

重金屬廢水之資源化技術與應用

報告人：周珊珊 博士

國立陽明交通大學 環境科技及智慧系統研究中心

廢水綠色轉型：污染防治→創能/循環/減碳



轉型背景與瓶頸

- **傳統治理導向**：以「污染物去除、符合放流水標準」為主要目的。
- **伴隨負擔高**：處理過程伴隨能源消耗、藥劑使用、污泥產生與碳排放。
- **用電持續成長**：水泵送與處理為重要能源消耗源，用電持續增加。



核心思維翻轉

- **廢水即資源** (wastewater as a resource)：蘊含水資源、有機質/能源、營養鹽、有價金屬及化學品。
- **定位升級重塑**：由傳統「污染防治設施」轉型為「資源回收中心」。
- **模式轉向循環**：水擺脫線性模式(使用-處理-排放)，邁向永續循環。



Wastewater Treatment → Resource Recovery



目標：建構高值化資源回收與低碳處理永續體系

⚡ 能源化

有機廢水厭氧處理，
沼氣再利用

♻️ 資源化

廢水氮/磷/**金屬**等物質，
資源回收再利用

☁️ 低碳智慧化

採用低碳節能技術，
導入智慧水管理

緣起

放流水Cu標準加嚴(含重點河川總量管制)

環境部於**116**年起加嚴銅排放限值

產業別	水量 (CMD)	銅限值 (mg/L)
半導體/光電/PCB業	> 500	1
電鍍/金表業	> 150	1

超標或排放濃度較高原因

- 廢水處理系統最後端沉澱或過濾操作不穩定
- 鍍槽老化液、濃酸重金屬廢水排放不當
- 螯合有機物並未斷鍵處理(如化學銅)



- **減少重金屬顆粒排出** - 結合薄膜技術，可提高污泥中銅含量，減少混凝劑用量及污泥量
- **螯合銅(化學銅、棕化銅)**的妥善處理或資源化
- 既有化學沉澱精準加藥- 可提高污泥中重金屬濃度，由付費to有價

重新檢視Cu資源化之契機：

- 盤點目前全廠銅資源化比例(高濃度Cu廢液電解)
- 其他高濃度Cu廢液資源化的困難
- 低濃度Cu廢水資源化的可能

放流水Cu超標：
溶解性Cu or 顆粒Cu？

含銅廢液/廢水典型處理流程介紹及問題說明

高銅A類

硝酸銅、硫酸銅、微蝕廢液

(高銅廢酸 $\text{Cu} > 1\%$)

高銅B類

棕化廢液、粗化液、SPS

(高銅廢酸 $\text{Cu} > 1\%$ 、高COD
數千~數萬)

高銅C類

化銅廢液

(高螯合銅 $\text{Cu} < 3000 \text{ mg/L}$ 、
 $\text{COD} > 10,000 \text{ mg/L}$)

酸洗及其他清洗廢水

電解
系統

調勻槽

pH調整槽快混槽反應槽

含重金屬廢水處理流程圖
(納管廠商通常無生物系統)

NaOH槽

H_2SO_4 槽

混凝劑槽

凝集劑槽

FeCl_2 or FeCl_3

污泥濃縮槽

污泥脫水機

污泥餅

銅污泥仍有
資源化空間

濾液迴流
至調勻槽

砂濾塔

中間貯槽

反沖洗水槽

中和槽放流槽

放流水

化混系統

PCB

~25%

~25%

~50%

總銅 = 游離銅 + 螯合銅 + 顆粒銅

溶解性銅

常見問題

1. pH控制不當
2. 螯合銅殘留水中
3. 沉澱池未完整攔截污泥

→最後中和槽加酸又溶出重金屬

含銅重金屬廢水資源化流向介紹

臺灣 2050 淨零轉型-12項關鍵戰略之一 ➡ 資源循環零廢棄

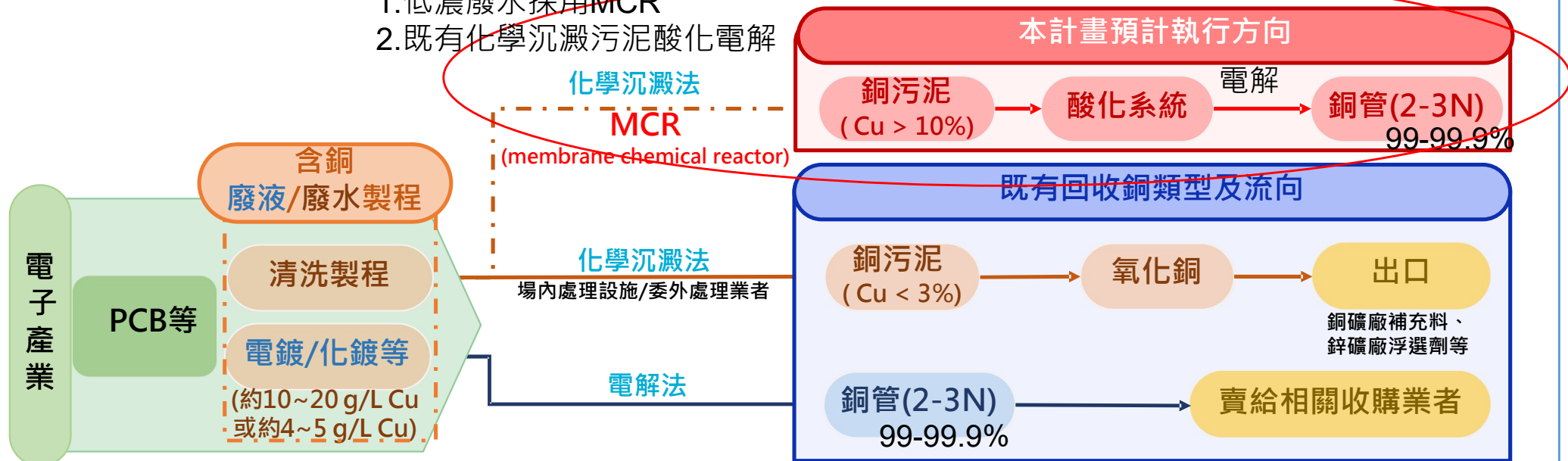
台灣電路板協會「台灣電路板產業循環經濟策略發展藍圖」

- ◆ 提高廢水及廢化學液資源化比重 (2019)
多數PCB業者已導入電解回收系統，但棕化液和化學銅液甚少導入
- ◆ 多數銅資源流失於清洗廢水
產業中仍有超過28%的銅分散在各產線的清洗廢水中
- ◆ 傳統處理方式缺乏回收價值
多依賴傳統的化學混凝沉澱法來處理，污泥作為廢棄物委外處理

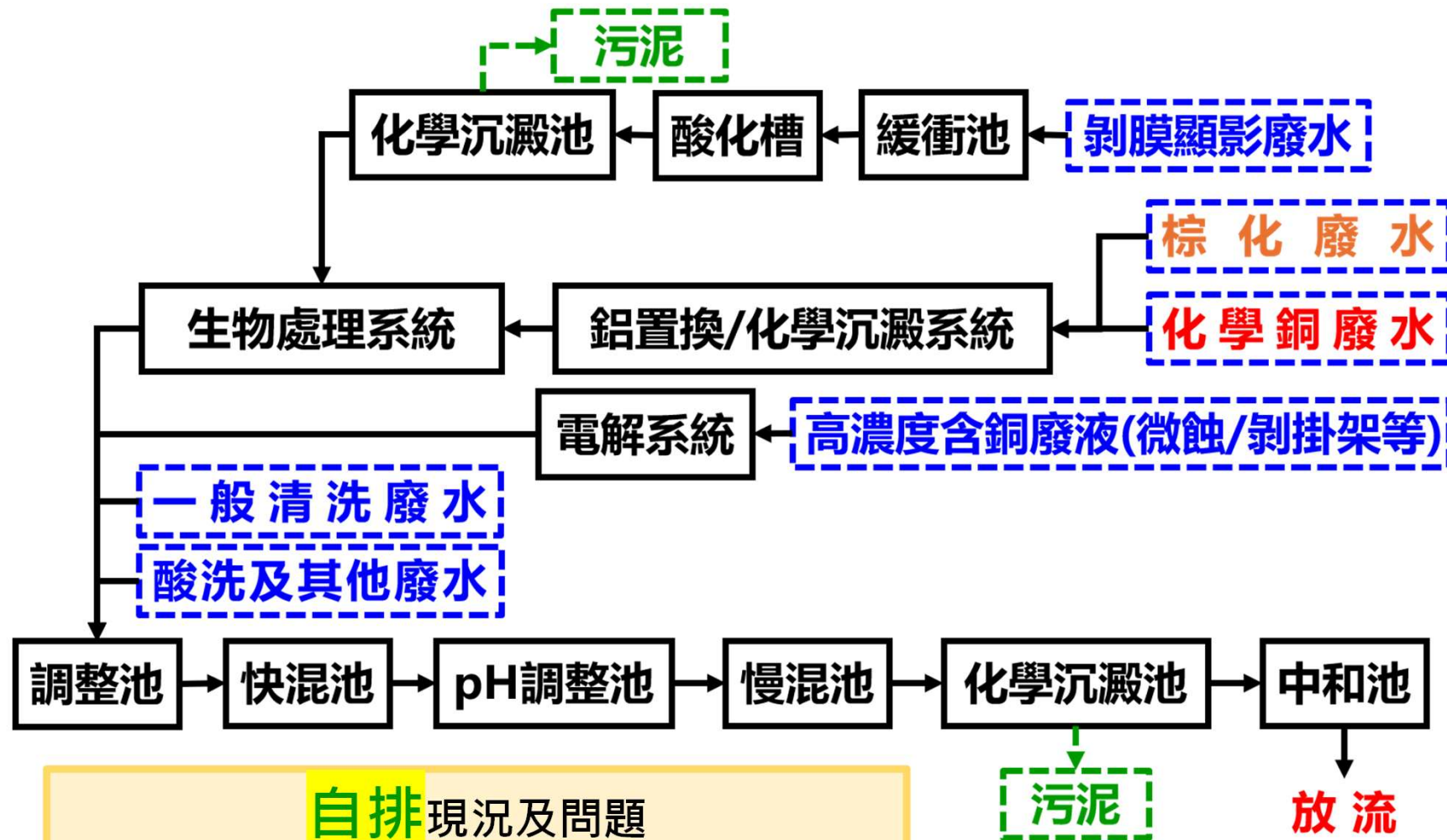
改變現有**低濃度含銅清洗廢水**的處理模式，提升整體廢水銅回收比例的最主要切入點，以「資源循環零廢棄」、「將廢棄物轉為產業原料」之目標。

兩方向

1. 低濃廢水採用MCR
2. 既有化學沉澱污泥酸化電解



PCB業廢水處理典型流程-納管 vs. 自排



自排現況及問題

- 化學銅和棕化廢水以化混或置換方式除銅，再接生物處理，但因偶而有重金屬排入而無法穩定操作
- 放流水銅多在0.5-1.0 mg/L，可能因雙氧水未去除造成顆粒上浮而造成銅超標

未來要達到放流水
銅<1 mg/L仍有風險

PCB廢水提昇資源化比例策略分析

銅質量平衡及資源化策略分析

(多數PCB廠為此狀況- **只有高銅A類廢液**進電解系統)

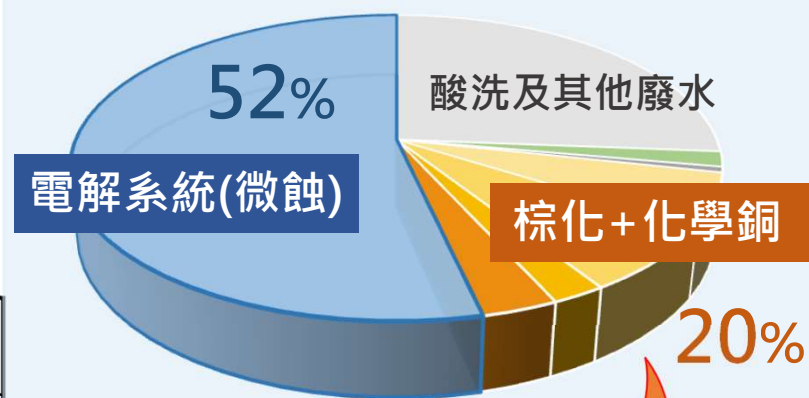
重金屬改善策略

- 1.減少重金屬顆粒排出
- 2.螯合銅(化學銅)廢水妥善處理

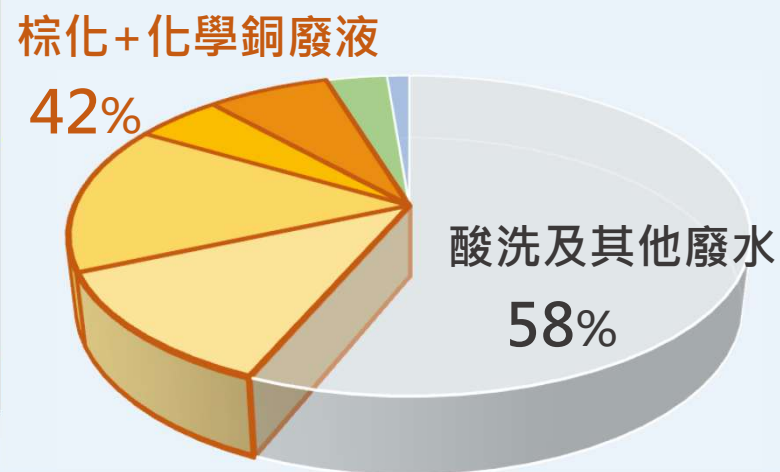
▼以某PCB廠為例

	水量 (CMD)	Cu (mg/L)	Cu (kg/d)	COD (mg/L)
排入廢水系統的含銅量				
原廢水(調勻)	2500	74	185	
各股含銅廢水				
棕化槽液	1	20670	20.7	17000
棕化水洗	30	1204	36.1	
化銅槽液	3	2829	8.5	15000
化銅水洗	50	240	12.0	
酸洗/微蝕前段水洗	350	280	98	
電解排出	20	300	6.0	
後段水洗水	2153	1	2.2	
total	2500		183	
電解系統銅回收量	20	10000	200	

含已經以電解回收之微蝕單元之銅



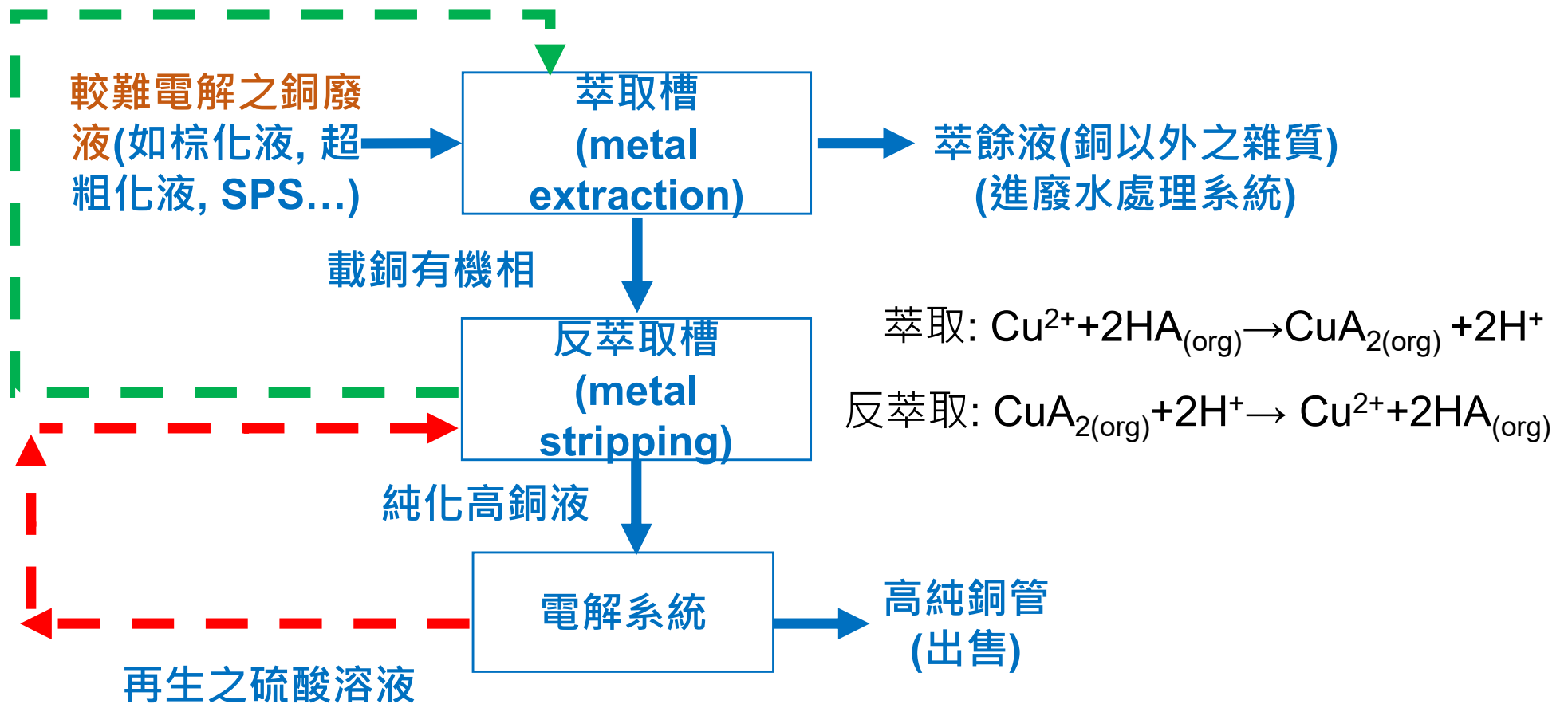
目前進入廢水廠未資源化部分



全廠銅資源化比例提升關鍵

較難電解的銅廢液新增萃取前處理系統(液態樹脂-高選擇性螯合萃取劑)

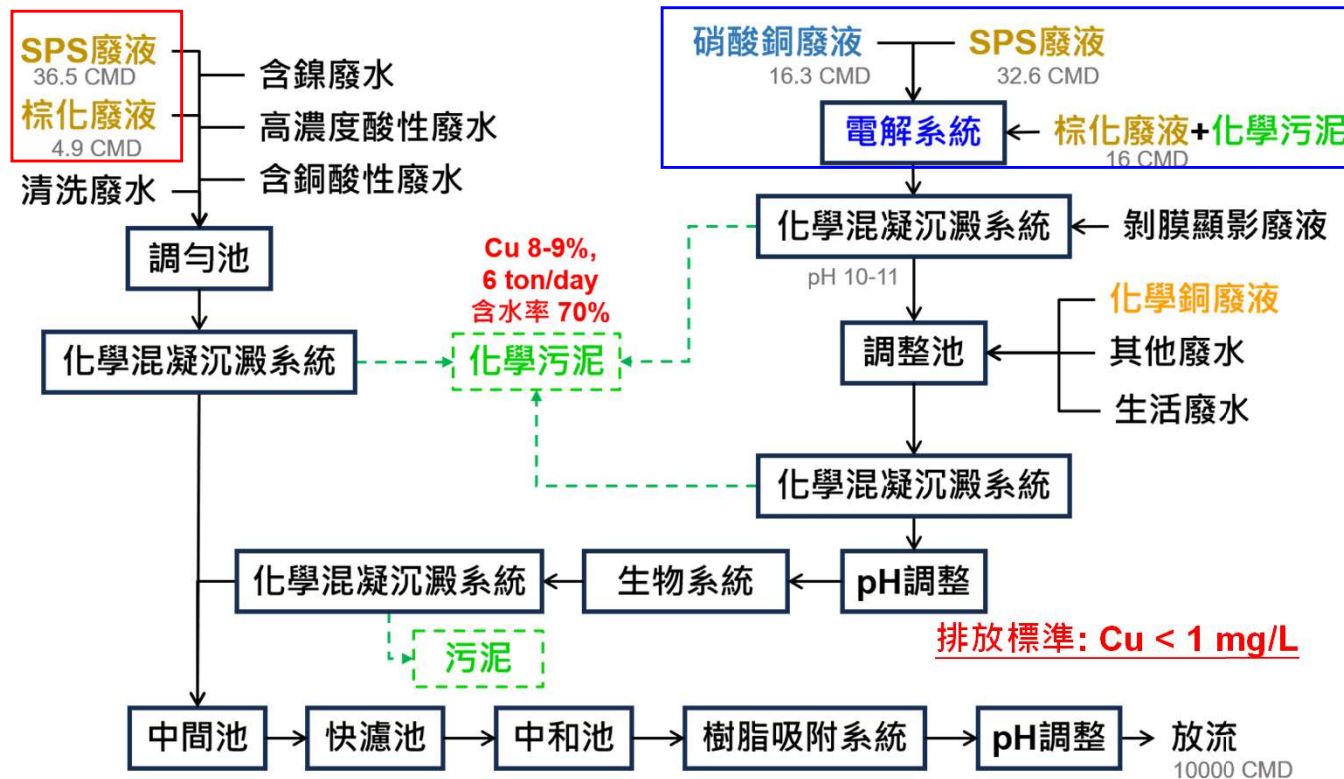
再生有機相(液態樹脂)



策略一：搭配萃取前處理及污泥酸化提升全廠銅資源化比例

- 高銅A類
(高銅廢酸 Cu>1%)
硝酸銅、硫酸銅、微蝕廢液
- 高銅B類
(高銅廢酸 Cu>1%、高COD 數千~數萬)
棕化廢液、粗化液、SPS
- 高銅C類
(高螯合銅Cu<3,000 mg/L、COD >10,000 mg/L)
化銅廢液

尚有高銅廢酸未資源化

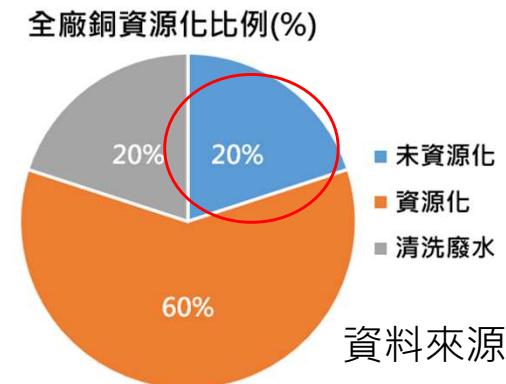


棕化液: Cu~16000 mg/L, COD~13000 mg/L
SPS: Cu~10000 mg/L, COD~4000 mg/L

某PCB廠

- 高銅A類與部分高銅B類廢液已進電解系統
- 目前污泥銅濃度~9%

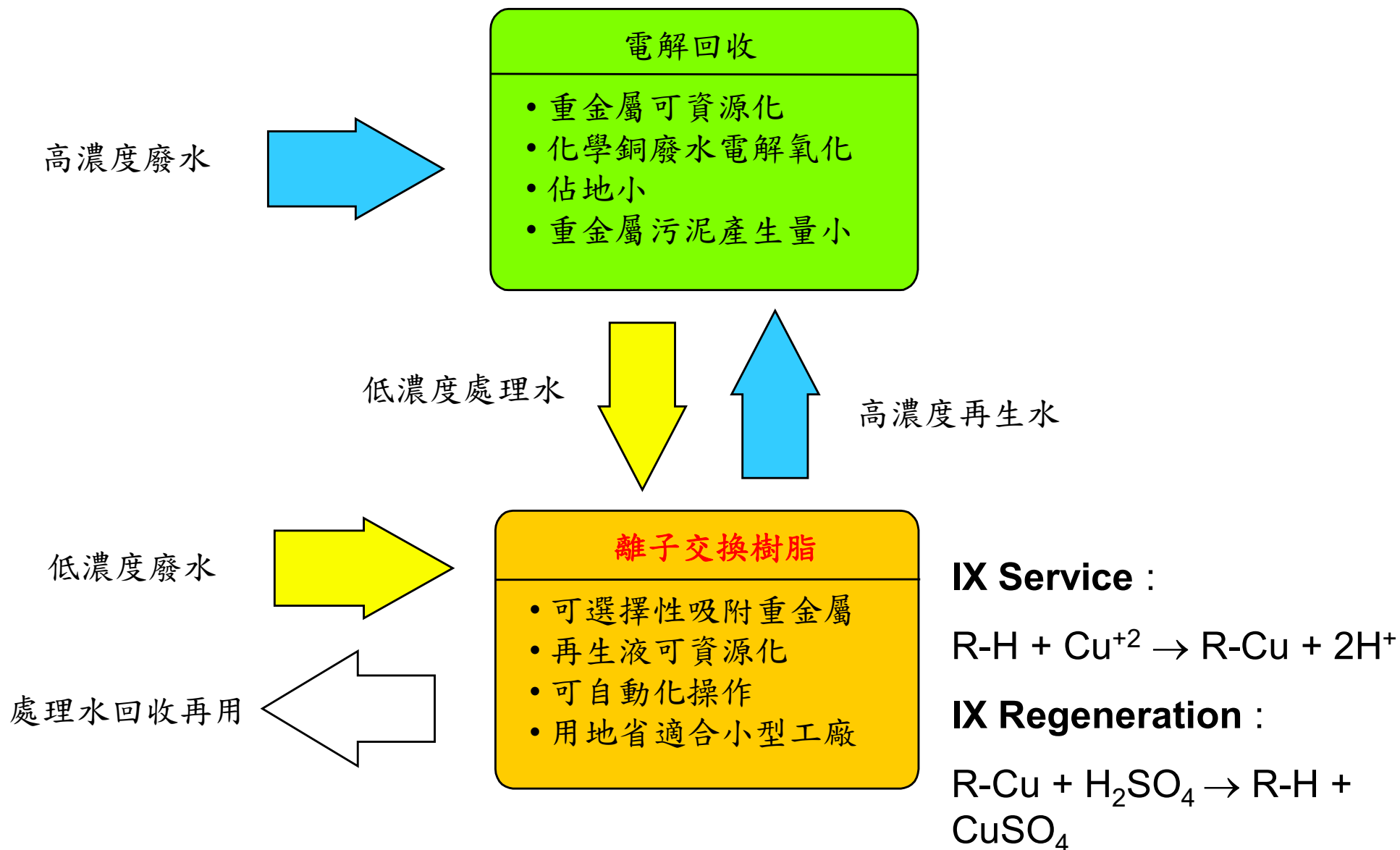
多數PCB廠產銅管比例為<60%



資料來源：水措

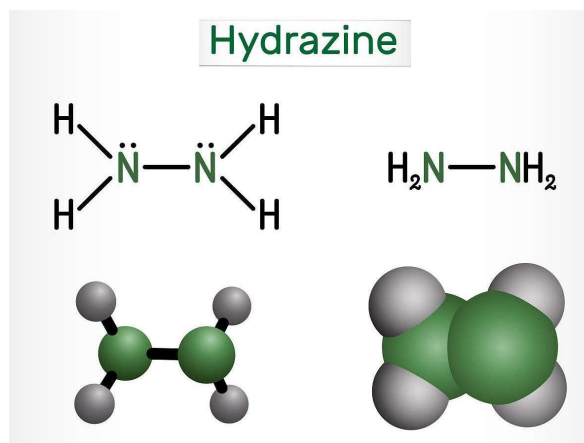
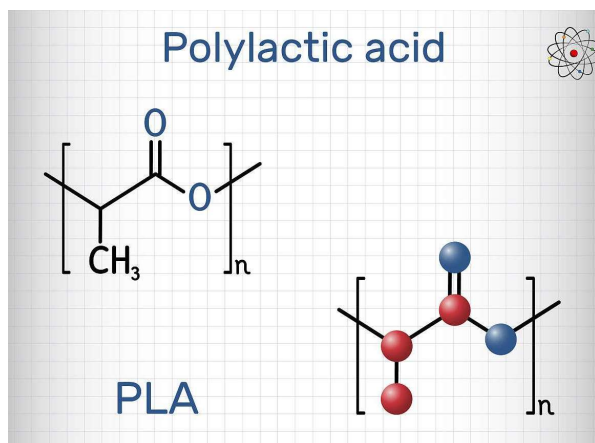
資源化比例可再提升至約80%

重金屬高低濃度廢水整合資源化策略



螯合樹脂重金屬廢水提濃技術說明

螯合樹脂水處理技術



01 工作原理

螯合樹脂是一種具有特殊官能團的高分子材料，能夠與水中重金屬離子發生螯合反應，形成穩定的絡合物。通過樹脂的吸附作用，可高效去除水中重金屬離子，達成淨化水質的目的。

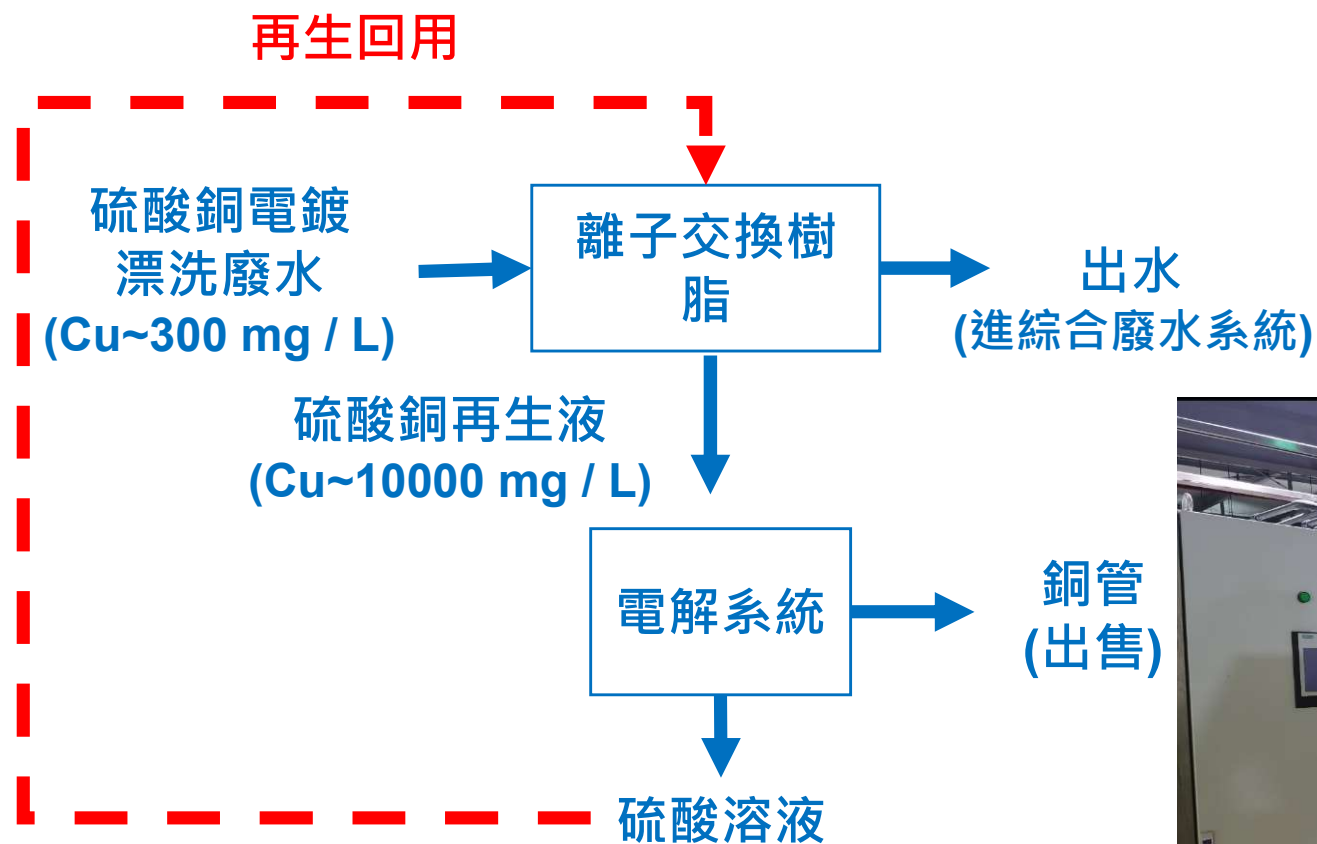
02 參數

螯合樹脂具的官能團、粒徑、孔隙結構等參數對設備的性能有影響，須根據實際水質情況進行選擇和調整。

03 優勢

- 高效率：吸附速度快，吸附容量大，可在短時間內去除水中重金屬離子。
- 高選擇性：對不同金屬離子具有選擇性，可以依據目標物質的性質選擇適合的螯合樹脂。
- 可再生性：可通過脫附再生重複利用。

離子交換樹脂及電解整合系統



策略二-游離重金屬廢水處理精進方案-MCR

既有處理技術問題與分析

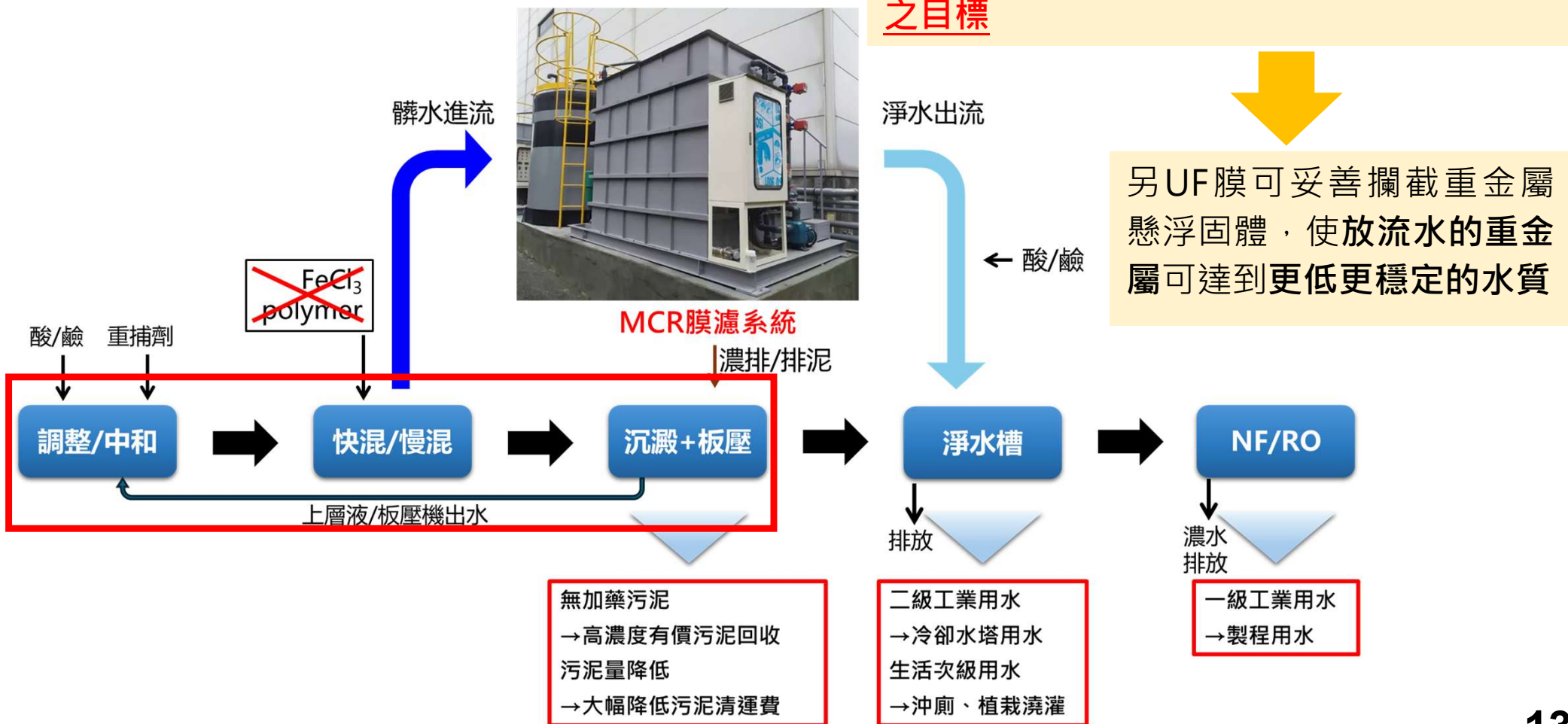
傳統化學
沉澱程序問題

加藥量大
槽體占地大
污泥濃度低

重金屬廢水的膜化學反應器(MCR)技術開發

沉浸式超濾(UF)膜

能取代傳統化混系統中的沉澱程序，且不須添加混凝劑與凝絮劑，能減少重金屬污泥產生量及提高污泥中的重金屬濃度，達資源化之目標



MCR運用實績及營運優化成果(1)

1 管好兩頭

源頭管理

從源頭詳細分類，降低運營成本並提升效益



廢水分類

- 回用廢水(5類)
- 高濃度廢水(6類)
- 製程廢液 (18類)



末端精進

創新、前瞻的智能化管理，提升環保安全與價值



回用系統

- 低濃度廢水(MCR運用)
- 中濃度重金屬廢水(MCR運用)
- 中濃度有機廢水(MCR+MBR運用)
- EDI、RO濃水
- 雨水收集回用

MCR運用實績及營運優化成果(2)

2 浸沒式超濾(MCR)應用

1 浸沒式超濾 (MCR) 特點



對污染物的去除效率高

- 對 SS 去除率 $\geq 99\%$ ，甚至可達 100%
- 對濁度去除率 $\geq 90\%$ ，出水濁度與自來水相近
- 膜孔徑 $0.01 \sim 1 \mu\text{m}$ ，可截留全部懸浮物與污泥



具有較大的靈活性和實用性

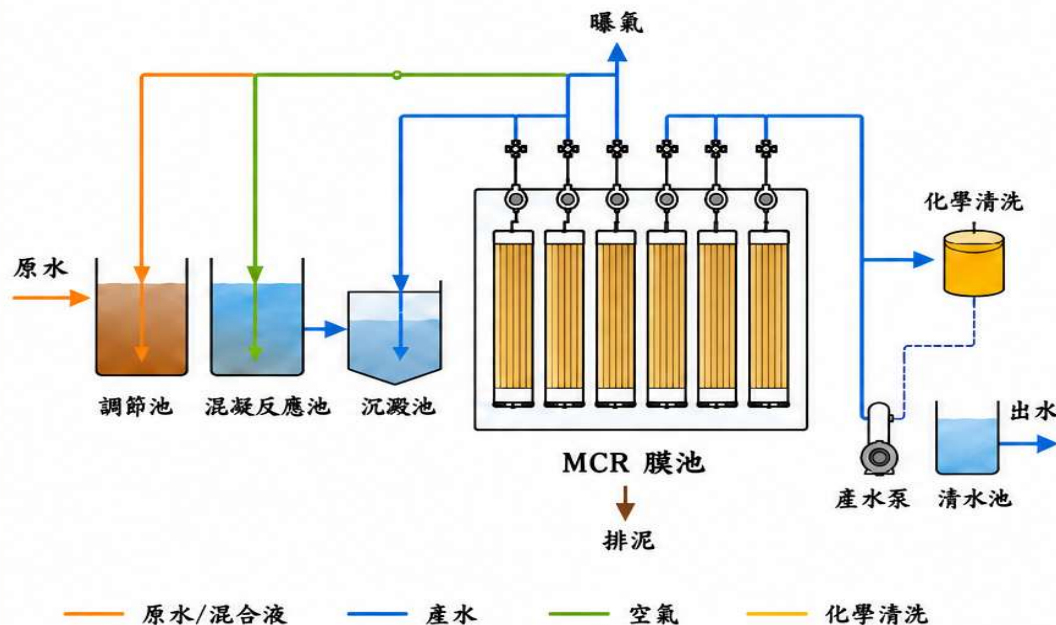
- 流程短、佔地小、處理水量靈活
- 只需增減膜組件片數即可調整產水量
- 無需沉澱池固液分離，解決污泥膨脹問題
- 易於自動控制，提高污水處理的自動化水平



操作管理方便，易於實現自動控制

- HRT 與 SRT 完全分離，運行穩定靈活
- 採用 PLC 全自動控制，無需專人看管
- 易於使用和維護

2 典型浸沒式超濾 (MCR) 系統工藝流程



浸沒式超濾 (MCR) 技術結合生物處理與膜分離優勢，具有效率高、佔地小、操作簡便、自動化程度高等特點，是工業廢水回用與中水回用的理想選擇。

MCR運用實績及營運優化成果(3)

3 案廠實績

路竹科學園區
(水回收率須提高至85%)

案例 1 深圳一園區



💧 項目規模：3000 噸/天重金屬廢水回用項目

💧 產水指標：5 us/cm

💧 回用率：≥66.7%

案例 2 宏啟勝電子 (全四期)



💧 項目規模：13000 噸/天二類及重金屬廢水回用項目

💧 產水指標：≤200 us/cm

💧 回用率：≥65% (實際運行回收率在 70%)

案例 3 高雄園區



💧 項目規模：900 噸/天低濃度廢水回用項目

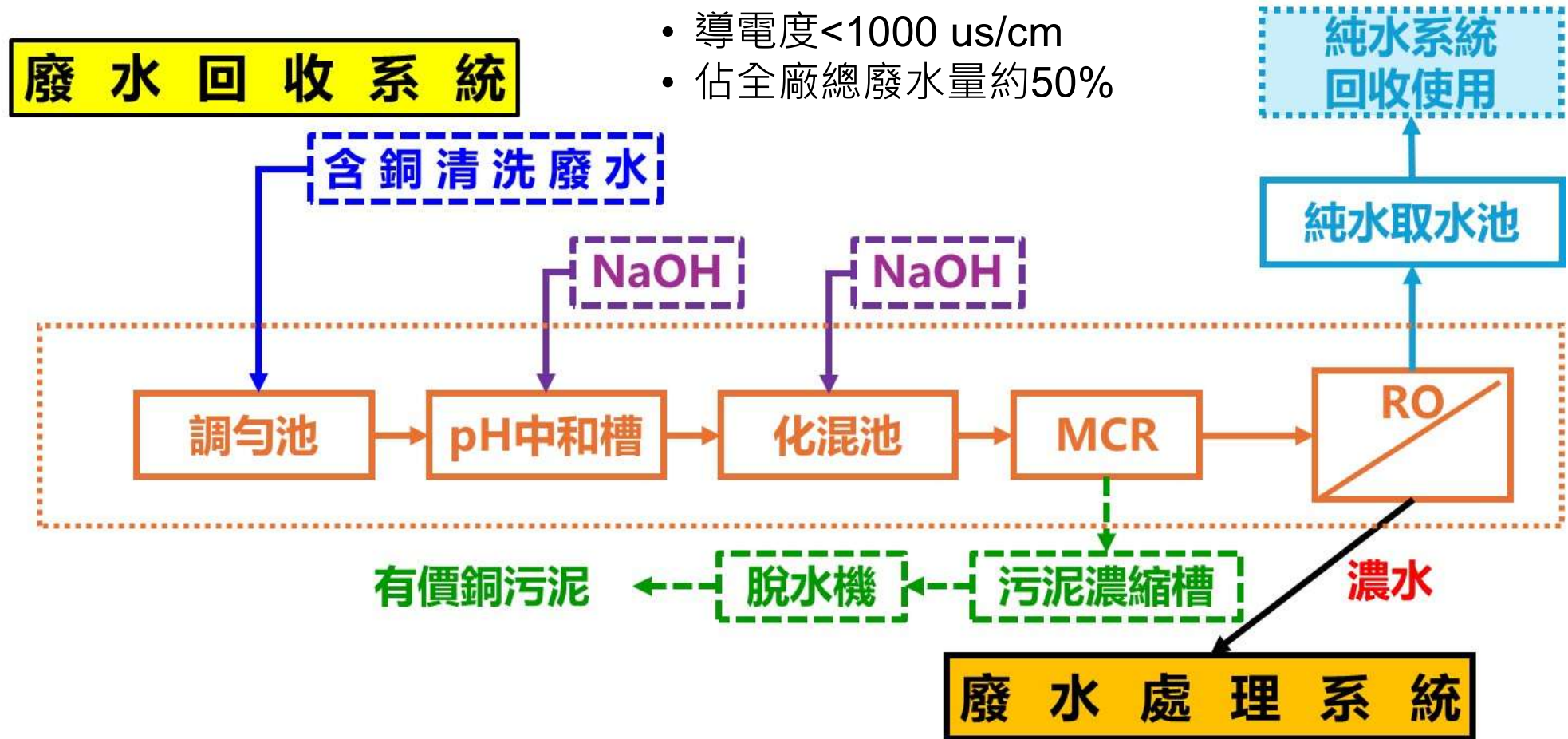
💧 產水指標：<30us/cm

💧 回用率：≥65%

重金屬清洗水回收案例-MCR+RO

中國華北某PCB廠含銅清洗廢水回收系統

MBR+RO提升有機廢水回收量 vs. MCR+RO提升重金屬廢水回收量



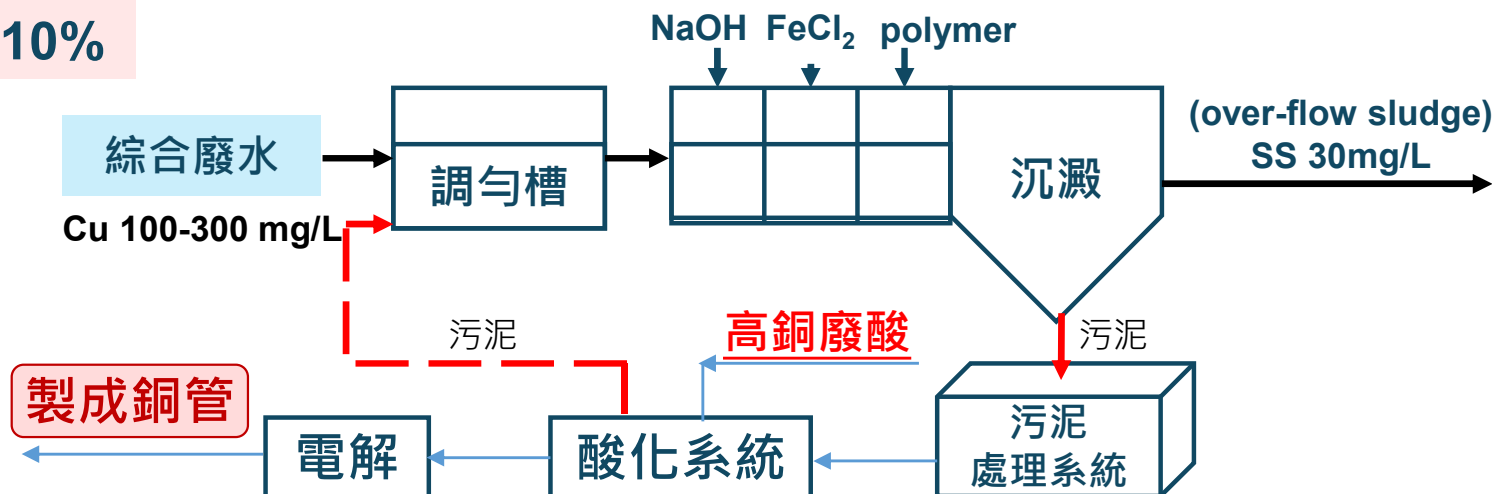
中濃度廢水

- 導電度 ~ 2000 us/cm
 - COD 90-200 mg/L
- 化混/MCR → 生物/MBR

含銅污泥資源化策略

策略一：污泥含銅量5~10%

➡新增污泥酸化程序



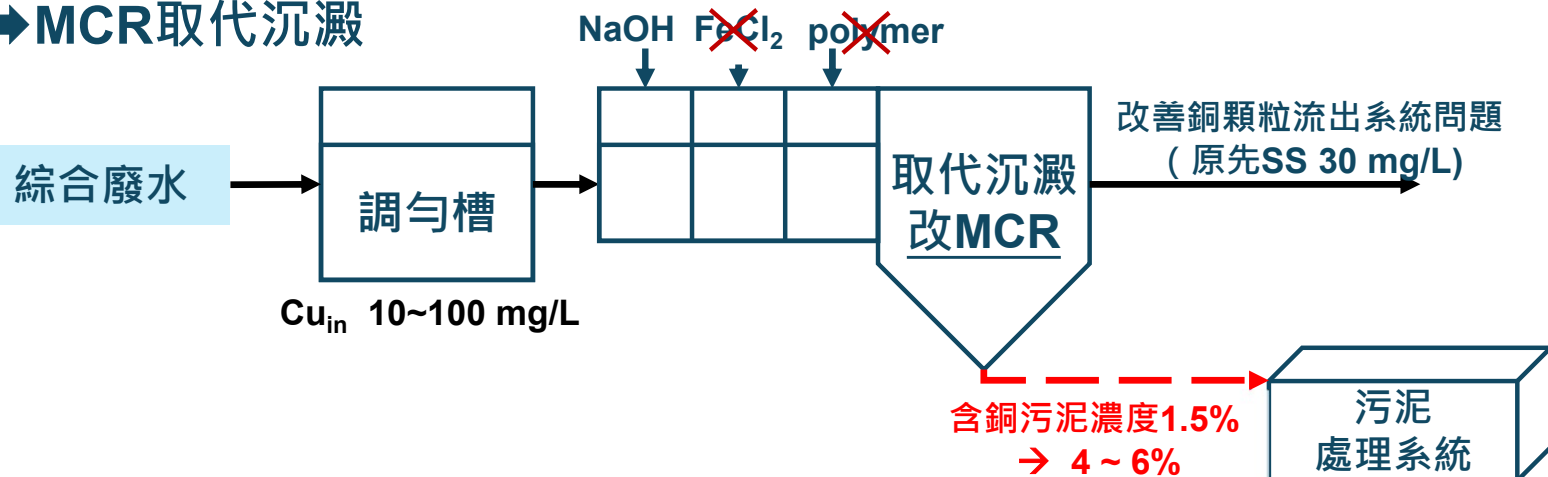
既有問題 分流不易及僅有部分廢水進電解系統

改善策略

將廠內高銅廢酸(棕化、化銅、SPS) 導入酸化系統, 提高污泥中銅回收率, 降低清運量。

策略二：污泥含銅量 < 3%

➡MCR取代沉澱



MCR系統

既有問題

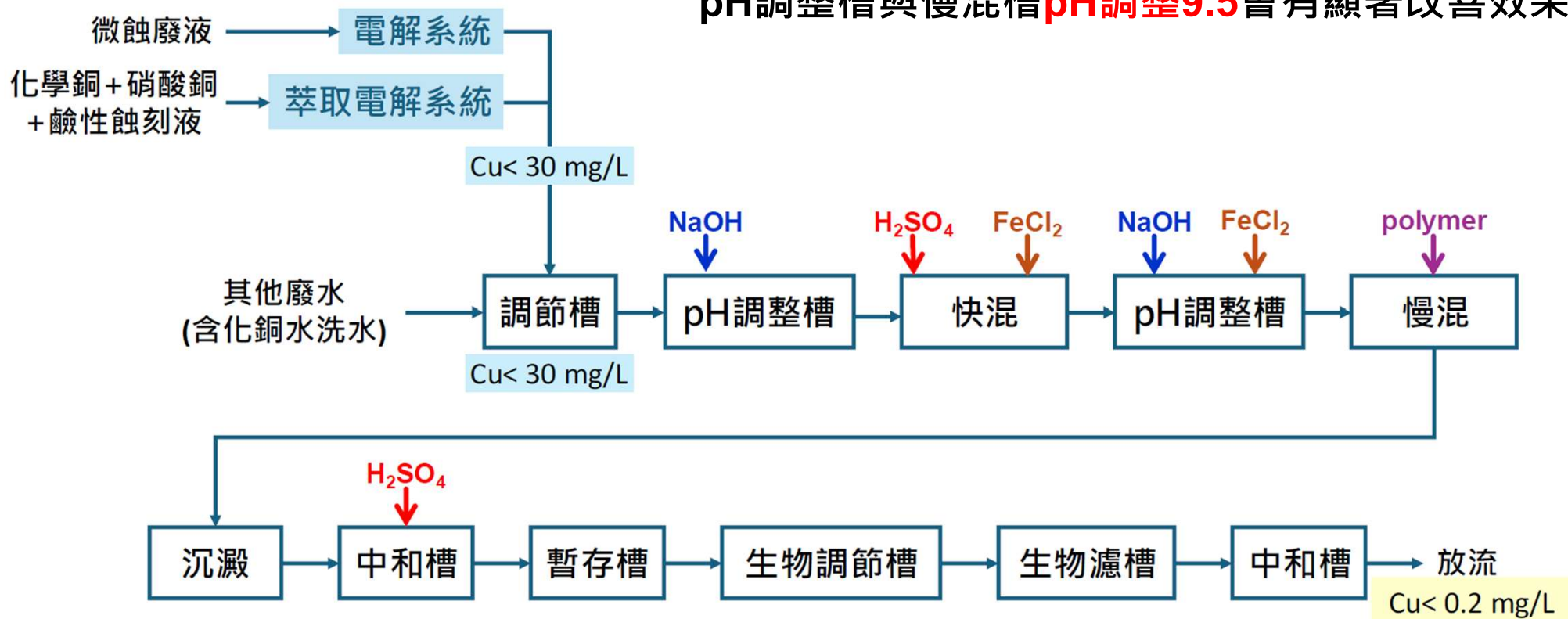
- 污泥清運成本高
- 加藥成本高

改善策略

導入MCR減少廠內FeCl₂加藥量及NaOH用藥量, 提升污泥中銅回收率, 且避免顆粒銅流出廠外

含銅廢水處理之極限案例-放流水Cu 0.2 mg/L

pH調整槽與慢混槽pH調整9.5會有顯著改善效果



重金屬廢水之資源化技術與應用

謝謝聆聽

