

望安海水淡化廠逆滲透膜設計方案之研究

Studies on RO configurations for Pre-design of Seawater Desalination Plant at Wang-an

黃文惠*、劉振漢*、吳華玲*、張哲榮*、王義輝*、張振章**

*嘉南藥理科技大學 環境工程與科學研究所 研究生

**京華工程顧問(股)公司 總工程師、嘉南藥理科技大學 兼任助理教授

摘要

Abstract

早期有鑑於離島缺（限）水的情況日益嚴重，政府積極尋找替代水源，雖然替代水源可能有幾種不同來源，不過其中只有一種可以大量生產，而且不用考慮原料不足者，那就是「海水淡化」。因此這幾年來，在離島陸續設置了許多座小型海水淡化廠，但因為諸多問題造成這些海水淡化廠無法順利操作。

本研究為瞭解問題，以澎湖望安海水淡化廠為案例，探討逆滲透膜之相關設計，透過設計軟體模擬不同膜管排列組合及各種操作參數，包括：膜管之選擇、前加酸、溫度、pH、硼離子去除率、SDI、LSI或SDSI等，研提合理設計方案供未來類似個案建廠之參考。

研究結果顯示：如果沒有妥善前處理，單靠砂濾與濾心並無法將 SDI 降至 5 以下，因此常造成逆滲透膜管污堵，致使清洗頻率增加，耗費藥劑與人力；另者由於海水水質偏鹼，因此導致逆滲透膜管濃縮液 LSI或SDSI 偏高，容易產生結垢現象，如果加酸調整，產水水質會偏酸，硼離子去除率也會變差，並增加後續加鹼之困擾；為提高產水水質，建議採用 **one stage two pass** 方式，將部份產水進行再純化處理後與原產水攪配成適飲好水；在特殊要求下，可以選擇對硼離子有較高去除率之薄膜；另外必須考慮低溫產水量不足但卻可以提高水質之問題。

關鍵字：海水淡化、逆滲透、望安海淡廠

一、背景說明

20世紀初，國際上就有「19世紀爭煤碳、20世紀爭石油、21世紀爭飲水」的說法，在經濟發展強勁需求下，全世界大部分國家都面臨著淡水資源短缺或品質不佳的共同問題。台灣平均年降雨量雖然相當大，卻也被聯合國認定為水

資源貧乏的地區，主要是因為大部分降雨集中在颱風季節及山區，時間及地點不對，加上山勢高、山坡陡峻、河流短促，降雨快速進流到至海洋，可利用的降雨量不到20%，且隨著經濟的繁榮，尤其是高科技園區不斷擴建的用水需求，造成近年來供水不足的壓力愈來愈大。此外因為高科技產業缺水容忍度最低，一旦削減其用水，等於削減國家整體經濟產值，加上傳統水庫、攔河堰、人工湖等之興建愈來愈困難，不僅用地取得不易、興建時程緩慢、投資龐大，非技術問題更增添許多困擾，另一方面地下水超抽導致地層下陷及井水鹽化等問題也長期存在沿海地區，使得台灣的水資源供應缺口問題越顯嚴重。

最近五年以來，海水淡化技術因為壓力能回收裝置（pressure exchanger）技術有重大突破，大型海水淡化廠之操作成本已大幅降低至0.5 US\$/m³左右，因此吸引許多國家與廠商投入興建每日超過十萬噸產水量的海水淡化廠。目前，全世界約有一百二十多個國家和地區採用海水或半鹹水（brackish water）淡化技術取得淡水，中東產油國家70%的淡水資源來自於海水淡化，美國、日本、西班牙等已開發中國家也競相發展海水淡化產業。

海水取之不竭，用之不盡，又不受乾旱之影響。海水淡化廠興建時程短，產水量擴充彈性大，佔地空間又小，產水水質較佳，且造水成本又隨著技術提昇持續下滑。據統計，海水淡化系統與生產量正以每年10%以上的速度在增加中。亞洲國家如日本、新加坡、韓國、印尼與中國等，也都積極發展或應用海水淡化做為替代水源。

以台灣本島與離島四面環海的地理特性而言，相當適合以海水作為替代水源。至民國94年底，已完成之海水淡化廠共有20座，臺灣本島之屏東縣2座、連江縣5座、金門縣2座、澎湖縣11座。已營運的海水淡化廠共有19座，澎湖縣11座、連江縣4座，屏東縣與金門縣各2座，另連江縣西莒海水淡化廠及澎湖縣將軍半鹹水淡化設備正試運轉中。政府亦規劃於新竹與桃園沿海興建海水淡化廠，確保新竹科學園區與桃園地區的穩定供水。未來在苗栗、雲林、台南、高雄等地區的海岸亦都有興建海水淡化廠之計畫。

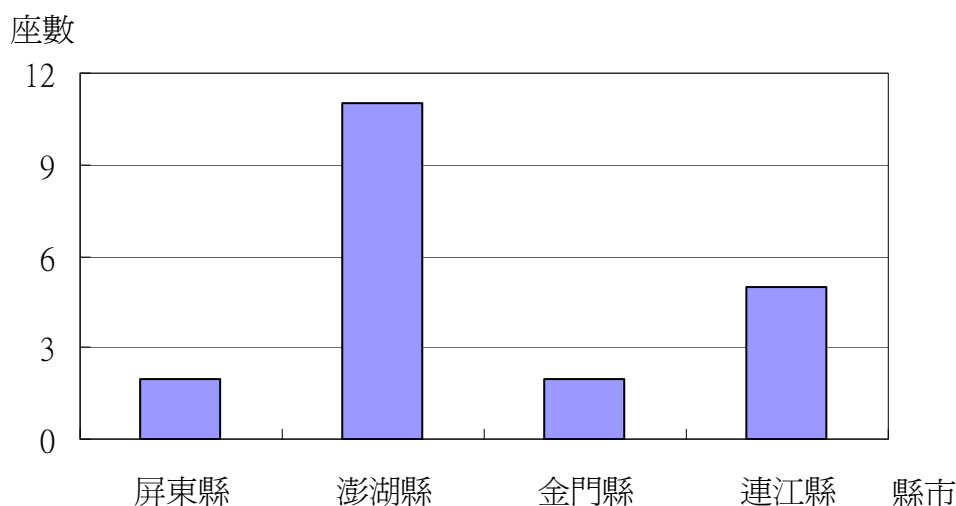


圖 1.1 現有縣市海水淡化廠家數

資料來源：水利署水利統計（94 年底）

目前台灣地區海水淡化廠的設置，除臺灣本島有 2 座外，餘皆位於離島，主因離島地區氣象天候及地形等條件比較不利於水庫之有效蓄水，造成供水不穩定與不足量。以澎湖地區為例，水源主要來自於深井水源（即深層地下水）、地面水庫及地下水庫（即地面水或淺層地下水），一旦觀光旺季來臨，民生用水馬上吃緊，全縣旱象窘現。早年應急措施，就是以軍艦或民間輪船由台灣本島運水支援，每度水成本高達 160 元。成功海水淡化廠興建後，海水淡化每度造水成本約 50~60 元，低於運水成本，可惜的是，成功海淡廠只運轉五年就關廠了。表 1.1 為澎湖地區自來水系統供應量⁽¹⁾，其中深井佔 58.8%，地面和地下水庫佔 20.2%，海水淡化廠則佔 21.0%。海淡水已成為澎湖地區最重要的新興水源。表 1.2 為澎湖縣海水淡化廠一覽表。

表 1.1 澎湖地區自來水系統供應一覽表⁽²⁾

系統別	供水區域	需水量 (立方公尺/日)	水 源	供水量 (立方公尺/日)
馬公系統	馬公市區 二十三里	16,500	成功、興仁、東衛三座水庫	5,500
			深水井二十九口	6,200
			烏崁海水淡化廠	4,800
澎南系統	馬公澎南 6 里	1,700	深井 8 口	1,700
湖西系統	湖西鄉 23 村	3,100	烏崁海水淡化廠	800
			深水井 17 口	2,300
白沙系統	白沙鄉 15 村	2,900	深水井 26 口	2,900
西嶼系統	西嶼鄉 11 村	2,700	深水井 13 口	2,700

系統別	供水區域	需水量 (立方公尺/日)	水 源	供水量 (立方公尺/日)
望安系統	望安鄉 5 村	650	西安水庫 望安海水淡化廠	250 400
七美系統	七美鄉等 6 村	出水量：800 用水量：700	深水井淡化 6 口	1,000

表 1.2 澎湖縣海水淡化廠一覽表

廠 名	完工時間	用水 標的	淡化水產量 ^{註1} (噸/每日)	實際造水量 (萬噸)	營運管理單位
烏崁海水淡化廠	89 年	民生	7,000	187	臺灣省自來水公司
尖山發電廠	89 年	工業	300	8.2	臺灣電力公司
七美半鹹水淡化設備	90 年	民生	1,000	3.18	臺灣省自來水公司
西嶼半鹹水淡化設備	91 年	民生	1,200	34.93	臺灣省自來水公司
白沙半鹹水淡化設備	91 年	民生	1,200	18.87	臺灣省自來水公司
虎井海水淡化廠	91 年	民生	200	6.93	臺灣省自來水公司
桶盤海水淡化廠	91 年	民生	100	3.43	臺灣省自來水公司
望安海水淡化廠	91 年	民生	400	1.66	臺灣省自來水公司
成功半鹹水淡化設備	92 年	民生	4,000	81.61	臺灣省自來水公司
烏崁海水淡化廠套裝	93 年	民生	3,000	-	臺灣省自來水公司
將軍半鹹水淡化設備	93 年	民生	180	4.77	臺灣省自來水公司

說明：1.『淡化水產量』係每日淡化水產量之產能
2.將軍半鹹水淡化設備正試運轉中
3.資料來源：水利署水利統計（94 年底）

2.1 海水水質特性

該廠之進流水係抽取鄰近海域之海水，該區海水外觀清澈，相關水質如表 2.1 所列，總溶解固體量 (TDS) 約為 40,000~41,000 mg/L，氫離子濃度指數 (pH) 約為 8.1~8.3，氯鹽 (Cl⁻) 約為 19,000~20,000 mg/L，總硬度 (TH) 約為 5,870~6,490 mg/L as CaCO₃，鈣離子 (Ca²⁺) 約為 1,010~1,160 mg/L as CaCO₃，鎂離子 (Mg²⁺) 約為 4,860~5,330 mg/L as CaCO₃。另依據烏坎海水淡化廠 92 年操作資料，進流水 TDS 介於 36,200~41,500 mg/L，顯示澎湖地區海水之 TDS 含量較一般海水水質略高，此為設計時重要參考因子。

表 2.1 海水水質⁽²⁾

水質項目	澎湖地區	硫球地區(日本)	備註
水溫 (°C)	21.4~29.7 ^{註1}	—	—
氫離子濃度指數 (pH)	8.1~8.3 ^{註1}	8.2~8.4	—
總溶解固體量 (TDS, mg/L)	40,000~41,000	35,100~36,900	—
氯鹽 (Cl ⁻ , mg/L)	19,000~20,000	18,700~19,700	—
總硬度 (TH, mg/L as CaCO ₃)	5,870~6,490	-	—
鈣離子 (Ca ²⁺ , mg/L as CaCO ₃)	1,010~1,160	930~980	—
鎂離子 (Mg ²⁺ , mg/L as CaCO ₃)	4,860~5,330	5,400	—
M _{alk} 鹼度 (HCO ₃ ⁻ , mg/L as CaCO ₃)	130~150	109~116	—
硼 (B, mg/L)	—	—	4.6 ^{註2}
銻 (Sr ²⁺ , mg/L)	—	—	13 ^{註2}
鋇 (Ba ²⁺ , mg/L)	—	—	0.05 ^{註2}
蘭氏飽和指數 (LSI)	1.17~1.65 ^{註3}	—	—

註 1：資料來源行政院環保署環境資料庫\海域水體\澎湖沿海\望安海域測站水質資料⁽³⁾

註 2：資料來源 www.geocities.com/RainForest/Vines/8882/ensc.html

註 3：LSI=pH-pHs 計算所得，TDS 超過 10,000 ppm 以上建議改用 Stiff & Davis Saturation Index，但為了方便比較，仍以 LSI 數值方式列出

2.2 產水目標

- 1、產水量：原設計出水量 400 CMD，新廠將擴建至 600 CMD。
- 2、造水率：35%。

2.3 產水水質要求

符合行政院環境保護署 94 年 5 月 30 日環署毒字第 0940039894 號令修正發布之飲用水水質標準，總溶解固體量 500 mg/L，總硬度 300 mg/L as CaCO₃。而在澎湖大部分自來水供應地區，水質主要不合格的檢驗項目以氯鹽居多，故亦將氯鹽列為產水水質要求標的。

另因海水中含硼（B）較高約為 4.5~5.0 mg/L⁽⁴⁾，硼雖為人體所需之微量元素，惟因攝取過過可能影響中樞神經系統、腸胃系統發炎，故歐盟、世界衛生組織均有訂定飲用水含硼之標準 0.5 mg/L，詳表 2.2。目前海水淡化廠招標規範，亦對產水水質硼要求需小於 1.0 mg/L。

表 2.2 各國飲用水中硼之標準

組織或國家	飲用水水質標準 (mg/L)
世界衛生組織 (WHO)	0.5
歐盟 (EU)	1.0
日本	1.0

表 2.3 產水水質要求

水質項目	飲用水水質標準
總溶解固體量 (TDS, mg/L)	500
總硬度 (TH, mg/L as CaCO ₃)	300
氯鹽 (Cl ⁻ , mg/L)	250
硼 (B, mg/L)	1.0*

註：*表海水淡化廠招標規範要求

三、 設計參數

望安海水淡化廠係採用逆滲透法原理，將抽取的海水，利用高壓與薄膜過濾獲得淡水。影響逆滲透操作效率的因素包括來水水質及系統設計如壓力、溫度等，前者係以經過完善前處理後之海水來源為要件，後者可從技術面進行調整，本研究主要針對後者來討論，透過美國海德能公司（HYDRANAUTICS）所提供 IMS Design（Integrated Membrane Systems Design）設計軟體進行模擬設計，參見圖 3.1，探討設計的合理性及產水的質與量。



圖 3.1 美國海德能公司（HYDRANAUTICS）IMS Design 設計軟體

IMS Design 操作步驟 1：選擇 Analysis，輸入海水水質。

The screenshot shows the 'Analysis' window of the Hydranautics RO Projection Program. The project is named 'SeaWater-Pacific' with code 'SEA' and feed 'Seawater - open intake'. The date is blank. The interface is divided into several sections for inputting water quality parameters:

- General Parameters:** pH (8.20), Turb (0.0), Temp (10.0 C), SDI (0.0), 15min.
- Electrical Conductivity:** E cond (61140 uS/cm), H2S (0.0 ppm).
- Chemical Analysis:** CO2 (1.600 ppm), Fe (0.000 ppm), CO3 (0.3 ppm), HCO3 (150.0 ppm), SO4 (7000.0 ppm), Cl (19000.0 ppm), F (0.0 ppm), NO3 (0.0 ppm), B (5.00 ppm), SiO2 (2.6 ppm).
- Ion Concentrations:** Ca (1016.0 ppm), Mg (5330.0 ppm), Na (12345.9 ppm), K (362.0 ppm), NH4 (0.0 ppm), Ba (0.000 ppm), Sr (5.080 ppm). These are converted to meq/l: CaCO3 (20.32), CaCO3 (106.60), 536.78, 9.28, 0.00, 0.00, 0.12.
- Summary:** Total positive (673.10 meq), Autobalance, Total negative (684.81 meq).
- Calculated Values:** Calculated TDS (40606 ppm), Ionic strength (0.815), CaSO4 saturation (55.1%), Silica saturation (2.4%), Saturation Index (1.0 Langelier), BaSO4 saturation (0.0%), SrSO4 saturation (42.6%), Osmotic pressure (381.2 psi).

圖 3.2 IMS Design 設計軟體 Analysis 圖示

IMS Design 操作步驟 2：選擇 RO Design，輸入產水量、造水率、選擇膜管型號及數量等，進行模擬設計。

The screenshot shows the 'RO Design' window of the Hydranautics RO Projection Program. The project is 'SeaWater-Pacific' and 'Calculated by' is '黃文惠'. The date is '09/20/06'. The membrane age is set to 3.0 years and the chem dosing rate is 53.2 ppm. The feed water type is 'Seawater - open intake'. The system is configured for 1 stage and 1 pass. The membrane type is 'SWC4+' with 6 elements per vessel and 2 vessels. The design parameters are as follows:

- Operating Conditions:** pH (6.60), Membrane age (3.0 years), Chem type (H2SO4), Chem concentration (100 ppm).
- Performance Metrics:** Flux decline % per year (7.0), SP increase % per year (10.0), Product recovery % (35.0).
- Flows:** Permeate flow (120.00 m3/d), Average flux rate (11.2 l/m2-hr), Feed flow (342.9 m3/d), Concentrate flow (222.9 m3/d).
- System Specs (Stage 1):** Element type (SWC4+), Elements/vessel (6), Vessels (2).
- Options:** Permeate blending (unchecked), Permeate throttling (unchecked), Concentrate recirc. (unchecked), Booster pump (unchecked).
- Buttons:** Run, Print, Flow diag., Recalc Array, AutoDisplay (unchecked).

圖 3.3 IMS Design 設計軟體 RO Design 圖示

IMS Design 操作步驟 3：產出設計報告及流程圖。

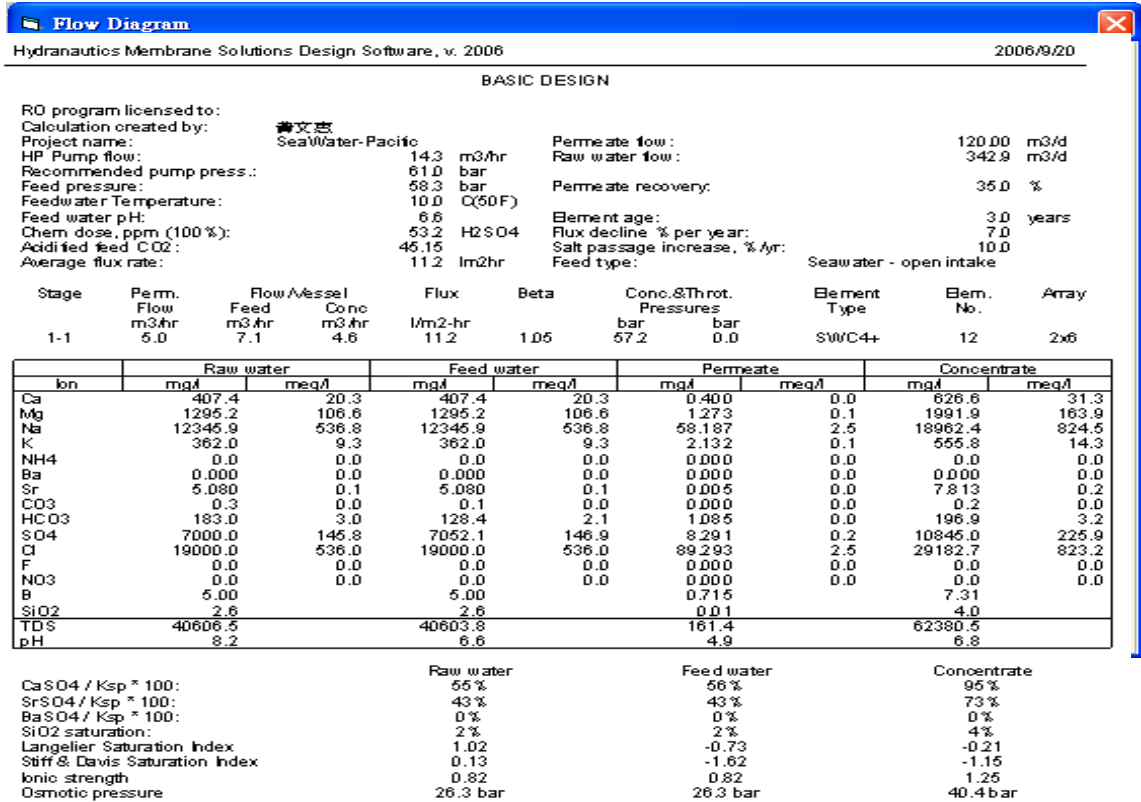


圖 3.4 IMS Design 設計軟體設計報告

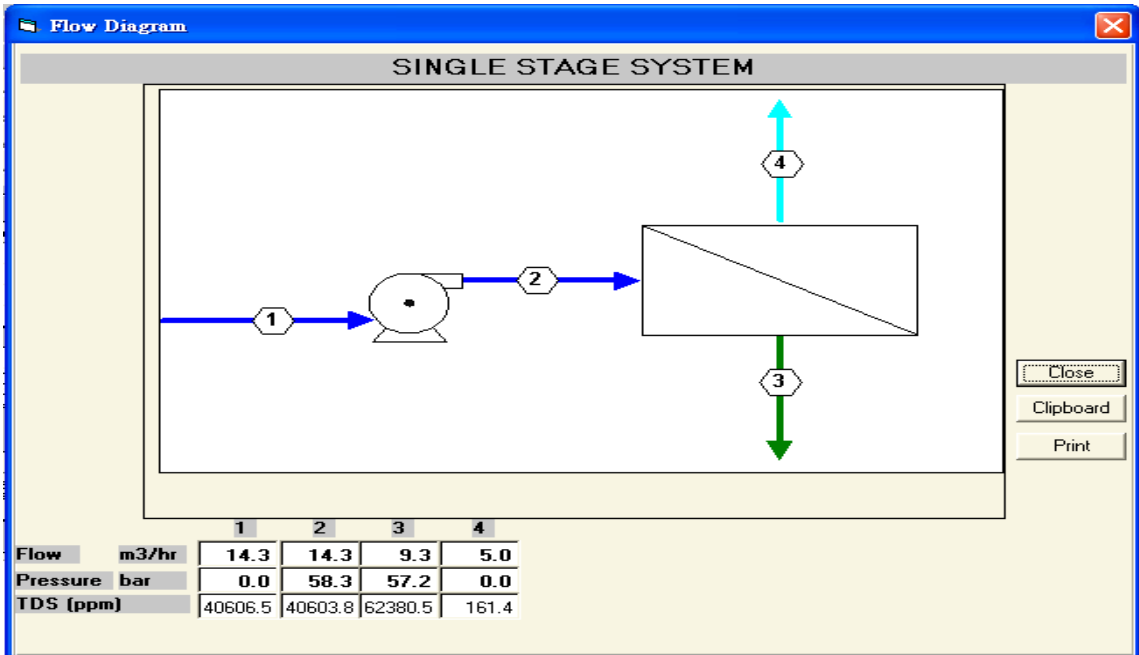


圖 3.5 IMS Design 設計軟體流程圖

以下分別就膜管排列、逆滲透膜管、造水率、操作溫度、pH、硼含量、抗垢劑添加、操作年限等進行探討。

3.1 膜管排列

該廠設計產水目標為 600 CMD，以 8040 膜管，每一支膜管平均產水量為 0.5 m³/hr 計算，推估約需 50 支膜管數，因需考量設計彈性，故以 60 支膜管進行設計為佳。

表 3.1 為不同的膜管組合設計，設計案例 1~4 係採一段一級式(1S1P：one stage one pass)膜管排列組合，設計案例 5 係採一段二級式(1S2P：one stage two pass)膜管排列組合。所謂一段二級式，即取部份產水進行再純化處理，將第一級產水與第二級產水混合，藉以提高產水品質。

由表 3.2 模擬設計顯示：設計案例 1~4 係採一段一級式(1S1P)設計，總溶解固體量(TDS)、總硬度(TH)、氯鹽(Cl⁻)去除率皆可達 99%以上，而硼(B)去除率可達 85%以上。惟硼含量 0.75~0.72 mg/L，較接近上限 1.0 mg/L，夏季水溫升高，硼含量可能會超出 1.0 mg/L，因此改以一段二級式(1S2P)之設計案例 5 之方式，模擬設計結果顯示：總溶解固體(TDS)由 161 mg/L 降至 61.9 mg/L；總硬度(TH)由 6.2 mg/L as CaCO₃降至 2.6 mg/L as CaCO₃；氯鹽(Cl⁻)由 89.3 mg/L 降至 31.6 mg/L；硼元素由 0.72 mg/L 降至 0.32 mg/L，除可符合歐盟(EU)標準外，甚至可符合世界衛生組織(WHO)標準，硼平均去除率亦由 85.60%提高至 93.60%，整體水質大幅提昇。

表 3.1 不同膜管排列組合

設計案例		膜管排列組合				產水 CMD/套	總產水量 CMD
		膜數/殼	殼數/套	套數	總膜管數		
1	1S1P	4	3	5	60	120	600
2		5	2	6	60	100	
3		6	2	5	60	120	
4		7	3	3	63	200	
5	1S2P	5	2	5	60	120	600
		2	1				

註：1S1P 代表 one stage one pass，1S2P 代表 one stage two pass

表 3.2 望安海淡廠模擬—不同膜管排列比較表

設計案編號		1	2	3	4	5			
		1S1P				1S2P			
RO 膜 管	型號	SWC4+				SWC4+	ESPAB		
	除鹽率%	99.8				99.8	99.2		
	流通量 GPD	6,500				6,500	8,600		
	膜管/殼	4	5	6	7	5	2		
	殼/套	3	2	2	3	2	1		
	套數	5	6	5	3	5			
操 作 參 數	產水量 (CMD/套)	120	100	120	200	165	15	120	
	造水率%	35	35	35	35	45	25	37.3	
	水溫°C	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	
	操作壓力 (bar)	61.8	61.2	61.0	59.8	71.6	3.5	75.9	
	流通量 (L/m ² hr)	11.2	11.2	11.2	10.7	18.5	8.4		
	B	1.08	1.06	1.05	1.04	1.10	1.15		
進 水 / 產 水 水 質	LSI	海水	1.02						
		進水	-0.73				-0.94	-1.95	-0.93
		鹵水	-0.21				-0.22	-1.60	-0.21
	pH	海水	8.2				8.2	4.9	
		進水	6.6 ^{加酸}				6.5 ^{加酸}	8.5 ^{加鹼}	
		產水	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	7.1	5.4
	TDS (mg/L)	進水	40,607						
		產水	167	163	161	168	147	6.54	61.9
		去除率%	99.59	99.60	99.60	99.59	99.85		
	TH (mg/L as CaCO ₃)	進水	6,490						
		產水	6.4	6.3	6.2	6.5	5.2	<1.0	2.6
		去除率%	99.90	99.90	99.90	99.90	99.96		
	Cl ⁻ (mg/L)	進水	19,000						
		產水	92.2	90.4	89.3	93.2	85.8	1.7	31.6
		去除率%	99.51	99.52	99.53	99.51	99.83		
	B (mg/L)	進水	5.0						
		產水	0.74	0.72	0.72	0.75	0.65	0.30	0.32
		去除率%	85.20	85.60	85.60	85.00	93.60		

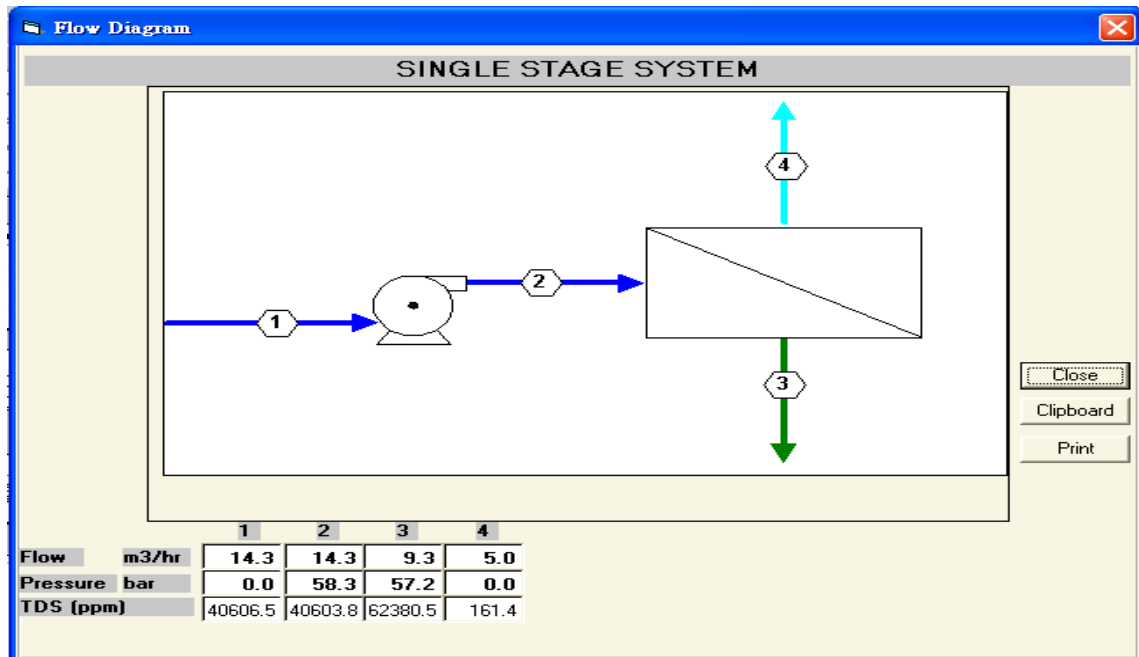


圖 3.6 設計案例 1~4 : one stage one pass 示意圖

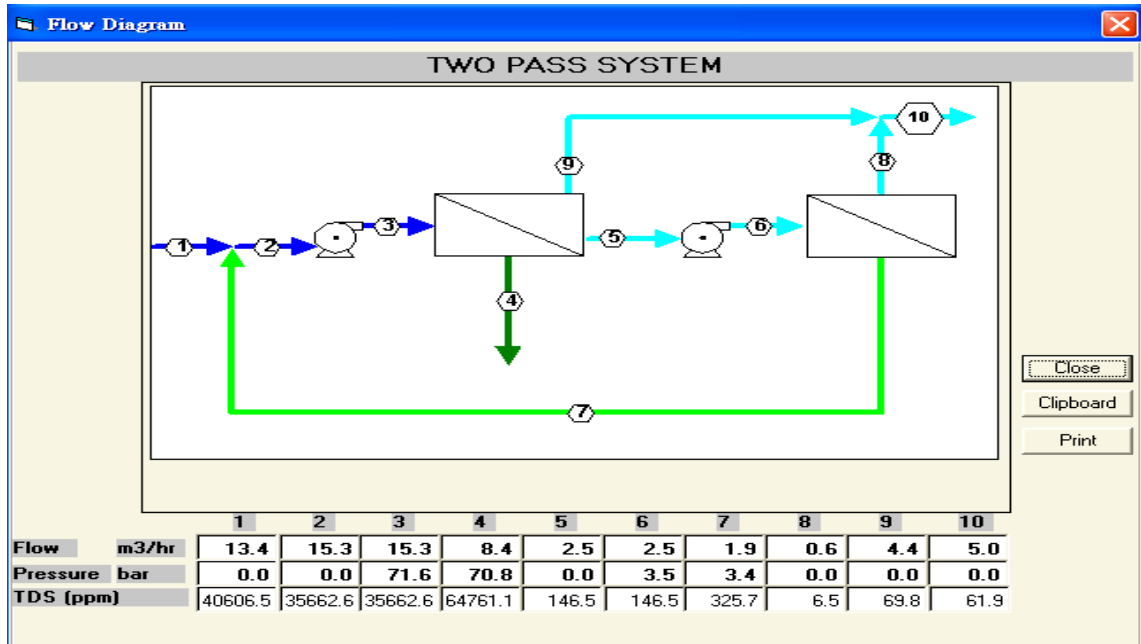


圖 3.7 設計案例 5 : one stage two pass 示意圖

3.2 逆滲透膜管

Hydranautics 公司所生產的海水淡化膜主要為 SWC 系列，如表 3.3。試以除鹽率相同、流通量不同之膜管（SWC3+、SWC4+、SWC5）進行比較，比較結果如表 3.4。由結果可知設計案例 5（SWC4+）因流通量較小，需施以較大壓力，方可得到所需產水量，其所得水質結果最佳，硼含量甚可達 0.32 mg/L。而設計案例 6 及 7 因流通量較大，操作壓力較低，所得水質結果與設計案例 5 比較略差，硼含量約在 0.50 mg/L 左右。

表 3.3 Hydranautics 公司 SWC 系列膜管

SWC		Tech Reference
Test Conditions		
The stated performance is initial (data taken after 30 minutes of operation), based on the following conditions:		
NaCl Solution, PPM		32,000
Applied Pressure, psig (MPa)		800 psi (5.5)
Operating Temperature, °F (°C)		77° (25°)
Permeate Recovery		10%
pH Range		6.5 - 7.0
Application Data		
Maximum Applied Pressure, psig (MPa)		1200 (8.27)
Maximum Feed Flow, GPM (m ³ /h)		4040-16(3.6), 8-inch-75(17.0)
Maximum Operating Temperature, °F (°C)		113° (45°)
Feedwater pH Range*		3.0-10.0
Maximum Feedwater Turbidity, NTU		1.0
Maximum Feedwater SDI (15 mins)		5.0
Maximum Chlorine Concentration, PPM		<0.1
Maximum Ratio of Concentrate to Permeate Flow for Any Element		5:1
Maximum Pressure Drop for Each Element, psig		10



Element Performance

Element Type	Min. Salt Rej., %	Nom. Salt Rej., %	Permeate Flow, GPD	(m ³ /d)
SWC1-4040	99.5	99.6	1,200	(4.5)
SWC1-6040	99.0	99.6	2,200	(8.3)
SWC3	99.5	99.7	5,900	(22.33)
SWC3+	99.7	99.8	7,000	(26.5)
SWC4	99.7	99.8	5,500	(20.81)
SWC4+	99.7	99.8	6,500	(24.6)
SWC5	99.7	99.8	9,000	(34.1)

表 3.4 望安海淡廠模擬設計-不同膜管比較表

設計案編號		5		6		7		
RO 膜 管	型號	SWC4+	ESPAB	SWC3+	ESPAB	SWC5	ESPAB	
	除鹽率%	99.8	99.2	99.8	99.2	99.8	99.2	
	流通量 GPD	6,500	8,600	7,000	8,600	9,000	8,600	
	膜管/殼	5	2	5	2	5	2	
	殼/套	2	1	2	1	2	1	
	套數	5		5		5		
操 作 參 數	產水量 (CMD/套)	120		120		120		
	造水率%	37.3		37.3		37.3		
	水溫°C	10.0		10.0		10.0		
	操作壓力 (bar)	75.9		73.2		65.3		
	流通量 (L/m ² hr)	18.5	8.4	18.5	8.4	18.5	8.4	
	β	1.10	1.15	1.10	1.15	1.09	1.15	
進 水 / 產 水 水 質	LSI	海水	1.02					
		進水	-0.93					
		鹵水	-0.21					
	pH	海水	8.2		8.2		8.2	
		進水	6.5 ^{加酸} /8.5 ^{加鹼}		6.5 ^{加酸} /8.5 ^{加鹼}		6.5 ^{加酸} /8.5 ^{加鹼}	
		產水	5.4		5.7		5.7	
	TDS (mg/L)	進水	40,607					
		產水	61.9		77.6		78.7	
		去除率%	99.85		99.81		99.81	
	TH (mg/L as CaCO ₃)	進水	6,490					
		產水	2.6		3.3		3.3	
		去除率%	99.96		99.95		99.95	
	Cl ⁻ (mg/L)	進水	19,000					
		產水	31.6		39.6		40.2	
		去除率%	99.83		99.79		99.79	
B (mg/L)	進水	5.0						
	產水	0.32		0.50		0.52		
	去除率%	93.60		90.00		89.60		

3.3 造水率

逆滲透系統中造水率指進水轉化為產水的百分率。造水率就是產水率，但造水率增加後，膜表面含鹽量更高，其滲透壓也增加，所需操作壓力也相對提高。如表 3.5 所示，當造水率由 29.4%提高至 37.3%，操作壓力需由 70.7 bar 提高至 75.9 bar，操作壓力增加對膜折損也提高，但對於產水水質僅些微提昇。因此，高造水率並非是逆滲透系統設計考量。

表 3.5 望安海淡廠模擬設計-不同造水率比較表

設計案編號		5	8		
操作參數	造水率%	37.3	29.4		
	水溫℃	10.0	10.0		
	操作壓力 (bar)	75.9	70.7		
	流通量 (L/m ² hr)	18.5	8.4	17.4	8.4
	β	1.10	1.15	1.07	1.19
進水 / 產水水質	LSI	海水	1.02		
		進水	-0.78	-0.93	
		鹵水	0.26	-0.21	
	pH	海水	8.2	8.2	
		進水	6.6 ^{加酸} /8.5 ^{加鹼}	6.5 ^{加酸} /8.5 ^{加鹼}	
		產水	5.6	5.7	
	TDS (mg/L)	進水	40,607		
		產水	61.9	68.5	
		去除率%	99.85	99.83	
	TH (mg/L as CaCO ₃)	進水	6,490		
		產水	2.6	2.9	
		去除率%	99.96	99.96	
	Cl ⁻ (mg/L)	進水	19,000		
		產水	31.6	35.0	
		去除率%	99.83	99.82	
	B (mg/L)	進水	5.0		
		產水	0.32	0.35	
		去除率%	93.60	93.00	

3.4 操作溫度

逆滲透膜產水量對進水水溫的變化十分敏感，隨著水溫的增加，進水水溫每升高 1°C，產水通量就增加 2.0%~3.0%⁽⁵⁾，故如欲維持穩定之產水量，則需留意進水溫度。依據行政院環保署環境資料庫\海域水體\澎湖沿海\望安海域測站水質資料顯示：90~94 年該海域平均水溫為 25.5°C，最高溫為 29.7°C，最低溫為 21.4°C，高低溫相差 8°C。

另尚需考量海水抽取上岸與大氣接觸後，冬季進水溫度可能低至 10.0°C，表 3.6 即模擬固定產水量下，比較不同水溫所得產水水質。結果發現溫度愈低，需愈高操作壓力，才能維持穩定的產水量。目前有許多海淡廠，冬季產水量不足，即為未調高操作壓力所致，惟高壓操作條件又會加速薄膜折損，因此設計時需在產水量或薄膜壽命作一選擇，比較周全的作法是一開始即把此一變數納入設計考量，雖然膜管數量會增加，但是可以一勞永逸解決問題。另者，雖然低溫會導致產水量下降，但是可以明顯看出產水水質變得比較好。

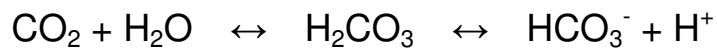
表 3.6 望安海淡廠模擬設計-不同操作溫度比較表

設計案編號		5		9		10		
操作參數	水溫°C	10.0		20.0		30.0		
	操作壓力 (bar)	75.9		67.6		62.4		
	流通量 (L/m ² hr)	18.5	8.4	18.5	8.4	18.5	8.4	
	β	1.10	1.15	1.09	1.15	1.08	1.14	
進水 / 產水水質	TDS (mg/L)	進水	40,607					
		產水	61.9		83.3		107	
		去除率%	99.85		99.79		99.74	
	TH (mg/L as CaCO ₃)	進水	6,490					
		產水	2.6		3.5		4.5	
		去除率%	99.96		99.95		99.93	
	Cl ⁻ (mg/L)	進水	19,000					
		產水	31.6		42.5		54.6	
		去除率%	99.83		99.78		99.71	
	B (mg/L)	進水	5.0					
		產水	0.32		0.54		0.81	
		去除率%	93.60		89.20		83.80	

3.5 pH

由模擬軟體測試結果發現進水 pH 值的改變對產水量幾乎沒有影響，在密閉體系內， CO_2 、 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 的相對含量隨 pH 值的變化而改變，低 pH 值條件下， CO_2 占主要部份，在中等 pH 值範圍內，主要為 HCO_3^- ，高 pH 值範圍內，主要為 CO_3^{2-} 。

由於 RO 膜可以有效去除大部份溶解性的離子，但對於溶解於水中氣體之去除率卻相當有限，因此對溶存水中的 CO_2 幾乎完全沒有去除效果，而對鹼度（ HCO_3^- 和 CO_3^{2-} ）則有較高之去除率，所以產水中的 CO_2 含量與進水中 CO_2 的含量幾乎相同，但是 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 之含量則有較大差異，此三種成份 CO_2 、 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 間的平衡關係，將隨 pH 或其中成份之分離而改變， CO_2 將與 H_2O 結合發生如下反應平衡的轉移，直到建立新的平衡關係。

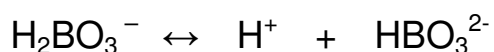
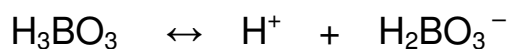


如果進水中含有 CO_2 ，則 RO 的產水 pH 值會降低或呈偏酸狀態，對於大多數 RO 系統逆滲透產水的 pH 值將有 1~2 個 pH 值的下降；當進水 M 鹼度或 HCO_3^- 濃度較高時，由於轉變成 CO_2 同時擴散入產水端造成產水的 pH 值下降就會更大，pH 值下降，會影響產水硼的去除率。

進水 pH 值對產水量幾乎沒有影響，但會影響產水水質，也就是說除鹽率會下降。依行政院環保署環境資料庫\海域水體\澎湖沿海\望安海域測站水質資料顯示：90~94 年該海域平均 pH 為 8.2，最高值為 8.3，最低值為 8.1。經計算所得澎湖海水之 LSI 值大於 0，RO 系統會有結垢問題。

3.6 硼的去除

硼在水中係以硼酸 (H_3BO_3) 存在，在水中的化學型態如下：



在低 pH 時，主要是以未游離之 H_3BO_3 ，未帶電荷，分子較小，不易被逆滲透膜移除；惟提高 pH 時，游離態之 HBO_3^{2-} 及 BO_3^{3-} ，易與海水中鈉離子 (Na^+) 結合形成較大分子，有助於被逆滲透膜移除，因此硼去除效能主要取決於 pH 值。

表 3.7 為不同 pH 下，硼去除率比較，pH 愈高，硼去除率愈高。採一段一級式 (1S1P) 設計時，因澎湖海水之 LSI 值大於 0，為防止系統結垢，需調降進水 pH 至 5~7，然而該條件下不利硼之去除，硼含量 0.70~0.72 mg/L，去除率僅 85~86%。若將水溫變化列入考量，表 3.8 為不同溫度下之硼去除率比較，當夏季水溫升高至 20°C 時，硼含量即超出 1.0 mg/L。

如以一段二級式 (1S2P) 之設計案例 5 方式設計時，因可於 two pass 將 pH 提高至 8~9，硼元素由 0.72 mg/L 降至 0.32 mg/L，去除率亦由 85.60% 提高至 93.60%，即使夏季水溫升高至 20~30°C 時，依設計案例 9~10 模擬結果，硼含量可控制於 1.0 mg/L 以下。

表 3.7 望安海淡廠模擬設計-pH 與硼去除率比較表

設計案編號		11	12	13	14
pH		5.0	7.0	9.0	11.0
B (mg/L)	進水	5.0			
	產水	0.72	0.70	0.22	0.06
	去除率%	85.60	86.00	95.60	98.80

表 3.8 望安海淡廠模擬設計-水溫與硼去除率比較表

設計案編號		3	15	16
pH		6.5		
水溫℃		10	20	30
B (mg/L)	進水	5.0		
	產水	0.72	1.09	1.62
	去除率%	85.60	78.20	67.60

3.7 抗垢劑添加

因澎湖海水之 LSI 或 SDSI 值大於 0，為防止系統結垢，建議添加適量抗垢劑，此一部份需搭配加藥軟體來模擬。

膜管污堵（fouling）常見原因：濃差極化、膠羽生成、沉澱、阻塞、生物污泥、薄膜分解等。污垢阻塞判斷方法有：產水流量降低了 10-15%、除鹽率降低了 2-3%、壓力差升高等。

預防污堵方法：由於 LSI 或 SDSI 太高所產生的結垢（scaling）可在高溫下、短時間內，加酸溶解去除（ H_2SO_4 , HCl, citric acid）；至於無機污泥（silt, clay, colloids）所造成之污堵，可能需要反向沖洗；比較麻煩的是微生物污堵（bacteria, fungi, algae），須使用類似清洗晶片（wafer）粒狀污染物的方法，採用鹼性溶液，伴隨高溫、高流率，再加一些清潔劑甚至酵素（enzyme）合併處理。

3.8 操作年限

膜的使用壽命取決於膜的化學穩定性、元件的物理穩定性、可清洗性、進水水源、預處理、清洗頻率、操作管理水準等，如果正確操作，膜管可以使用 3~5 年以上。目前行之有效的評價 RO 系統進水中膠體污染的技術是測量進水的污泥密度指數（SDI：silt density index），這是在 RO 設計之前必須確定的重要參數，在 RO 運作過程中，必須定期進行測量，ASTM D4189-82 規定了該測試的標準。膜系統的進水規定是 SDI_{15} 值必須小於

5⁽⁶⁾。

逆滲透膜系統使用一段時間後由於薄膜損耗，除鹽率會變差，每年約衰退 10%，同時每年流通量也會損失 7%左右，因此設計時須將該二因素列入考量。如欲維持穩定產水量及水質，操作壓力需隨著膜管使用年限的增加而提升。

表 3.9 望安海淡廠模擬設計-操作年限比較表

設計案編號		17		18		5		
操作年限		第 1 年		第 2 年		第 3 年		
操作參數	水溫°C	10.0		10.0		10.0		
	操作壓力 (bar)	70.7		73.2		75.9		
	流通量 (L/m ² hr)	18.5	8.4	18.5	8.4	18.5	8.4	
	β	1.09	1.15	1.10	1.15	1.10	1.15	
進水 / 產水水質	TDS (mg/L)	進水	40,607					
		產水	51.5		56.6		61.9	
		去除率%	99.87		99.86		99.85	
	TH (mg/L as CaCO ₃)	進水	6,490					
		產水	2.2		2.4		2.6	
		去除率%	99.97		99.96		99.96	
	Cl ⁻ (mg/L)	進水	19,000					
		產水	26.3		28.9		31.6	
		去除率%	99.86		99.85		99.83	
	B (mg/L)	進水	5.0					
		產水	0.27		0.30		0.32	
		去除率%	94.60		94.00		93.60	

四、 模擬結果

- 1、設計案例 1~4 係採一段一級（1S1P）方式設計，在相同造水量下，膜管數愈多，流通量當然較小，相對所需操作壓力亦較低，所得產水水質稍差些。如果減少膜管數，流通量需增加，操作壓力亦會提高，所得產水水質會稍微好一些。
- 2、設計案例 5 係採一段二級（1S2P）方式設計，將部份產水進行純化處理後與第一段產水混合，整體水質之除鹽效率，可提昇約 50%。
- 3、不同流通量之膜管，流通量較小，需施以較大壓力，方可得到所需產水量，所得產水品質也相對提高。
- 4、增加造水率，必須提高操作壓力，同時也會提高除鹽率，但會造成 RO 膜較大的負擔，另外較濃的濃縮液將對海域環境造成新的衝擊。
- 5、海水水質與操作壓力不變情況下，進水水溫每下降 1°C，產水通量就降低 2.5%~3.0%，故在設計時，應將水溫變化列入考量。目前運作之海水淡化廠產水量，無法達到目標值，就是未將水溫列入考量。
- 6、進水 pH 值對產水量幾乎沒有影響，但會使得產水 pH 值降低 1~2 個單位並影響產水水質，此時需考量管線腐蝕問題。
- 7、pH 愈高，硼去除率愈高。若進水 LSI 或 SDSI 值大於 0，為防止系統結垢，需調降進水 pH，惟該條件下不利硼之去除，故如欲提高硼去除率，建議以 1S2P 方式設計，於 second pass 再將 pH 提高，以利硼之去除。
- 8、RO 處理後淡化水 pH 值小於 6，鹼度、硬度及 TDS 偏低，造成淡化水之 LSI 為負值，具腐蝕性，將使輸送管線受腐蝕，故必需加鹼調整水質使 LSI 介於-1~+1 間。
- 9、污泥密度指數（SDI），是在 RO 設計之前必須確定的重要參數，進水規定 SDI₁₅ 值必須小於 5，才可有效確保薄膜使用年限。另系統隨時間經過，設計時需把流通量損失及水質的衰退列入考量。
- 10、綜合上述結果，我們建議下列設計方式：

採設計案例 5 一段二級 (1S2P) 方式設計，以每套 5 支 SWC4+膜管/殼*2 殼及 2 支 ESPAB 膜管/殼*1 殼，每套產水量 120 CMD，配置 5 套，合計產水量 600 CMD，造水率 37.3%，符合產水目標。至於產水水質：總溶解固體 (TDS) 61.9 mg/L；總硬度 (TH) 2.6 mg/L as CaCO₃；氯鹽 (Cl⁻) 31.6 mg/L；硼元素 (B) 0.32 mg/L，亦符合產水水質要求。設計案例 5 以 10°C 進行模擬，故冬季低溫產水量不足問題可以排除，至於夏季高溫為維持穩定產水量，需調降操作壓力，雖產水水質略差，但仍在產水水質要求範圍。

表 4.1 望安海淡廠模擬設計-建議版

Hydranautics Membrane Solutions Design Software, v. 2006 2006/9/20

SPLIT PARTIAL TWO PASS

RO program licensed to:
 Calculation created by: 蕭文惠
 Project name: SeaWater-Pacific
 Blended flow: 120.0 m3/d
 Permeate flow: 165.00 15.00 m3/d
 Raw water flow: 321.7 m3/d
 HP Pump flow: 15.3 2.5 m3/hr
 Recommended pump press.: 75.9 bar
 Feed pressure: 71.6 3.5 bar
 Permeate recovery: 45.0 25.0 %
 Total system recovery: 10.0 Q(50F) 37.3 %
 Feedwater Temperature: 10.0 8.5
 Element age: 3.0 years
 Feed water pH: 6.5 8.5
 Flux decline % per year: 7.0 0.0
 Chem dose, ppm, ppm: 61.3 47.9
 Salt passage increase, %/yr: 10.0 0.0
 Acidified feed CO2: 52.40 0.5
 Feed type: Seawater - open intake
 Average flux rate: 18.5 8.4 lm2hr

Stage	Perm. Flow m3/hr	Flow/Vessel		Flux lm2-hr	Beta	Conc.&Throt. Pressures		Element Type	Elem. No.	Array
		Feed m3/hr	Conc m3/hr			bar	bar			
1-1	6.9	7.6	4.2	18.5	1.10	70.8	0.0	SWC4+	10	2x5
2-1	0.6	2.5	1.9	8.4	1.15	3.4	0.0	ESPAB	2	1x2

Ion	Raw water		Feed water		Permeate		Concentrate	
	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l
Ca	407.4	20.3	357.5	17.8	0.168	0.0	649.8	32.4
Mg	1295.2	106.6	1136.4	93.5	0.535	0.0	2065.6	170.0
Na	12345.9	536.8	10844.3	471.5	24.717	1.1	19688.1	856.0
K	362.0	9.3	317.9	8.2	0.904	0.0	577.0	14.8
NH4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0
Ba	0.000	0.0	0.000	0.0	0.000	0.0	0.000	0.0
Sr	5.080	0.1	4.467	0.1	0.002	0.0	8.102	0.2
CO3	0.3	0.0	0.2	0.0	0.000	0.0	0.4	0.0
HCO3	183.0	3.0	115.5	1.9	0.703	0.0	209.5	3.4
SO4	7000.0	145.8	6195.1	129.1	2.919	0.1	11259.7	234.6
Cl	19000.0	536.0	16684.4	470.6	31.582	0.9	30291.1	854.5
F	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0
NO3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0
B	5.00	0.0	4.49	0.0	0.324	0.0	7.81	0.0
SiO2	2.6	0.0	2.3	0.0	0.00	0.0	4.1	0.0
TDS	40606.5		35662.6		61.86		64761.1	
pH	8.2		6.5		5.4		6.7	

	Raw water	Feed water	Concentrate
CaSO4 / Ksp * 100:	55%	47%	100%
SrSO4 / Ksp * 100:	43%	37%	77%
BaSO4 / Ksp * 100:	0%	0%	0%
SiO2 saturation:	2%	2%	4%
Langelier Saturation Index	1.02	-0.93	-0.21
Stiff & Davis Saturation Index	0.13	-1.79	-1.15
Ionic strength	0.82	0.72	1.30
Osmotic pressure	26.3 bar	23.1 bar	41.9 bar

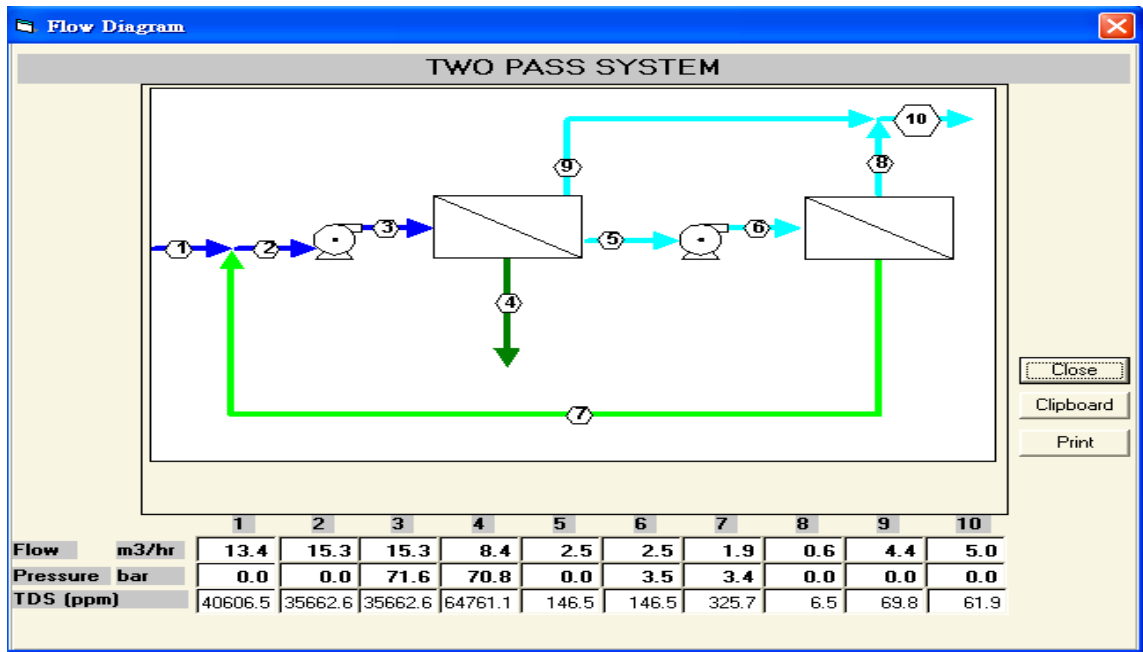


圖 4.1 望安海淡廠模擬設計-建議流程

五、 結論與建議

綜合上述模擬設計結果可發現欲合理設計一座海水淡化廠雖然需要專業技術，可是並不是那麼困難，薄膜設計軟體雖然是紙上談兵，但其理論分析與實廠操作差異並不大，仍具有蠻可信與重要之參考價值，理論對了，工程實務才有可能玩真的。在模擬分析瞭解眾多參數對操作之影響之後，以此嚴謹態度來探討造成現有海水淡化廠操作不順問題之原因就比較容易瞭解，也才能對症下藥，避免一而再、再而三發生相同的錯誤。

目前除了美國海德能公司之 IMS Design 軟體可供模擬設計參考之外，美國陶氏化學公司 (Dow Chemical / Filmtec) 之 ROSA 及日本東麗公司 (Toray) 之 Toray RO 軟體，亦有類似模擬設計功能，可供參考。

六、 參考文獻

- 1、 「澎湖縣政府發行澎湖縣綜合發展計畫」，2004/01，第一版。
- 2、 「澎湖烏坎海淡廠出水最佳經濟防蝕方式暨符合第三階段飲用水水質標準之研究」，台灣省自來水公司，2004/10。
- 3、 行政院環保署環境資料庫\海域水體\澎湖沿海\望安海域測站水質資料，
http://edb.epa.gov.tw/Index_water.htm。
- 4、 原水中硼存在之影響及其去除方法，李丁來、黃志彬、王銘源、劉廷政，2005/08，自來水會刊第 24 卷第 3 期，p69~78。
- 5、 影響逆滲透膜性能的因素，中國水網，
<http://www.h2o-china.com/report/fanshentou/zhibiao.htm>。
- 6、 反滲透膜及離子交換樹脂常見問題解答，慧聰網，
<http://info.water.hc360.com/2005/09/05185058124-7.shtml>。