

廢水處理

應用狹點分析方法以提昇工業用水效率探討

段紀義*、張一岑**

摘 要

本文探討如何應用狹點分析方法，以水資源循環再利用方式，進行一家石化廠及二家食品廠之工業節水與減廢。由於製程中各種污染物質多變，因此本文僅選擇最主要之污染成分作為限制因子進行研究。

應用狹點分析方法並藉由數學規劃技巧求出最低製程水使用量，可協助產業有效規劃水資源循環再利用方式。本研究之案例工廠經分析，省水比例達 30~60%；石化專區中之工廠所產生的高導電度廢水，如經集中處理理應可全部回收；而石化廠及兩個食品廠用水網路經整合後，可回收 60%。由此可見，現有工業用水效率尚有極大改善空間，此分析方法值得推廣應用。如將狹點分析方法應用於二個或以上之污染主成分限制因子之整合，效益更高；然而，技術上雖可行，但所需計算步驟與處理程序更為複雜，經濟可行性尚待探討。

【關鍵字】 1.狹點分析 2.節水減廢 3.系統整合

*中國合成橡膠公司明膠廠組長

**國立高雄第一科技大學環安系副教授

一、前 言

台灣年降雨量是世界平均值的 2.6 倍；但因地狹人稠，每年每人所分配雨量約僅為世界平均值之七分之一。而台灣地區年平均可利用水資源僅約佔降雨量之 7%。近年來由於氣候變遷，雨量顯著不足，每年夏季民生用水常面臨限水威脅，全民節約用水已成為水資源主管機關全力推展的工作之一。

製程系統整合一直是工業界長久以來極為重視的研究課題，能源危機發生後，熱能系統之整合倍受重視。目前傳統熱交換網路系統(heat exchange network, HEN)之整合技術已經相當成熟。由熱交換網路系統整合經驗可知，使用狹點分析，可以大幅提高熱能使用效率，降低能源成本(Linnhoff et al. 1978,1979, 1983; 陳師奇, 2000 ; Huang and Elshout, 1976; Gundersen and Naess, 1988)。近年來，狹點分析亦已應用至水網路系統等質量交換網路(Mass Exchange Network, MEN)，以求得最適用水狹點及最適供水線(El-Halwagi. and Manousiouthankis,1989, 1990; Mann & Liu, 1999)。

1994 年 Wang 及 Smith 將狹點分析應用於煉油廠用水改善中，原水消耗及廢水產出量降低 20%，製造成本下降約 20%；如於狹點分析上再增加再生製程(如廢水處理)，則可再進一步降低原水及廢水量約 60%，並降低製造成本超過 25% (Wang and Smith, 1994a)。

1995 年 Wang 及 Smith 將狹點技術應用於特用化學工廠分析，結果原水消耗量由 165 降低到 90.7 公噸/時，廢水產出由 110 降低到 50.64 公噸/時。1996 年 Tripathi 以狹點技術分析每天生產 1,200 噸紙之造紙及紙漿製造工廠，僅投資一百五十萬美元，每年可節省 80 萬美元。

本文運用狹點分析，探討石化業與食品業公用製程進行排放水的循環與再利用，以瞭解不同產業間水資源整合的可行性。

二、節水狹點分析之解析方法

2.1 建立目標值

一般常用之狹點分析方法有濃度複合曲線法、濃度區間圖表等，本文僅介紹濃度複合曲線法，以說明如何運用狹點分析方法建立目標值。圖 1 為一工廠用水未循環再利用的原水網路與限制因子濃度案例。

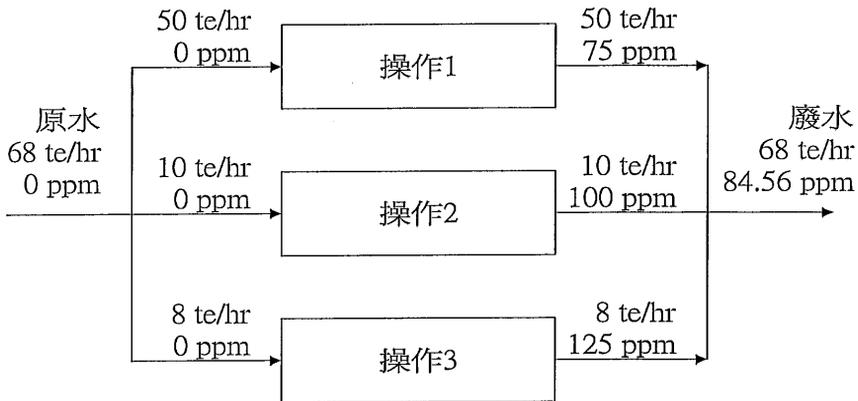


圖 1 未循環利用之水區塊圖 (Mann & Liu, 1999)

以圖 1 為例，當使用濃度複合曲線可求其最小原水需求量時，分為下列三步驟：
 步驟一：繪製以濃度與物質負荷為座標之座標圖，並標上三條操作個別程序線。
 步驟二：將各單元製程用水進出口之污染物不同濃度區分成污染物溶質濃度區間，再計算每一濃度區間內之污染物溶質負載量，將區間內各單元操作個別程序線連接起來成累積操作，如圖 2 所示。

4 應用狹點分析方法以提昇工業用水效率探討

步驟三：由起始點劃一直線，正切濃度複合曲線之點即為狹點，此條直線為最適供水線，如圖 3 所示。依據此法可得再利用之操作用水降至每小時 56.67 噸；此為再利用之操作用水之目標值。

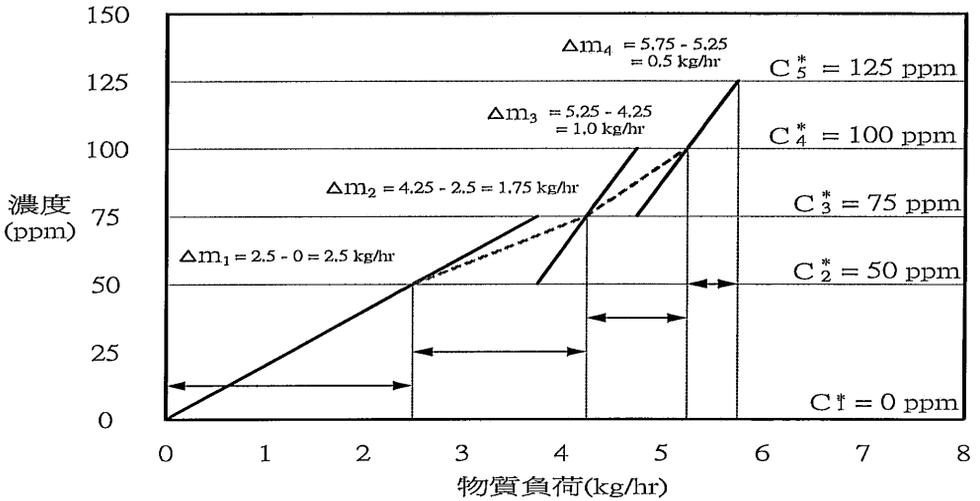


圖 2 再利用之操作用水濃度複合曲線—個別程序線之累積操作 (Mann & Liu, 1999)

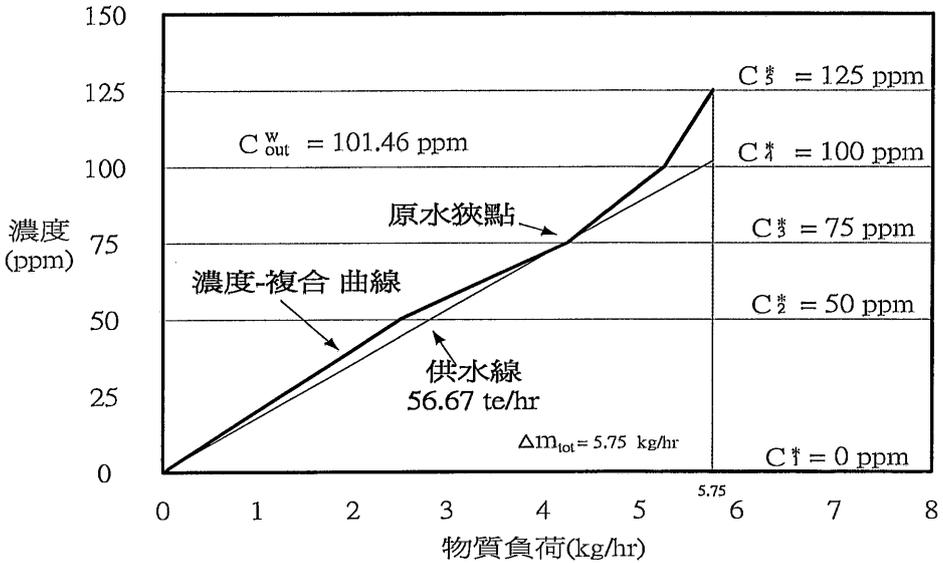


圖 3 再利用之操作用水濃度複合曲線及最適供水線(Mann & Liu, 1999)

2.2 水資源循環系統

水資源循環系統方式有下列三種：

1. 水再利用：廢水直接再利用於其他單元設備之操作用水。
2. 再生再利用：各單元設備排放出之廢水，經適當處理後，處理水再利用。
3. 再生回收：要求如同前述，唯再生移除之污染物會被要求更加嚴格，再生水可回收至主製程系統重複使用。

2.3 網路最適化(network optimization)

針對現有製程運用狹點分析找到最小指標化-最適供水線，然後再經過用水及排放水系統整合以達成此一目標；此即為系統流程狹點之最適供水線。但這並不一定是最適狹點，而須與製程實際狀況互相配合。因此，符合實際最適用水狹點即必須思考改變製程成最適製程，亦即需修正現有之用水網路系統使成為最適系統流程，如此方可得到最適用水狹點，使水再利用最大化及廢水產出最小化。

三、案例探討

3.1 石化廠

3.1.1 用水狀況說明

工廠每日實際總用水量為 4,855 噸，其中製程用水量 2,702 噸/日，汽電廠以鍋爐及冷卻水塔用水為主，用水量為 2,153 噸。廢水量 1,336 噸，其中 400 噸經該廠內廢水處理系統處理後回收至生產製程使用，剩餘 936 噸廢水則直接排放至工業區聯合污水處理廠。由於各製程單元水質要求不一，不易整合，因此僅探討汽電廠用水系統的整合。汽電廠中，影響水質較大之四種物質為電導度、鈣硬度、氯離子及懸浮物，由於各物質間存在比例性之關係，因此僅選定鈣硬度作為水質管制依據。圖 4 顯示該廠汽電廠各部門水流量與鈣離子濃度平衡。

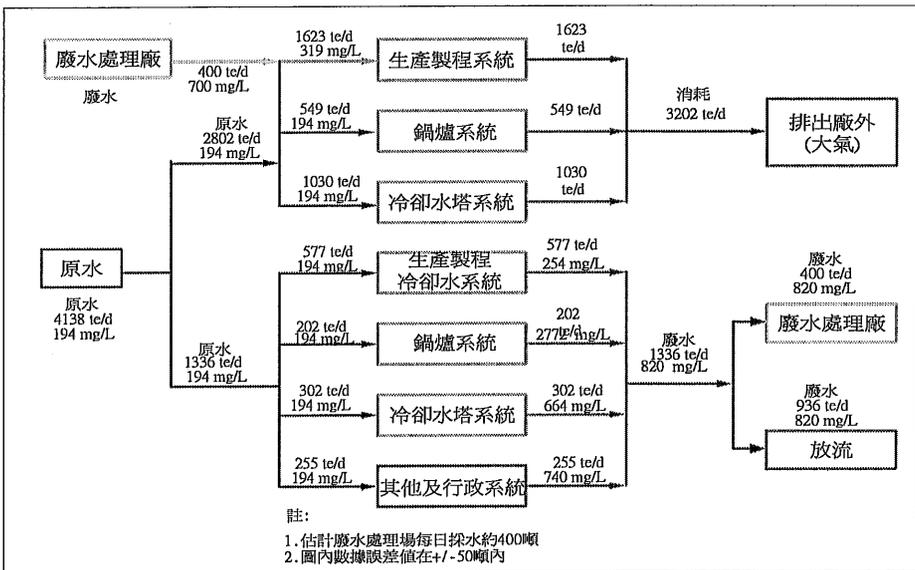


圖 4 石化廠生產製程簡化後水平衡圖

3.1.2 狹點分析

將限制數據製成濃度區間如表 2 所示，可經由表上明確得到各濃度區間之物質負荷數據，並得到鈣硬度為 600mg/L 時為狹點。依據狹點之累積物質負荷量，經計算後可得最大流量需求為 487.7 噸。同樣可運用作圖法—濃度複合曲線如圖 5 所示，及格線圖法如圖 6 所示得到相同之結果。

3.1.3 結果

經由運用狹點分析後，可將每日用水量由 703 噸調降至 488 噸，節水 215 噸，節水比例 30.58%。節水部份所有水均回收至冷卻水塔，項目如下：純水再生快洗水 66 噸、純水採水排放水 30 噸、廠房清潔水採簡易沉降後，取上層澄清水計 119 噸。

表 2 石化廠濃度區間表

	濃度	冷卻水塔 排水系統	清潔 用水	實驗室 用水	物質 負荷	累積物質 負荷	流量
	mg/L	302 te/day	344 te/day	57 te/day	kg/day	kg/day	te/day
1	0			↓		0	0
					11.4		
2	200	↓	↓	↓		11.4	57
					281.2		
3	600	↓	↓	↓		292.6	487.7
					71.8		
4	800	↓		↓		364.4	455.5
					96.9		
5	2500			↓		461.3	184.5

8 應用狹點分析方法以提昇工業用水效率探討

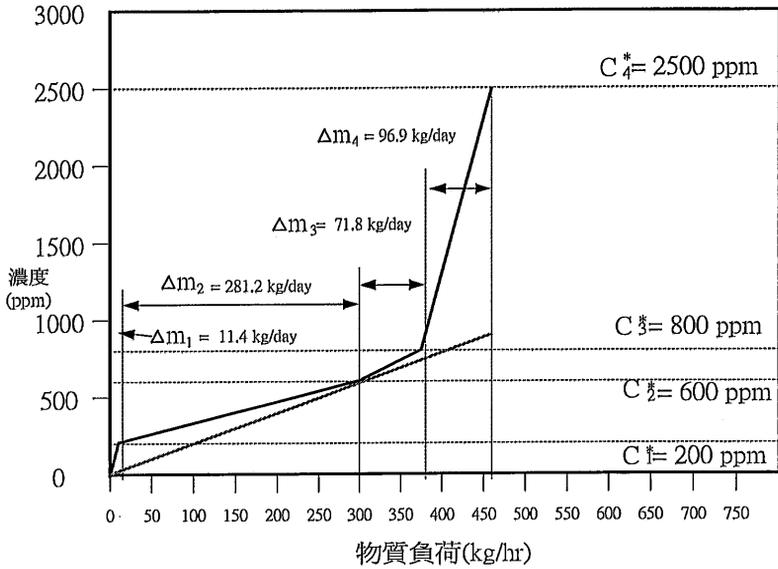


圖 5 石化廠作圖法—濃度複合曲線

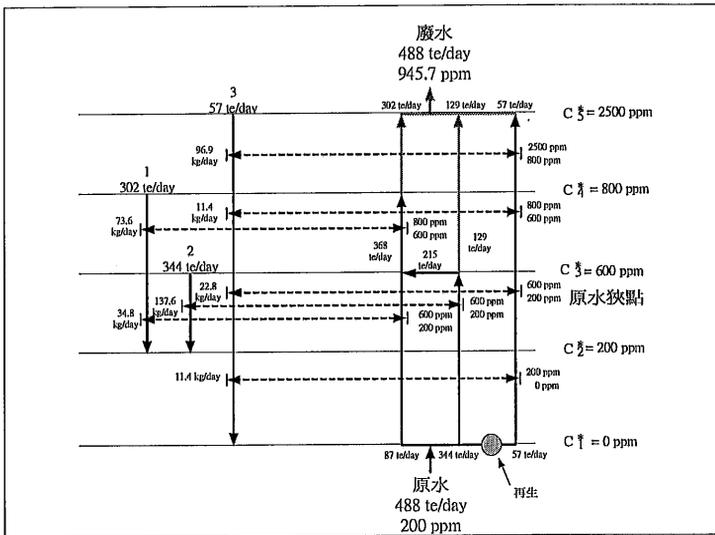


圖 6 石化廠格線圖

冷卻水塔之排放水可直接回收至製程使用，該廠後因開發新品，對水質要求提高以提升產品品質，在冷卻水回收至生產製程部分已無法使用；然而經系統整體進一步分析後，發現冷卻水塔仍有改善空間，即提高冷卻水塔循環水濃縮倍數，由原先濃縮倍數 4-5 倍提高至 6-7 倍，及鈣硬度可控制到 1200 mg/L，如此每日排水水量可由 302 噸降至 220 te/ay，相對亦減少每日排水量 82 噸。

使用狹點分析調整後水平衡圖如圖 7 所示。

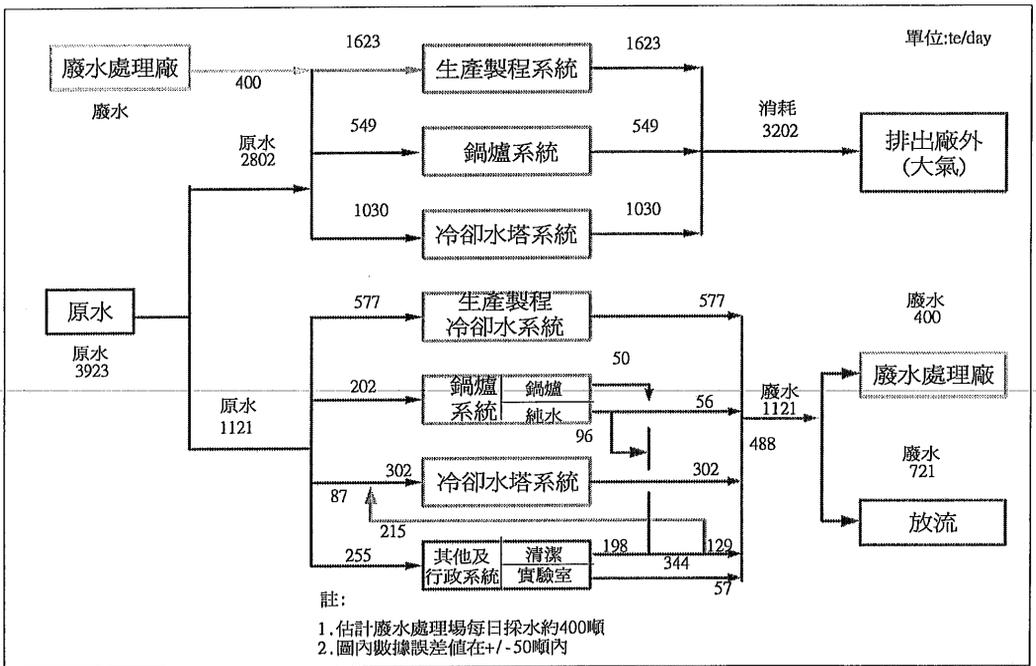


圖 7 石化廠使用狹點技術改善後水平衡圖

3.2 食品廠案例一

3.2.1 用水狀況說明

本案例工廠為豬隻外皮加工廠。每日使用水量約 800 噸，廢水產出量約 472 噸；全廠用水分為製程用水及公共用水兩大部分；製程用水又可分為冰水系統及熱水系統兩部分。冰水系統每日使用水量為 282 噸，詳細資料如圖 8 所示。水質之主要控制因子為水中之氫離子濃度含量，故針對此部分分別採取水樣後，量測其 pH 值再換算成氫離子濃度，作為水質管制項目。

3.2.2 限制濃度

本研究案例所使用限制濃度因子為氫離子濃度，主要為磷酸造成，可用石灰法使其產生磷酸氫鈣沉澱去除磷酸降低水中氫離子濃度達到再生效果。

本案例之濃度複合曲線如圖 9 所示，得到再生狹點為 6.3mg/L，但因累積物質負荷量下降故最大流量需求降為 60 噸，及出口濃度降為 26.86mg/L。相關區塊圖如圖 8 所示。

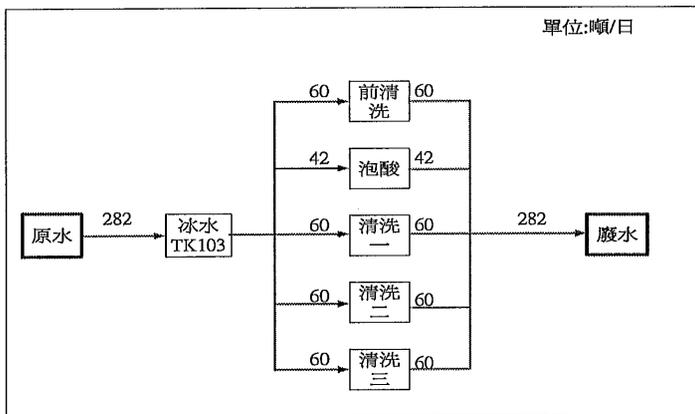


圖 8 食品廠案例一冰水系統水平衡圖

3.2.3 狹點分析應用

將限制數據製成濃度區間表如表 3 所示，經由表上得到各濃度區間物質負荷數據，並得到氫濃度為 6.3mg/L 時為狹點。而依據狹點之累積物質負荷量，經計算後可得最大流量需求為 120 噸。可運用作圖法—濃度複合曲線如圖 9 所示。此冰水系統經運用狹點技術後，將部份排放水直接回收利用相關區塊圖如圖 10。

表 3 食品廠案例一冰水系統濃度區間圖表

	濃度	泡酸	清洗一	清洗二	清洗三	物質負荷	累積物質負荷	流量
	mg/L	42 te/day	60 te/day	60 te/day	60 te/day	kg/day	kg/day	te/day
1	0			↓	↓	0.24	0.0	0
2	2.0		↓	↓	↓	0.516	0.24	120
3	6.3		↓	↓		0.57	0.756	120
4	15.8	↓	↓			0.6636	1.326	83.9
5	31.6	↓					1.9896	62.96

12 應用狹點分析方法以提昇工業用水效率探討

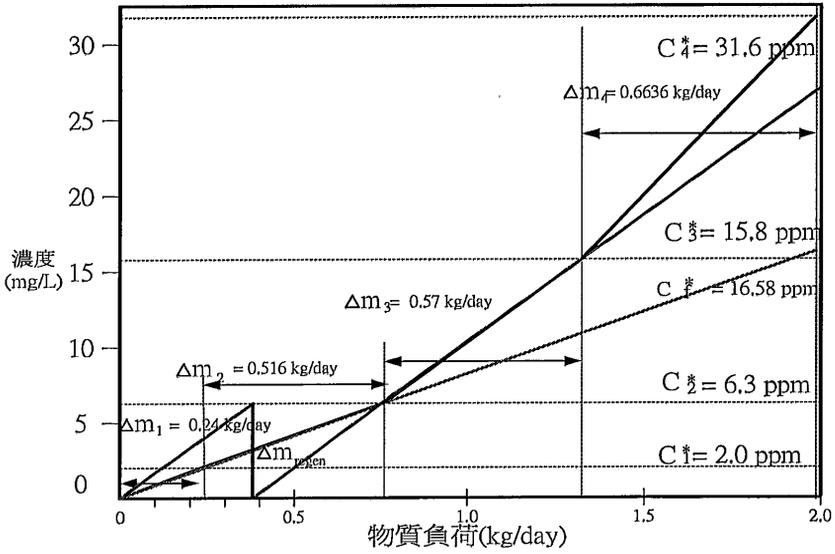


圖 9 食品廠案例一冰水系統再生作圖法—濃度複合曲線

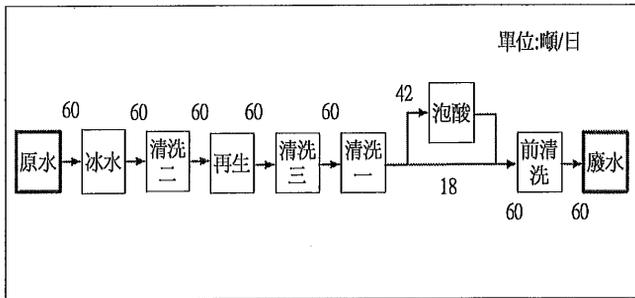


圖 10 食品廠案例一冰水系統運用狹點再生技術改善後區塊圖

3.2.4 結果

本案例為針對食品廠使用冰水部份進行討論，直接使用狹點分析後，可將每日用/排水量由 282 噸調降至 120 噸，每日減少用水量 162 噸，節水比例 54.45 %。該廠所用之泡酸劑為磷酸，計畫於排出水中加入石灰產製磷酸氫鈣，並作為肥料或飼料之添加物；相對於排出水可降低酸含量，可視為再生，此處理過之排出水可回收使用。此再生部分再運用狹點技術運算後，使用水量可再降至每日 60 噸，每日用水量可再下降 60 噸，及全部用水量每日減少 222 噸。

3.3 食品廠案例二

3.3.1 用水狀況說明

本節繼續檢討案例一食品廠熱水系統部份，熱水系統水平衡圖如圖 11 所示，由用水平衡圖中可得到每日使用水量為 308 噸及排放廢水量為 121 噸。

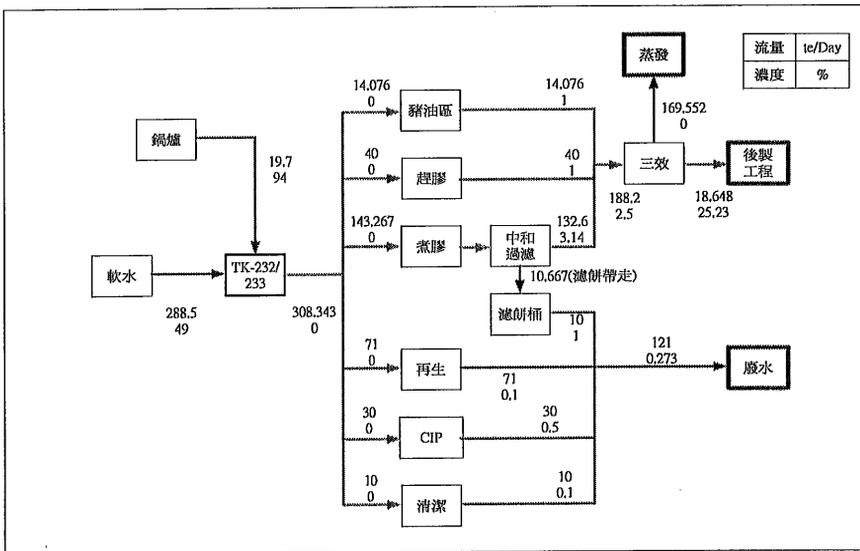


圖 11 食品廠案例二熱水系統水平衡圖

14 應用狹點分析方法以提昇工業用水效率探討

此處主要功用為豬隻外皮加工產品之精製處理程序，相對水質中即含有此產品，故針對此部分分別採取水樣後，量測其水中此產品濃度以作為此處水質管制項目。

3.3.2 狹點分析應用

將限制數據製成濃度區間表如表 4 所示，由表上明確得到各濃度區間物質負荷數據，並得到溶液中含產品濃度為 6.0 %時為狹點。依據狹點之累積物質負荷量，經計算後可得最大流量需求為 120 噸。同樣可運用作圖法—濃度複合曲線。此熱水系統經運用狹點技術後，將部份排放水直接回收利用相關區塊圖如圖 12 所示。

表 4 食品廠案例二熱水系統濃度區間圖表

	濃度	豬油區	趕出液	過濾	物質負荷	累積物質負荷	流量
	% (ton/te)	14.076 te/day	40 te/day	132.6 te/day	ton/day	ton/day	te/day
1	0		↓		0.04	0.0	0
2	0.1	↓	↓		0.379	0.04	40
3	0.8	↓	↓		0.028	0.419	52.317
4	1.0	↓		↓	1.467	0.447	44.668
5	2.0			↓	5.304	1.913	95.672
6	6.0			↓		7.217	120.29

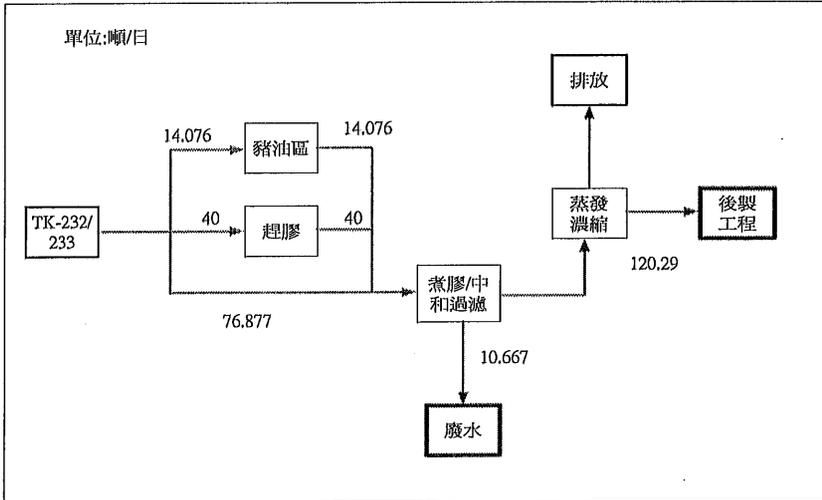


圖 12 食品廠案例二熱水系統區塊圖表

3.3.3 結果與討論

本案例經直接使用狹點分析調整後，可將每日用/排水量由 187 噸降至 120 噸，每日減少用水量 67 噸，節水比例 35.83%。於蒸發濃縮所排放出之水汽，可冷凝後回收使用，此部分每日水量約 140 噸，可視為狹點分析之再生回收使用部分，因含有溫度可直接回收至熱水系統使用，做法如前不再詳述；故全部回收水量可達 207 噸。經檢討 3.2 節與本節使用狹點分析調整後，原水用量由每日 800 噸降至 352 噸，廢水產出量由每日 472 噸降至 250 噸。

3.4 石化工業區廠際整合案例研究

經濟部水資局於 86 年舉辦「大社工業區節約用水示範計畫」，期間針對該工業區內 11 家廠商中選出 5 家進行節約用水輔導，執行成果每天可節省水量 2,944 噸，佔其總用水量之 16.4%，每年省水總效益為 1,894.2 萬元。本研究針對此 5 家廠商進行廠際整合，探討廠際間合作之可行性，故在數據之取得即直接沿用。

16 應用狹點分析方法以提昇工業用水效率探討

此 5 家工廠進行用水檢討後，使用原水及排放水均以公用設施最多，其中又以冷卻水塔最高，故針對冷卻水塔用水進行討論；其排水量 2,262 噸，為總用水之 84.96%，而排出水量佔總用水量之 13.98%；公用區排放水大部分為冷卻水塔排放水，小部分為離子交換再生逆洗水及鍋爐排放水，故水質均極為相近，均為含有高導電度之廢水，應集中處理。冷卻水塔排放水主要為硬度過高，可添加石灰、蘇打灰或苛性鈉軟化處理，以結晶或沉澱方式去除排放水中之鈣、鎂硬度、重碳酸鹼度及二氧化矽等硬度，即可全數回收使用。

3.5 廠際整合案例研究

3.5.1 用水狀況說明

本節將前面所討論的三個案例進行整合工作，以了解不同性質之工廠水資源整合使用之可行性。

3.5.2 數據及系統整理

食品廠之用排水量相較於石化廠少，但水質部分要求較為嚴格，甚至部份水質需先經過陽離子交換樹脂予以軟化成軟水再使用，其排放水之水質特性除因食品廠之關係造成有機物含量較高(COD 偏高)外，其餘無機物含量均低。

而石化廠對水質之要求相對於食品廠較寬放且用排水量較大，廠內用水多數用於高溫設備之降溫，對於高 COD 之廢水可直接使用對製程影響不大；故在水資源之運用上考慮將食品廠之排放水導入石化廠使用，故最後之限制因素以石化廠之鈣硬度作為限制要求，並將之整理後得到限制因子濃度表如表 5 所示。

3.5.3 狹點分析應用

前面數個章節已充份運用狹點分析之各種方法分析水資源整合工作，故於此僅運用格線圖法，結果如圖 13，主要目的除可看出水資源使用分配之情形外，對各水資源使用濃度區間物質負荷亦可清楚判定。

3.5.4 結果與討論

本案例將不同性質工廠經整合後，可將每日用/排水量由 1,371 噸降至 544 噸，每日減少用水量 827 噸，節水比例 60.32%。以本研究案如使用在綜合工業區內則亦可收到類似之效果，可減少水資源之使用及降低廢水處理成本。

表 5 廠際整合案例限制因子濃度表

操作		流量		限制濃度				
		入口	出口	入口	出口			
I		te/day	te/day	mg/L	mg/L			
石化廠	生產製程系統	1623	0	200	600			
	鍋爐系統	549	0	200	0			
	冷卻水塔系統	1030	0	200	800			
	生產冷卻水系統	577	577	200	600			
	純水再生(加/慢)	56	56	0	10000			
	鍋爐排放	50	703	0	488	0	946	
	純水再生(快/排)	96		0		200		0
	冷卻水塔系統	302		302		200		800
	清潔用水	198		129		200		600
	實驗室用水	57		57		0		2500
小計		4538	4323					
食品廠	冰水系統	60	352	60	250	400		
	熱水系統	202		157				
	公用設備	90		33				
合計		4890	4573					

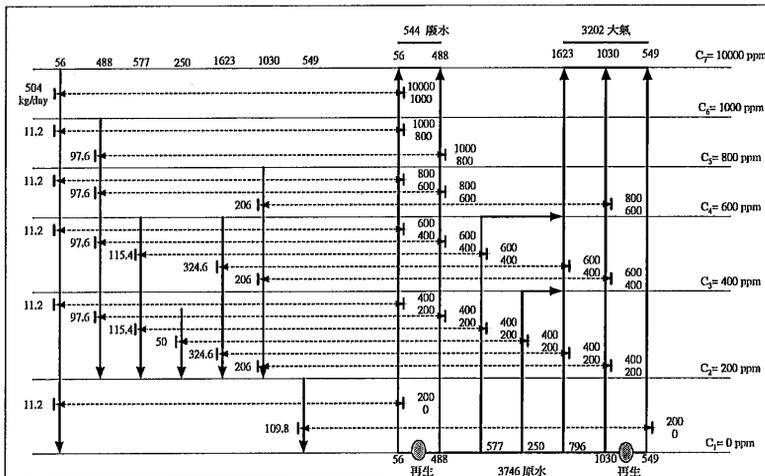


圖 13 廠際整合案例格線

四、結 論

1. 檢視所研究的案例結果，應用狹點分析調整後均可節水 30~60%，顯示國內各種工業在水資源使用上，確仍有改善之空間。
2. 同質性較高之專業工業區，各廠用水及排水特性均極接近，並不適合各廠間直接交互回收使用，但因排放水質相近，在廢水處理上可將類似公用區排放水於工業區內集中統一處理方式，如此可節省處理成本
3. 建議在較小單元或區域可應用類似本研究進行水資源回收系統整合工作，而數個或者數十個小區域可整合成一個大區域系統，再應用類似地理資訊系統(GIS)之方式進行系統比對整合，如此可快速得到整合結果。而大區域系統整合時，因系統複雜度提高，系統內可能同時存在二個或以上的主要限制因子，可應用狹點技術內多成分限制因子整合技術，在系統整合上將可獲得更大的效益。

參考文獻

中文部分：

1. 黃盈堯，1997，最適用水網路設計，國立成功大學，碩士論文。
2. 陳師奇，2000，狹點設計法與雙趨近溫度法在乙烯製成(含冷凍系統)熱交換網路設計之比較與應用，淡江大學，碩士論文。

英文部分：

1. El-Halwagi, M.M. and Manousiouthankis, V., 1992, " Optimal Design of Dephenolization Network for Pretroleum-Refinery Wastes", Trans. Instn Chem. Engrs part B 70, 131-139.
2. El-Halwagi, M.M. and Manousiouthankis, V., 1989, " Synthesis of Mass Exchange Networks", A.I.Ch.E. J., 8, 1233-1244.
3. El-Halwagi, M.M. and Manousiouthankis, V., 1990a, " Automatic Synthesis of Mass Exchange Networks with Single Component Targets", Chem. Engng. Sci., 9, 2813-2831.

4. Gundersen T. and L. Naess., 1988, "The Synthesis of Cose Optimal Heat Exchanger Networks", *Comp. Chem. Engng*, 12, 503-530.
5. Huang f. and R. V. Elshout, 1976, "Optimization the Heat Recovery of Crude Units", *Chem. Engng. Prog.*, 72, 68-74.
6. Linnhoff, B. and Flower, J. R.,1978,"Synthesis of Heat Exchanger Networks" *A.I.Ch.E. J.*,24,633-654.
7. Linnhoff, B. and Hindemarsch, E.,1983,"The Pinch Method for Heat Exchanger Networks ",*Chem. Eng. Sci.*,38,745-763.
8. Linnhoff, B., Mason, D. R. and Wardle, I.,1979,"Understanding Heat Exchanger Networks ",*Comp. Chem. Engng* , 3, 91-97.
9. Mann, J. G. and Liu, Y.A. 1999, *Industrial Water Reuse and Wastewater Minimization*.
10. Peters, J., 1995, "Process Technology Winner : Water-Monsanto and Linnhoff March," *The Chemical Engineer*, 54, May 25
11. Smith, R., 1995, *Wastewater Minimization*, in *Waste Minimization through Process Design*, A.P. Rissite, editor, pp.93-108, McGraw-Hill, N.Y..
12. akama, N., Kuriyama, T., Shiroko, K., and Umeda, T.,1980,"Optimal Water Allocation in a Petroleum Refinery", *Comp. Chem. Engng* 4,251-258.
13. Tripathi, P., 1996, "Pinch Technology Reduces Wastewater" *Chem. Eng.*, 103(11), 87.
14. Wang, Y. P. and Smith, R., 1994a, "Wastewater Minimization," *Chem. Eng. Sci.*,49, 981.
15. Wang, Y. P. and Smith, R., 1994b, "Design of Distributed Effluent Treatment Systems", *Chem.Eng.Sci.*,49, 3127.
16. Wang, Y. P. and Smith, R.,1995, "Wastewater Minimization with Flowrate Constraints,"*Trans. IChem.E.*,73(part A), 889.
17. Zeleny, M., 1982, *Multiple Criteria Decision Making*, McGraw-Hill, New York.