

PHYSICS WORKBOOK 04

熱力学と原子 問題集

熱力学は覚える式が $PV = nRT$ 、 $\Delta U = Q + W$ 、 $U = (3/2)nRT$ の3本だけ。あとは状態変化ごとに「何が0になるか」を判定する作業。原子は暗記寄りだが、**覚えた分だけ確実に得点になる**。新課程では出題範囲なので最後まで押さえる。

使い方

1周目 5分考えて出なければ解説へ。熱力学は**符号の定義を先に確認**してから式を書く。

2周目 翌日か翌々日。状態変化は「 $W = 0$ か $\Delta U = 0$ か $Q = 0$ か」を最初に書き込む。

3周目 本番の速さで。1問2分。○ がつかない問題だけ参考書に戻る。

$R = 8.31 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$ 、 $h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ 、 $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ 、電気素量 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$

1章

- ☐ 1周
- ☐ 2周
- ☐ 3周

2章

- ☐ 1周
- ☐ 2周
- ☐ 3周

3章

- ☐ 1周
- ☐ 2周
- ☐ 3周

4章

- ☐ 1周
- ☐ 2周
- ☐ 3周

5章

- ☐ 1周
- ☐ 2周
- ☐ 3周

6章

- ☐ 1周
- ☐ 2周
- ☐ 3周

7章

- ☐ 1周
- ☐ 2周
- ☐ 3周

8章

- ☐ 1周
- ☐ 2周
- ☐ 3周

問題編

解説は後半にまとめてある。先に見ないこと。

この本では W を「**気体がされた仕事**」として $\Delta U = Q + W$ で統一する。

熱と温度・比熱

記号の約束

Q 熱量 [J] m 質量 [g] c 比熱 [J/(g·K)] C 熱容量 [J/K] (= mc) ΔT 温度変化 [K]

この章で使う武器

- $Q = mc\Delta T = C\Delta T$ 、 $C = mc$
- **熱量保存**：高温の物体が失った熱 = 低温の物体が得た熱
- 混合後の温度は**質量で重みをつけた平均**
- 状態変化中（融解・蒸発）は**熱を加えても温度が上がらない**

1-1 熱量 ★

3周チェック ☐ ☐ ☐

水 200 g の温度を 20 °C から 60 °C まで上げる。水の比熱を 4.2 J/(g·K) とする。

1. 必要な熱量を求めよ。
2. この水の熱容量を求めよ。

1-2 熱量保存 ★★

3周チェック ☐ ☐ ☐

80 °C の水 300 g と、20 °C の水 100 g を混ぜた。外部との熱のやりとりはないものとする。

1. 混合後の温度を求めよ。
2. 移動した熱量を求めよ。（比熱 4.2）

1-3 金属 ★★3周チェック ☐ ☐ ☐

100 °Cに熱した金属 200 g を、20 °Cの水 300 g に入れたところ、全体が 24 °Cになった。水の比熱を 4.2 J/(g·K) とし、熱は外に逃げないものとする。

1. 水が得た熱量を求めよ。
2. この金属の比熱を求めよ。

1-4 容器 ★★★3周チェック ☐ ☐ ☐

熱容量 80 J/K の容器に 20 °Cの水 200 g が入っている。ここに 4200 J の熱を加えた。(水の比熱 4.2)

1. 水と容器を合わせた熱容量を求めよ。
2. 温度は何 K 上がるか。

1-5 状態変化 ★★3周チェック ☐ ☐ ☐

-20 °Cの氷を一定の割合で加熱し、温度を時間で記録すると、途中で温度が変化しない区間が2回現れた。

1. この2つの区間で何が起きているか答えよ。
2. そのとき加えた熱は何に使われているか。
3. この熱を何というか。

1-6 温度 ★3周チェック ☐ ☐ ☐

温度について答えよ。

1. 27 °Cは何 K か。
2. 絶対零度は何 °Cか。
3. 「温度が20 K上がった」は「何 °C上がった」に等しいか。

気体分子運動論と内部エネルギー

記号の約束

P 圧力 [Pa] V 体積 [m^3] n 物質質量 [mol] R 気体定数 8.31 T 絶対温度 [K] U 内部エネルギー [J]

この章で使う武器

- $PV = nRT$ (物理では V は m^3 、 $R = 8.31$)
- $P = \frac{1}{3} \frac{Nm\overline{v^2}}{V}$ (分子の力積の合計)
- $\frac{1}{2} m\overline{v^2} = \frac{3}{2} kT$ (温度=分子の運動エネルギーの平均)
- 単原子分子の内部エネルギー $U = \frac{3}{2} nRT$ (温度だけで決まる)

2-1 状態方程式 ★

3周チェック ☐ ☐ ☐

理想気体 2.0 mol が体積 0.020 m^3 の容器に入っていて、温度は 300 K である。(R = 8.31)

1. 圧力を求めよ。

2-2 内部エネルギー ★★

3周チェック ☐ ☐ ☐

単原子分子理想気体 3.0 mol について答えよ。(R = 8.31)

1. 300 K のときの内部エネルギーを求めよ。
2. 温度を 600 K にすると内部エネルギーは何倍になるか。
3. 温度を変えずに体積を半分にすると、内部エネルギーはどうなるか。

2-3 分子の速さ ★★3周チェック ☐ ☐ ☐

理想気体の分子の運動について答えよ。

1. 絶対温度を4倍にすると、分子の二乗平均速度は何倍になるか。
2. 同じ温度で、分子の質量が4倍の気体の二乗平均速度は何倍か。

2-4 圧力の導出 ★★★3周チェック ☐ ☐ ☐

一辺 L の立方体の容器に、質量 m の分子が N 個入っている。 x 方向の速度成分を v_x として、分子運動論により圧力を求める手順を考える。

1. 分子が1回壁に衝突したときに壁が受ける力積を求めよ。
2. この分子が単位時間に同じ壁に衝突する回数を求めよ。
3. これらから、圧力が $P = \frac{Nm\overline{v^2}}{3L^3}$ となる理由を説明せよ。

2-5 分子数 ★★3周チェック ☐ ☐ ☐

理想気体 0.50 mol について答えよ。($N_A = 6.0 \times 10^{23}$)

1. 含まれる分子の数を求めよ。
2. この気体が 300 K のとき、分子1個あたりの運動エネルギーの平均を求めよ。($k = 1.38 \times 10^{-23}$)

2-6 二原子分子 ★★3周チェック ☐ ☐ ☐

内部エネルギーについて答えよ。

1. 単原子分子理想気体の内部エネルギーの式を書け。
2. 二原子分子ではどう変わるか。
3. なぜ違いが生じるか、簡単に説明せよ。

熱力学第一法則

記号の約束

ΔU 内部エネルギーの変化 [J] Q 吸収した熱 [J] W された仕事 [J] (圧縮で正)

この章で使う武器

- $\Delta U = Q + W$ (W はされた仕事。圧縮で正・膨張で負)
- 圧力一定なら $W = -P\Delta V$
- $\Delta U = \frac{3}{2}nR\Delta T$ (単原子分子) → 温度が変わらなければ $\Delta U = 0$
- 問題文が「した仕事」か「された仕事」かを必ず確認する

3-1 符号 ★

3周チェック ☐ ☐ ☐

気体が 500 J の熱を吸収し、外部に 200 J の仕事をした。

1. この気体が「された仕事」はいくらか。
2. 内部エネルギーの変化を求めよ。
3. 温度は上がるか下がるか。

3-2 定圧 ★★3周チェック ☐ ☐ ☐

圧力 1.0×10^5 Pa 一定のもとで、気体が $2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ から $5.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ に膨張した。このとき気体は 500 J の熱を吸収した。

1. 気体がした仕事を求めよ。
2. 内部エネルギーの変化を求めよ。

3-3 定積 ★3周チェック ☐ ☐ ☐

体積を一定に保ったまま、単原子分子理想気体 2.0 mol に 600 J の熱を加えた。(R = 8.31)

1. 内部エネルギーの変化を求めよ。
2. 温度は何 K 上がるか。

3-4 等温 ★★3周チェック ☐ ☐ ☐

理想気体を、温度を一定に保ちながらゆっくり膨張させた。このとき気体は 400 J の仕事をした。

1. 内部エネルギーの変化を求めよ。
2. 気体が吸収した熱を求めよ。
3. この結果を言葉で説明せよ。

3-5 断熱 ★★3周チェック ☐ ☐ ☐

断熱容器の中で気体を急激に圧縮し、 300 J の仕事をした。

1. 内部エネルギーの変化を求めよ。
2. 温度は上がるか下がるか。
3. 逆に断熱膨張させると温度はどうなるか。

同じ状態の理想気体を、次の4つの方法で変化させた。

1. 定積変化で熱を加えたとき、 Q 、 W 、 ΔU の関係を書け。
2. 等温変化で膨張させたときの関係を書け。
3. 断熱変化で膨張させたときの関係を書け。
4. 同じ体積まで膨張させるとき、等温と断熱ではどちらが温度が下がるか。

状態変化とp-Vグラフ

記号の約束

定積 $W = 0$ 定圧 $W = -P\Delta V$ 等温 $\Delta U = 0$ 断熱 $Q = 0$ e 熱効率

この章で使う武器

- 定積 $W=0$ / 定圧 $W=-P\Delta V$ / 等温 $\Delta U=0$ / 断熱 $Q=0$
- p-Vグラフの面積が仕事。閉じた曲線が囲む面積が1サイクルの正味の仕事
- 1サイクルでは $\Delta U = 0 \rightarrow$ 正味の仕事 = 吸収熱 - 放出熱
- 熱効率 $e = \frac{W_{\text{正味}}}{Q_{\text{吸収}}}$ (1にはならない)

4-1 判定 ★

3周チェック ☐ ☐ ☐

次の変化で 0 になる量を答えよ。

- 定積変化での W
- 等温変化での ΔU
- 断熱変化での Q
- 1サイクル後の ΔU

4-2 仕事 ★★3周チェック ☐ ☐ ☐

圧力 2.0×10^5 Pa 一定のもとで、気体の体積が 1.0×10^{-3} m³ から 4.0×10^{-3} m³ になった。

1. 気体がした仕事を求めよ。
2. この仕事は p-V グラフのどの部分にあたるか。

4-3 熱効率 ★★3周チェック ☐ ☐ ☐

ある熱機関は、1 サイクルごとに高温熱源から 800 J の熱を吸収し、低温熱源へ 600 J の熱を放出する。

1. 1 サイクルでした正味の仕事を求めよ。
2. この熱機関の熱効率を求めよ。

4-4 サイクル ★★★3周チェック ☐ ☐ ☐

理想気体を $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ と変化させる。 $A \rightarrow B$ は定積で圧力を上げ、 $B \rightarrow C$ は定圧で膨張させ、 $C \rightarrow A$ は定圧・定積の組み合わせで元に戻るサイクルを考える。

1. $A \rightarrow B$ で気体がした仕事はいくらか。
2. 1サイクル全体での内部エネルギーの変化はいくらか。
3. 1サイクルでした正味の仕事は、 p - V グラフのどこにあたるか。

4-5 グラフの判別 ★★3周チェック ☐ ☐ ☐

p - V グラフ上で、同じ点から膨張させた等温変化と断熱変化の曲線を比べる。

1. どちらの曲線のほうが急に下がるか。
2. その理由を説明せよ。

単原子分子理想気体 1.0 mol を、300 K から 400 K まで定積で加熱した。(R = 8.31)

1. 内部エネルギーの変化を求めよ。
2. 気体がされた仕事を求めよ。
3. 加えた熱量を求めよ。
4. 同じ温度変化を定圧で行った場合、加える熱量は多いか少ないか。

光の粒子性

記号の約束

h プランク定数 ν 振動数 [Hz] λ 波長 [m] W 仕事関数 K_{max} 電子の運動エネルギーの最大値

この章で使う武器

- $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ (波長が短いほど高エネルギー)
- 光電効果 $h\nu = W + K_{max}$ 。 $h\nu < W$ ならいくら明るくしても電子は出ない
- K_{max} は振動数だけで決まる。明るさを変えると電子の数が変わる
- 阻止電圧 $eV_0 = K_{max}$ 。 K_{max} - ν グラフの傾きが h

5-1 光子 ★

3周チェック ☐ ☐ ☐

波長 5.0×10^{-7} m の光について答えよ。 ($h = 6.6 \times 10^{-34}$ 、 $c = 3.0 \times 10^8$)

1. この光の振動数を求めよ。
2. 光子1個のエネルギーを求めよ。

5-2 光電効果 ★★

3周チェック ☐ ☐ ☐

仕事関数 3.0×10^{-19} J の金属に、エネルギー 5.0×10^{-19} J の光子を当てた。

1. 飛び出す電子の運動エネルギーの最大値を求めよ。
2. この金属の限界振動数を求めよ。 ($h = 6.6 \times 10^{-34}$)

5-3 性質 ★★3周チェック ☐ ☐ ☐

光電効果の実験について答えよ。

1. 光の強さを2倍にすると、飛び出す電子の運動エネルギーの最大値はどうなるか。
2. 光の強さを2倍にすると、飛び出す電子の数はどうなるか。
3. 限界振動数より小さい振動数の光を、非常に強く当てるとどうなるか。

5-4 阻止電圧 ★★★3周チェック ☐ ☐ ☐

光電管に光を当て、飛び出した電子を止めるのに必要な電圧（阻止電圧） V_0 を測る。振動数 ν を変えて測定すると、 V_0 と ν の関係は直線になった。

1. V_0 と K_{max} の関係を式で書け。
2. V_0 を ν で表す式を書け。
3. この直線の傾きから何が求められるか。

5-5 eVの換算 ★★3周チェック ☐ ☐ ☐

エネルギーの単位について答えよ。($e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$)

- 1 eV は何 J か。
- $3.2 \times 10^{-19} \text{ J}$ は何 eV か。
- 仕事関数 2.0 eV の金属の限界波長を求めよ。($hc = 1240 \text{ eV}\cdot\text{nm}$)

5-6 コンプトン ★★3周チェック ☐ ☐ ☐

X線を物質に当てると、散乱された X線の波長がもとより長くなる現象が観測される。

- この現象を何というか。
- 光子の運動量を波長で表す式を書け。
- 波長が長くなるのはなぜか、エネルギーの観点から説明せよ。

電子の波動性と原子模型

記号の約束

λ ド・ブロイ波長 p 運動量 $= mv$ n 量子数 E_n エネルギー準位 [eV]

この章で使う武器

- ド・ブロイ波長 $\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{p}$
- 量子条件 $2\pi r = n\lambda$ (円周が波長の整数倍 = 定常波)
- 振動数条件 $h\nu = E_n - E_m$
- 水素原子 $E_n = -\frac{13.6}{n^2}$ eV (負。 n が大きいほど高い)

6-1 ド・ブロイ ★★

3周チェック ☐ ☐ ☐

質量 9.1×10^{-31} kg の電子が 2.0×10^6 m/s で運動している。 ($h = 6.6 \times 10^{-34}$)

- この電子のド・ブロイ波長を求めよ。
- 同じ速さで運動する質量 1.0×10^{-3} kg の粒の波長はどうなるか。

6-2 量子条件 ★★3周チェック ☐ ☐ ☐

ボーアの原子模型について答えよ。

1. 量子条件を式で書け。
2. この条件は物理的に何を意味しているか。
3. この条件から、電子の軌道について何が言えるか。

6-3 エネルギー準位 ★★3周チェック ☐ ☐ ☐

水素原子のエネルギー準位は $E_n = -\frac{13.6}{n^2}$ eV である。

1. 基底状態 ($n = 1$) のエネルギーを求めよ。
2. $n = 2$ のエネルギーを求めよ。
3. 基底状態の電子を原子から取り去るのに必要なエネルギーを求めよ。

6-4 遷移 ★★3周チェック ☐ ☐ ☐

水素原子で、電子が $n = 3$ から $n = 2$ の準位へ移った。 $(hc = 1240 \text{ eV}\cdot\text{nm})$

1. 放出される光子のエネルギーを求めよ。
2. その光の波長を求めよ。
3. この光は何色か。

6-5 系列 ★★3周チェック ☐ ☐ ☐

水素原子のスペクトル系列について答えよ。

1. $n = 1$ へ落ちる系列の名称と、その光の種類を答えよ。
2. $n = 2$ へ落ちる系列についても同様に答えよ。
3. $n = 3$ へ落ちる系列についても同様に答えよ。

原子のスペクトルについて答えよ。

1. 電子が低い準位から高い準位へ移るとき、光はどうなるか。
2. 太陽光のスペクトルに暗い線（フラウンホーファー線）が見えるのはなぜか。
3. 吸収される光の波長は、放出される光の波長とどんな関係にあるか。

原子核と放射線

記号の約束

Z 原子番号（陽子の数） A 質量数 T 半減期 N_0 はじめの原子核の数

この章で使う武器

- α 崩壊： $A - 4$ 、 $Z - 2$ / β 崩壊： A そのまま、 $Z + 1$ / γ 崩壊：どちらも変化なし
- 透過力 $\alpha < \beta < \gamma$ （電離作用は逆に α が最強）
- 半減期 $N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T}$
- 同位体＝原子番号が同じで質量数が違う

7-1

構成 ★

3周チェック ☐ ☐ ☐

${}_{92}^{235}\text{U}$ について答えよ。

1. 陽子の数はいくつか。
2. 中性子の数はいくつか。
3. ${}_{92}^{238}\text{U}$ とはどんな関係か。

7-2

崩壊 ★★

3周チェック ☐ ☐ ☐

${}_{92}^{238}\text{U}$ が α 崩壊し、生じた原子核がさらに β 崩壊した。

1. α 崩壊で生じる原子核の質量数と原子番号を求めよ。
2. 続く β 崩壊のあとの質量数と原子番号を求めよ。
3. β 崩壊で原子番号が増える理由を説明せよ。

7-3

半減期 ★★

3周チェック ☐ ☐ ☐

半減期 8 日の放射性同位体が、はじめ 40 g あった。

1. 24 日後に残っている量を求めよ。
2. 残りが 5.0 g になるのは何日後か。

7-4 放射線 ★★3周チェック ☐ ☐ ☐

α 線・ β 線・ γ 線について答えよ。

1. それぞれの正体を答えよ。
2. 透過力の強い順に並べよ。
3. 電場をかけたとき、曲がらないのはどれか。

7-5 年代測定 ★★★3周チェック ☐ ☐ ☐

生きている生物中の炭素には、一定の割合で ^{14}C が含まれている。 ^{14}C の半減期は 5700 年である。

1. ある化石の ^{14}C の割合が、生きている生物の $\frac{1}{4}$ であった。この化石は何年前のものか。
2. 生物が生きている間、 ^{14}C の割合が一定に保たれるのはなぜか。

放射線に関する量について答えよ。

1. 1秒あたりに崩壊する原子核の数を表す単位は何か。
2. 半減期が短い物質と長い物質では、同じ原子数のときどちらの放射能が強いのか。

核反応とエネルギー

記号の約束

Δm 質量欠損 c 光速 u 統一原子質量単位 (1 u $\approx$ 931 MeV)

この章で使う武器

- $E = \Delta mc^2$ 。質量欠損 = (核子の質量の和) - (原子核の質量)
- 1 u $\approx$ 931 MeV (u で出したら 931 をかける)
- 核反応式は質量数の和と原子番号の和が左右で等しい
- 核分裂も核融合もエネルギーを出す (鉄に近づく向きが安定)

8-1 質量欠損 ★★

3周チェック ☐ ☐ ☐

ヘリウム原子核 ${}^4_2\text{He}$ について答えよ。陽子 1.0073 u、中性子 1.0087 u、 ${}^4_2\text{He}$ 4.0015 u とする。

1. 質量欠損を求めよ。
2. 結合エネルギーを MeV で求めよ。(1 u = 931 MeV)

8-2 $E=mc^2$ ★★3周チェック ☐ ☐ ☐

質量 1.0×10^{-3} kg が完全にエネルギーに変わったとする。 ($c = 3.0 \times 10^8$ m/s)

1. 生じるエネルギーを求めよ。
2. これは水 1 t を何 K 上げられる熱量か。(水の比熱 4.2 J/(g·K))

8-3 核反応式 ★★3周チェック ☐ ☐ ☐

次の核反応式の X を求めよ。



1. X の質量数と原子番号を求めよ。
2. X は何という粒子か。

8-4 核分裂 ★★3周チェック ☐ ☐ ☐

ウラン235の核分裂について答えよ。

1. 核分裂を起こさせるために当てる粒子は何か。
2. 分裂したときに同時に出るものは何か。
3. それによって何が起こるか。

8-5 核融合 ★★3周チェック ☐ ☐ ☐

核融合について答えよ。

1. 核融合とはどのような反応か。
2. 太陽の中で起きている核融合の結果、何ができるか。
3. 核融合を地上で起こすのが難しいのはなぜか。

核子1個あたりの結合エネルギーを原子核ごとに調べると、質量数 60 付近（鉄のあたり）で最大となる山型のグラフになる。

1. 核子1個あたりの結合エネルギーが大きいほど、その原子核はどうなるか。
2. ウランのような重い原子核が分裂するとエネルギーが出るのはなぜか。
3. 水素のような軽い原子核が融合するとエネルギーが出るのはなぜか。

解説編

式は書き写せる順に並べてある。

自分の答案と1行ずつ突き合わせて、どこで分かれたかを特定する。

第1章 熱と温度・比熱

1-1 $Q = mc\Delta T$

■(1) $Q = mc\Delta T = 200 \times 4.2 \times (60 - 20) = 3.36 \times 10^4 \text{ J}$

■(2) $C = mc = 200 \times 4.2 = 840 \text{ J/K}$

答 (1) $3.4 \times 10^4 \text{ J}$ (2) 840 J/K

1-2 重みつき平均になる

■(1) 熱量保存：失った熱＝得た熱。混合後の温度を t とすると

$$300 \times 4.2 \times (80 - t) = 100 \times 4.2 \times (t - 20)$$

$$3(80 - t) = t - 20 \rightarrow 240 - 3t = t - 20 \rightarrow 4t = 260 \rightarrow t = 65 \text{ }^\circ\text{C}$$

(質量の大きい 80°C 側に寄っていることを確認する。)

■(2) $Q = 300 \times 4.2 \times (80 - 65) = 1.89 \times 10^4 \text{ J}$

答 (1) $65 \text{ }^\circ\text{C}$ (2) 約 $1.9 \times 10^4 \text{ J}$

1-3 比熱を求める

■(1) $Q = 300 \times 4.2 \times (24 - 20) = 5040 \text{ J}$

■(2) 金属が失った熱もこれに等しい

$$200 \times c \times (100 - 24) = 5040$$

$$c = \frac{5040}{200 \times 76} = 0.33 \text{ J/(g}\cdot\text{K)}$$

(水よりずっと小さい —— 金属は温まりやすく冷めやすい。)

答 (1) 5040 J (2) 約 0.33 J/(g·K)

1-4 容器の熱容量も足す

■(1) 水の熱容量は $200 \times 4.2 = 840 \text{ J/K}$

容器を合わせて $840 + 80 = 920 \text{ J/K}$

■(2) $\Delta T = \frac{Q}{C} = \frac{4200}{920} = 4.6 \text{ K}$

容器を無視すると 5.0 K になってしまう。「無視できない」と書かれていたら必ず足す。

答 (1) 920 J/K (2) 約 4.6 K

1-5 温度が上がらない区間

■(1) 1回目 (0 °C) : 氷がとけて水になっている (融解)

2回目 (100 °C) : 水が沸騰して水蒸気になっている (蒸発)

■(2) 状態を変えること (分子どうしの結びつきを切ること) に使われている。

温度 (分子の運動の激しさ) は変わらない。

■(3) 潜熱 (融解熱・蒸発熱)。この区間では $Q = mc\Delta T$ は使えない。

答 (1) 融解と蒸発 (2) 状態変化 (3) 潜熱

1-6 絶対温度への変換

■(1) $273 + 27 = 300 \text{ K}$

■(2) -273 °C (0 K)。分子の熱運動が止まる温度。

■(3) 20 °C上がったのと同じ。

目盛りの間隔が同じなので、差ならどちらの単位でも同じ値になる。

答 (1) 300 K (2) -273 °C (3) 等しい (20 °C)

第2章 気体分子運動論と内部エネルギー

2-1 単位に注意

$$\begin{aligned} \blacksquare P &= \frac{nRT}{V} = \frac{2.0 \times 8.31 \times 300}{0.020} \\ &= \frac{4986}{0.020} = 2.5 \times 10^5 \text{ Pa} \end{aligned}$$

(化学の $R = 8.3 \times 10^3$ は V を L で使うときの値。物理では m^3 と 8.31 。)

答 約 $2.5 \times 10^5 \text{ Pa}$

2-2 温度だけで決まる

$$\blacksquare (1) U = \frac{3}{2}nRT = 1.5 \times 3.0 \times 8.31 \times 300 = 1.12 \times 10^4 \text{ J}$$

■(2) $U \propto T$ なので 2倍

■(3) 変わらない。理想気体の内部エネルギーは温度だけの関数で、体積にはよらない。

答 (1) 約 $1.1 \times 10^4 \text{ J}$ (2) 2倍 (3) 変わらない

2-3 $v \propto \sqrt{T}$

$$\blacksquare (1) \frac{1}{2}m\overline{v^2} = \frac{3}{2}kT \text{ より } \overline{v^2} \propto T, v \propto \sqrt{T}$$

$$\sqrt{4} = 2\text{倍}$$

■(2) 同じ温度なら運動エネルギーの平均が同じなので $m\overline{v^2}$ が一定。

$$v \propto \frac{1}{\sqrt{m}} \text{ なので } \frac{1}{\sqrt{4}} = 1/2 \text{ 倍}$$

(軽い気体ほど速く動く。だから水素やヘリウムは地球の重力から逃げやすい。)

答 (1) 2倍 (2) 1/2 倍

2-4 力積から積み上げる

■(1) 弾性衝突なので速度は v_x から $-v_x$ に変わる。

分子の運動量変化は $-2mv_x$ なので、壁が受ける力積は $2mv_x$ 。

■(2) 往復の距離は $2L$ なので、1往復にかかる時間は $\frac{2L}{v_x}$ 。

単位時間の衝突回数は $\frac{v_x}{2L}$ 。

■(3) 分子1個が単位時間に壁に与える力積 (=力) は

$$2mv_x \times \frac{v_x}{2L} = \frac{mv_x^2}{L}$$

全分子で足すと $\frac{Nmv_x^2}{L}$ 。

3方向は対等なので $\overline{v_x^2} = \frac{1}{3}\overline{v^2}$ 。

圧力は力を面積 L^2 で割って

$$P = \frac{Nmv^2}{3L^3} = \frac{Nmv^2}{3V}$$

答 (1) $2mv_x$ (2) $\frac{v_x}{2L}$ (3) 力積×回数を全分子で合計し、面積で割る

2-5 アボガドロ定数を使う

■(1) $0.50 \times 6.0 \times 10^{23} = 3.0 \times 10^{23}$ 個

■(2) $\frac{1}{2}m\overline{v^2} = \frac{3}{2}kT = 1.5 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 300$
 $= 6.2 \times 10^{-21}$ J

分子の種類によらず、温度が同じなら同じ値になる。

答 (1) 3.0×10^{23} 個 (2) 約 6.2×10^{-21} J

2-6 係数が変わる

■(1) $U = \frac{3}{2}nRT$

■(2) $U = \frac{5}{2}nRT$

■(3) 単原子分子は並進運動（3方向）のエネルギーしか持てないが、二原子分子は回転のエネルギーも持てるため、同じ温度でも蓄えるエネルギーが大きくなる。

問題文に「単原子分子」とあるかどうかを必ず確認する。

答 (1) $U = \frac{3}{2}nRT$ (2) $U = \frac{5}{2}nRT$ (3) 二原子分子は回転のエネルギーももつから

第3章 熱力学第一法則

3-1 入るか出るか

■(1) 外部に仕事をしたので、された仕事は -200 J

■(2) $\Delta U = Q + W = 500 + (-200) = 300 \text{ J}$

■(3) $\Delta U > 0$ なので内部エネルギーが増えた → 温度は上がる

答 (1) -200 J (2) $+300 \text{ J}$ (3) 上がる

3-2 $W = -P\Delta V$

■(1) $W_{\text{した}} = P\Delta V = 1.0 \times 10^5 \times (5.0 - 2.0) \times 10^{-3} = 300 \text{ J}$

■(2) された仕事は -300 J なので

$$\Delta U = Q + W = 500 - 300 = 200 \text{ J}$$

加えた熱の一部が仕事に使われ、残りが内部エネルギーになった。

答 (1) 300 J (2) $+200 \text{ J}$

3-3 $W = 0$

■(1) 体積一定なので $W = 0$

$$\Delta U = Q = 600 \text{ J}$$

■(2) $\Delta U = \frac{3}{2}nR\Delta T$ より

$$600 = 1.5 \times 2.0 \times 8.31 \times \Delta T$$

$$\Delta T = \frac{600}{24.9} = 24 \text{ K}$$

答 (1) $+600 \text{ J}$ (2) 約 24 K

3-4 $\Delta U = 0$

■(1) 温度が変わらないので $\Delta U = 0$

■(2) $\Delta U = Q + W$ で $W = -400 \text{ J}$ だから

$$0 = Q - 400 \rightarrow Q = 400 \text{ J}$$

■(3) 吸収した熱がそっくりそのまま仕事に変わった。

内部エネルギーは使われていない（温度が変わらないので）。

答 (1) 0 (2) 400 J (吸収) (3) 吸収した熱がすべて仕事になった

3-5 $Q = 0$

■(1) 断熱なので $Q = 0$ 。圧縮なので $W = +300 \text{ J}$

$$\Delta U = 0 + 300 = 300 \text{ J}$$

■(2) 内部エネルギーが増えるので 温度は上がる（自転車の空気入れが熱くなる理由）。

■(3) 断熱膨張では $W < 0$ なので $\Delta U < 0 \rightarrow$ 温度は下がる。

上昇する空気が冷えて雲ができるのはこの現象。

答 (1) +300 J (2) 上がる (3) 下がる

3-6 4つを比べる

■(1) $W = 0$ 、 $\Delta U = Q$

■(2) $\Delta U = 0$ 、 $Q = -W$ （吸収した熱がすべて仕事になる）

■(3) $Q = 0$ 、 $\Delta U = W$ （仕事をしたぶん内部エネルギーが減る）

■(4) 断熱。等温変化では定義上まったく温度が変わらないのに対し、断熱膨張では外部から熱が入らないまま仕事をするので、その分だけ温度が下がる。

だから p-V グラフでは断熱線のほうが等温線より急になる。

答 (1) $W=0$, $\Delta U=Q$ (2) $\Delta U=0$, $Q=-W$ (3) $Q=0$, $\Delta U=W$ (4) 断熱

第4章 状態変化とp-Vグラフ

4-1 何が0か

■(1) $W = 0$ （体積が変わらないので仕事をしない）

■(2) $\Delta U = 0$ （温度が変わらないので）

■(3) $Q = 0$ （熱の出入りが無い）

■(4) $\Delta U = 0$ （元の状態に戻るなので、状態量である U も元に戻る）

この4つを最初に書き込むだけで、熱力学の問題は半分解けている。

答 (1) W (2) ΔU (3) Q (4) ΔU

4-2 面積を計算する

■(1) $W = P\Delta V = 2.0 \times 10^5 \times 3.0 \times 10^{-3} = 600 \text{ J}$

■(2) p-Vグラフで、グラフとV軸で囲まれた長方形の面積。

定圧変化では横一直線になるので、面積 = 高さ(P) × 幅(ΔV) となる。

答 (1) 600 J (2) グラフとV軸で囲む面積 (長方形)

4-3 分母は吸収熱だけ

■(1) 1サイクルで $\Delta U = 0$ なので

$$W_{\text{正味}} = Q_{\text{吸収}} - Q_{\text{放出}} = 800 - 600 = 200 \text{ J}$$

■(2) $e = \frac{200}{800} = 0.25$ (25 %)

分母は吸収した熱 (800) だけ。放出した分を引いてはいけない。

答 (1) 200 J (2) 0.25 (25 %)

4-4 囲む面積が仕事

■(1) 定積変化なので 0。

■(2) 元の状態に戻るので 0。内部エネルギーは状態量で、経路によらない。

■(3) 閉じた曲線が囲む面積。

時計回りに回れば正の仕事 (熱機関)、反時計回りなら負 (外から仕事をされる冷凍機)。

$$\Delta U = 0 \text{ より } W_{\text{正味}} = Q_{\text{吸収}} - Q_{\text{放出}} \text{ となる。}$$

答 (1) 0 (2) 0 (3) 閉じた曲線が囲む面積

4-5 等温と断熱の違い

■(1) 断熱変化のほうが急。

■(2) 等温変化では温度が一定なので、 $PV = \text{一定}$ に従って圧力が下がる。

断熱変化では膨張によって温度も下がるので、

「体積が増えた効果」に加えて「温度が下がった効果」が重なり、圧力がより大きく下がるから。

答 (1) 断熱変化 (2) 膨張に加えて温度も下がるため圧力の下がり方が大きいから

4-6 表を埋める

■(1) $\Delta U = \frac{3}{2}nR\Delta T = 1.5 \times 1.0 \times 8.31 \times 100 = 1247 \text{ J}$

■(2) 定積なので $W = 0$

■(3) $Q = \Delta U - W = 1247 \text{ J}$

■(4) 多く必要。定圧では膨張して外に仕事をするぶん、同じ温度上昇のために余分な熱が要る ($Q = \Delta U + P\Delta V$)。

これが $C_p > C_v$ (マイヤーの関係 $C_p - C_v = R$) の理由。

答 (1) 約 $1.2 \times 10^3 \text{ J}$ (2) 0 (3) 約 $1.2 \times 10^3 \text{ J}$ (4) 多く必要

第5章 光の粒子性

5-1 $E = hc/\lambda$

■(1) $\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3.0 \times 10^8}{5.0 \times 10^{-7}} = 6.0 \times 10^{14} \text{ Hz}$

■(2) $E = h\nu = 6.6 \times 10^{-34} \times 6.0 \times 10^{14} = 4.0 \times 10^{-19} \text{ J}$

答 (1) $6.0 \times 10^{14} \text{ Hz}$ (2) $4.0 \times 10^{-19} \text{ J}$

5-2 $h\nu = W + K$

■(1) $K_{max} = h\nu - W = 5.0 \times 10^{-19} - 3.0 \times 10^{-19} = 2.0 \times 10^{-19} \text{ J}$

■(2) 限界振動数は $K_{max} = 0$ となる振動数

$$\nu_0 = \frac{W}{h} = \frac{3.0 \times 10^{-19}}{6.6 \times 10^{-34}} = 4.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

答 (1) $2.0 \times 10^{-19} \text{ J}$ (2) 約 $4.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$

5-3 波では説明できない事実

■(1) 変わらない。 K_{max} は振動数だけで決まる。

■(2) 2倍になる (光子の数が2倍になるので、飛び出す電子も2倍)。

■(3) 電子は1個も飛び出さない。

光子1個のエネルギーが足りないので、いくら光子の数を増やしても意味がない。

これが「光は粒である」ことの決定的な証拠になった (波なら強くすれば出るはず)。

答 (1) 変わらない (2) 2倍になる (3) 電子は飛び出さない

5-4 hを求める実験

■(1) 電子が電圧に逆らって進めなくなる条件なので

$$eV_0 = K_{max}$$

■(2) $K_{max} = h\nu - W$ を代入して

$$V_0 = \frac{h}{e}\nu - \frac{W}{e}$$

■(3) 傾きが $\frac{h}{e}$ なので、プランク定数 h が求められる。

(横軸との切片から限界振動数、縦軸切片から仕事関数もわかる。)

金属を変えると傾きは変わらず、直線が左右に平行移動するのがポイント。

答 (1) $eV_0 = K_{max}$ (2) $V_0 = \frac{h}{e}\nu - \frac{W}{e}$ (3) プランク定数 h

5-5 単位を直す

■(1) $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$

■(2) $\frac{3.2 \times 10^{-19}}{1.6 \times 10^{-19}} = 2.0 \text{ eV}$

■(3) $\lambda_0 = \frac{hc}{W} = \frac{1240}{2.0} = 620 \text{ nm}$

これより長い波長では電子が出ない (赤い光では出ない)。

$hc = 1240 \text{ eV}\cdot\text{nm}$ は覚えておくと計算が一気に速くなる。

答 (1) $1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ (2) 2.0 eV (3) 620 nm

5-6 光子も運動量をもつ

■(1) コンプトン効果

■(2) $p = \frac{h}{\lambda}$

■(3) 光子が電子と衝突して電子にエネルギーを分け与えるため、散乱後の光子のエネルギーが減る。

$E = \frac{hc}{\lambda}$ なので、エネルギーが減る＝波長が長くなる。

光子が運動量をもつ (粒子である) ことの証拠で、光電効果と並ぶ重要な実験。

答 (1) コンプトン効果 (2) $p = h/\lambda$ (3) 電子にエネルギーを渡してエネルギーが減るから

第6章 電子の波動性と原子模型

6-1 $\lambda = h/(mv)$

$$\begin{aligned}\blacksquare(1) \lambda &= \frac{h}{mv} = \frac{6.6 \times 10^{-34}}{9.1 \times 10^{-31} \times 2.0 \times 10^6} \\ &= \frac{6.6 \times 10^{-34}}{1.82 \times 10^{-24}} = 3.6 \times 10^{-10} \text{ m}\end{aligned}$$

原子の大きさと同程度なので、結晶による回折が観測できる。

$$\blacksquare(2) \lambda = \frac{6.6 \times 10^{-34}}{1.0 \times 10^{-3} \times 2.0 \times 10^6} = 3.3 \times 10^{-37} \text{ m}$$

あまりに短すぎて波としての性質は観測できない。だから日常では物が波に見えない。

答 (1) 約 $3.6 \times 10^{-10} \text{ m}$ (2) 約 $3.3 \times 10^{-37} \text{ m}$ (観測できないほど短い)

6-2 円周＝波長の整数倍

$$\blacksquare(1) 2\pi r = n\lambda \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

$\lambda = \frac{h}{mv}$ を代入すると $mvr = n \frac{h}{2\pi}$ とも書ける。

■(2) 電子の波が円軌道を1周してちょうどつながる (定常波になる) という意味。

整数倍でないと、1周するたびに波が打ち消し合ってしまう。

■(3) 軌道の半径がとびとびの値しかとれない。

だからエネルギーもとびとび (量子化) になる。

答 (1) $2\pi r = n\lambda$ (2) 電子波が定常波になること (3) 軌道半径がとびとびになる

6-3 符号に注意

$$\blacksquare(1) E_1 = -13.6 \text{ eV}$$

$$\blacksquare(2) E_2 = -\frac{13.6}{4} = -3.40 \text{ eV}$$

■(3) 電子を無限遠 ($E = 0$) まで運ぶので

$$0 - (-13.6) = 13.6 \text{ eV}$$

これが水素のイオン化エネルギー。負の値の意味がここでわかる。

答 (1) -13.6 eV (2) -3.40 eV (3) 13.6 eV

6-4 差を波長に直す

■(1) $\Delta E = E_3 - E_2$ の絶対値

$$= 13.6 \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right) = 13.6 \times (0.250 - 0.111) = 1.89 \text{ eV}$$

■(2) $\lambda = \frac{1240}{1.89} = 656 \text{ nm}$

■(3) 赤色（水素の輝線スペクトルで有名な $H\alpha$ 線）。

$n = 2$ へ落ちる系列（バルマー系列）が可視光になる。

答 (1) 1.89 eV (2) 656 nm (3) 赤

6-5 どこへ落ちるか

■(1) ライマン系列／紫外線（エネルギー差が大きい＝波長が短い）

■(2) バルマー系列／可視光

■(3) パッシェン系列／赤外線

落ちる先が下（ n が小さい）ほどエネルギー差が大きく、波長が短くなる。

答 (1) ライマン系列・紫外線 (2) バルマー系列・可視光 (3) パッシェン系列・赤外線

6-6 上がるときは吸収

■(1) その差のエネルギーをもつ光を吸収する。

■(2) 太陽の外側の低温のガスが、特定の波長の光を吸収しているから。

どの波長が欠けているかを調べると、そこにある元素がわかる。

■(3) 同じ波長。準位の差が同じなので、吸収も放出も同じ波長で起こる。

答 (1) 吸収する (2) 途中のガスが特定波長を吸収するから (3) 同じ波長

第7章 原子核と放射線

7-1 AとZの意味

■(1) 原子番号がそのまま陽子の数 → 92 個

■(2) 質量数 - 原子番号 = $235 - 92 = 143$ 個

■(3) 同位体（原子番号が同じで質量数が違う）。

化学的性質はほぼ同じだが、核分裂のしやすさが違う。

答 (1) 92個 (2) 143個 (3) 同位体

7-2 AとZの変化

■(1) α 崩壊は A が -4 、 Z が -2

$$A = 238 - 4 = 234, Z = 92 - 2 = 90$$

■(2) β 崩壊は A そのまま、 Z が $+1$

$$A = 234, Z = 91$$

■(3) 原子核の中で中性子が陽子に変わり、電子 (β 線) が飛び出すため。

陽子が1個増えるので Z が $+1$ 、核子の総数は変わらないので A は不変。

答 (1) $A = 234$ 、 $Z = 90$ (2) $A = 234$ 、 $Z = 91$ (3) 中性子が陽子に変わり電子が出るから

7-3 何回ぶんか数える

■(1) $24 \div 8 = 3$ 回ぶん

$$40 \times \left(\frac{1}{2}\right)^3 = 40 \times \frac{1}{8} = 5.0 \text{ g}$$

$$\text{■(2)} \quad \frac{5.0}{40} = \frac{1}{8} = \left(\frac{1}{2}\right)^3$$

3回ぶんなので $8 \times 3 = 24$ 日後

((1)と同じ答えになる —— 検算として使える。)

答 (1) 5.0 g (2) 24 日後

7-4 3種類の性質

■(1) α 線=ヘリウム原子核、 β 線=電子、 γ 線=電磁波 (波長の非常に短い光)

■(2) $\gamma > \beta > \alpha$ (γ は鉛でないと止まらない。 α は紙1枚で止まる)

■(3) γ 線。電荷をもたないので電場でも磁場でも曲がらない。

α 線は正、 β 線は負なので、それぞれ逆向きに曲がる。

答 (1) ヘリウム原子核・電子・電磁波 (2) $\gamma > \beta > \alpha$ (3) γ 線

7-5 半減期の応用

$$\text{■(1)} \quad \frac{1}{4} = \left(\frac{1}{2}\right)^2 \text{ なので半減期2回ぶん}$$

$$5700 \times 2 = 11400 \text{ 年前}$$

■(2) 生きている間は食物や呼吸を通じて外界と炭素をやりとりしているので、崩壊して減った分がつねに補われるから。

死ぬとやりとりが止まり、あとは崩壊で減る一方になる —— これが年代測定の原理。

答 (1) 11400 年前 (2) 生きている間は外界と炭素をやりとりして補充されるから

7-6 放射能の強さ

■(1) ベクレル (Bq)。1 Bq = 1秒に1個崩壊。

■(2) 半減期が短いほう。

短い時間で多くの原子核が崩壊するので、単位時間あたりの崩壊数が多い。

(半減期が長いものは、長期間にわたって弱く出し続ける。)

答 (1) ベクレル (Bq) (2) 半減期が短いほう

第8章 核反応とエネルギー

8-1 バラバラのほうが重い

■(1) 核子は陽子2個・中性子2個

$$\Delta m = 2 \times 1.0073 + 2 \times 1.0087 - 4.0015$$

$$= 2.0146 + 2.0174 - 4.0015 = 0.0305 \text{ u}$$

■(2) $E = 0.0305 \times 931 = 28.4 \text{ MeV}$

バラバラのほうが重いことを確認する (そうでないと結合しない)。

答 (1) 0.0305 u (2) 約 28 MeV

8-2 単位をkgに直す

■(1) $E = \Delta mc^2 = 1.0 \times 10^{-3} \times (3.0 \times 10^8)^2$

$$= 1.0 \times 10^{-3} \times 9.0 \times 10^{16} = 9.0 \times 10^{13} \text{ J}$$

■(2) 水 1 t = $1.0 \times 10^6 \text{ g}$

$$\Delta T = \frac{9.0 \times 10^{13}}{1.0 \times 10^6 \times 4.2} = 2.1 \times 10^7 \text{ K}$$

わずか 1 g の質量から、とてつもないエネルギーが出ることがわかる。

答 (1) $9.0 \times 10^{13} \text{ J}$ (2) 約 $2.1 \times 10^7 \text{ K}$

8-3 AとZを合わせる

■(1) 質量数 : $14 + 4 = 17 + A \rightarrow A = 1$

原子番号 : $7 + 2 = 8 + Z \rightarrow Z = 1$

■(2) 質量数1・原子番号1 なので 陽子 (${}^1_1\text{H}$)

この2つの保存だけで未知の粒子は必ず決まる。

答 (1) 質量数1・原子番号1 (2) 陽子

8-4 連鎖反応

■(1) 中性子（電荷をもたないので原子核に近づける）。

■(2) 2～3個の中性子と、大きなエネルギー。

■(3) 出た中性子が次のウランに当たり、連鎖反応が起こる。

これを制御して熱を取り出すのが原子力発電。制御棒で中性子を吸収して調節する。

答 (1) 中性子 (2) 中性子2～3個とエネルギー (3) 連鎖反応

8-5 太陽のエネルギー源

■(1) 軽い原子核どうしが合体して、より重い原子核になる反応。

■(2) 水素（陽子）が集まってヘリウムができる。このとき質量欠損の分のエネルギーが出る。

■(3) 原子核はどちらも正の電荷をもち反発するので、近づけるには非常な高温・高圧が必要になるから。

答 (1) 軽い原子核が合体する反応 (2) ヘリウム (3) 正電荷どうしの反発を超える高温高圧が要るから

8-6 鉄がいちばん安定

■(1) 安定である（バラバラにするのにより大きなエネルギーが要る）。

■(2) 分裂して質量数が鉄に近づくと、核子1個あたりの結合エネルギーが大きくなる。

その差のぶんが余ってエネルギーとして放出される。

■(3) 融合してもやはり鉄に近づくので、同じ理由でエネルギーが出る。

山の両側から頂上（鉄）へ向かう変化はどちらもエネルギーを出す —— これが核分裂と核融合の共通点。

答 (1) 安定になる (2)(3) どちらも鉄に近づき、核子あたりの結合エネルギーが増えるから