

工業技術研究院

Industrial Technology
Research Institute

產業廢液資源化與水藥自給之應用

廠內減藥、減碳與水資源循環再利用創新策略

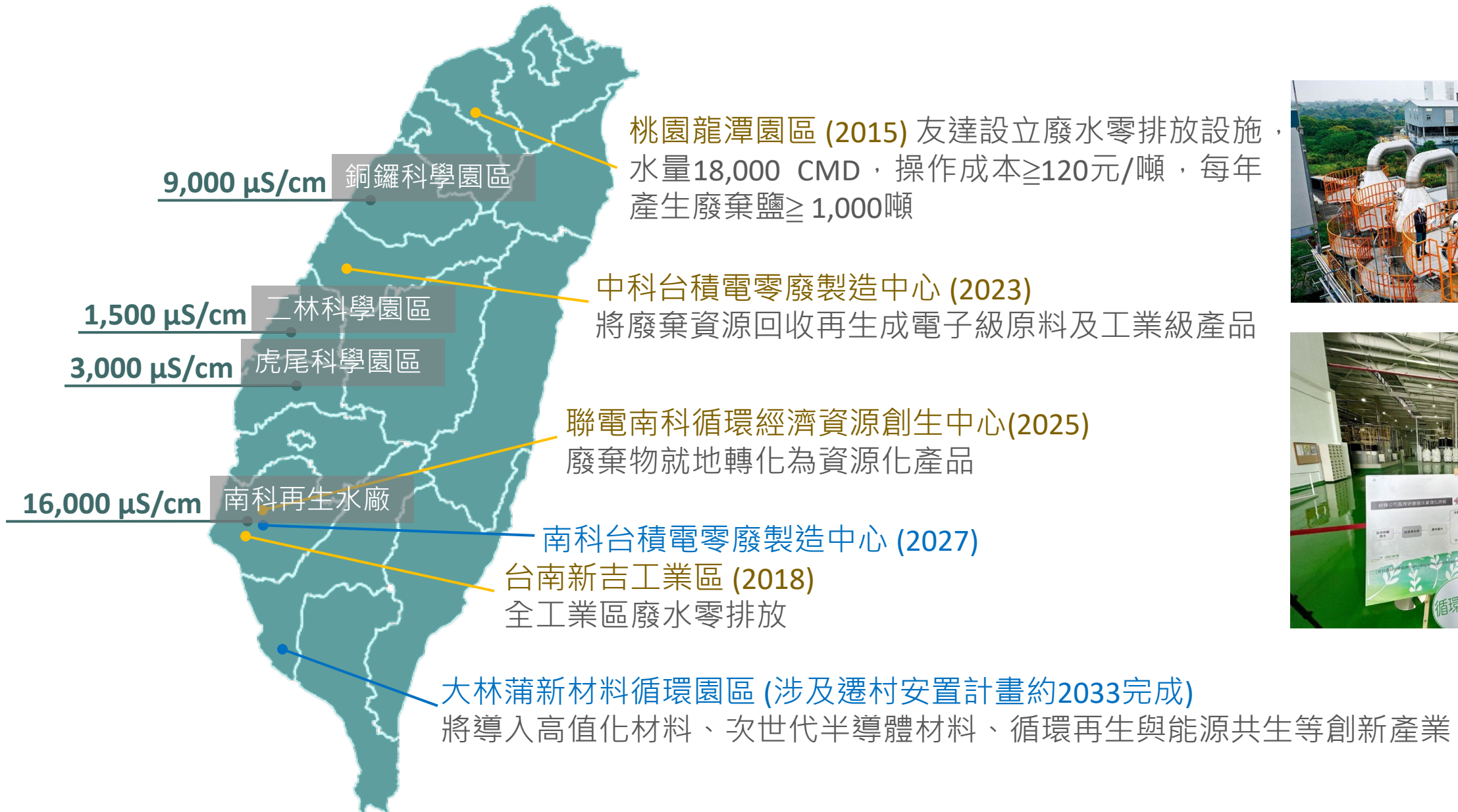
黃馨儀

水處理模組及產品研究室

材化所 水科技研究組

2026/09/10

國內園區排水導電度規範與產業零排放現況



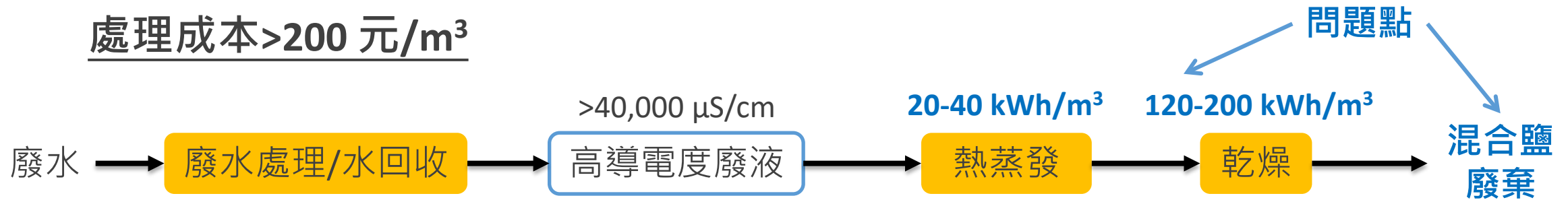
2025廢水淨零排放-綠色轉型方向



環境部資源循環署-116年補助資源循環創新及研究發展計畫

廢水處理系統現況問題 (ZLD)

處理成本 > 200 元/m³



問題點

熱蒸發系統能耗高，蒸發每噸水能源需求 > 20 kWh 以上，處理成本高。

廢水經由蒸發後，產生大量廢棄混合鹽，造成二次污染。

無法做到調控排放廢水導電度，僅能實施零排放。

解決問題點想法

減少進入熱系統水量。

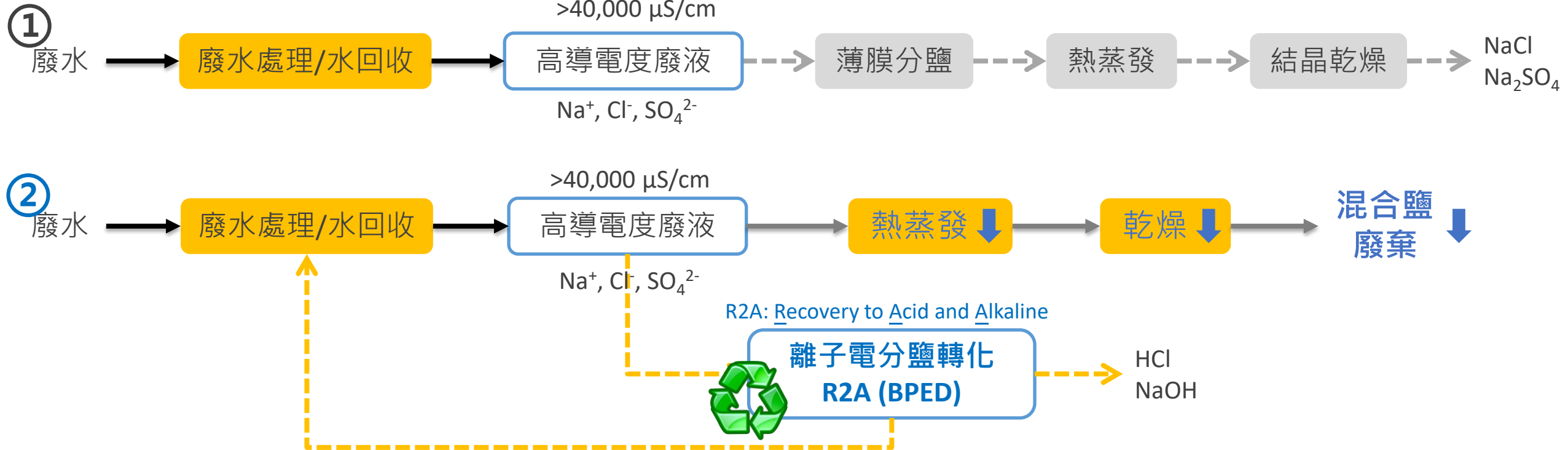
離子轉化利用，降低離子廢棄量。

從廢水端提取離子，降低離子濃度及導電度。



清運處理費用
> 15 元/kg

鹵水資源化策略



環境效益



1. 降低廢水排放導電度。
2. 降低零排放系統廢棄混合鹽量。
3. 再生水量增加。
4. 減碳，產出低碳化學品。

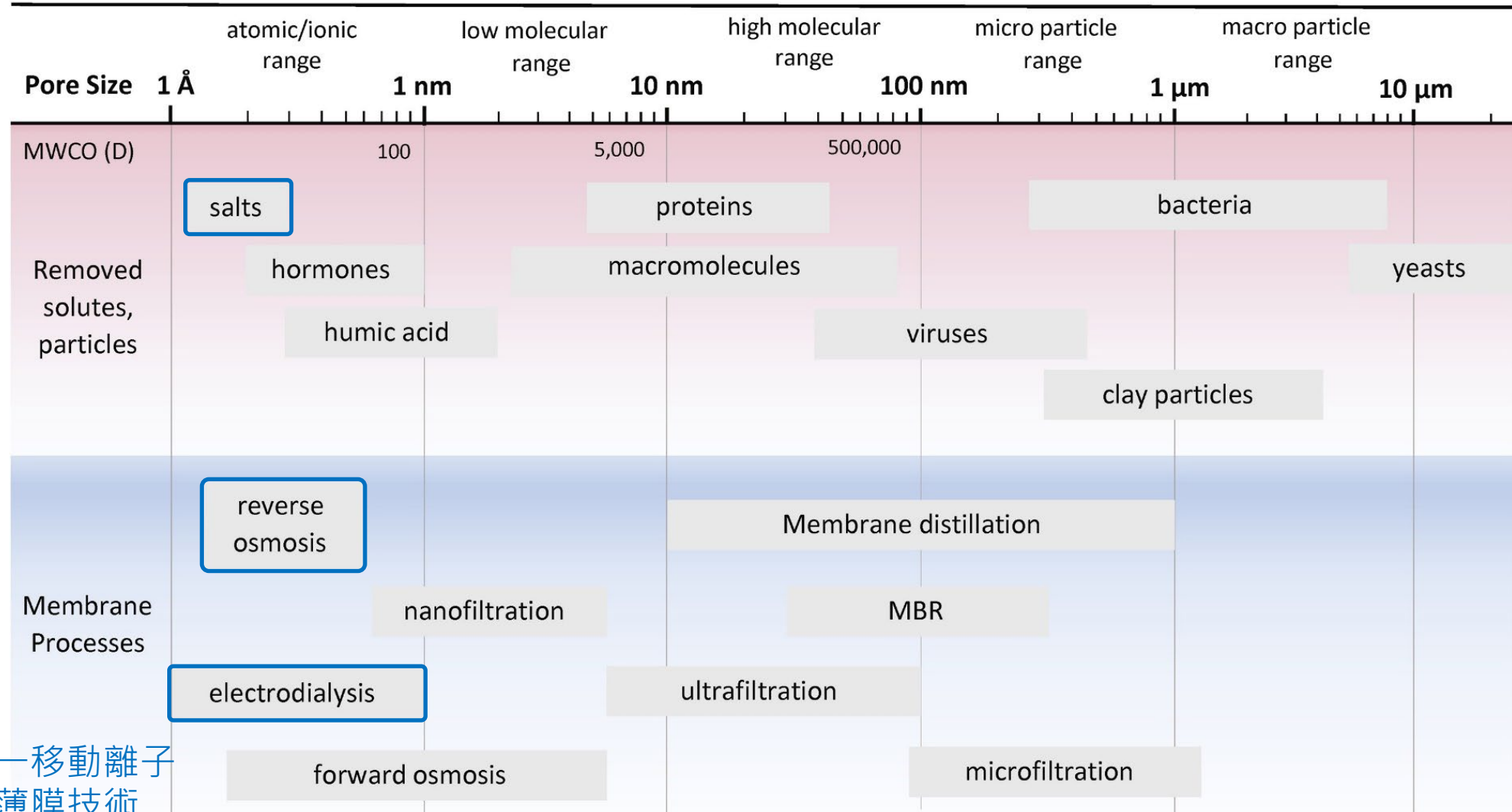
經濟效益



1. 再生酸鹼利用，減少外購酸鹼費用。
2. 熱系統處理量減少，操作能耗降低。
3. 廢棄物減量，清運費降低。

離子分離薄膜技術

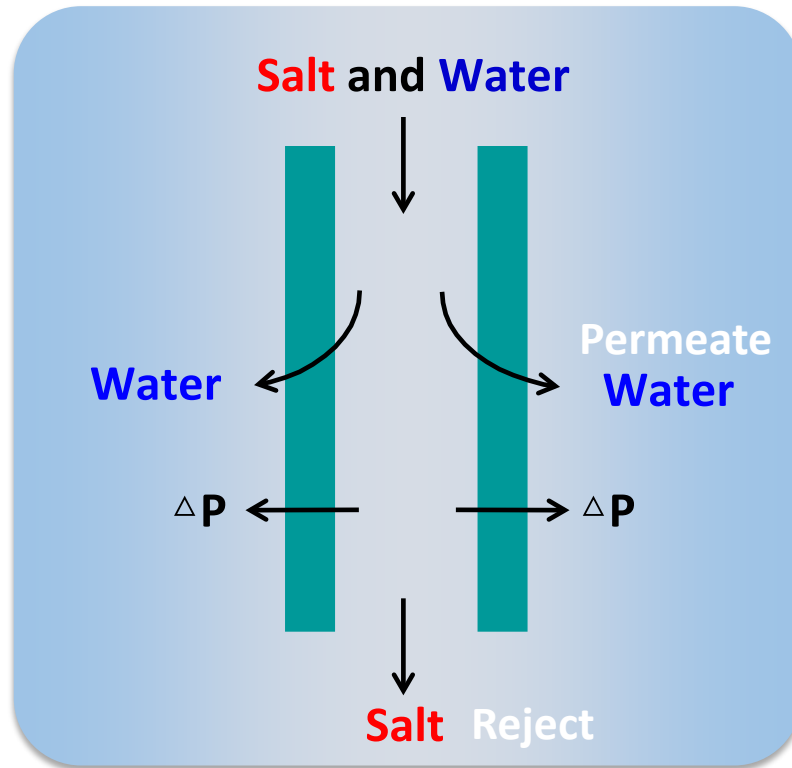
Solute filtration pore size



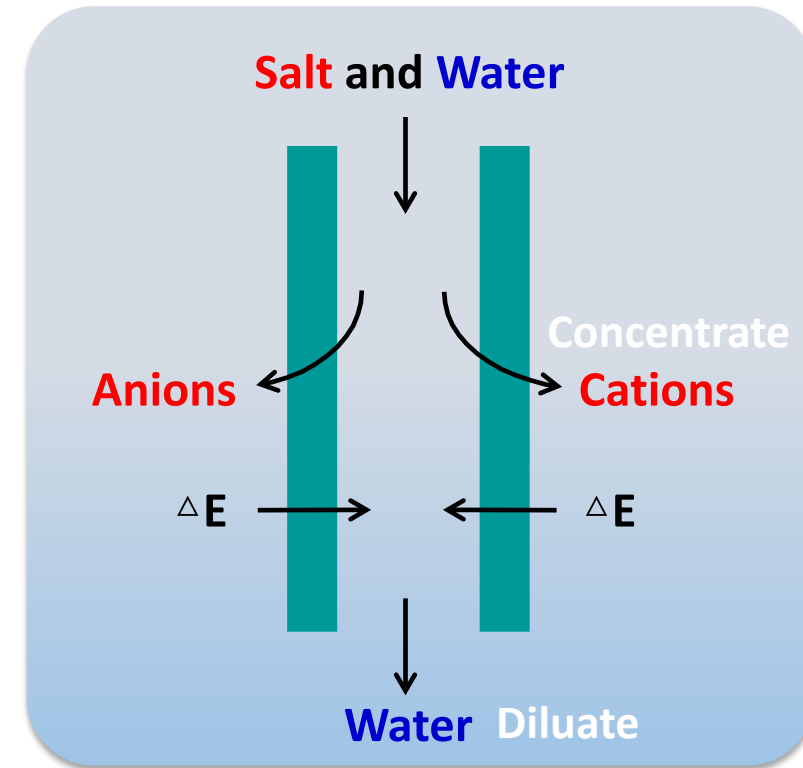
唯一移動離子的薄膜技術

Warsinger, D. M. et al.,(2018). A review of polymeric membranes and processes for potable water reuse.

逆滲透 (Reverse Osmosis) vs 電透析 (Electrodialysis)

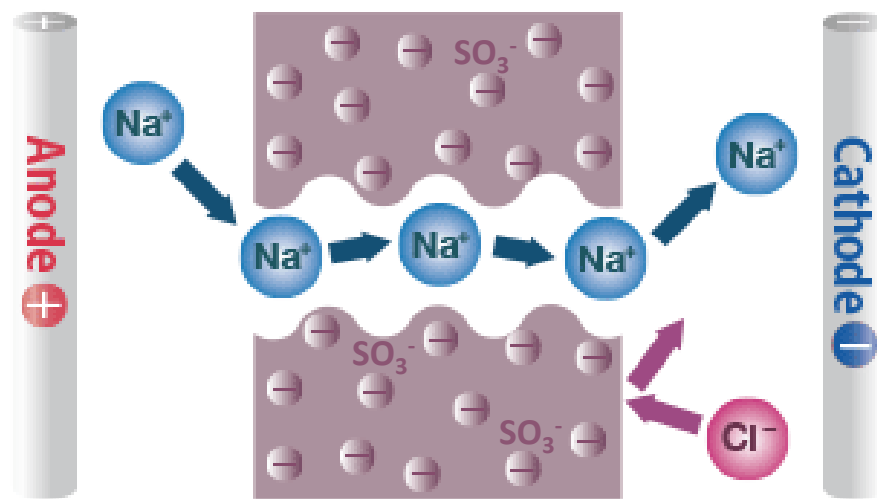


逆滲透
(半透膜-透水)



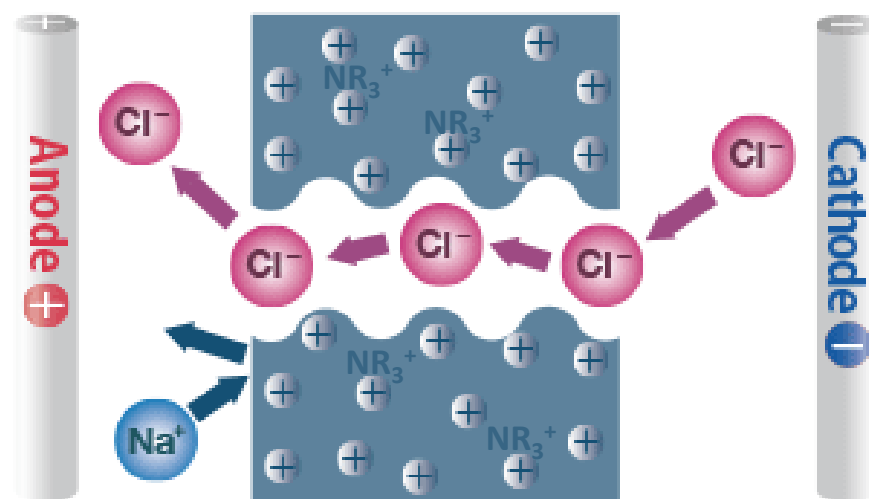
電透析
(離子交換膜-透離子)

離子於離子交換膜內的移動機制



cation exchange membrane

Figure 1-1 Selective permeability of CEM



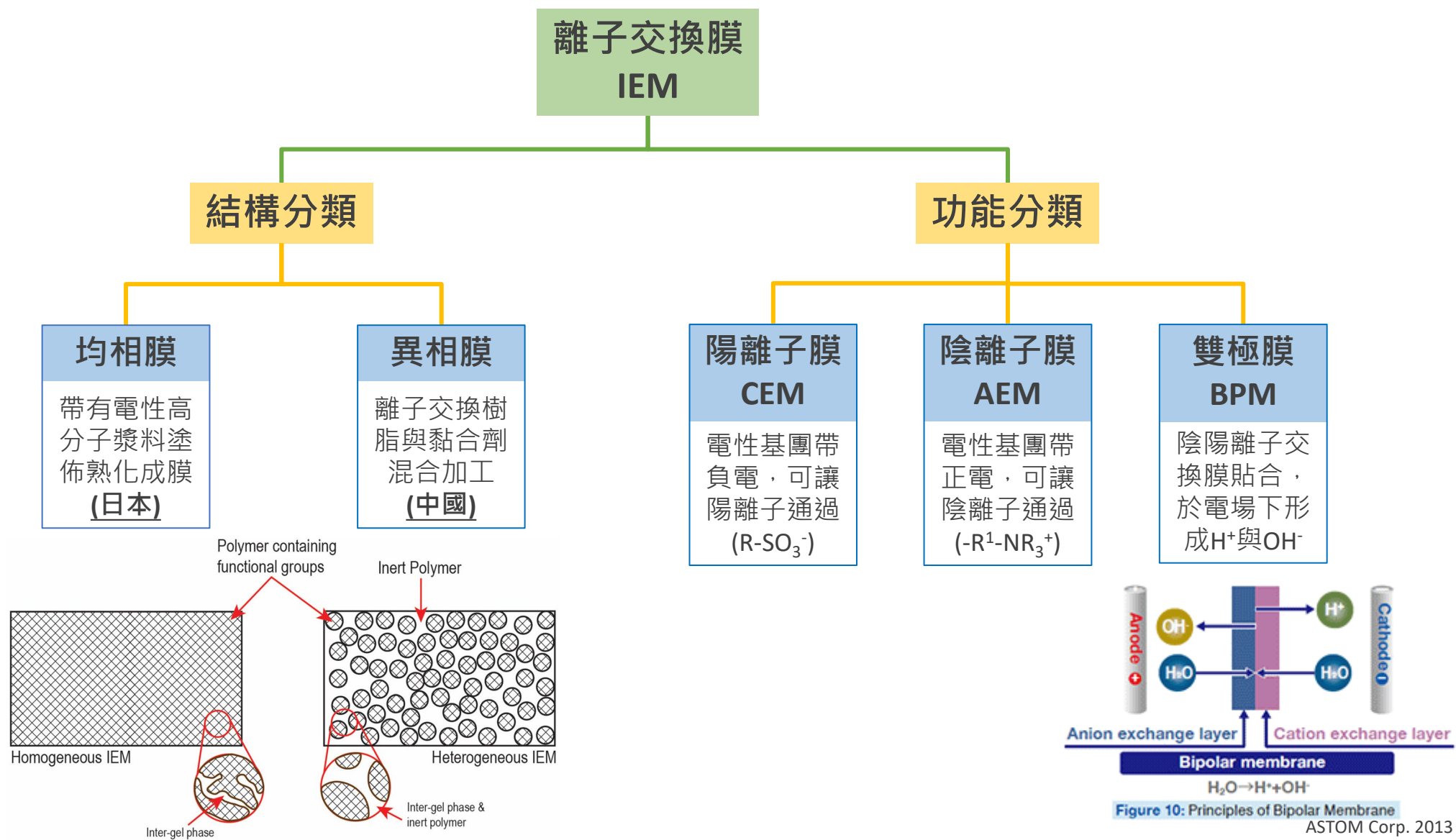
anion exchange membrane

Figure 1-2 Selective permeability of AEM

ASTOM Corp. 2013

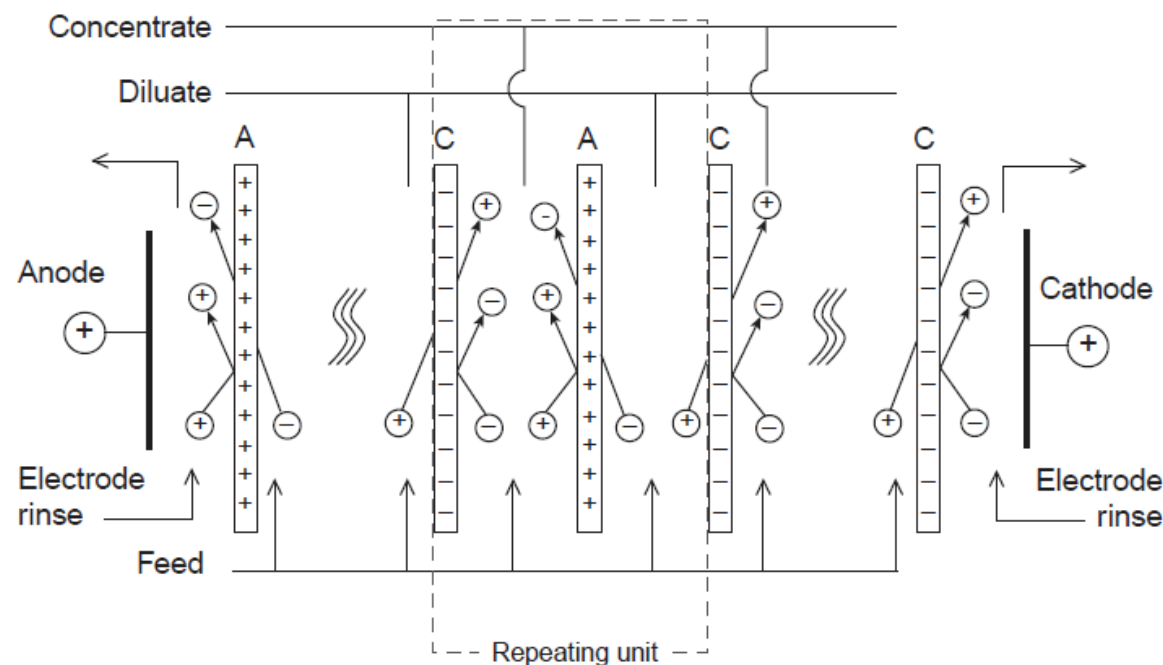
- 針對不同離子特性篩分的薄膜技術，使同電荷離子(coion)通過，阻擋反電荷離子(counterion)
- 陽離子交換膜上帶有負電荷官能基阻擋陰離子，使陽離子通過
- 陰離子交換膜上帶有正電荷官能基阻擋陽離子，使陰離子通過
- 搭配電場施加即可驅動水中離子移動，達到水與離子分離之目的

離子交換膜型態與種類



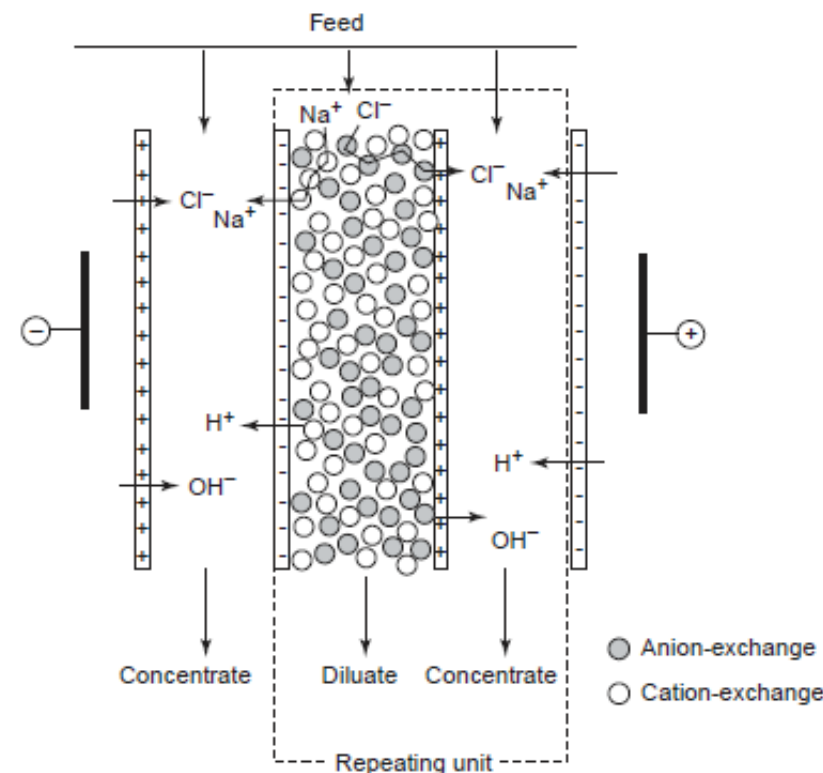
離子交換膜技術-脫鹽應用

電透析(ED/EDR)-再生水



◆ 鹵水脫鹽與工業排水水回收，及鹽類濃縮

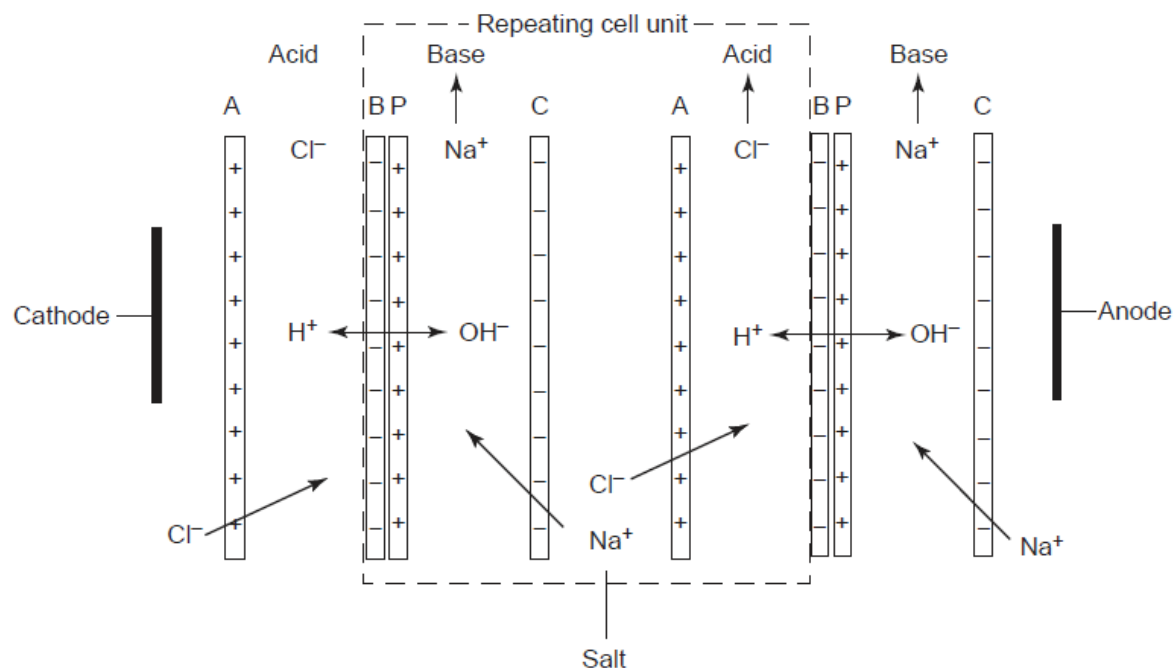
電去離子(EDI)-純水



◆ 食品、製藥、電子及能源再生工業上之純水製造

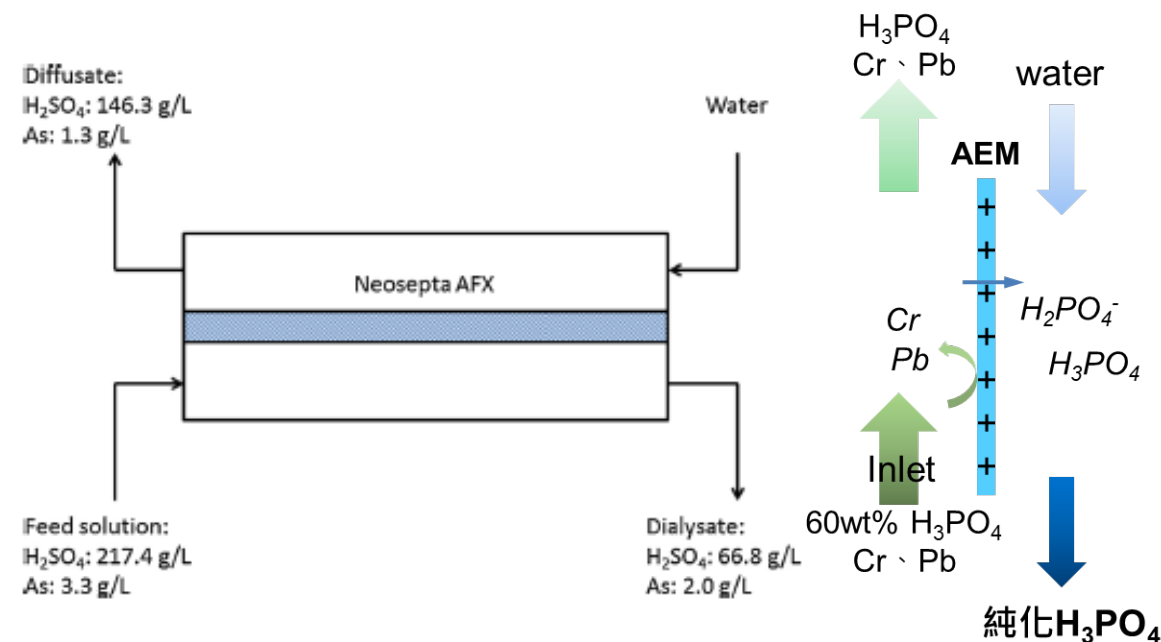
離子交換膜技術-酸鹼產製/純化應用

雙極膜電透析(BPED)-離子資源化/降導



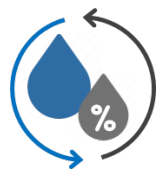
- ◆ 有機酸回收、鹵水、工業及製程廢水的酸鹼回收
- ◆ 降低排水導電度，同時可回收產生酸與鹼等有價物
- ◆ 廢水零排放運用

擴散滲析(DD)-廢酸鹼純化



- ◆ 利用濃度梯度差異，酸根離子會透過陰離子交換膜至回收側，金屬陽離子會被阻擋，達到純化效果。
- ◆ 高濃度蝕刻酸液、鹼洗液再製為工業級產品利用

離子交換膜資源化技術應用



鹵水降導

Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-}



樹脂合成有機
溶液脫鹽

Na^+



蝕刻液回收

H_3PO_4 , H_2SO_4 , NaOH



酸鹼再生廢液降導

NaOH , HCl

水質特性

資源化物質

應用

中性廢水

鹽酸/硫酸/液鹼

水處理系統化藥

酸性廢液

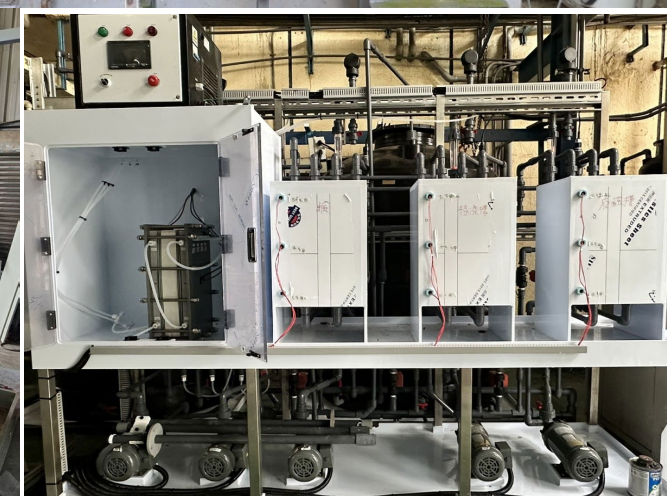
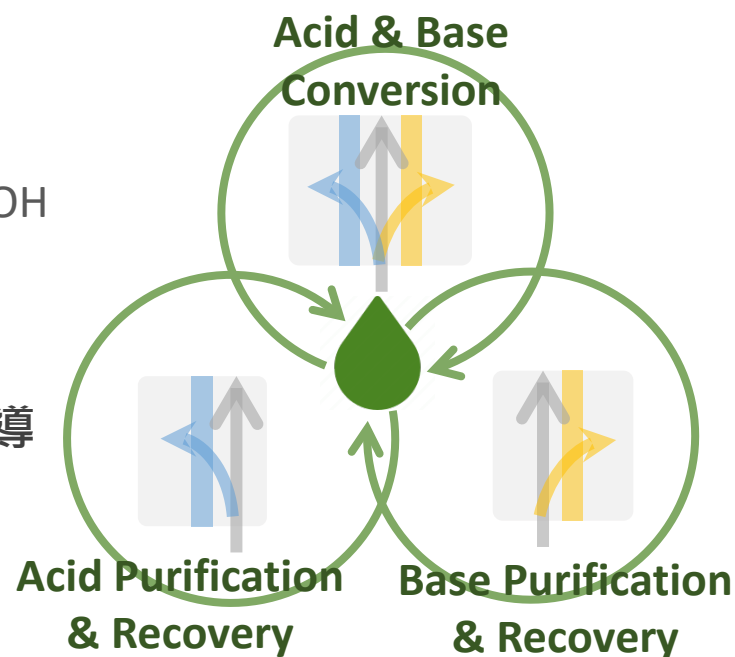
硫酸/磷酸/鹽酸/有機酸

蝕刻製程
純水樹脂單元

鹼性廢液

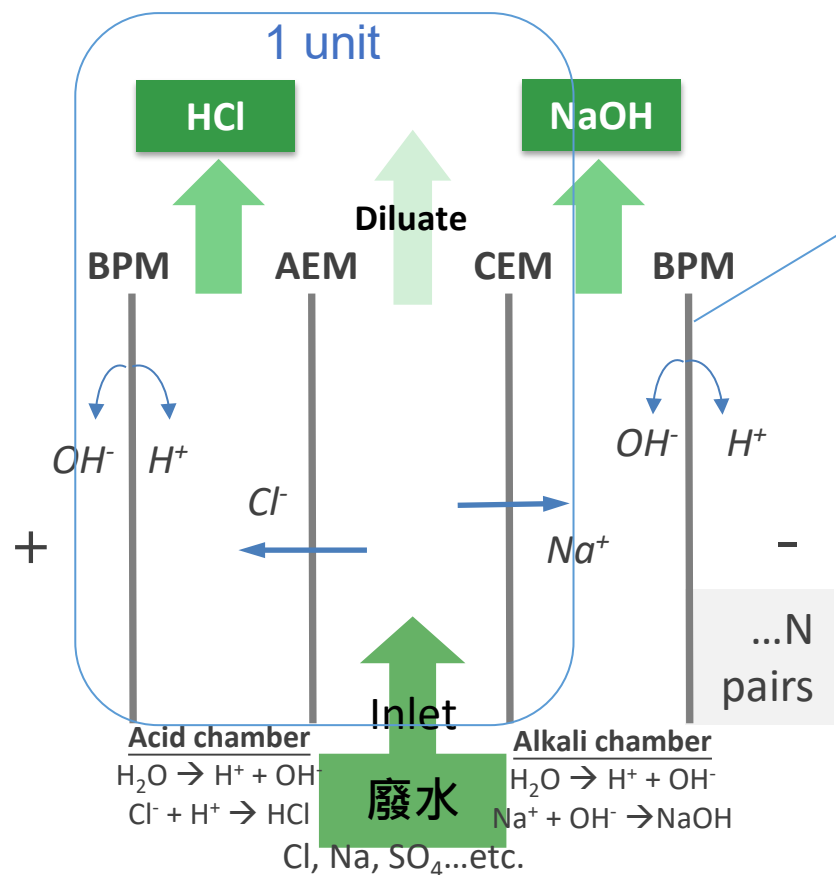
液鹼

純水樹脂單元
濕蝕刻

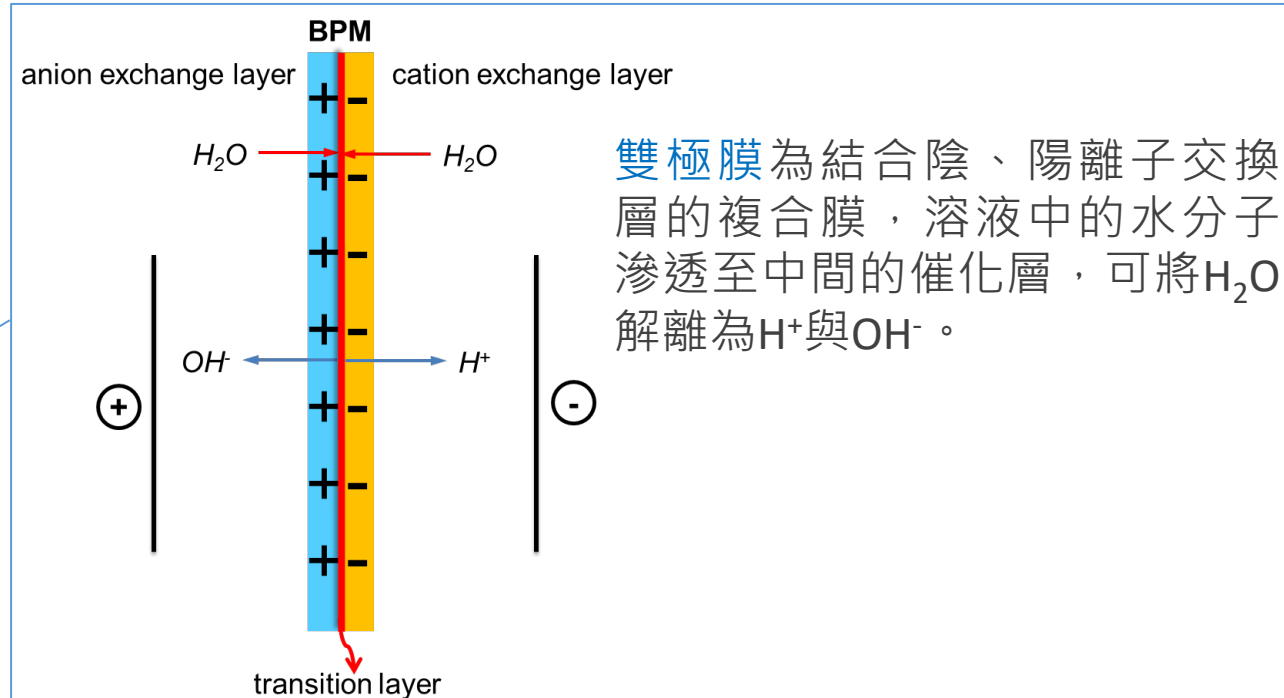


BPED-鹽轉化酸鹼原理

雙極膜(BPM)與陰、陽離子交換膜搭配，能夠將廢水中的陰陽離子分開，並與雙極膜產生的氫離子與氫氧根離子結合形成酸液和鹼液。



BPM: 雙極膜 / AEM: 陰離子選擇膜 / CEM: 陽離子選擇膜
Astom、Fumatech



雙極膜為結合陰、陽離子交換層的複合膜，溶液中的水分子滲透至中間的催化層，可將H₂O解離為H⁺與OH⁻。

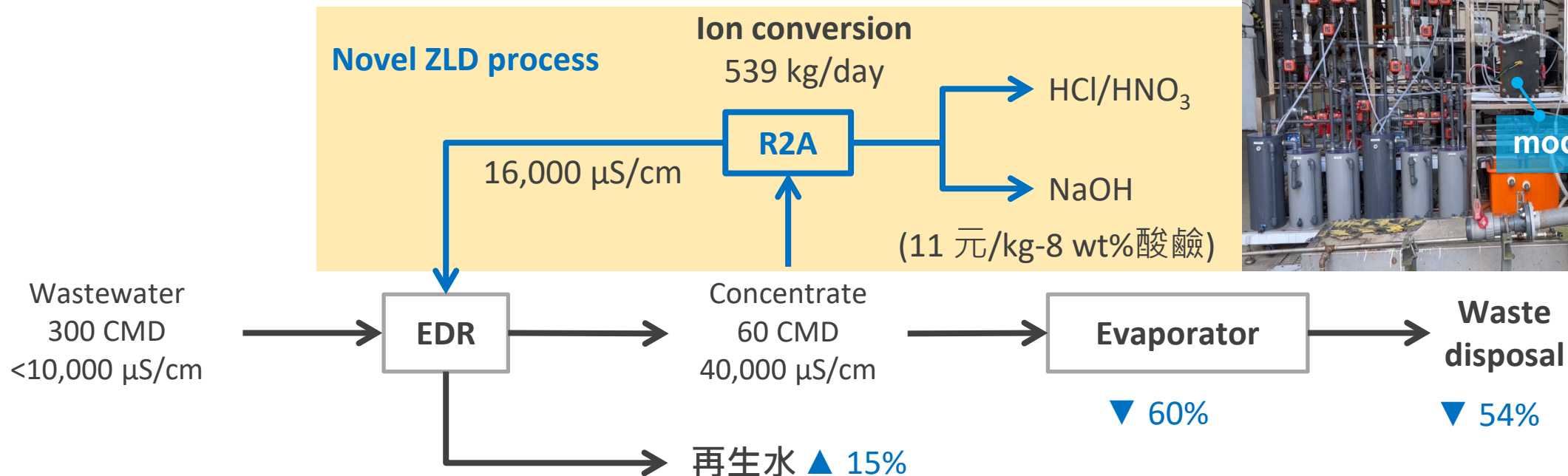
由於系統主要產製鹼液，廢水中若含有鈣鎂矽等**結垢物質**，需進行前處理，避免Ca²⁺、Mg²⁺於鹼室的膜片上產生無機結垢。同樣帶負電的**有機物**也有可能在酸室膜片上形成有機污堵。

系統設置考量點

1. 以產製酸鹼用途與用量，去設計處理水量。
2. 水質組成，會影響產品純度，可透過單價選擇性膜片分離一、二價離子。

零排放濃水資源化

光電廠評估案例 (模廠測試1.0 CMD)



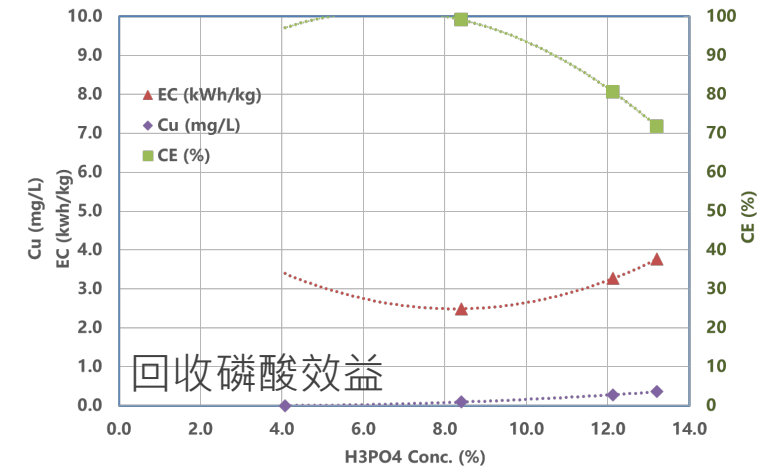
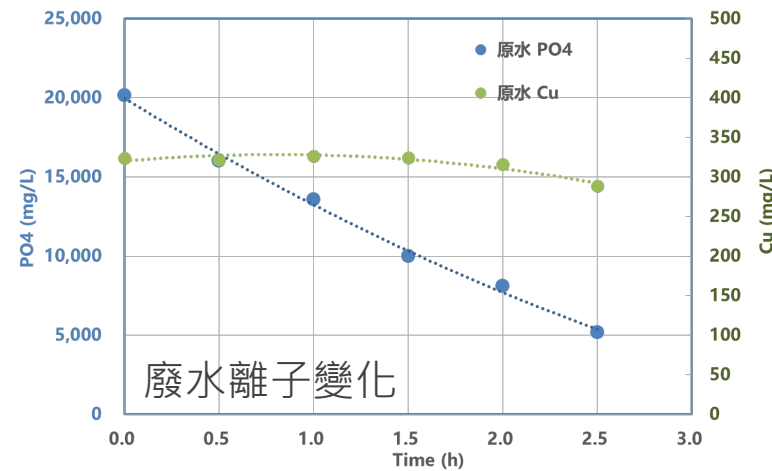
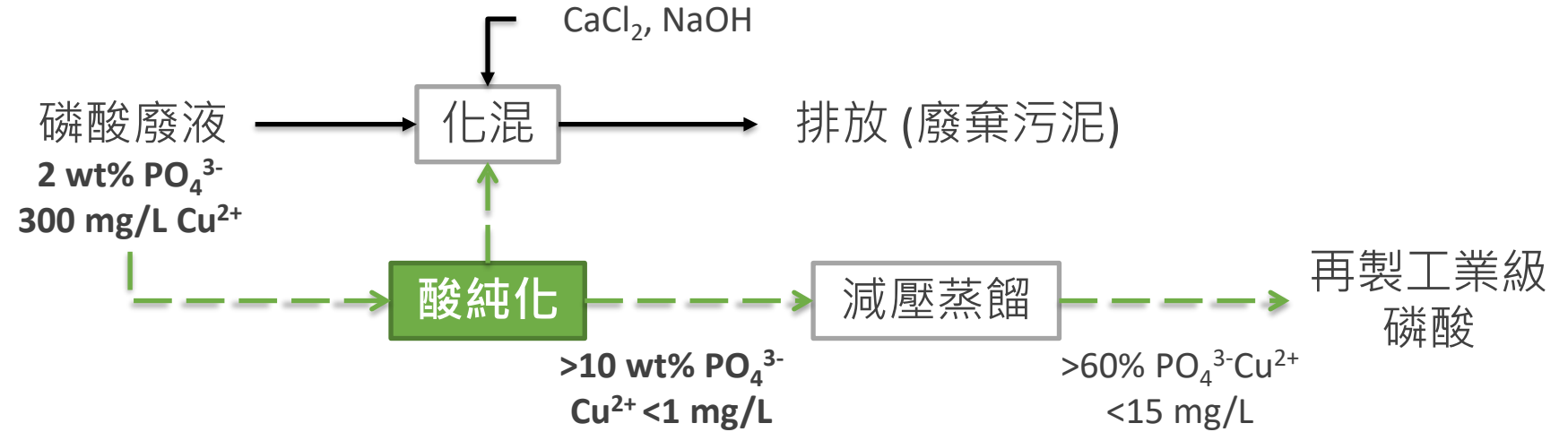
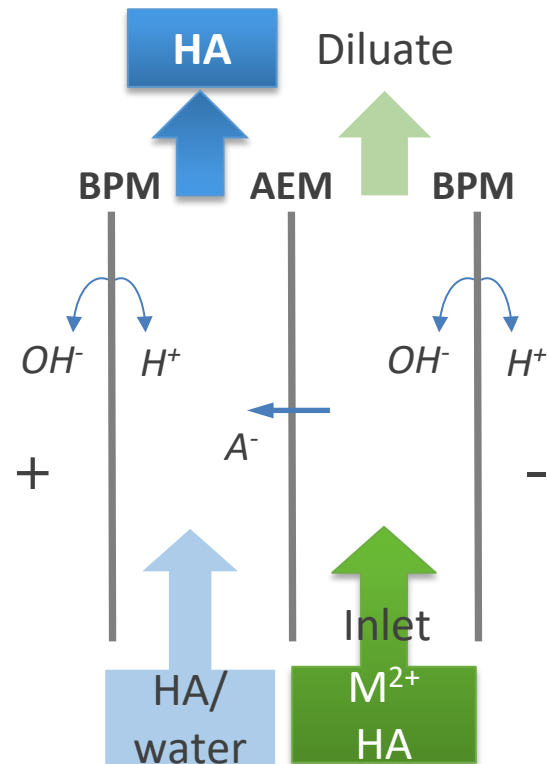
項目	原程序	新程序
R2A處理量 (CMD)	-	45
再生水量 (CMD)	240	276 (▲ 15%)
熱系統處量 (CMD)	60	24 (▼ 60%)
固體廢棄量 (ton/day)	1.3	0.6 (▼ 54%)
產酸量 (CMD)	-	4.0
產鹼量 (CMD)	-	3.5

項目	原程序	新程序
廢棄物清運費 (元/day)	19,650	9,000
系統操作費用 (元/day)	11,088	10,934 含EVP+R2A
節省藥劑開銷 (元/day)	-	11,000
總費用 (元/day)	30,738	8,935 (▼ 70%)
效益 (元/年)	6,542,400 (300天/年)	

15,000 元/ton-固廢; 2.0 元/kg-8%NaOH; 4.4 kWh/kg-NaOH; 2.56 元/kWh; 1.0 元/kg-8%HCl; 30 kWh/m³熱系統-電能; 27 元/L-柴油; 300 天/年; 4.0 L/m³熱系統-柴油

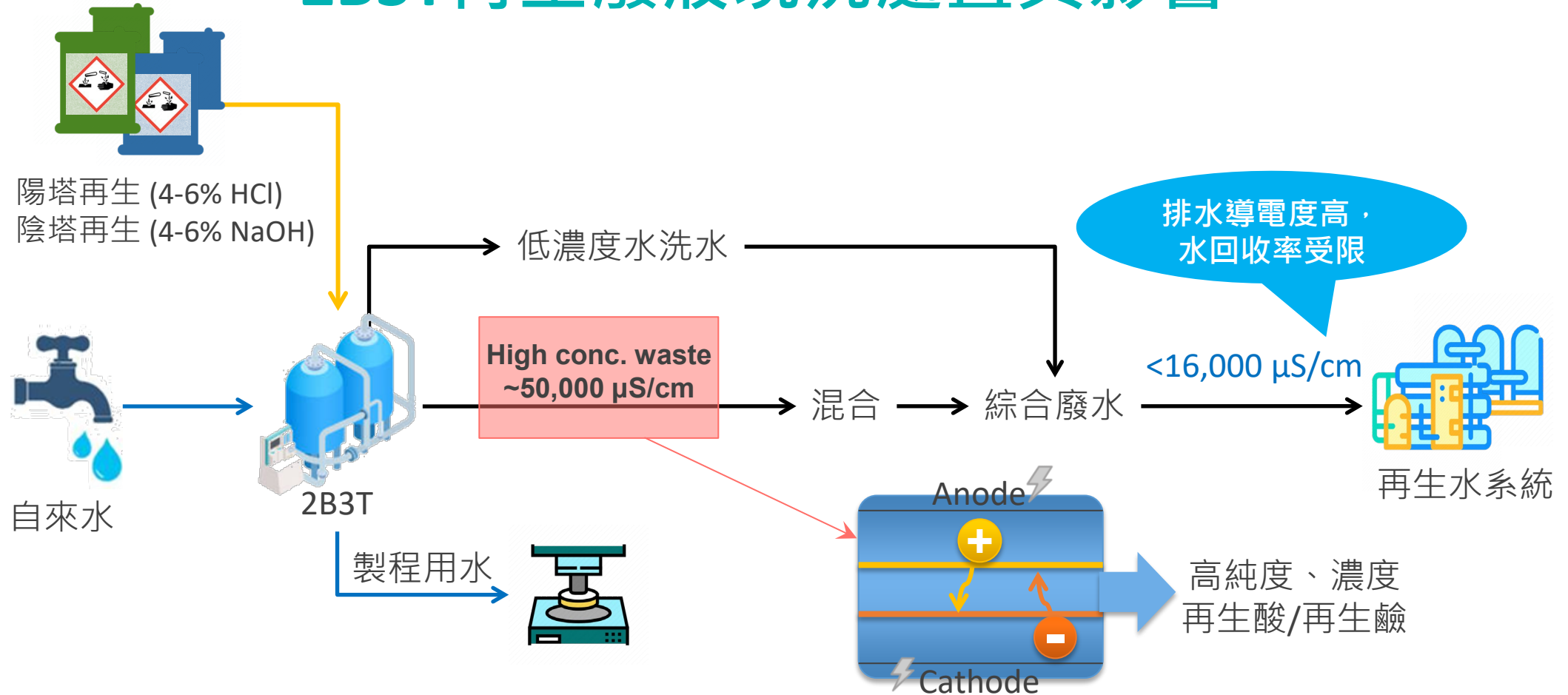
蝕刻磷酸提純提濃

半導體廠中濃度磷酸評估案例



- 廢磷酸預提濃並純化為 H_3PO_4 13 wt% , Cu^{2+} 0.36 mg/L
- 磷酸回收率75% , 能耗3.8 kWh/kg- H_3PO_4

2B3T再生廢液現況處置與影響



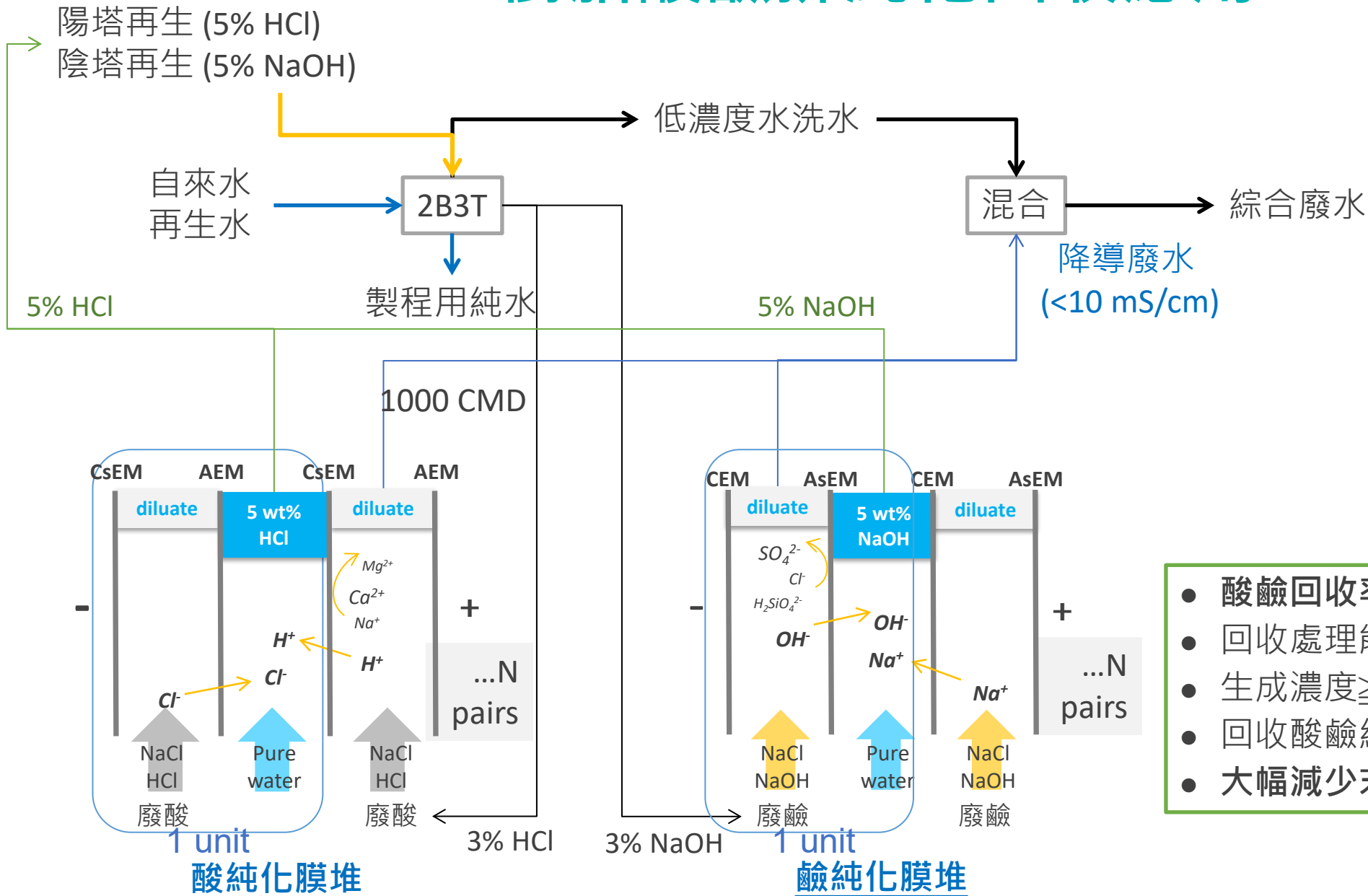
問題與瓶頸：

- 純水系統使用大量的鹽酸與液鹼，貢獻整廠排水導電度20-30%
- 增加後段再生水系統負荷，水回收率受限

策略與成效：

- 將部分離子回收，降低排水導電度
- 離子資源轉化為鹽酸與液鹼，減少廠內用藥
- 提升後端水回收率

樹脂酸鹼排純化回收應用



→ 廢水程序
→ 再生程序
→ 酸鹼回收

- 酸鹼回收率 $\geq 50\%$
- 回收處理能耗 $\leq 2.0 \text{ kWh/kg HCl/NaOH}$
- 生成濃度 $\geq 5 \text{ wt\% HCl/NaOH}$
- 回收酸鹼純度 $\geq 95\%$
- 大幅減少末端排水導電度

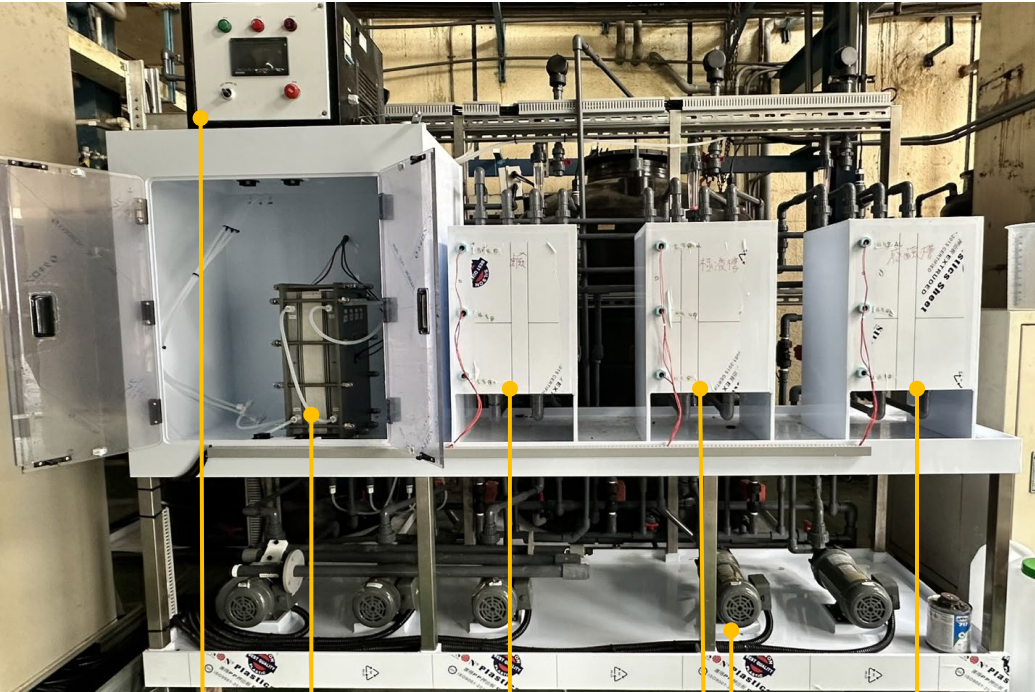
酸鹼排純化處理效能

	純度 %	成本 NTD/kg	碳排 kg-CO ₂ e/kg
再生鹽酸	98.0	7.0	0.99
市售鹽酸	99.99	13.0	2.13
2.0 kWh/kg, 3.5 NTD/kWh, 0.495 kg-CO ₂ e/kWh, 5 NTD/L-32%, 0.68 kg-CO ₂ e/kg-32%			
再生液鹼	95.0	5.3	0.74
市售液鹼	99.99	15.0	1.50
1.5 kWh/kg, 3.5 NTD/kWh, 0.495 kg-CO ₂ e/kWh, 10 NTD/L-45%, 0.675 kg-CO ₂ e/kg-45%			

- 酸排純化膜堆離子洩漏率0.5-1.5%，HCl生成純度98%，將實廠廢酸液純化生成5 wt% HCl，能耗約2.0 kWh/kg-HCl。
- 鹼排純化膜堆離子洩漏率5%，NaOH純度95%，將實廠廢鹼液純化生成5 wt% NaOH，能耗約1.5 kWh/kg-NaOH。

Applications of EDP technology

(Electric-Driven Purification)

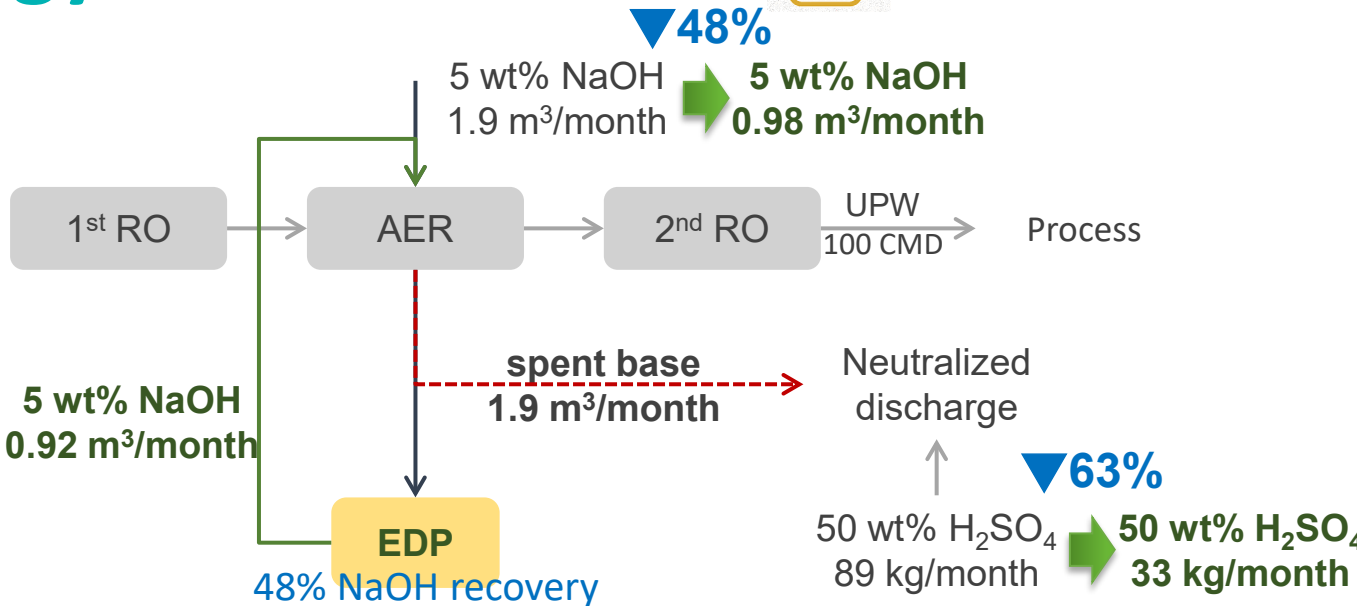


Power supply
Module
Electrolyte
Pump
Diluate
Concentrate

Pilot scale
Module size: 20 cm * 40 cm * 30 units
Feed stream: 3 wt% spent NaOH
Treatment capacity: 1 CMD



IX Resin Waste Recovery
NaOH, HCl



Item		Existing resin unit		With EDP technology
Purchased chemical amount	45% NaOH (kg/month)	222		115
	5 wt% NaOH (L/month)	1,897		979
	50% H₂SO₄ (kg/month)	89		33
Power consumption (kWh/month)	Module	-		24
	Pumps	-		4
Carbon emissions (kg-CO₂e/month)	Chemicals	162		82
	Electricity	-		14
Total carbon emissions (kg-CO₂e/month)		162		96 ▼40%

0.5 kWh/kg-NaOH, 0.018 kW-pump, 35 h/month, 3 pumps, 0.495 kg-CO₂e/kWh, 0.675 kg-CO₂e/kg-45% NaOH, 0.14 kg-CO₂e/kg-50% H₂SO₄

Applications of EDP technology

In the aluminum foil etching process, acid pickling is followed by using K_2HPO_4 as a protective agent.

- ◆ Once Cl^- exceeds 600 mg/L, the solution must be discharged and replaced.
- ◆ **Selective dechlorination:** EDP technology efficiently reduces Cl^- concentration from 600 mg/L down to 281 mg/L.
- ◆ **Closed-loop reuse:** Maintains the K_2HPO_4 concentration without significant loss, enabling continuous reuse of the protective solution.

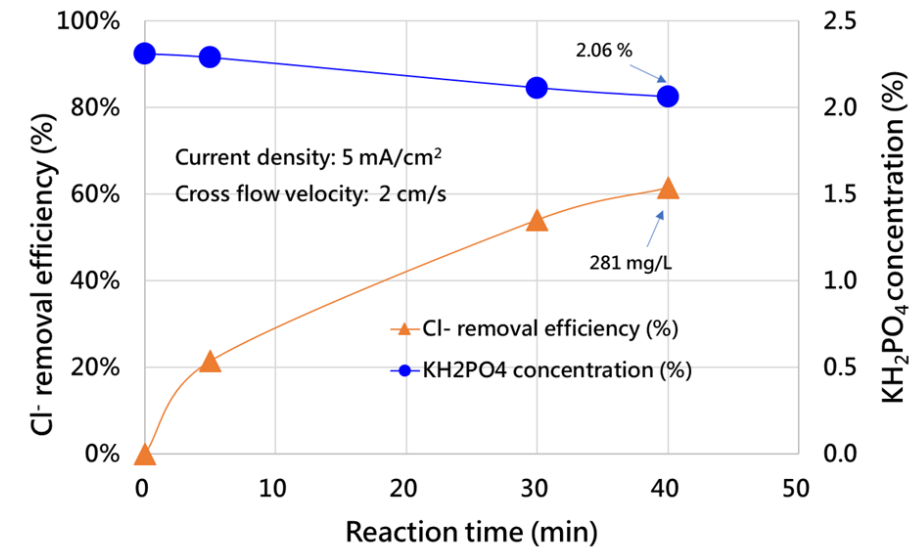
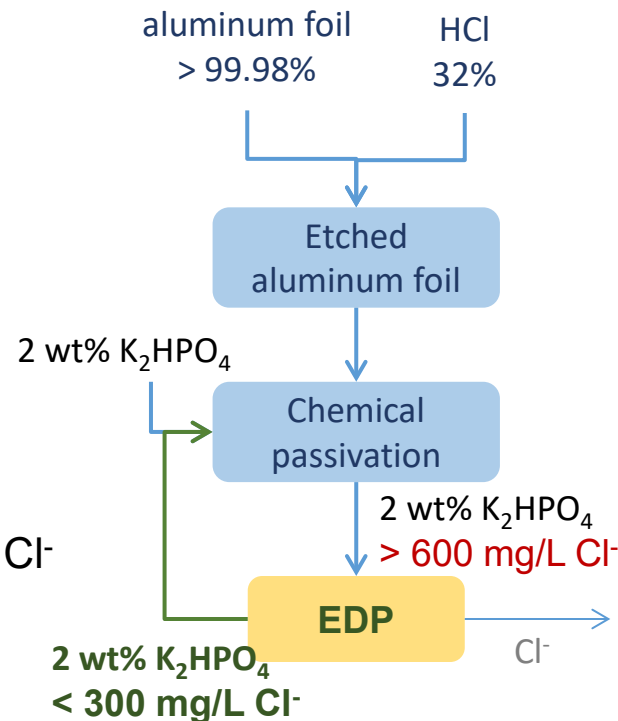


Full scale

Module size: 50 cm * 100 cm * 60 units

Feed stream: 2 wt% K_2HPO_4 containing 600 mg/L Cl^-

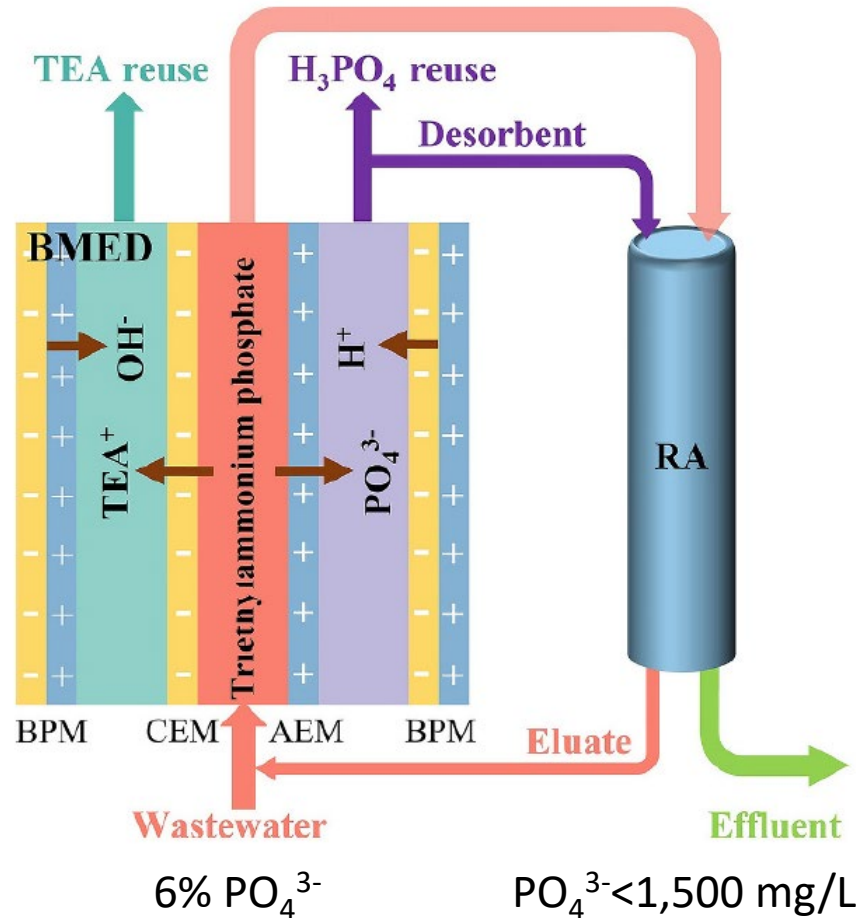
Treatment capacity: 20 CMD



中低濃度離子回收應用

Recovery of triethylamine and phosphoric acid from wastewater using a novel hybrid process of bipolar membrane electrodialysis and resin adsorption

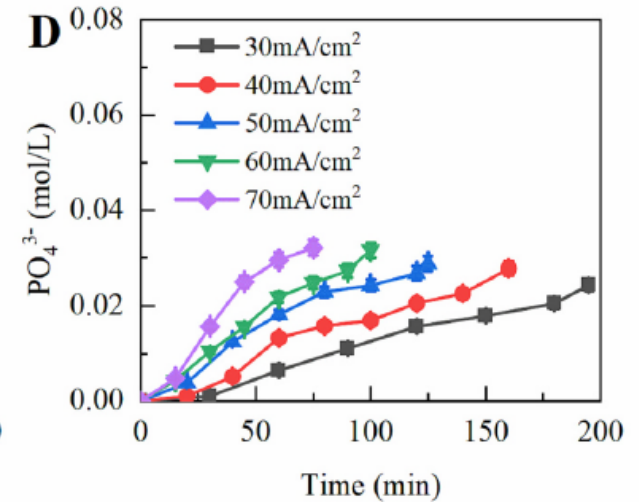
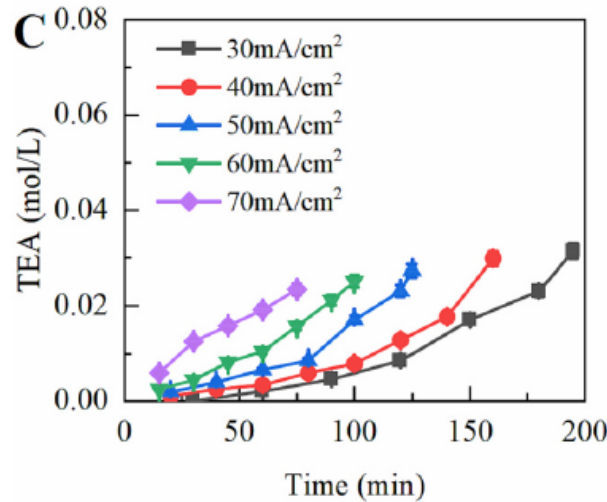
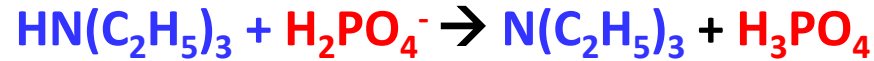
Desalination 576 (2024) 117363



Scrubber

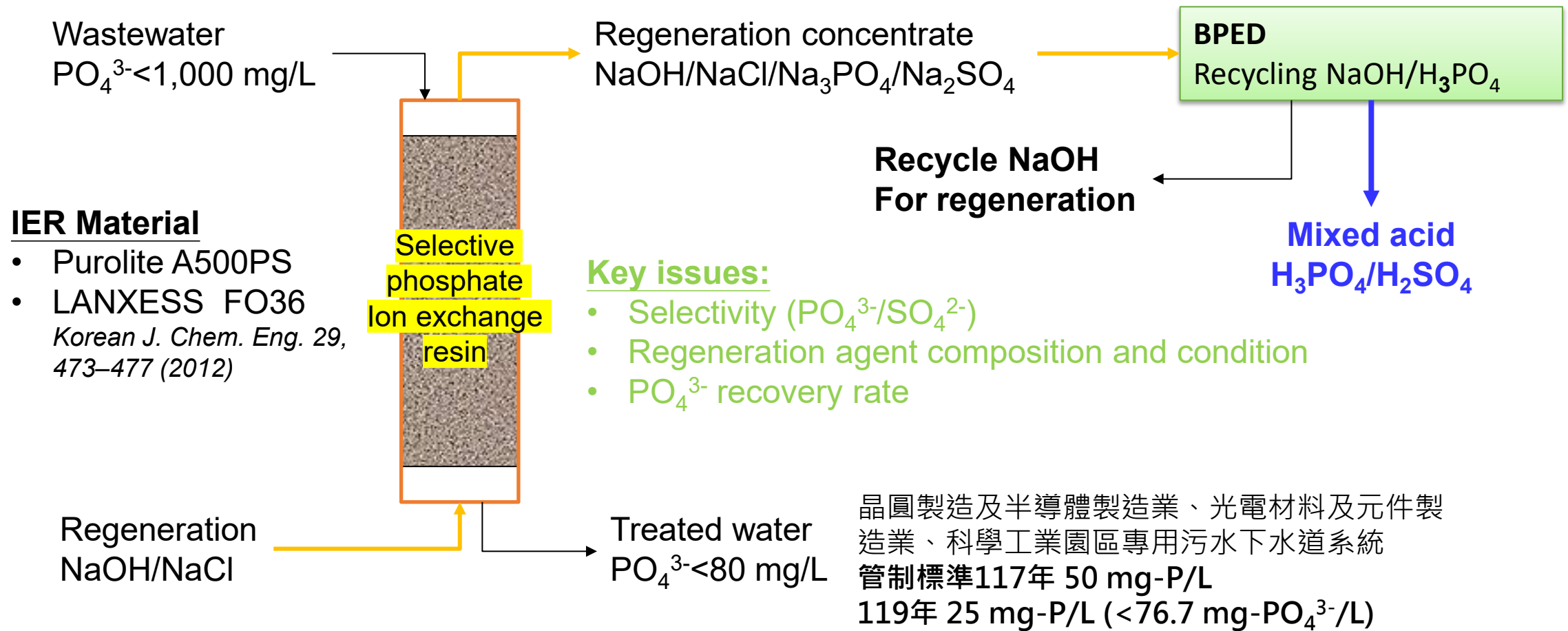


Bipolar electrodialysis

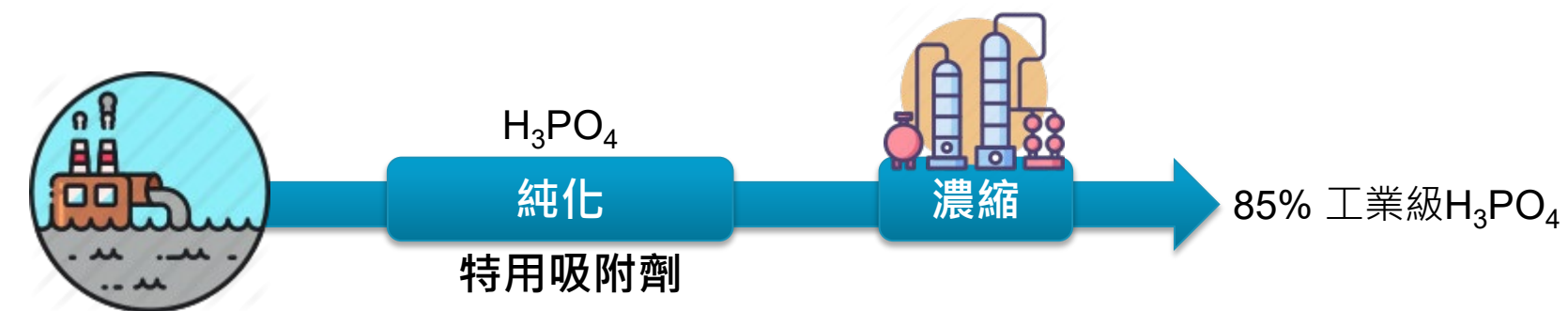


TEA與磷酸回收率達96%，EC=4.3 kWh/kg-TEA

Recovery PO_4^{3-} in Industrial Wastewater



高濃度蝕刻廢酸純化再製工業級化藥評估

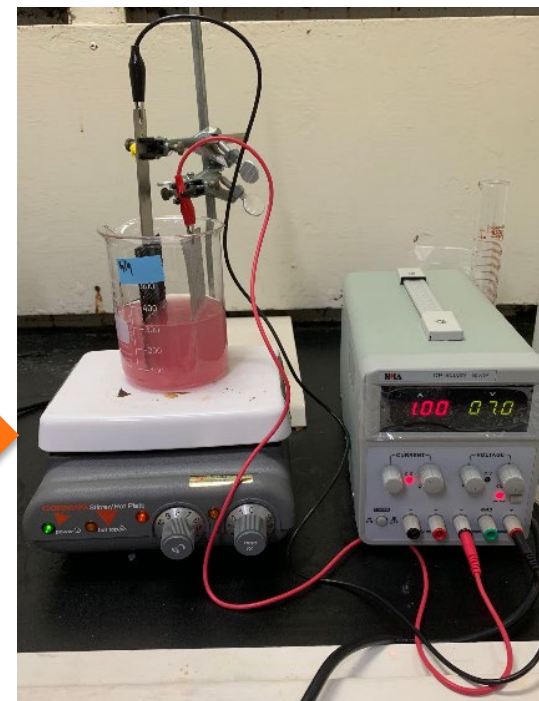


~75wt% H₃PO₄
Cu、Co

針對金屬離子去除
磷酸回收率高



電鍍金屬回收及酸液再利用

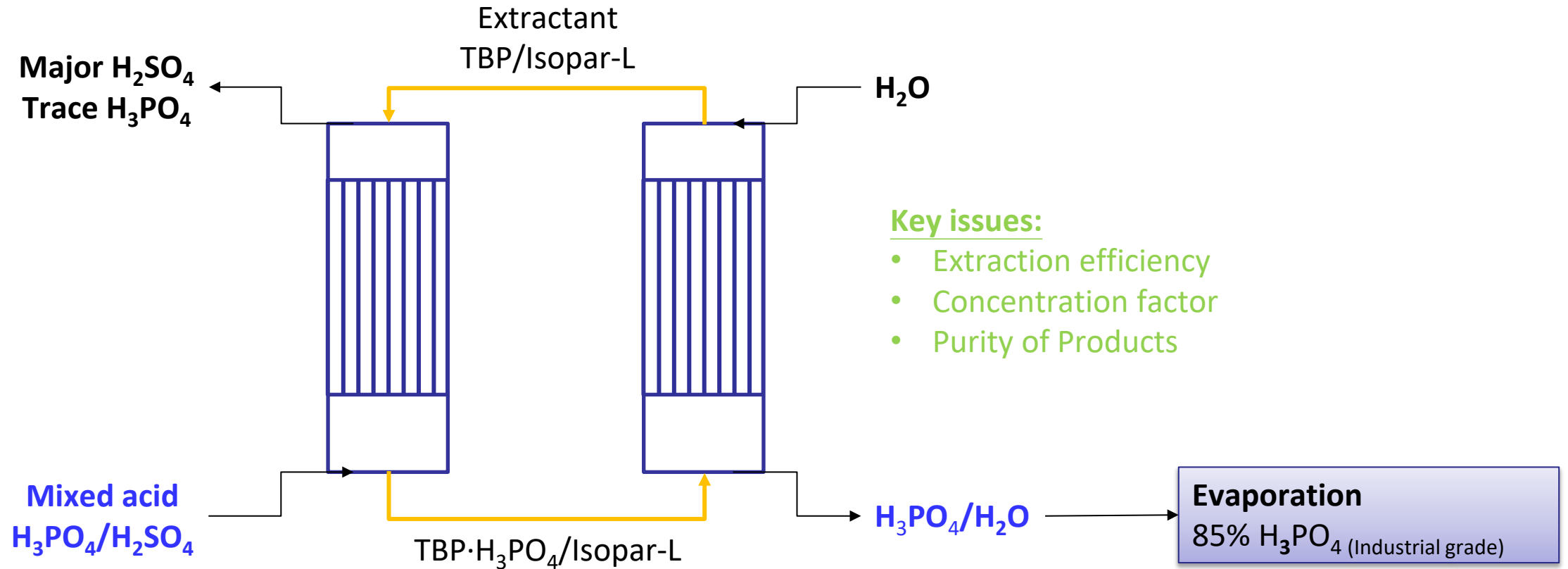


高濃度化學品純化回收應用

指標	支撐液膜 (SLM)	擴散滲析 (DD)	樹脂阻酸 (AR)	冷凍結晶 (FC)
分離選擇性	高	中等	中高	極高
高濃酸耐化性	挑戰	中等	良好	良好
能耗 藥劑成本	低 溶劑/水	極低 水	極低 水	較高 0-15°C
技術成熟度	實驗室階段 (TRL 3-4)	工業成熟 (TRL 8-9)	工業成熟 (TRL 8-9)	工業成熟 (TRL 8-9)
產物磷酸純度	中等	中等	工業級	電子級/藥用級
產物磷酸濃度 (相較廢酸)	維持不變	透析側下降(30%)	洗脫側下降(10%)	濃縮

Separation Mixed $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{H}_2\text{SO}_4$

Support Liquid Membrane





**THANKS
FOR LISTENING**

產業廢液資源化與水藥自給之應用
黃馨儀
SY@itri.org.tw