

平成 27 年 (2015 年) 度「宮水学園」マスター講座〈前期〉

日常は物理で満ちている —こんなところに自然法則—



真貝寿明

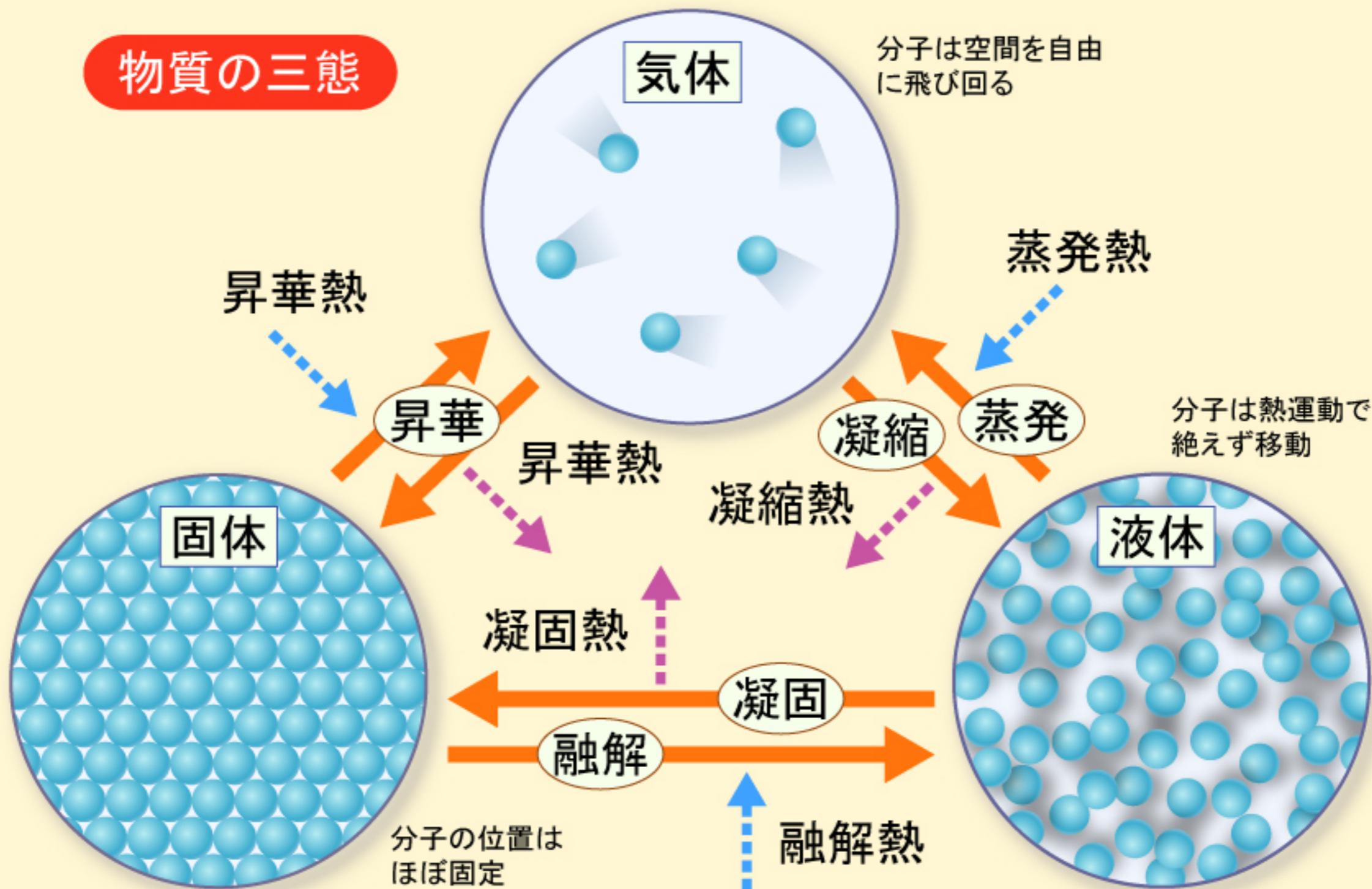
第 4 回 6 月 19 日 気象の物理—ペットボトルで雲を作る

第 5 回 7 月 3 日 台所の物理—山の上でご飯を炊く方法

第 6 回 7 月 17 日 音の物理—足踏み揃えて吊り橋渡るな

物質の三態

物質の三態



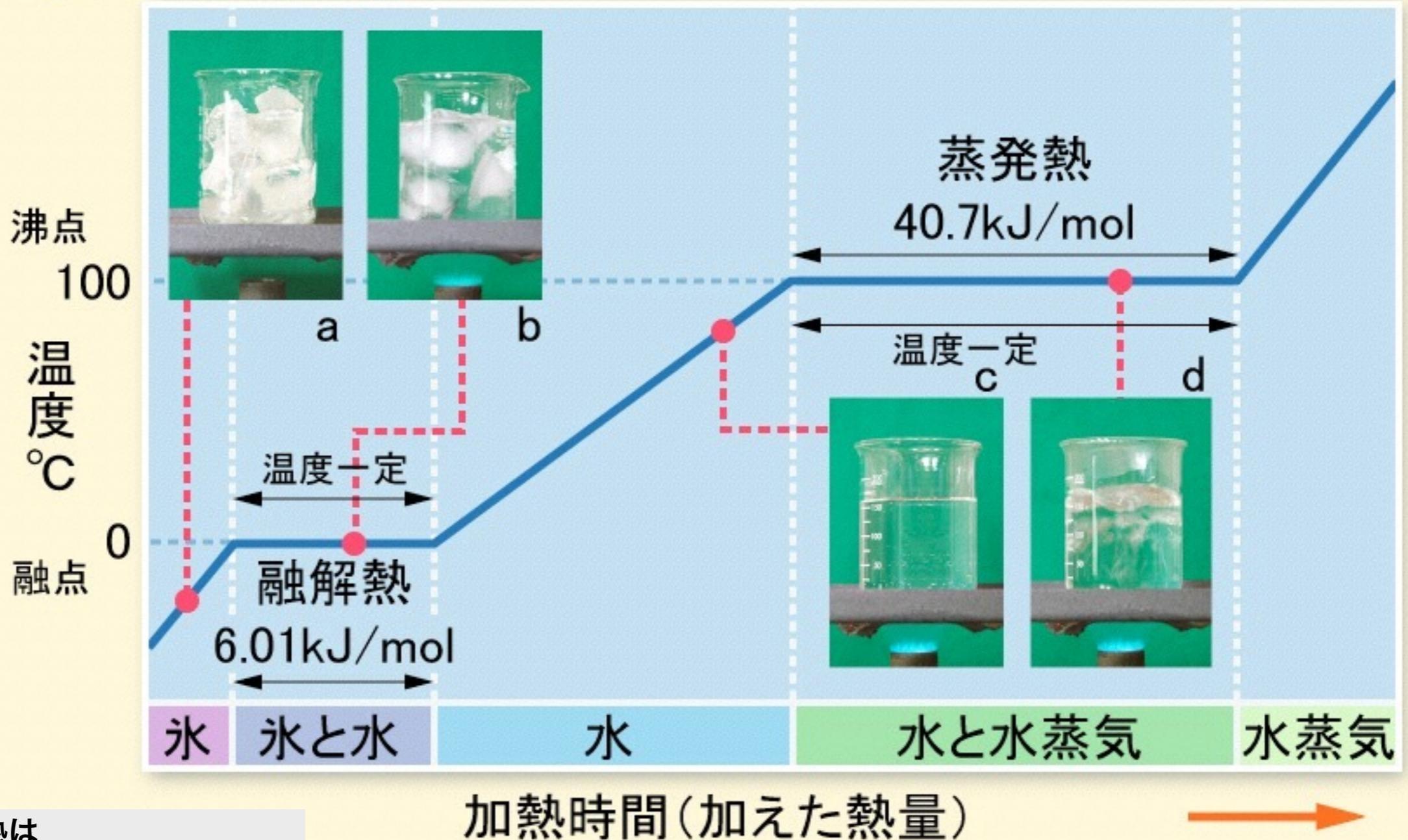
水の状態変化

水の状態変化

水の蒸発熱は

$$2257 \text{ J/g} = 540 \text{ cal/g}$$

$$41 \text{ kJ/mol} = 9720 \text{ cal/mol}$$



氷の融解熱は

$$334 \text{ J/g} = 80 \text{ cal/g}$$

$$6 \text{ kJ/mol} = 1440 \text{ cal/mol}$$

打ち水

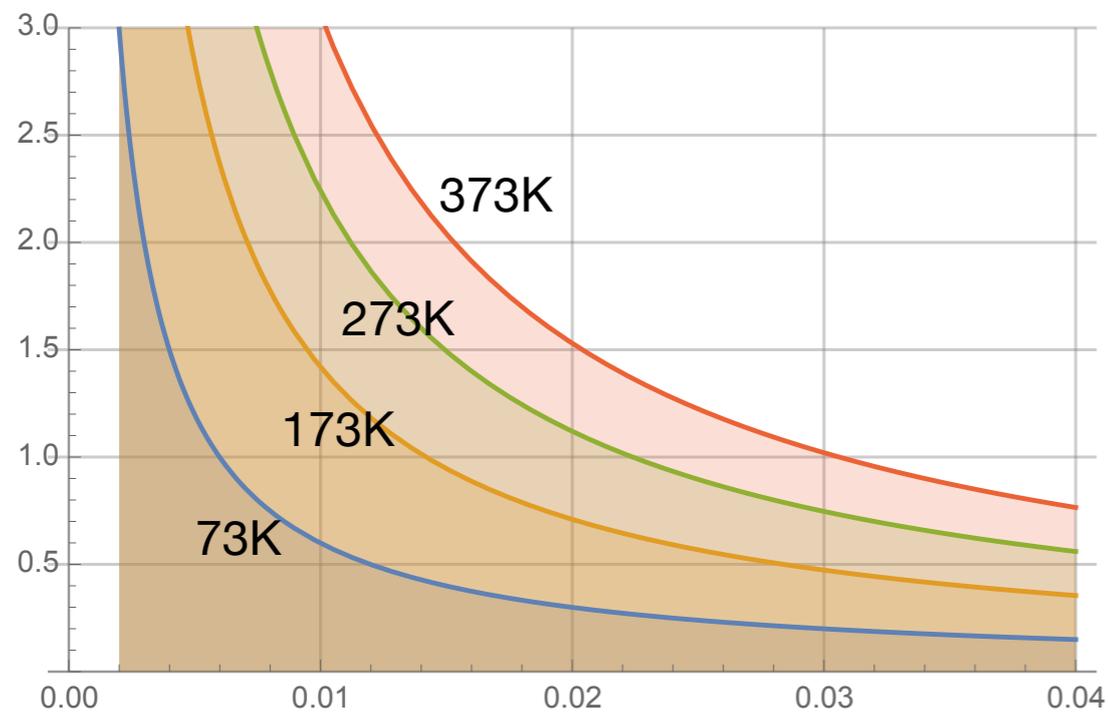
ボイルの法則

● ボイルの法則

温度を一定にすると、気体の体積 V は、圧力 P に反比例する。

$$PV = \text{一定}$$

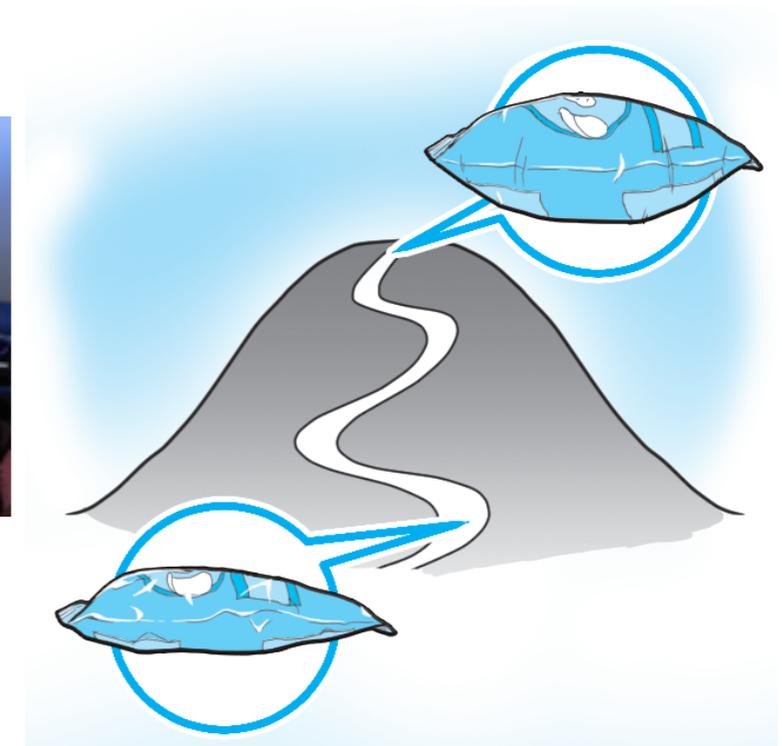
圧力 [気圧 ($\times 10^5$ Pa)]



体積 [$\times 10^{-2} \text{ m}^3$]

Boyle の法則

山の上でポテトチップスの袋が膨らむ。

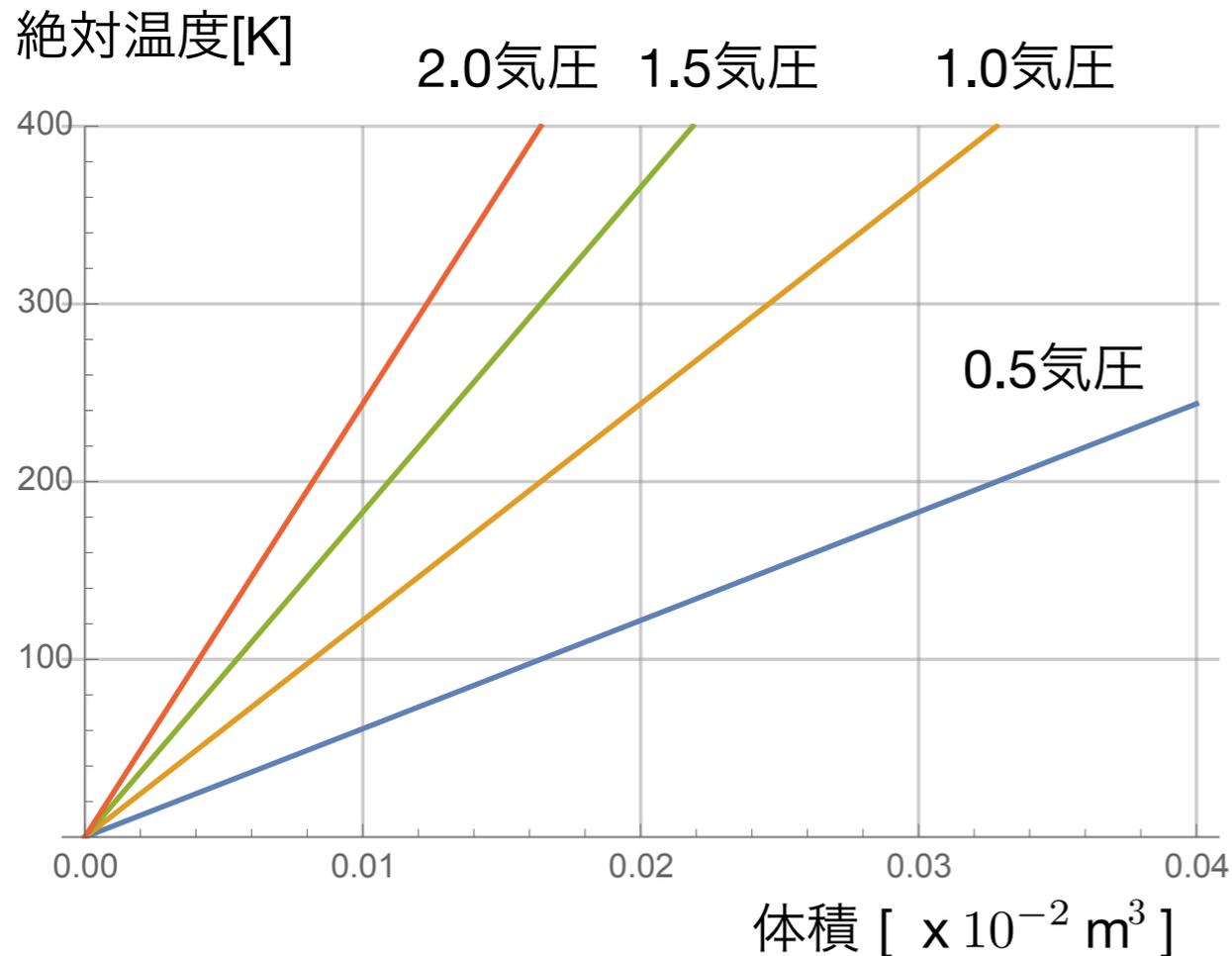


シャルルの法則

- シャルルの法則

圧力を一定にすると，気体の体積 V は，絶対温度 T に比例する。

$$\frac{V}{T} = \text{一定}$$



Charles の法則

お湯が沸くと鍋の蓋が浮き上がる。



- **ボイルの法則**

温度を一定にすると、気体の体積 V は、圧力 P に反比例する。

$$PV = \text{一定}$$

- **シャルルの法則**

圧力を一定にすると、気体の体積 V は、絶対温度 T に比例する。

$$\frac{V}{T} = \text{一定}$$

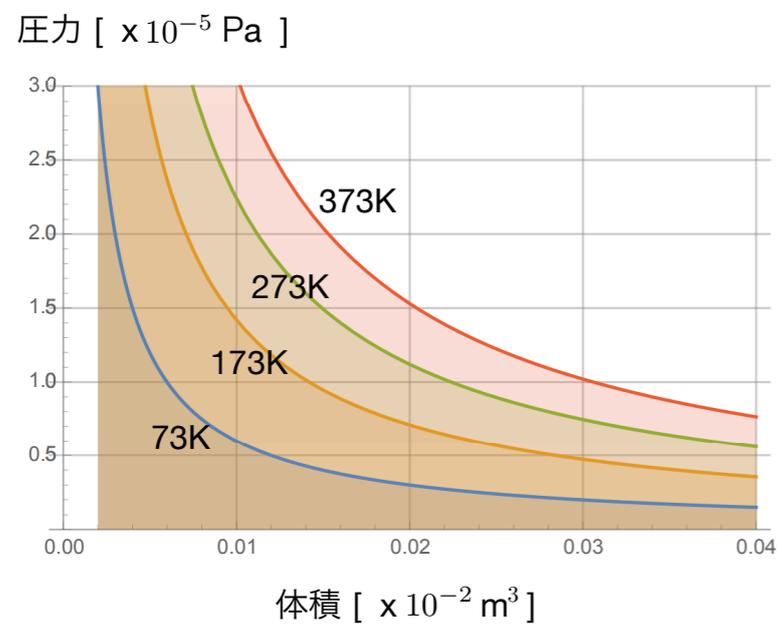
- **ボイル・シャルルの法則**

$$\frac{PV}{T} = \text{一定} = R \text{ (気体定数)}$$

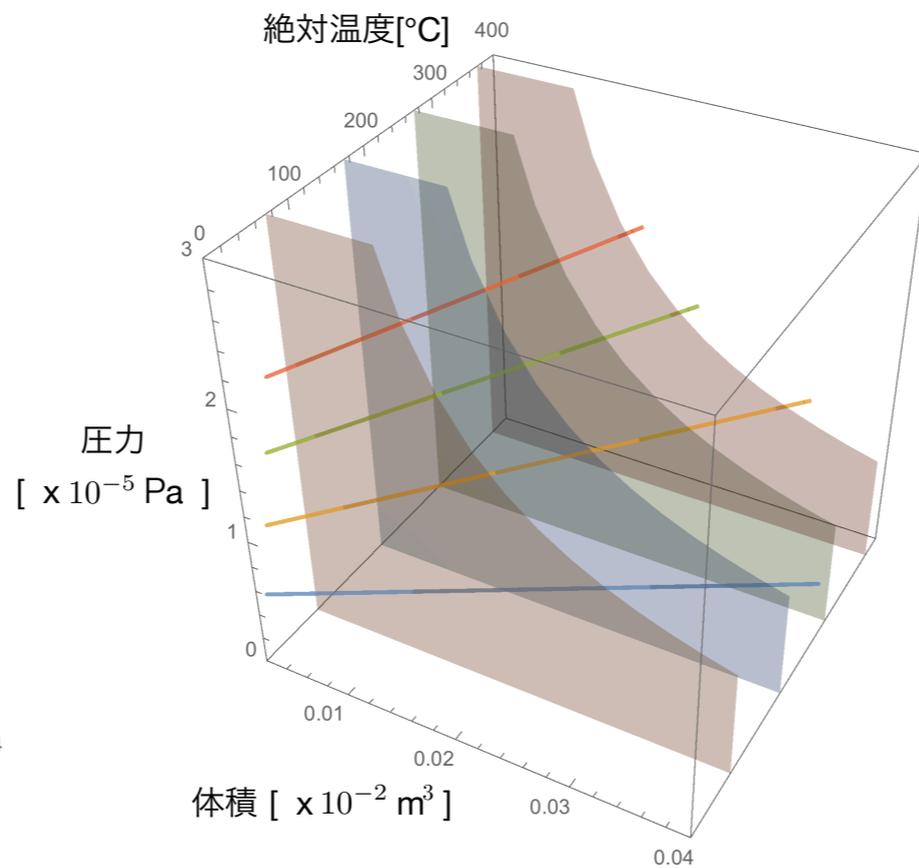
気体の量が n 倍になると、

- **理想気体の状態方程式** (equation of state for ideal gas)

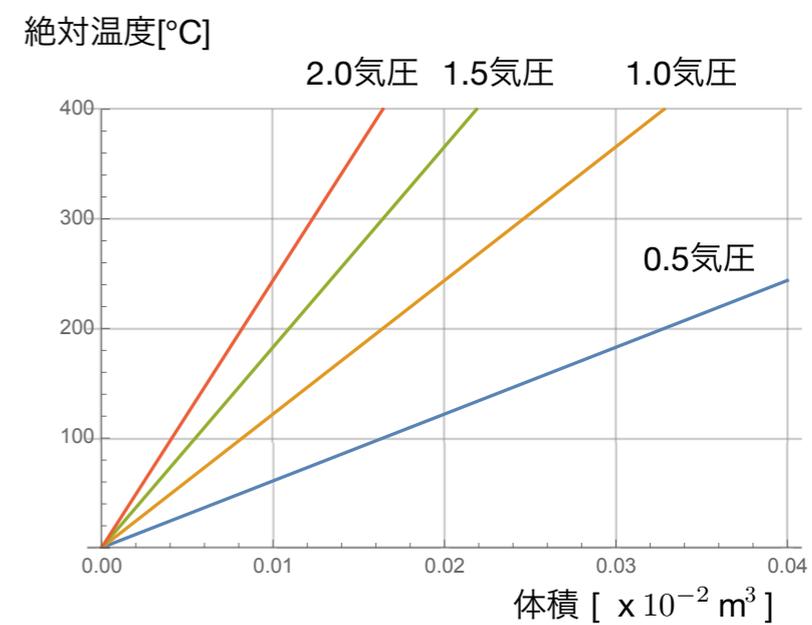
$$\frac{PV}{T} = nR \quad \text{すなわち} \quad PV = nRT$$



(a) PVグラフ



(b) PVTグラフ

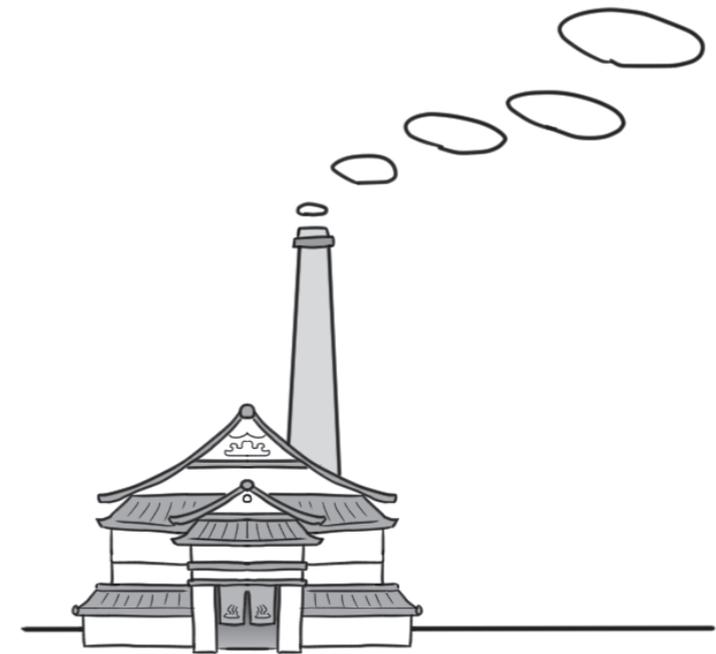
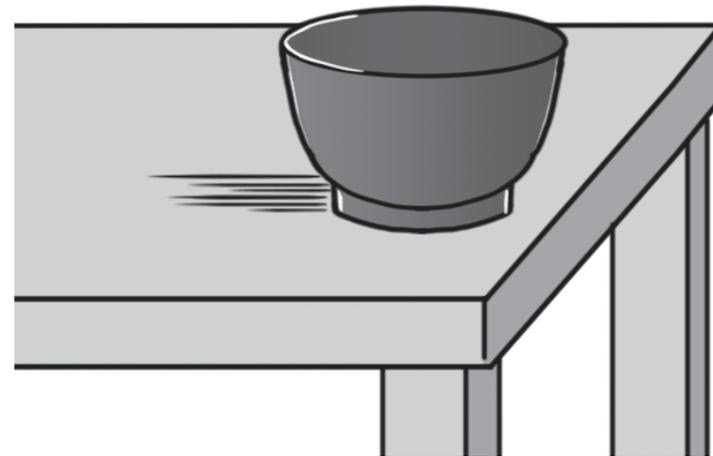


(c) TVグラフ

問 5.2 お吸い物のお椀の蓋が，冷めると開かなくなってしまう理由は何か。

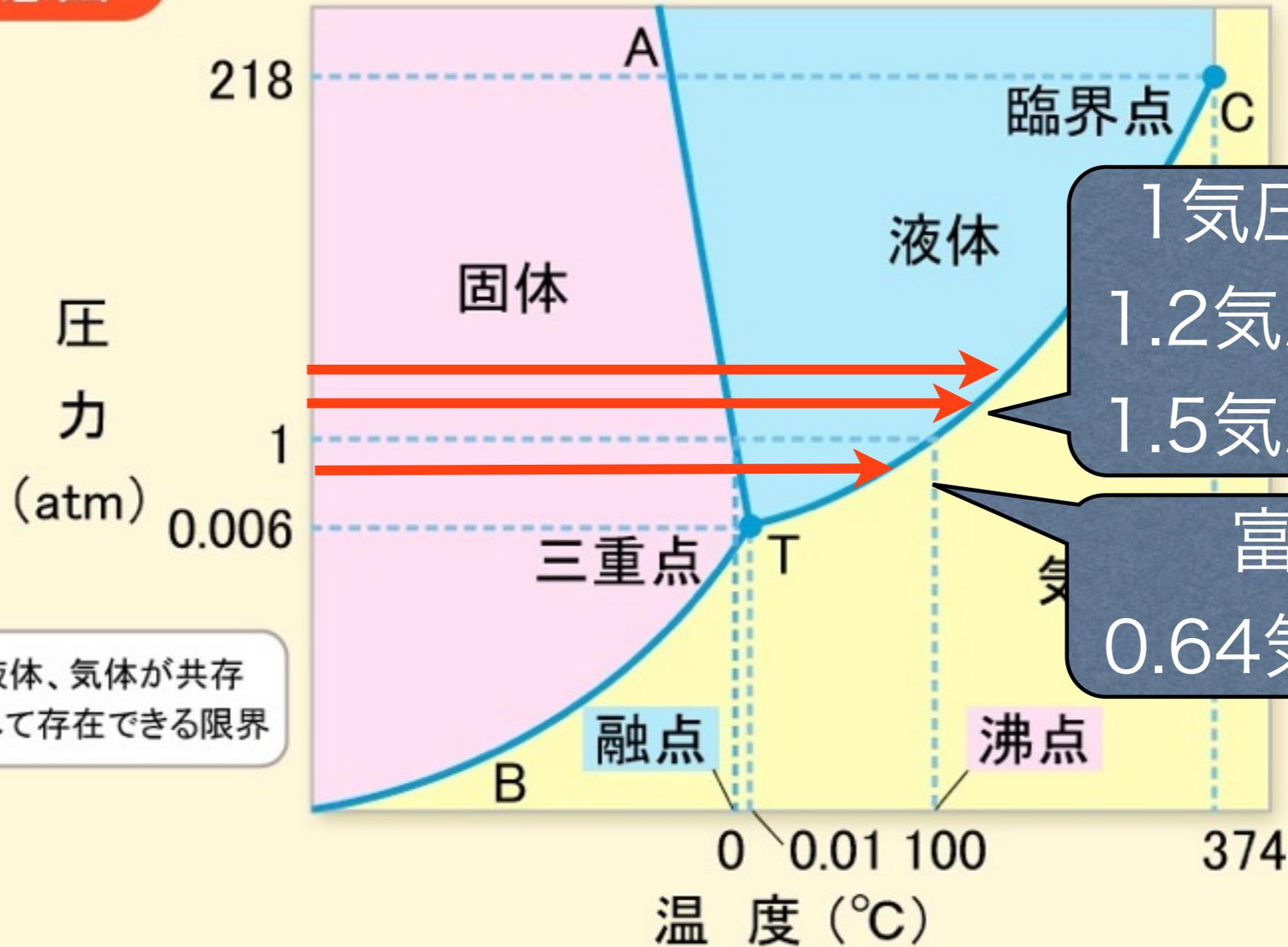
問 5.3 底が濡れたお椀にお汁をつぐと，お椀が勝手に動き出すことがある。この理由は何か。

問 5.4 暖炉の煙突や蒸気機関車から煙がポッポッポッと断続的に出る理由を説明せよ。



水の状態図

水の状態図



三重点: 固体、液体、気体が共存
 臨界点: 液体として存在できる限界

1気圧で100度
 1.2気圧で105度
 1.5気圧で115度
 富士山頂
 0.64気圧で88度

ご飯を炊く

おいしいご飯を炊く方法

はじめちょろちょろ

米に水を吸わせるために沸騰するまでは弱火に

なかパツパ

強火で一気に

赤子泣いてもふたとるな

炊きあがったら、火を落として十分に蒸らす

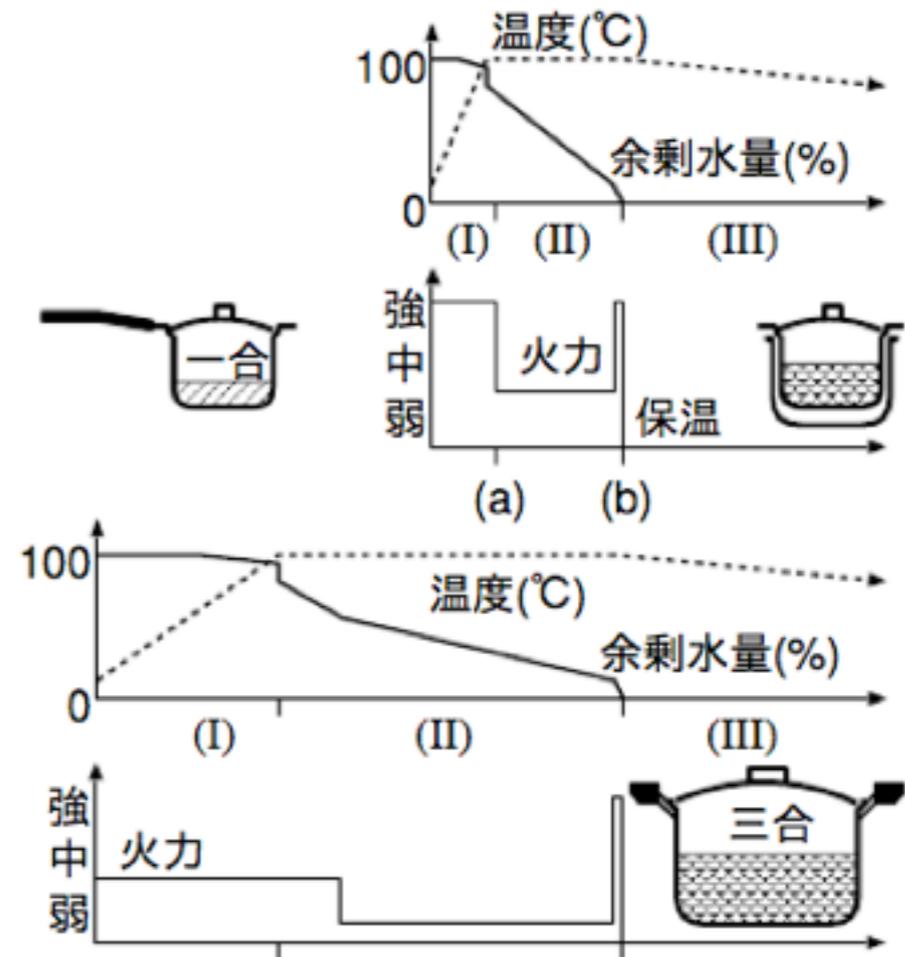


図1: 炊飯時の火力の調整手順例と、それから予想される温度変化と水量変化。



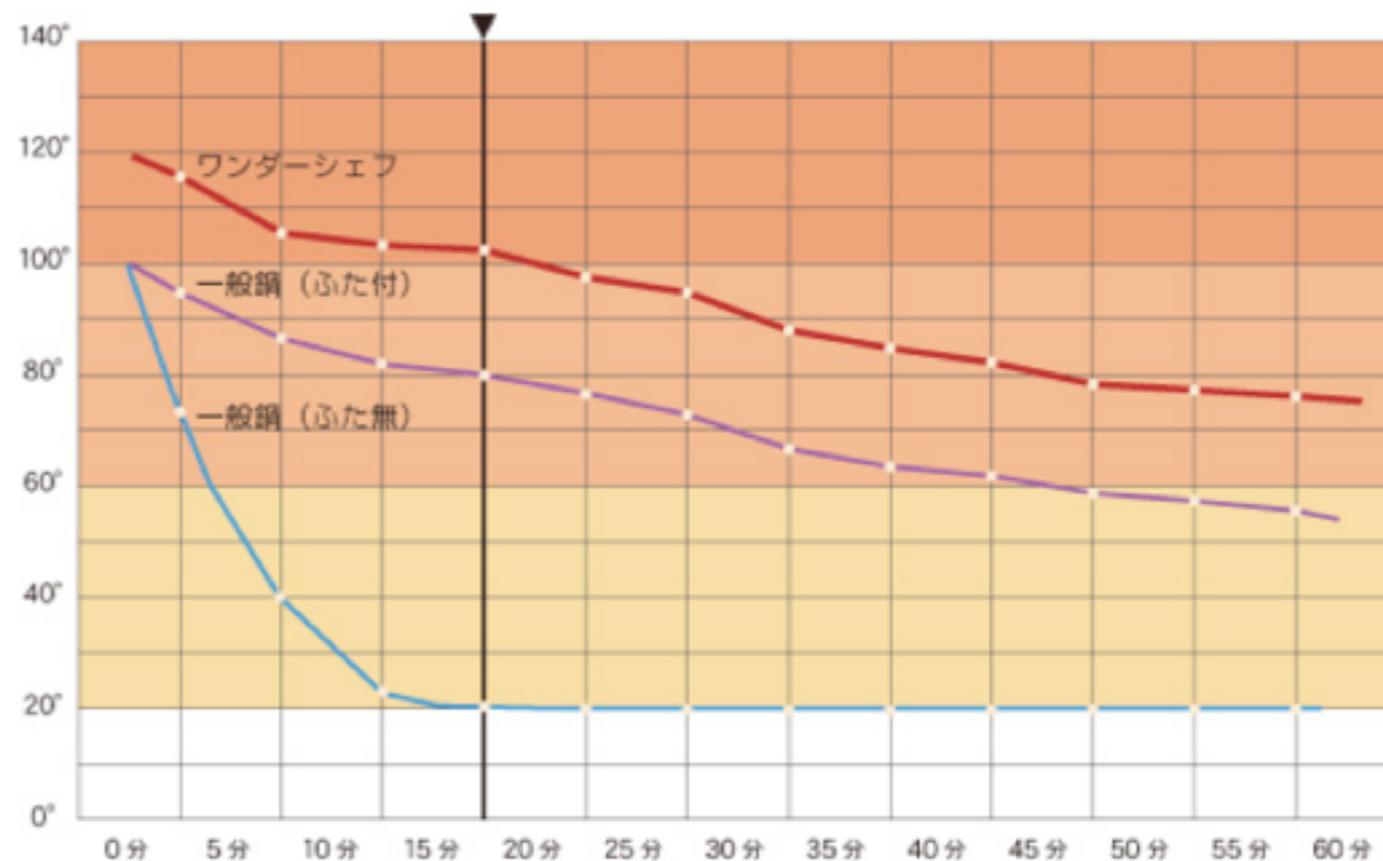
圧力鍋



	普通鍋	圧力鍋
黒豆	4時間	1時間45分
豚の角煮	70分	35分
ふろふき大根	30分	15分
茶碗蒸し	20分	7分

内部は、およそ2気圧で120°C、性能の良いものは2.45気圧で128°C程度になる。

この高温により食材を構成する分子の運動が加速され、早く熱分解して調理することが可能。調理時間は3分の1から4分の1に。



★加圧時間＋蒸らし時間

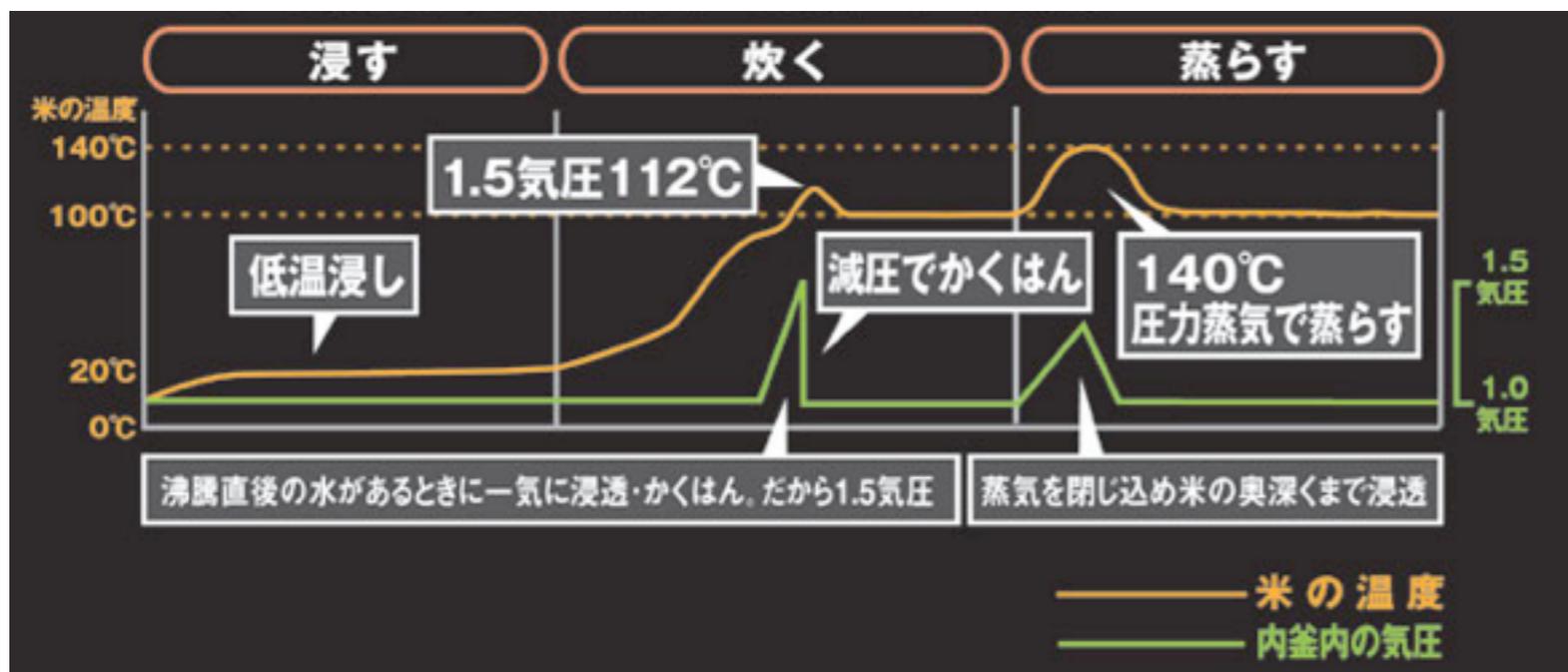
★加熱時間が少ないのでエコ

★フタをあけるとときには注意

圧力炊飯



- ★100度以上でアルファ化が促進
甘み成分が増す.
- ★圧力が加わりすぎると、ごはん
が柔らかくなりすぎる.
- ★攪拌することも大事



沸騰温度

- 1気圧で100度
- 1.2気圧で105度
- 1.5気圧で115度

<http://pc.watch.impress.co.jp/docs/2006/0711/kaden004.htm>

<http://kaden.watch.impress.co.jp/cda/word/2008/09/03/2856.html>

熱量の保存

■熱, 熱の移動

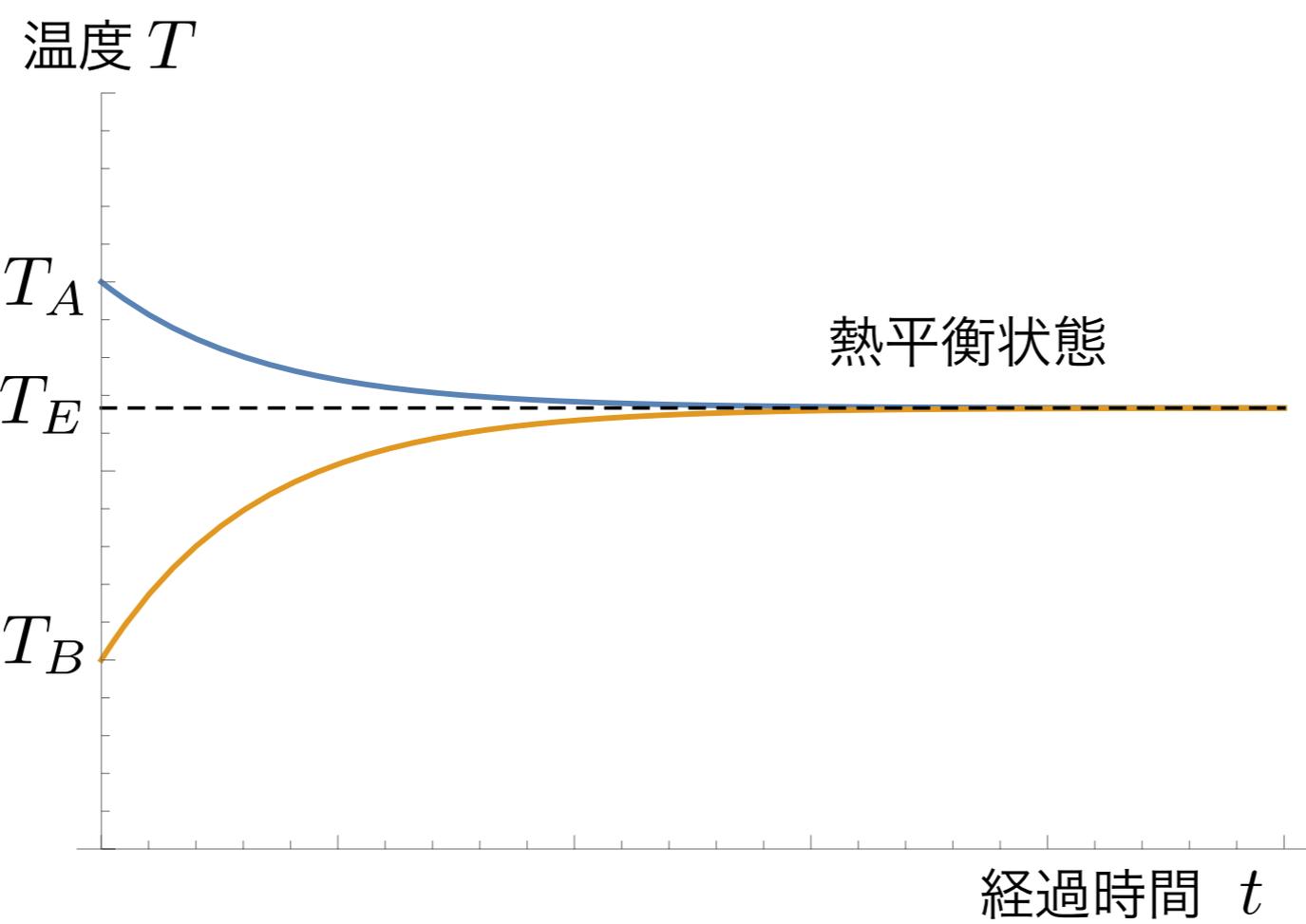
高温の物体と低温の物体が接すると, 熱エネルギーの移動が生じ, 高温の物体は熱量を失い, 低温の物体は熱量を得る. 熱の移動が生じたとき, 全体としては熱エネルギーは増減せず, 保存する.

法則 熱量の保存 (熱エネルギーの保存則)

高温の物体 A から低温の物体 B へ熱が移動したとき,

$$\text{物体 A が失った熱量} = \text{物体 B が得た熱量}$$

熱の移動は, 接した物体の温度が等しいところで落ち着く. この状態を熱平衡という.



比熱と熱容量

表 1: 比熱の比較

物質	比熱 [J/(g·K)]
鉛	0.13
銀	0.24
銅	0.38
鉄	0.45
アルミ	0.90
水	4.19

25°C における比較. cal の単位を使うなら水の比熱は 1 [cal/(g·K)].

■比熱と熱容量

物質ごとに温まり方は異なる.

定義 比熱・熱容量

- 1 g あたりの物質の温度を 1 K だけ上昇させるのに必要な熱量 [J] をその物質の比熱 c という. 比熱の単位は [J/(g·K)] になる.
- 物質が m [g] あるとき, 物質全体の温度を 1 K だけ上昇させるのに必要な熱量を熱容量 C という. 熱容量の単位は [J/K] になる.
- 温度を ΔT [K] 上昇させるときに必要な熱量 Q [J] は, したがって,

$$\begin{array}{l}
 Q = m c \Delta T = C \Delta T \\
 \text{熱量} = \text{質量} \times \text{比熱} \times \text{温度差} = \text{熱容量} \times \text{温度差}
 \end{array} \quad (4)$$

コラム 12 (鍋に適した金属は?)

銅：熱伝導に優れた鍋ならば、銅が一番だが、銅はすぐに変色してしまう。食品衛生法によって、銅の鍋の内側にはスズか銀でメッキをすることになっている。高温にしなくてもいい薄焼き卵などは、熱伝導率が良く全体に熱が伝わりやすい銅製のものがよいとされる。

鉄：強度があり、安価である。強い熱や過酷な使用に耐えられるため、中華料理や焼肉で使われる。ただし手入れをしないと錆びてしまう欠点がある。

アルミニウム：軽くて錆びにくく、安価である。熱伝導は銅に次ぐ良さがあり、調理道具の主力になっている。欠点は油なじみが悪いので焦げ付きやすいこと。磁性がないため電磁調理器での調理もできない。

火の通りが良いという観点からだと、底の薄いアルミ鍋になる。しかし、料理によっては食材に満遍なく火が通るもの、あるいは火から下ろしてもしばらくは料理の温度が保たれる方がよい場合がある。そうならば、底に厚みのあるアルミ鍋、あるいは鉄の鍋を選ぶ方がよい。



図 3: 鍋各種.

はかせ鍋



★一旦沸騰させたら、スカートをはかせることにより、90度前後の温度を維持。1時間後でも80度弱。

(通常のステンレス鍋では、沸騰して100度弱になって、火からおろすと、1時間後には約50度)。

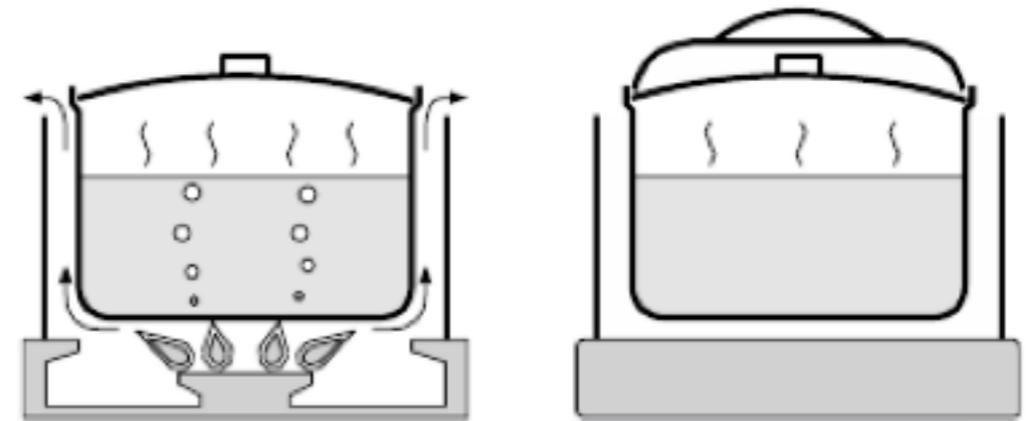


図2: はかせなべの断面図。鍋本体から伸びる両持ち取手(図では省略)は、スカートの上端を掴んで鍋本体と一体化している。左の加熱時には、スカートは熱効率を向上させる煙突の役割を担っている(市販品はIH加熱も可能)。加熱を終えたら平らなテーブルの上に置いて保温する(右)。スカートとテーブルに囲まれた空気層が、熱を逃しにくくしている。さらに外蓋を被せることで、鍋上部からの熱の放散も防いでいる。

轟真市「博士が愛した鍋」マテリアルインテグレーション, 23 (2010)91-92

ジュールの実験

ジュールは、おもりが下降することによる位置エネルギーの差が、水を攪拌する仕事に変わり、水の温度を上昇させることを実験で示した。これは、「温度の上昇が、エネルギーの増加と同じ」ことを意味していた。

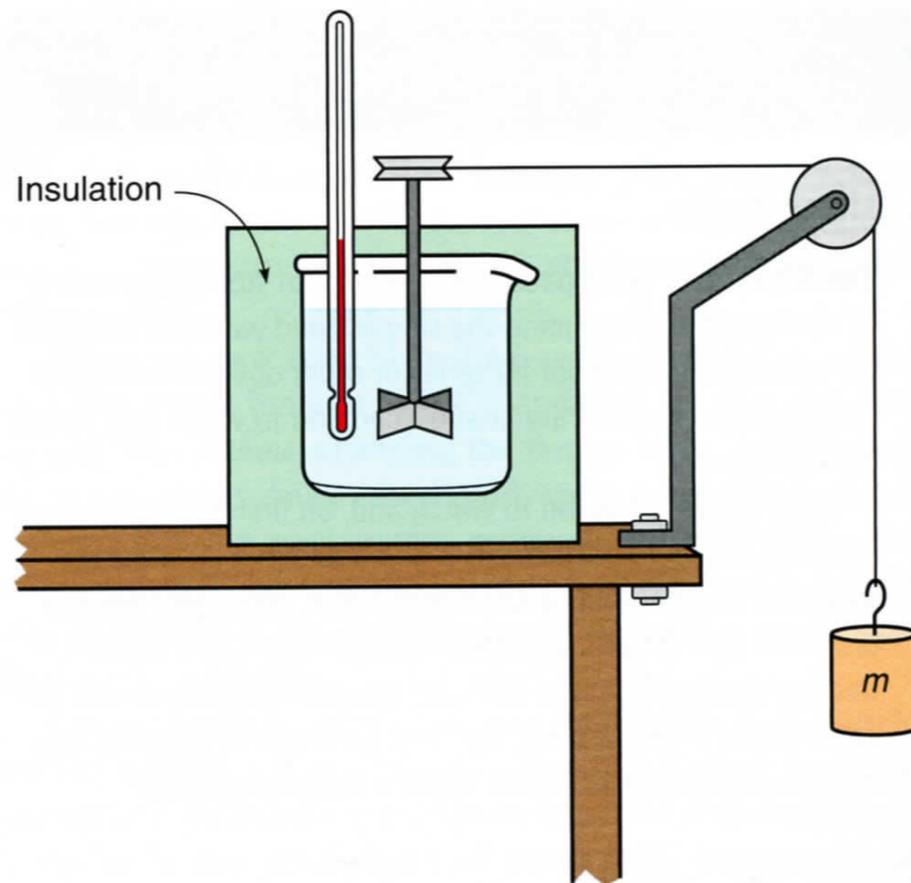
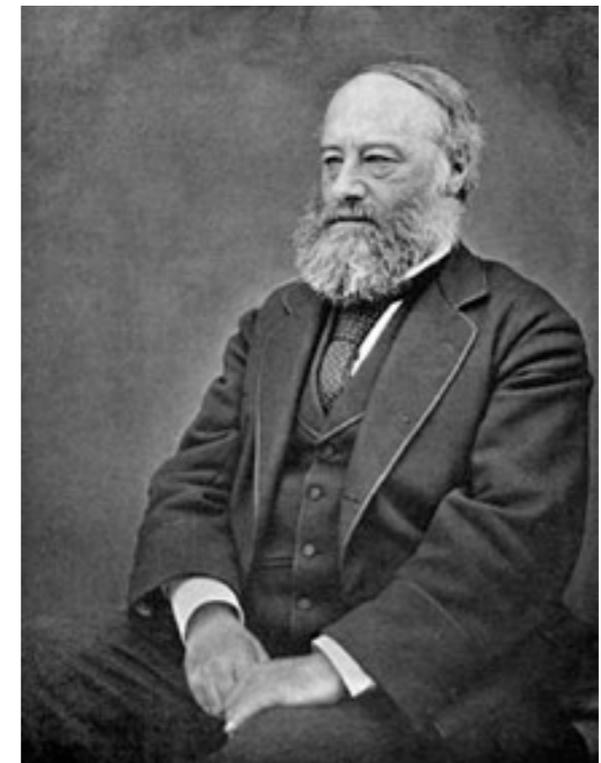


figure 10.12 A falling mass turns a paddle in an insulated beaker of water in this schematic representation of Joule's apparatus for measuring the temperature increase produced by doing mechanical work on a system.



James Prescott Joule
(1818-1889)

1845年、力学的エネルギーが熱に変換されることを示した。

5.2 熱力学の法則

エネルギーの単位 [J] (ジュール)

位置エネルギー mgh

$$mgh = 1[\text{kg}] \cdot 9.8[\text{m/s}^2] \cdot 1[\text{m}] = 9.8[\text{Nm}] = 9.8[\text{J}]$$

1 [g]の水の温度を1度上げるのに必要な熱量=1 [cal]

$$1 [\text{cal}] = 4.19 [\text{J}]$$

熱の仕事当量

基礎代謝エネルギー

(人間が1日あたり安静にしているも使うエネルギー)

	18~29歳	30~49歳	50歳以上
男性	24.0kcal	22.3kcal	21.5kcal
女性	22.1kcal	21.7kcal	20.7kcal

日本人の食事摂取基準2010年版より抜粋

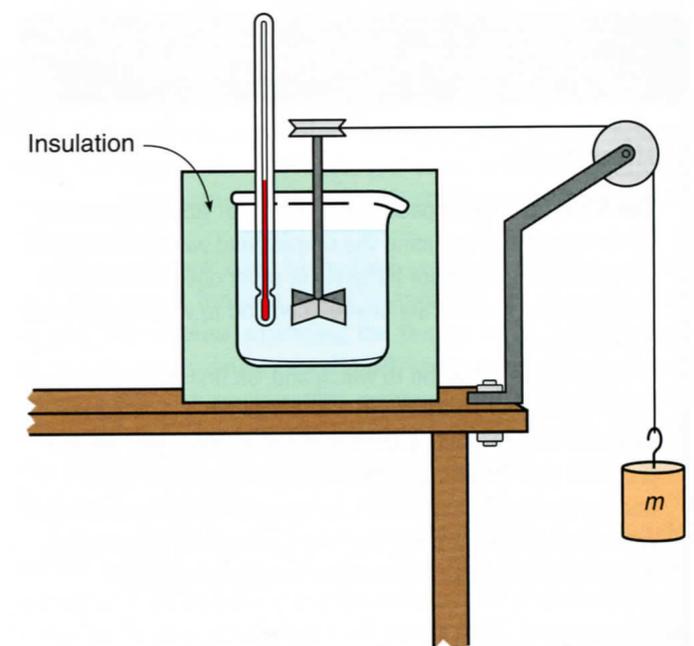


figure 10.12 A falling mass turns a paddle in an insulated beaker of water in this schematic representation of Joule's apparatus for measuring the temperature increase produced by doing mechanical work on a system.

☆ ジュールの実験で水をかきまぜると温度が上がるって言うんだけど、
あつあつのスープをスプーンでまぜると冷めてくる気がするのよ
なぜですか？ あれは逆効果ですか？

振り回してお湯をつくろう 実験

携帯用魔法瓶に水を少量だけ入れて数分間激しく振ると、温度が上がることを実験してみよう（体温が水温を上げないように、魔法瓶で行う）。力学的な運動を熱に変えるのは、火おこしも同じ。木くずを連続的にこすり合わせることで生じるまさつ熱を利用している。釘を金づちで打つと熱くなるのも同じ原理。

●仕事による熱の発生



回転する木の棒の先端と、下の木の間摩擦により、木は削れ、摩擦熱が発生する。こげて黒くなった木屑には種火がとる。

熱力学第1法則

= 熱まで含めたエネルギー保存則

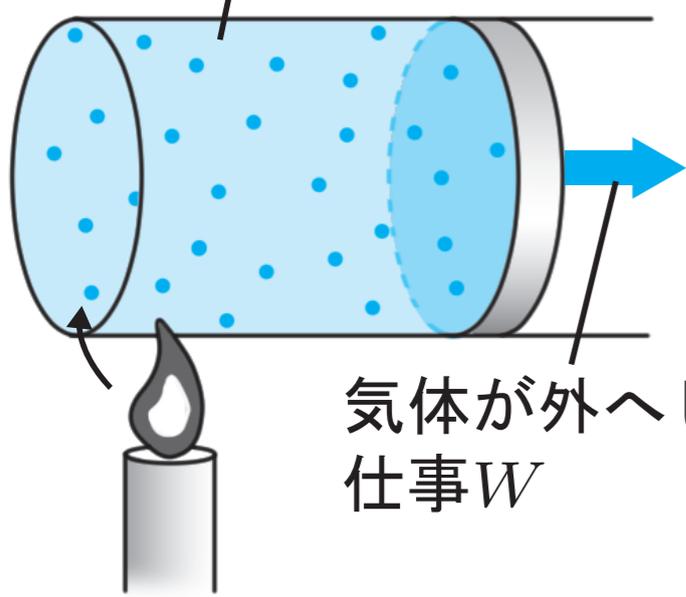
■ 熱力学の第1法則

熱エネルギーまでを含んだエネルギー保存則を、熱力学の第1法則という。

法則 熱力学の第1法則

熱はエネルギーの一形態である。力学的エネルギーなど、他のエネルギーと交換可能で、エネルギーの総和は一定である。

気体の内部エネルギー増加 ΔU



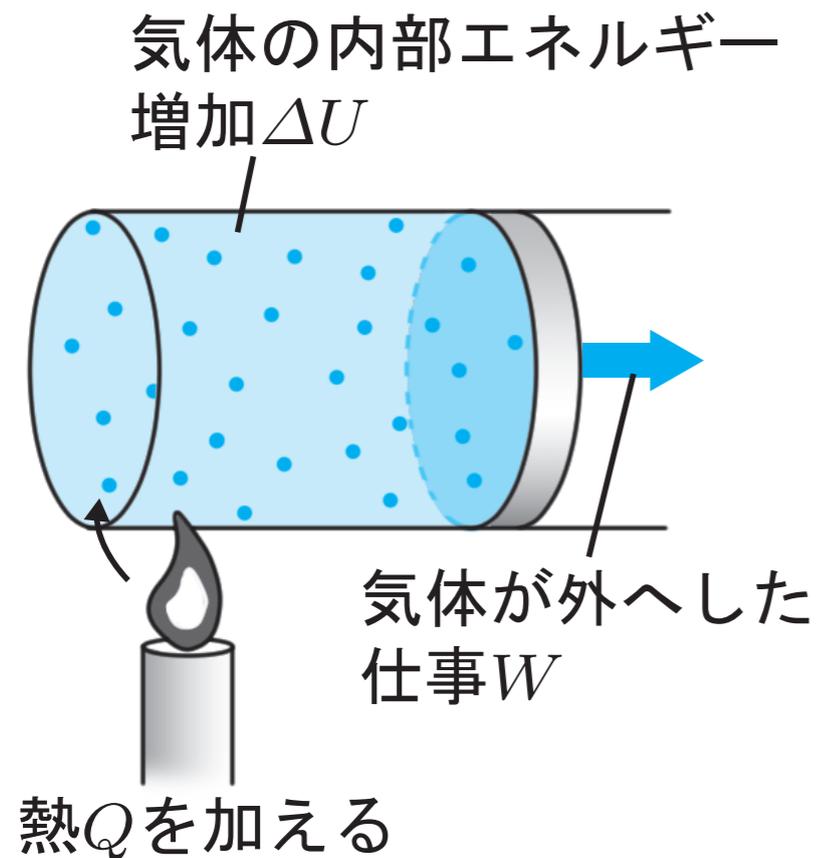
気体が外へした
仕事 W

熱 Q を加える

Topic 内部エネルギーの増加・減少

自転車のタイヤに空気を入れると、空気入れが熱くなる。これは、閉じ込められた気体が、外部から仕事をされて、気体の内部エネルギーを増加させたからである。

スプレー缶を使うと缶の温度が下がってくる。これは缶内の気体が放出することで、外部に仕事をした結果である。

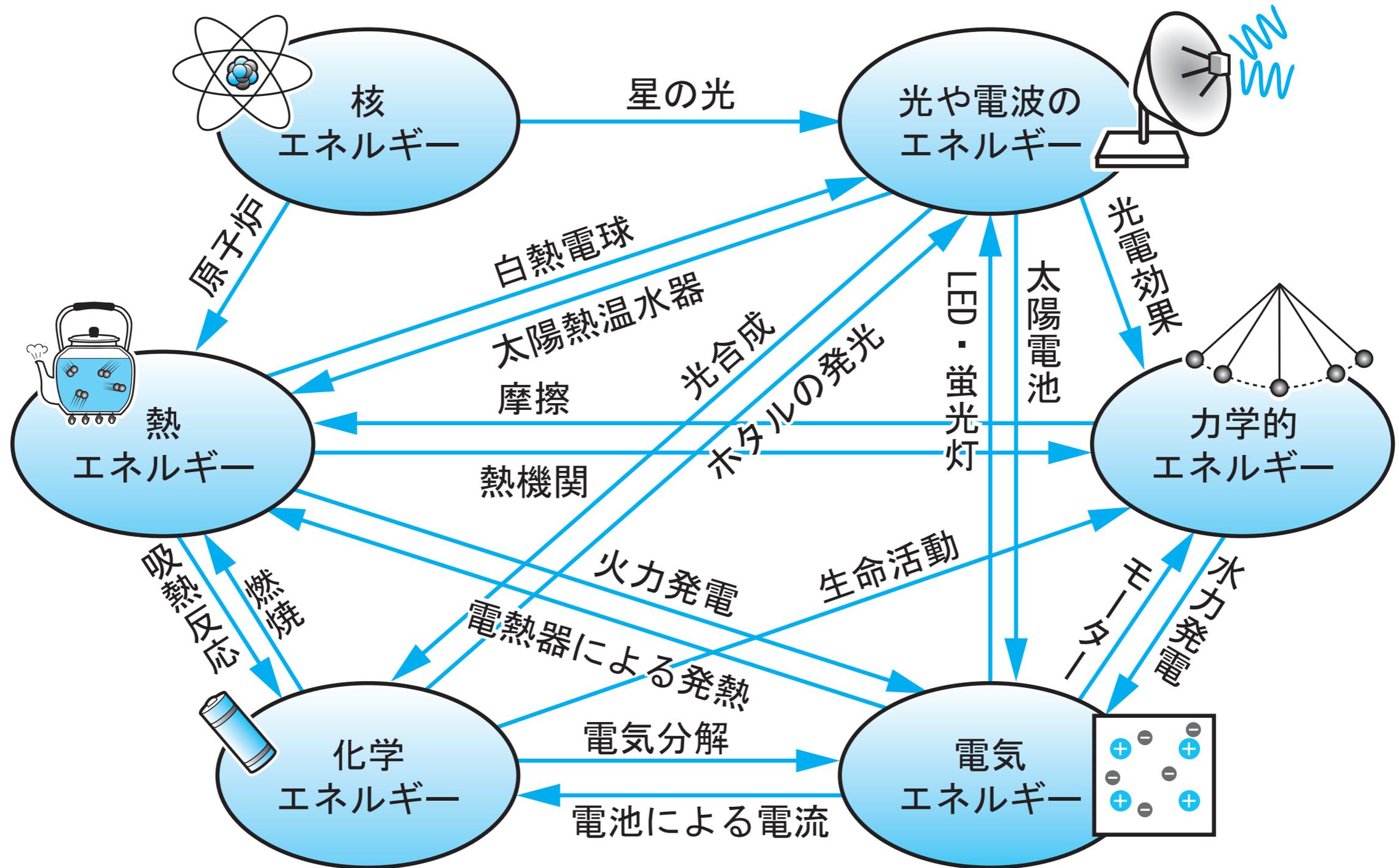


タイヤに空気を入れると
空気入れが熱くなる
(気体にした仕事＝正)



スプレーを使うと
缶が冷たくなる
(気体にした仕事＝負)

エネルギーは形態を変える



問 5.5 高さ 100 m の滝の水が落下し，位置エネルギーがすべて熱エネルギーに変わるとすると，温度は何度上昇するだろうか．重力加速度 g を $g = 9.8\text{m/s}^2$ とする．

水 1 kg に対して，位置エネルギーは，

$$Q = mgh = 1[\text{kg}] \times 9.8[\text{m/s}^2] \times 100[\text{m}] = 980[\text{J}]$$

単位を [J] から [cal] に直すと， $1[\text{cal}] = 4.2[\text{J}]$ より

$$980[\text{J}]/4.2 = 233.33[\text{cal}]$$

1 cal は，水 1g を 1°C 上昇させるエネルギー
計算したのは水 1 kg 分なので， 0.23°C 上昇．

蒸気機関の発明(1) ニューコメン

- ニューコメンは、1712年に鉱山の排水用として蒸気機関を製作。蒸気に冷水を吹き込んで冷やし、蒸気が水に戻るときに生じる負圧（真空減圧）でピストンを吸引するもので、大気圧を利用する方法だった。

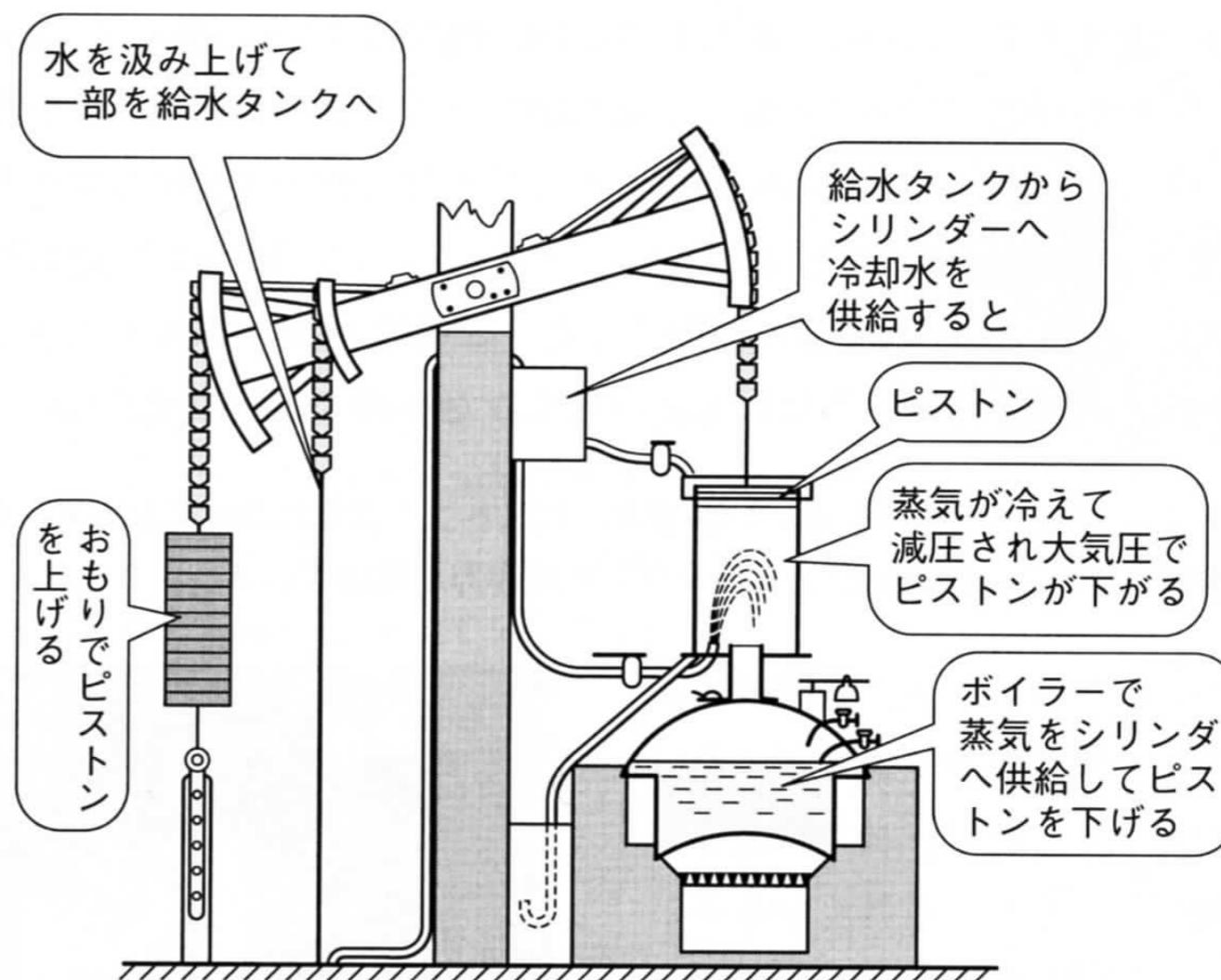
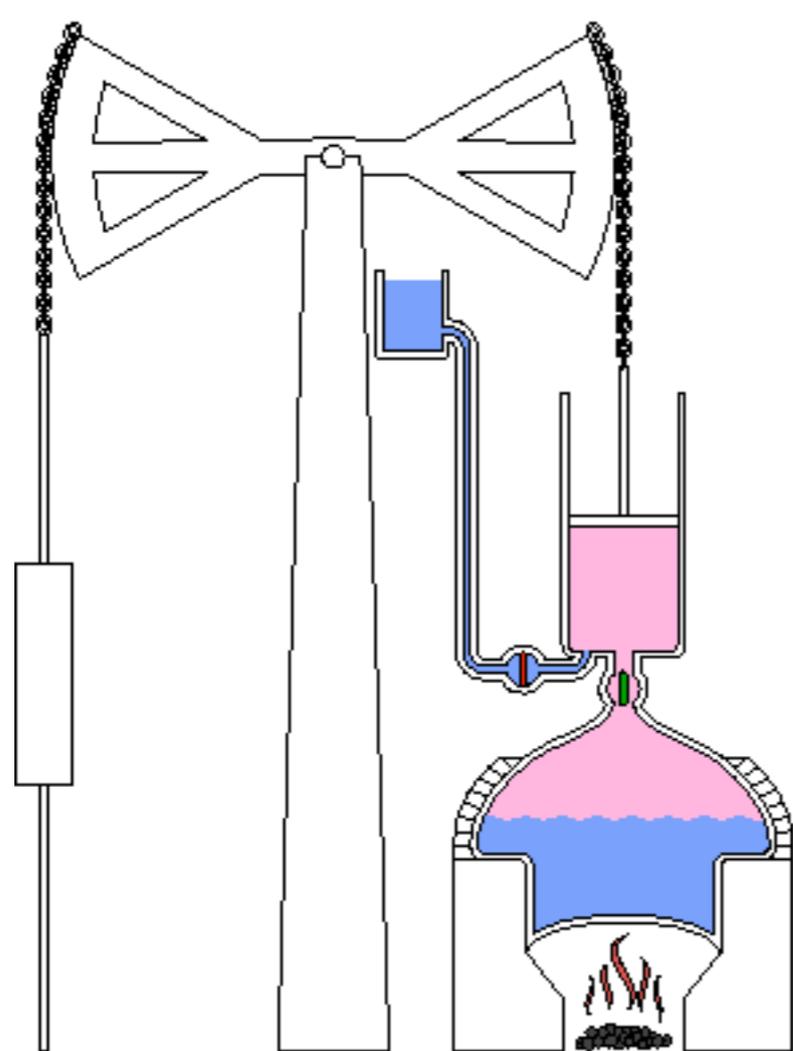


図 5-1 ニューコメンの大気圧機関の仕組み

蒸気機関の発明(2) ワット

- ワットは、1769年に新方式の蒸気機関を開発。復水器で蒸気を冷やす方法でシリンダーが高温に保たれることとなり効率が増した。往復運動から回転運動への変換などの改良も行った。

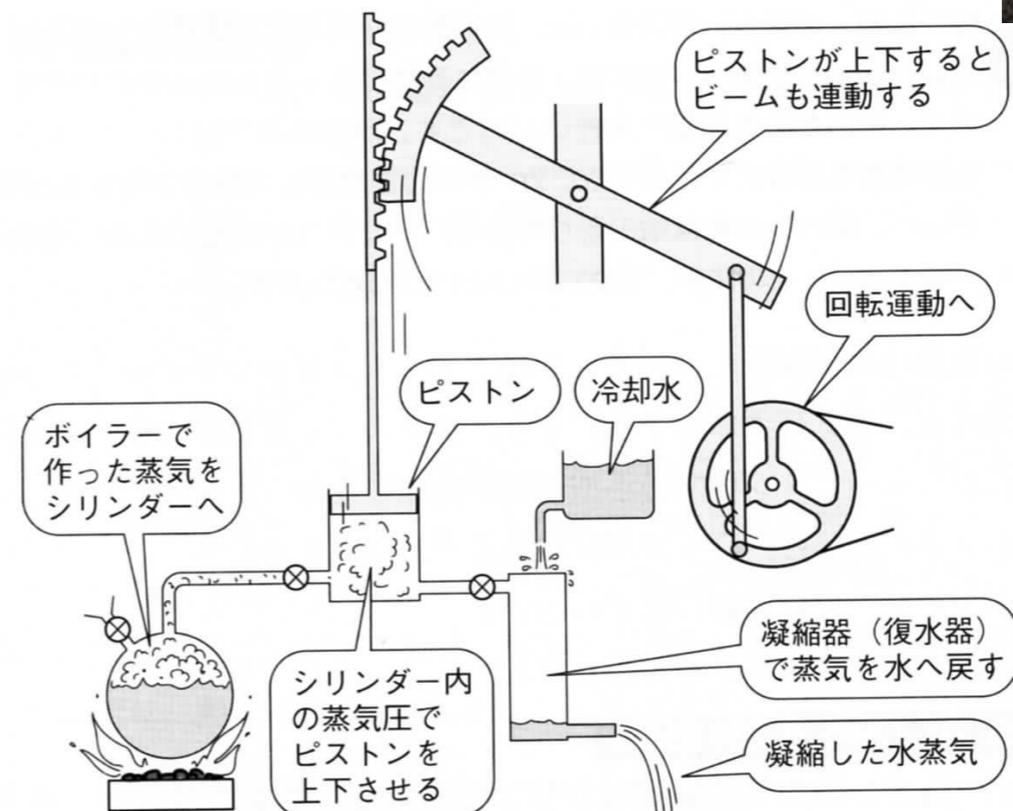
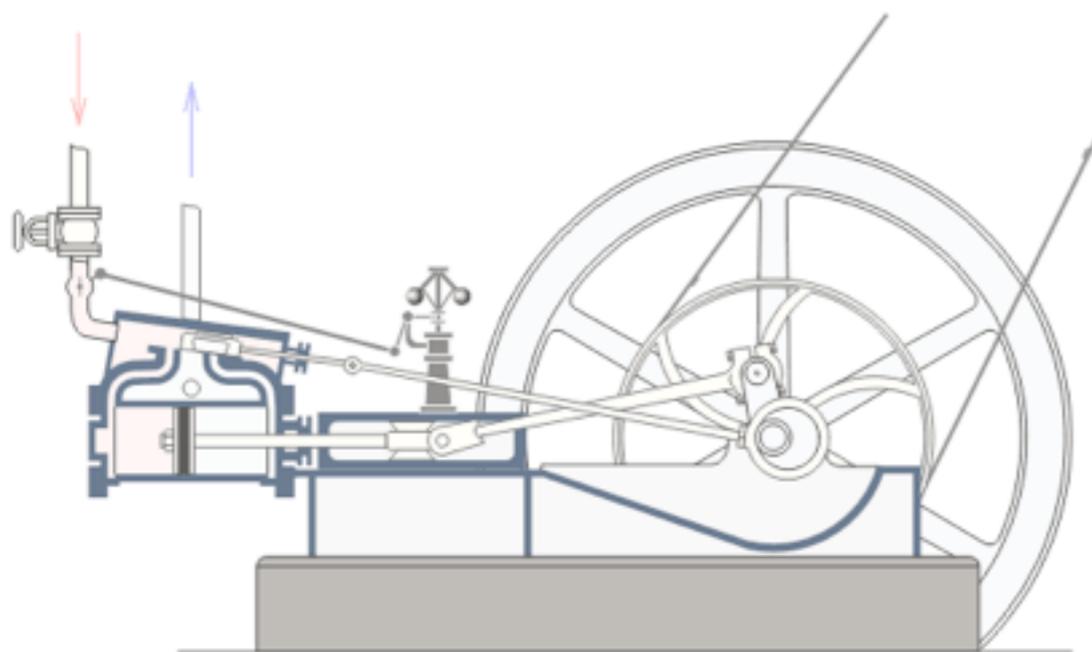
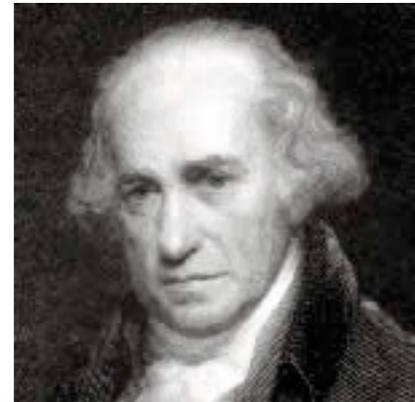


図5-2 ワットの蒸気機関の仕組み

熱サイクル エンジン熱サイクル

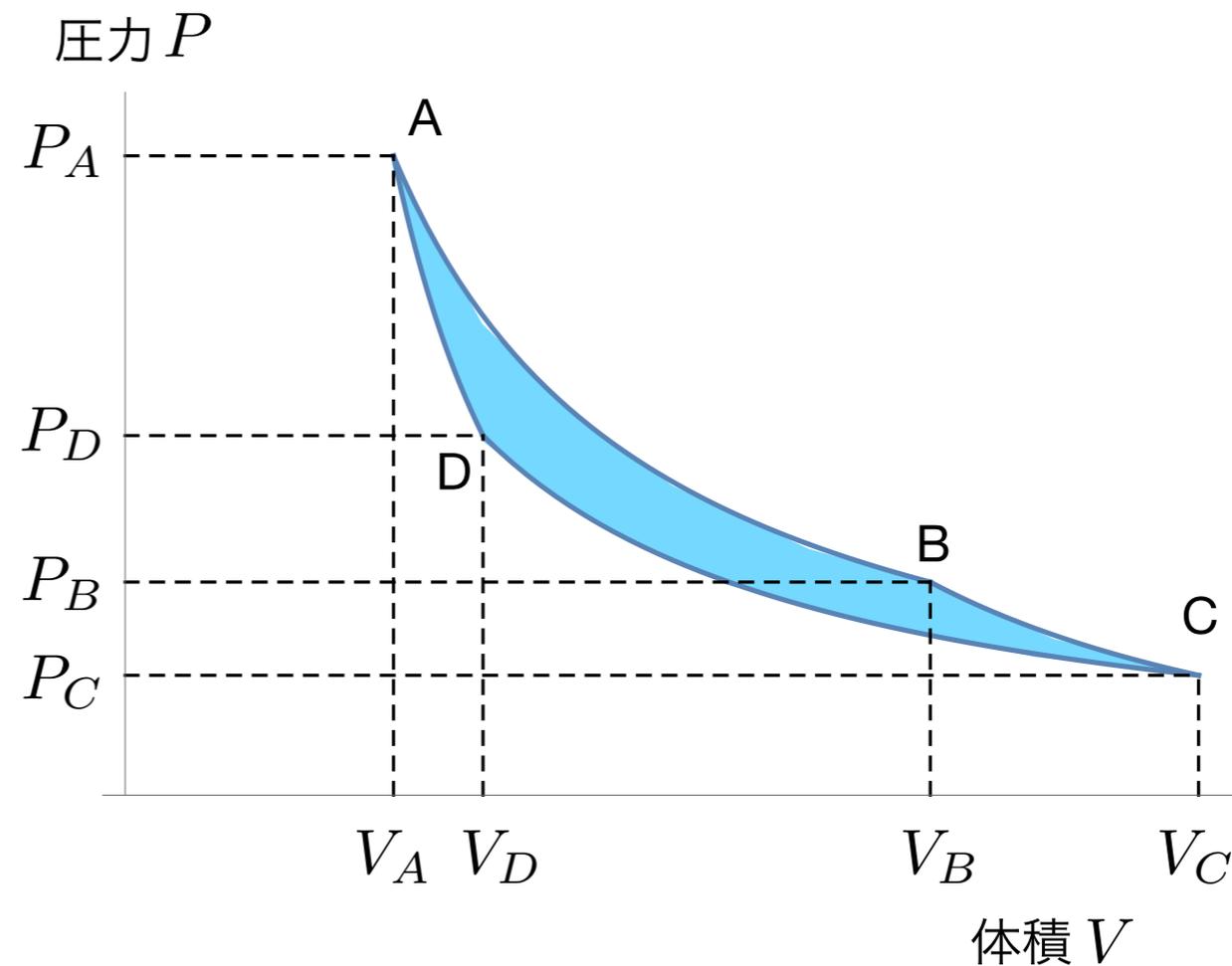
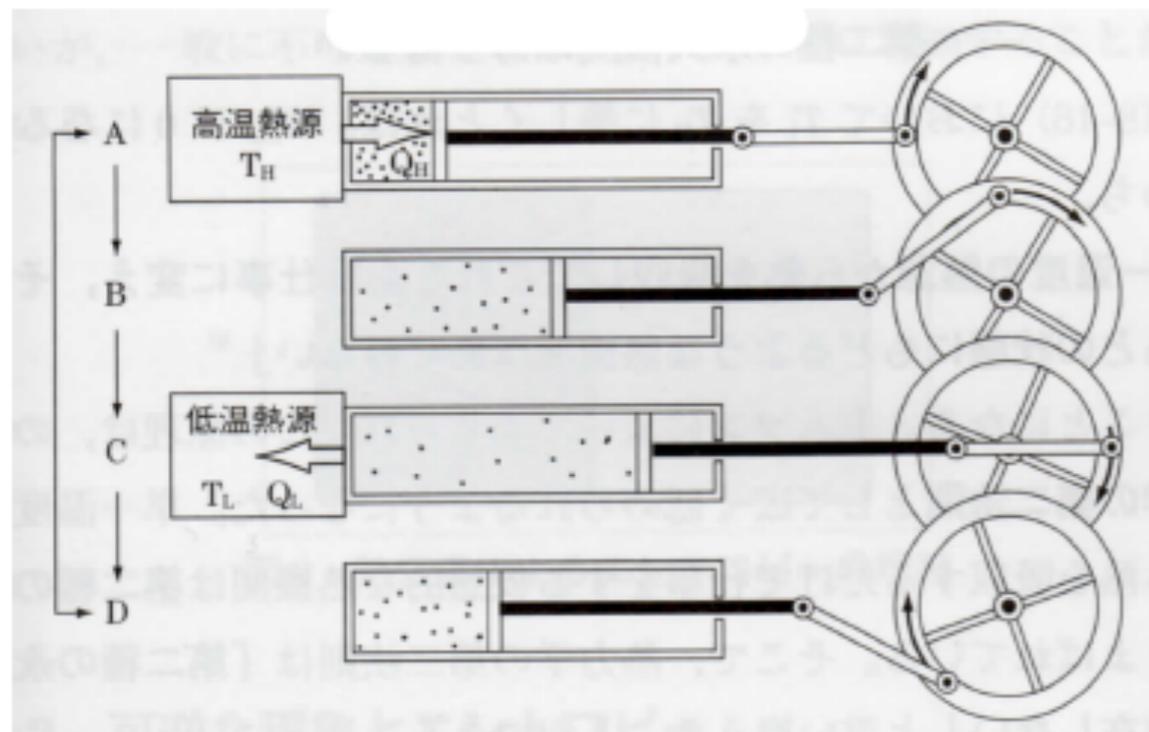
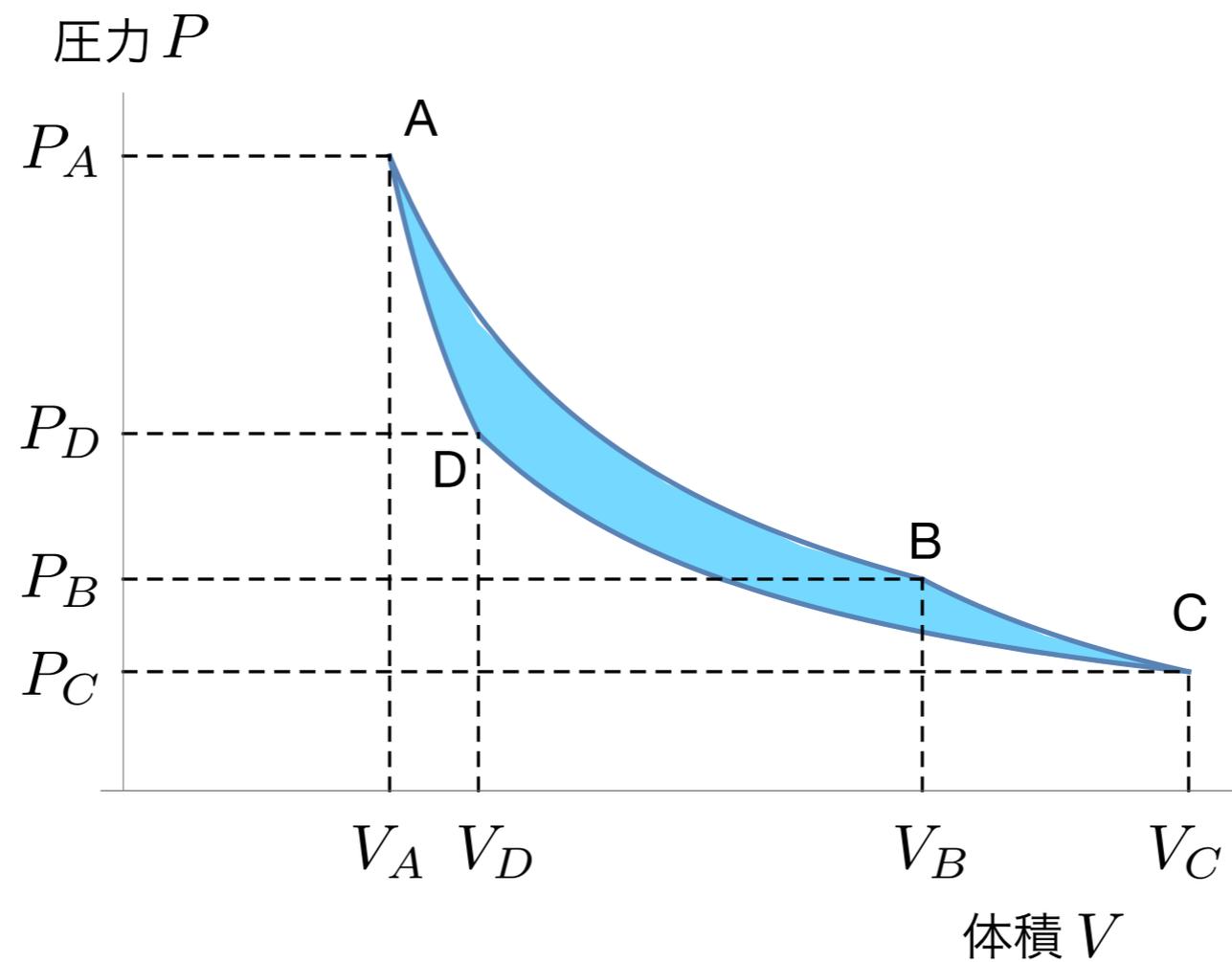


図 15: 〔左〕 シリンダー内の気体がピストンを押して仕事をする熱機関. 〔右〕 圧力 P -体積 V グラフ

PVグラフを右回りか、左回りか



熱効率

■熱効率

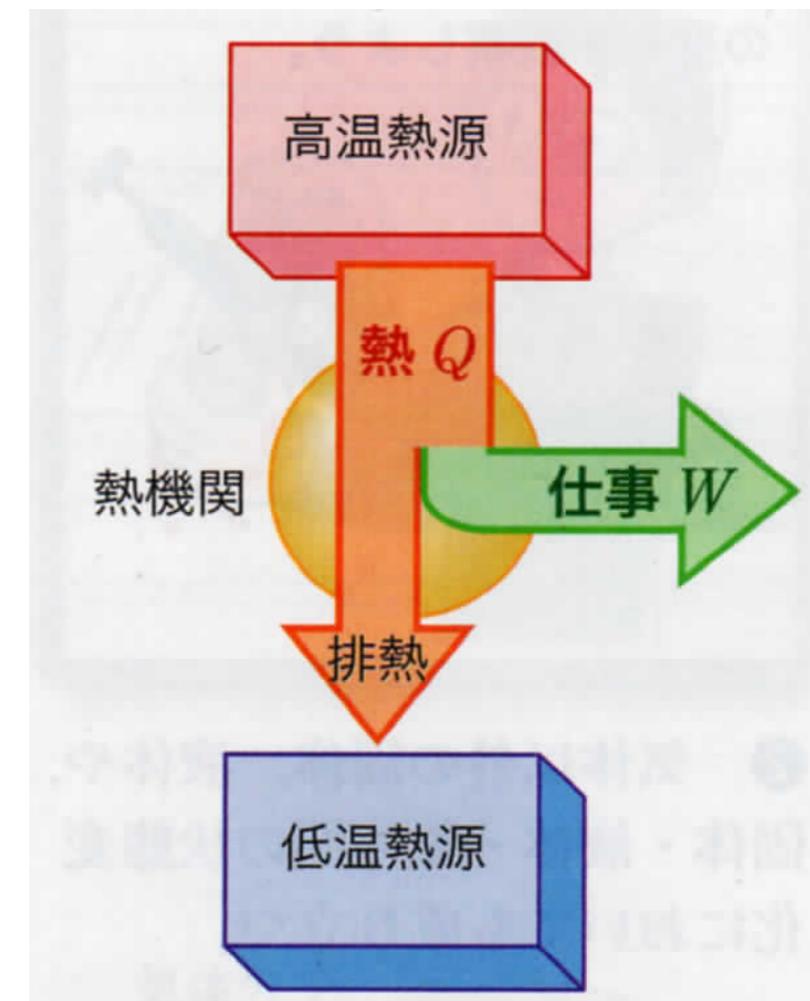
熱機関では、熱エネルギー Q_H を加えて、仕事 W をさせるのが目的であるが、前ページで見たように、必ず何割かの熱エネルギー Q_L を捨てて、もとの状態にもどす必要がある。熱機関の1サイクルで、加えた熱に対してどれだけ正味の仕事できたか、の割合を熱効率という。

定義 熱効率

高温熱源から受け取った熱エネルギー Q_H のうち、仕事 W に使われた変換効率を熱効率 η といい、次式で定義する。

$$\text{熱効率 } \eta = \frac{W}{Q_H} \quad \left(= \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \right) \quad (10)$$

右辺で書き直した部分の Q_L は、低温熱源に放出した熱エネルギーである。



PVグラフを右回りか、左回りか

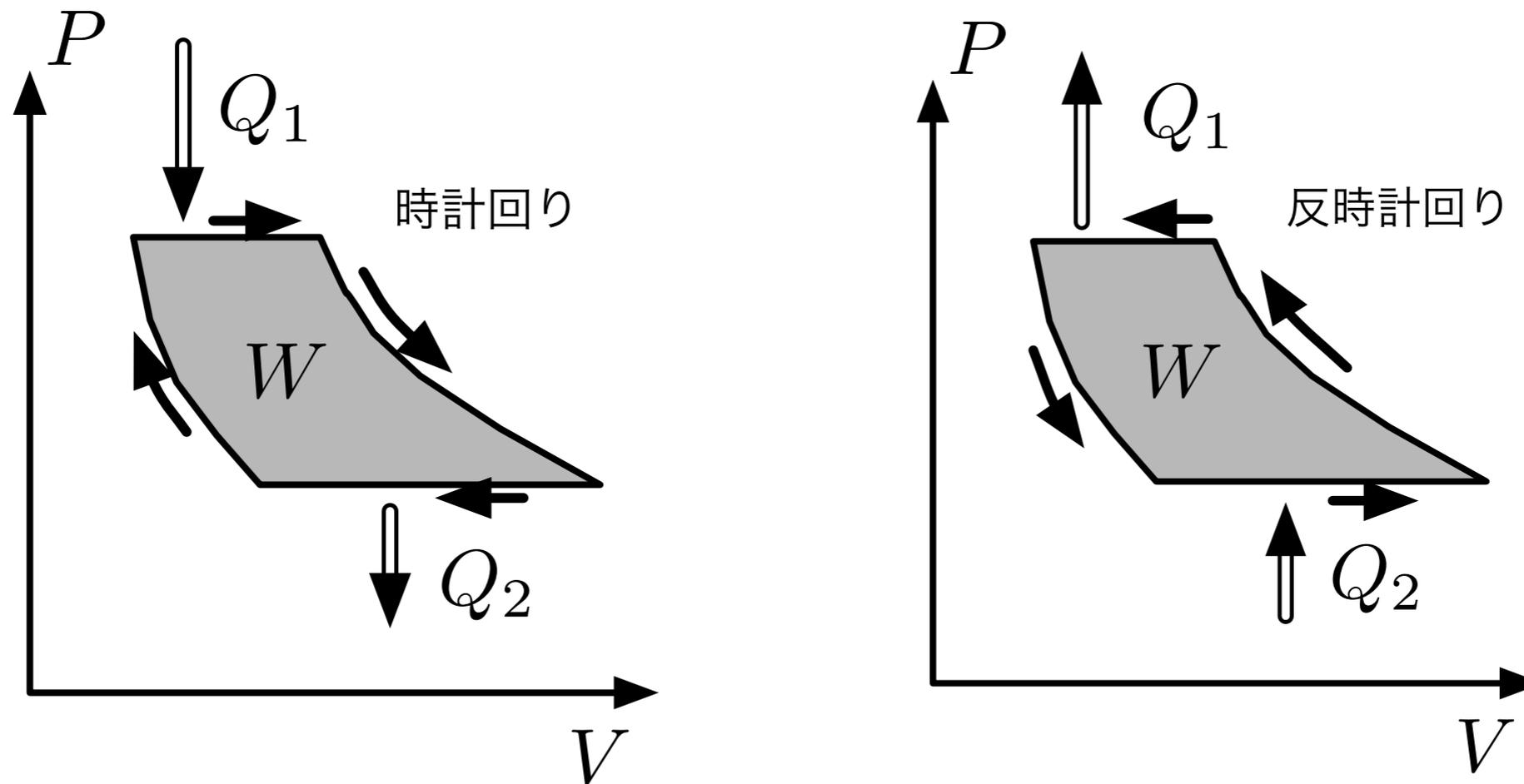


図 4.13 $P - V$ グラフ上を時計回りに 1 周する熱機関は、 Q_1 の熱を吸収し、 Q_2 の熱を放出して、正味 W ($P - V$ グラフで囲まれる部分の面積) の仕事を外に対して行う。反時計回りする熱機関は外に、受けたものより多くの熱を放出する冷却装置になる。

I. 冷蔵庫でものが冷える理由

I

II

III

1. 冷蔵庫の仕組み

2. 圧力と状態変化



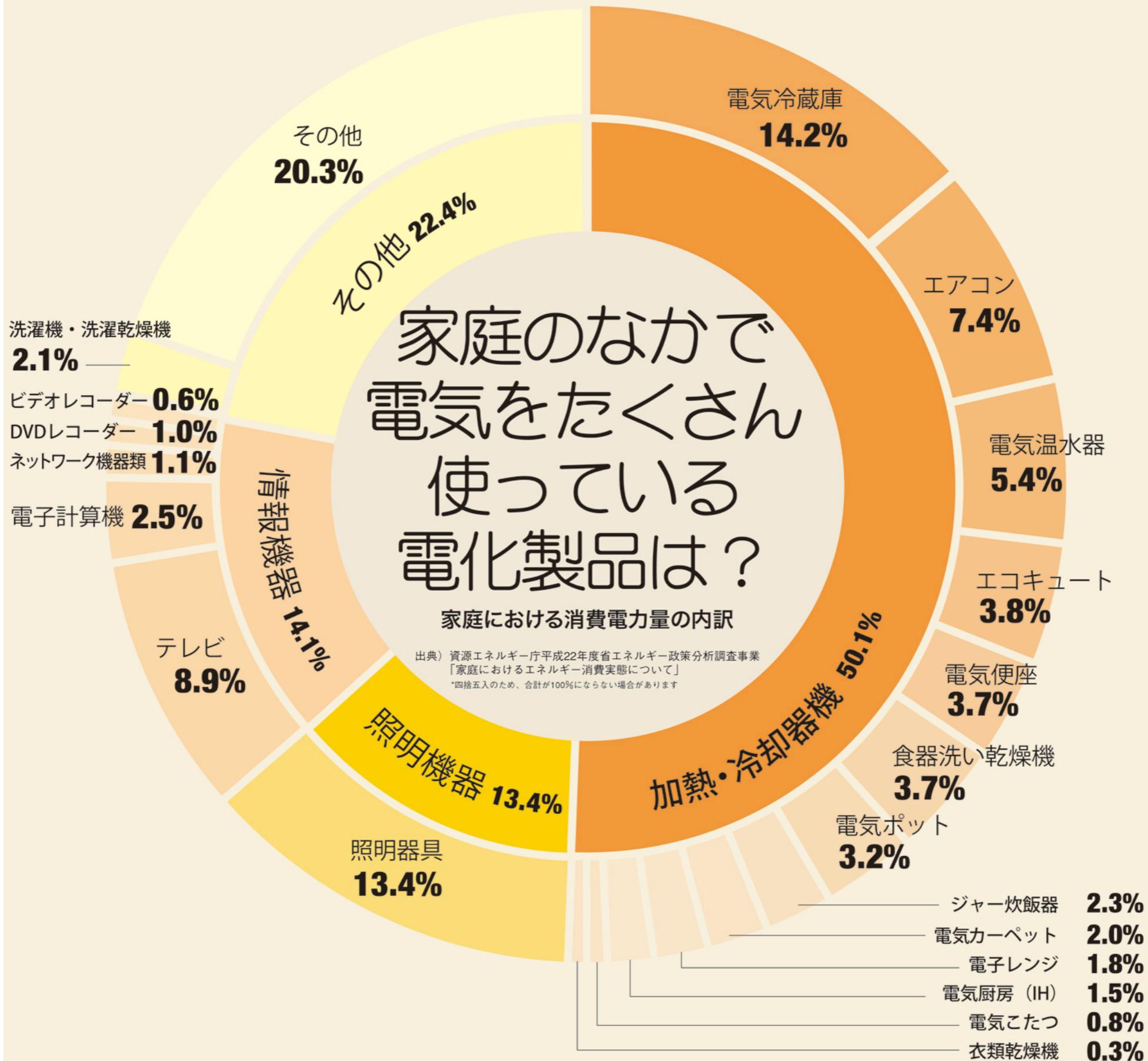
冷蔵庫の仕組み



家庭のなかで 電気をたくさん 使っている 電化製品は？

家庭における消費電力量の内訳

出典) 資源エネルギー庁平成22年度省エネルギー政策分析調査事業
「家庭におけるエネルギー消費実態について」
*四捨五入のため、合計が100%にならない場合があります

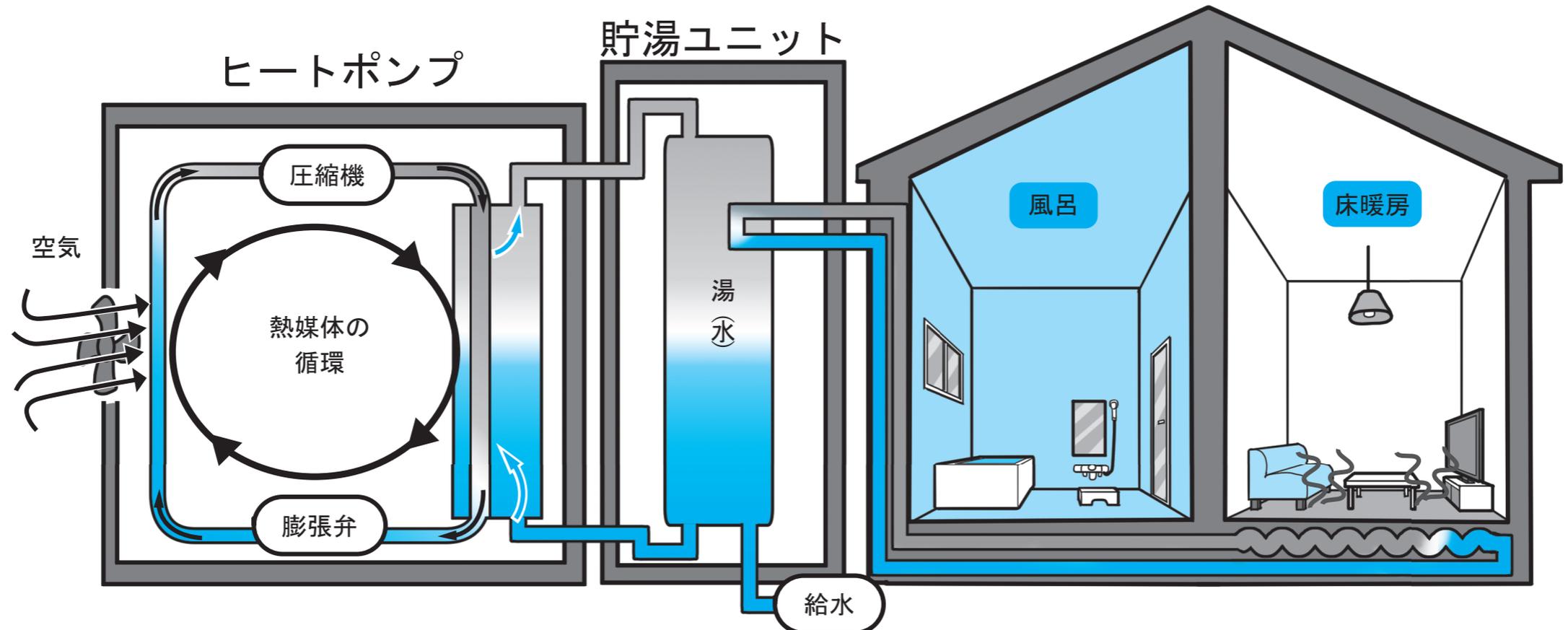


コジェネレーション

廃熱を利用して，発電や給湯を行う
大気の熱を利用して冷媒の加熱の一部を行う



- エコウィル (ガス)
- エコキュート (電気)
- エコジョーズ (ガス)
- エネファーム (ガス)



持続可能エネルギー キーワード

省エネルギー

ヒートポンプ

= 大気の熱を利用して
エネルギー効率を高める

コージェネレーション(cogeneration)

地熱

= combined heat and power
= 排熱を利用して
エネルギー効率を高める

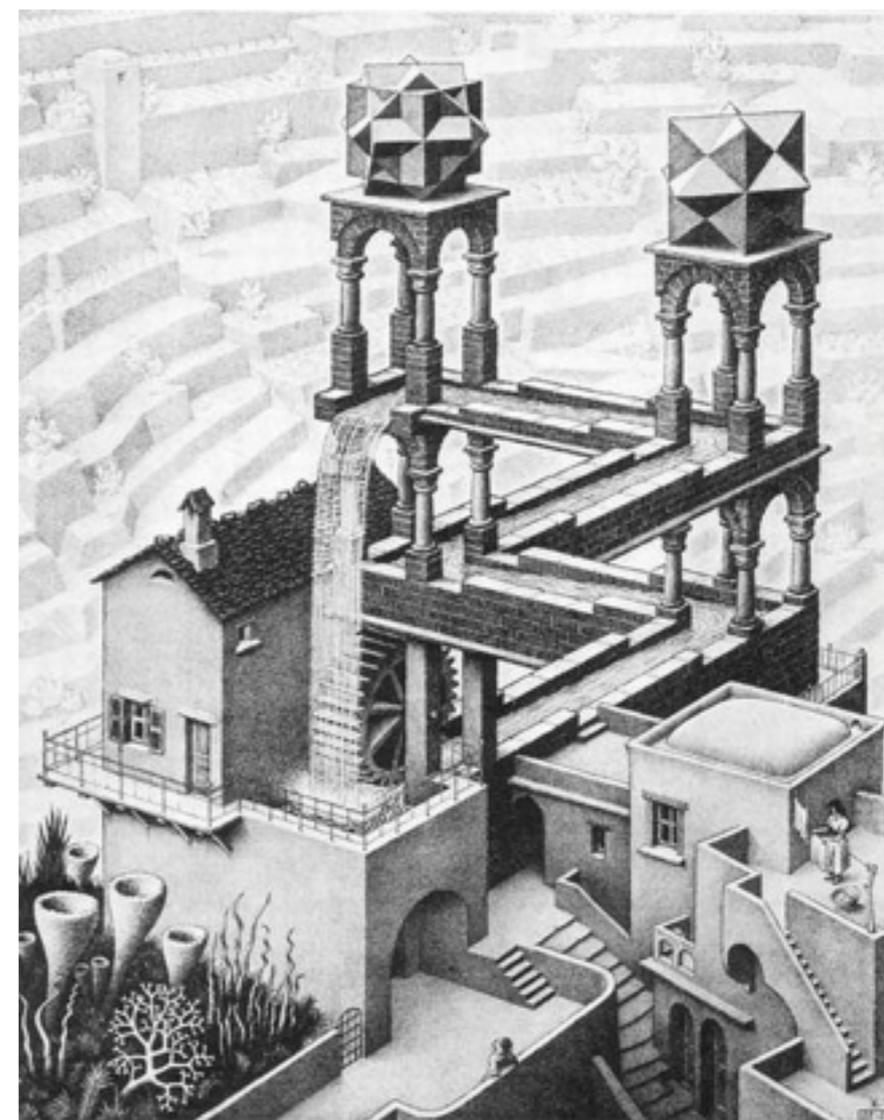
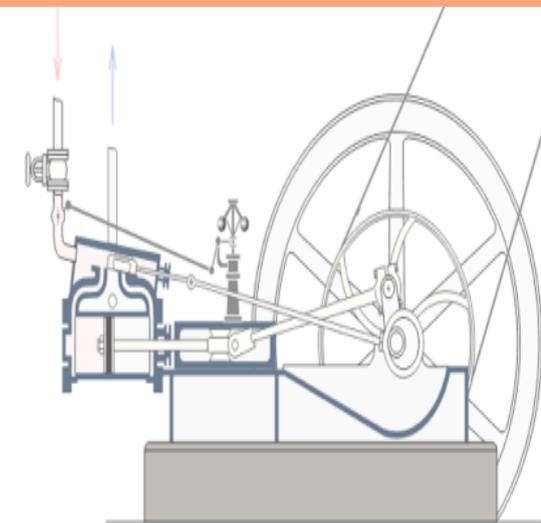
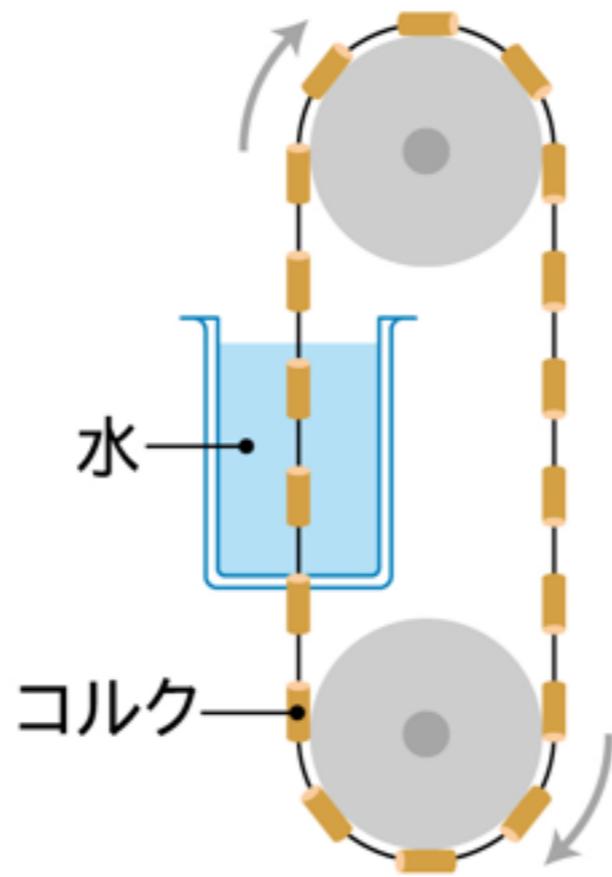
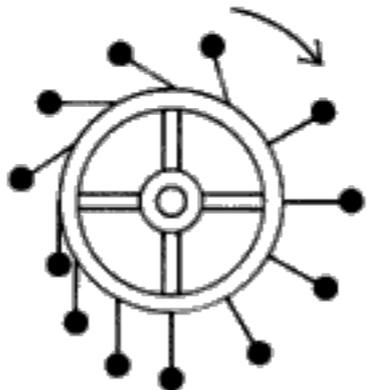
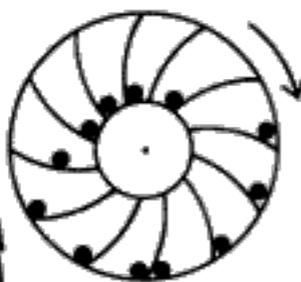
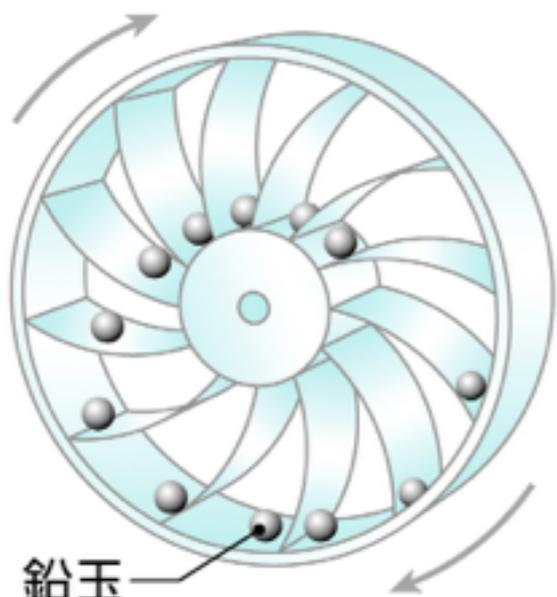
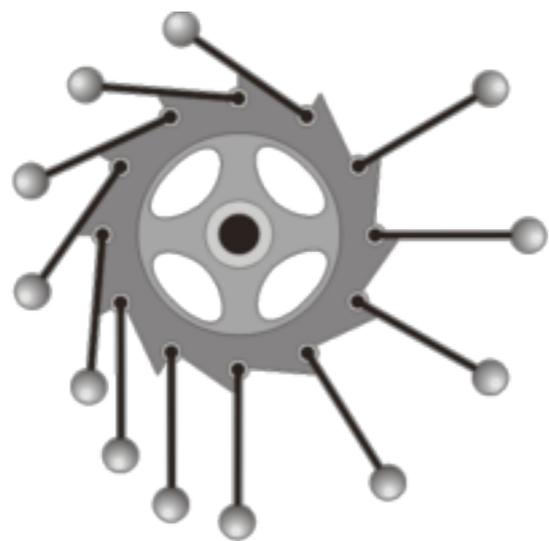
再生可能エネルギー

バイオマス

地熱・水力

太陽・潮力・風力

5.4 熱効率と不可逆変化



永久機関はできない

■カルノーの理想機関

カルノーは、もっとも熱効率が良くなる熱機関（理想機関）を考え、次の2つの条件を結論した。

- 理想機関は（完全にもとに戻ることができる）可逆サイクルであるはずだ。
- 理想機関は（効率がもっとも良い）等温過程を利用するはずだ。

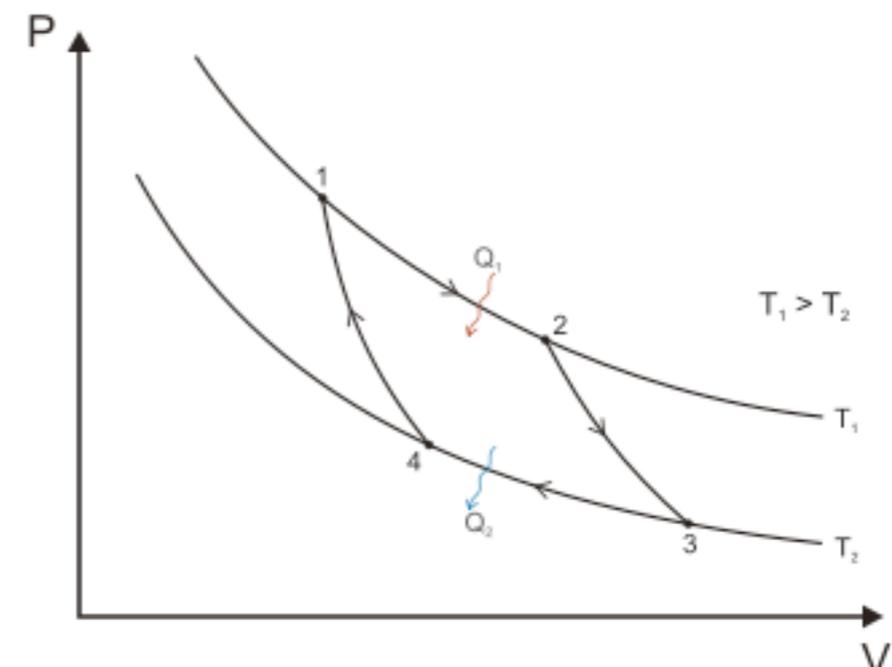
このような装置は、高温源 H と低温源 L の2つの熱浴が必要で、熱効率は、両者の温度差によって

$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (4.5.9)$$

となることが示された。しかし、この計算結果は、「熱効率が100%になり得ない」ことを示しており、永久機関は存在しないことを意味していた。



Nicolas Léonard Sadi Carnot
(1796--1832)

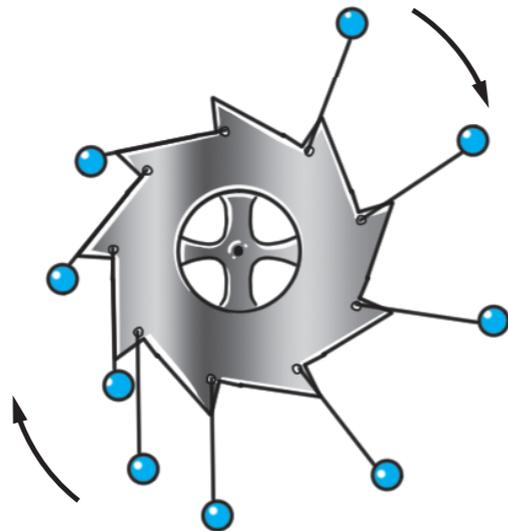
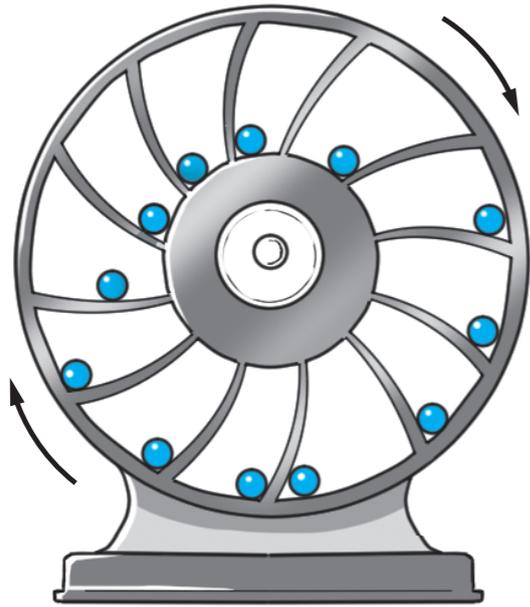


5.4 熱効率と不可逆変化

永久機関

不老不死・錬金術・永久機関は人類の3つの大きな夢であった。

- 第1種永久機関：外部からのエネルギー供給がないのに，仕事をする機関
- 第2種永久機関：外部からのエネルギーをすべて仕事に変える機関



エネルギー保存則に
反するからダメ

熱効率100%の熱機関は
存在するか，という問題

エントロピー = 乱雑さ, エントロピー増大則

■エントロピー

熱機関は、高温と低温の2つの熱源を必要とする。熱には必ず流れが必要ながわかってきた。このことを定量的に示したのが、クラウジウスによるエントロピーである。

$$\text{エントロピー} \quad \Delta S = \frac{\Delta Q}{T} = \frac{\text{加熱量}}{\text{温度}} \quad (12)$$

として計算される量で、熱の流れを示し、必ず増大してゆく。

熱力学の第2法則

- 仕事~~が~~熱に変わる現象は不可逆である。
- 高温物体から低温物体への熱の流れは不可逆現象である。
- エントロピーは増大する。
- 第2種永久機関を作ることはできない。

水飲み鳥は熱機関

サイクルは以下のように働く。

1. 頭部から水が蒸発する（マクスウェル分布）
2. 蒸発により頭部の温度が下がる（蒸発熱）
3. 温度の低下により頭部のジクロロメタン蒸気が凝集する
4. 温度の低下と凝集により頭部の気圧が下がる（理想気体の状態方程式）
5. 頭部と胴体の気圧差により管内の液面が上昇する
6. 液体が頭部に流れ込むことで重心が上がり、前方へ傾く
7. 傾くことで管の下端が液面より上に出る
8. 蒸気の気泡が管を通過して上昇し、液体は下降する
9. 液体が胴体に流れ、頭部と胴体の気圧が平衡する
10. 液体が胴体へ戻ったことで重心が下がり、鳥は元の直立状態に戻る

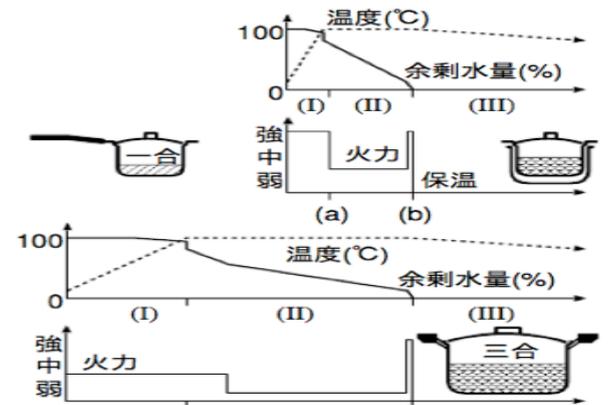
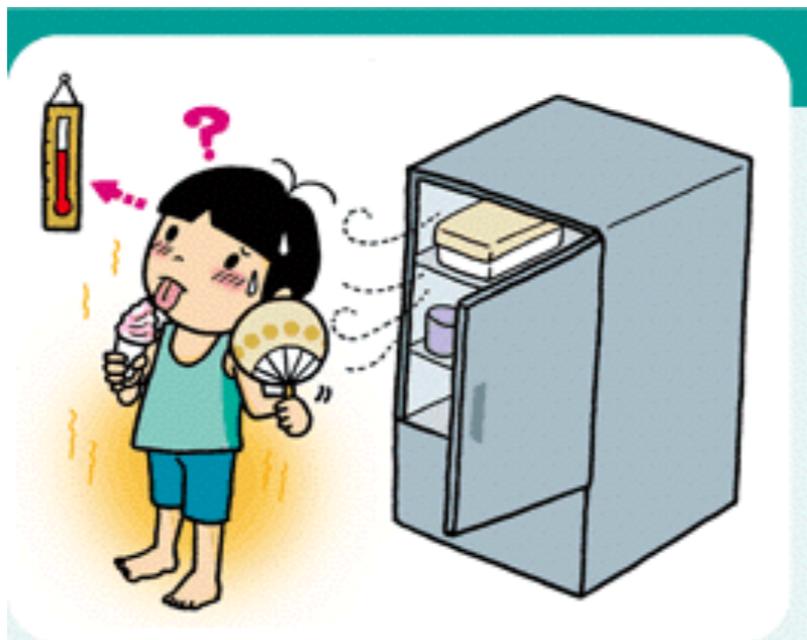


図1: 炊飯時の火力の調整手順例と、それから予想される温度変化と水量変化。

エネルギー源は周囲環境の熱であり、この玩具は永久機関ではない。



問 5.8 暑かったので、冷蔵庫を開け放して部屋を冷やそうと考えた。1時間後、部屋の温度はどうなるか。
(a) 上がる。 (b) 下がる。 (c) 変わらない。



https://www.shizecon.net/science/index_vol4.html



fridgeezoo/フリッジーズー

冷蔵庫など温度を冷やす装置は、それ以上のエネルギーを外部から与える必要がある。したがって、部屋全体では、冷やすよりも多くの熱エネルギーが外部から放出されるので、**部屋の温度は上がる。**

平成 27 年 (2015 年) 度「宮水学園」マスター講座〈前期〉

日常は物理で満ちている —こんなところに自然法則—

真貝寿明

次回は、7月17日（金）です。

- | | | |
|-------|----------|--------------------|
| 第 5 回 | 7 月 3 日 | 台所の物理——山の上でご飯を炊く方法 |
| 第 6 回 | 7 月 17 日 | 音の物理——足踏み揃えて吊り橋渡るな |
| 第 7 回 | 8 月 7 日 | 光の物理——光輪の正体は丸い虹なのか |