

2014年度  
熱力学 I  
FG40171, FG50171

システム情報工学研究科  
構造エネルギー工学専攻  
阿部豊・金子暁子・金川哲也

## 講義概要(1) -実施要領-

- 科目番号: FG40171, FG50171
- 受講対象: 工学システム学類 **必修科目**
- 標準履修年次: 第2学年
- 実施時期: 春AB学期 火曜日 1・2限
- 教室: 3A304
- 単位数: 2単位
- 担当教官名: 阿部豊(abe@kz.tsukuba.ac.jp)  
金子暁子(kaneko@kz.tsukuba.ac.jp)  
金川哲也(kanagawa@kz.tsukuba.ac.jp)  
– HP: <http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~abe/>

## 講義概要(2) -教科書・評価基準-

- 授業概要： 物理学の基礎分野としての「熱力学」を第1法則，第2法則を中心に，その概念を理解することを目的として解説する.
- 使用教科書： 印刷物を配布する.
- 参考書：
  - －「熱力学」 日本機械学会発行， 出版社：丸善(株)発売
  - －「ゼロから学ぶ 熱力学」 著者：小暮陽三， 出版社：講談社
  - －「なっとくする演習・熱力学」 著者：小暮陽三， 出版社：講談社
  - －「工学 基礎熱力学」 著者：谷下市松， 出版社： 裳華房
- 講義資料は，以下のHPで閲覧，印刷することが出来る.  
<http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~abe/>
- 単位取得要件 & 成績評価基準：  
2/3以上の講義への出席. 毎回の演習と期末試験により総合的に評価し，60%以上の得点により単位を認定する.

# 講義日程・授業内容・担当者(2014年度)1

1. 4/15(火) 1限[阿部]: 熱力学小史
  2. 4/15(火) 2限[金子]: 熱力学の基礎(温度, 温度と熱平衡, 理想気体, 状態方程式, 熱力学的な量, P-V線図と仕事)
  3. 4/22(火) 1限[金川]: 熱と分子運動1(気体分子, 気体の圧力, 気体の温度)
  4. 4/22(火) 2限[金子]: 熱と分子運動2(内部エネルギー, 分子間力)
  5. 5/9(金) 1限[金川]: 熱力学の数学(全微分など), 閉じた系の熱力学第一法則
  6. 5/9(金) 2限[金子]: 熱力学の基礎式(エンタルピー, 第一・第二基礎式)
  7. 5/13(火) 1限[金川]: 熱容量と比熱, 気体の膨張
  8. 5/13(火) 2限[金子]: 等温過程と断熱過程
  9. 5/20(火) 1限[金川]: これまでの復習
  10. 5/20(火) 2限[金子]: これまでの復習
- 5/27(火) 2限[金子・金川]: 中間試験

## 講義日程・授業内容・担当者(2014年度)2

- 11. 6/3(火) 1限[阿部]: サイクルと熱効率(カルノーサイクル、様々な機関のサイクルと熱効率)
- 12. 6/3(火) 2限[阿部]: 永久機関から熱力学第二法則・エントロピーへの道
- 13. 6/10(火) 1限[金川]: 熱力学第二法則1(サイクル)
- 14. 6/10(火) 2限[金子]: 熱力学第二法則2(カルノーの定理)
- 15. 6/17(火) 1限[金川]: クラウジウス積分(熱力学的温度, 可逆・不可逆サイクル)
- 16. 6/17(火) 2限[金子]: クラウジウス積分残りと復習・演習など
- 17. 6/24(火) 1限[金川]: エントロピー1(T-S線図, 可逆過程のエントロピー)
- 18. 6/24(火) 2限[金子]: エントロピー2(不可逆過程のエントロピー)
- 7/1(火) 2限[金子・金川]: 定期試験

# 熱力学の歴史

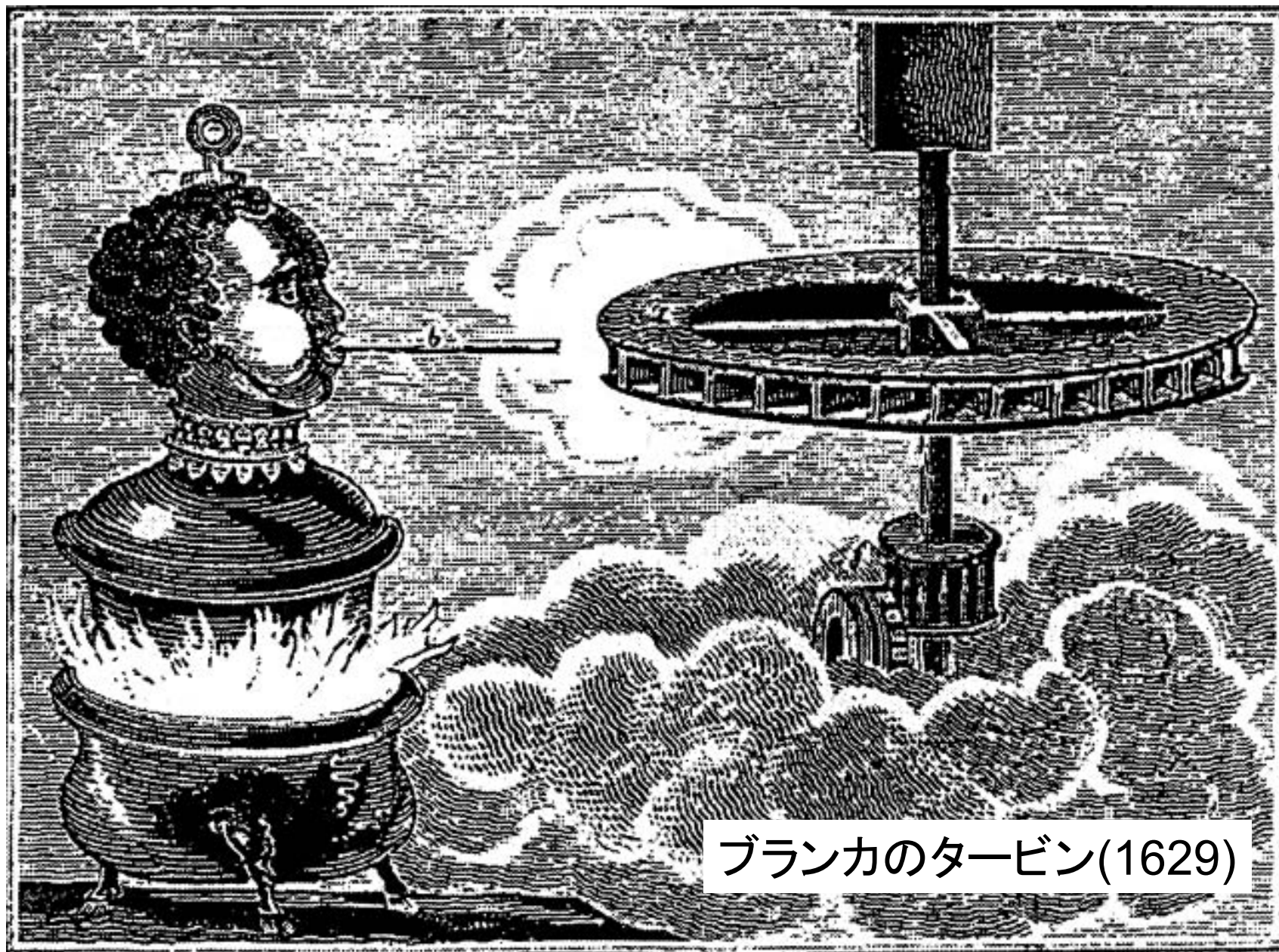
# 動力発生アイディア



ヘロン(10年頃 - 70年頃)の蒸気機関

- 古代アレクサンドリアの工学者・数学者であったヘロン(10年頃 - 70年頃)が考案したさまざまな仕掛けの中に、「ヘロンの蒸気機関」と呼ばれるものが存在する。これは、蒸気を円周上のノズルから噴出させることで回転力を得るものである。これが人類史上に蒸気機関が登場した最初のものであるとされる(これは現在のものとは原理が異なる)。
- 蒸気タービンに関して、1629年にイタリアのジョヴァンニ・ブランカ(Giovanni Branca)が蒸気タービン(衝動タービン)の概念を図示したものを残している。その後、1882年にスウェーデンのド・ラバル(Carl G. P. de Laval, 1845年 - 1913年)が衝動式タービンを開発(試作)。1884年にイギリスのチャールズ・アルジャーノン・パーソンズ(Charles Algernon Parsons, 1854年 - 1931年)が多段階反動式タービンを開発(試作)、1889年に発電用に実用化。1895年にアメリカのチャールズ・ゴードン・カーティス(Charles Gordon Curtis)が二段階多速衝動タービンを開発、1898年にはフランスのラトーが現在のものの直系の原型にあたるタイプのタービンを実用化した。

# 動力発生アイディア

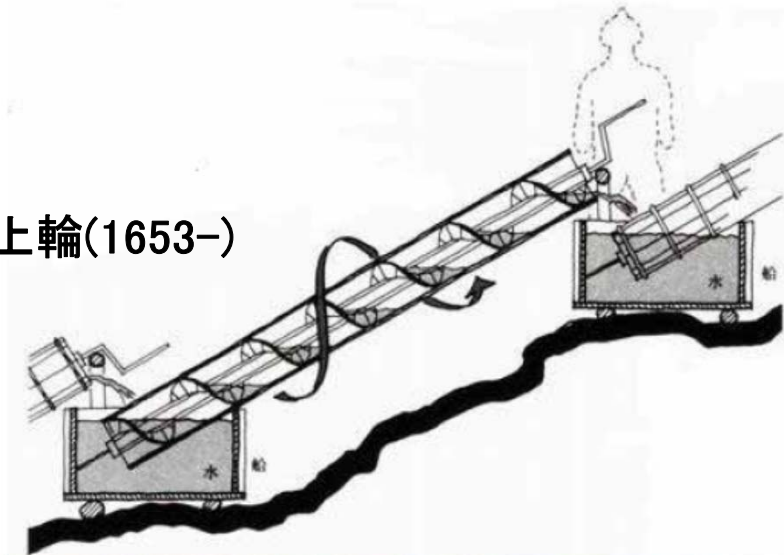


ブランカのタービン(1629)

# 鉾山の水の排水

史跡佐渡金山 <http://www.sado-kinzan.com/>

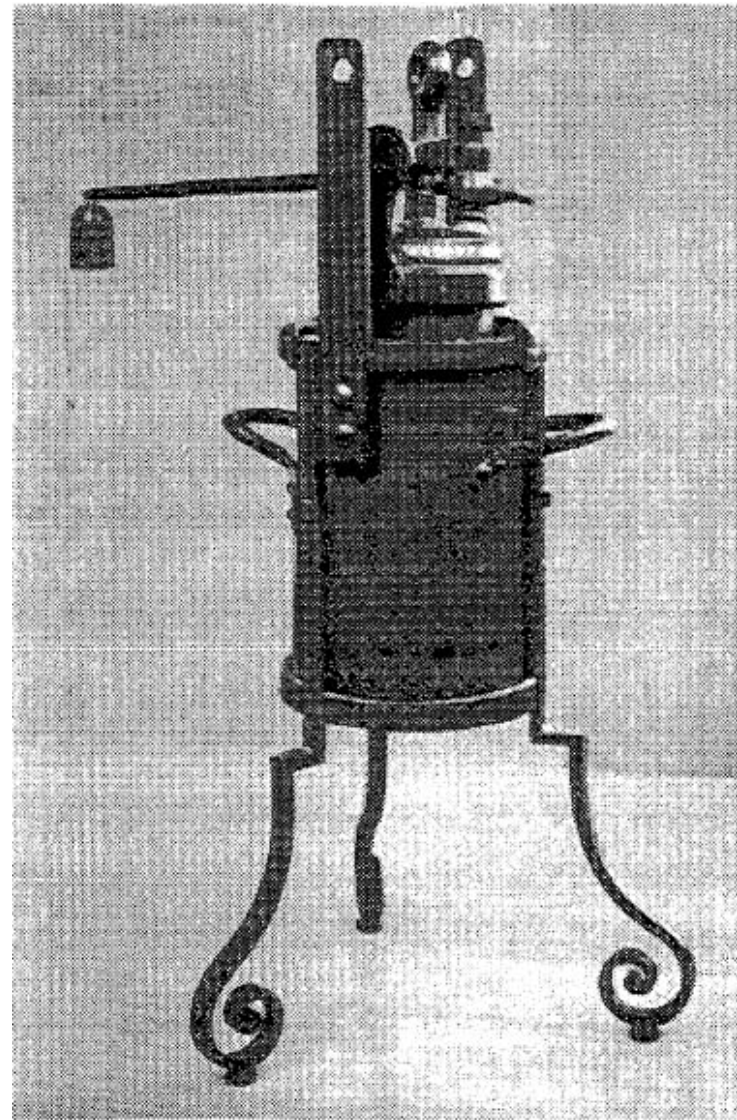
水上輪(1653-)



# パパンの真空機関



パパン



パパンのエンジン(1690)

# 圧力とは . . . .

- 単位面積  $S$  あたりに加わる力  $F$  :

$$P = F / S$$

- パスカルの原理

「非圧縮性流体中に加えられた力は、流体の他の部分の圧力を同じだけ増加させる。」

- 高さ  $h$  で密度  $\rho$  の流体の下にある物体に加わる圧力  $P$  :

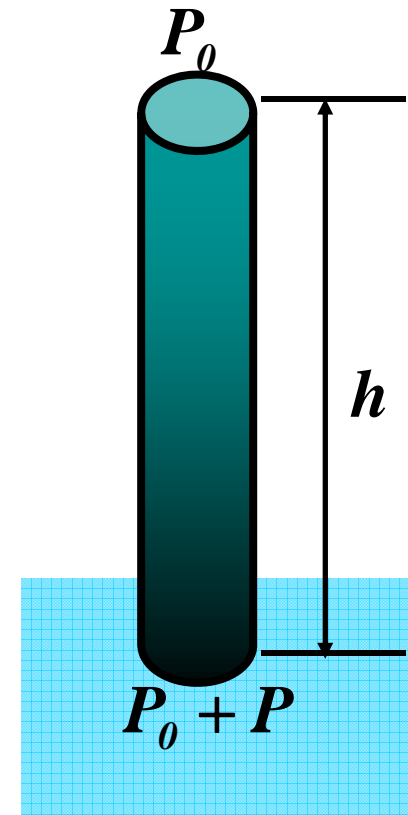
$$P = \rho gh$$

- 圧力の単位 :

$$P = \frac{F(N)}{S(m^2)} = (N / m^2) = (Pa)$$

$$10^5 (Pa) = 1(bar) = 1000(mbar)$$

$$10^{-3}(bar) = 1(mbar) = 1(hPa) = 100(Pa)$$



# 大気圧

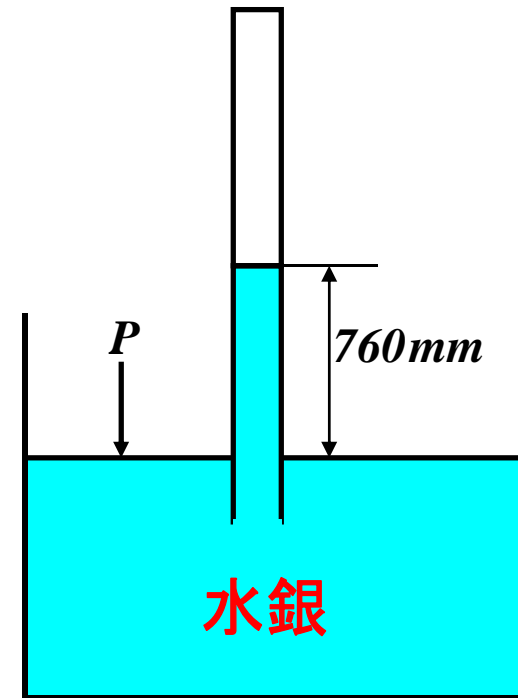
- 大気圧とは, 「地球上の平均海水面高さにおいて受ける圧力」
- その値は, 「**水銀**の高さ760mm」に等しい.

$$\begin{aligned} P &= \rho \cdot g \cdot h = (13.5951 \times 10^3 (kg / m^3)) \cdot (9.80665 (m / s^2)) \cdot (0.76 (m)) \\ &= 1.01325 \times 10^5 (kg \cdot m / s^2 / m^2) \\ &= 1.01325 \times 10^5 (N / m^2) \\ &= 1.01325 \times 10^5 (Pa) \\ &\approx 10^5 (Pa) \\ &= 1(bar) \end{aligned}$$

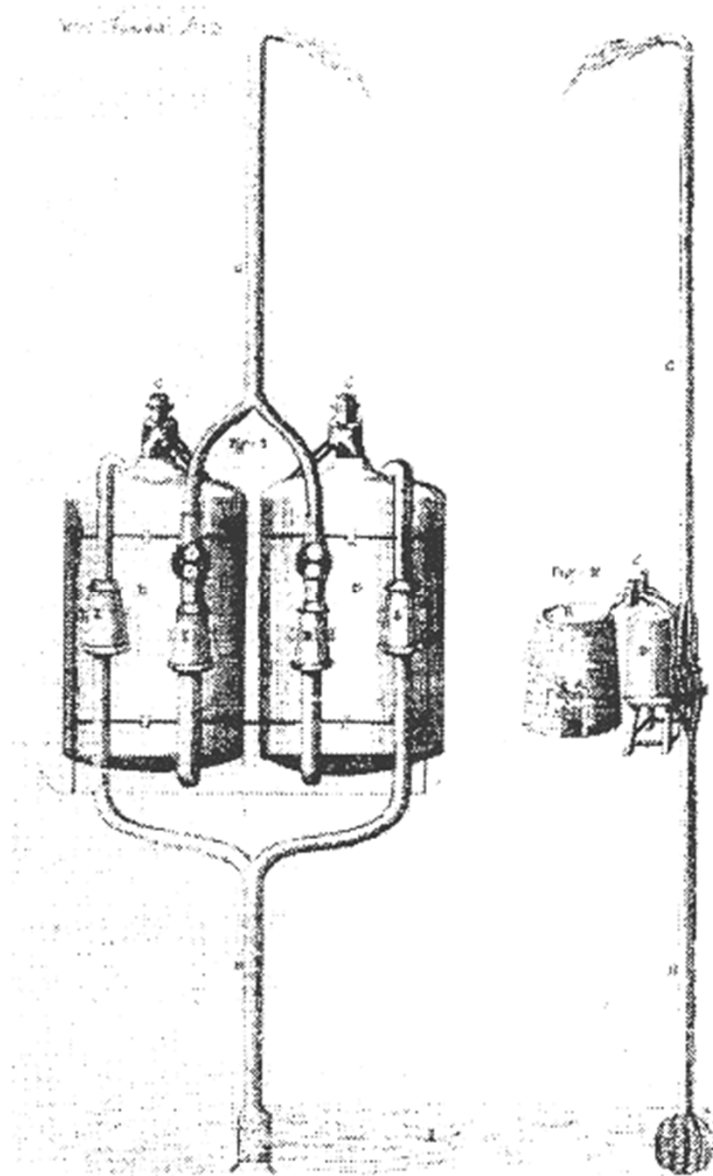
- また, **重力単位系**において大気圧は,

$$\begin{aligned} P &= \frac{1.01325 \times 10^5 (kg \cdot m / s^2 / m^2)}{9.80665 (m / s^2)} \\ &= 1.0332 \times 10^4 \frac{(N / m^2)}{(m / s^2)} \\ &= 1.0332 (kg_f / cm^2) \end{aligned}$$

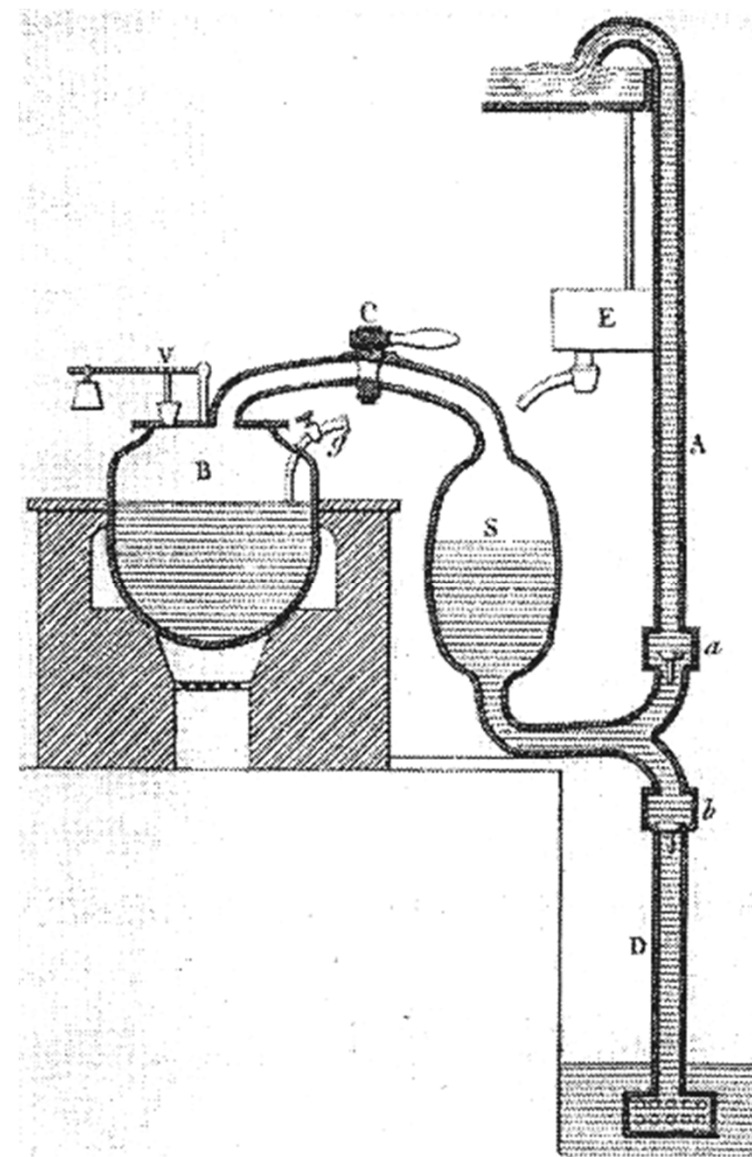
- 地球上の海水面高さにおいて, 我々は,  $1(cm^2)$ 当たり  $1(kg_f)$ の力を受けている.



# サグアリのポンプ機関 (1698)

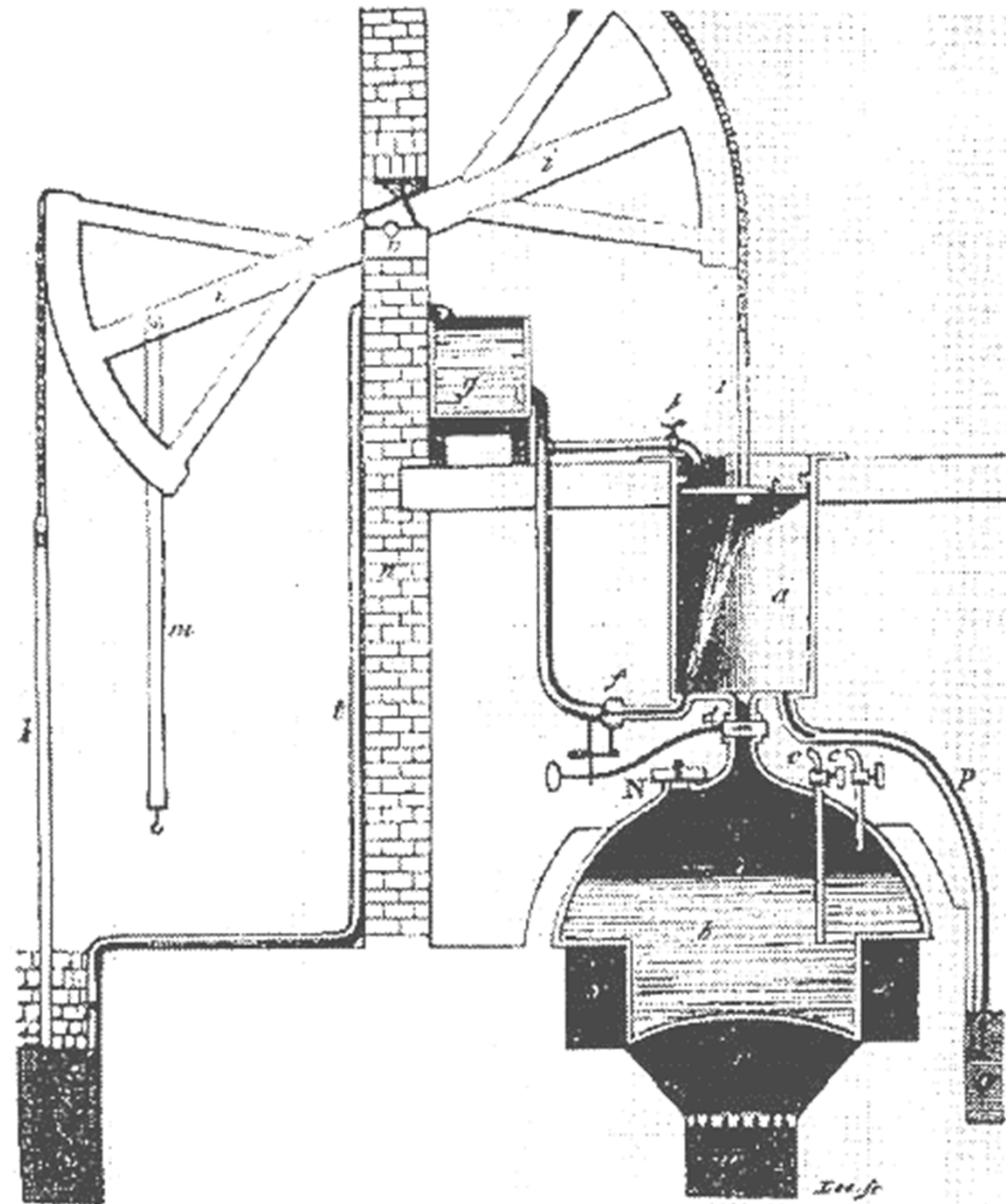


サグアリのポンプ機関の外観

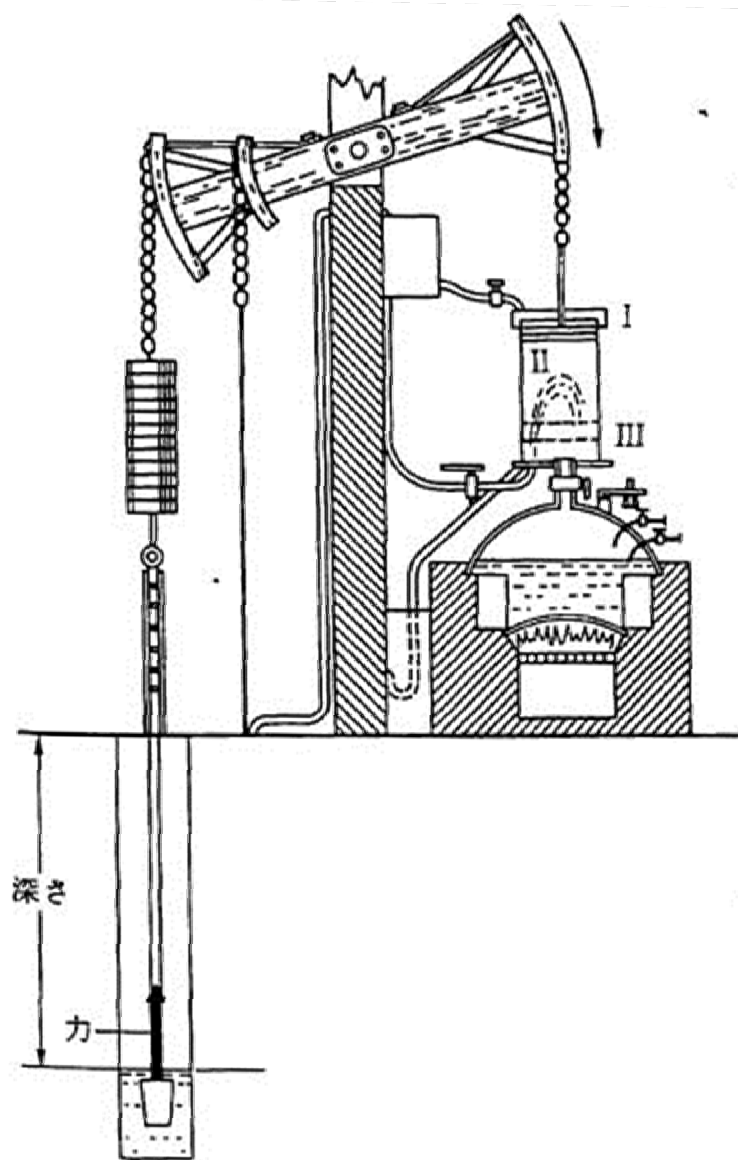


サグアリのポンプ機関の動作原理

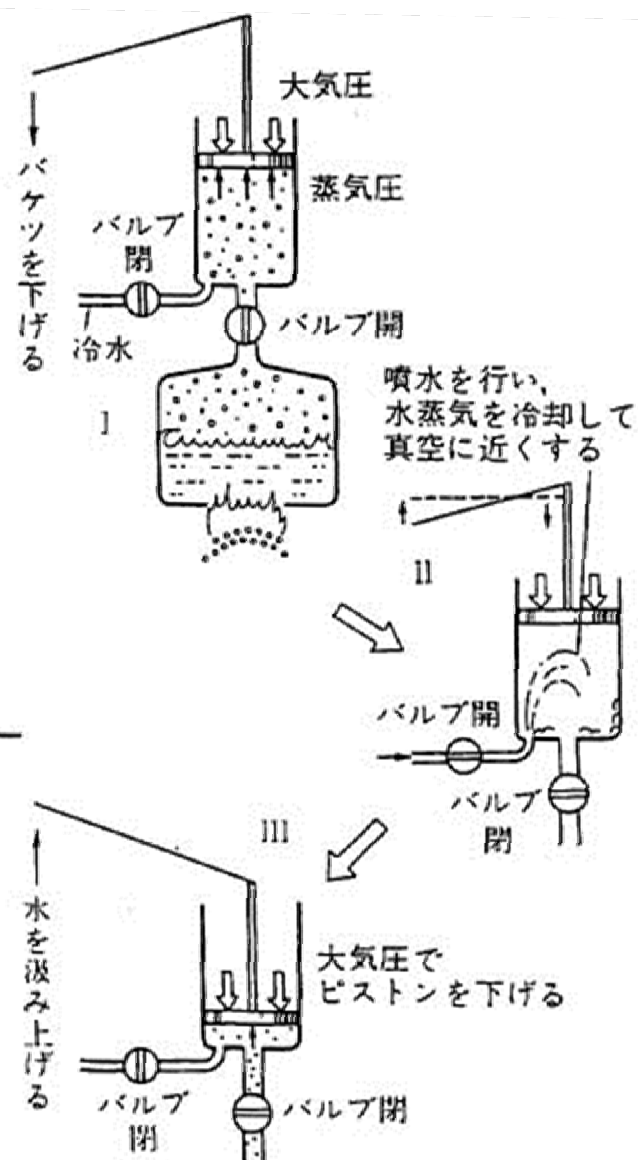
## ニューコメンの大気圧蒸気機関 (1717)



# ニューコメンの大気圧蒸気機関の動作原理

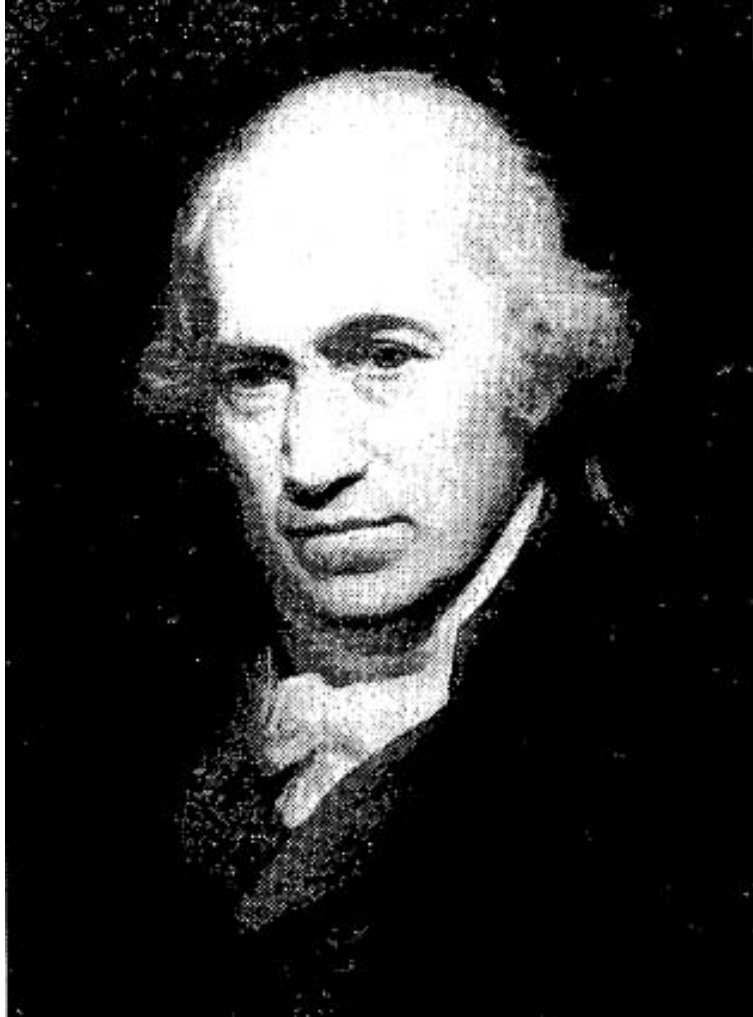


(a) ニューコメンの蒸気機関

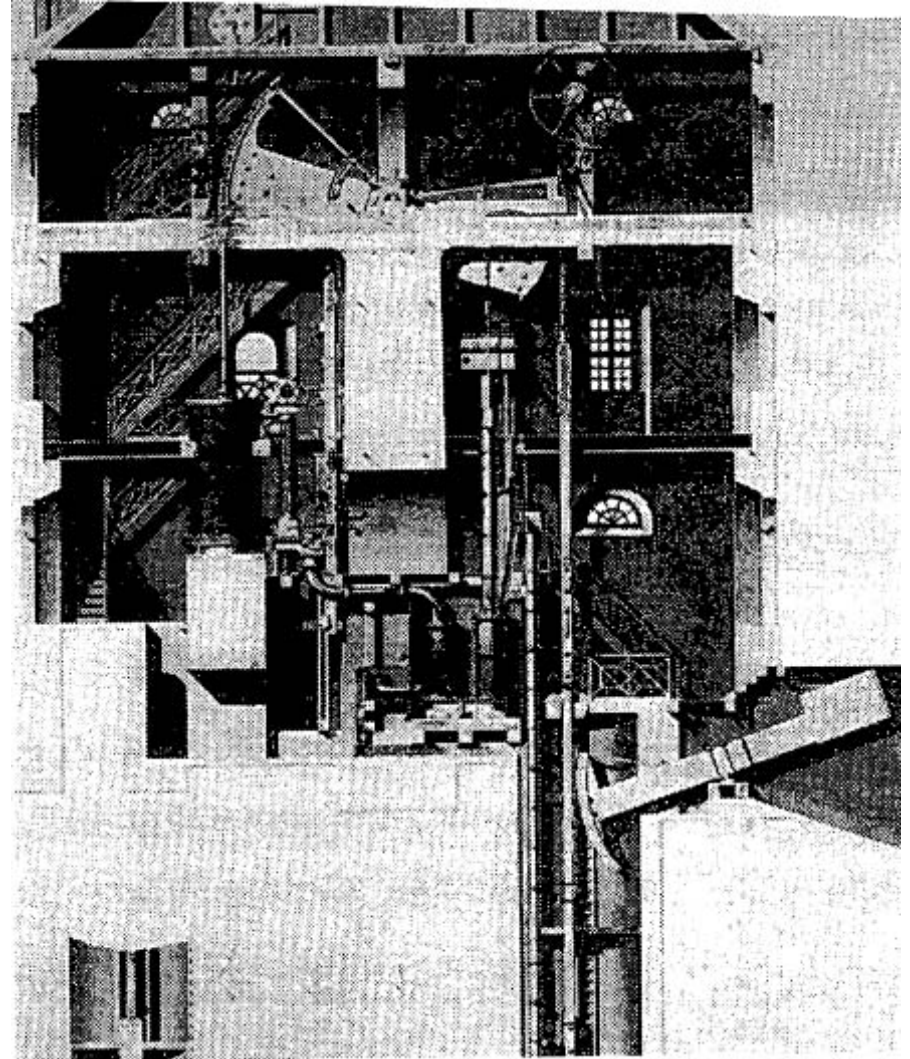


(b) ニューコメン機関の動作

## ワットの蒸気機関 (1802)

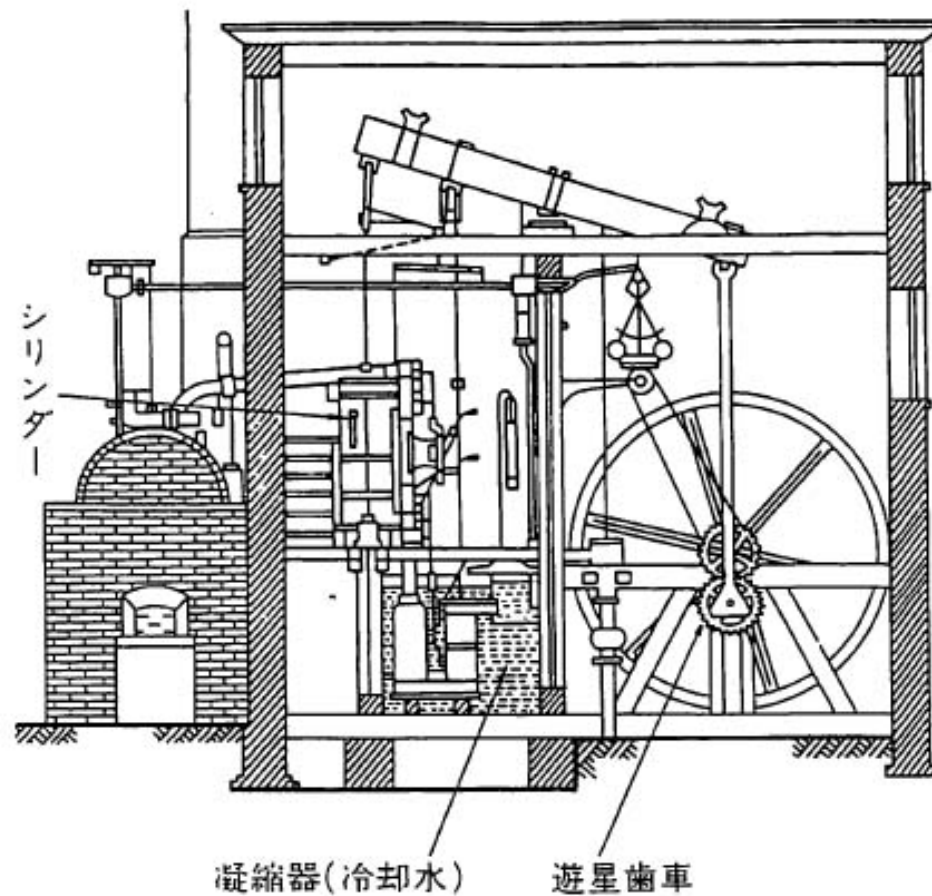


ワット

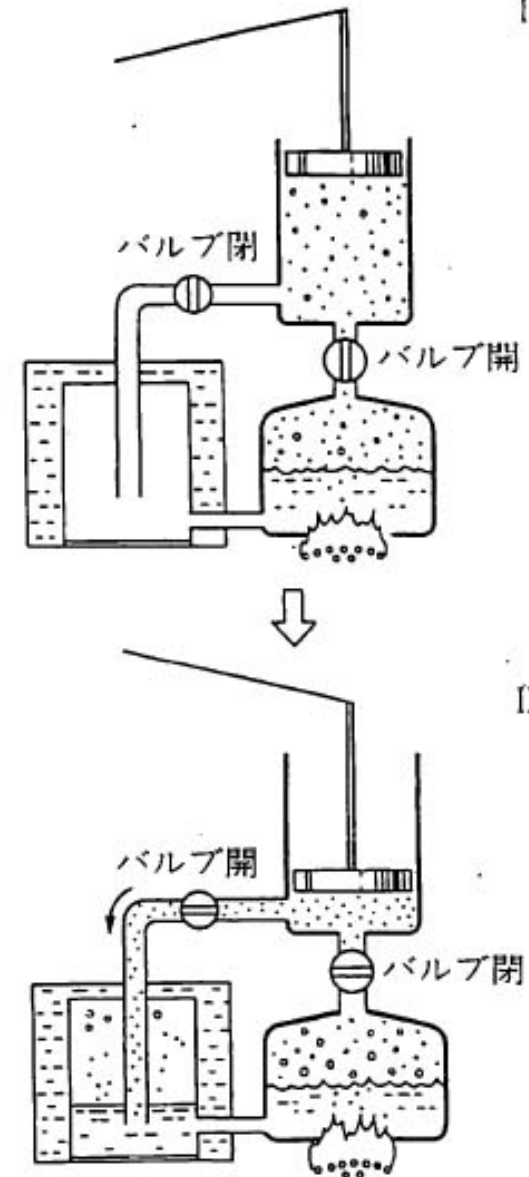


ワットの単段膨張ポンプ機関

# ワットのアイディア(その1)凝縮器の発明

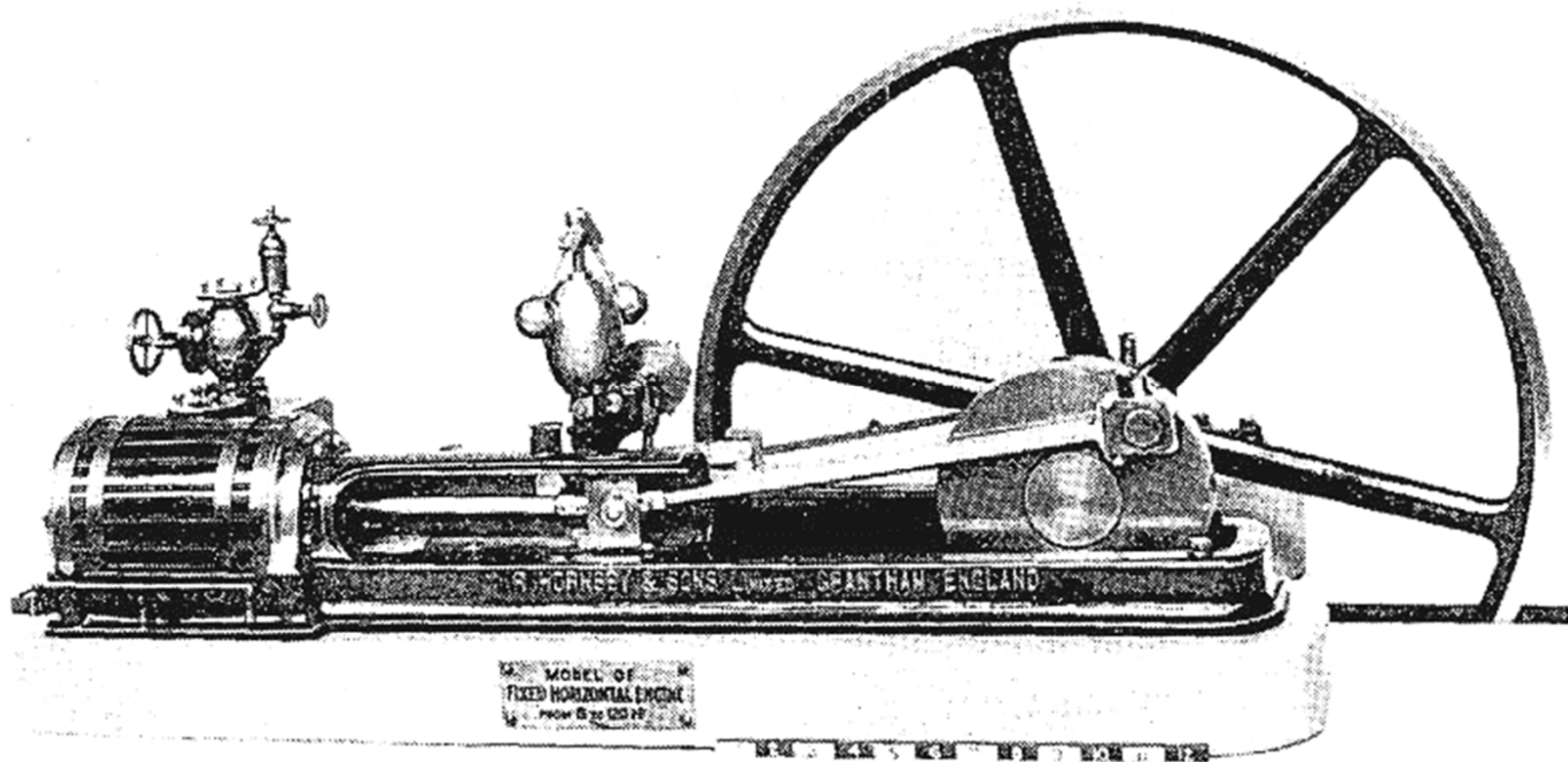


(a)ワットの蒸気機関



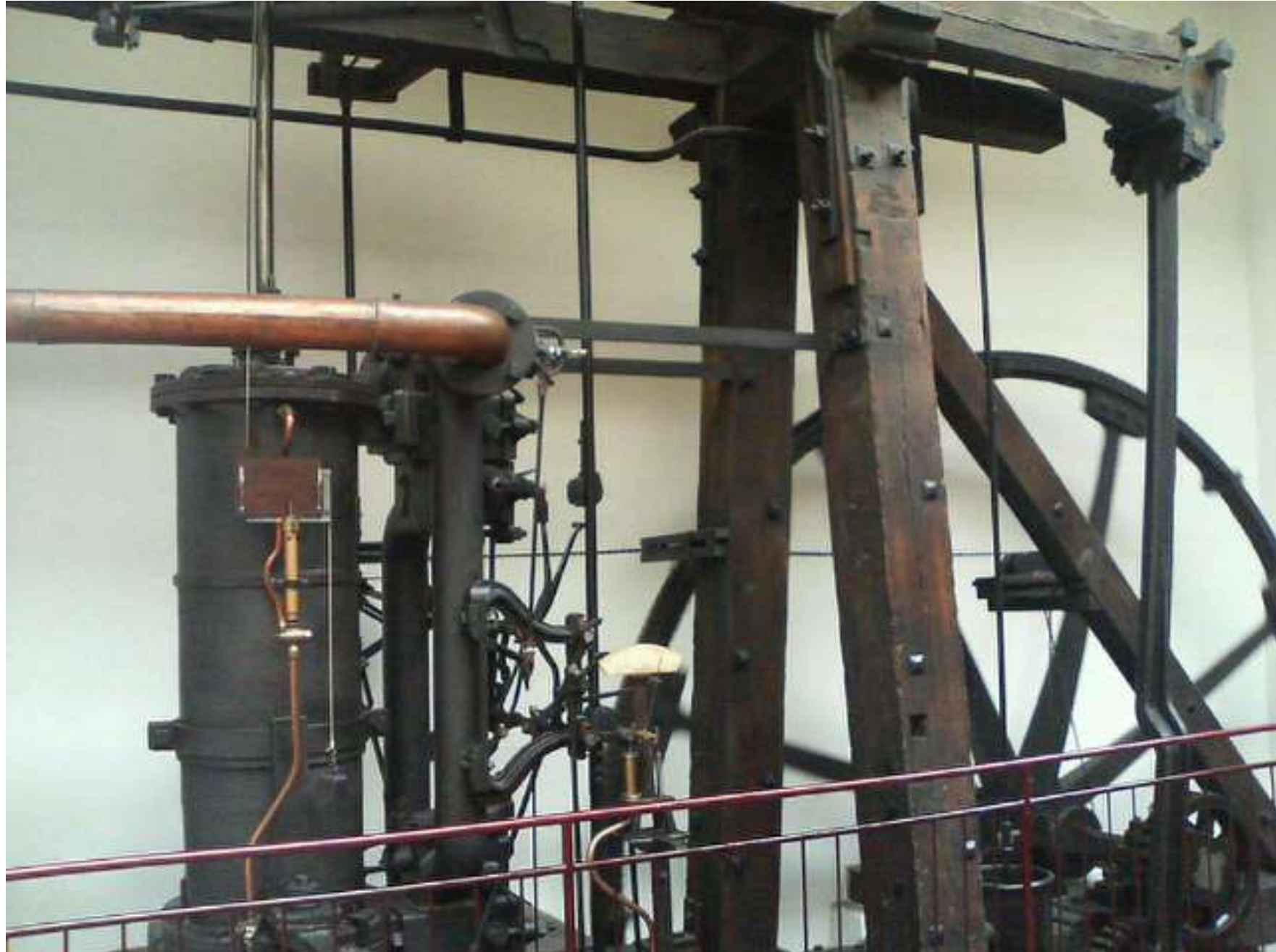
(b)凝縮器の役割

## ワットのアイディア(その2)往復動を回転動へ

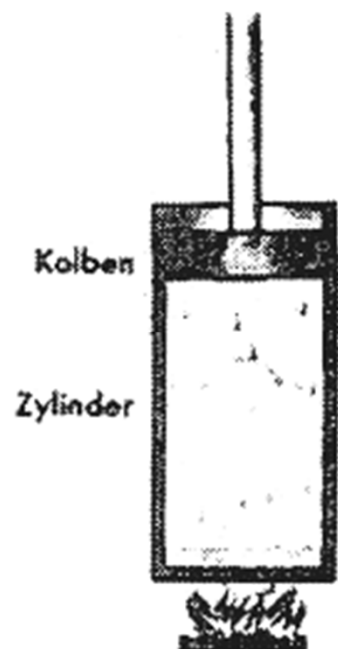


横置往復動蒸気機関(1788)

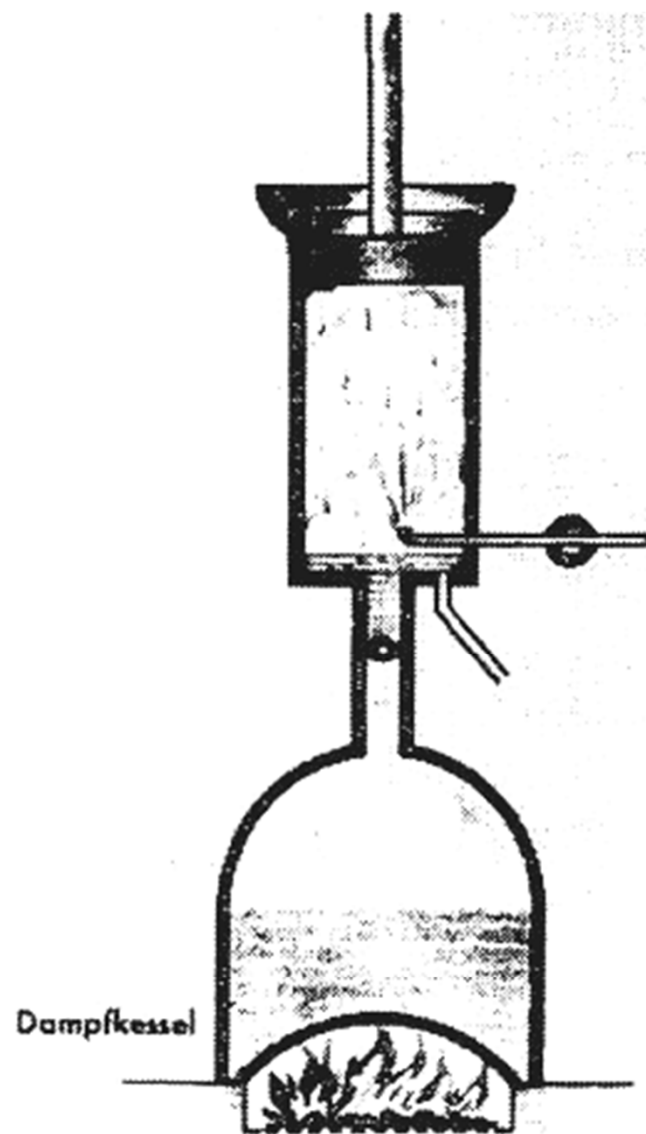
# James Watt Steam Engine



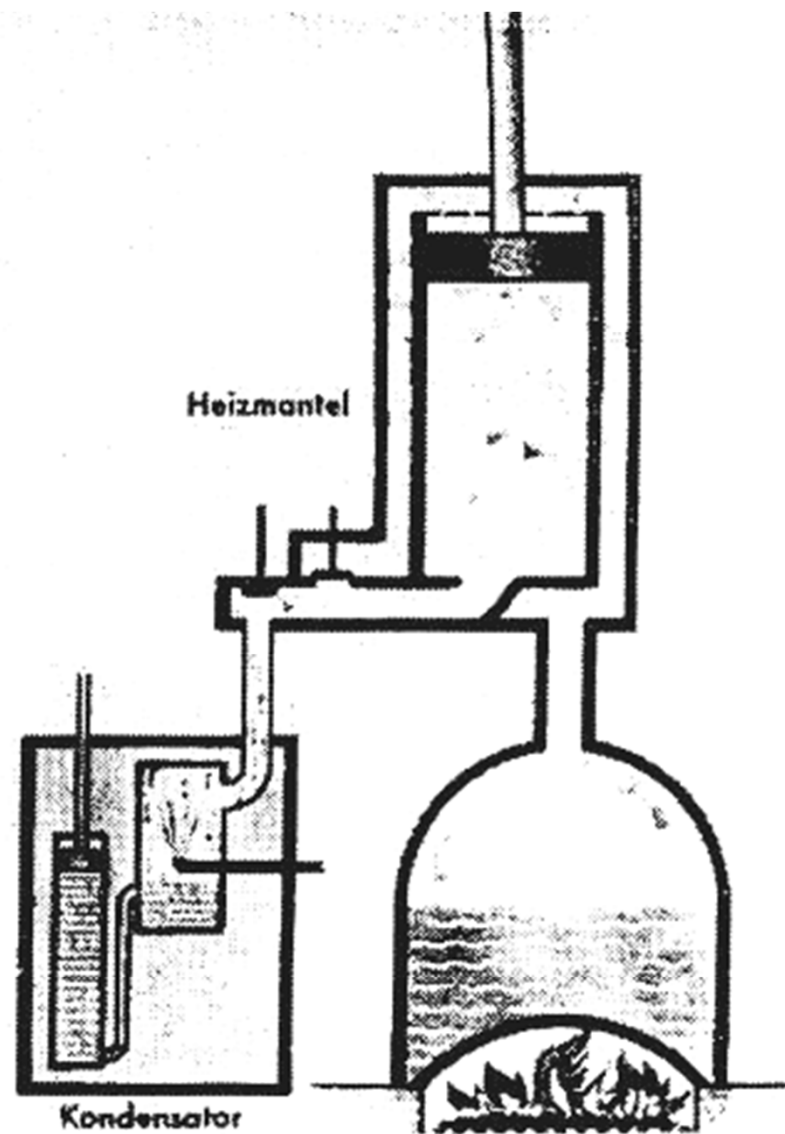
# 各機関の動作原理の比較



パノパン

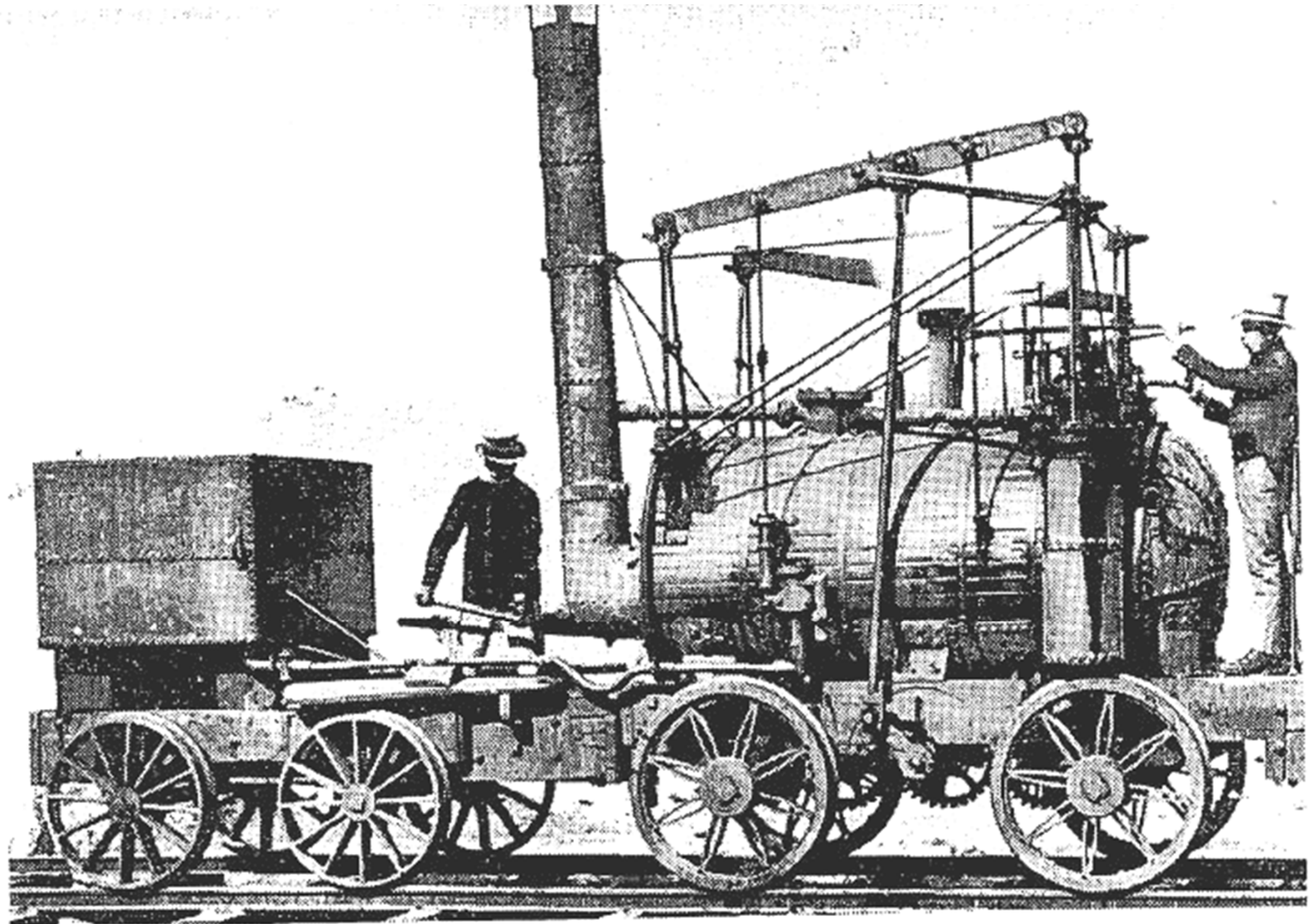


ニューコメン

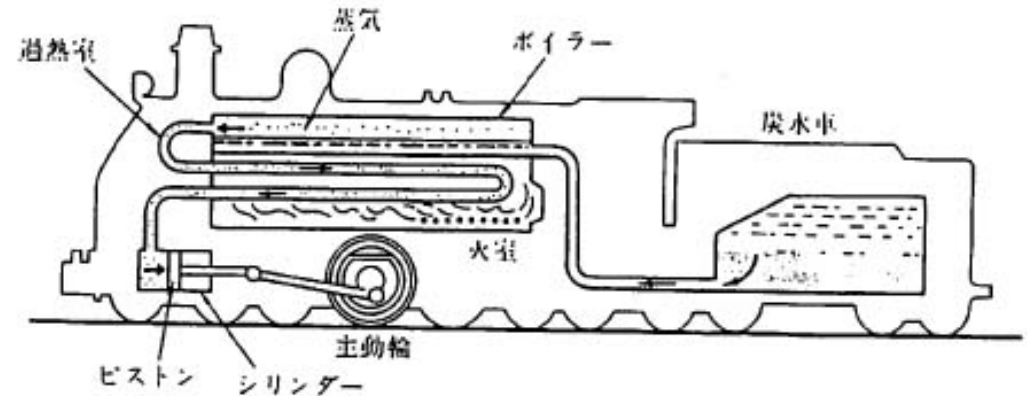
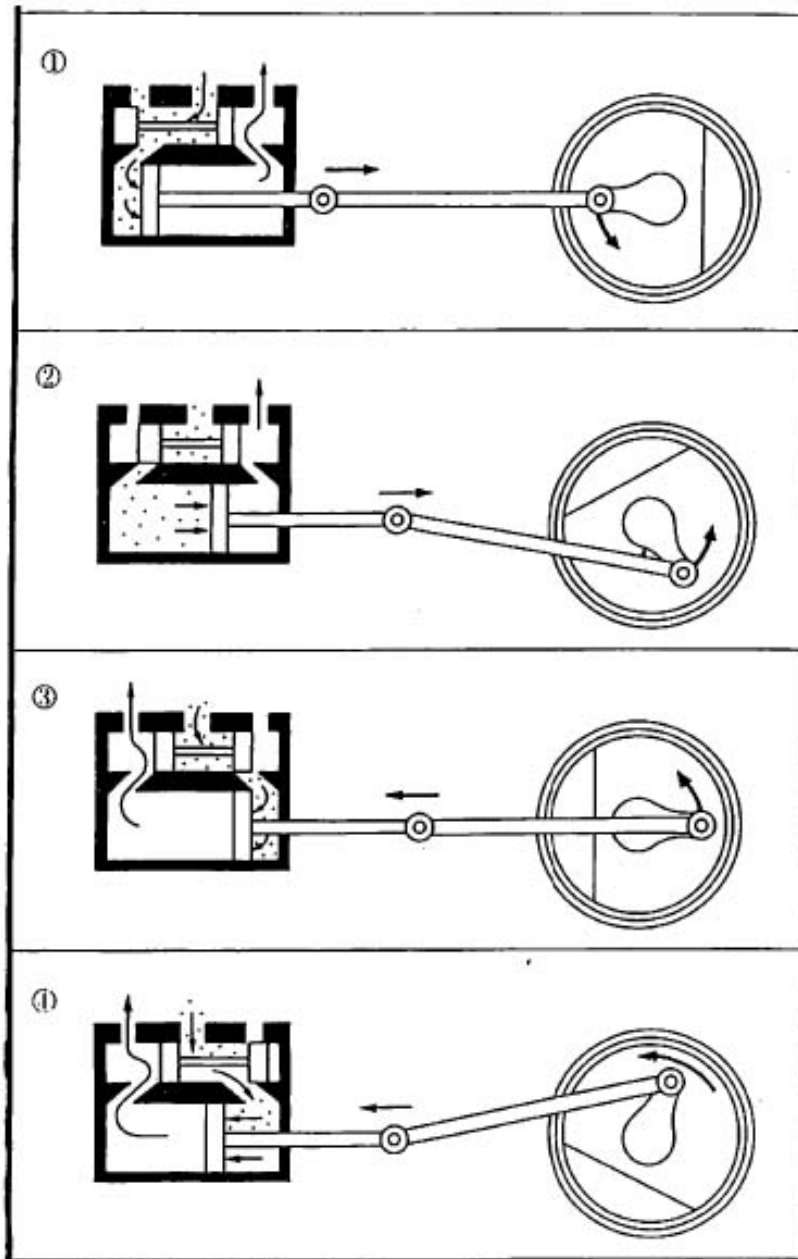


ワット

# 初期の蒸気機関車

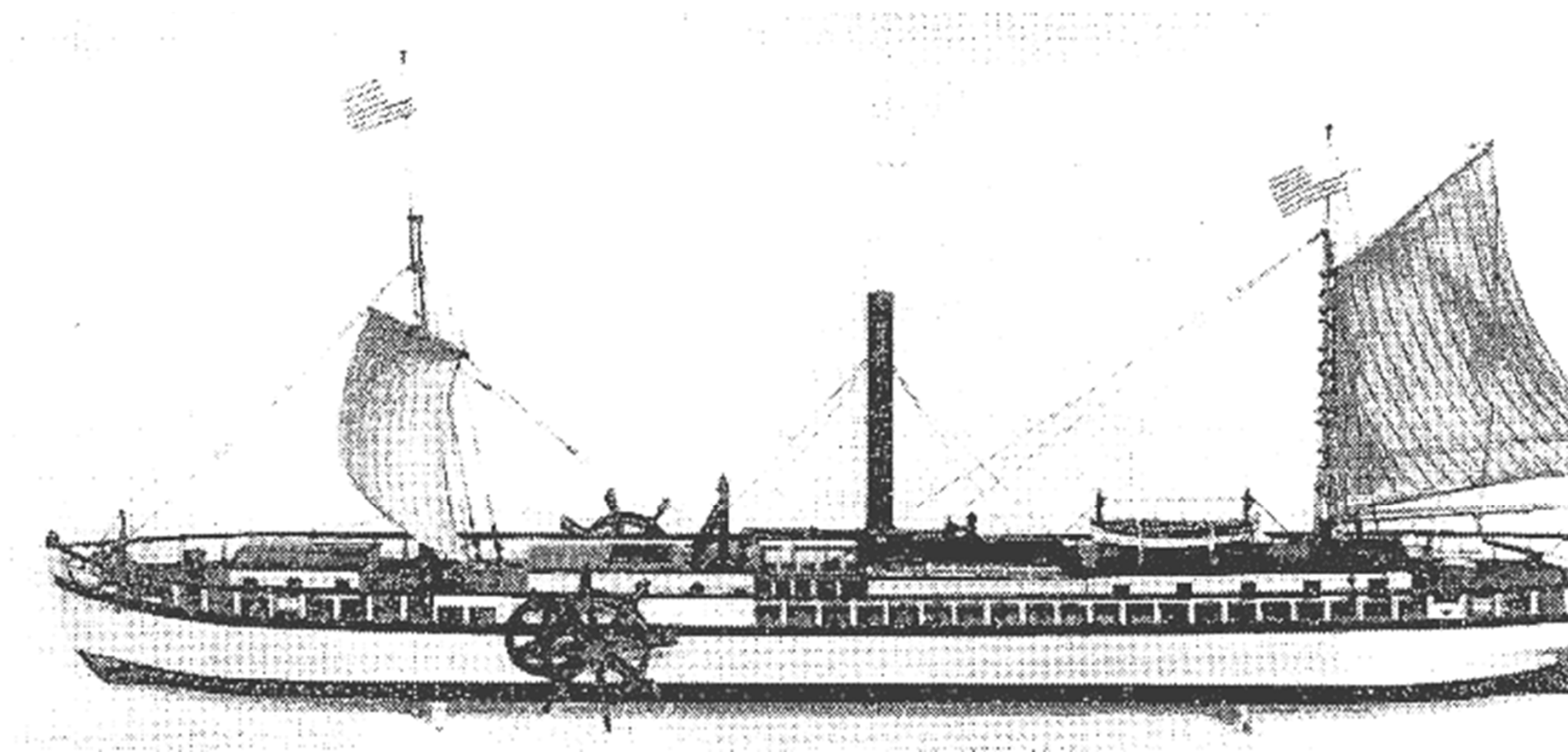


# 蒸気機関車の動作原理

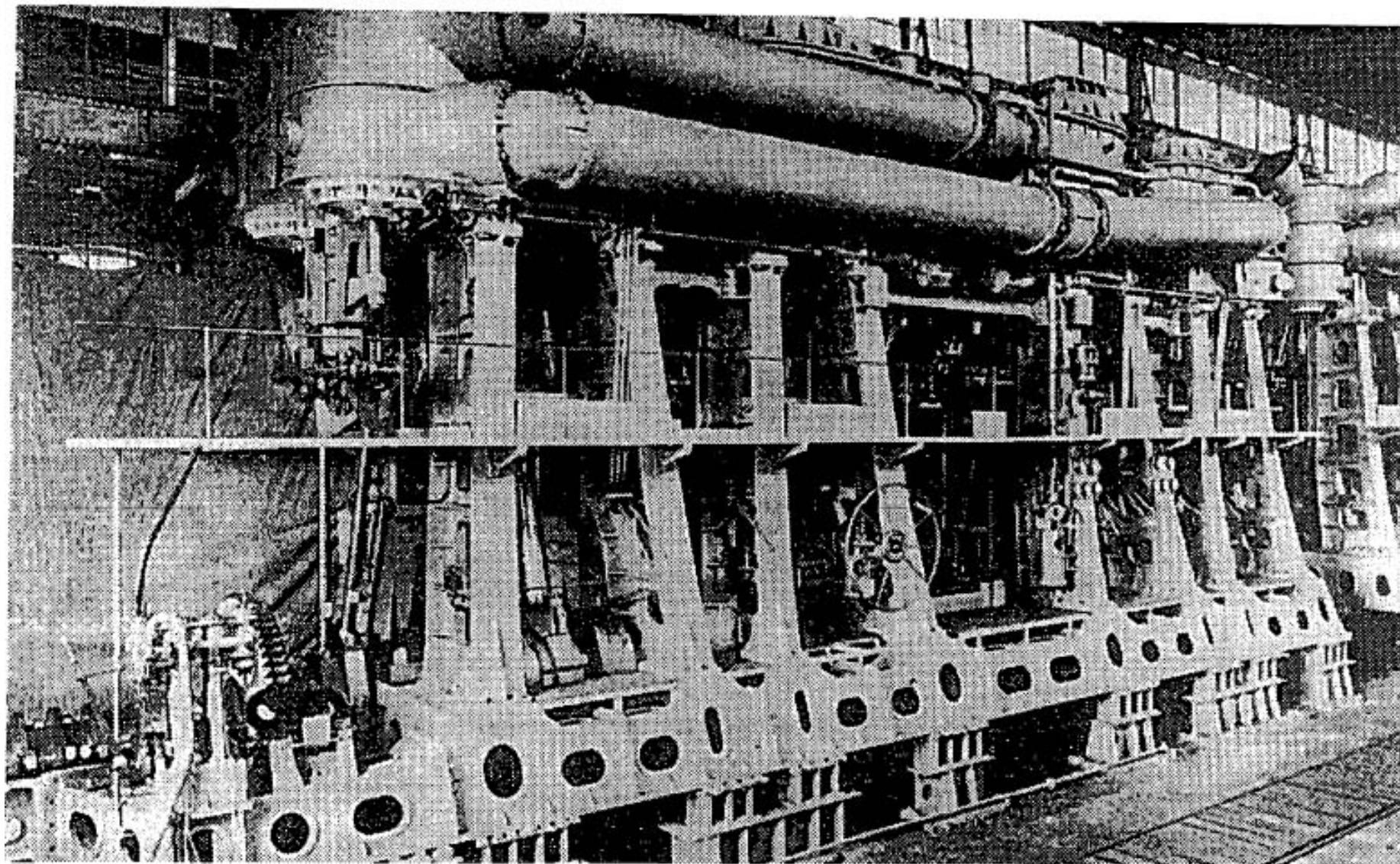


- 加熱蒸気がピストンの左側に入る.
- ピストンを右側に押す.
- ピストンが右側に押し切られると、弁が開いて右側に加熱蒸気が入る. このときピストンの左側は低温・低圧となり、蒸気が排出される.
- ピストンは左側へ動く.

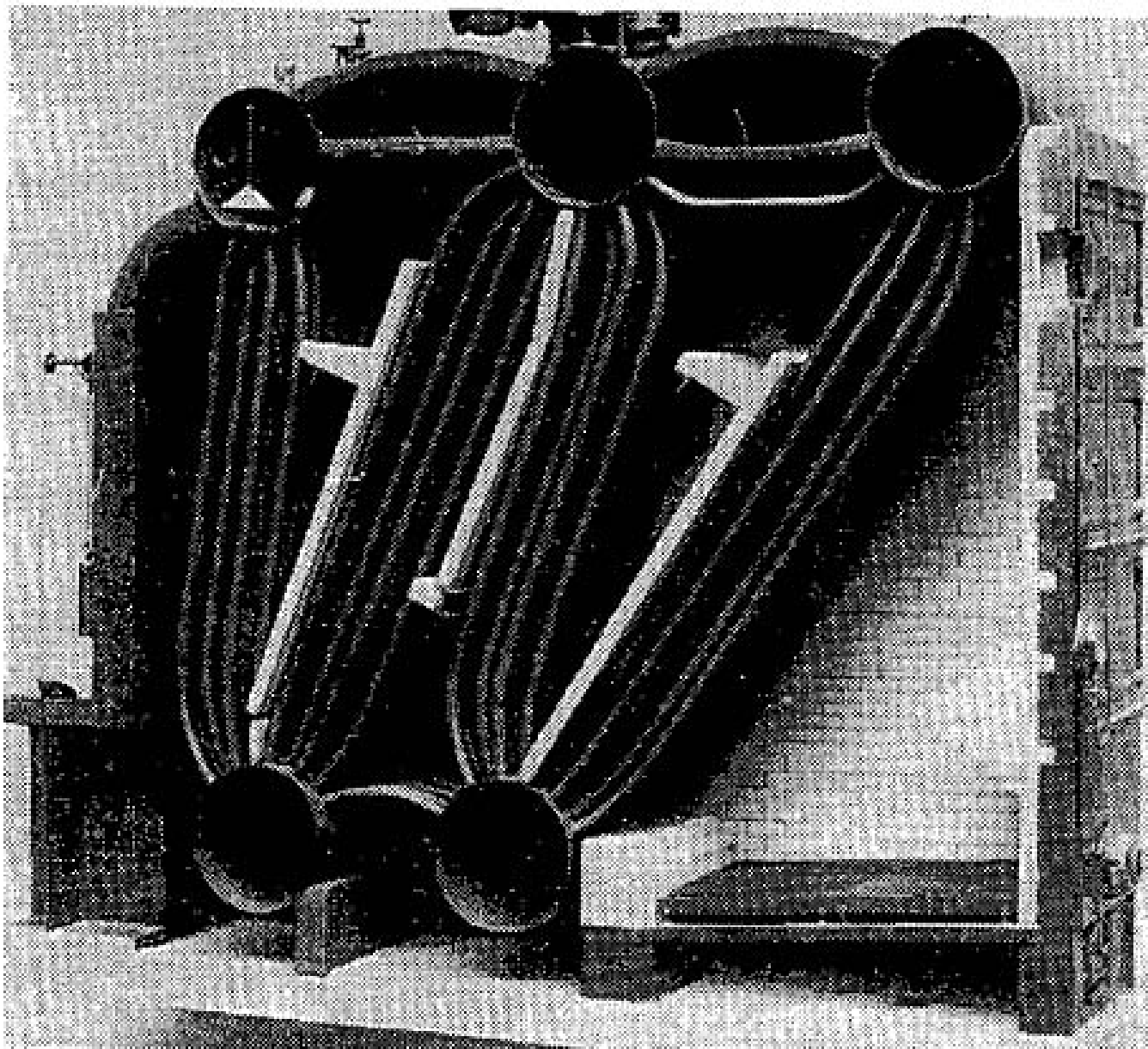
## フルトンの蒸気船 (1807)



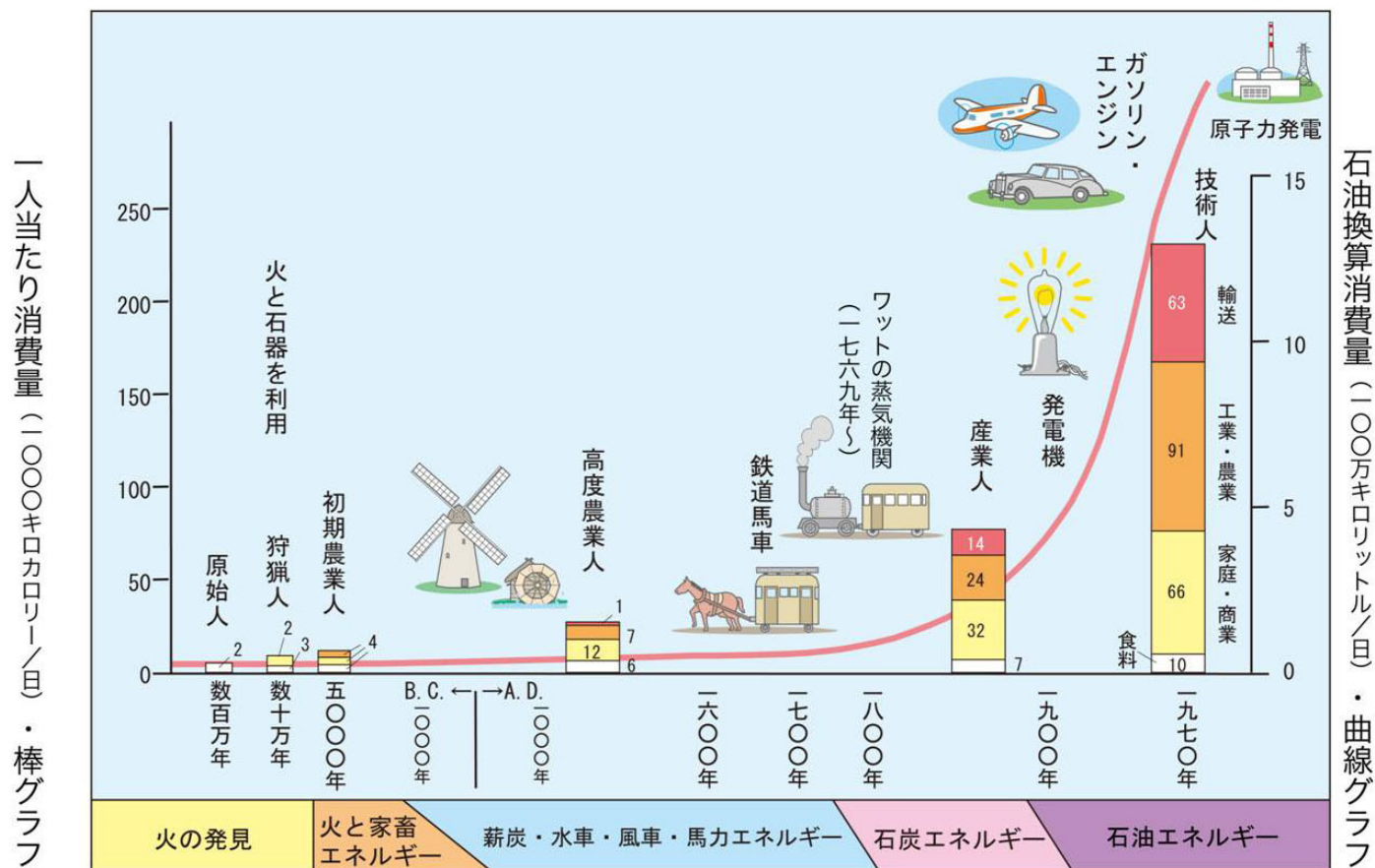
## 四段膨張往復動蒸氣機関 (1908)



## スターリングの曲管式水管ボイラー (1889)

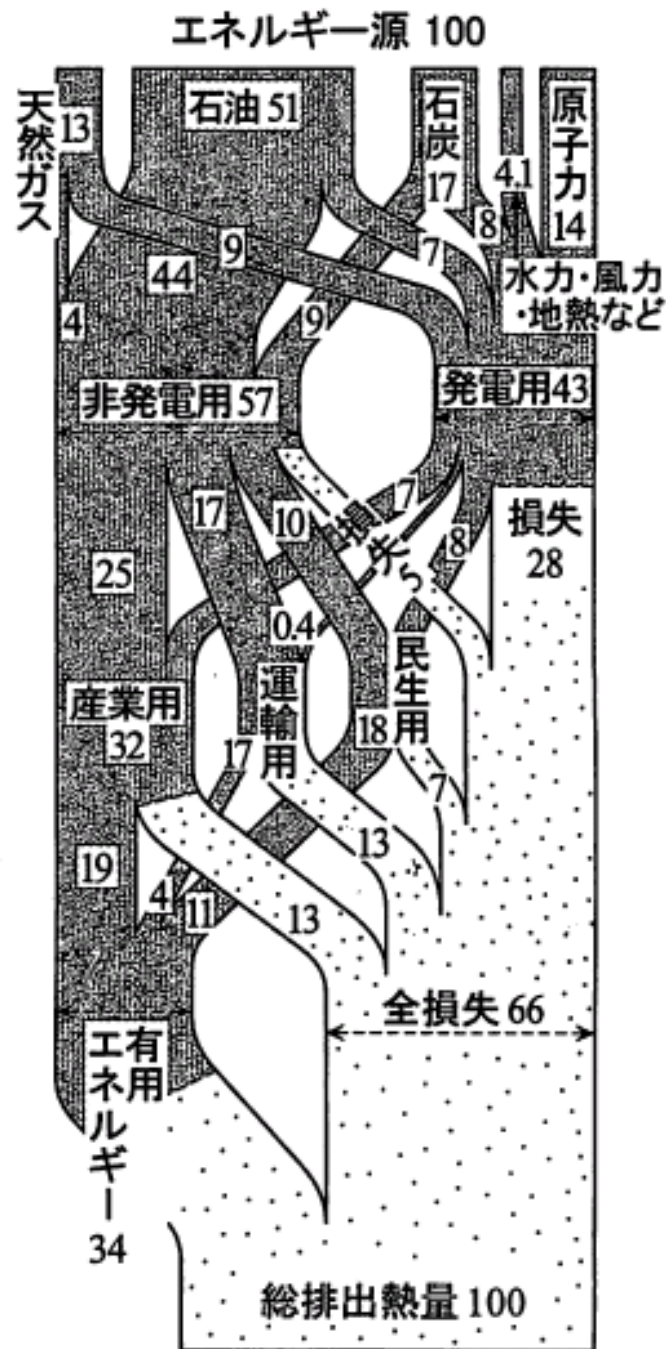


# 人類とエネルギーのかかわり



原始人 百万年前の東アフリカ、食料のみ。  
 狩猟人 十百万年前のヨーロッパ、暖房と料理に薪を燃やした。  
 初期農業人 B.C. 5000年の肥沃三角州地帯、穀物を栽培し家畜のエネルギーを使った。

高度農業人 1400年の北西ヨーロッパ、暖房用石炭・水力・風力を使い、家畜を輸送に利用した。  
 産業人 1875年のイギリス、蒸気機関を使用していた。  
 技術人 1970年のアメリカ、電力を使用、食料は家畜用を含む。



環境へ排出されるエネルギー

## 熱力学小史

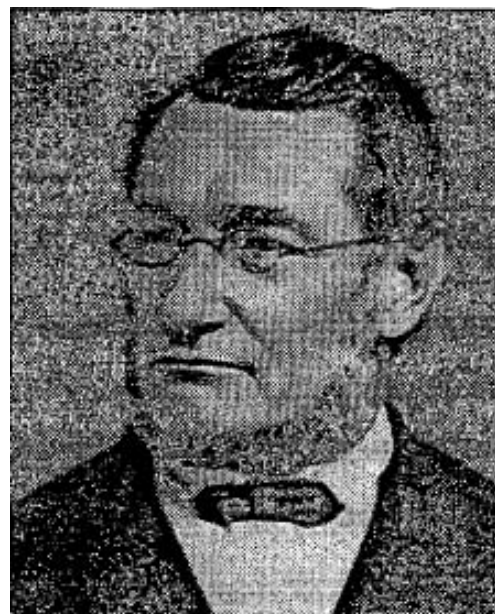
- 日本のエネルギー供給・消費のフローチャート  
(1998年度の1次エネルギー国内供給量  $2.2 \times 10^{19}(\text{J})$  を100とした場合)

(参考文献: 平田賢, (2002))

# 熱力学の先駆者たち



カルノー



マイヤー



ジュール



クラウジウス

# 熱力学を作った人々

- ボイル(Boyle) ... ボイルの法則(1662)
- シャルル(Charles) ... シャルルの法則(1787)
- ラボアジエ(Lavoisier) ... 熱素説(caloric説)の創始者  
(1787)
- ブラック(Black) ... 熱容量, 潜熱の概念を明らかにする  
(1761)
- ワット(Watt) ... 蒸気機関の発明(1763)
- ドルトン(Dalton) ... 近代原子論(1803)
- アボガドロ(Avogadro) ... アボガドロの仮説(1811)
- フーリエ(Fourier) ... 熱伝導理論(1822)
- カルノー(Carnot) ... カルノーサイクルにより熱効率の限界  
を示す(1824)
- マイヤー(Mayer) ... エネルギー保存則の熱現象への拡  
張の試み(1841)
- ジュール(Joule) ... 仕事当量の測定(1843)

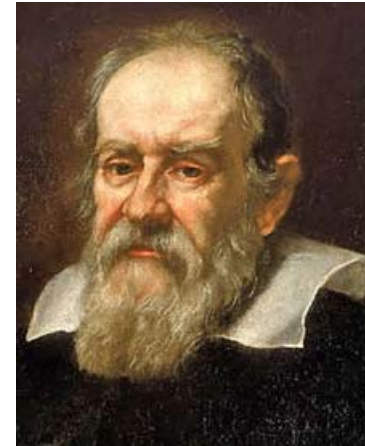
# 熱力学を作った人々

- トムソン(Thomson) ...絶対零度の発見, 熱力学第1法則, 第2法則を確立, 後に貴族となりケルビン卿(Lord Kelvin)と呼ばれる
- クラウジウス(Clausius) ...熱力学第1法則, 第2法則を確立, エントロピー(entropy)の概念を導入
- ヘルムホルツ(Helmholtz) ...エネルギー保存則(1847)
- オットー(Otto) ...ガソリン・エンジンの発明
- ディーゼル(Diesel) ...ディーゼル・エンジンの発明
- ファンデルワールス(Van der waals) ...実在気体の状態方程式
- マックスウェル(Maxwell) ...統計力学の確立
- ボルツマン(Boltzmann) ...統計力学の確立
- ギブス(Gibbs) ...平衡系の熱力学

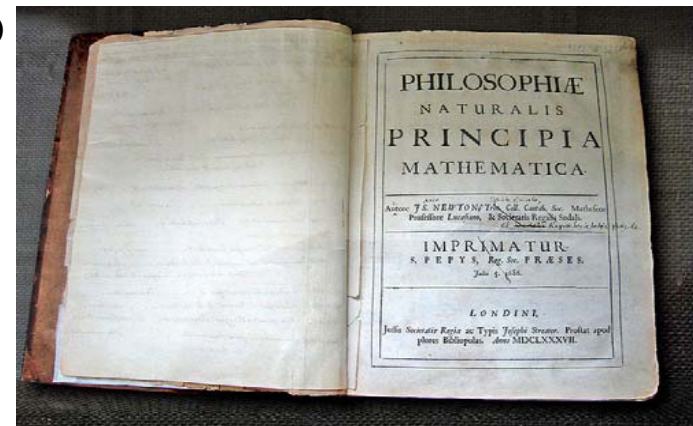
## 産業革命以前

# 自然哲学(Philosophy) から 科学(Science)へ

- ガリレオ・ガリレイ(1564-1642)
  - 科学理論の成否は観察と測定によって決まる.
  - 形而上学(神学)から科学へ



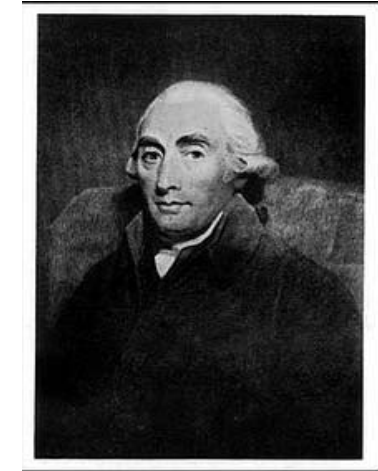
- アイザック・ニュートン(1642-1727)
  - 「自然哲学の数学的諸原理」(プリンキピア)の執筆・刊行(1687年刊)
  - 「ニュートン力学」の確立
  - 自然現象を数学により表現



# 産業革命

## 熱の理論の誕生, 熱素論の台頭

- ジョセフ・ブラック(1728-1799)
  - ウイスキーの蒸留器の改良.
  - 同体積の水と水銀の温度上昇に差があるという事実などから、「**熱容量**」の概念を発見.
  - 氷が温度を変えずに熱を吸収することを見出し、「**潜熱**」の概念を生み出す.
  - これらの発見をもとに、「熱は目に見えない流体である」という「熱流体説」を提唱
  - ジェームズ・ワット(1736-1819)を支援



- ラボアジェ(1743-1794)
  - 化学反応の前後では質量が変化しないという「**質量保存の法則**」を発見.
  - 熱は、「熱素」と呼ばれる質量の無い流体である, と考える「熱素論」を提唱.
  - 熱が保存されると考えた.



- 「熱素論」の基本 → 熱は変わることなく「保存」される
- 熱と仕事の関係や「エネルギー」の概念については, この時期, 全く考えられていなかった.



# 「エネルギー」への道

## 「エネルギー」という言葉の本質 → 「変換」と「保存」

- 現代であれば、学生であっても、「エネルギー」という言葉の意味は、ほとんど当たり前のように理解しているはずである。
- しかしながら、1800年代前半の科学者たちは、いずれは「エネルギー」という概念で統一されることになる、いくつもの効果について、まったく異なる別々のものであると捉えていた。
- すなわち、①力学的、②熱的、③化学的、④電氣的、⑤磁氣的な効果に何らかの共通点があるのではないかと考えていたが、その繋がりには、曖昧で不完全にしか理解されていなかった。
  - ボルタ電池： 化学的効果→電氣的効果
  - エルステッド(1820)： 電氣的効果→磁氣的効果
  - ゼーベック(1822)： 金属接合部の加熱→電氣的効果
  - ペルティエ(1834)： 電氣的効果→冷却効果
- これらの研究により、「化学的効果→電氣的効果→磁氣的効果→力学的効果→電氣的効果」のような「変換」が、何らかの形で、「保存」と結びついていることが示されていた。
- しかしながら、この時代、この「変換」し、「保存」されるものが何者であるかについての答えは、無かった。

# 「熱素論」の終焉

- マイヤー(1814-1878)
  - 理論によって、熱と仕事等価であることを示し、その値を、当時得られていた物性値を用いた計算によって、以下の数値として求めた(1841). 「**マイヤーの関係**」

$$J = 366(\text{kg}_f \cdot \text{m} / \text{kcal})$$

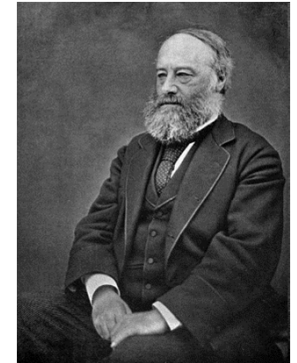
- ジュール(1818-1889)
  - 加熱された気体が膨張することによって行う仕事を、自らの精緻な実験によって「**熱の仕事当量**」として計測した(1843).

$$J = 425(\text{kg}_f \cdot \text{m} / \text{kcal})$$

- 「流体の摩擦によって熱が発生する」という事実を実証.

- これらの結果は、「何者かが、**変換されて、保存されている**」ことを明らかにしており、**熱素説を否定**.
- しかしながら、それが「エネルギー」の「変換」と「保存」を示す証拠として認識されることはなかった.

- ヘルムホルツ(1821-1894)
  - 「力の保存について」を出版(1847)
  - この中で用いられたドイツ語の「力」(Kraft)とは、方向のあるベクトルとしての「力」(Force)ではなく、方向のないスカラーとしての「エネルギー」(Energie)を意味しており、理論によってのみではあったが、初めて「**エネルギー保存則**」を提示していた.



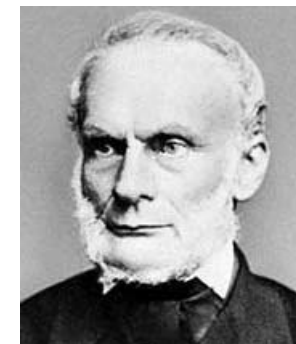
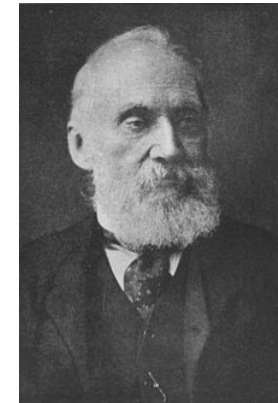
現在の値

$$\begin{aligned} J &= 426.80(\text{kg}_f \cdot \text{m} / \text{kcal}) \\ &= 426.80 \times 9.80665(\text{N} \cdot \text{m} / \text{kcal}) \\ &= 4185.5(\text{J} / \text{kcal}) \\ &= 4.185(\text{kJ} / \text{kcal}) \\ \therefore 1(\text{kg}_f) &= 9.80665(\text{N}) \end{aligned}$$



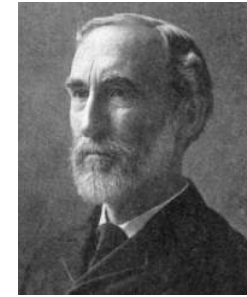
# 第一法則, 第二法則, エントロピーへの道

- カルノー(1796-1832)
  - 「火の原動力に関する省察」を公表(1824).
  - **カルノーサイクル**, 熱機関の動作原理を発見.
- トムソン(ケルビン卿, 1824-1907)
  - 絶対温度(K, ケルビン)を定義する方法を発見.
  - 「**エネルギー**」という概念を導入.
  - カルノー・ジュール問題を解決:「熱の力学的理論」(1851)において, 保存量であるエネルギーは, 系の固有の性質であり, 熱や仕事の影響で変化することを示した.「**熱力学第一法則**」
  - ジュール・フーリエ問題の解決:エネルギーの散逸と不可逆性について発表(1852).
- クラジウス(1822-1888)
- 熱は, 熱機関の中で, 高温から低温へ落下するだけでなく, 一部が仕事に変換されることを発表(1850).
- 不可逆過程の考え方をもとに,「**エントロピー**」の概念を導入(1854).「**熱力学第二法則**」を確立.



# 熱力学の完成, 統計力学から量子力学へ

- ギブス(1839-1903)
  - 「不均質物質の平衡」(1875-78)出版. **熱力学の完成**.
  - 「統計力学の基本原則」(1902)発表. 量子論誕生へ貢献.
  - 「偉大なるギブス」, 「熱力学におけるニュートン」
- マックスウエル(1831-1879)
  - 気体の動力学的理論の論文発表(1859). 個々の粒子の速度分布は**マクスウェル分布**に従うことを示した.
  - マクスウエル方程式を導出(1864)
- ボルツマン(, 1844-1906)
  - 気体分子運動論**.
  - ボルツマン方程式の考察から, H定理を導出(1872). **熱現象の不可逆性(エントロピーの増大)**を証明.
  - ボルツマンの関係式**:  $S = k \cdot \log W$  を導出(1877).



## 量子力学へ

- マックス・プランク(1858-1957): 量子論の父
- ニールス・ボーア(1885-1962): 原子モデル, 前期量子論
- ルイ・ドブロイ(1892-1987): 量子と物質波
- エルギン・シュレージンガー(1887-1960): 波動方程式の発見

# 熱力学の基礎

(温度, 温度と熱平衡, 理想気体,  
状態方程式,  
力学的な量,  $p$ - $V$ 線図と仕事)

# 熱力学とは...

物理学 ... 力学, 電磁気学, 量子力学, 相対性理論

四力学 ... 熱力学, 流体力学, 材料力学, 機械力学  
→ 熱工学, 伝熱工学, 統計力(統計熱力学)  
流体力学, 流体工学, 気体力学, 熱流体工学

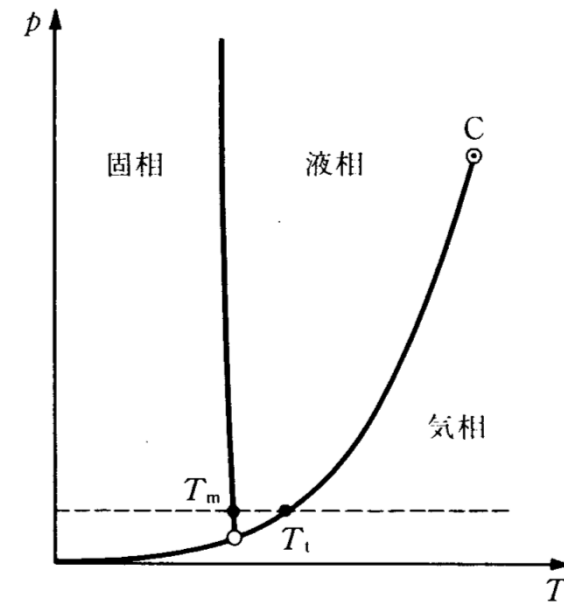
キーワード: 熱, エネルギー(エネルギーを取り扱う基礎教科)

環境に対する負荷を低減し, 如何にエネルギーを有効に利用するか, この解決を得るための学問の一つ.

# 温 度 (temperature)

## <温度目盛>

1. °C (摂氏) ... セルシウス (Celsius);  
スウェーデン
2. °F (華氏) ... ファーレンハイト  
(Fahrenheit); ドイツ



- ⊙: 臨界点 (C), 647.2 K, 218.3 atm
- : 三重点 ( $T_t$ ), 273.16 K,  $6.025 \times 10^{-3}$  atm
- : 融点 ( $T_m$ ), 273.15 K,  $6.028 \times 10^{-3}$  atm

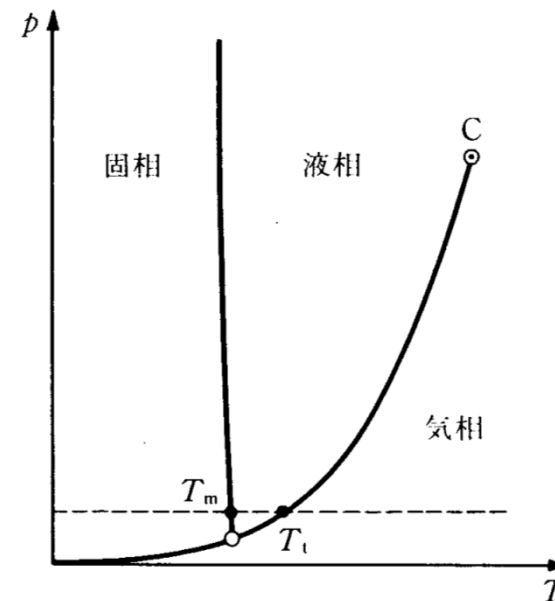
図 7.1 水の相図 (状態図)

# 温 度 (temperature)

<温度目盛>

3. °R (列氏) ... レオミュール  
(Reaumur); フランス

4. K (絶対温度) ... ケルビン  
(Kelvin); イギリス



⊙: 臨界点 (C), 647.2 K, 218.3 atm  
○: 三重点 ( $T_t$ ), 273.16 K,  $6.025 \times 10^{-3}$  atm  
●: 融点 ( $T_m$ ), 273.15 K,  $6.028 \times 10^{-3}$  atm

図 7.1 水の相図 (状態図)

## 華氏と摂氏

華氏と摂氏の表現はそれぞれの中国語表記に由来している.

- ファーレンハイト … 華倫海 … 華氏
- セルシウス … 摂爾修 … 摂氏

# 温度と熱平衡

＜熱平衡 (thermal equilibrium)＞

「温かい物体」と「冷たい物体」を接触させると「温かい物体」は冷え、「冷たい物体」は温まり、ある程度時間が経つとこの温冷の差はなくなる。これを熱平衡と呼ぶ。

＜熱力学第0法則 (the zeroth law of thermodynamics)＞

3つの物体A, B, Cがあり, AとBの温度が等しく, AとCの温度が等しいとき, BとCの温度は等しい。

例: 温度計

# 温度と熱平衡

## < 熱平衡 (thermal equilibrium) >

2つの物体を接触させると、2つの物体の状態が変わる。この2つの物体が、外から影響を受けないように周りから切り離されている場合、十分に時間がたつと、この変化が止まる。

この時、「2つの物体は熱平衡になった」という。

## < 熱力学第0法則 (the zeroth law of thermodynamics) >

3つの物体A, B, Cがあり、AとBが熱平衡になっており、AとCが熱平衡になっている場合、BとCは熱平衡になっている。

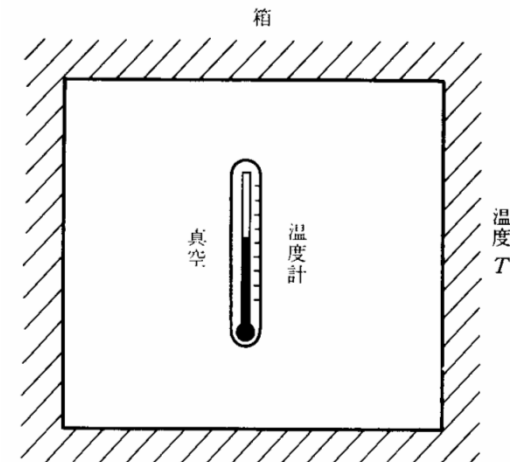
温度: 物体Aが特定の状態になっているとき、これと熱平衡になっている物体同士 (B, C) はすべて熱平衡になっているという共通の性質を持つ。この性質が温度であり、これらの物体は温度が等しい。

# 温度とは何か？

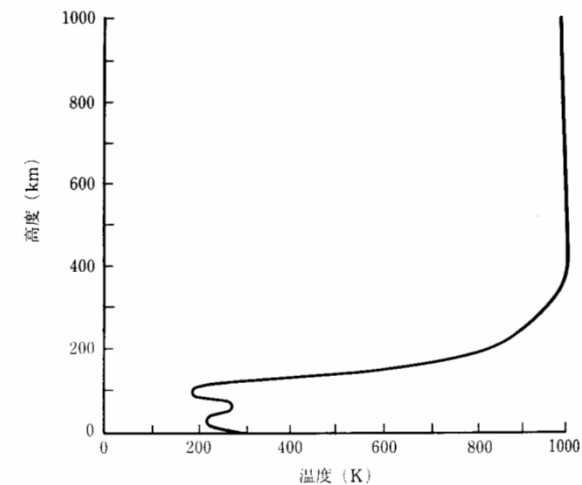
分子運動論 ...  $\overline{\frac{1}{2}mv^2} = \frac{3}{2}kT$

本当にこれでいいのか？

真空の温度は？

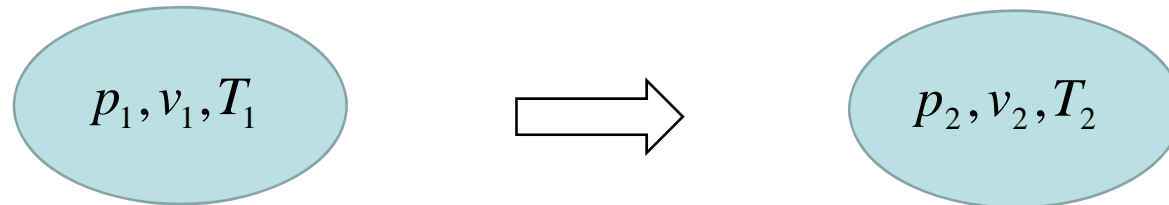


この温度計は何度を指す？



## 理想気体 (ideal gas)

圧力(pressure), 体積(volume), 温度(temperature)



<ボイル(Boyle)の法則>

## 理想気体 (ideal gas)

＜シャルル (Charles) の法則＞

＜ボイル-シャルルの法則＞

## 状態方程式 (equation of state)

### <理想気体の状態方程式>

ボイル-シャルルの法則から、理想気体1kgあたり

$$\frac{pv}{T} = R \quad (R[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]: \text{気体定数})$$

→

$M[\text{kg}]$ の気体では  と書ける.

※単位量(単位質量)当たりに対応する物理量は小文字(例:  
 $v$ )で、総量(全量)に対応する物理量は小文字(例: $V$ )で表す.  
ただし、量に関係のない物理量には、このルールは適用しない.

## 状態方程式 (equation of state)

圧力1気圧 ( $p_0 = 0.1013 \text{ MPa}$ ), 温度 $0^\circ\text{C}$  ( $T_0 = 273.15 \text{ K}$ )において, 分子1 mol のあらゆる種類の気体の体積は,  
 $V_0 = 0.02241 \text{ m}^3$ であることから, このときの気体定数 $R_0$ は

$$R_0 = \frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{0.1013 \times 10^6 \times 0.02241}{273.15} \cong 8.31$$

$n[\text{mol}]$ の気体では  と書ける.

一般気体定数 (1molあたり):  $R_0 = 8.31433 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$   
 $= 847.826 \text{ kgf} \cdot \text{m}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$   
 $= 1.986 \text{ cal}/(\text{mol} \cdot \text{K})$   
 $= 82.06 \text{ cm}^3 \text{ atm}/(\text{mol} \cdot \text{K})$

※ 気体定数 $R$ は, 気体の種類に固有な値であるが, 一般気体定数 $R_0$ は, 気体の種類によらず, 一定である.

$$R = R_0 / M \text{ [J / (kg} \cdot \text{K)]}$$

## アボガドロの法則

圧力と温度が等しい一定容積内の気体の分子数は、気体の種類に関係なく一定であり、1mol中の分子数 $N_A$ (アボガドロ数)は「  
」である.

ボルツマン定数:

J/K

## 例題1

水蒸気 ( $\text{H}_2\text{O}$  , 分子量18.016) を理想気体と見なして, その気体定数および標準状態 ( $0^\circ\text{C}$ ,  $101.3 \times 10^3 \text{Pa}$ ) における比容積 (1kgあたりの容積) を求めよ.

# 実在気体 (real gas) の状態方程式

# カマーリング・オネスの状態方程式 (Kamerlingh-Onnes equation of state)

理想気体の状態方程式  $pV = RT$  の右辺を圧力の一次関数で補正すると  $pV = RT + Bp$

この右辺第2項(補正項)に  $p = \frac{RT}{V}$  を代入することによって

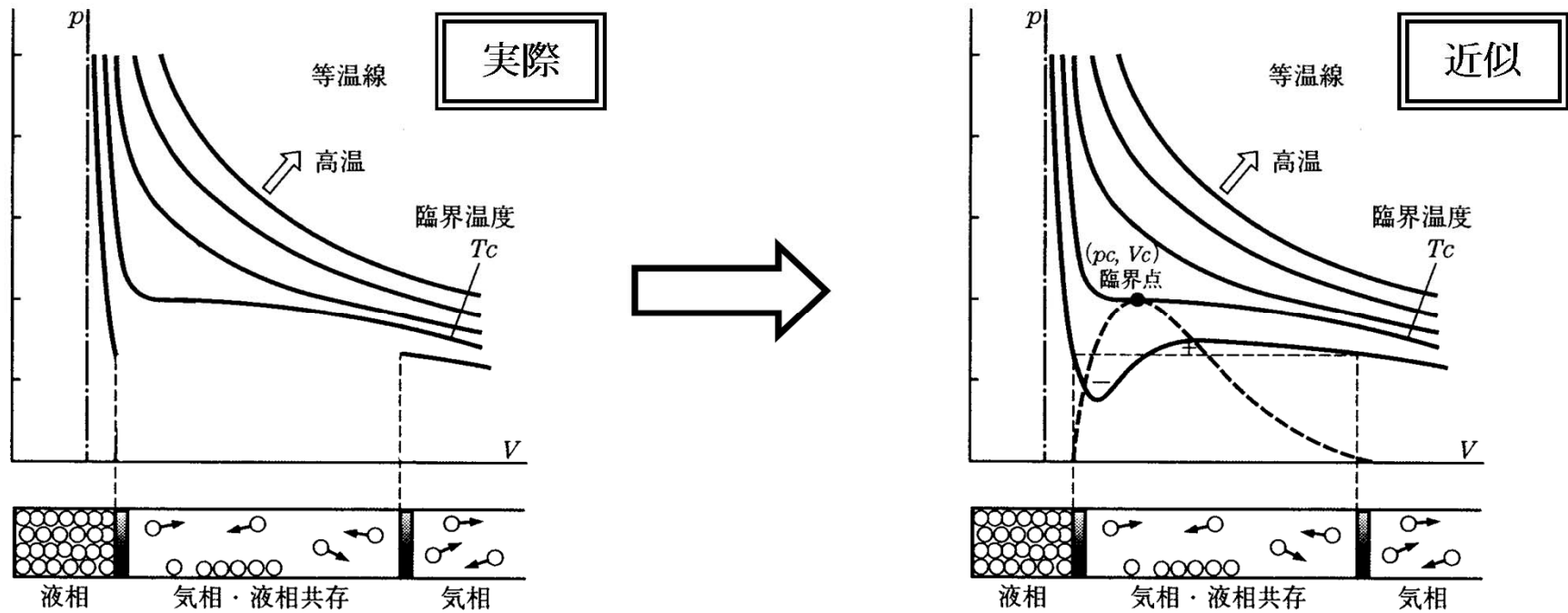
$$\begin{aligned} pV &= RT + B \frac{RT}{V} \\ &= RT \left( 1 + \frac{B}{V} \right) \end{aligned}$$

これは、 $pV/RT$ を $1/V$ のべき乗で級数展開して、その第2項までとったものに相当する。実在気体に対する実用的な展開式とされ、ビリアル展開と呼ぶ。

第2項の係数 $B$ を第2ビリアル係数と呼び、これを適切に定めることにより、近似的な実在気体の状態方程式として利用している。

# ファン・デル・ワールスの状態方程式 (van der Waals equation of state)

# 実在気体 (real gas) の状態方程式



# 実在気体 (real gas) の状態方程式

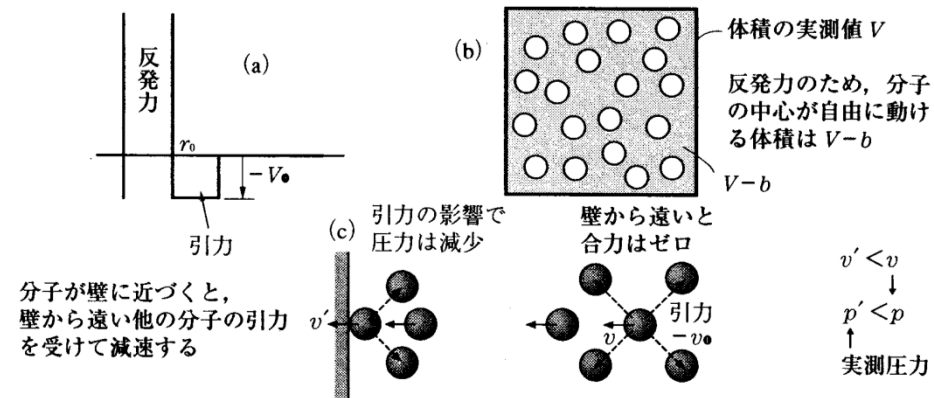


表 ファンデルワールスの定数

| 気体               | $a$ [ $\text{Nm}^4/\text{kmol}^2$ ] | $b$ [ $\text{m}^3/\text{kmol}$ ] |
|------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| He               | $0.035 \times 10^5$                 | $23.9 \times 10^{-3}$            |
| H <sub>2</sub>   | $0.248 \times 10^5$                 | $26.7 \times 10^{-3}$            |
| N <sub>2</sub>   | $1.370 \times 10^5$                 | $38.6 \times 10^{-3}$            |
| O <sub>2</sub>   | $1.390 \times 10^5$                 | $31.9 \times 10^{-3}$            |
| CO <sub>2</sub>  | $3.660 \times 10^5$                 | $42.8 \times 10^{-3}$            |
| H <sub>2</sub> O | $5.520 \times 10^5$                 | $30.4 \times 10^{-3}$            |

# 熱力学的な量

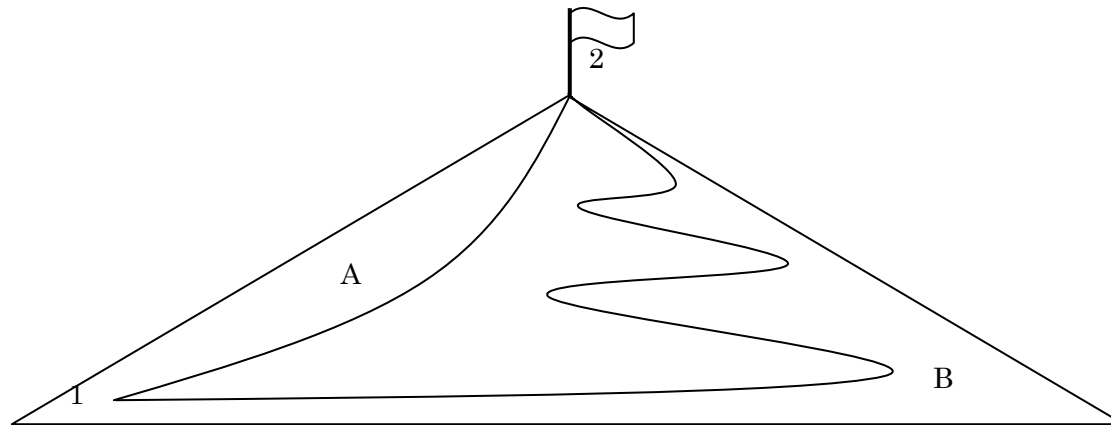
＜示強変数と示量変数＞

示強変数 (intensive variable)

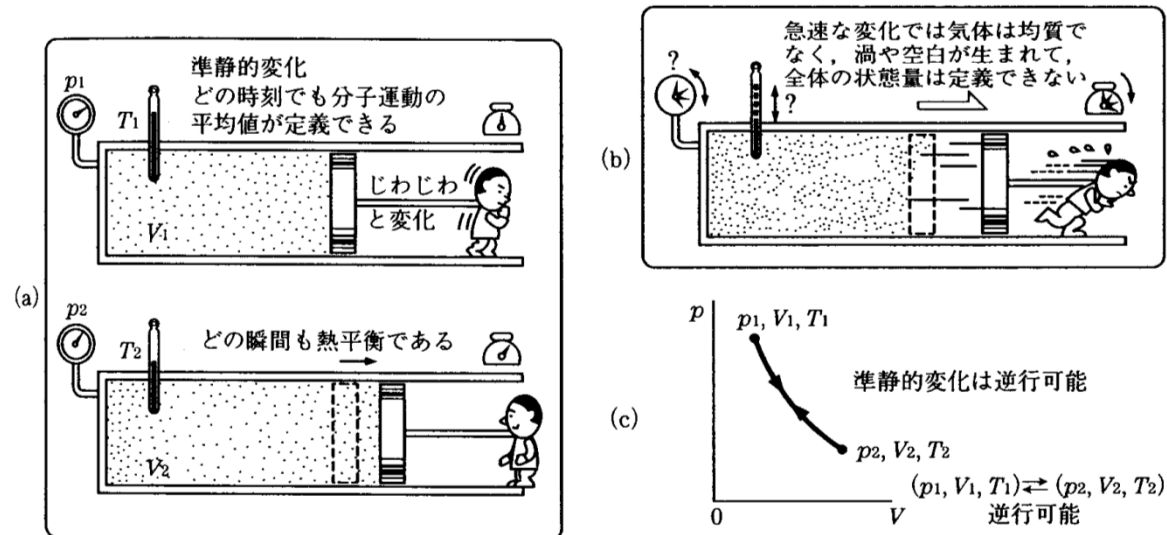
示量変数 (extensive variable)

# 熱力学的な量

＜状態量 (quantity of state)＞

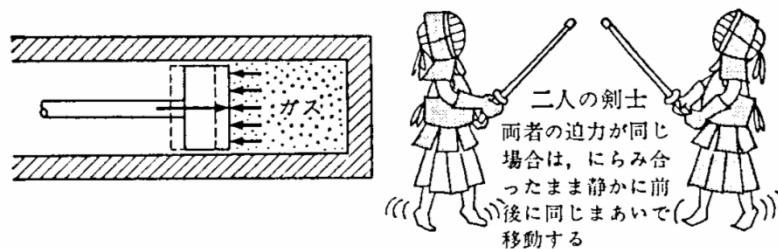


# 準静的過程 (quasi-static process)

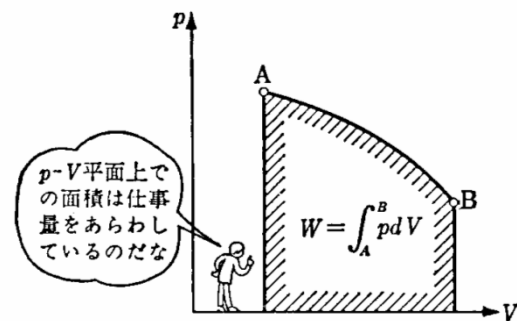
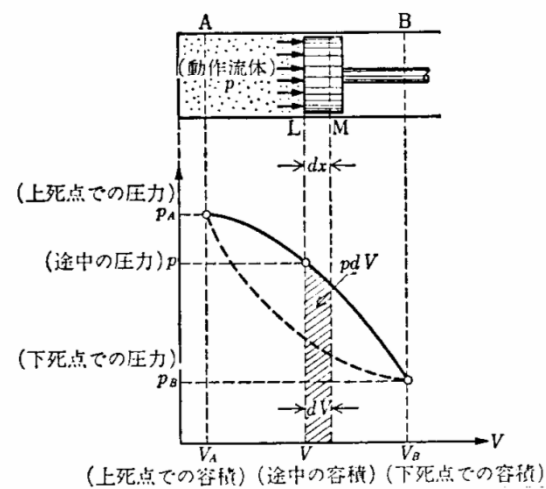


## $p$ - $V$ 線図と仕事量

# $p$ - $V$ 線図と仕事量



圧力がつり合った準静的変化



# 温度と熱

温度と熱の関係は？ ... 熱はエネルギーの一形態である

... ある物体の温度を $\Delta T^{\circ}\text{C}$ だけ上昇させるのに要する熱を $\Delta Q$ とすると,  $\Delta T$ は $\Delta Q$ に比例するから,

$$\Delta Q = C\Delta T \quad C: \text{熱容量 (heat capacity)} \quad \dots \text{物体固有の量}$$

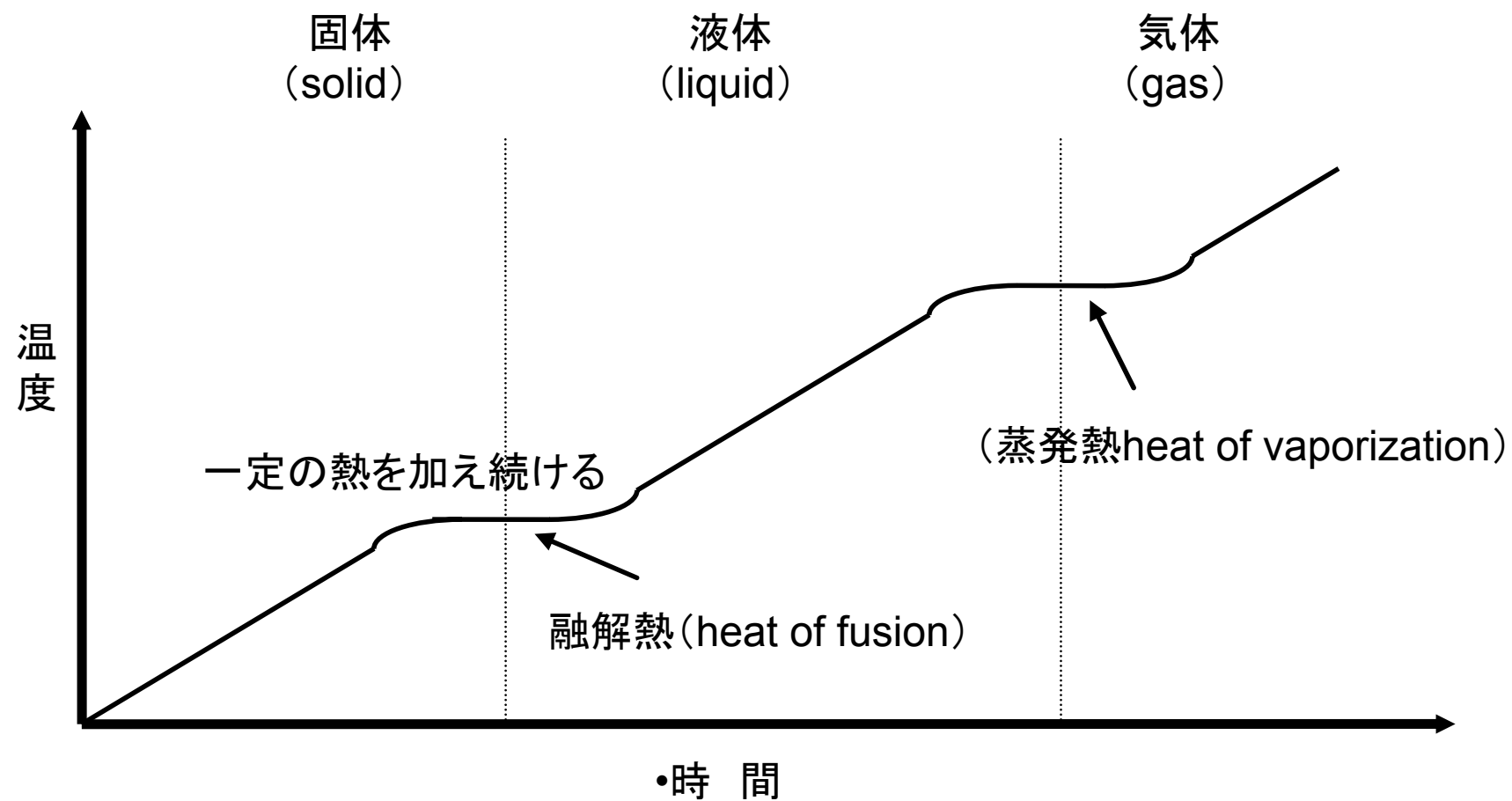
... 均質な物体では熱容量 $C$ はその質量 $m$ に比例するので,  
単位質量あたりの熱容量を $c$ とすると,

$$\Delta Q = mc\Delta T \quad c: \text{比熱 (specific heat)} \quad \dots \text{物質固有の数}$$

顕熱 (sensible heat) : 熱を加えることにより温度が変化する.

潜熱 (latent heat) : 蒸発熱や融解熱のように熱を加えても温度が変化しない.

# 温度と熱



## 例題2

－20°Cの氷3kgに熱を加えて完全にとくするためには、少なくともいくらの熱が必要か求めなさい。ただし、氷の比熱は3.768 kJ/(kg·K)、融解熱は334.0 kJ/kgとする。