

海水淡水化技術の動向と将来

通商産業省 工業技術院 研究開発官 菊地邦雄

1. はじめに

良質で豊富な水に恵まれているといわれてきたわが国も、昭和60年には全国8地区で合計55億 m^3 /年の不足が生ずると予測され、今後の水資源開発の有力な手段として海水淡水化が大きく注目されるに至っている。海水淡水化は無盡蔵な海水を原料として工業的に生産できる新しい水資源であり、季節や自然条件等外的要因に左右されず需要に応じて安定的に供給でき、しかも将来の技術の進歩によってコストが下る余地が大いなどの特徴があるため、この研究開発はわが国ばかりでなく主要先進国において活発に進められている。そこで以下に、海水淡水化の技術の現状と今後の開発を中心に展望してみたい。

2. 海水淡水化の諸方式と問題点

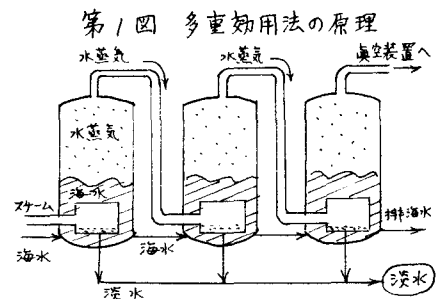
海水淡水化には各種の方式があり、それぞれ特徴がある。次に方式ごとにプロセスの概要や問題点等について述べたい。

(1) 蒸溜法

本法は淡水を蒸溜水として得る方法で、良質の水が得られる事に特長がある。大量の熱量を要するので、一旦使用した熱を効率よく回収し、繰返し蒸発に利用する必要があり、その方法によって次の種々の方法に分れる。

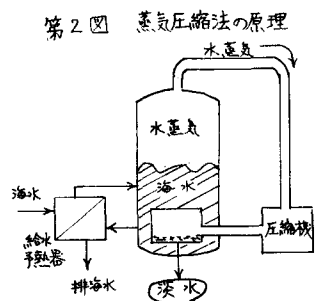
① 多重効用法

第1の蒸発法で発生した蒸気をより低圧に保圧した第2の蒸発法の加熱熱源として次々に利用する方式である。化学工業や製塩工業で長い実績をもっており、蒸発法の数を増加することによって熱経済がはかられるが、建設費がや、高いこと、伝熱管にスケール(垢)が付着し易いこと、腐食が比較的大きいこと等の問題がある。わが国では製塩工場で副産物ドレーン(凝縮水)を水道用に利用している例がある。ソ連で主に研究されていたが、数年前からアメリカでも熱心に開発が進められ、17重効用法の実証プラントの建設や伝熱係数の大きいひだ付き垂直管型式の開発が行なわれている。実用装置として世界で十数基の大型装置が稼働しており、その最大規模の装置は4500 $\text{m}^3/\text{日}$ である。



② 蒸気圧縮法

蒸発法から発生した蒸気を圧縮機で加圧して昇温させ、これを自己の蒸発法の加熱部に送って蒸発の熱源とする方式である。この方式は加熱のための熱を必要とせず理論的にエネルギー量も少なくて済むが、圧縮に電力や高圧スチームのような高価なエネルギーが必要で、これが安いところでないといふ不利がある。また圧縮機の容量に限界がある。

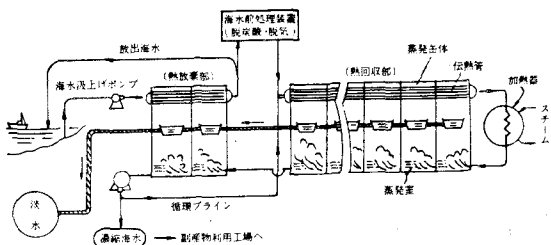


ため大型化のメリットは少ない。わが国では製塩工程に使われており、この副産物として淡水と利用している例もある。アメリカでは地下水かん水と原料とする実証プラントとして $3,800 \text{ m}^3/\text{日}$ のもへが建設されている。

第3図 多段フラッシュ蒸発装置

③ 多段フラッシュ蒸発法

液体を沸騰以上に加熱すれば蒸発が起るが、逆に高温の液体を急激に圧力降下させた場合にも沸騰蒸発（フラッシュ蒸発）が起る。多段フラッシュ法はこの原理を応用したもので、加熱した海水を圧力が順次低くなっている多数の蒸発室に次々に通すことにより、繰返しフラッシュ蒸発を行な



わせる方式である。この方式は熱源として比較的低温のものでよいので火力または原子力発電の安価な余熱が利用できること、多重効用法に比べスケールの付着や装置の腐食が少ないこと、建設費が安く、大型化しやすいなどの利点があるが、ポンプ動力費が比較的大きいなどの欠点がある。主な装置で現在世界で百数十基が動いているが大型の実用化装置の大部分はこの方式によっている。わが国からも今までに10基程度輸出されており、国内では2基稼働している。

④ 天日法

太陽熱で蒸発したものを冷却凝縮させる方法で、熱源としては最も安いのが、良好な気象条件と広大な土地を必要とし、量も限られるのでわが国では実施が困難である。メキシコ、ギリシアなどで研究されている。

⑤ 組合せ方式

多段フラッシュ法と多重効用法の組合せ、多段フラッシュ法と蒸気圧縮法の組合せ方式も研究されており、とくに前者はアメリカで最近力を入れて開発が行なわれている方式で、現在、4重効用と6段フラッシュを組合わせたモジュール（大型装置の部分試作、能力約 $1 \text{ 万 m}^3/\text{日}$ ）を建設中である。

(2) 冷凍法

海水を冷却して氷を析出させると、この氷には塩分が含まれていないのでこれを分離して水を得る方法である。この特徴は低温なので、スケールの発生がなく、装置の腐食が少ないが、一方生成した氷の結晶が微細なため海水との分離にまだ難点があり、また冷凍用の圧縮機の大ままでの限界から大容量化には向かない。今後の研究開発によっては離島、中小都市向けなどには将来性がある。

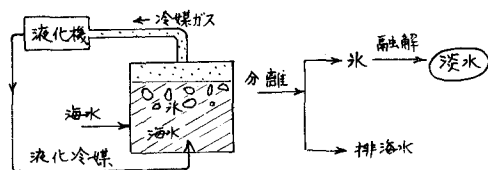
① 間接冷凍法

冷凍機を用いて伝熱面を通して海水を冷却する方法であるが析出した氷が伝熱面に固着して着しく伝熱を妨げ冷却効率を低下させる欠点が大まものでほとんど行なわれていない。

② 直接冷凍法

伝熱面を介さずに冷媒と海水を直接接触させるもので、融化した冷媒（ブタンやフロン等）を海水中に吹込んで冷媒を気化させ、その潜熱によって海水を冷却する方法である。原理的に優れているが、淡水の中

第4図 直接冷凍法の原理

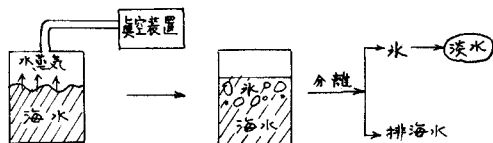


に冷媒が混入してくる可能性があること、運転中の冷媒のロスなどに問題がある。この方法は通産省の東京工業試験研究所から開発してきたもので、現在、民間企業との共同研究により、 $45 \text{ m}^3/\text{日}$ のパイロットプラントを建設中である。

第5図 真空冷凍法の原理

③ 真空冷凍法

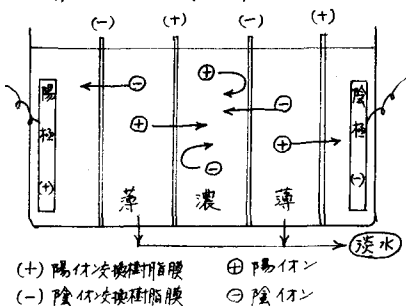
海水を入れた部屋を真空装置で引くと、海水中的の水が蒸発して潜熱を奪うために、海水が冷却し氷が生成するという原理によるものである。大がかりな真空装置を用いなければならぬので装置の大型化に難点がある。イスラエルに $225 \text{ m}^3/\text{日}$ 装置4基が設置され、エイラートの町に飲料水を供給している。



(3) 電気透析法

海水中の塩分を電気的に取り出して、淡水を残す方法である。すなわち陽イオン交換樹脂膜と陰イオン交換樹脂膜とを交互に多数並べ、これらの膜の間に海水を入れて両端から直流電圧をかけると、海水中的のナトリウムイオンや塩素イオンが移動して、一つおきに塩分の濃い部屋と薄い部屋ができていくことを利用したものである。この方法は原水の塩分濃度が高いとそれだけ電力消費量がかさむことと、脱塩率に限度があつて塩分が若干残ることなどから、海水よりもむしろ塩分濃度の低い地下水かん水などを原料とする場合に適し、また、装置の大型化のメリットがあまりないので、おもに中小規模の淡水化に使われている。この方法は海水の濃縮用としてわが国の製塩業に急速に採用され、塩田に代る塩業近代化の手段となっている。このことからわが国の電気透析法の技術は世界の一流水準にあり、アメリカの本法による淡水化実証プラント($2500 \text{ m}^3/\text{日}$)はわが国のメーカーの製作になすものである。わが国では離島などで最近相次いで設置されるようになり、現在、2基稼働、2基建設中である。最近リビアのベンガジに建設された透析装置は $19,400 \text{ m}^3/\text{日}$ の総容量を持つといわれ注目されている。

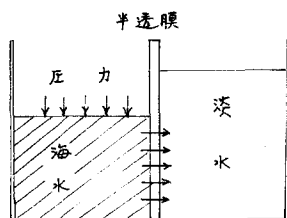
第6図 電気透析法の原理



(4) 逆浸透法

半透膜が水だけを通し、塩分を通さないという性質を利用して海水にその浸透圧以上の圧力をかけ半透膜から水だけを滲み出させる方法である。この方法は現在開発の初期の段階にある新しい方式で、プロセスが簡単で必要エネルギーが少なく、将来性のある技術である。しかし、海水のように塩分が高いものを原水とする場合には高い圧力を必要とし、膜の圧密化によって水の透過が妨げられ、しかも脱塩は完全ではないので、現在は稀薄な塩水の淡水化に使われている。すぐれた膜の開発が今後の重要な課題とされている。近年とくにアメリカを中心として各国で研究が行われており、わが国でも東工試、専売公社、各大学等が基礎研究が行なわれている。最近、鹿島地元に工業用水の浄化用の装置($5000 \text{ m}^3/\text{日}$)が設置され稼働している。

第7図 逆浸透法の原理



(5) 以上のほか、フレイシオン類などを海水と混合して水和物結晶を析出させた後これを分解して水を生成させる水和物（ハイドレート）法、特殊な溶媒で海水中的の水分だけを抽出する抽出法などがあるが、あまり発展していない。

第1表 世界の淡水化装置設置状況
(造水能力950 $\text{m}^3/\text{日}$ 以上の装置)

方式	基 数		総 容 量	
	(基)	(%)	(1,000 $\text{m}^3/\text{日}$)	(%)
蒸発法	フラッシュ	133	886.7	(89.7)
	多重効用	23	71.4	(6.5)
	蒸気圧縮	1	3.8	(0.3)
電気透析	15	(7.6)	52.3	(4.8)
逆浸透	8	(4.1)	12.8	(1.2)
不 明	17	(8.6)	71.0	(6.5)
合 計	197	(100.0)	1,096.9	(100.0)

3. 実用化の現状

現在、世界に設置されている淡水化装置は第1表のとおりで、合計197基、約110万 $\text{m}^3/\text{日}$ に及んでいる。わが国では、海水以外の水の脱塩を含めると第2表のとおり約10ヶ所に設置され（建設中のものも含む）ている。方式別では多段フラッシュ法が大部分を占め、次いで多重効用法、電気透析法となっており、逆浸透法も逐次実用化されるようになってきた。地域別では約半数がクエート、サウジアラビア等の砂漠で燃料資源の豊富なアラビア半島周辺、約20%が離島の観光地がある香港、西インドカリブ海地帯に設置されている。装置の大型化も次第に進み、現在稼働中の最大のもはクエートにおける22,500 $\text{m}^3/\text{日}$ 装置であるが、製作中のものではわが国から輸出される香港の30,000 $\text{m}^3/\text{日}$ （6基）が最も大きい。

第2表 わが国における実用淡水化装置

第3表 地域別設置状況

設置場所	方式	容量($\text{m}^3/\text{日}$)	運転開始年	備 考
松島炭鉱(地島)	多段フラッシュ	2,650	昭 42.4	発電造水二重目的装置
関西電力(姫路港)	〃	1,200	44.5	ボイラー用水用
東京都式根島	電気透析	200	45.6	地下かん水と飲料
〃伊豆大島	〃	1,000	47.4	〃
熊海市 初島	〃	200	48.3	〃 建設中
熊本旅行研究所(村郷町)	〃	200	48.2	〃
三菱化学(長崎) 三島工場	蒸気圧縮 多重効用	約2,000	31.6	製塩時のドレンと水道用水に利用
瀬戸田塩業組合	多重効用	約 300	〃	〃
仁尾塩田(徳島)	〃	約 200	38.10	〃
佐賀金属(鹿島)	逆浸透	5,000	47.10	工業用水の脱塩淨化に使用

地域別	容量($\text{m}^3/\text{日}$)	基数
クエート	24,550	27
ホンコン	180,000	6
バーズン諸島	152,150	10
オランダ	71,800	9
アメリカ	58,880	22
サウジアラビア	55,900	9
カタル	39,300	9
イタリア	35,800	11
リビア	34,700	5
アラソー	32,000	2

註 海水以外の水の淡水化を含む

註 建設中のものを含む

4. 研究開発の方向

海水淡水化は前節でみたようにかなり実用段階に達している。しかしながら、これは特殊条件のところであって、まだ普通一般のところでは、河川水に代りあるいはその不足を補って海水淡水化が行われるところまでは行っていない。この最も大きな障害は海水淡水化による水がまだ相当コストが高いことであり、いかにコストダウンを実現して行くかが海水淡水化の最大の課題となっている。

現状の淡水化コストは、条件によって大巾に異なるが、おおよそ1 m^3 当り100円前後が普通であり、わが国の水道料金（配水量を含む平均給水単価35～40円/ m^3 ）に比べはるかに高い。また、生産規模も1基当り数千 $\text{m}^3/\text{日}$ が普通であり、近い将来大量に不足するわが国の都市用水補給用としては、現在の技術水準では、まだまだ不十分である。

このようなことから、通産省では「海水淡水化と副産物利用」を大型工業技術研究開発制度（いわゆる大型プロジェクト）のテーマとして取り上げその研究開発を推進している。これは昭和44年度

から7ヵ年計画で約50億円の研究投資を予定し、多段フラッシュ装置の大型化と合理化によって、1㊦当り30円台のコストで淡水を生産する技術と確立することを目標としているものである。

そこで次に、このプロジェクトを例にとりて、海水淡水化のコスト引下げのための研究開発の考え方や方向を述べてみたい。

多段フラッシュ法では、エネルギー費および金利、償却などの固定費が淡水化コストの中でそれぞれ3分の1強と大きな比重を占めており、したがって、淡水化コスト低減のためには、より安いエネルギーをより少く使用する装置およびより一層建設費の安いあるいは耐用年数の長い装置を開発することが研究開発のポイントになる。

(1) エネルギー費の引下げ

①安いエネルギーを得る方法として火力または原子力発電の低圧蒸気の供給を受け、いわゆる二重目的プラントとして運営するのが得策であるが、このためには発電プラントと淡水化装置とがうまく連携運転できるシステムを開発する必要があり、このための最適制御系の研究が必要である。

②次の単位エネルギー当りの造氷効率(造氷比)を高めるためには、装置の形式、構成各部の構造、機能等の改善を行なって、エネルギー効率のよい高性能の装置を開発することが要求される。

大型プロジェクトではこのため、日産3,000 m^3 /日の造氷能力をもつテストプラントをはじめ、各種の実験装置を用いてこれらのデータを収集している。

(2) 装置建設費の引下げ

建設費を引下げるために、このプロジェクトでは、装置の大型化の技術と確立することによってスケールメリットを生かすことのほか、次の方法を追求している。

①伝熱管材料の安価なものへの置きかえ——多段フラッシュ装置には多数の伝熱管が使用されているが、高温の濃縮海水にさらされるため現在高価な材料が使われており、このため伝熱管材料の費用は装置建設費の40～50%にも達している。建設費を引下げるには、安くても熱海水の腐食に耐える優れた材料を開発する必要があり、このため、金属の耐食性をテストする装置を設置して多数の各種金属材料について腐食試験を繰り返している。

②缶体材料のコンクリート化——将来予想される大型装置では缶体(蒸発させる部屋)は巨大なものになり、化学プラントというよりはちょうどだだっ広いビルディングのような構造物になる。缶体を現在の鋼製からコンクリート製に置き換えることが製作もし易く、建設費も引下げられると考えられている。しかし今まで化学装置材料にコンクリートを使用した例がないので、海水の浸食作用や、熱、圧力に対する強度、気密性などを試験し、可能性と確かめる必要がある。このため、これらの基礎的な試験を実施するとともに、コンクリート製の多段フラッシュ装置も実際に試作して、海水の蒸発を行なわせる研究を実施している。

③装置のコンパクト化——これは装置内の循環海水の流速を高めることによって、単位造水量当りの装置の大きさを小さくすることである。高流速下でも十分なフラッシュ蒸発が行なわれるような技術を開発することが重要となる。

④装置型式の変更——従来の短管式蒸溜器を長管式に改めることを考えている。長管式は建設費が安いという点、動力費も節減できるが、製作技術がむづかしく、その性能も十分確かめる必要がある。

以上の③④に対しては、高流速長管式と呼ばれる新しいタイプのテストプラントを設置して研究している。

(3) その他経費の引下げ

①熱海水の腐食性を抑制し、スケール(垢石)の発生を防止するため海水の前処理が必要となるが、大量処理に適し、処理コストが安く、信頼性のある前処理方式を確立する必要がある。このため、脱気・脱炭酸 スケール防止実験プラントを設置して実証研究を行なっている。

②また、装置の電算機制御化、ポンプのタービン駆動化、設計および運転の最適化による経費引下げの研究を行なっている。

③さらに、副産物の回収利用として、淡水化装置から排出される濃縮海水から、ナトリウム、カリウム、塩素などの有用成分を有利に回収し、淡水化コストの引下げに役立てる研究も行なっている。

第8図 長期研究開発計画図

以上の研究は第8図の長期計画に従って実施しており、大部分は茅ヶ崎海岸に臨時に設置した臨海研究施設で研究している。

・この研究開発は全額国庫費により、通産省の東京工業試験所の基礎研究と民間企業7社に対する委託研究のほか、大学等の学識経験者の協力も得て官学民の密接な協力のもとに進められている。

年度	44	45	46	47	48	49	50
海水淡水化の研究	多段フラッシュ機構の解明 脱気脱炭酸スケール防止の研究 伝熱管材料テスト 塩体材料テスト 高流速長管式プラントテスト 最適化設計の研究 モジュールテスト						
副産物利用の研究		電気遠析法の研究 塩素等生成 カリウム回収の研究					

5. 諸外国での研究開発状況

(1) アメリカ

アメリカでは1952年に塩水法を制定し、内務省に塩水局を設けて国のインテグレーションのもとに研究開発を推進している。塩水局の研究方針は甚だ徹底的で可能と考えられるあらゆる技術的方法について理論的、基礎的な分野から、各種方式の実用化研究、さらには将来の大規模装置の開発計画に至るまで幅広い研究開発が行なわれている。同局の1971年度までに投下した研究費は約760億円に達し、公私立の研究所、大学、民間企業への委託研究という形で支出しており、その範囲は全米はおろか、イギリスやイスラエルにおよんでいる。研究施設としては、東海岸のライツビルビーチに臨海試験場があるほか、デモンストレーションプラントが、4地にも設置され、経済的な検討が行なわれている。塩水局のほかカリフォルニア州も淡水化についてかなりの研究投資をしている。

(2) イギリス

イギリスは古くから船舶用の淡水化装置を製作して来たが、最近各国で淡水化の研究が盛んになって来たので、政府は原子力公社に淡水化の研究を委託し、1965年から研究活動を開始している。研究投資額は5年間に約5億ポンドに達し、目標はまずアメリカ等に追いつき多段フラッシュ法のパフォーマンスを上げることにあり、次に長期目標として冷凍法、電気遠析法、逆浸透法等を開発することとしている。

(3) ソ連

ソ連では、逆浸透法について研究が進められており、とくに多重効用法による研究成果が多く発表されている。原子力多重目的プラントの検討も盛んに行なわれており、カスピ海沿岸のシェフケエンコに12万 m^3 /日の装置があるといわれている。

(4) フランス

原子力委員会事務局を中心として、薄膜蒸発多重効用法を主とした蒸発法の研究を行っており、電気透析法、逆浸透法等についても民間企業と共同研究を進めている。

(5) イタリア

国立の研究機関であるCNRはバリに総合パイロット実験場を建設し、1967年から淡水化の研究を開始している。特徴としては多段フラッシュ法に関する研究施設がなっており、その反面それ以外のプロセスについてはあらゆる種類のものを備えていることである。

(6) イスラエル

海水転換委員会を1950年に設置し、原子力二重目的プロジェクトについてアメリカと共同で検討している。また、冷凍法、逆浸透法についても多くの研究が行なわれている。