

海水淡水化

Desalination of Sea Water

外山茂樹*
Shigeki Toyama

1. 海と水

地球上の表面は71%が海である。ここに降り注ぐ太陽はやがて人類に恵みの雨をもたらす。マクロにみて海面から年間383兆 m^3 の水が蒸発するといわれる。このうち346兆 m^3 はそのまま海に降水するが、残りの37兆 m^3 が雲によって陸上に移動して降水する。陸地の年間降水量は99兆 m^3 であるから、実にその4割近くが天然の海水淡水化によるものである。

一方、人工的に海水淡水化が考えられたのは、海路で水を確保する方法としてであった。それは中世以降文化の発展に伴って、船による交通が頻繁に行われるようになってからである。当初はビヤ樽式の原始的なものであったが、19世紀末になると近代的な海水淡水化装置が作られるようになった。

一方、地球上の陸地では、年間平均降水量は990 mm であるが、地域によって極端に相違する。年間降水量が220 mm 以下のいわゆる乾燥地域でありながら、産油国ゆえに工業化を計画しているのは中東諸国で、人工的な造水を最も必要とする地域となっている。

降水量が過大または過小な地域は産業の発展はみられず、工業化が進んでいる地域は平均をやや下廻る、500mm 程度の地域に分布している。この中で我が国は年間降水量は平均 1,800 mm に達し、工業国としては多雨地域にある。しかしながら、風土、地勢から利水に限度があり、かつ人口の大都市集中によって地域的な水不足が予測されている。また、多くの島を領有するので、その水対策という問題をかかえているので、海水淡水化には早くから関心もたれていた。

2. 海水淡水化プラントの設置状況

上記のようなすう勢から、海水淡水化が本格的に陸上機器として都市用水を賄うようになったのは1945年

頃である。それはクエートやカタールなどの中近東地域で、当初は製塩などに使われた浸管式の蒸発缶であった。現在なお海水淡水化の主流を占める多段フラッシュ法は、英国グラスゴー大学のシルバー教授とウェストウェアガス社によって開発され、その1号機がクエートに導入されたのが1959年である。その後、海水淡水化プラントの導入は極めて急速であって、図-1のような推移をたどっている¹⁾。最近の統計²⁾によると、全世界で合計 1,000 万 m^3 /日の容量のプラントが設置されており、その国別分布を図-2に示す。これより、現在の海水淡水化プラントの60%以上が中東地域

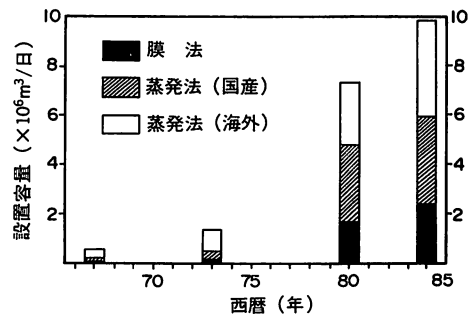


図-1 海水淡水化プラント設置容量全世界合計値の推移

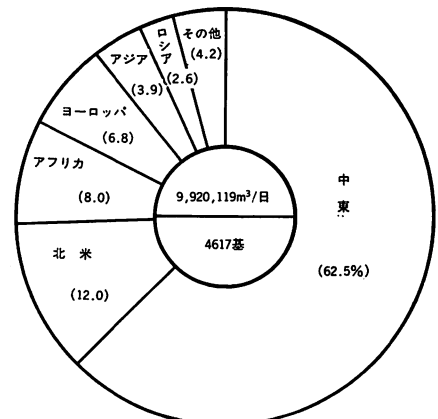


図-2 地域別世界の海水淡水化プラント容量 (1984年12月現在)

* 名古屋大学工学部化学工学科教授
〒464 名古屋市千種区不老町

表1 各種形式別海水淡水化プラント設置状況[単位 m³/日]

形 式	F	HTE	MSF	ST	VC	VTE	HYB	EVA	ED	RO	合計
全世界 [m ³ /日]	44018	107759	6705889	97457	205838	287420	22657	7471038	466559	1982522	9920119
国 産 [m ³ /日]	0	30192	3480130	0	5710	8070	537	3524639	39441	143057	3707137
占有率 %	.00	28.02	51.90	.00	2.77	2.81	2.37	47.18	8.45	7.22	37.37

F : 単段式フラッシュ蒸気 VTE : 多重効用垂直管式
 HTE : 多重効用水平管式 HYB : 2種以上の複合式
 MSI : 多段フラッシュ蒸発 EVA : 蒸発法小計
 ST : 浸管式 ED : 電気透析法
 VC : 蒸気圧縮法 RO : 逆浸透法

にあることがわかる。また、その方法別については後で具体的に説明するが、図-1に示すように現在なお蒸発法が大部分を占める。

蒸発法の中でも海水淡水化に適した多段フラッシュ蒸発法は英国で発明されたものである。その後、米国は1953年に塩水局 (Office of Saline Water:OSW) を発足させ、総合的な脱塩技術の開発を進めた。このような背景から、当初は英米勢によるプラントが主流を占めた。一方、我が国では1969年から工業技術院の大型プロジェクト制度によって海水淡水化の技術開発が官産学協力で進められた。折しも高度成長期の積極果敢な企業活動の波にのって、我が国のプラント生産のシェアを拡大していった。図-1の斜線は蒸発法のみに関する国産プラントの設置状況を示している。試作段階で英米が、大型の実用段階で我が国がいくこんでいる。現在競合する国は中東に近い欧州勢となっている。

3. 各種方法とエネルギー評価

3.1 各種方法別設置状況

海水淡水化の方法は、図-1のように大まかには蒸発法と膜法に分類されるが、さらに細かい形式別プラント設置状況の統計¹⁾が最近発表されたので、参考までにその一部をやや詳しく表1に示す。いろいろな内容を含んでいるが、ここでは掲げられている各種方法形式について説明する。

3.2 蒸発法

現在最も多く設置されている多段フラッシュ蒸発法の原理図を図-3に示す。海水は自然の温度で右から熱放出部の熱交換器に入り、大部分は熱を奪って海へ戻る。一部が前処理した後、熱回収部の熱交換器に導入される。海水は伝熱管の中を右から左へ流れ、その間伝熱管の外側に充満している蒸気を凝集し、自らは温度を上昇し t_{in} となって加熱器に入る。ここで $5\sim 6^{\circ}\text{C}$ 温度を高め t_{max} とし、第1段フラッシュ室に入る。第1段の室の圧力は温度 $t_{B(1)}$ の海水の飽和圧力となっており、海水が t_3 から $t_{B(1)}$ まで降下する熱量だけ水蒸発を発生して沸騰する。これをフラッシュ蒸発とよん

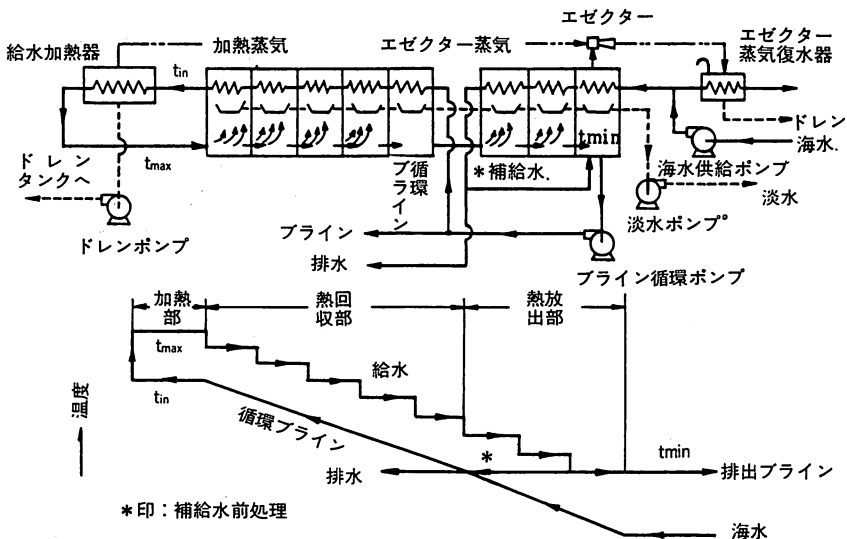


図-3 多段フラッシュ蒸発装置作動図 (ブライン循環方式)

でいる。1回のフラッシュではわずかしか蒸発しないので、逐次低温段へと流して沸騰を繰り返した後 t_{min} の温度で放出される。一方、蒸気は伝熱管外壁で凝縮して受皿に滴下し、淡水として取り出される。

加熱器の熱源は一般に蒸気を使用する。この加熱は海水の溶存成分の析出を防ぐため、最高海水温度は120℃以下で操作することが多い。このことは加熱に使用する蒸気は比較的低压でよいことになり、発電タービンの背圧蒸気を導入することができる。このように発電プラントと海水淡水化プラントを結びつけたものを二重目的プラントと呼んでいる。

二重目的プラントに導く背圧蒸気は、たとえ低压であってもお膨張して発電する余力をもっている。この余力分のエネルギーを生成淡水で除した値がいわゆるエネルギー原単位である。試算³⁾によると加熱に 1.97×10^4 kcal/m³、動力に 0.57×10^4 kcal/m³で、計 2.54×10^4 kcal/m³となる。比較のために、専用ボイラから加熱蒸気を供給する単一目的プラントの場合は、動力まで含めて 5.44×10^4 kcal/m³と試算されている。

多段フラッシュ法のほかには、第1段で発生した蒸気を第2段の加熱に用い、逐次繰返し蒸気の潜熱を利用する多重効用法がある。各段の蒸発缶の伝熱管が水平になっているのがHTEであり、垂直になっているのがVTEである。いずれも海水を液膜状に降下させて、伝熱を促進させる技術を適用して、性能の向上がはかられている。現在のところ、数百m³/日のものが多い。多段フラッシュ蒸発法ではユニット容量36,000 m³/日が最大級となっている。

3.3 膜法

膜法では逆浸透法が目ざされている。これは水は適すが塩分は透過させない半透膜を使って、浸透圧に逆って加圧して淡水を絞り出す方法である。これは含水性アセチルセルロース膜がすぐれた性能を示すことを発見して以来、一躍実用化の端緒が開けたものである。

この膜は不均質膜といわれ、膜表面に0.2~1μ程度の薄い密な層があって、ここで塩分の分離が行われ、残りの層はスポンジ状の支持層となっている。これに塩水の浸透圧を上廻る20~50kg/cm²の圧力を加えれば、淡水を透過させることができるから、操作は極めて簡単で、装置も蒸発法に比べればはるかにコンパクトである。ただ膜の目詰まりを防ぐために繊細な前処理を必要とする。長時間使用するとスポンジ層がつぶれて性能が劣化するので、膜の寿命が問題となる。しかし、複合膜や中空繊維状の膜など優秀な膜が開発さ

れて、小型プラントでは蒸発法をりょうがしようとしている。

逆浸透法で海水淡水化のためのエネルギーは、加圧するための動力が主なもので、動力は海水学会の調査³⁾によると、8~8.4 kWh/m³となっており、発電効率を考慮して熱量ベースにすると $1.8 \sim 1.9 \times 10^4$ kcal/m³となる。濃縮された加圧海水を排出するとき動圧変換をすると、5 kWh/m³程度までになることが期待されている。

この他、イオン交換膜を用いる電気透析法がある。これは製塩技術分野で開発されたもので、淡水化には塩分濃度の低いかん水に有利とされている。また操作も簡単である。

4. 都市施設としての海水淡水化

現在、生活用水を海水淡水化で賄っている地域は主に中東である。なかには砂漠の中に忽然と出現した都市も少なくない。このような場合は電気も新たに供給しなければならない。だから発電と海水淡水化の二重目的プラントは現実的なシステムである。

だが、海水淡水化が迎え入れられるための次の段階は、既存の河川水を補う形で、かつ河川開発と対比されることになるであろう。そこで河川開発と海水淡水化との関連を説明するために、図-4を掲げた。実線は河川開発が全く行われていない原始的な川の流況曲線である。流況曲線は年間の1日当たりの流量の多い順に並べたものである。水は毎日必要とするものであるから、河川の最小流量 F_0 が必要量を下廻ると支障を来すことになる。そこで貯水池を作る。これが河川開発でダムを作ることになる。開発の初期は鎖線で示すように割合と楽であるが、開発が進むにつれて点

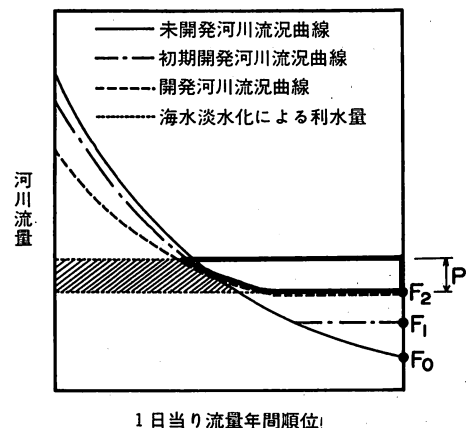


図-4 河川開発と海水淡水化プラント導入との関連

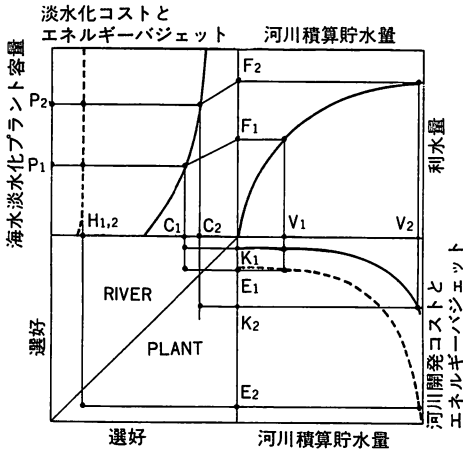


図-5 海水淡水化と河川開発の選好基準概念図

線のように、たまにしか降らない大雨まで貯めなければならなくなる。

一方、海水淡水化を導入した場合は、平行な線の幅がプラントの容量Pである。これにより海水淡水化プラントは、河川開発が進んで、流況曲線が右から左にかけて平らな部分が増えていったとき程有効といえる。新たに開発した河川水は別として、全部ならせば、海水淡水化はコスト高である。だから河川の流量が多いときは停止する。したがって太い線で囲まれた部分だけ稼動することになる。ただ、斜線で囲まれた部分は、海水淡水化を導入したことによって、河川開発を行わずして使えるようになった河川水である。ここで海水淡水化容量としたPは、下水の再生水のような、ほかの造水施設でも同じように考えることができる。

以上のことをふまえて、海水淡水化と河川開発を比較評価するダイアグラムが提案された。⁴⁾これを図-5に示す。まず、第1象限の曲線は河川の開発曲線である。横軸は貯水池の容積(V)で、縦軸はそれによって得られる河川水量Fである。直線とはならず漸近線状になることは、図-4の流況曲線からも理解できよう。

同じ横軸で、開発水量当たりの河川開発費(K)及び消費エネルギー(E)を縦軸にとった曲線を第4象限に示す。そして第2象限には、海水淡水化プラントの容量(P)に対する水コスト(C),とエネルギー消費(H)を示す。下ツキで示すケース1,2の値をたどれば、第3象限でその優劣を比較することができる。ここで、河川開発水量Fと、海水淡水化容量Pが同一値で対比していないのは、図-4の流況曲線で説明したように、造水によって河川開発を伴わない利水量が得られるので、この分を稼動造水量で年間にならして考

えるためである。ここで示したような曲線を作るには数多くのケーススタディを伴う。実際にはそんなにしないであろうが、ケーススタディを行うための筋立てを示したものである。

5. 今後の展望について

本稿は大型プロジェクト制度によるエネルギー関連の技術開発の1つという観点から解説した。海水淡水化のプロジェクトは高性能の多段フラッシュ蒸発装置を開発することを目標とし、終了してからすでに10年近い年月を経ている。その間実用化も進展し、蒸発法に関する技術は成熟期に達している。一方、新しい技術として逆浸透法が着目され開発が進められている。これも近い将来成熟期に入ると思われ、このとき蒸発法と逆浸透の選定基準が定まるであろう。具体的な大型プロジェクトの成果⁴⁾やその後の動向⁵⁾は、それぞれ成書もあるので、さらに詳しい内容はそれらを参照されたい。

引用文献

- 1) 米国内務省 OWRIT Inventory Rept. No. 3~6
- 2) Intl. Desalination Assoc. ; Desalting Plant Inventory Rept. No. 8, "Plant with a Unit Capacity of More than 100m³/d as of Dec. 31, 1984"(1985)
- 3) 日本海水学会 ; "海水淡水化トータルシステムの評価調査報告書"(1977)
- 4) 外山茂樹 ; Desalination 40, 297 (1982)
- 5) 日本産業技術振興協会編 ; 海水淡水化技術 (1978)
- 6) 造水促進センター編 ; 造水技術 (1983)

