

海水淡化技術發展現況

Desalination

工研院能資所 陳效禹

根據國際淡化協會 1997 年的統計，全世界淡化廠的總淡化量從 1975 年起，其年平均日產量每年以 75 萬



CMD 造水的產量增加，至 1997 年已達 2,274 萬 CMD。海水淡化之處理技術目前仍以 MSF 所佔的比率最高約佔了 52.4%，其次是 RO，其佔有率為 39.5%。但 MSF 主要應用於中東產油國家，其通常與火力發電廠互相配合運轉，利用火力發電廠汽輪機所使用過的低壓廢蒸汽，作為淡化過程中加熱海水的熱源，可降低淡化造水成本。逆滲透法（RO）已逐漸趕上 MSF 法，主要原因在薄膜材質及能源回收改良技術已達成熟階段，不但使淡化成本降低且造水率提高，除鹽率高達 99.5%，而膜管平均使用壽命延長至 5 年左右，較能被一般中東之外的非產油國家接受。

目前逆滲透海淡廠也漸漸走向大型化，沙烏地阿拉伯在 Al-Jubail 建造了一座日產 90,000 噸的海淡廠，於 1999 年開始啟用。而全球最矚目的則是位於美國 Florida 的 Tampa Bay，日產 95,000 噸的海淡廠，已在 1999 年 7 月完成了簽約，預計於 2002 年十月完成啟用。按美國 1990 年海淡廠營運資料統計，海水淡化成本估算每噸約 1 至 4 美元（造水量為 1 5 mgpd 間）；Tampa Bay Water 為佛羅里達州最大飲用水供應者，目前已簽訂購水合約為 0.55 美元/噸，顯示目前海水淡化成本已大幅下降。

發展現況

目前世界上海水淡化所使用方式，包括：多級閃化法(Multi-Stage Flash, MSF)、多效蒸餾法(Multi-effect Distillation, MED)、蒸汽壓縮法(Vapor Compression, VC)、逆滲透法(Reverse Osmosis, RO)前三項屬於蒸餾法，最後一項為薄膜法，各項海水淡化之處理技術、特性與能源需求如表 1 所列，並詳述如後。

1.多級閃化法 (Multi-Stage Flash, MSF)

多級閃化法係運用蒸餾的原理，在液體達到沸點時將溶液中的水轉變成蒸汽，而與溶解於溶液中的鹽份分離。閃化 (Flashing) 是以減壓方式來降低沸點，產生蒸汽，再冷凝後即可製得淡水。由於此方法並沒有真正沸騰(僅是表面沸騰)，可以大幅改善因蒸餾產生的積垢(Scale)問題，並於 1950 年代即已有商業化規模，加上其產能大，廣為中東產油國所採用，目前仍是全世界最主要海水淡化技術之一。

多級閃化製程主要分成兩個系統，一為加熱區，作為進料海水之預熱使用，一般多採蒸汽作熱源，蒸汽冷凝後回到鍋爐。另一為閃化區域，係一多級的閃化與熱回收區，通常為 16 級至 50 級不等，級數隨著不同的設計要求而決定。其所需的進料海水應預先處理。海水一般溫度在 20 至 35 之間，並且含鹽類(或總溶解固體，Total Dissolved Solid, TDS) 約為 42,000ppm，海水的成份易造成積垢與腐蝕，故需設計前處理系統，如：過濾、添加抗垢化學藥劑、除氣(Deaeration)或去碳化等設備。

2.多效蒸餾法 (Multi-effect Distillation, MED)

原理係利用高溫蒸汽與海水之溫差進行熱交換後，將受熱沸騰而蒸發的海水(應為不含鹽的水蒸汽)冷凝並收集而成。但由於沸騰而造成管線容易積垢使得 MED 法在應用上不如 MSF 法佔有率那麼大。

3. 蒸汽壓縮法 (Vapor Compression, VC)

蒸汽壓縮(Vapor Compression, VC)技術進入商業用途始於 1930 年代，由於此技術並不需要大量蒸汽作為熱能，可用以替代多效蒸餾 (MED) 或多級閃化 (MSF) 等海水淡化程序，並其具有易組裝可搬遷之特性，在蒸汽取得不易的地區，頗具吸引力。

海水由於含有鹽類之緣故，其沸點較純水為高 (即高於 100)，而當過熱蒸汽 (組成為水蒸汽) 遇冷凝結時，其凝結溫度將比原蒸發之沸點為低。故吾人可將蒸汽壓縮，以提高蒸汽之壓力與溫度，作為蒸發海水的熱源，由於壓縮蒸發管束中冷凝時將釋出潛熱，用以加熱海水可得到更多的蒸汽。蒸汽壓縮的方式可分為機械壓縮(Mechanical Compression)與熱壓縮(Thermo Compression)二類。機械壓縮的動力源可為電力馬達、渦輪機或柴油引擎，熱壓縮則採蒸汽噴射 (Steam Ejector)方式。目前台電公司核三廠已設置一套日產量可達 2,271 噸淡水的機械式蒸汽壓縮設備。

4. 逆滲透法 (Reverse Osmosis, RO)

逆滲透膜的發展始於六十年代初期，Loeb & Sourirajan 為了做海水淡化而成功的開發出相轉法 (Phase Inversion) 製膜技術，以此技術製得的逆滲透膜具有表面緻密、底層疏鬆的非對稱

表1 已成熟海水淡化技術發展現況

處理技術	蒸餾法			薄膜法
	多級閃化法 (Multi-Stage Flash, MSF)	多效蒸餾法 (Multi-effect Distillation, MED)	蒸汽壓縮法 (Vapor Compression, VC)	逆滲透法 (Reverse Osmosis, RO)
特性	閃化(Flashing)以減壓方式降低沸點，產生蒸汽後再冷凝製得淡水。產能較大使用廣泛。	受熱沸騰而蒸發的海水冷凝製得淡水。但由於管線容易積垢使得應用上不如MSF法佔有率那麼大。	因不需要大量蒸汽作為熱能，在蒸汽取得不易的地區，可替代MED或MSF海淡程序，且具有易組裝可搬遷之特性，頗具吸引力。	利用半透膜中分子晶格空隙對水及鹽類溶度的差異而將其分離，目前一般膜管的除鹽率已可達99.5%以上。
能源需求	蒸氣及電能	蒸氣及電能	機械壓縮 (MVC) -電能 熱壓縮 (TVC) -電能及蒸氣	電能

Composite ,TFC) 的界面聚合(Interfacial Polyme-rization)技術成功的應用於商業化生產，更提高了膜的透水量，使得逆滲透程序比其他分離程序更具競爭力。

一般商業用的逆滲透膜材質可分為醋酸纖維(Cellulose Acetate)及聚醯胺(Polyamide) 兩類，前者之單位面積流率高，適用於管筒型及螺旋型，後者則因其單位體積具有大表面積，適用中空纖維型。一般而言，聚醯胺類材質擁有較長壽命。

目前全世界海水淡化廠以美國的 2,563 座居全球第一（表 2），其次為沙烏地阿拉伯與日本，但就淡化水產量則以沙烏地阿拉伯居全球第一，日產約 705 萬噸 / 日，為美國兩倍產量。在海淡供水需求上，沙烏地阿拉伯與美國皆以民生需求為主要供應，而日本則以工業供水為

表2 已成熟海水淡化技術發展現況

國家	淡化廠	淡化水產量	民生/工業供水比例	能源	備註
沙烏地阿拉伯	1,260座 (全球第二)	705萬噸/日 (全球第一)	民生96% 工業4%	1.利用鄰近電廠之低壓蒸氣及電能。 2.結合電廠的興建推動海淡廠。	年降雨量僅100公厘
美國	2,563座 (全球第一)	355萬噸/日 (全球第二)	民生80% 工業20%	1.利用鄰近電廠之低壓蒸氣及電能。 2.結合電廠的興建推動海淡廠。	已推動日產94,625噸的海淡廠,其造水成本只要每噸新台幣17元。
日本	369座	77.8萬噸/日	民生13% 工業87%	1.利用鄰近電廠之低壓蒸氣及電能。 2.離島(包括沖繩島)則直接依賴電能。	海淡供應約佔全國工業總用水量的0.38%

主。在造水成本方面，美國推動日產 94,625 噸的海淡廠,其造水成本只要每噸新台幣 17 元，約目前國內淡化造水成本之三分之一左右。

國內現有海水淡化廠如表 3 所示，總淡化水量約 13,700 噸 / 日，除最早投資興建海淡廠的台電核三廠為蒸氣壓縮的淡化技術外，其他於民國 86 年之後所投資之海淡廠均採 RO 淡化技術。所投資建造金額隨淡化產水量而不同，如表 4 所示，淡化水量在 500 噸 / 日以下者，平均興建成本為 146 ,000 元/噸；而淡化水量在 5,000 噸 / 日以上者，平均興建成本為 65 ,000 元/噸，

.....

表3 國內現有海水淡化廠

廠名	造水量 (CMD)	淡化技術	用水標的	完工時間	營運管理	投資金額(億元)	單位建造 成本(元/噸)
澎湖海淡廠	2,500	RO	民生	87年2月	自來水公司	2.00	80,000
澎湖海淡廠 第二期工程	7,000	RO	民生	89年2月	自來水公司	4.40	62,857
澎湖虎井嶼	200	RO	民生	88年4月	自來水公司	0.35	116,667
澎湖桶盤嶼	100	RO	民生	88年4月	自來水公司		
澎湖望安島	400	RO	民生	招標中	自來水公司	0.57	142,500
馬祖南竿	500	RO	民生	86年11月	連江縣政府	0.90	180,000
馬祖南竿 第二期工程	500	RO	民生	88年12月	連江縣政府	0.45	90,000
馬祖西莒	500	RO	民生	89年2月	連江縣政府	0.95	190,000
金門海淡廠 第一期工程	2,000	RO	民生	89年6月	金門縣政府	2.00	100,000
台電核三廠 海淡廠	2,271	蒸氣壓縮 (VC)	工業	78年9月	台灣電力公司	2.06	90,709

灣海淡廠之興建規模太小，成本負擔難以下降，加上操作技術不純熟，造成國內海水淡化成本過高。

近十年來各種海水淡化法產水量不斷的成長，雖然 RO 開發較晚（1960 年），但以逆滲透處理海水淡化法已逐漸趕上 MSF 法。主要原因是薄膜材質及能源回收改良技術已達成熟階段，不但使淡化成本降低且造水率提高，除鹽率高達 99.5 %，而膜管平均使用壽命延長至 5 年左右，較能被一般中東之外的非產油國家接受。

表4 海水淡化平均興建成本

淡化水量	平均興建成本(元/噸)
< 500噸/日	146,000
2000~5000噸/日	88,000
> 5000噸/日	65,000

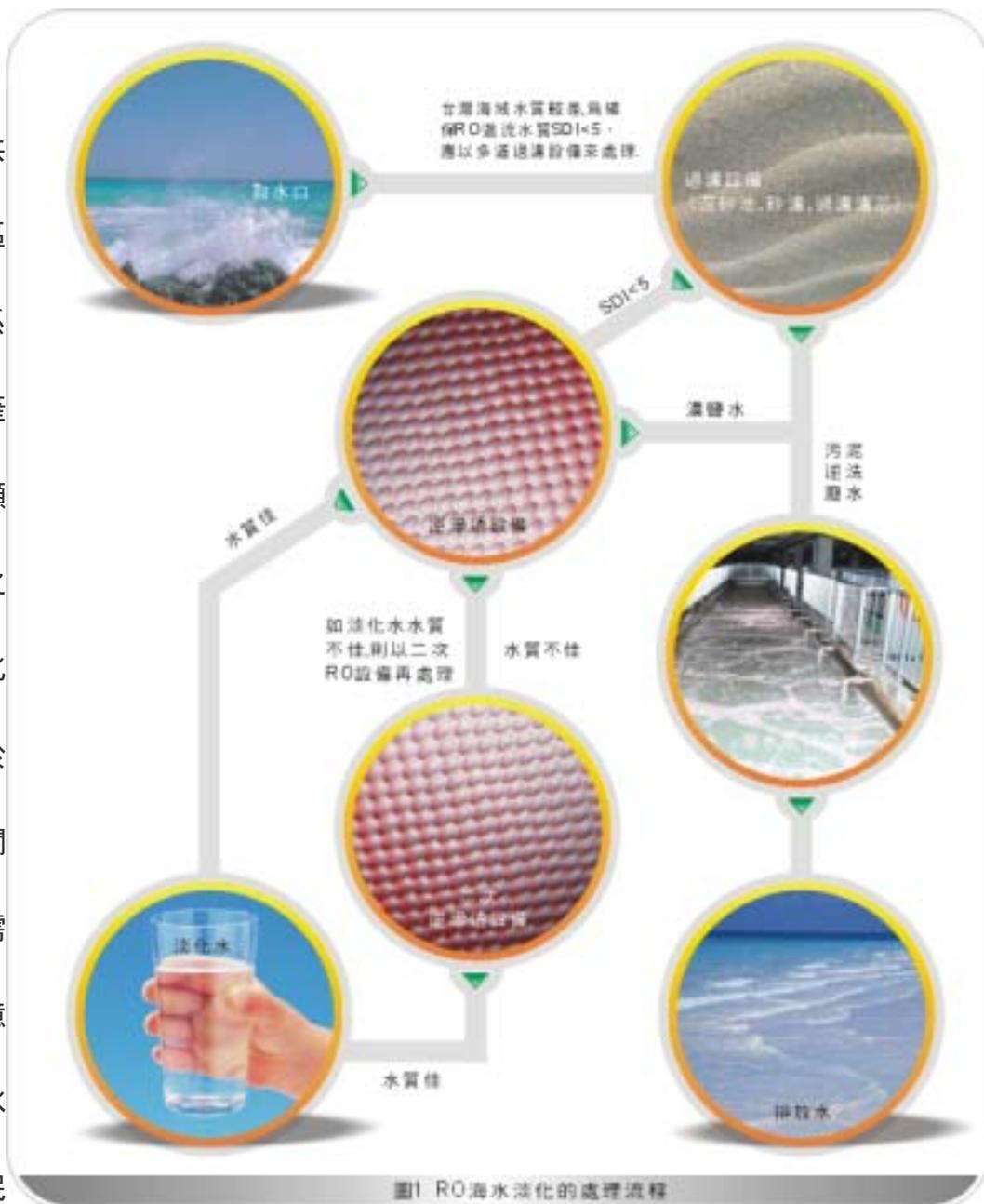
一般以 RO 進行海水淡化的處理流程如圖 1，主要為前處理過濾系統與逆滲透設備。影響逆滲透型海水淡化廠操作結果包括：

- (1) 海水取水水質長時間監測資料研判
- (2) 海水前處理系統操作單元表現
- (3) 逆滲透系統操作表現
- (4) 海水排放設備混合效應之監測

其中，前處理系統操作單元表現可檢視其出水之 SDI 值；至於 RO 逆滲透系統操作表現則需檢視其產水率、系統耗能狀況(流量/單位壓力)、膜清洗頻率、膜更換頻率等；而海水排放設備混合效果長期監測則可檢視排放系統設計及操作之好壞。

未來趨勢

目前全球共
120 個國家與地區
應用海鹹水淡化系
統，淡化水之日產
量已達 2,591 萬噸
(截至 1999 年底之
統計)。海水淡化
產業年成長率介於
10~30% 之間，相關
淡化產業之市場需
求全球已達數百億
美元；海水淡化水
質佳，除供作民
生、灌溉、一般工



業用水外，亦可做為高科技半導體廠超純水之原水。

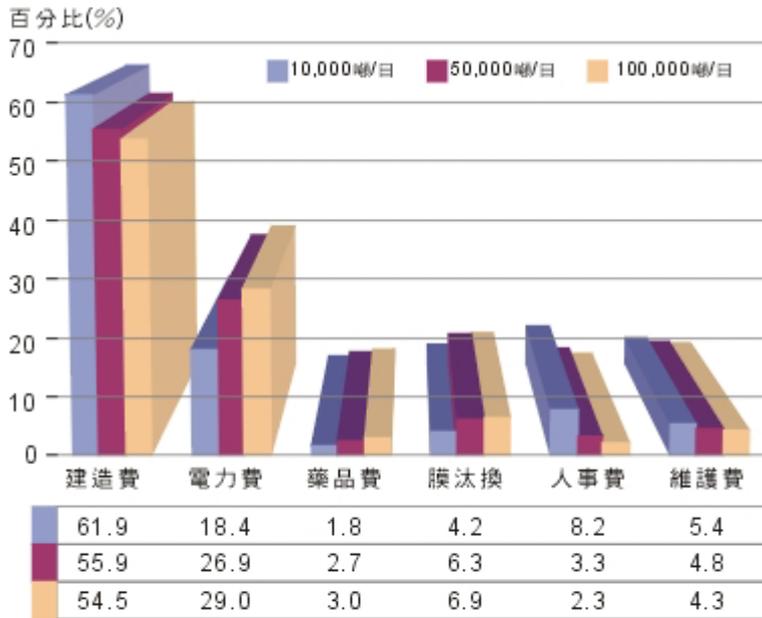
國內之海水淡化為了滿足離島地區的民生需求，目前已積極規劃與興建中，除了有澎湖與

前，達到離島地區淡化水產量佔該地區民生用水量百分之五十之目標。

此外，未來台灣沿海新興工業區對海淡廠的需求將更明顯。經濟部水資源局已同時針對台灣西部沿海自烏溪以南至高屏溪以北地區，進行海水淡化廠設置之規劃調查，據以瞭解該區對海水淡化之需要性及可行性，以期達到替代水源開發利用，並充份穩定供應工業用水；未來於民國 100 年前，增加淡化水產量達每日十萬公噸，民國 110 年前增加淡化水產量達每日二十萬公噸。

海水淡化廠的設置在台灣本島應以供應工業用水為主，民生用水為輔；離島地區則以供應民生用水為主。其工作內容包括可行海水淡化廠的佈設規劃，以及各可行海水淡化廠佈設點初步環境影響評估調查，並在考量出水水質要求、原料水特性、能源取得問題、滷水排放、廠址位置等因素後，初步選定彰濱工業區、雲林離島式基礎工業區、台南濱南工業區及台南科技工業區等四個工業區，評估其具備興建海水淡化廠之可行性。而台灣未來新增的工業區，預估用水需求量將從民國 90 年的 3.38 億噸/年，到民國 110 年將增加為 7.53 億噸/年。

由於 RO 海水淡化廠的建造工期短、能量需求低且操作維護容易，相對的較能適時的解決用水不足的問題；以荷蘭 St. Maarten 日產 10,000 噸的海淡廠為例，由 1996 年 9 月簽約至 1997 年 4 月啟用僅僅花了 8 個月的時間。而加勒比海之 Antigua & Barbuda 日產 2,500 噸的海淡廠，由 1998 年 1 月簽約至 1998 年 5 月啟用更只花了 5 個月的時間。此外，目前逆滲透海淡廠也漸漸走向大型化，沙烏地阿拉伯在 Al-Jubail 建造了一座日產 90,000 噸的海淡廠，於 1999 年開始啟用。



【註1】 10,000噸/日之建造費用為日幣9,800百萬元
 50,000噸/日之建造費用為日幣28,580百萬元
 100,000噸/日之建造費用為日幣46,680百萬元

圖2 日本海水淡化設施造水成本

7月完成了簽約，預計於2002年十月完成啟用。

RO 雖開發較晚(1960年)，但在薄膜材質及能源回收改良技術已達成熟階段，隨造水量增加建造成本愈低且造水率提高，除鹽率更高達99.5%，一座RO淡化廠之操作成本約佔40%之造水成本。因應節能的重要

性，目前RO造水所需電力已由每噸產水8~9度電降至3~4度電，而膜管平均使用壽命延長至5年左右，較能被一般中東之外的非產油國家接受。以日本海水淡化設施造水成本(圖2)為例，淡化造水量愈大，建造費用愈低，以100,000噸/日之建造費用為日幣46,680百萬元，與產水量10,000噸/日之建造費用相比，造水量雖有10倍之差，但建造費用卻差不到5倍。台灣本島日後欲發展海水淡化，應朝向大規模淡化廠的設置，其產水成本較能與自來水價拉近差距；但離島地區因人口分佈較少，不適合建造大型之海水淡化廠，但因地形與河川分布造成水庫集水不易，而取之不盡且潔淨的海水將成為離島地區最適合之水源。

由於近來水庫開發不易，除民眾抗爭外，潔淨的水源尋找不易與建造成本日益增高，均造成政府興建水庫的困難，以表5為例，寶山第二水庫及牡丹水庫的開發單位原水成本(未含輸

表5 各水庫單位原水成本

工程名稱	總工程費(萬元)	年計成本(萬元)	年供水量(萬噸)	單位原水成本(元/噸) ⁽¹⁾	淨水成本(元/噸) ⁽²⁾
寶山第二水庫	1,860,000	177,630	7,416	23.95	6.28
湖山水庫	2,264,000	184,916	25,331	7.30	6.28
南化水庫	995,700	95,089	29,200	3.26	6.28
牡丹水庫	780,000	74,490	3,710	20.08	6.28
美濃水庫 (未興建)	—	—	—	25 (可能推估)	—

註：(1)各水庫單位原水成本係依當年適價估算。

(2)淨水成本指機水庫原水處理到自來水水質之平均費用，參考自來水公司年報資料。

(3)供水成本=單位原水成本+淨水成本。

成本將再提高至 25 元/噸以上。

以興建中的寶山第二水庫為例，光是水庫的成本每度已達二十一元，若是加上淨水廠的興建及處理成本每度六元，則處理後的清水每度約為二十七元，相較於海水淡化技術越來越成熟，單位造水成本已經大幅下降到每度二十元，未來海水淡化廠將能有效解決高科技產業的供水問題，因此經建會建議，可運用海淡廠專管供應科學園區等高科技產業所需用水。

根據水資源署的調查與分析，以目前國際已發展成熟的海淡技術(MSF、MED、RO)，在國內興建乙座規模萬噸以上的海水淡化廠的單位造水成本(含建廠、營運、設備更新等費用)以利息 6%、20 年壽命計約新台幣 24 元，因此海水淡化與國內目前水庫開發的單位成本差距已經愈來愈小。

綜合國外資料並參酌國內特性，水資源局於民國八十九年訂定出台灣地區海水淡化廠興建成本與造水成本，分別為：

(1)單位建廠成本(不含土地、輸水管線、回饋補償)：新台幣 50,000 元/噸(視製程、規模而異)。

(2)單位造水成本(含建廠、土地、管線、營運、回饋、設備更新，以利息 6%，20 年壽命計)：新台幣 30 40 元/噸。

海水淡化技術發展與推動計劃

為提昇國內海淡廠之設計規劃施工能力，並加強操作人員之訓練，除參考現有海水淡化廠之系統功能評估、查核方式檢討評估及改善建議結果外，並建立工程計畫及主要設施基本資料庫，擬定海水淡化廠功能評估綜合性指標，包括水源監測與選擇、取水設施效率、資源耗用、能源耗用、藥品使用、產水品質、產水效率、清洗頻率、更換頻率、濃鹽水排放混合稀釋等等，研擬海水淡化廠功能評估手冊。詳細推動計劃說明如後。

1.技術諮詢服務單位之設立

近年來，政府透過技術服務團隊的成立，如地層下陷防治與節約用水等技術服務團隊。日本則有「造水促進中心」負責研發並推廣造水技術，。目的：成立產業技術服務單位輔導海水淡化事業，可舒緩政府的供水壓力，並帶動海水淡化相關產業之發展。

技術服務單位主要任務包括：

(1) 海水淡化技術開發計劃

(2) 研擬海水淡化廠功能評估手冊

(3) 輔導民間淡化水產業

(4) 提昇設計與操作能力，減低造水成本

(5) 國際合作計劃

2.加強海水淡化產業人才培訓

為因應未來海水淡化產業的發展趨勢，配合政府輔導海水淡化產業的人力需求，必須擬定人才培訓計劃，奠定長期產業人才之基礎。其執行方法如下：

(1) 主辦機關人才培訓

主要針對辦理海水淡化業務之單位與成員，定期辦理訓練課程，邀請國內相關工程、法律、財務、政策制定與執行等方面之專家經驗講習。

(2) 產業人才培訓

針對相關法規、海水淡化技術發展與應用、海水淡化裝置之維護管理，定期舉辦訓練課程。

3.促進國際交流與技術合作

透過與歐美日等先進國家之合作交流，擷取海淡發展之寶貴經驗，有助於我國海水淡化產業的發展，並提昇相關行業之競爭力。主要規劃工作如下：

(1) 積極參與國際海水淡化會議，了解各國海水淡化之發展與成果。

(2) 透過國際淡化學會(IDA)、歐洲淡化協會(EDS)、國際水協會(IWA)與水科技協會(WSTA) 推介國際間資深海水淡化績優造水廠及設備供應商，介紹相關海淡技術以及民間興建營運投資經驗。

(3) 參訪觀摩國外興建營運良好之海水淡化，做為降低國內造水成本之考量。

(4) 邀集國內投資業者與專家學者共同舉辦『海水淡化投資設廠研討會』。