

半導體業冷卻水塔使用回收廢水產生異常大量泡沫改善實例介紹

陳奎麟*、劉凱溢**、蔡漢育***、盧彭潭***

摘要

近年來，在產業迅速發展下工業用水量隨之大幅增加，無形中呈現出自來水源供應不足之問題。『取之於社會，用之於社會；生生不息，環環相扣。』水資源的再製造及回收再利用技術在國際上已被廣泛大量的應用，以解決水資源短缺的問題。

半導體產業之中央空調冷卻系統，供應穩定的製造環境以符機台生產需求，其年平均日空調量必須使用約千噸的冷卻水量，倘若以半導體製程廢水回收再利用，做為中央空調冷卻系統龐大的冷卻水源，具有非常好的經濟效益。不過所須克服的技術問題為如何持續穩定供應良好回收水源及水質。本研究以實際使用回收水已運轉約一年之冷卻水塔，於 95 年 03 月間異常產生大量泡沫無法使用回收廢水之實例，採用 QC 手法、KT 式理性思考方法及特性要因圖，尋找要因與可能原因，並以實驗計劃法(Design of Experiment, DOE)及其中之反應曲面法-中心混成設計(Central Composite Design, CCD)，找出異常真因並求得漂白水、磷酸廢水、氨廢水最佳化操作參數，成功改善冷卻水塔異常大量泡沫，並重新使用回收廢水，其年效益約 329 萬元，且達到水資源回收再利用之節流目的。

本研究介紹半導體業製程廢水回收再利用，供給冷卻水塔使用約一年後產生異常大量泡沫的實廠改善經驗，期能藉本案例中問題改善及技術最佳化的建制，作為未來其他同業廢水回收再利用之參考。

【關鍵詞】 1.廢水回收 2.異常泡沫 3.冷卻水塔 4.中心混成設計

*華邦電子 300mm 廠務處水氣化部 經理

**華邦電子 300mm 廠務處廢水課 副理

***華邦電子 300mm 廠務處廢水課 工程師

An instance of improving the cooling tower used reclaim from wastewater to product a lot of unusual foams in the semiconductor factory.

Q. L. Chen* 、 K. Y. Liu ** 、 H. Y. Tsai *** 、 P. T. Lu***

Abstract

In recent years, the industrial manufacture grew up by itself and city water demand increasingly. In regard to reuse technique of the wastewater that industry & academia have been discussed and applied extensively on various walks of life.

This introduction the reclaim from manufacture wastewater to supply to cooling use by cooling tower and that annual mean amount are 1,000 tons/day. But after operating one year, the cooling tower resulted a lot of unusual foams. In that case, our QIT (quality improvement team) undertook to find ways to solve it, such as "QC method 、 KT problem solving & decision making 、 cause & effect diagram 、 Design of Experiment". Then our QIT try to find the root cause and create optimal parameter. Therefore, our QIT succeed in improving the unusual problem and reusing reclaim of wastewater. Furthermore, its annual benefit about 3.29 millions. Besides, our QIT achieve an objective to reuse reclaim of wastewater, too.

【Key words】 1. reclaim of wastewater 2. unusual foams 3. cooling tower 4. Design of Experiment

*Dept. Manager, 300mm Facility Water, Gas & Chemical Dept., Winbond Electronics Corp.

**Section Manager, 300mm Waste Water Treatment Section, Winbond Electronics Corp.

***Engineer, 300mm Waste Water Treatment Section, Winbond Electronics Corp.

一、前言

半導體產業之中央空調冷卻系統，主要以供應穩定的製造環境符合機台生產需求。以本廠一座 FAB 為實例分析，年平均日空調量必須使用約千噸以上的冷卻用水量，倘若以半導體製程廢水回收再利用，做為中央空調冷卻系統龐大的冷卻水源，實具有非常好的經濟效益。不過隨著奈米科技的精研發展，半導體製程亦隨之日異求精，相對的廢水回收技術是首當其衝所須克服的問題，次之探討如何持續穩定供應良好的回收水源及水質。

本研究以半導體業製程廢水回收再利用，供應給中央空調冷卻系統之冷卻水塔做冷卻水源，在運轉約略一年後產生大量泡沫的異常狀況，在藉由問題與改善工具的方法應用，成功得著手排除異常問題，並以實廠的經驗建立技術最佳化機制，獲得水資源回收再利用之節流目的。

二、冷卻水塔使用回收廢水來源及特性

1. 系統設置及改善緣由

本廠(中科廠)位於中部科學園區台中園區，依園區規定需符合國家最高標準製程回收率 > 85% 以上，所以將製程廢水回收再利用供給中央空調冷卻水塔作為冷卻水源，以達回收率之標的。以本廠為實例分析探討，冷卻水塔(Cooling Tower)於 95 年 3 月 1 日產生大量不明泡沫(如圖 1 所示)。與正常運轉操作條件相比較 (如圖 2 所示)，異常狀況所產生的泡沫其差異甚大。

異常產生泡沫不但會影響冷卻水塔本身的散熱效率，同時亦影響冷卻水化學品加藥量異常增加；其次為了暫時去除冷卻水塔泡沫，須將冷卻水源由原本的製程回收水改用為自來水，不僅無形中增加了自來水的費用，亦大幅減少了廢水回收量 (如圖 3 所示)。

針對此異常狀況並響應公司環安衛政策，故成立改善團隊(QIT)進行異常狀況之改善，同時提升廢水回收量，進而達到園區回收率之標的及公司 Cost Down 之政策目標。



圖 1 冷卻水塔異常大量泡沫



圖 2 表冷卻水塔正常情況

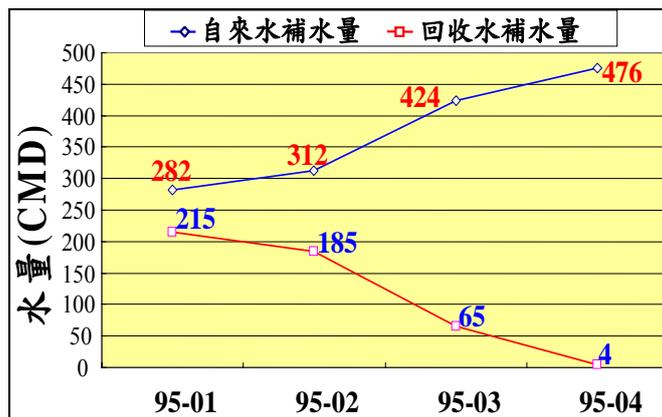


圖 3 冷卻水之自來水&回收水補水量關係圖

2.改善計劃

本團隊自 95 年 4 月成立，於同年 11 月結案。系統改善方法包含『現況分析、目標設定、要因分析、真因驗證、改善方法、效果確認、標準化、效益分析及問題與討論等』將於後續說明。

2.1.來源及特性分析

(1)冷卻水塔(Cooling Tower)冷卻系統流程如圖 4 所示。

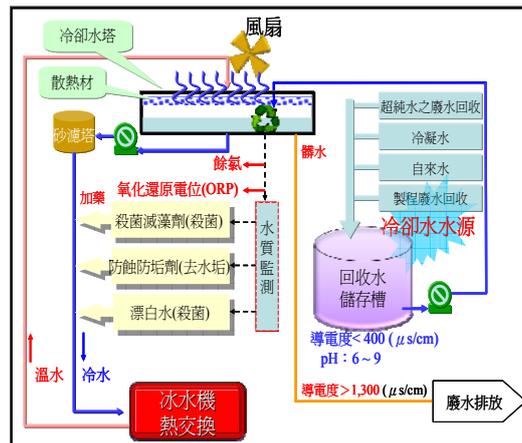


圖 4 冷卻水塔冷卻水循環系統圖

出冷卻水塔之冷卻水溫度為 32°C ，流經冰水機之熱交換器 (heat exchanger) 後，以 37°C 的溫度回流至冷卻水塔，藉由冷卻水塔之散熱材將溫度散熱，以達下降溫度之目的，且持續不斷的循環。依據水遇熱蒸發的物理特性及物質不減定律，當冷卻水於冷卻水塔內不斷的循環經熱蒸發後，於一段時間後導電度 (Conductivity) 將濃縮提高，冷卻水質導電度大於設定值 $1,300\mu\text{s/cm}$ 時，即進行冷卻水置換補水，補水機制從回收水儲存槽補水，以維持冷卻水之用水平衡及水質。冷卻水於管路循環使用時會於管路定點處添加殺菌滅藻劑、防蝕防垢劑及漂白水 (NaOCl) 以減少細菌及水垢產生。冷卻水源包含：自來水 (City Water)、超純水之廢水回收 (Ultra Pure Water Reclaim, UPWR)、冷凝水、製程廢水回收 (Waste Water Reclaim, WWR)。

(2)親和圖 (Affinity Diagram) 之應用

針對冷卻水塔產生大量泡沫，藉由組員腦力激盪之方式收集所有影響因子，經由思考與篩選依影響層別：環境、物料、人員、方法、設備將所列出之子因子 (factor) 分類，繪製出親和圖 (如圖 5 所示)。其中環境、人員、設備三個層別依經驗之判別及討論後其影響不大，故即將予以排除。

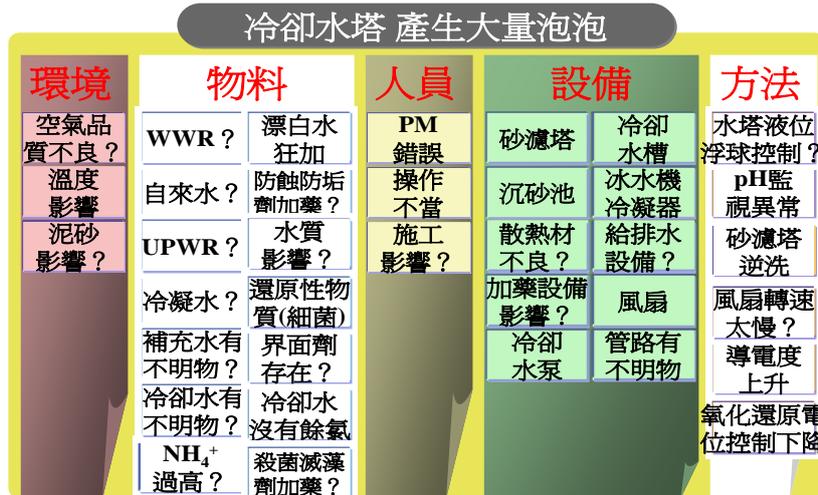


圖 5 冷卻水塔產生大量泡沫之問題討論親和圖

(3) 關聯圖之應用

親和圖在經過篩選之後，將物料及方法層別中的因子具有相關交互影響的加以連線，由各個因子組合而成一張交互影響之關聯圖(如圖 6 所示)。分析與主因子不相關的因子且予以篩選後，分為『原因已明』及『原因未明』兩部分：

- A. 原因已明：風扇轉速、砂濾塔逆洗頻率增加、殺菌滅藻劑、防蝕防垢劑。
- B. 原因未明：pH > 9、導電度上升、氧化還原電位下降 → 漂白水狂加、餘氯減少、冷卻水、冷卻水源。後續現況分析將針對原因未明的部份繼續分析。

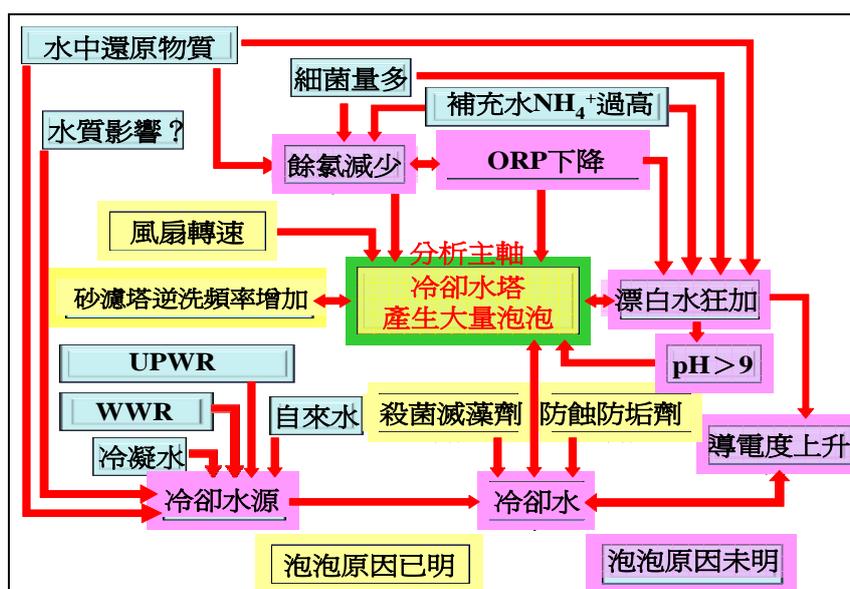


圖 6 冷卻水塔產生大量泡沫之因子交互作用關聯圖

① pH > 9

針對 pH > 9 影響因子於歷史資料中分別於 95 年 1 月及 3 月隨機抽樣，所得的數據及分佈如表 1 及圖 7 所示。數據經變異數分析 (Analysis of Variance, ANOVA)，所得之 p-value=0.234 > 0.05 無顯著差異，所以冷卻水 pH 變化的影響非要因。

表 1 異常發生前/後冷卻水 pH 值

異常前 95.01						異常後 95.00					
7.34	7.55	7.31	7.54	7.27	7.25	6.97	7.18	7.59	7.39	7.22	7.40
7.07	7.36	7.25	7.00	7.17	6.68	6.68	7.69	6.66	7.17	7.53	6.98
7.47	7.34	7.39	7.44	7.31	7.52	6.85	7.64	7.22	7.02	7.58	6.94
7.12	7.17	7.04	7.29	7.18	6.84	6.95	6.81	6.96	6.82	7.0	7.23
7.64	7.16	7.07	7.81	6.98	7.24	7.43	7.35	7.39	7.24	7.18	6.64

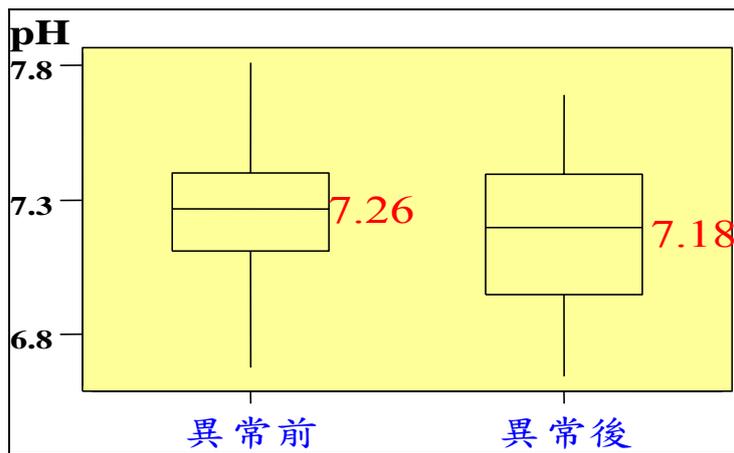


圖 7 冷卻水 pH 值箱型圖

② 導電度上升

冷卻水經於異常發生前/後隨機抽樣，所得之數據及分佈如表 2 及圖 8 所示，數據經變異數分析 (Analysis of Variance, ANOVA)，所得之 p-value=0.801 > 0.05 無顯著差異，所以冷卻水導電度變化的影響非要因。

表 2 異常發生前/後冷卻水導電度值

異常前 95/01						異常後 95/03					
273	241	182	214	213	204	216	244	247	284	233	231
251	239	272	155	273	149	312	265	168	200	246	227
303	254	319	266	303	246	275	276	194	212	317	141
239	335	294	273	224	242	213	270	299	186	269	239
254	258	221	276	300	206	377	305	235	335	310	248

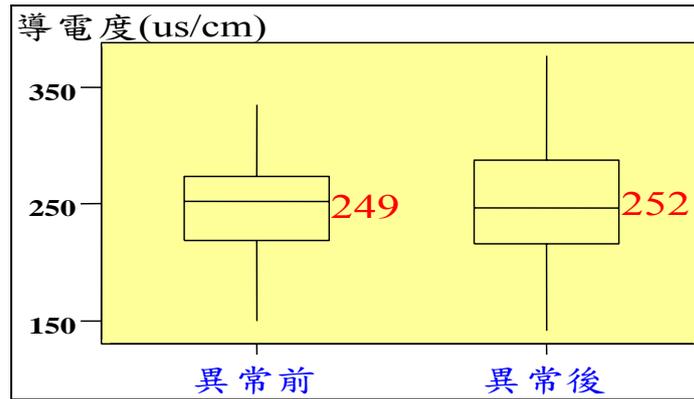


圖 8 冷卻水導電度值箱型圖

③氧化還原電位(Oxidation Reduction Potential,ORP)下降→漂白水狂加
冷卻水塔為了抑制冷卻水中細菌的生長於水中添加漂白水濃度維持 0.1ppm 以上，而冷卻水添加漂白水是透過冷卻水之氧化還原電位的監測控制加藥量，當冷卻水之氧化還原電位低於設定值時則會加漂白水直到設定值為止。其中冷卻水之氧化還原電位加藥控制點設定為 300mV(如圖 9 所示)。

於監控系統分析歷史曲線(如圖 10 所示)，異常狀況時的現象觀察出氧化還原電位值低於設定值 300mV，則漂白水加藥量相對增加。

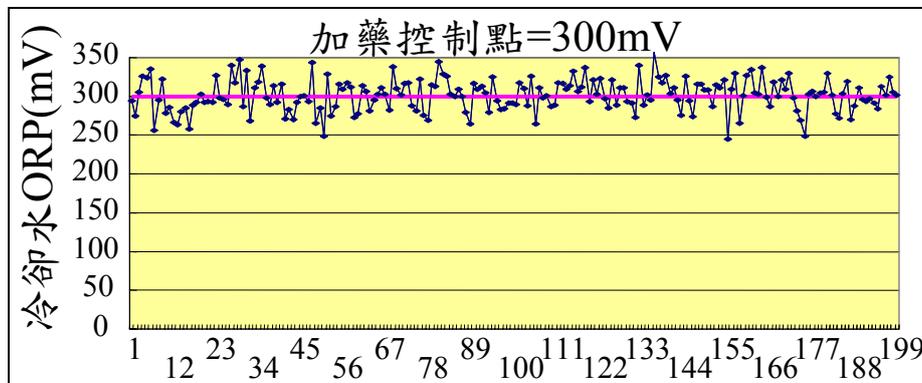


圖 9 冷卻水正常水質 ORP 推移圖

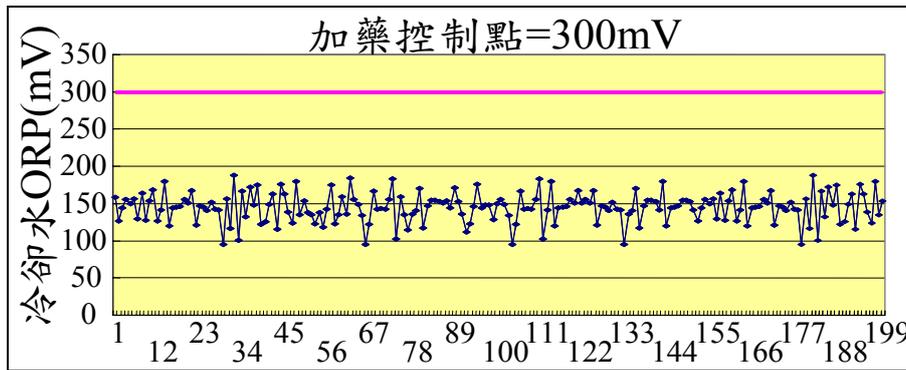


圖 10 冷卻水水質 ORP 異常推移圖

據文獻記載，氧化還原電位值與自由有效餘氯(Free available residual chlorine)並無呈現相關線性關係，因此氧化還原電位值與自由有效餘氯須定期校正對應值。每當冷卻水塔產生大量不明泡沫時，次氯酸鈉的加藥量相對增加高達 1.5 倍之多(如圖 10 所示)。經過多次觀察記錄異常泡沫體積與次氯酸鈉加藥量，經將資料繪製成散佈圖(scatter plot)發現呈線性正相關 (如圖 11 所示)。

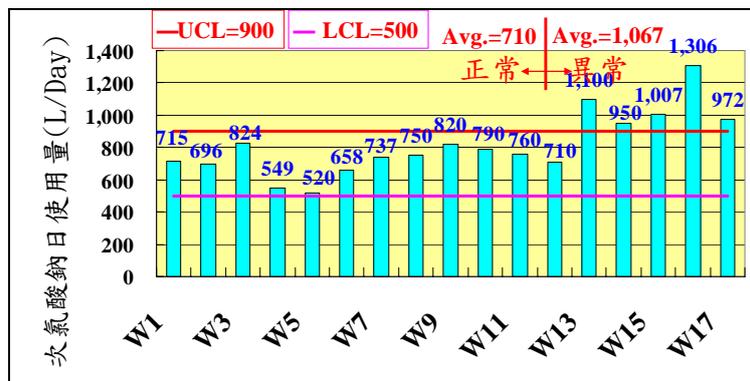


圖 10 異常前後漂白水使用量比較圖

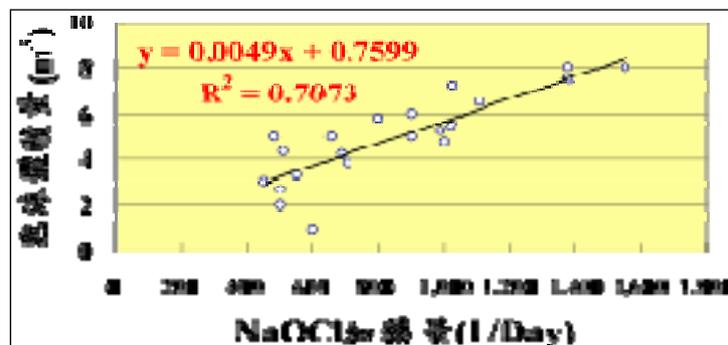


圖 11 泡沫體積與漂白水加藥量散佈圖

冷卻水中的自由有效餘氯濃度值會被存在於水中的還原性物質消耗，因此據文獻記載『加氯量與餘氯量』會呈現相關性(如圖 12 所示)。其中消耗氯量的物質有還原性物質(如： Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 H_2S)、有機物(COD)、氮氮化合物、細菌等。所以加氯量異常及泡沫的產生皆與冷卻水補充水有關，因此冷卻水的補充水源需進一步分析與探討。

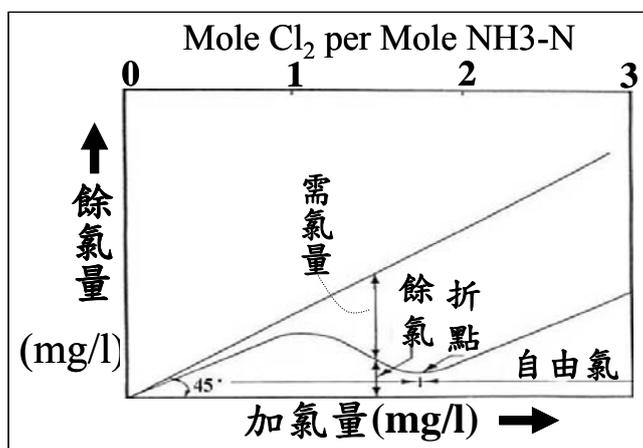


圖 12 加氯量與餘氯量特性曲線圖

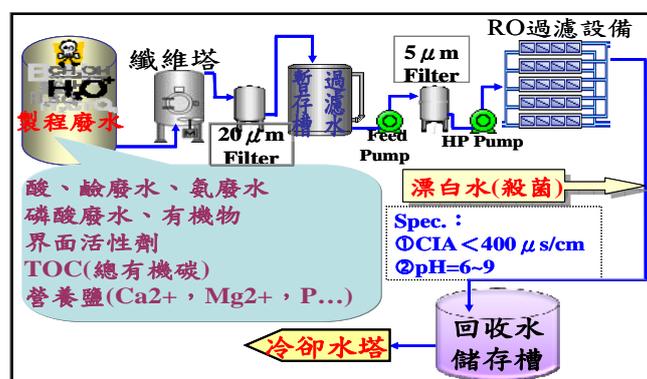


圖 13 廢水回收系統圖

④冷卻水源補充水

- 自來水：由自來水廠供應直接進回收水儲存槽(Reuse Tank)儲存，水質沒問題，影響層面可排除。
- 超純水之廢水回收：超純水系統製造過程中，當水質導電度在 $600\mu\text{s}/\text{cm}$ 以內即回收儲存於回收水儲存槽，當作二次用水。此回收水的源頭乃是自來水經過超純水系統後的次級水，水質穩定變化小影響層面可排除。
- 空調冷凝水：收集廠區空調機冷凝水回收再利用，此為環境溼度凝結水

其影響層面不大可排除。

d. 製程廢水回收：製程廢水經廢水系統的回收處理單元即 RO(Reverse Osmosis)過濾後儲存於回收水儲存槽。由於製程水源複雜，且水質變化大極不穩定，影響層面可能性大。廢水回收系統的水源為製程廢水，採分流收集分為：

I. 一般酸系廢水：CAcid(Concentrated Acid)、DAcid(Dilute Acid)。

II. 一般鹼系廢水：CBase(Concentrated Base)、DBase(Dilute Base)。

III. 磷酸廢水：Waste H_3PO_4 。

IV. 氨水：DNH₃(Dilute NH₃)。

綜合以上廢水，先採原水第一段中和讓原水接近中性後，再以回收處理系統前處理單元初濾，最後經 RO 單元過濾將出流水儲存於回收水儲存槽 (如圖 13 所示)，出流水質的 Spec. 為導電度小於 400 μ s/cm 及 pH 值介於 6~9 之間。製程廢水來自於機台端的 Drain，愈繁瑣的製程步驟相對的化學品用量及種類就愈多，隨著製程的日新月異其相對所排放的廢水就愈繁雜。雖然回收水源如此繁瑣複雜，但是製程廢水回收的過濾水質皆在監控 Spec. 內並沒顯示出異常現象(如圖 14 及圖 15 所示)。然而，為何冷卻水塔異常產生大量不明泡沫呢？

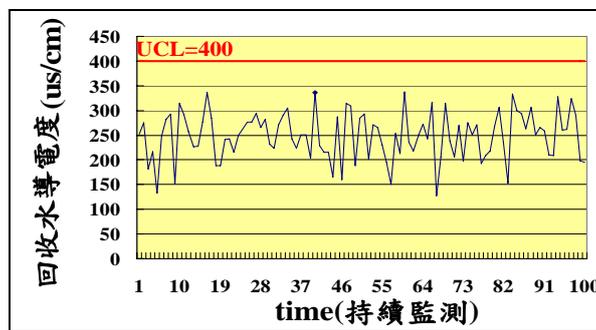


圖 14 回收水質導電度分佈圖

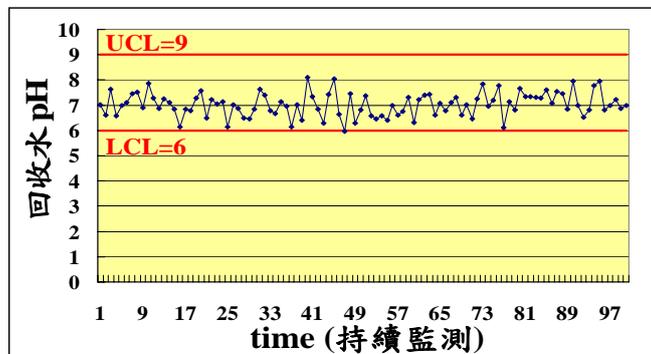


圖 15 回收水質 pH 分佈圖

⑤ 結論

綜合前述分析現況，對於冷卻水塔異常產生大量不明泡沫做以下結論：

- a. 冷卻水塔風扇、砂濾塔、殺菌滅藻劑、防蝕防垢劑對泡沫的產生具有影響→現況原因已明。
- b. 冷卻水塔 pH、導電度對泡沫的影響無顯著差異→現況原因已明。
- c. 冷卻水塔 ORP 平均過低對泡沫的產生未知是否有影響→現況原因未明。
- d. 冷卻水塔漂白水加藥量對泡沫的影響呈現正相關，但為維持有效餘氯量殺菌，所以現況觀察得知會狂加漂白水且會產生大量泡泡→現況原因已明。
- e. 冷卻水塔冷卻水源製程廢水回收對泡泡影響，雖然其回收水源成份複雜，但水質均符合回收水標準，未知是否為影響因子 →現況原因未明。

冷卻水塔產生泡沫在現況分析顯示出交互影響錯綜複雜，所以後續再將以特性要因圖及 KT(Kepner Tregoe)式理性思考方法尋找主要影響要因。

2.2 改善目標設定

冷卻水塔異常產生大量不明泡沫，首當期要的目標是解決去除冷卻水塔泡沫(如圖 14 所示)。其次廢水回收量的目標設定，係將異常發生時廢水回收量 35CMD，改善為異常前的供應量 200CMD(如圖 15 所示)。

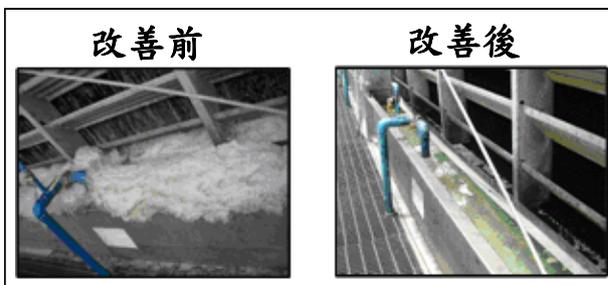


圖 14 冷卻水塔異常改善前後目標比較圖

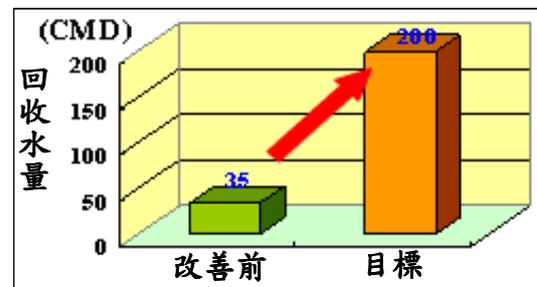


圖 15 回收水量改善前及目標比較圖

三、冷卻水塔使用回收廢水產生異常大量泡沫原因探討及改善

1. 異常大量泡沫原因探討

本研究使用特性要因圖進行分析，由物料及方法中的各個影響因子所造成的共同現象為冷卻水塔產生異常泡沫，故特性要因乃進行共同原因分析(如圖 16 所示)。

- ①物料：分為漂白水、殺菌滅藻劑、防蝕防垢劑、冷卻水等。其中於現況分析中已探討出『冷卻水水源』的影響機率較大，其餘次之。
- ②方法：分為導電度控制、風扇轉速控制、砂濾逆洗控制、ORP 控制等。其中在現況分析階段『ORP』及『風扇轉速控制(當有運轉時冷卻水塔的泡沫有減少趨勢)』影響機率大，其餘影響次之。

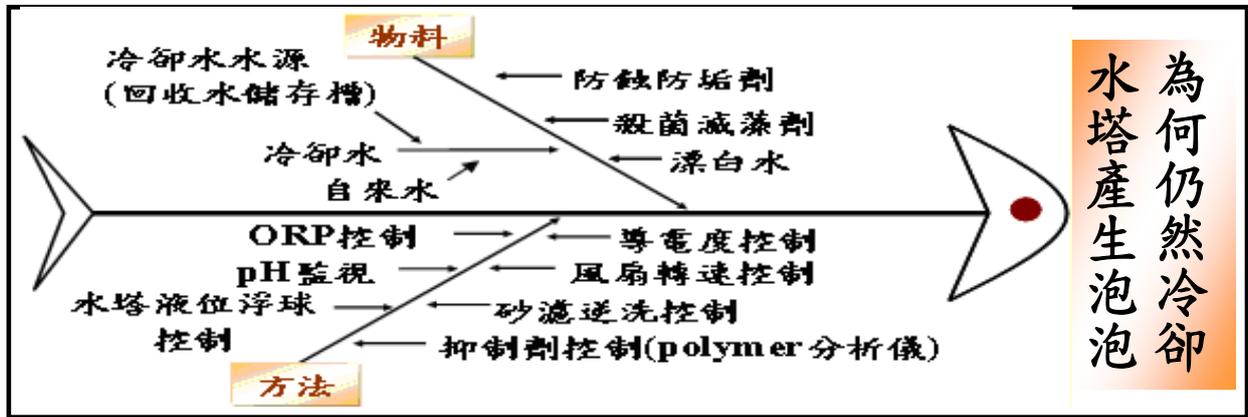


圖 16 特性要因圖

2. 異常大量泡沫原因再分析

經特性要因圖分析後原因仍不明確，故針對要因解析的因子以 KT(Kepner Tregoe)式理性思考方法進行要因再分析，方法說明如下：

①問題陳述：冷卻水槽異常有大量泡沫。

②具體說明問題：泡沫發生的現象，以 11 個步驟分析交叉探討。

例 1：泡沫是發生在什麼物體上(WHAT) → 是發生在冷卻水槽(IS) → 而不是發生在散熱材、排水管、沉砂池、砂濾塔(IS NOT)。

例 2：泡沫發生時有什麼偏差(WHAT) → 是產生大量泡泡(IS) → 而不是水變黃、長青苔(IS NOT)。

依此類推計 11 個具體說明問題步驟(如表 3 所示)。

③找出可能的起因：運用區別與變化或是知識與經驗針對上述問題陳述分析發生的原因或現象，進行篩選可能的起因(如表 4 所示)。

④評估可能的起因：將問題發生的原因，以表 3 是(IS)與不是(IS NOT)的討論結果進行交叉解釋是否合理。

例 1：表 5-1『第 4 項泡沫發生在冷卻水槽所有的水面；第 7 項泡沫發生在風扇低頻率運轉時及砂濾塔保養後(only one time)；第 8 項泡沫發生在冷卻水塔正在運轉時(8 台)；第 9 項泡沫發生時每次偏差量約為 2cm~0.1cm 內；第 10 項泡沫發生時泡沫量約在水面上 30cm 高；第 11 項泡沫發生時的趨勢為愈來愈嚴重』，上述所發生的原因與風扇是

沒有直接可以解釋的理由，除非系統運轉時沒有開風扇才有理由可以解釋。

例 2：如果冷卻水是造成泡沫發生的真正原因，沒有理由可以解釋證明冷卻水不是原因，所以需要進行真因驗證。

依此類推評估出可能的原因有五項(如表 5 所示)。

(3) 結論

由要因解析及要因再分析的結果顯示出需進行真因驗證的項目說明如下：

A. 冷卻水水源及冷卻水導電度、B. 風扇頻率及砂濾逆洗、C. 加藥(防蝕防垢劑及殺菌滅藻劑)為主要的影響因子，且無法取得充分的理由可以解釋與泡沫產生無關。另一層面顯示主要影響因子之間的相關性、影響度及交互作用非常複雜，故以 DOE(Design of Experiment, DOE)的實驗方法進行後續的真因驗證，找出影響冷卻水塔產生大量泡沫的兇手。

表 3 KT 問題分析表

Problem Analysis(問題分析)		Describe Problem(描述問題)
State the problem(陳述問題) 冷卻水槽異常有大量泡沫	Include both the object and the deviation in the sentence. (在句中包含物體與偏差)	
Specify the problem(具體說明問題)	IS (是)	IS NOT (不是)
WHAT(什麼)		
What object?(什麼物體?)1	冷卻水槽	散熱材、排水管、沉砂池、砂濾
What deviation?(什麼偏差?)2	大量泡泡	水變黃、長青苔
WHERE(何處)		
Where geographically?(在地理位置上的哪裡?)3	CUB RF 正在運轉冷卻水槽	CUB RF 正在進水沉砂池
Where on the object?(在物體表面上的哪裡?)4	冷卻水槽所有的水面	散熱材+水
WHEN(何時)		
When first?(第一次是何時?)5	95.03.01	更早(95.03.01之前)
When since?(下一次何時?)6	95-3/29、4/17、5/13、5/17、5/21	發生於下述時間以外：95-3/29、4/17、5/13、5/17、5/21
When in the life cycle?(在週期中哪一個階)	砂濾塔保養後(only one time) 風扇低頻率運轉時	保養外及風扇低頻率以外
EXTENT(程度)		
How many objects?(多少物體?)8	正在運轉時(8台)	正在運轉時(8台)以外
What is the size?(偏差多大?)9	2cm~0.1cm	2cm~0.1cm以外
How many deviations?(幾個偏差?)10	水面上30cm高	水面上30cm高以外
What is the trend?(趨勢如何?)11	愈來愈嚴重	減少

表 4 KT 問題分析描述表

Identify Possible Causes(找出可能的起因)		
Use distinctions and changes, or...(運用區別與變化，或者)		...knowledge and experience (...依組員知識與經驗)
What is different, odd, special, or unique about an IS compared to an IS NOT? (是與不是兩者間有什麼不同、古怪、特別或獨特的地方?)	What changed in, on, around, or about each distinction? (在每一個區別的裡外與週遭是否有任何改變?) When did the change occur? (改變何時發生?)	How could each...(如何每一個...) Change(改變) Change plus distinction(改變加區別) Change plus change(改變加改變) Distinction(區別) ...cause this deviation?(...造成偏差?)
Distinctions(區別)	Changes(變化)	Possible Causes(找出可能的起因)
		風扇頻率
		砂濾逆洗
		加藥(殺菌滅藻劑防蝕防垢劑)
		冷卻水水源
		冷卻水導電度

表 5 KT 可能原因表

Evaluate Possible Causes (評估可能的起因)	
Test possible causes(測試可能的起因)	
If _____ is the true cause of _____, how does it explain both the IS and the IS NOT? (如果 _____ 是造成 _____ 發生的真正原因，它如何解釋是與不是兩者的資訊呢?)	
Does not explain(不能解釋)	Explains only if(如果...能解釋)...
4,7,8,9,10,11	沒開風扇
ALL	
ALL	
ALL	
ALL	
Determine the most probable cause(決定最有可能的起因)	
Which cause best explains the IS and IS NOT information? (哪一個可能的起因最能夠解釋是與不是兩類資訊呢?)	
(一)冷卻水水源及冷卻水導電度 > (二)風扇頻率及砂濾逆洗 > (三)加藥(防蝕防垢劑及殺菌滅藻)	

3. 異常大量泡沫真因驗證

(1) 製程因子分析表

依據『來源及特性分析、要因分析』的結論，可能的影響因子綜多。在問題解決的應用手法中，以DOE的 2^{k-p}部分實驗法進行真因驗證為最佳的手法。擬選出 6 個因子及 2 個水準進行實驗(如表 6 所示)。

表 6 製程因子分析表

序號	製程因子	代號	水準		此製程因子可以很精確地設定或很容易控制	此製程因子之成本需特別考慮
			一	二		
1	砂濾逆洗	B	OFF	ON	✓	
2	風扇頻率	C	30Hz	50Hz	✓	
3	冷卻水導電度	A	1200 μs/cm	1300 μs/cm	✓	
4	冷卻水水源	D	CW+UPWR+冷凝水+WWR	CW+UPWR+冷凝水	✓	
5	防蝕防垢劑	E	58ppm	62ppm	✓	
6	殺菌滅藻劑	F	50ppm	70ppm	✓	

(2) DOE-2^{k-p} 部分實驗法

依據DOE的 2^{k-p}部分實驗法守則，在實務上需要兼具經濟效益及時效性故無法作全因子實驗(2⁶=64 次實驗)，所以實施部分實驗來進行。但部分實驗設計須考量主效用與低階交互作用的效應，因此在綜合上述的考量後，決定以最低階實驗次數進行全因子的 2⁶⁻³部份實驗，進行重要因子篩選實驗 8 組Run Order，各因子之實驗結果如圖 17 及圖 18 所示。

(3) 實驗設計軟體 minitab 應用

8 組 Run Order 隨機實驗，以實驗設計軟體 minitab 執行分析說明如下：

由柏拉圖(如圖 17 所示)解析對泡泡影響最大依序為 a.冷卻水、b.風扇轉速=CIA&殺菌滅藻劑交互作用、c.殺菌滅藻劑=防蝕防垢劑=砂濾

=CIA(導電度)。所以冷卻水對於泡泡的產生有絕對性的影響。繼而分析冷卻水源對泡泡影響主效果圖(如圖 18 所示)，說明如下：

①由DOE實驗結論分析，當冷卻水源為『CW、UPWR、冷凝水』則泡泡產生體積量約為 2 m³。

②當冷卻水源為『CW、UPWR、冷凝水、WWR』則泡泡產生體積量約 5.8m³。

從上述兩點說明，當冷卻水源多了WWR則泡泡體積量明顯增加的差距最大約有 3.8 m³之多。

從上述兩點說明，當冷卻水源多了WWR則泡泡體積量明顯增加的差距最大約有 3.8 m³之多。其餘『風扇轉速的頻率、CIA & 殺菌滅藻劑交互作用』影響次之。

(4) 結論

真因驗證以DOE全因子的 2⁶⁻³部份實驗法，進行重要因子篩選實驗 8 組 Run Order，結果對冷卻水塔產生泡泡影響的真因為WWR。因此要因為物料的層別。

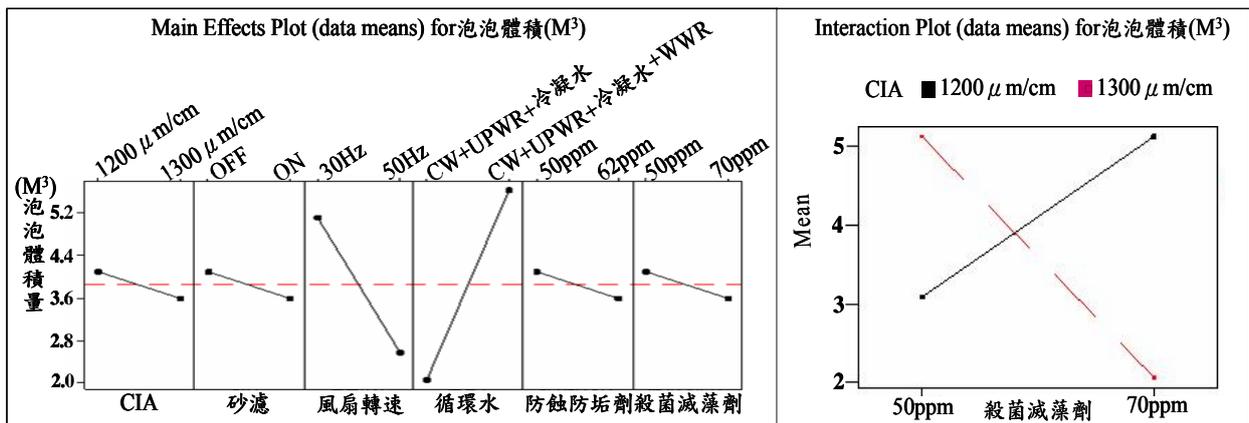


圖 17 製程因子與泡泡體積之柏拉圖

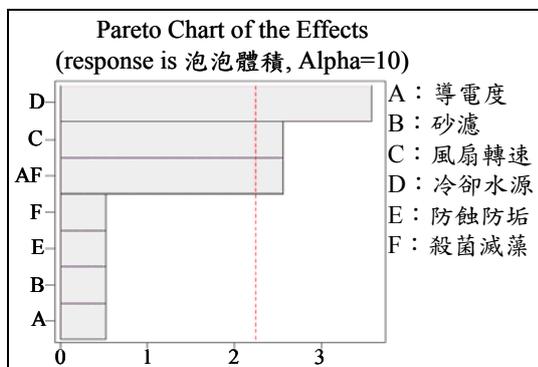


圖 18 製程因子與泡泡體積量主效果圖

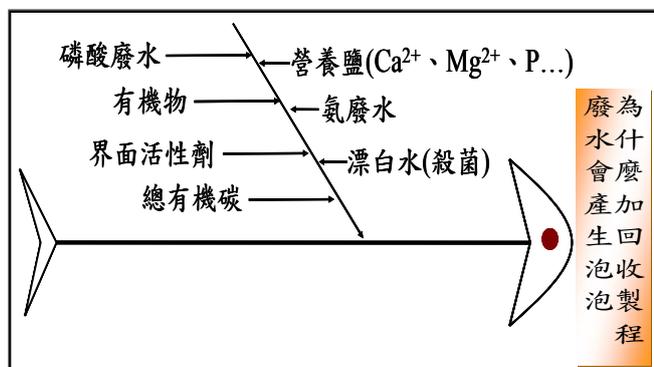


圖 19 WWR 特性要因圖

4.異常大量泡沫原因再分析

WWR(Waste Water Reclaim)即為廢水回收利用，針對為何冷卻水源加了回收製程廢水後會產生泡泡進行要因再分析。製程廢水回收的水源主要來至製程的Drain，包含磷酸廢水、氨廢水、有機物、漂白水(殺菌)、營養鹽(Ca²⁺,Mg²⁺,P…)、總有機碳、界面活性劑，並以特性要因圖 (cause and effect diagram) 方式進行『為什麼加回收製程廢水會產生泡泡』之要因分析(如圖 19 所示)探討其中差異性為何，所以後續將進行物料差異原因分析。

5.異常大量泡沫真因再驗證

(1)實驗因子篩選表

依據要因再分析之 WWR 特性要因圖，以實驗因子篩選表方式篩選出重要因子如表 7 所示：

表 7 實驗因子篩選表

層別	項次	小要因	控制力(母數)*1	技術力(強)*2	因子代號
物料	1	氨廢水(單獨收集)	Y	+	C
	2	磷酸廢水(單獨收集)	Y	+	B
	3	漂白水(系統加藥)	Y	+	A
	4	有機物(排多少收多少)	X	-	
	5	界面活性劑(排多少收多少)	X	-	
	6	總有機碳(排多少收多少)	X	-	
	7	營養鹽(排多少收多少) (Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , P...)	X	-	
*1.屬於母數之小要因為“Y”其餘為“X”					
*2.技術力篩選符號:+(強) V(中)- (弱)					

- ①小要因：解析 WWR 特性要因圖計七項。
- ②控制力：由系統操作面及實驗技術面分析小要因是否能獲得有效操作與控制，進而實驗分析影響層面。其中磷酸廢水、氨廢水屬於回收水源是實施單獨收集，能有效控制其水量多寡；漂白水(殺菌)屬於系統加藥，能有效控制加藥量及監控有效餘氯濃度多寡；其餘項目來源複雜無法獲得有效控制。
- ③技術力：根據控制力進一步分析，前三項小要因磷酸廢水、氨廢水及漂白水於系統上能獲得技術控制；其餘四項主要是來源複雜，所以於技術面無法控制。
- ④因子代號：依控制力與技術力的結果，給予小要因代號以利簡便進行分析。

實驗因子篩選表結果為磷酸廢水、氨廢水及漂白水(殺菌)，以 DOE

反應曲面法之中心混成設計(Central Composite Design, CCD)進行真因再驗證。

(2)DOE-反應曲面法 CCD

由實驗因子篩選表的結果進行製程因子分析表，如表 8 所示。以三個因子兩個水準進行 DOE-CCD 20 組 Run Order 中心混成設計隨機實驗，各因子之實驗結果如表 9 所示。

表 8 製程因子分析表

序號	製程因子	代號	水準		此製程因子可以很精確地設定或很容易控制	此製程因子之成本需特別考慮
			一	二		
1	漂白水	A	60%(206kg/day)	80%(274kg/day)	✓	
2	磷酸廢水	B	70%(16CMD)	90%(20CMD)	✓	
3	氨廢水	C	70%(263CMD)	90%(338CMD)	✓	

(3)實驗設計軟體 minitab 應用

20 組 Run Order 中心混成設計隨機實驗，以實驗設計軟體 minitab 執行分析說明如下：

①餘氯 ANOVA 模式適缺度檢定(Lack of Fit Test)=0.643 > 0.05，表示此模式正確(如表 9 所示)。

②導電度(CIA) ANOVA 模式適缺度檢定(Lack of Fit Test)=0.658 > 0.05，表示此模式正確(如表 9 所示)。

依據餘氯及導電度(CIA)模式適缺度檢定(Lack of Fit Test)結果均大於 0.05 表示此模式正確，驗證磷酸廢水、氨廢水及漂白水皆為 WWR 產生泡泡的真因。

表 9 餘氯及導電度(CIA)ANOVA 模式適缺度檢定表

Response Surface Regression: ST _{餘氯} versus NaOCl, H3PO4, NH3						Response Surface Regression: ST _{CIA} versus NaOCl, H3PO4, NH3							
The analysis was done using coded units.						The analysis was done using coded units.							
Estimated Regression Coefficients for ST _{餘氯}						Estimated Regression Coefficients for ST _{CIA}							
Term	Coef	SE Coef	T	P		Term	Coef	SE Coef	T	P			
Constant	0.7984	0.1685	4.737	0.001		Constant	0.09722	0.009344	10.405	0.000			
NaOCl	-0.0982	0.1118	-0.878	0.400		NaOCl	-0.01723	0.006199	-2.779	0.019			
H3PO4	0.1551	0.1118	1.387	0.196		H3PO4	-0.00223	0.006199	-0.360	0.726			
NH3	-0.0073	0.1118	-0.065	0.949		NH3	-0.00200	0.006199	-0.323	0.753			
NaOCl*NaOCl	-0.0069	0.1088	-0.064	0.950		NaOCl*NaOCl	-0.00037	0.006035	-0.062	0.952			
H3PO4*H3PO4	0.0461	0.1088	0.423	0.681		H3PO4*H3PO4	0.00511	0.006035	0.846	0.417			
NH3*NH3	-0.0953	0.1088	-0.876	0.402		NH3*NH3	-0.01275	0.006035	-2.113	0.061			
NaOCl*H3PO4	-0.0625	0.1461	-0.428	0.678		NaOCl*H3PO4	0.00213	0.008100	0.262	0.798			
NaOCl*NH3	-0.1875	0.1461	-1.283	0.228		NaOCl*NH3	-0.00137	0.008100	-0.170	0.869			
H3PO4*NH3	0.2375	0.1461	1.626	0.135		H3PO4*NH3	0.00038	0.008100	0.046	0.964			
S = 0.4132 R-Sq = 45.1% R-Sq(adj) = 0.0%						S = 0.02291 R-Sq = 57.7% R-Sq(adj) = 19.7%							
Analysis of Variance for ST_{餘氯}						Analysis of Variance for ST_{CIA}							
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	1.4006	1.4006	0.15563	0.91	0.551	Regression	9	0.007163	0.007163	0.000796	1.52	0.262
Linear	3	0.4609	0.4609	0.15364	0.90	0.475	Linear	3	0.004176	0.004176	0.001392	2.65	0.106
Square	3	0.1760	0.1760	0.05866	0.34	0.795	Square	3	0.002935	0.002935	0.000978	1.86	0.200
Interaction	3	0.7637	0.7637	0.25458	1.49	0.276	Interaction	3	0.000052	0.000052	0.000017	0.03	0.991
Residual Error	10	1.7074	1.7074	0.17074			Residual Error	10	0.005249	0.005249	0.000525		
Lack-of-Fit	5	0.7074	0.7074	0.14147	0.73	0.643	Lack-of-Fit	5	0.002126	0.002126	0.000425	0.68	0.658
Pure Error	5	1.0000	1.0000	0.20000		≥ 0.05	Pure Error	5	0.003123	0.003123	0.000625		≥ 0.05
Total	19	3.1080					Total	19	0.012412				

6. 改善方法研究及確認

真因再驗證的結果以 DOE 反應曲面法之中心混成設計搜尋最佳化的操作條件，並填入 Response 餘氯品質特性規格(望大、LSL=0、USL=1.5)及目標值(Target=1.0)等參數，以 minitab 求解 Response Optimazer，結果如表 10 所示。

表 10 DOE 反應曲面法之 CCD 最佳化結果表

Optimal D 0.00000	Hi Cur Lo	NaOCl 86.8179 [70.0] 53.1821	H3PO4 96.8179 [80.0] 63.1821	NH3 96.8179 [80.0] 63.1821	最佳化操作條件參數	
						製程因子
						參數
						氨廢水
					磷酸廢水	
					漂白水	

餘氯 Targ: 1.0 y = 0.7984 d = 0.59671			
--	--	--	--

以 P.D.C.A 的步驟驗證最佳化操作條件參數設定連續操作三個多月，由前述『改善目標設定』作為效果確認的方式，說明如下：

(1) 去除冷卻水塔泡沫

DOE-CCD 的結論，最佳化(Optimal)操作條件的參數設定分別為：

①NaOCl 加藥量參數設定開度 70%，亦即 240 kg/day(實廠換算值)。

②H₃PO₄廢水回收量 80%，亦即 18CMD(實廠換算值)。

③NH₃ 廢水回收量 80%，亦即 300CMD(實廠換算值)。

由最佳化操作參數設定，冷卻水塔產生泡沫次數由改善前的 25 次降為改善後的 0 次，效果確認目標達成。如圖 20 所示。

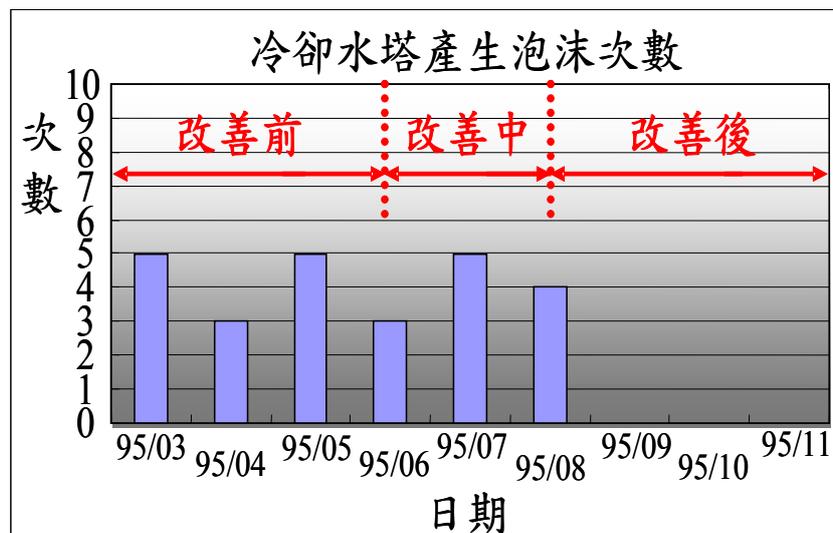


圖 20 冷卻水塔改善前/後柱狀圖

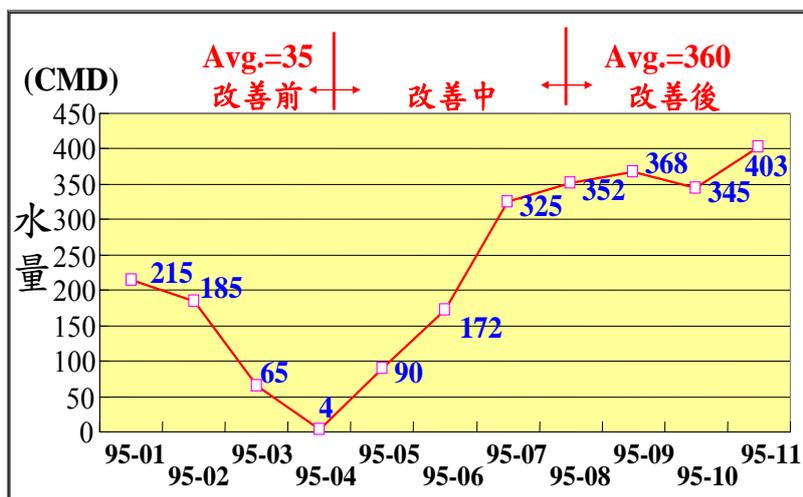


圖 21 回收水量改善前/後堆移圖

(2)提升回收水量至 200CMD

冷卻水塔產生異常泡沫獲得改善後，這促使了回收水可以回收再使用，亦即提高了回收水的使用率，由異常時(改善前)回收水無法再使用的現象，經過改善後達成回收水量 200CMD 以上之目標，且再現性良好(如圖 21 所示)。在經過了三個多月的效果確認後，統計回收水量竟然比目標設定值多出了 160CMD，亦即總回收水量達 360CMD，目標達成率高達 180%之多，順利達成目標(如圖 22 所示)。

7.改善流程標準化

問題的解決在經歷效果確認達成目標後，將 DOE 反應曲面法之中心混成最佳化的操作參數建立為日後作業系統標準化的規範內容(如表 11 所示)。

作業操作條件	
作業因子	參數
氨廢水回收量	80%
磷酸廢水回收量	80%
漂白水加藥量	70%

表 11 作業系統標準化規範

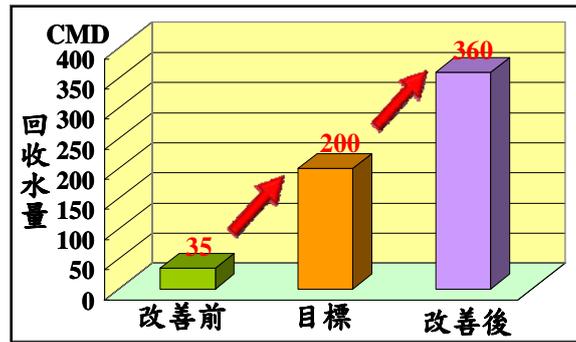


圖 22 回收水量目標效果確認圖

四、系統運轉經濟效益

經改善後各項費用節省共約 3,290,000 元/年，相關項目如圖 23 所示。

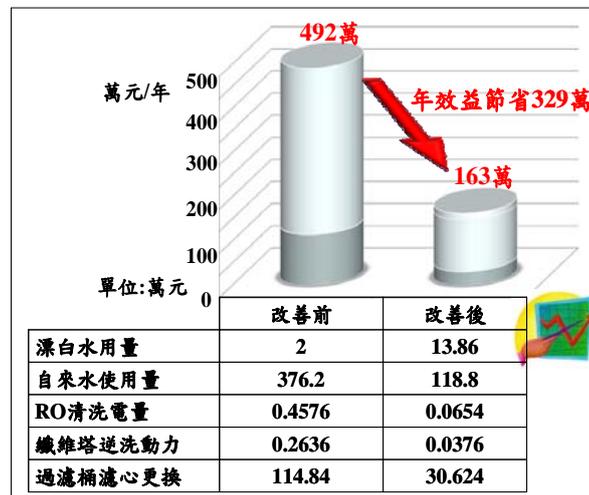


圖 23 改善效益圖

五、結 論

1. 本實廠案例經為期八個月之研究探討冷卻水塔產生異常泡沫之改善，找出真因分別為磷酸廢水、氨廢水及漂白水。其中解決之道僅需調整系統操作參數『①漂白水加藥量 240 kg/day②磷酸廢水回收量 18CMD③氨廢水回收量 300CMD』。而值得探討的是無須再增加硬體設備之投資即可改善異常狀況，期望這改善過程能提供作為同業的參考。
2. 本案例藉由系統化改善手法找出了錯綜複雜的真因，同時在改善之道無另外增加其他化學藥品以及必須兼顧回收水量不能減少之壓力下，解決了冷卻水塔產生大量泡沫異常之窘境，並成功的回收磷酸廢水及氨廢水達到廢

水回收再利用之目標。其有別於一般傳統冷卻水塔產生異常泡泡加漂白水抑菌解決之不同。

- 3 本研究經由 QC、統計、實驗計劃法及其中之反應曲面法-中心混成設計的手法找到異常之真因並且找出最適化系統操作參數，不僅解決實廠之問題並縮短尋找真因的時間節省了大量的資源。同時結合廢水專業之背景，有效的解決問題及系統流程之最佳化，期望提供本實廠案例能作為後續研究者之借鏡與參考。
4. 本案例 DOE-CCD 實驗中的餘氯及導電度模式其 R-sq 僅四至五成，未來仍有改善之空間。相對的，回收水量是否還有提升空間，未來仍需持續努力。
5. 以本廠實例而言，半導體業之冷卻水塔是不容許經常性的停機供做尋找問題點的實驗分析，因此在有限的時間內及有效運用統計工具將是解決問題之關鍵，故顯示出統計工具運用的重要性。

六、致 謝

能成功完成冷卻水塔使用回收廢水產生異常大量泡沫問題改善，最要感謝華邦電子 Z110 及 Z710 實驗室同仁的幫忙，並感謝唐麗瑛教授、王春和教授 DOE 手法的指導，此外 A00F 張協理、廠務郭副處長及以下各級長官支持及協助，機械課同仁對回收水使用於冷卻水塔的狀況討論，更是在系統改善過程中莫大的助益，最後更要感謝 MU23 廢水課全體同仁藉由團隊合作的力量完成這項錯綜複雜之工作。

七、參考文獻

1. 高肇藩，給水工程，台南市成功大學環境工程學系經銷，1900。
2. 經濟部工業局，廢水處理場操作管理，經濟部工業局編印，1994。
3. 王春和，工業實驗設計(反應曲面設計)講義，中正理工學院/王春和教授編寫，2006。
4. 唐麗瑛，實驗設計(DOE)講義，交通大學工業工程與管理學系/唐麗瑛教授編寫，2006。
5. 彭定國、吳鴻錚、鄭大興，MINITAB 統計分析與應用，新文京開發出版(股)公司，2006。
6. 詹昭雄，專業技術結合基本統計講義，世曜國際品質專業顧問(股)公司，2006。
7. 黎正中、陳源樹，實驗設計與分析，高立圖書有限公司，p.479~528，2006。
8. Charles H. Kepner、Benjamin B. Tregoe, The New Rational Manager, Kepner-Tregoe Inc.