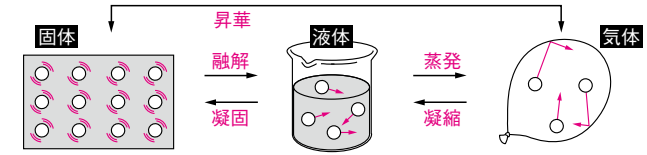
10 物質の三態

1 物質の三態

❶**熱運動**　物質の構成粒子(原子，分子，イオンなど)が行う温度に応じた運動。

❷**拡散**　粒子の熱運動により，気体分子や液体中の粒子が一様に広がる現象。

❸**物質の三態**　温度・圧力により，物質は**固体・液体・気体**のいずれかの状態をとる。



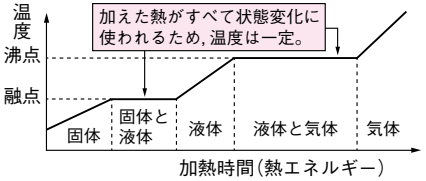
粒子は規則的に配列し，一定の位置で振動・回転している。

粒子はやや不規則に配列し，相互に位置を変える(流動性)。

粒子は空間を自由に運動。粒子間の引力は 0。

❹**融解熱**　物質 1mol の固体を液体にするのに必要な熱量。 例 氷 6.0kJ/mol(0℃)

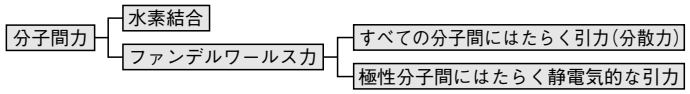
❺**蒸発熱**　物質 1mol の液体を気体にするのに必要な熱量。 例 水 41kJ/mol(100℃)



エネルギー…気体＞液体＞固体
密度…固体＞液体＞気体
(水の密度は，液体＞固体＞気体)

2 状態変化と分子間力

❶**分子間力**　分子間にはたらく弱い引力や相互作用の総称。



❷**ファンデルワールス力**　分子間力のうち，水素結合(後述)を除いたもの。

(a)構造の似た分子では，**分子量が大きいほど融点・沸点は高くなる。**

例

分子(分子量)	H_2(2)	O_2(32)	Cl_2(71)	Br_2(160)
分子間力	弱(小)	→	→	強(大)
沸点[℃]	−253	−183	−35	59

(b)分子量が同程度の分子では，無極性分子より極性分子の方が融点・沸点は高くなる。

❸**分子結晶**　多数の分子が分子間力により引き合い，規則的に配列した結晶。

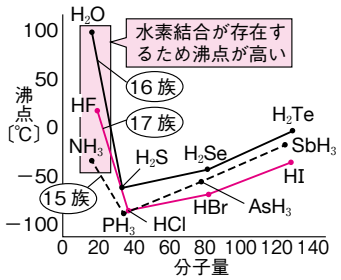
例 ドライアイス CO_2，ヨウ素 I_2，ナフタレン $C_{10}H_8$

(性質)軟らかく，融点が低い。電導性はない。昇華性を示すものが多い。

❹**水素結合**　電気陰性度の大きい F，O，N 原子の間で H 原子を仲立ちとして静電気的に引き合う結合。記号------で表す。

(a) HF，H_2O，NH_3 など強い極性分子間にできる。強い方向性がある。

(b)水素結合を形成している物質は，分子量に比べて，融点・沸点が異常に高くなる。



❺**分子間力の強さ**

水素結合＞極性分子間の分子間力＞無極性分子間の分子間力

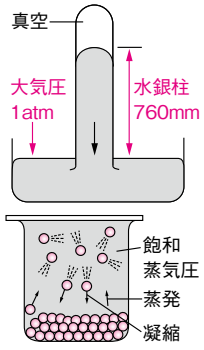
3 気体の圧力と蒸気圧

❶**気体の圧力**　気体分子が器壁に衝突するとき，単位面積あたりにおよぼす力。

1Pa(パスカル)は，$1m^2$ の面積に 1N(ニュートン)の力がはたらいたときの圧力。

❷**圧力の測定**　気体の圧力は水銀柱の高さを測定して求める。

$1atm(気圧) = 760mmHg(ミリメートル水銀柱) = 1.013 \times 10^5 Pa = 1013hPa(ヘクトパスカル)$



❸**気液平衡**　密閉容器に液体を入れて放置すると，やがて**(蒸発分子の数)＝(凝縮分子の数)**となり，見かけ上，蒸発が止まった状態になる。この状態を気液平衡という。

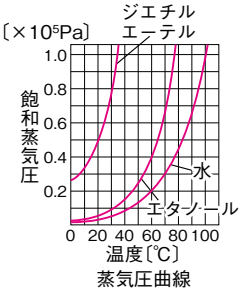
❹**飽和蒸気圧**[*1]　気液平衡のとき，蒸気(気体)の示す圧力。

(a)　温度が高くなると，急激に大きくなる。

(b)　一定温度では，空間の体積，他の気体によらず一定。

❺**蒸気圧曲線**　温度と蒸気圧の関係を表したグラフ。

分子間力の大きい物質ほど，蒸気圧は低く，沸点は高い。



蒸気圧曲線

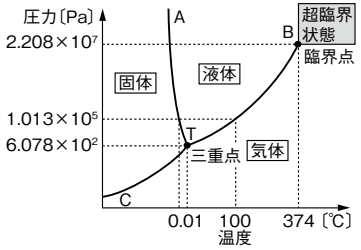
❻**沸騰と沸点**　飽和蒸気圧＝大気圧(外圧)になると，液体表面だけでなく，**液体内部からも激しい蒸発が起こる。**この現象を沸騰といい，沸騰の起こる温度を沸点という。

・外圧が低くなると，沸点は低くなる。

例 富士山頂(約 $0.54 \times 10^5 Pa$)で，水の沸点は約 92℃。

・外圧が高くなると，沸点は高くなる。

❼**状態図**　物質が温度・圧力に応じてとる状態を示した図。



[*1]単に蒸気圧ともいう。

水の状態図

固体・液体・気体が共存する T：**三重点。**

液体と気体を区切る曲線 BT：**蒸気圧曲線**

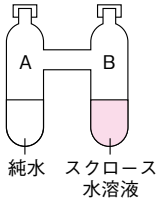
固体と液体を区切る曲線 AT：**融解曲線**

固体と気体を区切る曲線 CT：**昇華圧曲線**

これらの曲線上では両側の状態が共存する。

確認＆チェック

1 右図のように，密閉容器のA側に純水，B側に高濃度のスクロース（ショ糖）水溶液を同じ高さまで入れる。この容器を室温で長く放置すると，水面の高さはどうなるか。正しいものを下から記号で選べ。



(ア) 変化なし　(イ) B側が高くなる。
(ウ) A側が高くなる。　(エ) A側・B側ともに低くなる。

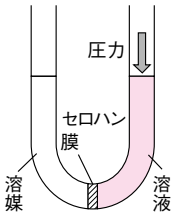
2 次の(1)～(3)で説明した現象を何というか。また，その実例を下の(ア)～(ウ)から記号で選べ。

(1) 水に不揮発性物質を溶かした溶液の蒸気圧は，純溶媒の蒸気圧よりも低くなる。
(2) 水に不揮発性物質を溶かした溶液の沸点は，純溶媒の沸点よりも高くなる。
(3) 溶液の凝固点は，純溶媒の凝固点よりも低くなる。
(ア) 純水は0℃で凍るが，海水は約－1.8℃で凍り始める。
(イ) 海水で濡れた水着はなかなか乾かない。
(ウ) 沸騰水に食塩を加えると，しばらく沸騰が止まる。

3 次の文の［　　］に適当な語句を入れよ。

ある溶液とその溶媒を，セロハン膜などの①［　　］で仕切ると，溶媒分子は膜を通って溶液の方へ移動する。この現象を溶媒の②［　　］といい，溶媒の移動を止めるためには，溶液側に余分な圧力を加える必要がある。この圧力を溶液の③［　　］という。

溶液の③は，モル濃度と絶対温度に比例する。この法則を④［　　］という。



4 次の物質の水溶液を，A：普通の水溶液，B：疎水コロイド，C：親水コロイドに分類し，記号で答えよ。

(ア) スクロース　(イ) ゼラチン　(ウ) 水酸化鉄(Ⅲ)
(エ) 硫黄　(オ) 硫酸銅(Ⅱ)　(カ) セッケン
(キ) デンプン　(ク) 粘土

解答

1 (イ)
➡純水の蒸気圧の方がスクロース水溶液の蒸気圧よりも高いため。

2 (1) 蒸気圧降下，(イ)
(2) 沸点上昇，(ウ)
(3) 凝固点降下，(ア)

3 ① 半透膜
② 浸透
③ 浸透圧
④ ファントホッフの法則

4 (ア) A　(イ) C
(ウ) B　(エ) B
(オ) A　(カ) C
(キ) C　(ク) B

例題 56　沸点上昇と凝固点降下

次の(ア)～(オ)の各物質1gを，それぞれ100gの水に溶かした溶液がある。この中で，沸点および凝固点が最も高いものはそれぞれ何か。化学式で答えよ。ただし，電解質は完全に電離しているものとする。原子量は，H = 1.0，C = 12，N = 14，O = 16，Na = 23，Cl = 35.5，K = 39，Ca = 40とする。

(ア) グルコース（$C_6H_{12}O_6$）　(イ) 尿素 $CO(NH_2)_2$　(ウ) 硝酸カリウム
(エ) 塩化カルシウム　(オ) エタノール

考え方 沸点上昇や凝固点降下の大きさ（**沸点上昇度，凝固点降下度**）は，いずれも溶液の**質量モル濃度に比例する**。本問は，溶かした溶媒の質量が同じなので，溶質粒子の物質量の大小を比較すればよい。

ただし，**電解質の場合は，電離によって生じたイオンの総物質量で比較する**必要がある。

〔電解質〕金属元素と非金属元素の化合物
$NaCl$　KNO_3　Na_2SO_4　$CaCl_2$
〔非電解質〕非金属元素のみの化合物
$C_6H_{12}O_6$　$C_{12}H_{22}O_{11}$　$CO(NH_2)_2$　C_2H_6O

$KNO_3 \longrightarrow K^+ + NO_3^-$（2倍）
$CaCl_2 \longrightarrow Ca^{2+} + 2Cl^-$（3倍）

分子量，および式量は，$C_6H_{12}O_6$ = 180，$CO(NH_2)_2$ = 60，KNO_3 = 101，$CaCl_2$ = 111，C_2H_6O = 46より，

(ア) $\frac{1}{180}$ mol　(イ) $\frac{1}{60}$ mol

(ウ) $\frac{1}{101} \times 2 = \frac{1}{50.5}$ mol

(エ) $\frac{1}{111} \times 3 = \frac{1}{37}$ mol　(オ) $\frac{1}{46}$ mol

∴ 溶質粒子の総物質量の最も多い(エ)の沸点上昇度が最も大きく，沸点は最も高い。

（ただし，エタノールだけは揮発性物質なので，沸点上昇は起こらないことに注意。）

∴ 溶質粒子の総物質量の最も少ない(ア)の凝固点降下度が最も小さく，凝固点は最も高い。

解答 沸点：$CaCl_2$　凝固点：$C_6H_{12}O_6$

例題 57　凝固点降下

水100gにグルコース $C_6H_{12}O_6$（分子量180）9.0gを溶かした溶液の凝固点は，水の凝固点に比べて0.93K低かった。これをもとにして次の問いに答えよ。

(1) 水1kgに非電解質1molを溶かした溶液の凝固点降下度は何Kか。
(2) 水100gに塩化ナトリウム0.025mol溶かした溶液の凝固点は何℃か。

考え方 (1) グルコース（ブドウ糖）水溶液の質量モル濃度は，$C_6H_{12}O_6$ = 180g/molより，

$\frac{9.0\text{g}}{180\text{g/mol}} \div 0.10\text{kg} = 0.50\text{〔mol/kg〕}$

凝固点降下度は溶質モル濃度に比例するから，1mol/kgの溶液の凝固点降下度を k_f（**モル凝固点降下**という）とおくと，

0.50 : 0.93 = 1 : k_f　∴ k_f = 1.86〔K〕

(2) 塩化ナトリウムは電解質で，水溶液中で次のように電離し，溶質粒子数は2倍になる。

$NaCl \longrightarrow Na^+ + Cl^-$

Na^+とCl^-によるイオンの総質量モル濃度は，

$\frac{0.025}{0.10} \times 2 = 0.50\text{〔mol/kg〕}$

$\Delta t = k_f \cdot m = 1.86 \times 0.50 = 0.93\text{〔K〕}$

この溶液の凝固点は，

$0 - 0.93 = -0.93\text{〔℃〕}$

解答 (1) 1.86K　(2) －0.93℃

例題 62　金属結晶の構造 ■■

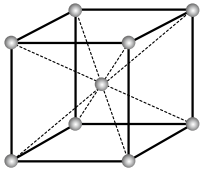
右図は，ある金属の結晶構造を示し，単位格子の 1 辺の長さは 4.3×10^{-8}cm であった。アボガドロ定数を 6.0×10^{23}/mol として，次の問いに答えよ。

(1)　この単位格子は何とよばれるか。

(2)　この単位格子中には何個の原子が含まれるか。

(3)　この金属原子の半径は何 cm か。($\sqrt{2} = 1.41$，$\sqrt{3} = 1.73$)

(4)　この金属の結晶の密度を 0.97g/cm^3 として，この金属の原子量を有効数字 2 桁で求めよ。($4.3^3 = 79.5$)



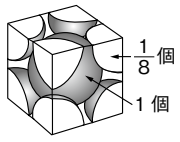
考え方　(1)　立方体の各頂点とその中心に原子が存在している上記の金属結晶の単位格子は，**体心立方格子**である。

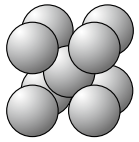
(2)

体心立方格子

単位格子中に含まれる原子の割合は，

各頂点…$\frac{1}{8}$個　中心…1 個

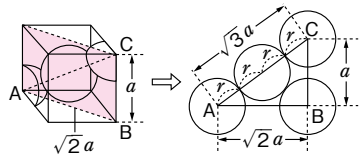




頂点は 8 つあるから，上記の単位格子中に含まれる原子の数は，

$\left(\frac{1}{8} \times 8\right) + 1 = 2$〔個〕

(3)　体心立方格子では，立方体の対角線(体対角線)上で原子が接している。単位格子の 1 辺の長さを a とすると体対角線の長さは $\sqrt{3}a$ で，原子半径 r の 4 倍分に等しい。



$\therefore \quad \sqrt{3}a = 4r$

$r = \frac{\sqrt{3}a}{4} = \frac{1.73 \times 4.3 \times 10^{-8}}{4} \fallingdotseq 1.85 \times 10^{-8} \fallingdotseq 1.9 \times 10^{-8}$〔cm〕

(4)　**単位格子の体積**〔cm^3〕×**結晶の密度**〔g/cm^3〕=**単位格子の質量**〔g〕の関係を利用する。

(2)より，単位格子中には原子 2 個分を含むから，単位格子の質量を 2 で割れば，金属原子 1 個分の質量が求められる。

金属原子 1 個分の質量 $= \frac{\text{単位格子の質量}}{2} = \frac{(4.3 \times 10^{-8})^3 \times 0.97}{2}$〔g〕

金属原子 1 個分の質量〔g〕×**アボガドロ定数**〔/mol〕=**金属のモル質量**〔g/mol〕

金属原子 1 個分の質量をアボガドロ定数倍したものがモル質量となる。原子量は原子 1mol あたりの質量(モル質量)から単位〔g/mol〕を取った値に等しい。

$\frac{(4.3 \times 10^{-8})^3 \times 0.97}{2} \times 6.0 \times 10^{23} \fallingdotseq 23.1 \fallingdotseq 23$〔g/mol〕

解答　(1) **体心立方格子**　(2) **2 個**　(3) **1.9×10^{-8}cm**　(4) **23**

問題 237 ～ 240 で，必要な場合は，アボガドロ定数を 6.0×10^{23}/mol として計算せよ。

練習問題

必は重要な必須問題。時間のないときはここから取り組む。

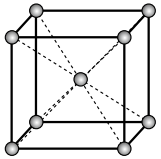
必 237 ★ □□　◀結晶の種類▶　次の文の［　　］に適当な語句を入れよ。

(1)　多数の金属原子が集まると，価電子はもとの原子から離れ，金属中を動き回るようになる。このような電子を①［　　］といい，①によって金属原子が規則的に配列した結晶を②［　　］という。

(2)　陽イオンと陰イオンが静電気的な引力で引き合う結合を③［　　］といい，③によってできた結晶を④［　　］という。

(3)　分子間にはたらく弱い引力を⑤［　　］という。多数の分子が⑤によって規則的に配列した結晶を⑥［　　］という。また，多数の原子が共有結合だけで結びついてできた結晶を⑦［　　］という。

必 238 ★★ □□　◀金属の結晶格子▶　ある金属の結晶は，図のような単位格子をもち，1 辺の長さは，0.32nm である。次の問いに答えよ。



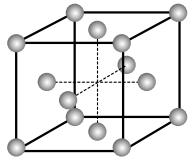
(1)　この単位格子には，何個の原子が含まれるか。

(2)　1 個の原子は何個の原子と接しているか。

(3)　この金属原子の半径〔nm〕を求めよ。ただし，$\sqrt{2} = 1.41$，$\sqrt{3} = 1.73$ とする。

(4)　この金属の原子量を 51 とする。この金属の結晶の密度〔g/cm^3〕を有効数字 2 桁で求めよ。ただし，$3.2^3 = 32.8$ とする。

必 239 ★★ □□　◀金属の結晶構造▶　ある金属の結晶は，右図のような単位格子をもつ。次の問いに答えよ。アボガドロ定数を N とする。



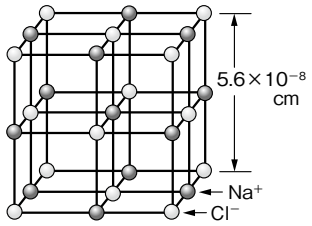
(1)　この単位格子には，何個の原子が含まれるか。

(2)　1 個の原子は，何個の原子と接しているか。

(3)　この単位格子の一辺の長さを a〔cm〕とすると，この金属原子の半径は何 cm か。(根号は開かなくてよい)

(4)　この金属の原子量を M として，この金属の結晶の密度〔g/cm^3〕を求めよ。

必 240 ★★ □□　◀イオン結晶▶　塩化ナトリウムの結晶の単位格子について，次の問いに答えよ。



(1)　結晶中で，Na^+ は何個の Cl^- と接しているか。

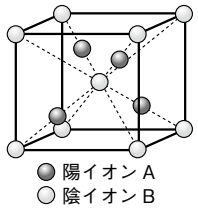
(2)　結晶中で，Na^+ を最も近い距離で取りまいている Na^+ の数は何個か。

(3)　Cl^- の半径は 1.7×10^{-8}cm であるとして，Na^+ の半径は何 cm か。

(4)　この結晶の密度〔g/cm^3〕を有効数字 2 桁で求めよ。(NaCl の式量：58.5)

問題 241 ～ 244 で，必要な場合は，気体定数 $R = 8.3 \times 10^3$ Pa·L/(K·mol)として計算せよ。

必 241 ★★ □□ ◀イオン結晶と組成式▶ 図は，陽イオン A と陰イオン B からできたイオン結晶の単位格子である。次の問いに答えよ。

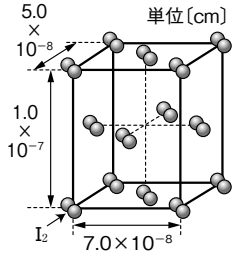


(1) 単位格子に含まれる A と B の個数をそれぞれ求めよ。

(2) この化合物の組成式を求めよ。

(3) A は何個の B と，B は何個の A とそれぞれ隣接しているか。

必 242 ★★ □□ ◀ヨウ素の結晶▶ ヨウ素の分子結晶の単位格子は右図のように直方体であり，ヨウ素分子は直方体の各頂点と，各面の中心に配置されている。ヨウ素の分子量を 254 として，次の問いに答えよ。

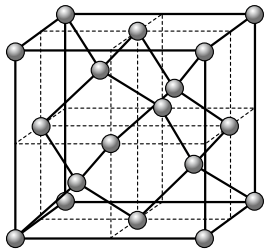


(1) この単位格子に含まれるヨウ素分子の数を求めよ。

(2) 単位格子の体積は何 cm^3 か。

(3) ヨウ素の分子結晶の密度は何 g/cm^3 か。

243 ★★ □□ ◀ダイヤモンド型結晶▶ ダイヤモンドを X 線で調べると，図のような単位格子をもち，1 辺の長さが 3.6×10^{-8}cm であることがわかった。次の問いに答えよ。

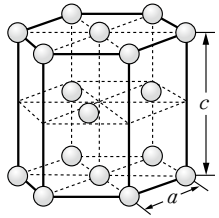


(1) この単位格子に含まれる炭素原子は何個か。

(2) 炭素原子の中心間距離〔cm〕を求めよ。ただし，$\sqrt{2} = 1.41$，$\sqrt{3} = 1.73$ とする。

(3) ダイヤモンドの結晶の密度〔g/cm^3〕を求めよ。ただし，原子量は C = 12，$3.6^3 = 46.7$ とする。

必 244 ★★ □□ ◀六方最密構造▶ マグネシウムの結晶は，右図のような六方最密構造をとっている。以下の問いに答えよ。



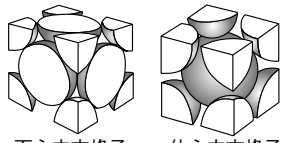
(1) 右図の結晶格子に含まれるマグネシウム原子の数を求めよ。

(2) マグネシウムの結晶の結晶格子は，正六角柱で $a = 0.320$nm，$c = 0.520$nm であるとする。この結晶格子の体積〔cm^3〕を求めよ。ただし，$\sqrt{2} = 1.41$，$\sqrt{3} = 1.73$ とする。

(3) マグネシウムの結晶の密度〔g/cm^3〕を求めよ。ただし，原子量は Mg = 24.3 とする。

センターチャレンジ 固体の構造

245 □□ ◀結晶の構造▶ 同じ大きさの球を用いて，面心立方格子と体心立方格子をつくった。図は，それぞれの単位格子を示す。結晶の構造に関する記述として正しいものを，次の①～⑤のうちから一つ選べ。$\sqrt{2} = 1.41$，$\sqrt{3} = 1.73$，$\pi = 3.14$ とする。



① 面心立方格子のほうが，体心立方格子よりも単位格子内に含まれる球の数が多い。

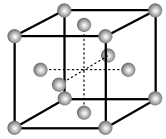
② 面心立方格子と体心立方格子では，単位格子の一辺の長さが等しい。

③ 面心立方格子と体心立方格子では，一つの球に接する他の球の数が等しい。

④ 面心立方格子よりも体心立方格子のほうが，球がより密に詰めこまれている。

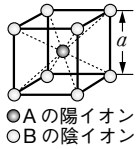
⑤ 面心立方格子と体心立方格子は，ともに単位格子の中心に隙間がない。

246 □□ ◀アボガドロ定数▶ 銀の結晶は，図に示す面心立方格子である。単位格子の一辺の長さを a〔cm〕，モル質量を M〔g/mol〕，結晶の密度を d〔g/cm^3〕とするとき，アボガドロ定数 N_A〔/mol〕を表す式として正しいものを，次の①～⑥のうちから一つ選べ。



① $\dfrac{M}{a^3d}$　② $\dfrac{2M}{a^3d}$　③ $\dfrac{4M}{a^3d}$　④ $\dfrac{Md}{a^3}$　⑤ $\dfrac{2Md}{a^3}$　⑥ $\dfrac{4Md}{a^3}$

247 □□ ◀イオン結晶▶ 図は，原子 A の陽イオン(●)と原子 B の陰イオン(○)からなる結晶の単位格子を示したものである。この単位格子は一辺の長さが a の立方体である。この結晶に関する記述として正しいものを，次の①～④のうちから一つ選べ。



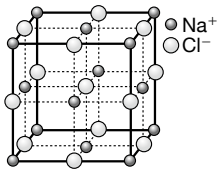
① 陽イオンと陰イオンとの最短距離は$\sqrt{3}a$ である。

② 単位格子の一辺の長さ a は，A と B の原子量およびアボガドロ定数だけから求められる。

③ 組成式は AB_2 である。

④ 陽イオンに隣接する陰イオンの数と，陰イオンに隣接する陽イオンの数は等しい。

248 □□ ◀イオン結晶▶ 右図は塩化ナトリウムの単位格子である。立方体の一辺の長さを a〔cm〕，アボガドロ定数を N_A〔/mol〕，塩化ナトリウムの式量を M とするとき，塩化ナトリウムの結晶の密度〔g/cm^3〕を表す式として最も適当なものを，次の①～⑥のうちから一つ選べ。



① $\dfrac{2M}{a^3N_A}$　② $\dfrac{4M}{a^3N_A}$　③ $\dfrac{8M}{a^3N_A}$　④ $\dfrac{a^3N_A}{2M}$　⑤ $\dfrac{a^3N_A}{4M}$　⑥ $\dfrac{a^3N_A}{8M}$

④　電解質。$AlK(SO_4)_2 \rightarrow Al^{3+} + K^+ + 2SO_4^{2-}$
$0.1 \times 4 = 0.4$〔mol/kg〕
⑤　電解質。$K_2SO_4 \longrightarrow 2K^+ + SO_4^{2-}$
$0.2 \times 3 = 0.6$〔mol/kg〕
よって，凝固点降下度が最も小さいものは，①。

解答　①

234 **解説**　純溶媒と溶液を半透膜で仕切ると，溶媒分子が半透膜を通って溶液中に移動する。これを溶媒の**浸透**といい，溶媒が半透膜を通って浸透しようとする圧力をその溶液の**浸透圧**という。一般に，希薄溶液の浸透圧 Π は，溶質の種類に無関係で，溶液のモル濃度 C と絶対温度 T に比例する（**ファントホッフの法則**）。

絶対温度 T〔K〕において，モル濃度が C〔mol/L〕の溶液の浸透圧を Π〔Pa〕，気体定数を R〔Pa･L/(K･mol)〕とすると，次式が成り立つ。

$\Pi = CRT$

非電解質の分子量を M とすると，次式が成り立つ。

$$498 = \frac{\frac{0.10}{M}}{\frac{10}{1000}} \times 8.3 \times 10^3 \times (273 + 27)$$

よって，$M = 5.0 \times 10^4$

解答　③

235 **解説**　溶液の温度を徐々に下げていくと，凝固点に達してもまだ凝固は始まらず，さらに下がった温度で凝固が始まる。このように凝固点以下であるにも関わらず液体として存在している状態を**過冷却**という。

過冷却が起こらなかったと仮定したとき，理想的な溶液の凝固点は，冷却曲線 B の直線部分を左に延長して求めた点 q となり，その温度は 4.99℃である。

図より，凝固点降下度は，「点 p の温度－点 q の温度」で
$5.50 - 4.99 = 0.51$〔K〕である。

質量モル濃度〔mol/kg〕$= \frac{\text{溶質の物質量〔mol〕}}{\text{溶媒の質量〔kg〕}}$ より，

有機化合物 X の分子量を M とすると，モル質量は M〔g/mol〕だから，有機化合物 X（非電解質）のベンゼン溶液の質量モル濃度は，

$$\frac{\frac{1.22}{M}}{0.0500} = \frac{24.4}{M}\text{〔mol/kg〕}$$

凝固点降下度 Δt＝モル凝固点降下 k × 質量モル濃度 m

$$0.51 = 5.1 \times \frac{24.4}{M}$$

$\therefore \quad M = 244$

解答　⑤

236 **解説**　①　塩化鉄（Ⅲ）の水溶液を沸騰水に加えると，加水分解が起こって赤褐色の水酸化鉄（Ⅲ）のコロイド溶液ができる。

$FeCl_3 + 3H_2O \longrightarrow Fe(OH)_3 + 3HCl$

金属の水酸化物のコロイドは，ふつう正に帯電したコロイドだから，電気泳動では陰極のほうへ移動する。〔×〕

②　疎水コロイドの表面は正または負の電荷を帯びており，コロイド粒子どうしが反発している。しかし，少量の電解質を加えることにより，表面の電荷が打ち消されるため，電気的な反発力を失って沈殿する。この現象を**凝析**という。凝析を起こさせるための電解質は，コロイド粒子のもつ電荷と反対符号で価数の大きなイオンほど有効である。硫黄のコロイドは負に帯電したコロイドだから，凝析をおこすには Na^+ よりも Mg^{2+}，さらに Al^{3+} のほうが有効である。〔×〕

③　水溶液中のふつうの分子やイオンはセロハン膜の目を通過して拡散するが，タンパク質などのコロイド粒子は通過できない。このような操作を**透析**という。〔○〕

④　コロイド溶液では，コロイド粒子はまわりの分散媒の粒子に衝突されることによって不規則に動いている。これを**ブラウン運動**という。

デンプンは高分子化合物でコロイド粒子であるから，限外顕微鏡を用いれば水溶液中のブラウン運動を観察することができる。〔×〕

⑤　ゼラチンはタンパク質で，親水コロイドであるから少量の電解質を加えても凝析しない。多量の電解質を加えると**塩析**が起こる。〔×〕

⑥　コロイド粒子の直径はおよそ $10^{-9} \sim 10^{-7}$m であり，セロハンなどの半透膜は通過できないが，ろ紙は通過できる。したがって，コロイド粒子をろ紙上に集めることはできない。〔○〕

⑦　牛乳など流動性を示すコロイドを**ゾル**，ゼリーやこんにゃくのように流動性を失ったコロイドを**ゲル**といい，さらにゲルを乾燥させたコロイドを**キセロゲル**という。〔○〕

解答　③，⑥，⑦

参考　**木綿豆腐と絹ごし豆腐の違い**

豆腐は豆乳に凝固剤を加えてつくられるが，その外観や食感などにより，木綿豆腐と絹ごし豆腐に分けられる。**木綿豆腐**は豆乳にニガリ（$MgCl_2$ や $CaSO_4$ など）を加えて凝集させ，さらに木綿布に包んで水分を減らしながら固めたもので，その表面に布目が見られる。一方，**絹ごし豆腐**は豆乳にグルコノラクトンなどの強力な凝固剤を加えて，水分を減らさずにそのまま固めたもので，きめが細かく，その表面には布目は見られない。なお，２種類の豆腐中の主な栄養成分量（100g 当たりの平均値）は次の通りであり，水分を減らした木綿豆腐の方が栄養価は少し高い。

	エネルギー	水分	タンパク質	脂質	Ca
木綿豆腐	77kcal	85.1g	7.6g	4.2g	0.12g
絹ごし豆腐	59kcal	88.5g	5.8g	3.0g	0.09g

14　固体の構造

237 **解説**　(1)　**金属結晶**は，金属原子が自由電子の仲立ちによる**金属結合**によってできた結晶である。陽イオンに近い状態にある金属原子が自由電子によって結びつけられている。

(2)　**イオン結晶**は，陽イオンと陰イオンが静電気的な引力（クーロン力）による**イオン結合**によってできた結晶である。

(3)　**分子結晶**は，分子が**分子間力（ファンデルワールス力）**によって集合してできた結晶である。**共有結合の結晶**は，多数の原子が共有結合によって次々に結合してできた結晶である。

解答　① **自由電子**　② **金属結晶**
③ **イオン結合**　④ **イオン結晶**
⑤ **分子間力（ファンデルワールス力）**
⑥ **分子結晶**　⑦ **共有結合の結晶**

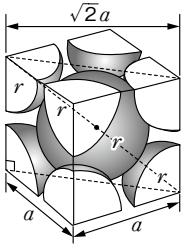
238 **解説**　(1)　この金属結晶の単位格子は体心立方格子である。単位格子にある各頂点の原子は $\frac{1}{8}$ 個ずつ，立方体の中心の原子は 1 個分が含まれる。

$\frac{1}{8} \times 8 + 1 = 2$〔個〕

(2)　結晶中で 1 つの粒子の周囲に最も近接する他の粒子の数を**配位数**という。体心立方格子の立方体の中心の原子に着目すると，立方体の各頂点の原子 8 個と近接しており，配位数は 8 である。

(3)　**体心立方格子**では，右図のように，単位格子の立方体の対角線上で原子が接している。単位格子の 1 辺の長さを a とすると，三平方の定理より体対角線の長さは $\sqrt{3}\,a$ で，この長さは原子半径 r の 4 倍に等しい。

$4r = \sqrt{3}\,a$



$\therefore \quad r = \frac{\sqrt{3}\,a}{4} = \frac{1.73 \times 0.32}{4} \fallingdotseq 0.138 \fallingdotseq 0.14$〔nm〕

(4)　この原子 1mol（6.0×10^{23} 個）の質量は 51g だから，原子 1 個あたりの質量は，$\frac{51}{6.0 \times 10^{23}}$〔g〕

単位格子には，この原子が 2 個分含まれるので，
$0.32\text{nm} = 0.32 \times 10^{-9}\text{m} = 3.2 \times 10^{-8}\text{cm}$ より，

$$\text{密度} = \frac{\text{単位格子の質量}}{\text{単位格子の体積}} = \frac{\frac{51}{6.0 \times 10^{23}} \times 2}{(3.2 \times 10^{-8})^3}$$

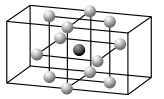
$\fallingdotseq 5.18 \fallingdotseq 5.2$〔g/cm^3〕

解答　(1) **2 個**　(2) **8 個**　(3) **0.14nm**　(4) **5.2g/cm^3**

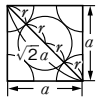
239 **解説**　(1)　面心立方格子では，単位格子の頂点 8 か所と，面の中心 6 か所に原子が位置している。したがって，単位格子に含まれる原子の数は，

$\frac{1}{8} \times 8 + \frac{1}{2} \times 6 = 4$〔個〕

(2)　面心立方格子の単位格子を右図のように 2 つつなぎ，その中央にある●の原子に着目すると，○の 12 個の原子と接していることがわかる。



(3)　面心立方格子では右図のように，単位格子の面の対角線上で原子が接している。単位格子の 1 辺の長さを a とすると，三平方の定理より面対角線の長さは $\sqrt{2}\,a$ で，この長さは原子半径 r の 4 倍に等しい。



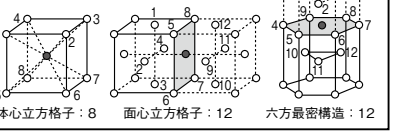
$4r = \sqrt{2}\,a \qquad \therefore \quad r = \frac{\sqrt{2}\,a}{4}$

(4)　この金属の原子量が M だから，この原子 1mol（6.0×10^{23} 個）の質量は M〔g〕。
原子 1 個あたりの質量は M/N〔g〕。
単位格子には，この原子が 4 個分含まれるので，

$$\text{密度} = \frac{\text{単位格子の質量}}{\text{単位格子の体積}} = \frac{\frac{M}{N} \times 4}{a^3} = \frac{4M}{a^3 N}\text{〔g/cm}^3\text{〕}$$

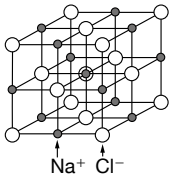
解答　(1) **4 個**　(2) **12 個**　(3) $\frac{\sqrt{2}\,a}{4}$ **cm**
(4) $\frac{4M}{a^3 N}$ **g/cm^3**

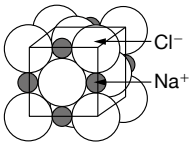
参考　**金属結晶の配位数**



240 ～ 243

240 解説　NaClの結晶では，Na^+とCl^-はそれぞれ**面心立方格子**の配列をとっている。





(1)　結晶格子において，1個の粒子をとり囲む最も近接する他の粒子の数を**配位数**という。イオン結晶では，あるイオンをとり囲む反対符号のイオンの数が配位数になる。単位格子の中心のNa^+に着目すると，その上下，左右，前後に合計6個のCl^-がある。

(2)　一方，中心のNa^+は，その回りを合計12個のNa^+でとり囲まれている(これは配位数ではない)。

(3)　問題文の単位格子を実際のイオンの大きさと同じ大きさの比の球で表すと，上図のようになる。Na^+とCl^-は，単位格子の各辺上で接している。図の単位格子の長さと，各イオン半径との関係は，

$(Na^+の半径\times2)+(Cl^-の半径\times2)=(一辺の長さ)$

$(Na^+の半径\times2)+(1.7\times10^{-8}\times2)=5.6\times10^{-8}$

∴　Na^+の半径$=1.1\times10^{-8}$〔cm〕

(4)　単位格子中のNa^+とCl^-は，いずれも面心立方格子の配列をしている。

Na^+：$\frac{1}{4}$(辺上)$\times12+1$(中心)$=4$〔個〕

Cl^-：$\frac{1}{8}$(頂点)$\times8+\frac{1}{2}$(面心)$\times6=4$〔個〕

∴　単位格子中には，NaClを4個分含む。

NaCl 1個分の質量は，NaCl 1molの質量が58.5gだから，$\frac{58.5}{6.0\times10^{23}}$〔g〕に等しい。

$$密度=\frac{単位格子の質量}{単位格子の体積}=\frac{\frac{58.5}{6.0\times10^{23}}\times4}{(5.6\times10^{-8})^3}$$

$\fallingdotseq2.22\fallingdotseq2.2$〔g/cm³〕

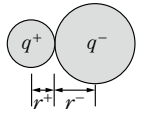
解答　(1) **6個**　(2) **12個**　(3) **1.1×10^{-8}cm**　(4) **2.2g/cm³**

参考　**イオン結合の強さ**

イオン結晶の結合力は，陽イオンと陰イオンとの間の**静電気力(クーロン力)**の大きさで決まる。クーロン力fは，次式で表される。

$$f=\frac{k\times q^+\times q^-}{(r^++r^-)^2}$$

(q^+，q^-は各イオンの電荷
r^+，r^-は各イオンの半径
kはクーロンの法則の定数)



電荷が同じ陽イオンと陰イオンの場合，イオン半径が，$Na^+<K^+<Rb^+$の順に大きくなると，クーロン力は，NaCl > KCl > RbClの順に弱くなり，この順に融点が低くなる。

CaO(Ca^{2+}とO^{2-})は，NaCl(Na^+とCl^-)よりも，イオンの価数がそれぞれ2倍なので，クーロン力はかなり強くなる。したがって，CaO(融点2572℃)はNaCl(融点801℃)に比べてかなり融点が高い。

241 解説　(1)　陽イオンAは，単位格子中に$1\times4=4$〔個〕含まれる。

陰イオンBは，各頂点に8個，中心に1個存在するので，$\frac{1}{8}\times8+1=2$〔個〕含まれる。

(2)　単位格子中に陽イオンAが4個と陰イオンBが2個含まれるので，両イオンの数の比は，

A：B＝4：2＝2：1　組成式はA_2Bとなる。

(3)　陽イオンAは対角線上にある陰イオンB 2個と隣接している。立方体の中心にある陰イオンBはその周囲にある陽イオンA 4個と隣接している。

解答　(1) **A：4個　B：2個**　(2) **A_2B**　(3) **A：2個　B：4個**

242 解説　(1)　ヨウ素分子は，単位格子の頂点8か所と，面の中心6か所に位置している。

単位格子に含まれるI_2分子の数は，

$\frac{1}{8}\times8+\frac{1}{2}\times6=4$〔個〕

(2)　直方体の体積＝(縦)×(横)×(高さ)より

$=5.0\times10^{-8}\times7.0\times10^{-8}\times1.0\times10^{-7}$

$=3.5\times10^{-22}$〔cm³〕

(3)　分子量が$I_2=254$より，モル質量は254g/mol。

I_2分子1個の質量は，$\frac{254}{6.0\times10^{23}}$〔g〕

単位格子中にはI_2分子が4個含まれるから，

$$密度=\frac{単位格子の質量}{単位格子の体積}=\frac{\frac{254}{6.0\times10^{23}}\times4}{3.5\times10^{-22}}$$

$\fallingdotseq4.83\fallingdotseq4.8$〔g/cm³〕

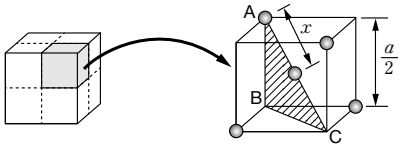
解答　(1) **4個**　(2) **3.5×10^{-22}cm³**　(3) **4.8g/cm³**

243 解説　(1)　単位格子の一辺の長さをaとおく。ダイヤモンドにおける炭素原子は，単位格子の各頂点と各面の中心，および，一辺$\frac{a}{2}$の小立方体の中心を1つおきに占めている。したがって，

$\frac{1}{8}\times8+\frac{1}{2}\times6+4=8$〔個〕

244 ～ 245

(2)　小立方体の中心に位置する炭素原子は，その頂点に位置する4つの炭素原子と結合している。



上図の斜線で示す△ABCを考えると，原子の中心間距離をx〔cm〕として，

$AB=\frac{a}{2}$，$BC=\sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2+\left(\frac{a}{2}\right)^2}=\frac{\sqrt{2}a}{2}$，$AC=2x$

△ABCの三平方の定理より，

$(2x)^2=\left(\frac{a}{2}\right)^2+\left(\frac{\sqrt{2}a}{2}\right)^2$

$x=\frac{\sqrt{3}a}{4}=\frac{1.73\times3.60\times10^{-8}}{4}\fallingdotseq1.55\times10^{-8}$〔cm〕

(3)　C原子1個の質量は，$\frac{12}{6.0\times10^{23}}$〔g〕

単位格子中にはC原子を8個含むから，

$$密度=\frac{単位格子の質量}{単位格子の体積}=\frac{\frac{12}{6.0\times10^{23}}\times8}{(3.6\times10^{-8})^3}$$

$\fallingdotseq3.42\fallingdotseq3.4$〔g/cm³〕

解答　(1) **8個**　(2) **1.6×10^{-8}cm**　(3) **3.4g/cm³**

参考　**充填率とは**

単位格子の体積に対する原子(球)の体積の割合を**充填率**という。単位格子の一辺の長さをa，原子半径をrとすると，

①　面心立方格子では，

$\frac{\frac{4}{3}\pi r^3\times4}{a^3}\times100$〔%〕。　$r=\frac{\sqrt{2}}{4}a$より，

充填率は，$\frac{\sqrt{2}\pi}{6}\times100\rightarrow$74.0%

②　体心立方格子では，

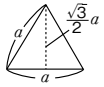
$\frac{\frac{4}{3}\pi r^3\times2}{a^3}\times100$〔%〕。　$r=\frac{\sqrt{3}}{4}a$より，

充填率は，$\frac{\sqrt{3}\pi}{8}\times100\rightarrow$68.0%

③　六方最密構造の充填率も74.0%である。

244 解説　(1)　$\frac{1}{6}$(頂点)$\times12+\frac{1}{2}$(面心)$\times2+3$(内部)$=6$〔個〕

(2)　六方最密構造の底面の正六角形は，右図の一辺aの正三角形を6つ合わせたものである。



したがって，底面積Sは，

$S=\frac{1}{2}\left(a\times\frac{\sqrt{3}}{2}a\right)\times6=\frac{3\sqrt{3}a^2}{2}$〔nm²〕

よって，正六角柱の体積Vは，

$V=\frac{3\sqrt{3}a^2}{2}\times c=\frac{3\sqrt{3}a^2c}{2}$〔nm³〕

ここへ　$a=0.320\text{nm}=3.20\times10^{-8}\text{cm}$

$c=0.520\text{nm}=5.20\times10^{-8}\text{cm}$　を代入

$V=\frac{3\times1.73\times(3.20\times10^{-8})^2\times(5.20\times10^{-8})}{2}$

$\fallingdotseq1.381\times10^{-22}\fallingdotseq1.38\times10^{-22}$〔cm³〕

(3)　Mgのモル質量は24.3g/molであるから，

Mg原子1個の質量は，$\frac{24.3}{6.0\times10^{23}}$〔g〕

単位格子中にはMg原子6個分が含まれるから，

$$結晶の密度=\frac{結晶格子の質量}{結晶格子の体積}=\frac{\frac{24.3}{6.0\times10^{23}}\times6}{1.381\times10^{-22}}$$

$\fallingdotseq1.760\fallingdotseq1.76$〔g/cm³〕

解答　(1) **6個**　(2) **1.38×10^{-22}cm³**　(3) **1.76g/cm³**

245 解説　①　体心立方格子に含まれる粒子の数は，$\frac{1}{8}$(頂点)$\times8+1$(中心)$\times1=2$個

面心立方格子に含まれる粒子の数は，

$\frac{1}{8}$(頂点)$\times8+\frac{1}{2}$(面心)$\times6=4$個　〔○〕

②　球の半径をr，単位格子の一辺の長さを面心立方格子はa，体心立方格子はbとする。

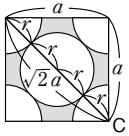
面心立方格子では，面の対角線上で原子が接しているから，

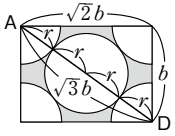
$\sqrt{2}a=4r$　　∴　$a=2\sqrt{2}r=2.82r$

体心立方格子では，立方体の対角線上で原子が接しているから，

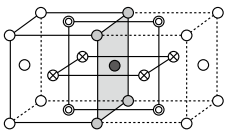
$\sqrt{3}b=4r$　　∴　$b=\frac{4\sqrt{3}}{3}r\fallingdotseq2.31r$

したがって，単位格子の一辺の長さは異なる。〔×〕





③　面心立方格子では，右図のように●の球はその周囲にある4個の○と，4個の⊗，4個の◎の計



12 個の原子と接する。

体心立方格子では，立方体の中心にある球は，立方体の各頂点の 8 個の球と接している。したがって，面心立方格子と体心立方格子では，一つの球に接する他の球の数が異なる。〔×〕

④　単位格子の体積中に占める球の体積の割合(**充填率**)を求めると，

【面心立方格子】$4r=\sqrt{2}\,a$ より $a=2\sqrt{2}\,r$

$$\frac{4\text{個の球の体積}}{\text{単位格子の体積}}=\frac{\frac{4}{3}\pi r^3\times 4}{(2\sqrt{2}\,r)^3}=\frac{\sqrt{2}\,\pi}{6}\fallingdotseq 0.74$$

【体心立方格子】$4r=\sqrt{3}\,a$ より $a=\frac{4\sqrt{3}}{3}r$

$$\frac{2\text{個の球の体積}}{\text{単位格子の体積}}=\frac{\frac{4}{3}\pi r^3\times 2}{\left(\frac{4\sqrt{3}}{3}r\right)^3}=\frac{\sqrt{3}\,\pi}{8}\fallingdotseq 0.68$$

したがって，面心立方格子のほうが体心立方格子よりも密に詰め込まれている。〔×〕

⑤　面心立方格子は単位格子の中心に球がなく隙間があるが，体心立方格子は単位格子の中心に球があり隙間がない。〔×〕

解答　①

246　解説　単位格子の質量〔g〕に対して，次式が成り立つ。

単位格子の体積〔cm³〕×密度〔g/cm³〕

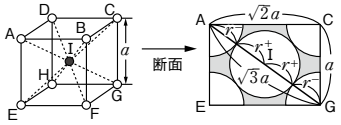
$=\dfrac{\text{モル質量〔g/mol〕}}{\text{アボガドロ定数〔/mol〕}}\times$単位格子当たりの粒子数

銀の単位格子は面心立方格子なので，単位格子当たりの粒子数は 4 である。その他は問題文中の記号を代入すると，

$a^3d=\frac{M}{N_A}\times 4$ より，$N_A=\frac{4M}{a^3d}$

解答　③

247　解説　①　陽イオンと陰イオンの最短距離は下図の「$r^+ + r^-$」に相当し，$\frac{\sqrt{3}\,a}{2}$ である。〔×〕



②　単位格子の質量に対して，次式が成り立つ。

単位格子の体積〔cm³〕×密度〔g/cm³〕

$=\dfrac{\text{モル質量〔g/mol〕}}{\text{アボガドロ定数〔/mol〕}}\times$単位格子当たりの粒子数

単位格子の一辺の長さ a を求めるには，単位格子の体積が必要であり，A と B の原子量(モル質量)とアボガドロ定数に加えて，結晶の密度も必要である。〔×〕

③　原子 A の陽イオンの数：1(中心)×1 = 1(個)

原子 B の陰イオンの数：$\frac{1}{8}$(頂点)×8 = 1 個

したがって，組成式は AB となる。〔×〕

④　図より，A の陽イオン●1 個に対して B の陰イオン○は 8 個が接している。同様に，B の陰イオン○1 個に対して，A の陽イオン●8 個と接している。〔○〕

解答　④

248　解説　図の単位格子に含まれる Na^+ と Cl^- の数は次のようになる。

Na^+：$\frac{1}{8}$(頂点)×8 + $\frac{1}{2}$(面の中心)×6 = 4(個)

Cl^-：$\frac{1}{4}$(辺の中心)×12 + 1(中心)×1 = 4(個)

単位格子には Na^+ と Cl^- が 4 個ずつ含まれているから，NaCl を 1 個の粒子と考えれば，それが 4 個分含まれていることになる。このとき，NaCl 粒子 1 個分の質量は，NaCl のモル質量 M〔g/mol〕とアボガドロ定数 N_A〔/mol〕を用いて，M/N_A〔g〕と表される。

また，NaCl 結晶の単位格子の体積は，一辺の長さ a〔cm〕を用いて a^3〔cm³〕と表される。したがって，NaCl 結晶の密度は，

$$\frac{\text{単位格子の質量(NaCl 粒子 4 個分の質量)〔g〕}}{\text{単位格子の体積〔cm}^3\text{〕}}$$

$$=\frac{\frac{M}{N_A}\times 4}{a^3}=\frac{4M}{a^3N_A}\text{〔g/cm}^3\text{〕}$$

解答　②

15 化学反応と熱

249　解説　(1)　**熱化学方程式**は，物質の変化を表す化学反応式の右辺に反応熱を書き加え，両辺を等号(=)で結んだ式である。物質の状態を書きそえるのを原則とするが，状態が明らかなときは，省略してよい。ただし，物質の状態変化を表す熱化学方程式では，必ず物質の状態を書きそえる。特に，水の場合，常温では気体と液体のいずれの状態でも存在しうるので，必ず明記する必要がある。また，同素体の存在する物質の場合も，C(黒鉛)，C(ダイヤモンド)のように，その種類を区別すること。

各反応熱は着目した物質 1mol あたりの値で表す約束があるので，熱化学方程式では，その物質の係数が 1 となるようにする。すなわち，反応熱の種類を区別するには，熱化学方程式中で係数が 1 の物質に着目すればよい。

反応熱	内容
燃焼熱	物質 1mol が完全燃焼するときに発生する熱量。正の値を示す。
生成熱	物質 1mol がその成分元素の単体から生成するときに出入りする熱量。
中和熱	酸と塩基の水溶液の中和で水 1mol を生じるときに発生する熱量。正の値を示す。
溶解熱	物質 1mol が多量の水に溶解するときに出入りする熱量。

(1)　NaCl が多量の水に溶解するときの**溶解熱**。
(2)　水の**蒸発熱**(吸熱であることに注意)。
(3)　左辺の C に着目すれば燃焼熱，右辺の CO に着目すれば**生成熱**となる。しかし，燃焼熱は物質の完全燃焼における発熱量だから，本問のような不完全燃焼のときは，燃焼熱とはいわない。
(4)　左辺の Al に着目して，Al の**燃焼熱**。
(5)　左辺の H_2 に着目すれば**燃焼熱**，右辺の H_2O(液)に着目すれば**生成熱**。どちらにも該当する。
(6)　酸と塩基の水溶液が中和して，水 H_2O1mol が生成しているから，**中和熱**。

(注意)　燃焼熱，生成熱…などの反応熱の単位は，〔kJ/mol〕であるが，熱化学方程式の右辺につける熱量の単位は〔kJ〕である。間違わないように！

解答　(1)…(ウ)　(2)…(オ)　(3)…(イ)　(4)…(ア)　(5)…(ア)，(イ)　(6)…(カ)

250　解説　(1)　エチレン 1mol あたりでは 1410kJ の発熱となる。エチレン C_2H_4 の完全燃焼では，CO_2 と H_2O(液)が生成する。また，エチレンの燃焼熱だから，左辺の C_2H_4 の係数を 1 にする。
(2)　メタノール CH_4O をつくるのに必要な単体は，C(黒鉛)，H_2，O_2 である。メタノールの生成熱だから，右辺の CH_4O の係数を 1 にする。
(3)　NaOH(固)1mol あたりでは，4.4 × 10 = 44〔kJ〕の発熱がある。多量の水は aq，NaOHaq のように化学式の後ろにつけた aq はその水溶液を表す。
(4)　気体分子中の共有結合 1mol を切断するのに必要なエネルギーを，その結合の**結合エネルギー**という。ただし，結合エネルギーを表すときは，通常，符号をつけずに絶対値で表す。しかし，熱化学方程式で表すときは，次のように符号をつける必要がある。
・結合を切断するとき……吸熱反応(−)
・結合が生成されるとき……発熱反応(+)
(5)　**中和熱**は，酸・塩基の水溶液が中和して，H_2O 1mol が生成するときの反応熱である。
HCl：1 × 0.5 = 0.5〔mol〕
NaOH：0.5 × 1 = 0.5〔mol〕
中和により水が 0.5mol 生成する。よって，生成する水 1mol あたりに換算すると，28 × 2 = 56〔kJ〕
(6)　状態変化も熱化学方程式で表すことができる。そのうち，融解熱(固体→液体)，蒸発熱(液体→気体)，昇華熱(固体→気体)は，吸熱(−)であることに注意。
(7)　気体分子中にあるすべての共有結合を切断してばらばらの分子にするのに必要なエネルギーを，その分子の**解離エネルギー**といい，その分子中にある各結合の結合エネルギーの和と等しい。
CH_4 分子 1mol 中には C−H 結合が 4mol 含まれるから，C−H 結合 1mol あたりの結合エネルギーの平均値はメタンの解離エネルギー 1644kJ/mol から，1644 ÷ 4 = 411kJ/mol となり，これが C−H 結合の結合エネルギーとなる。

解答　(1) $C_2H_4 + 3O_2 = 2CO_2 + 2H_2O$(液) + 1410kJ
(2) C(黒鉛) + $2H_2 + \frac{1}{2}O_2 = CH_4O$(液) + 237kJ
(3) NaOH(固) + aq = NaOHaq + 44kJ
(4) Cl_2(気) = 2Cl(気) − 239kJ
(5) HClaq + NaOHaq = NaClaq + H_2O + 56kJ
(6) C(黒鉛) = C(気) − 715kJ
(7) CH_4(気) = C(気) + 4H(気) − 1644kJ

251　解説　(1)　必要なメタノールの質量を x〔g〕とおく。
メタノールのモル質量は CH_3OH = 32.0〔g/mol〕。
メタノール 1mol の完全燃焼で，726kJ の発熱があるから，

$\frac{x}{32.0}\times 726 = 100$〔kJ〕

∴　$x \fallingdotseq 4.407 \fallingdotseq 4.41$〔g〕

(2)　HCl と NaOH の物質量を比較する。少ないほうが