

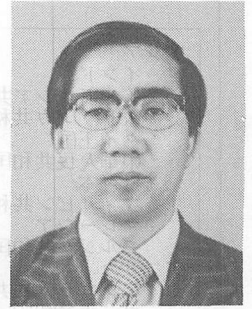
■ 展 望 ■

海洋温度差発電の現状

Ocean Thermal Energy Conversion

上 原 春 男*

Uehara Haruo



1. 緒 言

海洋温度差発電は、海洋の17～30℃の表層海水（温暖海水）を温熱源に、1～7℃の深層海水（冷海水）を冷熱源にして、発電サイクルを構成し、電気エネルギーを取り出すシステムである。

この発電の原理は、1881年にフランスのJ. D'Arsonval によって最初に提案されたものである。¹⁾

海洋温度差発電で利用出来る温度差は、高々、26℃で、このシステムのサイクル効率は、最高7%で、火力発電所に比較して、極めて小さい。このために、この発電システムを経済性のある実用的なものにするためには、従来の発電システム以上に、きめの細かい研究をしなければならない。

海洋温度差発電の最初の実用化の試みは、1926年から1948年頃まで、フランスのG. Claude を中心に行われた。しかし、基礎的研究やトータルシステムの研究が十分に行われていなかったために、実用化には至らなかった。

海洋温度差発電の実用化の研究が、本格的に行われ出したのは、1970年以降で、今日までに得られた成果は、質量ともに膨大である。¹⁾ これらの成果によって、海洋温度差発電は、夢物語でなく、実用段階に入ったといえる。本報では、これらの成果のうち、特に最近公表された成果について報告する。

2. 海洋温度差発電の設置可能海域と資源量

海洋は、太陽からのエネルギーをたえず受け、これを熱エネルギーの形で貯えている。このエネルギーを太陽から地球の入射エネルギーから計算すると約55.1 × 10¹² kw になる。この量は、2000年に必要な世界の電気エネルギー量 3 × 10¹⁰ kw の約1,000倍になる。このエネルギーのうち、2%を利用出来るかすると、約

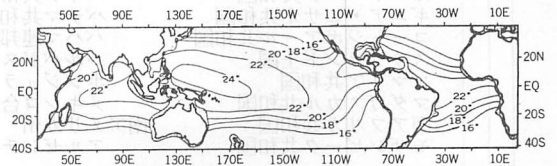


図-1 等温度差線（表層と1,000m水深）

1.1 × 10¹²kw になり、これでも約30倍になる。

アメリカのZener¹⁾ は、赤道をはさむ南北20度の範囲内にある海洋からの発電量を計算している。それによると、赤道をはさむ南北20度以内で、600億 kw の電力が得られると推定している。

Wolff²⁾ は、世界各地の海水の温度分布を調査し、表層海水と1,000mの深層海水との等温度差線を発表している。図-1は、その分布を示したものである。図から明かなように、海水の上下の温度差が16℃以上とれる海域は、北緯40度から南緯40度以内に含まれる。海洋温度差発電が経済的に成り立つ下限の温度差は、15～16℃である。したがって、北緯40度から南緯40度以内に含まれる国や島には、海洋温度差発電所を建設することが出来る可能性がある。すなわち、これらの国は、海中に膨大なエネルギーを保有しているといえる。

表1は、これらの国のうち、海洋温度差発電が建設しうる可能性のある国を列挙したものである。

わが国の経済水域（海岸200カイリ、360km）内で、海洋温度差発電によって得られるエネルギー量については、梶川³⁾ が詳細な計算を行っている。その結果によると、わが国の経済水域内では、年間1,000 × 10¹¹ kwhのエネルギーが得られる。この量は、昭和55年度のわが国のエネルギーの総需要量（約4.2億kl）の約20倍に相当する。このエネルギーの1%を利用することが出来るとしても、約1億klの石油に相当するエネルギーが取り出せることになる。わが国での海洋温度差発電によるエネルギー量を正確に見積るためには、

* 佐賀大学理工学部助教

〒840 佐賀市本庄町1

表1 OTEC 可能国

アジア	モーリシャス	ウルグアイ 東方共和国
インド	モーリタニア 回教共和国	エクアドル 共和国
インドネシア 共和国	モロッコ 王国	ガイアナ
スリランカ 共和国	北アメリカ州	グレナダ
タイ 王国	アメリカ合衆国	コロンビア 共和国
中華人民 共和国	エルサルバドル 共和国	スリナム 共和国
日本	キューバ 共和国	チリ 共和国
フィリピン 共和国	グアテマラ 共和国	ブラジル 連邦共和国
マレーシア	コスタリカ 共和国	ベネズエラ 共和国
モルジブ 共和国	ジャマイカ	ペルー 共和国
アフリカ	ドミニカ 共和国	ボリビア 共和国
アンゴラ 人民 共和国	トリニダードトバコ 共和国	オセアニア州
ガーナ 共和国	ニカラグア 共和国	オーストラリア
カーボベルデ 共和国	ハイチ 共和国	トンガ 王国
ギニア・ビサオ 共和国	パナマ 共和国	ナウル 共和国
コートジボアール 共和国	バハマ 連邦	西サモア
スワジランド 王国	バルバドス	ニュージーランド
ソマリア 共和国	ホンジュラス 共和国	パプア・ニューギニア
マダガスカル 共和国	メキシコ 合衆国	フィジー
南アフリカ 共和国	南アメリカ州	ベラウ 共和国
モザンビーク 共和国	アルゼンチン 共和国	

今後、海象条件や気象条件について詳細な調査をする必要がある。

3. 海洋温度差発電の要素の開発

3.1 作動流体

海洋温度差発電の実用化のための課題については、これまで、各方面で指摘されている¹⁾。その中で、作動流体の選択は、最も重要な課題である。作動流体の選択の如何によって、発電サイクル、熱交換器の形状や大きさ、熱交換器の材質、タービンの形状や大きさ、ポンプの形状や大きさ等が決定される。これらの決定によって、発電所の形態や規模も決定されるし、環境問題も論じられる。また逆に、これらの機器の製作に際しての技術的制約を明かにしたり、発電コストの算出を行うことによって、作動流体は決定される。

作動流体に関する研究は、これまでにも多く行われている。これらのうち、アンモニア、フロン22、水が有力な候補として上げられている。

アンモニアとフロン22を作動流体とした発電サイクルは、クローズサイクルとして利用され、水を作動流体としたものは、オープンサイクルとして利用される。オープンサイクルについては、種々の概念的 research は多く行われているが、発電システムを用いた実験的研究はほとんど行われていない。本報では、クローズサイクルについてのみ報告する。

クローズサイクルについては、アンモニアとフロン22が適当な作動流体であるということは、多くの研究者の意見がほぼ一致している。しかし、いずれが最適であるかという結論はまだ出ていない。

著者らのこれまでの研究によっても、熱力学的及び

伝熱工学的立場からすると、アンモニアの方がフロン22より優れている。しかし、アンモニアの場合には、銅系統の材質が利用されないために、コスト面からは必ずしも絶対的に優位とはいえない。また毒性からするとフロン22の方が優位になる。これらのことを考え合わせると、作動流体の選択は、設置場所や発電規模等によって、適当に選ぶ必要があるようである。

3.2 効 率

図-2にアンモニアのランキンサイクル効率を示す。タービン入口温度22°C、出口温度12°Cとすると、アンモニアの場合には、サイクル効率は3.32%になる。サイクル効率については、フロン22とアンモニアはほぼ同じで、上述の条件の場合では3.29%になる。実際の発電所の効率は、これらに、タービン効率や発電機効率をかける必要があるので、約2.7%になる。

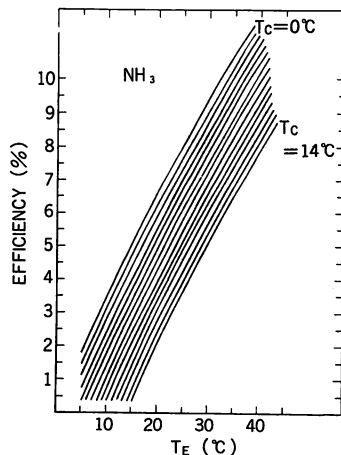


図-2 アンモニアのランキン効率

3.3 蒸発器と凝縮器

海洋温度差発電用の蒸発器と凝縮器に関しては、これまで多くの研究がなされている。¹⁾ これらのうち、特に海洋温度差発電用として注目されているものは、

- 1) プレート式蒸発器と凝縮器
 - 2) ポーラス管を用いた水平管外型蒸発器
 - 3) フルーテッド管を用いた鉛直管外蒸発器と凝縮器
- である。これらのものについては、基礎的な研究と共に、実用規模の大きさのものを用いて、性能試験が行われている。これらの特徴と試験結果について述べる。

3.3.1 プレート式蒸発器と凝縮器⁴⁾

プレート式蒸発器は、板と板とを重ね合わせ、その間に、交互に温海水と作動流体を通じて蒸発をさせるものである。図-3には、プレート式蒸発器での温海水と作動流体の流れを示す。この図は、二枚を一組として溶接したものである。プレート式は、一般には、板と板との間にパッキンを入れたものが多く利用されている。海洋温度差発電の場合には、作動流体側はあまり汚れないこと、作動流体側の圧力は11 at a になることがあるので、従来のパッキング方式より溶接方式の方が優れている。

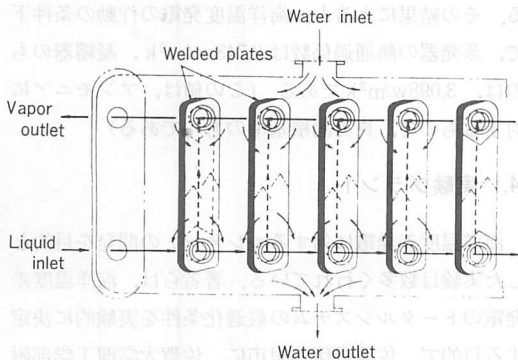


図-3 プレート式蒸発器のフロー線図

図-4に、伝熱面の例を示す。左側の白っぽい面は、作動流体側にアルミ粉末を溶射したものである。このようにすると、伝熱面にキャビティが多数でき、気泡の発生を促進し、沸騰開始点を小さくする。図-4の右側の面は、温海水側で、たて溝とドレンネッスが施されている。このようにすると、乱流の発生が促進され、温海水側の熱伝達係数が増大し、従来のものに比して圧力損失も小さくなる。

図-5は、プレート式蒸発器の熱通過係数(真実面積基準)の測定結果を示す。図中のS Plateは、作動流体側に何も施していないもので、IP Plateは作動流

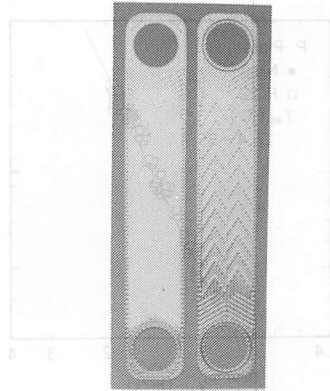


図-4 蒸発器のプレート

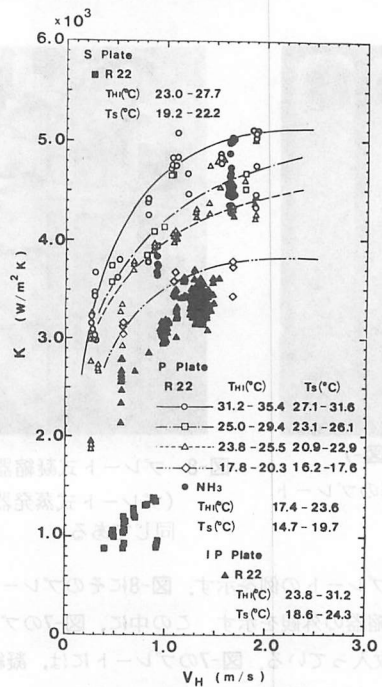


図-5 プレート式蒸発器の熱通過係数

体を伝熱面に噴射したものである。P Plate は、図-4に示したものである。作動流体には、アンモニアとフロン22が用いられている。温海水流速1.0 m/s、温海水入口温度25~29°Cで、約4,200w/m²kの熱通過係数が得れている(P Plate)。

図-6は、P Plateの温海水側の圧力損失の測定結果の例を示す。温海水流速が1.0 m/sの時、圧力損失は約4.5mである。

プレート式凝縮器の場合には、冷海水と作動流体の流し方は、蒸発器とはほぼ同じであるが、蒸気と液体の流れ方が上下逆になっている。図-7に、プレート式凝

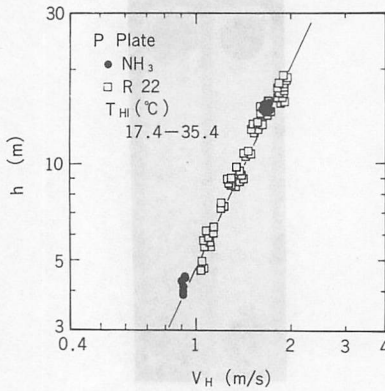


図-6 プレート式蒸発器の温海水側圧力損失

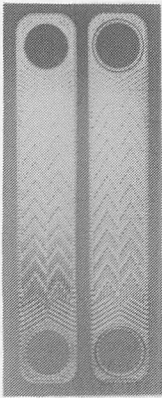


図-7

凝縮器のプレート

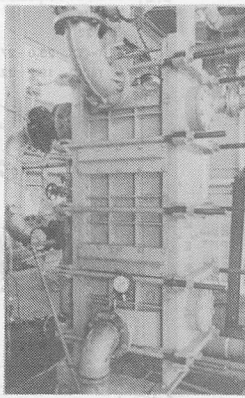


図-8 プレート式凝縮器の外観
(プレート式蒸発器もほぼ同じである)

縮器のプレートの例を示す。図-8にそのプレートを用いた凝縮器の外観を示す。この中に、図-7のプレートが168枚入っている。図-7のプレートには、凝縮熱伝達係数を促進させるために、フルートとドレンネッジが施してある。

図-9は、プレート式凝縮器の熱通過係数(真空面積基準)の測定結果の例を示す。アンモニアの場合には、冷却水の入口温度7.4~11.3℃で、冷海水流速が1.0 m/sの時、熱通過係数は、4,000~4,500 w/m²kである。しかし、フロン22の場合には、約3,500 w/m²kで、アンモニアよりかなり小さい。このような傾向は、他の形式の凝縮器の場合にも言える。

3.3.2 鉛直フルーテッド管形蒸発器と凝縮器¹⁾

鉛直フルーテッド管を用いた蒸発器と凝縮器は、OTEC用としては早くから注目され、数多くの研究が行われている。これらの研究をもとにして、アメリカのArgonne 研究所では、実用規模の大きさの蒸発器と

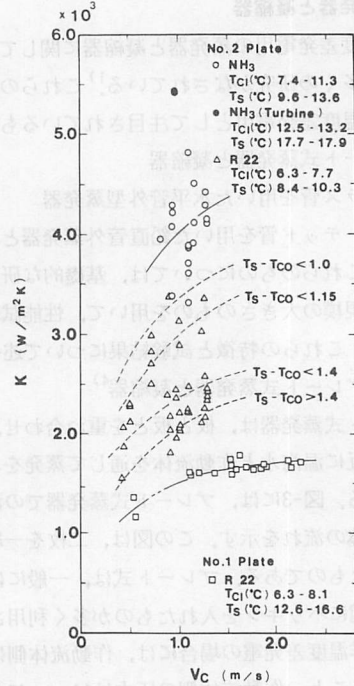


図-9 プレート式凝縮器の熱通過係数

凝縮器を用いて、熱通過係数と圧力損失を測定している。その結果によると、海洋温度発電の作動の条件下で、蒸発器の熱通過係数は2,743 w/m²k、凝縮器のものは、3,098 w/m²kである。(この値は、アンモニアに対するもので、真実面積基準のものである)

4. 実験プラント

海洋温度差発電に対するエレメントの開発を目的とした実験は数多く行われている。著者らは、海洋温度差発電のトータルシステムの最適化条件を実験的に決定する目的で、佐賀県伊万里市に、佐賀大学工学部附属の「海洋熱エネルギー変換実験施設 (OTECセン

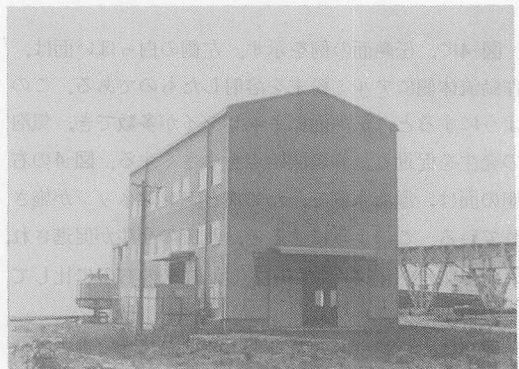


図-10 佐賀大学工学部附属「海洋熱エネルギー変換実験施設」

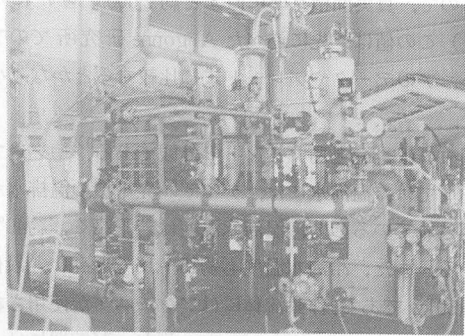


図-11 伊万里2号 (50kw プラント)

ター)」を建設した。この施設では、各種の熱交換器の性能を海洋温度差発電の条件下で測定している。ここでは、更に、発電所の構成機器間の相互依存性を、長期間の運転を行うことによって明らかにしている。図-10は、実験所の全景で、図-11は、伊万里2号の外観である。伊万里2号では、蒸発器、凝縮器には、前述のプレート式が用いられている。作動流体にはアンモニアとフロン22が用いられた、タービン・発電機の出力は50 kw である。(現在はタービン・発電機は徳之島のプラントで使用されているため取りつけてない。1983年度中に新しいものを取り付ける予定である)。このプラントでは、現在、ボラス管型蒸発器とスワール管型凝縮器を用いたシステムも稼動している。

この施設では、2-3ヶ月間の長期運転が行われているが、単一の機器の性能の実験では得られない貴重なデータが得られている。これらのデータは現在整理中で近々公表する予定である。

5. デモンストレーション・プラント

実際の海水を用いたデモンストレーション・プラン

トは、1) アメリカのロッキード社等が建設した Mini OTECプラント、2) 東京電力がナウルに建設した Nauruプラント、3) 九州電力が徳之島に建設した徳之島プラントの3基である。

Mini - OTEC の仕様については、各方面で発表されているので、詳細は省略するが⁴⁾ここでは、Mini - OTEC で得られた主な結果のみを紹介する。

表2は⁵⁾ Mini - OTEC で得られた正味出力と、各種の損失動力を示したものである。理論タービン出力101.3kwに対して、発電端出力は48.3kwになっている。発電端出力よりポンプ動力等の所内動力 34.8 kwを差し引くと、正味出力は18.2kwになる。

Owens ら⁵⁾も原論文で述べているように、この正味出力は50kw程度の小さいプラントでは決して小さいものではない。この表に示した正味出力が小さい原因は、表中に示した各機器の効率が、通常用いられている発電所のものに比較して極端に小さいためである。特に、発電機効率とタービンの機械効率、ポンプ類の効率が小さいことが大きな原因となっている。それで、表の右欄は、これらの効率を通常の発電所のものと同程度に改良したとして、Mini - OTEC の結果を修正したものである。発電端出力は、82.8kwになり、正味出力は58.3kwになり、この比率は0.704になる。この値は、著者らが、100 MWについてプレート式熱交換器を用いて計算した図-15の結果とほとんど一致している。すなわち、海洋温度発電でも、理にかなった設計を行うと、発電端出力の約70%の正味出力(送電端出力)が得られるわけである。

Nauru プラントについても、すでに、その概要は報告されている⁶⁾ので、ここでは主な結果のみを示す。

表2 Mini OTEC の実験結果

Component	Mini - OTEC		Improved Mini-OTEC	
	Eff.(percent)	Pwr(kw)	Eff.(percent)	Pwr(kw)
Turbine -Generator				
Thermal	78.5	21.8	86	14.2
Electrical	87.6	7.5	98	1.7
Mechanical	76	19	97	2.6
Overall	52	48.3	82	18.5
Cold Water Pump/Motor	70	14.3	81	12.4
Warm Water Pump/Motor	70	10.3	81	8.9
Ammonia Pump/Motor	17	6.2	60	1.7
Auxiliaries	—	4.0	—	1.5
Total Parasitic Power		34.8		24.5
Net Power		18.2		58.3
Total		101.3		101.3

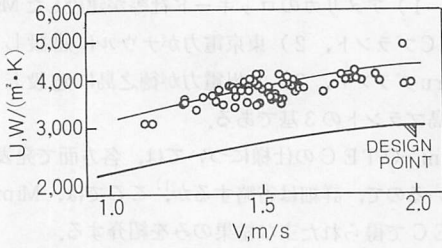


図-12 ポーラス管型蒸発器の熱通過係数

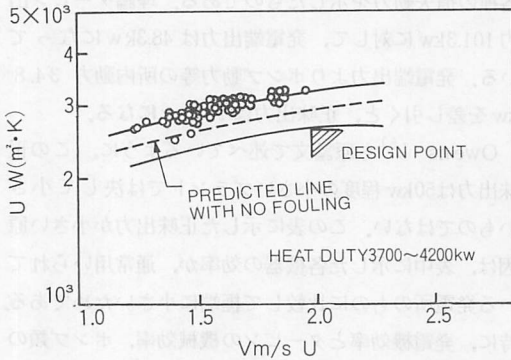


図-13 フルーラッド管型凝縮器の熱通過係数

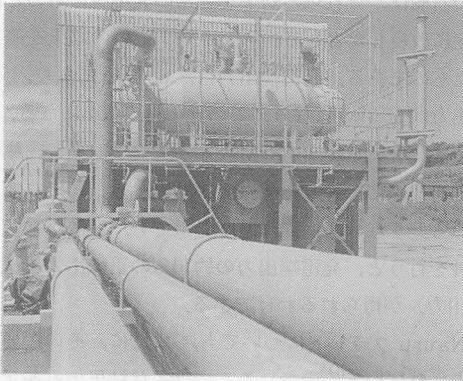


図-14 徳之島プラント

ナウルプラントでは、蒸発器に水平ポーラス管型が、凝縮器には、鉛直フルーテッド管型が用いられている。

図-12 は、温海水温度 27.2℃ ~ 28.7℃ の下で測定されたポーラス管型蒸発器の熱通過係数の値である⁷⁾。図から明らかなように、流速 2.0m/s で、熱通過係数は 4,300 (w/m²k) になっている。この値は、先に述べたプレート式蒸発器より若干小さいが、海洋温度差発電用としては経済性のある値である。

図-13 に、鉛直型フルーテッド凝縮器の熱通過係数を示す⁸⁾。冷海水の入口温度は 6.2~12.0℃ である。冷海水流速が 2.0 m/s の時、熱通過係数は約 3,000w/m²k である。(注: この値は、公称外径を基準にして計算して

いるので、真実面積基準に直すと約 2,500 ぐらいになる。) この値は、先に述べた Argonne 研究所でのアンモニアのデータやプレート式に比較するとかなり小さい。

図-14 は、徳之島プラントの外観である⁹⁾。徳之島プラントでは、温海水には、ディーゼル発電機の温排水が利用されているので、温海水温度は若干高く、約 40℃ である。また、冷海水温度も約 15~16℃ と高い。設備容量 50kw である。作動流体にはアンモニアが使用され、蒸発器にはシェルアンドプレート型が、凝縮器には、火力発電等用いられているシェル・アンドチューブ型が用いられている。そのために、蒸発器に比べて容量の大きなものになっている。冷却水の取水管は長さ 2,350m で、内径 50cm の硬質ポリエチレン管である。タービン・発電機は、著者らが伊万里 2号で借用していたものである。実験は 1982年 9月に開始され、連続運転が行われている。実験データの詳細は公表されていない。

6. トータル設計と諸元

前述の各種の熱交換器の実験的研究の結果を利用す

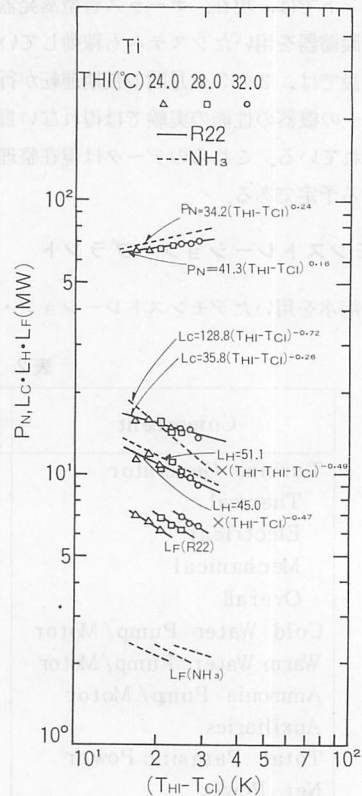


図-15 温度差と正味出力

ると、発電所の設計を行うことができる。海洋温度差発電の場合には、利用できる温度差が小さいために、設計に際しては、発電コストが最小になるように工夫する必要がある。

著者らは、OTECプラントを最適に設計するためのプログラムを開発し、種々の形式について最適設計を行った。¹⁰⁾

プレート式熱交換器を用いた場合について、図-15に温海水温度 (T_{HI}) と冷水温度 (T_{CI}) との差と、正味出力 (P_N)、温海水・冷海水・作動流体ポンプ動力 (L_H , L_C , L_F) との関係の例を示す。¹¹⁾ 図中の破線はアンモニア、実線がフロン22について示したものである。プレートの材質にはチタンを用いている。温度差が同じ場合には、アンモニアの方が約6%正味出力が大きい。

図-16は、同様に、温度差と伝熱面積を示したものである。総伝熱面積では、アンモニアはフロン22の場合の%でよいことがわかる。

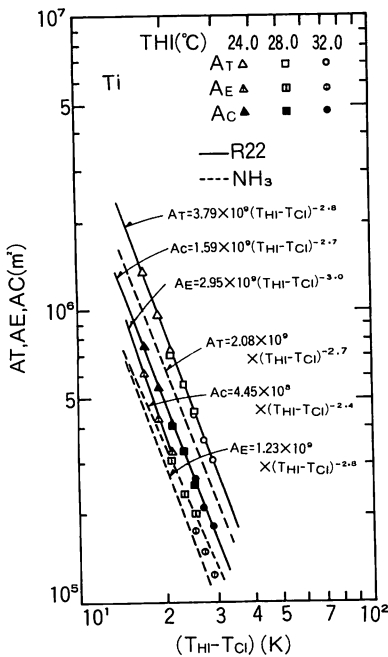


図-16 温度差と伝熱面積

7. むすび

海洋温度差発電の開発の現状について、最近の情報をもとに述べた。Mini-OTEC, Nauru プラント、徳之島プラントの成功によって、海洋温度差発電は実用化のメドが立ったと言える。また、著者らの理論的研究によっても、発電端出力の70%の正味出力が得ら

れることがわかった。

石油の価格が一時的に下がったために、石油代替エネルギーの開発のテンポを遅らせてよいという一部の人がいるが、現在の石油のコストでも、エネルギー不足のために、生活に窮している多くの人々がいることを我々は忘れてはいけない。世界の平和と人類の永久の幸せのためにも、多くの人々の協力のもとに、海洋温度差発電が一日も早く実用化されることを希望する。

文 献

- 1) 上原春男; 海洋温度差発電読本 (1982), オーム社.
- 2) Wolff, W. A., ほか2名; OTEC World Thermal Resource, Proc. 6th OTEC Conf., II, (1979) 13. 5. 1~13. 5. 7.
- 3) 本間塚也, 黒木敏郎, 梶川武信; 海洋エネルギー読本 (1980), オーム社.
- 4) Uehara, H. ほか4名; Shell and plate Type Heat Exchanger for OTEC Plant, Proc. ASME-JSME thermal Engineering Joint Conf., 2, (1983) 253~260.
- 5) Owens, W. L., Trimble, L. C.; Mini-OTEC Operational Results, J. Solar Energy Engineering, 103,, (1981), 233~240.
- 6) 伊藤文夫・ほか2名; 海洋温度差発電システム実証プラントの開発, 日機誌, 85巻, 764号(昭57), 728~733.
- 7) Mochida, Y. ほか2名; Performance Tests of an Evaporator for a 100-kw (Gross) OTEC Plant, Proc. ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conf., 2 (1983) 241~245.
- 8) Kawano, S. ほか2名; Performance Tests of a Condenser for a 100-kw (Gross) OTEC Plant, Proc. ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conf., 2 (1983) 247~252.
- 9) 九州電力パンフレット (1982).
- 10) 上原春男, ほか3名; ダブルフルーテッド管形熱交換器を用いた海洋温度差発電システムの研究 (第1報), 日機論 (B), 49巻, 442号(1983), ~
- 11) 上原春男・中岡 勉; プレート式熱交換器を用いた海洋温度差発電システムの研究 (作動流体がフロン22の場合), 日機論, No. 838-2, (1983), 138~145.