



海洋温度差大容量直接発電

木下仁志*, 松浦虔士**

テクノロジーの領域で、新しい研究とは一体何をいうのであろうか。例えば、光ファイバー、レーザ、VLSI、超電導、遺伝子、核融合、…、と並べれば、これらはすべて新しい研究の対象と考えておかしくないであろう。しかし、考えてみれば、一見新しいと思われるこれらも発想の origin はすべて海の向こうにあった。だから、日本人にとってそれが新しいとはいえないのだ、というような議論をここで展開しようとするつもりは毛頭ない。光ファイバーが研究対象として新しいのは、その低損失性と大容量の情報伝送性能などが理由で、これから先の新しい文明の創造にその技術が貢献できると考えられるからである。

研究者がバラ色の夢をみるということも、突き詰めていけば、人間が本来の理想を実現していく活動の過程での労働所産、一これが文明と一般にいわれるものであろうが一それを創りあげていったときの、一歩でも理想郷に近づいた未来の世界の佇まいが美しい色彩を伴って眼前に見え隠れするという、そういう状態をいうのではなかろうか。我々が現在とり組んでいる海洋温度差大容量直接発電の研究は、ふりそそぐ太陽エネルギーのとてつもなく大きな貯蔵庫である海洋がもつ恒常的な熱エネルギーを、静止形の固体熱電変換素子を用いて電気エネルギーに変換し、来るべき2000年代の文明の構築にいささかなりとも貢献しようとするものである。

さて、その海洋温度差発電であるが、予備的に次の3つの点を明らかにしたあとで、本論の我々の研究について考えてみることにする。

1° 海の水温構造モデル

*木下仁志 (Hitoshi KINOSHITA), 大阪大学, 工学部, 電気工学科, 教授, 工学博士, 電力工学

**松浦虔士 (Kenji MATSUURA), 大阪大学, 工学部, 電気工学科, 助教授, 工学博士, 電力工学

2° 熱容量空間としての海の持つ温度差エネルギー

3° 深海冷水の汲み上げに必要なエネルギー
先ず第1の点について。海洋の表層水は入射する太陽光のエネルギーを吸収するが、表層における水の運動は沿直方向よりも水平方向の方がはるかに大きく、また、海水の熱伝導率が小さいことも手伝って、表面の熱エネルギーは深層にまで到達し難い。この入射する太陽エネルギーと海水の蒸発で奪われるエネルギーとではほぼ熱平衡が保たれ、それによって表層水の温度が決まってくる。結果として、表面から100m位までは水温がほぼ一定の温海水、深度100mから1,000m位にかけては水温が急降下し、深層では4~6°Cの冷海水となっている。表層水と深層水の温度差は、熱帯地方では年間を通じて20~25°C、日本海対馬海流域でも夏季は25°C程度である。しかし、このように利用可能な温度差が20°C程度ということは、海水の温度差を利用して、海水の持つ熱エネルギーを電力に変換しようとするとき、そのエクセルギー的価値がきわめて低いということを意味している。

第2の点は、利用可能なエネルギーの量的な側面である。これについては、次のような試算例が1つの目安を与える。すなわち、赤道の両側の南と北、緯度20度の範囲内にある海域で、表層水の水温低下1°Cを永久に許容するという前提条件のもとに、発電のために必要な海水汲み上げ量を決定すると、温度差発電で600億kw程度の電力が得られるという計算である。考えてみると、これは1980年の世界の全エネルギー消費量の約10倍を毎年毎年まかなえるというきわめて莫大な量である。熱帯地方の海の表層水温低下1°Cが、はたして許容されるかどうかの環境アセスメントが現時点でなされていないので、何ともいいかねるが、可成り莫大な発

電電力が期待できそうではある。

第3の点は、表層温水を高温熱源、500~1,000 mの深層冷水を低温熱源として熱機関を陸上あるいは海上で動作させるためには、冷水をそこまで汲み上げねばならぬということで、そのエネルギーが馬鹿にならないのではという素朴な疑問である。ところが、もし冷水汲み上げ路に断熱パイプを用いると、汲み上げるという意味では、500m下の冷水を汲み上げる高さは僅か1m程度でよいという面白くて都合のよい話となるのである。これは、図1に示したように、任意の深さHにおけるA、B2点での海水の密度 ρ_A 、 ρ_B が、温度差のために、 $\rho_A < \rho_B$ (ρ_B は上から下まで、ほぼ一定)となるが、この密度差を考慮すると、つり合いの位置では、

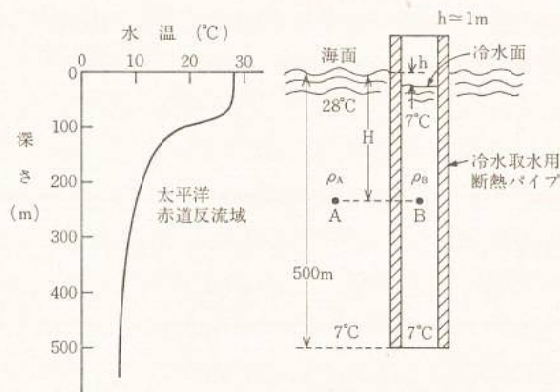


図1 海水温度分布の1例と水面レベル差

温水と冷水表面のレベル差は僅か1m程度にしかないから、従って、ポンプの揚程としては、これに断熱パイプ中での損失水頭を加算するだけでよいということである。

さて、それでは海洋温度差発電における熱エネルギー変換はどのような方法で行なうのかという問題について考えてみよう。結論を先に言えば、現在の世界の主流は、20°C程度の温度差エネルギーを、大規模な熱交換器へ導き、アンモニアやフロンなどの低沸点媒体を作動流体とするタービン発電機によって電気エネルギーに変換する方法である。この方式の実海域実験例としては、ハワイ島ケアホレ沖 2.1 km に建設された正味発電出力約 10 kw のアンモニアクロードサイクル方式の小形実験プラント (Mini OTEC) によるものが我々の記憶に新しい。これは、1979年8月から11月にかけて行な

われた500時間 (内連続110時間) の発電実験であるが、ハワイ州知事をして、大統領あての電報の中で「今世紀ライト兄弟の初飛行に匹敵する快挙である」と言わしめたほどの大成功であったと伝えられている。

しかし、我々は、そのようなタービン方式でなく、熱交換器と固体熱電変換素子を用いた静止形の直接発電方式を取り上げている。それは何故か。先ず第1点目は、良質のエネルギー源が熱帯海域に偏在しているということ。第2点目は、熱帯で発電した電力を日本のような中・高緯度地帯に、電力そのままの形で伝送することは实际的でなく、むしろ発電地点で水の電気分解を行なって水素を得、それを輸送する方が効率的と考えられることである。この場合、電極電圧としては直流 2 V 程度でよい (但し電流は大きい) ので、タービン発電機を回す方式では直流への変換器を別に必要とする。また、回転機であるために保守がわずらわしい。それよりも、直接直流低電圧大電流が発生できる熱電変換素子による温度差発電の方がシステム自体もシンプルとなり水電解用海上発電所の発電方式として適しているように思える。

第3点目は、その水素の貯蔵・輸送に関する技術開発が急速なテンポで進行しているということ。特に、金属や半導体の水素化物による固体化貯蔵は、従来のガス体あるいは液化液体貯蔵に比し、貯蔵・輸送両面において優れているので、今の目的にはうってつけである。我々の隣の研究室でも、水素によるシリコンの反応性スパッタなどから作製したシリコン水素化物 ($\text{SiH}_{1.5}$) を水素貯蔵体として実用化しようとする研究が鋭意なされておられ、明るい見とおしを得つつあるということである。

第4点目は、水素を2次エネルギーとして位置づける水素エネルギーシステムが、そのクリーン性並びに原料資源 (水) の無尽蔵性の故に2000年代の主流となる可能性を秘めているということである。

このように話が展開してくると、夢はバラ色めいてくるが、心臓部の発電器については困難な問題がいくつかある。発電器入力としての海洋温度差エネルギーは、自然エネルギーである

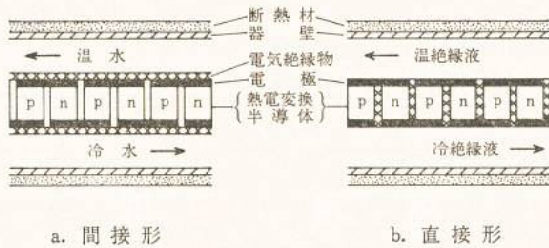


図2 半導体モジュールを用いた温度差発電器

から非枯渇であり、そのものの価格はゼロである。従って、この種の発電器には、「建設費に対する発電出力が大きく、かつ安定していること」が要求される。この点、入力エネルギーが高価格の従来の熱機関において、出入力比（効率）を大きくすることが技術開発の最重点目標となっていたことと本質的に性格を異にしている。しかし、何分利用可能な温度差が僅か 20°C そこそこである。この少ない温度差をできる丈有効に熱電変換用半導体モジュールの電極間に加えるための工夫が重要となる。例えば、海水や普通の水を直接発電器の中へ流す方式では、電極上に電気絶縁物を必要とし、それが熱流に対する抵抗体となって発電器出力を著しく低下させる（図2-a）。この欠点をなくすために、発電器の電極は露出させ、熱媒体として絶縁流体を用いることにした（図2-b）。流体選定の経緯は省略するが、最初の試みとして人工血液にも使われている無毒性で化学的にも安定な液状フルオロカーボンを選んだ（追って純水やアルコールも試してみたいと考えているが）。

この絶縁流体を、開電圧 100 mv, 最大出力

10mw の基礎実験用手作りミニ発電器のダクトに流して実験した。我々の1つの発見は、(理論的にも予測はしていたことであるが) 直流出力を左右する発電器の実効内部抵抗が、単に半導体モジュールの電気抵抗だけで決定されるのではなく、低温度差動作であるため電極前面の境界層の存在が効いてきて、半導体の電子的パラメータ（ゼーベック係数など）や絶縁流体の流体力学的パラメータ（レイノルズ数、プラントル数など）にも依存するということがあった。この点は、内部インピーダンスが巻線回路と電磁的要因のみによって決まってくる従来の発電機との本質的な相違点である。従って、固体熱電変換素子（pn 半導体モジュール）に於ける海洋温度差直接発電の場合には、出力を安定化させるための制御技術も重要な研究課題となってくる。

このように、システムの側からは、問題の本質が次第に浮き彫りにされてきつつあるが、10mw の出力を得るのに、現在では、1万円もする半導体モジュール（今の実験では Bi_2Te_3 を母体とする p 形 n 形半導体と銅電極で構成している）の高価格が実際上大問題である。製造技術改良 → 量産化 → コストダウンというオーソドックスな工業的手法による一方、物性研究者などからの目を見はるような新材料の提案をひき出せるよう、我々の側で研究のポテンシャルをアップして行く努力も必要である。バラ色の夢を、輝くマリンスプルの熱帯の海の上で本当に現実のものとならしめるためにも。