

工業技術研究院

Industrial Technology
Research Institute

經濟部園區管理局之節水技術教育訓練

水質軟化流體化床結晶（FBC）技術

工業技術研究院 材化所水科技組

講 師：李 茂 松

2026 年 9 月 10 日



背 景

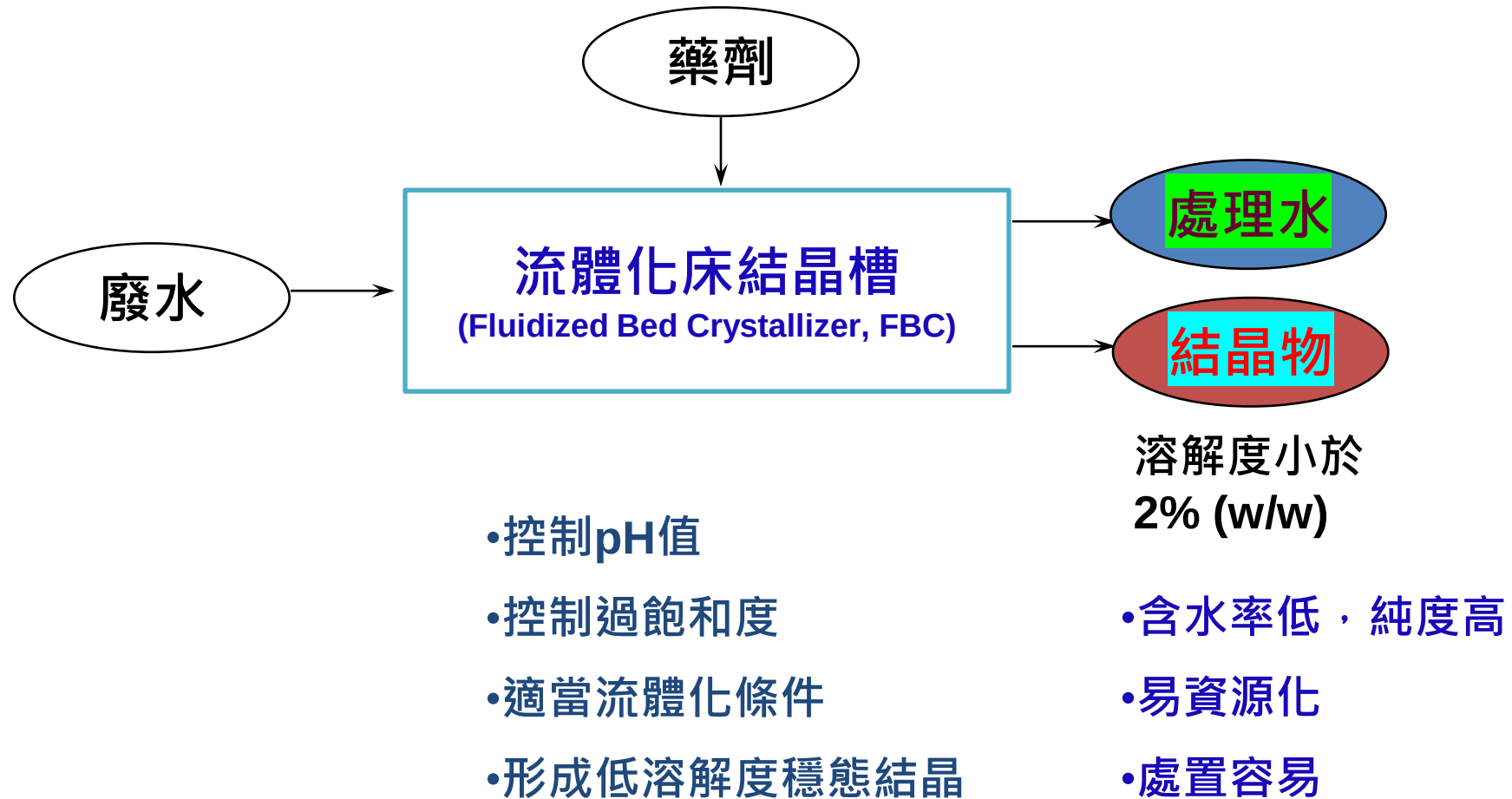
- 硬水中鈣和鎂離子，容易導致水垢的生成，進而降低水管效能，增加維護成本。
- 硬水問題一直是影響自來水用戶滿意度的一個重要因素，去除硬度將有效提升適飲性口感。
- 提高晶體純度之軟化技術，可有效去除水中硬度，將鈣離子轉化為有用的碳酸鈣資源，實現循環經濟的理念。
- 降低冷卻水塔用水或循環水的硬度、二氧化矽和比導電度，有效提升冷卻水塔濃縮倍率將可達到節水功效。

去除水中硬度之技術

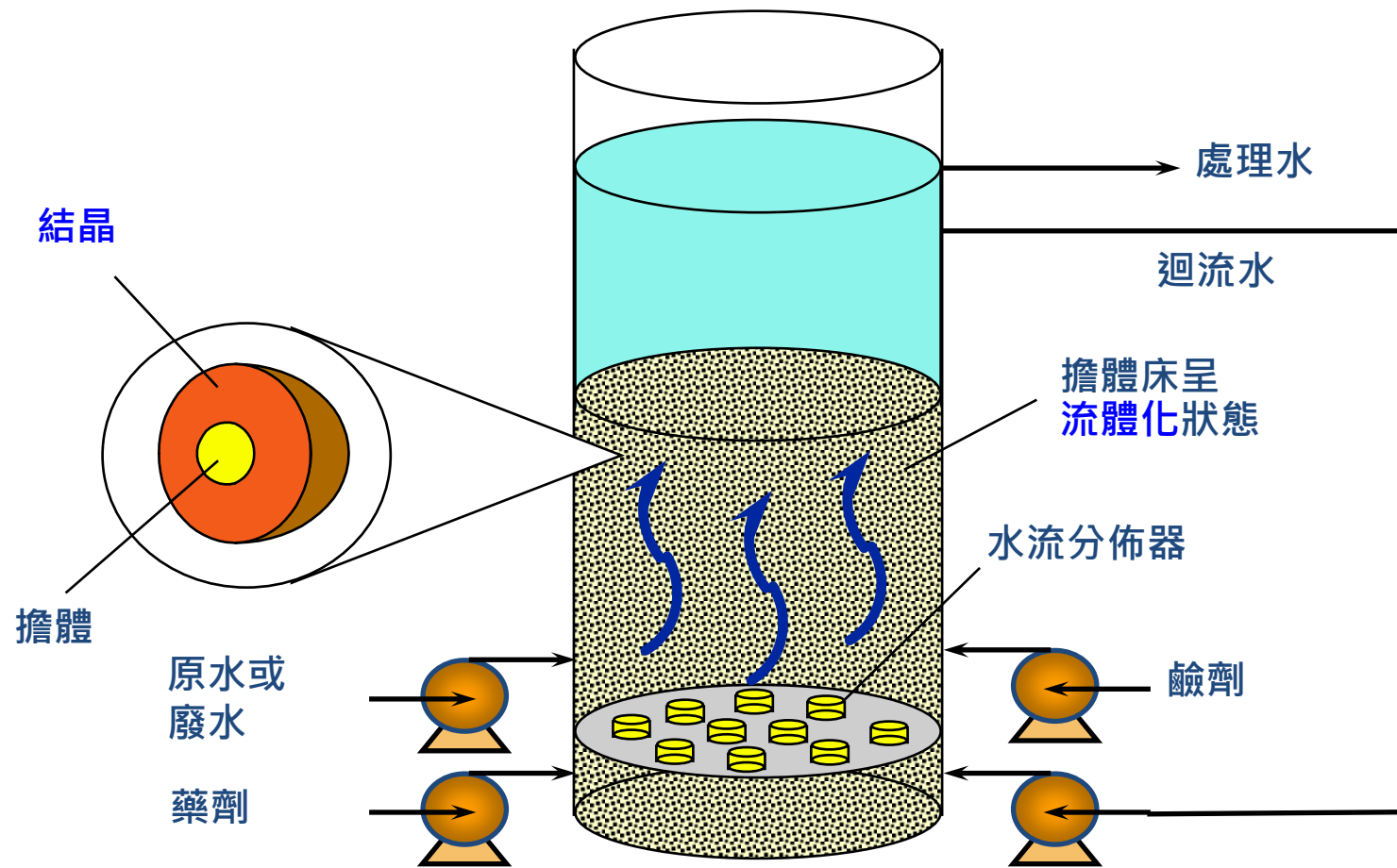
方法	優點	缺點
添加軟化藥劑沉澱法	簡單	汙泥量多
離子交換樹脂法	處理水離子濃度低	- 食鹽再生用量大 - 排放高導電度廢水，水體是否能承受
倒極式電透析法	利用離子交換膜與電極，有效分離陽陰離子，降低TDS濃度	- 初設成本高 - 耗電量相對大
UF/RO 薄膜法	- 可有效分離離子 - 水質佳	- 初設與維護成本高 - 水回收率60% ~ 70% - 濃水需要處理
流體化床結晶法	水回收率近 100%	TDS去除率約10% ~ 20%相對薄膜技術低 碳酸鈣結晶體回用管道待建立



技術理論



方法



技巧及反應機制

- 流體化床流態及結晶方法。
- 待處理進流水與選擇藥劑為可溶性的液體。
- 進流水與藥劑在FBC床中混合，化學式結晶產物的離子乘積（莫耳濃度）必須大於溶解度積常數（Ksp）。
- 依據相對過飽和度的定義(Nielsen,1982)

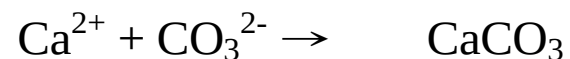
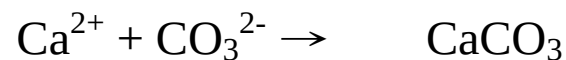
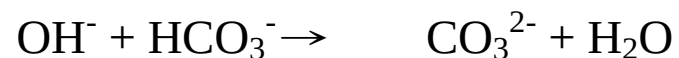
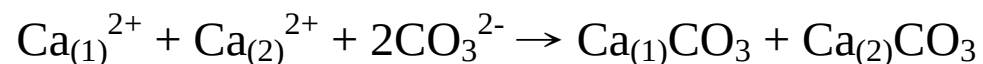
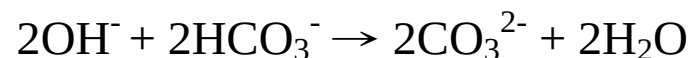
$$\sigma = (IP/Ksp)^{1/v} - 1 = (a_{Ca^{2+}} \times a_{CO_3^{2-}} / Ksp)^{1/2} - 1,$$

$$\text{at } 25^{\circ}\text{C}, ksp = 4.8 \times 10^{-9}$$

控 制 技 術

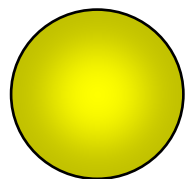
- 自動化控制
- pH計、離子偵測儀和液位計維護
- 排晶體和補充擔體控制

軟化藥劑選擇



結晶成長反應

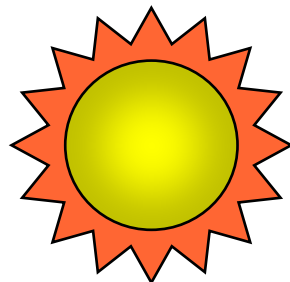
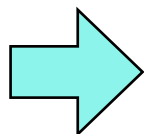
投入



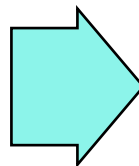
擔體

D:0.2~0.5
mm

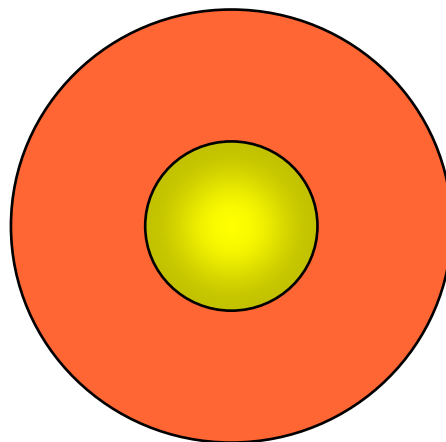
$$V=\pi D^3/6$$



水中無機物附著
擔體表面形成結晶



產出



結晶成長

D:1~3 mm

含水率低→量少，易處置
純度高→易資源化

影響晶體純度
— 外（進水水質）
— 內（擔體）

提高晶體成長量兩方法
(1) $U\uparrow$ ， $E\uparrow$ 耗能
(2) $D\downarrow E\downarrow$ ，需要克服擔體溢流到槽外

FBC 案例研究

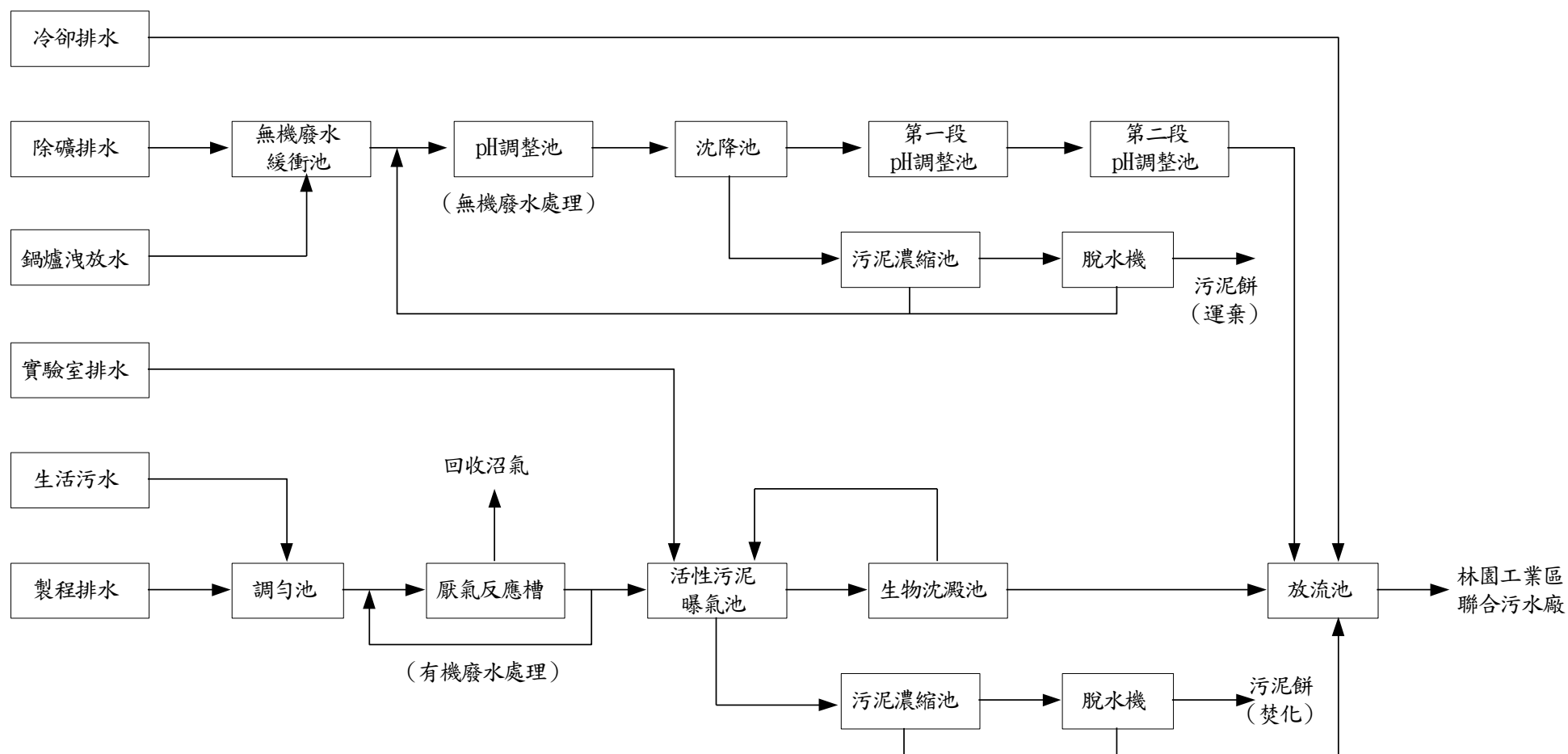
■ 異質擔體

- 石化廠綜合廢水
- 卓蘭淨水廠原水
- 鋼鐵廠冷卻塔用水

■ 同質擔體

- 3個淨水場原水

一、中美和石化廠廢水處理流程



需要解決污染問題

- 排放水平均懸浮固體含量SS 50mg/l > 30mg/L
- 污泥處理困擾多與處置費用高(1,650 NT \$ /ton)

廢水來源

喜氣放流水(WWT) --- PTA 有機廢水經厭氣與喜氣處理

冷卻塔排放水(CT BD) --- 冷卻塔蒸發提濃排放水

再生離子交換樹脂之酸性廢水(ISTa) ---

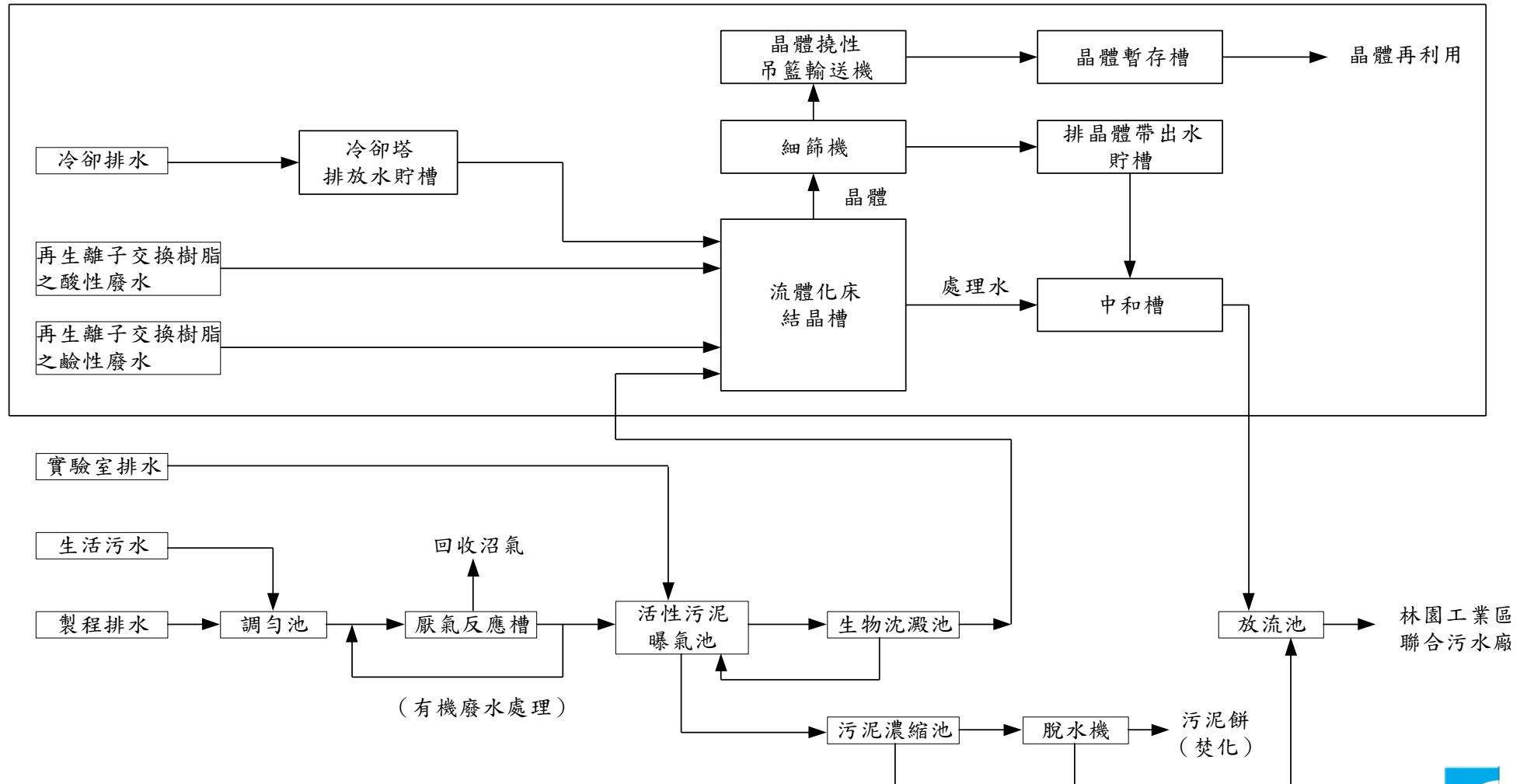
以酸再生陽離子交換樹脂所產生的廢水

再生離子交換樹脂之鹼性廢水(ISTb) ---

以鹼再生陰離子交換樹脂所產生的廢水

廢水處理流程

- 結晶單元取代混凝單元



中美和廢水FBC處理



效 益

·初設成本低

IST 5,000 CMD 混凝處理 2.5億元

IST(ISTa+ISTb) + CT BD + WWT 24,000 CMD
結晶處理 1.2億元

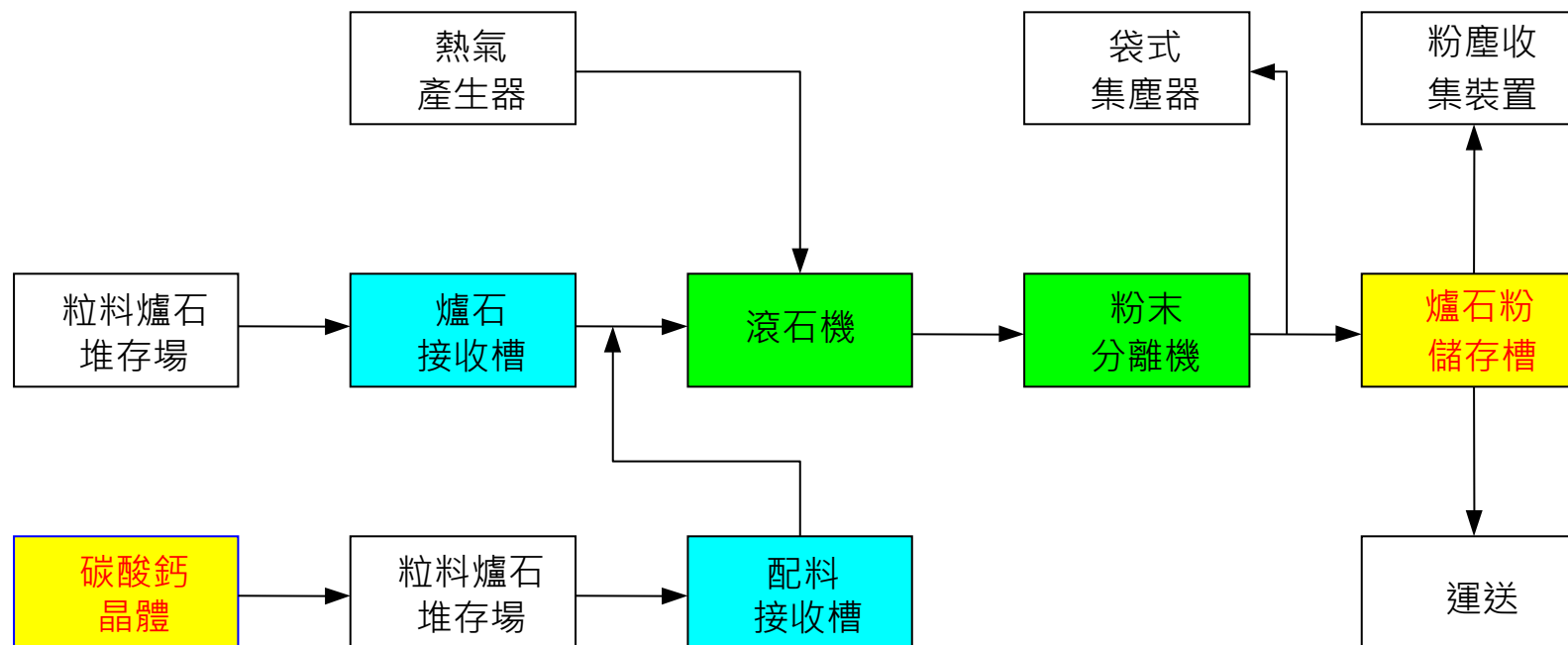
·操作費用低

IST 5,000 CMD 混凝處理 每年1,850萬元

IST(ISTa+ISTb)+CT BD+WWT 24,000 CMD 結晶處
理 每年1,200萬元，另外，節省TSS水污費 每年390
萬元，合計每年節省1,040萬元，減少56%開銷

高純度碳酸鈣 資源回用市場之一

中聯爐石 → 水泥

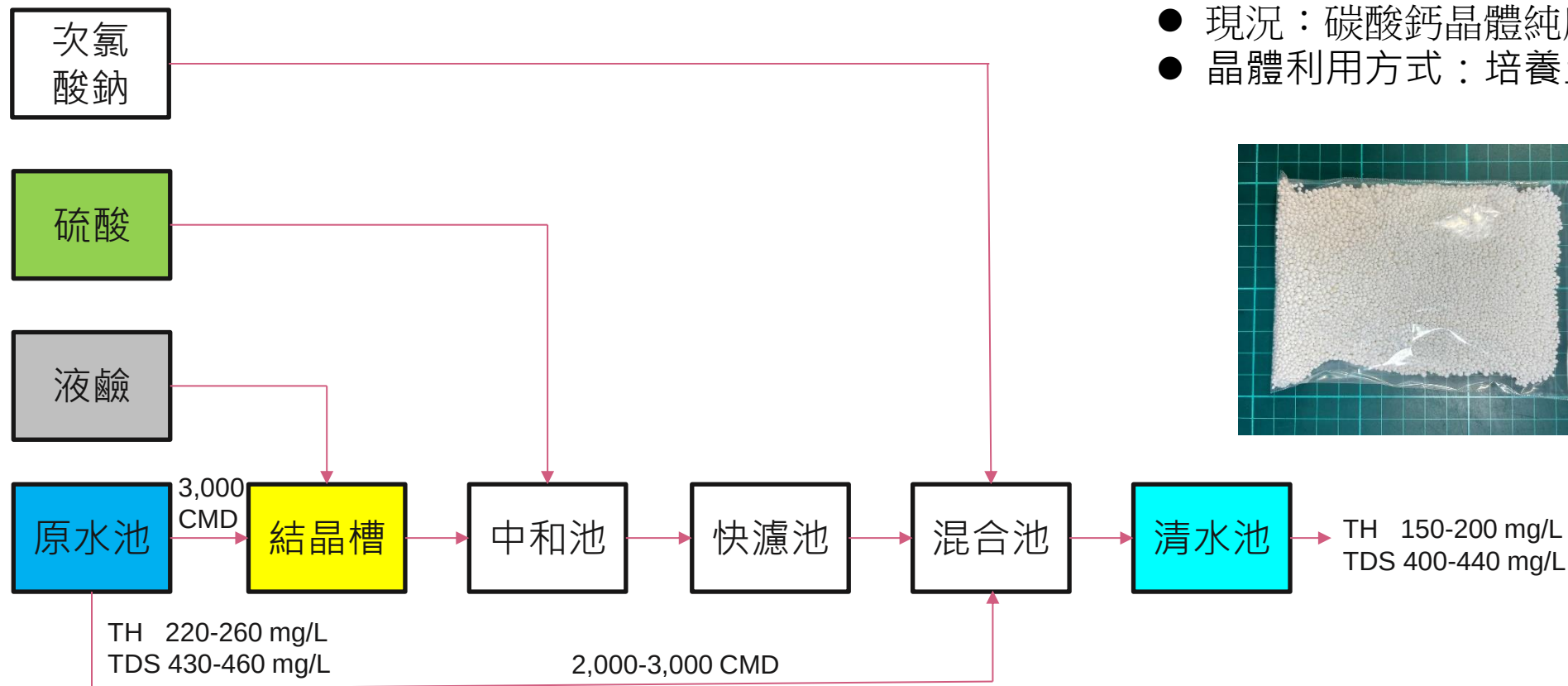


二、卓蘭淨水場原水

- 水量：增設7,000 CMD，實際配水水量5,200 CMD
- 水質：

水質項目	原水水質 (97.1 ~ 97.8)	出水水質 (最大限值)	94年7月1日起實施第三 階段飲用水質標準
pH	7.0 ~ 8.1	7 ~ 8	6.0 ~ 8.5
總硬度, mg/L	250 ~ 330	150	300
總溶解性固體量 (TDS) , mg/L	373 ~ 417	500	500
鐵, mg/L	低於檢測值(ND) ~ 0.02 mg/L	0.3	0.3
錳, mg/L	ND	0.05	0.05
藍氏飽和指數 (LSI)	---	- 1 ~ 1	---

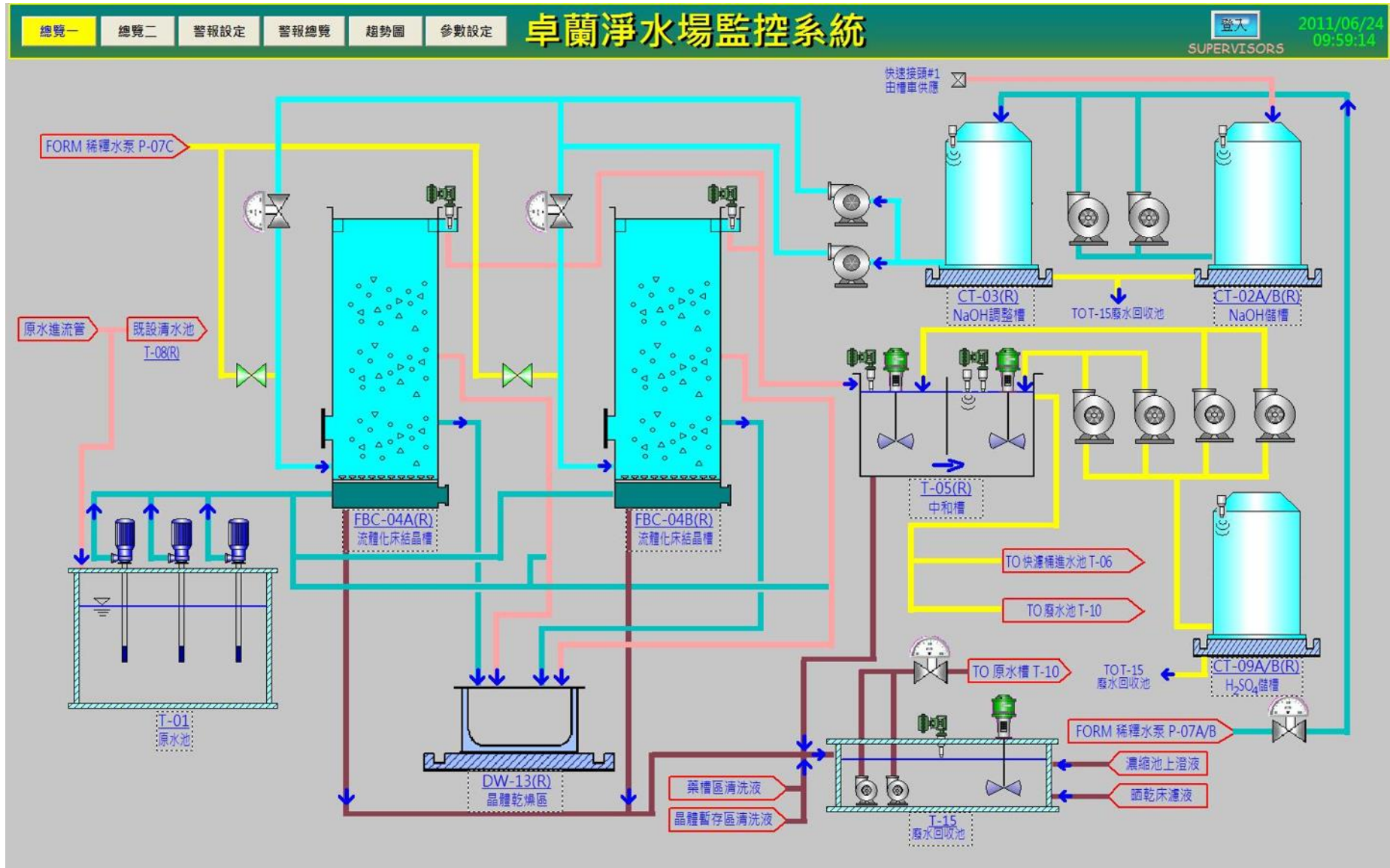
目前操作調整狀況



- 現況：碳酸鈣晶體純度80%
- 晶體利用方式：培養土肥料



圖控畫面



卓蘭淨水場原水FBC處理



試車結果

卓蘭淨水廠水質改善工程
水質檢測報告彙整一覽表

水質項目			PH 7-8	總硬度 (mg/L)	TDS (mg/L)	鐵 (mg/L)	錳 (mg/L)	硫酸鹽 (mg/L)	LSI (mg/L)	判定說明		備註
原水水質標準			7.1~7.6	139~330	295~507	ND~0.73	ND~0.036	141~175	—			
出流水水質標準			7.0~8.0	≤150	≤500	≤0.3	≤0.05	≤250	-1~1			
採樣日期	採樣時間	水源	報告內容							合格	不合格	
100.7.5	PM:15:08	原水	7.3	263	418	ND	ND	108	-0.18			R1002506H21 H100070535
	PM:15:08	出流水	7.8	131	413	ND	ND	103	-0.43	合格		R1002506H H100070534
100.7.6	AM:10:08	原水	7.3	257	397	≤0.1	ND	102	-0.14			R1002507H21 H100070634
	AM:10:20	出流水	7.9	125	334	≤0.1	ND	119	-0.36	合格 (第一天)		R1002507H21 H100070633
	PM:15:03	原水	7.3	255	400	ND	ND	104	-0.16			R1002508H21 H100070636
	PM:15:14	出流水	7.9	114	304	≤0.1	ND	132	-0.52	合格 (第一天)		R1002508H21 H100070635
100.7.7	AM:09:15	原水	7.3	248	398	≤0.1	ND	105	-0.03			R1002525H11 H100070728
	AM:09:02	出流水	7.8	105	324	≤0.1	ND	144	-0.48	合格 (第二天)		R1002525H11 H100070727
	PM:15:16	原水	7.3	249	397	≤0.1	ND	110	-0.08			R1002526H11 H100070730
	PM:15:04	出流水	7.8	108	355	ND	ND	136	-0.65	合格 (第二天)		R1002526H11 H100070729
100.7.8	AM:10:15	原水	7.3	247	344	≤0.1	ND	113	-0.04			R1002536H11 H100070818
	AM:10:05	出流水	7.7	95.7	309	≤0.1	ND	146	-0.72	合格 (第三天)		R1002536H11 H100070817
	PM:15:15	原水	7.3	248	378	≤0.1	ND	115	0			R1002537H11 H100070820
	PM:15:03	出流水	7.7	114	304	≤0.1	ND	148	-0.61	合格 (第三天)		R1002537H11 H100070819

出流水指結晶
中和後處理水

操作成本

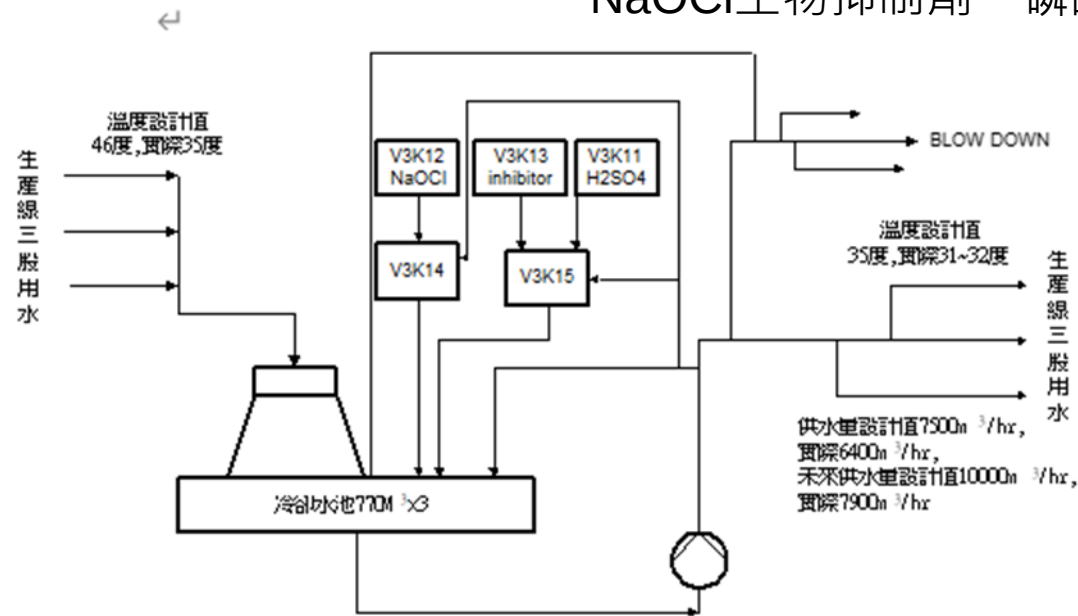
每噸水單位成本，包括藥品費、擔體費、動力費、廢棄物處置費及設備折舊費

合計約 2 ~ 2.9元

三、鋼鐵廠冷卻塔用水

熱量約80%以上藉由蒸發移走，剩下20%熱量由冷卻塔去除

NaOCl生物抑制劑、磷酸鹽鋅腐蝕抑制劑、硫酸結垢抑制劑



Blow Down :
循環水當Ca-H超過800 mg/L時
補充水量100 CMH, 排放水量20 CMH

某鋼鐵廠其中一座冷卻水塔流程說明

冷卻塔用水FBC模場試驗結果

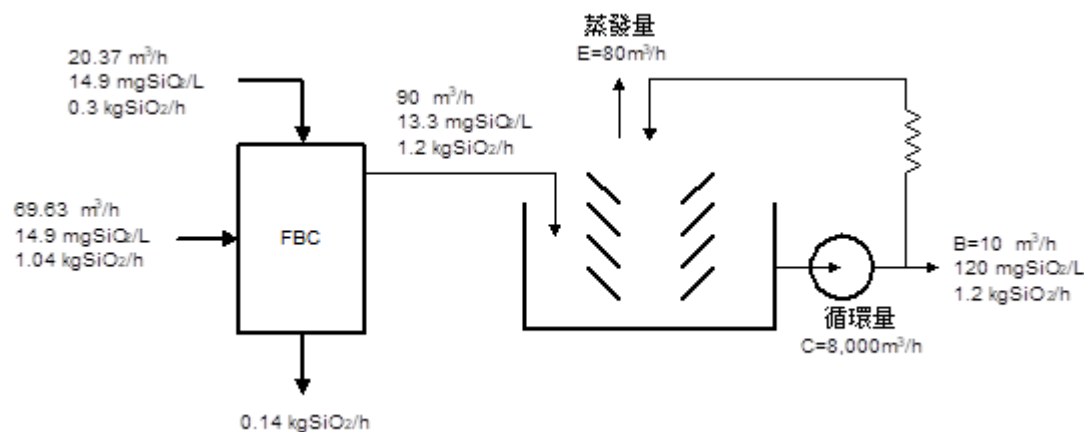
- 已知冷卻水塔用水水質 CaH 約200 mg/L, 比導電度約680 $\mu\text{mhos/cm}$, SiO_2 約18.2mg/L
- 由Beta公司所提供冷卻循環水限值比較，得知允許濃縮倍率下決定因子是比導電度和二氧化矽濃度
- 藥劑成本計算基準如下：68% CaO = 90%， Ca(OH)_2 2.03元/kg，98% Na_2CO_3 7.8元/kg，45% NaOH 4.6元/kg

	FBC處理水質			操作藥品費		其他	
藥劑 種類	比導電度 ($\mu\text{mhos/cm}$)	Ca-H (mg/L)	SiO_2 (mg/L)	元/kgCa-H	元/ m^3	污泥減量 (%)	操作 方便性
Ca(OH)_2 -NaOH	609	82	16.2	5.41	0.67	40~60	尚可
Na_2CO_3 -NaOH	798	56	18	10	1.46	50~70	佳
NaOH -NaOH	747	52	17	5.35	0.77	50~70	佳

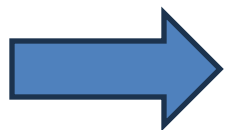
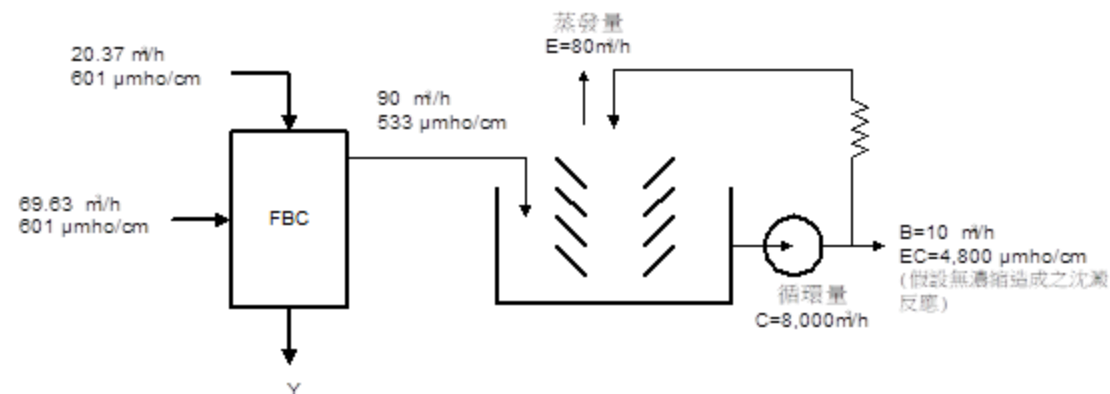
➡ Ca(OH)_2
- NaOH

改為使用石灰軟化後FBC處理水

(1) SiO_2 質量平衡：



(2) 比導電度 (EC) 質量平衡：

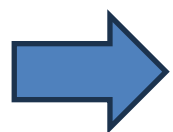


冷卻塔循環水濃縮倍率n=5倍提升到9倍

FBC去除冷卻水和原水比較

以 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - NaOH 加藥方式對主要決定因子 SiO_2 進行比較：

- (1)若處理冷卻塔循環水 SiO_2 去除率為 $(82.4-39.1) \times 100\% \div 82.4 = 53\%$ ，每噸水藥品費5.1元
- (2)若處理原水 SiO_2 去除率為 $(18.2-16.2) \times 100\% \div 18.2 = 11\%$ ，每噸水藥品費0.67元



處理冷卻水對 SiO_2 去除率高於原水約5倍，但對處理原水對冷卻水藥品費低7.6倍，故選擇處理原水略優於冷卻水。

冷卻水塔區回收再利用經濟效益分析

項次	處理對象 評估項目	A方案	B方案
1	節水補水量=減少排放量(m ³ /y)	65,700	87,600
	節水水費(元/y)	788,400	1,156,320
2	減少排放水集中處理費(元/y)	98,550	131,400
3	減少處理水排入海洋污染費(元/y)	65,700	87,600
4	減少循環水操作費用(元/y)	444,428	592,571
5	節省總額(1+2+3+4) (元/y)	1,397,078	1,967,891
6	FBC藥品用水量(m ³ /y)	232,228	178,441
	藥品費(元/y)	155,593	119,555
7	處理水量(m ³ /y)	810,300	788,400
	FBC操作電費(元/y)	395,426	384,739
8	FBC主要操作成本(6+7) (元/y)	551,019	504,294
9	回收再利用效益(5-8) (元/y)	846,059	1,463,597
10	回收再利用效益先後順序	2	1

原系統：原水→石灰軟化→冷卻水塔

A方案：原水→FBC→冷卻水塔

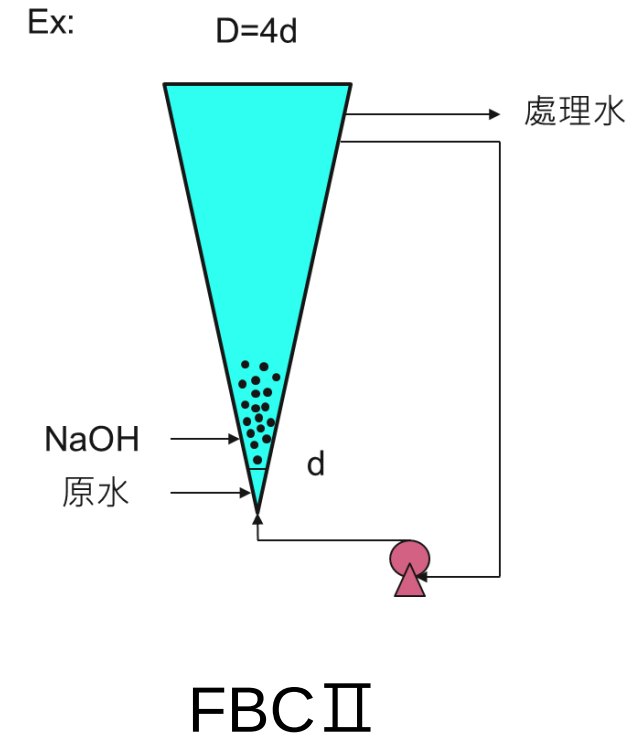
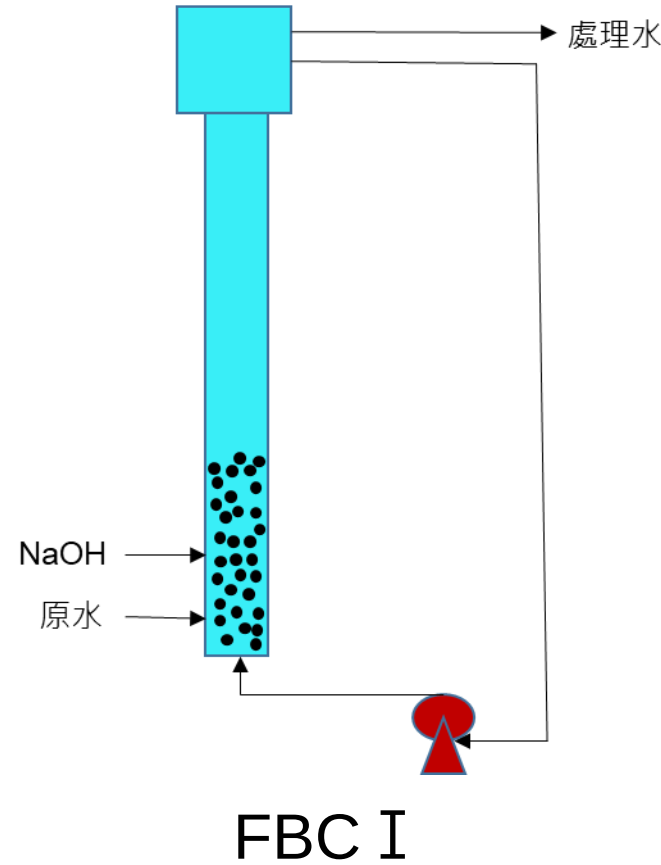
B方案：原水→石灰軟化→FBC→冷卻水塔

四、3個淨水場原水

- 結晶法不同反應器示意圖比較

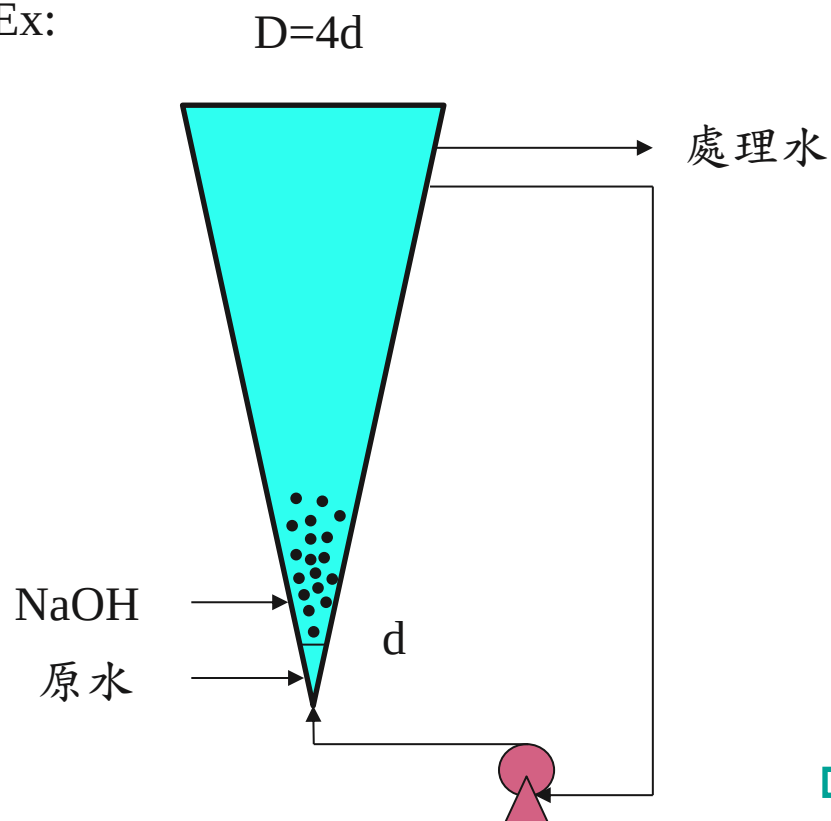
- FBC I 反應區相同直徑：
模擬目前現有3座水場處理效能

- FBC II 反應區不相同直徑：
提升更高效能



高純度結晶反應槽示意圖

Ex:



- $U = Q/A$, 當 $D=4d$, 槽頂 $U_2=1/16$
槽底 U_1
- 小粒徑擔體不溢流，大比
表面積提升質傳效率

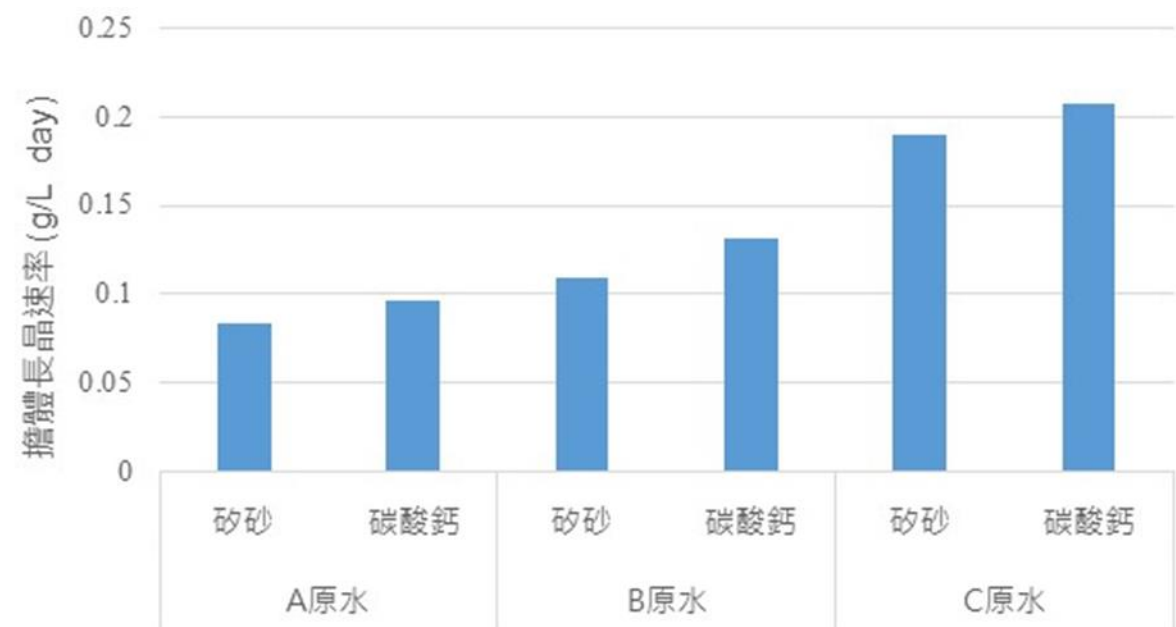


同質小粒徑擔體和新型結晶反應槽



工業技術研究院
Industrial Technology
Research Institute

碳酸鈣擔體長晶速率高



不同擔體種類

以FBC II長晶之碳酸鈣 純度鑑定檢測方法	A原水(%)	B原水(%)	C原水(%)
XRF	98.16	98.43	98.63
SGS-CNS 11393	96.1	96.9	97.8

- 小粒徑碳酸鈣擔體長晶速率高於矽砂擔體10%-20%
- 3種原水經FBC II試驗碳酸鈣純度約96%-98%

高純度碳酸鈣 資源回用市場之二

竹新化學 → 台灣龍盟



成品

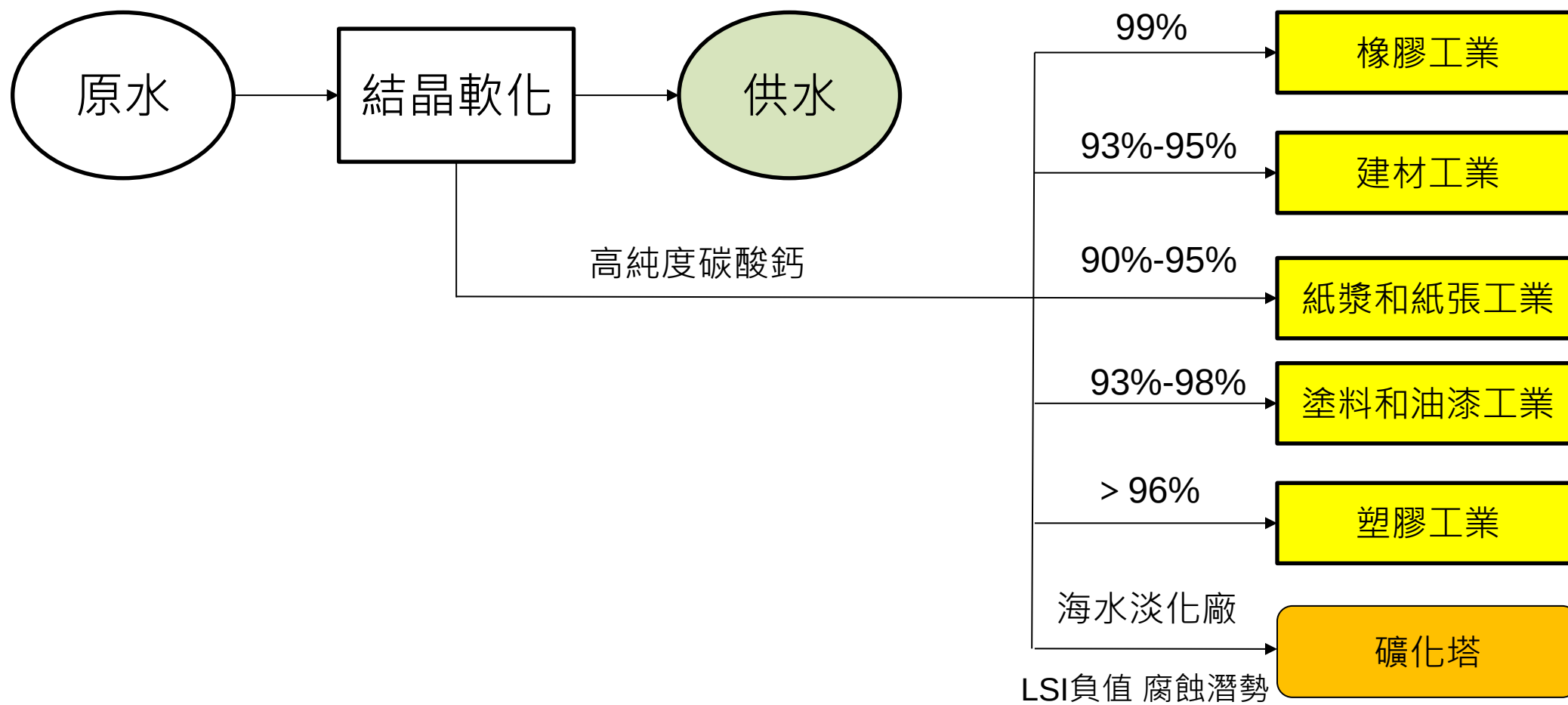


石頭紙



瓦楞紙

原水處理產生高純度碳酸鈣至未來資源應用



市場應用廣

Table B: Periodical system showing pellet reactor experience

1 H																	2 He
3 Li	4 Be	successfully recovered										5 B	6 CO ₃	7 NH ₄	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 PO ₄	16 SO ₄	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57/71 La-Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Ti	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89/103 Ac-Lr	104 Rf-Ku	105 Ha-Ns	106 Unh	107 Uns	108 Uno	109 Une									

Examples of produced pellets



上述27種加上 $\text{Ca}_3(\text{BO}_3)_2$, As_2S_3 , BaSO_4 合計為30種元素

結論與建議1

- pH值是軟化系統系統唯一需要精確控制，建議冷卻水及離子交換樹脂再生案例廠 8.7，控制範圍 ± 0.3 ，處理水 TSS 濃度低於30mg/L。

控制方式：

- (1) CT BD和WWT 分散式控制系統
- (2) ISTa/ISTb 比例控制

Ca - H 結晶率 80% ~ 85%自動化控制

結論與建議2

- 流體化床結晶（FBC）技術可降低卓蘭淨水廠的水質硬度，改善管線和民生用具結垢問題
- pH值是流體化床結晶軟化系統最重要控制參數，卓蘭淨水廠的軟化條件設定值為9.3，經中和後供水硬度可有效降低符合改善目標
- 雖然 Ca(OH)_2 溶解度差，但是對於 SiO_2 (主要限制化合物) 及比導電度(次要限制因子)去除較為有效，因此為了提高冷卻水塔濃縮倍率達到節水功能，選擇是 Ca(OH)_2 藥劑

結論與建議3

- 小粒徑同質碳酸鈣擔體長晶速率高於矽砂擔體約10%~20%，提升FBC II技術應用優勢
- 3淨水場FBC II碳酸鈣純度為97%到99%（XRF法）和96%到98%（CNS法）加上乾白度分別為99、90和85，符合工業上要求等級，該結晶體可當原料回用到相關產業
- FBC相較於薄膜法和離子交換樹脂法，具備水回收率接近100%優點，達到節水功效，相較於混凝沉澱法，具備廢棄物低優點，降低污泥處置費

報告完畢 敬請指教



李茂松
水系統整合與工程化研究室
工業技術研究院 材料與化工研究所 水科技研究組
新竹市光復路2段321號17館101室
Email: MaoSungLee@itri.org.tw