

太陽光発電塩水淡水化システムの 実運転について

Actual operation of the desalination system
by photovoltaic power generation

相 馬 伸 義*
Nobuyoshi SOMA

井 上 節 夫***
Setsuo INOUE

兼 信 文 彦**
Fumihiko KANENOBU

黒 田 修****
Osamu KURODA

Abstract

An electrodialysis (ED) desalination system powered by photovoltaic (PV) cells was developed.

And the 25kW PV-ED demonstration plant was accomplished in March 1986 and has been actually operating since June 1986. By evaluation of the long term actual operating data, we confirmed the reliability of this system and the ED method is one of the solutions for utilizing varying DC-power of PV-cells. We developed the Partially Desalinated Water (PDW) storing system for sea water desalination by solar energy and its concept will be expanded to another technology.

Next stage, we have been developing the 65kW PV-ED system for brackish water desalination system. This plant was constructed in March 1990 and has been operating since July 1990.

1. まえがき

『水』, それは人類及び生命の必要不可欠な物質であり, 日常生活や農業をはじめ多くの工業プロセスにおいても欠くことの出来ないものである。

この水資源の大半は, 地球上に存在する海水であるものの, 私たちが必要とする殆んどの水資源は淡水であって河川, 湖, 地下水あるいは天水(雨水)などに依存している。

そして人口の増加, 生活水準の向上あるいは産業の発展によっては水不足の問題も挙げられ, 特に発展途上国の農村地帯, 中近東の砂漠地帯をはじめ陸地から離れた数多くの有人離島における飲料水または生活用水の入手は深刻な問題として挙げられる。またこれらの地域は日射強度の強い国々でもある。

これらの地域における川または井戸から得られる水は塩分を含んだり汚れていたりしている為, 何等かの処理をしなければ飲料水や生活用水として使用するこ

とは難しい。特に島しょにおける生活用水の確保は, 解決しなければならない問題の一つとして挙げられる。

そこで, 我々は通商産業省工業技術院「サンシャイン計画」技術開発の一環で, 新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託研究として太陽エネルギーを利用

原稿受付, 平成3年3月7日

* バブコック日立㈱ 機械事業本部 主任技師

Senior engineer, Industrial equipment &
Systems Division, BABCOCK-HITACHI K.K.

**バブコック日立㈱ 呉工場 産業システム部 主任

Engineer, Industrial System Dept., Kure works,
BABCOCK-HITACHI K.K.

***バブコック日立㈱ 呉工場 産業システム部 主任技師

Senior engineer, Industrial System Dept.,
Kure works, BABCOCK-HITACHI K.K.

****日立製作所 日立研究所 主任研究員

Senior researcher,
Hitachi research laboratory, Hitachi Ltd.,

した淡水化システムの開発に着手した。

島しょ等を対象とした太陽光発電海水淡水化システムの実証プラントは長崎県福江市黄島へ1986年3月に完成し、1986年6月より約3ヶ年の期間実証確認運転を行ってきた。この長期運転研究から多くのノウハウが得られており、太陽光発電海水淡水化実証プラントの有用性及び信頼性を確認することによって当初の目的を達成した。

これにより離島における水資源確保の手段としての可能性を見出すとともに、近年地球環境問題の一つである砂漠緑化対応を考慮し、太陽光発電を利用した太陽光発電かん水淡水化システムの開発を開始した。本プロジェクトは、長崎県福江市崎山地区における地下かん水を真水に変えるシステムで、1990年3月に65kW太陽光発電かん水淡水化実証プラントを完成して試運転調整の後に、1990年7月より本格的な運転研究を開始した。これら海水淡水化システムの実証運転結果及びかん水淡水化システムの概要について報告する。

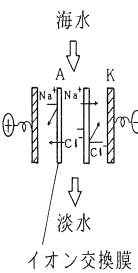
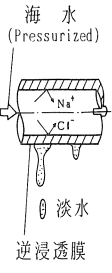
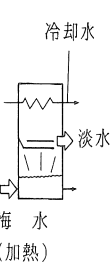
2. 各種淡水化(脱塩)方式

海水又はかん水は一種の水溶液であり、海水の場合は通常TDS(溶解性蒸発残留物)35,000~40,000mg/Lかん水の場合は1,000~30,000mg/L程度の各種溶解塩類を含んでいる。淡水化とは、これら水溶液から溶解塩類を除去することであり、その方法として各種挙げられるが広く実用化されているのは、蒸発法、逆浸透法及び電気透析法の3方式である。

図1に示した主要脱塩方式のひとつである蒸発法は、熱エネルギーによって塩水(海水又はかん水)を加熱し、溶媒(水)のみを蒸発して淡水と濃縮水に分離する方式である。海水淡水化技術としては、早くから実用化され多段フラッシュ法、多重効用法、蒸気圧縮法が開発されているが、実用化されている装置の大部分が多段フラッシュ法で実績が最も多い。

また逆浸透法は機械エネルギーによって、水を通しやすく塩を通しにくい半透膜を利用して塩水から淡水を得る方法である。これは浸透圧以上の圧力を機械エネルギーによって塩水に加えると水は膜を通過して淡水として得られる。近年、高性能な逆浸透膜の開発により海水淡水化プラントの計画や建設がなされている。

そして電気透析法は、電気エネルギーによって塩水中の溶質(陽イオン類及び陰イオン類)を分離し、イオン交換膜を利用して溶媒のみを取り出し淡水を得る方法である。消費電流値は塩水中の塩濃度に比例し、透析電源として直流を使用することから、太陽電池との組み合わせが容易である。

	電気透析法 (ED)	逆浸透法 (RO)	蒸発法 (EV)
主 要 図			
駆 動	電 気 (直流)	加 圧	加 熱
適 合 性	☆☆☆ (DC)	☆☆ (AC)	☆

ED:Electrodialysis DC:Direct Current
RO:Reverse Osmosis AC:Alternating Current
EV:Evaporation

図1 主要脱塩方式

以上の主要脱塩方式において、太陽エネルギーを利用した淡水化システムが開発されており、これは直接法と間接法に大別される。表1に太陽エネルギー利用海水淡水化技術の大分類を示す。

直接法は、太陽熱エネルギーの利用に限定され、いわゆる太陽熱蒸留器と称される。この直接法の一般的性質は、構造操作が簡単である反面造水量が少なく、かつ気象条件に大きく左右される。この問題点を解決するために間接法が開発されている。

間接法においては、集エネルギー部と脱塩部が分離されているため、設計の自由度が大きくシステムが多彩である。一度太陽熱を集熱器で集めた熱を利用して蒸発法淡水化装置を作動させることができるシステムや、集熱器で集めた熱で昇温した原水を高温電気透析法によって脱塩消費電力を低減するシステム、また太陽電池で発電した電力により電気透析装置及び逆浸透装置を作動するシステムがある。一般に直接法の装置規模は、最大数+㎡/dであり、間接法の装置規模は最大数百㎡/dまで可能と考えられている。

これらの太陽エネルギーを利用した淡水化システムとして、太陽光発電利用電気透析海水淡水化システムの実施例は、間接法の中の太陽光(発電)をエネルギー形態とした脱塩方式で電気透析法を用いたものである。国外でも実証化された例は無く、システムの概要等について示す。

表1 太陽エネルギー利用海水淡水化技術の分類⁽¹⁾

項目	エネルギー源	脱塩方式
直接法	太陽熱	蒸発法
		水盤型 傾斜トレー型 傾斜ウィック型 多重効用スチル型
		多段フラッシュ法 多重効用法
間接法	太陽熱	電気透析法 高温電気透析法
		蒸発法 蒸気圧縮法
	太陽光 (発電)	逆浸透法 光発電利用逆浸透法
		電気透析法 光発電利用電気透析法
	風力(発電)	逆浸透法 風力発電利用逆浸透法

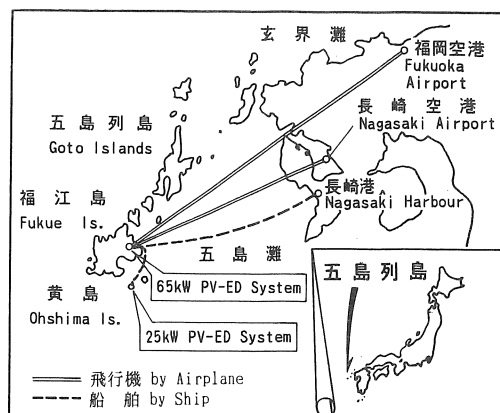


図2 実証プラント設置場所

3. 太陽光発電利用電気透析塩水淡水化システム

電気透析技術は、透析電源として直流を必要とする為、太陽電池が発電する直流電源をそのまま使えるという特長を有する。しかし、単なる太陽光発電システムと淡水化システムを組み合わせるのでは無く両者の特性を有機的に結合し、独立分散型として運転可能な様に開発を試みた。

第一段階のシステムとして離島を対象とした太陽光発電海水淡水化システム(25kW PV-ED system)、そして第二段階のシステムとして遠隔地における水資源確保及び淡水供給の為に太陽光発電かん水淡水化システム(65kW PV-ED system)である。

3.1 設置場所

両システムの実証プラントは、長崎県五島列島の内の黄島及び福江島崎山地区の2ヶ所へ設置した。

図2に両システムの設置場所を示す。

25kW PV-ED systemは、1986年3月に長崎県福江市黄島へ設置され、この黄島は最大標高：約90m、島面積：約1.5km²と平坦な島で人口約100人程度である。

設置場所は、島の集落中心より西へ約300m離れており、平坦な畑地を利用した。海岸からは約100m離れ海拔10m程度で北側の海岸より容易に海水を取水できる。

そして65kW PV-ED systemは、1990年3月に同じ福江市所轄の福江島崎山地区へ設置された。この崎山地区は3町から構成され人口約2,500人程度で、プラント設置場所は集落中心より西南の方向へ約15km離れた平坦な牧草地を利用した。敷地内に福江市所轄の取水井戸を利用し、容易に地下かん水の取水が可能である。

ほぼ福江島の南東部に位置している。

表2 設置場所の概況

項目	設置場所の概況	
黄島	所在地	長崎県福江市黄島町
	位置	東経128度54分、 北緯32度34分
	人口	約100名
	生産業	漁業
	設置実証プラント	25kW太陽光発電海水淡水化システム (25kW PV-ED System)
崎山地区	所在地	長崎県福江市上崎山
	位置	東経128度52分、 北緯32度38分
	人口	約2,500名
	生産業	漁業、農業
	設置実証プラント	65kW太陽光発電かん水淡水化システム (65kW PV-ED System)

3.2 主要設備仕様

設置された25kW PV-ED System 及び65kW PV-ED System 実証プラントの設備仕様を表3に示す。

3.3 複合システムの特長

電気透析技術は、透析電源として直流を必要とする為、太陽電池が発電する直流電源をそのまま使えるという特長を有する。しかし、単なる太陽光発電システムと淡水化システムを組み合わせるのでは無く両者の特性を有機的に結合する点に特長を持たせている。

表3 設 備 仕 様

設 備 名 称	25kW太陽光発電海水淡水化システム (25kW PV-ED System)	65kW太陽光発電かん水淡水化システム (65kW PV-ED System)
太陽光発電設備 太陽電池	型式：シリコン単結晶型 容量：最大出力 (Pmax) 64.0 W _p 最適動作電流 (I _{op}) 2.84 A 最適動作電圧 (V _{op}) 22.5 V 数量：390モジュール 総発電量 24.96 kW _p 型式：据置式ベント型蓄電池	型式：シリコン単結晶型 容量：最大出力 (Pmax) 47.0 W _p 最適動作電流 (I _{op}) 2.94 A 最適動作電圧 (V _{op}) 16.0 V 数量：1,380モジュール 総発電量 64.86 kW _p 型式：据置式ベント型蓄電池 (電解液攪拌装置付き)
蓄電装置	容量：1,200AH (10時間率) 公称電圧 2.0V/セル 数量：96個 (48個直列×2並列) 公称電圧 96.0 V	容量：1,200AH (10時間率) 公称電圧 2.0V/セル 数量：96個 (96個直列) 公称電圧 192.0 V
塩水淡水化設備 取水設備	海中井戸の位置：海面下約2～3m 海中井戸ポンプ：1.8m ³ /h×40mAq	深井戸の深さ：GL下約50～60m 深井戸揚水ポンプ：31.2m ³ /h×80mAq
脱塩装置	型式：電気透析装置 (HOTED-1S1-3504NC) 容量：海水塩濃度 35,000 mg/L-TDS 製造水塩濃度 400 mg/L-TDS 定格容量 0.42 m ³ /h	型式：電気透析装置 (HOTED-1S1-0204NC) 容量：かん水塩濃度 1,500 mg/L-TDS 製造水塩濃度 400 mg/L-TDS 定格容量 8.33 m ³ /h
付帯設備	濾過器：カートリッジ型 1.8 m ³ /h 濾過水タンク：円筒立型 1.6 m ³ 脱塩タンク：成層角型 2.0 m ³ 濃縮タンク：円筒立型 0.2 m ³ 脱塩水ポンプ：0.09m ³ /min×12mAq 濃縮水ポンプ：0.09m ³ /min×12mAq 中間濃度水貯蔵タンク：20m ³ +10m ³ 製造水タンク：10 m ³	濾過器：カートリッジ型 34.0 m ³ /h かん水貯蔵タンク：円筒立型 180 m ³ 脱塩タンク：角型 7.0 m ³ 濃縮タンク：円筒立型 1.2 m ³ 脱塩水ポンプ：0.59m ³ /min×18mAq 濃縮水ポンプ：0.59m ³ /min×18mAq 製造水タンク：6 m ³
制御関連設備 電源設備	電源監視制御盤： 太陽電池出力の蓄電池への充放電制御及び各負荷設備への分電 電気透析制御盤：二段脱塩運転法 太陽電池の発電特性に合わせて海水の脱塩操作を行い、昼間に中間濃度水の生成及び貯蔵する運転法が特長	電源監視制御盤： 太陽電池出力の蓄電池への充放電制御及び各負荷設備への分電 電気透析制御盤：かん水貯蔵脱塩運転法 昼間に深井戸から揚水及びかん水貯蔵し、電気透析の特性を利用して少ない消費脱塩電力による連続脱塩運転法が特長

3.3.1 二段濃度脱塩運転法⁽²⁾

25kW PV-ED systemは、海水から淡水を得るシステムである。本システムは、太陽光発電の発電特性と電気透析槽の塩濃度による脱塩消費電流の変化特性を利用し、二段脱塩運転法を採用しているのが特長である。

即ち、太陽光発電の発電量は日射量に依存し、昼間に発電量が多い。また電気透析による脱塩は、海水に含まれる塩分濃度によって消費電流値が変化する。

従って発電量の多い昼間は、海水(35,000mg/L-TDS)から中間濃度水(5,000mg/L-TDS)を製造する高濃度脱塩運転を行い、余剰の発電量は蓄電池へ充電する。

曇天時や雨天時の様に発電量の少ない時間帯や発電の得られない夜間時には、中間濃度水から淡水を製造する低濃度脱塩運転を行う。この時、蓄電池からの放電によって運転されるが、電源が不足する場合には、待機運転となり、運転条件の整うまで脱塩装置は停止となる。この運転を二段脱塩運転法と称し、全て運転は自動制御される。

本システムは、離島等を想定した立地条件を考慮しており、独立分散型システムとしては3年間の実証運転によりシステム機能が確認された。図3に運転結果を示す。

 3.3.2 運転結果^{(3)~(4)}

25kW PV-ED systemは、1986年4月より試運転調整を行った後、6月以降本格的運転を開始した。約3ヶ年の運転状況を図3に示す。

淡水化システムより得られる造水量は、日射量に依存しており夏場の日射量の多い季節は造水量も多く、冬場の日射量の少ない季節は造水量も少ない傾向を示している。この期間の年平均造水量は、約4.0m³/dであり、運転データの1日毎の造水量を調査すると、日射条件の良い日で1日最高9.5m³/d得られている例もある。

日射量に対する造水量の比率(Ratio=#2/#1)は、中間濃度水の塩濃度設定値の変化に影響することが判っており、初年度運転時より季節毎に中間濃度水の塩濃度を変化させた1988年度における比率が高く単位日射量当たりの造水量が多い事を示している。

また本システムの運転経験から、雨天時には天水を貯蔵し、貯めた雨水を利用することで生活水の確保が可能であり、晴天が続く渇水時期には、造水装置により生活用水が得られるという自然の摂理に叶ったシステムとなっていることが判った。また運転中には、運転に支障となる故障は無く、稼働率94.5%と高く信頼性も大きいことが確認された。

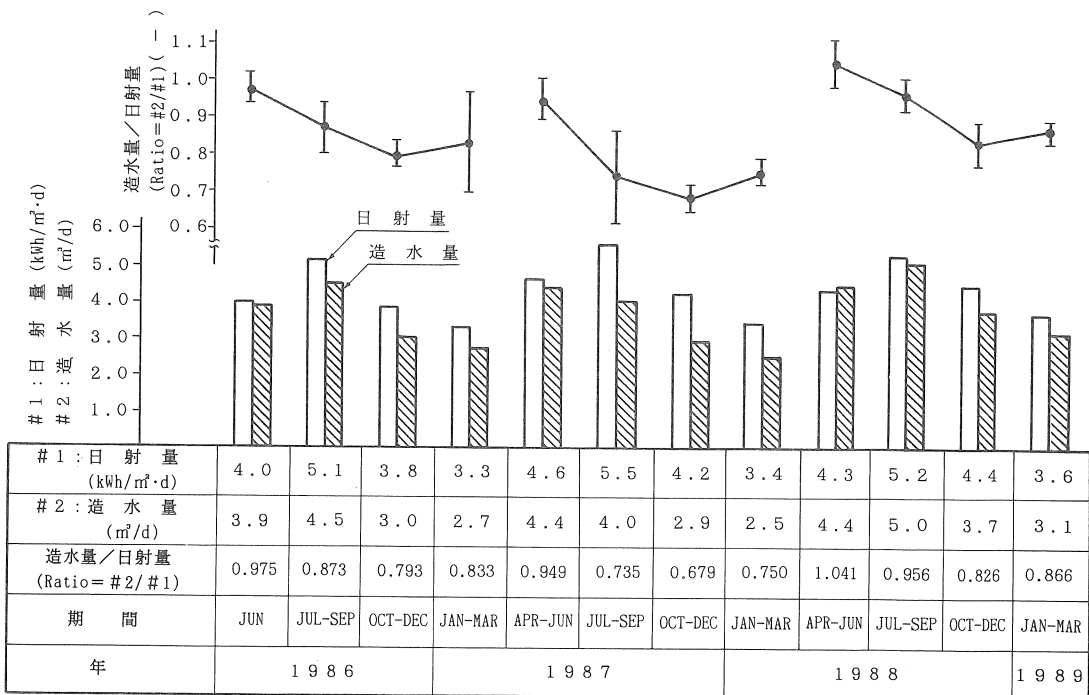


図3 実運転データ(季節毎)

本プラントから得られた淡水の水質が飲料水に適合しているかについては、公的専門機関に依頼分析をして海水の性状及び製造水の性状を調査した。製造水については、簡易水道施設並の滅菌装置を設置することにより飲料可能であることが確認された。表4に水質分析の結果例を示す。

表4 水質分析結果例

原 海 水			製 造 水			滅菌後
水質項目	計量(1987/7)	(1988/4)	水質項目	計量(1987/7)	(1988/4)	1987/7
塩素イオン	14,600mg/L	17,300	塩素イオン	127mg/L	170mg/L	125mg/L
トリカドミウム	7,300mg/L	10,000	有機物質	2.6mg/L	2.7mg/L	1.6mg/L
一般細菌	220個/mL	1,100個/mL	一般細菌	600個/mL	84個/mL	0
大腸菌群	検出する	検出する	大腸菌群	検出する	検出する	検出しない
電気伝導率	42mS/cm	42mS/cm	pH値	7.4	7.3	7.5
COD	2.1mg/L	2.1mg/L	色 度	5度以下	5度以下	5度以下
濁 度	0.9	0.2未満	濁 度	2度以下	2度以下	2度以下
蒸発残留物	32,000mg/L	40,000mg/L	蒸発残留物	349mg/L	395mg/L	-

また25kW PV-ED systemにおける太陽エネルギー収支を表5に示す。

システム効率は、太陽エネルギーを100%とした場合6.53%を示し、その内電気透析装置に寄与したエネルギー量は3.43%及び取水ポンプ等負荷設備は2.26%であった。

表5 エネルギー収支⁽⁵⁾

項 目	単位	エネルギー収支
日 射 量	kWh	712,402 (100.00%)
太陽電池発電量	kWh	46,524 (6.53%)
発電損失電力量	kWh	665,878 (93.47%)
蓄電池充放電損失電力量	kWh	2,611 (0.37%)
直交変換損失電力量	kWh	3,367 (0.47%)
電気透析装置消費電力量	kWh	24,459 (3.43%)
補機消費電力量	kWh	16,037 (2.26%)

3.3.3 経済試算

太陽光発電システムと淡水化システムの組み合わせ技術実用化に際してコスト試算を試みた。表6に海水淡水化システム及びかん水淡水化システムを想定した実規模プラントの造水コストを示す。

本システムは、独立分散型として離島等及び遠隔地における砂漠等の水不足地域を対象として試算した。

また実用化として非常に近い将来実現されるという観点から、太陽電池の価格については、現状の価格を

基本に、本格的に普及が進むであろうと推定される西暦2000年代の価格を想定して、それぞれ800¥/Wp, 500¥/Wp, 100¥/Wpの3ケースについて評価した。

この結果、造水コストは将来の太陽電池コストに依存しており、太陽電池のコストが低減されることにより大きく造水コストも低減できることが確認された。

表6 造 水 コ ス ト

項 目	単位	海水淡水化システム	かん水淡水化システム	かん水淡水化システム
太陽光発電システム				
太 陽 電 池	kWp	310	160	490
蓄 電 池	kWh	460	270	770
淡水化システム				
造水装置定格容量	m ³ /h	4.2	12.5	41.7
原水塩分濃度	mg/L	35,000	1,500	1,500
淡水塩分濃度	mg/L	400	400	400
造水コスト				
太陽電池コスト(800¥/Wp)	円/m ³	1,890	490	360
太陽電池コスト(500¥/Wp)	円/m ³	1,370	370	250
太陽電池コスト(100¥/Wp)	円/m ³	740	230	180

特に電気透析法によるかん水淡水化装置は、海水淡水化装置よりも効率良く造水可能であり、造水コストも安価である傾向が判った。地下水が塩分濃化傾向にある地域にとって非常に朗報であり、最近の地球環境規模の観点より砂漠緑化対策の技術にも対応できる技術として可能性を見出だした。

既に、65kW PV-ED Systemを長崎県福江市上崎山地区に実証プラントを建設完了し、試運転の後に本格的な運転を1990年7月より開始した。

3.3.4 かん水貯蔵脱塩運転システム⁽⁶⁾

65kW PV-ED systemは、かん水から淡水を得るシステムである。本システムは、前述の海水淡水化システムと同様に太陽光発電の発電特性と電気透析槽の塩濃度による脱塩消費電流の変化特性を利用している。

即ち、太陽光発電の発電量は日射量に依存し、昼間に発電量が多い。また電気透析による脱塩は、原水に含まれる塩分濃度が低ければ低い消費電流値で脱塩できる特性を有する。従って、発電量の多い昼間は、深井戸からの地下かん水(蒸発残留物1,000~30,000mg/L-TDS)の揚水ポンプ電源として利用し一度タンクへ貯蔵する。

また余剰の発電量は蓄電池へ充電する。この時、電気透析装置は、低消費電力でかん水から淡水を製造する運転が行われ、発電量の少ない時間帯や発電の得られない夜間時には、蓄電池からの放電により貯蔵してある地下かん水から淡水を製造することが可能である。

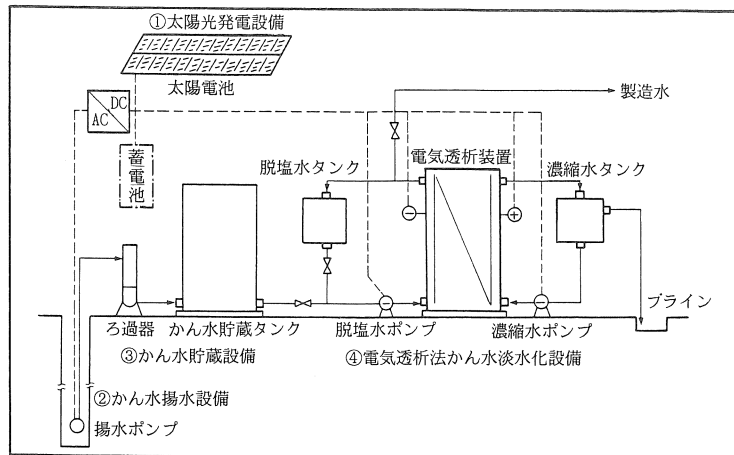


図4. SYSTEM FLOW SHEET

電力が不足する場合には待機運転となり、運転条件の整うまで脱塩装置は停止となる。この運転をかん水貯蔵システム運転法と称し、全て運転は自動制御される。

本システムは、水不足及び地下水が塩水化している地域等を想定して立地条件を考慮しており、独立電源とした電気透析法によるかん水淡水化装置は、世界でも初めての試みである。

図4にシステムフロー図を示す。

システムは、大別して太陽光発電設備、かん水貯蔵設備、電気透析法かん水淡水化設備から構成される。

太陽電池で発電された電力は揚水ポンプの動力源となり地下かん水をかん水貯蔵タンクへ汲み上げる。

このかん水は、次に電気透析槽へ送られ太陽電池から得られた直流電力の印加によって脱塩操作が行われる。脱塩水は電気透析槽内を循環し塩分濃度が目標塩濃度 (400mg/L-TDS) 以下になれば淡水として取り出される。

3.3.5 実証運転

65kW PV-ED System実証プラントは、1990年3月に完成し試運転調整の後に7月より本格的運転に入った。

この実証プラントの全景を写真1に示す。

かん水淡水化装置は、個別の建屋収納とし、制御盤、蓄電池、直交変換装置は管理棟内へ収納した。

実証運転は、約2～3ヶ年に渡って気象データ、太陽電池の発電量、電気透析装置の造水量及び各要素機器の特性等のデータを蓄積し、これらのデータを解析

することによって運転制御技術の確立を図り、今後システムの信頼性、経済性の評価を実施する予定である。

4. 結 言

離島等における水資源確保の手段として、太陽光発電海水淡水化実証プラントの信頼性が確認され、技術的には当初の目的を達した。また更に塩分を含んだ地下水 (かん水) が得られ、水不足の問題がある地域に対しては、現在実施している太陽光発電かん水淡水化システムが適用可能であると考えられる。

両システムの信頼性が確認されれば、水資源確保の手段として利用でき、尚かつ近年地球環境問題の一つである砂漠緑化対応技術として更に電気透析技術の応用範囲の拡大に期待できる。

本システムの実証に際し、得られた成果及びノウハウは、太陽光発電利用システムとしての信頼性と早期実用化の可能性において非常に有意義であった。

多くの知見より、今後太陽電池の実用化が進むに伴って、太陽電池コスト低減が尚一層進むと考えられ本複合システムの有効性は更に倍加し、離島及び島しょ部のみならず太陽エネルギーに恵まれた水不足地域への適用が促進されるものとして期待したい。

最後に、本プロジェクト推進に当たり、通商産業省工業技術院「サンシャイン計画」及び新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)、地元協力自治体である長崎県福江市、本研究を共同で推進した (財) 造水促進センター、(株) 日立製作所、昭和シェル石油 (株) の関係各位に感謝の意を表わす次第である。

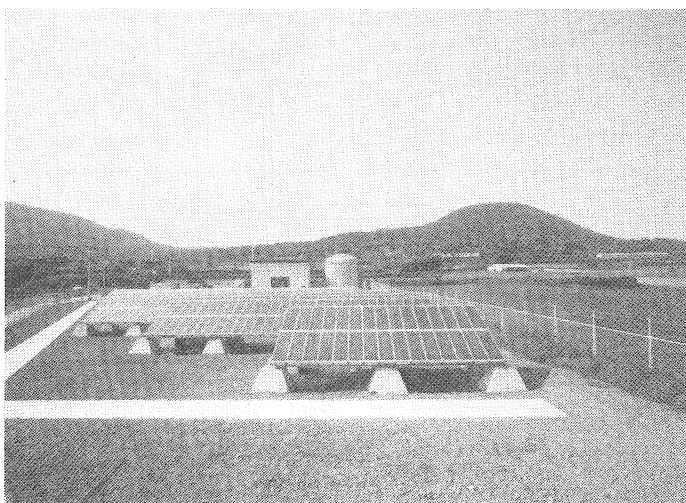


写真 1 65 kW PV-ED 実証プラント外観

文 献

- (1) 黒田修・高橋燦吉・久保田昌治, 太陽エネルギー利用
海水淡水化技術, 日本海水学会誌, 41-3(1987),
- (2) 相馬伸義・大森昌雄, 太陽光発電利用電気透析海水淡
水化システム, エネルギー・資源, 6-6(1985)11,
- (3) N.Soma, K.Nishinoiri, O.Kuroda, etl, PHOTOVOLTA-
IC POWER FOR SEA WATER DESALINATION BY MEANS OF
ELECTRODIALYSIS METHOD.
(1987-9), Hamburg, Germany.
- (4) N.Soma, O.Kuroda, S.Takahashi, etl, AN ELECTROD-
IALYSIS SEA WATER DESALINATION SYSTEM POWERED BY
PHOTOVOLTAIC CELLS, 65(1987),
161-169.
- (5) N.Soma, E.Inada, Y.Eguchi, O.Kuroda, etl, LONG
TERM ACTUAL OPERATION OF THE SEAWATER DESALTING
BY 25kW PHOTOVOLTAIC CELLS ON A SMALL ISLAND,
(1989-9), Kobe, Japan
- (6) 井上節夫, 電気透析法によるかん水淡水化システム,
太陽光発電システムシンポジウム, (1990-5), 東京.