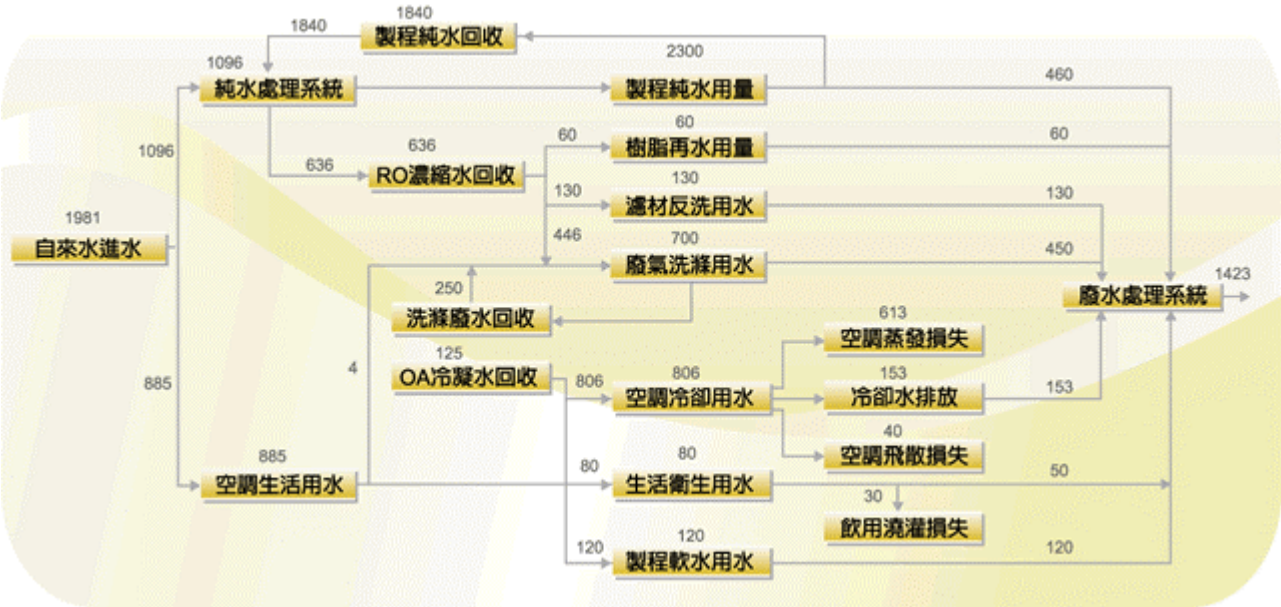
半導體工廠用水節約之研究

江岱叡/聯華電子公司

台灣近年來一直積極的朝向「亞太營運中心」發展，其中尤以建設「科技島」自許。半導體素有「工業之米」之稱，半導體工業在建設科技島的過程中，自是不可或缺之產業。但是半導體工業是一個十分依賴水資源的行業，尤其是在台灣水資源有限的情形下，限水、缺水實是半導體工廠營運之一大壓力。因此，半導體工廠用水節約之研究與推動，有助於其提昇用水效益，降低用水成本及營運風險。本文乃針對半導體工廠用水節約規劃與設計，提供相關之研究心得與經驗探討。

台灣由於工業的迅速發展，工業用水量亦迅速成長，根據前經濟部水資源局 86 年資源政策白皮書上所載，台灣地區工業用水量目前雖然僅佔各類用水之 9.84%，但是至民國 110 年預估將增為 11.61%。尤其是台灣朝工業區發展，工業用水具有區域集中性，以北部地區為例，因工業區較多，其工業用水比率便達 16.51%，明顯高於中部地區的 6.94%。而半導體工廠所集中之新竹地區，其區域用水集中情況，應更高於北部地區之一般平均比率。



▲ 圖 1 自來水用水平衡圖

一般來說，工業用水及生活用水均依賴送水設備及送水管線輸送，快速且集中的用水成長，使得區域用水因供應設備、供應量無法迅速跟上需求而失衡，因而時有限水、缺水的危機。過去幾年來，新竹科學園區便因為用水的快速成長而一直遭遇到限水與缺水問題的威脅。在開源不及之下，節流措施便成為此區域廠商—特別是半導體業者，目前所積極去研究與進行之對策。

▼ 表 1 新竹地區水質調查

〔水質成分〕	〔單位〕	〔水質數據〕	〔一般值〕
溫度(Temp.)	℃	15 ~ 27	21
酸鹼值(PH)		7.0 ~ 7.8	7.3
導電度(Cond.)	μ s /cm	240 ~ 370	320
陽離子(Cation)			
鈉離子(Na^{1+})	ppm as $CaCO_3$	10 ~ 50	20
鉀離子(K^{1+})	ppm as $CaCO_3$	~ 4	2
鎂離子(Mg^{2+})	ppm as $CaCO_3$	30 ~ 35	32
鈣離子(Ca^{2+})	ppm as $CaCO_3$	70 ~ 90	75
鐵離子(FeX^{+})	ppm	0.05 ~ 0.5	0.1
錳離子(MnX^{+})	ppm	~ 0.02	0.01
*Total Cation	ppm as $CaCO_3$	110 ~ 180	129
Total Hardness	ppm as $CaCO_3$	100 ~ 125	107
陰離子(Anion)			
氯離子(Cl^{1-})	ppm as $CaCO_3$	10 ~ 35	20
硝酸根(NO_3^{1-})	ppm as $CaCO_3$	~ 2	0.5
碳酸根(CO_3^{2-})	ppm as $CaCO_3$	70 ~ 90	75
硫酸根($SO4^{2-}$)	ppm as $CaCO_3$	30 ~ 53	43
*Total Anion	ppm as $CaCO_3$	110 ~ 180	139
M-Alkalinity	ppm as $CaCO_3$	70 ~ 90	75
總矽含量(SiO_2)	ppm	5 ~ 15	10
總有機碳(TOC)	ppm	1.0 ~ 2.5	1.5
溶解二氧化碳(DCD)	ppm	8 ~ 14	9
濁度(Turbidity)	Degree	＜ 2	＜ 2
色度(Color)	Degree	＜ 1	＜ 1
淤泥指數(SDI)		5 ~ 6.7	6

要研究半導體工廠的用水節約，那麼就得先對半導體工廠的各類用水消耗做一番瞭解。一般來說，各半導體工廠在產品組合與製程上，或多或少有些差異，但是生產每片 8 吋晶圓所消耗之純水，以一座滿載月產 3 萬片之 8 吋晶圓廠為例，大約介在 2.0M3/片~2.5 M3/片之間，也就是說，製程純水之消耗量約在 2,000M3/Day~2,500M3/Day 之間。然而製程純水必須經過一道道處理手續純化，純水依原水水質與水處理系統設計之不同，處理每單位純水耗用之自來水會有極大之差異。這個比率目前就台灣現有的半導體工廠而言，在 45%~75%之間。這代表的是什麼?如果是一座製程純水消耗量 2,300M3/Day 之半導體工廠，45%之純水產出率代表水處理系統必須消耗 5,111M3/Day 之自來水，75%之純水產出率代表水處理系統只要消耗 3,067M3/Day 之自來水，如此大之差異，也就是本文將就水處理系統用水節約研究之原因。

另外必須提到的，便是半導體工廠中特有的另一項用水大項，那便是廢氣洗滌用水。由於半導體工廠在製造過程中，使用了相當多種的化學品及特殊氣體，當它們氣化或反應殘留之氣體被排氣系統抽除後，一般均會先經過初級處理設備處理，這當中當然包含了燃燒、吸附及洗滌，但是洗滌幾乎是必備的步驟。即使最終排放前之處理，一般也都包含了洗滌，因此其用水量佔半導體工廠之用水比率相當不低。以一座月產 3 萬片之 8 吋晶圓廠來說，其用水量可達 700M3/Day。然而由於其用水水質之限制與顧慮不若其他各種用水嚴格，故一般在用水規劃上，可以考慮以回收水再利用來達到自來水用水節約之目的。

以圖 1「自來水用水平衡圖」表示一 8 吋晶圓半導體工廠之用水分佈範例。由於不同之工廠在水處理系統設計上、用水回收上、空調負荷上會有所差異，故用水分佈亦會與圖 1 有些差異。

一、新竹地區水源之分析

在進入水處理系統用水節約之研究討論前，首先讓我們先對台灣半導體工業的重鎮——新竹科學工業園區，其所在地新竹地區之自來水水質做一番調查(如表 1 所示)。這是因為原水的水質是影響水處理系統選擇與評估之一重要因素，要談水處理系統便不得不由此討論起。由表 1 可看出新竹地區的水質濁度低，FI 約 6.5 且總矽含量稍高。

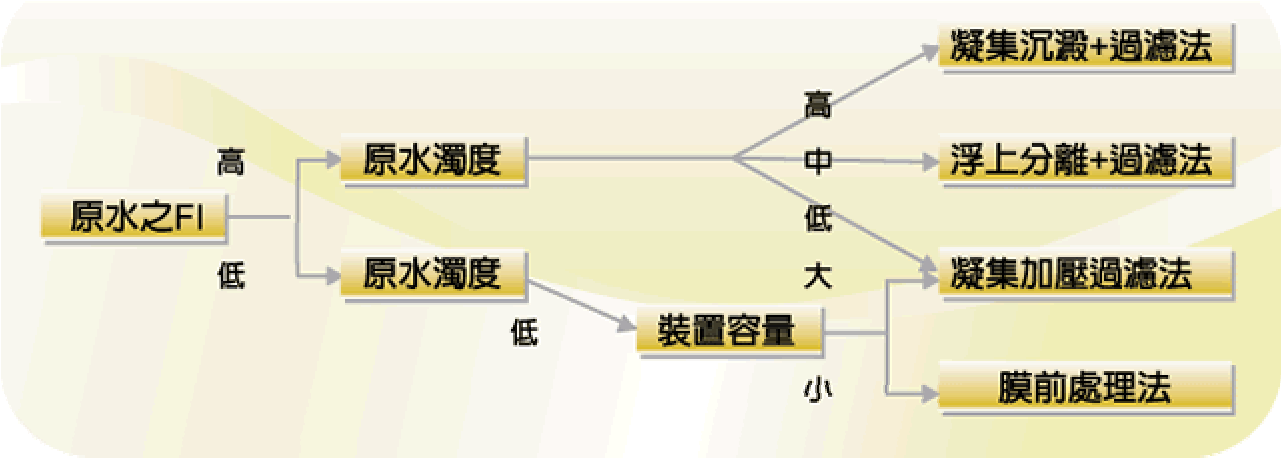
二、 純水系統之設計

半導體製程所使用之純水，其處理系統約有 16 個單元，各司其職。系統可概分為前處理系統，一次純水系統及二次純水系統。然而因地區水質之不同及各公司理念之差異，故各單元之排列組合會因公司而異。以下便根據上述之結果來討論水處理各子系統之處理效率及選擇。

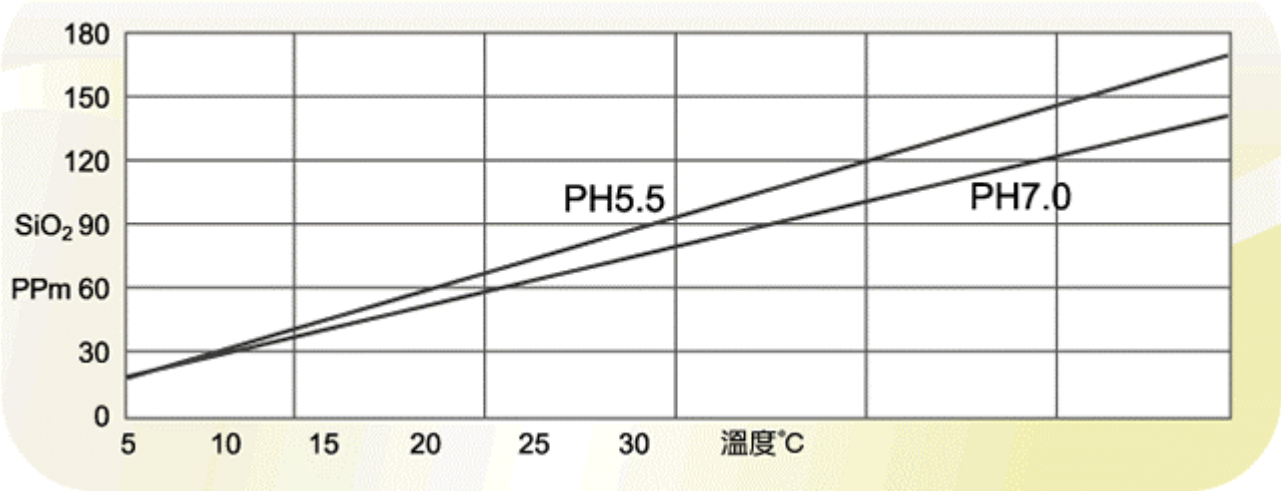
1. 前處理系統之選擇：

一般來說，在水處理各子系統中前處理系統主要負責將原水中之粗級粒子、懸浮固體及凝膠質去除，以利後續流程設備之處理進行。其處理方式可概分為凝集沉澱過濾法、浮上分離過濾法、凝集加壓過濾法、膜前處理法等幾種，而其處理方式之選擇考量因子，主要便是原水之 FI 值及濁度。

以下以圖 2 來說明針對不同之原水水質，如何選擇前處理系統之處理方式，並就其處理效率加以討論。當原水水質之 FI 及濁度偏高時，就水中不純物之去除而言，凝集沉澱+過濾法及浮上分離+過濾法是較佳之處理方式，選擇此處理系統可以將 FI 值降至 1.5~2.5 之間，而就處理水之產出率而言約為 95~97%。當原水水質之 FI 高而濁度低時，我們可以選擇凝集加壓過濾法為前處理系統，一般而言此處理系統可以將 FI 值降至 2.0~4.0 之間，而處理水之產出率而言約為 96~98%(如表 2 所示)。就懸浮固體及凝膠質之去除表現，凝集加壓過濾法略遜於凝集沉澱+過濾法及浮上分離+過濾法，但處理水之產出率約提高 1%，且設備佔用面積較小。當原水水質之 FI 及濁度均低時，我們可以選擇膜前處理法，選擇膜前處理法為前處理系統，就 FI 而言其可處理至 1.5 以下甚至更低，且其設備佔用面積在幾種前處理系統中最小，不過其處理水之產出率約為 90~95%，顯然低於前述幾種系統。綜合前述，針對新竹科學園區的水質，選擇凝集加壓過濾法為前處理系統似乎是較佳之選擇，尤其是在處理水產出率上面，而 FI 之處理效果稍遜，可由後續製程來補償。



▲ 圖 2 前處理方式流程選擇



▲ 圖 3 PH.溫度與 SiO2 析出界限關係圖

2. 一次純水系統之選擇：

在水處理系統中，一次純水系統主要負責承續處理經前處理系統處理後之淨水，去除水中之可溶性離子、可溶性有機質、溶解氣體、微生物及微小粒子等等，以達到初級純水之等級。其水質指標一般以比電阻為代表，當然除此之外還有總有機碳、溶氧量、總矽量、含菌量、微粒子等水質指標。一般來說，一次純水系統產出水的水質要求在 10 MΩ-CM 以上，而半導體工廠之一次純水水質要求一般會在 15 MΩ-CM 以上。以下我們就要針對一次純水系統之處理效率及選擇，加以研究討論。首先，在一次純水系統之處理設備裡， 一般來說包含了：紫外線殺菌燈組、全過濾膜模組、逆滲透膜模組、高效率脫氣塔、離子交換樹脂塔等等。目前各純水系統之設計流程幾乎大同小異，而主要之不同來自於逆滲透

膜模組及離子交換樹脂塔之選用，此二項設備各有其優缺點且會影響系統之淨水產出率，表 3 為兩單元之比較。

就節水之立場而言，我們應極力採用離子交換樹脂塔,然而由於逆滲透膜模組有其不可替代性(它可除去非離子態之微粒物質等，而離子交換樹脂塔無法去除)，故兩者搭配使用是一較佳之組合方式。但由於逆滲透膜模組之操作性能，受到入口水質差異之限制極大，尤其是 Silica、TOC 及溶解鹽類濃度。

這些影響因子直接限制到逆滲透膜模組之淨水可產出比率，當然的也就影響了逆滲透膜模組之選擇。

2-1. Silica 因素：

Silica 在水溫 20°C、PH7.0 時，其析出界限濃度約為 85PPM(如圖 3 所示)，也就是當 Silica 濃度超出 85PPM 時，對逆滲透膜會產生 Fouling 之現象，這將使逆透膜因堵塞而昇高入口壓力並降低通過水量。為了避免逆滲透膜的堵塞，可以有幾種設計上的選擇。

A. 降低逆滲透膜模組入口水質的 PH 值：

利用在逆滲透膜模組入口注入酸，將入口水質的 PH 值降至 5.5 左右。同樣在水溫 20°C時，當 PH 為 5.5，Silica 的析出界限濃度提高為 100PPM。不過此法雖然提高了 Silica 的析出界限濃度，但是因為注入酸，也增加了入水之離子濃度，對後續製程處理上亦是一負荷。

▼ 表 2 各前處理系統比較表

前處理系統選擇	適用原水水質		淨水產率	處理效果	設備面積	初置/運轉成本
凝集沉澱+過濾法	FI高	濁度高	95~97%	FI:1.5~2.5	大	中
浮上分離+過濾法	FI高	濁度中	95~97%	FI:1.5~2.5	大	中
凝集加壓過濾法	FI中	濁度低	96~98%	FI:2.0~4.0	中	較低
膜前處理法	FI低	濁度低	90~95%	FI:1.5以下	小	較高

▼ 表 3 離子交換及 RO 逆滲透之優缺點比較

	優 點	缺 點
離子交換	1.原水利用效率96 % 以上，適用於缺水區域，如新竹科學園區。 2.可連續操作，不需等年度維修停機保養。 3.運轉成本較低。	1.建造面積大，成本略高。 2.需用化學品費用與RO耗電量相當。 3.操作較複雜，需專業操作人員。 4.再生廢液需中和處理。
RO逆滲透	1.總建構成本較低。 2.廢液可直接排放。 3.操作簡單，小型工廠較適用。	1.耗電量大，費用與離子交換相當。 2.運轉成本較高(濾材較貴)。 3.膜組可能阻塞，造成系統中斷。 4.原水利用率僅有70~80%不適合缺水區域。

B. 提高逆滲透膜模組入水的溫度：

提高逆滲透膜模組入水的溫度：利用在逆滲透膜模組入口以熱交換器提高入水的溫度。同樣在 PH 7.0 而水溫為 25°C時，Silica 的析出界限濃度提高為 105PPM，而若在 PH 5.5 而水溫為 25°C時，Silica 的析出界限濃度則提高為 120PPM。

C. 降低逆滲透膜模組採水之濃縮比率：

當逆滲透膜模組入口水質之 Silica 濃度設計控制在 25PPM 以下時，如果逆滲透膜模組淨水產水率為 80%，亦即濃縮水之濃縮倍數為 5 倍，則在濃縮水側之 Silica 濃度為 125PPM。這也就是說，當入口水質之 Silica 濃度控制在 25PPM、PH 5.5、水溫 25°C時，逆滲透膜模組之淨水產水率必須限定在 80%以下，以避免 Fouling 之情形產生。若是入水之 Silica 濃度高於 25PPM 或是 PH 值控制在 5.5 以上，則淨水產水率將被限制在更低之比率，此就採水效率而言並不是一個好方法，只有在入水水質無法改善的情況下所採取的限制方法。

D. 降低逆滲透膜模組入口水質的 Silica 濃度：

利用離子交換樹脂前處理置於逆滲透膜模組之前，以降低逆滲透膜入水之 Silica 濃度。若經離子交換樹脂處理後之水質，其 Silica 濃度低於 1PPM，那麼對於淨水產水率為 90%之逆滲透膜模組，其濃縮水側之 Silica 濃度不會高於 10PPM，即使在 PH 7.0、水溫 25°C的條件下，針對 Silica 而言，遠低於其析出界

限濃度 85PPM，逆滲透膜不會有 Fouling 的顧慮，故在逆滲透膜模組之淨水產水率上，可解除 Silica 濃度之限制。

2-2.TOC 因素：

TOC(總有機碳)濃度對逆滲透膜模組之運轉限制，主要同樣是在濃縮水側經濃縮後之濃度。濃縮水側若 TOC 濃度過高，將會有 Fouling 之情形產生，造成逆滲透膜模組因阻塞而昇高操作壓力並降低操作流量。一般來說，在做逆滲透膜模組之選擇考量時，原水中之 TOC 值以 3PPM 為界，若 TOC 值高於 3PPM，則不適合選擇濃縮倍數達 10 倍以上之單段逆滲透膜模組。

2-3.溶解鹽類因素：

溶解鹽類對逆滲透膜模組之運轉限制，主要是當濃縮水側溶解鹽類濃度過高，尤其是碳酸鈣、碳酸鎂等水中溶解度較低之鹽類，則易在逆滲透膜模組形成沉積結垢，造成逆滲透膜模組因阻塞而昇高操作壓力並降低操作流量。碳酸鈣在 PH 7.0、水溫 25°C的條件下，水中溶解度約為 270PPM，因此如果水中之鈣離子濃度為 70PPM，濃縮倍數達 4 倍以上時〔即淨水產出率達 75%〕，逆滲透膜模組之濃縮水側即有結垢之可能。欲控制濃縮水側無結垢之傾向，一般有以下幾個方式：

A. 降低逆滲透膜模組入口水質的 PH 值 ：

針對避免溶解鹽類濃度過高之結垢而言，降低水中 PH 值的確是個簡單而有效之方法。同樣是在水溫 25°C的條件下，當 PH 值由 7 下降至 6.5 時，水中碳酸鈣溶解度提高至約 450PPM 左右，若再下降至 5.5 時，水中碳酸鈣溶解度提高至約 700PPM 左右。因此如果水中之鈣離子濃度為 70PPM，濃縮倍數在此條件下便可提高為 10 倍。

B. 降低逆滲透膜模組入水的溫度：

同樣是在水中 PH 值為 7 的條件下，當水溫由 25°C下降至 20°C時，水中碳酸鈣溶解度提高至約 290PPM 左右，若再下降至 15°C時，水中碳酸鈣溶解度提高至約 320PPM 左右。顯然利用水溫來控制避免溶解鹽類濃度過高之結垢而言，效果較為有限。

C. 降低逆滲透膜模組採水之濃縮比率：

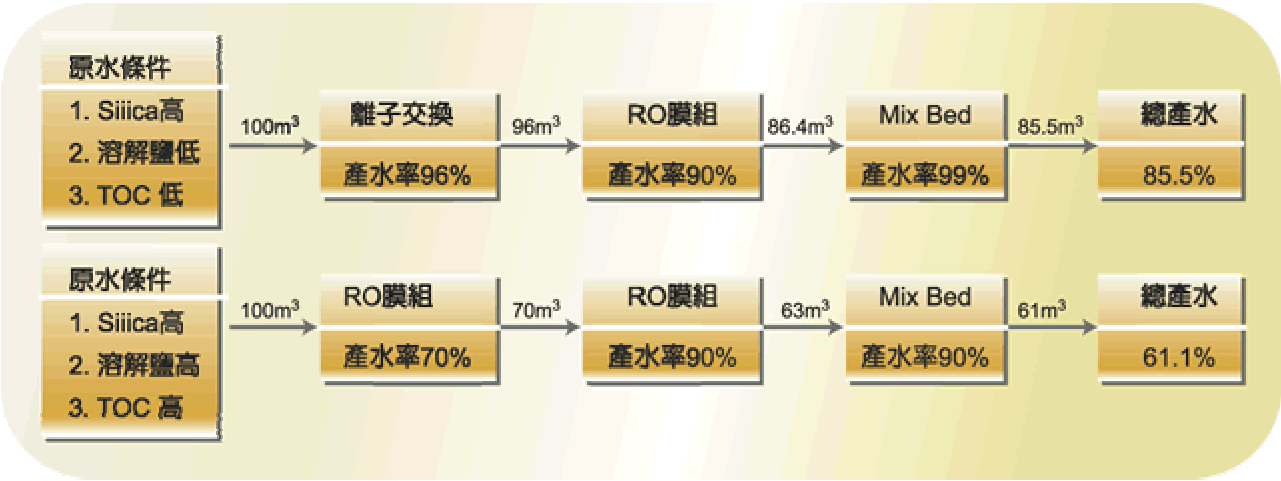
針對逆滲透膜模組之操作運轉而言，這是最不願意用到的方法。在 PH 7.0、水溫 25°C的條件下，如果水中之鈣離子濃度為 70PPM，則淨水產出率最高限制在 75%以下，若鈣離子濃度為 100PPM，則淨水產出率便被限制在 63%以下了，這對於想有較高之淨水產出率而言，是無法接受的方法。

D. 降低逆滲透膜模組入水的溶解鹽類濃度：

當我們不願利用降低逆滲透膜模組入水的 PH 值，來達到控制溶解鹽類之結垢時，利用逆滲透膜模組前之離子交換樹脂前處理，來降低入水的溶解鹽類濃度，似乎是個好方法。因為利用離子交換樹脂前處理，可以很容易的把溶解鹽類之濃度降至 5PPM 以下，甚至於更低。如此來說，溶解鹽類之溶解度與結垢問題，自然不再是逆滲透膜模組淨水產出率之限制因子。綜合以上對逆滲透膜模組入水之 Silica、TOC 及溶解鹽類等水質之討論，我們將一次純水系統之選擇，以圖 4 說明針對不同之入水水質，如何選擇一次純水處理系統之處理方式，並就其處理效率，做一比較。

綜合前述，針對新竹科學園區的水質，選擇離子交換樹脂前處理配合複合型逆滲透膜模組，似乎是較佳之選擇，尤其是在處理水產出率上面。另外，離子交換樹脂種類之選擇及再生方式之設計，亦會影響到離子交換樹脂塔之淨水產出率，這是在單元設備設計時應該加以注意的。

▼ 圖 4 處理效率比較



▼ 表 4 各處理系統比較表

一次純水處理系統選擇	適用入水水質	淨水產率	處理效果	設備面積	注藥控制
離子交換樹脂 單段 逆滲透膜模組	Silica高 溶解鹽低 TOC低	85%	Silica:約 2PPB 比電阻:約 2MΩ-CM TOC:約 2PPB	大	不需要
前段＋後段 雙段 逆滲透膜模組	Silica低 溶解鹽高 TOC高	61%	Silica:約 2PPB 比電阻:約 0.5MΩ-CM TOC:約 2PPB	中	需要

三、各類用水之節約與回收

1. 製程用水節約與回收

製程用水回收率之高低，取決於生產設備內部有無良好之排水分類，基於半導體製程化學品使用之複雜性，若於排放源頭即進行分類管理，不僅回收率可提高，且廢水處理之負擔亦可減輕。半導體設備，主要用水機台有 1. 化學站(Chemical Station) 2. 洗盒機(Box Cleaner) 3. 洗管機(H.T.C.及 V.T.C) 4.C.D.O 5.Wet Scrubber。

A. 各機台用水浪費之要因：

■ 化學站：

1. Process 用水量太大：

主要用水量為 a.Q.D.R b.O.F c.FR

2. 非 RUN 貨時用水太多：

a. 換酸清洗用水量太多。

b. 換酸頻率過高。

3. 回收比率太低：

a.Q.D.R 或 O.F 回收點時間太遲。

b.Sink Bath 沒回收。

■ 洗盒機：

1. 清洗時間過長。

2. 清洗水回收率低。

■ 洗管機(HTC.VTC)：

1. 清洗時間過長。

2. 清洗水回收率低。

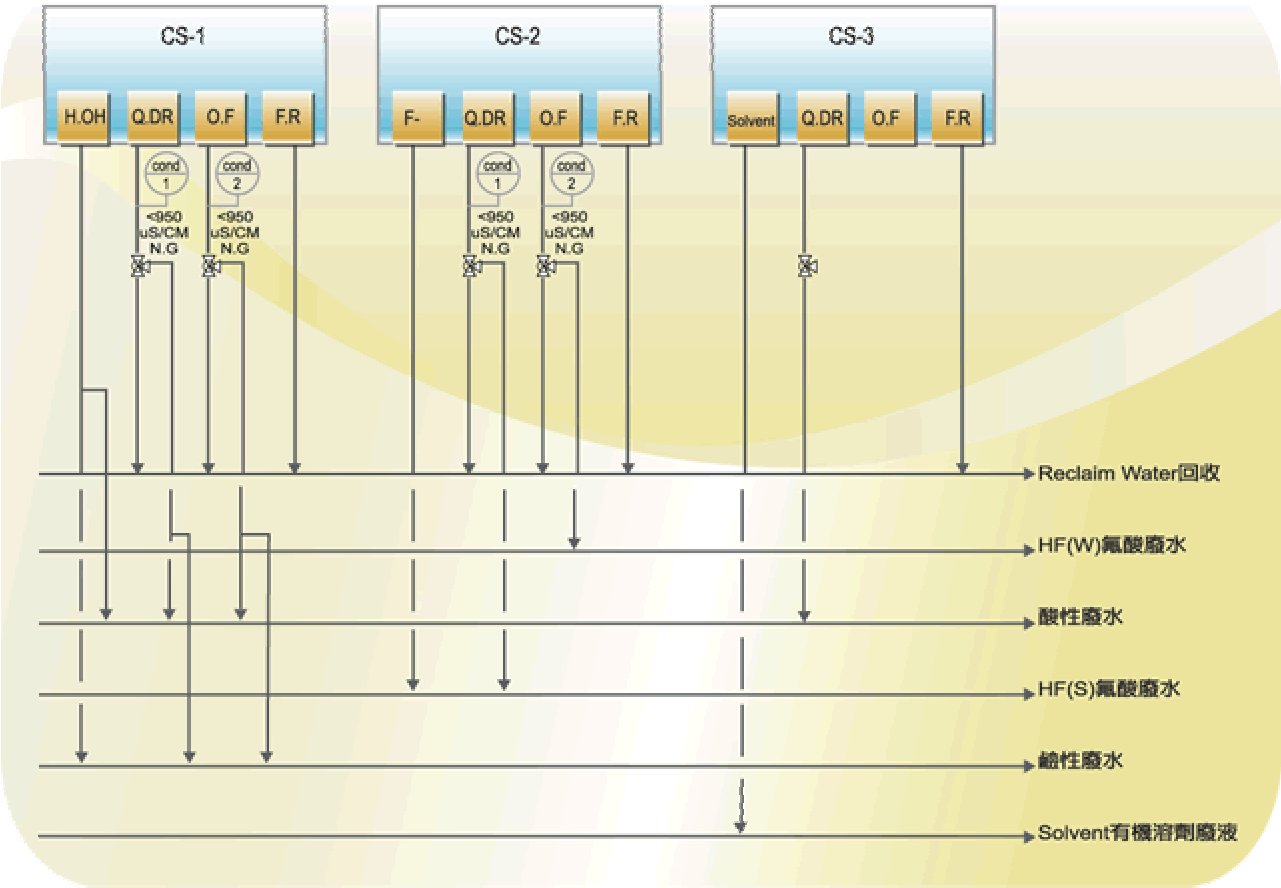
■ CDO：

1. 流量過高。

2. Wet Scrubber 流量太大。

3. TEOS 流量太大。

化學站為超純水之用水大宗，其主要用水處在 1.Q.D.R 2.O.F 3.F.R 三槽，而 F.R 槽用水全部回收，可知 Q.D.R 及 O.F 為施行回收所要研究的課題，其它各機台之節水方式請參考化學站機台之節水模式。



▲ 圖 5 製程設備用水回收

B：化學站機台節水模式之實際作法：(參考圖 5)

1. 於設備採購之前即需與設備製造商溝通，將節水需求及作法告知設備製造商使設備出廠時，為我們所需之設備。若購買機台後，再進行修改機台之管線及控制，將是很困難的事，甚至將因此而無法達成節水之目的。

2. 將回收管線依不同之化學品特性，分類回收，以達到最大之回收量及減少廢水之處理成本。

3. 機台調機時，即應進行該機台之排放水質分析，利用水阻計監測 Processing 中水質的改變，以確實訂定最佳的 Process time，使符合回收標準之水質均能回收。

4. 更改機台 Recipe，減少用水量。

5. 於各管線均需設立取樣口，隨即監測排放水質，及異常時之追蹤。

6. 水質之導電度及 T.O.C 值，是決定是否回收之考慮要項，操作不當或人為誤動作，將造成誤排水，減少回收率。

7. 依據統計化學站之用水結果分析為 HQDR >OF>FR 排放結果為 OF> HQDR>FR。

C：清洗時間之討論

本討論主要針對 O.F，Q.D.R，F.R 三槽的參數修改作說明。其中以 F.R 槽為探討重點。

1. SUGAI F.R 槽：Wafer 在 F.R 槽內，Process Time 固定，(製程設定 300s),即使槽內之水阻值已達到設定值，Wafer 仍需等待清洗時間終了，才能離開 F.R 槽;就省水觀點，比較浪費水源。

2. TEL F.R 槽：Wafer 一進入 F.R 槽內即開始計時，當時間達到 First Sampling Time(目前設定為 120s)時，才偵測此時之水阻值，若水阻值已達到設定值，則 Arm 將立即抓取 Wafer 離開 F.R 槽，假使水阻值未達設定值則繼續清洗，並每 20s 偵測一次水阻值(20s 為設定值)，偵測次數設定為 20 次 (20 次為定值)，在偵測時間若水阻值達到設定值，則 Arm 將立即抓取 Wafer 離開 F.R 槽。若偵測終了水阻值仍未達到設定值，Arm 仍將抓取 Wafer 離開 F.R 槽，但發出 Alarm 訊息。

3. SUGAI F.R 槽經過觀察，發覺 Wafer 在清洗槽內清洗，清洗時間約 155s~185s 間其水阻值即可達到設定值，且清洗時間在 270s~300s 間其水阻值幾乎持定值，所以減少 Process Time 為 270s，並減少各機台其 Pre-Flow Start Time 15s。

4. Chemical Station 的用水除了 O.F 槽中 Acid Drain Change Time(10：1 HF or BOE)：180s，Acid Drain Change Time (100：1 HF):150s，及 Hot QDR 槽的 Alkali Drain Change Time：150s 這三時段的用水未回收外，其餘時段的用水均回收。

2. 廢氣洗滌用水回收

A. 廢氣洗滌用水特性：

半導體製程所排出之廢氣，經過燃燒氧化後溶於水中形成酸根離子，主要為氟離子、氯離子及 Silica，故洗滌水為濁度低偏酸性溶液。由於廢氣中氣體濃度不高而均易溶於水因此洗滌水循環回收使用應可行，然因為回收使用之關係，水會漸成酸性、含大量微粒子及長菌，故需加以處理。

B. Wet Scrubber 節水探討： (圖 6)

1. Wet Scrubber .DAS.及 CDO 為耗水量甚大之附屬設備，因其對水質之要求較低，故可進行相當之回收再利用。

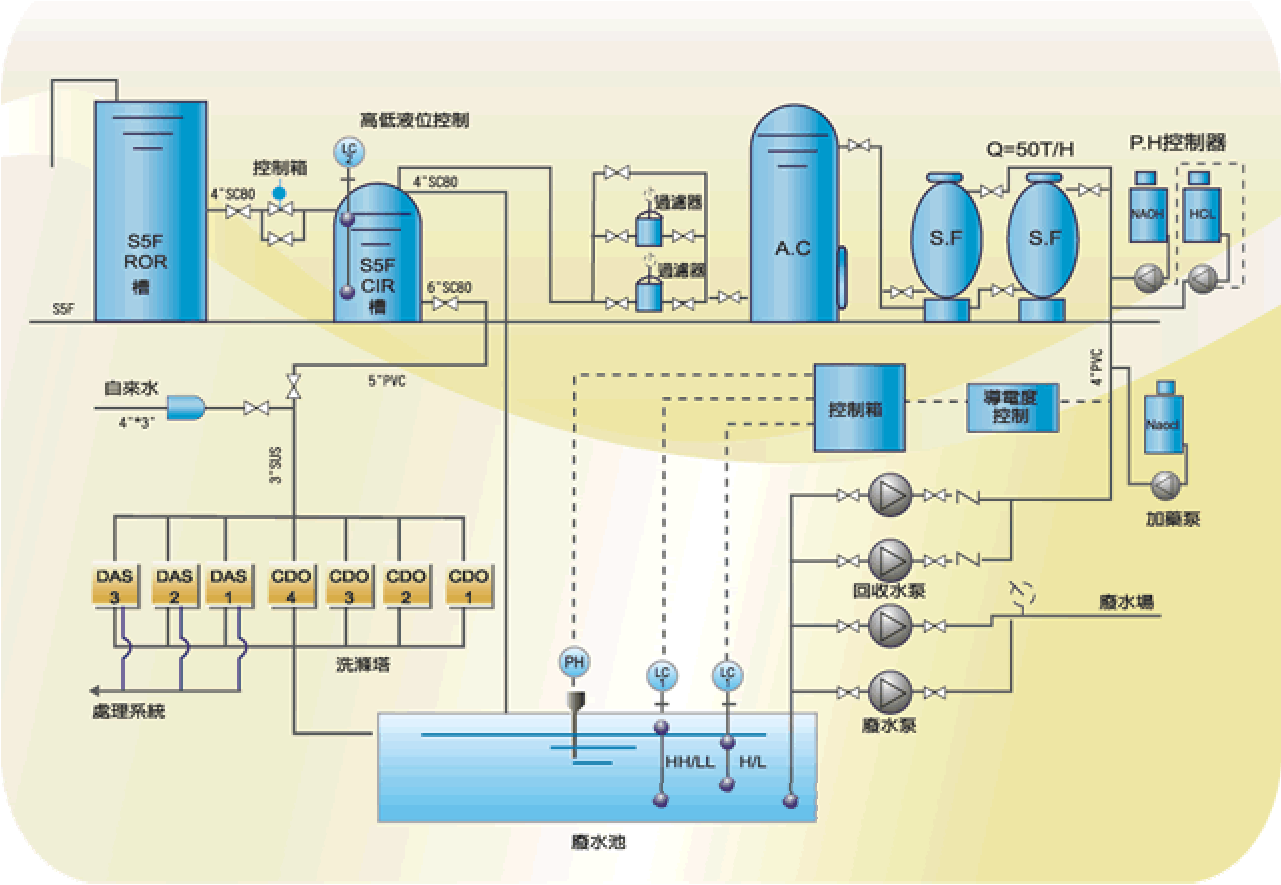
2. Wet Scrubber .DAS.及 CDO 之用水可使用 RO 濃縮水，再使用自來水為備用水源，以備濃縮水量不足時可切換使用。

3. 此回收系統之主要處理機構為:a.S.F b.A.C c.Filter d.酸鹼控制 e.殺菌控制，若對水質要求較嚴，可加入 2B3T 處理系統。

4. DAS 或其它有機溶劑之廢液需專管分類回收，以增加回收率及降低處理成本。

5. 收集系統中，需加入酸鹼控制，使供水符合所需。

6. 收集系統中，需加入漂白水等殺菌處理。



▲ 圖 6 廢氣洗滌回收系統

參考文獻

1. 王洪鎧，(1992) ，空氣調節設計基礎，徐氏基金會。
2. 吳宗榮;蔡基湧，(1990)，水及廢水分析，復文書局。
3. 張晉，(1994)，水處理工程與設計，鼎茂圖書。
4. 賴耿陽 譯著，(1994)，純水．超純水製造法，復漢出版社。
5. 顏登通，(1995)，潔淨室設計與管理，全華科技圖書。
6. 經濟部水資源局，(1997)，水資源政策白皮書。
7. 園區同業工會-水電供應委員會，(1998)，半導體廠水回收技術與規劃。
8. KURITA WATER INDUSTRIES Ltd.，(1998)，Presentation of UPW SYSTEM
9. Nomura Micro Science Co. Ltd.，(1996)，ULTRA PUREWATER SYSTEM

10.Nomura Micro Science Co. Ltd., (1995) , ULTRA PUREWATER SYSTEM for UMC FAB-III OPERATION MANIAL