3.熱エネルギー変換機器(その2)

3.3 気液二相サイクルによる熱機関

3.3.1 気液二相サイクル

気液二相サイクルによる熱機関は、液体を加熱することで発生する蒸気の圧力を利用して機械 的な仕事を取り出す装置であり、液体に比べて蒸気の比体積が格段に大きく容易に高圧の蒸気が 得られること、相変化を伴う熱移動の熱伝達率が大きく、定温加熱・定温冷却に近い熱移動が実 現しうることなどから、古くから熱機関として利用されてきた。現在でも火力発電所や原子力発 電所の多くでは、気液二相サイクルによる熱機関が用いられている。さらに気液二相サイクルに よる熱ポンプは家庭用のエアコンなどとしてなじみが深い。

気液二相サイクルでは作動流体の状態の変化に伴って流体の「相」が変化するから、前述のガ スサイクルのようにその変化を理想気体近似することができない。したがって、気液二相サイク ルにおける作動流体の状態変化を表すためには、「蒸気線図」を利用する必要がある。

<u>3.3.2 気液二相サイクルによる熱機関(Rankine サイクル)</u>

まず気液二相サイクルによる熱機関を考える。ここでは最も単純かつ広範に利用されている Rankine サイクルについて説明する。

Rankine サイクルは、ボイラーによって作動液体を加熱して高圧の蒸気を作成し、これを膨張機 に通して機械的仕事を取り出した後、冷却してもとの液相に戻すサイクルである。膨張機として は往復型、回転型いずれでも適用できるが、発電所などの大型プラントではタービンを用いるこ とが普通である。



図 3.3.1 蒸気タービン (Rankine サイクル)

このサイクルにおいて作動流体は次のような変化をする。

- 状態1 2:液相をポンプで加圧してボイラーに送り込む。
- 状態2 3:液相を加熱し飽和蒸気とする。
- 状態3 4: 飽和蒸気をさらに加熱して過熱蒸気とする。
- 状態4 5:過熱蒸気を膨張機に導入し、機械的仕事を取り出す。
- 状態5 1:膨張し終えた蒸気を復水器によって冷却し、液相に戻す。

これらの行程のうち、状態 2 3、3 4 ならびに 5 1 は等圧条件で、状態 1 2 と 4 5 は 断熱条件(等エントロピー条件)で作動流体の状態が変化するから、これらのサイクルを *p-v* 線図、 *T-s* 線図上に表すと次のようになる。



図 3.3.2 Rankine サイクルの *p-v* 線図と *T-s* 線図

図中の細曲線は蒸気の飽和線であり、曲線上 C 点の左側が飽和液、右側が飽和蒸気で、飽和線の 下側では気液二相状態にある。すなわち、状態2の液をボイラーで加熱していくとまず飽和液(点 2')になり、次いで蒸気が発生して気液二相状態になって、やがて飽和蒸気(点 3)となる。さら にこれを加熱すると過熱蒸気(点 4)となる。これらの加熱は等圧条件で行われるが、気液二相状 態では温度も一定である。

このような動作をする Rankine サイクルの出力と効率を求めるためには *p-v* 線図、*T-s* 線図から 仕事量、熱の出入りを求めればよいが、作動流体の状態変化は複雑であるため、それを線図にし た *i-s* 線図(作動流体が水の場合は蒸気線図 = Mollier 線図)を用いる。



図 3.3.3 蒸気線図 (Mollier 線図)の概略

すなわち、作動流体の質量流量を G とすれば、タービンの出力 $N_{ m out}$ は、	
$N_{out} = G(i_4 - i_5)$	(3.3.1)
作動流体を加圧するポンプには動力 $N_{ m in}$ が必要であるから、	
$N_{in} = G(i_2 - i_1)$	(3.3.2)
より、正味の出力 <i>N</i> は	
$N = N_{out} - N_{in} = G\left\{ \left(i_4 - i_5 \right) - \left(i_2 - i_1 \right) \right\}$	(3.3.3)
一方、ボイラーでの加熱量 $Q_{ m in}$ は	
$Q_{in}=Gig(i_4-i_2ig)$	(3.3.4)
であるから、熱効率は	
$\eta = \frac{N}{Q} = \frac{(i_4 - i_5) - (i_2 - i_1)}{(i_1 - i_1)}$	(3.3.5)
$\approx in$ $(4 \cdot 2)$	

ポンプで作動流体を加圧するための動力は一般にタービンの出力に比べて小さいので、効率は近 似的に次のように見積もられる。

$$\eta \approx \frac{(i_4 - i_5)}{(i_4 - i_2)} \qquad \dots (3.3.5')$$

<u>3.3.3 気液二相サイクルによる熱ポンプ</u>

エネルギー変換のための装置ではないが、エアコンなどの熱ポンプは気液二相サイクルを利用

した装置として我々になじみが深いので、ここでは気液二相サイクルによる熱ポンプを簡単に説 明しておく。気液二相サイクルによる熱ポンプの基本構成を下図に示す。



図 3.3.4 気液二相熱ポンプ

気液二相熱ポンプサイクルは基本的には Rankine サイクルの逆サイクルであり、作動流体は次のような変化をする。

状態1 2:気液二相状態にある作動流体を蒸発器で蒸発させて、熱を吸収させる。

状態2 3: 圧縮機によって蒸気を圧縮し、過熱蒸気とする。

状態3 4:過熱蒸気を凝縮器で冷却して高圧の飽和液とする。

状態4 1: 飽和液を膨張弁によって急激に膨張させ、低温の気液二相状態とする。

この様子を p-v 線図、T-s 線図上に表すと次のようになる。



図 3.3.5 気液二相熱ポンプの *p-v* 線図と *T-s* 線図

これらの線図からもわかるように、蒸発器における吸熱、凝縮器における放熱は等圧変化、圧縮機による圧縮は断熱変化(等エントロピー変化) 膨張弁における膨張は等エンタルピー変化である。したがって、これらの行程を p-i 線図上に示すことで、吸熱量 Q_{in} 、放熱量 Q_{out} 、所要動力 L、成績係数 ϕ は次のように求められる。



図 3.3.6 気液二相熱ポンプの p-i 線図

 $Q_{in} = G(i_2 - i_1)$

...(3.3.6)

$$Q_{out} = G(i_3 - i_4) \qquad \dots (3.3.7)$$

$$L = G(i_3 - i_2) \approx G \frac{\kappa}{\kappa - 1} RT_2 \left\{ \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right\} \qquad \dots (3.3.8)$$

$$\phi = \frac{Q_{in}}{L} = \frac{(i_2 - i_1)}{(i_3 - i_2)} \qquad \dots (3.3.9)$$

大型の熱ポンプサイクルでは、飽和液の膨張時に動力を回収するための膨張機を膨張弁に代え て使用することがある。このときには回収された動力分だけ成績係数が向上するが、気液二相域 で動作する性能の良い膨張機の実現が難しいため、小型の熱ポンプサイクルでは膨張機が用いら れることはまず無い。

3.4 熱機関によらないエネルギー変換

3.4.1 光 電気変換

光エネルギーを電力に変換することは、太陽日射が豊富に存在する地上や太陽系内の宇宙空間 などでは重要なエネルギー変換である。光電気変換は大きく分けて次の2通りに分類される。

(a) 光 熱 電気変換(太陽熱発電)

太陽ふく射を熱エネルギーの形で集め、熱機関を運転して発電器を駆動する形式のエネルギー 変換手法である。火力発電や原子力発電の熱源を太陽熱に置き換えたものと言える。効率を向上 させる、すなわち熱源の温度を高くするためには、太陽ふく射を「集光」する装置が必要である。



図 3.4.1 80MW 太陽熱発電プラントシステム

(b) 光 電気発電(太陽光発電=太陽電池)

太陽光(あるいはそれ以外の光)のエネルギーによって物体内の電子レベルを変化させ、電位 差を生じさせるもので、量子論的発電手法と言える。

太陽電池は基本的に半導体素子であり、その効率は大きさによらない。また、量産化によって コストを大幅に低減できる可能性がある。したがって、現状では、太陽熱発電よりは太陽光発電 の方が有望視されている。

太陽電池のコストは、製造量の増大とともに急激に低下している。さらに低価格化が進めば、 発電に要するコストが一般の発電設備のそれとほぼ見合ったものとなる。したがって、次の問題 は如何に効率を向上させるか(小面積で発電を行うか)である。



図 3.4.5 太陽電池のコストの推移

図 3.4.6 太陽電池の生産量の推移

太陽電池の効率は現実にはさほど高くない。これは発電効率が、「熱力学的効率」に代わって「量子論的効率」で制限されるためである。

太陽光の波長分布:

バンドギャップ以上(短波長)のエネルギーをもつ光 発電可能 バンドギャップ以下(長波長)の光 熱に変化して放散する バンドギャップの低下:

発電可能な波長域の拡大

× 太陽電池内部でのエネルギー損失の増大



図 3.4.8 各種太陽電池の理論効率の限界値

<u>3.4.2 燃料電池とMHD発電</u>

燃料のもつ化学的ポテンシャルや運動エネルギーを直接電気エネルギーに変換する装置として、 燃料電池や MHD 発電装置が考案されている。

(a) 燃料電池

燃料電池は、燃料のもつ電気化学的ポテンシャルを直接電気エネルギーに置き換えるものである(化学的ポテンシャルを熱エネルギーに置き換えるのが「燃焼」であることと対比して考えよ)。

動作原理:

(1) 燃料極上で水素 H₂を 2H⁺と電子 2e⁻とに分解する(触媒反応を利用)

(2) H⁺イオンのみが電解質中を移動し、取り残された電子 e⁻は電極 (陰極)・負荷を通して陽極へ 向かう。

(3) 電解質中を移動してきた H⁺イオンは陽極上で酸素 1/2O₂ と電子 e⁻と出会い、H₂O になる。



図 3.4.9 リン酸型燃料電池の原理

この動作を行わせるためには、電子と電荷担体(上記の例では H⁺)を分けるとともに、電荷担体のみを効率よく移動させる「電解質」を選定することが重要である。現在考えられている燃料電池では、この電解質によって次の3つに大きく分けられる。

		_	リン酸形	溶融炭酸塩形	固体電解質形		
π	#	Ŧ	賓	リン酸	炭酸塩	安定化ジルコニア	
電解	電解質内の電荷担体		H+	CO ₃ a-	0'-		
作	動	溫	度	200°C	600~700*C	1 000°C	
燃			料	H。 炭化水素の改質ガス	H ₂ , CO, 炭化木素 炭化木素の改質ガス	H ₂ , CO, 炭化水素 炭化水素の改質ガス	
特			微	最も実用化に近い	高発電効率 広汎な燃料利用,内部改賞可能	高発電効率 広汎な燃料利用,内部改質可能	
発	Ħ.	劝	率	40~45%	45~60%	50~60%	
氟	池	材	料	主にカーポン	Ni, ステンレス等	セラミック等	

表 3.4.1 燃料電池の主なタイプとその概要

燃料電池のメリットとデメリットは以下に示すとおりである。

メリット:

- (i) 比較的高効率であること。現状の技術でも 40%程度の発電効率が得られており、近い将来実 現するであろう燃料電池では 60%の発電効率が見込まれる。
- (ii) 熱電併給(コジェネレーション)への適用性が高い。燃料電池の排気には水蒸気しか含まれておらず、これを暖房や空調、給湯に利用する熱電併給への適用が容易である。このときの総合効率(電気エネルギーと熱エネルギーの出力の和を燃料のもつポテンシャルで除したもの)は80%以上となる。
- (iii)小規模なシステムでも効率が低下しにくい。数 100 kW 程度の小型のシステムでも熱効率が 低下しないため、ビル単位で使用する電力を燃料電池で発電し、かつ排熱をも利用するシス テムが構築しやすい。

デメリット:

(iv) 燃料と電解質の組合せが限られる。燃料電池では、燃料は単に加熱のために利用されるのではなく、燃料内の化学的ポテンシャルを電荷担体の移動に変換する対象であるから、電荷担体(すなわち燃料)と電解質とは対で考える必要がある。必要な燃料を得るためには「改質」の必要がある。

(v) 燃料電池によっては高温で動作するものがあり、電池本体や周辺機器の耐久性を改善する必要がある。



and the second se		the second s
項目	業務用システム	離島用システム
発電出力(送電端)	200 kW	202 kW
発電効率(送電階)	36.0%(HHV)	39.7% (HHV)
総合効率	80.2%(HHV)	発電専用
燃料	都市ガス	メタノール
NO _x	4ppm(O ₂ =7%)	$2ppm(O_3 = 7\%)$
排熱回収温度 高位 低位	170°C(水蒸気) 70°C(温水)	回収せず
冷起動時間	3 89/00	2 時間 45 分
負荷追従性	△20%に対し瞬時	△20%に対し瞬時
運転・制御	無人運転可能	無人運転可能

表 3.4.2 オンサイト型燃料電池システムの性能

図 3.4.10 燃料電池発電システムの構成例

(b) MHD 発電装置

MHD とは Magneto-Hydro Dynamic = 磁性流体力学のことであり、MHD 発電装置は流体のもつ運動エネルギーを直接電気エネルギーに変換する装置である。



図 3.4.11 MHD 発電装置と原理

動作原理:

磁場内に流体を流して「フレミングの右手の法則」にしたがって発生する電流を取り出す: 電流を流すためには、流体に電気伝導性が要求される。

このとき流体には「フレミングの左手の法則」で決まる抵抗力が作用し、運動エネルギーを 失う:運動エネルギーから電力への変換

発電を目的とした MHD 発電装置では流体へ運動エネルギーを与える(流速を速くする)ため に、加熱した流体のノズル内膨張を用いる(熱エネルギー 運動エネルギー)。また、一般に流体、 特に気体には電気伝導性がないので、次の何れかの方法によって電気伝導性を付与している。

- (1) 気体を高温にして電離(プラズマ化)する。
- (2) シード(カリウムなどの金属蒸気が多い)を加えて電気伝導性を高める。
- (3) 電気伝導性を有する液体金属の蒸気を用いる。

一般には作動流体として燃焼ガスを用いることが多いので、(2)の方法が採られることが普通であ

る。ただし、オープンサイクルの MHD 発電装置にこの方法を採用すると、シードの回収が必要となる。

MHD 発電装置のメリットとデメリットは以下に示すとおりである。

メリット:

高温流体からのエネルギー変換により、Carnot 効率を高くすることができる。特に発電機内 部に可動部が存在しないため、3000 K に達する流体が高温熱源として利用できる。

デメリット:

低温側の温度を十分に低下させることができない。すなわち、排気の持つ熱エネルギーが多 く、これを回収するためのボトムサイクルの存在が高効率化には不可欠である。





図 3.4.12 オープンサイクル MHD 発電プラント

図 3.4.13 クローズドサイクル MHD 発電プラント



図 3.4.14 液体金属 MHD 発電システムの高速炉への適用

3.4.3 熱電発電装置

熱エネルギーから直接電気エネルギーを得るための装置が熱電発電装置である。この方法は、 熱的状態の差(電子等のエネルギー状態の差)に基づく物質内の電子(あるいは正孔)の拡散を 利用するものである。

温度差に基づく電子の拡散:熱起電力 = Seebeck 効果 電界勾配による電子拡散に基づく吸熱・発熱:電子冷凍 = Peltier 効果 これら2つの現象は、原理的には可逆過程である。

Seebeck 効果の身近な利用例:

熱電対:

異種金属管の熱起電力の差による起電力と温度差の関係を温度測 定に利用したもの。温度差 1 K あたりの起電力は数 100 mV とご く小さく、電力を取り出すには不適である。

ガス器具の安全装置: ガスの炎が消えるとガスを遮断する装置。炎によって加熱された 熱電発電装置の起電力によって電磁バルブを開け、炎が消えると バルブが閉じるようになっている。熱電発電装置は起電力が小さ いが電流は流せる性質を利用したものである。



図 3.4.15 熱電発電による発電原理

実際の熱電発煙装置は下図のような構造をしている。

- ・単一物質の熱電発電能は小さいため、性質の異なる物質(温度差による電子状態の変化が 逆であるもの)を組み合わせて用いる。
- ・単一の熱電発電装置では起電力が小さいので、これらを直列に接続して用いる。





熱電発電装置の効率は基本的に Carnot 効率を越えることはできない。現状の装置の効率は高々10 数%である。この効率を決めるのが「熱電性能指数」(図中のZ)である。



図 3.4.17 熱電素子の最大効率

熱電性能指数:

$$Z = \frac{S^2}{\rho \lambda}$$

ここで、S は Seebeck 係数(物質によって決まる熱電能) ρは物質の電気抵抗率、λは物質の熱伝 導率である。この Z が高くなると熱電発電装置の効率は Carnot 効率に近付くが、電気抵抗率が小 さく、かつ熱伝導率が小さい、すなわち電気を良く通し熱を通さない物質の実現は難しいため、Z を高くすることは簡単ではない。

現実の熱電発電装置の多くは宇宙機器、特に惑星間探査衛星などのために開発されてきた。これは熱電発電装置の次のような特徴による。

- ・可動部が無く、真空中でも使用できる(熱機関では実現不可)
- ・原子炉を用いれば常時発電可能である(太陽電池は日射のある場合のみ発電可)
- ・単位重量あたりの発電能力が大きい

	SNAP-3A	SNAP-9A	SNAP-27	SNAP-19	MHW-RTG	GPHS-RTG
人工衛星 BOM**出力/RTG,W(e) 熱電素子材料 Du-239 使料料新	トランジット A 2.7 PbTe	トランジット5BN 26.8 PbTe	アポロ 73.4 PbTe	パイオニア 40.3 PbTe/Tags PMC*1	ポイジャー 158 SiGe	ガリレオ/ユリシス 292 SiGe 回答時少か
Pu-238 地科形能 変換効率 % 比出力 W (e) /kg	5.1 1.29	5.1 2.2	5.0 2.3**	6.2 3.0	6.6 4.2	6.6 5.2

表 3.4.3 ラジオアイソトープを用いた宇宙用熱電発電システム

* Beginning of Mission の略

** Plutonia molybdeunm cermet の略

* The SNAP-27 specific power is shown with the fuel-cask mass included



図 3.4.18 宇宙用熱電変換装置の単セル

アルカリ金属熱電変換

熱エネルギーから直接電気エネルギーを得る点では熱電発電装置と同じであるが、電荷担体の 移動を電解質を通して行う形式の装置がアルカリ金属熱電変換装置(AMTEC)である。

動作原理:

- (1) 陰極側で液相状態のアルカリ金属(普通は Na)を Na⁺と電子 e⁻とに分離する。
- (2) Na⁺イオンのみが電解質中を移動し、取り残された電子 e-は負荷を通して陽極へ向かう。
- (3) 電解質中を移動してきた Na⁺イオンは陽極上で電子 e⁻と出会い、もとの Na (蒸気)になる。



図 3.4.19 AMTEC の発電原理

電荷担体(この場合には Na⁺イオン)の駆動力は電解質両面の圧力差である(液相側では数気圧、 気相側では1Pa以下)。この圧力差は高温部と低温部との金属の蒸気圧差によって生じている。

AMTEC は熱電発電装置であると同時に、一種の熱再生型電池と見なすことができる。この装置の効率は比較的高く、35%程度に達するが、高温(1000 K 程度)の液体金属を作動流体とするため、装置の耐久性の問題が残されている。

演習問題

- [3-4] 3 MPa、400 の過熱蒸気を毎秒 10 kg の割合でタービンに投入するランキンサイク
- ルを考える。タービン出口の蒸気圧力が 0.2 MPa であるとき、以下の問に答えよ。
 - (1) タービンの出力を *i-s* 線図から求めよ。
 - (2) タービン出口における蒸気の温度と乾き度を i-s 線図から求めよ。
 - (3) このサイクルの復水器でタービン出口の蒸気を飽和水まで冷却するとする。このとき、 このサイクルの熱効率を求めよ。ただし圧縮水の比エンタルピーは飽和水のそれで近 似して良い。
- ヒント: ランキンサイクルでは、タービン内の蒸気は等エントロピー的に膨張する。すなわち、i-s 線図上では垂直な直線で表される。したがって、タービン入口の状態と出口における圧 力条件から、タービン出口の蒸気の状態を i-s 線図を読みとれる。タービンの出力、復 水器での放熱量、ボイラーでの投入熱量はいずれもエンタルビー差から計算される。な お、飽和水の状態は i-s 線図より飽和蒸気表を用いた方が評価しやすい。

[3-5] 太陽電池で走行抵抗 400 N の自動車を 60 km/h の速度で走らせたい。太陽日射を 1000 W/m²、太陽電池の効率を 10%とすると、必要な太陽電池の面積はいくらか。ただしモーターの効率と駆動系の機械効率はいずれも 100 %とする。

ヒント: 自動車を走らせるために必要な動力は、走行抵抗×速度で求められる。動力を W 単位で 求めるためには、速度を m/s 単位に換算すること。