

台灣高科技產業發展所面臨用水技術之挑戰

工研院能資所節水服務團 陳仁仲

近年來台灣的產業形態盤整，朝高科技產業發展的大勢應該已趨於底定，不論是兩兆雙星或未來的奈米、生醫等產業，無一不需用到水。以上這些高科技產業在未來發展過程中會面臨哪些用水技術的瓶頸呢？本文嚐試以高科技產業中具指標意義的半導體生產用水所面臨的問題為例，推行出未來高科技產業發展所有製造生產過程中與用水技術相關的一些共通性課題，諸如



用水量的大幅增長，用水水質的純度要求不斷提高，總體用水成本的增加，與因應用水質要求的超精度監測及分析技術的同步發展等。文中同時也指出隨高科技產業的用水型態改變，未來在造水、用水、資源化及無害化上面的著力是無可避免，水處理綜合工程的時代也將隨之來臨。筆者也舉出，在因應高科技產業發展所面臨之各項用水挑戰中，技術力是克服挑戰的重要關鍵，但此技術力卻帶有地域性的特質，本土化的投入是無可迴避的過程，同時呼籲推動高科技產業發展時，同時重視用水技術的研發與應用，惟有如此才能確保高科技產業的生根與鴻圖大展。

一、前言

高科技產業的發展是未來產業的主軸，不論是深次微米 IC、TFT-LCD、V 族通訊元件、奈米級電子元件、奈米材料 等等高科技產品的生產製造，只要製程中涉及水者就必須滿足超精微與超潔淨的要求，其中半導體產業的進程更具有重要的指標意義。近年來半導體產業已為各國的明星產業之一，投資狀況更是風起雲湧，各大財團競相投入此工業科技產品；對各國而言，此舉無疑將是帶動該國工業轉型最佳契機。而半導體製造日趨進步，元件密度愈來愈高，對環境的要求也愈來愈嚴格。迄公元 2000 年全球半導體業估計已興建 139 座晶片廠，其中 8 吋晶圓生產線有 117 座。由 6 吋晶圓提升至 8 吋晶圓廠之每片晶圓須水量，在美國由 2 噸提高至 7.5 噸，而在水回用率要求較高的台灣新竹科學園區則是由 1 噸/片提高到 4 噸/片，由此也突顯水對高科技產業的重

要。另外，在高科技產業生產製程中，對去除材質表面微污染物，與為了平坦需要的研磨後清洗，或是為了去除微影製程的光阻需要，甚至是控制氧化膜成長等，無一不需要用到水，這些濕式的製程技術，與先進的水處理技術都是息息相關密不可分的。

以下就以半導體產業為例探討高科技生產製程中，用水技術的一些發展趨勢。

二、用水技術的挑戰

一般半導體製造發展由大型積體電路(LSI)進步至目前之超大型積體電路(VLSI)，往後將繼續朝 ULSI 技術前進；而記憶體之容量則由 8K 而 16M DRAM 乃至 64M DRAM；製程中之主要技術乃掌握在晶圓線路的密緻，與此有關者實依賴蝕刻技術等之發展；為符合此密緻化技術的要求，須有效除去在蝕刻過程中附著於晶圓上之殘留化學藥品及微粒，避免影響後段加工製程，使半導體之製造良率大幅降低；因此為有效提升半導體之製造良率，對於相關程序之晶圓清洗，也就顯得相當重要，用水的潔淨度要求也與日劇增，如表 1 所示，因此必要的水量與水質便成為其中重的關鍵。

(一)水量的挑戰

對於半導體產業內在的用水量挑戰，主要反映於製程用水的成長。其用水量最大之處為晶圓清洗製程之超純水清洗用水，約佔總用水量 70%左右。在 8 吋晶圓濕式機台(Wet Benches)中超純水清洗槽及化學容量是 6 吋晶圓濕式機台之 2 倍，由此結果得超純水及化學品消耗量在每月相同晶圓產下，8 吋是晶圓 IC 廠為 6 吋晶圓廠之 2 倍。由 6 吋晶圓提升至 8 吋晶圓廠之每片晶圓超純水需水量，在美國由 2 噸提高至 4.5 噸，而在回用率較高的新科學園區也由 1 噸/片提高到 2.5~3 噸/片，具據國外研究資料顯示，在濕式蝕刻製程中，由 6 吋晶圓提升至 8 吋晶圓之超純水用量成本，佔濕式蝕刻製程總成本由 13%提升至 32%，(見表 2)，未來 12 吋晶圓製程之超純水用量估是 6 吋晶圓 10 倍以下用水量。以台灣地區半導體生產製程中，超純水用量的需求於 2000 年時每年約 4,000 萬噸，預計到 2006 年將需達 7,800 萬噸。同時配合使用的酸劑也由 1,600 噸/年成長到 3100 噸/年，廢水排放量也由 2,400 萬噸/年增加到 4,400 萬噸/年。這些預測都顯示隨著用水量的大增，相對衍生的問題及花費也一定隨之增加。除此之外，存在於世界各地的水資源匱乏與開源困難等問題，才是最終導致產業發展用水競爭的最嚴肅外在用水量挑戰因素。

技術引進時間	2001	2003	2005	2008
技術世代(晶片尺寸)	180nm(8 in.)	130nm(12 in.)	100nm(12 in.)	60nm(16 in.)
Organics/Polymers(C 原子/cm ²)	6.0E+13	4.9E+13	4.1E+13	2.8E+13
Critical surface metals(原子/cm ²)	≤6E+9	≤3.4E+9	≤2.5E+9	≤2.1E+9
Partical size(nm)	75	60	50	35
Light scatterers(cm ⁻²)	0.058	0.064	0.051	0.052

表 1 製程潔淨度規格 以半導體製程為例

Rank	200mmWet Bench		150mm Wet Bench	
	Cost Componen	Percent	Cost Componen	Percent
1	DI Water	32	Capital	31
2	Capital	23	Facilities	20
3	Consumables	16	Monitors	18
4	Facilites	14	DI Water	13

Ref Microcontamination, Jan. 1994, pp29-32

表 2 半導體 6 吋及 8 吋晶圓濕式機台成本分析表

(二)水質的挑戰

前述提及有關晶圓清洗程序的基本要求即是要將污染物移除，且避免污染物再次的污染晶圓，在半導體微電子元件(Semiconductor Microelectronic Devices)製造中，基材表面清洗的重要性從 1950 年代固態元件技術開始已有一定的認知。在晶圓或元件表面上有化學污染物和粒子不純物，對於矽電路(Silicon Circuits)之元件行為、可信度及產品良率有極大的影響，這是眾所週知的。因為半導體表面極端的敏感，而次微米元件製造時對最初矽晶圓經氧化及顯像(Patterning)後清洗之效率技術是比以前更為重要；因此，超清洗(Ultracleaning)矽晶圓成為 ULSI 電路元件(如 64 及 256M DRAM)製程中重要的關鍵技術。因為清洗晶圓表面之水質要求很高，所以非得採用超純水清洗不可，超清洗(Ultracleaning)的水質要求可以用矽表面上化學污物及粒子的濃度來定，對金屬不純物應小於 1010atoms/cm²，粒徑超過 0.1 μ 的粒子應小於 0.1 個/cm² (對於每 200mm 之晶圓表面應小於 30 個粒子存在)。然而，由於晶體設計的線路間距越做越小，因而其中的粒子和化學物質等污染物即變得重要且影響深遠，像這樣高標準的清淨度對半導體產業而言已是必須的，其製程線寬與水質需求的規格，以半導體為例，如表 3 所示。如此嚴格的規定是由於所有元件的品質都可能造成污染物質存在，積體電路製造過程中，每個過程都可能造成污染物質存在，積體電路製造過程中，事實上有超過 50%之晶圓不良率是因微污染物造成的。因此，水質的超純化，其造水過程與過程中品質的確保等課題另一項挑戰。

Year of Introduction	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Technology Node	180nm			100nm			70nm
Total oxidizable carbon(ppt)	2	1	1	<1	<1	<1	<1
Bacteria(CFU/liter)	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Total silica(ppb)	1	1	1	1	0.5	0.5	0.5
Dissolved oxygen(ppb)	10	7	3	1	1	<1	<0.5
Critical cation, anion,metals(ppt,cach)	20	20	<20	<20	10	10	10
Particles>0.05 μ m,1/L	<500	<200	<200	<200	<200	<200	<200

Ref. (SEMATECH/Ultrapure Water)

表 3 製程線寬與水質需求規格

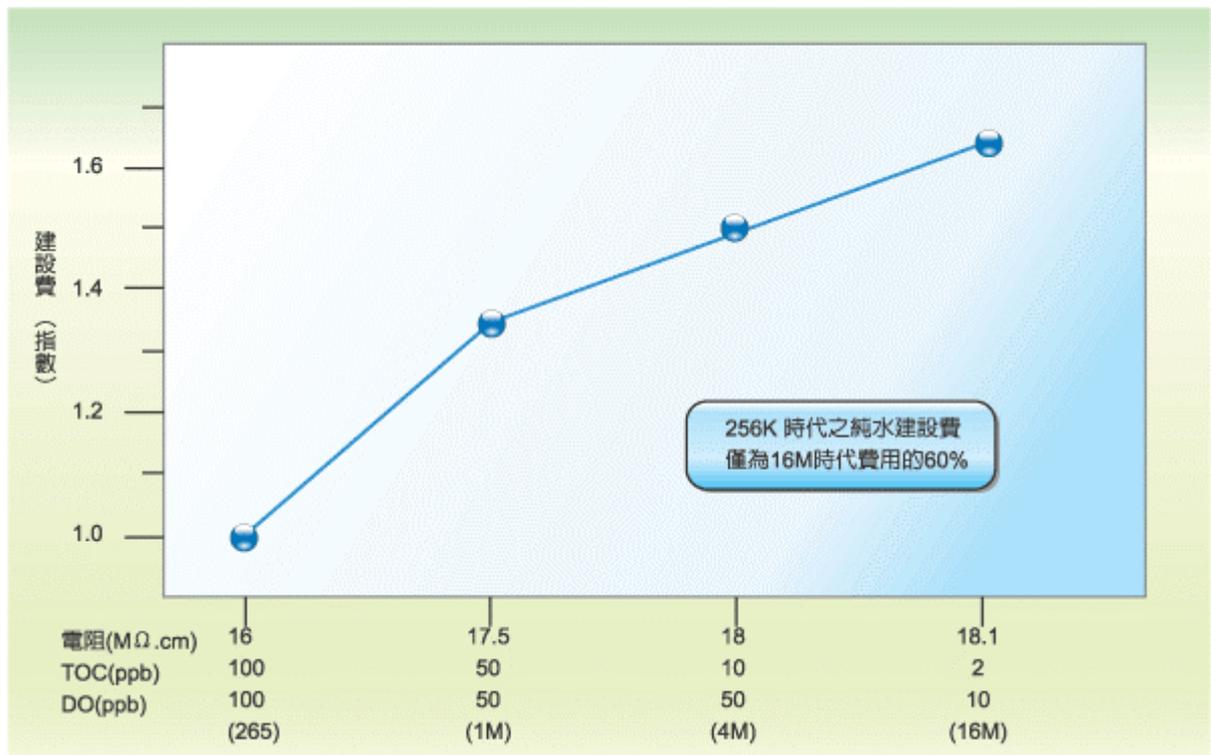


圖 1 純水水質與設廠投資建設費成長關係

(三)投資超大的挑戰

根據日本 Nishigaya 公司的評估，半導體或高科產業之純水水質要求，與設廠投資建設費有著正比例的關係，如圖 1 所示；而根據日本 Komiya 等的分析半導體 DARM 生產的設廠投資與記憶的容量也呈對數函數的變遷情形，如圖 2 所示。總體而言，由於半導體生產的用水，不論是水量上的提高，亦或是水質要求純度上的超級化，在在都是直接反映於生產成本的一項重要因素，用水成本之降低與產良率的確保，已成為半導體業競爭市場的嚴厲挑戰。因此半導體產

業也可以說是整個高科技產業的用水挑戰，其實就是如何降低生產成本，提高市場競爭力的挑戰。

三、降低生產成本從用水點著手

從述用水過程的水量與水質挑戰中已顯然可見，降低半導體生產製造成本的切入點，不外是降低超純水製造設備裝置與使用操作上的成本，因此由設備裝置設計、製作著手，與由用水點的超純水使用形態改善著手，便成為主要關鍵。前者的思考方式如：小型化及設計製作的合化等等；後者有關用水形態之改善減低藥品量等。實際應用上半導體產業的用水已由 4M DARM 的時代如圖 3 所示，供應超純水給用水點，並處理其排水的觀念，進化到 16M DARM 的時代如圖 4 所示，也就是 4 小 1 高的超純水製造，與處理排水的作法，所謂的 4 小 1 高乃意指廢棄物減小、初始成本減小、操作成本減小、空間減小的 4 小，與高性能超純水的穩定供應的 1 高。面對半導體產業的持續發展，未來朝 256M~1G DARM 的時代勢將馬上面臨，如圖 5 所示。其用水型態的轉變與挑戰必將更趨嚴酷，屆時用水型態的挑戰，大概會以結合水處理設施與水管理的水綜合工程 (Total Engineering)，如圖 6 所示；均成為用水型態所訴求的目標，未來不單只是努力降低成，造水與使用水的技術變化均會是綜合工程中重要的一環。

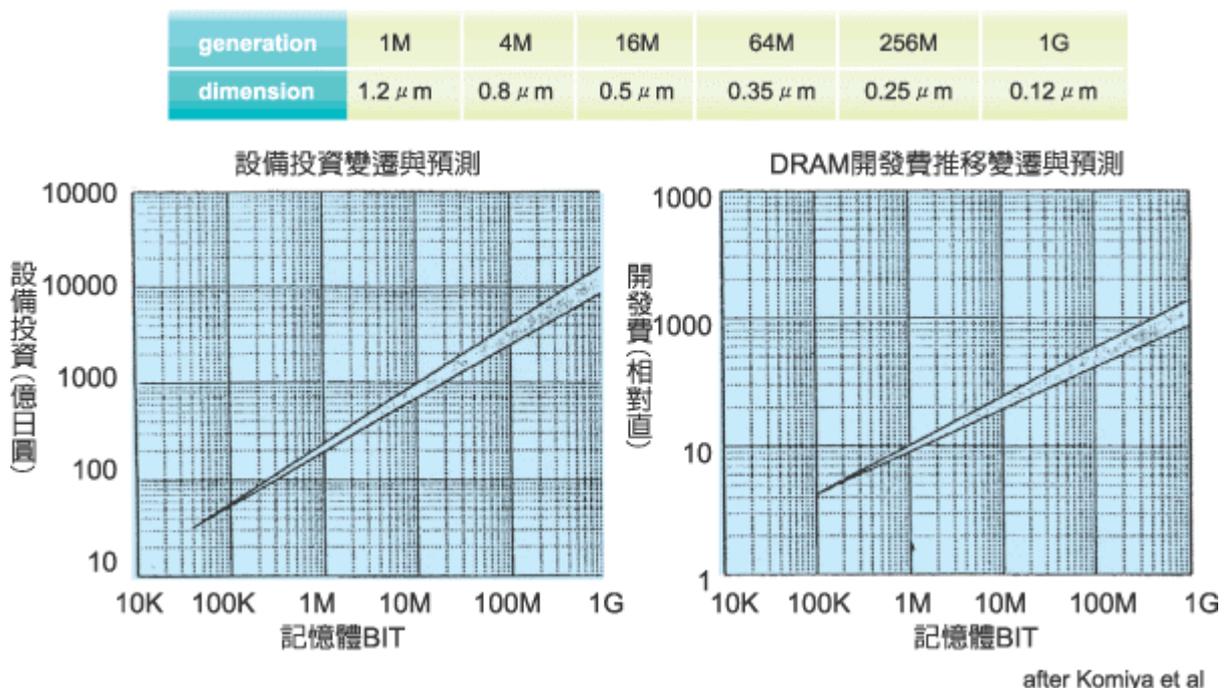


圖 2 DARM 生產設廠投資趨勢

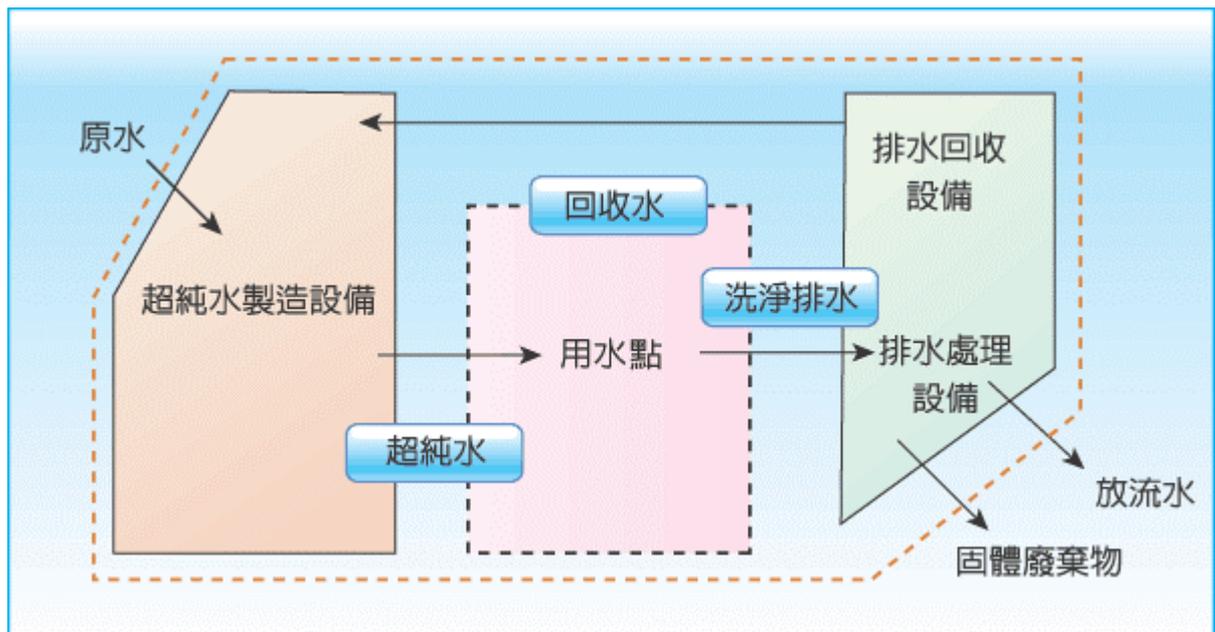


圖 3 4M- DARM 時代的用水型態

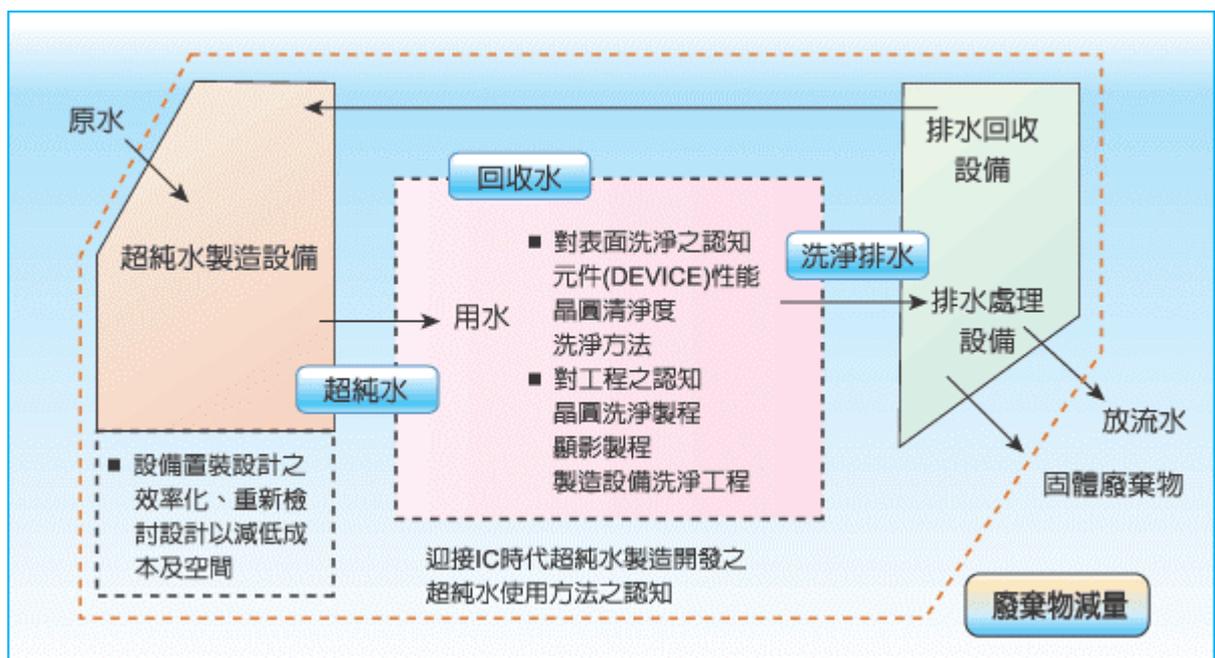


圖 4 16M-DARM 時代的用水型態

四、超精度分析能力的同步化

隨著高科技產業的日新月異，半導體產業用水型態朝向「造水」、「用水」及「資源化」，「無害化」的理想邁進的同時，支持這些技術進步的動力，也可以說是基礎簡單的說就是超精度分析能力的同步發展與建立。

以半導體產業使用超純水為例，為證明超純水的水質，並正確把握設施的操作運轉狀況，或對應更高的水質要求及支援最適當超純水製造系統所需的技

術開發，甚至為因應事故發生時的迅速應對等的需要，對用水的超精度分析對超精度水質的監測等技術能力的建立便更顯現其重要性，儘管半導體生產製程對潔淨室的環境品質本來就要求極高，然而面對更高積集度產品的開發生產，超潔淨分析環境的掌握也必然是項難度非常高，且成本很大的工程，為防止污染，濃縮樣品時對環境的留意，如採樣容器材質溶出的防範等，都是超精度分析所關注的課題。若從對超純水微粒子測定的監測方面思考，傳統以測定微水量的方式，加上現行 6 吋或 8 吋晶圓廠之超純水的微粒子數已少到 0~1 個/m (0.05 μ m)，樣品水中雖有微粒子存在，但是計數時遺漏的可能性卻相當高，因此有微粒子數過少計數不易的缺陷會發生。又假設微粒子以 1 為單位表示，0 個/m 與 1 個/m 之中間微粒子數則常無法判別，這些問題點會隨粒子的組合排列造成元件的缺陷而導致不良率的發生，但必竟集合多個粒子排劃組合的可率還它的隨機性存在。反之若針對個數非常少，但粒徑卻較大的微粒子(0.1 ~ 0.5 μ m)其所造成的破壞影響將呈現的更大，必竟單一個粒子或數一兩個粒子就能導致元件缺陷的可能性，幾乎可以說有幾個粒子存在，就有幾個不良品的產生。為此，未來為加強檢出原來被疏漏掉的大粒徑微粒子的存在，增加測定水量勢所難免，但相對測定水量的增加依現有技術能力檢測時間也等比例增加，依實際生產線中的持續用水實況評估，這樣耗時的監測系統事實上是不會存在的，新的課題也就因應而生。而以半導體生產用水中很忌諱的 TOC 問題而言，現在大都以有機物在超純水中以 TOC 表示其品質，而非以個個成分表示，雖然金屬等其他成份均以 ppt 單位來表示，而 TOC 卻以 ppb 表示，當 TOC 發生問題時能及時查出發生源，並謀求迅速的改善，是所有半導體產廠務工程師很想克服的問題，惟目前在及時監測能力上卻無法滿足未來用水型態的需求。所以，超精度的監測與分析能力的同步發展與否，也是未來高科技產業用水的另一項挑戰。

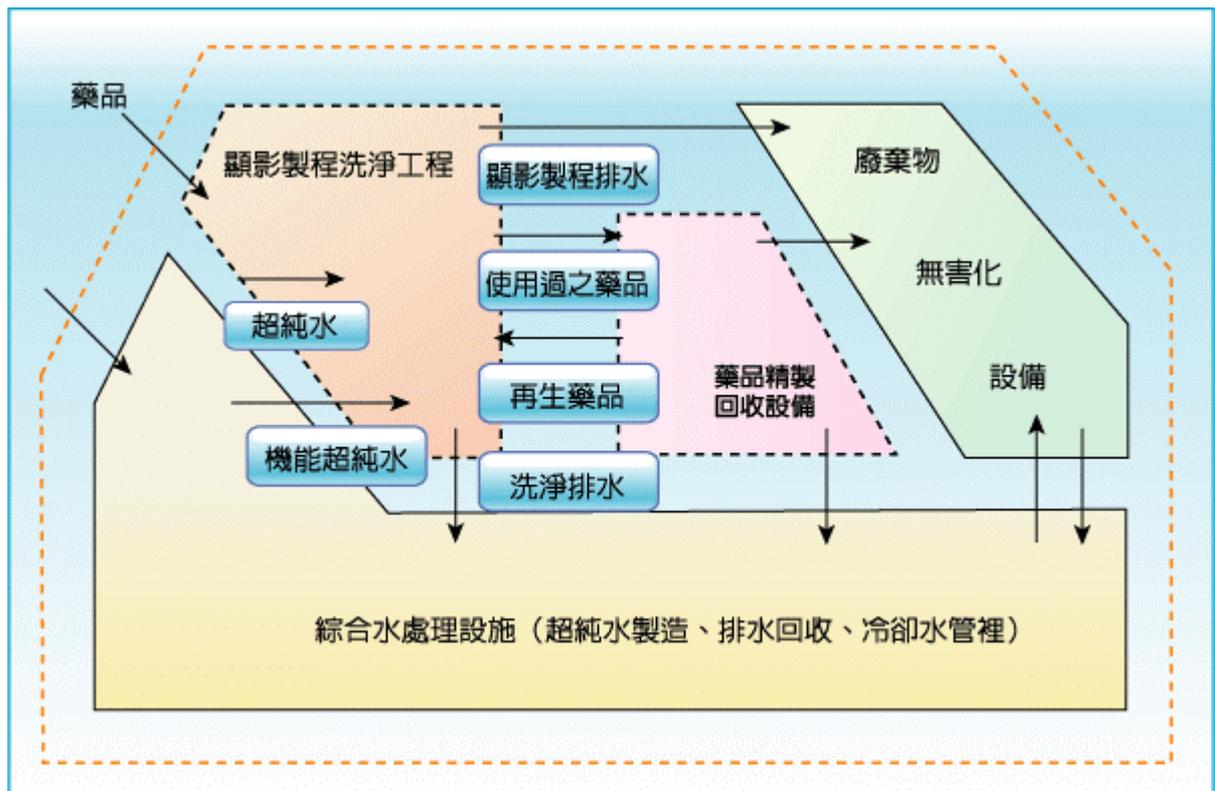


圖 5 256~1G-DRAM 時代的用水型態

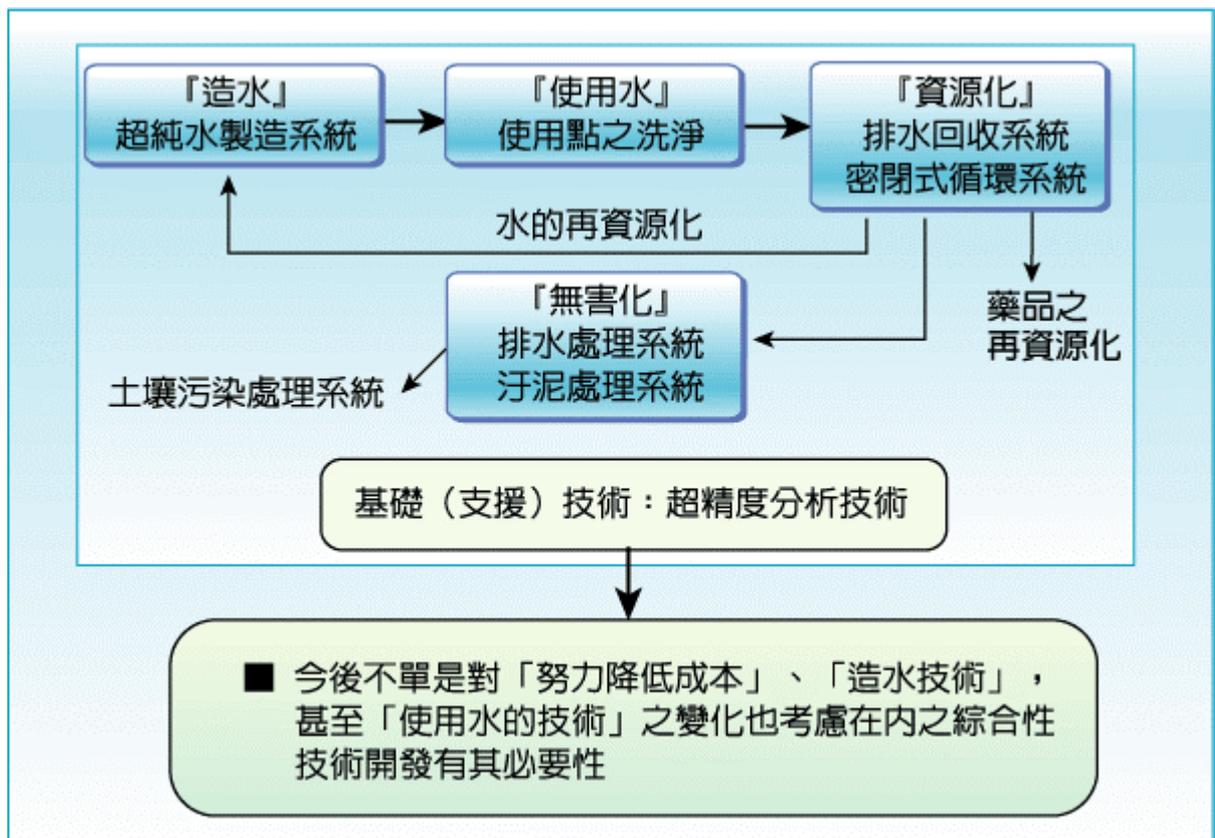


圖 6 水處理綜合工程(TOTAL ENGINEERING)

五、結語

總結前述有關高科技產業發展的用水挑戰，不難發現用水技術在高科技產業的生產製造過程所扮演的角色，已越來越突顯它的重要性，然而放眼國內外產、官、學、研此方面的技術發展投入，卻完全不能對比，試想在技術無根的生產投資其風險性是不言而喻的。或許也有人會舉出；用水技術一樣可以比照製程技術般，採取 turn key 方式或仰賴水處理藥品供應商的建議便可迎刃而解，筆者以為水處理技術除了其高深的學理基礎外，也具有相當的地域性特質，因此本土化最適化的發展是無法避免一環。若純粹買進技術除了無法競爭於高科技的最先端外，生產成本也無法確實降低，在水資源供給大環境水量與水質的衝擊下，共有頭痛醫頭，腳痛醫腳的窮於應付罷了。

為了配合人類永續發展與綠色生產的理念，未來高科技產業的發展，除了本體技術的不斷精進外，一套智慧用水(Use Water Wisely)及環境友善生產製程的週邊技術的健全發展與推廣運用，將是必然的趨勢。面對未來高科技產業發展，不論是本文主題的半導體產業，抑或是其他有關產業，相信在用水的挑戰上是面臨同樣的課題，外在是大環境水源不足的用水競爭，與供水穩定性的確保挑戰，內在則是用水量劇增，水質要求高純度化，而總體用水或成本增加，及如何有效監測與分析超精度的水等等的難題。但俗云：「天下無難事，只怕有心人」，相信在所有心人的群策群力的積極努力下，不久的將來言些挑戰都可化解於無形。

參考文獻

1. 神藤郁夫，「半導體工業用水處理技術」，工業節水技術系列研習會講義(一)，經濟部水利司，1995年。
2. 陳仁仲、吳惠如，「新竹科學工業園區與半導體工業用水現況研析」，工業節水技術系列研習會講義(一)，經濟部水利司，1995年。
3. 陳仁仲，「半導體產業用水技術發展」，工研院季報簡報資料，工研院能資所，1997年。
4. 工研院能資所，「水土資源開發與保育技術發展五年計畫」第二年度計畫書，1997年。
5. 盧文章，「淺談半導體產業節約用水」，節水季刊第11期，經濟部水資源局，1998年。
6. 陳仁仲，「高科技產業發展的用水挑戰 以半導體產業為例」，中台灣環境保護研討會論文集，P287~299，東海大學環境科學系，1998年。

7. 金光祖，「精微化製程環境友善生產技術基盤建構計畫，」簡報資料，工研院能資所，2001 年。