海洋プラント技術*

梶川武信** 磯 舜也***

Plant Technology for Utilization of Ocean Resources / Takenobu KAJIKAWA and Shunya ISO

Key words: ocean energy, ocean thermal energy conversion (OTEC), wave energy, desalination, manganese nodule, uranium adsorption

1. はじめに

海洋はすでに水産業、交通・運輸、資源採取（石油、砂利など）、及びレジャーの場として利用されてきている。更に、より高度に生物資源、鉱物・海水資源、エネルギー資源及び空間資源を活用していくことに対するニーズは、食料問題、エネルギー資源問題、より快適な生活の実現への要求などから、しだいに強いものとなっている。海洋プラント技術は、それらを具体化するための技術と位置付けることが出来る。鉱物・海水資源においては、マンガンノジュール、コバルトリッチクラスト、熱水鉱床、海中ウラン、リチウム採取、淡水化等を挙げることが出来、又、海洋エネルギー資源としては、海洋温度差、波浪、潮汐、海潮流、塩分濃度差、バイオマスが賦存している。広大な海洋に存在しているため潜在資源量は膨大であるという特徴があるが、賦存密度、エネルギー密度は陸上と比べてかなり小さいことが大きい問題となっている。又、海洋の平均水深が3795mといわれているように、大水深下に賦存している場合が多い。これらの資源のもつ特徴は、そのまま海洋プラント技術がかかえる課題となる。海洋プラント技術は、海洋と相互作用をしながら有用な資源やエネルギーを取り出すことを目的としているため、波浪、流れ、風といった外力に抗し、海水という腐食性環境や生物付着環境に対抗して海洋中で長期にわたって稼動しなければならない。このように海洋プラント技術は、海洋から物あるいはエネル

ギーを効率的且つ低コストで採取・変換する技術と、そのシステムの容器や海水と直接接触する海洋構造物技術とに分けることが出来る。ここでは以下に海水淡水化、鉱物資源採取、エネルギー資源採取にかかわる海洋プラント技術について概説することにした。

2. 海水淡水化プラント

海水淡水化プラントがはじめて船舶に搭載されたのは、約400年近くも前のことであるが、陸上用として実用に供された歴史は比較的浅く、第2次大戦後である。しかし近年、工業の発達、文化生活の向上、人口の都市集中化等により、世界各地の水需要は増大の一途を辿り、その解決の一方策として海水淡水化プラントの建設が急増し、それにともないその技術も急速に進歩してきた。

海水淡水化プラントには種々の方法があるが、水の相変化を伴うものと、水の相変化を伴わないもの到大別される。これらをさらに細分類すると表1のようになる。

主要プロセスは、(1) 蒸発法、(2) 逆浸透法、(3) 電気透析法であり、ガスハイドレート法と溶媒抽出法と

表1 海水淡水化プラントの種類

・相変化あり	蒸発法	多段フラッシュ蒸発法 (MSF)
		多重効用蒸発法 (ME)
		蒸気圧縮法 (VC)
	冷凍法 (FREEZING)	
	ガスハイドレート法	
・相変化なし	膜 法	電気透析法 (ED)
		逆浸透法 (RO)
	その他	イオン交換樹脂法 (IE)
		溶媒抽出法

* 原稿受付 昭和63年1月23日

** 電子技術総合研究所 (つくば市梅園1-1-4)

*** 東京久栄(株) (東京都中央区日本橋3-1-15)

は、実験室内での小規模実験のみが行われており、商業運転中の設備はない。

1) 蒸 発 法

蒸発法は海水を加熱して水分を蒸発させその水蒸気を凝縮させて淡水を得る方法で、最も古くから開発されたもので、現在表1のごとく、MSF、ME、VCの3方法が実用に供されており、プラントの実績ではMSFが圧倒的に多い。

本方法の特徴および技術の現状は、①蒸留水に近い良好な水質が得られる。②MSF法はスケールメリットが大きい。③エネルギー消費量が多い。④運転温度が高いため装置機器の腐食及び伝熱管へのスケール付着の防止が技術的問題点である。⑤多量の冷却海水が必要であり取排水設備が大きくなる。

2) 逆浸透法

逆浸透法は水を通しやすく、塩を通しにくい半透膜の両側に塩水と淡水と共存させ、塩水側にその塩水の浸透圧以上の圧力を加え膜を通じて塩水中より水分子を浸透させて淡水を得る方法である。膜としてはセルロースアセテート膜、複合膜等があり、膜を格納するモジュールとしては中空線型、スパイラル型等がある。

本方法の特徴および技術の現状は、①原理的にエネルギー消費が最も小さい。②運転が簡単で維持管理が容易である。③常温運転のため材料の腐食の問題が少ない。④膜の性能を長期間維持するため原水の前処理が必要となる。⑤膜の長寿命化が最重要課題である。

3) 電気透析法

陽イオンのみを通す陽イオン交換膜と陰イオンのみを通す陰イオン交換膜の両側に直流電圧をかけると、海水中的陽イオンと陰イオンがそれぞれの通過可能な膜を透過して電極の方へ移動して淡水を得る方法である。本方法の特徴および技術の現状は、①水の回収率が高い。②常温常圧運転のため装置腐食が少なく塩ビ等の安価な材料が使用できる。③電力消費量は原水の濃度に逆比例し、従って通常海水では、不利である。④膜面の汚れ除去のため定期的な洗浄が必要。⑤スケールメリットがない。

主要プロセスのエネルギー消費量、生産水コストを表2にまとめる。

従来海水淡水化プラントの主流は蒸発法、特にMSF法で、最大マーケットは中近東であったが、最近RO法の伸長が著しい。現在世界で稼働している海水淡水化プラントの基数は5700基で生産水量は約1150万m³/日、うち約70%が蒸

表2 エネルギー消費量・生産水コスト

方 式	エネルギー消費量 (kWh/m ³)	生産水コスト (円/m ³)	備 考
蒸発法	約 25	250~300 400~500	2万m ³ /日級 数百m ³ /日級
逆浸透法	約 7	約 200 約 300	2万m ³ /日級 800m ³ /日級
電気透析法 河川開発	約 8	約 600 100~150	2000m ³ /日級 地域特性大

発法、24%がRO法で上記全世界の生産水量の約40%は日本メーカの製作したプラントから生産されている。

今後は原水の水質、設置される場所の水の需給状況およびエネルギーの供給条件等により、それにマッチしたプロセス、および容量を有する多様化した装置が共存共栄で発展してゆくものと考えられる。

3. 鉱物資源採取プラント

3.1 ウラン採取

海水中のウラン濃度は、3.3μg/l (3.3ppb)と極めて低濃度であるが、地球上の海水には、全体で約40億tものウラン資源が溶存している。

海水中のウランを採取するために表3に示す各種の方法が研究開発されている²⁾。

共沈法、浮選法は、沈澱粒子が小さいほど、又気泡が小さいほど、回収率は良いが、回収時間が長い。溶媒抽出法は、抽出率が高いが、経済性と未回収溶剤による環境汚染が考えられる。生物濃縮法は多量の海水との自然接触が難しく、回収技術も又未開発である。

現状では無機、有機の吸着剤による吸着法が有利と考えられる。

吸着法における、吸着剤の性能向上も重要だが、多

表3 各種海水ウラン採取方法の比較

方 法	代 表 的 物 質	評 価					総 合
		の海水との 容易さの 接 触	物質の 安定性	物質の 価 格	物質の 形 態	U採取 容 量	
共 沈 法	水酸化鉄、水酸化アルミニウム、 水酸化チタン、りん酸カルシウム	△	○	○	×	○	×
吸着性	無機	○	○	○	○	○	○
	有機	○	△	—	○	○	△
浮 選 法	水酸化鉄およびドデシル硫酸ナトリウム	△	△	—	×	○	×
溶媒抽出法 生物濃縮法	DBP, TBP	△	×	×	△	○	×
	緑藻、クロレラ	○	○	—	△	△	△

図1 石油掘削リグ型海水ウラン採取プラント

量の海水との接触効率の高いプラントを開発することが、経済性を左右する。吸着床は、潮流等流れの大きい海域への設置が望ましく、一方脱着は淡水洗浄水や、濃縮工程上陸上部にプラント設置が必要である。海水流動エネルギー方式には、機械エネルギーを使用するポンプ流動方式、潮位差波浪・海流等を利用する自然エネルギー方式がある。

わが国では、通産省のプロジェクトとして、金属鉱業事業団が10 kg-U モデルプラントを香川県仁尾町の臨海部に建設し、1985年より実験を行い性能特性、経済性についての評価資料を得た。又同事業団では、1000 t-U の実用プラント、3種類のシステムの試設計を行った。システム A では沿岸平行式陸上設置型で、必要ポンプは80 m³/s×467台となる。システム B, C は沿岸部突堤式とし、吸着率を60%, 80%, ポンプでは500 m³/sを60台、45台としている。米国ではDOEのプロジェクトで、500 t-U/年の陸上揚水、落差を利用した固定流動床の概念設計が行われている。又、MITのDriscollらは、バージ型の採取船や、石油掘削リグを利用した着底式採取システムを試設計している。図1にプラント概念の一例としてMITリグ型ウラン採取プラントを示す²⁾。

現在、最も先行している吸着法の回収システムでも吸着剤の性能に関する基礎研究は高いレベル

にあるが、海水との接触技術の開発は遅れている。科学技術庁の技術予測報告書によれば、海水からのウラン採取の実用化は2002年とされている。

3.2 マンガン団塊採取

マンガン団塊 (manganese nodule) は水深2000～6000 mに分布する自生堆積物の一種である。1500～2000 mの海山では、岩盤を覆うクラスト状を示し、5000～6000 mの海盆では団塊状の形態で、主要含有金属は、マンガン、ニッケル、銅、コバルトである。微粒の赤粘土堆積層の主として表面近くに半埋没状で分布しており、賦存率は10 kg/m²程度である。表4に平均金属成分を示す³⁾。

昭和40年代から地質調査所による基礎調査が実施され、昭和57年には調査探査を行う深海資源開

発(株)が金属鉱業事業団と民間企業48社で設立、第2白嶺丸による自主採鉱も開始された。採鉱技術の開発の急務から昭和56年度に工業技術院大型プロジェクトとしてマンガン団塊採鉱システムがスタートした。

システムの構成は、流体ドレッジ方式—海底上の集鉱装置(曳航式又は自走式)により集鉱されたマンガン団塊を、海底から海面までのパイプラインにより揚鉱するシステムで、揚鉱する方法はエアリフト方式とポンプリフト方式がある。前者はパイプラインの途中より圧縮空気を送入し、固気液三相流で揚鉱する。後者はパイプライン中間に取りつけた水中ポンプにより固液二相流で揚鉱するシステムである。CLB方式(continuous line bucket)—エンドレスロープに多数のバケットを設け、船の両端から連続的にマンガン団塊を採取する方式である。

表4 マンガン団塊の平均金属成分 (wt%)

成分	全大洋平均	海山	深海	中部太平洋	北東太平洋
Mn	16.02	14.62	16.78	15.71	22.33
Fe	15.55	15.81	17.27	9.06	9.44
Co	0.284	1.15	0.256	0.213	0.192
Ni	0.480	0.351	0.540	0.956	1.080
Cu	0.259	0.058	0.370	0.711	6.627
水深(m)	—	1872	4460	5049	4537

マンガン段階採鉱の採算性は陸上ニッケル鉱山コストと対応しなければならない。それには、年間 300 万 t (乾重量) の規模が必要と 1970 年の米国、内務省報告書に述べられている。一方、採鉱には 1982 年 4 月の国連海洋法条約案の採決により、採鉱技術の保有が前提とされる。鉱区については条約準備委員会で調整されていたが、1987 年 12 月 18 日に正式決定されたハワイ沖西経 110~150 度、北緯 10~20 度にまたがる 75 000 km² である。

条約発効後、60 か国の批准を得て 1 年後に発効するので 1991 年ごろから採掘が可能となる。目標が設定されたので、技術の開発、実用化の準備が必要である。

4. 海洋エネルギープラント

4.1 海洋温度差発電⁴⁾

海洋の表層(水深 0~100 m)と深層(水深 600~1 000 m)との間の温度差を利用して、電力を取り出すシステムが海洋温度差発電プラントである。温度差は高々 20°C 程度であるため、1 kW の電力を作り出すのに、温水、冷水各々 3 l/s 程度が必要となるが、昼夜別なく安定して供給出来るという特徴を持っている。

海洋温度差発電システムは、発電システム、海洋構造物システム、エネルギー輸送・利用システム及び環境アセスメントに大別される。発電システムは、温・冷海水を取水し、その熱エネルギーにより、熱機関を駆動させて電力に変換するシステムである。その主要な方式として、① クローズドランキンサイクル、② オープンランキンサイクルがある。その基本的構成は同じで、蒸発器、タービン・発電機、凝縮器が主要機器である。クローズドサイクルでは、隔壁を持つ表面型熱交換器が用いられ、多管円筒式、プレート式、プレートフィン式などの熱交換器形状方式がある。発電出力 P は蒸発器処理熱量 Q_E と効率 η により、 $P = \eta Q_E$ と示され、 Q_E は伝熱面積と熱交換器性能の積に比例する。それ故コストを下げるためには、熱伝達性能の高性能化と低コスト伝熱面材料の採用が不可欠となる。蒸発伝熱面の高性能化には、各種多孔質面、微細加工面が考案されており、凝縮伝熱面では、薄膜化凝縮と迅速な凝縮液の排除を実現する加工面が提案されている。海水側は、特に温海水では、伝熱面に微小生物の付着により熱抵抗を生じる。そのため伝熱面の洗浄システムが必要となる。ボールやスラリーを用いた機械的クリーニングや塩素を用いた化学的クリーニング法がある。熱抵抗値としては従来の火力発電所における値よりかなり小さい $R_t = 1.7 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ K/kW}$ 以下が要求される。オープンサイクルではタービン入口

圧力が高々 2 700 Pa 程度であるため、大型且つ高効率なタービン及び海水中の溶存気体の動的な挙動解明が課題となっている。

海洋構造物システムでは海洋設置型と陸上設置型に分類される。発電出力 1 MW でも、直径 1.8~2.0 m、10 MW では 5~7 m の大口径長尺(海洋設置型: 6~800 m、陸上設置型: 1~2 km) 冷水取水管技術はほかに例をみないものである。

海洋温度差発電で用いられる深層冷水は無機栄養塩を多く含み、清浄で冷熱エネルギーを保有している。これらと、発電された電気エネルギーを有機的に連係してトータルシステムとして利用する方が、効用が大きい。現在ハワイ島でハワイ自然エネルギー研究所及び科学技術庁の「海洋深層資源の有効利用技術の開発に関する研究」プロジェクトにおいて深層水栄養塩利用と海洋温度差発電を結合させるための基礎実験が進められている。

4.2 波浪発電⁵⁾

風が主要原因となって発生する波浪は単位波頂線当たり約 $0.5 H^2 T$ (kW/m) の時間的平均パワーを持っている。ただし、 H 、 T は有義波高及び周期を示す。我が国周辺では年間平均 10 kW/m 程度の波浪エネルギーが海岸線にやってきている。その源は太陽エネルギーであるから、無尽でクリーンエネルギーであるが、変動が激しいという欠点を持っている。

波浪発電システムは、波浪エネルギーを他のエネルギーに変換する一次変換装置と、その後、最終的に我々が利用する電気エネルギー等に変換する二次変換装置、及び海洋構造物とから主に構成されている。一次変換装置が中核技術で、① 可動物体型、② 振動水柱型、③ 受圧面型、④ 越波型(波集中型)があり、波の上下や回転、水平運動を利用する。二次変換装置では、一次変換による運動流体(空気流又は油圧流)が往復流であることや変動があることを考慮して、なお且つ効率的に変換することが望まれる。近年往復流で同一方向に力が働く対称翼を持つウェルズタービンの開発がすすめられ、ガイドベーンの取付けやタンデム化などがウェルズタービンの特徴を生かすために試みられている。

海洋構造物としては洋上設置型と沿岸設置型とがある。前者は大形向き、後者は防波、消波堤などを利用するもので小形システムに向いている。

波浪エネルギーが変動するため、変動を許容する利用システムへの適用が不可欠である。

表 5 に波浪エネルギーの利用形態とシステム例を示す⁶⁾。

表5 波浪エネルギーの利用

エネルギー利用形態	利用項目	シ ス テ ム 例	根 拠
電力利用型	離島用電力	① 4 000 人程度の離島において、5 000 kW の既設発電設備の補助として、500 kW（定格）の波力発電設備を設ける。 ② 200 人程度で 300 kW の既設の発電設備をもつ離島において、500 kW（定格）の波力発電設備を設ける。	離島の発電量 0.9~1.5 kW/人
	灯台用電力	防波堤の灯台の電源として、1 kW（定格）の波力発電設備を設ける。	灯台用必要電力 100 W 程度
	電着用電力	80 kW（平均出力）の波力発電設備で 5~6 ha の海域に魚礁を造成する。	電着基板面積 4 000 m ² に対する消費電力は 80 kW
	海水の淡水化	400 kW（定格）の波力発電設備で、逆浸透法による海水の淡水化を行い、1 000 m ³ /日（5 000 人/日）の造水を行う。	1 000 m ³ /日の造水装置の主ポンプの容量が 250 kW
熱利用型	道路融雪	400 kW（定格）の波力発電設備で 2 000 m ² の融雪を行う。	融雪用電力は 170~300 W/m ²
	栽培漁業への温水供給	200 kW（平均出力）の波力発熱装置により 5℃ の水を 25℃ の温水に 100 m ³ /日変換する。	
	給湯、暖房、温水供給システム	280 kW（平均出力）の波力発熱装置により 50 戸の民家に、給湯、暖房を行い、同時に 200 m ² の道路の融雪を行う。	給湯 1.5 kW/戸 暖房 2 kW/戸 融雪 0.25 kW/m ²
動力利用型	空気防波堤	200 kW（定格）の波力発電設備により、周期 2.7 s、波高 50 cm の波を区間 35 m にわたって 50% 消波する。	所要空気量 84 m ³ /min 所要空気圧 2 kgf/cm ²
	海水交換	60 kW（平均出力）の波力発電装置で、60 000 m ² の小規模な湾内の海水を交換し、現状 COD 30 ppm を 3 ppm まで下げる。ただし、外海水は 2 ppm、港内への流入負荷 100 ppm で流入流量は 700 m ³ /日である。	50 kW のポンプでの流量は 60 m ³ /min

5. お わ り に

参 考 文 献

海洋は水産資源ばかりでなく、エネルギー、鉱物、淡水といった人類に不可欠な資源の宝庫であるといえる。その採取のための技術として、海洋プラント技術があり、採取・変換技術、海洋構造物技術及び海との共存を図るための環境保全技術から構成される。淡水化プラントを除いて多くは実海域パイロットプラント実験の段階にあり、今後とも着実な技術の開発が必要であり、そのアプローチは、海洋固有の特性を十分利用したものが求められることになろう。

- 1) 後藤藤太郎、尾方 昇：沿岸海水利用の現状と将来、日本海水学会誌、35, 4 (1981)。
- 2) 菅野昌義：溶存物質の回収システムの動向、日本海水学会誌、39, 4 (1985) 240。
- 3) 水野篤行：海底鉱物資源の研究の動向、日本海水学会誌、39, 4 (1985) 227。
- 4) 梶川武信：海洋温度差エネルギー利用技術と将来性、エネルギー・資源、7, 6 (1986) 64。
- 5) 前田久明：波浪エネルギーの利用技術と将来性、エネルギー・資源、7, 6 (1986) 34。
- 6) 合田良実ほか：波力エネルギー利用技術に関する総合調査、第2回波浪エネルギー利用シンポジウム、海洋科学技術センタ (1987) 249。