

## 演習問題1-1

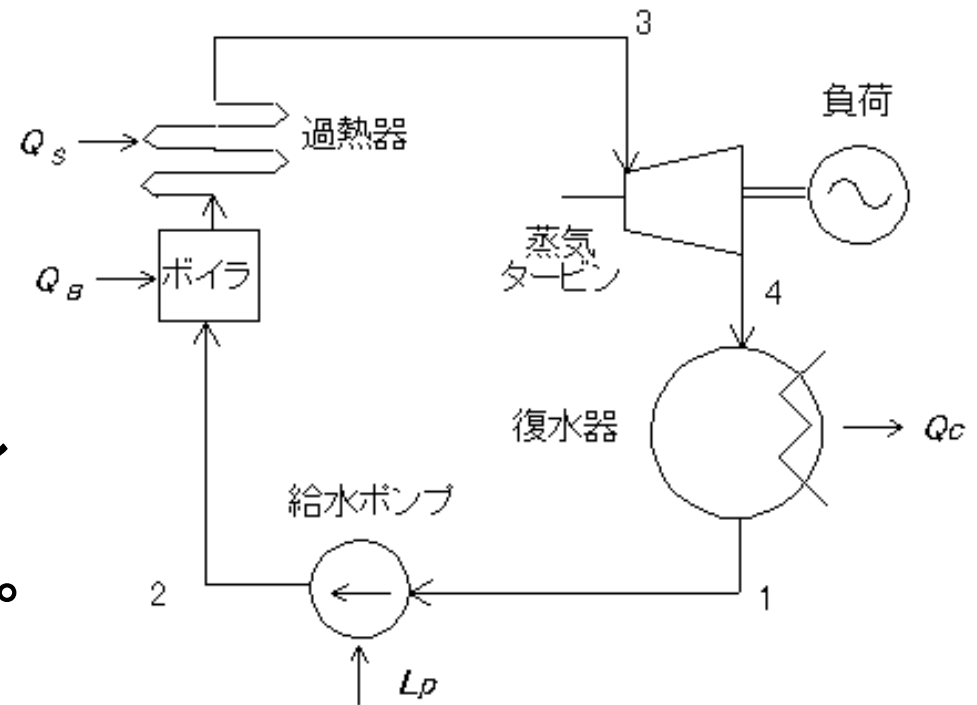
- 容器 $V(\text{m}^3)$ の容器の中に、1気圧(0.1MPa)の飽和水(')と飽和蒸気('')がそれぞれ、 $m'$ (kg)、 $m''$ (kg)づつ入っている。 $m'=1000(\text{kg})$ 、 $m''=0.1(\text{kg})$ として、容積 $V$ とこの容器内の流体の内部エネルギー $U(\text{J})$ を求めよ。

## 演習問題1-2

- 圧力0.05(MPa)、比エンタルピ $2000(\text{kJ}/\text{kg})$ の湿り蒸気の乾き度 $x$ とその湿り蒸気の比エントロピ $(\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K})$ をもとめよ。

## 演習問題1-3

- 図に示す蒸気原動所の理論サイクルを考える。圧縮水はボイラで過熱され圧力5MPa、温度400°Cの加熱蒸気となり、蒸気タービンを通して、圧力0.00424MPaの湿り蒸気まで可逆断熱膨張し、復水器で腹水して飽和水となり、ポンプで加圧されてボイラ入口に供給される。ポンプ前後での温度上昇は無視できるとする。
- ただし、0.00424MPaでの飽和温度を30°Cとする。



## 演習問題1-3(続き)

1. このサイクルのTs線図とhs線図を作成しなさい。線図中には、各状態の位置を明示し、両軸の数値と単位とを記入すること。
2. 水1kg当たりのボイラでの加熱量を求めなさい。
3. 水1kg当たりの蒸気タービンでの発生仕事量を求めなさい。
4. このサイクルの熱効率を求めなさい。

ただし、以下の数値を使用してよい。

表1 飽和蒸気表(抜粋)

| 圧力          | 比エンタルピー      |               | 比エントロピー        |                 |
|-------------|--------------|---------------|----------------|-----------------|
| $P_s$ (MPa) | $h'$ (kJ/kg) | $h''$ (kJ/kg) | $s'$ (kJ/kg/K) | $s''$ (kJ/kg/K) |
| 0.00424     | 125.66       | 2556.4        | 0.4365         | 8.4546          |

表2 圧縮水および過熱蒸気表(抜粋)

| 圧力          | 温度       | 比エンタルピー     | 比エントロピー       |
|-------------|----------|-------------|---------------|
| $P_s$ (MPa) | $t$ (°C) | $h$ (kJ/kg) | $s$ (kJ/kg/K) |
| 5           | 30       | 130.2       | 0.435         |
|             | 400      | 3198.3      | 6.6508        |

# 演習問題1-4

- 蒸気原動所の2つの理論サイクルを考える. 図1では $40^{\circ}\text{C}$ の水(状態①)を $15\text{MPa}$ の圧力のもとでボイラにより $360^{\circ}\text{C}$ (状態②)へ加熱する. この蒸気を $5\text{MPa}$ まで絞り弁により膨張させ(状態③),再熱器で再び $360^{\circ}\text{C}$ (状態④)へ加熱する. そして蒸気タービンAにより湿り蒸気の状態まで膨張させ(状態⑤),復水器で復水し,ポンプで加圧して状態①へ戻す. 一方,図2では図1における絞り弁を蒸気タービンに置き換えており,状態②の蒸気を蒸気タービンBに導いて仕事を発生させ,圧力 $5\text{MPa}$ まで膨張させたいもので(状態③'),③'を除く①から⑤までの状態は図1と同じである.
- 次の(1)–(5)の各問に答えよ.
- なお,蒸気の熱物性表は表1,表2の値を用いよ

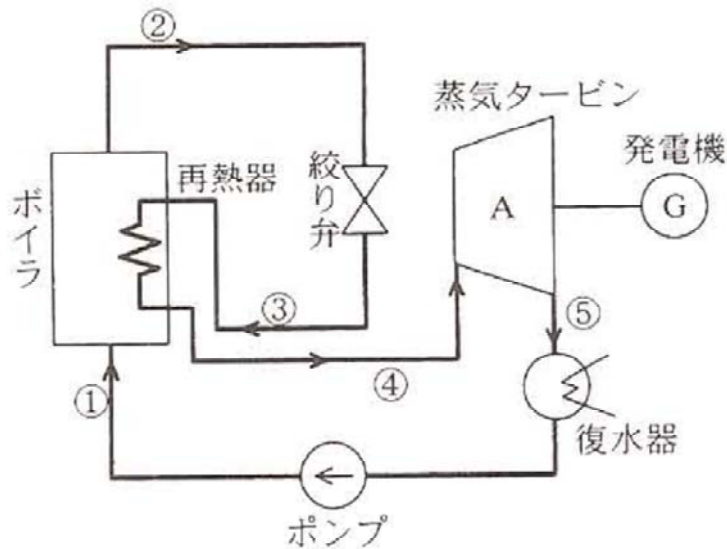


図1

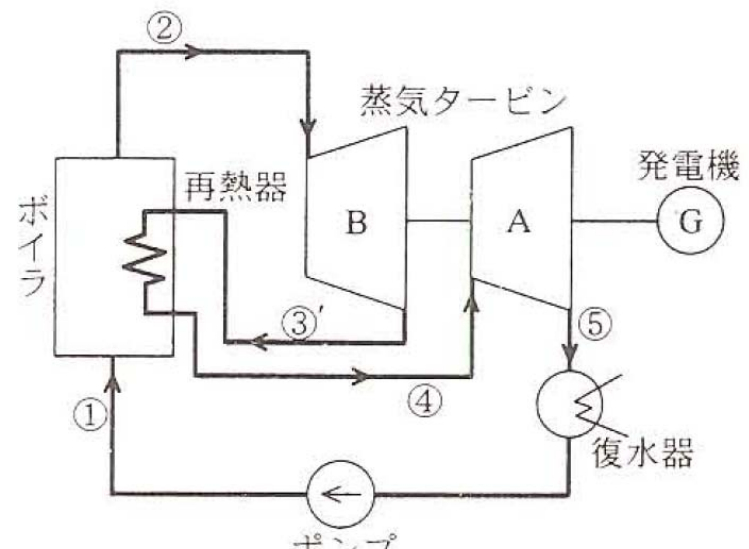


図2

表1

| 圧力<br>[Mpa] | 飽和温<br>度[°C] | 比エンタルピー<br>[kJ/kg] |       | 比エントロピー<br>[kJ/(kg・K)] |       |
|-------------|--------------|--------------------|-------|------------------------|-------|
|             |              | $h'$               | $h''$ | $s'$                   | $s''$ |
| $P$         | $t_s$        | $h'$               | $h''$ | $s'$                   | $s''$ |
| 5.0         | 263.9        | 1155               | 2794  | 2.921                  | 5.974 |

表2

| 圧力<br>[Mpa] | 飽和温<br>度[°C] | 比エンタルピー<br>[kJ/kg] |        | 比エントロピー<br>[kJ/(kg・K)] |     |
|-------------|--------------|--------------------|--------|------------------------|-----|
|             |              | $h$                | $s$    | $h$                    | $s$ |
| $P$         | $t$          | $h$                | $s$    | $h$                    | $s$ |
| 5.0         | 360          | 3098               | 6.497  |                        |     |
| 15.0        | 40           | 180.7              | 0.5663 |                        |     |
|             | 360          | 2771               | 5.568  |                        |     |

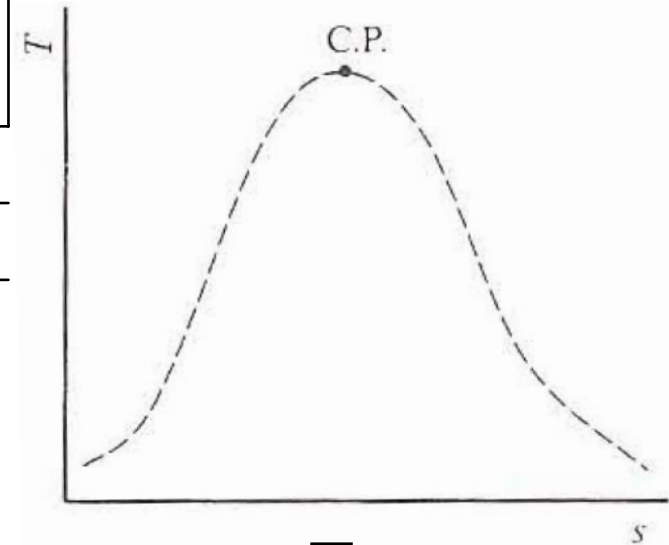


図3

- (1)この2つのサイクルの概略を同一のT-s線図上に記せ. ただし, 図3の線図を答案用紙に書き写し, サイクルを実線で記すと共に, 状態①②③③'④⑤の位置を図中に明示せよ.
- (2)状態③の蒸気の比エンタルピーと乾き度を求めよ.
- (3)図1のサイクルにおいて, 状態①~④の間で蒸気1kg当りに加えられる熱量を求めよ.
- (4)蒸気タービンBでの蒸気1kg当たりの発生仕事量を求めよ.
- (5)図2のサイクルにおいて, 状態①~④の間で蒸気1kg当りに加えられる熱量を求めよ.

# 演習問題1-5

図1は蒸気原動所の主要な機器構成を示し、図2はこの蒸気原動所の理論サイクルを水の気液共存曲線とともにp-v線図上に描いたものである。また図中の1-4は作動流体である水の熱力学的状態を示す状態番号である。

次の(1)-(3)の各問に答えよ。

- (1) 理論サイクルの名称を答えよ(またはp-v線図を描け)
- (2) 図2中の各状態番号1,2,3,4,4',4''にそれぞれ対応する水の熱力学的状態を表す名称を記せ。
- (3) 図2の理論サイクルをTs線図で描け。少なくとも図には「縦・横軸の記号」、「気液共存曲線」、「サイクル曲線」、「1-4'」の各状態点、「サイクルの方向矢印」を記入すること。

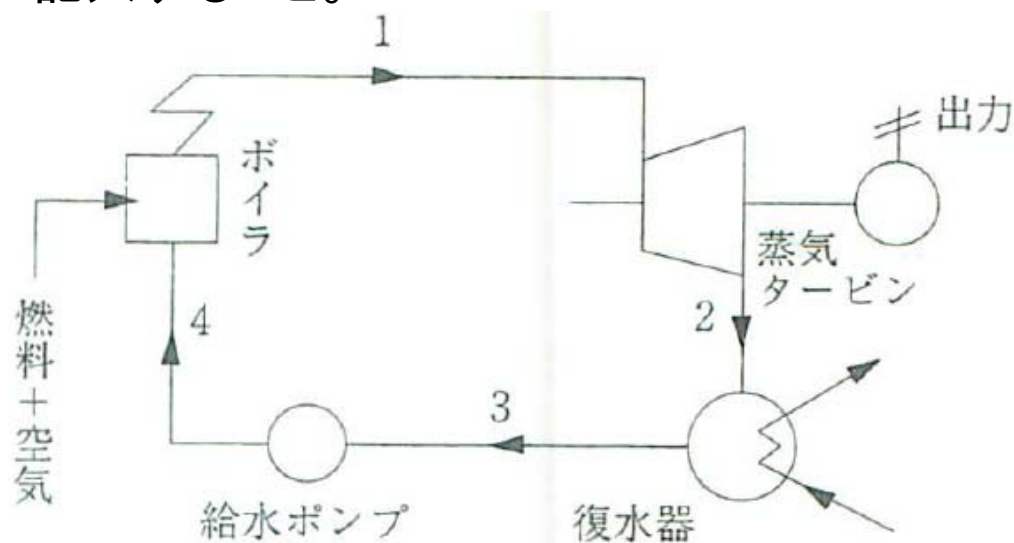


図1

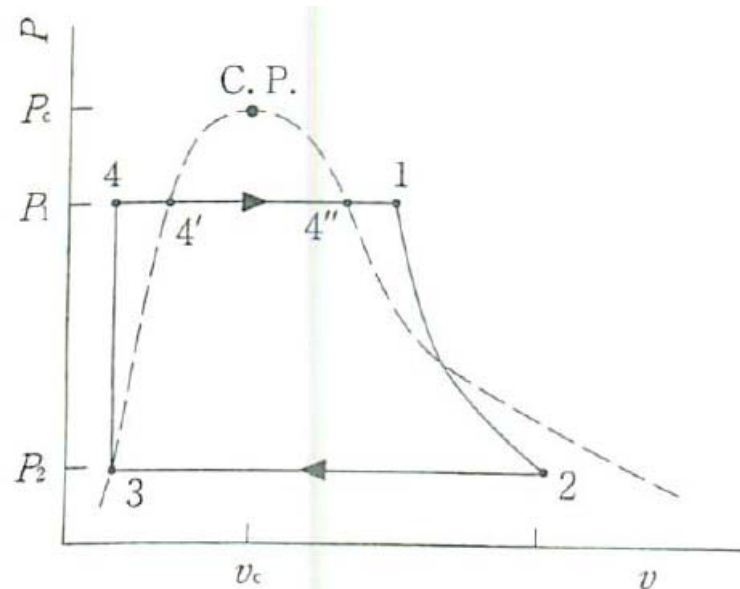
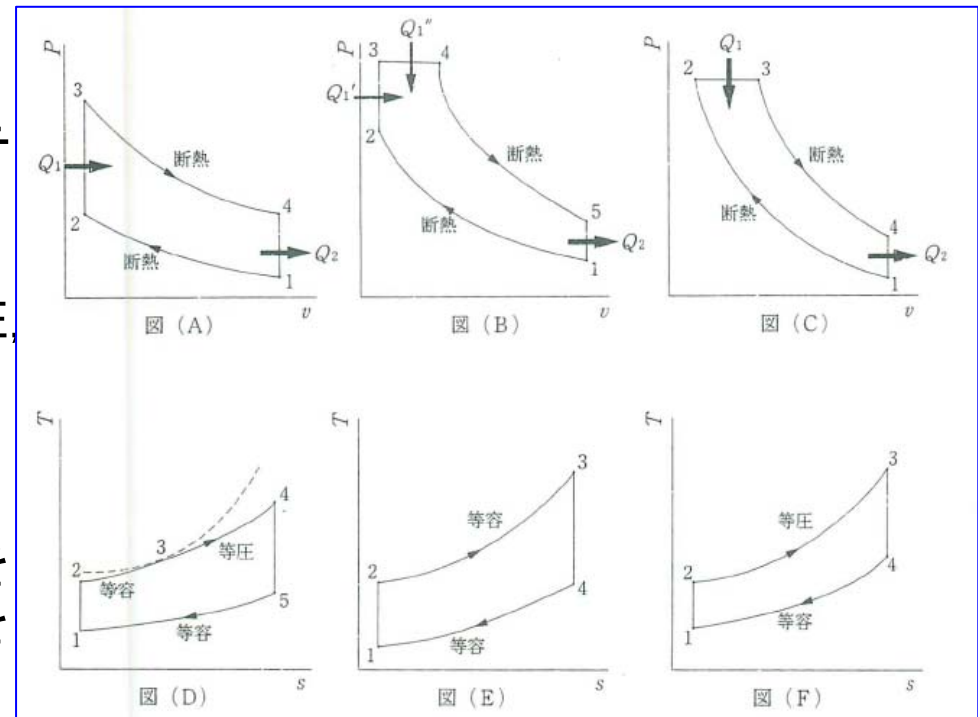


図2

# 演習問題1-6

代表的な熱機関の理論サイクルについて以下の問いに答えよ

- 図Aはオットーサイクル, 図Bはサバテサイクル, 図Cはディーゼルサイクルのp-v線図を示している。それぞれのサイクルに対応するT-s線図を図D, E, Fから選択せよ。
- 図Aのオットーサイクルにおいて熱効率の計算を行う。外部から供給される熱量 $Q_1$ および放出される熱量 $Q_2$ をそれぞれ求めよ。ただし、定圧比熱を $C_p$ , 定積比熱を $C_v$ とする。また各状態の温度は例に従って使用せよ。  
(例: 状態1の温度  $T_1$ )
- 2の結果を利用してオットーサイクルの熱効率を求めよ
- サバテサイクル, ディーゼルサイクルの熱効率をそれぞれ求めよ。







## 演習問題1-1回答(1/2)

- $P=0.1$  [MPa]において、

$$v' = 0.0010434 [m^3 / kg]$$

$$v'' = 1.694 [m^3 / kg]$$

$$\begin{aligned} V &= m'v' + m''v'' \\ &= 1.434 + 0.1694 \\ &= 1.2128 [m^3] \end{aligned}$$

- であるから、非容積は、

$$m = m' + m'' = 1000.1$$

$$v = \frac{V}{m} = 1.2127 \times 10^{-3} [m^3 / kg]$$

## 演習問題1-1回答(2/2)

- よって、乾き度 $x$ は、

$$x = \frac{v - v'}{v'' - v'} = 1.000 \times 10^{-4}$$

- 従って、

$$\begin{aligned} h &= (1 - x)h' + xh'' \\ &= (1 - 1.0 \times 10^{-4}) \times 417.51 + 1.0 \times 10^{-4} \times 2675.4 \\ &= 417.7358 [\text{kJ} / \text{kg}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u &= h - pv \\ &= 417.7358 \times 10^3 - 0.1 \times 10^6 \times 1.2127 \times 10^{-3} \\ &= 417.6145 \times 10^3 [\text{J} / \text{kg}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore U &= u \times (m' + m'') \\ &= 417.6145 \times 10^3 \times (1000 + 0.1) \\ &= 417.6563 \times 10^6 [\text{J}] \\ &\doteq 418 [\text{MJ}] \end{aligned}$$

## 演習問題1-2回答(1/2)

- エンタルピが、 $h = 2000 [kJ / kg]$  であるから、
- $P = 0.05 [MPa]$  において、蒸気表より

$$h' = 340.56 [kJ / kg]$$

$$r = h'' - h' = 2305.4 [kJ / kg]$$

であるから

$$\begin{aligned} x &= \frac{h - h'}{h'' - h'} \\ &= \frac{2000 - 340.56}{2305.4} \\ &= 0.7198 \end{aligned}$$

## 演習問題1-2回答(2/2)

- $P=0.05$  [MPa]において

$$S' = 1.0912 [\text{kJ} / \text{kg} \cdot \text{K}]$$

$$S'' = 7.5947 [\text{kJ} / \text{kg} \cdot \text{K}]$$

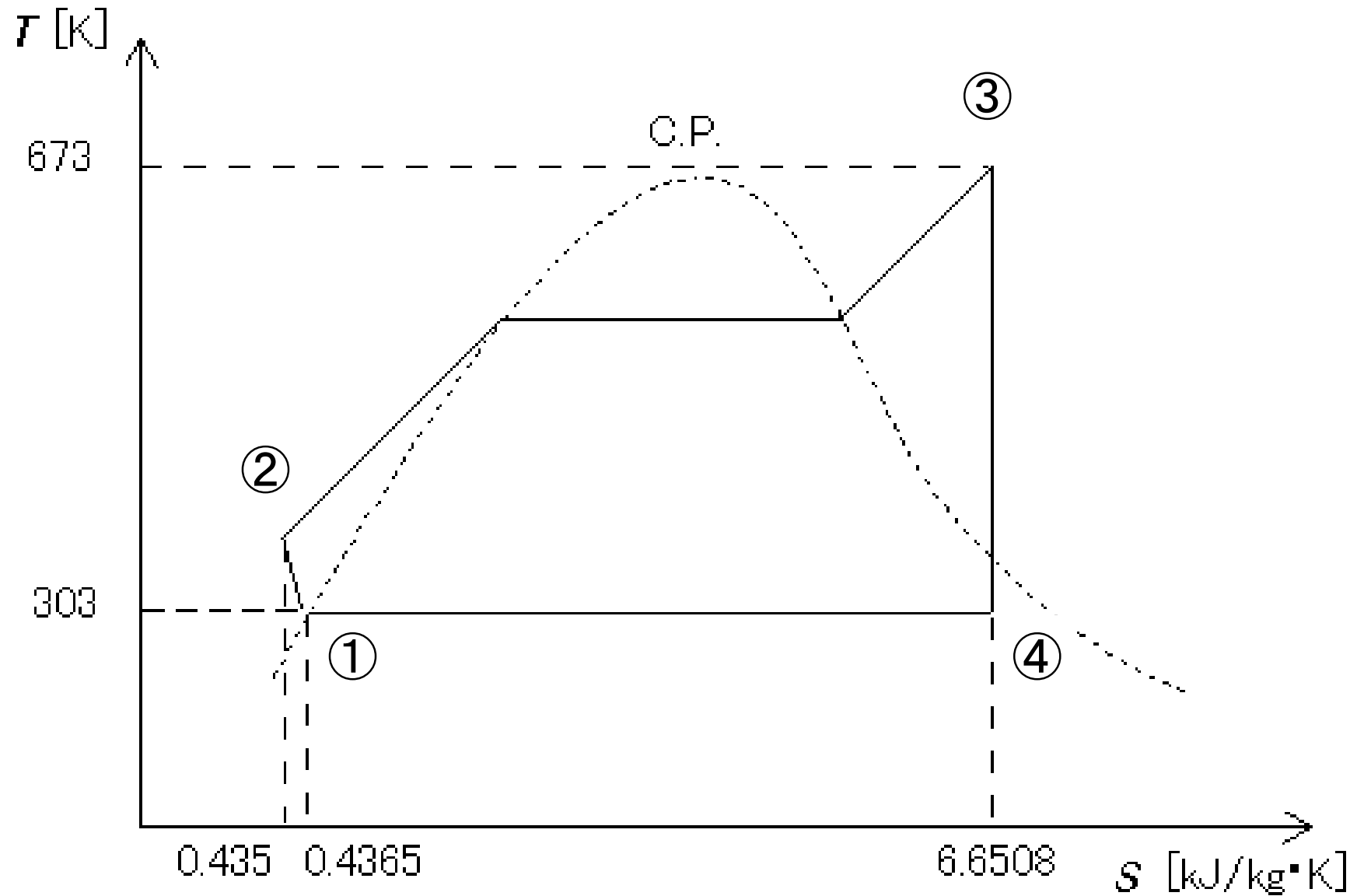
- であるから、

$$S = (1-x)S' + xS''$$

$$= (1-0.7198) \times 1.0912 + 0.7198 \times 7.5947$$

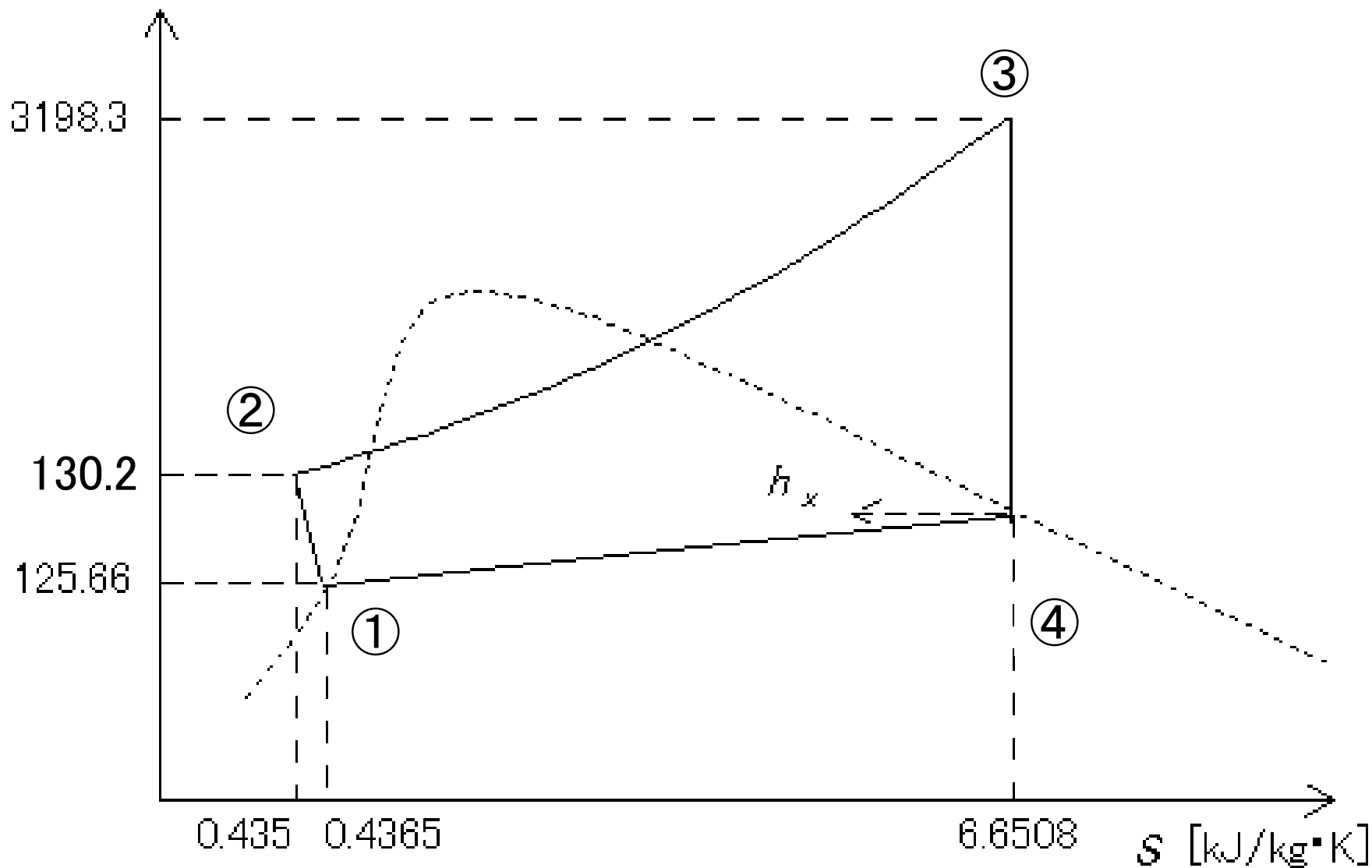
$$= 5.7724 [\text{kJ} / \text{kg} \cdot \text{K}]$$

# 演習問題1-3回答(1/4)



## 演習問題1-3回答(2/4)

(1)  $h$  [kJ/kg]



## 演習問題1-3回答(3/4)

(2)水1kg当たりのボイラでの加熱量をQとおくと、  
②→③において、

$$\begin{aligned} Q &= 3198.3 - 130.2 \\ &= 3068.1[\text{kJ} / \text{kg}] \end{aligned}$$

(3)

$$S = (1 - x)S' + xS''$$

$$x = \frac{S - S'}{S'' - S'} = \frac{6.6508 - 0.4365}{8.4546 - 0.4365} = 0.775$$

$$\begin{aligned} h_x &= (1 - x)h' + xh'' \\ &= (1 - 0.775) \times 125.66 + 0.775 \times 2556.4 \\ &= 2009.6[\text{kJ} / \text{kg}] \end{aligned}$$

より、③→④において、水1kg当たりの蒸気タービンでの発生仕事Wは

$$W = 3198 - 2009.6 = 1188.7[\text{kJ} / \text{kg}]$$



## 演習問題1-3回答(4/4)

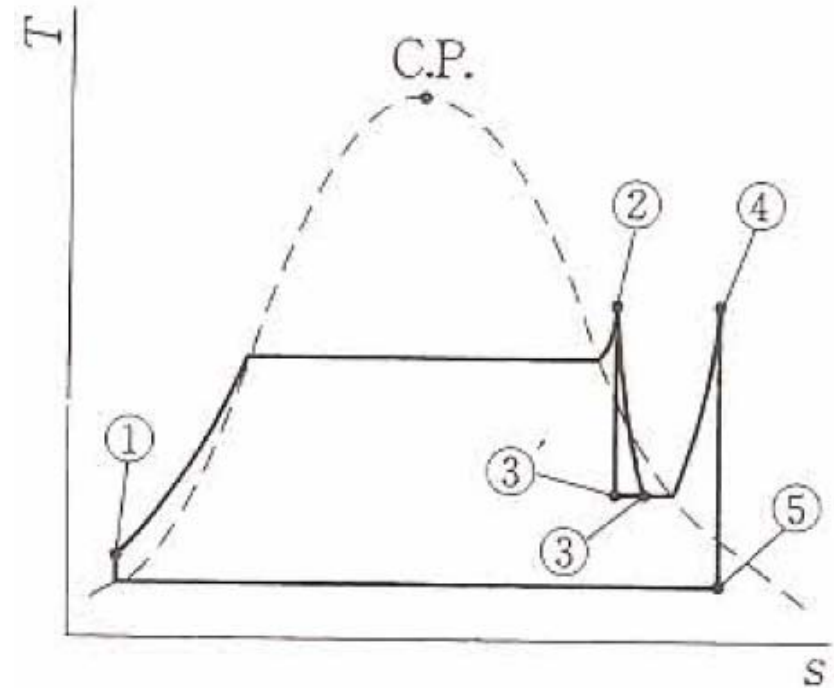
(4)このサイクルの熱効率  $\eta$  は

$$\begin{aligned}\eta_T &= \frac{\text{仕事}}{\text{加熱量}} = \frac{1188.7}{3068.1} = 0.3874 \\ &= 38.74[\%]\end{aligned}$$

# 演習問題1-4回答(1/3)

(1)

- ・ 状態1→2 圧縮水→飽和水→湿り蒸気→飽和蒸気→過熱蒸気
- ・ 状態2→3 等エンタルピー変化(絞り膨張)
- ・ 状態2 →3' 断熱変化
- ・ 状態3(3') →4 湿り蒸気→飽和蒸気→過熱蒸気
- ・ 状態4→5 断熱変化
- ・ 状態5→1 湿り蒸気→飽和水→圧縮水



(2) 状態③の蒸気の比エンタルピーと乾き度を求めよ.

状態2→3は等エンタルピー変化だから表1, 2を用いて

$$h_3 = h_2 = 2771 \text{ [kJ / kg]}$$

状態3の比エンタルピーと乾き度について以下の式が成り立つので

$$h_3 = x_3 h'' + (1 - x_3) h'$$

$$h_3 = x_3 (h_3'' - h_3') + h_3'$$

$$x_3 = \frac{h_3 - h_3'}{h_3'' - h_3'} = \frac{2771 - 1155}{2794 - 1155} = 0.986$$

## 演習問題1-4回答(2/3)

(3)図1のサイクルにおいて状態1→4の間に外部への仕事や放熱はない。  
よって比エンタルピーの増加量が蒸気1kg当りに与えられた熱量である。

①は15MPa, 40°Cの圧縮水, ④は5MPa, 360°Cの過熱蒸気だから

$$h_4 - h_1 = 3098 - 180.7 = 2917 \text{ [kJ / kg]}$$

(4)蒸気タービンBにおいて, 蒸気1kg当りに発生する仕事の量 $L_t$ は状態②→③におけるエンタルピーの変化に等しいので

$$L_t = h_2 - h_3'$$

である。②→③'は可逆断熱膨張(等エントロピー変化)であるから,

より, ③'の乾き度は

$$s_2 = s_3' = x_3'' (s_3'' - s_3') + s_3'$$

$$x_3' = \frac{s_2 - s_3'}{s_3'' - s_3'} = \frac{5.568 - 2.921}{5.974 - 2.921} = 0.867$$

## 演習問題1-4回答(3/3)

この結果を利用して

$$\begin{aligned} h_3' &= x_3' (h_3'' - h_3') + h_3' \\ &= 0.867 \times (2794 - 1155) + 1155 = 2576 \text{ [kJ / kg]} \end{aligned}$$

$$L_t = h_2 - h_3' = 2771 - 2576 = 195 \text{ [kJ / kg]}$$

(5) 状態①～④の間で蒸気1kgに加えられた熱量は、①～②および③'～④で  
加えられた熱量の和であるから

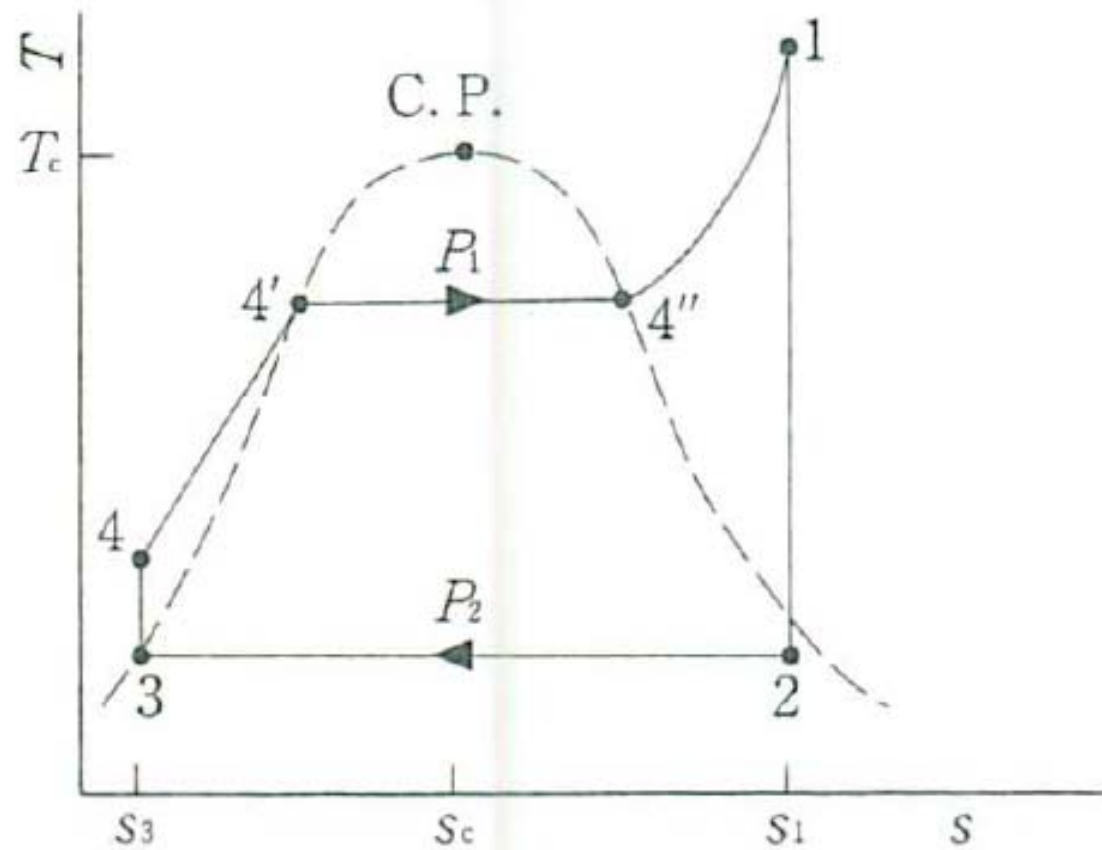
$$\begin{aligned} &(h_2 - h_1) + (h_4 - h_3') \\ &= (2771 - 180.7) + (3098 - 2576) = 3112 \text{ [kJ / kg]} \end{aligned}$$

# 演習問題1-5回答

(1) ランキンサイクル

(2) 1-過熱水蒸気 2-湿り水蒸気 3-飽和水 4-圧縮水  
4'-飽和水 4''-乾き飽和水蒸気

(3) 下図参照



## 演習問題1-6回答(1/3)

- (1) オットーサイクル - E, サバテサイクル - D, ディーゼルサイクル - F
- (2) 図Aより $Q_1$  (状態2→3) および  $Q_2$  (状態4→1) は等積変化なので出入りする熱量 $Q$ は作動流体の質量を $m$ とすると定積比熱を用いて $Q=mC_v\Delta T$  とかける. 以上より

$$Q_1 = mC_v(T_3 - T_2) \quad Q_2 = mC_v(T_4 - T_1)$$

- (3) (理論)熱効率 $\eta_{th}$ をとすると

$$\eta_{th} = 1 - \frac{\text{外部に放出する熱量}}{\text{外部から供給される熱量}}$$

- (2)の結果を利用すると熱効率 $\eta_{th}$ は

$$\eta_{th} = 1 - \frac{mC_v(T_4 - T_1)}{mC_v(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

## 演習問題1-6回答(2/3)

(4) サバテサイクルの熱効率

図Bより外部から供給される熱量は $Q_1=Q_1'+Q_1''$  外部に放出する熱量は $Q_2$

図Bより $Q_1'$  (状態2→3) は等積変化,  $Q_1''$  (状態3→4) は等圧変化なので

$$Q_1' = mC_v(T_3 - T_2) \quad Q_1'' = mC_p(T_4 - T_3)$$

$$Q_1 = Q_1' + Q_1'' = mC_v(T_3 - T_2) + mC_p(T_4 - T_3)$$

図Bより $Q_2$  (状態5→1) は等積変化, なので

$$Q_2 = mC_v(T_5 - T_1)$$

以上よりサバテサイクルの熱効率 $\eta_{th}$ は

$$\begin{aligned} \eta_{th} &= 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{mC_v(T_5 - T_1)}{mC_v(T_3 - T_2) + mC_p(T_4 - T_3)} \\ &= 1 - \frac{C_v(T_5 - T_1)}{C_v(T_3 - T_2) + C_p(T_4 - T_3)} \end{aligned}$$

## 演習問題1-6回答(3/3)

(4) ディーゼルサイクルの熱効率

図Cより外部から供給される熱量は $Q_1$  外部に放出する熱量は $Q_2$

図Cより $Q_1$  (状態2→3) は等圧変化,  $Q_2$  (状態4→1) は等積変化なので

$$Q_1 = mC_p(T_3 - T_2) \quad Q_2 = mC_v(T_4 - T_1)$$

以上よりディーゼルサイクルの熱効率 $\eta_{th}$ は

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{mC_v(T_4 - T_1)}{mC_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{C_v(T_4 - T_1)}{C_p(T_3 - T_2)}$$