

海洋熱エネルギー

Ocean Thermal Energy

渡 部 富 治*

Tomiji Watabe

1. はじめに

筆者は本来波浪発電を専門としている。研究を重ねるにしたがい、波浪発電システム単独では、質・量ともにすぐれた電力を経済的に生み出すことの難しさを一層痛感するようになっていた。

この打開の一つとして、波浪エネルギーと対照に海洋熱エネルギーをとりあげ、この両エネルギーが相互補完し合う複合システムを作れば、両エネルギーの長所が相乗効果を生み、海洋エネルギー利用の道が開けるのではなからうか？

海洋熱エネルギー利用では、太陽エネルギーを蓄えた表層の温海水と、深部の冷海水との温度差で働くカルノーサイクル式温度差発電が代表的なものである。1926年 G. Claude が実験を行なって以来、世界で多くの研究・実験が続けられてきた¹⁾。極めて簡単なシステムだから、特長・問題点を比較的容易に見つける反面、対策の自由度も限られやすい。

この外寒地圏では、ヒートポンプを使い、海洋の熱を直接利用しようとする試みがある²⁾。

こうした海洋熱エネルギー利用の実用化検討を、筆者は前述のシステム複合化の面から開始している。この分野での研究歴は大変浅いのであるが、将来を模索する考え方の一つとして、ここではシステム複合化にポイントを置き、海洋熱エネルギーの現状を述べたい。

2. 海洋熱エネルギー利用システム

現在つぎの3システムが考えられている。

- (1) 海洋温度差発電 (Ocean Thermal Energy Conversion, 以下OTECと略記) ……電力利用目的
- (2) ヒートポンプによる海水熱の取得 ……熱利用目的

- (3) 波浪エネルギー変換による熱の取得 ……熱利用目的 (波の力学エネルギーを吸収、熱に変換して利用するシステム。他の2システムに比較し、小容量のものに限られる)

2.1 海洋温度差発電OTEC

OTECは、海洋の表層と深層の水温差15~20℃にランキンサイクルを適用したものである。図-1はこの基本回路、図-2はT-S線図によるそのサイクルを示す。

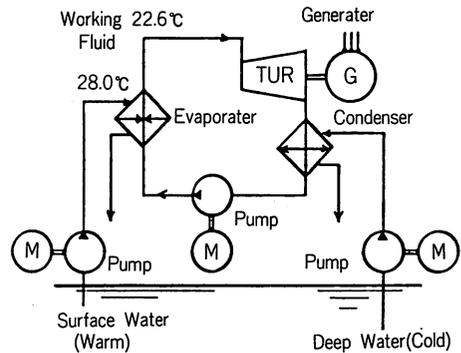


図-1 OTECの基本回路

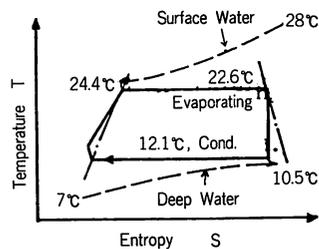


図-2 OTECのサイクル

作動流体は蒸発器で温海水より熱をえてガス化し、タービンを駆動した後に、凝縮器で冷海水に熱を奪われ液化する。この液はポンプで加圧され再び蒸発器に送られる。この連続により、タービンは半永久的に発電機駆動を続け電力を生み出す。この熱効率は、ランキンサイクル効率 η_R で示せば、

* 室蘭工業大学工学部教授
〒050 室蘭市水元町27-1

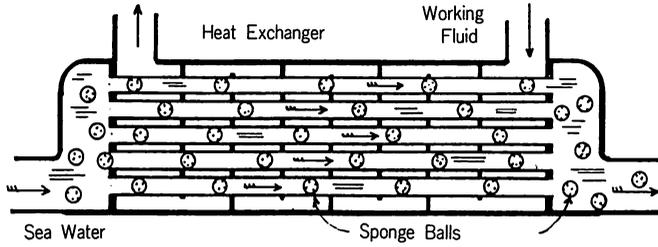


図-3 スポンジボールを使ったブラッシング

$$\eta_R = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad (1)$$

Q_1 = 温水よりえた熱量, Q_2 = 冷水に奪われた熱量である. この理想的な場合がカルノーサイクル効率 η_c に等しくなる.

$$\eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (2)$$

T_1 = 温水の絶対温度, T_2 = 冷水の絶対温度

実際の海水温度は, 高温側30℃以下, 低温側7℃以上であることを考えれば, $\eta_c < 7\%$ という水準にある. この結果, 発電出力を高めるには多量の高・低温海水が必要となり, この給排水設備が非常に大きくなる. さらに, 発電出力の30%以上はポンプ動力に費やされる.

実際の海洋温度差発電では, 海水と作動流体間の熱交換特性が, 運転経過に伴って急激に悪化し, 発電出力低下の大きな原因になる. 伝熱面に多量の海中生物が附着するからである. したがって, ポンプ運転などの補機動力を差引いた, 正味出力に対する発電効率は, 前述の η_c よりもはるかに小さい.

これらにより, 長期間, 高い伝熱性能を維持できる熱交換器を, 安価に製作しうる技術の確立が切望されている³⁾.

一般には熱交換器材料としてCuやAlが使われるけれども, 海水用には耐蝕性が不十分である. さらに海中生物が附着すれば, 伝熱面の腐蝕は一層加速される. このため, 自己補修機能を備えた材料……Ti または Ni-Cr系ステンレス鋼……が数少ない実用材質と思われる.

船底表面の海中生物附着防止には, 毒性物質を加えた塗料での船底塗装が知られている. しかし, 藻類に対しては効果がないし, 海水汚染の面から使用すべきではない.

熱交換器内は光が到達しないから, 藻類は成長できない. 貝類についてのみ対策を考えればよい. この一

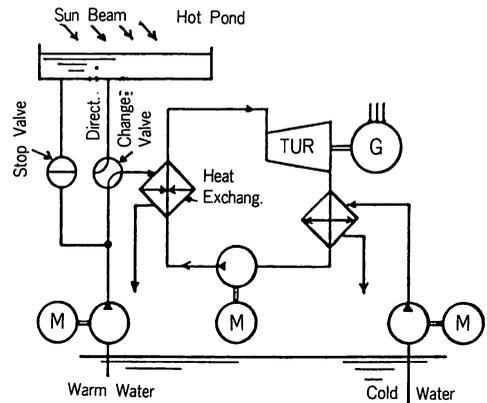


図-4 附着生物の除去回路

つにブラッシング法がある. 一例として, チューブ式熱交換器のチューブ内面を海水側, 外面を作動流体側とし, チューブ内に多数のスポンジボールを圧送してブラッシングする方法を図-3に示す. ブラッシングの目的で固形物を混入させた流体(混相流)を利用することは, ガスタービンやボイラーでは広く行なわれる.

特殊環境に順応し生存した一部のものを除くと, 海中動物は熱に弱い. この性質を利用し貝類附着を防ぐ

表 1 100KW実証試験プラントの概要

項目	仕様
発電出力	100kW (送電端出力11kW)
表層海水	29.8℃
深層冷水	7.8℃
作動媒体	R-22 (フロン)
熱交換器	蒸発器1基, 凝縮器1基
ポンプ	冷水ポンプ1台, 温水ポンプ1台, 媒体ポンプ1台
フロンタービン	二段衝動軸流式1台
発電機	空冷式1台
冷水取水管	延長 1,093m ポリエチレン管 932m, φ750×t30~35mm 塩ビ管 161m, φ732×t21mm
温水取水管	延長 118m 鋼管 φ711.2×t6mm
冷温水排水管	延長 140m 鋼管 φ1,016.0×8.7mm
その他	機器基礎一式

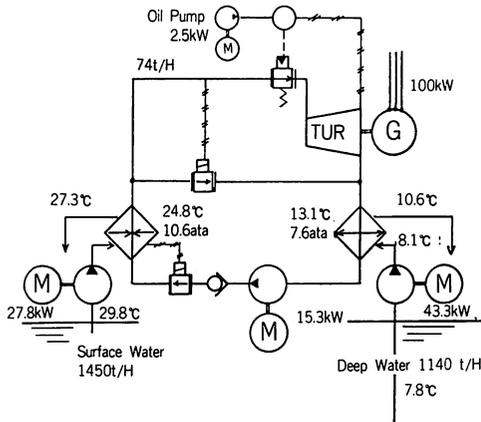


図-5 発電出力100kW OTECの構造と計画ヒートバランス

ことが考えられる。図-4はその例であり、予め太陽熱などにより45°C程度まで温めた貯水を、ある時間を区切り熱交換器内に導入するものである。

昭和56年10月、東京電力(株)を中心として、発電出力100kWのOTEC発電試験が実施された。ナウル共和国に設置され、世界最初の本格的実証プラントといわれた。この概要を表1に、その構造および計画ヒートバランスを図-5に示す。正味送電出力11kWの計画に対し結果では、定格出力試験で14.9kW、最大出力試験で31.5kW、という好成績をえた。さらに、240時間の連続運転を達成し試験を終了している⁴⁾。この施設は撤去されているが、将来は長期間の使用に耐えるものの開発が期待される。

2.2 ヒートポンプによる海水熱の取得

寒地圏では冬期の熱需要が高い。50°C以下の温度でも十分な活用が図りうる。例えば日本海に面した北日本は、対馬暖流の影響で冬期の海水温はそれ程低下しない。同様に北海に面したスコットランドやノルウェーも、北大西洋暖流やノルウェー暖流から少なからぬ影響を受けている。

この海水熱をヒートポンプを使って取得し利用することが検討されてきた。前述の海面では、特に冬期の波浪エネルギーが豊富であるから、波浪によるヒートポンプ駆動が実用できれば、冬期間の低コスト大量熱供給の可能性がある。ことにノルウェーでは、北海の冬期海水温が6~8°Cと高く²⁾、波浪エネルギー密度は日本の約3~5倍(年平均25~40kW/m)⁵⁾であるから、この実用化は極めて有望である。

冷凍サイクルは、低温部から高温部への熱移動をつ

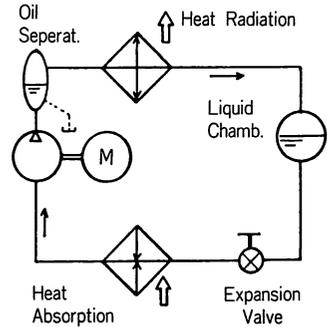


図-6 蒸気圧縮式冷凍機

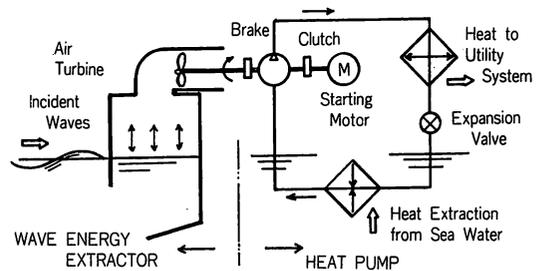


図-7 ヒートポンプによる海水熱の取得

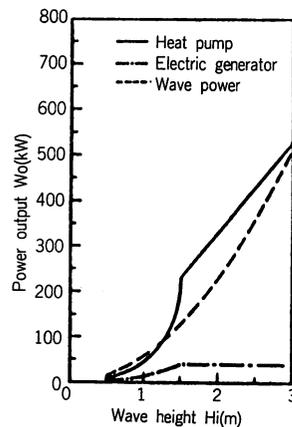


図-8 ヒートポンプによる熱取得特性 (図7の場合)

くりだす。ヒートポンプは、この凝縮器(高温部)からの放熱利用が目的であり、そのシステムは冷凍サイクルそのものである。図-6は蒸気圧縮式冷凍機の構造を示す。

ヒートポンプでは、サイクルの正味仕事 W_i と冷凍負荷 Q_i の比;成績係数(COP)= Q_i/W_i の値が重視される。システムの低温部(海水)温度 T_1 が高く、かつ高温部(熱利用側)温度 T_2 との差(T_2-T_1)が

小さい程、(COP) 値は大きくなり経済的である。図-7は、このシステムを日本海側に適用する場合の検討例で、 $T_1=5^\circ\text{C}$ 、 $T_2=20^\circ\text{C}$ (融雪用散水の加温) としている。

図-7では波浪エネルギーを利用して空気流をつくり出し、空気タービンを用いてヒートポンプを運転する。タービンとのマッチングから、高速スクリーコンプレッサーが採用されている。このシステムにおいて、仮にタービンで発電した場合の電力量と、前述ヒートポンプでえた熱量との比較結果が図-8である。熱量に換算して、波浪発電量の6~10倍の取得エネルギーになっている⁹⁾。

北海道では冬期海水温が低く、熱交換器部で海水の凍結が問題になる。(COP) 値も前検討例のような高い水準は望めないのが実情である。

2.3 波浪エネルギー変換による熱の取得

ここでは養殖漁業用熱源としての検討例を紹介する。

ひらめの養殖事業は日本中に普及しつつある。附加価値が大きくかつ比較的飼育がやさしいといわれる。日本海側では冬期水温がそれ程低下しないから、数年前より北日本でも事業化が始まっている。しかし越冬には最低水温 8°C 以上が必要であり、水槽の加温に重油燃焼が用いられている。したがって、この熱源を海洋に求める試みは極めて自然である。

対馬暖流の流域にあっても、北海道北部の冬期海水温は $0\sim 2^\circ\text{C}$ まで低下し、ヒートポンプの使用は困難である。したがって、冬期に集中する波浪エネルギーを直接熱変換することが検討された。

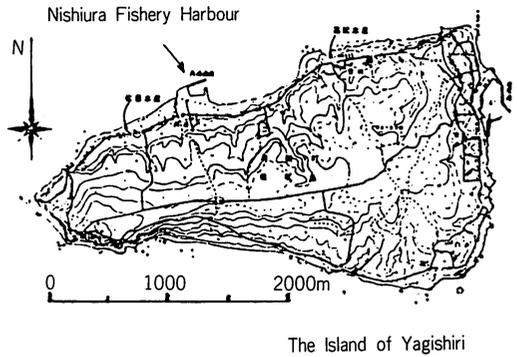


図-9 焼尻島

一般に海の波浪は風が原因で生れた海水運動である。力学的エネルギーから成り立っている。直接ジュール熱に変換するにしても、海水の水粒子速度は極めて低速で現実的ではない。このため、空気や油の流れに変換してから熱にするのがよい。利用部までの熱輸送を考えると、電力変換を経由することが有利になることもある⁷⁾。ここで、焼尻島を対象とした検討例について述べよう⁸⁾⁹⁾。

図-9は焼尻島である。北日本海に位置し、周囲6km、人口600人、漁業と観光が主産業になっている。海岸からの熱取得方法として、水深5m附近の海面に離岸堤(長さ25m)を設置し、防波を兼ね、波浪エネルギーを吸収して熱変換する。この熱は、ひらめ養殖の水温上昇に用いられる。

波浪エネルギーは冬期間に集中し、その平均エネル

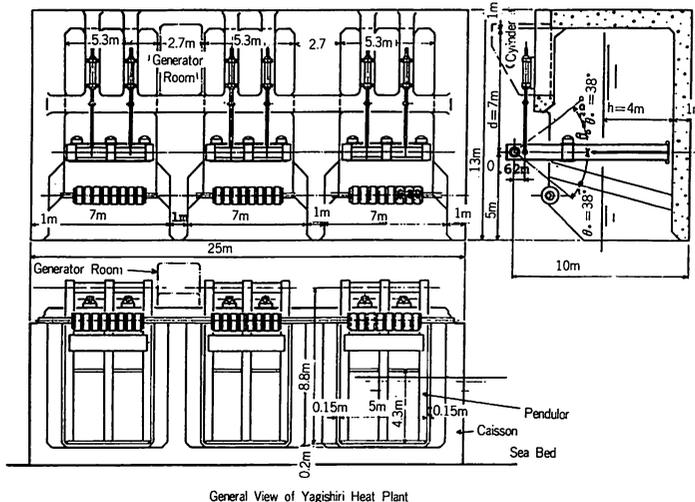


図-10 熱取付プラントの構造 (焼尻島を対象とした検討例)

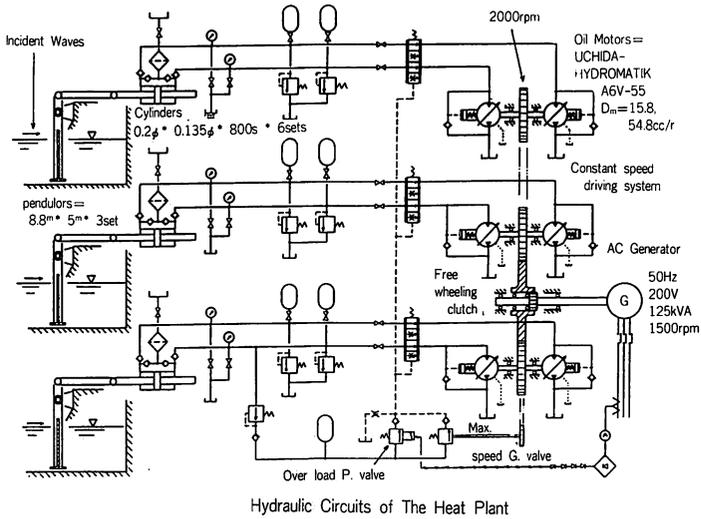


図-11 熱取得プラントの回路 (焼尻島)

ギー密度は約10kW/mである。波の屈折・散乱により場所ごとに増減があり、施設の設置海面の選定にあたり注意が必要である⁹⁾。

図-10はこの結果のヒートプラント構造図である。また図-11はその回路を示す。電力変換して陸上へエネルギーを輸送し、それから熱に変えられる。25m長のケーソンを使用して125kW/90kW(最大/定格)の熱エネルギーをうる。ケーソン内の水室に設けた3台の振子装置の揺動運動によって、ケーソンに到達した波浪エネルギーが吸収されるから、ケーソンに働く波浪の衝撃は緩和され、反射波も生じない。結果として、ケーソンは転覆に対する安全性が向上する。図-10では、従来よりも軽量化されたケーソン構造になっている⁹⁾。

3. OTEC—波浪・複合システム

前述のように、OTECは効率が低く、かつ大きな補助動力を必要とするのだが、一方でつぎのような魅力が秘められている¹⁾。

- (1)OTECにより発電可能な海洋熱エネルギーは、将来の主力電力源として考える水準の大きな量である。
- (2)海水温度の時間変動が小さいので、安定した高品位電力の発電に適している。
- (3)深部からくみ上げた冷海水は栄養分に富む。その排水は漁場の活性化に利用できる。

これに比較し、波浪発電システムではつぎのような特徴が知られている¹⁰⁾。

- (1)賦存量は遙に少ない。波浪の性質から、発電プラントの単基容量は1000kW以下である。離島などローカルエネルギー用として適している。
 - (2)力学エネルギーの変換だから、発電効率=40% (最高)が可能である。電力変換を省略し、力学エネルギーのまま利用することもできる。この場合は変換効率=50% (最高)が可能である。
 - (3)非定常性が強く、発電出力はこの影響を受けやすい。低品位電力の発電に向いている。
 - (4)海上構造物に波浪発電装置を併設すれば、構造物に作用する波浪強制力を緩和することができる。
- これら2つのシステムの特性を組合せ、OTECの補機動力を波浪システムから供給すれば、つぎのような効果が考えられる。

- (1)OTECの正味送電(高品位電力)出力が大幅に増

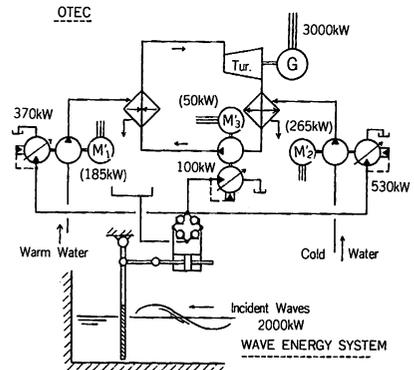


図-12 OTEC—波浪連合運転

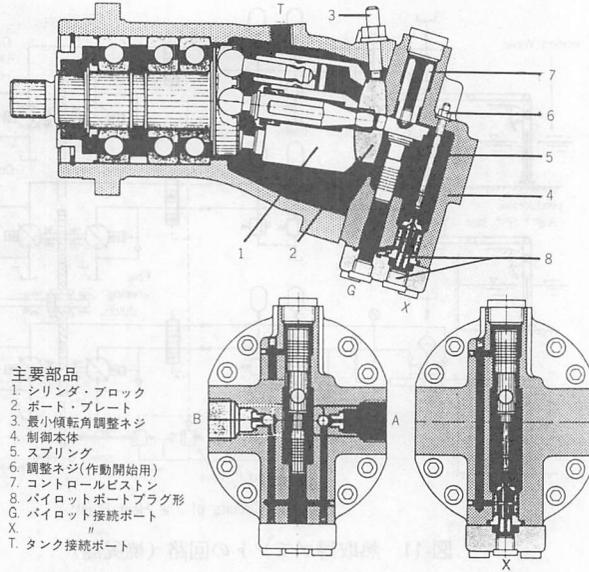


図-13 油圧モータ（可変容量形）の構造

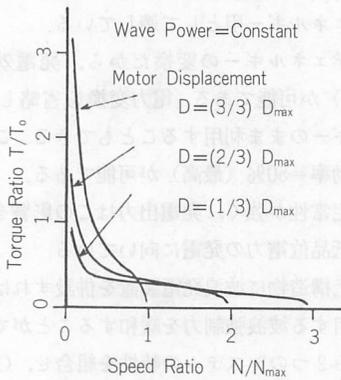


図-14 油性モータのトルク特性

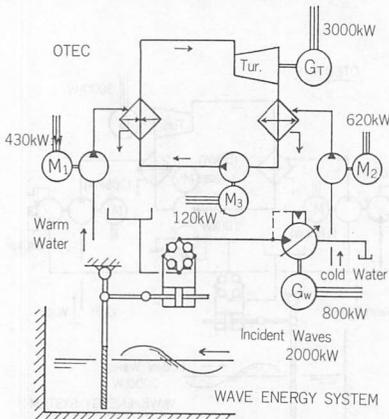


図-15 OTEC—波浪並列運転

大する。

(2)OTECの補機を、波浪システム内につくられた油圧動力で駆動すれば、波浪システムは簡素なものでも足りる。油圧回路部でシステム最適化制御への対応も困難ではない。またエネルギー効率もよい¹¹⁾。

(3)OTECが海上係留形をとる場合、波浪システムを併置することによる係留力の軽減が期待できる。

(4)OTECを単独に設置した場合、停止後の再起動が自力で行なえる。

しかし以下のことが問題である。

(1)海洋熱エネルギーと波浪エネルギーのいずれも豊富に存在する海面であること。

(2)OTECの出力の大きさが、入射波浪パワーの大きさによって制限されること。したがって無波浪時の発電に備え、補助動力を持たねばならぬこと。

図-12は、前述の内容を考慮の上まとめた、OTEC・波浪複合システムの回路であり、発電出力3000kW、補機動力1000kW（入射波浪パワー2000kW）の場合である。3000kWが正味電出力となる。2台の海水ポンプおよび作動流体用圧縮機は、それぞれ可変容量形油圧モータにより駆動される。これらのモータは、与えられた条件の下で発電出力が最大になることを目的として制御される。図示の波浪システムは振子式であり、水室内に定常波を生じさせ、その節部の往復水平流によって揺動運動が発生する。これで往復動ポンプを動かし、その吐出油が3台の油圧モータに送られる。波浪エネルギー変換効率は、振子が定常波の節部に設

置され、振子に働くポンプ負荷のマッチングをとり、振子を定常波動に共振させたとき最高値（水槽モデル実験では $\eta_{max} \approx 70\%$ ）を示す¹¹⁾。

図-13は油圧モータの構造図で、振子システムに組合された場合の速度・トルク特性は図-14のようになる。トルク変化に対して本質的な対応性があり、例えば作動流体圧縮機がトルク変動の大きい往復動形であっても差支えない。市販されている標準形を採用すれば、価額的にも大変有利である。

図-15は、図-12と比較のため示した。発電出力3000kWのOTECと、入射波浪パワー2000kWの波浪発電システムを、それぞれ独立に並列運転する場合である。OTECの補機動力は1000kWであるが、電動機効率を考慮し電力1170kWが発電機から供給される。正味送電出力は1830kWとなる。また、波浪システムは発電出力800kW（ただし低品質）が見込めるので、合計2630kWがえられる。波浪システムは、発電機や速度制御装置が含まれるので、図-12の場合よりも設備費が割高になる。

4. OTEC関連技術

海上の大形浮体にOTECを設備する場合は、その係留技術が安全上から極めて重要である。浮体とそこから釣下げられた冷海水用パイプに働く波浪強制力を軽減するため、半潜水構造浮体が検討対象になっている。構造により、安定性の心配があるものは対象外である。波浪中における浮体やチェーンに生ずる力について研究され、その予知が可能である。浮体が波浪強制力に対し共振するのを避けること、浮体およびチェーンに対し、効果的なダンピング特性を附与することが大切である。図-16はこの実験装置を示す¹²⁾。

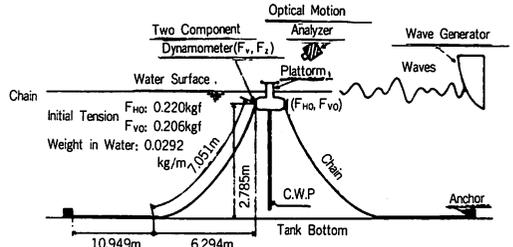


図-16 OTEC浮体の係留実験（モデル）

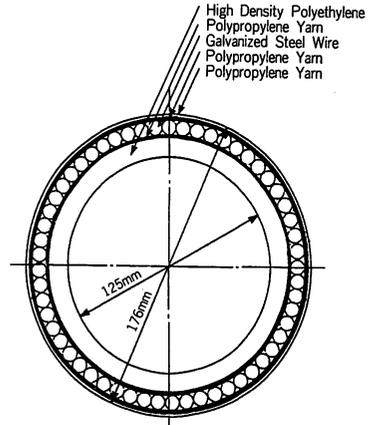


図-18 敷設パイプの断面構造

冷海水のくみ上げパイプは、前述図-12、発電出力3000kWの場合、内径2.5m×長さ1500m程度のものになる¹³⁾。したがって、スケールメリットを考えたこの1桁上の容量機を対象にする場合は、パイプの構造・設置などが、OTEC本体と同様に大きな技術課題を含む。試験的なものは、ハワイ、ナウル、徳之島などで実施されている。

図-17は、四国室戸岬に敷設された冷海水くみ上げ

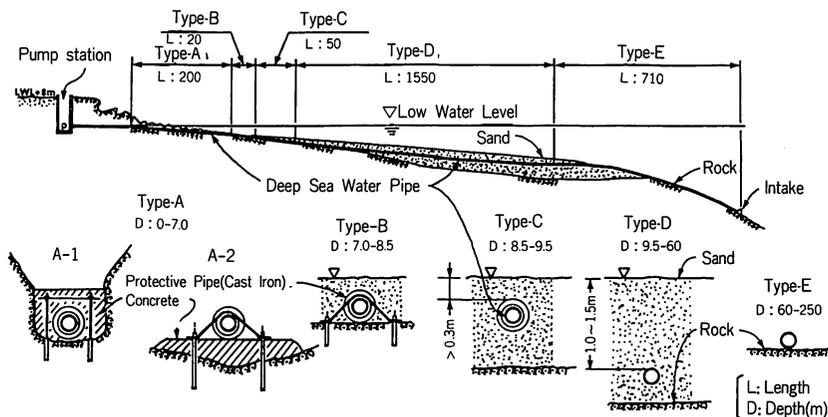


図-17 深海水くみ上げパイプの敷設状況（室戸岬）

パイプの例である(ただしOTEC用ではない)。海底に沿ってパイプを陸上まで敷く場合の問題点、…海流によるパイプと海底のこすり摩耗、パイプに要求される強度、柔軟性、耐蝕性、保温性…、などが検討され図示の設置法が採用された。なおパイプの構造は図-18に示される¹⁴⁾。鋼線で強化されたプラスチック材による多層構造である。

5. おわりに

OTECは、G. Claudeをはじめ、多くの人々によって数多くの研究が重ねられたが、いまなお実用化の兆しはない。石油資源の将来展望や地球環境問題に対する不安は進行していても、実用化を決断できるだけの技術水準に達していないことがこの主なる原因かと思われる。

これに対し、ヒートポンプなどによる海洋熱の取得利用は、需要と供給との関係が適合している北欧から実用化が進行するのは、それ程遠くではないように感ずる。

こうした自然エネルギー利用実用化の壁をブレイクスルーする鍵は、画期的な技術開発という類の華々しいものではなく、システムの隅々まで徹底的な最適化を図るといような、極めて地味な努力の積重ねにあるのではなからうか。この意味からわれわれは、生命の誕生以来進化を重ねてきた、いろいろな生物のエネルギー利用について学ぶことが必要であると筆者は痛感している。例えば植物の光合成では、太陽光エネルギーを使って、極めて効率よく空中炭素の固定が行なわれる。このプロセスの最適化を求め、ある秩序の下で一枚一枚の葉は、最適の場所に向かって生長し、最適の形状で太陽エネルギーを吸収する。その機能は極めて巧妙かつ複雑である。

このような生物の営みからみれば、人間が考えたOTECや波浪システムは極めて不完全である。この複合化により相互補完を考えるようになったのは、こうした合理化を追求した極限において、自然エネルギー利用の道が開かれるのではないかと考えたからである。

このためにも、広く自然エネルギー研究者は手を結び協力し、豊かな発想を育てて行かなければならないと思う。

参 考 文 献

- 1) 上原春男; 海洋温度差発電誌本(1982), オーム社
- 2) J. E. Steen; Seawater as an energy resource for heat pump in Norway, Proc. of 3rd Int. Symp. on Wave, Tidal, OTEC & Small S. Hydro Energy, BHRA, (1986) P. 203~216
- 3) H. Uehara et al.; Sell & Plate type heat exchangers for OTEC plants, Transact. of the ASME, Vol. 106, Aug. (1984) 286~290
- 4) 山本康博; ナウル島における100kW海洋温度差発電の実証試験について, 第30回海岸工学講演会, 土木学会, Nov. (1983) 21~31
- 5) G. Retief & F. Müller; Wave energy potential of Southern Africa, national cont. on renewable resources in Cape Town (1986)
- 6) 市川 晃, 外; ヒートポンプによる波力エネルギー利用熱回収システム, 第1回波浪エネルギー利用シンポジウム, JMSTC, Nov. (1984) 377~386
- 7) 北海道港湾・海岸研究会; 増毛港スリットケーソン実験堤(波力発電)見学会説明資料, Nov. (1981)
- 8) 渡部・外; 離島における沿岸形波浪エネルギー利用実用化計画…焼尻島のケーススタディ, エネルギーに関する社会的経済的諸問題, 昭62 成果報告書, 文部省重点領域研, エネルギー, 昭63・3, 107~114
- 9) T. Watabe et al.; A case study on the utilization of ocean wave energy for fish farming in Hokkaido, '89 Inter. Symp. on Cold Regions Heat Transfer, July (1989) 159~164
- 10) 渡部; 波力発電の現状と将来, 油圧と空気圧, Vol. 17-7, Nov. (1986) 491~500
- 11) T. Watabe et al.; Hydraulic technology & utilization of ocean wave power, JHPS Inter. Symp. on Fluid Power Tokyo, March (1989) 301~308
- 12) W. Koterayama et al.; Motions of OTEC platform moored in waves, Research on Natural Energy, SPEY 20, Oct. (1987) 139~144
- 13) 上原春男・外; 離島用海洋温度差発電の最適設計法, 火力原子力発電, Vol. 36-7, Jul. (1985) 61~66
- 14) T. Toyota et al.; Design of a deep sea water supply system for mariculture, TECHNO-OCEAN '88 Inter. Symp. Proc.s Vol. 1, Nov. (1988) 179~184