

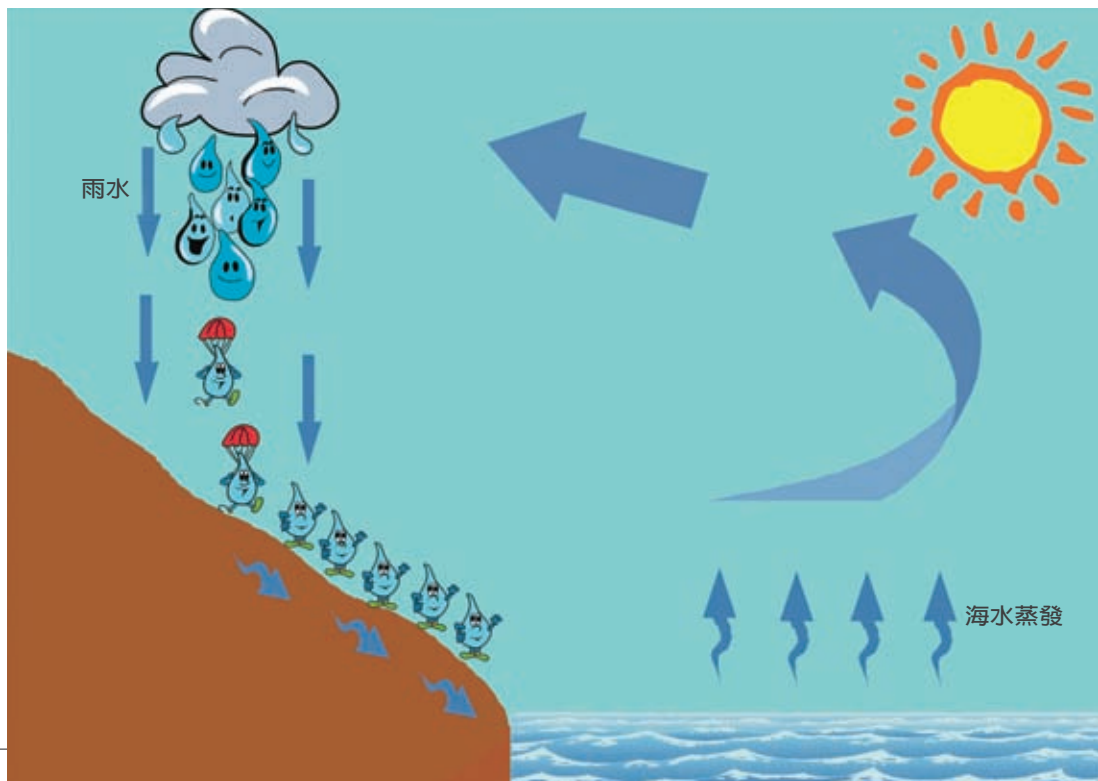
海水淡化的發展

■張淵斯 曹知行

台灣本島現今的自來水成本，
每噸平均約 12 元；
開發新水庫的成本，
每噸平均約 20 元；
而最便宜的海水淡化成本，
每噸約 15 元，
海水淡化已不是昂貴的水源了。

海水是地球上數量最大的資源，包括取之不盡、用之不竭的水資源。開發和利用海水淡化技術，不僅是現代海洋開發的一項重要任務，也是未來開發新水源解決全球性水資源危機的重要途徑之一。目前，地球上的水約 97% 是海水，淡水只有 3%，而且多數的淡水以冰河等形式存在於地球表面，人類可利用在地表的淡水資源大約只占全球水資源總量的 0.26%。根據聯合國公布的資料，目前全球超過 10 億人口居住在水資源缺乏地區。而到 2025 年，這個數字會攀升到 18 億。

隨著氣候變化、乾旱、人口和工業用水的增加，各國對淡水的需求量越來越大，使得淡水的有效供應日益趨緊。早在 400 多年前就有人提出海水淡化的構想，進入 20 世紀後，海水淡化技術隨著水資源危機的加劇而迅速發展。1970 年代以來，由於水資源匱乏，使得更多的沿海國家加快



大自然的海水淡化

了海水淡化的產業化。現今中東國家 70% 的淡水來自海水淡化，美國、日本、西班牙等已開發國家為了保有本國的淡水資源，也競相發展海水淡化技術。

海水淡化發展史

古代就有從海水中去除鹽分的故事和傳奇，但直到 16 世紀，人們才開始努力從海水中提取淡水。當時歐洲探險家在漫長的航海旅行中，就用船上的火爐煮沸海水以製造淡水。加熱海水產生水蒸氣，冷卻凝結就可得到純水，這是日常生活的經驗，也是海水淡化技術的開始。大自然的海水淡化，也是如此。海水受熱蒸發形成雲，雲在一定條件下遇冷形成雨，而雨就是不帶鹹味的淡化海水。

在 1850 年左右，由於製糖工業需要消

耗大量的燃料加熱糖液，以蒸發出其中的水分製糖，於是美國工程師研發出多效蒸發的煉糖技術。這方法可有效降低煉糖所需的能量，也造就了多效蒸發法於海水淡化上的應用。把海水放在水壺裡煮沸，壺蓋上就會有凝結的蒸餾水，就是淡化水。但為了節約能源，可以把第 1 壺燒出來的蒸氣用來燒第 2 壺，把第 2 壺的蒸氣用來燒第 3 壺……把所有的冷凝水收集起來便是所生產的淡化水，這就是多效蒸發法的原理。

二次大戰期間，各國為了供應在乾燥地區作戰的軍隊飲水，開始重視海水淡化技術的研究和應用。從 1950 年代開始，美國政府建立了一個鹽水中心來進行淡化技術的研究。美國加州大學洛杉磯分校的科學家開始研究薄膜脫鹽法，並於 1960 年成功開發出能滲透水，卻可阻止鹽分通過的

開發和利用海水淡化技術，不僅是現代海洋開發的一項重要任務，也是未來開發新水源解決全球性水資源危機的重要途徑之一。



海水是取之不盡的淡水來源

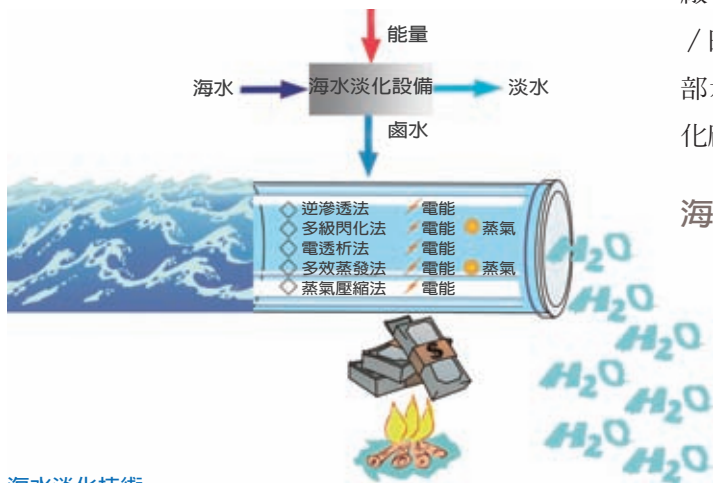
非對稱型醋酸纖維薄膜。

1965年，在加州 Coalinga 誕生了一座小型應用逆滲透法的海水淡化工廠。但至1960年代末期，才開始有日產量 8,000 噸蒸發法海水淡化廠的興建營運，薄膜法製程則一直到 1970 年代才達到商業化的運轉。

根據國際淡化協會的統計，全世界約有 133 個國家應用海水淡化系統，淡化水的日產量（單位機組日產 100 噸以上者）已達

3,240 萬噸。全球現今有 13,080 座海水淡化廠在運作，總共的日平均產能相當於 0.5 % 的全球用水量。

資料顯示截至 2001 年為止，美國淡化廠已有 2,563 座，數量居世界首位，淡化水產量 355 萬噸/日，全球第 2。沙烏地阿拉伯共有 1,260 座海水淡化廠，全球第 2，產量近 705 萬噸/日，則居世界首位，供民生使用占 96 %。日本共有 369 座海水淡化廠，數量是全球第 3，淡化水產量 78 萬噸/日，其中工業用水占 87 %。另根據經濟部水利署資料顯示，台灣共有 10 座海水淡化廠，淡化水產量 1.37 萬噸/日。

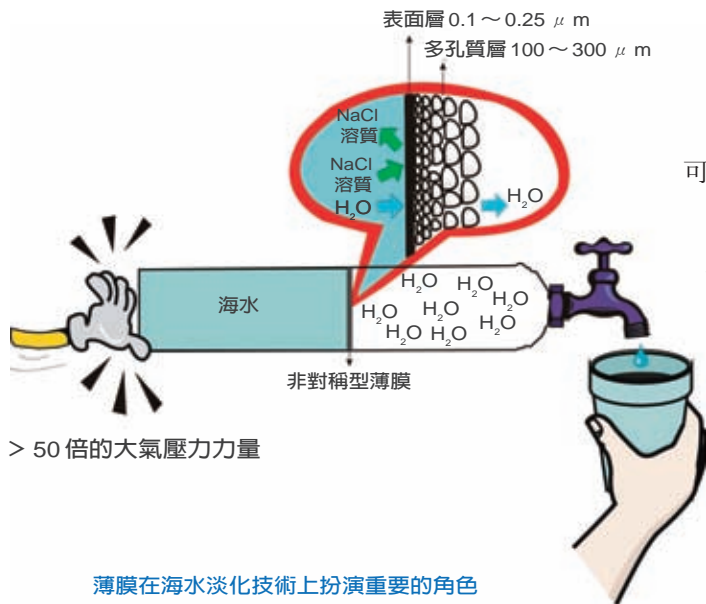


海水淡化技術

海水淡化技術

應用於海水淡化商業用途的技術，主要可分為蒸發法和薄膜法兩大類。蒸發法又包括多效蒸發法、多級閃化法和蒸氣壓縮法 3 種。薄膜法主要有逆滲透法和電透析法兩種。目前全世

早在 400 多年前就有人提出海水淡化的構想，進入 20 世紀後，海水淡化技術隨著水資源危機的加劇而迅速發展。



薄膜在海水淡化技術上扮演重要的角色

界海水淡化方法的應用，逆滲透法排名第1，日產量達1,400萬噸以上；多級閃化法占第2位，日產量達1,200萬噸以上，電透析法日產量146.2萬噸占第3位，逆滲透法和多級閃化法是海水淡化領域的主流方法。

多效蒸發法 多效蒸發法是海水淡化技術中較早發展成功的方法之一，它的原理是利用高溫蒸氣和海水的溫差進行熱交換後，使受熱沸騰而蒸發的海水冷凝並收集而得到淡水。它的處理過程是把海水和蒸氣分別引入第1道槽內，進行熱交換，蒸氣被冷凝成淡水，海水則被蒸發。蒸發的蒸氣進入第2槽內和較濃的海水在第2道槽中進行熱交換，這裡的壓力較第1道槽低。持續進行蒸發，並在不同的槽中重複蒸發和冷凝，收集冷凝後的水就是所得到的淡水。

由於多效蒸發法的海水在熱交換表面上蒸發，因此有礦物質沉澱而積垢的現象，進而阻礙了能量的傳輸。為了防止積垢現象的發生，多效蒸發法也設計在低溫操作，雖然可能損失掉一些能量，但是可以防止材料在高溫操作時所產生高腐蝕和積垢的現象，並

可促使整廠所使用的材料成本降低。

多級閃化法 多級閃化法是全球總裝置容量最大的海水淡化方式，於1950年代開始發展，是利用液體在沸點時產生蒸氣的原理，把溶液中的水分轉變成蒸氣，而和溶解於溶液中的鹽分分離。閃化以減壓方式降低液體沸點，並產生蒸氣，使蒸氣冷凝後就可製得淡水。

多級閃化製程主要分成兩個系統。一是加熱區，做為進料海水的預熱使用，一般多採用蒸氣做為熱源，蒸氣冷凝後回到鍋爐。另一是閃化區域，是一多級閃化和回收區，通常是16級至50級不等。它的過程是把海水加熱到一定溫度後，引入閃化室。由於閃化室中的壓力控制在低於熱鹽水溫度所對應的飽和蒸氣壓之下，因此熱鹽水進入閃化室後就急速地部分汽化，使得熱鹽水自身的溫度降低，汽化所產生的蒸氣冷凝後就是所生產的淡水。

多級閃化是以這原理為基礎，使熱鹽水依次流經若干個壓力逐漸降低的閃化室，逐級蒸發降溫，同時鹽水濃度也逐級增濃，直到它的溫度接近天然海水溫度。多級閃化法除了主要蒸發設備和多效蒸發法不同之外，其他的處理設備則和多效蒸發法類似。

由於多級閃化法的海水蒸發不在熱交換表面上發生，因此極少有礦物質沉澱，這方法是針對多效蒸發法的積垢較嚴重的缺點而發展出來的。它具有設備簡單可靠、防垢性能好、易於大型化、操作彈性

大、可利用低位熱能和廢熱等優點，主要應用在中東阿拉伯灣地區大型的海水淡化廠，並常和火力發電廠配合運轉，利用火力發電廠汽輪機使用過的低壓廢蒸氣，做為淡化過程中加熱海水的熱源。

蒸氣壓縮法 蒸氣壓縮法和多效蒸發法相同，主要的差異是通過導管內的鹽水所產生的蒸氣不被立即單獨冷卻，而是經壓縮機壓縮至外殼側，讓蒸氣凝結在導管上，同時放出潛熱而蒸發更多的鹽水。因此蒸發能源並非來自前述的兩種蒸發法中的加熱蒸氣，而是來自蒸氣壓縮機的能量轉換。壓縮的作用是使蒸氣溫度升高，以提供由蒸氣至鹽水的熱傳送潛力。

蒸氣壓縮法僅需利用電能驅動壓縮機，一方面壓縮蒸氣，提高它的凝結點；另一方面，降低濃鹽水的壓力和沸點，使它易於蒸發，再冷卻，如此不斷地在熱傳導面循環進行熱交換。

蒸氣壓縮技術進入商業用途始於 1930

抽取海水到過濾器的設備

年代，由於這項技術並不需要大量蒸氣做為熱源，可用以替代多效蒸發法、多級閃化法等海水淡化程序。此外，它具有易組裝和可搬遷的特性，在蒸氣取得不易的地區，例如沒有熱源的島嶼地區，頗具吸引力。

逆滲透法 逆滲透法是 1953 年才開始採用的一種膜分離淡化法。這方法是利用只允許溶劑透過、溶質不透過的半透膜，把海水和淡水分隔開，這時淡水會通過半透膜擴散到海水一側，使海水一側的液面升高，直至一定的高度才停止。這個過程稱為滲透現象，海水一側高出的水柱靜壓就稱為滲透壓。

如果對海水一側施加一大於海水滲透壓的外壓，海水中的純水會反滲透到淡水側中，這種現象就稱為逆滲透。它是利用海水滲透壓的原理，把海水經高壓水泵加壓處理，產生大於滲透壓的壓力，使淡水透過半透膜而反滲出來，濃鹽水則由另一端排放出去。

海水通過半透膜之前，必須經過預處理的過程，使水質能符合

圖片來源：林朝香



半透膜的設計需求，以增長半透膜的壽命。由於操作溫度較近於常溫，逆滲透法的最大優點是節能，它的操作能耗遠低於電透析法和蒸發法。因此，從1974年起，美、日等已開發國家把發展重點轉向逆滲透法。

19世紀末期，輪船開始利用引擎排氣中的熱能蒸發海水製造淡水（多效蒸發法），但當停泊時有無法造水的困擾。為解決這問題，現今豪華客輪都已使用逆滲透法製造淡水。

電透析法 電透析法是把很多的陰/陽離子薄膜交錯地並、串聯在一起，電解質溶液則在膜間流動。兩側施以直流電電壓後，陽離子會移向陰極，而陰離子會移向陽極。陰離子可順利通過陰離子膜，但是再往前時卻會被鄰近的陽離子膜阻擋。反之，陽離子也僅能通過陽離子膜，而無法通過陰離子膜。最後得以分離出低電解質濃度的溶液（淡水），和高電解質濃度的溶液（濃鹽水）。

為防止離子膜因長時間的使用而產生結垢和污穢的現象，在設計電極時通常都採用互換電流方向的方式，即每操作15至30分鐘後，就使電流逆轉方向，使兩極互換極性，可達到避免結垢的目的。

電透析法需耗用大量的電能，且隨著海水變淡水所造成的電阻增加，電流強度無法提升而影響效能。此外，海水所含的總溶解固體量（total dissolved solids, TDS）較高，若以這方法淡化海水，每噸水耗費的電量會較逆滲透法高，不符合經濟效益。因此，這方法多應用在總溶解固體量較低的鹹水（低鹽



電透析海水淡化設備

度含量)的淡化上。

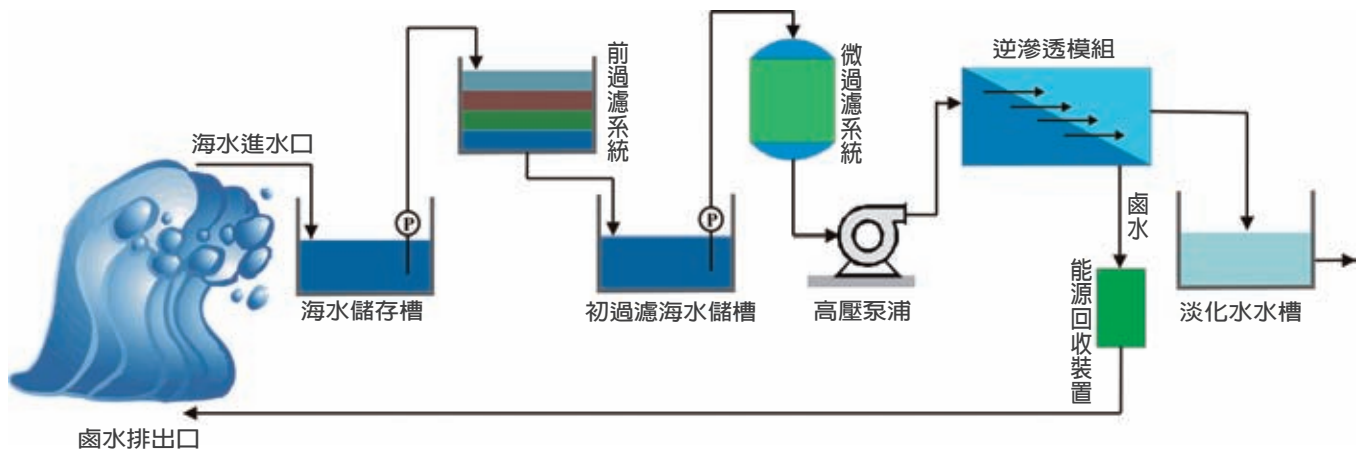
水電聯產 水電聯產主要是指海水淡化廠和電力廠聯合生產。由於海水淡化成本有很大程度上取決於消耗電和蒸氣的成本，水電聯產方式可以利用電廠的廢蒸氣和電力為海水淡化裝置提供熱能和動力，進而實現能源高效利用和降低海水淡化成本的目標。目前國外大部分海水淡化廠都是和發電廠建在一起的，這也是當前大型海水淡化廠的主要建設模式。

熱膜聯產 熱膜聯產主要是採用蒸發法和薄膜法海水淡化相聯合的模式（即多級閃化或多效蒸發法與逆滲法透連結的模式），以滿足不同用水需求，降低海水淡化成本。目前世界上最大的熱膜聯產海水淡化廠是阿聯酋富查伊拉海水淡化廠，日產淡化水量是45.4萬噸。多級閃化法日產28.4萬噸，逆滲透法日產17萬噸。它的優點是投資成本低，且可共用海水取水口。

以上海水淡化方法中，究竟哪種方法最好，不是絕對的，要根據規模大小、能源費用、海水水質、氣候條件、技術和安全性等實際條件而定。

有關可提供海水淡化量產技術的來源，多級閃化法量產技術是日本、英國、

**海水淡化廠和電力廠聯合生產，
可以利用電廠的廢蒸氣和電力為海水淡化裝置提供熱能和動力，
進而實現能源高效利用和降低海水淡化成本的目標。**



典型的逆滲透海水淡化流程

美國、韓國、義大利、法國等；逆滲透法技術來源是美國、日本、沙烏地阿拉伯、德國、西班牙等；多效蒸發法技術來源是以色列、美國、日本、法國等；蒸氣壓縮法製程主要技術來源是法國、美國、以色列、日本、荷蘭等。

海水淡化成本

對於海水淡化而言，能量損耗是直接決定成本高低的關鍵。40多年來，隨著技術的提升，海水淡化的能量損耗指標降低了90%左右（從26.4 kwh / m³降到2.9 kwh / m³），成本隨之大為降低。

綜觀全球現有海水淡化廠，核心製程主要以多級閃化法和逆滲透法為主。所有

的淡化製程都需要消耗電能，而多級閃化法和多效蒸發法除了需要電能之外，還需要蒸氣。逆滲透法和蒸氣壓縮法平均耗電量較高，驅動高壓泵的電能是主要的能源消耗。蒸發法為了降低能耗，必須提高造水率，提高造水率就必須增加級數或效數，降低能耗的代價就是增加投資費用。因此設計的造水率有最佳的範圍，必須在造水率和投資費用之間進行適當化設計，才可降低成本。

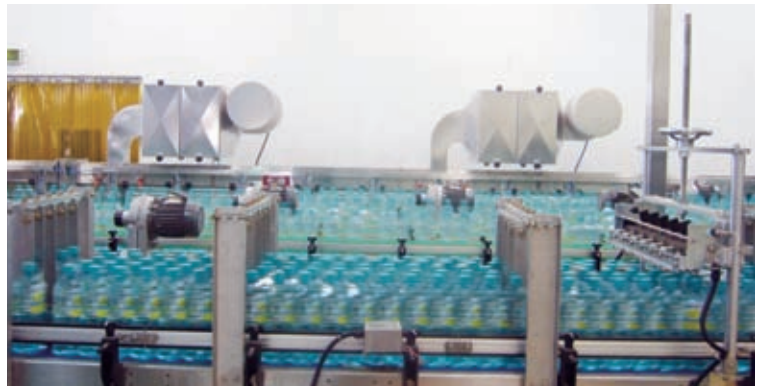
多級閃化法每噸水的電能消耗約為3.5 kwh（度），多效蒸發法每噸水的電能消耗約為1.0～1.5 kwh（度），但多級閃化法和多效蒸發法除了電能以外更需要蒸氣，通常每1公斤的淡化水約需250 KJ熱量的蒸氣。

1980年代，使用逆滲透法處理每噸淡化水平均仍需要約8 kwh（度）的電能。由於近年來新的薄膜材質和能源回收改良技術都已達商業化階段，不但使淡化成本降低且造水率提高，除鹽率高達99.5%外，膜管平均使用壽命更延長至5年以上，整廠用電可達每噸淡化水約2～4 kwh（度）。



海水淡化的飲用水產品

目前，由於生產技術的發展，海水淡化技術日趨完善，成本已經逐漸降低，甚至在某些地區已經接近或低於自來水的成本，這也為海水淡化技術在全球缺水地區起了關鍵作用。例如美國佛羅里達州



海水淡化後的瓶裝水生產線

圖片來源：林朝暉

Tampa Bay 海淡廠製水成本約每噸0.5元美金，新加坡 TUAS 海淡廠製水成本約每噸0.46元美金，以色列阿希奇隆海淡廠製水成本約每噸0.5元美金。

從事海水淡化時，通常須對海水做前處理，以保護淡化廠，並降低淡化成本。對蒸發法而言，所謂前處理主要是注入添加物，以降低碳酸化合物和硫酸化合物的沉澱。至於逆滲透法，主要是過濾去除懸浮微粒，以保護半透膜免於受損。

海水淡化的污染

發展海水淡化產業的同時，也應注意大規模海水淡化所產生的海洋環境污染問題。海水淡化所排出的大量濃鹽水，含鹽量一般是海水的兩倍，且溫度高於海水，通常直接排入海洋中。因此廢海水中的熱能會使局部海域水溫升高，導致某些浮游生物急遽繁殖和高度密集，造成海洋生物大量死亡。海水水溫的升高還會使海水中的溶氧量降低，影響生物的新陳代謝，甚至使生物群落發生改變，破壞海洋生物的棲息環境。

此外，蒸發法淡化廠易於腐蝕，可能會把一些重金屬，例如銅，排入廢液。逆滲透法也有類似的問題，它需要用化學品作預處理和清潔薄膜，這些化學品最後也成為廢液。

為解決海洋環境的污染問題，廢液須於

排放前先做處理，排放的濃鹽水則引入大海深處，讓濃鹽水和天然海水自然混合，以解決濃鹽水的區域性污染問題。此外，濃鹽水須控制在適當的溫度後再排放。

海水淡化的未來

海水淡化技術的發展和工業應用，已有半個世紀的歷史，在這期間形成了以多級閃化法、逆滲透法和多效蒸發法為主要代表的工業技術。據學者專家表示，在往後三、四十年的工業應用上，仍是這3項海水淡化技術的天下，但逆滲透法的比重會越來越大。

從地區上來講，中東海灣國家仍以多級閃化為首選，如沙烏地阿拉伯、阿拉伯聯合大公國、科威特、卡達、利比亞、伊朗、巴林等，因為它的單台設備產水量目前已高達日產淡水4~5萬噸，具有大型化和超大型化，適用於污染重的海灣水和預處理費用低的優勢。然而在中東以外地區，以逆滲透法為首選，如美國、亞洲的日本、印尼、韓國、中國大陸、台灣等，因為在能耗和成本上都較具優勢。 □

張淵斯

台鹽實業股份有限公司生產處

曹知行

台鹽實業股份有限公司企劃資訊處