

# 第 2 屆大專校院 綠色化學創意競賽成果報告書

組別：大專組；研究組

隊伍名稱：鋁氏春秋

主題：

難處理鋁渣能資源循環回收技術

## 摘要 (300 字以內)

二次鋁渣雜質(例如：碳化鋁、氮化鋁)量多，氮化鋁分解速率緩慢，貯存及資源化處理過程易衍生氨氣惡臭，尤其，非法棄置，導致重大環境污染問題。因此，可商業化之二次鋁資源化技術開發非常重要與急迫。本研究計畫重點是研發蒸氣水解二次鋁渣，回收二次鋁；並將氨氣導入水相，再以新型新流體式電容去離子(fluidized capacitive deionization(FdCDI))技術分離、富集銨離子產生濃氨水產品；另也將回收高熱值氣體(例如： $H_2$  及  $CH_4$ )連接發電機產生電力，因無添加藥品而無衍生廢棄物，屬環境友善、零廢棄、及全回收之綠色製程。

根據實驗數據，最佳之銨離子回收參數為進流流率 6 mL/min 且操作電壓為 1.2V 而進流銨離子濃度不影響回收效率，最佳吸附量為 14.3 mg  $NH_3$ /g AC，最大去除率為 27.5%，若欲達到 90% 離子去除效率則需 8 組 FdCDI 設備組成裝置。

## 壹、動機

鋁是一種常用的金屬，在冶煉過程表面與氧反應，生成一層緻密的氧化鋁層( $Al_2O_3$ )，為使鋁礦不繼續向內氧化，通常在冶煉過程中加入鹽類( $NaCl$ 、 $KCl$ )與表層鋁生成熔點較高的化合物以保護內部的金屬鋁不被氧化，該層在冶煉完成後，被移除，衍生廢棄物(鋁渣)，即一次鋁渣；一次鋁渣中所含單質鋁比例仍高，具提煉價值，通常再處理以回收殘餘鋁金屬，衍生廢棄物為二次鋁渣，成分多含：鋁及鋁氧化物、氮化鋁、鹽類(氯化鈉、氯化鉀)，視來源不同可能有：碳化鋁、磷化鋁、氧化鐵、氧化鎂等雜質。

二次鋁渣因成分複雜導致分離與處理不易，至今仍無成熟資源化的商業化處理技術，多採取安定化後掩埋方式處置。但因鋁渣之氮化鋁成分，接觸水後(下雨)容易發生化學反應而釋放惡臭氨氣，令鄰近民眾厭惡；單質鋁及碳化鋁與水反應生成氫氣與甲烷，若掩埋處理，此種高熱值可燃性氣體可能引發火災。由於二次鋁渣掩埋處理衍生環境汙染問題，又浪費能資源，因此，開發新穎二次鋁渣資源化技術勢在必行。

## 貳、目的

### 一、能資源全回收

二次鋁渣因單質鋁含量相對低、雜質(例如：碳化鋁、氮化鋁)量多，氮化鋁分解速率緩慢，貯存及資源化過程處理易衍生氨氣惡臭，造成資源化處理困難，尤其，非法棄置二次鋁渣，導致重大環境污染問題，因此，可商業化之二次鋁資源化技術之開發非常重要與急迫。本能資源循環回收技術研發重點含：

- (一) 蒸氣水解二次鋁渣，回收之安定鋁渣，經造粒作為陶瓷顆粒(輕質骨材)；
- (二) 衍生惡臭氨氣導入水相，再以新型新流體式電容去離子(fluidized capacitive deionization (FdCDI))技術分離、富集銨離子產生濃氨水產品；
- (三) 氣液分離回收高熱值可燃氣體(例如： $H_2$  及  $CH_4$ )連接發電機產生電力。

此種電力自給、操作簡單之新設計程序，因無添加藥品而無衍生廢棄物，屬環境友善、零廢棄、及全回收之綠色製程。

### 二、導入綠色化學設計理念

本創意符合綠色 12 原則(PRODUCTIVELY)中之防廢(prevent wastes)、再生(Renewable materials)、簡潔(Omit derivatization steps)、可解(Degradable chemical products)、保安(Use safe synthetic methods)、節能(Temperature, pressure ambient)、降輔(Very few auxiliary substances)、物盡(E-factor, maximize feed in product)、及低毒(Low toxicity of chemical products)等至少 9 個原則：

#### (一) 防廢(Prevent wastes) - 全回收而無衍生廢棄物

1. 因無添加藥品於此種新型二次鋁渣資源化處理程序，而無衍生廢棄物，自無最終處置掩埋需求；
2. 氣液分離氨氣導入水相(幾無  $NO_x$  排放)，再以新型新流體式電容去離子(FdCDI)技術分離回收去離子水循環再利用及富集銨離子產生濃氨水產品；回收之高熱值可燃性氣體逕自發電(幾無  $NO_x$  排放)，提供二次鋁渣資源化處理程序之電力需求；
3. 回收之安定鋁渣，經造粒作為陶瓷顆粒，以為輕質骨材製程之主要成分或添加物。

**(二) 再生(Renewable materials) - 全回收製造可商品化產品及產生電力**

1. 回收富集之銨離子製造濃氨水產品；
2. 回收之安定鋁渣，經造粒作為陶瓷顆粒，應用於輕質骨材製程；
3. 回收之高熱值可燃氣體連接發電機產生電力(電力自給)。

**(三) 簡潔(Omit derivatization steps) - 無添加藥品，程序簡單**

1. 以水蒸氣與二次鋁渣反應，使反應中衍生惡臭物質進入水相，透過電容去離子技術富極氨水，無添加藥品，程序簡單、易自動化；
2. 所開發之新型新流體式電容去離子(FdCDI)技術只以低電壓(0.8~1.2V)操作，設備成本低與程序操作維修相對簡易，以電吸附(electrosorption)銨離子分離回收去離子水循環再利用及再生(regeneration)富集銨離子製造濃氨水產品。

**(四) 可解(Degradable chemical products) - 產品均可再利用，不成為環境負擔**

1. 回收富集之銨離子製造濃氨水產品，提供他廠降低煙道 NO<sub>x</sub> 排放氣體濃度；
2. 回收之安定鋁渣，經造粒作為陶瓷顆粒，應用於輕質骨材製程；
3. 回收之高熱值可燃氣體連接發電機產生電力(電力自給)。

**(五) 保安(Use safe synthetic methods) - 反應溫度低，富集惡臭物質製造濃氨水產品**

1. 水蒸氣與二次鋁渣反應在常壓操作，水蒸氣溫度低於 110°C，不涉及劇烈反應；
2. 回收之高熱值可燃性氣體逕自發電(幾無 NO<sub>x</sub> 排放)，無儲存安全顧慮與風險；
3. 反應衍生惡臭物質進入水相，再分離回收去離子水(循環再利用)及富集銨離子製造濃氨水產品。

**(六) 節能(Temperature, Pressure ambient) - 電力自給**

回收之高熱值可燃性氣體逕自發電(幾無 NO<sub>x</sub> 排放)，提供二次鋁渣資源化處理程序之電力需求。

**(七) 降輔(Very few auxiliary substances) - 全程無添加加入藥劑，零廢棄**

- (八) 物盡(E-factor, maximize feed in product) - 全回收製造可商品化產品及產生電力，類似概念，也可應用於資源化處理其他泥渣廢棄物
- (九) 低毒(Low toxicity of chemical products) - 富集製程惡臭物質製造濃商用氨水產品

## 參、設備及器材

### 一、二次鋁渣資源化技術

本二次鋁渣資源化由螺旋反應器、蒸汽產生器、洗滌塔、燃氣發電機與流體式電容去離子(FdCDI)等設備組成：

- (一) 螺旋反應器：導入進料(二次鋁渣)與通入蒸汽於螺旋反應器攪拌，充分混合及反應，在進料與出料處採水封以避免惡臭氫氣及可燃性氫氣與甲烷外洩。

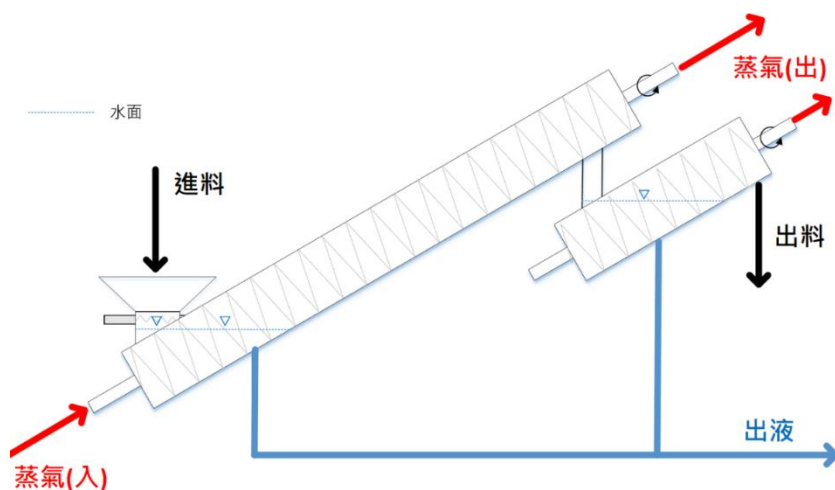


圖1、螺旋反應器設計概念

- (二) 洗滌塔：螺旋反應器產生之水溶性氫氣經2次洗滌至水相，以便FdCDI富集氫溶液，並使可燃性氣體含之氫氣濃度低至以燃氣發電機發電，造成幾無NO<sub>x</sub>或符合排放法規排放。
- (三) 燃氣發電機：將通過2次洗滌塔之氣體(僅剩氫氣與甲烷)逕自發電，供給廠內使用，減少外部能源需求，達到能源自給之目標。

### 二、流體式電容去離子(FdCDI)技術

電容去離子(capacitive deionization (CDI))技術關鍵是以低電壓通過電極產生電場以吸附離子，陰極吸附陽離子；陽極吸附陰離子，達到分離水中離子之功效；CDI反應裝置與結構可分為：水流從電極間通過(即水流方向與電極方向平行)之flow-by CDI(如圖2(A))、水流方向與電極方向垂直之flow-through CDI(如圖2(B))、利用陰陽離子交換膜分離水中離子之Membrane CDI(如圖2(C))、導入流動式電極的flow-electrode CDI (FCDI) (如圖2(H, I))，與本新式流體式電容去離子技術

(fluidized CDI (FdCDI))；比較一般flow-by及flow-through CDI，FdCDI增加流動式電極(填充於固定式電極間)以增加電雙層厚度與吸附面積，達到更佳之吸附效率，而Membrane CDI與FCDI涉及膜的使用，膜本身價格較高且容易產生水垢，因而增加設備成本與維護成本，相較於FdCDI能以流動電極提升吸附效率且不使用離子交換膜，增加成本，更具技術簡易與工程經濟競爭力。

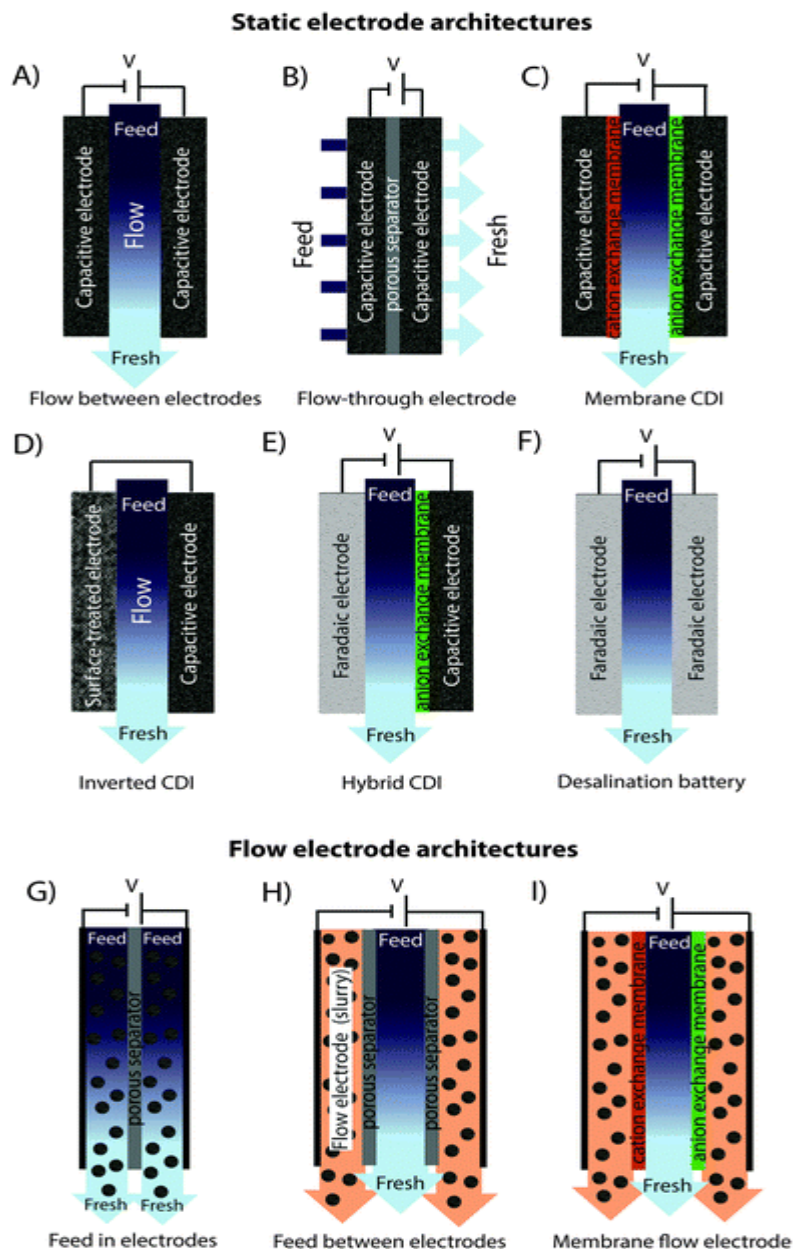


圖2、電容去離子裝置與結構(Suss et al., 2015)

流動式電容去離子(FdCDI)裝置與結構(如圖3)由固定式電極與流動式電極組成，固定式電極為塗佈活性碳知不鏽鋼板，其間填充顆粒狀活性碳作為流動電極；固定式電極以銅線與電源供應器連接以供給電壓，使電極表面形成電雙層便



能富集水中離子。實驗使用實驗室級電源供應器與導電度計量測離子濃度。

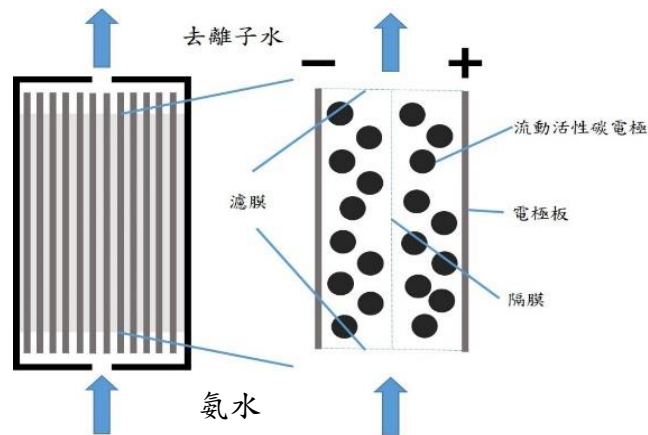


圖3、FdCDI反應器設計圖

(一) 不鏽鋼薄片電流集板(current collector)

1. 性質穩定：不易與化學物質反應，不易變質，可重複使用多次。
2. 堅硬：不易變形，有利於設計成方便拔插之模組架構，可快速更換。
3. 良導電性：不鏽鋼電阻為 $7.2 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$ ，具良好導電性質，助於傳遞電能予塗佈之材料形成電雙層。

(二) 活性碳(Activated carbon (AC))

1. 環境友善：農業剩餘物經乾燥、焙燒、賦活等步驟回收活性碳再利用，達到資源再利用與零廢棄目標，也是一種環境友善材料。
2. 性質穩定：活性碳性質穩定，不易變質，可重複使用多次，減少更換次數與廢棄量。
3. 大比表面積：其比表面積 $>2000m^2/g$ ，增加吸附量及比電容值。

(三) 電源供應器(Power supply)

FdCDI 實驗之源供應器為 Keithley Series 2400 SourceMeter，能以程式控制電壓與時間，達到自動化，減少操作時間及人力成本。

(四) 導電度計(Conductivity meter)

FdCDI 實驗使用之導電度計為 Suntex SC-2300 Conductivity Meter，靈敏度達  $0.1 \mu s/cm$ ，且能自動傳輸數據至電腦，達到實時監測與即時反饋的自動控制概念。

## 肆、過程或方法

### 一、二次鋁渣資源化流程

如圖 4，二次鋁渣於螺旋反應器與蒸氣反應，水解後產生氨氣、氫氣與甲烷，回收之安定鋁渣，經造粒作為陶瓷顆粒(輕質骨材)；反應器流出之氣體可經由熱交換器回收部分熱能，再經 2 次洗滌塔(以確定氨完全收集)將氣體所含水溶性氨氣與水蒸氣洗至水相，再以 FdCDI 設備進行氨水的電吸附，以富集銨離子產生濃氨水產品，同時回收之去離子水便可循環利用於洗滌塔與蒸汽產生器；氣態氫氣與甲烷導入燃氣發電機生產電力，達到零廢棄與能資源循環的目的。

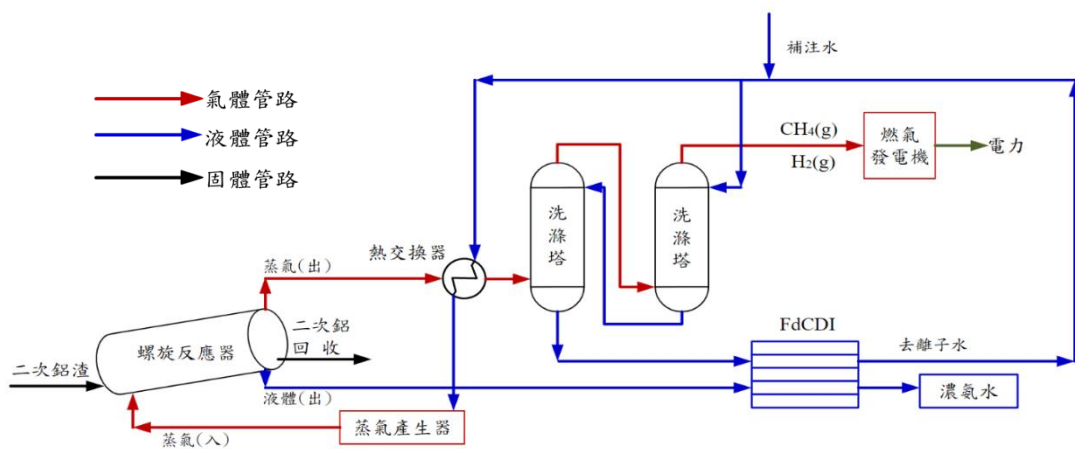


圖4、二次鋁渣資源化流程圖

### 二、流體式電容去離子(FdCDI)設備

- (一) **吸附階段**：通入氨水溶液並施加電壓，使銨離子等陽離子吸附於陰極；陰離子吸附於陽極極板表面，而可回收離子濃度較低之水溶液，可視狀況放流或二次處理以進一步回收離子。
- (二) **脫附階段**：當不施加電壓或施加反向電壓時，電極(AC)表面所吸附之離子將會脫附而離開 AC 表面，使出流溶液中離子濃度提升，達到富集離子的效果。

若於電吸附階段將稀溶液放流，再於脫附階段將濃溶液導回原水水槽以提升氨水濃度，不斷重複此兩階段，可以不添加藥劑之綠色化學的方法達到富集離子、產生濃氨水產物之目的。

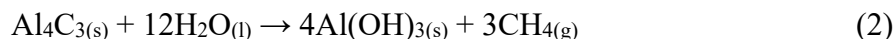
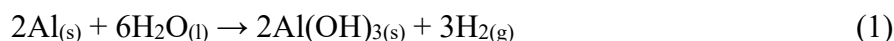
為探討富集銨離子之較有利操作參數，在操作模式固定為吸附階段(施加操作電壓)1 小時、脫附階段(不施加電壓)1 小時之環境下，設計以下實驗步驟：

1. 操作電壓之比較：使用相同進液氨濃度與流率，改變操作電壓以探討較有利操作電壓。
2. 進流流率之比較：使用相同進液氨濃度與操作電壓，改變進流體積流率以探討較有利進流體積流率。
3. 進流濃度之比較：使用相同進液流率與操作電壓，改變操作電壓，探討較有利操作電壓。

## 伍、結果

### 一、二次鋁渣資源化程序設計

(一) 產氣量計算：透過水蒸氣與二次鋁渣之氮化鋁、碳化鋁及單質鋁，與水反應之化學反應式：



根據中鋁公司典型二次鋁渣化學成分表，每公斤鋁渣中約含 0.103 公斤氮化鋁、0.103 公斤單質鋁與 0.056 公斤碳化鋁，水解後分別產生氫氣 5.72 公斤、甲烷 0.39 公斤及氨氣 2.57 公斤；若建設一資源化廠每日處理量為 5 公噸，運轉 8 小時，則每小時處理量為 625 kg/h，換算得氣體產量為：氫氣 3576 mol/h、甲烷 243 mol/h、氨氣 1570 mol/h，以此產率可規劃廠區所用燃氣發電機規模與發電量。

(二) 反應需水量計算：

若每小時處理二次鋁渣 625 kg，則氮化鋁與水反應需要 84.8 kg/h、氮化鋁與水反應需要 84.8 kg/h、單質鋁與水反應需要 55.6 kg/h、碳化鋁與水反應需要 77.8 kg/h；反應總需水量為 148.2 kg/h。

(三) 洗滌塔需水量計算：

洗滌塔需水量可由 L/G ratio 計算之，

$$\frac{L}{G} = \frac{y_{bottom} - y_{top}}{x_{bottom} - x_{top}}, \text{ 而 } x_{top} = 0,$$

$$x_{bottom} = \frac{P * y_{NH_3}^*}{H_{NH_3}} = \frac{1 \text{ atm} * y_{NH_3}^*}{0.016 \text{ atm}} = 62.5 y_{NH_3}^*$$

$$\text{令 } y_{NH_3}^* = 0.8 y_{bottom} \text{ 代入, 則 } x_{bottom} = 50 * y_{bottom}$$

$$\text{故 } \frac{L}{G} = \frac{y_{bottom} - y_{top}}{x_{bottom} - x_{top}} = \frac{y_{bottom} - y_{top}}{50 * y_{bottom} - 0} = \frac{y_{inlet} - y_{outlet}}{50 * y_{inlet}}$$

由氣體產量可換算得進氣氨濃度為 291,334 ppm，取  $y_{inlet} = 290,000$  ppm，經計算可得第一座洗滌塔  $y_{outlet} = 2000$  ppm、第二座洗滌塔  $y_{outlet} = 10$  ppm 時，兩座洗滌塔需水量接近(分別為 285 及 274 kg/h)為較合適之操作參數，可將第二座洗滌塔出流水導至第一座洗滌塔使用，節省廠區水資源消耗。

#### (四) FdCDI 需水量計算：

系統氨產生量為 26.9 kg，假定產生濃氨水(20 wt%)，需消耗水 102.8 kg/h

#### (五) 總需水量：

總需水量 = 反應需水量 + FdCDI 需水量 = 148.2 + 102.8  
= 251 kg/h，每小時需挹注水 251 公斤至系統。

#### (六) 固體產物量：

由質量平衡計算可得固體產物量為 733.8 kg/h。

## 二、流體式電容去離子(FdCDI)裝置設計

(一) 操作電壓之比較 (圖 5)：控制變因為進液氨濃度(5000ppm)與流速(6 mL/min)，操作電壓為 1.2 V 時吸附量為 14.3 mg NH<sub>3</sub>/g AC，最大去除率為 27.5%；操作電壓為 0.6 V 時吸附量為 7.1 mg NH<sub>3</sub>/g AC，最大去除率為 14.7%；故電壓較高(1.2 V)時有較好之吸附量與去除率。

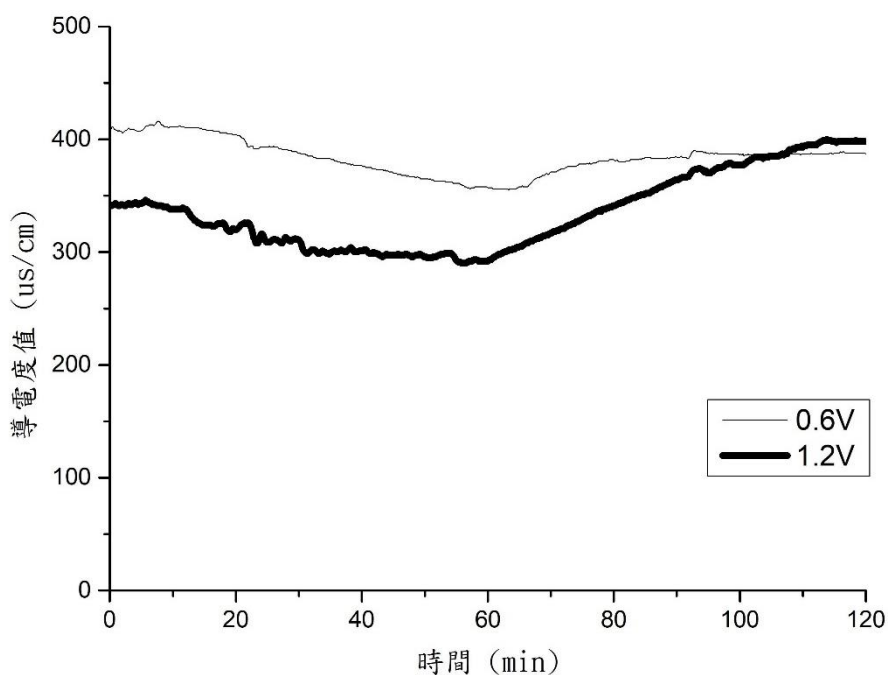


圖 5、電壓與吸附量關係圖

(二) 進流流率之比較 (圖 6)：控制變因為進液氨濃度(1000ppm)與操作電壓(1.2 V)，進流流率為 3 mL/min 時吸附量為 1.94 mg NH<sub>3</sub>/g AC，最大去除率為 8.2%；進流流率為 6 mL/min 時吸附量為 6.2 mg NH<sub>3</sub>/g AC，最大去除率為 22.1%；故進流流率較高(6 mL/min)時有較好之吸附量與去除率。

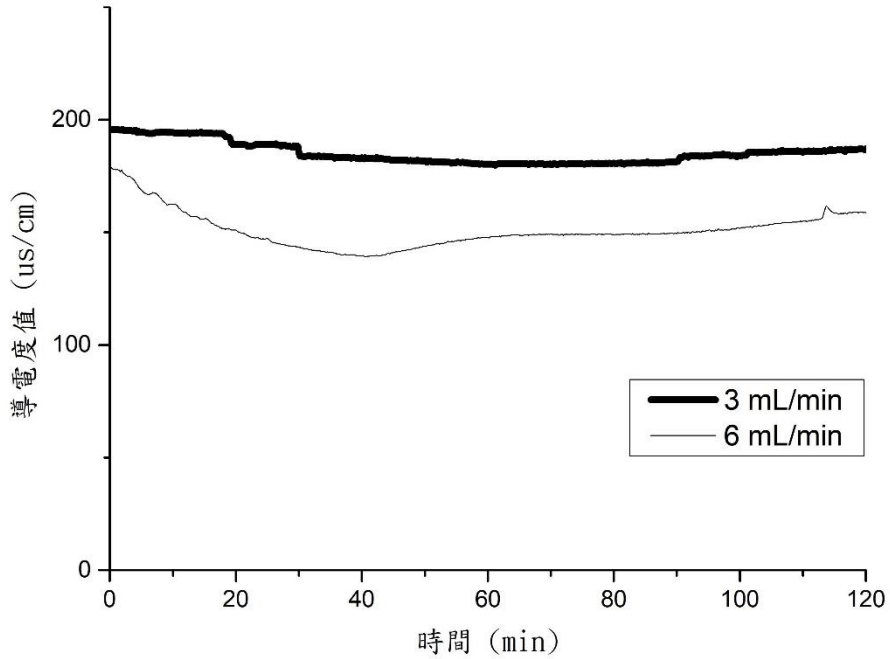


圖 6、流率與吸附量關係圖

(三) 進流濃度之比較(圖 7)：控制變因為進流流率(6 mL/min)與操作電壓(1.2 V)，進流濃度為 1000 ppm 時吸附量為 6.2 mg NH<sub>3</sub>/g AC，最大去除率為 22.1%；進流濃度為 5000 ppm 時吸附量為 14.3 mg NH<sub>3</sub>/g AC，最大去除率為 27.5%；雖然於高濃度(5000 ppm)時有較高之吸附量與吸附效率，但去除率相差不大，可見濃度對於去除效率的影響較低但較高濃度時去除率略高。

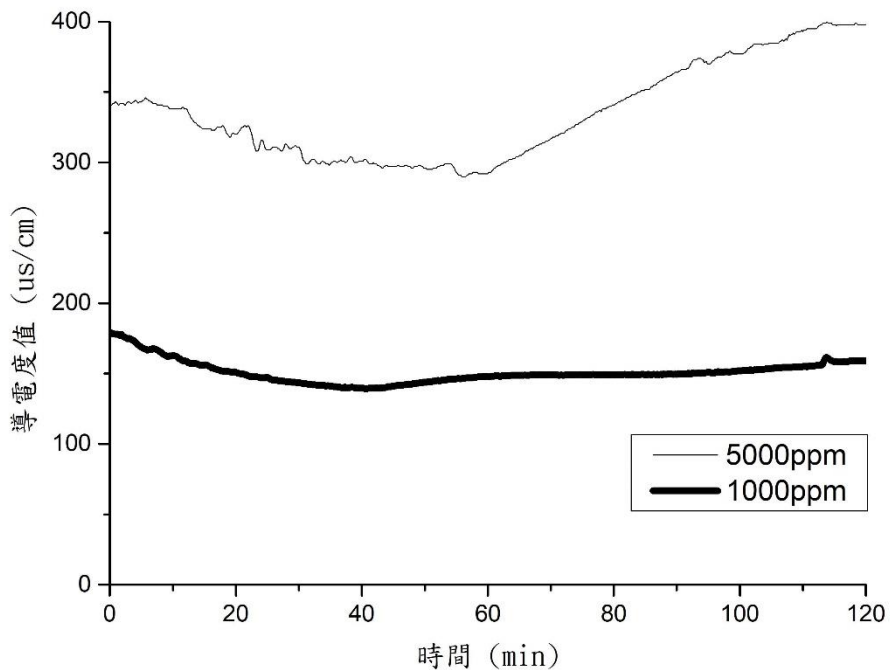


圖 7、溶液濃度與吸附量關係圖

從以上實驗結果可以得知進流流率較快者(6 mL/min) 去除效率較好，但囿於實驗器材限制，無法實驗更快的流率；操作電壓較大者(1.2 V) 去除效率較好，但為避免法拉第反應發生會控制操作電壓低於 1.23 V；而進流氨濃度對去除效率之影響較小。

#### (四) FdCDI 裝置設計

由以上實驗結果可知在進流流率為 6 mL/min 且操作電壓為 1.2 V 狀況下，銨離子去除效率為 27%，即仍有 73% 離子未被吸附，欲提高吸附較率，可進行下列方式：

1. 將 FdCDI 設備串聯：通過單槽仍有 73% 離子未被吸附，通過雙槽則有  $0.73 \times 0.73 \times 100\% = 53\%$  未被吸附，通過 N 槽之吸附狀況如表 1；若欲達到 90% 之吸附效率則需將 9 組 FdCDI 設備串聯。

表 1 FdCDI 串聯槽數與脫附效率

槽數(個)	2	3	4	5	6	7	8	9
吸附效率(%)	46.7	61.1	71.6	79.3	84.9	89.0	92.9	94.1

2. 進行二次處理：將 FdCDI 設備出流水導至貯槽進行二次處理，若廠區每日運作 8 小時，而導入自動控制使得廢水能處理 24 小時，則一天可進行三班次廢水處理，若欲達到 90% 之吸附效率則只需 3 組 FdCDI 設備串聯，相較單純串聯更節省廠區空間。
3. 進行材料表面改質：以增加吸附量與吸附效率為目標，如將活性炭表面改質以增加電子親和性或研發孔洞材料增加比表面積，以增加銨離子吸附能力。

## 陸、討論

### 一、經濟與效益

#### (一) 技術競爭力

技術名稱	技術競爭力之優勢
1. 二次鋁渣資源化反應器	(1)密閉系統建立(進出料水封、尾氣氣液輸送管路) (2)操作氣控制(蒸氣量、進料速率、停留時間)
2. 製程能資源整合有效應用	(1)60~80%合成氣連接發電機(syngas electric power generator) (50 kW) ( $\epsilon=0.3$ )，產生電力可提供製程部分電力需求，以降低生產成本。 (2)60~80%合成氣作為製程熱源，調適蒸汽產生器、及碳化爐(生產陶瓷顆粒)等操作單元之熱源需求。 (3)經由 FdCDI 流程所獲之回收水，經熱交換後，作為蒸汽產生器用水來源。
3. 衍生高附加價值產品	(1)由二次鋁渣資源化殘渣添加劑(碳酸鈣、氧化矽、氧化鋁)經造粒、高溫煅燒、產生多孔孔性陶瓷顆粒。 (2) 經由 FdCDI 流程所富集之氨水，可成為化工原料供其他產業使用。

#### (二) 效益

##### 1. 成本分析-估算廠房設備建設費

項目	費用(新台幣)
燃氣發電機(100kW)	400,000
FdCDI	1,000,000
螺旋進料器-2 台	150,000
分離裝置(洗滌塔)-3 座	30,000
熱交換器	20,000
蒸氣鍋爐	100,000
輸送機-2 台	80,000
儲槽-6 座	20,000
馬達-10 台	200,000
管線費	20,000
其他設備費	500,000
建築費用	1,000,000



工程費	500,000
總計	<b>4,020,000</b>

2. 成本分析-估算營運費用

項目	費用(新台幣)
水費(年)	10,000
電費(年)	1,500,000
工人薪水(年)-2人	1,000,000
土地租金(年)	1,000,000
設備維護費(年)	100,000
其他費用	100,000
總計	3,710,000

3. 收入分析

項目	費用(新台幣)
二次鋁渣處理費	15,000,000
電力費	480,000
氨水(20%)	6,000,000
回收殘渣	0
總計	21,480,000

4. 年利潤 = 2148 萬-371 萬=1777 萬元

回本期 = 461/1733 = 0.26 年(約 3 個月)

## 二、未來應用性

本資源化技術之關鍵於使用水蒸氣與鋁渣反應，以不額外添加藥劑的方式使不穩定成分水解，得以讓殘渣安定化以便後續再利用或處置，減少廢棄物產生且從中回收能資源並解決現今難處理鋁渣的問題；而除了鋁渣之外我國仍有許多爐渣與爐石任意棄置的問題，期許能應用本技術解決相關問題；以轉爐石為例，其中所含氧化鈣比例相當高，與水反應會產生熱能，便可用本資源化技術從中回收熱能並使轉爐石安定化，便於後續處理。

本技術開發之新型流體式電容去離子技術只需施加低電壓便能進行離子回收，且無後續汙泥、濾膜等廢棄物的處理問題，是一種低耗能、綠色化學、零廢棄的離子去除/富集技術；而我國作為海島國家且降雨有時空間分布不均的問題，缺水問題屢見不鮮，現今海水淡化技術多高耗能，期許將本技術應用於海水淡化，解決此一問題；再者我國高科技產業發達，貴金屬使用量大且多半倚賴進口，期許運用本技術從高科技業廢水中回收貴金屬離子，達到循環使用與降低進口需求之目的。

## 柒、結論

我國地小人稠，處處皆需要與環境共處，加上能資源仰賴進口，所以環境保護與能資源循環再利用等概念尤為重要；在減少廢棄的同時，如何處理過去產生的廢棄物、且從廢棄物中回收能資源的技術甚為重要，本資源化技術不只將二次鋁渣安定化得以再利用更將能資源回收，達到綠色 12 原則中的防廢、再生、節能與物盡。

而新型流體式電容去離子技術(FdCDI)以低耗能且無須加藥、無廢棄物產生的方式將離子富集，達到再生、簡潔、節能、降輔與低毒等原則，為綠色資源回收的方式，期許推廣此方法，達到能資源循環的社會。

## 捌、參考資料及其他

- [1] Arunabh Meshram et al., “Recovery of valuable products from hazardous aluminum dross: A review,” *Resources, Conservation & Recycling* 130, pp. 95-108, 2018.
- [2] P. Tsakiridis, “Aluminium salt slag characterization and utilization – A review,” *Journal of Hazardous Materials* 217-218, pp. 1-10, 2012.
- [3] Paul Bowen et al., “Degradation of Aluminum Nitride Powder in an Aqueous Environment,” *Journal of the American Ceramic Society* 73(3), pp. 724-728, 5 1990.
- [4] Fukumoto, S et al. , “Hydrolysis behavior of aluminum nitride in various solutions,” *Journal of Materials Science* 35[11], pp. 2743-2748, 2000.
- [5] Changyong Zhang et al., “Faradaic reactions in capacitive deionization (CDI) - problems and,” *Water Research* 128, pp. 314-330, 2018.
- [6] Dandan Zhao et al., “Electrodialysis reversal for industrial reverse osmosis brine treatment,” *Separation and Purification Technology* 213, pp. 339-347, 2019.
- [7] Changyong Zhang et al., “Ammonia-Rich Solution Production from Wastewaters Using,” *ACS Sustainable Chem. Eng.*, pp. 6480-6485, 7 2019.
- [8] A. C. Hsieh, New fluidized capacitive deionization of salt (waste) water with recycling of noble metal and water, National Cheng Kung University: MS Thesis, 2019.
- [9] Jinwang Li et al., “Mechanism and Kinetics of Aluminum Nitride Powder Degradation,” *Journal of the American Ceramic Society* 89[3], pp. 937-943, 2006.
- [10] M. E. Suss et al., “Water desalination via capacitive deionization: what is it and what can we expect from it?” *Energy Environ. Sci.*, 2015, 8, 2296-2319