

■ 展望・解説 ■

海洋エネルギー変換構造体

Extracting Ocean Energy Structures

長 崎 作 治*

Sakuji Nagasaki



1. 海洋エネルギー

海洋からエネルギーが変換できる。

海洋のエネルギーを利用した例としては、海上保安庁(日本)の波力発電灯浮標(ブイ)、アメリカ合衆国コーストガードの波浪の上下運動を利用したホイール(音響)ブイ、千葉県九十九里町に設置された、ヒラメ養殖場の補助電力と実証試験プラントを目的とした外径2.1m、鋼管10本の消波工を兼ねたエネルギー吸収装置、送気管、定圧化タンク、エアタービン発電機、高圧貯蔵タンク空気圧縮機からなる最大出力30kWの固定式波力発電システム、長さ80m、幅12m、高さ7.8mの浮体内部に22個の空気室をもち水深40mに多点係留し、3000KW発電を実証した波力発電装置“海明”、ノルウェー・ベルゲン北方海岸に350KW発電を目的とし、鋼製の円筒パイプ下端に海側に突出した一対のコンクリートの壁を付けた“harbour”によって、2種類の共振効果を引出し、一波の周期でしか発電できなかったのを2倍となるよう設計したMOWC(Multiresonant Oscillating Water Column)、コレクター、先が細いつの型水路、水路から溢れた海水を貯水する海面上3mの貯水場(5,500m³)、低落差タービンとからなる350KW発電、TAPCHAN(Tapered Channel Wave Power Plant)、そしてフランスの240MW(理想条件)潮力(潮位差)エネルギーランス発電所などがある。

1970年の石油値上げ以来、ソビエト、南朝鮮、イギリスも潮力発電を計画している。

また海流(5マイル/時)を利用する海流発電の計画がフロリダにある。1970年アメリカ合衆国は大平洋San Clemente島沖の海面下12mに世界最初の海洋エネルギー農場を設置し、深海から栄養に富んだ冷海水を汲み上げ、ジャイアントケルプの栽培実験に成功し

た。ケルプ(海藻)をメタンガスに変換することが目的で20*20km²の海洋ケルプ農場から5万人のエネルギーが期待できるという。日本でも500*250m²のユニット156個からなる4*8km²の農場を沖合10km以上、水深100m以上の海域に係留設置し、年間100万ton(50kg/m³)の海草を栽培し、メタンガスに変換する海洋バイオマス発電のスタディをすでに行っている。海洋温度差発電は、論文が1881年発表され、1920年Claude(フランス)がキューバの海岸沖で、22KWの発電に成功した。その後地中海に75KW発電が計画されたが、巨額の投資と海水によるボイラーの腐食問題から中止され、長年スタディが行われなかった。オイルショック以降ハワイ島(ハワイ州政府とアメリカエネルギー省)、ナウル島(東京電力)、徳の島(九州電力)で発電実験を行っており、100MWの実用化の時代を迎えている。夏至線と冬至線間の海域の場合、海面の平均温度は27℃、水深600mの水温は2~3.5℃である。この温度差を利用して作動流体(アンモニア、フロン)を海面水で蒸発させタービンを回し、発電し、冷水で蒸気を元の液体に戻す考え方が海洋温度差発電(Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC)である。なお塩濃度差発電の考え方の一つである塩水/真水バッテリー発電もスタディされている。

現在、石炭、原油、原子力発電KWHあたり単価に比較し、海洋エネルギー発電は高額となりその実施例は少ないが、場所、目的によっては利用価値が十分考えられる。また将来、洋上で海洋エネルギーをメタンガス、水素、電気に変換し、船で運搬、ケーブルで送電することも期待できる。

本文は、波浪(波力)、潮位差(潮力)、海流、バイオマス、海洋温度差、塩濃度差変換(発電)構造体についてユニークな一例をそれぞれで紹介する。

2. 波浪(波力)発電

海洋の孤点に建設される海洋構造物の電源として波

* 東海大学海洋学部海洋土木工学科教授

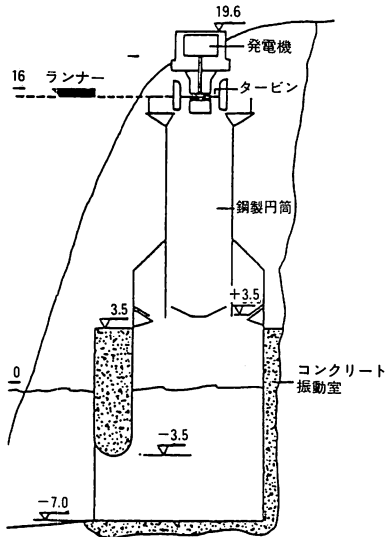


図-1 MOWC



図-2 TAPCHAN

浪エネルギーを利用することは誰も考える事である。波力発電を使用しているものには、灯浮標用の電源に中央パイプ型、東京湾入口海獺（あしか）島灯台の電源用として孤岩に取付けた固定式、御前崎港沖波浪観測塔（撤去）、防波堤などがある。

アメリカ合衆国エネルギー省は北大平洋の波浪エネルギーによって、海岸線1kmあたり5～50MWの発電を期待している。

またスコットランド・エジンバラ大学のSalter教授は480kmに及ぶSalterの波力発電を大西洋Hebridesの回りに係留することによってイギリスが必要と

する電力を波浪エネルギーから求めることが出来ると言う。1856～1973年間に波浪発電に関するパテントがイギリスだけで340件もある。波浪の上下運動を機械エネルギーに変換する考え方のパテントが多い。

ノルウェーは24億円のプロジェクトで2つの異なるタイプの波力発電所、図-1のMOWCとTAPCHANをベルゲンの北方海岸に建設した。

波浪発電を代表して、波浪(波力)エネルギーを低価格で電力に変換し、実用化の域に達したTAPCHANの構造体を紹介する。

TAPCHAN (Tapered Channel Wave Power Plant)発電所は図-2に示されるように、効率80～90%で入射波を集中する幅をもつコレクター(collector)①と波長の2～3倍の長さをもつ角(つ)型の斜水路(tapered channel)②すなわち波浪エネルギー変換路(コンバーター)からなり、コンバーターに進入した波浪は斜水路の幅が次第に狭くなっているため波頂が高くなり、水路から海水があふれ、貯水場(reservoir)③ないに流入する。貯水場から常に一定容量の海水が底落差タービン④に供給され、発電する。なおコレクターの幅は60m、長さ90m、コンバーター最大幅3m、最小幅0.2m、コンバーターの長さ90m、貯水場面積5,500m²、貯水場水面位海面上3m、発電容量は350kWである。

(a) コレクター

コレクターは入射波を集中させ、その地区の波浪に適したコンバーターを設計する。したがって与えられた周期、波向の分布をもつ入射波に対し、できるだけエネルギーを集中するコレクターとしなければならない。形状、寸法が問題となる。非共振構造とし集中エネルギーを無反射、無摩擦つまり損失0でコンバーターに伝達するようにする。したがって集中エネルギーはコンバーターの全面幅に比例する。反射を効果的に防止したコレクターが考えられ、コレクターと入射波の交互作用もわかり、効率80～90%の形状が設計された。

(b) エネルギーコンバーター

波浪エネルギーは特に設計された水路により海面上3mの貯水場に海水(波浪)を流入し、位置エネルギーに変換する。効率の高い変換が問題となり、水路に沿って運動する波頂が連続的にオーバーフローするようなテーパのついた水路を用いることとした。

テーパ付き水路による波浪エネルギー効率は次ぎのエネルギー式から求まる。

深海波のエネルギー E は

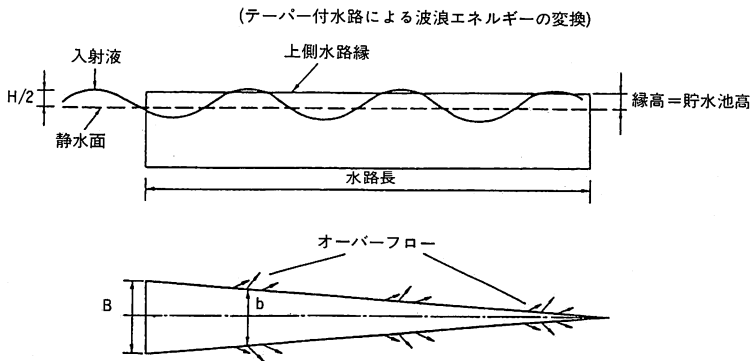


図-3 テーパー付き水路

$$E = \frac{1}{8} QH^2LB$$

ここで Q : 海水密度 H : 波高 L : 波長 B : 波長に沿う入射集中幅

図-3の全面開口集中幅のテーパー付き水路に波浪が入射すると、水路内を進行し、波高は増加する。損失を無視すると、水路内の波高 h は

$$h = \left[\frac{B}{b} \right]^{1/2} H$$

b は任意点の水路幅

波高は水路端に波頂が到達するまで増加し続け、海水は貯水場に流入する。水路の長さは波長の約3倍を要し、波頂の進行にともなって波頂から貯水場に流入する水量は単位水路長さあたり一定量である。

海水の全エネルギーは位置エネルギーと運動エネルギーの合計であるが、波頂の海水が水路からオーバーフローすると貯水場に貯蔵され位置エネルギーとなり、これが発電エネルギー源となる。

テーパー付き水路エネルギーの効率 η は波頂の海水エレメントの位置エネルギーと全エネルギーとの比となり、損失と高次作用を無視すると

$$\eta = \frac{E_p}{E_p + E_k} = \frac{mg \cdot \frac{H}{2}}{mg \cdot \frac{H}{2} + \frac{m}{2} \left[\frac{\pi H}{T} \right]^2} = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 H}{g T^2}}$$

ここで T : 波浪周期 g : 重力加速度 E_p, E_k : 質量 m をもつ波頂の海水エレメントの位置エネルギー、運動エネルギー

$$\omega^2 = \left[\frac{2\pi}{T} \right]^2$$

ここで ω : 波浪角振度 よって

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\pi H}{2L}}$$

η は波長が長くなると増加し、波高が高くなると減少する。水路ないの波高は図-3に示されるようにへり(rim)の高さの2倍になるので、へりの高さが低いほど効率は大きくなる。水力発電用タービンの効率から最小の高さが決められた。一方最大のへりの高さは水路の最小波長の1/7より少なくすべきである。波高/波長比が1/7より大きいと砕波が生じ、エネルギーが分散する。

効率は理論値より水路壁の摩擦、エッジ(端)を横切る海水の運動エネルギーの損失、高次作用による損失などにより現場値の方が小さい。縮尺1/100と1/50のモデル水槽実験の測定効率は50~70%で、摩擦損失5~10%、エッジ損失25~40%、波長の2~3倍の長さの水路が最大効率を示すことが判った。

(c) 貯水場

貯水場の機能はタービンに安定した海水を供給すること、水路を進行する波浪間の波高の増加による海水のこぼれ落ち変動に十分対応できる容量が必要で、タービンの条件から決定される。

(d) 水力発電プラント

低落差、Kaplan筒型タービンにより発電を行っているが、発電単価は6.4~9.6円/KWHである。

3. 潮位差(潮力)発電

太陽と月の引力が地球に作用する。

太陽は149,600,000kmはなれているので、月の引力の46%と少ない。月は334,400kmと近く一日2回、海洋に潮位をつくる。最大の潮位差はカナダ・ファンディ

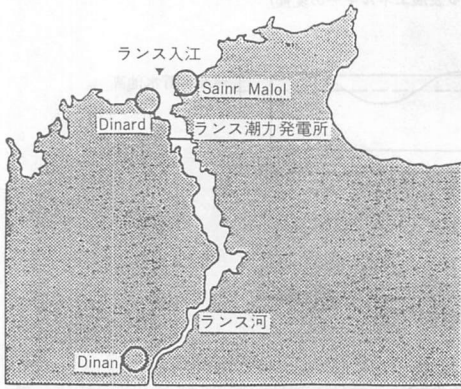


図-4 Rance潮力発電所

湾の18m, ポリネシアのフランス領タヒチ島の潮位差はわずか2.5cmである。

世界で最初の最大潮位差(潮力)発電所は、図-4のイギリス海峡を一望できる、フランス・Brittany海岸のRance河口にあるRance潮力発電所である。22の予定地から選ばれたRance河口の潮位差は13m, 18,900 m^3/sec の海水が入江の内に外に流入, 流失し, その潮流速は25 m/sec , 最適条件の位置である。

半世紀に及ぶ調査, 究明が行われている。まず, タービン変換機の究明, つづいてタービンを据付ける構造体の開発, プロジェクトの設計は1959年に完了した。

1961年, 河口から上流2マイル地点に幅770mの締切ドックの建設が開始され, 岩基礎の掘削, 潮流の強度と方向に対するコンクリートケーソンの据付, 急潮流における基礎杭の打設, ダムの切土と6か年間に及び, 1967年, ダム, パワープラント, 航路閘門, 上げ, 下げゲートすべてが完了し, 貯水地は満水となった。

ダムの頂部は2車線道路となっている。ダムには24個のタービン発電機が設置されており, 上げ潮流(ダム方向), 下げ潮流(海方向)のいずれの方向にもタービンが回転して作動できる構造となっている。Ranceの潮位差は一定でないから, 出力はつねに変化するが, 理想条件で240MW, 一年間の平均出力は60MWである。

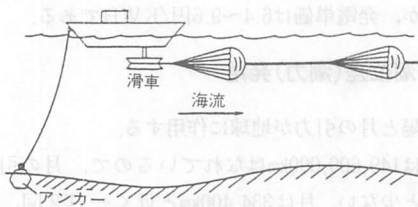


図-5 海流発電海中パラシュート

4. 海流発電

Gary Steelmanの海中パラシュート発電は図-5に示されるように船形浮体に乗せた車(wheel)と車軸を回転させる連続したパラシュート付きループベルトからなり, 海流中に本システムがおかれると, パラシュートは海流に引張られ, ループ状に回り, 車を回転させ, タービン発電機が回転し発電する。

海流の速度は, 時間, 場所によって異なるが, 速度が小さいのでエネルギーレベルも小さく, 低速度タービンをかなり多く設置しなければならない。流向に追従できる直径1.5m海流パラシュート発電の場合, 流速2ノットで出力10馬力と言われている。したがって大出力の場合, ループ材料の強度が問題となる。

5. バイオマス発電

本システム概念は, 生育が早く, 収穫の容易な種類の海藻を連続して外洋または沿岸の生育場で大量栽培生産し, 収穫, 貯蔵, 発酵させ, エネルギーに変換するものである。海藻栽培の目標としては, 乾燥重量20 $\text{kg}/\text{m}^2/\text{年}$ 年であれば, 変換メタンガスが天然ガスより経済的に劣るのでこのことがバイオマス農場の第一条件となっている。なお, 副産品の回収, 海藻に集まってくる魚類の収穫も期待できる。海洋バイオマス農場計画はアメリカ, H. A. Wilcoxの構想から出発し, 農場として利用できる海面は50*100平方マイル(130*100 km^2), 平方マイルあたり300人相当のエネルギーが生産できると推定している。

1970年大太平洋San Clemente島沖の海面下12mに農場(構造体)を設置し, 光合成と深海から栄養に富んだ冷水を汲上げジアアントケルプ(Macrocyctis Pyrifera)の栽培実験に成功し, 続いて, 1974年の人工筏によるケルプの栽培実験から海洋筏による増殖生産と生物学的問題が評価され, 環境に応じた成長度, 収穫量を予測するモデルも開発された。

1978年から2か年間, カルフォルニア・Corona Der Marの沖合4マイル, 水深500mに1エーカー(4000 m^2)のアンプレラ(傘)型構造体を海面下20mに位置づけ, 海面下300mから深層水をポンプアップする現場実験を行い構造体の安全性を確認している。この設計波高は12m, 潮流速は1.5ノットである。

1976年, Integrated Science Co.が設計した10万エーカー農場は, カルフォルニア南部沖合20 km^2 * 20 km^2 の海域で, 海面下30mにケルプを位置づけ, 水深90mか

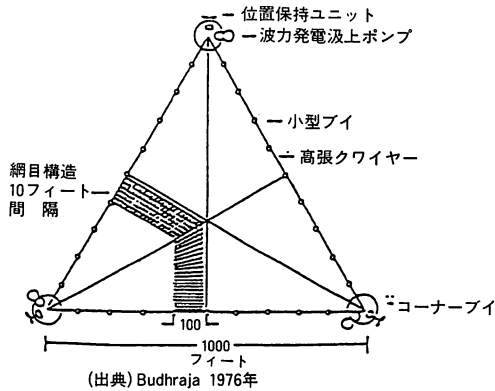


図-6 ケルプ支持構造体 (モジュール)

ら海水をポンプアップすることとした。

農場は海藻支持構造体、深層水汲上げ(冷水取水パイプ)システム、係留用の位置制御システムの3部分からなる。10万エーカーの支持構造体は図-6に示される一辺1000ft(300m)、面積10エーカー(4万㎡)の正三角形モジュールを1万個組合せて構成する。刈取船の喫水深、海象条件、ケルプの成長などから構造体を海面下30mに位置づけ、三角形モジュールの三辺に30m間隔で直径20~40cmの小型パイプを、また三角形の頂点に特種パイプを取付け、ケルプは3m間隔の網目状の網に取付けた直径15cmのボールに植付ける。網の直径は1/4インチ、ポリプロ製である。ケルプは成長し、9㎡あたり1本となる。水深90mから、栄養塩を含む海水を汲上げるため、三角形モジュールのコーナにポンプ3台を設置する。深層水の硝酸塩濃度は25~40 μg-atom/lの場合、農場全体を3~5 μg-atom/lとするには、農場1㎡あたり一日1.5㎡の揚水が必要となる。電源は平均波高0.6m、周期5secの波力発電による。取水パイプは直径1.2m、長さ90m、鉄筋コンクリート製で分散用の排出パイプはPVC製で長さ30mとする。なお波浪が小さいときは位置制御用の動力も使えるようにする。構造体の位置制御はダイナミックポジショニングシステムにより、平均潮流0.3ノット、最大1ノットの対し、スクリューによる推進機を三角形モジュールのコーナにそれぞれ設置し、1エーカーあたり2.3HPのマリンエンジンによって駆動させ、位置付と網の間隔を維持する。

6. 海洋温度差発電

海洋温度差発電(Ocean Thermal Energy Conversion: OTEC)の考え方は100年以前からある。

1881年フランスのJacquws A. D' arsonualは、

Sulfur dioxideを作動流体とし、30℃の温水で液体を蒸発させタービンを回転し、蒸気をセーヌ河の冷水で凝縮し、もとの液体に戻すクロズドサイクルに成功した。

この必要温度を海面と水深の深い海水との温度差に求める実験が、1930年キューバのハバナでClaude, Boucherdtによって行われ、60KWの発電が得られた。このときの海岸からの直径1.6Mのパイプの敷設長さは2kmである。続いて、Claudeは1934年、図-7の1万tonの貨物船“Tunisie”をブラジルの海岸沖に停泊させ、直径2.5m、長さ650mのCWPをセミサブフロートとフレキシブル接手を介し、800KWの発電に成功した。

OTECは、暖かい表面海水でアンモニアやフロンのような低沸点作動流体を蒸発させ、タービンを回転させ、冷たい深層海水で蒸気を凝縮する過程を繰返すタービン発電システムの一つである。発電システムを海洋に置く洋上タイプ(浮体)と海岸におく陸上タイプ(固定)とがある。

OTECの構造システムはプラント設備を海岸の建物に置くか、沖または洋上のダイナミックポジショニングかアンカー係留により位置づけられた浮体に、冷水、温水取水パイプ(Cold Water Pipe: CWP)を取付けた複合浮遊構造物に置くかによってまったく違ってくる。浮体の場合、発電電力は海底ケーブルにより陸に送電するか、水素に変換して船運搬することとなる。

アメリカ、ハワイ島沖水深1350mの海上実験、

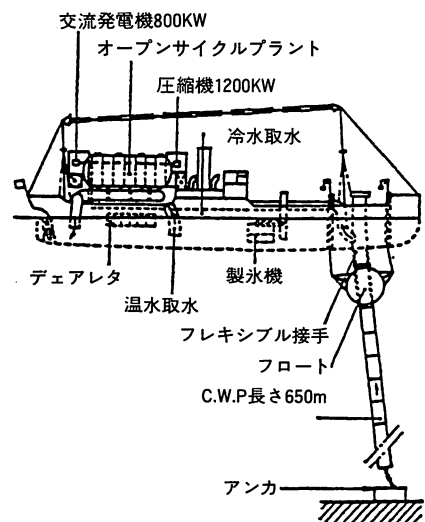


図-7 ClaudeのOTEC

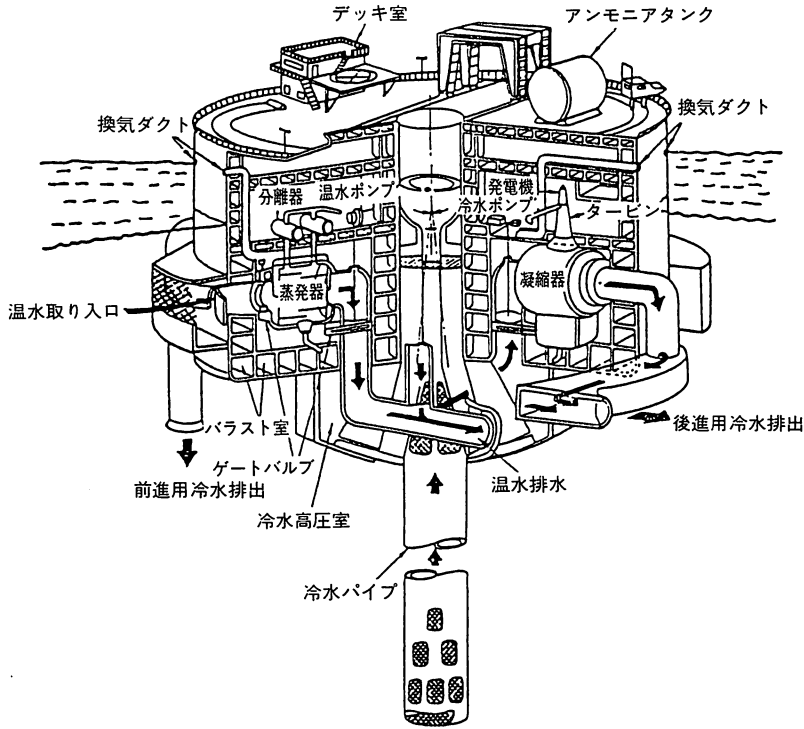


図-8 TRW社のOTEC

MINI-OTEC(1979年)とOTEC-1(1980年)は洋上発電を目的としたものである。

OTECは高低熱源間の温度差が 20°C 前後であるから、出力に対する処理熱量、すなわち取水量は 100MW (10万kW)プラントの場合、表面温水、深層冷水それぞれについて、一時間あたり 100万ton の量が必要で、水深 600m 以上に及ぶ直径 10m 以上の冷水取水パイプが問題となる。冷海水を海岸の発電プラントまでポンプアップする陸上OTECを目的とした現場実験が東京電力と九州電力によって実施された。東京電力は1981年、ナウル島で水深 580m まで長さ 945m 、直径 75cm のポリエチレンパイプラインを敷設し、取水テスト 100kW 発電実験に成功した。九州電力は1982年、徳之島で直径 50cm のポリエチレンパイプラインを水深 360m まで長さ 2400m 敷設し、長時間におよぶ 50kW 発電実験を実施している。

ハワイ、オアフ島のOTEC計画は海岸に発電所を建設し、直径 6.5m のパイプラインにより水深 600m から冷水を取水する考え方による陸上型である。これに対し、洋上型の計画としては、アメリカではすでに、直径 102m のコンクリート製円盤型構造体(ベッセル)に直径 12m 、長さ 1200m の強化プラスチック(FRP)

CWPを取付けた複合浮体を、温度差発電プラントから排出される温冷混合海水のジェット流を利用し、ダイナミックポジショニングによって位置保持する耐用年数40年の図-8のTRW社の 100MW 発電を目的としたアンモニアによるClosed-Rankinサイクルの設計、そしてテレスコピックス(一眼望遠鏡)の形をした直径 $38.7\sim 31.5\text{m}$ 、1ユニットの長さ 60m 、全長 450m のコンクリート製CWPと4基のパワーモジュール(240MW のパワーのうち $1/3$ 約 80MW をポンプ電源に $2/3$ 陸上に送電)から構成された円筒(スパー)形構造浮体を、直径 $36\sim 178\text{cm}$ の重量を軽くしたHollow Cylindrical Steel Link(中空円筒鋼リンク)Hy80からなる1点係留カタナリラインで、水深 $750\sim 6000\text{m}$ を対象とし、海底地盤に打ち込んだ16本の直径 25.4cm の杭上に置かれた、直径 28m 、高さ 4.8m 、水中重量 800ton のコンクリートアンカーに結び、定位置を確保する設計などユニークな設計が幾つか発表されている。

7. 塩濃度差発電

真水と塩水との混合からエネルギーを引出し、発電させる事ができる。河水と海水との塩混合時における相違がエネルギー源となり、このエネルギーを電氣的、

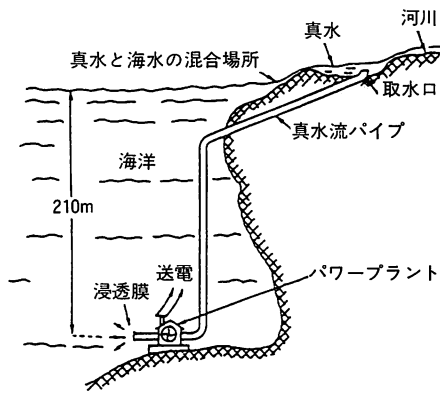


図-9 浸透膜による塩濃度差発電

機械的パワーに変換することを塩濃度差発電と言う。河口前面、海面下200mにおける河水と平均3.5%の塩濃度をもつ海水との混合時の浸透圧差は大きい。ここに浸透圧差装置を設置することは可能である。最初に発表された塩分濃度差発電は、河口前面の海面下240m位置にタービンを置き、河水をパイプラインでここまで導き、浸透圧差により海洋に河水を流出させる設計で、つづいて240mよりすくない位置で浸透圧差を可能とすることであった。

1979年までに研究をおこなった国は、イスラエル、スウェーデン、アメリカ、日本で、イスラエルは圧力-阻止浸透(PRO)変換に成果を上げた。これは真水をポンプで加圧し、浸透膜を通り海水側に流入した混合水によりタービンを回す方法である。オレゴン州立大学Levenepiel教授は浸透圧の作用力を応用した案を4案示しているが、図-9に示すものが最良と評価された。海面下210m位置に置かれたパワープラントまでパイプラインを通して流下するヘッドの高さによる発電で、排出パイプ先端につけた膜は真水のみ透過し、海水は浸透流入しない。膜を通過する真水の流速は膜の両側面間の圧力差による。-228mより以深になると、海水の静水圧は浸透圧を越えプロセスが逆になる。滲

透膜は人毛を束ねた空隙のある膜が、圧力に抵抗し、表面積も容易に形づくれることから最良とされており、13000本の毛から直径50mmの孔ファイバーが出来るがこの開発にはかなりの年数を要するものと思われる。また河口の真水と海水の混合を浸透膜が阻止することによる海洋の環境に与える影響について解決しなければならない。

8. 海洋エネルギーの展望

土木学会誌別冊増刊(1992. 2. Vol. 77) 21世紀社会に向けたエネルギーと土木において、エネルギー関連プロジェクトとしてゼネコンからの提言が2文あるが、これらプロジェクトのうち海水揚水発電とは逆の考え方の海水地下発電に興味をもった。それは東京湾周辺の地下300~500mの軟岩地域に200万 m^3 (30万 m^3 * 6~7本のトンネル)の海水貯蔵空洞を設け、ここに特殊透過性堤防を通して海水を昼間取り入れ、落差を利用してタービンを回しその後貯蔵し、夜間の余剰電力を利用して海水を湾に戻すというユニークな発想である。

水力、火力、原子力、風力、地熱、太陽光などの発電価格に海洋エネルギー発電を実用的に開発するには経済的な構造体の設計、施工が要求される。経験の少ない分野で可能性のある研究の段階ではあるが、地理的条件、海象条件によっては現段階でも採算性があると考えられるので、今後の実現に期待する次第である。

参考文献

- Augusta Goldin, ;Oceans of Energy.(1980)-Harcourt Brace Jovannovich, Inc.
- 長崎作治; 海洋浮遊構造物の係留設計(1981), 山海堂.
- 長崎作治; ノルウェーのMOWC, TAPCHAN波浪発電, 埋立と浚渫, No. 132(1986), 33~41.
- 長崎作治; 海洋エネルギー(塩位差, 波浪, 海流, 温度差, 農場, 塩濃度差)発電における構造体, 埋立と浚渫, No. 105(1982), 11~21.