-0586, “Final Generic Environmental Impact Statement on Decommissioning of Nuclear Facilities” 與 NUREG-1166, “Final Environmental Statement for Decommissioning Humboldt Bay Power Plant, Unit No.3”)。

在背景(Background)部分，簡要說明該部機組的基本資料和周邊設施的關聯、建造過程與運轉概況、除役安全評估報告的核定日程、以及用過核子燃料概況及 ISFSI 配合情形等。

緊接著對除役作業和計畫中的除役活動做了簡要敘述，說明四個主要除役工作活動：

1. ISFSI 的建造和用過核子燃料的移轉。
2. 除役作業將於用過核子燃料移轉後開始進行。
3. 原有 1 號機及 2 號機將被新型機組取代。
4. 待新型機組可操作後，才將進行 1 號機和 2 號機的除役。

這些項目都是非常廣義的目標，並未包含執行項目的細節與作業方式，只有大略說明規畫的除役作業時程和相關除役後活動。

PG&E 公司估計 Humboldt Bay 3 號機的除役費用約需 410 百萬美元(以 2007 年幣值與物價估計)，但這數量超過了 HBPP 核電除役基金(僅約 304.4 百萬美元)，因此需要在 2008 年以前進行招募或增資，包含基金帳戶的利息，經加州公用事業委員會(California Public Utilities Commission)的估計，

應可足以應付除役作業所需的花費，並依照 10 CFR 50.75(f)規定，提送年度除役資金保險報告(annual decommissioning funding assurance reports)，每年進行更新，確保除役作業有足夠的資金支援。

10 CFR 50.82(a)(4)(i)要求 PSDAR 必須包含「一個討論，其提供的理由可得出結論認為：與特定廠址除役活動相關的環境影響不逾越先前發布的環境影響報告」，Humboldt Bay 3 號機 PSDAR 簡略提到關於 10 CFR 50.82 要求對環境影響的討論，係包含並核備於下列兩個文件：

1. NUREG-1166, “Final Environmental Statement for Decommissioning Humboldt Bay Power Plant, Unit No. 3,”
2. NUREG-0586, “Final Generic Environmental Impact Statement (FGEIS) on Decommissioning Nuclear Facilities.”

關於環境衝擊的評估，早在 1984 年就已經進行，並由 NRC 在 NUREG-1166 文件中予以核備。第二份文件(FGEIS)用來評估 1155 MWe 沸水式反應器(boiled-water reactor, BWR)經過 40 年運轉後的除役，其中結論有三：(1)這種設施的除役不適配迫切的健康和安全問題、(2)除役活動對公眾造成的輻射劑量很小、(3)除役活動對除役工作人員劑量可維持在職業曝露限制以下。

相較於 FGEIS 所述電廠的規模(1155MWe)，Humboldt Bay 3 號機的規模小很多，對環境影響的衝擊是遠低於 FGEIS 的參考電廠，台電核一廠的機組也比該參考電廠小，故其結論同樣可適用。

文中提到除役 Humboldt Bay 3 號機的職業劑量包含：(1)3 號機在 SAFSTOR 狀態直到 2006 年的職業劑量 1.67 人-Sv、(2)預計 3 號機實際除役的所有職業活動將產生約 1.80 人-Sv 的職業劑量、(3)卡車運輸的職業劑量預計為 0.13 人-Sv。三者總計 3.6 人-Sv 的總職業劑量估計值並未超過 FGEIS 中參考 BWR 的暴露估計的限制。公眾劑量則估計約 0.02 人-Sv，也未超過 FGEIS。(註：在文件原文中仍是使用舊式的人-侖目單位)

最後在 PSDAR 中 PG&E 的結論是：3 號機的除役不會對環境造成重大衝擊，並歸納其結論原因如下：

1. 3 號機並沒有存在特定廠址因素改變 FGEIS 的結論。
2. 電廠並無獨特方法或除役技術的介入使用，而致使 FGEIS 中得出的結論無效的情形。
3. 經過 25 年的 SAFSTOR 後推遲拆除 3 號機導致相當大的輻射衰減、劑量率降低和職業輻射暴露降低。
4. 公眾和職業劑量都低於 FGEIS。

由上述內容可以知道 PSDAR 是一份非常初步的除役評估報告，只有概略敘述除役活動與時程，但強調對環境影響以及人員劑量的評估，以「不會造成危害」的結論來支持其「除役活動的安全性」。

5.1.2 Humboldt Bay 3 號機 LTP 的概述

Humboldt Bay 3 號機的 LTP 是一份非常完整的除役報告總結，其內容共分八個章節，第一章 Introduction 包含廠址歷史背景的描述(廠址概況、人口、地理與水源)、除役方法、除役目標、LTP 的範圍與摘要、LTP 的更新程序、LTP 資訊聯絡窗口等。第二章到第八章則是 LTP 的主要內容部分，包含廠址特性調查(第二章)、剩餘除役活動的確認(第三章)、廠址整治計畫(第四章)、最終狀態偵檢計畫(第五章)、執照終止輻射條件的相符性(第六章)、除役費用的更新(第七章)、環境報告附件(第八章)。

在第二章的廠址特性調查部分，根據廠址歷史評估(HSA)將廠區區分為數個偵檢區域，利用 MARSSIM 方法論決定其分級，HSA 根據實際調查來確定整治前輻射污染的程度和等級，做為進一步的廠址特性調查的基礎，在廠址特性調查期間收集的數據可用於更改區域的原始 HSA 分類(在 LTP 規定的要求範圍內)，直至最終狀態偵檢 (Final Status Survey, FSS)。

第三章確認了 LTP 提交時的剩餘拆除和除污活動。包括以下內容：

- 已經完成的拆除和除污活動。
- 需要整治區域的描述。
- 可能遇到的輻射狀況。
- 職業輻射劑量的估計。
- 即將被運送廢棄的放射性物質剩餘數量。

- 確保整治區域不會被再度污染的控制機制。

第四章提到廠址整治計畫，討論可能使用到的廠址整治技術，用以減低殘餘污染，使得輻射等級合乎 10 CFR 20 subpart E 的外釋條件，主要將被整治的物質為結構表面與土壤。這章也討論合理抑低的評估，這項評估將用於決定整治措施是否超出需要符合的輻射劑量條件，並描述了將在整治活動期間實施的輻射防護計畫。

第五章是關於最終狀態偵檢(Final Status Survey, FSS)計畫，這項程序將被用來確認 HBPP 廠址符合 10 CFR 20 所規範的不受限制使用(unrestricted use)，計畫將按照符合 FSS 品質保證專案計畫(Quality Assurance Project Plan, QAPP)的已批准程序和工作說明執行。整個 FSS 的設計，當然還是依照 MARSSIM 的 DQO 程序來進行。

第六章是執照終止的輻射條件，討論 DCGLs 的計算，針對建物表面和土壤的殘餘放射性進行評估，本章還討論了放射性核種的廠址存量、未來土地利用情景和劑量計算模型的識別，包括敏感性分析、暴露途徑和面積因子 (Area factors, AFs)的推導。

第七章提供了釋出 HBPP 廠址做為不受限制使用所需剩餘的費用，比較該費用與剩餘經費，確保財務上足以滿足除役作業。

第八章指出 HBPP 除役活動符合環境衝擊評估(即前所述之 NUREG-0586)，強調確認所有剩餘的除役活動對環境的影響非常小。

LTP 本身是一個活動的內部文件，週期性地需要依除役進程更新並提送，以符合 10 CFR 50.71(e)，除役活動的更改必須符合 10 CFR 50.59 與 50.82，在 NUREG-1700 “Standard Review Plan for Evaluating Nuclear Power Reactor License Termination Plans”指出 LTP 變更的額外限制，其中列出幾項內容是如果 NRC 沒有核可，則不可進行變更的項目，包括：

- DCGLs 與相關的最小可測濃度增加。
- 調查發現相對於適用的 DCGL 的輻射等級增加。
- 除了符號檢測(Sign Test)或魏克生秩和檢測(Wilcoxon Rank Sum Test)之外的統計檢驗的變化。
- LTP 陳述的 Type 1 決策錯誤增加。
- 先前並未審視過的明顯環境衝擊。

此外，如果偵檢單元被重新分類至較不受限制的等級(例如 class 2 變為 class 3)，必須在 14 天以前告知 NRC，反之若變更為較高限制的等級，則可以不用事先告知 NRC。

隨後則是附上 LTP 資訊聯絡窗口，列出數名聯絡人的資訊(含姓名、單位、地址、電話)，方便進行聯絡。

Humboldt Bay 3 號機雖為小規模之核能機組，但其針對「已經分類過」後之物質與設備之處置流程，係以「偵檢單元」為單位進行處置偵檢，故與電廠規模關係較小，若考慮其將鄰近 3 號核能機組，且為非核能機組的 1 號

機與 2 號機一併納入 MARSAME 報告，以受影響區標準予以處理，其物質與設備之整體規模並不下於大型核能電廠；而該廠除役過程所揭露之物質與設備之處置流程與偵檢流程十分具體，相較於其他參考電廠，揭露更為完整之 PSDAR、LTP、程序書、偵檢表格、以及詳細之計算範例等資料，規模雖小但卻具體而微，對於我國除役核能電廠仍有不錯之參考價值。

HBPP 的除役過程是將核能機組的 3 號機進行安全貯存(SAFSTOR)，先就非核能機組的 1 號機與 2 號機進行拆除，對物質與設備進行分類管制與處置偵檢，待拆除過程與廢料之處置完成後，才對 3 號機進行拆除解體，目前我國核一廠的除役，可能也會需要先將受影響程度較低的設備廠房進行拆除解體，一段時日之後再拆解受影響程度較高的廠房與設備，其步驟或有相似之處，亦可參考比較。

5.1.3 Yankee Rowe 核能電廠 LTP 的概述

106 年行政院原子能委員會委託研究計畫「核能電廠作業安全審查技術研究」之子項計畫一「除役核電廠與廠址解除管制之審查與驗證技術研究」有對 Yankee Rowe 核能電廠的 LTP 與除役執行概況進行簡單說明，其中提到 LTP 為描述除役核能電廠如何符合美國核管會對於執照終止和廠址釋放之標準，Yankee Rowe 電廠的 LTP 於 2003 年 11 月 24 日提交送審，2005 年 7 月由美國核管會正式同意，而其用過核燃料是從 2000 年 2 月開始至 2003

年 6 月間，從用過核子燃料穴(spent fuel pit, SFP)移至用過核子燃料獨立貯存設施(Independent Spent Fuel Storage Installation, ISFSI)，就時程上來說，用過核子燃料之移置，顯然必須早於 LTP 的撰寫與審查，在進行 DCGLs 的估算時，這些高活性的物料，會大幅度的影響估算的準確值，因此 ISFSI 的確立，應是除役核能電廠的首要工作目標之一，否則整個電廠將只能以 SAFSTOR 的狀態暫存，無法進行拆解，因而延長除役時程。

Yankee Rowe 核能電廠的 LTP，與 Humboldt Bay 3 號機的 LTP 內容編排完全相同，第一章一般資訊(General Information)對該電廠的一般描述、歷史資訊、執照終止計畫摘要、部分廠址解除管制的過程、環境影響評估之補充、LTP 內容修訂條件等；第二章廠址分類(Site Classification)就以 MARSSIM 建議的流程與方法進行評估說明，從廠址歷史評估與調查區域的劃定開始，評估歷史與現況及其中之發現，探討可能需要關注之核種，評估可能的受影響區，然後判斷非受影響區的決定是否可信，調查表面下方(subsurface)與地下水的污染情形，持續特性調查活動的進行；第三章指出剩餘廠址拆除活動(Identification of remaining dismantlement activities)，依照設定的拆除階段進行說明。

1. Phase 1：用過核燃料與超 C(Greater-than-Class-CC, GTCC)廢棄物移除前的拆除活動，需先確保這些物質與其他進行拆除的廠房與建物在物理結構與電氣方面完全隔離(mechanically/electrically isolated)，不需要支援用

過核燃料的組件可先行拆解與移除，但須符合當初所提出之除役計畫與安全分析報告(YNPS Decommissioning Plan and Final Safety Analysis Report)。

2. Phase 2: 在用過核燃料與 GTCC 廢棄物移除後，拆解與處置剩餘的系統、結構、與組件。包括：暫存廢水處理系統、輻射偵測系統、通風系統、燃料處理設備系統、用過燃料貯存區的冷卻與淨化系統、輔助給水系統、除礦系統、空壓系統、電氣系統、加熱系統、防火與偵測系統等。當一個區域或建築的系統與組件被移除後，需對污染的混凝土、鋼、與其他建築材料等物進行放射性除污，主要可除污的物件有：廠區起重機與支撐結構、蒸氣容器、反應器支撐結構、蒸氣容器起重機、輻射屏蔽物、管件、燃料輸送滯留槽、離子交換坑、主通風煙囪、用過核燃料坑與相關建築、新鮮燃料拱頂、主要輔助建築、廢料處置建築、安全關閉系統建築、可能污染區域之貯存建築與倉庫、壓實機建築、服務建築與燃料輸送附件、其他貯存槽與氣象塔等等。(在 Yankee Rowe 的 LTP 中，製有列表顯示目前各項組件的狀況是否已移除，並對未移除之組件進行狀態描述。)
3. Phase 3：當 Phase 2 活動結束後，所有系統與組件都被從廠房建築移除，並棄置於適當的設施後，進入 Phase 3 的執照終止階段。

第四章是有關廠址整治計畫(Site remediation plans)，這是在 10 CFR 50.82(a)(9)(ii)(C)所規定的內容，整治計畫必須符合 10 CFR 20 subpart E 的條件，在廠址解除管制或作為非限制利用前：

- 對於關鍵群體的年總有效劑量不超過 25 mrem，以及
- 對於公眾的劑量必須符合合理抑低(as low as reasonably achievable, ALARA)原則。

在此 Yankee Rowe 的 LTP 中，有附上如何符合 ALARA 的流程圖，可供輻射防護人員參考。而其中牽涉到的除污與拆除活動，也需要符合電廠輻射防護安全守則、安全與廢棄物管理計畫等相關規範。

第五章是最終狀態調查計畫(Final status survey (FSS) plan)，主要是按照以 MARSSIM 為首之相關導則與規範進行設計，因此和 MARSSIM 本文的編排方式一致，從 DQO 程序開始進行偵檢單元的分類、DCGLs 估算、設計調查與量測步驟、依據統計測試進行取樣位置與數量的選擇、建立決策規則等等，在量測方面，也依據 MARSSIM 對各式儀器做出定點量測 MDC 的計算，並將之歸納列表於其 LTP 之 table 5-4 當中，此外也詳細說明了對建築與結構量測時應注意的事項，對表面以下的活度、建築基礎的外表面、深埋管路與下水道系統、混凝土碎片等特殊情形予以說明。

第六章是對於廠址解除管制是否符合規定的彙整說明(Compliance with the radiological criteria for license termination)，首先指出廠址解除管制、非限

制使用的條件，接著進行情景選擇與曝露途徑設計，針對土壤與混凝土計算 DCGLs，以這些數據做為佐證資料。相關計算過程，清華大學在 106 年與 107 年原能會委託研究計劃中，對於 RESRAD 系列模擬程式的驗證使用，都有進行計算驗證，在此便不加贅述。

第七章是對除役所需費用的預估更新(Updates of the site-specific decommissioning costs)，因為在 PSDAR 中已經對整個除役費用做了評估，在除役後期的 LTP 中進行更新，除了費用預估外，也詳列資金來源，從而確認業主在財務方面係足以應付剩餘的除役作業。

第八章是環境報告的補充(Supplement to the environmental report)，目的是描述與特定地點執照終止活動相關的重大環境影響中的任何新資訊，並確定這些影響是否屬於先前評估的環境影響範圍，無論是一般情況或是特定地點，內容基於：

1. 為支持原設施而制定的環境影響聲明
2. 結合除役計劃(和 PSDAR)描述的與除役活動有關的環境影響
3. 解決除役問題的最終通用環境影響聲明(NUREG-0586, FGEIS)

文中再次說明在其 PSDAR 中所指出的環境衝擊，電廠在除役後造成的影響將不超過先前發布的環境影響聲明的範圍，其原因有下列幾點：

1. 與所選方法(DECON)相關的假定影響已在 FGEIS 中考慮過。
2. 該廠並無獨特處(或使用特定除役技術)會使得 FGEIS 中得出的結論無效。

3. 用於拆除和除污廠址的方法是基於建造的標準技術，已在 FGEIS 中得到充分考慮。
4. 所有除役活動的特定地點人員劑量係使用類似於 FGEIS 中使用的方法進行保守計算。

以上簡單彙整了 Yankee Rowe 核能電廠的 LTP 內容，可以發現無論是 PSDAR 或 LTP，抑或是前述提及的 Humboldt Bay 3 號機的 PSDAR 與 LTP，多半都是針對土壤與建築物進行詳細調查偵檢，做出結論與說明，對於物質與設備僅有概略性的描述，簡單列表顯示其目前的處置狀況，並未將其細部說明列於 LTP 中，可以理解為物質與設備的複雜性使然，因此多半將物質與設備的處置偵檢獨立於另外之評估報告中(通常命名為 MARSAME report of XXXXX)，但因其內容牽涉到除役工程的技術專利與商業機密，資料取得不易，仍需持續蒐集相關資料，作為我國進行除役作業或管制審查的參考，但 MARSSIM 和 MARSAME 在近年來國際核能電廠除役的作業流程中成為最泛用的導則，是既定的事實，對其進行深入研析有其必要性。

5.2 台電核一廠除役計畫與相關評估報告之研析

一般國際上核電廠係於機組永久停機並移除用過核子燃料後，才開始進行除役作業。然而我國因相關法規規定，須於核電廠永久停止運轉前 3 年，即須提出除役計畫(Decommissioning Plan, DP)，使核一廠除役計畫中所進行

輻射偵檢之目的及內容，與 MARSSIM 所定之範圍偵檢或特性偵檢，有一定程度的差異，但在本質上仍然有依據其基本精神。

IAEA 為顯示除役可安全完成並符合其定義的結束狀態，設施經營者應該於整個設施運轉期中準備及維持一份除役計畫。除非另有主管機關的許可，除役計畫應該輔以一適當的安全評估，內容涵蓋除役期間可能發生的規劃性除役活動及異常事件，以及如何處理職業曝露及可能導致民眾曝露的放射性物質外釋，和美國 NRC 的差異在於：IAEA 需完成除役計畫的報告，而美國 NRC 只採取除役計畫的原則，報告完成須在 LTP 內呈現，相較之下 NRC 的除役流程具有比較多的彈性，但是在除役過程中業主與主管機關可能需要更頻繁地進行溝通及資訊交換。

目前台灣的法規偏向 IAEA 事前提出除役計畫的作法，但要加入部分美國除役電廠 LTP 才會出現的內容，而 MARSSIM/MARSAME 的方法論主要還是依據美國法規來進行，自然在執行上會遇到一些問題，有些部分在實務上無法進行，只能依照特殊方法進行模擬估算，或使用參考電廠依比例推估得到相關參數。

現階段，由核能研究所協助撰寫的核一廠除役計畫，則已應用 MARSSIM 中輻射偵檢與場址調查之執行方法，完成廠址歷史評估及初步輻射偵檢，以應用於潛在污染區域鑑別、人員劑量評估、廢棄物存量估算及規劃最終狀態偵檢等。

在 106 年度原能會委託清大執行的研究計畫「核能電廠除役作業安全審查技術研究」的子項計畫二「除役核電廠輻射特性調查評估之審查與驗證研究」中，基於 MARSSIM 的方法論及相關規範，對台電「核一廠輻射特性調查之初步執行及評估」、「核一廠反應器壓力槽及其內部組件之放射性特性分析」、「核一廠除役放射性廢棄物產量初步調查與估算」之調查方法及評估結果進行驗證分析，所給出的初步結論是各項報告係就「現有資訊」進行評估，其結果大致符合 MARSSIM 的基本精神，但目前台電礙於核一廠尚未處於完全停止運轉狀態，除役計畫的內容及相關評估報告所引用的調查資料為永久停止運轉前 3 年(或更早)的資訊，由於許多針對目前狀況調查與量測無法確實進行，導致部分評估報告未能依照 MARSSIM 的步驟進行，例如：暫未提送 DCGLs 的估算，即使台電依照承諾提出完整 DCGLs 的估算，一旦停機進行除役活動後，各項補足性偵檢可能會導致 DCGLs 的變動，由於美國 NRC 將美國除役電廠 LTP 中 DCGLs 的變動視為需要進行審查與核備的敏感參數，除役計畫的內容勢必將有非常頻繁的審查與修訂過程，關於除役計畫內容修訂的條件，可參照 10 CFR 50.71、50.59、50.82 以及 NUREG-1700。

目前台電備有完整的廠址歷史評估，從中可以鑑別潛在污染區及初步廠址區域的劃分，Eric W. Abelquist 先生建議不須特別參考建廠前的輻射背景值，因為我們無法掌握數十年來的背景變動情形。

在物質與設備相關的部分，由於無法全面性地進行各種偵檢行動，因此在處置偵檢的部分，台電並未有完整的評估與規劃。但在廢棄物產量之初步調查與估算報告中，有針對除役規畫階段核一廠大修期間所能取得的少量爐水、廢氣系統用過活性碳與主冷卻水管路內表面閥件樣品進行分析，結果僅測得加馬核種活度，難測核種活度均為 MDA，此數據難以代表相關系統之污染程度，因此台電利用爐水淨化樹脂的放射化學分析數據統計而得到代表淨化系統之比例因數，再對照參考電廠之淨化系統與其他系統之比例關係，將核一廠淨化系統之資訊轉化成核一廠其他系統及混凝土廢棄物的比例因數，從而獲得預估量測值，待停機過渡階段後方能進行實際量測作為佐證。而爐心組件與反應器壓力槽的活度，則是利用中子活化評估模式進行模擬分析，取得所在區域之中子通量與相關資訊，再依據該元件之組成成分與運轉歷程，取得中子活化分析結果。

這些估算難免與實際量測結果有差異，但屬於有根據的科學評估，仍有相當程度的可信度，據此科學評估而撰寫之除役計畫，可視為一份較為詳細的 PSDAR，在除役進行過程中逐漸取得實際樣本的量測後，再予以持續更新，保證除役作業的輻射安全。

第六章 結論與建議事項

總結來說，本研究執行狀況順利，總體進依照計畫書之甘特圖進行，均有達到預期之目標，主要完成對 MARSAME 及相關文獻進行重點歸納與研析、對固體物質與設備的偵檢單元分析之實務操作進行研究、國際案例與相關計算範例分析、台電核一廠除役計畫與相關評估報告之研析，並完成期末報告。

期末報告共分六個章節，第 1 章闡明計畫背景，概要說明本計畫的背景和緣由，第 2 章說明計畫目的和執行方法，第 3 章為期中進度執行概述，對本次計畫期程進行了研究工作進度概述，分四節依次說明計畫期程中關於文件、導則、範例的探究，3.1 節概要說明 MARSAME 重點彙整與研析，3.2 節說明 NUREG-1761 中物件分類和偵檢單元的關係，3.3 節概要摘錄 ANS/HPS N13.12 的基本概念，3.4 節則說明除役核能電廠固體放射性廢棄物之估算及處理規劃。第 4 章以美國 Humboldt Bay 發電廠的 MARSAME 實際範例作了討論與研析，並分析 MARSAME 的計算範例。第 5 章是對台電核一廠除役計畫與相關評估報告之研析，內容摘要分析 Humboldt Bay 電廠的 PSDAR 和 LTP，以及 Yankee Rowe 電廠的 LTP，並與台電核一廠現階段的除役計畫進行比較。

在 Humboldt Bay 電廠的經驗中，對物質與設備的處置採用 MARSAME 程序，允許材料回收，確定最具成本效益的處置方案，允許材料分離，提供

最有效的調查，提供正式的流程來評估調查的要求，從而節省可觀的經費並符合輻射安全規範。本報告所舉之範例文件可供未來我國除役核能電廠時對物質與設備處置時的參考。

MARSAME report 雖然是關於物質與設備的分類量測與處置偵檢，表面上看起來是核物料與廢棄物管理的項目，但就 HBPP 的相關經驗，即使是極低污染性值的廢棄物，在其偵檢程序中，偵檢包的各項文件，是由輻射防護單位負責審閱與保管，在進行處置偵檢前的作業前會議中，需要輻射防護主管確認，而偵檢過程中發現較高放射性的存在時，也需要輻射防護主管指示處置方式，因此輻射防護單位在物質與設備的管理與處置，仍然需要扮演重要的角色，才能有效避免在偵檢過程中可能發生的輻射安全意外事故。

美國除役電廠的 PSDAR 和 LTP 分屬業主和主管機關的作業，業主在 PSDAR 中規畫除役作業的進程，承諾除役作業具有足夠資源，並保證硬體設備的處置及人員、環境保護的相關事項，在執照終止前提出 LTP，詳細描述除役工作內容與各項偵檢計畫與結果，明白揭示其與輻射安全規範對比之相符性，也包含廠址整治與環境保護等事項。

在管制建議方面，MARSSIM/MARSAME 雖然內容繁複，但仍然保有應用上的彈性，這些文件的存在並非建立或取代法規、執照的要求，主管機關對於人員規劃、執行與處置偵檢可能有不同的要求，但 MARSSIM/MARSAME 作為有序的科學步驟，確實有助於放射性物質與設

備的系統化評估與管理，從而決定較佳的處置方式，主管機關在進行除役作業的管制與視察時，可參考 MARSSIM/MARSAME，但不必要求業主必須依樣畫葫蘆，應視實際狀況採用合適的方式執行，並關注其執行根據與事實陳述之合理性，使各項作業能在合理的規範內，足以保證輻射作業的安全。

由於我國法規的不同，除役計畫與相關評估報告並不能完整套用 MARSSIM/MARSAME 的程序，目前的各項評估報告在實質內容上雖符合這些科學化方法論的精神，但在偵檢的執行方面，還是有難以進行之處，建議舉辦除役核能電廠相關的學者專家座談會，以我國核能電廠除役法規的適用性為題進行公開討論，研擬除役相關法規修訂之必要性。

在除役作業中，物質與設備處置偵檢流程的完備性和偵檢設備的可靠性是重要的考量，必須保有萬無一失的偵檢計畫，才能確保物質與設備的外釋或回收再利用是安全且不會影響環境。我國核電廠除役法規雖與美國除役電廠程序不同，但在驗證策略方面，仍應注重輻射安全的評估、廠址外釋利用的可完成性、以及除役作業對人員安全和環境保護的影響。未來應該關注的重點還是放在主要設備的解體及高度中子活化部件的拆除與處置，包括反應器壓力槽內部分割、反應器壓力槽外殼的分割與其準備工作、電廠系統組件的移除、汽輪機房之拆除等，這些工作的潛在危險遠較其他除役作業高，必須審慎看待，輻射安全與防護管制的部分尤須特別謹慎看待。而業主從自

我執行工作到監督主要土木工程承包商的過渡時期，也有需要關注的地方，必須確保(可能)經驗不足的承包商能夠安全地執行除役作業。

目前台灣核電相關專業的單位不外乎台電、核研所、清華大學、義守大學等少數具有相關背景之大專院校，其中台電本身為除役業主，核研所為隸屬於主管機關之研究機構，大專院校肩負人才培育的任務，亦難以全職進行除役相關實務或協助除役相關驗證作業，核電廠的除役相關事務，包括核能後端基金的管理、放射性廢棄物處置、核電廠除役工作、放射性廢棄物減廢措施、廢棄物盛裝容器等所有核能後端營運業務，都需要公正且專業的專責機構進行，我國正研擬成立的核能後端營運專責機構應加速成立，並可參考西班牙 ENRESA 公司的管理制度 (註：西班牙國營放射性廢棄物管理機構 (ENRESA) 成立於 1984 年，是西班牙政府依法成立的國營公司，負責用過核子燃料、高低放射性廢棄物的管理、貯存、處置、規劃，亦負責核能電廠除役工作)。

此外，國際間著名核能系統供應廠家都已開始重視核設施除役業務，我國亦應持續注意先進除役技術的發展現況及其相關產業鏈，以因應未來國內核電廠的除役工作，同時也應持續培養所需的跨領域專業團隊與人力，給予適當教育訓練並進行人才整合管理，使其適才適所，充分利用資源。

參考資料

1. MARSSIM (2002), “Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual (Revision 1)”, Nuclear Regulatory Commission NUREG-1575 Rev. 1, Environmental Protection Agency EPA 402-R-97-016 Rev.1, Department of Energy EH-0624 Rev. 1.
2. MARSAME (2009), “Multi-Agency Radiation Survey and Assessment of Materials and Equipment Manual”, NUREG 1575 Supplement 1.
3. 武及蘭，「物質及設備的處置偵檢與評估簡介」，台電核能月刊，中華民國 101 年 1 月。
4. ANSI/HPS N13.12 (1999/2013), "Surface and Volume Radioactivity Standards for Clearance".
5. ANSI/HPS N13.59, “Characterization in Support of Decommissioning Using the Data Quality Objectives Process”.
6. IAEA Safety Guide No. RS-G-1.7 (2004), “Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance”.
7. NUREG-1761, “Radiological Surveys for Controlling Release of Solid Materials”, US Nuclear Regulatory Commission.
8. DOE Code of Federal. Regulations, Part 835 (10 CFR 835), “Occupational Radiation Protection”, U.S. Department of Energy.
9. DOE Order 458.1 (2011-2013), “Radiation Protection of the Public and the Environment”, Office of Health, Safety and Security, U.S. Department of Energy.
10. DOE Order 5400.5, “Radiation protection of the public and the environment,” U.S. Department of Energy.

11. Eric. W. Abelquist, *Decommissioning Health Physics: A Handbook for MARSSIM Users*, 2nd edition, CRC Press, 2013.
12. NUREG-1700 “Standard Review Plan for Evaluating Nuclear Power Reactor License Termination Plans”, US Nuclear Regulatory Commission.
13. NUREG-1166, “Final Environmental Statement for Decommissioning Humboldt Bay Power Plant, Unit No. 3”, US Nuclear Regulatory Commission.
14. NUREG-0586, “Final Generic Environmental Impact Statement (FGEIS) on Decommissioning Nuclear Facilities”, US Nuclear Regulatory Commission.
15. 裴晉哲、白寶實、趙得勝、蔣安忠、劉鴻鳴「核能電廠除役作業安全審查技術研究」106 年度原能會委託研究計畫研究報告。

行政院原子能委員會
委託研究計畫期末報告

計畫名稱：

「核能電廠除役與室內乾貯安全審查技術之研究」有關除役部分之研究

子項計畫三：

除役核電廠之 RESRAD 廠址特性計算模型之建構與驗證方法研究

計畫編號：AEC10612052L

執行單位：國立清華大學

計畫主持人：裴晉哲

子項計畫三主持人：趙得勝

報告作者：趙得勝、翁韶澤、吳尚謙、梁正宏

報告日期：中華民國107年12月

子項計畫三：

除役核電廠之 RESRAD 廠址特性計算模型之建構 與驗證方法研究

摘要

為確保除役核電廠廠址在釋出之前可符合管制機關所制定以劑量為單位的管制限值，在除役廠址進行最終狀態調查之前，設施經營者必須依據管制限值建立以濃度為基準的符合性驗證標準，亦即導出濃度指引水平 (Derived Concentration Guideline Level, DCGL)。DCGL 是用來評估除役廠址中的土壤或建物所殘留的放射性污染濃度可符合管制限值，為進行除役廠址特性調查過程中最重要的一項評估指標。目前國際上已提出多種可用於特定廠址的輻射劑量評估計算程式，而 RESRAD-ONSITE 則是目前被公認最具有公信力的計算程式，且已被廣泛地使用於建立除役核電廠之土壤的 DCGL。因此，本研究計畫之目的為深入瞭解 RESRAD-ONSITE 程式的計算模型與各環境傳遞途徑的分析方法，藉此精進 DCGL 的計算能力，並建立廠址相依參數篩選及靈敏度分析的重要關鍵技術。本研究已完成 RESRAD-ONSITE 程式的曝露途徑與劑量評估方法的解析，同時也進一步地探究 RESRAD-ONSITE 程式的參數選擇策略，並實際利用 RESRAD-ONSITE 程式進行重要參數的靈敏度分析。此外，本研究也針對 RESRAD-ONSITE 程式的概率性分析功能進行解析，可藉此評估參數不確定性的影響並建立參數值選定流程。最後，本研究也實際參考美國 YNPS (Yankee Nuclear Power Station) 除役核電廠的案例進行 DCGL 的驗證計算，藉此瞭解除役核電廠的 DCGL 計算流程及其重要的輸入參數。

ABSTRACT

In order to ensure that the nuclear power plant site undergoing decommissioning can meet the regulatory dose limit set by the regulatory agency and then release the site safely, the licensee must establish a concentration-based criterion for compliance demonstration according to the regulatory dose limit before conducting a final status survey at a site undergoing decommissioning, i.e. the Derived Concentration Guideline Level (DCGL). DCGL is an important guideline level for the final status survey of a site undergoing decommissioning. It can be used to evaluate the residual radioactive concentration of soil or buildings at a site undergoing decommissioning that can meet the regulatory dose limit. So far many calculation codes for site-specific radiation dose assessment have been proposed worldwide. Currently RESRAD-ONSITE code has been recognized as the most credible radiation dose assessment tool. Also, it has been widely used to calculate the soil DCGL in nuclear power plant sites undergoing decommissioning. Therefore, the purpose of this research project is to deeply understand the computational methodology of the RESRAD-ONSITE code as well as the analysis models of each environmental transport pathways, such that we can improve the computational skills of the RESRAD-ONSITE code and also establish the critical capability to screen site-specific parameters and conduct sensitivity analysis. By the research project, we completed the analysis of exposure pathways and dose assessment methods of the RESRAD-ONSITE code. Moreover, we also studied the strategy of parameter selection for RESRAD-ONSITE code and performed the sensitivity analysis for the high-priority parameters using RESRAD-ONSITE code. In addition, the function of the probability analysis of the RESRAD-ONSITE code which can be used to evaluate

the influence of parameter uncertainty and establish the procedure for determining the parameter values was also analyzed in this study. Finally, a decommissioned site, Yankee Nuclear Power Station (YNPS) in US, was referred to perform the DCGL calculation and then verify the results, such that we can understand the DCGL calculation process as well as the significant input parameters for decommissioning nuclear power plants.

目錄

摘要	II
ABSTRACT	III
圖目錄	VII
表目錄	IX
一、計畫背景	1
二、計畫目標及執行方法	3
三、曝露途徑與劑量評估	6
3.1 輻射曝露途徑	7
3.2 放射性污染釋放標準	12
3.3 輻射劑量評估	19
四、參數選擇策略與靈敏度分析	32
4.1 參數選擇策略	32
4.2 參數評估標準	34
4.3 參數分級與靈敏度分析驗證	39
五、概率性輻射劑量風險分析	49
5.1 參數值選定流程	49
5.2 概率性輻射劑量分析方法簡介	53
5.3 輸入參數分布類型	58

5.4 概率性分析結果	60
六、DCGL 驗證計算	71
6.1 驗證案例背景說明	71
6.2 DCGL 計算流程	73
6.3 輸入參數分析	75
6.4 DCGL 驗證計算結果	77
七、結語	87
八、參考資料	90

圖目錄

圖 2.1、本研究計畫之執行進度甘特圖	5
圖 3.1、RESRAD 程式所考慮之三類輻射曝露及九種環境傳遞途徑	11
圖 3.2、個體位於污染區上之體外輻射幾何示意圖	11
圖 3.3、與水相關之曝露途徑示意圖	12
圖 3.4、射源因子隨著時間變化之範例示意圖	28
圖 3.5、Co-60 核種之深度與覆蓋係數隨污染區與覆蓋層厚度的變化情形	29
圖 3.6、逐點積分法用於計算面積係數之幾何示意圖	29
圖 3.7、Co-60 與 Pu-240 核種之面積係數隨污染區面積的變化情形	29
圖 3.8、RESRAD 程式中針對不規則污染區的設定頁面	30
圖 5.1、RESRAD-ONSITE 程式之參數值選定流程圖	62
圖 5.2、RESRAD-ONSITE 程式之確定性分析與概率性分析模式之概念示意 圖	63
圖 5.3、RESRAD-ONSITE 程式之概率性分析執行功能鍵及使用者界面 ..	64
圖 5.4、RESRAD-ONSITE 程式之概率性分析設定頁面	65
圖 5.5、利用 RESRAD 程式輸出具 Lognormal distribution 之 U-238 分配係 數在對數與線性尺度下之累積密度函數分布圖	66
圖 5.6、污染區密度與總孔隙率的相關係數為-0.8 時之取樣點分布情形 ..	66
圖 5.7、利用蒙地卡羅取樣法與 Latin Hypercube 取樣法針對 U-238 分配係	

數之取樣結果比較	67
圖 5.8、均勻分布示意圖	67
圖 5.9、常態分布示意圖	68
圖 5.10、對數常態分布示意圖	68
圖 5.11、三角形分布示意圖	68
圖 5.12、RESRAD-ONSITE 程式概率性分析之互動式輸出表格	69
圖 5.13、RESRAD-ONSITE 程式概率性分析之圖形化輸出範例	69
圖 6.1、DCGL 計算流程圖	80
圖 6.2、YNPS 核電廠所有關切核種經 RESRAD-ONSITE 程式計算所得之劑量隨時間的變化情形	81
圖 6.3、YNPS 核電廠所有關切核種於不同曝露途徑的劑量貢獻	81
圖 6.4、YNPS 核電廠各關切核種所造成之劑量/土壤濃度比值 (DSR _i) 隨時間的變化情形	82
圖 6.5、YNPS 核電廠 Pu-241 核種所造成之劑量隨時間的變化情形	82

表目錄

表 3.1、不同面積範圍之熱點增殖因子	19
表 3.2、不同曝露情境之下所對應的輻射曝露途徑	30
表 3.3、不同曝露情境下之關鍵參數的建議值	31
表 4.1、NUREG/CR6697 參數選擇策略的評估標準及配分標準	39
表 4.2、總分與參數等級對照表	42
表 4.3、NUREG/CR-6697 所篩選之等級 1 與等級 2 參數	43
表 4.4、利用 RESRAD-ONSITE 程式針對等級 1 參數的 NDD 計算結果 .	44
表 4.5、等級 1 參數之各評估標準配分及分數加總	47
表 4.6、等級 1 參數之物理意義及其作用機制	48
表 5.1、RESRAD-ONSITE 程式重要參數之等級、類型及建議的分布型式	70
表 6.1、YNPS 核電廠之關切核種及其半衰期	83
表 6.2、YNPS 核電廠所建立之廠址特定參數及其數值	83
表 6.3、YNPS 核電廠中敏感性參數及其 PRCC 數值與對應的 25% 或 75% 百 分位參數值	84
表 6.4、YNPS 核電廠之土壤 DCGL 驗證計算結果比較	86

一、計畫背景

核能電廠除役作業是一個相當複雜的過程，涉及諸多設備與結構體的除污、拆除與解體等活動，同時也必須考慮到現場工作人員和公眾的健康與安全及對於周遭環境可能造成的衝擊，而其最終目標則是安全的釋出廠址以供無限制或有限制的使用。當除役核電廠完成各項除役作業之後，在廠址釋出供一般民眾使用或做為其它特定用途之前，為了確保廠址所殘留的放射性污染可符合管制規範，進行完整且全面性的廠址特性調查便是一項很重要的工作。一般而言，管制機構所制定的執照終止接受標準為全身年有效劑量 (Total Effective Dose, TED) (單位為 mSv/y 或 mrem/y)，而除役執行單位在進行廠址特定調查時，經由污染特性量測與取樣結果則可以直接得知廠址中所殘留的放射性核種的活度濃度 (單位為 Bq/kg 或 pCi/g)，此即意謂廠址執照終止接受標準與除役廠址特性調查結果之間存在著單位的差異，必須建立劑量限值與濃度之間的關係。因此，為了能夠正確地進行除役廠址執照終止接受標準的符合性驗證，有必要使用一套可靠的廠址特性與輻射劑量評估計算模型，用以將管制機構中以劑量或風險為基礎的標準轉換為廠址污染特性調查所使用的濃度限值，此濃度限值即為除役廠址特性調查時必須使用的導出濃度指引水平 (或推導濃度基準限值) (Derived Concentration Guideline Level, DCGL)。DCGL 是用來評估除役廠址中的土壤或建物所殘留的放射性污染是否可符合管制限值，為進行廠址特性調查

過程中的一項重要指標。經由輻射劑量評估計算模型可進行 DCGL 數值的推算，而計算時必須依據廠址特定的地質水文特性來建構廠址相依模型，且需考慮個體未來在該廠址上活動的可能曝露情境，並評估所有可能的放射性核種傳遞途徑，在確保全身有效劑量在限值內的條件之下，藉由計算模型將管制的劑量限值轉換為各核種對應的濃度限值。

目前國際上已有許多廠址特性計算程式被提出用以進行此項 DCGL 濃度限值的轉換計算，其中 RESRAD (A Regulatory Tool for Determining the Allowable RESidual RADioactivity in Site Cleanup) 家族程式中的 RESRAD-ONSITE 則為公開且被認為最具有公信力的計算程式。RESRAD 家族程式係由美國能源局 (Department of Energy, DOE) 委託阿岡國家實驗室 (Argonne National Laboratory, ANL) 所開發的輻射劑量評估計算程式，可用於估算輻射劑量及癌症風險，據此評估環境中所殘留之放射性污染對於人類及生物群可能造成的輻射曝露影響。為了滿足美國核管會 (Nuclear Regulatory Commission, NRC) 之除役標準審查計畫的劑量評估指引，阿岡國家實驗室也針對相關程式進行了一系列的修訂，現行版次的 RESRAD 程式除可用以進行特定廠址的劑量評估之外，也可用於概率性的輻射劑量風險分析，在進行除役廠址之執照終止標準符合性驗證時，能夠提供正確及可靠的分析結果。此外，RESRAD 程式是目前美國 DOE 唯一指定用於放射性污染廠址評估的計算程式，且已獲美國 NRC 正式核准同意設施經營者用

於除役廠址執照終止的符合性驗證，並做為 NRC 員工進行除役廠址執照終止審查時的驗證工具。

然而，RESRAD-ONSITE 程式的計算過程牽涉許多理論計算模型，且必須考量為數眾多的核種、地質、水文、生化、行為、物理等相關參數，計算結果的驗證與確認工作將是必要的程序，且亦是影響 DCGL 數值正確性的重要關鍵。為了能夠正確及可靠地進行除役廠址輻射劑量評估，並建立 RESRAD 程式計算審查及平行驗證的能力，有必要確實熟悉 RESRAD 程式的計算功能，並深入地瞭解各種輻射曝露模型與不同參數之間的關係，同時也應建立參數分類及參數篩選的策略。因此，本子項研究計畫將使用 RESRAD-ONSITE 程式來進行除役廠址特性計算模型之建構與案例驗證研究，藉此精進 RESRAD-ONSITE 程式的計算能力，並建立廠址相依參數篩選及靈敏度分析的重要關鍵技術。

二、計畫目標及執行方法

執行除役廠址特性計算模型之建構與案例驗證研究之目的係為了可以計算求得正確的 DCGL，並據此確認除役廠址之土壤、建物及其周遭環境可符合管制機關所制定的以劑量或風險為基準的執照終止接受標準；同時，也可藉此建立相關計算的平行驗證能力。RESRAD-ONSITE 程式是目前最

廣泛被用於計算除役廠址之 DCGL 標準的輻射劑量評估計算程式，而該程式計算過程中需牽涉極為複雜的輻射曝露模式及數量龐大的輸入參數，唯有深入地瞭解程式的內涵及各類參數的物理意義與重要性，才能據此進行除役廠址之輻射劑量評估與 DCGL 計算。因此，本研究將循序漸進地建立 RESRAD-ONSITE 程式的計算能力，包含：程式的熟悉、程式重要功能的瞭解、分析技術的精進等，最後也將利用 RESRAD-ONSITE 程式來進行國外參考廠址的案例驗證。

有關本研究計畫之執行進度甘特圖如圖 2.1 所示，計畫中所進行的工作項目與執行步驟說明如下：(1) 資料收集與研析：美國阿岡國家實驗室與 NRC 已經發表了一系列與 RESRAD-ONSITE 程式相關的技術手冊、論文、以及管制技術指引等，本研究計畫將廣泛地收集相關的資料及案例，藉以熟習並精進 RESRAD-ONSITE 程式的計算能力。(2) RESRAD-ONSITE 程式之參數選擇策略及靈敏度分析研究：RESRAD-ONSITE 程式牽涉為數眾多的輸入參數，計算時必須依據所關切的廠址特性來決定廠址相依參數。為了能夠正確地設定這些參數，本研究將依據 NUREG/CR-6697 之技術指引來研擬參數選擇策略，藉此進行參數分類及參數重要性分級，同時也將藉由 RESRAD-ONSITE 程式的內部功能來進行參數的靈敏度分析。(3) RESRAD-ONSITE 程式之概率性輻射劑量風險分析研究：RESRAD-ONSITE 程式除了可以進行決定性的輻射劑量評估之外，也延伸發展了概

率性的輻射劑量風險分析功能，可用以進行不確定性分析，並可符合美國核管會除役標準審查計畫的劑量評估指引，本研究計畫將分析概率性輻射劑量風險評估的方法與計算流程。(4) 國外除役參考廠址計算模型之 DCGL 驗證方法研究：為了確認 RESRAD-ONSITE 程式的計算能力，本研究計畫將實際建立國外除役參考廠址的計算模型並進行 DCGL 驗證方法研究，藉此來比較計算 DCGL 結果的正確性，並進一步地獲知重要的廠址相依參數。

工作項目	年月												備註
	107 1	107 2	107 3	107 4	107 5	107 6	107 7	107 8	107 9	107 10	107 11	107 12	
收集與研析除役廠址特性計算模型相關指引與文獻		■	■										
RESRAD-ONSITE 程式之參數選擇策略及靈敏度分析研究		■	※	■	■	■							
RESRAD-ONSITE 程式之概率性輻射劑量風險分析研究						■	■	■					查核點： 6/15 期中報告
國外除役參考廠址計算模型之 DCGL 驗證方法研究									■	■	■		
整理與歸納研究結果，提出成果報告											■	■	查核點： 11/15 期末報告
工作進度估計百分比 (累 積 數)	8 %	16 %	24 %	32 %	40 %	48 %	56 %	64 %	72 %	80 %	90 %	100 %	
預 定 查 核 點	第一季：收集與研析除役廠址特性計算模型相關的指引與文獻資料 第二季：進行 RESRAD-ONSITE 程式之參數選擇策略及靈敏度分析研究，於 6 月 15 日之前提出期中報告 第三季：進行 RESRAD-ONSITE 程式之概率性輻射劑量風險分析研究 第四季：進行國外除役參考廠址計算模型之 DCGL 驗證方法研究，整理歸納研究結果並完成研究計畫之成果報告。11 月 15 日前提出研究成果期末報告初稿，12 月底前完成計畫報告。												

圖 2.1、本研究計畫之執行進度甘特圖

三、曝露途徑與劑量評估

RESRAD 家族程式涵蓋一系列的子程式，包括：RESRAD-ONSITE、RESRAD-OFFSITE、RESRAD-BUILD、RESRAD-BIOTA、以及 RESRAD-RDD，各子程式係根據特定的輻射劑量評估情境所建構，使用者必須依據欲評估的標的與範疇來選擇適用的程式。其中，RESRAD-ONSITE 程式可用於評估位於放射性污染土壤層上方之個體的輻射劑量及癌症風險，並藉此推導出特定劑量標準的 DCGL；同時，在進行除役核電廠之廠址特性調查作業時，其亦可用於建構除役廠址之概念模型，已成為評估除役廠址殘留放射性污染所致之輻射劑量最重要的輔助計算工具之一。RESRAD-ONSITE 程式在進行輻射劑量和癌症風險計算時係基於曝露情境的假設，使用者必須針對各情境選定適當的曝露途徑，同時也必須針對特定的核種與曝露途徑輸入對應的參數值，包括：污染核種資訊、地質、水文、生化等相關的參數。雖然 RESRAD-ONSITE 程式具備強大的輻射劑量評估計算能力及友善的操作介面，然計算中牽涉極為複雜的輻射曝露模式及為數眾多的廠址相依參數。因此，有必要深入瞭解其計算模型的基本原理與建構程序、劑量評估方法及各參數所代表的物理意義，以下即針對 RESRAD-ONSITE 程式的曝露途徑、DCGL 轉換、劑量評估方法等進行說明：

3.1 輻射曝露途徑

圖 3.1 所示為 RESRAD 程式中所考慮的主要輻射曝露途徑，分別為體外、吸入、嚥入三種輻射曝露途徑，而這三種輻射曝露途徑又分別經由九種環境途徑而影響個體，分別為直接體外輻射曝露、由土壤層釋出之懸浮或揮發性核種與氬氣的吸入曝露、以及土壤、植物、牛奶、肉類、飲用水、海鮮食品等嚥入曝露 [1]。體外曝露僅考慮由地面土壤污染所造成的主要曝露途徑，其它次要的路徑，如懸浮放射性核種的再沉積、懸浮的放射性粉塵、以及污染水等所造成的體外輻射曝露在 RESRAD-ONSITE 程式中並未被考慮。此外，不同的環境傳遞路徑可能會有相互的連結關係，如空氣中懸浮的粉塵會沉降於植物葉面上，進而透過嚥入途徑影響個體、污染的地表水或地下水除了會透過飲用水的嚥入路徑影響個體之外，也會經由澆灌植物或餵養牲畜的間接過程而造成個體嚥入途徑的輻射曝露。

散佈於污染區中核種所釋放的加馬 (gamma) 與貝他 (beta) 輻射為體外輻射曝露的主要來源，也是 RESRAD 程式在計算土壤限值所考慮的體外輻射曝露的主要來源。在計算這些體外曝露所造成的劑量時，係假設個體連續曝露於一個無限大的圓形污染區，且考慮距離地面一米處的輻射劑量，如圖 3.2 所示 [1]。然而，此計算結果必須藉由修正因子來針對污染區的實際幾何與環境條件及個體的行為等因素來進行修正。因此，其修正因子係與有限的污染面積、污染區的厚度、不規則形狀的污染區、未受污染覆蓋

層的屏蔽、個體待在室內與室外的時間比例、以及房屋地板和牆壁的屏蔽效率等因素相關。

吸入曝露主要是由氬氣衰變產物與受污染的懸浮粉塵所貢獻，這個途徑可以分成兩個階段，分別為懸浮放射性核種由污染區釋出的過程與懸浮放射性核種被個體吸入的過程，前者之懸浮污染物釋出過程可利用空氣/土壤濃度比值 (air/soil concentration ratio) 來加以描述，此比值即定義在個體的曝露位置上，污染的土壤粒子釋出而成為空氣中的懸浮粒子的濃度比例，此比值除了可用於計算吸入途徑之外，也被用於計算葉面沉積的食物鏈途徑；後者之個體吸入過程在程式計算時則以個體的佔用因子 (occupancy factor, 即個體吸入空氣的時間比例) 與吸入率 (inhalation rate) 來計算，這些數值因子可由 ICRP 23 號的報告中取得 [2]。

在 RESRAD-ONSITE 的程式中，共有植物、肉類、牛奶、水產食品等四類食物的嚥入途徑被考慮，其中植物類別的途徑又可再分為四個部分，分別為：(1) 種植在污染區之農作物的根部攝取、(2) 污染區塵土沉積於葉面的葉面攝取、(3) 來自於污染灌溉水的根部攝取、(4) 來自污染灌溉水的葉面攝取。這些植物攝取的途徑也適用於牲畜的飼料，亦即肉類與牛奶的污染來源可能透過牲畜嚥入這些污染的飼料；除此之外，肉類與牛奶的污染來源也可能間接來自於牲畜嚥入污染水源以及污染土壤所致。水產食品的途徑則來自於嚥入附近污染池塘內的魚、蝦、軟殼類生物，而池塘的污

染係源自於污染區核種經由濾出 (leaching) 而到達池塘中。

RESRAD-ONSITE 程式也可進一步地將上述這些食物的嚥入途徑所造成的劑量分為與水無關及與水相關，與水無關的途徑包括：根部與葉面攝取所造成的植物、肉類、牛奶的曝露途徑，另外亦包含牲畜的土壤攝取途徑；與水相關的途徑則是指經由污染區滲濾污染水的澆灌或嚥入所造成的途徑，如：植物、肉類、牛奶的灌溉水途徑、肉類與牛奶的牲畜飲用水途徑、以及水產食品途徑。假如自然降雨是該區域唯一的灌溉水來源，則與水相關的途徑僅有肉類與牛奶的牲畜飲用水途徑及水產食品途徑。此外，採用的灌溉方式也會影響劑量的貢獻來源，如：使用溝渠灌溉 (ditch irrigation)，則污染灌溉水的根部攝取是劑量的主要貢獻來源；使用高架灌溉 (overhead irrigation)，則葉面沉積與根部攝取的貢獻都須被考慮。

與水相關途徑的劑量貢獻來源係假設個體的家庭在污染區建立自給自足的住宅、菜園或果園，並抽取污染區的地下水飲用或灌溉，或者經由嚥入附近池塘的水產食品，考量此途徑的劑量模型可利用水/土壤濃度比值 (water/soil concentration ratio) 來描述，此比值即定義在污染水被抽出或使用的位上，核種於水中及污染區中的濃度比值。圖 3.3 所示為與水相關途徑的情境示意圖 [1]，RESRAD 模型中所考量的污染區核種傳遞模型係為三層式的用水模型 (three-box water-use model) [3]，亦即地質層分為污染區、未飽和區、以及飽和區，而未飽和區亦可依實際地質條件再細分為不同層，

最多可設定五層。飲用水與灌溉水的來源可分為井水與地表水（池塘），污染核種一部分係透過自然降雨或灌溉水的垂直溶出，經污染區而傳遞至非飽和區及飽和區（即地下蓄水區）；另一部分則是透過橫向溶出而溢流至地表水，這些污染最終可能會經由地下井水或地表水的提取、或池塘中水產食品的嚥入而造成劑量影響。

此外，土壤嚥入途徑亦即個體直接嚥入土壤，所造成的劑量值大小則與個體嚥入土壤的量與土壤污染濃度有關。個體每年攝入的土壤量與年齡有關，美國國家環境保護局建議，幼童（7歲以下）的平均值可以使用 36.5 克/年（100 毫克/日）的值，而 73 克/年（200 毫克/天）可以做為平均值的保守估計。對於其他年齡層（7歲以上），平均值為 18.25 克/年（50 毫克/天），此為室外土壤和室內灰塵的攝入總量。在 RESRAD-ONSITE 的程式中，則是以 36.5 克/年的土壤攝入量作為預設值，此係基於 100 毫克/天攝入量和 365 天/年的假設 [1, 4]。

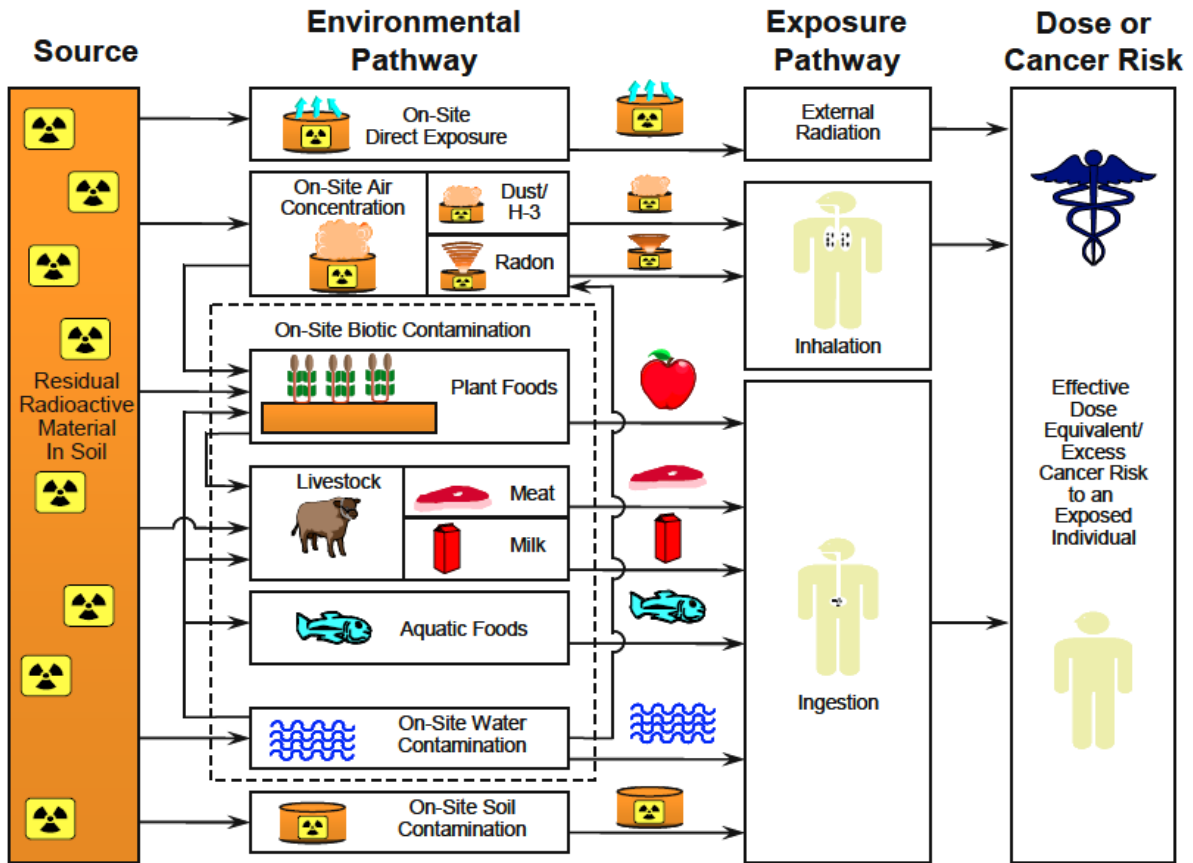


圖 3.1、RESRAD 程式所考慮之三類輻射曝露及九種環境傳遞途徑

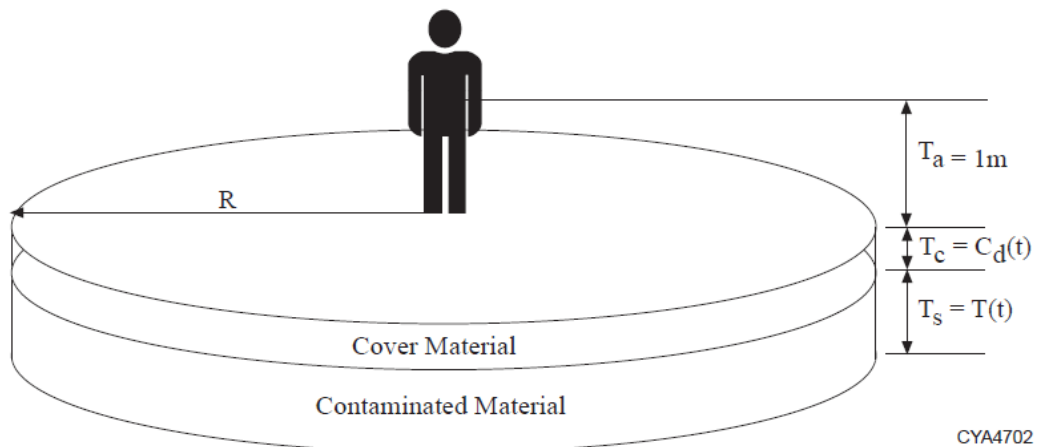


圖 3.2、個體位於污染區上之體外輻射幾何示意圖

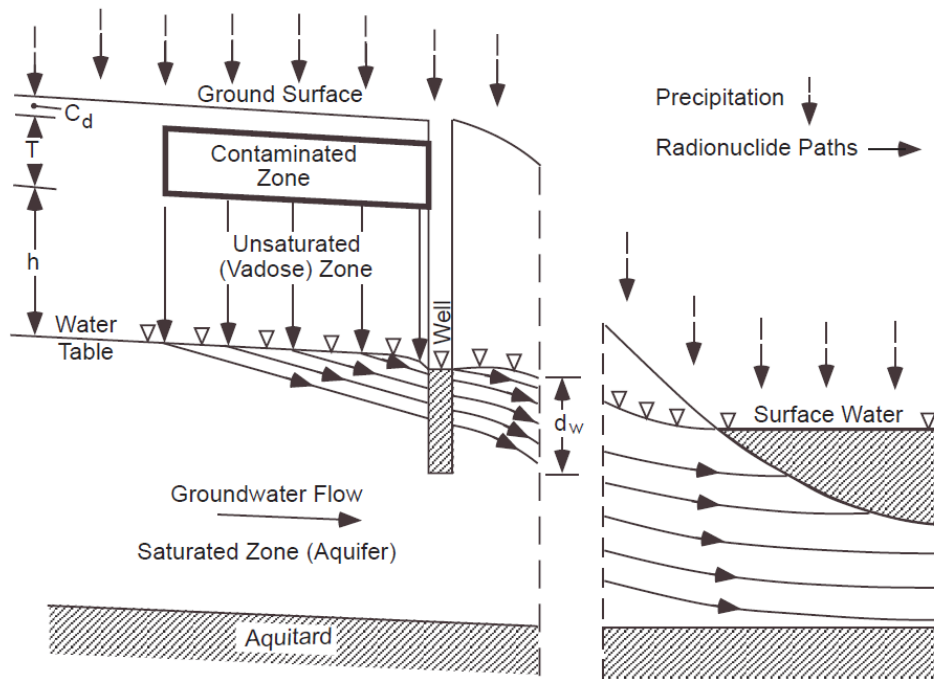


圖 3.3、與水相關之曝露途徑示意圖

3.2 放射性污染釋放標準

除役廠址之最終狀態調查的目的為確認廠址殘留的放射性污染所造成的劑量可滿足廠址的放射性釋放標準，依此來進行有限制或無限制的使用。一般而言，此基本的釋放標準可定義如下：

$$H_E(t) \leq H_{EL}, t_r \leq t \leq t_h \quad (1)$$

上式中， $H_E(t)$ 為廠址在開始進行輻射特性調查之後，經過時間 t 年時關鍵群體的個體所接受到的平均年有效劑量 (mSv/y)、 H_{EL} 則為劑量限值 (國內管制機關對於除役廠址無限制使用的劑量釋放標準為 0.25 mSv/y)、 t_r 為除役廠址在完成最終狀態調查之後，被釋放而開始進行無限制使用的時間

(通常預設為 1 年)、 $t_{1/2}$ 則為除役廠址所考量的評估期程的時間範圍 (通常預設為 1,000 年)。

進行除役廠址最終狀態調查時，最重要的是建立正確的放射性核種之土壤濃度指引水平 (soil concentration guideline，與前述之 DCGL 相同)，用以進行廠址釋出之符合性驗證。由於放射性污染所造成的輻射曝露途徑相當複雜，必須經由個別的環境傳遞途徑、劑量轉換因子、相關的參數等計算過程才能獲知特定放射性污染核種濃度所造成的劑量，此評估的過程並不適合實際在進行廠址特性調查時執行。為了能建立可直接量測的土壤濃度指引水平，必須借助可靠的輻射劑量評估計算程式，以回推計算 (backward calculation) 的方法來求得，亦即在已知管制的輻射劑量限值的條件之下，藉由輻射劑量評估模型針對各輻射曝露途徑進行分析，經考量體外、吸入、嚥入的劑量影響，最後即可求得所允許的土壤濃度指引水平。這也是在進行除役廠址特性調查時所必須建立的調查標準，設施經營者在特性調查之前必須根據廠址特性來計算求得這個數值。利用劑量評估方法來求得此標準的原因為管制標準係以劑量限值為單位，由於劑量限值無法直接量測，為了要證實殘餘土壤濃度所造成的劑量能夠符合標準，必須建立這樣的一個以濃度為單位的標準，如此才能夠藉由現場量測或實驗室取樣分析來驗證其符合性。在 RESRAD-ONSITE 程式中，土壤濃度指引水平亦可藉由劑量限值的轉換來獲得，其關係如下：

$$G_i(t) \equiv H_{EL}/DSR_i(t) \quad (2)$$

上式中， $G_i(t)$ 為第 i 個核種的土壤濃度指引水平 (Bq/g 或 pCi/g)， H_{EL} 為劑量限值 (mSv/y)， $DSR_i(t)$ 則為第 i 個核種在時間 t 時的劑量/土壤濃度比值 (dose/soil-concentration ratio) ((mSv/y)/(Bq/g) 或 (mSv/y)/(pCi/g))。由式 (2) 可知，每個核種皆會對應一個特定的土壤濃度指引水平或劑量/土壤濃度比值，土壤濃度指引水平也會因射源項的改變而隨著時間變化，最終須取其評估時間範圍的最小值來做為調查基準，例如：管制法規在規範除役設施經營者在進行輻射劑量評估時，評估的時間範圍必須涵蓋除役後 1,000 年的時間所造成的年劑量峰值，發生年劑量峰值的時間點即對應土壤濃度指引水平的最小值。此外，由於個別核種的劑量貢獻可能源自於不同的環境傳遞途徑， $DSR_i(t)$ 可再進一步表示如以下的關係式：

$$DSR_i(t) = \sum_p DSR_{ip}(t) \quad (3)$$

上式 $DSR_{ip}(t)$ 為第 i 個核種、第 p 個環境傳遞途徑在時間 t 時的劑量/土壤濃度比值。符號 p 代表環境傳遞途徑的代號，在 RESRAD-ONSITE 程式中總共考量九種環境傳遞途徑，分別為：體外曝露 ($p=1$)、粉塵吸入 ($p=2$)、植物嚥入 ($p=3$)、肉類嚥入 ($p=4$)、牛奶嚥入 ($p=5$)、水產食品 ($p=6$)、飲用水 ($p=7$)、土壤嚥入 ($p=8$)、以及氬氣曝露 ($p=9$)。

(1) 均勻污染釋放標準 (Homogeneous Release Criterion)

藉由式 (2) 計算所求得的土壤濃度指引水平係指針對單一核種的標準，然除役廠址中所殘留的放射性核種通常會同時涵蓋多種核種，在此情況之下則必須藉由以下的關係來判定除役廠址是否符合釋放標準：

$$M(t) \equiv \frac{H_E(t)}{H_{EL}} = \sum_i S_i(0) / G_i(t) \leq 1 \quad (4)$$

其中， $M(t)$ 被稱為比值總和 (sum of fraction) 或混合總和 (mixture sum)， $S_i(0)$ 為第 i 個核種在面積為 100 m^2 、厚度為 0.15 m 的污染區中的初始濃度 (Bq/g 或 pCi/g)，上式係表示所有個別核種濃度與其對應的土壤濃度指引水平之比值加總需小於等於一。由於實際的放射性核種分布並不一致，藉由特定途徑接受的潛在年度個人劑量應由情境活動的區域內之殘留放射性的平均值來決定。為了將平均濃度與土壤濃度指引水平進行比較，假設所有途徑的面積均為 100 m^2 ，在垂直方向上的放射性核種濃度不一致性則由厚度 0.15 m 來加以平均。因此，廠址的釋放標準則可改寫如下：

$$\bar{M}(t) = \sum_i \bar{S}_i(0) / G_i(t) \leq 1, \quad t_r \leq t \leq t_h \quad (5)$$

其中， $\bar{M}(t)$ 為時間 t 時的平均比值總和， $\bar{S}_i(0)$ 為第 i 個核種在面積為 100 m^2 、厚度為 0.15 m 的污染區中的平均初始濃度 (Bq/g 或 pCi/g)， $G_i(t)$ 則為第 i 個核種在一個均勻的污染區中在時間 t 時的土壤濃度指引水平 (Bq/g 或 pCi/g)。上述的觀念也可進一步地延伸應用於除役廠址現場的特性調查，如下：

$$\bar{M} = \sum_i \bar{S}_i(0)/G_i(t_m) \leq 1 \quad (6)$$

式中的 $G_i(t_m)$ 則為第 i 個核種在評估時間範圍內 ($t_r \leq t \leq t_h$) 所出現的最小土壤濃度指引水平 ($t = t_m$) (Bq/g 或 pCi/g)，而此 $G_i(t_m)$ 的數值在進行除役廠址現場特性調查之前即可藉由 RESRAD-ONSITE 程式求得。

(2) 非均勻污染釋放標準 (Inhomogeneous Release Criterion)

上式 (5) 為均勻污染釋放標準，主要可適用於污染區呈現大致均勻的情況。然而，對於實際的污染區而言，在某些局部區域中可能會出現放射性核種的濃度超過受污染地區的平均濃度三倍以上，此種污染區即稱為非均勻污染 (inhomogeneous contamination)。一般而言，為了能符合均勻污染釋放標準，非均勻污染區通常必須進行適當地整治。然而，在某些情況之下，均勻污染釋放標準可能會不適用，如：污染存在於馬路、鐵路、或建物下方而有整治上的困難、高污染區係在所有儀器與工作人員離開廠址之後才被發現等情形。此時，在進行廠址特性調查時，則得改採非均勻污染釋放標準來進行廠址的符合性驗證，其關係如下：

$$M^*(t) + \bar{M}(t) \leq 1, \quad t_r \leq t \leq t_h \quad (7)$$

其中， $M^*(t)$ 為高污染區的比值總和， $\bar{M}(t)$ 高污染區之外之平均區域 (averaging zone) 的比值總和，此處所指的平均區域為包圍高污染區且面積

為 100 m²的均勻污染區。上述的兩個比值總和則可再進一步地表示如下：

$$M^*(t) = \sum_i [S_i^*(0) - \bar{S}_i(0)] / G_i^*(t) \quad (8)$$

$$\bar{M}(t) = \sum_i \bar{S}_i(0) / G_i(t) \quad (9)$$

其中， $S_i^*(0)$ 為第 i 個核種在高污染區的初始濃度 (Bq/g 或 pCi/g)， $G_i^*(t)$ 為第 i 個核種在高污染區的土壤濃度指引水平 (Bq/g 或 pCi/g)， $\bar{S}_i(0)$ 為第 i 個核種在排除高污染區以外的平均區域 (面積 100 m²、厚度 0.15 m) 之平均初始濃度 (Bq/g 或 pCi/g)， $G_i(t)$ 則為第 i 個核種在均勻污染區的土壤濃度指引水平 (Bq/g 或 pCi/g)。上述的 $G_i^*(t)$ 與 $G_i(t)$ 均可藉由 RESRAD-ONSITE 程式計算求得， $G_i^*(t)$ 可利用高污染區所對應的面積求得， $G_i(t)$ 則可使用污染區的總面積求得。上述的非均勻污染釋放標準係為均勻污染釋放標準的權宜之計，意即在高污染區無法進行整治的情況之下才能使用，它相對於均勻污染釋放標準更為實際且具較少的限制。然而，當廠址使用非均勻污染釋放標準仍無法通過時，則此廠址中的高污染區則必定須要經過整治之後才能無限制地釋放。

(3) 熱點標準 (Hot Spot Criterion)

熱點標準則是另一個在現場執行特性調查時常常會遇到的情況，此處的熱點係指殘留放射性物質含量遠高於周邊地區水平的區域。相較於均勻

污染，熱點的存在可能會對使用該地區個體造成更大的曝露風險。為確保個體得到充分保護並確保劑量可合理被抑低 (ALARA)，必須在滿足均勻釋放標準的基礎之下，配合採用以下的熱點標準：

$$M^{**} = \sum_i S_i^* / G_i^{**} \leq 1 \quad (10)$$

其中， M^{**} 為熱點區的比值總和， S_i^* 為第 i 個核種在熱點所測得的濃度 (Bq/g 或 pCi/g)， G_i^{**} 則為第 i 個核種在熱點的土壤濃度指引水平 (Bq/g 或 pCi/g)。當熱點的面積等於或小於 1 m^2 時， S_i^* 為頂峰濃度；當熱點的面積大於 1 m^2 時， S_i^* 則為平均濃度。

基本上，熱點的土壤濃度指引水平 G_i^{**} 可藉由 RESRAD-ONSITE 程式並套用熱點所在的面積求得。然而，對於現場應用而言，在沒有電腦可即時求得 G_i^{**} 的情況之下， G_i^{**} 可藉由以下的關係式來進行快速的估算：

$$G_i^{**} = G_i(t_m) \times (100/A)^{1/2} \quad (11)$$

上式中， $G_i(t_m)$ 為第 i 個核種在評估時間範圍內 ($t_r \leq t \leq t_h$) 所出現的最小土壤濃度指引水平 ($t = t_m$) (Bq/g 或 pCi/g)， A 為熱點面積 (m^2)， $(100/A)^{1/2}$ 則為熱點增殖因子 (hot spot multiplication factor)。在廠址現場實際應用時，也可直接採用表 3.1 中所列出的熱點增殖因子來進行熱點基準限值的推導 [1]。上式 (10) 與 (11) 僅適用於熱點的面積小於 25 m^2 的情況，當熱點的面積高於 25 m^2 時，則直接使用均勻污染釋放標準即可。在式 (11)

中，當面積小於 1 m^2 時，則以 $A=1 \text{ m}^2$ 取代。而且，式 (11) 中計算所得的土壤濃度指引水平會較 RESRAD-ONSITE 程式計算結果更為保守。此外，不論是否採用熱點標準，在 100 m^2 的污染區中的平均放射性核種濃度必須總是滿足均勻污染釋放標準。

表 3.1、不同面積範圍之熱點增殖因子

面積 (m^2)	熱點增殖因子
< 1	10^*
1 ~ < 3	6
3 ~ < 10	3
10 ~ 25	2

*面積小於 1 m^2 則取 1 m^2 對應的增殖因子，且最大以不超過 10 為原則。

3.3 輻射劑量評估

由上述說明可知，不論是在核種濃度已知的情況之下要評估劑量影響，抑或是在管制劑量限值的條件之下要求得土壤濃度指引水平或 DCGL，在 RESRAD-ONSITE 程式中必須計算求得的一個最重要的參數即為劑量/土壤濃度比值 (dose/soil-concentration ratio, DSR)，如式 (2) 所示。只要我們知道劑量/土壤濃度比值，藉由量測所得的土壤濃度，就可進行劑量評估；或根據劑量限值，就可以推導出個別核種的 DCGL。因此，進行輻射劑量評估的主要目的即是為了求得所有核種與所有可能途徑所造成的 DSR。例

如：一個廠址遭受 1 pCi/g 的 Cs-137 污染，藉由 RESRAD-ONSITE 程式經曝露途徑分析該廠址上的個體會接收 1.7 mSv/y 的劑量峰值，由此可計算求得其 DSR 為 $1.7 \text{ (mSv/y)/(pCi/g)}$ ，同時也可利用劑量限值 (0.25 mSv/y) 進一步地求得該廠址的 Cs-137 的 DCGL 為 $0.147 \text{ pCi/g (0.25 mSv/y /1.7 (mSv/y)/(pCi/g))}$ 。

一般而言，個別核種與環境途徑有其相對應的劑量/土壤濃度比值，其定義如下：

$$DSR_{ip}(t) \equiv H_{E,ip}(t)/S_i(0) \quad (12)$$

其中， $DSR_{ip}(t)$ 為第 i 個主要核種經第 p 個環境傳遞途徑在時間 t 時所造成的劑量/土壤濃度比值， $H_{E,ip}(t)$ 為第 i 個主要核種及其相關的衰變核種經第 p 個環境傳遞途徑在時間 t 時對個體所造成的年有效劑量 (mSv/y 或 mrem/y)， $S_i(0)$ 則為第 i 個主要核種在均勻污染區的初始濃度 (Bq/g 或 pCi/g)。RESRAD-ONSITE 程式的計算過程中必須輸入眾多的參數，為了瞭解各參數的物理意義與重要性，有必要進一步地針對 RESRAD-ONSITE 程式對於個別主要核種與個別環境傳遞途徑之劑量/土壤濃度比值 $DSR_{ip}(t)$ 的計算方法進行分析，其關係式及其各項次的定義如下：

$$DSR_{ip}(t) = \sum_j DCF_{j,x(p)} \times BRF_{i,j} \times \sum_j \int_t^{t+t_{int}} ETF_{ij,pq}(\tau) \times SF'_{ij,pq}(\tau) d\tau \quad (12)$$

如上式， $DSR_{ip}(t)$ 主要係由幾個重要因子所決定，分別為：(i) $DCF_{j,x(p)}$ ：劑

量轉換因子 (對於體外輻射, 其單位為 (mSv/y)/(Bq/g) 或 (mrem/y)/(PCi/g); 對於吸入或吸入的體內輻射, 其單位為 (mSv/y) 或 (mrem/y))、(ii) $BRF_{i,j}$: 核種衰變的分支因子 (branching factor) (無因次), 用於描述第 i 個主要核種衰變造成第 j 個核種內增長 (ingrowth) 的比例、(iii) $ETF_{ij,pq}(t)$: 環境傳遞因子 (對於體外輻射, 其單位為無因次; 對於吸入或吸入的體內輻射, 其單位為 (g/y)), 係用於表徵第 j 個核種經由不同曝露途徑的劑量影響、(iv) $SF'_{ij,pq}(t)$: 射源修正因子 (source factor), 係用於描述第 i 個主要核種衰變產生的第 j 個核種因衰變、內增長、溶出等過程而隨著時間的變化情形。由上述可知, 劑量轉換因子 $DCF_{j,x(p)}$ 可藉由 ICRP 的報告中取得, 分支因子 $BRF_{i,j}$ 則取決於各核種的本質特性, 因此環境傳遞因子 $ETF_{ij,pq}(t)$ 與射源修正因子 $SF'_{ij,pq}(t)$ 為輻射劑量評估計算時的兩個重要項次。

(1) 射源因子

射源因子 (Source Factor) 主要用於決定殘留的放射性污染隨著時間釋放至外界環境的速率, 污染區的射源強度主要會受到幾何與時間兩個因素的影響。幾何的影響係指污染區的面積、形狀、覆蓋層與污染區的厚度、侵蝕率等造成射源對於個體輻射曝露的影響, 而這些幾何的影響可分別藉由環境傳遞因子項下的面積因子、形狀因子、深度與覆蓋因子來進行修正, 這些修正因子的定義將詳細說明於下一章節之中。另一方面, 此處所指之射源因子係用於修正污染區中的核種濃度因衰變、內增長、或經滲透溶出

等作用而隨著時間的變化情形，射源因子 $SF_{ij}(t)$ 的定義如下：

$$SF_{ij}(t) = S_{ij}(t)/S_i(0) \quad (13)$$

其中， $S_{ij}(t)$ 為經由第 i 個主要放射性核種溶出和內增長所產生並殘留於污染區中的第 j 個主要放射性核種在時間 t 時的濃度 (Bq/g 或 pCi/g)， $S_i(0)$ 則為污染區第 i 個主要放射性核種的初始濃度 (Bq/g 或 pCi/g)。圖 3.4 所示為射源因子隨著時間變化的範例示意圖， SF_i 代表母核 i 的射源因子， SF_{ij} 則代表內增長或溶出後所產生的 j 核種的射源因子。如圖所示，母核 i 的射源因子因母核衰變而隨著時間逐漸衰減，子核 j 的射源因子則是一開始因為內增長或溶出作用而增加，最後也因衰變而慢慢衰減 [5]。

(2) 環境傳遞因子

環境傳遞因子 (Environmental Transport Factor) 主要是利用數學模型來描述核種在不同環境途徑中的傳遞行為，每個環境傳遞途徑均有其對應的環境傳遞因子，而本報告中僅針對體外曝露的環境傳遞因子來當作說明的案例，其它途徑則可參閱 RESRAD-ONSITE 使用手冊的說明 [1]。體外曝露的環境傳遞因子 $ETF_{i1}(t)$ 分別由四個係數所組成，這些係數係用以修正影響體外曝露可能的環境因素，其關係式如下：

$$ETF_{i1}(t) = FO_1 \times FS_{i1}(t) \times FA_{i1}(t) \times FCD_{i1}(t) \quad (14)$$

其中， FO_1 為佔用和屏蔽係數 (occupancy and shielding factor)， $FS_{i1}(t)$ 為形狀係數 (shape factor)， $FA_{i1}(t)$ 為核種相依的面積係數 (area factor)， $FCD_{i1}(t)$ 則為深度與覆蓋係數 (depth-and-cover factor)，而上述這四個係數的單位都是無因次。

佔用和屏蔽係數 FO_1 係考慮一年中個體待在廠址中的時間比例，以及個體處於室內時由現場建築或其它結構所提供的體外曝露的屏蔽率，其關係如下：

$$FO_1 = f_{otd} + (f_{ind} \times F_{sh}) \quad (15)$$

其中， f_{otd} 為個體一年中待在室外的時間比例， f_{ind} 為個體一年中待在室內的時間比例， F_{sh} 則為體外輻射的室內屏蔽係數。在 RESRAD-ONSITE 程式中，個體一年中待在室外與室內的平均時間比例預設值為 0.25 與 0.50，而室內輻射屏蔽係數則預設為 0.70，此係表示個體在室內所接受的體外輻射值可較室外低 30%。上述這些係數均為 RESRAD-ONSITE 計算時必須輸入的，使用者須視真實情境進行適當地調整。

如圖 3.2 所示，RESRAD-ONSITE 程式在進行輻射劑量評估時係假設個體位於污染區上方，污染區上方可能會由非污染的覆蓋層所覆蓋。由於覆蓋層與污染區的厚度可能會受到侵蝕作用而隨著時間改變，深度與覆蓋係數 $FCD_{i1}(t)$ 主要是考慮覆蓋層與污染區厚度對於體外曝露的影響，其關

係式係由 Eckerman 和 Ryman 利用與污染源深度相關的劑量轉換因子 (DCF_i^{FGR}) 的回歸分析求得，如下：

$$FCD_{i1}(t) = \frac{DCF_i^{FGR}[T_s=T(t)]}{DCF_i^{FGR}(T_s=\infty)} = 1 - A_i e^{-100KA_i\rho_b^{CZ}T(t)} - B_i e^{-100KB_i\rho_b^{CZ}T(t)} \quad (16)$$

其中， $T(t)$ 為污染區在時間 t 時的厚度 (m)， ρ_b^{CZ} 為污染區土壤材料的本體密度 (g/cm^3)， A_i 與 B_i 為擬合係數 (無因次)， KA_i 與 KB_i 則為另一組擬合係數 (cm^2/g)。 A_i 、 B_i 、 KA_i 與 KB_i 擬合係數為核種相關，在 RESRAD-ONSITE 程式中有內建的資料庫可供取用 [1]。圖 3.5 所示為 Co-60 核種之深度與覆蓋係數隨污染區厚度與覆蓋層深度的變化情形，左圖係在無覆蓋層的條件之下改變污染區的厚度，深度與覆蓋係數值會隨著污染區厚度的增加而增加，並在污染區厚度達到約 0.3 m 時趨近於 1；右圖則是假設污染區厚度固定為 2 m 的條件之下改變覆蓋層厚度，深度與覆蓋係數值則會隨著覆蓋層厚度的增加而降低，直至覆蓋層厚度達到約 0.45 m 時，其值降為 0，此即表示覆蓋層的厚度足以屏蔽污染區對於個體之體外輻射曝露的影響 [5]。

面積係數 $FA_{i1}(t)$ 則是用於描述污染面積對體外曝露的影響，其定義是有限的污染面積與無限大的污染面積所造成之體外曝露的劑量比值，亦即以無限大污染區所造成的體外曝露劑量做為比較基準，當污染區面積縮小之後，則其劑量影響降低並可藉由此面積係數來進行修正，其關係式如下：

$$FA_{i1} = \frac{D[R=r, T_a=1m, T_c=C_d(t), T_s=T(t)]}{D[R=\infty, T_a=1m, T_c=C_d(t), T_s=T(t)]} \quad (17)$$

如圖 3.6 所示， R 為污染區半徑， $T(t)$ 為污染區厚度， $C_d(t)$ 為覆蓋層厚度， T_a 則為個體中心點距地面的高度（假設為 1 m）[1]。上式的方法是使用逐點積分的方式來分別求得特定面積與無限大污染區的劑量比值，並藉此推得劑量比值與這些幾何參數之間的關係。圖 3.7 所示為 Co-60 與 Pu-240 核種在無覆蓋層且污染區厚度為 2 m 的條件之下，其面積係數隨污染區面積的變化情形。如圖所示，當面積趨近於無限大時，面積係數趨近於 1；反之，當面積變小時，則面積係數降低 [5]。

最後，形狀係數則是用來修正污染區形狀為不規則形或不為圓形時對於體外曝露的影響。若污染區形狀為圓形，則形狀係數為 1；若污染層形狀為不規則形，則係採用不規則形狀的面積係數修正來求得形狀係數，亦即將不規則污染區以一個圓形區域來圍繞，在圓形區域中劃分多個環狀區域，並分別計算污染區在各環狀面積之下所佔的比例，再將各環狀面積的面積係數與污染比例相乘之後加總，所得之加總數值與原不規則污染區面積對應相同圓形區域的面積係數之比值即為形狀係數，而其關係式如下：

$$FS_{i1} = \frac{\sum_{j=1}^n f_j [FA_{i1}(A_j) - FA_{i1}(A_{j-1})]}{FA_{i1} [\sum_{j=1}^n f_j (A_j - A_{j-1})]} \quad (18)$$

其中， f_j 為第 j 個環狀面積區域中受污染的比例， $FA_{i1}(A_j)$ 為環狀面積 A_j 的面積係數。圖 3.8 所示即為 RESRAD-ONSITE 程式中針對不規則污染區的設定頁面，使用者可以程式內建的功能畫出任意不規則形狀的污染區，並

給定受曝露者所在的位置，程式便可自動計算出不同半徑環狀面積中，污染區在各環狀所佔比例，與各環狀面積係數乘積加總，並除上與不規則污染層等面積之圓形污染區的面積係數之後，即可得到不規則污染區的形狀係數。

(3) 劑量轉換因子

如式 (12) 所示，除了射源因子與環境傳遞因子之外，劑量轉換因子亦為計算劑量/土壤濃度比值的重要項次，其定義如下：

$$DCF_{ix} = H_{E,ix}/E_{ix} \quad (19)$$

其中， $H_{E,ix}$ 為第 i 個主要放射性核種及其相關核種經由路徑 x 的曝露所造成的有效劑量或約定有效劑量， E_{ix} 則為第 i 個主要放射性核種經由路徑 x 的曝露參數。當 $x=1$ 時， $H_{E,ix}$ 係指體外輻射所造成的有效劑量 (mSv/y 或 mrem/y)， E_{ix} 則為體外輻射的曝露參數 (Bq/g 或 pCi/g)；當 $x=2,3$ 時， $H_{E,ix}$ 係分別為吸入與嚥入之體內輻射所造成的約定有效劑量 (mSv/y 或 mrem/y)， E_{ix} 則為吸入與嚥入之體內輻射的曝露參數 (Bq/y 或 pCi/y)。因此，體外輻射之劑量轉換因子的單位為 (mSv/y)/(Bq/g) 或 (mrem/y) / (pCi/g)，吸入與嚥入之體內輻射的劑量轉換因子的單位為 (mSv/Bq) 或 (mrem/pCi)。

在 RESRAD-ONSITE 程式中，已經有內建一些劑量轉換因子的資料庫可供選用，體外輻射的劑量轉換因子有來自 FGR No.12 與 ICRP 60 報告可以選用，吸入與嚥入之體內輻射則有 FGR No.11 與 ICRP 72 可以選擇，在 ICRP 72 報告中也可以依年齡來選用適當的劑量轉換因子。此外，使用者也可透過劑量轉換因子編輯器來修改特定核種的劑量轉換因子。

(4) 曝露情境

上述的內容係從理論的分析來考量所有可能的輻射曝露途徑並建立適當的模型，然若欲評估個體最終可能接受到的輻射劑量，則必須依個體不同的活動型態與方式，來決定所需要考慮的輻射曝露途徑及其對應的加權比重，此即輻射曝露情境分析。曝露情境係指個體活動模式，這些模式可能會影響污染區放射性核種的釋出，也可能影響個體所接收到的輻射曝露量。有許多可能的曝露情境，如：自給農業和工人情境。一個廠址實際的曝露情境會取決於許多因素，包括：廠址的位置、土地的分區、廠址的物理特徵等。一般而言，土壤濃度指引水平係基於常住農夫的曝露情境，該情境涵蓋廠址或近廠址曝露的所有環境傳遞途徑，預期會得到最保守的劑量評估結果。其它的情境，如：郊區居民、工人、以及娛樂使用者，則可以藉由調整情境參數來計算放射性核種經由不同傳遞途徑的影響。表 3.2 與表 3.3 所示分別為美國國家環境保護局針對常住農夫、郊區居民、工廠工作者、

以及娛樂使用者等情境建議必須考慮的輻射曝露途徑以及各情境下之關鍵參數的建議值，表中的參數可依所考慮的情境來調整，其中以常住農夫情境為最保守的曝露情境 [1]。

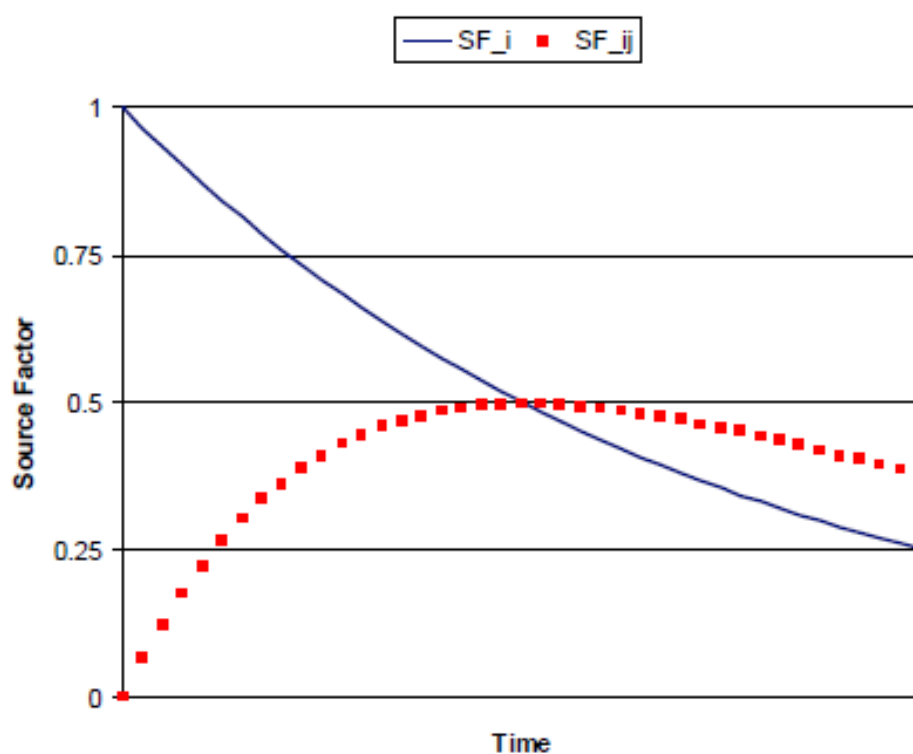


圖 3.4、射源因子隨著時間變化之範例示意圖

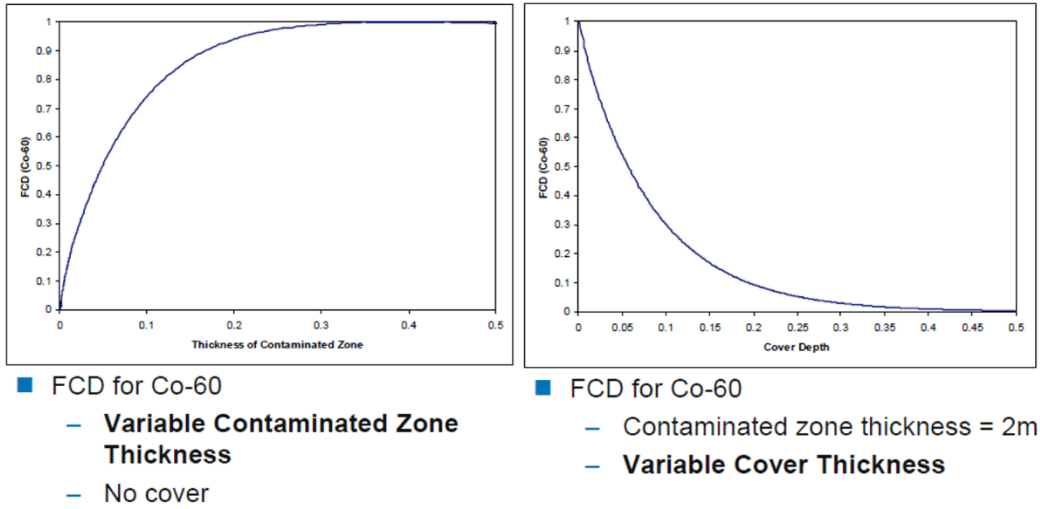


圖 3.5、Co-60 核種之深度與覆蓋係數隨污染區與覆蓋層厚度的變化情形

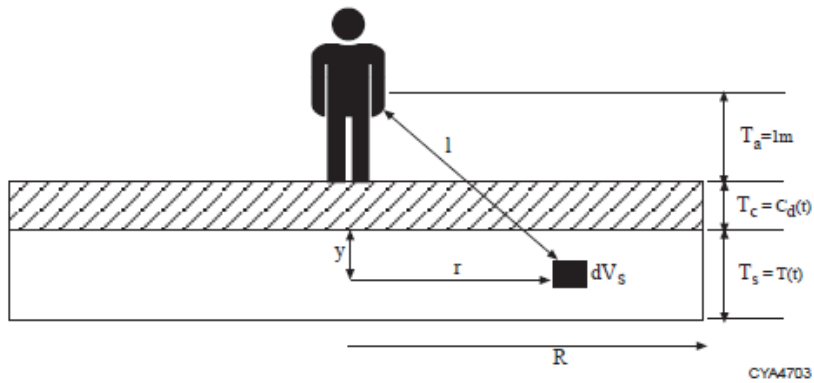


圖 3.6、逐點積分法用於計算面積係數之幾何示意圖

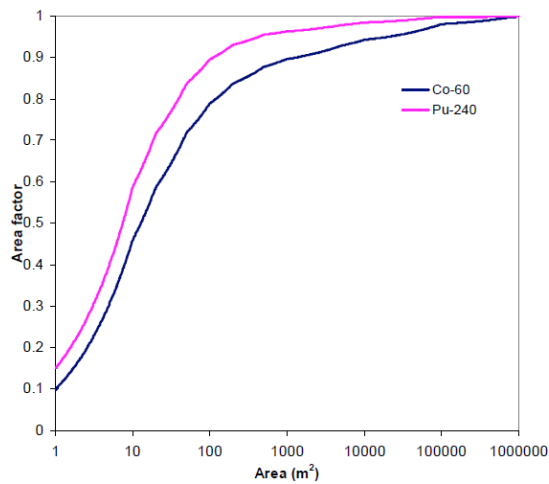


圖 3.7、Co-60 與 Pu-240 核種之面積係數隨污染區面積的變化情形

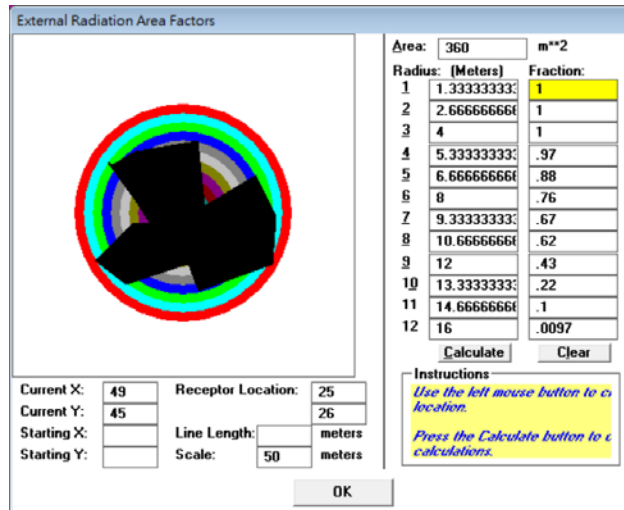


圖 3.8、RESRAD 程式中針對不規則污染區的設定頁面

表 3.2、不同曝露情境之下所對應的輻射曝露途徑

曝露途徑	農夫居民	郊區居民	工廠工作者	娛樂使用者
體外加馬曝露	√	√	√	√
粉塵吸入	√	√	√	√
氬氣吸入	√	√	√	√
植物嚥入	√	√	×	×
肉類嚥入	√	×	×	√
牛奶嚥入	√	×	×	×
魚類嚥入	√	×	×	√
土壤嚥入	√	√	√	√
水嚥入	√	×	×	×

表 3.3、不同曝露情境下之關鍵參數的建議值

參數	單位	農夫居民	郊區居民	工廠工作者	娛樂地點使用者
曝露時間	年	30	30	25	30
吸入速率 ¹	m ³ /y	8,400	8,400	11,400	14,000
室內時間比例 ²	* ³	0.5	0.5	0.17	0
室外時間比例 ⁴	*	0.25	0.25	0.06	0.006
嚥入食物受污染比例 ⁵					
食用植物	*	0.5	0.1	無 ⁶	無
奶類	*	1.0	無	無	無
肉類	*	1.0	無	無	無
水生動物	*	0.5	無	無	無
土壤嚥入 ⁷	克/年	36.5	36.5	36.5	36.5
飲用水 ⁸	公升/年	510	無	無	無

¹ RESRAD 計算所採用的吸入速率係為平均值，8400 m³/y 之數值援引於 EPA Exposure Factor Handbook 之 15.2 m³/d 的平均吸入速率。工作者與娛樂地點使用者也同樣參考 EPA Exposure Factor Handbook 之 1.3 m³/h 與 1.6 m³/h 的假設數值。

² RESRAD 假設農夫居民與郊區居民會花 50% 的時間待在污染廠址室內，而工作者則會以一天 6 小時 (一年 1,500 小時) 的時間待在污染廠址室內。

³ *符號表示無單位

⁴ RESRAD 假設農夫居民與郊區居民會花 25% 的時間待在污染廠址室外，而工作者則會以一天 2 小時 (一年 500 小時) 的時間待在污染廠址室外。

⁵ 以非常大的受污染區域 (> 20,000 m²) 作為基準，其攝取食物受污染比例。

⁶ 無表示不考慮該項傳遞方式。

⁷ RESRAD 採用 36.5 g/y 的土壤嚥入率，真正的土壤嚥入率則必須使用住居因子來進行校正

⁸ RESRAD 只考慮農夫居民的飲用水嚥入，並採用 510 L/y 的嚥入率。

四、參數選擇策略與靈敏度分析

4.1 參數選擇策略

RESRAD-ONSITE 程式具備優異的建模與劑量評估功能，可藉由各式曝露途徑分析劑量影響，如：體外曝露、空氣吸入曝露、攝入與地下水傳遞途徑所造成的體內曝露等。RESRAD-ONSITE 程式將內建模型裡需要的變因彙整成參數，藉由參數的修改，並配合 RESRAD-ONSITE 程式中所考量的各式模型，即能夠模擬評估假想曝露情境之下的輻射劑量。舉例來說，RESRAD-ONSITE 程式的地下水傳輸模型即是採用三層式用水模型 (three-box water-use model) 來評估土壤中的放射性核種經由滲漏 (infiltration)、吸附 (sorption)、溶出 (leaching) 等作用而遷移至地下水含水層 (groundwater aquifer) 的傳遞行為，藉此可估算污染區中水的滲漏率 (infiltration rate) 及核種的溶出率 (leaching rate) [3, 6]。為能利用此用水模型正確地估算核種於地下水中的傳遞行為，必須配合輸入廠址特定的地質與水力參數，包括：污染區、非飽和區、飽和區各層的厚度、密度、總孔隙率 (total porosity)、有效孔隙率 (effective porosity)、容水量 (field capacity)、侵蝕率 (erosion rate)、水力傳導率 (hydraulic conductivity)、土壤特定的指數參數 (b parameter)、非飽和區的層數、飽和區水力梯度 (saturated zone hydraulic gradient)、蒸散係數 (evapotranspiration coefficient)、降雨量 (precipitation rate)、灌溉率 (irrigation rate)、溢流係數 (runoff coefficient) 等，藉此模擬

污染源經由地下水傳遞的影響。

RESRAD-ONSITE 程式裡總計約有將近 145 個參數，其中某些參數可能與核種相關，亦即會隨著污染核種的改變而改變，而這些參數在 RESRAD-ONSITE 程式中皆有建議採用的預設值。然而，在實際進行劑量評估計算時，並不能完全採用程式內建的參數預設值，而必須依據廠址的特性使用廠址特定的參數。經由評估分析的結果，若發現某些參數對於劑量的影響甚鉅，則這些參數應該歸類為重要的參數，必須直接藉由量測取得該廠址對應的實際值，或者經由過往的文獻資料分析尋找出最適當的數值；反之，若評估之後發現某些參數對於劑量評估的影響不大，這些參數則可歸類為次要的參數，可直接使用預設值。因此，為了使得劑量評估的結果具有足夠的公信力，且又能使得資源能夠獲得有效地運用，必須建立一套有系統的參數選擇策略，針對這些參數進行分類與分級，藉此區分各參數的重要性及其優先等級。

在美國核管會 NUREG/CR6697 的技術文件中，已針對 RESRAD-ONSITE 程式的參數選擇制定一套系統化的評估標準，同時也針對評估的結果進行初步的參數分級 [7]。在該技術文件中，將 RESRAD-ONSITE 程式的參數依照四個標準來評估其優先順序，分別為：「相關性」、「劑量影響」、「參數類型」、「數據可取得性」。在每個評估標準中，各參數會按照該評估標準取得配分，接著將各參數經由四個評估標準所獲取的得分加總，最後

依據各參數的總分將參數依重要性優先次序分為「1」、「2」、「3」三種等級。參數的等級數字愈小代表該參數值對於劑量評估的影響愈大，其數值可能會傾向隨著廠址特性的改變而改變，且亦比較容易藉由量測或透過文獻資料取得其數值；相反地，等級數字愈大則表示該參數對於劑量的影響較微小，參數數值並不會隨廠址特性而異，且這些參數並不易藉由量測或文獻資料取得其數值。因此，在進行參數的收集與分析時，依重要性必須先聚焦於等級 1 的參數，其次為等級 2，再次之為等級 3。決定參數的優先次序之後，便能更有效率地進行輻射劑量評估計算 [7]。本節以下的內容中將具體說明 NUREG/CR-6697 文件中的參數分類與分級的做法，同時也將實際利用 RESRAD-ONSITE 程式來進行重要參數的靈敏度分析，並將分析結果依循此套評估標準來驗證這些參數的重要性。

4.2 參數評估標準

NUREG/CR-6697 文件中的參數選擇策略係依據「相關性」、「數值可取得性」、「參數類型」、以及「劑量影響」四類評估標準來進行參數的評估，在各類型的標準中會依據評估結果給定分數，分數愈低表示參數愈重要；分數愈高則表示參數優先度較低，表 4.1 所示即為利用此參數選擇策略的評估標準及其對應的分數分配規則。雖然此套配分規則未盡客觀，但藉由各評估標準所對應的大的分數配分範圍仍可有效地區分重要與不重要的參

數，以下即針對各評估標準的配分規則進行詳細說明：

(1) 相關性 (relevance)

參數相關性的衡量標準可由以下幾種條件來決定，包括：參數在實際劑量計算時是否被使用在數學關係式之中、參數是否需要給定特定的數值來完成計算的必要性、以及參數是否適合以分布函數來描述。當參數被認為具備不相關的條件時，則給定 9 分。RESRAD-ONSITE 程式中的不相關參數可分為三類：(一) 用於 RESRAD-ONSITE 模型中選定計算模式的參數，但是不涉及實際的劑量計算，如：灌溉模式參數 (overhead irrigation、ditch irrigation) 即屬於此類。(二) 在 RESRAD-ONSITE 程式中，某些參數之間會具備依賴性，亦即這些參數是可以藉由其它參數推導出來的，因此這些參數則沒有高度必要性需要給定特定的數值，可以歸為不相關參數。例如：土壤溶出率或植物、肉類、牛奶的污染比例等參數。(三) 某些參數的數值通常只被設定在 0 或 1 的極值，這類參數必須按照當地廠址特定的情形來決定，如：日常用水、牲畜餵養用水、灌溉用水的污染比例；地下水用於飲用水、日常用水、牲畜餵養用水、灌溉用水的比例等。由於這類參數不太適合以分布函數來描述，應被視為不相關的參數。除上述的不相關參數之外，其餘的參數則被認定為相關參數，並給定 0 分。

(2) 數據可取得性 (data availability)

數據可取得性的評估標準係將參數數據按照取得難易程度區分為三種類型，分別為：(一) 具有已知數據可取得性的參數：這類型參數的數值或分布特性可以直接從過去完整的報告或文獻資料庫中搜尋得知，如：NRC 的 NUREG/CR-5512 技術文件即針對 DandD 計算程式中所使用的參數值進行完整的編譯與分析 [8, 9]；另外，美國 DOE 也針對土壤/水的分配係數 (distribution coefficient, K_d) 進行深入地研究，可透過其發表的報告中直接蒐集到這些重要的水力相關數值 [10]。因此，針對這些僅需要較少的時間或心力編譯或分析的參數，且蒐集之後可以直接使用的參數便歸類為這一型的參數。(二) 需要重新蒐集或分析的參數：這類型的參數並不如前者可以直接取得，可能需要重新蒐集數據來源，並經過編譯或分析之後才能使用。(三) 難以蒐集分析的參數：相較於前兩者，這類型參數的數值更加難以蒐集或甚至無法取得，必須付出額外的心力蒐集分析原始數據，藉此獲知數據的分布情形。由上述可知，參數可依其可取得性的難易分別評估其重要性，具有已知數據可取得性的參數相對具有較高的重要性，參數可依據以上這三種類型分別給予 1 分、3 分、5 分的分數。

(3) 參數類型 (parameter type)

參數類型的評估標準係將參數依據其屬性區分為「物理型」、「行為型」、「代謝型」等三種類型，此三種類型的參數分別定義如下：(一) 物理型參數 (Physical Parameter (P))：此類參數不隨受體改變，由核種、位置、廠址

的地質特徵決定，亦即此類型參數會與污染源及廠址特性相關。(二) 行為型參數 (Behavioral Parameter (B))：此類參數取決於受體的行為與曝露情境，對於相同的個體群集，此類型的參數值仍可能隨著曝露情境的改變而改變，如：娛樂使用的情境參數與居住情境的佔用因子 (occupancy factor) 不同。

(三) 代謝參數 (Metabolic Parameter (M))：此類參數用於描述潛在受體的代謝特徵，與曝露情境無關，且其參數值會隨不同人口年齡族群而改變。代謝型參數係代表一般個體的平均數值，其值與不同情境、接受群體的行為、廠址條件無關。由上述可知，物理型參數與廠址相依且會隨著廠址而改變，而行為型與代謝型參數通常是為了因應輻射劑量評估的需求，係針對一般個體所設定的平均值。因此，物理型參數相對於行為型與代謝型參數具有較高的重要性，此評估標準依物理型、行為型、代謝型參數的順序分別給予 1 分、5 分、9 分。此外，若有某些參數同時屬於兩種類型，如：吸入率 (inhalation rate) 即同時屬於行為型與代謝型參數，此類參數則以較低分數的類別來做為配分標準。

(4) 劑量影響 (variability of radiation dose)

劑量影響的評估標準係探討參數對於劑量計算的變化率，若參數的改變會對劑量造成很大的影響，則表示該參數具有相當高的重要性，必須更正確地決定該參數的數值以獲得正確的輻射劑量估算結果。為了能夠確實量化參數對於輻射劑量評估的影響，在 NUREG/CR-6697 技術文件中即定

義標準化劑量差 (Normalized dose difference, NDD) 參數 [7]，其關係式如下：

$$\text{NDD} = \frac{(D_{high} - D_{low})}{D_{base}} \times 100\% \quad (20)$$

其中， D_{high} 、 D_{low} 、 D_{base} 分別代表所關切的參數值設定在高、低、以及基值時所對應的峰值劑量。為了求得關切參數所對應的 NDD 值，關切參數以外的其它參數在計算時會被設定為基值，各關切參數的高、低、以及基值的建議值可以參考 NUREG/CR-6697 技術文件，並使用 RESRAD-ONSITE 程式的靈敏度分析 (sensitivity analysis) 功能來評估參數改變對於劑量變化率的影響。由於關鍵曝露途徑所造成的峰值劑量可能隨放射性核種而異，為了避免單一特定核種造成 NDD 的偏差，進行計算時必須針對 Co-60、Sr-90、Cs-137、Ra-226、Th-230、U-238、Pu-239、Am-241 等八種代表性核種進行檢驗，而最終則選擇此八種核種所造成的最大 NDD 值做為判定劑量影響的評分依據。如表 4.1 所示，NDD 值的評分依據如下：NDD > 1000：1 分、300 < NDD ≤ 1000：2 分、100 < NDD ≤ 300：3 分、50 < NDD ≤ 100：4 分、10 < NDD ≤ 50：5 分、3 < NDD ≤ 10：6 分、NDD ≤ 3：7 分。

表 4.1、NUREG/CR-6697 參數選擇策略的評估標準及配分標準

評估標準	分數分配規則	
相關性	相關：0 分 不相關：9 分	
數值可取得性	具有已知數據可取得性的參數：1 分 需要重新蒐集或分析的參數：3 分 難以蒐集分析的參數：5 分	
參數類型	物理型：1 分 行為型：5 分 代謝型：9 分	
劑量影響	按照NDD值的範圍配分 1 到 7 分，如下表：	
	對應配分	NDD值 = x
	1	$1000 < x$
	2	$300 < x \leq 1000$
	3	$100 < x \leq 300$
	4	$50 < x \leq 100$
	5	$10 < x \leq 50$
	6	$3 < x \leq 10$
7	$x \leq 3$	

4.3 參數分級與靈敏度分析驗證

藉由上述的四個評估標準，可將各參數所獲取的配分加總，之後即可依其總分來決定各參數的重要性排序並進行參數的分級。如表 4.2 所示，若參數所獲得的總分範圍介於 3 到 6 分之間，則歸類為等級 1；總分範圍介於 7 到 10 分之間，則歸類為等級 2；總分達到 11 分以上，則歸類為等級 3。參數重要性的排序依次為等級 1、等級 2、等級 3，重要性愈高的參數即表示其對於劑量評估的影響更為重要，必須經由量測或可靠的文獻資料來

源依廠址特性來決定正確的數值，或藉由進一步地進行參數不確定性分析來瞭解其對於劑量的影響。依據上述的評估標準，NUREG/CR-6697 的報告中已針對 RESRAD-ONSITE 程式中 145 個參數進行分級，其中歸類為等級 1 的參數有 10 個，等級 2 的參數有 39 個，等級 3 的參數則有 96 個，本報告僅列示等級 1 與等級 2 的參數於表 4.3 之中供參。

為了能夠深入瞭解並熟悉 NUREG/CR-6697 所擬定的參數選擇策略，本研究即實際利用 RESRAD-ONSITE 程式的靈敏度分析功能，針對等級 1 的 10 個參數進行參數對於劑量的變化率分析，藉此求得等級 1 各參數的 NDD 數值。同時，也將依循上述的四個評估標準進行等級 1 參數的得分與加總，藉此驗證這些參數所獲得的總分排序確實落於等級 1 的分數範圍。本研究所使用的 RESRAD-ONSITE 程式為 7.2 版，使用的放射性核種轉換資料來源為 ICRP 38、體內劑量轉換因子資料庫為 FGR 11、體外劑量轉換因子資料庫為 FGR 12，而所有的植物、肉類、牛奶的轉移因數 (transfer factor) 與水產食品的生物累積因數 (bioaccumulation factor) 則使用 RESRAD-ONSITE 程式的內建數值。進行靈敏度分析時，所使用的輻射曝露情境係假設為自給自足的常住農夫情境，考慮污染廠址的農作物與水產食品嚥入及地下水抽取飲用與灌溉途徑，但排除氬氣曝露途徑的影響。除欲進行劑量靈敏度分析的參數之外，其餘參數的數值在計算時均設定在基值 (base values)，而每次計算時則調整關切參數的數值為高值、基值或低值，這些高

值、基值或低值的數值假設則參照 NUREG/CR-6697 的報告。

表 4.4 所示即為本研究針對等級 1 參數的 NDD 計算結果，表中除列出各參數在計算時所使用的高值、低值、以及基值之外，也列出利用 RESRAD-ONSITE 程式計算分別求得之各參數在高值、低值、基值所對應的峰值劑量 D_{high} 、 D_{low} 、 D_{base} ，並據此推算 NDD 值及最大的 NDD 值。由計算結果可以發現，個別參數的 NDD 數值隨著不同的核種有明顯的變化，此結果說明不同核種會對應不同的關鍵性影響途徑，其關鍵途徑的劑量貢獻相對於總劑量也會不相同。因此，在進行 NDD 值的計算時，應同時評估多個代表性核種的 NDD 值，並選定最大的 NDD 值 (NDD_{max}) 做為最終用於評分的結果，如此即可避免利用單一核種評估時可能造成的偏差。在 NUREG/CR-6697 的報告中即建議應使用具有不同關鍵曝露途徑的代表性核種來進行 NDD 值的計算，其所建議的代表性核種包括：Co-60、Sr-90、Cs-137、Ra-226、Th-230、U-238、Pu-239、Am-241。再者，由於 C-14 與 H-3 具有獨特的環境傳遞機制與曝露途徑，在進行 NDD 劑量影響分析時，與此兩個核種相關的輸入參數也應該單獨加入此兩個核種的 NDD 計算。另一方面，針對食物保存時間的輸入參數，進行 NDD 劑量影響分析時則需加入 Ca-45、Ra-228、Cf-252 核種，主要是由於此三個核種具有較短的半衰期，且對於吸入途徑的輻射劑量有較顯著的貢獻。根據 NDD 值的計算結果，本研究也重新針對上述的參數進行各評估標準的配分及分數加總，如表 4.5 所示，結果顯

示這些參數的總分仍落於等級 1 參數的範圍，與 NUREG/CR-6697 的結果相符 [7]。此外，表 4.6 也補充說明 RESRAD-ONSITE 程式中屬於等級 1 參數之物理意義與其作用機制。

表 4.2、總分與參數等級對照表

參數等級	1	2	3
總分範圍	3~6	7~10	11 以上

表 4.3、NUREG/CR-6697 所篩選之等級 1 與等級 2 參數

等級 1	等級 2
Distribution coefficient (分配係數) Density of cover material (覆蓋層密度) Density of contaminated zone (污染區密度) Density of saturated zone (飽和區密度) Saturated zone total porosity (飽和區總孔隙率) Saturated zone effective porosity (飽和區有效孔隙率) Saturated zone hydraulic conductivity (飽和區水利傳導度) Unsaturated zone thickness (非飽和區厚度) Depth of roots (根部深度) Transfer factors for plant (植物轉移因子)	Nuclide concentration (核種濃度) Area of contaminated zone (污染區面積) Thickness of contaminated zone (污染區厚度) Length parallel to aquifer flow (平行含水層流動的長度) Cover depth (覆蓋層深度) Cover erosion rate (覆蓋層侵蝕率) Contaminated zone total porosity (污染區總孔隙率) Contaminated zone erosion rate (污染區侵蝕率) Contaminated zone hydraulic conductivity (污染區水力傳導度) Contaminated zone b parameter (污染區 b 參數) Evapotranspiration coefficient (蒸散係數) Wind speed (風速) Precipitation rate (降雨率) Runoff coefficient (溢流係數) Saturated zone hydraulic gradient (飽和區水力梯度) Saturated zone b parameter (飽和區 b 參數) Well pump intake depth (井水抽取深度) Well pumping rate (井水抽取速率) Unsaturated zone density (非飽和區密度) Unsaturated zone total porosity (非飽和區總孔隙率) Unsaturated effective porosity (非飽和區有效孔隙率) Unsaturated zone soil-b parameter (非飽和區土壤 b 參數) Unsaturated zone hydraulic conductivity (非飽和區水力傳導度) Mass loading for inhalation (吸入之質量負載) Indoor dust filtration factor (室內粉塵過濾係數) External gamma shielding factor (體外加馬屏蔽因子) Fruit, vegetables, and grain consumption (水果、植物、穀類消耗) Milk consumption (牛奶消耗) Soil ingestion rate (土壤嚥入率) Drinking water ingestion rate (飲用水嚥入率) Aquatic food contaminated fraction (水生食品污染率) Depth of soil mixing layer (土壤混合層深度) Wet-weight crop yields for non-leafy vegetables (非葉類蔬菜的濕重作物產量) Weathering removal constant (氣候移除常數) Wet foliar interception fraction for leafy vegetables (葉菜濕葉面攔截部分) C-14 evasion layer thickness in soil (土壤中 C-14 逃逸層厚度) Transfer factors for meat (肉類轉移因子) Transfer factors for milk (牛奶轉移因子) Bioaccumulation factors for fish (魚類生化累積因子)

表 4.4、利用 RESRAD-ONSITE 程式針對等級 1 參數的 NDD 計算結果

參數名稱	低值	基值	高值	選用核種	D _{low}	D _{base}	D _{high}	NDD(%)	NDD _{max}
Distribution coefficients (分配係數)	參考NUREG/CR-6697附錄B表格3.2			Co-60	5.69E+00	5.74E+00	5.742	8.88E-01	1.10E+02
				Sr-90	5.43E-01	5.53E-01	5.60E-01	3.06E+00	
				Cs-137	1.32E+00	1.32E+00	1.32E+00	0.00E+00	
				Ra-226	4.87E+00	4.90E+00	4.91E+00	6.74E-01	
				Th-230	9.32E-01	7.31E-01	1.29E-01	1.10E+02	
				U-238	1.56E+00	1.56E+00	7.66E-02	9.51E+01	
				Pu-239	3.18E+00	3.18E+00	9.76E-02	9.69E+01	
				Am-241	1.19E-01	1.19E-01	1.19E-01	0.00E+00	
Density of cover material (覆蓋層厚度)	0.86	1.4312	1.76	Co-60	7.58E-01	2.18E-01	1.14E-01	2.95E+02	2.95E+02
				Sr-90	5.34E-01	5.33E-01	5.33E-01	7.50E-02	
				Cs-137	1.34E+01	4.83E+00	3.56E+00	2.04E+02	
				Ra-226	4.55E+00	4.54E+00	4.54E+00	1.98E-01	
				Th-230	1.48E+00	1.48E+00	1.48E+00	0.00E+00	
				U-238	1.58E+00	1.58E+00	1.58E+00	0.00E+00	
				Pu-239	3.50E+00	3.50E+00	3.50E+00	0.00E+00	
				Am-241	5.82E-02	5.82E-02	5.82E-02	1.20E-01	
Density of contaminated zone (污染區密度)	0.86	1.4312	1.76	Co-60	4.60E+00	5.74E+00	6.13E+00	2.66E+01	6.09E+01
				Sr-90	5.45E-01	5.53E-01	5.55E-01	1.70E+00	
				Cs-137	1.06E+00	1.32E+00	1.40E+00	2.57E+01	
				Ra-226	4.07E+00	4.90E+00	5.18E+00	2.28E+01	
				Th-230	5.81E-01	7.31E-01	7.84E-01	2.78E+01	
				U-238	9.44E-01	1.56E+00	1.90E+00	6.09E+01	
				Pu-239	1.98E+00	3.18E+00	3.83E+00	5.81E+01	
				Am-241	1.19E-01	1.19E-01	1.19E-01	2.52E-01	
Density of saturated zone (飽和區密度)	0.86	1.4312	1.76	Co-60	5.74E+00	5.74E+00	5.74E+00	0.00E+00	9.69E+01
				Sr-90	5.53E-01	5.53E-01	5.53E-01	0.00E+00	
				Cs-137	1.32E+00	1.32E+00	1.32E+00	0.00E+00	
				Ra-226	4.90E+00	4.90E+00	4.90E+00	0.00E+00	
				Th-230	1.25E+00	7.31E-01	5.45E-01	9.69E+01	
				U-238	2.87E+00	1.56E+00	1.60E+00	8.08E+01	
				Pu-239	5.21E+00	3.18E+00	2.59E+00	8.23E+01	
				Am-241	1.19E-01	1.19E-01	1.19E-01	0.00E+00	

(接上頁)

參數名稱	低值	基值	高值	選用核種	D _{low}	D _{base}	D _{high}	NDD(%)	NDD _{max}
Saturated zone total porosity (飽和區總孔隙率)	0.34	0.4599	0.68	Co-60	5.74E+00	5.74E+00	5.74E+00	0.00E+00	9.75E+01
				Sr-90	5.53E-01	5.53E-01	5.53E-01	0.00E+00	
				Cs-137	1.32E+00	1.32E+00	1.32E+00	0.00E+00	
				Ra-226	4.90E+00	4.90E+00	4.90E+00	0.00E+00	
				Th-230	4.70E-01	7.31E-01	1.18E+00	9.75E+01	
				U-238	1.20E+00	1.56E+00	2.13E+00	5.97E+01	
				Pu-239	2.36E+00	3.18E+00	4.65E+00	7.20E+01	
				Am-241	1.19E-01	1.19E-01	1.19E-01	0.00E+00	
Saturated zone effective porosity (飽和區有效孔隙率)	0.1	0.2	0.4	Co-60	5.74E+00	5.74E+00	5.74E+00	0.00E+00	1.57E+02
				Sr-90	5.53E-01	5.53E-01	5.53E-01	0.00E+00	
				Cs-137	1.32E+00	1.32E+00	1.32E+00	0.00E+00	
				Ra-226	4.90E+00	4.90E+00	4.90E+00	0.00E+00	
				Th-230	1.35E+00	7.31E-01	2.04E-01	1.57E+02	
				U-238	3.07E+00	1.56E+00	7.83E-01	1.46E+02	
				Pu-239	6.35E+00	3.18E+00	1.59E+00	1.50E+02	
				Am-241	1.19E-01	1.19E-01	1.19E-01	0.00E+00	
Saturated zone hydraulic conductivity (飽和區水力傳導度)	0.001	10	200	Co-60	5.74E+00	5.74E+00	5.74E+00	0.00E+00	1.18E+02
				Sr-90	5.53E-01	5.53E-01	5.53E-01	0.00E+00	
				Cs-137	1.32E+00	1.32E+00	1.32E+00	0.00E+00	
				Ra-226	4.90E+00	4.90E+00	4.90E+00	0.00E+00	
				Th-230	8.70E-02	7.31E-01	6.44E-01	7.62E+01	
				U-238	5.67E-02	1.56E+00	1.85E+00	1.15E+02	
				Pu-239	9.39E-02	3.18E+00	3.85E+00	1.18E+02	
				Am-241	1.19E-01	1.19E-01	1.19E-01	0.00E+00	
Unsaturated zone thickness (非飽和區厚度)	0.3	1.2288	316	Co-60	5.74E+00	5.74E+00	5.74E+00	0.00E+00	9.85E+01
				Sr-90	5.53E-01	5.53E-01	5.53E-01	0.00E+00	
				Cs-137	1.32E+00	1.32E+00	1.32E+00	0.00E+00	
				Ra-226	4.90E+00	4.90E+00	4.90E+00	0.00E+00	
				Th-230	8.07E-01	7.31E-01	8.70E-02	9.85E+01	
				U-238	1.56E+00	1.56E+00	1.57E+00	1.92E-01	
				Pu-239	3.18E+00	3.18E+00	9.39E-02	9.71E+01	
				Am-241	1.19E-01	1.19E-01	1.19E-01	0.00E+00	

(接上頁)

參數名稱	低值	基值	高值	選用核種	D _{low}	D _{base}	D _{high}	NDD(%)	NDD _{max}
Depth of roots (根部深度)	0.3	0.9	3	Co-60	5.79E+00	5.74E+00	5.72E+00	1.17E+00	2.60E+02
				Sr-90	1.62E+00	5.53E-01	1.81E-01	2.60E+02	
				Cs-137	1.37E+00	1.32E+00	1.30E+00	5.53E+00	
				Ra-226	6.36E+00	4.90E+00	4.45E+00	3.91E+01	
				Th-230	7.31E-01	7.31E-01	7.31E-01	0.00E+00	
				U-238	1.56E+00	1.56E+00	1.56E+00	0.00E+00	
				Pu-239	3.18E+00	3.18E+00	3.18E+00	0.00E+00	
				Am-241	2.00E-01	1.19E-01	9.09E-02	9.12E+01	
Transfer factors for plants (植物轉移因子)	參考NUREG/CR-6697附錄B表格3.2			Co-60	5.72E+00	5.74E+00	5.74E+00	4.35E-01	3.34E+02
				Sr-90	5.11E-02	5.53E-01	5.53E-01	9.07E+01	
				Cs-137	1.29E+00	1.32E+00	1.35E+00	4.02E+00	
				Ra-226	4.33E+00	4.90E+00	1.14E+01	1.45E+02	
				Th-230	1.22E+00	7.31E-01	1.22E+00	1.37E-01	
				U-238	1.56E+00	1.56E+00	1.56E+00	0.00E+00	
				Pu-239	3.18E+00	3.18E+00	3.18E+00	0.00E+00	
				Am-241	8.29E-02	1.19E-01	4.81E-01	3.34E+02	

表 4.5、等級 1 參數之各評估標準配分及分數加總

參數名稱	NDD _{max}	各評估標準得分				總分	等級
		相關性	可取得性	參數類型	劑量影響		
Distribution coefficients (cm ³ /g) 分配係數	1.10E+02	0	1	1	3	5	1
Density of cover material (g/cm ³) 覆蓋層密度	2.95E+02	0	1	1	3	5	1
Density of contaminated zone (g/cm ³) 污染區密度	6.09E+01	0	1	1	4	6	1
Density of saturated zone (g/m ³) 飽和區密度	9.69E+01	0	1	1	4	6	1
Saturated zone total porosity 飽和區總孔隙率	9.75E+01	0	1	1	4	6	1
Saturated zone effective porosity 飽和區有效孔隙率	1.57E+02	0	1	1	3	5	1
Saturated zone hydraulic conductivity (m/year) 飽和區水力 傳導度	1.18E+02	0	1	1	3	5	1
Unsaturated zone thickness (m) 非飽和區厚度	9.85E+01	0	1	1	4	6	1
Depth of roots (m) 根部深度	2.60E+02	0	1	1	3	5	1
Transfer factors for plants 植物轉移因子	3.34E+02	0	1	3	2	6	1

表 4.6、等級 1 參數之物理意義及其作用機制

參數名稱	類型	預設值	物理意義及作用機制
Distribution coefficients (cm ³ /g) 分配係數	物理型	核種相依	定義放射性核種在固態粒子中的濃度與在水中的濃度的比值，此參數可決定任一個放射性核種在污染區、未飽和區、以及飽和區的溶出率
Density of cover material (g/cm ³) 覆蓋層材料密度	物理型	1.5	定義覆蓋層材料的本體密度，此參數可決定深度與覆蓋係數 $FCD_{i1}(t)$ ，亦即覆蓋材料對外部輻射劑量的衰減程度
Density of contamination zone (g/cm ³) 污染區密度	物理型	1.5	定義污染區的本體密度，此參數可決定特定源項體積內土壤的總質量，由於放射性核種濃度係以 pCi / g 為單位，因此密度也決定了體積內放射性核種的總量。此外，其也用於計算放射性核種的溶出率。因此，此參數對於所有途徑皆具有潛在的影響
Density of saturated zone (g/cm ³) 飽和區密度	物理型	1.5	定義飽和區的本體密度，與放射性核種在飽和區的延遲因子 (retardation factor) 成正比關係，可用於計算放射性核種隨地下水從上坡邊緣移動到污染區域下坡邊緣所需的時間
Saturated zone total porosity 飽和區總孔隙率	物理型	0.4	定義飽和區中的孔隙體積與飽和區總體積的比值，與放射性核種在飽和區的延遲因子 (retardation factor) 成反比關係，可用於計算放射性核種隨地下水從上坡邊緣移動到污染區域下坡邊緣所需的時間
Saturated zone effective porosity 飽和區有效孔隙率	物理型	0.2	定義飽和區中水可以其內流動之孔隙的體積與飽和區總體積的比值，亦即總孔隙率排除孤立的孔隙和吸附在粘土礦物或其他顆粒上的水所佔的孔隙體積之後的孔隙率，可用於計算放射性核種隨地下水從上坡邊緣移動到污染區域下坡邊緣所需的時間
Saturated zone hydraulic conductivity (m/year) 飽和區水力傳導度	物理型	100	定義在一水力梯度之下，飽和區中土壤滲透水的能力，用於描述飽和區中地下水的流速。在飽和區，水力傳導率用於決定地下水流速，這會影響含水層到水的使用時間以及井水中放射性核種的稀釋係數。
Unsaturated zone thickness (m) 非飽和區厚度	物理型	4	定義位於污染區域底部下方和地下水位之上的未污染不飽和區的厚度，係為放射性核種從污染區域到達地下水位的距離。厚度愈厚則突破時間 (breakthrough time) 愈長，突破時間則會影響放射性核種的增長和衰減，也會影響到達地下水位放射性核種的總量。
Depth of roots (m) 根部深度	物理型	0.9	定義植物在地面以下的最大根部深度，此參數會影響植物根部吸收放射性核種的量。在導致植物污染的四種機制 (根部吸收、葉面沉積、高架灌溉、溝渠灌溉) 之中，根部吸收是最重要的一種，為造成植物、肉類、牛奶攝食途徑等劑量貢獻的重要來源。
Transfer factors for plants 植物轉移因子	物理型	核種相依	定義植物在剛收成時，其可食用部分之放射性核種濃度相對於乾土壤中放射性核種濃度之比值，此轉移因數會影響植物、肉類、牛奶等曝露途徑的輻射劑量

五、概率性輻射劑量風險分析

5.1 參數值選定流程

如本報告第四節的內容所述，當利用 RESRAD 程式進行殘留放射性核種輻射劑量評估計算時，為了處理眾多的 RESRAD 計算的相關參數，首先可先行參考 NUREG/CR-6697 報告附錄 A 中的方法進行各參數的屬性分類，接著可利用 RESRAD 程式中所內建的靈敏度分析功能，並遵循 NUREG/CR-6697 報告附錄 B 中所提出的系統性參數分級法則，據此即可依據量化的評分標準來判定各參數的重要性。在 NUREG/CR-6697 的報告中已針對上述的參數分類與分級的做法制定一體適用的方法，亦即藉由此方法所選出具有高重要性的參數，對於個體劑量具有決定性的影響，在建置除役廠址特性輻射劑量評估模型時都必須要謹慎地考慮這些參數的數值。因此，完成各參數的屬性與重要性的定義之後，下一個步驟係為 RESRAD 程式計算時最重要的步驟，也就是如何依據各參數的重要性來選擇或決定歸屬於各個特定廠址的參數值。

使用 RESRAD 程式來進行常住農夫情境的有效劑量與其對應的 DCGL 計算時，需要指定相當多的參數值；再者，有些除役核電廠廠址通常也會牽涉相當多的放射性核種，而模型中的某些參數又與個別核種相關。因此，對於會顯著影響有效劑量與 DCGL 的重要參數，則必須採取較保守的方式

來指定其參數值，使得藉由劑量模型所計算求得的結果通常會高估而不是低估可能的劑量影響。然而，在建立特定廠址劑量評估模型之前，使用者並無法得知那些參數對於個體之有效劑量與 DCGL 結果可能會具有顯著的影響，因此建立可靠的參數值選定方法與步驟有高度的必要性。一般而言，建構參數選定流程必須基於以下三個基本原則：(1) 行為型參數與代謝型參數值係與評估情境中的關鍵群體的行為與生理代謝性質相關，指定的數值必須為足以代表該關鍵群體的平均數值。(2) 物理型參數會隨著不同廠址的特性而改變，在量測方法與資源可取得的條件之下，物理型參數值必須使用特定廠址現場的量測值。(3) 對於無法取得特定廠址量測值的物理型參數，必須先確認其對該特性廠址的重要性，經判定其若是屬於具備高重要性的物理型參數，則必須指定為較保守的數值。上述第一與第二個原則較為明確且易於達成，然第三個原則則相對較難以建立具體的做法，也是建立參數值選定流程中最重要的一步。

圖 5.1 所示係參考 S.W. Taylor 等人於 2003 年所提出的一套參數值選定流程，此做法同時也是過去國際上重要的除役參考電廠在進行廠址特性計算時，用於決定參數數值時所採用的做法，如：Yankee Nuclear Plant Station、Maine Yankee Atomic Power Company、Haddam Neck Plant 等 [11-14]。如圖所示，在決定模型參數數值之前，首先必須先將參數分類為行為型、代謝型、以及物理型等三類。行為型參數值係取決於個體行為和情境的定義，

對於同一組個體，如果情境發生變化，其參數值可能會發生變化。如果該參數可表示為可能受影響個體的代謝特徵，並且與曝露情境無關，則可將其分類為代謝型參數。如果考慮不同的受曝群體，其值不會改變的參數則可被分類為物理型參數，而此類型的參數取決於廠址的來源、位置、以及地質和水文地質特徵，有關參數分類原則更詳細的說明可參考本文第四節的內文。對於歸屬於行為型與代謝型參數，其值係與個體及情境定義相關，且不屬於特定廠址相關的參數，指定的數值一般可採用足以代表關鍵受曝群體的平均數值即可。因此，此兩類的參數值可直接引用 NUREG/CR-5512, Vol. 3 中所提供的參考數值 [15]，或採用 RESRAD 程式的內建預設值。

對於物理型參數而言，由於其是用於描述廠址特性最為直接的參數，因此，決定這些參數值的最佳做法即是優先採用該廠址已經存在且可用的數值，或藉由其它可進行的量測方法來取得其正確的數值。然而，在廠址的物理型參數值無法取得的情況之下，即必須遵循圖 5.1 中的做法來決定其參數值，其流程如下：(1) 參照 NUREG/CR-6697 報告附錄 B 中所提出的參數相關性、數值可取得性、參數類型、劑量影響等四個評估標準進行參數的配分，並將參數分為等級 1、等級 2、等級 3 等三個等級，有關參數分級的方法可參閱本文第四節。(2) 由於等級 3 的物理型參數係屬於不會顯著影響劑量值的參數，當這些無法取得的物理型參數被判定歸屬於等級 3 時，則可直接採用 RESRAD 程式中的預設值或保守值（如：NUREG/CR-5512,

Vol. 3 報告中的參考數值) 來做為其參數值。(2) 由於歸屬於等級 1 與等級 2 的物理型參數值可能會顯著地影響所計算出的有效劑量和相對應的 DCGL，在計算之前必須依據 NUREG/CR-6697 報告附錄 C 的方法進行這些個別參數的概率性輻射劑量分析 (probabilistic analysis) 或不確性分析 (uncertainty analysis)，藉此來決定這些物理型參數是於屬敏感性參數或非敏感性參數。(3) 藉由概率性輻射劑量分析的結果，可以經由參數的取樣統計分析結果來求得該參數對於劑量值的偏量等級相關係數 (partial rank correlation coefficient, PRCC)，並可據此推定劑量與該參數之間的相關性。若此 PRCC 係數的絕對值大於 0.25，則表示該參數為敏感性參數；若此 PRCC 係數的絕對值小於 0.25，則可判定該參數為非敏感性參數。若經 PRCC 判定屬於非敏感性參數者，則該參數值可直接採用該參數分布的中位數 (median value)。(4) 當該參數經概率性輻射劑量分析求得之 PRCC 絕對值大於 0.25 且其真值為正數時，表示此參數與劑量值之間呈現正相關，在保守的考量之下，此時該參數值可取其分布 75% 百分位所對應的數值或平均值，以兩者中的最大值為優先；另一方面，當該參數經概率性輻射劑量分析所求得之 PRCC 絕對值大於 0.25 且其真值為負數時，表示此參數與劑量值之間呈現負相關，在保守的考量之下，此時該參數值則可取其分布 25% 百分位所對應的數值。由上述可知，概率性輻射劑量分析除可用於瞭解參數不確定性對於輻射劑量的影響之外，也是目前除役核電廠在進行

DCGL 計算時，被廣泛用於進行參數值選定的重要輔助方法。

5.2 概率性輻射劑量分析方法簡介

NRC 在發展除役廠址執照終止符合性評估的標準審查計畫 (Standard Review Plan, SRP) 時，即開始認知到劑量評估之概率性分析或不確定分析的重要性，也因此 NRC 於 1999 年時即正式委託阿岡國家實驗室，在 RESRAD 程式中新增廠址相依概率性輻射劑量分析的功能，藉此補足因輸入參數值的不確定性所導致的劑量誤差。雖然進行概率性輻射劑量分析未必能夠獲得最正確的結果，但其分析結果可用於輔助決定保守的參數值，且亦可做為劑量評估審查時最有利的支撐依據。此外，藉由建立概率性輻射劑量不確定分析的技術，也可同時滿足管制單位以風險為依據的管制決策方案。圖 5.2 所示為 RESRAD-ONSITE 程式之確定性分析 (deterministic analysis) 與概率性分析 (probability analysis) 兩種不同分析模式的概念示意圖 [16]。對於確定性分析模式，在進行劑量評估計算時，所有的輸入參數均對應單一的絕對數值，最後的計算結果也僅輸出一個單一的劑量值，此種分析模式雖能夠快速地評估特定應用案例的劑量影響，但卻可能忽略參數不確定性可能導致的變異量。相對地，概率性分析模式則會考慮輸入參數的不確定性，對於未知但重要的參數，在計算時可以依據參數的變異特性將這些參數指定為特定型式的分布，並由參數分布範圍中採用隨機取

樣的方式來決定這些不確定參數的數值。由於每一個參數取樣點會對應一劑量值，經由多次的取樣及計算之後，可由結果輸出劑量的機率密度關係，據此即可推估可能造成的劑量範圍，並且可利用統計分析的方法來得知劑量變化與各參數的相關性。以下即針對 RESRAD-ONSITE 程式的機率性輻射劑量分析方法進行說明 [17]。

(1) 程式操作說明

RESRAD-ONSITE 主程式的架構是基於確定性分析所設計的，而機率性分析則是建構於副程式之中，亦即 RESRAD-ONSITE 程式每次執行會先依據使用者所輸入的參數單一數值計算對應的單一劑量值，一旦使用者有針對特定參數進行機率性分析的需求時，RESRAD-ONSITE 程式才會在完成確定性分析之後接續進行機率性分析。使用者只要針對欲進行機率性分析的參數值輸入欄位按下 F8 的功能鍵，RESRAD 程式即會跳出機率性分析的設定頁面，完成設定及執行計算之後，即可由程式中的不確定性分析互動式輸出 (Interactive Output) 頁面中得知該參數相關的統計分析結果，如圖 5.3 所示。

(2) 機率性分析設定

圖 5.4 所示為 RESRAD-ONSITE 程式的機率性分析設定頁面，共包括四個設定分頁：

(一)圖 5.4 (a) 為參數分布的設定頁面，可用於增刪欲進行概率性分析的參數，並可用於設定特定分布型式參數的統計變數。圖 5.5 所示的範例即是假設 U-238 分配係數為 Lognormal distribution，且其分布的統計相關變數為 $\mu=4.84$, $\sigma=3.13$ ，利用 RESRAD 程式輸出所得在對數與線性尺度下的累積密度函數分布圖 (cumulative density function)。

(二)圖 5.4 (b) 為參數的取樣設定，使用者可在此設定取樣的亂數種子 (random seed)、取樣次數 (number of observations)、以及取樣的重複次數 (number of repetitions)，並可選擇使用蒙地卡羅 (Monte Carlo) 取樣法或 Latin Hypercube 取樣法 (LHS)。

(三)圖 5.4 (c) 顯示有關輸入參數之間的相關性設定，使用者只要預先知道兩個參數之間的關係，即可在此頁面設定此兩個參數的相關係數 (相關係數範圍介於-1 ~ 1)。例如：污染區的密度通常會與其總孔隙率 (total porosity) 呈現負相關的關係，只要在相關性設定頁面輸入這兩個參數的相關係數，RESRAD 程式即會依據此關係進行這兩個參數的取樣，圖 5.6 所示即是將污染區密度與總孔隙率的相關係數設定為-0.8 時的取樣點分布情形，圖中所示為重複 3 次取樣且每次取樣數為 300 的結果，不同顏色的數據點分別對應不同的取樣次數。

(四)圖 5.4 (d) 則為概率性分析結果的設定頁面，輸出選項包含峰值總劑量

(peak total dose)、依據核種或曝露途徑的峰值劑量、以及各計算時間點的平均劑量等。此外，使用者也可依據不同的計算結果選擇要分析輸入參數與輸出劑量之間的相關係數，可以選取的統計分析相關係數類型包括：PCC (partial correlation coefficient)、SRC (standardized regression coefficient)、PRCC (partial rank correlation coefficient)、SRRC (standardized rank regression coefficient)。

(3) 參數取樣方法

如上所述，在 RESRAD 程式中可以設定的取樣方法包含蒙地卡羅取樣法與 Latin Hypercube 取樣法兩種。其中，蒙地卡羅取樣法係使用隨機或偽隨機數從概率分布中進行取樣的傳統技術，原則上是完全隨機的，亦即任何選定的取樣值可能落在輸入分布範圍內的任何區間，這樣的取樣特性可能會造成取樣點集中在某些機率群集區間，而可能導致取樣結果的失真。相對地，Latin Hypercube 取樣法則會在取樣前，先將分布範圍依等量機率值劃分為不同的等機率值間隔，所劃分的間隔數則視設定的取樣數而定，最後即在這些機率間隔之內進行隨機的取樣。因此，使用 Latin Hypercube 取樣法可以使每個樣本更能接近匹配於輸入分布，使得所有或幾乎所有樣本均值都可落在標準誤差的一小部分之內，其相較於蒙地卡羅取樣法可以使計算結果獲得更快速的收斂。圖 5.7 所示即利用 RESRAD 程式蒙地卡羅取樣法與 Latin Hypercube 取樣法進行 U-238 分配係數的取樣結果（樣本數

為 100、重複取樣次數為 100，不同顏色的曲線對應不同的取樣次數)，明顯地可以發現使用蒙地卡羅取樣法的結果較為發散，而 Latin Hypercube 取樣法的取樣結果則能夠更為逼近原 Lognormal distribution 的分布。因此，進行概率性分析時，建議仍應使用 Latin Hypercube 取樣法，特別是針對具有高靈敏度的輸入參數。

(4) 相關係數類型

概率性分析結果可以提供劑量值的累積機率分布，同時也可利用回歸分析方法求得劑量結果與輸入參數之間的相關係數，藉由相關係數的絕對值即可得知輸入參數的相對重要性，並獲知參數的不確定性對於劑量的影響。相關係數的絕對值會介於 0~1 之間，接近 0 表示輸入參數與劑量結果不相關，接近 1 則表示表輸入參數與劑量結果具高度相關。如前所述，RESRAD 程式可以提供的相關係數類型包含 PCC、SRC、PRCC、以及 SRRC 四類。其中，PCC 係使用輸入參數與劑量值的真值進行分析，主要用以衡量輸入參數與劑量之間的線性關係；SRC 分析時則是採用輸入參數與劑量值的標準化數值 ($(\text{真值}-\text{平均值})/\text{標準差}$)，其可避免不同參數之間因單位與數值所造成的差異，適用於評估輸入參數的相對重要性。然而，PCC 與 SRC 分析僅適用於劑量值與輸入參數之間趨近於線性關係，當兩者之間存在非線性關係時，則應先將輸入參數由小到大進行排序，在依排序結果進行回歸分析，而 PRCC 與 SRRC 則是在參數排序之後，依據真值與標準化數值

進行回歸分析所得的相關係數。一般而言，當輸入與輸出值存在著非線性關係、寬廣的分布範圍、或較長的分布尾端時，使用 PRCC 與 SRCC 進行相關係數分析是比較適合的做法。

5.3 輸入參數分布類型

由前述之參數分類與分級策略可知，RESRAD-ONSITE 程式的輸入參數依其重要性程度可以分為等級 1 ~ 等級 3。由於等級 3 的參數已經由參數選擇規則判定屬於較不重要的參數，且其對於劑量的影響係依輻射曝露情境與個體的行為而定，因此針對大部分的等級 3 參數並不需要進行概率性分析，而可直接採用參考數值。相對地，等級 1 與等級 2 參數因具有較高的重要性，在概率性劑量分析相關的報告中，已經針對等級 1 與等級 2 大部分的參數指定適當的分布類型，用以進行概率性劑量分析 [7, 17, 18]。雖然這些參數皆有其對應的分布類型可用以進行概率性劑量分析，然而當這些參數已經存在廠址特定的量測數值時，第一優先則應考慮直接採用這些量測數值，而不需要再進行概率性劑量分析。表 5.1 列出了 RESRAD-ONSITE 程式中大部分的重要參數之等級、類型、以及依其屬性所建議的分布型式 [18]。如表所示，大部分被指定具分布型式的參數為等級 1 及等級 2 參數，然 humidity in air、indoor fraction、以及 inhalation rate 雖隸屬於等級 3 參數，但在此表中也被指定其分布類型，主要的原因是此三個參數在

RESRAD-BUILD 程式中被歸類為等級 2 參數，因此在此表中也一併列出其分布類型。此外，RESRAD-ONSITE 程式的參數分布依其屬性大致可分為均勻分布 (uniform distribution)、常態分布 (normal distribution)、對數常態分布 (Lognormal distribution)、三角形分布 (triangular distribution)、以及經驗關係式 (empirical) 等五種類型，關於各分布類型的關係簡要說明如下：

- (一) 均勻分布：也稱為矩形分布，用於定義參數在某一個範圍之內出現的機率相等，如圖 5.8 所示。在 RESRAD-ONSITE 程式中指定參數為均勻分布時，必須給定其分布範圍的最小值與最大值，即圖中的 a 與 b。
- (二) 常態分布：也稱為高斯分布，為統計學上十分常見的連續機率分布，經常被用於數學、物理及工程領域，用來代表一個不明的隨機變數。如圖 5.9 所示，常態分布的形狀為左右對稱如鐘形之曲線，通常必須配合使用該隨機變數的平均值 (μ) 及標準差 (σ) 來描述這個分布。
- (三) 對數常態分布：在機率論與統計學中，一個隨機變數的對數 (例如： $Y=\ln(X)$) 為常態分布，則稱此連續隨機變數 X 具有對數常態分布。同樣地，採用此對數常態分布需要給定隨機變數對數的平均值 (μ) 與標準差 (σ)，如圖 5.10 所示。
- (四) 三角形分布：如果對隨機變數的機率分布所知訊息有限，僅知道其最

大值與最小值，那麼此隨機變數可以採用均勻分布模型。然而，如果此隨機變數已經知道其最可能出現的數值，那麼就可以使用三角形分布來描述該隨機變數。如圖 5.11 所示，指定某變數為三角形分布時，必須定義該變數的上、下限與模數，即 a 、 b 與 c 。

(五) 經驗關係式：意指該隨機變數的機率分布具有特定的經驗關係式，使用者可自行定義機率與參數值的範圍，如：RESRAD-ONSITE 程式中的 mass loading for inhalation 與 contamination zone erosion rate 即具有連續線性及連續對數的經驗關係。

5.4 概率性分析結果

概率性分析的輸出結果涵蓋曝露途徑、時間、或核種相關的劑量結果，使用者可透過概率性分析的互動式輸出視窗來得知所有取樣點劑量評估結果的統計數據，如：所有取樣點計算所得之峰值劑量的平均值、標準差、最小值、最大值、以及不同機率百分位所對應的劑量值等。此外，程式也可依曝露途徑、特定核種或特定時間點來輸出這些計算統計結果，如圖 5.12 所示的互動式輸出表格。

除了表格化的結果，RESRAD-ONSITE 程式的概率性分析也可輸出圖形化結果，如圖 5.13 之範例所示，左圖顯示劑量結果的累積概率圖，右圖

則為 U-238 分配係數的各取樣點數值及其對應劑量值的點陣圖，此結果也有助於瞭解分配係數取樣點與輸出結果之間的關係，如：可得知分配係數影響劑量值的敏感範圍。

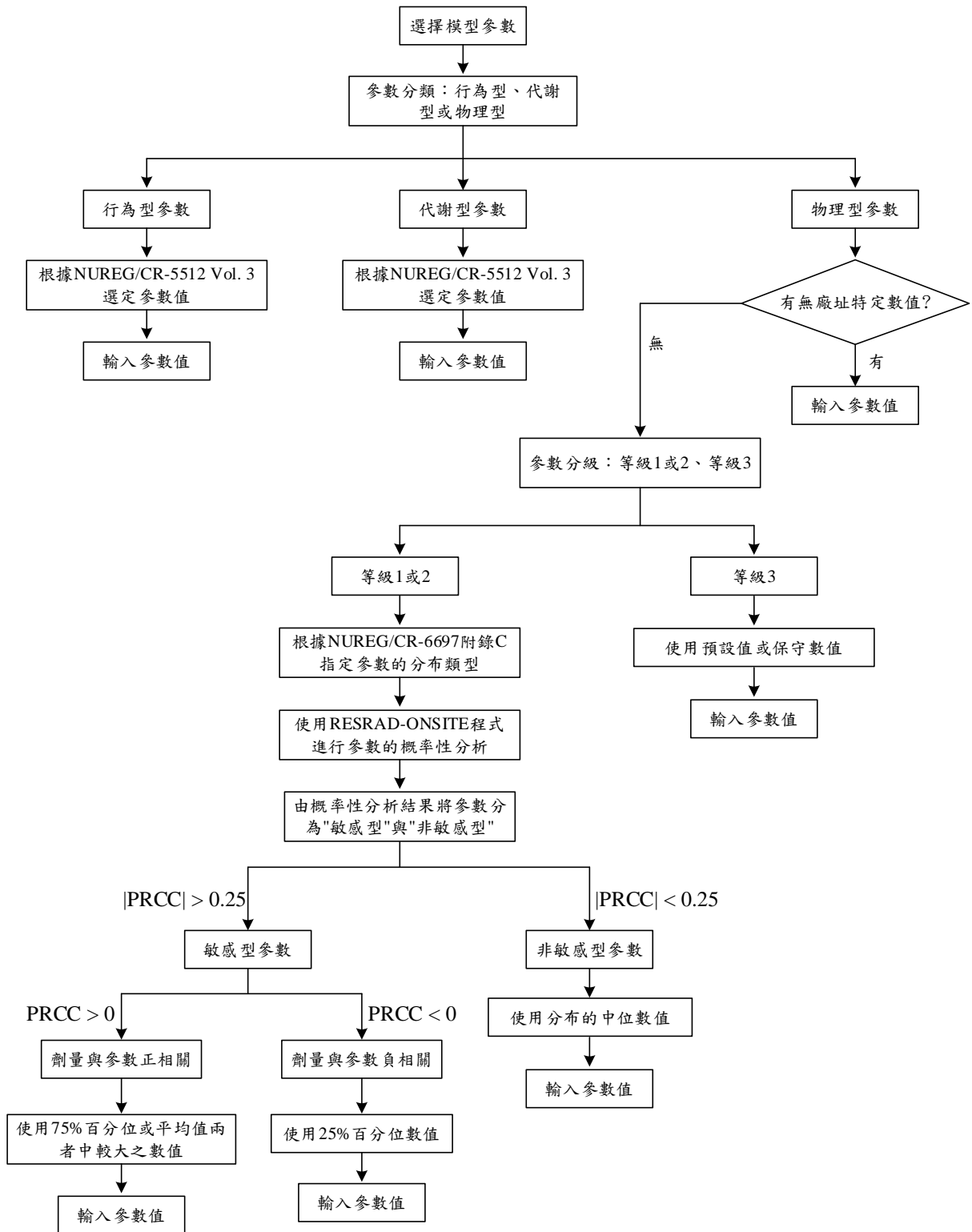


圖 5.1、RESRAD-ONSITE 程式之參數值選定流程圖

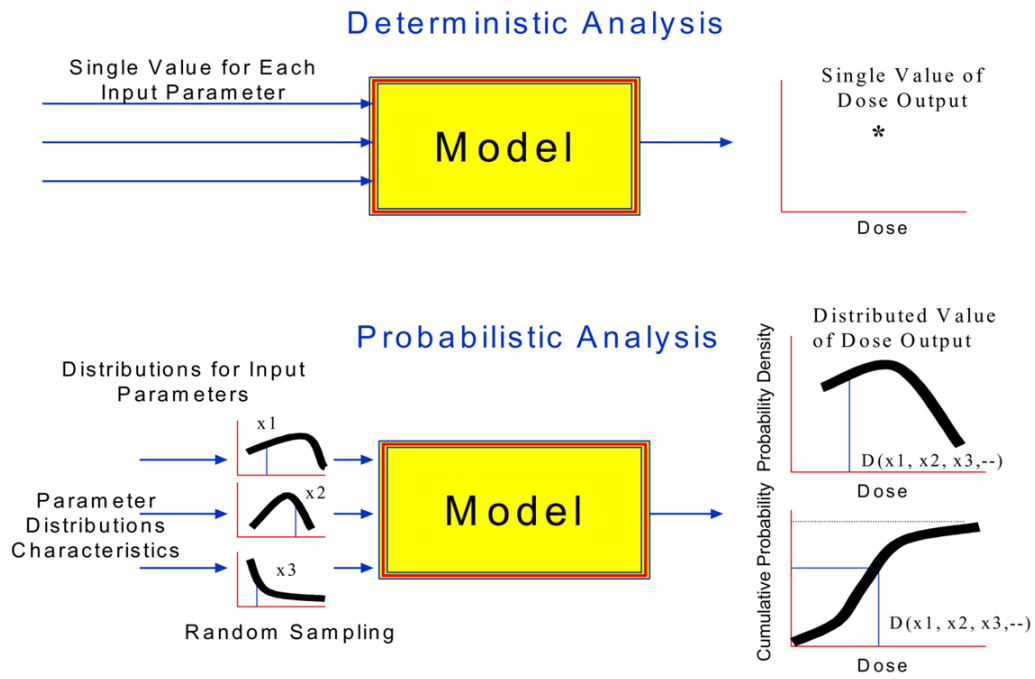


圖 5.2、RESRAD-ONSITE 程式之確定性分析與概率性分析模式之概念示意圖

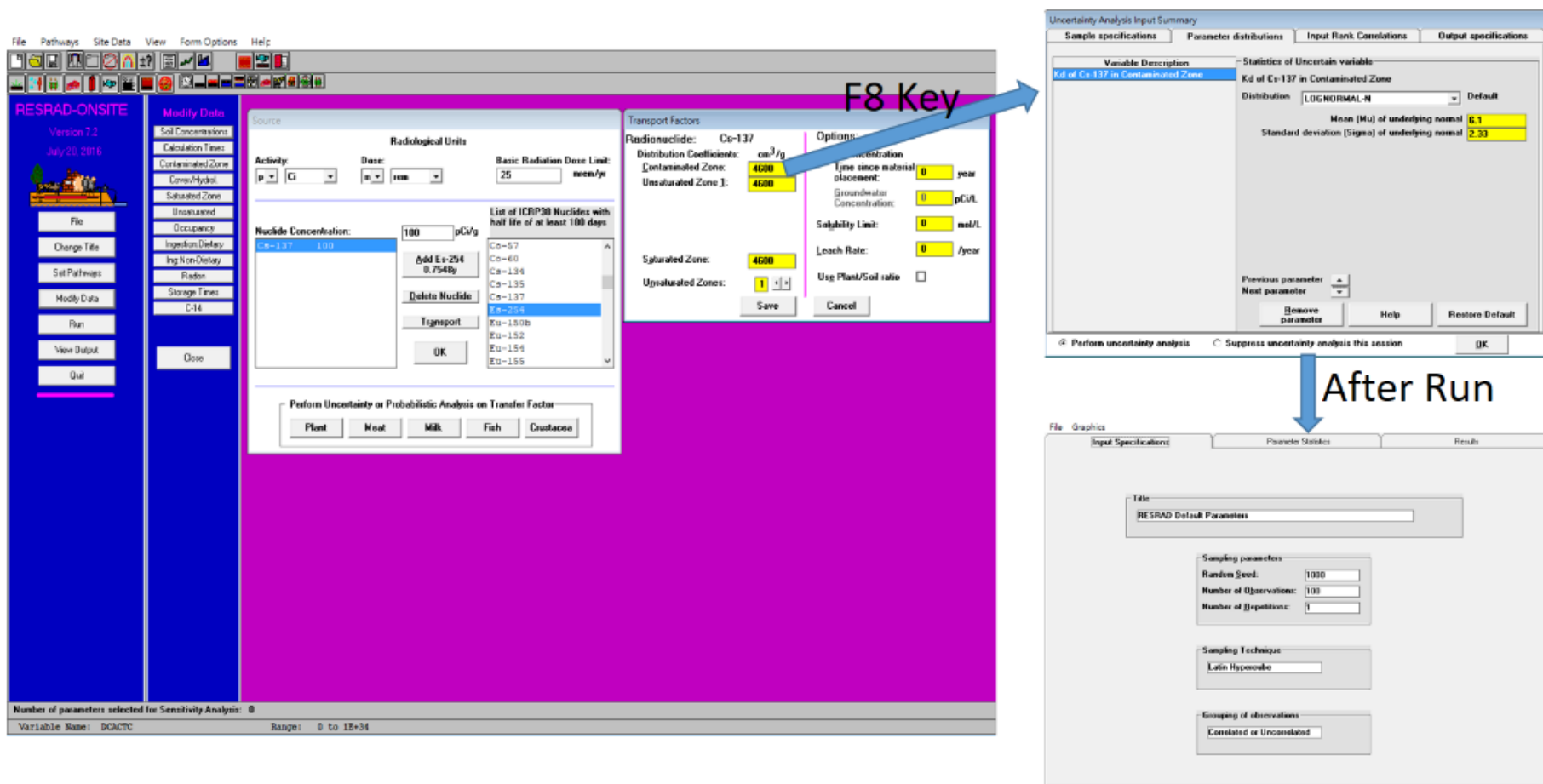


圖 5.3、RESRAD-ONSITE 程式之概率性分析執行功能鍵及使用者界面

(a) Uncertainty Analysis Input Summary

Sample specifications | **Parameter distributions** | Input Rank Correlations | Output specifications

Variable Description	Statistics of Uncertain variable
Density of contaminated zone	Contaminated zone total porosity
Contaminated zone total porosity	Distribution: TRUNCATED NORMAL (Default)
	Mean (Mu): .425
	Standard deviation (Sigma): .0867
	Lower quantile: .001
	Upper quantile: .999

Previous parameter: [up arrow]
Next parameter: [down arrow]

Remove parameter | Help | Restore Default

Perform uncertainty analysis Suppress uncertainty analysis this session

(b) Uncertainty Analysis Input Summary

Sample specifications | Parameter distributions | **Input Rank Correlations** | Output specifications

Sampling parameters:
 Random Seed: 1000
 Number of Observations: 100
 Number of Repetitions: 1

Information about current selection:
 It is desirable to repeat the uncertainty analysis a number of times in order to estimate the tolerance limits on the uncertainty / probability statistics.
 For example if 500 observations and 10 repetitions are specified, 10 sets of 500 sample values will be generated for each input variable selected for uncertainty / probabilistic analysis. Each set of 500 sample values will cover the entire distribution specified for the variable. Each set of 500 observations will produce a set of 500 RESRAD outputs. The uncertainty / probability statistics can be computed for each set of 500 outputs. The 10 sets of repetitions will be used to compute the tolerance limits on the uncertainty / probability statistics.

Sampling Technique:
 Latin Hypercube
 Monte Carlo

Grouping of observations:
 Correlated or Uncorrelated
 Random

Perform uncertainty analysis Suppress uncertainty analysis this session

(c) Uncertainty Analysis Input Summary

Sample specifications | Parameter distributions | **Input Rank Correlations** | Output specifications

Variable 1	Variable 2	RCC
DENSZ	TPCZ	-0.8

Rank Correlations:
 Variable 1: DENSZ
 Density of contaminated zone
 Variable 2: TPCZ
 Contaminated zone total porosity
 Rank Correlation Coefficient: -0.8

Update Correlation table | Remove correlation

Perform uncertainty analysis Suppress uncertainty analysis this session

(d) Uncertainty Analysis Input Summary

Sample specifications | Parameter distributions | Input Rank Correlations | **Output specifications**

PRE RESRAD run specifications:
 Check the outputs on which you want to perform probabilistic statistical analysis:
 Peak total dose (summed over nuclides and pathways)
 Peak dose from each pathway (summed over all nuclides)
 Peak dose from each nuclide in the source (summed over all pathways)
 Dose from each nuclide and pathway at each of the user specified times
 Total dose at graphic time points
 Total risk at each of the user specified times

Output-Input correlation and regression options:
 Check the coefficients to be computed:

	PCC	SRC	PRCC	SRRC
Dose at time of Peak mean dose	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Peak total dose	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Peak pathway dose	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Peak nuclide dose	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Probabilistic outputs available for current selection:
 The following probabilistic analysis options will be available for Peak total Dose:-
 1. Scatter plots against each of the inputs, and against each of the peak component doses.
 2. Cumulative frequency plot.
 3. Table of percentile values.
 4. Statistics (mean, standard deviation, minimum, maximum).
 5. Confidence intervals on mean and Statistical Tolerance limit on percentile doses.
 6. Correlation statistics (Partial Correlation Coefficient, Partial Rank Correlation Coefficient, Standardized Partial Regression Coefficient, Partial Ranked Regression Coefficients).*

Perform uncertainty analysis Suppress uncertainty analysis this session

圖 5.4、RESRAD-ONSITE 程式之概率性分析設定頁面

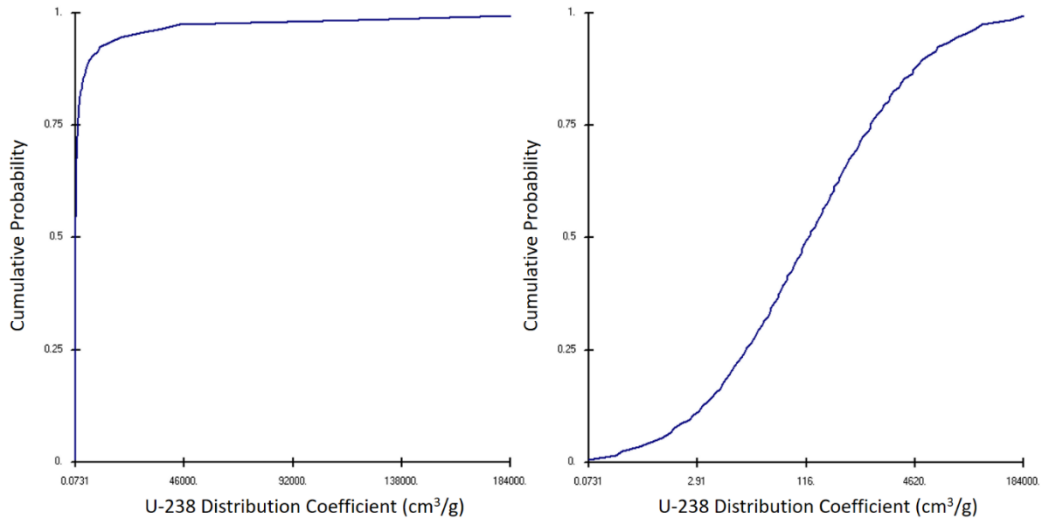


圖 5.5、利用 RESRAD 程式輸出具 Lognormal distribution 之 U-238 分配係數在對數與線性尺度下之累積密度函數分布圖

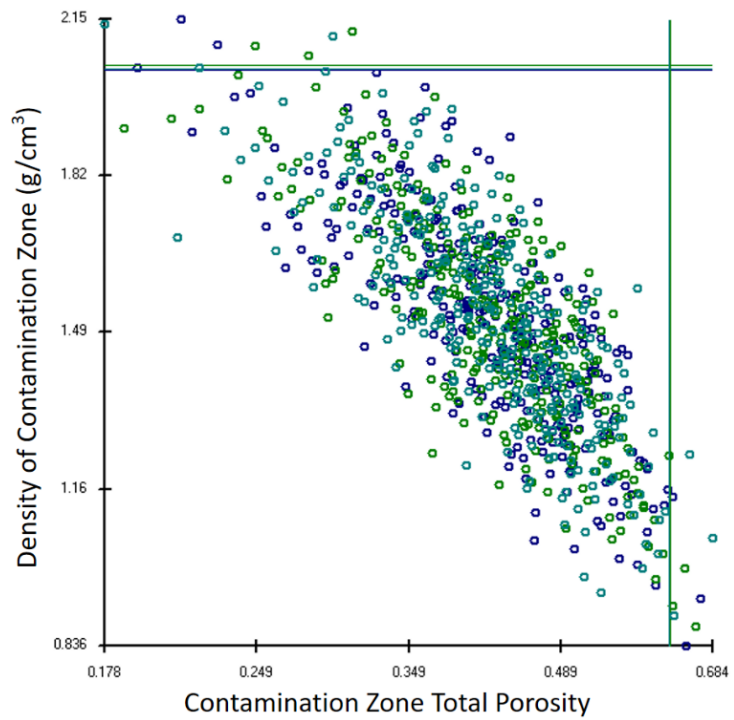


圖 5.6、污染區密度與總孔隙率的相關係數為-0.8 時之取樣點分布情形

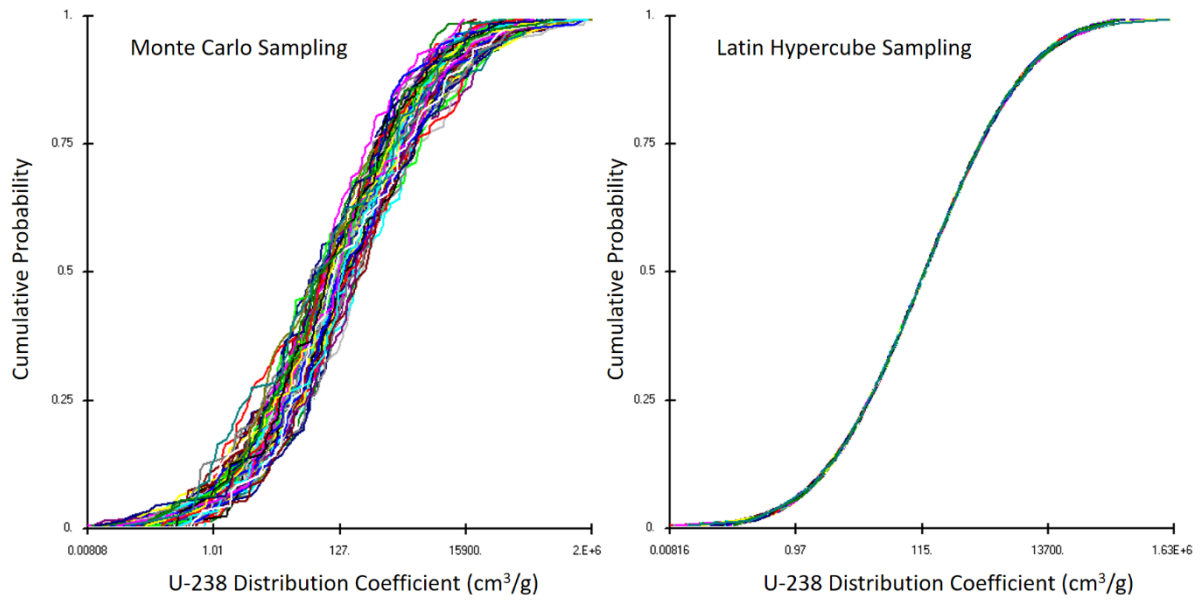


圖 5.7、利用蒙地卡羅取樣法與 Latin Hypercube 取樣法針對 U-238 分配係數之取樣結果比較

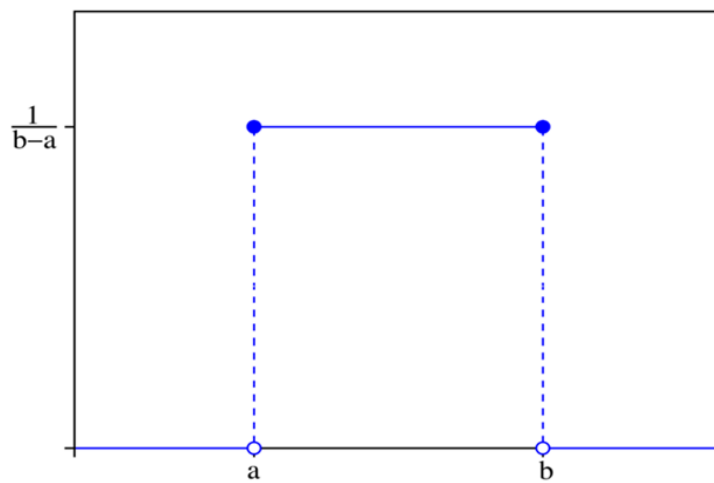


圖 5.8、均勻分布示意圖

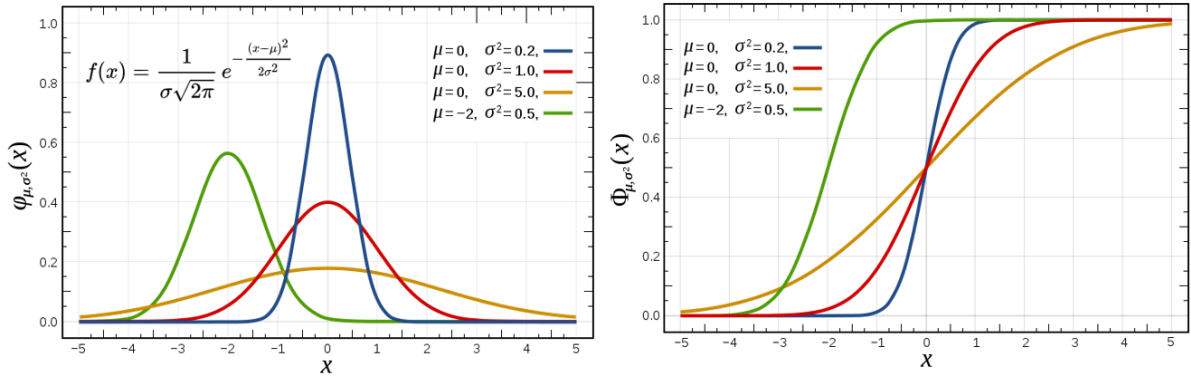


圖 5.9、常態分布示意圖

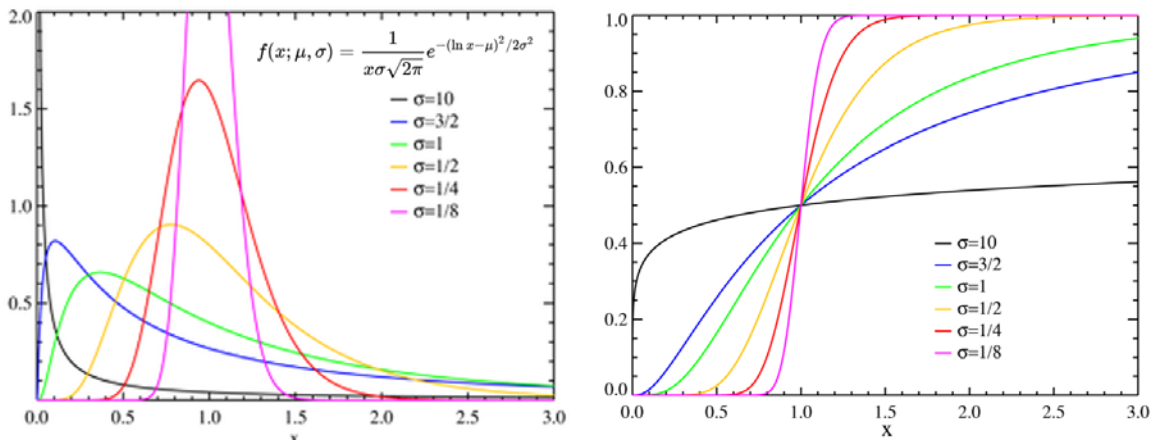


圖 5.10、對數常態分布示意圖

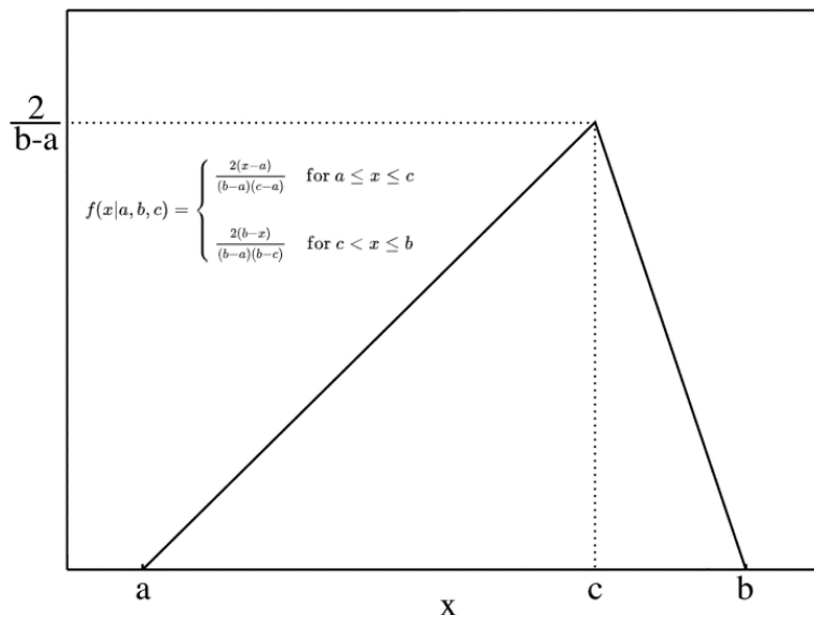


圖 5.11、三角形分布示意圖

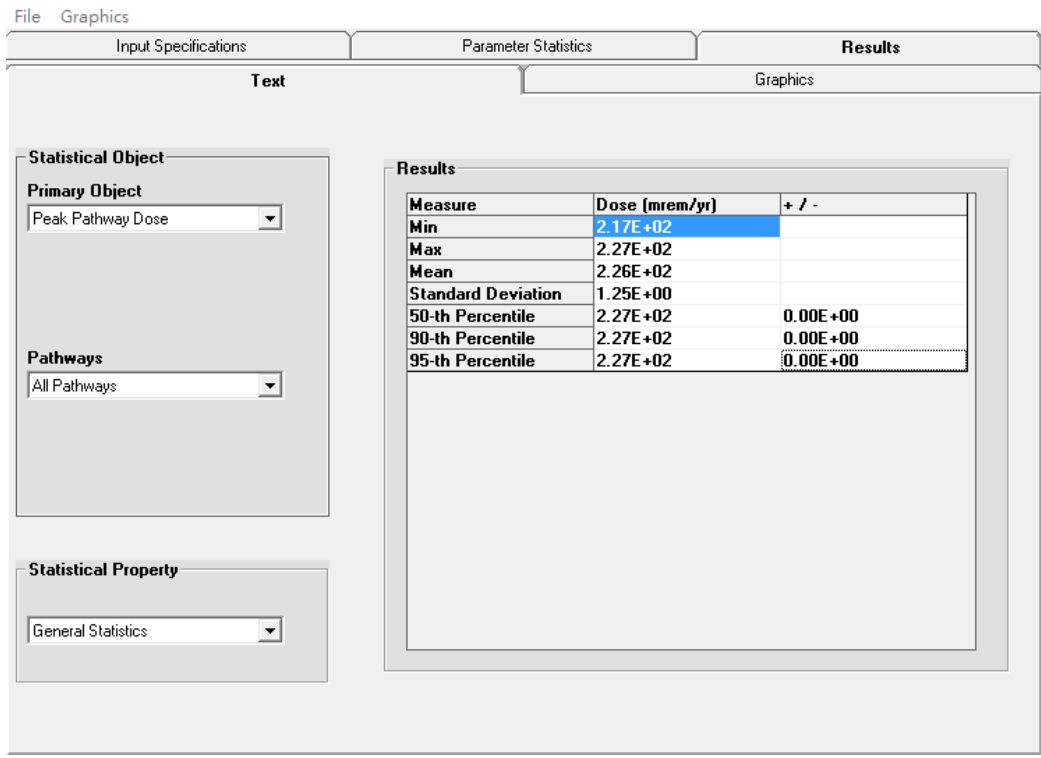


圖 5.12、RESRAD-ONSITE 程式概率性分析之互動式輸出表格

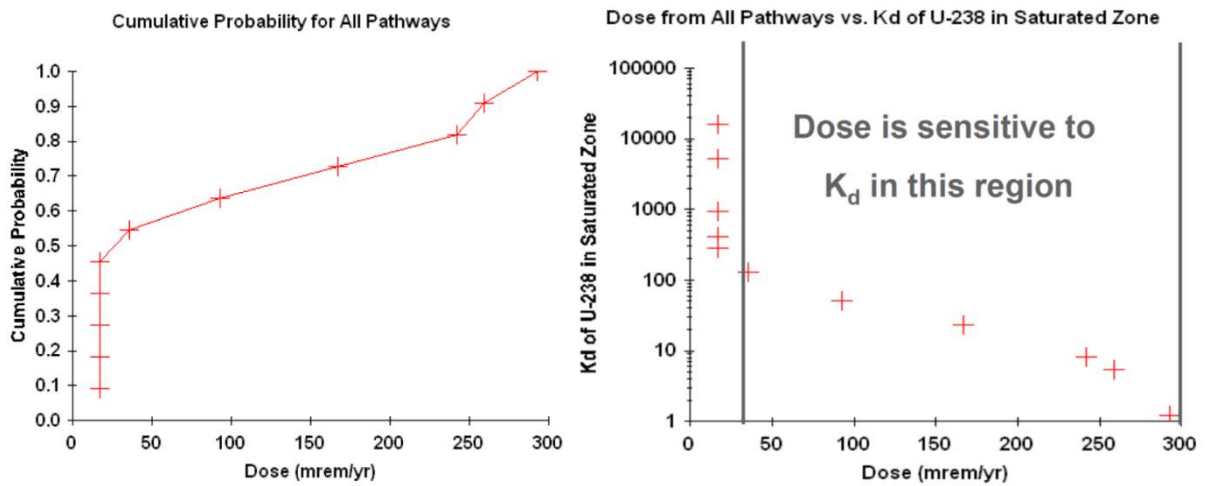


圖 5.13、RESRAD-ONSITE 程式概率性分析之圖形化輸出範例

表 5.1、RESRAD-ONSITE 程式重要參數之等級、類型及建議的分布型式

Parameter	Priority ^a	Type ^b	Assigned Distribution Type
Density of contaminated zone (g/cm ³)	1	P	Normal
Density of cover material (g/cm ³)	1	P	Normal
Density of saturated zone (g/m ³)	1	P	Normal
Depth of roots (m)	1	P	Uniform
Distribution coefficients (contaminated zone, unsaturated zones, and saturated zone)(cm ³ /g)	1	P	Lognormal
Saturated zone effective porosity	1	P	Normal
Saturated zone hydraulic conductivity (m/yr)	1	P	Lognormal
Saturated zone total porosity	1	P	Normal
Transfer factors for plants	1	P	Lognormal
Unsaturated zone thickness (m)	1	P	Lognormal
Aquatic food contaminated fraction	2	B,P	Triangular
Bioaccumulation factors for fish [(pCi/kg)/(pCi/L)]	2	P	Lognormal
C-14 evasion layer thickness in soil (m)	2	P	Triangular
Contaminated zone b parameter	2	P	Lognormal
Contaminated zone erosion rate (m/yr)	2	P,B	Empirical
Contaminated zone hydraulic conductivity (m/yr)	2	P	Lognormal
Contaminated zone total porosity	2	P	Normal
Cover depth (m)	2	P	None recommended
Cover erosion rate (m/yr)	2	P,B	Empirical
Depth of soil mixing layer (m)	2	P	Triangular
Drinking water intake (L/yr)	2	M,B	Lognormal
Evapotranspiration coefficient	2	P	Uniform
External gamma shielding factor	2	P	Lognormal
Fruit, vegetables, and grain consumption (kg/yr)	2	M,B	Triangular
Indoor dust filtration factor	2	P,B	Uniform
Mass loading for inhalation (µg/m ³)	2	P,B	Empirical
Milk consumption (L/yr)	2	M,B	Triangular
Precipitation rate (m/yr)	2	P	None recommended
Runoff coefficient	2	P	Uniform
Saturated zone b parameter	2	P	Lognormal
Saturated zone hydraulic gradient	2	P	Lognormal
Soil ingestion rate (g/yr)	2	M,B	Triangular
Transfer factors for meat [(pCi/kg)/(pCi/d)]	2	P	Lognormal
Transfer factors for milk [(pCi/L)/(pCi/d)]	2	P	Lognormal
Unsaturated zone density (g/cm ³)	2	P	Normal
Unsaturated zone effective porosity	2	P	Normal
Unsaturated zone hydraulic conductivity (m/yr)	2	P	Lognormal
Unsaturated zone, soil-b parameter	2	P	Lognormal
Unsaturated zone total porosity	2	P	Normal
Weathering removal constant (1/yr)	2	P	Triangular
Well pumping rate (m ³ /yr)	2	B,P	None recommended
Well pump intake depth (below water table) (m)	2	P	Triangular
Wet foliar interception fraction for leafy vegetables	2	P	Triangular
Wet-weight crop yields for nonleafy vegetables (kg/m ²)	2	P	Lognormal
Wind speed (m/s)	2	P	Lognormal
Humidity in air (g/m ³) ^d	3	P	Lognormal
Indoor fraction ^d	3	B	Empirical
Inhalation rate (m ³ /yr) ^d	3	M,P	Triangular

^a Priority as determined in Cheng et al. (1999). For RESRAD, Priority 2 parameters exclude nuclide concentration, area of contamination, length parallel to aquifer flow, and thickness of contaminated zone. These parameters are directly measurable as input from a site, and no meaningful distributions can be developed. For RESRAD-BUILD, excluded parameters include radionuclide concentration and source length or area.

^b P = physical, B = behavioral, M = metabolic; when more than one type is listed, the first is primary and the next is secondary.

^c Section of this report providing the distribution assigned to the parameter.

^d Priority 3 parameters with corresponding Priority 2 parameters in RESRAD-BUILD.

六、DCGL 驗證計算

由於除役廠址的 DCGL 計算牽涉極為複雜的劑量評估模型，計算過程中也需要考慮相當多與核種、地質、氣象水文、個體行為等相關的參數，除了廠址必須建立可靠的量測技術用以進行重要的物理型參數量測之外，針對無法量測或有量測上困難的其它重要參數，也必須發展一套適用的參數值選定法則，藉此降低參數的不確定性可能造成的劑量誤差。美國目前已有一些成功的除役案例，這些除役案例大多採用類似的參數值選定流程來進行 DCGL 的計算，並且他們的計算也都獲得美國 NRC 的正式核准。因此，為了進一步地瞭解除役廠址 DCGL 的計算流程，本研究係選擇以美國 Yankee Nuclear Plant Station (YNPS) 除役廠址來做為計算驗證的標的 [12]，實際使用 RESRAD-ONSITE 程式來進行 DCGL 的計算與結果比較。以下即針對 YNPS 核電廠的 DCGL 驗證結果進行說明，內容涵蓋背景說明、DCGL 計算流程、輸入參數分析、以及 DCGL 驗證計算結果。

6.1 驗證案例背景說明

YNPS 核電廠為美國第一家商用核能電力公司 Yankee Atomic Electric Company 所擁有，YNPS 核電廠也是美國第一個商用運轉的壓水式反應器，其位於馬薩諸塞州的 Franklin County，佔地 2200 英畝，其中僅有 10 英畝係用於電廠使用。YNPS 核電廠為西屋公司所設計，原設計的熱功率為 485

MWt，於 1963 年將功率提升至 600 MWt。該核電廠在 1960 年首次臨界，1961 年開始商轉，並於 1992 年時因經濟因素與反應器壓力槽脆化問題的考量決定永久停止運轉。YNPS 廠址的現場輻射偵測與廠址特性調查係遵循 MARSSIM 的方法論，其於 2003 年送出執照中止計畫 (License Termination Plan)，而廠址的實體除役作業最終於 2007 年完成並也獲美國 NRC 正式核准。目前該廠區大部分的區域已被安全地釋出，廠址中僅有一部份挪作獨立用過燃料儲存設施 (Independent Spent Fuel Storage Facility, ISFSI) 使用並仍受 NRC 監管，主要用於存放用過核燃料及超 C 類放射性廢棄物。

YNPS 廠址所採取的除役釋放標準係根據 NRC 10 CFR 20.1402 規定，採取無限制使用的放射性劑量標準。排除背景輻射的影響，廠址中所殘留的放射性活度 (包含地下水的影響) 對於關鍵群體中平均個體所造成的有效劑量限值為 0.25 mSv/y，同時廠址中殘留的放射性活度必須盡量遵循 ALARA 的原則以合理地抑低。為了驗證上述這些殘留的放射性活度不會超出劑量限值，必須藉由預期會發生的曝露情境與各種輻射曝露途徑的分析來計算其對應的 DCGL 基準值。完成 DCGL 計算之後，則需驗證平均的殘留放射性活度必須小於或等於 DCGL，且小區域的熱點活度不會超過升高量測比較 (elevated measurement comparison) DCGL 基準值 (即 DCGL_{EMC})。

6.2 DCGL 計算流程

圖 6.1 所示為本研究針對 YNPS 除役廠址之土壤 DCGL 基準值計算程序進行分析之後所建構的 DCGL 計算流程圖，此流程圖也可做為國內未來相關除役電廠在進行 DCGL 計算時的參考，各流程依序說明如下：

- (一) 決定廠址釋放標準：除役廠址必須依其未來的使用目的先行決定廠址的釋放標準，如此才能依該標準建構該廠址的 DCGL 基準。YNPS 廠址的除役目標為無限制使用，釋放標準為 0.25 mSv。根據國內核管法施行細則之規定，除役廠址依其非限制性與限制性使用目的，其對一般人造成之年有效等效劑量不得超過 0.25 mSv 與 1.0 mSv。
- (二) 廠址劑量評估模型假設：在建構廠址模型之前，必須先行假設該廠址未來的使用情境、關鍵群體、以及所考量的輻射曝露途徑。YNPS 廠址模型係採用最保守的住宅情境，關鍵群體為常住於此廠址的農夫，在此廠址中種植全部或部分食物，並使用地下水源做為飲用水與灌溉用水。在輻射曝露途徑方面，則考慮直接體外曝露、吸入懸浮核種的體內曝露、以及植物、肉類、牛奶、飲用水、海鮮、土壤等嚥入途徑的體內曝露。
- (三) 選擇劑量評估程式：YNPS 核電廠分別採用 RESRAD 家族程式中的 RESRAD-ONSITE 與 RESRAD-BUILD 程式來進行土壤與建物的輻射

曝露途徑分析與 DCGL 計算，採用的版次分別為 6.21 與 3.21。

- (四) 輸入參數選擇程序：YNPS 核電廠係依循圖 5.1 所示的參數值選定流程來決定各輸入參數的數值，這些程序包括：參數的分類與分級、參數處理（即依據參數的等級將參數分為確定型與機率型）、參數概率性分析、以及參數值給定。在進行概率性分析時，YNPS 核電廠使用 LHS 取樣方法，樣本點設定為 2000 點，重複次數為 1 次，並針對所有可能的核種進行分析。完成概率性分析之後，平均劑量峰值 (peak of the mean dose) 的 PRCC 相關係數被用來評估各參數的敏感性並用以決定該參數值，決定參數值的規則與圖 5.1 中所示的方法相同。
- (五) 輸入參數值：依序於 RESRAD-ONSITE 程式”Modify Data”設定視窗中輸入土壤濃度、分配係數、計算時間、污染區、覆蓋層與污染區水力參數、飽和區水力參數、未飽和區水力參數、行為參數、吸入參數、污染食品的儲存時間、劑量轉換因子、植物、肉類、牛奶轉移因數、水產食品的生物累積因數等欄位的參數值。最後，在”Change Title”視窗中設定圖形化參數與時間積分參數之後，即可進行程式的計算。
- (六) DCGL 計算分析：完成計算之後，RESRAD 程式會依據計算求得的平均劑量峰值與核種濃度的比值（亦即劑量/土壤濃度比值）來決定 DCGL，如式 (2) 所示。

6.3 輸入參數分析

RESRAD-ONSITE 程式中的輸入參數共有 145 個，其中的某些參數又會與所考慮的核種相關，因此進行除役廠址 DCGL 計算時需要考慮相當多的輸入參數。在 YNPS 核電廠中，經分析確認具有潛在劑量影響的重要放射性核種包括：H-3、C-14、Fe-55、Co-60、Ni-63、Sr-90、Nb-94、Tc-99、Ag-108m、Sb-125、Cs-134、Cs-137、Eu-152、Eu-154、Eu-155、Pu-238、Pu-239、Pu-241、Am-241、Cm-243，如表 6.1 所示。當進行 RESRAD-ONSITE 計算時，其中的分配係數、吸入與嚥入劑量轉換因子、植物、肉類、牛奶轉移因數、水產食品的生物累積因數等參數，都必須依據這些核種及其子核種給定特定的參數值。本研究已針對 YNPS 核電廠進行 RESRAD-ONSITE 計算時的輸入參數進行分析，詳細的參數值亦可參閱 YNPS 核電廠的執照終止計畫書 [12]，參數分析結果則說明如下：

- (一) 廠址特定參數：在進行 RESRAD-ONSITE 計算之前，必須先行依據廠址的特性建立相對應的參數值，這些參數有些必須直接在現場進行量測，有些則必須根據過去的氣象及水文資訊進行分析，表 6.2 列出了 YNPS 核電廠在進行 DCGL 計算時所建立的廠址特定參數及其數值。
- (二) 確定性分析參數：在 YNPS 核電廠中，當參數具有以下條件時會使用確定性數值來進行 DCGL 計算：(i) 參數被歸類為行為型與代謝型；

(ii) 參數屬於物理型，但有已建立的廠址特定參數值可供使用；(iii) 參數被歸類為等級 3 的物理型參數。對於這些確定性參數，YNPS 核電廠主要引用 NUREG/CR-5512 或 RESRAD 程式內建的參考數值。

(三) 概率性分析參數：當參數被歸類為物理型參數，且屬於等級 1 與等級 2 參數，同時也沒有廠址特定參數值時，這些參數則必須利用概率性分析來評估其對於劑量的影響。針對這些參數，YNPS 核電廠係參考 NUREG/CR-6697 來指定參數的分布類型及各參數分布對應的統計參數，如：平均值、標準差、最小值、最大值等。當概率性分析所得的 PRCC 相關係數絕對值小於 0.25，則代表該參數屬於非敏感性參數，可直接引用該參數分布的中位數做為輸入參數值；當 PRCC 相關係數絕對值大於 0.25，代表該參數為敏感性參數，必須視其為正相關或負相關來決定其參數值，亦即當 PRCC 為正值時，取其 75% 百分位的分布值或平均值兩者中的最大值來做為參數值；而當 PRCC 為負值時，則取其 25% 百分位的分布值做為參數值。表 6.3 列出了 YNPS 核電廠中各相關核種對應的敏感性參數的名稱、PRCC 數值、以及 25% 或 75% 百分位的參數值，這些參數也是未來國內除役核電廠在進行 DCGL 計算時必須特別謹慎處理的參數。

6.4 DCGL 驗證計算結果

根據 YNPS 核電廠所提供的輸入參數，本研究即利用 7.2 版的 RESRAD-ONSITE 程式，實際依據圖 6.1 所示之參數輸入流程逐次輸入各”Modify Data”設定視窗的參數值，並進行 YNPS 核電廠土壤 DCGL 的驗證計算。在本計算中，所使用的體外輻射劑量轉換因子資料庫來源為 FGR-12 報告，而體內輻射劑量轉換因子則參考 YNPS 核電廠計算時所使用的 FGR-11。值得注意的是，在本研究目前使用之 RESRAD 版次的 FGR-11 資料庫中，某些核種的吸入與嚥入劑量轉換因子與 YNPS 核電廠所使用的版本存在些許差異，如：Ac-227、Sr-90、Tc-99 等核種；此外，植物的轉換因數因屬於等級 1 的物理參數、而肉類與牛奶的轉換因數為等級 2 的物理參數，這些轉換因數在經過概率性分析之後，某些核種的轉換因數被判定為高度正相關性參數，因而需要將其值更改為 75% 百分位的分佈值。因此，為了一致化這些劑量轉換因子與轉換因數，本研究在進行 DCGL 計算之前，則利用 RESRAD 程式中的 DCF Editor 進行這些因子的修正。

本計算之目的為求得各關切核種的 DCGL 基準值，由於 DCGL 可藉由劑量限值與劑量/土壤濃度比推算求得，計算時並不需要輸入各關切核種的實際土壤濃度，因此本計算係假設各關切核種的土壤濃度皆為 1 pCi/g。圖 6.2 所示為 RESRAD-ONSITE 程式針對所有關切核種計算所得之劑量隨時間的變化情形，YNPS 除役廠址在釋放初期的劑量率最高約為 47.3 mrem/y，

劑量並隨著除役時間而緩慢降低，除役後 1,000 年的劑量率約為 4.3 mrem/y (由於此計算中各核種的土壤濃度係為假設值，所求得之劑量值僅做為參考之用)。為了進一步分析造成這些劑量的來源，圖 6.3 顯示了不同曝露途徑所造成的劑量貢獻，這些劑量的主要來源為體外直接曝露，另外很大一部分也來自於植物、牛奶、肉類、土壤等食物嚥入途徑所造成的影響。此外，上述的這些劑量主要是透過與水無關的傳遞途徑，亦即 YNPS 廠址經由地下水污染造成的劑量影響應可忽略。

為了計算各核種的劑量貢獻及其所對應的 DCGL 基準值，本研究也嘗試解析並比較個別核種所造成的劑量/土壤濃度比值 (DSR_i)，如圖 6.4 所示。由圖可知，在 YNPS 廠址所關切的核種之中，單位濃度所造成的劑量以 Sr-90 最為顯著，Co-60 次之，其餘如 Cs-134、Nb-94、Ag-108 等在廠址釋放初期也會有不小的貢獻。針對半衰期較短的核種，如：Sr-90、Co-60、Cs-134 等，其劑量影響在 100 年之後即可忽略；相對地，半衰期較長的核種，如：Nb-94，其劑量影響在 100 年之後反而成為主要的劑量來源。Pu-241 核種的劑量貢獻主要來自於與水無關的植物嚥入途徑，其所造成的劑量會在廠址釋放之後的 55.8 年為最大值，如圖 6.5 所示；除 Pu-239 核種之外，其餘所有核種所造成的劑量皆在廠址釋放初期最為顯著。根據上述各核種計算所得的劑量/土壤濃度比值峰值，將其代入式 (2) 即可求出各核種所對應的 DCGL 值。表 6.4 所示為本研究利用 7.2 版 RESRAD-ONSITE 程式，針

對 YNPS 核電廠各核種所造成的 DSR 與 DCGL 的驗證計算結果，表中同時也列出 YNPS 核電廠的計算結果，相互比較可以得知兩者之間僅具有些微的差異，此差異應可歸因於使用的 RESRAD 版本不同所致。

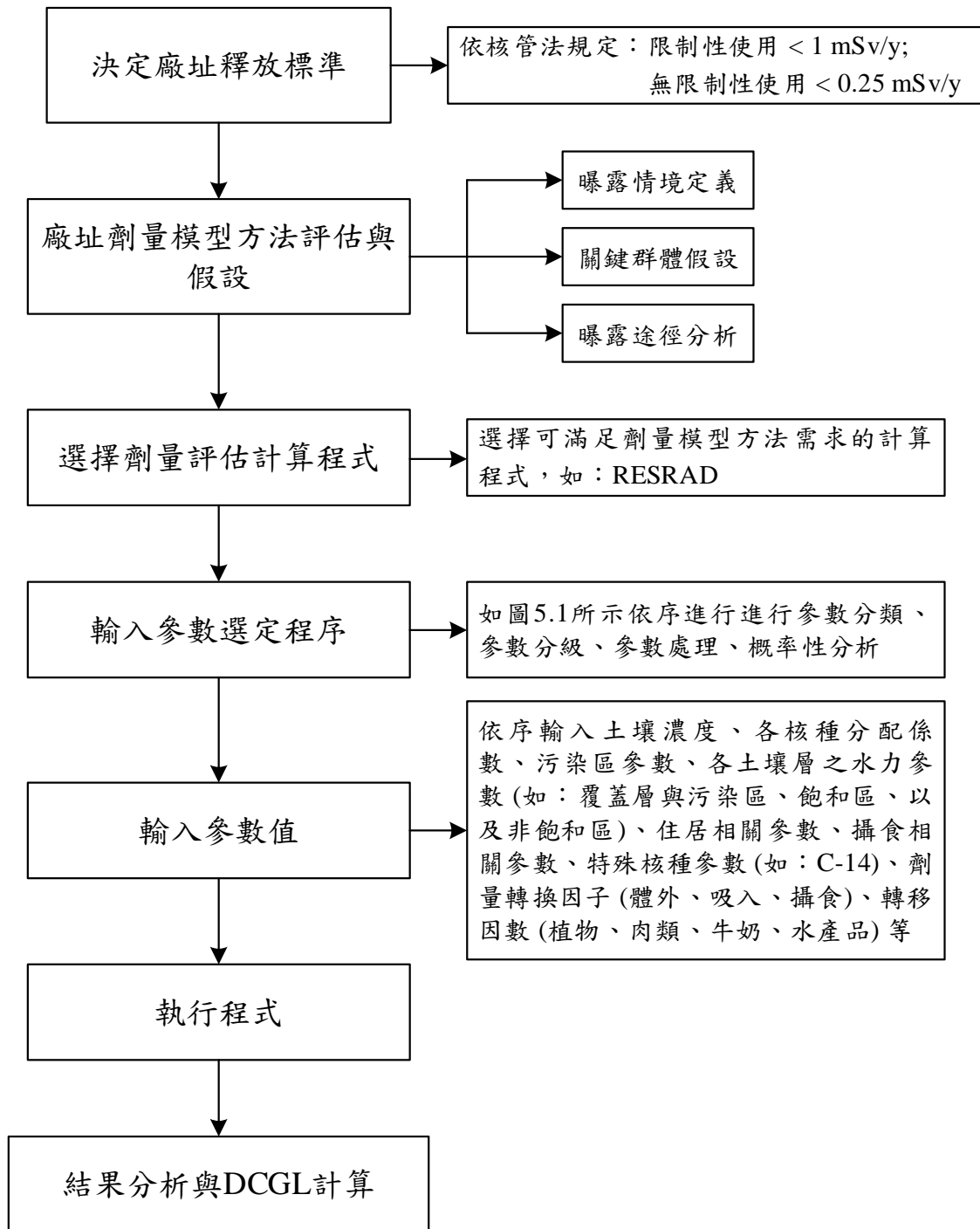


圖 6.1、DCGL 計算流程圖

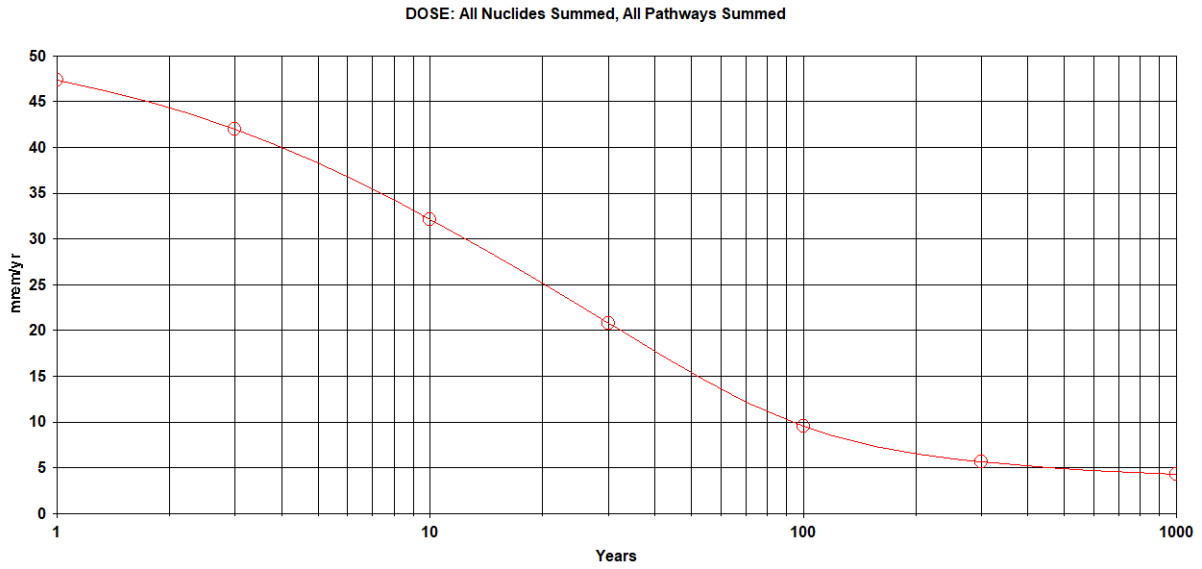


圖 6.2、YNPS 核電廠所有關切核種經 RESRAD-ONSITE 程式計算所得之劑量隨時間的變化情形

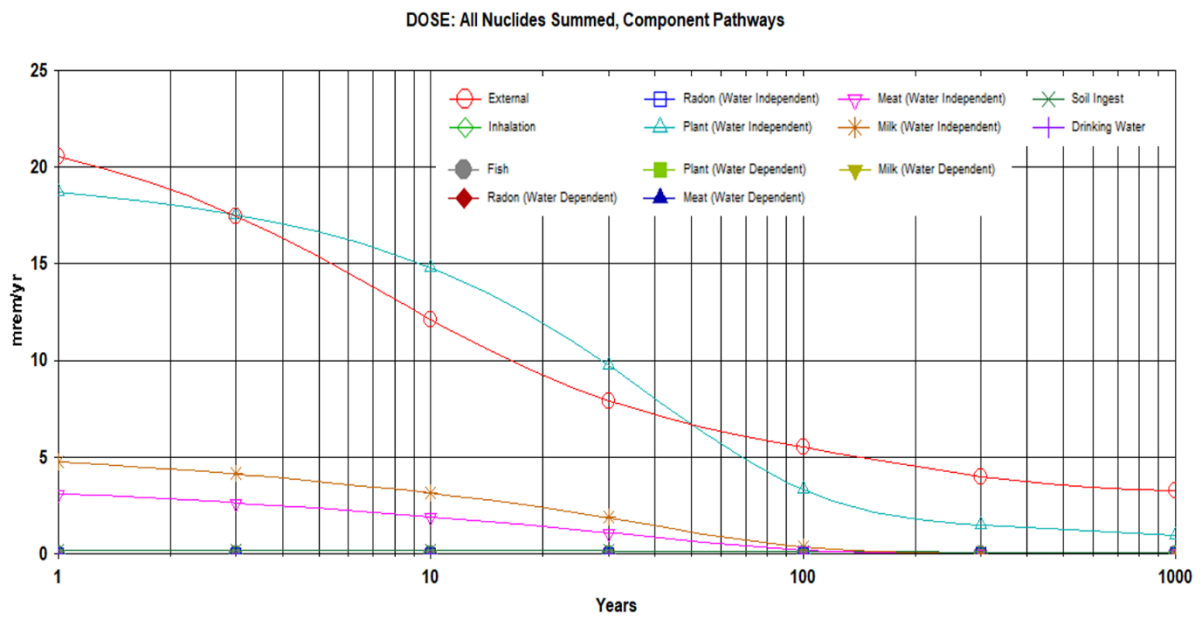


圖 6.3、YNPS 核電廠所有關切核種於不同曝露途徑的劑量貢獻

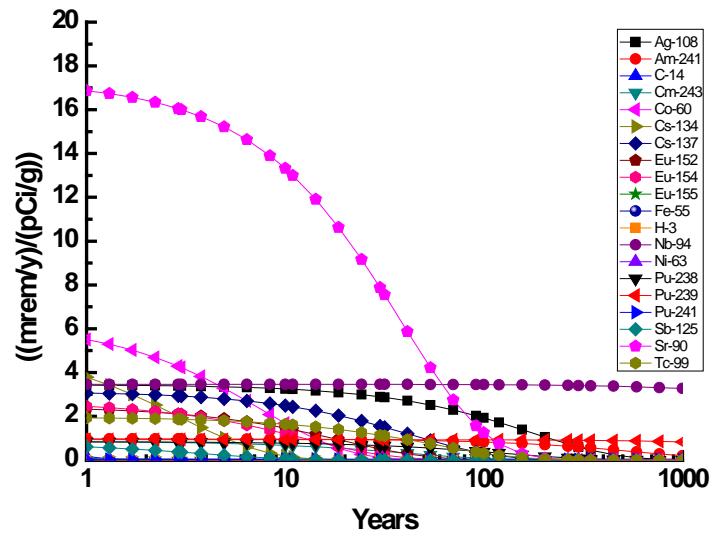


圖 6.4、YNPS 核電廠各關切核種所造成之劑量/土壤濃度比值 (DSR_i) 隨時間的變化情形

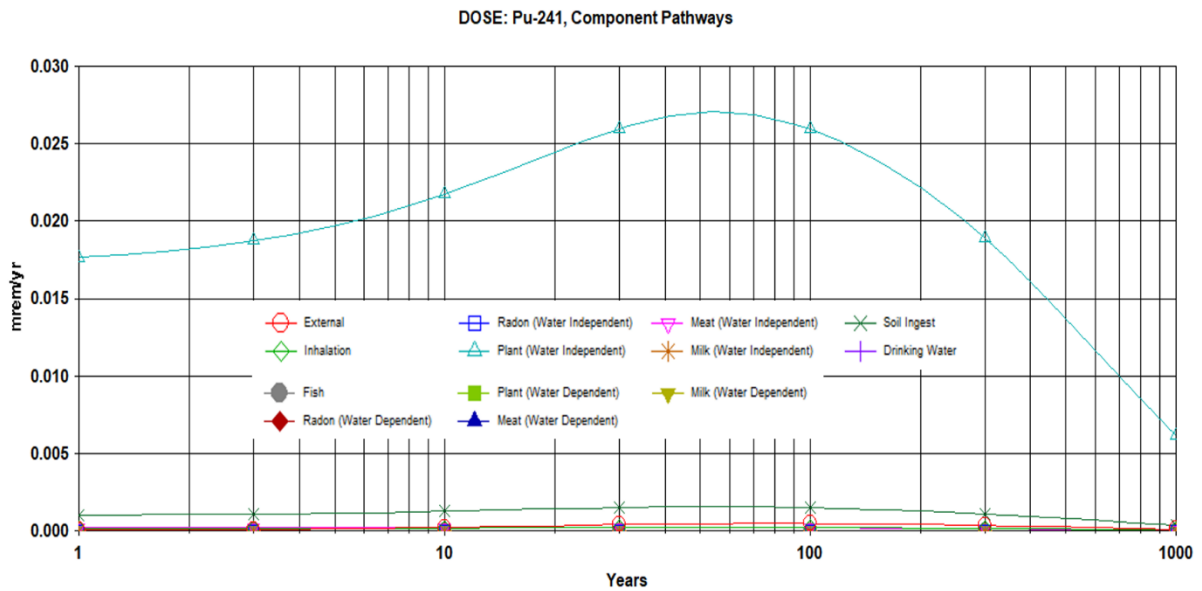


圖 6.5、YNPS 核電廠 Pu-241 核種所造成之劑量隨時間的變化情形

表 6.1、YNPS 核電廠之關切核種及其半衰期

Radionuclide	Half-Life (in years)
H-3	1.228E01
C-14	5.730E03
Fe-55	2.700E00
Co-60	5.271E00
Ni-63	1.001E02
Sr-90	2.860E01
Nb-94	2.030E04
Tc-99	2.130E05
Ag-108m	1.270E02
Sb-125	2.770E00
Cs-134	2.062E00
Cs-137	3.017E01
Eu-152	1.360E01
Eu-154	8.800E00
Eu-155	4.960E00
Pu-238	8.775E01
Pu-239,240	2.413E04
Pu-241	1.440E01
Am-241	4.322E02
Cm-243,244	2.850E01

表 6.2、YNPS 核電廠所建立之廠址特定參數及其數值

參數名稱	參數值
Area of the Contamination Zone 污染區面積	13,022 m ²
Contaminated Zone Erosion Rate 污染區侵蝕率	8.5E-04 m/y
Humidity in Air 空氣濕度	6.1 g/m ³
Average Annual Wind Speed 年平均風速	2.03 m/s
Precipitation 降雨率	1.2 m/y
Irrigation Rate 灌溉率	0.435 m/y
Contaminated Zone Total Porosity 污染區總孔隙率	0.43
Contaminated Zone Effective Porosity 污染區有效孔隙率	0.383
Unsaturated Zone Total Porosity 非飽和區總孔隙率	0.43
Unsaturated Zone Effective Porosity 非飽和區有效孔隙率	0.383
Saturated Zone Total Porosity 飽和區總孔隙率	0.43
Saturated Zone Effective Porosity 飽和區有效孔隙率	0.383
Saturated Zone Hydraulic Gradient 飽和區水力梯度	0.1 feet/foot
Well Pumping Rate 井水抽取率	376 m ³ /y
Watershed for Nearby Stream or Pond 附近溪流或池塘流域	7.77E+05 m ²

表 6.3、YNPS 核電廠中敏感性參數及其 PRCC 數值與對應的 25% 或 75%

百分位參數值

核種	參數名稱	PRCC	Value for 25% or 75% quantile
H-3	Depth of roots (m) 根部深度	-0.59	1.17E+00 (25%)
	K _d of contaminated zone (cm ³ /g) 污染區分配係數	-0.54	4.30E-02 (25%)
	Thickness of contaminated zone (m) 污染區厚度	0.45	2.89E+00 (75%)
C-14	Depth of roots (m) 根部深度	-0.59	1.17E+00 (25%)
	Thickness of contaminated zone (m) 污染區厚度	0.48	2.89E+00 (75%)
	Thickness of evasion layer of C (m) 碳的逃逸層厚度	0.35	4.27E-01 (75%)
Fe-55	Meat transfer factor for Fe (pCi/kg per pCi/day) Fe 之肉類轉移因子	0.92	3.91E-02 (75%)
	Plant transfer factor for Fe (pCi/g plant per pCi/g soil) Fe 之植物轉移因子	0.68	1.83E-03 (75%)
Ni-63	Plant transfer factor for Ni (pCi/g plant per pCi/g soil) Ni 之植物轉移因子	0.90	9.11E-02 (75%)
	Milk transfer factor for Ni (pCi/l per pCi/day) Ni 之牛奶轉移因子	0.80	3.21E-02 (75%)
	Depth of roots (m) 根部深度	-0.49	1.17E+00 (25%)
Co-60	External gamma shielding factor 體外加馬屏蔽因子	0.95	3.98E-01 (75%)
	Plant transfer factor for Co (pCi/g plant per pCi/g soil) Co 之植物轉移因子	0.67	1.46E-01 (75%)
	Meat transfer factor for Co (pCi/kg per pCi/day) Co 之肉類轉移因子	0.36	5.86E-02 (75%)
Sr-90	Plant transfer factor for Sr (pCi/g plant per pCi/g soil) Sr 之植物轉移因子	0.93	5.90E-01 (75%)
	Depth of roots (m) 根部深度	-0.53	1.17E+00 (25%)
Nb-94	External gamma shielding factor 體外加馬屏蔽因子	0.99	3.98E-01 (75%)
	K _d of contaminated zone (cm ³ /g) 污染區分配係數	0.30	3.31E+03 (75%)
Tc-99	Plant transfer factor for Tc (pCi/g plant per pCi/g soil) Tc 之植物轉移因子	0.88	9.16E+00 (75%)
	Depth of roots (m) 根部深度	-0.44	1.17E+00 (25%)
	K _d of contaminated zone (cm ³ /g) 污染區分配係數	0.49	4.28E+00 (75%)
Ag-108m	External gamma shielding factor 體外加馬屏蔽因子	1.00	3.98E-01 (75%)
Sb-125	External gamma shielding factor 體外加馬屏蔽因子	0.99	3.98E-01 (75%)
	K _d of contaminated zone (cm ³ /g) 污染區分配係數	0.29	3.31E+03 (75%)
Cs-134	External gamma shielding factor 體外加馬屏蔽因子	0.84	3.98E-01 (75%)
	Plant transfer factor for Cs (pCi/g plant per pCi/g soil) Cs 之植物轉移因子	0.84	7.82E-02 (75%)
	Depth of roots (m) 根部深度	-0.33	1.17E+00 (25%)
	Milk transfer factor for Cs (pCi/l per pCi/day) Cs 之牛奶轉移因子	0.32	1.39E-02 (75%)
	Meat transfer factor for Cs (pCi/kg per pCi/day) Cs 之肉類轉移因子	0.35	6.51E-02 (75%)
Cs-137	Plant transfer factor for Cs (pCi/g plant per pCi/g soil) Cs 之植物轉移因子	0.88	7.82E-02 (75%)
	External gamma shielding factor 體外加馬屏蔽因子	0.75	3.98E-01 (75%)
	Depth of roots (m) 根部深度	-0.39	1.17E+00 (25%)
	Milk transfer factor for Cs (pCi/l per pCi/day) Cs 之牛奶轉移因子	0.39	1.39E-02 (75%)
	Meat transfer factor for Cs (pCi/kg per pCi/day) Cs 之肉類轉移因子	0.31	6.51E-02 (75%)
Eu-152	External gamma shielding factor 體外加馬屏蔽因子	0.99	3.98E-01 (75%)
Eu-154	External gamma shielding factor 體外加馬屏蔽因子	0.99	3.98E-01 (75%)
Eu-155	External gamma shielding factor 體外加馬屏蔽因子	0.99	3.98E-01 (75%)

(接上頁)

	Plant transfer factor for Eu (pCi/g plant per pCi/g soil) Eu 之植物轉移因子	0.29	4.21E-03 (75%)
Pu-238	Plant transfer factor for Pu (pCi/g plant per pCi/g soil) Pu 之植物轉移因子	0.92	1.83E-03 (75%)
	Depth of roots (m) 根部深度	-0.54	1.17E+00 (25%)
Pu-239	Plant transfer factor for Pu (pCi/g plant per pCi/g soil) Pu 之植物轉移因子	0.92	1.83E-03 (75%)
	Depth of roots (m) 根部深度	-0.53	1.17E+00 (25%)
Pu-241	Plant transfer factor for Am (pCi/g plant per pCi/g soil) Am 之植物轉移因子	0.85	1.83E-03 (75%)
	Depth of roots (m) 根部深度	-0.44	1.17E+00 (25%)
	Kd of contaminated zone (cm ³ /g) 污染區分配係數	0.28	1.20E+04 (75%)
Am-241	Plant transfer factor for Am (pCi/g plant per pCi/g soil) Am 之植物轉移因子	0.92	1.83E-03 (75%)
	Depth of roots (m) 根部深度	-0.54	1.17E+00 (25%)
Cm-243	Plant transfer factor for Cm (pCi/g plant per pCi/g soil) Cm 之植物轉移因子	0.91	1.83E-03 (75%)
	External gamma shielding factor 體外加馬屏蔽因子	0.58	3.98E-01 (75%)
	Depth of roots (m) 根部深度	-0.50	1.17E+00 (25%)

表 6.4、YNPS 核電廠之土壤 DCGL 驗證計算結果比較

核種	YNPS 核電廠 (RESRAD 6.21)		本研究 (RESRAD 7.2)		DCGL 計算誤差 (%)
	DSR (mrem/y per pCi/g)	DCGL (pCi/g)	DSR (mrem/y per pCi/g)	DCGL (pCi/g)	
H-3	6.79E-02	3.7E+02	6.82E-02	3.7E+02	0.00
C-14	4.52E+00	5.5E+00	4.06E+00	6.2E+00	12.73
Fe-55	8.57E-04	2.9E+04	9.10E-04	2.7E+04	-6.90
Co-60	6.21E+00	4.0E+00	6.29E+00	4.0E+00	0.00
Ni-63	3.07E-02	8.1E+02	3.45E-02	7.3E+02	-9.88
Sr-90	1.45E+01	1.7E+00	1.73E+01	1.4E+00	-17.65
Nb-94	3.46E+00	7.2E+00	3.46E+00	7.2E+00	0.00
Tc-99	1.76E+00	1.4E+01	1.97E+00	1.3E+01	-7.14
Ag-108m	3.44E+00	7.3E+00	3.45E+00	7.3E+00	0.00
Sb-125	7.82E-01	3.2E+01	7.79E-01	3.2E+01	0.00
Cs-134	5.02E+00	5.0E+00	5.30E+00	4.7E+00	-6.00
Cs-137	2.92E+00	8.6E+00	3.14E+00	8.0E+00	-6.98
Eu-152	2.43E+00	1.0E+01	2.45E+00	1.0E+01	0.00
Eu-154	2.63E+00	9.5E+00	2.65E+00	9.4E+00	-1.05
Eu-155	6.29E-02	4.0E+02	6.31E-02	4.0E+02	0.00
Pu-238	7.48E-01	3.3E+01	8.43E-01	3.0E+01	-9.09
Pu-239	8.30E-01	3.0E+01	9.36E-01	2.7E+01	-10.00
Pu-241	2.54E-02	9.8E+02	2.95E-02	8.5E+02	-13.27
Am-241	8.59E-01	2.9E+01	9.72E-01	2.6E+01	-10.34
Cm-243	7.85E-01	3.2E+01	8.55E-01	2.9E+01	-9.38

七、結語

本研究計畫的工作重點主要聚焦於探討除役廠址特性計算模型之建構與驗證方法，據此可以計算求得正確的 DCGL，並確認除役廠址之土壤、建物及其周遭環境可符合管制機關所制定的以劑量或風險為基準的執照終止接受標準。在本研究計畫中，我們依序針對 RESRAD-ONSITE 程式的曝露途徑與劑量評估方法、參數選擇策略與靈敏度分析、概率性輻射劑量風險分析等方法進行研析，同時也選定美國 YNPS 核電廠的除役案例，實際利用 RESRAD-ONSITE 程式進行 DCGL 的驗證計算。本研究計畫已如期完成預定的工作項目，計畫相關的工作成果說明如下：

- (1) 曝露途徑與劑量評估方法分析：RESRAD-ONSITE 程式計算牽涉極為複雜的輻射曝露途徑，本研究已針對九種環境傳遞途徑、DCGL 推算方法、輻射劑量評估所牽涉的重要因子、以及曝露情境擬定方案等進行研析，藉此釐清計算模型與各類參數的物理意義。
- (2) 參數選擇策略與靈敏度分析：RESRAD-ONSITE 程式牽涉數量眾多的輸入參數，計算時必須依據所關切廠址的特性來決定重要參數的數值，如此才能求得正確的 DCGL。本研究已依據 NUREG/CR-6697 技術指引研擬 RESRAD-ONSITE 程式的參數選擇策略，藉此進行參數的分類與重要性排序，同時也利用 RESRAD-ONSITE 程式的靈敏度分析功能完成

重要參數的劑量影響評估，分析結果與 NUREG/CR-6697 的結果相符。

(3) 概率性輻射劑量風險分析：RESRAD-ONSITE 程式的概率性分析功能可用以評估輸入參數的不確定性對於劑量的影響，除了有助於瞭解參數的重要性之外，也可藉由統計分析所得的相關係數來決定保守的參數值。本研究已針對 RESRAD-ONSITE 程式的概率性分析功能進行研析，包含程式的操作設定、取樣方法、分佈類型、分析結果等，同時也針對如何利用概率性分析方法進行參數值選定的流程進行說明。

(4) DCGL 驗證計算：藉由國外除役核電廠的 DCGL 驗證計算，有助於精進輻射劑量評估概念模型的建構技術，同時也可藉此瞭解除役核電廠在進行 DCGL 計算時必須考慮的重要輸入參數，並獲知各殘留放射性核種對於劑量的影響。本研究引用美國 YNPS 除役核電廠的案例，除進行該廠址輸入參數的分析之外，也實際利用 RESRAD-ONSITE 程式進行該廠址的 DCGL 驗證計算，結果顯示與 YNPS 的計算結果相近。

在進行廠址劑量評估模型的建構與 DCGL 的計算時，最重要的工作即是建立有系統化及可靠的參數值選定流程，設施經營者除應建立必要的廠址特定參數之外，其餘參數也應依其重要性分為確定性分析參數與概率性分析參數。對於確定性分析參數，可直接採用預設值或援引於其它具有參考價值的文件或技術報告；對於概率性分析參數，則應進行參數的不確定

性分析以確知其重要性，並據此決定其保守的數值。本研究已針對 RESRAD 廠址特性計算模型之建構與驗證方法進行詳細的說明，相關的內容也可做為管制機關在進行除役核電廠 DCGL 計算審查及管制時的參考。

八、參考資料

- [1] C. Yu, A.J. Zielen, J.-J. Cheng, D.J. LePoire, E. Gnanapragasam, S. Kamboj, J. Arnish, A. Wallo III, W.A. Williams, H. Peterson, “User’s Manual for RESRAD Version 6”, ANL/EAD-4, Environmental Assessment Division, Argonne National Laboratory (2001).
- [2] International Commission on Radiological Protection, “Report of the Task Group on Reference Man, ICRP Publication 23”, prepared by a Task Group of Committee 2, Pergamon Press, New York, N.Y. (1975).
- [3] D.J. Goode, S.M. Neuder, R.A. Pennifill, T. Ginn, 1986. Onsite Disposal of Radioactive Waste. NUREG-1101, Vol. 3, Office of Nuclear Regulatory Research, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, 1986.
- [4] U.S. Environmental Protection Agency, “Exposure Factors Handbook”, EPA/600/P-95/002Fa, Office of Research and Development, National Center for Environmental Assessment, Washington, D.C. (1997).
- [5] “RESRAD Training Workshop Presentations”, Environmental Science Division, Argonne National Laboratory, April 11-12 (2011).
- [6] W.E. Kennedy, Jr., D.L. Strenge, R.A. Meek, 1992. Residual radioactive contamination from decommissioning, NUREG/CR-5512, PNL-7994, Vol. 1, Office of Nuclear Regulatory Research, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, October 1992.
- [7] C. Yu, D. LePoire, E. Gnanapragasam, J. Amish, S. Kamboj, B.M. Biwer, J.-J. Cheng, A. Zielen, S.Y. Chen, “Development of Probabilistic RESRAD 6.0 and RESRAD-BUILD 3.0 Computer Codes”, Argonne National Laboratory,

NUREG/CR-6697, ANL/EAD/TM-98, Office of Nuclear Regulatory Research, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, 2000.

- [8] Beyeler, W.E., et al., “Review of Parameter Data for the NUREG/CR-5512 Building Occupancy Scenario and Probability Distributions for the DandD Parameter Analysis”, Letter Report, prepared by Sandia National Laboratory for U.S. Nuclear Regulatory Commission, January, 1997.
- [9] Beyeler, W.E., et al., “Review of Parameter Data for the NUREG/CR-5512 Residential Farmer Scenario and Probability Distributions for the DandD Parameter Analysis”, Letter Report, prepared by Sandia National Laboratory for U.S. Nuclear Regulatory Commission, January, 1998.
- [10] K.M. Krupka, et al., “Understanding Variation in Partitioning Coefficient, K_d , Values, Vols. I and II”, EPA 402-R-99-004A and B, a cooperative effort by: Office of Radiation and Indoor Air, Office of Solid Waste and Emergency Response, U.S. Environmental Protection Agency, and Office of Environmental Restoration, U.S. Department of Energy, Washington, D.C., August, 1999.
- [11] S.W. Taylor, L.C. Smith, R.K. Carr, A. Carson, E. Darois, “Developing Site-Specific Derived Concentration Guideline Levels for Multiple Media at the Connecticut Yankee Haddam Neck Plant”, WM’03 Conference, February 23-27, 2003, Tucson, AZ
- [12] “Yankee Nuclear Plant Station License Termination Plan”, Yankee Atomic Power Company, Rowe, Massachusetts (2004).
- [13] “Maine Yankee Plant License Termination Plan”, Maine Yankee Atomic Power Company, Vermont, Massachusetts (2005).

- [14]“Haddam Neck Plant License Termination Plan”, Connecticut Yankee Atomic Power Company, East Hampton, CT (2002).
- [15]“Residual Radioactive Contamination From Decommissioning: Parameter Analysis”, NUREG/CR-5512, Vol. 3, SAND99-2148, Sandia National Laboratories, U.S. Nuclear Regulatory Commission, August, 1999.
- [16]C. Yu, “RESRAD-OFFSITE Code and Derivation of Cleanup Criteria”, Presentation Slides at EMRAS II NORM & Legacy Sites WG Meeting, 2010
- [17]D. LePoire et al., “Probabilistic Modules for the RESRAD and RESRAD-BUILD Computer Codes”, NUREG/CR-6692, ANL/EAD/TM-91, U.S. Nuclear Regulatory Commission, January, 1997.
- [18]S. Kamboj et al., “Probabilistic Dose Analysis Using Parameter Distributions Developed for RESRAD and RESRAD-BUILD Codes”, NUREG/CR-6676, ANL/EAD/TM-89, Office of Nuclear Regulatory Research, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, October 2000.

行政院原子能委員會
委託研究計畫期末報告

計畫名稱：

「核能電廠除役與室內乾貯安全審查技術之研究」
有關除役部分之研究

子項計畫四：

核電廠除役作業及排程規劃之審查技術及導則（草
案）研究

計畫編號：AEC10612052L

執行單位：國立清華大學

計畫主持人：裴晉哲

子項計畫四主持人：裴晉哲

報告作者：裴晉哲、劉千田、陳美雪

報告日期：中華民國107年12月

子項計畫四：

核電廠除役作業及排程規劃之審查技術及導則（草案）研究

摘要

本子計畫之目的係針對核電廠除役作業及排程規劃，作審查技術之研究，以提供除役管制作業及審查的參考。主要藉國際最新除役資訊，參考美國、德國及其他國家等核電廠除役之經驗，進行除役作業及排程規劃的相關經驗之整理、研析與歸納，就相關除役審核技術及管制重點提出建議，作為管制參考。

本研究已整理美國、德國、國際原子能總署 IAEA 的除役規範資料，將其除役作業及排程規劃的工作重點、規範事項以及準備策略進行研析與彙整，於比對與探討後，提出管制單位審查方向、建議及除役作業與排程規劃審查導則草案，精進除役審查技術。

Abstract

This objective of this sub-project is to establish the preliminary guideline of the Scheduling and Work Breakdown Structure(WBS) for reviewing the decommissioning plan of Taiwan from the experiences of decommissioning nuclear power plants of USA, Germany and other countries. In this sub-project, we study and analysis the experience of the Scheduling and WBS on decommissioning nuclear power plants.

In this study, information of USA, Germany and the related regulatory guides of IAEA were collected and studied. The detailed studies and comparisons among them were performed. Moreover, the top priorities and key issues for the decommissioning, further administration recommendations, and the preliminary guideline of the Scheduling and Work Breakdown Structure(WBS) from the studied results are proposed to elevate the auditing technology of the decommissioning plans.

目錄

第一章.. 前言	1
第二章.. 計畫目標與執行方法	3
2.1 計畫目標	3
2.2 執行方法	3
2.3 國際資訊	4
2.3.1 核電廠除役策略管理.....	4
2.3.2 工作分解架構與作業排程.....	5
2.3.3 費用組成預估與費用明細結構	11
第三章.. 國際除役經驗	18
3.1 國際間除役概覽	19
3.2 美國核電廠除役活動過渡階段經驗與學習 ²	21
3.2.1 聖奧諾弗爾 2 號及 3 號機組電廠經驗	25
3.2.2 Oyster Creek 電廠經驗	33
3.2.3 緬因州洋基電廠經驗.....	36
3.2.4 康乃迪克州的洋基電廠經驗 (Haddam Neck)	39
3.2.5 佛蒙特洋基電廠經驗.....	44
3.2.6 Kewaunee 電廠經驗.....	48
3.2.7 Crystal River 3 電廠經驗	49
3.2.8 錫安 1 號和 2 號機組電廠經驗	49
3.3 德國核電廠除役活動過渡階段經驗與學習	50
3.3.1 德國施塔德核電廠除役活動過渡階段經驗與學習	58
3.3.2 德國奧布里格海姆核電廠除役活動過渡階段經驗與學習	60
3.4 法國核電廠除役活動過渡階段經驗與學習	63
3.4.1 法國 Chooz 核子設施除役活動過渡階段經驗與學習	66

3.5 西班牙核電廠除役活動過渡階段經驗與學習	70
3.5.1 西班牙 José Cabrera 核子設施除役活動過渡階段經驗與學習	71
3.6 瑞士核電廠除役活動過渡階段經驗與學習	79
3.6.1 瑞士 Muhleberg 核子設施除役活動過渡階段經驗與學習	81
第四章..核電廠除役作業及排程規劃之相關資料	82
4.1 核一廠除役作業及排程規劃研究	91
4.2 除役參考廠之規劃	95
4.3 核電廠除役管制重點及建議	112
第五章..核電廠除役作業及排程規劃審查導則(草案)	115
第六章..結論	121
第七章..重要參考文獻	123

表目錄

表 2.1 美國能源部 DOE 除役常用的工作分解架構範例 ⁶	9
表 2.2 DOE 除役工作分解架構及編碼範例 ⁶	10
表 2.3 ISDC 編碼範例 ^{6,7}	14
表 3.1 過渡階段經驗範例的美國電廠狀態整理 ²	22
表 3.2 聖奧諾弗爾電廠除役執照終止活動預估的需求人數.....	32
表 3.3 聖奧諾弗爾電廠除役執照終止活動需求的承包廠預估人數.....	33
表 3.4 聖奧諾弗爾電廠除役用過燃料管理需求的預估人數.....	33
表 3.5 Oyster Creek 電廠除役各階段時間表.....	35
表 3.6 Maine Yankee 電廠過渡階段到除役的時程與主要活動表.....	37
表 3.7 康乃迪克洋基除役期間的關鍵事件時間表.....	41
表 3.8 佛蒙特洋基管制文件的送審順序和核准情形.....	46
表 3.9 德國目前僅有 7 部機組運轉整理表.....	51
表 3.10 德國之核電廠現況 ²	52
表 3.11 德國 Stade 核電廠的主要除役階段及重要事件 ²	59
表 3.12 德國 Obrigheim 核電廠的主要除役階段及重要事件 ²	62
表 3.13 德國 Stade 及 Obrigheim 核電廠的主要除役拆除活動內容 ²	62
表 3.14 法國核廢棄物分級及管理策略 ²	64
表 3.15 法國核電廠除役概況表 ²	65
表 4.1 西屋公司建議除役階段時程規劃架構表.....	82
表 4.2 西屋公司建議時程費用規劃架構表.....	83
表 4.3 針對核一廠不同的廠房所評估之困難因子.....	94
表 4.4 核一廠除役計畫需求規劃甘特圖示各階段之程序.....	95
表 4.5 除役參考廠立即除役之費用及輻射評估摘要(費用評估年 1993, 單位: 美元).....	98

表 4.6 除役參考廠立即除役之人力費用評估(費用評估年 1993,單位:美元)	99
表 4.7 除役執行契約廠商人力費用評估(費用評估年 1993,單位:美元)	101
表 4.8 除役參考廠除役第 2 階段移除燃料之工作時程及人時	108
表 4.9 除役參考廠除役第 4 階段拆除反應器廠房之工作時程及人時	109
表 4.10 除役參考廠除役第 4 階段拆除汽機廠房之工作時程及人時	110
表 4.11 除役參考廠除役第 4 階段拆除廢料處理場及控制廠房之工作時程及人時	111

圖目錄

圖 1.1 工作分解架構及作業排程主要結構 ¹	2
圖 2.1 除役設施盤點資料庫建立流程 ³	5
圖 2.2 除役工作項目樹狀結構 ³	6
圖 2.3 除役規劃常用的里程碑 ³	7
圖 2.4 ISDC 基本架構 ^{5,7}	12
圖 2.5 WBS 與 ISDC 編碼及關係連結 ⁷	15
圖 2.6 ISDC 費用管控流程 ⁷	16
圖 2.7 費用結構隨時間之變化 ⁵	16
圖 3.1 (A)美國計畫性立即除役例行工作完成項目的時程甘特圖 ² ，(B)為(A) 之重點工作	23
圖 3.2 (A)美國非計畫性立即除役例行工作完成項目的時程甘特圖 ² ，(B)為 (A)之重點工作	24
圖 3.3 美國 SONGS 除役例行工作完成的時間示意圖 ²	26
圖 3.4 SONGS 中 2 號機組和 3 號機組 SFPI 計畫的示意圖 ⁹	31
圖 3.5 Maine Yankee 過渡階段到除役的時程規劃	38
圖 3.6 康乃迪克洋基電廠過渡階段到拆除的主要除役活動時程規劃	42
圖 3.7 美國 Kewaunee 電廠規劃除役後執照終止預估需求人員的變動	48
圖 3.8 德國目前僅有 7 部運轉機組分佈圖	51
圖 3.9 德國核電廠除役作業管制圖 ²	56
圖 3.10 德國除役執照審核流程概覽 ⁹	57
圖 3.11 德國除役階段時程規劃範例 ⁹	57
圖 3.12 德國 Stade 除役電廠爐心上層組件搬運到用過燃料池的情形 ⁸	60
圖 3.12 西班牙電廠除役的組織架構 ⁸	71
圖 3.13 Zorita 核電廠，於 2006 年 4 月永久停機	72

圖 3.14 Zorita 核電廠除役主要五個步驟 ³	72
圖 4.1 除役作業之工作人時規劃流程圖 ³	92
圖 4.2 除役參考廠之立即拆除的活動時程規劃	97
圖 4.3 除役參考廠之除役第 1 階段人力需求	103
圖 4.4 除役參考廠之除役第 2 階段人力需求	104
圖 4.5 除役參考廠之除役第 3 階段人力需求	105
圖 4.6 除役參考廠之除役第 4 階段公司人力需求	106
圖 4.7 除役參考廠之除役第 4 階段執行契約廠商人力需求	107

第一章 前言

展望國際，截至 107 年 5 月，總計有 20 個國家，共 166 部的核電機組永久停機，並有多數正進行除役規劃。另外，永久停止運轉、正進行除役中或已完成除役的研究用核反應器，也達 554 座之多。因應全球未來即將面臨大量核電廠或核反應器的除役任務，許多國際先進核能公司或核能組織機構，如：Studs vik、AREVA、CEA、OECD...等，對核電廠除役的準備、運轉至過渡階段、技術及實務經驗，正積極透過國際核能組織，展開資訊與實際除役作業經驗交流。

除役作業是核設施（包括核電廠）的永久停機後，所需要執行的重要步驟，其進程序具有階段任務的特性，其中（一）廠址永久安全，（二）廠址無限制恢復再利用，為除役最終的兩個最重要目標。按照我國法規規定，核電廠營運方需要在運轉屆滿前三年，即擬妥除役計畫，向核安管制單位提報申請除役審查；另一方面，核管機構則需建立審查能力，憑藉相關除役研發計畫，進行除役、拆廠過程中關鍵技術之深入瞭解，以強化自身查核能量，因應日後相關工作之需。除役計畫內諸項，例如：人員輻射劑量評估、廢棄物數量預估、後續廢棄物的貯存甚至處置規劃等，均可能有所變化而須調整，其種種資訊亦可供除役費用估算時的重要參考。國內在推動非核家園政策之下，6 部運轉中的核能機組即將陸續除役，並已有核一廠一號機提出除役計畫申請除役，及早規劃除役資訊掌握，刻不容緩。

核電廠進行除役期間之作業排程規劃，為除役工作重要之一環，除役時程除須符合於法規時間內完成，還需兼顧可行性及達成性。本計畫研析各國核電廠除役各階段之目標、作業項目、工作分解架構（Work Breakdown Structure, WBS）及作業排程（Scheduling），考量的影響因素主要包括有：人員輻射劑量、廢棄物數量、費用估算等項目，深入了解各國除役程序以

及時程規劃，以訂定適合國內核電廠的除役作業及排程規劃，作除役審查管制的參考。除役工作牽涉範圍甚廣，舉凡精益管理、同步工程、費用分析、多目標優化、項目管理、軟體工具等概念，都將可應用於核電廠除役作業。近來，歐美學者提出多目標優化問題 (MOOP) 模型開發框架，重點討論核電廠的經驗數據，利用計算程式進行程序設計模型，並應用不同的軟體工具加以活用經驗數據，可提高作業排程設計的優化度，其主要原則有四：(一) 總費用最少化、(二) 安全風險最小化、(三) 活度曝露最小化、(四) 計畫時程最小化。(如圖 1.1)

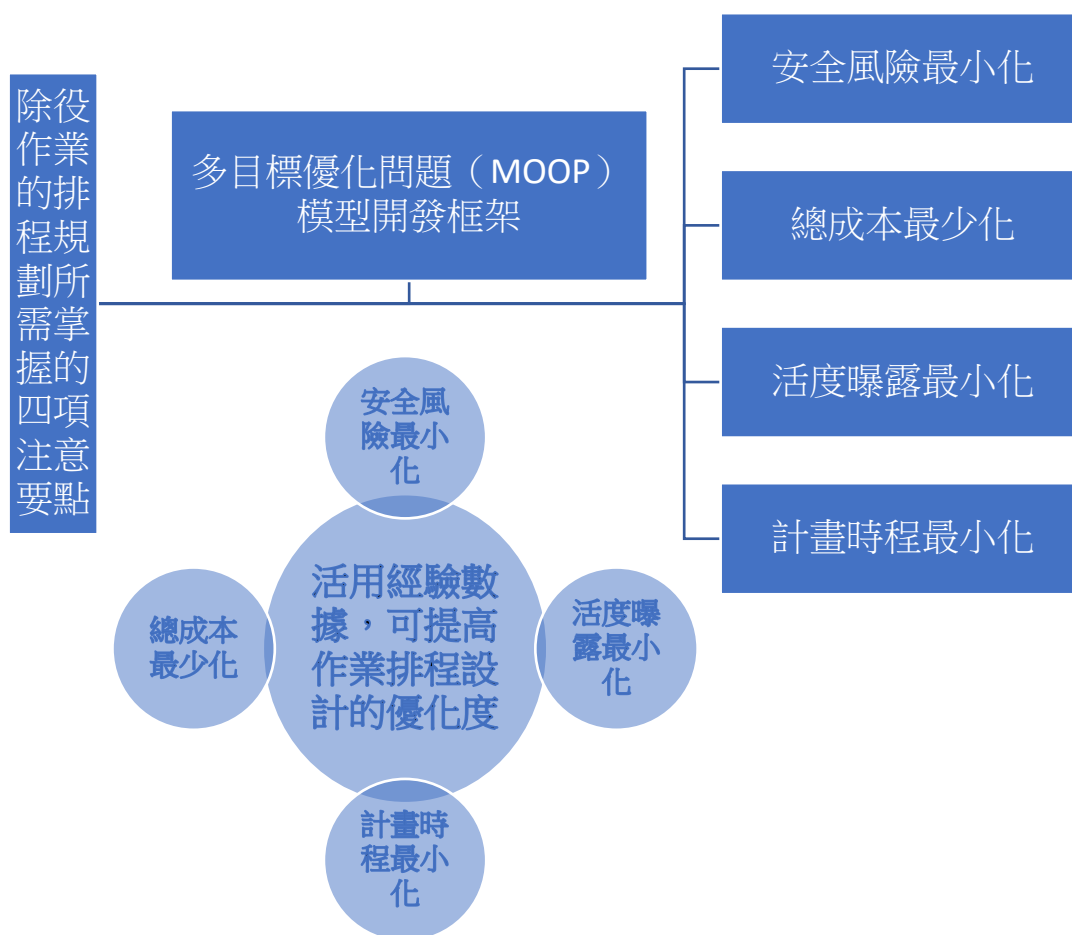


圖 1.1 工作分解架構及作業排程主要結構¹

在本研究中，藉掌握國際間各國核電廠除役作法、技術及實務經驗，對除役作業及排程規劃之審查技術進行研究，以供我國除役安全管理之參考。

第二章 計畫目標與執行方法

在核電廠除役階段，因牽涉有輻射的放射性物質，其除役作業的排程規劃十分重要，如一章所述，規劃所需掌握的注意要點有四：(一) 總費用最少化、(二) 安全風險最小化、(三) 活度曝露最小化、(四) 計畫時程最小化，藉作業排程的優化設計，使除役作業可達到最大效益。

2.1 計畫目標

本計畫預計自 IAEA、US/NRC、OECD 等國際核能相關組織取得相關資料，並參考近年國際舉辦的研討會 (Workshop) 最新資訊，藉系統化除役準備經驗，提出核電廠除役作業及排程規劃的重點方向。

工作項目 \ 時程(月)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	備註
收集與研析核電廠除役作業及排程規劃之國際經驗資訊相關資料，如管制法規、管制指引技術報告、論文資料及文獻等	■												
檢討比較核電廠除役作業及排程規劃之國際經驗			■										查核點 6/15
建議並條列出核電廠除役作業及排程規劃之國際經驗結果之關鍵重點							■						
整理與歸納研究結果，並完成計畫成果報告										■			查核點 11/15

2.2 執行方法

主要執行方法如下：

- (1) 研析國際組織及各國對核電廠除役準備與運轉過渡階段的作法、技術及實務經驗。
- (2) 建議我國核電廠除役作業及排程規劃的管制重點與作法。

2.3 國際資訊

2.3.1 核電廠除役策略管理

核電廠除役策略管理為除役規劃的核心，亦為各項除役規劃工作執行的依據，宜儘早明確訂定除役策略，將有助於執行除役規劃及除役計畫書編寫工作。為能落實除役策略與管理需求，除役工作項目分解及作業排程不可或缺，尤其核電廠除役時間可能由數年至數十年，所需經費龐大，更需要有效且系統化的管理，以輔助除役工作依照設定目標逐步進行，最後安全且順利完成核電廠除役³。

訂定除役策略（Strategy）所需考量的因素包羅萬象，且各國及各核電廠，均有其特有的文化和背景，因此無法訂定一套全體適用的除役策略，必須針對各核電廠訂定其適用的除役策略。依據西屋公司的除役經驗，可歸納整理訂定除役策略所需考量的因素，主要包含：安全、放射性衰減/輻射降低、放射性廢棄物數量、廢棄物/物質管理、財務、技術、廠址再利用、法規標準、電廠資訊/紀錄、社會政治及其他等，各因素間彼此互相影響，所代表的權重亦不盡相同，因此，如何獲得最佳化的結果，還要取決於各核電廠所處的環境及特性，但仍有相似的流程可作參考，圖 2.1 為除役設施盤點資料庫建立流程範例。

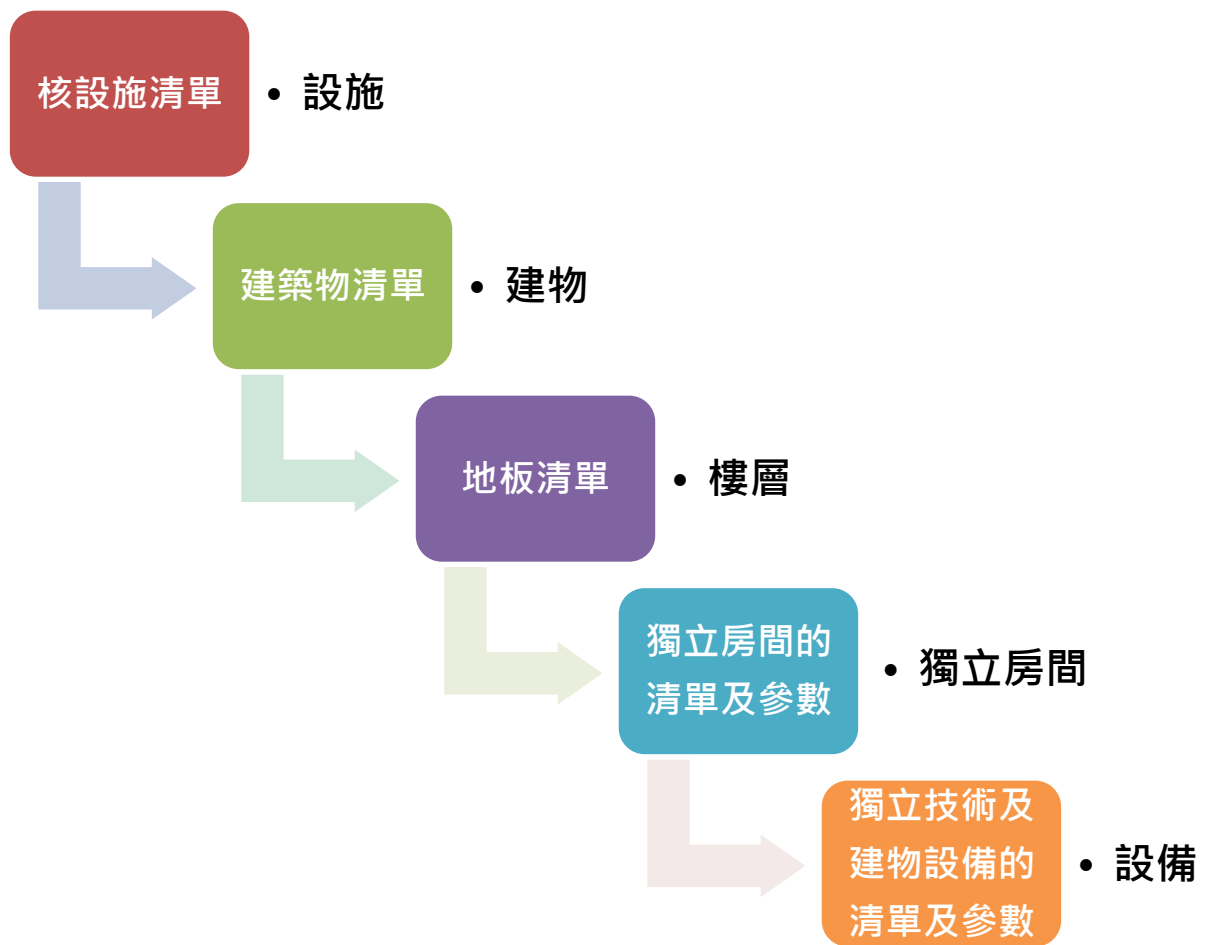


圖 2.1 除役設施盤點資料庫建立流程³

2.3.2 工作分解架構與作業排程

依據除役計畫審查導則，除役計畫針對除役拆除策略規劃除役各階段之目標、作業項目、WBS 與作業排程等，應佐以甘特 (Gantt) 圖示各階段之規劃程序，以及預計可完成時間。其目的在確保除役作業的順利完成。

因此，發展核電廠除役 WBS，準備工作和原則訂定非常重要。其步驟首先需進行計畫拆解，每個拆解項變成核心工作，直到最小工作項目為止，最後再替每個工作項目編碼；此外亦需訂定工作項目階數，此過程必須考量許多因素，才能發展出適用的 WBS，每個工作項目必須與除役有關，圖

2.2 即為除役工作項目樹狀結構及其編碼，且範圍必須涵括內部、外部和臨時工作，採由下而上（Bottom-up）的方法，包括除役技術評估、除役策略訂定、除役費用和工作效率影響因數評估等，均應於建立除役 WBS 時同步進行考量，並結合應用於後續發展除役排程及費用估算。

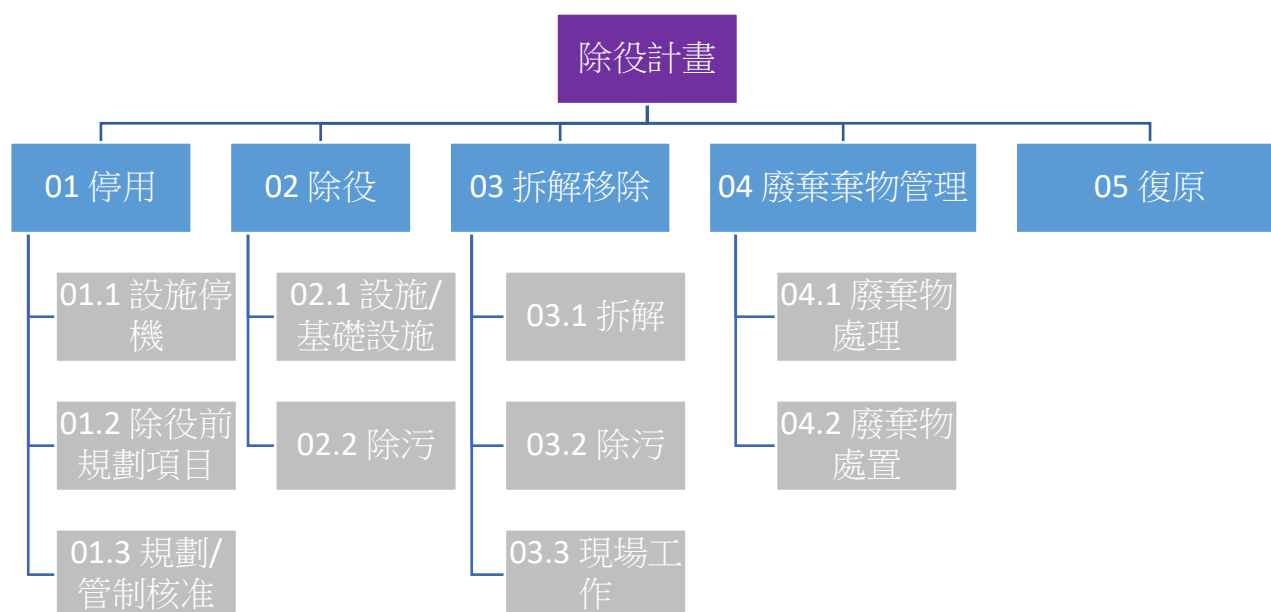


圖 2.2 除役工作項目樹狀結構³

除役排程在將 WBS 加入時間因素及工程費用的考量後，即可成為可執行的規劃；時間因素包含建立里程碑、選用合理可執行程序和人力工時估算等，這些因素分別說明如下：

- (a) 里程碑：除役規劃通常建立的里程碑，包含停止運轉、開始除役、建築物/設備拆除、廠址復原/再利用等，如圖 2.3 所示
- (b) 程序：通常分為功率運轉、停機/過渡、核設施拆解、傳統拆除和廠址復原等。
- (c) 人力工時：人力需先歸納定義每項工作所需的人力結構，例如西屋公司定義工作團隊是由工程師、領班、保健物理、技術和勞務等五種成員所組

成，再依工作性質不同訂定成員比例；工時同樣是先將除役工作項目訂出不同的工作類別，每項工作類別依工程資料庫和經驗訂出所需的工時，然後再經由公式轉換得到每項工作的人力工時。此部分估算準確與否，與工程資料庫準確性有相當大的關係。

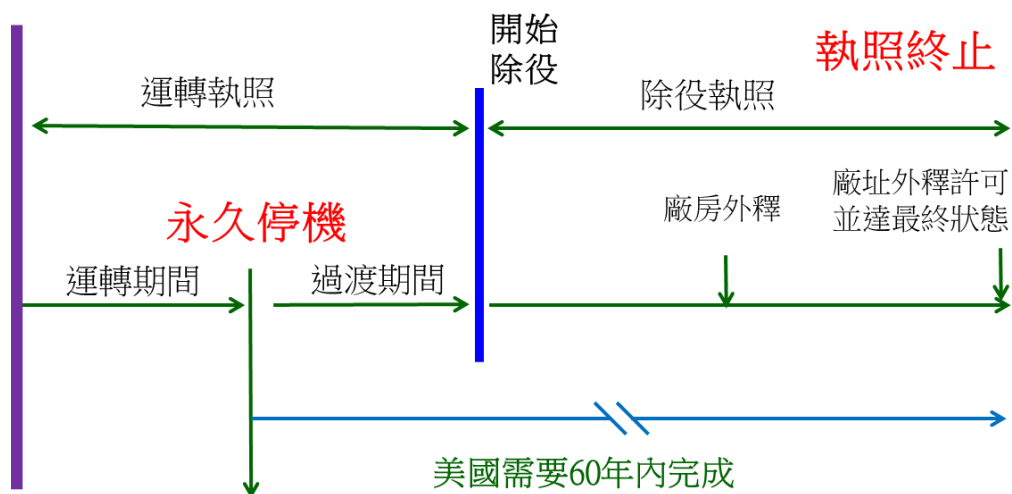


圖 2.3 除役規劃常用的里程碑³

舉例而言，美國加州 Humboldt Bay 核電廠執行除役計畫的長期里程碑主要有以下四個階段⁴：

- 第一階段-系統移除(24 個月)
- 第二階段-反應爐壓力槽移除(18 個月)
- 第三階段-廠房拆除準備(12 個月)
- 第四階段-廠房拆除，開關場工作，土壤復原及調查(27 個月)

其詳細的除役作業項目如下：

➤ 系統拆除

- 完成反應器研究，啟動準備工作團隊
- 汽機廠房大型組件拆除
- 用過燃料隔架拆除
- 燃料更換廠房管路與支架拆除

- 支援系統修改，如進出管制站、計測室、安裝臨時廢料處理系統等
- 修改與 1、2 號機共用消防系統
- 反應器拆除
 - 爐內組件切除
 - 反應器壓力容器包裝與移除
 - 繼續拆除燃料更換廠房與汽機廠房設備
 - 1、2 號機除役與拆除作業
- 廠房拆除準備作業
 - 拆除地下埋管與穿越管
 - 建築物混凝土表面除污
 - 活化污染混凝土拆除
 - 用過燃料池壁拆除
 - 繼續燃料更換廠房與汽機廠房設備拆除
 - 結構空洞回填
- 廠房拆除、廠區復原、土壤整治與最終偵測
 - 營運執照終止
 - 拆除地面層以上固定建築
 - 土壤整治與移除污染地區表土
 - 廠址偵測
 - 復原偵測
 - 最終廠址偵測
 - 廠區回填與分級

表 2.1 為美國能源部 DOE 除役常用的工作分解架構範例，表 2.2 為 DOE 除役工作分解架構及編碼範例，藉此建立完整的工作程序與關聯，並確認有充分的除役費用，使除役得以順利的執行且完成。

表 2.1 美國能源部 DOE 除役常用的工作分解架構範例⁶

第一層	第二層	第三層
主要群組項目	群組項目	次群組項目
A 廠房	A1 停用	A1.1 設施停機和檢查
		A1.2 除役前規劃項目
		A1.3 規劃/管制核准
	A2 除役	A2.1 設施/基礎設施
		A2.2 除污
	A3 拆解移除	A3.1 拆解
		A3.2 拆除
		A3.3 現場工作
	A4 廢棄物管理	A4.1 廢棄物處理
		A4.2 廢棄物處置
	A5 復原	

表 2.2 DOE 除役工作分解架構及編碼範例⁶

第一層	第二層	第三層	人力：	資本費用：	花費：	準備金：	所需經費
主要群組項目	群組項目	次群組項目	人員的薪資、保險與加班等費用	主要是指設備與耗材的費用	除了人力與資本費用以外的花費，如稅金、水電與辦公室租金等花費和電腦、電話傳真、專利、認證等之費用	除役工作依現場環境，可能多餘之費用；如因為颱風造成作業工期之延後	
A 除役或是編碼：01	A1 停用或是編碼：01.0100	A1.1 設施停機和檢查或是編碼：01.0101					
		A1.2 除役前規劃項目或是編碼：01.0102					
		A1.3 規劃/管制核准或是編碼：01.0103					
	A2 除役或是編碼：02.0100	A2.1 設施/基礎設施或是編碼：02.0101					
		A2.2 除污或是編碼：02.0102					
	A3 拆解移除或是編碼：03.0100	A3.1 拆解或是編碼：03.0101					
		A3.2 拆除或是編碼：03.0102					
		A3.3 現場工作或是編碼：03.0103					
	A4 廢棄物管理或是編碼：04.0100	A4.1 廢棄物處理或是編碼：04.0101					
		A4.2 廢棄物處置或是編碼：04.0102					
	A5 復原或是編碼：05.0100						

2.3.3 費用組成預估與費用明細結構

為順利完成除役工作，除役的費用需要如工作的架構作詳盡規劃，並建立其中的關聯性。除役費用主要包括以下四個項目：

1. 依據工程性質：直接與除役工程有關，又可以分為以下四個子項⁵
 - i. 人力：人員的薪資、保險與加班等費用。
 - ii. 投資：主要是指設備與耗材上面的投資費用。
 - iii. 花費：除了人力與投資以外的花費，像是稅金、水電與辦公室租金等花費和電腦、電話傳真、專利、認證等之費用。
 - iv. 準備金：除役工作依現場環境，可能多餘之費用；如因為颱風造成作業工期之延後。
2. 依據工程期間：相關之除役項目持續時間，在每個階段完成內，在工作範圍估算人力負擔，編列費用。像是拆解管理、許可證、健康與安全、保安等費用。
3. 工程特殊項目：無法於工程性質與工程期間分類之費用，如建築或拆除設備、現場準備、財產稅、保健物理用品、液體放射性廢物處理和獨立驗證調查等。
4. 工程特別因應費用：在確定的工程範圍內，依以前有關之估計與費用的經驗表，是可能會出現的增加費用。與風險之定義有所不同，風險是有可能不會發生之事件，而不確定性之準備金，則是會發生但估不準之事件。如颱風造成之停工，工程延遲之損失。

除役時常用工作費用的組成分析，主要原則歸納如下：

- i. 自下而上的累積評估：把工項詳細的列出後，從最低階的加總至最高階的，是一種最精確的評估方法。
- ii. 具體的類比評估技術：參照已評估過但相似的工項，做評估之參考。
- iii. 參數對比評估技術：研究歷史資料之參數，用來評估複雜的工程。

- iv. 審查和更新評估技術：重新評估原來做的費用分析。
- v. 專家意見評估：當以上方法都不容易分析時，則可邀請多位學者專家，討論建立一套評估方法來做估算。

2.3.3.1 費用組成預估

核設施除役費用的國際標準結構(ISDC, International Structure for Decommissioning Costing of Nuclear Installations)^{7, 8}，是國際原子能總署(IAEA)所制定之核設施除役費用估算參考規範。相對其他的費用估算，ISDC 有不同的技術應用，如圖 2.4 及表 2.3 所示，其架構中主要有以下 11 項相關費用：

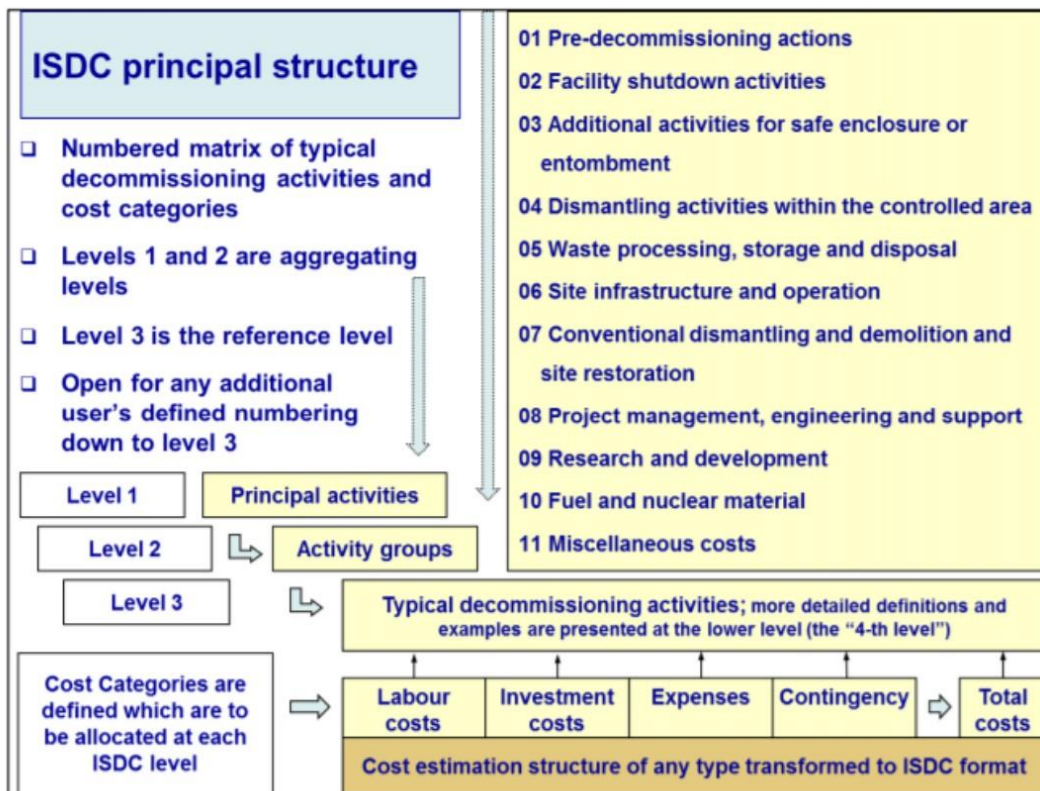


圖 2.4 ISDC 基本架構^{5,7}

1. 除役前準備：相關費用包含申請執照、工作規劃與文件之準備。
2. 電廠停機工作：停機至除役執照拿到時這段過渡期間的工作費用。

3. 設備封存之準備工作：立即拆除就不會有這一個費用分析，但在安全貯存與延遲拆除的方法之下，將設備封存之費用就需要考慮進去。
4. 管制區拆除之工作：管制區域以內的拆除工作，含先前準備工作。
5. 廢棄物之處理與貯存：依不同種類之廢棄物有不同處理與貯存方法。
6. 基礎設施之建立與營運：除了所需的基礎設施之建立與營運外，並視設施狀況設立保安設備。
7. 拆除與現場之復原：拆除後將場地整理並復原。
8. 計劃管理與工程：計劃與工程之管理與進度追蹤。
9. 研究與發展：如果目前拆除方法不適用時，將投入研發或者與國內外有相關技術之廠家合作。
10. 核燃料及物料：依各國定義，廣泛的包含有中期之燃料貯存與最終之燃料處置。
11. 雜項支出：社區補償金或外部服務費用、保險、稅額等等。

上述 ISDC 基本架構的 11 個工作分解架構可整理歸納如以下簡表架構 (表 2.3)，詳細架構可參閱附錄一。當為 WBS 與 ISDC 之間加入系統編碼及關係連結，將成為可執行的除役規劃程序。圖 2.5 為 WBS 與 ISDC 編碼及關係連結。藉由對照表及 WBS-ISDC 介面連結，可清楚並掌握整個除役工作架構及費用狀況，以便除役工作的順利完成。

圖 2.6 為 ISDC 費用管控流程，可將龐大的除役工作層層分類控管，並作有效的規劃。圖 2.7 則顯示費用結構在正常情況下隨時間之變化，當計畫開始執行時風險將逐步將低，基本費用可能因通膨緣故逐漸增加，這是計畫執行時所需考慮的變動因素。

表 2.3 ISDC 編碼範例^{6,7}

第一層	第二層	第三層	活動工作項目	人力：	基本費用：	花費：	準備金：	所需成本經費
主要群組項目	群組項目	次群組項目	活動工作項目說明	人員的薪資、保險與加班等費用	主要是指設備與耗材上面的投資成本。	除了人力與投資以外的花費，像是稅金、水電與辦公室租金等費用和電腦、電話傳真、專利、認證等之費用。	除役工作依現場環境，可能多餘之費用；如因為颱風造成作業工期之延後。	
01			除役前準備					
	01.0100		除役工作規劃					
		01.0101	除役策略規劃					
		01.0102	除役前期規劃					
		01.0103	除役最終規劃					
	01.0200		廠址輻射特性調查					
		01.0201	廠址輻射特性詳情調查					
		01.0202	危疑組件調查研析					
		01.0203	建立除役設施盤點資料庫					
		etc.						
02			電廠停機工作					
03			設備封存之準備工作					
04			管制區域內的拆除活動					
05			廢棄物之處理，儲存和處置					
06			現場基礎設施之建立與運營					
07			拆除與現場之復原					
08			計畫管理，工程和支援					
09			研究與開發					
10			核燃料及物料					
11			雜項支出					

除役規劃工作分解架構WBS			WBS-ISDC介面			ISDC架構			
階層	工作分解架構編碼	作業項目		工作分解架構編碼	ISDC第三層		第一層	第二層	第三層
1		除役目標					01		
2	1	文件之準備						01.0100	01.0101
3	1.1								01.0102
4	1.1.1								01.0103
5	1.1.1.1							01.0200	
6	1.1.1.1.1	除役規劃目標	➡	1.1.1.1.1	01.0103				
6	1.1.1.1.1	文件A之準備	➡	1.1.1.1.1	01.0103				
6	1.1.1.1.1	文件B之準備	➡	1.1.1.1.1	01.0103				
	etc.						04		
2	7	反應器拆除						04.0100	
3	7.1							04.0200	
4	7.1.1							04.0300	
5	7.1.1.1							04.0400	
6	7.1.1.1.1							04.0500	
7	7.1.1.1.1.1	拆除組件A	➡	7.1.1.1.1.1	04.0501				04.0501
7	7.1.1.1.1.1	拆除組件B	➡	7.1.1.1.1.1	04.0501				04.0502
7	7.1.1.1.1.1	拆除組件C	➡	7.1.1.1.1.1	04.0501				
	etc.								

圖 2.5 WBS 與 ISDC 編碼及關係連結⁷

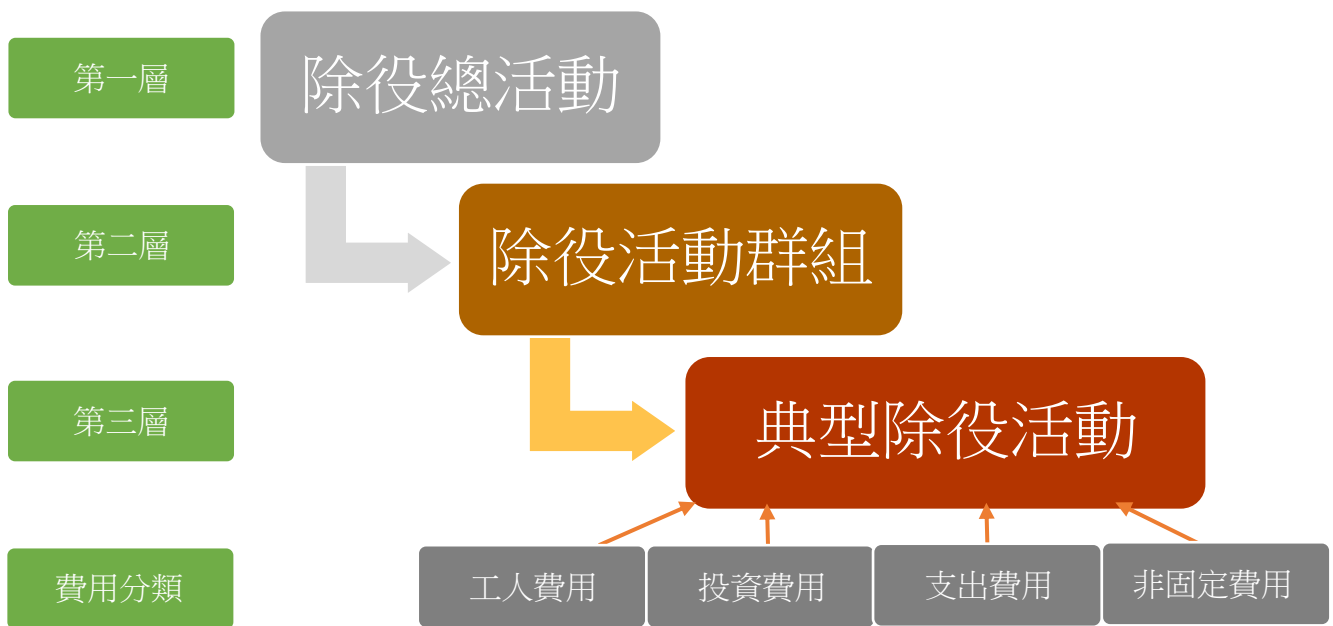


圖 2.6 ISDC 費用管控流程⁷

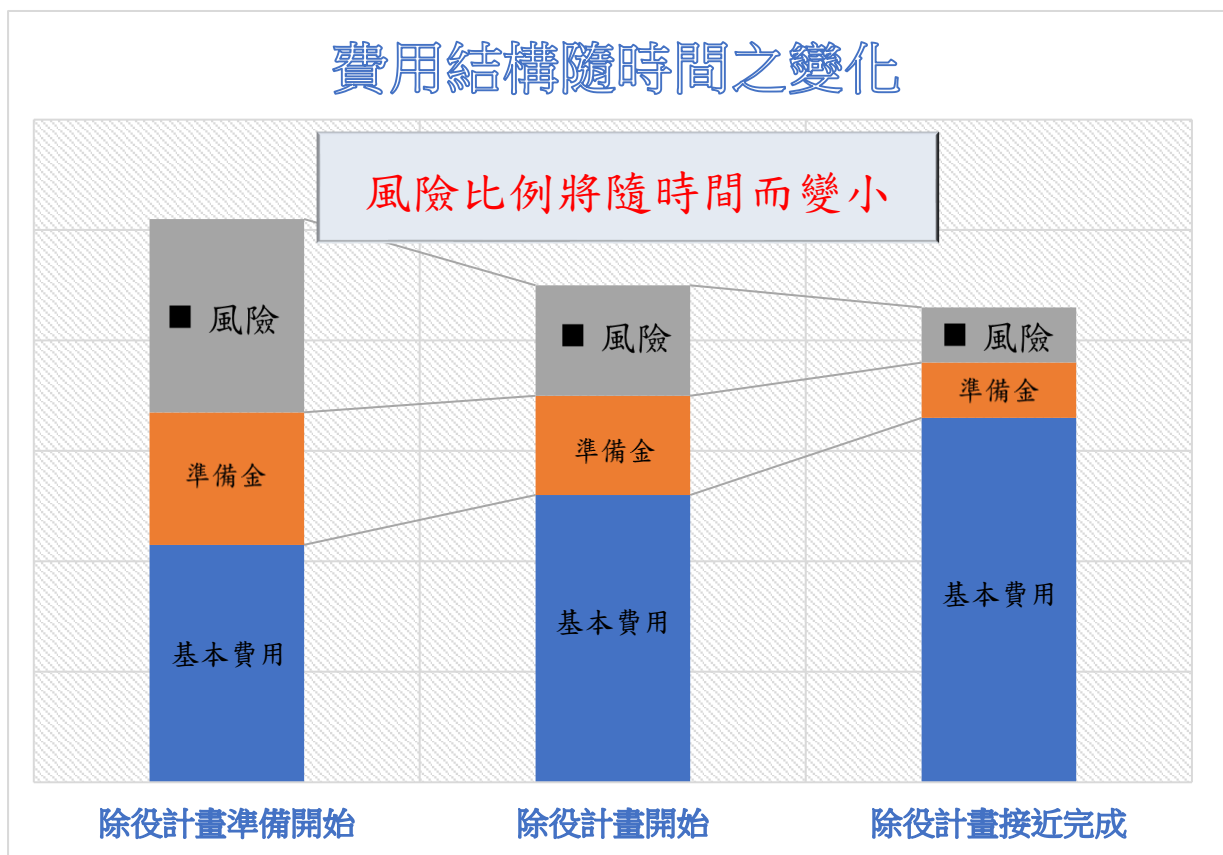


圖 2.7 費用結構隨時間之變化⁵

2.3.3.2 費用明細結構

費用明細結構（Cost Breakdown Structure, CBS）是一個工程的費用要素分析與費用類別，費用要素包含：

1. 除污和拆除；
2. 廢棄物管理；
3. 現場回復；
4. 行政、管理等週期性作業。

過去，因國內尚未有執行核電廠除役計畫之經驗，故對於費用估算的部分，一般僅能從國外的費用分析先來做定性分析，再加以定量。但我國的環境狀況(如：颱風)與政治等因素，需在原來的的基本預算上面再增加準備金與風險，目前此部分沒有前例可以作為參考。核一廠除役計畫為台灣第一個核電廠的除役工作，未來核二廠與核三廠將有許多評估，需藉由核一廠之經驗做參考，所以核一廠除役計畫之資料庫的建立與回饋，有其重要處。

第三章 國際除役經驗

當核電廠於決定永久停機後，到拆除啟動前，有一段時間，將會展開一連串廣泛的關鍵活動，此期間稱為過渡階段，或稱為運轉後停機階段。依據法規所完成的過渡階段計畫，在永久停機前應作出最適化的規劃。基於正常運轉到除役之過渡階段期間的法規要求與電廠經驗，世界各國核電廠已逐步發展出核電廠由運轉到除役之過渡階段導則。

有許多除役分類方式，已被多年應用於說明運轉組織（operating organization）的除役策略。如過去，這些相對於不同除役選項（如階段 1、階段 2 或階段 3）的分類系統。自從 1990 年代末期起，IAEA 的報告中已經不使用此一分類方式。進一步被聯合國會員所採用與考量的方法，包括：立即拆除（immediate dismantling, DECON）、遲延拆除（deferred dismantling, SAFSTOR）及現地固封（entombment, ENTOMB）等，也有可能是其他的選項或這些策略稍微修訂的版本，這些策略原則上可適用於所有設施。但由於政治的考量、安全或環境的要求、技術的考量、現場的條件或財務考量，適用性可加以調整之。

以下是目前主要運用的除役策略說明：

1. 立即拆除是將含有放射性污染物的設備、結構及部分的設施移除或除污至一允許設施無限制外釋使用的程度，或是在主管機關的限制下外釋的策略。此策略係迅速完成除役計畫，並且涉及自設施移除所有放射性物質至另一新的或現有執照的設施，並將其進行長期貯存或處置。
2. 遲延拆除，或稱之為安全貯存（safe storage）、安全貯藏（safe store）、或安全封存（safe enclosure），為將含有放射性污染物的部分設施進行處理或允許其處於一可被安全貯存與維護的狀態，一直到可以被

後續地除污及/或拆除至一允許設施無限制外釋使用的程度，或是在主管機關的限制下外釋的策略。

3. 現地固封則是將放射性污染物裝入一結構耐久的物質，一直到放射性衰減至設施可無限制外釋的程度，或是在主管機關的限制下外釋的策略。

簡言之，IAEA 將核電廠除役策略分成 DECON、SAFSTOR 及 ENTOMB：DECON 採用永久停止運轉後立即進行除污與除役；SAFSTOR 採用先讓放射性物質衰變至輻射安全水平再進行除役，可分為短期小於 15 年、中期 15~40 年及長期大於 40 年；ENTOMB 允許利用混凝土對放射性物質進行廠內包封，並持續監測與維護，直至允許限制釋出。

3.1 國際間除役概覽

在核電廠由正常運轉到除役之過渡階段中，有許多必要進行的活動；其中，有些需要在管制指定的規範下執行，有些則可能在缺乏導則的情況下執行，有些則以實際情形為導向或較具備選擇性。無論在何種狀況，妥適的規劃與符合管制規範要求的除役計畫，都需要在永久停機之前提出，以利管制機關進行審核。

世界各國在核電廠除役方面，其管制要求及過渡階段的經驗，這些國家主要包括美國、德國、法國、西班牙以及瑞士等五個國家。除指出除役過渡階段到除役最佳典範及經驗學習，另外，也將過渡階段到除役相關的導則，分類為不同除役策略的相關情節，以利計畫的說明。這些情節包括：

1. 計畫性停機過渡至 DECON；
2. 計畫性停機過渡至 SAFSTOR；
3. 非計畫性停機過渡至 DECON；
4. 非計畫性停機過渡至 SAFSTOR。

除役過渡階段導則主要應用於目前正在運轉，而近期不預定永久停機

的電廠，以協助意外永久停機的電廠將費用與衝擊減至最少。影響除役策略選擇的因素，包括：法令與法規要求、國家廢棄物管理策略、國家用過核子燃料管理策略、廠址的使用規劃、輻射因素、技術可利用性與其他資源、利害關係者考量、除役費用與基金及知識管理。現階段，各國狀況簡述如下：

1. 瑞典：由於缺少除役廢棄物處置場，Barseback 反應器遲延拆除。東歐由於缺乏基金其已永久停止運轉核電廠大多採 SAFSTOR。國際上，DECON 是公認的優先除役策略，此乃因其具有重要優點，包括設施歷史知識可及性、熟練工作人員可及性及社會與財務考量。若所選擇的策略是立即拆除，用過核子燃料自反應器廠房移走是重要里程碑。拆除可從渦輪機與其他相對未污染組件開始，所有拆除工作將在臨時帳棚或其他圍阻結構內進行，確保污染不會擴散。
2. 美國：不少已永久停止運轉核電廠採用 DECON 策略，主要原因是當時除役廢棄物最終處置場可利用性，以及未來最終處置場可利用性不確定與費用問題。另外，當時可利用的商業化處置場可處置大型組件，如：反應器壓力槽與蒸汽產生器完整移除。
3. 德國：經營者決定採用 DECON 策略，原因主要有技術支援系統可用於解體前工作；例如：放射性測繪、電廠不同區域輻射特性調查及電廠與設備項目量測，有經驗運轉人員知識能被利用並且重要相關紀錄遺失風險能被最小化。
4. 法國：第一代之八座核反應器於 1973-1994 年間相繼永久停止運轉，法國電力公司（EDF）考量輻射曝露及經費需求，原規劃於 50 年內除役（例如：Chooz A 及 Chinon 核電廠），包括 10 年除污作業、封存 20-30 年，再於 10 年內完全拆除。但 EDF 於 2001 年變更策略為：所有第一代

核電廠及 1997 年停止運轉的快滋生反應器都將於 25 年內拆除完畢。

5. 日本：除役策略採用 DECON 策略。日本將核電廠永久停止運轉後的除役程序分為主系統除污、5~10 年安全貯存及解體等三個階段，較短安全貯存期間有利於廠址未來再使用，包括用於新核電廠建造，此乃因日本可用來建造核電廠的廠址有限。

3.2 美國核電廠除役活動過渡階段經驗與學習²

本節概述 8 個美國電廠（10 部機組）從正常運轉情況轉變成除役情況的經驗，如表 3.1 所示，所討論的過渡經驗，包括：非計畫性和計畫性的兩種永久停機情況、轉換到 DECON 和 SAFSTOR 的兩種除役策略，並包含已完成除役和除役進行中兩種狀態²。

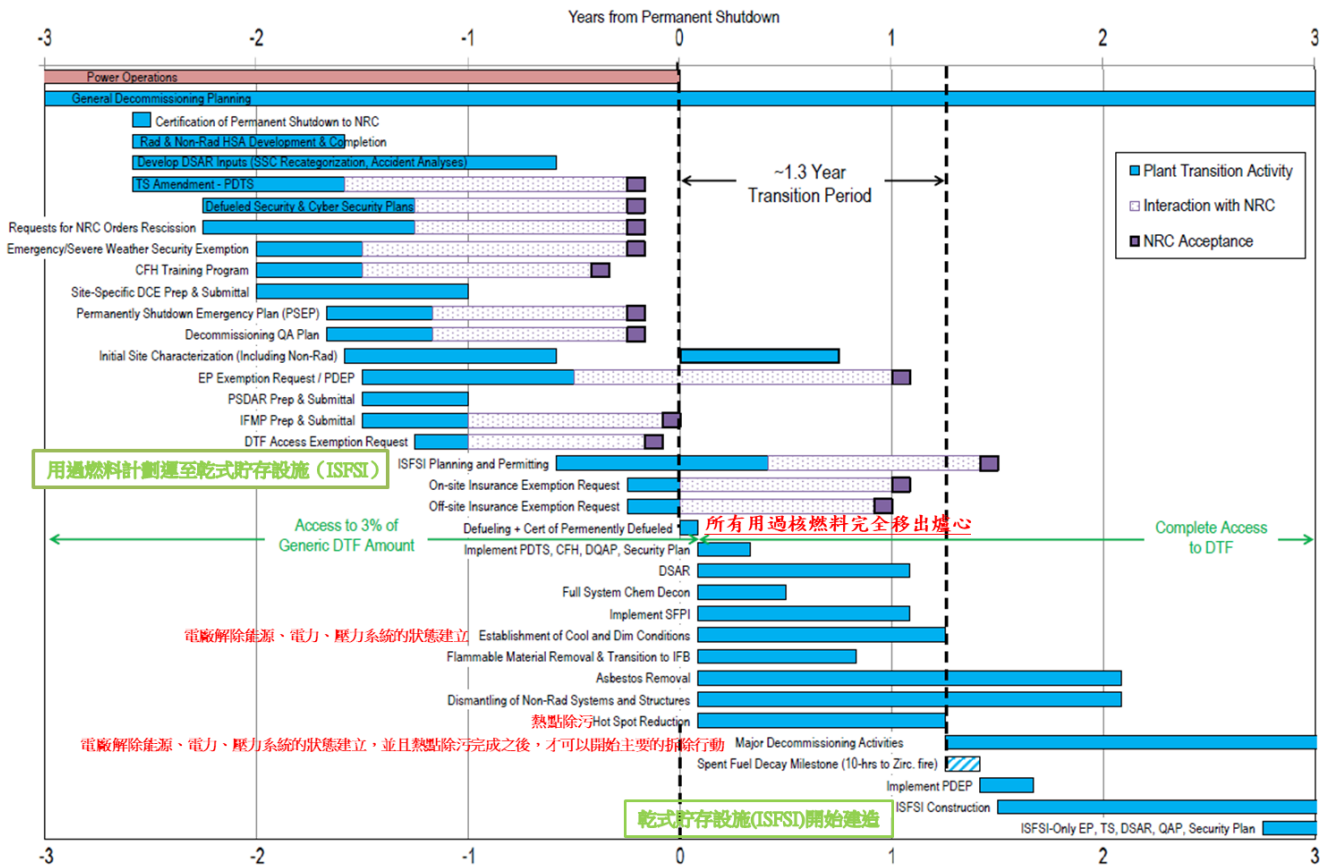
美國早期除役核電廠，電力公司為增加除役基金經費及等待亞卡山處置場，有十幾部核子反應爐採取 SAFSTOR 方式，但後因用過核子燃料乾式貯存技術已經成熟並且使用上漸為普遍，2016 年底有十幾部採取 DECON 方式進行。圖 3.1 及圖 3.2 舉出美國計畫性及非計畫性除役例行工作完成項目的時程表，可作比照參考，以計畫性除役例行工作完成項目的時程表看來，除役例行工作開始前三年即作預備，較為充分完備。再以美國計畫性及非計畫性除役例行工作完成項目的時程表相對比的結果可知：所有用過核燃料都需要及早完全移出爐心壓力容器，並且電廠在完成解除能源、電力、壓力系統的狀態後，才可以開始主要的拆除行動。美國計畫性除役亦可使乾式貯存設施（ISFSI）更早開始運轉，用過核燃料可更早轉運送至乾式貯存設施。

表 3.1 過渡階段經驗範例的美國電廠狀態整理²

電廠名	機型	額定 功率 (MWe)	商轉 日期	停止運 轉日期	總運 轉年	起始除役 策略	除役 準備 期(月)	過渡 期間 (年)	目前狀態
Connecticut Yankee	PWR	619	Jan-68	Dec-96	29.0	DECON	0	2.8	ISFSI Only
Maine Yankee	PWR	860	Dec- 72	Aug-97	24.6	DECON	>8	1.8	ISFSI Only
Zion 1	PWR	1040	Dec- 73	Feb-98	24.1	SAFSTOR	1	2.4	DECON
Zion 2	PWR	1040	Sep- 74	Feb-98	23.4	SAFSTOR	1	2.4	DECON
Oyster Creek	BWR	620	Dec- 69	Jan-00	30.1	DECON	33	N/A	Normal Op.
Crystal River 3	PWR	860	Mar- 77	Feb-13	36.0	SAFSTOR	0	2.4	SAFSTOR
Kewaunee	PWR	566	Jun- 74	May-13	38.9	SAFSTOR	7	1.6	SAFSTOR
San Onofre 2	PWR	1070	Aug- 83	Jun-13	29.9	DECON	0	4.1	DECON
San Onofre 3	PWR	1080	Apr- 84	Jun-13	29.2	DECON	0	4.1	DECON
Vermont Yankee	BWR	620	Nov- 72	Dec-14	42.2	SAFSTOR	16	1.3	SAFSTOR

ISFSI：乾式貯存設施

Example U.S Transition Plan (Planned Shutdown to DECON)

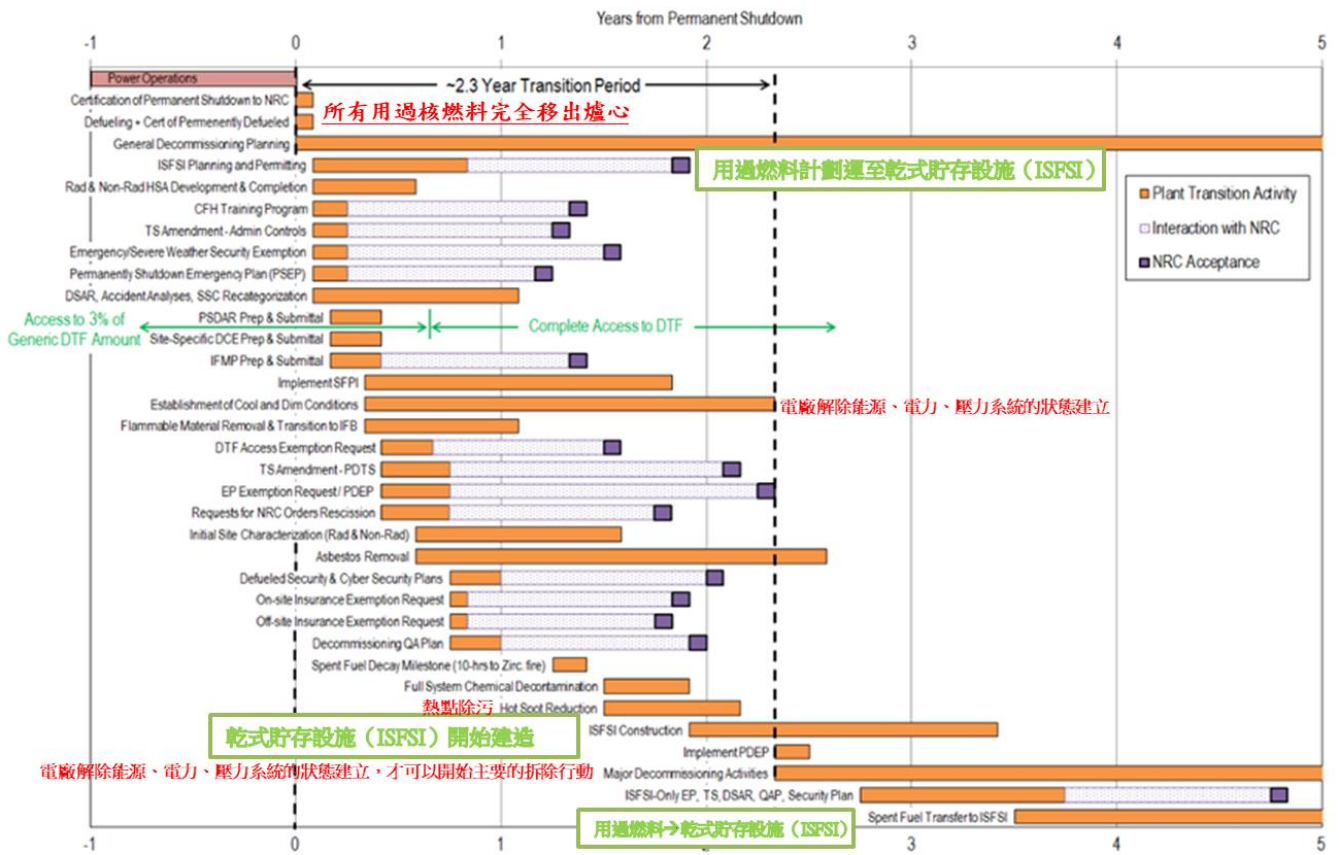


(A)

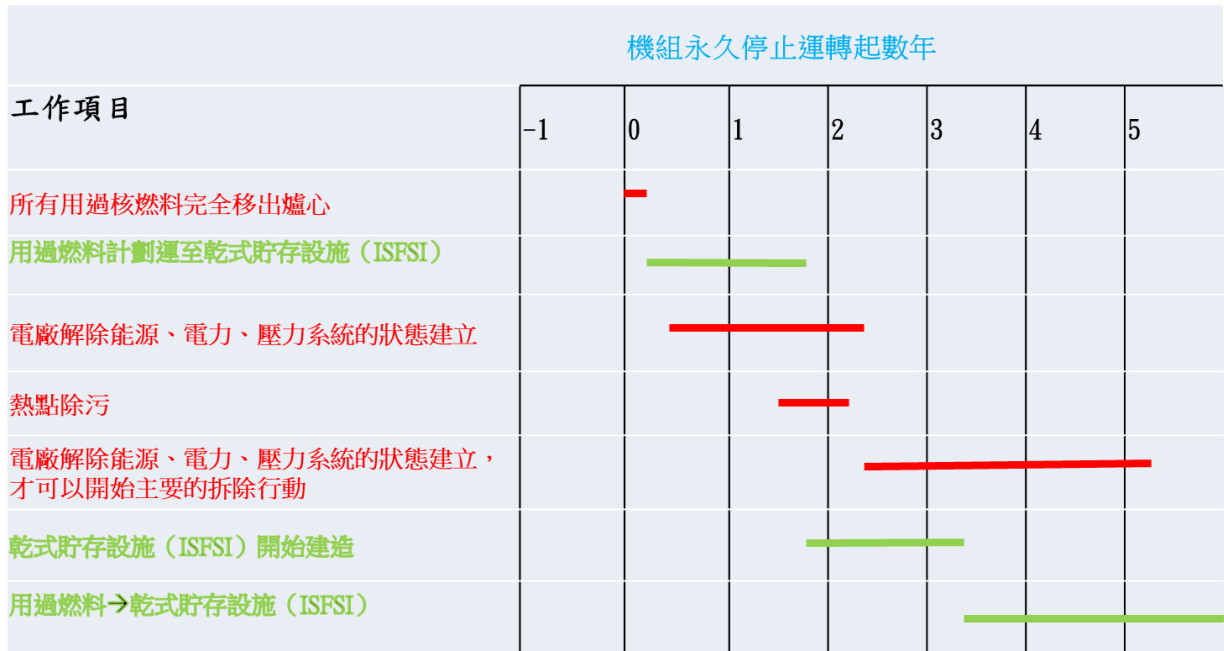


(B)

圖 3.1 (A)美國計畫性立即除役例行工作完成項目的時程甘特圖²，(B)為 (A)之重點工作



(A)



(B)

圖 3.2 (A)美國非計畫性立即除役例行工作完成項目的時程甘特圖²，(B)

為(A)之重點工作

3.2.1 聖奧諾弗爾 2 號及 3 號機組電廠經驗

聖奧諾弗爾電廠（San Onofre, SONGS）2 號機組和 3 號機組是燃燒工程公司所擁有的 2 迴路壓水式反應器，分別在 1983 年 8 月和 1984 年 4 月開始商業運轉，兩部機組的額定功率分別為 1070MWe 和 1080MWe。電廠決定在 2013 年 6 月永久停機，但在由於 3 號機組蒸汽產生器（SG）過早失效在 2011 年被替換，電廠已自 2012 年 1 月停止運轉，因此，基本上電廠決定永久停機和電廠實際永久停機沒有時間上的差別。此外，在永久停機的開始時間，所有用過核燃料已經儲存在用過核燃料儲存池（SFP）中近 1.3 年（意即：最熱的用過核燃料已經衰變了將近 1.3 年）。

SONGS 電廠的 2 號機組和 3 號機組為在近 18 年內，唯一於永久停機後即選擇進入 DECON（至少不是一段時間進入 SAFSTOR）的美國電廠。截至 2016 年初，SONGS 電廠正處於除役過渡期。2015 年 11 月後的一般重大除役過渡活動的安排，以及未來計畫的主要活動時程示意如圖 3.3 所示，其中可知，主要的除污和拆除活動計畫於 2017 年中期開始，因此聖奧諾弗爾電廠除役過渡期的時間預計是約 4 年。除役過渡期計畫的主要活動包括：(1)管制文件的送審；(2)修改電廠流程和程序，以反映永久停機狀態；(3)廠址歷史調查與輻射特性調查；(4)關閉電廠設備；(5)清除作業廢棄物；(6)重新啟動除役所需的電廠系統；(7)修改安裝獨立於其他電廠系統的 SFP 支持系統；(8)努力支持乾式燃料貯存和擴展 ISFSI；(9)除役營運承包廠（DOC）的選擇等。

3.2.1.1 技術規範（TS）的修訂

2013 年 10 月，SONGS 電廠對行政管理部門進行了小幅修改 TS。這些變動是為了反映除役新的人員配置和培訓要求，其中包括消除對現場有執

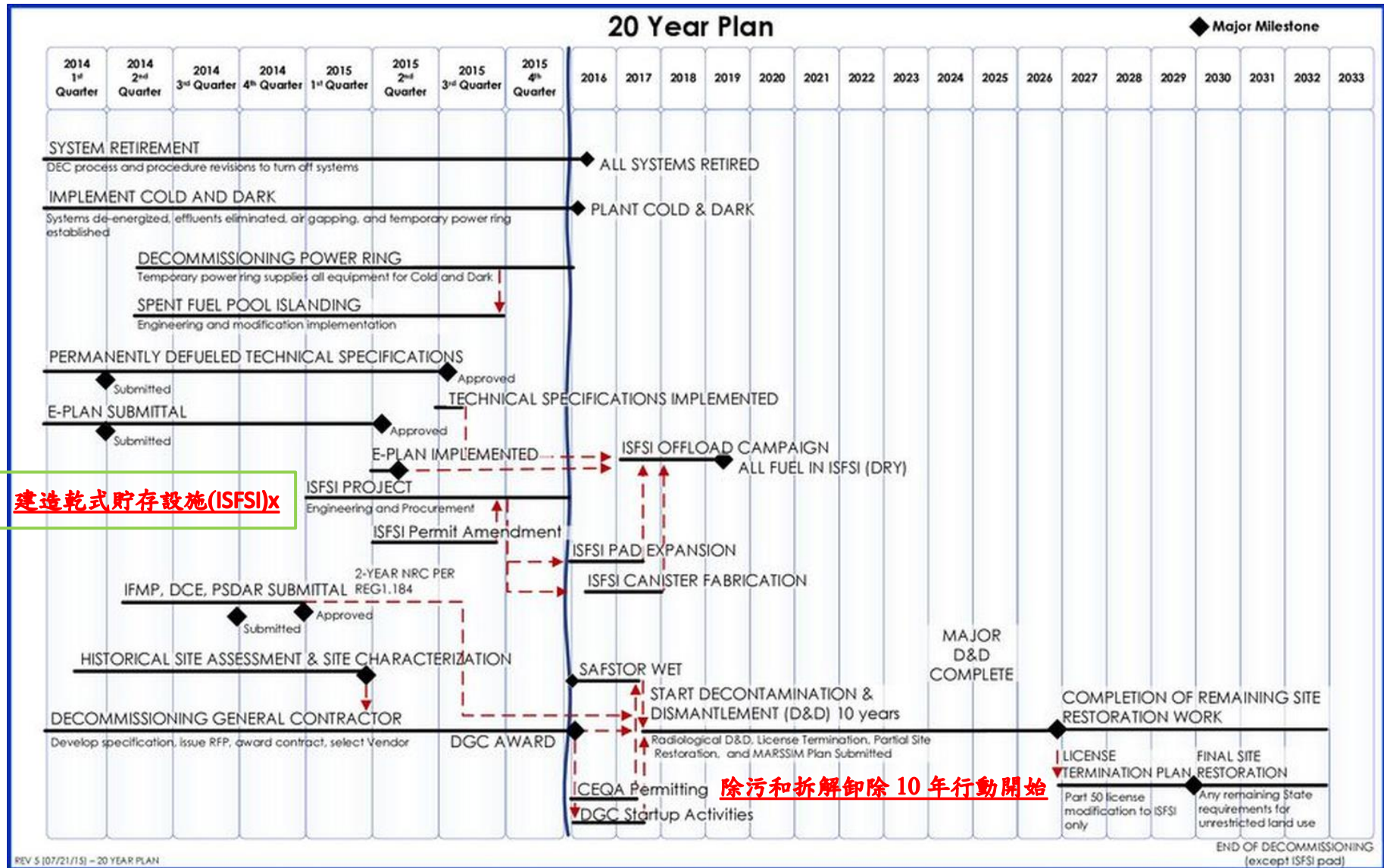


圖 3.3 美國 SONGS 除役例行工作完成的時間示意圖²

照的運轉員之持續要求。此外，這些變動將 CFH（認證的燃料處理程序）的使用納入 TS，並於 2014 年 9 月獲得 NRC 核准。

2014 年 3 月，SONGS 電廠將 PDTS（除役後技術規範）提交給 NRC 審核。PDTS 是延續性的 TS 修訂版以反映電廠的永久停機狀態，由於大多數 TS 都不符合在永久停機後的狀況，因此大多數 TS 可以完全從 PDTS 中刪除，NRC 於 2015 年 7 月核准了 PDTS。

3.2.1.2 最終安全分析報告（FSAR）的改版修訂

2014 年 9 月，SONGS 電廠修訂了 FSAR 第 15 章內容（事故分析），其中提出電廠永久性停機的架構下，只適用於 7 起事故/暫態，以前適用的其他事故/暫態則標示為“歷史”。僅提交 FSAR 改版修訂部分，將比提交整套 FSAR 更增加 NRC 在其他管制文件的審查速度。修改後的文件為“15.0.1.1 電力運作永久停止後適用的安全分析”。

SONGS 電廠已經永久停止運轉，並全部移除來自兩部機組反應器內的核燃料。有輻射性的燃料將被貯存在 SFP 及 ISFSI 中，直到將其運出廠址外，SFP 及其系統將專用於用過燃料的貯存。在此狀態下，事故/暫態的發生數目，將顯著小於運轉中的電廠反應器或燃料保留在反應器壓力容器中的狀態。

其報告中顯示，已不再適用於永久性燃料移除狀況的事故/暫態，當於 UFSAR（燃料移除狀況的最終安全分析報告）第 15 章中標記為歷史。其他 UFSAR 的部分可能仍然參考歷史第 15 章的分析，任何這樣的參考文獻也應被視為歷史。有輻射性的燃料貯存在 SFP 和 ISFSI 的情況下，反應器、反應器冷卻水系統（RCS）和二次系統就不再與有輻射性的燃料貯存有關。反應器核心隨著永久停止電力運作並永久移除燃料，事故/暫態初始條件/初始反應器功率水平無法產生分裂反應的現象，使得大多數事故/暫態情況都因此不可能發生。UFSAR 假設的第 15 章事故/暫態，若涉及反應器故障或

RCS 故障或二次系統故障的情形便不再適用。

UFSAR 第 15 章適用的事故/暫態包括：

- 放射性廢氣系統洩漏或故障。
- 放射性廢棄物系統洩漏或失效（釋放到大氣）。
- 由於液罐故障破損引起的假定放射性物質釋放。
- 燃料廠房內部設計基準 FHA（燃料處理事故）。
- 用過燃料護箱掉落事故。
- 用過燃料池沸騰事故。
- 使用 2000 磅以下的雜項設備。

2015 年 2 月，SONGS 電廠將 UFSAR 的所有其他章節也提交了修改版本，以反映永久停機電廠的狀態。這些修訂的目的是為了消除對與 SFP 設計有關的某些 RG 的承諾（RG 1.13, 1.29 和 1.76），這些承諾將被消除，因為 SONGS 計畫修改 SFP 與其他電廠系統隔離，SFPI（用過燃料池島嶼化）的要求則與電廠正常運轉時的某些 RG 規定要求不同（例如：因所需的反應時間增加、因 SFP 熱負載的降低...等）。

3.2.1.3 電廠解除能源、電力、壓力系統的狀態建立

建立“冷和黑”或“酷與暗”的狀況是指斷電、減壓和解除電廠除役過程不再需要的所有系統，電廠永久電力電路斷電替換為臨時電源。真正的“冷和黑”的狀態條件通常指完全失電的電廠。然而，在過去 20 年中，美國大部分電廠停止運轉，卻尚未由於所有電廠的系統完全失電，而達到真正的寒冷以及黑暗的情形（通常涉及建築物內的冷凝狀況，可能會導致不安全的工作條件）。但大多數電廠已建立了“酷和暗”的情形或“有限的冷和黑”情形。建立酷和暗的情形涉及與建立冷和黑相同的活動，而且還包括重啟和修改除役所需的某些系統（例如：HVAC 系統和確保良好工作條件所需的其他系統），而後電廠除役所需的系統由臨時安裝的電源進行重新啟動。

在 SONGS 電廠，這個臨時電源為一個“電源環”的電氣分佈系統，配上顏色明亮的橙色，以區分新的電力系統還是其他電廠設備。這個臨時電源將用在除役期間為需要的電廠系統供電，以及將被帶到電廠的設備供電以支援除役活動，建立冷和黑情形的主要的目的是降低電廠供電系統和工人傷害的風險。

如圖 3.3 所示，截至 2016 年初，SONGS 電廠正在建立“冷和黑”的情形。將支持電廠建立冷和黑的情形，所需的系統改修改總結如下：

- 用過燃料池島嶼化。
- 消防系統修改 - 現有的火災探測系統將從服務的區域刪除，新系統將安裝在必要的地區。此外，現有的火災儲水和配水設備將從服務的區域移出，而泵車將用於提供消防水。便攜式消防水助推泵將用於保護電廠某些結構，安裝獨立滅火系統以保護某些電廠區域。
- HVAC 修改 - 輔助廠房、放射性廢棄物廠房和燃料處理廠房的 HVAC 系統將被修改，以確保這些廠房在除役期間保持適合居住，並且確保在除役期間控制放射性廢棄物污染情形。
- 污水通道修改 - 用於稀釋從 SONGS 排放的液體廢棄物之鹽水冷卻泵將更換為尺寸較小的泵，以減少在除役期間產生的液體廢棄物量。
- 電信系統修改 - 現有的電廠電話、尋呼和無線電系統和這些系統的電源將被新系統所取代。在可能的範圍內，系統將被無線技術所取代，只有必要的電信系統將以硬體接線方式（如保安）。
- 開關廠修改。

3.2.1.4 除役品質保證計畫

2014 年 11 月，SONGS 電廠向 NRC 提交了品質保證計畫修訂。擬議修訂的範圍包括減少監管承諾。因此，NRC 需要審查和核准該文件。新的品質保證計畫，稱為除役品質保證計畫，於 2005 年 8 月獲得 NRC 核准，

品質保證計畫的變更總結如下：

- 移除共識工業標準（例如 ANSI N18.7）和適用於運轉電廠的 RG 承諾，作出一些新的承諾適用於除役和 ISFSI 運作的工業標準和指南。
 - 文件被修改為更簡單、更靈活，以便文件將在整個除役期間適用，儘管除役過程中有活動範圍和人員責任的重大變化。
 - 人員組織職能資訊簡化/流暢，運用文件可以調整人員除役期間的職責適切變化。
 - 實施方法的資訊已從品質保證計畫中刪除，相關任務實施的必要資訊將包含在具體任務的程序文件中，這種改變提高了品質保證計畫的靈活性，適應除役過程中活動範圍的變化。
 - 更新了品質保證計畫，以反映 SONGS 中結構、系統及組件(SSCs, structures, systems, and components)的重新分類。
- 3.2.1.5 用過燃料管理

截至 2015 年 7 月，SONGS 電廠在 2 號機組和 3 號機組的 SFPs 中有 2668 個燃料元件，計畫將這些燃料轉移到乾式貯存中。但是，在燃料轉移之前需要進行一些活動。在永久停機之前，SONGS 已經有了 ISFSI，但此 ISFSI 不夠大，不足以容納 2 號和 3 號機組 SFP 中的所有燃料，因此，ISFSI 必須擴大。2014 年 12 月簽署擴大 ISFSI 的合約，如圖 3.3 所示，截至 2016 年初，承諾採購和 ISFSI 擴展的工程正在進行。其餘活動的時間表如下：

- ISFSI 擴建計畫於 2017 年中期完成
- ISFSI 護箱生產計畫於 2016 年中期開始，到 2018 年初結束
- ISFSI 卸貨轉運計畫於 2017 年初開始，並於 2019 年中期結束。

用過燃料轉運到 ISFSI 後，乾式貯存將持續到美國能源部 (DOE) 有一個可用於接受用過燃料的儲存庫，SONGS 的 SFP 支援系統，有些部分位於用過燃料廠房之外，取決於其他電廠設備的功能。為了方便在濕式貯存用

過燃料期間（將持續到 2019 年中）安全拆除系統，SFP 支援系統被修改為與其他電廠系統隔離，並安裝新的獨立系統以支援隔離的 SFP（稱為用過燃料池島嶼化“SFPI”）。SONGS 的 2 號機組和 3 號機組 SFPI 計畫示意圖如圖 3.4 所示。根據圖 3.3 所示的時間，這些修改在 2015 年第 3 季完成。

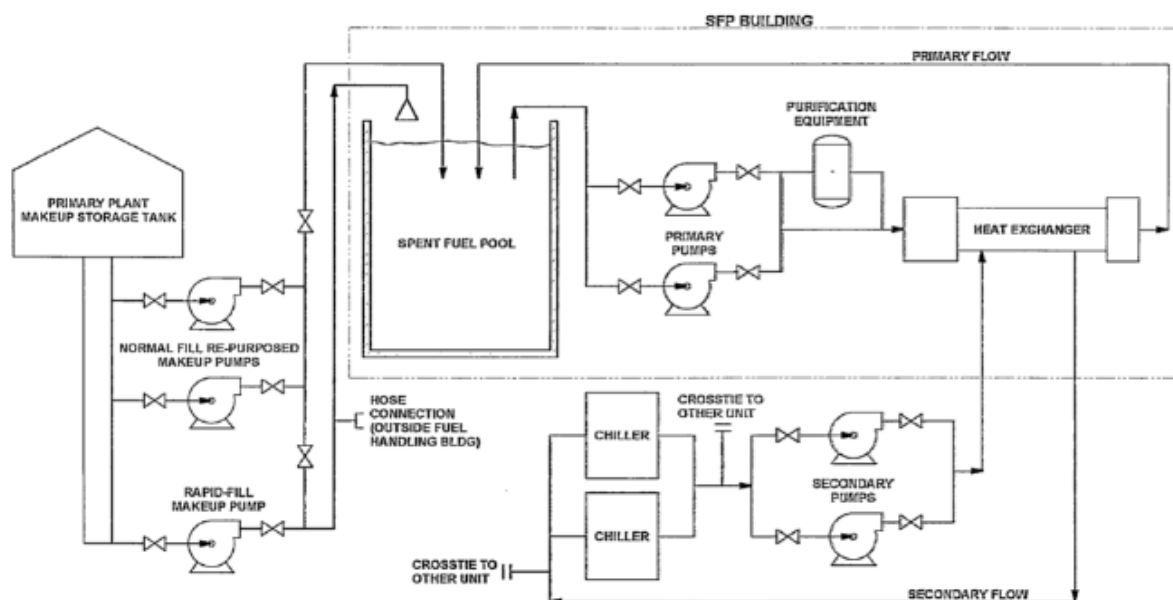


圖 3.4 SONGS 中 2 號機組和 3 號機組 SFPI 計畫的示意圖⁹

3.2.1.6 除役營運承包廠（DOC）的選擇

SONGS 電廠使用 DOC 管理除役，SONGS 表示有下列潛在優勢：

- 加強監督：透過使用 DOC，SONGS 只需與其一個承包商進行互動，可能會加強所有除役活動的監督。
- 費用控制：DOC 可分享一些計畫，使可能費用超支的經濟風險降低，預期可進一步減少費用。
- 更高的專長：除役表示將有與核電廠正常運轉不同的獨特挑戰，DOC 可具有更多處理這些挑戰的經驗，可有益於增強 DOC 組織和能力可提供的經濟規模。
- 經驗學習的優勢：DOC 可根據先前除役工作的經驗學習，幫助優化 SONGS 除役工作。

3.2.1.7 工作人員的更換

2012年8月（在SG過早失效後，在公佈永久停機之前）SONGS電廠宣布，計畫將員工人數從約2,230名減少至約1,500名。然後，在2013年8月（宣布永久停機後約兩個月），SONGS進一步將電廠人員從約1500人減少到約600人，開始向除役所需的人員數目過渡。至2014年2月底，電廠員工人數減少到約520人。在2016年初，SONGS的員工為325名員工。

SONGS的2號機組和3號機組除役預期人員需求記錄在廠址特定的DCE中，並列於表3.2至表3.4中。這些表包括從“第二階段”而不是“第一階段”開始的員工估算，因為“第一階段”在廠址特定DCE準備時已經完成。“第一階段”執照終止被稱為“過渡到除役”階段。但是，定義的過渡期間包括第一階段和第二階段終止執照的活動。如這些表所示，電廠除役過渡期間預計需要500名員工，與上述所討論的員工人數減少狀況一致。表3.2和表3.3中顯示於階段3：除役預備、階段4：系統及大型組件移除和階段5：廠房除污的時段，輻射防護保健物理部門預估所需求的人數為最多。

表 3.2 聖奧諾弗爾電廠除役執照終止活動預估的需求人數

	階段 2： 除役計畫	階段 3： 除役預備	階段 4： 系統及大型 組件移除	階段 5： 廠房除污	階段 6： 執照中止
除役部門	21	21	25	18	0
工程部門	49	14	14	12	0
維護部門	38	10	10	3	0
運轉部門	15	7	7	0	0
輻射防護保健物理部門	27	26 人數最多	31 人數最多	26 人數最多	0

表 3.3 聖奧諾弗爾電廠除役執照終止活動需求的承包廠預估人數

	階段 2： 除役計畫	階段 3： 除役預備	階段 4： 系統及大型 組件移除	階段 5： 廠房除污	階段 6： 執照中止
行政部門	0	9	17	17	0
工程部門	0	15	29	14	0
保健物理部門	0	16 人數最 多	73 人數最 多	73 人數最 多	2
管理部門	0	3	3	3	0
品保部門	0	2	5	4	0

表 3.4 聖奧諾弗爾電廠除役用過燃料管理需求的預估人數

Department	Phase 2: SF T transfer to Dry Storage	Phase 3: Dry Storage During Decom. (Units 1-3)	Phase 4: Dry Storage Only (Units 1-3)	Phase 5: Dry Storage Only (Unit 2 & 3)	Phase 6: ISFSI License Termination	Phase 7: ISFSI Demolition
Spent Fuel Shipping	0	0	2	2	0	0
Decommissioning	0	0	0	0	1	1
Engineering	1	1	1	1	0	1
Maintenance and Work Control	31	0	0	0	0	0
Operations	45	1	1	1	0	0
Oversight and Nuclear Safety	1	0.25	0.25	0.25	0	0
Radiation Protection and Chemistry	6	4	4	4	1	2
Regulatory and Emergency Planning	0	0	0	0	1	1
Security Admin	14	10	8	8	1	1
Security Guard Force	178	35	35	35	5	5
Site Management and Administration	0	0	0	0	1	1
Period Total	276	51.25	54.25	54.25	10	12

3.2.2 Oyster Creek 電廠經驗

Oyster Creek 電廠為具有單一 BWR 機組的電廠，額定功率為 620 MWe，

該電廠於 1969 年 12 月商業運轉。1997 年 4 月，公用事業公司 (General Public Utilities, GPU) 得到結論，該電廠預計在 20 世紀的 90 年代末，將不符合經濟的費用。因此，GPU 宣布該電廠採取以下之一選項：

- 2000 年電廠永久停機，接著是 DECON，
- 出售電廠，或
- 繼續運轉電廠，直到運轉執照於 2009 年到期。

為支持可能的永久停機電廠，電廠開始規劃除役工作計畫，在 2000 年由 AmerGen 取得經營權。在 2009 年，經營權轉至 Exelon，此後 Exelon 已向 NRC 通知 Oyster Creek 將在 2019 年 12 月 31 日之前永久停機，討論了 Oyster Creek 的除役現行計畫。雖然 Oyster Creek 目前仍在運轉，尚未宣布永久停機，但 Oyster Creek 是美國在預計永久停機日期之前多年，就開始大規模除役計畫的電廠之一。

3.2.2.1 除役假設

Oyster Creek 進行有組織的除役規劃，為過程所作的基本假設如下：

- 最終永久停機將在 2000 年秋季發生。
- 選擇“DECON”選項。
- 需要足夠的 SFP 容量。
- 以便永久停機時能將整個核心卸載，在永久停機之前需要安裝額外的燃料元件存放架。
- Oyster Creek 將進行除污，以允許場地按照 10 CFR 20.1402 可以不受限制地釋放使用。
- 假設美國能源部最早在 2010 年之前，不會監管用過的燃料。
- 假設電廠將除役時，將有一個低放射性廢棄物處置場地可使用。
- 假設內部 GPU 核工作人員將最大限度的運用，沒有作出明確的決定，GPU 核工作人員是否會作為 DOC，或將此功能外包給承包商。

- 關閉時的除役信託基金餘額足以允許啟動“除役”。

3.2.2.2 除役計畫

在除役規劃過程中，首要活動之一是制定合邏輯分階段進行的除役計畫和時間表，表 3.5 整合各階段完成的時間簡表。第一和第二階段涵蓋所有除役過渡活動的工作、計畫和執行。

表 3.5 Oyster Creek 電廠除役各階段時間表

	時間表
階段 1： 除役計畫	1997-2000
階段 2： 除役預備	2000-2001
階段 3： 除污及大型組件移除	2002-2009
階段 4： 執照中止	2007-2010
階段 5： 乾式用過燃料貯存設施	2007-2023

制定上述計畫的主要考量因素之一是圍阻體，Oyster Creek 圍阻體為 BWR 通用的「MARK I」型，SFP 位於反應器廠房內，更換燃料樓層與反應器相鄰，故在所有用過燃料其存儲於 ISFSI 中，或清除到美國能源部永久性貯存庫前，不能拆除反應器廠房。上述是假設在 2003 年開始燃料轉移到乾式貯存，於 2007 年完成，之後，才可以開始拆除反應器廠房。

3.2.2.3 用過燃料管理

在除役計畫工作規劃過程時，SFP 的容納量並不如預計的足夠大以支持全部核心燃料卸載。該廠的 SFP 預定容量為 2645 套元件，但預計在永久

停機之日將有 2980 套元件。因此，電廠向 NRC 提交了執照修改申請，將 SFP 容量提高了 390 套元件（通過安裝附加的存儲機架），該許可修正於 2000 年 9 月獲得 NRC 的核准。Oyster Creek 評估了幾種用過燃料貯存選項，包括現場臨時濕式貯存、現場臨時乾式貯存和非現場臨時乾式貯存。由於該電廠銷售給 AmerGen，在用過燃料管理計畫完成之前停止了除役計畫。2002 年，該廠隨後在現場建成乾式 ISFSI 以支持除役計畫的營運。

3.2.3 緬因州洋基電廠經驗

緬因州洋基 (Maine Yankee) 核電廠是緬因州 CE 的三迴路 PWR，1972 年 12 月 28 日開始運轉。該電廠的額定功率為 860 百萬瓦，達到終身容量因子~70%。1997 年 8 月，由於經濟原因，該廠非計畫性的永久停機。

緬因州洋基除役期間的關鍵事件如表 3.6 和圖 3.5 所示：電廠系統直到 1999 年 6 月才主動開始拆除，是在永久停機後約 1.8 年，以下將介紹在主要電廠系統進行拆除之前的主要除役活動。

3.2.3.1 RCS 全系統化學除污

在緬因州洋基除役過渡期間進行的主要活動之一，將對 RCS 和其他幾個系統進行全面的系統化學除污。除污應用在 EPRI Report TR-112092，有關除污應用的主要知識如下：

- 除污在兩個獨立的程序中進行，包括：淨化部分的 RCS、化學和體積控制系統 (CVCS)、餘熱移除系統 (RHRS) 和排水系統。內置的反應爐壓力容器 (RPV) 和大多數 SG 管的表面沒有包括在除污範圍。
- 申請的期間，包括設置活動，約為 67 天；化學應用本身的持續時間約為 19.5 天。

表 3.6 Maine Yankee 電廠過渡階段到除役的時程與主要活動表

階段	日期	主要活動
運轉階段	Aug-97	中止運轉
除役準備過渡階段	Aug-97	PSDAR
	Oct-97	輻射特性調查
	Mar-98	RCS 全系統化學除污
	May-98	用過燃料池島嶼化
	Sep-98	安裝修改獨立於其他電廠系統的 SFPI 支持系統
	Oct-98	建造了一個新而小的控制室，這個較小的控制室允許運轉員專注於較少的運轉系統數量
	Dec-98	電廠解除能源、電力、壓力系統的狀態建立
	Mar-99	熱點除污
除役階段	Aug-02	用過燃料→乾式貯存設施（ISFSI）
	Feb-04	用過燃料→乾式貯存設施（ISFSI）完成

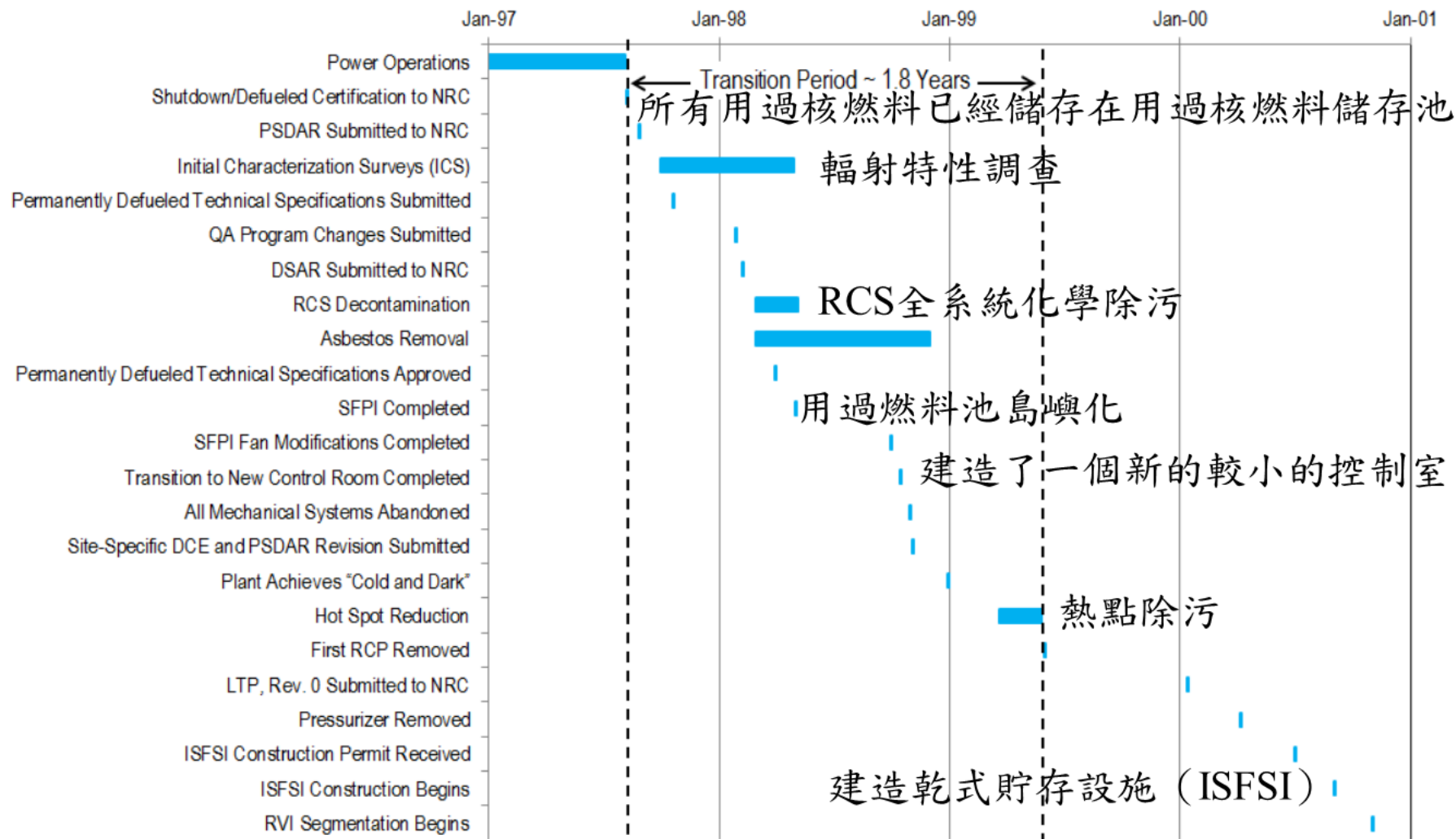


圖 3.5 Maine Yankee 過渡階段到除役的時程規劃

- 達到的平均除污因子（DF）為~31.5，估計人員劑量歸因於除污應用的除役過程中，節省~150 人-rem（1.5 人-西弗）。
- 在除污時，設備的可操作性無法保證。因此，在除污應用中沒有使用現有的設備。相反地，所有設備都由供應商提供，這可能會增加費用引發了這個過程中的問題。具體來說，承包商供應的泵可以達到的流量太低，這導致較低的除污效果。直至實現淨化目標，必須進行額外的除污循環，這增加了過程的持續時間、要求的化學試劑和產生的廢棄物。

3.2.3.2 電廠解除能源、電力、壓力系統的狀態建立

緬因州洋基的過渡期中，為支持電力解除條件而展開的活動包括：

- 用過燃料廠房升級為 SFPI。
- 成立了一個系統評估和重新分類小組，以評估哪些 SSCs 在除役期間需要。每個 SSC 被歸類為“可用”或“準備好”或“被放棄”，這種重新分類工作確定了哪些系統必須重新復電。
- 建造了一個新的較小的控制室，這個較小的控制室允許運轉員專注於較少的運轉系統數量，並有助於斷電及拆除電廠運轉期間使用的控制室。過渡到新控制室涉及：
 - 將除役期間所需的所有電廠警報重新安置到新的控制室
 - 將所有火災探測、抑制控制和指標重新定位到新的控制室
 - 將現場氣象塔的數據重新輸送到新的控制室

3.2.4 康乃迪克州的洋基電廠經驗（Haddam Neck）

康乃迪克州的洋基電廠 Connecticut Yankee（又名 Haddam Neck）是西屋在 Haddam 的四迴路 PWR，Connecticut Yankee 電廠於 1968 年開始商業營運，1996 年 12 月，該廠經過 29 年的運轉後被永久停機。該廠為 619 百萬瓦達到終身容量因子~70%，原不計畫永久停機，然而在 1996 年的夏天，

該廠大修正常填換燃料，在此期間，電廠管理者由於經濟考慮，因此決定了該電廠永久停機，所以在電廠永久停機之前即已進行局部除役計畫。

在永久停機之前進行的工作總結如下：

- 在電廠運轉期間採用 DECON 選項的 DCE 已經準備好並定期更新；然而，費用估算只是基於標準電廠設計的一個預算，並沒有反映康乃迪克州的洋基電廠系統。
- 根據 10CFR 50.75 (g) 的要求，可能會影響電廠內和周圍污染（例如洩漏物等）傳播的電廠事件總結整理表已由電廠維護中。但是，由電廠維護的文件不包含完成廠址歷史調查所有必需的資訊；因此，仍需要大量的工作，來準備除役初期的歷史現場評估。

康乃迪克洋基除役期間的關鍵事件時間表列於表 3.7 和圖 3.6，如表和圖所示，在康乃迪克州洋基進行電廠系統專業拆除活動前的除役活動，1996 年永久停機後約 3 年，從 1999 年秋天，康乃迪克洋基開始主動拆除電廠系統。

表 3.7 康乃迪克洋基除役期間的關鍵事件時間表

階段	日期	主要活動
運轉階段	Aug-97	中止運轉
除役準備過渡階段	Aug-97	PSDAR
	Oct-97	輻射特性調查
	Mar-98	RCS 全系統化學除污
	May-98	用過燃料池島嶼化
	Sep-98	安裝修改獨立於其他電廠系統的 SFPI 支持系統
	Oct-98	建造了一個新而小的控制室，這個較小的控制室允許運轉員專注於較少的運轉系統數量
	Dec-98	電廠解除能源、電力、壓力系統的狀態建立
	Mar-99	熱點除污
除役階段	Aug-02	用過燃料→乾式貯存設施 (ISFSI)
	Feb-04	用過燃料→乾式貯存設施 (ISFSI) 完成

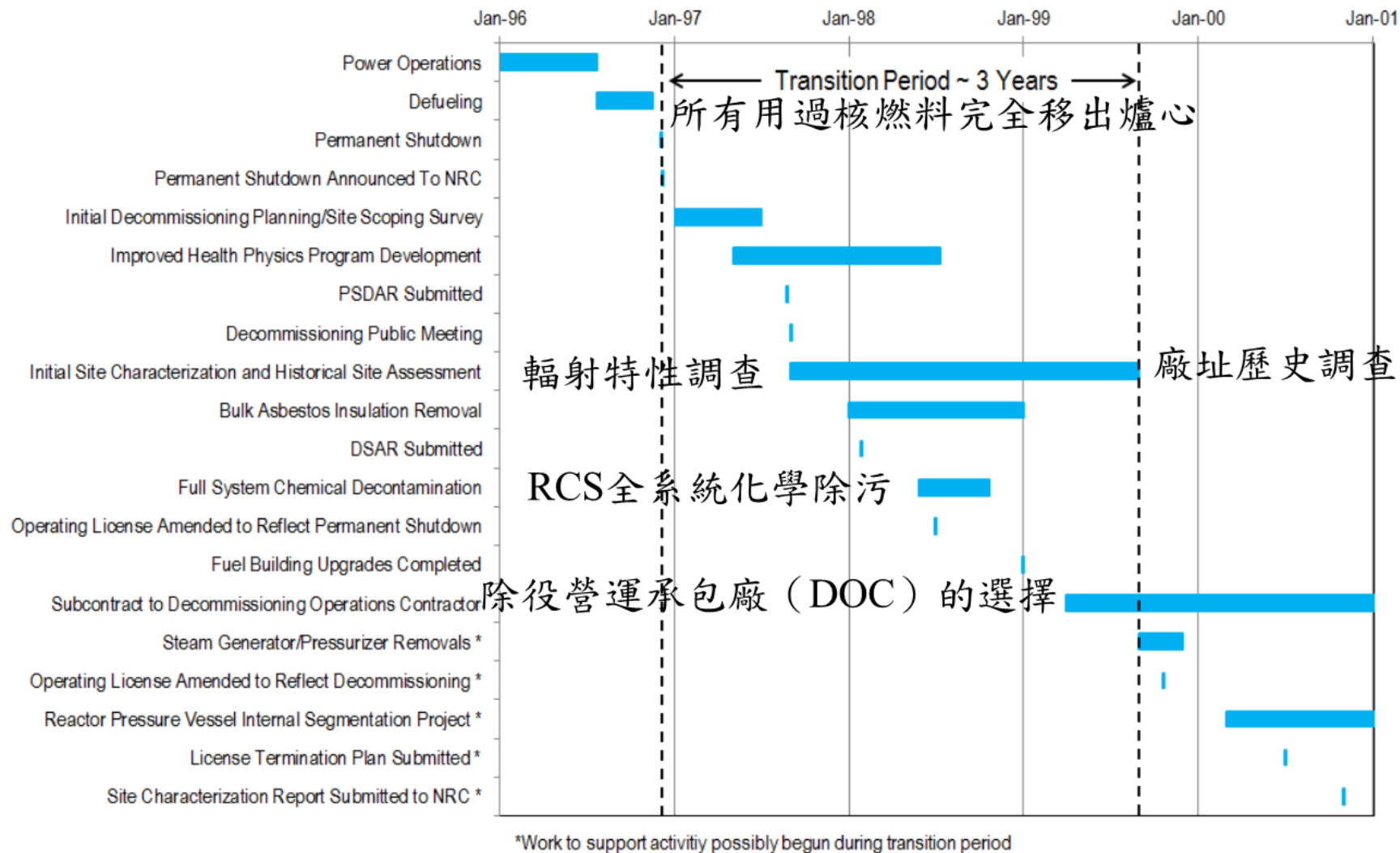


圖 3.6 康乃迪克洋基電廠過渡階段到拆除的主要除役活動時程規劃

3.2.4.1 RCS 全系統化學除污

在準備 PSDAR 期間，評估除役人員的總輻射曝露量，並確定 RCS 完整的系統化學除污和其他幾種支持系統的淨化作為，將有效的減低劑量，未經淨化作為的人員總輻射曝露量估計為 20.41 人-西弗，淨化後總輻射曝露量估計為 10.06 人-西弗。因此，除污被確定為顯著降低個人曝露的主要措施。此外，因沒有除污的曝露估算比美國 NRC GEIS 的除役曝露估算（12.15 人-西弗）高，該廠將需準備一個具體的電廠環境影響報告書(EIS)。在任何除役活動開始之前，需等待美國 NRC 特定的 EIS 審查和核准。

有關除污淨化應用的主要資訊如下：

- 淨化系統包括 RCS、CVCS、RHRS 和 RCS 填充排水系統，RPV 的內表面和大約 85-90% 的 SG 管沒有包括在除污過程中。
- 除承包商提供的設備之外，還使用了幾個電廠系統作除污淨化應用，包括一台 RHRS 泵、加壓加熱器和電廠脫鹽劑。
- 申請的期限，包括所有的安置和撤除活動，約為 154 天。化學應用本身的持續時間約為 9 天（不包括涉及電廠設備延遲的問題）。
- 由於除污而實現的平均 DF 約為 15.9，估計由於除污淨化造成的除役過程中的人員劑量減低是~1200 人-rem（12.0 人-西弗）。

從與除役過渡相關除污應用中學到的經驗總結如下：

- 在淨化過程中，RHRS 泵和加壓器加熱器表現非常好，應減少承包商申請提供的設備。但是，有使用電廠去礦物質的問題（除污溶液的洩漏）。這些問題是歸因於在停止運轉後和除污應用之前的系統惡化，如果在淨化過程中使用這些電廠系統，這些電廠系統的維護應該在永久停機後繼續運作，而這些系統應在除污應用前進行檢查。
- 理想情況下，淨化除污計畫應在永久停機之前開始，在永久停機後儘快消除污染，此有三個優點：

- 在此除污應用期間，將減少需使用的電廠設備之維護/檢查
- 確保知識淵博的工作人員，可在應用期間規劃和現場支持
- 最大限度地減少淨化除污作業本身造成的劑量

3.2.5 佛蒙特洋基電廠經驗

佛蒙特洋基 Vermont Yankee 電廠是 620 百萬瓦，4 迴路型 BWR，開始於 1972 年 3 月商業化營運。2013 年 8 月由於經濟原因，電廠決定在 2014 年第四季永久停機，該廠 2014 年 12 月 29 日永久停機，約 16 個月的預先通知，以開始規劃除役過渡活動，使除役過渡費用和時間大為降低。

2014 年 12 月，電廠向美國 NRC 提交了 PSDAR，表示他們打算在開始重大拆除活動之前，將電廠置向 SAFSTOR 大約 50 年。本文件顯示置向 SAFSTOR（帶有濕燃料貯存）的過渡計畫在 2016 年 4 月底前完成，這將對應過渡期只有 1.3 年。

3.2.5.1 永久停機前除役規劃

Vermont Yankee 在 2013 年 8 月電廠仍在運轉當中，宣布於 2014 年的第四季停止運轉。當決定永久停機時，DTF 不再收到捐款。因此，除役信託基金的管理使用與良好的規劃和謹慎執行對佛蒙特洋基非常重要。為此，除役計畫是在停止運轉日期前 16 個月啟動，以充分利用豁免監管承諾，經常需要 NRC 管制文件的送審核准，重點里程碑包括：緊急情況計畫、技術規範、NRC 命令、更新的最終安全分析報告、技術要求手冊、品質保證計畫手冊、10 CFR 72.212 報告、監管承諾、豁免監管要求、提供財務方式、除役期間的保證和輻射燃料管理計畫，表 3.8 是佛蒙特洋基管制文件的送審順序和核准情形。除役計畫階段的主要策略和活動包括但不是限於以下內容：

- 建立一個獨立的計畫組織，專注於除役計畫，以確保現場操作人員仍然專注於電廠營運。

- 制定除役項目手冊和除役項目計畫。
- 準備和提交送審監管機構的管制文件，並與監管機構加快聯繫，以減少電廠關閉後營運要求。
- 進行工程分析，以準時送審管制文件和修改電廠用於 SAFSTOR 上。
- 定義 SAFSTOR 的電廠設備和更改設計基準。
- 對 SSC 進行重新分類，並制定除役計畫中電廠關閉後執行的時間表。
- 制定程序和更改程序書。
- 制定變更管理和過渡計畫。
- 準備 HSA（放射性和非放射性）。
- 制定能夠減少人員配置的修改，認識人員配置減少是一項執照終止費用的重大工作貢獻者。
- 制定特定電廠的除役費用估算。
- 制定執照基礎文件的變更。
- 制定優化的用過燃料管理計畫。
- 與員工和利益相關者建立溝通。
- 交叉訓練員工，並與議價單位取得協議，以實現最大的靈活性。
- 優化燃料移除計畫。
- 與同儕除役電廠和 NEI 建立聯盟，以應對電廠和工業通用除役問題。
- 對其他關閉電廠進行基準測試。
- 實施員工保留計畫，以確保合格人員可以繼續安全操作直到關閉，支持 SAFSTOR 的轉換和準備。
- 制定預先規劃和關閉後過渡活動的綜合時間表。
- 在上一個營運週期內實施費用削減。

表 3.8 佛蒙特洋基管制文件的送審順序和核准情形

要求送審文件	送審日期	核准日期
技術規範要求手冊	Oct-13	Dec-14
緊急情況計畫	Mar-14	Feb-15
技術規範	Mar-14	Oct-15
品質保證計畫手冊	Oct-14	N/A
輻射燃料管理計畫	Dec-14	Oct-15

3.2.5.2 緊急計畫豁免

最初，Vermont Yankee 計畫在永久性關閉之後，依照 10 CFR 50.54 (q) 中概述的過程與方法，減少值班和人力資源管理人員。但是，基於 NRC 與 Kewaunee、CR3 和 SONGS 之間監管情況，NRC 認為，永久停機設施的員工人數減少在 50.54(q)過程中，明顯有不適當的評估。因此，Vermont Yankee 不是參考使用 10 CFR 50.54 (q) 過程來修正緊急計畫 (EP)，並在 2014 年 3 月 (約永久性關閉 9 個月前) 提送執照修改要求，以修正 EP。執照修改要求更改了 EP，以反映永久停機和燃料移除狀況，並反映在這種狀態可能發生事故數量減少的事實。擬議的修改消除了不需要在 SFP 中安全貯存用過燃料的值班職位，而且刪除不能有效應對可信事故的 ERO 職位。這個執照的修改要求是由 NRC 於 2015 年 2 月核准，因此，佛蒙特洋基能夠減少現場 ERO 人員配置約 50%。

3.2.5.3 用過燃料管理

在 Vermont Yankee 永久停機時，該廠 SFP 中有 2,996 個用過燃料的元件和 884 用過燃料元件在 ISFSI 中。雖然電廠現場有一個 ISFSI，現有的 ISFSI 無法容納所有在 SFP 中的用過燃料。

因此，電廠計畫在現有的 ISFSI 附近，擴展 ISFSI。然而，在永久停機時，因柴油發電機位於現有 ISFSI 的附近，沒有足夠的空間來擴展 ISFSI，所以拆除了柴油發電機為 ISFSI 的擴展騰出空間。到 2016 年初，電廠開始設計/建造/允許擴建 ISFSI，並設置更大容量的新柴油發電機來取代舊柴油發電機。這個新柴油發電機功率達 200 kW，在 SAFSTOR 期間為現場提供備用電源。

佛蒙特洋基進行費用效益分析，以確定是否應升級 SFP 對 SFPI 進行評估，並確定將 SFP 升級到 SFPI 費用上並不有利。

假設及時收到所需的國家監管部門的核准，ISFSI 的擴展估計於 2017

年完成。預計 2020 中期將完成燃料轉移到 ISFSI，燃料轉運完成後，將對 SFP 及其支援系統進行斷電及停止使用的措施。

3.2.6 Kewaunee 電廠經驗

Kewaunee 電廠是一個 Westinghouse 的 2 迴路 PWR，於 1974 年 6 月開始商業運轉，該電廠的額定功率為 590MWe。電廠於 2012 年 10 月決定永久停機，於 2013 年 5 月永久停止運轉。因此，通知永久停機前該電廠大約有 7 個月可以開始規劃除役過渡活動。2013 年 2 月（永久停機前三個月），Kewaunee 提交了 PSDAR 到美國 NRC，在展開大型拆除活動前 50 年，將該電廠選擇過渡在 SAFSTOR（濕式貯存）階段，並在 2014 年 11 月底前完成，共計有 1.6 年的過渡期。

3.2.6.1 人力資源變更

目前，此電廠除役費用中佔最大宗的部分為人力的管理，除役的各項活動離不開人力的管理，故該項費用應予詳細規劃。

從 2015 年 1 月永久停機之日起，Kewaunee 的員工人數變動總結如圖 3.7 所示，該圖所示的人員數目包括安全人員。



圖 3.7 美國 Kewaunee 電廠規劃除役後執照終止預估需求人員的變動

3.2.7 Crystal River 3 電廠經驗

Crystal River 3 核電廠(CR3)是一個 Babcock 和 Wilcox 的 2 迴路 PWR，在 1977 年 3 月商業運轉，運轉平均功率約為 860 百萬瓦，該廠與四個燃煤發電廠共同設立。該電廠於 2013 年 2 月決定永久停機，在決定永久停機的時候，由於 SG 更換期間/之後，發生三個圍阻體剝離事件，該廠自 2009 年 9 月後一直關閉，在永久停機時，所有用過燃料已被貯存在 SFP 3-4 年。2013 年 12 月，CR3 將 PSDAR 提交給 NRC，報告中表示在開始重大拆除活動之前，計畫將電廠放置在 SAFSTOR 大約 50 年，並於 2015 年 7 月完成向 SAFSTOR（含濕式貯存）的過渡，過渡期約 2.4 年。

3.2.7.1 用過燃料管理

在 CR3 永久停機時，該廠 SFP 有 1,243 組用過燃料元件和 76 組新鮮燃料元件，沒有現場的 ISFSI。76 個新鮮燃料元件已經裝載到反應器中進行新的循環，但沒有達到臨界。該電廠計畫在現場建造和轉移用過燃料到 ISFSI。提交給 NRC 的最近一份文件（2015 年 11 月）顯示用過燃料轉移到 ISFSI 預計將在 2018 年之前完成，為了促進在濕式 ISFSI 平衡期間 SAFSTOR 的營運，開始計畫 SFP 和支持系統與電廠的剩餘部分隔絕。CR3 的 PSDAR 中計畫，SFP 的修改將包括設計和安裝新的 SFP 冷卻系統，其中將包括空氣冷卻熱交換器在控制複雜的屋頂上。

關於 CR3 用過燃料管理的其他已知資訊總結如下：

- 2014 年 10 月，合約被授予 ISFSI 和裝貨營運。
- 截至 2015 年 6 月，燃料處理起重機的更換正在進行中。
- 截至 2015 年 6 月，正在進行燃料淹沒/檢查。

3.2.8 錫安 1 號和 2 號機組電廠經驗

錫安核電廠 1 號和 2 號機組 (Zion Units 1 and 2)，為西屋所設計的 4 迴路 PWR，機組電功率為 1,040 百萬瓦。錫安 1 號和 2 號機組於 1973 年 12

月和 1974 年 9 月分別開始商業運行，由於經濟考慮，兩個機組於 1998 年 2 月永久停機。在永久停機後，該廠選擇採用 SAFSTOR 策略。最初，計畫在 2013 - 2015 年之前留在 SAFSTOR，以允許累積足夠 DTF 信託基金來支持除役。依照如錫安核電廠現場特定 DCE 所規劃，2000 年 7 月已完成 SAFSTOR（濕式貯存）除役過渡計畫。2010 年，Exelon 將電廠執照轉讓給 Energy Solutions 的子公司 Zion Solutions 除役。根據這項協議，Zion Solutions 承接了該電廠的所有權，以完成所有除役活動，並在完成除役後將電廠執照歸回到 Exelon（但 ISFSI 的除役除外）。另外，值得注意的是，Zion Solutions 已選擇即時拆除的除役策略，且 Exelon 計畫使用 DOC 進行主要的除役活動，此對於除役過渡工作的完成有重要的影響。

3.2.8.1 廠址歷史調查

在除役過程中，發展 HSA 來確定電廠污染的程度和性質，並儘早進行此項評估調查是很重要的程序，能幫助確定某些組件和電廠位置應如何進行除污/復原，為除役的重要工作，該廠的 HSA 於 1999 年八月完成。為了獲得 HSA 所需的資訊，該廠進行了大約 300 次採訪電廠人員，並審查了大約 29,000 個電廠紀錄，並對部分電廠人員進行了約 2 小時的詳細訪談，此外，對離開廠址的電廠人員，也進行約 10 分鐘的短暫訪談。

3.3 德國核電廠除役活動過渡階段經驗與學習

德國有關原子能管制之法體系，是採取集中立法，以「原子能法（有關原子能之和平利用及其危險防護之法律，Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren – Atomgesetz v. 15. Juli 1985）」作為規範之核心基礎。本法最近一次修改是在 2011 年，因日本福島核災事故發生，德國決定逐步終止核能發電，調整能源政策改以再生能源作為能源的供給主軸，而將原子能法(Atomic Energy Act, AtG)針對核能的部分於 2011 年 7 月 31 進行修訂，德國至 2018 年 10 月，僅有

7 部運轉中核電廠，如表 3.9 及圖 3.8，2019 年又即將有 1 部停機，另外共有永久停機的機組共 29 部，總計 36 部機組。由表 3.9、3.10 可知，所有德國的核電廠預訂至 2022 年為止，將全數關閉德國境內的所有核能反應器機組。

表 3.9 德國目前僅有 7 部機組運轉整理表

機組名稱	型式	裝置容量 (MWe)	建造日期 年/月	商轉日期 年/月	預期除役 年份
Brokdorf	PWR	1395	1976-01	1986-12	2021
Emsland	PWR	1363	1982-08	1988-06	2022
Grohnde	PWR	1394	1976-06	1985-02	2021
Gundremmingen C	BWR	1308	1976-07	1985-01	2021
Isar 2	PWR	1410	1982-09	1988-04	2022
Neckarwestheim 2	PWR	1365	1982-11	1989-04	2022
Philippsburg 2	PWR	1390	1977-07	1985-04	2019
Gundremmingen B	BWR	1300	1976-07	1984-07	2017

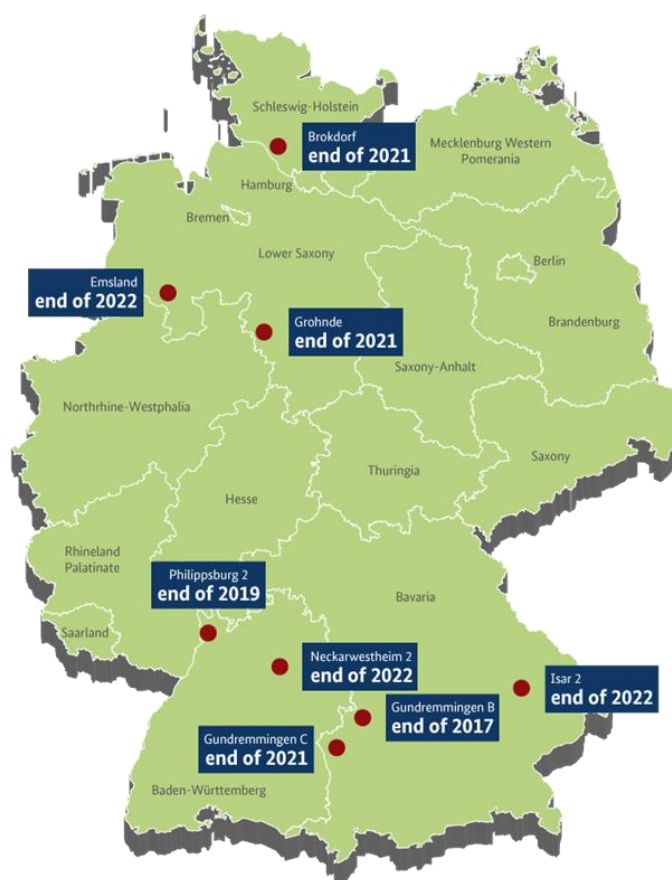


圖 3.8 德國目前僅有 7 部運轉機組分佈圖

表 3.10 德國之核電廠現況²

Name	Code	Status (at end 2011)	Key date
Juelich AVR	AVR	Decommissioning	Since 1994
Biblis A&B	KWB	Shut down	Since 2011
Brokdorf	KBR	Operating	Shutdown 2021
Brunsbuettel	KKB	Shut down	Since 2011
Emsland	KKE	Operating	Shutdown 2022
Grafenrheinfeld	KKG	Operating	Shutdown 2015
Greifswald 1-5	KGR	Decommissioning	Since 1995
Grohnde	KWG	Operating	Shutdown 2021
Gundremmingen A	KRB-A	Decommissioning	Since 1983
Gundremmingen B	KRB-B	Shut down	Since 2017
Gundremmingen C	KRB-C	Operating	Shutdown 2021
Isar 1	KKI-1	Shut down	Since 2011
Isar 2	KKI-2	Operating	Shutdown 2022
Kruemmel	KKK	Shut down	Since 2011
Lingen	KWL	Safe enclosure	Since 1988
Muelheim-Kaerlich	KMK	Decommissioning	Since 2004
Neckarwestheim 1	GKN-1	Shut down	Since 2011
Neckarwestheim	GKN-2	Operating	Shutdown 2022
Obrigheim	KWO	Decommissioning	Since 2008
Philippsburg 1	KKP-1	Shut down	Since 2011
Philippsburg 2	KKP-2	Operating	Shutdown 2019
Rheinsberg	KKR	Decommissioning	Since 1995
Stade	KKS	Decommissioning	Since 2005
Unterweser	KKU	Shut down	Since 2011
Wurgassen	KWW	Decommissioning	Since 1997
Karlsruhe KNK-II	KNK-II	Decommissioning	Since 1993
Karlsruhe MZFR	MZFR	Decommissioning	Since 1987
THTR-300	THTR-300	Safe enclosure	Since 1997

德國原子能法第 1 條規定的四大基本目的，包括（1）適當地終止商業發電用之核能利用，以及在終止之前保證其能適當地運轉；（2）保護因核能危險與游離輻射之有害作用所影響之生命、健康與財產，以及填補因核能危險或游離輻射所生之損害；（3）阻止因核能或游離輻射之利用與釋出所造成國內外安全之威脅；（4）確保履行核能與輻射防護領域中之國際上

義務。其中第一點與第二點，乃 2002 年取代舊法中原本「推進核能利用」目的之新規定。從這個修法方向，也可以看出核能運轉之安全維護以及人民生命、健康與財產之平安保障重要性，早已凌駕推進核能利用之必要性。

在原子能法第 7 條第 3 項中，執行除役與現地固封及拆除設施或其一部分，需要申請執照。對於除役所產生的放射性物質及可移動的物品、建築物、土壤區域、設施或其一部分，無論是被活化或污染，若要外釋的話，必須依據第 29 條的輻射防護規定(Radiation Protection Ordinance, StrlSchV)執行解除管制。

物質及可移動的物品、建築物、土壤區域、設施或其一部分，若係在原子能法第 7 條第 1 項，依據輻射防護規定第 29 條，只要它們並非來自管制區及沒有被污染或活化之情形，則可能不須解除管制即可外釋。土壤區域也可能依據輻射防護規定第 29 條，不需解除管制即可外釋，只要它的污染物被豁免。對於這類外釋的一般性程序，將在申照文件中說明。德國核電廠經營者決定採用 DECON 策略，主要考量為既有技術支援系統可用於拆除前工作；例如：放射性量測、電廠不同區域特性調查及電廠與設備項目，量測有經驗運轉人員知識能被利用，重要紀錄遺失風險能被最小化。

德國原子能法允許已永久停機的核設施 DECON 或遲延拆除，但不允許採用現地固封。核設施依據原子能法第二章第 7 條，部分設施除役、現地固封與拆除的申照程序是基於核能申照程序條例，核能申照程序條例提供指引，如：申照程序、公眾參與及環境影響評估原則。核設施經營者必須對核設施除役與拆除負完全責任，經營者決定除役策略與時間表及執照申請範圍。

核電廠永久停機前要提出除役申請，永久停機後進入後運轉過渡期，運轉執照仍然有效，過渡階段一般歷時約 5 年，用過核子燃料與爐心組件

自反應器池移走與傳送至廠內貯存設施，核電廠取得除役執照後，除污與除役活動直接開始，採階段性作業拆除方式，完成後依原子能法申請解除管制。拆除前不屬支援除污與除役的輔助系統停止運轉，並與操作系統分離、淨空（若有需要）、清理及永久隔離，控制界面與文件化。依據德國輻射防護法規，廠址特性調查必須達到所有設施、建物與地區有關參數深入與仔細編目/登記，以及設備與建物材料分項至解除管制類別。

依據德國原子能法，停止運轉後的核電廠可 DECON 或封存一段時間後再拆除，核設施擁有人必須完全負責核設施除役與拆除，德國大型除役計畫拆除策略採用由先拆外部再拆除內部。例如德國 Stade 核電廠除役第一階段先拆除污染系統與組件，第二階段移除大型組件，第三階段移除活化系統與組件，第四階段移除殘留系統與組件及準備清潔以利無條件釋出。

德國對除役廢棄物產生量最小化及物質循環與再利用非常重視，物質、建築物及廠址自核能管制釋出很重要。依據原子能法第 9 條，德國放射性物質與拆除裝置組件需循環再利用或以放射性廢棄物作適當處置。2001 年 8 月 1 日公布之新輻射防護條例，對物質、建築物及廠址自管制到釋出，有詳細與一致性定量與定性放射性核種數據，可作為依循。依據德國新輻射防護條例第 29 條，以劑量為基礎的廠址釋出標準與固體物質解除管制標準採相同標準，亦即廠址釋出標準為個人有效劑量小於 $10\mu\text{Sv/y}$ ，此劑量不到天然曝露的 1%因而可忽略不計。

德國主管除役的法規為原子能法，在電廠永久停機後，所有法規及要求，除了發電部分，皆仍適用於該電廠。並且法規說明正常運轉的執照，仍應用於除役期間，因運轉執照並未包含除役工作，因此在電廠永久停機後，主要的除役活動需取得除役執照後，方可進行。故在德國，電廠永久停機將進入”後運轉階段”（即過渡階段），直到自聯邦政府取得除役執照，則將

進入除役階段。在後運轉階段，主管機關仍將依照正常運轉的狀態下進行監督，這些活動包括：

- (1) 燃料移出爐心
- (2) 類似美國的 ISFSI，將燃料移至場內的貯存場暫存，該貯存場需另外取得核准執照
- (3) 放射性物質使用及廢棄物處理
- (4) 全廠設施及系統除污，包含全系統化學除污
- (5) 系統及組件取樣
- (6) 非輻射相關建築的拆除（如：辦公室、停車場...）
- (7) 廠址特性調查

電廠於過渡階段仍須遵照運轉中電廠方式進行維護工作，但可針對不使用的系統或組件，提出申請脫離管制要求。

核能申照程序條例（AtVfV）中有定義如何獲得除役執照的流程，其聯邦環境、自然保護及核能安全部門（BMU）3.3 節除役導則的規定中，有列出除役申請文件，內容包括以下 9 項：

- (1) 電廠歷史及設施說明；
- (2) 除役策略（DECON 或遲延拆除）；
- (3) 除役拆除及除污計畫，以及技術說明；
- (4) 為除役目的而改善的新系統；
- (5) 環境影響廠址評估；
- (6) 放射性存量評估；
- (7) 人員組織及除役技術資格認定；
- (8) 輻射防護措施；
- (9) 品質管制。

圖 3.9 為德國核電廠除役作業管制圖，圖 3.10 為德國除役執照審核流

程概覽，主管單位為聯邦政府，過程將諮詢顧問單位進行審查，以維護環境及人員的安全。

德國的電廠允許提出部分除役申請，執行特定建物的拆除，拆除過程可分為 4 個階段，可以分別單獨申請。圖 3.11 為德國除役計畫性除役的主要時程規劃範例，曾應用於 Stade 及 Obrigheim 電廠除役。依據近來 8 個非計畫性除役電廠，除役執照申請時間約花 1-2 年，執照審核約 3-5 年，故非計畫性除役的過渡階段總共為期約 4-7 年。Stade 電廠永久停機前 2.4 年即提出第一階段除役執照申請，故其過渡階段縮短至僅約 1.8 年。

除役策略可以是 DECON、遲延拆除或兩者的結合，大型組件在場內不做切割，而是移到場外處理廠進行切割與處理，德國不執行現地固封 EMTOMB 的策略。由表 3.10 為德國核電廠狀態的彙總資料中，有 Stade 和 Obrigheim 是兩座德國在過去 10 年內經過完整過渡期的電廠，以下將介紹這兩座核電廠的除役經驗。

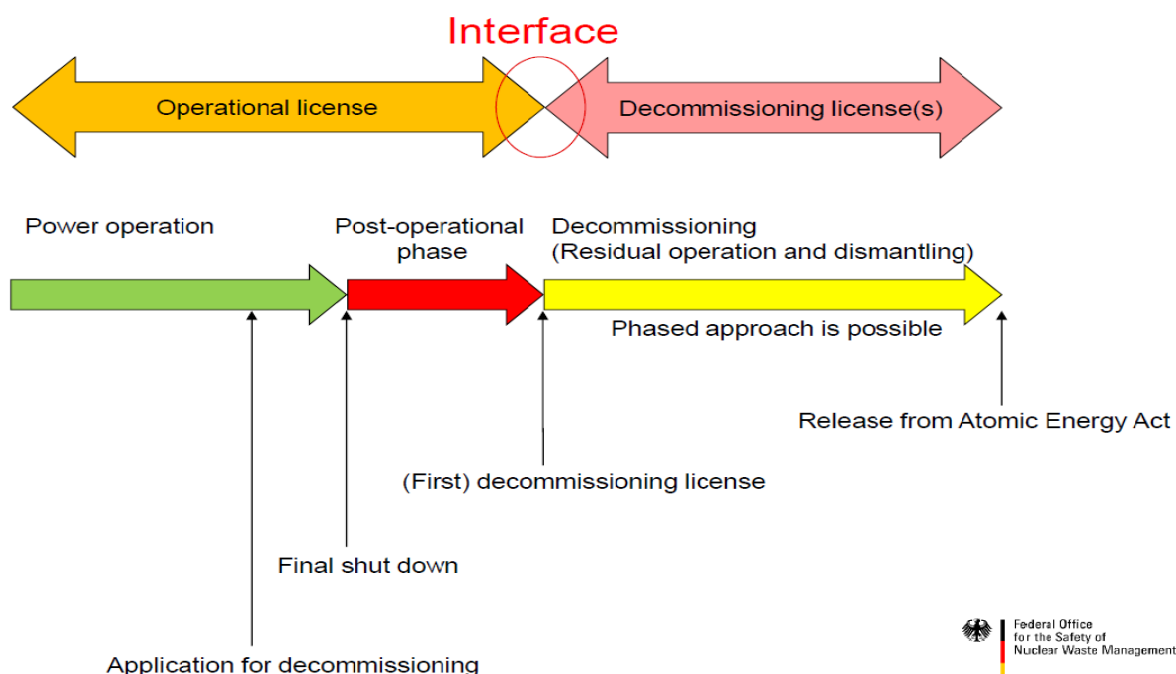


圖 3.9 德國核電廠除役作業管制圖²

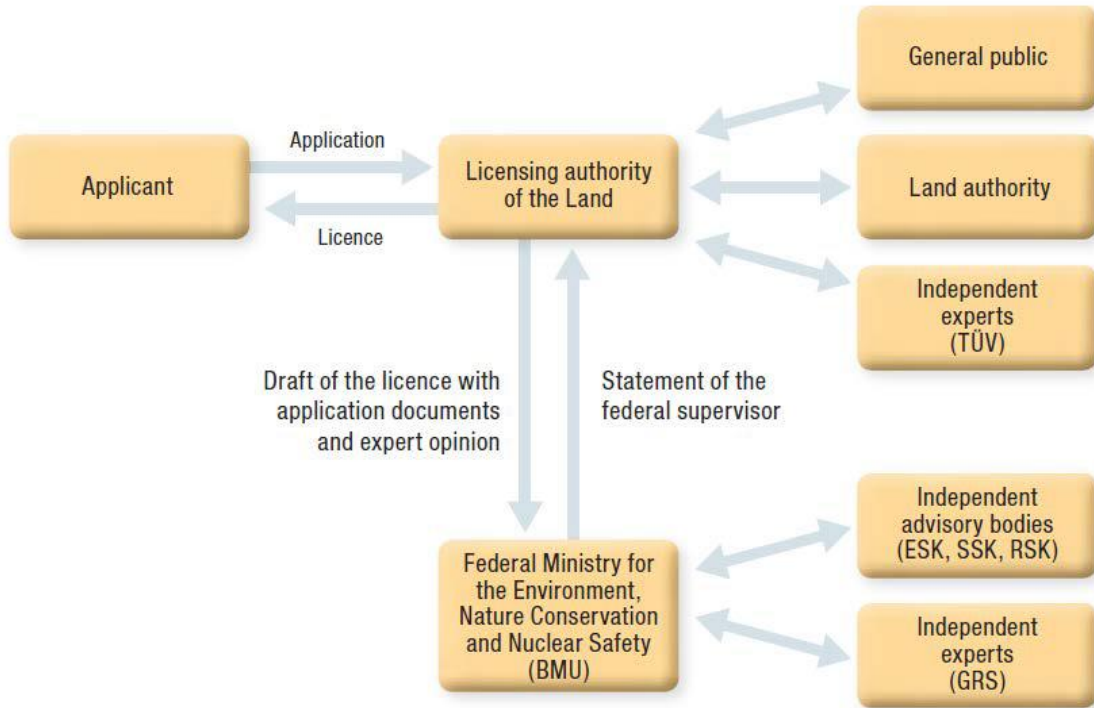


圖 3.10 德國除役執照審核流程概覽⁹

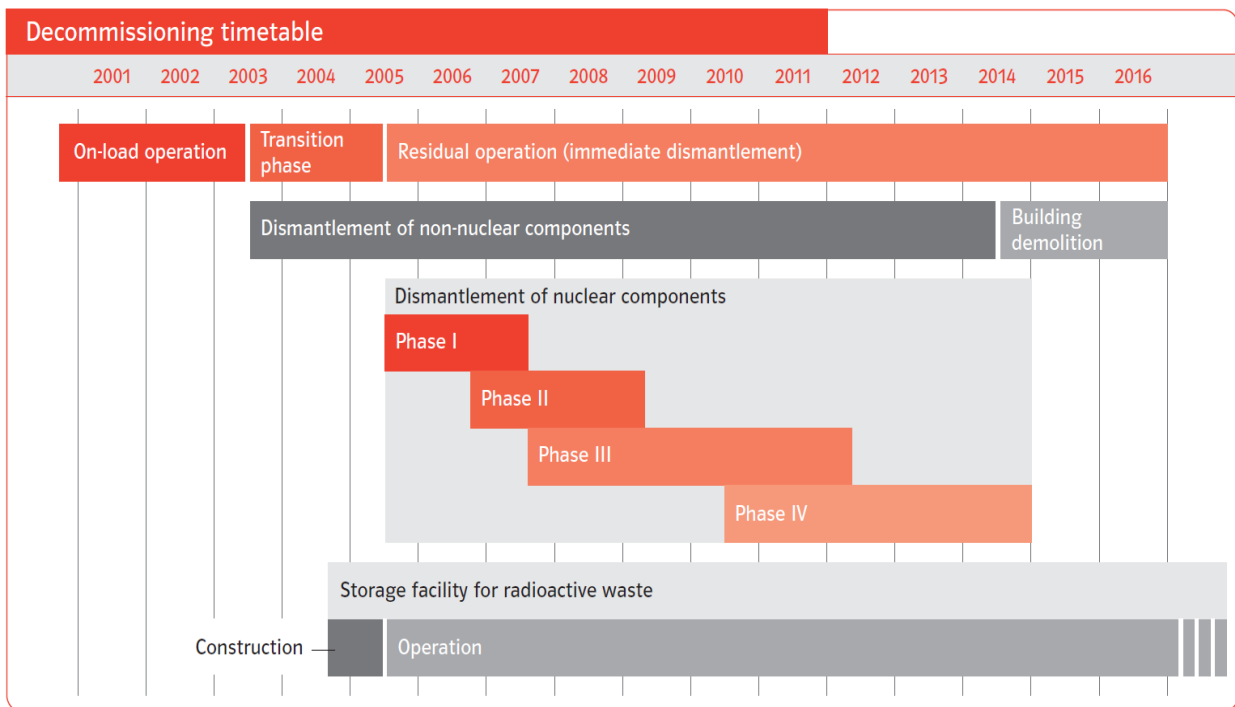


圖 3.11 德國除役階段時程規劃範例⁹

3.3.1 德國施塔德核電廠除役活動過渡階段經驗與學習

施塔德 Stade 核電廠是德國西門子 4 迴路壓水式反應器。額定功率 630 MWe，在 1972 年進行商業運轉。2003 年 11 月該電廠永久停機，表 3.11 列出了主要除役事件的時間表。此外，如表 3.11 所示，電廠永久停機的決定大約在永久停機前三年（即計畫性永久停機）。電廠決定永久停機後，電廠開始規劃除役事宜，大約一年之後，申請了第一個永久停機除役執照，此約在永久停機前 2.4 年。因這一提早的除役執照申請，使得 Stade 的過渡時期大約為期 1.8 年。這個過渡時期的時間比另一核電廠奧布里格海姆過渡期短，預計也將比 2011 年停機的 8 個核電廠過渡時期短。

下列為 Stade 全系統化學除污的主要資訊：

- (1) 2003 年，Stade 在電廠舉辦了一個除污除污研討會。在這個研討會上，電廠評估當時可用的除污除污技術，西門子（現在 AREVA）選擇 HP CORD D/UV 技術進行除污。
- (2) 整個系統的除污工程，包括三個階段：一個可行性研究、程序的開發和現場應用。
- (3) 需要除污的系統包括 RCS（包括 RPV 和 SG）、CVCS 和 RHRS。
- (4) 由於電廠系統的可用性，最小的供應商設備是必需的，除污工程主要是用電廠設備進行的。

除了除污的規劃和執行之外，預計還有一些如上所述列出的一般活動是在過渡期間進行的。此外，基於在授予 Stade 第二階段除役執照的日期（表 3.11），預計在過渡期間準備第二階段除役執照的申請。

表 3.11 德國 Stade 核電廠的主要除役階段及重要事件²

階段	日期	主要活動
運轉階段	Fall 2000	決定永遠停止運轉
	Jul-01	第一階段除役執照申請
除役準備過渡階段	Nov-03	永遠停止運轉
	2004/2005	全系統化學除污
	2004-2008	第二至四階段除役執照申請
除役階段	Sep-05	第一階段除役執照核准
	Feb-06	第二階段除役執照核准
	Summer 2007	輻射廢棄物貯存設施試運行
	Feb-11	第四階段除役執照核准

Stade 核電廠是在 2005 年獲准進行拆除作業，而在 2004 年至 2005 年期間先執行全系統的除污（Full System Decontamination, FSD）作業，2007 到 2009 年執行反應器內部組件拆除作業，所有的工作均在水下進行，拆除後的廢棄物總重量為 85 噸，目前先裝桶存放在電廠的暫時貯存庫，待德國的 Konrad 中低放最終處置場完成後，再進行處置。而前述的全系統除污與內部組件拆除作業，均委託法國的 Areva 公司負責。圖 3.12 為 Stade 核電廠的爐心上層組件搬運到用過燃料池的情形。在 Stade 核電廠的反應器壓力槽之拆除作業，係由德國的 Siempelkamp NIS 及 E.ON Anlagenservice GmbH 兩家核能工業公司共同負責。整個拆除期程是從 2008 年開始至 2010 年完成。在 2009 年時進行反應器壓力槽輻射特性調查，直到 2010 年才開始正式拆除工作，這項拆除作業特別使用了高功能的熱切割系統與角向磨光機配合進行，整個壓力槽被切割成 172 塊，總重量為 209 噸，然後將爐

心區域的部分裝入 59 桶 MOSAIK 的貯存容器，另外的區塊則是裝入 39 個用混凝土屏蔽的鋼製容器內。

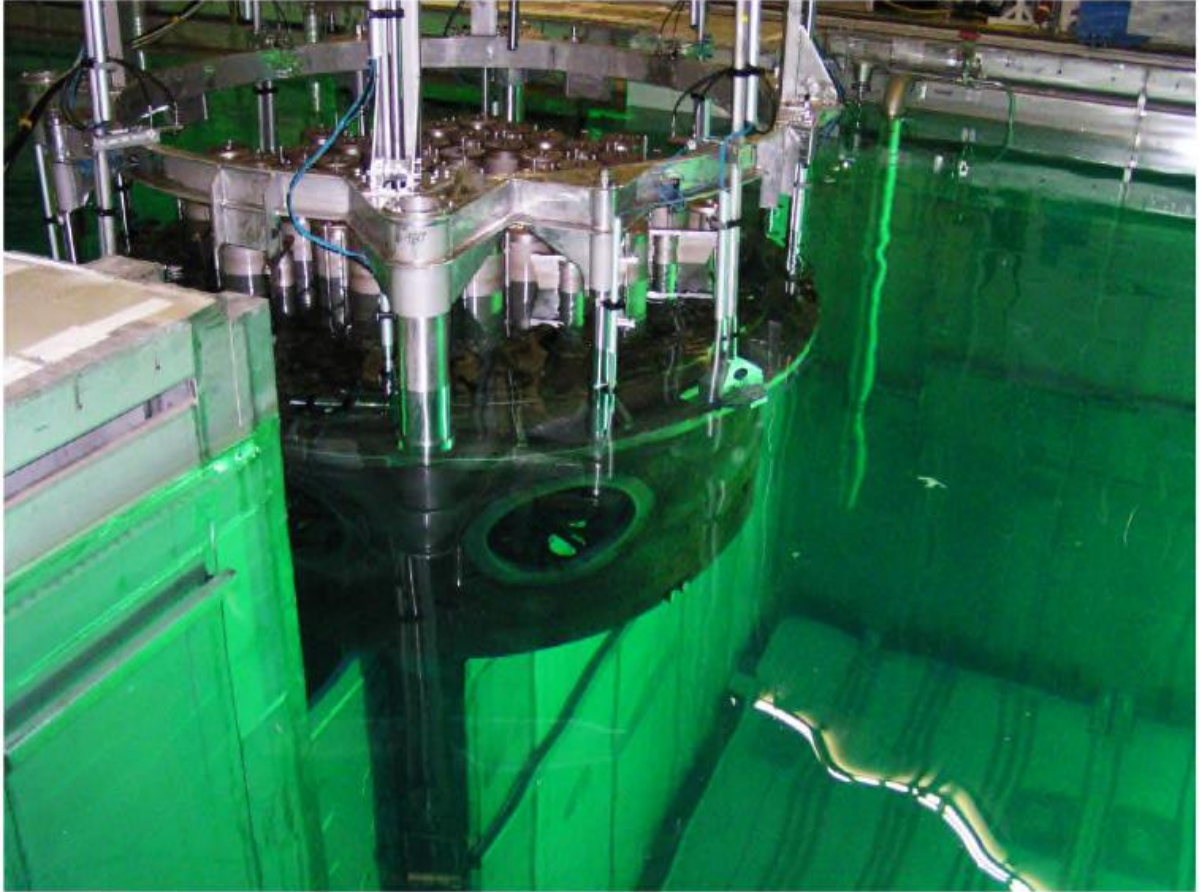


圖 3.12 德國 Stade 除役電廠爐心上層組件搬運到用過燃料池的情形⁸

3.3.2 德國奧布里格海姆核電廠除役活動過渡階段經驗與學習

奧布里格海姆 Obrigheim 核電廠是德國西門子 2 迴路壓水式反應器，額定功率為 357 MWe，於 1968 年開始商業營運，於 2005 年 5 月永久停機。表 3.12 顯示了在奧布里格海姆舉行的已知重大除役事件總整理，如表 3.12 所示：永久停機是經過規劃。因此，除役計畫可以在電廠關閉之前開始，在永久停機前約 0.4 年提交了除役執照第一階段申請。Obrigheim 過渡期間歷時約 3.3 年。

Obrigheim 過渡期進行了以下活動：

- (1) 編撰第一階段除役執照申請所需的所有文件，提交除役執照申請；
- (2) 用過燃料被轉移到外部的濕式貯存；
- (3) 電廠系統被沖洗和排乾；
- (4) 消除運轉廢棄物；
- (5) 進行全系統化學除污；
- (6) 關閉不必要的系統；
- (7) 努力支持減少維護和運轉測試；
- (8) 庫存整理；
- (9) 系統、部件和區域的放射性分類；
- (10) 在除役期間使用的幾個電廠系統進行了升級，其中包括排氣監測系統、排氣過濾系統和廠房起重機；
- (11) 準備廢棄物貯存和運輸物流；
- (12) 努力完成第二階段除役執照。

2011 年至 2015 年期間德國電廠關閉的已知過渡期活動總結如下：

一電廠在永久停機的 3 年後提交了第一份除役申請，Grafenrheinsfeld 和 Gundremmingen B 都在永久停機之前提交了第一份停止執照申請。

Neckarwestheim 1、Phillipsburg 1 和 Unterweser 已經執行完整的系統除污，Biblis A 開始完整的系統除污，但因一次冷卻水泵的一些發現而被中止。在表 3.13 中，總結 Stade 及 Obrigheim 第一階段除役執照（包含另外三個階段除役執照）中拆除活動的範圍的比較，兩者主要活動都相同。

表 3.12 德國 Obrigheim 核電廠的主要除役階段及重要事件²

階段	日期	主要活動
運轉階段	Fall 2000	決定永遠停止運轉
	Jul-01	第一階段除役執照申請
除役準備過渡階段	Nov-03	永遠停止運轉
	2004/2005	全系統化學除污
	2004-2008	第二至四階段除役執照申請
除役階段	Sep-05	第一階段除役執照核准
	Feb-06	第二階段除役執照核准
	Summer 2007	輻射廢棄物貯存設施試運行
	Feb-11	第四階段除役執照核准

表 3.13 德國 Stade 及 Obrigheim 核電廠的主要除役拆除活動內容²

除役階段	Stade	Obrigheim
1	二次側系統組件	二次側系統組件
2	主要一次側系統組件 (RCS 系統)	主要一次側系統組件 (RCS 系統)
3	反應爐壓力容器、內部組件 及屏蔽	反應爐壓力容器、內部組件及屏 蔽
4	其他仍存留系統	其他仍存留系統

3.4 法國核電廠除役活動過渡階段經驗與學習

法國核電廠的除役管制類似於其他的歐洲國家，需證明技術與財務足以完成除役工作，但與其他國家最大的不同，是其不核發分階段執照，管制單位只核發單一除役執照。根據 2007 年 11 月 2 日第 1557 號法令，電廠需於預見永久停機前 3 年，向法國核安全局 ASN (French Nuclear Safety Authority) 提出除役申請文件，內容包括：

- (1) 說明永久停機準備工作；
- (2) 標明除役重要系統與組件；
- (3) 廢棄物移除路徑。

電廠需於預見永久停機前 1 年，提出的除役申請文件，內容包括以下 7 項：永久停機設施說明、更新的除役計畫、環境影響評估、初期安全分析報告、風險分析、監測與維護的方法、及完成拆除後，廠址的使用限制。

以上文件，需於公眾質詢審核期間，系統化的送出審核。ASN 在除役活動開始前，必須完成審核，未限制核准時間，但以 Chooz A 為例，2004 年 11 月 30 日申請除役，於 2006 年 8 月完成公眾質詢，2007 年 9 月 29 日獲得除役核准，過程約需 3 年。獲得除役執照前，可以允許移除放射性液體及廢棄物，用過燃料係移送至 La Hague 再處理廠進行燃料再處理。除役的拆除耗費時程不定，以 Chooz A 為例，自 1991 年永久停機，1995 年 12 月燃料移除、1999 年電廠拆除排放水環道、汽輪機廠房設備，EDF 預估在移除燃料、排放環道水後，約有 99.9% 放射性物質已被移除。拆除策略的採取（立即或遲延拆除）可以據電廠情形決定。EDF 目前有 9 個電廠均採 DECON 方式進行除役；另外，與其他歐洲國家不同，法國沒有可忽略的放射性廢棄物。表 3.14 係依活度強度，摘要列出法國核廢棄物分級及管理策略。

表 3.14 法國核廢棄物分級及管理策略²

半衰期區分 活度	非常短半衰期 (<100 天)	短半衰期 (<31 年)	長半衰期 (>31 年)
非常低階 (約 1~100 Bq/g)	以輻射衰變方 式就地管理	CIRES	
低階 (約 0.1~100 kBq/g)		CSA	在監測之下進行 廢棄物管理 (CIGEO)
中階 (約 0.1~1 MBq/g)			
高階 (大於 1 MBq/g)		在監測之下進行廢棄物管理 (CIGEO 深處地質貯存倉庫處理)	

如同台灣，法國核電廠必須在最終關閉的預計日期的前 3 年，向法國核安全局 (ASN) 提交除役計畫，並依 2007 年 11 月 2 日第 1557 號法令，在最終預定日期的 1 年前提交除役申請/安全檔案。這些文件是有系統的經過公眾審查和詢問期，之後，ASN 必須在除役活動之前交付可以開始除役法令 (執照)，法國的過渡時期被認為是最終關閉和由 ASN 頒發除役法令之間的階段。在此期間，法國電廠可按照電廠經營執照的規定，撤離放射性流體和廢棄物。在法國，這包括移除用過燃料，並將其運到集中燃料再處理設施。

如表 3.15 所示，截至 2016 年初，法國有 9 座反應器正在除役，包含 1 座 PWR (Chooz A)、1 個重水反應器 (Brennilis)、6 座氣冷石墨反應器 (Chinon A1, A2 和 A3, St. Laurent A1 和 A2 和 Bugey 1)、1 個快滋生反應器 (Creys-Malville)。

表 3.15 法國核電廠除役概況表²

Project	Reactor Size/Type	Authorization/Safety Case File Issued	Final Shutdown	Public Inquiry Period Complete	Decommissioning Decree Issued
Creys Malville	1240 MW Fast Breeder	May-2003	1997	Apr-2004	Mar-2006
Brennilis	70 MW Heavy Water	July-2008	1985	Oct-2009	Jul-2011
Chooz A	300 MW PWR	Nov-2004	1991	Aug-2006	Sept-2007
Bugey 1	540 MW Gas Graphite	Sept-2005	1994	Aug-2006	Nov-2008
St. Laurent A1 and A2	480 MW (A1) and 515 MW (A2) Gas Graphite	Oct-2006	1990 (A1) and 1992 (A2)	Jan-2007	May-2010
Chinon A3	480 MW Gas Graphite	Sept-2006	1990	Mar-2007	May-2010
Chinon A1 and A2 [Note 1]	70 MW (A1) and 200 MW (A2) Gas Graphite	/	1973 (A1) and 1985 (A2)	/	/

所有這些反應器的最後關閉發生在第 1557 號法令頒布之前，因此這些反應器在最終關閉後提交除役申請/安全報告檔案，進入了遲延拆除的時期。在這種情況下，這些電廠過渡期的時間被視為提交申請/安全報告檔案以及從 ASN 收到除役法令之間（約 3 年的時間，目前正在法國除役的 9 座反應器如表 3.15）。

法國電力公司目前這 9 座反應器的除役策略是 DECON，從 Brennilis、Creys-Malville、Chooz A 和 Bugey 1 開始。從 Bugey 1 學到的經驗，再應用在剩餘的氣冷石墨反應器除役的過程中（希農 Chinon A1，A2 和 A3 以及聖洛朗 St. Laurent A1 和 A2）。另外，Chooz A 由學習到他廠的除役經驗，隨時反映 EDF 在運轉中壓水式反應器機組內的除役活動，以完成除役工作。

Chooz A 核電廠是法國第一個即將除役的壓水式反應器，Chooz A 的過渡階段運轉經驗，在以下分節中討論。

3.4.1 法國 Chooz 核子設施除役活動過渡階段經驗與學習

Chooz A 是一個 4 迴路，305 MWe 的壓水式反應器，這是在法國第一個建造和運轉的壓水式反應器，於 1991 年關閉。該電廠的設計獨特之處在於它被建在兩個洞穴中，在一座山丘中被挖掘到以容納反應器和核輔助部件和結構。位於山頂的核廠房（洞穴上方~200 米處）包含有緊急爐心冷卻系統和通風管道，一個包含核能系統和通風管道的陡峭隧道連接這些廠房與洞穴。該電廠還包括一個特定的系統來收集可能潛在污染的山泉水。

Chooz A 的過渡期有點獨特，在營運期間，該電廠由法國電力公司和 SENA（一家比利時公司）共同擁有。於最終關閉的時候，除役責任轉交給了法國電力公司，並採取遲延拆除策略。但是，在 2001 年，法國電力公司的除役策略改變成 DECON，並決定加速除役計畫，安全封閉期減少到只有幾年。在 2004 年，法國電力公司提交了所需的申請/安全文件，在 Chooz A 進行拆除，並在 2007 年由 ASN 頒發除役法令/執照。

Chooz A 的過渡期為 1991 年最終停工和 2007 年收到除役法令/執照之間的時間，法國電力公司在籌備期間作出重大努力，審查國際反應器壓力容器 RPV 和反應器內部構件 RVI 經驗並與國際專家交流資訊。這些活動的總結如下：

- (1) 1991 年 - 電廠最終關閉，將除役責任自 SENA 轉移給法國電力公司，當時採用了遲延拆除策略。
- (2) 1995 年 12 月 - 所有的燃料已經從現場移走，並運往當時 Cogema（現在的 AREVA）在 La Hague 的燃料再處理設施。
- (3) 1999 年 - 所有的迴路已經排乾，工業廢棄物被清除，汽機廠房的設備拆除。EDF 估計燃料移走並迴路的排水，消除了電廠 99.9% 的放射性。
- (4) 1999-2004 年 - 拆除山頂建築物、行政大樓和汽機廠房。

- (5) 2001 年 - 法國電力公司的策略從遲延拆除改變為 DECON，加速除役計畫，安全封閉時間減少到只有幾年。
- (6) 2001 年 - 成立拆除和環境工程中心 (CIDEN)，重點在電力後端營運 (除役/拆除) 和環境安全。
- (7) 2004 年 - 提交了除役申請/安全文件，包括除役計畫和安全報告。這些文件包括對法國電力公司反應器壓力容器 (RPV) 最初的描述和反應器內部構件 (RVI) 拆解策略，這預計將成為整體拆解工作的重要組成部分。

在提出申請之前，EDF 提供其最初 RPV/RVI 分割計畫，將由 EWN 德國公司進行審查。在此期間完成的活動摘要如下：

1. EWN 是一家德國公司，負責 Greifswald 和 Rheinsberg 核電廠的除役工作，並且已經分割了一個 RPV 而測試了各種切割方法 (例如：機械、熱及磨料水噴射流等)。
2. 此外，在 2006 年秋季，法國電力公司與美國 Maine Yankee、SONGS1 和 Trojan 除役專家舉行了研討會，以及參與的美國公司 WMG Inc. 提供了幾個以前的美國 RPV 拆除經驗。
3. 法國電力公司還與德國 Obrigheim 核電廠 EnBW 公司交換了資訊，EDF (EnBW 的大股東) 曾經考慮過發行 Chooz A 和 Obrigheim 的 RPV / RVI 分割合同。最終，對這兩個項目的要求彼此相差甚遠，而僅有一個分割合同安排將不是有利的。儘管如此，EDF 和 EnBW 仍在繼續交換供應商提出相關的技術解決方案。
4. 總體而言，上述提到與美國和德國進行實體經驗交流，在協助 EDF 開發和優化 RPV/RVI 分割方面是有益的策略。但是，由於 RPV/RPI 分割優化，很大程度上是由可用的廢棄物容器類型和處理低階和中階廢棄物的規格所驅動的。因此，法國電力公司認為在美國和德國使用的具體

做法並不一定是在法國使用的最佳選擇。例如：

- (1) 美國的磨料水噴射流切割經驗是非常積極的，因為這個過程是有效的，並有一個有效的方式來處理二次廢棄物（石榴石）的產生。但是，這種方法在法國不是首選，因為二次廢棄物由於其活度而必須在混凝土容器中再進行調節。
 - (2) 同樣地，在德國 RPV/RPI 必須分成相對較小的部分，因為只有一種容器類型可用於處理這種材料（容量為 500 升的 MOSAIK 型容器）。這些的能力由於可能需要額外的鉛，集裝箱內部屏蔽可能會受到進一步的限制，以確保容器的劑量率低於允許值。在法國，部分 RPV/RPI 可以使用較大的容器，主要用於處理活性較低的物質。因此，部分 RPV/RVI 分割成更大的塊可能是可行的（甚至更具費用效益）。
5. 2005-2009 年 - 拆除易燃材料（拆除服務通道）和通道擴大工作。拆解、清理和拆除山坡上的核建築物，更衣室的翻新，服務隧道設施的拆除（包括隧道連接洞穴底部和山上的設施）都發生在 2008 年之前。
 6. 2006 年 - 公眾查詢期結束。
 7. 2007-2008 年 - 服務升級（通風，廢棄物管理設施等）。
 8. 2007 年 9 月 - 由 ASN 頒發的除役法令/執照，授權電廠拆除。
 9. 在 ASN 發布除役法令/執照後，儘管這些活動不是上述定義的過渡期的一部分，但這些活動總結如下，以提供更多 Chooz A 的主要除役活動和考慮的完整面貌：
 10. 2008-2012 年 - 拆除核輔助洞穴。
 11. 2010-2016 年 - 洞穴內的所有設備將被拆除，設備除外尚需要收集、監測和釋放通過山坡滲透的排水。在此期間內的重大活動包括：
 - 拆除反應器和輔助洞穴中的電化學設備。

- 蒸汽產生器、調壓槽、RCS 管道和 RCP 的化學除污，以減少從 LL 廢棄物到 VLL 廢棄物的分類（從 2011 年 11 月到 2013 年 3 月）。
- 蒸汽產生器在除污後被一整體地移除，其中一個並貯存在 CIRES VLL 廢棄物倉庫中（完整），而不是勞動密集型的切割，便於在較高級別的廢棄物處理設施。
- 反應器壓力容器和內部組件應在水下進行拆除。

12. 2010 年 1 月 - RPV 拆解開始。關鍵細節總結如下：

- (1) RPV / RVI 拆解合同是由一個財團授予西屋公司與法國 Nuvia。
- (2) RPV / RVI 的水下分割將使用各種工具（例如帶鋸、盤鋸、剪切工具等）通過機械切割進行。機械切割被選中的原因如下：(1) 幾乎不產生二次廢棄物，(2) 在切割過程中的可見度是好的（可以忽略的微粒量，切割時產生的切屑落到池底容易收集），(3) 不產生可能造成空氣污染的氣體，(4) 技術安全可靠，(5) 可用於切割所有 RPV 尺寸、材料和厚度。1999 年以來，西屋公司成功使用機械切割將 BWR 福爾馬克 1 號、2 號和 3 號，奧斯卡港 1 號、2 號和 3 號以及奧爾基洛托 1 號和 2 號 RVI 分段。最近（2010 年 - 2013 年），西屋公司在 Zorita（也被稱為 José Cabrera，西班牙壓水式反應器）完成了 RVI 分割。
- (3) RPV / RVI 分割過程進行了優化，以從較少程度中子活化的組件分離出高度中子活化組件，並符合廢棄物容器類型和在法國的規格。
- (4) 在 RPV / RVI 分割期間產生的短半衰期 LL 和 VLL 廢棄物將被運送到安德拉 Andra 設施，長半衰期的 LL 和 IL 廢棄物將是運送到 EDF 臨時貯存設施（ICEDA），直到 Andra 長期貯存這些廢棄物類型的設施可用。

(5) 截至 2016 年初，RPV/RVI 分割設備全尺寸合格模型和現場工作（水下 RPV / RPI 分割）正在進行中。切割順序如下：(1) 上高部內部，(2) 運轉廢棄物，(3) 低下部內部，和 (4) 隔絕 RPV。

13. 2010 年底 - ASN 一次側迴路除役授權。

14. 2013 年底 - 兩個 SG 裝運到 CIRES VLL 廢棄物倉庫，兩個 SG 和調壓槽等待 Andra 的貨運授權。從這時起，剩下的兩個 SG 已經運往 CIRES VLL 廢棄物倉庫。

15. 2016 年 - 預計將開始混凝土除污和場地修復。

拆解作業結束後，電廠繼續受到多年監控。將收集並測試洞穴內部的水，直到放射性水平（特別是由於氙的存在而引起的）減少到足以使排放沒有需要進一步測試。一旦達到這些水平，最後仍然在核輔助洞穴和廢棄物處理設施的組成部分將被拆除。然後一部分建築物的外部平台將被除污和拆除，並且該地點將完全被清除復原。預計到 2020-2025 年將完成除役行動，一旦電廠已經完全拆除，地下結構將全部機電部件清空及進行除污。部分洞穴將進行填滿，以避免山坡沉降的風險，而位於廠址的建築物將拆除。在除役完成後，電廠將被降等，法國電力公司將繼續擁有該廠址的財產權。

3.5 西班牙核電廠除役活動過渡階段經驗與學習

在西班牙，除役工作主要由政府機關負責，其中包含放射性廢棄物及用過燃料項目，由廢棄物管制機構 ENRESA 主管此工作。故電廠的運轉執照將先轉給 ENRESA，待除役工作完成後再轉讓回原電廠業主。

但在執照轉讓給 ENRESA 前，原業主需先獲得除役許可，通常原業主將自 SFP 移除用過燃料後進行，但若有完善的用過燃料管理計畫並經電廠能源機構核准，在用過燃料放置於 SFP 中的情況下，仍可進行除役工作。

為申請拆除許可，ENRESA 需提出拆除計畫至西班牙安全機關（CSN, Consejo de Seguridad Nuclear）及環境機構加以審核，電廠需修改 FSAR 及

TS 以反映永久停機狀態（此類似美國送審 DSAR 及 PDTs），廢棄物管理計畫則送至安全管制機關審核。當修改 FSAR 及 TS 獲得核准後，則可在取得除役許可前，執行相關文件中所提到的活動。

在建立歐洲除役組織上所需要的關鍵元素，包括了計畫管理 (PM)、營運與維護 (O&M)、行政組織 (Administration)、廢棄物的管理 (WM)、放射性與核能安全 (Radiation and Nuclear Safety)。圖 3.12 為西班牙電廠除役的組織架構、圖 3.13 為 Zorita 核電廠，於 2006 年 4 月永久停機的照片資料、圖 3.14 為 Zorita 核電廠除役主要五個步驟示意圖。



圖 3.1 西班牙電廠除役的組織架構⁸

3.5.1 西班牙 José Cabrera 核子設施除役活動過渡階段經驗與學習

José Cabrera 核電廠（也稱為 Zorita）是西班牙單一迴路的西屋壓水式反應器，於 1968 年開始商業運轉，該電廠的額定功率為 160 MWe。2006 年 4 月電廠永久停機，在西班牙的核電廠永久停機後，電廠執照被轉交給 ENRESA 負責除役，此執照轉讓發生在 2010 年 2 月。但是，一些除役過渡

工作，其中包括 2006/2007 一個完整的系統化學除污，是在 ENRESA 負責除役的這一日期之前，根據合同進行的實用運轉程序⁹。



圖 3.13 Zorita 核電廠，於 2006 年 4 月永久停機

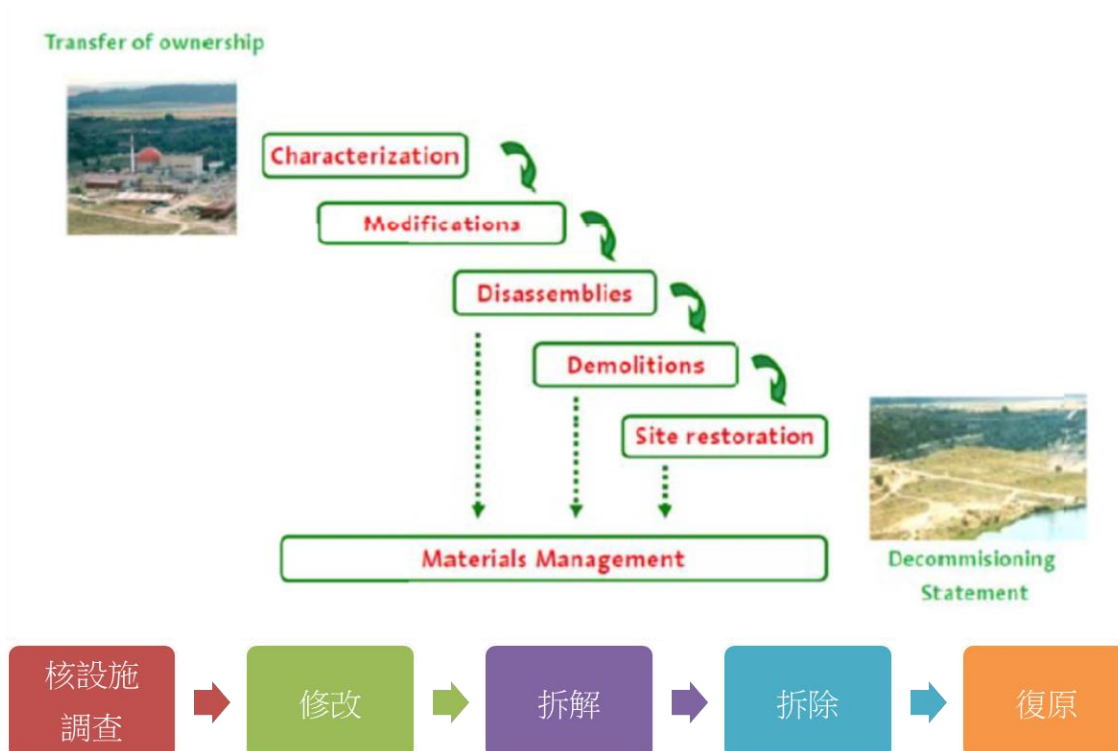


圖 3.14 Zorita 核電廠除役主要五個步驟³

Zorita 核電廠除役主要五個步驟為調查、修改、拆解、拆除到復原等階段³：

(1) 階段 0—燃料移除及前期工作

- (A) 停機後的活動
- (B) 一次側系統除污
- (C) 初期輻射特性調查更新
- (D) 更新盤點
- (E) 關閉並隔離不需要的系統和組件
- (F) 興建用過核子燃料乾式貯存場
- (G) 用過核子燃料移除（燃料池清空）

(2) 階段 1—準備動作

- (A) 動員並設立工地辦公室
- (B) 危險物質移除
- (C) 拆解非放射性系統、區域和設備
- (D) 修改且重新配置系統和設備
- (E) 拆解和整建汽機廠房設備
- (F) 測試並啟動新系統和設施

(3) 階段 2—拆解主要放射性組件

- (A) 放射性設備與系統之除污及拆解
- (B) 反應器內部組件拆解
- (C) 大型組件拆解，核能蒸氣供應系統移除
- (D) 設備和系統的解除管制調查
- (E) 放射性廢棄物處理、貯存和處置
- (F) 一般廢棄物管理

(4) 階段 3—其他系統和設備移除、清理和拆除

- (A) 其他系統和設備移除
- (B) 放射性結構除污
- (C) 後期輻射特性調查
- (D) 結構和建築物的解除管制調查
- (E) 結構和建築物的拆解和移除

(5) 階段 4—環境復原

- (A) 最終清理
- (B) 執照終止目的之最終輻射特性調查 FSS
- (C) 廠址回填
- (D) 廠址復原
- (E) 廠址綠化
- (F) 結案報告
- (G) 執照終止獲得主管機關許可
- (H) 歸還所有權

展開實質除役工作前，有數項重要的準備工作，其中將用過核子燃料自燃料池移出至暫存設施為最主要且最關鍵的準備工作³。

Zorita 核電廠用過核子燃料的處理工作有三個重要關鍵點，分別是：

- (1) 2006 年電廠業主 Unión Fenosa Generación 公司獲得西班牙工業、觀光及貿易部 (Ministry of Industry, Tourism and Trade) 核准興建用過核子燃料乾式貯存設施。
- (2) ENRESA 公司的乾貯規劃獲得西班牙核子安全委員會 (Nuclear Safety Council, NSC) 核可後，開始建造乾貯護箱及擴建用過核子燃料的乾式貯存設施。
- (3) 2009 年，用過核子燃料成功移入乾式貯存設施。

之後，Zorita 核電廠便進入拆除及廢棄物移除階段。

重大除役活動（即拆除受輻射污染的系統）開始於 2011 年第四季；因此，José Cabrera 過渡時期的時間大約是 5.5 年。這一時期已知的除役過渡工作總結如下²：

- (1) 進行完整的系統化學除污。
- (2) 準備許可文件和環境影響聲明。
- (3) 規劃主要的除役活動。
- (4) 電廠特性工作支持除役。
- (5) 建立一個 ISFSI 並將用過燃料轉移給 ISFSI，用過燃料轉移到 ISFSI 在 2009 年完成。
- (6) 2010 年，電廠開展了在電廠建立冷和暗條件的活動，包括：電廠系統的排水和斷電、處理有害物質以及減少火災負荷。更詳細地說，包括：修改電廠電氣系統，修改一些機械、通風和防火系統。
- (7) 汽機大樓被改造成放射性物質調節和貯存設施，該改建後的建築物更名為輔助除役廠房。進行到轉換汽機大樓建築物的所需工作總結如下：
 - 所有的渦輪汽機組件和系統都被移除。
 - 混凝土結構被修改，以創造新的牆壁
 - 安裝了新的通風和過濾系統（符合 ISO 的設計標準 17873：2004）
 - 安裝了新的防火系統（符合 NRC RG 1.191 的設計標準）
 - 電氣系統被重新連接
 - 安裝了新設備，以方便切割、除污、調整和處理臨時存儲活動。
- (8) 傳統電廠區域（即非輻射區域）的一些建築物被拆除，這包括：拆解冷卻塔和緊急柴油發電機組變壓器。

3.5.1.1 全系統化學除污

JoséCabrera 在過渡階段進行的一項重大活動是全面開展 RCS 和支持系統的系統化學除污工作。化學除污申請於 2006 年和 2007 年進行，除污申請在 EPRI 1019230 中詳細描述。關於除污的關鍵應用程序提供如下²：

- (1) 除污工程於 2006 年 1 月開始規劃，在 2006 年 11 月除污申請日期大約 10 個月之前。
- (2) 選擇西屋 NITROX 和 EPRI DFD 除污技能過程，這兩個過程被串聯應用，這些細節可見 EPRI 報告 TR-112352、TR-106386 和 1019230。
- (3) 化學除污系統包括 RCS（包括反應器、內部和 SG）、RHRS 和 CVCS。
- (4) 主要是電廠提供設備和服務（如空氣、水和人員支持）在除污應用程序中使用，唯一由承包商提供的設備是去礦物質、化學注入罐和水盾。
- (5) DF 取值範圍從 7.8 到 50.2，預期的人員劑量節省，歸因於除役過程的除污申請約為 272 人-rem（2.7 人-西弗）。
- (6) 在化學除污過程中，在電廠系統輔助設備中只能達到比所需水平要低的 DF。據信這是由於從反應器容器和內部結構中除去高活性沉積物，以及一些高活性沉積物原本就沉積在電廠系統輔助設備中而造成的。為了獲得更高的 DF，還有兩個額外的化學除污階段要進行，EPRI 1019230 提供了關於這種經驗的更多詳細資訊。從這個經驗中得到的主要經驗學習是，電廠必須仔細考慮是否將反應器容器和內部結構包括在完整的系統化學除污中。
- (7) JoséCabrera 全系統化學除污的額外經驗學習可在 EPRI 1019230 中獲得。

3.5.1.2 拆除反應器壓力槽與內部組件

沸水式及壓水式核電廠除役時，對於反應器內部組件與壓力槽使用何種方式進行拆除與切割是非常謹慎的。例如：蒸汽分離器（Steam Separator）大部分使用鋼鋸（Hack Saw）、等離子電弧（Plasma Arc）氣化設備、帶鋸

機 (Band Saw) 等方式進行切割，至於反應器壓力槽 (RPV) 本身，則多數是使用磨料水流切割 (Abrasive Water Jet Cutting) 技術、氧氣燃料切割 (Oxy-fuel) 及帶鋸機等方式進行⁸。

關於電熱式切割 (Electric-Thermal Cutting)、機械式切割 (Mechanical Cutting) 與水力切割 (Hydraulic Cutting) 等方式各有其優缺點，對於反應器內部組件適合用機械式切割，而反應器壓力槽則是仍以前述 3 種主要的切割方式為主。一般而言，內部組件之拆除作業會因為輻射較高，國際上常用的技術是經由水下切割，然而最近的國際間趨勢對於內部組件之拆除卻開始朝向使用機械式的切割法，因為此方式可以減少因水下切割產生碎屑後降低能見度的問題⁴。

位於西班牙的 José Cabrera 核電廠於 2010 年 7 月交付西屋公司進行拆除反應器內部組件 (Reactor Vessel Internals, RVI) 的除役工程，工程包括：須對 RV 內部和運轉時產生的廢棄物拆解和分割，以及包含先期性的工程研究，先期性的工程研究意謂著要對一些必要的廠房改建、設備供應、一次和二次廢棄物的裝載進行研究。其中反應器壓力槽用了 10 個月時間將其搬到燃料池，經由水下切割處理後完成，切割所產生的廢棄物約 114 噸重，並運送到 EL CABRIL 低放射性廢棄物處置場⁹。

在進行除役計畫的第一年，該公司致力研究爾後的工程規劃與製作未來工程所需的器材設備，這些器材設備都須經過特定的測試及檢驗合格後才移往廠址，操作人員亦然。所有的方案推動都必須經過客戶，也就是電廠擁有人的同意才可續行，而該電廠最後選擇的組件切割方式係為機械切割方式。在切割活動之前，需要先切割反應器爐穴與用過核燃料池之間的牆、確保水池的完整性以及裝設新的工作橋台和清潔燃料池⁹。

可以預見的是，將來的現場工作具有相當程度的複雜性，現場的任何程序及設備工具須經測試合格後才可開始運作，而廠址也必須處理恢復至初始狀態，所有的設備也須經過除污後搬離廠址才算是告一段落⁹。

各類核子反應器壓力容器 (RPV) 的切割方式與技術皆各有其優點與缺點，其中分別有熱切割技術、機械切割技術與水切割技術。這些技術皆須考量下列因素⁸：

- (1) 切割所需花費的總時間；
- (2) 廢棄物盛裝容器的尺寸與廢棄物處理設施的系統；
- (3) 爐心燃料池的空間大小；
- (4) 輻射防護的考量，特別是考慮合理抑低 (ALARA)；
- (5) 切割後所產生的二次廢棄物產量；
- (6) 執行切割的設備與費用；
- (7) 總計畫時程的考量；
- (8) 放射性廢棄物與二次廢棄物的處理費用。

切割拆除工法、廢棄物容器及現有處置場狀況三者息息相關。處置場可允許放置的廢棄物容器數量、尺寸規格、劑量率等，決定了廢棄物容器的選用；廢棄物容器規格的選用，也決定了切割拆除工件之切割尺寸，因此，處置場狀況為第一優先的考量。拆除工法應考慮切割速度、維護頻率、粉塵污染、二次廢棄物產生及工具安裝狀況等。現有除役常用的拆除工法有金屬拆解切割 (Metal Disintegration Machining, MDM)、磨料水刀切割 (Abrasive Water Jet Cutting, AWJC)、熱切割 (Thermal Cutting, TC)、機械切割 (Mechanical Cutting, MC) 等。西屋公司在執行 Zorita 核電廠爐內組件拆除作業時，曾經規劃將磨料水刀切割也一併納入拆除工法選項。但是 ENRESA 公司基於廢棄物處理層面考量，分析磨料水刀切割方式造成二次

廢棄物生成數量遠遠超過機械切割方式的幅度，將導致廢棄物處理數量大幅增加的問題，因此，西屋公司最後仍選擇以機械切割作為拆除工法³。

3.6 瑞士核電廠除役活動過渡階段經驗與學習

2014年，瑞士主管核能機關，聯邦核能安全監督委員會(ENSI)，公布ENSI-G17導則，供作除役管制依據。其法規與法國和德國相近，永久停機後，瑞士電廠仍具備運轉執照，但不能大幅移除運轉執照的相關設備，實際的除役必須經管制單位討論協商後方可進行。在過渡階段，以下文件需送至管制單位審核：

- (1) 過渡階段將執行的工作，包括工作時程說明
- (2) 更新的安全分析報告
- (3) 燃料貯存，貯存櫃箱的採購與運送說明
- (4) 說明放射性及非放射性廢棄物管理
- (5) 除役期間人力資源安排，包括組織及行動計畫

經過管制單位審核後，電廠正常運轉執照可以終止。為進行除役，以下文件需要按順序提出申請，相關文件與德國類似：

- (1) 除役工作摘要說明，包括流程圖
- (2) 除役程序、資源、設計規劃
- (3) 更新的安全分析報告
- (4) 除役期間需要維持的必要基礎設施
- (5) 工作監督程序
- (6) 應列入計算材料的量測程序
- (7) 放射性存量管理
- (8) 詳細的輻射防護計畫
- (9) 人員組織及除役技術資格認定

法規雖未明定，除役計畫的執行內容需在永久停機後兩年內提出。除非特別說明，每一階段需 ENSI 核准之後方可執行。其內容應具有以下因素：

- (1) 不同階段的變動比較、除役開始及結束時程，包括改變選擇的原因
- (2) 除役各階段基金的需要說明，包括放射性設施安裝、解體、除污、拆除、建物破壞
- (3) 說明放射性及非放射性廢棄物管理、分離程序
- (4) 人員輻射防護，放射性物質外釋環境的措施
- (5) 保安措施
- (6) 事故分析
- (7) 人員組織、分工及權責
- (8) 品質管理計畫
- (9) 環境影響評估
- (10) 經費摘錄整理

瑞士的正常運轉電廠規定需要有除役計畫，並且每 10 年進行資料更新。故除役計畫將定期受到審核，其內容主要如下：

- (1) 除役改變的選擇與動機
- (2) 運轉措施及設施變更，以利後續進行拆除程序
- (3) 說明現有需要的安全相關系統及安裝的設施組件
- (4) 為拆除或管理廢棄物附加設備或系統的一般說明
- (5) 一般安全評估
- (6) 保安措施
- (7) 人員組織及除役技術資格認定、技術及財務資源
- (8) 人力組織因子的觀念建立
- (9) 放射性廢棄物及一般外釋材料數量，亦包含廢棄物處理觀念
- (10) 貯存櫃箱、燃料的採購與運送觀念

(11)同廠址機組的關聯性說明

(12)國際或我國的除役經驗評估報告

3.6.1 瑞士 Muhleberg 核子設施除役活動過渡階段經驗與學習

Mühleberg 核電廠為 GE BWR，額定功率為 373 MWe 的瑞士核電廠，1972 年商業運轉，2019 年電廠計畫永久停機，預計將成為瑞士第一個永久停機的商業核電廠。Mühleberg 已經開始計畫除役，並向瑞士監管機構提出除役計畫，至 2016 年初，此計畫仍進行審查中。該除役活動簡要總結如下：

(1)除役管理系統規劃人力資源管理。

(2)將安裝新的 SFP 支持設備，以確保 SFP 獨立於其他電廠系統設備。此為值得注意的功能設備：在 SFP 和通道之間額外安裝一個鎖，以確保 SFP 中的水與反應器中的水保持隔離。

(3)永久停機後，電廠將進入營運後階段，計畫該階段將持續約 1 年（即電廠計畫在永久性關機之後一年，接受第一次除役的執照）。將進行的活動總結如下：

- 反應器的燃料移出
- 全系統化學除污
- 對 SFP 的修改（如上所述）
- 建立物流和除污中心（使用汽機大樓計畫）
- 安裝所需的更換系統

(4)電廠計畫首次除役階段預估為四年左右，在這階段，所有用過燃料將被轉移出 SFP。當所有用過燃料已經轉移到 SFP，此階段計畫就結束。之後，電廠將進一步除役階段將繼續電廠系統的拆除。

除役計畫的一個顯著方面，是該電廠計畫啟動反應器壓力容器和內部組件以及生物屏蔽組件的拆除，之前已經實施上面討論 SFP 的修改，但也可在所有的用過燃料已經被轉出 SFP 之前。

第四章 核電廠除役作業及排程規劃之相關資料

研究中彙整美國、德國、國際原子能總署 IAEA 的除役相關資料，並進行除役作業及排程規劃的比對與探討。表 4.1 為西屋公司建議除役階段時程規劃架構表，表 4.2 為西屋公司建議除役時程費用規劃主要架構表，其中包括：功率運轉、移出燃料、停機、核相關拆解、一般拆除等階段的排程規劃分解架構，該表列至第四層的除役作業，實際的除役可能有牽涉第五層甚至更細的規劃，該有關資料可作為主管機關審核業者所提出的排程規劃依據及參考。在正常規劃情況下隨時間之費用結構變化，則可參考第二章的圖 2.7。

表 4.1 西屋公司建議除役階段時程規劃架構表

1. Power operation 功率運轉	2. Defueling 移出燃料	4. Nuclear dismantling and demolition 核相關拆解和卸除	5. Conventional demolition 一般拆除
	↑		Plant Decommissioning finishe 電廠除役完成
3. Plant shutdown 停機		Unit cleared ↑ 機組清除	↑
			Site restoration 廠址復原
	Fuel removal 燃料移出	Waste handling and storage 廢棄物之處理與貯存	
Decommissioning preparation activities 除役準備行動		Dismantling and demolition activities 分解和拆除行動	

表 4.2 西屋公司建議時程費用規劃架構表

WBS 編號	工作/作業項目
1	功率運轉
1.1	電廠運轉費用
1.1.1	人力資源費用
1.1.1.1	管理及行政管理
1.1.1.2	資訊及民眾關係
1.1.1.3	輻射與環境保護
1.1.1.4	化學及廢料
1.1.1.5	防火及保安
1.1.1.6	建築物及設備維護
1.1.1.7	電廠系統運轉
1.1.2	運轉費用
1.1.2.1	輻防及環保
1.1.2.2	化學及廢料
1.1.2.3	防火及保安
1.1.2.4	維護
1.1.2.5	能源及用水
1.1.3	組織費用
1.1.3.1	除役相關之行政及資訊管理費用
1.2	計畫費用
1.2.1	採購計畫管理、行政及技術支援
1.2.1.1	計畫管理
1.2.1.2	規劃及管制
1.2.1.3	品制管理與管控
1.2.1.4	技術支援
1.2.1.5	文件管理
1.2.1.6	一般及供應管制
1.2.2	除役預備活動
1.2.2.1	先期環境影響評估(EIA)工作
1.2.2.2	除役計畫工作
1.2.2.3	資訊蒐集

表 4.2 西屋公司建議時程費用規劃架構表(續)

2	移出燃料
2.1	電廠運轉費用
2.1.1	人力資源費用
2.1.1.1	管理及行政
2.1.1.2	資訊及民眾關係
2.1.1.3	輻射與環境保護
2.1.1.4	化學及廢料
2.1.1.5	防火及保安
2.1.1.6	建築物及設備維護
2.1.1.7	電廠系統運轉
2.1.2	運轉費用
2.1.2.1	輻防及環保
2.1.2.2	化學及廢料
2.1.2.3	防火及保安
2.1.2.4	維護
2.1.2.5	能源及用水
2.1.3	組織費用
2.1.3.1	行政及除役資訊管理
2.2	計畫方案費用
2.2.1	採購計畫管理、行政及技術支援
2.2.1.1	計畫管理
2.2.1.2	規劃及管制
2.2.1.3	品制管理與管控
2.2.1.4	技術支援
2.2.1.5	文件管理
2.2.1.6	一般及供應管制
2.2.2	除役預備活動
2.2.2.1	先期環境影響評估(EIA)工作
2.2.2.2	除役計畫工作

表 4.2 西屋公司建議時程費用規劃架構表(續)

3	停機運轉
3.1	電廠運轉費用
3.1.1	人力資源費用
3.1.1.1	管理及行政
3.1.1.2	資訊及民眾關係
3.1.1.3	輻射與環境保護
3.1.1.4	化學及廢料
3.1.1.5	防火及保安
3.1.1.6	建築物及設備維護
3.1.1.7	電廠系統運轉
3.1.2	運轉費用
3.1.2.1	輻防及環保
3.1.2.2	化學及廢料
3.1.2.3	防火及保安
3.1.2.4	維護
3.1.2.5	能源及用水
3.1.3	組織費用
3.1.3.1	行政及除役資訊管理
3.2	計畫方案費用
3.2.1	採購計畫管理、行政及技術支援
3.2.1.1	計畫管理
3.2.1.2	規劃及管制
3.2.1.3	品制管理與管控
3.2.1.4	技術支援
3.2.1.5	文件管理
3.2.1.6	一般及供應管制
3.2.2	除役預備活動
3.2.2.1	環境影響評估(EIA)工作
3.2.2.2	輻射特性調查、容器存量調查
3.2.2.3	物件除污、保存
3.2.2.4	一次水系統除污
3.2.2.5	先期除役系統調整
3.2.2.6	一般準備活動

表 4.2 西屋公司建議時程費用規劃架構表(續)

4	核相關拆解和卸除費用
4.1	電廠運轉費用
4.1.1	人力資源費用
4.1.1.1.	管理及行政
4.1.1.2	資訊及民眾關係
4.1.1.3	輻射與環境保護
4.1.1.4	化學及廢料
4.1.1.5	防火及保安
4.1.1.6	建築物及設備維護
4.1.1.7	電廠系統運轉
4.1.2	運轉費用
4.1.2.1.1	輻防及環保 1 階段
4.1.2.1.2	輻防及環保 2 階段
4.1.2.2.1	化學及廢料 1 階段
4.1.2.2.2	化學及廢料 2 階段
4.1.2.3.1	防火及保安 1 階段
4.1.2.3.2	防火及保安 2 階段
4.1.2.4.1	維護 1 階段
4.1.2.4.2	維護 2 階段
4.1.2.5.1	能源及用水 1 階段
4.1.2.5.2	能源及用水 2 階段
4.1.3	固定費用
4.1.3.1	其他經費、檢查費用
4.1.3.2	稅
4.1.3.3	保險
4.1.4	組織費用
4.1.4.1	行政及除役資訊管理費用
4.2	採購計畫管理、行政及技術支援
4.2.1	計畫管理
4.2.2	規劃及管制
4.2.3	品制管理與管控
4.2.4	技術支援
4.2.5	文件管理

4.2.6	一般及供應管制
4.3	拆解及卸除活動費用
4.3.1	反應器壓力容器及內部組件
4.3.1.1	反應器內部組件切割
4.3.1.2	反應器壓力容器切割
4.3.1.3	反應器單一物件移除及其他費用
4.3.2	反應器圍阻體
4.3.2.1	空間準備
4.3.2.2	處理管線及設備
4.3.2.3	結構及各類金屬
4.3.2.4	氣體處理系統
4.3.2.5	電力設備及線路
4.3.3	反應器廠房
4.3.3.1	空間準備
4.3.3.2	處理管線及設備
4.3.3.3	結構及各類金屬
4.3.3.4	氣體處理系統
4.3.3.5	電力設備及線路
4.3.4	汽機廠房
4.3.4.1	空間準備
4.3.4.2	處理管線及設備
4.3.4.3	結構及各類金屬
4.3.4.4	氣體處理系統
4.3.4.5	電力設備及線路
4.3.5	活化污染水泥的清除
4.3.5.1	生物屏蔽體
4.3.5.2	其他受活化污染之水泥
4.3.5.3	輻射防護及測量
4.3.6	控制區建築物的清潔及清除
4.3.6.1	建築物表面除污
4.3.6.2	建築物清理後偵檢
4.3.7	非控制區建築物的拆除
4.3.7.1	空間準備
4.3.7.2	處理管線及設備
4.3.7.3	結構及各類金屬

4.3.7.4	氣體處理系統
4.3.7.5	電力設備及線路
4.3.8	雜項未分配費用
4.3.8.1	處理除役拆除廠商計畫管理及行政管制
4.3.8.2	處理除役拆除廠商設備及工具
4.3.8.3	處役系統修改
4.4	廢料處置及貯存倉庫費用
4.4.1	廢料管理系統
4.4.1.1	廢料系統及建築物改善
4.4.1.2	廢料設施營運
4.4.1.3	廢料設施除污及拆除
4.4.1.4	廠外處理
4.4.1.5	再循環
4.4.2	運送及貯存容器
4.4.2.1	SFL(長期貯存)容器
4.4.2.2	SFR(再處理)容器
4.4.2.3	廠外容器
4.4.3	運送及貯存倉庫
4.4.3.1	運送至 SFL(長期貯存)
4.4.3.2	運送至 SFR(再處理)
4.4.3.3	運送至掩埋場
4.4.4	貯存倉庫及掩埋
4.4.4.1	掩埋費用
4.4.4.2	SFL 貯存費用(長期貯存)
4.4.4.3	SFR 貯存費用(再處理)
4.4.5	非放射性有危害性廢棄物處置

表 4.2 西屋公司建議時程費用規劃架構表(續)

5	一般拆除費用
5.1	電廠運轉費用
5.1.1	人力資源費用
5.1.1.1	管理及行政
5.1.1.2	保安及環保
5.1.1.3	維護
5.1.2	運轉費用
5.1.2.1	保安及環保
5.1.2.2	維護
5.1.2.3	能源及用水
5.1.3	固定費用
5.1.3.1	其他經費、檢查費用
5.1.3.2	稅
5.1.3.3	保險
5.1.4	組織費用
5.1.4.1	行政及除役資訊管理費用
5.2	採購計畫管理、行政及技術支援
5.2.1	計畫管理
5.2.2	規劃及管制
5.2.3	品制管理與管控
5.2.4	技術支援
5.2.5	文件管理
5.2.6	一般及供應管制
5.3	拆解及卸除活動費用
5.3.1	反應器圍阻體
5.3.2	反應器廠房
5.3.3	汽機廠房
5.3.4	其他建築物
5.3.5	建築物擊碎及隨機檢查活動
5.4	廢料處置及貯存
5.4.1	運送及貯存倉庫
5.4.1.1	運送
5.4.1.2	掩埋費用

5.4.2	非放射性有危害性廢棄物處置
5.5	廠址復原
5.5.1	獨立偵檢
5.5.2	土地復原

4.1 核一廠除役作業及排程規劃研究

「核一廠除役作業及排程(WBS)規劃研究」報告，係依據核一廠除役計畫需求，針對核一廠除役拆除策略規劃除役各階段之目標、除役作業、WBS與 Scheduling 等項目，佐以甘特 (Gantt) 圖示各階段之規劃程序，以及預計可完成時間。其預計完成時間符合法規規定，也滿足除役計畫之可執行性及可達成性，並且供廢棄物估算、人員輻射劑量與除役費用估算的參考。以下為根據「核一廠除役作業及排程(WBS)規劃研究」報告中得到之核一廠目前的初步規劃、執行狀況及困難因子之整理，並初步歸納於表 4.3 中。

核一廠除役作業排程規劃方法已考慮以下幾點：

1. 工作的範圍；
2. 除役策略；
3. 資訊的收集；
4. 時間估算的安排；
5. 排程的規劃。

除役作業排程方法則主要含括：

1. 工作範圍的確認；
2. 系統、組件、結構的調查；
3. 放射性特性描述與調查；
4. 確認適合的拆解技術；
5. 確認適合的廢棄物管理技術；
6. 建立工作分解架構；
7. 準備排程評估。

圖 4.1 為除役作業之工作人時規劃流程圖，由該流程圖可知在規劃除役工作人時，須就特性調查、工作程序、系統零件彙整資訊、持續時間、工作時數估算及困難因子等項目，進行整體考量後，方進一步評估除役作業

之工作人時。以下為這些項目的注意要點：

➤ **特性調查**

設備廠房之特性調查首先開始的項目，其中設備廠房包含機械設備、管路、反應器壓力槽及內部組件、廠房、放射性廢棄物等，對上述之設備廠房進行數量、重量、長度與體積等參數之調查。

➤ **工作程序**

每個除役設備的移除不是僅一種指定工作程序就能完成，大部分是包含多個指定工作程序的結合，此取決於除役設備的特性。每個工作程序是以工作團隊的方式執行，其工作團隊的工作人員類別，西屋公司定義是由工程師、領班、保健物理、技術和勞務等五種成員所組成，再依工作性質訂定成員比例；工時部分則依同樣原則，先將除役工作項目訂出不同的工作類別，再依工程資料庫和經驗訂出所需的工時，然後再經由公式轉換得到每項工作的人力工時。估算準確與否，與工程資料庫準確性有相當大的關係。

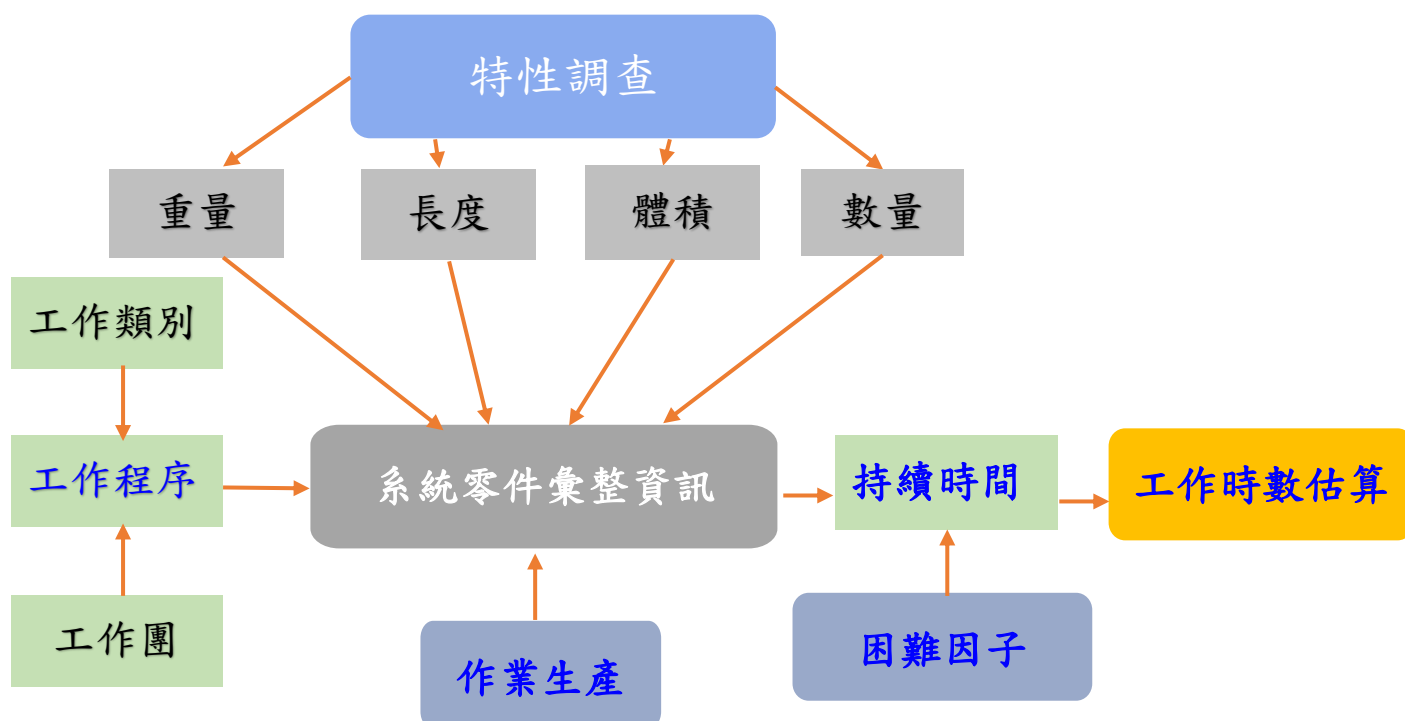


圖 4.1 除役作業之工作人時規劃流程圖³

➤ 系統零件彙整資訊

依對電廠各系統之特性調查與工作程序分配，將各系統零件做分類，再彙整成一張系統零件彙整結果，而後根據前述之特性調查結果與工作程序分配，結合西屋公司在各工作團隊之除役作業生產率，則可大致推估出團隊之工作時間。

➤ 持續時間與工作時數估算

每項系統零件會有相對應之特性調查結果，而且每項系統零件的拆除會對應到不同的工作程序與作業生產率，再將調查結果填入為西屋公司所提供評估計算表計算後，可以得到團隊的工作時間，而後將團隊的工作時間依工作團隊分配比例，即可得到各類工作人員的工作時數。

➤ 房間專用困難因子

在進行除役工作時，會因為空間因素造成工作進行的困難度增加，導致增加施工時間，此稱為房間專用困難因子，此因子與以下因素有關：

1. 可達性 (Accessibility) - 因為狹窄的隔間或高度等限制，故應考慮可達性。
2. 距離 (Distances) - 結構與材料、設備間之不可避免地運送距離。
3. 工作條件 (Working conditions) - 拆解環境的工作條件，如溫度、能見度及防護等級 (輻射、噪音、一般安全要求，如重型升降機) 等，或是需要進行遙控處理。
4. 等待週期 (Waiting periods) - 4 主要涉及拆解過程中，設備、工具與防護的改變。

表 4.3 係針對核一廠不同的廠房所評估之困難因子，數值越大代表越困難，也表示除役所需時間越長，工時及費用將增加。

表 4.3 針對核一廠不同的廠房所評估之困難因子

困難種類	反應器圍阻體 R1	反應器圍阻體 R2	聯合結構廠房 C1	聯合結構廠房 C2	汽機廠房 T1	汽機廠房 T2
可達性	2.31	2.31	0.44	0.44	0.55	0.55
距離	0.35	0.35	0.31	0.31	0.42	0.42
工作情況	0.96	0.96	0.69	0.69	0.69	0.69
等待週期	0.96	0.96	0.69	0.69	0.69	0.69
總計	4.58	4.58	2.13	2.13	2.35	2.35

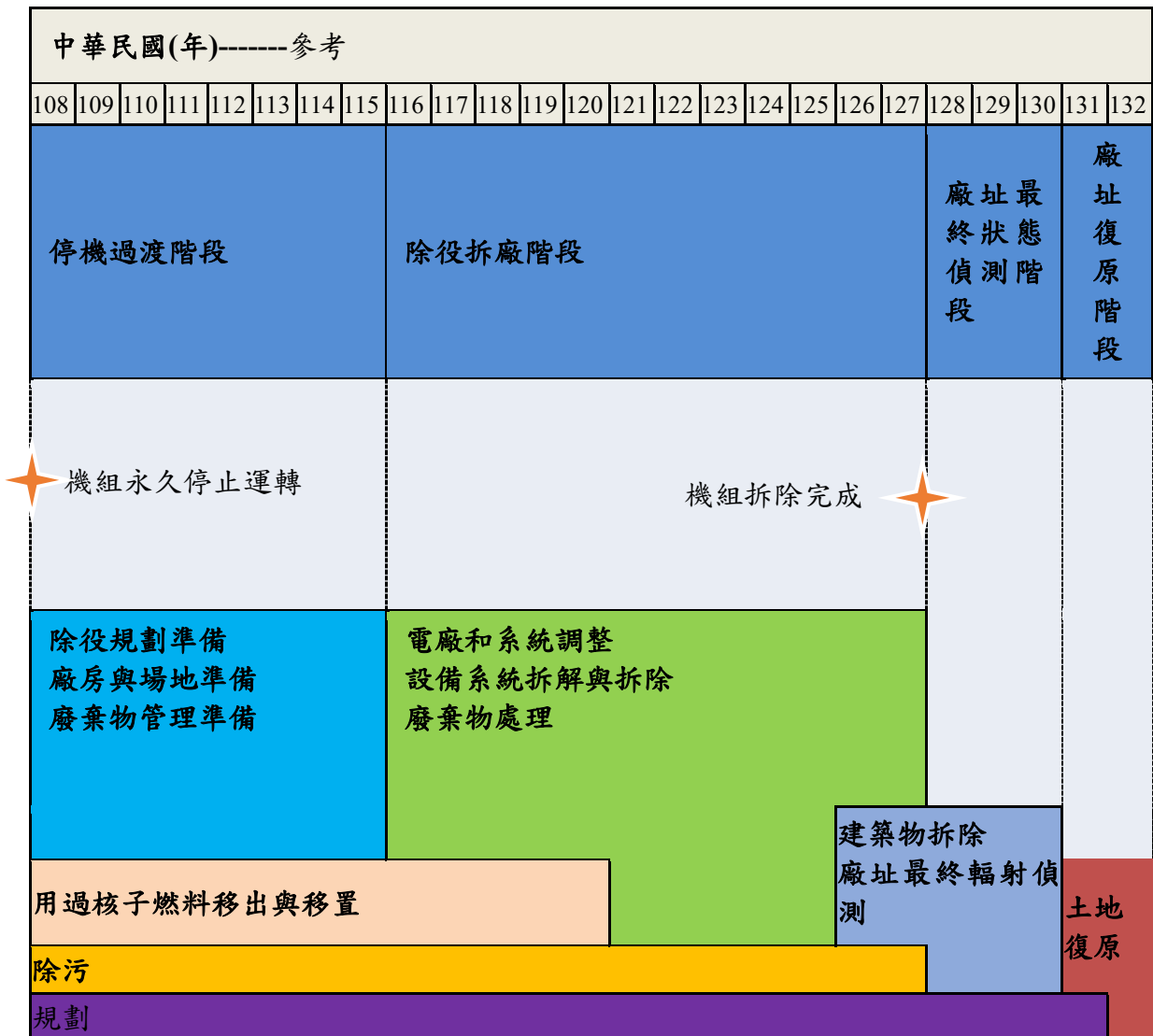
表 4.4 為核一廠現行除役計畫需求規劃甘特圖示各階段之程序，目前規劃除役為以下四階段：

1. 停機過渡階段-108-115 年，為期 8 年；
2. 除役拆廠階段-116-127 年，為期 12 年；
3. 廠址最終狀態偵測階段-128-130 年，為期 3 年；
4. 廠址復原階段-131-132 年，為期 2 年。

依照除役計畫，預計於 25 年內完成除役工作。

比較表 4.4 依據核一廠除役計畫需求規劃甘特圖示各階段之程序和表 4.1 西屋公司建議除役階段時程規劃架構表其間差異，則發現核一廠目前所規劃的部份，在正常情況下費用結構隨時間之變化上，風險比例有無法隨時間進展而變小的現象存在。用過燃料未及早移出爐心，安全風險最小化及活度曝露最小化的目標有可能無法達成；但若能加以克服，則可增進除役作業的實質效益。

表 4.4 核一廠除役計畫需求規劃甘特圖示各階段之程序



4.2 除役參考廠之規劃

NRC 有關電廠除役之分析報告中，NUREG/CR-6174 是以華盛頓州 WNP-2 功率 1,155 MWe(3,320 MWt)之 BWR 電廠為參考廠所進行的除役活動規劃報告，其中有關於除役參考廠除役活動時程規劃、各除役階段人力需求、契約廠商人力需求、人力工時及費用、除役之費用及輻射評估等方面的分析結果¹⁰。圖 4.2 為立即拆除的活動時程規劃，規劃分為 4 階段共費時 8.8 年進行除役工作，第 1 階段為除役規劃及準備(2.5 年)，第 2 階段為反應器去活化至安全貯存(1.2 年)，第 3 階段為安全貯存及用過燃料管理

(3.4 年)，第 4 階段為拆除作業(1.7 年)。

表 4.5 除役參考廠立即除役之費用及輻射評估摘要表，為 1993 年的費用評估，單位為美元，表中列出除役工作的主要花費有：(1)除役、(2)移除、(3)包裝、(4)運送、(5)處置、(6)未分配等部分，另外還包含 25%的臨時費用，總計費用約需 1.65 億美元(約 43.7 億台幣，以當時匯率 1 美元比新台幣 26.5 計算)。表 4.6 為其立即除役之人力費用評估，總共約花費 617.3 人年，總人力費用 3,500 萬美元，其中，用過核子燃料池營運部分的人力與費用占比均約為 50%為最大部分。表 4.7 為除役執行契約廠商人力費用評估，總共花費 169.8 人年，總人力費用 1,720 萬美元。

圖 4.3 為除役參考廠之除役第 1 階段人力需求，圖為 4.4 之除役第 2 階段人力需求，圖 4.5 為除役第 3 階段人力需求，圖 4.6 為除役參考廠之除役第 4 階段公司人力需求，圖 4.7 為除役第四階段執行契約廠商人力需求。總結各階段所使用人力如下：

階段 人力	1	2	3	4
公司人力	23	184	54	54
契約廠商人力	19			76

表 4.8 為第 2 階段移除燃料之工作時程及人時，表 4.9 為第 4 階段拆除反應器廠房之工作時程及人時，表 4.10 為第 4 階段拆除汽機廠房之工作時程及人時，表 4.11 為第 4 階段拆除廢料處理場及控制廠房之工作時程及人時。在此二階段的排程規劃，牽涉實質燃料移除作業及拆除作業，十分重要，此參考廠的系統式及摘要性的規劃，可作管制審查的重要參考。

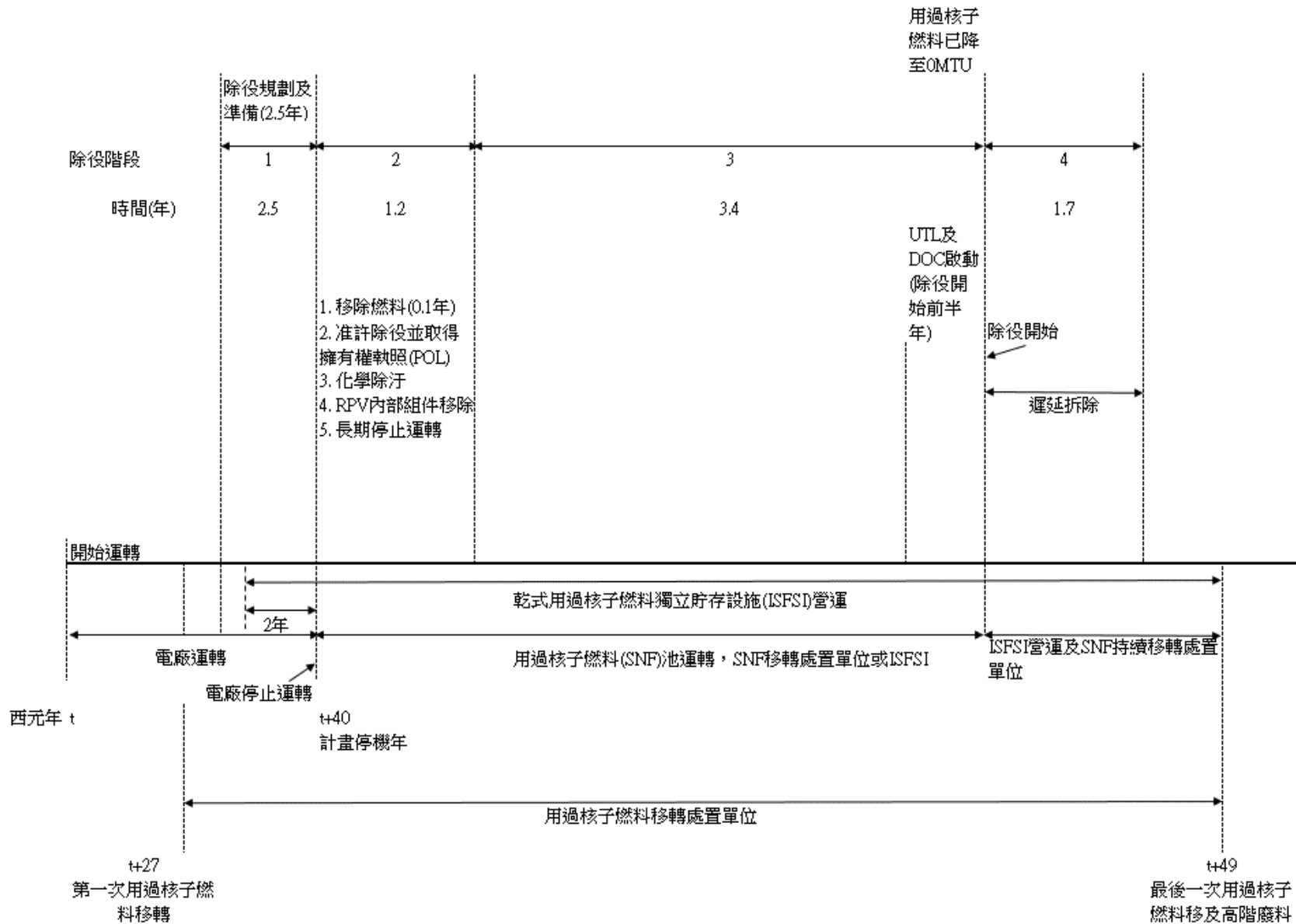


圖 4.2 除役參考廠之立即拆除的活動時程規劃

表 4.5 除役參考廠立即除役之費用及輻射評估摘要(費用評估年 1993，單位：美元)

階段	期間(年)	DECON ^(a)	Remove ^(b)	Package ^(c)	Transport ^(d)	Disposal ^(e)	Undistributed ^(f)	Total	輻射劑量評估 (person-Sv)
1	2.5	—	—	—	—	—	9,459,241	9,459,241	
2	1.2	13,256,628	781,421	138,020	789,554	3,428,898	22,260,381	40,654,902	3
3	3.4	—	—	—	—	—	4,594,011	4,594,011	0
4	1.7	782,266	13,496,955	3,507,042	322,172	33,176,085	25,684,770	76,869,290	5
小計	8.8	14,038,894	14,278,376	3,645,063	1,111,726	36,604,983	61,998,403	131,677,444	8
百分比(%)		10.7	10.8	2.8	0.8	27.8	47.1	100.0	
							25% 臨時費	32,919,361	
							總計	164,596,805	

(a)包括系統化學除污、表面清洗、廢水處理的直接除役人力及材料

(b)包括系統及元件移除的直接除役人力及材料

(c)包括廢料處理的直接成本

(d)包括運送櫃及運輸成本

(e)包括於低放廢料處理廠處理廢料的所有成本

(f)包括不同階段的所有成本，如除役計畫廠商動員、遣散，公司及廠商管理工資，核能保險、管制成本、電廠使用、稅、洗衣房服務、環境監測

表 4.6 除役參考廠立即除役之人力費用評估(費用評估年 1993，單位：美元)

項次	職務	年薪資 ^(a)	除役階段人年及人力成本													
			階段 1(2.5yr)		階段 2(0.62yr)		階段 3(3.4yr)		階段 4(1.7yr)		用過核子燃料池營運 ^(b) (3.9yr)		ISFSI 營運 (P4)(1.7yr)		ISFSI 營運 (P5)(3.3yr)	
			人年	人力成本	人年	人力成本	人年	人力成本	人年	人力成本	人年	人力成本	人年	人力成本	人年	人力成本
1	廠長	129,518	0.125	16,190	0.62	80,301	0.63	81,596	1.7	220,181	5.67	734,367	—	—	—	—
2	副廠長	104,824	0.125	13,103	0.62	64,991	0.63	66,039	—	—	5.67	594,352	1.7	178,201	3.3	345,919
3	秘書	29,110	0.125	3,639	3.69	107,416	0.63	18,339	1.7	49,487	5.67	165,054	—	—	—	—
4	行政人員	27,150	—	—	9.85	267,428	3.15	85,523	6.8	184,620	28.35	769,703	1.7	46,155	3.3	89,595
5	化學監督人	74,735	0.25	18,684	0.62	46,336	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	化學技術員	43,012	—	—	2.46	105,810	0.63	27,098	0.4	17,205	5.67	243,878	—	—	—	—
7	品保經理	86,819	0.625	54,262	0.62	53,828	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	品保工程師	49,288	—	—	2.46	121,248	—	—	1.7	83,790	—	—	—	—	—	—
9	品保技術員	43,012	—	—	4.92	211,619	0.63	27,098	—	—	5.67	243,878	—	—	—	—
10	保健物理經理	79,449	0.125	9,931	0.62	49,258	0.63	50,053	—	—	5.67	450,476	—	—	—	—
11	保健物理合理抑低規劃員	73,045	—	—	0.62	45,288	—	—	1.7	124,177	—	—	—	—	—	—
12	高級保健物理技術員	73,045	—	—	2.46	179,691	1.89	138,055	—	—	17.01	1,242,495	1.7	124,177	3.3	241,049
13	保健物理技術員	45,028	—	—	9.85	443,526	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14	電廠運轉經理	97,440	0.125	12,180	0.62	60,413	0.63	61,387	—	—	5.67	552,485	—	—	—	—
15	計畫/時程工程師	74,735	—	—	0.62	46,336	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16	運轉監督人	86,819	—	—	2.46	213,575	0.63	54,696	3	260,457	5.67	492,264	1.7	147,592	3.3	286,503
17	控制運轉員	72,988	—	—	9.85	718,932	2.52	183,930	4.5	328,446	22.68	1,655,368	1.7	124,080	3.3	246,860
18	儀器運轉員	51,787	—	—	9.85	510,102	3.78	195,755	4.5	233,042	34.02	1,761,794	1.7	88,038	3.3	70,897
19	維護經理	95,410	0.125	11,926	0.62	59,154	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20	電廠工程師	72,619	5	363,095	2.46	178,643	0.63	45,750	6	435,714	5.67	411,750	—	—	—	—

21	維護監督人	87,231	—	—	2.46	214,588	0.63	54,956	1.5	130,847	5.67	494,600	—	—	—	—
22	工匠	60,790	—	—	9.85	598,782	2.52	153,191	5.3	322,187	22.68	1,378,717	1.7	103,343	6.6	644,374
23	行政管制經理	86,819	—	—	0.62	53,828	0.63	54,696	—	—	5.67	492,264	—	—	—	—
24	合約採購專家	69,026	0.625	43,141	1.85	127,698	0.63	43,486	1.7	117,344	5.67	391,377	—	—	—	—
25	執照工程師	72,264	0.125	9,033	1.85	133,688	0.63	45,526	1.7	122,849	5.67	409,737	—	—	0.5	382,999
26	會計師	69,026	—	—	1.23	84,902	0.63	43,486	1.7	117,344	5.67	391,377	—	—	—	—
27	工安專家	67,592	—	—	1.85	125,045	0.63	42,583	1.5	101,388	5.67	383,247	—	—	—	—
28	放射性物質運送專家	79,449	—	—	1.85	146,981	0.63	50,053	1.5	119,174	5.67	450,476	—	—	3.3	521,080
29	訓練工程師	74,735	0.25	18,684	0.62	46,336	—	—	1.5	112,103	—	—	—	—	—	—
30	核能紀錄專家	61,429	0.25	15,357	0.62	38,086	0.63	38,700	1.7	104,429	5.67	348,302	0.5	30,715	3.3	202,716
31	保管人	32,248	—	—	1.23	39,665	1.26	40,632	3.4	109,643	11.34	365,692	—	—	3.3	106,418
32	保安經理	86,819	0.125	10,852	0.62	53,828	0.63	54,696	0.2	17,364 ^(c)	5.67	492,264	1.5	130,229 ^(c)	3.3	286,503
33	保安輪值監督	38,439	—	—	2.46	94,560	1.89	72,650	0.6	23,063 ^(c)	17.01	653,847	4.5	172,976 ^(c)	9.9	380,546
34	保安巡邏	34,875	—	—	19.69	686,689	5.04	175,770	1.6	55,800 ^(c)	45.36	1,581,930	12	41,850 ^(c)	26.4	920,700
35	公司管理人年級人力成本總計		8	600,077	112.7	6,008,571	33.39	1,905,744	55.9	3,390,654	300.51	17,151,694	30.4	1,187,356	76.4	4,726,159
36	百分比分析(%)		1.3	1.7	18.3	17.2	5.4	5.4	9.1	9.7	48.7	49.0	4.9	3.4	12.4	13.5

(a) 薪資包含 42% 公司管理費用

(b) 成本分配： 10% 安全貯存， 90% 核子燃料池貯存 總人年 617.29

(c) 成本分配： 12% 拆除， 88% 核子燃料池貯存 總人力費用 34,970,255

表 4.7 除役執行契約廠商人力費用評估(費用評估年 1993，單位：美元)

項次	職務	年薪資 ^(a)	除役階段人年及人力成本							
			階段 1(2.5yr)		階段 2(0.62yr)		階段 3 ^(b) (6.3yr)		階段 4(1.7yr)	
			人年	人力成本	人年	人力成本	人年	人力成本	人年	人力成本
1	計畫經理	220,272	2.5	550,680	—	—	0.5	110,136	1.7	374,462
2	計畫副經理	178,275	2.5	445,688	—	—	0.5	89,138	1.7	303,068
3	秘書/行政人員	47,829	12.5	597,863	—	—	2.5	119,573	13.6	650,474
4	計畫/時程工程師	127,101	—	—	—	—	—	—	5.1	648,215
5	品保經理	147,653	—	—	—	—	—	—	1.7	251,010
6	品保工程師	83,825	2.5	209,563	—	—	0.5	41,913	1.7	142,503
7	品保技術員	76,580	—	—	—	—	—	—	6.0	459,480
8	保健物理經理	148,643	—	—	—	—	—	—	1.7	252,693
9	保健物理合理抑低規劃員	124,228	—	—	—	—	—	—	1.7	211,188
10	高級保健物理技術員	124,228	—	—	—	—	—	—	5.1	633,563
11	保健物理技術員	76,580	—	—	—	—	—	—	21.0	1,608,180
12	除役及拆除執行監督人	147,653	—	—	—	—	—	—	4.5	664,439
13	工頭	114,060	—	—	—	—	—	—	1.5	171,090
14	電廠運轉員	88,075	—	—	—	—	—	—	3.0	264,225
15	工匠	103,386	—	—	—	—	—	—	3.0	310,158
16	工具廠家	76,725	—	—	—	—	—	—	3.0	230,175
17	防護衣廠家	76,725	—	—	—	—	—	—	3.0	230,175
18	電廠安全專家	114,954	—	—	—	—	—	—	4.5	517,293
19	工程監督	147,653	—	—	—	—	—	—	1.5	221,480
20	工程師	122,899	5.0	614,495	—	—	1.0	122,899	12.0	1,474,788
21	製圖專家	67,813	7.5	508,598	—	—	1.5	101,720	4.5	305,159

22	安全顧問	242,200	—	—	—	—	—	—	0.5	121,100
23	律師	150,744	5.0	753,720	—	—	1.0	150,744	0.8	120,595
24	合約/會計監督人	150,744	—	—	—	—	—	—	1.7	256,265
25	會計師	117,369	5.0	586,845	—	—	1.0	117,369	1.7	199,527
26	採購專家	106,743	2.5	266,858	—	—	0.5	53,372	1.5	160,115
27	合約專家	117,369	2.5	293,423	—	—	0.5	58,685	1.7	199,527
28	執照工程師	122,899	—	—	—	—	—	—	1.7	208,928
29	放射性物質運送專家	135,119	—	—	—	—	—	—	1.5	202,679
30	公司管理人年級人力成本總計		47.5	4,827,730	—	—	9.5	965,546	112.6	11,392,552
31	百分比分析(%)		28.0	28.1	—	—	5.6	5.6	66.4	66.3

(a) 薪資包含 110% 管理費用，15% 利潤費用

總人年 169.6

(b) 根據來自階段 1 人力半年的工作成果

總人力費用 17,185,828

第 1 階段

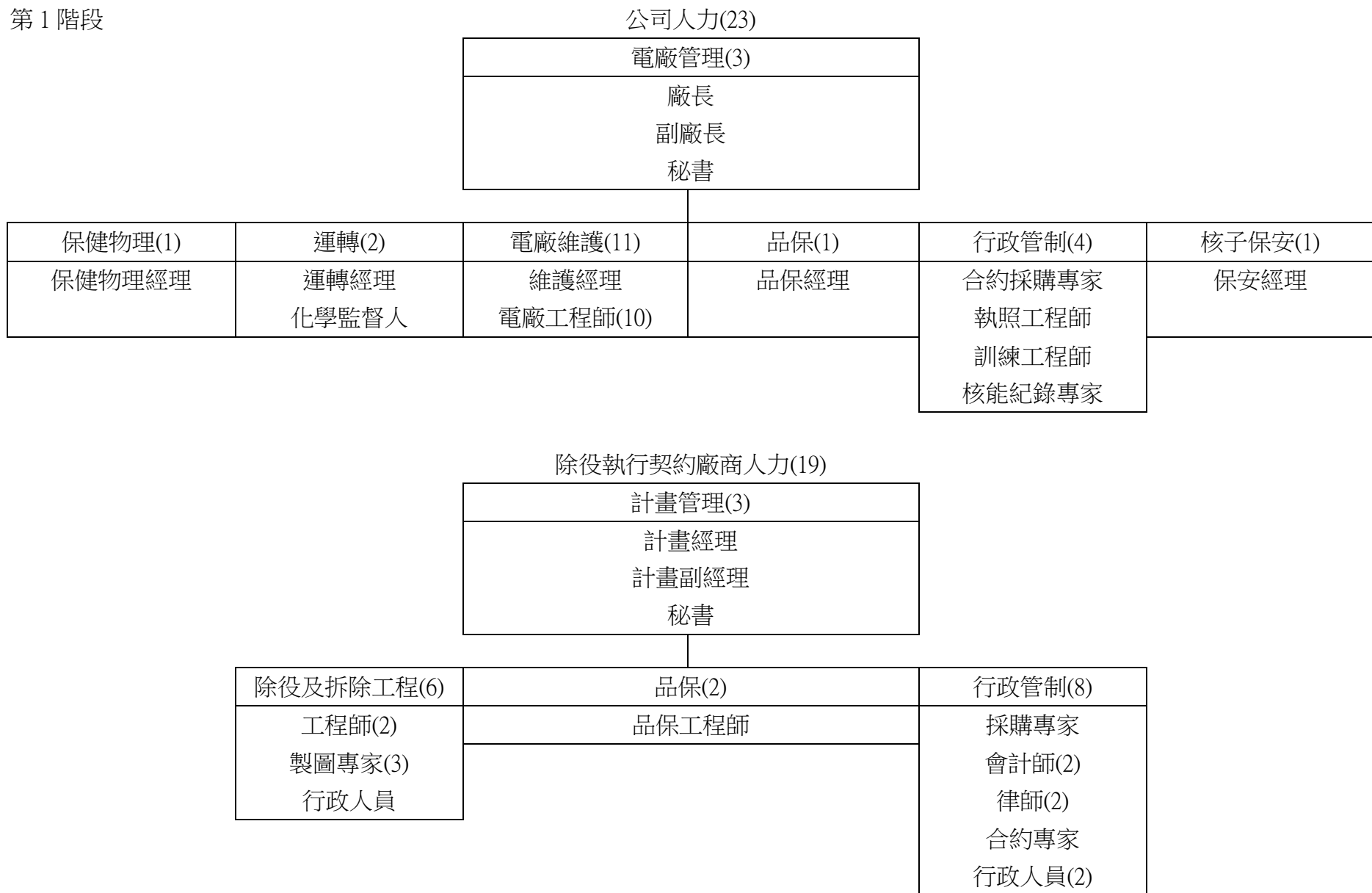


圖 4.3 除役參考廠之除役第 1 階段人力需求

第 2 階段

公司人力(184)

<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td colspan="6" style="text-align: center;">電廠管理(6)</td> </tr> <tr> <td colspan="6" style="text-align: center;">廠長</td> </tr> <tr> <td colspan="6" style="text-align: center;">副廠長</td> </tr> <tr> <td colspan="6" style="text-align: center;">秘書(2)</td> </tr> <tr> <td colspan="6" style="text-align: center;">行政人員(2)</td> </tr> </table>						電廠管理(6)						廠長						副廠長						秘書(2)						行政人員(2)					
電廠管理(6)																																			
廠長																																			
副廠長																																			
秘書(2)																																			
行政人員(2)																																			
保健物理(23)	運轉(45)	電廠維護(30)	品保(17)	行政管制(21)	核子保安(42)																														
保健物理經理 保健物理合理抑低規劃員 高級保健物理技術員(4) 保健物理技術員(16) 行政人員	運轉經理 秘書 行政人員 計畫/時程工程師 運轉監督人(4) 控制運轉員(16) 儀器運轉員(16) 化學監督人 化學技術員(4)	維護經理 秘書 行政人員 電廠工程師(4) 維護監督人(4) 工匠(16) 建物系統監督 保管人(2)	品保經理 品保工程師(4) 品保技術員(8) 行政人員(4)	行政管制經理 秘書 行政人員(3) 合約採購專家(3) 執照工程師(3) 會計師(2) 工安專家(3) 放射性物質運送專家(3) 訓練工程師 核能紀錄專家	保安經理 秘書 行政人員(4) 保安輪值監督(4) 保安巡邏(32)																														

圖 4.4 除役參考廠之除役第 2 階段人力需求

第 3 階段

公司人力(54)



圖 4.5 除役參考廠之除役第 3 階段人力需求

第 4 階段(1)

公司人力(54)



圖 4.6 除役參考廠之除役第 4 階段公司人力需求

<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td colspan="6" style="text-align: center;">電廠管理(6)</td> </tr> <tr> <td colspan="6" style="text-align: center;">計畫經理</td> </tr> <tr> <td colspan="6" style="text-align: center;">計畫副經理</td> </tr> <tr> <td colspan="6" style="text-align: center;">秘書</td> </tr> <tr> <td colspan="6" style="text-align: center;">計畫/時程工程師(3)</td> </tr> </table>						電廠管理(6)						計畫經理						計畫副經理						秘書						計畫/時程工程師(3)					
電廠管理(6)																																			
計畫經理																																			
計畫副經理																																			
秘書																																			
計畫/時程工程師(3)																																			
保健物理(22)	除役及拆除執行(19)	除役及拆除工程(11)	品保(7)	行政管制(11)	除役及拆除子契約廠商																														
保健物理經理 保健物理合理抑低規劃員 高級保健物理技術員(3) 保健物理技術員(16) 行政人員	除役及拆除執行監督人(6) 工安專家(3) 工具廠家(2) 防護衣廠家(2) 行政人員 工頭 控制運轉員(2) 工匠(2)	工程監督人 工程師(8) 製圖專家 行政人員	品保經理 品保工程師 品保技術員(4) 行政人員	行政管制經理 行政人員(3) 採購專家 合約專家 執照工程師 放射性物質運送專家 律師 安全顧問 會計師	視需要																														

圖 4.7 除役參考廠之除役第 4 階段執行契約廠商人力需求

表 4.8 除役參考廠除役第 2 階段移除燃料之工作時程及人時

立即拆除第二階段工作時程(移除燃料)																
直接工作人時(人時)	工期(週)	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60
	4	輻射偵檢以作為系統除污基準														
1,920		1,920														
	18	執行系統除污														
12,960		2,880	2,880	2,880	2,880	1,440										
	12	解除支架系統														
5,760						1,920	1,920	1,920								
	37	切割、移除、打包內部組件														
21,647						2,340	2,340	2,340	2,340	2,340	2,340	2,340	2,340	2,340	587	
	2	隔離池的洩水、除污及乾燥														
2,016															2,016	
	4	處理、釋放RPV之中的水，乾燥隔離池														
4,032																4,032
	36	放射性廢料打包														
10,080								1,120	1,120	1,120	1,120	1,120	1,120	1,120	1,120	1,120
58,415		1,920	2,880	2,880	2,880	7,140	5,700	5,380	3,460	3,460	3,460	3,460	3,460	3,460	3,723	5,152

表 4.9 除役參考廠除役第 4 階段拆除反應器廠房之工作時程及人時

立即拆除第四階段工作時程(拆除反應器廠房)																							
直接工作人時(人時)	工期(週)	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60	64	68	72	76	80	84	88
	6	特性偵檢																					
1,920		1,280	640																				
4,000	5	移除、除污、打包燃料架																					
		800	3,200																				
4,032	4	洩除、處理用過燃料池水																					
			4,032																				
1,749	5	移除用過燃料池水系統																					
			1,589	160																			
60	1	移除更換燃料橋式吊車																					
			60																				
1,563	6	除污、移除、打包用過燃料池管線																					
			1,120	443																			
29,863	34	移除反應器冷卻劑系統RCS管線及設備																					
		1,703	3,520	3,520	3,520	3,520	3,520	3,520	3,520	3,520	3,520	3,520	3,520	3,520	3,520	3,520	3,520	3,520	3,520	3,520	3,520	3,520	3,520
12,178	14	移除控制棒及驅動系統																					
			3,520	3,520	3,520	1,618																	
5,073	9	分解及打包反應器壓力容器																					
						2,250	2,250	573															
3,600	9	移除生物屏蔽																					
						1,200	1,600	800															
74,027	43	移除其他管線及吊架																					
			3,627	7,040	7,040	7,040	7,040	7,040	7,040	7,040	7,040	7,040	7,040	7,040	7,040	7,040	7,040	7,040	7,040	7,040	7,040	7,040	7,040
12,738	15	移除受污染之乾井內部結構																					
						2,178	3,520	3,520	3,520														
7,767	10	移除反應器廠房內之其他系統																					
13,910	15																						
1,162	2	廠房表面真空及除污																					
5,057	10	移除受污染混凝土表面																					
1,776	5																						
2,902	4	移除HVC導管及設備																					
183,377		2,080	5,543	7,612	12,256	15,360	14,523	14,428	12,810	12,333	14,338	11,360	10,560	10,560	10,560	7,040	4,247	3,520	4,512	1,920	1,920	2,638	3,257

表 4.10 除役參考廠除役第 4 階段拆除汽機廠房之工作時程及人時

立即拆除第四階段工作時程(拆除汽機廠房)															
直接工作人時(人時)	工期(週)	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56
	8		移除汽輪機及發電機												
7,040			3,520	3,520											
	36		移除汽輪機及發電機												
54,896			6,096	6,100	6,100	6,100	6,100	6,100	6,100	6,100	6,100	6,100	6,100		
	12		移除汽輪機冷凝器												
12,564			4,164	4,200	4,200										
	4		移除汽水分離器重熱器												
3,456								3,456							
	4		移除飼水加熱器												
1,920								1,920							
	4		移除飼水冷凝系統												
1,812								1,812							
	2		移除飼水泵汽輪機驅動												
392															
	2		廠房吊車現場除污												
800															
			除污、移除洩水												
2,940												1,960	980		
			廠房表面真空及除污												
160													160		
			移除受污染混凝土表面												
478														478	
			移除HVAC導管及設備												
3,049														1,524	1,525
89,507			3,520	9,616	10,264	10,300	10,300	9,556	8,020	7,912	7,292	8,060	1,140	2,002	1,525

4.3 核電廠除役管制重點及建議

綜觀國內目前的除役環境，在未來執行除役管制時，可能應注意國際間以下幾點重要經驗：

1. 訂定除役策略 (Strategy) 所需考量的因素包羅萬象，且各國及各核電廠，均有其特有的文化和背景，因此無法訂定一套全體適用的除役策略，必須針對各核電廠訂定其適用的除役策略。
2. 過去，台灣並沒有執行核電廠除役計畫之經驗，故對於費用估算這一部分，一般都由國外的費用分析先做定性分析，再加以定量。但我國的環境狀況(如：颱風)與政治等因素，需在原來的的基本預算上面再增加準備金與風險，目前此部分沒有前例可以作為參考。核一廠除役計畫為台灣第一個核電廠的除役工作，未來核二廠與核三廠將有許多評估，需藉由核一廠之經驗做參考，所以核一廠除役計畫之回饋資料庫將顯為特別重要。
3. 由圖 3.1 美國計畫性除役例行工作完成項目的時程表看來，除役例行工作開始前三年即作預備，較為充分完備。再則比對圖 3.2 非計畫性除役例行工作完成項目的時程表，結果可知兩者執行方式，皆是先將所有用過核燃料及早完全移出爐心壓力容器，並且解除電廠能源、電力、壓力系統的狀態建立，方開始主要的拆除行動。
4. 由 Maine Yankee 過渡階段到除役的時程規劃(圖 3.5)，與康乃迪克洋基主要電廠過渡階段到拆除的主要除役活動時程規劃(圖 3.6)相對比的結果，可知兩者都於除役前，先將所有用過核燃料完全移出爐心。
5. 由 SONGS 經驗顯示於階段 3：除役預備、階段 4：系統及大型組件移除、及階段 5：廠房除污的時段，預估輻射防護保健物理部門所需求的人力為最多。

6. 目前除了西班牙，尚未有其他國家允許在有完善的用過核燃料管理計畫並經電廠能源機構核准，在用過核燃料放置於 SFP 中的情況下，仍可進行除役工作。
7. 除役作業及排程(WBS)規劃研究，其主要目標有四：(一) 總費用最少化、(二) 安全風險最小化、(三) 活度曝露最小化、(四) 計畫時程最小化。比較表 4.4 依據核一廠除役計畫需求規劃甘特圖示各階段之程序和表 4.1 西屋公司建議除役階段時程規劃架構表其間差異，則發現核一廠所規劃的部份，除了在正常情況下費用結構隨時間之變化上，風險比例有無法隨時間進展而變小的風險存在。另外，若用過燃料未及早移出爐心，安全風險最小化及活度曝露最小化的目標有可能無法達成。若能加以克服，可增進除役作業的實質效益。
8. 除役工程是否須先對 RV 內部和運轉時產生的廢棄物拆解和分割，其先期性的工程研究可能牽涉對一些必要的廠房改建、設備供應、一次和二次廢棄物的裝載等方面規劃，應需加以審查，以確保計畫的完善。
9. 將來的除役現場工作具有相當程度的複雜性，應考慮現場的程序及工具規劃需先經測試合格後才可開始運作，而廠址也必須處理恢復至初始狀態，所有的設備也須經過除污後搬離廠址才算完成。
10. Humboldt Bay 核電廠除役執行計畫主要包括⁴：第一階段-系統移除(24 個月)，第二階段-反應爐壓力槽移除(18 個月)，第三階段-廠房拆除準備(12 個月)第四階段-廠房拆除，開關場工作，土壤復原及調查(27 個月)。若比較 Humboldt Bay 核電廠除役執行計畫與德國 Stade 及 Obrigheim 核電廠的主要除役拆除活動內容，可以發現：美國建議先拆除反應爐壓力容器、內部組件及屏蔽，而德國則建議先拆除二次側系統組件，兩種不同的作法各有其優劣之處。二者各有優劣，美國先拆高

劑量區 (from hot to cold)，可快速降低設施放射性強度 (radioactive inventory)，可簡化後續的輻射防護作業；德國則先拆低劑量區 (from cold to hot)，有避免放射性污染交叉污染 (cross-contamination on cold equipment) 的機會，具防止輻射的擴大的優點。

美國 Humboldt Bay 核電廠及德國 Stade、Obrigheim 核電廠的主要除役拆除活動內容²。

除役階段	Stade	Obrigheim	Humboldt Bay
1	二次側系統組件	二次側系統組件	系統移除(24 個月)
2	主要一次側系統組件 (RCS 系統)	主要一次側系統組件 (RCS 系統)	反應爐壓力槽移除(18 個月)
3	反應爐壓力容器、內部組件及屏蔽	反應爐壓力容器、內部組件及屏蔽	廠房拆除準備(12 個月)
4	其他仍存留系統	其他仍存留系統	廠房拆除，開關場工作，土壤復原及調查(27 個月)

第五章 核電廠除役作業及排程規劃審查導則(草案)

根據以上的研究整理，本章歸納擬訂核電廠除役作業及排程規劃審查導則(草案)¹¹，內容如下：

壹、審查目的

一、確認申請者於其所擬定除役排程時，已確實考慮到其所產生之風險變化，並遵守其所發展用於管制電廠組態之降低風險管理方法；對喪失重要的安全功能，已擬定救援對策且遵守運轉執照和運轉技術規範之要求，以確保深度防禦。

二、確認於發電運轉期間不易接近之區域，在規劃除役排程時，已考慮適當之檢查執行，以驗證安全相關及風險顯著之結構、系統和組件維持於正常可用之狀態。

三、確認申請者提高作業排程設計的優化度，其主要目標有二：(一) 安全風險最小化、(二) 活度曝露最小化。

貳、審查要求

一、除役計畫之審查

審查人員應查核關於除役各階段之目標及時程，在除役之前審查電廠的除役計畫，確認電廠已適度地考慮風險、同業經驗和申請者以往特有之問題，並確認電廠對喪失重要的安全功能有救援／反應之對策。

二、除役作業之監控

- (1) 確認除役工程是否須對 RV 內部和運轉時產生的廢棄物拆解和分割。
- (2) 除役現場工作具有相當程度的複雜性，確認任何程序及工具操作是否規劃經測試合格後才開始運作。

- (3) 對功率運轉期間不易接近之其他廠區亦應考慮進行檢查，以確認是否有洩漏之跡象並驗證結構、系統和組件之完整性。

參、審查指引

一、一般的指引

比照美國計畫性除役例行工作完成項目時程表，申請者於除役例行工作開始前三年即應作規劃預備。所有用過核燃料應需要完全移出爐心壓力容器，並在解除電廠能源、電力、壓力系統的狀態建立，才開始主要的拆除行動。

二、特定的指引

目前發現國際間僅有西班牙，允許在用過核燃料仍放置於 SFP 中的情況下，於提出完善的用過核燃料管理計畫並經電廠能源機構核准下，進行除役工作。

三、審查要點與接受基準

除役計畫內之除役時程、使用之設備、方法及安全作業程序的內容應符合以下要求，方能接受並同意審查：

1. 除役時程

- A. 申請者必須詳實說明除役各階段之目標及時程，並佐以甘特(Gantt)或計畫評估樹(PERT)圖示各階段之拆除程序，施工開始時間、以及預計完成時間。甘特(Gantt)圖應說明除役各階段之目標、作業項目、工作分解架構及作業排程。每一個作業項目並應說明主要之影響因素：人員輻射劑量、廢棄物數量、成本估算等事項。成本估算可採用 ISDC (International Structure for Decommissioning Costing of Nuclear Installations) 執行，ISDC 是目前核電廠除役成本的國際標準結構。
- B. 申請者必須為工作分解架構、作業排程與 ISDC 之間加入系統

編碼及關係連結，成為可執行的除役規劃程序。藉建立對照表及介面連結，清楚並掌握整個除役工作架構及費用狀況，使除役工作得以按照期程進行。

- C. 申請者在規劃除役各階段之時程須說明規劃之依據，並應說明在廠址輻射特性調查結果及考量下，各項預期除污效果下的拆除程序與時程規劃依據。
- D. 拆除程序應為合理且可執行，應確保拆除作業之安全及減少放射性廢棄物之產生。
- E. 申請者在規劃除役各階段之時程，亦須說明考量國內用過核子燃料及放射性廢棄物處理、貯存或最終處置計畫的綜合規劃結果。
- F. 拆除時程之預計完成時間須符合法規規定，並應滿足可執行性及可達成性。

2. 拆除作業

- A. 申請者必須詳實說明各階段核子反應器設施廠房結構及各重要系統、設備、組件等的拆除工法與時序。須詳實說明執行拆除前不屬支援除污與除役的輔助系統停止運轉情況，並與操作系統分離、淨空（若有需要）、清理及永久隔離，控制界面與文件化。
- B. 申請者所規劃之拆除作業，須說明廢棄物分類原則及考量放射性廢棄物處理、貯存或最終處置計畫的綜合規劃結果。在除污時，設備的可操作性無法保證。於除污時，設備將由除污廠商提供，申請者須說明將發生成本增加而引發除污過程中產生問題的可能性。
- C. 反應器壓力容器和反應器內部組件分割的優化，與可用的廢棄

物容器類型以及處理低階和高階廢棄物的規格有很大的關聯性，申請者必須詳實說明廢棄物容器類型以及處理低階和高階廢棄物的規格。

- D. 申請者必須詳實說明具活化效應之機械系統、設備、重要組件與廠房結構的拆除方法及其使用之設備，以及拆除作業中安全作業程序及其相關之輻射防護與防治污染擴散的設計。
- E. 前述說明宜包含對不同材質之不同結構、系統、設備之拆除方法及使用之設備。另亦需說明拆除工法應考慮的切割速度、維護頻率、粉塵污染、二次廢棄物產生及工具安裝狀況等。
- F. 現有處置場狀況與切割拆除工法、廢棄物容器之間有重要關聯性。處置場可允許放置的廢棄物容器數量、尺寸規格、劑量率等，決定了廢棄物容器的選用；廢棄物容器規格的選用，也決定了切割拆除工件之切割尺寸。申請者採用機械切割方法須確保拆除作業中的安全。如應說明電氣安全、空浮污染議題及其防範規劃；切割後所有反應器壓力容器和反應器內部組件尺寸、材料和厚度。另亦需說明一次、二次廢棄物產生及收集方式。
- G. 在空氣中採用熱切割方法，須注意拆除作業過程中的安全。如應說明如何避免發生燃燒或爆炸；避免產生有毒氣體；捕捉空浮微粒的通風過濾之設計理念，以防止污染擴散並保持空氣中的能見度；以及說明對於一次、二次廢棄物之產生及收集方式。
- H. 在水下採用熱切割方法，應說明捕捉水下懸浮微粒的過濾系統設計理念，以保持水中的能見度；水下熱切割可能產生氣泡，因而產生空浮微粒的過濾設計理念；以及說明對於一次、二次廢棄物之產生及收集方式。
- I. 採用高壓水刀方法執行切割作業，應說明在空氣中及水中捕捉

切割產生碎屑的過濾設計理念；以及一次、二次廢棄物產生之產生及收集方式。

- J. 採用各種切割方法應說明其設計理念，及如何達成減廢之目標。關於電熱式切割、機械式切割與水力切割等方式各有其優缺點，對於反應器內部組件適合用機械式切割，而反應器壓力槽則是仍以前述三種主要的切割方式為主。一般內部組件之拆除作業會因為輻射較高，國際上常用的技術是經由水下水力切割，但因為機械式的切割法可以減少因水下切割產生碎屑後降低能見度的問題，最近對於內部組件之拆除，國際間趨勢開始朝向使用機械式切割法。故申請者應說明各種切割方法優缺點，以及如何達成減廢之目標。
- K. 本項拆除作業得併同「第九章、除役放射性廢棄物之類別、特性、數量、減量措施及其處理運送、貯存與最終處置規劃」，以及「第十章、輻射劑量評估及輻射防護措施」進行審查。

肆、審查發現

審查人員應查核關於除役各階段之目標及時程。審查人員應評估申請者之廠房結構及各重要系統、設備、組件等的拆除工法、時序及其相關之輻射防護與防治污染擴散的設計，以確認拆除作業使用之設備、方法及安全作業程序可安全地執行。

對於具活化效應之機械系統、設備、重要組件與廠房結構的拆除方法及其使用之設備等資訊，若申請者現階段尚無法提供詳實之細部技術資料，申請者應於本章內交代未來的提出時程。審查人員應確認已提出之初步資訊是否合理、是否影響後續放射性廢棄物的管理規劃。審查人員亦應確認申請者已承諾之提報時程合理，且不致影響整體除役之時程規劃。

伍、相關法規與技術規範

1. 核子反應器設施管制法。
2. 核子反應器設施管制法施行細則。
3. 核子反應器設施安全設計準則。
4. 游離輻射防護法。
5. 游離輻射防護安全標準。
6. 放射性物料管理法。
7. 核子反應器設施除役許可申請審核辦法。
8. 核子反應器設施除役計畫導則。

第六章 結論

本研究已蒐集研析國際最新除役資訊，參考美國、德國、及其他國家等核電廠除役之經驗，進行除役作業及排程規劃的相關經驗之整理、研析與歸納，就相關除役審核技術及管制重點提出建議，作為管制參考。由美國、德國、國際原子能總署 IAEA 的除役規範資料，在除役作業及排程規劃的工作重點、規範事項以及除役策略上，進行彙整與研析，並於 4.3 中提出相關管制重點及建議。並於第五章提出除役作業與排程規劃審查導則(草案)，以協助除役審查的執行。

綜觀國內目前的除役環境，在未來執行除役管制時，仍應特別注意以下幾點國際重要經驗：

1. 除役策略的訂定所需考量的因素包羅萬象，且各國的核電廠，均有其特有的文化和背景，因此必須針對各核電廠訂定其適用的除役策略。
2. 故對於除役費用估算這一部分，國內一般都由國外的費用分析先做定性分析，再加以定量。但我國的環境狀況(如：颱風)與政治等因素，需在原來的的基本預算上，再增加準備金與風險金，此部分宜請除役計畫申請者加以考慮之。
3. ISDC 的基本架構包含 11 個工作分解架構，已整理歸納其簡表架構於表 2.3，詳細架構可參閱附錄一，可供規劃工作分解架構及費用明細評估的參考。
4. 由美國的計畫性除役的時程規劃經驗，應於除役例行工作開始前三年即作充分預備，將可使除役工作進行的完備。此外，由非計畫性除役例行工作完成項目的時程表中，可知兩者的執行方式，皆是先將所有用過核燃料及早完全移出爐心壓力容器，並且解除電廠能源、電力、壓力

系統的狀態建立，方開始主要的拆除行動。此應為除役的重要方針。

5. 由 Maine Yankee 過渡階段到除役的時程規劃，與康乃迪克洋基主要電廠過渡階段到拆除的主要除役活動時程規劃間互相對比的結果，可知兩者都於除役前，先將所有用過核燃料完全移出爐心。但國內用過核燃料乾貯設施蓋造及燃料遷移部分，阻力較大，該問題可能造成除役時程的延宕，造成除役費用增加，需加強溝通與克服。
6. 目前除了西班牙，尚未有其他國家允許在有完善的用過核燃料管理計畫並經電廠能源機構核准，在用過核燃料放置於 SFP 中的情況下，仍可進行除役工作。該國的除役規範應屬特例。
7. 除役工程是否須先對 RV 內部和運轉時產生的廢棄物拆解和分割，其先期性的工程研究可能牽涉對一些必要的廠房改建、設備供應、一次和二次廢棄物的裝載等方面規劃，應需加以審查，以確保計畫的完善。
8. 將來的除役現場工作具有相當程度的複雜性，應考慮現場的程序及工具規劃需先經測試合格後才可開始運作，而廠址也必須處理恢復至初始狀態，所有的設備也須經過除污後搬離廠址才算完成。

由於國內對核子反應器設施除役活動的管制主要係進行「除役計畫」及「環境影響評估報告」的審核，對於除役計畫執行過程中，是否需要定期針對計畫內容進行更新，則無較明確的規定。然而，除役活動前後費時長達二十多年以上，常會隨除役計畫執行過程中獲得新的資訊、測量結果以及可實行技術工法的改進等應用，而有所改變。因此，為能貫徹除役活動過程中的相關管制，建議未來考量能建立「除役計畫內容定期更新及審查」的制度，並考慮將其法制化，以確保核子設施除役活動的安全管制。

第七章 重要參考文獻

1. Sven Sudholt, “A multiple objective optimization approach to the decommissioning and dismantling of a nuclear power plant”, Department of Industrial Engineering in University of Louisville, December 2013.
2. “Guidance for Transition from Operational to Decommissioning for Nuclear Power Plant”, EPRI # 3002007551, Final Report, June 2016.
3. “赴西班牙參加核電廠除役技術訓練及參訪 Zorita、El Cabril 核能設施” 行政院原子能委員會核能研究所出國報告，民國 103 年 5 月 8 日。
4. “考察美國除役中核電廠” 經濟部出國報告，民國 102 年 2 月 6 日。
5. “Work Breakdown Structure Handbook”, U.S. Department of Energy Washington, D.C. 20585, August 16, 2012.
6. “核二廠除役研習計畫”，台灣電力公司出國報告，民國 106 年 4 月 26 日。
7. “Cost Control Guide for Decommissioning of Nuclear Installations”, NEA/RWM/R(2012)10, 27-Feb-2013.
8. “Interntional Structure for Decommissioning Costing (ISDC) of Nuclear Installations”, OECD 2012/NEA No. 7088.
9. “赴義大利參加EPRI 核電廠除役會議”，台灣電力公司出國報告，民國 101年12月22日。
10. “Revised Analyses of Decommissioning for the Reference Boiling Water Reactor Power Station”, NUREG/CR-6174 PNL-9975, July 1996.
- 11.A：核子反應器設施除役計畫導則第六章；B：核子反應器設施除役計畫

審查導則第六章，行政院原子能委員會，民國103年09月19日。

附錄一：核電廠除役費用的國際結構分級表

第一層	第二層	第三層	活動工作項目
主要群組項目	群組項目	次群組項目	活動工作項目說明
01			除役前準備
	01.0100		除役工作規劃
		01.0101	除役策略規劃
		01.0102	除役前期規劃
		01.0103	除役最終規劃
	01.0200		廠址輻射特性調查
		01.0201	廠址輻射特性詳情調查
		01.0202	危疑組件調查研析
		01.0203	建立除役設施盤點資料庫
	01.0300		安全，保安和環境研究
		01.0301	除役安全分析
		01.0302	環境影響評估
		01.0203	現場作業的安全，保安和應急計畫
	01.0400		廢棄物管理計畫
		01.0401	制定廢棄物管理標準
		01.0402	制定廢棄物管理計畫
	01.0500		授權
		01.0501	許可證申請和許可證核准
		01.0502	利益相關者參與
	01.0600		準備管理組織和簽約
		01.0601	管理團隊活動
		01.0602	承包商活動
02			電廠停機工作
	02.0100		電廠停機和檢查
		02.0101	終止運轉，電廠穩定，隔離和檢查。
		02.0102	將燃料卸載並轉移至用過核子燃料貯存廠
		02.0103	冷卻用過核子燃料

		02.0104	管理燃料，可裂變物料和其他核子物料
		02.0105	隔離電力設備
		02.0106	設施重用
	02.0200		系統的排水和乾燥
		02.0201	未運轉之封閉系統的排水和乾燥
		02.0202	用過燃料貯存池和其他未運轉之開放系統的排放
		02.0203	從開放系統中去除污泥和產物
		02.0204	特殊過程流體的排放
	02.0300		用於減少劑量之封閉系統的淨化
		02.0301	使用運轉操作程序對裝置進行淨化
		02.0302	使用其他程序對裝置進行淨化
	02.0400		輻射特性調查盤點以支持詳細規劃
		02.0401	輻射特性調查盤點
		02.0402	地下水監測
	02.0500		清除系統流體，運轉之廢棄物和多餘材料
		02.0501	去除可燃物質
		02.0502	去除系統流體（水，油等）
		02.0503	去除特殊系統流體
		02.0504	去除淨化除污廢棄物
		02.0505	去除用過廢樹脂
		02.0506	從燃料循環設施中清除特定的運轉廢棄物
		02.0507	從設施運營中清除其他廢棄物
		02.0508	拆除多餘的設備和材料
03			設備封存之準備工作：遲延拆除或現地固封的附加活動
	03.0100		準備設備安全封存
		03.0101	對選定的部件和區域進行淨化以確保安全
		03.0102	選定長期儲存區劃
		03.0103	拆除不適合安全封存的庫存設備
		03.0104	為將用於長期儲存的密封結構拆除和轉移受污染的設備和材料
		03.0105	安全封存的輻射特性調查盤點

	03.0200		場地邊界重新配置，隔離和固定結構
		03.0201	輔助系統的修改
		03.0202	場地邊界重新配置
		03.0203	建造臨時圍牆，商店，結構改進等等
		03.0204	放射性和危險廢棄物的穩定化
		03.0205	強化設施控制區域，隔離安全封存
	03.0300		設施現地固封
		03.0301	設施現地固封作為除役策略的最終狀態
		03.0302	對現地固封最終狀態的適度控制和監督
04			管制區域內的拆除活動
	04.0100		採購除污和拆解設備
		04.0101	採購一般現場拆解設備
		04.0102	採購人員和工具除污設備
		04.0103	採購拆除反應器系統的專用工具
		04.0104	採購用於拆除燃料循環設施的專用工具。
		04.0105	採購拆卸其他部件或結構的特殊工具
	04.0200		拆解的準備和支持
		04.0201	重新配置現有功能，設施和廠房以支持拆解
		04.0202	準備拆除的基礎設施和物流
		04.0203	拆除過程中正在進行的輻射特性調查
	04.0300		拆解前的除污
		04.0301	剩餘系統的排水
		04.0302	從剩餘系統中去除污泥和產物
		04.0303	對剩餘系統進行除污淨化處理
		04.0304	建築物區域的除污淨化
	04.0400		去除需要特定程序的材料
		04.0401	去除隔熱層
		04.0402	去除石棉
		04.0403	去除其他有害物質
	04.0500		拆除主要過程系統，結構和組件
		04.0501	拆除反應器爐內組件

		04.0502	拆除反應爐容器和核心組件
		04.0503	拆除其他一次側主循環組件
		04.0504	拆除燃料循環設施中的主要過程系統
		04.0505	拆除其他核設施的主要過程系統
		04.0506	拆除外部熱/生物屏蔽。
	04.0600		拆除其他系統和組件
		04.0601	拆除輔助系統
		04.0602	拆除剩餘組件
	04.0700		清除建築物結構中的污染物
		04.0701	拆除建築物中的嵌入式元素
		04.0702	清除受污染的結構
		04.0703	建築物除污淨化
	04.0800		清除建築物外的污染物
		04.0801	拆除地下污染的管道和結構
		04.0802	去除污染土壤和其他污染物品
	04.0900		建築物釋放的最終輻射特性調查
		04.0901	建築物的最終輻射特性測量
		04.0902	建築物解除管制
05			廢棄物之處理，儲存和處置
	05.0100		廢棄物之管理系統
		05.0101	建立廢棄物之管理系統
		05.0102	重建現有設施的除役廢棄物之管理系統
		05.0103	採購額外設備進行歷史/遺留廢棄物管理
		05.0104	支持廢棄物管理系統的維護，監視和運營
		05.0105	廢棄物管理系統的複營運/除役
	05.0200		管理歷史/遺留的高階廢棄物
		05.0201	輻射特性調查
		05.0202	檢索和處理
		05.0203	最後的調理
		05.0204	存儲
		05.0205	運輸

		05.0206	處置
		05.0207	容器
	05.0300		管理歷史/遺留中階廢棄物
		05.0301	輻射特性調查
		05.0302	檢索和處理
		05.0303	最後的調理
		05.0304	存儲
		05.0305	運輸
		05.0306	處置
		05.0307	容器
	05.0400		管理歷史/遺留低階廢棄物
		05.0401	輻射特性調查
		05.0402	檢索和處理
		05.0403	最後的調理
		05.0404	存儲
		05.0405	運輸
		05.0406	處置
		05.0407	容器
	05.0500		管理歷史/遺留非常低階廢棄物
		05.0501	輻射特性調查
		05.0502	檢索和處理
		05.0503	運輸
		05.0504	處置
	05.0600		管理歷史/遺留豁免廢棄物和材料
		05.0601	檢索，處理和包裝
		05.0602	豁免廢棄物和材料的清除量
		05.0603	運輸危險廢棄物
		05.0604	在專用垃圾場處置危險廢棄物
		05.0605	運輸傳統廢棄物和材料
		05.0606	在傳統廢棄物垃圾場處置傳統廢棄物
	05.0700		管理除役高階廢棄物

		05.0701	輻射特性調查
		05.0702	檢索和處理
		05.0703	最後的調理
		05.0704	存儲
		05.0705	運輸
		05.0706	處置
		05.0707	容器
	05.0800		管理除役中階廢棄物
		05.0801	輻射特性調查
		05.0802	檢索和處理
		05.0803	最後的調理
		05.0804	存儲
		05.0805	運輸
		05.0806	處置
		05.0807	容器
	05.0900		管理除役低階廢棄物
		05.0901	輻射特性調查
		05.0902	檢索和處理
		05.0903	最後的調理
		05.0904	存儲
		05.0905	運輸
		05.0906	處置
		05.0907	容器
	05.1000		管理除役非常低階廢棄物
		05.1001	輻射特性調查
		05.1002	處理和包裝
		05.1003	運輸
		05.1004	處置
	05.1100		管理除役半衰期非常短暫的廢棄物
		05.1101	輻射特性調查
		05.1102	處理，存儲，處置和包裝

		05.1103	除役半衰期非常短暫廢棄物的最終管理
	05.1200		管理除役豁免廢棄物和材料
		05.1201	處理和包裝
		05.1202	豁免廢棄物和材料的清除量
		05.1203	運輸危險廢棄物
		05.1204	在專用垃圾場處置危險廢棄物
		05.1205	運輸傳統廢棄物和材料
		05.1206	在傳統廢棄物垃圾場處置傳統廢棄物
	05.1300		管理管制區外所產生的除役廢棄物和材料
		05.1301	回收混凝土
		05.1302	危險廢棄物的處理和包裝
		05.1303	其他材料的處理和回收
		05.1304	危險廢棄物運輸
		05.1305	在專用垃圾場處置危險廢棄物
		05.1306	運輸傳統廢棄物和材料
		05.1307	在傳統廢棄物垃圾場處置傳統廢棄物
06			現場基礎設施之建立與運營
	06.0100		現場保安和監視
		06.0101	採購一般保安設備
		06.0102	自動門禁系統，監控系統和警報的操作和維護
		06.0103	安全圍欄和保護其餘入口安全
		06.0104	部署警衛/保安部隊
	06.0200		現場操作和維護
		06.0201	建築物和系統的檢查和維護
		06.0202	現場維護活動
	06.0300		支持系統的操作
		06.0301	供電系統
		06.0302	通風系統
		06.0303	供暖，蒸汽和照明系統
		06.0304	供水系統
		06.0305	污水/廢水系統

		06.0306	壓縮空氣/氮氣系統
		06.0307	其他系統
	06.0400		輻射和環境安全監測
		06.0401	輻射防護和環境監測設備的採購和維護
		06.0402	輻射防護和監測
		06.0403	環境保護和輻射環境監測
07			拆除與現場之復原
	07.0100		採購常規拆除設備
		07.0101	採購常規拆除設備
	07.0200		拆除管制區的系統和建築構件
		07.0201	發電系統
		07.0202	冷卻系統組件
		07.0203	其他輔助系統
	07.0300		拆除建築物和構築物
		07.0301	從原管制區拆除建築物和構築物
		07.0302	拆除管制區外的建築物和構築物
		07.0303	拆除堆棧
	07.0400		最後的清理，美化和翻新
		07.0401	土方工程，土地工程
		07.0402	園林綠化和其他場地裝修活動
		07.0403	翻新建築物
	07.0500		現場最終輻射特性偵測
		07.0501	最終偵測
		07.0502	最終偵測的獨立驗證
	07.0600		永久性資金/監督限制或釋放
		07.0601	日常維護
		07.0602	監督和監測
08			計畫管理，工程和支援
	08.0100		動員和準備工作
		08.0101	動員人員
		08.0102	建立除役項目的一般支持基礎設施

	08.0200		項目管理
		08.0201	核心管理小組
		08.0202	項目實施計畫，詳細的持續計畫
		08.0203	調度和成本控制
		08.0204	安全和環境分析，正在進行的研究
		08.0205	品質保證和品質監督
		08.0206	一般行政和會計
		08.0207	公共關係和利益相關者的參與
	08.0300		支持服務
		08.0301	工程支持
		08.0302	信息系統和計算機支持
		08.0303	廢棄物管理支持
		08.0304	除役支持包括化學除污
		08.0305	人事管理和培訓
		08.0306	文檔和紀錄管理控制
		08.0307	採購，倉儲和材料處理
		08.0308	住房，辦公設備，支持服務
	08.0400		健康與安全
		08.0401	保健物理學
		08.0402	工業安全
	08.0500		復員
		08.0501	除役項目基礎設施的復員
		08.0502	人員復員
	08.0600		承包商的動員和準備工作（如果需要）
		08.0601	動員人員
		08.0602	建立除役項目的一般支持基礎設施
	08.0700		承包商的項目管理（如果需要）
		08.0701	核心管理小組
		08.0702	項目實施計畫，詳細的持續計畫
		08.0703	調度和成本控制
		08.0704	安全和環境分析，正在進行的研究

		08.0705	品質保證和品質監督
		08.0706	一般行政和會計
		08.0707	公共關係和利益相關者的參與
	08.0800		支持服務
		08.0801	工程支持
		08.0802	信息系統和計算機支持
		08.0803	廢棄物管理支持
		08.0804	除役支持包括化學除污
		08.0805	人事管理和培訓
		08.0806	文檔和紀錄管理控制
		08.0807	採購，倉儲和材料處理
		08.0808	住房，辦公設備，支持服務
	08.0900		健康與安全
		08.0901	保健物理學
		08.0902	工業安全
	08.1000		承包商復員（如有需要）
		08.1001	除役項目基礎設施的復員
		08.1002	人員復員
09			研究與開發
	09.0100		研究和開發設備，技術和程序
		09.0101	輻射特性調查的設備，技術和程序
		09.0102	除污的設備，技術和程序
		09.0103	拆解設備，技術和程序
		09.0104	廢棄物管理的設備，技術和程序
		09.0105	其他研發活動
	09.0200		複雜工程的模擬
		09.0201	實體模型和培訓
		09.0202	測試或演示程序
		09.0203	計算機模擬，可視化和 3D 建模
		09.0204	其他活動
10			燃料和核物料

	11.0100		從除役設施中清除燃料或核物料
		11.0101	將燃料或核物料轉移到外部儲存或處理設備
		11.0102	將燃料或核物料轉移到專用緩衝存儲器
	11.0200		用於燃料和/或核物料的專用緩衝存儲器。
		11.0201	緩衝存儲器的構造
		11.0202	緩衝存儲器的操作
		11.0203	將燃料和/或核物料從緩衝存儲器中轉移出去
	11.0300		停用緩衝存儲器
		11.0301	停用緩衝存儲器
		11.0302	廢棄物管理
11			雜項支出
	11.0100		業主成本
		11.0101	過渡計畫的實施
		11.0102	除役後將要執行的外部項目
		11.0103	向當局支付（費用）
		11.0104	特定的外部服務和付款
	11.0200		稅
		11.0201	增值稅
		11.0202	地方，社區，聯邦稅
		11.0203	環境稅
		11.0204	工業活動稅
		11.0205	其他稅
	11.0300		保險
		11.0301	核相關保險
		11.0302	其他保險
	11.0400		資產回收
		11.0401	與冗餘設備相關的資產回收
		11.0402	與可外釋材料相關的資產回收
		11.0403	與傳統拆除材料和設備有關的資產回收
		11.0404	與建築物和場地有關的資產回收
		11.0405	其他資產回收

行政院原子能委員會委託研究計畫期末報告

計畫名稱：

「核能電廠除役與室內乾貯安全審查技術之研究」
有關除役部分之研究

子項計畫五：

利用 RESRAD 建立除役人員劑量及工作場所評估與
驗證審查技術

計畫編號：AEC10612052L

執行單位：國立清華大學

計畫主持人：裴晉哲

子項計畫五主持人：劉鴻鳴

報告作者：劉鴻鳴、陳宗源

報告日期：中華民國107年12月

子項計畫五：

利用 **RESRAD** 建立除役人員劑量及工作場所評估與
驗證審查技術

摘要

本計畫主要是利用 RESRAD-BUILD 程式，針對建築物中殘留的放射性活度，對於在建築物內部活動的人員（包括工作人員、視察人員...）可能造成的輻射劑量進行評估。並進行程式中各參數的靈敏度分析（包括射源種類、射源強度分佈、房間換氣率...等），瞭解程式中各參數的重要性，做為管制單位要求台電進行參數調查的參考依據。

ABSTRACT

The project mainly uses the RESRAD-BUILD program to evaluate the radiation dose that may be caused by personnel (including staff, inspectors, etc.) who are active inside the building for the residual activity in the building. The sensitivity analysis of each parameter in this computer code (including the type of source, source intensity distribution, room ventilation rate, etc.) is carried out to understand the importance of each parameter, and as a reference for the regulatory agency to request the Tai-power company (TPC) to conduct parameter survey.

目錄

摘要	i
ABSTRACT.....	ii
目錄	iii
圖目錄	v
表目錄	vi
第一章 計畫背景	1
第二章 計畫目的與執行方法	2
第三章 RESRAD-BUILD 程式介紹及應用	5
3.1 RESRAD-BUILD 程式介紹	5
3.2 RESRAD-BUILD 程式的使用介面	7
3.3 RESRAD-BUILD 程式的應用	8
第四章 RESRAD-BUILD 參數靈敏度分析	24
4.1 參數說明	24
4.2 比較基準模型	25
4.3 參數靈敏度測試	27
4.4 參數重要性匯整與建議	35
第五章 RESRAD-BUILD 程式驗證	43
5.1 生物科技南館污染歷史	43

5.2 銫-137 污染活度分析	44
5.3 RESRAD-BUILD 程式模擬	45
5.4 影響空間輻射劑量率變動因素探討	46
第六章 目前成果與建議事項	58
參考資料.....	61

圖目錄

圖 2.1：計畫預定進度甘特圖	4
圖 3.1：RESRAD 家族程式發展歷史示意圖	20
圖 3.2：因應不同模組功能所建立之 RESRAD 家族程式	20
圖 3.3：RESRAD-BUILD 的使用介面	21
圖 3.4：時間參數輸入圖框	21
圖 3.5：建築體參數輸入圖框	22
圖 3.6：受體參數輸入圖框	22
圖 3.7：射源參數輸入圖框	23
圖 3.8：屏蔽參數輸入圖框	23
圖 4.1：比較基準模型	42
圖 4.2：沉積速度與粒子大小的關係曲線(RESRAD-BUILD 建議)...	42
圖 5.1：生物科技南館 1F 空間輻射劑量率調查（2012 年）	54
圖 5.2：生物科技南館 101 室網格南 42、鑽心取樣及活度分析結果	55
圖 5.3：生物科技南館 101 室模擬示意圖(One-room model)	56
圖 5.4：污染分佈對於空間輻射劑量率的影響	57
圖 5.5：生物科技南館 Three-room model 模擬示意圖	57

表目錄

表 3.1：時間參數匯整說明	11
表 3.2：建築體參數匯整說明	12
表 3.3：受體參數匯整說明	13
表 3.4：射源參數匯整說明	14
表 3.5：屏蔽參數匯整說明	16
表 3.6：RESRAD-BUILD 各項參數值比較.....	17
表 4.1：不同核種與計算點數的比較	37
表 4.2：沉積速度對劑量造成之影響	37
表 4.3：不同放射性核種的平均沉積速度	38
表 4.4：再懸浮率對劑量所造成的影響	38
表 4.5：空氣交換率對劑量所造成的影響	39
表 4.6：空氣釋放比例對劑量所造成的影響	39
表 4.7：射源侵蝕率對劑量所造成的影響	40
表 4.8：相同射源、不同模擬方式對累積劑量所造成的影響	41
表 5.1：生物科技南館一樓 101 室鑽心取樣分析結果（6 個不同鑽心 取樣位置樣品）	51
表 5.2：生物科技南館案例有關射源項的主要輸入參數彙整	52

表 5.3：生物科技南館不同房間劑量貢獻度 (Three-rooms model) 53

第一章 計畫背景

在非核家園政策推動下，國內核電機組將陸續進行除役，但國家放射性廢棄物最終處置場的建置卻遲遲無法推動執行，導致核能機組除役所產生之放射性廢棄物可能面臨無處存放的窘境。對於核電廠既有建築，在電廠除役過程或完成除役工作後，倘若殘留的放射性活度低於一定程度，經評估後符合現行之輻射安全標準，極有可能留用做為其他用途。

將核電廠既有建築在除役過程中加以留用或改建，或完成除役後做為其他用途(如辦公室用途)，因留用建築可能殘留的放射性活度，將對在此一建築內工作或活動的人員造成輻射曝露(來自於體外直接輻射曝露、或透過呼吸所造成的體內輻射曝露)。因此，針對核電廠除役過程所處的工作環境(尤其針對留用之建築)，必須評估其殘留放射性活度對建築物內部活動的人員所造成的輻射劑量，管制單位則必須針對留用建築進行必要的審查與驗證，確保輻射安全無虞。

第二章 計畫目的與執行方法

國際上有一些計算機程式可做為評估放射性物質殘留對環境所造成的影響，其中 RESRAD 系列程式被廣泛應用的原因，包含該系列程式已藉由實際操作的研討會獲得不同情境下的討論、驗證及檢討；以及應用 RESRAD 系列程式所發表的期刊、學術論文及其它出版物已超過 1000 份，所以是一套適用於環境及人員劑量評估的工具，並已獲得國際認證且具有廣泛使用及紀錄。

引進 RESRAD 程式集做為評估核能設施除役後之廠址的放射性程度，可視為台灣核電廠除役所必須進行的分析之一。整個 RESRAD 程式集主要是以 RESRAD-ONSITE 程式為主，再針對特定評估項目分別延伸發展個別的程式所組成的程式集，主要包括 RESRAD-BUILD、RESRAD-OFFSITE、RESRAD-RECYCLE...等程式。本計畫主要是利用 RESRAD-BUILD 程式，針對建築物中殘留的放射性活度，對於在建築物內部活動的人員（包括工作人員、視察人員...等）可能造成的輻射劑量進行評估。並進程式中各參數的靈敏度分析（包括射源種類、射源強度分佈、房間換氣率...等），瞭解程式中各參數的重要性，做為管制單位要求參數調查的依據。

RESRAD-BUILD (ref. 1)主要是評估廠房結構（包括地板、牆壁、天花板...等）中所殘留的放射性物質，對於在廠房內活動的人員所造成的輻射劑

量。依據本程式評估所得的結果，可做為核電廠現有廠房再利用的可行性、或做為廠房再利用時廠房結構是否需進行除污的參考依據。但 RESRAD-BUILD 程式內所需引用的參數值(ref. 2)，引用恰當與否對於評估結果有一定的影響。因此，利用 RESRAD-BUILD 進行建築物中殘留的放射性活度對於在建築物內部活動的人員可能造成的輻射劑量進行評估，其結果有必要進行驗證研究；此外，程式內所設定的參數預設值，未必符合台灣除役電廠的現況，因此，有必要進行各參數的靈敏度分析，瞭解程式中各參數的重要性(ref. 3)，做為管制單位是否要求台電進行參數調查的依據。

本計畫將著重於 RESRAD-BUILD 的引進、測試、及驗證，並將結果提供給國內核能管制單位做為未來國內核電廠除役過程中，若有留用建築之審查與管制的參考依據。本計畫的主要的工作項目如下，計畫預定甘特圖如圖 2.1 所示：

- (1) 蒐集與研析國際核能先進國家，核能電廠除役過程中對周圍活動人員與工作場所環境影響程度之相關資料，藉以瞭解留用建築對於人員與環境劑量的影響。
- (2) 研析 RESRAD-BUILD 在除役人員劑量與工作場所評估的建構方法。藉由 RESRAD-BUILD 程式進行除役作業場所的劑量評估。
- (3) 進行 RESRAD-BUILD 除役人員劑量與工作場所評估結果驗證研究。
- (4) 針對核電廠除役留用建築之審查重點與接受準則提出建議。

六、預定進度：														
工作項目	年月													備註
	107 1	107 2	107 3	107 4	107 5	107 6	107 7	107 8	107 9	107 10	107 11	107 12		
收集與研析國際核能先進國家核能電廠除役過程中對週圍活動人員與工作場所環境影響程度之相關資料			※											
研析 RESRAD 除役人員劑量與工作場所評估之建構方法						※								查核點： 6/15 期中報告
進行 RESRAD 除役人員劑量與工作場所評估結果驗證研究									※					
針對核電廠除役留用建築之審查重點與接受準則提出建議											※			
完成期末報告											※			查核點： 11/15 期末報告
工作進度估計百分比 (累 積 數)	8 %	16 %	24 %	32 %	40 %	48 %	56 %	64 %	72 %	80 %	90 %	100 %		
預 定 查 核 點	<p>第一季：收集彙整國際核能先進國家針對核電廠除役過程對周遭人員及工作場所環境的影響。</p> <p>第二季：引進 RESRAD-BUILD 程式，進行 Test Run 及參數靈敏度分析，以掌握個別參數的重要性，並於 6 月 15 日之前提出期中報告</p> <p>第三季：進行 RESRAD-BUILD 評估結果的驗證。</p> <p>第四季：提出核電廠除役留用建築之審查重點與接受準則。並於 11 月 15 日前提出研究成果期末報告初稿，12 月底前完成計畫報告。</p>													
<p>說明：1.工作項目請視計畫性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起迄日期。</p> <p>2.「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：(1)工作天數，(2)經費之分配，(3)工作量之比重，(4)擬達成目標之具體數字。</p> <p>3.每季之「預定查核點」，請在條形圖上標明※符號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。</p>														

圖 2.1：計畫預定進度甘特圖

第三章 RESRAD-BUILD 程式介紹及應用

3.1 RESRAD-BUILD 程式介紹

美國阿岡國家實驗室(ANL)為有效評估放射性核種在場內與場外傳輸之曝露劑量與風險，開發 RESRAD 家族程式。其中，RESRAD-ONSITE 程式最初在 1980 年代初期發展出來，主要用來評估核設施廠址除役後廠區土壤所殘留之放射性活度所造成之輻射劑量與風險；隨後更因應不同狀況、需求、以及使用者之要求，在過去 30 幾年來陸續開發了包括不同模組功能的程式，此一整套程式即被稱為 RESRAD 家族程式，RESRAD 程式的發展歷史及 RESRAD 家族程式分別如圖 3.1、圖 3.2 所示。

RESRAD 家族程式已經被保健物理學家和輻射防護工程師作為輻射風險評估的工具，程式計算廠址特有之殘餘放射性物質之法規限值、輻射劑量和現場居民之癌症風險。目前 RESRAD 程式已經被廣泛地使用在美國和世界各國，並已獲聯邦和州政府核准，包括美國能源部 (DOE)、美國核管會 (NRC)、及美國環保署 (EPA) ...等。

本計畫所採用之 RESRAD-BUILD 程式(ref. 4, ref. 5)為 2009 年所正式釋出的 3.50 版。RESRAD-BUILD 係 ANL 在 1994 為評估建築物殘留放射性物質對於在建築物內活動的人員所造成的放射性劑量而發展，從那時以來，該程式已被美國 DOE 及其承包商，美國 NRC、EPA 和許多其他政府機

構廣泛使用。隨後並陸續針對用戶提供的意見加入新功能，逐步形成目前的版本，這些改進提高了使用 RESRAD-BUILD 的功能和靈活性。

RESRAD-BUILD 採用一種路徑分析模型，用於評估在受放射性物質污染的建築物內工作或生活的個人所產生的潛在輻射劑量；並採用室內空氣質量模型計算建築物內的放射性物質從一個房間到另一個房間的傳輸。空氣質量模型考慮了由於空氣交換、沉積和再懸浮、以及放射性衰變和子核種的產生，再進行放射性粉塵顆粒和氬氣子體的傳輸計算。

RESRAD-BUILD 程式一次運行可以模擬最多 3 個相鄰的房間、4 種污染射源項（包括點、線、面、和體積射源），10 個不同的射源位置（Sources）和 10 個接收體位置（Receptors）的建築物。其中體積射源可由多達五層不同材料組成，每層均勻且均向性；並可以在每個射源與受體之間指定屏蔽材料，用於計算體外加馬輻射劑量，使用者可以從中選擇 8 種不同的材料類型做為屏蔽材料，並輸入不同的材料密度。

RESRAD-BUILD 程式總計考慮七種不同的曝露路徑，包括：

- （1）直接來自外部的曝露源（External）。
- （2）外部曝露於沉積在地板上的材料（Deposition）。
- （3）由於空氣浸沒導致的外部曝露（Immersion）。
- （4）吸入空氣中的放射性粉塵顆粒（Inhalation）。

(5) 吸入空氣中之氡氣子體和氘化水蒸汽 (Radon & Tritium)。

(6) 無意中直接從射源項嚥入放射性物質 (Ingestion)。

(7) 嚥入沉積在建築結構表面上的材料 (Ingestion)。

此外，RESRAD-BUILD 評估的曝露情境可以包括 (但不限於) 辦公室工作人員、裝修工人、除污工作人員、參訪人員、或居住情境...等。同時可執行包括確定性 (deterministic) 和概率性 (probabilistic) 劑量分析方法，其結果可以文字或圖形報告顯示。

3.2 RESRAD-BUILD 程式的使用介面

RESRAD-BUILD 程式的使用介面如圖 3.3 所示(ref. 1)。程式參數的輸入分成 5 大族群，包括時間參數 (Time Parameters)、建築體參數 (Building Parameters)、受體參數 (Receptor Parameters)、射源參數 (Source Parameters)、以及屏蔽參數 (Shielding Parameters)。分別說明如下：

時間參數主要是用來描述受體欲評估劑量的曝露期間、受體在建築體內的時間比例、不連續曝露時間段的數量、進行劑量計算的開始時間、以及曝露期間內計算劑量的最大時間點數。時間參數的輸入圖框如圖 3.4 所示，主要輸入參數之說明、單位、預設值、及輸入途徑整理如表 3.1 所示。

建築體參數主要是用來描述房間的數量(最多三間)、房間的尺寸大小、房間內空浮微粒的沉積速度、再懸浮率、以及房間和房間彼此之間、房間和

戶外空氣之間的空氣交換比例。建築體參數的輸入圖框如圖 3.5 所示，主要輸入參數之說明、單位、預設值、及輸入途徑整理如表 3.2 所示。

受體參數則是用來說明受體的數量（最多 10 人）、受體所在位置（一般評估受體離地面 1 公尺處的劑量）、受體在不同位置或房間的時間比例、受體在房間內的呼吸率、以及嚥入的比例。受體參數的輸入圖框如圖 3.6 所示，主要輸入參數之說明、單位、預設值、及輸入途徑整理如表 3.3 所示。

射源參數則是用來模擬射源的數量（最多 10 個）、射源的種類（包括點、線、面、及體積射源 4 種）、射源所在的房間或位置、進一步可以說明污染射源的核種及活度、射源的物質形態、射源可脫落並進入空氣的比例、甚至模擬射源污染的區域及厚度、射源被直接嚥入的比例...等資訊。射源參數的相關輸入圖框如圖 3.7 所示，主要輸入參數之說明、單位、預設值、及輸入途徑整理如表 3.4 所示。

屏蔽參數則是用來模擬不同射源與不同受體之間的屏蔽資訊，包括屏蔽材料、材料密度、以及屏蔽厚度等資訊。屏蔽參數的輸入圖框如圖 3.8 所示，主要輸入參數之說明、單位、預設值、及輸入途徑整理如表 3.5 所示。

3.3 RESRAD-BUILD 程式的應用

RESRAD-BUILD 主要是用來評估廠房結構（包括地板、牆壁、天花板...等）中所殘留的放射性物質，對於在廠房內活動的人員所造成的輻射劑量。

考量現實層面，在台灣進行核電廠除役過程，受限於核廢料暫無最終處置場所，因此，最有可能將核電廠既有建築在除役過程中加以留用或改建，或做為除役廢棄物臨時處理設施、或最終成為放射性廢棄物的暫時貯存場所。

因留用建築可能仍殘留部分的放射性活度，並造成在此一建築體內工作或管理人員的輻射曝露（來自於體外直接輻射曝露、或透過呼吸所造成的體內輻射曝露）。執行單位有必要針對留用建築所殘留之放射性活度對建築物內部活動的人員所造成的輻射劑量進行評估；管制單位則必須針對留用建築進行必要的審查與驗證，以確保輻射安全無虞。

RESRAD-BUILD 已被證明可用於評估建築體殘留放射性活度對於在建築內活動人員所造成的劑量，同時也證明可做為建築物是否符合以劑量限值為除役要求準則的劑量評估工具。以美國已完成除役核電廠 Yankee Rowe 為例，在其執照終止計畫書（License Termination Plan）中的 6.4 節，特別針對執照終止時仍欲保留的 5 個建築體（包括 Primary Auxiliary Building, PAB Gravity Drain Tank, Spent Fuel Pit, Waste Disposal Building, 及 Elevator Pit）進行評估。建築體表面污染之 DCGL 值係以 RESRAD-BUILD 3.21 版、考量辦公室使用情境（Building Occupancy Scenario），曝露途徑則依據 NUREG / CR-5512 第 1 卷中描述的潛在曝露途徑，包括：

- 直接體外曝露（包括來自於建築體原始殘留放射性活度、空浮微粒沉積在地板上的放射性物質、以及浸入空氣中的灰塵）；

- 體內曝露（由於吸入空氣中的放射性粉塵所造成）；以及
- 體內曝露（由於無意間嚥入放射性物質所造成）。

表 3.6 比較了 RESRAD-BUILD 程式中所使用各項參數的預設值、美國已完成除役核電廠 Yankee Rowe 依據留存建築進行分析的使用值、以及本計畫為了進行後續靈敏度分析所設計的比較基準值。(ref. 6~ref. 11)

表 3.1：時間參數匯整說明

參數名稱	單位	程式預設值	參數說明 / 輸入路徑
Exposure Duration	Days (d)	365	劑量評估考慮的總時間長度。 (Time Parameters)
Indoor Fraction	Unitless	0.5	在室內持續曝露的時間比例。 (Time Parameters)
Number of Times for Calculation	Unitless	1	使用者自行定義的不連續曝露時段的數量。 (Time Parameters-->Evaluations Times)
Time	Years	1	進行劑量計算的曝露持續時間的開始時間。 (Time Parameters-->Evaluations Times)
Maximum Time Integration Points	Unitless	17	在曝露持續時間內，劑量率積分所用的最大點數。 (Time Parameters → Maximum Time Integration Points)

表 3.2：建築體參數匯整說明

參數名稱	單位	程式預設值	參數說明 / 輸入路徑 / 參考文件
Number of Rooms	Unitless	1	模擬不同氣流區域的房間數量。 (Building Parameters)
Deposition Velocity	m/s	0.01	建築物空氣中污染物顆粒的室內沉積速度。 (Building Parameters)
Resuspension Rate	s ⁻¹	5×10^{-7}	每單位時間內沉積在內表面上的材料又重新懸浮在室內空氣中的速率。 (Building Parameters)
Room Height	m	2.5	建築物中特定房間的地板與天花板之間的距離。 (Building Parameters → Airflow (room details))
Room Area	m ²	36	建築內特定房間的建築面積。 (Building Parameters → Airflow (room details))
Air Exchange Rate	1/h	0.8	每單位時間內建築物或房間內的空氣總量被外部空氣所取代交換的速率。 (Building Parameters → Airflow (room details))
Flow Rate between Rooms	m ³ /h	30	相鄰房間之間空氣流向各個方向的速率。 (Building Parameters → Airflow (room details))
Outdoor Inflow and Outflow	m ³ /h	72	空氣在房間和建築物外部之間流動的速度。 (Building Parameters → Airflow (room details))

表 3.3：受體參數匯整說明

參數名稱	單位	程式預設值	參數說明 / 輸入路徑 / 參考文件
Number of Receptors	Unitless	1	作為劑量評估對象的個體數量。 (Receptor Parameters)
Receptor Room	Unitless	1	受體所在的房間。 (Receptor Parameters)
Receptor Location	Meters (m)	1,1,1	受體所在位置的空間坐標。 (Receptor Parameters)
Receptor Time Fraction	Unitless	1	建築物內部的一個或多個受體在給定位置所花費的時間比例。 (Receptor Parameters)
Receptor Breathing / inhalation rate	m ³ /d	18	個體在受體位置吸入空氣的速率。 (Receptor Parameters)
Indirect Ingestion Rate	m ² /h	0.0001	在建築物內指定位置的受體針對沉積材料的攝取率。 (Receptor Parameters)

表 3.4：射源參數匯整說明

參數名稱	單位	程式預設值	參數說明 / 輸入路徑 / 參考文件
Number of Sources	Unitless	1	在劑量評估中要考慮的放射源位置的數量。 (Source Parameters)
Source Room/ Primary room	Unitless	1	特定射源所在的房間編號。 (Source Parameters)
Source Type	Unitless	Volume	射源物理分佈的幾何表示。 (Source Parameters)
Source Direction	Unitless	X axis	射源相對於三個笛卡爾坐標軸的方向。 (Source Parameters)
Source Location	Meters (m)	0,0,0	射源中心點在三維空間中相對於原點的空間位置。 (Source Parameters)
Source Length/Area	m ²	36	指污染射源在面積或體積射源中的曝露面積；或線性射源中的長度。 (Source Parameters → Source Details)
Air Release Fraction	Unitless	0.1	射源中釋放到空氣中的比例，並成為可吸入顆粒範圍的量。 (Source Parameters → Source Details)
Direct Ingestion Rate	g/h	0	直接來自射源的污染物質的偶然攝取率。 (Source Parameters → Source Details)
Removable Fraction	Unitless	0.5	點、線或面積射源中，可以被移除的比例。 (Source Parameters → Source Details)
Source Lifetime	Days (d)	365	射源的可移除部分被（線性）侵蝕的時間。 (Source Parameters → Source Details)
Radon Release Fraction	Unitless	0.1	鐳衰變產生的氡總量的一部分，它從污染物質表面逸出並釋放到空氣中。 (Source Parameters → Source Details)
Radionuclide Concentration/ Activity	Activity/ m ² or Activity/ g	1 pCi/g of Co-60	放射性射源中分佈的活度（對於點源）或活度濃度（對於體積，面積和線源）。 (Source Parameters → Source Details)
Number of Regions in Volume Source	Unitless	1	體積射源中不同層的數量。 (Source Parameters → Source Details)
Contaminated Region (Volume Source)	Unitless	1	體積射源中污染區域的數量。 (Source Parameters → Source Details → Wall Region Parameters)
Source Region Thickness (Volume Source)	cm	15	體積射源中每一層的厚度。 (Source Parameters → Source Details → Wall Region Parameters)
Source Density (Volume Source)	g/cm ³	2.4	體積射源中每個區域的體積密度。 (Source Parameters → Source Details → Wall Region Parameters)

Source Erosion Rate (Volume Source)	cm/d	2.4×10^{-8}	每單位時間內消除污染物質的量（表示為層的厚度[垂直於污染表面的距離]）。 (Source Parameters → Source Details→ Wall Region Parameters)
Source Porosity	Unitless	0.1	多孔性體積與射源材料的代表性樣品的總體積的比率。 (Source Parameters → Source Details→ Wall Region Parameters)
Radon Effective Diffusion Coefficient	m ² /s	2×10^{-6}	氡在空氣或材料中的擴散係數。 (Source Parameters → Source Details→ Wall Region Parameters)
Radon Emanation Fraction	Unitless	0.2	鐳衰變產生的氡總量的比例，它從污染物質的基質中逸出並進入介質的孔隙。 (Source Parameters → Source Details→ Wall Region Parameters)
Source Material	Unitless	Concrete	構成體積射源的材質。 (Source Parameters → Source Details)

表 3.5：屏蔽參數匯整說明

參數名稱	單位	程式預設值	參數說明 / 輸入路徑 / 參考文件
Shielding Thickness	cm	0	射源和受體對之間的有效屏蔽厚度。 (Shielding Parameters)
Shielding Density	g/cm ³	2.4	受體和輻射源之間的有效屏蔽密度。 (Shielding Parameters)
Shielding Material	Unitless	Concrete	在受體和射源之間的屏蔽所使用的材料類型。 (Shielding Parameters)

表 3.6：RESRAD-BUILD 各項參數值比較

(RESRAD 預設值、Yankee Rowe 使用值、本計畫比較基準值)

時間參數 (Time Parameters)				
參數名稱	程式預設值	美國除役核電廠 Yankee Rowe	比較基準值	比較基準值採用原因
Exposure Duration	365	365.25	365	計算一年劑量，以確認是否符合法規限值
Indoor Fraction	0.5	0.267	0.23	一年工作 2000 小時/一年 8760 小時
Number of Times for Calculation	1	1	1	一般在第一年的劑量會最高
Time	1	0	0	
Maximum Time Integration Points	17	17	17	依核種半衰期、或射源存在時間有關，可進行靈敏度分析
建築體參數 (Building Parameters)				
Number of Rooms	1	1	1	設定單一房間，房間尺寸:6m x 6m x 3m
Deposition Velocity	0.01	1.51E-05	0.01	與空浮微粒大小等因素相關，可進行靈敏度分析
		4.79E-04		
Resuspension Rate	5×10^{-7}	1.02E-06	5×10^{-7}	與房間內的活動情形相關，可進行靈敏度分析
		6.75E-10		
Room Height	2.5	3.51	3	依實際狀況
Room Area	36	19.71	36	依實際狀況
Air Exchange Rate	0.8	1.52	0	依實際狀況，可進行靈敏度分析
Flow Rate between Rooms	30	Not Required	-	one-room model，無需要
Outdoor Inflow and Outflow	72	Not Required	-	在 one-room model 中，與 Air exchange rate 同步改變
受體參數 (Receptor Parameters)				
Number of Receptors	1	1	1	考慮單一個人
Receptor Room	1	1	1	考慮單一房間

Receptor Location	1,1,1	2.22, 2.22, 1	3, 3, 1	評估房間中間，高度 1 公尺處之劑量
Receptor Time Fraction	1	1	1	全時間
Receptor Breathing / inhalation rate	18	33.6	28.8	以工作狀態 1.2m ³ /h，計算一天 24 小時
Indirect Ingestion Rate	0.0001	0	0	無進食
射源參數 (Source Parameters)				
Number of Sources	1	5	1	僅地板受到污染殘留
Source Room/ Primary room	1	1	1	單一房間
Source Type	Volume	Area	Volume	體積射源，厚度 15 公分，均勻分布
Source Direction	X axis	Z axis (Floor)	Z-axis	地板污染
		X axis (West Wall)		
		Y axis (North Wall)		
		X axis (East Wall)		
		Y axis (South Wall)		
Source Location	0,0,0	2.22, 2.22, 0 (Floor)	3, 3, -0.075	地板均勻污染 (6m x 6m x 15cm)
		0, 2.22, 1.76 (West Wall)		
		2.22, 4.44, 1.76 (North Wall)		
		4.44, 2.22, 1.76 (East Wall)		
		2.22, 0, 1.76 (South Wall)		
Source Length/Area	36	19.71 (Floor)	36	6m x 6m
		15.58 (West Wall)		
		15.58 (North Wall)		
		15.58 (East Wall)		
		15.58 (South Wall)		
Air Release Fraction	0.1	1 (for H-3)	0.1	假設從原始污染源脫落之放射性物質，會有 10% 進入空氣中，可進行靈敏度分析
		0.07 (for all nuclides except H-3)		
Direct Ingestion Rate	0	1.34E-06	0	無進食

Removable Fraction	0.5	0.1	0.1	假設 10% 為鬆散污染(體積射源 無需輸入)
Source Lifetime	365	18240	365	假設移除的持續存在 1 年(體積 射源無需輸入)
		52777		
Radon Release Fraction	0.1	Not Required	-	無氡氣釋放
Radionuclide Concentration/ Activity	1 pCi/g of Co-60	1 pCi/m ²	1 Bq/g of Co-60	假設為單一 Co-60 污染射源， 比活度為豁免管制上限之 1/10
Number of Regions in Volume Source	1	Not Required (Area Source)	1	單一污染層
Contaminated Region (Volume Source)	1	Not Required (Area Source)	1	單一污染層
Source Region Thickness (Volume Source)	15	Not Required (Area Source)	15	污染厚度，可進行靈敏度分析
Source Density (Volume Source)	2.4	Not Required (Area Source)	2.4	地板混凝土密度
Source Erosion Rate (Volume Source)	2.4×10^{-8}	Not Required (Area Source)	2.4×10^{-8}	地板腐蝕脫落率，可進行靈敏 度分析
Source Porosity	0.1	Not Required	-	體積射源，無需輸入
Radon Effective Diffusion Coefficient	2×10^{-6}	Not Required	-	無氡氣釋放
Radon Emanation Fraction	0.2	Not Required	-	無氡氣釋放
Source Material	Concrete	Not Required (Area Source)	Concrete	地板材質
屏蔽參數 (Shielding Parameters)				
Shielding Thickness	0	0	0	無屏蔽設計
Shielding Density	2.4	0	0	無屏蔽設計
Shielding Material	Concrete	None	None	無屏蔽設計

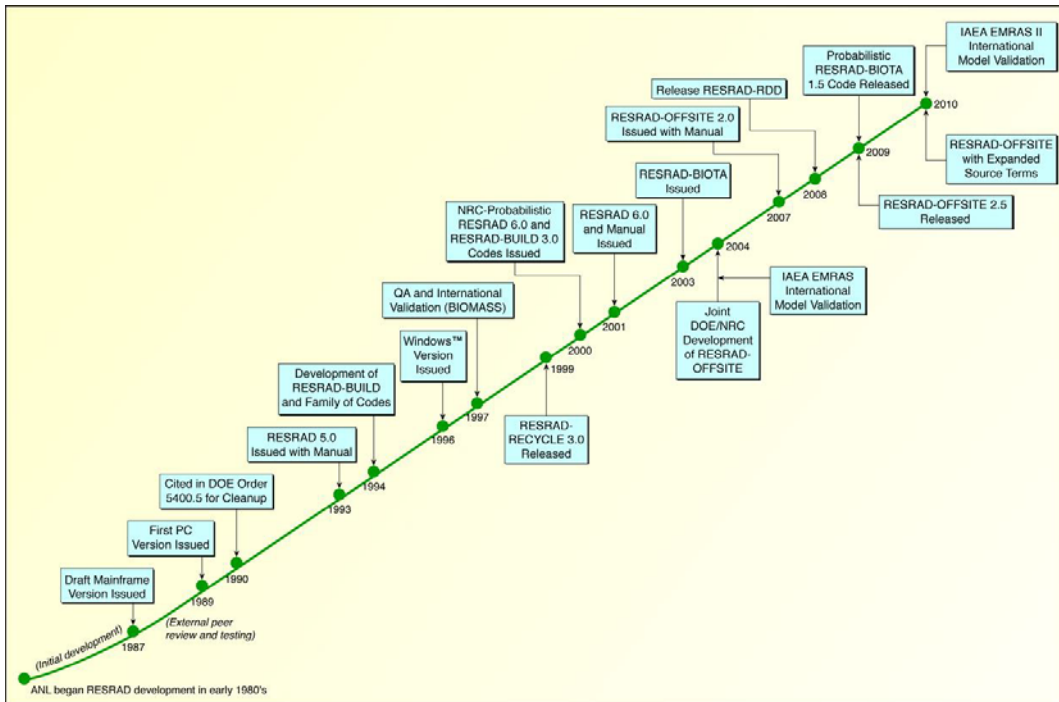


圖 3.1：RESRAD 家族程式發展歷史示意圖

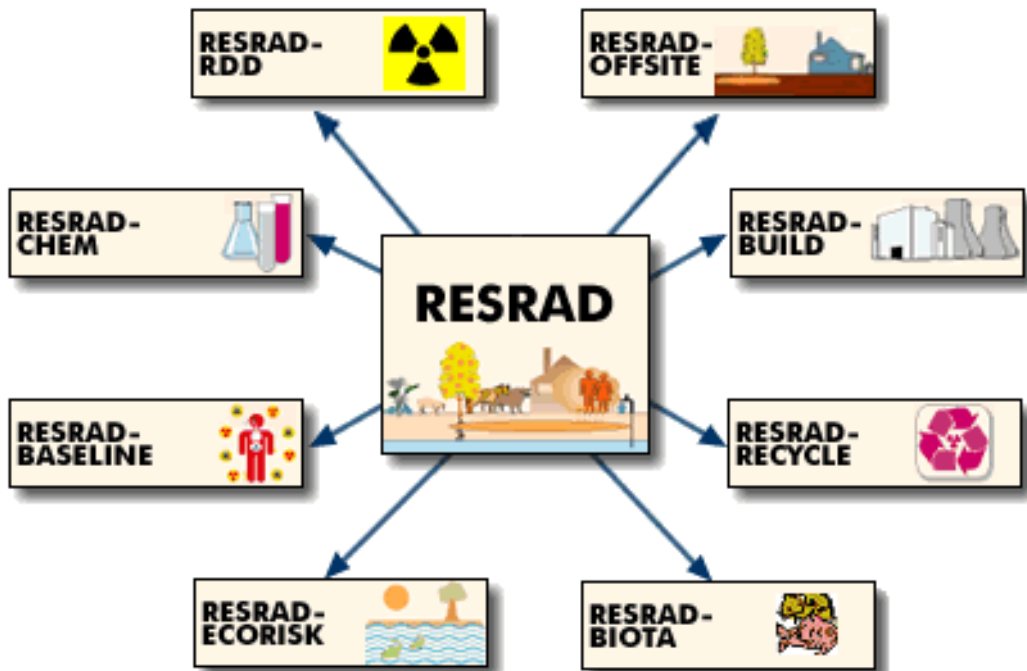


圖 3.2：因應不同模組功能所建立之 RESRAD 家族程式

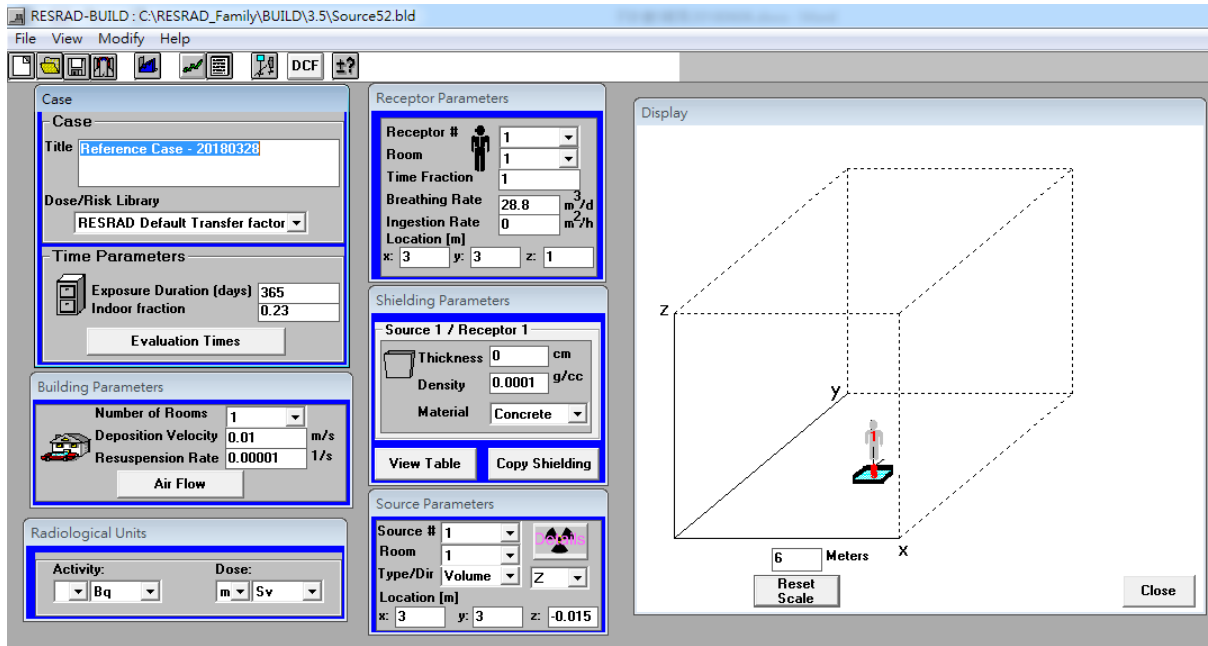


圖 3.3：RESRAD-BUILD 的使用介面

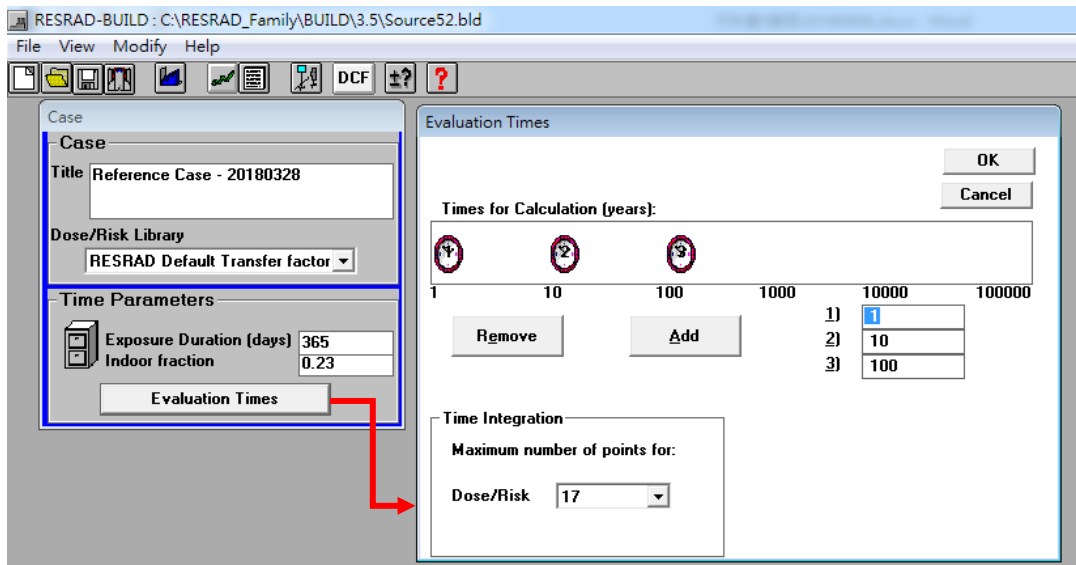


圖 3.4：時間參數輸入圖框

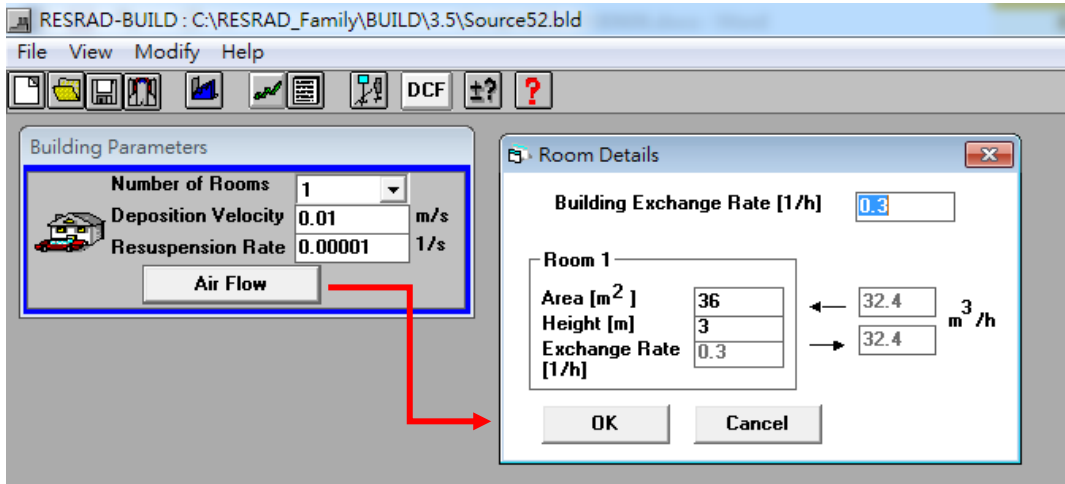


圖 3.5：建築體參數輸入圖框

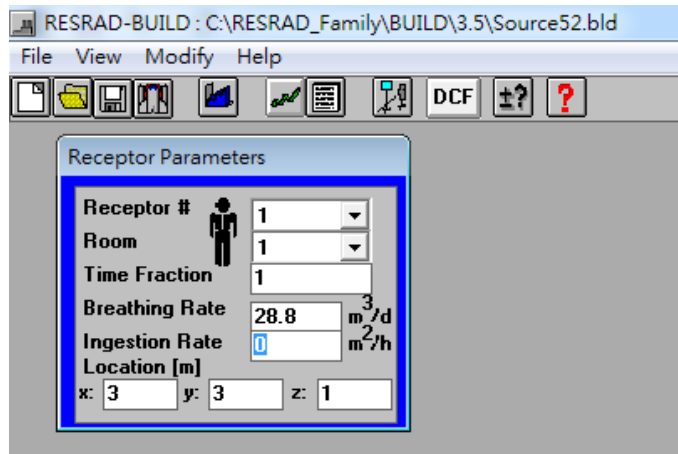


圖 3.6：受體參數輸入圖框

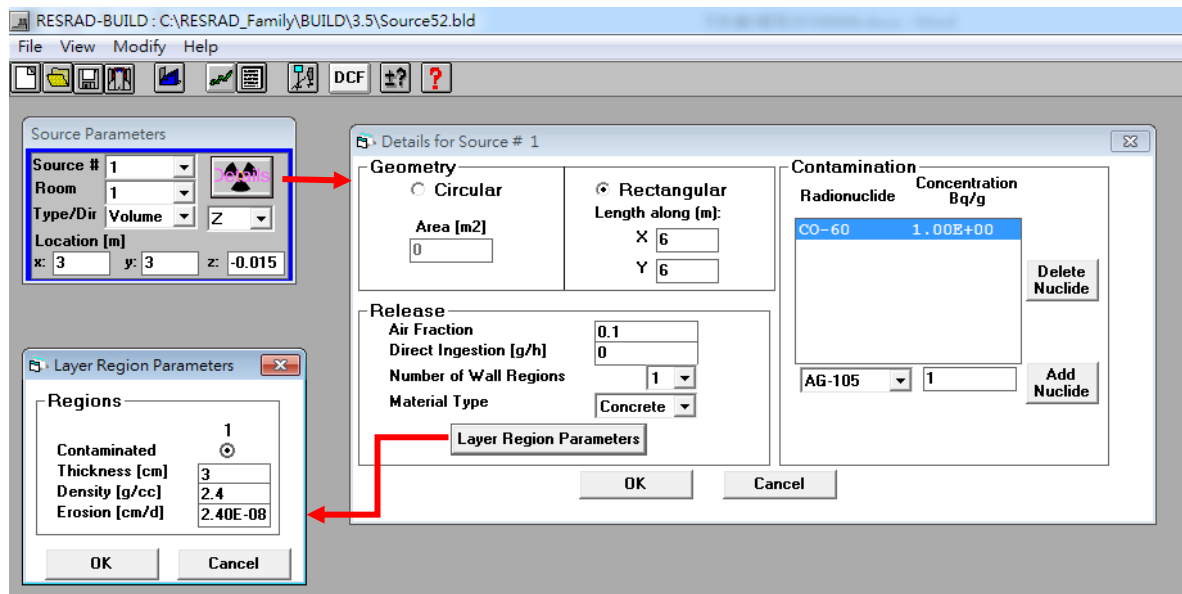


圖 3.7：射源參數輸入圖框

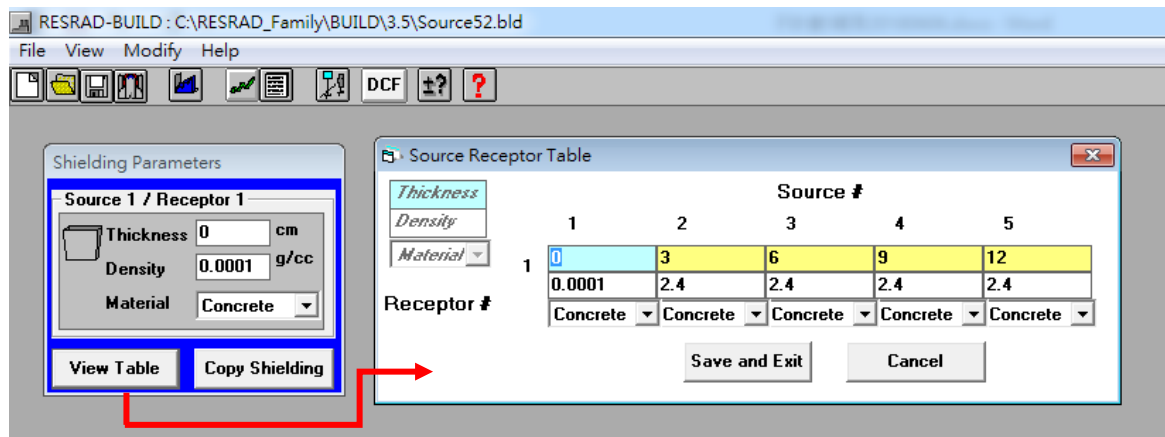


圖 3.8：屏蔽參數輸入圖框

第四章 RESRAD-BUILD 參數靈敏度分析

4.1 參數說明

若以參數的性質來劃分，RESRAD-BUILD 的參數基本上可分為三大類：第一類為物理相關類（Physical，P 類），主要和廠址特性相關，如污染房間數量、房間尺寸大小、污染核種及活度、污染位置或區域、污染型式、屏蔽材料及設計...等；第二類為行為相關類（Behavioral，B 類），主要是和受體行為相關，如：曝露期間、待在建築體內的時間比例、受體所在位置或房間、空氣交換率、受體呼吸率或嚥入比例...等；第三類為新陳代謝相關（Metabolic，M 類），主要是和受體接受輻射之後的生理反應相關，如體外輻射劑量轉換參數（External Dose Conversion Factor）、空浮沉浸（Air Submersion）劑量轉換參數、吸入（Inhalation）劑量轉換參數、嚥入（Ingestion）劑量轉換參數。

有關各種劑量轉換參數(ref. 12, ref. 14)，目前 RESRAD-BUILD 的預設值是依據 ICRP-26 號報告所推導出的聯邦指導報告(Federal Guidance Report, FGR) 第 11、12、及 13 號報告；另一個選項則是依據 ICRP-60 報告所提供的體外劑量轉換參數和 ICRP-72 報告依據年齡別的吸入和嚥入轉換參數。為方便靈敏度分析之比較，後續之研究將以 RESRAD-BUILD 預設值為依據。

4.2 比較基準模型

為了建構研析 RESRAD 除役人員劑量與工作場所評估、同時方便靈敏度分析比較的進行，本計畫設計了比較基準模型如圖 4.1 所示。利用此一模型配合 RESRAD-BUILD 程式計算，可以評估除役工作人員在留用建築內進行除役過程接受輻射劑量的來源，並進一步評估此一工作場所的輻射工作環境。此外，藉由各參數的靈敏度分析，可掌握各項參數的重要性，再依據除役現場實際條件(如工作場所尺寸、工作人員可能位置、污染核種、強度分佈狀況、作業時間、現場空浮抽氣過濾...等)，即可計算除役工作人員的劑量，並評估工作場所的輻射分佈情形。

在此一模型中，僅考慮單一房間(One-room model)、房間面積 36m^2 ($6\text{m} \times 6\text{m}$)、房間高度 3m、污染源位於地板之均勻體積射源(厚度 15 公分)、受體位於房間正中央位置、不考慮房間內進食嚥入情形，其他輸入參數條件及採用原因如上一章之表 3.6 所示。

在 RESRAD-BUILD 劑量評估中，劑量的來源主要包括體外劑量、吸入劑量、及嚥入劑量三大類。其中體外劑量的來源又區分為污染源的直接體外曝露(Direct external dose)、沉積於地面污染物所造成的體外劑量(Deposition dose)、以及浸潤於空氣中污染懸浮微粒所造成的體外劑量(Immersion dose)；吸入劑量的來源則又區分為：吸入空浮微粒(包含重新懸浮微粒)所造成的劑量(Inhalation dose)、以及因為氡氣產生所造成的劑量(Radon dose)；嚥

入劑量的來源則可區分為直接嚥入原始污染源所造成、以及間接嚥入因空
 浮微粒沉積污染所造成。在本計畫之比較基準模型中，因不考慮氬氣子核的
 產生、也不考慮在房間內進食的可能性，因此劑量種類主要來自體外劑量
 （三種）和吸入劑量（一種）。

針對一個體積射源在第 i 個房間因為放射性核種 n 所造成的體外曝露
 劑量 ($D_{iV}^n(t)$)，基本上可以利用 4.1(式)計算求得：

$$D_{iV}^n(t) = \left(\frac{ED}{365}\right) F_{in} F_i \overline{C_{sV}^n(t)} DCF_V^n F_G^n \quad (4.1)$$

其中：

ED：曝露期間（天）；

F_{in} ：待在室內的時間比例；

F_i ：待在第 i 個房間的比例；

$C_{sV}^n(t)$ ：曝露期間內的平均體積射源濃度(pCi/g)；

DCF_V^n ：考量無限（寬度及厚度無限大）體積射源條件下的劑量轉
 換參數，(mrem/yr)/(pCi/g)；

F_G^n ：幾何因子，用來修正有限面積、屏蔽、射源材料、或受體位
 置的修正，主要由下列三項因素組成：

F_{CD} ：深度及屏蔽修正因子(depth-and-cover factor)；

F_{AM} ：面積及材料修正因子(area and material factor)；

$F_{OFF-SET}$ ：偏向修正因子(off-set factor)；

吸入劑量則主要由室內的空浮濃度來決定，再考量受體的呼吸率、以及吸入核種的劑量轉換參數來計算求得。其中房間內的體積空浮濃度變化 ($V dC/dt$) 可以由房間內的質量平衡模式推導，並表示如 4.2(式)：

$$V dC/dt = I - QC - \lambda VC + \lambda VC_p - \lambda_D VC + \lambda_R \lambda_D VC / (\lambda_R + \lambda) \quad (4.2)$$

其中：

I ：從原始污染源轉換為空浮微粒的注入（增加）；

QC ：與房間外空氣的交換（減少）；

λVC ：核種在空氣中的衰變（減少）；

λVC_p ：由母核種衰變所產生（增加）；

$\lambda_D VC$ ：在房間內因沉積掉落地面（減少）；

$\lambda_R \lambda_D VC / (\lambda_R + \lambda)$ ：沉積在地面之污染重新懸浮至空氣中（增加）。

至於各種劑量轉換參數，目前 RESRAD-BUILD 的預設值是依據 ICRP-26 號報告所推導出的聯邦指導報告 FGR-11、FGR-12、及 FGR-13；另一個選項則是依據 ICRP-60 報告所提供的體外劑量轉換參數和 ICRP-72 報告依據年齡別的吸入和嚥入轉換參數。為方便靈敏度分析之比較，後續之研究將以 RESRAD-BUILD 預設值為依據。

4.3 參數靈敏度測試

如同 4.1 節所述，RESRAD-BUILD 各項參數中，屬於第一類物理類的參數主要和廠址特性相關，此一部份必須依據個別廠址的實際情況加以模

擬（如房間數量、房間尺寸大小...等）、或必須進行詳細廠址污染情況調查（如污染核種及活度、污染位置或區域、污染型式...等），進行靈敏度測試的意義不大；屬於第二類行為相關類的參數則主要是和受體行為相關，此一部份可能因現場不同工作條件（如空氣交換率、沉積速率、再懸浮速率、污染物進入空氣比例、污染物移除比例...等）而造成不一樣的輻射曝露結果，因此有必要進行靈敏度分析；至於第三類新陳代謝相關的參數，主要是各種曝露途徑的劑量轉換參數，本計畫暫時以 RESRAD-BUILD 預設值為主。

以下本計畫將以比較基準模型為範例，針對 RESRAD-BUILD 主要參數進行靈敏度分析，並說明如下：

(1) 最大時間積分計算點數，Maximum Time Integration Points

(POINT)：

本參數是指在整個曝露時間內，計算累計劑量所用的最大計算點數。使用者可以選擇 1, 2, 3, 5, 9, 17, 33, 65, 129, 或 257 作為計算時間積分劑量的點數。如果使用者選擇 1，表示 RESRAD-BUILD 將以指定時間的瞬時劑量率來計算曝露期間的總劑量（一般較為保守）。

表 4.1 是比較兩種不同放射性核種（Co-60 及 I-131），利用不同計算點數評估所得的結果（計算結果以 1 個計算點數的結果進行歸一化）。隨著計算點數的增加，計算結果會逐步下降而趨於穩定，但不同核種因為半衰期長短的差異性，計算結果趨於穩定所需要的計算點數也不一樣。

一般而言，若評估一年曝露期間的劑量，核種半衰期也在五年以上，3 個計算點數應已足夠；若核種半衰期只有幾天，則計算點數最好在 33 個以上。考量核電廠除役污染源含有多樣核種、且半衰期較短的核種在除役真正進行前可能已衰變殆盡，因此選擇 RESRAD-BUILD 預設值 17 應該已能符合需求。

(2) 沉積速度，Deposition Velocity (UD)：

本參數是表示建築體內空氣中的空浮微粒的沉積速度。由於沉積速度取決於顆粒大小，所以預計沉積速度的概率密度函數分佈取決於顆粒大小分佈（圖 4.2 是 RESRAD-BUILD 所建議之沉積速度與粒子大小的關係曲線），數值約介於 $1 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^{-5}$ 之間，本計畫亦在此範圍進行靈敏度測試。

表 4.2 是利用比較基準模型所得之沉積速度對劑量所造成的影響。當沉積速度變大時，由於沉積到地面的污染物增加，導致 Deposition 所造成的體外劑量微幅增加；但因為空浮濃度同時變小，導致 Immersion 的體外劑量、以及 Inhalation 的吸入劑量也明顯變小。

此外，沉積速度也與核種有關，表 4.3 顯示不同放射性核種的平均沉積速度（ref. Roed and Cannell, 1987），但目前 RESRAD-BUILD 的計算過程中，針對沉積速度，不管空浮微粒大小、或放射性核種種類，僅能設定為同一個沉積速度。

從輻防管制觀點來看，由於沉積污染物並非體外劑量的主要來源，若基於吸入劑量的保守考量，並考慮 Cs-137 的平均沉積速率，取 1×10^{-4} (m/s) 應屬合理。

(3) 再懸浮率，Resuspension Rate (DKSUS)：

再懸浮率（室內）係表示每單位時間沉積在室內表面上的物質重新懸浮到室內空氣中的速率，一般重新懸浮是受到氣流或機械干擾的結果（如空調系統、人員走動、室內清掃...等）。再懸浮率與室內活動程度有極大關係，不同的研究報告的結果也有明顯差異。目前 RESRAD-BUILD 所蒐集的研究報告顯示其數值介於 2.5×10^{-11} ~ 1.3×10^{-5} 之間，因此本計畫也約略在此範圍進行靈敏度測試。

表 4.4 是利用比較基準模型所得之再懸浮率對劑量所造成的影響。再懸浮率變大時，導致空浮濃度增加，因此 Immersion 的體外劑量、以及 Inhalation 的吸入劑量也隨之增加，但因為再懸浮率僅占沉積污染物的一小部分，因此對於沉積污染物所造成的體外劑量影響並不明顯。

由於影響再懸浮率的變數眾多、且並無完整報告界定範圍，基於本參數主要影響係導致吸入劑量的增加，預設值 5×10^{-7} (1/s) 應屬合理，但在輻防管制上仍應注意避免過度擾動造成空浮濃度的增加。

(4) 空氣交換率，Air Exchange Rate (LAMBDA T、LINPUT)：

建築物或房間的空氣交換（或通風）率是指建築物或房間在每單位時間內由外部空氣取代的空氣總量。例如，一個空氣交換率為每小時1次（1/h）的建築物（或房間）係指平均每小時更換一次空氣。空氣交換率與空調系統的換氣率有關，因此本計畫在換氣率：0~1 之間進行靈敏度測試。

表 4.5 是利用比較基準模型所得之空氣交換率對劑量所造成的影響。當空氣交換率變大時，室內空浮濃度因室外乾淨空氣替換而降低，因此 Deposition、Immersion 的體外劑量、以及 Inhalation 的吸入劑量也隨之明顯降低。因此，從輻防管制觀點來看，若除役工作場所因空浮濃度太高導致吸入劑量增加時，可加強空氣交換率來降低劑量；但考量污染空氣可能會藉由排氣而影響戶外環境，應同時加裝過濾裝置，以降低對戶外一般環境的影響。

(5) 空氣釋放比例，Air Release Fraction (AIRFR)：

空氣釋放比例是指從原始污染源移除的放射性物質中，釋放出可被吸入顆粒大小範圍到空氣中的污染物質的量。本參數與污染牆面侵蝕（Erosion）過程有極大的關聯性，例如打磨，刮擦或碎裂等機械干擾會導致比較高的污染物去除率，但同時釋放到空氣中比例反而較小（因為大部分被侵蝕的材料傾向於落在地板上，隨即可透過家務活動從房間中移出）；除塵（Dusting）活動會導致較低的侵蝕速率，但相對較高的比

例會釋放到空氣中；吸塵(Vacuuming)則可能導致比除塵更高的侵蝕率，但是更小的部分會釋放到空氣中(因為很大一部分會被吸附在吸塵器中)。由於本參數的大小完全取決於不同的作業方式，因此本計畫在空氣釋放比例： 10^{-6} ~1.0 換進行靈敏度測試。

表 4.6 是利用比較基準模型所得之空氣釋放比例對劑量所造成的影響。當空氣釋放比例增加時，導致 Deposition, Immersion, 及 Inhalation 的劑量也隨之增加。此外，由於 RESRAD-BUILD 計算過程會先考慮污染射源的移除率(Removable Fraction，適用於點、線、面射源)或侵蝕率(Erosion Rate，適用於體積射源)，再針對其中有多少比例會轉變成為透過呼吸可吸入的粒子大小範圍，因此，External Dose 的劑量維持不變。

從輻防管制觀點來看，若除役作業屬於空氣釋放比例較高的情形，可透過限縮作業範圍(例如小範圍帷幕作業)來降低整體作業環境的空氣浮程度。

(6) 射源侵蝕率，Source Erosion Rate – for Volume source (EROS0)：

本參數適用於體積射源，係表示在單位時間內(天)原始污染源被移除的數量(表示為垂直於污染表面的厚度)。射源侵蝕率與污染所在位置及相關活動有密切關係，例如若污染牆面塗有油漆保護層、或地面鋪設磁磚，射源侵蝕率可能很低、甚至為 0；反之，在進行室內整修或執

行污染牆面除污過程，射源侵蝕率可能相當高。因此，本計畫在射源侵蝕率：0~0.1 之間進行靈敏度測試。

表 4.7 是利用比較基準模型所得之射源侵蝕率對劑量所造成的影響。隨著射源侵蝕率變大時，導致 Deposition, Immersion, 及 Inhalation 的劑量也明顯隨之增加。然而，除非在射源侵蝕率很大的情況下，直接體外輻射劑量 (External) 才會明顯變小，若在合理的射源侵蝕率情況下 (如 $<5.6 \times 10^{-07}$)，External 劑量幾乎維持不變。

從輻防管制觀點來看，若建築體污染嚴重可能導致過量的直接體外輻射劑量，應先進行污染牆面除污，才能留做其他用途。

(7) 射源模擬測試，Source Description Test：

雖然上述的各項參數變異皆有可能對於所造成的輻射劑量有所影響，但真正影響劑量貢獻的首要因素仍在於對污染射源的掌握程度，包括對污染射源的核種、活度、污染位置及分佈方式...等。因此，本計畫將以比較基準模型中的射源為範本，同時利用不同射源模擬方式，探討其對於劑量所造成的影響。

在 RESRAD-BUILD 中對於射源的模擬，最多可同時輸入 10 個射源，其中每個射源最多又可分為 5 層。因此，在比較基準模型中的地面污染射源 (體積射源、厚度 15 公分)，本計畫以另外三種方式進行模擬，包括(A)維持單一體積射源但均分為 5 層，每層 3 公分；(B)將原本的單

一體積射源均分為 5 個獨立的體積射源，每個射源只有一層(3 公分)，非計算射源項的位置，另設計相同尺寸及密度的材料做為屏蔽體；(C)同上述(B)之設計，但非計算射源項的位置不提供另外的屏蔽設計。

表 4.8 顯示相同射源、不同模擬方式對累積劑量所造成的影響。相同射源以不同的方式進行模擬計算時，其結果也會略有不同，但差異不大（小於 5%）。但 RESRAD-BUILD 在計算體外直接輻射劑量時，對於非計算射源項，雖然仍有材料、密度等參數輸入，但計算時並不會視為屏蔽材料，因此若不在非計算射源項的位置另外輸入屏蔽設計，將導致體外直接輻射曝露劑量嚴重高估（如模擬(C)之情況）。

(8) 其他參數：

RESRAD-BUILD 的其他參數可能與個別廠址的特性有關，如污染房間數量、房間相關尺寸、污染核種與活度、污染範圍、污染型態、屏蔽設計...等；也可能與受體的作業管制有關，如受體所在房間或位置、受體待在室內的時間、受體曝露期間、呼吸率或嚥入率...等。這些參數進行靈敏度分析的意義並不大，反而必須要求執行單位針對廠址特性進行詳細調查與描述，以及透過輻防管制措施，針對工作人員的工作模式進行合理安排。

4.4 參數重要性匯整與建議

如同上節所述、以及主要參數的靈敏度分析結果，RESRAD-BUILD 各項參數中，屬於物理類（P類）的參數主要和廠址特性相關，此一部份必須依據個別廠址的實際情況加以模擬（如房間數量、房間尺寸大小…等）、或必須進行詳細廠址污染情況調查（如污染核種及活度、污染位置或區域、污染型式…等）。由於此類參數主要與現場條件相關，原能會審查台電報告時可確認這些參數是否符合現場條件，同時針對高靈敏度參數可要求台電進行必要且合理之調查。此處所謂高靈敏參數主要是針對射源項的描述（包括主要放射性核種及其活度、射源型式及其射源分佈情形、射源密度、可移除射源比例…等），因此有必要進行詳細污染源的的特性調查。其他次要的參數則包括建築物幾何尺寸、沉積速度與再懸浮比例、空氣釋放比例、射源侵蝕率…等。

另外一類屬於行為相關類（B類）的參數則主要是和受體行為相關，此一部份可能因現場不同工作條件（如空氣交換率、沉積速率、再懸浮比率、污染物進入空氣比例、污染物移除比例…等）而造成不一樣的輻射曝露途徑與結果。由於此類參數主要與現場輻防管制作業相關，可依據除役輻防管制作業條件確認是否合理。例如若作業現場空浮濃度太高，可藉由加強空氣交換率、或抑制再懸浮比例來達到空浮濃度降低的效果；若總體體外輻射劑量偏高，則可藉由提高污染物移除比例（或射源侵蝕率）在短期內降低射源總

強度，以確保長期使用的安全；此外，亦可藉由控管工作人員在室內持續曝露的時間比例、或提供屏蔽設計來達到輻防管制的要求。

最後一類是新陳代謝相關（M類）的參數，主要是各種曝露途徑的劑量轉換參數，只需確認業者所使用之參數是否保守且符合現行輻防法規即可。

管制者（原能會）主要應著重於個別參數靈敏度的掌握及合理性判斷，本土化參數調查則應是業者（台電）要做的事。

表 4.1：不同核種與計算點數的比較

點數 / 核種	Co-60 (T _{1/2} =5.27 年)	I-131 (T _{1/2} =8.04 天)
1	1.0000	1.0000
2	0.9399	0.5000
3	0.9356	0.1663
5	0.9356	0.0835
9	0.9356	0.0449
17	0.9356	0.0336
33	0.9356	0.0319
65	0.9356	0.0318
129	0.9356	0.0318
257	0.9356	0.0318

表 4.2：沉積速度對劑量造成之影響

Deposition Velocity (m/s)	External (mSv)	Deposition (mSv)	Immersion (mSv)	Inhalation (mSv)
1 x 10 ⁻¹	5.86E-01	6.03E-07	6.92E-10	1.08E-07
1 x 10 ⁻²	5.86E-01	6.03E-07	6.92E-09	1.08E-06
1 x 10 ⁻³	5.86E-01	6.02E-07	6.91E-08	1.08E-05
1 x 10 ⁻⁴	5.86E-01	5.94E-07	6.82E-07	1.07E-04
1 x 10 ⁻⁵	5.86E-01	5.24E-07	6.01E-06	9.39E-04

表 4.3：不同放射性核種的平均沉積速度

放射性核種	平均沉積速度(m/s)
Cs-137	6.4×10^{-5}
Cs-134	6.2×10^{-5}
I-131 (particulate)	1.1×10^{-4}
Be-7	7.1×10^{-5}
Ru-103	2.0×10^{-4}
Ru-106	1.7×10^{-4}
Ce-141	3.1×10^{-4}
Ce-144	3.9×10^{-4}
Zr-95	5.8×10^{-4}
Nb-95	1.9×10^{-4}

表 4.4：再懸浮率對劑量所造成的影響

Resuspension Rate (1/s)	External (mSv)	Deposition (mSv)	Immersion (mSv)	Inhalation (mSv)
1×10^{-11}	5.86E-01	6.03E-07	5.74E-11	8.96E-09
1×10^{-10}	5.86E-01	6.03E-07	5.86E-11	9.15E-09
1×10^{-09}	5.86E-01	6.03E-07	7.09E-11	1.11E-08
1×10^{-08}	5.86E-01	6.03E-07	1.94E-10	3.04E-08
1×10^{-07}	5.86E-01	6.03E-07	1.43E-09	2.23E-07
1×10^{-06}	5.86E-01	6.03E-07	1.38E-08	2.15E-06
1×10^{-05}	5.86E-01	6.01E-07	1.37E-07	2.14E-05

表 4.5：空氣交換率對劑量所造成的影響

Air Exchange Rate (1/h)	External (mSv)	Deposition (mSv)	Immersion (mSv)	Inhalation (mSv)
0	5.86E-01	6.01E-07	1.37E-07	2.14E-05
0.1	5.86E-01	2.87E-08	3.54E-09	1.02E-06
0.2	5.86E-01	1.47E-08	3.35E-09	5.23E-07
0.4	5.86E-01	7.44E-09	1.70E-09	2.65E-07
0.6	5.86E-01	4.98E-09	1.13E-09	1.77E-07
0.8	5.86E-01	3.74E-09	8.53E-10	1.33E-07
1.0	5.86E-01	3.00E-09	6.83E-10	1.07E-07

表 4.6：空氣釋放比例對劑量所造成的影響

Air Release Fraction (Unitless)	External (mSv)	Deposition (mSv)	Immersion (mSv)	Inhalation (mSv)
1×10^{-06}	5.86E-01	9.88E-14	2.25E-14	3.52E-12
1×10^{-03}	5.86E-01	9.88E-11	2.25E-11	3.52E-09
1×10^{-01}	5.86E-01	9.88E-09	2.25E-09	3.52E-07
5×10^{-01}	5.86E-01	4.94E-08	1.13E-08	1.76E-06
$1 \times 10^{+00}$	5.86E-01	9.88E-08	2.25E-08	3.52E-06

表 4.7：射源侵蝕率對劑量所造成的影響

Source Erosion Rate (cm/d)	External (mSv)	Deposition (mSv)	Immersion (mSv)	Inhalation (mSv)
0	5.86E-01	0	0	0
1×10^{-09}	5.86E-01	4.12E-10	9.38E-11	1.47E-08
1×10^{-07}	5.86E-01	4.12E-08	9.38E-09	1.47E-06
1×10^{-05}	5.86E-01	4.12E-06	9.38E-07	1.47E-04
1×10^{-03}	5.84E-01	4.12E-04	9.38E-05	1.47E-02
1×10^{-01}	1.67E-01	1.69E-02	3.86E-03	6.03E-01

表 4.8：相同射源、不同模擬方式對累積劑量所造成的影響

Source Description	Region/source	Dose (mSv)	Accumulated Dose (mSv)
1 Volume Source - 1 region (15cm/source)	1	5.86E-01	5.86E-01
模擬(A)： 1 Volume Source - 5 regions (3cm/region)	1	2.16E-01	5.96E-01 (+1.7%)
	2	1.66E-01	
	3	1.09E-01	
	4	6.63E-02	
	5	3.90E-02	
模擬(B)： 5 Volume Source - 1 region (3cm/source) With shielding	1	2.25E-01	6.09E-01 (+3.92%)
	2	1.71E-01	
	3	1.09E-01	
	4	6.59E-02	
	5	3.86E-02	
模擬(C)： 5 Volume Source - 1 region (3cm/source) Without shielding	1	2.25E-01	1.08E+00 (+84.3%)
	2	2.20E-01	
	3	2.16E-01	
	4	2.11E-01	
	5	2.08E-01	

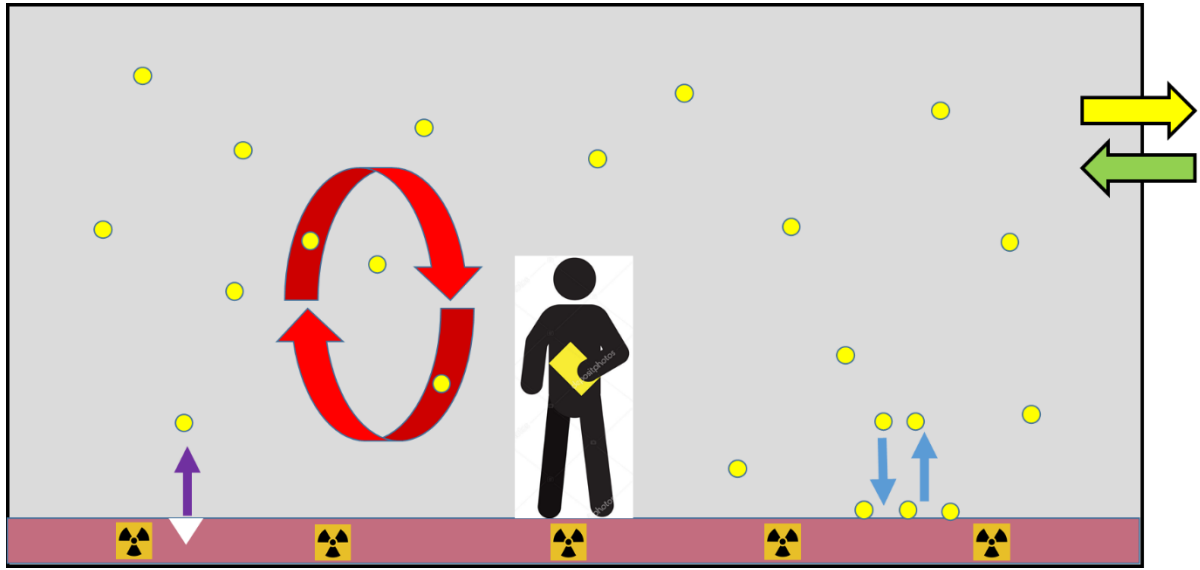


圖 4.1：比較基準模型

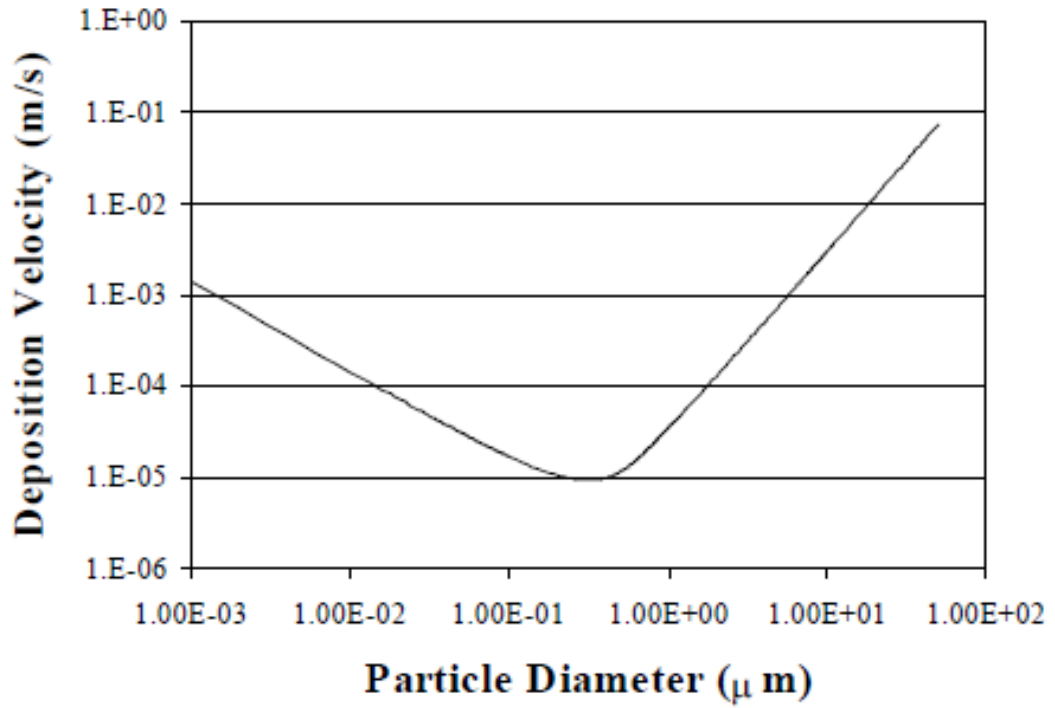


圖 4.2：沉積速度與粒子大小的關係曲線(RESRAD-BUILD 建議)

第五章 RESRAD-BUILD 程式驗證

為了進行 RESRAD-BUILD 程式與實際案例的驗證，本研究選擇清華大學生物科技南館(曾遭受 Cs-137 輻射污染建築)做為個案研究標的，最主要原因係該建築有比較詳細的污染特性調查、以及室內空間輻射劑量率測量數據，可做為模擬計算結果的驗證，進而提升執行該程式的掌握度。

5.1 生物科技南館污染歷史

西元 1970 年，有位高雄劉姓醫師載送 Cs-137 射源前來清華大學要求分裝，抵達時的偵測過程卻發現容器表面輻射劑量甚高，懷疑包封該銫-137 射源之鉛罐已然破損污染，遂將該射源鉛罐存放於現今生物科技館前放射廢料貯存溝內，並在原能會要求下代為保管該射源。

西元 1977 年，原科所建築（後改稱生物科技南館）開始施工興建，施工期間適值夏天經常缺水，工程承包商擅自將上鎖溝蓋打開，引入自來水注入廢料貯存溝儲備，並自貯存溝內抽水使用攪拌水泥，提供窗戶修補及水泥灌漿表面塗抹之用途，遂造成該建築全面污染。清華大學原科中心在確認該建築遭受污染之後，立即動員全體保健物理人員輪流監督進行除污工作。該建築雖然經過除污，但仍然殘留低活度的銫-137 放射性物質。為確保該建築能符合當時輻射防護法規以提供繼續使用之用途，後來在該建築外牆增加約 15 公分的水泥屏蔽結構之後，建築周圍之空間輻射劑量率已降低至背

景輻射劑量率變動範圍，該建築才陸續做為原科所、輻生所、以及生物科技館之用途，直到西元 2017 年完成拆除為止。

生物科技南館在拆除之前曾多次進行館舍內部空間輻射劑量率之量測，以做為該館舍分配使用及管制之用途。最近一次全面性之空間輻射劑量率量測係在西元 2012 年委託輻射防護協會進行，其中 1F 之空間輻射劑量率分佈調查結果如圖 5.1 所示。大部分空間輻射劑量率介於背景輻射變動範圍 $\sim 0.06 \mu\text{Sv/h}$ 之間，少數幾個靠近牆壁的点可能大於 $0.1 \mu\text{Sv/h}$ 。

5.2 銫-137 污染活度分析

西元 2016 年清華大學決定將遭受輻射污染的生物科技南館拆除，為進行拆除物件的分類檢整、避免放射性污染擴散到一般環境，清華大學在拆除之前進行牆壁的鑽心取樣分析，以掌握放射性污染活度分布狀況。圖 5.2 是生物科技南館一樓 101 室南邊網格編號 42 位置，進行牆壁鑽心取樣及活度分析結果。從鑽心取出的樣品可以看出整個樣品可以明顯區分為兩個部分，其中第一部分屬於原始結構牆面（編號 1~8、總長度 25 公分、紅磚切牆、表面塗抹水泥）；第二部分屬於後續增建之屏蔽牆（編號 9~12、總長度 15 公分、水泥灌漿）。污染的分佈主要在第一部分之原始結構牆面，殘留的污染活度分布情形則受到當初除污過程的影響，靠近室內（編號 1~2）的殘留

污染活度較低、另一側（編號 7~8）的污染活度則較高，若從整個 40 公分的牆面來看，污染主要集中於中間部位，呈現一種三明治式的污染情形。

表 5.1 是針對生物科技南館一樓 101 室、6 個不同鑽心取樣位置所進行的樣品分析結果。其中僅針對原始結構受污染部分（25 公分）進行分析，但受限於鑽心取樣所得樣品的完整性，每一組樣品分切的樣品編號數量不儘相同（每一個樣品切片的厚度約略 3 公分）。從表 5.1 的結果可計算出 25 公分厚度受污染區域的平均比活度為 2166 Bq/kg。

5.3 RESRAD-BUILD 程式模擬

為評估牆壁所殘留之放射性活度對於空間輻射劑量率所造成之影響，本計畫利用 RESRAD-BUILD 程式進行模擬計算，其結果並與西元 2012 年輻射防護協會所測得之空間輻射劑量率進行比對。

圖 5.3 是生物科技南館 101 室模擬示意圖，採用單一房間模式（one-room model）評估。其中面向東邊及南邊的外牆，主要為紅磚堆砌原始結構（25 公分）與屏蔽外牆（15 公分）所組成，屬於有污染牆面（污染分佈狀況如 5.2 節所述）、並各自擁有對外窗戶；面向西邊和北邊的部分則屬於空心磚之室內隔間牆，原本假設為無污染牆面。整體室內空間為：長 720 公分、寬 470 公分、高 300 公分。劑量評估點（Receptor）位於室內中心點高度離地面 100 公分處（與實驗量測位置相同）。

為了與量測結果做比對，劑量貢獻部分僅考慮 external dose（來源包括 Directly, Immersion, Submersion），其他如：Inhalation 及 Ingestion dose 則不列入考慮。表 5.2 為生物科技南館案例有關射源項的主要輸入參數彙整，其中射源項分為兩層：第一層厚度 25 公分、第二層厚度 15 公分，其中假設污染位於第一層（靠近室內部分），污染分佈狀況為均勻污染、平均污染活度為 2.166 Bq/g（如 5.2 節所述）。其他重要參數還包括沉降速度(Deposition velocity)：0.01、重新懸浮率(Resuspension rate)：5E-7、空氣交換率(Building exchange rate)：0、在室內比例(Indoor fraction)：1、劑量轉換參數則採用 RESRAD 預設值。

在此一情況下，利用 RESRAD-BUILD 程式進行室內中央處離地面 1 公尺處的年度劑量為 0.699 mSv/year，換算成空間輻射劑量率約為 0.08 μ Sv/h（略大於量測結果 0.05 μ Sv/h）。

5.4 影響空間輻射劑量率變動因素探討

在 5.2 節及 5.3 節中，我們分別利用鑽心取樣的方式瞭解輻射污染分佈狀況、並初步利用 RESRAD-BUILD 程式計算污染均勻分布情況下所造成的空間輻射劑量率，計算所得結果（0.08 μ Sv/h）略大於實際量測結果（0.05 μ Sv/h）。然而在實際情形下，仍有其他因素會造成空間輻射劑量率的改變，茲分別探討如下：

(1) 窗戶的影響：

從圖 5.3 中針對生物科技南館 101 室模擬示意圖中可以明顯發現，在受到污染的東面和南面牆壁中，因為對外窗戶的存在（窗戶玻璃並無污染），實際污染面積將小於 5.3 節計算所用的污染面積。在扣除窗戶污染面積對於空間輻射劑量率的貢獻後，利用 RESRAD-BUILD 程式進行室內中央處離地面 1 公尺處的年度劑量為 0.433 mSv/year，換算成空間輻射劑量率約為 0.049 μ Sv/h（與量測結果 0.05 μ Sv/h 相近）。

(2) 污染分佈的影響：

從 5.2 節的污染分佈調查中可以發現，除了表面少量污染外、主要污染集中在整個牆面的中間區域。如同圖 5.3 中針對污染的模擬採用三明治式的污染方式，將整個結構分為三層，由外而內包括無污染屏蔽層（15 公分）、主要污染層（5 公分）、輕度污染層（20 公分）。若將所有污染集中到中間主要污染層區域，則將污染比活度提高為 10.828 Bq/g。重新利用 RESRAD-BUILD 程式進行計算，並扣除窗戶污染面積對於空間輻射劑量率的貢獻後，室內中央處離地面 1 公尺處的年度劑量為 0.089 mSv/year，換算成空間輻射劑量率約為 0.010 μ Sv/h（小於量測結果 0.05 μ Sv/h）。

為了瞭解污染分佈對於空間輻射劑量率所造成的影響，我們假設污染厚度固定為 5 公分，但分布範圍逐漸從最靠近室內的表面延伸至牆壁內層（此案例不考慮窗戶的存在），對於室內中央處所造成的空間輻射劑量率計算結果如圖 5.4 所示。在總污染活度相同的情況下，其結果的差異主要來自於原始結構中污染層的所在位置不同所導致，當污染層位於牆壁內層深處時，未遭受污染的表面層可提供屏蔽作用，屏蔽厚度越厚、空間輻射劑量率也相對降低。

(3) 其他房間的影響：

考量生物科技南館 101 室並非獨立單一建築，其周圍仍有其他受到污染的房間存在，因此有必要評估其他房間所造成的劑量影響。從圖 5.1 的生物科技南館平面配置圖可以發現在其右側（西面）存在 103 室、下方（北面）存在 102 室、正上方則有 2F 的 201 室、以及其他房間存在。考量 RESRAD-BUILD 最多只能評估三個房間模式 (Three-rooms model)，因此本計畫僅考量其正右方（103 室）及正上方（201 室）的影響，生物科技南館 Three-rooms model 模擬示意圖如圖 5.5 所示。

表 5.3 是利用 RESRAD-BUILD 在 Three-rooms model 下，針對生物科技南館 101 室 (Room 1) 及周圍不同房間 (Room2、Room3) 的劑量貢獻度。結果顯示：當 Receptor 位於 Room 1 時，Room 1 的射源 (Source 1、Source 2) 合計所造成的劑量貢獻度高達 98%，Room 2 及 Room 3 的

射源則受限於距離的增加、以及樓板或隔間牆的屏蔽作用，對於位於 Room 1 中央處的 Receptor 而言，其劑量貢獻度相當低，幾乎可忽略不計。

(4) 熱點 (Hot spot) 的影響：

從圖 5.1 在 2012 年針對生物科技南館 1F 空間輻射劑量率調查報告中，101 室中央處的空間輻射劑量率約為 $0.5 \mu\text{Sv/h}$ 。此外，該報告亦針對靠近牆壁表面的 4 個位置進行量測，其結果分別為 $0.4 \mu\text{Sv/h}$ (3 個位置)、及 $0.14 \mu\text{Sv/h}$ (1 個位置)。為了驗證牆壁表面輻射劑量率的差異是否因牆壁表面存在熱點所導致，本計畫假設牆壁表面存在一處 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 、厚度僅 1cm 的體射源 (Volume source)、比活度為 54.15Bq/g (以污染平均比活度 2.166Bq/g 、污染厚度 25 公分計算總活度，並將總活度設定為集中在表面且厚度僅 1 公分的體射源)，偵測位置則是位於該熱點射源中央、距離牆壁表面 5 公分處。經由 RESRAD-BUILD 計算可得：此一熱點射源造成該量測位置的輻射劑量率為 $0.113 \mu\text{Sv/h}$ ，若加計其他污染牆面的射源所造成的劑量，確實有可能達到表面輻射劑量率 $0.14 \mu\text{Sv/h}$ 的可能性。但若距離該離點較遠的房間中央 (距離 2.35 公尺)，則該熱點所造成的空間輻射劑量率將急速下降到只有 $0.0001 \mu\text{Sv/h}$ 左右，幾乎可以忽略不計。

從上述影響空間輻射劑量率變動的各項因素探討中可以獲得結論如下：

- (a) 污染總活度可利用鑽心取樣分析所得之比活度做為計算基礎，並以此換算做為 RESRAD-BUILD 程式計算所需之射源強度。
- (b) 在污染均勻分布條件下，RESRAD-BUILD 評估因牆壁殘留放射性活度所造成之空間輻射劑量率為 $0.049 \mu\text{Sv/h}$ ，其結果與實際量測結果 ($0.05 \mu\text{Sv/h}$) 相近。
- (c) 若考量因污染分佈部均勻所造成的影響，隨著污染區域進入牆壁內層深度，對於空間輻射劑量率的影響將逐漸降低。從表層 0~5 公分污染的 $0.148 \mu\text{Sv/h}$ 降低至深層 20~25 公分污染的 $0.017 \mu\text{Sv/h}$ 。
- (d) 相鄰房間雖然一樣遭受污染，但由於距離較遠、且兩個房間之間存在著樓板或隔間牆的屏蔽，導致受體 (Receptor) 所在房間的劑量因其他房間的貢獻度極低 (本案例只有 2% 左右)。
- (e) 若牆壁表面存在著放射性活度較大的熱點，對於牆壁表面 (距離 5 公分) 的輻射劑量率影響相當明顯；但對於較遠距離 (2 公尺以上) 的影響則可忽略不計。
- (f) 綜合上述的計算與實際量測結果比較，RESRAD-BUILD 確實可以合理評估建築物殘留放射性活度對於空間輻射劑量率的影響，但也可以瞭解污染活度及污染分佈狀況對於空間輻射劑量率的貢獻最為明顯。

表 5.1：生物科技南館一樓 101 室鑽心取樣分析結果（6 個不同鑽心取樣位置樣品）

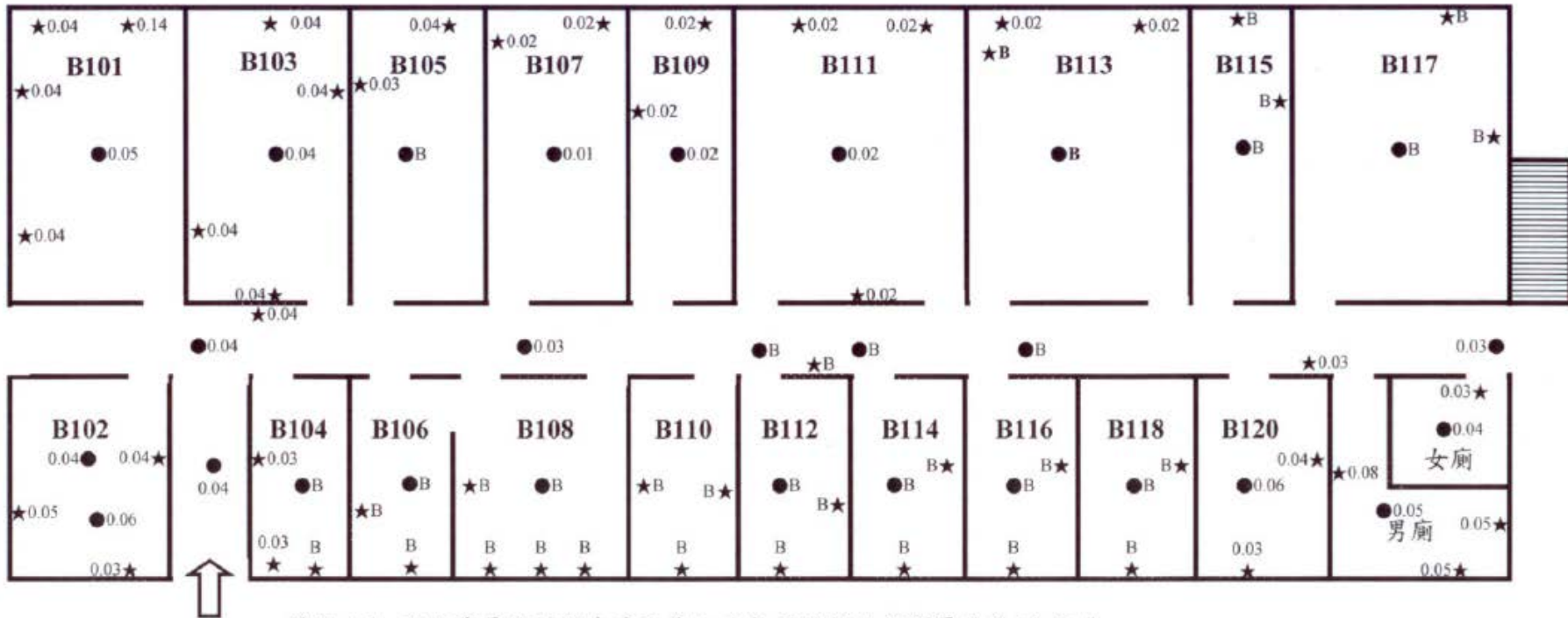
編號	第 1 組樣品		第 2 組樣品		第 3 組樣品		第 4 組樣品		第 5 組樣品		第 6 組樣品	
	樣品重 (kg)	比活度 (Bq/kg)	樣品重 (kg)	比活度 (Bq/kg)	樣品重 (kg)	比活度 (Bq/kg)	樣品重 (kg)	比活度 (Bq/kg)	樣品重 (kg)	比活度 (Bq/kg)	樣品重 (kg)	比活度 (Bq/kg)
1	0.271	267	0.189	158	0.275	4.8	0.205	36	0.303	73.8	0.167	0
2	0.219	0	0.194	10	0.286	22.6	0.252	0	0.233	0	0.160	0
3	0.231	0	0.242	18.5	0.279	48.1	0.261	0	0.248	0	0.158	0
4	0.241	0	0.219	57.1	0.272	3830	0.236	0	0.239	6.3	0.132	0
5	0.225	0	0.253	214	0.244	23700	0.273	0	0.245	41.8	0.184	0
6	0.243	0	0.238	409			0.263	3.6	0.232	293	0.154	122
7	0.222	0	0.226	4480			0.270	45.8	0.253	3470	0.158	238
8	0.244	1680	0.251	1420			0.360	712	0.227	57800	0.173	287
9											0.138	807
10											0.139	2110
11											0.123	1250
總活度 (Bq)	482.277		1569.168		6845.764		277.0128		14100.59		664.449	
總重量 (kg)	1.896		1.812		1.356		2.120		1.980		1.686	

表 5.2：生物科技南館案例有關射源項的主要輸入參數彙整

參數名稱	單位	程式預設值	生物科技南館案例
Number of Sources(射源項)	Unitless	1	2
Source Room/ Primary room(房間數)	Unitless	1	1
Source Type(射源形態)	Unitless	Volume	Volume
Source Direction(射源方向)	Unitless	X axis	X axis (東面)
			Y axis (南面)
Source Location(射源位置)	Meters (m)	0,0,0	-0.125, 3.6, 1.5 (東面)
			2.35, 7.325, 1.5 (南面)
Source Length/Area (射源長度/面積)	m ²	36	7.2 x 3 (東面)
			4.7 x 3 (南面)
Air Release Fraction (空氣釋放比例)	Unitless	0.1	0.1
Direct Ingestion Rate (直接嚥入率)	g/h	0	0
Removable Fraction (移除比例)	Unitless	0.5	Not Required (Volume source)
Source Lifetime (射源存在時間)	Days (d)	365	Not Required (Volume source)
Radon Release Fraction (氡氣釋放比例)	Unitless	0.1	Not Required
Radionuclide Concentration/Activity (放射性核種及活度)	Activity/m ² (area source); Activity/g (volume source)	1 pCi/g of Co-60	2.166 Bq/g of Cs-137
Number of Regions in Volume Source (體積射源區域數)	Unitless	1	2
Contaminated Region (Volume Source) (體積射源污染區域)	Unitless	1	1
Source Region Thickness (Volume Source) (體積射源污染厚度)	cm	15	25
Source Density (Volume Source) (體積射源密度)	g/cm ³	2.4	1.8
Source Erosion Rate (Volume Source) (腐蝕速率)	cm/d	2.4×10^{-8}	2.4×10^{-8}
Source Porosity (射源孔隙)	Unitless	0.1	Not Required
Radon Effective Diffusion Coefficient (氡氣有效擴散係數)	m ² /s	2×10^{-6}	Not Required
Radon Emanation Fraction (氡氣輻射分數)	Unitless	0.2	Not Required
Source Material(射源材料)	Unitless	Concrete	Concrete

表 5.3：生物科技南館不同房間劑量貢獻度 (Three-rooms model)

Room #	Source #	Dose/year (mSv)	Dose rate (μ Sv/h)	比重(%)
Room 1 (101 室)	Source 1	0.09730	0.01111	63.88%
	Source 2	0.05200	0.00594	34.14%
Room 2 (201 室)	Source 3	0.00038	0.00004	0.25%
	Source 4	0.00060	0.00007	0.39%
Room 3 (103 室)	Source 5	0.00203	0.00023	1.33%

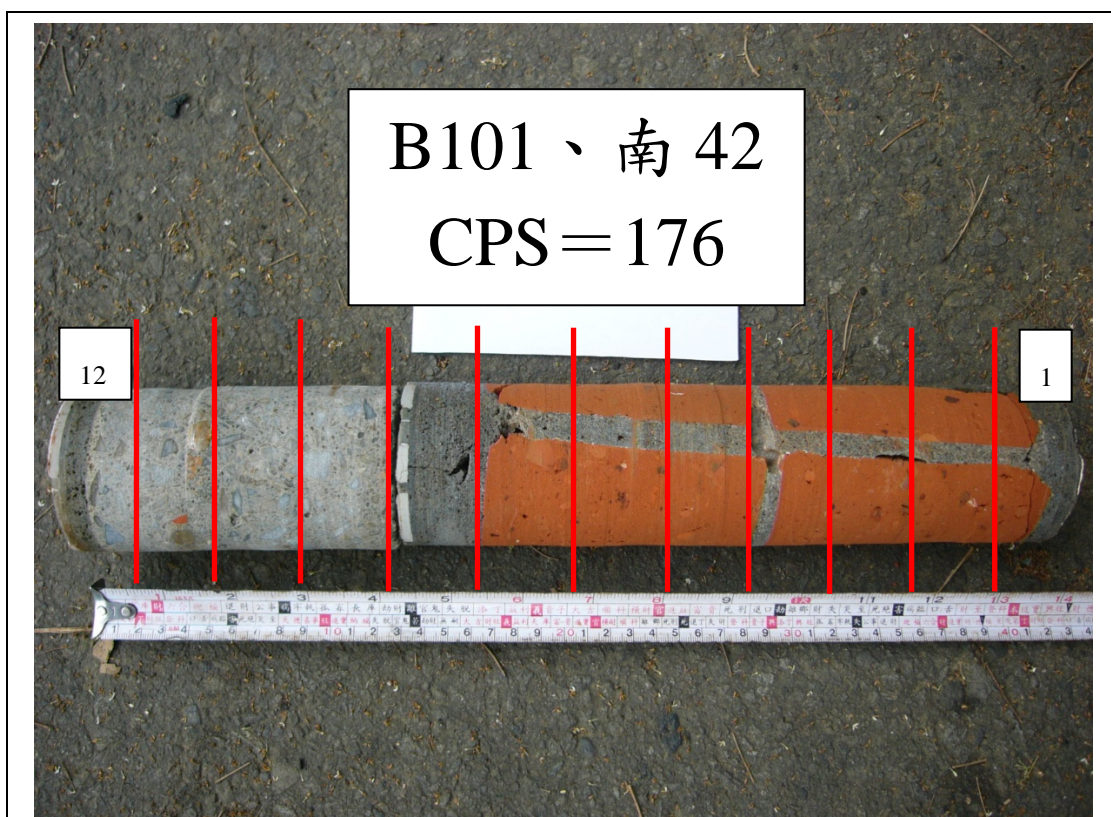


備註：1. 室內背景值採用未受污染之生物科技館北館測量值 $0.14\mu\text{Sv/h}$ 。

2. 本數據已扣除室內背景輻射。

3. ★表示為牆壁表面劑量率偵測點；●表示為空間劑量率偵測點；B 表示為背景輻射值變動範圍 ($0.10\sim 0.15\mu\text{Sv/h}$)。

圖 5.1：生物科技南館 1F 空間輻射劑量率調查 (2012 年)



樣品編號	樣品重量 (kg)	活度 (Bq/kg)
1 (原始結構)	0.189	158
2	0.194	10.0
3	0.242	18.5
4	0.219	57.1
5	0.253	214
6	0.238	409
7	0.226	4480
8	0.251	1420
9 (外加屏蔽牆)	0.247	-
10	0.259	-
11	0.316	-
12	0.255	-

註： - 表示低於最低可測值

圖 5.2：生物科技南館 101 室網格南 42、鑽心取樣及活度分析結果

(生物科技南館模擬)
 B101室
 (One-Room Model)

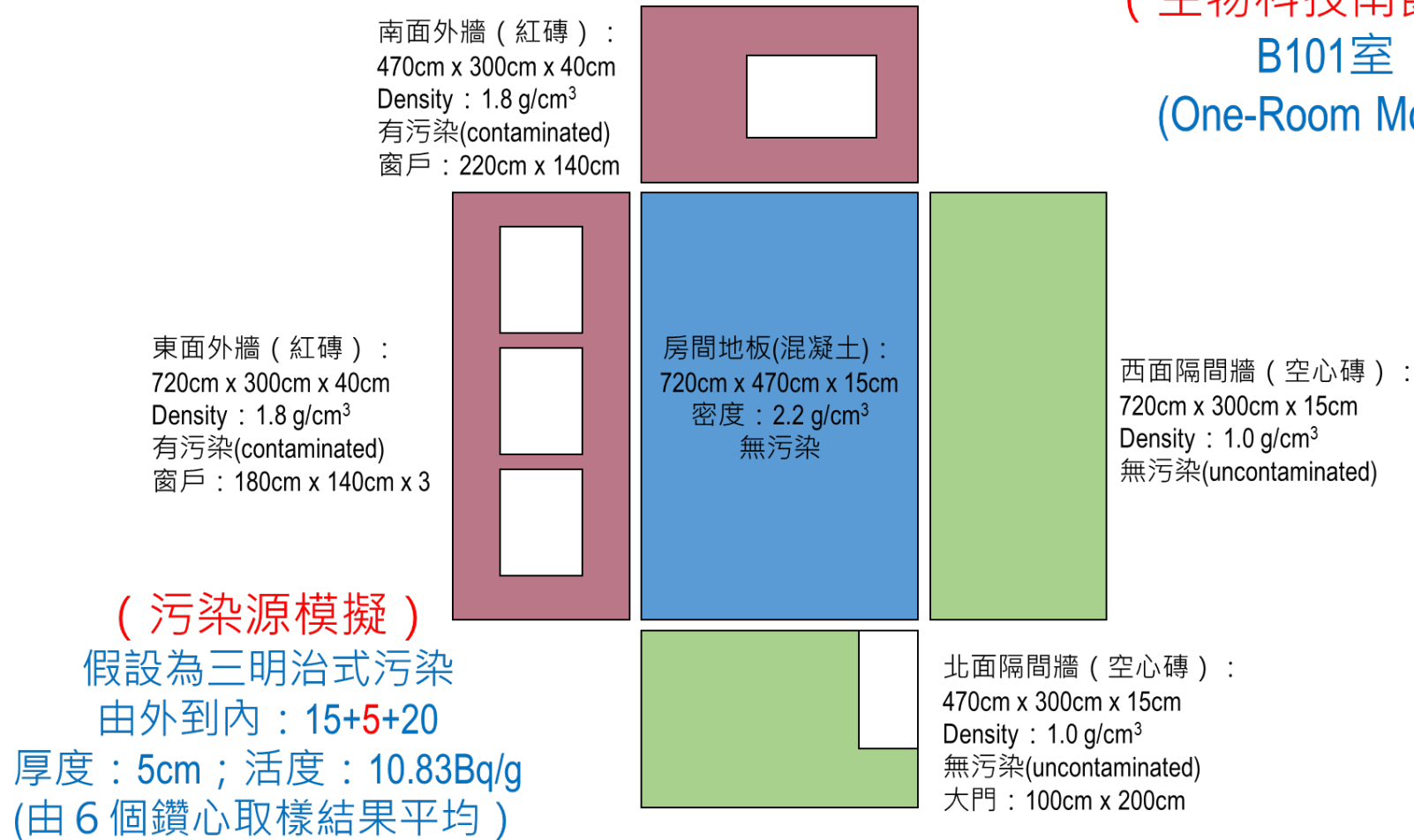


圖 5.3 : 生物科技南館 101 室模擬示意圖(One-room model)

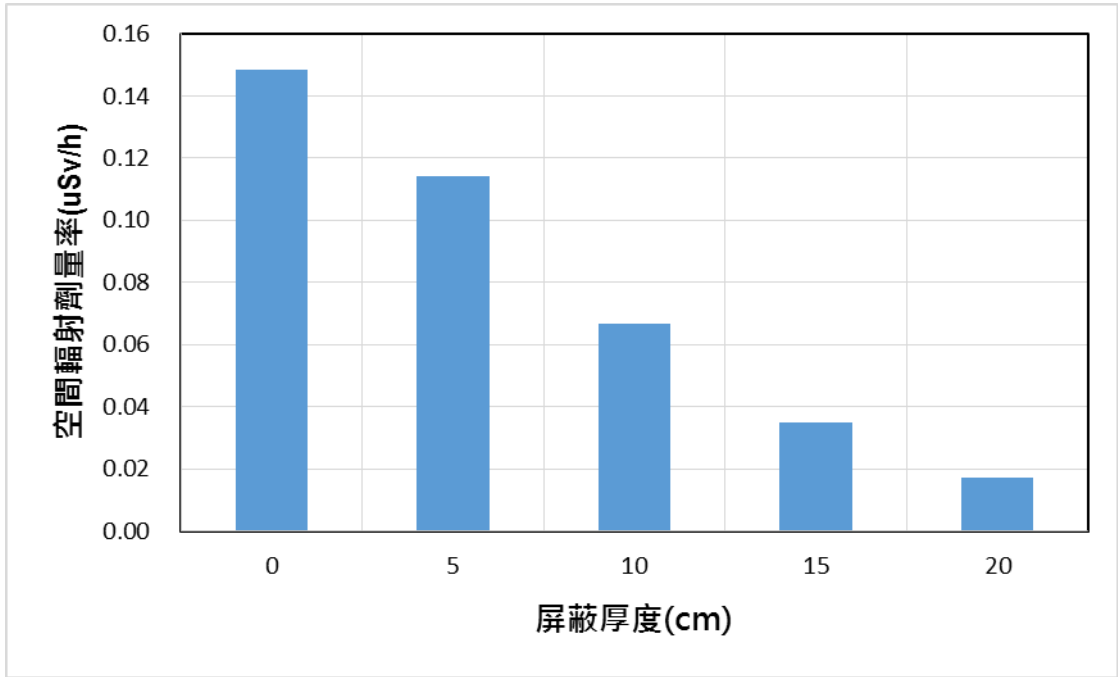


圖 5.4：污染分佈對於空間輻射劑量率的影響

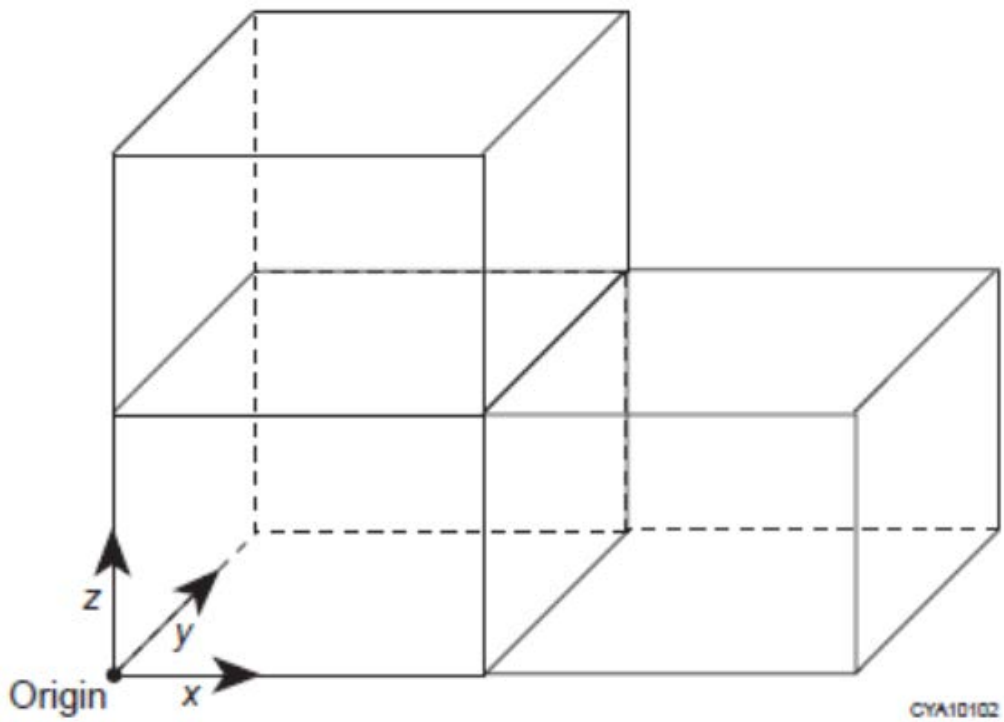


圖 5.5：生物科技南館 Three-room model 模擬示意圖

第六章 目前成果與建議事項

本計畫主要是利用 RESRAD-BUILD 評估核電廠除役過程，留用之受污染建築對於周圍環境、及除役工作人員的劑量影響評估。經過一年的研究，目前之初步成果說明如下：

- (1) 透過資料之蒐集及研析，確認美國已完成除役之核電廠(Yankee Rowe)，在其執照終止計畫書(License Termination Plan)中特別針對執照終止時仍欲保留的 5 個建築體利用 RESRAD-BUILD 進行評估(相關輸入參數如表 3.6)。留用建築體之表面污染 DCGL 限值則以 RESRAD-BUILD 3.21 版、並考量辦公室使用情境來計算。
- (2) 本計畫已完成 RESRAD-BUILD 之安裝與測試，並針對各項輸入參數進行分類，瞭解每一項輸入參數的物理意義，並完成主要參數的靈敏度分析。本計畫同時完成建構比較基準模型如圖 4.1，做為研析 RESRAD 除役人員劑量與工作場所之評估。
- (3) 利用清華大學遭受輻射污染建築(生物科技南館)做為實際案例，本計畫已完成利用 RESRAD-BUILD 程式評估工作場所輻射劑量的驗證工作。利用鑽心取樣與放射性活種分析所建立的污染總活度與污染分佈模式，進而評估污染建築室內空間輻射劑量率，其計算結果與現場實際量測結

果相近，說明 RESRAD-BUILD 在評估建築物殘留放射性物質對輻射劑量影響的適用性。

針對核電廠除役留用建築之審查重點與接受準則，本計畫依據執行 RESRAD-BUILD 的相關結果與經驗，提出建議如下：

- (1) 依據 RESRAD-BUILD 評估之結果，影響室內工作人員劑量主要來自於殘留放射性物質經由體外曝露途徑所造成的輻射劑量，此一部分主要與殘留放射性物質之種類(核種)、放射性總活度、以及污染分佈方式(諸如面射源、體射源)有關。因此，審查之首要重點在於確認業者(台電)是否針對殘留放射性物質進行詳細的污染調查(特性調查)。
- (2) 針對核電廠除役留用建築之接受準則，主要是考量該建築未來之用途(諸如輻射作業場所用途、辦公室用途)、以及相對應的輻射劑量管限制值。此外，也與該建築之幾何尺寸、放射性物質殘留狀況、以及室內人員活動行為有關。因此，留用建築之接受準則應該是個別建築獨立審查，至於評估模式之合理性，則可要求業者(台電)提供評估模式所用的各項參數值(或輸入檔)，做為是否留用的審查依據。
- (3) RESRAD-BUILD 若用於除役過程的劑量評估與輻防管制，主要與除役行為、及輻防管制作為有關。除役行為(如除污)可能影響的參數包括污染物移除比例(Removable Fraction)、射源壽命(Source Lifetime)、射源侵蝕速率(Source Erosion Rate)、空氣釋放比例(Air Release Fraction)、空

氣再懸浮比例(Resuspension Rate)...等。輻防管制作為(如屏蔽、空氣過濾...等)可能因應除役作業現場輻射劑量偏高或空浮濃度增加所採取的措施,相關之參數包括屏蔽厚度及密度(Shielding Thickness、Shielding Density)、空氣交換率(Air Exchange Rate)、甚至限制人員在室內的工作時間(Indoor Fraction)...等。此一部份通常是應用於欲留用建築無法符合留用標準所進行的短期作為。

依據本計畫執行 RESRAD-BUILD 的相關結果與經驗,此一程式不但可用於建築物殘留放射性活度所造成的劑量影響是否符合留用標準;也能針對室內除役過程進行人員劑量評估、進而提出輻防管制方案;甚至未來針對放射性廢棄物貯存場所對於場所管理(工作)人員、以及場所外可能之劑量影響評估,提供良好的評估模式。

參考資料

1. “User’s manual for RESRAD-BUILD 3”, ANL/EAD/03-1 (2003).
2. “Data Collection Handbook to Support Modeling Impacts of Radioactive Material in Soil and Building Structures”, ANL/EVS/TM-14/4, ANL 2015.
3. “Development of Probabilistic RESRAD 6.0 and RESRAD-BUILD 3.0 Computer Codes”, NUREG/CR-6697, ANL/EAD/TM-98 (2000).
4. “Technical Basis for Calculating Radiation Doses for the Building Occupancy Scenario Using the Probabilistic RESRAD-BUILD 3.0 Code”, NUREG/CR-6755, ANL/EAD/TM/02-1, ANL 2002.
5. “Probabilistic Modules for the RESRAD and RESRAD-BUILD Computer Codes”, NUREG/CR-6692, ANL/EAD/TM-91, ANL 2000.
6. “Guide to Assessing Radiological Elements for License Termination of Nuclear Power Plants”. EPRI, Palo Alto, CA: 2002. 1003196.
7. US Nuclear Regulatory Commission, “Multi-agency radiation survey and site investigation manual (MARSSIM)”. NUREG-1575, Rev. 1, 2000.
8. US Nuclear Regulatory Commission, “Standard Review Plan for Evaluating Nuclear Power Reactor License Termination Plans (NUREG-1700)”. NUREG-1700, April, 2000.
9. US Nuclear Regulatory Commission, “NMSS decommissioning standard review plan (NUREG-1727)”. Washington, DC: US NRC, 2000.
10. “License Termination Plan Revision 4”. February 28, 2005, Maine Yankee Atomic Power Company.
11. “Maine Yankee Decommissioning – Experience Report: Detailed Experiences 1997-2004”, EPRI, Palo Alto, CA: 2005. 1011734.

12. “External Exposure to Radionuclides in Air, Water, and Soil”, Federal Guidance Report No. 12, EPA-402-R-93-081, 1993.
13. “R&D and Innovation Needs for Decommissioning Nuclear Facilities”, NEA No. 7191, OECD 2014.
14. “Use of NORM-containing products in construction Using RESRAD-BUILD to assess the external dose from the natural radioactivity of building materials”, Construction and Building Materials, Vol. 168, pp.1003-1007, 2018.
15. MARSSIM (2002), “Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual (Revision 1)”, Nuclear Regulatory Commission NUREG-1575 Rev. 1, Environmental Protection Agency EPA 402-R-97-016 Rev.1, Department of Energy EH-0624 Rev. 1.
16. Eric. W. Abelquist, Decommissioning Health Physics: A Handbook for MARSSIM Users, 2nd edition, CRC Press, 2013