熱力學

上卷

神戸高等商船學校

熱力學　上卷

熱力學上卷目次

第一章 緒 論

1. 熱 力 學 1
2. エ ネ ル ギ 1
3. 機械的エネルギ 1
4. 內部エネルギ 2
5. 溫度及びその單位 2
6. 壓力，仕事，動力及びその單位 3
7. 熱及び熱量單位 5
8. 比 熱 6
9. 熱力學の第一法則 8
10. 特 性 式 9
11. 外部仕事，エネルギ式 9
12. 循 環 變 化 11
13. エ ン タ ル ピ 12
14. 膨脹係數，壓力係數，壓縮率，定積比熱，定壓比熱 14

問 題 (I)

第二章 完全ガス

15. 完 全 ガ ス 17
16. ボイルの法則，ゲイリユサツクの法則 17

17. ガ ス 定 數 19
18. ジユールの法則 20
19. 定壓比熱 c_p と定積比熱 c_v との關係 23
20. 完全ガスの狀態變化 24
21. ポリトロープ變化に於ける比熱 31
22. 指數 n の決定方法 31
23. 等溫曲線, 斷熱曲線, ポリトロープ曲線の作圖法 34
24. 完全ガスのカルノーサイクル 35
問 題 (II)

第三章 熱力學の第二法則, エントロピ

25. 熱力學の第二法則 40
26. 可逆變化及び非可逆變化 41
27. 任意の流體を使用するカルノーサイクル 43
28. 可逆機關の效率 44
29. 熱力學的溫度目盛 45
30. エントロピ 47
31. 非可逆過程に於けるエントロピ 49
32. エントロピ線圖 49
33. ガス及びその他の物體のエントロピ 51
問 題 (III)

第四章 空氣機械

34. 空氣壓縮機 54

35. 多段壓縮機 58
36. 壓縮機の效率 62
37. 熱 氣 機 關 64
問 題 (IV)

第五章 蒸氣及び蒸汽

38. 蒸氣の發生 68
39. $T-S$ 平面に於ける蒸發過程 71
40. 蒸氣のエンタルピ, エントロピ 73
41. 濕り飽和蒸氣の性質 76
42. 蒸汽の特性式 76
43. 過熱蒸汽の比熱 78
44. 蒸 汽 表 78
45. 蒸汽の溫度—エントロピ線圖及びエンタルピ—エントロピ線圖 81
46. 蒸汽の狀態變化 82
47. 蒸汽の斷熱變化, 略算式 87
48. 蒸汽の乾き度の測定 88
問 題 (V)

第六章 特殊蒸汽罐

49. シユミット罐 92
50. レツフラー罐 92
51. ベンソン罐 93

第七章 蒸汽機關

52. 飽和蒸汽のカルノーサイクル 94
53. ランキンサイクル 95
54. 再熱サイクル，再生サイクル 97
55. 二流體サイクル 100
56. 蒸汽機關に於ける効率 100
57. 實際蒸汽機關サイクルと完全機關サイクルとの比較 102
58. インヂケータ線圖を $T-S$ 線圖に移すこと，ブールバンの方法 107
59. 汽筒體積の計算 108
60. 蒸汽機關の熱勘定 111
61. 汽筒壁に於ける傳熱について 115

問　　題 (VI)

符　號　表

A	仕事の熱當量	G	重　さ	Q	熱　量
C	定　數	H	摩擦熱，發熱量	R	ガス定數
D	蒸汽消費量	J	熱の仕事當量	S	バネの强さ
D_h	熱消費量	K	冷凍機の成績係數	T	絶對溫度
F	面　積	N	馬　力	W	仕　事

a	常　數	n	ポリトロープ變化の指數	s	エントロピ
c	比　熱	n'	毎分サイクル數，回轉數	t	溫　度
d	直　徑			u	内部エネルギ
f	線圖係數	p	壓　力	v	體　積
i	エンタルピ	q	熱　量	w	速　さ
k	斷熱變化の指數	r	蒸發の潛熱	x	蒸氣の乾き度
l	ピストンの行程	r'	膨脹比	z	係　數

α	膨脹係數，角	η	効　率	κ	壓縮率
β	壓力係數，角	θ	ケルビンの絶對溫度	ψ	外部潛熱
γ	比　重	ρ	内部潛熱		

第一章　緒　　論

1. 熱　力　學

熱力學 (thermodynamics)[1] は熱エネルギと，それより他の形のエネルギへの變遷とを取扱ふ學問である。熱力學の内で工學上の問題のみを取扱ふものを**工業熱力學** (technical thermodynamics)[2] といひ，熱原動機の理論の基礎となるものである。本書もこれに屬し，動作流體の性質，蒸汽原動機，ガス原動機，空氣壓縮機，冷凍機に關する事項を述べることゝする。

2. エネルギ

物體が狀態變化をなす際に仕事をなし得るならば物體は**エネルギ** (energy)[3] を有すといふ。高所にある物體はその位置を變化する際に仕事をなし，熱せられた鐵棒は冷えて縮む際に仕事をなし得る故に，エネルギを有する。エネルギは運動と等しく相對的なものであつて，或標準狀態に關してその數値をいふ。例へばタンク内の水のエネルギは或水平面に關していひ表はされ，蒸汽 1 kg のエネルギは，氷點に於ける水 1 kg のエネルギに關していひ表はされる。

エネルギには熱エネルギ，機械的エネルギ並に電氣，磁氣，化學，光，音のエネルギ等がある。

3. 機械的エネルギ

質量 m なる物體が w なる速さにて運動する時に，物體の有する

1. Thermodynamik.　2. technische Thermodynamik.　3. Energie.

動的エネルギ (kinetic energy)[1] は $\frac{1}{2}mw^2$ であつて，物體が靜止するまでになし得る仕事である。

物體の位置又は形狀に關するものは**靜的エネルギ** (potential energy)[2] であつて，物體が或位置又は形狀より標準位置又は形狀に移る時になし得る仕事である。

動的エネルギと靜的エネルギとを合せて**機械的エネルギ** (mechanical energy) といふ。

4. 內部エネルギ

物體の力學に於ては機械的エネルギのみを考へれば充分であるが，物體が仕事をなし又はなされる時に起るあらゆる變化を考へるためには，他の形のエネルギ即ち物體分子の狀態による**內部エネルギ** (internal energy)[3] を考慮せねばならぬ。內部エネルギには分子運動の速さに關する動的エネルギと，分子の集合狀態に關する靜的エネルギとがある。

5. 溫度及びその單位

溫度 (temperature)[4] は物體の熱さを表はすために用ひられる。即ち熱い物體は高溫度にあり，冷い物體は低溫度にあるといふ。溫度を測るには水銀寒暖計の如く液體の膨脹を利用するか，ガス寒暖計の如くガスの分子運動を利用するか，又は固體の電氣抵抗の變化，熱電流，光學的效果を利用するもの等がある。一般に溫度の單位は次

1. kinetische Energie.　2. potentielle Energie.　3. innere Energie.
4. Temperatur.

の如く定められてゐる。

標準氣壓に於て純粹なる水の氷が融解する溫度を攝氏 0 度 (0°C) とし，標準氣壓に於て純水の沸騰する溫度を攝氏 100 度 (100°C) とし，この間を 100 等分し，それを攝氏 1 度 (1°C) の溫度變化とする。

日本に於ては，度量衡法により溫度の單位は次の如く定められてゐる。溫度ノ單位ハ度トス。度ハ一定ノ體積ヲ保タシメツヽアル一定質量ノ完全瓦斯ノ溫度ヲ，融解シツヽアル純粹ノ水ノ氷ノ溫度ヨリ 1.0133 バール＝於テ沸騰スル純粹ノ水ノ蒸氣ノ溫度マデ變ゼシムル間＝於テ，生ズル壓力ノ增加ノ百分ノ一ノ壓力ヲ其ノ瓦斯＝生ズル溫度ヲ謂フ。

融解シツヽアル純粹ノ水ノ氷ノ溫度ハ之ヲ零度トス。度ハ之ヲ攝氏度ト稱スルヲ得。

攝氏 0 度を華氏 32 度 (32°F) とし，攝氏 100 度を華氏 212 度 (212°F) とし，この間を 180 等分し，それを華氏 1 度の溫度變化とする。

6. 壓力，仕事，動力及びその單位

長さの**單位** (unit)[1] にメートルの $\frac{1}{100}$ 卽ちセンチメートルを取り，質量の單位にキログラムの $\frac{1}{1000}$ 卽ちグラムを取り，時間の單位に秒を取り，これを以て組立てた單位を **C.G.S. 單位**といふ。メートル法に於て力の單位として力の絕對單位卽ち上の C.G.S. 基本單位から導いた單位を取る場合と，力の重力單位卽ち單位質量を有する物體が地球に引かれる力(物體の重さ)を單位に取る場合とがある。前者は學術上に使用し，C.G.S. 單位或は**メートル法絕對單位**といひ，後者は工業上に使用し，**メートル法重力單位**又は**工學單位**といふ。

力の絕對單位に於ては，質量 1 g の物體に 1 cm/s² の加速度を與へる力を單位とし，これを 1 ダイン (dyne) といふ。1 メガダイン (Mdyne) は 10^6 dyne である。

力の重力單位に於ては，質量 1 kg の物體の重さを力の單位とし，これを 1 重量キログラム或は單に 1 キログラムともいふ。重力の加速度を g cm/s² とすれば 1 kg=1000 g dyne である。g の値は緯度及び海面よりの高さによりて異なり，國際協定標準値は 980.665 cm/s²，**日本度量衡法**では 980.00 cm/s² になつてゐる。

英國に於ては長さの單位にフートを取り，質量の單位にポンドを取り，時間の單位に秒を取り，これを以て組立てた單位を **F.P.S. 單位**といふ。力の單位として力の絕對單位を取る場合を**英國絕對單位**といひ，力の重力單位を取る場合を**英國重力單位**といふ。絕對單位に於ては質量 1 ポンドの物體に 1 ft/s² の加速度を與へる力を單位とし，これを 1 パウンダルといふ。重力の加速度 g の値は London にて 32.19 ft/s² であるから 1 重量ポンド=32.19 パウンダルである。

1. Einheit.

1. 壓　　力

單位面積に加はる力を**壓力の强さ** (intensity of pressure) 又は**壓力** (pressure)[1] といふ。壓力の單位は絕對單位ではバール (bar) を用ひる。1 bar は 1 Mdyne/cm² である。又**標準氣壓** (standard atmosphere)[2] を用ひることがある。これは $g=980.665$ cm/s² なる場所に於て水銀の密度が 13.5951 g/cm³, 溫度が攝氏 0 度なる時, 水銀柱 760 mm の及ぼす壓力で略して 1 atm とする。重力單位では 1 kg/cm² を用ひ, これを**工學氣壓**とも呼び略して 1 at とする。

英國重力單位では lb/in² を用ふ。

これ等の單位の關係は次の如くである,

$$1\ \text{atm} = 760\ \text{mm Hg} = 10.332\ \text{m Aq}$$

$$1.0333\ \text{at} = 1\ \text{atm} = 1.0133\ \text{bar} = 14.696\ \text{lb/in}^2$$

絕對壓力 (absolute pressure)[3] の代りに**ゲージ壓力** (gauge pressure)[4], **眞空** (vacuum)[5] を用ひることもある。卽ち

ゲージ壓力 = 絕對壓力 − 大 氣 壓

眞　　空 = 大 氣 壓 − 絕對壓力

尙 $100 \times \dfrac{\text{眞　空}}{\text{大氣壓}}$ を**眞空率** (vacuum percentage) といふ。本書に於ては壓力は絕對壓力を使用し, ゲージ壓力を使用する場合には p atü, p lb/in² g の如く記することゝする。

2. 仕　　事

仕事 (work)[6] は力とそれにより生じた物體の變位との積である。

1. Druck.　2. normale Atmosphäre.　3. absoluter Druck.　4. Überdruck.
5. Vakuum.　6. Arbeit.

その單位には, 絕對單位にエルグ (erg), ジュール (joule), 重力單位ではキログラム・メートルを用ふ。英國重力單位ではフート・ポンド (ft lb) を用ふ。これ等の單位の關係は次の如くである。

$$1\ \text{joule} = 10^7\ \text{erg} = 10^7\ \text{dyne cm}$$

$$1\ \text{kgm} = 9.80665\ \text{joule} = 7.233\ \text{ft lb}$$

他に動力單位より導いたキロワット時 (kWh), 馬力時 (PSh) 等も用ひる。

3. 動　　力

動力 (power)[1] とは單位時間に仕事のなされる割合である。絕對單位ではワット (W), キロワット (kW), 重力單位ではキログラム・メートル每秒 (kgm/s), 馬力 (PS) を用ひる。英國重力單位ではフート・ポンド每秒 (ft lb/s), 英馬力 (HP) を用ふ。これ等の單位の關係は次の如くである。

$$1\ \text{kW} = 1000\text{W} = 1000\ \text{joule/s}$$

$$1\ \text{PS} = 75\ \text{kgm/s} = 0.7355\ \text{kW}$$

$$1\ \text{HP} = 550\ \text{ft lb/s} = 0.7457\ \text{kW}$$

本書に於ては以下重力單位を用ひることゝする。

7. 熱及び熱量單位

異なる溫度の 2 物體を近付ければ, 溫い物體の溫度は下つて冷い物體の溫度は上る。これは**熱** (heat)[2] が溫い物體より冷い物體に流れるからである。熱は測り得るものである。

1. Leistung.　2. Wärme.

潜熱 (latent heat)[1] は物體分子の集合狀態を變へ且靜的エネルギとして蓄はへられるもので，**顯熱** (sensible heat)[2] は物體分子の動的エネルギを增すものである。顯熱は熱を受ける物體の溫度の變化を生じるが，潜熱は溫度の變化を生じない。熱量の單位としては次の如く定められてゐる。

15°C に於ける純水 1 g の溫度を 1°C 上げるに要する熱量を **1 カロリー** (calorie, cal) といひ，1000 cal を **1 キロカロリー** (kilocalorie, kcal) といふ。尙キロカロリーを大カロリー，カロリーを小カロリーともいふ。純水 1 g の溫度を 0°C より 100°C まで上げるに要する熱量の $\frac{1}{100}$ を**平均カロリー**といふ。

60°F の純水 1 lb の溫度を 1°F 上げるに要する熱量を **1 英熱單位** (British Thermal Uuit, **B.T.U.**) といひ，純水 1 lb の溫度を 32°F より 212°F まで上げるに要する熱量の $\frac{1}{180}$ を**平均英熱單位**といふ。又水 1 lb の溫度を 1°C 上げるに要する熱量を **1 攝氏熱單位** (Centigrade Heat Unit, **C.H.U.**) といふ。

平均カロリー，平均英熱單位，攝氏熱單位の間には次の如き關係がある。

$$1\ \text{B.T.U.} = 0.252\ \text{kcal.} = \frac{5}{9}\ \text{C.H.U.}$$

8. 比　　熱

物質の單位重さを 1° 溫めるに要する熱量を**比熱** (specific heat)[3] といひ c を以て表はす。重さ G の物體を dt 丈溫めるには次の如き熱量を要する。

$$dQ = G.\ c.\ dt \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \ (1)$$

1. latente Wärme.　2. fühlbare Wärme.　3. spezifische Wärme.

比熱の**ヂメンシヨン** (dimension) は kcal/°C kg であつて，水の比熱は 1 kcal/°C kg である。溫度 t_1 より t_2 に高めるに要する熱量は，比熱が溫度により變らぬ時には

$$Q = G\,c\,(t_2 - t_1) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \ (1\text{a})$$

比熱が溫度により變る時は

$$Q = G\int_{t_1}^{t_2} c\,dt = G\,[c]_{t_1}^{t_2}\,(t_2 - t_1) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \ (1\text{b})$$

$$[c]_{t_1}^{t_2} = \frac{1}{t_2 - t_1}\int_{t_1}^{t_2} c\,dt \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \ (2)$$

$[c]_{t_1}^{t_2}$ は t_1 t_2 間の**平均比熱**である。溫度 t_1，t_2，比熱 c_1，c_2，重さ G_1，G_2 なる 2 物體が混合して t_m なる溫度になりたりとせば

$$t_m = \frac{G_1 c_1 t_1 + G_2 c_2 t_2}{G_1 c_1 + G_2 c_2} = \frac{\sum Gct}{\sum Gc} \quad \cdots\cdots\ \cdots\cdots \ (3)$$

比熱は熱を加へる方法によりて異なる。卽ち物體の體積を一定に保ちつゝ熱を加へる時の比熱を**定積比熱** (specific heat at constant volume)[1] といひ，c_v でこれを表はし，壓力を一定に保ちつゝ熱を加へる時の比熱を**定壓比熱** (specific heat at constant pressure)[2] といひ，c_p でこれを表はす。

例 1　重さ G kg の物體を t_1 より t_2 に溫めるには幾何の熱量を要するか。但比熱は $c=c_0+c_1 t$ (c_0, c_1 は定數) とす。

解　$$Q=G\int_{t_1}^{t_2} c\,dt=G\int_{t_1}^{t_2}(c_0+c_1 t)\,dt$$

$$=G\,\left[c_0(t_2-t_1)+\frac{1}{2}c_1(t_2^2-t_1^2)\right]\ \text{kcal}$$

1. spezifische Wärme bei konstantem Volumen.
2. spezifische Wärme bei konstantem Druck.

9. 熱力學の第一法則

エネルギの變遷に際して，經驗により次の一般法則が見出されて居る。

物體の有する全エネルギは常に一定で，如何なる方法を用ひてもこれを減じ，又はこれを增すことは出來ない。

これを**エネルギ不滅の法則** (law of conservation of energy)[1] といふ。即ちエネルギは物質と同じく (**物質不滅の法則**, law of conservation of matter)[2] 造り出すことも出來ねば又無くすることも出來ぬ。見掛け上で消失する時は外の形のエネルギに變遷したのである。エネルギを與えないで無限に仕事が得られる**第一種永久機關** (perpetual machine of the first type)[3] は存在しない。

エネルギ不滅の法則を熱と仕事との關係に應用したものが**熱力學の第一法則** (first law of thermodynamics)[4] である。即ち

熱を得るために仕事をなせば，生じた熱量は仕事に比例し，又逆に仕事をなすために熱を用ひれば，仕事に相當する熱量が消失する。

Q を熱量とし，これより變遷によりて得た仕事を W とせば熱力學の第一法則は次式によりて與へられる。

$$W=JQ \qquad Q=AW \qquad \text{.................} \quad (4)$$

但 J = **熱の仕事當量** (mechanical equivalent of heat)[5]

1. Prinzip der Erhaltung der Energie.
2. Prinzip der Erhaltung der Materie.
3. Perpetuum mobile erster Art.
4. der erste Hauptsatz der Wärmelehre.
5. mechanisches Wärmeäquivalent.

$A=\dfrac{1}{J}$ = **仕事の熱當量** (heat equivalent of mechanical work)

Q をキロカロリー，W をキログラム・メートルで表せば

$$J=426.9\fallingdotseq\mathbf{427} \qquad \text{....................} \quad (5a)$$

Q を B.T.U., W をフート・ポンドで表せば

$$J=778.6\fallingdotseq\mathbf{778} \qquad \text{..............................} \quad (5b)$$

Q を C.H.U., W をフート・ポンドで表せば

$$J=1400 \qquad \text{..............................} \quad (5c)$$

10. 特　性　式

物質の狀態をいひ表はすには溫度 T, 體積 v, 壓力 p の 3 量を要する。一般に 3 量の中 2 量を決定すれば殘りの量は從つて定まる。例へば氣筒中に空氣を入れて，ピストン上に或壓力を加へながら溫度を高めると，その溫度により空氣は或る體積を占める。即ち v は獨立變數 p, T の函數である。以上の關係を式で表はせば次の如くなる。

$$v=f(p,\,T) \quad \text{又は} \quad F(p,\,v,\,T)=0 \qquad \text{...........} \quad (6)$$

(6) を物質の**特性式** (characteristic equation)[1] といふ。

11. 外部仕事，エネルギ式

物體が外部より熱を吸收すると，熱はその溫度を高め竝にその體積を增して，內部エネルギを增し，外壓に抗して**外部仕事** (external work)[2] をなす。熱量 Q, 內部エネルギ u, 外部仕事 W との關係を式で示せば

$$dQ=du+AdW \qquad \text{....................} \quad (7)$$

1. Zustandsgleichung.
2. äußere Arbeit.

これを**エネルギ式** (energy equation)[1] といふ。

今流體が F なる面積のピストンを有する氣筒中にて膨脹する時，ピストンは p なる壓力を受けながら距離 dx を動いたとする。然る時は外部仕事は

$$dW=pFdx \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (8)$$

$Fdx=dv$ なる故に

$$dW=pdv \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (8a)$$

(7) より

$$dQ=du+Apdv \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (\mathbf{7a})$$

外部仕事の符號は，流體がなす時卽ち膨脹 (expansion)[2] は正，なされる時卽ち壓縮 (compression)[3] は負である。熱量の符號は流體が熱を吸收する時は正，放出する時は負である。

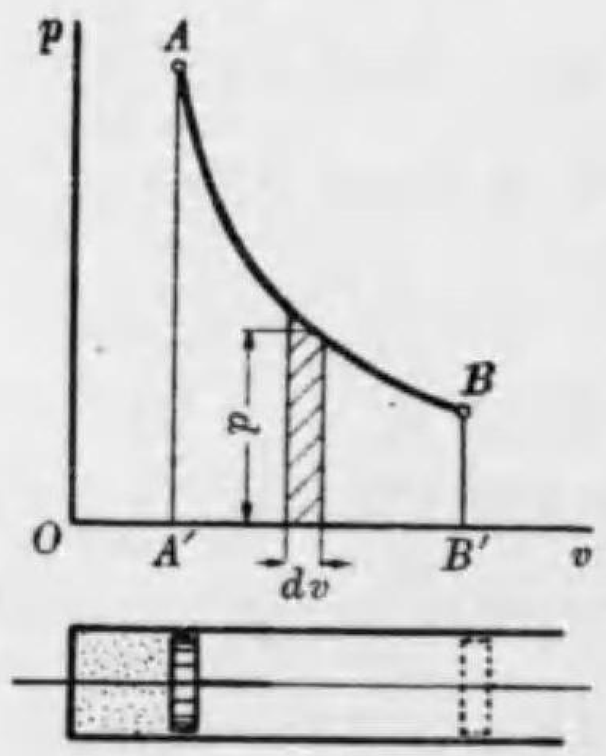


圖 -1

壓力 p と體積 v を獨立變數に取り，pv 平面に狀態變化の有樣を示すと圖 -1 の如くなる。初の狀態は A，終の狀態は B，狀態變化の曲線は AB である。この線圖を**インヂケータ線圖** (indicator diagram)[4] といふ。曲線 AB と v 軸に挾まれた面積 $A'ABB'$ は微少面積 pdv の和であつて $\int_{v_A}^{v_B}pdv$ で與へられ，外部仕事を表はす。

1. Wärmegleichung. 2. Ausdehnung. 3. Verdichtung.
4. Indikatordiagramm.

12. 循還變化

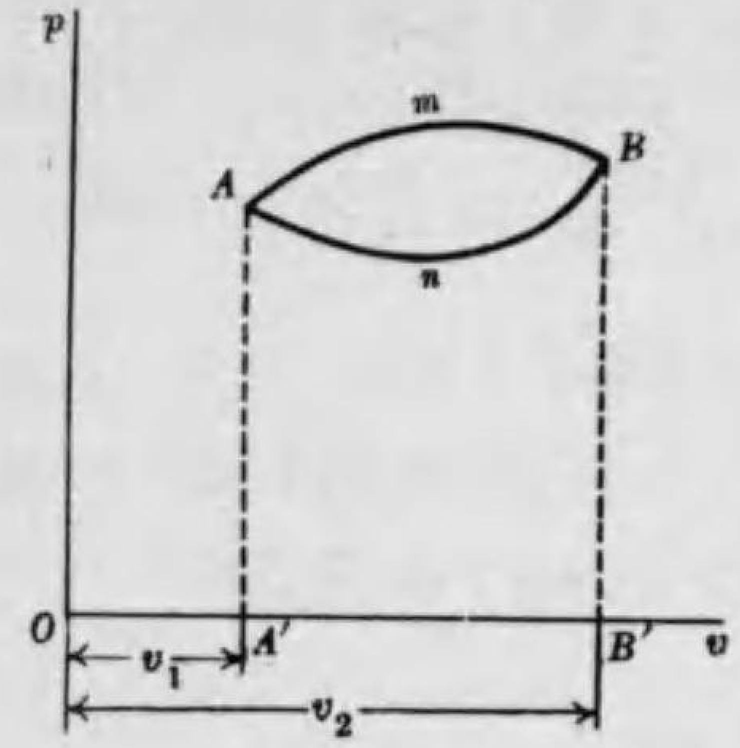


圖 -2

物體が或狀態より出發して狀態變化をなし，最後に元の狀態に歸つて來るならば**サイクル** (cycle)[1] をなしたといふ。

圖 -2 のサイクルを考へんに，狀態 A より m 線を傳つて狀態 B までになした外部仕事は面積 $A'AmBB'$，狀態 B より n 線を傳つて狀態 A に歸る時に外部よりなされた仕事は面積 $B'BnAA'$ である。從つてサイクルの外部仕事は $AmBnA$ なる閉曲線に圍まれたる面積により表はされる。

$$W=\oint pdv=\text{面積 } AmBnA$$

逆方向にサイクルを行へば，面積 $AnBmA$ なる仕事が，物體になされた事になる。

次に內部エネルギについて考へんに，A なる狀態に於ては或量の內部エネルギを有するが，狀態變化の後再び A に戻れば最初の溫度，集合狀態を有することになるので，內部エネルギは初の値となり，積分 $\oint du$ は零となる。

$$\oint du=\int_{A\,m}^{B}du+\int_{B\,n}^{A}du=\int_{A\,m}^{B}du-\int_{A\,n}^{B}du=0$$

$$\therefore \int_{A\,m}^{B}du=\int_{A\,n}^{B}du \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (9)$$

1. Kreisprozeß.

かやうに內部エネルギの變化は，變化の初點 A 及び終點 B の狀態のみに關し，變化の道筋には關係せぬ。A 點と B 點との間の內部エネルギの變化は

$$\int_A^B du = u_B - u_A \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(10)}$$

外部仕事は內部エネルギと異なり，狀態變化の初點，終點の狀態に關する上に變化の道筋にも關する。n 線に沿ふ外部仕事は m 線に沿ふ外部仕事より小さい。外部仕事は次の如く表はさる。

$${}_AW_B = \int_A^B dW = \int_{v_1}^{v_2} p\,dv \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(11)}$$

${}_AW_B$ は變化の道筋卽ち p と v との關係が判れば計算せられる。

(7) より，

$$\int_A^B dQ = \int_A^B du + A\int_A^B dW = u_B - u_A + A\,{}_AW_B \quad \cdots\cdots \text{(12)}$$

故に狀態變化の間に吸收した熱量は外部仕事の如く變化の道筋に關する。サイクルに (7) を適用すれば

$$\oint dQ = \oint du + A\oint dW \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \text{(13)}$$

$\oint du = 0$ であるから

$$\oint dQ = A\oint dW \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(13a)}$$

故に次の法則を得る。

サイクルに於て與へられた熱量はなした外部仕事に等しい。

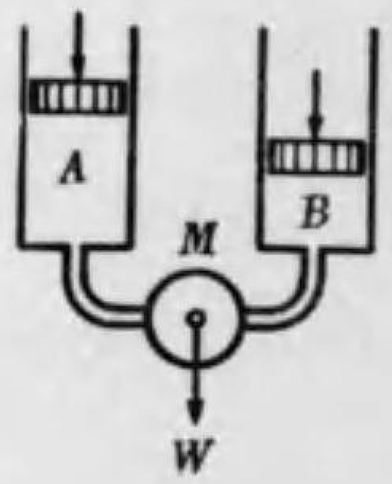


圖 -3

13. エンタルピ

圖 -3 に於て A, B を氣筒，M を原動機と

し，氣筒 A にありたる單位重さの流體がピストンに押されて流出し，原動機 M に於て仕事 W をなし，氣筒 B に流入する。この際外部との間に熱の授受がなければ，內部エネルギの變化は次式にて與へられる。

$$u_A - u_B = AW + Ap_2v_2 - Ap_1v_1 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \text{(14)}$$

但 p_1v_1 は氣筒 A に於てピストンを押し下げる時の，p_2v_2 は氣筒 B に於て流體がピストンを押し上げる時の仕事で，W は原動機に於ける仕事である。(14) より

$$AW = (u_A + Ap_1v_1) - (u_B + Ap_2v_2)$$
$$= i_A - i_B \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(15)}$$

但　$$i = u + Apv \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(16)}$$

i を**エンタルピ** (enthalpy)[1] 又は**含熱量** (heat content)[2] といふ。i は u と pv の和であつて，どちらも狀態のみに關する量であるから，i も狀態のみに關する量である。(15) より外部仕事は流體の初のエンタルピと終のエンタルピの差に等しい。

(16) より

$$di = du + A(pdv + vdp) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \text{(16a)}$$

又 (7a) より

$$dQ = du + Apdv$$

なる故に

$$dQ = di - Avdp \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{(17)}$$

狀態變化の際には (7a) 及び (17) より，吸收した熱量が次の如く與へられる。

1. Enthalpie.　2. Wärmeinhalt.

$$ {}_AQ_B = u_B - u_A + A\int_{v_1}^{v_2} p\,dv \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\ (7b)$$

$$ {}_AQ_B = i_B - i_A - A\int_{p_1}^{p_2} v\,dp \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(17a)$$

vdp は圖 -4 に於て陰を付けた面積で示され，$-\int_{p_1}^{p_2} vdp$ は面積 $ABB'A'$ で示される。

(17) に於て $dp=0$ とせば

$$dQ = di \quad \cdots\cdots\cdots\ (17b)$$

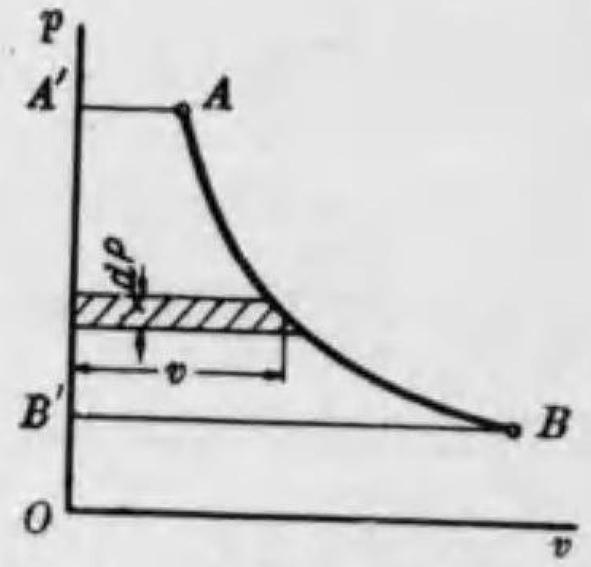


圖 -4

即ち一定壓力の下に加へた熱量はエンタルピの變化に等しい。汽罐中に於ける罐水の加熱，蒸發の如きものは一定壓力の下になされるが，この際吸收した熱量は初と終のエンタルピの差に等しい。

14. 膨脹係數，壓力係數，壓縮率，定積比熱，定壓比熱

壓力 p，體積 v，溫度 T の間の關係を示すために，夫々一の量の他の 2 量に關する偏微分を求めれば次の如くなる。付字は一定に保つ量を示す。

$$dT = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_v dp + \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_p dv \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\ (18)$$

$$dp = \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T dv + \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v dT \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\ (19)$$

$$dv = \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T dp + \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right) dT \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\ (20)$$

物體を一定壓力の下に dT 溫める時は，$dp=0$ なる故に體積の變化は (20) より

$$dv = \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p dT$$

0°C に於ける體積 v_0 に對して體積の變化を考へれば

$$\alpha = \frac{1}{v_0}\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\ (21)$$

これを**膨脹係數**といふ。

物體を一定體積の下に dT 溫める時は，$dv=0$ なる故に壓力の變化は (19) より

$$dp = \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v dT$$

0°C に於ける壓力 p_0 に對して壓力の變化を考へれば

$$\beta = \frac{1}{p_0}\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\ (22)$$

これを**壓力係數**といふ。

壓力を一定溫度の下に高めれば，$dT=0$ なる故に體積の變化は (20) より

$$dv = \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T dp$$

初の體積 v に對して體積の變化を考へれば

$$\varkappa = -\frac{1}{v}\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\ (23)$$

これを**壓縮率**といふ。

內部エネルギ u の T, v に關する偏微分を求めれば

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T dv \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\ (24)$$

(7a) にこれを代入すれば

$$dQ = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v dT + \left[\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T + Ap\right] dv$$

一定體積の變化に於ては $dv=0$

$$dQ = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v dT = c_v dT$$

即ち
$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\ (25)$$

又エンタルピ i の T, p に關する偏微分を求めれば

$$di = \left(\frac{\partial i}{\partial T}\right)_p dT + \left(\frac{\partial i}{\partial p}\right)_T dp \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\ (26)$$

(17) にこれを代入すれば

$$dQ = \left(\frac{\partial i}{\partial T}\right)_p dT + \left[\left(\frac{\partial i}{\partial p}\right)_T - Av\right] dp$$

一定壓力の變化に於ては $dp=0$

$$dQ = \left(\frac{\partial i}{\partial T}\right)_p dT = c_p dT$$

即ち
$$c_p = \left(\frac{\partial i}{\partial T}\right)_p \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\ (27)$$

問　　題（I）

1. 蒸汽タービン (steam turbine)[1] あり。その蒸汽罐の壓力計の示度は 27 atü，復水器の眞空計の示度は 740 mm Hg なり。氣壓計の示度を 755 mm Hg とせば，罐及び復水器の絶對壓力は各幾何となるか。又復水器の眞空率は幾何か。

2. 前問に於て罐の壓力計の示度が 200 lb/in². g，眞空計の示度が 27 in Hg，氣壓計の示度が 29.3 in Hg なる時，罐及び復水器の絶對壓力と，復水器の眞空率を求めよ。

3. 熱量計あり。その容器は銀製にして重さ 250 g，比熱 0.056 kcal/°C kg である。これに 15°C の水 800 g を充し，重さ 200 g，100°C のアルミニユームを投入するに，溫度が一様になつた時 19.24°C であつた。アルミニユームの比熱幾何か。

4. A，B，C の 3 枝管の水が主管中に注がれる。毎分 A 管よりは 80°C の水が 0.6 m³，B 管よりは 10°C の水が 1.08 m³，C 管よりは 98°C の水が 0.048 m³，注がれる。比熱及び密度の溫度による變化なしとせば，主管に於ける水の溫度は幾何か。

5. 鉛球が 100 m の高さから堅い地面に落ちる。動的エネルギは衝突により熱に變り，その $\frac{2}{3}$ が鉛球に移る。鉛の比熱を 0.030 kcal/°C kg とせば鉛球は何度溫るか。

6. 英馬力は毎時 2545 B.T.U.，馬力は毎時 632 kcal，キロワットは毎時 860 kcal に相當する。これを證明せよ。

7. 原動機あり。$n'=1200$/min に於て水動力計で制動され，回轉モーメントは 500 mkg なることを測定された。動力計に 10°C る冷却水を毎時 8 m³ 通す時，全制動仕事が冷却水に熱の形で移るならば，冷却水は何度で流出するか。

本書に於ては特別に斷はらざる限り單位はメートル法を使用す。溫度は攝氏，熱量はキロカロリーを用ふ。

1. Dampfturbine.

第二章　完全ガス

15. 完全ガス

完全ガス (perfect gas)[1] とはボイル (Boyle) 及びゲイリユサツク (Gay-Lussac) の 2 法則に嚴密に從ふガスをいふ。かゝるガスは實在しないが，理論の上ではこれを假想し，ガスの研究に當つて標準とする。空氣，窒素，酸素，水素等は通常の氣溫，氣壓に於ては略々完全ガスの如き性質を有する。往時研究の未だ進まなかつた時代には液化出來ないガスを**永久ガス** (permanent gas) と呼んでゐたが，近時低溫，高壓に於ては液化出來ないものではないので，永久ガスはなくなつた。前記 2 法則より著しく偏差のあるガスは過熱蒸氣である。

16. ボイルの法則，ゲイリユサツクの法則

ボイルの法則 (Boyle's law) は又**ボイル・マリオツト** (Boyle-Mariotte) **の法則**[2] ともいふ。ボイルは西紀 1662 年に，マリオツトは 1676 年にこの法則を發見した。卽ち，**溫度が一定なれば，ガスの比體積はその壓力に反比例する。**

式でこれを示すと，

$$pv=f(t) \quad \text{..........................} \quad (28)$$

或溫度に於ては

$$pv=\text{定數} \quad \text{..........................} \quad (28a)$$

(28a) は pv 平面に於ては**直角双曲線** (equilateral hyperbola)[3] である。

---

1. vollkommenes Gas, ideales Gas.　2. Gesetz von Boyle-Mariotte.
3. gleichseitige Hyperbel.

ゲイリユサツク (Gay-Lussac)[1] 又は **シヤール** (Charles) **の法則**は 1802 年に發見せられた。即ち**一定壓力の下では ガスの體積は溫度 1° 昇る毎に 0° に於ける體積の $\frac{1}{273.16}$ づゝ增す。**

即ち $\alpha=\frac{1}{273.16}$ なる故に，v_0 を 0° に於ける體積，v を $t°$ に於ける體積とすれば

$$v=v_0(1+\alpha t) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (29)$$

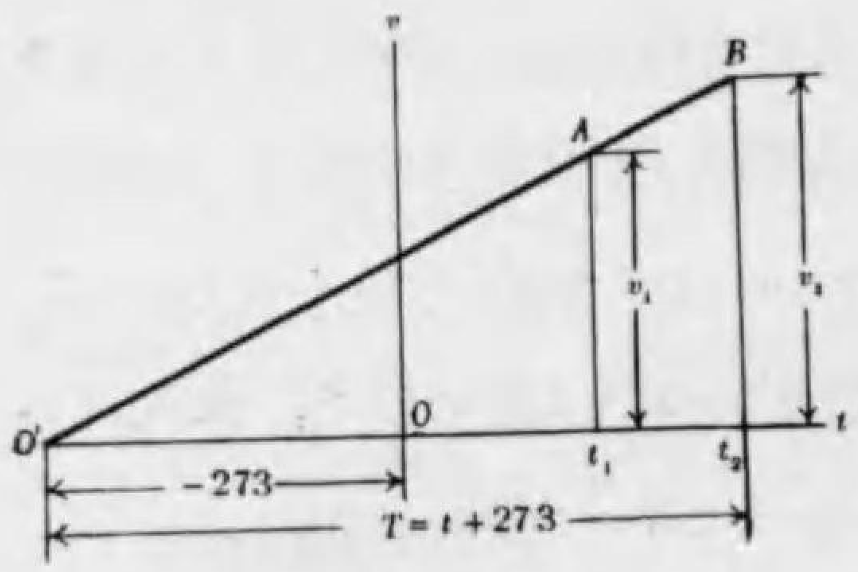


圖 -5

溫度による體積の變化を tv 平面上に示すと，圖 -5 の直線 AB の如くなる。A 點は初の狀態 (t_1, v_1)，B 點は終の狀態 (t_2, v_2) である。AB を延長して t 軸との交點 $0'$ をとすれば，$0'$ は體積零なるべき點である。(29) に於て $v=0$ とおけば $0'$ 點の溫度は

$$t=-273.16°$$

原點を 0 より $0'$ に移し，$0'$ より測つた溫度を T とする。

$$T=t+273.16\cong t+273$$

この溫度をガス寒暖計の**絶對溫度** (absolute temperature)[2] といひ，$0'$ の溫度を**絶對零** (absolute zero) といふ。絶對溫度表はすに °abs 又は °K の如くで記す。華氏單位では $T=t+459.8\cong t+460$ 又圖 -5 より次の關係を得る。

$$\frac{v}{T}=\text{定數} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (30)$$

1. Gesetz von Gay-Lussac.　2. absolute Temperatur.

ボイル，ゲイリユサツクの法則を結び付けると p, v, T の關係を與へる式が得られる。(28a) (30) より

$$\frac{pv}{T}=\text{定數}$$

R を以て**ガス定數** (gas constant)[1] を表はせば

$$pv=RT \quad \cdots (31)$$

これを**完全ガスの特性式** (characteristic equation of perfect gas)[2] といふ。ガスの重さが G，體積が V なる時は

$$pV=GRT \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (31a)$$

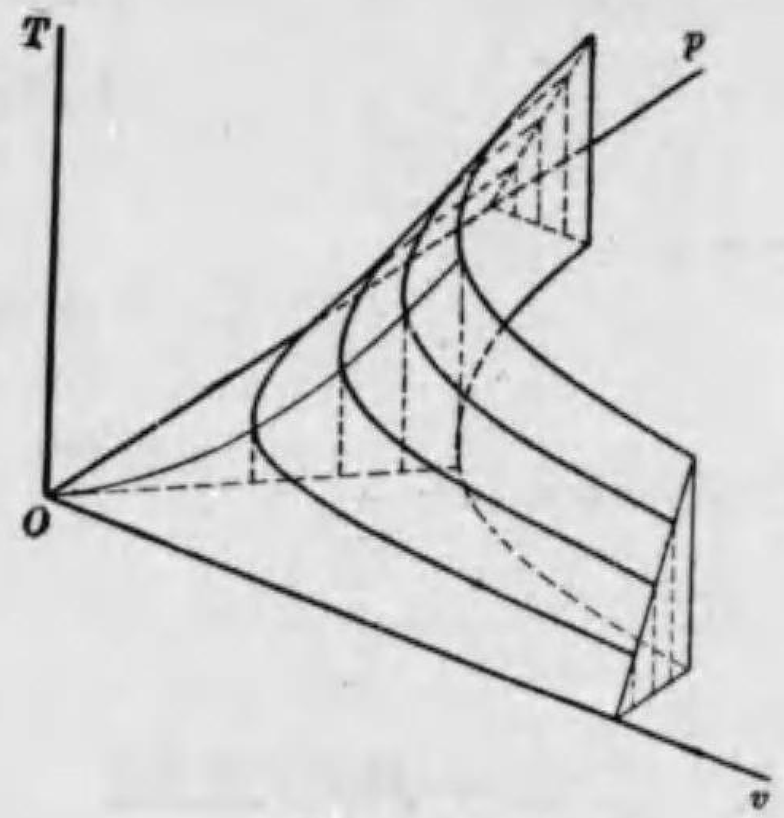


圖 -6

(29) (31) はガス寒暖計の目盛を表はす式である。

ガスの特性式 (31) は p, v, T の三變數を持つから，圖上では圖 -6 の如き一個の表面となり，ガスの或狀態はこの表面の一點で表はされる。從つて狀態變化はこの狀態點の表面上の運動即ち空間曲線により示される。表面を平面 $T=$ 定數 で切れば直角双曲線，平面 $p=$ 定數，$v=$ 定數 で切れば各々直線となる。

17. ガス定數

ガス定數 R の値はガスの或狀態に於ける p, v, T より計算し得られ，ガスにより異なる。空氣の場合には，0°，標準氣壓の下に於ては

1. Gaskonstante.　2. Zustandsgleichung der vollkommenen Gase.

$$p = 10333\ \mathrm{kg/m^2}$$

$$T = 273.16\ ^\circ\mathrm{K}$$

$$\gamma = \frac{1}{v} = 1.293\ \mathrm{hg/m^3}$$

なる故に

$$R = \frac{pv}{T} = \frac{10333}{1.293 \times 273.16} = 29.27\ \frac{\mathrm{mkg}}{^\circ\mathrm{K\ kg}}$$

外の狀態に於ても R は計算出來る。種々なるガスの R を表 -1 に示す。

18. ジュールの法則

完全ガスに對する法則には又**ジュールの法則** (Joule's law) がある。卽ち**完全ガスの內部エネルギは溫度のみに關し，體積には無關係である。**

この法則を式で示すと

$$u = f(T),\ \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T = 0$$

となる。ジュールの實驗裝置を圖 -7 に示す。2 個の容器 A, B が管によりて連絡されて，水中に浸されて居る。尙實驗裝置と周圍とは絕緣されて居る。初容器 A に 22 氣壓の壓縮空氣を入れ，容器 B は空にしておく。後コック C を開いて空氣を A より B に流入させ，平衡後水溫を見るに變化はない。外部仕事はこの狀態變化に於てなされず，水溫は同じ

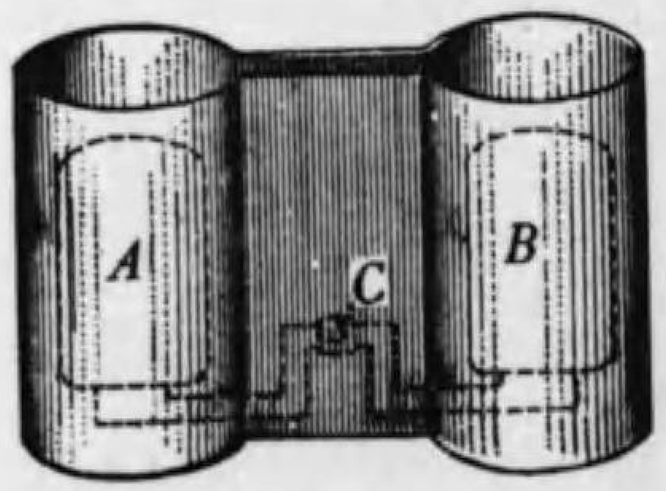


圖 -7

表 —1

ガス	化學記號	原子數	分子量 m		ガス定數 R	0°, 760mm Hg に於ける比重 kg/m³		空氣を 1 とせる比重	0°, 低壓に於ける比熱				$k=\frac{c_p}{c_v}$
			近似値	精確値	$\frac{\mathrm{mkg}}{^\circ\mathrm{K\ kg}}$	計算値	測定値	測定値	1 kg に付 c_p	1 kg に付 c_v	1 kmol に付 c_p	1 kmol に付 c_v	
ヘリウム	He	1	4	4,002	211,9	0,1786	0,1785	0,1381	1,251	0,755	5,00	3,01	1,66
アルゴン	Ar	1	40	39,944	21,23	1,7821	1,7834	1,379	0,125	0,076	5,00	3,01	1,66
水素	H_2	2	2	2,016	420,3	0,08994	0,08987	0,0695	3,403	2,417	6,86	4,87	1,409
窒素	N_2	2	28	28,016	30,26	1,2499	1,2505	0,968	0,2482	0,1774	6,96	4,97	1,400
酸素	O_2	2	32	32,000	26,49	1,4276	1,42895	1,105	0,2184	0,1562	6, 9	5,00	1,399
空氣	—	—	29	28,964	29,27	1,2922	1,2928	1,000	0,240	0,171	6,94	4,95	1,402
一酸化炭素	CO	2	28	28,00	30,28	1,2495	1,2500	0,967	0,2486	0,1775	6,96	4,97	1,400
酸化窒素	NO	2	30	30,008	28,25	1,3388	1,3402	1,037	0,2384	0,1722	7,16	5,17	1,385
鹽酸	HCl	2	36,5	36,465	23,25	1,6265	1,6391	1,268	0,191	0,136	6,96	4,97	1,40
炭酸ガス	CO_2	3	44	44,00	19,25	1,9634	1,9768	1,530	0,1957	0,1505	8,61	6,62	1,301
亞酸化窒素	N_2O	3	44	44,016	19,26	1,9637	1,9878	1,538	0,2131	0,1680	9,39	7,40	1,270
亞硫酸ガス	SO_2	3	64	64,06	13,24	2,8581	2,9265	2,264	0,1453	0,1143	9,31	7,32	1,272
アムモニヤ	NH_3	4	17	17,032	49,78	0,7598	0,7713	0,596	0,491	0,374	8,36	6,37	1,313
アセチレン	C_2H_2	4	26	26,016	32,59	1,1607	1,1709	0,906	0,3613	0,2904	10,13	8,14	1,255
メタン	CH_4	5	16	16,031	52,89	0,7152	0,7168	0,554	0,515	0,390	8,24	6,25	1,319
鹽化メチル	CH_3Cl	5	50,5	50,48	16,79	2,2522	2,3084	1,785	0,176	0,137	8,87	6,88	1,29
エチレン	C_2H_4	6	28	28,031	30,25	1,2506	1,2604	0,975	0,385	0,308	10,02	8,03	1,249
エタン	C_2H_6	8	30	30,047	28,22	1,3406	1,3560	1,049	0,413	0,345	12,41	10,34	1,20
鹽化エチル	C_2H_5Cl	8	64,5	64,50	13,14	2,8776	2,8804	2,228	0,32	0,276	20,3	17,8	1,16

であるから水と空氣との間に熱の授受はない。故に内部エネルギも變りはない。空氣は容積を增加するから，内部仕事卽ち分子を分子引力に抗して引離すために仕事をなす。これはガスの動的内部エネルギの消費によりてなされ，ために溫度は下る筈である。實際には溫度が變らないので，内部仕事はしなかつたことになる。故に一般に完全ガスは靜的内部エネルギを有せず，そのエネルギは動的で溫度のみに關する。

次に圖 -8 に於て T_1, T_2 を pv 平面に引いた 2 本の等溫曲線とする。ジユールの法則により内部エネルギは溫度のみに關するから T_1 線上の D, A, T_2 線上の B, C, E は各々等しい内部エネルギを有する。T_1 線上のエネルギを u_1 とし，T_2 線上のエネルギを u_2 とすれば (u_2-u_1) は如何なる道筋についても同じである。道筋 AC は一定體積に於ける溫度の上昇を示すが，これを内部エネルギ變化の道筋の代表としてもよい。(7a) より

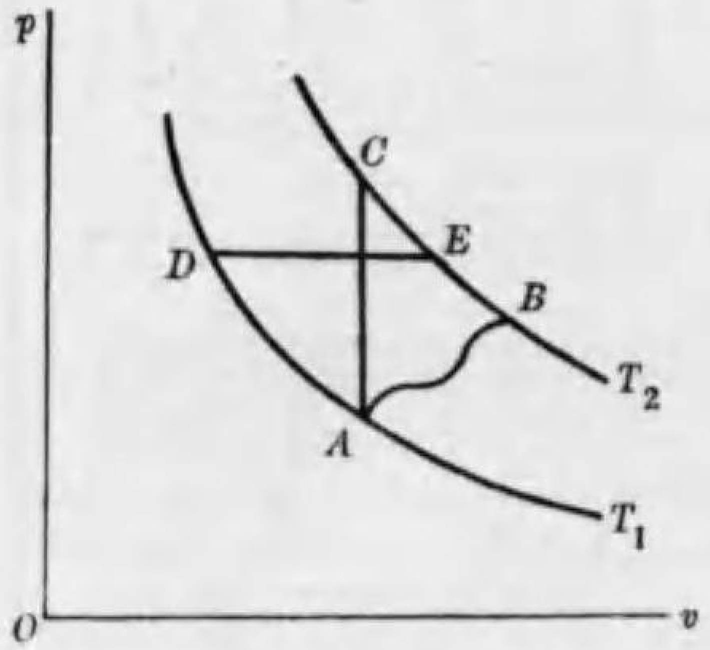


圖 -8

$$dQ = du + Apdv$$

v= 定數であるから $\qquad dv=0$

$$dQ = du = c_v dT \quad \text{.....................} \quad (32)$$

$$u = \int c_v dT \quad \text{.....................} \quad (33)$$

c_v= 定數なれば

$$u = c_v T + u_0 \quad \text{.....................} \quad (33a)$$

u_0 は積分定數であるが，狀態 1 より 2 への狀態變化に於ける内部エネルギの變化を考へれば

$$u_2 - u_1 = c_v (T_2 - T_1) \quad \text{..............} \quad (33b)$$

となり，積分定數には無關係である。(32) を (7a) に代入すれば，完全ガスに於ては

$$dQ = c_v dT + Apdv \quad \text{.................} \quad (7c)$$

19. 定壓比熱 c_p と定積比熱 c_v との關係

壓力一定なる狀態變化に於てガスに吸收される熱量は (17b) より

$$dQ = di = c_p dT \quad \text{....................} \quad (34)$$

$$i = \int c_p dT \quad \text{........................} \quad (35)$$

c_p= 定數なれば

$$i = c_p T + i_0 \quad \text{........................} \quad (35a)$$

i_0 は積分定數であつて，u_0 の如く狀態變化の際には消える。c_p は c_v より大なることは一定壓力の變化の場合には外部仕事をなすから，これに對して餘分の熱量を要することより知られる。c_p と c_v の關係は次の如くして得られる。(31) より

$$pv = RT$$

p 一定の下の狀態變化に於ては

$$pdv = RdT$$

(7c) より

$$di = c_v dT + ARdT$$
$$= (c_v + AR)\, dT \quad \text{.................} \quad (7d)$$

(34) (7d) より

$$\left.\begin{aligned} c_p &= c_v + AR \\ c_p - c_v &= AR \end{aligned}\right\} \quad \text{.....................} \quad (36)$$

$$\frac{c_p}{c_v}=k \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \textbf{(37)}$$

とせば (36) より

$$c_v=\frac{AR}{k-1} \qquad c_p=\frac{kAR}{k-1} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\text{(37a)}$$

ガスの c_p と c_v は溫度上昇と共に緩慢に増すが，狀態變化の溫度範圍が狹いならば平均値を取つて一定と考へられる。內部エネルギの變化は (33b) より次の形にても與へられる。

$$u_2-u_1=c_v(T_2-T_1)=\frac{AR}{k-1}(T_2-T_1)$$

$$=\frac{A}{k-1}(p_2v_2-p_1v_1) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \textbf{(38)}$$

例 2 壓力 2 at，體積 1.5 m³ の空氣が壓力 5 at，體積 1.0 m³ まで壓縮される時，內部エネルギの變化を求めよ。但 $k=1.4$ とす。

解 $$u_2-u_1=\frac{A}{k-1}(p_2v_2-p_1v_1)$$
$$=\frac{10000}{427\,(1.4-1)}(5\times1.0-2\times1.5)$$
$$=117.1\ \text{kcal}$$

20. 完全ガスの狀態變化

1. 等 溫 變 化

溫度一定の變化を**等溫變化** (isothermal change of state)[1] といふ。ガスの特性式 $pv=RT$ に於て $T=$ 定數とせば

$$pv=p_1v_1=RT_1=\text{定數} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \textbf{(39)}$$

又は $$pdv+vdp=0 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\text{(39a)}$$

これは pv 平面に於ける等溫線であつて，直角双曲線である。狀態

1. Zustandsänderung bei konstanter Temperatur, Isotherme.

A より B までの外部仕事は

$$W=\int_{v_1}^{v_2} pdv$$

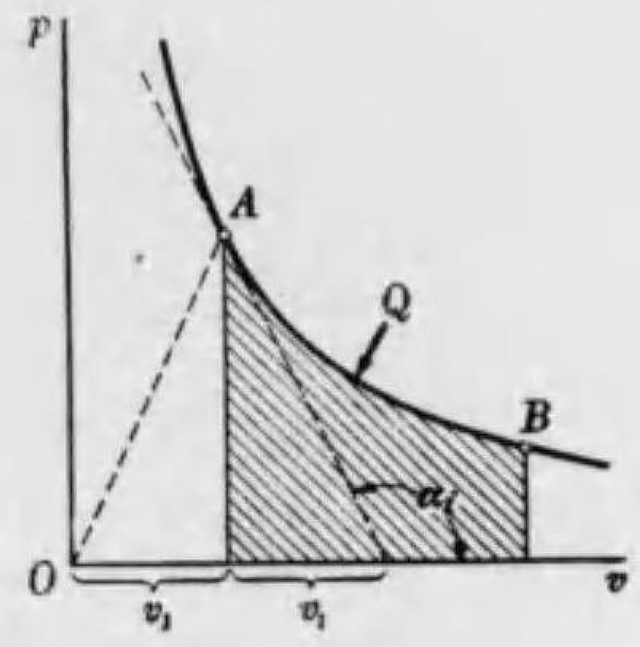


圖 -9

(39) を用ひて p を v でおき換へると

$$W=p_1v_1\int_{v_1}^{v_2}\frac{dv}{v}=p_1v_1\log\frac{v_2}{v_1}$$
$$=RT_1\log\frac{v_2}{v_1}=p_1v_1\log\frac{p_1}{p_2}$$
$$\cdots\cdots \textbf{(40)}$$

內部エネルギの變化は

$$u_2-u_1=c_v(T_2-T_1)=0 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \text{(41)}$$

從つて (7c) より

$$Q=AW \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \textbf{(42)}$$

故に等溫膨脹ではガスのなす仕事は與えられた熱量に等しく，等溫壓縮ではガスになした仕事に相當する熱量を取り去らねばならぬ。

例 3 體積 20 m³，壓力 7 at の空氣あり。これを氣筒中に於て 1 at まで等溫膨脹せしめる時仕事は幾許か。

解 $$p_1v_1=p_2v_2$$
$$\frac{v_2}{v_1}=\frac{p_1}{p_2}=\frac{7}{1}=7$$
$$W=p_1v_1\log\frac{v_2}{v_1}$$
$$=10000\times7\times20\times2.3026\log_{10}7$$
$$=27.28\times10^5\ \text{kgm}$$

2. 斷 熱 變 化

外部と熱の授取のない變化を**斷熱變化** (adiabatic change of state)[1]

1. adiabatische Zustandsänderung, Adiabate.

といふ。(7c) より

$$dQ=c_v dT+Apdv$$

に於て $dQ=0$

$$c_v dT+Apdv=0 \quad \ldots \text{(7e)}$$

ガスの特性式 (31) を微分して A を乗ずれば

$$Avdp+Apdv=ARdT=(k-1)\,c_v dT$$

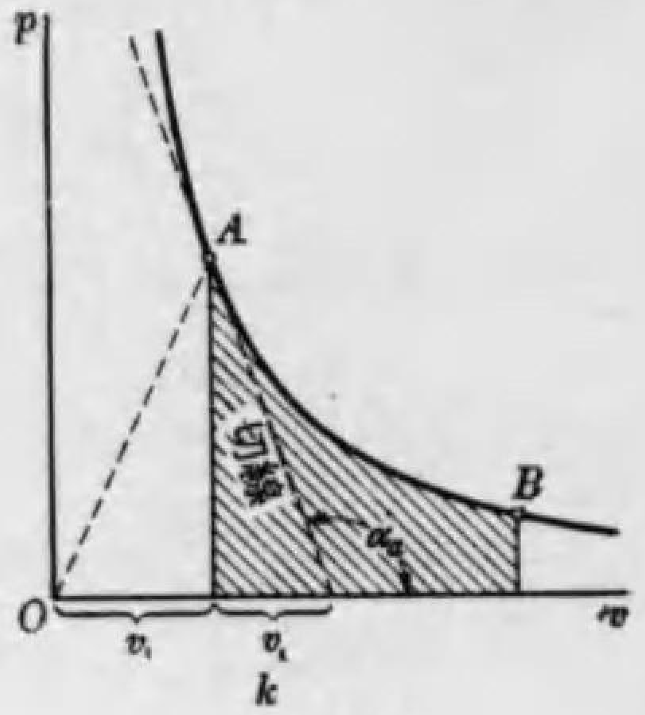


圖 -10

(7e) によりこれを書換へて

$$Avdp+Apdv+(k-1)\,Apdv=0$$

又は

$$\frac{dp}{p}+k\,\frac{dv}{v}=0 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{(43)}$$

これを積分すると

$$\log p+\log v^k=\log c$$

又は

$$pv^k=\text{定數} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \textbf{(43a)}$$

これは pv 平面に於ける断熱曲線 (adiabatic curve) である。(31) により (43a) を書換へると Tv, pT の關係式が得られる。即ち

$$Tv^{k-1}=\text{定數} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{(43b)}$$

$$\frac{p^{\frac{k-1}{k}}}{T}=\text{定數} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{(43c)}$$

ガスの初の狀態 p_1, v_1, T_1 が判つて居れば定數を計算し得る。(43b), (43c) をまとめると

$$\frac{T}{T_1}=\left(\frac{v_1}{v}\right)^{k-1}=\left(\frac{p}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \textbf{(43d)}$$

断熱變化に於ては授受せられたる熱量は零であるから (7) に於て $dQ=0$

$$W=-J(u_2-u_1)$$

$$=\frac{p_1v_1-p_2v_2}{k-1}=\frac{R(T_1-T_2)}{k-1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \textbf{(44)}$$

(44) は又次の如く記することも出來る。

$$W=\frac{p_1v_1}{k-1}\left[1-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]$$

$$=\frac{p_1v_1}{k-1}\left[1-\frac{T_2}{T_1}\right] \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{(44a)}$$

(44) より明かなる如く断熱膨脹に於ては仕事は內部エネルギの消費によりなされるから，同じ膨脹範圍では，等溫膨脹の場合より終の壓力も低く溫度も低い。断熱壓縮に於ては，ガスになした仕事に相當するだけ內部エネルギが增し終の溫度，壓力も高くなる。

例 4 空氣壓縮機あり。壓力 1 at, 體積 1.2 m³ の空氣を壓力 4 at まで断熱的に壓縮す。壓縮に要したる仕事を求めよ。又初めの溫度を 15° とすれば終の溫度は何度となるか。

解 $v_2=v_1\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{k}}=1.2\left(\frac{1}{4}\right)^{\frac{1}{1.4}}$

$=0.387\ \text{m}^3$

壓縮に要する仕事

$$W=\frac{p_1v_1-p_2v_2}{k-1}=\frac{10000\,(1\times1.2-4\times0.387)}{1.4-1}$$

$=-8700$ kgm

初の溫度 $T_1=t_1+273=15+273$

$=288\ ^\circ\text{K}$

終の溫度 $T_2=T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}=288\left(\frac{4}{1}\right)^{\frac{0.4}{1.4}}$

$=428.3\ ^\circ\text{K}$

$t_2=155.3^\circ$

3. 斷熱曲線と等溫曲線の比較

pv 平面に於て，等溫曲線の切線の傾斜は (39a) により

$$\tan \alpha_i = \frac{dp}{dv} = -\frac{p}{v}$$

同様に斷熱曲線の切線の傾斜は (43) により

$$\tan \alpha_a = \frac{dp}{dv} = -k\frac{p}{v}$$

故に斷熱曲線は k 倍だけ傾斜が急なることが判る。圖 -11 に兩曲線を示す。

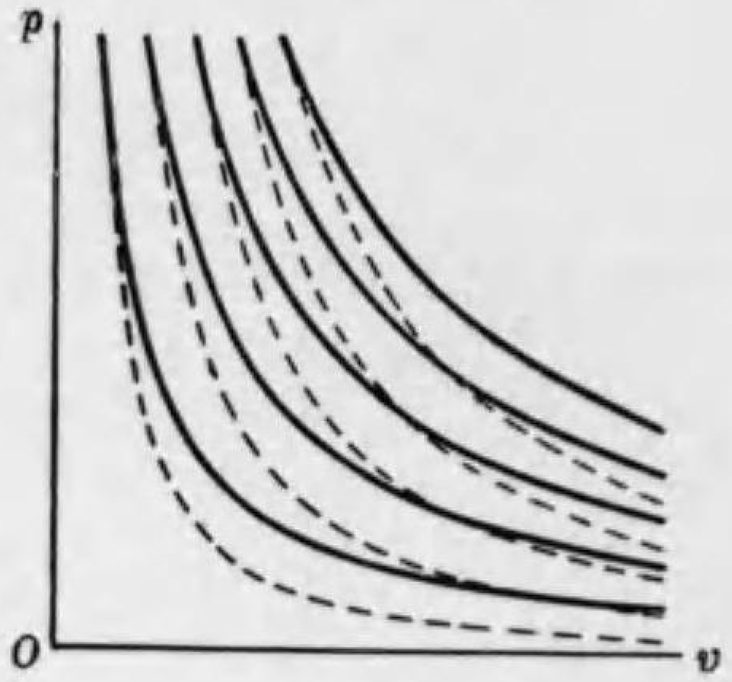


圖 -11

等溫膨脹による仕事は，外部より吸收した熱量を以てなされるから，熱さへ供給すれば，得られる仕事は無限である。

$$W_{i_{\max}} = p_1 v_1 \int_{v_1}^{\infty} \frac{dv}{v} = p_1 v_1 \log \frac{\infty}{v_1} = \infty \quad \text{...... (40a)}$$

斷熱膨脹による仕事は，自分の內部エネルギを消費してなされるから，初の內部エネルギ以上には出來ない。(44) に於て $p_2=0$ とおけば，

$$W_{a_{\max}} = \frac{p_1 v_1}{k-1} \quad \text{.................... (44b)}$$

4. ポリトロープ變化

斷熱變化，等溫變化は實際には起らない。多く見られるのはこの中間にあるもので，空氣壓縮機に於ける空氣の壓縮，內燃機關に於る燃燒成生物の膨張等に於ては pv 平面に於ける狀態變化は次の如き形の式で表はされる。

$$pv^n = \text{定數} \quad \text{...................... (45)}$$

この狀態變化を**ポリトロープ變化** (polytropic change of state)[1] と呼ぶ。n に種々な値を與へることにより，種々な狀態變化を得ることが出來る。

$n=0$	$pv^0=$定數	$p=$ 定數	**等壓變化**[2]
$n=1$		$pv=$ 定數	等溫變化
$n=k$		$pv^k=$ 定數	斷熱變化
$n=\infty$	$p^{\frac{1}{\infty}}v=$定數	$v=$ 定數	**等積變化**[3]

(45) とガスの特性式 (31) より

$$\frac{T}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v}\right)^{n-1} = \left(\frac{p}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \quad \text{.............. (46)}$$

狀態變化に於ける仕事は

$$W = \int_{v_1}^{v_2} p\,dv = p_1 v_1^n \int_{v_1}^{v_2} v^{-n}\,dv$$

$$= \frac{p_2 v_2 - p_1 v_1}{1-n} = \frac{R(T_2 - T_1)}{1-n} \quad \text{......... (47)}$$

內部エネルギの變化は

$$u_2 - u_1 = \frac{A(p_2 v_2 - p_1 v_1)}{k-1} = \frac{AR}{k-1}(T_2 - T_1) \quad \text{... (38)}$$

狀態變化に於てガスに吸收されたる熱量は

$$Q = u_2 - u_1 + AW = \frac{A(p_2 v_2 - p_1 v_1)}{k-1} + \frac{A(p_2 v_2 - p_1 v_1)}{1-n}$$

$$= \frac{A(k-n)}{(k-1)(1-n)}(p_2 v_2 - p_1 v_1) = \frac{AR(k-n)}{(k-1)(1-n)}(T_2 - T_1) \quad \text{... (48)}$$

1. polytropische Zustandsänderung, Polytrope.
2. constant pressure change of state, Isobare.
3. constant volume change of state, Isochore.

(47), (38), (48) より

$$AW : u_2 - u_1 : Q = k-1 : 1-n : k-n \quad \cdots\cdots\cdots (49)$$

(49) により外部と授受する熱量，內部エネルギの變化，外部仕事の割合が判る。

例 5 空氣が $pv^{1.2}=$定數に從ひ膨脹する時には外部仕事，內部エネルギの變化，授受した熱量の割合如何。但 $k=1.4$ とせよ。

解 $Aw : u_2 - u_1 : Q = k-1 : 1-n : k-n$

$$= 0.4 : -0.2 : 0.2$$

外部仕事は空氣が吸收したる熱及びエネルギの減少を以てなされたことが判る。

例 6 ガス機關 (gas engine)[1] あり。氣筒直徑 250 mm，行程 400 mm，隙間體積は行程體積の $\frac{1}{4}$ なり。膨脹行程の初に於て燃燒ガスの壓力は 16 at なれば，膨脹が $pv^{1.3}=$定數に從ふ時仕事を見出せ。

解 行程を l とせば

行程體積 $v_h = \frac{\pi}{4} d^2 l$

$$= \frac{\pi}{4} (25)^2 \times 40$$

$$= 19625 \text{ cm}^3$$

隙間體積 $v_1 = \frac{1}{4}\left(\frac{\pi}{4} d^2 l\right)$

$$= 4906 \text{ cm}^3$$

氣筒體積 $v_2 = v_h + v_1 = 19625 + 4906$

$$= 24531 \text{ cm}^3$$

膨 脹 比 $r' = \frac{v_2}{v_1} = \frac{24531}{4906} = 5$

$$p_1 v_1^{1.3} = p_2 v_2^{1.3}$$

$$p_2 = p_1 \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{1.3}$$

$$= 16 \left(\frac{1}{5}\right)^{1.3}$$

$$= 1.97$$

$$W = \frac{p_2 v_2 - p_1 v_1}{1-n} = \frac{10^4(1.97 \times 0.0245 - 16 \times 0.0049)}{1-1.3}$$

$$= 1004.5 \text{ kgm}$$

1. Gasmaschine.

21. ポリトローブ變化に於ける比熱

(48) より

$$Q = \frac{AR(k-n)}{(k-1)(1-n)} (T_2 - T_1)$$

然るに $\frac{AR}{k-1} = c_v$ なる故に

$$Q = c_v \frac{k-n}{1-n} (T_2 - T_1)$$

$$= c_n (T_2 - T_1) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (48a)$$

但

$$c_n = c_v \frac{k-n}{1-n} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (50)$$

c_n を**ポリトローブ變化に於ける比熱**と呼び，c_v が一定なれば n の便によりて變化する。卽ち

$n=0$	$c_n = c_p$	(等壓變化)
$n=1$	$c_n = \infty$	(等溫變化)
$n=k$	$c_n = 0$	(斷熱變化)
$n=\infty$	$c_n = c_v$	(等積變化)

$n=1 \sim k$ なる時は c_n は負となる。

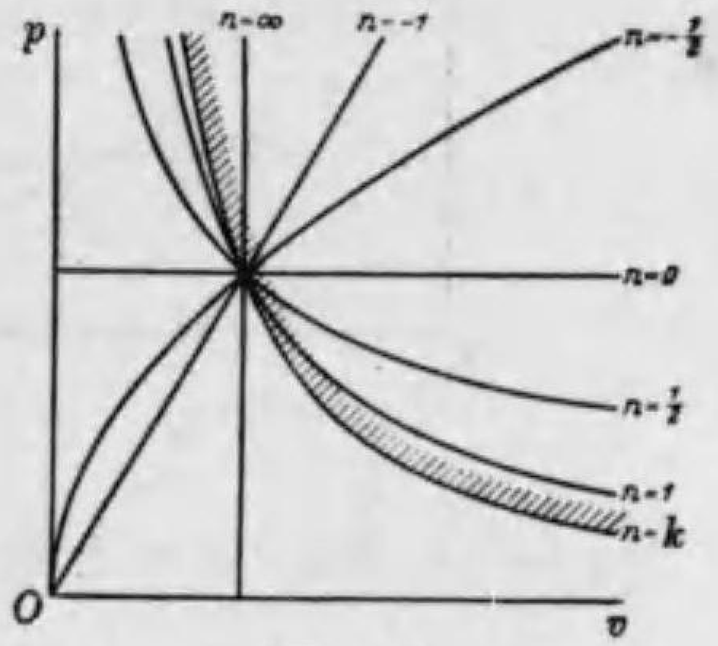


圖 -12

これ等の變化を圖 -12 に示す。

22. 指數の決定方法

實驗により得た曲線，例へば空氣壓縮機のインヂケータ線圖の壓縮曲線等を，$pv_n=$ 定數にあてはめれば取扱ひ上便利である。指數 n を求める方法を次に述べる。

1. 2點を用ひる方法

曲線の上に 2 點を選びその狀態を p_1, v_1 及び p_2, v_2 とすれば，

$$p_1 v_1^n = p_2 v_2^n$$

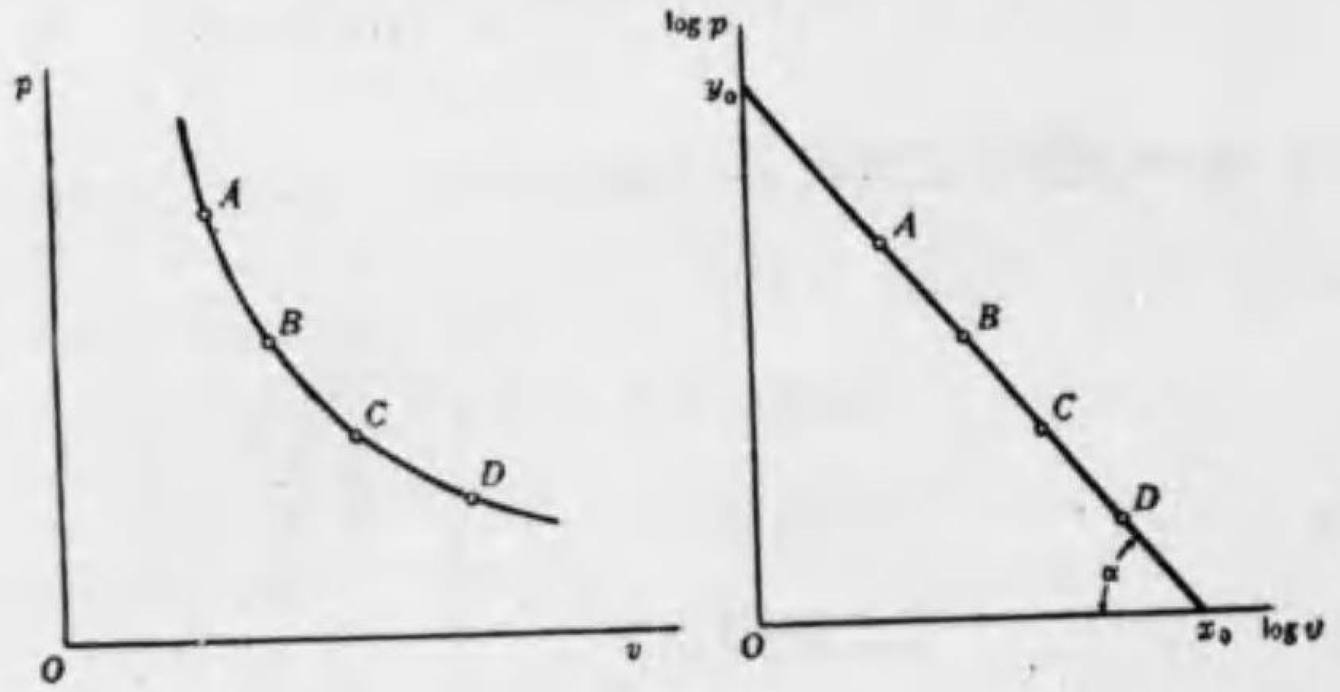
$$\therefore \quad n = \frac{\log p_2 - \log p_1}{\log v_1 - \log v_2} = \frac{\log \dfrac{p_2}{p_1}}{\log \dfrac{v_1}{v_2}} \quad \text{.........} \quad \textbf{(51)}$$

2. 多數の點を用ひる方法

ポリトロープ變化の式より

$$pv^n = \text{定數}$$

又は
$$\log p + n \log v = \log c = a = \text{定數}$$



a　　圖 -13　　b

$\log p = y$, $\log v = x$ とおくと，$y + nx = a$ となり，$\log p - \log v$ 平面に於てはポリトロープ曲線は直線となる。故に pv 線圖上の數點 A, B, C, D を $\log p - \log v$ 線圖上に寫すと，若し pv 曲線がポリトロープなれば $\log p - \log v$ 線は直線となり，指數 n は $\tan \alpha$ となる。

その證明は $y + nx = a$ に於て

$x = 0$　　$y = a = \overline{oy_0}$

$y = 0$　　$x = \dfrac{a}{n} = \overline{ox_0}$

$$\tan \alpha = \frac{\overline{oy_0}}{\overline{ox_0}} = \frac{a}{\dfrac{a}{n}} = n$$

例 7　空氣壓縮機のインヂケータ線圖より次の値を得たり。

壓縮初に於て，$p_1 = 1\,\text{at}$，$v = 0.0725\,\text{m}^3$

壓縮終に於て，$p_2 = 4.83\,\text{at}$，$v_2 = 0.0218\,\text{m}^3$

壓縮が $pv^n =$ 定數に從ふものとすれば，指數 n の値を求めよ。

解　$n = \dfrac{\log p_2 - \log p_1}{\log v_1 - \log v_2} = \dfrac{\log 4.83 - \log 1.0}{\log 0.0725 - \log 0.0218}$

$= 1.31$

例 8　10 at, 50° の空氣 1 kg が 1 at まで膨脹せる時，膨脹後の溫度，外部仕事，授受せる熱量，內部エネルギの變化を，等溫，斷熱，ポリトロープ變化 ($n = 1.2$) について求めよ。但ガス定數 $R = 29.27$，$k = 1.4$ とせよ。

解　$p_1 = 10 \times 10^4\,\text{kg/m}^2$　　$p_2 = 1 \times 10^4\,\text{kg/m}^2$

$T_1 = 273 + 50 = 323°\,\text{K}$

1. 等溫膨脹

$$v_2 = \frac{RT_2}{p_2} = \frac{29.27 \times 323}{1 \times 10^4} = 0.9454\,\text{m}^3$$

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{29.27 \times 323}{10 \times 10^4} = 0.09454\,\text{m}^3$$

$$\therefore \quad W = RT_1 \log \frac{v_2}{v_1}$$

$$= 29.27 \times 323 \log \frac{0.9454}{0.0945}$$

$$= 21869\,\text{kgm}$$

$$u_2 - u_1 = 0$$

$$Q = AW = \frac{21869}{427} = 51.2\,\text{kcal}$$

2. 斷熱膨脹

$$v_2 = v_1 \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{k}} = 0.09454 \times 10^{\frac{1}{1.4}} = 0.484\,\text{m}^3$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 323 \left(\frac{1}{10}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 165\,°\text{K}$$

$$t_2 = 165 - 273 = -108°$$

$$W = \frac{p_1 v_1}{k-1}\left[1 - \frac{T_2}{T_1}\right] = \frac{10 \times 10^4 \times 0.9454}{1.4 - 1}\left[1 - \frac{165}{323}\right] = 11279\,\text{kgm}$$

$$u_2 - u_1 = -AW = \frac{-11279}{427} = -26.4\,\text{kcal}$$

$$Q = 0$$

3. ポリトロープ膨脹

$$v_2=v_1\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{n}}=0.09454\left(\frac{10}{1}\right)^{\frac{1}{1.2}}=0.644\ \mathrm{m^3}$$

$$T_2=T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}=323\left(\frac{1}{10}\right)^{\frac{1.2-1}{1.2}}=220\ \mathrm{^\circ K}$$

$$t_2=220-273=-53^\circ$$

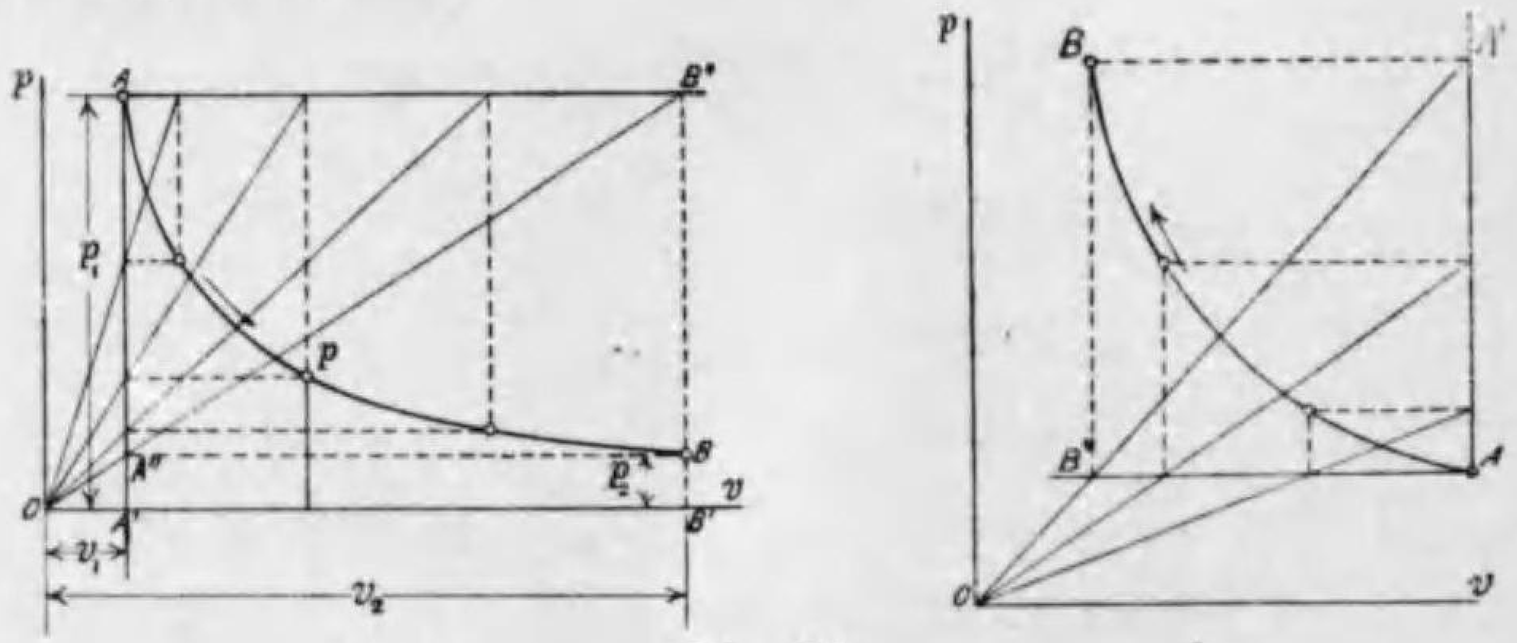
$$W=\frac{R\,(T_2-T_1)}{1-n}=\frac{29.27\,(220-323)}{1-1.2}=15074\ \mathrm{kgm}$$

$$AW=35.3\ \mathrm{kcal}$$

$$u_2-u_1=\frac{AR\,(T_2-T_1)}{k-1}=\frac{29.27\,(220-323)}{(1.4-1)\,427}=-17.2\ \mathrm{kcal}$$

$$Q=u_2-u_1+AW=-17.2+35.3=18.1\ \mathrm{kcal}$$

23. 等温曲線，斷熱曲線，ポリトロープ曲線の作圖法



a　　圖 -14　　b

1. 等温曲線の作圖法

A 點を初の狀態 (p_1, v_1) とす。A より水平線 AB'' と垂直線 AA' を引く。O より任意の放射線を引き，これと AB'', AA' との交點より更に垂直線と水平線を引くと，これらの線の交點は双曲線上にある。圖 -14 (a) は膨脹，(b) は壓縮を示す。

その證明は，圖 -14a に於て　$B'B'' : A'A''=OB' : OA'$

即ち　$p_1 : p_2=v_2 : v_1$

$\therefore\ p_1v_1=p_2v_2$

2. 斷熱曲線，ポリトロープ曲線の作圖法

ブラウアー (Brauer) の方法によれば，原點 O より v 軸に任意の角 α をなして直線を引き，又 p 軸と次の式にて與へられる β の角をなして直線を引く。

$$1+\tan\beta=(1+\tan\alpha)^k$$

A より出發して矢にて示す方向に千鳥形に作圖すれば順次に點を得る。α を大に取れば得る點の間隔は遠ざかる。

$$1+\tan\beta=(1+\tan\alpha)^n$$

として β を定めればポリトロープ變化の場合の作圖が出來る。

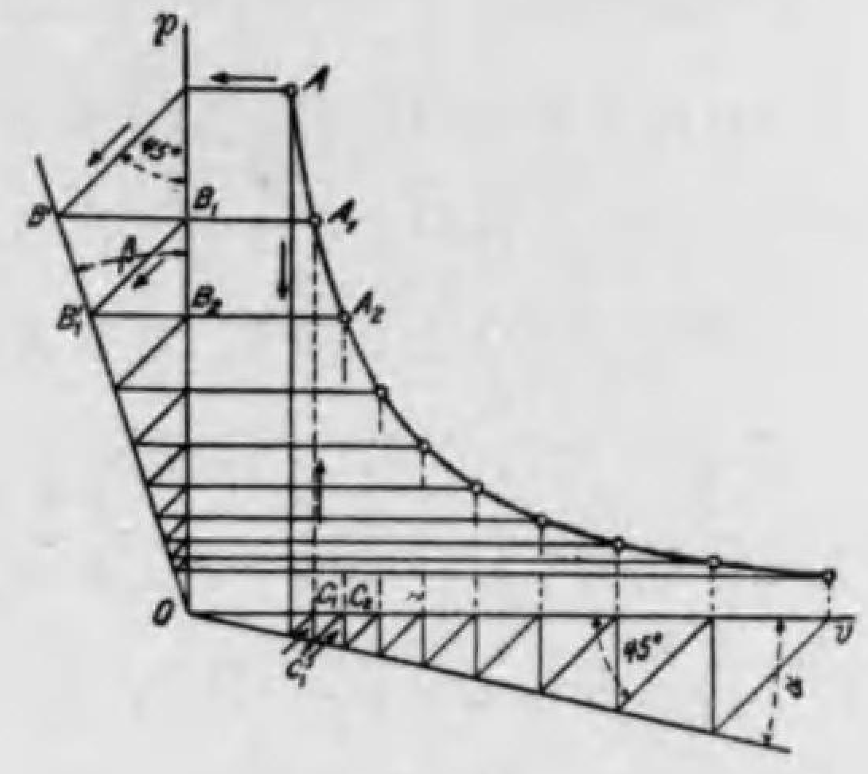


圖 -15

その證明は圖に於て

$$B_1B_2=B_1'B_2 \qquad C_1C_2=C_1C_1'$$

$$1+\tan\beta=1+\frac{B_1'B_2}{OB_2}$$

$$=1+\frac{B_1B_2}{OB_2}=\frac{OB_1}{OB_2}=\frac{p_1}{p_2}$$

$$1+\tan\alpha=1+\frac{C_1C_1'}{OC_1}=1+\frac{C_1C_2}{OC_1}=\frac{OC_2}{OC_1}=\frac{v_2}{v_1}$$

然るに　$1+\tan\beta=(1+\tan\alpha)^k$

$$\therefore\ \frac{p_1}{p_2}=\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^k$$

$$\therefore\ p_1v_1{}^k=p_2v_2{}^k$$

以下同樣に證明出來る。

24. 完全ガスのカルノーサイクル

動作流體 (working fluid)[1] がサイクルをなす時には，(13a) より

$$\oint dQ=A\oint dW$$

なる關係がある。即ち流體がサイクルに於て受取つた熱量を Q_1，棄てた熱量を Q_2 とすれば

$$AW=Q_1-Q_2$$

なる關係がある。次に受取つた熱量 Q_1 と，なした仕事 W との比

$$\eta=\frac{AW}{Q_1}=1-\frac{Q_2}{Q_1} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\ (52)$$

をサイクルの**熱効率** (thermal efficiency)[2] といふ。

1. Arbeitsflüssigkeit.　2. thermischer Wirkungsgrad.

各種熱機關サイクルの効率の大小を批判するに當つて，その標準となる最も効率の良い理想サイクルがある。このサイクルは 1824 年に佛人 Carnot により考へ出されたもので，2ヶの等溫變化と，2ヶの斷熱變化とより成り，**カルノーサイクル** (Carnot cycle)[1] といふ。

圖 -16 に於て S, R は**熱源** (Source of heat)[2], M は動作流體卽ちこゝでは例へば 1 kg の完全ガスであつて外部と熱絶縁された氣筒の中に入れらてゐる。溫度 T_1 の熱源 S, 溫度 T_2 の熱源 R は容量甚だ大にしてサイクル中，熱の出入にかゝはらず溫度不變と考へる。M の初の狀態を A とし，これより氣筒の底を S に通じつゝ溫度 T_1 の下に B まで等溫膨脹をする。B より氣筒の

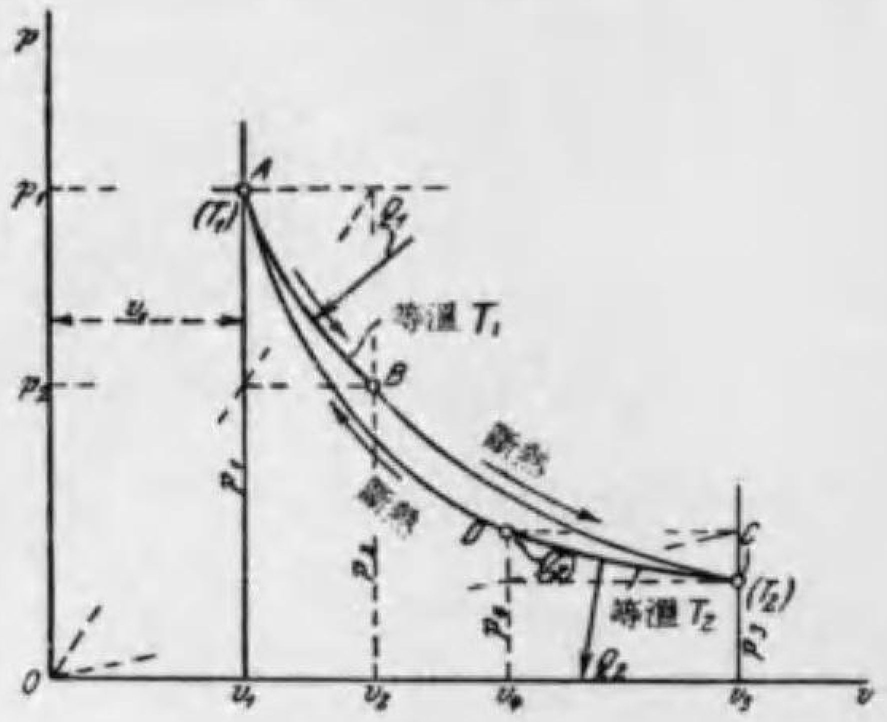


圖 -16

底を外部と熱絶縁し，C まで斷熱膨脹して溫度 T_2 となる。C より氣筩の底を R に通じつゝ溫度 T_2 の下に D まで斷熱壓縮される。D より氣筩の底を外部と熱絶縁し，D まで斷熱壓縮して溫度 T_1 となり，A に到りてサイクルを終る。

等溫膨脹 AB にて外部より吸收した熱量は

$$Q_1 = ART_1 \log \frac{v_2}{v_1}$$

等溫壓縮 CD に於て外部に放出した熱量は

$$Q_2 = ART_2 \log \frac{v_3}{v_4}$$

1. der Carnotsche Kreisprozeß.　2. Wärmebehälter, Wärmespeicher.

次に斷熱線 BC, AD より

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_2}{v_3}\right)^{k-1} \qquad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_4}\right)^{k-1}$$

$$\therefore \quad \frac{v_2}{v_3} = \frac{v_1}{v_4} \qquad \frac{v_2}{v_1} = \frac{v_3}{v_4}$$

從つて

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{ART_2}{ART_1} \frac{\log \frac{v_3}{v_4}}{\log \frac{v_2}{v_1}} = \frac{T_2}{T_1} \quad \text{............} \quad (53)$$

又仕事は

$$AW = Q_1 - Q_2 = Q_1\left(1 - \frac{Q_2}{Q_1}\right)$$

$$= Q_1\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)$$

カルノーサイクルの熱効率は (52) より

$$\eta = \frac{AW}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad \text{...............} \quad \mathbf{(52a)}$$

卽ちカルノーサイクルに於ては，熱効率は過程の行はるゝ溫度範圍 T_1, T_2 の比にのみ關する。

下限溫度 $t_2 = 20°$ 卽ち $T_2 = 293°\mathrm{K}$ なる時，種々な上限溫度 t_1 に對するカルノーサイクルの熱効率を下に記す。

$t_1 = 1200$	1000	800	600	400	200	100
$T_1 = 1473$	1273	1073	873	673	473	373
$\eta = 0.81$	0.77	0.73	0.66	0.56	0.38	0.21

溫度範圍の大なる程 η は大となる。

(53) より

$$\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = 0 \quad \text{....................} \quad (53a)$$

このサイクルに於ては，外部より吸收せる熱量を正，放出せる熱量を負とすれば，一般に次の如き關係がある。

$$\sum \frac{Q}{T}=0 \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \textbf{(53b)}$$

カルノーサイクルを逆に行ふと，外部より仕事 W を供給されて等溫過程 DC に於ては R より熱量 Q_2 を吸收し，等溫過程 BA に於ては S に熱量 Q_1 を放出する。

$$Q_1=Q_2+AW$$

卽ち低溫の物體より熱を取り，これを高溫の物體に送ることが出來る。**冷凍機** (Refrigerator)[1] はこの應用である。冷凍機の**成績係數** (coefficient of preformance)[2] は次の如く與へられる。

$$K=\frac{Q_2}{AW}=\frac{T_2}{T_1-T_2}$$

又この理を應用するものに**熱ポンプ** (heat pump)[3] がある。もし 427 kgmの 仕事を直接熱に變へると 1 kcal しか得られないが，熱ポンプを，例へば 0° と 90° の間に働せると，

$$\frac{AW}{Q_1}=\frac{T_1-T_2}{T_1}=\frac{90}{363}$$

$$\therefore\ Q_1=4.03\,AW$$

費した仕事の 4.03 倍の熱量が 90° に於て加熱に用ひることが出來る。

---

1. Kältemaschine.　2. Leistungsziffer.　3. Wärmepumpe.

問　　題 (II)

1. 次の計算をなせ

$(31.8)^{1.23}$,　　$(3.18)^{12.3}$,　　$(0.0318)^{0.123}$

2. 空氣のガス定數を英國單位にて求めよ。但標準狀態に於て空氣の比重は 0.08071 lb/ft³ とす。

3. 大氣の壓力 1 atm なる時，太さ一樣にして長さ 1 m なる有底圓筒を逆にして海底に鉛直に押込みたるに，海水のこの圓筒內に浸入したる高さは 80 cm である。然らば海底の深さ幾何なるか。但海水の比重は 1.02 とす。

4. 體積 2 m³ の容器に溫度 20°，壓力 5 at の空氣が充してある。空氣の壓力を 10 at にするには何度に溫めればよいか。又この際幾何の熱量を供給すべきか。

5. 前問に於て溫度 100° なる時，壓力 100 at 以下なるべき制限ある時は，幾何の空氣を容器に入れ得るか。

6. 空氣とガソリンの或混合物を高度に壓縮すれば 430° に於て自然發火をなす。最初溫度 100°，壓力 0.9 at なる時，混合物が自然發火をなさぬためには，斷熱的に幾何の壓力まで壓縮せられるか。但 $k=1.4$ とす。

7. ディーゼル機關 (Diesel engine)[1] に於ては，空氣は重油の引火點以上に斷熱的に壓縮される。最初溫度 100°，壓力 0.9 at にして壓縮後溫度が 850° なる時は隙間體積を氣筒體積に對し幾何にすべきか。又壓縮壓力は如何程か。但 $k=1.4$ とせよ。

8. チェッペリン (Zeppelin) 飛行船あり。その氣囊の容量 200000 m³ にして，これに水素又はヘリウムを充す。ガスの充塡は，4500 m の高さに於ける大氣壓 400 mm Hg，溫度 0° なる時，丁度膨らむ如くす。幾何の重さの水素又はヘリウムを充すべきか。地上の大氣を 700 mm Hg，溫度 20° とせば氣囊の幾部分がガスにて充されるか。又飛行船の重さは積荷を含んで幾何迄許されるか。

9. 蒸汽罐 (steam boiler)[2] の爐に於ける溫度を 1300°，給水の溫度を 20° とせば，この溫度範圍に於けるカルノーサイクルの効率を求めよ。
假に燃燒熱が全部罐內に吸收せられたりとせば，蒸汽溫度 190° なる時，カルノーサイクルにより，與へられたる熱の幾何を仕事に換へ得るか。但得られる最低溫度を 20° とす。

10. 等積變化及び等壓變化の間に出入したる熱量の式を求めよ。

---

1. Dieselmaschine.　2. Dampfkessel.

第三章　熱力學の第二法則，エントロピ

25. 熱力學の第二法則

熱力學の第一法則は仕事と熱量との間には一定の關係あることを示してゐるが，仕事を熱に變ずる時と，熱を仕事に變ずる時とは同じ容易さを以て行ひ得ぬことについては，何等論及してはゐない。

經驗によれば，仕事から熱を得ることは容易であるが，熱から仕事を得るには制限がある。軸頸が軸受の中で廻轉する時は摩擦の爲に熱を發するが，これ等を冷しても軸を回轉することは出來ない。これをなすためには熱機關を要する。かやうに仕事は容易に熱に變ずるが，熱は容易に仕事に變じ得ない。

熱の移動には一定の方向があつて，この場合に於てのみ熱は仕事に變り得る。**熱力學の第二法則** (second law of thermodynomics)[1] はこの關係を表はすもので，色々な形にいひ表してあるが，この所に於てはその內一，二を記すことにする。クラウジユース (Clausius) によれば，

熱はそれ自身では低溫度の物體から高溫度の物體へは移り得ない。

これは我々が平素經驗することであつて，高溫度の物體と低溫度の物體とを接觸すれば，高溫度の物體の溫度が下り，低溫度の物體の溫度が上り兩者の溫度が同一となる。卽ち熱は高溫度の物體より低溫度の物體に移る。若し逆に低溫度の物體より高溫度の物體に熱を移さうとすれば，冷凍機を要する。

1. der zweite Hauptsatz der Wärmelehre.

又熱力學の第二法則をケルビン (Kelvin) は次の如くいつてゐる。

熱機關の動作流體をして仕事をなさせるには，これより更に低溫度の物體を必要とする。

或物體の有してゐる熱を仕事に變ずるには，これより低溫度の物體と，動作流體とを要する。流體は先づ高溫度の物體より熱 Q_1 を得て，高溫高壓となつた後，熱機關中で膨脹して仕事をなし，低溫低壓となつてこれを去り，殘りの熱 Q_2 を低溫度の物體に與へる。卽ち熱を仕事にかへるには，必ず溫度の降下と低溫度に於ける熱の放出とを要し，從つて熱は一部，(Q_1-Q_2) のみ仕事に變じ得る。この法則によつて，**第二種の永久機關** (perpetual machine of the second type)[1]，卽ち熱を溫度の降下なくして，又他に何の變化をも及ぼすことなくして，機械的仕事にかへる運動の不可能であることがわかる。

26. 可逆變化及び非可逆變化

節 12，節 24 に於ては過程は逆に行ひ得るものと考へたが，この點について，も少し深く考へねばならない。

物體が A の狀態より B の狀態に變ずる時，他に少しの變化を殘すことなく，全く前の道筋を通り B の狀態より再び A の狀態に戾り得れば，その變化を**可逆變化** (Reversible change)[2] といひ，然らざるものを**非可逆變化** (irreversibie change)[3] といふ。變化が可逆なるためには，その變化中のすべての點に於て，動作流體の壓力と外部

1. Perpetuum mobile zweiter Art.　2. umkehrbare Zustandsänderung.
3. nicht umkehrbare Zustandsänderung.

からこれに加はる壓力とは同一で平衡を保つと同時に，熱交換に際して動作流體はこれと熱交換を行ふ物體と全く同一溫度にならなければならぬ。

非可逆變化の內次のものは重要である。

1. 摩　　擦[1]

推進器で水をかき廻すと，摩擦によつて水が溫まるが，水を冷却しても推進器を逆轉することは出來ない。これをなすためには外的手段を要する。

2. 熱　傳　導[2]

高溫度の物體と低溫度の物體を接觸すると，熱は高溫度の物體より低溫度の物體へ移るが，この逆過程は冷凍機を用ひなければ行はれぬ。

3. 絞り作用[3]

流體が高壓部より低壓部に流れ口を通じて流れる時，例へば蒸汽が減壓弁を通り，冷凍機に於てアムモニアガスが膨脹弁を通る時，流體は低壓部より高壓部には流れない。これをなすためには壓縮機を要する。

自然界の現象で摩擦，熱傳導を伴はないものはないので，嚴密にいへば可逆過程はないが，次の2過程は限界狀態に於ては可逆過程と見なし得る。

1. 流體の壓縮と膨脹

流體をピストンを有する氣筒中に閉ぢ込めて，その時の流體の壓

1. Reibung.　2. Wärmeleltung.　3. Drosselung.

力を p，外壓を $p+\partial p$ とする。∂p を正とすれば流體は壓縮され，負とすれば流體は膨脹する。∂p は極少に出來るから，極徐々に行ふ膨脹，壓縮は可逆過程と見られる。

2. 物體間の熱傳導

物體 A の溫度を t，物體 B の溫度を $t+\partial t$ とする。この2物體を接觸する時，∂t を正とすれば熱は B より A に流れ，負とすれば熱は A より B に流れる。∂t は極少に出來るから，極緩慢な熱傳導は可逆過程と見られる。

27. 任意の流體を使用するカルノーサイクル

節24に於て完全ガスを使用するカルノーサイクルについて述べたが，使用する動作流體が任意なる時のカルノーサイクルを述べることにする。圖 -16 に於て，サイクル中の膨脹，壓縮過程に於ては，ピストンの兩側の壓力差を極く少にして極く徐々に行ひ，熱を取捨する際には取捨する物體と同じ溫度に於て行ひ，摩擦もないとすれば，カルノーサイクルは可逆サイクルである。故にカルノーサイクルは逆にして冷凍サイクルも行ふことが出來る。カルノーサイクルで働く可逆機關を**カルノー機關**と呼ぶ。

カルノーサイクルの効率は使用する流體によりて異なるか否かを調べるために，2溫度 T_1，T_2 の間に働き，異なる流體を使用する2つのカルノー機關を考へる。例へば圖 -17 に於て A を蒸汽を動作流體とする機關，B をガスを動作流體とする機關とする。高溫體より A は Q_1，B は Q_1' を受け，低溫體に A は Q_2，B は Q_2' を捨てゝ兩者は同一量の仕事 AW をなすものとすれば，

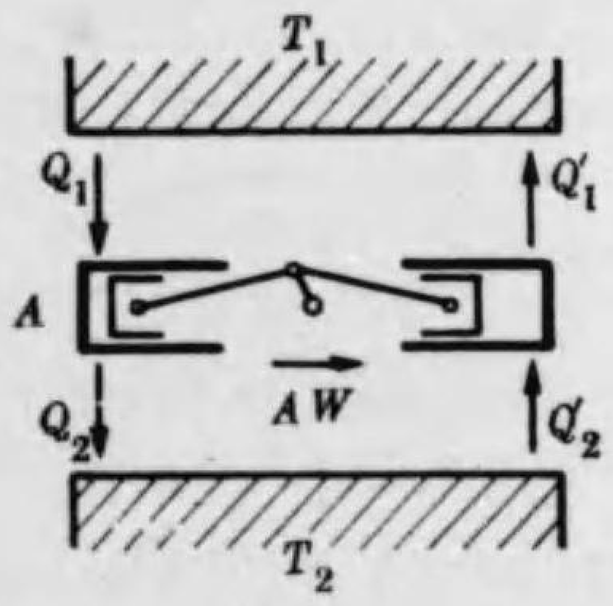


圖 -17

A に於ては

$$AW=Q_1-Q_2$$

B に於ては

$$AW=Q_1'-Q_2'$$

$$\therefore\ Q_1-Q_2=Q_1'-Q_2'$$

今 $Q_1'>Q_1$，從つて $Q_2'>Q_2$ と考へ，B を冷凍機として A で運轉すると，A より出る仕事と B の消費する仕事は等しいから，運動は永久に續くことゝなる。然るに高溫體に於ては $(Q_1'-Q_1)$ だけ熱量が増し，低溫體に於

ては $(Q_2'-Q_2)$ だけ熱量が減ずる。即ち 1 サイクルに於てエネルギの消費なしに低温體より高温體に熱量が移動する。これは熱力學の第二法則に反する。

次に $Q_1>Q_1'$，從つて $Q_2>Q_2'$ と考へ，A を冷凍機として B で運轉すると，全體としてエネルギの消費なしに $Q_1-Q_1'=Q_2-Q_2'$ の熱量が低温體より高温體に移動する。これも熱力學の第二法則に反するから，

$$Q_1=Q_1',\quad Q_2=Q_2'$$

でなければならぬ。即ち

$$\frac{Q_2}{Q_1}=\frac{Q_2'}{Q_1'}$$

これと (52a) より

$$\eta=1-\frac{Q_2}{Q_1}=1-\frac{Q_2'}{Q_1'}=1-\frac{T_2}{T_1} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (52b)$$

これより**カルノーサイクルの効率は動作流體の種類に關はらず一定で，高温體低温體の温度のみに關する。**この際にも完全ガスを使用する際の如く，次の關係がある。

$$\Sigma\frac{Q}{T}=0 \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (53b)$$

28. 可逆機關の効率

2 温度間に働く機關のサイクルには多くの可逆及び非可逆サイクルがある。これ等の機關の効率とカルノー機關の効率とを次に比較して見る。

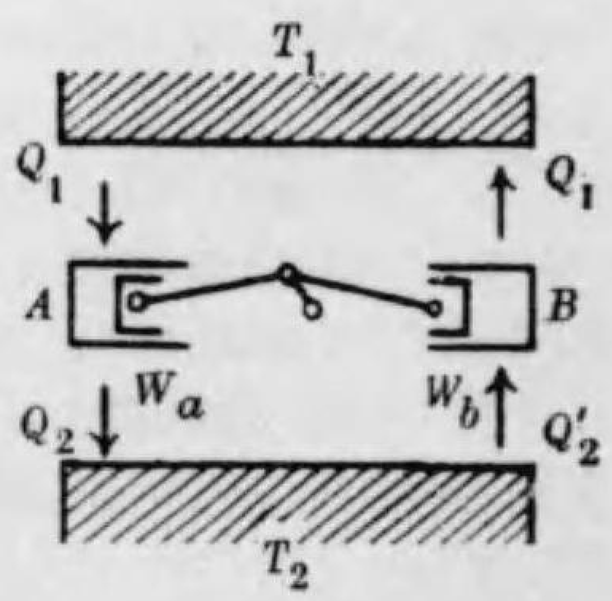


圖 -18

今 A を任意の機關，B をカルノー機關とし，同じ温度範圍 T_1，T_2 間に働くものとする。若し機關 A の効率がカルノー機關 B に勝るものとすれば，A は高温體より熱量 Q_1 を受け，仕事 W_a をなし，低温體に熱量 Q_2 を捨てる。B は高温體より熱量 Q_1 を受け，仕事 W_b をなし低温體に熱量 Q_2' を捨てる。この際には次の關係がある。

$$W_a>W_b \qquad Q_2<Q_2'$$

B は可逆機關であるから，A によつて B を逆回しする場合を考へる。この際 A は $W_a=Q_1-Q_2$ の仕事をなし，この内 $W_b=Q_1-Q_2'$ に相當する仕事を B に供給し，低温體より Q_2' を取り高温體に Q_1 を捨てさせる。然る時は高温體より出入する熱量は零，低温體より出る熱量は $Q_2'-Q_2$，このために餘分の仕事 W_a-W_b がなされることゝなる。これは低温體の有する熱を用ひて仕事をすることになるから熱力學の第二法則に反する。故に機關 A の効率は機關 B の効率より小である。

同様に機關 A が可逆機關であればその効率は機關 B の効率より小でないことが證明出來る故に同温度間に働く可逆機關は總て同一の効率を有する。

節 27 と節 28 とより次の結論を得る。**同じ温度範圍の間に働く可逆機關は同じ効率を有し，効率は動作流體の性質に關係はなく，只高温體の温度と低温體の温度のみに關する。如何なる機關の効率も，同温度範圍に働く可逆機關の効率よりも小である。**

29. 熱力學的温度目盛

水銀寒暖計は水銀の温度による膨脹を利用したもので，その目盛は同一の温度上昇に對し同一の膨脹を生ずるやうにしてある。度量衡法では完全ガス寒暖計を使用することになつてゐるが，その温度目盛は同一の温度上昇に對し，完全ガスが同一の壓力變化を生ずるやうにしてある。かやうに寒暖計は物體が有する性質を利用したものであるから，異なる物體を使用する寒暖計に於ては，2 定點即ち 0°C と 100°C とでは一致しても，その間の温度では一致しない。温度は物體の性質に無關係でなくてはならぬから，カルノーサイクルを利用して温度の目盛をする。

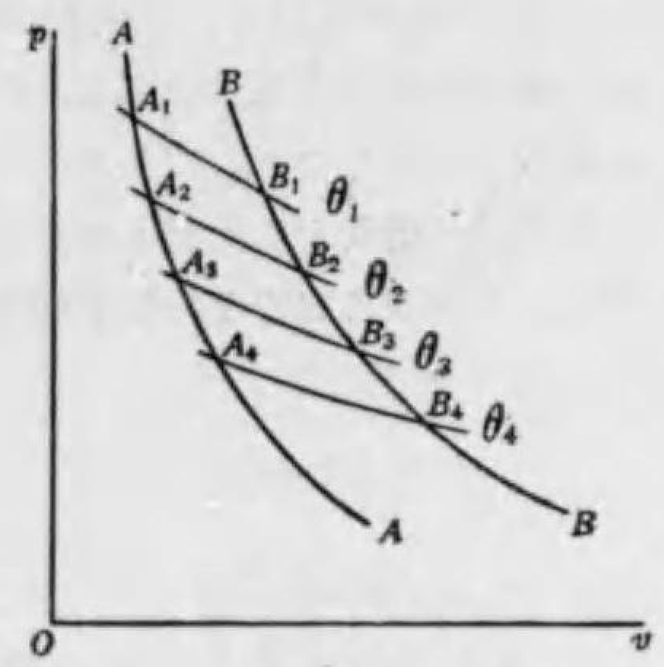


圖 -19

これを**熱力學的温度目盛** (themodynamic temperature scale)[1] 又は**ケルビンの温度目盛**といひ，°K と記す。その目盛方法は次の如くなす。

圖 -19 に於て AA 及び BB を任意の 2 つの斷熱線，A_1B_1，A_2B_2，A_3B_3 等を夫々温度 θ_1，θ_2，θ_3 等の等温線とし，等温線に沿ふて出入する熱量を Q_1，Q_2，Q_3 等とする。温度 θ_1，θ_2，θ_3 の間隔を適當に選び，面積 $A_1B_1B_2A_2$，$A_2B_2B_3A_3$，$A_3B_3B_4A_4$ 等を等しくすると，カルノーサイクル $A_1B_1B_2A_2$，$A_2B_2B_3A_3$，$A_3B_3B_4A_4$ 等の仕事は等しくなり，

$$Q_1-Q_2=Q_2-Q_3=Q_3-Q_4=\cdots\cdots\cdots\cdots=AW$$

となる。かやうにカルノーサイクル中の仕事が同一になるやうに温度の目盛をする時は，物體の性質には無關係な温度となる。目盛を普通の寒暖計の如く純粹の水の氷點と沸騰點との間に 100 個の目盛を作るには，氷點及び沸騰點の温度に對する等温線を引き，その間に 99 個の等温線を引き，これで目盛を作ればよい。

次に上記の方法による最低温度を θ_n，その等温線を A_nB_n とし，これに沿うて放出される熱量を Q_n とすると

---

1. thermodynamische Temperaturskala.

$$Q_1 - Q_2 = AW,$$
$$Q_1 - Q_3 = (Q_1 - Q_2) + (Q_2 - Q_3) = 2AW,$$
$$Q_1 - Q_4 = 3AW$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$
$$Q_1 - Q_n = (n-1)\,AW$$

カルノーサイクルの仕事は溫度差 $(\theta_1 - \theta_2)$ に比例するから

$$AW = f(\theta_1 - \theta_2) = \frac{1}{n-1} f(\theta_1 - \theta_n)$$

從つて θ_1, θ_n 間に働くカルノーサイクルの効率は

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_n}{Q_1} = \frac{(n-1)\,AW}{Q_1} = \frac{(n-1)\dfrac{1}{n-1} f(\theta_1 - \theta_n)}{Q_1}$$
$$= C(\theta_1 - \theta_n) \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (54)$$

但 C は θ_n には無關係の量である。

(54) は基準溫度 θ_n の如何に關はらず成立するから供給された熱量 Q_1 が全部仕事に變り得る溫度を基準點に取り，これを零度とする。然る時は効率 η は 1 となり，これ以下の溫度は存在しない。若しかやうな溫度があるならば，効率は 1 より大となつて，供給された熱量に相當する仕事よりも多くの仕事がなされることゝなり，熱力學の第一法則に反する。かやうに定義された零度は自然界に存在し得る最低溫度で，絕對零度である。(54) に於て $\theta_n = 0$ とおけば

$$1 = C\theta_1 \qquad \therefore\ C = \frac{1}{\theta_1}$$

故に θ_1, θ_n 間に働くカルノーサイクルの効率 η は

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = C(\theta_1 - \theta_2) = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\theta_1} = 1 - \frac{\theta_2}{\theta_1} \qquad \cdots\cdots (55)$$

故に

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\theta_1}{\theta_2} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (56)$$

これより，**カルノー機關が高溫體より吸收する熱量と，低溫體に捨てる熱量との比は，その兩物體の絕對溫度に正比例する。** 完全ガスを動作流體とするカルノーサイクルの効率 (52a) 及び (55) より

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{T_1}{T_2} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (57)$$

即ち**完全ガス寒暖計の絕對溫度と，熱力學的絕對溫度とは互に比例する。** 故に同一の大いさの目盛にすればすべての溫度に於て示度が一致する。熱力學では絕對溫度 θ を用ひるのが正しいが，完全ガスの絕對溫度 T は數字では全く θ と等しいから，一般には T を用ひることゝする。實際には完全ガスは存在しないが，水素は最もこれに近い性質を持つてゐるから水素寒暖計を標準寒暖計として用ひる。

30. エントロピ

圖 -20 のサイクルを一般可逆サイクルとし，熱の授受は溫度の變化の間に行はれる。このサイクルを無數の斷熱線で小サイクルに分つと，各サイクルに於ける熱の授受は一定溫度に於て起ると考へられる。換言すれば無數の小カルノーサイクルの集合よりなると見なされる。カルノーサイクル I の熱の授受は夫々 T_2, T_1 の下に行はれ，その熱量は dQ_2, dQ_1 である。カルノーサイクル II の熱の授受は夫々 T_2', T_1' の下に行はれその熱量は dQ_2', dQ_1' である。以下同樣とすれば，(53b) により次式を得る。

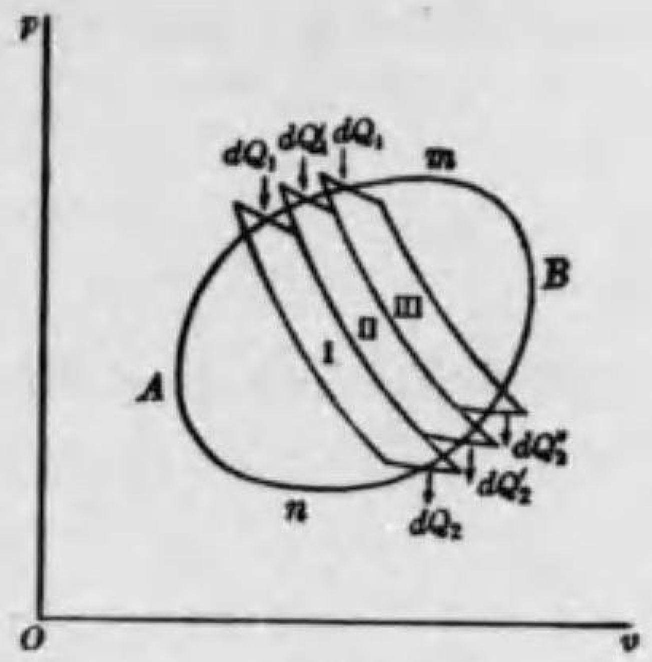


圖 -20

$$\frac{dQ_1}{T_1} - \frac{dQ_2}{T_2} = 0$$
$$\frac{dQ_1'}{T_1'} - \frac{dQ_2'}{T_2'} = 0$$
$$\frac{dQ_1''}{T_1''} - \frac{dQ_2''}{T_2''} = 0$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots$$

全サイクルについてはこれ等を加へれば，

$$\sum \frac{dQ_1}{T_1} - \sum \frac{dQ_2}{T_2} = 0$$

熱の授受に於て正を熱を吸收する時，負を熱を放出する時とせば

$$\sum \frac{dQ}{T} = 0$$

又は積分形で書くと，

$$\oint \frac{dQ}{T}=0 \qquad \text{(58)}$$

卽ち**可逆サイクルに於てはエントロピの增減はない。**

又

$$ds=\frac{dQ}{T},\quad s=\int\frac{dQ}{T} \qquad \text{(59)}$$

とすると，この s を**エントロピ** (entropy)[1] といふ。(7a) より

$$ds=\frac{du+Apdv}{T} \qquad \text{(59a)}$$

エントロピのヂメンションは kcal/°K kg である。次に 圖 -20 に於て可逆サイクル $AmBn$ を考へる。(58), (59) より

$$\oint ds=\int_{\substack{A\\m}}^{B}ds+\int_{\substack{B\\n}}^{A}ds=0$$

然るに過程 BnA は可逆なる故に，逆過程とすれば

$$\int_{\substack{A\\m}}^{B}ds-\int_{\substack{A\\n}}^{B}ds=0$$

$$\therefore\ \int_{\substack{A\\m}}^{B}ds=\int_{\substack{A\\n}}^{B}ds \qquad \text{(60)}$$

卽ち ds を AB 間に積分する時には，如何なる道筋によりても同じ結果を得る。これによりて 2 狀態間のエントロピの變化は，その初及び終の狀態のみによつて決定され，基準狀態が定まるとエントロピの値は現在の狀態のみによつて與へられる。

1. Entropie.

31. 非可逆過程に於けるエントロピ

主なる非可逆過程についてエントロピの變化を考へやう。

1. 摩　　擦

流體例へばガスが膨脹する際，摩擦抵抗があると，外部仕事をなすと同時に，抵抗に打勝つためにエネルギを消費し，これが熱になつてガスのエントロピを增加する。ガスが少しく膨脹する時，摩擦により生じた熱量を ΔH，ガスの溫度を T とせばエントロピの增加は

$$\Delta s=\frac{\Delta H}{T}$$

2. 熱　傳　導

小量の熱量 ΔQ が溫度 T_1 なる高溫體より溫度 T_2 なる低溫體に流れる時には，高溫體に於けるエントロピの減少は

$$\Delta s_1=\frac{\Delta Q}{T_1}$$

低溫體に於けるエントロピの增加は

$$\Delta s_2=\frac{\Delta Q}{T_2}$$

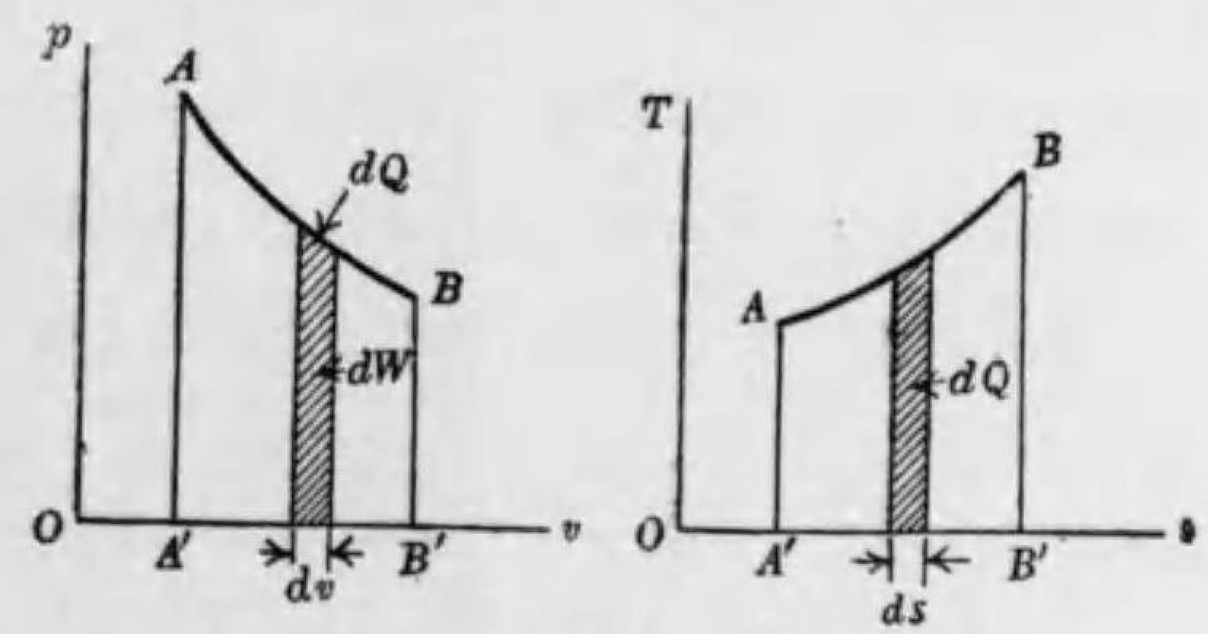
エントロピの變化は　$\Delta s=\Delta s_2-\Delta s_1$

然るに $T_1>T_2$，$\Delta s_1<\Delta s_2$ であるから，エントロピは Δs だけ增すことになる。

かやうに**非可逆過程に於ては，エントロピは常に增加する。**自然現象は必ず非可逆過程を伴ふから，自然界に於けるエントロピは常に最大値を取らんとする。

32. エントロピ線圖

エントロピは p, v, T と同様に物體の現在の狀態のみによつて定まるから，狀態を示す線圖の坐標の一に用ひることが出來る。ベルペア (Belpaire) は 1874 年に，縱軸を絕對溫度 T，橫軸をエ



(a)　圖 -21　(b)

ントロピ s として引いた**エントロピ線圖** (entropy diagram)[1] を紹介してゐる。インヂケータ線圖の場合には狀態變化の間に出入した熱量は圖中には表はれて來ないが，エントロピ線圖では明かにそれが表はれる。圖 -21 に於て陰を付けた面積は Tds であつて，(59) より

$$Tds = dQ$$

なる關係があるから，これは熱量 dQ を示す。故に狀態變化 AB に於て加へた熱量は，これを初の狀態より終りの狀態迄積分すればよい。

$$Q=\int_A^B dQ=\int_{s_1}^{s_2} Tds = \text{面積 } ABB'A' \quad \text{.........} \quad (61)$$

次にカルノーサイクルを**溫度—エントロピ**又は $T-S$ **線圖** (temperature-entropy diagram)[2] で表はすと，圖 -22 となる。等溫變化は AB, CD の如く水平線となり，斷熱線は垂直線となる。その理由は斷熱變化に於ては $dQ=0$ であつて

$$Tds = 0 \qquad \therefore \quad ds = 0$$

$$\therefore \quad s = \text{定數}$$

だからである。斷熱變化をこれより**等エントロピ變化** (isentropic change)[3] とも呼ぶ。

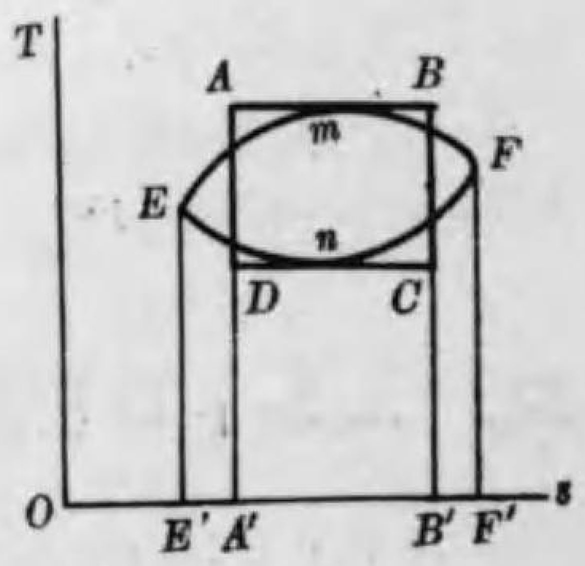


圖 -22

面積 $ABB'A'$ は等溫變化 AB 中に加へられた熱量，面積 $DCB'A'$ は等溫變化 CD 中に捨てられた熱量，又面積 $ABCD$ はサイクル中の仕事である。サイクルの效率は次の如く與へられる。

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{\text{面積 } ABCD}{\text{面積 } ABB'A'} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

1. Entropiediagramm. 2. T, S—Diagramm. 3. Isentrope.

い摩擦のあるガスの斷熱膨脹では，摩擦に打ち勝つために消費された仕事が熱になり，これがガスを溫めてエントロピを增加する。圖 -23 に於て面積 $ABB'A'$ は摩擦に打勝つために消費した仕事に相當する熱量で，$A'B'$ はエントロピの增加である。

圖 -23

今圖 -22 の如くカルノーサイクルと，それと同じ溫度範圍に働く他の任意の可逆サイクルを考へ，兩者のなす仕事は等しいものとす。然る時は捨てる熱量については，面積 $DCB'A'$ < 面積 $EnFF'E'$，吸收する熱量については面積 $ABB'A'$ < 面積 $EmFF'E'$ なる關係がある故，カルノーサイクルに勝る效率を有する他の可逆サイクル及び非可逆サイクルはない。カルノーサイクルはかくして熱量を仕事に變へる最良の方法である。

33. ガス及びその他の物體のエントロピ

1. ガスのエントロピ

(59a) を完全ガスの場合に適用すれば

$$ds = \frac{c_v dT + Apdv}{T} \quad \text{...............} \quad (59b)$$

ガスの特性式 (31) を用ひて，(59b) より p を消去すれば

$$ds = c_v \frac{dT}{T} + AR \frac{dv}{v} \quad \text{...............} \quad (62)$$

c_v 一定として積分すれば

$$s = c_v \log T + AR \log v + s_1 \quad \text{............} \quad (63)$$

s_1 は積分定數である。 同様にして T 又は v を含まぬエントロピの式も得られる。

$$s = c_p \log T - AR \log p + s_2 \quad \text{............ (64)}$$

$$s = c_v \log p + c_p \log v + s_3 \quad \text{............... (65)}$$

2. 任意の物體のエントロピ

任意の物體に於ては (59a) によりて計算する。

$$ds = \frac{du + Apdv}{T} \quad \text{............... (59a)}$$

固體又は液體に於ては，甚しい高壓の下を除いては膨脹係數が小さいから，外部仕事 $Apdv$ を du に對して省略することが出來る。 然る時には Q と u と i と等しくなるので，比熱を一般に c と記すと

$$ds = \frac{du}{T} = c\frac{dT}{T} \quad \text{.................. (59c)}$$

又は

$$s = \int_0^T c\frac{dT}{T} + s_o \quad \text{..................... (66)}$$

s_o は積分定數である。

例 9 氣温 20° なる時，−5° の氷 100 kg が融けて 20° の水になる。 氷の融解熱は 79.7 kcal/kg で，比熱は 0.485 kcal/°C kg である。 この變化に於てエントロピの増加は幾何か。

解 ．氷を融かすためには次の熱量を要す。

$$Q = G\{c(t_2 - t_1) + q_s + c'(t_3 - t_2)\}$$
$$= 100\{0.485(0+5) + 79.7 + 1(20-0)\}$$
$$= 10210 \text{ kcal}$$

この熱量を周圍より 20° にて奪ふ故にエントロピの減少は

$$S_1 = \frac{Q}{T_3} = \frac{10210}{293} = 34.9 \text{ kcal/°K}$$

氷が水となる際のエントロピの増加は

$$s_2 = \int\frac{dQ}{T} = G\left(c \log\frac{T_2}{T_1} + \frac{q_s}{T_2} + c' \log\frac{T_3}{T_2}\right)$$
$$= 100\left(0.485 \log\frac{273}{268} + \frac{79.7}{273} + 1.\log\frac{293}{273}\right)$$
$$= 37.2 \text{ kcal/°K}$$

故にこの過程のエントロピの變化は

$$s = s_2 - s_1 = 37.2 - 34.9$$
$$= 2.3 \text{ kcal/°K}$$

問　　題 (III)

1. 汽罐室に於て，温度 300° に於て毎時 500000 kcal の熱量が得られる。カルノー機關を用ひる時は，冷却水の温度を 20° とすると，この熱量より幾 kW の動力が得られるか。又冷却水に幾何の熱量が捨てられるか。このサイクルを $T-S$ 線圖にて示せ。
2. 氣温 20° なる時，温度 −15° の冷藏庫内に毎時 30000 kcal の熱量が傳はる。 然る時は冷藏庫の温度を −15° に保つために冷凍機に幾何の動力を要するか。但冷却水の温度を 20° とせよ。 冷却水の温度上昇を 7° 許すものとすれば，毎時幾何の冷却水を要するか。
3. 10° の水 20 kg と 85° の水 30 kg とを混ぜる時，得られる最低温度を 10° とせば，エントロピの變化は幾何か。
4. 壓力 3.5 at，體積 0.45 m³ を有する空氣 1.8 kg が，pv^n=定數に從ひ 1 at，1.15 m³ まで膨脹する。然る時はエントロピの變化，授受したる熱量を求めよ。

第四章　空　氣　機　械

34.　空氣壓縮機

空氣壓縮機 (air compressor)[1] は高壓の**壓縮空氣** (compressed air)[2] を作るのに用ひられる。壓縮空氣の用途は空氣機關，空氣工具類を働かせ，ディーゼル機關氣筒に於ける燃料の噴射を始とし，鑛山諸機械，車輛の制動機を動かす等甚だ多い。

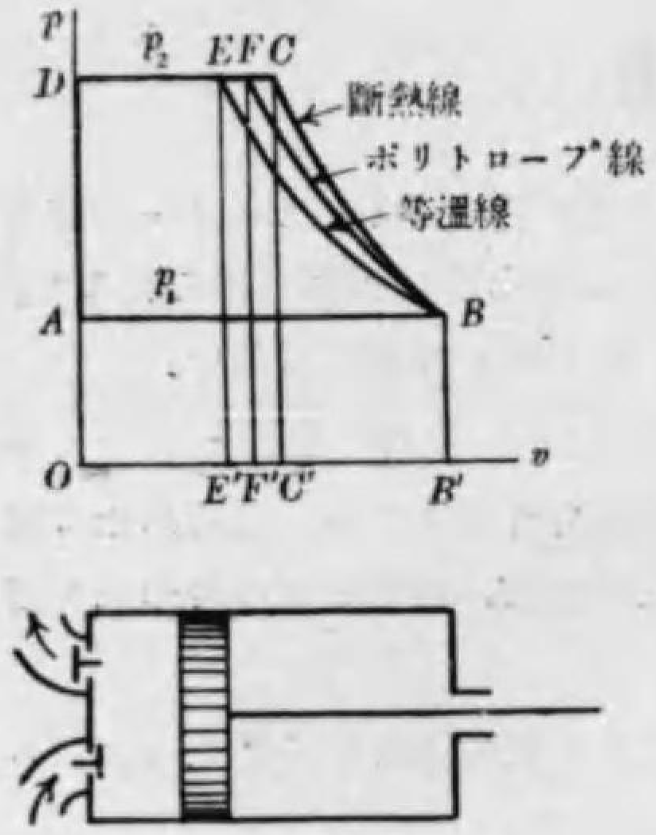


圖 -24

空氣壓縮機のサイクルを圖 -24 に示す。一定壓力線 AB は吸入行程で，ピストンの運動と共に氣筒內の壓力が DA と下り，吸込弁が開くから外部より空氣が吸入される。復行程に於て，曲線 BC は壓縮過程で吸込弁は閉ぢて空氣は氣筒內で壓縮せられる。一定壓力線 CD は排出過程で，氣筒內の空氣の壓力が高いから排出弁を押開いて外に流出する。かくしてサイクルを終る。

空氣がピストンの1側にのみ流入するものは**單動** (single acting)[3] であり，ピストンの兩側に交互に流入するものは**複動** (double acting)[4] であつて，ピストンの1側が吸入行程にある時他側は壓縮，排出行程にある。1氣筒のみに於て壓縮を完了するものを**一段壓縮

1. Luftverdichter, Luftkompressor.　2. Preßluft, Druckluft.
3. einfachwirkend.　4. doppeltwirkend.

機** (single-stage compressor)[1]，相續く數ヶの氣筒を經て壓縮を完了するものを**多段壓縮機** (multi-stage compressor)[2] といふ。

一段壓縮機に於ては，初の狀態を p_1, v_1, 壓縮終の狀態を p_2, v_2 とすれば，サイクルに要する仕事は次の如くなる。

但計算を簡單にするために，節 20 の式を絕對値を求めるやうに用ふ。

1.　等溫壓縮の場合

$p_1v_1=p_2v_2$ なる關係ある故に，

$$W=\text{面積}\ ABED$$
$$=\text{面積}\ DEE'O+\text{面積}\ EBB'E'-\text{面積}\ ABB'O$$
$$=p_2v_2+p_1v_1\log\frac{p_2}{p_1}-p_1v_1=p_1v_1\log\frac{p_2}{p_1}\quad\text{.........}\ (67)$$

(67) に於て $v_1=1$ とおいたものを W_1 とせば，これは吸入空氣 1m³ についての仕事を與へる。

$$W_1=p_1\log\frac{p_2}{p_1}\quad\text{..................}\ (67\text{a})$$

(67) に於て $p_1v_1=p_2v_2$ とし，$v_2=1$ とおいたものを W_1' とせば，これは壓縮空氣 1m³ についての仕事を與へる。

$$W_1'=p_2\log\frac{p_2}{p_1}\quad\text{.....................}\ (67\text{b})$$

2.　斷熱壓縮の場合

$$W=\text{面積}\ ABCD$$
$$=\text{面積}\ DCC'O+\text{面積}\ CBB'C'-\text{面積}\ ABB'O$$

1. einstufiger Verdichter.　2. mehrstufiger Verdichter.

$$=p_2v_2+\frac{1}{k-1}(p_2v_2-p_1v_1)-p_1v_1$$

$$=\frac{k}{k-1}(p_2v_2-p_1v_1) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (68)$$

毎サイクルに要する仕事は断熱壓縮の仕事の k 倍である。

又は

$$W=\frac{k}{k-1}p_1v_1\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}-1\right] \quad \cdots\cdots\cdots \quad (68a)$$

吸入空氣 $1\,m^3$ についての仕事は

$$W_1=\frac{k}{k-1}p_1\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}-1\right] \quad \cdots\cdots\cdots \quad (68b)$$

(68a) より壓縮空氣 $1\,m^3$ についての仕事を求むれば

$$W_1'=\frac{k}{k-1}p_2\left[1-\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right] \quad \cdots\cdots\cdots \quad (68c)$$

斷熱壓縮に於て，壓縮空氣を吸入溫度まで冷却すれば，その體積は $\frac{T_1}{T_2}$ 倍に減じ，從つて吸入溫度に於ける壓縮空氣 $1\,m^3$ についての仕事は $\frac{T_2}{T_1}=\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$ 倍に増し，次の如く與へられる。

$$W_1''=\frac{k}{k-1}p_2\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}-1\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (68d)$$

3. ポリトロープ壓縮の場合

ポリトロープ壓縮の場合には，斷熱壓縮に對する式に於て k の代りに n とおけばよい。

$$W=\text{面積}\ ABFD=\frac{n}{n-1}p_1v_1\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}-1\right] \cdots \quad (69)$$

吸入空氣 $1\,m^3$ についての仕事は

$$W_1=\frac{n}{n-1}p_1\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}-1\right] \quad \cdots\cdots\cdots \quad (69a)$$

壓縮空氣 $1\,m^3$ についての仕事は

$$W_1'=\frac{n}{n-1}p_2\left[1-\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right] \quad \cdots\cdots\cdots \quad (69b)$$

吸入溫度に於ける壓縮空氣 $1\,m^3$ についての仕事は

$$W_1''=\frac{n}{n-1}p_2\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}-1\right] \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (69c)$$

一般に壓縮機を運轉するに要する馬力は次の如くなる。

$$N=\frac{W n'}{60\times 75} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (70)$$

但　n'＝毎分のサイクル數

＝毎分の回轉數（單動）

＝毎分の回轉數の 2 倍（複動）

單位體積當りの仕事 W_1 を用ひれば，馬力は次の如く與へられる。

$$N=\frac{W_1\ V}{60\times 60\times 75} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (70a)$$

但　V＝1 時間に壓縮する空氣量

例 10. 壓力 4 atü，外氣の溫度に於ける壓縮空氣を毎時 100 m^3 得るには，何馬力を要するか。但氣壓は 1.033 at とす。等溫，斷熱，n=1.22 のポリトロープ壓縮を行ふ場合について求めよ。

解　1. 等溫壓縮

$$W_1'=p_2\log\frac{p_2}{p_1}=(4+1.033)\times 10000\times\log\frac{4+1.033}{1.033}$$

$$=79712\ \mathrm{kgm/m^3}$$

$$N=\frac{W_1'\ V}{60\times 60\times 75}=\frac{79712\times 100}{60\times 60\times 75}=29.5\ PS$$

毎時取去るべき熱量

$$Q=\frac{W_1'V}{J}=\frac{79712\times 100}{427}=18660\ \mathrm{kcal}$$

2. 斷熱壓縮

$$W_1''=\frac{k}{k-1}p_2\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}-1\right]$$

$$=\frac{1.4}{1.4-1}(4+1.033)\times10000\times\left[\frac{5.033}{1.033}\right)^{\frac{0.4}{1.4}}-1\Bigg]$$

$$=101300\ \mathrm{kgm/m^3}$$

$$N=\frac{W_1''\ V}{60\times60\times75}=\frac{101300\times100}{60\times60\times75}=37.5\ PS$$

壓縮機より出る空氣の溫度は

$$T_2=T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}=T_1\left(\frac{5.033}{1.033}\right)^{\frac{0.4}{1.4}}=1.57\ T_1$$

3. ポリトロープ壓縮

$$W_1''=\frac{n}{n-1}p_2\left[\left(\frac{p_1}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}-1\right]$$

$$=\frac{1.22}{1.22-1}(4+1.033)\left[\left(\frac{5.033}{1.033}\right)^{\frac{0.22}{1.22}}-1\right]$$

$$=92000\ \mathrm{kgm/m^3}$$

$$N=\frac{W_1''\ V}{60\times60\times75}=\frac{92000\times100}{60\times60\times75}=34.1\ PS$$

壓縮機より出る空氣の溫度は

$$T_2=T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}=T_1\left(\frac{5.033}{1.033}\right)^{\frac{0.22}{1.22}}=1.33T_1$$

毎時取り去るべき熱量は (48) より

$$Q=\frac{A\,(k-n)}{(k-1)\,n}W_1''V$$

$$=\frac{1.4-1.22}{427\,(1.4-1)\,1.22}\times92000\times100=8180\ \mathrm{kcal}$$

35. 多段壓縮機

例 10 によりても，又圖 -24 によりても，壓縮が等溫的に行はれる時には，仕事が最少であることが判る。このためには空氣を徐々に壓縮するか，又は壓縮によつて生じた熱を盡く取り去るべきであるが，實際にはこれは不可能であるから**多段壓縮法**を用ひる。

この方法は 1 氣筒で壓縮する代りに數氣筒に分けて壓縮する，原則としては若干の壓縮機を直列に連續したのと同じである。圖 -25 は四段壓縮機を示す。點線 BF は初の溫度に於ける等溫線であつて，BE は斷熱線である。第一氣筒では B より C に斷熱的に壓縮され受器に於て初の溫度迄冷却されると，D 點の狀態となり，等溫線 BF 上にある。これを各氣筒で繰り返すと壓縮曲線は階段狀をなして等溫線に近寄り，一氣筒で壓縮した場合の壓縮曲線 BE と比べれば，仕事は著しく少い。次に多段壓縮機の例として**二段壓縮機** (two-stage compressor)[1] について考へやう。

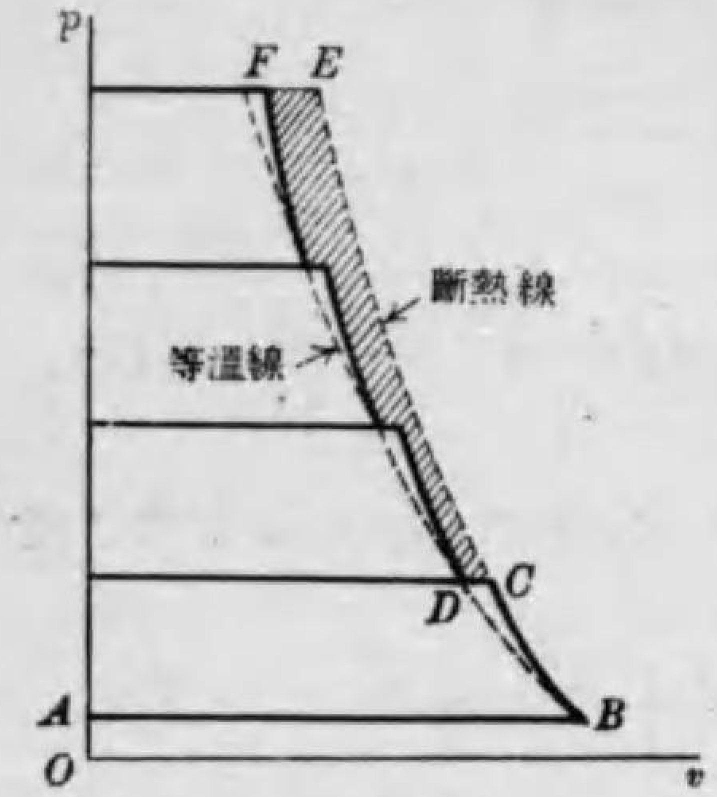


圖 -25

圖 -26 に於て BC は低壓氣筒の壓縮曲線，DE は高壓氣筒の壓縮曲線である。壓縮は pv^n＝定數に隨ふものとする。壓縮機を毎サイクル運轉するに要する全仕事は低壓，高壓兩氣筒に要する仕事の和である。

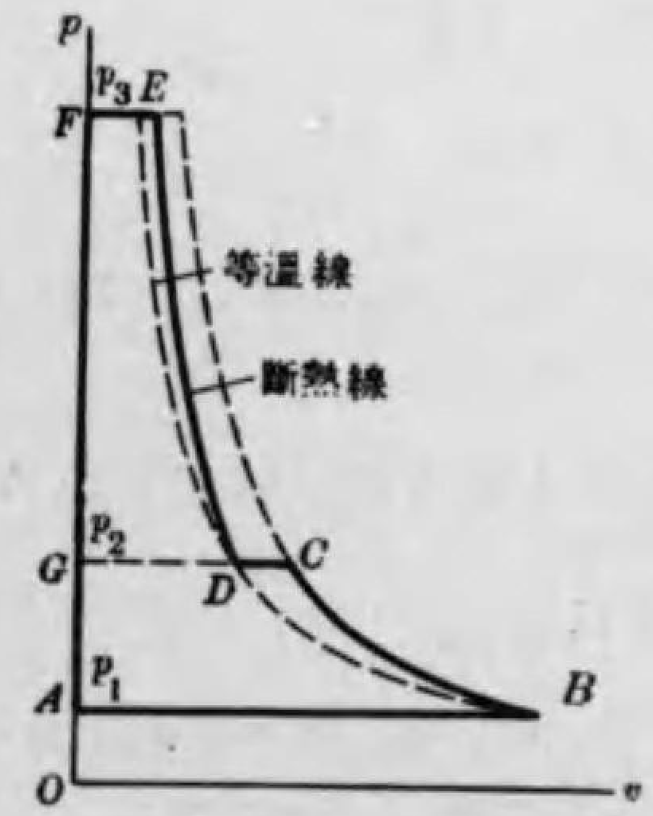


圖 -26

低壓氣筒に於て毎サイクルに要する仕事は

$$\frac{n}{n-1}p_1v_1\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}-1\right]$$

1. zweistufiger Verdichter.

高壓氣筩に於て毎サイクルに要する仕事は

$$\frac{n}{n-1}p_2v_2\left[\left(\frac{p_3}{p_2}\right)^{\frac{n-1}{n}}-1\right]$$

從つて全仕事は

$$W=\frac{n}{n-1}\left[p_1v_1\left\{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}-1\right\}+p_2v_2\left\{\left(\frac{p_3}{p_2}\right)^{\frac{n-1}{n}}-1\right\}\right]\quad\ldots(71)$$

中間冷却が完全ならば點 D は等溫線上にあつて，$p_1v_1=p_2v_2$ なる故に

$$W=\frac{n}{n-1}p_1v_1\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}+\left(\frac{p_3}{p_2}\right)^{\frac{n-1}{n}}-2\right]\quad\ldots(71a)$$

これが最少なる仕事である。次に p_1, p_3 を與へられて，最も良い中間壓力 p_2 を定めやう。それには (71a) を p_2 について微分して，これを零と置けばよい。これにより得た p_2 は仕事が最少なる時の中間壓力である。$\frac{n-1}{n}=a$ と置くと

$$\frac{dW}{dp_2}=\frac{1}{a}p_1v_1\left[ap_1^{-a}p_2^{a-1}-ap_2^{-a-1}p_3^{a}\right]=0$$

又は

$$\frac{p_2}{p_1}=\frac{p_3}{p_2},\qquad p_2=\sqrt{p_1p_3}\quad\ldots\ldots\ldots\ldots(72)$$

最良なる中間壓力については，各氣筒に於ける壓力比は同じである。

これは2段以上の壓縮機の場合にも適用される。

例 11. 二段單動空氣壓縮機[1] あり。空氣を 15°, 1 at より 60 at に，$pv^{1.35}$=定數に從ひ壓縮す。空氣は中間冷却に於て 30° に冷却され，中間壓力は 7 at である。

低壓氣筩の直徑 100 mm, 兩氣筒の行程 125 mm とし，毎行程に吸入される空氣の量は低壓氣筒の行程體積に等しとすれば高壓氣筒の直徑及び毎分 250 回轉に於ける壓縮機運轉に要する馬力を見出せ。

1. 本書に於ては特に斷らざる限り單動とす。

解　低壓氣筒體積

$$v_1=\frac{\pi}{4}\times\left(\frac{1}{10}\right)^2\times\frac{125}{1000}$$
$$=0.000981\ \mathrm{m^3}$$
$$T_1=273+15$$
$$=288°\mathrm{K}$$

$p_1V_1=GRT_1$ より

$$G=\frac{p_1V_1}{RT_1}=\frac{1\times10000\times0.000981}{29.27\times288}=0.00116\ \mathrm{kg}$$
$$T_2=273+30=303°\mathrm{K}$$

$p_2V_2=GRT_2$ より高壓氣筒體積

$$V_2=\frac{0.00116\times29.27\times303}{10000\times7}=0.000147\ \mathrm{m^3}$$

高壓氣筒直徑

$$d_2=\sqrt{\frac{V_2}{0.125}\times\frac{4}{\pi}}$$
$$=\sqrt{\frac{0.000147}{0.125}\times\frac{4}{\pi}}$$
$$=0.0387\ \mathrm{m}$$
$$=38.7\ \mathrm{mm}$$

毎サイクルの仕事

$$W=\frac{n}{n-1}\left[p_1V_1\left\{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}-1\right\}+p_2V_2\left\{\left(\frac{p_3}{p_2}\right)^{\frac{n-1}{n}}-1\right\}\right]$$
$$=\frac{1.35}{1.35-1}\times10000\left[1\times0.000981\left\{\left(\frac{7}{1}\right)^{\frac{1.35-1}{1.35}}-1\right\}\right.$$
$$\left.+7\times0.000147\left\{\left(\frac{60}{7}\right)^{\frac{1.35-1}{1.35}}-1\right\}\right]$$
$$=54.43\ \mathrm{kgm}$$

馬　力

$$N=\frac{Wn'}{60\times75}$$
$$=\frac{54.43\times250}{60\times75}$$
$$=3.02\ PS$$

36. 壓縮機の効率

空氣壓縮機の理論馬力は壓縮が等溫的であると考へて計算し，これに對して空氣壓縮機の効率の良否を批判する。**等溫馬力** (isothermal horse power)[1] を N_{is} **圖示馬力** (indicated horse power)[2] を N_i，**軸馬力** (shaft horse power)[3] を N_e とせば，**壓縮機效率** (compresor efficiency)[4] η_i，**機械効率** (mechanical efficiency)[5] η_m，**全効率** (overall efficiency)[6] η_g は次の如く與へられる。

$$\left.\begin{aligned}\eta_i&=\frac{N_{is}}{N_i}\\ \eta_m&=\frac{N_i}{N_e}\\ \eta_g&=\eta_i\,\eta_m\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\quad(73)$$

等溫馬力は (67), (70) より計算され，圖示馬力はインヂケータ線圖より計算する。

次に空氣壓縮機に於ける諸損失を述べよう。

1. 隙間體積によるもの。

氣筒には**隙間體積** (clearance volume)[7] があるから排出過程に於て一部の空氣は殘存し，これが吸入行程に於て膨脹し吸入空氣量を減ずる。隙間體積は**行程體積** (stroke volume)[3] に對する比 ε でその値が示される。圖-27 に於て隙間體積の影響を見ると，吸入過程は AB に減じ，排出過程は CD で終り，仕事面積が減じる。この際壓縮，膨脹兩曲線を指數 n のポリトロープ曲線とすると

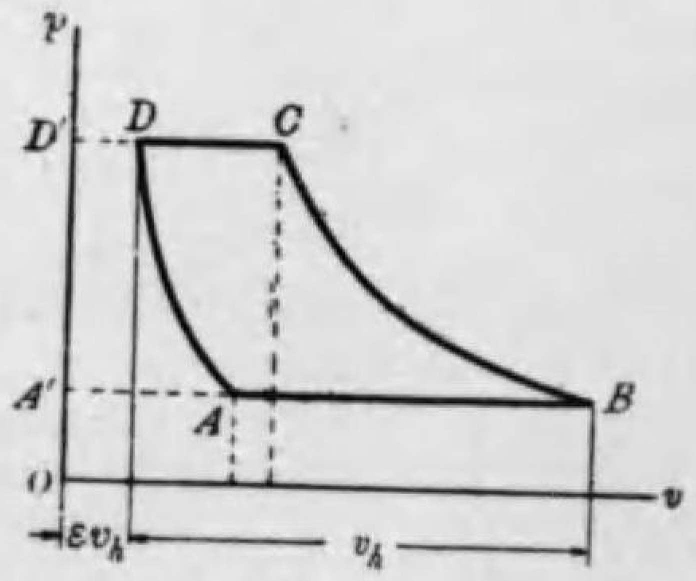


圖-27

1. isothermische Leistung.
2. indizierte Leistung.
3. Leistung an der Welle.
4. indizierter Wirkungsgrad.
5. mechanischer Wirkungsgrad.
6. Gesamtwirkungsgrad.
7. schädlicher Raum.
8. Hubvolum.

$$W=\frac{n}{n-1}p_1v_{A'B}\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}-1\right]-\frac{n}{n-1}p_1v_{A'A}\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}-1\right]$$
$$=\frac{n}{n-1}p_1v_{AB}\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}-1\right]$$

即ち隙間體積があると，吸入量については壓縮機は隙間體積のない行程體積 v_{AB} の壓縮機と同様となり，一定量の空氣を壓縮するに大型の機械を要することになる。$\eta_v=\frac{v_{AB}}{v_h}$ を**體積効率** (volumetric efficiency)[1] といひ，一定量の空氣を壓縮するに隙間體積のある壓縮機の仕事は隙間體積のない場合に，體積効率を乘じたものに等しい。體積効率は ε 一定とすれば，$\frac{p_2}{p_1}$ が大なる程小さい。

2. 絞り抵抗よるもの。

壓縮機に於ては弁又は通路の抵抗があり，開いてゐる時間が限られてゐるので，インヂケータ線圖の角が丸くなり，又吸入壓力は外氣の壓力より低く，排出壓力は壓力タンクの壓力よりも高い。圖-28 はこれを示し，この際の體積効率は $\frac{CD}{AB}$ である。

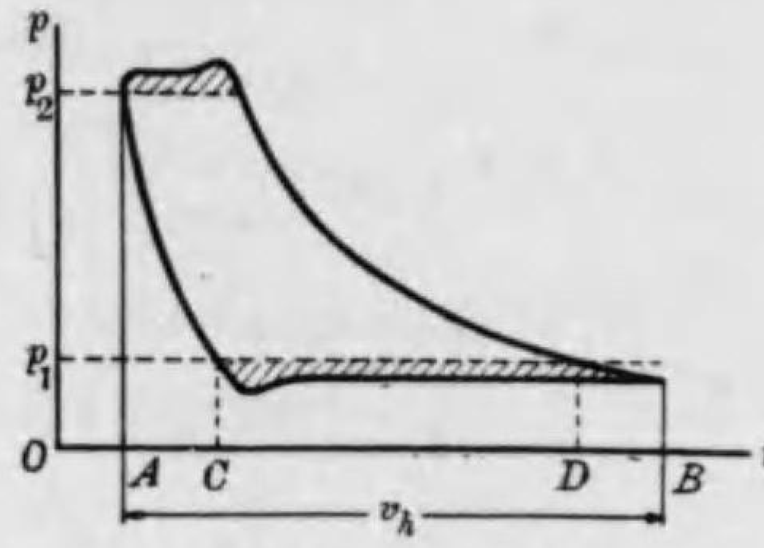


圖-28

3. その他のもの。

壓縮機の氣筒は壓縮過程に於て溫まつてゐるから，これに續く吸入過程に於ては吸入された空氣は溫められて膨脹するので，1 回に吸入される空氣は少くなる。仕事はこの際變らない。又ピストン，弁，詰物箱の漏洩により起される仕事の增加もある。

例 12. 二段空氣壓縮機あり。空氣を 15°, 1 at より $pv^{1.3}$=定數に從ひ 47 at に壓縮す。中間冷却器に於ける壓力を 7 at とし，そこで初の溫度にまで冷却されるものとすれば，空氣 1 kg を壓縮するに要する仕事を求めよ。又兩氣筒のピストンの直徑を夫々 120 mm, 40 mm とし，壓縮機の體積効率を 85% とせば中間冷却器壓力は運轉中一定なりや。又上るか，下るか。

解　中間冷却が完全であるから，空氣 1 kg につき每サイクルの仕事

$$W=\frac{n}{n-1}p_1v_1\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}+\left(\frac{p_3}{p_2}\right)^{\frac{n-1}{n}}-2\right]$$
$$=\frac{n}{n-1}RT_1\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}+\left(\frac{p_3}{p_2}\right)^{\frac{n-1}{n}}-2\right]$$
$$=\frac{1.3}{1.3-1}\times29.27\times288\left[\left(\frac{7}{1}\right)^{\frac{1.3-1}{1.3}}+\left(\frac{47}{7}\right)^{\frac{1.3-1}{1.3}}-2\right]$$
$$=40912\ \mathrm{kgm}$$

1. Füllungsgrad, volumetrischer Wirkungsgrad.

次に壓縮を行ふ前に於ける空氣 1kg の體積

$$v_1=\frac{RT_1}{p_1}=\frac{29.27\times 288}{1\times 10000}=0.843\ \mathrm{m}^3$$

低壓氣筒を出る時の空氣 1kg の體積

$$v_c=v_1\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{n}}$$

$$=0.843\left(\frac{1}{7}\right)^{\frac{1}{1.3}}$$

$$=0.189\ \mathrm{m}^3$$

その時の溫度は

$$T_c=T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}$$

$$=288\left(\frac{7}{1}\right)^{\frac{1.3-1}{1.3}}$$

$$=451.3^\circ\mathrm{K}$$

冷却器出口に於ける空氣 1kg の體積

$$\frac{p_2v_2}{T_2}=\frac{p\,v_c}{T_c}$$

$$\therefore\ v_2=v_c\left(\frac{T_2}{T_c}\right)$$

$$=0.189\left(\frac{288}{451.3}\right)=0.121\ \mathrm{m}^3$$

兩氣筒の入口に於ける空氣 1kg の體積比

$$\frac{v_1}{v_2}=\frac{0.843}{0.121}=6.97$$

然るに氣筒體積比

$$R_c=\left(\frac{\text{低壓氣筒直徑}}{\text{高壓氣筒直徑}}\right)^2\times\frac{85}{100}=\left(\frac{120}{40}\right)^2\times\frac{85}{100}$$

$$=7.65$$

氣筒體積比は pv 線圖より計算した體積比より大であるから中間冷却器の壓力は上る。

37. 熱 氣 機 關

ガスを動作流體とする熱機關は 2 種類に分たれる。即ち

1. 爐が動作氣筒の外部にあるもの。動作流體は爐によりて間接に熱せられる。
2. 氣筒が爐を形成し，氣筒內部に於ける燃燒により流體は直接に熱せられる。

前者を**外燃機關** (external combustion engine)，後者を**內燃機關** (internal combustion engine) と呼ぶ。こゝに於ては空氣を動作流體とする外燃機關即ち**熱氣機關** (hot air engine)[1] のみを考へる。

熱氣機關は現在は使用されない歷史的のものであるが，理論は甚だ興味がある。空氣の加熱，冷却の際等積で行はれるものはスターリング (Stirling) サイクル，等壓で行はれるものはエリクソン (Ericsson) サイクルである。圖-29 は機關の略圖，圖-30 はスターリングサイクル，圖-31 はエリクソンサイクルの $p-v$, $T-S$ 線圖を示す。

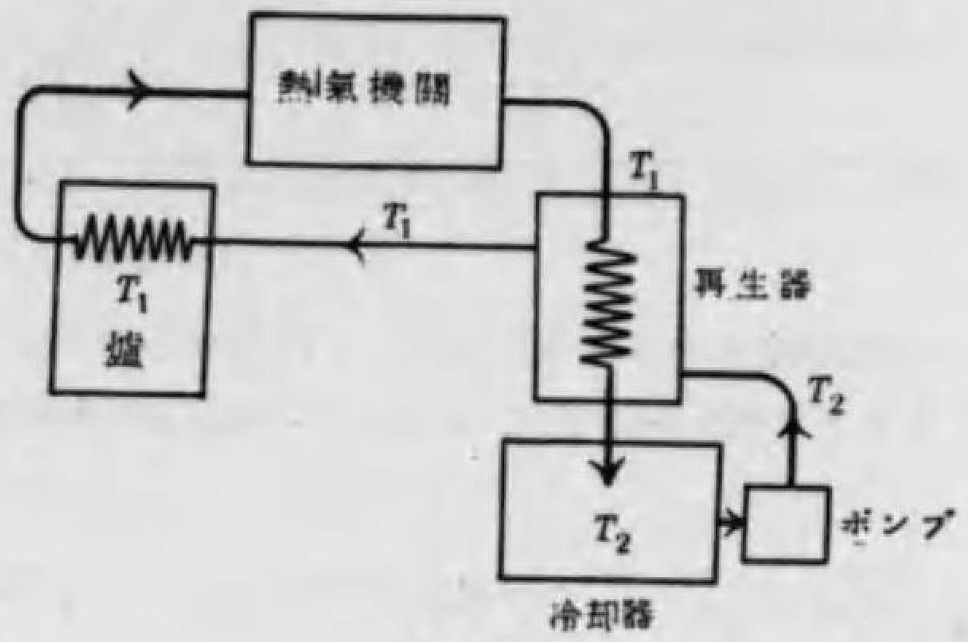
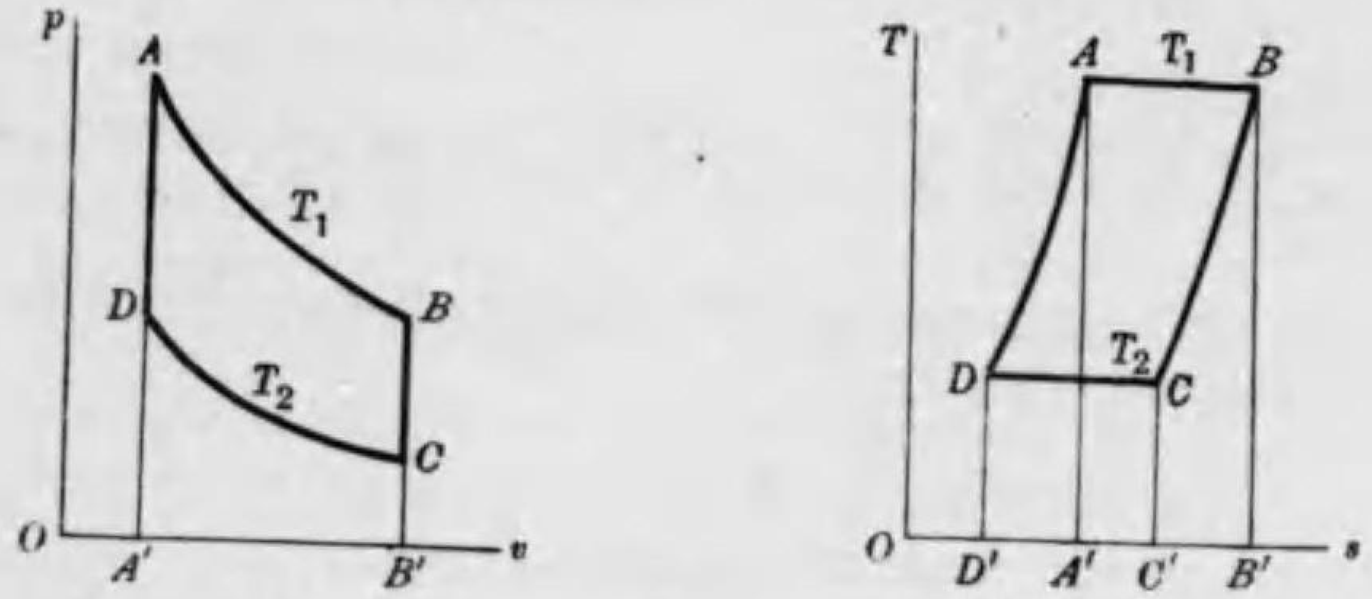
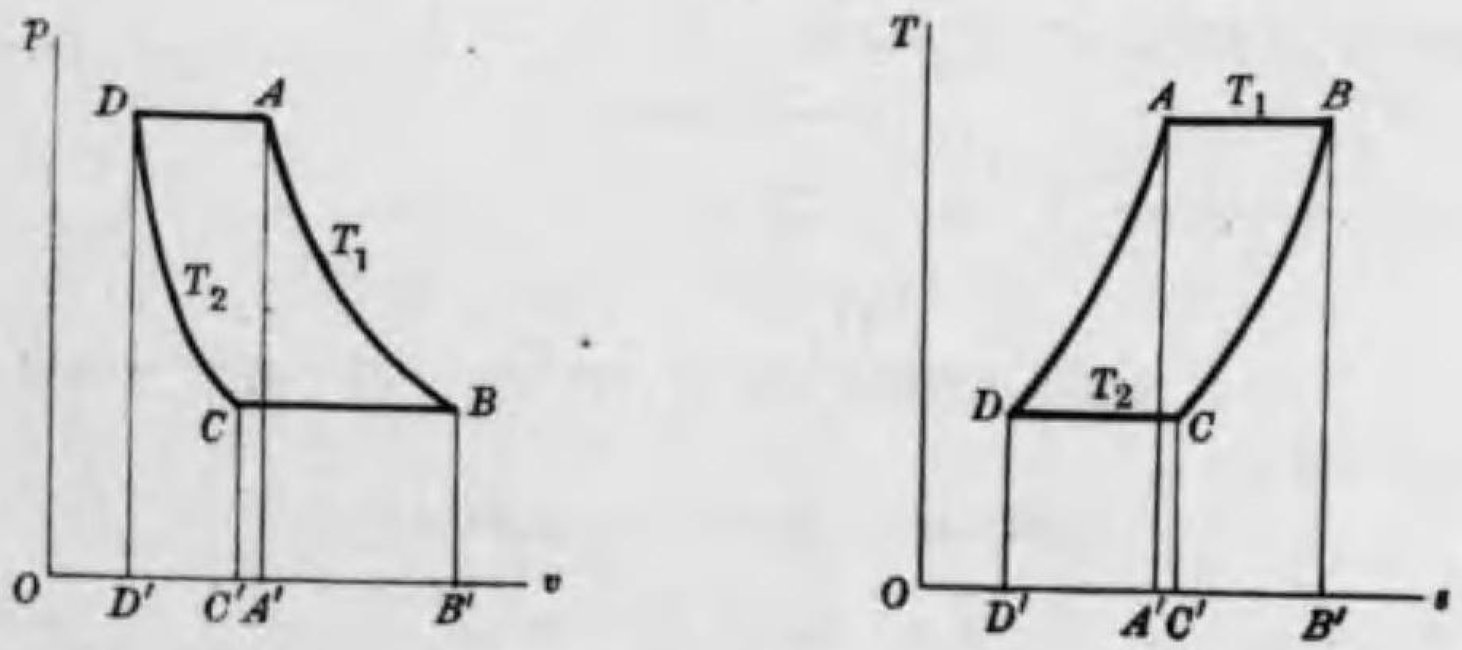


圖-29



(a) 圖-30 (b)



(a) 圖-31 (b)

スターリングサイクルに於ては空氣は**再生器** (regenerator) を通り溫度 T_1 まで熱せられ，爐で熱を吸收しつゝ機關に於て等溫膨脹をする (AB)。この際空氣 1kg が吸收した

1. Heißluftmaschine.

熱量は
$$Q_1=RT_1\log r'$$
r' は膨脹比である。廢氣は再生器を通り，等積に於て溫度 T_2 となる (BC)。再生器に與へた熱量は
$$Q_2=c_v(T_1-T_2)$$
次に冷却器に於て，等溫の下に冷却壓縮される (CD)。棄てた熱量は
$$Q_3=RT_2\log r''$$
r'' は壓縮比である。冷却器より空氣は再生器に至り，等積に於て熱せられ，溫度 T_1 となり又サイクルを繰返す (DA)。再生器より吸收した熱量は
$$Q_4=c_v(T_1-T_2)$$
このサイクルに於ては膨脹比は壓縮比に等しく，再生器との間に授受した熱量は相等しい。仕事の熱當量は
$$AW=Q_1-Q_3=R(T_1-T_2)\log r'$$
故に熱效率は
$$\eta=\frac{Q_1-Q_3}{Q_1}=\frac{R(T_1-T_2)\log r'}{RT_1\log r'}=\frac{T_1-T_2}{T_1} \qquad \text{..............} (74)$$

エリクソンサイクルに於ては再生器に於ける熱の授受を等壓の下に行ふもので，等溫膨脹に於て爐より吸收する熱量は (AB)
$$Q_1=RT_1\log r'$$
r' は膨脹比である。等壓の下に再生器に與へる熱量は (BC)
$$Q_2=c_p(T_1-T_2)$$
等溫壓縮の下に冷却器に於て棄てる熱量は (CD)
$$Q_3=RT_2\log r''$$
等壓の下に再生器で吸收する熱量は (DA)
$$Q_4=c_p(T_1-T_2)$$
このサイクルに於ても膨脹比は壓縮比に等しく，再生器との間に授受した熱量は相等しい。仕事の熱當量は
$$AW=Q_1-Q_3=R(T_1-T_2)\log r'$$
熱效率は
$$\eta=\frac{Q_1-Q_3}{Q_1}=\frac{R(T_1-T_2)\log r'}{RT_1\log r'}$$
$$=\frac{T_1-T_2}{T_1} \qquad \text{..} (74a)$$

兩サイクル共效率はカルノーサイクルの效率に等しい。

問　　題 (IV)

1. 一段空氣壓縮機あり。氣筒直徑 150 mm，行程 200 mm なり。電動機ベルト掛けにて，毎分 400 回轉にて運轉される。空氣を 1 at より 7 at まで，$n=1.3$ のポリトロープ壓縮する。ベルトの傳導效率を 97%，壓縮機の機械效率を 90% とせば，電動機の馬力を見出せ。但隙間體積はなきものとす。

2. 1 at, 15° の空氣 1 kg を，14 at まで $n=1.25$ のポリトロープ壓縮をするに，一段壓縮機を使用すると，完全冷却の二段壓縮機を使用すると，仕事に幾何の差があるか。

3. 三段空氣壓縮機あり。6 個のディーゼル機關に壓縮空氣を供給す。空氣は壓縮機に 1 at, 10° で吸入され，各中間冷却器にて 30° に冷却される。中間冷却器の壓力は 3 atü, 14 atü にして，排出壓力は 60 atü なり。各ディーゼル機關が毎時 6 kg の空氣を使用すれば，空氣壓縮機を運轉するに要する馬力を算出せよ。但隙間體積はなきものとし，斷熱壓縮を行ふものとす。

4. 二段空氣壓縮機あり。毎分 300 回轉に於て，760 mm Hg, 15° の空氣毎時 100 m^3 を 40 at に壓縮する時，

　a) 高壓，低壓兩氣筒に於ける壓縮比を幾何とすべきか。

　b) $n=1.3$ のポリトロープ壓縮をなし，中間冷却器を經て，溫度 50° を以て高壓氣筒に入るとせば，兩氣筒に於ける理論馬力は幾何か。

　c) 幾何の熱量が兩氣筒と中間冷却器とに於て冷却水に取り去られるか。

　d) 如何なる溫度に於て，空氣は高壓氣筒を出るか。

　e) 低壓氣筒に於ける體積效率を 90%，高壓氣筒に於ける體積效率を 85% とすれば兩氣筒の寸法を求めよ。

第五章　蒸氣及び蒸汽

38.　蒸氣の發生

一定壓力 p の下に，0° の液 1 kg に熱を加へて或溫度 $t°$ になると，溫度上昇が止る。この溫度をその壓力に對する**飽和溫度** (saturation temperature)[1] といひ，壓力との間には一定なる關係がある。溫度が與へられるとその溫度に對する壓力も定まり，この壓力をその溫度に對する**飽和壓力** (saturation pressure)[2] といふ。飽和溫度までに供給された熱量を**液體熱** (heat of the liquid)[3] といひ，液の溫度を高めると共に液の膨脹の仕事に費される。後者は小であるから無視してもよい。飽和溫度にある液を**飽和液** (saturated liquid), 飽和溫度以下にある液を**非飽和液** (non-saturated liquid) といふ。

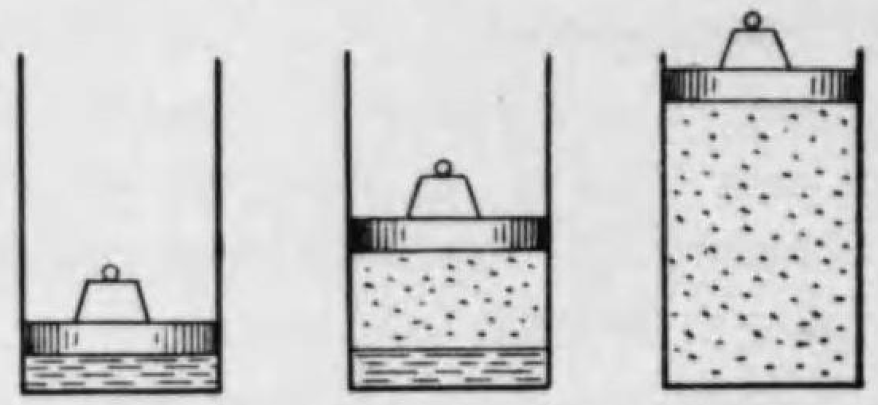


圖 -32

飽和溫度に達した液を尙熱すると，その一部が氣體となり體積が急激に增加する。この現象を**蒸發** (vaporization)[4] といふ。若し加熱が急激であれば，全體が一樣に熱せられないので，氣泡が所々に發生して，蒸發が不平均でその液面が立ち騷ぐ。これを**沸騰** (boiling)[5] といふ。蒸發は一定壓力 p, 一定溫度 t で起り，液が存在する間は蒸氣は**飽和蒸氣** (saturated vapour)[6] である。液の蒸發中に供給され

1. Sättigungstemperatur.　2. Sättigungsdruck.　3. Flüssigkeitswärme.
4. Verdampfung.　5. Sieden.　6. gesättigter Dampf. Sattdampf.

た熱量は液體から氣體への狀態變化をなすために用ひられるもので，これを**蒸發の潛熱** (latent heat of vaporization), 又は**蒸發熱** (heat of vaporization)[1] といふ。蒸發の初期に於ては蒸氣は**濕り飽和蒸氣** (wet saturated vapour) であるが，蒸發が進むにつれて**乾き飽和蒸氣** (dry saturated vapour) となる。乾き飽和蒸氣に一定壓力の下で熱を加へると，その溫度は昇り t_s となる。その時加へたものは顯熱であつて，その狀態にあるものを**過熱蒸氣** (superheated vapour)[2] といひ，(t_s-t) を**過熱度** (degree of superheat) といふ。低い壓力に於ける高溫の過熱蒸氣は完全ガスの狀態に近接く。かくガスと蒸氣とは別個のものにあらずして，たゞ狀態の相違のみである。

前述の過程を $p-v$ 平面に於て見れば，圖 -33 の如くなる。液體の單位重さを考へ，壓力 p を受けて居るとする。液體の體積 v' は A' によりて示され，蒸發が進むと液と蒸氣の混合物の體積が增して，狀態を表はす點は $A'A''$ に沿つて動く。A'' は乾き飽和蒸氣の體積 v'' を示すから，$A'A''$ は $(v''-v')$ である。或點

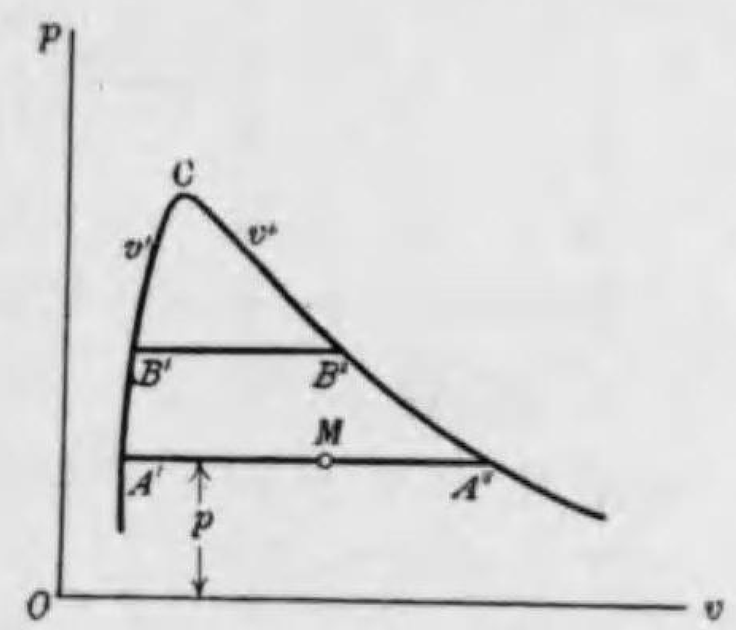


圖 -33

M に於て $x=\dfrac{A'M}{A'A''}$ とせば，　A' では $x=0$,　A'' では $x=1.0$ この値を飽和蒸氣の**乾き度** (quality of vapour, dryness fraction)[3] といひ，及び $(1-x)$ を**濕り度** (wetness fraction)[4] といふ。壓力が高く

1. Verdampfungswärme.　2. überhitzter Dampf. Heißdampf.
3. Trockenheit, Dampfgehalt.　4. Feuchtigkeitsgrad.

なると蒸發は $B'B''$ で表はされ，各壓力に於ける飽和蒸氣の比體積を示す $B''A''$ 線は**飽和蒸氣線** (saturated vapour line, saturation curve)[1] といひ，飽和液の比體積を示す $B'A'$ 線は**飽和液線** (saturated liquid line, liquid curve)[2] といふ。飽和線の右は過熱蒸氣，液線の左は非飽和液である。

飽和線と液線とは高壓の部分に於て一點 C に會し，この點の壓力，溫度，體積を**臨界壓力** (critical pressure)[3]，**臨界溫度** (critical temperature)，**臨界體積** (critical volume) といふ。この點以上では液體に熱を加へると，溫度は絶へず上り，蒸發に當つても體積の急激なる增加を表すこともない。各物質の臨界狀態を表 -2 に示す。

表 -2

物質	化學記號	臨界壓力 kg/cm²	臨界溫度 °C	臨界體積 dm³/kg
水銀	Hg	1000	1470	0.2
水蒸氣	H_2O	225.5	374.1	3.09
鹽化エチール	C_2H_5Cl	55.8	187.0	—
亞硫酸ガス	SO_2	80.3	157.5	1.92
鹽化メチール	CH_3Cl	68.2	142.8	2.7
アンモニアガス	NH_3	116.0	133	4.24
炭酸ガス	CO_2	75.3	31.0	2.16
酸素	O_2	51.4	-119	2.33
空氣	—	38.5	-141	3.2
窒素	N_2	34.5	-147	3.22
水素	H_2	13.2	-240	32.3
ヘリウム	He	2.34	-268	15

1. rechte Grenzkurve 飽和線と略す。 2. linke Grenzkurve 液線と略す。
3. kritischer Druck.

表 -2 より各物質の臨界壓力は大氣壓より甚しく大であるから，各蒸氣は大氣壓に於ては略々完全ガスの如くなることが判る。又これよりガスと蒸氣との區別をするならば，空氣，窒素，酸素等の如く臨界溫度が常溫より遙に低いものをガスといひ，水蒸氣，炭酸ガス等の如く臨界溫度が常溫以上のものを蒸氣といふ。

例 13. 1 kg の飽和蒸氣が 0.16 kg の濕氣を含んで居る時，蒸氣の乾き度，濕り度を求めよ。

解　乾き蒸氣の重さ　$G=1-G'=1-0.16=0.84$ kg

乾き度　$x=\dfrac{G}{G+G'}=\dfrac{0.84}{0.84+0.16}=0.84$

濕り度　$1-x=1-0.84=0.16$

39. $T-S$ 平面に於ける蒸發過程

飽和蒸氣の狀態を考へるには 0° の液の狀態を標準に取る。0° に於ける 1 kg の液をその壓力に相當する沸騰點まで熱するには次の如き液體熱が必要である。

$$q'_t=\int_0^t c'dt \qquad \cdots\cdots (75)$$

c' は液の比熱であつて一般に溫度の函數である[1]。この過程は $T-S$ 平面に於ては AA' により表はされる。面積 $OAA'A_1$ は液體熱 q' を示す。液體の加熱に際して體積變化は少いから，外部仕事はなく q' は全部液のエネルギを增すために費される。

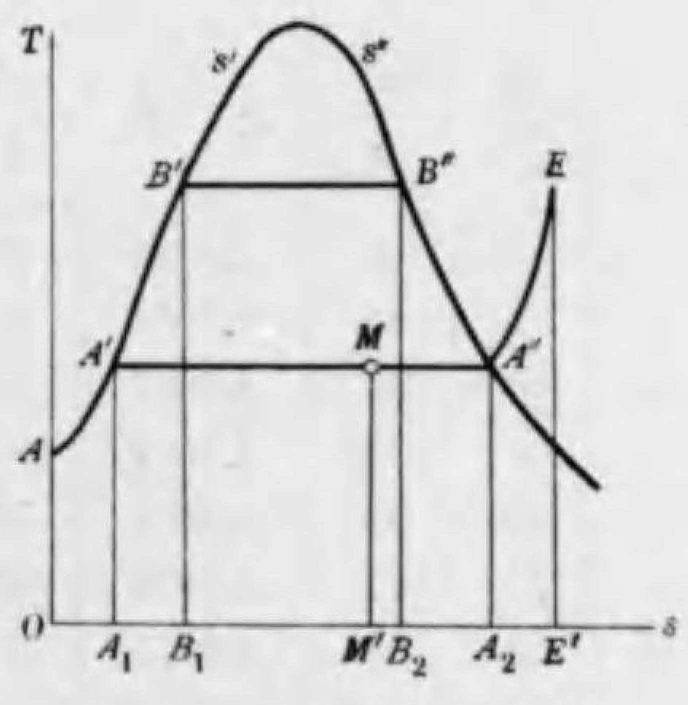


圖 -34

1. 次頁にあり。

飽和溫度に達すると液は蒸氣になり始め，溫度一定で起るから水平線 $A'A''$ は蒸發で，蒸發の潛熱 r は面積 $A_1A'A''A_2$ により示される。壓力が高くなると AB' は液の加熱，$B'B''$ は蒸發となる。蒸發中に液の體積 v' より飽和蒸氣の體積 v'' に變化する。壓力は一定であるから外部仕事は

$$W=p(v''-v') \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (76)$$

潛熱は流體のエネルギを增し，外部仕事をなす。液體が蒸氣に變ずる時のエネルギの增加は

$$r-AW=r-Ap(v''-v') \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (77)$$

これを**內部潛熱** (internal latent heat)[2] といひ ρ で表はす。外部仕事の熱當量を**外部潛熱** (external latent heat)[3] といひ ψ で表はす。

$$r=\rho+\psi \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (78)$$

液體熱と蒸發の潛熱との和を飽和蒸氣の**全熱量** (total heat)[4] といふ。

---

1. 例へば水の場合には，17.5°C の比熱を 1 とせば，次の如き關係を Griffith により與へられてゐる。

溫度		比熱	溫度		比熱	溫度		比熱
C	F		C	F		C	F	
0	32	1.0083	35	95	0.9974	70	158	1.0000
5	41	1.0054	40	104	0.9973	75	167	1.0007
10	50	1.0027	45	113	0.9974	80	176	1.0015
15	59	1.0007	50	122	0.9977	85	185	1.0023
20	68	0.9992	55	131	0.9981	90	194	1.0031
25	77	0.9978	60	140	0.9987	95	203	1.0040
30	86	0.9975	65	149	0.9993	100	212	1.0051

2. innere Verdampfungswärme. 3. äußere Verdampfungswärme.
4. Gesamtwärme.

$$q''=q'+r$$
$$=q'+\rho+\psi \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (79)$$

$q'+\rho$ は 0° の液より，飽和蒸氣になるまでのエネルギの增加を示す。

$$u''=q'+\rho \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (80)$$

一定壓力に於て飽和蒸氣が熱を加へられると $A''E$ に沿つて過熱され面積 $A_2A''EE'$ に相當する熱量 $c_{pm}(t_s-t)$ が吸收される。c_{pm} は過熱蒸氣の平均比熱，t_s は過熱蒸氣の溫度，t は壓力 p に相當する飽和溫度である。E の狀態に相當する全熱量は面積 $OAA'A''EE'$ により表はされる。

$$q_s=q''+c_{pm}(t_s-t)$$
$$=q'+r+c_{pm}(t_s-t) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (81)$$

過熱蒸氣の體積及エネルギを v_s, u_s とせば

$$W_s=p(v_s-v') \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (82)$$

$$u_s=q_s-AW_s \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (83)$$

40. 蒸氣のエンタルピ，エントロピ

圖-34 に於て狀態變化 AA', $A'A''$, $A''E$ は一定壓力に於て起るから各變化の間吸收した熱量はエンタルピの增加に等しい。點 A, A', A'' に於けるエンタルピを i_o', i', i'' とせば

AA' に對し $\quad q'=i'-i_o' \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (84)$

$A'A''$ に對し $\quad r=i''-i'$

AA'' に對し $\quad q''=i''-i_o' \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (85)$

AE に對し $\quad q_s=i_s-i_o' \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (86)$

但 i_s は點 E のエンタルピである。q', q'', q_s は i', i'', i_s より i_o' だけ小である。A に於けるエンタルピは

$$i_o'=u_o'+Apv_o' \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (87)$$

v_o', u_o' は A に於ける比體積，エネルギである。u_o' を零とすれば

$$i_o'=Apv_o' \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (87a)$$

これを具體的に考へれば，v_o なる體積を有する液體を壓力 p なる汽罐内にポンプで押込むに要する仕事の熱當量は i_o' であるとも考へられる。故に q'' は汽罐内にある液體を，i'' は汽罐外にある液體を A より A'' まで加熱するに要する熱量と見られる。實際には p が極大きくない時には i_o' は小さいから[1]，q' と i', q'' と i'' とは等しいと見てよい。1929 年ロンドンで開かれた國際蒸汽表會議では水蒸氣について 0°C に於ける飽和水のエンタルピを零と定めた。

$$i''=i'+r \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (88)$$

$$i_s=i'+r+c_{pm}(t_s-t) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (89)$$

又 $i=u+Apv$ であるから，内部エネルギは次の如く與へられる。

$$u'=i'-Apv' \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (90)$$

$$u''=i''-Apv'' \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (91)$$

---

1. 水について考へると，　$p=5\times10000\ \mathrm{kg/m^2}$

$v_o'=0.001\ \mathrm{m^3/kg}$

$i_o'=Apv_o'=\dfrac{1}{427}\times5\times10000\times0.001=0.117\ \mathrm{kcal/kg}$

然るに　$i''=656.3\ \mathrm{kcal/kg}$

$$u_s=i_s-Apv_s \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (92)$$

次に 0° に於ける飽和液のエントロピを標準とし零と定めると，液の加熱の際のエントロピの增加を液のエントロピと呼び s' で表はす。圖-34 に於て OA_1 は A' なる狀態に於ける液のエントロピを示す。液の比熱を c' とせば

$$ds'=\frac{dq'}{T}=\frac{c'dT}{T}$$

$$s'=\int_{273}^{T}c'\,\frac{dT}{T} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (93)$$

c' が T の函數として與へられると (93) は積分が出來て，これを圖示すると液線が出來る。A'' に於ける飽和蒸氣のエントロピは

$$s''=s'+\frac{r}{T} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (94)$$

s'' を圖示すれば飽和線が出來る。A'', E に於ける絕對溫度を T, T_s とし，過熱蒸氣の定壓の比熱を c_p とすれば過熱蒸氣のエントロピは

$$s_s=s''+\int_{T}^{T_s}c_p\,\frac{dT}{T} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (95)$$

c', c_p を定數とせば

$$s'=c'\log\frac{T}{273} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (93a)$$

$$s''=c'\log\frac{T}{273}+\frac{r}{T} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (94a)$$

$$s_s=c'\log\frac{T}{273}+\frac{r}{T}+c_p\log\frac{T_s}{T} \quad \cdots\cdots (96)$$

41. 濕り飽和蒸氣の性質

圖 -34 に於て點 M は液と蒸氣の混合物であつて，乾き度は $x=\dfrac{A'M}{A'A''}$ である。M にある蒸氣の狀態を付字 m で示すことにすれば次の如く與へられる。A' を基準に取れば

$$q_m=q'+xr \quad \cdots\cdots (97)$$

$$i_m=i'+xr \quad \cdots\cdots (98)$$

$$u_m=i_m-Apxv'' \quad \cdots\cdots (99)$$

$$s_m=s'+\frac{xr}{T} \quad \cdots\cdots (100)$$

$$v_m=v'+x(v''-v')$$

$$\cong xv'' \quad \cdots\cdots (101)$$

v' は v'' に比して小であるから省いてもよい。A'' を基準に取れば

$$q_m=q''-(1-x)r \quad \cdots\cdots (97a)$$

$$i_m=i''-(1-x)r \quad \cdots\cdots (98a)$$

$$s_m=s''-(1-x)\frac{r}{T} \quad \cdots\cdots (100a)$$

42. 蒸汽の特性式

飽和蒸氣に對しては坐標 p, v, t を結ぶ函數關係は完全ガスと全く異なる。蒸氣の飽和溫度は壓力のみに關し，ガスの如く p と t とに別々に任意の値を與へる事は出來ない。圖 -35 は種々な蒸氣の p と t との關係を示す。

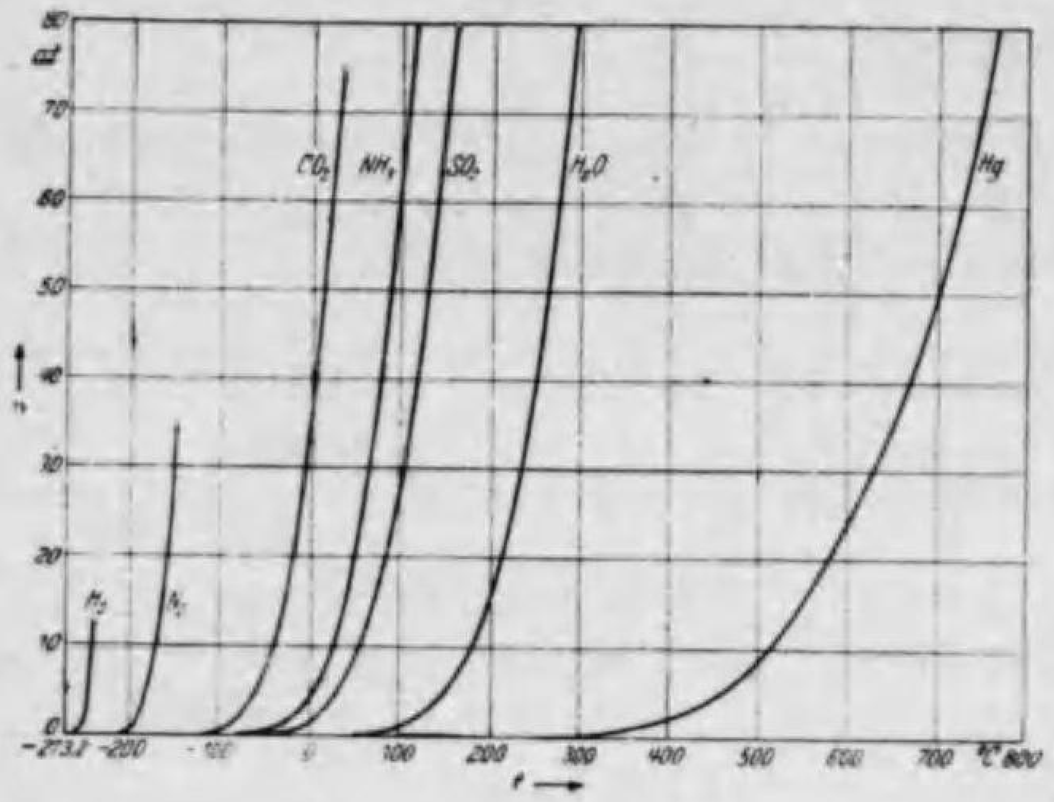


圖 -35

飽和蒸氣の比體積は或壓力に於ける蒸氣の比體積並に乾き度に關する。故に蒸氣に對しては

$$t=f(p) \quad p=F(t) \quad \cdots\cdots (102)$$

$$v=\phi(p,x) \quad \cdots (103)$$

過熱蒸氣に於てはガスの如く p, t は別々に變へることが出來て，p, v, t の關係は一般形となる。

$$F(p, v, t)=0 \quad \cdots\cdots (6)$$

水蒸氣卽ち**蒸汽** (steam)[1] の特性式は，過熱蒸汽及び乾き飽和蒸汽に對して，次の如く學者によつて與へられてゐる。

モリエ (Mollier) の式

$$v=47.02\frac{T}{p}-\frac{1.45}{\left(\frac{T}{100}\right)^{3.1}}-\frac{58p^2}{10^6\left(\frac{T}{100}\right)^{13.5}} \quad \cdots\cdots (104)$$

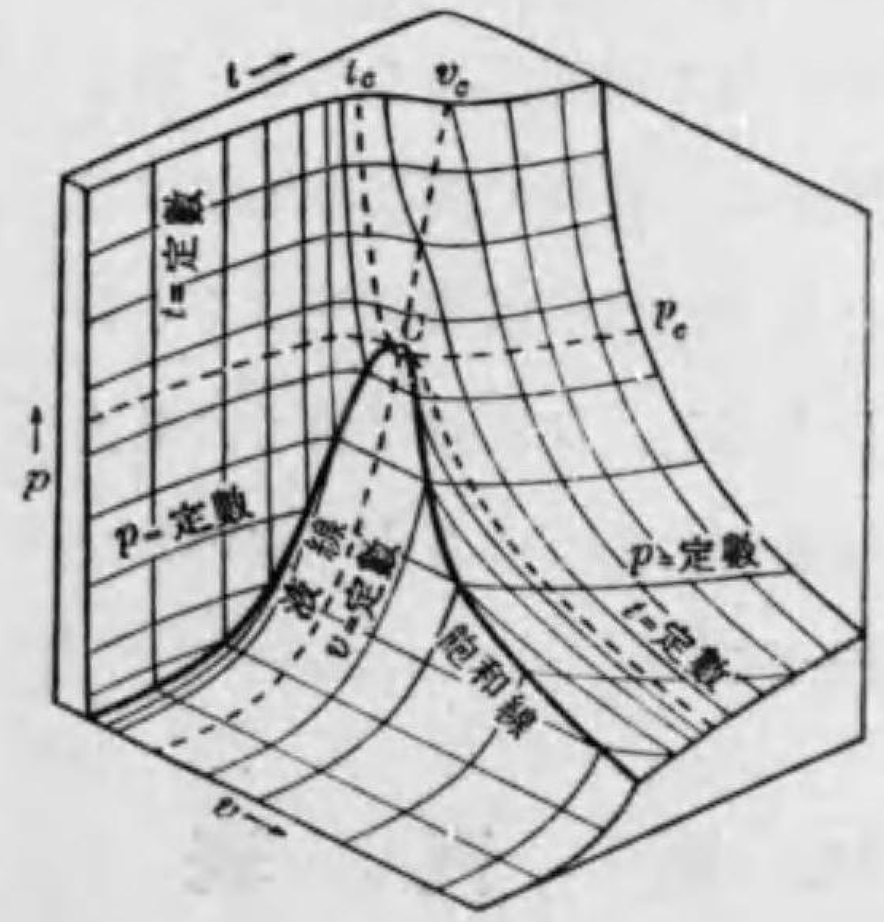


圖 -36

1. Wasserdampf.

菅原の式

$$v=47.05\frac{T}{p}-\frac{0.60}{\left(\frac{T}{100}\right)^{2.6}}-\frac{42p}{\left(\frac{T}{100}\right)^{14}}$$

$$+\frac{1.26\times10^{-7}\times p^{3}-8.16\times10^{-34}\times p^{7}}{\left(\frac{T}{100}\right)^{13}}+\frac{22}{p+1000} \qquad \cdots\cdots\cdots(105)$$

但以上の式に於て，T は °K にて，p は kg/m² にて，v は m³/kg にて表はす。蒸汽の特性表面を圖-36 に示す。

43. 過熱蒸汽の比熱

圖-37 は温度，壓力による**過熱蒸汽** (superheated steam)[1] の比熱の變化を示す。壓力零に於ては蒸汽の比熱は完全ガスに於ける如く温度が高くなると増して來る。高壓の蒸汽の比熱は乾き飽和蒸汽の狀態に近づくと甚しく増し，又高温に於ては壓力の如何にかゝはらず一定の値に近づく。

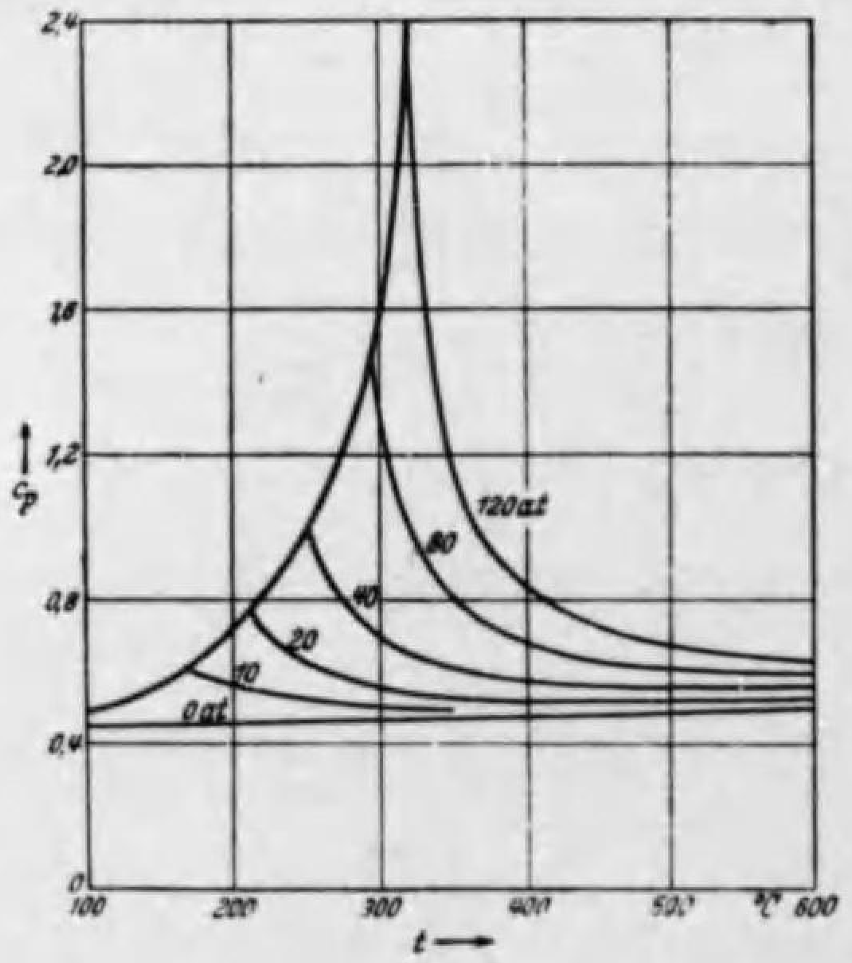


圖-37

44. 蒸　汽　表

蒸汽表 (steam tables)[2] は飽和水，乾き飽和蒸汽及び過熱蒸汽の有

1. überhitzter Wasserdampf.　2. Wasserdampftafeln.

する諸量を與へるもので，菅原，コッホ (Koch)，モリエ，キーナン (Keenan) 等諸氏のものがある。菅原表についてはその表-1 は温度を基準とした飽和水並に飽和蒸汽表で，0° より臨界點に至る各温度に對する p, v, i, s を與へる。表-2 は壓力を基準としたものである，表-3 は過熱蒸汽表で，種々の壓力並に温度に對する v, i, s を與へる。以上の諸表に於ては，0° に於ける飽和水の i', s' を零として基準としてある。

例 14. 壓力 28 at，乾き度 0.95 の飽和蒸汽 1 kg のエンタルピ，體積，エントロピ，内部エネルギを求めよ。

解　$i=i'+xr=235.4+0.95\times433.5=647.2$ kcal/kg

$v=v'+x(v''-v')=0.001206+0.95\times0.07158=0.06921$ m³/kg

$s=s'+x\frac{r}{T}=0.6208+0.95\times0.8634=1.4410$ kcal/°K kg

$u=i-Apv=647.2-\frac{1}{427}\times10000\times28\times0.06921=601.8$ kcal/kg

この例に於て $v=xv''$ とせば正確なる v の値と如何に異なるか。

例 15. 壓力 7 at の乾き飽和蒸汽 5 kg を 220° に過熱するに要する熱量，並に平均比熱を求めよ。

解　7 at，乾き飽和蒸汽のエンタルピ

$i''=659.6$ kcal/kg

7 at，220° の過熱蒸汽のエンタルピ

$i_s=690.8$ kcal/kg

故に過熱蒸汽 5 kg を得るには

$Q=5(i_s-i'')=5(690.8-659.6)=156$ kcal

平均比熱は

$$c_{pm}=\frac{i_s-i''}{t_s-t}=\frac{690.8-659.6}{220-164.2}=0.559 \text{ kcal/°C kg}$$

例 16. 前問に於て，過熱の際に於けるエントロピの増加及び體積の増加を求めよ。

解　7 at，乾き飽和蒸汽のエントロピ

$s=1.6028$ kcal/°K kg

7 at，220° の過熱蒸汽 1 kg のエントロピ

$s_s=1.6701$ kcal/°K kg

故にエントロピの增加は

$$5\,(s_s-s)=5(1.6701-1.6028)=0.3365\ \mathrm{kcal/^\circ K}$$

7 at，乾き飽和蒸汽の體積

$$v''=0.2775\ \mathrm{m^3/kg}$$

7 at，220°C の過熱蒸汽の體積

$$v_s=0.3211\ \mathrm{m^3/kg}$$

故に體積の增加は

$$5\,(v_s-v'')=5(0.3211-0.2775)=0.218\ \mathrm{m^3}$$

過熱蒸汽の體積の計算に當つては，略算式としてボイル—ゲイリユサックの法則を用ふ。即ち飽和蒸汽の飽和溫度を絕對溫度にて T，過熱蒸汽の溫度を絕對溫度にて T_s とせば

$$\frac{pv''}{T}=\frac{pv_s}{T_s}\qquad p=\text{一定なる故に}$$

$$v_s=v''\,\frac{T_s}{T}$$

この式を用ひ上の問題の體積の增加を計算せよ。

例 17. 壓力 14 at，乾き度 0.9 の蒸汽 100 kg を 80° の水より得るには幾何の熱量が必要なるか。

解　14 at，乾き度 0.9 の蒸汽のエンタルピは

$$i_1=i_1'+xr=197.2+0.9\times468.4=618.8\ \mathrm{kcal/kg}$$

80° に於ける水のエンタルピ

$$i_2=80\ \mathrm{kcal/kg}$$

所要の熱量は

$$Q=100\,(i_1-i_2)=100(618.8-80)=53880\ \mathrm{kcal}$$

例 18. 壓力 10 at の乾き飽和蒸汽の外部潛熱，內部潛熱を求めよ。

解　外部潛熱は

$$\psi=Ap\,(v''-v)=\frac{1}{427}\times10000\times10\times0.1966=46.0\ \mathrm{kcal/kg}$$

內部潛熱は

$$\rho=r-\psi=481.7-46.0=435.7\ \mathrm{kcal/kg}$$

45. 蒸汽の溫度—エントロピ線圖及びエンタルピ—エントロピ線圖

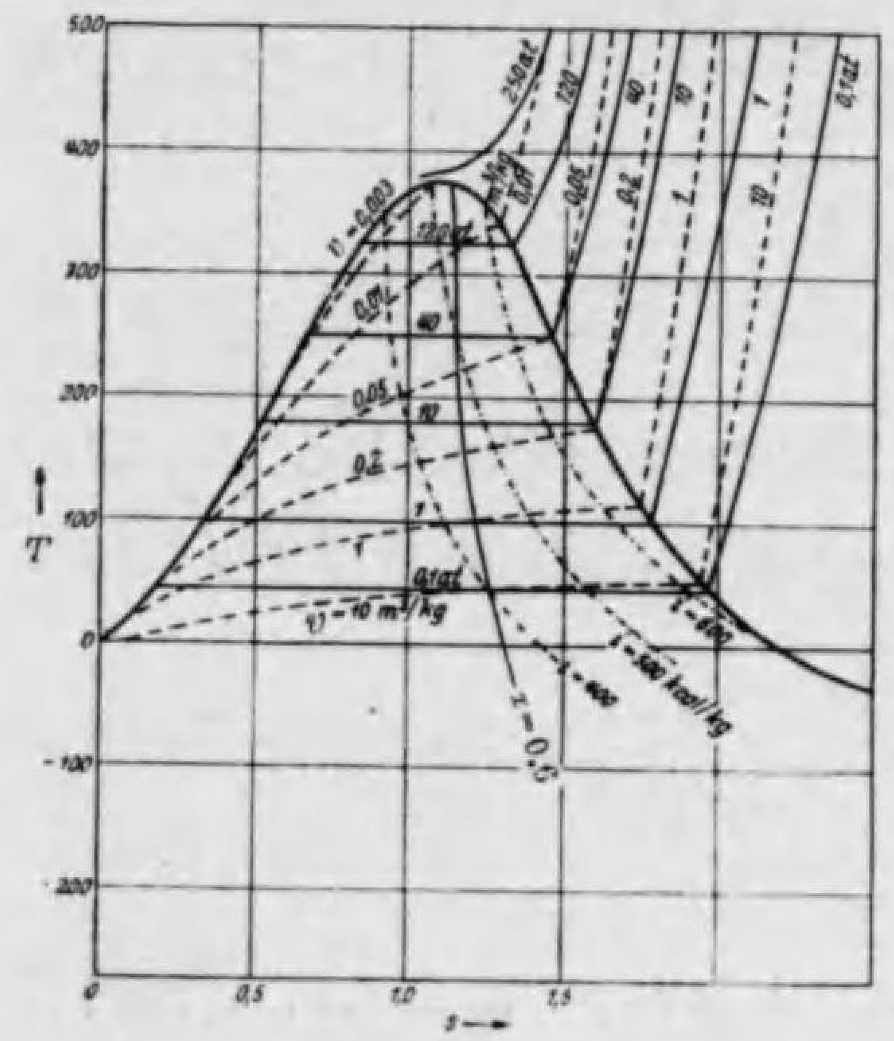


圖 -38

溫度—エントロピ線圖では縱坐標に絕對溫度，橫坐標にエントロピを取る。圖 -38 に於ては壓力，體積，エンタルピ，乾き度一定の諸曲線が引いてある。液に於ける一定壓力線は殆ど液線と一致する。この線圖に於ては，狀態變化を表はす曲線の下にある絕對零度に及ぶ面積が，狀態變化に於て授受された熱量を示す。**エンタルピーエントロピ線圖**では縱坐標にエンタルピ，橫坐標にエントロピを取る。これを**モリエ線圖** (Mollier diagram) 又は **$i-s$ 線圖**[1] といふ。圖 -39 に見る如く液線，飽和線の形が變り，臨界點は C の位置に來る。飽和蒸汽の部分に於ては壓力，乾き度一定の曲線，過熱蒸汽の

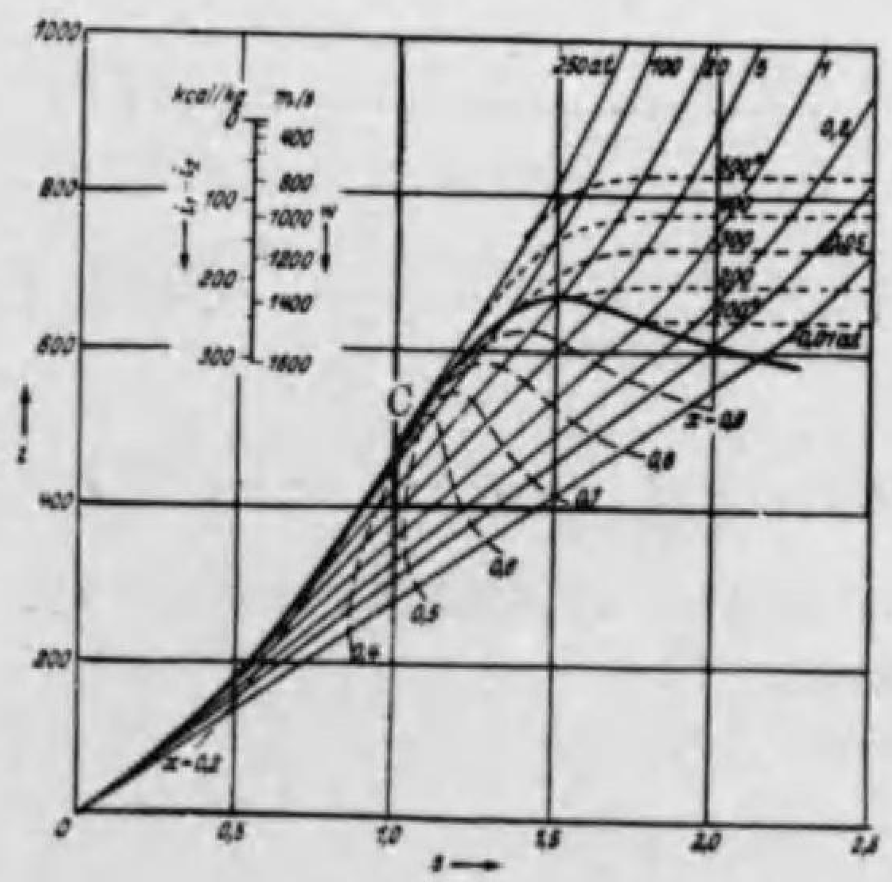


圖 -39

1. $i-s$ Diagramm.

部分に於ては壓力，溫度一定の 曲線が引いてある。 菅原表付屬の $i-s$ 線圖に於ては 體積一定の 曲線も引いてある。 この線圖に於ては狀態變化の始終を表はす2點の垂直距離の長さが熱量を示す。

46. 蒸汽の狀態變化

1. 等壓變化

飽和蒸汽に 於ては，等壓變化は 同時に等溫變化である， x_1 は初の乾き度，x_2 は終の乾き度とすれば，初及び終の體積は夫々

$$v_1=v'+x_1(v''-v')$$
$$v_2=v'+x_2(v''-v')$$

體積の變化は

$$v_2-v_1=(x_2-x_1)(v''-v') \quad \text{..............}(106)$$

外部仕事は

$$W=p(v_2-v_1)=p(x_2-x_1)(v''-v')$$
$$=J\psi(x_2-x_1) \quad \text{...........................}(107)$$

エネルギ變化は

$$u_2-u_1=\rho(x_2-x_1) \quad \text{.................}(108)$$

吸收された熱量は

$$Q=i_2-i_1=r(x_2-x_1) \quad \text{.................}(109)$$

例 19. 汽罐中の蒸汽の壓力 16 at, 乾き度 0.98 である。 これが過熱器で 240° となり汽罐を去る。蒸汽 1 kg のなす仕事を求めよ。

解　蒸汽表より

$$v_2=0.1414\ \mathrm{m^3/kg}$$
$$v_1=0.1259\times0.98=0.1234\ \mathrm{m^3/kg}$$
$$W=p(v_2-v_1)=10000\times16(0.1414-0.1234)$$
$$=2880\ \mathrm{kgm/kg}$$

2. 双曲線變化

双曲線變化 (hyperbolic or constant pv change of state) は $pv=$定數の變化である。 壓力 p_1, 乾き度 x_1 の飽和蒸汽が $pv=$定數に從ひ膨脹して p_2 となるとす。

$$p_1v_1=p_2v_2$$

例へば初も終も飽和狀態の時は

$$p_1x_1v_1''=p_2x_2v_2''$$

終が過熱狀態の時は

$$p_1x_1v_1''=p_2v_2$$

エネルギの變化は

$$u_2-u_1=i_2-i_1 \quad \text{.....................}(110)$$

外部仕事は

$$W=p_1v_1\log\frac{v_2}{v_1}$$

變化中に吸收した熱量は

$$Q=u_2-u_1+AW$$

例 20. 壓力 8 at, 乾き度 0.9 の蒸汽が 0.3 at に $pv=$定數に從ひ膨脹する時，變化の間に蒸汽の吸收した熱量を求めよ。

解　$p_1v_1=p_2v_2$

$$\therefore\quad v_2=v_1\frac{p_1}{p_2}=0.2445\times0.9\times\frac{8}{0.3}=5.868\ \mathrm{m^3/kg}$$
$$t_2=102.6^\circ$$
$$i_1=i_1'+xr_1=171.3+489.6\times0.9=611.94\ \mathrm{kcal/kg}$$
$$i_2=643.26\ \mathrm{kcal/kg}$$
$$u_2-u_1=i_2-i_1=643.26-611.94=41.32\ \mathrm{kcal/kg}$$
$$W=p_1v_1\log\frac{v_2}{v_1}=10000\times8\times0.245\times0.9\log\frac{5.868}{0.245\times0.9}$$
$$=57817\ \mathrm{kgm/kg}$$
$$Q=u_2-u_1+AW=41.32+\frac{57817}{427}=176.74\ \mathrm{kcal/kg}$$

3. 等積變化

初及び終の體積 v_1, v_2 が等しいから

$$v_1 = v_2$$

飽和蒸汽の場合には

$$v_1' + x_1(v_1'' - v_1') = v_2' + x_2(v_2'' - v_2')$$

又は

$$x_1 v_1'' = x_2 v_2''$$

これより終の乾き度 x_2 は求められる。 外部仕事は零であるから,吸收された熱量は

$$Q = u_2 - u_1 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (111)$$

4. 斷熱變化

斷熱變化に於てはエントロピは一定である。

$$s_1 = s_2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (112)$$

飽和蒸汽の場合には

$$s_1' + \frac{x_1 r_1}{T_1} = s_2' + \frac{x_2 r_2}{T_2}$$

これより終の乾き度 x_2 が見出される。 又 x_2 は $i-s$ 線圖によりても求められる。 供給された熱量は零であるから,外部仕事は內部エネルギの減少に等しい。

$$W = J(u_1 - u_2)$$

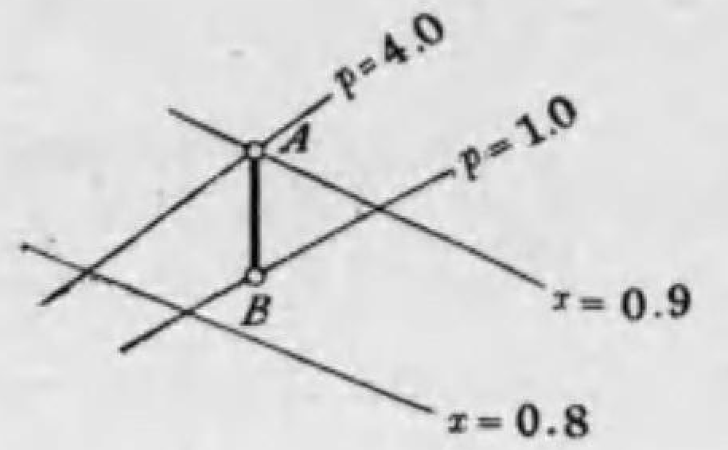
例 21. 壓力 4 at, 乾き度 0.9 の飽和蒸汽 1 kg が斷熱的に壓力 1 at まで膨脹する時は蒸汽のなす仕事を求めよ。

解

$$s_1' + \frac{x_1 r_1}{T_1} = s_2' + \frac{x_2 r_2}{T_2}$$

$$0.4219 + 1.2263 \times 0.9 = 0.3090 + 1.4501\,x_2$$

$$\therefore\ x_2 = 0.839$$



これを $i-s$ 線圖を用ふれば, $p=4$ の定壓線と $x=0.9$ の一定乾き度線との交點に初の狀態 A を得, A より $s=$ 定數に相當する垂線を引き, これと $p=1.0$ の定壓線との交點に終の狀態 B を得, B の乾き度として $x_2=0.839$ が求められる。

$$i_1 = i_1' + x_1 r_1 = 143.6 + 510.3 \times 0.9 = 602.87 \text{ kcal/kg}$$

$$i_2 = i_2' + x_2 r_2 = 99.12 + 539.85 \times 0.839 = 552.05 \text{ kcal/kg}$$

i_1, i_2 は又 A 點, B 點の i の値であるから, $i-s$ 線圖によりても求められる。

$$u_1 = i_1 - Ap_1 v_1 = 602.87 - \frac{1}{427} \times 10000 \times 4 \times 0.9 \times 0.4705$$
$$= 563.2 \text{ kcal/kg}$$

$$u_2 = i_2 - Ap_2 v_2 = 552.05 - \frac{1}{427} \times 10000 \times 1 \times 0.839 \times 1.726$$
$$= 518.14 \text{ kcal/kg}$$

$$W = J(u_1 - u_2) = 427(563.2 - 518.14)$$
$$= 19240.62 \text{ kgm/kg}$$

5. 絞り

流體の通路に急に狹くなつた所があると,流體が通過するに際してその壓力が下る。 かやうな現象を**絞り** (throttling, wire drawing) といひ,壓力降下は流體の種類,狀態,速度及び通路の狹り方による。 減壓弁,冷凍機の膨脹弁,蒸汽機關の滑弁を通る流れは絞りの例である。

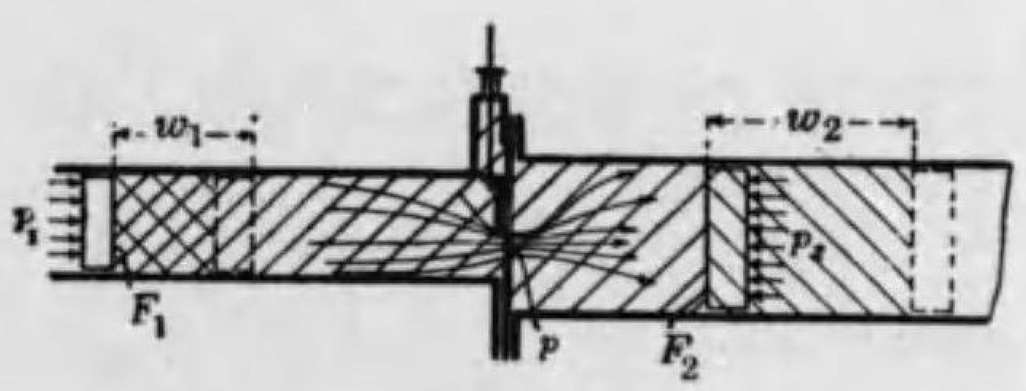


圖-40

高壓部の狀態を p_1, v_1, u_1, i_1, w_1, 低壓部の狀態を p_2, v_2, u_2, i_2, w_2 とせば,過程は外部仕事をせず斷熱的に行はれるから,次の關係がある。

$$u_2-u_1+A\left(\frac{w_2^2}{2g}-\frac{w_1^2}{2g}\right)=A\,(p_1v_1-p_2v_2) \quad \ldots\ldots(113)$$

$$\therefore\ \ u_1+Ap_1v_1+A\,\frac{w_1^2}{2g}=u_2+Ap_2v_2+A\,\frac{w_2^2}{2g}$$

$$i_1+A\,\frac{w_1^2}{2g}=i_2+A\,\frac{w_2^2}{2g} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(113a)$$

$\frac{w_1^2}{2g}$ と $\frac{w_2^2}{2g}$ の差は極僅かであるとせば

$$i_1=i_2 \quad 又は \quad di=0 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(113b)$$

即ち絞りはエンタルピ一定の變化である。完全ガスに於ては

$$di=c_p dT$$

$$\therefore\ \ dT=0$$

溫度も一定である。實際のガス及び蒸氣では溫度が下り，臨界點の近所に於ては著しい。これを**ジュールートムソン効果** (Joule-Thomson effect)[1] といひ，次の如く表はす。

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_i \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ (114)$$

又絞りの際には，低壓部に吹き出された流體は亂流をなして流れ，噴出のエネルギは摩擦のため熱となりて流體に入り，そのエントロピを增す。

飽和蒸汽の絞りを考へるに

$$i_1'+x_1r_1=i_2'+x_2r_2$$

これを次の如く變形する。

$$x_2=x_1+\frac{(i_1'-i_2')-x_1(r_2-r_1)}{r_2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ (115)$$

$p_1=8$ at より次の壓力に絞れば

$p_2=4$	3	2	1 at
$i_1'-i_2'=27.7$	38.0	51.4	72.18 kcal
$r_2-r_1=20.7$	27.9	37.0	50.25 kcal

1. Joule-Thomson Effekt.

(115) の右邊第2項に於て $(i_1'-i_2')$ は (r_2-r_1) より常に大であり，且後者に1より小なる x_1 が乘じられてゐるから，$x_2>x_1$ である。即ち蒸汽が乾くことゝなる。

圖-41 は飽和水及び飽和蒸汽の絞りを $T-S$ 平面に於て示す。i—s 線圖に於ては絞りは水平線によりて示される。

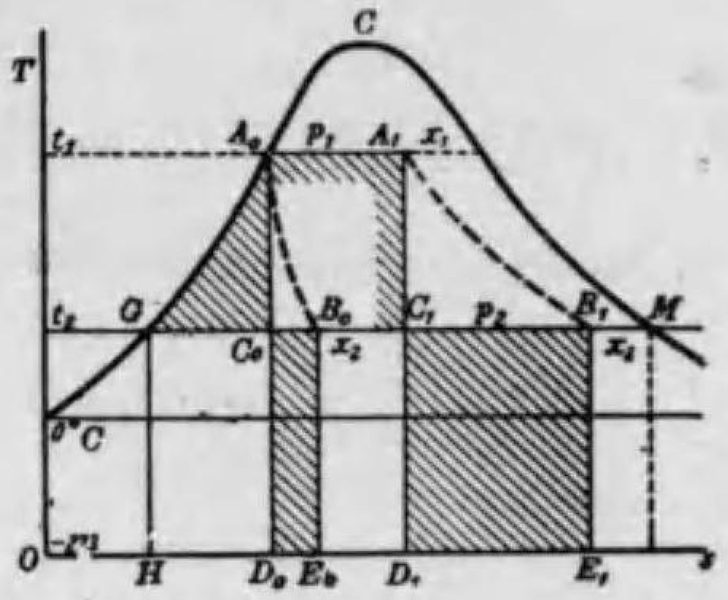
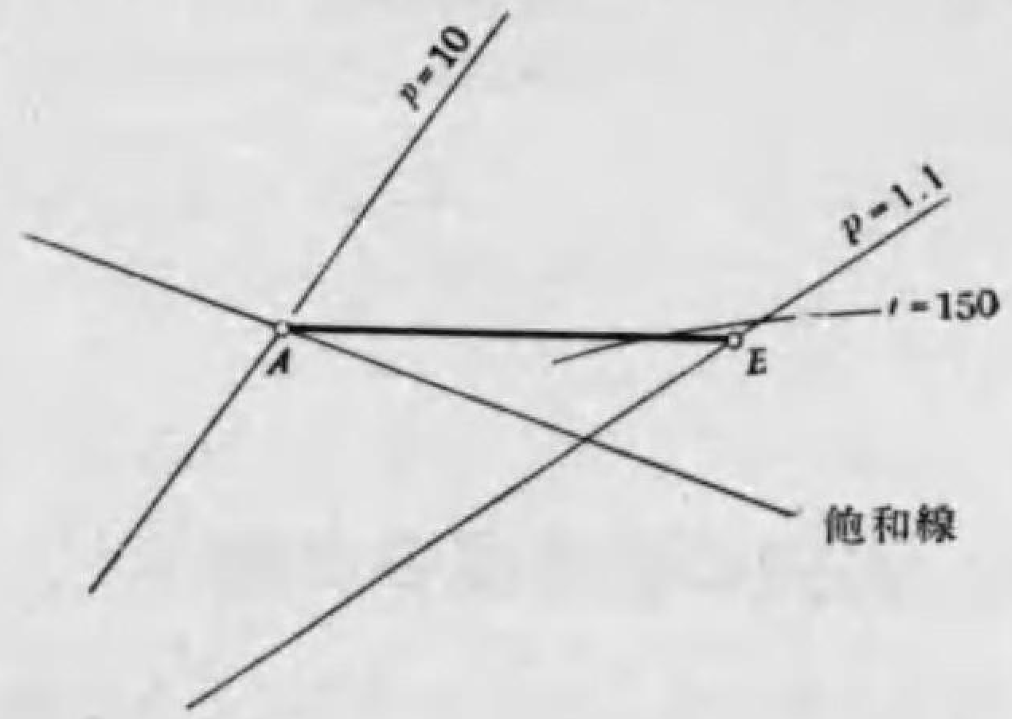


圖 -41

例 22. 壓力 10 at の乾き飽和蒸汽を壓力 1.1 at の場所に流せば終の狀態は如何。

解　$i_1=i_2=662.9$ kcal/kg

これは溫度 149.2°，壓力 1.1 at の過熱蒸汽である。$i-s$ 線圖を用ひれば次の如くして終の狀態を得る。



47. 蒸汽の斷熱變化，略算式

略近的には斷熱變化に於ける p と v との關係を次の如く考へる。

$$pv^m=c \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(116)$$

指數 m の値は次の如くである。

濕り飽和蒸汽，　$m=1.035+0.1x$　(乾き度 75% 以上)

乾き飽和蒸汽，　$m=1.135$

過 熱 蒸 汽，　$m=1.3$

(116) 式より外部仕事を求めれば

$$W=\frac{p_2v_2-p_1v_1}{1-m} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(117)$$

又一定乾き度の狀態變化では $m=\frac{16}{15}$ (20 at まで)

例 23. 例 21 の問題を本節の方法によりて解け。

解　$n=1.035+0.1x$

$\fallingdotseq 1.035+0.1\times 0.9$

$=1.125$

$p_1v_1{}^n=p_2v_2{}^n$

$v_2=v_1\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{n}}$

$=0.9\times 0.4705\times\left(\frac{4}{1}\right)^{\frac{1}{1.125}}$

$=1.452\ \mathrm{m^3/kg}$

$v_2''=1.726\ \mathrm{m^3/kg}$ なる故に終の乾き度は 0.84 となる。

$W=\frac{p_2v_2-p_1v_1}{1-m}=\frac{10000(1\times 1.452-4\times 0.9\times 0.4705)}{1-1.125}$

$=19344\ \mathrm{kgm/kg}$

例 21 の計算と大略一致する。

48. 蒸汽の乾き度の測定

蒸汽の乾き度は次の 3 方法によりて測られる。

1. **樽熱量計** (barrel calorimeter)
2. **分離熱量計** (separating calorimeter)
3. **絞り熱量計** (throttling calorimeter)[1]

1. 樽熱量計

この方法では木製樽の中に入れられた冷水中に蒸汽を吹き込み水と混合して凝結させる。樽内の水の溫度の上昇を測定すれば乾き度

1. Drosselkalorimeter.

は計算出來る。成るべく蒸汽と冷水を多量に使用して終りの溫度を低くすれば，熱傳導も蒸發も少くなり，測定は正確になる。

G=凝結せる蒸汽の重さ

x=蒸汽の乾き度

r=蒸汽の潛熱

t=蒸汽の飽和溫度

G'=樽內の冷水の重さ

t_1=冷水の初の溫度

t_2=冷水の終の溫度

とすれば，蒸汽が失つた熱量は水の得た熱量に等しいから

$$G(xr+t-t_2)=G'(t_2-t_1)$$

これより乾き度 x が計算せられる。

2. 分離熱量計

濕り蒸汽は熱量計內で流れの方向を急變し，水分を下に落す。殘つた乾き蒸汽を凝結させてその重さを測り，水分の重さと共に次式を用ひて乾き度を計算する。

G=凝結した乾き蒸汽の重さ

G''=水分の重さ

とすれば乾き度は

$$x=\frac{G}{G+G''}$$

3. 絞り熱量計

濕り蒸汽は細孔を通じて斷熱的に膨脹し，終りの狀態に於ては過熱されるやうにする。過熱蒸汽の壓力，溫度及び初の濕り蒸汽の壓力を知れば乾き度は次式により計算される。

p_1＝濕り蒸汽の壓力

x_1＝濕り蒸汽の乾き度

r_1＝p_1 に於ける潛熱

p_2＝膨脹後の過熱蒸汽の壓力

t_s＝過熱蒸汽の溫度

t_2＝p_2 に對する飽和溫度

r_2＝p_2 に於ける潛熱

とすれば，絞り過程の前後に於てはエンタルピの等しいことより

$$i_1'+x_1r_1=i_2'+r_2+c_{pm}(t_s-t_2)$$

終りの狀態が過熱する必要があるから，この熱量計は普通の汽罐壓力では 3%～5% 以內の濕り度である場合にのみ用ひられる。濕り度の大なる場合は，槽熱量計，分離熱量計を用ひるか，分離熱量計と絞り熱量計を併用する。

問　　題 (V)

1. 蒸汽管內の蒸汽の壓力は 12 atü なり。蒸汽の溫度を 230°，大氣壓を 1 at とせば，蒸汽は過熱せるや。過熱せる時には過熱度を求む。

2. 蒸汽罐あり。100 at，450° の蒸汽を每時 20 t 發生す。給水は給水加熱器に於て 100 at の下に 30° より 180° に溫められ，罐に於て蒸發し，過熱器に於て 450° に過熱される。然る時は給水加熱器，罐，過熱器に於て夫々加へた熱量は幾何か。

3. 汽罐あり。體積 2 m³ にして 120 at，飽和溫度の蒸汽と水 1000 kg を保有す。蒸汽の比體積は幾何か。罐中には幾何の水及び蒸汽があるか。罐中の蒸汽及び水のエンタルピは幾何か。

4. 汽罐あり。體積 5 m³ にして，蒸汽と水 3000 kg を保有す。汽罐を休止せるに壓力が 2 at に下つた。壓力を 20 at に上げるには幾何の熱量を加ふべきか。又その際幾何の水が蒸發するか。

5. 蒸汽が双曲線的に 1 at，乾き飽和狀態より 13 at まで壓縮せられる。壓縮中汽筒壁と交換したる熱量を求む。

6. 15 at，60° 過熱の蒸汽が 1 at まで斷熱的に膨脹する。蒸汽の終の狀態は如何。如何なる壓力で乾き飽和蒸汽となるか。又蒸汽のなす仕事は幾何か。

7. 14 at の蒸汽が絞り熱量計を通じて流れ，膨脹後 120°，1.2 at となる。蒸汽の乾き度は幾何なりしか。又エントロピの增加は幾何か。

8. 槽熱量計あり。15° の水 250 kg を保有す。これに 8 at の蒸汽を槽內の水の溫度が 38° になるまで吹込んだ所，水の重さは 260 kg となつた。蒸汽の乾き度は幾何か。

第六章　特殊蒸汽罐

49.　シユミツト罐

この罐はシユミツト (Schmidt) 會社[1] の方法で，その構造の大要を 圖-42 に示す。飽和狀態にある加熱用蒸汽を使用して所要の蒸汽を發生する。例として 60 at の蒸汽を得るには，加熱用の蒸汽は熱傳達のためにそれより溫度の高いことが必要であるから，壓力は 100 at 位であるべきである。然る時は 60 at の飽和溫度は 274.3°，100 at の飽和溫度は 309.5° となるから，溫度差は 35.2° であつて，加熱用蒸汽は蒸發熱を失つて，低壓の蒸汽を發生する。**蒸汽發生器** (steam generator)[2] は蒸汽胴 D，水胴 C，及び水管 B より成り，純水をその給水とする。それより出た加熱用蒸汽は蒸汽罐 A の水部にある加熱用蛇管を通り，60 at の蒸汽を生じ，自身は凝結する。その溫水は給水加熱器 E の中を通り，給水の溫度にまで冷却されて水胴 C に戾り循環を繰り返す。蒸汽は過熱器 F に於て 400° 位に熱せられ，機關に赴く。

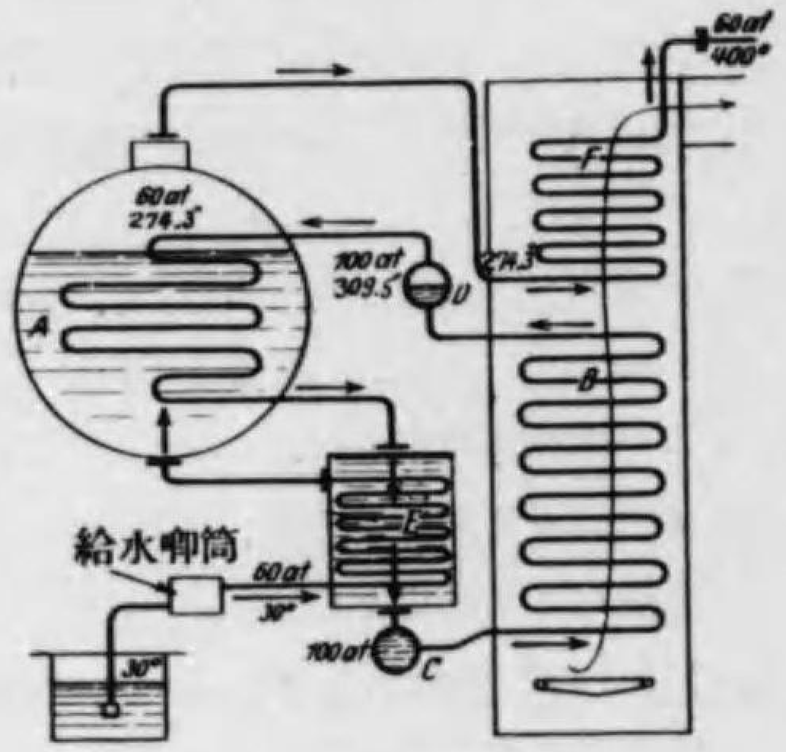


圖 -42

50.　レツフラー罐

レツフラー (Löffler) 罐の大要を圖-43 に示す。この方法に於ては加熱用蒸汽は過熱蒸汽であつて，所要の蒸汽と共に作られる。加熱用蒸汽の壓力は罐壓力より僅か高いが，過熱の熱量を所要蒸汽の蒸發に用ひるから過熱度は非常に高くしてある。例へば 100 at の蒸汽を作るためには 350°～400° 位の過熱蒸汽を使用する。圖-43 に於て A は蒸汽發生器で，100 at の飽和蒸汽を過熱蒸汽によつて發生する。この蒸汽を循環ポンプ B によつて過熱器 C に送り，それより一部 G_1 を機關に，殘部 G_2 を元の汽罐に返す。G_1 に相當する給水は給水ポンプによりて，給水加熱器を經て蒸汽發生器に送られる。

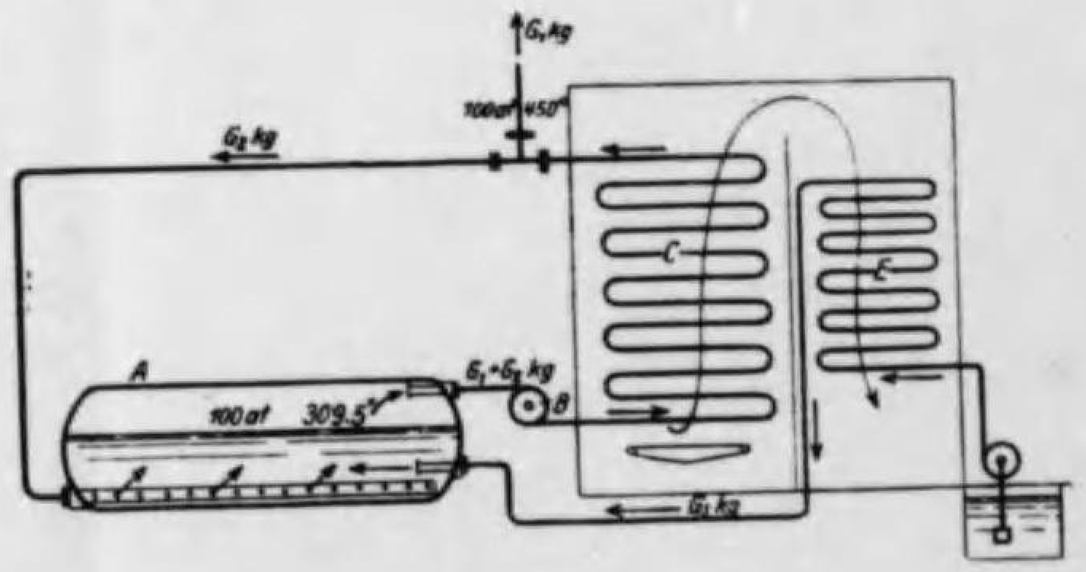


圖 -43

1. Schmidtsche Heißdampfgesellschaft.　　2. Dampferzeuger.

この罐に於ては (G_1+G_2) の飽和蒸汽のエンタルピは，G_2 の過熱蒸汽と G_1 の給水の有するエンタルピの和に等しいことより，G_1 に對する G_2 の割合が決定される。尙循環ポンプに要する動力については，レツフラーによれば蒸汽壓力 20 at の時はその必要動力が罐の出力に殆ど等しいが，100 at 以上に於ては僅か 2～3% となるから，高壓程利益となる。

51.　ベンソン罐

給水の加熱を臨界壓力より大なる壓力にて行へば，飽和蒸汽の狀態を經ることなく，自然に過熱蒸汽になる。しかしこれは蒸汽機關に用ひるのは壓力が高過ぎるのでこれを絞り，更に過熱して使用する。これはジーメンス (Siemens) 會社[1] のベンソン (Benson) 法であつて，その構造を圖-44 に示す。1 例を擧げれば給水は給水ポンプによつて壓力 230 at の下に給水加熱器 A に送られ，150° まで溫められる。それより燃燒室 B に於て 380° に溫められ，臨界狀態に近づく。それより第一過熱器 C に於て 450° になり，絞り弁 D によりて 150 at，409° となり，第二過熱器 E に於て 450° になる。それより機關に赴く。圖-45 は $i-s$ 線圖に於てこの過程を示す。

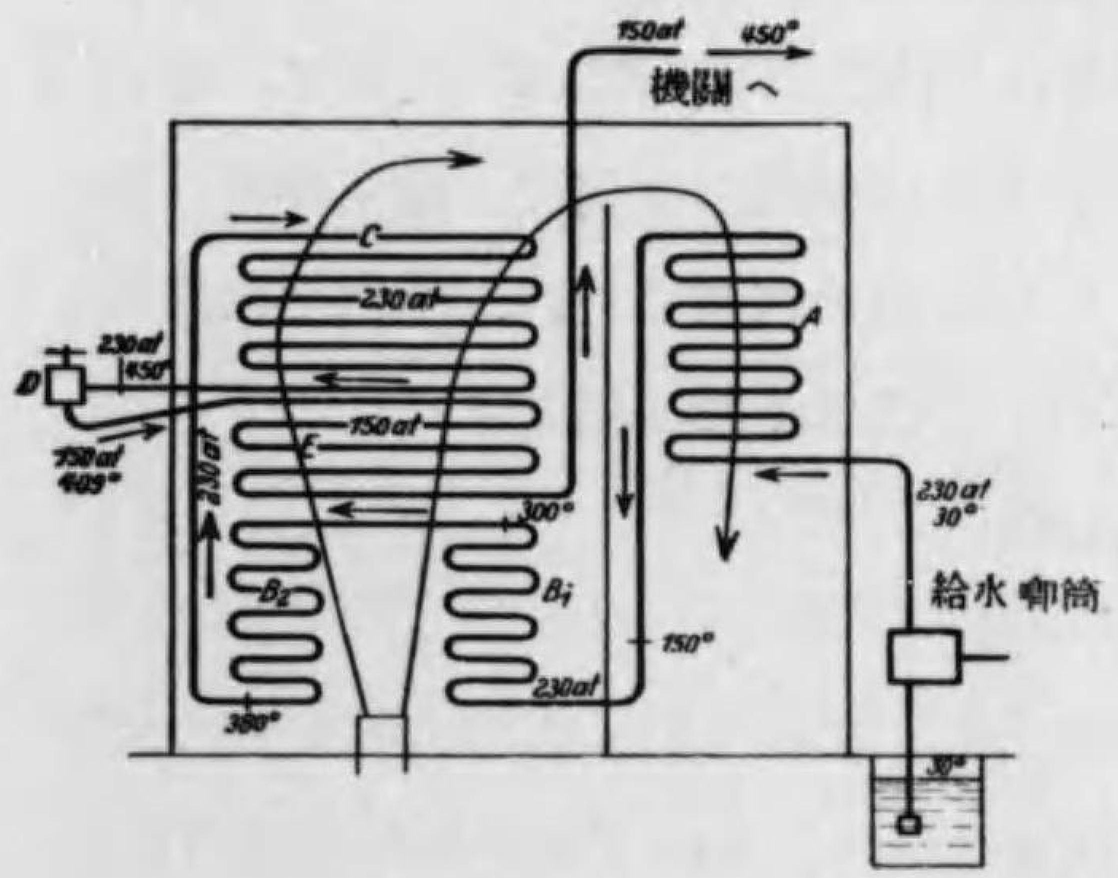


圖 -44

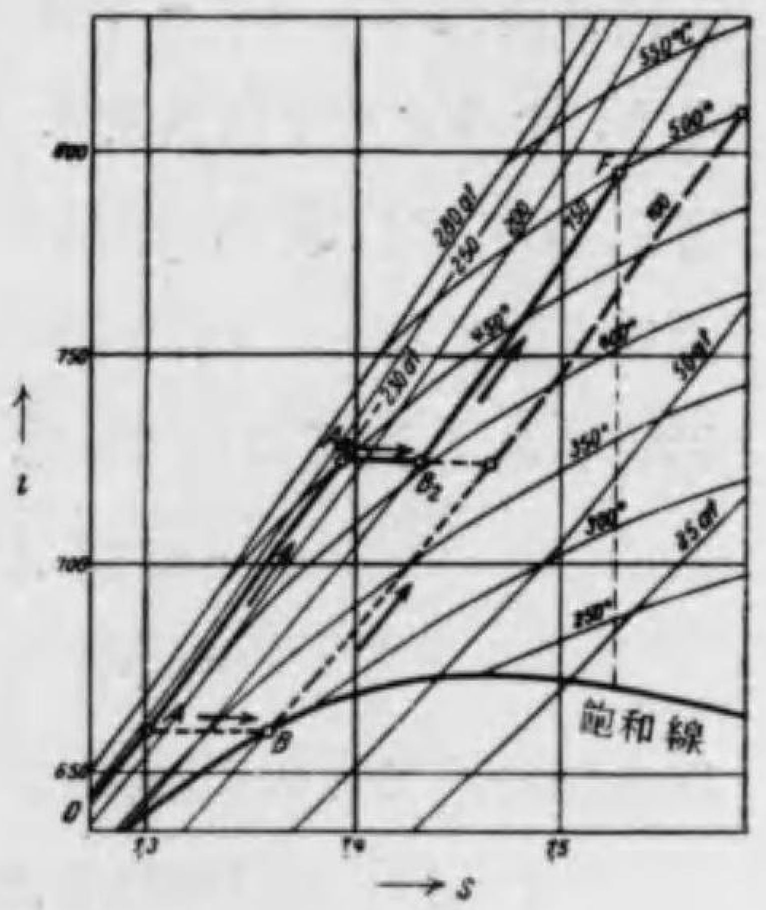


圖 -45

1. Siemens-Schuckertwerk.

第七章　蒸汽機關

52.　飽和蒸汽のカルノーサイクル

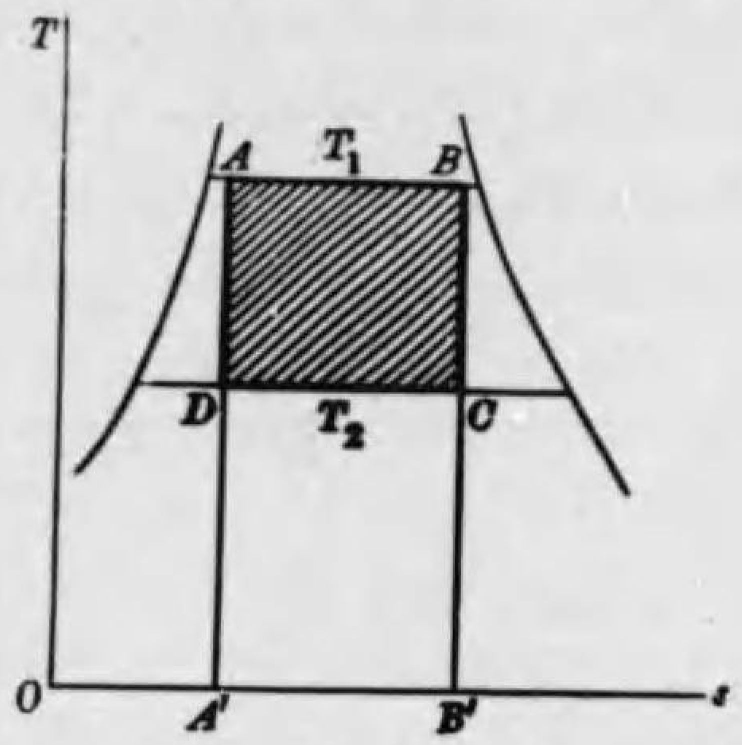


圖-46

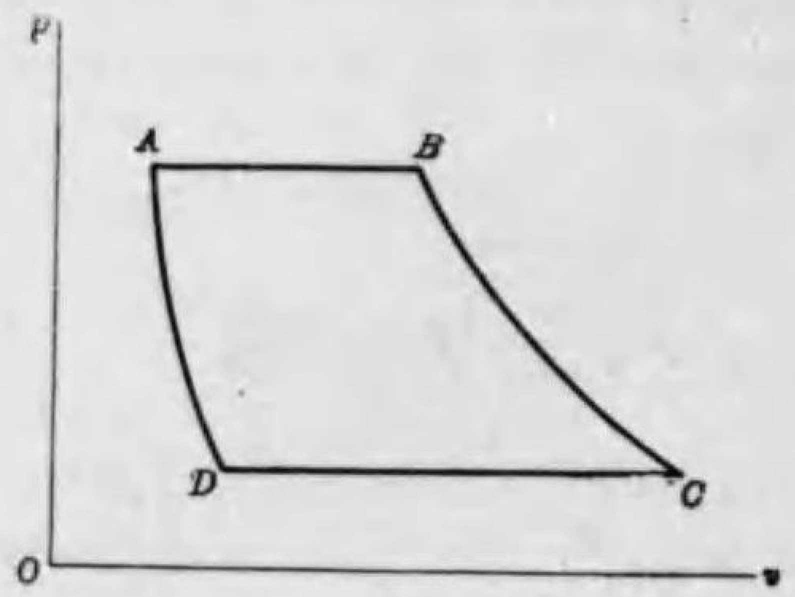


圖-47

飽和蒸汽のカルノーサイクルは完全ガスのカルノーサイクルと異なり，サイクル中に蒸發及び凝結を伴ふ。圖-46, 47 に於て，等溫膨脹 AB は汽罐で，斷熱膨脹 BC は機關の汽筒で，等溫壓縮 CD は復水器で起る。斷熱壓縮 DA を別の汽筒で行ひ，蒸汽を汽罐に供給する。汽罐に於ては水 1 kg の受取りたる熱量は

$$Q_1 = \text{面積 } A'ABB'$$
$$= r_1(x_b - x_a)$$

復水器に捨てられた熱量は

$$Q_2 = \text{面積 } A'DCB'$$
$$= r_2(x_c - x_d)$$

仕事に變りたる熱量は

$$AW = Q_1 - Q_2 = \text{面積 } ABCD$$
$$= \frac{T_1 - T_2}{T_1}\, r_1(x_b - x_a)$$

効率は

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad \text{……………(52b)}$$

カルノーサイクルの効率は蒸汽の場合にも變りはない。

蒸汽消費量 (steam consumption)[1] は 1 PSh に付き，kg にて

$$D = \frac{632}{AW} = \frac{632\,T_1}{r_1(x_b - x_a)(T_1 - T_2)} \quad \text{…………(118)}$$

A が飽和水，B が乾き飽和蒸汽ならば

$$x_a = 0, \quad x_b = 1$$

$$AW = \frac{T_1 - T_2}{T_1}\, r_1$$

$$D = \frac{632\,T_1}{r_1(T_1 - T_2)} \quad \text{………………(118a)}$$

53.　ランキンサイクル

實際の原動機に於ては，等溫壓縮は蒸汽が凝結するまで行はれる。給水はそれよりポンプにて汽罐に押込まれ，等壓の下に飽和溫度になるまで熱せられる。この過程は液線より少しく異なるが，その差は少いから液線を以てこれに當てる。溫度上昇の下の加熱であるから明かに不可逆過程である。汽罐より出る蒸汽は機關に導かれて斷熱膨脹をなし，サイクルを終る。これを**ランキンサイクル** (Rankine cycle) 又は**クラウジウス－ランキンサイクル**[2]といひ，蒸汽原動機の効率を比較するに用ふ。

1. Dampfverbrauch.　　2. Clausius-Rankine Prozeß.

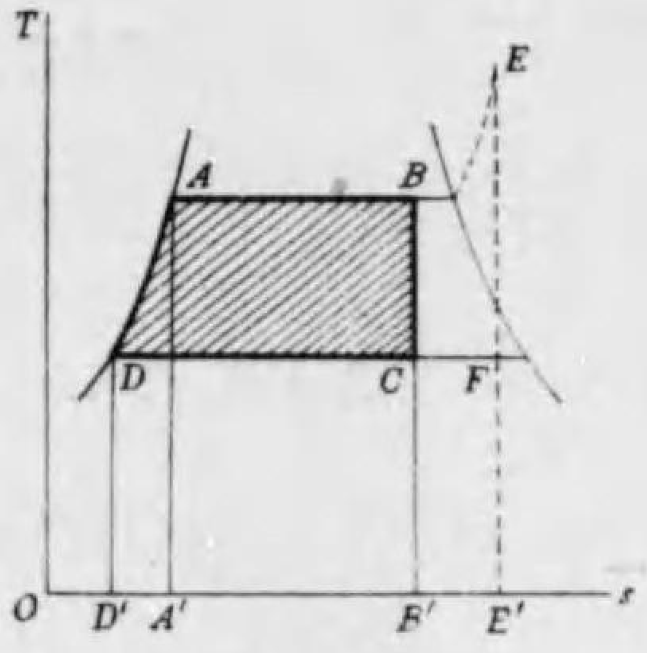


圖 -48

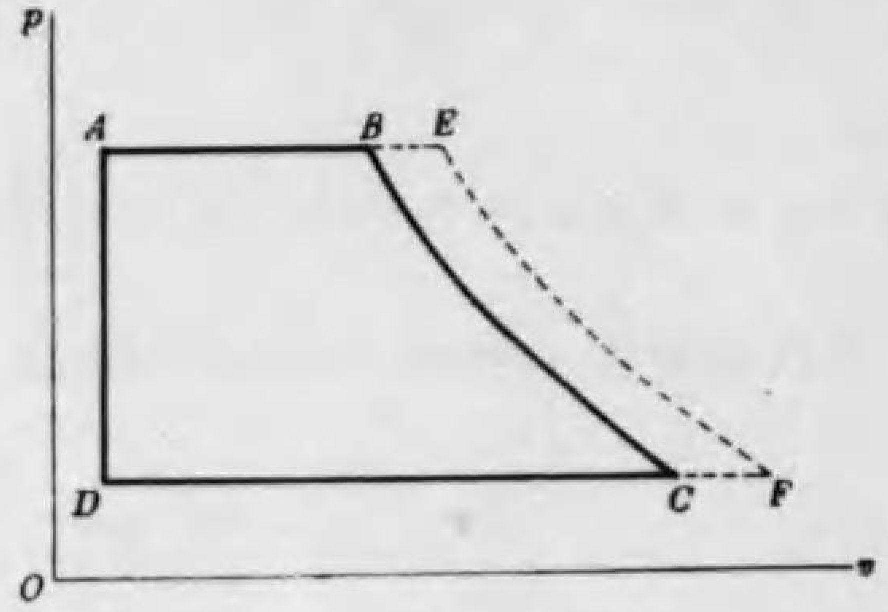


圖 -49

汽罐に於て供給された熱量は

$$Q_1 = {}_D Q_A + {}_A Q_B$$

$$= i_1' - i_2' + r_1 x_b$$

$$= i_b - i_2'$$

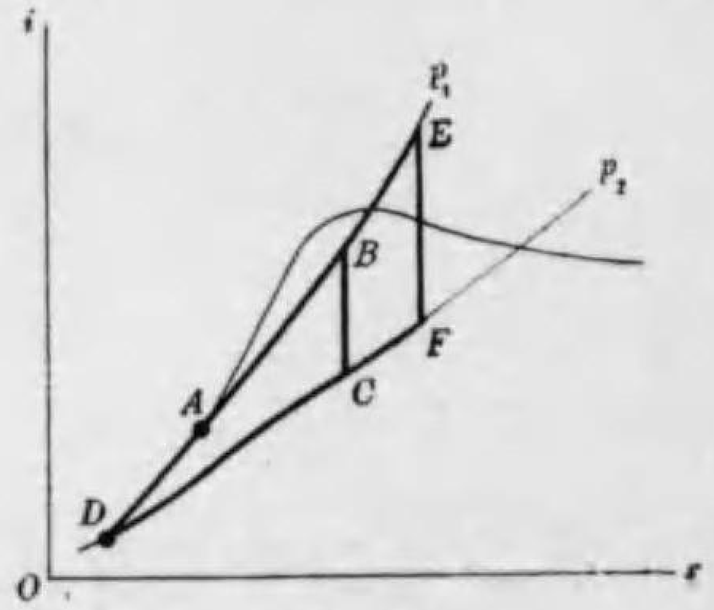


圖 -50

復水器に於て捨てられた熱量は

$$Q_2 = r_2 x_c$$

仕事に變りたる熱量は

$$AW = Q_1 - Q_2 = i_b - i_2' - r_2 x_c$$

$$= i_b - i_c$$

ランキンサイクルの効率は

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{i_b - i_c}{i_b - i_2'} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(119)$$

この効率はカルノーサイクルの効率よりも小さい。

蒸汽消費量は 1 PSh に付き

$$D = \frac{632}{AW} = \frac{632}{i_b - i_c} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(120)$$

過熱蒸汽の場合には

$$AW = i_e - i_f$$

$$\eta = \frac{i_e - i_f}{i_e - i_2'} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(119a)$$

$$D = \frac{632}{i_e - i_f} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(120a)$$

例 24. 蒸汽の壓力 10 at, 乾き度 0.98 にして, 復水器壓力 0.15 at である。カルノーサイクル及びランキンサイクルの効率を求めよ。

解　i)　蒸汽表より壓力 10 at 及び 0.15 at に於ける飽和溫度を求めれば, 179°, 53.6° である。

$$\eta_{\mathrm{Carnot}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{179 - 53.6}{179 + 273} = 0.277$$

ii)　蒸汽表より

$i_b = 181.2 + 0.98 \times 481.7 = 653.27$ kgcl/kg

$i_2' = 53.55$ kcal/kg

モリエ線圖より C 點の乾き度は 0.79

$i_c = 53.55 + 0.79 \times 566.65$

$= 501.20$ kcal/kg

$$\eta_{\mathrm{Rankine}} = \frac{i_b - i_c}{i_b - i_2'} = \frac{653.37 - 501.20}{653.37 - 53.55} = 0.254$$

54. 再熱サイクル, 再生サイクル

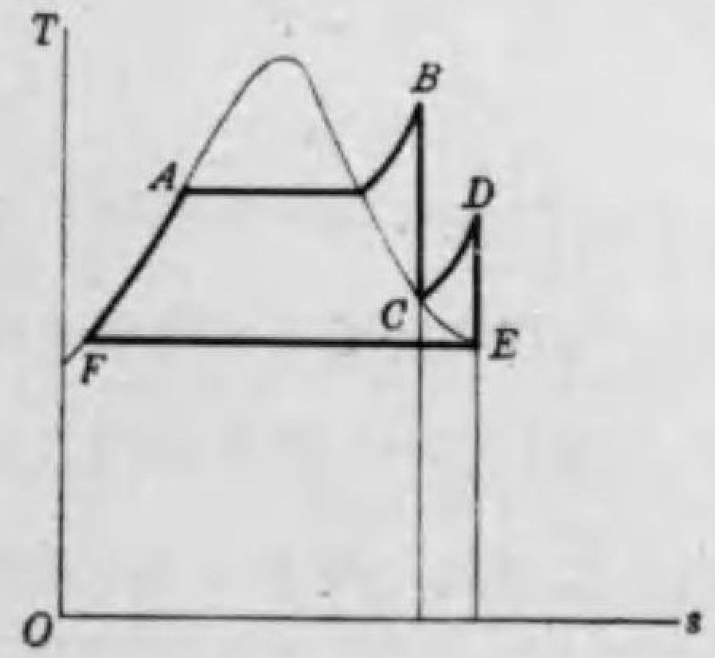


圖 -51

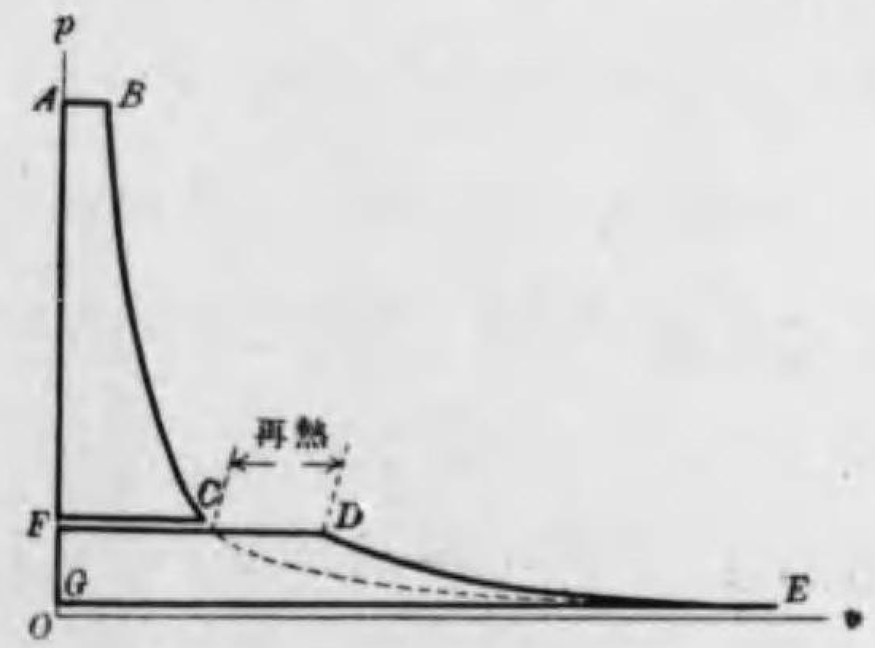


圖 -52

1. 再熱サイクル

蒸汽が原動機を一部通過した後に**再熱** (reheat)[1] して使用する方法で，複式蒸汽タービン及複式蒸汽機關に用ひられる。再熱に當つては汽罐の煙道ガス又は新しい蒸汽によりてなされる。この法によれば蒸汽のなす仕事が增加し，蒸汽が濕らないから熱效率も增加する。再熱サイクルの效率は

$$\eta=\frac{(i_b-i_c)+(i_d-i_e)}{(i_b-i_f)+(i_d-i_c)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(121)$$

2. 再生サイクル

全部の蒸汽を復水器壓力まで膨脹させないで，一部を原動機より抽汽し，給水を加熱器の壓力に相當する飽和溫度まで加熱する。かくすれば復水器で冷却水に奪はれる。熱量を給水に與へることになるから，損失熱量を減じ且復水器に於ける負荷を減ずることになる。これを**再生サイクル** (regenerative cycle)[2] といふ。

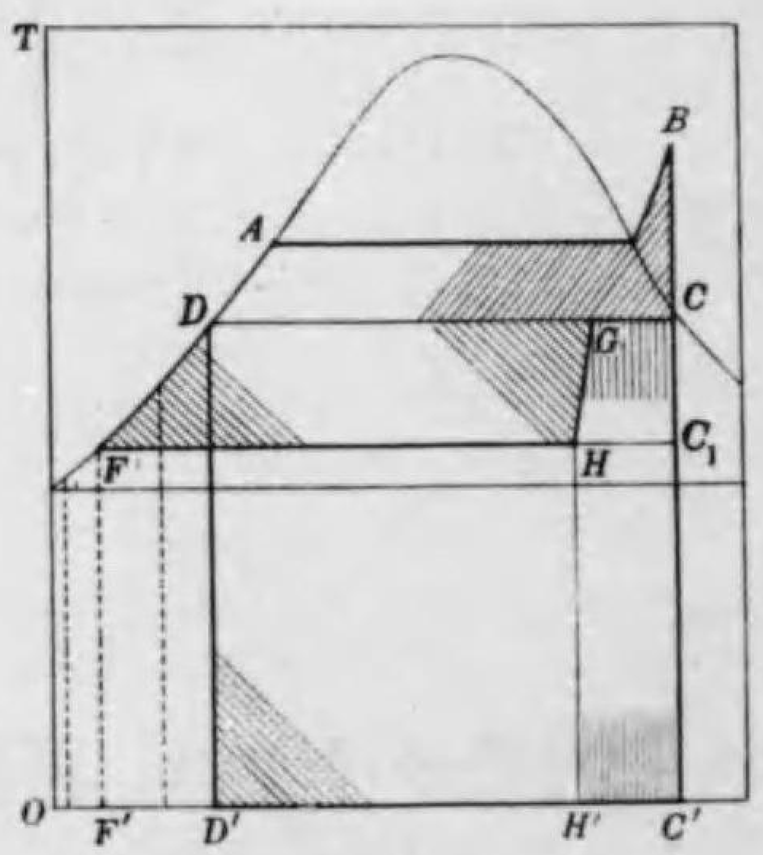


圖-53

一段抽汽の場合を圖-53に示す。1 kg の蒸汽が高壓汽筒に於てなす仕事は面積 $ABCD$ で表はされ，低壓汽筒に於てなす仕事は面積 DCC_1F で表はされる。然るに z kg の蒸汽が C 點で抽汽されるから，$\overline{DG}=(1-z)\overline{DC}$, $FH=(1-z)\overline{FC_1}$ に寸法を縮めると，低壓

1. Zwischenüberhitzung.　2. Regerativ Verfahren.

汽筒に於ける仕事は面積 $DGHF$ にて與へられる。又面積 $CGH'C'$ と面積 $DFF'D'$ とは蒸汽と給水とが交換した熱量を表はすから兩者は相等しい。この際の效率は

$$\eta=\frac{\text{面積 } ABCGHF}{\text{面積 } D'DABC'}=\frac{(i_b-i_{c_1})-z(i_c-i_{c_1})}{i_b-i_d} \quad \ldots(122)$$

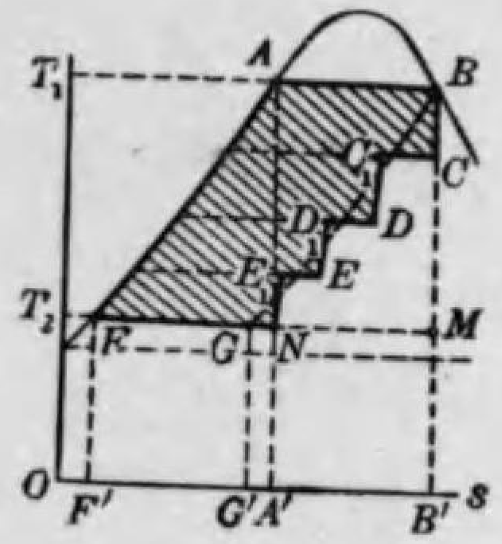


圖-54

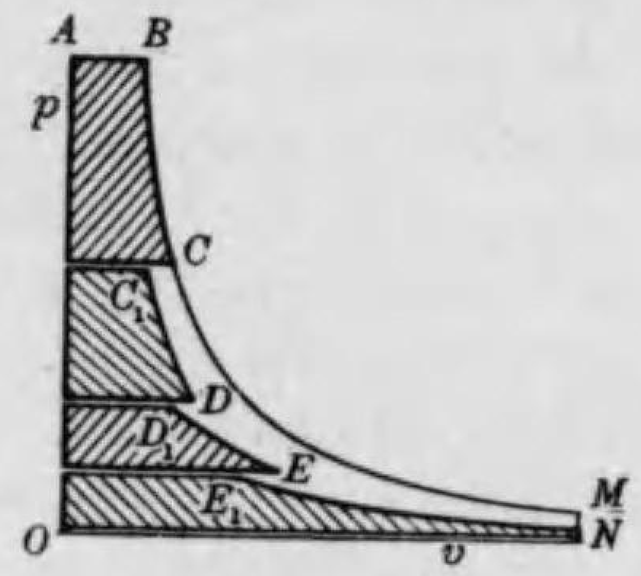


圖-55

一回の抽汽量を減じ抽汽回數を增して行けば，罐の壓力に於ける飽和溫度まで給水を溫めることが出來る。圖-54に於て膨脹曲線は $BCC_1DD_1EE_1N$ となり，回數が無限大となれば BG となり給水の加熱曲線 FA に平行になる。この際 1 kg の蒸汽のなす仕事は面積 $ABGF$, 罐で給水に與へる熱量は面積 $ABB'A'$ である。面積 $ABGF$ は面積 $ABMN$に等しいから效率は

$$\eta=\frac{T_1-T_2}{T_1}$$

となり，カルノーサイクルの效率となる。再生サイクルは蒸汽タービンに多く用ひられる。尙再生サイクルと再熱サイクルを組み合せた**再熱再生サイクル**を圖-56に示す。

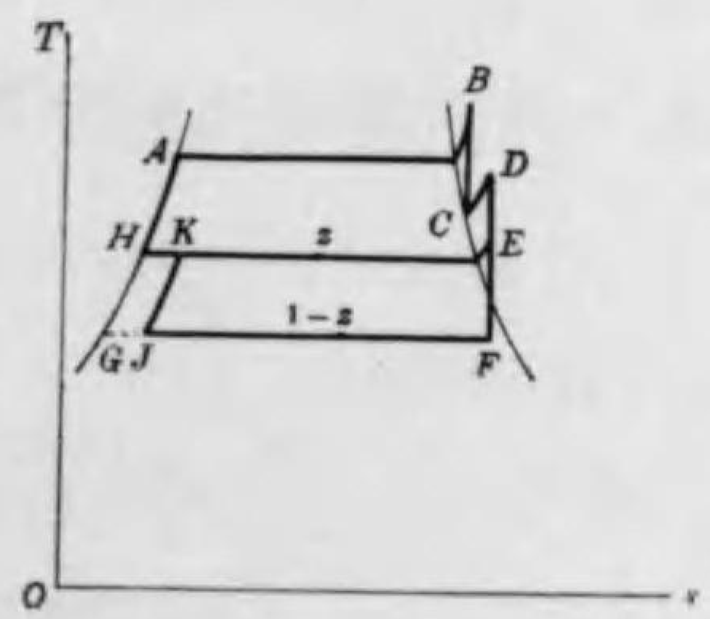


圖-56

55. 二流體サイクル

蒸汽機關に於て効率を高めるためには蒸汽の溫度を高くせねばならぬ。然るに蒸汽に於ては溫度と共に壓力が甚しく增すから不都合であるが，水銀はこれに反し 500° に於て飽和壓力は僅か 8.37 at である。低溫に於ては水銀は壓力は甚だ低く，比體積は蒸汽に比し甚だ大であるから，機關の構造上不都合である。かやうに水銀と蒸汽は各長所があるから，兩者を組み合せて，高溫部分に水銀を用ひ高溫に於て凝結せしめ，その放出する熱量で蒸汽を作り低溫部分にこれを用ひる。これが水銀と蒸汽を使用する**二流體サイクル** (binary fluid cycle) である。1例を示せば圖 -57 は蒸汽 1 kg と水銀 9.73 kg について示したもので，高溫ガスにより供給される熱量は，水銀に面積 $ABCDE$ に相當するもの，並に蒸汽の過熱に面積 $FGHD$ に相當するものである。蒸汽の液體熱の一部は再生過程により與へられ，その殘及び蒸發に要する熱量は水銀凝結器に於て與へられる。面積 $ABCF$ は水銀タービンより得られる仕事量で，與へられたる熱量の 27.4% に當る。水銀は 500°, 8.37 at に於て蒸發し，250°, 0.1 at に於て凝結する。面積 $FGQLKP$ は蒸汽タービンより得られる仕事で與へられたる熱量の 29.4% に當る。蒸汽は 235°, 31.2 at に於て蒸發し，400° に過熱し，32.5°, 0.05 at に於て凝結する。二流體サイクルの効率はかくして 56.8% となり，面積 $KLMN$ に相當する 43.2% の熱量が復水器の冷却水に與へられる。

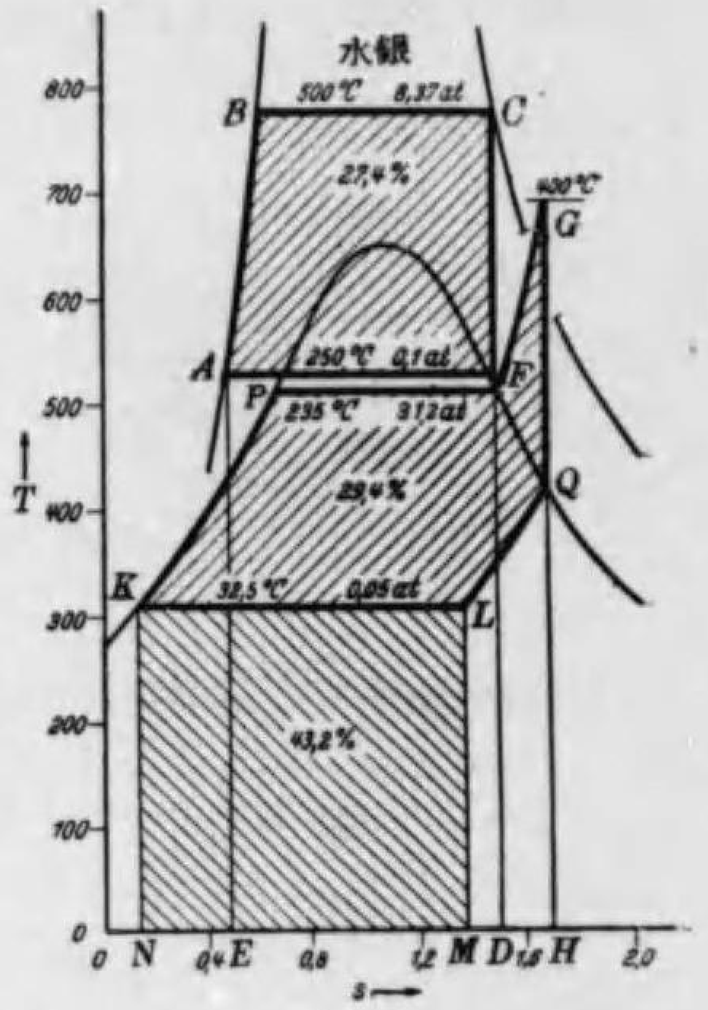


圖 -57

56. 蒸汽機關に於ける効率

$Q=i_1-i_2'$	汽罐に於て給水に與へた熱量
$AW=i_1-i_2$	ランキンサイクルにより得られる仕事
AW_i	實際の機關より得られる圖示仕事
AW_e	實際機關のクランク軸より得られる正味仕事

とせば，蒸汽機關に於ては次の如き効率を考へる。

1. 完全機關の熱効率 (standard efficiency)[1]

$$\eta_{th}=\frac{AW}{Q}=\frac{i_1-i_2}{i_2-i_2'} \qquad \text{..................(123)}$$

2. 圖示効率比，比較効率 (relative efficiency)[2]

$$\eta_i=\frac{AW_i}{AW} \qquad \text{..................(124)}$$

3. 圖示熱効率 (indicated thermal efficiency)[3]

$$\eta_t=\frac{AW_i}{Q}=\frac{AW_i}{i_1-i_2'} \qquad \text{..................(125)}$$

4. 機械効率 (mechanical efficiency)[4]

$$\eta_m=\frac{AW_e}{AW_i} \qquad \text{..................(126)}$$

5. 制動馬力効率 (brake thermal efficiency)[5]

$$\eta_e=\frac{AW_e}{Q}=\eta_{th}\ \eta_i\ \eta_m \qquad \text{..................(127)}$$

倘	G',	1時間に罐に於て燃燒した燃料の重さ
	G,	1時間に罐に於て發生した蒸汽の重さ
	H	燃料 1 kg の發熱量

とせば

6. 罐の効率 (boiler efficiency)[6]

$$\eta_k=\frac{G(i_1-i_2')}{G'H} \qquad \text{..................(128)}$$

1. thermische Wirkungsgrad des theoretischen Prozesses.
2. indizierte Wirkungsgrad, themodynamische Wirkungsgrad, Gütegrad.
3. thermische Wirkungsgrad des wirklichen Prozesses.
4. mechanische Wirkungsgrad. 5. effective Wirkungsgrad.
6. Wirkungsgrad des Kessel.

7. 原動所の効率 (overall effiency)[1]

$$\eta_w=\frac{AW_e}{G'H}=\eta_k\,\eta_e$$
$$=\eta_k\,\eta_{th}\,\eta_i\,\eta_m \qquad \cdots\cdots(129)$$

蒸汽機關と他の熱機關との運轉狀態を比較するために**熱消費量** (heat consumption)[2] を用ふ。1 PSh の仕事に付き kcal にて

$$D_h=\frac{632}{\eta} \qquad \cdots\cdots(130)$$

上式にて η は η_{th}, η_i, η_e 等。

蒸汽機關に於ては大約

$\eta_i=0.5\sim0.9$

$\eta_t=0.1\sim0.3$

$\eta_m=0.8\sim0.9$

制動馬力に對する熱消費量は大約

蒸汽機關[3]	2200～5900	kcal/PSh
ガス機關	2200	kcal/PSh
ディーゼル機關	1500	kcal/PSh

57. 實際蒸汽機關サイクルと完全機關サイクルとの比較

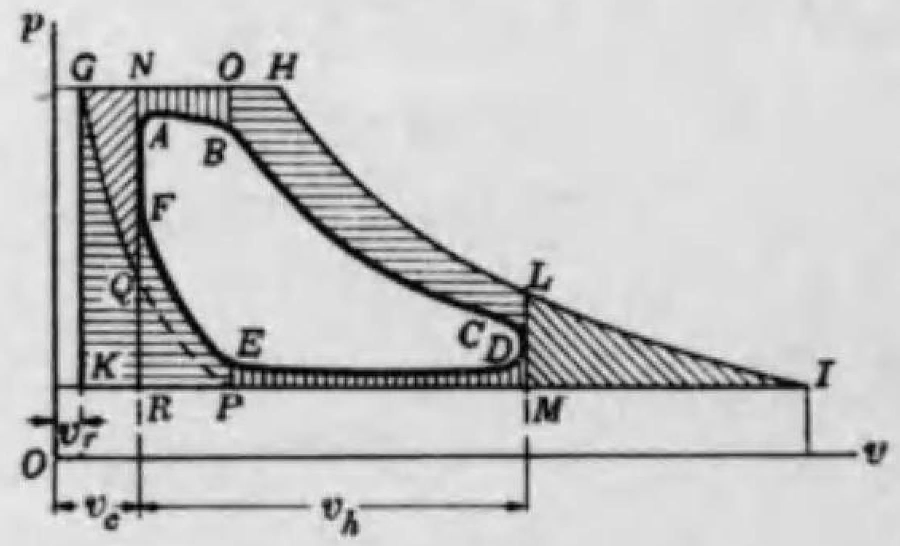


圖 -58

實際機關に於ける損失は一般に箇々の原因によるものを分離することは不可能で，同時に起ることが多い。ランキンサイクルをなす機關卽ち完全機關の線圖と實際機關のインヂケータ線圖とを圖 -58 に比較してある。圖に

1. wirtschaftliche Wirkungsgrad.　2. Wärmeverbrauch.
3. steam engine, Dampfmaschine.

於て　面積 LIM は不完全膨脹による損失

面積 $OHLCBO$, $FEPKGQF$ は筒壁による損失

面積 $NOBA$, $DMPE$ は絞り損失

面積 GNQ は隙間體積による損失（GQ は**バネ蒸汽**-cushion steam[1] の斷熱壓縮線）

である。これを詳細に見るに

1. 溫度差の下に於ける熱の流れによる損失

汽罐の傳熱面の溫度は 500° 位であり，熱ガスの溫度 1200～2000° 位であるから，溫度差の下に傳熱現象が行はれる。罐より機關に來る間に蒸汽管に於て外部に熱が失はれ，又汽筒に於ても同じ現象が起る。復水器に於ては冷却水に癈汽の有する熱を與へるためには矢張溫度差が存するので，例へば 16 at の蒸汽を供給され，復水器に於ける蒸汽溫度を 35°，冷却水の溫度を 15° とすればランキンサイクルの仕事の 13% が失はれる。

2. 不完全膨脹による損失

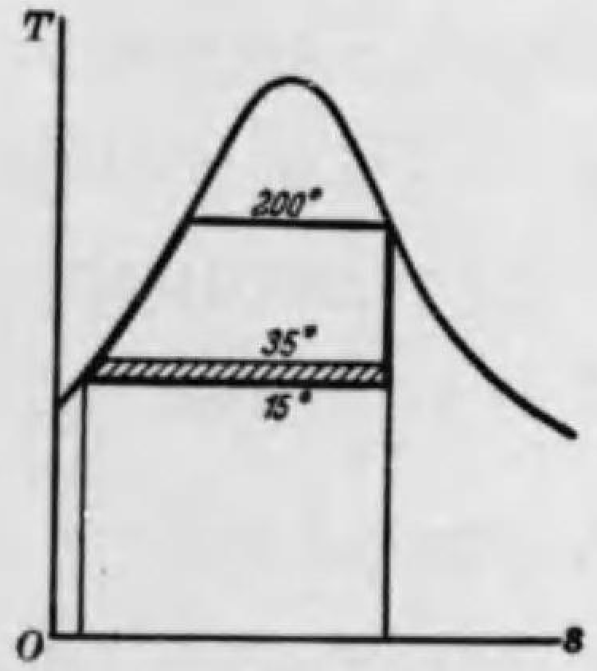


圖 -59

蒸汽機關に於ては蒸汽を初壓 p_1 より背壓 p_0 迄膨脹させると甚大なる汽筒體積を要し，ピストン摩擦と壁損失が增す。故に膨脹を中間壓力卽ち**終壓** (terminal pressure) p_2 で打切るので，圖 -60, 61 に於て面積 CEF にて表はされる仕事が失

1. Restdampf.

はれる。その値は次式により與へられる。

$$AW_e=i_e-i_c-Av_2(p_2-p_0) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(131a)$$

$$W_e=\frac{k}{k-1}p_2v_2\left[1-\left(\frac{p_0}{p_2}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]-v_2(p_2-p_0) \quad \cdots(131b)$$

このサイクルの仕事量は次式により與へられる。

$$AW=i_b-i_e+Av_2(p_2-p_0) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(131c)$$

不完全膨脹による損失は熱となりて蒸汽に入り，復水器に至る狀態は G によりて表はされる。

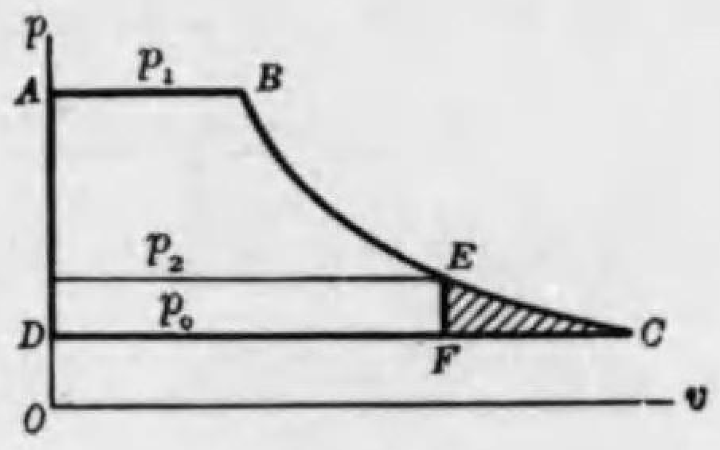


圖-60

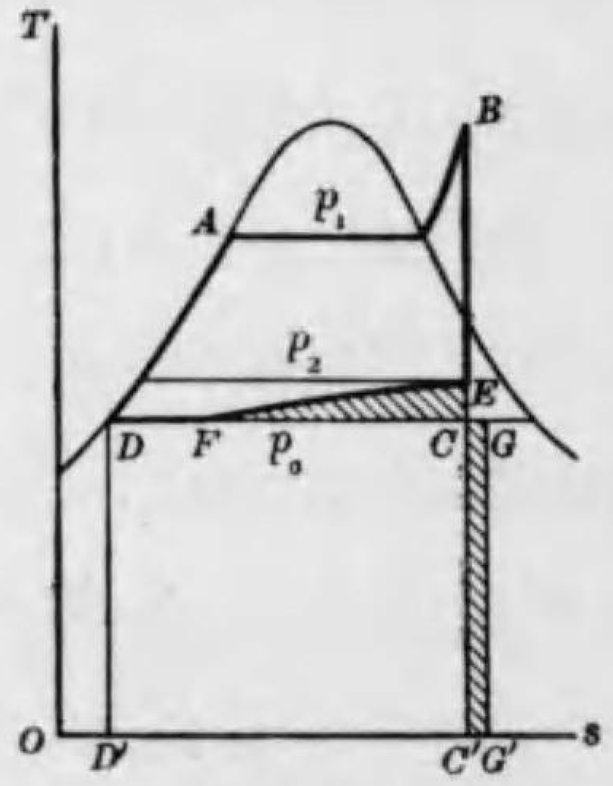


圖-61

瘶汽の吐出に於ては p_2-p_0 の壓力で流出するから動的エネルギを得て，これが復水器に於ては摩擦のために熱となる。これを有効に利用するためには舶用機關では**バウエル－ワツハ瘶汽タービン** (Baner-Wach exhaust turbine)[1] を設備することもある。

3. 汽筒壁の損失

蒸汽は汽筒に入り來る時は高溫で，膨脹すると共に低溫となり，時々刻々に溫度は變化する。然るに汽筒壁は熱容量が大で，傳熱に

1. Abdamptturbine.

も限りがあるから，蒸汽溫度と共に變化する能はず，蒸汽の最高最低溫度間に位する一定の平均溫度を有してゐる。故に新しい蒸汽は冷い汽筒壁に觸れて一部凝結する。即ち**最初の復水** (initial condensation)[1] をする。行程の終りに於ては蒸汽の溫度は汽筒壁より下るから凝結水は再び蒸發する。即ち**再蒸發** (re-evaporation)[2] をする。圖-62 は $p-v$ 線圖に於ける汽筒壁の損失を示す。最初の復水がなければ蒸汽は AB 丈供給される所冷却があれば AB_1 となり，膨脹の初に於ては B_1 より F までは蒸汽より汽筒壁に熱が流れる。

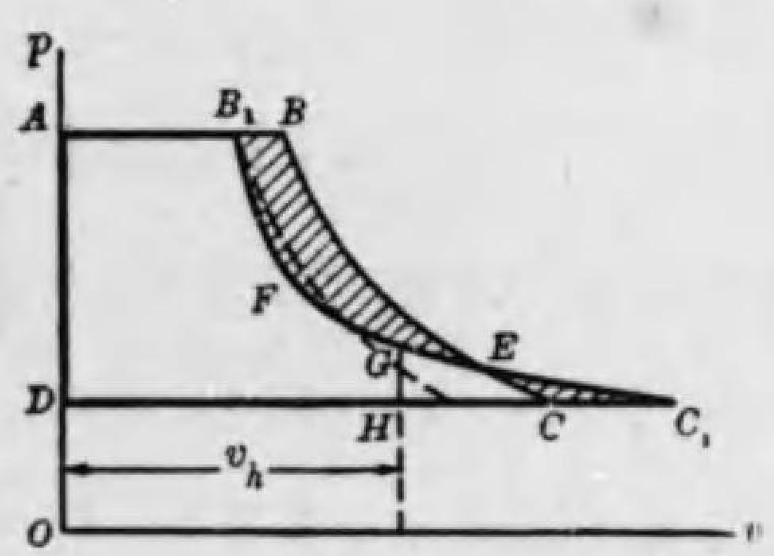


圖-62

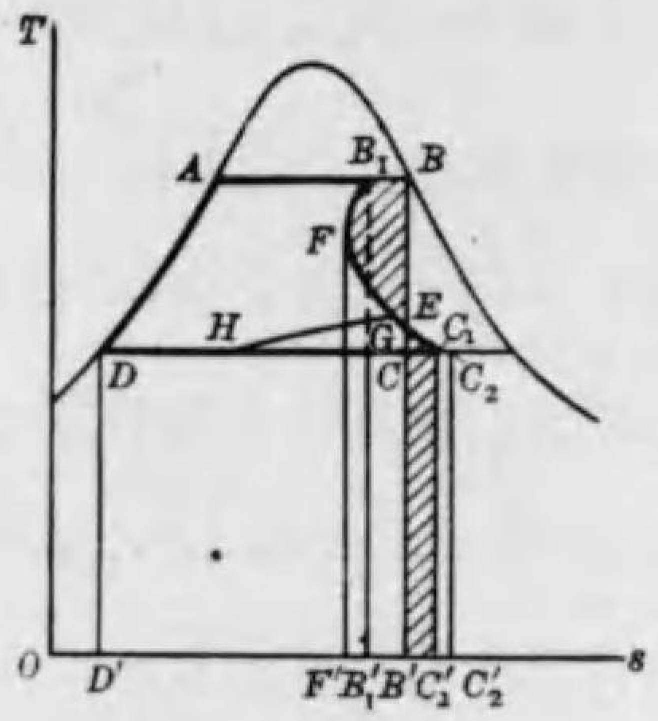


圖-63

F に於ては蒸汽の溫度は汽筒壁の溫度と等しくなり瞬間的には斷熱變化をする。後熱が汽筒壁より蒸汽に移り C_1 に至る。圖に於て點線は斷熱線を示す。完全機關サイクルと比較せば仕事の減少は BB_1FE-EC_1C となり，これを**汽筒壁損失**[3] といふ。圖-63 は $T-S$ 線圖にてこれを示す。

4. 絞り損失

機關に於ては蒸汽の流入口の大きさは限られて居り，開くのに或

1. Eintrittskondensation. 2. Nachverdampfung. 3. Wandverlust.

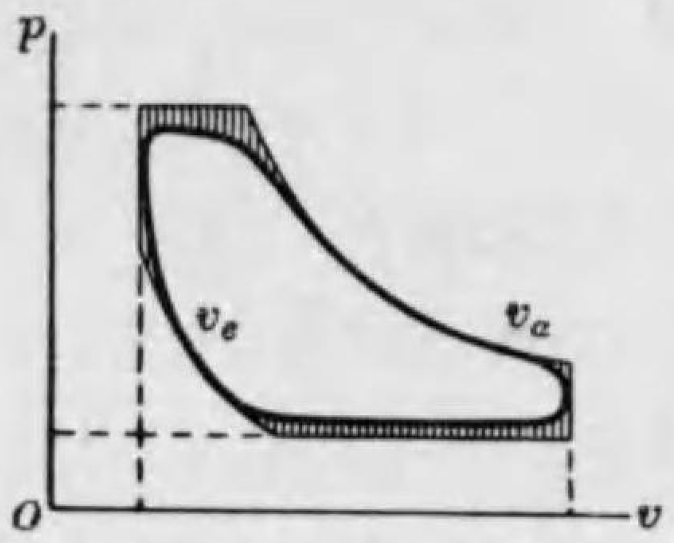


圖 -64

時間を要する事より，弁，滑り弁等のため壓力損失が起る。これを圖 -64 に示す。圖に於て v_a, v_e は死點に於て充分なる弁の開きを得るために，弁を開け始める點である。入口の絞りにより熱に變つた仕事は蒸汽の乾き度を高め一部は再び仕事として得られるが，出口の絞りにより高速を得に蒸汽は內部摩擦により蒸汽のエンタルピを高めて復水器に趣く。

5. 隙間體積による損失

機關に於ては弁の動作のため空間を要し，又ピストンが運轉中事故を起さぬためにも隙間體積が必要である。壓縮を行はぬとせば，新しい高壓の蒸汽が復水器の壓力の蒸汽の存してゐる所に流れ込むから自由膨脹をすることになる。かく隙間體積による損失を避けるためには壓縮を死點より前 D より始めればよいが，その代り仕事量が減ずる。

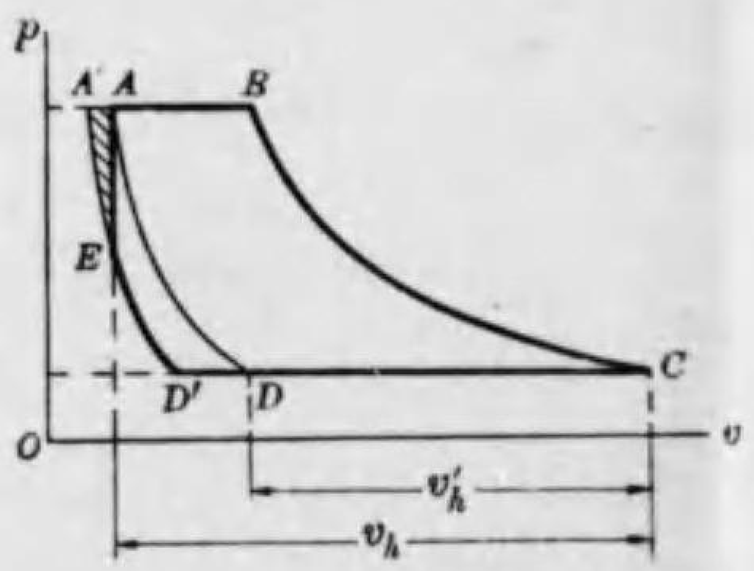


圖 -65

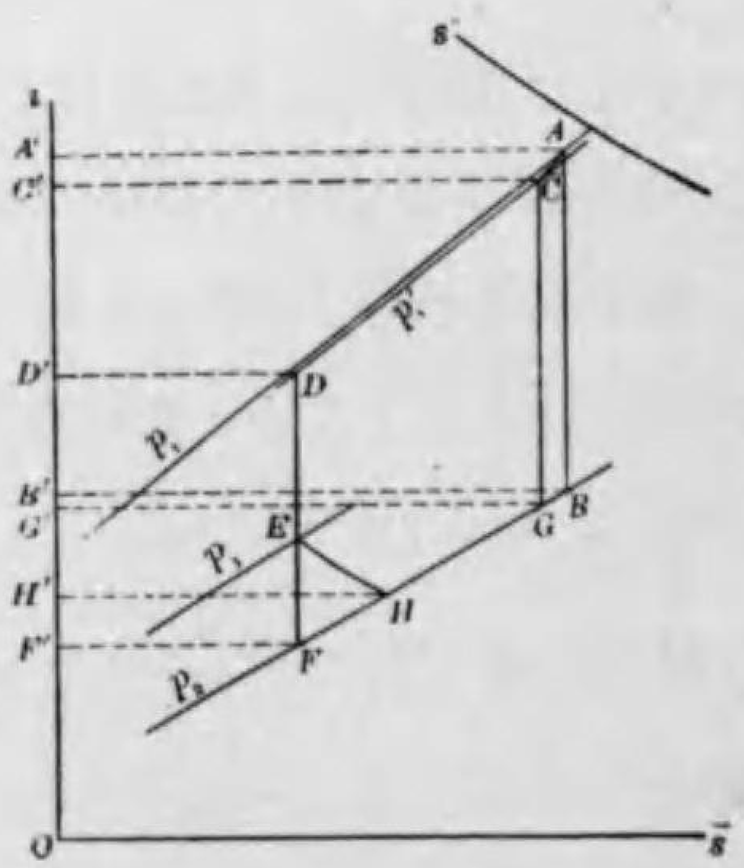


圖 -66

一般には死點と D の中間 D' の如き點より壓縮を始めるから隙間損失は $AA'E$ となる。蒸汽は普通壓縮の始めに於て乾き飽和の狀態にある。

圖 -66 は $i-s$ 線圖に於ける蒸汽機關サイクルを示す。

$(A'B'-C'G')$ は蒸汽管中の損失，
$(C'G'-D'F')$ は最初の復水による損失，
$(D'F'-D'H')$ は不完全膨脹による損失，
隙間體積による損失は C 點が D 點に近寄ることにより示される。

58. インヂケータ線圖を $T-S$ 線圖に移すこと，ブールバンの方法

ブールバン (Boulvin) の方法にては重さ G_r のバネ蒸汽と，重さ G_f の動作蒸汽とが始終汽筒中にあつて，動作蒸汽は復水器で凝結する代りに汽筒中で凝結し熱を汽筒壁を通じて棄て，新しい蒸汽が汽筒に流入する代りに凝結水が再び汽筒內で蒸發すると考ふ。即ち (G_f+G_r) の重さの蒸汽がサイクルをなすと考へる。

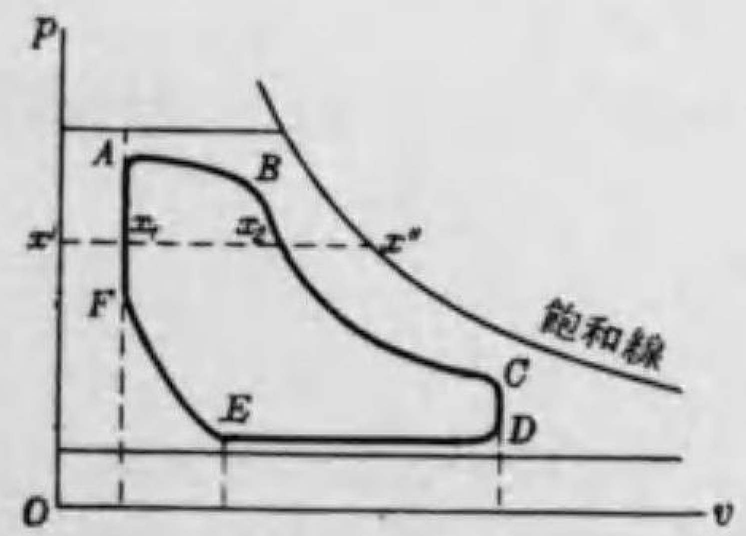


圖 -67

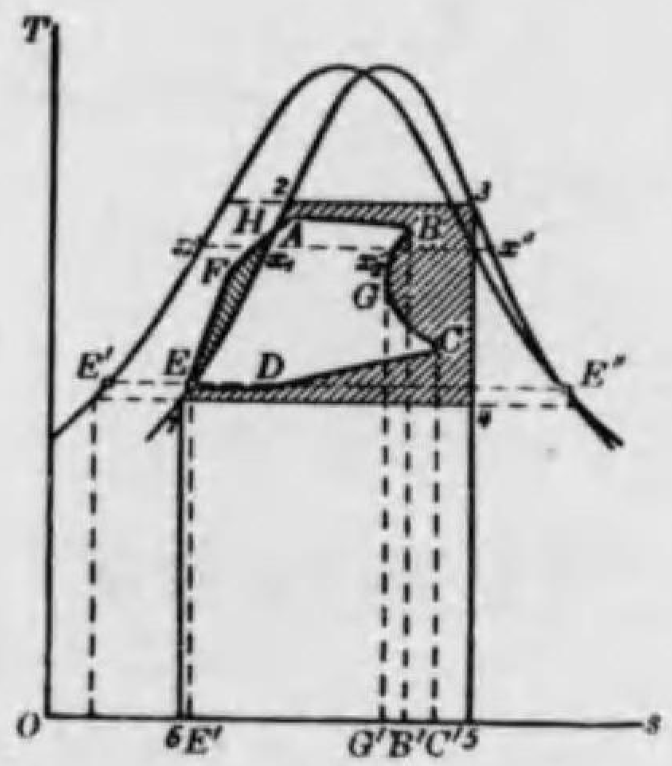


圖 -68

1. G_r を求めること

圖 -67 に於て p_e，v_e 壓縮の初 E 點の狀態とせば，蒸汽表より p_e に相當する蒸汽の比體積 v'' を得て，G_r は次式より求められる。

$$v_e = G_r v''$$

$$\therefore \quad G_r = \frac{v_e}{v''} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (132)$$

2. G_f を求めること

G_f は蒸汽消費量と機關の回轉數が知られると，次式により計算せられる。

$$G_f=\frac{\text{毎時間に使用される蒸汽量}}{\text{毎時間の行程數}}$$

例 25. インヂケータ線圖に於て，壓縮初の體積は 0.002493 m³，壓力は 2.46 at なり。機關が毎分 102 回轉をなし，蒸汽消費量を毎分 6.26 kg とすれば，膨脹行程に於て汽筒にある蒸汽量を見出せ。

解　2.46 at に於ては $v''=0.7437\ \mathrm{m^3}$

$$G_r=\frac{v_e}{v''}=\frac{0.002493}{0.7437}=0.00335\ \mathrm{kg}$$

$$G_f=\frac{G}{2n'}=\frac{6.26}{2\times102}=0.0307\ \mathrm{kg}$$

$$G_f+G_r=0.0307+0.00335=0.03405\ \mathrm{kg}$$

圖 -67 の $p-v$ 線圖に於て E は壓縮初で，乾き飽和蒸汽としてバネ蒸汽 G_r が存在してゐる。液線は p 軸と一致してゐるから，飽和線を (G_f+G_r) に對して引く。圖 -67 に於ける等壓線 $x'x''$ は圖 -68 の $T-S$ 線圖に於て等溫線 $x'x''$ に相當する。圖 -67 の 2 點 x_1x_2 を同じ割合で分割する樣に圖 -68 の x_1x_2 に移す。かくしてインヂケータ線圖 $ABCDEF$ を $T-S$ 線圖 $ABCDEF$ に移すことが出來る。蒸汽が初過熱してゐる時には，圖 -67 の過熱部分に等溫線を引き，圖 -68 の過熱部分に等壓線を引き，圖 -67 の一點を圖 -68 の相當する p, T の點に移す。

圖 -67，68 の點 E に於てはバネ蒸汽は乾き蒸汽として存し，動作蒸汽は復水器に於ける水として存する。故に圖 -68 に於て $E'E$ はバネ蒸汽に相當し，EE'' は動作蒸汽に相當する。然る時は

$$G_f:(G_f+G_r)=EE'':E'E''$$

となり動作蒸汽に對するサイクルは前サイクルの $\dfrac{G_f}{G_f+G_r}$ 倍となり，E''，E を通る。

59. 汽筒體積の計算

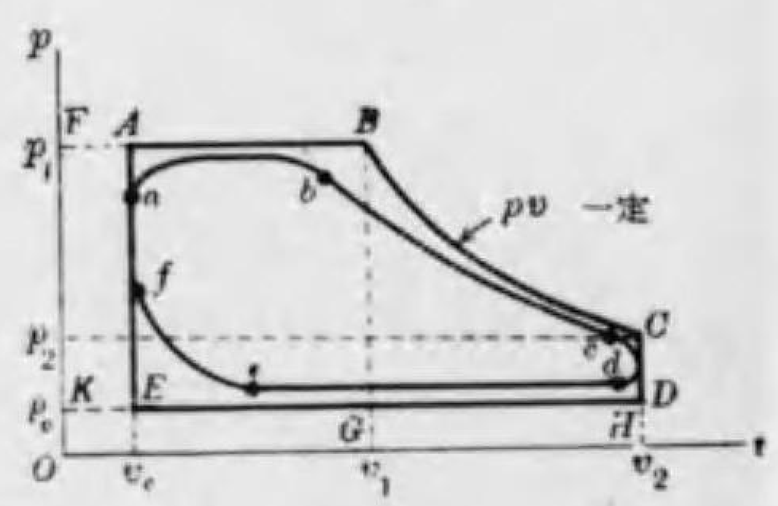


圖 -69

氣筒の寸法を計算するには，インヂケータ線圖を假定する。それには圖 -69 の如き汽筒壁の損失，絞り損失及び壓縮が無く，膨脹は双曲線的に行はれる場合の線圖 $ABCDE$ を考へ，その仕事を次式の如く得る。

p_1＝罐に於ける壓力

p_2＝終　　壓

p_o＝背壓＝復水器壓力

v_c＝汽筒の隙間體積

v_1＝締切に於ける汽筒體積

v_2＝汽筒の全體積

とせば，**膨脹率** (rate of expansion) は

$$r=\frac{v_2}{v_1}$$

毎行程の仕事は

$$W=\text{面積 } ABCDE$$

$$=\text{面積 } FBGO+\text{面積 } GBCH-\text{面積 } KDHO-\text{面積 } FAEK$$

$$=p_1v_1+p_1v_1\log r-p_ov_2-(p_1-p_o)v_c$$

$$=p_1v_1(1+\log r)-p_ov_2-(p_1-p_o)v_c \quad \text{...............(133)}$$

平均有效壓力 (mean effective pressure)[1] は

$$p_m=\frac{W}{v_2}$$

$$=\frac{p_1v_1(1+\log r)-p_ov_1-(p_1-p_o)v_c}{v_2}$$

$$=\frac{p_1(1+\log r)}{r}-p_o-(p_1-p_o)\frac{v_c}{v_2} \quad \text{.........(134)}$$

(133)，(134) に於て v_c が甚だ小さいのでこれを省略すると

$$W=p_1v_1(1+\log r)-p_ov_2 \quad \text{...............(133')}$$

1. mittlerer Druck, Nutzspannung.

$$p_m = p_1 \frac{1+\log r}{r} - p_o \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(134')$$

次に前記の損失を含むインヂケータ線圖 $abcdef$ を考へると，兩者の面積の比を**線圖係數** (diagram factor) といふ。

$$f = \frac{\text{面積 } abcdef}{\text{面積 } ABCDE} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(135)$$

$$\therefore \ \text{面積 } abcdef = f \times \text{面積 } ABCDE$$

かくて線圖係數が與へられると，與へられたる馬力，回轉數に對して汽筒寸法が決定せられる。隙間體積，ピストン桿面積を無視し

$$l = \text{行程} = a \times \text{ピストン直徑} = ad$$

$$v_2 = \text{汽筒の全體積} = \frac{\pi}{4} d^2 \times ad = \frac{\pi}{4} ad^3$$

$$v_1 = \text{締切の體積} = \frac{v_2}{r}$$

とすれば

$$W = f\left[p_1 v_1 (1+\log r) - p_o v_2\right]$$

$$= f\left[p_1 \frac{v_2}{r}(1+\log r) - p_o v_2\right] \qquad \cdots\cdots\cdots(135')$$

又

$$W = \frac{N \times 75 \times 60}{2n'} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(136)$$

(135′), (136) より

$$\frac{4500N}{2n'} = f v_2 \left[\frac{p_1}{r}(1+\log r) - p_o\right] \qquad \cdots\cdots\cdots(137)$$

(137) より v_2 は計算せられる。

例 26. 13 at の乾き飽和蒸汽を供給せられ，締切 40%，背壓 1 at なる複動蒸汽機關あり。每分 175 回轉に於て 450 H.P. を出す。線圖係數 0.7，行程が汽筒直徑の 1.4 倍なりとせば汽筒の寸法を見出せ。

解

$$\frac{4500N}{2n'} = f v_2 \left[\frac{p_1}{r}(1+\log r) - p_o\right]$$

$$\frac{4500 \times 450}{2 \times 175} = 0.7 v_2 \left[\frac{13}{\frac{1}{0.4}}\left(1+\log\frac{1}{0.4}\right) - 1\right] \times 10000$$

$$v_2 = 0.0923 \text{ m}^3$$

$$\therefore \ d = 0.0973 \text{ m}$$

$$l = 0.1362 \text{ m}$$

60. 蒸汽機關の熱勘定

蒸汽機關に對して供給された熱量が如何なる方面に幾何赴くかを調べることを**熱勘定** (heat balance)[1] といふこれを爲すには，蒸汽機關を一定荷重，一定の蒸汽供給の下に**試驗** (test)[2] をして，インヂケータ線圖を採取し，**蒸汽套** (steam jacket)[3] に供給する蒸汽量，汽筒に供給する蒸汽量，及び復水器の冷却水量等を測定する。

1. 機關に供給された蒸汽の有する熱量

蒸汽の壓力及び過熱蒸汽ならば溫度，飽和蒸汽ならば乾き度を測定する。汽筒に供給された蒸汽量は復水器で凝結した量より，汽套に供給された蒸汽量は汽套排水量より知られる。

$$i_1 = \text{蒸汽の有するエンタルピ}$$

$$G_I = \text{汽筒に每分供給された蒸汽量}$$

$$G_J = \text{汽套に每分供給された蒸汽量}$$

1. Wärmebilanz.　2. Versuch.　3. Dampfmantel.

とせば毎分機關に供給された熱量は

$$Q=i_1(G_f+G_J) \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots(138)$$

2. 圖示馬力に使用された熱量

圖示馬力はインヂケータ線圖より得られる。然る時は毎分の熱量は

$$Q_1=\frac{N_i\times 75\times 60}{J}$$

$$=\frac{4500N_i}{427} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots(139)$$

3. 癈汽中に捨てられた熱量

G_c＝復水器に於ける毎分の冷却水量

t_1＝冷却水の入口に於ける溫度

t_2＝冷却水の出口に於ける溫度

i_2'＝湯溜 (hot well) に於ける凝結水の有するエンタルピ

とせば，癈汽中に保持される熱量は

Q_2＝冷却水に與へた熱量＋湯溜に捨てた熱量

$$=G_c(t_2-t_1)+G_ji_2' \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots(140)$$

4. 汽套排水中に捨てられた熱量

i_3'＝汽套排水の有するエンタルピ

とせば，毎分汽套排水中に捨てられた熱量は

$$Q_3=G_Ji_3' \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots(141)$$

5. 輻射等に捨てられた熱量

これは (138) より (139) (140) (141) を引いた殘である。熱平衡表は上述の事項を一括して次の如く表はす。

	熱量 (kcal)	百分比 (%)
毎分機關に供給された熱量		
毎分圖示馬力に使用された熱量		
毎分癈汽に捨てられた熱量		
毎分汽筒排水に捨てられた熱量		
輻射等に捨てられた熱量		
計		100

例 27. 蒸汽機關の試驗に於て次の記錄を得たり。圖示馬力，制動馬力，機械效率，完全機關の熱效率，比較效率及び原動所の效率を求め，機關の熱平衡表を作れ。

行　程　$l=300$ mm

ピストン直徑　$d=200$ mm

毎分回轉數　$n=170$

蒸汽は乾き飽和蒸汽にて

蒸汽壓力　$p_1=2.7$ at

毎分蒸汽消費量　$G_f=2.8$ kg

復水器壓力　$p_2=1$ at

復水器に於ける

毎分冷却水の量　$G_c=45.6$ kg

冷却水の入口溫度　$t_1=8.6°$

冷却水の出口溫度　$t_2=37.5°$

燃料については

毎分石炭消費量　$G'=0.25$ kg

石炭の發熱量　$H=8400$ kcal/kg

制動荷重については

制動荷重　$G_b=56.6$ kg

バネ秤讀み　$G_o=6.64$ kg

制動車の直徑　$d_b=600$ mm

インヂケータ線圖については

インヂケータ線圖の面積　$F_i=6.72\ \mathrm{cm}^2$

インヂケータ線圖の長さ　$l_i=6.8$ cm

インヂケータバネの強さ　$S=1$ kg/14 mm

解

1. 馬　力

平均有效壓力，$p_m=\dfrac{F_i\times S}{l_i}=\dfrac{6.72\times 1}{6.8\times 1.4}=0.706\ \mathrm{kg/cm^2}$

ピストン面積，$F=\dfrac{\pi}{4}d^2=\dfrac{\pi}{4}(20)^2=100\pi\ \mathrm{cm^2}$

圖示馬力，$N_i=\dfrac{2p_mFln}{60\times 75}=\dfrac{2\times 0.706\times 100\pi\times 0.30\times 170}{60\times 75}$

$=5.03\ PS$

制動馬力， $N_e=\dfrac{(G_b-G_o)\,r\times 2\pi n}{60\times 75}$

$$=\frac{(56.6-6.64)\times 0.3\times 2\pi\times 170}{60\times 75}$$

$$=3.55\ PS$$

2. 効　率

機械効率， $\eta_m=\dfrac{N_e}{N_i}=\dfrac{3.55}{5.03}=0.705$

圖示熱効率， $\eta_{it}=\dfrac{4500N_i}{G_f J\,(i_1-i_2{}')}=\dfrac{4500\times 5.03}{2.8\times 427\times(649.7-99.12)}$

$$=0.034$$

完全機關の熱効率， $\eta_{ith}=\dfrac{i_1-i_2}{i_1-i_2{}'}=\dfrac{649.7-609}{649.7-99.12}=0.074$

比較効率， $\eta_i=\dfrac{\eta_{it}}{\eta_{ith}}=\dfrac{0.034}{0.074}=0.46$

原動所の効率， $\eta_{ie}=\dfrac{4500N_e}{G'HJ}=\dfrac{4500\times 3.55}{0.25\times 8400\times 427}=0.018$

3. 熱勘定

機關に供給されたる熱量， $Q=i_1G_f=649.7\times 2.8$

$$=1819.16\ \text{kcal}$$

圖示馬力に使用された熱量， $Q_1=\dfrac{N_i\times 4500}{J}=\dfrac{5.03\times 4500}{427}$

$$=53.01\ \text{kcal}$$

復汽中に捨てられた熱量， $Q_2=G_c(t_2-t_1)+G_f i_2{}'$

$$=45.6(37.5-8.6)+2.8\times 99.12$$

$$=1595.38$$

	熱　量 (kcal)	百分比 (%)
毎分機關に供給されたる熱量	1819	100
圖示馬力に使用されたる熱量	53	2.90
毎分復汽に捨てられた熱量	1595	87.70
輻射等に捨てられた熱量	171	9.40
計	1819	100

61. 汽筒壁に於ける傳熱について

汽筒壁に於ける熱傳達を減ずるためには，次の方法を用ふ。

1. 過熱蒸汽を使用する。
2. 機關に蒸汽套を備へる。
3. 多段膨脹機關とする。
4. 單流機關とする。

1. 汽筒中に飽和蒸汽が入つて來て汽筒壁に觸れると，蒸汽の一部は凝結して壁に沿つて流下し，その後に絶えず新しい蒸汽が壁と接觸する。蒸汽と汽筒壁との間に僅かでも温度差がある限り，蒸汽はその潜熱を壁に傳達する。過熱蒸汽の場合には，汽筒壁の温度がその壓力に對する飽和温度以上である時は，蒸汽はその顯熱を失ふ丈けであるから，傳達される熱量は極小さい。飽和蒸汽の場合には熱流に對する抵抗は壁面に付著する水の層によりて呈せられ，過熱蒸汽の場合には壁面に接する蒸汽の層によりて呈せられるから，前者の抵抗は極小である。實驗によると蒸汽機關に於ては

飽和蒸汽の熱傳達率　　10000～40000 kcal/m²h°C

過熱蒸汽の熱傳達率　　100～1000　kcal/m²h°C

かくの如く過熱蒸汽を機關に用ひれば汽筒壁損失が甚しく減ずる。

2. 機關に蒸汽套を備へて，汽筒壁の温度を蒸汽の温度に近付けると汽筒壁損失は減ずるが，構造が複雑になるのと，外形が大になつて周圍の大氣中に奪はれる熱量が増す。

3. 蒸汽を初壓より背壓まで膨脹させるのに 1 箇の汽筒を以てせず，數箇の汽筒を以てする，即ち**多段膨脹機關** (multi-expansion engine)[1] にすると，1 箇の汽筒の膨脹前後に於ける溫度差が小となるので，汽筒壁損失を減ずる。 又前の汽筒で再蒸發したる蒸汽は次の汽筒で仕事をなす。 この機關には**二段膨脹** (compound expansion)[2]，**三段膨脹** (triple expansion)[3]，**四段膨脹** (quadruple expansion)[4] 機關等がある。

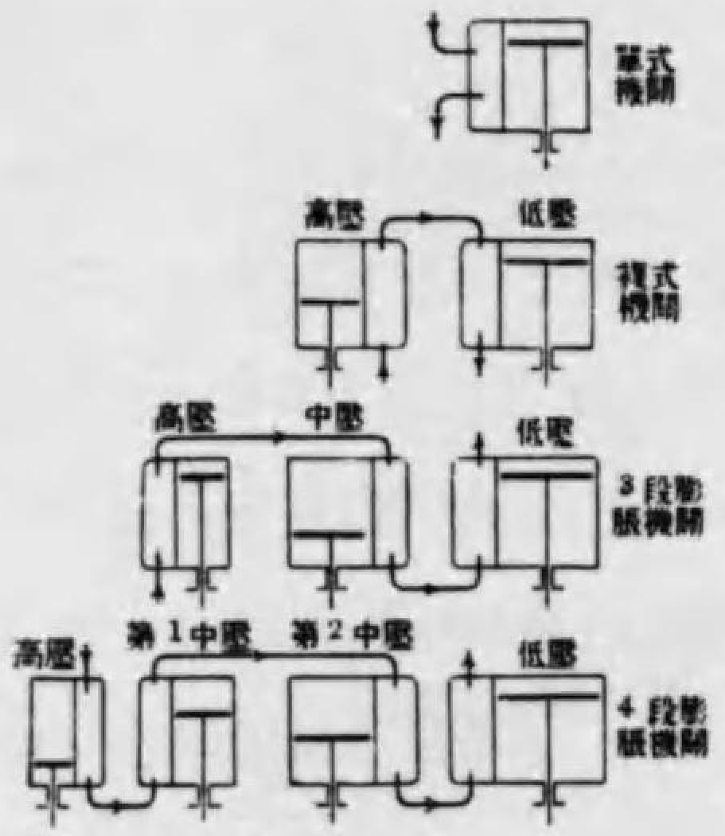


圖 -70

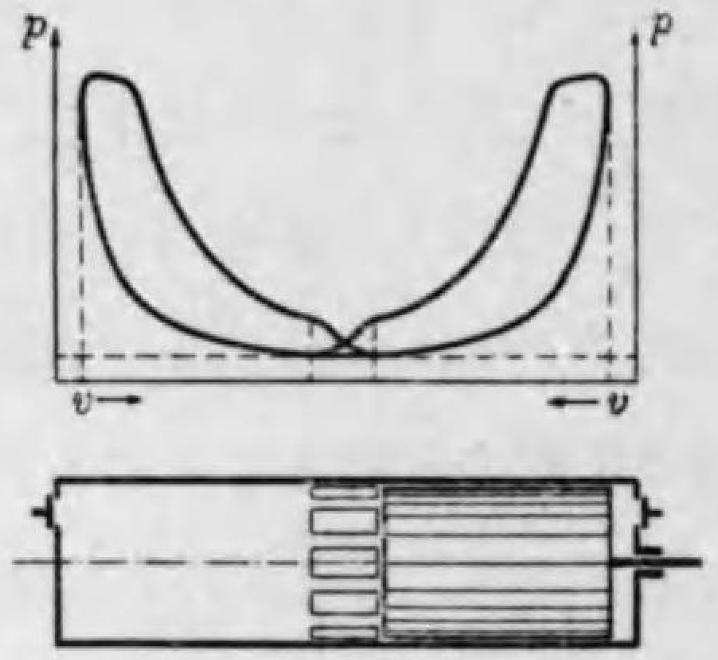


圖 -71

4. **單流機關** (uniflow engine)[5] に於ては蒸汽は汽筒の 1 側より入り，他側より出るので，いつも高溫の蒸汽は高溫の筒壁と接し，低溫の蒸汽は低溫の汽筒壁と接するから，汽筒壁損失は減ずる。

1. Verbundmaschine. 2. zweistufig. 3. dreistufig. 4. vierstufig.
5. Gleichstrommaschine.

問　　題 (VI)

1. 蒸汽原動所あり。32.5° の水毎時 10000 kg を供給せられ，25 at，400° の過熱蒸汽を發生す。蒸汽は比較効率 (η_i) 80% を以て，タービン中に於て 0.05 at に膨脹し，復水器に於て凝結する。幾何の熱量が汽罐に於て，過熱器に於て與へられ，又復水器に於て取り去られたるか。機械効率 (η_m) を 95% とせば幾 kW の動力をタービン軸が出すか。 1 kWh に對する蒸汽及び熱消費量を求めよ。

2. 蒸汽原動機あり。100 at，400° の蒸汽を供給され，0.05 at の復水器壓力で働き
   (a) ランキンサイクルをなす際，
   (b) 飽和線に達する度に 400° まで再熱を二回なす際，
   熱効率は何幾か。
   (c) (a)，(b) の場合に於て復水器に赴く廢汽の乾き度。
   (d) (a)，(b) の場合を $T-S$，$i-s$ 線圖に示せ。

3. 蒸汽機關あり。 9 at，220° の蒸汽を供給され。 終壓 1.5 at，背壓 1.1 at にて働く。効率 η_{th}，η_i，η_t を求め平均有効壓力，並にサイクルに於て與へた熱量を見出せ。

4. 蒸汽機關の調速法に於ては，絞りによるものと，締切點を變更するものとある。絞りによるものでは圖示馬力に對する蒸汽消費量の關係は直線的となる。これを**ウイランの法則** (Willan's law) といふ。 絞り調速を行ふ機關に於て圖示馬力が 55 及び 285 なる時，蒸汽消費量 535 及び 2180 kg/h なれば，200 PS を出す時の圖示熱効率 (η_t) を求めよ。但 12 at の乾き蒸汽を供給し背壓は 1.4 at とす。

5. (131c) に於て全行程の間蒸汽を供給し，無膨脹サイクルを行はしむる時，仕事及び熱効率 (η_t) を求む。

索　引

ア

壓　縮 …… 10
壓縮機効率 …… 62
壓縮空氣 …… 54
壓縮率 …… 15
壓　力 …… 4
壓力係數 …… 15

イ

一段壓縮機 …… 54
インヂケータ線圖 …… 10

ウ

ウイランの法則 …… 117

エ

永久ガス …… 17
英國絶對單位 …… 3
英國重力單位 …… 3
英熱單位 …… 6
液體熱 …… 68
エネルギ …… 1
エネルギ式 …… 10
エネルギ不滅の法則 …… 8
F.P.S. 單位 …… 3
エンタルピ …… 13
エンタルピ-エントロピ線圖 81
エントロピ …… 48
エントロピ線圖 …… 50

オ

溫　度 …… 2
溫度—エントロピ線圖
($T-S$ 線圖) …… 50

カ, ガ

外部仕事 …… 9
外部潜熱 …… 72
外燃機關 …… 65
可逆變化 …… 41
ガス定數 …… 19
過熱蒸氣 …… 78
過熱蒸汽 …… 69
過熱度 …… 69
罐の効率 …… 101
カルノー機關 …… 43
カルノーサイクル …… 36
カルノーサイクルの熱効率 . 37
カロリー …… 6
乾き度 …… 69
乾き飽和蒸汽 …… 69
完全ガス …… 17
完全ガスの特性式 …… 19
完全機關の熱効率 …… 101
含熱量 …… 13

キ

機械効率 …… 62, 101
機械的エネルギ …… 2
汽筒壁損失 …… 105
キロカロリー …… 6

ク

空氣壓縮機 …… 54
クラウジウス—ランキンサイクル …… 95

ケ, ゲ

ゲイリユサツクの法則 …… 18
ゲージ壓力 …… 4
ケルビンの溫度目盛 …… 45
原動所の効率 …… 102
顯　熱 …… 6

コ

工學氣壓 …… 4
工學單位 …… 3
工業熱力學 …… 1
行程體積 …… 62

サ

サイクル …… 11
最初の復水 …… 105
再蒸發 …… 105
再生器 …… 65
再生サイクル …… 98
再　熱 …… 98
再熱サイクル …… 98
再熱再生サイクル …… 99
三段膨脹 …… 116

シ, ジ

仕　事 …… 4
仕事の熱當量 …… 9
C.G.S. 單位 …… 3
絞　り …… 42, 85
絞り熱量計 …… 89
濕り度 …… 69
濕り飽和蒸氣 …… 69
シヤールの法則 …… 18
終　壓 …… 103
シユミツト罐 …… 92
ジユール—トムソン効果 … 86
ジユールの法則 …… 20
蒸　氣 …… 68
蒸　汽 …… 77
蒸汽消費量 …… 95
蒸汽套 …… 111
蒸汽發生器 …… 92
蒸汽表 …… 78
蒸　發 …… 68
蒸發熱 …… 69
蒸發の潜熱 …… 69
眞　空 …… 4
眞空率 …… 4

ス

隙間體積 62

セ, ゼ

成績係數 38
靜的エネルギ 2
制動馬力效率 101
攝氏熱單位 6
絕對壓力 4
絕對溫度 18
絕對零 18
全效率 62
線圖係數 110
潛熱 6
全熱量 72

ソ

双曲線變化 83

タ, ダ

第一種の永久機關 8
第二種の永久機關 41
體積効率 63
多段壓縮機 55
多段壓縮法 58
多段膨脹機關 115
樽熱量計 88
單位 3
單動 54
斷熱變化 25
單流機關 116

チ, ヂ

軸馬力 62
ヂメンシヨン 7
直角双曲線 17

ツ, ヅ

圖示効率比 101
圖示熱効率 101
圖示馬力 62

テ

定壓比熱 7
定積比熱 7

ト, ド

等壓變化 29
等エントロピ變化 50
等溫馬力 62
等溫變化 24
動作流體 35
等積變化 29
動的エネルギ 2
動力 5
特性式 9

ナ

內燃機關 65
內部エネルギ 2
內部潛熱 72

ニ

二段壓縮機 52
二段膨脹 116
日本度量衡法 3
二流體サイクル 100

ネ

熱 5
熱勘定 111
熱氣機關 65
熱源 36
熱効率 35
熱消費量 102
熱傳導 42
熱の仕事當量 8
熱ポンプ 38
熱量計 89
熱力學 1
熱力學の第一法則 8
熱力學の第二法則 40
熱力學的溫度目盛 45

ハ, バ

バウエル―ワツハ廢汽タービン 104
バネ蒸汽 103

ヒ

非可逆變化 41
比較効率 101
比熱 6
非飽和液 8
標準氣壓 4

フ, ブ

複動 54
物質不滅の法則 8
沸騰 68
分離熱量計 89

ヘ, ベ

平均英熱單位 6
平均カロリー 6
平均比熱 7
平均有効壓力 109
ペンソン罐 93

ホ, ボ, ポ

飽和壓力 68
飽和液 68
飽和液線 70
飽和溫度 68
飽和蒸氣 68
飽和蒸氣線 70

ボイルの法則 …………… 17
ボイル—マリオツトの法則 . 17
膨　　脹 …………… 10
膨脹係數 …………… 14
膨 脹 率 …………… 109
ポリトロープ變化 …………… 29
ポリトロープ變化に於ける
比熱 …………… 31

マ

摩　　擦 …………… 42

メ

メートル法絶對單位 …………… 3
メートル法重力單位 …………… 3

モ

モリエ線圖 (i—s 線圖) …… 81

ヨ

四段膨脹 …………… 116

ラ

ランキンサイクル …………… 95

リ

臨界壓力 …………… 70
臨界溫度 …………… 70
臨界體積 …………… 70

レ

冷 凍 機 …………… 38
レツフラー罐 …………… 92

昭和十五年五月十日印刷
昭和十五年五月十五日發行

【定價二圓〇七錢】

編者　其阿彌辰雄

海事教育振興會理事
發行者　秋山孝市

神戸市神戸區江戸町一〇二番
田中印刷出版株式會社代表者
印刷者　田中守一

兵庫縣武庫郡本庄村
神戸高等商船學校內
發行所　海事教育振興會

終