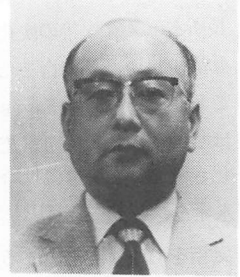


小温度差利用による海水淡水化



Utilization of Small Temperature Difference Energy Resources for Sea-Water Desalination

宮 武 修
Osamu Miyatake

1. はじめに

わが国は、古来、豊葦原の瑞穂の国と美称されるごとく、年間降雨量1600mmを持つ屈指の多雨国で、いかにも水に富まれているかのように考えられてきたが、人口密度が高いので一人当りの降雨量は米国の $\frac{1}{2}$ にすぎない。また、中央に山岳地帯をもつ細長い国土のため、河川は急勾配で短いという地形上の不利に加え、人口の異常な都市集中と工業の急速な発展に水利権問題も絡み、局地的な水不足は年中行事化されるに至っている。

陸上での究極的な水資源の開発と水の有効利用は、今後とも積極的に推進すべきであるが、海水淡水化についても、水飢饉時の“非常食”確保の手段さらには最終的な水不足解決の手段として、長期的展望に立って検討していくべきであろう。

海水淡水化プラントを思うまま輸入できる中近東産油国は別として、イスラエル^{1)~3)}では水資源の完全国有化を基盤とした独特の水行政のもとに、徹底した再生水利用と灌漑法改良、地下帯水層を利用した水の蓄積と回収などを行い、香港^{4),5)}では雑用水として海水の給水、総有効貯水量5億 m^3 の淡水湖の建設を行っており、両国とも高い安心料を払って海水淡水化装置を導入した有機的なトータル水システムを完成させている。これらの水に対する取り組み方は参考とすべき点が多々あるように思える。

2. 海水淡水化の動向

世界の陸上用海水淡水化装置の全造水容量の1950年からの推移は、10年毎にほぼ9倍となる指数関数的増加傾向を堅持しており^{6),7)}、1980年の推定値では714万 m^3 /日に達している。海水淡水化の方法としては、蒸発法と膜法(逆浸透法及び電気透析法)が主であり、造

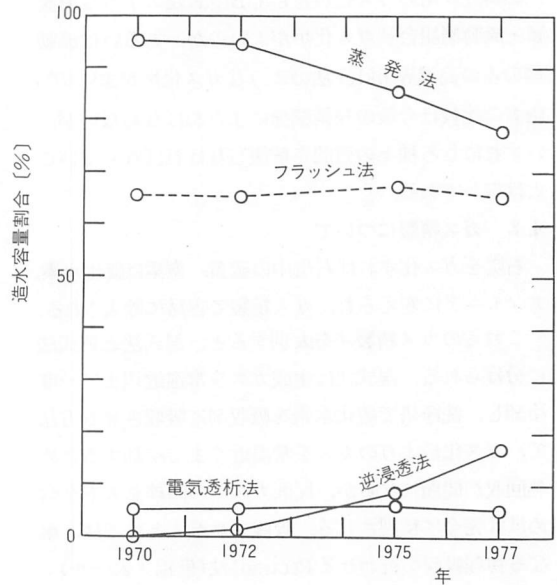


図-1 各方法の造水容量割合の推移

水容量割合の推移は図-1のようになる。

蒸発法は、割合として漸減の傾向にあるものの、依然として主流を占めており、蒸発法のなかでもフラッシュ法は常に全造水容量の $\frac{2}{3}$ を占めている。半透膜を利用する逆浸透法は従来は地下かん水の脱塩を対象としていたが、(財)造水促進センターが進めている国産膜による海水直接脱塩の開発研究⁸⁾の進展によっては、増加傾向にさらに加速をかける可能性があり、将来性が期待されている。冷凍法は固液操作の困難性などから実用化には至ってなく、実質的な数字としては現われてこない。

各方法によるエネルギー原単位を表-1に示した⁹⁾。逆浸透法は相変化を利用しない単純な分離であるので、最少のエネルギー原単位となる。蒸発法は大容量に適し、信頼性も極めて高いが、造水のための単一目的又は発電用のスチームタービンの背気又は抽気を利用した

*九州大学生産科学研究所 教授

発電と造水の二重目的だけでは石油価格高騰に打勝つことは不可能で、さらに高性能化を図るとともに、温海水あるいはガスタービン、ディーゼル機関の排気廃熱の利用に方向を転ずる必要性に迫られている。例えば、ごみ焼却工場でごみ発電に供した 2.5Kg / cm³ の蒸気を、公営事業のよしみで造水側に無償で供与するとすれば、蒸発法のエネルギー原単位は (0.18~0.44) × 10⁴ kcal / m³ と経済性が高まる。

蒸発法はさらにフラッシュ法、多重効用法、蒸気圧縮法、太陽熱利用法などに分類されるが、以下には小温度差利用の場合に主として対象となるフラッシュ法に絞って話を進めていくことにする。

3. フラッシュ法

ある温度の液をその温度に対応する飽和蒸気圧以下に急減圧すると、液は保持していた顕熱の一部を蒸発潜熱に変えて瞬間的な断熱沸騰を行う。その結果、液温度は減圧した圧力に対応する飽和温度へ向って低下する。この現象をフラッシュ蒸発又は自己蒸発という。

この現象を応用した多段フラッシュ蒸発装置の一般的な作動図を図-2に示した¹⁰⁾。ブライン(濃縮海水)最高温度 t_{max} は硬質スケール (CaSO₄ · ½ H₂O) の析出防止のため、通常 120℃以下に抑えられる。

製造淡水量 P と給水加熱器における加熱蒸気量 V には大まかに次の関係がある。

$$\frac{P}{V} = 0.86 \frac{t_{max} - t_{min}}{t_{max} - t_{in}}, \quad (t: \text{温度})$$

この P/V は造水比と呼ばれ(加熱蒸気の状態が考慮されていないので便宜的なもの)、造水比を大きくすると運転費は安くなるが、凝縮器の所要伝熱面積や段数の増加などで設備費が高くなり、最適造水比が存在する。最適造水比は運転費と設備費の相対関係により定まり、従来は8程度と考えられていたが、最近の試設計では石油価格高騰によって14を越えており、投資額をふやしても装置を高性能にした方がよくなってきている。

フラッシュ蒸発装置の出現は比較的新しく、1948年、1953年にそれぞれ単段、2段の米国特許がおりている¹²⁾、

表-1 各方法のエネルギー原単位

	蒸発法	逆浸透法	電気透析法	冷凍法
標準的な操作による海水淡水化のエネルギー原単位 (10 ⁴ kcal / m ³)	(二重目的) 2.54 (単一目的) 5.54	1.8~1.9 (1.0)*	3.73	3.16
省エネルギー方策をとったときのエネルギー原単位 (10 ⁴ kcal / m ³)	排熱利用温海水 67℃ / 0.475	塩分濃度 2,000 ~ 6,000ppm / 0.498 ~ 0.860	塩分濃度 2,000 ~ 3,000 ppm / 0.226 ~ 0.543	LNG冷熱利用 / 0.679 ~ 0.905
	排熱利用温海水 43℃ / 1.569	排水圧の動力変換 海水 / 1.13 ~ 1.36		

* 温度調節用スチーム

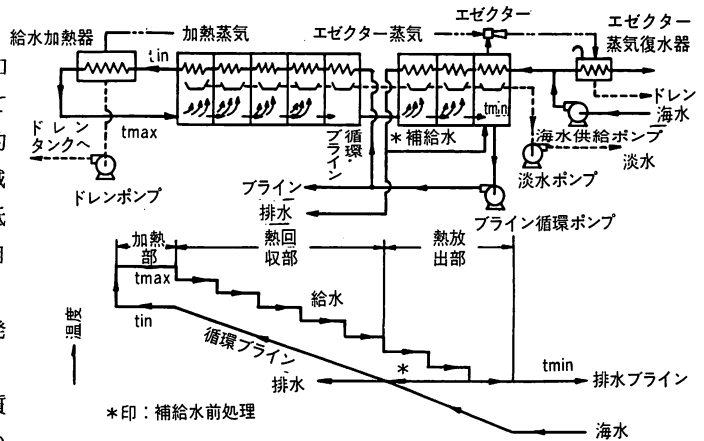


図-2 多段フラッシュ蒸発装置作動図

¹³⁾ 1957年にクエートに容量2300 m³/日の4段装置が建設されて、フラッシュ蒸発法海水淡水化時代の幕開けとなった以後、1975年には単機容量3万 m³/日の28段装置⁴⁾へと急速に大型化され、1977年の工技院大型プロジェクトでのモジュール試験¹⁰⁾が完了した時点で、単機容量10万 m³/日の装置を製作することが可能となった。その間、日本メーカーのプラント輸出(殊に中近東向け)は目覚しく、多段フラッシュ蒸発装置だけで造水容量280万 m³/日の実績(昭和55年1月1日現在)¹⁴⁾を持っている。

このようにフラッシュ蒸発装置は海水淡水化装置として開発されてきたが、最近では地熱熱水から蒸気を取得し、発電やバイナリーサイクルの低沸点媒体の加熱を行う場合にも用いられている^{15), 16)}。

4. 小温度差利用の場合の問題点

工場内で冷却水として使用し、又は排ガスなどと熱交換し、海水温度 T_{sea} から T_{fi} まで昇温した温海水を多段フラッシュ蒸発装置に直接導く図-3に示した場合を例にとって考えてみることにする。

(1) 製造淡水量の減少の問題

温海水温度が低ければ装置内の全液温度降下 ΔT_i が小さくなるので、供給温海水量 F に比して製造淡水量 P は減少する。図-4は P/F と ΔT_i の関係¹⁷⁾ で、 $\Delta T_i = 10^\circ\text{C}$ では温海水の1.75%しか淡水が得られなくなる。

したがって、単位造水量当り多量の温海水を必要とすることになり、ポンプ動力の増大が運転費を上げてくる。

(2) 溶存空気放出の問題

補給海水を最終段に供給し、そこで脱気を行う従来方式が適用できないので、未脱気の供給海水から第1段(第1回目のフラッシング)ではほとんどの溶存空気が放出し、凝縮器の性能が低下するとともに、低温低圧における比容積の著しい増大で大容量の抽気系統が必要となる。供給温海水の単位体積当りの放出溶存空気の体積 G と T_{fi} の関係は図-5のようになる¹⁸⁾。 $T_{sea} = 20^\circ\text{C}$ 、 $T_{fi} = 35^\circ\text{C}$ の場合、温海水の体積の30%もの体積の溶存空気が放出されることになり、第1段での液温度降下 $\Delta T = 2^\circ\text{C}$ で凝縮伝熱係数を1/4程度低下させる。

各段の不凝縮気体を最終段でまとめて抽気する従来方式では全段の凝縮器性能を低下させる危険性があり、少なくとも第1段は別系統で抽気を行うか、温海水に脱気前処理を施すべきである。

(3) 負荷変動時の不安定性の問題

温海水は段間を蒸気圧の差で流れるので、各段の液位は温度変動に対して極めて敏感である¹⁹⁾。液位が高くなると、蒸気が弱まるばかりでなく、製造淡水のトレイを浸すようにもなる。また低くなると段間オリフィスを蒸気が吹き抜け、2段が1段の機能しか持たなくなる。したがって各段を所定の一定液位に保持する必要がある。

排熱利用の場合には温度変動も大きいので、温度制御と最終段でのみ液位制御を行っていた従来方式に変えて、各段間に可変オリフィスを用いた高度の液位制御システムを導入しなければならないであろう。

(4) 蒸発が弱まる問題

低液温度になるにつれてフラッシュ蒸発は弱くなる。したがって次に述べるような適切な蒸発促進が施され

なければならない。

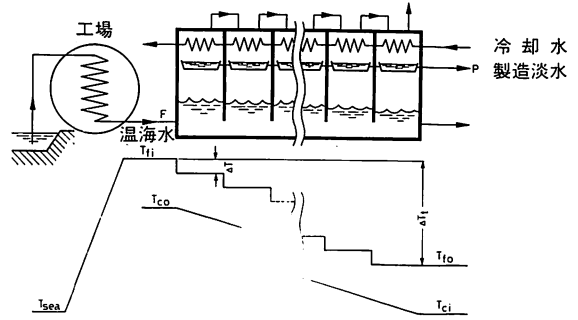


図-3 温海水利用多段フラッシュ蒸発装置作動図

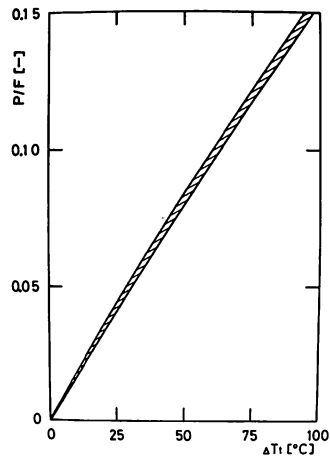


図-4 製造淡水量と供給温海水量の比と全液温度降下の関係

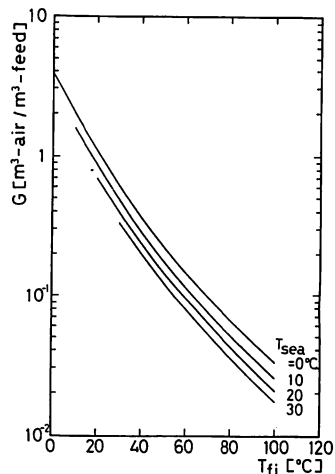


図-5 供給温海水の単位体積当りの放出溶存空気の体積と供給温海水温度の関係

5. フラッシュ蒸発の促進法

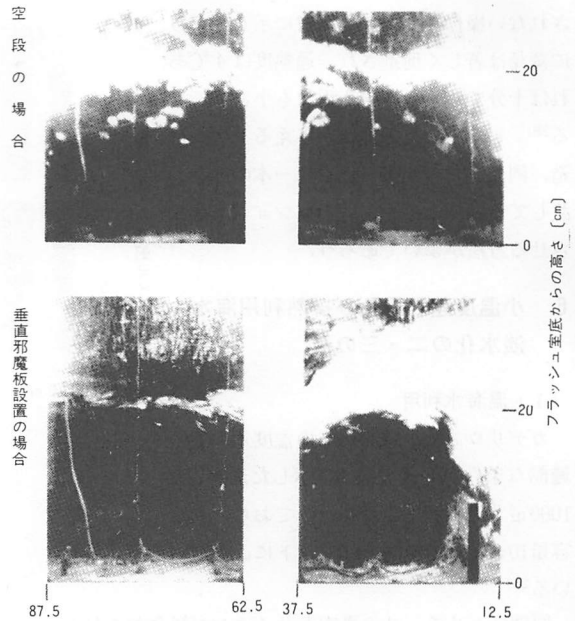
各段での気泡発生を伴う蒸発は、液が飽和温度に達する以前に、非平衡状態で終結する。

この非平衡現象は、塩分による沸点上昇、蒸気デミスター及び凝縮器管束の流動抵抗とともに、各段の凝縮器の伝熱推進温度差を低下させる要因となり、設備費の $\frac{1}{3}$ ~ $\frac{1}{2}$ 程度を占める高価な凝縮器の伝熱面積を増大させることになる²⁰⁾。

そこで、従来からフラッシュ室内に種々の蒸発促進器の設置が試みられている。気泡核を宿すための多孔板又は金網を設置したもの、下流で液位を低くするための垂直板又は溢流堰を設置したもの、乱れを促進するために室底にルーバー板を設置したり室底から別の液を注入したもの、底流液を蒸気相に注ぐ熱サイホンを設置したものなどがある。これらのデータを総合的に整理して検討してみると、気泡核を供給しても、乱れを促進しても、下流で液位を下げて、それらの効果はほとんど無いということがわかる²¹⁾。その理由は、気泡核が十分存在する気泡成長域は安定に存在しており、そこに熱い液が入ってくると自ずとフラッシングが開始するし、乱れの促進と局所的な液位の低下は未蒸発の熱い液と既蒸発の冷たい液の混合を促し、蒸発のポテンシャルを極端に下げってしまうためである。これらのことは、人為的に気泡核を供給した多段フラッシュ蒸発の実験²²⁾、液の攪乱が生じた状態下での蒸発は攪乱のない蒸発に比べて弱くなるプール水のフラッシュ蒸発の実験²³⁾からも立証できる。

フラッシュ室底部にある液位をもって流動する液の蒸発促進には、熱い流入液を蒸発が終った冷たい液と混合させないように、そのまま液表面近傍に送り出すことが肝要である。

図-6は、フラッシュ室長を実用装置の $\frac{1}{2}$ 以下の1mとした場合の液温度60°Cにおけるフラッシュ蒸発現象の写真²⁴⁾である。フラッシュ室に何も設置しない空段の場合には、熱い流入液噴流は上層の冷たい液を巻き込み温度低下し、その一部が下流仕切板に沿って上昇して、液表面近傍を逆流しながら弱い蒸発を起こす。垂直邪魔板を設置すると流入液は直接液表面近傍に達するので、液温度が40°Cになっても激しい蒸発を誘起



流入オリフィスからの距離 [cm]
過熱度 = 2.6°C, 液流量 = 7×10^4 kg/h・m幅

図-6 多段フラッシュ蒸発現象
(垂直邪魔板設置の効果)

させることができる。このように邪魔板設置の効果は著しいが、液温度が高くなるにつれ、また液流量が大きくなるにつれて、空段における流動パターンは、流入オリフィス近傍の気泡成長によって、邪魔板設置と同様な流動パターンに変わってゆくの、邪魔板設置の効果はしだいに小さくなる^{24), 25)}。

以上の考察に基づけば、過熱液をノズルから蒸気相に直接放出してやると、液位に起因する蒸発抑制から解放され、液の混合も軽減でき、また液柱は内部の気泡成長により自ら微粒化するので表面積も増大し、急激でより完全な蒸発が誘起されると考えられる。

長い円管を通して過熱液を放出した実験を液温度40~80°Cで行った結果^{26), 27)}、適切な操作条件が選ばれるならば、従来方式の多段フラッシュ装置内の蒸発速度に比して400倍の蒸発速度が得られることがわかった。しかし液のフラッシュ室内滞留時間は従来方式の $\frac{1}{100}$ と極端に短いので、その間に十分な数の気泡核が発生しにくいことと、気泡が成長しても流れに押し流されて(バーナーの炎の吹飛びに似て)後続の液に気泡核を与えるように作用しにくいことで、十分な蒸発を誘起させるためには一般的に10°C以上の過熱度を必要とする。

液の電解により人為的に気泡核を供給すると、推奨

されない操作条件下でも図-7に示したように蒸発は著しく促進され、過熱度は4℃あれば十分であり、非平衡現象も小さくできる²⁸⁾。したがって気泡核を与えるノズル構造、例えばノズル出口近くに一本の針金を渡してその面上でキャビテーションを起こさせる方法がよいであろう。

6. 小温度差利用及び排熱利用海水淡水化の二・三の例

(1) 温海水利用

ガデリウス社が原海水との温度差7℃の過酷な条件のもとで図-8に示した造水容量1000m³/日の概念設計を行っており、造水容量10m³/日のテストプラントによる実験を完了している²⁹⁾。

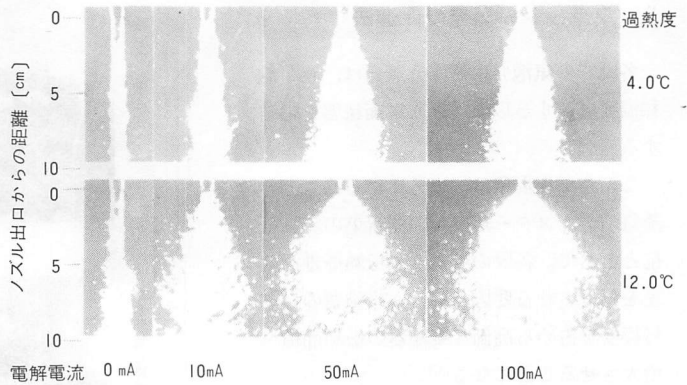
原理はトリチェリの真空とサイホンが組合わされたもので、脱気器と蒸発器を10mの高さ近くにおき、まず温排水を脱気器に導き飽和蒸気圧よりやや高い圧力で脱気し、放出溶存空気は降水管に生ずる渦のガス吸入現象を用いて搬送して底部で分離し、冷却水系統に設けられた水エゼクターで抽気する。脱気した温海水は多段フラッシュ蒸発装置に導き淡水を得るというものである。造水容量1000m³/日の設備費は取水設備費を除いて3.5億円程度となり、造水コストは図-9に示したように温海水と冷却水の温度差が7～18℃に対して310～150円/m³となっている³⁰⁾。運転費は電力費を10円/kWhとして算出しているの、現時点では値上の比率だけ運転費が上昇する。温度差20℃以上が得られる製鉄所、石油化学工業では検討するに十分な価値がある。

(2) 海洋温度差利用

フィンランドのNord-Aqua社は造水容量2500m³/日の多段フラッシュ蒸発装置の概念設計を行っており、図-10は500m³/日のそのテストプラントの写真で³¹⁾、やはり大きな脱気器が付設されている。造水コストは温海水利用の場合と同様であると考えてよからう。ただ注意しなければならないのは、造水コストは稼動日数に大きく依存しており、このような自然エネルギー利用で温度差の大きい季節のみの間欠運転を行う場合には、造水コストが大幅に上昇することである。

(3) ごみ焼却熱利用

オランダのロッテルダムに図-11に示したごみ焼却・発電・造水の三重目的のプラントが稼動している。6基の焼却炉で6×400t/日のごみを処理し、2基の背



ノズル口径=8.15mm, 液流速=7.6m/S

図-7 スプレーフラッシュ蒸発現象 (気泡核供給の効果)

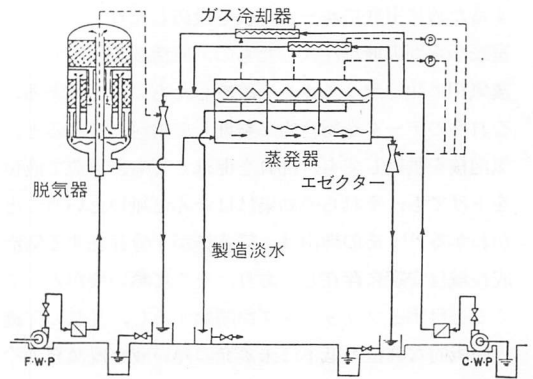


図-8 温海水利用多段フラッシュ蒸発装置

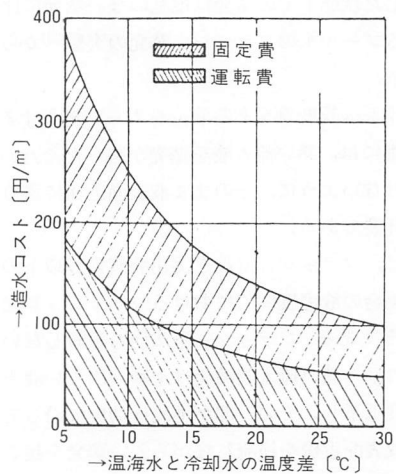


図-9 温海水利用の場合の造水コスト

圧タービン、1基の復水タービン発電機で55MWの発電を行い、3基（さらに2基増設可能）の多段フラッシュ蒸発装置で $3 \times 10,800 \text{ m}^3/\text{日}$ の淡水を得るものである³²⁾。

このようなごみ焼却熱利用の場合に造水コストは、稼働日数310, 195, 72日のそれぞれの場合に、189, 256, 564円/ m^3 となる³³⁾。算出基準は、蒸気費としては蒸気供給設備の年間経費の海水淡水化プラントの分担分、電力量としては買電12円/kWh、ごみ発電からの供給電力5円/kWh（売電してもこの程度）である。新たなダム開発による水コストは100円/ m^3 以上にはなっているが、温水を体験して水の価値意識を変えなければ、造水コストは高いという認識が先に立ってしまう。

(4) 太陽熱利用

すでにギリシャ、インドなどの各地で実用装置が操業中である。わが国でも(財)機械システム振興会が、瀬戸内海の屏風島に試験研究プラント（写真は本誌第1巻、第1号、31頁の図3に示されている）を設置して、技術とシステムの開発に当たっている。図-12は水盤型と呼ばれるその断面図であり、太陽熱で水盤内の海水を蒸発させ、ガラス屋根の裏側で凝縮させた水をトラフに集めるという構造、運転操作ともに簡単なものである。造水容量は年間平均で $1 \text{ m}^3/\text{日}$ 、雨水併用で $2 \text{ m}^3/\text{日}$ であり、集熱面積は 600 m^2 、集雨面積は 880 m^2 （集熱面積を含む）である。

運転費は極めて安い、造水量は年間平均 $1.5 \text{ l}/\text{m}^2/\text{日}$ なので広大なスペースを要し、そのプラントで約3千万円かかり、造水コストは補助率70%でも $550 \sim 600 \text{ 円}/\text{m}^3$ となる。したがって設備費の削減が重要な課題である。この地の年間平均降雨量は 1185 mm なので、 880 m^2 の集雨面積を利用して雨水を補収効率 \times タンク受入効率 $=70\%$ で貯めると $2 \text{ m}^3/\text{日}$ が確保できる。乾燥地を除いては、この雨水を貯めるという原始的な方法に分があるように思える。

7. おわりに

以上、小温度差利用の海水淡水化について、その背景を若干挙げて記述してきたが、多分に自己中心的な表現になり、客観性を失ったのではないかと危惧している。

排熱利用を含めた海水淡水化トータルシステムについては、あらゆる角度から詳細な検討がなされている報告書^{34), 35)}も出ているので、ご一読されることをお

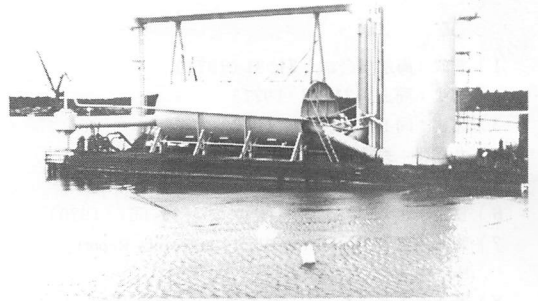


図-10 海洋温度差利用テストプラント

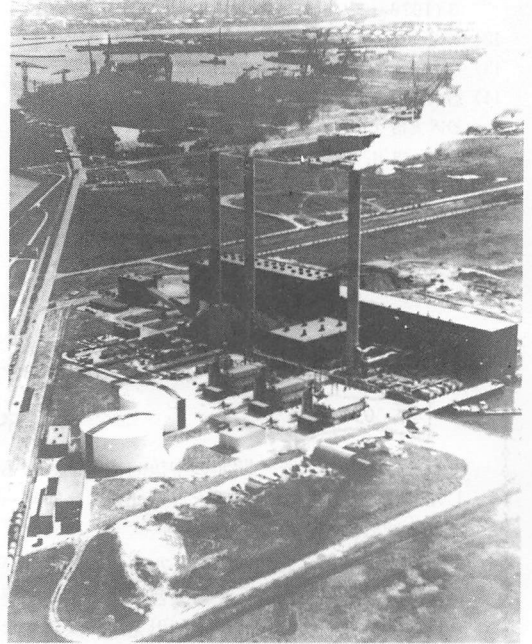


図-11 ごみ焼却・発電・造水の三重目的プラント

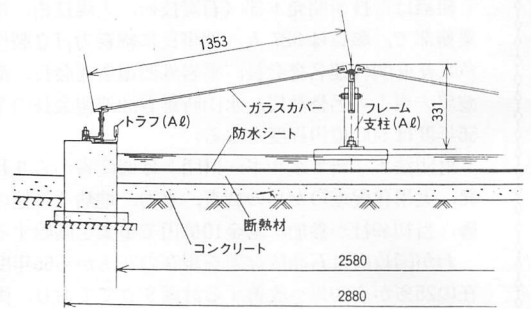


図-12 太陽熱利用海水淡水化装置

勧めする。

文 献

- 1) 宮武：海水学会誌，31, 31 (1977)
- 2) 宮武：同上，31, 73 (1977)
- 3) 宮武：同上，31, 131 (1977)
- 4) 九経連：香港海水淡水化プラント等視察報告(1975)
- 5) 九経連：香港における総合水行政視察報告(1979)
- 6) 宮武：ケミカル・エンジニアリング，15, 661 (1970)
- 7) 米国内務省：Desalting Plants Inventory Report, No. 4 (1972) ~ No. 6 (1977)
- 8) 造水促進センター：逆浸透法による海水淡水化について(1979)
- 9) 外山：化学と工業，31, 70 (1978)
- 10) 産技振協：海水淡水化技術(1978)
- 11) 宮武：造水技術講演会要旨(造水促進センター)，3 (1978)
- 12) Kivgan, J. : U.S. Pat., No. 2441361 (1948)
- 13) Worthen, G. : ibid., No. 2613177 (1953)
- 14) 造水促進センター：日本メーカーの陸上用脱塩設備設置実績(1980)
- 15) 相川，福田，田原：三菱重工技報，15, 175 (1978)
- 16) 森：エネルギー・資源，1, (2), 15 (1980)
- 17) 宮武：温排水利用による海水淡水化システム技術開発セミナーテキスト(フジテクノシステム)(1978)
- 18) 宮武，田中，橋本，富村：海水学会誌，32, 183 (1978)
- 19) 佐藤，伊ヶ崎，外山：化学工学論文集，4, 342 (1978)
- 20) 宮武：化学工学協会編化学機械技術(丸善)，81 (1974)
- 21) 宮武，藤井，田中，中岡：海水学会誌，28, 386 (1975)
- 22) 宮武，田中，藤井：同上，29, 228 (1976)
- 23) 宮武，藤井，田中，中岡：化学工学論文集，1, 393 (1975)
- 24) 宮武，藤井，橋本：同上，1, 454 (1975)
- 25) 宮武，橋本：同上，6, 536 (1980)
- 26) 宮武，富村，井手，藤井：機械学会論文集，B編，45, 1883 (1979)
- 27) 宮武，富村，井手，湯田：同上，投稿中
- 28) 宮武，富村，井手，片山：第17回日本伝熱シンポジウム講演論文集，D 201 (1980)
- 29) 岩本，川上：海水学会誌，30, 292 (1977)
- 30) 岩本，川上：造水技術，3(4)，42 (1977)
- 31) 川上：低温温差エネルギーの有効利用に関する研究成果報告書Ⅱ(機械学会)，129 (1980)
- 32) 石崎：造水技術，5(2)，43 (1979)
- 33) 造水促進センター，高性能多段フラッシュ蒸発法実用化調査報告書(1979)
- 34) 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(1976)，(1977)
- 35) 造水促進センター：海水淡水化トータルシステムの研究成果報告書(1977)

話の泉

新エネ機構が発足

石油代替エネルギー開発の中核的推進体となる官民合同の「新エネルギー開発機構」が10月1日に発足した。また民間側の受け皿となる「新エネルギー財団」も発足し、21世紀に向けて新エネルギー技術開発に取り組む体制が整った。

新エネ機構は「石油代替エネルギーの開発及び導入の促進に関する法律」(55年5月30日公付，施行)に基づいて設立された。石炭鉱業合理化事業団を廃止しその業務を一部継承するが，主業務は①新エネルギー技術開発(石炭液化，熱水利用発電，深層熱水供給システム，太陽光発電，産業用ソーラーシステムなど)②地熱資源開発(開発にかかわる債務保証，地熱資源の賦存状況調査，地質構造調査)③海外炭開発(探鉱資金の融資，開発にかかわる債務保証，開発可能性調査にかかわる補助金の交付，探鉱のための地質構造調査)，の3つとなっている。

組織は，技術開発本部(石炭技術，太陽技術，地熱技術の3グループと立地対策室)，地熱調査部，企画業務部で，職員は327人。理事長に綿森力日立製作所副社長，運営委員に土光敏夫経団連名誉会長(委員長)，芦原義重関経連名誉会長，平岩外四電事連会長，池浦喜三郎興銀頭取，円城寺次郎日本経済新聞顧問，斯波忠夫東工大名誉教授，永山時雄石油連盟会長の7人。初年度予算は365億円(新エネ事業176億円)で，56年度は600億円程度となる。

財団法人「新エネルギー財団」は通産省から9月29日付で設立許可がおりた。主業務は新エネ技術の開発，実用化促進のための調査，水力，地熱その他のローカル・エネルギーの開発，利用に関する調査研究等。当初49社が参加，基金10億円で事業を開始する。55，56年度の事業規模は86億を予定している。

わが国政府は石油依存率を現在の75%から65年度には50%以下とし，非石油の代替エネルギー比率を現在の25%から50%へ改善する計画を立てており，両組織はこの実現にむけて取り組むことになっている。

(K)