

離子交換樹脂應用於消除放射性廢水減容之研究

作者簡介



作者邱皓意上士，畢業於國立臺灣科技大學化學工程系(102 年班)、化訓中心士高班 106-1 期，曾任核生化防護兵、射線偵檢士，現職為化生放核防護研究中心戰劑化驗士。

提要

- 一、離子交換樹脂廣泛運用於重工業、超純水處理及貴金屬回收等，可有效去除水中陽離子與陰離子，具有可再生、選擇性高等優勢。
- 二、國軍化學兵部隊於核子事故發生時，協助支援重要道路消除、人員消除、車輛消除所產生大量放射性廢水，經集中後，可參考核能電廠之廢水處理系統，透過離子交換樹脂設備，於現場將放射性廢水進一步處理，再經由取樣、監控下，使其放射性物質總活度降低至排放標準，期能達成放射性廢水減容之目的。
- 三、有鑒於福島核電廠事故，核子事故復原階段之廢水處理至關重要，國軍部隊如能以機動且簡便之廢水處理設備，於現場即時地處理，便能減低儲水壓力且能提高人員及車輛消除之效率，達成快速及安全的目標。

關鍵字：離子交換樹脂、放射性、廢水減容

前言

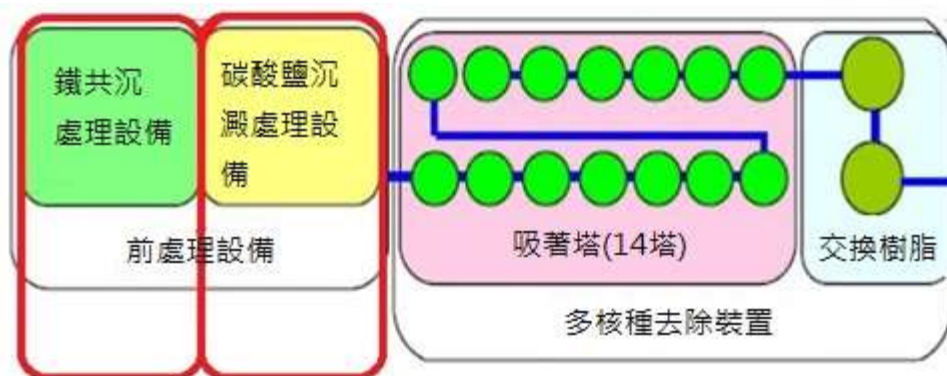
近幾十年來，能源議題一直是全球性的議題，再加上日趨嚴重的溫室效應，發展乾淨的再生能源是必然的趨勢。但是顯然地，目前人類仍無法完全依靠再生能源來供應日常生活所需，而核能因其具有不會造成空氣污染也不會加重溫室效應的優點，因此被許多國家用來當作主要電力來源之一。但是核能發電也有其問題所在，其發電後產生的具放射性廢棄物的處置方式一直是全世界都頭疼的一個問題，再加上我國地狹人稠，放射性廢棄物的處置更是一大難題。

國軍依中央災害應變中心作業要點成立支援中心，投入人力、物力等各項資源，實施災害搶救、人員除污、車輛除污等。化學兵部隊於選定場址，依令開設人員除污站及車輛除污站實施消除。然而實施人員及車輛除污後所產生之大量放射性廢水，須占用許多儲水設備且體積龐大，如無法及時處理，將影響除污效能，延遲人員及車輛遠離污染地區。本研究以離子交換樹脂處理放射性廢水，使其放射性物質總活度降低至排放標準，便能有效減低儲水壓力及放射性廢棄物處理機構處置時間，進一步達到快速且安全的處理效率。

核子事故放射性廢水性質分析

有鑑於福島核子事故核電廠產生之放射性廢水，核種複雜且數量數百倍於核電廠平日產生量。在福島核電廠事故後，因降雨或地下水流經福島第一核電廠一、二、三號機組廠房的水，接觸到廠房內部熔渣（冷卻凝固後的熔融燃料棒）而含有高濃度放射性物質。這些含高濃度放射性物質的輻射污染水，東京電力公司在福島第一核電廠的一、二、三、四號機組外，靠近陸地一側加裝凍土牆，防止地下水繼續流經一、二、三號機組；在靠近海岸一側加裝擋水牆，防止流經一、二、三號機組，受到輻射污染的「污染水」流入海洋；並在一、二、三、四號機組附近裝設水井汲水，調節地下水位高低，並試圖讓廠區內的「污染水」量不要擴大。這些收集到的「污染水」，首先會送到「銫吸附裝置」，除去銫（Cs）和銩（Sr）。除去銫和銩的「污染水」，再經過淡水化裝置（除去水中的鹽分）後，稱之為「銩處理水」。這種「銩處理水」，可作為一、二、三、四號機組的冷卻水回收再利用。絕大多數的「銩處理水」會被送到「ALPS 多核種除去設備」，將 63 種放射性核種中的 62 種放射性核種去除。「ALPS 多核種除去設備」唯一不能去除的放射性核種，就是氫（ ^3H ）。經過「ALPS 多核種除去設備」處理過後的「銩處理水」稱之為「處理水」，也有人稱之為「含氫處理水」。這些經過一連串除放射性核種淨化處理的「處理水」，有效輻射劑量已經低於日本的國家標準每年 1 毫西弗（ mSv/year ），也低於日本政府訂定的「告示濃度」每公升 100 貝克（ Bq/L ）。按照法規，只要這些「處理水」的有效輻射劑量和告示濃度都低於標準，就可以將這些「處理水」釋放到自然環境中。¹

圖 1 ALPS 廢水處理系統



資料來源：<http://report.nat.gov.tw/ReportFront/PageSystem/reportFileDownload/C10204813/001>。

¹ <http://report.nat.gov.tw/ReportFront/PageSystem/reportFileDownload/C10204813/001>，最後檢索日期 110 年 2 月 13 日。

國軍化學兵消除部隊協助支援人員、車輛及重要道路除污作業，於作業期間持續將廢水集中至污水集水坑，並透過核子事故中央災害應變中心協調放射性廢棄物處理單位處理，往往於協調過程中面臨不預期之問題，導致處理時間延宕，大量待處理之放射性廢水便會影響後續消除作業之遂行，如能於消除站周圍運用相關的放射性廢水處理設備，將污水集水坑之放射性廢水同步處理，使放射性廢水所含放射性物質總活度低於主管機關訂定之排放標準(游離輻射防護安全標準§14)，便能有效降放射性廢水儲水壓力，提升作業效能，期能達成快速且安全之作業成效。

離子交換樹脂介紹

離子交換樹脂又稱有機離子交換劑，離子交換劑是指能與溶液中的陽或陰離子進行交換的物質。可分無機離子交換劑（如沸石）和有機離子交換劑。合成之有機離子交換劑廣泛用於分析化學的純化分離，工業上用於廢水處理（分離或回收重金屬以及放射性廢水）及硬水軟化等。

圖 2 離子交換樹脂種類



資料來源：<https://www.bioman.com.tw/>

由於離子交換系統具有交換去除離子及濃縮、回收功能，且可有效處理重金屬廢水，並易於回收重金屬，能以避免產生重金屬污泥造成二次污染，因此已被廣泛地應用在純水及廢水處理上；包括硬水軟化、污水淨化、脫鹼軟化、純水、超純水製造、凝結水處理、貴重金屬回收、放射性廢水處理、重金屬及有毒廢水處理回收等。

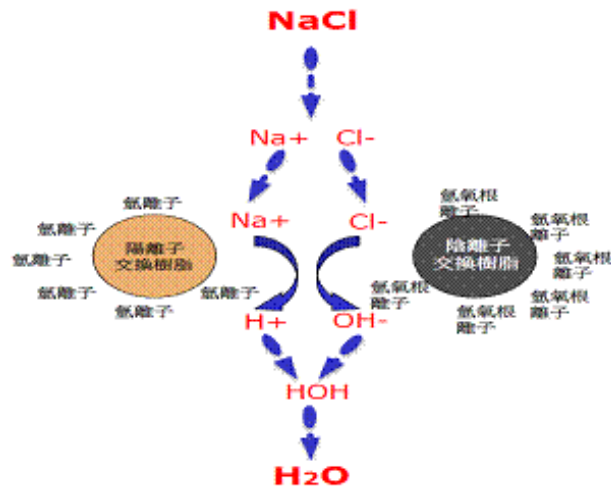
其中在處理含重金屬的工業廢水方面，離子交換法越來越受到相關產業的重視，主要是因為傳統的化學沉澱處理方法，有時不能將廢水中的重金屬離子完整加以去除，尤其是當廢水成分中含有錯合劑或螯合劑時，其去除效率更加

偏低，此外沉澱處理會產生大量的重金屬污染，造成污泥最終處置的困難。

一、離子交換樹脂的工作原理

陽離子交換樹脂利用氫離子(H^+)來交換水中的陽離子;而陰離子交換樹脂則利用氫氧根離子(OH^-)來交換陰離子，氫離子與氫氧根離子互相結合成中性水，其反應流程如下：

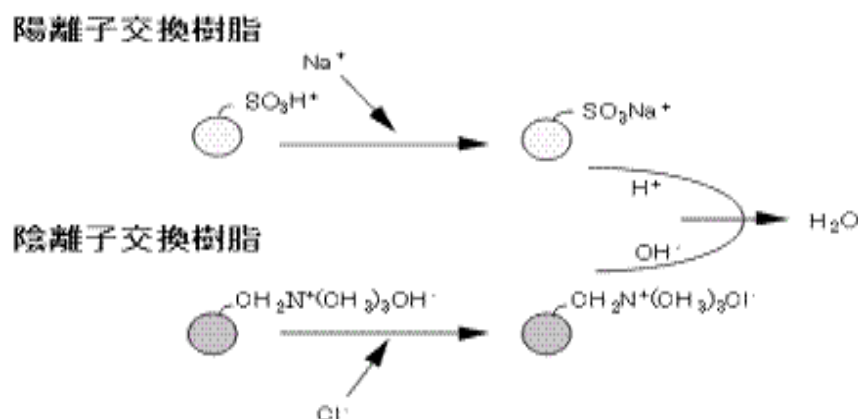
圖 3 離子交換樹脂工作原理



資料來源：<https://www.bioman.com.tw/>

在上圖及下圖中，我們利用鈉離子(Na^+)代表所有的陽離子，而利用氯離子(Cl^-)代表所有的陰離子來進行離子交換反應：

圖 4 離子交換樹脂反應圖



資料來源：<https://www.bioman.com.tw/>

二、離子交換樹脂的分類

(一)強酸性陽離子交換樹脂

這類樹脂含有大量的強酸性官能基，如磺酸基 SO_3H^+ ，容易在溶液中解離出 H^+ ，故呈強酸性。樹脂解離後，本體所含的負電基團，如 SO_3^- ，能吸附結合溶液中的其他陽離子。這兩個反應使樹脂中的 H^+ 與溶液中的陽離子互相交換。強酸性樹脂的解離能力很強，在酸性或鹼性溶液中均能解離和產生離子交換作用。樹脂在使用一段時間後，要進行再生處理，即使用化學藥品(強酸)使離子交換反應以相反方向進行，使樹脂的官能基團回復原來狀態，以供再次使用。如上述的陽離子樹脂是用強酸進行再生處理，此時樹脂放出被吸附的陽離子，再與 H^+ 結合而恢復原來的組成。

(二)弱酸性陽離子交換樹脂

這類樹脂含弱酸性官能基，如羧基 COOH^+ ，能在水中離解出 H^+ 而呈酸性。樹脂解離後餘下的負電基團，如 R-COO^- (R 為碳氫基團)，能與溶液中的其他陽離子吸附結合，從而產生陽離子交換作用。這種樹脂的酸性即解離性較弱，在低 pH 下難以解離和進行離子交換，只能在鹼性、中性或微酸性溶液中(如 pH5 ~ 14)起作用。這類樹脂亦是用酸進行再生(比強酸性樹脂較易進行再生)。

(三)強鹼性陰離子交換樹脂

這類樹脂含有強鹼性官能基，如季胺基(亦稱四級胺基) $-\text{NR}_3\text{OH}$ (R 為碳氫基團)，能在水中解離出 OH^- 而呈強鹼性。這種樹脂的正電基團能與溶液中的陰離子吸附結合，從而產生陰離子交換作用。這種樹脂的解離性很強，在不同 pH 下都能正常工作。它利用強鹼(如 NaOH)來進行再生。

(四)弱鹼性陰離子交換樹脂

這類樹脂含有弱鹼性官能基，如一級胺基 $-\text{NH}_2\text{R}$ 、二級胺基 $-\text{NHR}_2$ 、或三級胺基 $-\text{NR}_3$ ，它們在水中能解離出 OH^- 而呈弱鹼性。這種樹脂的正電基團能與溶液中的陰離子吸附結合，從而產生陰離子交換作用。它只能在中性或酸性條件(如 pH1 ~ 9)下工作。它可用 Na_2CO_3 、 NH_4OH 進行再生。²

三、離子交換樹脂交換能力

2 <https://www.bioman.com.tw/uv%E7%B4%AB%E5%A4%96%E7%B7%9A%E7%9A%84%E5%8A%9F%E8%83%BD%E8%88%87%E9%99%90%E5%88%B6-2-2-2/>，最後檢索日期 110 年 2 月 16 日

根據不同應用的需求，不同的陰/陽離子交換樹脂的化學官能基有強弱之分(如下圖)，導致其交換能力(純化能力)及再生條件皆有所不同。

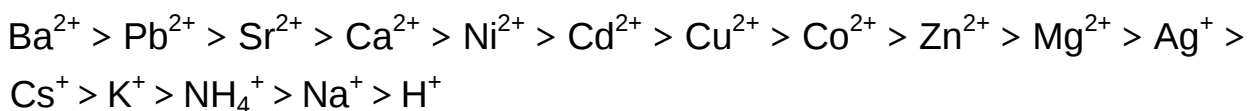
圖 5 離子交換樹脂對官能基強弱比較圖

Ion Exchange - Bonded Functionalities		
	Cation	Anion
WEAK	$\sim\sim\sim \text{COO}^- \text{Na}^+$ Carboxylic Acid	$\sim\sim\sim \text{N}^+-\text{R} \text{Cl}^-$ Primary, Secondary or Tertiary Amine
STRONG	$\sim\sim\sim \text{SO}_3^- \text{Na}^+$ Sulfonic Acid	$\sim\sim\sim \text{N}^+(\text{R})_3 \text{Cl}^-$ Quaternary Amine

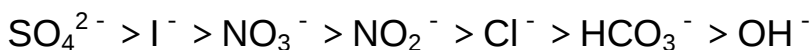
資料來源：<https://www.bioman.com.tw/>

離子交換樹脂對各種陽離子或陰離子的吸附力有所差異，這也是造成不同離子之間在離子交換樹脂的表面上產成交換的原因，其交換的強弱程度及相對關係如下：

陽離子交換樹脂與各陽離子之間的親合力強度：



陰離子交換樹脂與各陰離子之間的親合力強度：



四、離子交換樹脂的應用

離子交換的方法常用於水或廢水的處理中，常見的實例如：

- (一)硬水軟化處理：是環境工程上最常見的用途之一，將水中形成硬度的鈣、鎂等離子與離子交換樹脂上的鈉離子進行交換，以軟化水質。
- (二)除礦：利用離子交換法去除水中所有的陽離子及陰離子。
- (三)去除、回收廢水中的重金屬，例如電鍍工廠之廢水中所含有的鋅、銅、鎳等，都具有回收的價值。

五、離子交換樹脂的限制

離子交換樹脂只能去除水中陰陽離子，卻無法去除其它污染物，如有機污染物，微生物，懸浮顆粒。故絕大部分會以逆滲透法為前端處理，其優點有二：

- (一)離子交換樹脂非常容易被自來水或地下水的懸浮顆粒及有機污染物阻塞而失去大部分的交換功能，而逆滲透可以輕易的去除 98 %以上的懸浮顆粒及有機污染物，足以保護離子交換樹脂的功能正常。
- (二)通常逆滲透可以輕易去除水中 98%的陰陽離子，故經逆滲透處理的離子交換樹脂壽命將比未經逆滲透處理過的例子交換樹脂增加 50 倍的壽命。

我國核能電廠放射性廢水處理方式

核能電廠在運轉過程中無可避免會產生一些氣體、液體和固體廢棄物，有些廢棄物含有強弱不等的放射性，不能任意棄置。放射性廢棄物處理的目的就是收集、處理和處置電廠放射性廢棄物，以控制排放到廠外的放射性量低於輻射防護法之游離輻射防護安全標準第十三條，並須依輻射防護法第九條記錄、申報及保存。常見的放射性廢棄物的處理方式為：

- (一)滯留、吸附以衰減其放射性後稀釋排放。
- (二)經由過濾、分離、濃縮等方式處理，處理至遠低於法規的限制標準，在嚴密取樣分析及監測下排放。
- (三)固體廢棄物分可燃及不可燃兩類，可燃固體廢棄物由低放射性廢棄物焚化爐焚化；不可燃廢棄物及焚化後的餘灰均密封在 55 加侖鋼桶內，貯存於廠內廢棄物倉庫，以待進一步處理。

由於結構材料的活化，介入冷卻水中不純物的活化以及燃料破損所釋出的分裂產物，使得無數的活化產物和分裂產物在冷卻水中被發現。以下列舉較重要的活化分裂產物及其移除方法：

表 1 存於溶液中之分裂產物

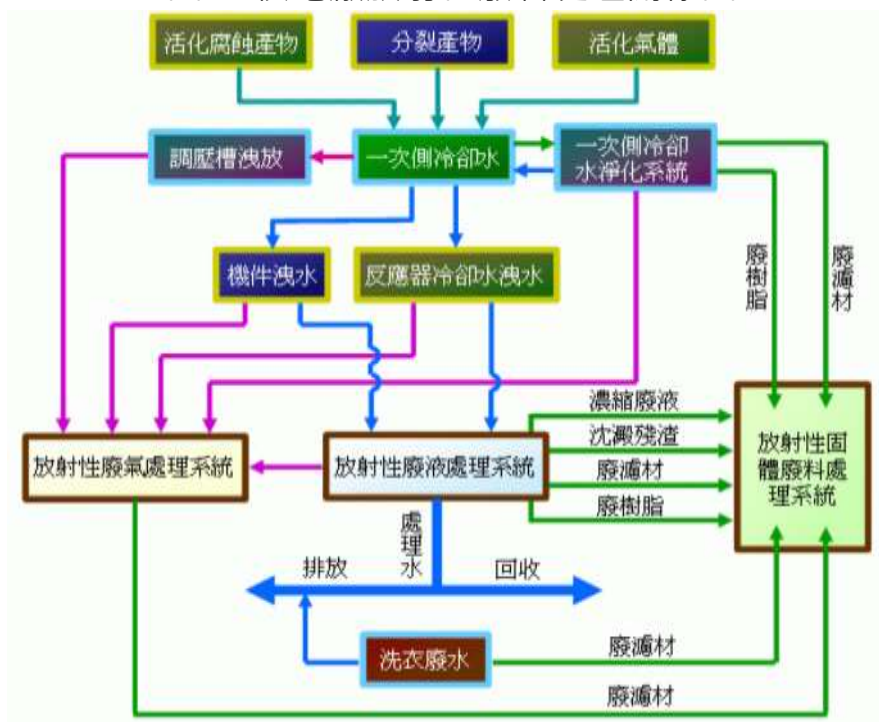
元素	同位素	半衰期	分裂產物來源	移除方法
銫	^{134}Cs	2.06 年	燃料護套破損。	利用陽離子樹脂或混合床除礦器移除。
	^{137}Cs	30.17 年	燃料護套破損。	
	^{138}Cs	32.2 分鐘	微小的燃料元件護套洩漏。	
銪	^{89}Sr ^{90}Sr	50.5 天 28 年	會在骨頭中濃縮，但燃料護套破損時逃逸係數低。	
碘	^{131}I ^{133}I	8.04 天 20.8 小時	會在甲狀腺內濃縮，起動後 ^{131}I 與 ^{133}I 比例增加表示燃料護套破損	利用混合床除礦器中的陰離子樹脂和去硼除礦器

				移除
氬	^{85}Kr ^{87}Kr ^{88}Kr	10.72 年 76.3 分鐘 2.84 小時	氬與氙二者皆為惰性氣體，不會與有機物起動，因此它不會濃縮。	利用剝離法移除。
氙	^{133}Xe ^{135}Xe	5.3 天 9.11 小時	浸於此種氣體的雲霧中具危險由伽射線產生。	
氚	^3H	12.3 年	經由燃料護套擴散進入冷卻水中，有些會被鋯合金護套吸收，取代水中的氫，形成氚水，氚水導致害且很難偵測到，氚也能由硼 ^{10}B 作用產生。	無法從冷卻水中移除，必須排出冷卻水，以降低氚濃度。

資料來源: <https://www.taipower.com.tw/upload/203/N3/ch15.pdf>

放射性液體的處理主要是以收集、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，然後再分析其放射性和化學性，以決定是否可排放至廠外，本節引用核電廠放射性液體處理系統(L.R.S)說明。³

圖 6 核電廠放射性廢料處理關係圖



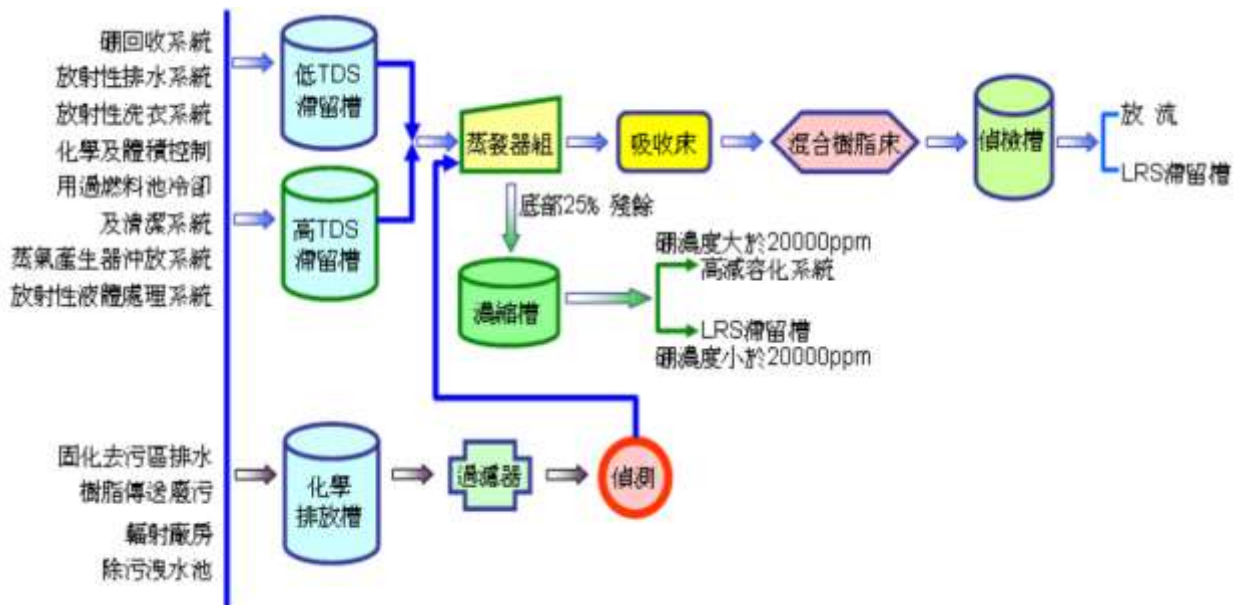
資料來源: <https://www.taipower.com.tw/upload/203/N3/ch15.pdf>

³ <https://www.taipower.com.tw/upload/203/N3/ch15.pdf>，最後檢索日期 110 年 2 月 16 日。

一、放射性液體處理系統概述

收集由爐水洩放系統 (Reactor Coolant Drain System)、地面集水系統 (Floor Drain System)及放射性洗衣用水系統 (Radiative Laundry System)之放射性液體加以處理，以減少固化廢棄物產量，使排出核電廠外的液體均符合各項法規標準。

圖 7 放射性液體處理流程圖



資料來源:<https://www.taipower.com.tw/upload/203/N3/ch15.pdf>

二、設備說明

(一)滯留槽 (L.R.S Holdup Tank)

三個直立式不銹鋼槽，每槽容量 33,700 加侖，水源來自：

- 1.放射液體處理系統吸收床
- 2.用過樹脂槽
- 3.輔助蒸汽冷凝回收槽
- 4.廢料廠房集水池
- 5.放射性固體廢棄物處理系統
- 6.放射性液體處理系統偵檢槽
- 7.化學洩水槽
- 8.一、二號機、輔機廠房、燃料廠房、圍阻體集水池

(二)L.R.S 濃縮槽 (L.R.S Concentrate Tank)

二個直立式容量各 7,500 加侖鋼高錳 825 槽，由 L.R.S 蒸發器組來的濃

縮放射性液體經加熱管路打入濃縮槽，視需要加鹼中和而後濃縮。

(三)L.R.S 偵檢槽 (L.R.S Monitor Tank)

二個直立式容量各 33,700 加侖不銹鋼槽，由 L.R.S 混合床來的液體流到此槽，經偵檢後不符排放標準的水打回滯留槽再處理，符合則排放。

(四)化學洩水槽 (L.R.S Chemical Drain Tank)

二個直立式容量 3,450 加侖不銹鋼槽，可加鹼、消泡劑中和，其水源來自：

- 1.一、二號機燃料池淨化水
- 2.一、二號機硼液再生除礦水
- 3.一、二號機硼液調節系統鹼性床及混合床除礦水
- 4.一、二號機燃料廠房除污洩水槽
- 5.放射固體廢棄物回流和裝桶虹吸水
- 6.廢料廠房除污洩水槽
- 7.L.R.S 吸收床
- 8.L.R.S 離子交換器混合床
- 9.B.R.S 蒸發器凝結除礦水
- 10.B.R.S 蒸發器飼水

(五)鹼儲存槽

一個 500 加侖直立式不銹鋼槽，槽內可貯存的苛性鹼，隨時可補充到鹼分批槽。

(六)化學配藥槽

鹼、消泡劑槽各一個，為 100 加侖直立式玻璃纖維槽，每槽可裝的化學藥劑，鹼可添加至濃縮槽、化學洩水槽及滯留槽中和用。消泡劑可添加至化學洩水槽及滯留槽。

(七)L.R.S 滯留槽泵

三台離心式不銹鋼泵，設計流量 280 gal/min，出口壓力 280 psig，溫度 140°F。用以將滯留槽內的放射性液體泵出。

(八)L.R.S 濃縮泵

二台離心式合金 20 泵，設計流量 60 gal/min，出口壓力 195 psig，溫度 250°F。用以將濃縮液泵至放射性固體廢棄物處理系統後再濃縮、固化。

(九)L.R.S 蒸餾水凝結水泵

二台離心式碳鋼泵，設計流量 45 gal/min，壓力 185 psig，溫度 250°F。用以將蒸餾水凝結水經次冷器、除礦器打至偵檢槽。

(十)L.R.S 化學洩水槽泵

二台離心式不銹鋼泵，設計流量 110 gal/min，壓力 210 psig，溫度 100°F。用以將 L.R.S 化學洩水槽的液體泵至 L.R.S 排放集管，或泵至 L.R.S 蒸發器。

(十一)L.R.S 化學分批槽泵

兩台齒輪式不銹鋼泵，設計流量 20 gal/min，壓力 29 psig，溫度 200°F。分別將鹼、消泡劑分批槽的化學藥劑泵出。

(十二)L.R.S 滯留槽過濾器

二只卡式不銹鋼 5 微米濾網，設計流量 100 gal/min，溫度 200°F，壓力 250 psig。

(十三)L.R.S 化學洩水槽過濾器

一只卡式不銹鋼 5 微米濾網，設計流量 250 gal/min，壓力 250 psig，溫度 200°F。用以過濾由 L.R.S 化學洩水槽泵打出的液體。

(十四)L.R.S 吸收床

一個容積 50 ft³ 不銹鋼樹脂床，設計壓力 200psig，溫度 250°F，流量 130 gal/min。用以吸附、滯延由 L.R.S 蒸發器來的放射性同位素。

(十五)L.R.S 混合床離子交換器

二個容量各 50 ft³ 的不銹鋼樹脂床，其設計壓力為 200 psig，溫度 250°F，流量 130 gal/min，它位於 L.R.S 吸收床後，與之串連用以吸收、滯延由 L.R.S 蒸發器來的放射性同位素。

(十六)L.R.S 可處理吸收床

一個容量 5.5 ft³ 內鑲環氧樹脂之碳鋼槽，設計壓力 100 psig，溫度 130 °F，流量 15 gal/min。當化學槽水質不佳時，可作為進入蒸發器前之處理。

(十七)L.R.S 蒸發器組

一組，主要包括除氣器、加熱器、蒸發器、再循環泵、分離器、冷凝器、次冷卻器等，其設計進水流量 35 gal/min，溫度 230 °F，壓力 64 psig。在大氣壓力下，用以除去液體中的內含氣體，及將分餾後的濃縮液送到濃縮槽。

三、系統流程

放射性液體處理系統以前述分類設計，但為避免放射性物質不當的排放，各類放射性液體處理均須經蒸發器，當三只滯留槽總水位達 170 %時，由滯留槽泵送至蒸發器組，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。蒸發器底部所收集的高濃度濃縮液則被收集至濃縮槽。當濃縮槽灌滿高濃度廢液後即封閉。這些高放射性廢液即滯留其中慢慢衰變。同時進行取樣化驗，加固化劑經化學處理後送至放射廢料固化系統 (R.S.S)，固化包裝運至廢棄物倉庫儲放。

四、系統運轉

放射性液體處理系統由一連串的自動和手動操作處理，通常廢水收集是自動地完成，系統收集後的廢水，其處理過程由操作員決定。大略可分為低放射性的地面洩水和高放射性的反應器冷卻水。

(一)地面洩水 (Floor Drain Waste)

被收集至滯留槽的高全溶地面洩水，因並不含放射氣體，故不需經蒸發器組的除氣器，而直接進入蒸發器再循環管道 (其設計的平均流量在 15 ~ 30 gal/min 之間)，經加熱器加熱後再流入蒸發器。加熱器所用的蒸氣是經降壓、降溫後的輔助蒸氣，此過熱蒸氣經加熱器殼側冷凝，泵送經蒸氣冷卻器冷卻至 93 °C 後送至冷凝回收槽 (Condensate Recovery Tank) 而加熱器的殼側部份蒸氣亦排放至冷凝器，以增加加熱器之效率。通常「增加加熱器的蒸汽進汽量，即可增加蒸發器組的運轉速率，反之則否」，而其他部份如飼水流速、蒸發器水位，可由操作員控制或隨蒸汽速率自動調整。蒸發器水位須大於 25 % 液位時才可引入蒸汽，以防止加熱器管露出與損壞。加熱器內熱水 由於有水頭的壓力，可防止液體在加熱器內沸騰。加熱過的蒸餾液由蒸發器上部再進入分離器底部，經過分離器內一系列的穩壓盤 (Ballast Trays) 由下往上與冷凝器迴流的冷凝水由上往下噴灑接觸將液體中的硼酸和雜質移去。液體內的純水氣經分離器的網盤 (Mesh Pad) 送至冷凝器(Condenser) 冷凝和次冷卻器(Subcooler) 冷卻至 48 °C 以下，再送至吸收床，若導電度不符合則回流至滯留槽。至於在冷 凝器內不凝結氣體則經逸氣冷卻器 (Condenser Vent Gas Cooler) 後送至放射性氣體處理系統 (G.R.S)。在蒸發器運轉時，蒸餾水持續蒸發，造成

的蒸發器水位降低同時可由進水來補充，以維持蒸發器內的水位，如此蒸發器內硼濃度隨之上升。當濃縮液硼濃度達 20000 ppm 時(密度約 1.03)，停止蒸發器運轉，底部的濃縮液經再循環泵送至 L.R.S 濃縮槽。由於高濃度濃縮液在室溫中可能凝固，故在整個移出過程中流經管路應加溫，並隨即以飼水 (Feed) 或水 (Water) 沖洗管路，以避免管路中的濃縮液凝固阻塞。

(二)反應爐冷卻水 (Reactor Coolant Feed)

反應爐冷卻水含放射性氣體及氫氣，故須先經過除氣器 (Gas Stripper or Degasifier) 移除。在除氣器內，飼水 (Feed) 由上噴灑下來至一個填料而蒸汽由下逆流而上經填料，當飼水被加熱，其所含的放射性氣體及氫氣就連同少量蒸汽被帶走，這些氣體離開除氣器後，經過冷卻器 (Gas Stripper Vent Gas Cooler) 水蒸汽部份被冷凝，往下送回飼水管道，放射性氣體及氫氣經冷卻後送至放射性氣體處理系統 (G.R.S) 處理或經區域通氣系統排至廠外。脫氣後的飼水經加熱器，蒸發器再循環泵和分離器之操作與地面洩水相同，少量的殘餘放射性氣體和氫氣可能跟隨蒸汽送至冷凝器，故在冷凝器有一小型蒸汽噴吸器 (Eductor) 將這些氣體帶至放射性氣體處理系統。

五、放射性液體排放評估

液體經處理後回復為純水，這些水可再利用或排出廠外。由液體濾出來的放射性廢棄物被收集在各濾網、離子交換樹脂、蒸發器底，這些收集來的廢棄物被送到固體放射性廢棄物處理系統固化後，暫存於廢棄物倉庫。若要排出，需經偵測後符合運轉規範及法規的要求方可排出廠外。電廠每年所預定的液體排放來源如下：

- (一)所有汽機房的集水池水直接外排。
- (二)所有低或高 TDS 及放射化學和去污液經蒸發器分餾及離子交換器處理後外排。
- (三)所有洗衣廢水經過濾混合樹脂或活性碳處理後外排。
- (四)B.R.S 蒸發分餾後的凝結水因計畫性氬排放的排放液。
- (五)凝結水除礦器再生溶液可直接外排。

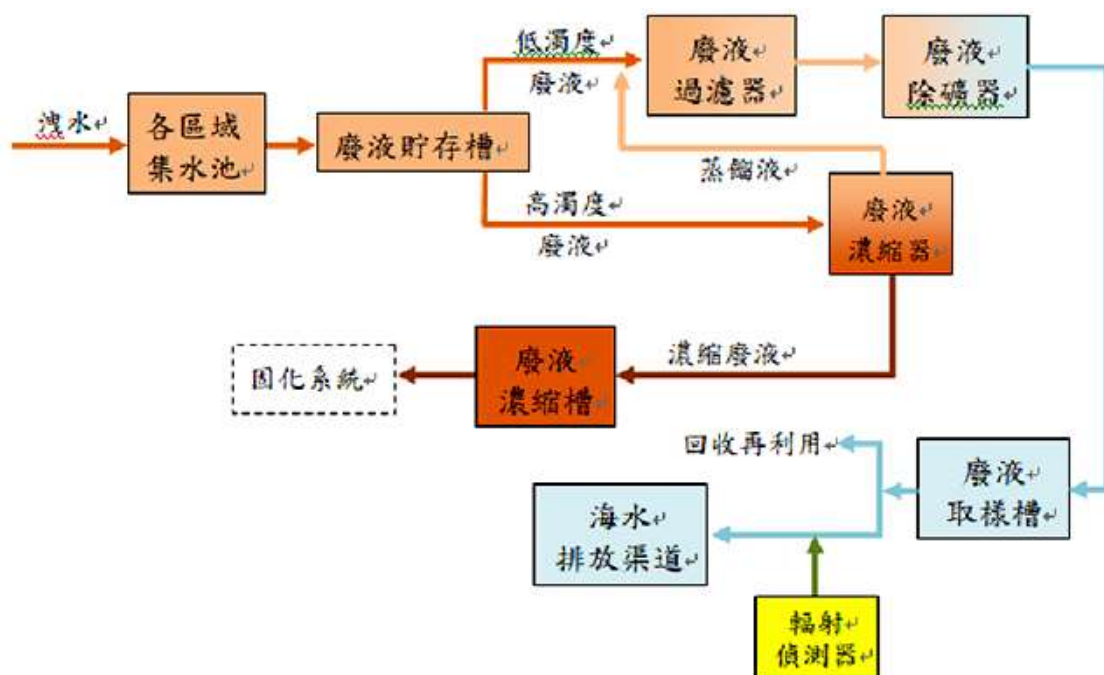
放射性廢水處理流程探討

一、處理原則

核能發電產生的放射性廢液，透過核電廠內專屬設置的放射性廢液處理系統進行處理，處理流程包含收集、過濾、除礦、取樣、回收/排放，或經由蒸發濃縮處理。其中銫 (^{137}Cs) 和銂 (^{90}Sr) 是高放射性廢液中最危險的高釋熱裂變產物，其半衰期較長 (^{137}Cs ， $t_{1/2} \approx 30$ 年； ^{90}Sr ， $t_{1/2} \approx 29$ 年)，是核廢液中 β 和 γ 射線的主要放射源，且具有生物毒性。

國軍化學兵部隊於消除期間所蒐集的放射性廢水透過陽離子交換樹脂去除大部分銫 (^{137}Cs) 和銂 (^{90}Sr)，使處理後之廢水放射性物質總活度低於游離輻射防護安全標準，透過取樣及嚴格監控再決定是否排放。

圖 8 低放射性廢液處理流程圖

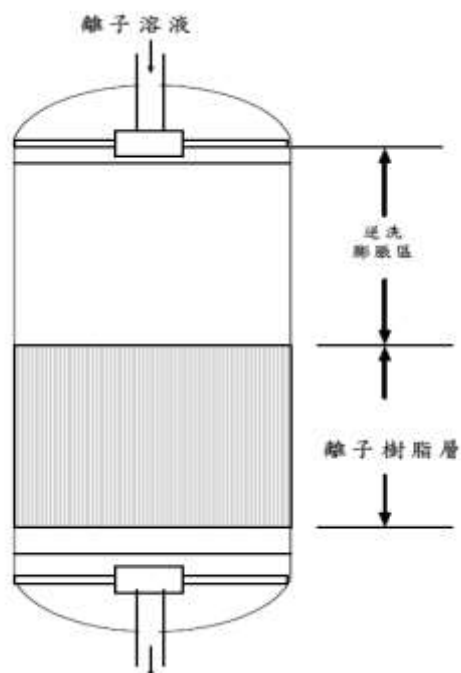


資料來源: <https://www.aec.gov.tw/>

二、處理設備

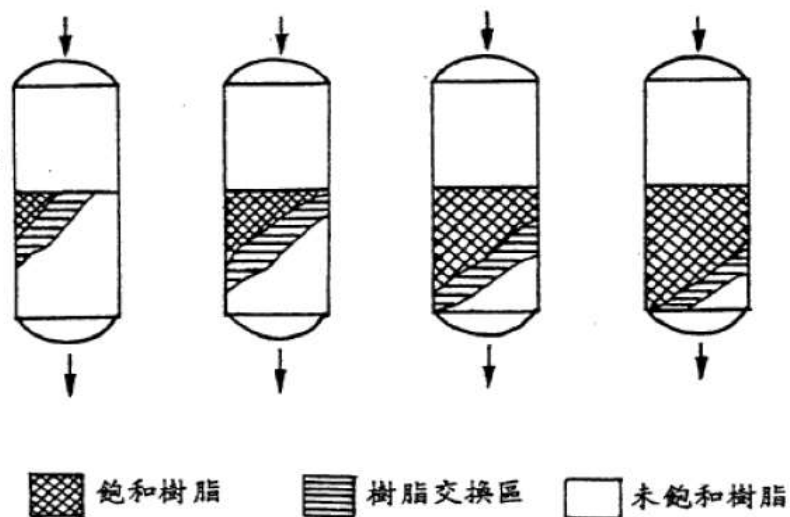
一般用於吸附處理之技術及設備，均可以用於離子交換技術中。因此，其處理方式有批次或連續性處理，在連續性處理中，以固定床式連續性處理最為常見。下圖為典型的固定床式樹脂塔。

圖 9 固定床式樹脂塔簡易結構圖



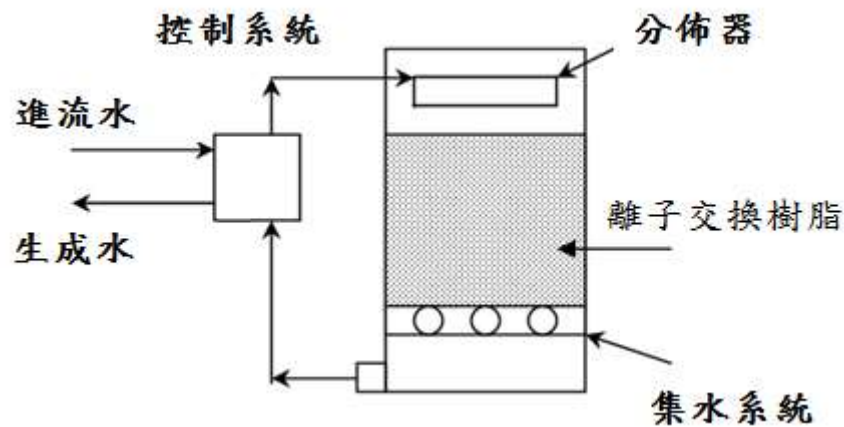
資料來源: <http://sp.fhes.tn.edu.tw/sites/science/aaafang/DocLib3/%E4%B8%8A%E8%AA.doc>

圖 10 樹脂交換反應動態變化圖



資料來源: <http://sp.fhes.tn.edu.tw/sites/science/aaafang/DocLib3/%E4%B8%8A%E8%AA.doc>

圖 11 樹脂交換反應簡易流程圖



資料來源:<http://liukovsky.niu.edu.tw/lesson/ysli/%E9%9B%A2%E5%AD%90%E4%BA%A4%E6%8F%9B.doc>

圖 12 核子級/半導體級離子交換樹脂



圖 13 離子交換樹脂塔

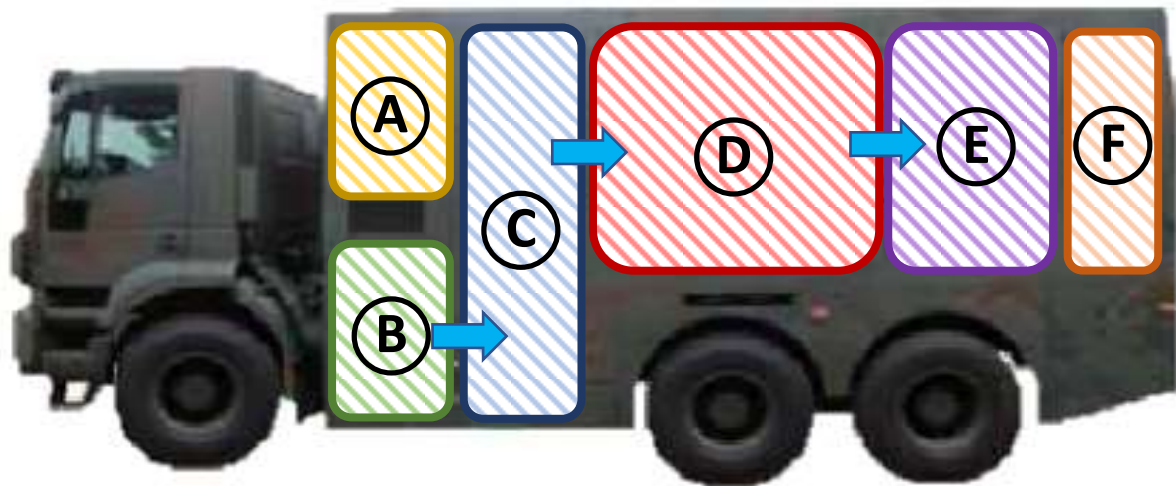


資料來源: <https://www.concordtech.com.tw/zh-tw/>

三、野戰機動載具構想

為使處理放射性廢水達到快速且有效，可運用機動載具於消除站週邊實施作業，以 MD-105 重型消毒車為構想，將車廂空間分區規劃運用，包含汲水、離子交換、分析檢驗等設備，期能於現場立即將處理後廢液分析檢驗，大大縮短運送、協調等相關單位協處時程，提升支援核子事故量能。

圖 14 載具規劃示意圖



➡：原水流向

A.發電及控制系統

B.汲水馬達設備

C.RO 逆滲透處理設備

D.陽離子交換器

E.廢液儲存槽

F.輻射監控及分析設備

資料來源：MD-105 重型消毒車操作手冊

載具空間區分六大區塊，以 RO 逆滲透設備為處理原水第一道程序，有效將水中污染物去除，如鹽類、重金屬、膠質等雜質，可提升離子交換樹脂使用壽命，第二道程序為陽離子交換器，透過高選擇性之陽離子交換樹脂，針對原水中所含銫（Cs）和銻（Sr）離子去除，去除後之廢液儲存在廢液儲存槽內，透過採樣分析，測定水中放射性物質總活度及氬含量，依據游離輻射防護安全標準§14 之排放標準執行後續處理程序，廢液儲存槽排水口設置輻射偵檢器確保周遭環境安全。

結語

國軍化學兵部隊執行核子事故消除任務所產生之大量放射性廢水，往往面臨龐大儲水壓力及後續處置困難，如能運用離子交換樹脂裝置，於現場即時將產生之放射性廢水處理，藉由取樣及嚴格監控，使排出之廢水所含放射性物質總活度低於法規標準，便能達到減容之目的。

依據核子事故緊急應變作業北部輻射監測中心程序書，除污時產生之廢水，收集後交由台灣電力公司放射試驗室負責核種活度分析，檢測結果回報後由核電廠處理，惟事故發生之時，各單位依此程序耗費時效及大量儲水設備，如能以本文之廢水處理設備於現場先行立即處理，便能降低放射性廢水核種活度，

避免收集之放射性廢水濃度過高，減低人員風險，並設置檢驗分析儀器於現場即時檢測分析，將結果紀錄、回報後配合核電廠執行後續處置作業，有效提升收集後廢水處理效率。透過蒐集實驗數據，將詳細之流量、膨脹率、交換容量等資料，完整規劃出廢水處理設備，期能以模組化、機動及安全之設備，提升消除效率及安全性。

參考資料

一、準則論著

- (一)《陸軍化學兵偵消部隊訓練教範》
- (二)《化學災害應援作業手冊》
- (三)《核子事故復原階段執行廢棄物清除人員之輻射防護原則》
- (四)《MD-105重型消毒車操作手冊》
- (五)《核子事故緊急應變作業北部輻射監測中心程序書》

二、報刊網路

- (一)行政院原子能委員會，<https://www.aec.gov.tw/>，最後檢索日期110年2月11日。
- (二)台灣電力公司，<https://www.taipower.com.tw/>，最後檢索日期110年2月11日。
- (三)全國法規資料庫，《游離輻射防護法》，<https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?PCode=J0160009>，2002，檢索日期110年2月11日。
- (四)全國法規資料庫，2008，《游離輻射防護法施行細則》，<https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?pcode=J0160022>，最後檢索日期110年2月11日。
- (五)全國法規資料庫，2005，《游離輻射防護安全標準》，<https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?pcode=J0160004>，最後檢索日期110年2月11日。
- (六)工業廢水離子交換處理技術手冊，http://www.ftcc.com.tw/upload/News/Editor/docs/B0110_%E5%B7%A5%E6%A5%AD%E5%BB%A2%E6%B0%B4%E9%9B%A2%E5%AD%90%E4%BA%A4%E6%8F%9B%E8%99%95%E7%90%86.pdf，最

後檢索日期110年2月15日。

(七)慧眾生物科技有限公司，<https://www.bioman.com.tw>，最後檢索日期110年2月11日。

(八)康淳科技水處理系統規劃設計工程公司，
<https://www.concordtech.com.tw/zh-tw/>，最後檢索日期110年2月11日