

## 第八章 除污方式及除役期間放射性廢氣、廢液處理

### 目 錄

第八章 除污方式及除役期間放射性廢氣、廢液處理 .....	8-1
一、 除污方式 .....	8-1
(一) 除污範圍規劃 .....	8-2
(二) 除污作業規劃 .....	8-6
(三) 二次廢棄物管理規劃 .....	8-21
二、 除役期間放射性廢氣、廢液之處理規劃 .....	8-25
(一) 除役期間放射性廢氣處理規劃 .....	8-25
(二) 除役期間放射性廢液處理規劃 .....	8-29
三、 結語 .....	8-37
四、 參考文獻 .....	8-38
附錄 8.A 第八章除污方式及除役期間放射性廢氣、廢液處理之重要管制事項	8-55

## 圖 目 錄

圖 8-1 核二廠廠址環境整治之除污程序.....	8-40
圖 8-2 不同金屬結構層與其適合之除污技術.....	8-41
圖 8-3 系統除污流程圖.....	8-41
圖 8-4 化學除污設備流程示意圖.....	8-42
圖 8-5 核二廠金屬類組件之化學除污作業流程示意圖.....	8-43
圖 8-6 核二廠金屬類組件之電化學除污作業流程示意圖.....	8-44
圖 8-7 核二廠金屬類組件之機械除污作業流程示意圖.....	8-45
圖 8-8 核二廠結構混凝土之機械除污作業流程示意圖.....	8-46
圖 8-9 HVAC 通風架構圖.....	8-47
圖 8-10 核二廠廢液收集集水坑示意圖.....	8-47
圖 8-11 核二廠廢料處理系統流程.....	8-48
圖 8-12 核二廠廢液處理系統流程圖.....	8-49
圖 8-13 清潔劑廢液系統.....	8-50
圖 8-14 雜項廢液處理系統.....	8-50

## 表 目 錄

表 8-1 核能電廠拆除前系統化學除污之案例.....	8-51
表 8-2 金屬組件之除污技術之比較.....	8-51
表 8-3 除污方式要點彙整.....	8-52

## 第八章 除污方式及除役期間放射性廢氣、廢液處理

本章針對核二廠除役期間污染範圍進行規劃，說明除污作業方式，包含除污準則、除污程序、除污技術、作業場所、作業安全及輻射防護；並考量除污作業產生之放射性廢氣與廢液的處理規劃，以確保執行相關作業時能達到降低廢棄物污染程度、減少工作人員輻射曝露及廢棄物有效減量之目的。

本章參考本計畫第三章及第四章之內容，說明核二廠可能受污染的廠址環境(土壤、地下水)、系統、組件及結構，並針對除污作業，提出化學、電化學及機械除污技術之特性與適用範圍。除污作業期間將沿用核二廠原有之通風系統、廢液處理系統及減容中心，並配合本計畫第五章規劃除役期間仍須運轉之重要系統、設備、組件及其運轉方式，將通風、廢液處理系統及減容中心規劃保留至除役拆廠階段後期；本章亦參考本計畫第六章之除役各階段執行目標、作業時程及拆除工法，進行一次側系統除污、組件除污、結構除污及產生廢液廢氣處理與排放之規劃。本章所述之除污作業規劃場所，以及後續產生低放射性廢棄物之減量、處理、運送、貯存及最終處置規劃，請參見本計畫第九章。

### 一、除污方式

參考國外核電廠之除役經驗，如美國 Big Rock Point、Maine Yankee、Connecticut Yankee 與 Trojan 核電廠、德國 Wurgassen、Stade 核電廠、瑞典 Barseback 核電廠、西班牙 José Cabrera 核電廠等，本公司將參核算二廠運轉期間之除污經驗，並於爐心燃料全數移出後才執行系統除污作業，系統除污作業計畫預訂於執行除污作業前1年提報主管機關(原能會)審查，並於核備後據以執行相關除污作業。核二廠系統除污作業規劃之準備時程為 111 年 1 月至 114 年 12 月，系統除污作業計畫預訂於 114 年 1 月前提送主管機關(原能會)審查，兩部機組除污作業時程為 115 年 1 月至 116 年 12 月。除污計畫編撰之準備說明如下：

- 啟動除污計畫相關之規劃工作；

- 準備除污計畫相關之工程規範及程序；
- 準備除污計畫所需之設備；
- 準備除污計畫所需之外包作業；
- 維持除污計畫所需之系統運轉。

除污計畫內容包含：核二廠除污範圍規劃、核二廠除污作業規劃與除污作業可能衍生的二次廢棄物及其減廢措施規劃。

### (一) 除污範圍規劃

本公司係依據本計畫第三章設施運轉歷史及曾發生之重大事件與其影響之評估結果，以及本計畫第四章廠址與設施之特性調查與評估結果，進行除污範圍之規劃，未來將配合機組運轉執照屆期後全面性輻射特性調查作業之結果進行確認/更新。

以下將分別說明，核二廠經評估後可能受到污染之廠址環境、結構、系統、組件，以及可再除污之廢棄物。

#### 1. 廠址環境

依本計畫第三章廠址歷史評估結果，核二廠發生污染及非污染液體溢出或洩漏及氣體洩漏的區域統計包括有反應器廠房乾井區域及其它反應器廠房樓層、緊急爐心冷卻系統及汽機廠房區域、主冷凝器區域、廢液處理廠房區域。經第三章評估，液體之洩漏曾造成廠房內地面的局部污染，惟並無造成廠區外之影響；氣體洩漏的影響範圍僅限於廠房內部，對廠外環境未有影響。有關廠址環境偵檢之土壤、水樣詳細結果可參考本計畫第四章、三、(五)節，其調查範圍及劑量分布如本計畫第四章、圖 4-11 所示。本公司於進行除役作業時，將持續對影響電廠輻射狀態之資料進行收集與調查，包含廠址地表水、地下水調查及土壤污染評估。

未來，若偵測到地表水/地下水有污染時，則將於含水層及其週邊開挖取樣井監測，以界定污染之程度，並確認污染物於土層中之垂直分佈及傳輸特性。另外，亦將配合水文地質資料之收集，建立污染傳輸模式，以瞭

解放射性污染物質於地下水及土壤中之傳導及擴散特性，進一步確定污染範圍。

## 2. 結構

依本計畫第三章廠址歷史評估結果，核二廠廠內可能受輻射影響之結構建物區域主要有：一號機、二號機反應器廠房、輔助廠房、燃料廠房、廢料廠房、控制廠房、汽機廠房、雜項廢液廠房、乾洗衣房、新洗衣房、19、27、28、31、37 號倉庫、低微污染器材倉庫、廢棄物壕溝、減容中心、1 號低放射性廢棄物貯存庫、2 號低放射性廢棄物貯存庫、3 號低放射性廢棄物貯存庫，以及東區貨櫃集散區等，其主要廠房位置如本計畫第三章、圖 3-3 所示。

依本計畫第三章廠址歷史評估結果，涉及燃料更換可能影響之區域都將列入用過核子燃料貯存相關之潛在高輻射區域考量，包含位於燃料廠房中的用過核子燃料池與廢料廠房、爐心探針偵測器間與乾井區域、乾燥器貯存池，以及燃料更換樓層區域。

有關建物、水池等結構之偵檢詳細結果可參考本計畫第四章、三、(二)節。本公司於進行除役活動時，將持續對影響電廠輻射狀態之資料進行收集與調查，如發現建物、水池等結構表面有污染時，將確定污染範圍，並評估混凝土污染層之厚度及適合之除污工具，以機械法為主，進行除污作業。

## 3. 系統

依本計畫第四章輻射特性調查及評估結果，以及美國核管會於 1980 年所發表之 NUREG/CR-0672 核電廠除役研究報告[1]，推估核二廠受到污染之系統彙整如下：

- 核能蒸汽供應系統
- 反應器再循環水系統
- 凝結水及飼水系統

- 凝結水除礦器系統
- 備用氣體處理系統
- 氫氣/氧氣偵測系統
- 低壓爐心噴灑系統
- 餘熱移除系統
- 爐水淨化系統
- 燃料廠房用過核子燃料池冷卻系統
- 備用硼液控制系統
- 廢液處理系統
- 廢料固化系統
- 廢氣系統
- 高壓爐心噴灑系統
- 反應器及汽機廠房冷卻水系統
- 通風及空氣調節系統
- 消防系統
- 爐心隔離冷卻系統
- 控制棒驅動系統
- 中子偵測系統
- 燃料傳送系統

上述可能污染之系統，本公司將在機組運轉執照屆期後於除役過渡階段，執行全面性輻射特性調查作業時，再進行更詳細之輻射偵測，以確認系統除污之範圍。

#### **4. 組件及可再除污的廢棄物**

根據核二廠各系統組件之位置與功能性，以及現場特性調查結果，推估核二廠污染之組件及可再除污的廢棄物，包括下列各項：

- 主汽機及附屬設備。主汽機包含高壓、低壓汽機、葉片、控制閥組、噴嘴室、汽水分離再熱器、再熱閥、中間閥等組件。附屬設備包含汽機洩水閥、汽機液壓頂起油泵系統、釋壓膜片等組件。
- 其它可能受污染之系統零組件，包括(1)廢棄物貯存容器與護箱表面；(2)抑壓池；(3)蒸汽乾燥器及汽水分離器貯存池；(4)放射性廢棄物處理系統受污染之外表。
- 其它可能受污染之大型組件(屬低放射性廢棄物)，包括(1)低壓飼水加熱器；(2)高壓飼水加熱器；(3)凝結水儲存槽(CST)。

結構、系統、組件及可再除污廢棄物可依材料特性可分類為金屬廢棄物(含活化金屬、污染金屬)、混凝土廢棄物、其他類型廢棄物(含乾性、濕性廢棄物)等三類，其類別可分為可外釋、A類、B類、C類及超C類，核二廠除役產生之低放射性廢棄物數量及特性之推估，以中子活化、比例因數、廢棄物產量及廢棄物活度等估算方法進行污染程度分類及推估。活化金屬廢棄物來自反應器壓力槽及內部組件，經推估其重量及活度分別為1,751 MT及 $1.72 \times 10^{17}$  Bq，其中超C類、C類、B類及A類占比分別為27.8%、5.2%、8.3%及58.6%。污染金屬廢棄物來自於系統、組件及設備，經推估其總重量約為16,322 MT，總活度約為 $2.24 \times 10^{14}$  Bq，其中C類、B類及A類占比分別為0.5%、0.2%及99.3%。活化混凝土來自於生物屏蔽，經推估其重量及活度分別為1728 MT及 $7.01 \times 10^{13}$  Bq，皆屬A類廢棄物。污染混凝土來自於建物結構，經推估其重量及活度分別為2590 MT及 $8.51 \times 10^{13}$  Bq，皆屬A類廢棄物。其他類型廢棄物來自於乾性、濕性、保溫材等廢棄物，經推估其重量及活度分別為2346 MT及 $6.77 \times 10^{13}$  Bq，其中B類及A類廢棄物佔比分別為66.5%及33.5%。詳細污染程度及分類推估說明可參考本計畫第九章、一、(三)節。

## (二) 除污作業規劃

污染系統、結構及組件之除污作業可採用現場除污、拆除後除污或拆除後直接貯存/處置等方式，或透過以上三種方式之組合進行，以達到降低污染等級、減少工作人員輻射曝露及廢棄物減量之目的[2]。

本節針對核二廠除役期間之環境、系統、結構及組件說明除污作業規劃。未來，本公司將配合機組運轉執照屆期後全面性輻射特性調查之結果，於執行除污作業前依下列原則，進行除污作業規劃。

- 彙整核二廠運轉期間之系統除污資料，包含技術文件、除污結果及學習經驗，擬定一次側系統之除污可行性評估；
- 進行除污作業評估，評估項目包括：污染物種類、污染數量(範圍)、除污技術之有效性、工作人員之輻射劑量、除污時程、除污因子，以及預估除污產生之二次廢棄物數量等；
- 爐心用過核子燃料移除後，再進行系統除污，以確保除污作業不會影響用過核子燃料池島區之正常運作；
- 除污作業產生放射性廢棄物，依放射性廢棄物相關作業程序書進行處理；
- 除污作業所產生之污染液體，以廠內廢液處理系統或移動式廢液處理設備處理；
- 除污作業產生之粉塵應被適當收集、處理及監測；
- 利用現有或額外增加之隔絕設備，防止除污作業時，污染液體、氣體或粉塵之洩漏；
- 污染液體或氣體於排放前必須經過適當處理及分析，並依相關規定執行排放作業。

### 1. 污染廠址環境之除污規劃

依據本計畫第三章核二廠運轉歷史及第四章初步輻射特性調查資料顯示，核二廠廢水溢流事件對廠外環境雖無影響，進行除役工作時，應對該區域進行採樣確認是否仍有殘留的土地污染。另外，依據地下水防護計畫

執行廠區地下水監測，由廠區地下水監測結果及水樣監測之量測結果，核種活度均小於調查基準值；未來於除役過渡階段及廠址最終狀態偵測階段，將會再進行更詳細之輻射偵測。若輻射偵測後，發現有土壤、地表水及地下水有受污染，則將視污染情況採用下列適當之處理方案，直至該區域輻射偵測值符合標準。核二廠除役時之土壤、地下水整治策略分為三大階段，包含掌握污染資訊、評估與執行、監測與紀錄，其廠址環境整治之除污程序[3]如圖 8-1 所示。當進行污染廠址環境之除污作業時，須考量之準則說明如下：

- 安全層面：確保整治過程及除污技術對於反應器安全及人員輻安無虞。因整治區域位置不同，亦影響整治策略採用的除污技術及所需時程。
- 技術效果：瞭解待整治土壤/地下水之核種種類、濃度及污染範圍，選擇可行之除污技術。
- 二次廢棄物：評估除污整治過程所產生的二次廢棄物種類、數量、暫存及處置方案。

地表水若發現污染時，可採取沉降、過濾、離子交換或其他可行技術之水質淨化，有關土壤及地下水若發現污染而須進行處理時，將以下列可行方式進行，說明如下：

#### (1) 土壤復原

本公司於除役期間進行特性偵檢時，將對該區域進行調查及取樣分析，以確認該區域之輻射特性。土壤復原標準，係以除役後廠址劑量限值(如限制性使用為 1 mSv/y，非限制性使用 0.25 mSv/y)為基準，採用合適之評估軟體，根據可能之曝露情節、途徑，模擬推估造成相當於劑量限值之放射性核種濃度，稱為導出濃度指引基準(Derived Concentration Guideline Level, DCGL)。在除役過程中，藉除污等改善措施以降低土壤之污染核種濃度，再經最後輻射偵測，確認土壤污染核種濃度低於 DCGL 時，解除廠址的管制。若發現廠區有土壤受到放射性污染，本公司規劃將受污染之土壤移除，且以放射性廢棄物之方式處理，直至該區域輻射偵測值符合廠址輻射劑量非限制性使用標準

為止；另挖掘過程中，將控制飛塵以避免污染範圍擴大，而受污染之土壤原則上會使用挖土機或鋤耕機移除。由於污染可能為非均勻分布，因此，必要時將透過減量方案，進行移除土方的篩選或處理，將量測或評估劑量率低於法規標準之土壤，經分離或分類後，回填至廠區土地，以減少放射性污染土壤的體積；量測或評估劑量率高於法規標準之土壤，則可視污染狀況，考慮採以下方式處理：A. 電動力學除污法-利用加入之化學藥劑及電場，將核種由污染土壤中脫除，進而達到分離的效果，該方法屬於化學處理技術；B. 清洗法-於水溶液為主的系統中，利用污染土壤粒子的大小差別，藉由過濾方式，將附著在微細土壤粒子上的污染物與土壤分開，該方法屬於物理分離技術；C. 高溫處理法-利用高溫，將污染泥土中之污染物氣化，再利用尾氣處理系統將揮發之污染物捕捉，該方法屬於熱處理技術。

## **(2) 地下水處理**

若發現有地下水污染時，本公司規劃以抽出法(Pump and Discharge)、抽出再處理法(Pump and Treat)、覆蓋封頂技術(Capping Technology)，或工程包封法(Engineered Confinement)等方式進行處理。

### **A. 抽出法**

抽出法主要是防止污染區域持續擴散，規劃適當的抽水井，深入至地下水層之飽和帶，利用泵將地下水抽至地表的監測槽(Monitoring Tank)。若無放射性污染，可循電廠原有的排水管線進行排放；若有污染則需貯存等待處理或以放射性廢棄物方式處理。透過抽水與排水系統之設計，可改變地下水的流向，避免位於高處之上游地下水流經污染區被污染，以防止污染之擴散。若下游區域地下水已有污染狀況，則可於上游處持續將地下水抽出，以阻斷污染來源避免下游污染程度持續升高。

### **B. 抽出再處理法**

此法與抽出法原理相同，並針對抽出廢水進行處理，規劃適當的抽水井，深入至地下水層的飽和帶，利用泵將地下水抽至地表的監測槽，若有放射性污染則以離子交換樹脂設備進行除污，處理後的水樣經檢測後若符合法規要求，則可循電廠原有的排水管線進行排放。此法可減少液態放射性廢棄物的體積，但會產生交換樹脂等二次廢棄物，需額外進行處理。

### C. 覆蓋封頂技術

覆蓋封頂技術係指阻礙或降低污染物藉由地表水滲透到地表下，造成地下水受污染之風險。惟覆蓋技術無法阻止污染物隨地下水流動所造成之水平遷移，故應搭配工程包封法，建立完整結構物以阻擋污染物之移動。

### D. 工程包封法

此法將建立結構物用以阻擋地下水流的移動，避免地下水流經污染區造成下游地區之地下水污染，以防止污染區域之範圍擴大。通常會與抽出法一起應用，於上游區域將地下水抽出，避免於包封結構處產生過大的水壓發生溢流，造成污染擴散的狀況。工程包封的結構體可分為以下幾種：

#### a. 鋼板樁牆(Sheet Pile Walls)

將厚金屬鋼板打入土壤中，深及不透水之岩層，如黏土層或岩盤，才能有效阻擋地下水流。

#### b. 薄泥漿帷幕(Grout Curtain)

於地表多個位置向下鑽孔，加壓注入薄泥漿進行固化。由於每個鑽孔加壓灌漿相對位置規律排列，使其地層在其範圍內土壤砂石均勻受壓而整體密度提升，固化後形成連續的帷幕，能有效阻擋地下水流。常見的泥漿材料種類有液壓水泥(Hydraulic Cement)、黏土質、火山灰質的膠土與二氧化矽，此外亦可使用具不透水性之高分子聚合物漿。

c. 泥漿牆(Slurry Walls)

於地面上挖掘溝渠，灌入泥漿材料，形成不透水之屏障層，包封受污染之區域或是將上游地下水導引至別處，建立之屏障需深及不透水之岩層，才能有效阻擋地下水流。

d. 冷凍牆(Freeze Walls)

於土壤中插入成排的冷凝管路，透過冷媒的循環，將管路周圍土壤的溫度降低，進而結凍，形成一面與地表垂直的冷凍牆，阻擋地下水流進污染區或自污染區內流出，達到阻隔包封的效果。若不透水之岩層之深度太深，其他工程結構體無法觸及或成本過高時，冷凍牆為唯一可應用之方法，而此法需要維持冷凍系統的運轉，運轉成本較高。

e. 可透水反應障壁法(Permeable Reactive Barriers)

前述工程包封法係將地下水流阻隔或導引至不同方向，而此法則使用可透水材料，以物理、化學或生物方法使地下水通過時，將放射性核種吸附於材料之中。當污染源位於建物或設備底下無法立即被處理時，可應用此法減少污染物之擴散，然而若該區域於建物拆除後仍未衰變至廠址輻射劑量非限制性使用標準，則需進行土壤或岩層的挖掘移除。

## 2. 污染系統之除污規劃

核電廠運轉期間進行之系統除污，通常採取除污效果較溫和之化學試劑，以免金屬管線過度腐蝕而受損。本公司核二廠除役期間進行系統除污之目的為移除系統管件內部表面之放射性污染物質，其作法為先移除可能含污染物質之表面氧化層後，再移除可能擴散至母材表層之污染物質，進而降低除役工作人員於進行系統拆除作業時之輻射曝露，因此，採用除污效果較強之化學試劑。根據國際經驗，針對除役階段之系統除污，應選擇除污效果較好或除污因子(Decontamination Factor, DF)較高之除污技術，DF 值的要求至少須大於 10[1,4]。

經評估，核二廠受污染或可能受污染之系統主要為金屬材質，其表面最上層通常是一些結構較鬆散之沉積物或污染物，由上往下分別有外層氧化層、內層富鉻氧化層、擴散層及金屬底材。因此，基於金屬結構層之特性，可透過選擇適合之除污技術進行表面除污，如圖 8-2 所示。依據不同的除污方式，除污深度會有所不同，例如高壓水柱可以將金屬廢棄物部份之外層氧化層去除，化學除污法可以將金屬底材表層去除，而機械除污法之除污深度及效果最佳，但不適用於封閉系統。因此，對於封閉系統之除污，並且達到除役所需之 DF 要求，化學法是最佳的選擇，故本公司規劃採取化學除污方式，進行核二廠封閉之受污染系統之除污。由於核二廠運轉期間曾經執行系統化學除污，本公司將收集過去留存之資料，評估系統化學除污之可行性。

化學除污是一個多步驟的程序，其中包含氧化、還原、除污及淨化等階段[5]。氧化階段主要是藉由氧化劑如高錳酸鹽，將鏽垢層(Crud)內部不溶於酸的氧化鉻(三價鉻)氧化成可溶於酸的重鉻酸鹽(六價鉻)；而還原階段藉由還原劑將氧化過程中形成之副產物，還原為可溶解於除污試劑的離子態；除污階段則是利用除污試劑(一般為酸液)的腐蝕特性，將金屬氧化層及被污染的金屬層溶解，形成金屬離子；最後，淨化階段是利用離子交換樹脂，將溶解於除污試劑中之金屬離子(陽離子樹脂)與剩餘之除污試劑(陰離子樹脂)移除。上述系統化學除污之程序如圖 8-3 所示。在選擇合適系統除污技術之前，可進行除污技術之可行性評估。評估的項目包含污染系統之材質與該除污技術所需之化學藥劑、該除污技術預期達到之除污因子與量測技術需求、除污產生之二次廢棄物產量，以及除污作業對工作人員與環境之防護措施等。

參考國外 BWR 核電廠除役經驗，如美國 Big Rock Point 核電廠、義大利 Caorso 核電廠、德國 Wurgassen 核電廠、瑞典 Barseback 核電廠等，本公司核二廠規劃未來除役可能需進行系統除污之系統，主要包括反應器冷卻水再循環系統、餘熱移除系統及爐水淨化系統；其中，反應器冷卻水再循環系統之除污，不包含反應器壓力槽，主要是為避免除污試劑的腐蝕作用

將反應器壓力槽表面之活化物質溶解出來，以致二次廢棄物之活度及數量遽增。惟若除役現場輻射劑量率過高，導致拆除作業不易執行時，仍將考量進行反應器壓力槽之除污作業。本公司仍將在機組運轉執照屆期後於除役過渡階段，執行全面性輻射偵測，以進一步確認應進行除污系統之範圍。系統除污規劃於除役過渡階段執行，請參考本計畫第六章除役過渡階段作業排程。參考歐、美電廠除役之現況，由於各國電廠之裝置容量、系統設計、運轉過程及除役策略因廠址不同而有差異。因此，核電廠除役時常採用之 CORD D UV (Chemical Oxidation Reduction Decontamination for Decommissioning by Ultraviolet Light) 及 DFD (Decontamination for Decommissioning) 系統除污技術之平均 DF 值及預估可能的除污效能各有不同，其範圍為 10~625，如表 8-1 所示。針對日本核電廠使用之 HOP 及 T-OZON 技術進行系統化學除污，亦可作為借鏡參考。本公司亦可與國內研究機構、專業廠商進行合作，開發污染金屬除污技術，據以實施核二廠之系統化學除污。

本公司參考國外除役及核二廠運轉期間系統化學除污之經驗[6-7]，進行系統之化學除污程序，於核二廠裝設系統除污設備，利用該設備所提供之泵將化學除污試劑進行輸送。除污試劑於反應器壓力槽增設旁通(Bypass)管件，因此，除污試劑並未經過反應器，避免使得二次廢液活度過高，而增加放射性廢液處理成本及廢液處理系統之負荷。除污試劑旁通反應器壓力槽將進入餘熱移除系統及爐水淨化系統，再使除污試劑最後回到系統除污設備，並以上述輸送流程進行循環除污。本公司針對一次迴路(Primary Loop)之數個系統，包括冷卻水再循環系統、餘熱移除系統、爐水淨化系統，目前規劃為同時進行系統除污。參考國際案例，執行化學除污的污染系統須與除污設備之各單元連結，包含藥品注入槽、藥品注入泵、緩衝槽、氧化劑注入槽、流體輸送泵、熱交換(冷卻)單元、二次廢液處理單元(觸媒反應器或 UV 光分解器)、離子交換樹脂單元等，其基本流程如圖 8-4 所示。上述除污設備各項單元、相對位置及管路配置因不同除污技術略有差異。多系統同時進行除污將產生相對較多之二次廢棄物(因各系統的污染程度不

同)，因此，實際之除污範圍及是否包含反應器壓力槽仍需視環境與人員安全及現場系統狀況，經評估後再進行調整，將於除污計畫內說明是否包含反應器壓力槽之除污。

參考國際上系統除污相關經驗，核二廠在執行系統除污工作時，應考量之除污準則彙整如下：

- 核二廠運轉期間，其系統、設備運作及保養皆按照相關程序書辦理。因此，目前在停機前各項系統、設備係維持正常可用。未來停機後，參考過去核二廠運轉期間之化學除污經驗，核二廠將與除污技術廠商進行評估，並於除污前擬定除污計畫，其內容包含準備所需之設備及系統運轉。
- 一般來說，增加除污液輸送流速可減少除污循環次數、提高 DF 值、減少除污時間、減少化學藥劑用量最好的方式是使用廠內現有的泵(有較高的流速)，來進行除污劑的輸送。
- 某些除污試劑(如氟硼酸)具有較高的腐蝕性，因此，除污系統之管件必須具有耐腐蝕特性(如 Teflon 材質或 Teflon 處理過之管件)。另外，針對混合金屬材質(碳鋼、不鏽鋼、Inconel)之腐蝕速率也較難控制。
- 可考慮以遠端輻射監測(Teledosimetry)評估系統除污效果，主要是將劑量偵測儀(Dosimeter)裝設在即將進行除污的系統周圍，目的在於量測系統除污前與除污後的劑量率，以估算除污因子，量測點與數量應謹慎評估，以取得有效數據。
- DF 值與二次廢棄物產量之間為正向關係，因此，除污時必須考慮在可接受的 DF 值範圍內，儘量降低二次廢棄物產量，兩者取得平衡。
- 系統除污作業應在電廠機組運轉執照屆期後儘快進行，以確保電廠具有適合的設備及相關經驗的工作人員，來支援除污作業。
- 除污前應詳細評估是否需要使用廠內現有的設備(泵、離子交換床、加熱器等)來支援除污作業，如果需要，則必須於除污作業進行前，確保這些設備可正常運作。

- 除污過程中可能會產生不溶解的微小顆粒，並累積於過濾設備中，導致除污流速降低或管線阻塞，因此，必須選用合適孔徑的過濾設備。
- 於除污管線中安裝流量計或壓力計，以隨時監控除污管線是否有洩漏的狀況；另外因微小之洩漏狀況，通常無法由管線內液體體積或壓力的變化偵測；故將視狀況考慮於適當位置(可能洩漏之位置)裝設監視器，以監控微小之洩漏狀況。
- 如果除污過程中發現有超鈾元素(TRU)核種，則必須嚴格監測離子交換樹脂的活度，以避免超 C 類(GTCC)廢棄物的產生。
- 化學藥劑應妥善存放，並隨時監控存放之環境條件，以避免意外發生。

系統除污可透過化學試劑以一次性(Single-pass)或循環式(Recirculation)進行，以達到需要之除污效果。核二廠如採用一次性化學除污，適用之試劑通常為草酸銨及檸檬酸銨之溶液、磷酸溶液、鹽酸溶液或相關具有金屬除污之化學試劑。一次性化學除污所產生之廢液應視狀況需要，以氫氧化鈉進行酸鹼中和之預處理。一次性化學除污之化學試劑、金屬材質、操作時間、操作溫度等條件與除污效果有關。本公司將依現場量測狀況，評估所需採用之相關條件，以達到可接受之除污因子。

本公司核二廠之系統化學除污若採取循環式，有兩種試劑可選擇。第一種化學試劑通常使用過錳酸鹽類、檸檬酸、草酸溶液或相關具有金屬除污之化學試劑，多次採用此循環方式除污，其除污效果良好，且對於組件不具傷害性。第二種循環式化學除污通常使用乙二胺四乙酸(Ethylenediaminetetraacetic Acid, EDTA)、檸檬酸、草酸溶液或相關具有金屬除污之化學試劑，通常循環時間可能數天，並於加熱條件下進行除污程序。循環式化學除污產生廢液，通常需要經過前處理，如過濾設備、離子交換樹脂等，使其水質達到核二廠廢液處理系統之接收標準。

### 3. 污染結構及組件之除污規劃

結構及組件除污之主要目的為降低其污染程度，以達到廢棄物減量或再利用之目標，以及降低廢棄物處置成本。在選擇結構及組件除污技術之前，可進行相關成本分析，以確認採用該除污技術之必要性。

為了達到預期之除污因子，除污程序必須根據廠址的特殊性而設計，並廣泛考慮核二廠現場實際狀況，列舉如下：(1)基底材質之種類：鋼、鋁合金、水泥等；(2)表面型態：粗糙、多孔性、塗佈面等；(3)污染物形式：氧化物、渣滓、污泥等；(4)污染物組成：活化產物、分裂產物、放射性元素；(5)內部或外部表面污染；(6)目標除污因子；(7)組件除污後之去處：貯存、處置、再利用；(8)所需之除污時間；(9)組件的形式：管線、桶槽等；(10)除污設備的可利用性、成本及複雜性；(11)產生的二次廢棄物；(12)除污造成的職業及公眾劑量；(13)安全、環境及社會議題；(14)訓練良好的員工；(15)設施需要調整之程度：隔離系統，包圍與通風的空間；(16)除污方法的特徵及系統的複雜度。

核二廠除役期間進行除污作業時，除污技術可採取具有相當規模且發展成熟之技術，或我國自行開發之除污技術。核二廠除役所選擇之除污技術應選擇最為安全之作業方式，且除污之化學試劑應選用對人體健康危害、環境危害較低之試劑，並考慮以下準則[8]：

- 安全性

採取之除污技術應達到大幅降低工作人員於拆除作業時之輻射曝露。

- 效果

採用的除污技術應該能移除物件表面的放射性物質，有效達到除污效果。

- 成本

採用的除污技術的成本原則上不應超過該廢棄物原本所須處理及處置的成本。

- 廢棄物最少量化

避免大規模採用會產生大量二次廢棄物的除污技術，並配合適當的二次廢棄物處理區域及減容程序。

- 技術可行性

由於除役期間可能需要處理大量的組件及結構，採用的除污技術應具有可行性。

本公司核二廠拆除之組件，包含熱交換器、汽機組件、泵、桶槽、閥件、管件、鋼材、電纜槽、電力組件、通風元件及雜項製程組件等各類材質廢棄物。另外，一號機及二號機反應器廠房、輔助廠房、廢料處理廠房、燃料廠房及汽機廠房之結構、牆面、地面及天花板等混凝土材質亦可能受到污染。

以上待除污廢棄物，依種類材質可大致分為兩類，第一類為金屬材質廢棄物，規劃採用化學、電化學及機械除污技術；第二類為結構混凝土材質，規劃採用機械除污技術，分別說明如下[9-10]：

- (1) 金屬材質組件之除污作業程序規劃

- A. 化學除污

首先選取適當的化學藥劑，注入組件化學除污系統之浸泡槽，並以泵輸送使其槽體內部液體循環流動。再將拆除或切割之金屬組件置入浸泡槽中施以攪拌及溫控。歷經適合之反應時間後，將金屬組件以清水浸泡及人工潤(刷)洗，即可完成除污程序。化學除污作業之優點是所需時間較短，並具有高的 DF 值，但須注意採用此程序的限制，即高濃度的腐蝕性化學試劑將對後續的廢液處理系統產生潛在的負擔，因此，將視情況規劃化學試劑進入廢液處理系統前先經過酸鹼中和程序。除污作業程序執行期間，溶液中的污染物濃度逐漸增加，可能使除污中的組件再被污染或污染的更嚴重。此問題可以透過兩個方式解決：(a)將污染程度最低的組件先進行除污，然後依序處理污染程度較高的組件；(b)當污染物濃度超過設定值時，將溶液進行清潔或更換程序。組件設備化學

除污除了利用上述浸泡槽方式處理，亦可規劃採取移動式之除污設備，其中以遙控式操作單元包含循環泵、桶槽、電控加熱裝置及閥件，而以控制單元進行除污作業之控制。實際作業上，將可拆除之設備組件以軟管連結移動式除污設備，使其形成再循環之迴圈。再將化學試劑注入並啟動循環作業，在循環除污期間維持所需之溫度。上述化學除污作業規劃程序如圖 8-5 所示。

#### B. 電化學除污

電化學技術可使表面金屬溶解，再與污染物混合後移除，可避免電解液的再污染問題，經淨水潤洗後完成除污。電化學除污技術僅能應用在具導電性表面，例如鐵基合金(包含不鏽鋼)、銅、鋁、鉛及鈾材質，除污前須清除附著在待除污組件表面的非導電性物質，例如油脂、潤滑油、氧化物(鏽)、塗料或其他附著物。本公司規劃電化學以浸泡(Soaking)方式處理，需要兩組不鏽鋼製的桶槽，其中一個桶槽盛裝電解液(通常為磷酸、硫酸)、電極及待除污組件。另一個桶槽則盛裝淨水，可供除污後組件潤洗。將待除污組件連接陽極浸泡於電解液池中，對於不具有孔隙結構的污染組件來說，適合採用電化學除污。上述電化學除污作業規劃程序如圖 8-6 所示。

#### C. 機械除污

針對多孔性表面，化學或電化學除污技術並不適合，而可利用機械除污技術進行除污。本公司規劃於核二廠輔助廠房、汽機廠房可建立此類技術的使用設備，針對拆除或切割後之組件，進行表面除污程序。濕式噴砂研磨系統是屬於具封閉性迴路的液態研磨除污技術，採用此技術須合併使用水、磨料及壓縮空氣，於防漏的隔離區內執行除污作業。除污作業現場應設置排氣設備及高效率空氣過濾系統，並在除污作業區內維持負壓，避免空污污染之情況發生。本公司亦規劃採用乾式研磨噴砂技術，通常以壓縮空氣或噴射渦輪設備帶動研磨材料，對金屬、塑膠或石造表面進

行快速噴射研磨料顆粒，除污效果顯著且具有清潔、除鏽、除毛邊的作用。噴砂技術可應用在平面開放式的表面，包含地板及牆面，也可應用在具有複雜表面的設備或組件。根據核二廠待除污之金屬廢棄物，可選擇各種適合的研磨材料，包含：(a)礦物類，如磁鐵礦或砂；(b)不鏽鋼顆粒或氧化鋁；(c)玻璃珠、玻璃融塊、碳化矽及陶瓷材料；(d)塑膠粒子及(e)二氧化碳乾冰。研磨材料具有不同型體(圓形、不規則狀、稜角狀)、硬度及密度，可根據待除污之金屬表面選擇適合之研磨材料。例如金屬表面的塗漆可選用圓形或低硬度之磨料，而單純金屬表面可選用稜角狀或高硬度之磨料，以達到除污效果。各項研磨材料之型態、硬度及密度等物理特性可參考商業化材料之規格。上述研磨材料並不包含矽材，以避免作業人員引發矽肺病。另一方面，本公司核二廠規劃採用高壓水除污技術，以高壓噴射水強力沖洗污染表面。可溶性的污染物會溶解，而鬆散未固著的顆粒則藉著水而被帶走。高壓水技術可以應用在金屬表面，亦可針對混凝土、磚材、磁磚表面進行除污，無論是多孔性或無孔表面都有良好的效果。不過此技術不建議使用在木材、纖維或相似的材質上。上述機械除污作業規劃程序如圖 8-7 所示。針對金屬組件之化學、電化學及機械除污之優缺點及適用性比較如表 8-2 所示。

## (2) 混凝土材質之除污作業程序規劃

### A. 機械除污

核二廠除役產生之建物結構廢棄物主要為反應器廠房、燃料廠房、廢料廠房與汽機廠房、輔助廠房內受污染之混凝土結構(地面、牆面、天花板)、乾井與生物屏蔽。當建物結構進行除污時，規劃採取機械式表面移除技術。機械式表面移除技術可除去不同深度的表面污染物，使剩餘之混凝土結構成為可釋出或非污染之廢棄物。本公司規劃採取簡易的人力手動作業程序執行，用來清潔少量受污染的油漆表面或平整表面，例如刷除、沖洗、擦除。針對

結構混凝土較深之污染，本公司規劃採取具破壞性之機械除污程序包含研磨、破碎、鑽洞、高壓水噴射等技術，並考量污染程度、場地大小、除污面積、刨除深度、表面幾何結構及位置，選擇合適的手持型、推車型、遙控型等設備。上述機械除污作業規劃程序如圖 8-8 所示。

本公司核二廠除役期間規劃進行除污、拆除及切割等作業，設置適合之設備及場地，以縮短時程、降低人員輻射曝露、防止污染擴散及作業方便性。有關除役期間低放射性廢棄物處理區域(包含汽機廠房、輔助廠房)之設置及規劃，請參考本計畫第九章、三節。

#### 4. 除污之作業場所、作業安全及輻射防護

核二廠系統除污規劃以化學除污為主，利用化學試劑以密閉循環方式在系統中循環以達到除污效果，由於該除污作業是在系統拆除前進行，因此，作業場所是系統所在地。

核二廠金屬組件之除污可包含化學/電化學除污及機械除污技術，化學除污通常是在新增的除污桶槽內進行，主要是將切割組件浸泡在含有化學試劑的桶槽中，利用攪拌裝置使化學試劑與待除污組件充分接觸混合以達到除污效果。組件化學除污採用的桶槽為開口向上之容器，因此，必須加裝通風系統。此外，須避免操作人員接觸到具腐蝕性之化學試劑。由於化學反應是在高溫狀況下進行，須建立有效安全措施以應付突發狀況，如有毒氣體或爆炸性氣體的產生狀況，並裝設緊急排水系統、氣體偵測器及緊急排氣系統。電化學除污須採用至少兩個不鏽鋼桶槽，第一個桶槽含有電解液、電極及待除污之切割組件。第二個桶槽盛裝潤洗用水以處理經電化學除污後之組件。為了控制電化學除污過程所產生的蒸氣，須沿著電解桶槽裝設排氣煙櫃，並提供桶槽加熱及攪拌裝置。化學及電化學除污設備將設置在核二廠除役作業規劃之廢棄物處理區域中，以方便集中管理。除役期間於核二廠設置低放射性廢棄物處理區域(包含汽機廠房、輔助廠房)，現有汽機廠房 4 樓(標高 EL.+ 30' 0")及 2 樓(標高 EL.- 30' 0")規劃暫時處理

區域，進行廢棄物之細切、包裝。經細切且須除污之廢棄物，則送至廢料廠房 3 樓除污間、機械間或汽機廠房 3 樓噴砂間進行除污作業，其位置示意圖如第九章圖 9-7~圖 9-10 所示，相關細節請參考本計畫第九章、三節。

核二廠除役期間，系統之化學除污與金屬組件之化學/電化學除污作業，以及操作化學試劑相關設備，須符合相關健康及安全規定。工作人員須接受相關訓練課程，並視需要配戴防護眼鏡或面罩、全身保護工作服、不滲透性手套及腳部防護具。此外，須根據污染物的危害特性及待除污組件的類別，額外增加適當的安全設備。

組件之機械除污技術可分為表面清潔及表面移除兩大類，如同化學及電化學組件除污，組件之機械除污設備應設置在核二廠除役作業規劃之廢棄物處理區域中，以方便集中管理。組件機械除污時會產生懸浮粉塵污染，因此，須裝設防止污染擴散之設備及人員安全保護設備。採用濕式噴砂研磨是屬於封閉迴路系統之技術，結合水、壓縮空氣及研磨料，在負壓狀態櫃體中進行除污動作，並須裝設含有高效率空氣過濾系統之空氣通風系統。放射性廢棄物以旋風/離心分離器進行篩選移除，而廢水則加以過濾並循環再利用。乾式噴砂研磨利用高壓空氣帶動研磨料對待除污組件進行衝擊研磨，除去組件表面材質達到除污效果。乾式噴砂研磨不適用於會被研磨料擊碎的材質，如玻璃或樹脂玻璃(Plexiglas)等，以免破碎造成危險。乾式噴砂研磨避免運用在鋁及鎂材質表面以降低導致粉塵爆炸的風險。採用乾式噴砂研磨技術之前，須先將可燃性污染物移除(如紙類、木質類等易燃物先予撕除或磨除)，以避免除污時污染物產生受熱燃燒或爆炸的風險。另外，乾式噴砂研磨除污過程中會產生靜電，須將待除污組件或設施裝設接地設備。

核二廠建物結構表面之除污，如混凝土牆面及地板等，可採用機械除污技術，因此，作業場所通常是在建物結構的所在地。在進行表面清潔或表面移除的活動前，須先採取表面準備工作及安全預防措施。表面須先處理為不具阻礙的狀態，如混凝土內的管件或支撐物預先拆除或移除，並裝

設真空設備將懸浮粉塵釋出問題降到最小。當進行可能含爆炸物質之機械除污時，須採取預防爆炸之措施。故採用此技術之前，須先將可燃性污染物移除(如紙類、木質類等易燃物先予撕除或磨除)，以避免除污時污染物產生受熱燃燒或爆炸的風險。採用此技術須針對空浮污染風險進行詳細考慮以避免造成傷害。此技術可裝設粉塵收集設備，小型操作工具可加裝真空式的清潔裝置及外部加裝高效率空氣過濾系統，以收集粉塵。大型操作之機械除污機具除需要粉塵收集設備，另可併入旋風式分離器處理較大粒徑之混凝土粉塵顆粒，並裝設含前置過濾設備及高效率空氣過濾系統。

核二廠除役期間，系統之化學除污、金屬組件之化學/電化學/機械除污，以及混凝土結構之機械除污等作業，應採用符合安全、經濟效益及有效的方法，並訂定該除污作業相關管理措施，以維護人員及作業場所之安全。除污作業場所須符合「游離輻射防護安全標準」[11]之相關規定，並採取適當措施以抑低與限制輻射工作人員職業輻射劑量限度。

### **(三) 二次廢棄物管理規劃**

本節說明除污作業可能衍生的二次廢棄物及減廢措施。

#### **1. 系統除污二次廢棄物**

系統化學除污技術所產生之廢除污液，一般是以離子交換樹脂來進行處理，因此，該程序所產生之二次廢棄物主要為離子交換樹脂，由於離子交換樹脂處理後之廢液大部分陽離子、陰離子已被吸附，可傳送至廠內廢液處理系統進行處理，或經過額外之前處理設備處理後，再排至廠內廢液處理系統進行處理。

有關核二廠系統除污產生廢離子交換樹脂處理方式之規劃，本公司將採行濕式氧化方式處理、脫水後盛裝在耐 100 年結構完整之容器(HPC)或經主管機關(原能會)同意之適當容器及其他可行處理方式，使廢棄物容積減到最小，以節省放射性廢棄物之貯存空間。

## 2. 組件化學除污二次廢棄物

再生程序為組件化學除污的基本步驟之一，該程序可採取單獨或結合數種可行處理方式使廢溶液進行再生，如沉澱過濾及離子交換、蒸發或蒸餾等方式。例如電化學除污過程會導致磷酸除污液中的鐵離子濃度持續增加，當鐵離子濃度超過飽和濃度時，磷酸鐵會析出而沉澱，因而降低除污的效率。因此，該技術之磷酸溶液必須定期的更換或再生，以降低二次廢棄物產生的數量。上述組件除污作業所產生之廢磷酸液，可加入草酸，形成黃色的草酸鐵析出並移除，經熱解處理(草酸鐵之熱解處理會產生氧化鐵及鐵粉等產物，若無妥善處理可能產生自燃現象，故應至設置有消防安全措施之焚化場所處理)。再生之磷酸可繼續重複使用。廢磷酸液亦可添加鉍鹽，使其形成白色結晶之磷酸鉍沉澱物，再經過濾處理後之廢液由廢液處理系統處理。廢磷酸處理後直接抽取上層懸浮液如符合廢液處理系統接收標準，應可將上層懸浮液送至廢液處理系統進行處理。若有濁度過高之考量，則可利用過濾裝置進行過濾。

## 3. 組件機械除污二次廢棄物

噴砂研磨技術有乾式或濕式兩種方式。使用乾式噴砂研磨時，可在工作區域加裝粉塵控制系統及真空過濾系統，以降低粉塵污染狀況。使用濕式噴砂研磨時，會產生廢水、磨料及研磨後的碎屑粉塵，過程中可採取適當的減廢措施，如磨料的回收及廢水(包含處理或未處理)的再循環等。磨料可經由過濾設備進行回收，當磨料與較輕之粉塵經過分選器時，藉由比重差異，氣流將粉塵帶離，而較重之磨料則掉入下方過篩單元而收集。廢水循環是藉由過濾方式，將水進行回收利用。上述組件除污作業所產生之廢棄噴砂可盛裝於 55 加侖桶或固化處理。機械除污產生之廢棄噴砂及殘礫粉塵若採取固化方式處理，應先評估固化作業之可行性，以符合「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」相關規定。

#### 4. 結構機械除污二次廢棄物

進行結構混凝土除污技術時規劃以粉塵收集設備過濾收集殘礫及微小粉塵，避免交叉污染及污染擴散。針對較小型及手操作型的機械除污工具，採用處理量足夠之真空式的清潔裝置，並於外部加裝高效率空氣過濾系統，以收集粉塵。大型操作之機械除污機具，採用處理量足夠之真空式清潔裝置，併入旋風式分離器處理較大粒徑之混凝土粉塵顆粒、可清潔前置過濾設備及高效率過濾系統。上述結構機械除污作業所產生之殘礫粉塵可盛裝於 55 加侖桶或固化處理。機械除污產生之廢棄噴砂及殘礫粉塵若採取固化方式處理，應先評估固化作業之可行性，以符合「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」相關規定。

#### 5. 除污作業之二次廢棄物處理及減廢

本公司規劃於除役階段，進行適當的除污作業，減少放射性廢棄物之數量及體積。例如系統、設備、組件、管件及混凝土之表面除污，使污染物質自物體表面移除，僅占原來整體體積之一小部分，以達到廢棄物減量。放射性廢棄物擴散的最小化是非常重要的，並藉此減少二次廢棄物的數量。除污作業過程採取預防污染擴散之措施，例如組件除污之浸泡槽，須加設通風設備及過濾設備，避免放射性粉塵擴散。混凝土之機械式除污可配置抽氣及過濾設備，收集除污作業產生碎礫粉塵，避免使周遭環境遭受放射性污染而增加須除污之區域。

除了上述廢棄物之減量，本公司規劃進行廢棄物減容程序。除役所產生的廢棄物可以藉由壓縮、焚化、過濾及蒸發進行減容。本公司規劃使用既有之減容處理設施，包含核二廠減容中心之超高壓壓縮機及焚化爐設施。因此，針對可壓縮性廢棄物進行超高壓壓縮之減容處理；而針對可燃性的廢棄物進行焚化之減容處理。本公司將依放射性物料管理法第 18 條規定，於執照到期前 2 年以前向主管機關(原能會)申請換發執照。

本公司核二廠除役產生之二次廢棄物，建議將其進行分類，區分為可燃、可壓縮及不可燃不可壓縮性等三種類別。可燃性固態之二次廢棄物經過焚化(Incineration)處理後，可大幅地減少體積，而產生的廢棄物產物灰燼(Ash)，可採超高壓壓縮機壓縮再減容。可燃性之廢棄物主要為固態放射性廢棄物，如除污作業產生之二次廢棄物，包含手套、衣服、口罩、紙張及塑膠等，適合用於焚化法處理，以達到減容之目的。核二廠之液態廢棄物可經過適當的前處理再以焚化法進行減容。核二廠除役產生之廢油，應依據核二廠「減容中心可燃及可壓縮低放射性廢棄物接收作業程序」規定之「廢油」處理方式進行焚化減容。針對除污作業產生之含有機成分之廢液採取吸附或化學氧化方式進行預處理後，將剩下之無機廢液導入廢液處理系統進行後續處理。

針對可壓縮廢棄物，本公司規劃採取超高壓壓縮，以達到減容目的，包含除役期間除污作業過程產生之金屬、管件、砂礫碎塊等廢棄物。針對不可燃不可壓縮之廢噴砂可與其它裝桶之廢棄物一併盛裝於 55 加侖桶或固化處理。核二廠除役的過程中，化學除污試劑的回收循環利用，產生不可燃不可壓縮之廢離子交換樹脂，且核二廠運轉產生的放射性廢樹脂目前做法為暫時裝桶，均以暫時貯存方式處理，除役時規劃廢樹脂併同廠內除礦器廢樹脂一併處理。核二廠除役期間將於新建低放射性廢棄物貯存庫建置廢粒狀離子交換樹脂濕式氧化暨高效率固化系統(WOHESS)，針對運轉及除役期間所產生之低放射性廢粒狀離子交換樹脂進行安定化處理，而無法以上述設施處理之廢離子交換樹脂(如系統化學除污產生)，本公司將其脫水後盛裝在耐 100 年結構完整之容器(HPC)或經主管機關(原能會)同意之適當容器及其他可行方式處理。本章針對環境、系統、組件及結構進行除污方式之說明，並配合本計畫第六章 WBS 的規劃，擇要表列相關資訊，包含範圍、規劃、預期效果、二次廢棄物、程序及時程等資訊，彙整如表 8-3 所示。新建低放射性廢棄物貯存庫、WOHESS 及新設廢液處理系統預計一併向主管機關申請處理及貯存設施運轉執照，俟獲主管機關核發運轉執照後開始營運，其時程規劃如本計畫第六章之圖 6-1。

## 二、除役期間放射性廢氣、廢液之處理規劃

放射性廢棄物處理主要有前處理(包括收集、預處理等)、處理、安定化及包裝程序，在本節將參考核二廠最終安全分析報告(FSAR)與國內、外除役經驗及相關資料，彙整核二廠除役期間產生之放射性廢氣、廢液處理需求，說明除役期間放射性廢氣、廢液產生來源與管理作業，包括放射性廢氣、廢液收集與輸送、處理方法、排放標準、監測方法及排放管控等，使放射性廢氣、廢液能妥善處理，避免放射性污染擴散，保障操作人員及環境之安全，並兼顧經濟效益之考量。

### (一) 除役期間放射性廢氣處理規劃

核二廠除役期間產生之廢氣，主要來自於拆除、切割、除污及廢棄物處理過程，為了防止廢氣的擴散，應經由廢氣收集系統的捕獲，使得廢氣可以安全地被處理[12-13]。氣體廢棄物主要處理方法為利用活性碳、靜電集塵器或HEPA(High-Efficiency Particulate Air)予以過濾去除其放射性核種。作業區可設置 HEPA 過濾設備，避免空浮污染產生，廠房內部可利用既有各廠房排氣系統的 HEPA、活性碳過濾設備以確保廢氣之排放安全，亦可採取污染隔離罩及移動式空氣除污裝置，以避免污染擴散。以下將針對除役期間放射性廢氣處理，包括放射性廢氣產生來源、收集與輸送、處理方法、排放標準、監測方法及排放管控等，提出相關規劃與管控措施。

#### 1. 廢氣來源與組成

核二廠除役期間放射性廢氣產生來源主要可分為二大類：(1)核電廠運轉時殘留的放射性廢氣：主要是因反應器運轉時核分裂反應及活化反應產生之放射性廢氣(在核二廠除役初期該系統仍有運轉期間殘留之惰性氣體與碘等分裂產物，但該活化產物活度隨時間逐漸衰減而大幅降低)；(2)除役作業產生之放射性廢氣：為拆除切割核設施產生之煙霧氣體、粉塵及一般管制區內的氣體，其核種多半以微粒型態存在。

由於反應器運轉時因核子燃料造成核分裂及活化產生之放射性氣體之半化期都很短，且停機後核分裂反應立即停止。核二廠除役初期，因燃料束尚未移至乾式貯存設施，因此，上、下燃料池尚須運轉，亦可能產生具放射性核種之氣體。因此，除役過程主要之放射性廢氣來源，為用過核子燃料池運轉產生之氣體、拆除切割核設施產生之煙霧氣體及一般管制區內之氣體。此類廢氣除了具有輻射危害，亦有吸入放射性顆粒的風險。除役期間產生放射性廢氣之氣體核種及預估活度，詳請參本計畫第十章。

## 2. 廢氣收集與輸送

除役過程中，由於主要的放射性廢氣來源為拆除、切割核設施產生之煙霧氣體及粉塵，為了防止這些放射性廢氣的擴散，降低對人員、環境的危害，因此，除役期間仍需要廢氣收集系統或設備，經由廢氣收集系統的收集輸送，使得廢氣可以安全地被處理。

針對放射性廢氣收集，所須執行之工作內容包括：先期建置隔離帳篷、負壓通風系統、儀電控制系統、人員供氣淨化系統等設備，與現場輻射防護人員應提供執行拆除工作人員在輻射管制區內穿著之各式防護衣、配戴面罩、供氣式面具及攜帶個人操作與輻射防護裝備與工具等，並使其正確使用。

在除役期間，核二廠的 HVAC(如圖 8-9)所提供的氣流，須是從清潔且無輻射的區域流向輻射污染區，並確保空氣流動所流經的連續區域，其輻射等級是逐漸增加的，即空氣是從低輻射低污染的區域流向高輻射、高污染的區域。另外，可使用實體帳篷或現有的房間邊界，分隔不同輻射等級區域的邊界。建立的臨時隔離區，須處於負壓狀態，進而確保氣流是流向隔離區內部，可防止顆粒的反向擴散。

執行除役時，設施的拆除方式可分為整體移除或就地拆除兩種方式。核二廠採整體移除方式，可降低廠房空浮事件發生之機率，其組件可整體移出者宜整體移出；核二廠亦可採就地拆除方式，切割組件時宜配合容器尺

寸進行切割，並事先採取適當之除污方式以降低其污染及粉塵飛揚程度。執行拆除切割作業時，可搭建隔離帳篷，且應視需要架設排氣過濾設備或移動式空氣過濾設備，並維持負壓梯度及設置防止回流裝置，將排風口導入廠房通風系統，以利廢氣之收集及輸送，最後經過濾設備處理，透過相關空氣輻射監測及輻射防護管制作業程序(SOP)後排放。另外，執行拆除作業人員應穿著適當之個人防護具，如空氣呼吸器，以避免工作人員因吸入拆除切割作業時所產生之煙霧氣體或一般管制區內洩露之氣體而造成體內污染。

### 3. 廢氣處理方法

放射性氣體的處理方法大致可分為二種：(1)針對短半衰期之氣體，可藉由延長其滯留時間使其衰變；(2)利用過濾器、吸附等方式去除含放射性核種之微粒，將氣相廢棄物轉變為較穩定的形態(如固相)，再針對此穩定形態的廢棄物進行後續的處理、處置。

除役期間因核反應器停機並移除燃料束及冷卻水後，其核分裂反應已經停止，所以反應器一次系統產生放射性廢氣之主要來源就已消失，由一次系統產生之廢氣經由廠房通氣系統處理，遠低於運轉時產生之廢氣量，且廢氣透過既有之通風系統排放，於除役過渡階段已所剩無幾。根據瑞典 Oskarshamn 與 Forsmark 的除役經驗，除役期間產生之放射性氣體主要為切割或拆除工作產生之粉塵及一般管制區內的氣體。

除役期間為避免放射性廢氣向設施外擴散，可運用廠房既存的隔牆、過濾設備、通風等設備，並維持廠房內照明、負壓、空調、廢棄物處理、輻射監測等系統皆依照現有之相關作業規定進行運作，利用既有的 HEPA 過濾設備可有效減少放射性廢氣的排放，在廠房內進行拆除及除污工作時，維持廠房內既有通風系統及輻射監測系統照常運作，並應視情況增加臨時通風系統。

核二廠除役期間，既有通風系統仍維持運轉，直至除役拆廠階段後期停止運轉，其規劃時程，請參考本計畫第五章及第六章。除維持廠房內既有之通風系統等正常運作外，為減少除役期間放射性廢氣產生及避免污染擴大，可採取之措施包括：(1)事先採取適當之除污方式以降低欲拆除設施污染程度；(2)先期建置隔離帳篷；(3)妥善使用污染隔離罩、局部排氣過濾設備與移動式空氣除污裝置等。

#### 4. 廢氣排放標準

由於未經處理之放射性廢氣會對人員、周圍環境及生態造成影響，故放射性廢氣必須經過處理，以抑減大部分之放射性成份及有害物質。經過處理後之放射性廢氣排放標準應符合我國「游離輻射防護安全標準」對廠外地區中一般人體外曝露造成之劑量限值與排放標準，並合理抑低。

依據「游離輻射防護法」[14]第八條規定，設施經營者應確保其輻射作業對輻射工作場所以外地區造成之輻射強度與水中、空氣中及污水下水道中所含放射性物質之濃度，不超過「游離輻射防護安全標準」[11]附表四之二規定。

核二廠於放射性廢氣排放口均裝置有流程輻射監測器執行線上連續監測，若達到警報值時會依據規定採取對應管制行動。另外廢氣排放口亦設有取樣器，對於放射性廢氣定期取樣、分析與記錄並統計排放量。

#### 5. 廢氣監測方法及排放管控

除役期間產生之放射性氣體盡可能利用隔離、負壓及過濾方式去除核種顆粒以避免向設施外擴散，廠房及通風排氣管道可設置連續式空氣輻射偵測器及收集空氣樣品取樣器或以濾紙收集空氣中懸浮性微粒，空氣取樣視可能之放射性核種而定，包括：收集空氣樣品或濾紙收集空氣中懸浮性微粒，以評估輻射工作人員及一般民眾健康與安全，並確保排放之氣體符合「游離輻射防護安全標準」[11]。在廠房執行切割拆除作業時，可視情況設置臨時通風系統及架設移動式輻射偵測器、連續空浮監測器等方式，作為

緊急廢氣處理措施，以防止異常狀況發生，減低污染微粒之擴散。並依現場輻射防護人員管制作業，以確保輻射安全，所有空氣輻射監測器皆須通過定期校驗，並參考操作程序書進行管制，亦須定期保養或更換濾紙以確保儀器可正常使用。廢氣監測方法除以廠房內連續空浮監測器進行偵測及進行空氣取樣分析外，各廢氣排放至環境之排放口亦設有具警報功能之流程輻射監測器以執行連續監測，並設有取樣器可進行取樣分析並統計排放量，以掌握放射性物質活度。

核二廠除役期間產生之放射性廢氣經適當地收集、輸送及處理後須符合「游離輻射防護安全標準」[11]規定，排放之廢氣須經過空氣過濾設備及氣體流程輻射監測器。所有排放廢氣之總 $\beta$ 、 $\gamma$ 活度與微粒活度均有紀錄。相關管控措施參考核二廠之標準作業程序書規定辦理。除役期間廢氣排放管控參考核二廠營運程序書「放射性廢氣、廢水外釋管制程序」[15]，如排放濃度超過該標準時，即依規定計算排放活度，並驗證對一般人造成之年累積劑量仍符合「游離輻射防護安全標準」[11]第十二條規定。

本公司放射試驗室負責執行核電廠外環境輻射偵測業務，每週、每月、每季定期採取環境試樣進行放射性核種分析，並執行全天候 24 小時全程自動化監測環境輻射劑量率。

## (二) 除役期間放射性廢液處理規劃

除役期間放射性無機液體廢棄物處理技術，包括酸鹼中和、化學沉降、過濾、離子交換、蒸發濃縮及固化等常見而具可行性之技術。對於除役期間產生放射性無機廢液之處理規劃，廢液處理系統可由既有運轉期間廢液處理設施負擔，處理廢液產生之過濾殘渣、爐水淨化殘渣、濃縮廢漿、清槽污泥、除污廢液等濕性污泥，集中後採用水泥固化後貯存。有機液體廢棄物處理技術包括：焚化、水解、相分離、蒸餾、酸化分解、濕式氧化、電化學氧化、超臨界水氧化、光化學氧化、固化等處理方法。以下將針對除役期間放射性廢液處理，包括放射性廢液產生來源、收集與輸送、處理方法、排放標準、監測方法及排放管控等，提出相關規劃與管控措施[16-20]。

## 1. 廢液來源與組成

核二廠除役期間放射性廢液產生來源主要可分為二大類：(1)核電廠運轉之廢液：主要來源包括地面洩水(Floor Drain)、設備洩水(Equipment Drain)、洗衣(輻射防護衣)設備排水、凝結水和反應器給水系統洩水、實驗室排水、沖洗或再生離子交換器之排水、爐水淨化系統或廢水處理系統、過濾設備逆洗(Backwash)排水、廠房空調排水；(2)除役作業產生之放射性廢液：主要來源為除污作業產生的廢液、焚化爐洗滌塔廢液及牆面/地面清洗、切割作業所產生之二次廢水。

除役期間因核反應器停機並移除燃料束及冷卻水後，產生放射性廢液之熱源及污染源已消失，所以正常原有運轉時的放射性廢液不會再產生，但由於系統在進行系統除污或拆除前，必須將部分或所有系統內原有因運轉所需之液體排出，因此，除役期間產生廢液主要來源為設備洩水(如反應器冷卻水)、系統除污、組件除污產生之二次廢液。除污之二次廢液可能含有化學物質，若其總有機碳濃度/pH 值過高，應進行前處理後才由核二廠之廢液處理系統進行接收處理。

## 2. 廢液收集與輸送

核二廠廢液處理程序的第一個步驟是將廢液先收集到分佈在電廠各角落的集水坑，再以泵經管路傳送到廢液處理系統的收集槽中，在此靜置、調和並等待處理，處理之原則不外乎移除水中之懸浮性固體及溶解性離子而達到淨化水質的目的。

液體廢料收集系統包括集水坑(Sumps)及水泵。參考核二廠營運程序書「放射性廢液查漏程序」，核二廠運轉時放射性廢液來源，可概分為二大類。第一類為來自全廠各廢水集水坑(共有 27 個)，第二類為廢水集水坑外其他來源。液體廢料收集系統各集水坑設有兩台水泵，由水位開關自動起動或停止水泵，將廢水送往收集槽作進一步處理。核二廠廢液收集之集水坑示意圖如圖 8-10 所示。

因核二廠的廢液收集系統已建置相當完善，利用既有廢液收集系統，除了可以縮短除役時程外也可以減少除役成本；所以，在除役期間可將會產生廢液的設備建置在原本的廢液收集系統附近，並將其排放系統與現有廢液收集系統做連結，如組件的化學除污設備即可建置於汽機廠房，以利廢液的收集及後續的處理。

### 3. 廢液處理方法

放射性廢液之處理方法，包括化學沉降法(Chemical Precipitation)、過濾(Filtration)、蒸發(Evaporization)及離子交換(Ion Exchange)技術，對於數量較少之有機廢液(如油類、廢溶劑萃取劑、閃爍劑等)一般採取焚化方式進行處理。

#### (1) 化學沉降法

放射性廢液中，含放射性核種的氫氧化物、碳酸鹽、磷酸鹽等化合物大多為不溶性之高濃度鹽類，可於放射性廢液中加入凝聚劑，通過化學反應後，形成細小分散狀態的膠體顆粒；各細小的膠體顆粒逐漸凝聚形成大的絮團而逐漸沉澱，絮團的沉澱過程中，會有物理吸附、化學吸附或是生成晶體，進而將放射性廢液中的離子態或是膠狀態的放射性核種一起沉澱，而達到除去核種目的。化學沉降法之成效取決於攪拌速度、添加凝聚劑、膠體凝聚、廢水 pH 值、沉澱、靜置、過濾等條件，最後，分離下層沉降污泥與上層澄清液，進行後續沉降污泥濃縮及固化。

#### (2) 過濾

此技術是用來去除廢液中所含懸浮固體物的過程，屬於物理性的固液分離技術，腐蝕產物如 Co-58、Co-60、Cr-51、Ni-58、Fe-59 及 Mn-54 等核種可能以微粒狀態懸浮於廢水，故移除懸浮固體不但可以減輕後處理(蒸發器或除礦器)的負荷，同時兼具去除放射性核種功能。過濾設備視情況可單獨使用或作為前處理設備，並依放射性廢液特性選擇適合孔徑規格與材質。

### (3) 蒸發

利用蒸發器如鍋爐或加熱管等加熱廢液使其達到沸騰狀態，藉由蒸發作用移除水、揮發性物質，因而使廢液中非揮發性物質達到濃縮之效果。蒸發程序所殘留於蒸發器內的高濃度廢液即稱濃縮廢漿 (Concentrated Sludge)，須再經過固化處理，以利後續運輸、貯存及最終處置。

### (4) 離子交換

放射性物質如以溶解狀態存在於溶液中，可透過離子交換器或稱除礦器 (Demineralizer) 移除溶液中的離子。離子交換材料包含無機及有機二種，其中無機交換材料如天然的黏土、沸石、鈦鹽之氧化物或氫氧化物、過渡金屬六氰合鐵 (Hexacyanoferrate) 等皆可以用來移除銫、鋇或阿伐放射性核種。有機交換材料包含強/弱酸型陽離子交換樹脂、強/弱鹼型陰離子交換樹脂等。操作離子交換樹脂床應注意樹脂之交換能力，可藉由取樣分析、線上儀器分析 (如矽土、總有機碳、濁度、導電率) 或自動警示裝置等，提醒操作人員進行更換。

核二廠放射性液體廢料處理系統其程序主要為收集、處理、回收或排放放射性廢水，其處理方式是以分批式 (Batch) 收集與處理，其處理方式需依其化學性質、放射性、導電度等性質決定，但由於廢液的成份通常較複雜，往往需要經過多道的處理程序，最後，再分析其放射性和化學成份，才能決定收回再用或稀釋後排釋廠外。液體廢棄物處理原則分類如下：

- (1) 低放射性和高導電率廢水 (如地面洩水系統之污水)，或高放射性與低導電率廢水 (如機件洩水收集系統之水)，經過濾、除礦、儲存後，視取樣結果送回系統或排棄於大海。
- (2) 高放射性、高導電率廢水 (如化學廢液)，經濃縮廢液處理系統後之低導電率凝結水送至廢液收集槽再處理，濃縮後之濃漿送至固體廢料處理系統，濃縮後固化，併入固體廢棄物處理。
- (3) 清潔劑廢液 (如洗衣廢水)，經過濾處理後排放。

核二廠廢料處理系統流程如圖 8-11 所示，其中放射性廢液處理系統包含以下系統：

(1) 液體廢料儲存與處理系統(Storage and Processing System)

液體廢料儲存與處理系統的主要功能是將收集槽的廢水先經過濾設備及紫外線處理器降解總有機碳(Total Organic Carbon, TOC)後，再經混合床除礦器處理，然後送至取樣槽。取樣化驗後，若符合廢液排放標準，可進行排放；若不符合廢液排放標準，則利用移動式廢液處理設備進行再循環處理，或送至廢水收集槽或調節槽進行再處理，其程序如圖 8-12 所示。除役期間廢液已無須回收至系統使用，將依實際情況評估是否須進行前處理，以避免增加二次廢棄物產量，並重新針對廢液處理系統之廢液接收標準進行調整，以符合除役實際需求。

(2) 化學廢料濃縮系統(Chemical Radwaste Concentration System)

化學廢料濃縮系統用來處理化學廢液，其處理後的濃漿最後將送至固化系統與水泥混合，裝入桶中成為固體廢棄物。此系統產生之濃漿通常含有很多不具揮發性物質，但因無經濟價值，所以，不以離子交換樹脂來做純化回收處理。

(3) 清潔劑廢液系統(Detergent Drain System)

清潔劑廢液主要來源(收集各種清潔劑廢液)：洗衣廢水、工作人員除污水、除污站洩水、各種清洗設備排水，其水質通常為低放射性活度，收集相當數量時，經過濾、取樣後(經取樣槽排放管)，排洩至排水道。作業方法是一槽收集，經活性炭過濾處理至另一取樣槽分析排洩，放射性強度若太高時，經由活性炭或樹脂處理，降低活性符合排放法規再予排放，其程序如圖 8-13。

(4) 廢渣濃縮系統(Sludge Concentration System)及廢樹脂系統(Spent Resin System)

廢渣濃縮系統功能為收集和儲存來自爐水淨化系統、燃料池冷卻與淨化系統、廢棄物過濾式除礦器的離子交換樹脂，以及過濾媒介混合物(Powdex)。廢樹脂系統為收集凝結水除礦器或液體廢料系統混合床

除礦器的廢樹脂，這些樹脂因為有機污染(Organic Fouling)或交換能力降低不堪使用，具有放射性，係送至固化系統脫水裝桶暫存。

#### (5) 雜項廢液處理系統(M.L.R Processing System)

雜項廢液是指來自一、二號機汽機廠房含油及一般廢液集水坑、一號機柴油機房廢液集水坑、二號機柴油機房廢液集水坑、輔助鍋爐間廢液集水坑、五號柴油機房廢液集水坑、輔助鍋爐燃油槽區集水坑、輔助鍋爐燃油備用槽區集水坑，雜項堰牆區域集水坑、經各集水坑之泵送至雜項廢液處理廠房集水坑等廢水。雜項廢液廠房集水坑水位達高水位時即自動起動集水坑泵，將池內廢液經傾斜浪板油水分離器流至調節槽。收集於調節槽中的廢液是以批次處理，先泵至加壓空氣上浮槽以除去廢液中之懸浮微粒及乳化油，送至除濁水槽再泵至取樣槽。化學技術人員由取樣槽之取樣口取樣分析，水質及放射活性符合排放標準，即可進行排放，其程序如圖 8-14。

設備洩水的處理方式則可參考核二廠大修時，設備洩水的處理方式辦理，係導入核二廠現有廢液處理系統內進行處理，並視需求進行預處理。由於系統除污的廢液通常具有腐蝕性化學物質、可溶性金屬離子及放射性核種，所以，會先經專用之廢液處理系統(通常由系統除污包商提供)，一般是以離子交換樹脂來進行處理，其廢液在經酸鹼中和等前處理後，再送現有廢液處理系統進行後續的處理。

考量組件除污廢液之組成、放射性活度及除污試劑成分，因此，除役期間產生之廢液可先進行分類後，再由核二廠之廢液處理系統進行處理。例如，組件化學除污所產生的低活度除污廢液，因含有金屬離子，可輸送至高導電度集水坑或槽；而高壓水組件除污中所產生之廢液主要為水，且大部分活度較低，可先過濾去除金屬碎屑後，輸送至設備及地面洩水集水坑或槽。不過，以上原則仍須視每批次廢液個別特性加以調配，最後，均輸送至核二廠現有廢液處理系統進行處理，並視廢液處理之需求，可在輸送進入廢液處理系統前，先進行預處理。另外，針對除污作業產生之含有機成分之少量廢液，可以導入至核二廠 TOC 紫外線照射反應器進行處理，

也可利用吸水材料混合後焚化，或採取吸附或化學氧化方式進行預處理後，將剩下之無機廢液導入廢液處理廠進行後續處理。

既有核二廠廢液處理系統可繼續留用於除役期間進行廢液處理，可依需求先進行預處理，配合除役期間除污及拆除作業產生之廢液，去除可溶性金屬離子、有機物質、非溶性顆粒等污染物，以離子交換、吸附、過濾或其他可行之程序處理。此外，除役中之系統除污、大型物件拆除切割、組件除污等工作，皆會產生廢液；因此，本公司規劃待核二廠系統設備組件拆除、切割及除污程序等作業完成後，才可以拆除廢液處理系統。如拆除後仍有少量廢液產生時，則可採用移動式處理設備進行後續處理。為避免產生額外二次廢棄物，廢液處理系統於拆除後，以切割裝桶方式處理，必要時可搭配超高壓壓縮機處理。

後續保留區內所產生之廢液，則輸送至新設廢液處理系統進行處理。新設廢液處理系統規劃於除役過渡階段進行建造，並設置於保留區內之新建低放射性廢棄物貯存庫內，以利處理保留區產生之廢液。新設廢液處理系統用於處理保留區內設施產生之廢水，如一般廢水、空調冷凝水、作業廢水或洗衣廢液等，主要以調節、沉降、過濾、吸附、離子交換、生物處理或蒸發濃縮等單元進行處理，以符合法規標準。核二廠之廢水係排放至循環海水排水渠道，利用循環海水稀釋排放至海洋。然而核二廠除役期間已無循環海水可利用，因此，規劃以緊急海水系統引進海水，以稀釋方式處理排放。

#### 4. 廢液排放標準

考量未經處理之放射性廢液會對人員、周圍環境及生態造成危害，故放射性廢液必須經過處理，以去除大部分放射性成份及有害物質，達到廢液排放標準，方可排放至環境中，以達到合理抑低排放原則。

處理後之廢液欲排放，必須符合相關法規，包括「游離輻射防護安全標準」[11]，以及環保署所規定之「放流水標準」[21]暨水污染防治相關法規。核電廠各排放口釋放之廢液放射性濃度，須符合「游離輻射防護安全標準」

[11]第 13 條規定，設施經營者得以下列兩款之一方式證明其輻射作業符合前條之規定。第一，依附表三或模式計算關鍵群體中個人所接受之劑量，確認一般人所接受之劑量符合前條劑量限度。第二，輻射工作場所排放含放射性物質之廢氣或廢水，造成邊界之空氣中及水中之放射性核種年平均濃度不超過附表四之二規定，且對輻射工作場所外地區中一般人體外曝露造成之劑量，於一小時內不超過 0.02 mSv，一年內不超過 0.5 mSv。

為確保核二廠除役產生廢液之放射性核種濃度符合「游離輻射防護安全標準」[11]，對於排放之廢水均予以取樣、分析、記錄與統計，並於各排放口設置具有警報功能之流程輻射監測器，以確實掌握放射性廢水的實際排放濃度。另依廢水排放實績，利用計算模式進行廠外民眾輻射劑量評估，以證明放射性廢水排放造成之廠外民眾輻射劑量符合法規。

## 5. 廢液監測方法及排放管控

核二廠定期於放流口取樣分析檢測，其取樣分析程序參考核二廠營運程序書「液體樣品取樣分析程序」操作。檢測結果須符合相關法規，包括「游離輻射防護安全標準」[11]，以及環保署所規定之法規「放流水標準」[21]暨水污染防治相關法規。

核二廠除役期間產生之放射性廢液須符合「游離輻射防護安全標準」[11]規定之放射性廢液排放標準始可排放，且皆應符合核二廠針對廢液處理後之相關管控標準作業程序書(SOP)、放射性廢棄物外釋之相關作業規定、緊急應變措施、緊急通報程序及相關標準作業程序書規定辦理。

### 三、結語

在核二廠除役初期因系統中仍有運轉期間殘留之惰性氣體與碘等分裂產物，故預期此階段放射性氣、液體排放核種組成將與運轉期間相當，但因反應器內已無核分裂反應，分裂產物及活化產物活度必然隨時間逐漸衰減而大幅降低。

當進入除役拆廠階段，放射性粉塵的主要來源為拆除、切割設施產生之煙霧，為避免放射性粉塵產生污染擴大可採取之措施包括：(1)事先採取適當之除污方式以降低欲拆除之核設施污染程度；(2)先期建置隔離帳篷；(3)靈活使用污染隔離墊及使用局部排氣過濾設備等方式。此外，可運用廠房既存的隔牆、過濾設備、通風等設備，且廠房內照明、負壓、空調、廢棄物處理、輻射監測等系統皆按照相關作業規定進行運作，利用既有的 HEPA 過濾設備可有效減少放射性廢氣的排放，在廠房內進行拆除及除污工作時，維持廠房內通風系統及輻射監測系統正常運作，並應視情況設置臨時通風系統及架設移動式輻射偵測器、連續式空浮監測器等方式，作為緊急廢氣處理措施，以防止異常狀況發生。

放射性廢液來源為(1)無機廢液：系統/組件除污作業所產生之除污廢液、牆面/地面清洗與槽溢流等所造成之地面洩水、切割作業所產生之二次廢水、放射化學分析實驗所產生之實驗室廢液、廢水處理系統過濾設備與離子交換樹脂之逆洗廢液；(2)有機廢液：系統除污作業所產生之有機酸與螯合劑、放射化學分析實驗所產生之有機溶劑、系統泵使用後產生之廢油(例如：機油、潤滑油)及輻射防護衣物與除污工具之清洗劑等。針對除役期間產生之廢液，為降低除役成本及費用，參考國外核電廠案例，除役期間產生之廢液沿用核二廠廠內既有的廢液處理系統處理，妥善處理廢液之水質，並達到放射性廢棄物減量之目的。

核二廠除役期間廢氣及廢液的處理主要是利用既有之廢氣及廢液的處理系統，以有效縮短除役時程及減少除役成本，直至除役拆廠階段之後期才進行既有處理系統的拆除。期間相關管控措施亦必須符合核二廠相關作業程序規定，經過處理後之放射性廢氣、廢液應符合我國「游離輻射防護安全標準」[11]及環保署所規定「放流水標準」[21]暨水污染防治相關法規。

#### 四、參考文獻

1. Technology, Safety and Costs of Decommissioning a Reference Boiling. Water Reactor Power Station, NUREG/CR-0672.
2. IAEA, Methods for the Minimization of Radioactive Waste from Decontamination and Decommissioning of Nuclear Facility, IAEA Technical Series No. 401, Vienna, 2001.
3. EPRI, Groundwater and Soil Remediation Guidelines for Nuclear Power Plants, Public Edition, Technical Report, 2011.
4. IAEA, Decommissioning of Nuclear Facilities Decontamination Technologies, 2006
5. EPRI, Evaluation of the Decontamination of the Reactor Coolant Systems at Maine Yankee and Connecticut Yankee, EPRI Report TR-112092, Final Report, 1999.
6. 台灣電力公司核一廠，Chemical Decontamination Service for Taiwan Power Company's Chinshan Nuclear Power Station Unit No.1 and 2, 2000.
7. 台灣電力公司核二廠，Decontamination of the Reactor Recirculation Loops A and B and the Reactor Water Clean Up System at Kuosheng Unit 1 in September/October 2001 with the CORD<sup>®</sup>UV Process and the AMDA<sup>®</sup> Equipment, 2001.
8. NEA, Decontamination Techniques Used in Decommissioning Activities, 1998.
9. IAEA, State-of-the-Art Technology for Decontamination and Dismantling of Nuclear Facilities, IAEA Technical Series No. 395, Vienna, 1999.
10. EPA, Technology Reference Guide for Radiologically Contaminated Surfaces, EPA-402-R-06-003, 2006.
11. 中華民國行政院原子能委員會，「游離輻射防護安全標準」，94年12月30日。
12. 陳定海，「BWR 放射性廢棄物處理(核二廠廢氣系統簡介)」，97年11月13日。
13. 尤坤山，「放射性廢氣處理」，核二廠訓練課程資料。
14. 中華民國，「游離輻射防護法」，91年1月30日。
15. 台灣電力公司核二廠，“核二廠營運程序書 913「放射性廢氣、廢水外釋管制程序程序」”，105年6月17日。
16. 陳定海，「放射性廢棄物處理系統」，105年1月。

17. 核二廠模擬中心，「放射性廢棄物處理系統」，第 11 期運轉技術班資料，105 年 7 月。
18. 台灣電力公司核二廠，“核二廠營運程序書 383「液體廢料儲存與處理系統程序」”，104 年 7 月 28 日。
19. 台灣電力公司核二廠，“核二廠營運程序書 385「廢渣濃縮廢樹脂及清潔劑排洩系統程序」”，104 年 7 月 28 日。
20. 台灣電力公司核二廠，“核二廠營運程序書 369「雜項廢液處理系統操作程序」”，105 年 11 月 22 日。
21. 中華民國，「放流水標準」，106 年 12 月 25 日。

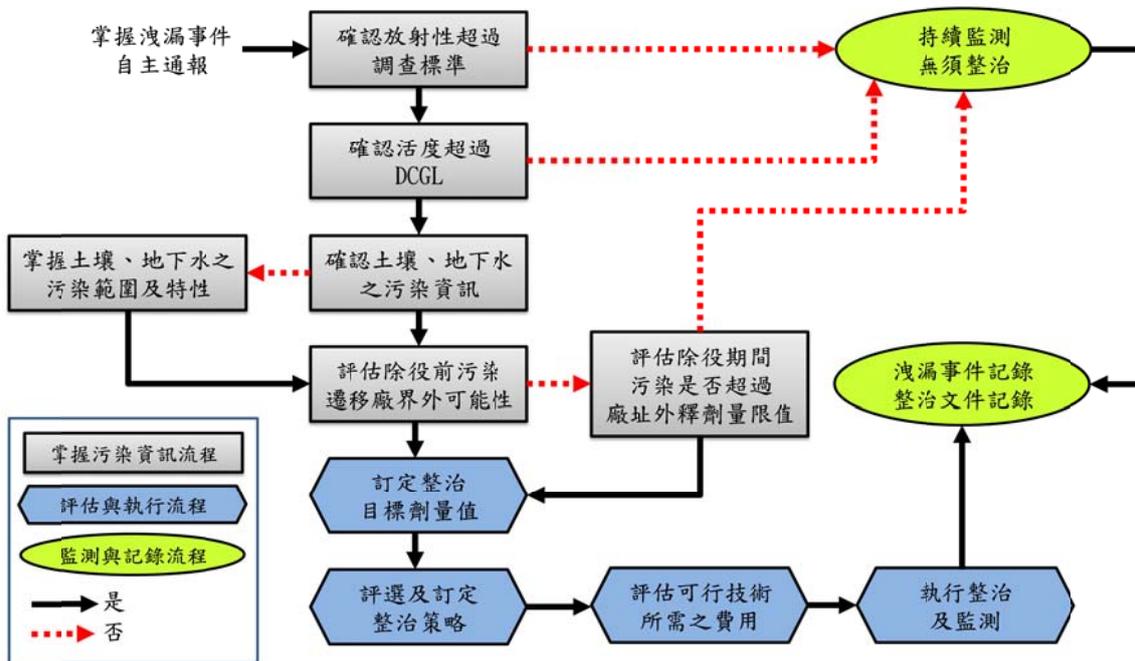


圖 8-1 核二廠廠址環境整治之除污程序

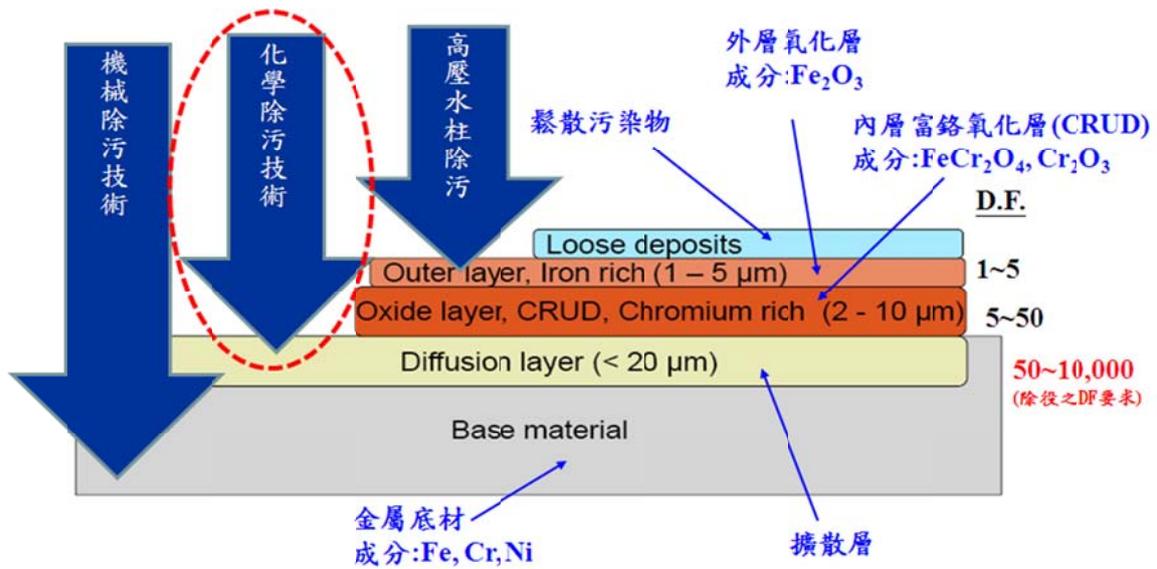


圖 8-2 不同金屬結構層與其適合之除污技術

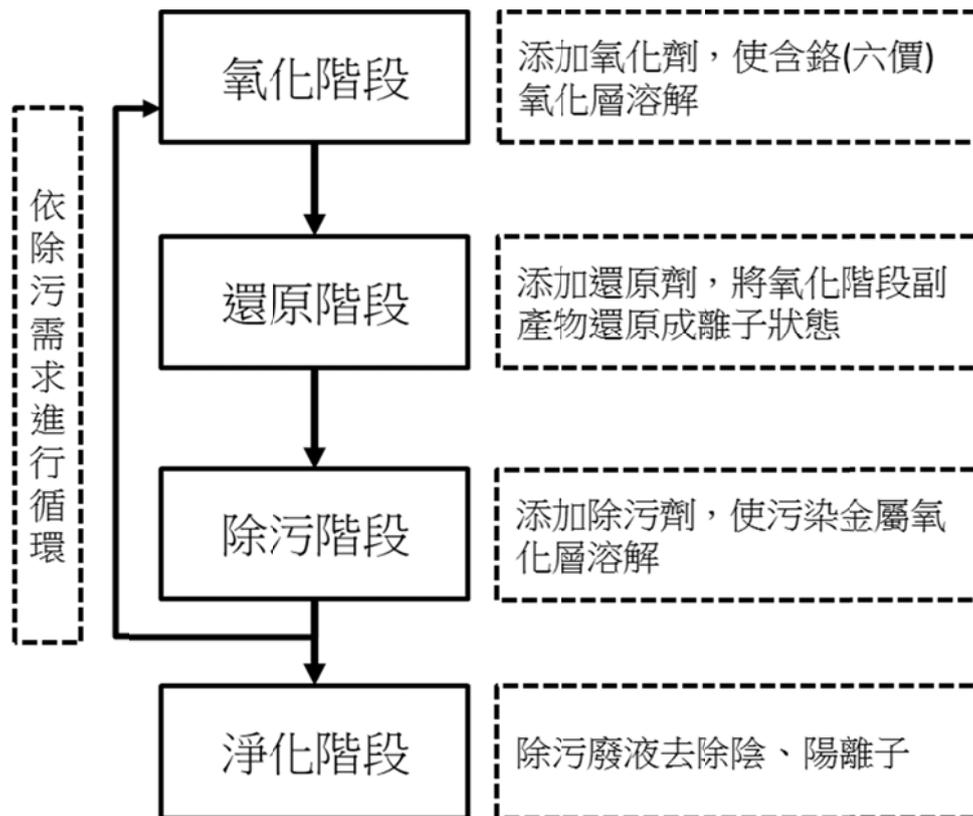


圖 8-3 系統除污流程圖

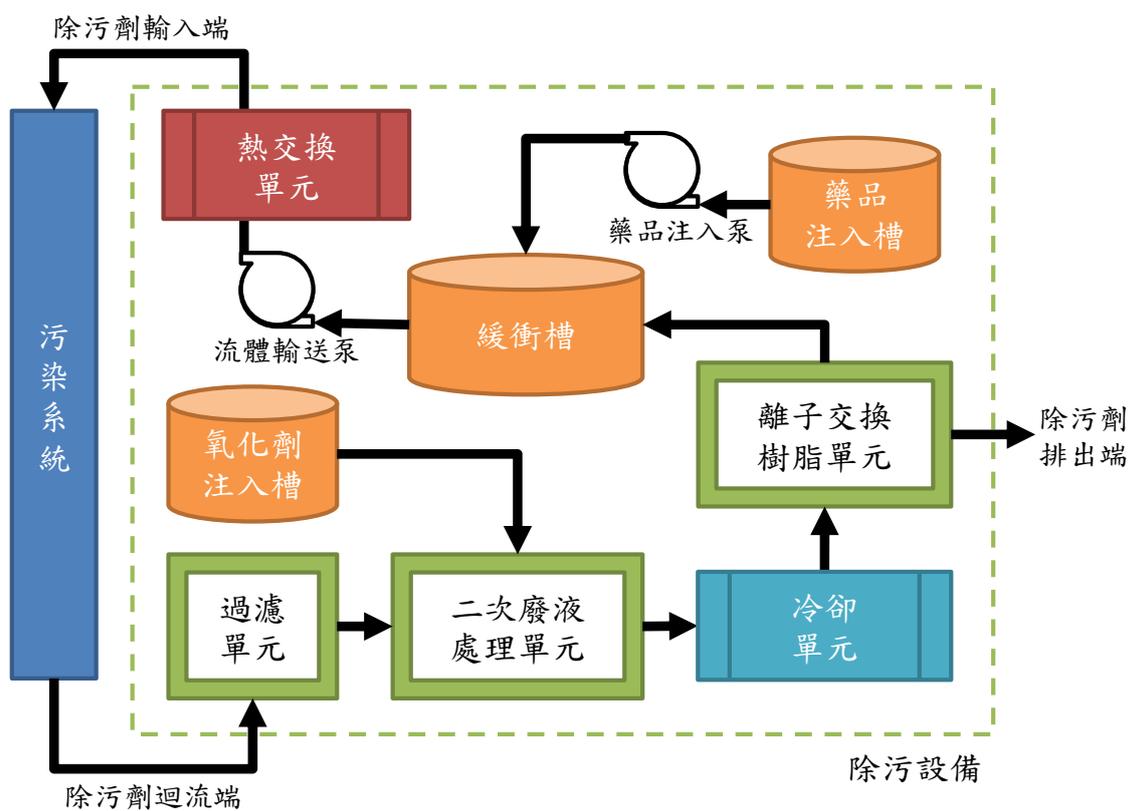


圖 8-4 化學除污設備流程示意圖

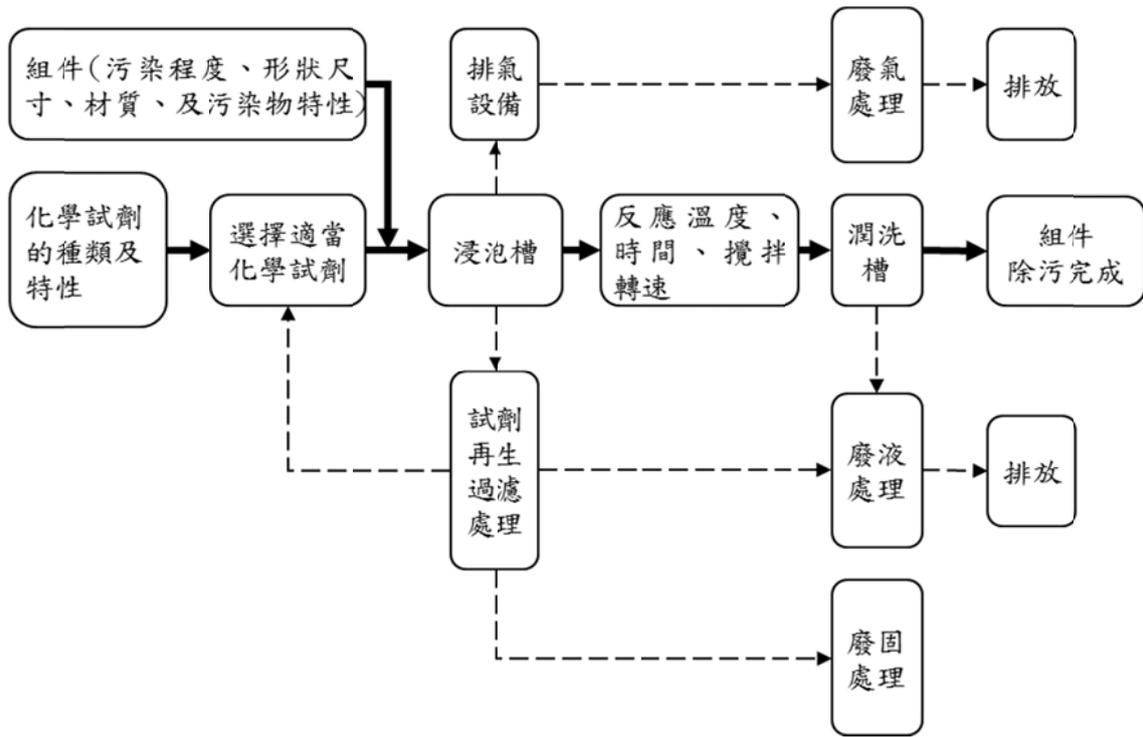


圖 8-5 核二廠金屬類組件之化學除污作業流程示意圖

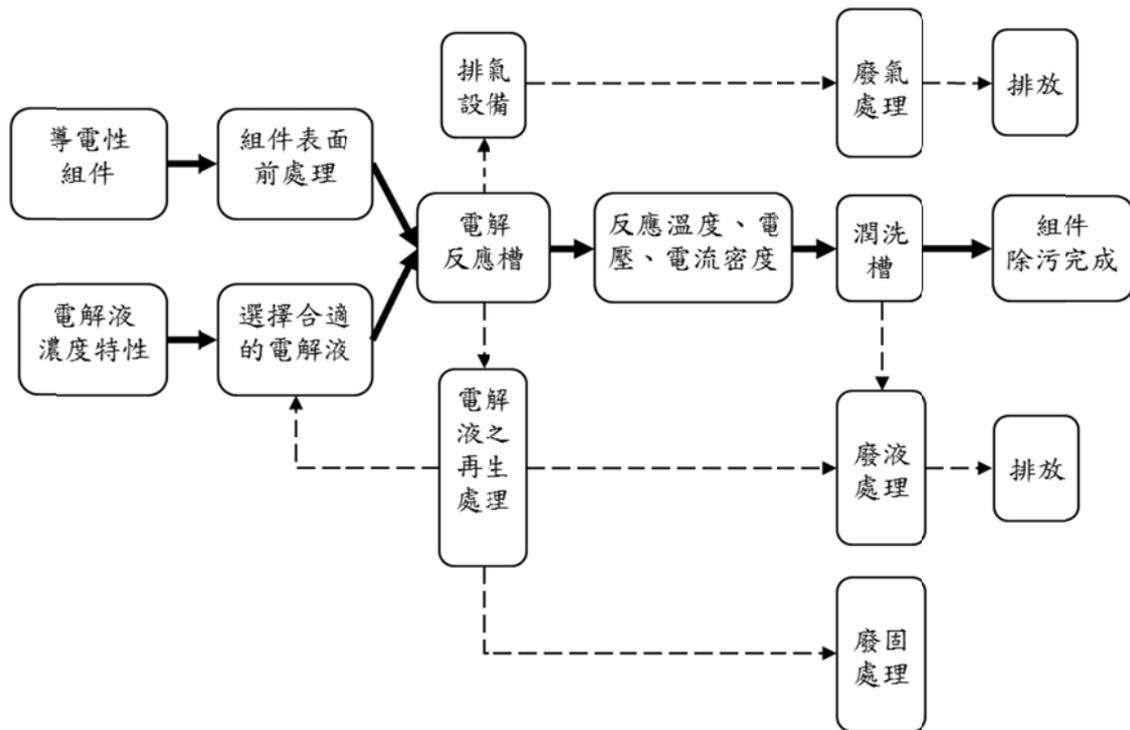


圖 8-6 核二廠金屬類組件之電化學除污作業流程示意圖

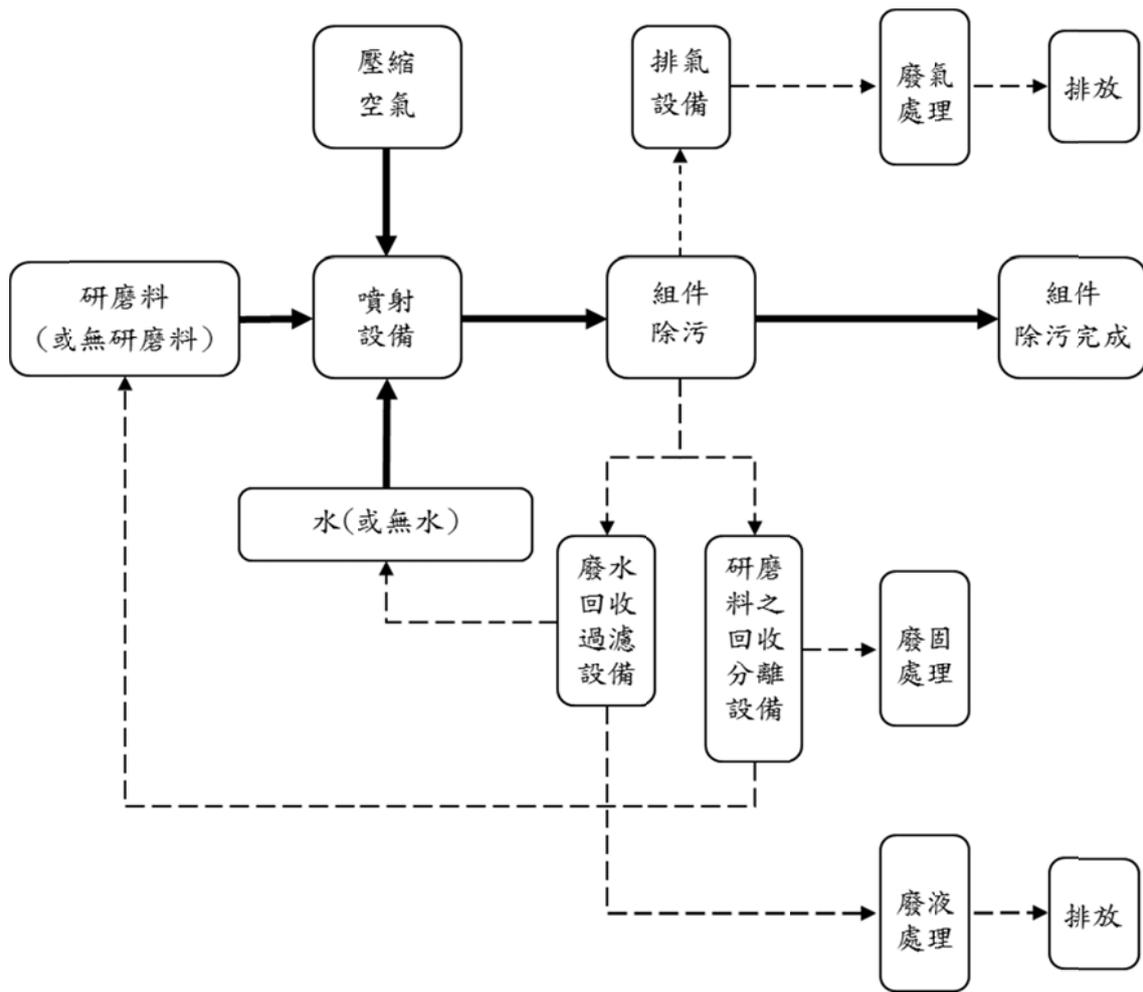


圖 8-7 核二廠金屬類組件之機械除污作業流程示意圖

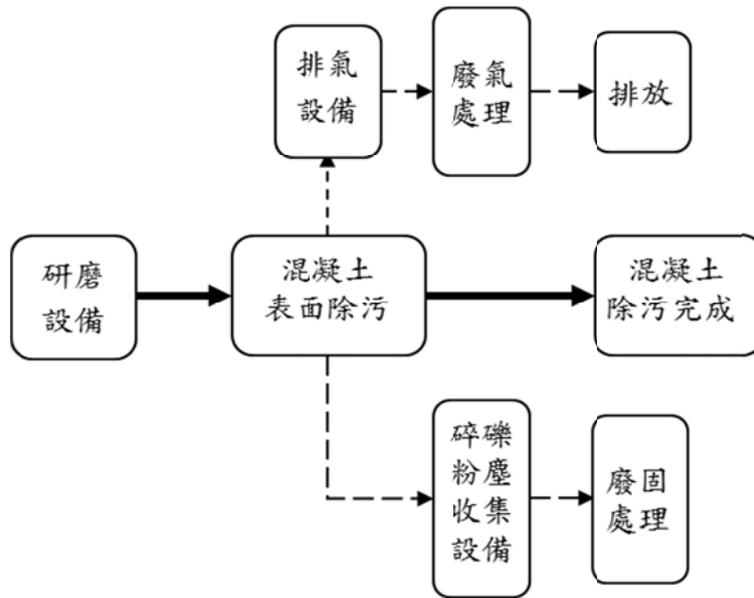


圖 8-8 核二廠結構混凝土之機械除污作業流程示意圖

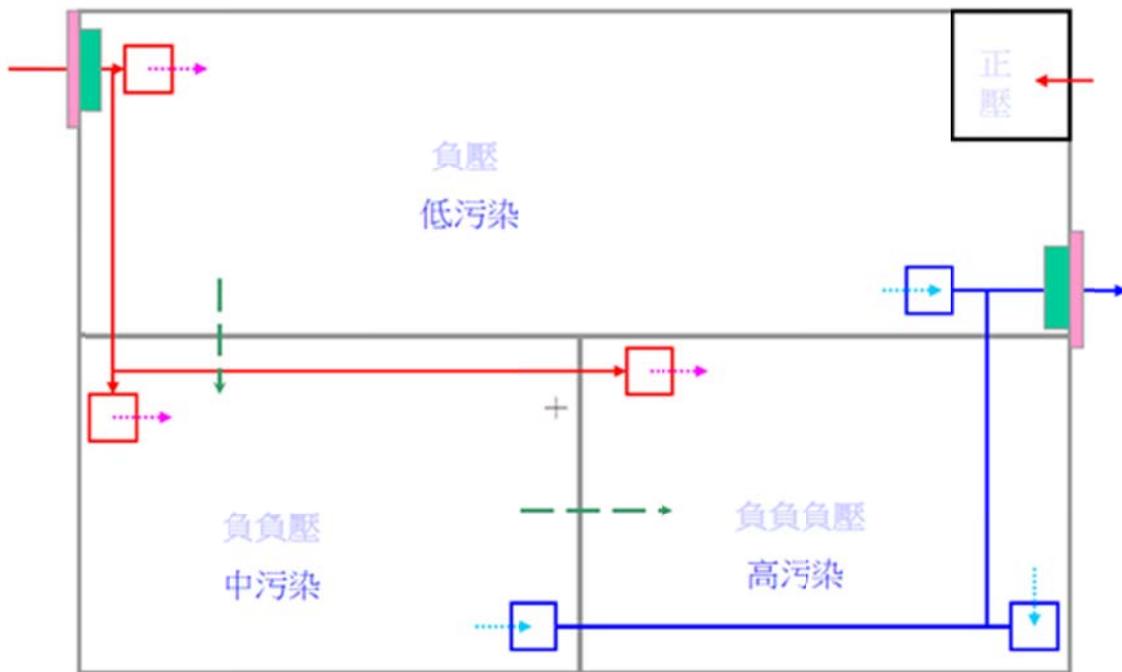


圖 8-9 HVAC 通風架構圖

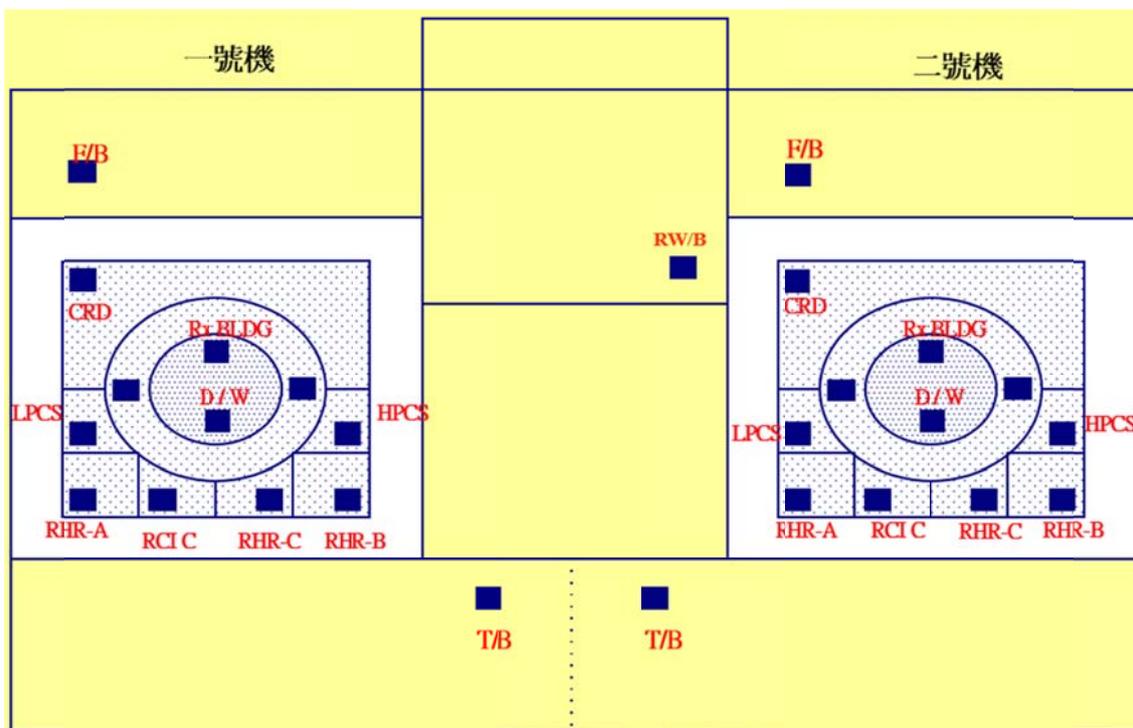
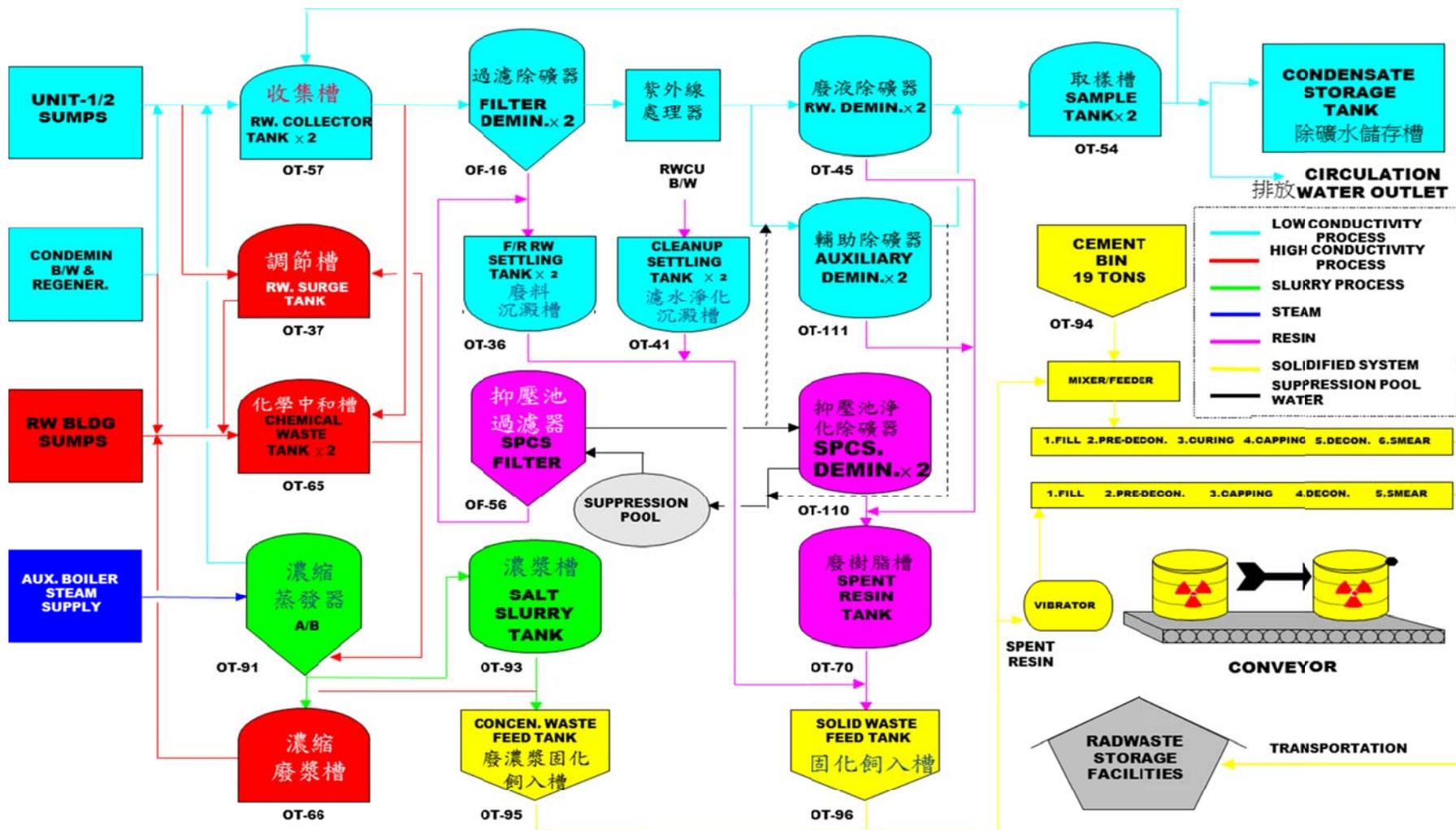


圖 8-10 核二廠廢液收集集水坑示意圖



**RADWASTE TREATMENT SYSTEM FLOW CHART**

圖 8-11 核二廠廢料處理系統流程

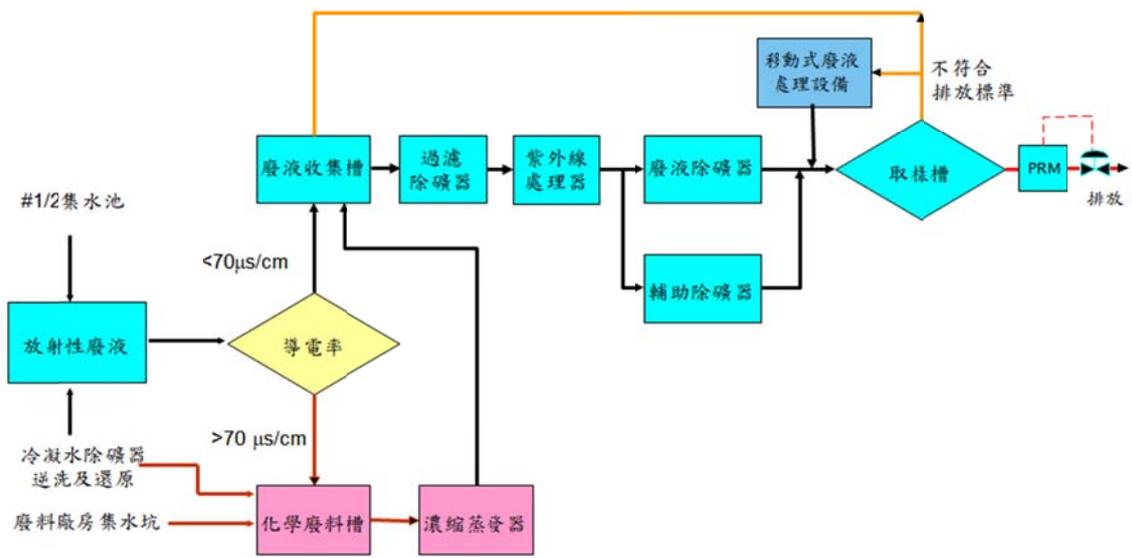


圖 8-12 核二廠廢液處理系統流程圖

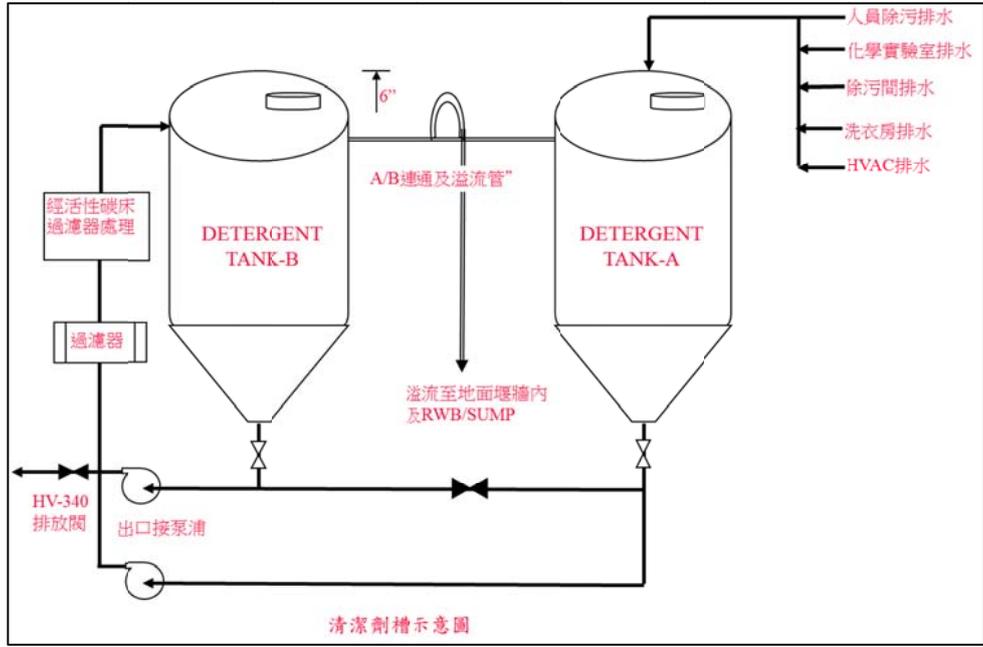


圖 8-13 清潔劑廢液系統

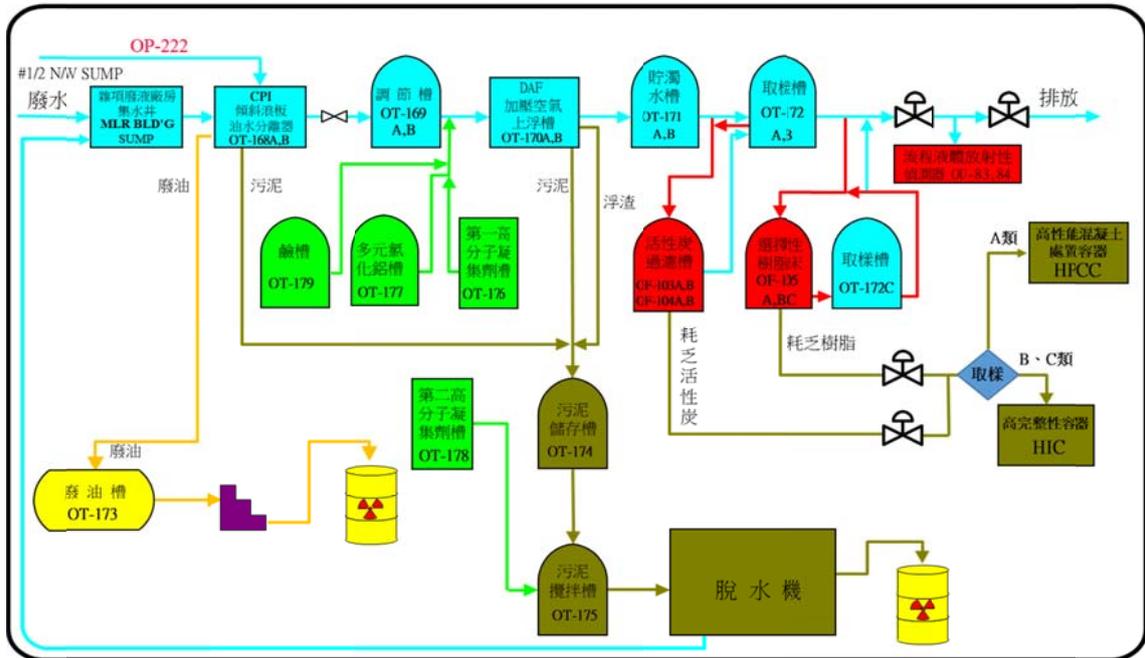


圖 8-14 雜項廢液處理系統

表 8-1 核能電廠拆除前系統化學除污之案例

核電廠	國家	系統化學除污技術	除污因子
Big Rock Point	美國	EPRI DFD 程序	27
Connecticut Yankee	美國	HP/CORD D UV 程序	15.9
Maine Yankee	美國	EPRI DFD 程序	31.5
Trojan	美國	EPRI DFD 程序	RHR Hx=66
Barsebäck	瑞典	HP/CORD D UV 程序	Unit 1=93 Unit 2=286
Jose Cabrera	西班牙	EPRI DFD 程序	RCS=29.4 Aux=33.1
Obrigheim	德國	HP/CORD D UV 程序	625
Stade	德國	HP/CORD D UV 程序	58
BR3	比利時	HP/CORD D UV 程序	10
普賢	日本	HOP 程序	RR Loop A=10.6 RR Loop B=6.9
濱岡	日本	T-OZON 程序	準備中 (2015-2022)

表 8-2 金屬組件之除污技術之比較

特性\技術	化學除污	電化學除污	機械除污
適用性	含有不易接觸內表面或幾何型態複雜之金屬組件	具導電性之金屬管路	平面型態且無死角之金屬組件
優點	可透過除污劑配方、溫度調整除污因子	可透過溫度、電壓、電流控制除污因子	速度快且設備簡易，二次廢棄物體積較小
缺點	產生大量二次廢液須進行處理	電極須清理或更換、耗電量大、機制複雜	無法針對死角處進行處理

表 8-3 除污方式要點彙整

除污範圍	廠址環境	系統	組件	結構
範圍說明	土壤/地下水	反應器冷卻水再循環系統、餘熱移除系統及爐水淨化系統或反應器壓力槽。	熱交換器、汽機組件、泵、桶槽、閥件、管件、鋼材、電纜槽、電力組件、通風元件及雜項製程組件。	核二廠受污染建物、一號機及二號機反應器廠房、輔助廠房、廢料處理廠房、燃料廠房及汽機廠房之結構、牆面、地面及天花板等混凝土材質。
除污規劃	<p>進行除役作業時，將持續對影響電廠輻射狀態之資料進行收集與調查。</p> <p>土壤： 若偵測到受污染之土壤，將進行移除，且以放射性廢棄物之方式處理，並進行減量、分類及除污。</p> <p>土壤除污技術如下： (1) 電動力學除污法 (2) 清洗法 (3) 高溫處理法</p> <p>地下水： 若偵測到地下水有污染時，開挖取樣井及監測，以界定污染之程度，並確認污染物於土層中之垂直分佈及傳輸特性、建立污染傳輸模式，進一步</p>	<p>進行系統化學除污以移除系統內部及管件表面之放射性污染物質。將於除役過渡階段執行停機後現場輻射偵測，以進一步確認應進行除污系統之範圍。系統除污技術可參考CORD D UV、DFD、HOP、T-OZON 等之國際案例，或透過化學試劑以一次性或循環式進行，以達到需要之除污效果。</p>	<p>金屬材質廢棄物，規劃採用</p> <p>(1) 化學除污 選取適當的化學藥劑，注入組件化學除污系統之浸泡槽，將拆除或切割之金屬組件置入浸泡槽中施以攪拌及溫控。將金屬組件以清水浸泡及人工潤(刷)洗，即可完成除污程序</p> <p>(2) 電化學除污 以浸泡(Soaking)方式處理，需要兩組不鏽鋼製的桶槽，其中一個桶槽盛裝電解液(通常為磷酸、硫酸)、電極及待除污組件。另一個桶槽則盛裝淨水，可供除污後組件潤洗。</p> <p>(3) 機械除污技術(乾/濕式研磨噴砂技術、高壓</p>	<p>結構混凝土材質，規劃採用機械除污技術。當建物結構進行除污時，規劃採取機械式表面移除技術。本公司規劃採取簡易的人力手動作業程序執行，用來清潔少量受污染的油漆表面或平整表面，例如刷除、沖洗、擦除。針對結構混凝土較深之污染，本公司規劃採取具破壞性之機械除污程序包含研磨、破碎、鑽洞、高壓水噴射等技術，並考量污染程度、場地大小、除污面積、刨除深度、表面幾何結構及位置，選擇合適的手持型、推車型、遙控型等設</p>

除污範圍	廠址環境	系統	組件	結構
	<p>確定污染範圍。</p> <p>地下水除污技術如下：</p> <p>(1)抽出法</p> <p>(2)抽出再處理法</p> <p>(3)覆蓋封頂技術</p> <p>(4)工程包封法</p>		<p>水柱)</p> <p>濕式噴砂研磨系統須合併使用水、磨料及壓縮空氣，於防漏的不鏽鋼隔離區內執行除污作業。乾式研磨噴砂技術，通常以壓縮空氣或噴射渦輪設備帶動研磨材料，對表面進行快速噴射研磨料顆粒的除污效果顯著。高壓水除污技術，以高壓噴射水強力沖洗污染表面。可溶性的污染物會溶解，而鬆散未固著的顆粒則藉著水而被帶走。</p>	備。
預期效果	使全廠區輻射偵測值符合廠址輻射劑量非限制性使用標準。	降低除役工作人員於進行系統拆除作業時之輻射曝露。根據 IAEA 之建議，針對除役階段之系統除污，應選擇除污效果較好或除污因子較高之除污技術，DF 值的要求至少須大於 10。	組件除污之主要目的為降低其污染程度，以達到廢棄物減量、再利用或釋出之目標，以及降低廢棄物暫存、處置之數量及成本。	機械式表面移除技術可除去不同深度的表面污染物，使剩餘之混凝土結構成為可釋出或非污染之廢棄物。
二次廢棄物	抽取之污水、清洗後之污水、廢棄過濾裝置、核種吸附劑或樹脂。	離子交換樹脂除污二次廢液過濾耗材。	化學廢液、廢水、廢研磨料、碎屑粉塵。	粉塵顆粒、濾材、廢水。
除污	土壤：	除污範圍界定→	圖 8-4、圖 8-5、	圖 8-7

除污範圍	廠址環境	系統	組件	結構
程序	輻射資料調查→ 移除→減量→分 類→除污 地下水： 偵測地下水→開 挖取樣井→監測 →界定污染之程 度→確認土層之 垂直分佈及傳輸 特性→建立污染 傳輸模式→確定 污染範圍→除污	決定除污因子→ 除污設備安裝→ 氧化程序→還原 程序→除污程序 →淨化程序→二 次廢棄物移除→ 除污設備移除	圖 8-6	
時程 規劃	核二廠將於最終 狀態偵測階段完 成廠址環境整治 作業(若需要)。	於爐心內之用過 核子燃料退出後 進行系統化學除 污作業，預計於 115-116 年 2 年 內完成。	除役拆廠階段前 2 年建造組件除 污設備，開始執 行組件除污作業 8 年，並於除役 拆廠階段結束前 1 年拆除設備。	除役拆廠階段之 最後 3 年完成結 構除污作業。

附錄 8.A 第八章除污方式及除役期間放射性廢氣、廢液處理之重要管制事項

項次	內 容	管制時程
8-1	核二廠系統除污作業計畫提報主管機關審核。	114.01 (執行系統除污作業前一年)
8-2	除役保留區放射性廢液處理系統設置申請。	113.05 提出申請 118.12 完工啟用
8-3	廢粒狀樹脂濕式氧化暨高效率固化系統(WOHESS)設置申請。	113.05 提出申請 118.12 完工啟用