

水回收技術評選-以半導體廠 CMP廢水為例

弘光科技大學環境工程研究所
蘇弘毅 教授

摘要自何永隆-弘光科技大學環境工
程研究所碩士論文

前言

研究動機

半導體廠化學機械研磨(CMP)廢水成份複雜、處理困難，早期多以化學混凝法處理，但成本偏高且不具回收價值，因此近期已有其他處理技術陸續被發展研究。

針對單一處理技術之研究眾多，但**缺乏所有技術整合與比較**。故收集近十年內，各種CMP廢水處理技術之研究結果，重新匯整成一篇含括所有技術之詳盡分析與優劣比較報告。

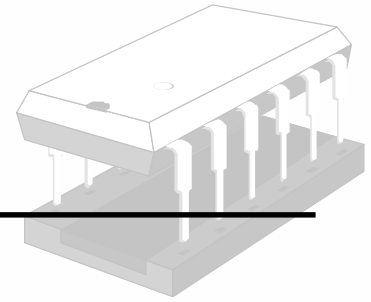
前言

研究目的

整合所有技術之**操作條件**、**影響因子**、**處理效率**、**運轉成本**等，提供既設半導體工廠於運轉操作或參數調整之參考。

進行所有技術之**技術可行性**、**處理效能**、**成本優勢**、**操作難易度**等優劣比較，提供新設半導體工廠於設計規劃前之技術選用參考。

文獻回顧



CMP概述

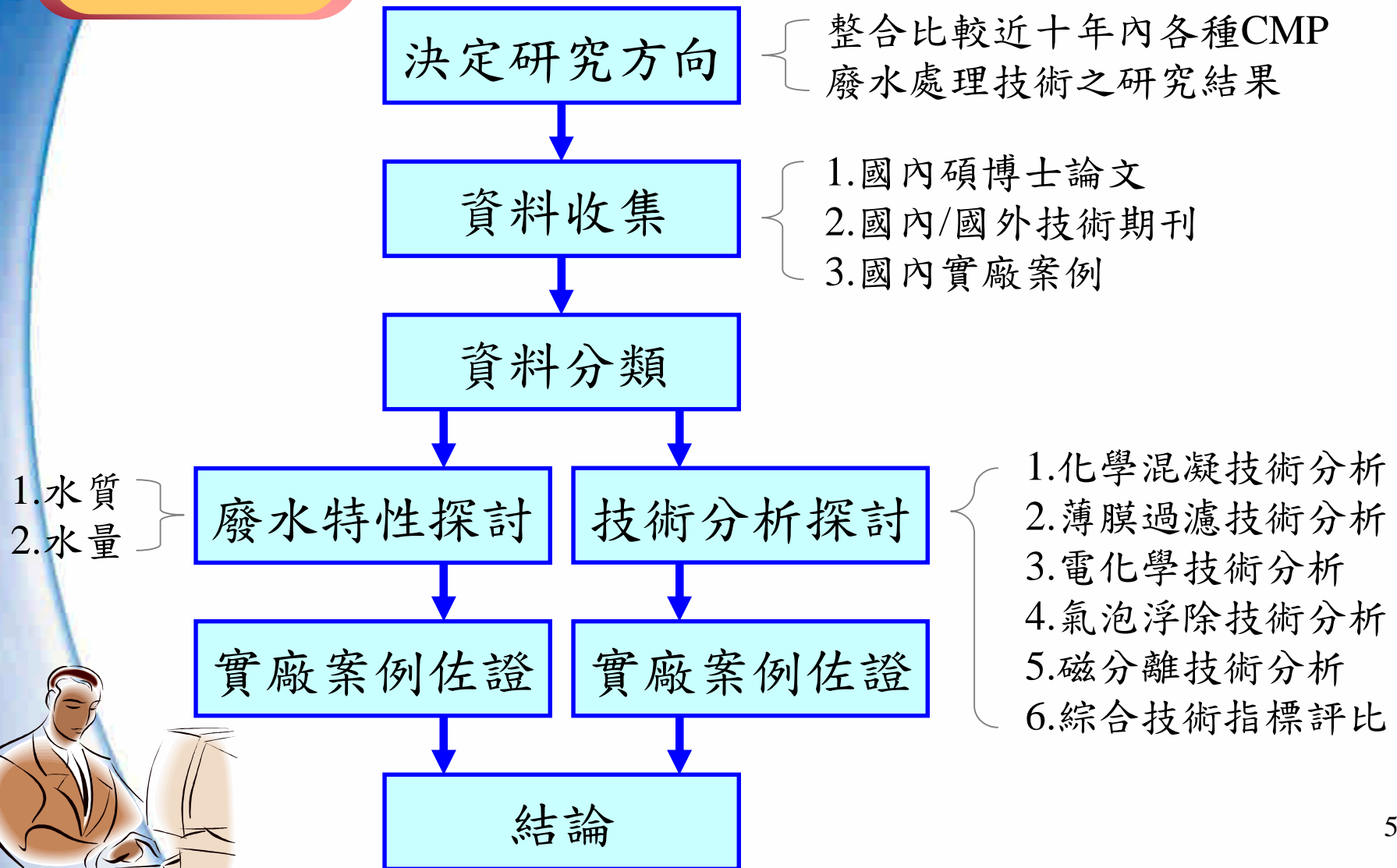
- **CMP目的**：晶圓「全面平坦化」之唯一技術。
- **CMP研磨程序**：
 - ⊕ 研磨時—添加**研磨液**磨光。(奈米研磨砥粒、化學物質)
 - ⊕ 研磨後—以**純水+清洗劑**洗淨。(化學混合物質)
- **CMP廢水成份**：
 - ⊕ **有機污染物**—金屬錯合劑、分散劑、介面活性劑、腐蝕抑制劑和酸性物質等。
 - ⊕ **無機污染物**—金屬連接線、奈米研磨砥粒、氧化劑、強鹼、強酸和弱酸緩衝液等。
- **CMP耗水特性**：經國內/外統計結果—CMP用水量約占製程用水量**5 ~ 30 %**，未來隨技術成長將提高到**40 ~ 50 %**。

成份複雜

耗水量大

研究方法

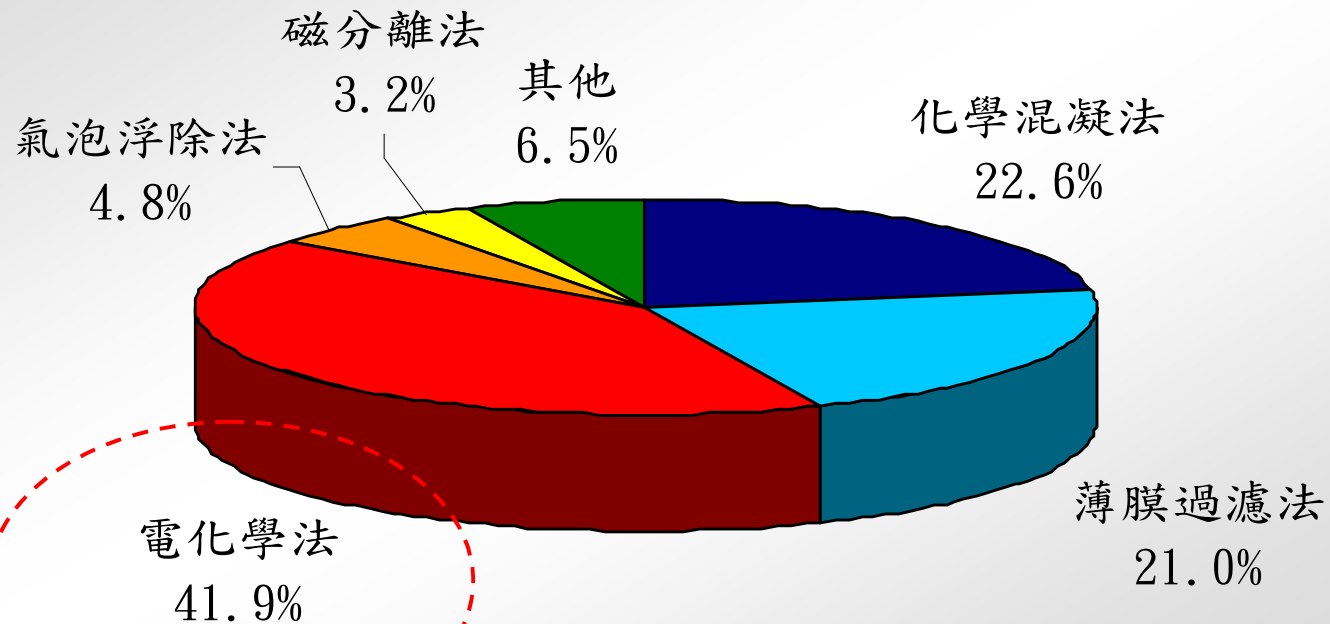
研究流程



研究方法

資料分類

技術類型比例圖



結果與討論

Quality

CMP水質特性

■ CMP廢水種類：

金屬層研磨廢水/氧化層研磨廢水/金屬氧化層混合廢水

■ CMP廢水水質：

- ✦ 金屬層pH偏酸性(氧化劑)、氧化層pH偏鹼性(pH緩衝劑)。
- ✦ 有機物、界達電位偏高，水質穩定(分散劑、界面活性劑)。
- ✦ 總固體物、濁度偏高，粒徑分佈狹窄(100~1000nm)，外觀呈白色混濁狀(奈米研磨砥粒、研磨碎屑)。
- ✦ 含有少量鋁、銅、鎢、鉀，及微量鈣、鎂、鐵等金屬離子(金屬錯合劑、鋁導線、鎢栓塞、鹼性清洗液)。
- ✦ 含有Cl⁻、SO₄²⁻等陰離子(HCl及H₂SO₄清洗液)。

結果與討論

Quantity

CMP水量特性

■ CMP排放量：

國內半導體廠CMP廢水排放量約在**50 ~ 500 噸/日**左右不等，其隨著工廠規模或產能變化而有所差異。

■ CMP用水比率：

國內半導體廠CMP用水量約占製程總用水量的**5 ~ 25 %**，可見得CMP製程相當耗水，故應妥善處理並設法予以回收，方能達到節約用水之效益。

結果與討論

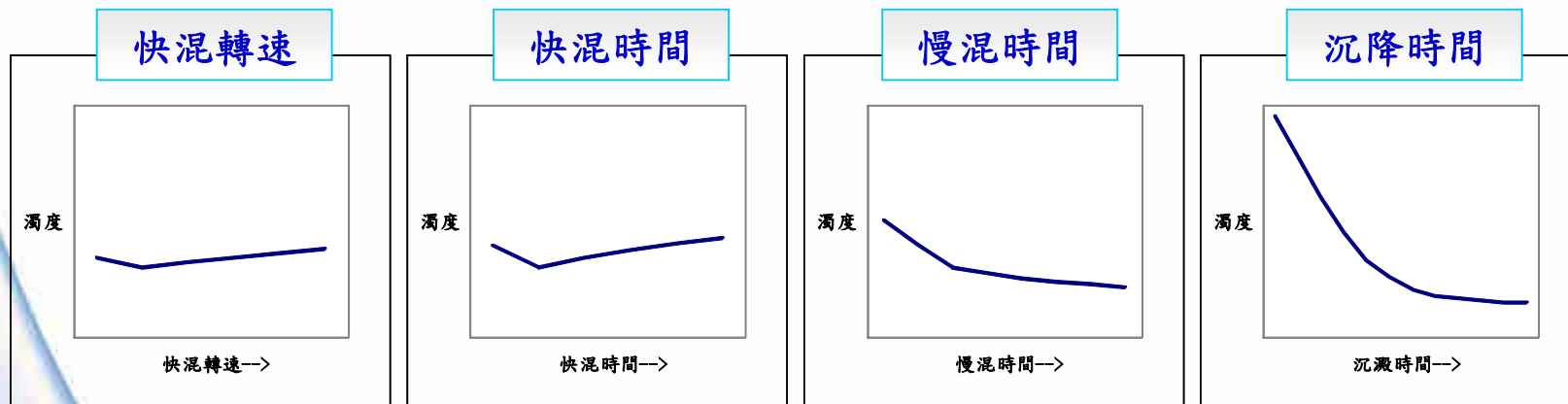
化學混凝法

■ 原理：

利用混凝使廢水 SiO_2 顆粒去穩定化而相互凝聚，再透過慢速攪拌促使膠羽碰撞集結成大膠羽，最後由重力沉降去除。

■ 操作因數的影響：

匯整14篇化學混凝技術
研究結果，並繪製成關係圖



結果與討論

化學混凝法

■ 混凝劑的影響：

- ✦ 使用無機性混凝劑，濁度皆可降至10 NTU以下。
- ✦ 使用二價鐵混凝劑對濁度去除效率較差。
- ✦ 使用硫酸銅混凝劑會殘餘銅離子。
- ✦ 使用高分子劑雙重絮凝，可減少用藥量，但費用昂貴。
- ✦ PAC價格低、效率高、pH範圍大、可過量加藥，故最佳。

■ 加藥量的影響：

- ✦ 劑量不足—所有混凝劑之殘餘濁度皆高於原始濁度。
- ✦ 劑量過多—部份混凝劑(硫酸鐵、硫酸鋁等)有再穩定情況發生。

■ pH值的影響：

- ✦ 鐵鹽pH範圍較窄；鋁鹽pH範圍則較大。
- ✦ pH過高或過低時濁度會再上揚。
- ✦ 提高加藥量可加大pH範圍。

結果與討論

化學混凝法

水質資料整理自
混凝技術研究結果

■ 處理效率：

- 除二價鐵混凝劑效率較差外，其餘皆可降低濁度至10 NTU以下，若搭配助凝劑使用更可降至1 NTU以下。
- 混凝對於金屬離子、有機物、溶解性固體物等去除效果不明顯。
- 可直接放流、當回收系統的進流水，或為景觀、灑水用水。

混凝劑種類	出口濁度(NTU)	濁度去除率(%)
PAC	2.3	98.7
硫酸銅	2.5	98.6
氯化鐵	4.0	99.3
硫酸鋁	5.8	96.8
硫酸鐵	9.2	95.0
硫酸亞鐵	> 30	< 75
氯化亞鐵	> 50	< 50
混凝劑 + 陽助凝劑	< 1	> 99

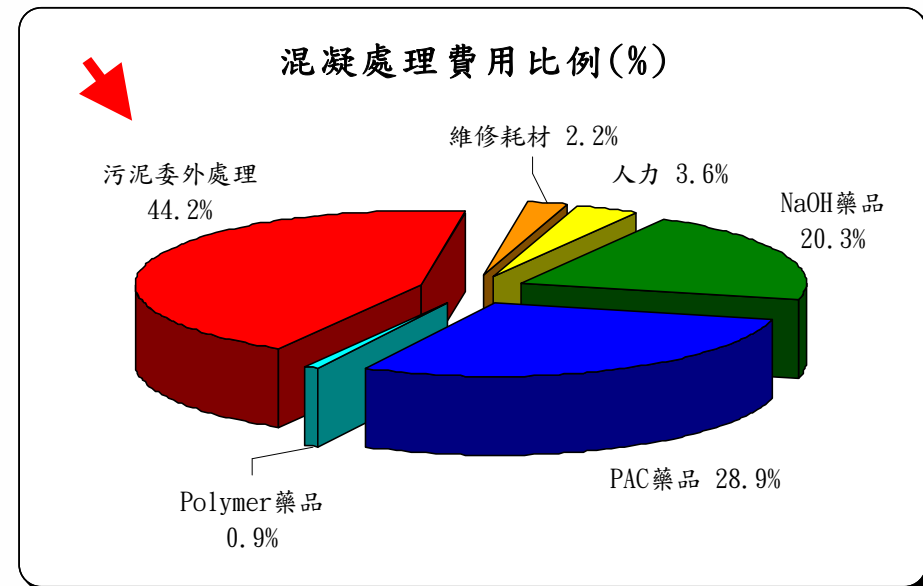
結果與討論

化學混凝法

成本統計整理自
混凝技術研究結果

■ 操作成本：

- 包含電力成本、藥劑成本、維修成本、人事成本及污泥處理成本等。
- 匯整文獻統計結果，以混凝處理CMP廢水之操作成本約在22 ~ 48 元/噸之間。
- 費用比例以污泥處理成本及藥劑成本最高。



結果與討論

薄膜過濾法

■ 原理：

利用壓力、濃度或電位之差異，將污染物與水分子分離於薄膜兩端，達到淨化的目的。

■ 操作因數的影響：

匯整13篇薄膜過濾技術
研究結果，並以關係表表示

項目	流通量	去除率	阻塞率
壓力 ↑	↑	↑	↑
回收率 ↑	↓	↓	↑
溫度 ↑	↑	↓	↓
進流濃度 ↑	↓	↓	↑
反沖洗頻率 ↑	↑	—	↓

↑:表示增加 ↓表示降低 —表示不變

結果與討論

薄膜過濾法

匯整薄膜過濾技術研究
結果，並整理成下表

■ 膜材質的影響：

項目	處理濁度	耐酸鹼	抗氧化	抗阻塞結垢	藥洗回復性	回收率	壽命	費用
有機膜	優	佳	劣	劣	劣	低	短	便宜
無機膜	優	優	優	佳	優	高	長	昂貴

■ 前處理的影響：適當的前處理可避免大量微細顆粒直接黏附或阻塞薄膜孔洞，降低不可逆阻塞之頻率。

■ 主要結垢物質：二氧化矽(SiO_2)為主要結垢物，解決方法為：

- ✦ 提高或降低pH值(大於8或小於7)，增加矽的飽和溶解度。
- ✦ 提高進水溫度(45 °C)，增加矽的溶解速率。
- ✦ 線上添加聚丙烯酸脂抗垢劑，增加 SiO_2 飽和溶解度。
- ✦ 利用氟化銨(NH_4F)進行化學清洗。

結果與討論

薄膜過濾法

水質資料整理自
薄膜技術研究結果

■ 處理效果：

- 使用MF/UF，濁度可降至0.5 NTU以下，TSS去除率>99 %，TOC、SiO₂去除率30 ~ 50 %，但TDS及金屬離子無法去除。
- 使用RO對所有污染物皆有極佳的去除效率。
- 濾液符合自來水或超純水製程標準。

項目	MF / UF		RO	
	出口值	去除率 (%)	出口值	去除率 (%)
濁度 (NTU)	< 0.5	> 99.5	< 0.2	> 99.5
TSS (mg/L)	< 1	> 99.5	< 1	> 99.5
TDS (mg/L)	無效果	NA	< 7.5	> 97
導電度 (μ s/cm)	無效果	NA	< 20	> 96.5
TOC (mg/L)	4	≒30	0.4	> 75
SiO ₂ (mg/L)	162	≒30	7.8	> 95
金屬物 (μ g/L)	無效果	NA	< 5	> 99.9

結果與討論

薄膜過濾法

成本統計摘錄自
薄膜技術研究結果

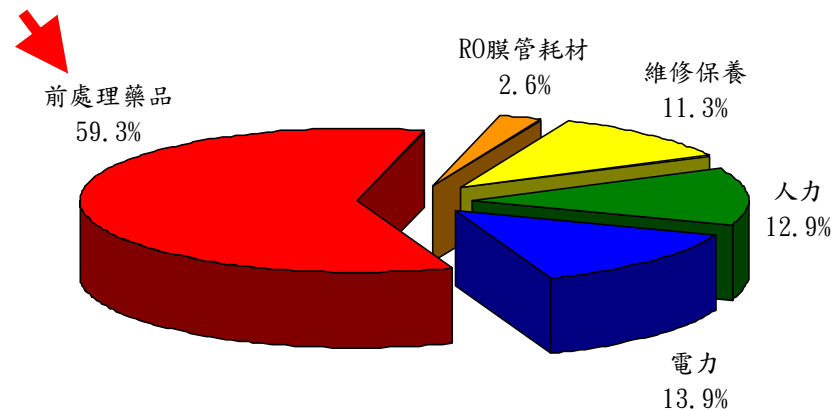
■ 操作成本：

- 包含電力成本、膜管耗材成本、藥劑成本、維修保養成本、人事成本等。

- 根據統計，以「**混凝前處理 + 陶瓷MF + RO**」處理CMP廢水，假設RO三年更換一次，陶瓷MF不更換，則操作成本約為**43 元/噸**。

- 費用比例以**前處理藥品**占六成最高，電力占14%次之。

薄膜處理費用比例(%)



結果與討論

整合26篇電化學法
研究報告，並繪製圖表表示

電化學法

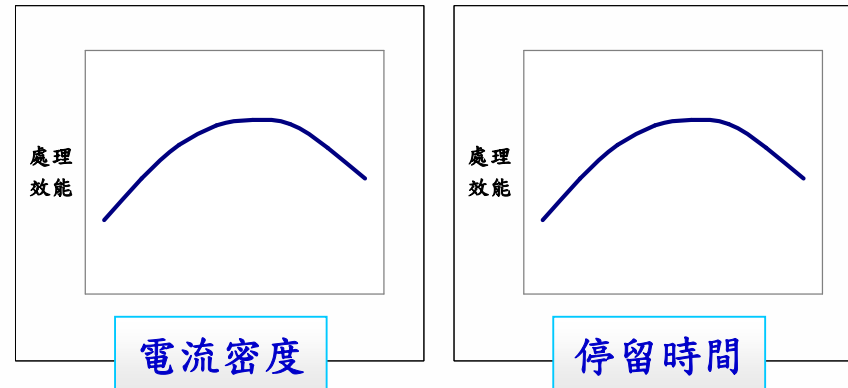
■ 原理：

利用電子在陰陽兩極與溶液間流動引發的電化學反應產生能量，對水中污染物進行氧化、還原、混凝、浮除、電泳等去除作用。

■ 技術種類：

- 電解混凝技術(EC)
- 電聚浮除技術(EPN)
- 外加電過濾技術(EF)

■ EC/EPN操作影響：



■ EF操作影響：↑:增加 ↓:降低 —不變

項目	濾速	濾液品質	阻塞速率
電場強度 ↑	↑	↑	↓
過濾壓差 ↑	↑	—	↑
進流速度 ↑	—	↓	—
進流濃度 ↑	—	↓	↑
反沖洗頻率 ↑	—	—	↓

結果與討論

電化學法

■ 電極板的影響：

- ✦ 陽極板**表面積越大**或數量越多，處理效果越好。
- ✦ 極板表面應保持在**孔蝕化狀態**，避免膠羽四處飄浮。
- ✦ 定期**再生極板表面**，可去除鈍化層、增加釋鐵率。

■ 添加藥劑的影響：

- ✦ **陽離子界面活性劑**—提升處理效率、減少污泥體積。
- ✦ **陰離子界面活性劑**—縮短反應時間、加快沉降速度。
- ✦ **輔助電解質**—提高導電度，增加金屬離子釋出量。

■ pH值的影響：如果將pH控制在**中性偏酸**，則少量釋鐵量(電流不用太大)就有很好的濁度去除效果。

結果與討論

電化學法

水質資料整理自
電化學技術研究結果

■ 處理效果：

- 濁度降至 1 NTU 以下，TS 及總砂去除率 >85 %，有機物去除率 60 ~ 80 %，重金屬去除率 20 ~ 40 %。但陰極還原反應釋出 OH^- ，造成導電度及總鹼度上升。
- 可回收至灌溉用水、次級用水、冷卻用水及自來水用水。

項目	EC/EPN		EF	
	出口值	去除率	出口值	去除率
濁度(NTU)	0.8	99.3	0.7	99.5
總固體(mg/L)	385	85.4	180	86.5
導電度(us/cm)	40~110	50	190	-45
鹼度(mg/L)	8	90.1	80	-85
有機物(mg/L)	5	61.5	< 3	≐80
總砂(mg/L)	30.5	97	68	89
溶解砂(mg/L)	34	39.1	***	***
重金屬(mg/L)	< 0.2	20 ~ 40	< 0.2	40

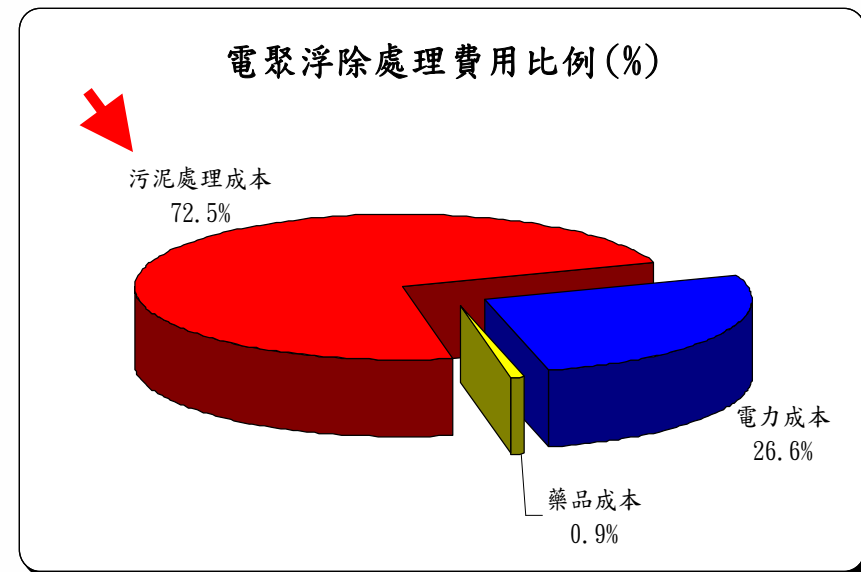
結果與討論

電化學法

成本資料整理自
電化學技術研究結果

■ 操作成本：

- 包括電力成本、藥劑成本、污泥處理成本、極板/膜片更換成本及人事成本等。
- 匯整文獻統計結果，以電化學法處理CMP廢水，平均操作成本約在**27 ~ 35 元/噸**。
- 成本支出主要來自**污泥處理**與**電能消耗**。



結果與討論

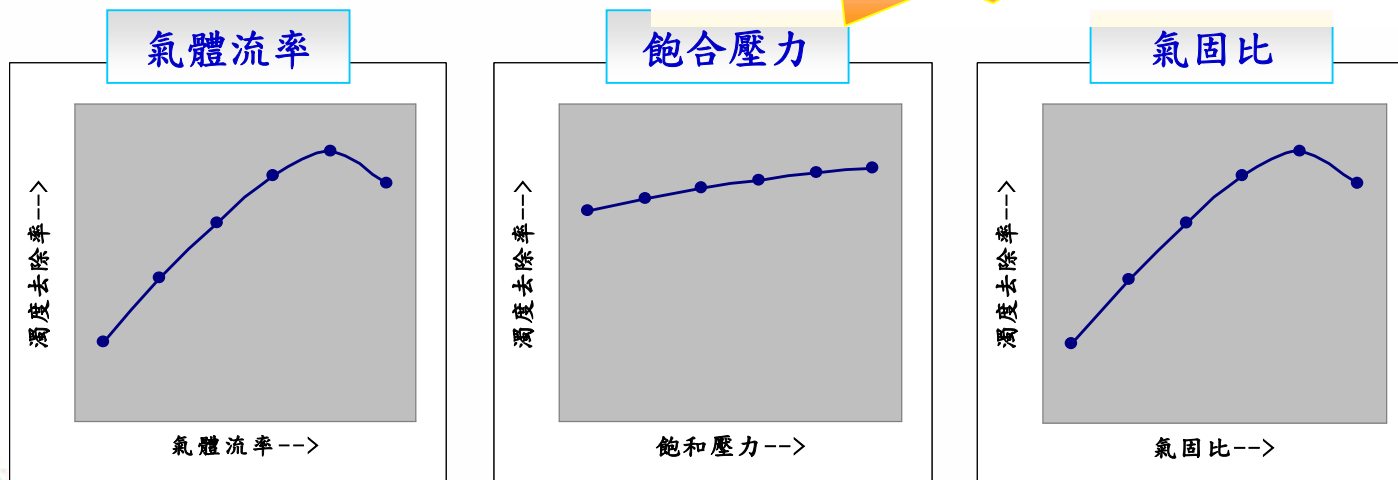
氣泡浮除法

■ 原理：

利用氣泡與固體顆粒物相互接觸、黏著，使形成比重小於水的凝聚物質，再藉由浮力原理達到固/液分離的目的。

■ 操作因數的影響：

匯整自3篇浮除技術
研究報告，並繪成關係圖表示



結果與討論

氣泡浮除法

■ 添加藥劑的影響：

- ✦ 活化劑(混凝劑) — 可去除不易浮除之大顆粒；或使顆粒表面呈疏水性，增加氣/固接觸機會。
- ✦ 捕集劑(界面活性劑) — 可吸附於氣/液界面，減少氣泡破裂的機會。

■ 氣泡數量及大小的影響：

- ✦ 氣泡數量越多或直徑越小，浮除效率越好。
- ✦ 分散空氣式(1000 μm) > 傳統溶解空氣式(10 ~ 100 μm) > 奈米微氣泡溶解空氣式(小於0.1 μm)。

■ pH值的影響：當pH值大於7時，顆粒與氣泡碰撞附著的能力將隨pH提高而降低，故一般以4 ~ 5為最佳。

結果與討論

氣泡浮除法

水質資料整理自
氣泡浮除技術研究結果

■ 處理效果：

- 使用高效率奈米微氣泡浮除程序，濁度可降至1 NTU，總固體物去除率>98%，總矽去除率>99%，藻類去除率90%，TOC去除率50%。
- 可回收至生活雜用水、再生用水、灑水用水、景觀用水等**次級用水**使用。

項目	出口值	去除率(%)
濁度	1 ± 0.5 NTU	99.8
總固體物	80 ± 50 mg/L	99.2
總矽	19 ± 4 mg/L	99.6
TOC	5.2 ± 0.3 mg/L	53.2
導電度	0.40 ± 0.02 ms/cm	NA

結果與討論

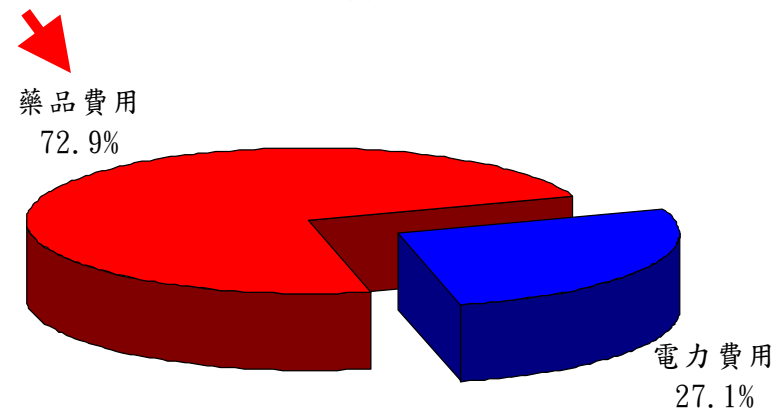
氣泡浮除法

成本資料摘錄自
氣泡浮除技術研究結果

■ 操作成本：

- 包括電力成本、藥劑成本、污泥處理成本、維修保養成本及人事成本等。
- 根據統計，以浮除法處理CMP廢水操作成本為**13.3元/噸**。
- 主要支出為**藥劑費用**。

浮除處理費用比例(%)



結果與討論

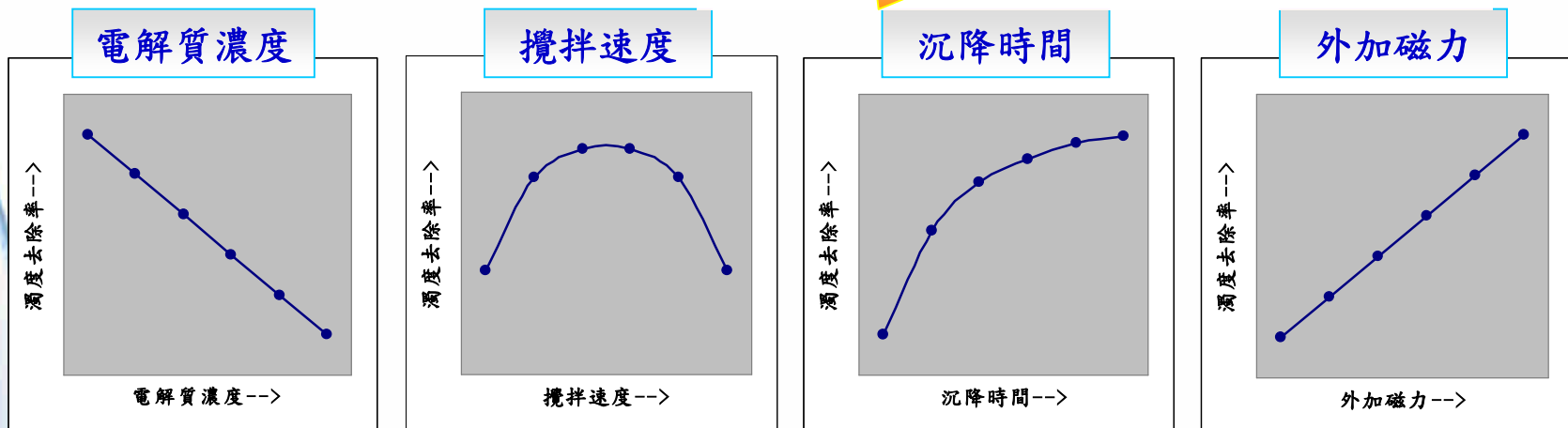
磁分離法

■ 原理：

利用磁力學異性相吸原理，使帶正電的磁種顆粒與帶負電的 SiO_2 顆粒相互吸引碰撞後形成較重顆粒，再藉由重力沉降或外加磁力去除。

■ 操作因數的影響：

匯整2篇磁分離技術研究，並繪成下圖表示



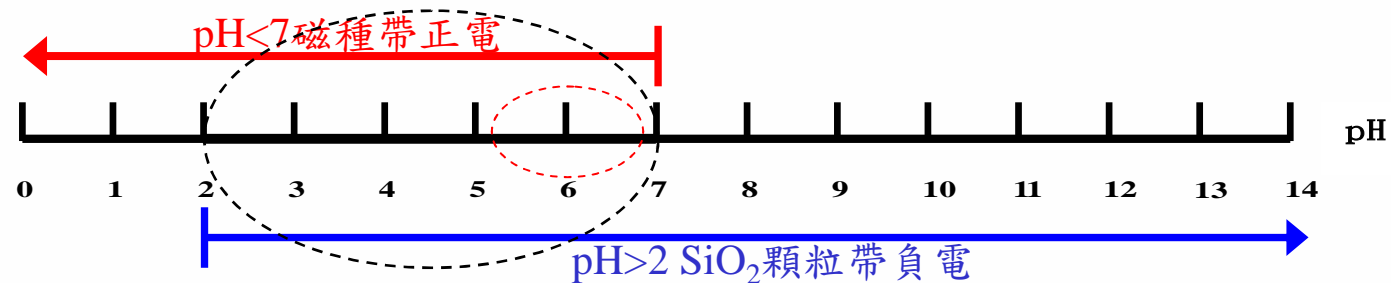
結果與討論

磁分離法

■ 磁種顆粒數量及大小的影響：

- ⊕ 數量越多、粒徑越小時，總表面積增加，濁度去除率提高。
- ⊕ 數量過多、粒徑過大時，將使磁種過重而先行沉降。

■ pH值的影響：



■ 磁種回收再利用：

- ⊕ 1. 直接回收沉降污泥再用—可重覆使用1~2次。
- ⊕ 2. 經界面活性劑分離沉降污泥—可重複使用4~6次。
- ⊕ 3. 線上連續添加陽離子界面活性劑—可大幅增加處理容量及處理效率。

結果與討論

磁分離法

水質資料整理自
磁分離技術研究結果

■ 處理效果：

- 延長沉降時間或外加磁場作用下，可使濁度降至3 NTU，總砂去除率99.9 %；TOC去除率50 %。
- 水中溶鐵及色度因氧化鐵釋出鐵離子而大幅上升，對於直接放流或進入後續回收系統處理皆造成負擔。
(PS:放流鐵離子<10mg/L)

項目	初次使用		回收重複使用10次	
	出口值	去除率(%)	出口值	去除率(%)
濁度 (NTU)	3.54	98.2	1.98	99.0
總砂 (mg/L)	0.86	99.9	17.05	97.1
TOC (mg/L)	21.73	56.7	23.33	53.5
鐵 (mg/L)	264	反效果	5.9	反效果

結果與討論

綜合技術比較

項目	評分標準	劣~優
1.技術可行性	實廠應用程度	1~5
2.處理效能	污染物去除率加權得分	1~5
3.成本優勢	平均操作成本	1~5
4.操作難易度	pH範圍 / 操作參數影響度	1~5
總合		4~20

結果與討論

技術可行性比較

■ 以實廠應用程度作為技術可行性之評分標準

技術	說明	結果	得分
化學 混凝法	經竹科管理局統計，以化學混凝處理CMP廢水占26.7 %	實廠應用率最高	5
薄膜 過濾法	經竹科管理局統計，以薄膜過濾處理CMP廢水占6.7 %	實廠應用率次高	4
電化 學法	尚無實廠應用實績，但工研院已在力晶、旺宏等廠有pilot-scale測試案例	於模廠試驗階段	2
氣泡 浮除法	尚無實廠應用實績，但環保署93年度「環保科技育成中心計畫」已成功利用奈米微氣泡浮除設備回收實廠廢水，且已進行相關實廠開發	於實廠開發階段	3
磁分 離法	尚無實廠應用實績或模廠測試案例，且奈米磁種製備不易，故尚無規格品	於瓶杯實驗階段	1

最優

最劣

結果與討論

處理效能比較

■ 以**污染物去除率加權得分**作為處理效能之評分標準

項目	化學 混凝	最優		最劣	
		薄膜 過濾	電化學	氣泡 浮除	磁分離
濁度	◎	◎	◎	◎	◎
懸浮固體	◎	◎	◎	◎	◎
溶解固體	—	◎	△	—	—
導電度	—	◎	△	—	—
鹼度	—	◎	X	—	—
有機物	—	○	○	△	△
SiO ₂	—	◎	△	—	—
金屬離子	—	◎	△	—	X X
結果	6	23	11	7	5
得分	2	5	4	3	1

加權得分說明：

◎ 去除率 > 90 % (+3)

○ 去除率 > 60 % (+2)

△ 去除率 > 30 % (+1)

— 少量或無效果 (0)

X 有反效果 (-1)

X X 有反效果，且影響放流標準 (-2)

結果與討論

成本優勢比較

■ 以平均操作成本作為成本優勢之評分標準

技術	說明	結果	得分
化學 混凝法	能量消耗低，但藥劑用量大、污泥產量大，操作成本約22~48 元/m ³	平均35元/m ³	2
薄膜 過濾法	能量消耗稍大，且需有前處理設計、薄膜價格昂貴，操作成本約43 元/m ³	平均43元/m ³	1
電化 學法	能量消耗大，但用藥量少、污泥產量稍少，操作成本約27~35 元/m ³	平均31元/m ³	3
氣泡 浮除法	能量消耗稍大，但用藥量少、污泥產量少，操作成本約13 元/m ³	平均13元/m ³	4
磁分 離法	能量消耗極低，且無需加藥、無需污泥處理、磁粉可重覆回收使用，故操作成本較浮除更低廉	平均<13元/m ³	5

最劣

最優

結果與討論

操作難易度比較

■ 以pH範圍及操作參數影響度作為操作難易度評分標準

技術	說明	結果	得分
化學 混凝法	1.pH範圍局限在6~8 →最差∴1 2.操作參數隨進流水質變化而有所差異，故應時常進行Jar test確認參數，否則要過量加藥因應→中等∴3	1+3=4	3
薄膜 過濾法	1.pH範圍廣大，於2~12之間都可操作→最佳∴5 2.操作參數不需要調整，若阻塞時只需以化學藥洗回復，且無機膜藥洗週期可達一年以上→最佳∴5	5+5=10	5
電化 學法	1.pH範圍宜<7，否則增加耗電量→次佳∴4 2.各操作參數的交互影響很大，故確認一個參數後需反覆再確認其他參數 →次差∴2	4+2=6	4
氣泡 浮除法	1.pH範圍應<7，否則影響去除率→中等∴3 2.操作參數調整複雜且不易，例如迴流率調整只差10%，處理效率即可能相差好幾十倍最→最差∴1	3+1=4	3
磁分 離法	1.pH範圍受限在3~6 →次差∴2 2.設備構造簡單，故沒有太多複雜的操作程序→次佳∴4	2+4=6	4

最劣

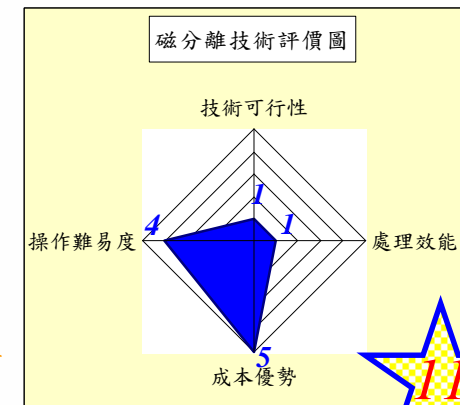
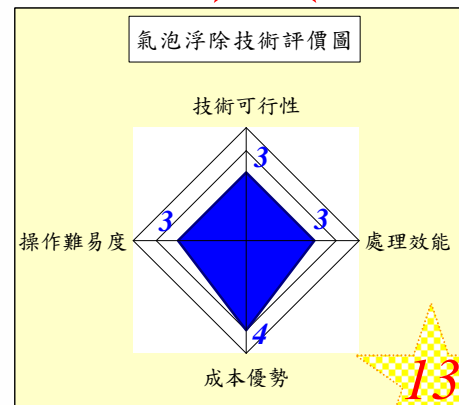
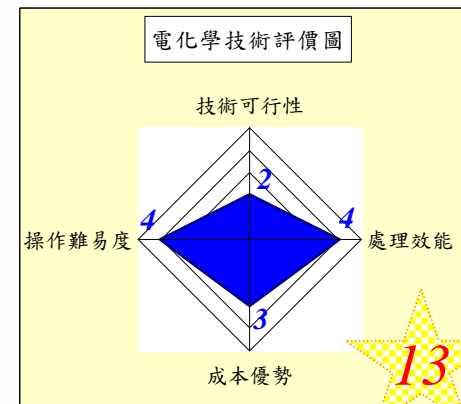
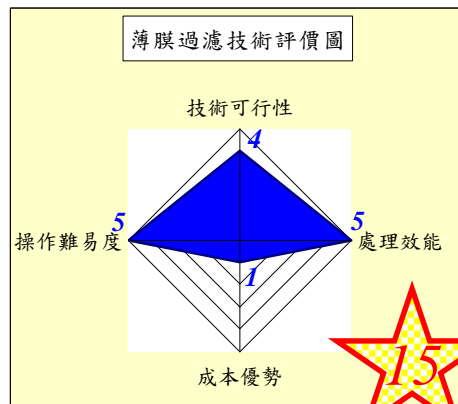
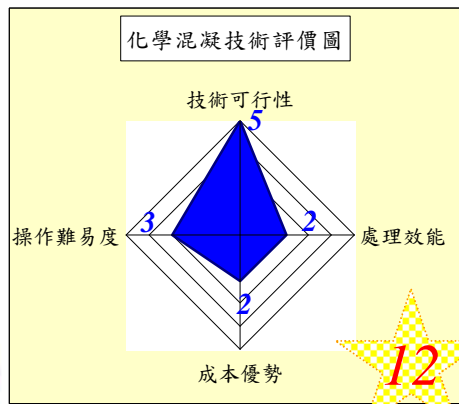
最優

最劣

結果與討論

綜合比較結果

■ **薄膜過濾法**技術可行性高、處理效能佳、操作簡單，為當前最佳處理技術；**磁分離法**仍有許多技術問題待克服，故還無法在現實面應用。



實廠案例

實廠水量統計

統計國內某
12吋半導體廠
產能與水量數據

■ 製程用水量與產能之關係：

- 隨著產能提高，製程用水量約呈線性增加
- 平均每單位產能之製程耗水量約為**3.3 m³/片**

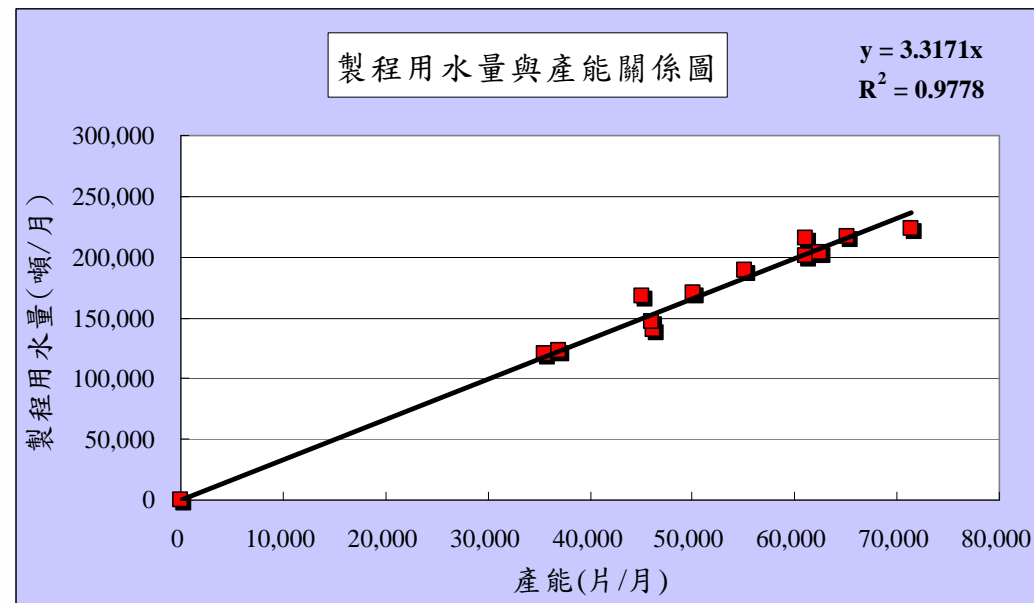
【公式一】

$$y = 3.3171 \times x$$

式中

y ：製程用水量(噸/月)

x ：產能(片/月)



實廠案例

實廠水量統計

■ CMP用水量與產能之關係：

- 隨著產能提高，CMP用水量約呈線性增加
- 平均每單位產能之CMP耗水量約為**0.23 m³/片**

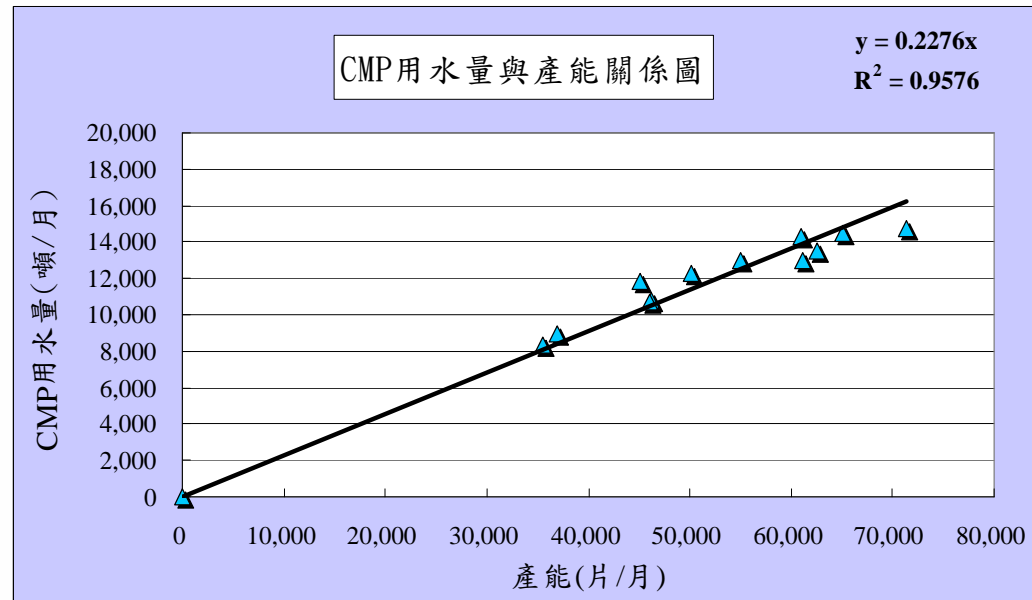
【公式二】

$$y = 0.2276 \times x$$

式中

y ：CMP用水量(噸/月)

x ：產能(片/月)



實廠案例

實廠水量統計

- **CMP用水量與製程用水量之關係：**
 - 隨著製程用水量提高，CMP用水量約呈線性增加
 - CMP耗水量約占總製程用水量的**7%**
 - 結果與文獻統計之5 ~ 25 %比例相符

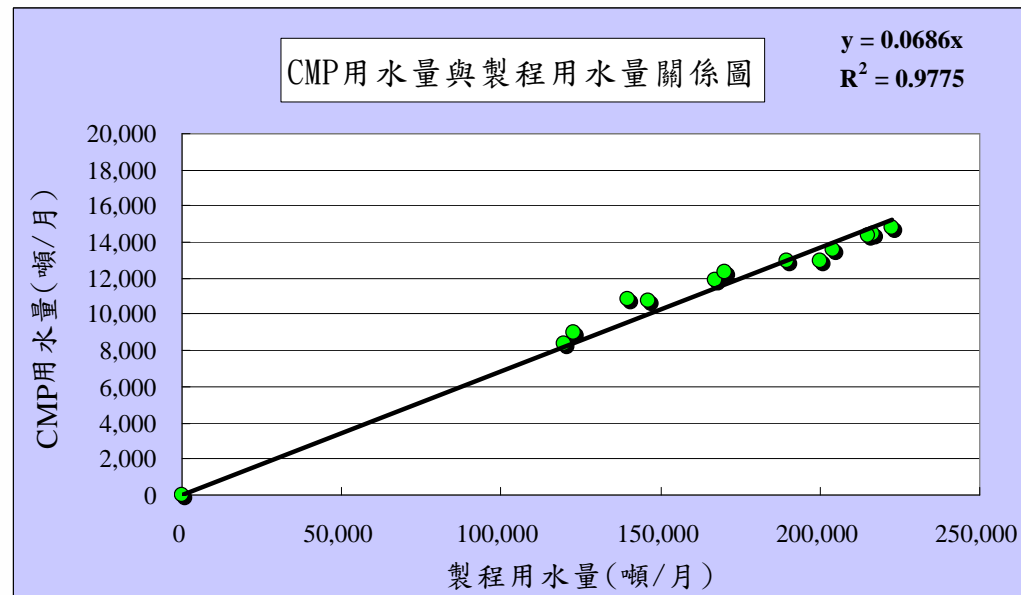
【公式三】

$$y = 0.0686 \times x$$

式中

y ：CMP用水量(噸/月)

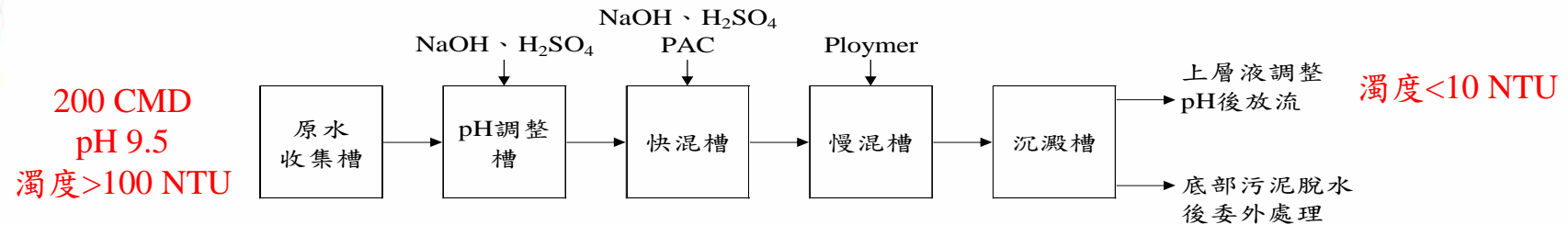
x ：製程用水量(噸/月)



實廠案例

實廠混凝運轉狀況

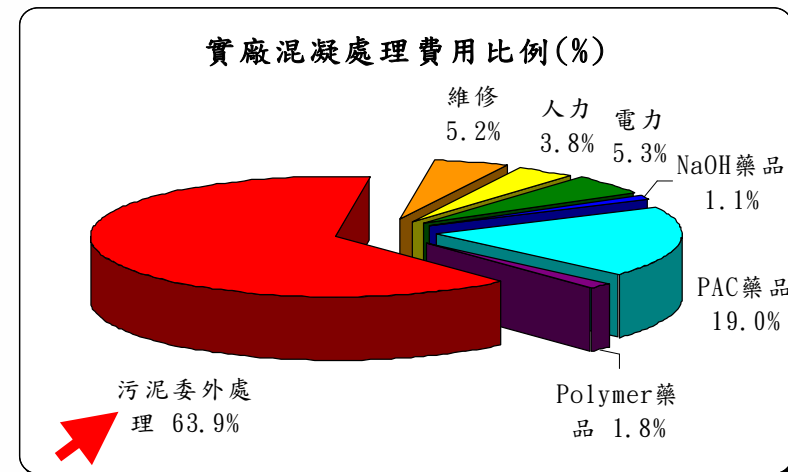
■ 混凝操作流程：



■ 凝凝操作成本：

該廠實際操作成本為**48.4 元/噸**，污泥處理占總比例**六成**最多，此結果大致與文獻22~48 元/噸及污泥處理占最大比例**相符**。

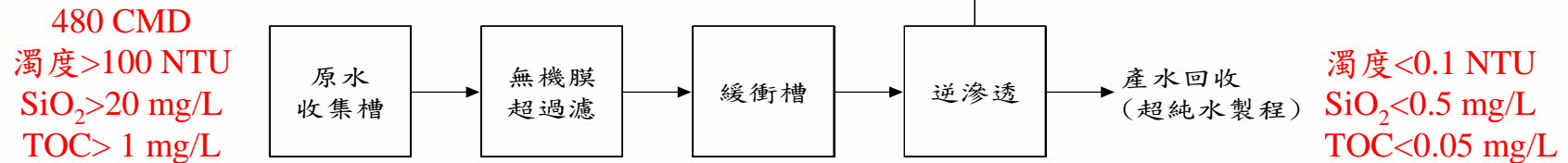
項目	費用(元/月)	比例(%)
電力	15,400	5.2
NaOH藥品	3,125	1.1
PAC藥品	55,300	19.0
Polymer藥品	5,100	1.8
污泥委外處理	185,500	63.9
維修(含耗材)	15,000	5.2
人力	11,000	3.8



實廠案例

實廠薄膜運轉狀況

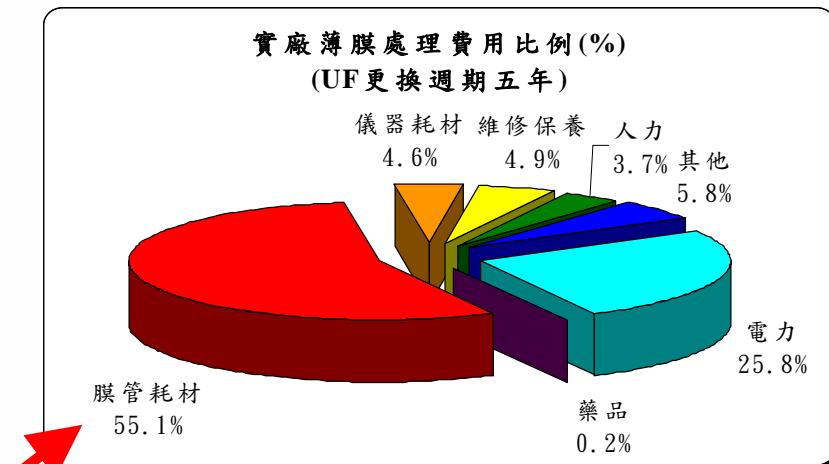
■ 薄膜操作流程：



■ 薄膜操作成本：

該廠無機膜藥洗週期長達一年以上，濾液可回收至超純水製程，與文獻說明操作簡單、處理效率高相符。而實際操作成本為**44.2 元/噸**，與操作成本高相符。

項目	費用(元/月)	比例(%)
電力	163,800	25.8
藥品	1,320	0.2
膜管耗材	350,034	55.1
儀器耗材	29,160	4.6
維修保養	31,260	4.9
人力	23,400	3.7
其他	36,840	5.8



結論與建議

水質水量特性

- CMP廢水具有微細顆粒多、粒徑範圍窄、界達電位強、懸浮穩定性高等特點，欲達放流水標準需將懸浮固體物去除；如要回收使用，則溶解固體物、無機離子與有機物需更進一步去除。
- CMP廢水排放極不穩定，造成處理難度增加。
- CMP用水量與產能略呈線性關係，以國內某12吋半導體廠為例，平均單位產能耗水量為0.23 m³/片，占製程總用水量約7%左右。

結論與建議

技術分析比較

■ 技術比較結果

技術 \ 指標	技術可行性	處理效能	成本優勢	操作難易度	總分
化學混凝法	5	2	2	3	12
薄膜過濾法	4	5	1	5	15
電化學法	2	4	3	4	13
氣泡浮除法	3	3	4	3	13
磁分離法	1	1	5	4	11

- **薄膜過濾法**有多項優點，但處理成本較高。如以浮除法或電化學法為前處理先去除SiO₂顆粒，再搭配逆滲透去除其他污染物，則可降低操作成本亦可回收再利用。
- **磁分離法**尚處於研究發展初期，許多技術問題仍有待克服，故目前較不適用。

結論與建議

研究貢獻與建議

- 經整合之各技術影響因子、操作條件、使用應考量事項等探討，可提供**既設半導體工廠**運轉操作時參考，作為該廠最佳參數之調整依據。
- 經指標評比之各技術可行性、處理效能、成本優勢及操作難易度比較結果，可提供**新設半導體工廠**設計規劃前參考，作為該廠最適技術之選取依據。
- 由於資料來源較缺乏各種技術之初設成本研究，建議可以直接向水處理工程公司詢價，再將實際費用納入比較內容。
- 對於本研究未探討的其他處理技術，建議也可納入討論內容。

報告完畢，敬請指教

