

行政院原子能委員會放射性物料管理局

委託研究計畫期末報告

除役核電廠廠址特性與環境輻射分  
析之審查技術研究

計畫編號：104FCMA008

執行單位：國立清華大學

計畫主持人：趙得勝

報告作者：趙得勝、王振安、吳尚謙、梁正宏

報告日期：中華民國 104 年 12 月

## 摘要

廠址特性調查與環境輻射檢測作業之目的係為了確認核電廠在除役之後，其廠址上的土地及建物的輻射污染情形可以符合廠址執照終止的接受標準。由於核電廠的土地面積幅員廣闊，各式建物林立其中，想要完整且順利地進行除役廠址的特性調查及輻射污染檢測實屬不易。因此，如何針對除役廠址的特性調查與環境輻射檢測制定一套有效且具代表性的準則，係為除役核電廠廠址釋出前的一項重要工作。有鑑於此，本研究計畫係針對由美國多個機構所共同發展且目前已被廣泛採用的 MARSSIM 廠址特性評估指引文件進行深入地評估與分析，並確實瞭解進行廠址上土壤及建物表面污染情形特性調查作業時所必須遵循的原則，包括：計畫、執行、評估、決策、以及文件記錄等各階段的作業。在本研究計畫中，研究工作係採分階段且有系統地針對輻射檢測與廠址特性調查作業、管制標準符合性之決策模式、DCGL 推算濃度限值的轉換方法、以及其它作業準則等進行深入地分析，以作為國內發展適合的廠址特性調查作業之重要參考，本計畫的成果預期將有利於管制機關在進行相關的安全管制工作，藉此也可厚實廠址特性調查作業之安全審查與管制的基礎。

## **Abstract**

The purpose of site investigation and environmental survey for decommissioned nuclear power plant is to demonstrate that decontamination of the soils and buildings on the site is in compliance with the regulatory license termination criterion. Usually it is very difficult to conduct the site investigation and environmental survey in nuclear power plant site due to its vast land area and quantities of buildings on the site. Therefore, developing an effective and consentaneous guideline to conduct the site investigation and environmental survey is an important task before the site release of decommissioned nuclear power plant. For this reason, this research project attempted to conduct an in-depth assessment and analysis on the regulatory guide of site investigation, MARSSIM, which has been jointly developed and adopted by multiple agencies in United States. The principles of survey planning, implementation, assessment, decision making, and documentation during site investigation were also drawn up. This research project systematically reviewed and analyzed the procedures of site investigation and environmental survey in turn, including implementation of site investigation and environmental survey plan, demonstration of compliance with release criterion, translation of the release criterion into a derived DCGL level, and comparison with other guidelines. The results of this research project are useful to develop the procedures of site investigation and environmental survey that are suitable to be adopted in our country. They are also expected to be favorable for regulatory authorities, which can strengthen the basis of the safety review and regulation for site investigation and environmental survey.

## 目錄

一、前言 .....	1
二、計畫目標及執行方法 .....	3
三、除役核電廠之廠址特性調查作業 .....	8
3.1 MARSSIM 準則簡介 .....	8
3.2 區域分類與資料品質 .....	11
3.3 計畫階段 .....	12
3.3.1 廠址歷史評估 (historical site assessment) .....	12
3.3.2 初步調查評估 (preliminary survey consideration) .....	15
3.3.3 計畫與設計調查 .....	20
3.4 執行階段 .....	25
3.4.1 測量方法與儀器選擇 .....	25
3.4.2 樣品蒐集與檢測 .....	27
3.5 評估階段 .....	28
3.6 決策階段 .....	29
3.7 總結 .....	30
四、廠址特性計算模型 .....	33
4.1 推算濃度基準限值 (DCGL) .....	33
4.2 曝露途徑分析 .....	34
4.2.1 射源分析 .....	34
4.2.2 環境傳遞分析 .....	36
4.2.3 劑量與曝露分析 .....	41
4.2.4 情境分析 .....	42
4.3 劑量評估 .....	43

4.3.1 射源因子.....	44
4.3.2 劑量轉換因子.....	45
4.3.3 環境傳遞因子.....	46
4.3.4 氬氣效應.....	49
4.4 總結.....	50
五、其它作業準則之分析比較.....	52
5.1 EURSSEM 簡介.....	52
5.2 污染區域整治計畫.....	54
5.3 廠址特性調查.....	57
5.4 環境整治.....	58
5.5 EURSSEM 與 MARSSIM 之比較分析.....	60
5.5.1 內容架構.....	60
5.5.2 非表面取樣.....	60
5.5.3 核輻射度量儀器資訊.....	61
5.5.4 風險評估.....	61
5.5.5 地質調查.....	63
5.6 總結.....	64
六、結論與建議.....	66
參考資料.....	67

## 圖目錄

圖一、本研究計畫的具體工作項目與進行步驟 .....	7
圖二、廠址特性調查作業之資料生命週期 .....	10
圖三、受污染區的理想幾何 .....	35
圖四、受污染區的實際幾何 .....	36
圖五、各主要輻射曝露途徑及其關聯性 .....	40
圖六、水的傳遞途徑示意圖 .....	40
圖七、農夫居民情境示意圖 .....	43

## 表目錄

表一、除役核電廠之廠址特性調查作業於各階段所必須建立的品質控 管文件.....	31
表二、潛在曝露途徑 .....	37
表三、各情境所考慮之傳遞途徑及傳遞速率比較 .....	42
表四、MARSSIM 與 EURSSEM 準則的特性比較 .....	63
附表一、體外輻射的劑量轉換因子 (DCF).....	70
附表二、吸入輻射的劑量轉換因子 .....	72
附表三、攝取輻射之劑量轉換因子 .....	75
附表四、常用之污染區面積轉換表 .....	78
附表五、深度與覆蓋因子經驗公式之參數 .....	79

## 一、前言

核子反應器設施之除役，其拆除後之廠址環境輻射劑量，必須符合執照終止接受標準，此除了可確保民眾在除役廠址上或附近區域活動時的健康及安全之外，也可強化拆除廠址上之土地或建物有可再被活化利用的可能性，例如：工業或農、牧等用途。為了確保核電廠除役之後，廠址環境輻射劑量可符合接受標準，通常核電廠在除役之前必須針對廠址上的土地、建物等進行特性調查與環境輻射檢測，並據此採取適當的處置措施。由於核電廠的土地面積幅員廣闊，各式建物林立其中，想要完整且順利地進行除役廠址的特性調查及環境輻射污染檢測實屬不易。因此，如何針對除役廠址的特性調查與環境輻射檢測制定一套有效且具代表性的準則，係為除役核電廠廠址釋出前的一項重要工作。MARSSIM (Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual) 為目前已被廣泛採用作為除役核電廠之廠址特性調查的重要指引文件，本計畫之主要目的即將針對 MARSSIM 廠址特性評估準則進行評估與分析，以確實瞭解進行廠址上土壤及建物表面污染情形特性調查作業時所必須遵循的原則，包括：計畫、執行、評估、決策、以及文件記錄等各階段的作業，並藉此擬定未來可行的廠址特性評估作業之審查導則與管制策略。

此外，廠址污染特性檢測結果與廠址執照終止接受標準之間存在著單

位的差異，通常由污染檢測結果可以直接得知放射性核種的濃度或活度(例如：Bq/kg 或 pCi/g)，而執照終止接受標準係以人體組織或器官每年所吸收之等效劑量為單位(例如：mSv/y 或 mrem/y)。因此，為了方便進行廠址執照終止接受標準的符合性評估，開發一套以劑量或風險評估為基礎的廠址特性計算模型，用以將廠址污染量測結果轉換為等效劑量的單位，並藉此得知推算的濃度基準限值(Derived Concentration Guideline Level, 簡稱 DCGL)，此亦是進行廠址特性調查作業時所須採取的必要程序。本計畫的另一個目的則將初步瞭解目前被用來建構廠址特性計算模型的做法，並藉此獲知建立執照終止接受標準及 DCGL 推算濃度限值的方法。

目前國外已制定了一些與廠址特性評估相關的參考文件，除了美國多個機構所共同提出的 MARSSIM 廠址特性調查作業的指引手冊之外，歐洲國家也普遍遵循其所制定的 EURSSEM (Environmental Radiation Survey and Site Execution Manual) 手冊。然而，目前國際上在除役作業方面所累積的實務經驗並不足夠，手冊規範與實務操作之間得宜與否仍有待時間考驗。就國內的執行情況而言，由於國內過去並未曾實際執行過核電廠的除役作業，有關廠址特性評估作業相關的文件資料、專業技術、人力資源、以及審查及管制規範等都仍未臻完備。因此，即早瞭解及分析目前國外在廠址特性評估作業方面所採用的準則，將有助於厚實國內未來在執行相關作業時的基礎。

## 二、計畫目標及執行方法

本研究計畫將針對目前已被廣泛採用的 MARSSIM 除役廠址特性評估準則進行深入地剖析，首先將完整地收集與研讀與 MARSSIM 相關之論文、技術報告、管制指引等文獻資料，從中釐清各項流程的中心原則及具體措施，務求全盤地掌握廠址特性評估作業的標準作法與可能遭遇的瓶頸，再藉此建立未來進行相關審查與管制工作時的重要指引。

執行除役電廠之廠址特性評估與環境輻射檢測之目的係為了確認除役電廠的土地、建物、及其周遭環境是否符合管制單位常用的以劑量或風險為基準的執照終止接受標準，而 MARSSIM 指引手冊則詳細地提供相關人員在進行除役電廠的最終狀態驗證時可以遵循的標準操作流程。有關除役電廠之最終狀態調查與管制規範符合性的驗證作業大致可分為三個階段，分別為：廠址釋出標準之 DCGL 推算濃度限值的轉換、廠址之土地與建物的殘餘污染檢測與現場取樣、以及最終的決策模式，MARSSIM 指引手冊涵蓋的範疇則主要為後面兩個階段的作業。有關本研究計畫的具體工作項目與進行步驟如下圖一所示，研究中將有系統地分析及歸納各工作階段的重點與可遵循的準則，藉此提供未來在進行除役核電廠之廠址特性調查作業時可採取之策略，或作為審查或管制工作的參考。

有關本研究計畫擬進行的工作項目與執行步驟說明如下：

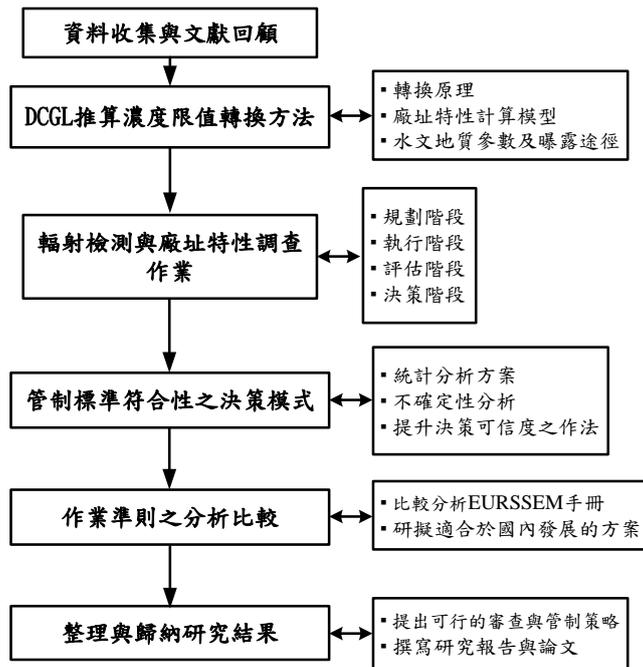
1. 資料收集與研讀：除役核電廠之廠址特性調查作業牽涉極為複雜的作業程序，且很多的檢測或調查工作可能會因現場環境因素的限制而需要採取特殊的作法，因此唯有深入地瞭解相關工作的目的與執行方法才可隨機應變解決可能遭遇的困難。目前國外相關單位已經制定了一些有關廠址特性調查作業的管制指引，且也累積了一些相關的技術報告與論文資料，本研究計畫將採系統性的方式來收集與研讀這些專業知識，可能的話也將向國內相關的核能設施或機構進行諮詢，以釐清相關的問題並尋求必要的資訊。
2. DCGL 推算濃度限值轉換方法：由於除役核電廠之釋出管制標準係採用以劑量或風險為基準的單位，而除役廠址的現場檢測與調查結果則係以可量測的放射性核種活度或濃度為單位。為順利進行廠址特性評估工作，管制的劑量標準必須被轉換為推定的濃度限值，亦即 DCGL 數值。目前的轉換作法大都藉由建立廠址特性計算模型，並考量廠址的水文地質參數及可能的曝露途徑等來估算 DCGL 限值。本研究計畫將初步瞭解建立廠址特性計算模型的方法，以得知管制標準與 DCGL 限值之間的轉換原理。
3. 輻射檢測與廠址特性調查：進行現場的檢測與特性調查作業必須有系統地完成各階段的工作，依序為規劃階段、執行階段、評估階段、以及最

後的決策階段。在規劃階段，必須擬定一套完備的廠址特性調查計畫，設定計畫目標及數據收集策略，並開發適用的品質保證方案來確保檢測數據的可靠性；在執行階段，則須依據建議的現場或實驗室的檢測方法或技術來進行廠址的輻射檢測與評估，並依據擬定的 QC/QA 品質保證方案來執行相關的驗證作業；在評估階段，則依據取得的數據進行分析，並採用各式的數據評估與驗證方法來比較其與原擬定的調查目標是否有差異；最後的決策階段則須判斷在評估階段所得到的結果是否符合管制單位所訂定的標準，最終目標需使得所有的檢測調查結果及結論必須具有一定的公信力。在本研究計畫中，將根據 MARSSIM 準則中的規範內容，釐清在進行廠址之土壤與建物表面污染檢測與特性調查時所必須遵循的原則及可能遭遇的困難，並據此擬定輻射檢測與廠址特性調查作業之審查與管制策略。

4. 管制標準符合性之決策模式：廠址特性調查的決策係根據現場檢測與調查的結果來評估該區域之污染情形是否符合管制規範的釋出標準。為了使得檢測與調查的數據可被用於支持最終的決策，這些數據通常必須具有相當程度的可信度。然而，由於檢測與調查的結果不可避免地會產生不確定性，此不確定性因而可能導致評估決策時的錯誤。在本研究計畫中，將深入地瞭解 MARSSIM 準則中用以降低發生決策錯誤所可能採

行的作法，例如：如何擬定適當的調查計畫、如何建立適當的 QC 品管程序、以及如何藉由統計分析方法來分析導致不確定性發生的可能原因。

5. 其它作業準則之分析比較：除了美國多個機構所共同發展與採行的 MARSSIM 準則之外，歐洲相關的機構也制定了一套廠址環境輻射檢測與現場的執行手冊，簡稱為 EURSSEM (Environmental Radiation Survey and Site Execution Manual)。同樣地，EURSSEM 手冊中也提供了廠址特性調查的策略、計畫、執行、評估、以及文件記錄等作業的相關資訊與準則。在本研究計畫中，除了研析 MARSSIM 準則之外，也將深入地比較分析 EURSSEM 中有關廠址特性調查作業的建議與規範，並藉此嘗試提出較適合於國內發展的作法。
6. 整理與歸納研究結果：藉由上述之廠址特性調查作業的比較分析結果，歸納最佳化的作業方案及預期可能遭遇的瓶頸，並據此建立進行該項作業之審查及管制工作時可採取的策略。最後，撰寫本計畫的年度成果報告，或將研究成果投寄國內外的學術期刊發表。



圖一、本研究計畫的具體工作項目與進行步驟

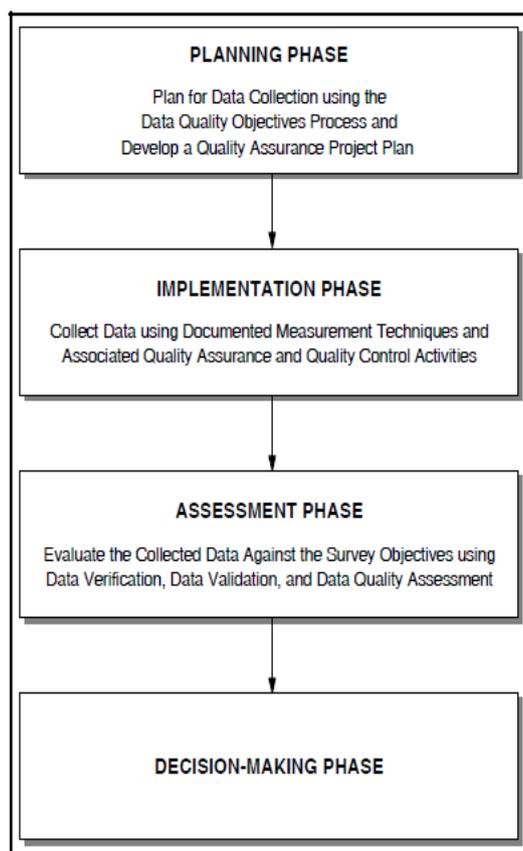
### 三、除役核電廠之廠址特性調查作業

#### 3.1 MARSSIM 準則簡介

MARSSIM 係為美國環境保護局 (Environmental Protection Agency, EPA)、核子管制委員會 (Nuclear Regulatory Commission, NRC)、能源部 (Department of Energy, DOE)、以及國防部 (Department of Defense, DOD) 等多個機構所共同制定的準則，目的為各機構在進行放射性污染設施之輻射檢測與廠址特性評估作業時，可遵循由這些機構所一致認可的標準流程來進行各項的評估作業。MARSSIM 的範疇係針對有污染疑慮廠址之表層土壤及建物表面的區域，準則內容涵蓋執行除役廠址特性調查作業時，如何證實該檢測區域可達到管制單位的釋放標準、如何有系統地進行量測檢測及達成品質目標、以及可以採用哪些量測方法及檢測技術等。然而，MARSSIM 準則的範疇並未包含釋放標準的選定、如何將劑量或風險基準的管制標準轉換為濃度為單位的方法、地下水或飲用水的符合性評估、表層下的土壤、以及建物內部材料。

資料生命週期 (data life cycle, DLC) 為 MARSSIM 準則中規劃用來進行廠址特性調查作業時的基本架構，以確保在進行廠址特性評估時可以使資料具有足夠的可信度。資料生命週期包含四個部分 (如圖二)：第一個部份是計畫階段：在擬定檢測計畫與進行檢測設計時，必須遵循資料品質目

標流程，且必需建立品質保證方案；第二個部分則是執行階段：執行廠址調查時，必須遵照標準操作程序並落實品質保證與品質控制措施，以確保所得到的資料符合先前計畫的規範；第三個部份是評估階段：評估時必須注意資料的正確性，並且採用資料品質評估方法以得到正確的評估結果；第四個部份是決策階段：當檢測結果評估完成後，即可以依據評估結果來決定除役廠址是否符合管制機關制定的釋放標準。MARSSIM 要求進行廠址特性評估時必須確定在每個階段皆符合 MARSSIM 所規範的標準，以確保在最後廠址特性評估報告完成時具有足夠的可信度，使得決策結果可以被管制機構所採納。為了使最終結果具有足夠的可信度，MARSSIM 除了要求廠址特性評估須依照標準進行之外，還必須在進行完每個關鍵步驟時須將過程中的方法與數據進行記錄，並且在廠址特性評估完成時整理成一份完整的報告。



圖二、廠址特性調查作業之資料生命週期 [Ref.: NUREG-1575 Rev. 1]

值得注意的是，MARSSIM 在使用上具有一些限制，包括：(一) MARSSIM 提供標準且完整的方法以進行廠址特性評估，但是並不提供放射性污染的處理方法。雖然如此，MARSSIM 仍然可以作為處理放射汙染時的輔助，以檢視處理放射汙染當下的成效；(二) MARSSIM 對於放射性物質的調查主要在於土壤與建築物表面，不包括水源、空氣或是非地表的土壤；(三) MARSSIM 只考量環境的放射劑量，並不會考量當地的輻射生物效應或是放射性核種對於人類的化學性影響；(四) MARSSIM 並不提供與背景輻射非常接近的人造放射性汙染，或是無法找出可供參考的背景區

域這兩種問題的解決方案。

### 3.2 區域分類與資料品質

MARRSIM 依廠址歷史評估結果將調查檢測區域分為受影響及未受影響兩類，其中受衝擊區域又可分為三級，在調查檢測時會因為不同級別的區域而有不同的測量方法或是不同的數據處理方法。第一級(class 1)區域：代表此區域受到輻射污染，或者是先前有經過整治措施並可能有殘留的輻射污染，並且預期其輻射劑量可能超過 DCGL 推定濃度限值。例如：已知的輻射物質外洩地區。第二級(class 2)區域：代表此區域可能遭受輻射污染影響，或者是先前有經過整治措施並可能有殘留的輻射污染，但是已被判斷其輻射劑量不會超過 DCGL 推定濃度限值。例如：運送輻射污染物的路徑或是輻射材料並未確實密封的地區。第三級(class 3)區域：代表此區域為可能受影響的區域，但預期該區域並沒有殘留的輻射污染物，或其殘留的輻射污染遠低於 DCGL 推定濃度限值。第三級區域通常為第一級或是第二級的延展範圍，並且被判斷極不可能受到輻射污染所影響，但是並未被實際確認的區域。

資料品質目標 (data quality objectives, DQO) 程序係為一系列的規畫步驟，可應用於建立資料品質的標準及調查規劃，其目的為改善各階段調查的有效性、效率、以及決策失誤率，並可減少調查過程中因蒐集不必要、

重複、且過於精準的資料所造成的成本浪費。在調查計畫的過程中，採用資料品質目標程序可確保調查的結果具有足夠的數量與品質，以提供最終的決策使用。資料品質目標包括七個步驟，分別為：提出問題、確認欲決定的污染種類、確認進行該項決策所需備齊的資源、確認問題範圍、訂出決策法則、訂出決策錯誤的現值、以及優化調查設計方案。

資料品質評估 (data quality assessment, DQA) 為使用科學與統計的方法，以確認得到的資料形式、資料品質、以及資料數量等可符合原先設定的要求。資料品質評估的五個步驟分別為：檢視資料品質目標程序與調查設計方案、初步審查得到的調查資料、選擇統計測試方法、確認統計測試的假設、從得到的資料中得到結論。

### **3.3 計畫階段**

#### **3.3.1 廠址歷史評估 (historical site assessment)**

著手於廠址特性調查的第一個階段為計畫階段，而計畫階段的第一個部分為廠址歷史評估。廠址歷史評估係使用資料蒐集的方式，根據過去廠址的運轉情形與記錄以得到廠址的概略資訊與大致狀況，據以判定該區域可能遭受的污染種類並可初步進行區域的分類，以及判知污染擴散的可能性。廠址歷史評估主要有五個目標：(一) 藉由現存的資料判斷可能存在輻射污染的種類、劑量與地區；(二) 尋找廠址內是否有污染的區域會對人體造成

危害；(三) 評估污染可能的擴散區域；(四) 尋找對於未來界定調查或是特徵調查時有用的資訊；(五) 提出初步的區域分類，例如：受影響的區域或是未受影響的區域。

## 1. DQO

廠址歷史評估必須依照 DQO 進行資料蒐集的計畫，在廠址歷史評估的 DQO 成果應該包含三個部分：(一) 確認廠址歷史評估計畫的人員名單（包含決策者）；(二) 簡單的敘述目前所需解決的問題；(三) 劃出受影響的區域與未受影響的區域。經由 DQO 過程後除了可以使未來計畫上有更明確的方向，執行上也可以更為順利。

## 2. 界定廠址

界定廠址為確認廠址的位置、廠址名稱與廠址所有權歸屬，並且紀錄這方面的資訊。某些廠址可由先前使用或是殘留的輻射物質了解廠址的資訊，但是對於未知的廠址則可以從政府的資料中、民眾的投訴、知情的人士或是直接的考察了解這方面的資訊。

## 3. 初步廠址歷史評估調查

初步廠址歷史評估調查藉由蒐集足夠的資料將受影響的區域分為第一級區域或是第二級區域。藉由蒐集資料將區域分級有利於後續的界定調查或是特徵調查。初步廠址歷史評估調查蒐集資料的方式主要可以分為兩種：第一種是查閱紀錄，進行初步廠址歷史評估調查的成員可以藉由調閱記錄

或是查閱廠址的運轉記錄以得到相關的資料。第二種是與先前或是現任廠址的作業人員進行面談以得到第一手的資料。

#### 4. 廠地勘查

廠地勘查的目的為藉由實際走訪以得到缺少或是難以得到資料。與往後介紹的調查所不同的地方在於，廠地勘查並不需要進行完整範圍的測量，只需要得到所需要的資料即可。另外，為了確保廠地勘查可以確實得到所需要的資料，進行廠地勘查前必須事先閱覽與分析之前所得到的資料。

#### 5. 分析廠址歷史評估資料

廠址歷史評估後會得到許多的資料，必須經過詳細的分析以利於後續的處理。分析可以分為四個方向：(一) 確認可能的污染物以提供往後選擇測量儀器時的參考，或是根據污染物的種類評估污染物隨時間衰變的狀況；(二) 確認可能被污染的區域，在此步驟中最重要的並不是確認被污染的區域，而是盡可能的找出未受污染的區域，以減少未來調查時的成本；(三) 確認污染物可能的散佈媒介，由於污染物可能藉由媒介擴散，導致污染面積擴大，因此必須找可能的散佈媒介，監測可能散佈媒介的動向，確認不會漏掉污染的區域。而可能的媒介包含土壤、地表水源、地下水源、空氣與地表設施等；(四) 建立廠址的模型，並且在模型上標示出污染物的資訊。然而，有時會因為資訊不足或其他因素而無法進行以上的分析，此時可以

尋求專家進行判斷得到建議，但此方法非常不建議使用，因為判斷錯誤的機率較高。

## 6. 決定廠址歷史評估後的動作

廠址歷史評估後，可以決定未來的動作，以事先研究往後步驟所需要的資料並進行判斷。例如：當廠址歷史評估資料足夠充分時可以跳過界定調查，執行下一個步驟。

## 7. 廠址歷史評估報告

廠址歷史評估後需要產出一份報告，報告中需要含有廠址的已知資訊、廠址歷史評估的過程細節、與其它相關的資訊，並且附加資料的參考來源。

### 3.3.2 初步調查評估 (preliminary survey consideration)

一般而言，廠址特性調查作業為一循序漸進的過程，包含一系列不同類型的廠址特性評估與調查，分別為：廠址歷史評估、初步調查、整治行動輔助調查 (remedial action support surveys)、以及最終狀態調查 (final status surveys)，其中初步調查又可分為界定調查 (scoping surveys) 及特徵調查 (characterization surveys)。進行各種廠址特性評估與調查以前都必須依照 DQO 程序擬定調查計畫與調查設計。以下敘述關於廠址特性評估與調查的計畫準則，不同類型的廠址特性評估與調查都必須依照此初步調查評估的步驟進行規劃：

## 1. 除役標準

當廠址經過除役後，必須確定往後人員不會接受到無法容許的劑量，此時需要以管制機關訂定的釋放標準來建立 DCGL 除役標準。DCGL 是輻射污染劑量標準，藉由管制機關所訂定的釋放標準可經由計算轉換取得 DCGL 數值，在往後的輻射劑量都會以 DCGL 作為單位來進行評估與調查。除役標準主要有兩個部分：第一個部分為整體污染範圍的污染劑量平均值應低於管制機關所訂定大面積 DCGL ( $DCGL_w$ )；第二個部分為單一測量值不應高於管制機關所訂定小面積升高 DCGL ( $DCGL_{EMC}$ )。

## 2. 確認污染物與建立廠址劑量

此部分的目標在於建立污染物的種類、污染物所佔比率與污染劑量，並且採用與 DCGL 相同的可量測濃度單位來建立廠址劑量，而進行此步驟時可以使用廠址歷史評估資料來作為參考。另外，建立廠址劑量必須考量不同種類的射線，例如：阿法射線或貝塔射線。

## 3. 進行區域分級

在廠址中各個區域會有不同受污染的可能性，而往後會依照受污染的可能性進行不同程度的調查。當區域內受污染的可能性高時，必須接受較為仔細的調查；反之，當區域受污染的可能性低時，可以減少調查的深入程度以減少調查的成本。區域分級後廠址將被分為一到三級，而各級的定義

與前文所述相同。

進行區域分級時可以使用廠址歷史評估中所得到的資料作為判斷的依據，而區域分級的步驟為先將整個廠址設為第一級，視為皆具有受到污染且劑量可能超過 DCGL。接著，根據廠址歷史評估將污染劑量非常不可能超過 DCGL 的區域歸類為第二級，視為有受到污染的可能但污染劑量不超過 DCGL。最後，則將第二級中非常不可能受到污染的區域歸類為第三級，視為不受污染或可能受到極少的污染物影響。

#### 4. 選擇背景參考區域

由於各個地區會因為自然或人為的因素而具有不同的背景放射核種，例如：自然界中存在鉀-40 或碳-14，或由於使用核武使得背景中也可能存在銻-137。因此，判斷區域是否受到輻射污染時，必須尋找適當的背景參考區域作為對照組，或是藉由衡量背景區域與受污染區域的差異測量污染劑量。

一般來說，背景參考區域的標準為未受污染的區域，可以將廠址周邊未受污染的區域作為背景參考區域。然而，有時背景參考區域的放射性核種濃度不平均或是並不確定是否為受污染影響時，必須經過判斷或是測量以確定符合背景參考區域的標準。

#### 5. 確定測量單位

一般進行調查時，會以單位面積的輻射劑量作為測量結果的表示方法，進行廠址特性評估時會依據不同的情況選擇不同大小的單位面積以表示測量結果。當選取的單位面積越小時，污染的分佈狀況會變得更加精準，而選取的單位面積越大時，污染的分佈狀況會更加模糊。當區域內構造較為複雜或是受污染的可能性較高時，應選擇較小的單位面積以更精確的表示污染劑量的分佈狀況，例如：第一級區域或是建築物內部會選擇較小的單位面積以進行量測。

## 6. 選擇測量儀器與技術

廠址特性評估作業可使用的測量方式有三種，分別為：掃描法、直接測量法與送樣檢測法，而進行測量時也必須選定適當的測量儀器，並必須確保儀器具有一定的最小可偵測濃度 (minimum detectable concentration, MDC)。一般來說，進行測量時，儀器的測量極限 MDC 必須低於 10% 到 50% 的 DCGL。當儀器的測量極限越低時，所造成的標準差將會越小，且可以減少測量的次數而提升量測的可信度。然而，當測量極限越高時，所造成的標準差將會越大，需要增加測量的次數以達到相當的可信度。由於儀器的測量極限越低時，價格往往越高，調查時可以根據儀器價格、測量人力成本等因素選擇最適當的測量儀器。

掃描法一般用於污染較低或是較不可能受污染的區域，掃描法可以在大

面積中確認並無殘留高輻射劑量。對於已知的污染區域或是有可能受污染的區域，會使用直接測量法或送樣檢測法。直接測量法為在單一點上直接進行測量，而當現場或是儀器條件無法進行直接測量時，則可使用送樣檢測法，送樣檢測法為在現場取樣後，委託由實驗室進行量測分析。

## 7. 廠址準備

廠址準備包含得到廠址調查許可、訂出廠址邊界、評估廠址物理特性與移除廠址障礙物。當廠址不屬於調查者時，調查前應合法的得到廠址擁有者的同意。進行調查前必須訂出廠址的確切邊界，雖然廠址的擁有者可以提供廠址的地圖做為訂出邊界的參考，但是可能污染範圍超過地圖的範圍，因此必須依據專業的判斷訂出廠址的邊界。

評估廠址物理特性的目的為提供進行廠址特性評估設計時的參考，廠址特性評估之前應確認廠址的結構、地形等，在調查以後建立廠址的地圖，並且以座標系統建立網格劃分廠址的區域。當區域位於第一級或第二級區域及建築物內，必須使用較小的網格，以在往後的分區測量中得到較為詳細的污染分布。

廠址準備也包含了移除廠址障礙物，廠址特性評估為針對地表進行測量，當地表上存在障礙物時無法進行測量，因此廠址準備時必須移除會影響到測量的障礙物。

## 8. 品質控制

進行測量前必須事先進行品質控制的規劃，以確保最終所得到的數據具有相當的可信度。品質控制會從三個方面著手：第一個方面為確認資料的精準度，資料的精準度會與測量的方法、儀器測量的誤差有關；第二個方面為確認應該蒐集的資料數量，由於資料本身一定具有誤差，因此必須藉由多次的測量進行資料的統計分析，使資料達到足夠的精準度；第三個方面則是研究其它有可能造成誤差的因素，並且盡可能的避免，例如：污染劑量會隨測量的時間點而改變等。

## 9. 健康安全

進行調查時必須確保作業人員在安全的情況下作業，當廠址中可能存在高劑量的輻射污染時，作業人員必須在充足的防護措施下進行作業。

### 3.3.3 計畫與設計調查

MARRSIM 準則雖然涵蓋許多不同類型的廠址特性評估與調查，包含：廠址歷史評估、界定調查、特徵調查、整治行動輔助調查、與最終狀態調查，但 MARSSIM 內容著重於最終狀態調查，其它種類的評估與調查則被視為最終狀態調查的輔助，而最終狀態調查的目的在於確認原先具有輻射污染的區域，經過整治後其範圍內的輻射劑量並未超過標準值。

#### 1. 界定調查

界定調查的主要目的在於依據先前的廠址歷史評估結果對於廠址進行更進一步的調查，因此在界定調查中會實地確認廠址歷史評估中未受污染的區域或第三級區域是否未受污染，另外在界定調查中會初步的調查在廠址歷史評估中被列為第一級或第二級的區域，大略的得到區域內的劑量做為未來更進一步調查時的輔助。

設計界定調查時主要依照廠址歷史評估結果進行規劃，在界定調查中需要依據 DQO 程序進行規劃，以確保蒐集到足夠充分與可靠的資訊。界定調查屬於較為初步的調查，因此可能不需要採用與最終狀態調查同等嚴謹的規範。

進行界定調查必須對於廠區內進行整體的調查，以得到污染劑量的分布。另外，進行界定調查時需要調查背景輻射劑量，以利於未來分析廠區內的資訊。界定調查後所有得到的輻射劑量應採用與 DCGL 相同的單位來呈現以利於資料的判斷，資料正確的呈現以後可以將資料與廠址歷史評估結果進行比較。當區域內資料與廠址歷史評估不符合時，可以將區域重新分級，例如：當第三級區域調查後的輻射劑量到高於 DCGL 時，可將此區域重新歸類為第一級區域。

界定調查完成後應該做成一份報告，報告內容應包含廠區的整體概略輻射污染分布，並且提供輻射污染的劑量、種類等資訊。

## 2. 特徵調查

特徵調查的主要目的在於調查背景與受污染區域的輻射劑量、調查廠址周遭的環境特徵、評估整治行動的效果與可行性、及整治行動對於人體健康安全的影響等。特徵調查可以在未來進行最終狀態調查時提供廠區內的自然背景輻射劑量、估計整治後區域內的輻射劑量、重新評估整治後的區域分級、提供最終狀態調查時測量儀器的選擇、與提供最終狀態調查時可能的誤差原因。

設計特徵調查時必須依據 DQO 程序進行規劃，可以先使用廠址歷史評估結果以了解廠址的環境特徵。在特徵調查中，必須明確的列舉出廠區的環境特徵，如：水源、土壤、建築物等，並且在調查時依據環境的特徵推斷出污染可能的擴散媒介，判斷可能的污染擴散範圍，並且加以確認是否受到污染。

進行特徵調查時必須根據 DCGL 選擇合適的儀器以進行測量，並且根據廠址歷史評估結果建立調查時的輻射防護，以確保人員在安全的狀況下作業。由於特徵調查需要較為精準且詳細的數據，因此在不同的環境中進行調查作業會有不同的考量，例如：在建築物中，有時會探鑽牆面以得到污染在牆內的分布，而在平地上會取樣不同深度的土壤以得到污染的垂直分布。特徵調查也必須對於污染可能的擴散媒介進行調查，例如：地下水、

空氣、與河流等，確保不會低估污染範圍的大小。

特徵調查後資料應以可與 DCGL 相互比較的形式呈現，並且呈現污染劑量以供往後的整治步驟或是最終狀態調查的參考。在調查結束以後，也應將所有的調查過程與結果分析寫成一份報告，供未來進行不同階段調查作業時的參考。

### 3. 整治行動輔助調查

執行整治行動輔助調查之主要目的係為了監控各項整治行動或除汙措施的有效性，並用以決定該場址或調查單元是否已準備妥適而可進行下一階段的最終狀態調查。此外，整治行動輔助調查的結果也可用於即時更新各廠址特定的參數，可於最終狀態調查規劃時使用。整治行動輔助調查通常仍需依規畫、執行、評估、以及決策等分階段進行，過程中需遵循 DQO 程序的要求來進行調查的規劃與設計，且最終也需要將執行整治行動輔助調查的結果以文件化的形式予以保存供參。進行整治行動時，為了確定當下整治行動的成效或是確認整治成效是否達到進行最終狀態調查的標準，會在整治行動的當下，配合執行整治行動輔助調查。整治行動輔助調查在操作上並沒有硬性的規定，但是其原則為配合與提供整治行動區域內污染劑量的數據。當整治行動輔助調查完成後，應將其資料建檔，以供往後的最終狀態調查時使用。

#### 4. 最終狀態調查

最終狀態調查的目的在於確認廠址在經由整治過後，輻射污染劑量並未超過 DCGL。為了使結果具有足夠的可信度，在調查上會相對地較為詳細與嚴謹，而在資料的分析上則必須使用統計學的方法，以評估資料的誤差與準確性。

最終狀態調查必須依照 DQO 程序進行規劃，並且根據調查以前的資訊進行各區域最終狀態調查的規劃。為了增加最終狀態調查的可信度，計畫最終狀態調查前應規劃驗證步驟。一般來說，驗證步驟多由獨立的政府機關或是第三方組織進行，以確保調查人員的結果並無疏漏。進行最終狀態調查前，必須通知相關的管制機關，以確認並安排最終狀態調查的驗證步驟與執行方式。

最終狀態調查的目的在於確認廠址內輻射劑量低於可接受的釋放標準。為了達到前述的目的，在調查之前會假設廠址皆超過輻射劑量標準值，並且在調查的過程中以調查所得的資料證明廠址的輻射劑量符合標準。在廠址特性評估中，會使用統計的方法以證明輻射劑量符合標準，為了使往後的統計順利進行，在計畫最終狀態調查時應正確的估算出往後所需要的測量數量或是測量地點，以支持最終狀態調查的結果。

測量數量或是測量地點會因為不同級別的區域、不同的地形、測量的誤

差等因素而有所改變。MARSSIM 準則即建議第一級區域應接受最仔細的調查，並且調查時必須採用 100%掃描及系統性取樣的方式來進行區域內土地或建物的檢測，而第二級區域在調查時則必須包含 10~100%的土地或建物的掃描性量測，第三級區域則可以以隨機取樣。一般來說，建築物內部的取樣密度也應高於土地的取樣密度。

完成最終狀態調查後，必須以可與 DCGL 相互比較的單位呈現數據，並且依照 MARSSIM 所提供的統計方法，或是其它被認可的統計方法進行統計分析，以評估廠區內輻射劑量是否低於標準值。在最終狀態調查報告中，應詳細的提供調查的過程與數據，避免引用參考資料內的數據，並且在最終狀態調查報告發表之前，必須經過獨立的政府機關或是第三方的審查。

### **3.4 執行階段**

#### **3.4.1 測量方法與儀器選擇**

在廠址特性調查中，測量的含意為使用測量儀器測量表面或是樣品以得到某種數值或是污染程度。測量的方法有三種，分別為：掃描法、直接測量法與送樣檢測法。另外，在儀器的選擇方面，必須確認儀器有能力估量該地點或是提供該地點與放射性相關的數據，並且其測量極限必須低於 DCGL，以確保儀器有一定的精準度。在廠址特性調查中，由於廠址可能具

有不同種類的放射線或是不同的物理特性，在選擇測量方法或儀器時，必須依據廠址的特性進行選擇。

選擇測量方法或是儀器時必須依照 DQO 程序以確保調查結果的完整性，而選擇測量方法時可以依據幾項指標檢查選擇的正確性：第一項指標為精準度，在進行調查前可以多次重複進行相同的測量，以確認數據的偏差可分布在一定的範圍之內，否則會降低往後調查結果的可信度或是需要增加往後的測量次數；第二項指標為誤差，誤差可以藉由量測已知的標準樣品後，將測量數據與理論值進行相互對照，並且確保誤差不會影響最終結果的判斷；第三項指標為代表性，測量的結果應該要能代表區域內的特性，特別是抽樣調查區域內的輻射劑量時；第四項指標為比較性，進行測量時應該要依照同一套的標準流程進行，以避免不同的流程導致數據無法進行比較；第五項指標為完整性，測量完成時必須再次確認資料的數量是否足夠，以確保未來分析資料時能順利的進行。最後，可以使用目前已在核輻射度量實驗室內的控制表，使用控制表列出標準的流程，以確認選擇的測量方法或是儀器是否適合廠址特性調查。

進行測量時，必須選擇合適的單位組織與人員進行測量。選擇時可以依據單位組織是否具有調查的能力、調查的技術、調查的經驗與過去的行為記錄作為選擇的考量。

在廠址現場，可以使用的測量法為掃描法與直接測量法。掃描法為使用可移動的測量儀器，在廠址內移動並且進行測量。掃描法主要有兩項優勢：第一項為可以有效的了解區域內存在輻射核種的種類；第二項則可以偵測區域內是否有輻射污染劑量分布不均的情形。因此，掃描法適合在初步的調查中使用。直接測量法為將測量儀器置於距離表面一定的高度，進行一分鐘左右的計量測量。直接測量法的優勢在於可以較為精確的測量當地的劑量。因此，當進行需要精細測量的污染區域時，則會建議使用直接測量法。

進行測量之前，應該要先確認測量儀器的靈敏度是否足夠，使往後的結果具有足夠的可信度。測量完畢後，必須將測量結果轉換為可與 DCGL 單位相互比較的資料，並且使用統計的方式，計算出測量結果的不確定性與信心區間。

在進行測量時，除了可以使用偵測輻射劑量的儀器之外，也可以搭配全球定位系統 (GPS)、雷達等輔助儀器，使測量過程可更為順利地進行。

### **3.4.2 樣品蒐集與檢測**

當廠址內無法使用掃描法與直接測量法，或者掃描法、直接測量法無法滿足測量需求時，往往會使用送樣檢測法進行測量。送樣檢測法為在廠址內進行取樣，並且在取樣後交付實驗室進行測量以得到資料。送樣檢測法

應依照 DQO 程序進行規劃，再經由適當的取樣過程之後交付予合適的實驗室進行檢測，以確保資料的正確性。

進行取樣時，必須考量廠址的特性，確保取樣地點足以代表周遭區域內的特性，而製作樣品也必須確保樣品符合實驗室的測量條件。另外，在取樣時必須詳細記錄樣品的取樣地點、取樣時間與其它與樣品相關的資訊。取樣後應妥善的包裝樣品，並且選定合適的運送方式將樣品轉交由實驗處理。

為了確保實驗室測量的準確度，進行送樣檢測前必須選擇合適的實驗室。選擇時可以依據實驗室是否具有測量能力、測量技術、及測量經驗，並由過去的行為紀錄作為選擇的考量。進行取樣時，應與實驗室討論樣品的形式，確保實驗室能順利的測量樣品。將樣品交付實驗室後也應與實驗室保持密切聯繫，並詢問樣品處理的進度。

### 3.5 評估階段

當調查測量結束以後，須將測量資料正確的分析以及適切的評估。當數據全數大於或全數小於 DCGL 時，用直觀便可判讀調查結果。然而，調查中會因為儀器誤差、廠址特性、與人為操作等因素造成調查資料的誤差，影響調查的最終結果。在廠址特性調查時，為了確保分析結果的準確性，在分析調查資料時應使用正式的統計方法以得到可信任的調查結果。

分析調查資料時，會依照 DQA 的流程來評估資料的正確性，DQA 有五個步驟，分別為：審查 DQO 與調查設計、進行初步資料審查、選擇統計方法、證實假設、以及給予結論。分析調查資料的第一個步驟是審查 DQO 程序與調查設計，確認調查設計本身無誤，並且找出調查前各個區域的推估計量，以提供往後分析進行對照。接下來則是進行初步資料審查，此步驟中須先將原資料轉換為可與 DCGL 單位相互比較的資料，再求出資料的平均值、標準差與中位數，並將分析結果製成圖表。下一個步驟是選擇統計方法，選擇統計方法時必須考量廠址的特性與需求，再進行統計分析。接下來則是證實假設，將統計結果與調查前的假設進行對照，確認調查過程蒐集到足夠的資料。最後給予結論的步驟中，將分析的結果作彙整，並做出調查的結論。

### 3.6 決策階段

進行廠址特性調查後必須檢查其結果，當調查結果與設計時預估的結果不符合時，必須找出不符合的原因，例如：在最終狀態調查中或是在其它調查中的第三級區域，當輻射劑量超過 DCGL 便與設計時預估的結果不符合，此時需先檢查調查流程的正確性，當調查流程正確時，便有可能是廠址未確實整治或是調查初期的假設錯誤。

廠址特性調查後必須依照法規將調查的流程、過程中的數據、與最終的

評估結果彙整成一份檔案。報告中的資料盡量由自身的調查資料提供，以避免參考資料錯誤的影響。

### 3.7 總結

由於除役核電廠廠址特性調查作業牽涉極為複雜的程序，且因廠址的釋放與否攸關於日後在該區域上住居或進行活動之民眾的健康與安全，因此必須有可供遵循的準則來嚴格執行各項廠址特性調查作業。本研究計畫為能確實掌握除役核電廠之廠址特性調查作業的準則，已初步針對目前已被國際認可的 MARSSIM 準則進行研讀與分析，藉此先全盤地瞭解核電廠廠址特性調查作業的進行方式與執行步驟，並能夠深入地掌握廠址特性調查作業各階段的實務細節。此外，為有利於管制機關未來在進行除役核電廠廠址特性調查作業的管制工作，本計畫也從準則的研析過程中擷取未來管制機關可以加強的管制重點，希可藉此建立或強化管制機關在此相關作業的管制能量：

1. **品質保證方案**：執行單位在調查計畫階段，須依據 QAPP (quality assurance project plan) 建立各檢測階段的品質保證方案，並據以落實各項 QA/QC 措施及檢視各階段作業的有效性。
2. **標準作業程序書**：執行單位在執行各項調查作業之前，須建立廠址污染

調查與檢測作業的相關程序書，包括：調查計畫、執行、評估、以及決策各階段的作業程序書、各項儀器與檢測技術程序書、以及 DCGL 推定濃度計算程序書等。

3. **記錄文件與報告**：執行單位必須留存各項調查與檢測記錄、檢測異常記錄、現場量測與掃描數據、實驗室取樣記錄、QA/QC 記錄、儀器的量測現值與校正報告、以及各項調查與檢測作業之評估與決策報告等。

此外，為了更有系統地瞭解廠址特性調查作業各階段所必須建立的品保組織與品質控管相關文件，如：標準作業程序書、資料蒐集方法、檢測紀錄、稽核紀錄、以及廠址特性評估決策報告等，本計畫也依據各階段作業所必須建置的品質控管文件進行分析，如下表一所示。

表一、除役核電廠之廠址特性調查作業於各階段所必須建立的品質控管文件

階段	應完成之文件或報告
計畫階段	廠址歷史評估報告、初步調查評估報告、品質保證方案計畫(QAPP)、標準作業程序書 (SOP)
執行階段	品質保證方案計畫(QAPP)、標準作業程序書 (SOP)、測量方法與儀器選擇、各項調查與檢測紀錄、檢測異常紀錄、現場量測與掃

	描數據、實驗室取樣紀錄、QC/QA 稽核紀錄、儀器 MDC 與校正報告
評估階段	分析調查資料報告、資料取得與驗證紀錄
決策階段	廠址特性評估決策報告

## 四、廠址特性計算模型

### 4.1 推算濃度基準限值 (DCGL)

當核電廠運轉執照到期並決定停止運轉之後，各項除役作業將會逐漸展開，如：拆除及除污等作業，然進行完成拆除及除污等作業之後，要將廠址釋出給一般民眾使用之前，廠址仍然可能有輻射核種的殘留，此時對於殘餘輻射劑量的評估便是一項很重要的工作。一般而言，殘餘輻射劑量在管制的規範上係使用全身有效等效劑量 (Total Effective Dose Equivalent, TEDE)，限值為 0.25 毫西弗/每年 (mSv/yr)。有效等效劑量是被發展用以進行輻射防護評估的量值，其針對不同器官進行能量吸收的加權，可以完善地代表人體受輻射照射時的風險性。然而，實際在執行廠址特性評估時，並無法直接量測到全身有效等效劑量，而是土壤中所含之輻射核種濃度，因此必須定義另一個可作為指標的數值。

推算濃度基準限值 (DCGL) 即是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遞途徑進行評估，在確保全身有效等效劑量在限值內的情況下，將劑量轉換為相對應之土壤核種濃度，藉此才可進一步地推算出土壤濃度限值。目前國際上已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，其中，RESRAD 程式為公開且被認為具有公信力的計算程式，本報告也將根據此程式中的

計算方式及概念，進行各種劑量曝露途徑之分析，並將概略地評估各項分析所對應的重要參數，且提供各參數較保守或通用的數值，以利往後研究及進行相關管制工作時的參考。

## 4.2 曝露途徑分析

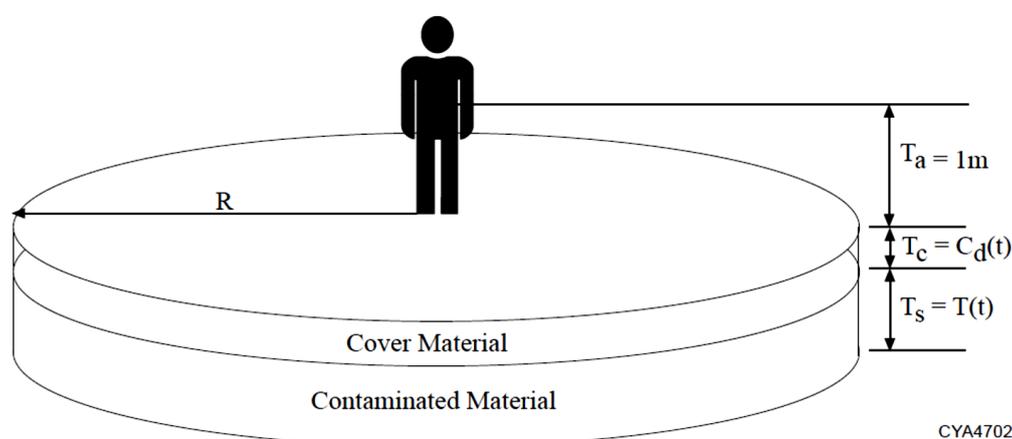
如前所述，劑量限值要先從不同曝露途徑的評估著手，確定各途徑及放射性核種所造成的劑量比例，再以該比例乘上劑量限值 (0.25 mSv/yr) 才可定義出所有核種的土壤濃度限值。曝露途徑的分析上主要可分為四個部分：(一) 射源分析、(二) 環境傳遞分析、(三) 劑量與曝露分析、以及 (四) 情境分析，以下則詳述各分析的重點及代表意義：

### 4.2.1 射源分析

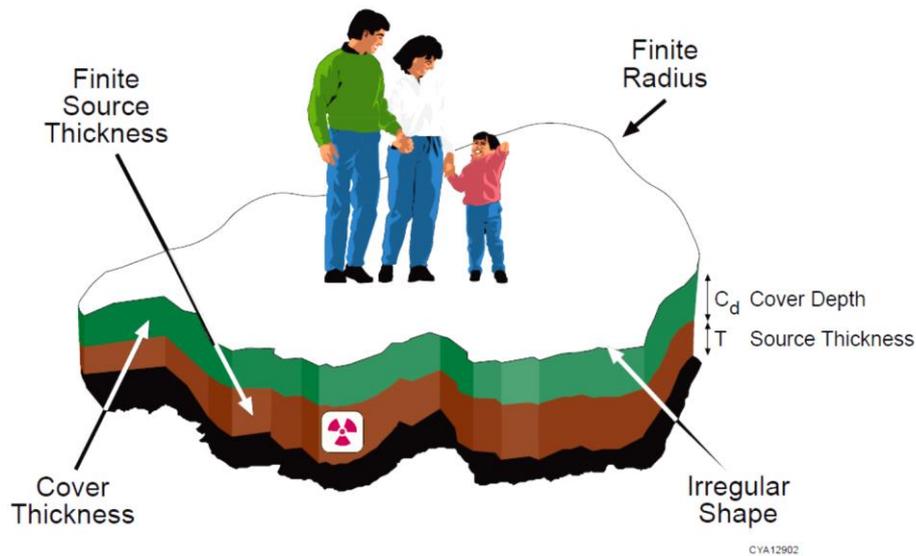
射源分析為評估核電廠除污之後，廠址土壤所殘餘的放射性核種射源的量，隨著幾何與時間的變化。本項分析需考慮的效應有土壤的幾何效應、殘餘放射性核種的增長及衰變、受污染地區經沖蝕或瀝濾、以及放射性核種經環境傳遞至受污染區外的行為。受污染區的理想幾何為圓柱狀的均質污染區，如圖三所示，通常會有一層未受污染的土壤可作為天然屏蔽，稱之為覆蓋層，圖中  $C_d$  即是覆蓋層的厚度。一般而言，待評估的廠址為非理想幾何，如圖四所示，因此需要考慮修正用的形狀因子 (shape factor) 及面

積因子。形狀因子的計算上首先將污染區分為複數個同心圓柱，並將各圓柱中污染面積所占之比例算出，乘上該區的面積後總合再除以污染區的總面積即可得出；另一方面，面積因子則是從相同面積之等效半徑推算而來。除此之外，廠址的放射性核種分佈多為不均勻，致使非均質效應的計算也是必須的。

射源的活度及位置是受到時間影響的，其現象可能受到核種的來源不同而有所差異，如：核種自污染區瀝濾出、放射性核種的增長與衰變、覆蓋層或污染層之土壤沖蝕、以及核種經環境傳遞至污染區外。在考慮時間效益時，上述現象發生的速率都必須被計算出，如此才可準確的得出在廠址工作或生活的人口之累積劑量。



圖三、受污染區的理想幾何 [Ref.: C. Yu et al.]



圖四、受污染區的實際幾何 [Ref.: C. Yu et al.]

#### 4.2.2 環境傳遞分析

人體接收到輻射曝露的途徑主要有三種：(1) 體外輻射、(2) 吸入輻射、以及 (3) 攝取輻射，更細的分類所有潛在曝露途徑則列於表二之中。然而，實際在執行劑量評估時，會省略劑量過低的曝露途徑，如：體外輻射類的水接觸輻射。圖五所示為主要的曝露途徑，也是 RESRAD 軟體所考慮的九種曝露途徑，圖中的藍色曲線代表各個途徑的相互影響情形。在主要的曝露途徑中，體外輻射只考慮土壤中直接產生的輻射；吸入輻射考慮廠址空氣中懸浮粒子以及氬氣被吸入體內時的情形，常會影響呼吸器官；而攝取輻射則是食用植物、肉類、奶類、水生動物、水、以及土壤被人體攝取的

情形，常會影響消化器官。上述的曝露途徑中也會有互相作用的途徑，例如：植物的攝取輻射可能是由被污染的水帶來的。

表二、潛在曝露途徑

體外輻射	地表輻射-體射源與面射源
	空氣輻射-懸浮粒子、氬氣與其餘氣態放射性核種
	水輻射
吸入輻射	懸浮粒子
	氬氣
	其餘氣態放射性核種
攝取輻射	食物-植物、肉類、奶類、水生動物
	水-井水、池塘
	土壤

### (1) 體外輻射

體外輻射的最大輻射源為 $\gamma$ 射線，其餘射源因產量太少或穿透力過低，所產生的劑量遠小於 $\gamma$ 射線。在計算 $\gamma$ 射線所帶來的影響時，因其穿透性強，可用理想的幾何（均勻圓柱污染區）進行評估，且需考慮建築物的屏蔽效應。

## (2) 吸入輻射

吸入輻射的輻射源來自氬氣或被放射性核種污染的懸浮粒子，其途徑分為兩步驟：從污染區傳遞至曝露環境以及從曝露環境傳遞至接受劑量的個體。前者的評估重點為放射性核種在空氣中以及在土壤中的濃度比值，這關係到該核種從土壤粒子變為懸浮粒子的速率；後者的重點則是測量個體的呼吸速率，可能會與年齡、體型等原因導致差異。

## (3) 攝取輻射

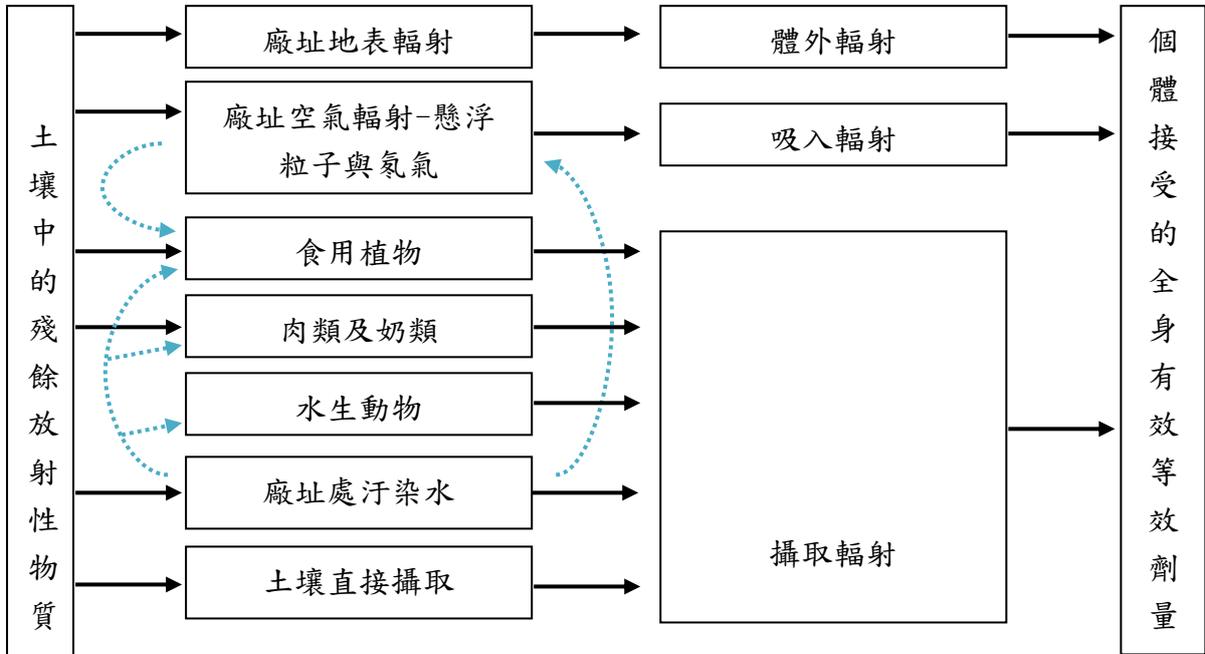
攝取輻射由人體攝取食物或水時，攝取物內含有放射性核種，攝取輻射較為複雜的部分來自於食物鏈導致各個途徑會互相影響。食物的途徑分為植物、肉類、奶類、水生動物四種，其中，植物的污染源自土壤中的污染、灌溉用水含有放射性核種或空氣中的放射性核種懸浮粒子落在植物上。肉類及奶類的污染源自用作飼料的植物或飲用水內含有放射性核種，導致食用動物體內出現污染源。水生動物的污染則是源自養殖池的池水。食物類的另一種分類方式則是分為經水傳遞及不經水傳遞，空氣懸浮粒子造成食用植物擁有污染源，及其進而導致肉類、奶類污染等可歸類為不經水傳遞，其餘的傳遞則為經水傳遞。

飲用水及經水傳遞的食物其途徑為污染區中的水被取出飲用、灌溉或是用為養殖水生動物，致使人體從食物鏈亦或直接從水中攝取到放射性核種。

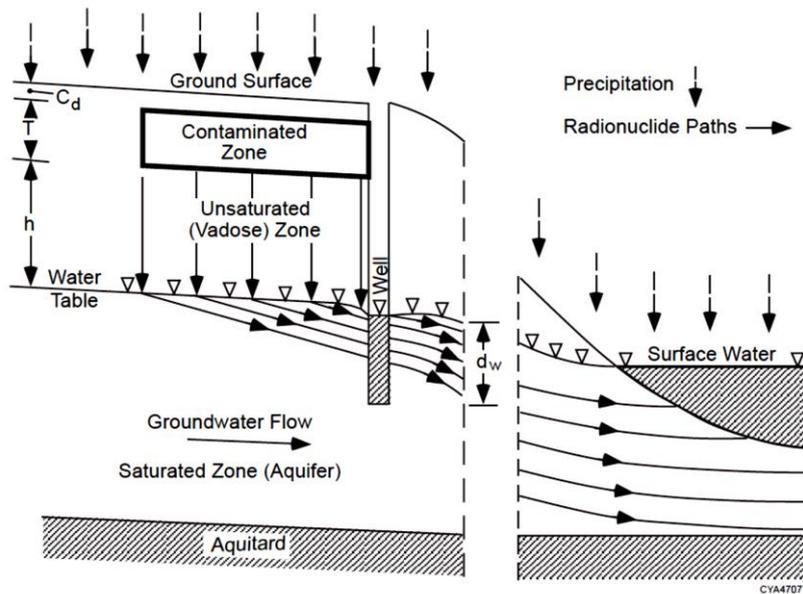
圖六所示即為水的傳遞過程示意圖，地表下區域可分為覆蓋區、污染區、未飽和區 (unsaturated zone) (根據不同的地理環境，有時此區並不存在)、以及飽和區 (saturated zone)。通常飽和區的核種傳遞速率會變快，致使核種進入人類生活圈的機會變大，潛在風險提高。污染區水的傳遞上，常經由水井或池塘由地下運至地表上，因此，在評估上須分為地下水與地表水兩類。

地下水傳遞的評估使用兩種模型：質量平衡模型 (mass balance model, MB) 或非分散模型 (nondispersion model, ND)。前者假設所有被釋出的放射性核種皆發自污染區中央的井水，以環狀方式釋放；後者則先假定放射性核種分散度為零，即是未飽和區及飽和區皆為均質，而井口的位置在污染區邊緣，因此放射性核種只會影響少部分的區塊。上述評估模型分別適合用在小區域污染 ( $< 1000 \text{ m}^2$ ) 以及大區域污染。地表水的部分，可將池塘當作分析標的，假設流入與流出的水相等，以及從污染區瀝濾出的放射性核種總活度等於流入池塘的總活度。然因池塘原本的水並非污染水，污染物流入後會被稀釋，並可以稀釋因子 (稀釋的比例) 推估污染區的放射性核種含量。若流至池塘的污染水是先垂直經過污染區才傳遞到池塘，如圖六所示，則稀釋因子可以簡單的以污染區面積除以池塘面積求得，如此只需採樣池塘中的放射性核種濃度便可推算出污染區的核種濃度。

攝取輻射中還有一個特殊的狀況，即土壤直接攝取，此項對於幼童或患有異食症的居民來說非常重要，而其造成的影響與攝取的量具有直接相關。



圖五、各主要輻射曝露途徑及其關聯性



圖六、水的傳遞途徑示意圖 [Ref.: C. Yu et al.]

### 4.2.3 劑量與曝露分析

人體受到的劑量分佈情形與輻射的種類、接受的途徑、以及放射性核種的位置有關，在殘餘核種之放射性評估上，根據放射線種類以及途徑分作體內輻射（包含吸入及攝取輻射）與體外輻射兩種來進行分析。基本上，測量到的輻射單位都是空間曝露，要將之轉換為劑量還需一轉換因子，稱為劑量轉換因子 (dose conversion factor, DCF)。劑量轉換因子定義為劑量與曝露的比例，同樣根據不同放射線與器官而有所差異。

在體內輻射的評估上，要先描述放射性核種進入體內的途徑及其在體內釋出的能量，才可計算出該放射性核種造成的劑量。體內輻射根據吸入與攝取兩種途徑，分別對呼吸器官與消化器官造成較為重大的劑量，劑量因子的計算上主要與進入體內的放射性核種濃度以及從人體排出的速率有關，且放射性核種衰變後的產物若仍具有放射性，也須考慮進劑量轉換因子的計算中。

核電廠廠址殘餘核種所造成的體外輻射通常只考慮 $\gamma$ 射線，因其擁有能量高、穿透力強的特性，若無屏蔽物質時，可從放射性核種的空間分佈簡單的轉換為劑量分佈。在理想的狀態下，可將放射性核種假設為均勻分佈在無限大的區域，此時不同放射性核種的劑量轉換因子可簡單的求得並製成表格，以利評估較複雜狀況時使用。

#### 4.2.4 情境分析

上述的分析工作皆是從理論假設上將所有需考慮的可能性列出，並將各個因子針對不同核種製表以提供有興趣者使用，而實際上用來分析的放射性核種以及傳遞的途徑則是由情境分析所決定。除役核能電廠常用的情境包括：農夫居民、郊區居民、工廠工作者、以及娛樂地點（如：籃球場）使用者，各情境所考慮之傳遞途徑及傳遞速率則列於表三之中。其中，最廣為使用的為農夫居民情境，推定濃度基準限值 DCGL 也是根據此情境所決定。

表三、各情境所考慮之傳遞途徑及傳遞速率比較 [Ref.: C. Yu et al. & J.

*Moya et al.*]

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	立方公尺/年	8,400	8,400	11,400	14,000
室內時間比例	* <sup>1</sup>	0.5	0.5	0.17	0
室外時間比例	*	0.25	0.25	0.06	0.006
攝取食物受污染比例 <sup>2</sup>					
食用植物	*	0.5	0.1	無 <sup>3</sup>	無
奶類	*	1.0	無	無	無
肉類	*	1.0	無	無	無
水生動物	*	0.5	無	無	無
土壤攝取	克/年	36.5	36.5	36.5	36.5
飲用水	公升/年	510	無	無	無

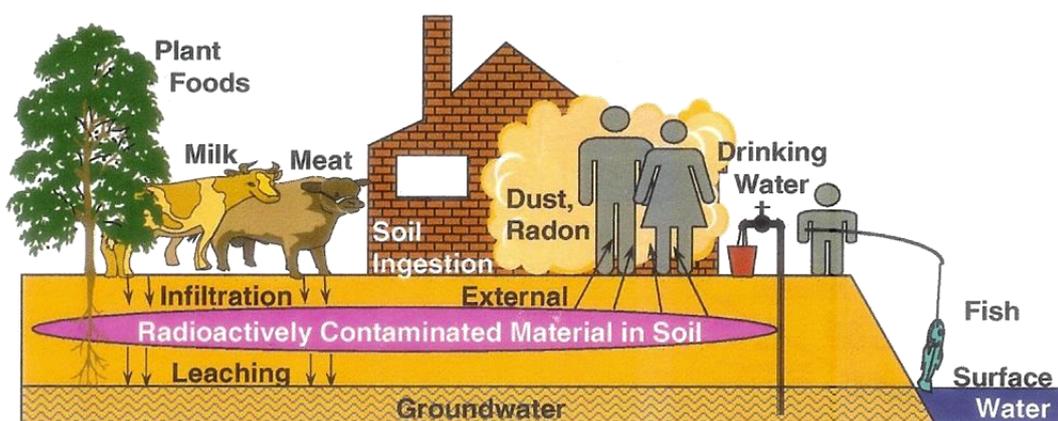
<sup>1</sup> \*符號表示無單位

<sup>2</sup> 以非常大的受污染區域 (> 20,000 m<sup>2</sup>) 作為基準，其攝取食物受污染比例

<sup>3</sup> 無表示不考慮該項傳遞方式

圖七所示則為農夫居民的情境示意圖，其係假設有一個家庭移居至除役後的廠址，並在此栽培作物與飼養家畜，此情境包含了圖五所示的所有主要傳遞途徑，且其屬於最有可能接受到長期劑量的狀況，可用以推估居民一生所受到的總劑量，並以此作為廠址特性評估標準。

**Exposure Pathways Considered in RESRAD:  
(Resident Farmer Scenario)**



圖七、農夫居民情境示意圖 [Ref.: C. Yu et al.]

### 4.3 劑量評估

除役時，要求廠址劑量要低於推算濃度基準限值，而劑量限值轉換為土壤濃度限值時，使用劑量/射源比值 (dose to source ratio, DSR)，此比值可分為三部分計算：射源因子、劑量轉換因子、以及環境傳遞因子，三者相

乘後即是劑量/射源比值，其算式如下：

$$DSR_{ip}(t) = \sum_j DCF_{j,x(p)} \times ETP_{jp}(t) \times SF_{ij}(t), \quad (1)$$

其中， $DSR_{ip}(t)$ 為時間  $t$  時放射性核種  $i$  於傳遞途徑  $p$  的劑量/射源比值。 $p$  為傳遞途徑的指標，以主要傳遞路徑區分成九類。 $DCF_{j,x(p)}$  為放射性核種  $j$  於傳遞途徑  $p$  的劑量轉換因子， $x(p)$  為曝露途徑的指標， $x(p)$  以體外輻射、吸入輻射及攝取輻射分別代表 1~3。 $SF_{ij}(t)$  為射源因子，下標  $ij$  表示第  $j$  個放射性核種因第  $i$  個放射性核種產生的增長。

接下來會較詳細的敘述不同傳遞途徑下各因子的計算方式以及常見的假設。首先，列出所需評估的放射性核種及其衰變產物是不可或缺的，一般而言，電廠的拆除時間是多於三年的，較短半衰期的核種可忽略之，在此只考慮半衰期大於一個月的放射性核種。完成放射性核種評估之後，根據三項因子針對不同的傳遞路徑與放射性核種，歸納出其適用參數與計算方式。

#### 4.3.1 射源因子

射源因子的計算上較不受傳遞途徑影響，通用的算式如下：

$$SF_{ij}(t) = S_{ij}(t)/S_i(0) \quad (2)$$

其中，下標  $ij$  表示第  $j$  個放射性核種因第  $i$  個放射性核種產生的增長，因此，當  $i \neq j$  或  $j$  並非  $i$  的衰變產物時， $S_{ij}(t) = 0$ 。射源因子的計算上，較為簡略

的方式為只考慮放射性核種的增長與衰變，也就是簡單的使用活度計算的式子求得。簡化如下：

$$SF_{ij}(t) = A_{ij}(t)/A_i(0) \quad (3)$$

其中，A 為活度，計算方式為  $dA/dt = -\lambda A$ 。

劑量轉換因子及環境傳遞因子的計算上則需從不同傳遞途徑著手，接下來會根據不同傳遞途徑列出可參考的值及說明針對不同問題的計算方式。

### 4.3.2 劑量轉換因子

#### (1) 體外輻射

體外輻射的劑量轉換因子的製表上有兩種考量，面污染以及體污染，兩者分別代表無限薄的污染層以及無限厚的污染層，寬廣上都是無限大平面。劑量取離地表一公尺處作計算，所得出的劑量轉換因子列於附表一之中。

#### (2) 吸入輻射

吸入輻射分為含有放射性核種的灰塵、氫氣、以及其餘氣體核種，氫氣通常是最主要的體內輻射劑量來源，但其傳遞方式較為複雜，須特別分開來討論（將說明於後面章節），而其餘氣體核種中，二氧化碳中的 C-14 以及水蒸氣中的 H-3 是主要核種。吸入輻射中所考量的核種除氫氣之外，其劑量轉換因子皆列於附表二。在分類上，除了輻射核種與吸入物形式的區別

外，也針對同一輻射核種所吸入之量的差異進行分類，從半殘留時間 (retention half-time, 即自體內代謝移除一半的量所需時間) 分為小於十天、十至百天、以及大於百天三類。

### (3) 攝取輻射

攝取輻射共有六項傳遞途徑，各核種所造成的輻射劑量主要根據核種進入腸胃道比例，所攝取之化合物形態會影響此比例，附表三即是攝取輻射的劑量轉換因子，一般在分析時，若不清楚核種進入腸胃道比例，則選用此表中的最高比例進行分析。

#### 4.3.3 環境傳遞因子

一般環境傳遞因子的式子列如下：

$$ETP_{jp}(t) = E_{jp}(t)/S_j(t) \quad (4)$$

其中， $E_{jp}(t)$  為  $j$  核種於  $p$  傳遞途徑之曝露參數，於體外輻射時可由核種濃度、污染區大小及深度決定 (單位為 Bq/g 或 pCi/g)；體內輻射時則是由吸入或攝取的放射性核種造成之年曝露量 (Bq/yr or pCi/yr) 來決定。 $S_j(t)$  為污染區中  $j$  核種的平均濃度。 $ETP_{jp}(t)$  有兩種單位，體外輻射時此因子為無因次參數，體內輻射時則是 g/yr。

接下來會就各項傳遞途徑，簡述計算方式：

## (1) 體外輻射

體外輻射基本上只考慮  $\gamma$  射線，其傳遞只受放射性核種於污染區之分佈及屏蔽（覆蓋層或建築物）影響，傳遞因子列於下式：

$$ETF_{i1}(t) = FO_1 \times FS_{i1}(t) \times FA_{i1}(t) \times FCD_{i1}(t) \quad (5)$$

其中， $FO_1$  為情境屏蔽因子，其考慮在戶外無屏蔽及在室內有屏蔽的比例，農夫情境下使用 0.6（戶外比例 0.25 及室內比例 0.50），室內屏蔽體外輻射參數為 0.7。 $FS_{i1}(t)$  為形狀因子， $FA_{i1}(t)$  為面積因子，兩者的計算方式如 4.2.1 節所述，附表四簡述常用到的污染區面積及有效半徑所得出的面積因子。

$FCD_{i1}(t)$  為深度與覆蓋因子，其係使用經驗公式求得，如下：

$$FCD_{i1} = A_i e^{-100KA_i \rho_b^{cv} C_d(t)} (1 - e^{-100KA_i \rho_b^{cz} T(t)}) + B_i e^{-100KB_i \rho_b^{cv} C_d(t)} (1 - e^{-100KB_i \rho_b^{cz} T(t)}) \quad (6)$$

其中， $A_i$ 、 $KA_i$ 、 $B_i$  及  $KB_i$  為從實驗中求出的經驗參數，列於附表五。 $\rho_b^{cv}$  為覆蓋層的密度， $C_d(t)$  為覆蓋層的深度。 $\rho_b^{cz}$  為污染區中土壤的密度， $T(t)$  為污染層的厚度。除此之外，上述所有因子皆為無因次參數。

## (2) 吸入輻射

吸入懸浮粒子的傳遞受到空氣與灰塵的比例、居民在戶外的時間、污染區的面積與覆蓋層深度等影響，其傳遞因子如下：

$$ETF_{i2}(t) = ASR_2 \times FA_2(t) \times FCD_2(t) \times FO_2 \times FI_2(t) \quad (7)$$

其中， $ASR_2$ 為空氣與懸浮粒子的濃度比例，通常為 $1 \times 10^{-4} \text{ g/m}^3$ 。 $FA_2(t)$ 為面積因子，受懸浮粒子大小、風速及污染區面積影響，在理想狀態下（懸浮粒子大小為1微米，污染區面積為10,000平方公尺），風速1 m/s時此因子約為0.3407，風速10 m/s時則為0.0343。 $FCD_2(t)$ 為深度與覆蓋因子，在此項為地表上受污染土壤所佔之比例，因此當覆蓋層夠厚時（ $>0.15$ 公尺），此項因子為0，無覆蓋層時，此項因子為1。 $FO_2$ 情境與屏蔽因子，在此項傳遞途徑通常為0.45（戶外比例0.25及室內比例0.50，室內吸入灰塵參數為0.4）。 $FI_2(t)$ 為年均吸入空氣的量，一般為8,400立方公尺/年。

### (3) 攝取輻射

攝取輻射之傳遞途徑最為複雜，在此只描述計算概念。首先，確定居民每年所攝取的食物的量（RESRAD預設為植物類每年174公斤、奶類92公升、肉類63公斤、水生動物類6.3公斤、土壤直接攝取36.5公克、以及飲用水510公升）。接著，還需得知各項食物種類其污染比例，最後由受污染食物中放射性核種種類及其停留在體內的時間定義出年曝露量，即是攝取輻射之傳遞因子。

#### 4.3.4 氡氣效應

如前所述，氡氣所造成的體內劑量影響甚大，其傳遞途徑非常多樣且複雜。一般而言，產生氡的途徑有兩種，可由鈾-238、釷-230 及鐳-226 衰變成氡-222，或是由釷-232 及鐳-228 衰變成氡-220。兩者皆會釋出高能量的 $\alpha$  粒子，若不慎吸入氡，將在體內造成極大的劑量。氡的主要傳遞途徑有土壤、空氣、水、以及特殊的建築物傳遞，以體外輻射與吸入輻射而言，通常室內的劑量會比戶外少，但若考慮到氡氣的建築物室內效應，則室內的劑量將會具有極重要的貢獻。

氡的出現多經由擴散所導致，因此氡的通量可簡單經由擴散理論計算出：

$$J = -D \frac{dc}{dz} \quad (8)$$

其中，J 為通量、D 為擴散係數、C 為氡在孔隙中的濃度、z 則是擴散方向。不同的材料會有不同的擴散係數，也增加了計算氡通量的複雜度，除此之外，還需考慮氡核種的增長與衰變，才可求出實際的氡通量。

##### (1) 室內之氡效應

氡的室內來源有四：(1) 由土壤中擴散至地下室地板及牆壁，再進一步擴散至室內、(2) 由建築材料擴散而來、(3) 伴隨空氣自抽風機進入室內、(4) 地下水含有氡核種，並擴散至空氣中（空氣與水中的氡含量比例為四

比一)。計算上可先假設地表擴散的量是均勻的，不隨地點改變，且氬核種自室內消失只有衰變及自抽風機抽離室內兩種。將各個路徑皆考慮清楚後，即可知道不同時間下室內氬的濃度，而當進入室內與消失的量皆固定時，室內外的氬濃度即會達一個平衡值。

## (2) 戶外之氬效應

氬在戶外所可能造成的體內劑量主要為空氣中所含有的氬經由人體吸入後造成的吸入劑量，此項劑量主要受空氣中的氬濃度影響。而戶外的氬濃度則是受地表土壤的氬濃度影響，通常在計算時使用地表上一公尺處的氬濃度作為保守之基準（因該處會造成孩童之最大氬吸入劑量），並假設地表之氬濃度為均勻分布，而戶外之氬濃度還受污染區面積、該地區平均風速影響。

## 4.4 總結

以上針對推定濃度基準限值 DCGL 之定義與計算方式進行一連串之探討，當管制單位定出規範的劑量限值時，必須經過曝露途徑分析將之轉換為推定濃度基準限值，藉此確認除役核電廠的土地、建物、及其周遭環境是否符合管制單位常用的以劑量為基準的執照終止接受標準。在將劑量限

值轉換為推定濃度基準限值的過程中，需經過曝露途徑分析與劑量評估，概念上為考慮所有可能的傳遞途徑後，以最保守的方式針對放射性核種之射源增長與衰變、各種主要傳遞途徑、以及劑量轉換找出射源因子、劑量轉換因子、以及環境傳遞因子，三者相乘即可得出劑量/射源比值。如此，便可求得推定濃度基準限值。本文敘述了各個因子的計算觀念，並給予各參數大略的參考數值，可作為未來進行廠址特性之最終狀態調查與管制規範符合性驗證作業時的重要參考資料。

## 五、其它作業準則之分析比較

除了美國多個機構所共同發展與採行的 MARSSIM 準則之外，歐洲相關的機構也制定了一套環境輻射調查暨廠址評估執行手冊，簡稱為 EURSSEM (Environmental Radiation Survey and Site Execution Manual)。同樣地，EURSSEM 手冊中也提供了廠址特性調查的策略、計畫、執行、評估、以及文件紀錄等作業的相關資訊與準則。在本報告中，除了研析 MARSSIM 準則之外，也深入地比較分析 EURSSEM 中有關廠址特性調查作業的建議與規範。

### 5.1 EURSSEM 簡介

環境輻射調查暨廠址評估執行手冊 (EURSSEM) 原英文全名為 European Radiation Survey and Site Execution Manual，但由於手冊建立期間受到國際原子能總署的幫助，因此改為目前的英文全名 Environmental Radiation Survey and Site Execution Manual，而全名簡寫則沿用至今。EURSSEM 是基於國際原子能總署、CIRIA SAFEROUNDS Learning Network、MARSSIM 與 ITRC (Interstate Technology Regulatory Council) 等機構的文件所編撰而成。

EURSSEM 的主要內容為提供對於受輻射污染廠址的處置辦法。

EURSSEM 的內容中有五個原則，分別為：(1) 保護環境與人類、(2) 提供主管管理辦法、(3) 提出較佳的廠址處置辦法、(4) 提供立即的處理辦法、(5) 記錄資料以供未來參考。手冊本身由五大部分所組成，依序為決定 EURSSEM 使用辦法、建立污染區域整治辦法、廠址調查、環境整治、管理辦法。然而，EEURSSEM 在使用上仍是有些限制的，包括：EURSSEM 不提供非科學性方面的指引，如：法規流程與政治等、不提供放射性廢棄物的封裝、運輸、封存、除污方法、不提供專業人員的訓練辦法、不提供輻射污染對於生物圈的影響、也不考量放射性核種對於環境生物的化學影響。

EURSSEM 第一部分為決定 EURSSEM 使用辦法。應用 EURSSEM 以前需大致了解 EURSSEM 的架構與內容，並且判斷會使用到 EURSSEM 的部分。事前決定 EURSSEM 的使用辦法可以增加作業的效率，並且避免作業時間的浪費。

EURSSEM 第二部分為建立污染區域整治計畫。由於 EURSSEM 以處理受輻射污染區域為首要目標，因此建立污染區域整治的計畫為第一步驟。建立整治計畫可分為五個步驟，依序為廠址歷史調查、初步廠區調查與建立整治區域、找出整治區域的方法並予以改進、建立整治計畫、管制與整治後管理。

EURSSEM 的第三部分為廠址特性調查。為了有利於環境整治的規劃，與檢測環境整治計畫後的成果，EURSSEM 提供廠址特性調查的辦法。EURSSEM 提供了資料品質控管的辦法、資料的統計辦法、樣品蒐集與處理辦法、場域調查辦法與調查檔案整理辦法。

EURSSEM 的第四部分為環境整治。此部分的目標在於對社會有利的條件下去除廠址內部的輻射風險。此部分介紹環境整治的規劃辦法、整治技術的選用辦法、環境整治執行辦法與環境整治後廠址處理辦法。

EURSSEM 的第五部分為管理辦法。EURSSEM 在此章提供管理者在環境輻射調查暨廠址執行一連串的步驟中，管理的原則與辦法。以下即針對 EURSSEM 手冊中的第二、三、四部分進行較深入的說明：

## 5.2 污染區域整治計畫

EURSSEM 針對污染區域的整治計畫提供了相關的發展策略及辦法，其範圍除了涵蓋了土地、建物之外，也包含了地下水等考量。在進行放射性污染的處置時，EURSSEM 提供了幾個可供遵循的原則，包括：人員與環境的防護、應符合法規規範、具利益關係者應適度參與、以及資料應保存以供參考等。

(1)設計污染廠址整治計畫：EURSSEM 指引中提供了制訂整治計畫階段的準備工作，例如：須先評估人員及生態的衝擊、公眾認知問題、污染的

負面效應及傳播影響、污染的標準建立、廢棄物的跨界傳播疑慮、技術方案及資源可用性、以及財務支援等。

(2) 利益關係者參與方案：EURSSEM 中提及在進行污染區域的整治計畫時，必須設計一套有效的利益關係者參與方案，其目的係為了促進廠址特性調查執行作業的決策過程、社區支援與溝通、增進資訊透明及彼此的互信基礎等。

(3) 廠址歷史特性調查：該項工作之目的係為了蒐集廠址從開始運轉之後的完整資訊，用以判斷可能的污染來源、污染的型態、過去發生的活動及意外事件、公眾及環境的衝擊、污染遷移可能性評估、進行廠址特性調查的必要資訊等。如同 MARSSIM 準則，EURSSEM 準則中也強調必須遵循 DQO 品質目標程序來進行該項作業的所有工作，如：數據收集評估、必要的訪視及勘察、專業判斷、評估報告及審核等。

(4) 風險評估：EURSSEM 中建議廠址整治相關活動之前都必須進行風險評估，用以決定所需採取的整治作業的實施程度及種類，並確保殘留的污染不會對人員或環境造成衝擊。風險評估的方法則可選擇採用劑量評估或風險評估，手冊中也提供了相關的計算方法及模型建立的實務等。

(5) 保健物理、安全、保安和環保計畫：EURSSEM 準則中提供了建立各類型放射性污染廠址的保健物理、安全、保安和環保計畫的指引，其提及

最重要的工作乃是建立可供執行廠址整治作業的執行人員遵循的各項作業程序書，而這些程序書則必須依據各廠址特性、作業項目來分別制定。

(6) 廠址特性調查計畫：廠址特性調查可用以決定要採取的環境整治措施，也可提供污染特性、分佈、範圍、以及人員或環境的曝露風險等，而在廠址特性調查行動的計畫階段，其規劃的深入程度則必須取決於調查區域的複雜程度來做區分。同樣地，在規劃廠址特性調查作業時，仍須依循 DQO 程序，用以改善調查作業的有效性及效率，有關 DQO 的程序則與 MARSSIM 準則中所敘述的內容完全一致。

(7) 整治計畫：EURSSEM 準則提供了整治計畫的目標與標準、污染廠址整治方案與技術、整治措施的執行方法、以及整治計畫與環保符合性評估等。

(8) 廢棄物管理及放射性材料運送計畫：污染區域整治的執行過程中，將產生放射性及非放射性的廢棄物，這些廢棄物的管理計畫應該事先被妥善地制訂，並且與廠址廢棄物處置程序書進行適當地整合，EURSSEM 中則提供了放射性廢棄物之來源、減量、分類、豁免、運送等處置與管制建議。

(9) 管理：完成廠址整治作業之後，必須實施適當的管理職責來監控及維持

這些區域的使用限制，如：無限制的使用或局部區域有限制的使用等，亦即該廠址須在整治計畫中整合建立長期管理權責的計畫，並建立相關方案的目標及管理權責的轉移及終止機制。

(10)紀錄保存及歸檔：紀錄保存及歸檔可避免廠址特性調查作業相關資料的遺失，且亦為品質保證方案或標準規範中所要求必須進行的，此作為也將有利於未來的知識傳承與經驗分享。EURSSEM 準則提供了廠址特性調查作業過程必須記錄的資訊、可採取的紀錄管理方案、紀錄媒介與設備等。

(11)品質管理計畫：在整個廠址整治的過程中，為了確保所有的作業程序均能符合原先的作業目標且正確地執行各項工作，在品質管理計畫中必須建立適當的品質管理系統，例如：必須建立 QA/QC 的目標、必須發展品質保證計畫方案等。

### 5.3 廠址特性調查

EURSSEM 準則中有關廠址特性調查的內容係參考 MARSSIM 準則，因此大部分的內容與 MARSSIM 中的內容極為類似，在本報告中則不再贅述，有興趣者可自行參照 EURSSEM 手冊。較特別的是，EURSSEM 手冊中提供了建立 DCGLs 的方法、可支援廠址特性調查的額外研究方法，如地形/地貌、氣候/氣象、地質、以及水文等、各類樣品的分析、侵入式與非侵

入式的調查方法、輻射偵測儀器與分析技術的選擇等，這些都可作為廠址特性調查作業實務可參考的有用資訊。

## 5.4 環境整治

EURSSEM 準則中提供了有關污染區域及地下水的整治除污指引，除提供發展整治計畫的資訊與指引之外，也針對各整治除污技術提供詳細的比較分析及回顧，包括：如何執行及安排這些整治技術，及如何進行整治後的相關作業等。

(1) 設計環境整治計畫：決定進行污染廠址的整治作業之後，首先即須草擬

整治計畫及說明環境整治作業將如何被安全地執行。各別的污染廠址均應備妥特定的廠址整治計畫，且這些計畫均應在實施及執行之前通過主管機關的審核。環境整治計畫中必須說明整治的目標與標準、可能遭遇的問題、輻防方案、整治作業選項、以及審核及管控作業等。

(2) 整治計畫方案：在整治作業中，任何被採用的整治除污技術方案之目的

即是用於移除或降低放射性射源項，或者阻斷放射性的曝露途徑，不同的整治除污技術方案適用不同的整治除污問題。針對預期進行的整治除污作業，在評估採取何種整治除污技術的計畫階段，EURSSEM 提供了三種可以採取的計畫方案，包括：不受干預地監控廠址劑量、利用圍阻技術來阻絕曝露途徑、以及移除射源項，準則中也詳細地提供這三種方

案的執行原則與作法。

- (3) 整治方法與技術的評估標準：一旦廠址的整治目標被建立之後，對於會衝擊決策結果的影響因子即應該被考慮，包括：污染整治的有效性、整治技術實施的可行性、整治方案牽涉的成本、整治技術可能引發的人員安全與健康風險、二次環境衝擊的影響程度、整治技術的應用經驗、以及社會經濟考量等。
- (4) 圍阻及射源移除整治技術綜述：EURSSEM 準則中完整地表列了可用的圍阻及移除整治技術，各表格中也根據污染物的物理、化學、生物、熱傳、以及承載媒介等特性來加以分類，並列出各種整治技術的特性說明，這些資訊極有助於評估適用的整治技術。
- (5) 整治實施活動：污染區域整治作業係涵蓋了許多步驟，包括：整治計畫的準備與核准、整治工作實施、整治活動所造成的廢棄物管理等。EURSSEM 手冊提供各階段作業的建議作法，包括：整治計畫的發展及實施、整治措施的運作實務，如：輻防、臨廠及離廠監測、廢棄物管理、保安、緊急應變計畫、品保等。
- (6) 進行整治後相關措施：完成廠址整治活動之後，整治後的廠址即可釋出供限制性或非限制性使用。然而，大多數的情況仍需在有顧慮的區域進行整治後的監控措施，這些措施的完整性與實行期間則須視該區域的整

治程度而有所差異。

## 5.5 EURSSEM 與 MARSSIM 之比較分析

### 5.5.1 內容架構

MARSSIM 的內容為執行廠址特性評估，而與廠址特性評估相關的環境整治與廠址執行工作並不包括在 MARSSIM 的範圍內。EURSSEM 的內容則為廠址整體的處理手冊，其內容包括了污染區域整治、廠址調查與環境整治。EURSSEM 中的廠址調查為參考 MARSSIM 所撰寫，因此 EURSSEM 中的廠址調查與 MARSSIM 的內容相似度高。另外，由於 EURSSEM 內說明廠址特性調查的篇幅較少，因此 MARSSIM 在廠址特性調查的內容較為完善，並且 MARSSIM 在附錄的部分有提供廠址特性調查的範例。

在未來實際操作時，MARSSIM 適合作為進行廠址特性評估的主要參考手冊。然而，實際廠址特性評估往往僅為除役工作中的一部分，EURSSEM 適合作為除役時的輔助手冊，將進行廠址特性調查工作與整體除役工作互相結合，預期將可使整體的除役工作更為順利。

### 5.5.2 非表面取樣

MARSSIM 的廠址調查工作限定在建築物表面或是土壤表面，雖然 MARSSIM 有提到地下水、空氣等非表面物質有可能散播輻射污染，然而

對於地下水、空氣等非表面物質並沒提供建議的取樣作法。EURSSEM 中非表面取樣雖然並不直接包含於廠址特性調查之中，但是非表面取樣可以使廠址特性調查更為可信、可預測輻射污染的傳播路徑、並且可以作為未來環境影響的參考。因此，EURSSEM 中提供了蒐集地下水、空氣與生物體樣品的實際取樣辦法。

在未來實際操作時，可以參考 EURSSEM 中有關非表面取樣的內容，以輔助進行廠址特性評估作業，使廠址特性評估作業更具公信力，並且可以利用非表面污染物質的資訊來輔助整體除役作業的進行。

### **5.5.3 核輻射度量儀器資訊**

EURSSEM 的附錄 B 中提供各種核輻射度量儀器的介紹，內容包含了核輻射度量儀器的偵測功能、操作方法、偵測靈敏度、價格成本，而 MARSSIM 中並無如此明確整理分類各種核輻射度量儀器的資訊。在未來實際操作時，EURSSEM 的附錄 B 可作為未來進行廠址特性調查作業時，選用核輻射度量儀器時的參考資料。

### **5.5.4 風險評估**

除役核電廠進行廠址特性評估作業的過程中，需要進行廠址特性的風險或劑量的評估計算，以確保未來人員或公眾在該土地上的健康與安全，並

也可藉此掌握廠址上殘留的輻射污染是否符合管制機關所規範的風險或劑量標準。由於 EURSSEM 內容涵蓋了整體廠址特性評估作業的處理程序，內容也包含風險及劑量評估的部分，如：風險或劑量評估的程序、曝露途徑的選擇、廠址特性計算的方法與程式開發、參數的選用、計算時的必備要件等。在 MARSSIM 中，並無揭露過多廠址特性評估作業中有關風險或劑量計算的資訊，而是建議透過其它相關的參考資料來瞭解此部分的相關作法，如：本報告中第四節所述有關 RESRAD 的部分即屬之。

為順利地進行廠址特性評估工作，除役核電廠之釋出管制標準可分成兩種，分別為劑量評估與風險評估。劑量評估係以輻射劑量率為單位，如：微西弗/小時為，以評估廠址的劑量標準是否符合執照終止標準，工作人員及公眾在該土地上活動是否處於安全的輻射劑量範圍之內。然而，有時造成身體健康風險的因素不僅只有輻射線，也可能包含了放射性核種可能引起的化學效應，因此必須改採以風險指標來評估廠址的特性，例如：以人員的癌症風險做為評量的標準。

在進行廠址特性評估計算時，可以先行參閱 EURSSEM 中有關廠址特性之風險或劑量評估方法的說明，以掌握建置廠址特性計算模型的方法，並事先研擬必要的準備工作及執行事項。

### 5.5.5 地質調查

MARSSIM 與 EURSSEM 皆有強調地質調查的重要性，由於地質調查可以確保地表以下沒有危險物品及潛藏污染物質，有利人員在其上作業的安全，並且可以藉此瞭解地表以下的構造。EURSSEM 中有提供地質調查的技術，分別為非侵入性調查與侵入性調查兩種。非侵入性調查可以使用地表穿透雷達、微重力、磁力、電流等方法進行地質調查，而侵入性調查則會使用探鑽等方式進行調查。

在進行地質調查時，可以參閱 EURSSEM 中有關地質調查的章節，其中有提供許多地質調查的方法，可藉此強化廠址特性評估作業之地質調查的效果。

上述有關 MARSSIM 與 EURSSEM 兩準則在不同方面的特性比較分析，則被整理歸納於表四之中。

表四、MARSSIM 與 EURSSEM 準則的特性比較

項目	MARSSIM	EURSSEM
內容架構	提供廠址特性調查作業準則，但未包括與廠址特性調查作業相關的環境整治與廠址執行工作	提供廠址特性調查作業整體的處理手冊，內容涵蓋污染區域整治、廠址調查與環境整治
取樣作法	限定在建築物表面或是土	提供蒐集地下水、空氣非表面取

	壤表面，對於地下水、空氣等非表面物質並沒提供建議的取樣作法，需參考其它指引	樣做法以及生物體樣品的實際取樣辦法
輻射度量儀器資訊	並未明確整理分類各種核輻射度量儀器的資訊	提供各種核輻射度量儀器的介紹，內容包含了核輻射度量儀器的偵測功能、操作方法、偵測靈敏度、價格成本等
風險評估	並未揭露過多廠址特性評估作業中有關風險或劑量計算的資訊，而是建議透過其它相關的參考資料來瞭解此部分的作法	涵蓋了整體廠址特性評估作業的處理程序，內容包含風險及劑量評估的部分，如：風險或劑量評估的程序、曝露途徑的選擇、廠址特性計算的方法與程式開發、參數的選用、計算時的必備要件等
地質調查	強調地質調查的重要性，但並未揭露地質調查的實務細節	強調地質調查的重要性，且提供地質調查的技術，分別為非侵入性調查與侵入性調查兩種

## 5.6 總結

EURSSEM 環境輻射調查暨廠址評估執行手冊係是參考 MARSSIM 準則以及其它資料所撰寫而成，由於 EURSSEM 手冊完整地涵蓋了污染區域整治、廠址調查、環境整治等各個面向，因而在廠址特性調查部分的內容

較為精簡。因此，MARSSIM 適合作為廠址特性評估作業的主要參考手冊，而 EURSSEM 雖然內容較為精簡，但卻可整體地概觀環境輻射與特性調查各項作業必須遵循的重要原則及執行方向，使得廠址特性調查作業易於與整體除役工作相互配合。因此，除 MARSSIM 之外，EURSSEM 亦足堪作為執行除役作業時的重要輔助手冊。

## 六、結論與建議

為了掌握廠址特性調查作業的發展概況與未來執行該項管制作業時可能遭遇的困難與挑戰，本計畫已完整地蒐集與除役廠址特性調查作業相關的文獻資料與報告並進行深入的分析，所獲致的成果建議可作為未來擬定廠址特性調查作業之審查與管制策略的參考。針對 MARSSIM 準則的評估與分析，本計畫已確實瞭解進行廠址上土壤及建物表面污染情形特性調查作業時所必須遵循的原則，包括：該準則之範疇、廠址調查與檢測類型、最終狀態檢測方法與步驟、污染區域分類、檢測單元大小及要求、現場量測方法與儀器、以及廠址調查與檢測之品質評估方式等，並由此提出該項作業可加強的管制要點與建議，包括：執行單位應建立適當的品質保證方案、須建立廠址污染調查與檢測作業的相關程序書、執行過程須建立與保存必要的文件、量測紀錄及檢測報告、以及確實執行 QA/QC 作業等。在廠址特性計算模型方面，本計畫已針對可能的殘餘核種曝露途徑與劑量分析模式進行瞭解，並歸納可能影響廠址特性的水文地質參數等，藉此得知管制標準與 DCGL 推定濃度限值之間的轉換原理與轉換方法。此外，本計畫也比較分析不同的廠址特性調查作業準則 MARSSIM 與 EURSEEM 之間的差異，藉此更廣泛地獲知廠址特性調查各項作業所必須遵循的重要原則及執行方向。

## 參考資料

- [1] R&D and Innovation Needs for Decommissioning of Nuclear Facilities, NEA No. 7191, Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Co-operation and Development (OECD/NEA) (2014)
- [2] Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual (MARSSIM) (Revision 1), NUREG-1575 Rev. 1, EPA 402-R-97-016 Rev. 1, DOE/EH-0624 Rev. 1, U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) (2002)
- [3] Environmental Radiation Survey and Site Execution Manual (EURSSEM), European Commission (2010)
- [4] Consolidated Decommissioning Guidance: Characterization, Survey, and Determination of Radiological Criteria, NUREG-1757 Vol. 2 Rev. 1, U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) (2006)
- [5] Comparison of the Models and Assumptions Used in the DandD 1.0, RESRAD 5.61, and RESRAD-Build 1.50 Computer Codes with Respect to the Residential Farmer and Industrial Occupant Scenarios, NUREG/CR-5512, Vol. 4, U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) (1999)
- [6] Recommended Radiological Protection Criteria for the Clearance of Buildings and Building Rubble from the Dismantling of Nuclear Installations, European Commission (2000)
- [7] Residual Radioactive Contamination from Decommissioning: Technical Basis for Translating Contamination Levels to Annual Total Effective Dose Equivalent, NUREG/CR-5512 Rev. 1, U.S. Nuclear Regulatory

- Commission (NRC) (1992)
- [8] Probabilistic Dose Analysis Using Parameter Distributions Developed for RESRAD and RESRAD-Build Codes, NUREG/CR-6676, U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) (2000)
- [9] Development of Probabilistic RESRAD 6.0 and RESRAD-BUILD 3.0 Computer Codes, NUREG/CR-6697, U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) (2000)
- [10] Probabilistic Modules for the RESRAD and RESRAD-Build Computer Codes, NUREG/CR-6692, U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) (2000)
- [11] Y.-Y Wang, B.W. Biwer, and C. Yu, A Compilation of Radionuclide Transfer Factors for the Plant, Meat, Milk, and Aquatic Food Pathways and the Suggested Default Values for the RESRAD Code, ANL/EAIS/TM-103, Argonne National Laboratory (1993)
- [12] User's Manual for RESRAD Version 6, ANL/EAD-4, Argonne National Laboratory (2001)
- [13] Release of Sites from Regulatory Control on Termination of Practices, Safety Guide No. WS-G-5.1, International Atomic Energy Agency (IAEA) (2006)
- [14] Inventory of Best Practices in the Decommissioning of Nuclear Installations: Final Report, European Commission (2006)
- [15] Release of Radioactive Materials and Buildings from Regulatory Control, ISBN 978-92-64-99061-6, Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Co-operation and Development (OECD/NEA) (2008)
- [16] Multi-Agency Radiation Laboratory Analytical Protocols Manual

- (MARLAP), NUREG-1576, U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) (2004)
- [17] NRC, “*NRC Regulations 10 CFR part 20, Standards for protection against radiation*”.
- [18] J. K. Shultis, R. E. Faw, “*Radiation Shielding*”, American Nuclear Society, ISBN 0-89448-456-7, 2000.
- [19] C. Yu, A.J. Zielen, J. –J. Cheng, D. J. Lepoire, E. Gnanapragasam, S. Kamboj, J. Arnish, A. Wallo III, W. A. Williams, and H. Peterson, “*User’s Manual for RESRAD Version 6*”, Argonne National Laboratory, 2001.
- [20] 周炫成碩士論文，”核設施除役後之活性濃度限值研究”，國立清華大學工程與系統科學系，1993。
- [21] J. Moya, L. Phillips, L. Schuda, P. Wood, A. Diaz, R. Lee, R. Clickner, R. J. Birch, N. Adjei, P. Blood, K. Chapman, R. de Castro, K. Mahaffey, “*Exposure Factors Handbook: 2011 Edition*”, Environmental Protection Agency (EPA), 2011.

附表一、體外輻射的劑量轉換因子 (DCF)

核種	面汙染	體汙染	核種	面汙染	體汙染
Ac-227+D <sup>1</sup>	4.52E-01	2.01	Ni-59	0.00E+00	0.00E+00
Ag-108m+D	1.87	9.65	Ni-63	0.00E+00	0.00E+00
Ag-110m+D	3.1	1.72E+01	Np-237+D	2.61E-01	1.10E+00
Al-26	2.91	1.74E+01	Pa-231	4.75E-02	6.05E-03
Am-241	3.21E-02	4.37E-02	Pb-210+D	4.12E-03	6.05E-03
Am-243+D	2.53E-01	8.95E-01	Pm-147	3.98E-05	5.01E-05
Au-195	9.16E-02	2.07E-01	Po-210	9.68E-06	5.23E-05
Ba-133	4.64E-01	1.98E+00	Pu-238	9.79E-04	1.51E-04
Bi-207	1.73E+00	9.38E+00	Pu-239	4.29E-04	2.95E-04
C-14	1.88E-05	1.34E-05	Pu-240	9.38E-04	1.47E-04
Ca-41	0.00E+00	0.00E+00	Pu-241+D	6.07E-06	1.89E-05
Ca-45	5.38E-05	6.26E-05	Pu-242	7.79E-04	1.28E-04
Cd-109	2.63E-02	1.47E-02	Pu-244+D	1.49E+00	7.73E+00
Ce-141	8.62E-02	3.18E-01	Ra-226+D	1.94E+00	1.12E+01
Ce-144+D	6.73E-02	3.20E-01	Ra-228+D	1.08E+00	5.98E+00
Cf-252	8.43E-04	1.76E-04	Ru-106+D	2.48E-01	1.29E+00
Cl-36	7.86E-04	2.39E-03	S-35	1.96E-05	1.49E-05
Cm-243	1.46E-01	5.83E-01	Sb-124	2.00E+00	1.17E+01
Cm-244	1.03E-03	1.26E-04	Sb-125	4.96E-01	2.45E+00
Cm-245	1.02E-01	3.40E-01	Sc-46	2.25E+00	1.27E+01
Cm-246	9.17E-04	1.16E-04	Se-75	4.40E-01	1.98E+00
Cm-247+D	3.90E-01	1.86E+00	Se-79	2.42E-05	1.86E-05
Cm-248	7.01E-04	8.78E-05	Sm-147	0.00E+00	0.00E+00
Co-57	1.34E-01	5.01E-01	Sm-151	5.88E-06	9.84E-07
Co-60	2.74E+00	1.62E+01	Sn-113+D	3.22E-01	1.46E+00
Cs-134	1.78E+00	9.47E+00	Sr-85	5.84E-01	2.97E+00
Cs-135	3.89E-05	3.83E-05	Sr-89	2.65E-03	9.08E-03
Cs-137+D	6.48E-01	3.41E+00	Sr-90+D	6.55E-03	2.46E-02
Eu-152	1.28E+00	7.01E+00	Ta-182	1.44E+00	7.94E+00
Eu-154	1.39E+00	7.68E+00	Tc-99	9.11E-05	1.26E-04
Eu-155	6.89E-02	1.82E-01	Te-125m	4.22E-02	1.51E-02
Fe-55	0.00E+00	0.00E+00	Th-228+D	1.64E+00	1.02E+01
Fe-59	1.31E+00	7.64E+00	Th-229+D	3.72E-01	1.60E+00

Gd-152	0.00E+00	0.00E+00	Th-230	8.76E-04	1.21E-03
Gd-153	1.24E-01	2.45E-01	Th-232	6.44E-04	5.21E-04
Ge-68+Dc	1.10E+00	5.62E+00	Tl-204	1.73E-03	4.05E-03
H-3	0.00E+00	0.00E+00	U-232	1.18E-03	9.02E-04
I-125	4.99E-02	1.66E-02	U-233	8.36E-04	1.40E-03
I-129	3.01E-02	1.29E-02	U-234	8.74E-04	4.02E-04
Ir-192	9.38E-01	4.61E+00	U-235+D	1.94E-01	7.57E-01
K-40	1.71E-01	1.04E+00	U-236	7.59E-04	2.15E-04
Mn-54	9.48E-01	5.16E+00	U-238+D	3.25E-02	1.37E-01
Na-22	2.45E+00	1.37E+01	Zn-65	6.46E-01	3.70E+00
Nb-93m	1.10E-03	1.04E-04	Zr-93	0.00E+00	0.00E+00
Nb-94	1.79E+00	9.68E+00	Zr-95+D	8.45E-01	4.52E+00
Nb-95	8.74E-01	4.69E+00			

<sup>1</sup>+D 表示該核種衰變後產生的半衰期小於一個月之放射性子核種也同時考慮

附表二、吸入輻射的劑量轉換因子

核種	吸入類別-半 殘留時間或 吸入物形式	劑量轉換因 子	核種	吸入類別-半 殘留時間或 吸入物形式	劑量轉換因 子
Ac-227+D <sup>1</sup>	小於十天	6.72	Ni-59	小於十天	1.32E-06
	十至百天	1.74		十至百天	9.18E-07
	大於百天	1.31		氣態	2.70E-06
Ag-108m+D	小於十天	3.01E-05	Ni-63	小於十天	3.10E-06
	十至百天	2.53E-05		十至百天	2.30E-06
	大於百天	2.83E-04		氣態	6.29E-06
Ag-110m+D	小於十天	3.96E-05	Np-237+D	十至百天	5.40E-01
	十至百天	3.09E-05			
	大於百天	8.03E-05			
Al-26	小於十天	7.96E-05	Pa-231	十至百天	1.28E+00
	十至百天	7.22E-05		大於百天	8.58E-01
Am-241	十至百天	4.44E-01	Pb-210+D	小於十天	1.38E-02
Am-243+D	十至百天	4.40E-01	Pm-147	十至百天	2.58E-05
				大於百天	3.92E-05
Au-195	小於十天	4.33E-07	Po-210	小於十天	8.60E-03
	十至百天	4.18E-06		十至百天	9.40E-03
	大於百天	1.30E-05			
Ba-133	小於十天	7.86E-06	Pu-238	十至百天	3.92E-01
Bi-207	小於十天	3.23E-06	Pu-239	十至百天	4.29E-01
	十至百天	2.00E-05		大於百天	3.08E-01
C-14	有機化合物 一氧化碳 二氧化碳	2.09E-06	Pu-240	十至百天	4.29E-01
		2.90E-09		大於百天	3.08E-01
		2.35E-08			
Ca-41	十至百天	1.35E-06	Pu-241+D	十至百天	8.25E-03
Ca-45	十至百天	6.62E-06	Pu-242	十至百天	4.11E-01
				大於百天	2.93E-01
Cd-109	小於十天	1.14E-04	Pu-244+D	十至百天	4.03E-01
	十至百天	3.96E-05		大於百天	3.89E-01
	大於百天	4.51E-05			
Ce-141	十至百天	8.33E-06	Ra-226+D	十至百天	8.60E-03
	大於百天	8.95E-06			
Ce-144+D	十至百天	2.16E-04	Ra-228+D	十至百天	5.08E-03
	大於百天	3.74E-04			
Cf-252	十至百天	1.37E-01	Ru-106+D	小於十天	5.62E-05
	大於百天	1.57E-01		十至百天	1.18E-04

				大於百天	4.77E-04
Cl-36	小於十天 十至百天	2.24E-04 2.19E-05	S-35	小於十天 十至百天 蒸氣	3.02E-07 2.48E-06 3.53E-07
Cm-243	十至百天	3.07E-01	Sb-124	小於十天 十至百天	5.55E-06 2.52E-05
Cm-244	十至百天	2.48E-01	Sb-125+D	小於十天 十至百天	2.13E-06 1.22E-05
Cm-245	十至百天	4.55E-01	Sc-46	大於百天	2.96E-05
Cm-246	十至百天	4.51E-01	Se-75	小於十天 十至百天	7.22E-06 8.47E-06
Cm-247+D	十至百天	4.14E-01	Se-79	小於十天 十至百天	6.55E-06 9.84E-06
Cm-248	十至百天	1.65E+00	Sm-147	十至百天	7.47E-02
Co-57	十至百天 大於百天	2.63E-06 9.07E-06	Sm-151	十至百天	3.00E-05
Co-60	十至百天 大於百天	3.31E-05 2.19E-04	Sn-113+D	小於十天 十至百天	4.00E-06 1.07E-05
Cs-134	小於十天	4.63D-05	Sr-85	小於十天 大於百天	1.92E-06 5.03E-06
Cs-135	小於十天	4.55E-06	Sr-89	小於十天 大於百天	6.51E-06 4.14E-05
Cs-137+D	小於十天	3.19E-05	Sr-90+D	小於十天 大於百天	2.47E-04 1.31E-03
Eu-152	十至百天	2.21E-04	Ta-182	十至百天 大於百天	2.18E-05 4.48E-05
Eu-154	十至百天	2.86E-04	Tc-99	小於十天 十至百天	1.02E-06 8.33E-06
Eu-155	十至百天	4.14E-05	Te-125m	小於十天 十至百天	5.62E-06 7.29E-06
Fe-55	小於十天 十至百天	2.69E-06 1.34E-06	Th-228+D	十至百天 大於百天	2.53E-01 3.45E-01
Fe-59	小於十天 十至百天	1.48E-05 1.22E-05	Th-229+D	十至百天 大於百天	2.16E+00 1.75E+00
Gd-152	小於十天 十至百天	2.43E-01 6.48E-02	Th-230	十至百天 大於百天	3.26E-01 2.62E-01
Gd-153	小於十天 十至百天	2.38E-05 9.47E-06	Th-232	十至百天 大於百天	1.64E+00 1.15E+00
Ge-68+Dc	小於十天 十至百天	1.80E-06 5.19E-05	Tl-204	小於十天	2.41E-06
H-3	水蒸氣	6.40E-08	U-232	小於十天 十至百天	1.27E-02 1.49E-02

				大於百天	6.59E-01
I-125	小於十天	2.42E-05	U-233	小於十天 十至百天 大於百天	2.79E-03 7.99E-03 1.35E-01
I-129	小於十天	1.74E-04	U-234	小於十天 十至百天 大於百天	2.73E-03 7.88E-03 1.32E-01
Ir-192	小於十天 十至百天 大於百天	1.89E-05 1.81E-05 2.82E-05	U-235+D	小於十天 十至百天 大於百天	2.54E-03 7.29E-03 1.23E-01
K-40	小於十天	1.24E-05	U-236	小於十天 十至百天 大於百天	2.59E-03 7.44E-03 1.25E-01
Mn-54	小於十天 十至百天	5.25E-06 6.70E-06	U-238+D	小於十天 十至百天 大於百天	2.45E-03 7.03E-03 1.18E-01
Na-22	小於十天	7.66E-06	Zn-65	大於百天	2.04E-05
Nb-93m	十至百天 大於百天	3.21E-06 2.92E-05	Zr-93	小於十天 十至百天 大於百天	3.21E-04 8.33E-05 7.40E-05
Nb-94	十至百天 大於百天	3.61E-05 4.14E-04	Zr-95+D	小於十天 十至百天 大於百天	2.36E-05 1.59E-05 2.33E-05
Nb-95	十至百天 大於百天	4.77E-06 5.81E-06			

<sup>1</sup>+D 表示該核種衰變後產生的半衰期小於一個月之放射性子核種也同時考慮

附表三、攝取輻射之劑量轉換因子

核種	核種進入腸 胃道比例	劑量轉換因 子	核種	核種進入腸 胃道比例	劑量轉換因 子
Ac-227+D <sup>1</sup>	1.00E-03	1.48E-02	Ni-59	5.00E-02	2.10E-07
Ag-108m+D	5.00E-02	7.62E-06	Ni-63	5.00E-02	5.77E-07
Ag-110m+D	5.00E-02	1.08E-05	Np-237+D	1.00E-03	4.44E-03
Al-26	1.00E-02	1.46E-05	Pa-231	1.00E-03	1.06E-02
Am-241	1.00E-03	3.64E-03	Pb-210+D	2.00E-01	5.37E-03
Am-243+D	1.00E-03	3.63E-03	Pm-147	3.00E-04	1.05E-06
Au-195	1.00E-01	1.06E-06	Po-210	1.00E-01	1.90E-03
Ba-133	1.00E-01	3.40E-06	Pu-238	1.00E-03	3.20E-03
				1.00E-04	3.36E-04
				1.00E-05	4.96E-05
Bi-207	5.00E-02	5.48E-06	Pu-239	1.00E-03	3.54E-03
				1.00E-04	3.69E-04
				1.00E-05	5.18E-05
C-14	1.00E+00	2.09E-06	Pu-240	1.00E-03	3.54E-03
				1.00E-04	3.69E-04
				1.00E-05	5.18E-05
Ca-41	3.00E-01	1.27E-06	Pu-241+D	1.00E-03	6.85E-05
				1.00E-04	6.92E-06
				1.00E-05	7.66E-07
Ca-45	3.00E-01	3.16E-06	Pu-242	1.00E-03	3.36E-03
				1.00E-04	3.50E-04
				1.00E-05	4.92E-05
Cd-109	5.00E-02	1.31E-05	Pu-244+D	1.00E-03	3.32E-03
				1.00E-04	3.60E-04
				1.00E-05	6.32E-05
Ce-141	3.00E-04	2.90E-06	Ra-226+D	2.00E-01	1.33E-03
Ce-144+D	3.00E-04	2.11E-05	Ra-228+D	2.00E-01	1.44E-03
Cf-252	1.00E-03	1.08E-03	Ru-106+D	5.00E-02	2.74E-05
Cl-36	1.00E+00	3.03E-06	S-35	1.00E-01	4.48E-07
				8.00E-01	7.33E-06
Cm-243	1.00E-03	2.51E-03	Sb-124	1.00E-01	9.81E-06
				1.00E-02	1.01E-05
Cm-244	1.00E-03	2.02E-03	Sb-125	1.00E-01	2.81E-06

				1.00E-02	2.80E-06
Cm-245	1.00E-03	3.74E-03	Sc-46	1.00E-04	6.40E-06
Cm-246	1.00E-03	3.70E-03	Se-75	8.00E-01 5.00E-02	9.62E-06 1.75E-06
Cm-247+D	1.00E-03	3.42E-03	Se-79	8.00E-01 5.00E-02	8.70E-06 1.30E-06
Cm-248	1.00E-03	1.36E-02	Sm-147	3.00E-04	1.85E-04
Co-57	3.00E-01 5.00E-02	1.18E-06 7.44E-07	Sm-151	3.00E-04	3.89E-07
Co-60	3.00E-01 5.00E-02	2.69E-05 1.02E-05	Sn-113+D	2.00E-02	3.19E-06
Cs-134	1.00E+00	7.33E-05	Sr-85	3.00E-01 1.00E-02	1.98E-06 1.49E-06
Cs-135	1.00E+00	7.07E-06	Sr-89	3.00E-01 1.00E-02	9.25E-06 9.25E-06
Cs-137+D	1.00E+00	5.00E-05	Sr-90+D	3.00E-01 1.00E-02	1.53E-04 2.28E-05
Eu-152	1.00E-03	6.48E-06	Ta-182	1.00E-03	6.54E-06
Eu-154	1.00E-03	9.55E-06	Tc-99	8.00E-01	1.46E-06
Eu-155	1.00E-03	1.53E-06	Te-125m	2.00E-01	3.67E-06
Fe-55	1.00E-01	6.07E-07	Th-228+D	2.00E-04	8.08E-04
Fe-59	1.00E-01	6.70E-06	Th-229+D	2.00E-04	4.03E-03
Gd-152	3.00E-04	1.61E-04	Th-230	2.00E-04	5.48E-04
Gd-153	3.00E-04	1.17E-06	Th-232	2.00E-04	2.73E-03
Ge-68+Dc	1.00E+00	1.41E-06	Tl-204	1.00E+00	3.36E-06
H-3	1.00E+00	6.40E-08	U-232	5.00E-02 2.00E-03	1.31E-03 6.92E-05
I-125	1.00E+00	3.85E-05	U-233	5.00E-02 2.00E-03	2.89E-04 2.65E-05
I-129	1.00E+00	2.76E-04	U-234	5.00E-02 2.00E-03	2.83E-04 2.61E-05
Ir-192	1.00E-02	5.74E-06	U-235+D	5.00E-02 2.00E-03	2.67E-04 2.81E-05
K-40	1.00E+00	1.86E-05	U-236	5.00E-02 2.00E-03	2.69E-04 2.47E-05
Mn-54	1.00E-01	2.77E-06	U-238+D	5.00E-02	2.69E-04

				2.00E-03	3.74E-05
Na-22	1.00E+00	1.15E-05	Zn-65	5.00E-01	1.44E-05
Nb-93m	1.00E-02	5.21E-07	Zr-93	2.00E-03	1.66E-06
Nb-94	1.00E-02	7.14E-06	Zr-95+D	2.00E-03	3.79E-06
Nb-95	1.00E-02	2.57E-06			

<sup>1</sup>+D 表示該核種衰變後產生的半衰期小於一個月之放射性子核種也同時考慮

附表四、常用之污染區面積轉換表

污染區面積	等效半徑	面積因子
1	0.56	0.016
25	2.80	0.4
100	5.60	0.55
500	13.0	0.8
1200	20.0	1.0

附表五、深度與覆蓋因子經驗公式之參數

核種	$A_i$	$B_i$	$KA_i$	$KB_i$
Ac-227+D	9.229E-01	7.710E-02	1.172E-01	1.512E+00
Ag-108m+D	9.282E-01	7.180E-02	9.670E-02	1.442E+00
Ag-110m+D	9.261E-01	7.390E-02	8.740E-02	1.339E+00
Al-26	9.276E-01	7.240E-02	7.940E-02	1.284E+00
Am-241	8.365E-01	1.635E-01	3.130E-01	2.883E+00
Am-243+D	9.098E-01	9.020E-02	1.473E-01	1.642E+00
Au-195	8.772E-01	1.228E-01	2.380E-01	1.880E+00
Ba-133	7.950E+02	9.200E-01	1.640E+00	1.130E-01
Bi-207	9.246E-01	7.540E-02	8.890E-02	1.350E+00
C-14	6.421E-01	3.579E-01	2.940E-01	3.369E+00
Ca-41	0	0	0	0
Ca-45	2.519E-01	7.481E-01	2.743E+00	2.259E-01
Cd-109	6.534E-01	3.466E-01	2.047E-01	4.753E+00
Ce-141	9.187E-01	8.130E-02	1.457E-01	1.683E+00
Ce-144+D	9.116E-01	8.840E-02	9.380E-02	1.411E+00
Cf-252	6.505E-01	3.495E-01	7.259E+00	1.820E-01
Cl-36	8.885E-01	1.115E-01	1.325E-01	1.886E+00
Cm-243	9.247E-01	7.530E-02	1.350E-01	1.662E+00
Cm-244	7.000E-03	9.930E-01	8.461E+02	2.194E+00
Cm-245	7.900E-02	9.210E-01	1.860E+00	1.640E-01
Cm-246	8.700E-02	9.130E-01	4.580E-01	8.600E+00
Cm-247+D	9.270E-01	7.250E-02	1.090E-01	1.490E+00
Cm-248	7.333E-01	2.667E-01	1.042E+01	1.215E+00
Co-57	9.288E-01	7.120E-02	1.604E-01	1.671E+00
Co-60	9.235E-01	7.650E-02	7.830E-02	1.263E+00
Cs-134	9.266E-01	7.340E-02	9.260E-02	1.379E+00
Cs-135	7.254E-01	2.746E-01	2.508E-01	3.030E+00
Cs-137+D	9.281E-01	7.190E-02	9.470E-02	1.411E+00
Eu-152	9.100E-01	9.000E-02	8.400E-02	1.185E+00
Eu-154	8.939E-01	1.061E-01	8.250E-01	1.008E+00
Eu-155	8.569E-01	1.431E-01	1.912E-01	1.486E+00
Fe-55	0	0	0	0
Fe-59	9.276E-01	7.240E-02	8.190E-02	1.314

Gd-152	0	0	0	0
Gd-153	8.226E-01	1.774E-01	1.986E-01	1.983E+00
Ge-68+Dc	9.270E-01	7.300E-02	9.940E-02	1.412E+00
H-3	0	0	0	0
I-125	8.540E-01	1.460E-01	3.451E+00	4.422E-01
I-129	4.350E-01	5.650E-01	7.137E-01	3.555E+00
Ir-192	9.306E-01	6.940E-02	1.078E-01	1.482E+00
K-40	7.260E-02	9.274E-01	1.269E+00	7.700E-02
Mn-54	8.480E-02	9.152E-01	1.215E+00	8.790E-02
Na-22	9.263E-01	7.370E-02	8.740E-02	1.331E+00
Nb-93m	9.990E-01	4.700E-04	1.050E-01	9.170E-01
Nb-94	9.275E-01	7.250E-02	9.100E-02	1.378E+00
Nb-95	7.480E-02	9.252E-01	1.363E+00	9.120E-02
Ni-59	0	0	0	0
Ni-63	0	0	0	0
Np-237+D	9.255E-01	7.450E-02	1.288E-01	1.671E+00
Pa-231	9.295E-01	7.050E-02	1.163E-01	2.014E+00
Pb-210+D	7.502E-01	2.498E-01	1.753E-01	2.200E+00
Pm-147	7.726E-01	2.274E-01	2.087E-01	2.780E+00
Po-210	9.269E-01	7.310E-02	9.040E-02	1.385E+00
Pu-238	2.972E-01	7.028E-01	1.958E-01	9.011E+00
Pu-239	8.002E-01	1.998E-01	1.348E-01	6.550E+00
Pu-240	2.977E-01	7.023E-01	2.176E-01	8.997E+00
Pu-241	9.132E-01	8.680E-02	1.582E-01	2.027E+00
Pu-242	3.314E-01	6.686E-01	2.109E-01	8.982E+00
Pu-244	9.259E-01	7.410E-02	9.260E-02	1.431E+00
Ra-226+D	9.272E-01	7.280E-02	8.350E-02	1.315E+00
Ra-228+D	9.266E-01	7.340E-02	8.770E-02	1.371E+00
Ru-106	9.271E-01	7.290E-02	9.570E-02	1.409E+00
S-35	3.405E-01	6.595E-01	3.312E+00	2.846E-01
Sb-124	1.109E-01	8.891E-01	9.478E-01	7.380E-02
Sb-125	9.273E-01	7.270E-02	1.005E-01	1.507E+00
Sc-46	7.290E-02	9.271E-01	1.352E+00	8.530E-02
Se-75	6.850E-02	9.315E-01	1.552E+00	1.245E-01
Se-79	6.620E-01	3.380E-01	2.860E-01	3.280E+00
Sm-147	0	0	0	0

Sm-151	3.310E-02	9.669E-01	8.270E-01	4.926
Sn-113+D	9.272E-01	7.280E-02	1.070E-01	1.652E+00
Sr-85	7.210E-02	9.279E-01	1.441E+00	9.99E-02
Sr-89	8.998E-01	1.002E-01	1.279E-01	1.763E+00
Sr-90+D	9.074E-01	9.260E-02	1.202E-01	1.699E+00
Ta-182	9.233E-01	7.670E-02	8.490E-02	1.337E+00
Tc-99	7.871E-01	2.129E-01	2.106E-01	2.589E+00
Te-125m	7.763E-01	2.237E-01	3.481E+00	3.700E-01
Th-228+D	9.277E-01	7.230E-02	7.550E-02	1.262E+00
Th-229+D	9.130E-01	8.700E-02	1.130E-01	1.491E+00
Th-230	8.628E-01	1.372E-01	1.871E-01	4.033E+00
Th-232	8.152E-01	1.848E-01	2.082E-01	5.645E+00
Tl-204	8.679E-01	1.321E-01	2.068E-01	1.923E+00
U-232	8.086E-01	1.914E-01	1.754E-01	6.021E+00
U-233	8.889E-01	1.112E-01	1.394E-01	4.179E+00
U-234	7.229E-01	2.771E-01	1.937E-01	7.238E+00
U-235	9.292E-01	7.080E-02	1.383E-01	1.813E+00
U-236	5.932E-01	4.068E-01	1.980E-01	8.379E+00
U-238+D	8.590E-01	1.410E-01	9.190E-02	1.111E+00
Zn-65	9.271E-01	7.290E-02	8.370E-02	1.327E+00
Zr-93	0	0	0	0
Zr-95+D	9.298E-01	7.020E-02	9.300E-02	1.445E+00