

対馬海域における海水の温度差エネルギーの利用

栗須 正登*

1. はじめに

日本海には、シベリヤ大陸の雪解けの冷海水（0.2°C 実測値）がほぼ無尽蔵に存在する。一方、その表層には黒潮の一部である対馬暖流が流入し、27°C（夏場）の温海水が存在する。両者の温度差エネルギーは膨大なものでこのエネルギーの有効活用が可能になればエネルギー資源に貧しい我国において寄与すること大であることは多言を要しない。筆者らは、プロジェクトを作り、日本海島根沖^{2,4,6)}にて温度差発電の洋上実験^{5,6)}を行い2 kw 発電に成功した。

日本海の実験に先立って洋上発電に適する海域の調査⁴⁾を行なったが、日本海も好適な海域であることも解ったが、対馬海域は更に都合が良いことを知った。実験海域として、日本海にするか、対馬海域にするか迷ったが、洋上実験をするには長年月の準備を必要とし、前から日本海の実験を予定していたのでここで実験を行なった。今回、日韓トンネルの設置位置と海洋エネルギー基地とは、ほぼ同じ海域である。例えば、トンネルとエネルギー基地の同時施工となれば、別々の単独施工よりも建設費の大幅軽減が期待される。このような意味でこの報告を述べる。

2. 対馬海域・海洋エネルギー基地の利点

筆者らは海水の温度差を利用する洋上エネルギー・プラントに適する海域の調査を行なった。長崎大学水産学部の長崎丸などの協力を受けて、東シナ海や日本海などを調査したが、図-1示した対馬海域の海水の温度分布も実測した。その結果対馬海域は他の海域（例えば、ハワイ沖や日本海など）に比べて非常に利点を有することが明らかになった。

図-1は、実験を行なった対馬海域を示し、●印は、1979.9.5の測定点で、■印は1979.9.8の実測点である。実測結果の詳細は別に報告⁴⁾したが、図-2に、水深断面に沿った水温分布を示した。同図の縦軸は水深で横軸は測定点No⁴⁾である。

図-1には、対馬海域出口の海底の200 mと1,000 m 等水深線を示している。日本海は対馬海域出口＝日本海入口は水深200 mより急激に深くなっており深い所は5,000 m以上に達する。日本海の200 m以上の深海にはシベリヤ大陸の雪解け水がほぼ無尽蔵に存在し、この冷海水と表層の温海水の温度差を利用して、プロジェクトは海水淡水化^{1,2,3)}や温度差発電^{5,6)}の洋上実験を行なった。日本海での実験海域⁴⁾は、島根県日御崎北西38 kmの海上であった。

*長崎大学教授

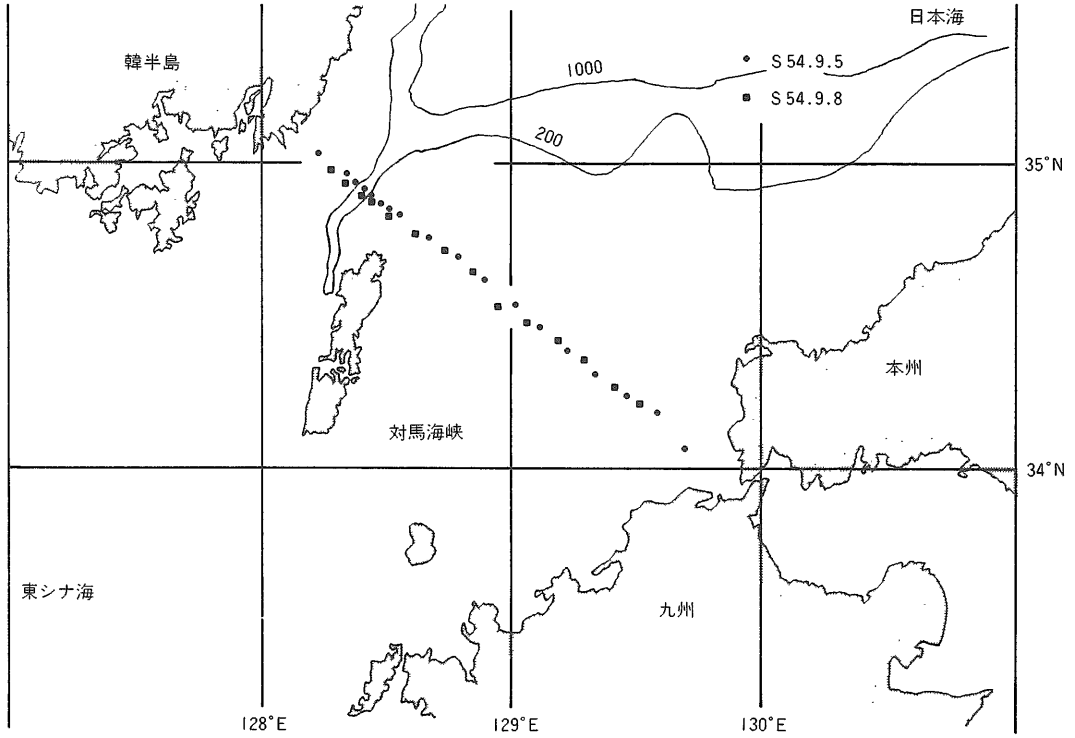


図-1 海洋温度分布の調査海域

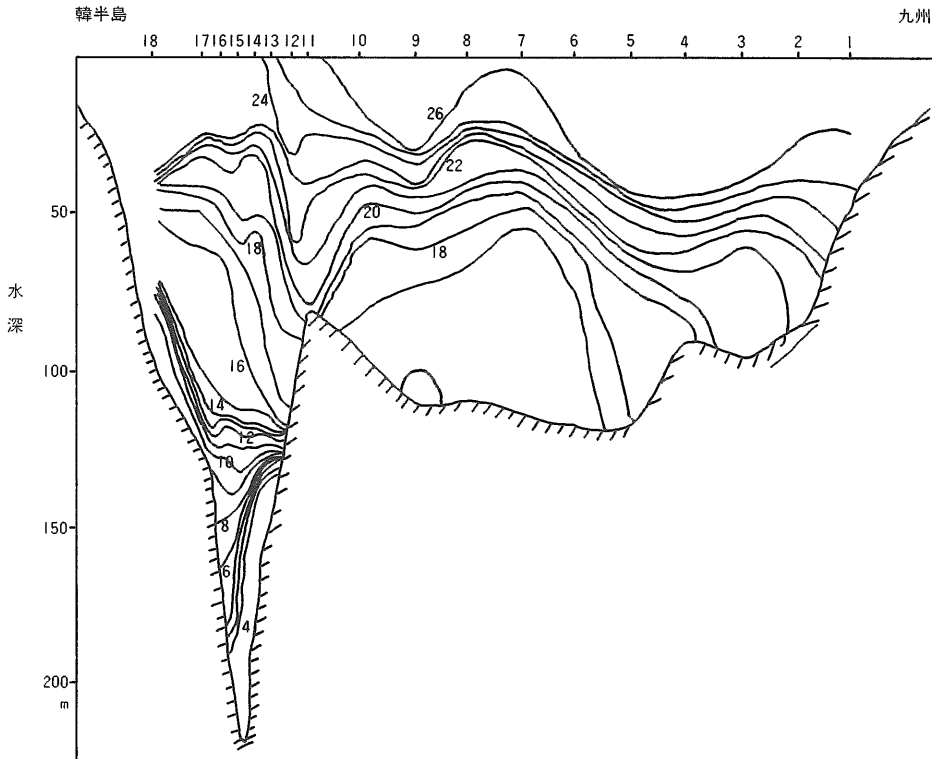


図-2 対馬海域の海水の水温分布

図-1および図-2から解るように、対馬海域の実測海域は水深約100m前後であるが、韓半島より水深200mに達する海溝があり、このなかの海水は冷たい。この海溝は、対馬の伊奈崎海岸へ約6kmまでに近づいている。これは極めて好都合のことで、日本海で冷水を採るには、前述の日御崎北西が陸地より一番近く、ここでは38kmであるが、対馬は6kmで良い。これは、エネルギー・プラントの建設にも便利で、発生した電力の陸地への輸送にも都合が良いことは多言を要しない。対馬海域の利点は、陸地に近接した海溝から冷水が得られることである。

次に、図-3は、本プロジェクトが想定した洋上エネルギー・プラントの構想を示したもので、また、表-1には、構造

表-1 構造物の強度

	200 m	663 m
l	1	3.3
l^2	1	10.
l^3	1	33.

物の強度を示した。話を具体的にするため、ハワイ沖と対馬海域とで比較して示したが、水深663m→200mと浅くなるため、工事費は概略的に1/33で済むことになる。

プロジェクトは日本海での洋上実験に

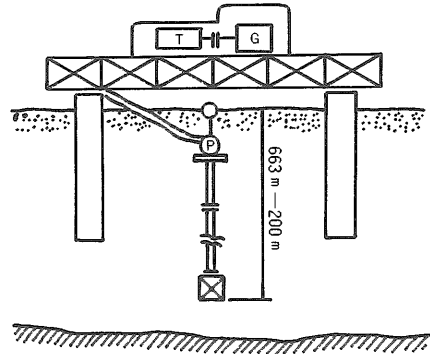


図-3 洋上エネルギー・プラント (想定図)

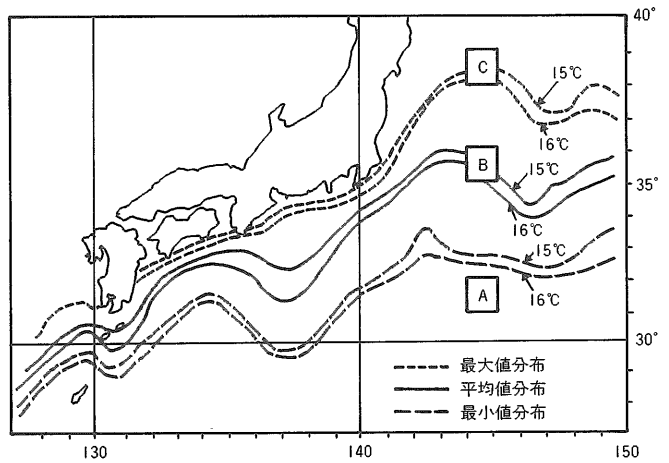


図-4 黒潮の季節変化

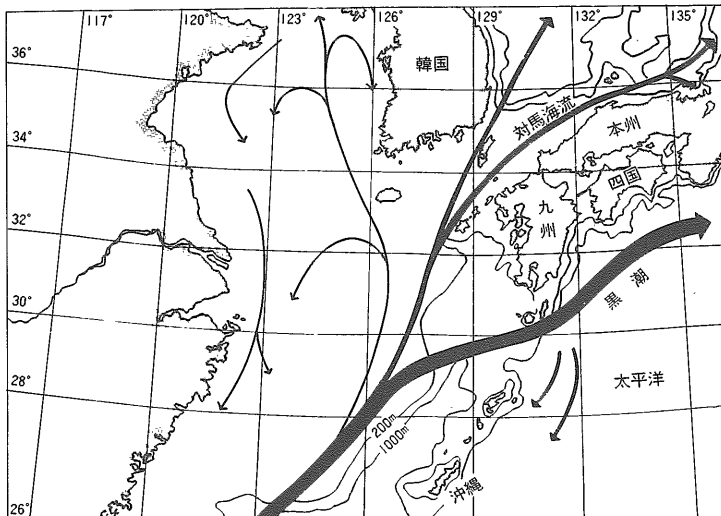


図-5 黒潮→対馬海流

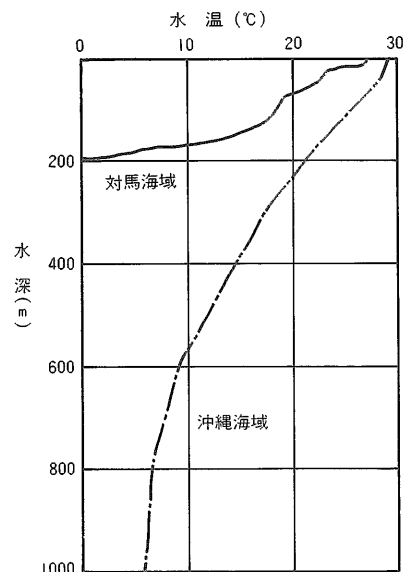


図-6 対馬海域と沖縄海域との水温分布の比較

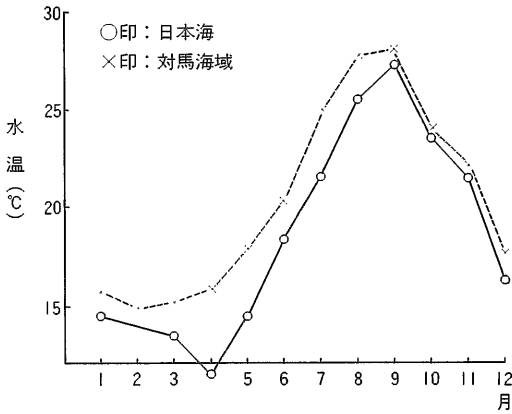


図-7 日本海と対馬海域月別水温の比較

先立ち、日本列島周辺海域の水温の調査を行ない結果は別に報告⁴⁾した。ここでは、対馬海域エネルギー・プラント構想に関係のある点を述べて、この海域の特長を強調したい。

図-4は、黒潮の季節変化で、黒潮の一部が図-5に示すようにトカラ列島海域で分かれて、対馬暖流となって日本海へ入る。

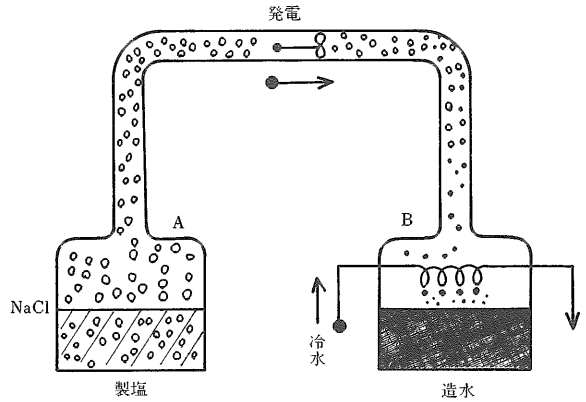
図-6は、沖縄海域の水温分布と、対馬海域の水温を比較したもので、同図より明らかなように、沖縄では、1,000 m での水深でも、水温は5°C以上あるのに、対馬海域では、200 m の浅い所で2°C (実測値) の冷海水が得られる。

浅い海から冷海水が得られることは甚だ都合の良いことで、これを要約すれば、

- a)、洋上エネルギー・プラントの建設費が大幅に安くなる。(例えば、ハワイ沖では663 m の水深で冷水が得られるが、それと比較すれば、約33分の1になる)。
- b)、深海水を吸い上げるための動力が小さい
- c)、吸い上げパイプ中の温度上昇が小さい。

などの利点が明らかである。

図-7では、日本海島根沖の水温と対馬の水温の月別変化を比較した。両海域とも海底の水温は年間通じて2°Cで一定であるが、表層水温は対馬の方が暖かく、とくに、冬季はシベリヤ大陸よりの季節風影響で日本海の表層水の温度は低下する。



(a)

製塩 = 造水



(b)

図-8 製塩→発電→造水

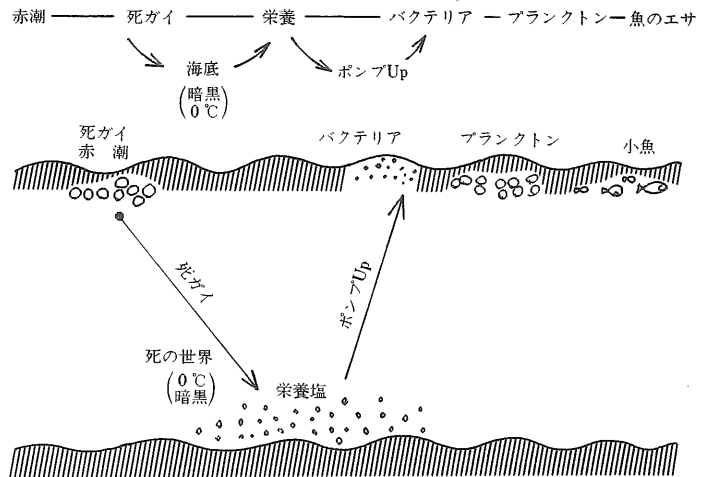


図-9 深海水の栄養水の栄養を活用した海洋牧場

3. 海水温度差利用の各種

筆者らのプロジェクトは、日本海島根沖の洋上で、深海の冷水と表層水の温度差を利用して、1980年8月には海水淡水化の実験^{1,2,3)}を行ない、また、1982年9月には洋上温度差発電^{5,6)}を実施した。この外にも海水温度差利用の各種が考えられる。

図-8は、製塩→発電→造水の関係を説明したもので、同図(a)に示すように、容器Aに海水を入れて真空にすれば、海水が蒸発する。一方容器Bに冷水パイプを通せば、パイプの表面に水蒸気が凝縮して真水が得られる。すなわち、容器Bでは造水が行なわれる。一方、容器A内では海水の濃縮、すなわち、製塩が行なわれる。同図(b)に示すように、製塩=造水である。また、容器AとBとは、圧力差があるので、ここで、タービン発電が行なわれることを説明したものである。

冷海水は、陸上に導けばそのまま、地域冷房に利用出来るし、温度差を利用した吸収式冷凍機を応用すれば、暖冷房になるし、また、製水することも経済的な利用法であろうと考えている。

図-9は、深海水利用の海洋牧場の推定図である。深海は暗黒で冷水であり、全く死の世界と言って良い。しかし、ここには栄養(塩)に富んでいる。例えば、温度差発電の冷却水としてポンプアップすれば、表層の温水と混合し、バクテリア→プランクトン→小魚の過程をたどり、発電と併せて海洋牧場となる。

4. 海水温度差利用の淡水化と温度差発電の原理とその問題点

図-10には、淡水化の原理を、また、図-11には、温度差発電の原理を示した。海水淡水化の原理は図-10のとおりである。表層の温海水を密閉容器に入れ真空に近く減圧すれば、0.02気圧(水温25°Cの場合)で沸騰する。ここで発生した水蒸気を別の容器に導き、冷海水で冷却すれば蒸留水が得られるという簡単な原理である。

図-11が、温度差発電の原理で、日本海では実験時の夏場、表層では27°Cの温海水だが、

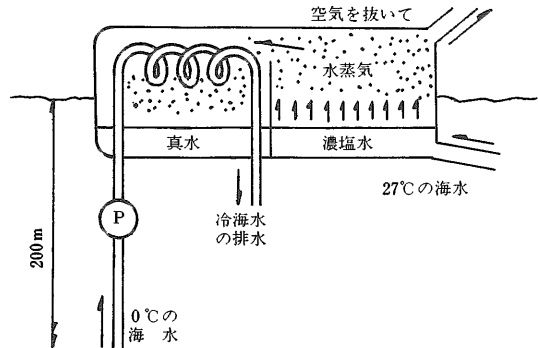


図-10 低温度差利用の淡水化の原理

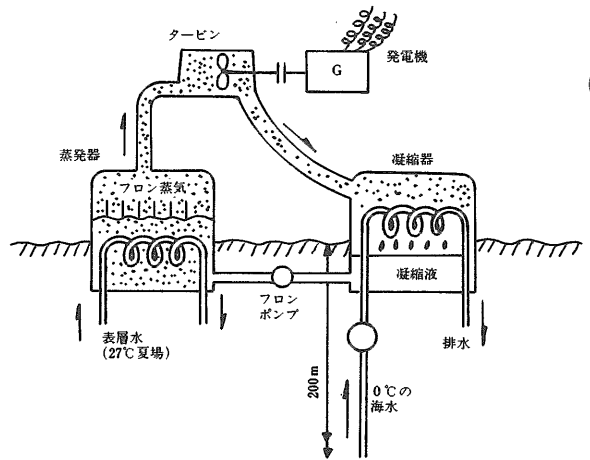


図-11 温度差発電の原理

200 mの深海においては0.2°Cが記録された。

水の沸点は1気圧で100°Cだが、気圧を0.02気圧に下げると27°Cでも沸騰する。したがって、27°Cと0°Cの海水の間には0.02~0気圧の圧力差があり、この圧力差で理論的にはタービンが回転出来るが、実際にはこの圧力ではタービンは回らない。このため、圧力を上げる各種の試みが行なわれている。このプロジェクトでは、圧力を上げる熱媒体としてフロン12を用いた。フロン12を用いると、25°Cの温度差で、1.4 kg/cm²の圧力差となり、この圧力ではタービンは十分回転する。

図-11に示すように、2つの容器があり、一方の蒸発器には表層水を入れてフロン溶液を加熱すると、ここでフロンガスが発生する。他方の容器(凝縮器)では200 mの深海からポンプアップした冷海水で冷却すれば、フロン蒸気は液体に凝縮する。(図-11参照)。両者の間でフロンター

ピンを回し、これに直結した発電機で電力が得られる。

図-11のような発電において、タービンおよび発電機については現状の技術で全く問題はない。温度差発電では、石油や石炭などの燃料を全く使用しない。また原子力発電のような公害問題も発生しないので甚だ都合が良いが、次に述べるような2つの技術難点を有する。

- 1) 燃料は全く使用しないが、その代り極めて大容量の熱交換器を必要とする。例えば、この計画の5 kw (洋上で得られたのは、2 kw) の発電に対して1"×8,000 m の裸銅パイプを必要とする。裸銅パイプを用いたのではその設備資金の利子の方が石油の燃料代をはるかにオーバーする計算になる。この問題を解決するために、プロジェクトは、冷凍機および冷房設備技術グループの協力を受けた。日本のこの方面の技術の進歩は目覚ましいものがあり、その結果、前述の8,000 m の10分の1の800 m に短縮出来た。
- 2) 海洋エネルギーはその量が膨大でほとんど無尽蔵と言って良い。問題は温度差が小さいことで、地球上の洋上で得られる温度差はどこでもおよそ25°C位である。温度差が小さいため現状の技術では発電の効率が1~2%程度と非常に小さい。これを石油発電所の効率約40% (最大) と比べると非常に悪く、換言すれば同じ容量の発電に対して、設備資金が20~40倍必要とすることを意味する。

発電効率を上げるために、プロジェクトは他の研究グループと異なり、発電の前段にヒートポンプを用い、1度昇温する方法を採用している。昇温の具体的方法として、すでにケミカルヒートポンプを用いて成功²⁾しており、また、これとは別に、ゼートヒートポンプを用いて昇温する研究も進んでいる、その結果に明るい見通しを持っている。

5. 海水温度差利用の現状

5.1 海外および国内での研究状況

アメリカはハワイ沖で実施していたMINI-OTECを1979年に終了し、1980年からIMW発電を目標としたOTEC-1のプロジェクトに移行する計画であったが、現在中断されている。

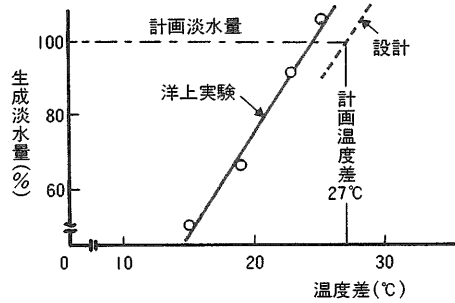


図-12 洋上淡水実験結果

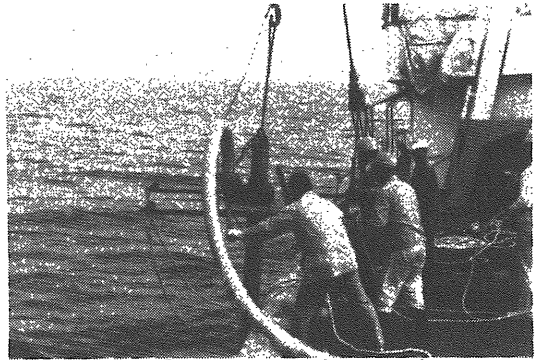


写真-1 海水ポンプの投入状況



写真-2 東シナ海における深海水のポンプ Up

MINI-OTECでは、アンモニア closed cycle により発電端出力53 kwを得たが、プラント駆動に34.8 kwを消費したので、送電端出力は18.2 kwであった。バージを改造したプラットフォームは13.6トンのコンクリートアンカで1点繫留され、これからポリエチレン製外径60 cmのパイプ658 mが懸垂され、冷水汲み揚げが行なわれた。温・冷水の温度差は20.9°Cであった。このプラントは1979年8月から11月にかけて約3カ月稼動した。これが実際に稼動したOTECの唯一の例である。フランスの海洋開発局(CNEXO)も1985年にopen cycleのパイロットプラントを

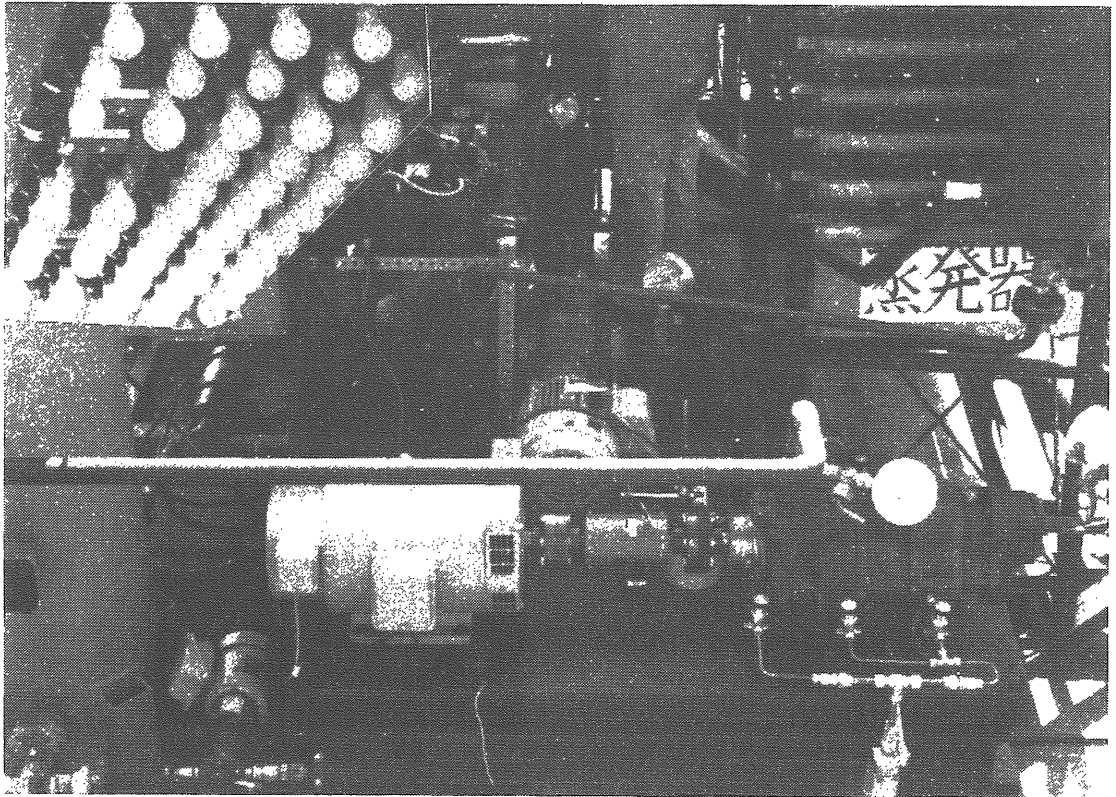


写真-3 実験船上の温度差発電設備

設置するよう検討中という。一方我国では、通産省のサンシャイン計画によるプロジェクトや、電力会社による陸上発電設備からの温排水と深層冷水の温度差を利用する研究があるが、海上での実験はまだ行なわれていない。

5.2 長崎大学を中心とした研究グループの成果

長崎大学を中心としたプロジェクトは、1975～80年にかけて、日本近海の海洋温度差分布の調査⁴⁾を行なった。その結果、日本海島根沖を実験海域とすることにしたが、その前に、1979～80年には、東シナ海で、深海水のポンプアップの予備実験¹⁾を行なった。(写真-1、-2、参照)。

1980年8月には、造水の洋上実験を行ない、2.3 l/hの造水に成功^{1,2,3)}した。揚水量35 m³/hの内、造水プラントに使用した量は200 l/hで他は海に放流した。実験時の表層水温は(22～26°C)で、深海よりのポンプアップの水温を2.1°Cのものが得られた。このときケミカルヒートポンプ

を用いて、22～26°Cの表層水を44°Cまで昇温させることにも成功した。造水とケミカルヒートポンプの実験の外に、実験船(512 t)の200 m深海の洋上設定にも成功して、洋上設定に関する多数のデータ²⁾が得られた。

1982年には、造水実験と全く同じ海域で、洋上温度差発電の実験を行ない成功した。写真-3は、実験船上のタービン・発電設備である。

実験船やポンプアップ設備について前述したので説明を省略するが、今回の実験で得られた冷海水の温度は、2.3°Cでその量は45 t/hであり、また、この時の表層の温海水は24.4°Cで90 t/hを用いた。

蒸発器および凝縮器の熱交換には、冷房に開発された22φの特種パイプを4 m×100=400 mを200本用いた。これらを、それぞれ100本の管群方式としたため、熱交換器の大幅な重量軽減と性能アップが可能となった。

フロン・タービンにはスクリー空気圧縮機(工事用エア・マン)を逆にしたスクリー膨張機を

用いた。プロジェクトでは、当初、ジェット機に用いられるガスタービン（遠心式タービン）の小型のもので実験を行なった。その結果、性能は良いことが確認できたが、問題は回転数で、小型のため、10~20万回の高速となり、これにつながり発電機にこのような高速のものは現状では見当らなかつた。スクリュー膨張機は、3,000~4,000 r.p.m. でこれと直結する発電機と同じで好都合であった。発電機には、7.5 kw の市販の漁船用のものを直結して用いた。

洋上で発電機出力として最大2 kw が得られ100 w×30 個の電球に点燈した。この時、タービン発電機の回転数は、最高で1,800 r.p.m. で、また、熱交換器の熱落差は1.6 kcal/kg であった。

6. 海水温度差発電の経済性に関する研究

海洋温度差発電が可能なことは、すでに実証^{5,6)}されて、その技術も飛躍的に進歩している。問題は発電コストであり、これを安くするために、2つの方向がある。その1つは大型プラントにすることであり、他は、昇温³⁾することである。筆者は第2の方針に従って研究を進めている。

図-13は、横軸に温度差を採り、縦軸に発電機出力を示している。洋上では2 kw の出力が温度差を大きくした陸上では、4 kw の出力に増加する。更に、この装置を長崎県の小浜温泉に運び、温泉発電⁷⁾を行なった。温度差が大きく採れたので全く同じ装置で7 kw の発電機出力となった。

本プロジェクトの低コスト化研究の特長は昇温することであるが、その他に熱媒体としてフロンを用い、家庭の空調機用に開発された熱交換器やフロンタービン・発電機に多量生産の製品を用いることは、すでに述べた。

海底温泉発電（写真-5）は、小浜海底温泉の赤外線写真を、図-14は、海底温泉の発電方式⁷⁾の説明である。図-14の発電方式をハイドロ・サーモ発電と呼んでいるが、この方式の特長は海底に凝縮器をおき、海面に凝縮器をおく。このため、両者の高さの差をハイドロ的に利用することが出来るため、循環ポンプの動力を全く省略⁷⁾出来ることになる。温度差発電では、温度差が小さいので、熱交換器に多量の温水や冷水を循環させる必要があり、これに消費される内部動力

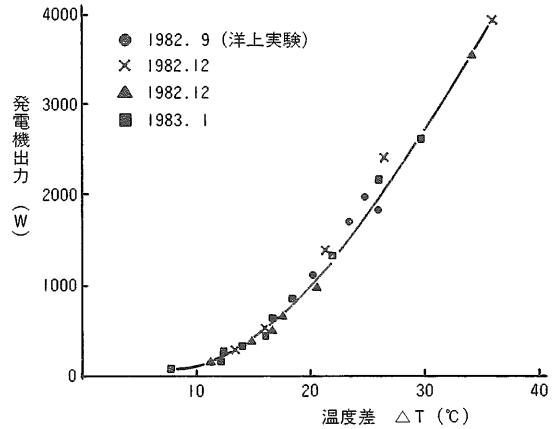


図-13 温度差と発電機出力

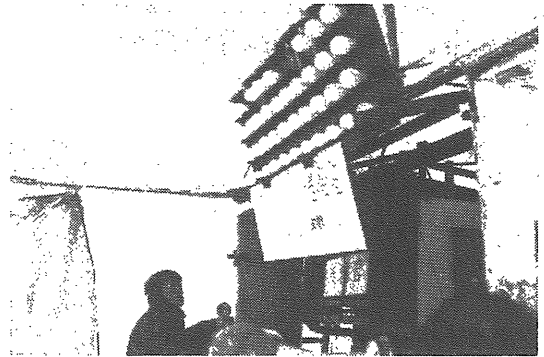


写真-4 温泉・温度差発電

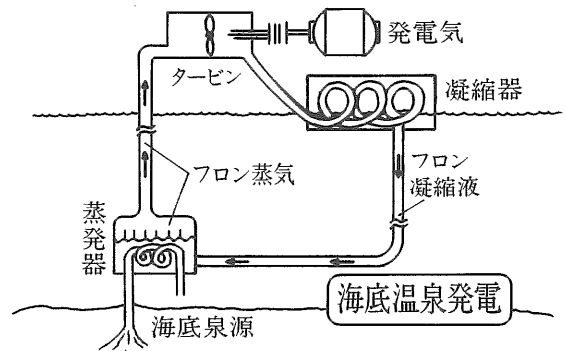


図-14 海底温泉発電

の発生電力に占める割合が大きく、技術難点の1つであった。

7. 対馬海域における海水温度差利用について

対馬の伊奈崎では、陸地より約6 kwの近い所で冷海水が得られ、海水温度差利用の海域として

は極めて立地条件にめぐまれていることは前述した。

海水の温度差を利用した造水や発電の技術は現在ほぼ完成されつつある。問題は建設費と発電コストであろう。日韓トンネルとの関係において経済性を考えて見よう。

日韓トンネルも対馬海域を通り、幸に、この海域は海水温度差利用に好都合である。いずれも、海洋工事を必要とするが、両者を別々に建設するより、同時作業の方が建設費の節減が期待出来よう。

海洋温度差発電の場合、洋上で得られた電力の陸地への輸送も技術的な難点の1つである。トンネルを物流の輸送手段と、電力輸送の2つを併用させることにすれば、九州や韓半島への電力輸送も直ちに解決出来る。

日韓トンネルが開通して、この地域の開発が進めば、水不足になることは日を見るより明らかである。洋上造水プラントの淡水も、これもトンネルを通して輸送すれば直ちに利用出来て地域開発に寄与することが期待出来よう。

表-2 豊岐郡勝本町の温泉成分

温泉名	湯ノ本温泉						
源泉名	長山温泉						
泉質	含臭素食塩泉 (Na-cl)						
湧出地	豊岐郡勝本町湯の本浦43-2 (所有者:長山仁十郎)						
分析年月日	S 42.11.14			pH値 (RpH)	6.30 ()		
泉温 (気温)	67.5°C (21.0°C)			密度	1.0129 (°C)		
湧出量	30 ℓ /min ()			蒸発残留物	17.500g/kg (°C)		
堀さく深度	65m			ラドン (Rn)			
陽イオン	mg/kg	m val	m val %	陰イオン	mg/kg	m val	m val %
H ⁺				F ⁻			
Li ⁺				Cl ⁻	9505.	268.1	91.47
Na ⁺	5350.	232.7	79.44	Br ⁻	31.2	0.39	0.13
K ⁺	235.0	6.01	7.05	I ⁻	0.5	0.00	0.00
NH ₄ ⁺	1.4	0.08	0.03	S ₂ O ₃ ²⁻			
Mg ²⁺	271.3	22.32	7.62	HSO ₄ ⁻			
Ca ²⁺	633.8	31.63	10.80	SO ₄ ²⁻	856.1	17.82	6.08
Sr ²⁺				H ₂ PO ₄ ⁻			
Al ³⁺	tr		0.00	HPO ₄ ²⁻			
Mn ²⁺	0.2	0.01	0.05	HCO ₃ ⁻	413.5	6.78	2.31
T-Fe(ssFe ²⁺)	4.2	0.15	100.	CO ₃ ²⁻			
計	6496.	292.9		計	10810.	293.1	100.
遊離成分	mg/kg	m/mol		その他			
非遊離成分				HSiO ₃ ⁻	0.03	mg/kg	
	H ₂ SO ₄						
	HAsO ₂			S	41.8.24	堀さく	
	H ₂ SiO ₃	67.6	0.87				
	HBO ₂						
溶存ガス成分							
	CO ₂	495.0	11.25				
	H ₂ S						
溶存物質 (除・ガス)	17.37g/kg						
成分総計	17.87g/kg						

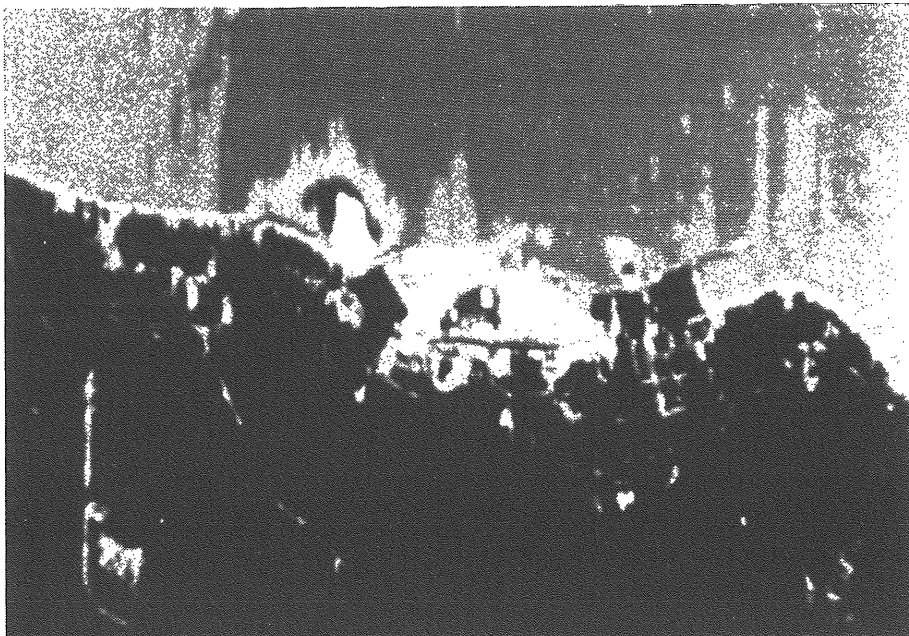


写真-5 小浜海底温泉の赤外線写真

海水の温度差利用は、前に述べたように、造水、製塩および発電の3者一体となって行なうべきで、このような意味において対馬地域の新たな産業としても大いに期待出来よう。最後に、表-2は宍岐勝本町湯の本の温泉の成分表を示した。同表より、この温泉の湯温は67.5°Cを記録している。このような地質⁸⁾の所の海底から陸地より高温の温泉が噴出していることは筆者らの研究⁷⁾から類推される所である。海底温泉発電は、前に述べたように、効率良い海水発電が理論的に可能なので大いに希望が持てる。

参 考 文 献

- 1)、市屋・白石・栗須：「海洋温度差エネルギー利用の研究」(昇温サイクルの利用を応用した海水淡水化)、機械学会第12回九州学生会、213、56年3月

- 2)、東・田中・栗須：「海洋温度差エネルギー利用の研究」、(1. 実験船の洋上設置と冷海水のポンプUp)、長大工報、17号、56年7月
 3)、栗須・琴浦・宇都：「海洋温度差エネルギー利用の研究」、(2. 昇温サイクルの利用を応用した海水淡水化)、長大工報、17号、56年7月
 4)、東・高橋・栗須：「海洋温度差分布測定法について」、(日本海近海における実測)、長大工報、17号、56年7月
 5)、栗須：「海洋温度差発電」、トリガーNo2、P. 50
 6)、山口・田中・中根・栗須：「日本海・島根沖における海洋温度差発電」、長大工報、21号、58年7月
 7)、栗須・田中・児玉・東・高橋・植木：「温泉・温度差発電」、長大工報、23号、59年7月
 8)、神田：「宍岐の地質」、日韓トンネル研究、p22、1984

シルクロードの発見

シルクロードの名付け親は、19世紀のドイツの地理探検学者フェルディナント・フォン・リヒトホーフンである。ドイツ語の「絹の道、(Seiden Strassen) がイギリスに伝わってシルクロードと訳された。

さて、シルクロードといえば西域、西域といえば張騫^{ちやうけん}の名を出さないわけにはいかない。張騫はシルクロードの発見者であり、路線開発の一大貢献者なのである。

紀元前221年に中国の統一に成功した秦の始皇帝が最も頭を痛めたのは、国土の北方を脅かすモンゴル系遊牧民族の匈奴との戦いであった。匈奴に対する北側の防衛線として設けられたのが有名な「万里の長城」である。

北からの攻撃をあきらめた匈奴は、中国の西の諸地方(中央アジア)へまわり、いわゆる西域を支配するようになった。西域は東と西を結ぶ陸上交通路の要衝である。

秦の始皇帝の死後しばらくして、漢帝国の安定期に即位した武帝(紀元前140~87年)は、西域の交通路を奪還すべく、匈奴撃退の作戦計画をねった。匈奴により西域を追われ、タリム盆地のさらに西のアム川流域に逃げていた月氏と連絡をとり、匈奴を東と西からはさみ撃ちしようというのがその計画である。

月氏への使者に選ばれたのが下級官吏の張騫だった。紀



元前139年、張騫は100人以上の随行者を引きつれ、都の長安を出発し西へ西へと向かった。だが、旅に出て間もなく、一行は匈奴に捕えられてしまい、なんと張騫は匈奴のもとに10年間も抑留される破目に陥ったのである。しかし、かれは使者としての使命は忘れず、ついに脱出して、天山山脈の南側の山麓に沿ってタリム盆地を横断し、パミール高原を越え、アム川のバクトリア地方にいた月氏の一族・大月氏のもとにたどりついた。

しかし、大月氏は、バクトリアを征服して長い間平和な生活を送っていたので、匈奴に対する復讐の念をすっかり失っていた。そのため張騫は、長年の労苦にもかかわらず、大月氏と軍事同盟を結ぶことには成功しなかったが、この大旅行を通じて見聞を大いに広めた。かれは帰途タリム盆地でまたもや捕えられたが、奇跡的にその手からのがれて長安に帰りつき、西域についての貴重な情報をもたらした。

張騫の旅は、本来の使命からすれば失敗だったが、かれの報告に基づき、武帝は西域進出を決意し、シルクロード開拓の発端となったという点では、重要な意味を持っている。

佐藤清著『アジアハイウェイ』昭和51年2月日本経済新聞社発行「日経新書」より