

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

除役核能電廠之除污方式及除役期間放
射性廢棄物處理之研究

計畫編號：103FCMA004

執行單位：國立清華大學

計畫主持人：蔣安忠

報告作者：蔣安忠、趙得勝、林宇捷

報告日期：中華民國 103 年 12 月 16 日

(本頁空白)

目錄

第 1 章	前言	1
第 2 章	計畫目標與參考資料	3
第 3 章	除役核能電廠除污方式之研究	4
3.1	除役核能電廠除污方法的基本要素	4
3.2	除污技術概述	10
3.3	典型的除污技術	13
3.3.1	一般通用的表面除污技術	14
3.3.2	金屬材料的除污	15
3.3.3	對混凝土的除污	16
3.3.4	對管道的除污	17
3.3.5	其他新型除污技術	19
第 4 章	除役期間放射性廢棄物的處理	25
4.1	除役期間放射性廢棄物的分類與處理	25
4.1.1	固體放射性廢棄物	26
4.1.2	液體放射性廢棄物	29
4.1.3	氣體放射性廢棄物	31
4.1.4	用過核子燃料的處理	33
4.1.5	中子活化部件的分析驗證	35
4.2	除役期間放射性廢棄物處理之結論	36
4.2.1	廢棄物最少化	36
4.2.2	縱深化管理	37
4.2.3	具體的廢棄物管理與處置措施	38
4.2.4	延緩除役期程的安排	40
4.2.5	除役廢棄物的減量與再利用	43
4.2.6	除役過程放射性廢棄物的相關法規	45
4.3	法國對放射性廢棄物的處理經驗	46
第 5 章	討論與建議	47
	重要參考資料	50

圖目錄

圖 3-1 除役核能電廠流程示意圖	5
圖 3-2 核能電廠拆除物料的清潔程序	6
圖 3-3 除污過程的分類	8
圖 3-4 各式不同形狀的的 PIG 裝置	17
圖 3-5 不同材料的雷射波長吸收曲線圖	21
圖 4-1 低導電度液體放射性廢水處理流程圖	30
圖 4-2 洗衣廢水處理流程圖	31
圖 4-3 地面洩水與化學廢液處理流程圖	31
圖 4-4 典型的氣體放射性廢棄物處理流程圖	32
圖 4-5 我國用過核子燃料營運時程圖	34
圖 4-6 美國 Humboldt Bay 核能發電廠照片	42
圖 4-7 美國 Zion 核能發電廠照片	42
圖 4-8 德國卡爾斯魯厄理工學院實施的廢棄物分類處理與處置要求	44

表目錄

表 3-1 一般的放射性廢棄物除污方式	11
表 3-2 各種新型放射性廢棄物除污技術的特點和適用對象	23
表 4-1 日本濱岡核能電廠固體放射性廢棄物的推估產生量	27
表 4-2 日本低放射性廢棄物中各核種的濃度上限值	28
表 4-3 美國 Humboldt Bay 和 Zion 核能電廠延緩除役拆除時程的比較	41

第1章 前言

依照國家能源政策規劃，核一廠一、二號機將面臨運轉 40 年屆齡除役之先期作業規劃階段，核電廠按照法規規定在運轉屆齡 3 年前，即需擬妥除役計畫書，向核安管制單位提報申請核准除役審查。

核能電廠之除役，在經過全盤及完整之廠址特性調查後，接踵而來的工作便是繁複之拆除工程，其中包含用過核子燃料之搬移與解體拆除工程，工程細項則著重於放射性、污染程度較高的設備，在這些工程進行當中，將面臨系統除污、安全貯存、解體拆除等工程技術之考驗，同時也會產生數量龐大的廢棄物，其數量及性質，與所採取的策略、拆除及除污技術、物料回收標準及清潔標準劑量建議值有關，這些不同樣貌之放射性廢棄物各有不同的處理方式，其中固體放射性廢棄物部分相較於液體和氣體放射性廢棄物來說較易處理，但仍有較難處理之部分，例如爐心與附近部件中子活化程度之驗證評估、長半衰期活化產物之處理等，液體和氣體放射性廢棄物本身的流動性與貯存方式則更增加收集、貯存和運送方面的困難度。

針對核能電廠在除役拆除過程中所產生的大量放射性廢棄物，最重要的概念是分類管制並減少數量，隨後進行除污作業後妥善處置，過程中將使用不同的除污技術來應對不同種類的放射性廢棄物，同時必須確保所使用的除污技術可以有效除污，且不致於產生大量二次廢棄物。整個拆除過程所產生的放射性廢

棄物(含二次廢棄物)都應妥善處理，依循嚴格的管制措施，避免人員曝露及不當外釋而造成環境污染，業主所提的除役計畫應周詳地看待除役拆除過程中的除污作業和放射性廢棄物的管理、處置。

隨著除役日期逐漸逼近，對管制單位來說，除役審查工作的準備已是刻不容緩。雖然各國管制作法迥異，除役程序繁複，期望本計畫能夠從龐雜的資料中，理出一個頭緒，使未來擔任除役計畫的審查人員能理解各種常用除污技術的原理和適用對象，同時明瞭除役期間產生的放射性廢棄物的處置方式，於審查除役計畫時便能明確體察台電所提交之除役計畫的可行性，進行有效率的審查。

第2章 計畫目標與參考資料

本計畫的目標將針對除役核能電廠的除污技術及所產生之放射性廢棄物之處理，進行資料收集與分析研究，提出歸納整理之報告，並對除役計畫書中之相關章節提出建議事項、內容涵蓋範圍及審查要點與流程，以利核能電廠除役作業之執行。按照計畫書和合約規範，本計畫須進行下列項目：

1. 蒐集及研讀核電廠除役計畫相關法規及文獻，追蹤與掌握國外已除役或即將除役之核能電廠的現況，並整理分析核能電廠除役審查案例。資料提供來源為原能會、核研所、台電等單位提供，清大原科院及相關系所、清大原科中心亦有部分歷年研究資料，再加上 IAEA、美國 NRC 等核能相關機構的資訊，有非常充裕的資訊來源。
2. 針對除役核能電廠除污方式、除役期間放射性廢棄物之處理、除污工程之善後進行研讀、分析，提出歸納整理，並提出相關建議事項。
3. 依合約規範完成期末報告，內容包含封面、摘要、目錄、內文及參考資料，內文章節包含前言、計畫目標與參考資料、除役核能電廠除污方式之研究、除役期間放射性廢棄物除污與處理、討論與建議事項等章節。

本計畫的參考資料列於本期末報告結尾，並於報告本文中用上標數字索引，將所參考的資料註明於該頁面下方以便交互參照。標號前半依序為報告內文中所直接引用的參考文獻，其餘則為已蒐集並研讀過後之資料。

第3章 除役核能電廠除污方式之研究

102 年度物管局委託清大原科中心執行研究計畫「除役核能電廠特性調查之審查技術研究」及「核能電廠除役廢棄物審查技術之研究」，於過程中已經蒐集眾多國內外除役核能電廠之相關資料，其中有不少是關於核能電廠拆除解體工程之相關資訊，因該年度計畫主題與重點並非在拆除解體工程上，故未針對其內容進行相關研究。然而，除役核能電廠之拆除解體工程是整個除役過程最為核心之重要步驟，範圍廣大且內容繁瑣，在執行全盤及完整之廠址特性調查後，接踵而來的工作便是繁複之核能電廠拆除工程，其中包含用過核子燃料之搬移與解體拆除工程，工程細項著重於放射性、污染程度較高的設備，這些設備面臨到的首要問題便是除污方法的選用與執行，以及所產生之放射性廢棄物之處理。

本計畫蒐集及研讀核電廠除役計畫相關法規及文獻，並追蹤與掌握國外已除役或即將除役之核能電廠的現況，就各國除役案例中核能電廠除污方式相關資料進行研讀與分析後，提出歸納整理，羅列於本章節之內。

3.1 除役核能電廠除污方法的基本要素

核能電廠的除役過程包含停止運轉後的用過核子燃料移除、系統除污、安全貯存、設施與建物的解體、廠址復原及釋出等步驟，其中更包含除役廢棄物管

理、除役過程之善後與環境管理等重要步驟。如圖 3-1 所示，除役過程中的除污作業是很重要的一環，緊緊環繞在除役的各項重要步驟中，應針對不同的除污對象挑選不同的除污技術與方式，最終的目的是朝向有利於環境保護、人員健康、節省開支、避免資源浪費。

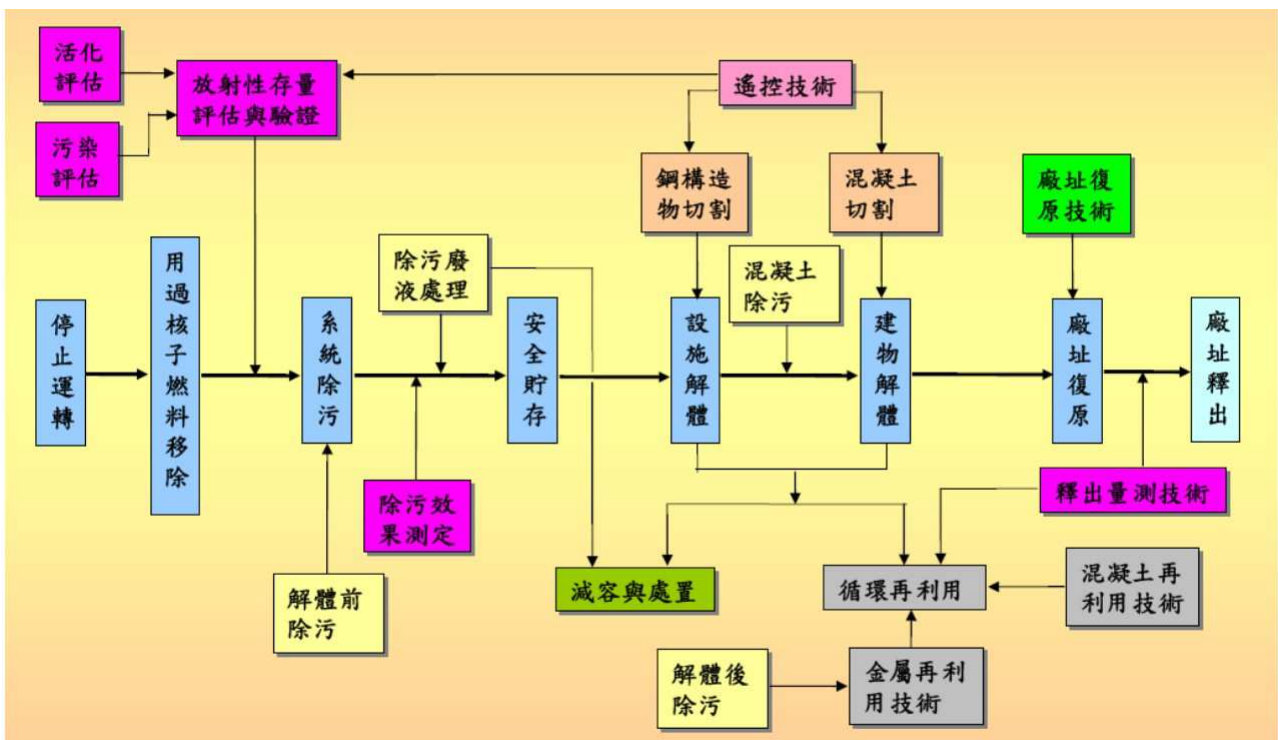


圖 3-1 除役核能電廠流程示意圖

核能電廠拆除的除污和清潔工作也有固定流程，拆除物料的清潔程序如圖 3-2 所示，基本的流程就是在拆除過程中取樣量測，判定是否需要處理，然後進一步切割除污，再進行量測、清潔，最後將清潔完畢後的廢棄物分類為放射性廢棄物和非放射性廢棄物，經過重複取樣量測，在管制機關之監督下進行外釋或妥善處置。

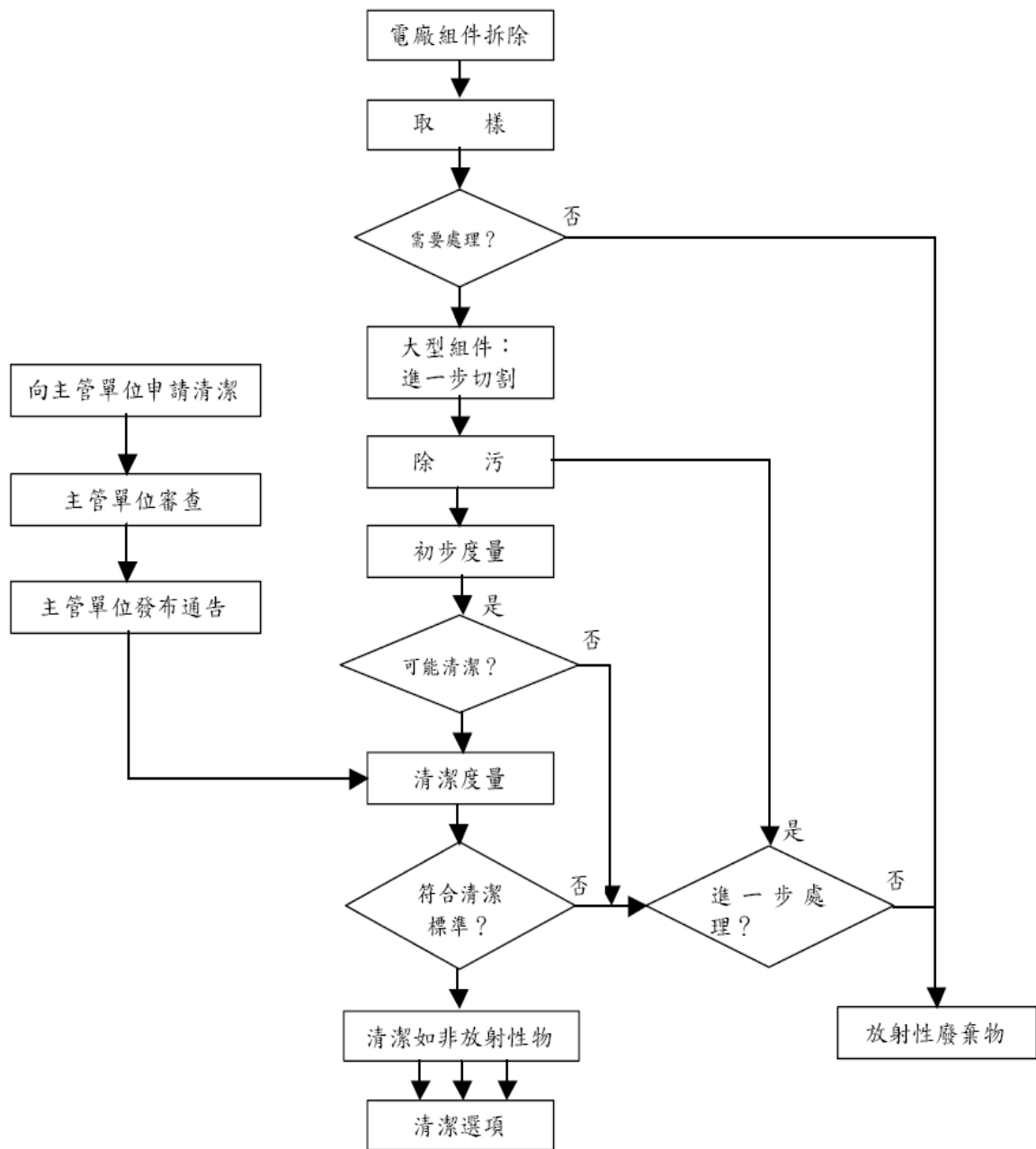


圖 3-2 核能電廠拆除物料的清潔程序¹

放射性除污的基本概念是利用清洗、加熱、機械、化學(或電化學)作用或其他方式來除去核設施或相關設備表面上的放射性污染物，相關技術的研究已將近 60 年。近幾年核能電廠紛紛面臨使用期限的終止與除役作業的需求，對放射

¹ 台電核能月刊第 341 期，第 26 頁，民 100 年 5 月

性除污技術的需求也逐漸提升，在此之前的除污技術通常只是針對核設施的檢修作為主要目的，除役和檢修所應用到的除污作業在基本技術上可能相似，但在規模上卻相差甚遠。也因此美國、加拿大、日本、歐盟、印度等國，為了除役作業的大規模化學除污方面做了非常多的研究²，國際間對此方面的研究自1970年初即開始起步，時間很早且涉及的範圍也較廣，對於相關的除污材料與方法技術都很深入。除此之外，中國大陸近年來也對除污技術進行了廣泛的研究，除了軍事用途核設施的除污外，對除役核能電廠的除污和用過核子燃料的後處理都累積很多的實際經驗。但就目前資料看來，這些除污相關技術都有著共同的缺點：操作溫度高、除污時間長、產生的廢料多等等，也因此近年來世界各國都想盡辦法解決這些問題，朝向縮短除污時間、減少廢料量和提高除污效果的方向發展。經過多年的除污技術研究，化學、機械、材料冶金、生物分解等多種類的除污技術不斷被開發出來，於是除污技術的研發有了很大的進展。

在實際應用上，特別是在核設施的除役過程中，除污方法的決策與方案的立即目標在於降低(或減少)職業及公眾輻射曝露，隔離物質表面或表面下的污染，使廢棄物管理或處置能經濟有效率。換言之，除污的目的是為了降低輻射曝露、回收利用舊設備和材料、減少需要特別處置的廢棄物體積，使場地和設施恢復到不受限制使用的狀況。

如圖 3-3 所示，除污一般分為四類，第一類是拆卸解體前的初步除污，其安

² IAEA, Decontamination of water cooled reactors, IAEA Technical Reports No.365, Vienna, 1994; PNL EPRI SA – 14675, 1987.

全目標是控制職業照射。第二類是拆卸解體後的深度除污，其安全目標是達到物料的清潔、解除控管以供回用。第三類內部回用的物料除污，其安全目的是達到有條件的清潔解除控管水準。第四類是使 α 嚴重污染物料非 α 廢物化的除污，其安全目的是把 α 廢棄物降級為可以近地表處置的中低放射性廢棄物。

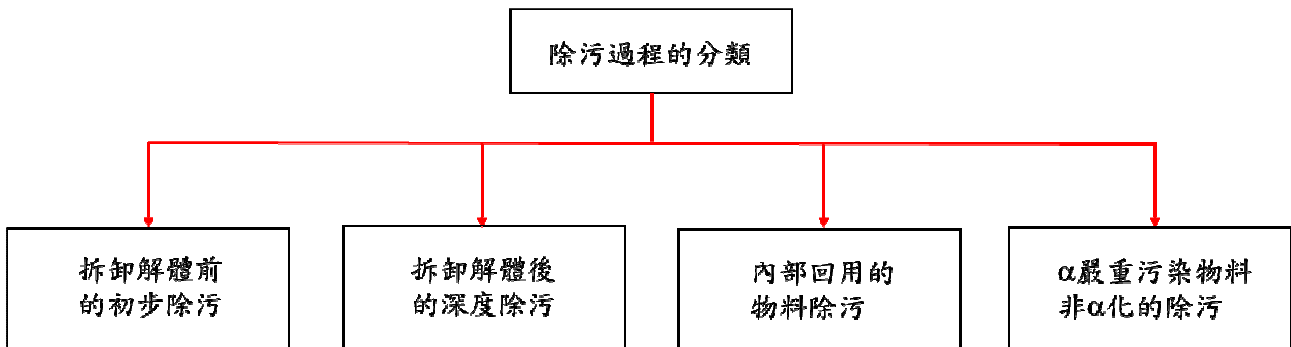


圖 3-3 除污過程的分類

除污之中期目標如下³：

- 移除鬆散污染並固定殘留的污染
- 減少剩餘需防護貯存的污染
- 設備、材料儘可能做最大的回收再利用
- 減少放射性廢棄物貯存體積(減廢、減容)
- 以最少限制及可接受的形式，如運送、貯存等隔離廢棄物
- 減少需防護貯存或長期監控之期間

而在進行除污工程評估時，應弄清楚下列問題：

- 為何此組件需被除污？

³ 李文鎮，核設施除污技術研究，核能研究所對內報告編號 INER-5263，龍潭，台灣，中華民國 97 年。

- 此組件能否無條件外釋？
- 此組件能被直接處置？
- 需要何種處置之場所？
- 處置場所可接受之輻射劑量及污染程度為何？
- 除污費用符合成本效益嗎？
- 應使用何種除污方法？
- 以前此場所曾經除污此種組件或部份組件？
- 產生之二次廢棄物為何？
- 產生之二次廢棄物有輻射傷害嗎？

雖然市面上可供使用的除污技術很多，包括清洗、加熱、化學(或電化學)作用、機械清理等等³⁻⁹。4,5,6,7,8,9,10

但從操作層面看，應考慮因素如下：

- 出現的核種及其物理狀態
- 受污染之物質及表面形式
- 受污染表面之大小、組態及位置及與其它表面之關係

⁴ American Society of Mechanical Engineer(ASME). The Decommissioning Handbook. Chapter 23, ASME, New York, 2004.

⁵ 張國源，核設施除役拆除技術，核能研究所內部報告編號 INER-OM-1114R，龍潭，台灣，中華民國 96 年。

⁶ European Commission. European Nuclear Decommissioning Training Facility. A Training Material, Belgium (2005).

⁷ US Department Of Energy. The Decommissioning Handbook CD Supplement 2004 (2004).

⁸ 李文鎮，核設施除污技術研究，核能研究所對內報告編號 INER-5263，龍潭，台灣，中華民國 97 年。

⁹ 吳台生、陳鴻斌、謝榮春，核子反應器設施除役除污技術審查研究，核能研究所對內報告編號 INER-3966，龍潭，台灣，中華民國 95 年。

¹⁰ IAEA. New methods and techniques for decontamination in maintenance or decommissioning operations--Results of a co-ordinated research programme 1994-1998. IAEA-TECDOC-1022, Vienna (1998).

- 受污染區域之可接近性
- 期望受污染表面在除污完成時之情形
- 期望除污達到之程度
- 在表面除污後需保有之功能特性
- 可用於除污之設備及物質，包括目前在廠區及在他處而可用者
- 工作人員安全及輻射劑量降至最少
- 經濟有效之替代方案，包括處置、替換或除污、再利用等之有關費用
- 將產生之廢棄物數量、性質及其處置費用，包括由除污溶劑所產生之二次廢棄物
- 人力資源及訓練需求

3.2 除污技術概述

除污的目的是為了降低輻射曝露、回收利用舊設備和材料、減少需要特別處置的廢棄物體積，使場地和設施恢復到不受限制使用的狀況，也須將鬆散易擴散的放射性污染物固定在原處，做好永久封存和最終處置的準備。

一般對除污的定義是：透過物理、化學或其他方法移除核設施組件、系統、結構物內、外表面存在的放射性物質，要達成此項目的必須先理解放射性核種如何與物體表面結合，才能選擇適合的除污方法。

一般來說，放射性核種和物體表面的結合形式有：

(1) 以分子間作用力結合的非固定性污染。此種污染容易去除，因核種和物體表

面並無發生化學反應，結合較為鬆散之故。

(2)以化學吸附或離子交換形式結合的弱固定性污染。此種污染因二者之間產生較為緊密的化學結合，通常伴隨一定的滲入情形，除污難度略高。

(3)放射性核種擴散滲入基材內部或基材材料內微量元素被中子活化產生放射性核種。這種情形的污染牽涉到內部的大量滲入，固定性很高，因此很難除污。

依據放射性核種和物體表面的結合形式不同，採用的除污方法也不同。

表 3-1 一般的放射性廢棄物除污方式

除污方法	說明
物理法	利用沖洗、吸塵、機械擦拭、高壓水/蒸氣噴射、磨料噴射表層剝離、超音波除污等方法，對污染物進行物理效應的處理。
化學法	利用化學溶劑清洗污染的區域和設施，以達到除污的目的。
電化學法	利用電解反應，使造成表面污染的放射性核種進入電解槽中，達到除污的目的。
熔融法	將低度污染的金屬廢料經熔鍊處理後，使大部分的放射性核種進入爐渣或尾氣中，少部分殘留於鑄錠內呈現均勻分佈。
生物法	利用微生物對放射性污染物的生物分解或吞食作用，除去這些物質，達到除污的目的。

對放射性污染的除污方法通常有物理法、化學法、電化學法、熔融法和生物法等(如表 3-1 所示)，以下概略加以說明。

(1)物理法

常見的物理除污方法有沖洗、吸塵、機械擦拭、高壓水/蒸氣噴射、磨料噴

射表層剝離、超音波除污等方法。主要又可分為三大類：機械除污法(又細分為表面淨化與表面移除)、物理表面清洗技術、熱清洗表面方法。

(2) 化學法

化學除污的主要概念為利用化學溶劑清洗污染的區域和設施，以達到除污的目的¹¹。所使用的除污劑包括有機溶劑、酸液、鹼液、氧化還原劑、配位化合物、介面活性劑、鹽溶液、緩蝕劑等。執行化學除污的方法可直接進行清洗浸泡，或將溶劑製成泡沫、乳膠、膏/糊狀物噴塗在待除污的區域或組件上。化學除污法廣泛應用於除去管道、組件、設備和設施表面上的固定放射性污染物。其方法主要可分為化學泡沫法、化學凝膠法、有機酸處理法、氟硼酸處理法、無機酸處理法、去污劑處理法、氧化還原處理法、配位化合物處理法、氣相除污法、紫外線/臭氧活化法、揮發/低溫熱脫附法等。化學除污技術的除污效果取決於除污劑的種類、濃度、作用時間、溫度等。

(3) 電化學法

電化學法主要是利用電解反應，將欲除污之組件作為陽極，電解槽為陰極，通電後使污染的表層均勻地溶解，使造成表面污染的放射性核種進入電解槽中，達到除污的目的。這種方法除污的效果良好，能適用於構造較複雜的組件，受電解槽的體積限制之故，也僅適於小體積的金屬組件。由於電解過程較為昂貴，經濟方面的考量也是需要評估的一環。

¹¹ Enserch Inc., Department of Energy Office of Environment Restoration. Decommissioning Handbook. DOE/EM-0142P (1994).

(4) 熔融法

透過材料科學的冶金技術，依靠熔融金屬進行除污，適用於低度污染的金屬類廢料。其原理為：將低度污染的金屬廢料經熔鍊處理後，使大部分的放射性核種進入爐渣或尾氣中，少部分殘留於鑄錠內呈現均勻分佈。這些鑄錠可轉用於製造放射性廢棄物容器或用做遮罩、圍阻之用，但若要用於其他用途，須經主管機關評估或同意。

(5) 生物法

利用特定微生物對放射性污染物的生物分解或吞食作用，除去這些物質，達到除污的目的。低污染的混凝土的除污可使用生物法加以處理。

目前國際上針對不同的除污對象已經有了很多具體的實施方法，如對於大塊厚重污染物採用的除污、反應器燃料池的除污、掩埋罐的除污、單一混凝土結構採用的除污、高放射性結構物的除污、石綿的除污、設備的除污方法等。

在下一節中，將摘要幾種典型的除污方式，提供參考。

3.3 典型的除污技術

依照前節所述，除污方法主要有物理除污和化學除污，針對不同的除污對象須使用不同的除污技術。由於使用水清洗的除污技術會產生二次污染物，且為較難處理的液體，也因此非水清洗技術已然成為當前放射性污染除污技術研究的一個重點，本節將重點介紹幾種典型的除污技術。

3.3.1 一般通用的表面除污技術

(1) 可剝離膜除污法

1980 年代隨著核設施的使用年限漸至，除役及除污作業需求日增，可剝離膜除污法是隨之發展起來的新型除污技術¹²，國際間對這項技術的相關應用做了大量研究，迄今已有相當多的實務經驗。概念上來說，這項技術是將成膜劑、塑化劑、剝離劑等成分配製成膠/糊狀物，再將其噴塗在受到放射性污染的物體表面上，表面污染物會和塗膜中的配位化合物產生化學反應，並經過塗膜的吸附作用，使得污染物得以脫離物體表面，等到塗膜自然乾燥形成固化的薄膜後，便可剝落膜體而達到去除和防止污染的雙重目的。這種去污劑可與電解、超音波等除污法合併使用，可以解決深層、滲入性高的污染和粗糙表面的污染，過程中不會產生放射性廢液，固體廢料也相對較少，具有很高的除污效率，對於放射性灰塵也有很好的壓制與固定作用，膜體本身不受氣候條件影響且易於回收，在環境大面積除污具有優秀的應用前景。

(2) 高分子聚合物除污劑除污法

這是一種使用高分子聚合物做為除污劑的除污法¹³，又稱做自脆形除污劑除污法。使用這種除污劑噴塗到受放射性污染的物體表面後，會形成一層能夠自行脆化破裂並能從表面自行脫落的薄膜。在整個成膜的過程中，隨著黏度增加，

¹² K. Archibald, R. Demmer, M. Argyle, L. Lauerhass, and J. Tripp, "Cleaning and decontamination using strippable and protective coatings at the Idaho National Engineering and Environmental Laboratory," WM'99 Conference, Feb 28 ~ March 4 (1999).

¹³ M. Varady, B. Mantooth, T. Pearl, and M. Willis, "Reactive decontamination of absorbing thin film polymer coatings: model development and parameter determination," American Physics Society March Meeting 2014, Volume 59, Number 1, March 3-7, 2014; Denver, Colorado (2014).

對放射性物質的吸附力也隨之增強，因此當薄膜成形並自行脫落後也將吸附著的放射性物質一併帶走，達成除污的目的。這一類型的去污劑通常以水做為溶劑，透過乳液聚合而成，具有低毒性、高穩定性、黏度適中、高除污效能的優點。這種技術屬於非水清洗技術，整個去污過程中不需用水清洗，與可剝離膜除污法相同，不會產生放射性廢液，具有良好的除污性能，使用上也很方便靈活。對於受污染對象的種類及表面特性要求不高，適合塑膠、金屬、陶瓷、木材等各種材料和不同粗糙程度的放射性污染物體的除污，是一種能夠保障室內環境、物體表面除污較為看好的除污技術。

然而，目前國際上對於此種技術的研究較少，特別是高分子聚合物的特性和穩定性尚有很多改進空間，例如：膜體易受環境溫濕度而影響成膜品質、膜體固化成膜的過程具有若干不確定性、脆化脫落膜體的收集回收技術尚待加強、膜體擴散的再污染問題等等。由於此技術的優缺點均很清楚，未來學者專家和工程技術人員於此部分的研究方向可以說是非常明確。

3.3.2 金屬材料的除污

目前對於金屬材料的除污，多半採用二氧化碳丸(乾冰粒)的方法加以處理。1970 年代，美國在應用乾冰的過程中發現了固體二氧化碳的除污性能，一直到了 1980 年代，乾冰清洗技術才實際被應用出來。在乾冰清洗系統中，液態二氧化碳經由乾冰製備系統備固化成乾冰方塊，然後再經研磨而成規格一致的乾冰粒，接著使用壓縮空氣加速乾冰粒通過噴嘴而噴射至物體表面，當乾冰粒被噴

射至物體表面時，乾冰粒破裂所產生的動能滲入基體材料，並使其散開，側向噴出的碎片，去掉了基體表面上的污染物，使污染物掉落地面。由於乾冰碎片立刻昇華產生上升力，從而加速污染物的去除。過程中揮發的二氧化碳不具毒性，可以直排大氣，產生的廢物少，與噴砂、噴冰等的去污方法相比有明顯的優勢。對清洗塑膠、陶瓷、複合材料和不銹鋼也都有效(參考<http://www.knightarmour.com>)。二氧化碳雖無毒性，但仍屬窒息性氣體，在密閉環境中能使人窒息死亡，工程上須提供良好的自然通風環境，才能避免工安意外。目前此技術的瓶頸在於乾冰粒的製備，並無法有效率地大量製備，此技術也因此受到限制。

3.3.3 對混凝土的除污

對於混凝土，除了使用生物分解法加以處理之外，通常是採用微波除污法來實施除污作業。美國橡樹嶺國家實驗室(Oak Ridge National Laboratory, ORNL)使用微波來轟擊混凝土表面¹⁴，使混凝土內部產生機械應力和熱應力，造成表面污染的混凝土破碎成碎屑，於此同時，利用真空系統收集碎屑，達到除污的效果。這項技術可以調整微波發射的頻率和功率來控制混凝土的去除，高頻微波可針對混凝土表層的薄層材料進行除污、低頻微波則應用於較厚的混凝土，至於如何調整，端看不同狀況的混凝土對微波的吸收效率而定。由於使用微波的關係，

¹⁴ T.L. White, R.G. Grubb, L.P. Pugh, D. Foster Jr., and W.D. Box, "Removal of contaminated concrete surfaces by microwave heating—phase I results," presented at the 18th American Nuclear Society Symposium on Waste Management Waste Management 92, Tucson, Arizona (1992).

此技術不適用於金屬表面的除污。此外，利用微波除污所產生的粉塵較少，表面不須潮濕，處理費用也相對較為低廉。

3.3.4 對管道的除污

對於管道的除污，可以採用 PIG 技術(pipeline pigging technology)¹⁵進行除污作業。PIG 清洗技術是一項由防腐專業延伸為管道處理的技術。始於 20 世紀 60 年代，主要用於管道內表面除鏽、除垢、脫水、乾燥及塗敷，是預防和清除管道結垢的良好技術。該技術裝備簡單、清洗時不必停輸、對管道無腐蝕、無環境污染、操作簡便、適宜作為常規操作定期進行。



圖 3-4 各式不同形狀的的 PIG 裝置¹⁶

¹⁵ https://www.rigzone.com/training/insight.asp?insight_id=310&c_id=19

¹⁶ <http://www.tdwilliamson.com/EN/PRODUCTS/PIGGINGPRODUCTS/Pages/Home.aspx>

PIG 清洗裝置主要由 PIG、發射接收設備、檢測設備等組成。PIG 是由特殊的聚氨酯材料製成的形如子彈的清洗材料(如圖 3-4 所示)，具有很好的彈性和韌性，在管道線路中的彎頭、T 形三通管接頭和彎曲管道部分都能輕易通過，並且具有抗拉伸力、抗剪切强度高和很好的耐磨性，能在較高壓力和溫度下進行清管而不損壞。PIG 的一般收縮率為 5%-50%，最大可達 65%，可連續通過 90 度的標準彎頭、變徑管、180 度的回轉彎頭、閘門和管接頭等處。PIG 發射接收設備包括發射器、接收器及輸送設備，在管道的一端用一個比實際管道直徑大一點的安有變徑接頭的專用設備(形如旋錐體結構的漸縮管)，把 PIG 推入管道，通過液壓泵或空氣壓縮機產生的液壓或氣壓作用使 PIG 在管道中行走，利用 PIG 與管道壁間的摩擦進行清污。PIG 檢測設備是安裝在發射器和接收器上的信號控制器，其作用是在發射和接收時，檢查發射和接收的 PIG 數量是否相等。流量計通過對 PIG 輸送流體流量的計算，來確定 PIG 在管道中的行走位置。通過連續測定和記錄發射器、接收器的動態壓力，可以掌握 PIG 行進中的狀態，並能監視升壓現象的發生以及能發現和防止 PIG 堵塞事故的發生。

PIG 清洗技術的特點如下：

- 適應性廣。一般情況下，各種管道都可以用 PIG 清洗。
- 適合於對超長管道的清洗。幾公里以至幾十公里的長管道，用 PIG 清洗能在較短時間內完成清洗。
- 可採用多層清洗方式。使用 PIG 清洗可以在管道清洗過程中分別在兩個 PIG 之間充入清洗用化學藥劑、漂洗水或空氣，分別完成清洗、漂洗或乾燥過程。

使清洗工藝大大簡化，可節約大量的藥品和設備，經濟上更加節約。

- 設備簡單、需用人員少、經濟效益高。

PIG 清洗技術對被清洗管線的要求如下：

- 能承壓的金屬或非金屬壓力管道；
- 管徑大於 50 mm 的管線；
- 管徑彎頭曲率半徑不小於管徑的 1.5 倍；
- 管徑的最大變形量不大於管徑的 20%
- 管線上的截斷閥應為球閥或平板閘閥；
- 管線上的管路附件的內徑應與管線內徑相同；
- 管輸介質溫度不大於 70°C。

PIG 清洗時須選用直徑比待清洗管路內徑略大的 PIG 材料，利用壓力介質的推動使 PIG 在管道內移動，在推動力和摩擦力共同作用下使 PIG 被壓縮，延徑向膨脹，與管壁產生強大的摩擦，使附著的垢層脫落，達到清洗的目的。目前 PIG 技術已經成為先進國家廣泛採用的管道清洗與維護的方法，美國和中國已將之應用於核設施的除役工程中。

3.3.5 其他新型除污技術

(1) 化學泡沫除污法

化學泡沫除污法是以泡沫載除污劑對放射性核種污染組件進行高效率除污的方法，這種方法所產生的二次廢棄物產量僅為一般化學除污法的 10% 或更

少，尤其適用於大體積空腔類型和結構複雜的核設施的除污，具有很好的除污效果，但具有一定程度的腐蝕性。這項技術最具代表性的是英、法聯合研發的兩步泡沫除污裝置¹⁷。

(2) 超臨界流體除污法

利用超臨界狀態下流體的高擴散性、低黏度、良好的溶解能力和獨特的分離性質，將超臨界流體與待去除的放射性污染物接觸，溶解其中的有害成分，然後藉助減壓、升溫的方法，使超臨界流體變為普通流體，分離出被溶解的放射性污染物，從而達到除污的目的。除污過程中無腐蝕、除污效率高、產生的廢料少，具有明顯的環境和經濟效益。

(3) 臭氧氧化法

臭氧氧化除污法是利用臭氧的氧化反應將難溶的腐蝕產物氧化¹⁸，形成易溶的鹽溶液後加以除去，除污效果良好。目前臭氧已廣泛應用於淨水工業中的殺菌消毒過程，1980年後應用於原子能工業，在放射性污染的除污作業中獲得了不錯的發展。

(4) 雷射除污法

使用雷射照射受污染的表面，促使表面的薄氧化層吸收光子能量，受熱分解從而消除氧化層，達到除污的目的。Ph. Delaporte 等人使用 XeCl 雷射進行了大

¹⁷ B. Fournel, S. Faure, J. Pouvreau, C. Dame and S. Poulain, "Decontamination Using Foams: A Brief Review of 10 Years French Experience," Paper No. ICEM2003-4526, pp. 1483-1489; 7 pages doi:10.1115/ICEM2003-4526, ASME 2003 9th International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation: Volumes 1, 2, and 3, Oxford, England, September 21–25 (2003).

¹⁸ Y. Yaita; M. Enda, H. Aoi; H. Sakai; N. Saito; N. Chujo and I. Inami, "Chemical decontamination using ozone oxidation process," 9th international conference on nuclear engineering; Nice Acropolis, France, Apr 8-12 (2001).

量的除污實驗¹⁹，獲得了在各種條件下(混合型或非混合型污染)對不同放射性核種(Cs、Co、Eu 等)的除污結果。對於混合污染的除污因數(Decontamination factor, DF)可達 15，而對於非混合型污染的除污因數可達 100。使用不同的雷射波長也有著不同的除污效率，視待除污物體對該雷射波長的吸收率而定，圖 3-5 為銅(Cu)、碳鋼(Carbon Steel)和鋁(Al)這三種材料對不同雷射波長的吸收曲線，由圖中可知較短波長的雷射具有較高的吸收率，除污效果較佳，但造價較為昂貴，且各波長的穿透深度亦各有差異，應用時須加以評估。

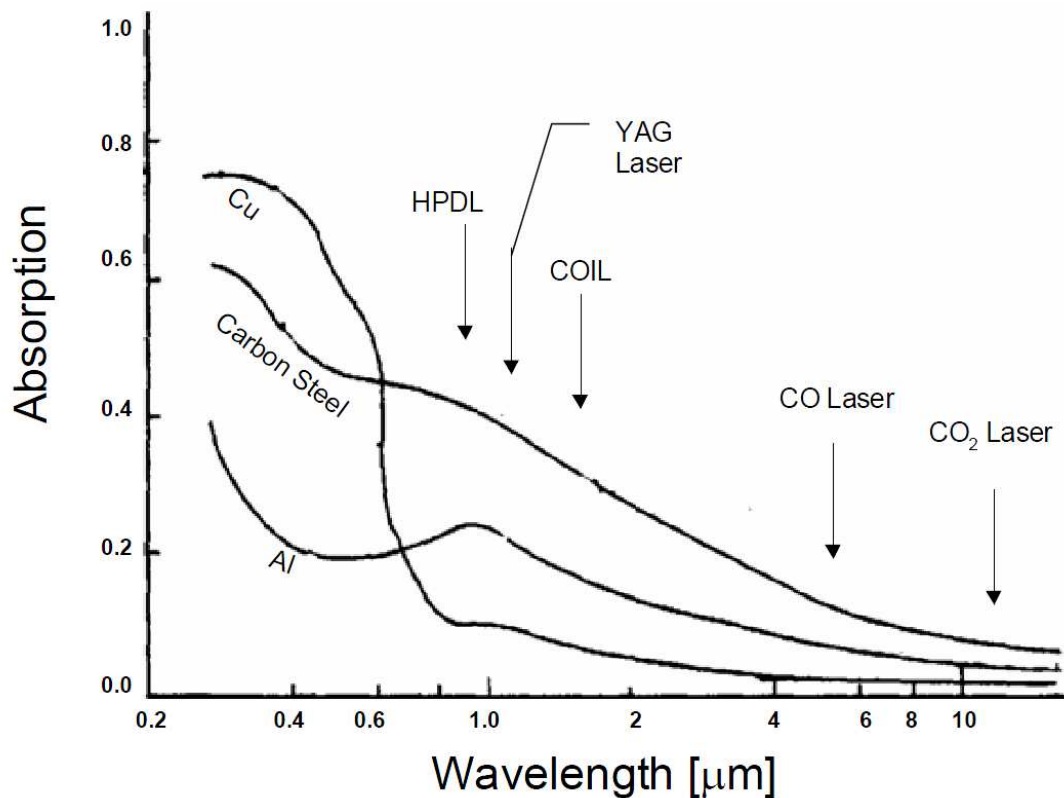


圖 3-5 不同材料的雷射波長吸收曲線圖

(5) 低壓放電法

低壓放電除污法是一種新型的表面除污技術，是透過電解溶解一層很薄的金

¹⁹ Ph. Delaporte, M. Gastaud, W. Marine, M. sentis, O. Uteza, P. Thouvenot, J.L. Alcaraz, J.M. Le Samedy and D. Blin, "Radioactive oxide removal by XeCl laser," *Applied Surface Science* **197-198** 826-830 (2002).

屬表面，使金屬表面變平滑而達到除污的目的。日本 K. Fujiwara 等人以被放射性物質腐蝕的不銹鋼和碳鋼做為樣品²⁰，將受污染金屬做為陰極、金屬銅作為陽極，在金屬表面通電後，作為陰極的金屬表面氧化層受熱脫落而被收集起來。在低壓放電狀態下，陰極表面的離子移動速度較快，短時間內便可達到良好的除污效果(80%)，除去金屬表面放射性腐蝕層。

(6) 電漿除污法

韓國 Yong-Hwan Kim 等人所研發的常壓電漿除污法²¹，是以氮氣做為載體，與少量(約氮氣載體的 1%)的甲烷(CH₄)和氧氣(O₂)進行反應，在常壓下與受到放射性鈷腐蝕的金屬表面噴射氮氣電漿，使污染核種部分發生羰基化反應而生成具有揮發性的 Co₂(CO)₈，利用化學方法加以回收即可達到除污的目的，這種方法對於金屬表面結合牢固的鈷氧化層具有很好的除污效率，除污率可達 95%。

(7) 超高壓水除污

雖然非水清洗除污技術是放射性除污的主要方向，但基於原有高壓水除污技術而發展出來的超高壓水除污技術仍然具有一定的除污效果。拜新式馬達幫浦技術所賜，已經可以利用高壓增壓幫浦將水增壓至 380 MPa 以上的高壓，然後強制水流通過小口徑噴嘴，產生 14 m/s 的高速水流，可快速清除表面污染物。若在其中加入磨料，可清除更深層的污染層。此方法的除污效果與水壓、流速、噴嘴結構設計、噴頭與表面距離和移動速度有直接關聯。當然，此項技術的缺

²⁰ K. Fujiwara, S. Furukawa, K. Adachi, T. Amakawa, and H. Kanbe, "A new method for decontamination of radioactive waste using low-pressure arc discharge," *Corrosion Science* **48** 1544-1559 (2006).

²¹ Y.H. Kim, Y.H. Choi, J.H. Kim, J. Park, W.T. Ju, K.H. Paek, Y.S. Hwang, "Decontamination of radioactive metal surface by atmospheric pressure ejected plasma source," *Surface and Coatings Technology* **171**, 317-320 (2003).

點在於會產生大量放射性廢水，施用的考量需與此法的快速除污特性達到一個妥協。

(8) 空氣爆破除污法

空氣爆破除污法是利用特殊氣室結構，瞬間釋放壓縮空氣所貯存的能量，形成氣爆，產生的空氣波動使周圍物質鬆動、破碎，達到清淤、除垢、裂碎等目的。主要應用於清洗管線、溝槽、水渠等，具有非常顯著的除污效果，在執行過程中不會污染環境，用於清洗管線的效果特佳，尚能節省電能、減少材料消耗、保護環境、改善生態，在除役工程技術中是一種備受矚目的除污方法。

表 3-2 各種新型放射性廢棄物除污技術的特點和適用對象

除污技術	基本說明和特性	適用對象
化學泡沫	以泡沫載除污劑，效率高，二次廢物少，略帶腐蝕性。	大體積空腔、結構複雜度高的設備。
超臨界流體	具備高擴散性、低黏度、良好的溶解能力。	小型且結構複雜度高的設備。
臭氧	利用臭氧將難溶的腐蝕產物氧化。	表面腐蝕物。
雷射	表面的薄氧化層吸收光子能量，受熱分解從而消除。	污染物對使用雷射之波長具有良好吸收能力。
低壓放電	電解溶解一層很薄的金屬表面。	金屬、不銹鋼類。
電漿	噴射氬氣電漿，使污染核種部分發生羰基化反應，再以化學方法回收。	金屬表面的鈷氧化層。
高壓水	使用增壓幫浦將水增壓，強化除污速度。	大型污染物表面。
空氣爆破	使用特殊結構壓縮空氣產生氣爆。	管線、溝槽、水渠。

表 3-2 摘要整理了以上各種新型放射性廢棄物除污技術的特點和適用對象，供審查人員參考。未來的新型放射性廢棄物的研發方向都是強化除污效果、減少二次廢棄物(或產生的二次廢棄物易於處理)，並希望能應用於舊有除污技術無法處理的特殊對象。

第4章 除役期間放射性廢棄物的處理

民國 100 年政府確立新的能源政策，決定國內既有核能電廠不延役，並依規定展開核能電廠除役計畫，因此台灣電力公司將於 104 年 12 月底前提出核一廠除役計畫，而主管機關為合理與嚴謹審查經營者提出之除役計畫，應掌握各國核子反應器設施之除役法規、實務經驗及關鍵安全問題與評估技術，並建立一套完善之除役廢棄物審查機制及具有學術專長之審查團隊，以期協助審查與檢查各項除役作業計畫，期盼除役工作可依照除役計畫之規劃順利執行，並於預定期程內完成。

實際執行除役拆除工作時，廢棄物的處理、貯存及可能處置路徑往往並不完善，後果常導致更進一步延遲或無限期封存，造成曠日廢時的漫長過程，於是經費不斷追加，衍生出各種問題。因此廢棄物處理對核能電廠的除役是一重大關鍵，然而對於除役廢棄物之審查管理，主要是依據放射性廢棄物分類及解除管制基準等相關法規，由於除役勢必衍生大量低污染放射性廢棄物，查明並引用放射性廢棄物分類與解除管制基準的法規，對縮減除役時間與有效管理是必要的步驟。

本章節討論除役期間放射性廢棄物的分類與處理，並對相關流程做出結論和建議事項。

4.1 除役期間放射性廢棄物的分類與處理

放射性廢棄物管理最好的方法為避免或減少廢棄物產生，除役期間放射性廢

棄物的產生無可避免，但也須盡量以來源減廢為優先原則，系統拆除與除污的過程也必須嚴格管制以減少二次廢棄物的產生。

放射性廢棄物產生的主要機制包括：核分裂、中子活化或污染；低放射性廢棄物分為運轉廢棄物與除役廢棄物；運轉廢棄物依產生時的物理型態可分為固態、液態與氣態；台電核能電廠運轉廢棄物更細分為固化廢棄物、脫水樹脂、可燃廢棄物、可壓廢棄物及不可燃不可壓廢棄物。

現行台電之核能電廠放射性分裂產物之主要核種為 Cs-137 及 Sr-90，放射性活化產物之主要核種為 Co-60、Fe-59 及 Mn-54，壓水式核能電廠則多了一項 Co-58，所以在核能電廠的拆除和除污過程中，應特別注意這些核種的含量。

核種組成，會隨著停機後的時間而發生變化。在反應器停機後 10 年，主要的核種是 Fe-55，接著由核種 Co-60 主導，而後是核種 Ni-63。從輻射劑量率來看，雖然是由半衰期約 5 年的核種 Co-60 佔主導地位，但反應器停機 40 年過後，Co-60 的活度將減少兩個數量級。

現行法令規定是 8 年內須要完成拆除工作，相較於國外延緩拆除的時間動輒數十年的過程來說，須要考慮的核種較多，活度也較高，除役計畫書應對預期的核種種類、活度進行評估和預測，避免過度曝露。

4.1.1 固體放射性廢棄物

由各國核能電廠的除役經驗顯示，廢棄物中最大宗的是廢混凝土塊與金屬，而廢混凝土塊中 95% 以上為受極低微或根本未受放射性污染，經簡單除污後，

絕大多數的廢混凝土均可依照一般事業廢棄物處理，或回收作為道路基底，甚至再作為建築骨材，廢金屬約 50%經適當處理或除污後可回收再使用；故透過適當之分類，將可大幅降低人力、物力、與經費的開銷。

以輕水式反應器的放射性物質總量為例，一座擁有 40 年運轉經歷的大型(100 萬 kWe 級)發電用反應器，在其核子反應器停機後，推測輻射強度約為 10^{17} 貝克 (Bq)；放射性物質總量也將集中於反應爐壓力槽，推測壓力容器及生物屏蔽等約佔有超過 99.9% 以上的放射性物質；而附著於其它設備或管線上的腐蝕生成物則為 0.1% 左右。

表 4-1 為日本濱岡核能電廠運轉和解體固體放射性廢棄物的推估產生量，表 4-2 則為日本低放射性廢棄物中各核種的濃度上限值。

表 4-1 日本濱岡核能電廠固體放射性廢棄物的推估產生量

(資料來源：日本濱岡核能電廠除役計畫)

[單位：噸]

輻射等級區分		運轉中的廢棄物*1	解體廢棄物	合計
低等級 放射性 廢棄物	輻射等級較高者 (L1)	30	1,530	約 1,600
	輻射等級較低者 (L2)	4,210	8,870	約 13,100
	輻射等級極低者 (L3)	—	13,080	約 13,100
	小計	約 4,300	約 23,500	約 27,800
無需視為放射性物質之物		—	40,160	約 40,200
合計		約 4,300	約 63,700	約 67,900

- 廢棄物量顯示為解體後除污處理後的物量。
- 包含已發生的隨附廢棄物 (伴隨工程發生的廢材)。
- 除役期間中所發生「非放射性廢棄物之廢棄物」的量約 128,700 噸。
- 小計值與合計值為無條件進位至百噸 (因進位處理，而有小計值與合計值不同的情況)。
- *1：顯示運轉中發生的保管量，目前顯示於發電廠保管的放射性廢棄物量。
- 日本核能發電廠的放射性廢棄物依輻射等級分類為高標放射性物質濃度 (L1 廢棄物)、低標放射性物質濃

度 (L2 廢棄物)、偏低標放射性物質濃度 (L3 廢棄物) 3 種。

- 高放射性廢棄物(L1)：深地層處置場處置法－將廢棄物於地下 50 至 100 公尺深度混凝土處置場處置，並監測 300 年左右。
- 低放射性廢棄物(L2)：混凝土坑處置－廢棄物於接近地表的地下混凝土坑結構中處置，並監測 300 年左右。
- 極低放射性廢棄物(L3)：溝渠處置－廢棄物置於地面溝渠中，並監測 30 至 50 年。

表 4-2 日本低放射性廢棄物中各核種的濃度上限值

低等級放射性廢棄物			
核種	濃度上限值(Bq/ton)		
	輻射等級較高者(L1)	輻射等級較低者(L2)	輻射等級極低者(L3)
Co-60	-	10^{15}	10^{10}
Cs-137	-	10^{14}	10^8
Sr-90	-	10^{13}	10^7
Ni-63	-	10^{13}	-
C-14	10^{16}	10^{11}	-
Tc-99	10^{14}	10^9	-
Cl-36	10^{13}	-	-
I-129	10^{12}	-	-
核種	10^{11}	10^{10}	-

核能電廠的固體放射性廢棄物分為濕性和乾性，各有不同的處理原則：

(1) 濕性固體放射性廢棄物

1. 粉狀樹脂、槽底污泥、濃縮殘渣等廢棄物以固化方式處理。
2. 粒狀樹脂脫水後以防水內襯廢棄物桶盛裝貯存。

(2) 乾性固體放射性廢棄物

1. 可燃固體放射性廢棄物以焚化方式處理。
2. 可壓固體放射性廢棄物以壓縮方式處理。
3. 不可燃不可壓固體放射性廢棄物裝桶貯存。

核能電廠的除役過程所產生的固體放射性廢棄物大致也可依照上述處理原則，雖然放射性廢棄物管理最好的方法為避免或減少廢棄物產生，但因在拆除過程中無可避免地會產生大量固體廢棄物，來源減廢變得沒有意義，妥善分類和採用高減容固化技術是大幅減少放射性廢棄物的重要關鍵。

所幸一般的固體放射性廢棄物性質都很安定，在處理過程中也不易發生外釋或再污染的可能性，如果暫不考慮未來永久處置場所的不確定性，在處理上其時只有時間和經費的問題，技術執行面上並無短期可見之障礙。

4.1.2 液體放射性廢棄物

液體放射性廢棄物有部分是來自濕式固體放射性廢棄物，主要包括廢樹脂、濃縮廢液、及反應爐淨化水系統所產生的過濾殘渣等，並且於系統除污的過程中，若使用溼式除污技術，則會產生液體型態的二次放射性廢棄物，無論其來源為何，液態放射性廢棄物的處置都是朝向調理、脫水、固化等步驟進行，其大致上的概念是把水分和放射性物質分離，經取樣量測後排放，再將餘下的放射性廢棄物依一般固體放射性廢棄物的原則加以處理。

在沉澱分離的過程中，應有完善具備暫存功能的放射性液體廢棄物處理系統，裝置目的為收集、處理和貯存放射性廢液，必須能夠容納並處理停機、起動、運轉時所產生之廢水，處理廢水時能使大部份處理後廢水能回收到系統再利用，還要能減低並控制排放廢水的放射性使不超過法規限制值，核能電廠仍在運轉時，廢液處理系統尚須考慮在運作時不能使電廠運轉或可用性受到限

制，但在除役拆除階段若要設立新的廢液處理系統，則不須考慮，若考量縮短延緩除役時程(見節 4.2.4)，則可利用現有仍具功能之廢液處理系統，以減少除役成本。

放射性廢液的導電度可直接反應該廢液內含核種的量，對低導電度廢液來說，其內含放射性核種量較少，其處理原則為經過濾、除礦、貯存後，視取樣結果是否符合標準再決定送回系統或排放至大海，高導電度廢液之處理原則為經濃縮處理後，凝結水送至低導電率廢液系統處理，除污用清潔劑則先經吸附或過濾再取樣確認符合排放標準後，排放至大海，各廢液的處理流程分別圖示於圖 4-1~4-3。無論何種廢水，都經過多重過濾、沉澱、取樣偵測後依進行外釋(合乎外釋標準)或再處理(不合外釋標準)，較高活度的放射性廢水進入廢水中和槽後將進行蒸發或沉澱過程後將濃縮廢液分離出來，進行固化和暫貯的工作。

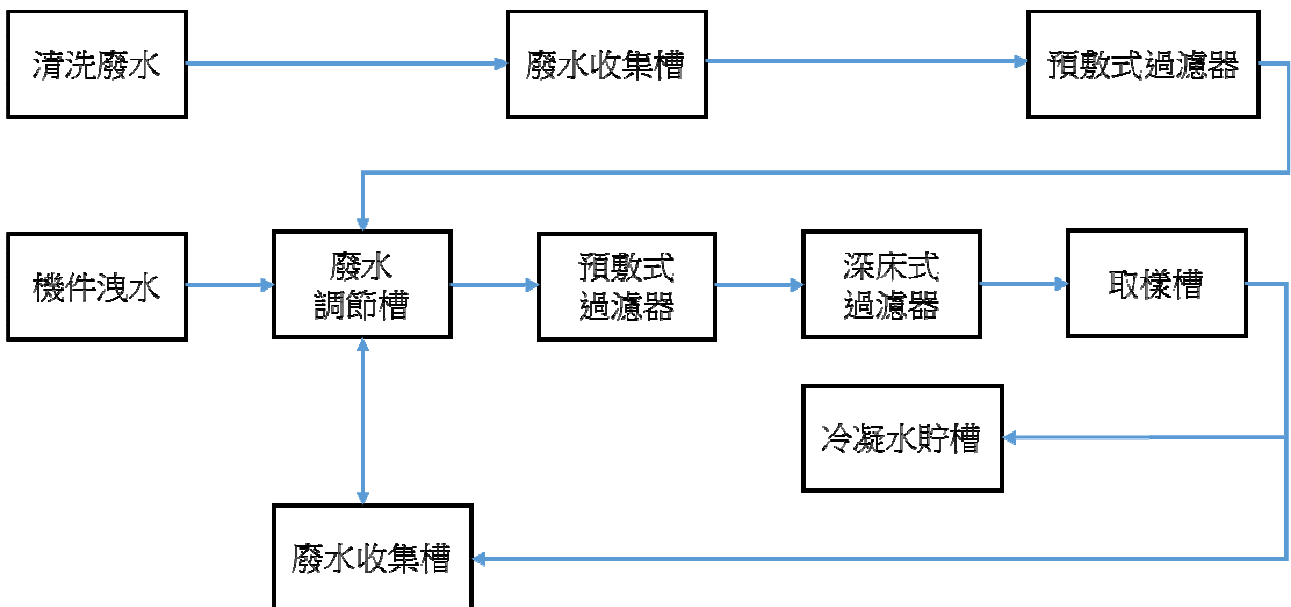


圖 4-1 低導電度液體放射性廢水處理流程圖

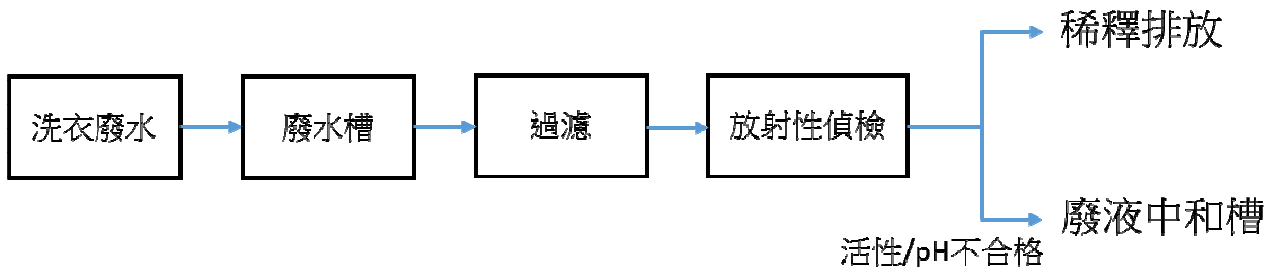


圖 4-2 洗衣廢水處理流程圖

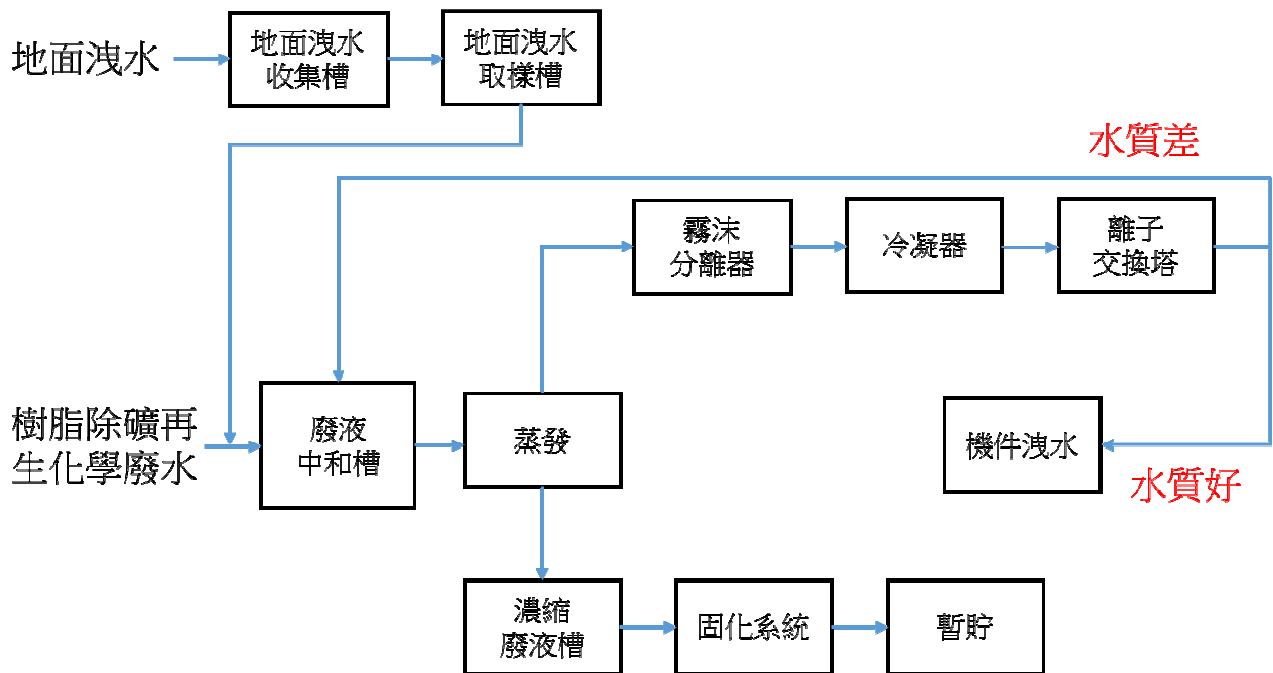


圖 4-3 地面洩水與化學廢液處理流程圖

4.1.3 氣體放射性廢棄物

氣體放射性廢棄物可能來自切割、拆除作業的懸浮物和粉塵、二次廢棄物的焚化、壓縮處理所產生的粉塵，以及一些除污使用的揮發性物質，這些數量相較於固體放射性廢棄物而言少得多，處理的方法是用活性炭吸附氣體狀的放射

性廢棄物，等到活度衰減之後，再用過濾器除去放射性物質，並測定氣體中的活度，確認沒有放射性之後才能從煙囪或排氣孔排出。圖 4-4 為典型的氣體放射性廢棄物處理流程圖，氣體放射性廢棄物放射性核種會累積在前過濾器、活性炭床及後過濾器中，這些組件內所使用的材料會被污染，成為固體低階放射性廢棄物。圖中虛線處為滯留管，其功能為延長氣體通過的時間，使氣體內短半衰期的核種有機會衰變。

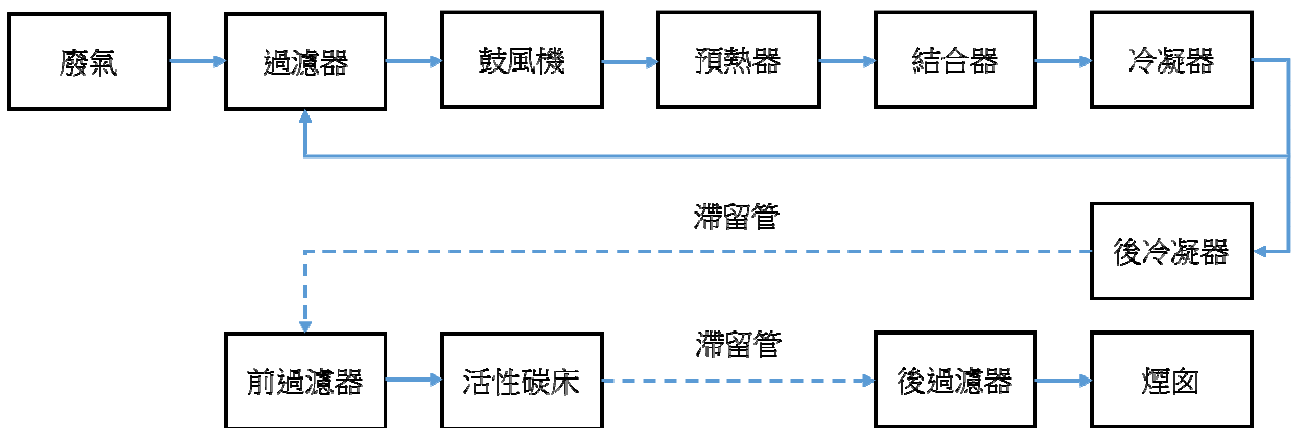


圖 4-4 典型的氣體放射性廢棄物處理流程圖

除役核能電廠所產生的氣體放射性廢棄物的量，取決於除役拆除的施工方式，一般而言由於反應器已經停止運轉，不會有中子活化產物出現，空氣中含有的放射性核種可能是拆除過程中所產生的微小固體灰塵，這些灰塵可能經由空氣流動而擴散，因此在拆除或進行除污作業時，要妥善監測，避免外釋。人員進行施工時也應配戴防護設備避免吸入，造成體內殘留。

由於氣體的不可固定性，須考量氣體廢棄物的轉移模式，在解體建築物的放射性物質方面，尤應考量：切割、拆除作業的粉塵、空氣中的懸浮粉塵移動

比例、過濾器排氣系統的過濾效果，及空氣懸浮物的產生移轉行為，控制其轉移在可以掌控的範圍之內。

各核能設施之放射性氣、液體排放管制作業，係依據主管機關訂定之『游離輻射防護法』第八條：「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之規定」。故各核能設施對於發電、處理過程或貯存期間產生之廢液，均須先經過放射性廢棄物處理系統處理，儘量考慮回收利用為原則，少量無法回收者，均須再經過過濾處理並執行取樣分析，確認放射性濃度符合前述安全標準之水中排放物濃度後，始可排放；否則送往濃縮器加熱減容後，加以固化裝桶。上述管制程序，核能電廠皆須有相對應之操作及品管作業程序書，確切落實執行。

4.1.4 用過核子燃料的處理

國際原子能總署「用過核燃料安全管理與放射性廢棄物安全管理聯合公約」已於 2001 年 6 月 18 日正式生效，該聯合公約主要目標包括：(1) 經由加強本國措施和國際合作，達成並保持符合全世界高安全水準之用過核子燃料與放射性廢棄物管理；(2) 在滿足當代人的需要和願望，而又無損於後代滿足其需要和願望的能力的前題下，確保在現在及將來都能有效地保護民眾、社會及環境，使能免於潛在游離輻射有害影響之危險；和(3)防止任何階段有輻射傷害的事故發生，並且一旦事故發生時，能減輕其後果。

目前在國際間的處理方式大致分三階段；首先將其置於燃料池冷卻貯存，俟燃料冷卻後再予以乾式貯存，最後深埋地下進行最終地質處置或再處理利用。我國目前的作法也相同採取三個階段的作法，其時程如圖所示。

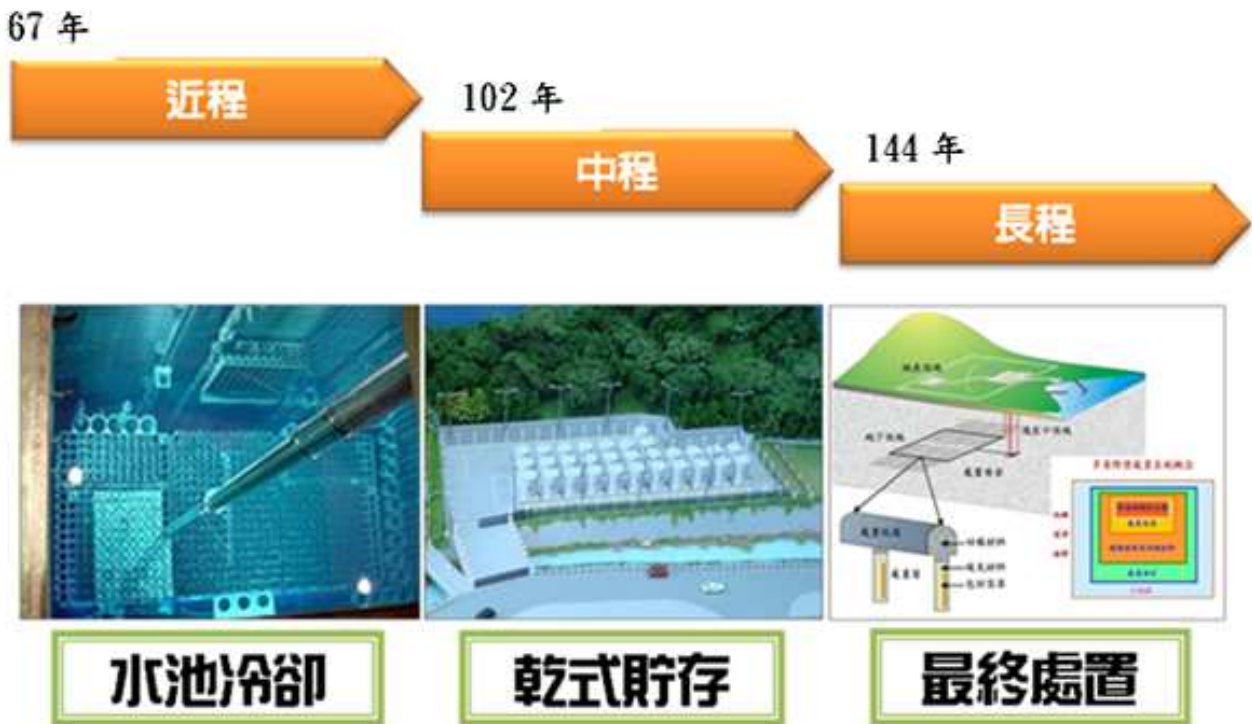


圖 4-5 我國用過核子燃料營運時程圖 (圖片來源：台電全球資訊網)

設置最終地質處置場所的爭議仍然很大，目前全球尚無用過核子燃料或高放射性廢棄物深層地質處置場在運轉，除有些國家採用再處理外，大多數國家利用廠內乾式中期貯存設施貯存用過核子燃料，美國有 7 座已核准執照終止的核能電廠採用獨立用過核子燃料中期貯存設施貯存用過核子燃料。

無論如何，用過核子燃料終須尋找適合的存放處，為了執行除役措施，須考慮廠址內用過核子燃料處理事故，確保安全。

4.1.5 中子活化部件的分析驗證

核子反應器在運轉時，會因爐心的中子照射而導致反應器本體、周圍的結構材料及屏蔽設備的活化，評估方法包括實際取樣法、測量法及分析法。直接測量及取樣會耗費過多人力，且難以充分掌握輻射的分佈，故通常是配合分析法一起使用。

從核子反應器到生物屏蔽為止的所有構造，必須因應等級，予以標準模式化，並輸入各區域的組成物質，及運轉時由爐心計算結果得出的中子數據。分析的主要工作內容包括中子流(Neutron Flux)量測、中子流分佈計算(2D&3D)、輻射分佈計算，及放射性物質和非放射性物質邊界推估。中子流量測乃使用數十組活化箔(activated foils)直接量測中子流分佈，使用的活化箔包括金箔、外覆鎳的金箔，以及鎳箔等三種箔片。中子流分佈計算主要運用 DORT 和 MCNP-5 分析軟體；輻射分佈計算則運用 ORIGEN-S/SCALE 5 進行。中子流計算結果與量測結果進行比對，當數值差異小於一個數量級時，結果即可被接受。

運用中子流分佈計算結果推估金屬受活化的程度與分佈，並定義當金屬材料受中子照射量小於 $6.25 \mu\text{Sv/h}$ 時，即視為不具放射性之物質。

此外，鋼筋內的微量元素 Co、Nb，以及混凝土中的微量元素 Eu、Co、Cs 等，因有可能受到活化關係，而對放射性物質產生重大影響。混凝土中的水份含量，因有助於中子減速，也有一定的重要性。

4.2 除役期間放射性廢棄物處理之結論

一座核能電廠除役後，將產生數量龐大的廢棄物，其數量及性質，與所採取的策略、拆除及除污技術、物料回收標準及清潔標準劑量建議值有關。由於核能電廠經過數十年的運轉，將產生大量放射性分裂產物(用過核子燃料)、中子活化放射性物質(反應爐壓力容器及爐內組件等)、還有許多放射性污染的組件等，在除役過程中也會產生大量放射性氣體、液體和固體廢棄物，這些放射性廢棄物的處理和處置的過程是除役核能電廠的重點之一。

除役開始前所有廢棄物的處理、貯存及可能處置路徑均需備齊，方可達事半功倍之效。然而實際除役時，往往並非如此，結果導致更進一步延遲或無限期封存，因此廢棄物處理對除役各方面是一重大關鍵。

對於除役過程中放射性廢棄物的處理和處置，世界各國的主管機關都十分重視，且不斷徵求學術研究單位的合作，開發新型放射性廢棄物的相關技術。我們就計畫目前所收集的資料加以研讀，發現在處置放射性廢棄物上有幾個重點觀念和方向，將分項歸納整理如後。

4.2.1 廢棄物最少化

廢棄物最少化是國際原子能總署廣泛宣導，並為各成員國共同認同的放射性廢棄物管理基本原則之一。目的是合理性地使廢棄物的體積、重量以及廢棄物中所包含的放射性核種降低到可達到的最少量。國際原子能總署已出版了關於

核設施除污和除役過程中，使廢棄物最少化方法的專書²²，內容強調除役不應增建新廢液貯存罐和廢棄物貯存庫，也不應把倒空的貯存罐或貯存庫再行盛裝廢棄物。原則上應儘量減少核設施除役過程中的二次放射性廢棄物產生量，在廢棄物處理與處置的過程中，也應遵守保護後代健康與不給後代增加過多負擔的原則。

達成廢棄物最少化的措施包括：

- 在選擇除役過程中的除污和切割技術時，優先選擇二次廢棄物少的技術。
- 嚴格進行分類，把一般廢棄物和極低放射性廢棄物分類出來。
- 採取減容措施，除壓縮減容外，亦可採用焚燒以獲得更大減容。(如果廢棄物做焚燒處理，除役過程應少用或不用含氯、氟的橡膠或塑膠製品，避免空氣污染)
- 在主管機關嚴格監管下，廢金屬(廢鋼鐵、廢銅、廢鎳、廢鋁)可經熔融處理後回收再利用。

4.2.2 縱深化管理

核能電廠的選址、建造、試運轉、運轉、除役是幾項重要的工作階段，其中包含各項管理措施和標準作業流程，服役中的核能電廠應確保各項安全防護措施，而核能電廠的除役也同樣應有嚴密的管理與流程，特別是廢棄物管理方面，應與核電工業的安全防護一樣，在設計建造時就應該預見在其安裝、維修、

²² IAEA. Methods for the minimization of radioactive waste from the decontamination and decommissioning of nuclear facilities R. Vienna : IAEA Technical Reports , 2001.

拆卸和除役等過程中，採用不同工藝技術的廢棄物產生情形，預先規劃並實現管理和制度的縱深化。其基本觀念在於核能電廠在服役期間並不會產生大量廢棄物，但在除役的切割和拆卸過程中會在短期內產生大量的廢棄物，在這些廢棄物中，大部分都是放射性很低的廢棄物或一般廢棄物，經過適當處理後便能依照一般事業廢棄物處理，除役拆除的過程中若能妥善管理並監測過程，可以避免再度污染的產生，也能在拆解過程中將不需管制的廢棄物分類出來，大量減少放射性廢棄物的產生。因此，在除役作業開始時就應該規劃廢棄物的管理。

其做法如下：

- 設法減少二次廢棄物的產生，並為可能產生的二次廢棄物預備處理措施。
- 對所產生的廢棄物進行即時監測和分類。
- 廢棄物的包裝需滿足運輸、貯存和處置的多功能要求。
- 廢棄物暫存庫只暫存廢棄物，要保證可回取。
- 廢棄物最終處置有困難時，只能暫作貯存，但業主要對廢棄物處置作出承諾。

4.2.3 具體的廢棄物管理與處置措施

除役產生大量各式各樣物質類型，這些物質能被以放射性廢棄物處理與處置或能被除污後作為非放射性物質釋出，因此核設施除役階段廢棄物管理比運轉階段更具有挑戰性。放射性廢棄物的大量產生是除役核設施過程中不可避免的結果，完善而具體的廢棄物管理與處置措施應涵蓋並貫穿廢棄物的產生、運

輸、處理、整備、暫存、處置和長期貯存。業主應備妥詳細的廢棄物處理與處置計畫，提出安全、有效的處理、包裝、裝卸、運輸與最終處置放射性廢棄物的技術方案，並關注新的處理技術，不斷進行相關技術的研發。

任何核設施類型整個生命週期所產生的放射性物質與放射性廢棄物可區分為三大類，分別為：運轉廢棄物、維護廢棄物及除役廢棄物，前二者可利用既有處理設施處理，而除役廢棄物則需小心管理，以確保在環境與經濟適當條件下能夠供再利用、貯存或處置。按照國際和國家有關規定,對除役中產生的放射性廢物應按其種類、等級分別予以處理與處置。就一般規定來說，放射性廢棄物(含運轉中會產生的物質)必須依照其性質及輻射等級，進行容積減少、固化等處理後，先臨時保管於貯存庫，待除役結束前再搬出廢棄設施，禁止將放射性廢棄物與一般廢棄物混合收集、存放，嚴禁把易燃、易爆、易腐的廢棄物與放射性廢棄物混合收集、貯存。超鈾廢棄物與非放化學毒物不可送低、中放射性廢棄物處置場處置。另外，必須在開始進行反應器區域解體拆除工程前，先確定貯存地點，若無法確定時，則應延長安全貯存期間，而不需以放射性物質處置的物質及非放射性的廢棄物，則應盡可能再次利用。建議可訂定對低放氣體、氣溶膠及低放廢液的排放與監測要求，以及對固體放射性廢棄物的暫存與處理要求。

大多數國家用於中、低放射性廢棄物的最終貯存場已投入營運，但高放射性廢棄物場地(用於貯存用過核子燃料或者經過後處理的玻璃固化廢棄物以及長壽命或高熱輻射廢棄物)卻一直懸而未決。由於核能工業部門正在積極負責地管

理廢棄物，提出具體的廢棄物管理和處置措施，若能有效執行，放射性廢棄物處置對環境的影響將是很微小的，甚至毫無影響。為此，處理高放廢棄物和用過核子燃料的設備的立即營運也必須跟上管理措施的脚步，不該因為其他企圖而持續延宕，同時也必須持續研發能減少廢物量或縮短其有害時間的新技術和新工藝。

4.2.4 延緩除役期程的安排

核能電廠除役時所產生的廢棄物量的多寡取決於採用何種除役技術和方式，廢棄物的產率和處理技術也與除役是採用立即拆除或延緩拆除的時程安排有關。一般認為反應器停止運轉後應延緩數十年(30~50年)再作拆除，利用這數十年的延緩時程，可使短半衰期的放射性核種衰變殆盡，可以很大幅度地降低除役工作人員的輻射曝露，亦可減少低放射性廢棄物的體積。

然而根據近幾年核設施除役的相關經驗，採用立即拆除也有值得讚賞的優點，其中最重要的一點是能大幅降低整體費用的開銷，因為廢棄物的處置費用隨時間上漲劇烈，以美國為例，1950年代的低放射性廢棄物處置費用每平方公尺約數十美元，現在則高達20,000美元/平方公尺，短短60餘年的時間上升了數百倍，人力和其他相關物資成本尚且未加入考慮。成本考量之外，尚有下列數項優點：

- 場址可以較早獲得使用。
- 降低延緩拆除期間所需之監管費用。

- 反應器專業人員可同步參與除役拆除工作。
- 既有的水電、通訊、輔助、廢物處理等設施於拆除時能直接利用。

核能電廠除役方式的選擇與一個國家的政治、經濟和文化傳統有關，各國國情不同，也應當用不同角度看待延緩拆除的問題。

法國相關單位認為在取出燃料元件及可切割、拆卸、貯存的組件後，應等待至少 50 年後才能進行後續拆除工作，英國打算等待 100 年後拆除，美國安全部門則越來越傾向於在短期內進行拆除的方案，美國正在進行之除役電廠，像是 Humboldt Bay 和 Zion 核能電廠，都先經過一段安全貯存(SAFSTOR)的過程，封閉電廠一段時間後，才開始著手進行除役拆除工作，如表 4-3 的記載，Humboldt Bay 和 Zion 核能電廠目前這二座電廠均已進入拆除(DECON)階段，從 SAFSTOR 到 DECON 所經過的時間均未超過 25 年^{23, 24}。雖然並不是停止運轉後立即進行拆除，但相較於英、法的除役觀念，其延緩拆除時間已經大幅縮短。圖 4-6 和 4-7 分別為 Humboldt Bay 和 Zion 核能電廠於 2010 年所拍攝的照片。

表 4-3 美國 Humboldt Bay 和 Zion 核能電廠延緩除役拆除時程的比較

核能電廠	停止運轉時間	SAFSTOR 開始時間	DECON 開始時間	預計終止時間
Humboldt Bay	7/2/1976	7/16/1985	Dec 2008	12/31/2015
Zion	2/13/1998	3/9/1998	11/14/2013	12/31/2020

²³ <http://www.nrc.gov/info-finder/decommissioning/power-reactor/humboldt-bay-nuclear-power-plant-unit-3.html>

²⁴ <http://www.nrc.gov/info-finder/decommissioning/power-reactor/zion-nuclear-power-station-units-1-2.html>



圖 4-6 美國 Humboldt Bay 核能發電廠照片



圖 4-7 美國 Zion 核能發電廠照片

德國政府在綠黨的壓力下，傾向於在設施停止運轉後短期內拆除，東歐因緊急關閉核電廠會導致電力短缺，可能採取更靈活的選擇，可能為各大主要核能電廠提出各種延役方案，推遲相關的除役工作。我國則是規定 8 年內完成拆除工作，是傾向於短期內拆除的作法，勢將面臨較高核種活度的問題，對參予

拆除或除污作業的工程人員多少都會造成較多的曝露，對於輻防安全管制方面不可不慎重考量。

4.2.5 除役廢棄物的減量與再利用

對於除役過程產生的放射性廢棄物，須針對不同技術和作業方式採用適宜的方法以減少其產量，並透過嚴格的監測與處理後再利用。

除役廢棄物減量策略包括來源減量、防止污染擴散、循環與再利用及廢棄物管理最適化。任何廢棄物減量策略第一個步驟是使放射性廢棄物產生最小化，當產生放射性廢棄物無法避免時，應用適當的廢棄物管理技術是最後一個步驟。放射性產生與擴散機會最小化可使放射性廢棄物產生最小化，減廢是核設施整個生命週期必須維持的活動，建立適當政策與文化以達到廢棄物減量是電廠管理的主要責任。

放射性廢棄物管理優先順序依序為避免產生、減廢、再利用、循環、能源回收及最終處置。物質或廢棄物管理主要著重於隔離、除污及解除管制程序，若隔離、除污及解除管制程序適當作好，除役程序所產生的放射性物質需處理與處置於放射性廢棄物處置場的數量便可大幅降低。

對於低放射性廢棄物的控制標準和清潔解除管制基準，世界各國有不同規範，而放射性物質解除管制的法規依據，是除役的重要層面，直接影響除役工程必須處置的廢棄物體積。其共同的基本原則在於：廢棄物產生前應已進行輻射及污染狀況的調查與偵測，以確定各物件的放射性存量，且可能已進行先期

的除污或輻射熱點拆除，俾使拆除的廢棄物可經輻射偵檢後，符合輻防計畫的「放行標準」者可視為「一般事業廢棄物」。

國際原子能總署於 2004 年 8 月出版安全標準系列第 RS-G-1.7 號報告，報告中公布解除管制基準，劑量標準為對民眾個人有效劑量低於 10 $\mu\text{Sv}/\text{yr}$ 。德國與日本依循國際原子能總署方式，均訂定法律規定解除管制基準。日本管制機關於 2005 年決定採用該基準作為立法依據，詳細資料可參閱物管局委託研究計畫研究報告「核能電廠除役廢棄物審查技術之研究」(計畫編號：102FCMA006。)

圖 4-8 是德國卡爾斯魯厄理工學院(Karlsruher Institut für Technologie)實施的廢棄物分類處理與處置要求，可供廢棄物回收參考。

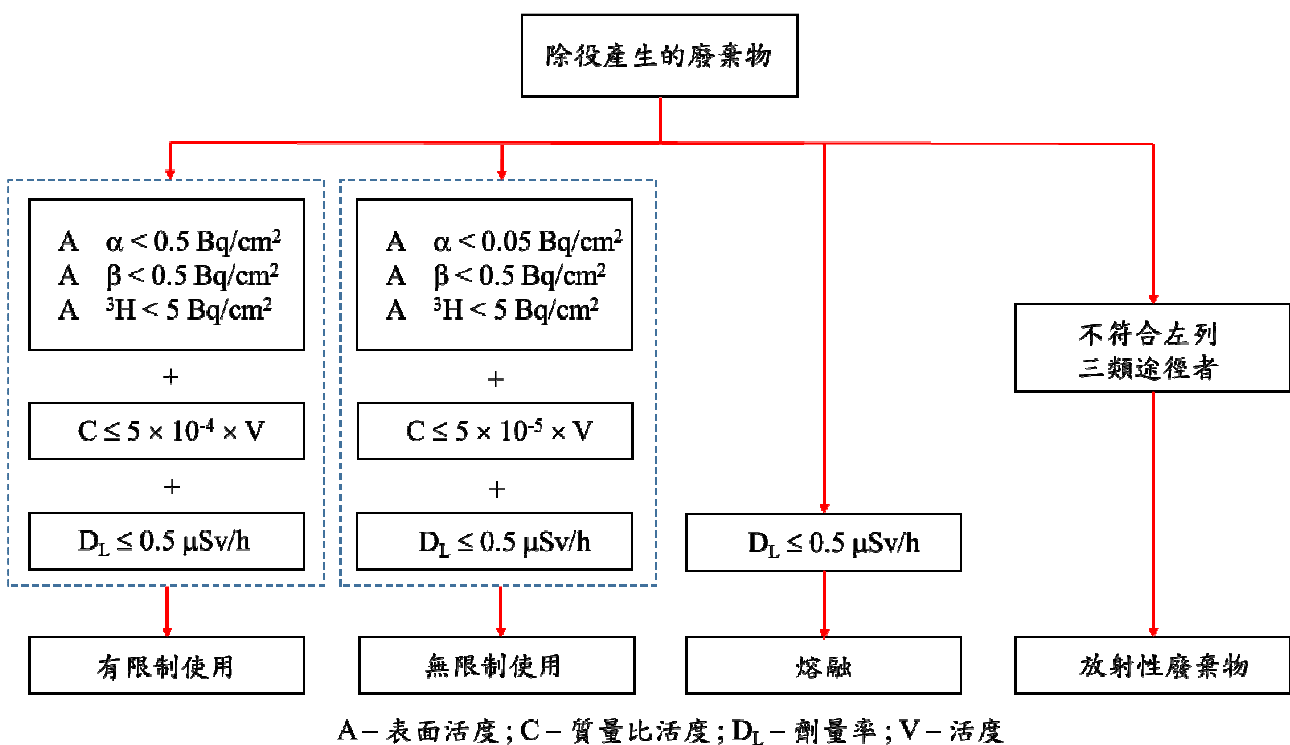


圖 4-8 德國卡爾斯魯厄理工學院實施的廢棄物分類處理與處置要求

4.2.6 除役過程放射性廢棄物的相關法規

核能電廠的除役工作是能與核能電廠興建相提並論的重要步驟，在眾多核能電廠逐漸面臨除役問題時，其重要性逐漸被彰顯出來。相關單位須針對除役過程產生的廢棄物訂定相關法規、標準、導則，這些規範中必須預期各種可能發生的狀況，除役產生的放射性廢棄物必須依據有關的法規、標準和導則進行處理。

依據行政院環保署 2009 年 12 月 2 日修正的「開發行為應實施環境影響評估細目及範圍認定標準」第 31 條及 2010 年 2 月 26 日修正的「開發行為環境影響評估作業準則」第 46 條，核子反應器設施之除役應實施環境影響評估。

依據原子能委員會 2003 年 1 月 15 日發布的「核子反應器設施管制法」第 21 條，核子反應器設施之除役，應採取拆除之方式，並在主管機關規定之期限內完成。前項之拆除，以放射性污染之設備、結構及物質為範圍。第 22 條規定核子反應器設施之除役，其拆除後之廠址輻射劑量，應符合主管機關所定之標準。

依據「核子反應器設施管制法」第 23 條，核子反應器設施之除役，經營者應檢附除役計畫，向主管機關提出申請，經審核合於下列規定，發給除役許可後，始得為之：

1. 除役作業足以保障公眾之健康安全。
2. 對環境保護及生態保育之影響合於相關法令之規定。
3. 輻射防護作業及放射性物料管理合於相關法令之規定。
4. 申請人之技術與管理能力及財務基礎等足以勝任除役之執行。

前項之除役計畫，經營者應於核子反應器設施預定永久停止運轉之三年前提出。

4.3 法國對放射性廢棄物的處理經驗

核能簡訊第 107 期中詳細描述了法國對放射性廢棄物的處理經驗，由於法國是世界上積極使用核能的國家之一，境內運轉中的核能電廠非常多，也具備成熟的運轉、管理及除役經驗，這些經驗可以做為我國進行除役計畫的審查及除役實際工作重要的參考依據。

大致上來說，法國對於放射性廢棄物仍著重於詳細的分類，依其特性分別處置，由管理專責機構—國家放射性廢棄物管理局(ANDRA)負責廢棄物的處置工作，在管理上首重民眾健康和環境保護，法國原子能委員會(CEA)則負責高放射性廢棄物轉化、分離、固化包裝及長期貯存的研究，兩個單位的相關研究則由核能安全局(ASN)、核能安全及輻射防護研究所(IRSN)、國家放射性廢棄物審查委員會(CNE)等單位共同監督、審查，並舉辦全國公聽會及採納國會科學技術專家建議後，由工業、環境及研究 3 個部會共同草擬放射性廢棄物法草案，法國國會於 2006 年 6 月 28 日通過放射性物質及廢棄物長期管理法(Act 2006-739)，做為法國處理放射性廢棄物的指標，這項法案包含了放射性廢棄物與用過核子燃料的管理、管制單位的組織架構、新建設施的釋照與審查、廢棄物處置場所的建立、地方監督委員會的成立、核能研究的發展等，可以說從上到下、由近至遠都有著嚴謹且充分的規範和導則，其中尚包含舉辦民眾公聽會與接受地方監督委員會和國會審查的相關規定，在各單位的重重監督下，消除法國民眾對放射性廢棄物危安的疑慮。

第5章 討論與建議

本研究介紹了數種核能電廠除役過程中可能用到的除污方法，並簡述其原理和特性。總結來說，對於小型物件表面的除污，金屬表面的除污可使用低壓放電法；超臨界流體擴散性高、黏度低，適合精密儀器和複雜組件的除污；具有複雜表面附著牢固的放射性氧化層可使用雷射除污、臭氧氧化、電漿除污等方法；管道類的組件則以 PIG 技術為主。以上幾種方式由於需要特殊除污容器或污染物本身構造限制，不易用於大型物件的除污。對於大型物件的除污，則須選用可剝離膜、自脆型除污劑、氣溶膠技術等除污方法。主要的發展趨勢則是朝向非水除污技術，用以避免二次廢棄物的產生。

除役過程中的廢棄物管理計畫應考慮除役過程中產生的多種廢棄物，依其特性和毒性路徑予以妥適分類處理，並著重於這些廢棄物的安全管理，在策略上應該要主動避免一些可能發生的潛在威脅，像是實際暴露、潛在曝露、以及污染可能擴散的風險，這些問題必須在除役工作進行中即予以嚴密控管，不能等到除役後期或後續環境復歸整理工作時再予以亡羊補牢，一旦污染擴大，則所造成的後果將難以估計，最終可能面臨無法處理的困窘。同時也應重視安全管理與最少交叉污染及二次廢棄物產生的最佳化，透過除役程序、拆除技術的控制、污染控制、廢棄物分類、有效的加工和某些情況下管理者的控制和內部審查，並依照法規管制規定釋放低活性廢棄物，擬定廢棄物再使用的策略，從

而有效縮小放射性廢棄物的體積。

此外，在進行除污及相關拆除工作時，額外應注意的事項包括：

- 使用相關切割、拆除技術時應避免氣體、碎片、煙塵擴散於圍阻體內造成二次污染。
- 對於無經驗或少經驗之工作人員，應盡速建立其良好之核能工作場所觀念，避免人為意外事故發生。
- 須建立跨部門良好的合作關係。
- 執行放射性物質外釋時，建議參考美國環保署 MARSAME (Multi-Agency Radiation Survey and Assessment of Materials and Equipment manual)之規定²⁵。
- 廢棄物管理系統應有能力處理所預期除役時，來自於清除、拆除和破壞後的廢棄物，假如不是，就須提供一個新的場所來處理。
- 丟棄廢棄物所考量的地方和沒有適合的場所可獲得的時候，評估下列除役的方案：準備和維持反應器主體在安全圍阻體裡；拆除反應器主體和貯存產生的廢棄物在適合的暫存場所；或轉換所有的設施或部分至貯存或丟棄場所。
- 須注意非放射性廢棄物的危險物質的存在(例如：石棉)，並確實注意廢棄物對於工作人員、大眾和環境的潛在影響。

目前除役審查導則對於除污方式及除役期間放射性廢氣、廢液處理這部分已有滿完整的指導方針，其對除污範圍的界定、除污作業的流程規劃、除污技術的選定、二次減廢措施等方向均有詳細描述，建議增加對除污過程可能產生的

²⁵ <http://www.epa.gov/radiation/marssim/marsame.html>

廢棄物預估數量及其可能擴散至廠區外的風險評估，總結來說，我們對於審查導則相關章節的幾點補充建議如下：

1. 關於除污方式

- a. 分類說明除污的對象、範圍和對應之除污方式，是否清楚呈現，使審查者可一目了然，並說明應用該技術的理由和預估除污效能。
- b. 檢閱是否包含除污過程中二次放射性廢棄物的預估數量，以及放射性廢棄物是否有不當外釋或擴散的風險，如有大規模危害環境和民眾安全的可能性時，建議加以詳細評估。
- c. 是否說明除污作業環境的管制規範，藉此減少人員曝露及避免外釋風險。

2. 關於放射性廢液及廢氣的處理

- a. 是否具備具體的放射性廢棄物管理和處置措施，包含分類、除污、暫存、再利用、及最終處置，若因故只能暫存，是否承諾最終能完善的加以處置。
- b. 內容是否詳細評估廢氣和廢液的可能產生來源，並規劃緊急應變作業流程，做為因應可能外釋的補救措施。

3. 其他相關建議

- a. 除污作業和廢棄物處理配合除役拆除工作的相關進程，必須確實可行。
- b. 建議評估可能發生的工安意外事故及處理方式。

審查人員在進行除役計畫書的審查時，除依照最新審查導則的項目一一檢視外，尚可參考上述幾項建議進行審查，使審查過程更加嚴謹。

重要參考資料

1. 台電核能月刊 341 期，第 26 頁，中華民國 100 年 5 月。
2. Decontamination of water cooled reactors, IAEA Technical Reports No.365, IAEA, Vienna, 1994; PNL EPRI SA – 14675 (1987).
3. 李文鎮，核設施除污技術研究，核能研究所對內報告編號 INER-5263，龍潭，台灣，中華民國 97 年。
4. American Society of Mechanical Engineer(ASME). The Decommissioning Handbook. Chapter 23, ASME, New York (2004)
5. 張國源，核設施除役拆除技術，核能研究所內部報告編號 INER-OM-1114R，龍潭，台灣，中華民國 96 年。
6. European Commission. European Nuclear Decommissioning Training Facility. A Training Material, Belgium, 2005.
7. US Department Of Energy. The Decommissioning Handbook CD Supplement 2004 (2004)
8. 李文鎮，核設施除污技術研究，核能研究所對內報告編號 INER-5263，龍潭，台灣，中華民國 97 年。
9. 吳台生、陳鴻斌、謝榮春，核子反應器設施除役除污技術審查研究，核能研究所對內報告編號 INER-3966，龍潭，台灣，中華民國 95 年。
10. IAEA. New methods and techniques for decontamination in maintenance or decommissioning operations--Results of a co-ordinated research programme 1994-1998. IAEA-TECDOC-1022, Vienna (1998)
11. Enserch Inc., Department of Energy Office of Environment Restoration.

- Decommissioning Handbook. DOE/EM-0142P (1994).
- 12.K. Archibald, R. Demmer, M. Argyle, L. Lauerhass, and J. Tripp, "Cleaning and decontamination using strippable and protective coatings at the Idaho National Engineering and Environmental Laboratory," WM'99 Conference, Feb 28 ~ March 4 (1999).
 - 13.M. Varady, B. Mantooth, T. Pearl, and M. Willis, "Reactive decontamination of absorbing thin film polymer coatings: model development and parameter determination," American Physics Society March Meeting 2014, Volume 59, Number 1, March 3–7, 2014; Denver, Colorado (2014).
 - 14.T.L. White, R.G. Grubb, L.P. Pugh, D. Foster Jr., and W.D. Box, "Removal of contaminated concrete surfaces by microwave heating—phase I results," presented at the 18th American Nuclear Society Symposium on Waste Management Waste Management 92, Tucson, Arizona (1992).
 - 15.https://www.rigzone.com/training/insight.asp?insight_id=310&c_id=19
 - 16.<http://www.tdwilliamson.com/EN/PRODUCTS/PIGGINGPRODUCTS/Pages/Home.aspx>
 - 17.B. Fournel, S. Faure, J. Pouvreau, C. Dame and S. Poulain, "Decontamination Using Foams: A Brief Review of 10 Years French Experience," Paper No. ICEM2003-4526, pp. 1483-1489; 7 pages doi:10.1115/ICEM2003-4526, ASME 2003 9th International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation: Volumes 1, 2, and 3, Oxford, England, September 21–25 (2003).
 - 18.Y. Yaita; M. Enda, H. Aoi; H. Sakai; N. Saito; N. Chujo and I. Inami, "Chemical decontamination using ozone oxidation process," 9th international conference on nuclear engineering; Nice Acropolis, France, Apr 8-12 (2001).
 - 19.Ph. Delaporte, M Gastaud, W. Marine, M. sentis, O. Uteza, P. Thouvenot, J.L.

- Alcaraz, J.M.Le Samedy and D. Blin, "Radioactive oxide removal by XeCI laser," *Applied Surface Science* **197-198** 826-830 (2002).
- 20.K. Fujiwara, S. Furukawa, K. Adachi, T. Amakawa, and H. Kanbe, "A new method for decontamination of radioactive waste using low-pressure arc discharge," *Corrosion Science* **48** 1544-1559 (2006).
- 21.Y.H. Kim, Y.H. Choi, J.H. Kim, J. Park, W.T. Ju, K.H. Paek, Y.S. Hwang, "Decontamination of radioactive metal surface by atmospheric pressure ejected plasma source," *Surface and Coatings Technology* **171**, 317-320 (2003).
- 22.IAEA. Methods for the minimization of radioactive waste from the decontamination and decommissioning of nuclear facilities R . Vienna : IAEA Technical Reports (2001).
- 23.<http://www.nrc.gov/info-finder/decommissioning/power-reactor/humboldt-bay-nuclear-power-plant-unit-3.html>
- 24.<http://www.nrc.gov/info-finder/decommissioning/power-reactor/zion-nuclear-power-station-units-1-2.html>
- 25.<http://www.epa.gov/radiation/marssim/marsame.html>
- 26.台電核能簡訊第 107 期。
- 27."Final Generic Environmental Impact Statement (GEIS) on Decommissioning of Nuclear Facilities" , NUREG-0586
- 28."Standard Format and Content of License Termination Plans for Nuclear Power Reactors" , Regulatory Guide 1.179
- 29."Standard Review Plan for Evaluating Nuclear Power Reactor License Termination Plans" , NUREG-1700
- 30.INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Principles of Radioactive

Waste Management, Safety Series No. 111-F, IAEA, Vienna (1995)

31. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Predisposal Management of Radioactive Waste Including Decommissioning, Safety Standards Series No. WS-R-2, IAEA, Vienna (1999)
32. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Legal and Governmental Infrastructure for Nuclear, Radiation, Radioactive Waste and Transport Safety, Safety Standards Series No. GS-R-1, IAEA, Vienna (1999)
33. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL LABOUR ORGANISATION, OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, PAN AMERICAN HEALTH ORGANIZATION, WORLD HEALTH ORGANIZATION, International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series No. 115, IAEA, Vienna (1996)
34. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety of Nuclear Power Plants: Design, Safety Standards Series No. NS-R-2, IAEA, Vienna (1999)
35. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety of Nuclear Power Plants: Operation, Safety Standards Series No. NS-R-1, IAEA, Vienna (1999)
36. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Quality Assurance for Safety in Nuclear Power Plants and Other Nuclear Installations, Safety Series No. 50-C/SG-Q, IAEA, Vienna (1996)
37. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Code on the Safety of Nuclear Research Reactors: Design, Safety Series No. 35-S1, IAEA, Vienna (1992) °

38. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Code on the Safety of Nuclear Research Reactors: Operation, Safety Series No. 35-S2, IAEA, Vienna (1992) ◦
39. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Decommissioning of Medical, Industrial and Research Facilities, Safety Standards Series No. WS-G-2.2, IAEA, Vienna (1999)
40. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Principles for Limiting Releases of Radioactive Effluents into the Environment, Safety Series No. 77, IAEA, Vienna (1986)
41. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Regulatory Control of Radioactive Discharges to the Environment, Safety Standards Series No. RS-G-1.5, IAEA, Vienna (1999)
42. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Decontamination of Nuclear Facilities to Permit Operation, Inspection, Maintenance, Modification or Plant Decommissioning, Technical Reports Series No. 249, IAEA, Vienna (1985) ◦
43. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Methods for Reducing Occupational Exposures During the Decommissioning of Nuclear Facilities, Technical Reports Series No. 278, IAEA, Vienna (1987) ◦
44. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Decommissioning of Nuclear Facilities: Decontamination, Disassembly and Waste Management, Technical Reports Series No. 230, IAEA, Vienna (1983) ◦
45. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of Remotely Operated Handling Equipment in the Decommissioning of Nuclear Facilities, Technical Reports Series No. 348, IAEA, Vienna (1993) ◦

46. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Monitoring Programmes for Unrestricted Release Related to Decommissioning of Nuclear Facilities, Technical Reports Series No. 334, IAEA, Vienna (1992) ◦
47. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Periodic Safety Review of Operational Nuclear Power Plants, Safety Series: A Safety Guide, No. 50-SG-O12, IAEA, Vienna (1994) ◦
48. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Safety of Nuclear Power, Safety Series No. 75-INSAG-5, IAEA, Vienna (1992)
49. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Defence in Depth in Nuclear Safety, INSAG Series No. 10, IAEA, Vienna (1996)
50. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Staffing of Nuclear Power Plants and the Recruitment, Training and Authorization of Operating Personnel: A Safety Guide, Safety Series No. 50-SG-O1 (Rev. 1) , IAEA, Vienna (1991) ◦
51. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials, Safety Standards Series No. ST-1, IAEA, Vienna (1996)
52. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Physical Protection of Nuclear Material, INFCIRC/225/Rev. 2, IAEA, Vienna (1989) ◦
53. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Agency's Safeguards System (1965, as provisionally extended in 1966 and 1968) , INFCIRC/66/Rev. 2, IAEA, Vienna (1968) ◦
54. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Structure and Contents of Agreements Between the Agency and States Required in Connection with the

Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons, INFCIRC/153 (corrected),
IAEA, Vienna (1972)。

55.核子反應器設施除役許可申請審核辦法。

56.“核子反應器設施除役廠址特性調查研究”，行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告，計畫編號：101FCMA006，中華民國 101 年 12 月。

57.“核能電廠除役計畫審查技術之研究”，行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告，計畫編號：101FCMA007，中華民國 101 年 12 月。

58.“核子反應器設施除役審查規範技術建立”行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告，計畫編號：932004FCMA001，中華民國 93 年 12 月。

59.邱太銘，“國外核子動力反應器設施除役概況”，行政院原子能委員會核能研究所，民國 100 年 8 月 3 日。

60.“核能電廠除役安全管制技術之建立(2)”行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告,計畫編號：922003FCMA001，中華民國 92 年 12 月 29 日。