

東海大學
環境科學與工程學系碩士班

碩士論文

利用線性規劃法評估微電子產業之最佳水回收策略

Identification of water recycling strategy for
microelectronics industry using linear programming
models

研究生：黃柏穎 Po Ying Huang

指導教授：鄧宗禹 博士 Dr. Walter Den

中華民國一百零五年二月

東海大學碩士班研究生
論文指導教授推薦書

環境科學與工程學系黃柏穎君所提之論文

題目：利用線性規劃法評估微電子產業的最佳水回收策略

Identification of water recycling strategy for microelectronics industry using linear programming models

係由本人指導撰述，同意提付審查。

指導教授： 鄧守禹 (簽章)

105年1月25日

東海大學環境科學系碩士班

論文口試委員審定書

環境科學與工程學系碩士班黃柏穎君所提之論文

題目：利用線性規劃法評估微電子產業的最佳水回收策略

Identification of water recycling strategy for microelectronics industry using linear programming models

經本委員會審議，認為符合碩士資格標準。

論文口試委員召集人 葉順興 (簽章)

委員

陳宗弟

吳心迪

陳印輝

中華民國 105 年 1 月 25 日

致謝

時間過的很快，碩士生涯即將在此告一段落，在這段時間，首先要先感謝指導教授 鄧宗禹博士的指導與教誨，感謝老師開放式的教學方法，使學生得以自由發揮，且於研究及生活上給予鼓勵、建議。同時也感謝逢甲大學 吳志超教授、東海大學 陳維燁副教授、朝陽科技大學 莊順興教授在口試時，提出許多寶貴意見讓學生的論文能夠更完整。

而在研究生活中，也感謝空污奈米實驗室的李孟珊 博士、采薇學姊、薇馥學姊、企鵝學長、NEW、Ekk、柏融、芳瑜、三毛、栢諺、柏勳、瑞珂、典佑的幫忙及協助，沒有你們的協助，就不會有這份完整的論文。也感謝其他實驗室的同學們乃綾學姊、培軒學長、彥博學長、文志、彥智、瀨儀、陽能、欣怡學姊、雅琪學姊、美君學姊等在兩年的生活中，不管是在研究、生活、社會與娛樂上都給予我許多寶貴的人生知識及快樂的回憶，因為有你們的陪伴，使得我的研究所生活能夠歡樂並順利地完成論文。也感謝朋友柏融、昱元、韻帆、家瑞，在我遇到困難及低潮時不斷給我鼓勵與建議，讓我能夠繼續向前。

最後，謝謝我的家人，在求學的日子中，雖然我常常沒有回家幫忙家裡工作，但你們仍然在背後不斷的支持、鼓勵及體諒，有了你們當我的後盾，我才能順利完成學業，也才有現在的我，所有的感謝我將謹記在心，最後告訴大家，我要畢業了。

黃柏穎 謹誌

2016年2月 東海大學

中文摘要

在降雨時空分佈不均下，台灣水資源供應不穩定，為了確保用水無虞、維持正常生產已儼然成為高科技產業重要之挑戰，而為了提高水資源的回收再利用及水的利用效率，政府早已訂定嚴格之各項回收標準已及輔導廠商進行水回收的規劃。然而目前產業多半是使用經驗法則來規劃水資源的回收策略，但卻鮮少利用數學模式，計算出最大的節水量。

本研究旨在透過線性規劃法，針對最小用水成本及最小碳放兩目標進行模式設立及求解。當自來水水價提升 50% 時，將促成回收水單元 I、II 之回收量增加 10.5%，最後並歸納出工業的節水策略及建議。

關鍵詞：線性規劃法、微電子產業、用水回收率、碳足跡

Abstract

As uneven distribution of rainfall, the water supply in Taiwan is unstable. Thus, Maintaining normal production have become an important challenge in the high-technology industry. To improve the efficiency of water reuse and recycle in water resources, government has defined stringent recycle standards and provided counsel of water recovery planning. However, recycle water planning strategy has been frequently used in current industry, which mathematical models is rarely used to calculate the maximum amount of water saving. The aim of this study is using linear programming to design models and solution for minimum water cost and minimum carbon emission. When the water supply cost increased by 50 %, the water recovery unit (i,ii) would lead the recovered amount increased by 10.5 %. The water-saving strategies and recommendations also conclude in this study.

Keywords: Linear programming, Microelectronics industry, Water recovery, Carbon footprint

目錄

第一章、 緒論	1
1.1 研究緣起	1
1.2 研究動機	2
1.3 研究目的	3
1.4 研究架構	4
第二章、 文獻回顧	6
2.1 水資源概況	6
2.1.1 水資源供需情形	7
2.1.2 水資源環境潛在問題	11
2.2 工業用水概況	13
2.2.1 工業用水分類	13
2.2.2 水回收的技術、成本	15
2.2.3 微電子廠廢水特性：	19
2.2.4 微電子廠用水管理	20
2.3 碳足跡於水資源管理之應用	25
2.3.1 生命週期評估概述	25
2.3.2 水資源的碳足跡案例	29

2.4 工業用水最佳化模式	36
第三章、 研究方法	39
3.1 研究範疇與限制	39
3.2 模式架構	40
3.3 模式建立	47
3.4 限制條件	54
第四章、 結果與討論	55
4.1 最佳化模式情境模擬	55
4.1.1 最小需水成本	55
4.1.2 最小碳排放	62
4.1.3 小結	67
4.2 工業用水策略建議	68



圖目錄

圖 一-1 研究流程	5
圖 二-1 台灣地區民國 94 年至民國 103 年年平均降雨量....	8
圖 二-2 台灣地區水資源利用概況(2003-2012 平均值).....	9
圖 二-3 各標的用水概況	11
圖 二-4 工業用水分類	15
圖 二-5 三種水回收策略，左圖為直接再利用，中間為再生 再利用，右圖為再生再循環利用	17
圖 二-6 ISO 14040 原則與架構	27
圖 二-7 義大利「Water Distribution through Mains, except steam and hot water」自來水系統 PCR 系統邊界圖 ..	30
圖 二-8 純水前處理中含 Precoat Filter 製程	32
圖 二-9 純水前處理中含 C/A Filter 製程.....	33
圖 三-1 公會 R7 版用水平衡圖	42
圖 三-2 廠區內水資源流布圖	44
圖 四-1 最小需水成本情境一之解.....	58
圖 四-2 最小需水成本情境二之解.....	61
圖 四-3 最小碳排放之解	66

表目錄

表 二-1 回收系統的處理成本.....	18
表 二-2 中部科學中業園區各園區用水計畫書、環境影響說明書用水回收率相關規定	24
表 二-3 義大利 TW 與 BW 碳足跡系統邊界及結果.....	31
表 二-4 三級處理中各級處理程序之碳足跡.....	35
表 三-1 參數說明.....	45
表 四-1 最小需水成本情境一之解.....	57
表 四-2 最小需水成本情境二之解.....	60
表 四-3 最小碳排放之解.....	64

第一章、緒論

1.1 研究緣起

隨著世界人口不斷增長、科技發達及工業的持續蓬勃發展，民生用水以及家庭用水之需水量也日益增加，加上全球氣候變遷造成降雨時空分配不均，美國麻省理工學院全球變遷科學中心主任普林(Ronald G. Prinn)，於2014年8月在台達電揚光大樓發表之「氣候變遷對企業的意義-解析 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第五次評估報告」中，明確指出近年來發生極端氣候事件，例如颱風、乾旱以及夏季北極海冰的減少等，可能會影響現有的淡水資源循環率(Oki & Kanae, 2006)，由此顯示氣候變遷等問題對於環境影響的急迫與重要性，全球氣候暖化將導致高緯度地區降雨增多，中低緯度乾旱將增加，再加上台灣的地理環境因素，河川坡度過陡、降雨時空分部不均以及貯留堰壩容量不足等問題，造成國內用水風險不斷增高。因此，以經濟發展與永續發展為前提，工業用水的節約以及廢水的減量將是目前所需面對的重要課題(Gumbo et al., 2003)。

雖然台灣在工業用水方面僅占總用水量的7.8%，但相較民生用水以及農業用水，工業用水是較不與生活直接相關，但常於缺水期時協調農業休耕，調度水源使用以減少經濟損失，故也較容易引起民眾

觀感不佳。因此，產業用水減量以及回收率提升等問題是迫在眉睫的問題。

根據經濟部水利署核定，中部科學工業園區台中基地一、二期發展區域用水計畫書總需水量至民國 100 年為 145,000 頓/天；目前在中部科學工業園區中的主要廠商為光電、半導體產業以及精密機械產業共占 73%，而在這些產業中的製程需要消耗大量的水資源及能源，用以維持機械設備的運轉及產品的良率。其中，廠區內之冷卻用水、製程水等水源經利用後仍有一定的水質品值，這些是值得透過直接再利用、再生再利用、再生再循環利用等回收方法，將回收水回歸至製程當中繼續使用，亦或者降階使用至非接觸性用水或取代次及用水如冷卻水塔等非製程用水使用，而水資源的回收再利用及水的利用效率，在全球層面上將是一個被長期性關注的問題(Miller, 2006)。

1.2 研究動機

以中部科學工業園區為例，科技相關產業如光電業與半導體業等，因製程用水量，雖並無直接利用水資源產生產品，但仍需大量水源以去除產品中雜質，因此，其用水效率受到極大的重視。而依照環境影響說明書及用水計畫書之內容指出，中部科學園區之開發，除要求產業達到全廠回收率大於 77% 以及全廠排放率小於 70% 外，園區內

不同產業亦依照其相關產業特性分別做規範，而又以光電產業及半導體產業更為嚴格，其製程回收率分別為 80% 及 85%。

為了達到環評所規範之用水指標，如製程回收率、全廠回收率與全廠排放率等指標，中部科學工業園區管理局自 96 年度起每年持續推動節約用水技術輔導，針對園區內廠家提出節約用水之策略以提升用水資源使用效率。另一方面透過問卷調查、現地訪查、統計分析等方法，深入了解園區內高科技產業的用水合理性。

而目前產業多半是使用經驗法則來規劃水資源的回收策略，但只能單純依據各用水點水量與水質之數據，進行回收水量的調配，然而，此種經驗法則方法，並不一定為最適用水規劃，也不一定能幫助廠商達到最佳的水資源利用率。文獻中雖有不同的節水策略評估、用水平衡盤點等方法，以提供進一步用水與節水量的分析，但卻鮮少利用科學的方法，或數學的模式，可以清楚地指出可回收之節水點，並同時計算出最大的節水量。

1.3 研究目的

本研究的目的是透過科學計算方法及數學模式，分析微電子廠中廢水流向以及確立可行之節水點與節水量，應用於半導體產業或光電產業之用水回收最佳化之規劃，並探討研究結果與實際用水情況，相

對於環評承諾之間之差異，釐清產官學界對於科技產業水資源規劃將面臨的挑戰。

1. 計算出廠內最小需水成本
2. 計算出廠內最小碳排放量
3. 提供工業節水策略建議

1.4 研究架構

本研究是以中部科學工業園區中之微電子廠為研究範圍，因目前產業多半是使用經驗法則來規劃水資源的回收策略，但卻鮮少利用科學的方法，或數學的模式透過科學計算方法及數學模式進行分析，故本研究將利用線性規劃法，並建立數學模式及情境設定，分析後並提出建議供決策者及後續研究之參考。其流程整理如下圖 一-1 所示。

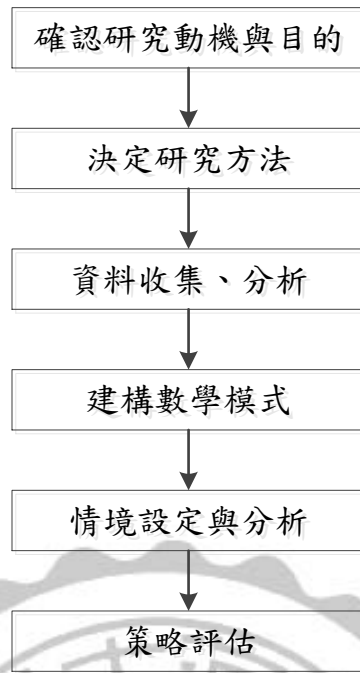


圖 一-1 研究流程



第二章、 文獻回顧

本研究將相關文獻整理為四個小節，首先在第一節水資源概況中收集了台灣的水資源供需情形，其中包含了歷年的降雨情形、水資源的利用概況、各標的用水概況以及水資源環境的潛在問題；第二節為探討工業的用水概況，內容包含工業用水的分類，並透過了解微電子廠的廢水特性以及現階段的回收技術與成本，配合現行環保法規中所提及或承諾之用水管理標準，審視工業用水的情況；第三節為探討碳足跡於水資源管理的應用，透過了解生命週期評估法以及水資源在碳足跡上的應用；第四節為工業用水的最佳化模式，透過案例來了解如何利用線性規劃來探討在資源有限的情況下，如何使工業用水更具效益。本章蒐集文獻種類包括期刊、博碩士論文、專案計畫報告、政府資料、法令及網路資料等，其整理內容如下：

2.1 水資源概況

本節依據經濟部水利署 2015 年 1 月出版之台灣地區近十年 (94-103 年)水利統計，及中央氣象局資料整理分析後，摘要說明台灣地區之歷年降雨情形及水資源利用實況及個標的用水概況，最後再分析水資源環境潛在的問題以做參考。

2.1.1 水資源供需情形

一、歷年降雨情形

台灣地區民國 94 年至民國 103 的年平均降雨量大約為 2486 毫米如

圖 二-1，民國 94 年平均雨量為 2984 毫米，較十年內平均多約 20%，其降雨量多分部在 7-9 月。民國 95 年平均雨量為 2631 毫米，較十年內平均多約 5.8%。民國 96 年平均雨量為 2778 毫米，較十年內平均多約 11.7%。民國 97 年平均雨量為 2702 毫米，較十年內平均多約 8.68%。民國 98 年平均雨量為 2179 毫米，較十年內平均短缺約 12.4%。民國 99 年平均雨量為 2284 毫米，較十年內平短缺約 8.2%。民國 100 年平均雨量為 2189 毫米，較十年內平短缺約 11.9%。民國 101 年平均雨量為 2761 毫米，較十年內平均增長約 11.1%，為連續三年短缺之降雨量帶來緩解。民國 102 年平均雨量為 2532 毫米，較十年內平均增長約 1.8%。而民國 103 年平均雨量為 1824 毫米，較十年內平均短缺約 26.7%，大量雨水短缺造成供水壓力上出現極大的問題。

(經濟部水利署, 2015)

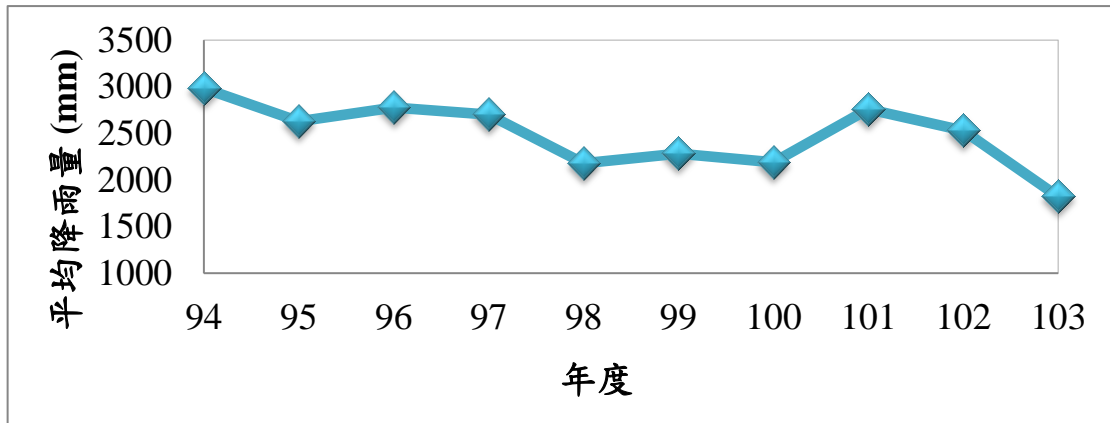


圖 二-1 台灣地區民國 94 年至民國 103 年年平均降雨量

(資料來源：交通部中央氣象局)

二、水資源利用實況

經統計 2003 年至 2012 年間，平均年降雨量為 980 億立方公尺，其中逕流量 722 億立方公尺占 73.6%，年蒸發量為 208 億立方公尺占 21.2%，年滲透量為 50 億立方公尺占 5.1%；而年逕流量 722 億立方公尺中流入海水量為 573 億立方公尺占每年逕流量的 79.4%；年河川引水量為 109 億立方公尺，占每年逕流量的 15.1%；年水庫供水量為 40 億立方公尺，占每年逕流量的 5.5%；而地下水的用水量為 56 億立方公尺，與年滲透量 50 億立方公尺相較之下顯示地下水仍有明顯的超抽 6 億立方公尺的狀況，圖 二-2。

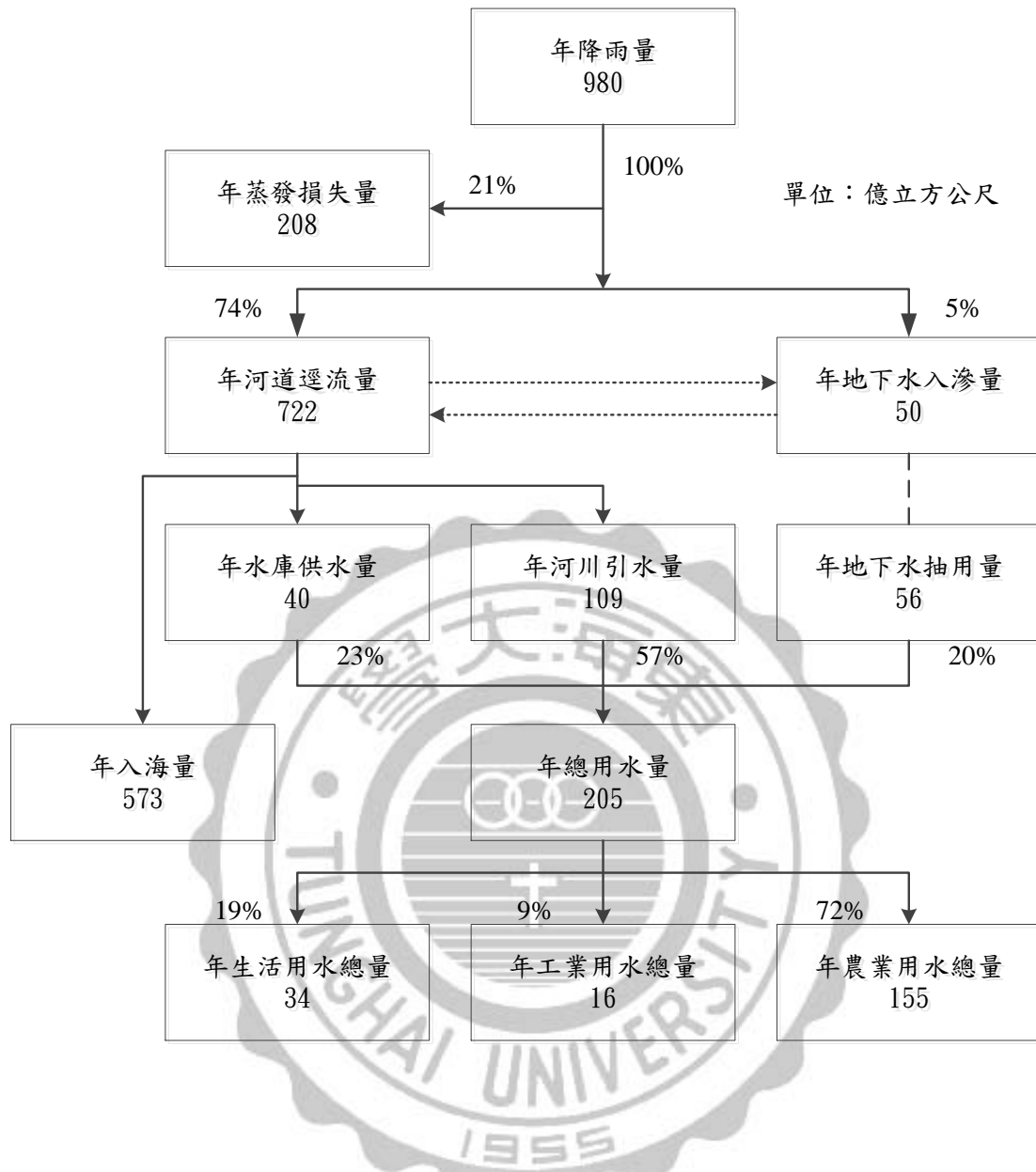


圖 二-2 台灣地區水資源利用概況(2003-2012 平均值)

(資料來源：經濟部水利署，(94-103 年)水利統計)

三、各標的用水概況

台灣本島的水資源利用概況 (2003-2012 年平均值)，總用水量為 205 億立方公尺，其中用水量最高者為農業用水 155 億立方公尺，占

總用水量的 75.6%，另生活用水為 34 億立方公尺，占總用水量的 16.6%，工業用水則為 16 億立方公尺，占總用水量的 7.8%。其分配如圖 二-3。

工業用水雖僅占百分之七點八，但在工業製程中之水多半為清洗產品用水或是冷卻用水，而這些水資源於排放時仍具有不錯的水質條件，可以透過再生及再利用等技術加上用水管理，讓這些水資源更有效率的被利用。

農業用水雖占總用水的最大宗，但其需求量可依水量的多寡做彈性調整供給。台灣每年的 5 到 10 月為豐水時期，約有百分之八十的雨量集中於此階段，此時期則利用豐沛的雨量來灌溉；而每年的 11 月至次年的 4 月為枯水時期，在這降雨量偏少的時候就會配合補助辦理休耕，以降低農業用水需求，適時調度農業用水轉往生活用水使用。
(歐陽嶠暉, 2014)

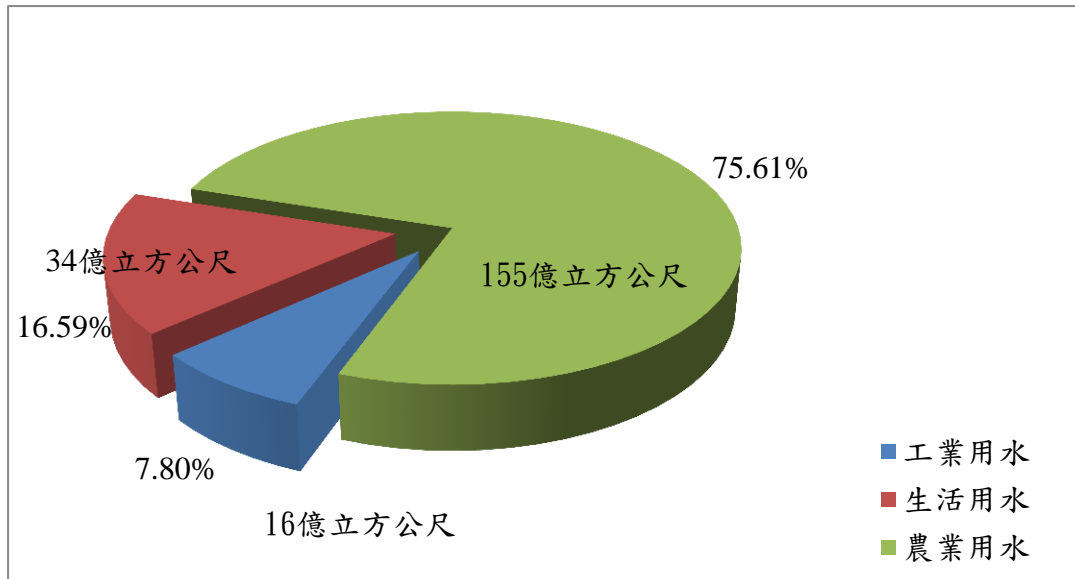


圖 二-3 各標的用水概況

(資料來源：經濟部水利署，(94-103 年)水利統計)

2.1.2 水資源環境潛在問題

根據「聯合國政府間氣候變遷小組」(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 於 2001 年的報告中指出，全球的暖化對於島嶼型國家在水文及水資源環境方面可能造成以下重大影響：

- 一、海平面上升：隨著暖化的現象加劇，海平面不斷上升不僅造成海岸線內縮，入侵的海水也將加速造成低窪地區的國家消失。
- 二、極端氣候事件頻傳：經統計，發生高強度降雨導致大規模洪水災害的事件頻傳；同時，乾旱區域也日益擴大，頻率愈加頻繁、持

續性的乾旱也更加劇惡化。

三、水資源供應面向：由於氣候變遷，可能使降雨時空更分布不均，因此增加了供水風險。

四、需水量：因溫度的上升必將造成蒸發量劇增，將導致灌溉需水量增加，最後造成供水的壓力提升。

而上述四項影響，對台灣而言也有不容小覷的影響，台灣有多處屬低漥地區，若海平面上升慎多恐將造成國土流失，河川變短。且日趨明顯的極端氣候造成降雨時空更分布不均也為將影響台灣的貯留堰壩造成蓄水、供水負擔。

台灣地區民國 94 年至民國 103 的年平均降雨量大約為 2486 公釐，是世界平均的 2.6 倍也是全世界第二多的國家，雖然擁有豐沛的降雨量，卻因受到地形特性影響、降雨時空分配不均以及貯留堰壩容量不足等問題，使大量雨水逕流入海，造成台灣成為世界第十八個缺水國家。

2.2 工業用水概況

工業用水依不同用途可分成冷卻用水、製程用水、鍋爐用水、生活用水、其它用水五大類。就各類別因水質不同亦可透過如：過濾、吸附、氧化、逆滲透(RO)、電透析(ED)、離子交換等再生技術，並搭配不同的回收技術如：直接再利用、再生再利用、再生再循環利用，來達成目前科學工業園區於環境影響說明書、園區用水計畫書中所定之水回收率。

2.2.1 工業用水分類

工業用水一般指在生產過程中所用來製造、加工、冷卻、空調、洗滌、鍋爐及其它用水的總稱。而工業用水大致可分為五類如：冷卻用水、製程用水、鍋爐用水、生活用水以及其它用水等，如圖 二-4 所示(夏羅振祥, 2010; 經濟部水利署, 2004)。

1. 冷卻用水 (Cooling Water Use)：工業產品生產過程中，為吸收或轉移製品及設備上多於之熱量，以維持正常溫度下工作所用之水。又依接觸方式分為直接冷卻與間接冷卻兩種。直接冷卻指被冷卻物直接與水接觸達到冷卻效果；間接冷卻指用水經過熱交換器而達到冷卻效果。另外，公共空調用水係指在工作場所中或製程中需溫、濕度調節之用水，一般歸類

於間接冷卻用水。

2. 製程用水 (Process Water Use)：指在製造過程中用來當作原料或是半成品進行化學反應或物理作用所需的水，也包含作為原料、半成品、成品、機具、生產有關之設備清洗所用之水等等都屬製程用水。而在不同的產品類型或規格，在水質的要求也將有不同的標準。
3. 鍋爐用水 (Boiler Water Use)：指在生產中提供生產或發電所需之蒸汽，在鍋爐內汽化所用之水含鍋爐給水、鍋爐水處理之用水等。
4. 生活用水 (Sanitary Water Use)：指員工及工作環境所需飲用水、廚房用水及衛生用水。此部分用水與工廠生產較無直接相關性。
5. 其他用水 (Miscellaneous Water Use)：包含景觀用水、消防用水、維修用水、營建用水，因使用時間較不固定，故將其歸納為其它用水。

而冷卻水中的洗滌塔用水(Local/Central scrubber)、冷卻水塔用水(Cooling tower)、公共用水(Public use)，因使用水質需求較低且無直接與製程相關，故歸類為次級用水。

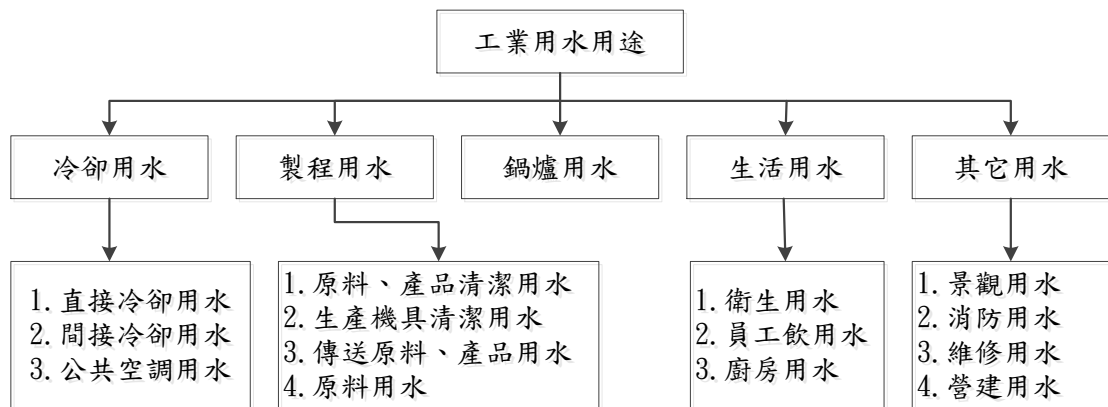


圖 二-4 工業用水分類

(資料來源：夏羅振祥, 2010)

2.2.2 水回收的技術、成本

在面對這些水資源供應的不穩定，我們可以透過水資源的節約或是水資源的再利用來減少用水的風險。一般而言，在產業界中的水資源規劃，大多以水資源節約與再生利用為主。也就是說藉由良好的污染預防或管理機制，以達到水資源的開發與利用最大化。有效利用及管理水資源，可大幅降低水資源使用時所造成之環境衝擊，特別是將已使用過之水資源直接降階使用至非接觸性(non-potable)用水或取代次級用水(secondary usage)，如冷卻水塔等非製程用水等(Meneses et al., 2010)抑或可以取代海水淡化(Pasqualino et al., 2011)。

而為了降低製程對水資源的需求量，最有效的方式應為設法提高

水資源的回收率，配合水再生設備，將製程的水回收再利用於其他的製程單元中。而現行可提高水回收率的策略簡述如下(Foo, 2009;

Wang & Smith, 1995)：

1. 直接再利用(Reuse):

經過製程 1 所產生的廢水，在未經處理且並不影響製程 2 產品良率或產量的情況下，可直接提供製程 1 廢水給製程 2 直接使用。

如此直接再利用的方法，可以減少製程 2 所需之原水，即為再利用所節省之水量。

2. 再生再利用(Regeneration-Reuse):

經過製程 1 所產生的廢水，因廢水中含有過多的污染物質而影響了直接回收再利用的可能性，因此，該股廢水的回收再利用，必須經過再生設備的處理，移除影響再利用的污染物質後，確定其水質在其他製程可以接受的濃度範圍(降低濃度)，即可再利用至其他製程中(如製程 2)。

3. 再生再循環利用(Regeneration-Recycle):

不同於前述兩種直接再利用與再生再利用的水回收方法，無論於任何製程所排放出的廢水，直接進入水處理單元，經過再生處理，移除所有內含之污染物質至製程源頭所能接受的水質條件為止(原水水質)，再進入原來的製程循環中使用。

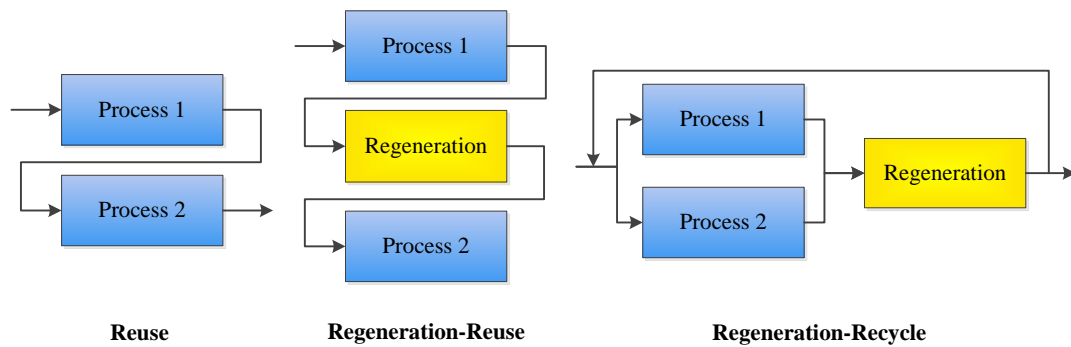


圖 二-5 三種水回收策略，左圖為直接再利用，中間為再生再利用，右圖為再生再循環利用

(資料來源：Foo, 2009)

而常用的水再生技術包含過濾、MF/UF、吸附、氧化、逆滲透(RO)、電透析(ED)、離子交換(IE)、消毒單元等技術。

以回收再利用或循環使用大致分類如下：

- (1) 濃硫酸回收：由於半導體廠製程中所使用的硫酸純度極高，因此使用後之廢棄濃硫酸仍為高純度之硫酸，可將其收集後提供鋼鐵業、金屬表面處理業等產業使用。
- (2) 廢酸、廢鹼液回收：在超純水製造過程中所使用之離子交換樹脂，經再生程序所產生之廢酸、廢鹼應將其收集，避免各自排出而造成廢水 pH 值驟變使管末廢水處理困難，且多餘之廢酸、廢鹼可供廢水處理場作為調整 pH 值使用。

(3) 製程用水回收再利用：以濕式蝕刻清洗為例，在製程機台中常用去離子水來清洗產品，其使用之電阻係數為 $18\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$ (25°C)，但清洗後流出之清洗水仍有 $10\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$ (25°C) 之潔淨度，因此可以就此股水進行回收再利用。

而回收系統的處理成本與設計節水量有相當大的關係，其整理如下表。

表 二-1 回收系統的處理成本

回收系統	費用	設計節水量
PWR 製程水回收系統	8000 萬	32000CMD
純水系統-RO 濃縮水回收	50 萬	300CMD
純水系統-UF 濃縮水回收	30 萬	240CMD
純水系統-MMF 反洗水回收	50 萬	200CMD
UF 濃縮水做 PCW 及 AC+2B3T 水源	100 萬	800CMD
RO 一段濃縮水做 AC+2B3T 再生用水	200 萬	1500CMD

(資料來源：本研究整理)

2.2.3 微電子廠廢水特性：

一、Integrated Circuit, IC 製造廠

由於半導體業的產品類型、規格相當的多樣化，製程單元的組合也都不盡相同，因此在製造過程中所產生的廢水種類及造成污染之化學物質種類多樣繁雜，但多半是為清洗晶片、去光阻劑及蝕刻等程序中所產生的廢水，若依其特性可分為酸性廢水、鹼性廢水以及含氟廢水如下(經濟部工業局, 2009)：

- A. 酸鹼廢水：含有 HNO_3 、 HF 、 NH_4OH 、 HCl 、 H_2SO_4 、 HAC 、 NaOH 、 NH_4F 、 H_2O_2 、二甲苯等成份，污染質為 pH、COD、SS 及微量 F^- 。
- B. 含氟廢水：含高濃度 HF ，污染質為 pH、COD、 F^- 。

二、IC 構裝廠

IC 構裝廠中電鍍過程因產品差異而有所不同，包括鍍錫鉛、鍍鎳、鍍銀等，綜合其廢水種類可依污染性及廢水來源區分為下列五種：研磨廢水、脫脂廢水、酸鹼廢水、氰化物廢水、重金屬廢水。

- A. 研磨廢水：含矽晶粉末，污染質為懸浮固體(suspended solids, SS)。
- B. 脫脂廢水：由電鍍前處理程序產生，含有懸浮固體、油脂、化學需氧 (Chemical Oxygen Demand, COD) 以及螯合劑等。

- C. 酸鹼廢水：由電鍍前處理程序產生，含有 H_2SO_4 、 HCl 、 $NaOH$ 等，污染質為酸鹼值(pH)、化學需氧(COD)、懸浮固體(SS)。
- D. 氰化物廢水：污染質為 CN^- 、酸鹼值(pH)。
- E. 重金屬廢水：由電鍍程序中產生，包括底材溶出、鍍液帶出，而溶入水洗水，其污染質為酸鹼值(pH)、鋅、鉛等重金屬。

2.2.4 微電子廠用水管理

國內微電子產業包含了晶圓代工、IC 半導體、TFT-LCD、發光二極體晶片及晶粒等產業，其用水單元包含了純水製造系統、製程用水、空調系統、廢氣處理系統等。在晶圓廠中，用水量的大小除了取決於製程產量、產能利用率外，也會受所生產產品之尺寸及線寬等影響用水量之多寡。而半導體製程中的主要用水點在利用超純水清洗及化學機械研磨 (Chemical Mechanical Polishing) 之用水(林文雄, 2005)。

以中部科學中業園區為例，不同園區內因其環境影響說明書以及用水計畫書中規範不同，而依照不同產業別訂定相對應之製程回收率 (Process recovery rate, RP)、全廠回收率 (Total plant recovery rate, TR)、全廠排放率 (Total plant discharge rate, TD) 用以規範科學園區內廠商節約用水，其整理如表 二-2。

台中園區目前依照「中部科學工業園區台中基地開發計畫環境影響說明書」及「中部科學工業園區台中基地第二期發展區擴建計畫(含第一期發展區變更)環境影響說明書」中用水管理措施已有明確規範台中園區中各產業回收用水率分別為：光電產業 80%、半導體產業 85%、生物科技／通訊／研發產業 70%。

后里園區-后里基地部分目前依照「中部科學工業園區第三期發展區(后里基地-后里農場部分)開發計畫書環境影響說明書」中之環評審查結論為后里園區-后里基地部分區內高科技業製程用水回收率(Process recovery rate, RP)應達 85%以上。環境影響說明書中用水管理措施已有明確規範后里園區-后里基地部分高科技廠商製程回收率需達 85%以上。

后里園區-七星基地部分目前依照「中部科學工業園區第三期發展區(后里基地-七星農場部分)開發計畫環境影響說明書」中之環評審查結論為后里園區-七星基地區內全區用水回收率應達 85%以上。環境影響說明書中用水管理措施已有明確規範后里園區-七星基地內園區全區營運後用水回收率需達 85%以上。

虎尾園區部分目前依照「中部科學工業園區雲林基地開發計畫環境影響說明書」中之環境影響說明書中第八章規定虎尾園區內各產業回收用水率分別為：光電產業 80%、生物科技／通訊／研發產業 70

%。

二林園區部分目前依照「中部科學工業園區第四期(二林園區)開發計畫環境影響說明書」中環評承諾為園區管理中心輔導進駐廠商研訂製程用水回收計畫，以節約水資源並減少放流水排放。

而在用水計畫書中也因不同園區而訂定不同的回收標準，台中園區內有純水製程之新廠，製程回收率需大於 80%，全廠回收率需大於 70%；而其他廠商製程用水回收率則需大於 70%。

后里園區-后里基地的部分有純水製程之新廠，製程回收率需大於 80%，全廠回收率需大於 70%；其他廠商製程用水回收率則需大於 70%。

后里園區-七星基地的部分有純水製程之新廠，製程回收率需大於 85%，全廠回收率需大於 75%；而其他廠商製程用水回收率則需大於 70%。

虎尾園區內製有純水製程之新廠，製程回收率需大於 80%，全廠回收率需大於 70%；而其他廠商製程用水回收率則需大於 50%。

二林園區中針對光電、積體電路、電腦周邊產業中含有純水製程之新廠製程回收率需大於 85%，全廠回收率需大於 70%，而無純水製程之新廠製程回收率需大於 75%，全廠回收率需大於 70%。

且「再生水資源發展條例」已於 104 年 12 月通過，賦予廢汙水

及放流水回收再利用明確的法律框架，此法主要內容包含水源供應短缺之虞地區之用水單位，強制使用一定比率再生水，這樣一來雖然再生水的建置成本攤提及操作費約 20 到 30 元，在其缺少價格競爭優勢下仍有強制力，這將迫使微電子廠在各廠內進一步提升節水措施、水回收率。



表 二-2 中部科學中業園區各園區用水計畫書、環境影響說明書用水回收率相關規定

用水計畫/ 環境影響說明書	用水回收率 規定	台中園區	后里園區 -后里基地	后里園區 -七星基地	虎尾園區	二林園區
用水計畫書	用水回收率	【純水】製程回收率之新廠，製程回收率>80%，全廠回收率>70%。	【純水】製程回收率之新廠，製程回收率>80%，全廠回收率>70%。	【純水】製程回收率之新廠，製程回收率>85%，全廠回收率>75%。	【純水】製程回收率之新廠，製程回收率>80%，全廠回收率>70%。	光電、積體電路及電腦周邊產業中【有純水】製程回收率之新廠，製程回收率>85%，全廠回收率>70%。
		其他廠商製程用水回收率>70%。	其他廠商製程用水回收率>70%。	其他廠商製程用水回收率>70%。	其他廠商製程用水回收率>50%。	【無純水】製程之新廠，製程回收率>75%，全廠回收率>70%。
	廠商自行設置用水容量	1~2 日	2 日	5 日	1~2 日	3 日以上
環境影響說明書	用水回收率	產業用水回收率：光電 80%、半導體 85%、生物科技／通訊／研發產 70%。	高科技廠商製程回收率>85%。		產業用水回收率：光電 80%、生物科技／通訊／研發產業 70%。	

2.3 碳足跡於水資源管理之應用

本節挑選水資源管理方法之一的生命週期評估法，透過投入和產出以及對環境影響之衝擊評估，盤查產品之碳足跡，了解其完整的生命週期過程所累積的直接與間接產生之溫室氣體排放總量，作為本研究模式建立中的參數參考。

2.3.1 生命週期評估概述

生命週期評估(Life Cycle Assessment，簡稱 LCA)，是系統分析與評估之方法，針對一產品在整個生命週期中所投入的原料以及產品的最終處置，投入和產出以及對環境影響之衝擊評估(Klopffer, 1997)。從原料的取得、製造、使用、回收、廢棄等階段來評估所產生對環境的衝擊。

1992 年國際標準組織(International organization for standardization, ISO)制訂了 ISO 14040 系列的管理標準；於 2006 年，ISO 修訂了 ISO 14040 與 ISO 14044，其中 ISO 14040 將生命週期評估分成四個階段，如圖 二-6 所示。

1. 目標與範疇界定(Goal and Scope Definition)

在進行產品的生命週期評估之前必須先確定其「研究目標」以及「界定研究範圍」，包含其功能單位、目標系統範圍、衝擊種類及衝擊評估之方法、假設及限制數據品質等(Mohapatra et al., 2002)。

2. 生命週期盤查分析(Life Cycle Inventory Analysis, LCI)

生命週期盤查分析包含了數據收集以及清單計算兩大類，過程

中必須依照其功能單位進行數據收集，包含所有使用的原物料以及能資源，以及製造過程中所排放至空氣、土壤、水體之物質之數據。其中較具爭議的部分為產品與副產品的負荷分配，可於範疇界訂時將其分配原則及比例定義完整。

3. 生命週期衝擊評估(Life Cycle Impact Assessment, LCIA)

透過聯結盤查數據與特定的環境衝擊來評估其對於環境的潛在衝擊及其程度，在衝擊評估階段時會將不同衝擊種類分別予以不同權重，計算其個別貢獻度。

4. 生命週期闡釋(Life Cycle Interpretation)

闡釋合併盤查分析與衝擊評估的觀察結果，或將盤查分析的觀察結果，與目的與範疇整合一致之階段，以達成結論與建議用以提供決策考量。



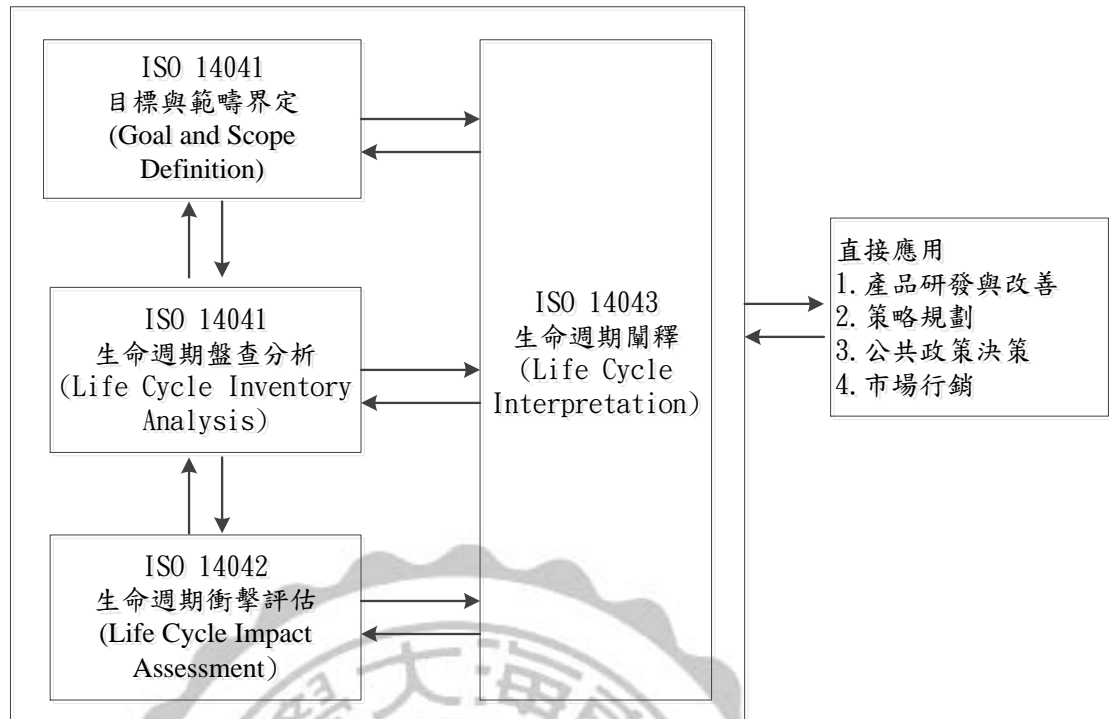


圖 二-6 ISO 14040 原則與架構
(資料來源：ISO 14040, 2006)

碳足跡(Carbon Footprint)一詞源自於Wackernagel 於1996年所提出之「生態足跡(Ecological footprint, EF)」，他將人類所消耗的各種物質、資源，因其生產過程中所衍生的各類環境衝擊，轉換成面積表示，藉以分析人類對於自然資源的消耗與生態的涵容能力進行比較。而在2009年時Minx 利用會計原則及建模方法將碳足跡定義為「用以衡量經濟活動(Activity)所產生之溫室氣體排放總，或是產品完整的生命週期過程所累積的直接與間接產生之溫室氣體排放總量」(Minx et al., 2009)。而這些經濟活動的行為者可以包含個人、群體、政府、公司、甚至是世界的人口；產品的部分則包含商品與服務。所以，碳足跡的計算必須包含所有直接(現地或內部的)與間接(非現地、外部、隱含及

上下游等)的活動。

在環保署「產品與服務碳足跡查證技術指引」中針對碳足跡盤查作業程序訂定完整之作業程序，其中必須包含下列幾點：(一) 建立查證協議、(二)初始文件審查及風險評估、(三) 規劃查證與取樣計畫、(四)展開查證作業、(五)查證意見、(六)內部技術審查、及(七)核發查證聲明等步驟，盤查產品的整個生命週期，從生產製造時原物料的使用，到成品的棄置(不包括使用階段的排放)，將估算之溫室氣體 (greenhouse gas ,GHG)以二氧化碳當量為表示單位。



2.3.2 水資源的碳足跡案例

一、義大利自來水系統產品規則

全球第三類環境產品宣告網路組織 (GEDNET) 已公告一份由義大利工業發展組織 (Emilia-Romagna Development Agency, ERVET) 所制訂之有關自來水系統產品類別規則(Product Category Rule, PCR) 文件：「Water Distribution through Mains, except steam and hot water」，此 PCR 以於 2011 年 9 月 27 日被正式批准。

以生命週期評估的概念而言，自來水的製造過程包含取水、淨水及配送過程所使用到的能源、化學品、保養的用料等都需將其製造過程納入計算，甚至各階段中的基礎設施建造、再投資 (reinvestment)，以及拆除過程中的能源、材料的使用、運輸相關部分均包含在評估範疇內詳如圖 二-7 所示。

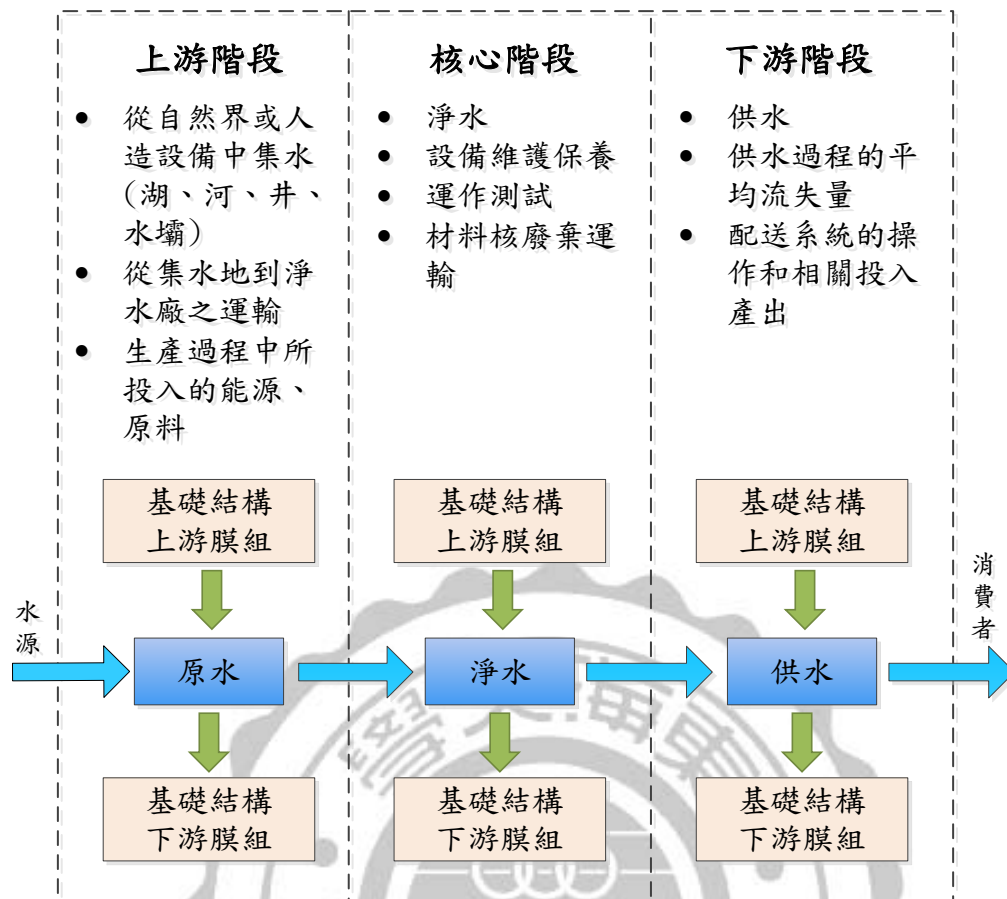


圖 二-7 義大利「Water Distribution through Mains, except steam and hot water」自來水系統 PCR 系統邊界圖
(資料來源：Botto, 2009)

Stefano Botto 於 2009 年探討一來自義大利的 Siena 城市的自來水系統 (Tap Water, TW) 以及義大利六家不同規模之瓶裝天然礦泉水 (Plastic-bottled Natural Mineral Water, BW) 製造商，以評估功能單位體積皆為 1.5L 的水進行碳足跡研究。在 TW 的部分，系統邊界被規範為以下四個階段，1.原水的提取，2.原水提取後送至生產地之能源消耗，3.淨水過程及儲存階段 4.配送至用戶端階段，計算結果顯示，1.5L 的自來水碳足跡為 0.00091 kg CO₂ eq，其中能源投入占最高

97.19%，而能源投入中又以電力使用為最高占 95.93%。而在 BW 的部分，其系統邊界被規範為以下四個階段，1.原水的提取以及製做PET瓶原料的生產製造，2. 原水提取後送至生產地之能源消耗、PET 瓶製造與運送至裝配廠之能源消耗，3.裝瓶和包裝之過程，4.配送至銷售據點及運送到消費者間的運輸過程，計算結果顯示，1.5L 的自來水碳足跡為 0.238~0.3 kg CO₂ eq 取其平均應為 0.269 kg CO₂eq。由此結果可知同樣 1.5L 的水，取自 BW 相較於 TW 將高出約 300 倍的二氯化碳當量排放(Botto, 2009)。

表 二-3 義大利 TW 與 BW 碳足跡系統邊界及結果

評估項目	自來水(TW)	瓶裝天然礦泉水(BW)
項目 1	原水的提取	原水的提取以及製做 PET 瓶原料的之產製造
項目 2	原水提取後送至生產地之能源消耗	原水提取後送至生產地之能源消耗、PET 瓶的製造與運送至裝配廠之能源消耗
項目 3	淨水過程及儲存階段	裝瓶和包裝之過程
項目 4	配送至用戶端階段	配送至銷售據點及運送到消費者之間的運輸過程
計算結果 (單位： 1.5L)	0.00091 kg CO ₂ eq	0.238~0.3 kg CO ₂ eq

(資料來源：Botto, 2009)

二、半導體廠超純水分析

在台灣一半導體廠個案中，生產單位為每片八吋晶圓，以一座滿載為三萬片之八吋晶圓廠為例，該案例的功能單位為生產 10,000 片晶片所需之超純水，而每片晶片耗用超純水水量以 3.3m^3 計算，研究範圍內探討兩種超純水製程因使用過濾水源材質不同而分為預塗膜製程 (Precoat Filter Process) 及陽離子交換樹脂(C/A Filter Process)。

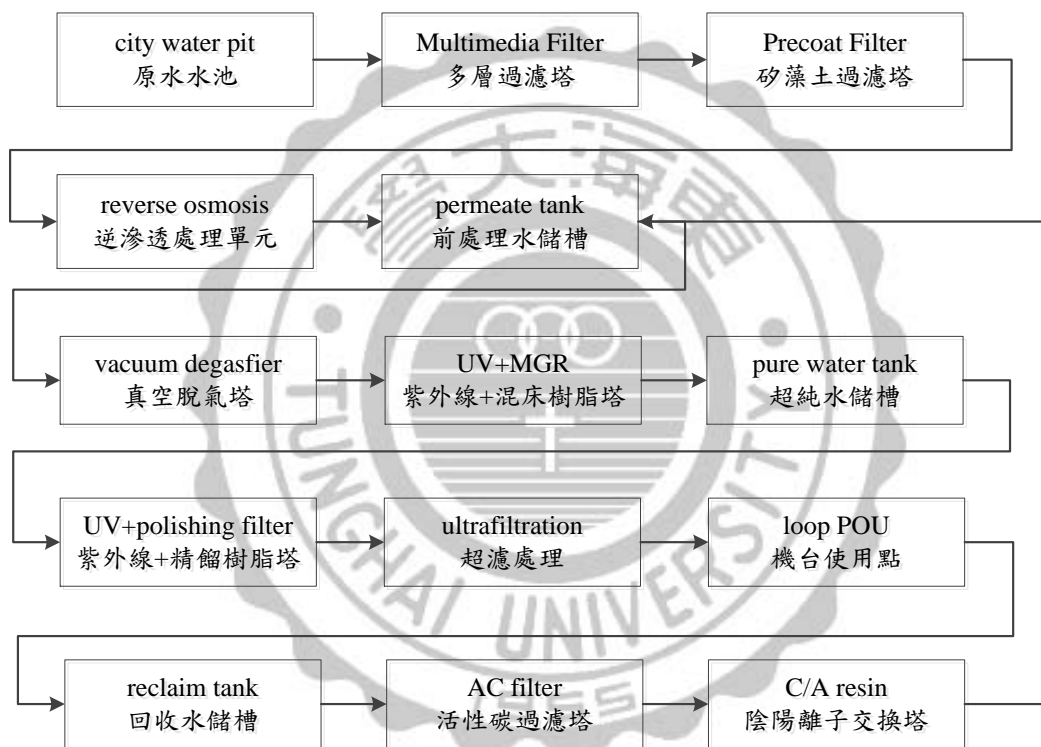


圖 二-8 純水前處理中含 Precoat Filter 製程

(資料來源：吳明炘, 2003)

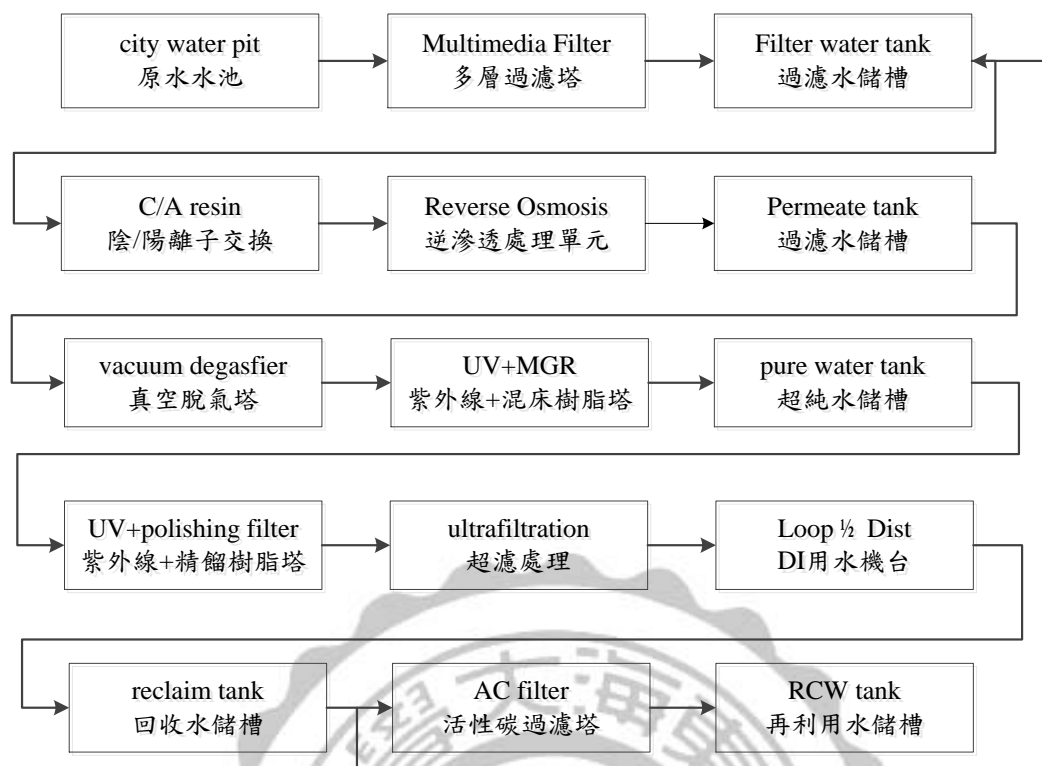


圖 二-9 純水前處理中含 C/A Filter 製程

(資料來源：吳明炘, 2003)

此研究的系統邊界定義為，針對超純水製程中前處理的部分，即如圖 二-8 及圖 二-9 中從原水水池 (City water pit) 到多層過濾塔 (M.M.Filter) 至過濾水儲槽 (Permeate Tank) 的部分，包含兩種前處理中分析不同製程中使用的化學品、能源使用以及廢棄物排放。在其研究結果中，預塗膜製程 (Precoat Filter Process) 之碳足跡為 128 kg CO₂ eq；而陽離子交換樹脂 (C/A Filter Process) 之碳足跡為 9110 kg CO₂ eq，兩者差異甚大(吳明炘, 2003)。

三、西班牙市政廢水透過三級處理回收

在西班牙的 Catalonia 城市中目前共有 346 座生活污水處理廠，一天的總處理量可以到 3,000,000 M³/天，其中一座三集處理廠位於地中海沿岸，為了因應當地的旅遊人口，設立一座處理能力為 2,347 M³/天(856,655 M³/年)處理附近的生活污水以及雨水。而整個處理廠中約分為水線 (Water Line) 以及污泥線 (Sludge Line)，水線部分的系統邊界包含了一級處理廠中的收集、過濾、沉降幾個步驟，二級處理當中包含了生物降解、二沉池、消毒等步驟，三級處理當中包含了化學混凝與絮凝、沙濾、加氯消毒、紫外線消毒、二次加氯等步驟。污泥線的部分包含了污泥濃縮、污泥脫水兩步驟。經計算系統邊界內的運輸過程所消耗之能源以及處理過程中所投入的化學品、耗材等所得到的碳足跡如下表 二-4，在同一功能單位為 1M³ 的污水中，水線當中的一級處理共產生 0.155 kg CO₂ eq 排放，二級處理程序中共產生了 0.504 kg CO₂ eq 排放，三級處理程序中共產生了 0.170 kg CO₂ eq 排放，污泥處理程序中共產生了 0.145 kg CO₂ eq 排放，所以一立方公尺的生活雨水混合污水經過三級處理程序處理回收至次級用水使用階段共產生 0.974 kg CO₂ eq 排放(Pasqualino et al., 2011)。

表 二-4 三級處理中各級處理程序之碳足跡

項目	計算結果
Water Line – 一級處理	0.155 kg CO ₂ eq
Water Line – 二級處理	0.504 kg CO ₂ eq
Water Line – 三級處理	0.170 kg CO ₂ eq
Sludge Line 汙泥處理	0.145 kg CO ₂ eq
總合	0.974 kg CO ₂ eq

(資料來源：Pasqualino, 2003)



2.4 工業用水最佳化模式

一、狹點分析於工業節水之應用

狹點分析(Pinch analysis)原先是用於熱網的合成，後來漸漸被運用到其他能源整體分析上。基於熱量和質量之間可以互相轉換，故可將熱能在製造網絡中的整合擴大到利用質量交換(Klemes et al., 2010)。

水狹點分析應用於水資源利用最佳化的方法，首先必須繪製一個物質回收狹點圖，在水狹點分析中，所選擇的單元首先被分成水槽流(sink)和源流(source)兩個部分，水槽流被歸類於此單元的入口流，相反的，出口流就被視為源流，但有些廢水會因為無法被使用或再利用而無法被分類(Bai et al., 2007)。

水狹點應用於工業上的案例如下：針對伊朗德黑蘭煉油廠進行水回收，並且利用水狹點分析，找出用水量的最佳化。在整個煉油廠的總製程中，使用 $505\text{m}^3/\text{h}$ 的總水流量來設計整個製程，其中三個水槽(冷卻水塔；脫鹽設備；飲用水、消防用水、澆灌)大約使用 $340.0\text{m}^3/\text{h}$ ，並且以 COD 為此研究之單一污染物進行實驗。實驗畫出負荷量與流率關係圖進行水狹點分析。再加入各項可能造成的誤差後，數據顯示水槽所需之原水總需水量為 $191.0\text{m}^3/\text{h}$ ，可以看出原水的水流量從 $340.0\text{m}^3/\text{h}$ 減少至 $191.0\text{m}^3/\text{h}$ ，共省下了 $149.0\text{m}^3/\text{h}$ 的原水量，約為總原水需求量的 43.8%(Bidhendi et al., 2010)。

二、線性規劃法

線性規劃(Linear programming)是一種數學模式，其重點在於最

佳化(極大化或極小化)的一個線性目標函數，又同時滿足於一組限制式(包含等式及不等式)的表現，透過數學方法計算得其結果。在有關資源分配、工廠流程作業最佳化、政策決策、生產規劃、管理等問題中，有可能透過模式的建構設法解決這些問題。

在 1947 年，由丹齊克(George B. Dantzig)提出了一般線性規劃模型及理論，最普遍的方式就是利用單形法(Simplex Method)透過數學計算來求解。若一線性規劃之問題有解時，最佳的解必定出現在可行解區域中之邊界上的端點，因此從可行解區域上的某一端點開始，最為檢驗起始值得初始點，再將其依序帶入其它端點即可得到一最佳的解點。單形法及為透過上述概念不斷重複運算直到得到最適解。

線性規劃式經由一種決策模式來解決問題，而模式的組成包括目標函數、決策變數以及由決策變數和參數所組成的限制式，其大致上分為以下幾個過程：

1. 定義問題核心：

當面對其一欲解決之問題時，必須了解其問題的核心意義，針對問題的重點，透過料蒐集並思考解決之方式，才能對案例做出正確之分析。

2. 構建出問題的決策模式

當所研究之按例的問題可透過數學運算方法來解決時，此時即可為欲解決之問題建構一數學模式來求解。模式的建構包含了目標函數的建立、決策變數的定義以及限制式建立並將其轉換成可計算之數學函數。

3. 敏感度分析

經由敏感度分析測定來決定參數變動時所造成之影響以及影

響成度的大小的一種分析方式。且當線性規劃在案例使用中，當中所設定之係數可能因時間而變動，此時就可透過敏感度分析來了解其變動後對最適解有何影響。

三、線性規劃法於工業節水之應用

(Shafiei et al., 2004)以演算法結合線性規劃對紙漿造紙廠進行封閉系統的水網分析，將目標建立於滿足所有需求之下(用水量最小化、纖維損失、污染程度)，可優化激流的水網配置。然而此方法是否可行取決於極限需求濃度的取得，否則需要有解決方案來替代此問題。

(Barrington et al., 2013)利用盤查技術來測定煉油廠的流量，同時找出可行的節水方法。透過初階盤查來得到整個工業廠總用水的投入與產出；第二階段盤查著重於過程中詳細的水流紀錄，並將其水分為三部分：製程水、次及用水(蒸氣、冷卻水)、其他(主要家庭用水)。以數據管理系統進行資料整合，並估計最終的廢水量。此方法僅決定出最後要進入廢水處理廠的廢水量，並未真正對廢水進行回收處理。

第三章、 研究方法

本研究系透過台灣科學工業園區科學工業同業公會所訂之 R7 版用水平衡圖整理後將一廠區內水資源流布繪製成圖，再經由現性規劃法，以最小需水成本、最小碳排放兩個目標建立模式，求其最佳化之解。

3.1 研究範疇與限制

一、 研究對象

本研究所探討對象係以科技部中部科學工業園區中的微電子廠為主，首先透過分析中科園區問卷之數據及台灣科學工業園區科學工業同業公會所訂之 R7 版用水平衡圖，以了解其單一廠區之用水流布。研究中將使用實際廠內用水單位之用水量，包含超純水用水量、製程用水量，以及次及用水端的洗滌塔用水、冷卻水塔用水與公共用水之用水量，用於最佳化模式之模擬。

二、 研究限制

本研究因微電子廠中生活污水相較於製程用水占比非常少，且其與各廠是否供餐有絕對之影響，因此本研究暫不考慮生活污水之用量。另外，雨水貯流系統之水量，因目前法規並無規定必須設置，為方便本研究建立通用之模式，因此本研究暫不考慮雨水貯流系統之水量。

因微電子廠中各廠的產品不同，製程也不盡相同，所以在實際的用水平衡圖也會有所不同，但仍可透過本研究所繪製的用水流布圖做進一步之線性規劃模擬。

3.2 模式架構

一、公會版用水平衡圖

本研究係透過由台灣科學工業園區科學工業同業公會所訂之 R7 版用水平衡圖如圖 三-1 公會 R7 版用水平衡圖所示：由圖的最左邊為三個水的來源，分別為自來水、外氣空調箱冷凝水 (outside air condensate, OAC)、雨水回收；中間為純水系統端，其進流來源為自來水以及由製程廢水經回收系統處理後回用到純水系統進水，其出水端為製程用水的進水以及廢水排放兩股。製程用水之進流水源為由純水系統造水提供，以及 c7 由製程機台用水循環再利用(串級利用)之水源，其出水端為廢水排放以及製程水循環回收利用系統的進流水。

再往右則是四個用水端，分別為製程用水以及三個次級用水端：洗滌塔用水(Local/Central scrubber)、冷卻水塔用水(Cooling tower)、公共用水(Public use)。

洗滌塔用水之進流水源則是由製程水循環回收利用系統所處理後之回收水和由自來水或外氣空調箱冷凝水或雨水回收端補給，除此之外也有由洗滌塔本身的循環回收水，其出水端部分有廢水排放、蒸發以及進到廢水回收端。

冷卻水塔用水之進流水源則是由製程水循環回收利用系統所處理後之回收水和由自來水或外氣空調箱冷凝水或雨水回收端補給，除此之外也有由冷卻水塔本身的循環回收水，其出水端部分有廢水排放、蒸發以及進到廢水回收端。

公共用水之進流水源則是由製程水循環回收利用系統所處理後之回收水和由自來水或外氣空調箱冷凝水或雨水回收端補給，而其出

水端部分有使用消耗及廢水排放兩者。

由台灣科學工業園區科學工業同業公會所訂之 R7 版用水平衡圖如圖除了能讓科技廠了解該廠區內之用水點之外，也可以經由公式計算其製程回收率(RP)、全廠回收率(TR)、全廠排放率(TD)以審核其水資源利用效率。

製程用水回收率(RP)=(製程用水回收量/製程用水量)*100%

全廠回收率(TR)=(製程用水回收量+其它用水回收量)/(全廠用水量-洗滌塔蒸發量-冷卻水塔蒸發量)*100%

全廠排放率(TD)=(排放量/需水量)*100%



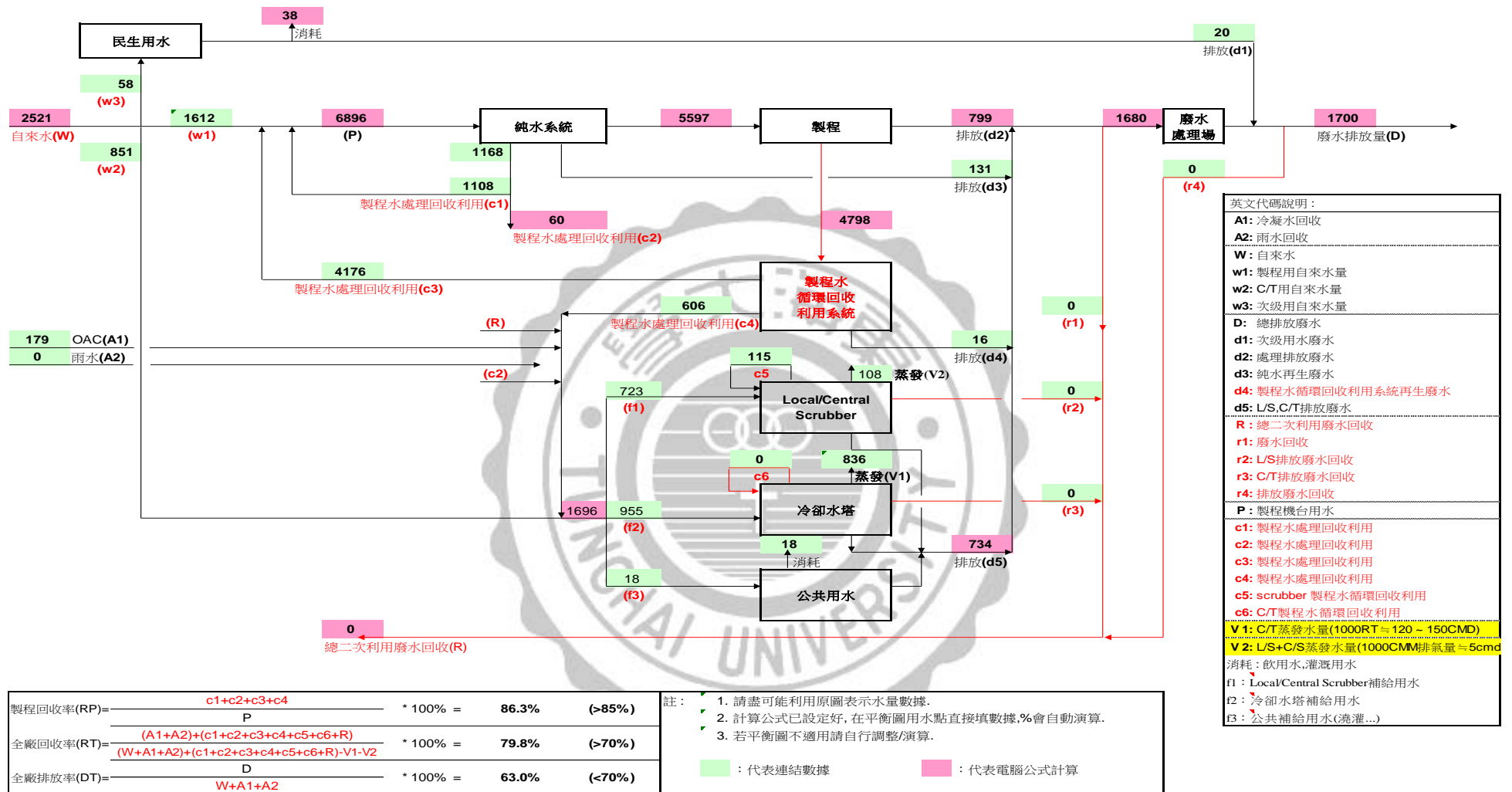


圖 三-1 公會 R7 版用水平衡圖

(資料來源：台灣科學工業園區科學工業同業公會, 2013)

二、轉化後廠區內水資源流布圖

本研究係以公會 R7 版用水平衡圖整理後將一廠區內水資源流布繪製如圖 三-2 廠區內水資源流布圖，研究中將水資源的需求分為自來水需求量(D_{TW})及回收水需求量(D_{RW})，兩者的總合即為總需水量。

研究中供水單元供有四個，其中超純水單元及自來水單元兩者的水源為自來水供給；而回收水單元 I 及回收水單元 II 兩者的水源則是由回收水供給。

四個供水單元由圖左到右依序為超純水單元、自來水單元、回收水單元 I、回收水單元 II。超純水單元的水源由自來水(S_3)及回收水單元 I (F_1)提供，其出水端部分為提供製程用水使用(F_5)；自來水單元的水源由自來水(S_3)提供，其出水端為提供三個次級用水端：洗滌塔用水(F_6)、冷卻水塔用水(F_7)、公共用水(F_8)之使用；回收水單元 I 的水源由製程使用後之廢水(F_9)補給，經回收處理後提供超純水單元使用(F_1)及廢水排放(W_1)；回收水單元 II 的水源由製程使用後之廢水(F_9)補給，經回收處理後提供三個次級用水端如：洗滌塔用水(F_2)、冷卻水塔用水(F_3)、公共用水(F_4)之使用。

研究中的用水端共有四個分別為製程用水以及三個次級用水端如：洗滌塔用水、冷卻水塔用水、公共用水。製程用水之水源由超純水單元提供(F_5)，其出水端除了有廢水排放(W_3)外，還有提供回收水單元 I、回收水單元 II 作使用(F_9)；而洗滌塔用水之水源由自來水單元(F_6)及回收水單元 II (F_2)所提供，其出水則為廢水排放(W_4)；而冷卻水塔用水之水源則是由自來水單元(F_7)及回收水單元 II (F_3)所提供，其出水則為廢水排放(W_5)；最後公共用水之水源則是由自來水單元(F_8)及回收水單元 II (F_4)所提供，其出水則為廢水排放(W_6)。

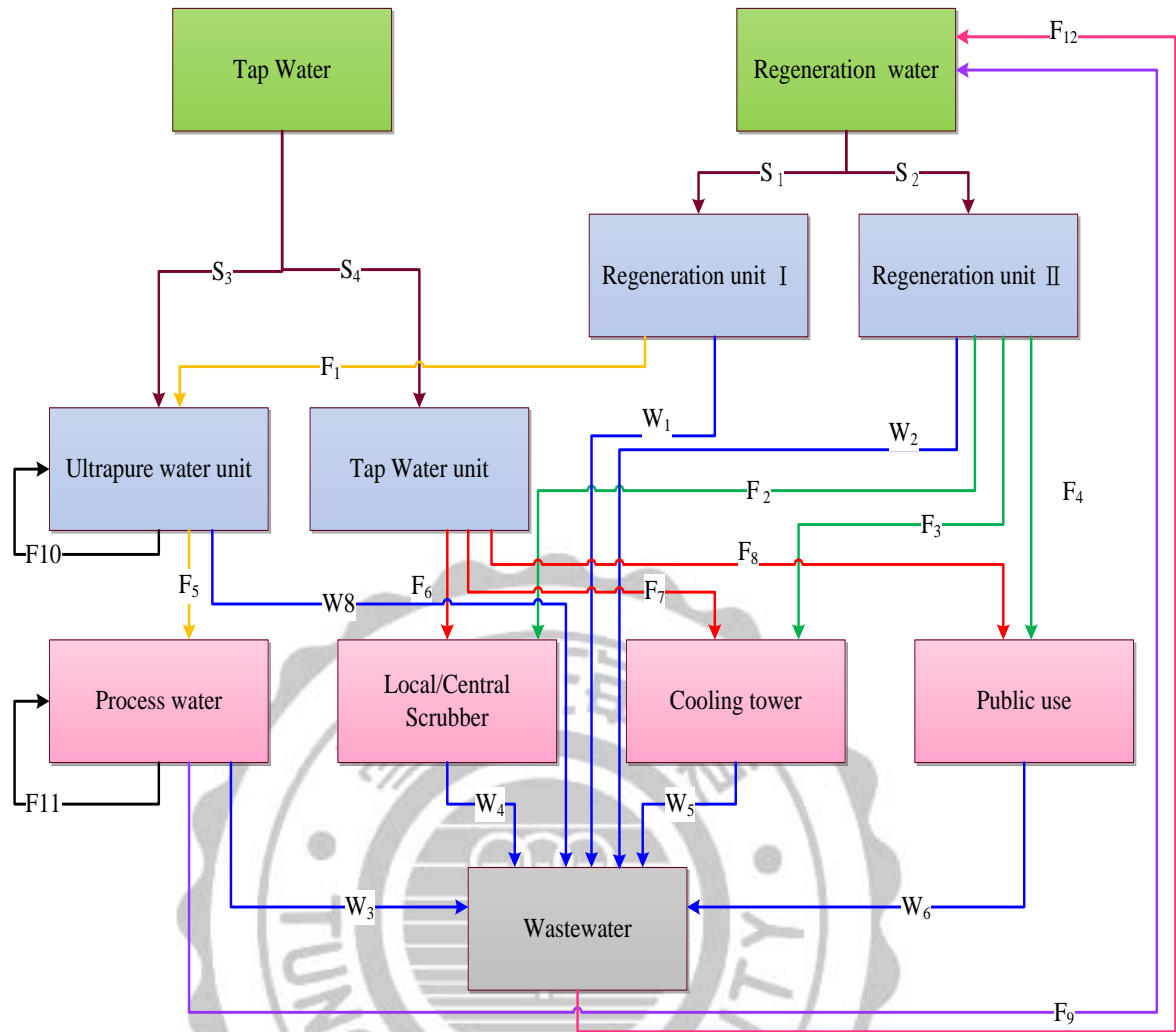


圖 三-2 廠區內水資源流布圖

(資料來源：本研究繪製)

三、參數說明

本研究所設計之參數說明如下表 三-1, F 為單元之間或單元到用水點之間的水流; W 為各單元及用水端之廢水排放; S 則為各單元之水源供給。

表 三-1 參數說明

參數	說明	單位
F1	從回收水單元 I 到超純水單元之水流	CMD
F2	從回收水單元 II 到洗滌塔用水端之水流	CMD
F3	從回收水單元 II 到冷卻水塔用水端之水流	CMD
F4	從回收水單元 II 到公共用水端之水流	CMD
F5	從超純水單元到製程用水端之水流	CMD
F6	從自來水單元到洗滌塔端之水流	CMD
F7	從自來水單元到冷卻水塔端之水流	CMD
F8	從自來水單元到公共端之水流	CMD
F9	從製程使用後之廢水到回收水需求端之水流	CMD
F10	由超純水單元使用後之 RO 濃縮廢水經回收處理後回用到超純水單元之水流	CMD
F11	製程用水端使用後之廢水經回收處理後回用到製程用水端使用之水流	CMD
W1	回收水單元 I 之廢水排放	CMD
W2	回收水單元 II 之廢水排放	CMD
W3	製程用水端之廢水排放	CMD
W4	洗滌塔用水端之廢水排放	CMD
W5	冷卻水塔用水端之廢水排放	CMD
W6	公共用水端之廢水排放	CMD

W7	總廢水排放	CMD
W8	超純水單元之廢水排放	CMD
S1	回收水單元 I 之水源供給	CMD
S2	回收水單元 II 之水源供給	CMD
S3	超純水單元之水源供給	CMD
S4	自來水單元之水源供給	CMD

(資料來源：本研究整理)



3.3 模式建立

為解決現今水資源問題，科技廠透過各種節水措施以及水回收方式力求更高之製程回收率(RP)、全廠回收率(TR)、全廠排放率(TD)，本研究將問題回歸到最根本之問題，不外乎就是成本最小化及對環境影響最小化，透過單一目標的抉擇，求最佳化之解。

情境一：最小需水成本

情境一當中係以透過模式中四個水源供給單元所使用之總水量乘上自來水水價，並減去因回收所省去之用水量乘上其水價(若回收水成本大於自來水之成本，則此項為正，即當自來水水價小於回收水價時，供水成本會增加)，以求最小之取水成本。

目標式：

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & [(S_1 + S_2 + S_3 + S_4) \times C_6] - [S_1 \times (C_6 - C_1)] - [S_2 \times \\ & (C_6 - C_2)] - [F_{10} \times (C_6 - C_3)] - [F_{11} \times (C_6 - C_4)] \end{aligned} \quad (3.1)$$

限制式：

$$F_9 = S_1 + S_2 \quad (3.2)$$

$$F_5 + F_{11} = F_9 + W_3 + F_{11} \quad (3.3)$$

$$F_5 = (F_1 + S_3) \times 0.9 \quad (3.4)$$

$$S_3 + F_1 + F_{10} = F_5 + W_8 + F_{10} \quad (3.5)$$

$$S1=W1+F1 \quad (3.6)$$

$$S2=F2+F3+F4+W2 \quad (3.7)$$

$$S4=F6+F7+F8 \quad (3.8)$$

$$F6+F2=W4 \quad (3.9)$$

$$F7+F3=W5 \quad (3.10)$$

$$F8+F4=W6 \quad (3.11)$$

$$S1, S2, S3, S4 > 0 \quad (3.12)$$

$$F5=Q1 \quad (3.13)$$

$$F6+F2= Q2 \quad (3.14)$$

$$F7+F3= Q3 \quad (3.15)$$

$$F8+F4= Q4 \quad (3.16)$$

模式說明：

目標式 (3-1)	依照四個水源供給單元(回收水單元 I 之水源供給、回收水單元 II 之水源供給、超純水單元之水源供給、自來水單元之水源供給)之用水總量乘上其自來水水價，再扣除回收水單元 I 之水源供給量乘上其回收水單元 I 之用水成本之差額，以及扣除回收水單元 II 之水源供給量乘上其回收水單元 II 之用水成本之差額。即為本研究所欲求解之最小需水成本。
限制式 (3.2)	回收水單元 I 跟回收水單元 II 的合等於從製程使用後之廢水到回收水需求端之水流。
限制式 (3.3)	從製程使用後之廢水到回收水需求端之水流加上製程用水端之廢水排放等於從超純水單元到製程用水端之水流，加上製程用水端使用後之廢水經回收處理後回用到製程用水端使用之水流。
限制式 (3.4)	從超純水單元到製程用水端之水流等於從回收水單

	元 I 到超純水單元之水流加上超純水單元之水源供給量乘以純水單元造水率 90%。
限制式 (3.5)	超純水單元之水源供給量加上從回收水單元 I 到超純水單元之水流，即等於從超純水單元到製程用水端之水流加上超純水單元之廢水排放，加上由超純水單元使用後之 RO 濃縮廢水經回收處理後回用到超純水單元之水流。
限制式 (3.6)	回收水單元 I 之廢水排放加上從回收水單元 I 到超純水單元之水流，即為回收水單元 I 之水源供給量。
限制式 (3.7)	從回收水單元 II 到洗滌塔用水端之水流加上從回收水單元 II 到冷卻水塔用水端之水流再加上從回收水單元 II 到公共用水端之水流再加上回收水單元 II 之廢水排放，即等於回收水單元 II 之水源供給。
限制式 (3.8)	從自來水單元到洗滌塔端之水流加上從自來水單元到冷卻水塔端之水流再加上從自來水單元到公共端之水流，即等於自來水單元之水源供給。
限制式 (3.9)	從自來水單元到洗滌塔端之水流加上從回收水單元 II 到洗滌塔用水端之水流，即等於洗滌塔用水端之廢水排放。
限制式 (3.10)	從自來水單元到冷卻水塔端之水流加上從回收水單元 II 到冷卻水塔用水端之水流，即等於冷卻水塔用水端之廢水排放。
限制式 (3.11)	從自來水單元到公共端之水流加上從回收水單元 II 到公共用水端之水流，即等於公共用水端之廢水排放。
限制式 (3.12)	決策變數 S1, S2, S3, S4 為大於零之整數。
限制式 (3.13)	從超純水單元到製程用水端之水流等於製程用水需求量。
限制式 (3.14)	從自來水單元到洗滌塔端之水流加上從回收水單元 II 到洗滌塔用水端之水流，即等於洗滌塔用水需求量。
限制式 (3.15)	從自來水單元到冷卻水塔端之水流加上從回收水單元 II 到冷卻水塔用水端之水流，即等於冷卻水塔用水需求量。
限制式 (3.16)	從自來水單元到公共端之水流加上從回收水單元 II

	到公共用水端之水流，即等於公共用水需求量。
--	-----------------------

(資料來源：本研究整理)



情境二：最小碳排放量

在情境二當中，透過生命週期評估法，分別針對回收水單元 I 之水源供給、回收水單元 II 之水源供給、超純水單元之水源供給、自來水單元，以上四個水源供給單元的處理技術，分析其製造過程及配送過程中所產生之二氧化碳排放量，針對各單元不同的造水率以及水量進行計算，以求最小之碳排放量。

目標式：

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & \left[\left(\frac{S3+F1}{Y1} \right) \times G1 \right] + \left[\left(\frac{S4}{Y2} \right) \times G2 \right] + \left[\left(\frac{S1}{Y3} \right) \right. \\ & \left. \times G3 \right] + \left[\left(\frac{S2}{Y4} \right) \times G4 \right] + (F10 \times G5) + (F11 \times G6) \\ & + [(W1 + W2 + W3 + W4 + W5 + W6 + W7 + W8) \\ & * G7] \end{aligned} \quad (3.17)$$

限制式：

$$F9=S1+S2 \quad (3.18)$$

$$F11+F5=F9+W3+F11 \quad (3.19)$$

$$F5=(F1+S3)*0.9 \quad (3.20)$$

$$S1=W1+F1 \quad (3.21)$$

$$S2=F2+F3+F4+W2 \quad (3.22)$$

$$S4=F6+F7+F8 \quad (3.23)$$

$$F6+F2=W4 \quad (3.24)$$

$$F7+F3=W5 \quad (3.25)$$

$$F8+F4=W6 \quad (3.26)$$

$$S1, S2, S3, S4 > 0 \quad (3.27)$$

$$F5=Q1 \quad (3.28)$$

$$F6+F2= Q2 \quad (3.29)$$

$$F7+F3= Q3 \quad (3.30)$$

$$F8+F4= Q4 \quad (3.31)$$

$$S3+F1+F10=F5+W8+F10 \quad (3.32)$$

模式說明：

目標式 (3-17)	依照四個水源供給單元(回收水單元 I 之水源供給、回收水單元 II 之水源供給、超純水單元之水源供給、自來水單元之水源供給)之用水總量除以該用水單元的造水係數，再乘上該用水單元的暖化潛能值，取其四個供水單元之計算值得總和。再加上由超純水單元使用後之 RO 濃縮廢水經回收處理後回用到超純水單元(F10)，乘上其暖化潛能值(G5)。加上製程用水端使用後之廢水經回收處理後回用到製程用水端使用之水流(F11)，乘上其暖化潛能值(G6)最後再加上所有廢水之總合並乘上其因廢水處理所造成之二氧化碳排放量。
限制式 (3.18)	回收水單元 I 跟回收水單元 II 的合等於從製程使用後之廢水到回收水需求端之水流。
限制式 (3.19)	從製程使用後之廢水到回收水需求端之水流加上製程用水端之廢水排放等於從超純水單元到製程用水端之水流，加上製程用水端使用後之廢水經回收處理後回用到製程用水端使用之水流。
限制式 (3.20)	從超純水單元到製程用水端之水流等於從回收水單元 I 到超純水單元之水流加上超純水單元之水源供給量乘以純水單元造水率 90%。

限制式 (3.21)	回收水單元 I 之廢水排放加上從回收水單元 I 到超純水單元之水流，即為回收水單元 I 之水源供給量。
限制式 (3.22)	從回收水單元 II 到洗滌塔用水端之水流加上從回收水單元 II 到冷卻水塔用水端之水流再加上從回收水單元 II 到公共用水端之水流再加上回收水單元 II 之廢水排放，即等於回收水單元 II 之水源供給。
限制式 (3.23)	從自來水單元到洗滌塔端之水流加上從自來水單元到冷卻水塔端之水流再加上從自來水單元到公共端之水流，即等於自來水單元之水源供給。
限制式 (3.24)	從自來水單元到洗滌塔端之水流加上從回收水單元 II 到洗滌塔用水端之水流，即等於洗滌塔用水端之廢水排放。
限制式 (3.25)	從自來水單元到冷卻水塔端之水流加上從回收水單元 II 到冷卻水塔用水端之水流，即等於冷卻水塔用水端之廢水排放。
限制式 (3.26)	從自來水單元到公共端之水流加上從回收水單元 II 到公共用水端之水流，即等於公共用水端之廢水排放。
限制式 (3.27)	決策變數 S_1, S_2, S_3, S_4 為大於零之整數。
限制式 (3.28)	從超純水單元到製程用水端之水流等於製程用水需求量。
限制式 (3.29)	從自來水單元到洗滌塔端之水流加上從回收水單元 II 到洗滌塔用水端之水流，即等於洗滌塔用水需求量。
限制式 (3.30)	從自來水單元到冷卻水塔端之水流加上從回收水單元 II 到冷卻水塔用水端之水流，即等於冷卻水塔用水需求量。
限制式 (3.31)	從自來水單元到公共端之水流加上從回收水單元 II 到公共用水端之水流，即等於公共用水需求量。
限制式 (3.32)	超純水單元之水源供給量加上從回收水單元 I 到超純水單元之水流，即等於從超純水單元到製程用水端之水流加上超純水單元之廢水排放，加上由超純水單元使用後之 RO 濃縮廢水經回收處理後回用到超純水單元之水流。

(資料來源：本研究整理)

3.4 限制條件

因微電子廠中生活汙水相較於製程用水占比非常少，且其與各廠是否供餐有絕對之影響，因此本研究暫不考慮生活汙水之用量。

另外，雨水貯流系統之水量，因目前法規並無規定必須設置，為方便本研究建立通用之模式，因此本研究暫不考慮雨水貯流系統之水量。



第四章、 結果與討論

4.1 最佳化模式情境模擬

在資本主義時代下，工廠思考製程回收率(RP)、全廠回收率(TR)、全廠排放率(TD)標準之前，成本仍是公司老闆最重視之問題，故本研究以最小需水成本作為模擬目標進行分析。另外，隨著環保意識的抬頭，工廠之碳排放量也為大家所重視之課題，故本研究另一目標為最小碳排放量進行分析。

4.1.1 最小需水成本

本節係以僅考慮最小的自來水取水量換算其取水成本，其計算方式應為，依照四個水源供給單元(回收水單元 I 之水源供給(S1)、回收水單元 II 之水源供給(S2)、超純水單元之水源供給(S3)、自來水單元之水源供給(S4))之用水總量乘上其自來水水價(C6)，再扣除回收水單元 I 之水源供給量(S1)乘上其回收水單元 I 之用水成本之差額(C6-C1)，以及扣除回收水單元 II 之水源供給量(S2)乘上其回收水單元 II 之用水成本之差額(C6-C2)。即為本研究所欲求解之最小需水成本。如(4.1)式：

$$\text{Min } Z = [(S1 + S2 + S3 + S4) * C6] - [S1 * (C6 - C1)] - [S2 * (C6 - C2)] - [F10 * (C6 - C3)] - [F11 * (C6 - C4)] \quad (4.1)$$

A 假設一：現況

在 1M^3 自來水水價為 11 元、回收水單元 I 水處理成本為 15 元、回收水單元 II 水處理成本為 5 元、超純水單元回收處理成本為 3.2 元、製程回收循環水回收處理成本為 6.8 元時，且製程用水端需水量為 7510CMD 以及三個次級用水端如：洗滌塔用水需水量為 1700CMD、冷卻水塔用水需水量為 2500CMD、公共用水需水量為 1200CMD 之情境下進行分析模擬。

計算結果得知最小之需水成本為 103,418 元。超純水單元之水量由超純水單元之水源供給(S3)提供 8344CMD 之水量，另由超純水單元使用後之 RO 濃縮廢水經回收處理後提供 834 CMD 之水量回用到超純水單元(F10)；

製程用水端由超純水單元提供 7510CMD 之水量(F5)給製程用水使用，以及製程用水端使用後之廢水經回收處理後提供 2110 CMD 之水量回用到製程用水端使用之水流(F11)。

從製程使用後之廢水到回收水需求端之水流(F9)為 5400CMD，作為回收水需求量(D_{RW})，其提供給回收水單元 II 之水源供給(S2)5400CMD，經回收水單元 II 處理後之水，供給 1700CMD 之水量給洗滌塔用水端使用(F2)，供給 2500CMD 之水量給冷卻水塔用水端使用(F3)，供給 1200CMD 之水量給公共用水端使用(F4)。其詳細結果如下表 四-1 及圖 四-1 所示。

表 四-1 最小需水成本假設一之解

Variable	Value	Variable	Value
S1	0	F11	2110
S2	5400	C1	15
S3	8344	C2	5
S4	0	C3	3.2
F1	0	C4	6.8
F2	1700	C6	11
F3	2500	W1	0
F4	1200	W2	0
F5	7510	W3	0
F6	0	W4	1700
F7	0	W5	2500
F8	0	W6	1200
F9	5400	W8	0
F10	834		

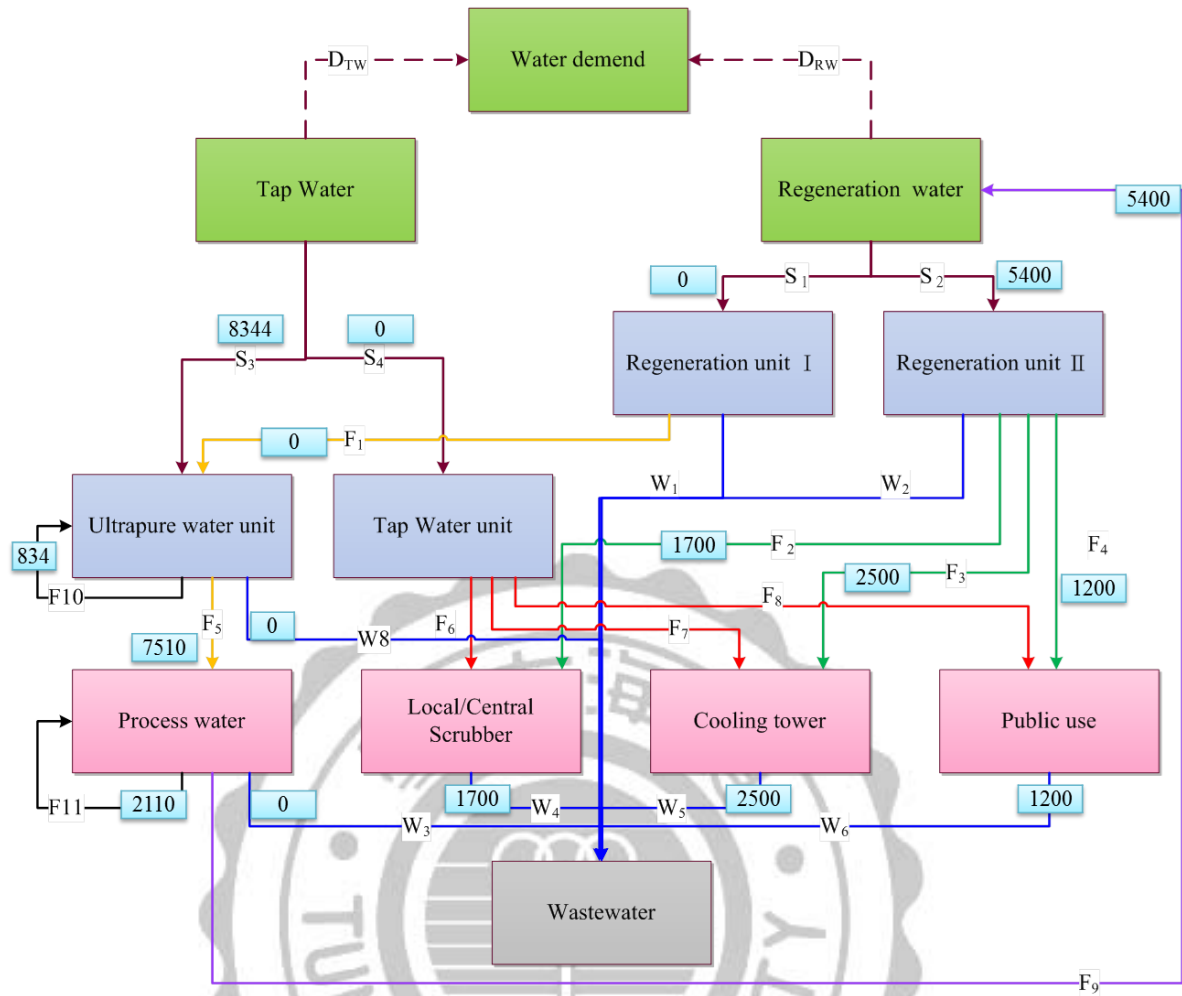


圖 四-1 最小需水成本假設一之解

其回收率計算如下

製程用水回收率(RP)=(製程用水回收量/製程用水量)*100%

$$= \frac{(F_9 + F_{10} + F_{11})}{(S_3 + F_1)} * 100\% = 100\%$$

全廠回收率(TR)=

$$\frac{(S_1 + S_2 + F_{10} + F_{11})}{(Q_{pw} + Q_s + Q_c + Q_p) - (\text{scrubber 蒸發} + \text{cooling tower 蒸發})} * 100\%$$

$$= 77.4\%$$

全廠排放率(TD)=(排放量/需水量)*100%

$$= 39.1\%$$

B 假設二：因政策調整自來水水價 50%

在 1M^3 自來水水價為 16.5 元、回收水單元 I 水處理成本為 15 元、回收水單元 II 水處理成本為 5 元、超純水單元回收處理成本為 3.2 元、製程回收循環水回收處理成本為 6.8 元時，且製程用水端需水量為 7510CMD 以及三個次級用水端如：洗滌塔用水需水量為 1700CMD、冷卻水塔用水需水量為 2500CMD、公共用水需水量為 1200CMD 之情境下進行分析模擬。

計算結果得知最小之需水成本為 133,118 元。超純水單元之水量由超純水單元之水源供給(S3)提供 7711CMD 之水量，另由超純水單元使用後之 RO 濃縮廢水經回收處理後提供 834 CMD 之水量回用到超純水單元(F10)，以及從回收水單元 I 到超純水單元之水流(F1)提供 633CMD 之水量。

製程用水端由超純水單元提供 7510CMD 之水量(F5)給製程用水使用，以及製程用水端使用後之廢水經回收處理後提供 1477 CMD 之水量回用到製程用水端使用之水流(F11)。

從製程使用後之廢水到回收水需求端之水流(F9)為 6033CMD，作為回收水需求量(D_{RW})，其分別提供給回收水單元 I 之水源供給(S1)633CMD、回收水單元 II 之水源供給(S2)5400CMD。

經回收水單元 I 處理後之水，供給 633CMD 之水量給超純水單元使用(F5)；經回收水單元 II 處理後之水，供給 1700CMD 之水量給洗滌塔用水端使用(F2)，供給 2500CMD 之水量給冷卻水塔用水端使用(F3)，供給 1200CMD 之水量給公共用水端使用(F4)。其詳細結果如下表 四-2 及圖 四-2 所示。

表 四-2 最小需水成本假設二之解

Variable	Value	Variable	Value
S1	633	F11	1477
S2	5400	C1	16.5
S3	7711	C2	5
S4	0	C3	3.2
F1	633	C4	6.8
F2	1700	C6	11
F3	2500	W1	0
F4	1200	W2	0
F5	7510	W3	0
F6	0	W4	1700
F7	0	W5	2500
F8	0	W6	1200
F9	6033	W8	0
F10	834		

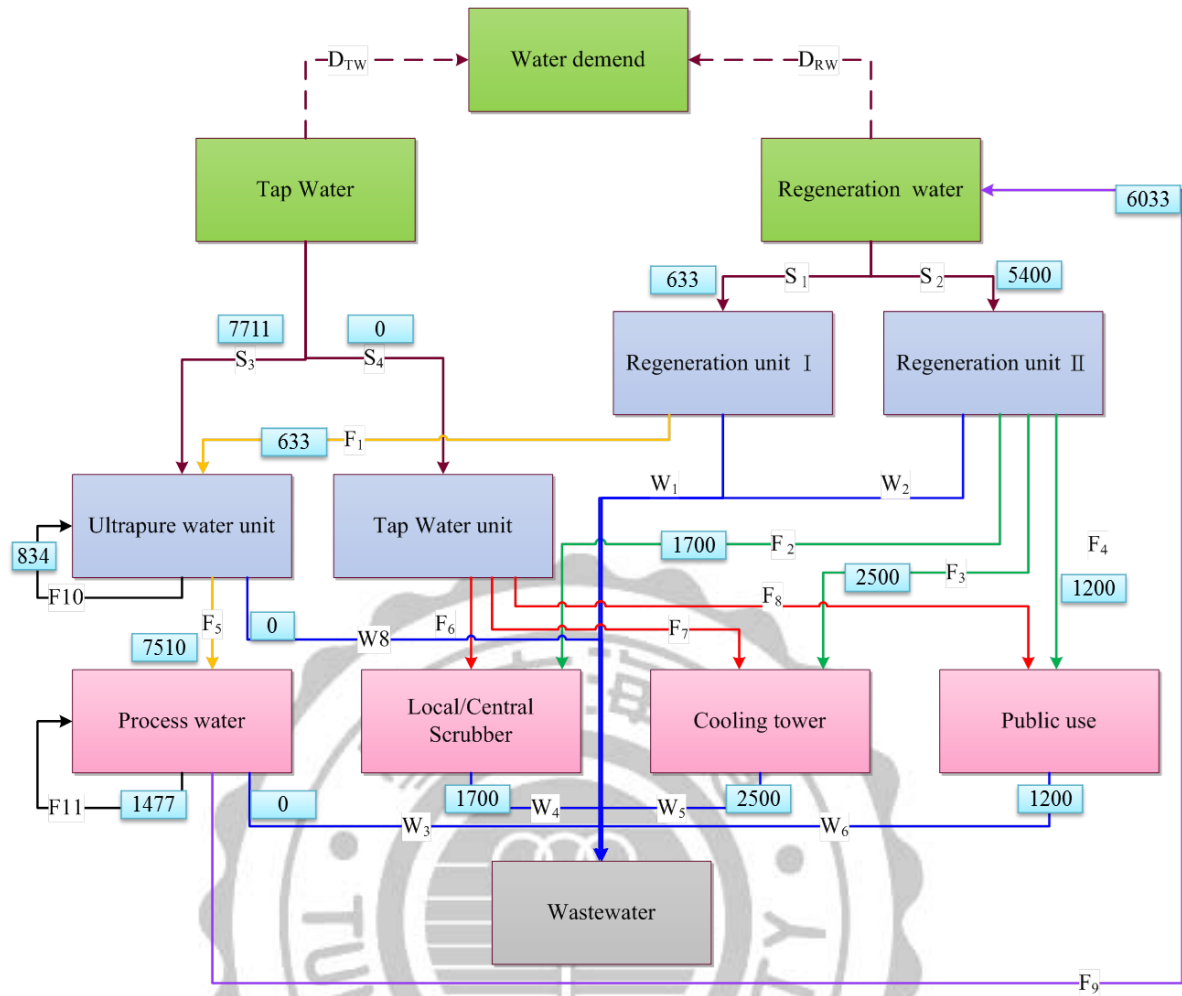


圖 四-2 最小需水成本假設二之解

其回收率計算如下

製程用水回收率(RP)=(製程用水回收量/製程用水量)*100%

$$= \frac{(F_9 + F_{10} + F_{11})}{(S_3 + F_1)} * 100\% = 100\%$$

全廠回收率(TR)=

$$\frac{(S_1 + S_2 + F_{10} + F_{11})}{(Q_{pw} + Q_s + Q_c + Q_p) - (\text{scrubber 蒸發} + \text{cooling tower 蒸發})} * 100\%$$

$$= 77.4\%$$

全廠排放率(TD)=(排放量/需水量)*100%

$$= 39.1\%$$

4.1.2 最小碳排放

本節係以僅考率最小碳排放量，其計算方式應為，依照四個水源供給單元(回收水單元 I 之水源供給、回收水單元 II 之水源供給、超純水單元之水源供給、自來水單元之水源供給)分別透過生命週期評估法計算其各單元中之水在製造過程及配送過程中所產生之二氧化碳排放量，而回收水單元 I 之部分其水源為經製程使用後之廢水經一級處理及二級處理後再經活性碳過濾及逆滲透之程序處理後回用至製程用水；回收水單元 II 之部分其水源為經製程使用後之廢水經一級處理及二級處理後回用至三個次級用水端如：洗滌塔用水(F₂)、冷卻水塔用水(F₃)、公共用水(F₄)之使用。而四個水源供給單元也將因其處理程序不同而有不同之二氧化碳排放量。另由超純水單元使用後之 RO 濃縮廢水經回收處理後回用到超純水單元(F₁₀)，以及製程用水端使用後之廢水經回收處理後回用到製程用水端使用之水流(F₁₁)也將因處理程序計算其二氧化碳排放量。

其計算方式為超純水單元的消耗量(S₃+F₁)除以超純水單元的造水係數(Y₁)，乘上超純水單元的暖化潛能值(G₁)。加上自來水單元的消耗量(S₄)除以自來水單元的造水係數(Y₂)，乘上自來水單元的暖化潛能值(G₂)。加上回收水單元 I 的消耗量(S₁)除以回收水單元 I 的造水係數(Y₃)，乘上回收水單元 I 的暖化潛能值(G₃)。加上回收水單元 II 的消耗量(S₂)除以回收水單元 II 的造水係數(Y₄)，乘上回收水單元 II 的暖化潛能值(G₄)。加上由超純水單元使用後之 RO 濃縮廢水經回收處理後回用到超純水單元(F₁₀)，乘上其暖化潛能值(G₅)。加上製程用水端使用後之廢水經回收處理後回用到製程用水端使用之水流

(F11) ，乘上其暖化潛能值(G6)。最後再加上所有廢水之總合並乘上其因廢水處理所造成之二氧化碳排放量。如(4.2)式

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & \left[\left(\frac{S3 + F1}{Y1} \right) * G1 \right] + \left[\left(\frac{S4}{Y2} \right) * G2 \right] + \left[\left(\frac{S1}{Y3} \right) * G3 \right] + \left[\left(\frac{S2}{Y4} \right) \right. \\ & * G4 \left. \right] + (F10 * G5) + (F11 * G6) \\ & + [(W1 + w2 + w3 + w4 + w5 + w6 + w7 + w8) * G7] \end{aligned} \quad (4.2)$$

在製程用水端需水量為 7510CMD 以及三個次級用水端如：洗滌塔用水需水量為 1700CMD、冷卻水塔用水需水量為 2500CMD、公共用水需水量為 1200CMD，且超純水造水率(Y1)為 80%、自來水造水率(Y2)為 100%、回收水單元 I 造水率(Y3)為 80%、回收水單元 II 造水率(Y4)為 90%，以及超純水單元所導致的全球暖化潛能值(G1)為 0.875 kg CO₂ eq 排放、自來水單元所導致的全球暖化潛能值(G2)為 0.6 kg CO₂ eq 排放、回收水單元 I 所導致的全球暖化潛能值(G3)為 2.875 kg CO₂ eq 排放、回收水單元 II 所導致的全球暖化潛能值(G4)為 0.659kg CO₂ eq 排放、由超純水單元使用後之 RO 濃縮廢水經回收處理後回用到超純水單元所導致的全球暖化潛能值(G5)為 0.15kg CO₂ eq 排放、由製程用水端使用後之廢水經回收處理後回用到製程用水端使用之水流所導致的全球暖化潛能值(G6)為 0.15kg CO₂ eq、廢水處理所導致的全球暖化潛能值(G7)為 0.175kg CO₂ eq 之情境下進行分析模擬。

其計算結果最小之碳排放量為 14467.4 kg CO₂ eq 排放。若考量碳排放量之問題後，超純水單元之水量由超純水單元之水源供給(S3)提供 8344CMD 之水量，另由超純水單元使用後之 RO 濃縮廢水經回收處理後提供 834 CMD 之水量回用到超純水單元(F10)。

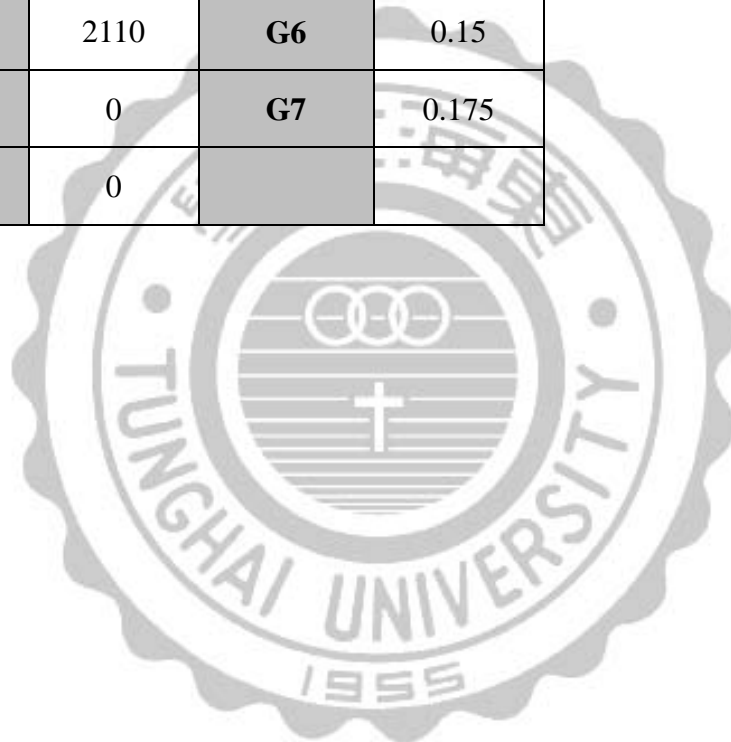
製程用水端由超純水單元提供 7510CMD 之水量(F5)給製程用水使用，以及製程用水端使用後之廢水經回收處理後提供 2110 CMD 之水量回用到製程用水端使用之水流(F11)。

從製程使用後之廢水到回收水需求端之水流(F9)為 5400CMD，作為回收水需求量(D_{RW})，其提供給回收水單元 II 之水源供給(S2)5400CMD，經回收水單元 II 處理後之水，供給 1700CMD 之水量給洗滌塔用水端使用(F2)，供給 2500CMD 之水量給冷卻水塔用水端使用(F3)，供給 1200CMD 之水量給公共用水端使用(F4)。其詳細結果如下。其詳細結果如下表 四-3 及圖 四-3 所示。

表 四-3 最小碳排放之解

Variable	Value	Variable	Value
S1	0	W3	7510
S2	5400	W4	1700
S3	8344	W5	2500
S4	0	W6	1200
F1	0	W8	834
F2	1700	Y1	0.8
F3	2500	Y2	1

F4	1200	Y3	0.8
F5	7510	Y4	0.9
F6	0	G1	0.875
F7	0	G2	0.6
F8	0	G3	2.875
F9	5400	G4	0.659
F10	834	G5	0.15
F11	2110	G6	0.15
W1	0	G7	0.175
W2	0		



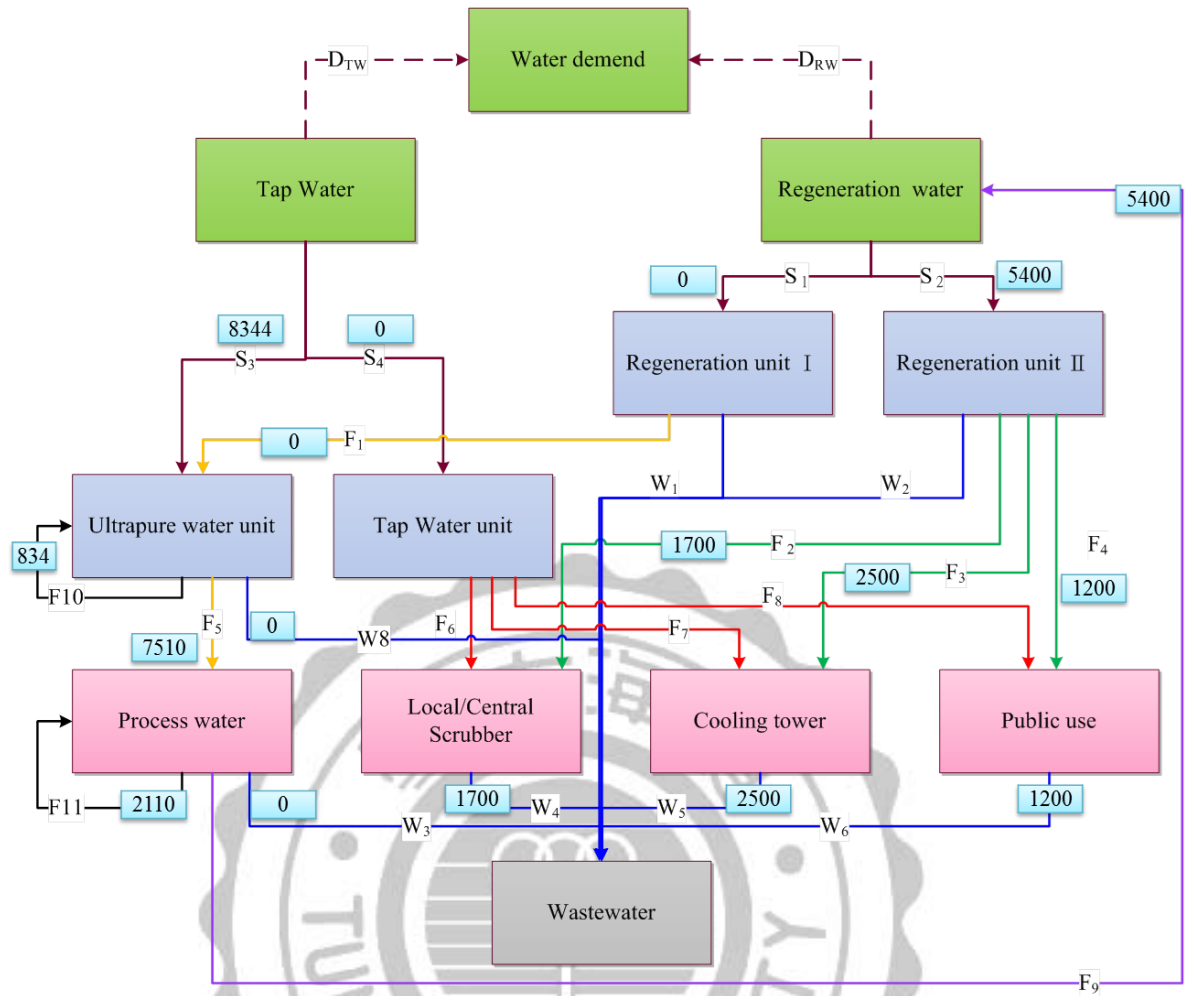


圖 四-3 最小碳排放之解

其回收率計算如下

製程用水回收率(RP)=(製程用水回收量/製程用水量)*100%

$$= \frac{(F_9 + F_{10} + F_{11})}{(S_3 + F_1)} * 100\% = 100\%$$

全廠回收率(TR)=

$$\frac{(S_1 + S_2 + F_{10} + F_{11})}{(Q_{pw} + Q_s + Q_c + Q_p) - (\text{scrubber 蒸發} + \text{cooling tower 蒸發})} * 100\%$$

$$= 77.4\%$$

全廠排放率(TD)=(排放量/需水量)*100%

$$= 39.1\%$$

4.1.3 小結

- 一、 情境一中最小之需水成本為 103,418 元，且其製程用水回收率 (RP)=100%，全廠回收率(TR)=77.4%，全廠排放率(TD)=39.1% 皆符合回收標準及排放標準。
- 二、 情境二中最小之需水成本為 133,118 元且其製程用水回收率 (RP)=100%，全廠回收率(TR)=77.4%，全廠排放率(TD)=39.1% 皆符合回收標準及排放標準。
- 三、經最小需水成本之模擬結果中的兩個情境假設中可以發現，若因政策改變而調整其自來水水價 50%，將造成經回收水單元 I、回收水單元 II 之水量有明顯上升之趨勢。所以，提高水價對於回收率有提生 10.5% 的效果。
- 四、最小碳排放量之模式探討之結果為 14467.4 kg CO₂ eq 排放，且其製程用水回收率(RP)=100%，全廠回收率(TR)=77.4%，全廠排放率(TD)=39.1% 皆符合回收標準及排放標準。

4.2 工業用水策略建議

- 一、經最小需水成本之模擬結果中的兩個情境假設中可以發現，若因政策改變而調整其自來水水價 50%，將造成經回收水單元 I、回收水單元 II 之水量有明顯上升之趨勢。所以政府應透過政策，針對水價進行調整，及可提高為電子廠之回收水量。
- 二、線性規劃法應用在工業節水上，雖可將水資源的再利用透過成本最小化及最小排碳量作計算，但應考量增加污染乘度對於回水的回收可行性，並透過更多情境模擬，方可歸納出較理想之模式。
- 三、對於最小碳排放之部分，因目前無現行法規規範其排放量，且碳權交易制度在台灣也尚未成熟，未來可在溫室氣體排放方面增家排放標準，這也將迫使廠商透過水回收進行減少碳排放。
- 四、在工業節水的策略上除透過法律規範外，應建立獎勵機制(如減稅)之誘因，或透過推廣企業社會責任，以提高產業水回收率。



- BAI, J., FENG, X., & DENG, C. 2007. Graphically based optimization of single-contaminant regeneration reuse water systems. *Chemical Engineering Research & Design*, 85(A8), 1178-1187.
- BARRINGTON, D.J., PRIOR, A., & HO, G. 2013. The role of water auditing in achieving water conservation in the process industry. *Journal of Cleaner Production*, 52, 356-361.
- BIDHENDI, N.G.R., MEHRDADI, N., & MOHAMMADNEJAD, S. 2010. Water and Wastewater Minimization in Tehran Oil Refinery using Water Pinch Analysis. *International Journal of Environmental Research*, 4(4), 583-594.
- BOIX, M., MONTASTRUC, L., PIBOULEAU, L., AZZARO-PANTEL, C., & DOMENECH, S. 2012. Industrial water management by multiobjective optimization: from individual to collective solution through eco-industrial parks. *Journal of Cleaner Production*, 22(1), 85-97.
- BOTTO, S. 2009. Tap Water vs. Bottled Water in a Footprint Integrated Approach. In Available from Nature Precedings 1-13.
- FOO, D.C.Y. 2009. State-of-the-Art Review of Pinch Analysis Techniques for Water Network Synthesis. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(11), 5125-5159.
- GRANT, S.B., SAPHORES, J.D., FELDMAN, D.L., HAMILTON, A.J., FLETCHER, T.D., COOK, P.L.M., STEWARDSON, M., SANDERS, B.F., LEVIN, L.A., AMBROSE, R.F., DELETIC, A., BROWN, R., JIANG, S.C., ROSSO, D., COOPER, W.J., & MARUSIC, I. 2012. Taking the "Waste" Out of "Wastewater" for Human Water Security and Ecosystem Sustainability. *Science*, 337(6095), 681-686.
- GUMBO, B., MLILO, S., BROOME, J., & LUMBROSO, D. 2003. Industrial water demand management and cleaner production potential: a case of three industries in Bulawayo, Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28(20-27), 797-804.
- KHEZRI, S.M., LOTFI, F., TABIBIAN, S., & ERFANI, Z. 2010. Application of water pinch technology for water and wastewater minimization in aluminum anodizing industries. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 7(2), 281-290.
- KLEMES, J.J., LAM, H.L., & FOO, D.C.Y. 2010. Water Integration for Recycling and Recovery in Process Industry. *Security of Industrial Water Supply and Management*, 1-12.
- KLOPFER, W. 1997. Life cycle assessment - From the beginning to the current state. *Environmental Science and Pollution Research*, 4(4), 223-228.
- MENESES, M., PASQUALINO, J.C., & CASTELLS, F. 2010. Environmental assessment of urban wastewater reuse: Treatment alternatives and applications. *Chemosphere*, 81(2), 266-272.

MILLER, G.W. 2006. Integrated concepts in water reuse: managing global water needs. *Desalination*, 187(1-3), 65-75.

MINX, J.C., WIEDMANN, T., WOOD, R., PETERS, G.P., LENZEN, M., OWEN, A., SCOTT, K., BARRETT, J., HUBACEK, K., BAIOCCHI, G., PAUL, A., DAWKINS, E., BRIGGS, J., GUAN, D., SUH, S., & ACKERMAN, F. 2009. INPUT-OUTPUT ANALYSIS AND CARBON FOOTPRINTING: AN OVERVIEW OF APPLICATIONS. *Economic Systems Research*, 21(3), 187-216.

MOHAPATRA, P.K., SIEBEL, M.A., GIJZEN, H.J., VAN DER HOEK, J.P., & GROOT, C.A. 2002. Improving eco-efficiency of Amsterdam water supply: A LCA approach. *Journal of Water Supply Research and Technology-Aqua*, 51(4), 217-227.

OKI, T., & KANAE, S. 2006. Global hydrological cycles and world water resources. *Science*, 313(5790), 1068-1072.

PASQUALINO, J.C., MENESES, M., & CASTELLS, F. 2011. Life Cycle Assessment of Urban Wastewater Reclamation and Reuse Alternatives. *Journal of Industrial Ecology*, 15(1), 49-63.

RALUY, R.G., SERRA, L., & UCHE, J. 2005. Life cycle assessment of desalination technologies integrated with renewable energies. *Desalination*, 183(1-3), 81-93.

SHAFIEI, S., DOMENECH, S., KOTELES, R., & PARIS, J. 2004. System closure in pulp and paper mills: network analysis by genetic algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 12(2), 131-135.

SHRESTHA, S., & KAZAMA, F. 2007. Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: A case study of the Fuji river basin, Japan. *Environmental Modelling & Software*, 22(4), 464-475.

TONG, L., LIU, X., LIU, X.W., YUAN, Z.W., & ZHANG, Q. 2013. Life cycle assessment of water reuse systems in an industrial park. *Journal of Environmental Management*, 129, 471-478.

VINCE, F., Aoustin, E., BREANT, P., & MARECHAL, F. 2008. LCA tool for the environmental evaluation of potable water production. *Desalination*, 220(1-3), 37-56.

WANG, Y.P., & SMITH, R. 1995. Wastewater minimization with flowrate constraints. *Chemical Engineering Research & Design*, 73(A8), 889-904.

吳明炘. 2003. 半導體超純水製程之生命週期評估. 中華大學, 81-120 pp.

夏羅振祥. 2010. 高科技產業合理用水回收率之探討. In 台北市.

歐陽嶠暉. 2014. 臺灣水資源效率化利用策略. In 財團法人中技社 2014-05 專題報告: 財團法人中技社, A1 1-12.

經濟部工業局. 2009. 行業製程減廢及污染防治技術—半導體業介紹.

經濟部水利署. 2004. 用水計畫審查作業要點. In 用水計畫審查作業要點.

經濟部水利署. 2015. 水利統計. 經濟部水利署.

林文雄. 2005. 工業用水回收率合理性之探討、研擬與實用. In 陳建宏 ed.
第十五屆下水道與水環境再生研討會論文集, 21-23.

