

整合薄膜再生水技術

梁德明

工研院材化所水科技組

2022/07/26

薄膜程序應用

Size, μm	Ionic	Molecular	Macromolecular	Microparticle	Macroparticle		
	0.001	0.01	0.1	1.0	10	100	1,000
Approximate Molecular Weight	100 200 1,000	10,000 20,000	100,000 500,000				
Relative Sizes of Materials in Water	Metal ions Aqueous Salts	Viruses Humic Acids	Clays	Bacteria Algae Cysts Silt			Sand
Separation Process	ED and EDR RO	Nanofiltration	Ultrafiltration	Microfiltration	Conventional Filtration Processes		

Metal Ions
Antimony
Arsenic
Nitrate
Nitrite
Cyanide

Aqueous Salts
Sodium Salts
Sulfate Salts
Manganese Salts
Aluminum Salts

Viruses
Infectious
Hepatitis

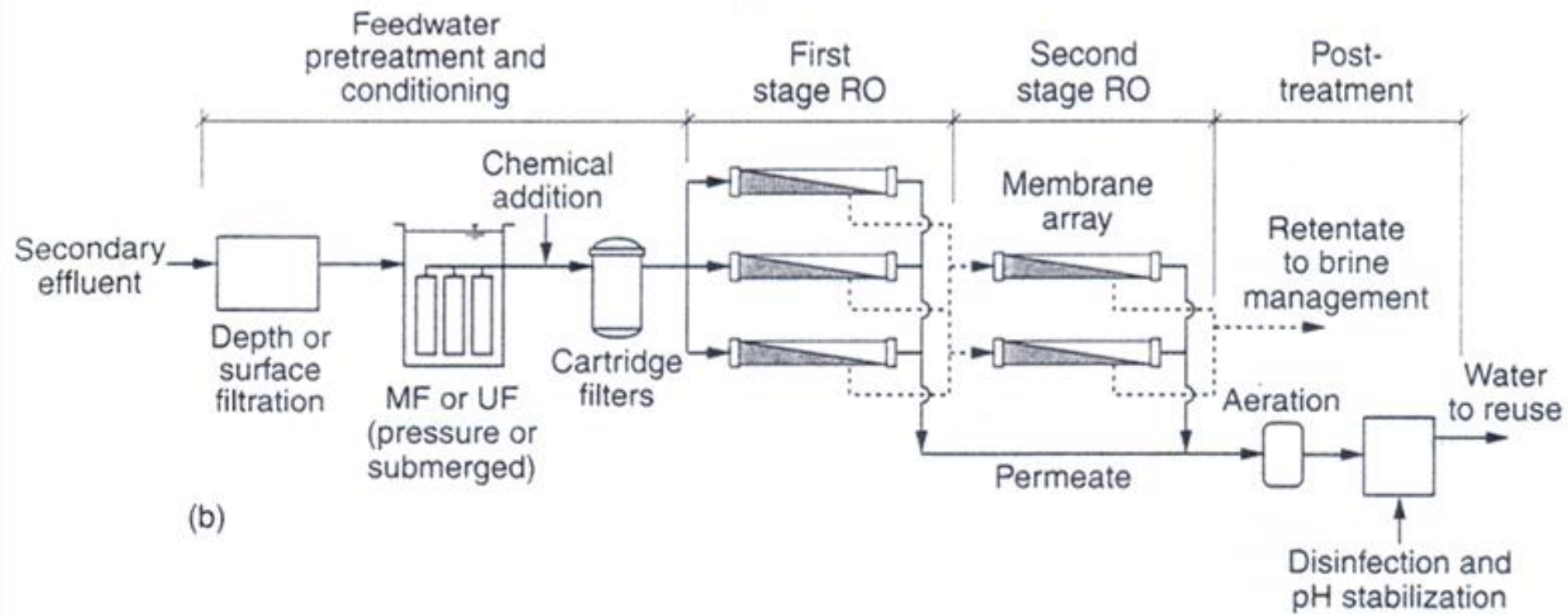
Humic Acids
Trihalomethane
Precursors

Bacteria
Salmonella
Shigella
Vibrio cholerae

Cysts
Protozoa
Giardia
Cryptosporidium

(AWWA, 1995)

水再生回收程序



切割研磨廢水



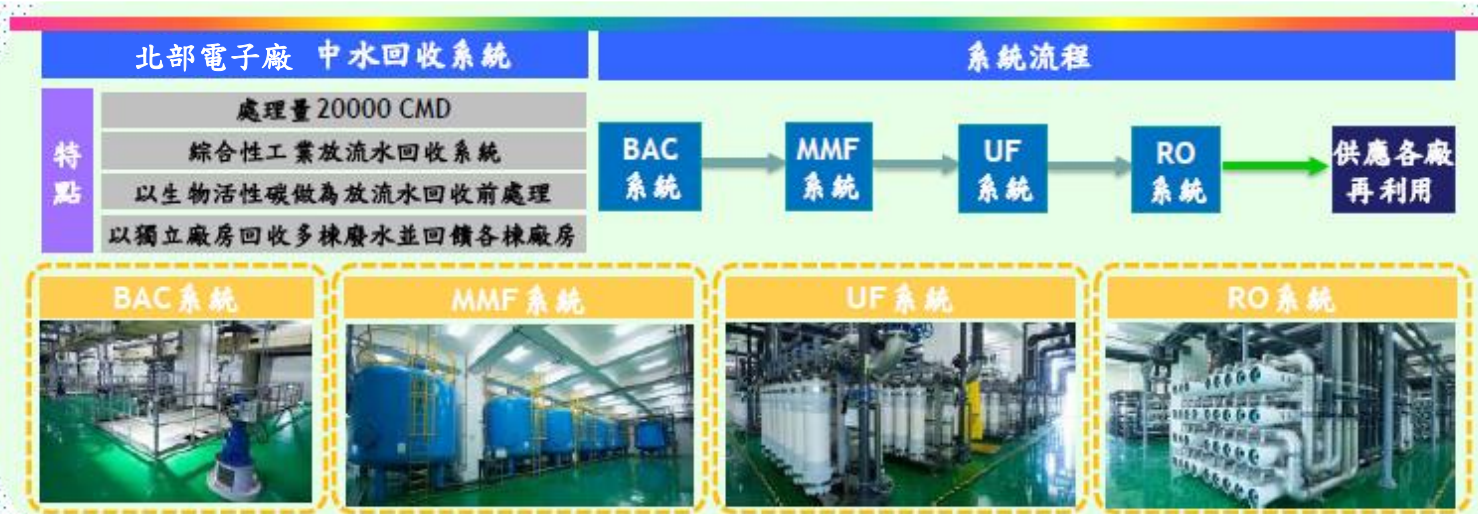
進水及產水水質比較：

	UF進水	UF產水	RO產水
TOC	< 5 mg/l	< 1 mg/l	< 0.5 mg/l
SiO ₂	30~70 mg/l	< 15 mg/l	< 0.5 mg/l
S.S.	150~900 mg/l	< 1 mg/l	< 1 mg/l
濁度	1000~5000 NTU	< 1 NTU	< 0.3 NTU

平均運轉成本：6~10 NT\$/ M³

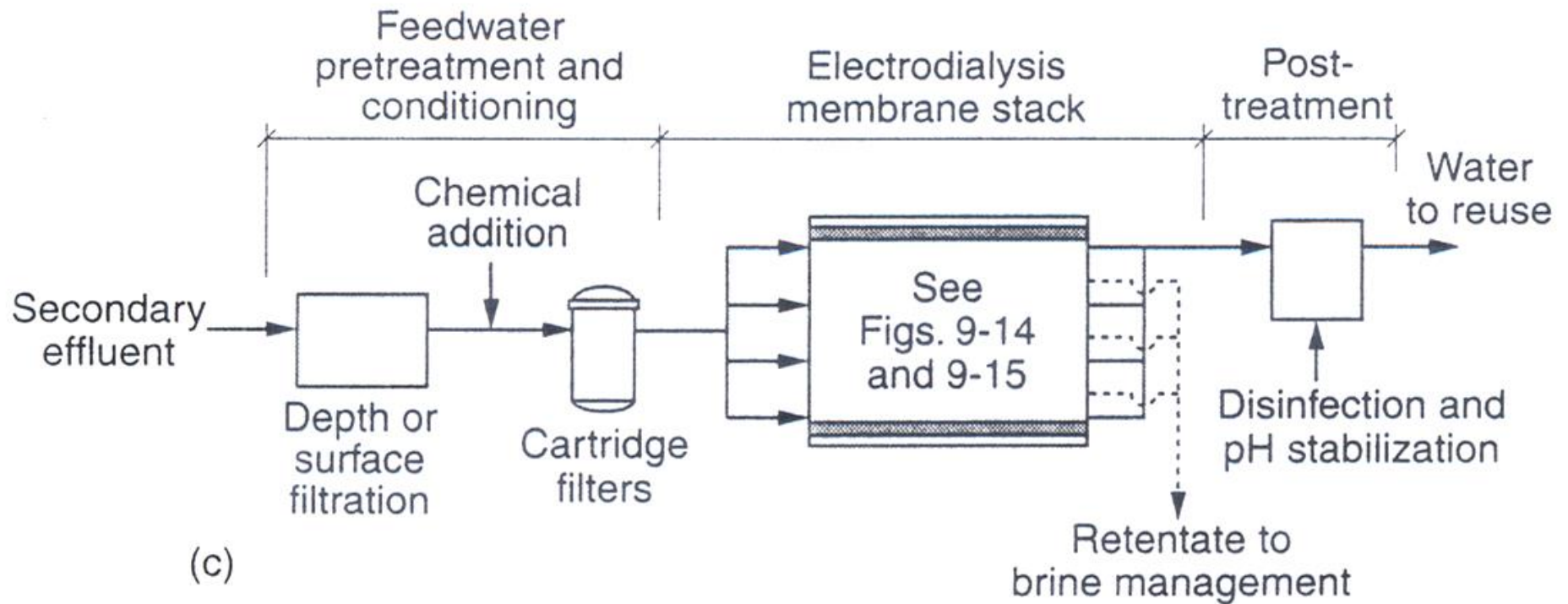


UF-RO 工業廢水再生案例



- ◆ 系統回收率：70%。
- ◆ 平均進流水質：pH=7~8、Cond.=800~1100 us/cm、TOC=8~15 ppm。
- ◆ 平均RO產水水質：Cond.<5 us/cm、TOC<0.05 ppm。
- ◆ 放流水水質：pH=7~8、SS<5ppm、Cu<0.5 ppm、Ni<0.2 ppm，各項水質皆符合陸放水標準。

水再生回收程序



廢水再生

EDR取代RO技術用於廢水再生脫鹽,大幅降低結垢與藥劑清洗成本

工業廢水
生活污水

脫鹽再生



- 工業製程用水
- 冷卻水

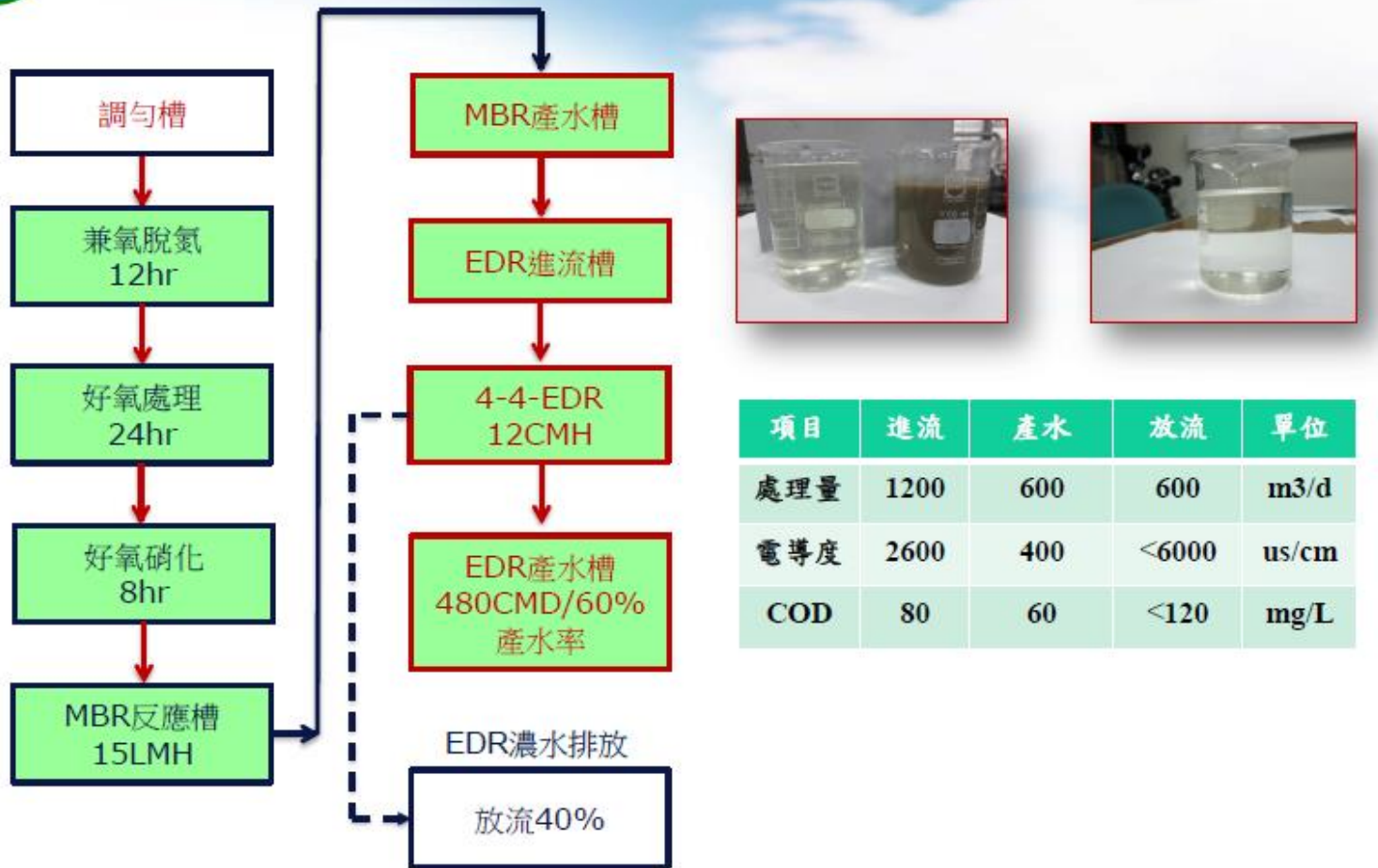


地下水利用脫鹽回收做為沖洗水 (50 m ³ /day)	RO濃縮水回收至工業水槽 (電子廠, 300 m ³ /day)	螺絲製造廢水回收做為清洗水 (450 m ³ /day)	PCB廠製程清洗廢水回收做為冷卻水塔補充水 (1200 m ³ /day)	含氟廢水回收做為洗滌塔補充水 (1200 m ³ /day)	高導電度河川水回收做為製程用水 (2400 m ³ /day)	RO濃縮水利用脫鹽回收再利用 (食品業, 300 m ³ /day)
---	---	---	--	---	--	---



電子廠冷卻水以脫鹽回收 (虎生電子公司, 550 m ³ /day)	精密螺絲製造業廢水回收再利用 (日東公司, 350 m ³ /day)	熱軋單元直接排放冷卻水回收再利用 (中鋼公司, 550 m ³ /day)	化工廠廢水以回收做為冷卻水塔補充水 (800 m ³ /day)	鍍鋅製程廢水以回收做為清洗水 (中鋼公司, 700 m ³ /day)	尼龍纖維製造廠廢水脫鹽回收做為冷卻水塔補充水 (800 m ³ /day)
---	--	--	---	--	--

MBR+EDR

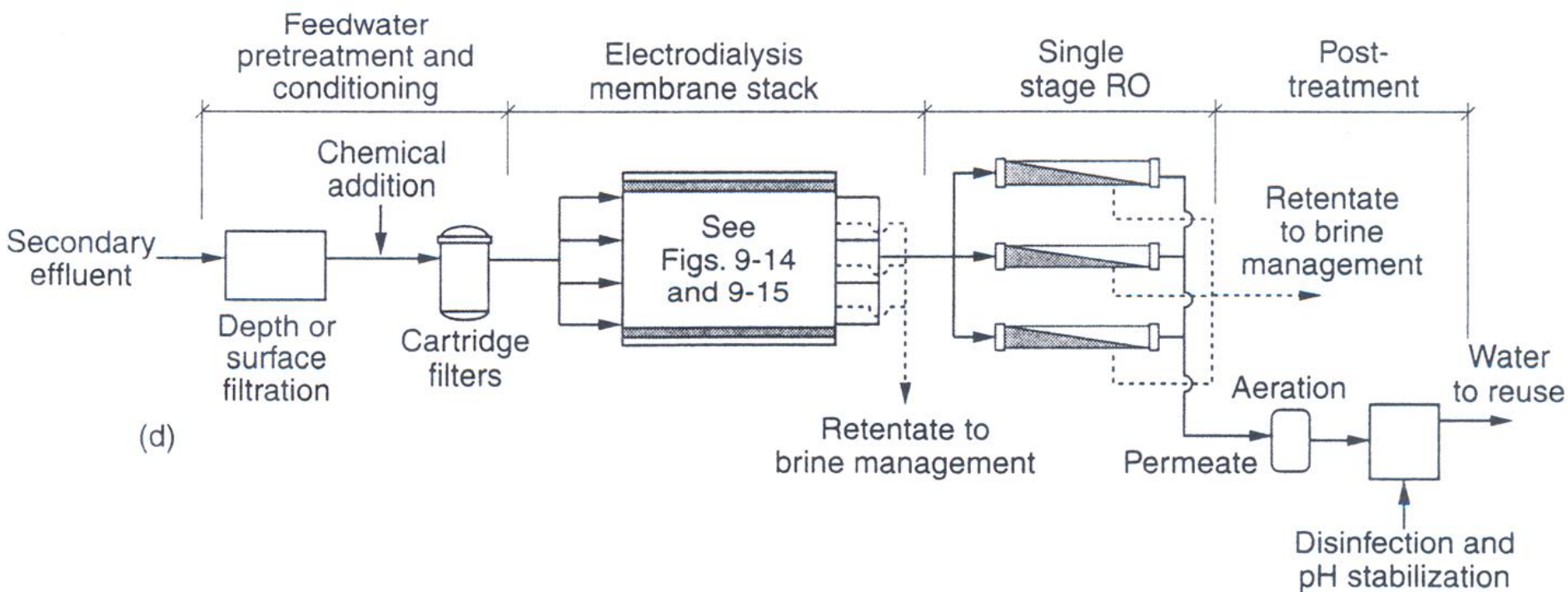


項目	進流	產水	放流	單位
處理量	1200	600	600	m ³ /d
電導度	2600	400	<6000	us/cm
COD	80	60	<120	mg/L

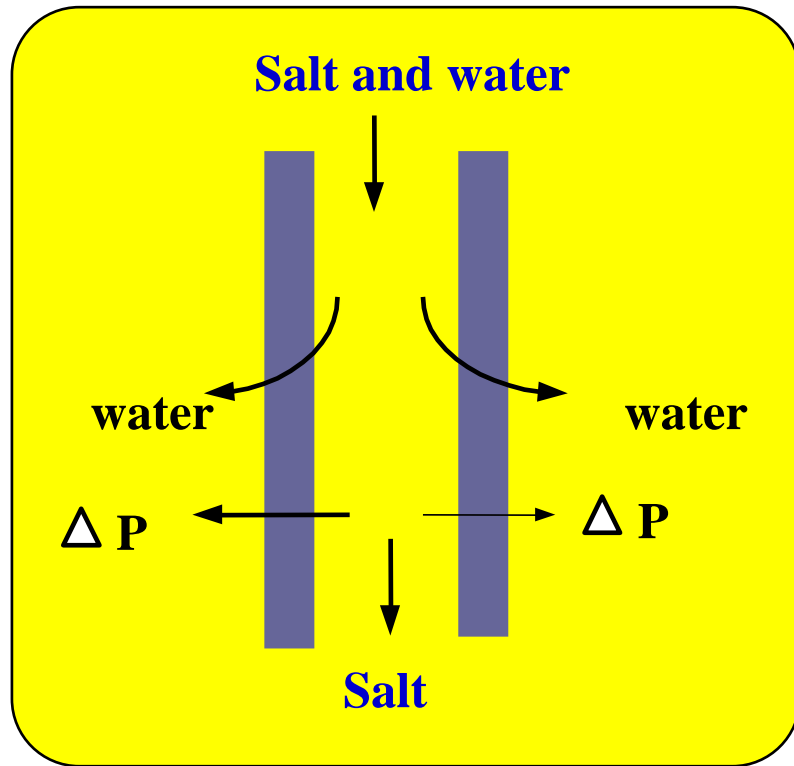
MBR+EDR



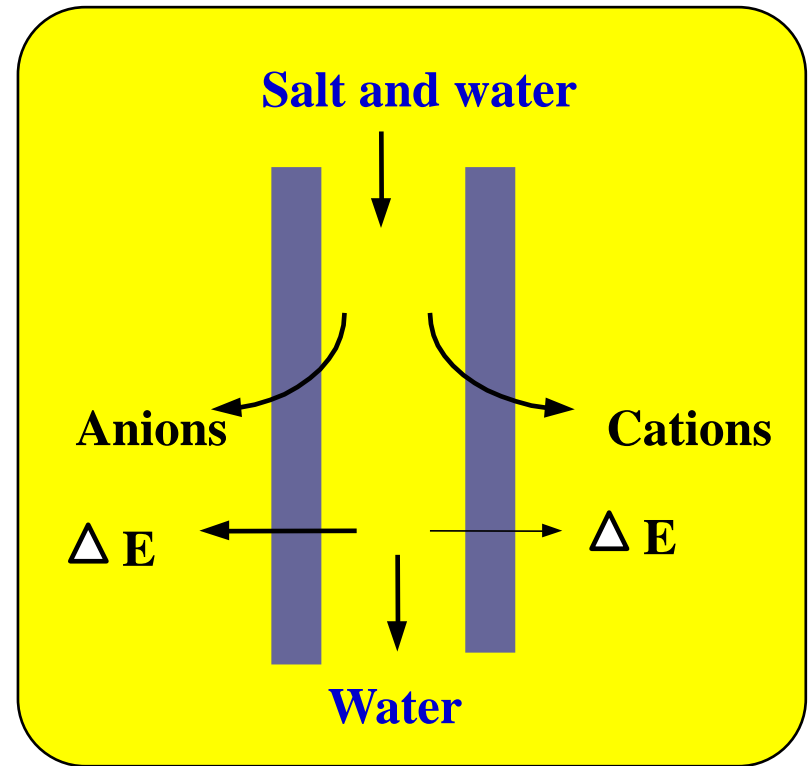
水再生回收程序



逆滲透與電透析分離機制



Reverse Osmosis



Electrodialysis

操作壓力

List of Applied Pressure for Typical Membrane Filtration Processes

Membrane processes	Pressure (atm)
RO – Seawater	54.4–68.0
RO – Waste and process	20.4–40.8
RO – Water purification	13.6–23.8
RO – Undersink (home)	3.4
NF	6.8–13.6
UF	1.7–10.2
MF (crossflow)	0.7–1.7

ED、RO與NF 進水建議水質比較

TABLE Feedwater Turbidity and SDI Limits Recommended by Manufacturers for RO, NF, and ED/EDR Systems

	RO and NF		ED/EDR
	Spiral wound	Hollow fiber	
Maximum turbidity, ntu	1*	—	2 to 3
Maximum SDI (15 min)	3 to 5	3 to 4	—
Maximum SDI (5 min)	—	—	15

*Recommended turbidity less than 0.2 ntu.

Sources: Spiral-wound RO data based on product literature from Dow-FilmTec, Koch Fluid Systems, Hydranautics, and TriSep. Hollow-fiber RO data based on product literature from the DuPont Company. EDR data based on Ionics, Inc., Bulletin No. 121-E, *EDR—Electrodialysis Reversal*, March 1984.

RO 膜進水水質要求

Table Feed water requirements to minimise fouling

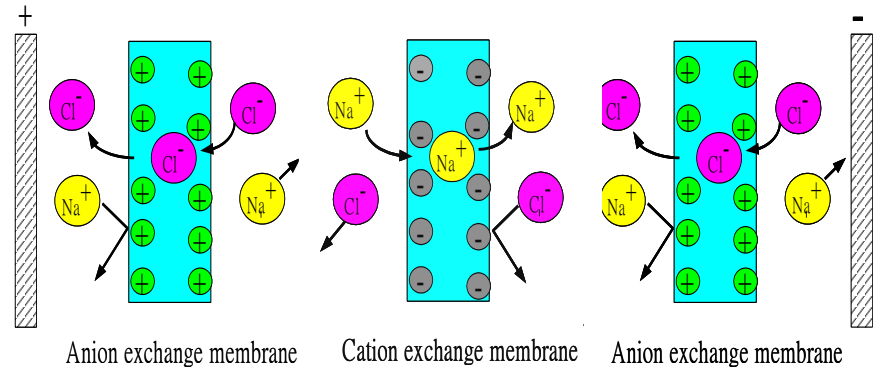
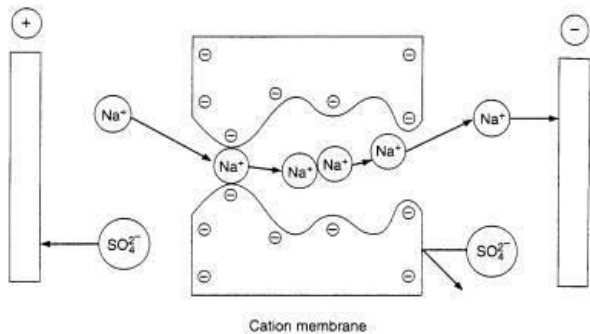
Parameter	Value
SDI ₁₅	≤4
Turbidity	< 1*
Iron**	< 0.05 mg/l
Manganese	< 0.5 mg/l
Hydrogen sulphide	< 0.1 mg/l
Organics (TOC)	< 10 mg/l

* Some membrane manufacturers recommend that turbidity be < 0.2 NTU

** At pH > 7.0 and 5–10 mg/l dissolved oxygen; at lower pH and lower oxygen levels, slightly higher iron levels can be tolerated

分離原理

利用陽離子只能穿透陽離子交換膜，而陰離子只穿透陰離子交換膜的特性，在外加直流電場的作用下，水中的陰離子移向陽極、陽離子移向陰極，最後得到淡水及濃水，達到淡化除鹽的目的



Ionic permselectivity
of ion-exchange
membranes

分離原理

- **電透析(electrodialysis, ED)**

電透析處理技術是利用不同特性的薄膜對水中的離子作分離選擇，水中離子的移動則是靠正負直流電來當吸引的驅動力

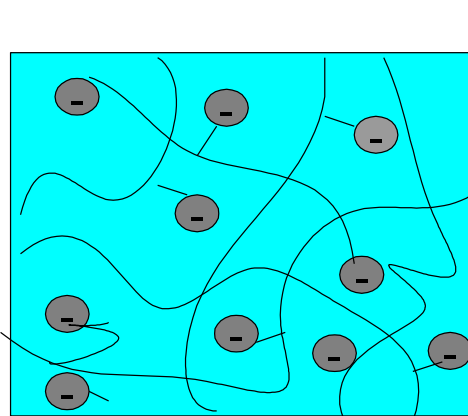
- **倒極式電透析(electrodialysis reversal, EDR)**

倒極式電透析是將電透析處理技術作進一步修正，乃利用直流電正負極和內部導流的切換來延長薄膜使用壽命

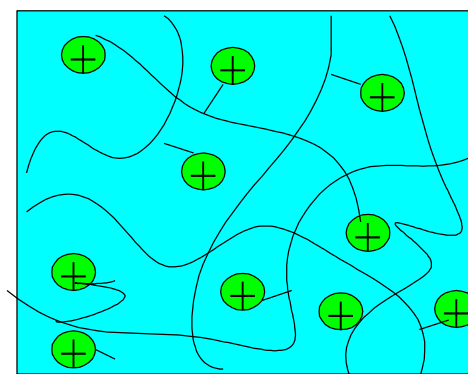
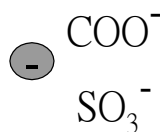
離子交換膜的分類

膜中所含官能基的種類

- (1)陽離子交換膜：含酸性官能基的膜，如強酸性磺酸型。
- (2)陰離子交換膜：含鹼性官能基的膜，如強鹼性季銨型。



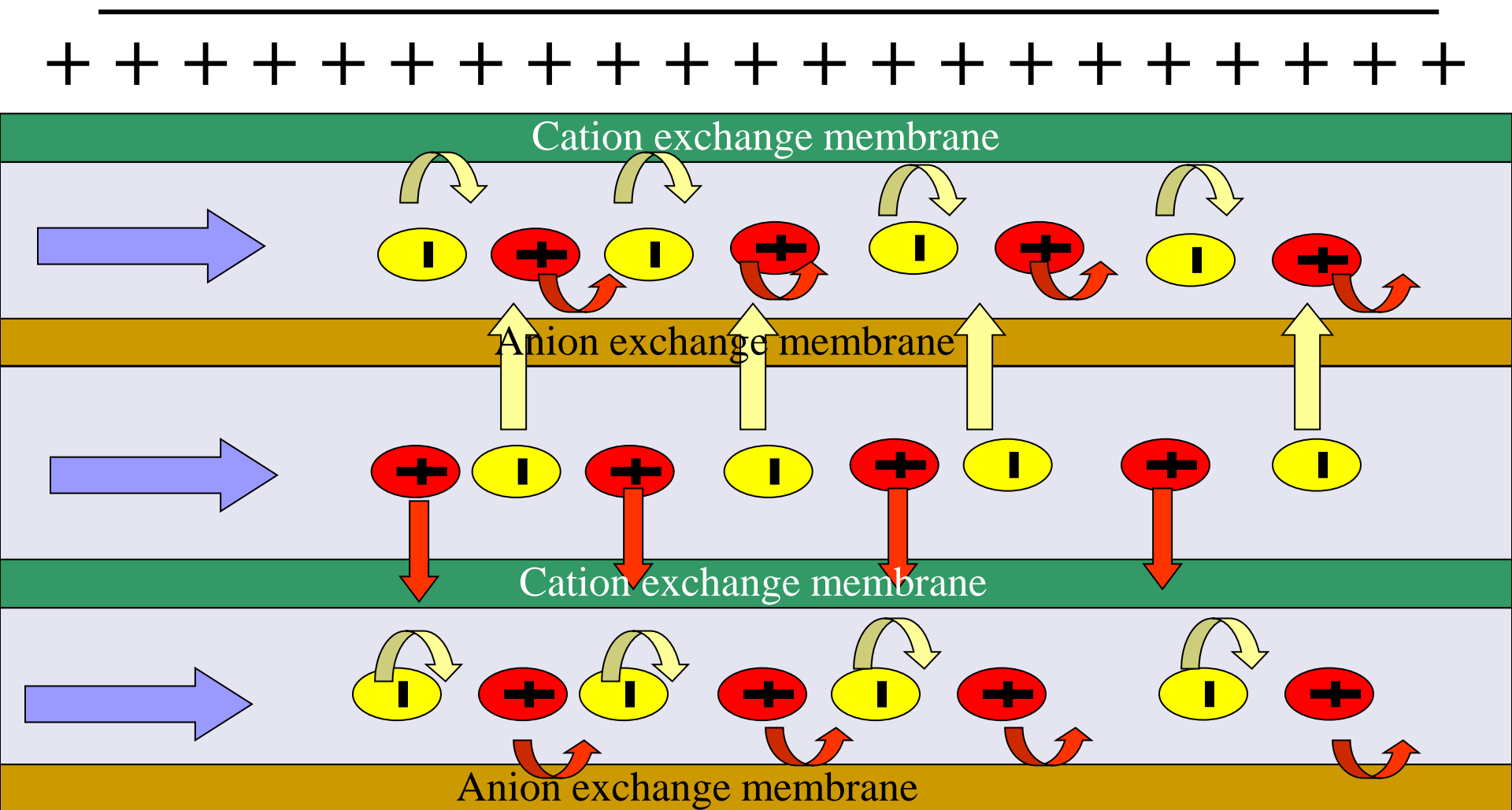
Cation exchange membrane



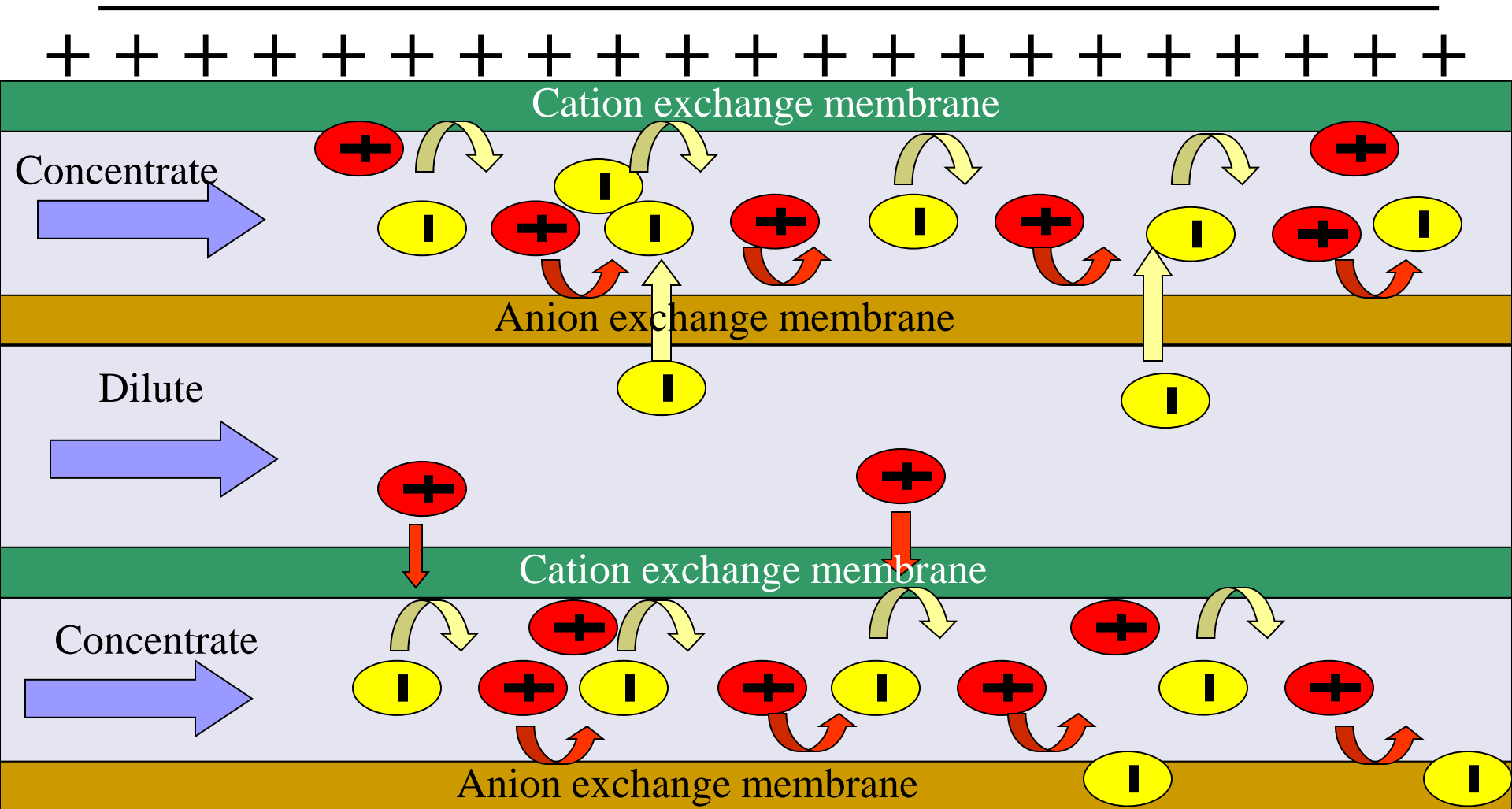
Anion exchange membrane



分離原理



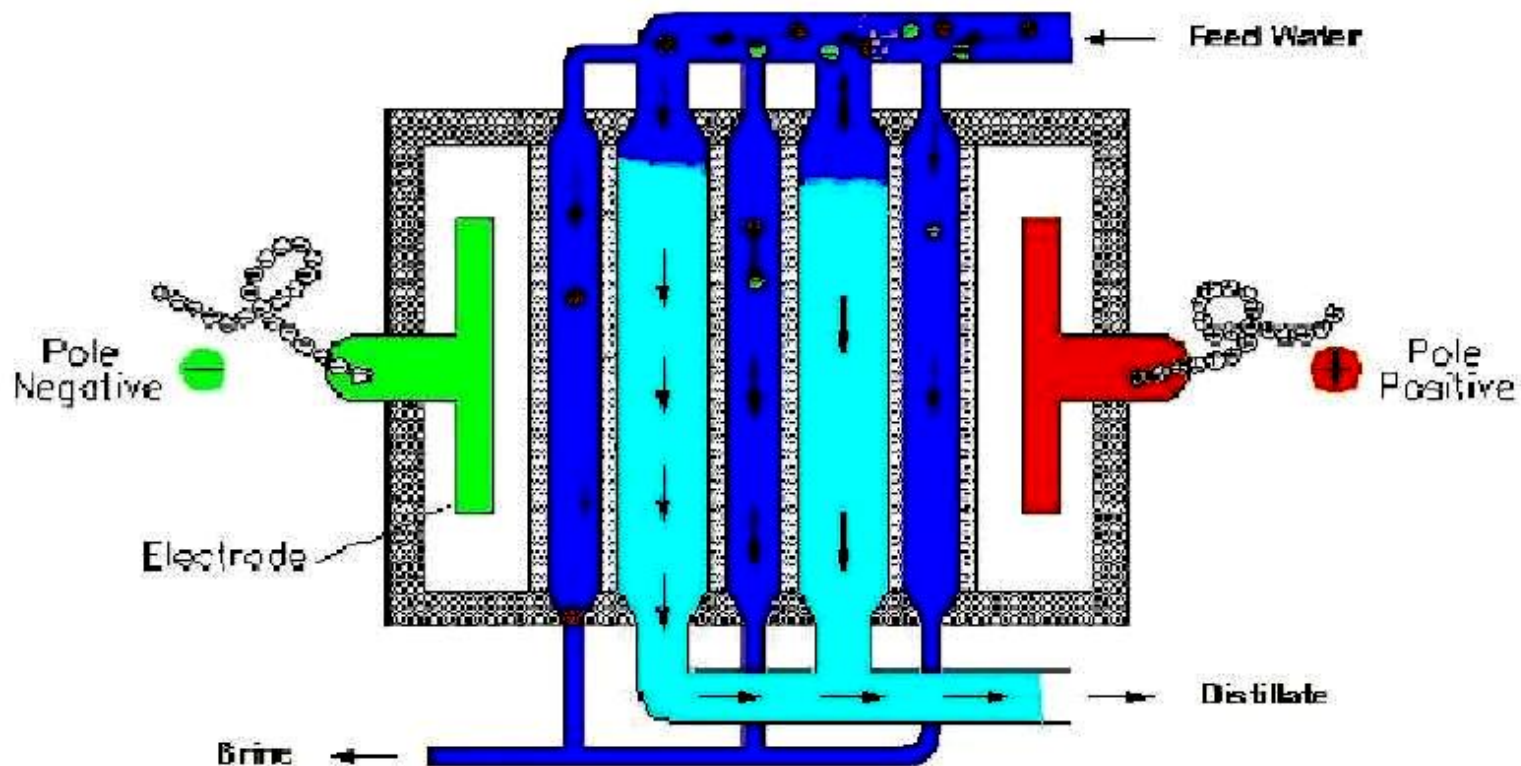
分離原理



電透析

Electrodiaysis ED

Brackish Water $0.7 - 2.5 \text{ kWh/M}^3$



EDR理論

$$A = \frac{ZFQ\Delta C}{i\xi}$$

A：薄膜面積

Z：電荷數

F：法拉第常數

N：膜室數

Q：進料溶液的流速

ΔC ：進料溶液與稀釋液之濃度差

i ：電流密度

ξ ：電流利用率

濃度極化

滯留之成份造成累積現象

離子在溶液中和薄膜中的傳送係數與電流密度有關

$$i_l = \frac{DF\Delta C}{Z\delta(t_M - t_L)}$$

其中， i_l ：極限電流密度

Z ：電荷數

D ：電解質之擴散係數或質傳係數

F ：法拉第常數

ΔC ：電解質在溶液與薄膜間之濃度差

δ ：薄膜一液相間之邊界層厚度

$t_{M, tL}$ ：離子溶質在薄膜及溶液中之傳送數目

EDR理論

極限電流(i_l) 經驗式，與淡水的流速及濃度相關：

$$i_l = k \times C_p^m \times V^n$$

$$C_p = (C_{di} - C_{do}) / \ln(C_{di} / C_{do})$$

K ：水力學常數

C_p ：淡水進出口平均當量濃度(meq/L)

C_{di} , C_{do} ：淡水進口與出口濃度

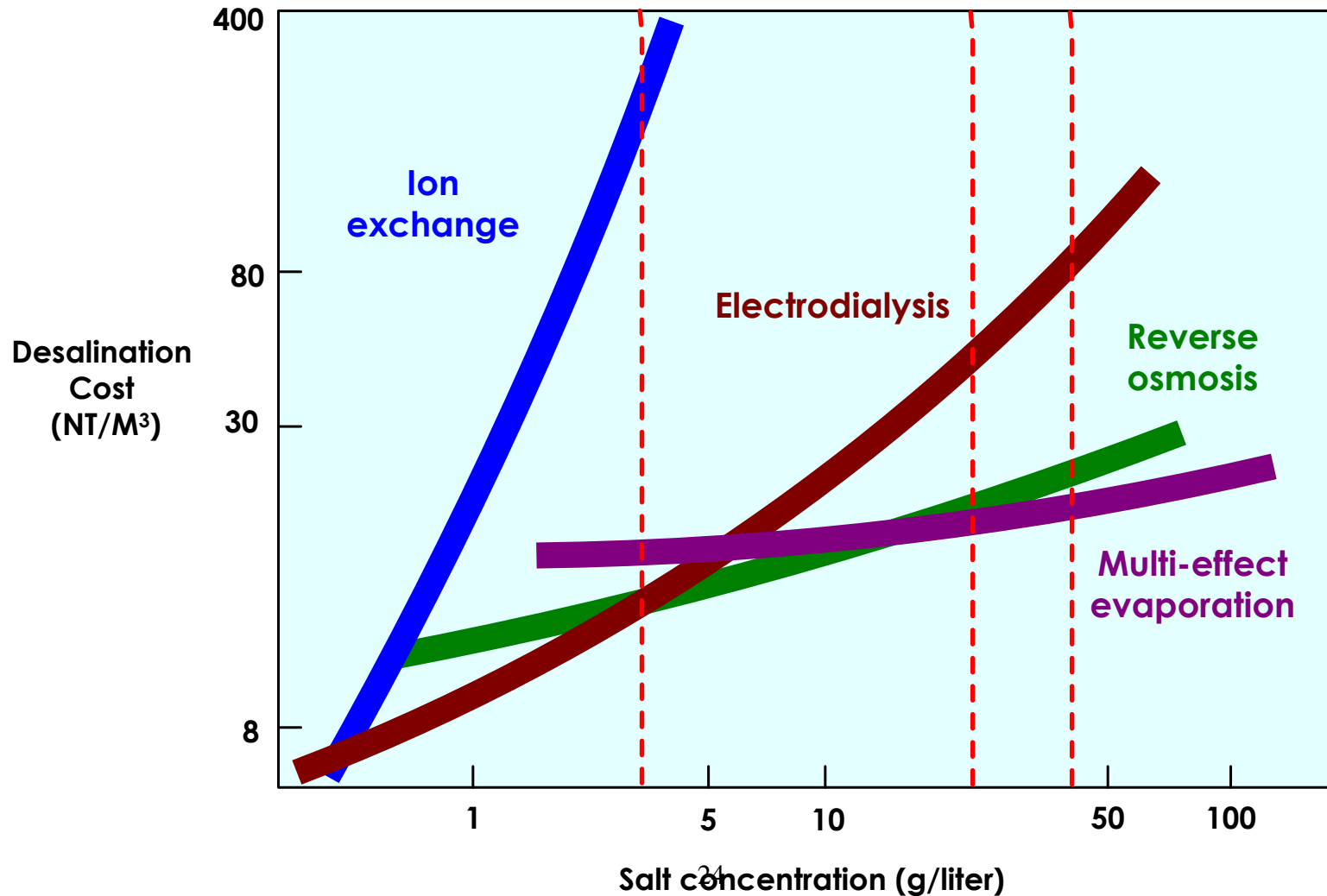
V ：淡水線性流速(cm/s)

n ：流速常數（一般為0.5-0.8）

m ：濃度常數（一般為0.95-1.00）

k , n 需由實驗測定不同線性流速之極限電流密度決定

薄膜技術脫鹽操作成本



比較 RO and EDR特性

	EDR	RO
Conductivity, [S/cm	200~ 8,000	> 1,000
Pretreatment	Sand filter/UF/MF	UF
SDI	< 12	<2
Anti-scaling	Fair/reversal/acid	Poor/acid/chemicals
Anti-biofouling	Fair/NaOCl	Poor/chemicals
SiO ₂ deposition	Poor	High
Cleaning	HCl/NaOH	Specific chemicals
Driving force	electricity	pressure
Turbulence	Cross flow	-
Recovery	70~90 %	~60%
Desalination ratio	high	high

薄膜污堵的問題

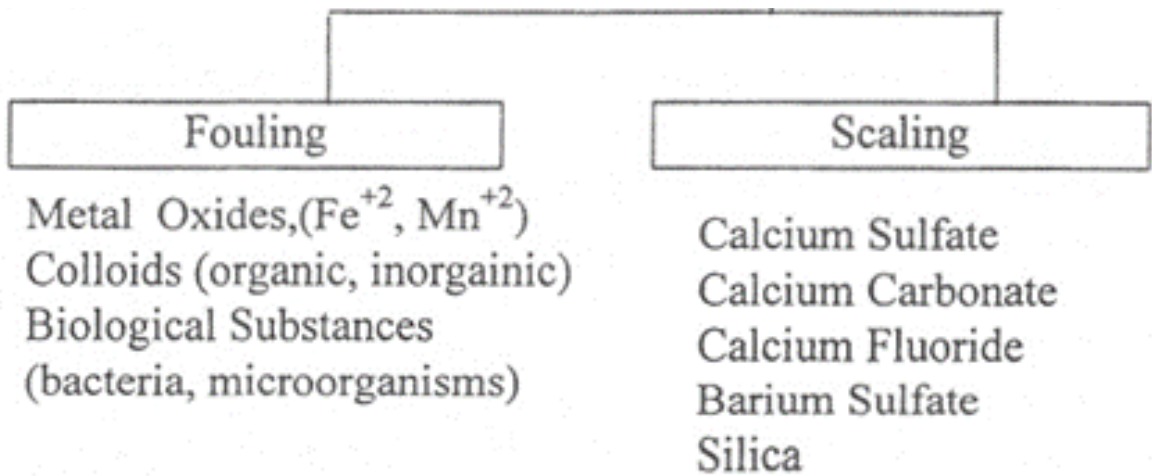


Figure 3.18 Scale delimiting a dry tubercle from a steel pipe surface.



Figure 3.19 Small, hard tubercles on an essential service water system pipe in a nuclear reactor.

常見水中化合物的溶解度積

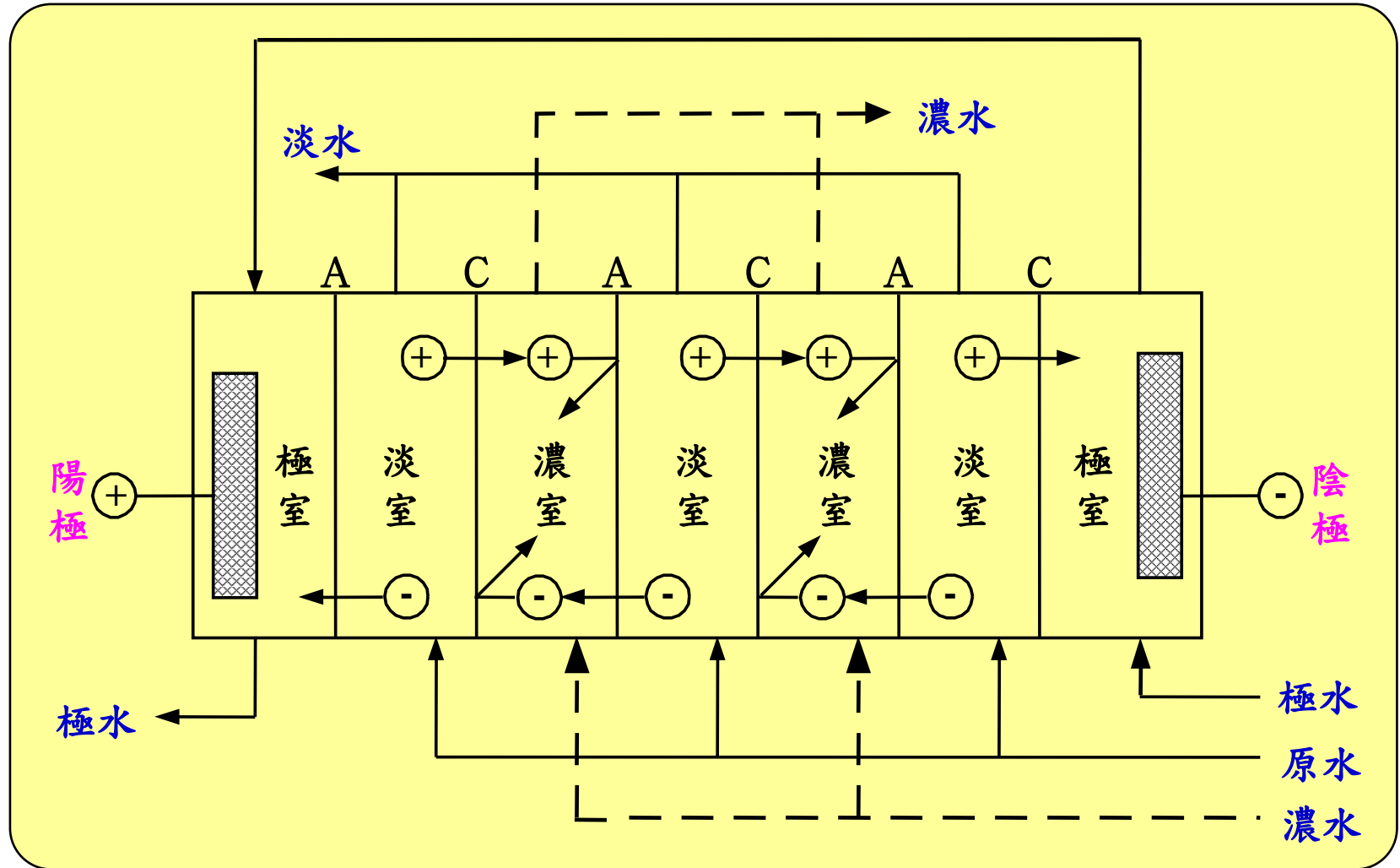
Table 17-3

Typical limiting salts and their solubility products

Salt	Equation	Solubility Product ^a (pK _{sp} at 25°C)
Calcium carbonate (aragonite)	$\text{CaCO}_3(\text{s}) \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	8.2
Calcium fluoride	$\text{CaF}_2(\text{s}) \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2\text{F}^-$	10.3
Calcium orthophosphate	$\text{CaHPO}_4(\text{s}) \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{HPO}_4^{2-}$	6.6
Calcium sulfate (gypsum)	$\text{CaSO}_4(\text{s}) \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$	4.6
Strontium sulfate	$\text{SrSO}_4(\text{s}) \rightleftharpoons \text{Sr}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$	6.2
Barium sulfate	$\text{BaSO}_4(\text{s}) \rightleftharpoons \text{Ba}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$	9.7
Silica, amorphous	$\text{SiO}_2(\text{s}) + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Si}(\text{OH})_4(\text{aq})$	2.7

^a From Stumm and Morgan (1981).

電透析模組示意



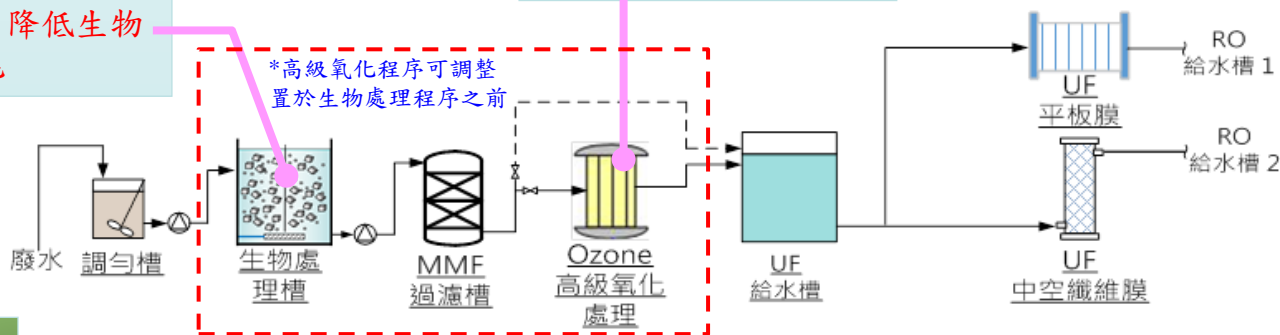
A：陰離子交換膜

C：陽離子交換膜

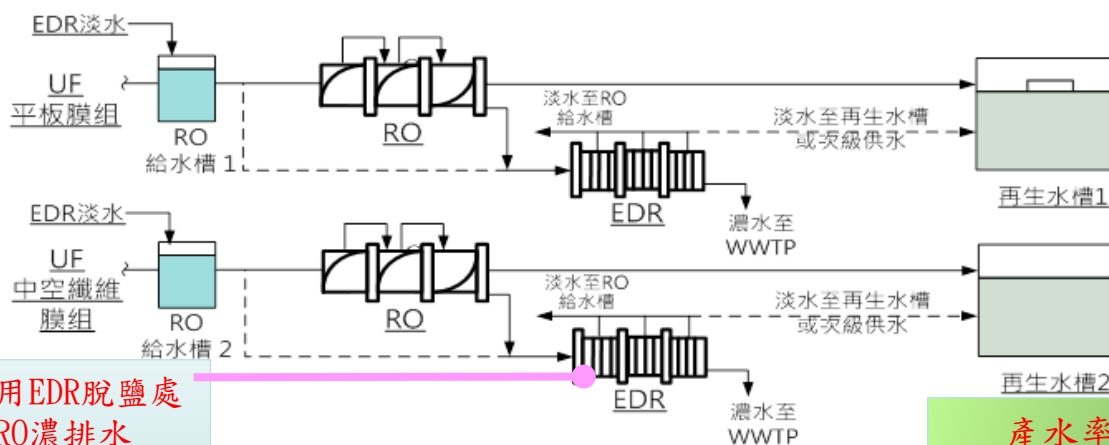
工業區放流水再生

1. 採用高級生物系統
去除生物難分解有機物
2. 去除氨氮
3. 採用節能與電力優化設計，降低生物系統能耗

1. 採用高級氧化AOP處理流程，去除難分解有機物
2. 降低產水TOC



處理量: 200 CMD



1. 採用EDR脫鹽處理RO濃排水
2. 降低操作費用
3. 提升水回收率

產水率 > 70%
產水量約 140 CMD

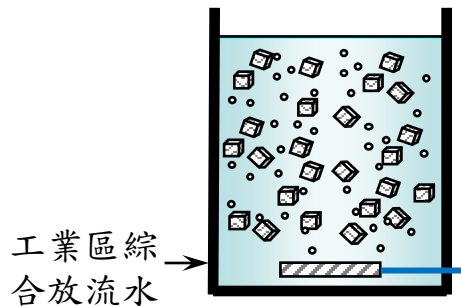
AOP: 高級氧化程序 (Advanced Oxidation Process)

UF: 超濾過濾技術 (Ultra filtration) EDR: 倒極式電透析 (Electrodialysis reversal)



創新技術研發-前處理流程

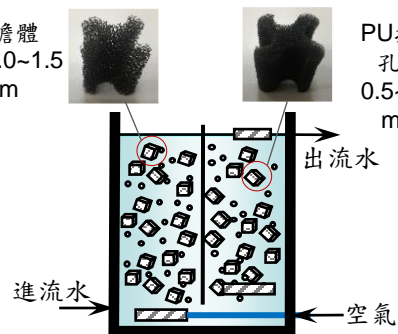
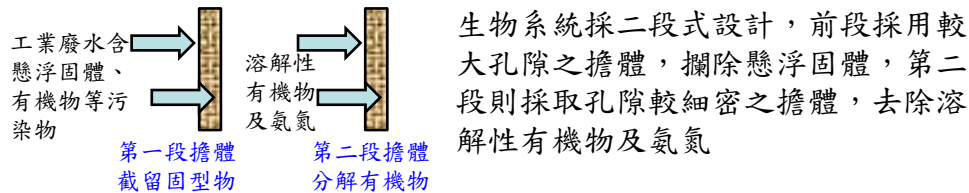
創新點-多功能生物處理系統



問題點:

工業區綜合放流水水質複雜，含懸浮固體與多類有機物，生物系統負荷大，易阻塞

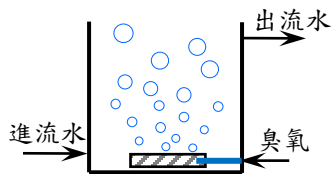
創新想法：



增加生物系統穩定度

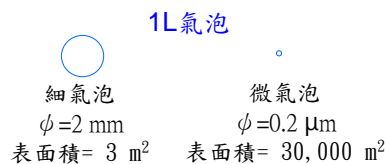
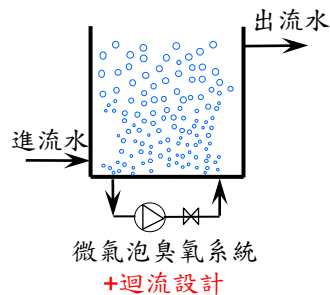
- 降低反沖洗downtime 30%
- 曝氣量減少20%
- 提昇污染物去除量10%

創新點-微氣泡臭氧氧化技術



問題點:

1. 廢水中有機物增加薄膜結垢風險
2. 一般臭氧曝氣產生細氣泡以1~3 mm居多
3. 臭氧溶解率低，濃度不易提升
4. TOC去除率低，影響產水水質



表面積增加10,000倍

創新想法：

研發廢水AOP處理微氣泡系統，增加臭氧溶解率，配合迴流設計增加臭氧停留時間

增加AOP前處理效能

- 去除20~50% TOC
- 有機物大分子→小分子
- 殺菌、脫色

創新技術研發-處理流程

提高回收率



目前瓶頸：

- 業界常用UF+RO雙膜法，回收率約在50%左右
- 回收率低造成單位產水成本高，影響水回收投資意願

作法

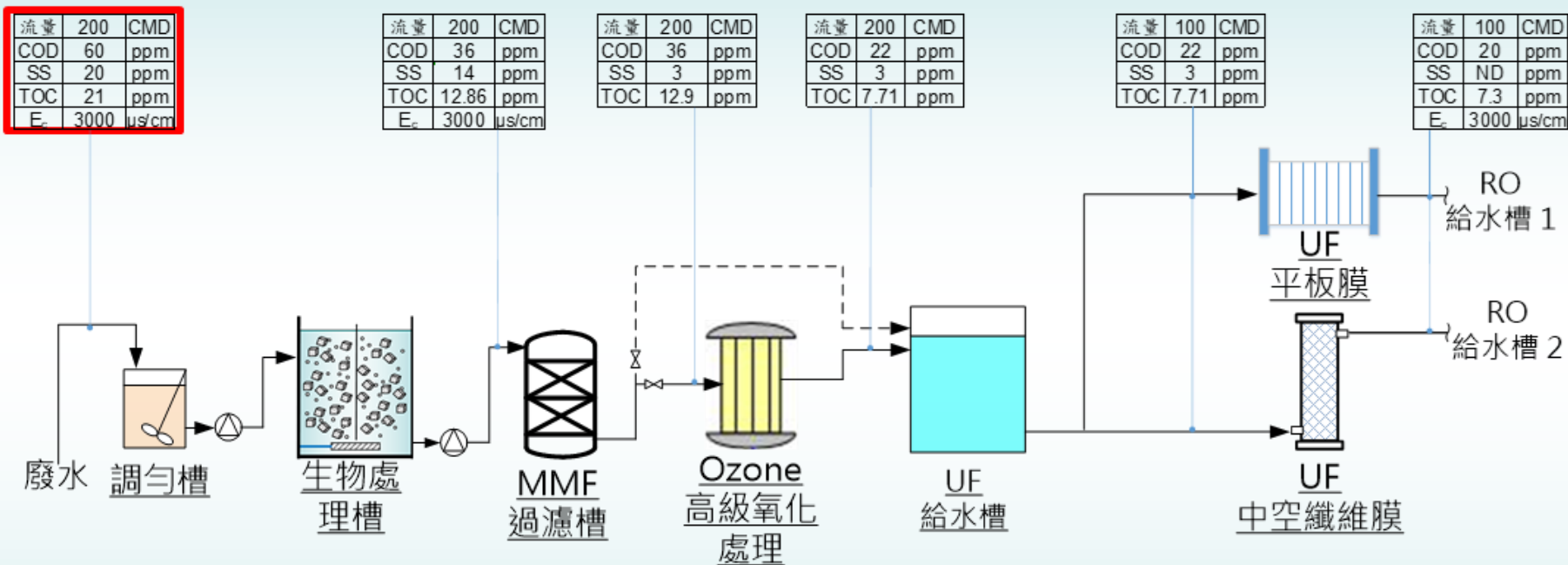
創新想法：

- 藉由電透析（EDR）回收RO濃排水，以提升整體水回收系統回收率

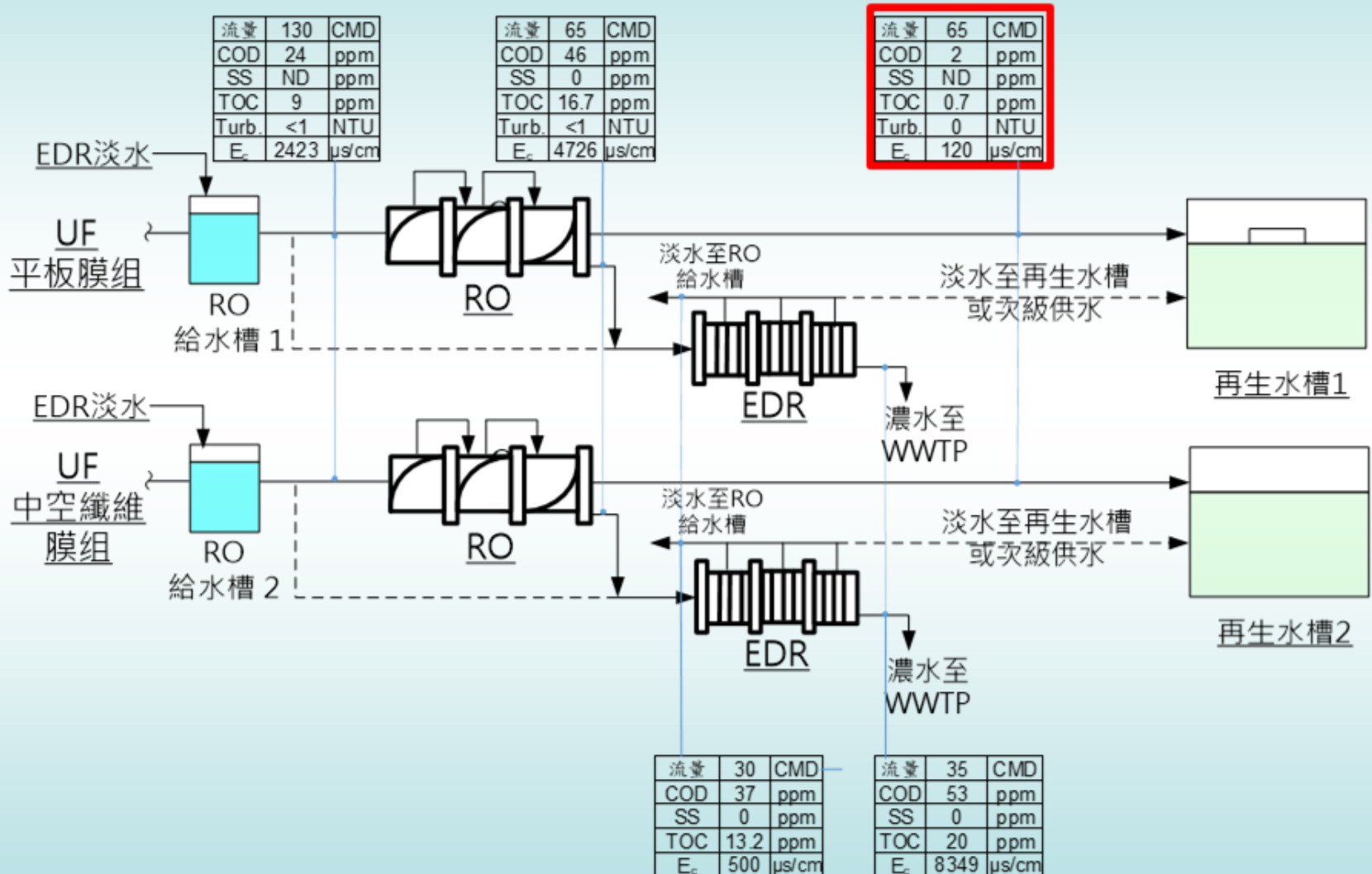


- 水回收率 $\geq 70\%$ 以上
- 單位產水成本 減少 20%~30%

RO_EDR 產出水質水量



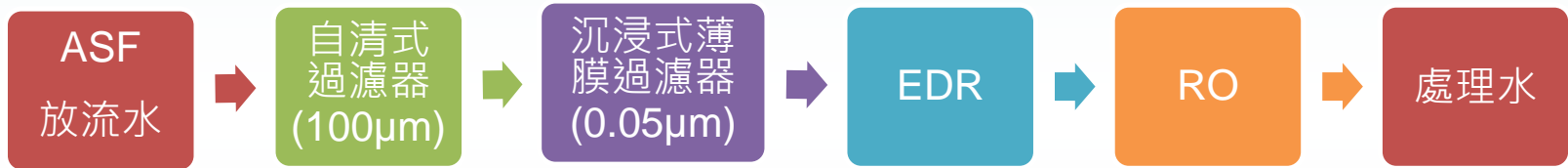
RO_EDR 產出水質水量



奇美實業建立全台首座最大EDR再生水系統

3000 CMD EDR水回收系統，避免因缺水造成產線停工風險

- 放流水含高鈣與硫酸根離子，易形成結垢物，無法直接以RO進行水回收。故規劃設計倒極式電透析脫鹽系統(ElectroDialysis Reversal, EDR)達成水回收之目標。
- 3000 CMD回收水可做為冷卻水塔補水，減少自來水使用量，藉此可提升奇美綠色企業形象。



ASF單元



SMF單元



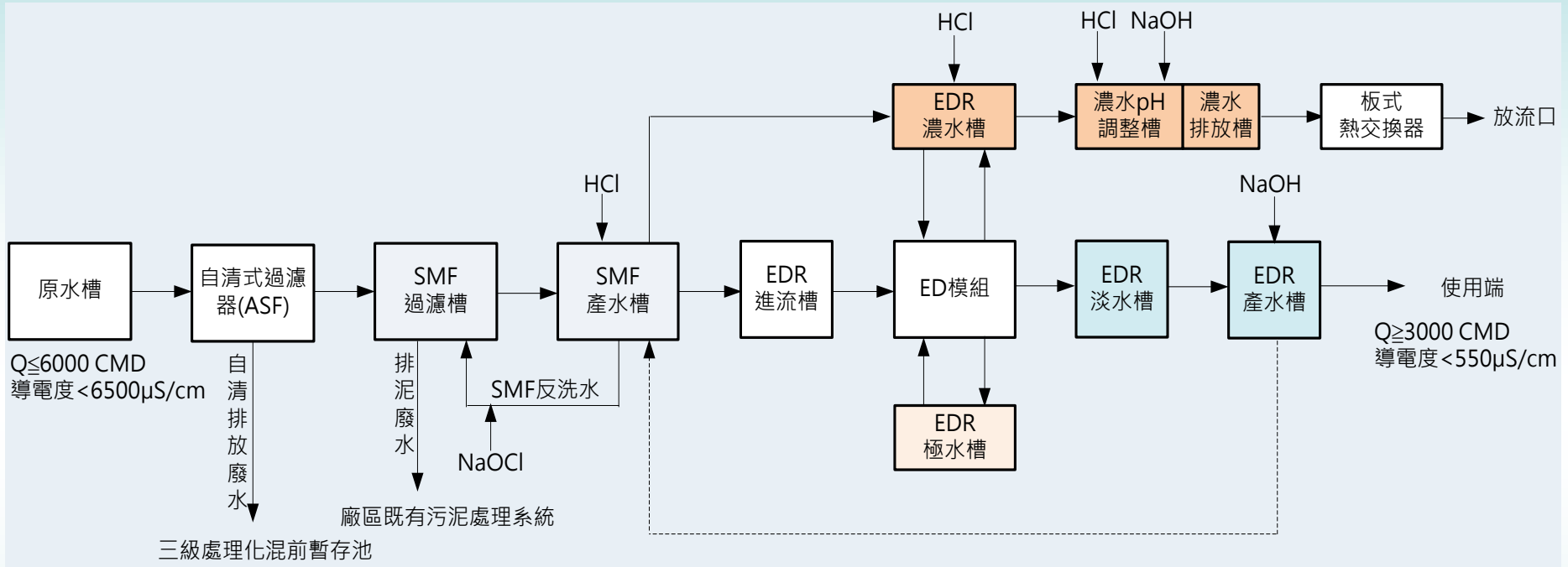
EDR單元



RO單元

EDR模組設備照片
(共14條線，56座模組)

EDR再生水系統



EDR系統建置

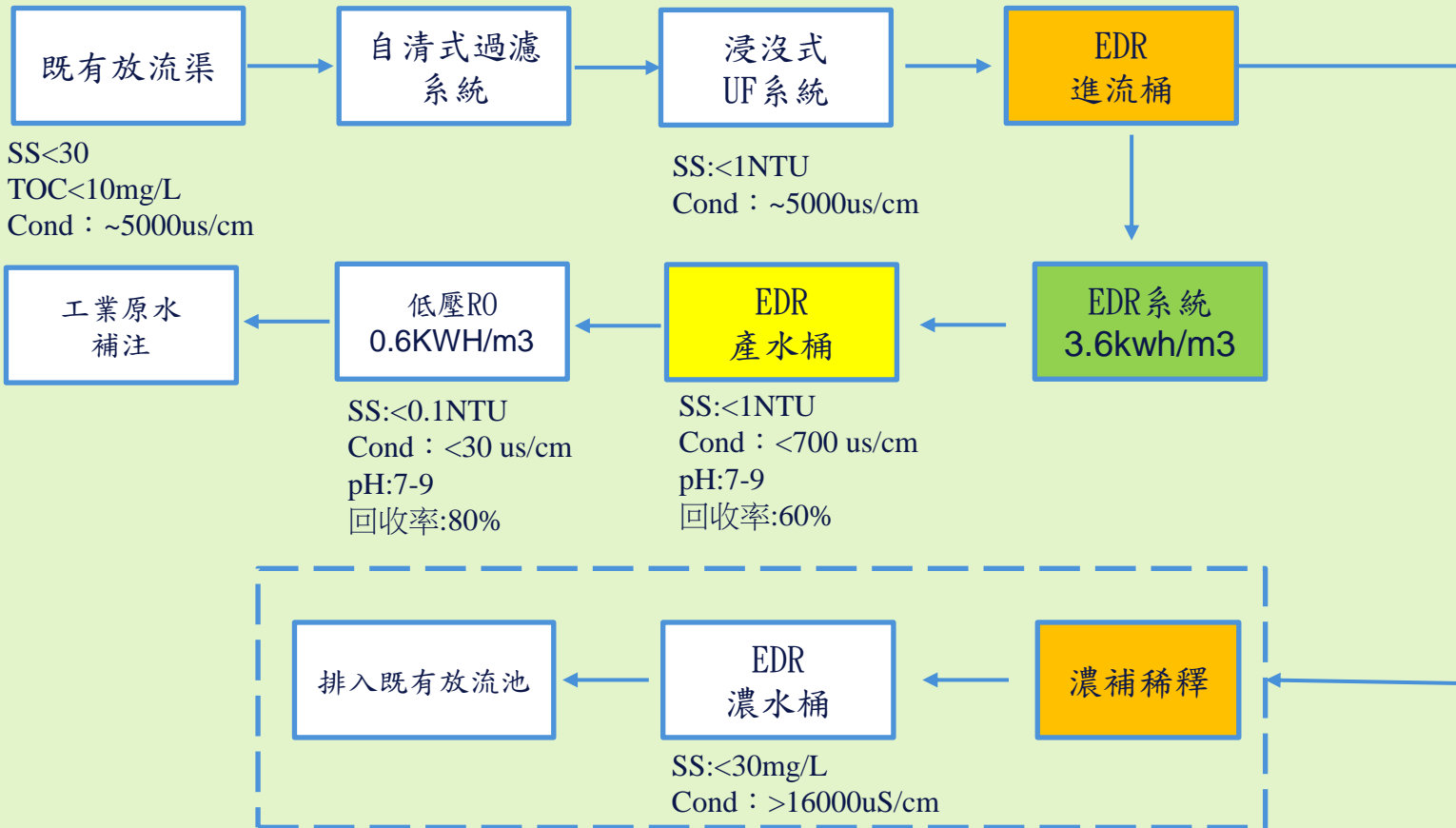


EDR水資源中心建築物外觀



EDR模組設備照片
(共14條線，56座模組)





奇美EDR水資中心啟用

「奇美EDR水資源中心」於2020年完成主體建築與系統最佳化調校，已全面穩定運作，每天產出3000噸再生水導入製程使用。雖然今年遭遇56年來大旱，生產線依然全量運轉。操作成本約17元/m³，能耗3.7 kWh/m³。



奇美EDR水資源中心介紹

工研院水科技發展

無機鹽類分離技術

(Purification, Separation, Reclamation, ZLD)

水處理技術
(COD, F, NH₃, NO₃⁻...)

- BioNET®
- UASB
- AFB
- FBC
- Fenton Family

污泥處理技術

- USHS
- Anaerobic Digestion

脫鹽/提濃

- NF
- EDR
- CDI
- MD
- FO

資源回收系統

- R2A



脫鹽及資源回收技術開發



智能水處理技術開發
(Smart iWater SRP)