

■ 技術報告 ■

太陽熱利用海水淡水化システム

Solar System for Desalination

土屋 恵一*・村井 淳男**・石井 盛郎***
Keiichi Tsuchiya Atsuo Murai Morio Ishii

1. はじめに

人間の生存のために水は不可欠のものであり、昔から水の豊富な場所に都市が栄えてきた。しかし最近では地域によって或は時期によって水不足が発生するようになってきた。これは産業の発展、人口の都市集中、生活水準の向上などによるものであり、水不足解消の手段として、ダムの建設や排水の再利用などが進められている。さらに、これらの手段で水不足が解消しきれない場合の最後の手段として海水及びかん水（塩分を含む地下水）の淡水化が注目されるに至った。

淡水化装置の需要は中東諸国を中心に増加してきており、最近の5年間をみると毎年約100万 m^3 /日の装置が設置されている。図-1に「淡水化装置容量の推移」を示す。

地域別にみると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、次いで米国、アフリカの順になっている。表1に「淡水化装置の地域別分布」を示す。

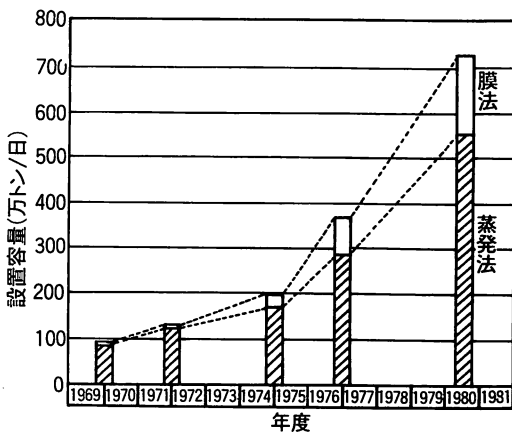


図-1 淡水化装置容量の推移

* (株) 笹倉機械製作所東京事務所営業部長
〒103 東京都中央区八重洲1-3-8 (井田ビル)

** (株) 笹倉機械製作所東京事務所所長

*** 東京三洋電機(株)空調事業部ソーラ技術部課長

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	

2. 淡水化の方法

淡水化の方法は大別して蒸発法、膜法、冷凍法の3つに分けられる。表2に「方式別淡水化装置の設置状況」を示す。

2.1 蒸 発 法

原水を加熱しその一部を蒸発させ、発生した蒸気を冷却し凝縮させて淡水を得る方法である。表2に示すとおり蒸発法にもいくつかの方法がある。

多段フラッシュ型は1基数千 m^3 /日以上の大容量向きであり容量で全体の67%を占めている。

多重効用型は中小規模(数千 m^3 /日以下)向きであり、日本では太陽熱利用による海水淡水化テストプラントにこの型が採用されている。

2.2 膜 法

電気透析法と逆浸透圧法がある。電気透析法は海水又はかん水に電位差を与え、陽イオン及び陰イオンに選択性を持つ2種のイオン交換膜を用い、 Na^+ 、 Cl^- 等のイオンを除くことによって淡水を得る方法である。数千ppm以下のかん水の淡水化に多く用いられ、海水の淡水化に採用される例は少ない。

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				
単段フラッシュ型	—	—	77	43
多段フラッシュ型	208	2,889	415	4,892
浸管型	—	—	127	82
立型多重効用型	11	9	104	287
横型多重効用型	4	9	19	78
蒸気圧縮型	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	—	—	16	31
小計	255	2,915	965	5,523
膜法				
電気透折	72	58	82	135
逆浸透圧	201	154	929	1,478
電気透折/逆浸透圧	—	—	228	139
小計	273	212	1,239	1,752
冷凍法	—	—	1	—
合計	528	3,127	2,205	7,275

逆浸透圧法は水は通すが溶存物質は通しにくいという性質を持つ特殊な半透膜を用いて淡水を得る方法である。初期の段階では海水より濃度の低いかん水の淡水化に用いられていたが、最近では膜の開発が進み、1段で海水から淡水を得ることが可能となり、大型海水淡水化装置が建設されるようになってきている。

2.3 冷凍法

原水を冷却して細い氷の結晶を作り、これを取り出し、融解して淡水を得る方法である。水を氷の結晶にするために必要なエネルギーは、水を蒸発させるエネルギーの約1/8であるため、所要エネルギーが小さいという特徴があるが、氷の結晶の周囲に付着している原水の洗滌等に技術的な問題が残されており、まだ実用化の段階には至っていない。

3. 太陽熱利用の海水淡水化装置

前述の各種の淡水化装置を運転するためには、加熱のための熱エネルギーと電力が必要である。そこで太陽熱を利用し、淡水化に必要なエネルギーを低減することが昭和52年ごろから日本でも検討されはじめた。

太陽熱を利用した淡水化方式は直接法と間接法に大別される。

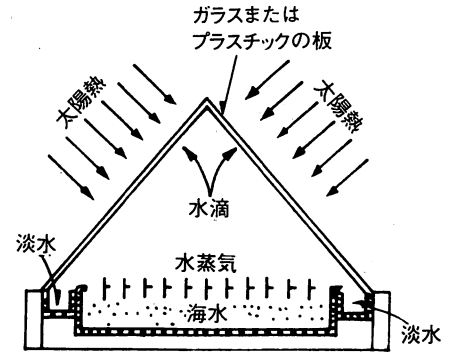


図-2 直接法

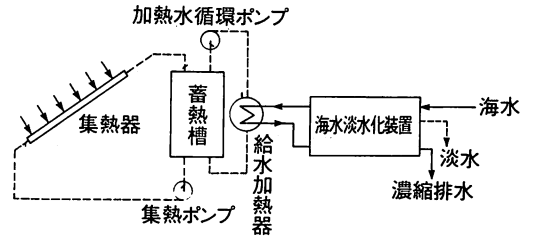


図-3 間接法の一例

3.1 直接法

図-2に直接法の一例を示す。ガラス或は合成樹脂製の屋根の下に浅い海水槽を配置したもので、ガラスを通過した太陽エネルギーにより海水の一部が蒸発し、ガラスの内側で凝縮し淡水としてとり出される。運転及び保守が簡単であるが、熱効率が低く、単位面積当りの造水量が少ない。

直接法は、ギリシャ、オーストラリア、米国等で1960年代から1~25m³/日程度の装置が作られている。これまでに作られた装置(約30基)の平均造水量は2.85 l/m²・日である。

3.2 間接法

直接法は集熱器と海水の蒸発器が一体となったものであるが、間接法では集熱器と淡水化装置が独立し、この間に蓄熱槽が置かれ、集熱器、蓄熱槽、淡水化装置の間は熱媒体によって結ばれている。図-3に蒸発法による間接法の一例を示す。

間接法は直接法に比べ、所要面積、熱効率において有利である。米国、西独、オランダ、スイス等で研究が進められ、クエート、サウジアラビア、メキシコ等に小型の装置が導入されている。わが国においてもテストプラントが建設され、運転研究が行われているので次項で述べることにしたい。

4. 太陽熱利用の海水淡水化テストプラント
(機械システム振興協会の蒸発法)

表3 月別気象データ

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
海水温度 (°C)	10.0	7.5	9.0	11.0	15.5	19.0	23.0	26.5	27.0	24.0	19.5	15.0
日射量 (cal/cm ² /日)	193	253	322	395	425	398	437	456	337	276	220	180

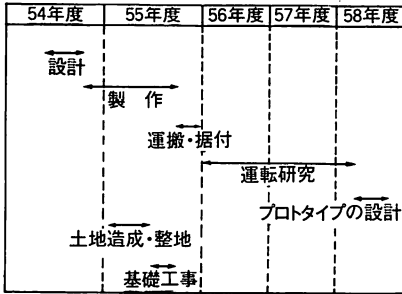


図-4 テストプラント全体スケジュール

4.1 経緯

太陽熱利用の海水淡水化については、機械システム振興協会によって調査、テストプラントの設計、製作、運転研究を含むフィジビリティスタディ (FS) が進められた。昭和52年度から同協会に太陽熱脱塩調査研究委員会が組織され、内外の文献調査、需要調査、テストプラントの計画等が進められた。

ここでは間接法のうち蒸発法テストプラントについて概要を述べることにしたい。

テストプラントの設置場所は香川県多渡津町の高見島に決定され、昭和54年度、55年度にわたって設計、製作が行われ、56年8月から同島で運転研究に入り、現在も引き続き運転中である。

4.2 FSの目的及び計画条件

FSの目的は、試験研究用プラントを建設し、間接法太陽熱脱塩システムの実用化の可能性を技術的、経済的に把握することである。

テストプラントは次の条件で計画された。

計画条件

- イ. 日射量 3,240 Kcal/m²・日 (年平均)
- ロ. 気温 最高37°C, 最低-5°C, 設計値18°C
- ハ. 風速 2 m/s, 最高50 m/s
- ニ. 海水温度 最高28°C, 最低4°C, 設計値17°C
- ホ. 緯度 北緯34度

なお、日別の日射量、海水温度は高松のデータに基づき表3のとおりとされた。

4.3 テストプラントの系統図

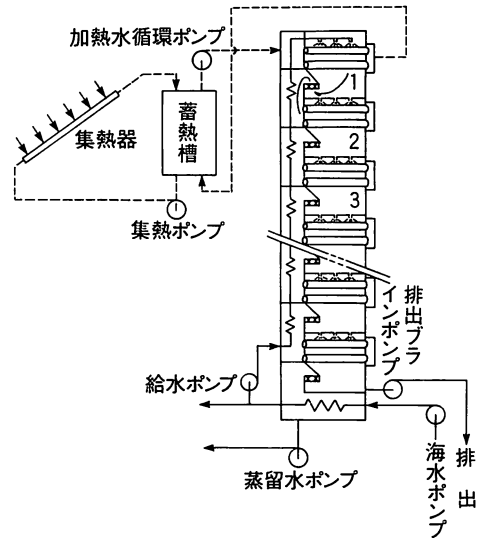


図-5 テストプラントの系統図

図-5にテストプラントの系統図を示す。集熱器で集められた熱エネルギーは温水として蓄熱槽に蓄えられ、ここから加熱水ポンプにより淡水化装置に送られる。加熱水は淡水化装置最上段で海水に熱を与え、加熱水自身は温度低下し、蓄熱槽にもどされる。

4.4 海水淡水化装置

テストプラントの仕様を表4に示す。

蒸発法海水淡水化装置として多重効用水平管液膜型が選定された。これは、小容量の装置であって、しかも熱経済性の高いことが要求されたためである。熱経済性が高く、単位量の淡水を得るに必要な熱エネルギーが少なければ、集熱器の面積が小さくなり、装置全体の建設費が低減され、最終的な淡水コストが安くなる。

多重効用水平管液膜型海水淡水化装置の原理図を図-6に示す。

各蒸発室は水平に伝熱管が配置され、伝熱管の上部から海水が均一に散布される。最上部の伝熱管内部には太陽熱により温度上昇した加熱水が送られ、伝熱管の外面に散布された海水に熱を与え、海水の一部を蒸発させる。発生した蒸気は次の段の伝熱管内部に送られ、伝熱管外面の海水に熱を与え、凝縮して淡水とな

表4 テストプラント(蒸発法)の仕様

造水能力	最大16m ³ /日(平均10m ³ /日)
脱塩装置	多重効用水平管液膜型
効用数	16
造水比	12
集熱器	真空ガラス管型
集熱面積	336m ²
蓄熱槽	温度成層型 48m ³
日射量	3,240Kcal/m ² ・日
原水水質	35,000ppm
製造水純度	50ppm以下(TDS)

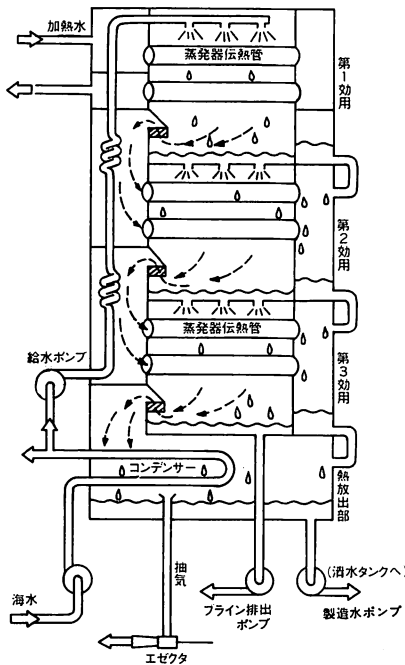


図-6 多重効用水平管液膜型海水淡水化装置原理図

る。このように一つの蒸発室で発生した蒸気が次の蒸発室で加熱源として用いられ、この操作を繰り返す方式を多重効用法と云い、蒸発と凝縮が行われる部屋を「効用」と云う。テストプラントは高い熱経済性を得るため16効用で計画された。

4.5 集熱器

真空ガラス管型集熱器が採用された。集熱面積は336m²である。

4.6 蓄熱槽

温度成層型蓄熱槽(48m³)が採用された。

4.7 システムの自動化とデータロガー

集熱、蓄熱、淡水化プラントを含む全システムが完

全に自動化されている。主要な自動化項目を次に示す。

イ.集熱

- (イ) 日照による集熱ポンプの起動、停止
- (ロ) 所定の温度に達した集熱水の蓄熱槽への移送
- (ハ) 冬期の凍結防止

ロ.蓄熱・淡水化プラント

- (イ) 蓄熱槽中の高温水のレベルによる淡水化プラントの起動、停止
- (ロ) ポンプの故障等事故発生時の停止順序

テストプラントの運転データは操作盤面で指示、記録されるほか、データロガー装置に記録される。

4.8 テストプラントの運転結果

造水量については計画値を上まわる結果が得られたが、造水比(プラントの熱経済性を示す)については目標12に対し、約90%の達成にとどまった。これはプラント表面及び支持部からの放熱が予想より大きかったことによるものであることが判明し、詳細なチェックの結果、次に計画されているUAE向け実証プラントでは所定の造水比を達成する見通しが得られている。蓄熱槽は下部からの放熱が大きいことが判明し、保温を強化することにより、所期の性能が得られた。

集熱器については別項で詳細に述べられることになっている。

なお、上述の太陽熱利用の海水淡水化テストプラント(蒸発法)については、機械システム振興協会の委託を受け、集熱器は三洋電機空調設備㈱が、蓄熱槽は三菱重工業㈱が、海水淡水化装置と蒸発法全体のまとめは㈱笹倉機械製作所が担当した。

5. 海水淡水化装置用集熱器

5.1 集熱器の種類

我が国においてはすでに、太陽熱の利用は給湯や冷暖房設備に数多く使用されている。これらの太陽熱設備に使用されている集熱器にはつぎの3種類が最も一般的である。

1) 一重カバー+黒色ペイント平板型集熱器

この集熱器は太陽光を受ける吸収面が黒色ペイントのため、太陽光の吸収率(0.95程度)がよい反面集熱面からの赤外放射率(0.95程度)も高く、高温集熱での放射熱損失が大きい。また断熱構造が空気層+裏面保温材のため、高温集熱での対流、熱伝導損失が大きい。

2) 一重カバー+選択吸収膜付平板型集熱器

太陽光を受ける吸収面にニッケルやクロム等で処理

した選択吸収膜をつけてある。選択吸収膜とは太陽光の波長(約0.2~2.5 μmに分布)はよく吸収し、集熱温度近辺の赤外波長(約3 μm以上)はあまり放射させない特殊な膜である。この膜により黒色ペイントに比べ吸収率(約0.9程度)をあまり低下させることなく、放射率(約0.2以下)を低くおさえ高温集熱での放射熱損失を低減させている。

3) 真空ガラス管型集熱器

選択吸収膜により放射熱損失をおさえ、集熱板の周囲を高真空(10⁻⁴mmHg程度)でおおっているため、対流、熱伝導による熱損失がほとんどなく、高温集熱時や低日射量時にも高い集熱効率を示す。

図-7にこれらの集熱器の集熱効率の異いを示す。

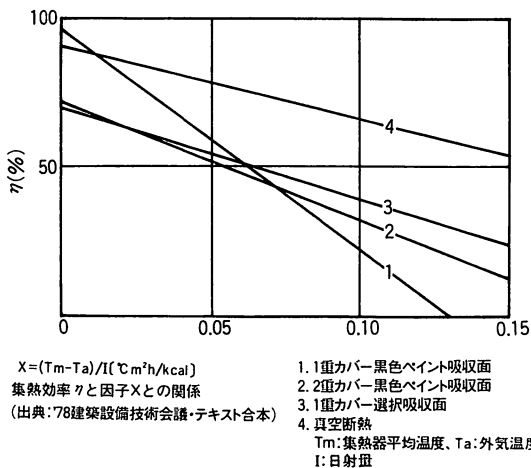


図-7 集熱器の性能

5.2 集熱温度

蒸発法の多重効用型脱塩装置の場合、加熱水温が高く、海水温度が低い方が効率的な運転が出来るが、海水の濃度やスケール防止等の条件を考慮すると100°C近辺の加熱水温度で使用される。

また一般の太陽熱利用設備などと異なり24時間連続運転が行われるのが普通であり、夜間の造水に必要な加熱水も日照時に確保しなければならない。従って集熱温度としては、かなり高くなる事が予想される。

そこで海水淡水化装置が最も多く利用されている中近東地区の気象条件により、シミュレーションを行い蓄熱槽内の温度を求め、代表的な例を図-8に示す。このシミュレーションの結果では、冬期においても蓄熱槽内は75°C以上に保たれることになり、集熱器としては高温集熱時の集熱効率が高い必要がある。シミュレーションは6項で述べられる実証プラントの条件を基にして行った。

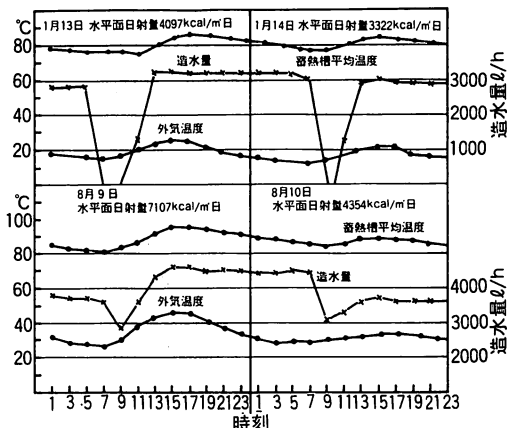


図-8 蓄熱槽平均温度

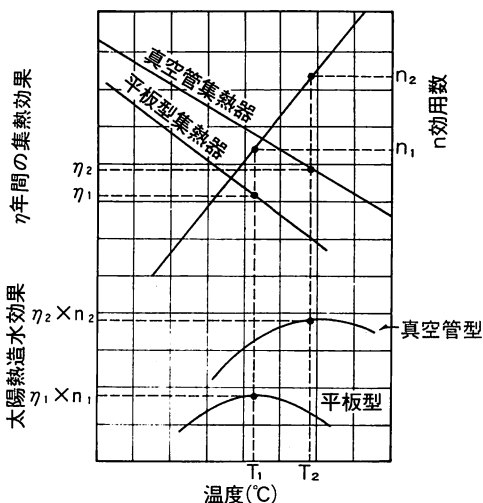


図-9 集熱温と造水効率

5.3 集熱温度と造水効率

集熱温度と造水効率の関係を図-9に示す。多重効用型脱塩装置の効用数は下限値が海水温度により決まり上限値はスケール防止により決ってくる。造水に使われる熱量は効用数にほぼ反比例する。したがって一効用当りの温度差を2dagで設計するととして、太陽熱造水効率を考えると、集熱器単位面積当りの太陽熱造水効率は、効用数 n と集熱効率 η の積に比例する。真空ガラス管型集熱器と平板型集熱器の太陽熱造水効率の比は $\eta_2 n_2 / \eta_1 n_1$ となる。したがって集熱器と多重効用型造水器の組合せによる太陽熱海水淡水化装置においては、高温域で集熱効率の高い真空管型集熱器を使用して、可能なかぎり海水温度との温度差をとり効用数を多くする必要がある。

6. アラブ首長国における太陽熱利用の海水淡水化実証プラント

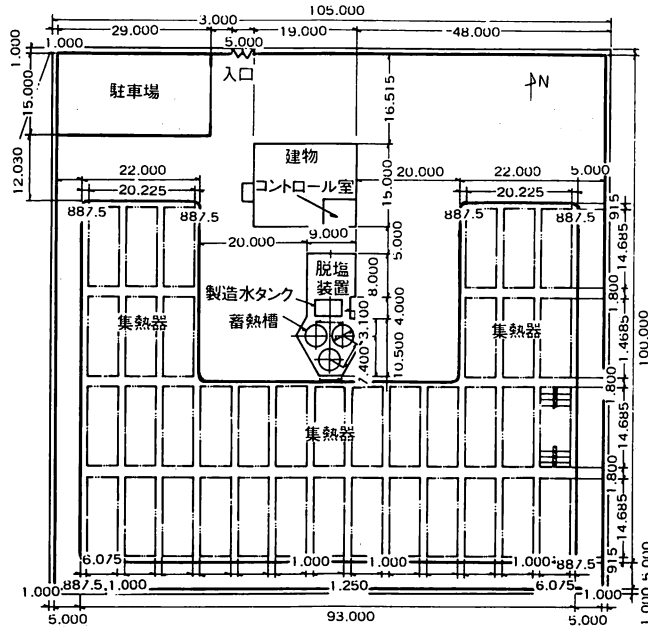


図-10 実証プラントのプロットプラン

太陽熱を利用した海水淡水化実証プラントをアラブ首長国連邦に建設し、その実証運転により中近東地域における同種プラントの実用化の可能性を技術的、経済的に探求するため、日本とアラブ首長国連邦は協同で本プロジェクトを推進している。

推進母体は、日本側は通商産業省-新エネルギー総合開発機構-財団法人エンジニアリング振興協会であり、アラブ首長国側は、水電力庁-石油鉱物資源省である。以下プロジェクトの概要を説明する。

6.1 海水淡水化方式

財団法人機械システム協会が開発された蒸発方式である。即ち4で述べられたように、集熱には真空ガラス管型、蓄熱には温度成層型、脱塩には多重効用水平管液膜型を採用している。

6.2 計画条件

実証プラントの設置場所は、アブダビ市効外にあるウム・アル・ナール発電・造水所（北緯24°25′，東経54°25′）の敷地内であり、実証プラントの計画条件は次の通りである。

- 日射量 5,000 Kcal/m²日 (年平均)
- 大気温 最高50℃ 最低7℃ 設計値30℃
- 風速 5m/s (集熱器設計値)
- 30m/s (プラント、建物設計値)
- 海水温度 最高39℃ 最低21℃ 設計値35℃
- 海水濃度 55,000 ppm (TDS)

6.3 設計仕様

造水能力は、1日年平均80m³ (最大能力120m³/日) を目標としており、その主要仕様は、次の通りである。

- 集熱器 集熱面積 1,862m²
- 効率 66% (日射量 700 Kcal/m²・時, 大気温30℃, 平均集熱温度95℃)
- 蓄熱槽 3塔合計内容積 300m³
- 熱損失 1.05℃/日 (99℃で)
- 脱塩装置 効用数 18, 造水比 12, 製造水純度 50ppm (TDS)

6.4 プロットプラン

105m × 100mの敷地に主要機器が図-10の通り配置が計画されている。

6.5 運転研究

運転研究は、昭和59年10月より1ヶ年間が予定されており、その主要研究項目は次の通りである。

単体機器の性能確認

- 集熱器 集熱効率
- 蓄熱槽 熱損失
- 脱塩装置 造水比, 造水量, 製造水純度, 負荷変動巾

システム評価

最適運転条件の設定, 熱効率の算定, 造水コストの試算

実証プラントの保守方法の確立

集熱器のガラス管表面汚れの洗滌方法, 脱塩装置に発生するスケールの酸洗方法