

第10章 化学平衡

[この章の学習目標] 化学平衡に関する知識

(1) 生成自由エネルギー

標準生成自由エネルギー

$$\Delta G_{f,298}^{\circ} \quad \text{基準: } 25^{\circ}\text{C}, 1\text{ atm, 安定な単体(および } \text{H}^+(\text{aq})) \quad \dots\dots (1)$$

[補足1] 標準生成自由エネルギー

$$\Delta G_{f,298}^{\circ} \quad \text{基準: } 25^{\circ}\text{C}, 1\text{ atm, 各元素の安定な単体(及び, 水溶液中の } \text{H}^+)$$

$$\text{水素} \quad : \quad \Delta G_{f,298}^{\circ}(\text{H}_2, \text{ 気体}) = 0$$

$$\text{酸素} \quad : \quad \Delta G_{f,298}^{\circ}(\text{O}_2, \text{ 気体}) = 0$$

$$\text{炭素} \quad : \quad \Delta G_{f,298}^{\circ}(\text{C}, \text{ 黒鉛}) = 0$$

$$\text{臭素} \quad : \quad \Delta G_{f,298}^{\circ}(\text{Br}_2, \text{ 液体}) = 0$$

$$\text{水素イオン} \quad : \quad \Delta G_{f,298}^{\circ}(\text{H}^+, \text{ 水溶液}) = 0$$

$$\Delta G_{f,298}^{\circ}(\text{O}_3, \text{ 気体}) = 163.4 \text{ k J mol}^{-1}$$

$$\Delta G_{f,298}^{\circ}(\text{C}, \text{ ダイヤモンド}) = 2.866 \text{ k J mol}^{-1}$$

$$\Delta G_{f,298}^{\circ}(\text{Br}_2, \text{ 気体}) = 3.142 \text{ k J mol}^{-1}$$

$$\Delta G_{f,298}^{\circ}(\text{HBr}, \text{ 気体}) = -53.22 \text{ k J mol}^{-1}$$

$$\Delta G_{f,298}^{\circ}(\text{Br}^-, \text{ 水溶液}) = -102.82 \text{ k J mol}^{-1}$$

$$\Delta G_{f,298}^{\circ}(\text{OH}^-, \text{ 水溶液}) = -157.30 \text{ k J mol}^{-1}$$

生成自由エネルギー

$$\Delta G_{f,298}^* = \Delta G_{f,298}^{\circ} + \Delta G(\text{圧力変化}) \quad (\Delta G_{f,298}^* : 25^{\circ}\text{C}, P \text{ atm}) \quad \dots\dots (2)$$

[問1] 理想気体 n mol を一定温度 T で、圧力を P_1 から P_2 まで変化させたときのギブズ自由エネルギーの変化が、

$$\Delta G(\text{圧力変化}) = nRT \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (\text{ただし, } P_1 = 1 \text{ atm})$$

である(第8章(7)自由エネルギー 参照)ことから、温度 25°C 、圧力 P atm での理想気体の生成自由エネルギー(標準生成自由エネルギーではない) $\Delta G_{f,298}^*$ が、次式で表されることを確認せよ。

$$\Delta G_{f,298}^* = \Delta G_{f,298}^{\circ} + RT \ln(P) \quad (\text{生成自由エネルギーは } 1 \text{ mol 当たりの量, } P \text{ の単位は atm})$$

[問2] 25°C 、 100 atm の水素(理想気体)の生成自由エネルギー $\Delta G_{f,298}^*$ を求めよ。 《 $11.416 \text{ k J mol}^{-1}$ 》[問3] 25°C 、 23.71 mmHg の水蒸気(理想気体とする)の生成自由エネルギー $\Delta G_{f,298}^*$ を求めよ。ただし、水(気体)の標準生成自由エネルギー $\Delta G_{f,298}^{\circ}$ は $-228.596 \text{ k J mol}^{-1}$ である。 《 $237.192 \text{ k J mol}^{-1}$ 》[問4] 液体や固体の場合には、体積 V は圧力によらず、ほぼ一定であるものと仮定できる。この場合には、圧力を P_1 から P_2 まで変化させたときのギブズ自由エネルギーの変化は、

$$\Delta G(\text{圧力変化}) = V(P_2 - P_1) \quad (\text{ただし, } P_1 = 1 \text{ atm})$$

であることから、温度 25°C 、圧力 P atm での液体や固体の生成自由エネルギー $\Delta G_{f,298}^*$ は、

$$\Delta G_{f,298}^* = \Delta G_{f,298}^{\circ} + V(P_2 - P_1) \quad (\text{ただし, } P_1: \text{標準状態である } 1 \text{ atm, } P_1, P_2 \text{ の単位は Pa})$$

で近似できることを確認せよ。

[問5] 25℃, 100atmでの水(液体)の生成自由エネルギー $\Delta G_{f,298}^*$ を求めよ。ただし, 25℃での水(液体)の標準生成自由エネルギー $\Delta G_{f,298}^0$ は $-237.192 \text{ k J mol}^{-1}$, 水(液体)のモル体積は $17.962 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$ である。

《 $-237.012 \text{ k J mol}^{-1}$ 》

[問6] ゲルマニウムの原子量は72.61, 密度は 5.323 g cm^{-3} である。25℃, 100atmでのゲルマニウム(固体)の生成自由エネルギー $\Delta G_{f,298}^*$ を求めよ。 《 $0.137 \text{ k J mol}^{-1}$ 》

(2) 混合物

モル分率

$$x_A \equiv \frac{n_A}{n_A + n_B} \quad \dots\dots (3)$$

$$x_B \equiv \frac{n_B}{n_A + n_B} \quad \dots\dots (4)$$

理想気体の分圧

$$p_A = x_A P \quad \dots\dots (5)$$

$$p_B = x_B P \quad \dots\dots (6)$$

(3) 混合エンタルピー

理想混合物

$$\Delta H_{\text{mix}} = 0 \quad \dots\dots (7)$$

[問7] 圧力一定の条件下で, 可逆的に成分Aと成分Bを混合した。このとき, 熱の発生, 吸収がない場合, すなわち,

$$dq = 0$$

であるとき, エンタルピーの変化 dH は“零”であることを示せ。

(4) 混合エントロピー

理想混合物

$$\Delta S_{\text{mix}} = -R (n_A \ln x_A + n_B \ln x_B) \quad (T, P: \text{一定}) \quad \dots\dots (8)$$

[問8] $n \text{ mol}$ の理想気体の体積が, 温度一定条件下で V_1 から V_2 に変化した。このときのエントロピーの変化は,

$$\Delta S = nR \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

で表される(第8章(6)エントロピー参照)。理想気体Aが $n_A \text{ mol}$, 理想気体Bが $n_B \text{ mol}$ ある。この2つの理想気体を, 圧力一定の下で混合したとき, その体積は混合前の2つの理想気体の体積の和である。混合したことによるエントロピーの変化は, 混合前の気体の体積が混合後の体積(2つの気体の体積の和)に変化したものとして求まるから,

$$\Delta S(\text{気体Aについての混合}) = n_A R \ln \left(\frac{V(\text{混合後の全体積})}{V(\text{混合前の気体Aの体積})} \right)$$

$$\Delta S(\text{気体Bについての混合}) = n_B R \ln \left(\frac{V(\text{混合後の全体積})}{V(\text{混合前の気体Bの体積})} \right)$$

である。2つの気体を混合したときのエントロピーの変化は,

$$\Delta S_{\text{mix}} = \Delta S(\text{気体Aについての混合}) + \Delta S(\text{気体Bについての混合})$$

で求まる。このことから, ΔS_{mix} は, となることを示せ (x_A : 成分Aのモル分率, x_B : 成分Bのモル分率)

$$\Delta S_{\text{mix}} = -R (n_A \ln x_A + n_B \ln x_B) \quad (T, P: \text{一定})$$

[問9] 25℃, 1 molの水素(理想気体) 25 dm³ と 25℃, 3 molの窒素(理想気体) 75 dm³ を混ぜて, 25℃, 100 dm³ の気体混合物を得た。この時の混合エントロピーを求めよ。 《18.702 J K⁻¹》

[問10] 25℃, 1 atmの水素(理想気体) 10 dm³ と 25℃, 1 atmの窒素(理想気体) 30 dm³ を混ぜて, 25℃, 1 atmの理想気体混合物を得た。この時の混合エントロピーを求めよ。 《7.644 J K⁻¹》

(5) 混合自由エネルギー

理想混合物

$$\Delta G_{\text{mix}} = RT (n_A \ln x_A + n_B \ln x_B) \quad (T, P: \text{一定}) \quad \dots\dots (9)$$

[問11](a) 温度と圧力が一定の条件下で, 物質を混合するときの自由エネルギーの変化は, 次式となることを示せ。

$$\Delta G_{\text{mix}} = \Delta H_{\text{mix}} - T \Delta S_{\text{mix}}$$

(b) 2種類の物質A, Bから構成されている混合物が, 理想的な混合物であるときには, 混合エンタルピーと混合エントロピーは, それぞれ,

$$\Delta H_{\text{mix}} = 0$$

$$\Delta S_{\text{mix}} = -R (n_A \ln x_A + n_B \ln x_B)$$

であることから, 混合自由エネルギー(混合による自由エネルギーの変化量)は, 次式となることを示せ。

$$\Delta G_{\text{mix}} = RT (n_A \ln x_A + n_B \ln x_B)$$

[問12] 25℃, 1 atmのメタン 2 mol と, 25℃, 1 atmのエタン 3 molを混ぜ, 同温同圧の混合物を得た。このときの混合自由エネルギーを求めよ。 《-8.342 kJ》

(6) 混合物の自由エネルギー

理想混合物

$$\Delta G_{\text{mixture}} = n_A \Delta G_{f,T}^*(A) + n_B \Delta G_{f,T}^*(B) + RT (n_A \ln x_A + n_B \ln x_B)$$

($\Delta G_{f,T}^*$: 温度 T , 圧力 P での生成自由エネルギー) (T, P : 一定) …… (10)

[問13](a) A, Bの2成分から構成されている混合物がある。温度 T , 圧力 P で, このA成分の純粋な状態でのモル生成自由エネルギーが $\Delta G_{f,T}^*(A)$, B成分のそれが $\Delta G_{f,T}^*(B)$ であるとすると, この混合物全体の自由エネルギーは, 混合自由エネルギーを ΔG_{mix} とすると, 次式となることを示せ。

$$\Delta G_{\text{mixture}} = n_A \Delta G_{f,T}^*(A) + n_B \Delta G_{f,T}^*(B) + \Delta G_{\text{mix}}$$

(b) この混合物が理想的な混合物である場合には, 以下の式となることを示せ。

$$\Delta G_{\text{mixture}} = n_A \Delta G_{f,T}^*(A) + n_B \Delta G_{f,T}^*(B) + RT (n_A \ln x_A + n_B \ln x_B)$$

[問14] メタン(g)の $\Delta G_{f,298}^0$ は $-50.794 \text{ kJ mol}^{-1}$, エタン(g)の $\Delta G_{f,298}^0$ は $-32.89 \text{ kJ mol}^{-1}$ である。25℃での次の値を求めよ。ただし, 気体は理想気体であり, 理想的な混合物であるとする。

(a) メタン 2 molとエタン 3 molを含む 1 atmの気体混合物 [ヒント: メタンに関しては 1 atm (標準状態) のメタン 2 molを, モル分率 0.4 の混合物にして, エタンに関しては 1 atm (標準状態) のエタン 3 molを, モル分率 0.6 の混合物にする。]

(b) メタン 4 molとエタン 1 molを含む 1 atmの気体混合物

《-208.60 kJ, -242.27 kJ》

(7) 化学ポテンシャル

$$\mu_j \equiv \left(\frac{\partial G}{\partial n_j} \right)_{T, P, n_{j(\neq i)}} \quad (G: \text{系の自由エネルギー, } i \text{ は成分を表す}) \quad \dots\dots (11)$$

理想混合物

$$\mu_j = \Delta G_{f, T}^*(i) + RT \ln x_j \quad (i \text{ は成分を表す}) \quad \dots\dots (12)$$

($\Delta G_{f, T}^*(i)$: 温度 T , 圧力 P での i 成分(純粋な物質)の生成自由エネルギー)

[問15] 化学ポテンシャルは、混合物の自由エネルギー $\Delta G_{\text{mixture}}$ を、それぞれの成分について物質の量で偏微分することによって得られる。理想混合物についての自由エネルギーの式、

$$\Delta G_{\text{mixture}} = n_A \Delta G_{f, T}^*(A) + n_B \Delta G_{f, T}^*(B) + RT(n_A \ln x_A + n_B \ln x_B)$$

について、

$$\mu_A = \left(\frac{\partial \Delta G_{\text{mixture}}}{\partial n_A} \right)_{T, P, n_B}$$

を求める(すなわち、 $\Delta G_{\text{mixture}}$ を成分 A の量 n_A で偏微分する) と、

$$\mu_A = \Delta G_{f, T}^*(A) + RT \ln x_A$$

になることを示せ。

[問16] 理想混合物の化学ポテンシャルは、

$$\mu_A = \Delta G_{f, T}^*(A) + RT \ln x_A$$

で表される。理想気体混合物の場合には、

$$\mu_A = \Delta G_{f, T}^0(A) + RT \ln p_A$$

となることを示せ。ただし、 p_A は、圧力 P である系に含まれている成分 A の分圧で、 $p_A = x_A P$ である。

表1. 化学ポテンシャル $\mu_i = \mu_i^* + RT \ln a_i$ (i は成分を表す)

相	μ_i^*	a_i		
		理想状態	非理想状態	単位
気体	$\Delta G_{f, T}^0(i)$	p_i (分圧)	f_i (フガシテイ)	[atm]
液体 (非電解質)	$\Delta G_{f, T}^*(i)$	x_i (モル分率)	a_i (アクティビティ)	[-]
液体 (水溶液)		m_i (重量モル濃度)	a_i (アクティビティ)	[mol/kg]
固体 (共晶)		1	1	[-]
固体 (固溶体)		x_i (モル分率)	a_i (アクティビティ)	[-]

$\Delta G_{f, T}^0(i)$: 温度 T での気体の標準(1atmでの)生成自由エネルギー

$\Delta G_{f, T}^*(i)$: 温度 T , 圧力 P の状態での生成自由エネルギー

[問17] メタン(理想気体)とエタン(理想気体)が、理想的に混合された気体がある。つぎの状態でのメタンの化学ポテンシャルを求めよ。

(a) メタン2 molとエタン3 molを含む25°C, 1 atmの混合物

(b) メタン2 molとエタン3 molを含む25°C, 10 atmの混合物

$$\Delta G_{f,298}^{\circ}(\text{メタン, g}) = -50.794 \text{ kJ mol}^{-1}$$

$$\langle -53.07 \text{ kJ mol}^{-1}, -47.36 \text{ kJ mol}^{-1} \rangle$$

[問18] トルエン(液体)1 molとエチルベンゼン(液体)3 molの混合物は、理想液体混合物である。25°Cでのこの混合物中のトルエンの化学ポテンシャルを求めよ。

$$\Delta G_{f,298}^{\circ}(\text{トルエン, 液体}) = 114.1 \text{ kJ mol}^{-1}$$

[問19] モリブデンヘキサカルボニル, $\text{Mo}(\text{CO})_6$ は、常温で固体の物質であるが、25°Cで、0.106 mmHgの蒸気圧を示す。25°Cでのモリブデンヘキサカルボニル(気体)の化学ポテンシャルを求めよ。ただし、

$$\Delta G_{f,298}^{\circ}(\text{モリブデンヘキサカルボニル, 気体}) = -856 \text{ kJ mol}^{-1}$$

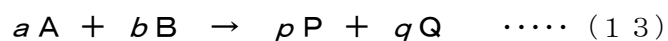
である。 $\langle -878 \text{ kJ mol}^{-1} \rangle$

[問20] 鉄カルボニル(ペンタカルボニル鉄), $\text{Fe}(\text{CO})_5$ は、常温で液体の物質であるが、25°Cで、30.1 mmHgの蒸気圧を示す。25°Cでの鉄カルボニル(気体)の化学ポテンシャルを求めよ。ただし、

$$\Delta G_{f,298}^{\circ}(\text{鉄カルボニル, 気体}) = -697 \text{ kJ mol}^{-1}$$

である。 $\langle -705 \text{ kJ mol}^{-1} \rangle$

(8) 反応自由エネルギー



化学ポテンシャル

$$\mu_A = \mu_A^* + RT \ln a_A \quad \dots\dots (14)$$

$$\mu_B = \mu_B^* + RT \ln a_B \quad \dots\dots (15)$$

$$\mu_P = \mu_P^* + RT \ln a_P \quad \dots\dots (16)$$

$$\mu_Q = \mu_Q^* + RT \ln a_Q \quad \dots\dots (17)$$

反応自由エネルギー

$$\Delta G_r = p\mu_P + q\mu_Q - (a\mu_A + b\mu_B) \quad \dots\dots (18)$$

$$= p\mu_P^* + q\mu_Q^* - (a\mu_A^* + b\mu_B^*) + RT \ln \left(\frac{(a_P)^p (a_Q)^q}{(a_A)^a (a_B)^b} \right) \quad \dots\dots (19)$$

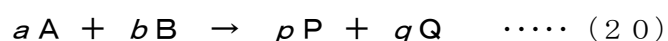
[問21] 反応自由エネルギー

$$\Delta G_r = p\mu_P + q\mu_Q - (a\mu_A + b\mu_B)$$

から、次式となることを示せ。

$$\Delta G_r = p\mu_P^* + q\mu_Q^* - (a\mu_A^* + b\mu_B^*) + RT \ln \left(\frac{(a_P)^p (a_Q)^q}{(a_A)^a (a_B)^b} \right)$$

(9) 平衡状態



平衡条件

$$\Delta G_r = 0 \quad \dots\dots (21)$$

基準状態での反応自由エネルギー

$$\Delta G_r^* \equiv p\mu_P^* + q\mu_Q^* - (a\mu_A^* + b\mu_B^*) \quad \dots\dots (22)$$

平衡定数

$$K \equiv \frac{(a_P)^p (a_Q)^q}{(a_A)^a (a_B)^b} \quad \dots\dots (23)$$

平衡関係式

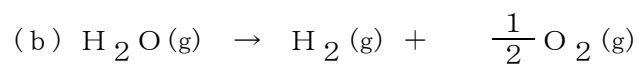
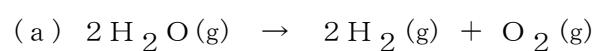
$$\Delta G_r^* = -RT \ln K \quad \dots\dots (24)$$

[問22] 反応自由エネルギー

$$\Delta G_r = p\mu_P + q\mu_Q - (a\mu_A + b\mu_B)$$

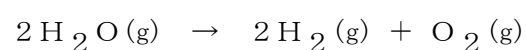
において、平衡条件 ($\Delta G_r = 0$) から、

$$\Delta G_r^* = -RT \ln K$$

となることを示せ。ただし、 ΔG_r^* は『基準状態での反応自由エネルギー』， K は『平衡定数』である。[問23] つぎの反応の 25°C での ΔG_r^* および平衡定数 K を求めよ。

$$\Delta G_{f,298}^0(\text{H}_2\text{O}, \text{g}) = -228.596 \text{ kJ mol}^{-1}$$

$$\langle 457.192 \text{ kJ}, 8.01 \times 10^{-8} \text{ l}, 228.596 \text{ kJ}, 8.94 \times 10^{-4} \text{ l} \rangle$$

[問24] つぎの反応について、 1000K での標準反応自由エネルギー ΔG_r^* および平衡定数 K を求めよ。

$$\Delta G_{f,1000}^0(\text{H}_2\text{O}, \text{g}) = -215.466 \text{ kJ mol}^{-1}$$

$$\Delta G_{f,1000}^0(\text{H}_2, \text{g}) = -14.834 \text{ kJ mol}^{-1}$$

$$\Delta G_{f,1000}^0(\text{O}_2, \text{g}) = -15.745 \text{ kJ mol}^{-1}$$

$$\langle 385.52 \text{ kJ}, 7.29 \times 10^{-2} \text{ l} \rangle$$

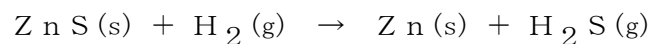
[問25] $2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow 2\text{H}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$ の反応について、 1000K での標準反応自由エネルギー ΔG_r^* は 385.52 kJ である。温度 1000K の密閉容器(体積: 2.0 dm^3)に水 5.0 mol を入れ、平衡状態になるまで温度一定で放置した。気体はすべて理想気体とする。

(a) 容器中の水素の分圧を求めよ。

(b) 容器に含まれる水素の量を求めよ。

$$\langle 8.50 \times 10^{-6} \text{ atm}, 2.07 \times 10^{-7} \text{ mol} \rangle$$

[問26] つぎの反応について、1000Kでの標準反応自由エネルギー ΔG_r^* および平衡定数 K を求めよ。



$$\Delta G_{f,1000}^0(\text{ZnS}, s) = -196.583 \text{ kJ mol}^{-1}$$

$$\Delta G_{f,1000}^0(\text{H}_2, g) = -14.834 \text{ kJ mol}^{-1}$$

$$\Delta G_{f,1000}^0(\text{Zn}, s) = -13.966 \text{ kJ mol}^{-1}$$

$$\Delta G_{f,1000}^0(\text{H}_2\text{S}, g) = -84.817 \text{ kJ mol}^{-1}$$

$$\langle 112.634 \text{ kJ}, 1.308 \times 10^{-6} \rangle$$

[問27] $\text{ZnS}(s) + \text{H}_2(g) \rightarrow \text{Zn}(s) + \text{H}_2\text{S}(g)$ の反応について、1000Kでの標準反応自由エネルギー ΔG_r^* は 112.60 kJ である。1 atmの圧力の水素を1000Kに熱した硫化亜鉛上を通したとき、出てきた水素ガスに含まれている硫化水素の分圧を求めよ。 [ヒント：気体の基準状態は1 atmである。] $\langle 1.308 \times 10^{-6} \text{ atm} \rangle$

(10) 純物質の気固平衡と気液平衡

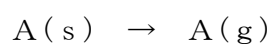
気固平衡

$$p^* = \exp\left(-\frac{\Delta G_{f,T}^0(g) - \Delta G_{f,T}^*(s)}{RT}\right) \quad \dots (25)$$

気液平衡

$$p^* = \exp\left(-\frac{\Delta G_{f,T}^0(g) - \Delta G_{f,T}^*(l)}{RT}\right) \quad \dots (26)$$

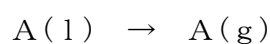
[問28] 気固平衡



において、平衡条件 ($\Delta G_r = 0$) から、この気体の圧力 p は、次式となることを示せ。

$$p = \exp\left(-\frac{\Delta G_{f,T}^0(g) - \Delta G_{f,T}^*(s)}{RT}\right)$$

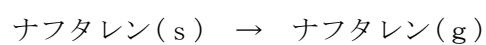
[問29] 気液平衡



において、平衡条件 ($\Delta G_r = 0$) から、この気体の圧力 p は、次式となることを示せ。

$$p = \exp\left(-\frac{\Delta G_{f,T}^0(g) - \Delta G_{f,T}^*(l)}{RT}\right)$$

[問30] ナフタレン(C_{10}H_8)は常温で固体の物質で、その蒸気は防虫作用を持っている。25℃で、固体のナフタレンと平衡状態にあるナフタレンの蒸気圧を求めよ。

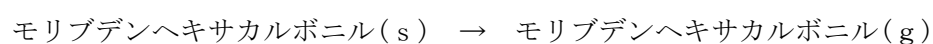


$$\Delta G_{f,298}^0(\text{ナフタレン}, s) = 200.6 \text{ kJ mol}^{-1}$$

$$\Delta G_{f,298}^0(\text{ナフタレン}, g) = 223.0 \text{ kJ mol}^{-1}$$

$$\langle 0.000119 \text{ atm} (0.090 \text{ mmHg}) \rangle \quad (\text{参考: 実測値は } 0.083 \text{ mmHg})$$

[問31] モリブデンヘキサカルボニル, $\text{Mo}(\text{CO})_6$ は, 常温で固体の物質である。25℃で, 固体のモリブデンヘキサカルボニルと平衡状態にある気体状態のモリブデンヘキサカルボニルの蒸気圧を求めよ。

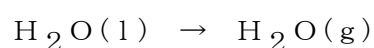


$$\Delta G_{f,298}^{\circ}(\text{モリブデンヘキサカルボニル, s}) = -878 \text{ kJ mol}^{-1}$$

$$\Delta G_{f,298}^{\circ}(\text{モリブデンヘキサカルボニル, g}) = -856 \text{ kJ mol}^{-1}$$

$$\langle 1.40 \times 10^{-4} \text{ atm (0.106 mmHg)} \rangle$$

[問32] 25℃で, 液体の水と平衡状態にある水蒸気の蒸気圧を求めよ。

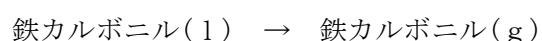


$$\Delta G_{f,298}^{\circ}(\text{H}_2\text{O, l}) = -237.192 \text{ kJ mol}^{-1}$$

$$\Delta G_{f,298}^{\circ}(\text{H}_2\text{O, g}) = -228.596 \text{ kJ mol}^{-1}$$

$$\langle 0.0312 \text{ atm (23.7 mmHg)} \rangle \quad (\text{参考: 実測値は } 0.03099 \text{ atm (23.55 mmHg)})$$

[問33] 鉄カルボニル(ペンタカルボニル鉄), $\text{Fe}(\text{CO})_5$ は, 常温で液体の物質である。25℃で, 液体の鉄カルボニルと平衡状態にある気体状態の鉄カルボニルの蒸気圧を求めよ。



$$\Delta G_{f,298}^{\circ}(\text{鉄カルボニル, l}) = -705 \text{ kJ mol}^{-1}$$

$$\Delta G_{f,298}^{\circ}(\text{鉄カルボニル, g}) = -697 \text{ kJ mol}^{-1}$$

$$\langle 0.040 \text{ atm (30 mmHg)} \rangle \quad (\text{参考: 実測値は } 4.7 \text{ kPa (0.046 atm, 35 mmHg)})$$

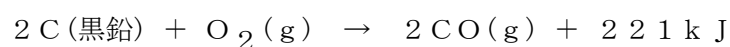
(11) ル・シャトリエの原理

ル・シャトリエの原理 (Le Chatelier's principle)

[問34] 平衡反応 $\text{N}_2(\text{g}) + 3\text{H}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{NH}_3(\text{g})$ で, 化学平衡の移動方向を推定せよ。

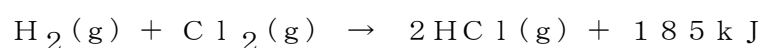
- (a) 圧力を上げたとき
- (b) 窒素ガスを, 更に, 加えたとき

[問35] つぎの平衡反応において, 化学平衡の移動方向を推定せよ。



- (a) 温度を上げたとき
- (b) 圧力を上げたとき
- (c) 酸素ガスを, 更に, 加えたとき

[問36] つぎの平衡反応において, 化学平衡の移動方向を推定せよ。



- (a) 温度を上げたとき
- (b) 圧力を上げたとき