

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	8-5
(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	8-23
(一) 除役期間放射性廢氣處理規劃	8-24
(二) 除役期間放射性廢液處理規劃	8-28
三、結語	8-35
四、參考文獻	8-36
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	8-51

圖 目 錄

圖 8-1 核三廠廠址環境整治之除污程序.....	8-38
圖 8-2 不同金屬結構層與其適合之除污技術.....	8-38
圖 8-3 系統化學除污流程圖.....	8-39
圖 8-4 核三廠金屬類組件之化學除污作業流程示意圖.....	8-39
圖 8-5 核三廠金屬類組件之電化學除污作業流程示意圖.....	8-40
圖 8-6 核三廠金屬類組件之機械除污作業流程示意圖.....	8-40
圖 8-7 核三廠結構混凝土之機械除污作業流程示意圖.....	8-41
圖 8-8 HVAC 通風架構圖.....	8-41
圖 8-9 核三廠廢料處理系統流程.....	8-42
圖 8-10 核三廠硼回收系統(BRS)示意圖.....	8-42
圖 8-11 核三放射性液體處理系統(LRS)流程圖.....	8-43

表 目 錄

表 8-1 核三廠除役廢棄物分類重量推估結果.....	8-44
表 8-2 核三廠除役廢棄物分類活度推估結果.....	8-45
表 8-3 核能電廠拆除前系統化學除污之案例.....	8-46
表 8-4 金屬組件之除污技術之比較.....	8-46
表 8-5 除污方式要點彙整.....	8-47
表 8-6 放射性廢氣、廢液產生之來源與組成.....	8-50

第八章 除污方式及除役期間放射性廢氣、廢液處理

本章針對核三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（以下簡稱廢氣）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，說明核三廠可能受污染的環境(土壤、地下水)、結構、系統及組件，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三廠原有之通風系統、廢液處理系統，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，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，及本公司核一、核二、核三廠運轉期間之除污經驗，將於爐心燃料全數移出後才執行系統除污作業，系統除污作業依本計畫第六章規劃進行系統化學除污及相關準備作業。系統除污作業之準備及作業時程為 114 年 1 月至 116 年 9 月，系統除污作業計畫預訂於 114 年 9 月前提送原能會審查，並於核備後據以執行相關除污作業。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：核三廠除污範圍規劃、核三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

本公司係根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，如意外事件、環境例行監測資料、各系統、結構及組件之功能性、現場實際量測結果及資深工作人員訪談等，以及本計畫第四章廠址與設施之特性調查與評估結果，未來將依機組運轉執照屆期後之現場輻射量測結果確認及更新除污範圍。

核三廠經初步評估後可能受到污染之環境、結構、系統、組件，以及可再除污之廢棄物，說明如下：

1. 環境

依本計畫第三章廠址歷史評估結果，核三廠一號機與二號機發生污染及非污染液體溢出或洩漏，以及氣體洩漏的區域進行統計，影響區域包括有圍阻體廠房、輔助廠房、燃料廠房、燃料更換水儲存槽、進出管制廠房、廢料廠房、低放射性廢棄物貯存庫等廠房區域。經第三章評估，液體之洩漏曾造成廠房內地面及廠房外的局部污染，雖然曾經發生洩漏之區域已於該地點完成除污及改善作業，未來進行除役作業時仍應對該區域進行取樣分析。另依據歷年核三廠廠外空氣環境監測，其結果皆在環境背景值變動範圍，顯示廠房內工作區的氣體洩漏或空浮事件經電廠通風過濾吸附後，氣體洩漏的影響範圍僅限於廠房內部，對廠房外環境未有影響，但仍需注意是否造成放射性物質附著於牆壁、天花板及通風系統中。

有關環境偵檢之土壤、水樣詳細結果可參考本計畫第四章。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，包含廠址地下水調查及土壤污染評估。未來若偵測到地下水有污染時，則將參考國際經驗於偵測有污染位置處周邊開挖取樣井及監測，以界

定污染之程度，並確認放射性污染物質於土層中之垂直分布及傳輸特性。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輸及擴散特性，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，核三廠廠內可能受影響之結構建物區域主要有：一號機/二號機之圍阻體廠房、輔助廠房、燃料廠房、燃料更換水儲存槽、進出管制廠房、廢料廠房、低放射性廢棄物貯存庫等。

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，以及美國核管會所發表之NUREG/CR-0130[1]、NUREG/CR-5884[2]等核電廠除役研究報告，推估核三廠可能受到污染之系統彙整如下：

- 反應爐冷卻水系統。
- 餘熱移除系統。
- 化學與容積控制系統。
- 安全注水系統。
- 圍阻體噴灑系統。
- 反應爐補水系統。
- 更換燃料水儲存系統。
- 用過燃料池冷卻及淨化系統。

- 燃料廠房通風系統。
- 廢料廠房通風系統。
- 輔助廠房通風系統。
- 圍阻體熱移除系統。
- 圍阻體空氣淨化和可燃性氣體控制系統。
- 通道控制廠房通風系統(又稱進出管制廠房通風系統)。
- 氣體廢料處理系統。
- 液體廢料處理系統。
- 硼酸再回收系統。
- 輻射洩水系統。
- 洗衣廢水系統。
- 一次側取樣系統 (Nuclear sampling system) 。
- 固化系統。
- 熱減容系統。

上述可能污染之系統，本公司將在機組運轉執照屆期後，進行更詳細之輻射偵測，以確認應進行除污系統之範圍。

4. 組件及可再除污的廢棄物

根據核三廠各系統組件之地理位置與功能性，以及現場特性調查結果，推估核三廠主要可能污染之組件及可再除污的廢棄物屬於一次側系統組件，包括下列各項：

- 反應器冷卻水系統、餘熱移除系統、化學容積控制系統、安全注水系統、圍阻體噴灑系統、反應器補水系統、用過燃料池冷卻及淨化系統，及更換燃料水儲存系統等組件等。

- 其它可能受污染之系統零組件，包括廢棄物貯存容器與護箱表面及放射性廢棄物處理系統受污染之外表。

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(含活化混凝土、污染混凝土)、其他類型廢棄物(含乾性、濕性廢棄物)等三類，其類別依一定活度或比活度以下放射性廢棄物管理辦法[3]及低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則[4]分為可外釋、A 類、B 類、C 類及超C類，核三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，彙整如表8-1、表8-2所示；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1,165.28 MT(噸)及 6.03×10^{17} Bq(貝克)，其中超C類、B類及A類占比分別為18.6%、15.0%及66.4%。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6,987.25 MT，總活度約為 1.04×10^{15} Bq，其中除些許C類及B類外，其餘大部分皆A類廢棄物。活化混凝土來自於生物屏蔽，經推估其重量及活度分別為2,201.07 MT及 1.04×10^{14} Bq，皆屬A類廢棄物。污染混凝土來自於建物結構，經推估其總重量及總活度分別為1,645.23 MT及 1.64×10^{13} Bq，其中B 類及A 類占比分別為61.8%及38.2%。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1,415 MT及 2.21×10^{14} Bq，皆屬A類廢棄物。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

除役作業前，將規劃先確認最佳之處理程序，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、除污成本與效益及二次廢棄物產生量等。將依上述評估結果規劃污染結構、系統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/處置等單一方式，或透過現場除污搭配拆除後除污等不同組合方式進行，以達到降低污染等級、減少工作人員輻射曝露及二次廢棄物的產生。

本節將針對核三廠除役期間之環境、結構與系統，以及組件之除污作業規劃，進行原則說明。未來，本公司將於開始執行除污作業前，依下列原則，完成細部之除污作業規劃。

- 彙整核三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；
- 進行除污必要性之評估，以確認最佳之處理程序，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、除污成本與效益分析、達到目標除污因子(Decontamination Factor, DF)的可能性，以及除污時所產生的二次廢棄物產量等；

註：除污因子(DF)為除污前的放射性比活度與除污後比活度之比值，除污效果(去污率)的計算為 $(100 * (1 - 1/DF))$ ，如 DF 為 10 即代表 90%污染已去除。

- 與用過核子燃料冷卻及貯存設施有關之系統或結構應進行隔離，以確保除污作業不會影響用過燃料池之正常運作；
- 除污作業產生放射性廢棄物，應依照放射性廢棄物相關管理計畫進行處理；
- 除污作業所產生之污染液體，應以廠內廢液處理系統或簡易式廢液處理設備處理；
- 除污作業產生之氣體或空氣微粒應被適當收集、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. 污染環境之除污規劃

核三廠一號機與二號機發生污染及非污染液體溢出或洩漏，以及氣體洩漏的區域進行統計，影響區域包括有圍阻體廠房、輔助廠房、燃料廠房、進出管制廠房、燃料更換水儲存槽、廢料廠房、低放射性廢棄物貯存庫等廠房區域。曾造成廠房內地面及廠房外之局部污染，故進行除

役作業時，應對該區域進行取樣分析，確認是否有殘留的土地污染。未來於除役過渡階段及廠址最終狀態偵測階段，將會有再進行更詳細之輻射偵測。若輻射偵測後，發現有土壤或地下水有污染，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，核三廠廠址環境整治之除污程序如圖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人員工安、輻安及設備安全無虞。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(毫西弗/年))，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，再經最終輻射偵測，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使用挖土機或鋤耕機移除，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。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

發現有地下水污染時，將先判斷是否超過法規標準；若超過標準者，本公司規劃以下列防止污染擴散及整治除污等方式進行處理。地下水若有抽取處理，執行前將先向水利相關單位(如屏東縣政府水利處)提出申請。處理後之地下水，除排水管線進行排放外亦將一併考量地層下陷問題，評估將處理後的水補注到原來的地下水層的飽和帶。

A. 抽出法(Pump and Discharge)

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造成污染，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(Pump and Treat)

此法與抽出法原理相同，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或其它合適的方法進行除污，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(Capping Technology)

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(Engineered Confinement)

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)

在排列緊密的間隔處同時以壓力注射方式，注入薄泥漿至土壤中，固化後形成連續的帷幕，需深及不透水之岩層，才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。若不透水之岩層之存在深度太深，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

核電廠之系統除污主要有三大目的，包含(1)移除系統組件之污染物質以降低設施之劑量，減少後續拆除之工作劑量；(2)降低除役期間污染物質擴散之風險；(3)降低放射性廢棄物之類別或達到解除管制。若在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。本公司核三廠除役期間進行系統除污之目的為移除系統內部及管件表面之放射性污染物質，故必須移除可能含污染物質的表層氧化物，再移除材料表面層下方之污染物質，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。依國際經驗[5]，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。

經評估，核三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，接下來，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中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，而機械剷除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，化學除污法是最佳的選擇，故本公司規劃未來可能採化學除污方式，進行核三廠封閉之受污染系統之除污。由於核三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[6]。氧化階段主要是藉由氧化劑如高錳酸鹽，將鏽垢層(Crud)內部不溶於酸的三價鉻轉換成可溶於酸的六價鉻；而還原階段是將氧化過程中形成之副產物，轉化為可溶解於除污劑的離子態；除污階段則是利用除污劑(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，將溶解於除污劑中之金屬離子(陽離子樹脂)與剩餘之除污劑(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，應先進行除污技術之可行性評估。評估的項目應包含該除污技術可減少之總輻射曝露、污染系統之材質與該除污技術所需之化學藥劑、該除污技術可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可能造成的衝擊等。

參考國外PWR核電廠除役經驗，如美國Connecticut Yankee核電廠、西班牙Jose Cabrera核電廠、德國Stade核電廠等，本公司核三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系統、餘熱移

除系統及化學容積控制系統；其中，反應器冷卻水系統之除污，不包含反應器壓力槽，主要是為避免除污劑腐蝕反應器壓力槽表面之活化物質，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。本公司仍將於除役過渡階段執行機組運轉執照屆期後現場輻射偵測，以進一步確認應進行除污系統之範圍。有關系統除污之詳細時程請參考本計畫第六章除役作業工法排程。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8-3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，據以實施核三廠之系統化學除污。

本公司參考國外除役及核三廠大修期間系統化學除污(除銳作業)之經驗，透過核三廠現有化學與容積控制系統(CVCS)之加藥及取樣流程，來進行反應器冷卻水系統(RCS)、餘熱移除系統(RHR)等化學除污程序。參考國際上系統除污相關的文獻及報告(NUREG/CR-0130) [1]，核三廠在執行系統除污工作時，應考量之除污準則彙整如下：

- 核三廠運轉期間，其系統、設備運作及保養皆按照相關程序書辦理。
因此，目前在機組運轉執照屆期前各項系統、設備係維持正常可用。
未來機組運轉執照屆期後，參考過去核三廠運轉期間之化學除污經驗，核三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，因此報告中建議最好的方式是使用廠內現有的泵(有較高的流速)，來進行除污液的輸送。

- 某些除污劑(如氟硼酸)具有較高的腐蝕性，運轉階段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)，而除役階段較不必考慮管件耐腐蝕問題。
- 可考慮以遠端劑量監測(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完成設備的維護測試，確保這些設備可正常運作。
- 使用廠內既有設備的優點，包括：縮短設備運送及安裝時間、較高的除污流速、除污路徑較為簡單、離子交換管柱無須額外裝設屏蔽及成本較低。
- 使用廠內既有設備的缺點，包括：廠內離子交換樹脂床的處理量通常都小於除污的需求，因此會縮短離子交換樹脂使用的時間(即更換的頻次增加)，由於廠內設備與各系統相連，發生問題時通常較難解決且設備使用彈性較低。
- 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(建議 20-50 μm)。
- 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循環式(Recirculation)或非循環式(Non-Recirculation)進行，以達到需要之除污效果。循環式化學除污通常係應用於具有循環迴路之管線系統，透過除污試劑於金屬管線內部多次循環，以提升除污效果。非循環式則係應用於無法進行循環除污時，所採取的一種折衷方式。核三廠如採用非循環式化學除污，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。非循環式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。非循環式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。

本公司核三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、檸檬酸、草酸溶液、氟硼酸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，使其水質達到核三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，以達到廢棄物減量及再利用之目標，並降低廢棄物貯存、處置壓力及成本。在選擇結構及組件除污技術之前，應進行相關成本分析，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，除污程序必須根據該場址的特殊性而設計，並廣泛考慮核三廠現場實際狀況，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：如活化產物、分裂產物、放射性元素等；(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；(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。

核三廠除役期間進行除污作業時，採取之除污技術建議具有相當規模且發展成熟之技術，或我國自行開發之系統化學除污技術。核三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：

(1) 安全性

採用的除污技術應可大幅降低工作人員作業時之輻射曝露。

(2) 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。

(3) 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。

(4) 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。

(5) 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相當規模且發展成熟之技術。

本公司核三廠拆除之組件，包含熱交換器、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，一號機及二號機圍阻體廠房、輔助廠房、廢料廠房、燃料廠房之結構、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：

A. 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 8-4 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 8-5 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。本公司核三廠除役時規劃在燃料廠房、核機冷卻水廠房、熱修配廠房或其他廠房等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，於防漏的不鏽鋼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，避免空浮污染之情況發生。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，對表面進行快速噴射研磨料顆粒，除污效果顯著，產生清潔、除鏽、除毛邊的作用，將金屬、塑膠或構造表面移除污染物質。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。根據核三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態(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。另一方面亦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 8-6 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 8-4 所示。

B. 混凝土材質之除污作業程序規劃

核三廠除役產生之建物結構污染廢棄物主要為圍阻體廠房、輔助廠房、燃料廠房與廢料廠房等內部受污染之混凝土結構(地面、牆面、天花板)。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 8-7 所示。

核三廠除役期間須進行除污、拆除及切割等作業，應具有適合之設備及場地，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。有關除役期間廢棄物管理區(包含燃料廠房、核機冷卻水廠房、熱修配廠房或其他廠房等)之設置及規劃，請參考本計畫第九章。

4. 除污之作業場所、作業安全及輻射防護

核三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。

核三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銹鋼桶槽，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三廠除役作業規劃之廢棄物處理區域中，以方便集中管理，該廢棄物處理區域可規劃設置於燃料廠房、核機冷卻水廠房、熱修配廠房或其他廠房等內部空間，相關細節請參考本計畫第九章。

核三廠除役期間，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、全身保護工作服、不滲透性手套及腳部防護具。此外，須根據污染物的毒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三廠除役作業規劃之廢棄物管理區中，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。

核三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。此技術須裝設粉塵收集設備，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，另應併入旋風式分離器處理較大粒徑之混凝土粉塵顆粒，並裝設含有可清潔前置過濾設備及高效率空氣過濾系統。

核三廠除役期間，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」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通常活度不高，可直接傳送至廠內廢液處理系統進行處理，或經過前處理設備處理後，排至廠內廢液處理系統進行處理。

有關核三廠放射性廢離子交換樹脂之處理，詳本項第5節除污作業之二次廢棄物處理及減廢說明。

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傳統處理方式使廢溶液進行再生，如沈澱過濾及離子交換、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。

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，須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，會產生大量的廢水、磨料及研磨後的碎屑粉塵，過程中應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亦需要抽氣及過濾設備，收集除污作業產生碎礫粉塵，避免使用周遭環境遭受放射性污染而大幅增加須除污之區域。

除了減少放射性廢棄物的產生量以外，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。核三廠除役產生之二次廢棄物，將其進行分類，區分為可燃、可壓縮及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，產生穩定的廢棄物產物爐灰(Ash)並裝桶貯存。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，皆適合用於焚化法處理，以達到減容之目的。至於某些液態廢棄物，經過適當的前處理亦可以焚化法進行減容。針對除污作業產生之含有機成分之少量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，本公司規劃評估興建壓縮減容設備，或現有壓縮機等減容設備，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。核三廠除役的過程中，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，且核三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，待後續選擇適當的廢樹脂處理技術，經原能會同意後使用，例如：廢樹脂濕式氧化暨高效率固化系統(WOHES)、乾燥裝桶...等。乾燥裝桶本公司將根據「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」第四條的規定，A類廢棄物採用耐100年結構完整之容器(HPC)，B類與C類廢棄物則需使用經主管機關核准之高完整性容器(HIC)或其他經主管機關核准的方法後再處理。本章針對環境、結構、系統及組件進行除污方式之說明，並配合除役計畫第六章WBS，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8-5所示。二號低放射性廢棄物貯存庫及廢樹脂處理系統預計一併向原能會申請處理及貯存設施運轉執照，俟獲原能會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

一般而言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，在本節將依據核三廠最終安全分析報告(FSAR)[7]與國內、外除役經驗及相關資料，提出核三廠除役期間產生之放射性廢氣、廢液處理的初步

規劃，並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

核三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[8]。氣體廢棄物主要處理方法為利用活性碳、靜電集塵器或高效率空氣過濾器 HEPA(High-Efficiency Particulate Air)予以過濾去除其放射性核種。作業區需設置 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

核三廠除役期間放射性廢氣產生來源主要可分為三大類，彙整如表 8-6 所示：(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(在核三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，但該活化產物活度必然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；(3)保留區內設施之氣體：為二號低放射性廢棄物貯存庫、用過核子燃料室內乾貯設施內之氣體，主要組成為空調氣體、檢整作業產生之懸浮微粒；(4)廢棄物處理過程中產生之放射性廢氣(如焚化爐運轉)，主要組成為廢棄物焚化所產生之細微懸浮物質。

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，且機組運轉執照屆期後，核分裂反應立即停止。核三廠除役初期，因燃料棒尚未移至用過核子燃料室內乾式貯存設施，因

此用過燃料池尚須運轉，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，為用過燃料池運轉產生之氣體、拆除切割核設施產生之煙霧氣體、一般管制區內及保留區內設施之氣體。此類廢氣除了具有輻射危險外，尚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，而造成對人員、環境的危害，所以廢氣收集系統的設計及安裝就顯得相當重要，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興建工程，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、佩戴面罩、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，核三廠的空調通風系統(Heating Ventilation and Air Conditioning, HVAC)如圖8-8其所提供的氣流，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。另外需分隔不同輻射等級區域的邊界，使用實體帳篷或現有的房間邊界，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。核三廠採整體移除方式，可降低廠房空污事件發生之機率，其組件可整體移出者即整體移出；核三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，同時將開口處密封，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漏之氣體而造成體內污染。執行拆除切割作業時，應搭建氣密式隔離帳篷，且廠區應視需要架設局部排氣過

濾設備及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。

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)針對短半化期之氣體，可藉由延長其停留時間使其衰變；(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。為了提高淨化效果，往往採用多種方法的綜合處理流程，處理後的放射性氣體經偵測後，符合排放標準，始得排放。

除役期間因核反應器機組運轉執照屆期並移除燃料棒及冷卻水後，其核分裂反應立即停止，所以由反應器一次系統產生之放射性廢氣來源及污染源就已消失，由反應器產生之廢氣與可能由廢氣處理系統洩漏之廢氣，皆遠低於運轉時產生之廢氣量，而此殘留之廢氣透過抽風後經由廢氣處理設備排放，反應器內所殘留之廢氣幾乎已經微乎其微。根據國際電廠Yankee Rowe與José Cabrera的除役經驗[9,10]，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原有之技術規範正常運作，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照常運作，可確保放射性廢氣排放正常，並應視情況增加臨時通風系統。

核三廠除役期間，通風系統將配合除役作業逐步停止運轉，直至除役拆廠階段後期完全停止運轉，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之核設施污染程度；(2)先期建置氣密式隔離帳

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

由於放射性廢氣如果直接排放到環境中，會對周圍環境及生態造成危害，故放射性廢氣必須經過處理，以去除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」[11]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[12]第8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]之規定。

核三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法規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。另依廢氣排放實績與當地氣象資料，及附近居民之生活環境與膳食習慣，利用模式評估進行關鍵群體劑量與民眾集體劑量之評估，以驗證符合游離輻射防護安全標準[11]之劑量限度及核能電廠環境輻射劑量設計規範之規定。

5. 廢氣監測方法及排放管控

除役期間產生之放射性氣體應盡可能利用隔離、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須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，應視情況增加臨時通風系統及架設移動式空氣輻射偵測器、連續式手提空浮輻射監測器等方式，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，並依照操作程序書

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氣輻射監測器進行偵測以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，以掌握放射性物質濃度。

核三廠除役期間排放之廢氣須經過空氣過濾設備及連續性空氣輻射偵測器監測。所有被釋放在環境中的廢氣體總 β 、 γ 活度和微粒活度，必須被監測及記錄。相關管控措施必須符合核三廠之標準作業程序書(如程序書「放射性物質外釋管制程序」)[13]，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。

原能會輻射偵測中心及本公司放射試驗室負責執行國內核電廠外有關環境輻射偵測業務，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。

(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，廢液處理系統可由原有運轉期間廢液處理設施負擔，處理廢液產生之廢液過濾殘渣、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[8,14-15]。

1. 廢液來源與組成

依核能電廠放射性廢液產生來源主要可分為三大類，彙整如表8-6所示：(1)除役期間所需維持運轉系統產生之廢液：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、廠房空調排水等；(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；(3)保留區內設施之廢液：為二號低放射性廢棄物貯存庫、用過核子燃料室內乾貯設施內之廢液，主要組成為一般廢水，或含少量放射性核種之空調冷凝水、檢整廢水及池水。

除役期間因核反應器機組運轉執照屆期並移除燃料棒及冷卻水後，產生放射性廢液之熱源及污染源已消失，所以正常原有運作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及保留區內設施內之廢液。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三廠之廢液處理系統進行接收處理。

2. 廢液收集與輸送

核三廠廢液處理程序的第一個步驟是將廢液先收集到分布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。根據核三廠營運程序書「洩水監視及查漏程序」，核三廠運作時放射性廢液來源，可概分為二大類。第一類為來自全廠各廢水集水坑，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。

因核三廠的廢液收集系統已建置相當完善，利用現有仍具功能之廢液收集系統，除了可以縮短除役時程外也可以減少除役成本；所以，在除役期間規劃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。

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)一般採取焚燒方式進行處理。

(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是不溶性的高濃度鹽類，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 等中很多以懸浮微粒存在廢水中，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，並依廢液特性選擇適合孔徑規格與材質。

(3) 蒸發

藉熱交換器將溶液加熱使之沸騰，使揮發性物質透過蒸發過程移出，因此溶液中所含的不純物(非揮發性部分)濃度會增加而達到濃縮目的。蒸發程序所殘留於蒸發器內的高濃度廢液即稱蒸發底泥(Evaporate Bottom)或濃縮廢漿(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)等皆可以用來移除銻、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/弱鹼型陰離子型樹脂等。操作離子交換樹脂床應注意樹脂之交換能力，可藉由自動警示裝置，提醒操作人員進行更換。

核三廠放射性液體廢料處理系統其程序主要為收集、處理、儲存全廠放射性廢水，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處理後排釋至廠外。液體廢料處理原則如下：

- 各輻射廠房內現場產生之廢水，經廢水處理系統處理。蒸發濃縮處理後之冷凝水經除礦、儲存後，視取樣結果排放於大海；處理後之濃縮廢液送至固體廢料處理系統處理。
- 清潔劑廢液(如洗衣廢水)，過濾後排放於大海。

核三廠廢料處理系統流程如圖8-9所示，其中放射性廢液處理系統包含以下系統，除役期間硼回收系統及放射性氣體處理系統將停用，其餘系統仍可續用。

A. 硼回收系統(Boron Recycle System)

硼液回收系統流程為收集反應器冷卻水，首先經過除礦器和過濾器，將分裂產物和離子性雜質移除，而後流到滯留槽儲存。當兩只滯留槽水位達一定水位時，起動蒸發器，將蒸餾水、硼酸水及分裂氣體分離。蒸餾水打回反應器補水槽或進行計畫性排放，硼酸水打回硼酸槽，氣體則送到放射性氣體處理系統(GRS)處理。硼酸亦可打至緩衝槽暫存，或調整成較低濃度硼酸水傳至用過燃料池冷卻及淨化系統。其流程如圖8-10所示。

B. 放射性液體處理系統(Liquid Radwaste System)

主要是收集、處理、儲存和處置電廠運轉時各輻射廠房內設備洩漏和地面洩水池收集的放射性液體。以蒸發器組處理放射性廢液，而蒸發器組分餾出來的冷凝水可經由吸收床清除有機污染物。再經兩組串接的混合床離子交換器淨化，經偵檢槽偵測後，若符合排放標準則排至廠外，不符合標準則回送至滯留槽再處理。蒸發器組處理後之濃縮廢液則送至固體廢料處理系統處理。其流程如圖8-11所示。除役期間廢液已無需回收至系統使用，為使除役期間產生之廢液可以符合放射性液體處理系統(LRS)之廢水接收標準值，亦將評估廢液實際狀況，採用前處理作業方式來配合廢水標準。

C. 放射性洗衣廢水系統(Radioactive laundry system)

主要功能為收集及處理控制出入房內之洗衣廢水、面具室、保健物理主管制站及進出管制廠房所產生的去污廢水。這些放射性廢水利用重力排洩到集水池，然後由傳送泵將廢液泵送至放射性洗衣廢水收集槽內儲存。任一槽水位達3.8m以上時，即進行廢水循環淨化處理，其處理流程為：洗衣廢水→彈匣式不銹鋼過濾器→棉質過濾器→活性炭吸附床。廢水排放前必須取樣分析，分析結果符合排放允許標準及經相關部門審核通過後，才得排放。

因核三廠的廢液收集及處理系統已建置相當完善，利用現有仍具功能之廢液收集及處理系統，視除役作業需要可再改建或設置所需的部分(如系統除污需建置前處理部分)，如此，可以有效縮短除役時程及減少除役成本。所以，在除役期間規劃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就可建置於圍阻體廠房、輔助廠房、廢料廠房等空間，以利廢液的收集及後續的處理。

設備洩水的處理方式則可參考核三廠大修時，設備洩水的處理方式辦理，基本上也是導入核三廠現有廢液處理系統內進行處理，並視需求增設預處理設備如離子交換樹脂床。

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，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，才排放至核三廠內高活度、高導電度廢液集水坑或槽，再送現有廢液處理系統進行後續的處理。

目前核三廠已不再分高全溶(High TDS)或低全溶(Low TDS)，因此除役期間產生之廢液，兩者均可經放射性液體處理系統(LRS)進行處理；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，最後均輸送至核三廠現有廢液處理系統進行處理，如果需要，可在核三廠廢液處理系統前增設前處理系統。另外針對除污作業產生之含有機成分之少量廢液，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。

註：TDS(Total Dissolved Solids)是溶解性總固體值，為溶解於水中的任何礦物質，鹽、金屬、陽離子或陰離子之情況，此處指為全溶固態廢液。高全溶(High TDS)廢液，雜質高導電度高，低全溶(Low TDS)廢液則反之。

現有核三廠廢液處理系統可繼續留用於除役期間進行廢液處理，可依需求適度變更設計，若變更涉及「核子反應器設施管制法施行細則」第18條所列情形之一者，將依規定報請主管機關核准後再執行。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三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。而廢液處理系統本身為高放射性污染設備，當該系統於除役拆廠階段後期進行拆除時，可能會評估於系統內進行簡易除污降低污染後，再進行拆除、切割及裝桶等作業，必要時可搭配壓縮減容設備處理。另一方面，擬規劃於保留區二號低貯庫內設置簡易式廢液處理設備，如後續保留區仍有少量廢液產生時，則以收集槽收集廢水，再以槽車分批方式運送至簡易式廢液處理設備進行過濾

或蒸餾處理，處理完之廢水須經取樣偵測，取樣分析合乎排放標準後可回收至保留區環境使用。

核三廠之運轉期間廢水排放需透過放射性液體處理系統(LRS)來排放，即放射性液體處理系統處理完之蒸餾水須經偵檢槽執行循環取樣，取樣分析合乎排放標準後方可排放到出水渠道至大海。然而，排放程序須遵守核三廠程序書「放射性物質外釋管制程序」[13]之相關規定。

核三廠除役期間，將保留循環水系統之熱稀釋泵（Thermal Dilution Pump）至除役拆廠階段，便於後續該階段仍有些許廢水排放之需求。

4. 廢液排放標準

放射性廢液必須經過處理，以去除大部分放射性成分及有害物質，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，包括原能會規定之法規「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」[16]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。

為確保核三廠排放至環境之廢水的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

現有核電廠放射性廢液監測方法主要有兩種，一者是於排放口設置即時輻射偵測監測系統，有跳脫單元(表示高輻射)與低指示跳脫單元(表示儀器故障)，提供控制動作或警報，以及作為放射性物質進入環境之釋出流率記錄。其設計的目標可由釋出環境流率計算出總排出釋出活度，作為一個指標，讓工作人員明確知道作業有無超越排放限定數值。另一種廢液監測方法是定期於放流口取樣分析檢測，檢測結果皆須符合我國原能會規定之「游離輻射防護安全標準」[11]與環保署規定之「放流水標準」[16]。

核三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，且皆應符合核三廠針對廢液處理後之相關管控標準作業程序書(SOP)、放射性廢棄物外釋技術規範、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

在核三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，放射性廢氣的主要來源為拆除、切割核設施產生之煙霧氣體及一般管制區內的氣體，為避免放射性廢氣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)先期建置氣密式隔離帳篷；(3)靈活使用污染隔離罩及使用局部排氣過濾設備與移動式空氣除污裝置等方式。並可運用廠房既存的隔牆、過濾設備、通風等設備，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原有之技術規範正常運作，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照常運作，可確保放射性廢氣排放正常，並應視情況增加臨時通風系統及架設移動式空氣輻射偵測器、連續式手提空浮輻射監測器等方式，作為緊急廢氣處理措施，以防止異常狀況發生。

而放射性廢液種類為(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。除役期間產生之廢液以系統化學除污與組件化學除污無機廢液為最大宗，為減少除役期間處理放射性廢液成本，國外許多核電廠除役期間產生之廢液大部分都是直接採用廠內現有的廢液處理系統處理，以達到減少處理成本，且兼具放射性廢棄物減量之理想。

核三廠除役期間廢氣及廢液的處理主要是利用現有的廢氣及廢液的處理系統，視除役作業需要再改建或設置所需的部分，如此可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現有處理系統的拆除。期間相關管控措施亦必須符合核三廠之作業程序書規定，以確保排放到廠外環境之放射性濃度及造成廠界一般人之劑量，不超過游離輻射防護安全標準[11]之規定。

四、參考文獻

1. Technology, Safety and Costs of Decommissioning a Reference Pressurized Water Reactor Power Station, NUREG/CR-0130, Nuclear Regulatory Commission, 1978.
2. Revised Analyses of Decommissioning for Reference Pressurized Water Reactor Power Station, NUREG/CR-5884, Nuclear Regulatory Commission, 1995.
3. 中華民國行政院原子能委員會，「一定活度或比活度以下放射性廢棄物管理辦法」，93 年 12 月。
4. 中華民國行政院原子能委員會，「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」，101 年 7 月。
5. Decommissioning of Nuclear Facilities Decontamination Technologies, IAEA, 2006.
6. Evaluation of the Decontamination of the Reactor Coolant Systems at Maine Yankee and Connecticut Yankee, EPRI Report TR-112092, Final Report, EPRI, 1999.

7. 台灣電力公司，「核三廠 Final Safety Analysis Report(FSAR)」，106 年 12 月。
8. 台灣電力公司，「第三核能發電廠 PWR 訓練教材第 15 章「放射性廢棄物處理」，104 年 4 月 23 日。
9. Yankee Rowe Decommissioning Experience Record Volume 2, EPRI, 1998.
10. Characterization and Management of Cutting Debris During Plant Dismantlement, EPRI, 2015.
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. 中華民國，「游離輻射防護法」，91 年 1 月 30 日。
13. 台灣電力公司，「核三廠程序書 913「放射性物質外釋管制程序」」，109 年 12 月 24 日。
14. 台灣電力公司，「核三廠程序書 382.1「液體廢料之收集與處理」」，109 年 8 月 12 日。
15. 台灣電力公司，「核三廠程序書 382.16「液體廢料偵檢槽和泵運轉與液體廢料偵檢槽傳送到排放集管」」，105 年 3 月 16 日。
16. 中華民國行政院環境保護署，「放流水標準」，108 年 4 月 29 日。

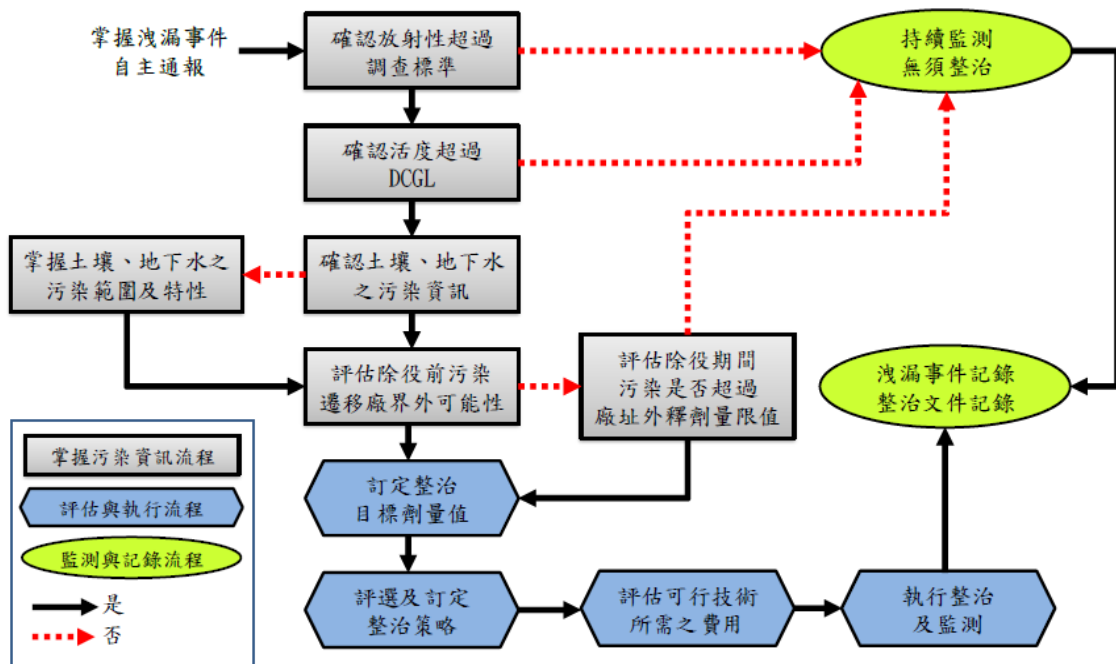


圖 8-1 核三廠廠址環境整治之除污程序

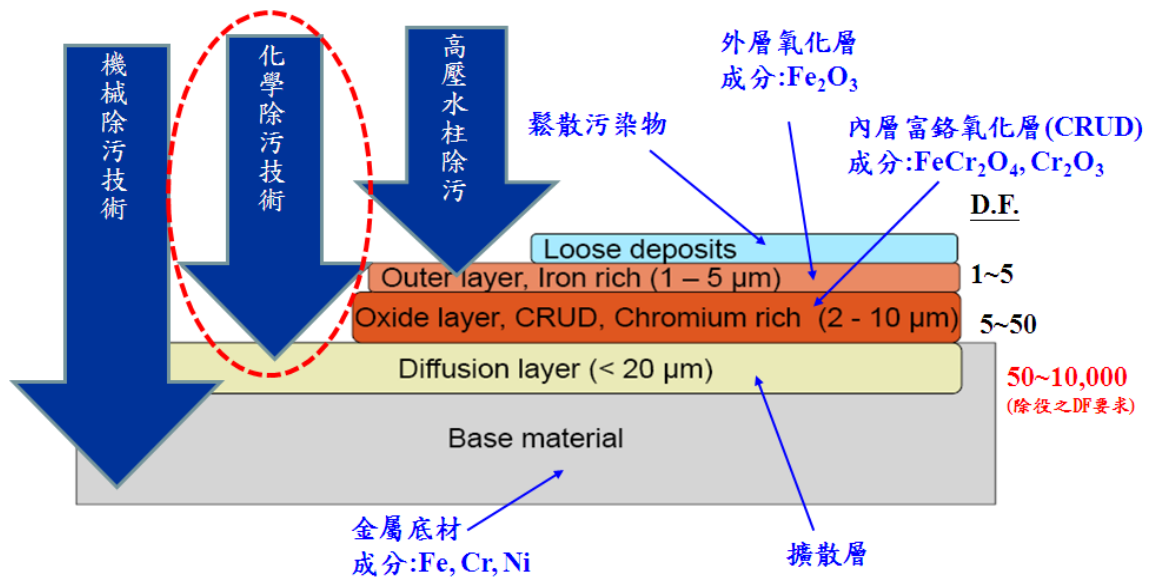


圖 8-2 不同金屬結構層與其適合之除污技術

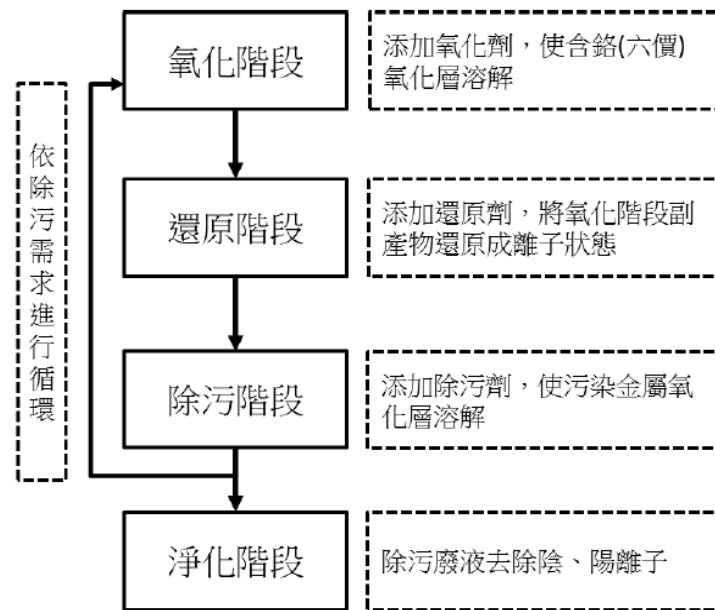


圖 8-3 系統化學除污流程圖

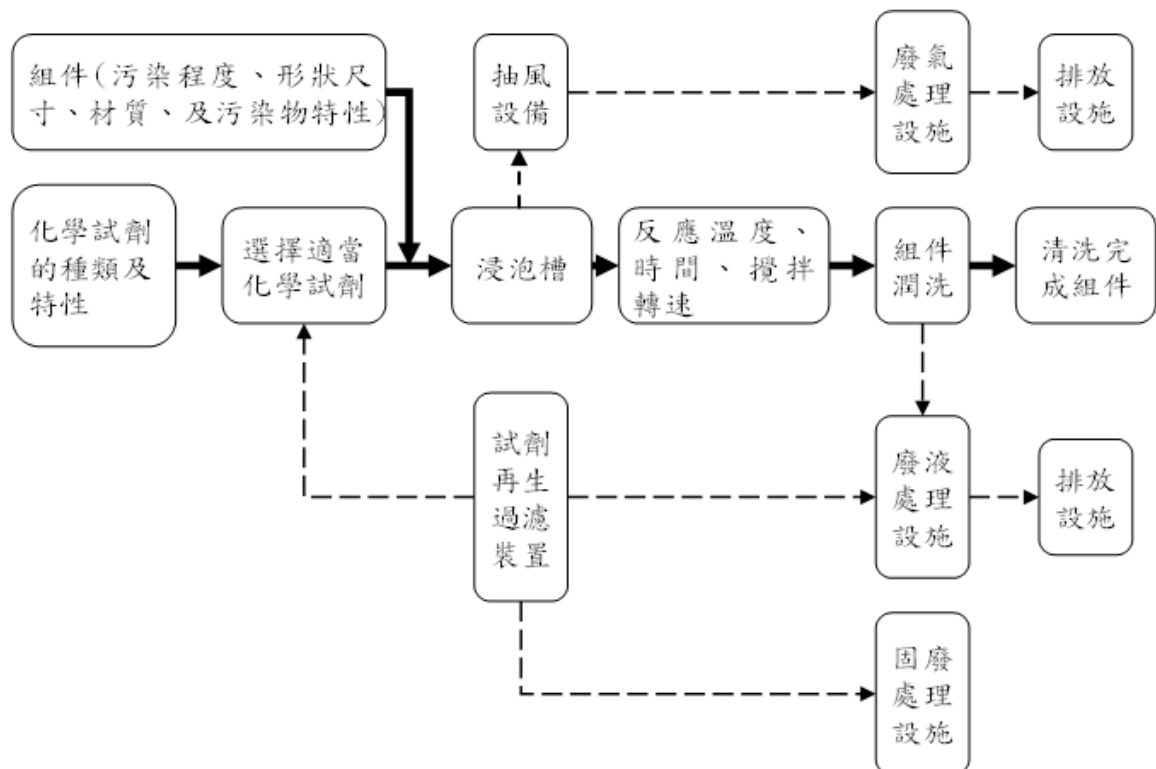


圖 8-4 核三廠金屬類組件之化學除污作業流程示意圖

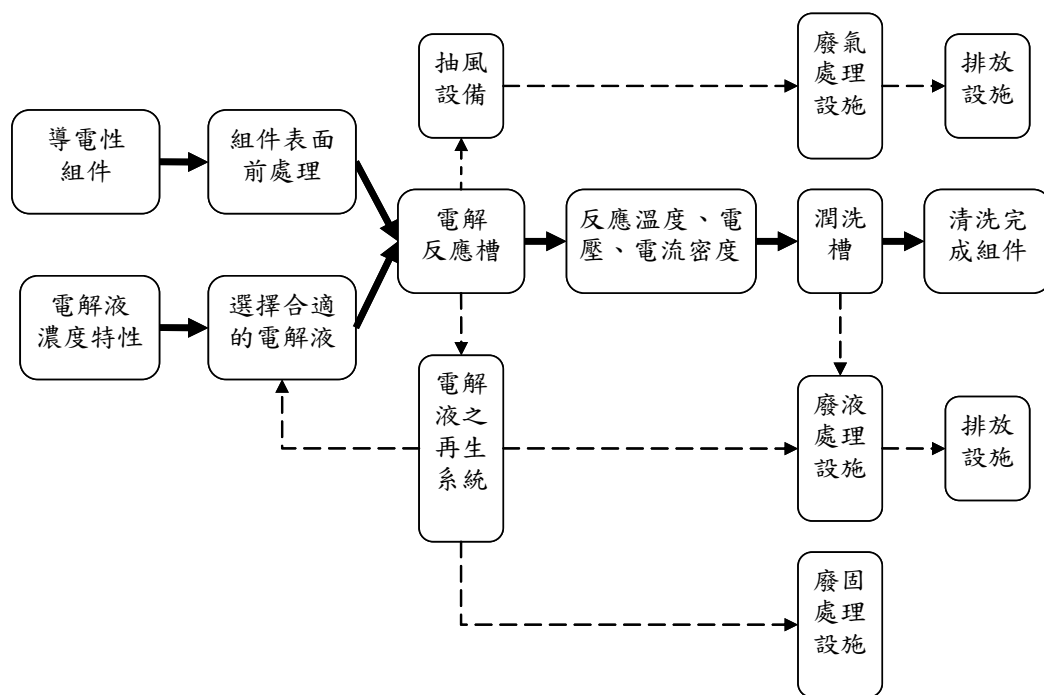


圖 8-5 核三廠金屬類組件之電化學除污作業流程示意圖

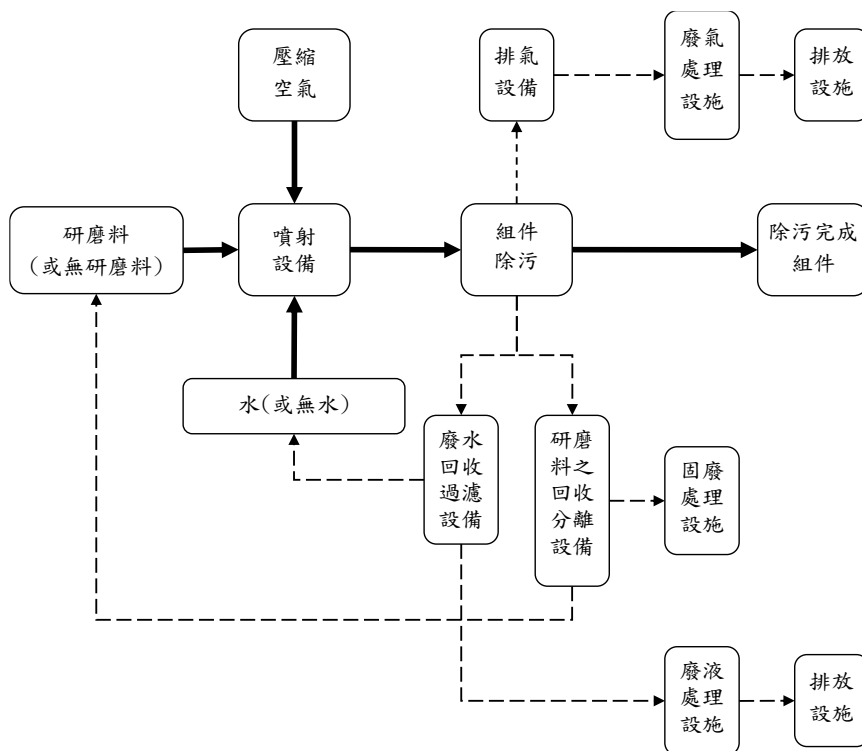


圖 8-6 核三廠金屬類組件之機械除污作業流程示意圖

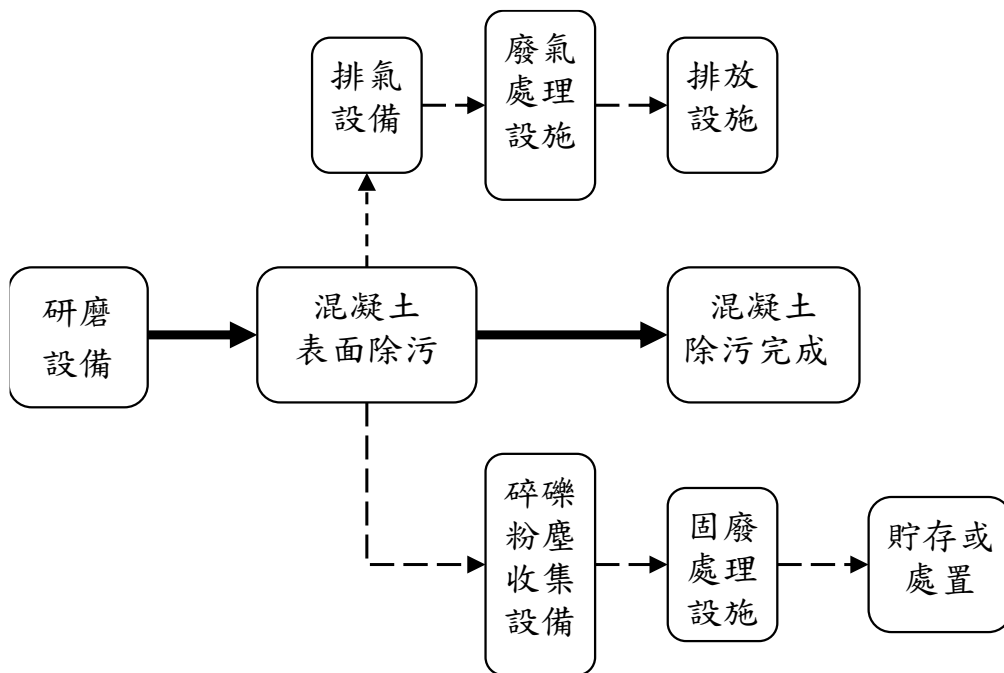


圖 8-7 核三廠結構混凝土之機械除污作業流程示意圖

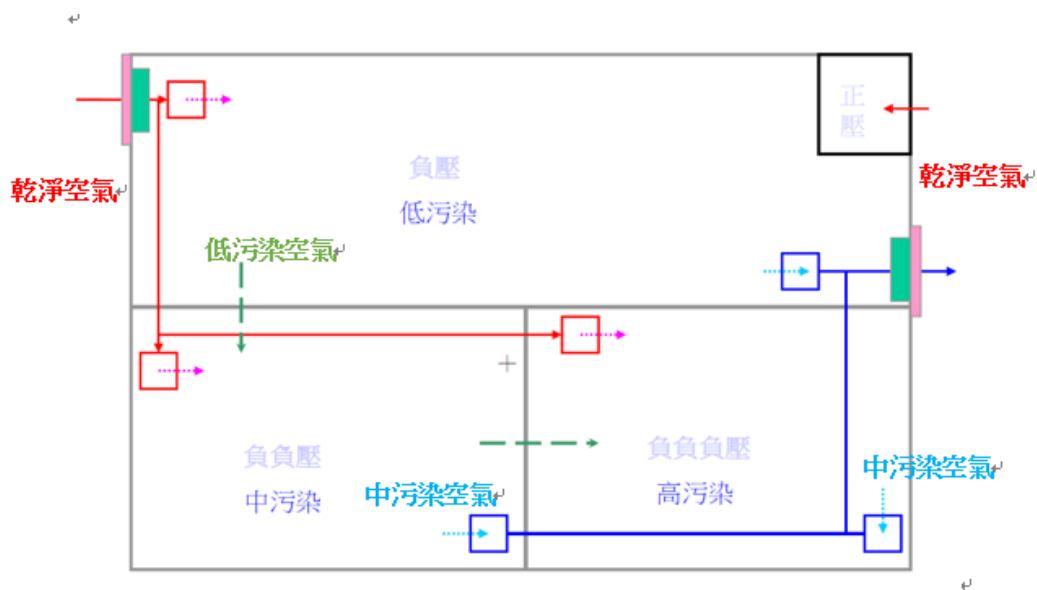


圖 8-8 HVAC 通風架構圖

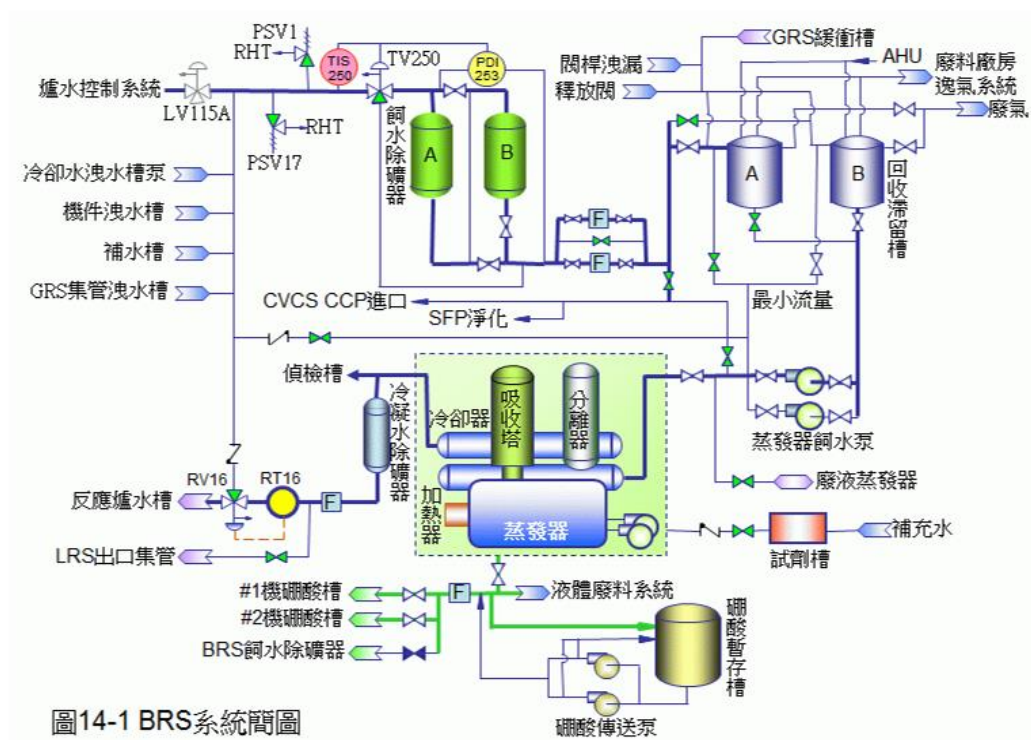
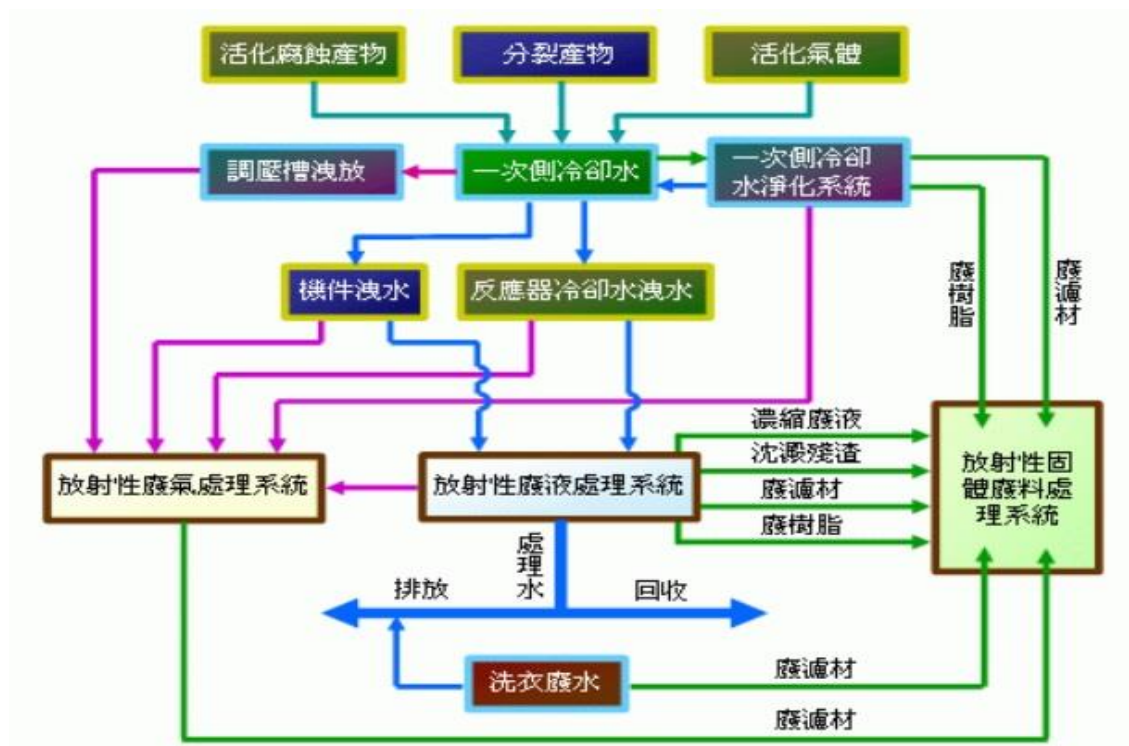


圖 8-10 核三廠硼回收系統(BRS)示意圖

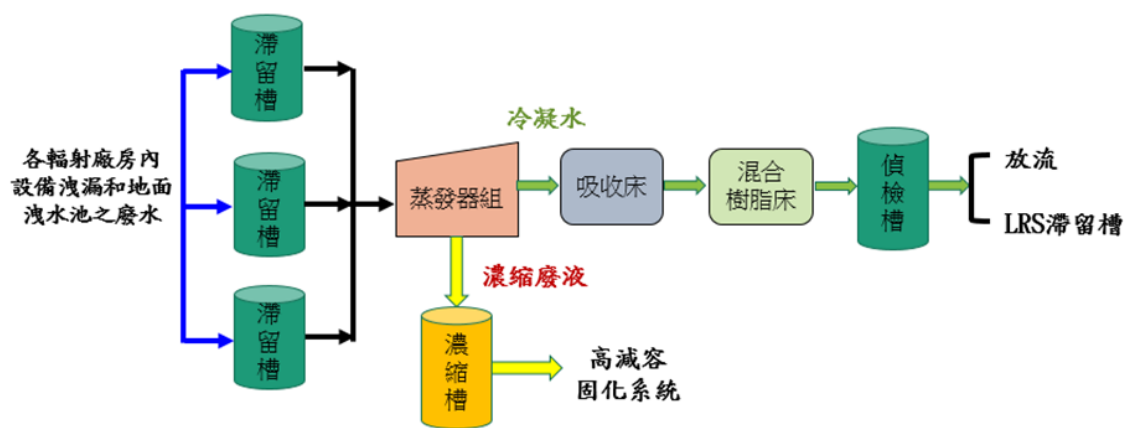


圖 8-11 核三放射性液體處理系統(LRS)流程圖

表 8-1 核三廠除役廢棄物分類重量推估結果

類 別	超 C 類	C 類	B 類	A 類	合 計
1. 金屬廢棄物					
1.1 活化金屬					
1.1.1 反應器壓力槽	0	0	175.04	584.41	759.45
1.1.2 反應器內部組件	216.52	0	0	189.31	405.83
合計	216.52	0	175.04	773.72	1,165.28
百分比	18.6%	0.0%	15.0%	66.4%	100.0%
1.2 污染金屬					
1.2.1 閥件(含未滿 6")	0	0	0	196.72	196.72
1.2.2 熱交換器	0	0	0	980.03	980.03
1.2.3 泵	0	0	0	659.10	659.10
1.2.4 桶 槽	0	0	0	1,067.41	1,067.41
1.2.5 製程管線(含未滿 6")	0	0	0	790.76	790.76
1.2.6 管路連接件(含未滿 6")	0	0	0	155.81	155.81
1.2.7 儀器管線	0	0	0.03	1.06	1.09
1.2.8 雜項製程組件	0	0	0	130.99	130.99
1.2.9 內襯鋼板與燃料格架	0	0	0	2,955.88	2,955.88
1.2.10 通風元件(10%污染)	0	0	0	49.46	49.46
合計	0	0	0.03	6,987.22	6,987.25
百分比	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	100.0%
2. 混凝土廢棄物					
2.1 活化混凝土(生物屏蔽)	0	0	0	2,201.07	2,201.07
合計	0	0	0	2,201.07	2,201.07
百分比	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	100.0%
2.2 非活化混凝土	0	0	1,016.31	628.92	1,645.23
合計	0	0	1,016.31	628.92	1,645.23
百分比	0.0%	0.0%	61.8%	38.2%	100.0%
3. 其他廢棄物					
3.1 乾性廢棄物(焚化減重後)	0	0	0	118.00	118.00
3.2 濕性廢棄物	0	0	0	781.00	781.00
3.3 保溫材	0	0	0	516.00	516.00
合計	0	0	0	1,415.00	1,415.00
百分比	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	100.0%
合計	216.52	0	1,191.38	12,005.93	13,413.83
註：1.本表污染類數值為各核種衰變至 2028 年 05 月 17 日之推估結果。					
2. 單位：MT。					
3. 本表參考第九章表 9-11。					

表 8-2 核三廠除役廢棄物分類活度推估結果

類 別	超 C 類	C 類	B 類	A 類	合 計
1. 金屬廢棄物					
1.1 活化金屬					
1.1.1 反應器壓力槽	0	0	1.93E+15	1.00E+15	2.93E+15
1.1.2 反應器內部組件	6.00E+17	0	0	3.89E+13	6.00E+17
合計	6.00E+17	0	1.93E+15	1.0389E+15	6.0293E+17
百分比	99.5%	0.0%	0.3%	0.2%	100.0%
1.2 污染金屬					
1.2.1 閥件(含未滿 6")	0	0	0	9.79E+10	9.79E+10
1.2.2 熱交換器	0	0	0	6.21E+13	6.21E+13
1.2.3 泵	0	0	0	5.44E+11	5.44E+11
1.2.4 桶 槽	0	0	0	1.89E+12	1.89E+12
1.2.5 製程管線(含未滿 6")	0	0	0	1.57E+13	1.57E+13
1.2.6 管路連接件(含未滿 6")	0	0	0	2.61E+12	2.61E+12
1.2.7 儀器管線	0	0	2.42E+09	5.28E+10	5.53E+10
1.2.8 雜項製程組件	0	0	0	1.06E+11	1.06E+11
1.2.9 內襯鋼板與燃料格架	0	0	0	9.54E+14	9.54E+14
1.2.10 通風元件(10%污染)	0	0	0	9.00E+09	9.00E+09
合計	0	0	2.42E+09	1.04E+15	1.04E+15
百分比	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	100.0%
2. 混凝土廢棄物					
2.1 活化混凝土(生物屏蔽)	0	0	0	1.04E+14	1.04E+14
合計	0	0	0	1.04E+14	1.04E+14
百分比	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	100.0%
2.2 非活化混凝土	0	0	1.59E+13	4.93E+11	1.64E+13
合計	0	0	1.59E+13	4.93E+11	1.64E+13
百分比	0.0%	0.0%	97.0%	3.0%	100.0%
3. 其他廢棄物					
3.1 二次乾性廢棄物(焚化減重後)	0	0	0	0	0
3.2 濕性廢棄物	0	0	0	2.10E+14	2.10E+14
3.3 保溫材	0	0	0	1.08E+13	1.08E+13
合計	0	0	0	2.208E+14	2.208E+14
百分比	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	100.0%
合計	6.00E+17	0	1.95E+15	2.40E+15	6.04E+17
註： 1. 本表污染類數值為各核種衰變至 2028 年 05 月 17 日之推估結果。 2.單位：Bq。 3.本表參考第九章表 9-12。					

表 8-3 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 (餘熱移除系統熱交換器)
Barsebäck	瑞典	HP/CORD D UV 程序	Unit 1(1 號機組)=93 Unit 2(2 號機組)=286
Jose Cabrera	西班牙	EPRI DFD 程序	RCS(反應器冷卻水系統)=29.4 Aux(輔助廠房)=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-Ozone 程序	準備中(2015-2022)

表 8-4 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 8-5 除污方式要點彙整

除污範圍	環境	系統	組件	結構
範圍說明	土壤/地下水	反應器冷卻水系統、餘熱移除系統及化學容積控制系統或反應器壓力槽。	熱交換器、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。	核三廠受污染建物、一號機及二號機圍阻體廠房、輔助廠房、廢料廠房、燃料廠房之結構、牆面、地面及天花板等混凝土材質。
除污規劃	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。 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。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 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，進一步確定污染範圍。	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機組運轉執照屆期後現場輻射偵測，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，或透過化學試劑以循環式或非循環式進行，以達到需要之除污效果。	金屬材質廢棄物，規劃採用 (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 (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。 (3) 機械除污技術(乾/濕式研磨噴砂技術、高壓水柱)	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、遙控型等設備。

除污範圍	環境	系統	組件	結構
	地下水除污技術如下： (1)抽出法 (2)抽出再處理法 (3)覆蓋封頂技術 (4)工程包封法		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。	
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。

除污範圍	環境	系統	組件	結構
除污程序	土壤： 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	除污範圍界定→ 決定除污因子→ 除污設備安裝→ 預氧化程序→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 8-4、圖 8-5、 圖 8-6	圖 8-7
時程規劃	核三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 114 年-116 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。

表 8-6 放射性廢氣、廢液產生之來源與組成

放射性廢棄物種類	產生來源	發生原因	組成性質
廢氣	為用過燃料池運轉產生之氣體。	因燃料束尚未移至乾式貯存設施，用過燃料池仍須運轉。	池水核種組成之霧滴或細微懸浮物質。
	拆除切割核設施產生之煙霧氣體。	系統、管路、設備拆除、切割作業。	污染管路表面核種組成之細微懸浮物質。
	一般管制區內之氣體。	金屬除污作業、混凝土表面刨除作業等。	除污試劑蒸氣、細微懸浮物質。
	保留區內設施之氣體。	二號低放射性廢棄物貯存庫、用過核子燃料室內乾貯設施之氣體。	空調氣體、檢整作業產生之懸浮微粒。
	廢棄物處理過程產生之廢氣。	焚化爐運轉產生之廢氣。	廢棄物焚化產生之細微懸浮物質。
廢液	除役期間所需維持運轉系統產生之廢液。	維持運轉系統內部用水、設施排水。	維持運轉系統、設施內部之核種組成。
	除役作業產生之放射性廢液。	系統化學除污作業、組件除污作業之二次廢液。	除污標的物之表面污染核種。
	保留區內設施之廢液。	二號低放射性廢棄物貯存庫、用過核子燃料室內乾貯設施之廢液。	一般廢水，或含少量放射性核種之空調冷凝水、檢整廢水及池水。

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	系統除污作業計畫提報主管機關審核。	114.09 (執行系統除污作業 前 1 年)
8-2	新設放射性廢液處理系統設置申請。	115.08 提出申請 131.03 完工啟用