

高校物理

熱力学

1. [分子の運動](#)
2. [熱量と蓄熱](#)
3. [エネルギー変換と効率](#)
4. [理想気体の状態方程式](#)
5. [気体分子運動論](#)
6. [熱力学の4法則](#)
7. [P-V線図と状態変化](#)
8. [熱サイクル](#)

Y-teraya

CC BY-NC-SA 4.0

熱力学のスタンス

化学 物質は分子の集まりである！

- 温度：分子の運動
- 圧力：分子の衝突

物理学 原子や分子の存在は分からない…

- 温度：熱膨張からの経験温度
 - 圧力：力を面積で割った量
-

熱力学のキーワード

- 絶対温度 T [K]
- 圧力 P [Pa]
- 体積 V [m³]

この3つを抑えたうえで
グラフを描けば
すべての問題が解ける！

01

分子の運動

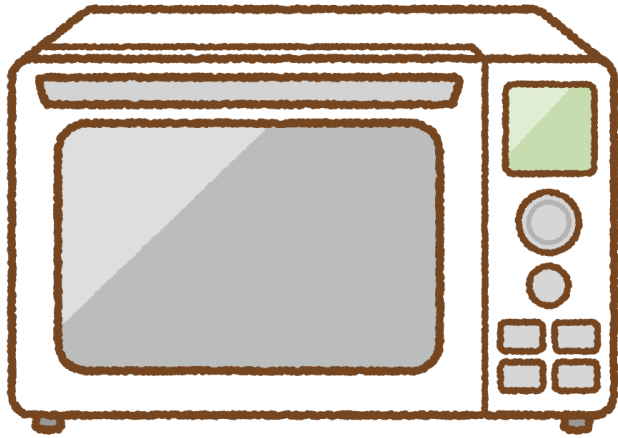
- 分子の運動と衝突
- 物質の三態
- 熱膨張

分子の運動

- 物体を構成する原子や分子は熱運動している.
- ▼
- 熱運動する分子との衝突で生じる, ランダムな運動をブラウン運動と呼ぶ.
- 原子の運動がすべて停止する温度は, 実験的に $-273[^\circ\text{C}]$ と求められた. (温度の下限)
- ▼
- $-273[^\circ\text{C}]$ を $0[\text{K}]$ とし, 絶対零度と呼ぶ.

$$\text{絶対温度 } T[\text{K}] = \text{セルシウス温度 } t[^\circ\text{C}] + 273 \cdots (2.1)$$

電子レンジとIH



- ◆ 電子レンジは水分子を，IHは金属原子を**直接振動**させる機械である.
- ◆ この振動が**分子を運動**させ，**温度を上げる**ことができる.
- ◆ そのため，食べ物を間接的に温めることができる.

演習

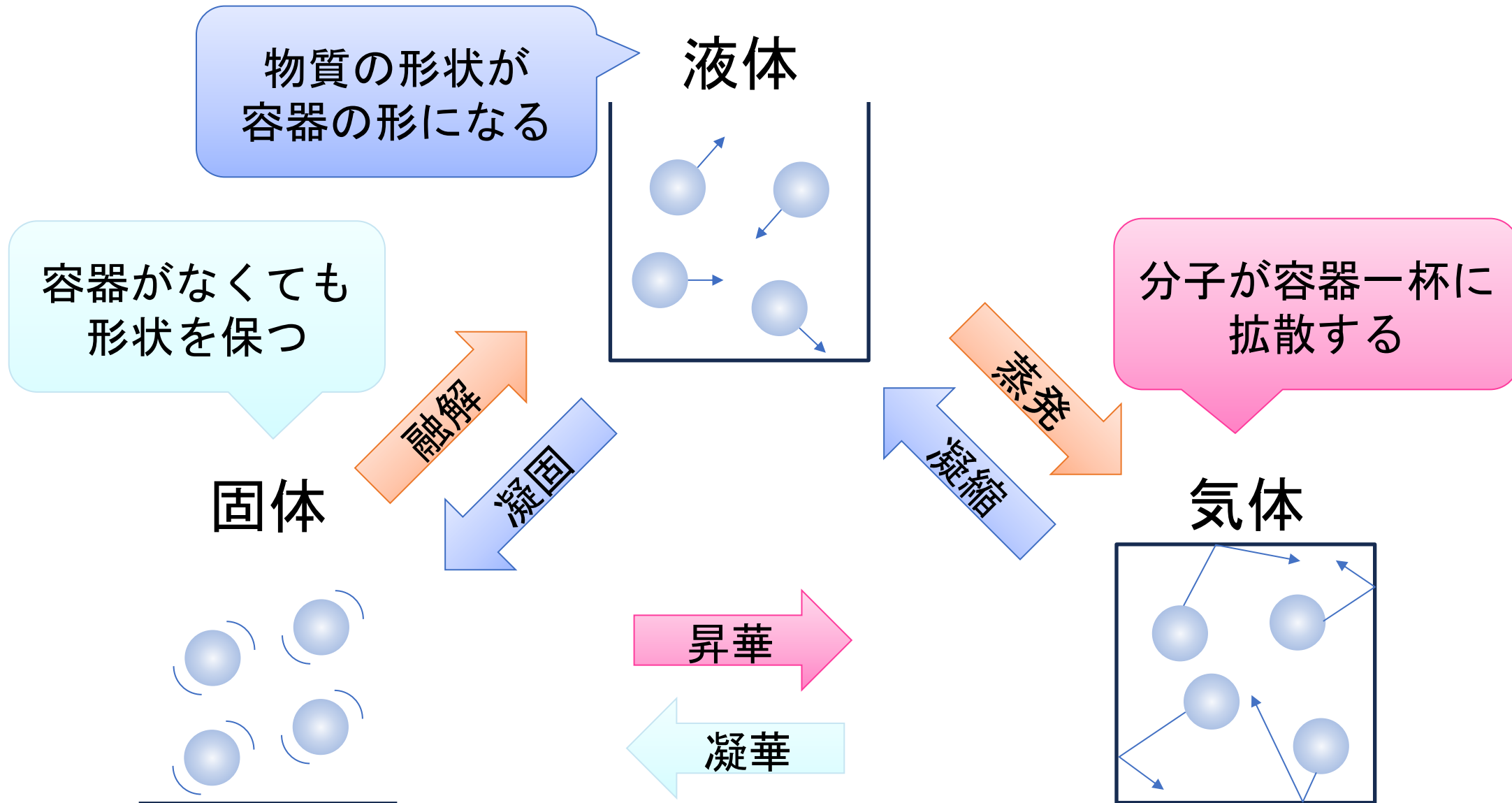
セルシウス温度を絶対温度にせよ

セルシウス温度 t [°C]	+ 273 ⇒	絶対温度 T [K]
-273		0
-196		77
0		273
27		300



温度変化は，セルシウス温度と絶対温度で同じになる

物質の三態



発展： 分子間距離

- 水1[mol]は18[g]でその体積は18[m³]なので、その分子間距離は次である.

$$r_{\text{wat}} = \sqrt[3]{\frac{18 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{mol}}{6.0 \times 10^{23} / \text{mol}}} \doteq 3 \times 10^{-10} [\text{m}] \cdots (2.2)$$

ピンポン玉
の大きさ程

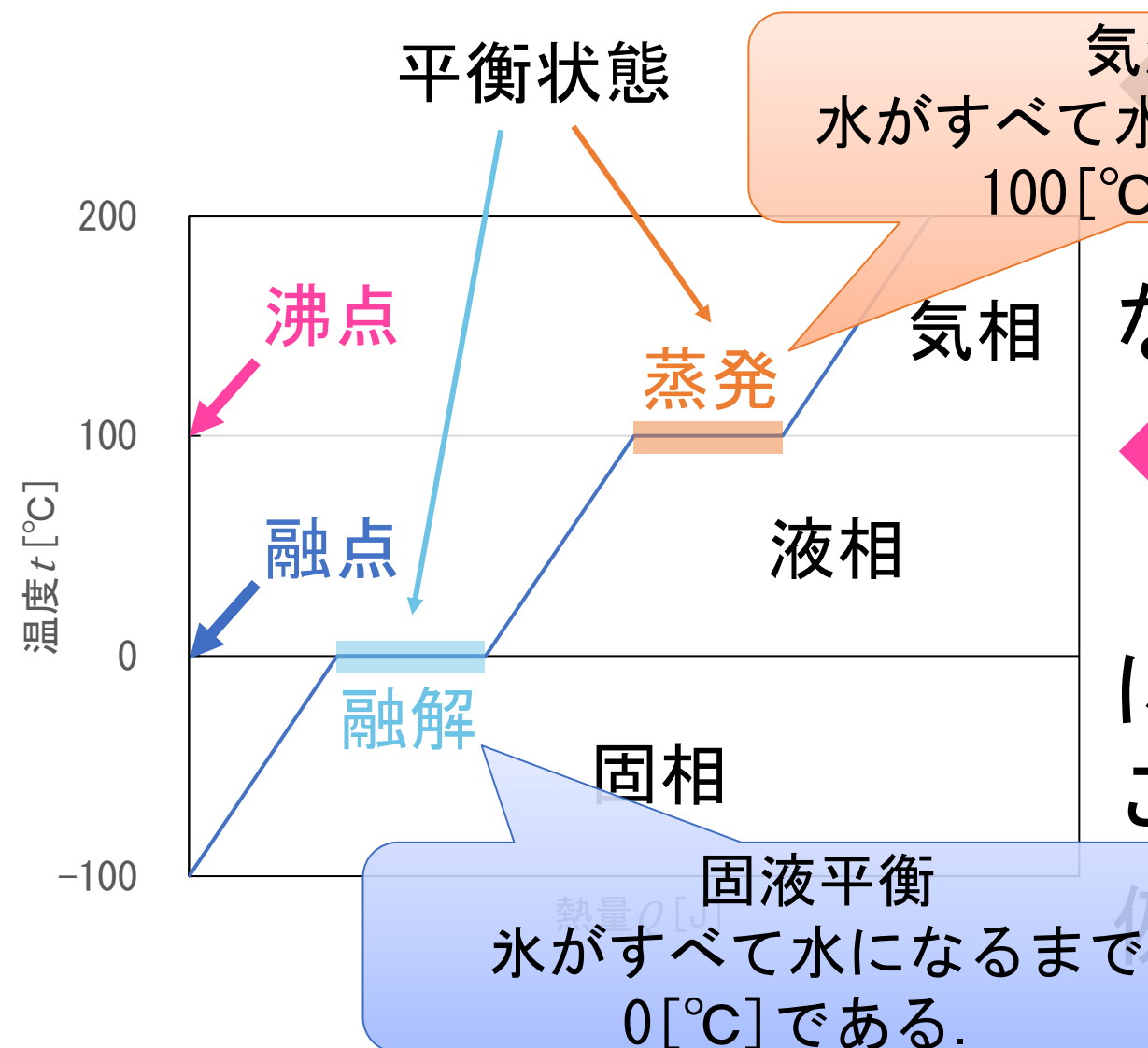
- これは分子半径とほぼ同じになる.
- 気体1[mol]は標準状態で22.4 × 10⁻³ [m³]なので、その分子間距離は次である.

$$r_{\text{air}} = \sqrt[3]{\frac{22 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}}{6.0 \times 10^{23} / \text{mol}}} \doteq 3 \times 10^{-9} [\text{m}] \cdots (2.3)$$

バスケットボール
の大きさ程

- ——— よって $r_{\text{air}} \doteq 10 r_{\text{wat}}$ となる.

水の相変化

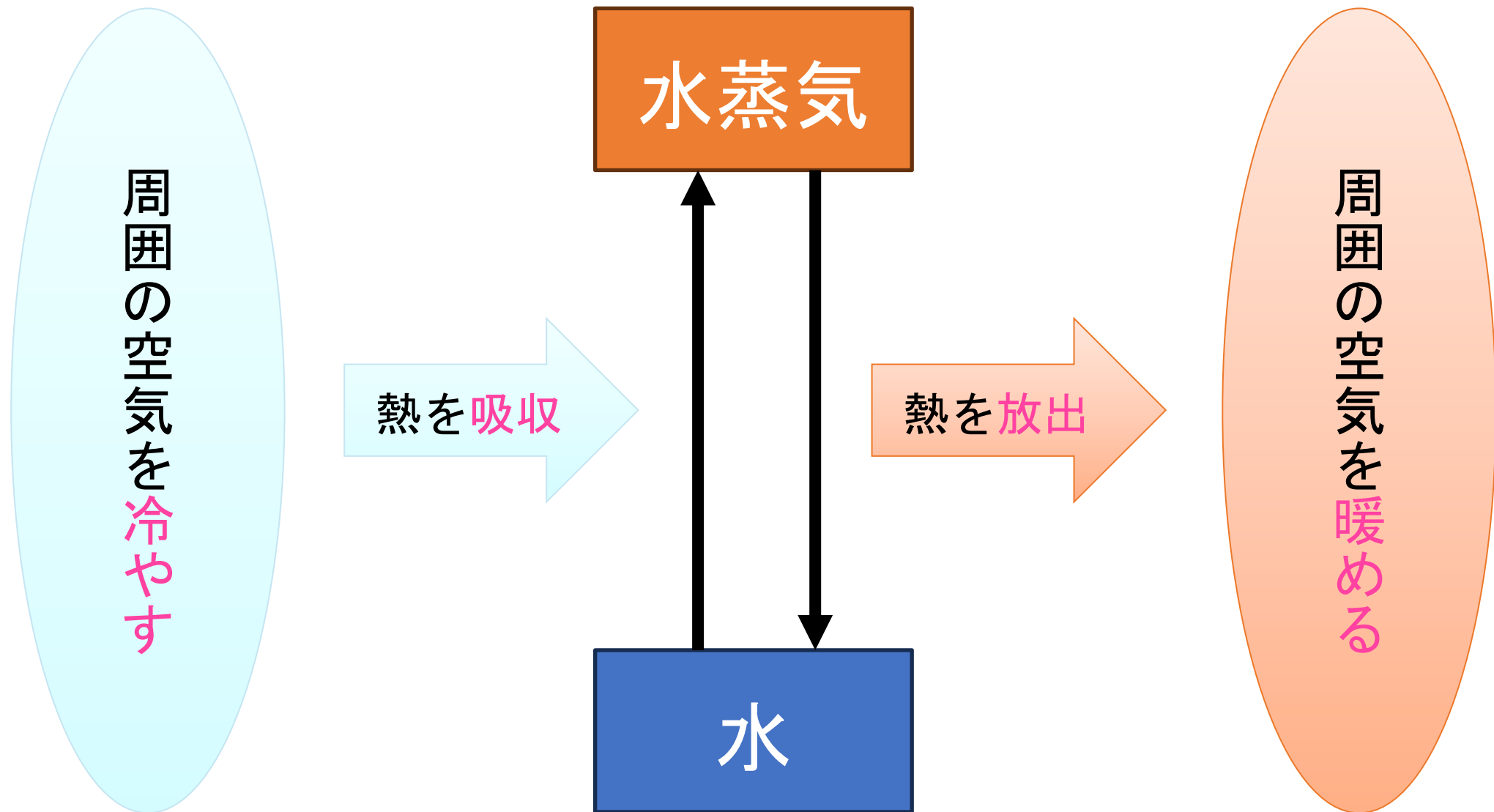


明確な境を持つ均一な物質の系のこと。

◆ 潜熱

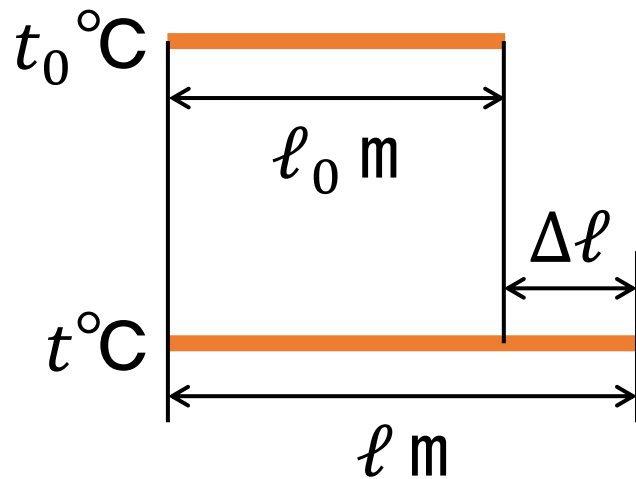
相が変化をするときに吸収・放出する熱のこと。

例) 融解熱, 蒸発熱など



熱膨張 -1

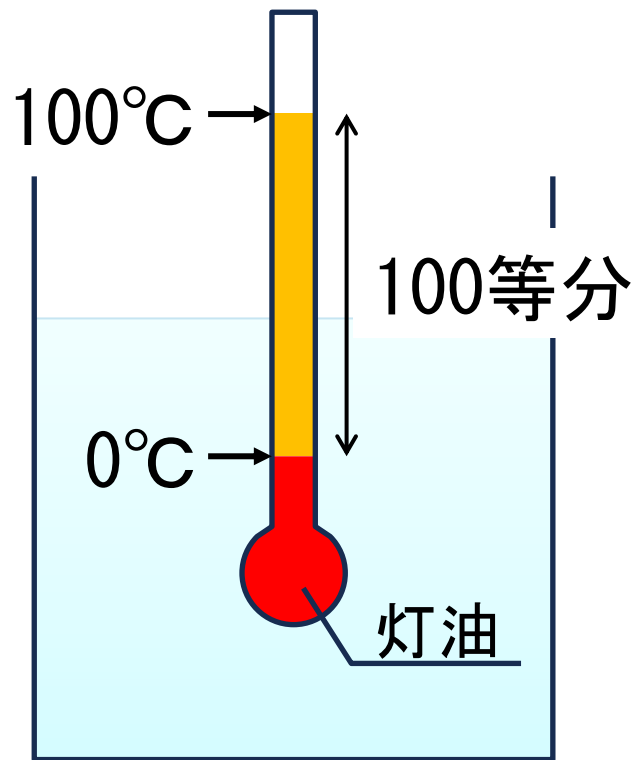
- ◆ 温度による固体の長さの変化を線膨張と呼ぶ.



- ◆ $t_0\text{ }[^{\circ}\text{C}]$ における長さを $l_0\text{ [m]}$, $t\text{ }[^{\circ}\text{C}]$ における長さを $l\text{ [m]}$, 線膨張率を $\alpha\text{ [/K]}$ とすると次である.

$$\frac{1}{l_0} (l - l_0) = \alpha (t - t_0) \cdots (2.4)$$

経験温度



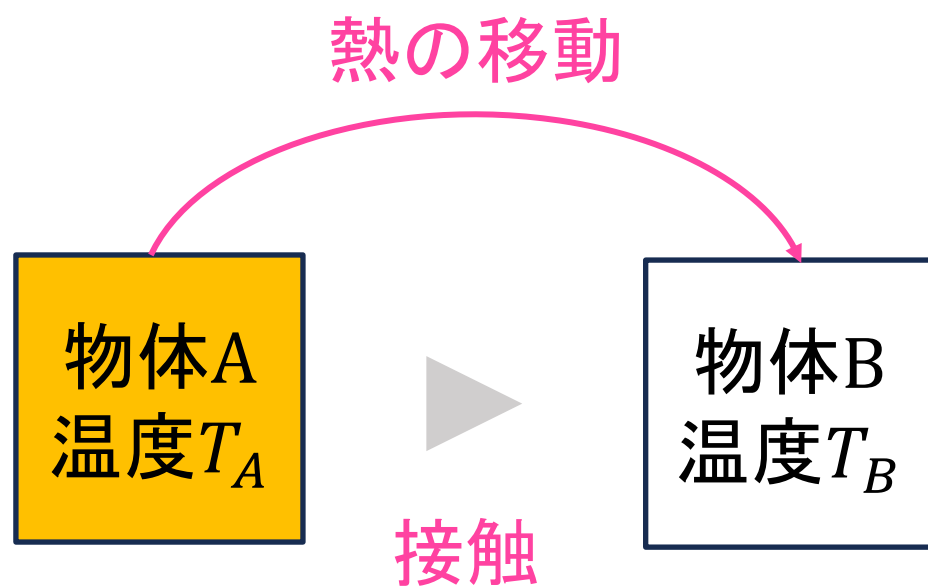
- ◆ かつては水銀の体膨張率で温度を定義していた.
- ◆ 今でも, アルコール温度計として利用されている.
- ◆ 水の融点, 沸点を $0[^\circ\text{C}]$, $100[^\circ\text{C}]$ とし, 目盛をつける.
- ◆ その間を100等分し, 1目盛りを $1[^\circ\text{C}]$ とした.
- ◆ よって, セルシウス温度 $t[^\circ\text{C}]$ は次で定義される.

$$t = 100 \frac{V - V_{\text{bp}}}{V_{\text{bp}} - V_{\text{mp}}} \cdots (2.5)$$

02

熱量と蓄熱

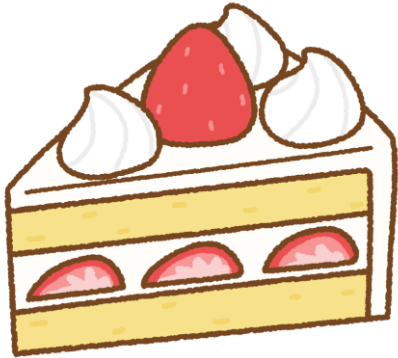
- 熱量
- 熱平衡
- 比熱と熱容量



$$T_A > T_B$$

- ◆ 高温部から低温部へ移動する何らかの実体がある
と見なし、それを熱と呼ぶ。
- ◆ 熱エネルギーの大きさを
熱量と呼ぶ。
- ◆ 現在では、分子の乱雑な
運動であることがわかって
いる。
- ◆ 熱量の元々の単位は、
カロリーである。

食べ物のカロリー



ショートケーキ
約300[kcal]

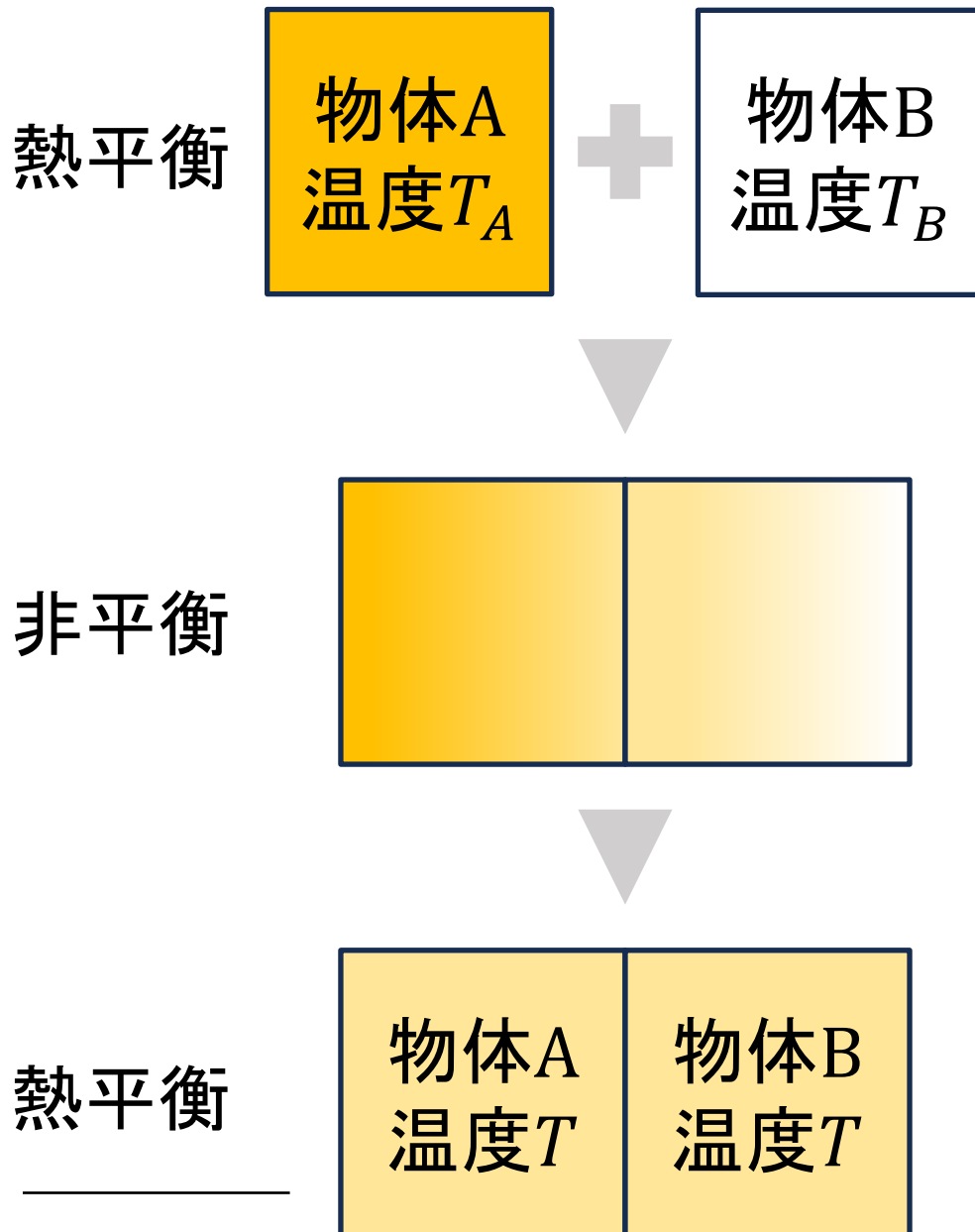
すべてのエネルギーを消費するには？



ウォーキング
約60[min]

- ◆ 我々は食べ物から **化学エネルギー** を得て活動している.
- ◆ 糖質→脂質→タンパク質の順にエネルギーへ変換する.
- ◆ **糖質を制限すれば**, 脂質から分解してくれる.
- ◆ 糖質: 4[kcal/g]
- ◆ 脂質: 9[kcal/g]
- ◆ タンパク質: 4[kcal/g]

熱平衡 -1

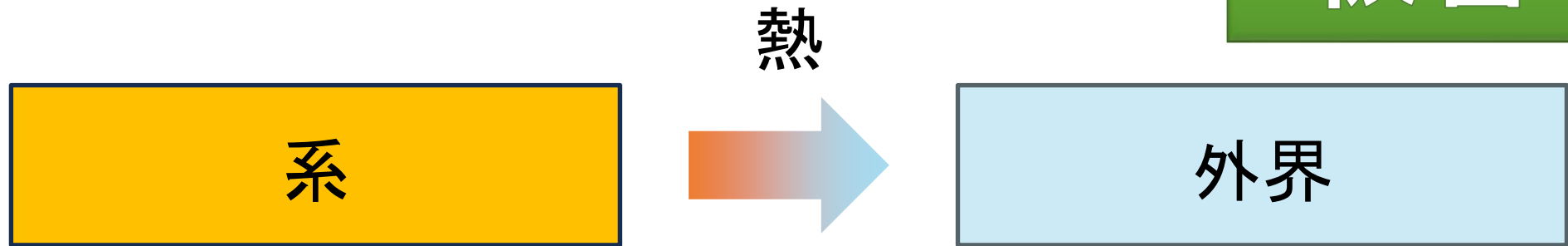


- ◆ 温度の違う物質を接触させて放置する.
- ◆ 経験則上, 二物体の温度は一樣になる.
- ◆ 最終的な温度 T は, 最初の温度 T_A , T_B の中間の値になる.
- ◆ T が T_A , T_B に自発変化しないことを不可逆変化と呼ぶ.

熱平衡 -2

板書

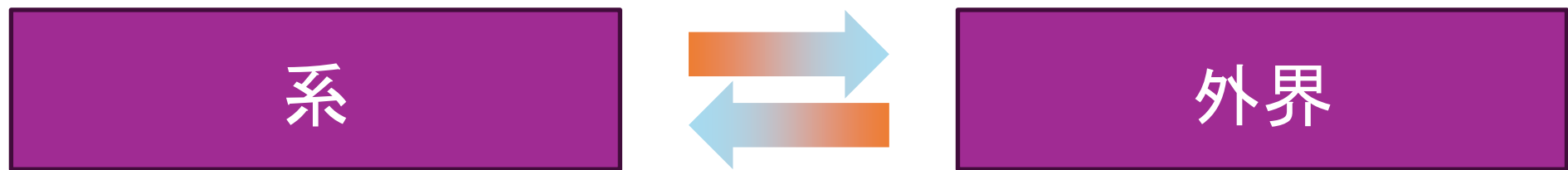
18



系の温度 > 外界の温度

熱は、一方的に流れる.

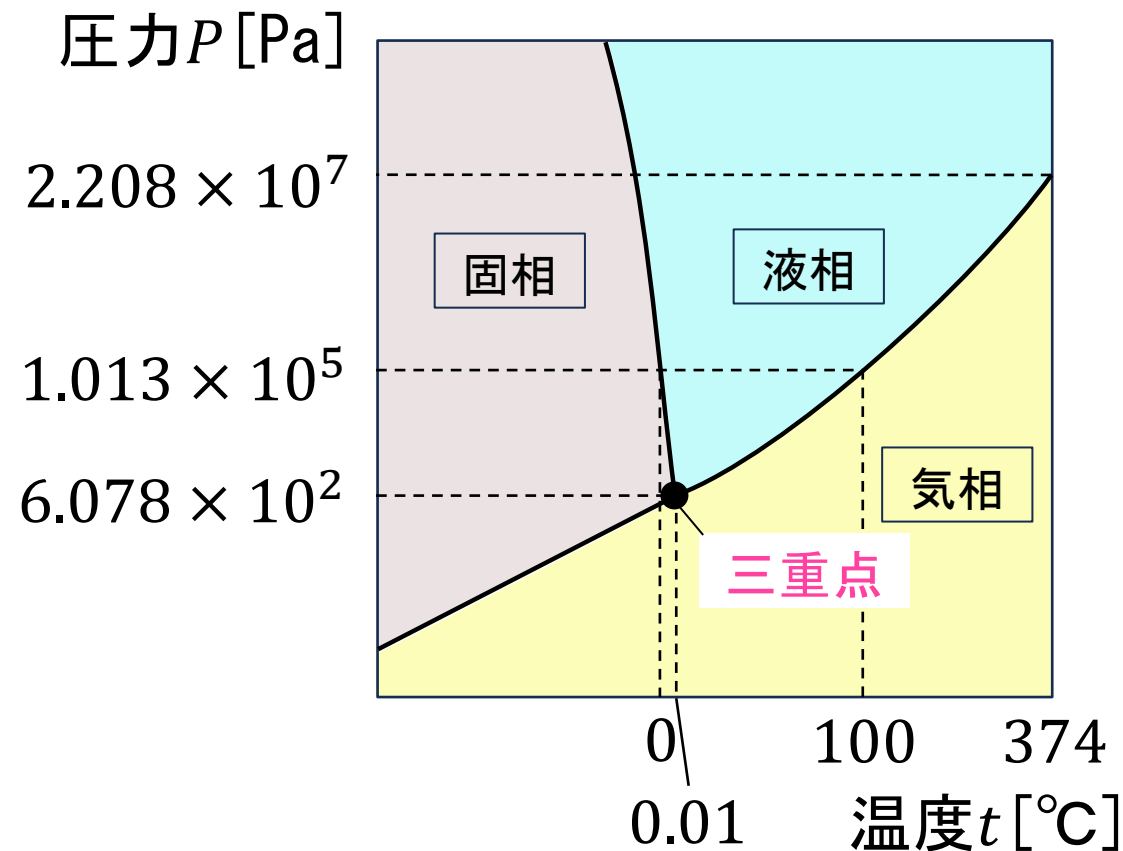
熱平衡



系の温度 = 外界の温度

熱は、見かけ上流れない.

水の平衡状態図



- ◆ 相の種類は圧力 P [Pa], 温度 t [°C], 組成によって決まる.
- ◆ これらの関係を線図で表したものを平衡状態図と呼ぶ.
- ◆ 固相, 液相, 気相が共存し平衡状態である点を三重点と呼ぶ.

部屋が散らかることは自然な

モノの置き場を決めていると、
可能な状態の総数が少なく
エントロピーが小さい

状態A



可能な組み合わせは1通り

状態B



モノの置き場を決めていないと、
可能な状態の総数が大きく
エントロピーが大きい

「乱雑さ」の度合いを表す値のことをエントロピーと呼ぶ。

エントロピーは増大する方向へ不可逆変化する。

これを「エントロピー増大則」と呼ぶ。

エントロピーは可能な状態の総数の対数と定義。

$$= 0, \ln 10 \doteq 2.30$$

$$\ln 1 < \ln 10 \dots (2.6)$$

比熱と熱容量

- 質量 m [g], 比熱 c [J/(g·K)], 上昇温度 ΔT [°C], 発熱量 Q [J] とすると次である.

$$Q = mc\Delta T = C\Delta T \cdots (2.7)$$

- 物質 1 [g] の温度を 1 [°C] 上げるのに要する
物質固有の熱量を, 比熱と呼ぶ.
- 熱容量 C [J/K] は, 質量と比熱の積である.

03

エネルギー変換と効率

- エネルギー間の相関
- エネルギーの変換と効率と保存
- 仕事

余談

凝縮

位置エネルギー

水力発電

機械

運動エネルギー

新幹線

家庭

電気エネルギー

火力発電

太陽光発電

変電所

熱エネルギー

蒸発

風力発電

光エネルギー

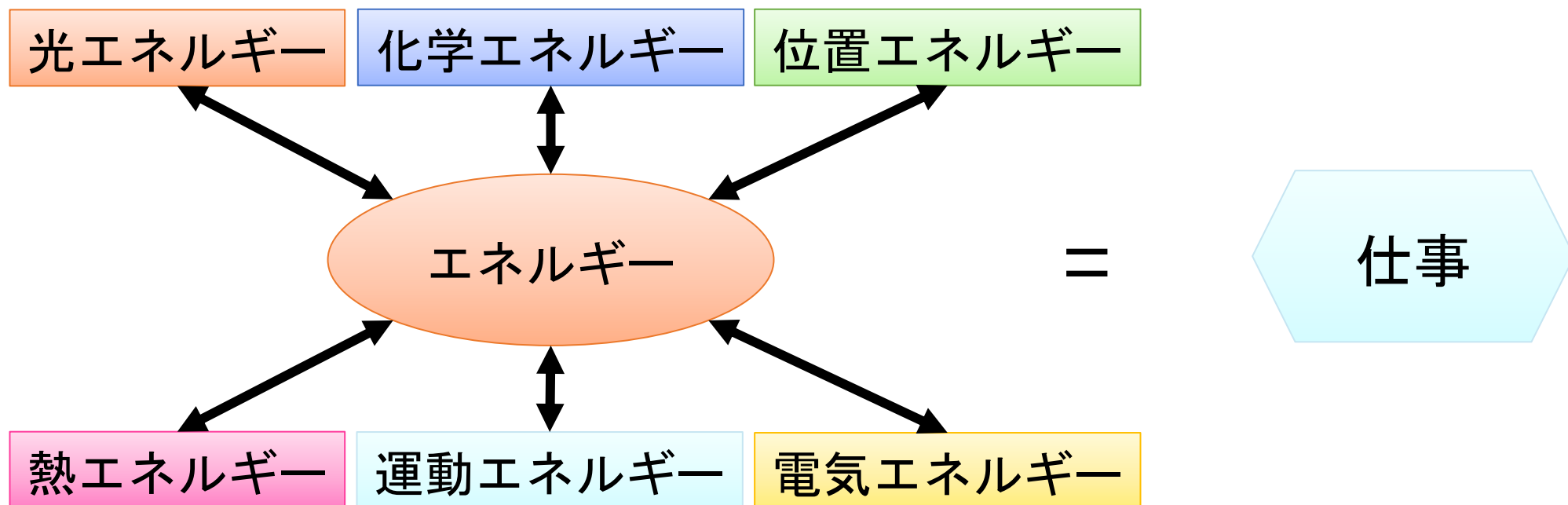
太陽

化学エネルギー

熱エネルギー

運動エネルギー

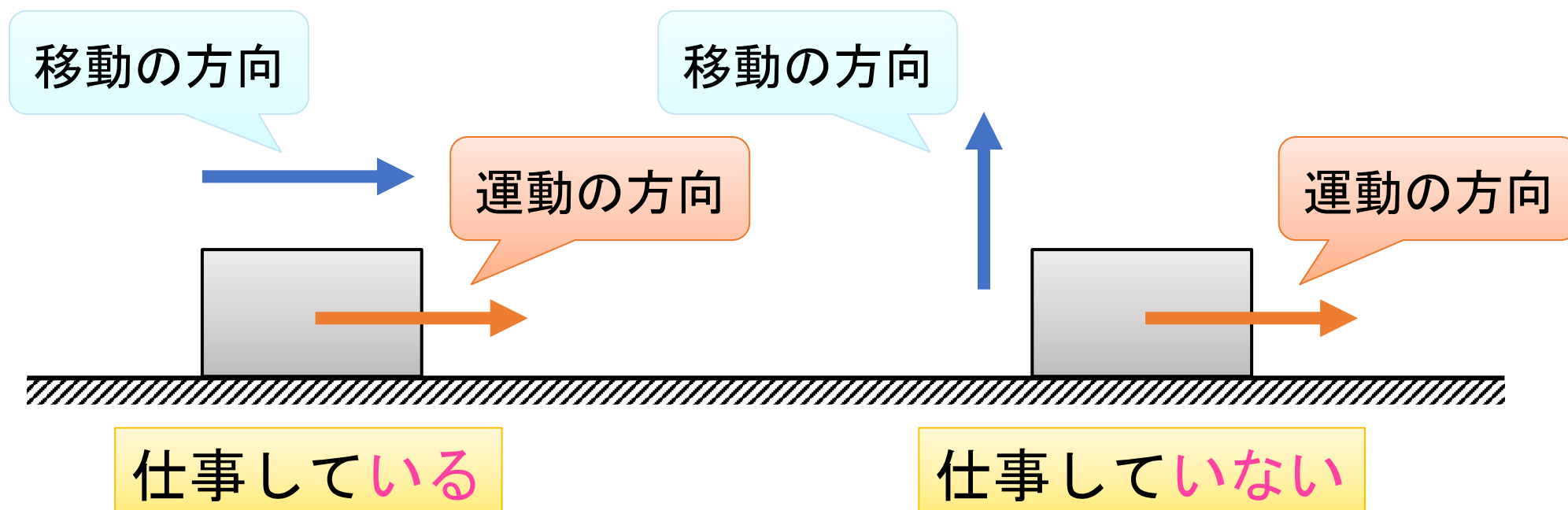
エネルギー



- ◆ 仕事をすることができる**潜在的な能力**のこと.
- ◆ エネルギーは**別のエネルギーに変換**できる.
- ◆ 仕事 W [J], 力の大きさ F [N], 移動距離 x [m] とすると次である.

$$W = Fx \cdots (1. xx)$$

仕事



◆ 物体に力を加えた方向と，物体の移動した方向が一致したとき力が仕事をしたと言う．

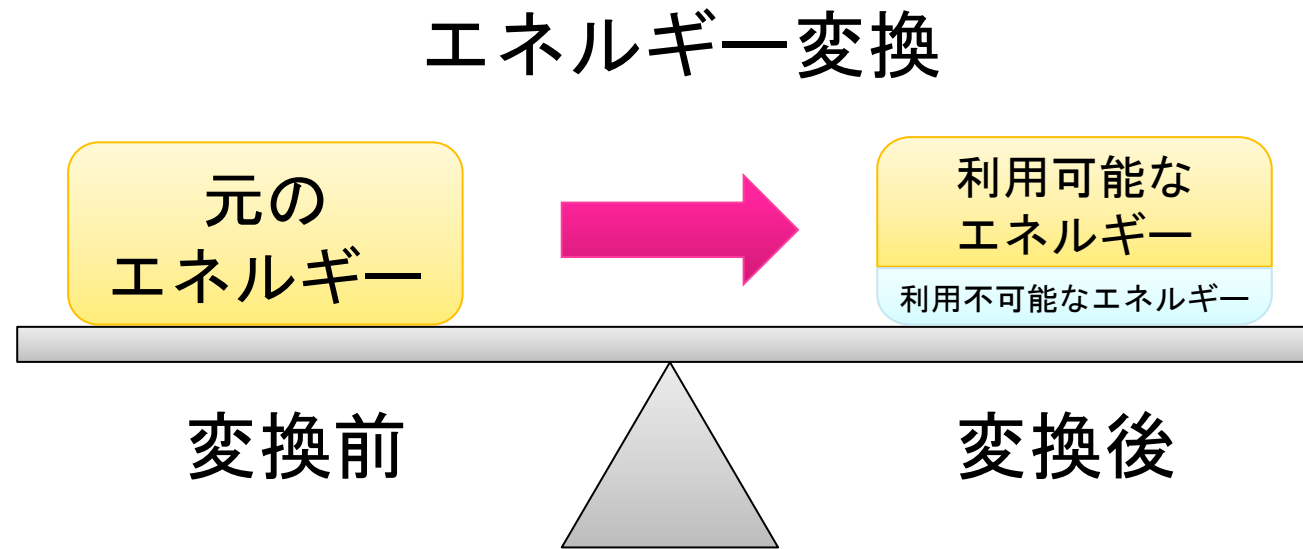
◆ $P-V$ グラフの面積が気体の仕事である．

引っ越し業者は仕事してない？



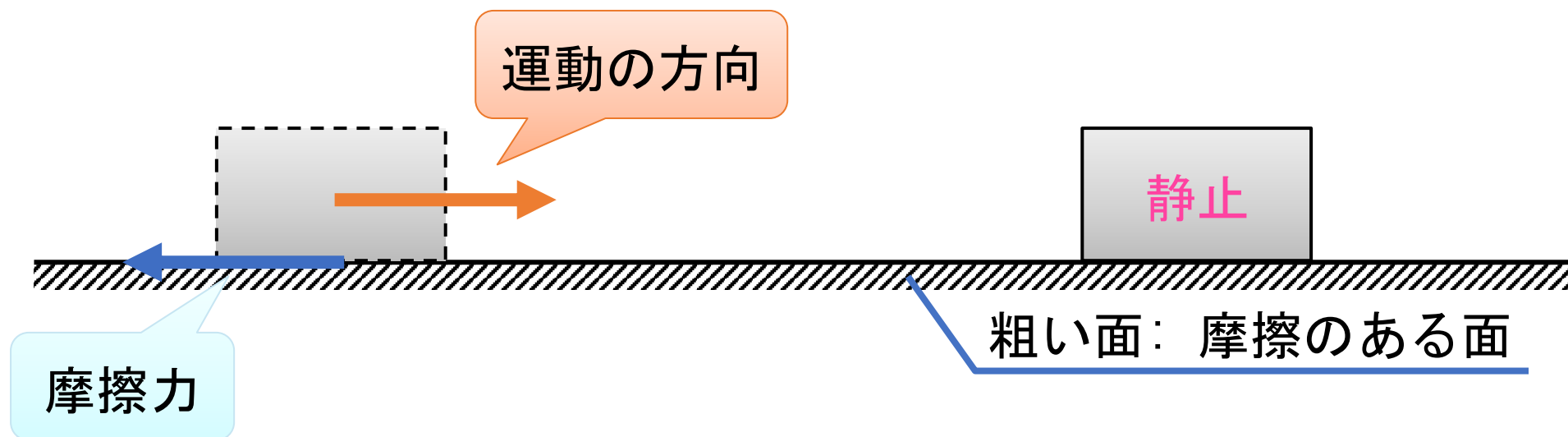
- ◆ 荷物を持ち上げる力は**上向き**である.
- ◆ 荷物を移動させる力は**横向き**である.
- ◆ そのため、物理学の定義では**仕事してない**と言える.
- ◆ ただ持ち上げる、階段を登る動作は**仕事した**と言える.

エネルギーを変換する



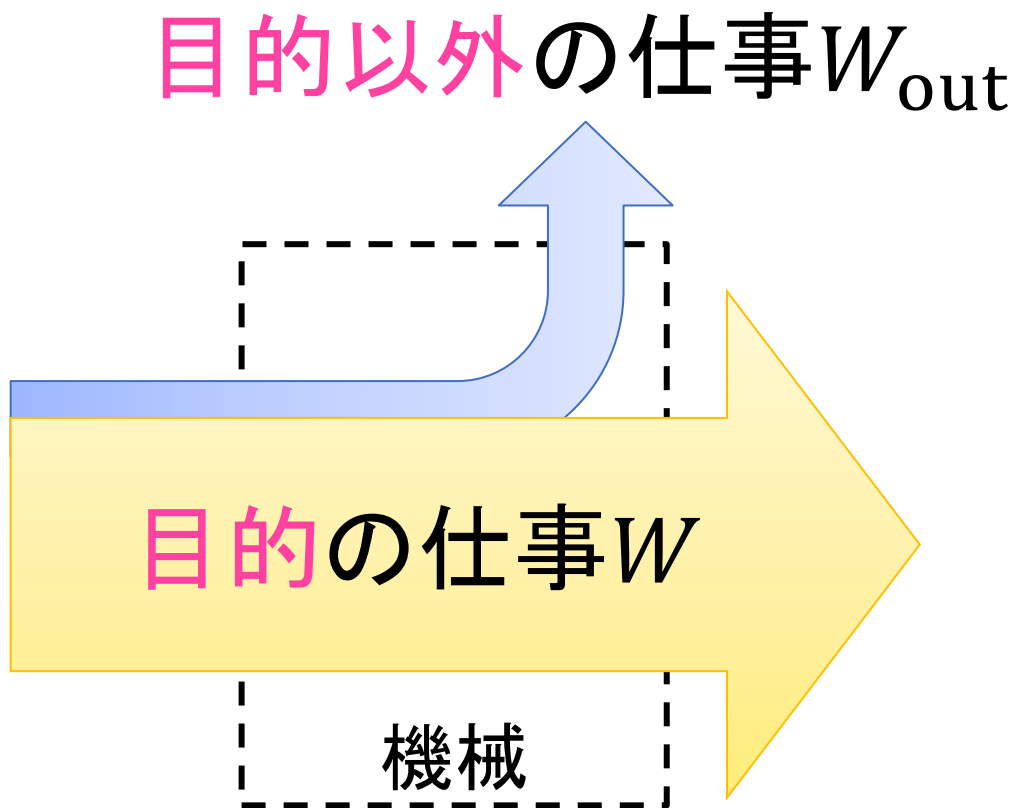
- ◆ 変換後では仕事で使えるエネルギー量が，変換前と比べて常に減少する。
- ◆ エネルギー変換前後で総量が変わらないことを，エネルギー保存則と呼ぶ。

エネルギー保存則の例



- ◆ 摩擦のある面では，滑っていく物体はやがて静止する．
- ◆ これは，運動エネルギーを失ったためである．
- ◆ 失った運動エネルギーは，面上を構成している分子へすべて伝わり激しく運動させる．
- ◆ だからモノの表面を擦ると温かくなる（摩擦熱）．

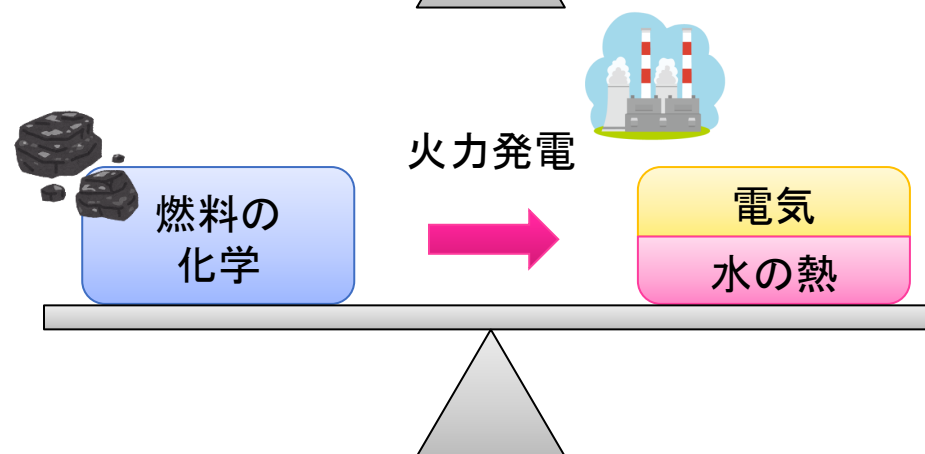
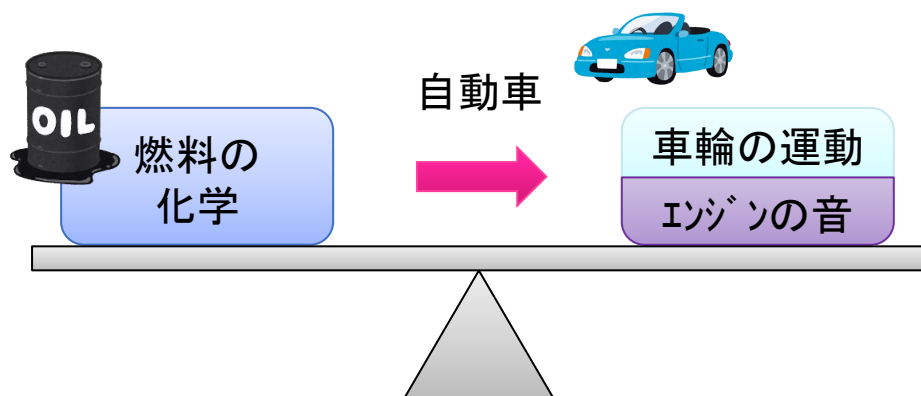
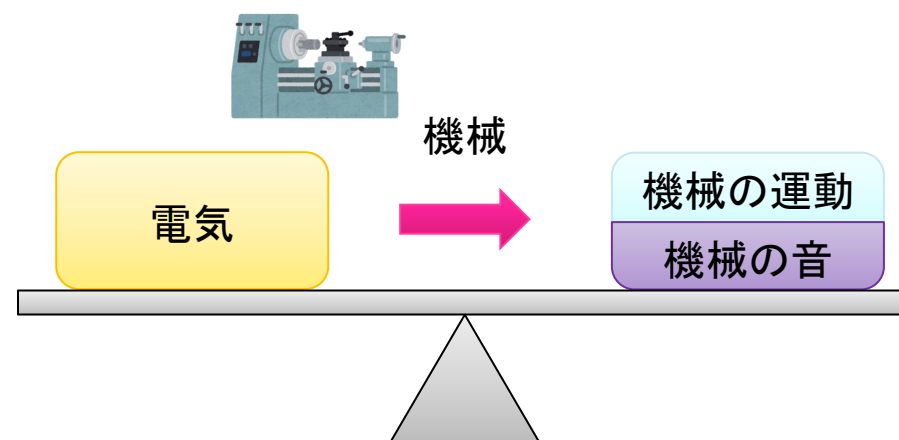
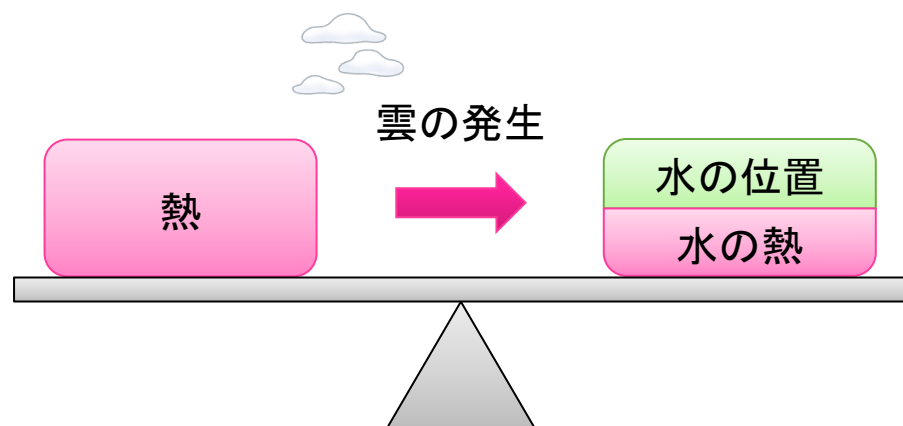
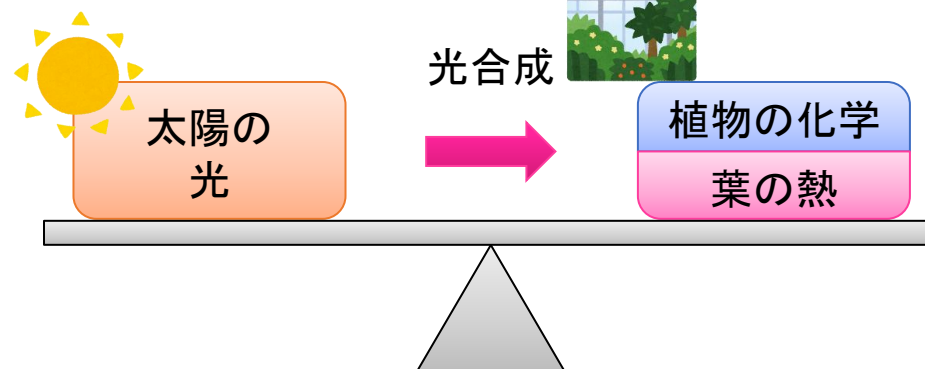
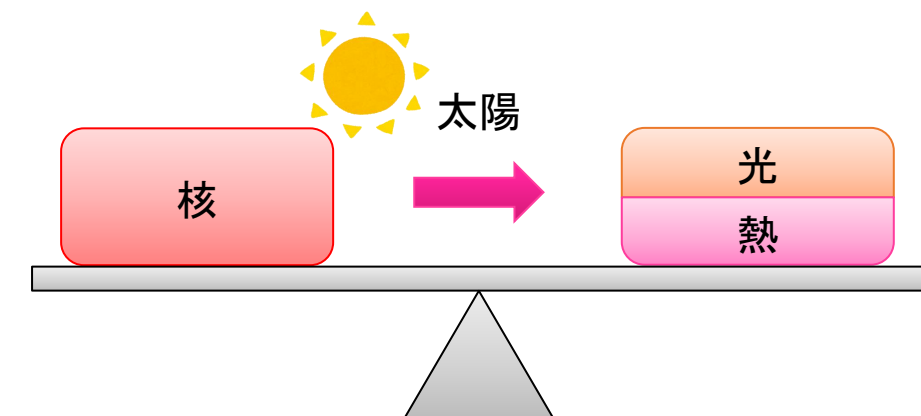
エネルギー利用の効率



- ◆ 元のエネルギーから目的のエネルギーに変換された割合を、**変換効率**と呼ぶ.
- ◆ 効率 e , 有効仕事 W [J] , 損失仕事 W_{out} [J] とすると次である.

$$e = \frac{W}{W_{out}} \cdots (2.8)$$

板書



04

理想気体の状態方程式

- 物質質量と体積
- ボイル-シャルルの法則
- 理想気体の状態方程式

物質質量と体積

アボガドロ数

$$6.0 \times 10^{23} [\text{個}]$$

物質質量

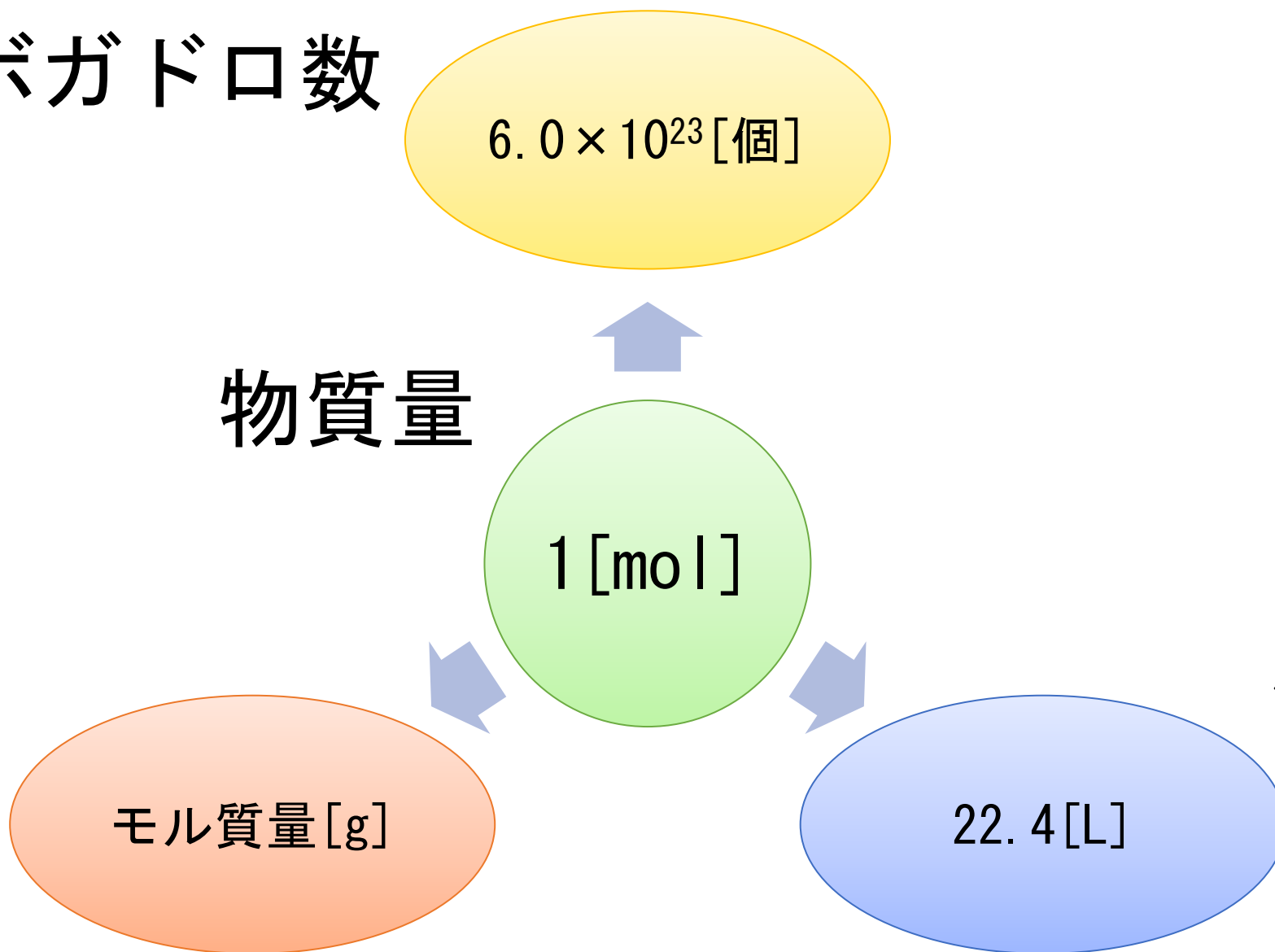
$$1 [\text{mol}]$$

質量

モル質量[g]

体積

$$22.4 [\text{L}]$$



DARSって12個入りだよね！

余談

33

1ダース

= 12個

MoI もDARSも概念は同じ

余談

34

1mol

= 6.0 × 10²³個

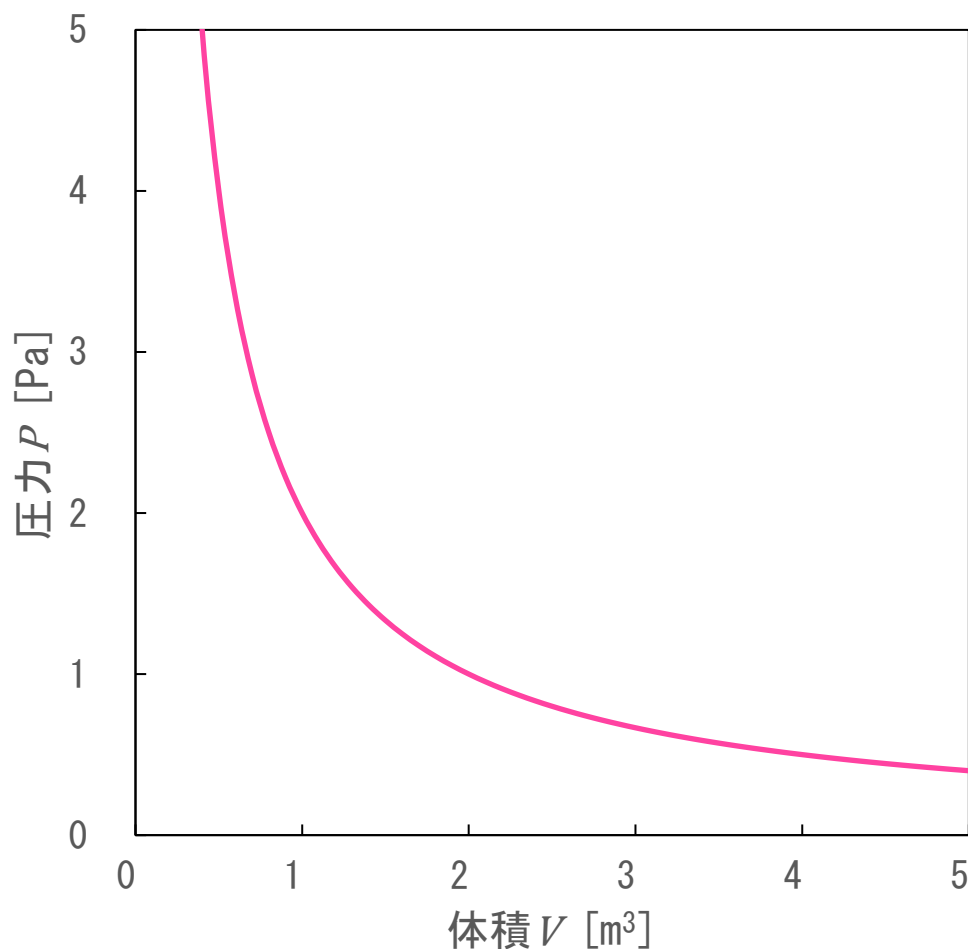
板書

ロバート・ボイル (A. D. 1627–1691年)

一定温度下で、気体の
圧力 P と体積 V の積
は不変である。
(ボイルの法則)



ボイルの法則



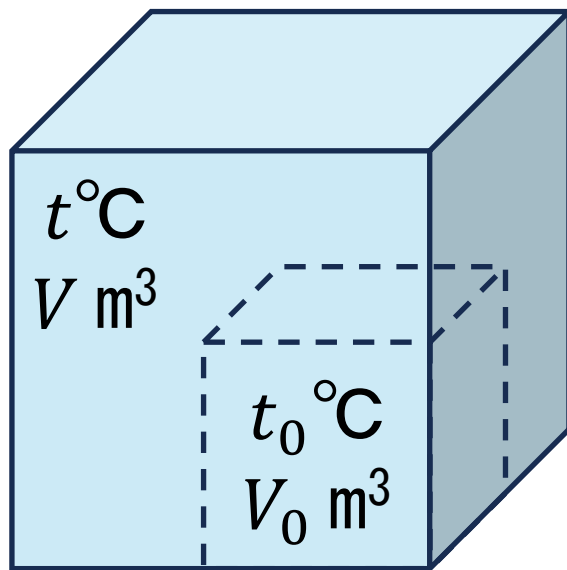
P と V は反比例の関係

- ◆ 一定質量の気体を注射器に閉じ込め,
- ◆ ピストンに力を加えていくと
- ◆ 体積は小さくなる.

$$PV = P_0V_0 \cdots (2.9)$$

- ◆ $P - V$ 線図を左に示す.

熱膨張 -2



- ◆ 温度による気体の体積の変化を体膨張と呼ぶ.
- ◆ $t_0 [^{\circ}\text{C}]$ における体積を $V_0 [\text{m}^3]$, $t [^{\circ}\text{C}]$ における体積を $V [\text{m}^3]$, 体膨張率を $\alpha [/\text{K}]$ とすると次である.

$$\frac{1}{V_0} (V - V_0) = \alpha (t - t_0) \cdots (2.10)$$

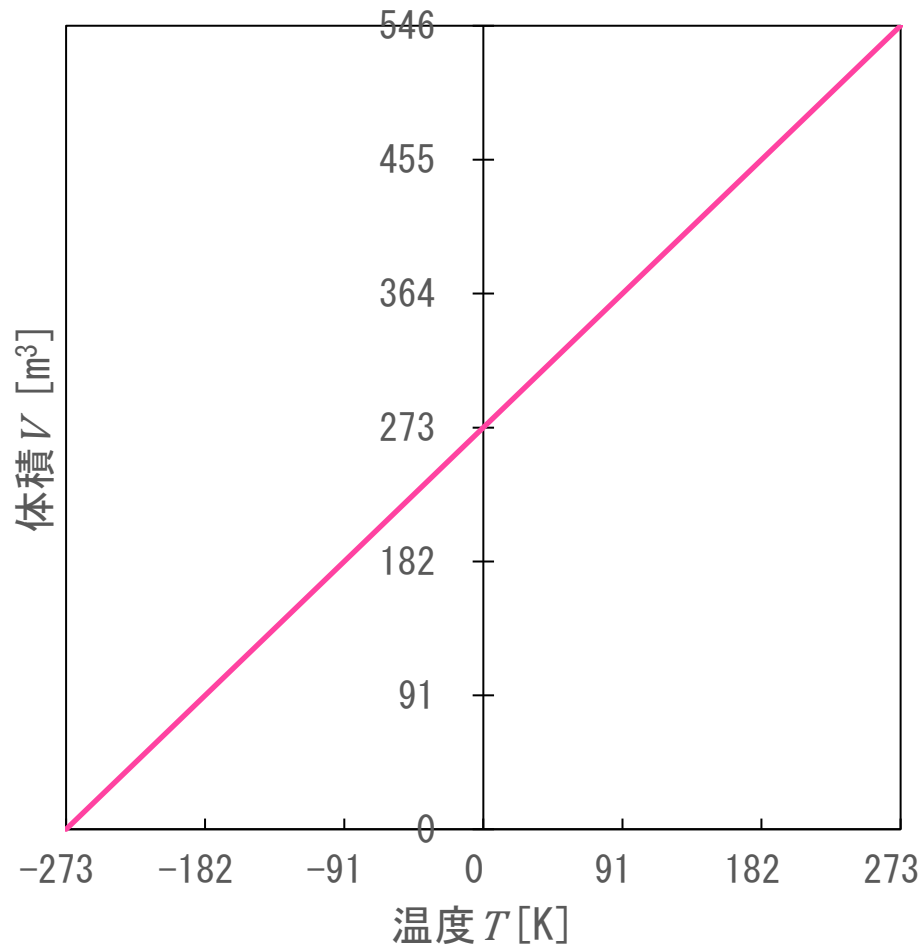
板書

ジャック・シャルル
(A. D. 1746–1823年)

一定圧力で、気体の膨張率 α は不変である。
(シャルルの法則)



シャルルの法則



V と T は比例の関係

- ◆ 理想気体では, $\alpha = \frac{1}{T_0}$ である.
- ◆ (2.10) 式に代入すると次である.

$$\frac{V}{T} = \frac{V_0}{T_0} \cdots (2.11)$$

- ◆ $V - T$ 線図を左に示す.

膨張率から絶対温度が決まる

- 実験で1[atm]のとき体膨張率 α は,

$$\alpha = \frac{1}{273} \cdots (2.12)$$

の値を持つ.

- ここで基準点の異なる温度 T [K]を,

$$T = t + \frac{1}{\alpha} = t + 273 \cdots (2.13)$$

と定義する.

理想気体の状態方程式

- ボイル-シャルルの法則
- 1 [mol] を標準状態 (0 [°C] かつ 1 [atm]) で 22.4 [L] を占める気体の量
- 気体定数 R [J / (mol · K)] を気体 1 [mol] の状態方程式における比例定数
- n [mol] を物質質量

上記より, 次のように立式できる.

$$PV = nRT \cdots (2.14)$$

05

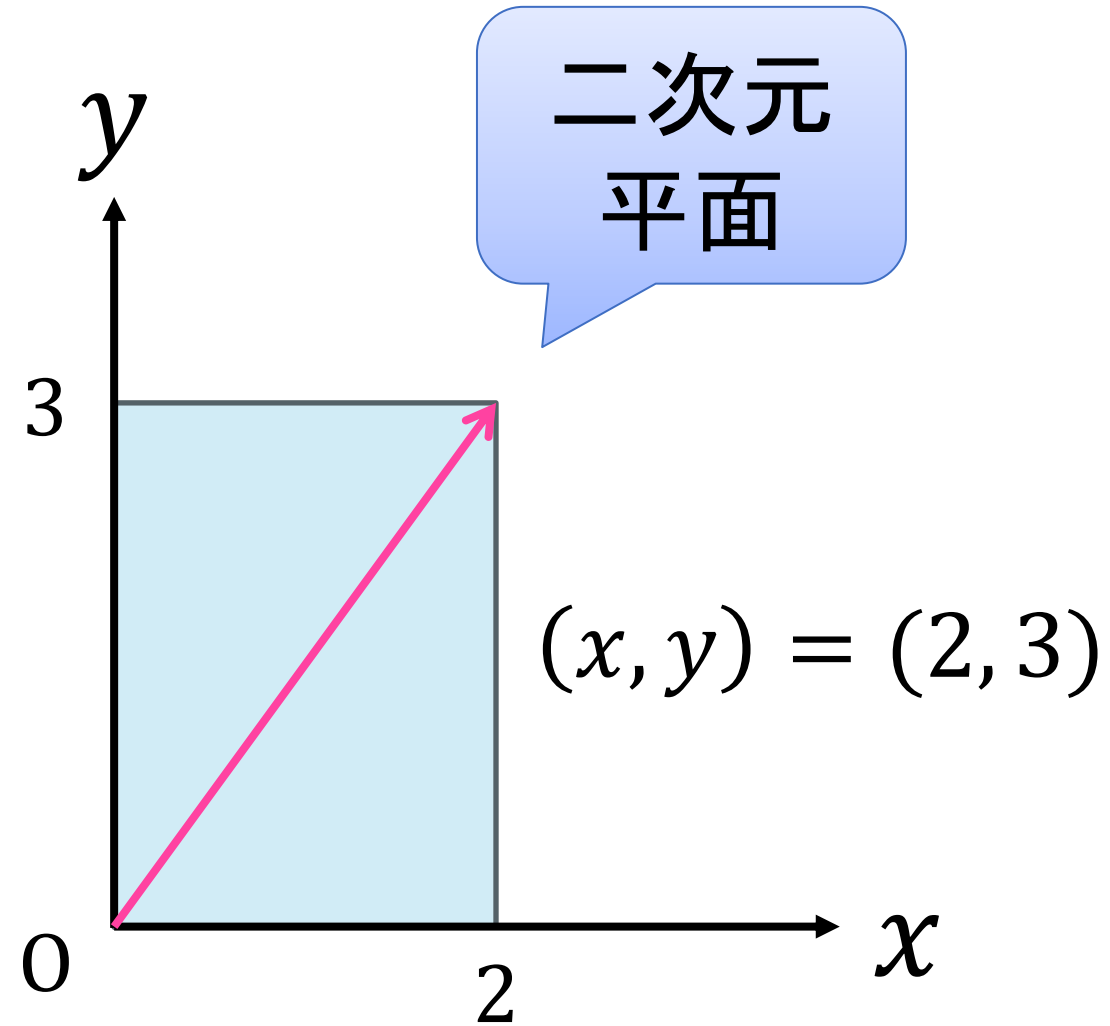
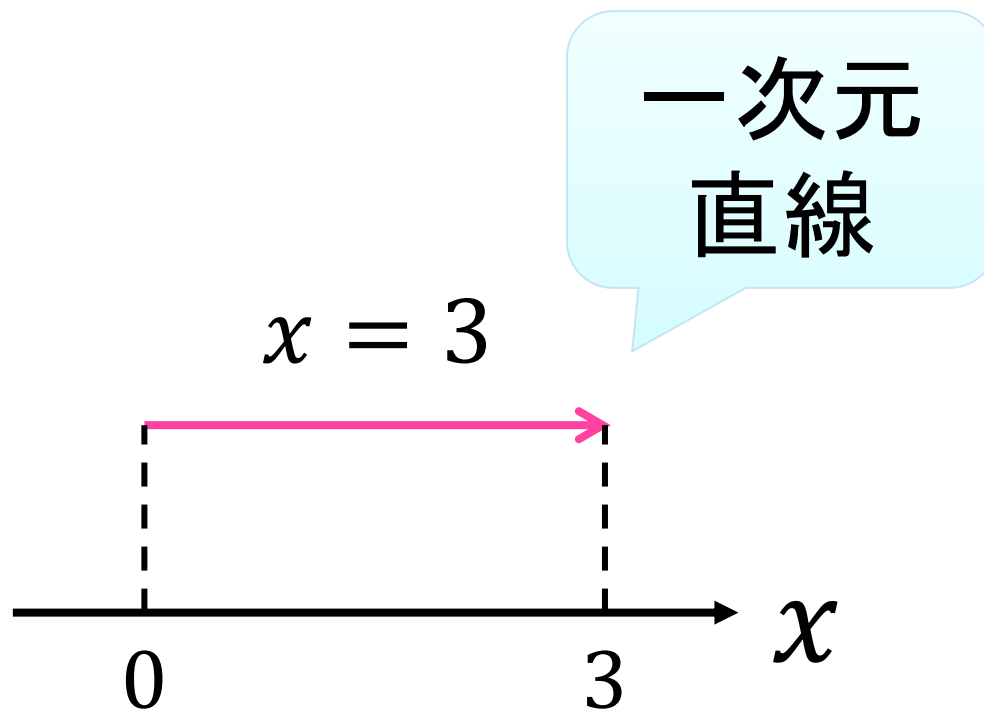
気体分子運動論

- 力学の復習
- 分子の運動
- 気体の圧力
- 状態方程式と比較
- 分子の並進運動

スカラーとベクトル -1

余談

43

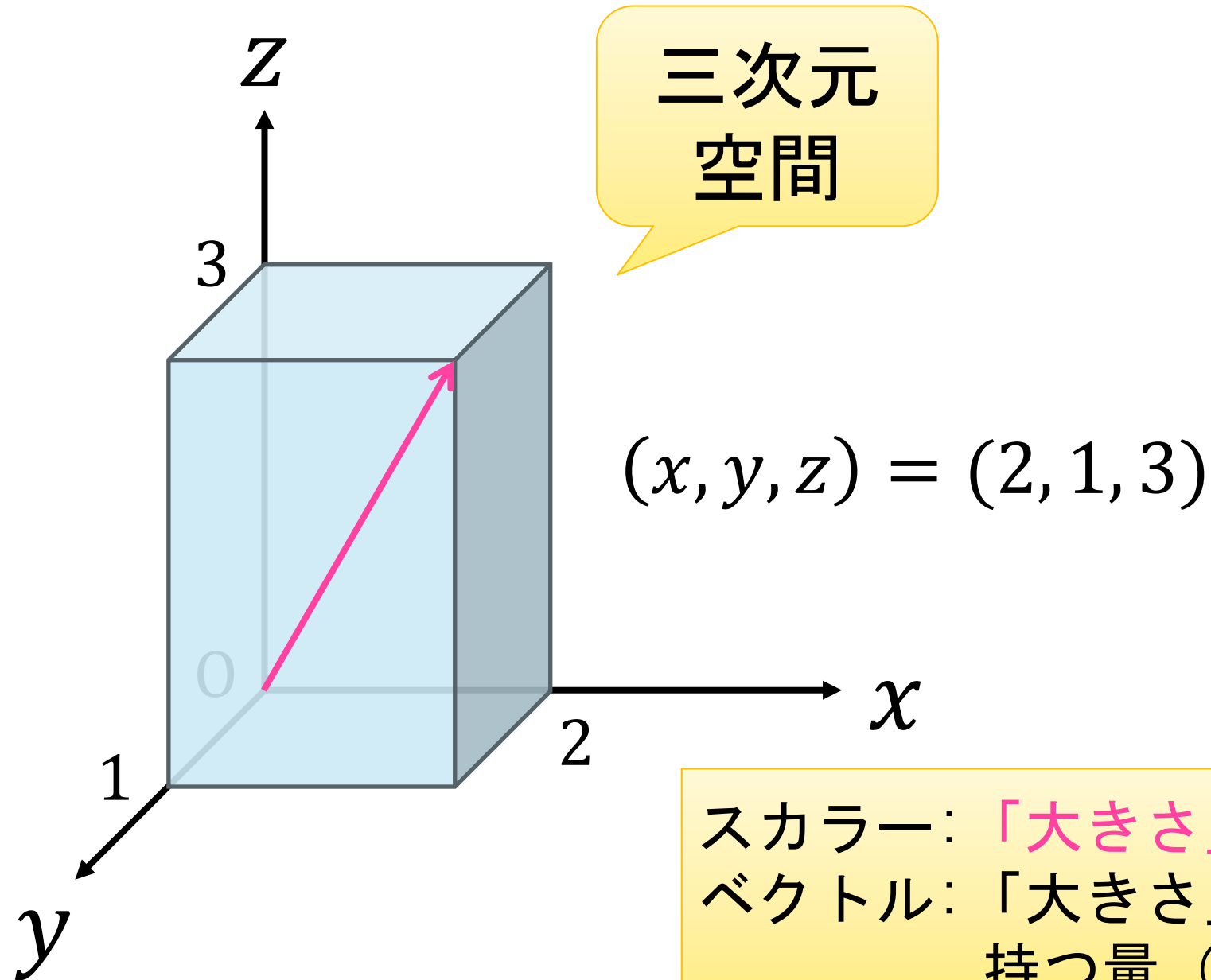


2軸目によって、
向きが定まる！

スカラーとベクトル -2

余談

44



スカラー: 「大きさ」のみ持つ量
ベクトル: 「大きさ」と「向き」を持つ量 (数と数の組)

運動量と力積

$$\vec{F} = m\vec{a} \cdots (1. \text{xx})$$

 $\times t$
 $\times x$

$$m\vec{a}t = \vec{F}t$$

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$$

$$\vec{v} - \vec{v}_0 = \vec{a}t$$

$$m(\vec{v} - \vec{v}_0) = \vec{F}(t - t_0) \cdots (1. \text{xx})$$

運動量

力積

$$m\vec{a}x = \vec{F}x$$

$$v^2 - v_0^2 = 2ax$$

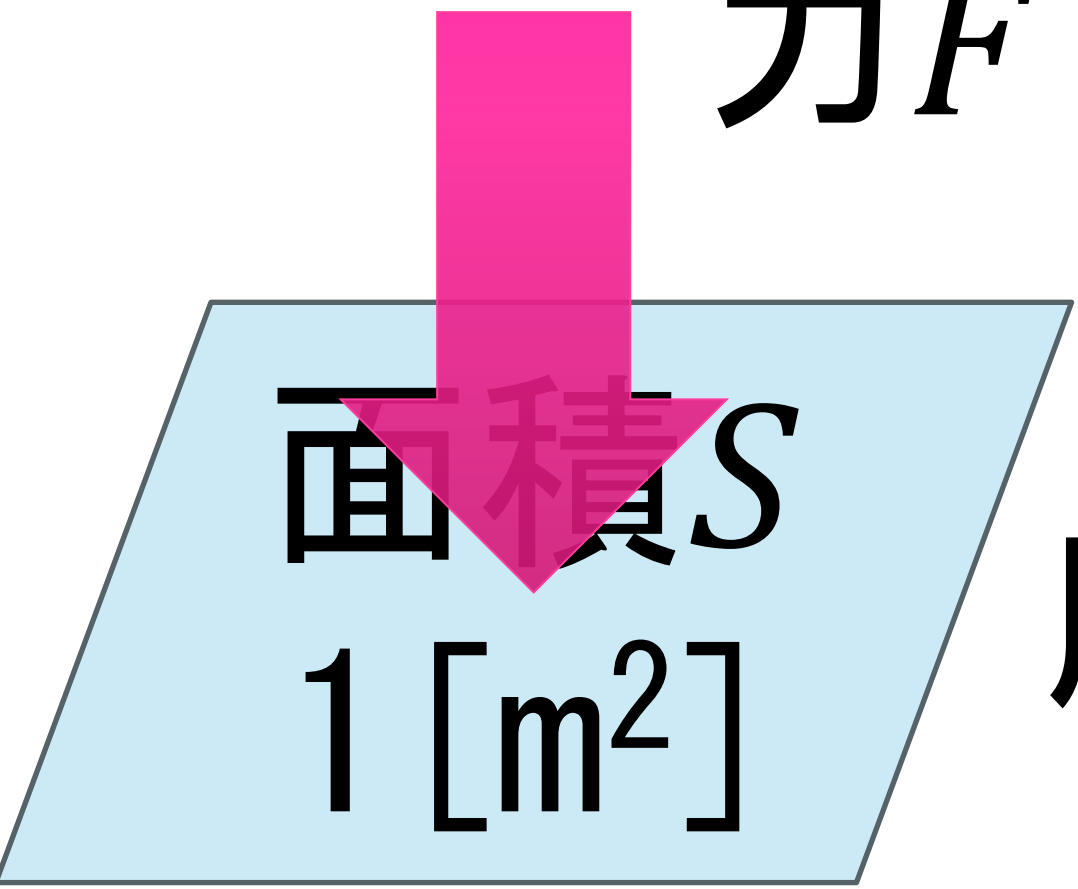
$$\frac{1}{2}(v^2 - v_0^2) = ax$$

$$\frac{1}{2}m(v^2 - v_0^2) = F(x - x_0) \cdots (1. \text{xx})$$

運動エネルギー

仕事

力 F 1 [N]



面積 S
1 [m²]

圧力 p 1 [Pa]

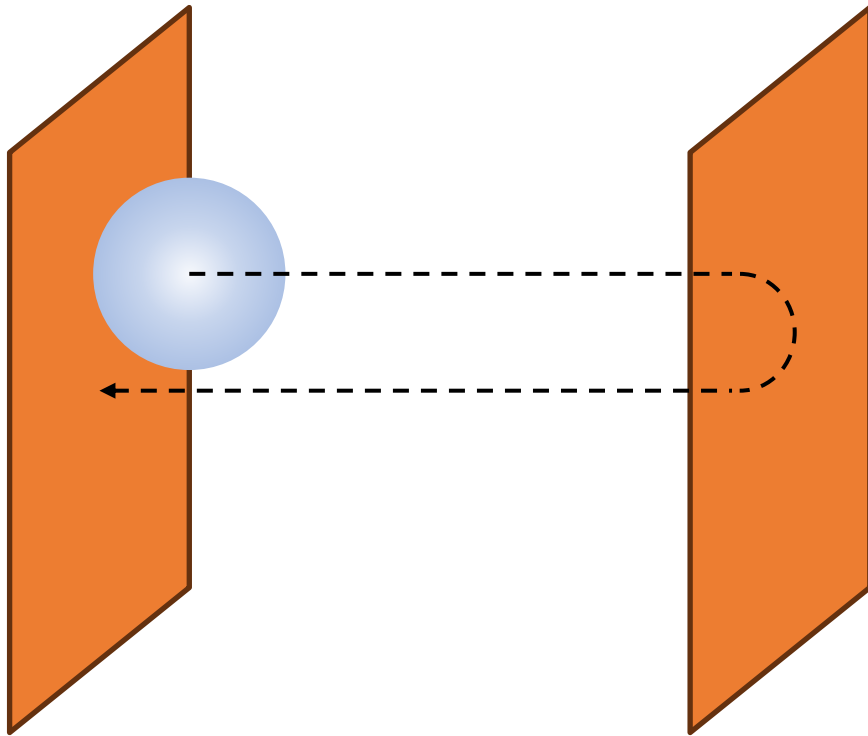
単位面積 S あたりに垂直にかかる力 F

$$p = \frac{F}{S} \cdots (1. xx)$$

分子の運動 -1

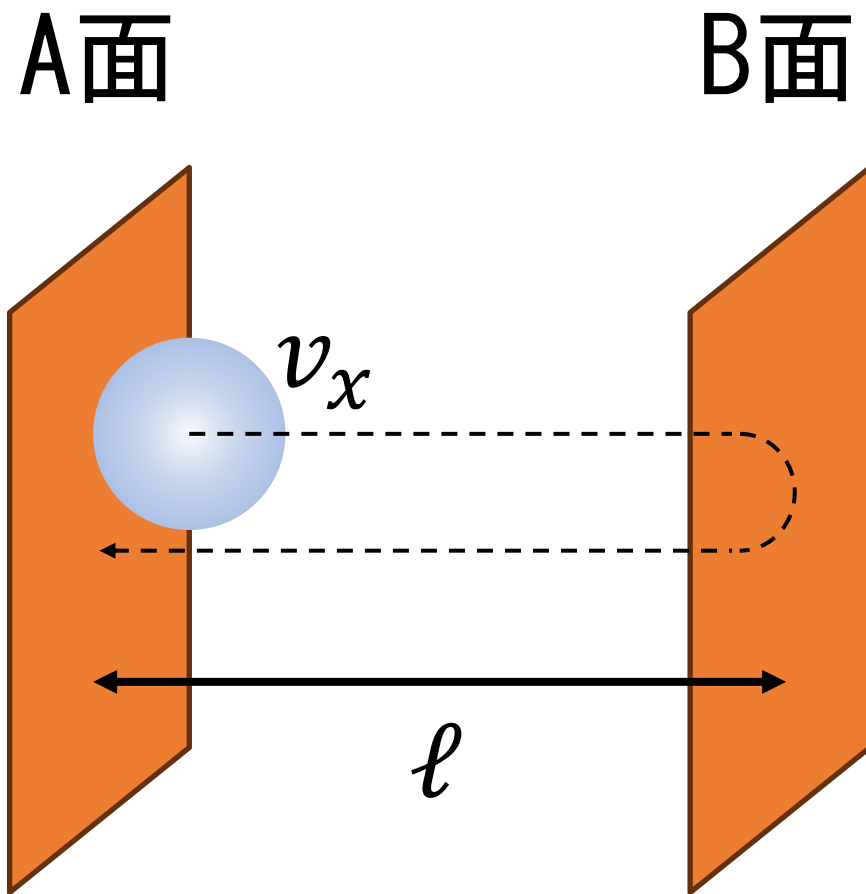
A面

B面



- ◆ 分子の運動を簡単のため1次元で考える.
- ◆ 1[個]の分子がA面からB面に完全弾性衝突し,
- ◆ 再びA面に衝突する運動を仮定する.

分子の運動 -2



- ◆ x 軸方向における分子の運動 v_x [m/s],
- ◆ 質量を m [kg] とすると運動量の変化は次である.

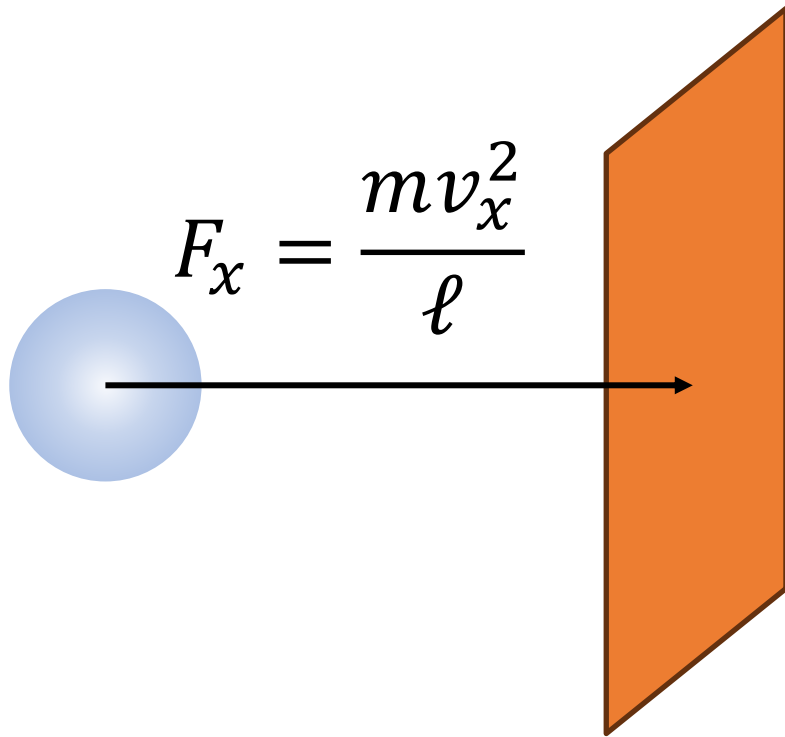
$$m((-v_x) - v_x) = -2mv_x \quad \dots (2.15)$$

- ◆ 距離 ℓ [m] 離れたAB間を, 速さ v_x [m/s] で往復する時間 t [s] は次である.

$$t = \frac{2\ell}{v_x} \quad \dots (2.16)$$

気体の圧力 -1

B面

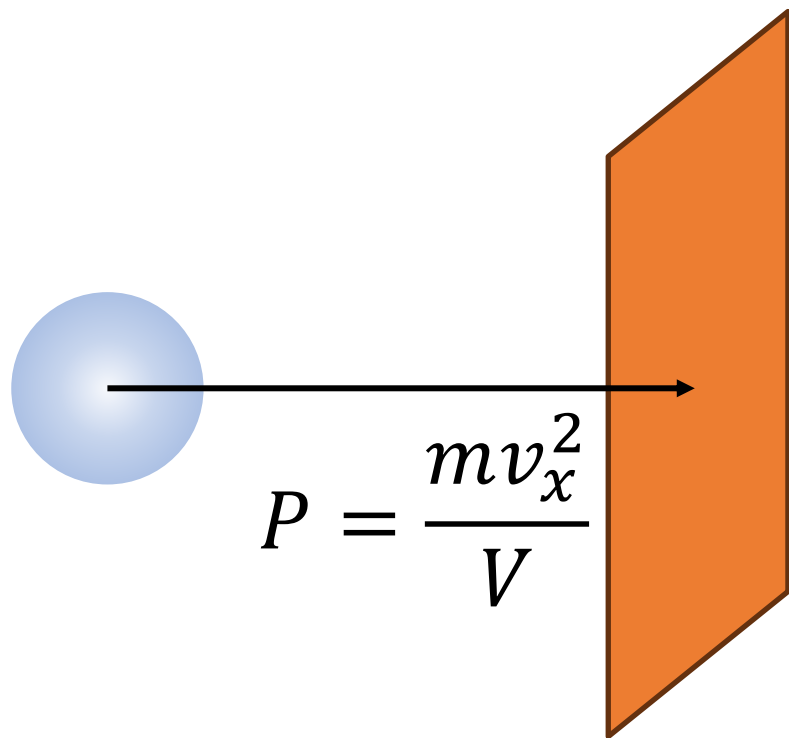


- ◆ 分子の力積 J は(2.15)式より $-2mv_x$ である.
- ◆ そのため壁が分子から受ける力は、作用-反作用の法則より $2mv_x$ である.
- ◆ 分子の力 F は、力積 J 、時間 t より次である.

$$F_x = \frac{|J|}{t} = \frac{mv_x^2}{\ell} \cdots (2.17)$$

気体の圧力 -2

B面



- ◆ ここで分子が与える圧力 P は, B面の面積を S_B とすると次である.

$$P = \frac{F}{S} = \frac{mv_x^2}{\ell^3} \cdots (2.18)$$

- ◆ $\ell^3 = V$ より次である.

$$P = \frac{mv_x^2}{V} \cdots (2.19)$$

直線から空間へ拡張

- ◆ 3次元に拡張して考える.

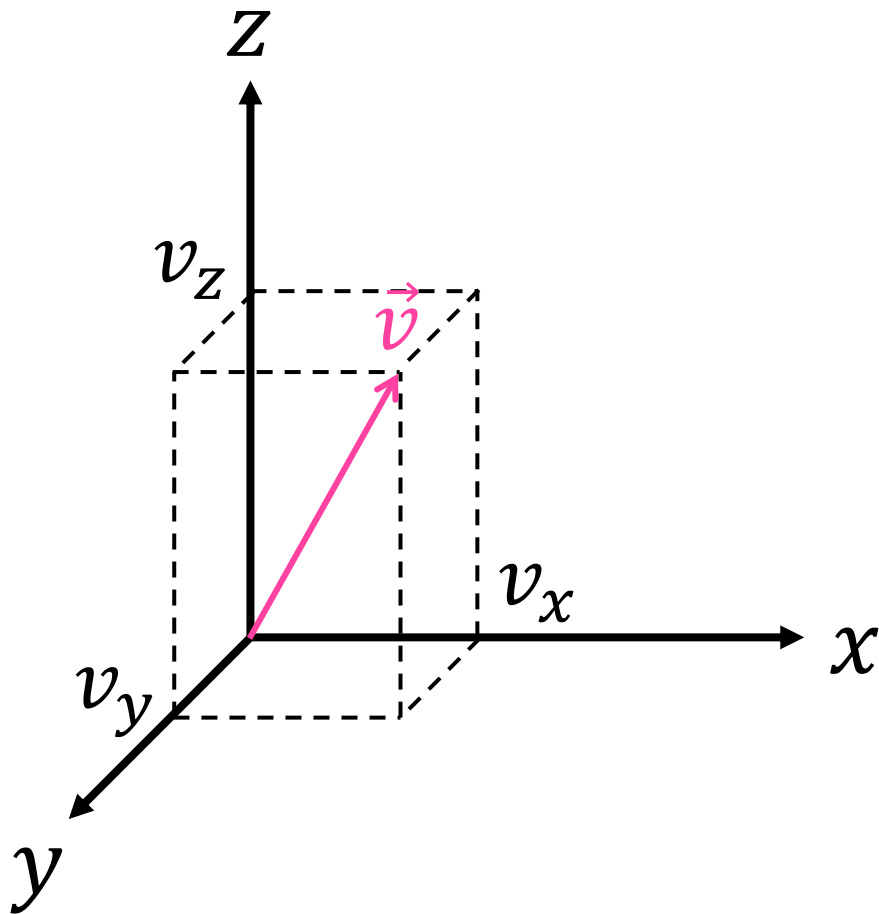
$$v_x = v_y = v_z \cdots (2.20)$$

$$|\vec{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \cdots (2.21)$$

- ◆ (2.20) と (2.21) 式より次である.

$$v_x^2 = \frac{v^2}{3} \cdots (2.22)$$

- ◆ $\sqrt{v^2}$ を二乗平均速度と呼ぶ.



気体の圧力 -3

■ (2. 19) 式を (2. 22) 式に代入すると, 次である.

$$P = \frac{mv^2/3}{V} = \frac{mv^2}{3V} \cdots (2. 23)$$

■ N_0 [個] の分子と仮定すると, 次である.

$$P = N_0 \frac{mv^2}{3V} \Leftrightarrow PV = \frac{1}{3} N_0 mv^2 \cdots (2. 24)$$

■ 分子の運動エネルギーは $\frac{1}{2}mv^2$,

■ N_0 [個] は物質量 n [mol] とアボガドロ定数 N_A [/mol] の積なので次である.

$$PV = \frac{2}{3} n N_A \frac{1}{2} mv^2 \cdots (2. 25)$$

状態方程式と比較 -1

- (2.14) と (2.25) 式は恒等式なので、次である.

$$nRT = \frac{2}{3} n N_A \frac{1}{2} m v^2 \quad \cdots (2.26)$$

- 分子の運動エネルギーについて整理すると、次である.

$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{3}{2} \frac{R}{N_A} T \quad \cdots (2.27)$$

- これらのことから、理想気体のエネルギーは温度のみで決まることが分かる.

単原子分子理想気体

- 単原子分子理想気体の場合，粒子数 N は1なので，次である．

$$n = \frac{N}{N_A} = \frac{1}{N_A} \cdots (2.28)$$

- (2.27) 式に代入すると，次である．

$$U = \frac{3}{2} nRT \cdots (2.29)$$

- 二原子分子の場合， $N = 2$ として(2.27)式に代入すればよい．

状態方程式と比較 -2

- (2.27) 式の $\frac{R}{N_A}$ を定数と見なし, **ボルツマン定数** と呼び k を用いる.
- 気体定数 R [J/(mol·K)], アボガドロ定数 N_A [/mol] とすると, ボルツマン定数 k [J/K] は, 次である.

$$\underline{k} = \frac{R}{N_A} = \frac{8.31}{6.02 \times 10^{23}} = 1.38 \times 10^{-23} \quad \dots (2.30)$$

分子の並進運動

- 最後に，分子の並進運動を考える．
- 二乗平均速度について整理すると，次である．

$$PV = \frac{2}{3} n N_A \frac{1}{2} m v^2 \Leftrightarrow \vec{v} = \sqrt{\frac{3PV}{n N_A m}} \cdots (2.31)$$

- 理想気体の状態方程式を考慮すると，次である．

$$\vec{v} = \sqrt{\frac{3k}{m} T} \cdots (2.32)$$

- よって，温度が上がると分子の平均速度が上昇することが示された．

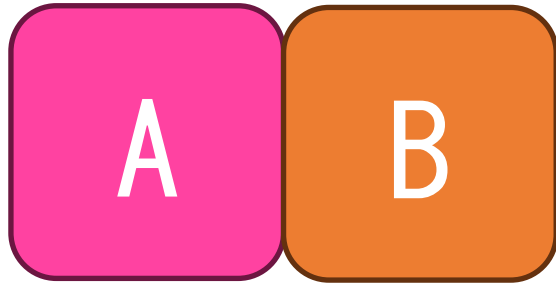
06

熱力学の4法則

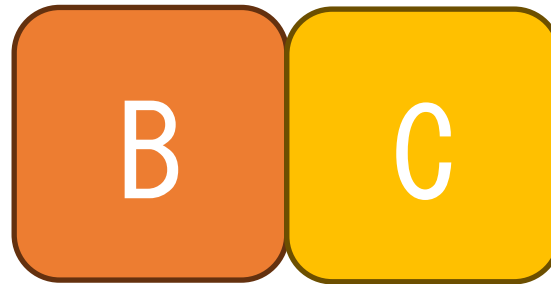
- 熱力学第0法則：熱平衡
- 熱力学第1法則：熱量保存則
- 熱力学第2法則：トムソンの原理 他
- 熱力学第3法則：ネルンストの熱定理

法則とは？

- 自然界に見られる現象の法則性を**実験**または**観測**で見出し、**数学**を用いて記述する。
- すなわち、**経験則**である。
- 法則性の正しさは、**測定**の「**不確かさ**」の**範囲**で検証される。
- そのため、**証明はされない**。



熱平衡



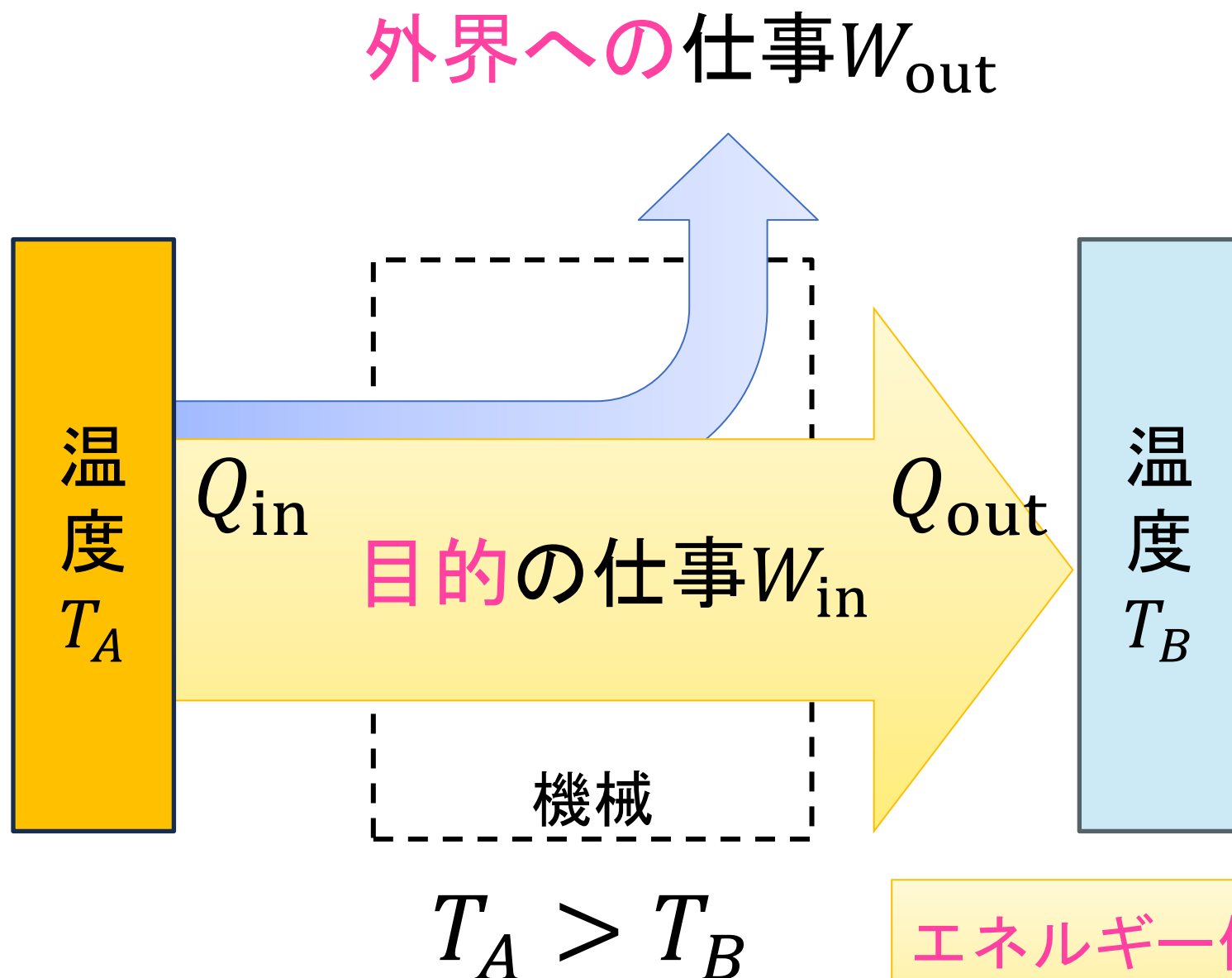
熱平衡



熱平衡

物体Aと物体B, 物体Bと物体C
が熱平衡のとき,
物体Aと物体Cも熱平衡である.

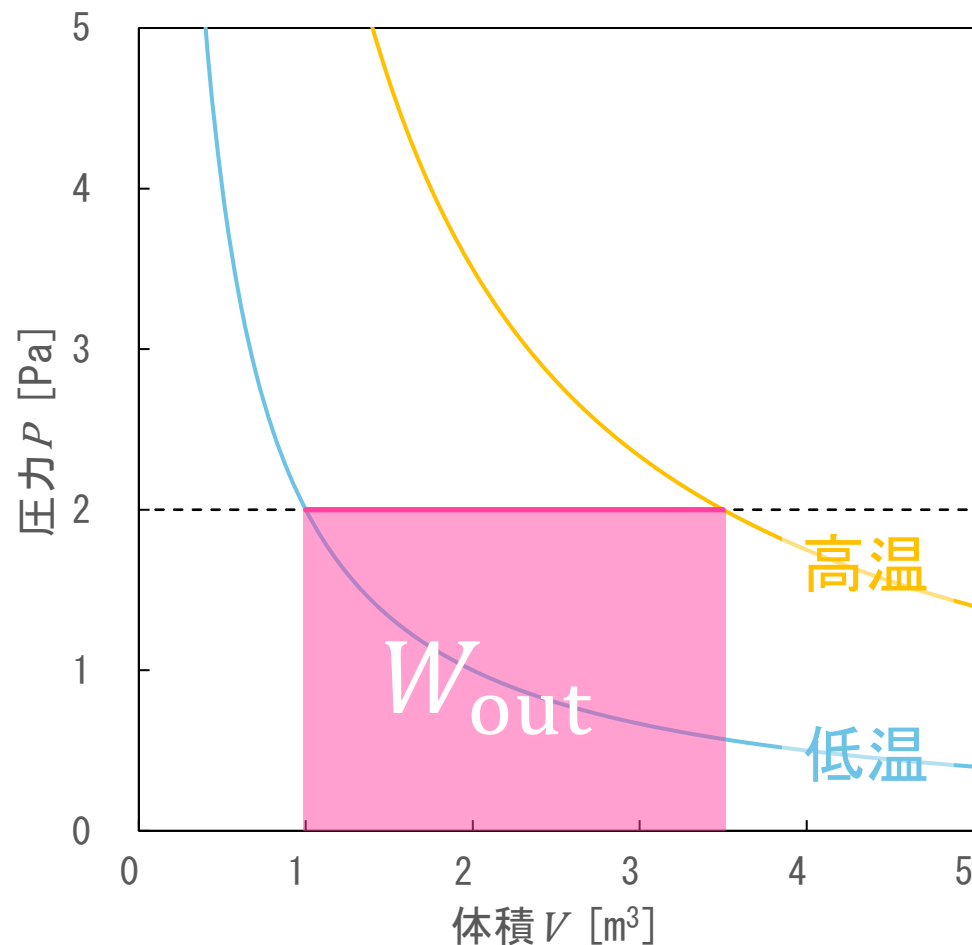
熱量保存則



エネルギー保存則

$$Q_{in} = Q_{out} + W_{out} \cdots (2.33)$$

内部エネルギーと仕事



内部エネルギー ΔU [J]

◆ 物質を構成する分子の運動エネルギーの総和

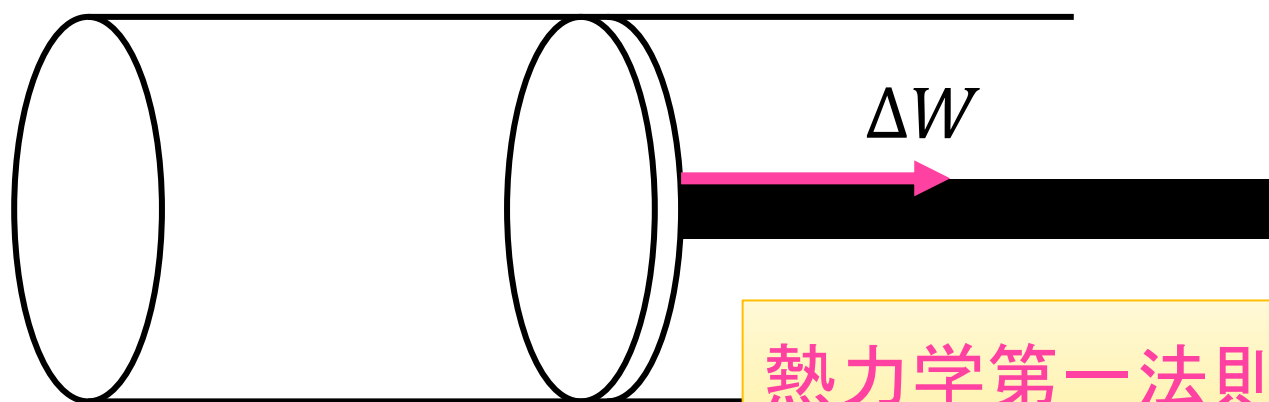
気体が外部にする仕事

W_{out} [J]

◆ $W_{\text{out}} = (P - V \text{線図の面積})$

... (2.34)

シリンダー内の気体に熱を加える

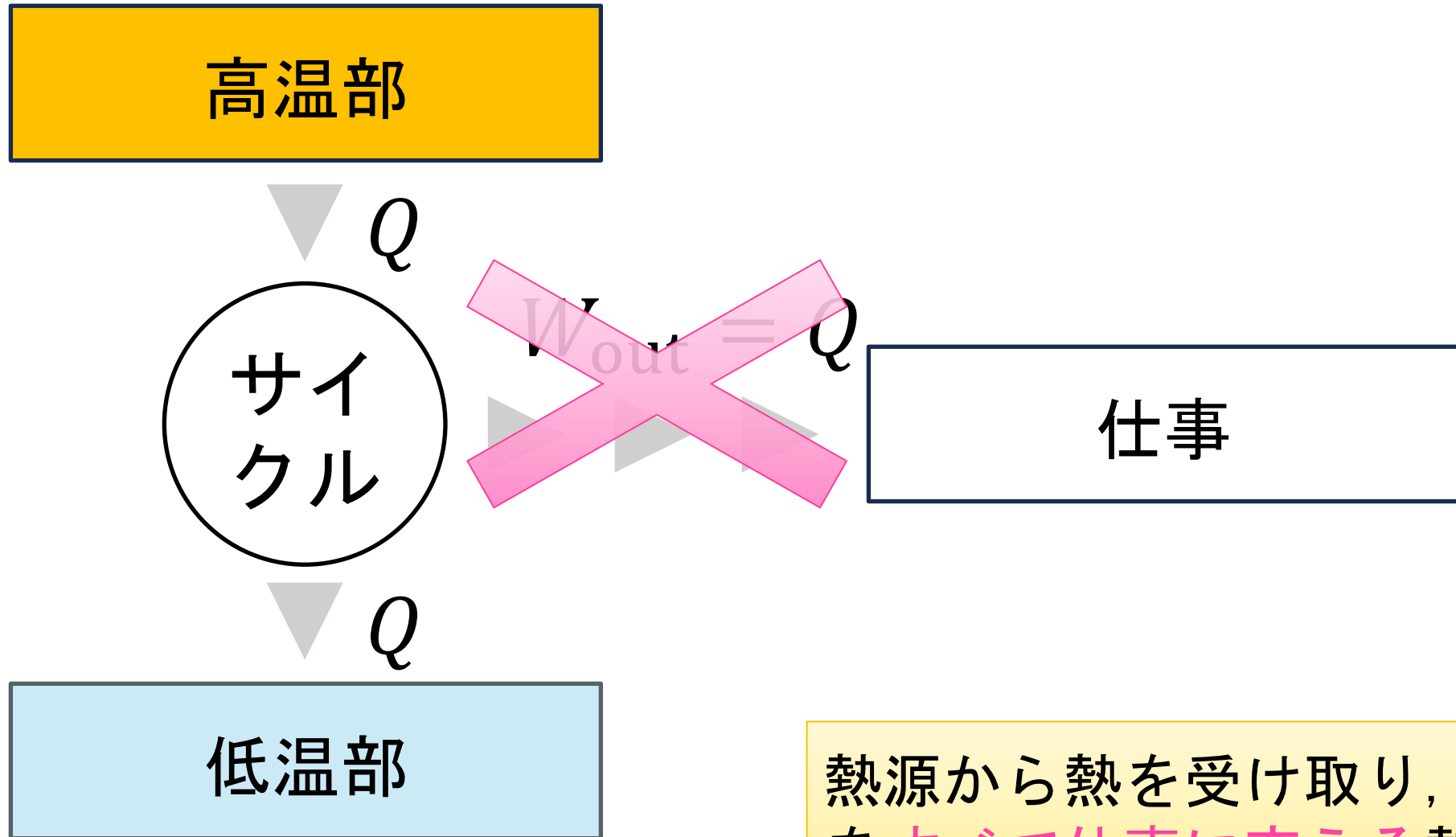


熱力学第一法則

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W \quad \cdots (2.35)$$

- ◆ 気体は膨張する \Rightarrow 外部に仕事する ΔW
- ◆ 内部エネルギーは増加する \Rightarrow 温度が上昇する ΔU

ΔQ : 加えた熱量, ΔW : 体積変化, ΔU : 温度変化

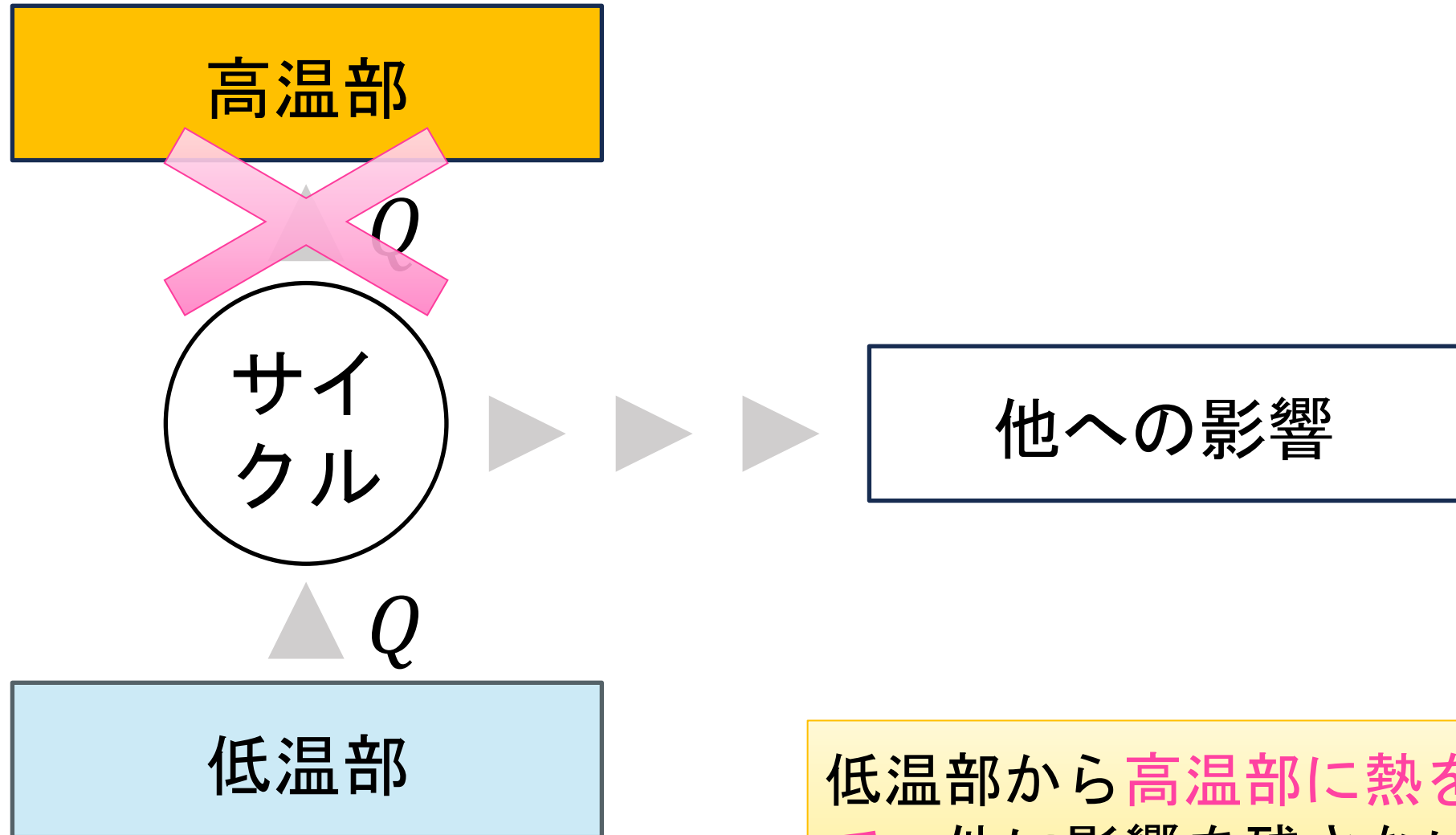


熱源から熱を受け取り，それをすべて仕事に変える熱サイクルは存在しない。

クラウドジウスの原理

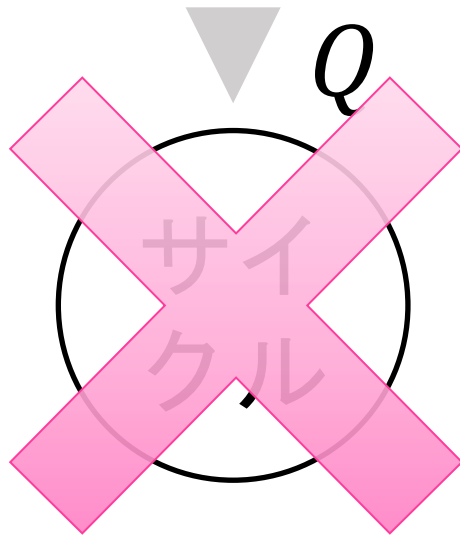
板書

64



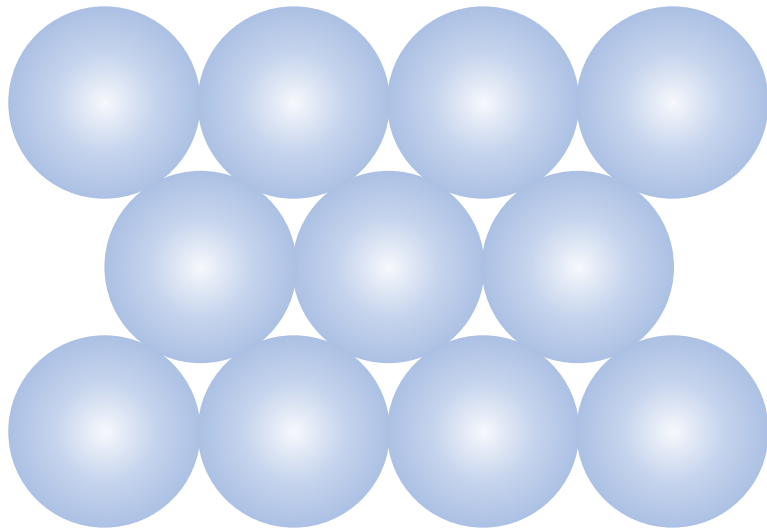
低温部から高温部に熱を移して、他に影響を残さない熱サイクルは存在しない。

高温部



ただ1つの熱源から熱を吸収し、
ずっと動き続ける熱サイクル
第二種永久機関は存在しない。

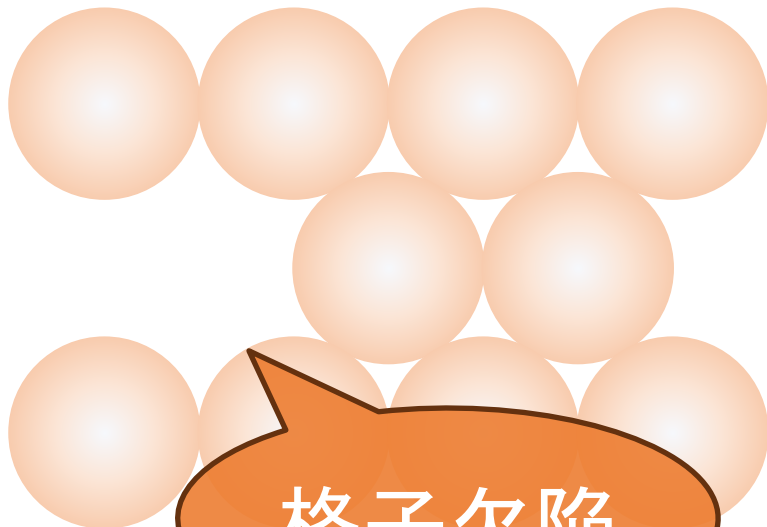
ネルンストの熱定理



$$T = 0$$

完全結晶

分子が規則正しく配列した結晶



格子欠陥

$$T \neq 0$$

完全結晶になるすべての物体の運動は、 $T = 0$ において0である。

07

$P - V$ 線図と状態変化

- 定圧変化
- 定積変化
- 定温変化
- 断熱変化

比例・反比例 -1

■ 比例

$$y = kx \cdots (1. \text{xx})$$

- そのため, $\frac{y}{x} = \text{Const.}$ である.

■ 反比例

$$y = \frac{k}{x} \cdots (1. \text{xx})$$

- そのため, $xy = \text{Const.}$ である.

比例・反比例 -2

- 物理学の数式は，ほとんどが比例・反比例の関係である．
- 掛け算がConst. のとき比例の関係であるといい， $x \propto y$ と表記する．
- 割り算がConst. のとき反比例の関係であるといい， $x \propto^{-1} y$ と表記する．

物理学では $y - x$ と限らない

力学

- グラフ： 速さ v - 時間 t , 面積： 位置 x
- グラフ： 合力 F - 位置 x , 面積： 仕事 W
- グラフ： 合力 F - 時間 t , 面積： 力積 J

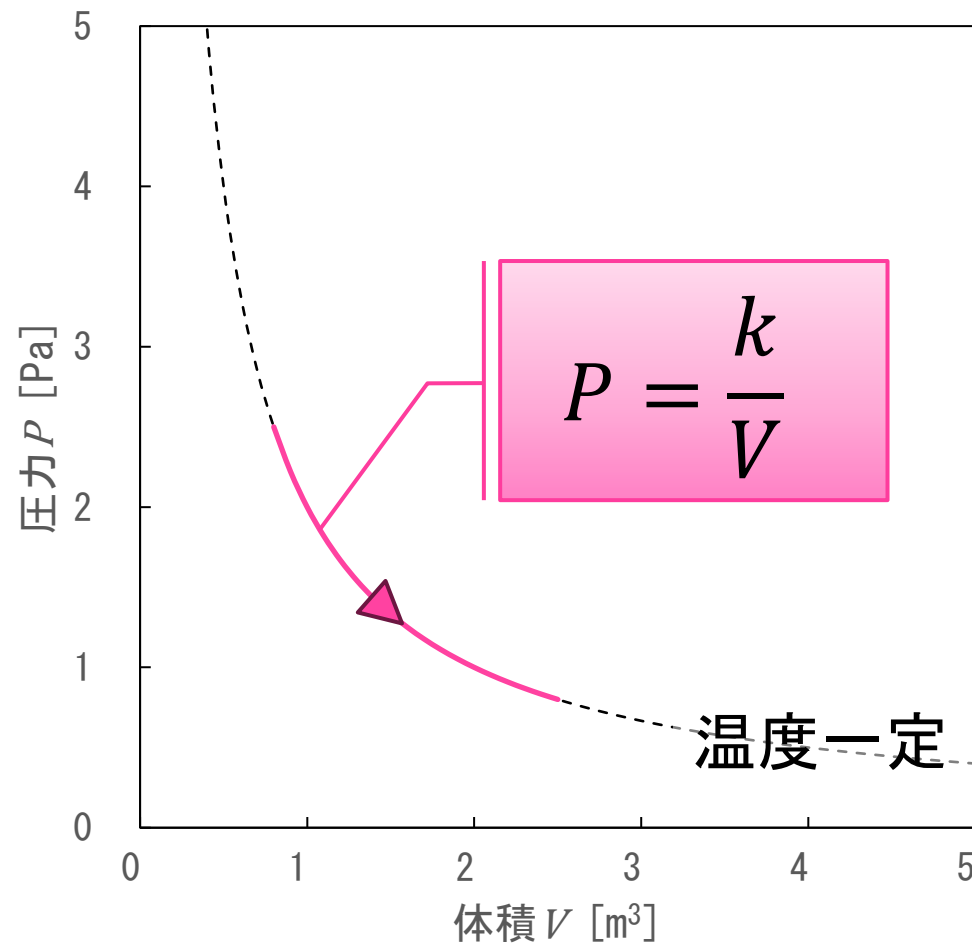
熱学

- グラフ： 圧力 P - 体積 V , 面積： 気体の仕事 W

電磁気学

- グラフ： 電場 E - 位置 x , 面積： 電位 V
- グラフ： 電流 I - 時間 t , 面積： 電気量 e

定温変化



- ◆ 定温（等温）変化なので,
 $T = \text{Const.} \cdots (2.36)$
 $\Delta U = 0 (\Delta T = 0) \cdots (2.37)$
 である.
- ◆ ボイルの法則より,
 $PV = \text{Const.} \cdots (2.9)$
 である.
- ◆ 熱力学第一法則より,
 $Q_{\text{in}} = W_{\text{out}} \cdots (2.38)$
 である.

定積モル比熱 -1

- 定積変化において物質1 [mol] を1 [K] 上げるのに必要な熱量のこと.
- 定積モル比熱を c_V [J/ (mol · K)], 物質量 n [mol], 熱量 Q [J] とすると, 次である.

$$\Delta Q = nc_V \Delta T \cdots (2.39)$$

- そのため, 定積モル比熱 c_V [J/ (g · K)] は次である.

$$c_V = \frac{\Delta Q}{n \Delta T} \cdots (2.40)$$

定積モル比熱 -2

- 定積変化では $W_{\text{out}} = 0$ より, (2.35) 式に代入すると, 次である.

$$\Delta Q = \Delta U \quad \cdots (2.41)$$

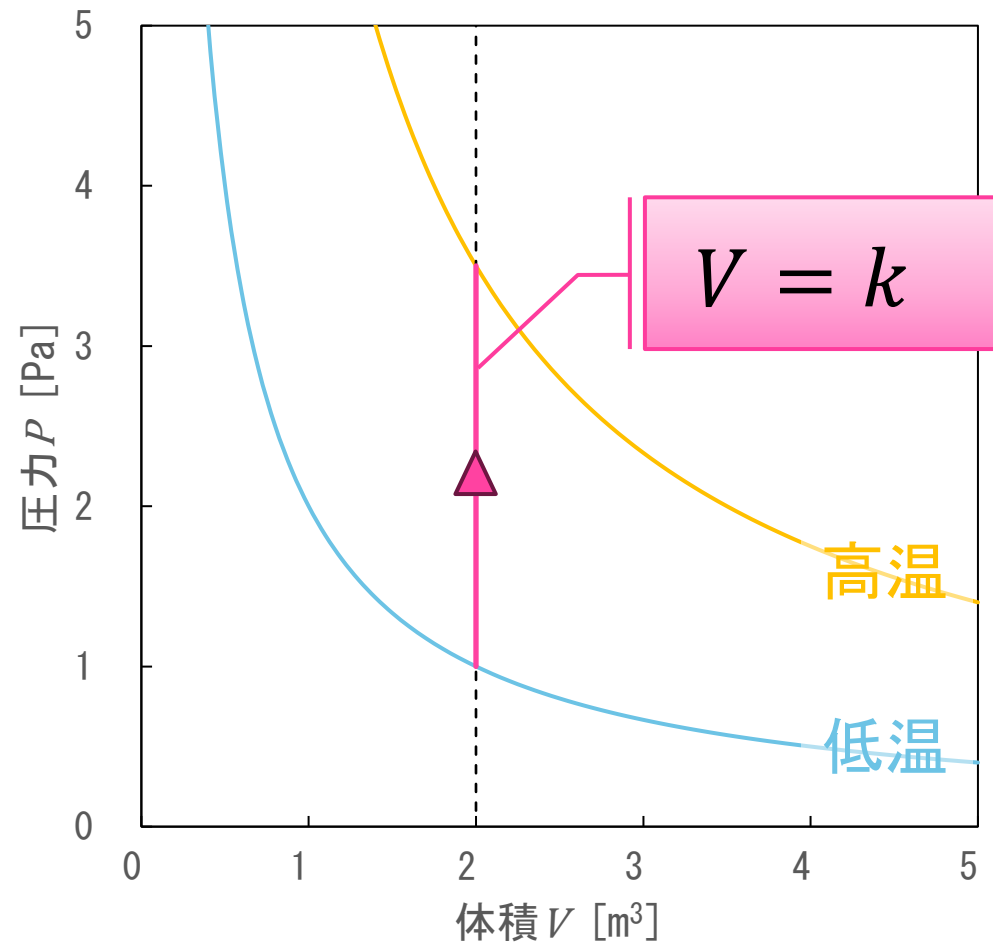
- (2.41) 式を (2.40) 式に代入すると, 次である.

$$\Delta U = nc_V \Delta T \quad \cdots (2.42)$$

- (2.29) と (2.42) 式は恒等式なので, 単原子分子の定積モル比熱は次である.

$$c_V = \frac{3}{2} R \quad \cdots (2.43)$$

定積変化



◆ 定積（定容）変化なので、
 $V = \text{Const.} \cdots (2.44)$

$W_{\text{out}} = 0 (\Delta V = 0) \cdots (2.45)$
 である。

◆ ボイル・シャルルの法則より、
 $\frac{P}{T} = \text{Const.} \cdots (2.46)$
 である。

◆ 熱力学第一法則より、
 $Q_{\text{in}} = \Delta U \cdots (2.47)$
 である。

定圧モル比熱 -1

■ 定圧変化において物質1 [mol] を1 [K] 上げるのに必要な熱量のこと.

■ 定圧モル比熱を c_p [J/(mol·K)], 物質質量 n [mol], 熱量 Q [J] とすると, 次である.

$$\Delta Q = nc_p \Delta T \cdots (2.48)$$

■ そのため, 定圧モル比熱 c_p [J/(g·K)] は次である.

$$c_p = \frac{Q}{n\Delta T} \cdots (2.49)$$

定圧モル比熱 -2

- 定圧変化では $W_{\text{out}} = nRT$ より, (2.35) 式に代入すると, 次である.

$$\Delta Q = \Delta U + nRT \cdots (2.50)$$

- (2.50) 式に (2.48) と (2.42) 式に代入すると, 次である.

$$nc_p \Delta T = nc_v \Delta T + nRT \cdots (2.51)$$

定圧モル比熱 -3

■ (2.51) を整理すると次である.

$$c_P = c_V + R \cdots (2.52)$$

■ (2.52) 式を, **マイヤーの関係式**と呼ぶ.

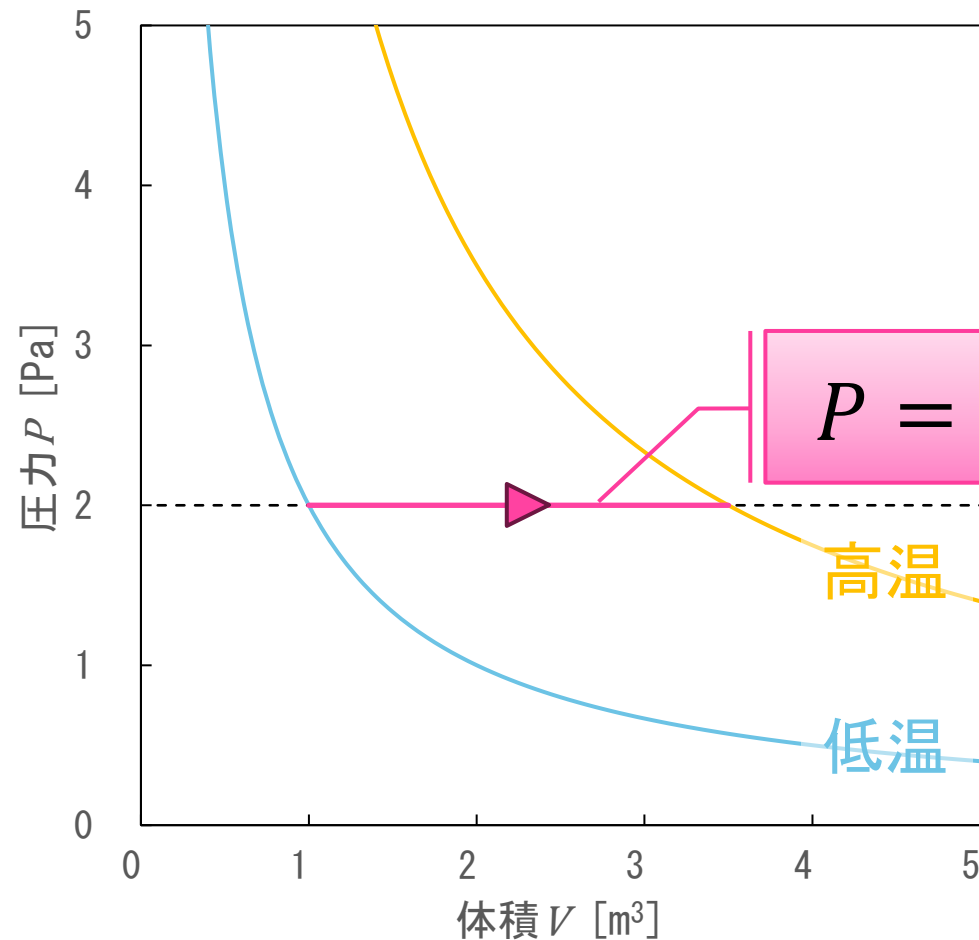
■ (2.52) 式に (2.43) 式を代入すると, 次である.

$$c_P = \frac{3}{2}R + R \cdots (2.53)$$

■ (2.53) 式を計算し, 単原子分子理想気体の定圧モル比熱は次である.

$$c_P = \frac{5}{2}R \cdots (2.54)$$

定圧変化



◆ 定圧変化なので,
 $P = \text{Const.} \cdots (2.55)$
 である.

シャルルの法則より,
 $\frac{V}{T} = \text{Const.} \cdots (2.11)$
 である.

◆ 熱力学第一法則より,
 $Q_{\text{in}} = \Delta U + P\Delta V \cdots (2.56)$
 である.

ポアソンの法則 -1

- 断熱変化では $Q = 0$, $U = nc_V\Delta T$, $W_{out} = PV$ なので, (2.35) 式に代入すると次である.

$$0 = nc_V\Delta T + PV \cdots (2.57)$$

- (2.57) 式に状態方程式 $P = \frac{nRT}{V}$ を代入し, 辺々 $nc_V\Delta T$ で割ると次である.

$$0 = \frac{1}{T}\Delta T + \frac{R}{c_V}\frac{1}{V}\Delta V \cdots (2.58)$$

- (2.58) 式を辺々積分すると, 次である.

$$\text{Const.} = \log TV^{\frac{R}{c_V}} \cdots (2.59)$$

ポアソンの法則 -2

- 定積モル比熱と定圧モル比熱の比のことを、**比熱比**と呼び γ を用いる.

$$\gamma = \frac{c_P}{c_V} \cdots (2.60)$$

- (2.59) 式に (2.52) 式を代入し、**比熱比**を用いて表すと次である.

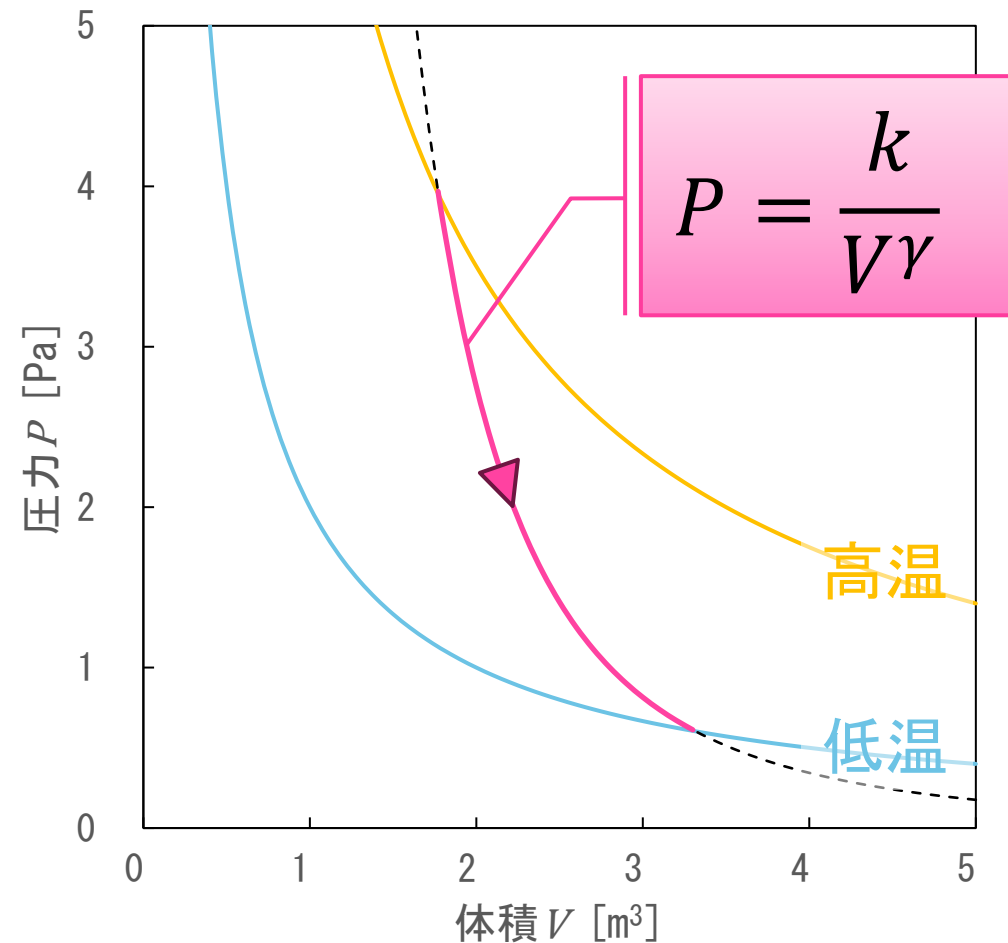
$$TV^{\gamma-1} = \text{Const.} \cdots (2.61)$$

- (2.61) 式に状態方程式 $T = \frac{PV}{nR}$ を代入すると、次である.

$$PV^{\gamma} = \text{Const.} \cdots (2.62)$$

- (2.62) 式を**ポアソンの法則**と呼ぶ.

断熱変化



- ◆ 断熱変化なので,

$$Q = 0 \quad \cdots (2.63)$$

である.
- ◆ ポアソンの法則より,

$$PV^\gamma = \text{Const.} \quad \cdots (2.62)$$

である.
- ◆ 熱力学第一法則より,

$$0 = \Delta U + W_{\text{out}} \quad \cdots (2.64)$$

である.

08

熱サイクル

- 熱機関
- 熱効率
- グラフの組み合わせ

板書

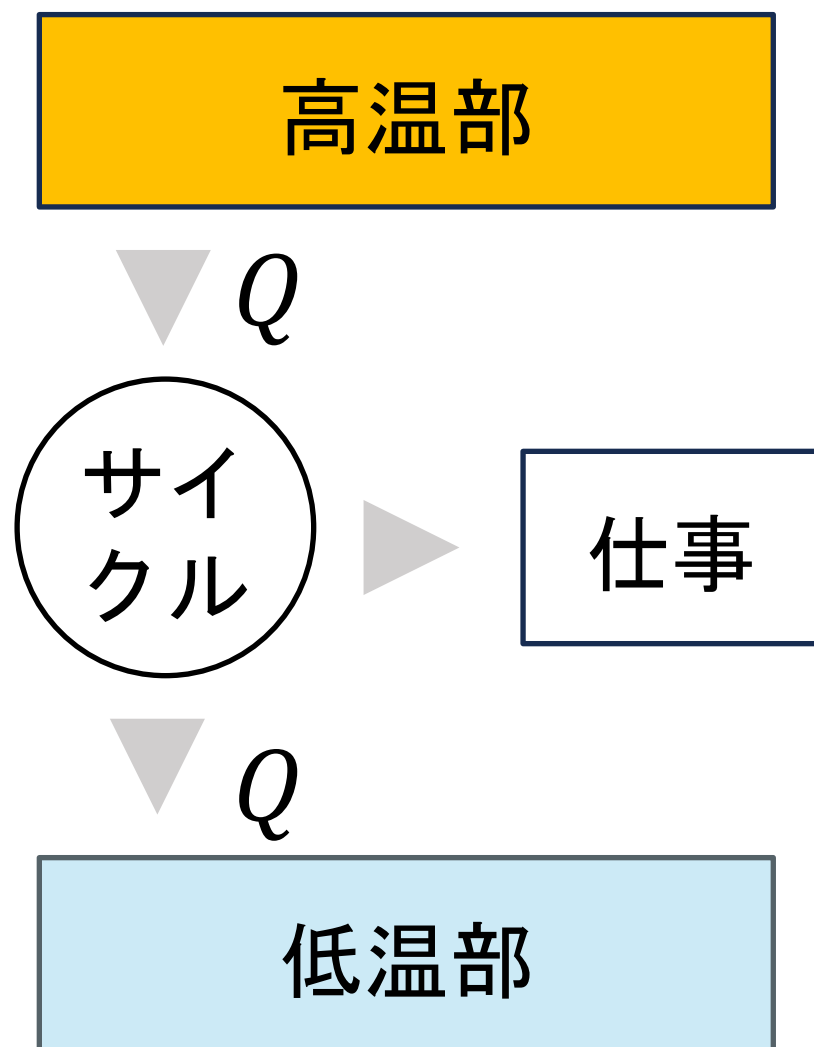
ニコラ・レオナル・サディ・カルノー
(A. D. 1796–1832年)



2つの熱源で動作する
系についての最大熱
効率 η は、物体によら
ず2つの温度のみで
決まる.

(カルノーの定理)

熱機関



- ◆ 熱から仕事に変換する機械を、熱機関と呼ぶ.
- ◆ 高温部から熱を受け取り外界に仕事する.
- ◆ そのあと元の状態に戻るために、低温部に熱を捨てる.
- ◆ このように元に戻る変化の過程を、熱サイクルと呼ぶ.

日本の電気の約80%を
火力発電で供給している！

仕事する

水蒸気

発電機

復水器

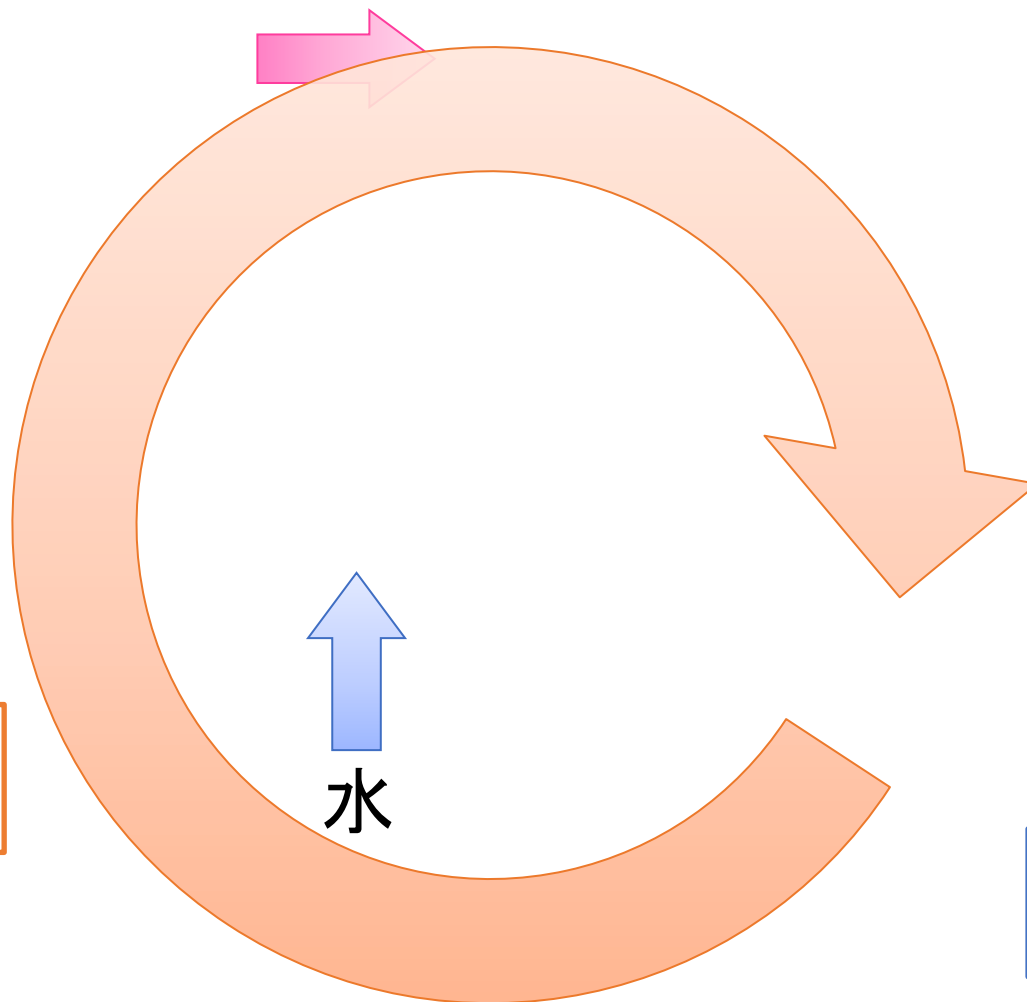
熱を捨てる

熱を受け取る

ボイラー

給水ポンプ

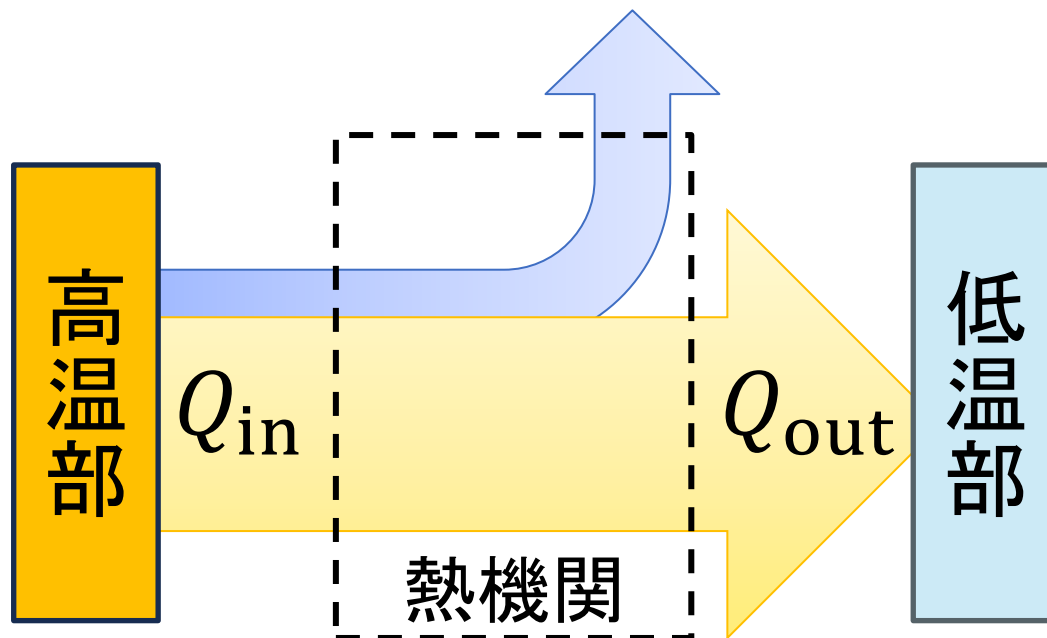
水



発電用タービン

熱効率 -1

外界への仕事 W_{out}



- ◆ 高温部から得た熱量に対し，外界へ仕事した割合を熱効率と呼ぶ.
- ◆ 温度，圧力，体積でサイクルが作られる.
- ◆ 1サイクルで内部エネルギーの変化は，次である.

$$\Delta U = 0 \cdots (2.65)$$

熱効率 -2

- 高温部から得た熱量を Q_{in} ，低温部に捨てた熱量を Q_{out} とすると気体が得た熱量の総和 ΔQ [J]は次である.

$$\Delta Q = Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}} \cdots (2.66)$$

- 熱力学第一法則 (2.35) 式に (2.66) 式を代入すると，次である.

$$0 = (Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}}) - W_{\text{out}} \cdots (2.67)$$

- 熱効率を e とすると，次で表せる.

$$e = \frac{W_{\text{out}}}{Q_{\text{in}}} = \frac{Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}}}{Q_{\text{in}}} \cdots (2.68)$$