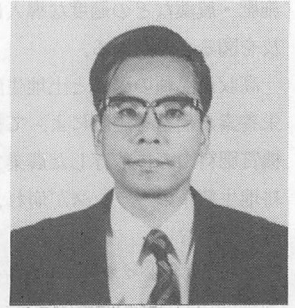


■ 展 望 ■

内外の海水淡水化の現状

The Present Situation of Sea Water Desalination in the World.

森 岡 錠 一*
Joichi Morioka

1. はじめに

人類の文明は生活用水や農業用水が容易に得られる河川流域などを中心として発展してきた。しかし、近代文明の発達にともない、工業用水が必要になるとともに、人口増加と生活水準の向上により、生活用水や農業用水の需要も増大した。そして、地域によっては、また時期によっては水不足になるという事態が生ずるようになってきた。このため、ダム建設などによる水資源の確保や産業排水の再利用をはかることが必要となり、さらに、水資源を得る最後の手段として、海水から真水を作る、すなわち、海水淡水化が注目されるにいたった。

海水淡水化の歴史は比較的新しく、本格的な海水淡水化装置が建造され始めてから、まだ30年位に過ぎないが、この間に海水淡水化の需要は急増し、これにともなって海水淡水化技術も発展してきた。そこで本稿においては、内外における海水淡水化の現状についての概括的な展望を試みることにする。

2. 淡水化設備の用途

米国のNWSIA(National Water Supply Improvement Association)は、世界に約100社ある淡水化装置メーカーにアンケートを出し、これをまとめて1981年5月にレポート(Desalting Plants Inventory Report No. 7)を発表した。このレポートによると、1980年6月現在、2,207基の淡水化装置が稼動中または建造中であり、その合計造水量は日産約730万トンであると報告されている。図-1は1969年以降の淡水化装置による合計造水量の推移を示したものである。淡水化装置の需要は中近東諸国を中心に増加しており、上述のレポートに集計されていない最近建造された淡水化装置を加えると、現時点では合計造水量で日産約

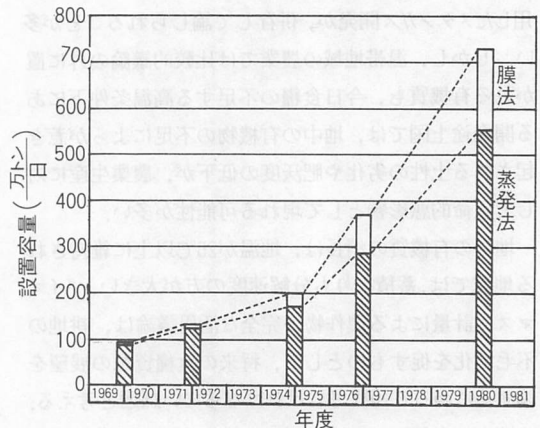


図-1 淡水化装置設置容量の推移

1,000万トンの淡水化装置が稼動中または建造中である。

上述のレポートに記載の2,207基の淡水化装置は、表1に示すように、当然のことながら石油と砂漠の国である中近東地域に最も多く設置されており、ついで、米国中西部、カリブ海諸島、北アフリカなど、降雨量の少ない地域に多く設置されている。

海水淡水化装置とは、海水から真水を作るためのものであり、後述のように種々の方式が開発されたが、その製造水コストはいまだに天然水のコストに対抗できるまでにはいたっていない。したがって、淡水化装置は、水の絶対量が不足している地域での生活用水や工業用水を得るために設置されており、海水淡水化により得られた水を農業用として使うにはいたっていない。前述のレポートによると、日産約730万トンの生産水量のうち、約70%が都市などの生活用水として使用され、残りの約30%が工業用水として使用されていると報告されている。

我が国においても表1に示すように、日産約12万トンの淡水化装置が稼動しているが、これらは発電所などの工業用水や離島などの生活用水を得るのが目的であり、都市用水を得るための大規模な淡水化装置はまだ建造されていない。

* 関根倉機械製作所 プラントエンジニアリング部長

〒555 大阪市西淀川区竹島4-6-45

表1 淡水化装置の地域別分布
(1980年6月現在)

地 域		基 数	容 量 (千トン/日)	容 量 %
北 米	米 国	671	1,033	14.2
	そ の 他	58	62	0.9
南 米	カリブ海	66	151	2.1
	そ の 他	41	37	0.5
ヨーロッパ	ソ 連	18	250	3.4
	そ の 他	319	533	7.3
ア フ リ カ		244	539	7.4
ア ジ ア	中 近 東	599	4,300	59.1
	日 本	143	125	1.7
	そ の 他	29	235	3.2
オセアニア		19	11	0.2
合 計		2,207	7,276	100

3. 淡水化技術の発展

今から130年前頃にすでにヨーロッパにおいて淡水化装置が使用されていたという事例もあるが、本格的な海水淡水化装置が建造されはじめたのは1950年代からである。その後、海水淡水化の需要は飛躍的に増大し、それとともに種々の淡水化方式が開発され、その技術が発展確立されてきた。

わが国では海水淡水化装置という用語が一般的に使われているが、欧米においては脱塩装置(Desalting Plant)という用語が使われ、これには海水からの淡水化だけでなく、かん水や産業排水を脱塩する装置も含めている。かん水とは、いわゆるブラッキッシュ・ウォーター(Brackish Water) のことで、塩分が比較的多いため、そのままでは飲料用に適しないが、海水よりは一般に塩分濃度が低い地下水などのことである。前述のレポートに示された日産約720万トンの淡水化装置のうちには、かん水または排水からの脱塩装置が約25%含まれており、残りの約75%が海水からの淡水化装置である。かん水脱塩も海水淡水化も同じ原理であり、密接な関連もあるので、本稿においては、かん水脱塩も含めた広義の淡水化について述べることにする。

表2に示すように、淡水化方式は蒸発法、膜法および冷凍法に大別される。このうち蒸発法が最も早く実用化され、現在の淡水化装置の約75%がこの方式によるものである。膜法による淡水化装置の大部分は、か

表2 淡水化方式と設置状況
(1980年6月現在(容量95トン/日以上))

淡水化方式	日本メーカーが建造した淡水化設備		全淡水化設備	
	基 数	容 量 (千トン/日)	基 数	容 量 (千トン/日)
蒸 発 法				
単段フラッシュ式	—	—	77	43
多段フラッシュ式	208	2,889	415	4,892
浸 管 式	—	—	127	82
立型多重効用式	11	9	104	287
横型多重効用式	4	9	19	78
蒸気圧縮式	32	8	200	92
多段フラッシュ/ 多重効用	—	—	7	18
多重効用/蒸気圧縮式	—	—	16	31
小 計	255	2,915	965	5,523
膜 法				
電気透析式	72	58	82	135
逆浸透圧式	201	154	929	1,478
電気透析/逆浸透 圧式	—	—	228	139
小 計	273	212	1,239	1,752
冷 凍 法	—	—	1	—
合 計	528	3,127	2,205	7,275

ん水の脱塩に使用されており、現時点においては海水淡水化装置はまだ少数しか建造されていない。また冷凍法は技術的に種々の問題があり、まだ本格的に実用化されるにいたっていない。上述の方式の他に、ガス水和物法や溶媒抽出法などの淡水化方式が開発中であるが実用化にはいたっていない。

海水淡水化方式のうち最も早く実用化されたのが浸管式蒸発法であり、かなりの数の装置が建造されたが、現在ではほとんど使われなくなった。これについてフラッシュ式蒸発法が実用化され、性能が安定しており、事故が少ないため、現在最も多く建造されている。特に10,000トン/日以上的大型装置の約90%が多段フラッシュ式であり、海水淡水化の最も代表的な方式であるといえる。多重効用蒸発法は上述の浸管式を改善して薄膜蒸発を採用したもので、フラッシュ式に比較して種々の特長を有しているため、徐々にではあるが、多段フラッシュ式に置きかわりつつある。

膜法では、イオン交換膜を使用する電気透析式がま

ず開発され、海水よりも塩分の少ないかん水の脱塩に使われた。ついで半透膜を使用する逆浸透圧式が開発され、初期のうち、かん水の脱塩にのみ使用されたが、最近では海水用の半透膜が開発され、海水淡水化が可能となった。逆浸透膜法は、淡水化のためのエネルギー消費が蒸発法よりも少ないという長所を有しているため、省エネルギー型の海水淡水化方式として注目され、その需要は飛躍的に増大しつつある。

このような海水淡水化技術の発展において、米国のはたした役割は大きい。すなわち、海水淡水化の重要性に着目した米国は内務省にOSW (Office of Saline Water) を設置し、多額の研究費を投じて淡水化に関する技術の開発と育成につとめてきた。そして1960年代の初めに日産100万ガロン(3,785トン/日)規模の異なった方式による実証プラントを4基建造し、運転研究を実施した。これらのうち、多段フラッシュ蒸発法と立型多重効用蒸発法によるものは海水からの淡水化であり、蒸気圧縮蒸発法と電気透析膜法によるものはかん水の脱塩であったが、これらより得られた研究成果は、その後の淡水化技術の発展に大きく寄与した。なお、現在OSWは内務省OWRT (Office of Water Research & Technology) に吸収され、規模は縮小されたが、淡水化技術の開発育成業務は続けられている。

我が国においても、将来の水不足に対処するため、1969年に通商産業省工業技術院の大型技術開発制度の一つの課題として、“海水淡水化と副産物利用”が取り上げられ、多額の国費と官民協力による多数のマンパワーを注ぎこみ、多段フラッシュ蒸発法を中心とする研究が1977年まで実施された。その結果、わが国の淡水化技術は世界中から高く評価されるようになった。そして、その成果を基盤とした我が国の企業の努力により、表2に示すように、海水淡水化プラントの受注において、世界一のシェアを占めるにいたった。特に海水淡水化の主流である多段フラッシュ蒸発法においては、その60%近くが我が国の企業によって建造されたものである。このように、我が国の淡水化技術は世界のトップクラスにあるといえるが、上述の大型技術開発を継承して、(財)造水促進センターが中心となり、現在も逆浸透膜法などに関する研究が続けられており、我が国の淡水化技術の発展に寄与している。

上述のごとく、海水淡水化には種々の方式があるが、実績からみても、将来性からみても、多段フラッシュ蒸発法、多重効用蒸発法および逆浸透膜法の三方式が断然他をリードしている。そこで、この三方式にしぼ

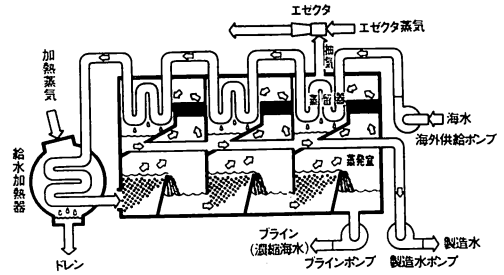


図-2 多段フラッシュ蒸発法の作動図

って、これらの特長と現状について以下に述べる。

4. 淡水化の諸方式

4.1 多段フラッシュ蒸発法

真空器内に、その真空に相当する飽和温度より高い温度の液体を導入すると、器内に入った瞬間に、その液体が自己蒸発を起こす現象をフラッシュ蒸発と呼んでいる。この原理を応用したのがフラッシュ式淡水化装置である。

その作動は図-2に示すように、海水供給ポンプより送られた海水は、蒸留器の管内を冷却水として通過し、その間に予熱され、給水加熱器で加熱蒸気により所定の温度まで加熱され蒸発室へ導入される。蒸発室は抽気エセクタによって真空に保たれているので、導入された高温海水は、フラッシュ蒸発を起こし一部は水蒸気となり、蒸留器に入り復水して淡水となる。

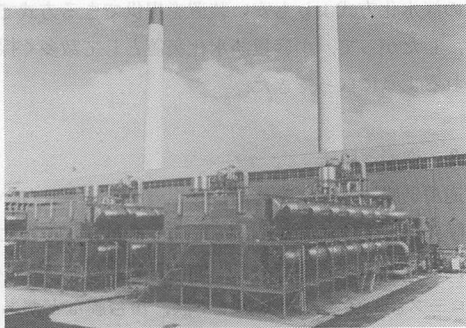
図-2に示す装置は3段の蒸留器で構成されているが、一般の装置では10~40段の蒸留器で構成されている。造水量/加熱蒸気量を造水比と呼ぶ、すなわち、1トンの加熱蒸気で何トンの水を得られるかを示す尺度が造水比である。この造水比を高めるためには、必然的に段数を増加させる必要があり、一般に段数の増加は装置費の増大をもたらす。すなわち、造水比を高めると、蒸気消費量は減少するが、建造コストは増大する。

フラッシュ蒸発法の特長は、他の方式の蒸発法のような伝熱面における蒸発でなく、フラッシュ蒸発の原理を応用しているため、伝熱を阻害し、性能を低下させるスケール(水あか)の発生が起りにくいことである。海水淡水化における最も重要な技術的課題は、スケールと腐食である。初期の多段フラッシュ式淡水化装置は、加熱器出口の海水最高温度を90℃以下に制限し、重合リン酸塩などのケミカルをスケール防止剤として使用したが、スケール発生を完全に防止するにはいたらなかった。その後、酸注入pH制御法が開発され、スケール発生を確実に防止できるようになり、しかも、

海水最高温度を120℃まで高めることが可能となり、装置費の大幅な低減がはかれるようになった。しかし、酸注入より海水のpHが低下するため、装置構成材料の腐食が問題となり、耐食性のある高級材料を使用せざるを得なくなった。そして、海水を脱気処理し溶存酸素を減少させることにより、材料の腐食を軽減する方法が採用されたが、十分な効果をあげるにはいたっていない。そこで、90℃以上の高温海水においても使用でき、重合磷酸塩系のケミカルよりもスケール防止効果が大きいケミカルの出現が望まれていたが、スイスのチバガイギ社などによって、この条件を満足するスケール防止剤が開発された。こうして、ケミカル注入方法においても海水最高温度を110℃位まで高めることが可能となり、また酸注入pH制御法とともに開発されたスポンジボールによるスケール除去技術の確立により、伝熱面へのスケール附着はほとんど完全に防止できるようになった。このため現在においては、酸注入pH制御法よりも、むしろケミカル注入方法を採用した多段フラッシュ淡水化装置が多く建造されるようになってきた。

多段フラッシュ蒸発法において開発されたスケール防止技術を応用することにより、他の蒸発法においてもスケール生成をほとんど確実に防止できるようになったが、フラッシュ蒸発法は依然として最も安定したスケール防止ができ、長期間にわたって造水能力を低下させることのない方式であるといえる。これが多段フラッシュ淡水化装置が最も多く建造され、最も広く使用されている理由である。

海水淡水化装置の信頼性と技術水準を示すものに、1基当りの造水容量があるが、この点でも多段フラッシュ式は常に他の方式をリードしており、現在他の方式が1基当り日産10,000トン以下の規模であるのに対



写-1 香港に建造された世界最大規模の多段フラッシュ淡水化装置
(合計造水能力180,000トン/日)

し、多段フラッシュ式では1基当たり日産30,000トン以上の装置が稼働している。写-1は1976年に香港に建設された30,000トン/日×6基、合計180,000トン/日の世界最大規模の海水淡水化装置である。他の装置やプラントと同様に、海水淡水化装置においても、1基当りの容量（造水能力）を高めることが、装置の建造費を低減させる有力な手段である。この意味で、前述の通商産業省工業技術院の大型技術開発“海水淡水化と副産物利用”において日産100,000トンのテストモジュールによる研究がとりあげられ、大容量多段フラッシュ淡水化装置を建造するための技術が確立され、我が国の海水淡水化技術を世界のトップクラスに高めたことは、画期的な出来事であった。このように1基当りの造水容量においても他の方式をリードしている多段フラッシュ式は、現時点における最も信頼性の高い淡水化方式であるといえる。

4.2 多重効用蒸発法

多重効用蒸発法とは、高温効用で海水から発生した蒸気が次効用で海水を蒸発させ、自らは淡水になる作用を何回もくり返し、少量の熱で多量の水が得られるように考案されたものである。加熱管を海水中に浸し、海水を沸騰蒸発させる浸管式も多重効用蒸発法の一つであるが、効用数の多い装置には適さないで、現在ではほとんど使用されていない。これに代わって、加熱管を垂直に配置し、この管内に沸騰する海水を薄膜状に流下させることにより、伝熱抵抗を少なくした立型長管式多重効用蒸発法が開発され、前述のOSW実証プラントにてその技術が確立された。これについて、加熱管を水平に配置し、この管外に海水を薄膜状に散布し沸騰蒸発させる横型多重効用蒸発法が開発され実用化された。図-3は横型多重効用蒸発法の作動を示すものである。

給水ポンプにより送られた海水は予熱器を順次通過して温度上昇した後、第1効用蒸発器加熱管の外側に散布され、その管内に供給される加熱蒸気によって沸騰蒸発を起こす。第1効用で残った海水は第2効用加熱管外面に散布される。第2効用加熱管内面には第1効用で海水から発生した水蒸気が供給され、そこで凝縮して淡水となり、その凝縮熱によって管外の海水を沸騰蒸発させる。こうした一連の作動を各効用でくり返し、最終効用の加熱管外面で発生した水蒸気はコンデンサで復水される。蒸発器内は抽気エゼクタによって下方の効用ほど高度の真空中に保たれ、したがって蒸発温度

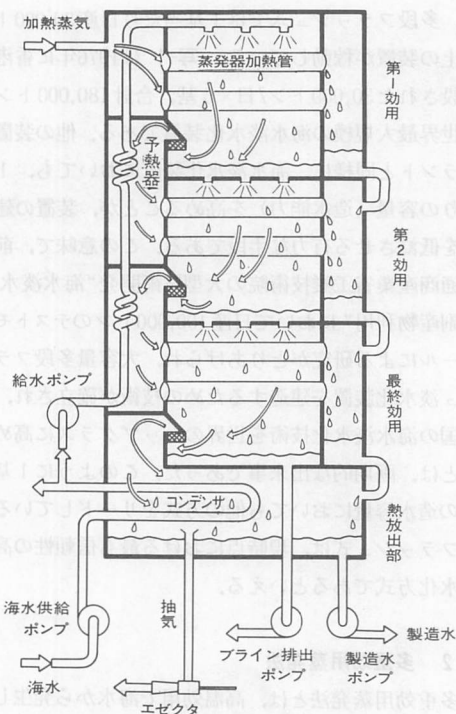
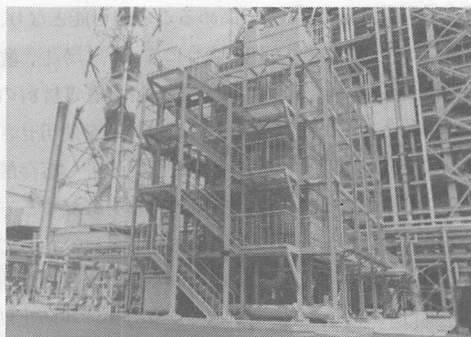


図-3 横型多動効用蒸発法の作動図

も低くなっている。

このように、加熱蒸気として加えられた熱は何回もその働きをくり返すことにより、少ない熱で多量の淡水を得ることができる。すなわち、効用数を多くすることにより、造水比を高めることができる。しかし、造水比を高めると、蒸気消費量は減少するが、装置の建造費が増加するのは、多段フラッシュ式の場合と同じである。

多重効用においては、多段フラッシュ式と異なり、伝熱管表面で海水が沸騰するので、局部濃縮が起り、スケールが発生しやすい。このため初期のうちはスケール・トラブルが多く、多段フラッシュ式よりも実用化がよかったが、最近ではスケール防止技術の発達により、多段フラッシュ式と遜色のないものとなった。しかし、各加熱管への海水の分散が不均一となった場合は、スケール発生のおそれがあるため、いかに各加熱管へ海水を均一に分散させるかが、現在の技術的焦点である。この点において、立型（垂直管）多重効用よりは横型（水平管）多重効用の方が海水の均一な分散が容易であるため、初期のうちは垂直管式が採用されたが、最近では水平管式の方が多く採用されるようになった。写-2 は九州電力豊前発電所に設置された水平管式多重効用海水淡水化装置である。



写-2 九州電力豊前発電所に建造された多重効用淡水化装置（造水能力2,000トン/日）

一般に多重効用蒸発法の方が、多段フラッシュ蒸発法よりも建造費が安く、電力消費量が少なく、完全自動制御が容易であるなどの長所を備えている。このため、中型規模の淡水化装置には、多重効用式が多段フラッシュ式に代わって採用されつつあり、蒸発法の中では最も将来性のある方式といえる。

多重効用蒸発法と作動および構造が類似しているものに蒸気圧縮蒸発法がある、すなわち、最終効用で発生した水蒸気を圧縮機またはエゼクタで圧縮昇温し、第1効用の加熱蒸気として使用するのが蒸気圧縮蒸発法である。ブロワなどの圧縮機を使用する場合は、加熱蒸気が不要で、圧縮機を駆動するための動力だけでよく、後述の逆浸透膜法と同等の動力消費量とすることが可能である。すなわち、蒸発法の中では最も省エネルギー型の淡水化方式であるが、大容量装置には適しないため、ほとんどが小規模淡水化装置として使用されている。また、蒸気エゼクタによって水蒸気を圧縮昇温する方法は、最も新しく実用化された蒸発法であり、上述の圧縮機方式よりもエネルギー消費は多いが、どの淡水化方式よりも安い装置を提供できる方式である。したがって、小容量淡水化装置として数多く採用されるようになってきた。

4.3 逆浸透膜法

逆浸透膜法とは水を透過させ塩分を透過させない半透膜に、浸透圧にさからって圧力差を与えることにより、淡水を得る方法である。逆浸透膜にはアセチルセルロース膜、芳香族ポリアミド膜、複合膜などがあり、モジュール構造としては、中空繊維型モジュールやスパイラル型モジュールなどがある。中空繊維型モジュールは米国デュポン社によって開発されたもので、我

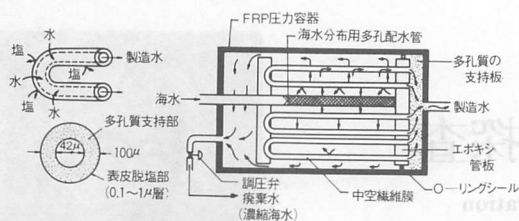


図-4 逆浸透膜法の作動図

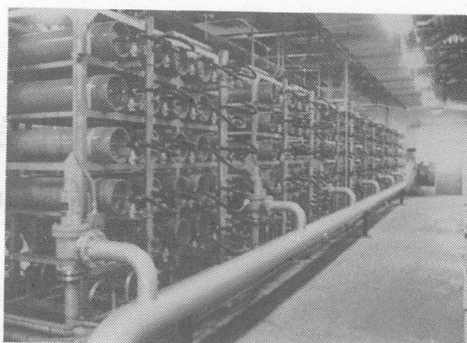
が国では東洋紡がこの方式を採用している。スパイラル型モジュールは米国 UOP や我が国の東レなどが採用している方式である。図-4は中空繊維型モジュールの作動を示したものである。

モジュールに入った海水は中心軸にある多孔質の配水管から放射状に流れ出し、中空繊維膜の外側を流れる。海水が中空繊維膜束の層を流れていく間に、水は繊維の壁を通過して中空部に入り、この穴の中と多孔質の支持板を通して外部に取り出される。一方、海水中の塩分は中空繊維膜によって排除され、海水は次第に濃縮され廃棄水(濃縮海水)としてモジュールの外に排出される。

逆浸透膜法で製造された水の純度は、蒸発法で製造された水の純度よりも劣るといふ短所があるが、淡水化に要するエネルギーが蒸発法の約 $\frac{1}{3}$ であることが、逆浸透膜法の最大の長所である。また、モジュールから排出される高圧廃棄水のエネルギー回収が実用化され、エネルギー消費がさらに節減されるようになった。このため、逆浸透膜法は省エネルギー型の淡水化方式として、将来は蒸発法に代わって淡水化装置の主流となるであろうと期待されている。

逆浸透膜法は蒸気が不要であり、電気動力だけで淡水化ができ、始動や停止の運転操作が容易である。また、海水を加熱せず常温で運転するため、蒸発法に比べて、スケールの生成や腐食が起りにくいという長所がある。しかし、逆浸透膜モジュールの寿命が3~5年であること、しかもモジュールに導入する海水の充分な前処理が必要なことなど、今後の技術的進歩にまつべき課題も多い。

かん水脱塩用の逆浸透淡水化装置は実績も多く、現在では完全に実用段階にある。写-3は塩分の多い地下水を脱塩するためサウジアラビアに設置された逆浸透淡水化装置である。一方、海水淡水化用の逆浸透膜が実用化されてから、まだ10年位にすぎないため、逆浸透膜法による海水淡水化装置の実績は少ない。しかし、中近東諸国などで日産数万トン規模の逆浸透海水



写-3 サウジアラビアに建造された逆浸透淡水化装置
(造水能力5,200トン/日)

淡水化装置が稼動中または建造中であり、我が国においても、小規模ではあるが離島などにおいて順調に稼動している。

海水淡水化装置の最大需要先である中近東地域においては、石油採掘の副産物である天然ガスが熱源として安価に利用できるため、現在のところは逆浸透膜法よりも蒸発法が有利である。しかし、我が国などにおいては近年の石油価格高騰により、よほど安価な熱源が利用できないかぎり、蒸発法は逆浸透膜法に到底対抗できなくなってきた。また、逆浸透膜の技術は著しく進歩しており、エネルギー消費が少ないという長所とあいまって、将来最も有望な海水淡水化方式といえる。

5. あとがき

海水淡水化において、最も重要なのは製造水コストの低減である。すなわち、いかに安い水を作るかということである。このためには、淡水化に要するエネルギーの消費を低減すること、また、淡水化装置の建造費を低減することなどが必要である。製造水コストは、淡水化の方式、容量、エネルギー単価などの諸条件によって決まるものであるため、一概にいくらになるかということとはできないが、一般に淡水化装置で製造される水のコストは、トン当たり200~500円である。この製造水コストは天然水に比較して、まだまだ高価であるので、製造水コストを天然水コストに近付けるための努力と開発がなされており、これにともなって海水淡水化技術も進歩を続けているのが現状である。