

## 海洋温度差発電の熱力学的考察

濱 田 圭 之 助

長崎大学教育学部化学教室  
(昭和63年10月31日 受理)

### Thermodynamic Consideration of Electrical Power Generated by Temperature Difference of Ocean Water

Keinosuke HAMADA

Department of Chemistry, Faculty of Education  
Nagasaki University, Nagasaki 852, Japan  
(Received Oct. 31, 1988)

#### Abstract

Japan produces less natural resources, so it is the most important problem for Japan to develop a perennial natural energy. One of them, an electrical power generated by temperature difference of a ocean water (EPTD) has been exploited for practical use. The EPTD is generated by expansion of liquefied ammonia, but electrical power produced by water vapor (EPWV) is generated by thermal expansion of water vapor. Therefore, the EPTD system has an extra equipment for liquefaction of ammonia, comparing with the EPWV system, because an ammonia of b. p.  $-33.5^{\circ}\text{C}$  can not be liquefied by only cooling the ammonia gas which is vaporized from the liquid ammonia, using the bottom water ( $\sim 4.5^{\circ}\text{C}$ ) of deep ocean.

The thermodynamics says that the thermal engine can not obtain 100 % efficiency with every efforts, because of the energy loss which is inevitable to the thermal engine. The thermodynamic calculation of the thermal energy which is necessary for obtaining some electrical energy shows that the ratio of the energy for the EPWV system to the energy of the EPTD is 1 : 1.7. It means that the EPTD system wastes more fossil fuels than the obtained perennial natural energy.

## 1. 緒 言

資源小国である日本にとっては、石油に代わるエネルギーとして、不枯渇エネルギーの開発が急務であることは論を俟たない。すでに水力発電、地熱発電、風力発電あるいは太陽電池など実用化されているものもあるが、最近、海洋温度差発電が注目されてきている。しかしながら、この海洋温度差発電の1キロワット当たりの発電コストが、通常の火力発電の10倍近くにもなっている\*1)。はたして海洋温度差発電のコストが、通常火力発電のコスト程度に下げうるかどうか、熱力学的に比較考察を試みた。

## 2. 海洋温度差発電の原理

海洋温度差発電は図1に示されるように、蒸発器に低い温度で気化する液化アンモニア（または液化フロン）を入れ、このアンモニア液を表層部分の海水で温めて気化させる。この気体をタービンに送ってタービンを回転させ発電機をまわす。タービンを出た蒸気は凝縮器\*1、\*2)に導かれ、そこで海の深層部分の冷たい海水で冷やして液化させ、再び蒸発器に入れる。すなわち海水の温度差を利用して発電ができる。

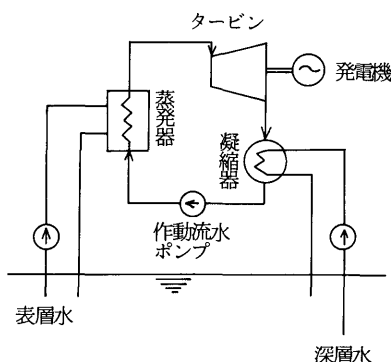


図1 海洋温度差発電の概略図\*1)

## 3. 海洋温度差発電と火力発電との熱力学的比較

海洋温度差発電（A発電と略す）と火力発電（B発電と略す）共に、媒体の膨脹エネルギーを利用して発電機を回すことに変わりはないが、A発電では媒体であるアンモニア（またはフロン）を液化し、これを表層海水にて加温して膨脹させる。他方B発電においては、媒体である水をボイラーで加熱して膨脹させタービンを回す。このように両発電共、媒体を膨脹させて発電機を回す点は同じであるが、媒体の凝縮に際し、A発電では凝縮器を必要とするがB発電では必要としない\*1、\*2)。

### 3-1 媒体の持つ仕事エネルギー（電気エネルギー）\*3)

#### 3・1・1 液化の潜熱と気化の潜熱

A発電においては、媒体である液化アンモニア（b. p.  $-33.5^{\circ}\text{C}$ ）が、表層の海水（温度 $\sim 26.5^{\circ}\text{C}$ ）で加温され膨脹して仕事をする。このとき $-33.5^{\circ}\text{C}$ の液体アンモニアから同温の気体への膨脹のエネルギーは、アンモニアを液化するために要したいわゆる液化の潜熱に等しい。この場合 $-33.5^{\circ}\text{C}$ （239.5K）における等温変化であるので、1モルのアンモニアの持つ仕事エネルギーは $P\Delta V=RT=239.5R$  cal/molとなる。次いで $-33.5^{\circ}\text{C}$ （239.5

K) の気体アンモニアを表層海水で加温して26.5°C (299.5K) の気体にする。このとき仕事エネルギーは  $P\Delta V = R(T_2 - T_1) = (299.5 - 239.5)R = 60R \text{ cal/mol}$  となる。したがって仕事エネルギーの合計は  $(239.5 + 60.0)R = 299.5R \text{ cal/mol}$  となる。

B 発電において A 発電の場合と同じ 299.5R cal/mol の仕事エネルギー（電気エネルギー）を得るためには、水をボイラーで加熱して蒸気を生ぜしめればよいわけである。つまり A 発電の蒸発器に B 発電のボイラーが相当するわけである。

### 3・1・2 海洋温度差エネルギー利用の得失

A 発電の場合、深層海水 (4.5°C) で表層海水 (26.5°C) で暖められたアンモニアガスを冷却する。この後アンモニアガスを凝縮器で液化する。したがって利用された海洋温度差エネルギーは  $\Delta Q = P\Delta V = R \cdot \Delta T = R(299.5 - 277.5) = 22.0R \text{ cal/mol}$  である。しかしながら A 発電では、この海洋温度差エネルギーを得るために凝縮装置<sup>\*2)</sup>を使用しなければならない。これに対して B 発電ではボイラーを使用するだけでよい。ボイラーは熱損失を防ぎさえすれば、理論上熱効率100%達成も可能であるが、熱機関である凝縮装置は後に述べるように、如何にしても(擬)熱損失を生ずるので熱効率100%達成は不可能である。たとえばカルノー熱機関のような、理想的な往復動式機関の場合でも最大効率は50%である<sup>\*3)</sup>。したがって A 発電の場合 239.5R cal/mol のエネルギーを得るためには  $239.5R/0.50 \approx 479.0R \text{ cal/mol}$  のエネルギーを必要とする。すなわち同じ電気エネルギー299.5cal/molを得るのに、A 発電では B 発電に比べて 239.5cal/mol のエネルギーを余分に消費することになる。ただし計算にあたっては、アンモニアガスおよび水蒸気共に理想気体とした。

#### 3-2 海水を汲み上げるに必要なエネルギー

B 発電の場合、10m の深さのところから海水を汲み上げるものとする、大気圧で1モル (18g) の水を汲み上げるには  $18 \times (10 \times 100) \times 980$  エルグとなる。カロリーに換算すると  $1 \text{ cal} = 4184 \text{ joule} = 4.184 \times 10^7$  エルグであるので、約 4R cal/mol となる。しかしながら深層海水には、それに相当する水圧がかかっている、揚水のためのエネルギーは、表層海水の場合と同程度の 0.2R cal/mol とす。

#### 3-3 A 発電および B 発電のエネルギー収支

結局表 1 の示すところは、A 発電では 22.0R cal/mol の海洋温度差エネルギーを利用す

表 1 A 発電および B 発電のエネルギー収支<sup>\*3)</sup>

	海洋温度差発電 (A 発電) cal/mol	通常火力発電 (B 発電) cal/mol
1. 仕事エネルギー [電気エネルギー]	299.5R	299.5R
(内訳) (液化あるいは蒸発の潜熱による) (気体の膨脹による)	(239.5R) (60.0R)	
2. 利用された海洋温度差エネルギー	- 22.0R	0
3. 液化装置による熱損失 (液化装置の最高効率50%とす)	+239.5R	0
4. 揚水に必要なエネルギー	+ 0.2R	+ 0.2R
合計	519.2R	299.7R

るために、B発電より  $239.5R \text{ cal/mol}$  のエネルギーを余分に必要とするということである。この余分のエネルギーに、深度200米の海水配管、液化装置の設備費、運転コスト等を加えると、現在のB発電コストの約10倍のコストをどれだけ改善できるか疑問である。更にA発電では温度差が  $26.5 - (-33.5) = 60^\circ\text{C}$  付近に限定されるので、はるかに大きな温度差のとれるB発電に比べて、発電機の効率と容量の点でもはるかに不利となる。

B発電においても、図2のように深層海水で復水器（凝縮器）を冷却し、表層海水で加温器（熱交換器）を加温すると、A発電の場合と同じく表層水と深層水との温度差を利用できる。このようにすると、両発電の差は液化装置の有無だけとなる。

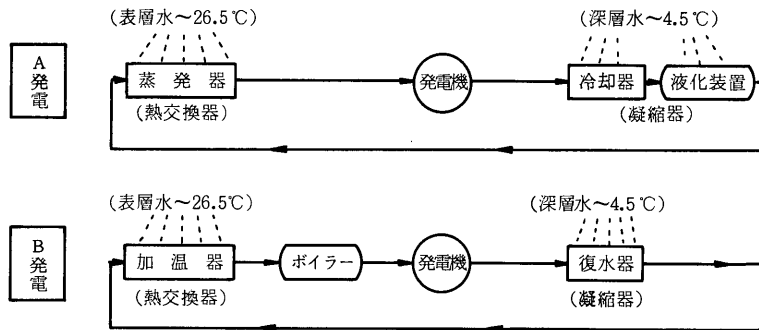


図2 海洋温度差発電と火力発電のフローチャート

#### 4. エネルギー算出の熱力学的基礎

##### 4-1 エネルギー<sup>1)</sup>

エネルギーは微視的には位置エネルギーと運動エネルギーのみであるが、巨視的には表2に示すように色々な形態として表われる。しかしながら、形態は異なってもエネルギーという本質は変わらない。つまり、電気エネルギーにしても機械エネルギーにしても、その本質は仕事をする能力を持つということである。エネルギーは必ず、強度因子と容量因子の積として表現される。強度因子とは、大きさに関係なく表わすことのできる力、圧力、

表2 巨視的エネルギー

エネルギーの形態		強度因子	容量因子
位置エネルギー	$U = f \times l$	f (力)	l (距離)
機械エネルギー	$W = P \times V$	P (圧力)	V (体積)
熱エネルギー	$Q = R \times T$	R (ガス定数)	T (温度)
擬損失熱	$q = S \times T$	S (エントロピー)	T (温度)
電気エネルギー	$W = E \times I$	E (電位)	I (電流)
化学エネルギー (位置エネルギー)	$B = \mu \times s$	$\mu$ (化学力)	s (原子間距離)

ガス定数，エントロピー，電位，化学力などであり，容量因子とは，大きさに関係する距離，体積，温度，電流，分子間距離などである<sup>1)</sup>。

熱Qは微視的には，分子の運動エネルギー  $\frac{1}{2}mv^2$  に比例する量である。この場合矢張り，容量因子m（質量）と強度因子v（速度）の二乗の積で表わされる。他方巨視的には  $Q = PV = RT$  で表わされる。PVはQが仕事に変換されたときの仕事エネルギーである。RTは強度因子R（ガス定数）<sup>\*)</sup>と容量因子T（絶対温度）の積であるので，RTは熱エネルギーすなわち状態P，V，Tにおける内部エネルギーである。

第二種永久機関は不可能である。すなわち海水や空気の持つ熱エネルギーが機械的エネルギーに利用できないのは，ダムに貯えられた水がそのままでは仕事をしないのと同様に，大洋や大気中では熱の流れがないからである。このように考えてくると，RTは熱のポテンシャルエネルギーと考えることができる。したがって温度差 $\Delta T$ による断熱変化による1モルの気体の仕事エネルギー  $P\Delta V$  は，熱に換算すると  $\Delta Q = (P\Delta V) = RT^{**})$ となる。

#### 4・2 カルノー・サイクルの等温過程と断熱過程

カルノー・サイクルの等温過程は外部より熱を受けて等温で変化するが，断熱過程は外部と断熱されているから断熱なのであって，「外部との間でエネルギーの出入りはない」とする考え方があるようである。しかし等温変化とはこの変化に使用されるエネルギーを，変化に要しただけ少し宛高熱源から供給する変化である。したがってこの過程は等温で経過する。一方断熱過程とは，内部に貯えておいたエネルギーを一度に使用して変化させる。したがってこの過程では系の温度変化を生ずる。カルノー・サイクルは，等温過程と断熱過程を組み合わせてサイクルを完結させるところの思考上のサイクルである。断熱過程のみあるいは等温過程のみではサイクルは完結しないのである。

何れにしても実際の熱機関では，シリンダー内での燃料の燃焼によりエネルギーを得るが，カルノー熱機関では，外部の高温部から供給されるエネルギーを使用して等温過程も断熱過程も実施可能なのである。断熱過程では外部との間に熱を断っているのので，系の温度が下がるというのではないのである。もしそれが可能であるなら，断熱過程はエネルギーなしに仕事をしたことになる。したがって効率の計算に当っては，等温圧縮・断熱圧縮は仕事にはならないが，カルノー熱機関を作動させるためには必要な過程であるので，それらに要するエネルギーは分母に加えなければならない。従来の効率計算では等温圧縮に必要

なエネルギーは分母に加えられているが，断熱膨脹・圧縮に必要なエネルギーが忘れられている。

#### 4-3 カルノー熱機関の効率

##### 4・3・1 旧効率

カルノー熱機関（図3）の効率 $\eta$ は， $\eta = (|Q_1| - |Q_2|) / |Q_1| = (T_1 - T_2) / T_1 \dots \dots (1)$  であるとされてきた。この(1)式は次のようにして求められた。熱量 $Q_1$ を高熱源から得て，この熱を使用して等温膨脹（A→B）により仕事をさせる。次いで断熱膨脹（B→C）により仕事をさせるが，この仕事は断熱圧縮（D→A）に必要なエネルギーと相殺される。最後に等温圧縮（C→D）のためのエネルギー $Q_2$ を

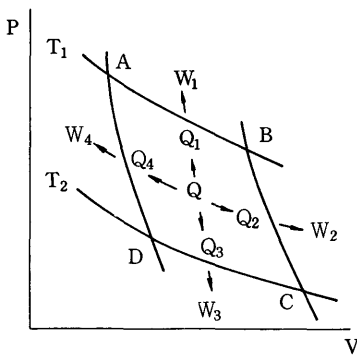


図3 カルノー熱機関

必要とするので、正味の仕事量は  $|W_1| - |W_2| = |Q_1| - |Q_2|$  となる。したがって効率  $\eta$  は  $(|Q_1| - |Q_2|) / |Q_1| = (T_1 - T_2) / T_1$  となり、その効率は  $T_2 = 0$  のとき100%になると考えられていた。しかしながら、仕事量としては相殺される断熱膨脹・圧縮といえども、これを行なわせるためにはエネルギーを必要とする。式(1)で表わされているカルノー熱機関の効率は、断熱膨脹および断熱圧縮に必要なエネルギーを分母に加えることを忘れていたので間違いである（正しい効率については次の4・3・2で述べる）。

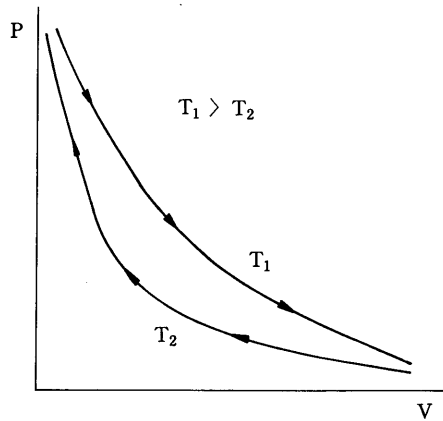


図4 等温膨脹と等温圧縮

等温膨脹・圧縮のみの過程（図4）を考えれば、その効率は  $\eta = (|Q_1| - |Q_2|) / (|Q_1| + |Q_2|) = (T_1 - T_2) / (T_1 + T_2) \dots (2)$  となり、 $T_2 = 0$  のときその効率は100%となる。勿論このような熱機関は存在しないが、実在のエンジンで効率を良くするためには、ストロークを長くすればよいことが分る。

#### 4・3・2 新効率

前述のように仕事量としては相殺される断熱膨脹・圧縮といえども、これを行なわせるためにはエネルギーを必要とする。したがって、断熱膨脹（B→C）および断熱圧縮（D→A）に要する熱量をそれぞれ  $Q_3$  および  $Q_4$  とすると、高熱源から受けとった全熱量  $Q = (|Q_1| + |Q_2| + |Q_3| + |Q_4|)$  に対する正味の仕事量  $(|Q_1| - |Q_2|)$  の割合、すなわちカルノー熱機関の効率  $\eta$  は次のようにならなければならない。

$$\eta = (|Q_1| - |Q_2|) / (|Q_1| + |Q_2| + |Q_3| + |Q_4|) \dots (3)$$

温度  $T_1$  における、熱量  $Q_1$  による等温膨脹（A→B）の仕事量は  $RT \cdot \ln V_B / V_A$  となるが、もし定容変化であれば  $Q_1$  はシリンダー内に  $nRT_1$  だけのエネルギーを増すことになる。すなわち式(4)が成立する。同様にして、熱量  $Q_3$  による等温圧縮（C→D）による仕事量は  $nRT_2$  に等しくなり式(6)が成立する。断熱膨脹（B→C）・圧縮（D→A）は、それぞれ状態Bより状態C、状態Dより状態Aへの変化である。状態B ( $P_B, V_B, T_1$ ) の内部エネルギーは  $RT_1 \cdot \ln V_B$ 、状態C ( $P_C, V_C, T_2$ ) の内部エネルギーは  $RT_2 \cdot \ln V_C$  である。したがって状態Bから状態Cへの断熱膨脹に要するエネルギー  $Q_2$  は(5)式に示すようになる。同様に状態D ( $P_D, V_D, T_2$ ) から状態A ( $P_A, V_A, T_1$ ) への断熱圧縮に要するエネルギー  $Q_4$  は(7)式に示すようになる。

$$|Q_1| = P \Delta V = P \int dV = RT_1 \int dV / V = RT_1 \cdot \ln V_B / V_A = nRT_1 \dots (4)$$

$$|Q_2| = RT_1 \cdot \ln V_B - RT_2 \cdot \ln V_C \dots (5)$$

$$|Q_3| = P \Delta V = P \int dV = RT_2 \int dV / V = RT_2 \cdot \ln V_D / V_C = nRT_2 \dots (6)$$

$$|Q_4| = RT_1 \cdot \ln V_A - RT_2 \cdot \ln V_D \dots (7)$$

したがってカルノー熱機関の効率  $\eta$  は

$$\eta = [(|Q_1| + |Q_2|) - (|Q_3| + |Q_4|)] / (|Q_1| + |Q_2| + |Q_3| + |Q_4|)$$

$$= \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1| + |Q_2| + |Q_3| + |Q_4|} \quad (\because |Q_2| = |Q_4|) \text{ となる。 (4)~(7)式を代入して}$$

$$\therefore \eta = \frac{\ln V_B/V_A \cdot RT_1 - \ln V_D/V_C \cdot RT_2}{(\ln V_B/V_A + \ln V_A \cdot V_B)RT_1 + (\ln V_D/V_C - \ln V_C \cdot V_D)RT_2} \quad \dots\dots(8) \text{ を得る。}$$

式(8)より低温部の温度  $T_2$  が低い程効率は良くなる。 $T_2=0K$  のときは  $\eta=0.5$  となる<sup>\*5)</sup>。つまり、レシプロ機関においては最大効率は50%である。

#### 4・3・3 擬熱損失量

カルノー熱機関の効率を求めるにあたって、これまで断熱膨脹・圧縮に必要なエネルギーを考慮しなかったため、効率は  $\eta = (|Q_1| - |Q_2|) / |Q_1| = (T_1 - T_2) / T_1$  となった。したがって、 $T_2=0K$  のときには効率は100%となると考えられていた。そして効率が100%にならないのは、絶対温度零度に到達することは不可能であるからとも、あるいはまた機械的可動部分があれば、摩擦による損失が必ず生ずるためであるとも言われていた。しかしながら前節で示したように、摩擦による熱損失のないカルノー熱機関において  $T_2=0K$  になっても、効率は最高50%にしかならず100%になることはない。

熱機関は一回だけ膨脹をさせて仕事をすればよいというものではなく、繰り返し仕事をしなければならぬ。そのためには  $A \rightarrow B$  の膨脹をさせれば、 $B \rightarrow A$  の圧縮により元の状態に戻らなければならない。この元の状態に戻すためのエネルギーは、仕事にはならないエネルギーであるが、熱機関としてはどうしても必要なエネルギーである。つまり純粋な熱損失ではなく、熱損失に準ずる擬熱損失と呼ぶべきものである。この擬熱損失のため、熱機関の効率は如何ようにしても100%にはなりえないのである。

一般に熱機関の効率を考えると、摩擦損失などはないものとして考える。カルノー熱機関においても、はじめから摩擦などによる熱損失はないものとしている。熱損失と考えられていたのは、実は擬熱損失のことである。これに対して、繰り返し部分のない熱機関たとえばジェットエンジンは、摩擦などによる熱損失を皆無にすれば効率100%も理論上可能である。

## 5. お わ り に

海洋温度差発電は、表層の海水と深層の海水の温度差を利用して発電するものであるが、実際にはアンモニアあるいはフロンなどの気体を液化し（この時深層の低温の海水を利用する）、液化ガスを表層の海水で気化し、この気化ガスを用いて発電機を回そうというものである。媒体の膨脹のエネルギーを使用して発電することは火力発電と同じであるが、火力発電では発電後の蒸気は海水で冷却するだけで液体の水に戻るのに対して、海洋温度差発電では媒体であるアンモニアは海水で冷却しただけでは液化しない。すなわち機械力による気体の液化の行程が必要である。前述のように熱機関は、一般に擬熱損失のため効率100%にはなり得ないのであるから、熱機関を使用する行程が増える程、熱効率は悪くなるはずである。熱力学的な概算の結果も、同量の電気エネルギーを得るために必要なエネルギーは、漏洩、摩擦などによるエネルギー損失を無視しても、海洋温度差発電は火力発電に比して約1.7倍の燃料を必要とする。更にアンモニアやフロンなどの環境汚染物質を使用しなければならないこと、あるいはまた高出力の発電機を得ることができないなど、海洋

温度差発電の一般火力発電に対する利点は見当らない。

海洋温度差エネルギーを利用する方法として、通常火力発電の復水器の冷却水に深層水を使い、ボイラーに入る前の復水(缶水)を表層水で加温すれば(図2)、エネルギー的には、純粋に約22R cal/molの海洋温度差エネルギーが利用されることになる。

海洋温度差発電に関する資料を御恵与下さった九州電力(株)に、厚く御礼申し上げます。

- 
- \* 1) 九州電力株式会社の資料による。
  - \* 2) 図1の凝縮器は単に深層海水で冷やすだけでなく液化装置を備えている。つまり気化したアンモニアやフロンは、深層海水(〜4.5°C)で冷却するだけでは液化しないので、凝縮器を使用して液化しなければならない。アンモニアを加圧したまま回せば4.5°Cで冷やすだけで液化するというが、それでは膨脹によるエネルギーを使用しての発電はできない。
  - \* 3) 第4章「エネルギー算出の熱力学的基礎」参照。
  - \* 4) 気体定数Rは熱エネルギーの強度因子である。これまで断熱膨脹B→Cによる仕事量は、 $C(T_1 - T_2)$ (Cは気体の比熱)とされていたが $R(T_1 - T_2)$ が正しい。つまりRは理想気体の比熱でもある。
  - \* 5)  $V_A$ を基準(1モル)にとると、常に $\ln V_B / V_A = \ln V_A \cdot V_B$ である。したがって、 $T_2 = 0K$ のとき $\eta = \ln(V_B / V_A) R T_1 / 2 \ln(V_B / V_A) \cdot R T_1 = 0.5$ となる。

- 1) 濱田圭之助「新熱力学による反応速度論——エントロピー神話の崩壊——」  
化学教科書研究会(1986) p.16