

# 沖 縄 の 水 資 源

## 5. 八重山群島・黒島の水

～離島における水問題と塩水の淡水化について～

小西泰次郎・野間泰二

### まえがき

第三次沖縄水資源開発調査技術指導として 沖縄本島北部地区に向け渡航準備に当たっているとき 琉球政府企画部から一通の手紙を受取った。それには本島北部地区調査の合間に 八重山群島竹富町所属の小離島である黒島の水を調査してほしいという要請書であった。

竹富町から琉球政府へ当たった要望書には ある高名な教授の「黒島に地下水あり 調査を要す」という視察報告が添えてあり 淡水地下水の取得も可能であろうという趣旨のものであった。

沖縄は大小合わせて60有余の島々から成立っているので 小離島における水の問題は毎年どこかの島でおこっているようで そのために琉球政府では 建設局工事課に調査用兼水源開発用のボーリングマシンと人員をそろえて水資源調査に当っており この島に対しても1963年に井戸調査および電気探査 1966年に試錐が行われ その結果から井戸による地下水の取得はむずかしいという結論に達していた。しかし島の人々にとっては水は死活問題であり この視察報告により 新たな力をえて地下水調査の要望にのり出したのはもっともな話で そこで琉球政府は 私たちに対する調査の要請となったも

のである。

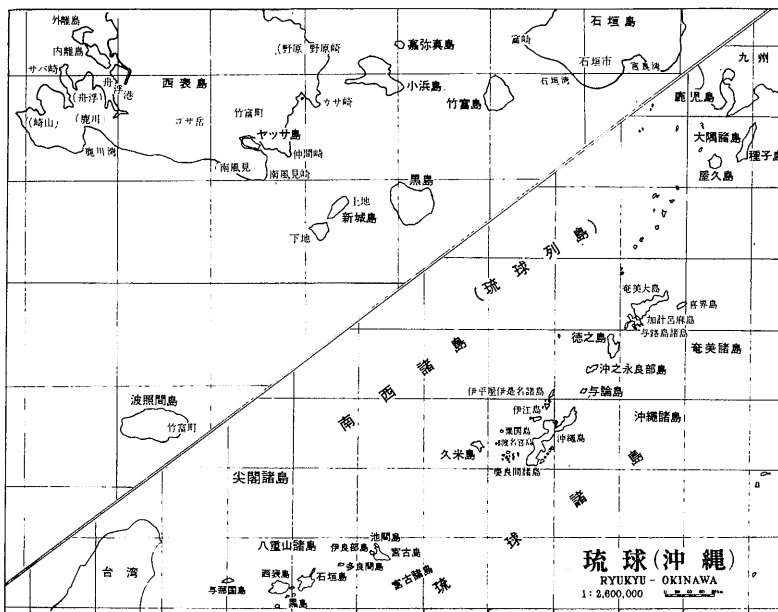
離島と一口にいても大小さまざまで またその地形地質も違っているので 地下水取得の可能性を判断するのはなかなかむずかしいが 島の大きさ 地形とくにその高さおよび地質の組み合わせにより およその判断はつくものである。沖縄本島の調査においても 本島周辺の離島の調査は 伊江島をはじめ津堅島 平安座島 古宇利島 瀬底島など多数の島々をみてきたが 地図で見る限り また話を聞いた限りでは 黒島の地下水取得の可能性については すこぶる疑問を抱いていたものであるが 実際に島に渡って調査してみても 離島の水の窮状とそれに関していろいろと学ぶことができた。

沖縄本島北部地区を調査した際に 本部半島の渡久地港からすぐ近くの瀬底島に渡ったが この島とそれからさらに 3km 沖合にある水納島では 住民の間では「おはよう」とか「今日は」という挨拶の代わりに「水はどうですか」という言葉が 挨拶がわりに使われる習慣ができてしまっているということであるが 真偽はとにかく 離島の水に対する実感がこもっている。

これら離島の飲料水を解決する一つの方策として 塩

水化した地下水を用いた塩水の淡水化による水の供給が考えられ またこれを実施している東京都根島の例などもあるので 塩水の淡水化について その概略を述べ とくに離島向きの塩水の淡水化について若干の紹介を試みた。

5月15日には待望の本土復帰が実現するが 一たん渇水となると 飲料水にさえ事欠く多くの離島の一例として 過疎になやむ このさいはての島の水問題を早急に解決するよう考えていかなければならないと思う。



第1図 位 置 図



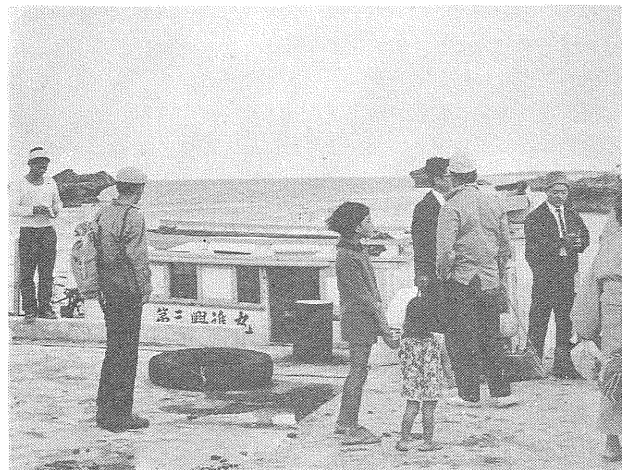
写真① 定期船から望んだ黒島

### 黒島という島

黒島といっても沖縄の人でさえ どこにあるどんな島か答えられない人が多いのであるが その島が一躍有名になったのは1971年の大干ばつの時で 本土の新聞にさえその窮状がのったほどで 水が全くなくなった黒牛の島ということで話題になった。

黒島は沖縄本島の南方 八重山群島石垣島の近くにある島で 竹富町に属している。 竹富町は石垣島と沖縄

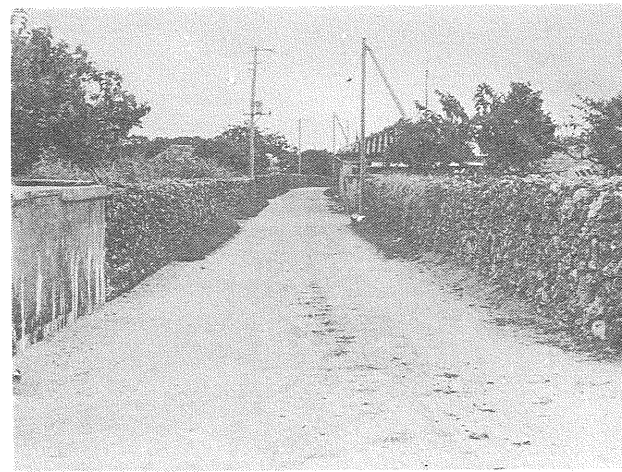
最西端の与那国島の間にある島々からなる町で 沖縄で2番目に大きい西表島や竹富島 黒島など 無人島3を含めた13の島からなる町で それらの島々を直接結ぶ航路はなく すべての航路は石垣島の石垣港を起点としているので 町内の一つの島から別の島に渡るには 必ず石垣港に一たん来てから他の島に渡らなければならない。そのため竹富町の役所は石垣市に間借りしているという変わった町である。 黒島は大きさからいうと 竹富



写真② 黒島栈橋についた 第二興進丸 15.4トン



写真③ 玉代勢泰徳氏宅の前庭 ガジマルの下の調査団一行 向かって右から 工事課 金城紀三氏 企画部 島袋真栄調査官 野間技官 小西課長



写真④ 黒島の東筋部落のメインストリート 両側に石灰岩を積上げた石垣が続いている



写真⑤ 黒島では部落の家並みがきれると道の両側は途端にジャングルの様相になる

町内では西表島 波照間島に 次ぐ3番目の島で 周囲12.13 km 面積13.73km<sup>2</sup>の三角円形をなした島で 島の北西部がやや高い台地で最高標高14mの平たんな島で 周縁に堡礁をめぐらしている。石垣港を午後便で出発して黒島に渡った私たち一行のみたその島は 夕陽を受けて文字通り波に浮んだ黒島であった。この島は石垣港からの距離15km 連絡には定期船がかよっていて 私たちの乗った大きい方の定期船興進丸は 15.41 トン 定員35人の小船で船賃は 15¢ 石垣港からの所要時間は 1時間25分で黒島桟橋に到着する。黒島の人口は1969年末現在 男266人 女324人 計590人で 本籍人口が2,039人であるのと比べて過疎現象が目立っている。

竹富町全体の人口は 大正年代に5,662人から漸次増加し 昭和28年の10,061人を最高に以後は次第にへり 昭和44年には5,945人と またもとの大正年代にもどってしまっている。黒島はもともと砂糖キビと黒牛の島であったが キビの生産高は 次表のように激減している。

年 期	1965—66年期	66—67年期	67—68年期	68—69年期
キビ面積 (a)	2,132	700	380	168
生産量 (t)	523	261	66	59

黒島の家畜飼養頭数は黒毛和種牛985頭 豚101 山羊117頭 (1969) で 71年の大干ばつ当時この島に1,100頭の牛がいたが これを800頭に減らしてしまっている。

この島の部落は5つに別れているが そのうち最も大きい東筋の部落にはもちろん宿屋などなく 部落の有力者玉代勢泰徳氏宅に私達一行は泊ったが 興進丸の持主でありまた島で2台ある車のうちの小型ライトバン (あ

と1台は軽バン) を所有し また村の必需品をまかなう何でも屋を経営しているお宅でもある。東筋部落のメインストリートは 両側に石灰岩ブロックを積上げた石垣にはさまれた砂利道であるが 家並の石垣が切れると写真⑤のように 道の両側はジャングルの様相を呈するのである。

### 黒島の地形・地質

黒島は写真や図でわかるように低平な島で 島の中央からやや北西寄にある小・中学校を中心とした部分が高い台地をつくり 最高点はこの学校の北西にあるが海拔14mにすぎない。島の東部は標高10m以下で 海岸線は石灰岩の崖が海にのぞんでいる。地質は島全体が隆起珊瑚からなるいわゆる琉球石灰岩の地層からなり 緻密堅硬な部分とやや粗な部分とがあり 堅硬な石灰岩の地帯は時に割目から浸透した雨水の侵蝕による石灰岩洞くつがみられる。干潮時に島の周囲を一巡してみたが 石灰岩の下位には地下水の受盤となる古生層や第三紀層の泥岩などを見出すことができなかった。琉球石灰岩地帯における地下水は 石灰岩の下位にある第三紀層または先第三紀層が地下水を通さない受盤となって地下水は石灰岩の下底に貯留されているのが石灰岩地帯における最も普通の地下水賦存のあり方であるが この島ではこのような受盤になる地層の存在が認められなかったことは すぐ近くの竹富島では 石灰岩の下位に古生層の分布が認められるのとは対照的で これら両島の地下水賦存状態は全く違うことを示している。

黒島は新しい時代の琉球石灰岩のみでできている島であるため湧水はもちろんなく 降水は石灰岩の間を通過して止まることなくすべて下降してしまう。黒島が大きな島で また高い台地や山のある島であれば この山体



写真⑤ 東筋にある天水を貯める共同水槽 容量105石 竣工 昭和9年3月31日とある

内に地下水が貯溜され また地下の塩水は島の中央部まで侵入してこないかもしれないが 黒島は小さくまた低平な島であるため 島全体がちょうど塩水の上に浮いたような状態にあり 降水はすべて地下に下って塩水と化してしまうのである。したがって島内にある20をこえる井戸水も塩分が多く 飲料水として不適当なために 生活用水は専ら天水を利用している。

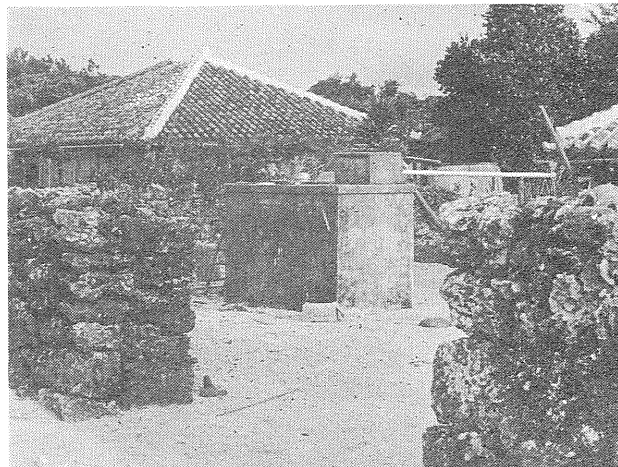
天水を貯溜するタンクは各戸に備えつけられ 大小さまざまであるが 東筋には昭和9年3月に竣工した105石(19m<sup>3</sup>)入りの共同水槽が2個ある。各戸で使い水は屋根に降った雨を樋で導き 天水を集めて貯溜するのであるが それら水槽は四角なもの丸いものあり 時には栗石造りの立派なものまである。

竹富町の資料によると 水確保のためにはいろいろな手が打たれているが それらは次の通りである。

- (1) 1957年 高等弁務官資金(米国民政府が高等弁務官名で配布する民生治安対策のための資金)により天水丸タンクを

各戸に設置。

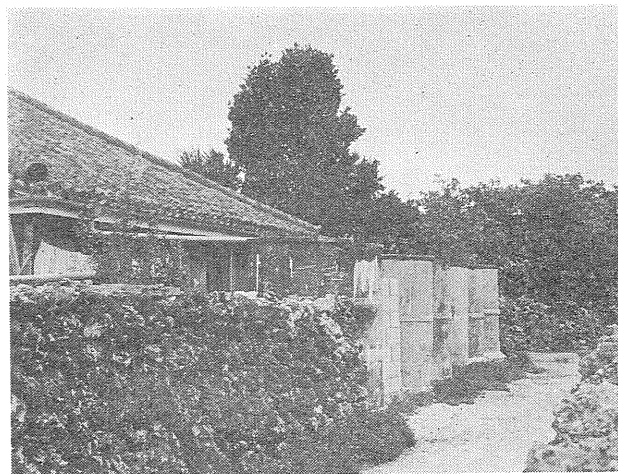
- (2) 1963年 大干ばつ(琉球气象台始まって以来の大干ばつ)のため各戸の天水丸タンクの水が完全に枯渇したため 琉球政府の救援措置として 西表島から小船で飲料水を運搬した。
- (3) 1964年 干ばつ時の対策として琉球政府の補助により 天水丸タンクの増設および家畜用施設として島内3ヶ所に溜池施設を行なった。
- (4) 1965年 琉球政府の手により島内3ヶ所に 深度50mの地下水探査用ボーリングを実施した。
- (5) 1970年 米国民政府民事部隊の援助により 各戸に天水丸タンクを増設。
- (6) 1971年 再び1963年を上廻る大干ばつとなり 黒島も最も水に困っている島の一つに数えられ 当時434人の黒島の住民に対し 米陸軍第一特殊部隊の乗り込む上陸用舟艇(LCM)に タンク ゴム容器 給水トレーラーなどを



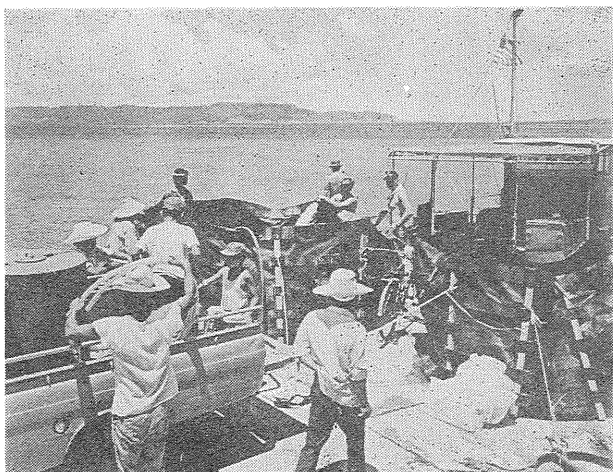
写真⑦ 天水タンクのいろいろ 角型タンク



写真⑧ 栗岩を積んだ天水槽



写真⑨ 天水丸タンク 多いのは6個も並べてある



写真⑩ 71年の大干ばつに待ちに待った真水を運んでくるたびに米陸軍の上陸用舟艇に集まる黒島の住民(守礼の光 1971.12)

第1表 黒島の井戸一覽表

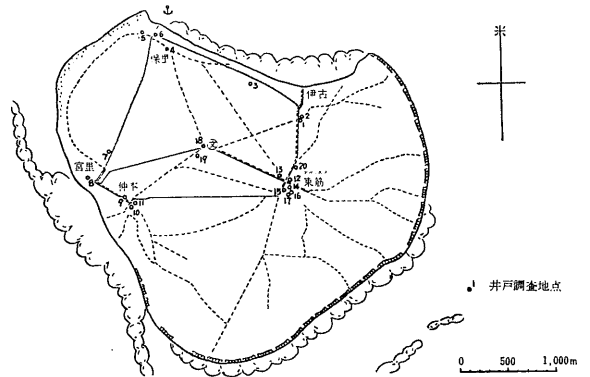
測点番号	所有	所在地	深度 m	水位 m	水温 ℃	水比抵抗 Ω-cm
1	金城	伊古	1.40	0.95	22.7	4,550
2	名嘉	〃	2.30	2.10	23.2	4,170
3	牧場	〃	3.50	2.40	24.6	2,780
4	前盛	保里	3.20	2.85	24.4	570
5	下川	〃	2.20	1.60	23.4	2,560
6	仲盛	〃	3.15	2.90	24.9	1,330
7	牧場	宮里	1.80	0.90	23.1	2,080
8	知念	〃	4.10	4.00	24.4	160
9	多良間	仲本	2.30	2.10	24.5	480
10	宮喜	〃	2.70	2.40	24.9	1,050
11	上原	〃	2.85	2.50	24.6	330
12	東船	東筋	3.55	3.00	24.4	640
13	又吉	〃	3.60	3.35	24.8	340
14	玉代勢	〃	3.05	2.55	24.6	1,540
15	玉代勢	〃	2.75	2.25	24.5	1,090
16	東船道	〃	2.75	2.20	24.4	1,430
17	船道	〃	3.33	2.92	25.2	450
18	黒島 中学校	〃	9.06	8.71	24.9	360
19	島仲	〃	11.90	7.70	24.2	710
20	玉代勢	〃	2.65	2.50	24.7	830

\* 測点番号20の水質分析結果

pH		7.65
M-アルカリ度	CaCO <sub>3</sub> ppm	175.5
全硬度	CaCO <sub>3</sub> ppm	236.8
カルシウム	Ca <sup>2+</sup> ppm	49.9
マグネシウム	Mg <sup>2+</sup> ppm	27.3
塩素	Cl <sup>-</sup> ppm	261.5
全鉄	ppm	0.25

積み込み 定期的に水の輸送を行なった。

このように天水用丸タンクは 増設されて 家によっては数個連結して使用しているものもあるが タンクの数には限度があり 大干ばつ時にはやはりどうにもならないようである。



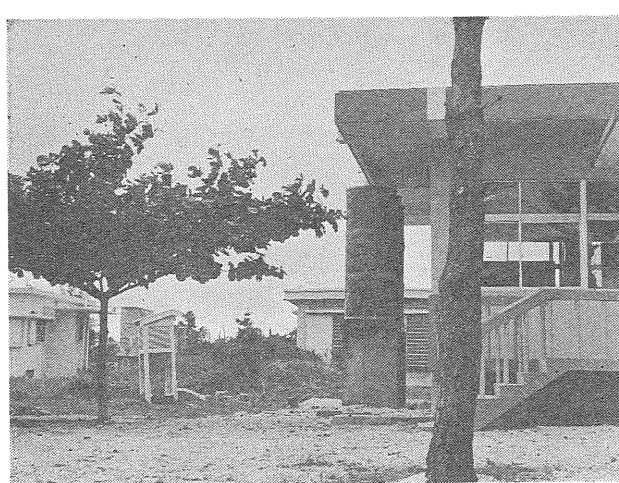
第2図 黒島における井戸地点位置図

### 黒島の井戸と水調査

黒島の各部落を中心に 民家の浅井戸 学校 牧場の井戸について井戸深度 地下水位 水温および水比抵抗などを測定したので これを第1表に各測点を第2図に示した。また玉代勢氏宅の水質分析を行なったが この程度の塩分濃度の水は 洗用にまた風呂用として常時使用している水質である。

黒島中学校は ほぼ島の中央の最も高いあたりに位置しており 手掘の深さ9 m余の井戸がある。井戸側のそばに四角い水槽があって 揚水した水は 一たん水槽へ入れてから配水するようになっている。この井戸は学校用のため常時汲み上げているので 水位も低く 塩分濃度もかなり高くなっている。もちろん天水槽は学校にも常備されていて 新しくでき上がったモダンな図書館にも丸形タンクが備えつけられている。井戸は学校の井戸も同じであるが 地上部分は石灰岩を積み上げて 外側をセメントで固めたものが多く 高さは低いものが多い。

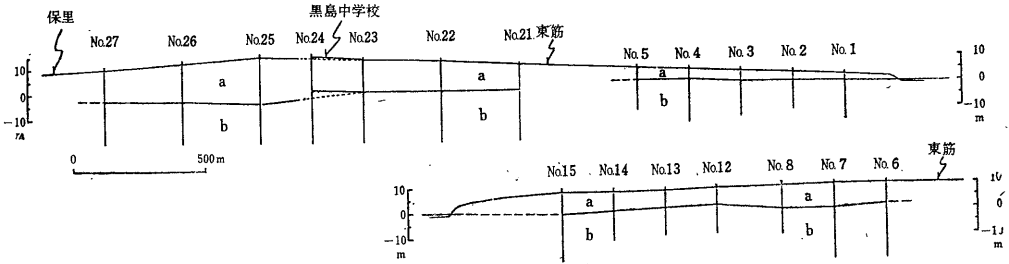
地下水調査のための電気探査を行なった。測点は第



写真① 黒島中学校のモダンな図書館に具えられた天水用丸タンク



写真② この島の浅井戸の枠はこのようにたけの低いものが多い。井戸と天水タンクは必ずいっしょにある。



第4図 黒島電気探査結果による推定断面図

3図に またABC断面およびBD断面は第4図である。島の東部のトラバーチン化した石灰岩に電探棒を打込むのは なかなかの作業であった。第4図の断面で a b 両地層にわけているが a層は薄い表土層と琉球石灰岩の地層で 部分的には表土層のない堅硬な石灰岩の分布するところもこれに属している。 b層は一般に見掛け比抵抗の低い地層で a層と同じく琉球石灰岩であるが石灰岩層中に塩水が侵入しているところとみられる。この a b 両層の境界面は おおむね海水準に近いところとみられるが なかでも東筋から南東方では比較的浅く黒島中学校から保里部落方面においては逆に深くなっている。

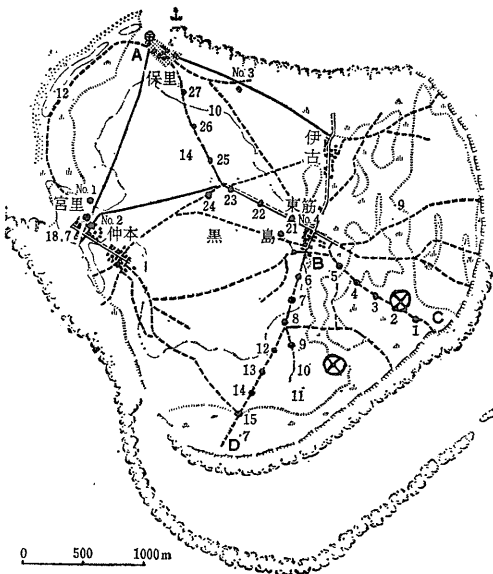
この境界は淡水と塩水と一線を画す境界ではなく a層は淡水に近い 塩分濃度のあまり高くない地下水 b層は塩分濃度のかなり濃い塩水化した地下水の入っている地層と判断され なかでも黒島中学校付近の b層はかなり海水準よりも上にきているが これは井戸調査の

No. 18の 黒島中学校と すぐ近くにある No. 19 島仲牧場の調査結果とを比較すればわかるように 常時地下水を汲み上げている学校井戸の水位は低く 塩分濃度も高く 牧場のものはその逆であることにもよくあらわれている。

このようにみえてくると この島では海水準より高い位置の しかも島のほぼ中央部においてさえ すでに地下水は塩水の影響を受けており 結論として黒島においては 生活用水を地下水に依存するのはむずかしいということになった。 それでは黒島において生活用水を確保するには いかなる手段によったらよいかは 大きくわけて次の方法が考えられる。

- (1) 黒島に最も近い西表島から海底パイプラインを引いて給水する。
- (2) 天水を大規模に集水して貯留し これを処理して水道水源として給水する。
- (3) 塩水淡水化装置を用いて 塩水化した地下水 または海水を淡水化して給水する。

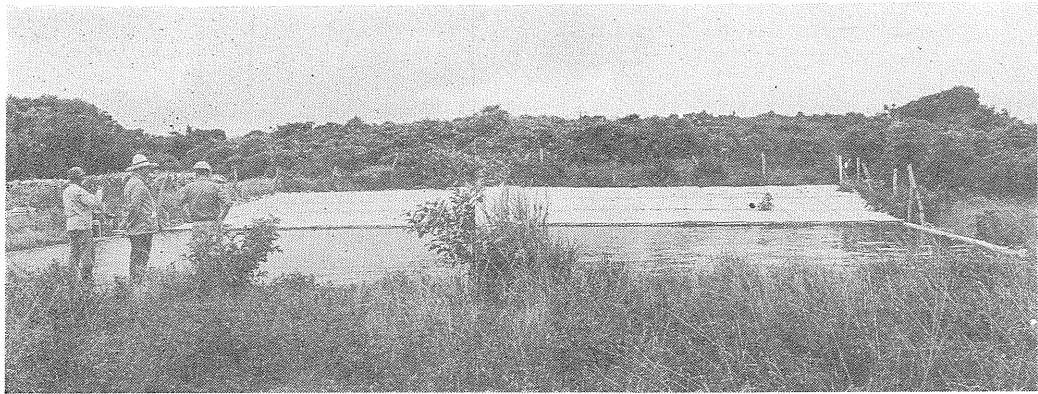
これらの方法の得失は 資金面で また用水コストの面および技術的な面で速断はむずかしいが 以下これらの方法について検討してみることにする。



第3図 黒島電気探査測点位置図



写真19 黒島東部のトラバーチン化した石灰岩の上での電気探査



写真④  
降雨を鉄板に  
受けてそれを  
プールに集め  
た黒島方式の  
天水槽

1) 西表島から海底パイプラインを布設して給水する

黒島と西表島は 最短直距離で約9.5km 黒島の西方にある新城島の上地島を経由すれば約10kmである。1971年の干ばつには 米軍は西表島北東部にあるオミジヤ川の河口からほど近い上流にコンクリートダムをつくり この貯水池から海岸まで250mのパイプを引き それからさらに海面下の珊瑚礁の上を850mのパイプを引き そこから上陸用舟艇に給水したそうであるが 環礁の外海はかなり深く また潮の流れも相当にあるであろうから 西表島に水が確保されたとしても 海底のパイプラインの布設には莫大な資金が必要となり従って用水コストも高くなるので 最も安定した用水の供給方法ではあるが 資金面から 実現はなかなか困難と思われる。

今年に入って 宮古島と池間島の間に海底送水管が敷設されることになったが この両島の間は工事施工地域の水深がごく浅い珊瑚礁の上であるから 技術的にもあまり問題にはならなかったであろうが それでも 給水人口2,500人 送水量420m<sup>3</sup>/日に対して送水管はφ150mm 3kmで約1億円を要しているので 池間島のように給水人口が多く 送水管が短かく かつ水深が浅いところなら海底送水も可能であろうが 黒島の場合は 給水対象人口が少なく 距離も大きいので 水コストがかさむのではないかと思われる。

2) 天水を大規模に集水して貯留しこれを処理して給水する

天水の利用は この島に限らず沖繩全域で昔から行なわれ 那覇市内においてさえ天水槽はよくみかける。黒島においては 米軍および琉球政府により各戸にいくつかの天水槽が設けられ また部落共同の水槽もあるが 新しい試みとして原野に鉄板を敷きつめて降水を集めて大きなプールに貯水している。土地が十分にあるところでは これはなかなかよい方法であるが 島全体の給

水をこのような方法でまかなうとなると ここにもいろいろ問題がある。それは貯水池の容量とそこにためるための集水板の大きさおよび水処理の問題である。黒島の人口を500人とみて 家畜を入れた必要水量を200ℓ/人/日とすれば 1日約100m<sup>3</sup>あれば十分で そして連続無降雨の日を何日間と設定してそれによって貯水池の容量を決めなければならない。さいわい石垣島には1896年に創立された八重山気象台があり 黒島もおよそこれに準じた降水状況と仮定すれば 降水状況は次の通りである。1898年から1960年に至る間の年平均降水量は 63カ年平均で 2,175mm また1898年から1967年までの年降水量の最小値の累年順位は 次の通りである。

順位	年降水量	起 年
1	1,271.6	1963(昭和38年)
2	1,352.3	1958(昭和33年)
3	1,381.0	1929(昭和4年)
4	1,456.1	1946(昭和21年)
5	1,456.2	1910(明治43年)

1971年は'70年11月頃から雨が少なく 8月までの降水量は440.5mmで 1963年の461.9mmよりも少ない。しかし71年は9月以降の降水量は多く 11月で1,000mmをこえているので 気象台はじまって以来の大干ばつとはいうものの年間降水量では63年を上廻るものと思われる。ここで問題になるのは年間降水量ではなく 渇水の継続する日数である。1963年と1971年の八重山気象台(石垣島)の月別降水量は 次の通りである。

年	月											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1963	74.8	31.2	113.7	31.0	0.6	152.8	32.1	25.7	319.7	82.9	151.2	255.9
1971	147.0	91.0	24.0	5.5	41.0	25.5	57.5	49.0	362.5	123.0	118.5	

第2表

期 間	期 間 内 限 水 量 (mm)	継 続 日 数 (日)
1897・4・17 ~ 6・11	86.4	56
1898・4・12 ~ 5・31	88.9	50
1902・1・29 ~ 5・5	38.9	97
9・1 ~ 10・30	85.0	60
1910・6・6 ~ 8・8	77.3	64
1931・12・14~1932・2・2	52.2	51
1938・6・4 ~ 7・29	38.9	56
1939・1・20 ~ 3・10	55.4	50
1943・4・13 ~ 6・9	46.6	58
1945・2・26 ~ 4・18	48.7	52
6・5 ~ 8・19	78.8	76
1946・3・25 ~ 5・14	51.2	51
10・22 ~ 12・16	96.7	56
1952・9・30 ~ 11・19	70.8	51
1953・6・11 ~ 8・2	34.3	53
1960・4・1 ~ 5・22	96.0	52
1962・1・10 ~ 3・13	53.6	63
1963・1・5 ~ 9・7	424.9	246

また石垣島における降水量がとくに少なかったものの記録として 期間内降水量100mm以下 継続日数50日以上のものにつき 石垣島気象災害資料によってあげれば 第2表である。

これらの表から大まかにみると 渴水の継続期間は長くて2カ月位ということになり 各戸の天水タンク容量と合わせると貯水池の容量は 100m<sup>3</sup>/日 50日として 3,000~5,000m<sup>3</sup> のものが必要となるであろう。したがって 降水を受ける集水板の面積は 渴水のはじまる前の雨量をもとに 算定しなければならない。もっとも 渴水時には水を節約して使うから 貯水池の容量はこの半分位で間に合うかもしれない。集水の問題とは別に もう一つの問題は 長い期間貯水しておく 貯水池に藻の発生するおそれもあり 水処理の面での問題とさらに数千 m<sup>3</sup> の貯水槽の場合 資金面その他にも問題がありそうで 今後なお検討が必要である。

### 3) 塩水淡水化装置を用いて水を供給する

塩水の淡水化は 工業技術院の大型プロジェクトにも取り上げられ 現在研究は着々と進み 実用化の域に達し 造水コストも次第に下がりつつある。しかし未だ一般の陸水に比べるとコスト高になっているが この点さえ考慮に入れば 装置そのものは既に完成している ので 最も確実に淡水がえられる方法である。

淡水化の対象となる原水は大別して 海水と塩水化し

た地下水または地下の塩水で 海水の塩分濃度は通常 19,000ppm であるが 地下塩水の塩分は数百 ppm から数千 ppm で海水に比べれば塩分濃度は はるかに低い。しかし水量的にみれば海水は無限の量といえるが 地下塩水はその水量には限りがあり またこれを揚水しているうち次第に塩分濃度が上昇するなどの欠点もある。しかし少量の淡水供給を目的とする場合には 塩分濃度の薄い地下水を用いることは 造水コストの面で有利であり 従来は全く価値がないとされていた地下塩水も これからは淡水化される水資源の対象として見直されるのではなからうか。

黒島においても 地下塩水が一定量づつ取水されうるという見通しがつけば この水を淡水化するのが最も確実で また用水コストも安くあがるものと思う。

塩水淡水化にはいろいろの方法があり また一長一短があるので 各方式についての概略を述べ とくに離島向けに適すると思われる方式について 若干の紹介をこころみる。

### 塩水淡水化の諸方式

わが国は四面を海に囲まれているので 淡水化の対象となる原水はもっぱら海水で 海水淡水化という言葉がわが国では一般的に用いられているが 諸外国では塩分濃度の高い地下水 すなわち地下塩水(地下かん水)が利用されることも少なくないので 海水だけでなく 海水をも含めた意味で塩水淡水化といった方が一般的なようで またここで問題にしようとしている離島の水については 塩水化した地下水の淡水化を目標にしているので ここでは塩水淡水化と呼ぶことにする。

塩水淡水化の方式は 大きくわければ 塩水から水分を分離して淡水として取り出す方式と 塩類を集めてこれを取り除いて淡水を残す方法とがある。この方法を列記すれば 次の通りである。

#### 1 蒸発法

- i) 太陽熱法
- ii) 多重効用缶法
- iii) 多段フラッシュ法
- iv) 蒸気圧縮法

#### 2 膜法

- i) 電気透析法
- ii) 逆浸透法

#### 3 結晶化法

- i) 真空冷凍法
- ii) 冷媒直接接触冷凍法
- iii) 間接冷凍法
- iv) ハイドレート法



4 その他

i) 溶媒抽出法

これらの方法を用いた塩水淡水化は、今や実用の時期に入っているが、現在ではまだコストの面では従来の陸水の用水価格よりかなり高い値段であるが、横浜市水道局の海水淡水化研究会がまとめた「東京湾周辺地域における陸水と淡水化大規模プラントとの比較」という報告書によると、計画年次を昭和60年にとり、陸水開発は大規模の貯水ダムと流域変更によるものとし、用水1m<sup>3</sup>当りのコストを約41円と計算し、一方海水淡水化は、三浦半島に原子力発電所を建設し、165万kWの発電と1日200万m<sup>3</sup>の造水を行なうという計画で、造水コストは1m<sup>3</sup>当り50~58円と算定して、陸水開発が可能なら陸水の方がよいという結論であるが、将来大規模ダムの建設や河川の流域変更による取水はますます困難になると予想され、一方淡水化の技術は月日と共に進んでいくので、近い将来は、いずれがまさってくるかは速断しにくいところである。現在、1,000m<sup>3</sup>/日以上以上の造水能力をもつ装置の方式別の容量と基数を示すと次のようになる。

塩水淡水化装置の方式別容量と基数

方 式	総 容 量		基 数	
	1,000m <sup>3</sup> /日	%	数	%
多段フラッシュ法	428.6	88.3	82	77.5
フラッシュ法	34.7		11	
垂直長管多重効用缶法	13.1	6.2	5	14.2
横型浸管多重効用缶法	19.5		12	
蒸気圧縮法	3.8	0.7	1	0.8
電気透折法	10.5	2.0	5	4.2
不 明	11.4	2.2	4	3.3
計	521.6	100	120	(文献11)

以下これら方式について、科学技術庁の報告の説明図をもとにその概略を述べるが、各方式についての詳細は末尾に入手しやすい文献を記してあるので、それらを参照していただきたい。

1. 蒸 発 法

塩水を加熱すると、水是水蒸気になり蒸発して、塩分はあとに残る。この水蒸気を凝縮すれば淡水が得られる。従って蒸発法は原理的には最も簡単で常識的な淡水化方式ということができ、また最も盛んに行なわれている方法である。

i) 太 陽 熱 法

太陽熱はあらゆるところにある熱源で、この太陽の輻射熱を利用する方法は、最も安価な淡水化法である。この説明図は第5図で、コンクリートにアスファルトを敷いた浅い池をつくり、ガラスやビニールなどでその上を覆うと、太陽熱に暖められて塩水から蒸発した蒸気は、冷たい屋根の内面に凝縮して集められる仕組みになっている。この方法で大量の淡水を得るためには広い土地が必要で、また年間の晴天日数が多いところでなくてはならないという制約があり、立地が限られるので、沖縄の離島などでは適用できない。

ii) 多 重 効 用 缶 方 式

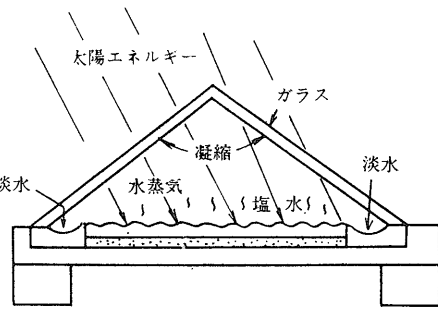
この方式は、製塩、製糖、パルプ工業などの化学工業で溶液の蒸発濃縮工程で、最も普通に用いられている方法である。この方式を大別すると、垂直型長管式と横型浸管式の2方法がある。

第6図は垂直型のもので、蒸発缶は密閉した容器でなかに加熱器が入っている。缶に塩水を入れ加熱器に蒸気を吹込んで加熱すると、最初の蒸発缶で加熱された塩水は水蒸気を発生し、発生した水蒸気は第2缶の塩水を加熱蒸発させると同時に、自からは冷却凝縮して淡水となり、ポンプPで淡水として取り出される。このような操作を何回か繰り返して使えば、加熱用の熱は繰り返し使えるので効率がよい。この方法の問題点はイ) 缶数を増すほど熱利用効率は大きくなるが、設備費が高くなる。ロ) 海水を原水に使った場合、Ca、Mg塩等が含まれているので、スケールが伝熱面に付着しやすく、また蒸留缶、パイプなどが腐食するという欠点がある。この装置はすでに実用化され、缶数の最も多いものには、米国のテストプラントの17重効用缶がある。わが国においても瀬戸内海沿岸の製塩業者がこの装置により製塩を行ない、副産物の淡水を町の上水道に給水していた例もあるが、製塩の廃止に伴い上水道は別の水源に切替えている。一例として香川県仁尾町では、47年1月までこの給水を行っていた。

多重効用缶法には、このほか横型浸管式といい、蒸発室を横型に設置したものがあがるが、スケールの問題、運転上の問題などもあり、現在ではあまり用いられなくなっている。

iii) 多 段 フ ラ ッ シ ュ 法

水は大気圧のもとでは100℃で沸とうするが、たとえば、富士山の上のような気圧の低いところでは100℃以下の温度でも沸とうする。つまり水の沸とうする温度は圧力が上れば上昇し、下れば下降する。フラッシュ



第5図 太陽熱蒸発法説明図(文献4)

ユとは高温高压の水が圧力の低下によって瞬間的に沸とう蒸発する状況を表わすもので これを利用して高温に熱した水を減圧した容器内に入れて フラッシュさせて蒸留するのが多段フラッシュ法である。

第7図の(a)は1段 (b)は2段 (c)は4段のフラッシュ蒸発法を示したが (a)では常温の塩水を密閉した蒸発缶の上部にある凝縮室の冷却蛇管を通し 蒸気を冷却凝縮させると同時に予熱し左端の加熱器内でさらに蒸気で加熱し高温になった塩水を 減圧してある蒸発缶の下部に入れてフラッシュさせる。フラッシュして温度が下った塩水はポンプで排出され フラッシュした蒸気は上の室に入り 冷却凝縮して淡水として集められる。

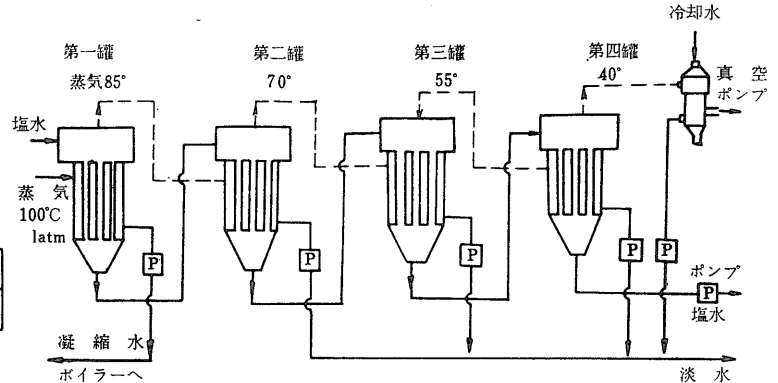
これを(b)のように2段にすると 冷却管の表面積が2倍になり塩水の予熱がより良好に行なわれ (c)のように4段に またそれ以上にすればさらに熱効率は高くなる。

この方法は比較的低温の熱源を利用することができ濃縮のおこるフラッシュ室では蒸発する缶液が伝熱面に接触せず 濃縮により起こるスケールの伝熱面への付着というトラブルが少ないという特長がある。

多段フラッシュ法と多重効用缶法を比較すると 次の点で多段フラッシュ法が有利であると考えられる。

- イ) 比較的低温の熱源が使用できるので エネルギーコストを低下させることができる。
- ロ) 構造が比較的簡単で ポンプの数が少なくてすむ。
- ハ) パイプ内の蒸発がないため 管が細くてすむので 熱伝達面に要する費用が安くなる。
- ニ) スケールが付着しにくいので それによる熱伝導率の低下や腐食が少ない。
- ホ) 大容量のプラントを作るのに適し 建設費が安くまた運転も容易である。

以上のように多段フラッシュ法は大型の造水設備に適し 現在操業中および建設中の主要淡水化装置はすべてこの方法によっている。また前記のようにこの方法は質の悪いスチームをエネルギー源に使えるところに特長



第6図 多重効用真空蒸発法垂直型長管式(文献4)

があり 発電所において無駄に冷却水を暖めているスチームの熱を利用できる。これを利用して発電所と淡水化工場を組合わせたものを二重目的工場と呼んでいるが将来原子力発電所と組合わせたこのプラントは 大容量の淡水化計画として最もコストの安いプラントとして注目される。近年この多段フラッシュ法をさらに有利にするため 多重効用とすることが考えられ 多重効用多段フラッシュ蒸発法も研究され 前記横浜市の報告書にも造水法として原子力発電所と組合わせた 多重効用多段フラッシュ法を採用している。現在ある全世界の主要淡水化装置の方式別内訳をみると 5分の4はこの方式によっている。

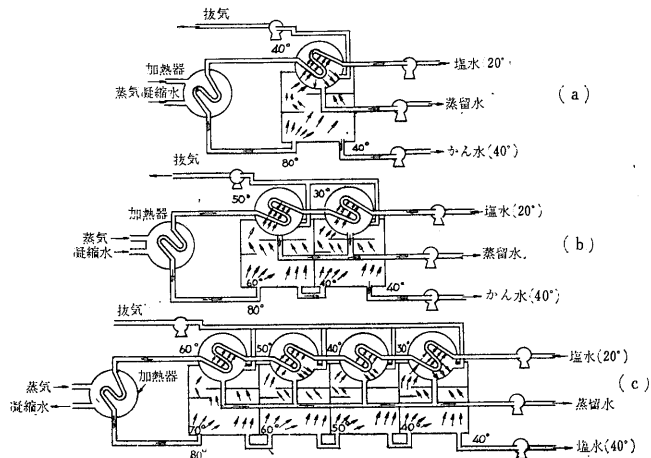
iv) 蒸気圧縮法

この方法は 密閉した蒸発缶で発生した蒸気を 圧縮機で圧縮して温度を上げて再び加熱に利用し その際生じたドレインを淡水として取得するもので この方式は圧縮に必要なエネルギー以外は 加熱用の熱などを必要としないので 淡水化に要するエネルギー量は比較的少ないという利点がある。しかしその反面 圧縮に用いる機械的エネルギーのコストが必ずしも安くはないということと 造水量に比例して圧縮機の容量を大きくしなければならないという欠点がある。第8図はその説明図で わが国においても製塩を目的としてこの方法が使われた。

2. 膜 法

塩水中の塩分のみを除去することによって淡水化を行なう方法で それには イオン交換樹脂膜を用いる電気透析法と 半透膜を用いる逆浸透法とがある。

塩分濃度が海水に比べて低い海岸近くの塩水化した地下水 離島の地下塩水 河口湖の塩水などの500~5,000 ppmの塩分の入った塩水から 塩分 100~500ppmの淡



第7図 多段フラッシュ蒸発法(文献4)

水化にはすでにイオン交換樹脂膜による電気透析法が実用化され 淡水のコストもかなり安くなっているが 将来は塩分濃度の低い塩水淡水化としては 逆浸透法がのびることも予想されている。

i) 電気透析法

イオン交換樹脂膜は イオン交換樹脂が膜状になっているもので イオンの選択透過性のある隔膜である。

第9図は電気透析法の説明図であるが 陽イオン交換樹脂膜(K)は 陽イオンは通すが陰イオンは通さず 陰イオン交換樹脂膜(A)は陰イオンは通すが陽イオンは通さない。そこで陰陽両膜を適当な間隔で交互に置いて 多室に区画した電解槽に塩類溶液を入れて この両端を一組の電極で挟み 膜に垂直方向に直流電流を流すと 陽イオン(Na<sup>+</sup>)は陰極に 陰イオン(Cl<sup>-</sup>)は陽極に向かって泳動し 第9図のような作用で濃縮水と淡水とにわけられる。この操作を脱塩室に通水しながら行なえ

ば連続的に淡水をつくることができる。

イオン交換樹脂は 1935年英国の B. A. ADAMS, E. L. HOLMES らにより発明され 1950年米国の Ionics 社の W. JUDA がはじめて イオン交換樹脂膜の製造およびこれによる塩水淡水化技術を発表してから 電気透析法は一やく実用化の方向へと進んだのである。しかしこの方法は 原水の塩分濃度が高くなると電力消費料がかさむので 比較的低濃度の塩水に適し また中小容量の規模の淡水化に適している。

ii) 逆浸透法

逆浸透法は圧力エネルギーにより膜を通して水を移動脱塩する方法である。第10図-1

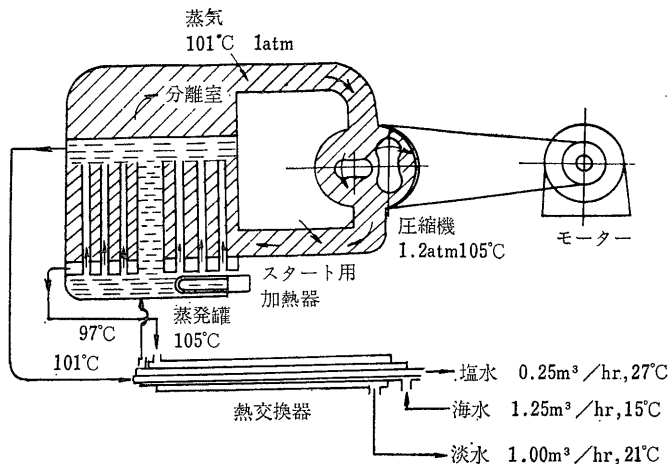
のように半透膜で仕切られた容器の一方に淡水 他方に塩水を入れると その膜を通して淡水が塩水の方に拡散して塩水を希釈する。この現象が浸透現象で 両液の間に生じた圧力差を浸透圧という。逆浸透法はこの塩水側に浸透圧より大きな圧力を加えることによって 第10図-2のように逆に塩水から水だけを膜を通して移動させる方法である。

逆浸透現象は1748年 ABHE NALLET により発見されて以来研究が続けられ 1953年 C. E. REID 教授は米国塩水局に対し 逆浸透法は将来有望な淡水化法の一つとして提案し研究を実施した。その後この方法の開発研究は盛んとなり 1965年にはカリフォルニア大学の研究グループがパイロットプラントをつくり わが国でも現在実用化されている。

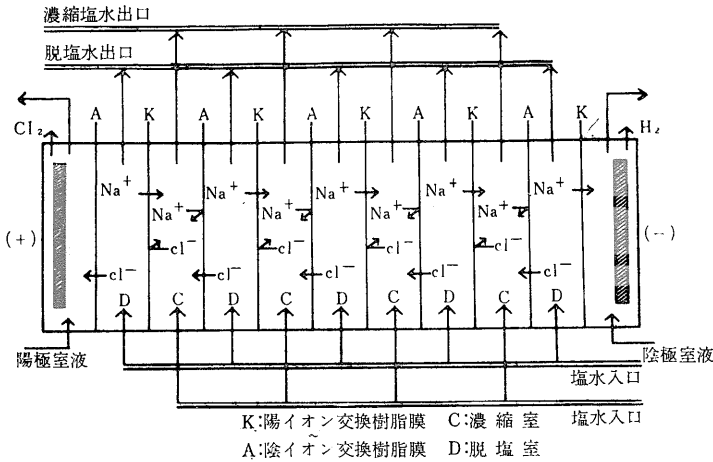
3. 結晶化法 (冷凍法)

海水を冷却して氷の純結晶を析出させ これを分離して淡水とする方法である。

1kgrの水を蒸発させるのは540~600 kcalの熱量が必要であるのに対して 1kgrの水を氷結させるのは80kcalの熱量を奪えば足りるという数字が基礎になっているが この比がそのまま両者の優劣の尺度になるというわけではない。しかしこの方法には 解決しなければならない問題が多く 実用化にはいま一步というところで 中小規模の淡水化装置として 将来は実用化されるであろう。



第8図 蒸気圧縮蒸発法(文献4)



第9図 電気透析法説明図

i) 真空冷凍法

海水を断熱下で約 3mmHgabs の減圧室に導いて沸とうさせ その際の気化熱により残りの海水を冷却して凍結させ氷をつくる方法で その氷を原水から分離して融解すれば淡水になる。この方法には吸収式と圧縮式があり 第11図は圧縮式真空冷凍法の説明図である。

ii) 冷媒直接接触冷凍法

海水にブタンまたはプロパンなどの沸点の低い炭水化物を混じて一緒に冷凍缶に吹込み気化させると 気化の潜熱によって海水の一部が氷となるので その氷を分離して洗浄融解すれば淡水がえられる。この説明図は第12図である。

iii) 間接冷凍法

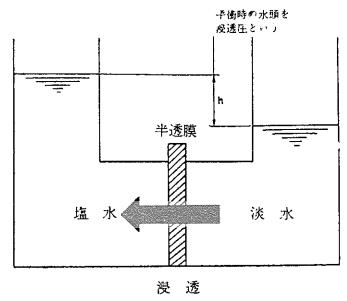
冷凍機を用いて 伝熱面を通じて海水を冷却して海水中の水の一部を氷として取出し この氷から淡水をつくるものであるが 冷却効率が悪く実際の淡水化の方法としては不適当な方法である。

iv) ハイドレート法(水和物法)

海水中に種々のフロン類 ブタン プロパンなどをまぜて冷却すると大量の結晶水を含んだ固体のハイドレートの結晶を析出する。この現象を用いて淡水化する方法である。この方法を第13図に示すが 水和剤の回収などに問題を残している。

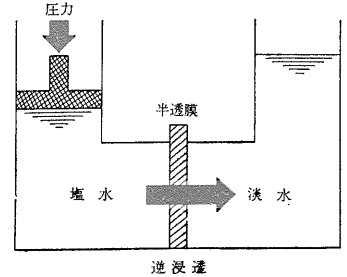
4. その他の方法

溶媒抽出法 この方法はある種



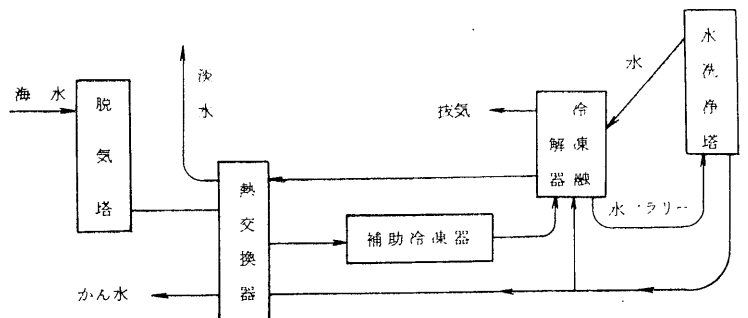
第10図

逆浸透法の原理説明図

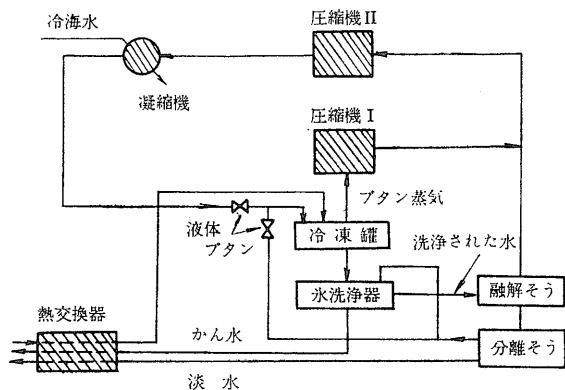


の溶媒を使うと 海水から水の部分だけ抽出することができる。この溶媒と水とが混ぜ合わされたものに温度の変化を与えると 水と溶媒が分離するので それにより淡水を得る方法である。この説明図は第14図である。この方法は溶媒が淡水中に残留するので 溶媒の完全回収に問題があるとともに コストが高くなる欠点がある。

以上塩水淡水化方式の概略の説明を行なったが このなかには 実用化されていないものも多く含まれている。現在では 大容量の淡水化には多段フラッシュ方式が用いられ 中小規模のものには電気透析式が実用化されているが 将来は逆浸透方式も大きく伸びる可能性があり 離島に用いられる淡水化装置としては 地下塩水を原水とする 後二者の方式が採用されるものと考えるので それらについて紹介する。



第11図 圧縮式真空冷凍法(文献4)

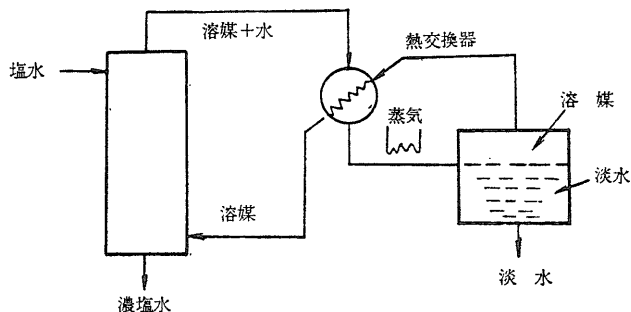


第12図 冷媒直接接冷法説明図(文献4)

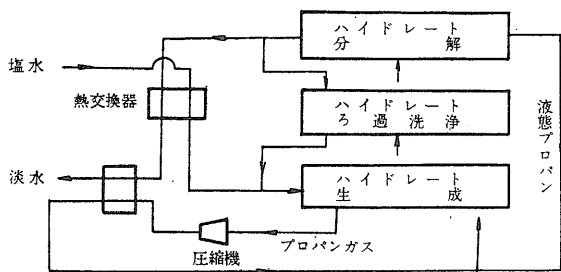
逆浸透式脱塩装置について

逆浸透方式の一般的なフローシートは第15図である。実際にこの脱塩装置を使ったデータとして鹿島臨海工業地帯に供給されている工業用水を処理した脱塩成績と米国サンジェゴの地下塩水の成績は 第3表の通りである。逆浸透法による造水の単価はどの位になるかという設備費 処理コスト等についての試算の多くは大規模の装置のものが多く 中小装置のものには当てはめにくい。最近では小型装置についても力を入れているので その費用も明確になってきている。米国において 造水能力 19m<sup>3</sup>/日のパイロットプラントのコスト試算によると 全運転コストは生産淡水 1m<sup>3</sup> 当り 205円になる。しかしこれは実験装置であるので これを生産設備に直して計算すると そのコストは130円/m<sup>3</sup>となり さらにこれを10倍の規模の 190m<sup>3</sup>/日の設備に換算すると コストは1m<sup>3</sup> 当り53円になるということである。

企業ベースで算出した設備費のうち Du Pont社のものを第4表に示すが これは地下塩水を用いた場合のコスト表で ここでは膜の寿命を5年とみているので 膜の償却費の占める割合が大きい。膜の寿命が倍の10年に延びると 380m<sup>3</sup>/日の設備では62円/m<sup>3</sup> 3,800m<sup>3</sup>/日



第14図 溶媒抽出法説明図



第13図 ハイドレート法説明図

では45円/m<sup>3</sup>にコストは下る。これらの試算はもちろん造水の費用だけであるから 簡易水道として給水するには配管その他維持管理費がかかるので 大まかにみて水道として供給する場合は 1m<sup>3</sup> 当り 100円前後とみて差支えないと考える。ただし簡易水道の場合は補助金などがつくので 実際に各戸に給水する際には 50円/m<sup>3</sup> 以下になるものと思われる。

電気透析法による東京都根島の例

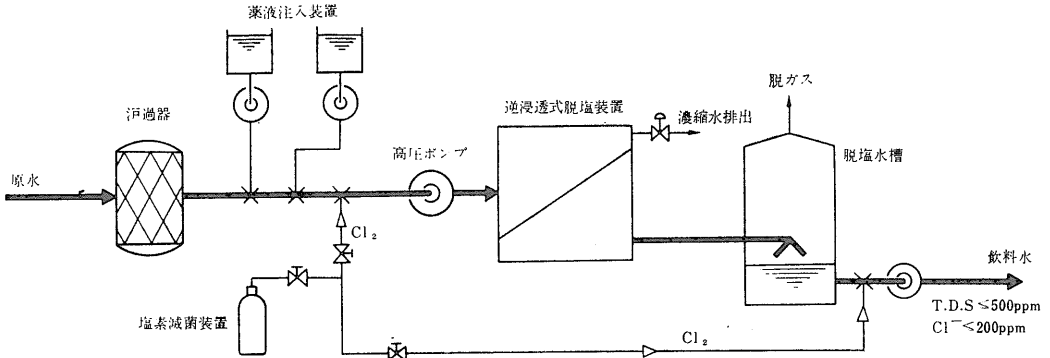
離島においてはじめて電気透析法による脱塩浄水場をもった東京都根島の例は離島の水問題の解決策の一つを具体的に示すとともに それによる問題も提起した。式根島は大島の南方 30km 新島の南西約 2.5km にある離島で 面積 3.3km<sup>2</sup> 人口約 800人であるが 夏は観光客でにぎわうが 水は天水に依存しているので 常に水不足になやまされてきた。1969年東京都では塩水の脱塩による簡易水道施設の建設が決定され 1970年6月からこの施設が運転されるようになった。

原水は地下塩水を汲み上げて用い 電気透析装置による脱塩を行なっている。

この脱塩浄水場の仕様は 給水人口 1,000人として脱塩装置能力は200m<sup>3</sup>/日(家庭用150m<sup>3</sup> 業務用50m<sup>3</sup>)である。所要電力はディーゼル発電 22kW 総建設費 3,095万円 給水コストは 1m<sup>3</sup> 当り 48円である。しかしこの簡易水道の場合は 国が40% 都が30%の補助を行なっているので この値段になったものである。

原水の地下塩水は はじめは塩分 800ppm 位であったが 現在は 2,000ppm 以上にも塩分濃度が上がったため造水能力が低下し 今後さらに塩分濃度が上昇するようならば 何らかの措置を考慮しなければならないということ。原水の安定した塩分濃度による供給 ということがこの場合最も問題になる事項と考えられ 将来離島において地下塩水を用いる場合に 最も重視されなければならないことである。

式根島脱塩浄水場の概略フローシートは第16図で この図において 浄水場から約 500m 離れた井戸から 右



第15図 逆浸透式脱塩装置の一般的なフローシート

下にあるポンプP・9により汲み上げられた塩水は着水井T・8 (20m³) に送られ T・8の原水はP・8原水ポンプにより自動バルブレス・フィルターF・1を通り 濁度2度以下まで除濁されたのち原水タンク (3m³) に貯められる。 T・1のろ過原水はP・1により希釈循環タンクT・2(5m³)に送られる。 別にろ過原水はP・6により常時濃縮液循環タンクT・3および陽極液タンクT・5に各々供給されている。 T・2 T・3 T・4およびT・5の液は各々電気透析槽の希釈室 濃縮室 陰極室 締結枠室および陽極室と各タンク内の液のpHは約2.0に保たせている。 濃縮液循環タンクT・3からのオーバーフロー液の大部分は陽極液タンクT・5に 一部は陰極室 締結枠室液タンクT・4に注がれる。 この装置はすべて自動運転を行なえるようになっていて また保護計装装置もついているので いまのところ運転に支障はないが 前述のように原水の塩分濃度の上昇が一番の問題であるという。

沖縄の島々には昔は電灯がなかったが 今は小さな島にもディーゼル発電所があって たとえ夜は10時まで というような制約はあるにもせよランプ生活からはのがれている。 沖縄本島には水の無い地域には 琉球水道公

社による給水が行なわれているが 離島は 未だそのような恩恵を受けていない。 光と水は生活とは切り離せないものである。 天水タンクの増設には限りがあるもので水不足の根本的な解決策ではありえない。

塩水淡水化は いまでは早実験ではなく実用の域に達しているので 地下塩水を用いた塩水淡水化による給水を実施するときに至っていると考える。 またそれと同時に これまでは無価値と考えられてきた塩分の高い地下水も 水資源のうちの一つとして考えるべき時になったのである。 (筆者らは 応用地質部水資源課)

第4表 逆浸透膜装置の設備費と運転費

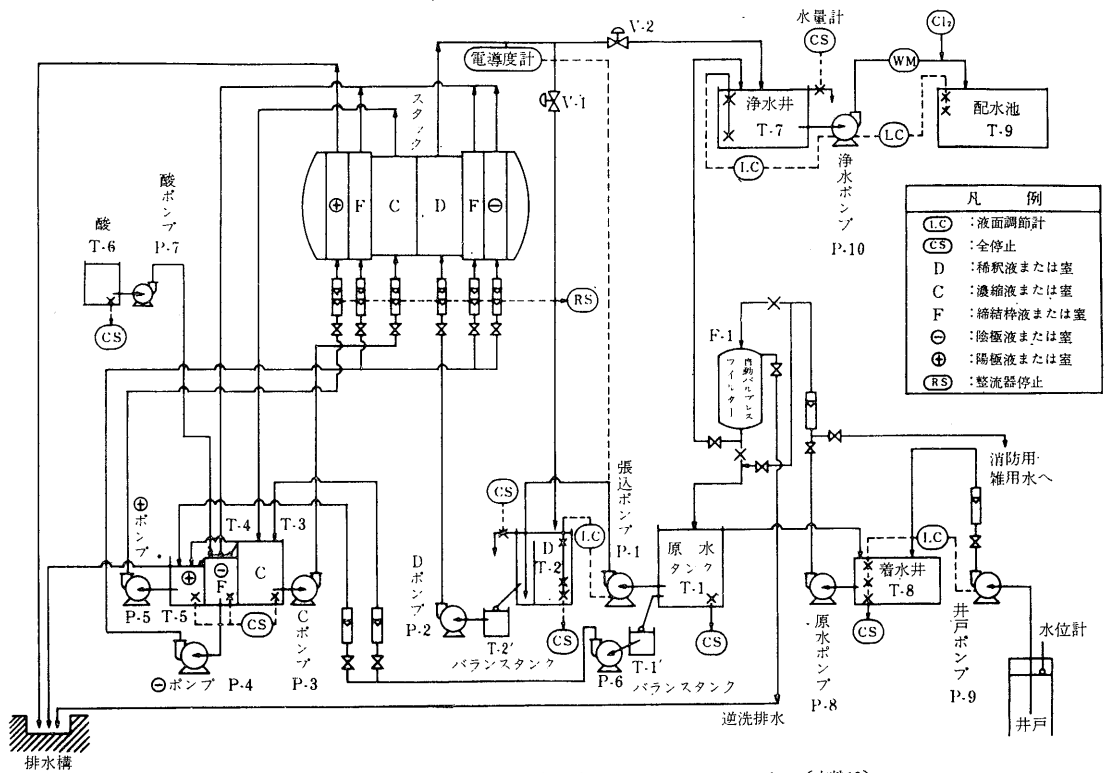
装置規模 (m³/日)	380	3,800
Permeator の性能 (m³/日基)	32.7	32.7
Permeator の単価 (千円/基)	1,676	1,676
Permeator の必要量 (基)	12	116
供給液圧力 (atm)	41	41
脱塩水回収率 (%)	70	70
1. 設備費		
Permeator 設備費 (千円)	19,800	192,000
プラント設備費 (千円)	36,000	168,000
全設備費 (千円)	55,000	360,000
2. 運転費 (円/m³)		
電力費 (3.6円/kWh)	13.3	10.4
プラント償却費 (22%/年)	18.0	8.5
Permeator 償却費 (22%/年)	31.5	29.5
Permeator 取替費 (1%/年)	1.9	1.9
維持費保険費 (1.75%/年)	6.7	4.8
全運転費 (円)	71.4	55.1

備考：金利は3.5%として計算

(文献 8)

第3表 逆浸透法による実際の脱塩成績表 (ppm)

項目	装置	鹿島工業地帯 (日本)		サンジェゴ・カリフォルニア (米国)	
		工業用水	脱塩水	地下塩水	脱塩水
硬度 CaCO <sub>3</sub>		177	3.7	1880	20
カルシウム Ca <sup>2+</sup>		21.9	<0.8	360	7.6
マグネシウム Mg <sup>2+</sup>		29.7	0.7	240	0.5
ナトリウム Na <sup>+</sup>		200	23	900	110
カリウム K <sup>+</sup>		10.9	1.6	26	3.8
硫酸 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		78	<1.0	640	0
塩素 Cl <sup>-</sup>		390	44.6	2020	170



第16図 式根島脱塩浄水場概略フローシート (文献10)

文献

塩水淡水化に関する文献は 内外とも多数でているがここにはその一部として容易に入手できる文献をのせた。

1. 江原亮：電気透析 用水と廢水 vol. 13 no. 1 1971
2. 伏野清蔵：海水の淡水化について 工業用水 no. 143 1970
3. 稲葉実：海水淡水化技術の現状と今後の課題 工業用水 no. 124 1969
4. 科学技術庁：資源調査会報告 第41号 1966
5. 加藤正明：イオン交換膜による脱塩 工業用水 no. 136 1970

6. 三角照之：イオン交換膜 化学と工業 第24巻 第2号 1971
7. 中島克己：イオン交換樹脂膜と淡水化 工業用水 no. 136 1970
8. 谷口良雄・加藤健司：逆浸透法 水処理技術 vol. 11 no. 6 1970
9. 東京工業試験所：淡水化プロセスと副産物の利用
10. 東京都新島本村：東京都式根島かん水脱塩浄水場について 1970
11. 藤岡達慈：海水の淡水化について 工業用水 no. 148 1971

新刊紹介

CLAY-BONDED FOUNDRY SAND

鑄造用珪砂はわが国ではきわめて需要の多い資源で 天然珪砂と人工珪砂が使用されている。鑄型の良否は主として通気性と強度で判定されるが これを調整する因子は珪砂の粒度と配合される耐火粘土の量比である。

本書は粘土-珪砂混合物の性状を理解するための好適な解説書で 珪砂 粘土の性質はもとより 製法による違い 試験法や調整法を中心に詳細に述べられている。また鑄造耐火物用鑄型は溶鋼よりはるかに高温の湯を注入するため 結合材に油を用いて 混練成形したものを焼成して使用しているが 本

書の最後の2章は これについて記されている。鑄造関係者はもちろん 原料にたづさわる技術者に一読をおすすめする。

<主要目次>

第1章 珪砂の試験と応用/第2章 鑄物砂の形成と産状/第3章 珪砂の粒度による影響/第4章 粘土/第5章 天然珪砂と人工珪砂/第6章 粘土結合砂へ有機物の添加/第7章 珪砂の調整/第8章 鑄型の製造と性状/第9章 粘土結合砂 (clay-bonded sand) の加熱結果/第10章 鑄込中と鑄込後の鑄型の性質/第11章 油中子/第12章 中子造型——中子に起因する欠陥

著者：W. B. PARKES

発行所：APPLIED SCIENCE PUBLISHERS LTD, LONDON

A 5判 367ページ 取扱店：全国洋書販売店 定価：9,270