

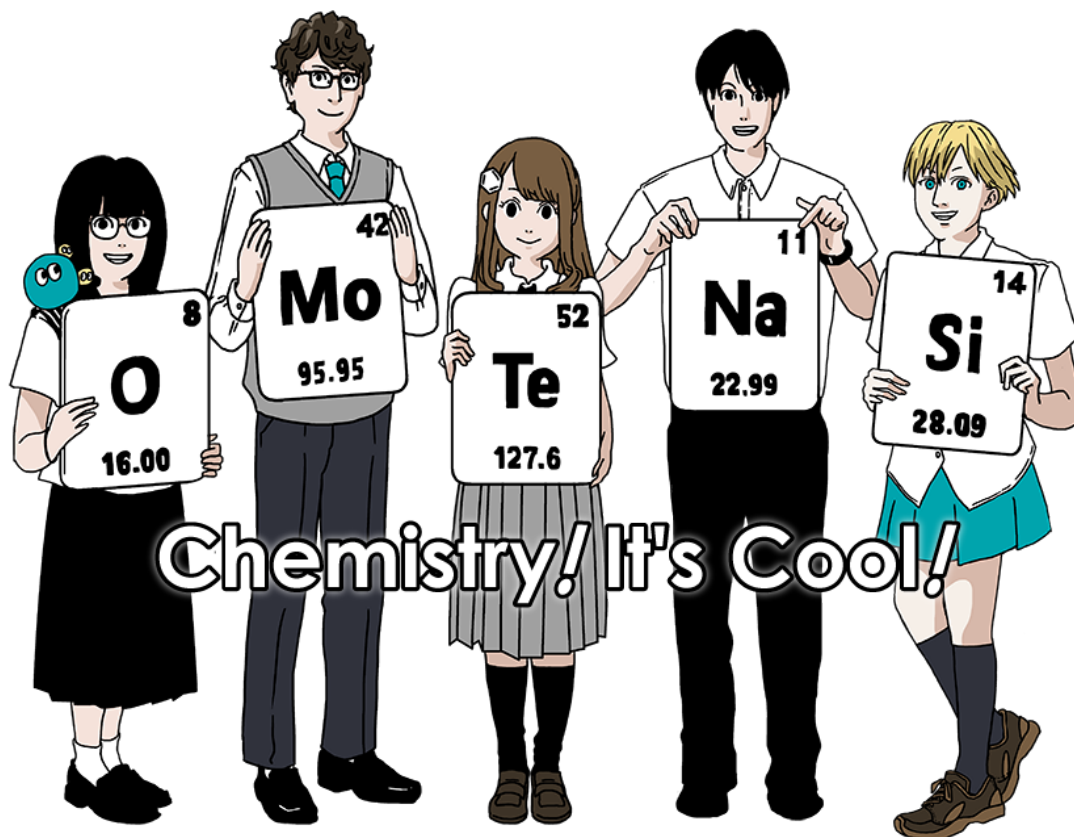
OMN-1 C-0 C-1

**OMN-1 C-0 C**  
MARYAM AL-HATMI

**IChO**  
**General instructions**  
**Cover sheet**

Please return this cover sheet together with all the related question sheets.

أولمبياد الكيمياء العالمي 2021 اليابان



## تعليمات عامة

- يُسمح لك باستخدام القلم فقط لكتابة الإجابة.
- يجب أن تكون الآلة الحاسبة غير قابلة للبرمجة.
- يتضمن هذا الامتحان 9 مسائل.
- يمكنك حل المسائل بأي ترتيب.
- سيكون لديك 5 ساعات لحل جميع المسائل.
- لا يمكنك بدء العمل إلا بعد إعطاء الأمر بالبدء.
- يجب كتابة جميع النتائج في مربعات الإجابة المناسبة باستخدام قلم على أوراق الإجابة. استخدم الجزء الخلفي من أوراق الأسئلة إذا كنت بحاجة إلى مسودة. تذكر أن الإجابات المكتوبة خارج مربعات الإجابات لن يتم تقديرها.
- اكتب الحسابات ذات الصلة في المربعات المناسبة عند الضرورة. سيتم منح درجات كاملة للإجابات الصحيحة فقط عندما يتم عرض عملك.
- سيقوم المراقب بالتحذير قبل 30 دقيقة من إنتهاء الامتحان.
- يجب أن تتوقف عن العمل عند إعطاء الأمر بالتوقف. سيؤدي عدم التوقف عن الكتابة إلى إبطال امتحانك.
- النسخة الإنجليزية الرسمية من هذا الاختبار متاحة عند الطلب فقط للتوضيح.
- لا يسمح لك بمغادرة قاعة الأمتحان دون إذن. إذا كنت بحاجة إلى أي مساعدة (آلة حاسبة معطلة ، تحتاج الذهاب إلى دورة المياه ، وما إلى ذلك) ، ارفع يدك وانتظر حتى وصول المراقب.

حظاً موفقاً

## جدول توزيع الدرجات

العنوان	مجموع النقاط	النسبة المئوية	
1 الهيدروجين على سطح معدني	24	11	
2 كبسولة وقت النظائر	35	11	
3 قانون لامبرت بير ؟	22	8	
4 كيمياء الأكسدة والاختزال للزنك	32	11	
5 السيليكون الغامض	60	12	
6 كيمياء الحالة الصلبة للمعادن الانتقالية	45	13	
7 اللعب بالمركبات العطرية الغير بنزينية	36	13	
8 الجزيئات العضوية الديناميكية وتناقضاتها	26	11	
9 يحب ويكره الكبسولات	23	10	
<b>المجموع</b>		<b>100</b>	

## الثوابت والمعادلات الفيزيائية

### الثوابت

	سرعة الضوء في الفراغ
	ثابت بلانك
	الشحنة الأولية
$m_e = 9.10938370 \times 10^{-31} \text{ kg}$	كتلة الإلكترون
$\epsilon_0 = 8.85418781 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$	ثابت كهربائي السماحية في الفراغ
$N_A = 6.02214076 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	ثابت افوجادرو
$k_B = 1.380649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$	ثابت بولتزمان
$F = N_A \times e = 9.64853321233100184 \times 10^4 \text{ C mol}^{-1}$	ثابت فاراداي
$R = N_A \times k_B = 8.31446261815324 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ $= 8.2057366081 \times 10^{-2} \text{ L atm K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$	ثابت الغاز
$u = 1 \text{ Da} = 1.66053907 \times 10^{-27} \text{ kg}$	وحدة الكتل الذرية
$p = 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$	الضغط القياسي
$p_{\text{atm}} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$	الضغط الجوي
$0^\circ\text{C} = 273.15 \text{ K}$	نقطة الصفر السليزية
$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$	الانجستروم
$1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$	البيكومتر
	شحنة الالكترون
	الميكرومتر
	نانومتر
	البيكومتر
	باي
	قاعدة اللوغارتم الطبيعي
	رقم يولر



OMN-1 C-0 G-4

**G0-4**  
Arabic (Oman)

## المعادلات

	قانون الغاز المثالي
	قانون كولومب
	القانون الاول للثرموديناميك حفظ الطاقة الانتالبية $H$
حيث $W$ هو عدد الحالة الصغرى.	الانتروبيا العشوائية على أساس مبدأ بولتزمان on based Entropy $S$ principle Boltzmann's
حيث $q_{rev}$ الحرارة للعملية العكسية	التغير في الانتروبيا $\Delta S$ entropy of change
حيث $K$ ثابت التوازن , $z$ عدد الالكترونات , $E^\circ$ الجهد القياسي .	طاقة جيبس للطاقة المحترة
حيث $[A]$ التركيز الى A	حاصل التفاعل $Q$ quotient reaction a For



OMN-1 C-0 G-5

**G0-5**  
Arabic (Oman)

التغير في الحرارة	حيث $c_m$ السعة الحرارية النوعية
معادلة نيرنست	حيث $C_{ox}$ تركيز المادة المؤكسدة ، $C_{red}$ تركيز المادة المختزلة
معادلة آرهينيوس equation Arrhenius	حيث $k$ قيمة ثابتة ، $A$ معامل أسي ، $E_a$ طاقة التنشيط
معادلة لامبرت بير equation Lambert-Beer	حيث $A$ هو الامتصاص ، $\epsilon$ معامل الامتصاص ، $l$ طول المسار ، $c$ تركيز المحلول
معادلة هاسلبالتش Henderson-Hasselbalch ( equation	من أجل الاتزان حيث $K_a$ ثابت الاتزان
طاقة الفوتون	حيث $\nu$ التردد ، $\lambda$ الطول الموجي للضوء ،
مجموع السلسلة الهندسية	When
المعادلة التقريبية لحل المسائل Approximation be can that equation problems solve to used	when ,

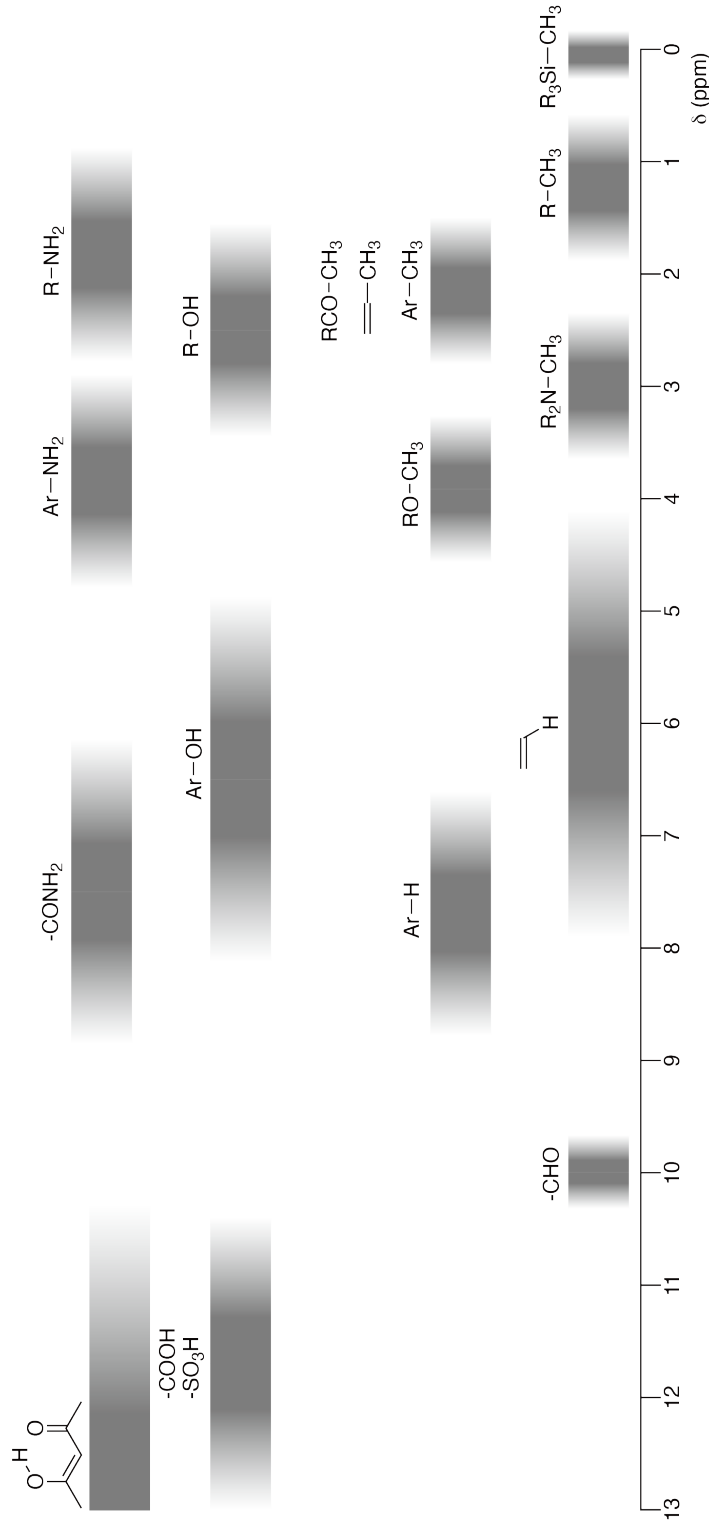
## الجدول الدوري

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 H Hydrogen 1.008																	2 He Helium 4.003
3 Li Lithium 6.968	4 Be Beryllium 9.012															9 F Fluorine 18.998	10 Ne Neon 20.180
11 Na Sodium 22.990	12 Mg Magnesium 24.306															17 Cl Chlorine 35.452	18 Ar Argon 39.948
19 K Potassium 39.098	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.956	22 Ti Titanium 47.867	23 V Vanadium 50.942	24 Cr Chromium 51.996	25 Mn Manganese 54.938	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.933	28 Ni Nickel 58.693	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.38	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.630	33 As Arsenic 74.922	34 Se Selenium 78.971	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.798
37 Rb Rubidium 85.468	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.906	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.906	42 Mo Molybdenum 95.95	43 Tc Technetium [99]	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.906	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.868	48 Cd Cadmium 112.414	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.710	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.904	54 Xe Xenon 131.293
55 Cs Caesium 132.905	56 Ba Barium 137.327	57-71 La-Lu Lanthanoids	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.948	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.217	78 Pt Platinum 195.084	79 Au Gold 196.967	80 Hg Mercury 200.592	81 Tl Thallium 204.384	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98	84 Po Polonium [210]	85 At Astatine [210]	86 Rn Radon [222]
87 Fr Francium [223]	88 Ra Radium [226]	89-103 Ac-Lr Actinoids	104 Rf Rutherfordium [267]	105 Db Dubnium [268]	106 Sg Seaborgium [271]	107 Bh Bohrium [272]	108 Hs Hassium [277]	109 Mt Meitnerium [276]	110 Ds Darmstadtium [281]	111 Rg Roentgenium [280]	112 Cn Copernicium [285]	113 Nh Nihonium [278]	114 Fl Flerovium [289]	115 Mc Moscovium [289]	116 Lv Livermorium [293]	117 Ts Tennessine [293]	118 Og Oganesson [294]
57-71 La-Lu Lanthanoids	89-103 Ac-Lr Actinoids	59 Pr Praseodymium 140.908	58 Ce Cerium 140.116	60 Nd Neodymium 144.242	61 Pm Promethium [145]	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.925	66 Dy Dysprosium 162.500	67 Ho Holmium 164.930	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.934	70 Yb Ytterbium 173.045	71 Lu Lutetium 174.967	103 Lr Lawrencium [262]	
		91 Pa Protactinium 231.036	90 Th Thorium 232.038	92 U Uranium 238.029	93 Np Neptunium [237]	94 Pu Plutonium [239]	95 Am Americium [243]	96 Cm Curium [247]	97 Bk Berkelium [247]	98 Cf Californium [252]	99 Es Einsteinium [252]	100 Fm Fermium [257]	101 Md Mendelevium [258]	102 No Nobelium [259]	103 Lr Lawrencium [262]		

Key:

113 Nh Nihonium [278]	atomic number
<b>Symbol</b>	name
atomic weight	[in parenthesis for the radioactive element]

الازاحة الكيميائية للرنين المغناطيسي للبروتون







OMN-1 C-0 G-8

**G0-8**  
Arabic (Oman)

group-substitution: alkyl one for  
الازاحة الكيمائية لمجموعة واحدة متفرعة

International Chemistry Olympiad 2021 Japan

53rd IChO2021 Japan

25th July - 2nd August, 2021

<https://www.icho2021.org>





OMN-1 C-0 G-2

# G0-2

English (Official)

## General Instruction

- You are allowed to use only pen to write the answer.
- Your calculator must be non-programmable.
- This examination has **9 problems**.
- You can solve the problems in any order.
- You will have **5 hours** to solve all problems.
- You can **begin** working only after the **START** command is given.
- All results must be written in the appropriate answer boxes with pen on the **answer sheets**. Use the back of the question sheets if you need scratch paper. Remember that answers written outside the answer boxes will not be graded.
- Write relevant calculations in the appropriate boxes when necessary. Full marks will be given for correct answers only when your work is shown.
- The invigilator will announce a **30-minute** warning before the **STOP** command.
- You **must stop** working when the **STOP** command is given. Failure to stop writing will lead to the nullification of your examination.
- The official English version of this examination is available on request only for clarification.
- You are not allowed to leave your working place without permission. If you need any assistance (broken calculator, need to visit a restroom, etc), raise your hand and wait until an invigilator arrives.

**GOOD LUCK!**

## Problems and Grading Information

	<b>Title</b>	<b>Total Score</b>	<b>Percentage</b>
<b>1</b>	Hydrogen at a Metal Surface	<b>24</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	Isotope Time Capsule	<b>35</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	Lambert–Beer Law?	<b>22</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	The Redox Chemistry of Zinc	<b>32</b>	<b>11</b>
<b>5</b>	Mysterious Silicon	<b>60</b>	<b>12</b>
<b>6</b>	The Solid-State Chemistry of Transition Metals	<b>45</b>	<b>13</b>
<b>7</b>	Playing with Non-benzenoid Aromaticity	<b>36</b>	<b>13</b>
<b>8</b>	Dynamic Organic Molecules and Their Chirality	<b>26</b>	<b>11</b>
<b>9</b>	Likes and Dislikes of Capsules	<b>23</b>	<b>10</b>
		<b>Total</b>	<b>100</b>



## Physical Constants and Equations

### Constants

Speed of light in vacuum	$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
Planck constant	$h = 6.62607015 \times 10^{-34} \text{ J s}$
Elementary charge	$e = 1.602176634 \times 10^{-19} \text{ C}$
Electron mass	$m_e = 9.10938370 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Electric constant (permittivity of vacuum)	$\epsilon_0 = 8.85418781 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$
Avogadro constant	$N_A = 6.02214076 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Boltzmann constant	$k_B = 1.380649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$
Faraday constant	$F = N_A \times e = 9.64853321233100184 \times 10^4 \text{ C mol}^{-1}$
Gas constant	$R = N_A \times k_B = 8.31446261815324 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ $= 8.2057366081 \times 10^{-2} \text{ L atm K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
Unified atomic mass unit	$u = 1 \text{ Da} = 1.66053907 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Standard pressure	$p = 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$
Atmospheric pressure	$p_{\text{atm}} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$
Zero degree Celsius	$0^\circ \text{C} = 273.15 \text{ K}$
Ångstrom	$1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$
Picometer	$1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$
Electronvolt	$1 \text{ eV} = 1.602176634 \times 10^{-19} \text{ J}$
Part-per-million	$1 \text{ ppm} = 10^{-6}$
Part-per-billion	$1 \text{ ppb} = 10^{-9}$
Part-per-trillion	$1 \text{ ppt} = 10^{-12}$
pi	$\pi = 3.141592653589793$
The base of the natural logarithm (Euler's number)	$e = 2.718281828459045$

**Equations**

The ideal gas law	$PV = nRT$ , where $P$ is the pressure, $V$ is the volume, $n$ is the amount of substance, $T$ is the absolute temperature of ideal gas.
Coulomb's law	$F = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2}$ , where $F$ is the electrostatic force, $k_e (\approx 9.0 \times 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2})$ is Coulomb's constant, $q_1$ and $q_2$ are the magnitudes of the charges, and $r$ is the distance between the charges.
The first law of thermodynamics	$\Delta U = q + w$ , where $\Delta U$ is the change in the internal energy, $q$ is the heat supplied, $w$ is the work done.
Enthalpy $H$	$H = U + PV$
Entropy based on Boltzmann's principle $S$	$S = k_B \ln W$ , where $W$ is the number of microstates.
The change of entropy $\Delta S$	$\Delta S = \frac{q_{\text{rev}}}{T}$ , where $q_{\text{rev}}$ is the heat for the reversible process.
Gibbs free energy $G$	$G = H - TS$ $\Delta_r G^\circ = -RT \ln K = -zFE^\circ$ , where $K$ is the equilibrium constant, $z$ is the number of electrons, $E^\circ$ is the standard electrode potential.
Reaction quotient $Q$	$\Delta_r G = \Delta_r G^\circ + RT \ln Q$ For a reaction $aA + bB \rightleftharpoons cC + dD$ $Q = \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b}$ , where $[A]$ is the concentration of A.

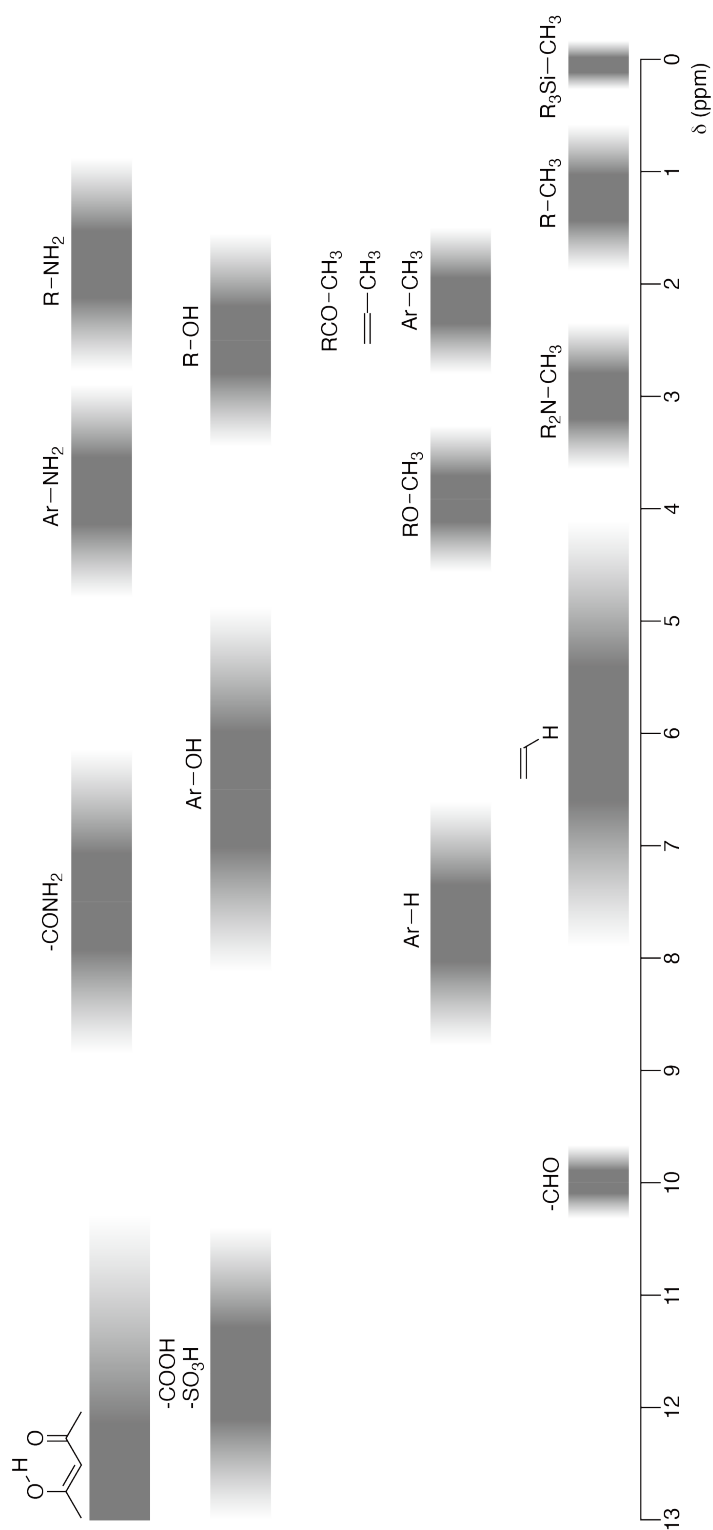
Heat change $\Delta q$	$\Delta q = nc_m \Delta T$ , where $c_m$ is the temperature-independent molar heat capacity.
Nernst equation for redox reaction	$E = E^\circ + \frac{RT}{zF} \ln \frac{C_{\text{ox}}}{C_{\text{red}}}$ , where $C_{\text{ox}}$ is the concentration of oxidized substance, $C_{\text{red}}$ is the concentration of reduced substance.
Arrhenius equation	$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$ , where $k$ is the rate constant, $A$ is the pre-exponential factor, $E_a$ is the activation energy. $\exp(x) = e^x$
Lambert-Beer equation	$A = \varepsilon lc$ , where $A$ is the absorbance, $\varepsilon$ is the molar absorption coefficient, $l$ is the optical path length, $c$ is the concentration of the solution.
Henderson-Hasselbalch equation	For an equilibrium $\text{HA} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{A}^-$ , where equilibrium constant is $K_a$ , $\text{pH} = \text{p}K_a + \log\left(\frac{[\text{A}^-]}{[\text{HA}]}\right)$
Energy of a photon	$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$ , where $\nu$ is the frequency, $\lambda$ is the wavelength of the light.
The sum of a geometric series	When $x \neq 1$ , $1 + x + x^2 + \dots + x^n = \sum_{i=0}^n x^i = \frac{1 - x^{n+1}}{1 - x}$
Approximation equation that can be used to solve problems	When $x \ll 1$ , $\frac{1}{1 - x} \simeq 1 + x$

## Periodic Table

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 H Hydrogen 1.008																	2 He Helium 4.003
3 Li Lithium 6.968	4 Be Beryllium 9.012															9 F Fluorine 18.998	10 Ne Neon 20.180
11 Na Sodium 22.990	12 Mg Magnesium 24.306															17 Cl Chlorine 35.452	18 Ar Argon 39.948
19 K Potassium 39.098	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.956	22 Ti Titanium 47.867	23 V Vanadium 50.942	24 Cr Chromium 51.996	25 Mn Manganese 54.938	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.933	28 Ni Nickel 58.693	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.38	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.630	33 As Arsenic 74.922	34 Se Selenium 78.971	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.798
37 Rb Rubidium 85.468	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.906	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.906	42 Mo Molybdenum 95.95	43 Tc Technetium [99]	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.906	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.868	48 Cd Cadmium 112.414	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.710	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.904	54 Xe Xenon 131.293
55 Cs Caesium 132.905	56 Ba Barium 137.327	57-71 La-Lu Lanthanoids	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.948	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.217	78 Pt Platinum 195.084	79 Au Gold 196.967	80 Hg Mercury 200.592	81 Tl Thallium 204.384	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98	84 Po Polonium [210]	85 At Astatine [210]	86 Rn Radon [222]
87 Fr Francium [223]	88 Ra Radium [226]	89-103 Ac-Lr Actinoids	104 Rf Rutherfordium [267]	105 Db Dubnium [268]	106 Sg Seaborgium [271]	107 Bh Bohrium [272]	108 Hs Hassium [277]	109 Mt Meitnerium [276]	110 Ds Darmstadtium [281]	111 Rg Roentgenium [280]	112 Cn Copernicium [285]	113 Nh Nihonium [278]	114 Fl Flerovium [289]	115 Mc Moscovium [289]	116 Lv Livermorium [293]	117 Ts Tennessine [293]	118 Og Oganesson [294]
57-71 La-Lu Lanthanoids		57 La Lanthanum 138.905	58 Ce Cerium 140.116	59 Pr Praseodymium 140.908	60 Nd Neodymium 144.242	61 Pm Promethium [145]	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.925	66 Dy Dysprosium 162.500	67 Ho Holmium 164.930	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.934	70 Yb Ytterbium 173.045	71 Lu Lutetium 174.967	
89-103 Ac-Lr Actinoids		89 Ac Actinium [227]	90 Th Thorium 232.038	91 Pa Protactinium 231.036	92 U Uranium 238.029	93 Np Neptunium [237]	94 Pu Plutonium [239]	95 Am Americium [243]	96 Cm Curium [247]	97 Bk Berkelium [247]	98 Cf Californium [252]	99 Es Einsteinium [252]	100 Fm Fermium [257]	101 Md Mendelevium [258]	102 No Nobelium [259]	103 Lr Lawrencium [262]	

Key:  
 113  
 Nh  
 Nihonium  
 [278]  
 atomic number  
 Symbol  
 name  
 atomic weight [in parenthesis for the radioactive element]

**<sup>1</sup>H NMR Chemical Shifts**



$\Delta\delta$  for one alkyl group-substitution: ca. +0.4 ppm



OMN-1 C-1 C-1

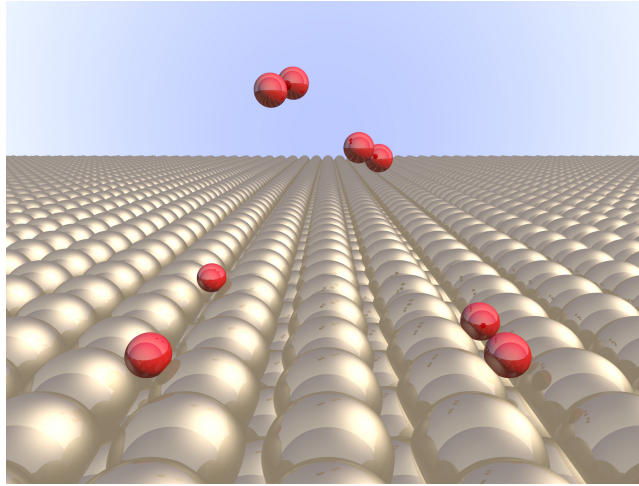
**OMN-1 C-1 C**  
MARYAM AL-HATMI

**IChO**  
**Problem 1**  
**Cover sheet**

Please return this cover sheet together with all the related question sheets.

## الهيدروجين على سطح معدني

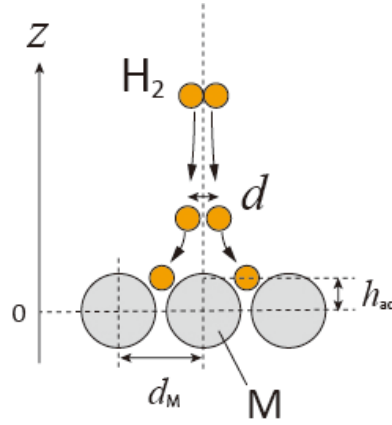
11 % من الإجمالي							
المجموع	B.4	B.3	B.2	B.1	A.2	A.1	السؤال
24	3	3	3	5	4	6	درجة
							حقق



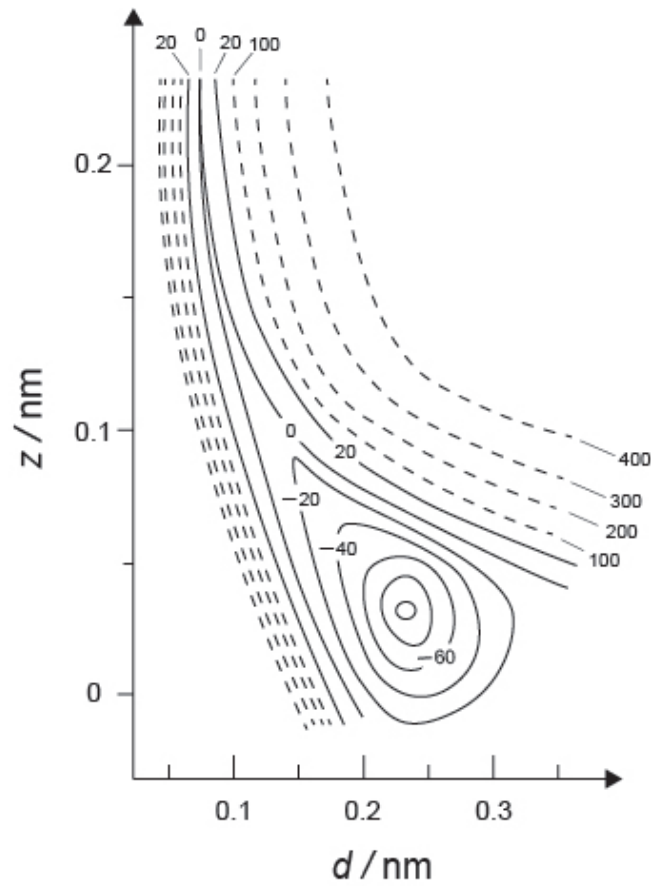
من المتوقع أن يكون الهيدروجين مصدر الطاقة في المستقبل الذي لا يعتمد على الوقود الأحفوري. هنا ، سوف نعتبر عملية تخزين الهيدروجين في المعدن ، والتي ترتبط بتقنية نقل وتخزين الهيدروجين.

### الجزء A

عندما يتم إدمصاص وإمتزاز الهيدروجين في الجزء الأكبر من المعدن عبر سطحه ، دعونا أولاً نفكر في عملية إدمصاص وإمتزاز الهيدروجين على سطح المعدن ،  $H_2(g) \rightarrow 2H(ad)$  ، حيث يرمز للحالة الغازية (g) والممتزة (ad) في المعادلة. تنفصل جزيئات الهيدروجين  $H_2$  التي تصل إلى السطح المعدني (M) عند السطح ويتم إمتزازها على شكل ذرات H (الشكل 1). هنا ، يتم تمثيل الطاقة الكامنة لـ  $H_2$  بمتغيرين: المسافة بين الذرات d والارتفاع بالنسبة لسطح الذرة المعدن z . يُفترض أن المحور على طول ذرتي H موازي للسطح وأن مركز الثقل دائماً على الخط المنقط الرأسي في الشكل 1. يوضح الشكل 2 مخطط كنتور الطاقة الكامنة للانفصال عند السطح. القيم العددية تمثل الطاقة الكامنة بوحدة kJ لكل مول من  $H_2$ . تباعد الأسطر الصلبة هو  $20 \text{ kJ mol}^{-1}$  ، وتباعد الأسطر المتقطع  $100 \text{ kJ mol}^{-1}$  ، والتباعد بين الخطوط الصلبة والمتقطعة  $80 \text{ kJ mol}^{-1}$ . يتم إهمال طاقة اهتزاز النقطة الصفرية.



الشكل 1. تعريف المتغيرات. الرسم ليس حسب القياسات الحقيقية.



الشكل 2.

6pt

**A.1** لكل من الأسئلة التالية من (i) إلى (iii) ، اختر أقرب قيمة من A إلى G  
(i) المسافة بين الذرات لجزيء  $H_2$  الغازي  
(ii) المسافة بين الذرات بين ذرات المعدن ( $d_M$  في الشكل 1)  
(iii) مسافة ذرات H المتمزة من السطح ( $h_{ad}$  في الشكل 1)

D. 0.15 nm   C. 0.11 nm   B. 0.07 nm   A. 0.03 nm  
G. 0.27 nm   F. 0.23 nm   E. 0.19 nm

4pt

**A.2** لكل من الأسئلة التالية من (i) إلى (ii) ، اختر أقرب قيمة من A إلى H.  
(i) الطاقة المطلوبة لتفكك غاز  $H_2$  إلى غاز H حسب المعادلة التالية  
 $H_2(g) \rightarrow 2H(g)$   
(ii) الطاقة المنبعثة أثناء إمتزاز الغاز  $H_2$  حسب المعادلة التالية  
 $H_2(g) \rightarrow 2H(ad)$

D.  $100 \text{ kJ mol}^{-1}$    C.  $60 \text{ kJ mol}^{-1}$    B.  $40 \text{ kJ mol}^{-1}$    A.  $20 \text{ kJ mol}^{-1}$   
H.  $400 \text{ kJ mol}^{-1}$    G.  $300 \text{ kJ mol}^{-1}$    E.  $200 \text{ kJ mol}^{-1}$    E.  $150 \text{ kJ mol}^{-1}$

**الجزء B**

ذرات الهيدروجين التي حدث لها إمتزاز adsorbed إما أن تمتص إلى داخل المعدن، أو تتحد وتعود إلى الطور الغازي ، كما هو موضح في المعادلتين (1a) و (1b). الرمز H(ab) يرمز لذرة هيدروجين ممتصة في داخل المعدن.



سرعة التفاعلات لكل موقع سطحي لتحرير الغاز (adsorption)  $r_1$  والامتزاز (desorption)  $r_2$ ، الامتصاص (absorption)  $r_3$  حيث  $r_1[\text{s}^{-1}]$ ,  $r_2[\text{s}^{-1}]$ ,  $r_3[\text{s}^{-1}]$  يمكن التعبير عنها على النحو التالي:

$$r_1 = k_1 P_{\text{H}_2} (1 - \theta)^2 \quad (2)$$

$$r_2 = k_2 \theta^2 \quad (3)$$

$$r_3 = k_3 \theta \quad (4)$$

حيث  $k_1[\text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}]$ ,  $k_2[\text{s}^{-1}]$ ,  $k_3[\text{s}^{-1}]$  هي ثوابت سرعة التفاعل و  $P_{\text{H}_2}$  هي ضغط  $\text{H}_2$ . من بين المواقع المتاحة على السطح يمثل  $\theta$  (  $0 \leq \theta \leq 1$  ) الجزء الذي تشغله ذرات H. ويمكن إعتبار أن الامتزاز وتحرير الغاز سريعان مقارنة بالامتصاص  $r_1, r_2 \gg r_3$  وأن  $\theta$  تظل ثابتة.

5pt

**B.1** يمكن التعبير عنها على النحو التالي:

$$r_3 = \frac{k_3}{1 + \sqrt{\frac{1}{P_{\text{H}_2} C}}} \quad (5)$$

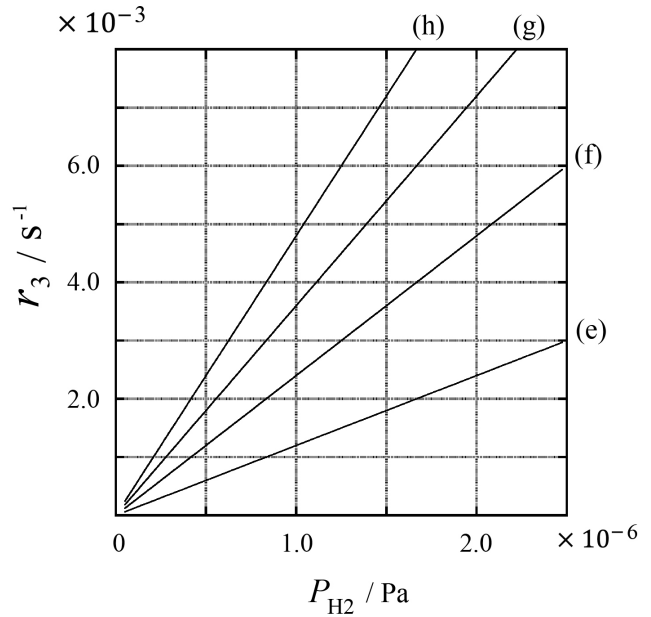
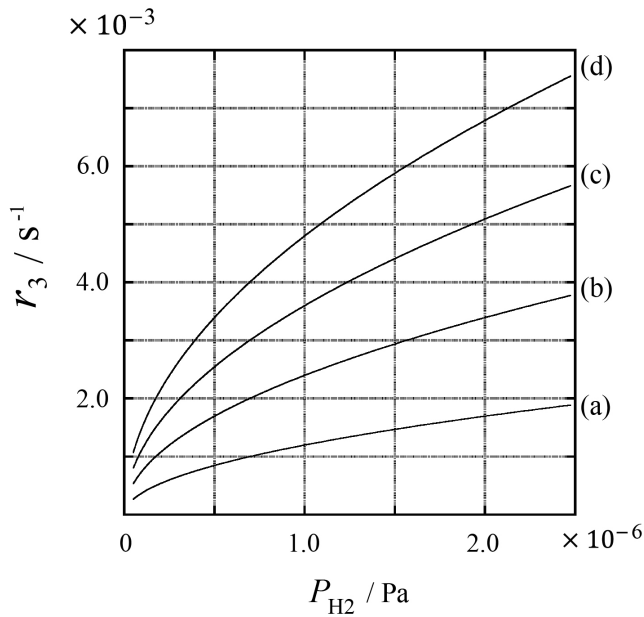
عبر عن  $C$  باستخدام  $k_1$  و  $k_2$ .

تم وضع عينة معدنية بمساحة سطح  $S = 1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2$  في وعاء ( $V = 1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ) مع  $\text{H}_2$  ( $P_{\text{H}_2} = 1.0 \times 10^2 \text{ Pa}$ ). كانت كثافة مواقع إمتزاز ذرة الهيدروجين على السطح  $N = 1.3 \times 10^{18} \text{ m}^{-2}$ . تم تثبيت درجة حرارة السطح عند  $T = 400 \text{ K}$ . مع استمرار التفاعل (1)، انخفض ضغط الغاز  $P_{\text{H}_2}$  بمعدل ثابت مقداره  $v = 4.0 \times 10^{-4} \text{ Pa s}^{-1}$ . افترض أن غاز  $\text{H}_2$  هو غاز مثالي وأن حجم عينة المعدن يمكن إهمالها.

**B.2** احسب كمية ذرات H في عدد المولات الممتصة لكل وحدة مساحة من السطح لكل وحدة زمنية،  $A [\text{mol s}^{-1} \text{ m}^{-2}]$ .

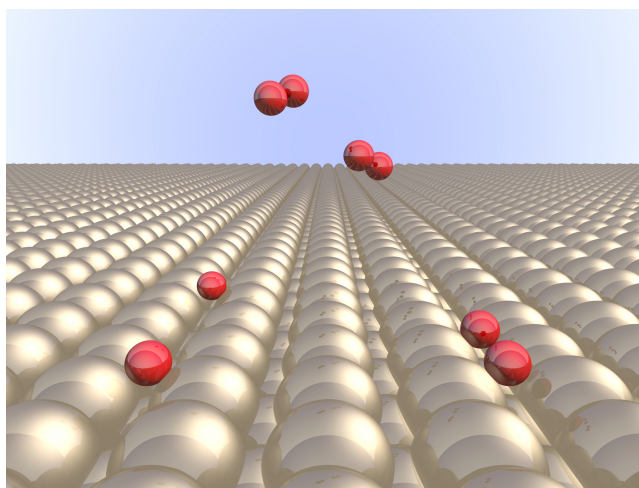
**B.3** عند  $T = 400 \text{ K}$ ، فإن  $C$  تساوي  $1.0 \times 10^2 \text{ Pa}^{-1}$ . أحسب قيمة  $k_3$  عند  $400 \text{ K}$  إذا لم تحصل على إجابة B.2، فاستخدم  $A = 3.6 \times 10^{-7} \text{ mol s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ .

**B.4** عند  $T$  مختلفة،  $C = 2.5 \times 10^3 \text{ Pa}^{-1}$  و  $k_3 = 4.8 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  معطاة. بالنسبة لـ  $r_3$  كدالة  $P_{\text{H}_2}$  في درجة الحرارة هذه، إختار المنحنى الصحيح من (a) إلى (h).



## Hydrogen at a Metal Surface

11 % of the total							
Question	A.1	A.2	B.1	B.2	B.3	B.4	Total
Points	6	4	5	3	3	3	<b>24</b>
Score							



Hydrogen is expected to be a future energy source that does not depend on fossil fuels. Here, we will consider the hydrogen-storage process in a metal, which is related to hydrogen-transport and -storage technology.

### Part A

As hydrogen is absorbed into the bulk of a metal via its surface, let us first consider the adsorption process of hydrogen at the metal surface,  $\text{H}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{H}(\text{ad})$ , where the gaseous and adsorbed states of hydrogen are represented as (g) and (ad), respectively. Hydrogen molecules ( $\text{H}_2$ ) that reach the metal surface (M) dissociate at the surface and are adsorbed as H atoms (Fig. 1). Here, the potential energy of  $\text{H}_2$  is represented by two variables: the interatomic distance,  $d$ , and the height relative to the surface metal atom,  $z$ . It is assumed that the axis along the two H atoms is parallel to the surface and that the center of gravity is always on the vertical dotted line in Fig. 1. Fig. 2 shows the potential energy contour plot for the dissociation at the surface. The numerical values represent the potential energy in units of kJ per mole of  $\text{H}_2$ . The solid line spacing is  $20 \text{ kJ mol}^{-1}$ , the dashed line spacing is  $100 \text{ kJ mol}^{-1}$ , and the spacing between solid and dashed lines is  $80 \text{ kJ mol}^{-1}$ . The zero-point vibration energy is ignored.

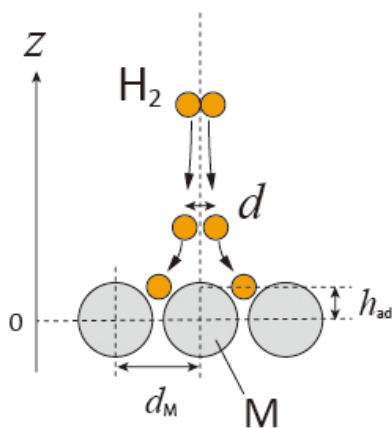


Fig.1 Definition of variables. Drawing is not in scale.

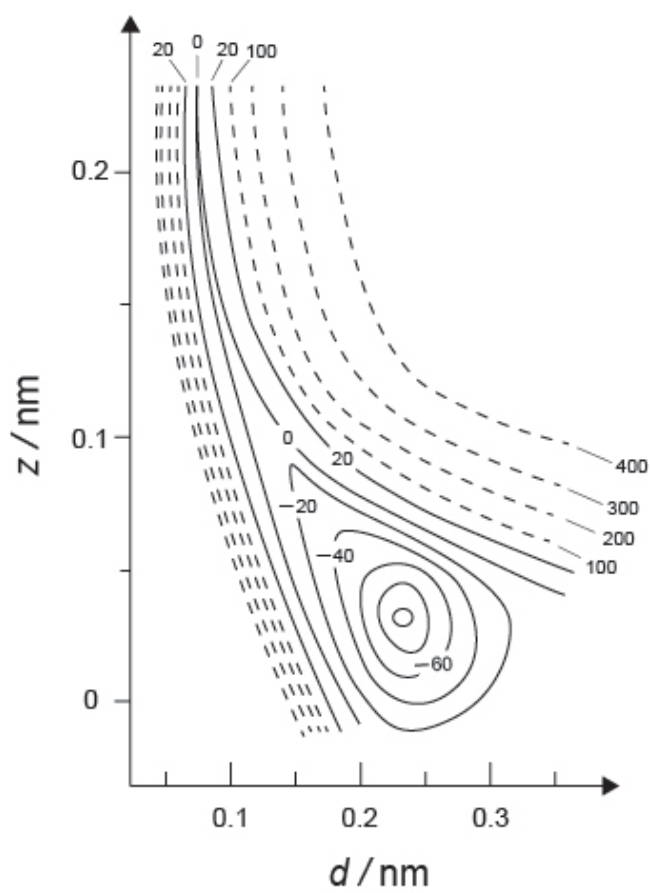


Fig.2



- A.1** For each of the following items (i)–(iii), **select** the closest value from A–G. 6pt
- (i) The interatomic distance for a gaseous  $\text{H}_2$  molecule
  - (ii) The interatomic distance between metal atoms ( $d_M$  in Fig. 1)
  - (iii) The distance of adsorbed H atoms from the surface ( $h_{\text{ad}}$  in Fig. 1)

A. 0.03 nm   B. 0.07 nm   C. 0.11 nm   D. 0.15 nm  
E. 0.19 nm   F. 0.23 nm   G. 0.27 nm

- A.2** For each of the following items (i)–(ii), **select** the closest value from A–H. 4pt
- (i) the energy required for the dissociation of gaseous  $\text{H}_2$  to gaseous H  
[ $\text{H}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{H}(\text{g})$ ]
  - (ii) the energy released during the adsorption of a gaseous  $\text{H}_2$  [ $\text{H}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{H}(\text{ad})$ ]

A. 20  $\text{kJ mol}^{-1}$    B. 40  $\text{kJ mol}^{-1}$    C. 60  $\text{kJ mol}^{-1}$    D. 100  $\text{kJ mol}^{-1}$   
E. 150  $\text{kJ mol}^{-1}$    F. 200  $\text{kJ mol}^{-1}$    G. 300  $\text{kJ mol}^{-1}$    H. 400  $\text{kJ mol}^{-1}$

## Part B

The adsorbed hydrogen atoms are then either absorbed into the bulk, or recombine and desorb back into the gas phase, as shown in the reactions (1a) and (1b). H(ab) represents a hydrogen atom absorbed in the bulk.



The reaction rates per surface site for adsorption, desorption, and absorption are  $r_1[\text{s}^{-1}]$ ,  $r_2[\text{s}^{-1}]$  and  $r_3[\text{s}^{-1}]$ , respectively. They are expressed as:

$$r_1 = k_1 P_{\text{H}_2} (1 - \theta)^2 \quad (2)$$

$$r_2 = k_2 \theta^2 \quad (3)$$

$$r_3 = k_3 \theta \quad (4)$$

where  $k_1 [\text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}]$ ,  $k_2 [\text{s}^{-1}]$  and  $k_3 [\text{s}^{-1}]$  are the reaction rate constants and  $P_{\text{H}_2}$  is the pressure of  $\text{H}_2$ . Among the sites available on the surface,  $\theta$  ( $0 \leq \theta \leq 1$ ) is the fraction occupied by H atoms. It is assumed that adsorption and desorption are fast compared to absorption ( $r_1, r_2 \gg r_3$ ) and that  $\theta$  remains constant.

**B.1**  $r_3$  can be expressed as:

5pt

$$r_3 = \frac{k_3}{1 + \sqrt{\frac{1}{P_{\text{H}_2} C}}} \quad (5)$$

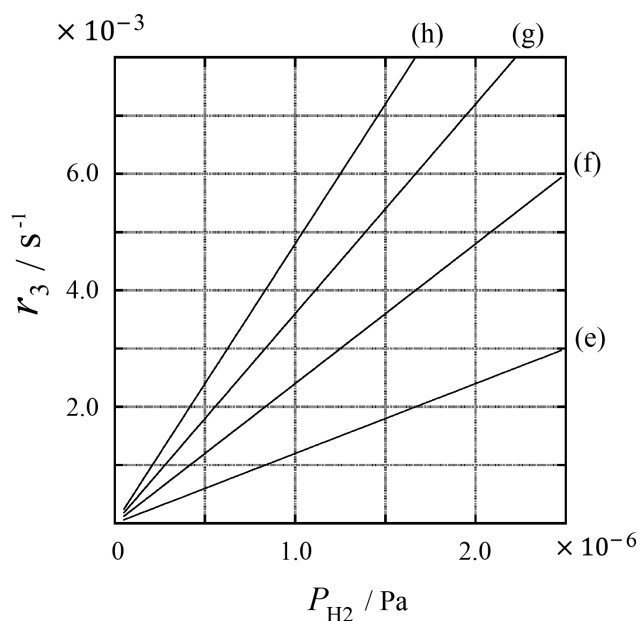
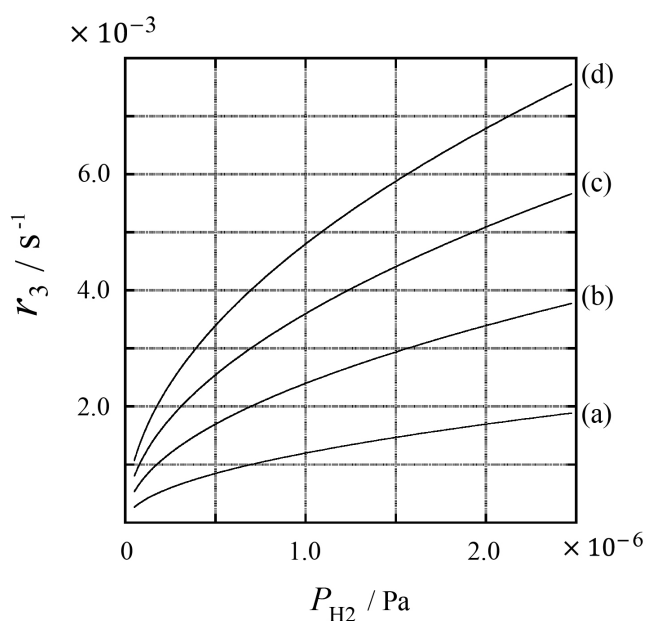
**Express**  $C$  using  $k_1$  and  $k_2$ .

A metal sample with a surface area of  $S = 1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2$  was placed in a container ( $V = 1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ) with  $\text{H}_2$  ( $P_{\text{H}_2} = 1.0 \times 10^2 \text{ Pa}$ ). The density of hydrogen-atom adsorption sites on the surface was  $N = 1.3 \times 10^{18} \text{ m}^{-2}$ . The surface temperature was kept at  $T = 400 \text{ K}$ . As the reaction (1) proceeded,  $P_{\text{H}_2}$  decreased at a constant rate of  $v = 4.0 \times 10^{-4} \text{ Pa s}^{-1}$ . Assume that  $\text{H}_2$  is an ideal gas and that the volume of the metal sample is negligible.

**B.2** Calculate the amount of H atoms in moles absorbed per unit area of the surface per unit time,  $A$  [ $\text{mol s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ]. 3pt

**B.3** At  $T = 400 \text{ K}$ ,  $C$  equals  $1.0 \times 10^2 \text{ Pa}^{-1}$ . Calculate the value of  $k_3$  at 400 K. If you did not obtain the answer to **B.2**, use  $A = 3.6 \times 10^{-7} \text{ mol s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ . 3pt

**B.4** At a different  $T$ ,  $C = 2.5 \times 10^3 \text{ Pa}^{-1}$  and  $k_3 = 4.8 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  are given. For  $r_3$  as a function of  $P_{\text{H}_2}$  at this temperature, select the correct plot from (a)–(h). 3pt





OMN-1 C-1 A-1

**A1-1**  
Arabic (Oman)

## الهيدروجين في الأسطح المعدنية

الجزء A

(6 pt) **A.1**

(iii)	(ii)	(i)

(4 pt) **A.2**

(ii)	(i)



OMN-1 C-1 A-2

# A1-2

Arabic (Oman)

## الجزء B

(5 pt) **B.1**

$C =$  \_\_\_\_\_

(3 pt) **B.2**

$A =$  \_\_\_\_\_  $\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$



OMN-1 C-1 A-3

# A1-3

Arabic (Oman)

(3 pt) **B.3**

$$\underline{k_3 = \hspace{10em} s^{-1}}$$

(3 pt) **B.4**

\_\_\_\_\_

OMN-1 C-2 C-1

**OMN-1 C-2 C**  
MARYAM AL-HATMI

**IChO**  
**Problem 2**  
**Cover sheet**

Please return this cover sheet together with all the related question sheets.

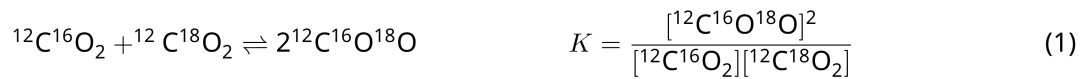
## كبسولة وقت النظائر (Isotope Capsule) Time

11% من الإجمالي					
المجموع	A.4	A.3	A.2	A.1	السؤال
35	9	10	8	8	درجة
					الدرجة

### الجزء



الكيانات الجزيئية التي تختلف فقط في التركيب النظائري ، مثل  $\text{CH}_4$  و  $\text{CH}_3\text{D}$  ، تسمى النظائر isotopologues . تعتبر النظائر أن لها نفس الخصائص الكيميائية. ومع ذلك ، يوجد اختلاف طفيف في الطبيعة. افترض أن جميع المواد الموضحة في هذا السؤال هي في الطور الغازي. دعونا نفكر في الإتزان التالي:



تزداد الإنتروبيا ،  $S$  ، مع زيادة عدد الحالات المجهرية المحتملة للنظام ،  $W$ :

$$S = k_B \ln W \quad (2)$$

حيث  $W = 1$  لـ  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$  و  $W = 12$  لـ  $^{12}\text{C}^{18}\text{O}_2$  . في المقابل ،  $W = 2$  للجزيء  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$  لأن ذرات الأكسجين يمكن تمييزها في هذا الجزيء. لانه يحتوي على جزيئين  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$  في الطرف الأ لمعادلة الاتزان 1 ، يكون  $W = 2^2 = 4$ .

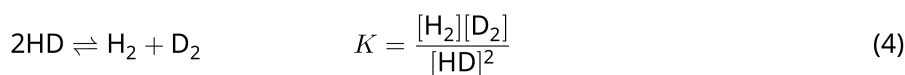


**A.1** تغيير المحتوى الحراري ،  $\Delta H$  ، للمعادلة 3 موجب دائماً بغض النظر عن درجة الحرارة. 8pt



**احسب** ثوابت الإتزان  $K$  للمعادلة 3 عند درجة حرارة منخفضة جداً (فكر في  $T \rightarrow 0$ ) و عند درجة حرارة عالية جداً (فكر في  $T \rightarrow +\infty$ ). افترض أن التفاعل لا يتغير عند درجات الحرارة هذه وأن  $\Delta H$  تصبح قيمة ثابتة عند درجات الحرارة المرتفعة.

يمكن تفسير  $\Delta H$  ، لهذه العملية من خلال الاهتزازات الجزيئية



عند درجة الحرارة  $T = 0 \text{ K}$  ، يتم التعبير عن الطاقة الاهتزازية لجزيء ثنائي الذرة تردد اهتزاز  $\nu$  [s<sup>-1</sup>] على النحو التالي:

$$E = \frac{1}{2} h\nu \quad (5)$$

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\mu}} \quad (6)$$

حيث أن  $k$  هو ثابت القوة و  $\mu$  هي الكتلة المختزلة ، والتي يتم التعبير عنها من حيث كتلة الذرتين في الجزيء ثنائي الذرة ،  $m_1$  و  $m_2$  ، وفقاً لما يلي:

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \quad (7)$$

**A.2** يكون اهتزاز  $\text{H}_2$  عند  $4161.0 \text{ cm}^{-1}$  عند التعبير عنه بالعدد الموجي . **احسب**  $\Delta H$  للمعادلة التالية عند  $T = 0 \text{ K}$  بوحدة  $\text{J mol}^{-1}$  . 8pt



افتراض أن:  
 الطاقة الاهتزازية تساهم فقط في  $\Delta H$ . قيمة  $k$  ل  $\text{H}_2$  و  $\text{HD}$  و  $\text{D}_2$  متطابقة.  
 كتلة  $\text{H}$  تساوي  $1 \text{ Da}$  و كتلة  $\text{D}$  تساوي  $2 \text{ Da}$ .

تعتمد النسبة المولية لـ  $H_2$  و  $HD$  و  $D_2$  على درجة الحرارة في نظام في حالة الإتزان . هنا ، يتم تعريف  $\Delta_{D_2}$  على أنه تغيير في النسبة المولية لـ  $D_2$ .

$$\Delta_{D_2} = \frac{R_{D_2}}{R_{D_2}^*} - 1 \quad (9)$$

هنا ،  $R_{D_2}$  يشير إلى  $\frac{[D_2]}{[H_2]}$  في العينة و  $R_{D_2}^*$  إلى  $\frac{[D_2]}{[H_2]}$  عند  $T \rightarrow +\infty$  . وتجدر الإشارة هنا إلى أن توزيع النظائر يصبح عشوائياً عند  $T \rightarrow +\infty$  .

**A.3 احسب  $\Delta_{D_2}$  مع نسبة التواجد الطبيعية (الوفرة الطبيعية) لـ D عندما تتبادل النظائر في** 10pt  
حالة الإتزان عند درجة الحرارة حيث  $K$  في المعادلة. 4 هي 0.300. افترض أن نسب الوفرة الطبيعية لـ D و H هي  $1.5576 \times 10^{-4}$  و  $1 - 1.5576 \times 10^{-4}$  ، على التوالي.

بشكل عام ، تزداد النسبة المولية للنظائر المستبدلة المزدوجة ، والتي تحتوي على ذرتين من النظائر الثقيلة في جزيء واحد ، مع انخفاض درجة الحرارة. دعونا نعتبر أنه في النسبة المولية لجزيئات CO<sub>2</sub> ذات الأوزان الجزيئية 44 و 47 ، والتي توصف أدناه بـ [CO<sub>2</sub>[44]] و [CO<sub>2</sub>[47]]. يتم تعريف الكمية Δ<sub>47</sub> على النحو التالي:

$$\Delta_{47} = \frac{R_{47}}{R_{47}^*} - 1 \quad (10)$$

يشير R<sub>47</sub> إلى  $\frac{[CO_2[47]]}{[CO_2[44]]}$  في العينة و R<sub>47</sub><sup>\*</sup> إلى  $\frac{[CO_2[47]]}{[CO_2[44]]}$  عند T → +∞. الوفرة الطبيعية لذرات الكربون والأكسجين موضحة أدناه ؛ تجاهل النظائر غير المعروضة هنا.

<sup>13</sup> C	<sup>12</sup> C	النظير
0.011112	0.988888	الوفرة الطبيعية ( نسبة التواجد الطبيعية )

<sup>18</sup> O	<sup>17</sup> O	<sup>16</sup> O	صف
0.0020000	0.0003790	0.997621	الوفرة الطبيعية ( نسبة التواجد الطبيعية )

يتم تحديد اعتماد درجة الحرارة لـ Δ<sub>47</sub> على النحو التالي ، حيث يتم إعتبار T كدرجة الحرارة المطلقة بوحدة K :

$$\Delta_{47} = \frac{36.2}{T^2} + 2.920 \times 10^{-4} \quad (11)$$

**A.4** إذا كان R<sub>47</sub> للعوالق الأحفورية التي تم الحصول عليها من قاع البحر في القطب الجنوبي 9pt  
 $4.50865 \times 10^{-5}$ . **قدر** درجة الحرارة باستخدام R<sub>47</sub> . يتم تفسير درجة الحرارة هذه على أنها درجة حرارة الهواء خلال العصر الذي عاشت فيه العوالق. ضع في اعتبارك فقط النظير الأكثر شيوعاً لـ [CO<sub>2</sub>[47]] للحساب.

## Isotope Time Capsule

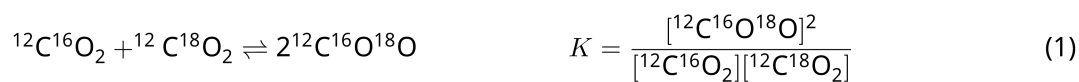
11 % of the total					
Question	A.1	A.2	A.3	A.4	Total
Points	8	8	10	9	<b>35</b>
Score					



Molecular entities that differ only in isotopic composition, such as  $\text{CH}_4$  and  $\text{CH}_3\text{D}$ , are called isotopologues. Isotopologues are considered to have the same chemical characteristics. In nature, however, there exists a slight difference.

Assume that all of the substances shown in this Question are in a gas phase.

Let us consider the following equilibrium:



The entropy,  $S$ , increases with increasing the number of possible microscopic states of a system,  $W$ :

$$S = k_{\text{B}} \ln W \quad (2)$$

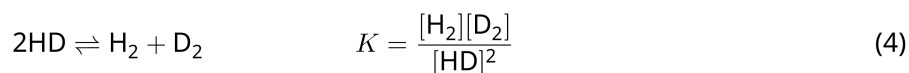
$W = 1$  for  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$  and  $^{12}\text{C}^{18}\text{O}_2$ . In contrast,  $W = 2$  for a  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$  molecule because the oxygen atoms are distinguishable in this molecule. As the right-hand side of the equilibrium shown in eq. 1 has two  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$  molecules,  $W = 2^2 = 4$ .

**A.1** The enthalpy change,  $\Delta H$ , of eq. 3 is positive regardless of the temperature. 8pt



**Calculate** the equilibrium constants,  $K$ , for eq. 3 at very low (think of  $T \rightarrow 0$ ) and very high (think of  $T \rightarrow +\infty$ ) temperatures. Assume that the reaction remains unchanged at these temperatures and that  $\Delta H$  converges to a constant value for high temperatures.

The  $\Delta H$  of the following process can be explained by molecular vibrations.



At  $T = 0$  K, the vibrational energy of a diatomic molecule whose vibration frequency is  $\nu$  [ $\text{s}^{-1}$ ] is expressed as:

$$E = \frac{1}{2}h\nu \quad (5)$$

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\mu}} \quad (6)$$

Wherein  $k$  is the force constant and  $\mu$  the reduced mass, which is expressed in terms of the mass of the two atoms in the diatomic molecule,  $m_1$  and  $m_2$ , according to:

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \quad (7)$$

**A.2** The vibration of  $\text{H}_2$  is at  $4161.0 \text{ cm}^{-1}$  when reported as a wavenumber. 8pt  
**Calculate** the  $\Delta H$  of the following equation at  $T = 0$  K in units of  $\text{J mol}^{-1}$ .



Assume that:

- only the vibrational energy contributes to the  $\Delta H$ .
- the  $k$  values for  $\text{H}_2$ ,  $\text{HD}$ , and  $\text{D}_2$  are identical.
- the mass of H to be 1 Da and the mass of D to be 2 Da.

The molar ratio of  $\text{H}_2$ ,  $\text{HD}$ , and  $\text{D}_2$  depends on the temperature in a system in equilibrium. Here,  $\Delta_{\text{D}_2}$  is defined as the change of the molar ratio of  $\text{D}_2$ .

$$\Delta_{\text{D}_2} = \frac{R_{\text{D}_2}}{R_{\text{D}_2}^*} - 1 \quad (9)$$

Here,  $R_{\text{D}_2}$  refers to  $\frac{[\text{D}_2]}{[\text{H}_2]}$  in the sample and  $R_{\text{D}_2}^*$  to  $\frac{[\text{D}_2]}{[\text{H}_2]}$  at  $T \rightarrow +\infty$ . It should be noted here that the distribution of isotopes becomes random at  $T \rightarrow +\infty$ .

**A.3 Calculate**  $\Delta_{\text{D}_2}$  with natural D abundance when the isotopic exchange is in equilibrium at the temperature where  $K$  in eq. 4 is 0.300. Assume that the natural abundance ratios of D and H are  $1.5576 \times 10^{-4}$  and  $1 - 1.5576 \times 10^{-4}$ , respectively. 10pt

In general, the molar ratio of the doubly substituted isotopologue, which contains two heavy isotope atoms in one molecule, increases with decreasing temperature. Let us consider the molar ratio of CO<sub>2</sub> molecules with molecular weights of 44 and 47, which are described as CO<sub>2</sub>[44] and CO<sub>2</sub>[47] below. The quantity Δ<sub>47</sub> is defined as:

$$\Delta_{47} = \frac{R_{47}}{R_{47}^*} - 1 \quad (10)$$

$R_{47}$  refers to  $\frac{[\text{CO}_2[47]]}{[\text{CO}_2[44]]}$  in the sample and  $R_{47}^*$  to  $\frac{[\text{CO}_2[47]]}{[\text{CO}_2[44]]}$  at  $T \rightarrow +\infty$ . The natural abundances of carbon and oxygen atoms are shown below; ignore isotopes that are not shown here.

	<sup>12</sup> C	<sup>13</sup> C
natural abundance	0.988888	0.011112

	<sup>16</sup> O	<sup>17</sup> O	<sup>18</sup> O
natural abundance	0.997621	0.0003790	0.0020000

The temperature dependence of Δ<sub>47</sub> is determined as follows, where  $T$  is given as the absolute temperature in units of K:

$$\Delta_{47} = \frac{36.2}{T^2} + 2.920 \times 10^{-4} \quad (11)$$

**A.4** The  $R_{47}$  of fossil plankton obtained from the Antarctic seabed was  $4.50865 \times 10^{-5}$ . **9pt**  
**Estimate** the temperature using this  $R_{47}$ . This temperature is interpreted as the air temperature during the era in which the plankton lived. Consider only the most common isotopologue of CO<sub>2</sub>[47] for the calculation.



OMN-1 C-2 A-1

# A2-1

Arabic (Oman)

## كبسولة وقت النظائر

(8 pt) **A.1**

$$T \rightarrow +\infty : K =$$

$$, T \rightarrow 0 : K =$$





OMN-1 C-2 A-2

**A2-2**  
Arabic (Oman)

(8 pt) **A.2**

$\Delta H =$  \_\_\_\_\_  $\text{J mol}^{-1}$



OMN-1 C-2 A-3

# A2-3

Arabic (Oman)

(10 pt) **A.3**

$\Delta_{D_2} =$  \_\_\_\_\_



OMN-1 C-2 A-4

**A2-4**  
Arabic (Oman)

(9 pt) **A.4**

$T =$  \_\_\_\_\_ K

OMN-1 C-3 C-1

**OMN-1 C-3 C**  
MARYAM AL-HATMI

**IChO**  
**Problem 3**  
**Cover sheet**

Please return this cover sheet together with all the related question sheets.

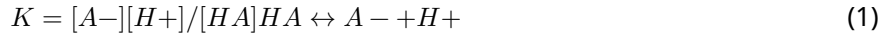
## قانون لامبرت - بير Law Lambert-Beer

8% من الإجمالي				
المجموع	B.2	B.1	A.1	السؤال
22	6	6	10	الدرجات
				الدرجة

في هذه المسألة ، تجاهل امتصاص الخلية والمذيب. يتم الاحتفاظ بدرجات حرارة جميع المحاليل والغازات ثابتة عند  $25^{\circ}C$ .

### الجزء A

تم تحضير محلول مائي  $X$  باستخدام  $HA$  و  $NaA$ . التركيزات  $[A^-]$  ،  $[HA]$  ، و  $[H^+]$  في المحلول  $X$  هي  $1.00 \times 10^{-2} \text{ mol L}^{-1}$  و  $1.00 \times 10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$  و  $1.00 \times 10^{-4} \text{ mol L}^{-1}$  ، على التوالي ، والتي ترتبط عبر التوازن الحمضي القاعدي equilibrium acid-base التالي:



طول المسار الضوئي هو  $l$  في الجزء A . تجاهل تغير الكثافة عند التخفيف. افترض أنه لا توجد تفاعلات كيميائية بخلاف المعادلة 1.

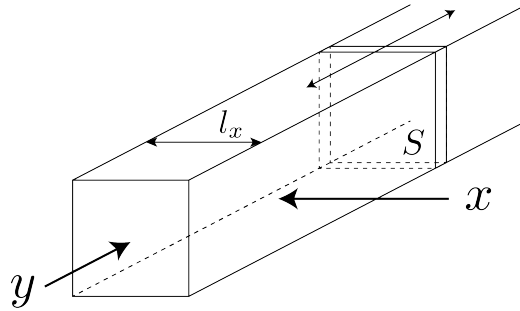
**A.1** كان امتصاص  $X$  هو  $A_1$  بطول موجة  $\lambda_1$ . بعد ذلك ، تم تخفيف المحلول  $X$  مرتين إلى 10pt لحجمه الأولي باستخدام حمض الهيدروكلوريك باستخدام  $pH = 2.500$ . بعد التخفيف ، الامتصاصية لا تزال  $A_1$  عند  $\lambda_1$ . **حدد** النسبة  $\epsilon_{HA}/\epsilon_{A^-}$  ، حيث تمثل  $\epsilon_{HA}$  و  $\epsilon_{A^-}$  معامل الامتصاص لـ  $HA$  و  $A^-$  ، على التوالي ، عند  $\lambda_1$ .

**الجزء B**

إعتبر الإتزان التالي في الحالة الغازية.



يُملأ الغاز النقي D في حاوية مكعبة لها جدار متحرك شفاف مع مقطع عرضي من  $S$  (انظر الشكل أدناه) عند ضغط  $P$ ، ويتم تحقيق الإتزان عندما يتم الاحتفاظ بالضغط الكلي عند  $P$ . امتصاص الغاز هو  $A = \varepsilon(n/V)l$ ، حيث  $\varepsilon$  و  $V$  و  $V$  هي معامل الامتصاص وكمية الغاز بالمولات وحجم الغاز وطول المسار الضوئي على التوالي. افترض أن جميع مكونات خليط الغازات تتصرف كغازات مثالية.



استخدم التعريفات التالية عند الضرورة.

بعد الإتزان		الحالة الابتدائية		
M	D	M	D	
$p_M$	$p_D$	0	$P$	الضغط الجزئي
$n_M$	$n_D$	0	$n_0$	الكمية بالمولات
الحجم $V$		الحجم الابتدائي $V_0$		الحجم

**B.1** كان امتصاص الغاز عند  $\lambda_{B1}$  المقاس من الاتجاه  $x(l = l_x)$  هو  $A_{B1}$  في كل من الحالة الأولية وبعد الإتزان. حدد النسبة  $\varepsilon_D/\varepsilon_M$  عند  $\lambda_{B1}$ ، حيث تمثل  $\varepsilon_D$  و  $\varepsilon_M$  معاملات امتصاص D و M على التوالي. 6pt

**B.2** كان امتصاص الغاز عند  $\lambda_{B2}$  المقاس من الاتجاه  $y$  هو  $A_{B2}$  في كل من الحالة الابتدائية  $l = l_{y0}$  وبعد الإتزان  $l = l_y$ . حدد النسبة  $\varepsilon_D/\varepsilon_M$  عند  $\lambda_{B2}$ . 6pt

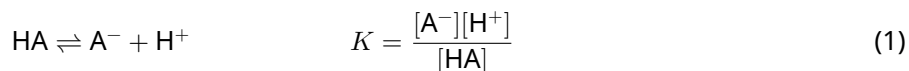
## Lambert-Beer Law?

8 % of the total				
Question	A.1	B.1	B.2	Total
Points	10	6	6	<b>22</b>
Score				

In this problem, ignore the absorption of the cell and the solvent. The temperatures of all solutions and gases are kept constant at 25 °C.

### Part A

An aqueous solution **X** was prepared using HA and NaA. The concentrations  $[A^-]$ ,  $[HA]$ , and  $[H^+]$  in solution **X** are  $1.00 \times 10^{-2} \text{ mol L}^{-1}$ ,  $1.00 \times 10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$ , and  $1.00 \times 10^{-4} \text{ mol L}^{-1}$ , respectively, which are correlated via the following acid-base equilibrium:



The optical path length is  $l$  in Part A. Ignore the density change upon dilution. Assume that no chemical reactions other than eq 1 occur.

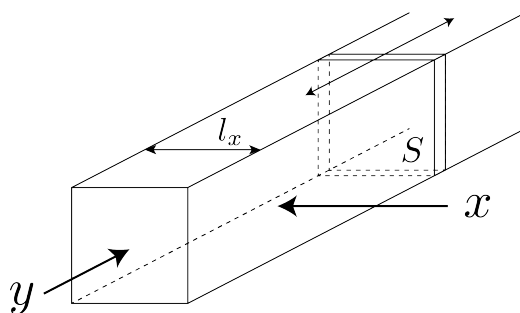
- |            |   |      |
|------------|---|------|
| <b>A.1</b> | The absorbance of <b>X</b> was $A_1$ at a wavelength of $\lambda_1$ . Then, solution <b>X</b> was diluted to twice its initial volume using hydrochloric acid with pH = 2.500. After the dilution, the absorbance was still $A_1$ at $\lambda_1$ . <b>Determine</b> the ratio $\varepsilon_{HA}/\varepsilon_{A^-}$ , where $\varepsilon_{HA}$ and $\varepsilon_{A^-}$ represent the absorption coefficients of HA and of $A^-$ , respectively, at $\lambda_1$ . | 10pt |
|------------|---|------|

**Part B**

Let us consider the following equilibrium in the gas phase.



Pure gas D is filled into a cuboid container that has a transparent movable wall with a cross-section of  $S$  (see the figure below) at a pressure  $P$ , and equilibrium is established while the total pressure is kept at  $P$ . The absorbance of the gas is  $A = \varepsilon(n/V)l$ , where  $\varepsilon$ ,  $n$ ,  $V$ , and  $l$  are the absorption coefficient, amount of the gas in moles, volume of the gas, and optical path length, respectively. Assume that all components of the gas mixture behave as ideal gases.



Use the following definitions if necessary.

	Initial state		After equilibrium	
	D	M	D	M
Partial pressure	$P$	0	$p_D$	$p_M$
Amount in moles	$n_0$	0	$n_D$	$n_M$
Volume	$V_0$		$V$	

**B.1** The absorbance of the gas at  $\lambda_{B1}$  measured from direction  $x$  ( $l = l_x$ ) was  $A_{B1}$  both at the initial state and after the equilibrium. **Determine** the ratio  $\varepsilon_D/\varepsilon_M$  at  $\lambda_{B1}$ , where  $\varepsilon_D$  and  $\varepsilon_M$  represent the absorption coefficients of D and of M, respectively. 6pt

**B.2** The absorbance of the gas at  $\lambda_{B2}$  measured from direction  $y$  was  $A_{B2}$  both at the initial state ( $l = l_{y0}$ ) and after the equilibrium ( $l = l_y$ ). **Determine** the ratio  $\varepsilon_D/\varepsilon_M$  at  $\lambda_{B2}$ . 6pt





OMN-1 C-3 A-1

# A3-1

Arabic (Oman)

## قانون لامبرت-بير

الجزء A

(10 pt) A.1

(واصل الحل في الصفحة التالية)



OMN-1 C-3 A-2

# A3-2

Arabic (Oman)

(cont.) A.1

$$\frac{\epsilon_{HA}}{\epsilon_{A^-}} =$$



OMN-1 C-3 A-3

# A3-3

Arabic (Oman)

## الجزء B

(6 pt) **B.1**

$$\epsilon_D/\epsilon_M =$$



OMN-1 C-3 A-4

**A3-4**  
Arabic (Oman)

(6 pt) **B.2**

$\epsilon_D/\epsilon_M =$  \_\_\_\_\_

OMN-1 C-4 C-1

**OMN-1 C-4 C**  
MARYAM AL-HATMI

**ICHO**  
**Problem 4**  
**Cover sheet**

Please return this cover sheet together with all the related question sheets.

## كيمياء الأكسدة والاختزال للزنك (The Redox of Chemistry Zinc)

11% من مجموع الدرجات							
Total	B.4	B.3	B.2	B.1	A.2	A.1	السؤال
32	9	5	3	4	5	6	الدرجات
							الدرجة



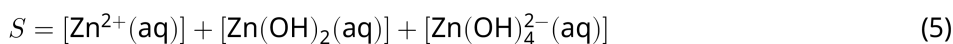
يستخدم الخارصين منذ فترة طويلة كسبائك لعواد النحاس و الحديد الصلب. يتم فصل الزنك الموجود في مياه الصرف الصناعي عن طريق الترسيب لإزالة السموم من الماء ، ويتم تقليل الراسب الناتج لاستعادته وإعادة استخدامه كزنك معدني.

### الجزء A

يتم إعطاء إتران انحلال هيدروكسيد الخارصين  $Zn(OH)_2(s)$  عند  $25^\circ C$  وثوابت الإتران ذات الصلة في المعادلة 4-1



يتم إعطاء الذوبانية ،  $S$  ، للخارصين (تركيز الخارصين في محلول مائي مشبع) في المعادلة 5



**A.1** عندما الإتزان في المعادلة من 1 إلى 4 تم عملة ، **احسب** مدى pH الذي يكون فيه 6pt  
[Zn(OH)<sub>2</sub>(aq)] هو الأكبر بين [Zn<sup>2+</sup>(aq)] و [Zn(OH)<sub>2</sub>(aq)] و [Zn(OH)<sub>4</sub><sup>2-</sup>(aq)].

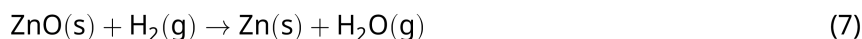
**A.2** تم تحضير محلول مائي مشبع من Zn(OH)<sub>2</sub>(s) مع الرقم الهيدروجيني pH = 7.00 و تم 5pt  
ترشيحه. تمت إضافة NaOH إلى هذا المرشح لزيادة pH إلى 12.00. **احسب** النسبة  
المولية للخارصين التي تترسب عند زيادة pH من 7.00 إلى 12.00. تجاهل التغييرات في  
الحجم ودرجة الحرارة.

### الجزء B

بعد ذلك ، يتم تسخين هيدروكسيد الخارصين المستعاد للحصول على أكسيد الخارصين وفقاً للتفاعل أدناه:

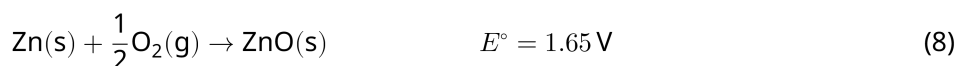


يتم بعد ذلك اختزال أكسيد الخارصين إلى خارصين فلزي بالتفاعل مع الهيدروجين:



**B.1** لكي يستمر التفاعل (7) يجب تثبيت ضغط الهيدروجين عند 1 bar ومن الضروري تقليل 4pt  
الضغط الجزئي لبخار الماء المتولد. **احسب** الحد الأعلى للضغط الجزئي لبخار الماء للسماح  
للتفاعل (7) للاستمرار عند 300°C . هنا ، طاقات تكوين جيبس لأكسيد الخارصين وبخار  
الماء عند 300°C و 1 bar لجميع الأنواع الغازية هي  
 $\Delta G_{\text{H}_2\text{O}}(300^\circ\text{C}) = -2.20 \times 10^2 \text{ kJ mol}^{-1}$  و  $\Delta G_{\text{ZnO}}(300^\circ\text{C}) = -2.90 \times 10^2 \text{ kJ mol}^{-1}$   
على التوالي.

يستخدم الخارصين الفلزي كمادة قطب سالب (أنود) (anode) لبطاريات الهواء-الفلزي. يتكون القطب من Zn و ZnO. يستخدم تفاعل الأكسدة والاختزال التالي لتوليد الكهرباء بالقوة الدافعة الكهربائية (emf) (جهد الخلية) عند 25°C و ضغط 1 bar،  $E^\circ$ .



**B.2** تم تفريغ بطارية الزنك والهواء عند 20mA لمدة 24 ساعة. **احسب** التغير في كتلة القطب 3pt  
السالب (الأنود) للبطارية.



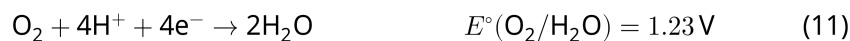
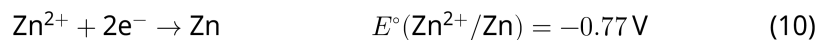
قمة جبل فوجي. Fuji Mt.

**B.3** اعتبر تغيير جهد الخلية e.m.f. لبطارية الخارصين-هواء حسب البيئة. احسب قيمة جهد الخلية emf ( $E^\circ$ ). في قمة جبل فوجي ، حيث درجة الحرارة (في فبراير)  $-38^\circ\text{C}$  والارتفاع  $3776\text{ m}$  ، على التوالي. يتم تمثيل الضغط الجوي بواسطة

$$P [\text{bar}] = 1.013 \times \left(1 - \frac{0.0065h}{T + 0.0065h + 273.15}\right)^{5.257} \quad (9)$$

على ارتفاع  $h [\text{m}]$  ودرجة الحرارة  $T [^\circ\text{C}]$ . تبلغ النسبة المولية للأكسجين في الغلاف الجوي 21%. طاقة تغير جيبس للتفاعل (8) هو  $\Delta G_{\text{ZnO}}(-38^\circ\text{C}) = -3.26 \times 10^2 \text{ kJ mol}^{-1}$  عند  $-38^\circ\text{C}$  و  $1\text{ bar}$ .

**B.4** احسب التغير في طاقة جيبس للتفاعل (6) عند  $25^\circ\text{C}$ . لاحظ أن جهد الإختزال القياسي ،  $E^\circ(\text{O}_2/\text{H}_2\text{O})$  و  $E^\circ(\text{Zn}/\text{Zn}^{2+})$  ، عند  $25^\circ\text{C}$  و  $1\text{ bar}$  تُعطى ك (10) و (11) ، على التوالي.





## The Redox Chemistry of Zinc

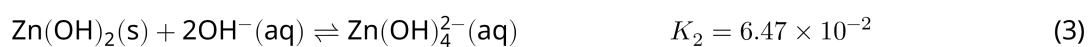
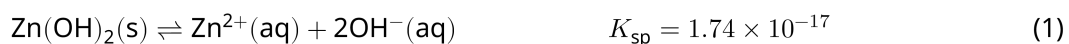
11 % of the total							
Question	A.1	A.2	B.1	B.2	B.3	B.4	Total
Points	6	5	4	3	5	9	<b>32</b>
Score							



Zinc has long been used as alloys for brass and steel materials. The zinc contained in industrial wastewater is separated by precipitation to detoxify the water, and the obtained precipitate is reduced to recover and reuse it as metallic zinc.

### Part A

The dissolution equilibrium of zinc hydroxide  $\text{Zn}(\text{OH})_2(\text{s})$  at 25 °C and the relevant equilibrium constants are given in eq. 1-4.



The solubility,  $S$ , of zinc (concentration of zinc in a saturated aqueous solution) is given in eq. 5.

$$S = [\text{Zn}^{2+}(\text{aq})] + [\text{Zn}(\text{OH})_2(\text{aq})] + [\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}(\text{aq})] \quad (5)$$

**A.1** When the equilibria in eq. 1–4 are established, **calculate** the pH range in which  $[\text{Zn}(\text{OH})_2(\text{aq})]$  is the greatest among  $[\text{Zn}^{2+}(\text{aq})]$ ,  $[\text{Zn}(\text{OH})_2(\text{aq})]$  and  $[\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}(\text{aq})]$ . 6pt

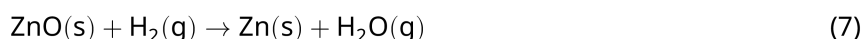
**A.2** A saturated aqueous solution of  $\text{Zn}(\text{OH})_2(\text{s})$  with  $\text{pH} = 7.00$  was prepared and filtered.  $\text{NaOH}$  was added to this filtrate to increase its  $\text{pH}$  to 12.00. **Calculate** the molar percentage of zinc that precipitates when increasing the  $\text{pH}$  from 7.00 to 12.00. Ignore the volume and temperature changes. 5pt

## Part B

Next, the recovered zinc hydroxide is heated to obtain zinc oxide according to the reaction below:

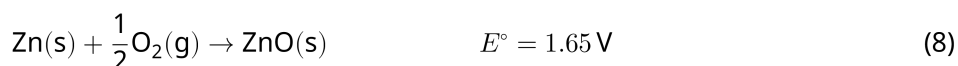


The zinc oxide is then reduced to metallic zinc by reaction with hydrogen:



**B.1** In order for reaction (7) to proceed at a hydrogen pressure kept at 1 bar, it is necessary to reduce the partial pressure of the generated water vapor. **Calculate** the upper limit for the partial pressure of water vapor to allow reaction (7) to proceed at 300 °C. Here, the Gibbs formation energies of zinc oxide and water vapor at 300 °C and 1 bar for all gaseous species are  $\Delta G_{\text{ZnO}}(300^\circ\text{C}) = -2.90 \times 10^2 \text{ kJ mol}^{-1}$  and  $\Delta G_{\text{H}_2\text{O}}(300^\circ\text{C}) = -2.20 \times 10^2 \text{ kJ mol}^{-1}$ , respectively. 4pt

Metallic zinc is used as a negative electrode (anode) material for metal-air batteries. The electrode consists of Zn and ZnO. It uses the following redox reaction to generate electricity with the electromotive force (e.m.f.) at 25 °C and pressure of 1 bar,  $E^\circ$ .



**B.2** A zinc–air battery was discharged at 20 mA for 24 hours. **Calculate** the change in mass of the negative electrode (anode) of the battery. 3pt



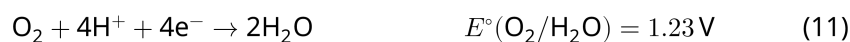
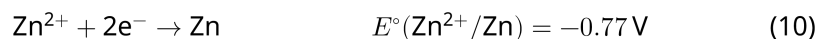
Mt. Fuji

- B.3** Consider the change of e.m.f. of a zinc-air battery depending on the environment. **Calculate** the e.m.f. at the summit of Mt. Fuji, where the temperature and altitude are  $-38^\circ\text{C}$  (February) and 3776 m, respectively. The atmospheric pressure is represented by 5pt

$$P [\text{bar}] = 1.013 \times \left( 1 - \frac{0.0065h}{T + 0.0065h + 273.15} \right)^{5.257} \quad (9)$$

at altitude  $h$  [m] and temperature  $T$  [ $^\circ\text{C}$ ]. The molar ratio of oxygen in the atmosphere is 21%. The Gibbs energy change of reaction (8) is  $\Delta G_{\text{ZnO}}(-38^\circ\text{C}) = -3.26 \times 10^2 \text{ kJ mol}^{-1}$  at  $-38^\circ\text{C}$  and 1 bar.

- B.4** **Calculate** the Gibbs energy change for reaction (6) at  $25^\circ\text{C}$ . Note that the standard reduction potentials,  $E^\circ(\text{Zn}^{2+}/\text{Zn})$  and  $E^\circ(\text{O}_2/\text{H}_2\text{O})$  at  $25^\circ\text{C}$  and 1 bar are given as (10) and (11), respectively. 9pt





OMN-1 C-4 A-1

**A4-1**  
Arabic (Oman)

## كيمياء الأوكسدة والاختزال للزنك

الجزء A

(6 pt) **A.1**

< pH <



OMN-1 C-4 A-2

**A4-2**  
Arabic (Oman)

(5 pt) **A.2**

\_\_\_\_\_ %



OMN-1 C-4 A-3

**A4-3**  
Arabic (Oman)

**الجزء B**

(4 pt) **B.1**

$p_{\text{H}_2\text{O}} =$  \_\_\_\_\_ bar

(3 pt) **B.2**

\_\_\_\_\_ g



OMN-1 C-4 A-4

**A4-4**  
Arabic (Oman)

(5 pt) **B.3**

\_\_\_\_\_ V



OMN-1 C-4 A-5

**A4-5**  
Arabic (Oman)

(9 pt) **B.4**

$\Delta G^\circ =$  \_\_\_\_\_  $\text{J mol}^{-1}$



OMN-1 C-5 C-1

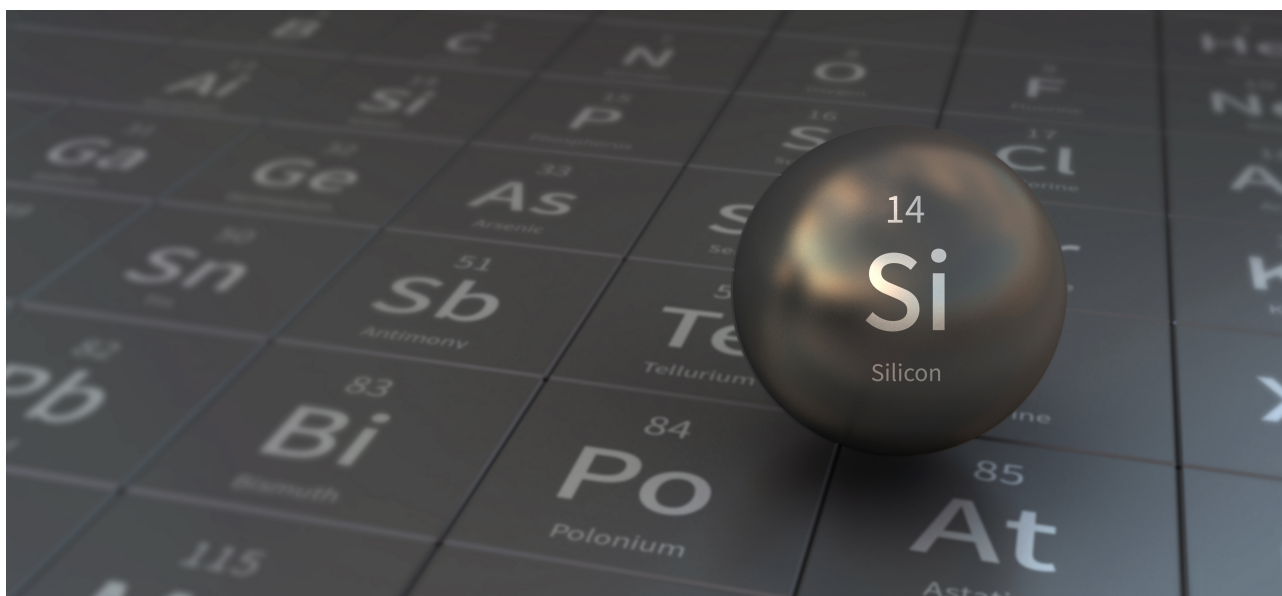
**OMN-1 C-5 C**  
MARYAM AL-HATMI

**IChO**  
**Problem 5**  
**Cover sheet**

Please return this cover sheet together with all the related question sheets.

## السيليكون الغامض Silicon Mysterious

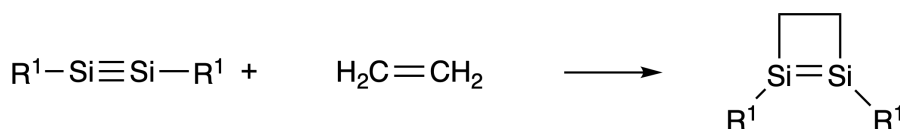
12% من إجمالي مجموع الدرجات								السؤال
المجموع	B.3	B.2	B.1	A.4	A.3	A.2	A.1	الدرجات
60	8	15	5	10	6	7	9	الدرجة



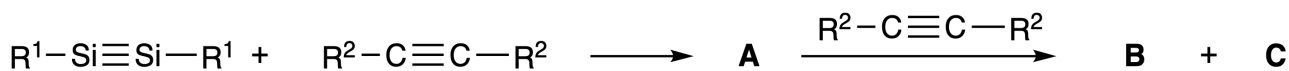
على الرغم من أن السيليكون هو أيضاً عنصر من المجموعة 14 مثل الكربون ، إلا أن خصائصه تختلف بشكل كبير.

### الجزء A

على عكس الرابطة الثلاثية للكربون والكربون ، فإن الرابطة الثلاثية للسيليكون والسيليكون في مركب تمت صياغته على شكل  $R^1-Si \equiv Si-R^1$  : تعتبر متفرعة عضوي الكيل ( شديدة التفاعل. على سبيل المثال ، يتفاعل مع الإيثيلين  $CH_2=CH_2$  لتكوين ناتج حلقي يحتوي على حلقة رباعية.



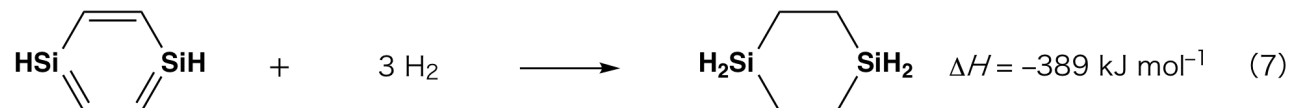
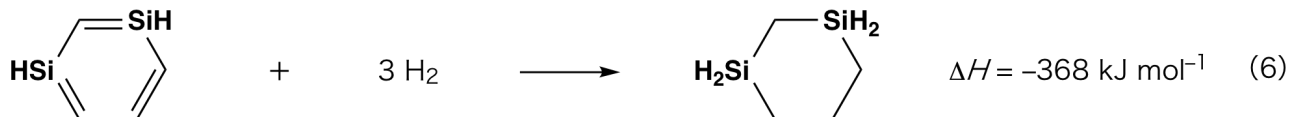
عندما يتم التعامل مع  $R^1-Si \equiv Si-R^1$  باستخدام ألكاين  $R^2-C \equiv C-R^2$  ، يتشكل المركب ذو الحلقة الرباعية **A** باعتباره وسيطاً أولياً. يتيح التفاعل الإضافي لجزء آخر من  $R^2-C \equiv C-R^2$  مع **A** لإنتاج المتشابهين **B** و **C** ، وكلاهما له هياكل مترافقة conjugated حلقة شبيهة بالبنزين ، تسمى ثنائي سليكا بنزين "disilabenzenes" التي تحتوي على حلقة سداسية ويمكن كتابة صياغتها العامة على الشكل  $(R^1-Si)_2(R^2-C)_4$



يُظهر تحليل الرنين النووي المغناطيس للكربون  $^{13}C$  NMR للتراكيب البنائية ذات الحلقات السداسية  $Si_2C_4$  إشارتين (قمتين) للمركب **B** وإشارة واحدة (قمة واحدة) للمركب **C**.

**A.1** ارسم التركيب البنائي للمركبات **A** و **B** و **C** باستخدام الصيغ  $R^1$  و  $R^2$  و  $Si$  و  $C$  ، باستخدام 9pt  
 أحد التراكيب الرنينية الممكنة.

**A.2** احسب طاقة الاستقرار ( التثبيت ) العطري (ASE) للبنزين و المركب **C** (في حالة  $R^1 = R^2 = H$ ) كقيم موجبة ، مع الأخذ في الاعتبار تغير المحتوى الحراري في بعض تفاعلات الهدرجة للأنظمة غير المشبعة الموضحة أدناه (الشكل 1). 7pt



الشكل 1

عندما يتم تسخين محلول زيلين للمركب **C** ، فإنه يمر بعملية مشابهة لإعطاء خليط إتران من المركبات **D** و **E**. النسبة المولية هي  $D : E = 1 : 20.0$  عند درجة مئوية  $50.0$  و  $D : E = 1 : 40.0$  عند  $120.0$  درجة مئوية .

**A.3 احسب  $\Delta H$  لتحويل المركب **D** إلى **E**. افترض أن  $\Delta H$  لا تعتمد على درجة الحرارة.** 6pt

تستمر عملية المشابهة isomerization من المركب **C** إلى **D** و **E** عبر تحويلات الروابط الثنائية  $\sigma$  إلى الروابط الأحادية  $\pi$  دون كسر أي روابط أحادية  $\sigma$ . كشف تحليل الرنين النووي المغناطيسي للكربون  $^{13}\text{C}$  NMR عن إشارة واحدة (قمة واحدة) للتركيب البنائي لـ  $\text{Si}_2\text{C}_4$  للمركب **D** وإشارتين (قمتين) لتلك الخاصة بالمركب **E**. لا يحتوي التركيب البنائي للمركب **D** على أي حلقات ثلاثية ، بينما يحتوي المركب **E** على حلقتين ثلاثية تشترك في الحافة.

**A.4 ارسم الصيغ البنائية للمركبين **D** و **E** باستخدام الصيغ  $\text{C}$  ,  $\text{Si}$  ,  $\text{R}^2, \text{R}^1$**  10pt

### الجزء B

السيليكون قادر على تكوين مركبات تناسيقة عالية التنسيق (< أربعة تفرعات) مع عناصر لها سالبية كهربية مثل الفلور. نظرًا لأن الفلوريدات الفلزية غالباً ما تستخدم كواشف للفلورة ، فإن فلوريدات السيليكون عالية التنسيق تعمل أيضاً ككواشف فلورة.

تم إجراء تفاعل الفلورة من  $\text{CCl}_4$  باستخدام  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  على النحو التالي.

تحضير المحلول القياسي  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ :

طريقة التحضير لمحلول قياسي من  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$

المحلول المائي **F** يتم تحضيره :  $0.855\text{g}$  من  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  ( $188.053\text{ g mol}^{-1}$ ) مذاب في الماء (الحجم الكلي:  $200\text{mL}$ ).

محلول مائي **G** يتم تحضيره :  $6.86\text{g}$  من  $\text{Ce}_2(\text{SO}_4)_3$  ( $568,424\text{ g mol}^{-1}$ ) مذاب في الماء (الحجم الكلي:  $200\text{mL}$ ).

· إجراءات:

معايرة الترسيب لمحلول **F** حجمه ( $50.0\text{ mL}$ ) عن طريق إضافة محلول **G** بالتنقيط في وجود زايلينول برتقالي xyleneol orange ، والذي يرتبط إلى  $\text{Ce}^{3+}$  ، ككاشف. بعد إضافة  $18.8\text{ mL}$  من المحلول **G** ، يتغير لون المحلول من الأصفر إلى الأرجواني. الراسب المتكون هو مركب ثنائي يحتوي على  $\text{Ce}^{3+}$  ، ومركب السيليكون الناتج الوحيد هو  $\text{Si}(\text{OH})_4$ .

**B.1** اكتب المعادلة الموزونة لتفاعل  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  مع  $\text{Ce}_2(\text{SO}_4)_3$ . 5pt

تفاعل  $\text{CCl}_4$  مع  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ :

(المواد المفقودة عن طريق التبخر على سبيل المثال مهمل أثناء العمليات التالية.)

تمت إضافة  $x$  [g] من المادة ( $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  إلى  $\text{CCl}_4$  ( $500.0\text{ جم}$ ) وتم تسخينه إلى  $300^\circ\text{C}$  درجة مئوية في وعاء تفاعل محكم الغلق مقاوم للضغط. تمت إزالة  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  غير المتفاعل و  $\text{NaCl}$  الناتج عن طريق الترشيح. تم تخفيف المادة المرشحة إلى حجم إجمالي قدره  $1.00$  لتر باستخدام  $\text{CCl}_4$  (محلول **H**). أظهر أطياف الرنين النووي المغناطيسي لـ  $^{29}\text{Si}$  و  $^{19}\text{F}$  (NMR) للمحلول **H** أظهر  $\text{SiF}_4$  كمركب السيليكون الوحيد. في طيف  $^{19}\text{F}$  NMR ، بالإضافة إلى  $\text{SiF}_4$  ، لوحظت الإشارات (القمم) المقابلة لـ  $\text{CFCl}_3$  و  $\text{CF}_2\text{Cl}_2$  و  $\text{CF}_3\text{Cl}$  و  $\text{CF}_4$  (راجع الجدول 1). تتناسب نسب التكامل في طيف NMR  $^{19}\text{F}$  مع عدد نوى الفلور.

الجدول 1

CF <sub>4</sub>	CF <sub>3</sub> Cl	CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	CFCl <sub>3</sub>	data NMR <sup>19</sup> F الرنين المغناطيسي للفلور (19)
2.0	18.0	65.0	45.0	نسبة تكامل المساحة

تتحلل المادة SiF<sub>4</sub> بالماء ليشكل H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> حسب المعادلة 8:



تمت إضافة محلول H (10 mL) إلى كمية زائدة من الماء ، مما أدى إلى التحلل المائي الكامل لـ SiF<sub>4</sub>. بعد الفصل ، تم عمل تفاعلا تعادل للمركب H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> الناتج من التحلل المائي في المحلول المائي وتحويله بالكامل إلى Na<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> (محلول مائي J).

تم إذابة راسب Na<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> و NaCl غير المتفاعل ، والذي تمت إزالته بالترشيح في الخطوة الأولية (تحت خط) ، تم إذابته تمامًا في الماء لإعطاء محلول مائي (المحلول K : 10.0 لتر).

بعد ذلك ، تم إجراء معايرة إضافية لهطول الأمطار باستخدام المحلول G ، وكانت نقاط النهاية للمعايرة مع G كما يلي:

· للمحلول J (الكمية الكاملة): 61.6 mL .

· لكل 100 مل من محلول K هي : 44.4 mL .

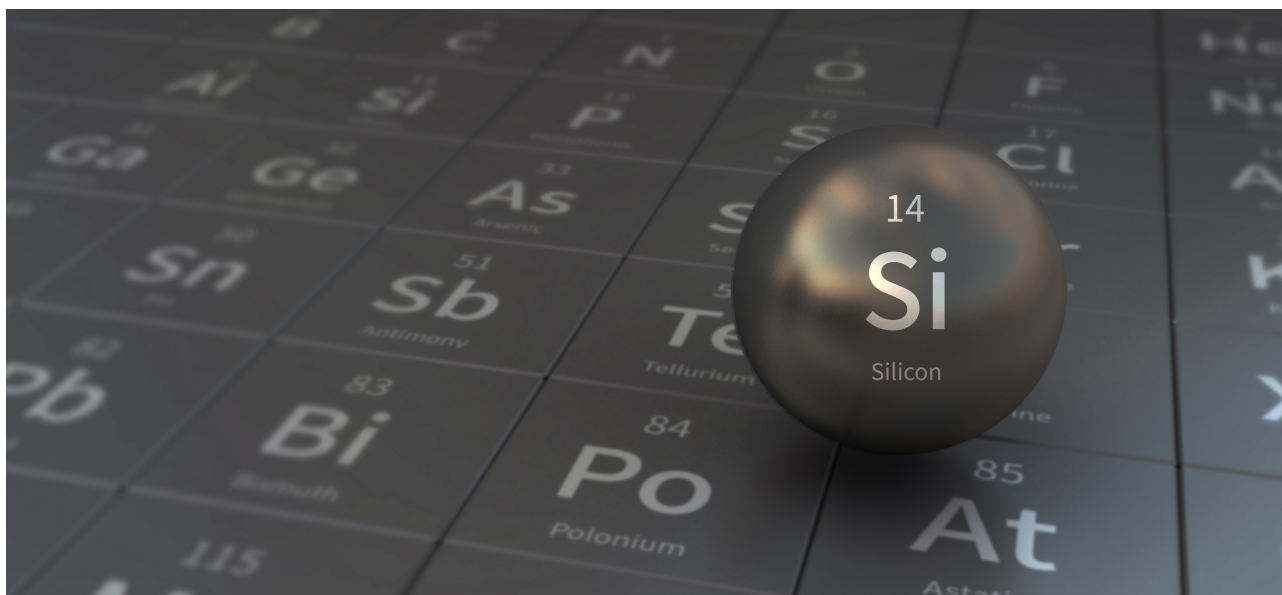
وتجدر الإشارة هنا إلى أن الوجود المشترك للمادتين NaCl أو SiO<sub>2</sub> ليس له أي تأثير على معايرة الترسيب.

**B.2** احسب كتلة NaCl المنتجة في وعاء التفاعل (المعلومات التي تحتها خط) ، واحسب 15pt  
الكتلة (x [g]) لـ Na<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> المستخدمة كمادة بداية.

**B.3** 77.8% من CCl<sub>4</sub> المستخدم كمادة بداية لم يتفاعل. احسب كتلة CF<sub>3</sub>Cl الناتجة. 8pt

## Mysterious Silicon

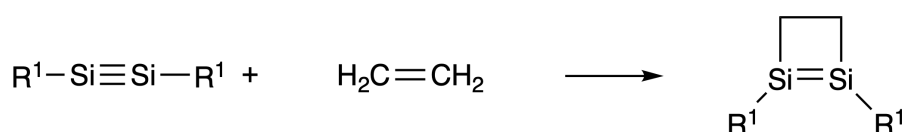
12 % of the total								
Question	A.1	A.2	A.3	A.4	B.1	B.2	B.3	Total
Points	9	7	6	10	5	15	8	<b>60</b>
Score								



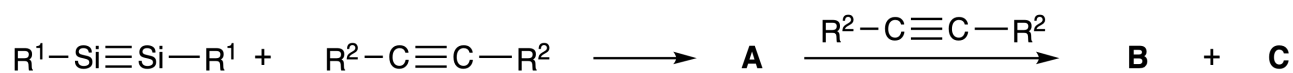
Although silicon is also a group 14 element like carbon, their properties differ significantly.

### Part A

Unlike the carbon-carbon triple bond, the silicon-silicon triple bond in a compound formulated as  $R^1-Si \equiv Si-R^1$  ( $R$ : organic substituent) is extremely reactive. For example, it reacts with ethylene to form a cyclic product that contains a four-membered ring.



When  $R^1-Si \equiv Si-R^1$  is treated with an alkyne ( $R^2-C \equiv C-R^2$ ), the four-membered-ring compound **A** is formed as an initial intermediate. Further reaction of another molecule of  $R^2-C \equiv C-R^2$  with **A** affords isomers **B** and **C**, both of which have benzene-like cyclic conjugated structures, so-called 'disilabenzenes' that contain a six-membered ring and can be formulated as  $(R^1-Si)_2(R^2-C)_4$ .



The  $^{13}C$  NMR analysis of the corresponding six-membered ring skeletons  $Si_2C_4$  shows two signals for **B** and one signal for **C**.

**A.1** **Draw** the structural formulae of **A**, **B**, and **C** using  $R^1$ ,  $R^2$ , Si, and C, with one of the possible resonance structures. 9pt

**A.2** **Calculate** the aromatic stabilization energy (ASE) for benzene and **C** (in the case of  $R^1 = R^2 = H$ ) as positive values, considering the enthalpy change in some hydrogenation reactions of unsaturated systems shown below (Fig. 1). 7pt

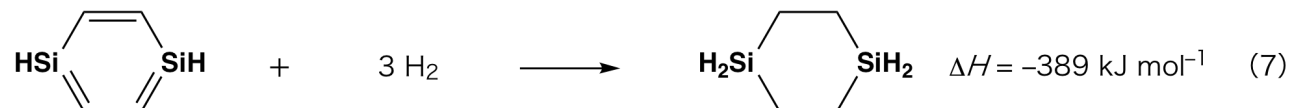
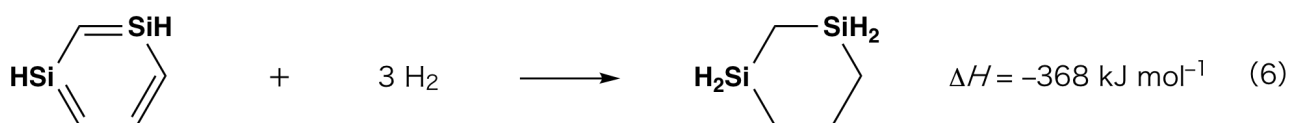


Fig. 1

When a xylene solution of **C** is heated, it undergoes isomerization to give an equilibrium mixture of compounds **D** and **E**. The molar ratio is **D** : **E** = 1 : 40.0 at 50.0 °C and **D** : **E** = 1 : 20.0 at 120.0 °C.

**A.3 Calculate**  $\Delta H$  for the transformation of **D** to **E**. Assume that  $\Delta H$  does not depend on temperature. 6pt

The isomerization from **C** to **D** and to **E** proceeds via transformations of  $\pi$ -bonds into  $\sigma$ -bonds without breaking any  $\sigma$ -bonds. A  $^{13}\text{C}$  NMR analysis revealed one signal for the  $\text{Si}_2\text{C}_4$  skeleton of **D** and two signals for that of **E**. The skeleton of **D** does not contain any three-membered rings, while **E** has two three-membered rings that share an edge.

**A.4 Draw** the structural formulae of **D** and **E** using  $\text{R}^1$ ,  $\text{R}^2$ , Si, and C. 10pt

## Part B

Silicon is able to form highly coordinated compounds (> four substituents) with electronegative elements such as fluorine. As metal fluorides are often used as fluorination reagents, highly coordinated silicon fluorides also act as fluorination reagents.

The fluorination reaction of  $\text{CCl}_4$  using  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  was carried out as follows.

• **Standardization of  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  solution :**

• Preparation

Aqueous solution **F**: 0.855 g of  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  ( $188.053 \text{ g mol}^{-1}$ ) dissolved in water (total volume: 200 mL).

Aqueous solution **G**: 6.86 g of  $\text{Ce}_2(\text{SO}_4)_3$  ( $568.424 \text{ g mol}^{-1}$ ) dissolved in water (total volume: 200 mL).

• Procedure

Precipitation titration of a solution **F** (50.0 mL) by dropwise adding solution **G** in the presence of xylenol orange, which coordinates to  $\text{Ce}^{3+}$ , as an indicator. After adding 18.8 mL of solution **G**, the color of the solution changes from yellow to magenta. The generated precipitate is a binary compound that contains  $\text{Ce}^{3+}$ , and the only resulting silicon compound is  $\text{Si}(\text{OH})_4$ .

**B.1 Write** the balanced equation for the reaction of  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  with  $\text{Ce}_2(\text{SO}_4)_3$ . 5pt

• **Reaction of  $\text{CCl}_4$  with  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ :**

(Substance losses by *e.g.* evaporation are negligible during the following operations.)

$\text{Na}_2\text{SiF}_6$  ( $x$  [g]) was added to  $\text{CCl}_4$  (500.0 g) and heated to 300 °C in a sealed pressure-resistant reaction vessel. The unreacted  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  and generated NaCl were removed by filtration. The filtrate was diluted to a total volume of 1.00 L with  $\text{CCl}_4$  (solution **H**). The  $^{29}\text{Si}$  and  $^{19}\text{F}$  NMR spectra of solution **H** showed  $\text{SiF}_4$  as the only silicon compound. In the  $^{19}\text{F}$  NMR spectrum, in addition to  $\text{SiF}_4$ , signals corresponding to  $\text{CFCl}_3$ ,  $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ ,  $\text{CF}_3\text{Cl}$ , and  $\text{CF}_4$  were observed (*cf.* Table 1). The integration ratios in the  $^{19}\text{F}$  NMR spectrum are proportional to the number of fluorine nuclei.

Table 1

$^{19}\text{F}$ NMR data	$\text{CFCl}_3$	$\text{CF}_2\text{Cl}_2$	$\text{CF}_3\text{Cl}$	$\text{CF}_4$
Integration ratio	45.0	65.0	18.0	2.0





$\text{SiF}_4$  is hydrolyzed to form  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  according to the following eq. 8:



Solution **H** (10 mL) was added to an excess amount of water, which resulted in the complete hydrolysis of  $\text{SiF}_4$ . After separation, the  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  generated from the hydrolysis in the aqueous solution was neutralized and completely converted to  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  (aqueous solution **J**).

The precipitate of unreacted  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  and  $\text{NaCl}$ , which was removed by filtration in the initial step (underlined), was completely dissolved in water to give an aqueous solution (solution **K**; 10.0 L).

Then, additional precipitation titrations using solution **G** were carried out, and the endpoints of the titrations with **G** were as follows:

·For solution **J** (entire amount): 61.6 mL.

·For 100 mL of solution **K**: 44.4 mL.

It should be noted here that the coexistence of  $\text{NaCl}$  or  $\text{SiO}_2$  has no effect on the precipitation titration.

**B.2** Calculate the mass of the  $\text{NaCl}$  produced in the reaction vessel (information underlined), and **calculate** the mass ( $x$  [g]) of the  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  used as a starting material. 15pt

**B.3** 77.8% of the  $\text{CCl}_4$  used as a starting material was unreacted. **Calculate** the mass of  $\text{CF}_3\text{Cl}$  generated. 8pt



OMN-1 C-5 A-1

# A5-1

Arabic (Oman)

## السيليكون الغامض Mysterious Silicon

الجزء A

(9 pt) **A.1**

pt) 3) **C**

pt) 3) **B**

pt) 3) **A**

(7 pt) **A.2**

$C_6H_6$  :

$\text{kJ mol}^{-1}$ , **C** :

$\text{kJ mol}^{-1}$



OMN-1 C-5 A-2

# A5-2

Arabic (Oman)

(6 pt) **A.3**

$\Delta H =$  \_\_\_\_\_  $\text{kJ mol}^{-1}$

(10 pt) **A.4**

pt) 5) **E**

pt) 5) **D**



OMN-1 C-5 A-3

**A5-3**  
Arabic (Oman)

**الجزء B**

(5 pt) **B.1**

(15 pt) **B.2**

(تابع في الصفحة التاليه)



OMN-1 C-5 A-4

**A5-4**  
Arabic (Oman)

(cont.) B.2

NaCl : \_\_\_\_\_ g, Na<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> : \_\_\_\_\_ g



OMN-1 C-5 A-5

**A5-5**  
Arabic (Oman)

(8 pt) **B.3**

$\text{CF}_3\text{Cl}$  : \_\_\_\_\_ g

OMN-1 C-6 C-1

**OMN-1 C-6 C**  
MARYAM AL-HATMI

**IChO**  
**Problem 6**  
**Cover sheet**

Please return this cover sheet together with all the related question sheets.

كيمياء الحالة الصلبة الفلزات الانتقالية  
The Solid State Chemistry

13% من الإجمالي											
الإجمالي	C.3	C.2	C.1	B.4	B.3	B.2	B.1	A.3	A.2	A.1	السؤال
45	5	5	5	4	4	4	6	3	3	6	الدرجات
											نتيجة



بركان في جزيرة ساكورا جيمما

**الجزء A**

اليابان هي واحدة من الدول التي لديها أكبر عدد من البراكين في جميع أنحاء العالم. عندما تتبلور معادن السيليكات من الصهارة الماجما، يحصل اندماج جزء من أيونات الفلزات الانتقالية ( $M^{n+}$ ) في الصهارة الماجما مع معادن السيليكات. تكون  $M^{n+}$  المدروسة في هذه المسألة مرتبطة تناسقياً مع أيونات الأكسيد ( $O^{2-}$ ) وتشكل عدد تناسقي أربعة في شكل رباعي الأوجه ( $T_d$ ) في الصهارة الماجما وتشكل عدد تناسقي ستة في شكل ثماني الوجوه الأوجه ( $O_h$ ) في معادن السيليكات وكلاهما يظهر تكوين دوران الكتروني مرتفع spin. high يمكن التعبير عن معامل التوزيع للايون  $M^{n+}$  بين معادن السيليكات والصهارة الماجما D بالعلاقة:

$$D = \frac{[M]_s}{[M]_l}$$

حيث أن  $[M]_s$  و  $[M]_l$  تمثل تراكيز  $M^{n+}$  في كل من معادن السيليكات والصهارة، على التوالي. يوضح الجدول أدناه قيمة D لـ  $Cr^{2+}$ ،  $Mn^{2+}$  كأمثلة.



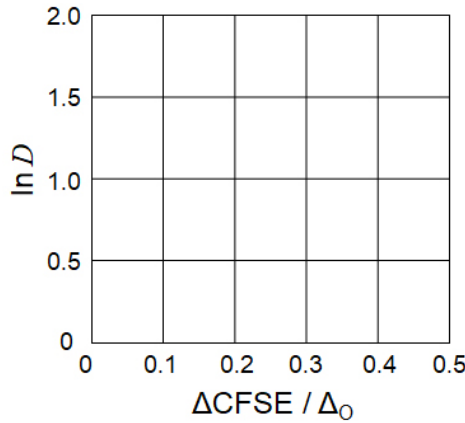
	Cr <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup>
$D$	7.2	1.1

لنفترض أن  $\Delta_o$  و  $CFSE^O$  هما طاقة الفصل لمدارات الفلك d لـ  $M^{n+}$  وطاقة استقرار المجال البلوري في المجال  $O_h$ ، على التوالي.

وبفرض أن  $\Delta_T$  و  $CFSE^T$  يمثلانهم في المجال  $T_d$

**A.1** احسب  $\Delta CFSE = |CFSE^O - CFSE^T|$  بدلالة  $\Delta_o$  لكن من  $Cr^{2+}$  و  $Mn^{2+}$  و  $Co^{2+}$  أفترض 6pt  
أن  $\Delta_T = 4/9 \Delta_o$

**A.2** لوحظ وجود علاقة خطية من خلال رسم  $\ln D$  مقابل  $\Delta CFSE / \Delta_o$  في نظام الإحداثيات الديكارتيّة الموضح أدناه. عين  $D$  لـ  $Co^{2+}$  بالتقدير 3pt



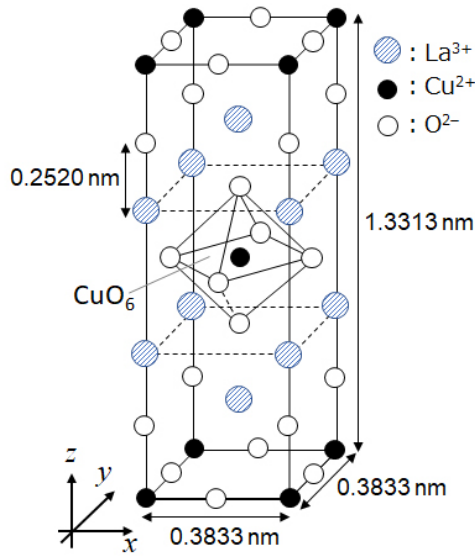
تتبلور أكاسيد المعادن MO حيث المعدن يمثل أي من المعادن التالية، ( $M : Ca, Ti, V, Mn \text{ or } Co$ ) على هيئة بلورة الملح حيث يتبنى  $M^{n+}$  هندسة  $O_h$  مع تركيب إلكتروني عالي الدوران high spin. ترتبط انثاليات طاقة الشبكة البلورية لهذه الأكاسيد بشكل أساسي بتأثيرات كولوم بين الشحنات على أساس نصف قطر وشحنة الأيونات وبعض المساهمات من  $CFSE$  لـ  $M^{n+}$  في المجال  $O_h$

A.3 اختر المجموعة المناسبة من انثاليبيات طاقة الشبكة البلورية [ $\text{kJ mol}^{-1}$ ] من أحد الخيارات 3pt  
(a) إلى (f).

	CaO	TiO	VO	MnO	CoO
(a)	3460	3878	3913	3810	3916
(b)	3460	3916	3878	3810	3913
(c)	3460	3913	3916	3810	3878
(d)	3810	3878	3913	3460	3916
(e)	3810	3916	3878	3460	3913
(f)	3810	3913	3916	3460	3878

**الجزء B**

يتبلور أكسيد مختلط **A** ، يحتوي على  $\text{Cu}^{2+}$  و  $\text{La}^{3+}$  ، في خلية وحدة رباعية الزوايا كما هو موضح في الشكل 1. في المجسم الثماني  $[\text{CuO}_6]$  ، يكون طول  $\text{O} - \text{Cu}$  على طول المحور  $z$  أطول من طول المحور  $x$  ( $l_x$ ) ، ويتشوه  $[\text{CuO}_6]$  عن هندسة  $\text{O}_h$  العادية. هذا التشويه يزيل الانحلال بين المدارات  $e_g$  ( $d_{x^2-y^2}$  and  $d_{z^2}$ ).



الشكل 1

يمكن تصنيع **A** عن طريق التحلل الحراري (الانحلال الحراري) للمركب **B** ، والذي يتكون عن طريق خلط كلوريدات المعادن في محلول أمونيا مائي مخفف يحتوي على حمض سكواريك  $\text{C}_4\text{H}_2\text{O}_4$  ، أي ثنائي حامض. يُظهر سلوك الانحلال الحراري لـ **B** في الهواء الجاف فقدًا في الوزن بنسبة 29.1% حتى  $200^\circ\text{C}$  بسبب فقد ماء التبلور ، يليه فقدان آخر للوزن حتى  $700^\circ\text{C}$  بسبب إطلاق  $\text{CO}_2$ . إجمالي فقدان الوزن أثناء تكوين **A** من **B** هو 63.6%. وتجدر الإشارة إلى أنه يتم إطلاق الماء و  $\text{CO}_2$  فقط في تفاعل الانحلال الحراري.

6pt	<b>B.1</b> اكتب الصيغة الكيميائية لـ <b>A</b> و <b>B</b> .
4pt	<b>B.2</b> احسب $l_x$ و $l_z$ استخدم الشكل 1
4pt	<b>B.3</b> بالنسبة إلى $\text{Cu}^{2+}$ في ثماني السطوح المشوه $[\text{CuO}_6]$ في <b>A</b> من الشكل 1 ، اكتب أسماء المدارات المنقسمة $e_g$ ( $d_{x^2-y^2}$ and $d_{z^2}$ ) في (i) و (ii) ، وارسم التوزيع الإلكتروني في المربع المنقط في ورقة إجابتك.

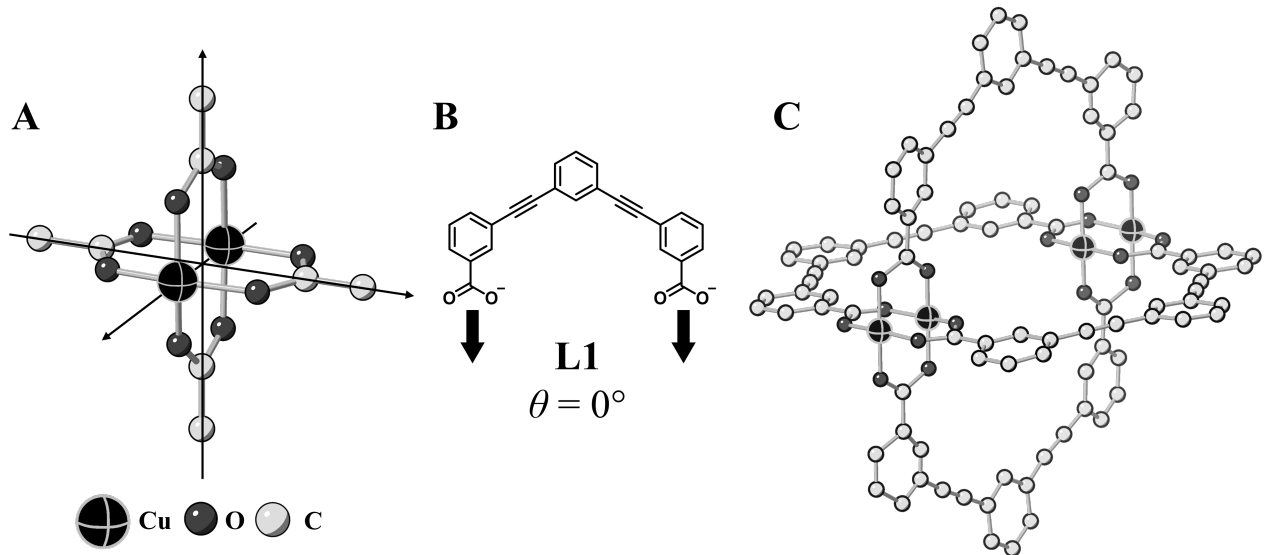
يعتبر **A** مادة عازلة. وعند استبدال أيون واحد من  $\text{La}^{3+}$  بأيون واحد من  $\text{Sr}^{2+}$  يظهر بالمقابل ثقب واحد في الشبكة البلورية التي يمكنها من توصيل الكهرباء. نتيجة لذلك، أظهر **A** الذي تم تطعيمه بأيون  $\text{Sr}^{2+}$  موصلية فائقة تحت 38K. عندما حدث تفاعل استبدال لـ **A**، يتكون  $2.05 \times 10^{27}$  من الثقوب لكل متر مكعب  $\text{m}^{-3}$

**B.4 احسب النسبة المئوية لأيون  $\text{Sr}^{2+}$  المستبدل في مواقع أيون  $\text{La}^{3+}$  بنسبة مولية في 4pt**  
تفاعل الاستبدال. لاحظ أن تكافؤات الأيونات المكونة والبنية البلورية لم تتغير أثناء تفاعل الاستبدال.

### الجزء C

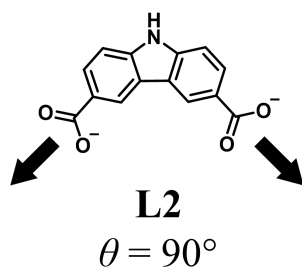
يتكون  $\text{Cu}_2(\text{CH}_3\text{CO}_2)_4$  من أربع  $\text{CH}_3\text{CO}_2^-$  مترابطة تناسقياً إلى اثنين من  $\text{Cu}^{2+}$  من الشكل 2A. يظهر  $\text{Cu}_2(\text{CH}_3\text{CO}_2)_4$  مستويات عالية من التناظر الهيكلي، مع محورين يمران عبر ذرات الكربون في الليجندات (المرتبطة) الأربعة  $\text{CH}_3\text{CO}_2^-$  ومحور يمر عبر أيونين من  $\text{Cu}^{2+}$ ، وجميع المحاور موجهة بشكل متعامد بالنسبة لبعضها البعض. عند استخدام ليجاندي ثنائي الكربوكسيل بدلا  $\text{CH}_3\text{CO}_2^-$ ، يتكون "معقد ذو فجوات قفص" (cage complex).

يتكون معقد القفص  $\text{Cu}_4(\text{L1})_4$  من مستويين من ثنائي كربوكسيلات **L1** الشكل 2B و  $\text{Cu}^{2+}$  الشكل 2C. تحدد الزاوية  $\theta$  بين اتجاهات التناسق لاثنتين من الكربوكسيلات، المشار إليها بواسطة الأسهم في الشكل 2B، تركيب بنية معقد القفص.  $\theta = 0^\circ$  لـ **L1**. لاحظ أن ذرات الهيدروجين غير موضحة في الشكل 2.



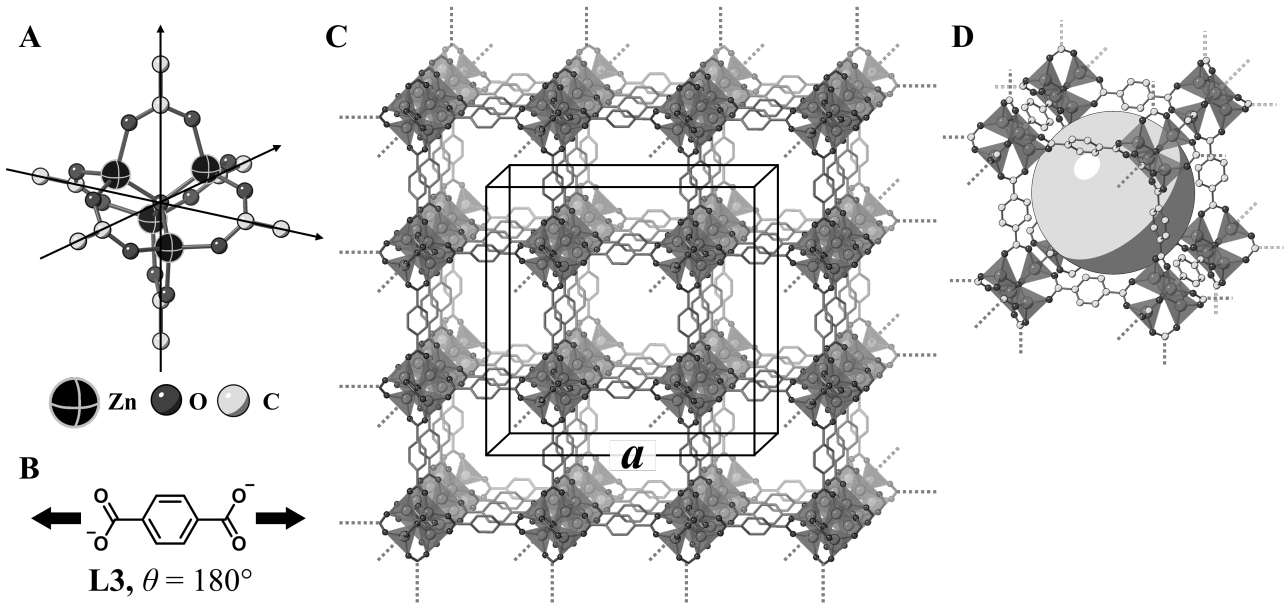
الشكل 2

**C.1** تم تثبيت الزاوية  $\theta$  لثنائي كربوكسيلات المستوي **L2** الموضح أدناه عند زاوية  $90^\circ$ . إذا كان تركيب معقد القفص المتكون من **L2** و  $\text{Cu}^{2+}$  هو  $\text{Cu}_n(\text{L2})_m$  اذكر اصغر مجموعة من الاعداد الصحيحة لكل من  $n$  و  $m$ . افترض أن مجموعات  $\text{CO}_2^-$  لليجاند **L2** ترتبط فقط برابطة تناسقية الى أيونات  $\text{Cu}^{2+}$



يحتوي معقد الخارصين  $Zn_4O(CH_3CO_2)_6$  ، على أربعة رباعي السطوح  $Zn^{2+}$  وستة  $CH_3CO_2^-$  و واحد  $O^{2-}$  (الشكل 3A).

في المعقد  $Zn_4O(CH_3CO_2)_6$  يقع  $O^{2-}$  عند نقطة مركز الأصل ، والمحاور الثلاثة التي تمر عبر ذرات الكربون في  $CH_3CO_2^-$  متعامدة بالنسبة لبعضها البعض. عند استخدام p-benzenedicarboxylate (الشكل 3B ،  $\theta = 180^\circ$  ،  $L3$  ) بدلاً من  $CH_3CO_2^-$  ، ترتبط مجموعات  $Zn^{2+}$  ببعضها البعض لتشكيل مادة صلبة بلورية (X) تسمى "بوليمر تنسيق مسامي" (الشكل 3C). تركيبة X هي  $[Zn_4O(L3)_3]_n$  ولها بنية بلورية مكعبة ذات مسام بحجم النانو. يتم تمثيل المسام الواحدة على شكل كرة في الشكل 3D ، ويتم تمثيل كل رباعي السطوح  $Zn^{2+}$  على شكل متعدد السطوح رمادي غامق في الشكل 3C و 3D. لاحظ أن ذرات الهيدروجين غير موضحة في الشكل 3.



الشكل 3

**C.2** يحتوي X على خلية وحدة تكعيبية طول ضلعها  $a$  (الشكل 3C) وكثافة  $(592.0 \text{ g cm}^{-3})$  5pt  
احسب  $a$  بوحدة [cm]

**C.3** يحتوي X على عدد كبير من المسامات ، ويمكن لـ 1g من X استيعاب  $3.0 \times 10^2 \text{ mL}$  من  $CO_2$  5pt  
في المسام عند  $1 \text{ bar}$  و  $25^\circ \text{C}$  . احسب متوسط عدد الجزيئات من  $CO_2$  غاز لكل مسام واحد.

## The Solid-State Chemistry of Transition Metals

13 % of the total											
Question	A.1	A.2	A.3	B.1	B.2	B.3	B.4	C.1	C.2	C.3	Total
Points	6	3	3	6	4	4	4	5	5	5	<b>45</b>
Score											



Volcano at Sakurajima island

### Part A

Japan is one of the countries with the highest numbers of volcanos worldwide. When silicate minerals crystallize from magma, a part of the transition-metal ions ( $M^{n+}$ ) in the magma is incorporated into the silicate minerals. The  $M^{n+}$  studied in the problem are coordinated by oxide ions ( $O^{2-}$ ) and adopt a four-coordinate tetrahedral ( $T_d$ ) geometry in the magma and six-coordinate octahedral ( $O_h$ ) geometry in the silicate minerals, both of which exhibit a high-spin electron configuration. The distribution coefficient of  $M^{n+}$  between the silicate minerals and magma,  $D$ , can be expressed by:

$$D = \frac{[M]_s}{[M]_l}$$

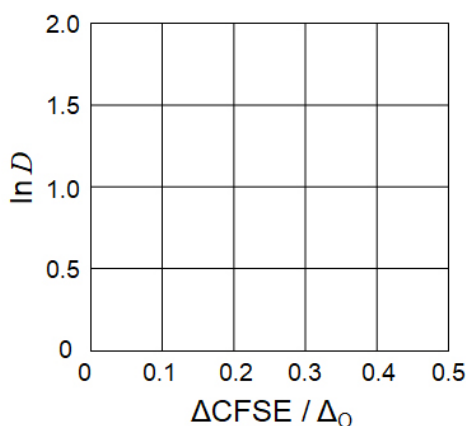
where  $[M]_s$  and  $[M]_l$  are the concentrations of  $M^{n+}$  in the silicate minerals and the magma, respectively. The table below shows the  $D$  values of  $Cr^{2+}$  and  $Mn^{2+}$  as examples.

	$Cr^{2+}$	$Mn^{2+}$
$D$	7.2	1.1

Let  $\Delta_o$  and  $CFSE^O$  be the energy separation of the d-orbitals of  $M^{n+}$  and the crystal-field stabilization energy in a  $O_h$  field, respectively. Let  $\Delta_T$  and  $CFSE^T$  be those in a  $T_d$  field.

**A.1 Calculate**  $|CFSE^O - CFSE^T| = \Delta CFSE$  in terms of  $\Delta_o$  for  $Cr^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ , and  $Co^{2+}$ ; assume  $\Delta_T = 4/9\Delta_o$ . 6pt

**A.2** A linear relationship is observed by plotting  $\ln D$  against  $\Delta CFSE / \Delta_o$  in the Cartesian coordinate system shown below. 3pt  
**Estimate**  $D$  for  $Co^{2+}$ .



Metal oxides MO (M: Ca, Ti, V, Mn, or Co) crystallize in a rock-salt structure wherein the  $M^{n+}$  adopts an  $O_h$  geometry with a high-spin electron configuration. The lattice enthalpy of these oxides is mainly governed by the Coulomb interactions based on the radius and charge of the ions and some contributions from the CFSE of  $M^{n+}$  in the  $O_h$  field.

**A.3 Choose** the appropriate set of lattice enthalpies [ $kJ mol^{-1}$ ] from one of the options (a) to (f). 3pt

	CaO	TiO	VO	MnO	CoO
(a)	3460	3878	3913	3810	3916
(b)	3460	3916	3878	3810	3913
(c)	3460	3913	3916	3810	3878
(d)	3810	3878	3913	3460	3916
(e)	3810	3916	3878	3460	3913
(f)	3810	3913	3916	3460	3878



**Part B**

A mixed oxide **A**, which contains  $\text{La}^{3+}$  and  $\text{Cu}^{2+}$ , crystallizes in a tetragonal unit cell shown in Fig.1. In the  $[\text{CuO}_6]$  octahedron, the Cu–O length along the z-axis ( $l_z$ ) is longer than that of the x-axis ( $l_x$ ), and  $[\text{CuO}_6]$  is distorted from the regular  $O_h$  geometry. This distortion removes the degeneracy of the  $e_g$  orbitals ( $d_{x^2-y^2}$  and  $d_{z^2}$ ).

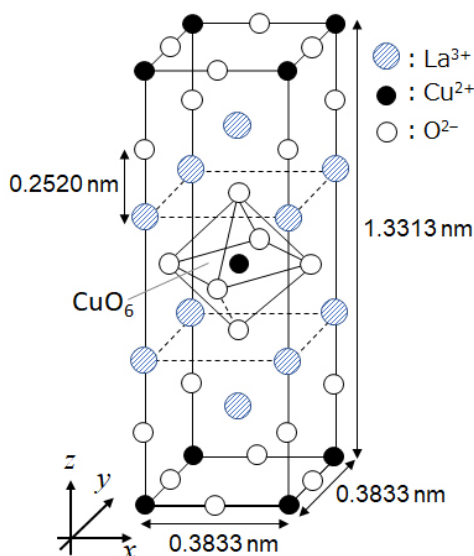


Fig. 1

**A** can be synthesized by thermal decomposition (pyrolysis) of complex **B**, which is formed by mixing metal chlorides in dilute aqueous ammonia solution containing squaric acid  $\text{C}_4\text{H}_2\text{O}_4$ , i.e., a diacid. The pyrolysis behavior of **B** in dry air shows a weight loss of 29.1% up to 200 °C due to the loss of crystallization water, followed by another weight loss up to 700 °C due to the release of  $\text{CO}_2$ . The total weight loss during the formation of **A** from **B** is 63.6%. It should be noted that only water and  $\text{CO}_2$  are released in the pyrolysis reaction.

<b>B.1</b>	<b>Write</b> the chemical formulae for <b>A</b> and <b>B</b> .	6pt
<b>B.2</b>	<b>Calculate</b> $l_x$ and $l_z$ using Fig. 1.	4pt
<b>B.3</b>	For $\text{Cu}^{2+}$ in the distorted $[\text{CuO}_6]$ octahedron in <b>A</b> of Fig. 1, <b>write</b> the names of the split $e_g$ orbitals ( $d_{x^2-y^2}$ and $d_{z^2}$ ) in (i) and (ii), and <b>draw</b> the electron configuration in the dotted box in your answer sheet.	4pt

**A** is an insulator. When one  $\text{La}^{3+}$  is substituted with one  $\text{Sr}^{2+}$ , one hole is generated in the crystal lattice that can conduct electricity. As a result, the  $\text{Sr}^{2+}$ -doped **A** shows superconductivity below 38 K. When a substitution reaction took place for **A**,  $2.05 \times 10^{27}$  holes  $\text{m}^{-3}$  were generated.

**B.4 Calculate** the percentage of  $\text{Sr}^{2+}$  substituted for  $\text{La}^{3+}$  based on the mole ratio in the substitution reaction. Note that the valences of the constituent ions and the crystal structure are not altered by the substitution reaction. 4pt

### Part C

$\text{Cu}_2(\text{CH}_3\text{CO}_2)_4$  is composed of four  $\text{CH}_3\text{CO}_2^-$  coordinated to two  $\text{Cu}^{2+}$  (Fig. 2A).  $\text{Cu}_2(\text{CH}_3\text{CO}_2)_4$  exhibits high levels of structural symmetry, with two axes passing through the carbon atoms of the four  $\text{CH}_3\text{CO}_2^-$  and an axis passing through the two  $\text{Cu}^{2+}$ , all of which are oriented orthogonal relative to each other. When a dicarboxylate ligand is used instead of  $\text{CH}_3\text{CO}_2^-$ , a "cage complex" is formed. The cage complex  $\text{Cu}_4(\text{L1})_4$  is composed of planar dicarboxylate **L1** (Fig. 2B) and  $\text{Cu}^{2+}$  (Fig. 2C). The angle  $\theta$  between the coordination directions of the two carboxylates, indicated by the arrows in Fig. 2B, determines the structure of the cage complex. The  $\theta$  is  $0^\circ$  for **L1**. Note that hydrogen atoms are not shown in Fig. 2.

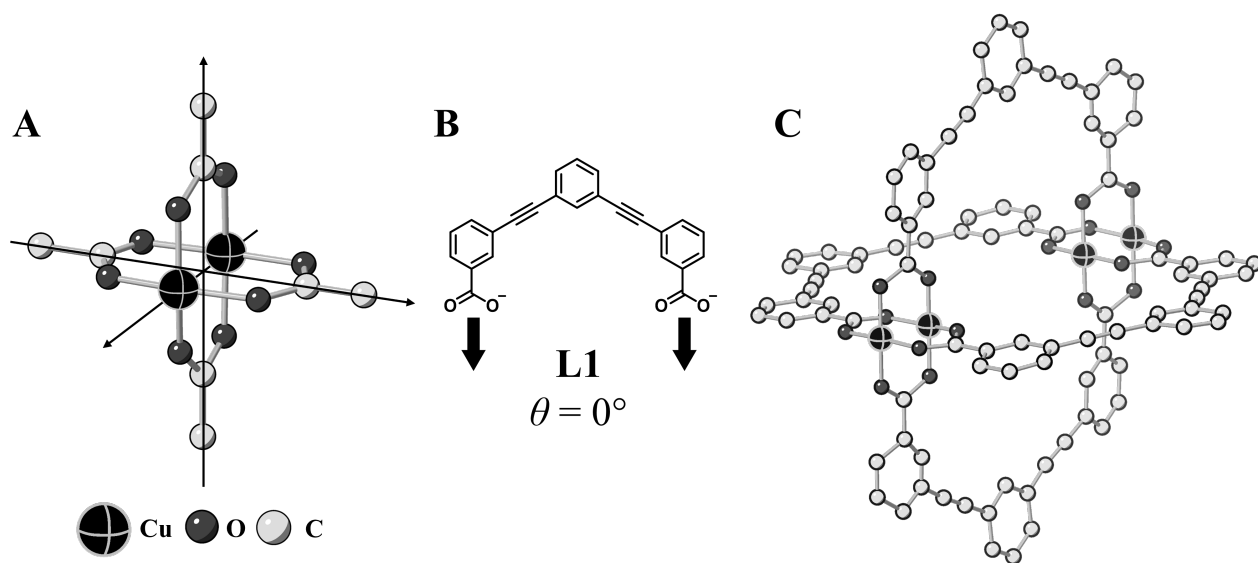
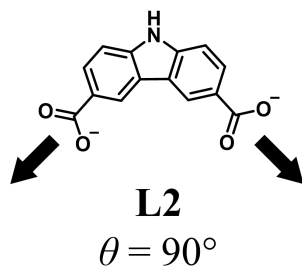


Fig. 2

- C.1** The  $\theta$  of the planar dicarboxylate **L2** below is fixed to  $90^\circ$ . If the composition of the cage complex formed from **L2** and  $\text{Cu}^{2+}$  is  $\text{Cu}_n(\text{L2})_m$ , **give** the smallest integer combination of  $n$  and  $m$ . Assume that only the  $\text{CO}_2^-$  groups of **L2** form a coordination bond to  $\text{Cu}^{2+}$  ions. 5pt



A zinc complex,  $\text{Zn}_4\text{O}(\text{CH}_3\text{CO}_2)_6$ , contains four tetrahedral  $\text{Zn}^{2+}$ , six  $\text{CH}_3\text{CO}_2^-$ , and one  $\text{O}^{2-}$  (Fig. 3A). In  $\text{Zn}_4\text{O}(\text{CH}_3\text{CO}_2)_6$ , the  $\text{O}^{2-}$  is located at the origin, and the three axes passing through the carbon atoms of  $\text{CH}_3\text{CO}_2^-$  are oriented orthogonal relative to each other. When *p*-benzenedicarboxylate (Fig. 3B, **L3**,  $\theta = 180^\circ$ ) is used instead of  $\text{CH}_3\text{CO}_2^-$ , the  $\text{Zn}^{2+}$  clusters are linked to each other to form a crystalline solid (**X**) that is called a “porous coordination polymer” (Fig. 3C). The composition of **X** is  $[\text{Zn}_4\text{O}(\text{L3})_3]_n$ , and it has a cubic crystal structure with nano-sized pores. One pore is represented as a sphere in Fig. 3D, and each tetrahedral  $\text{Zn}^{2+}$  cluster is represented as a dark gray polyhedron in Fig. 3C and 3D. Note that hydrogen atoms are not shown in Fig. 3.

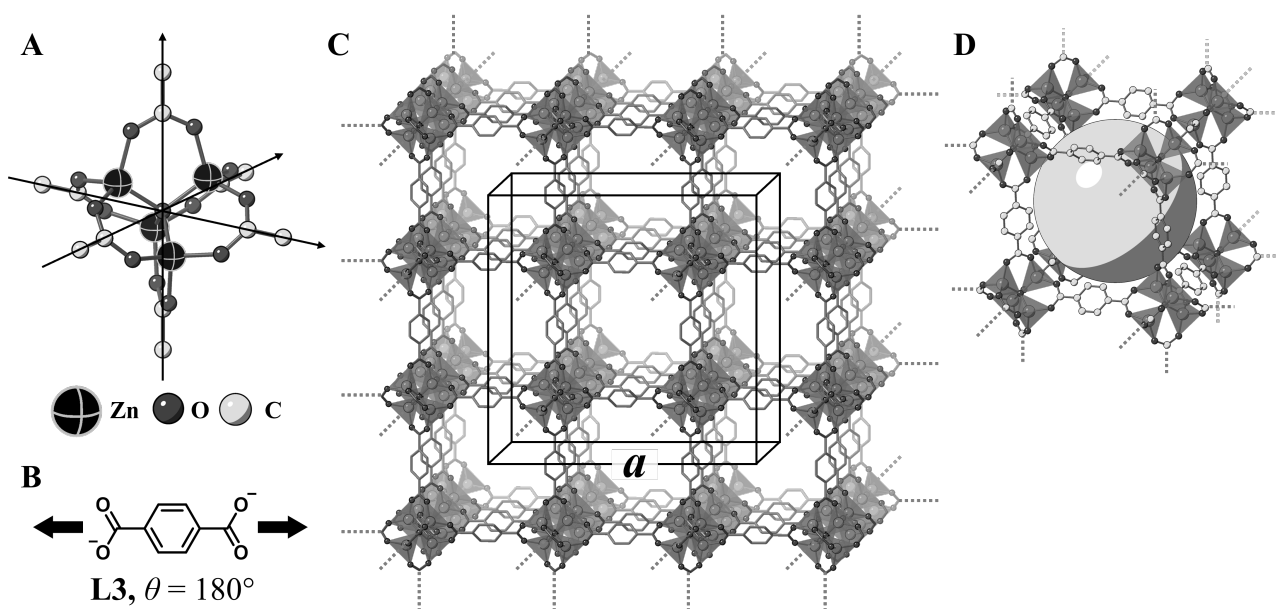


Fig. 3

**C.2** **X** has a cubic unit cell with a side length of  $a$  (Fig. 3C) and a density of  $0.592 \text{ g cm}^{-3}$ . **Calculate**  $a$  in [cm]. 5pt

**C.3** **X** contains a considerable number of pores, and 1 g of **X** can accommodate  $3.0 \times 10^2 \text{ mL}$  of  $\text{CO}_2$  gas in the pores at 1 bar and  $25^\circ\text{C}$ . **Calculate** the average number of  $\text{CO}_2$  molecules per pore. 5pt



OMN-1 C-6 A-1

# A6-1

Arabic (Oman)

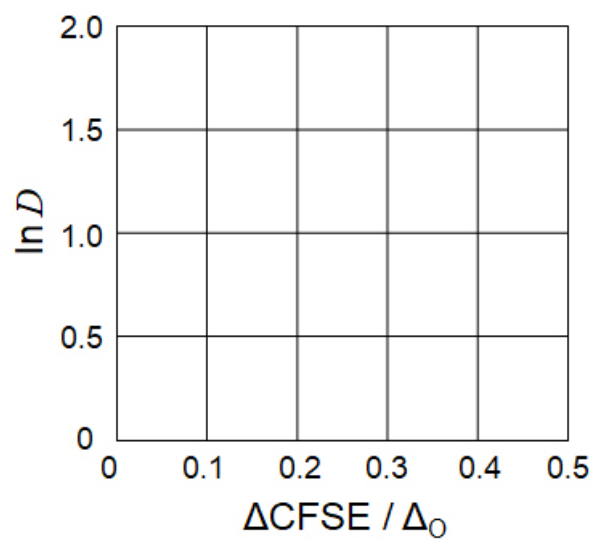
## كيمياء الحالة الصلبة للمعادن الانتقالية

الجزء A

(6 pt) A.1

$\Delta_o \text{Co}^{2+}$  : \_\_\_\_\_ ,  $\Delta_o \text{Mn}^{2+}$  : \_\_\_\_\_ ,  $\Delta_o \text{Cr}^{2+}$  : \_\_\_\_\_

(3 pt) **A.2**



$D$ : \_\_\_\_\_

(3 pt) **A.3**

\_\_\_\_\_



OMN-1 C-6 A-3

# A6-3

Arabic (Oman)

## الجزء B

(6 pt) **B.1**

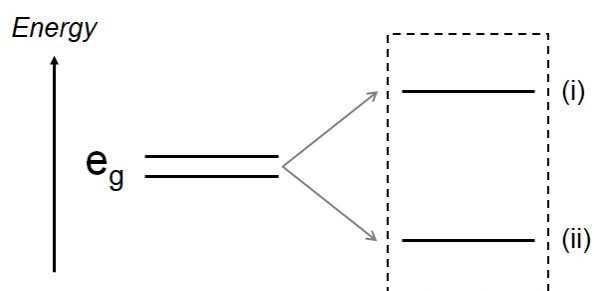
B : \_\_\_\_\_ , A : \_\_\_\_\_

(4 pt) **B.2**

$l_z =$  \_\_\_\_\_ nm ,  $l_x =$  \_\_\_\_\_ nm

(4 pt) **B.3**

(ii) : \_\_\_\_\_ , (i) : \_\_\_\_\_



(4 pt) **B.4**





OMN-1 C-6 A-5

# A6-5

Arabic (Oman)

## الجزء C

(5 pt) **C.1**

$m =$  \_\_\_\_\_ ,  $n =$  \_\_\_\_\_

(5 pt) **C.2**

$a =$  \_\_\_\_\_ cm



OMN-1 C-6 A-6

**A6-6**  
Arabic (Oman)

(5 pt) **C.3**

\_\_\_\_\_

OMN-1 C-7 C-1

**OMN-1 C-7 C**  
MARYAM AL-HATMI

**ICHO**  
**Problem 7**  
**Cover sheet**

Please return this cover sheet together with all the related question sheets.

## اللعب بعطرية المركبات غير البنزينية **Non-benzenoid with Playing Aromaticity**

13% من إجمالي الدرجات					
المجموع	B.1	A.3	A.2	A.1	السؤال
36	10	19	2	5	الدرجات
					درجة

افتتح البروفيسور نوزوي (1996-1902) مجال البحث عن المركبات العطرية غير البنزينية ، والتي أصبحت الآن منتشرة في كل مكان في الكيمياء العضوية



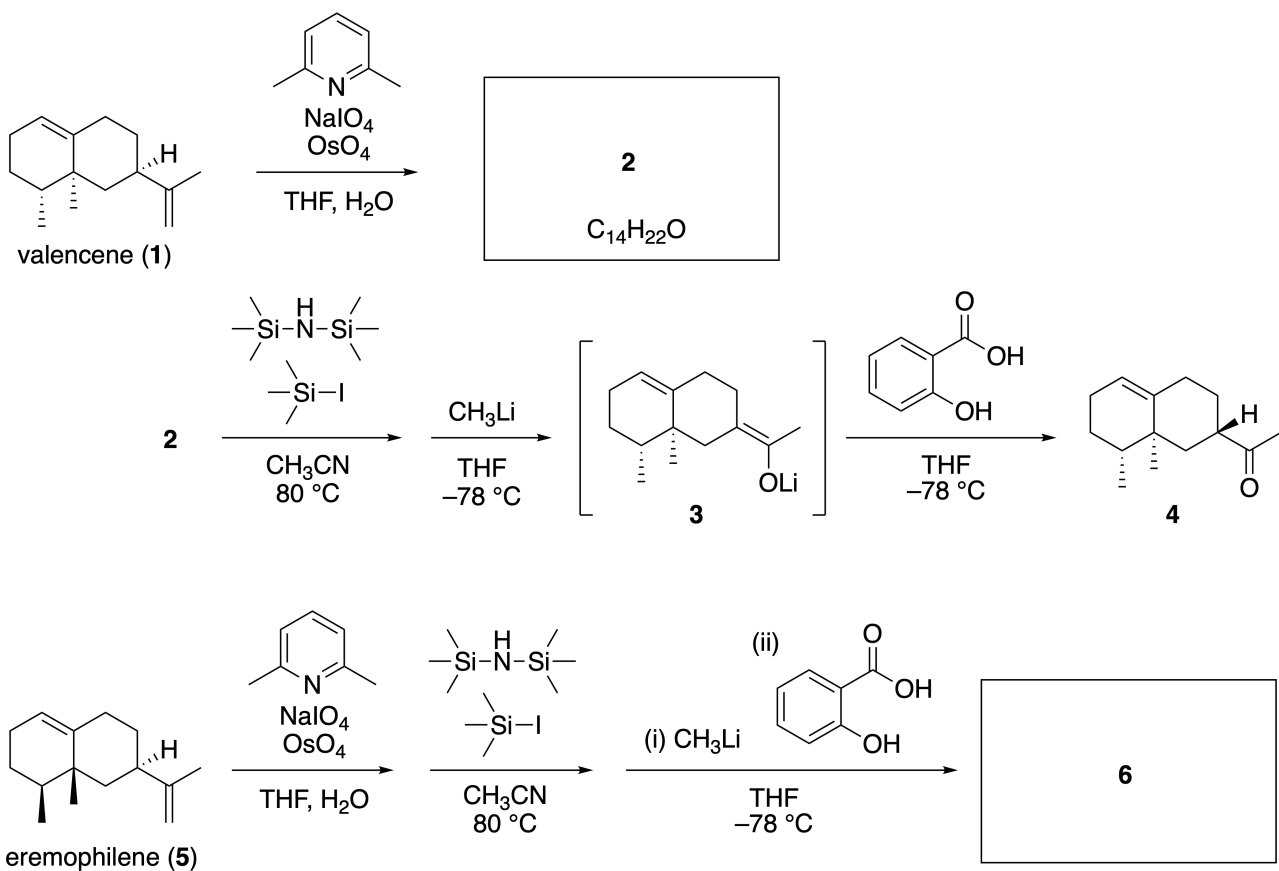
الصورة البروفيسور نوزوي : جامعة توهوكو.

### الجزء A

المركب Lineariifolianone هو منتج طبيعي له تركيب بنائي فريد تم فصله من النبتة *Inula linariifolia*. من فالنسين valencene (1) ، ينتج التحويل في خطوة واحدة ينتج المركب 2 ، قبل التحويل من ثلاث خطوات عبر المركب 3 ينتج الكيتون 4. يتم تحويل Eremophilene (5) إلى المركب 6 عن طريق إجراء نفس التحويل المكون من أربع خطوات.



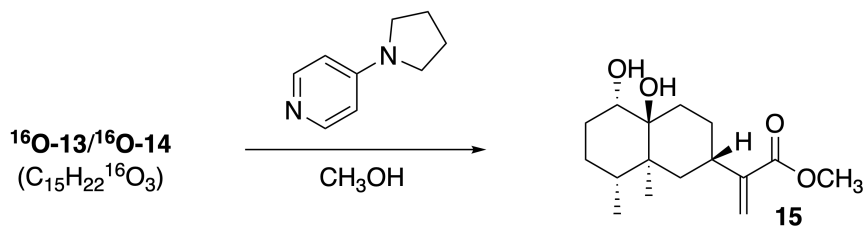
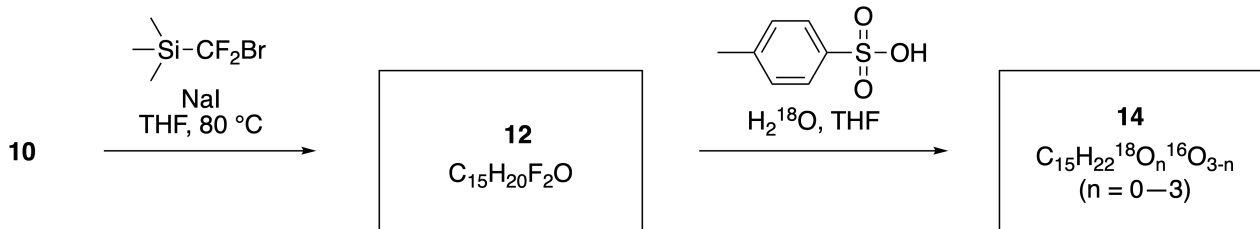
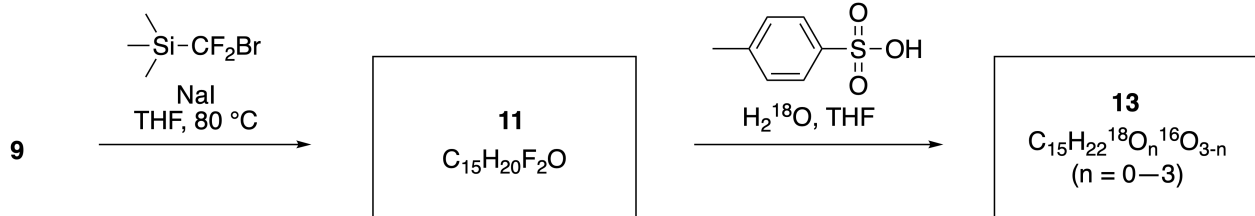
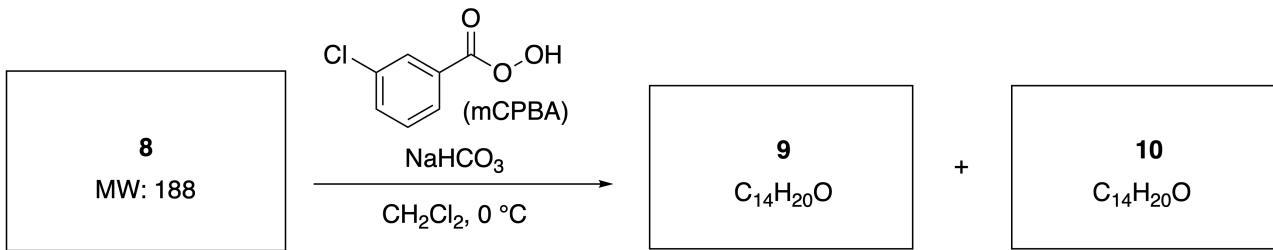
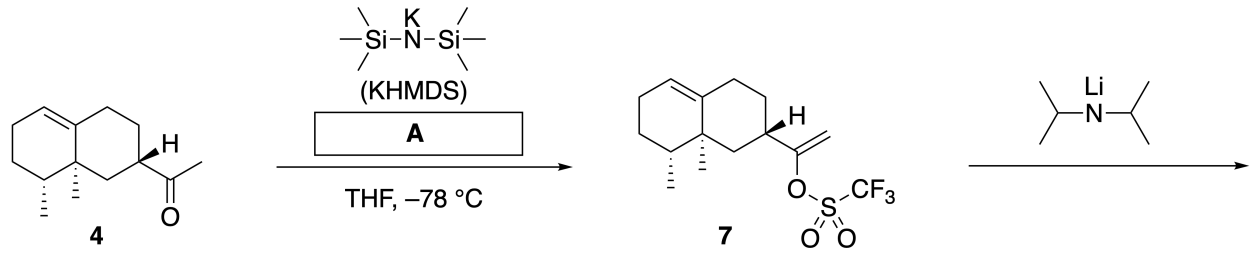
لينارييفوليا Inula linariifolia النبتة إينولا لينارييفوليا



A.1 ارسم التركيب البنائي للمركبين 2 و 6 وحدد الكيمياء الفراغية بوضوح عند الضرورة. 5pt

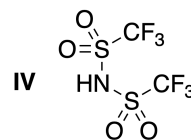
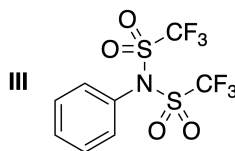
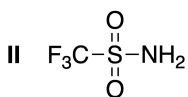
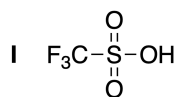
بعد ذلك ، يتم تحويل الكيتون 4 إلى استر 15. يحتفظ المركب 8 (الوزن الجزيئي: 188) يحتفظ بجميع مراكز التناظرية الكاير الفراغية (chiral) stereocenters في 7. المركبات 9 و 10 تحتوي على خمسة مراكز كايرل مركزية ولا توجد

روابط ثنائية بين الكربون والكربون. افترض أنه يتم استخدام  $H_2^{18}O$  بدلاً من  $H_2^{16}O$  لتصنيع المركب 13 و المركب 14 من المركب 11 و 12 ، على التوالي. المركبات 13 و 14 عبارة عن مشابهاً نظائر ل  $^{18}O$ . بتجاهل وضع العلامات النظرية ، يوفر كل من 13 و 14 نفس الناتج 15 مع كيمياء فراغية متطابقة.

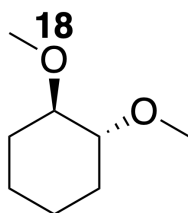


2pt

A.2 اختر التركيب المناسب للمركب A.

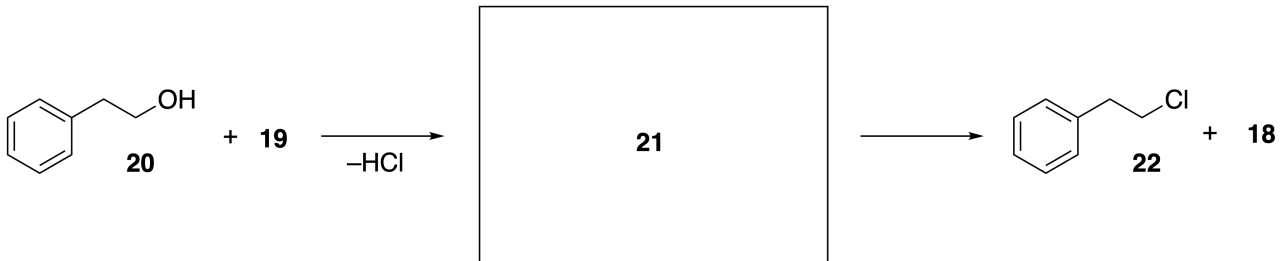
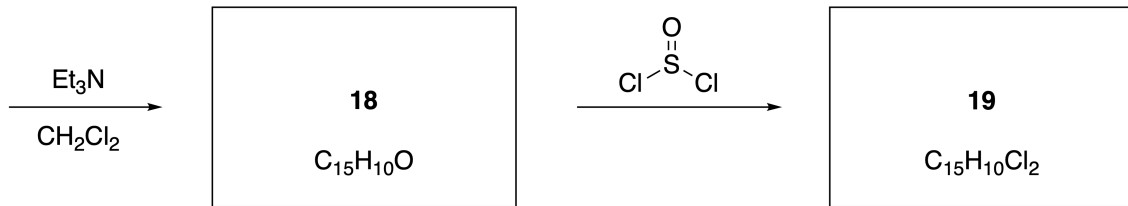
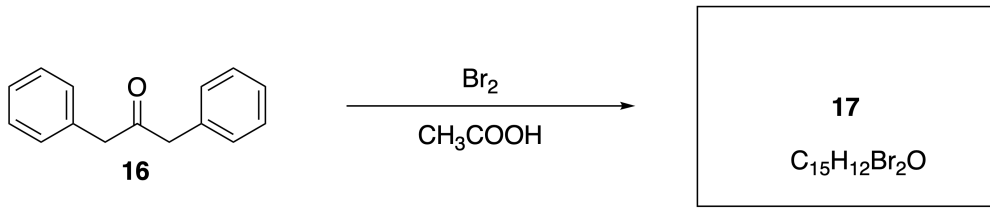


A.3 ارسم التركيب البنائي للمركبات من 8 إلى 14 وحدد الكيمياء الفراغية بوضوح عند الضرورة. 19pt  
 أشر أيضًا إلى ذرات  $^{18}\text{O}$  المقدمة للمركب 13 و 14 كما هو موضح في المثال أدناه.



**الجزء B**

يتم تصنيع المركب **19** كما هو موضح أدناه. فيما يتعلق بخاصية الأروماتية العطرية غير البيزنينية ، يمكن استخدام المركب **19** كمنشط للكحول ، وتم تحويل **20** إلى **22** عبر وسيط زوج أيوني **21**. على الرغم من أن تكوين **21** لوحظ بواسطة الرنين المغناطيسي النووي ، **21** يتحلل تدريجيًا ليعطي **18** و **22**.



$^1\text{H NMR}$  ( $\text{CD}_3\text{CN}$ , ppm) **20**:  $\delta$  7.4–7.2 (5H), 3.7 (2H), 2.8 (2H), 2.2 (1H)

**21**:  $\delta$  8.5–7.3 (15H), 5.5 (2H), 3.4 (2H)

10pt

**B.1** ارسم التركيب البنائي **17-19** و **21**. ليس من الضروري تحديد الكيمياء الفراغية.



## Playing with Non-benzenoid Aromaticity

13 % of the total					
Question	A.1	A.2	A.3	B.1	Total
Points	5	2	19	10	<b>36</b>
Score					

Prof. Nozoe (1902–1996) opened the research field of non-benzenoid aromatic compounds, which are now ubiquitous in organic chemistry.



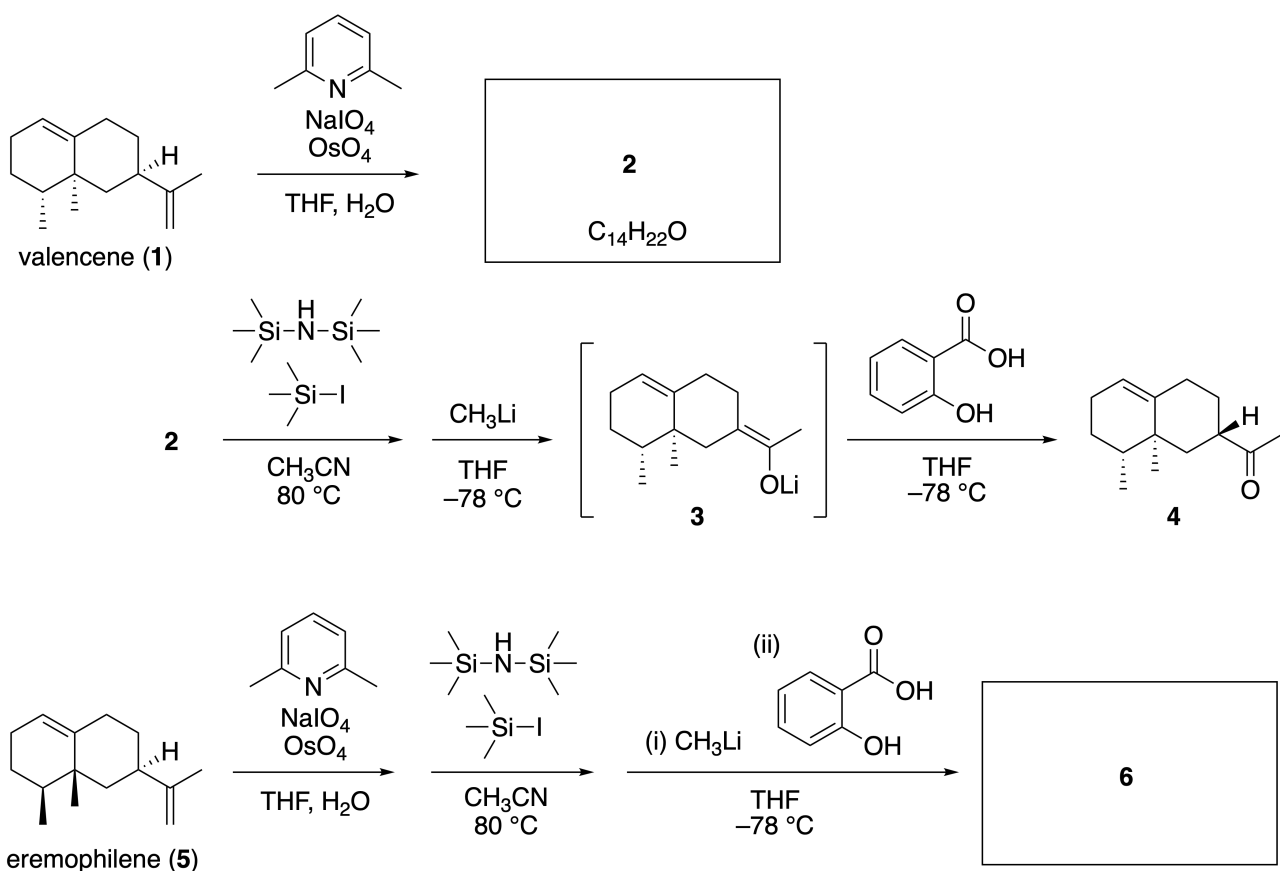
Photo courtesy: Tohoku Univ.

### Part A

Lineariifolianone is a natural product with a unique structure, which was isolated from *Inula linariifolia*. From valencene (**1**), a one-step conversion yields **2**, before a three-step conversion via **3** yields ketone **4**. Eremophilene (**5**) is converted into **6** by performing the same four-step conversion.



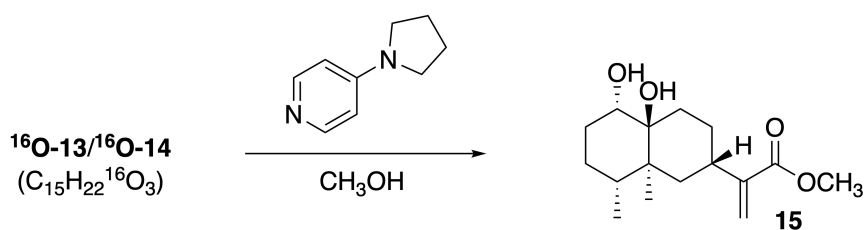
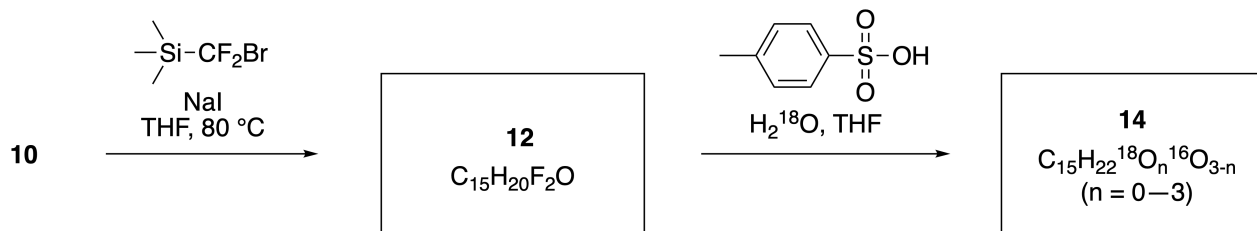
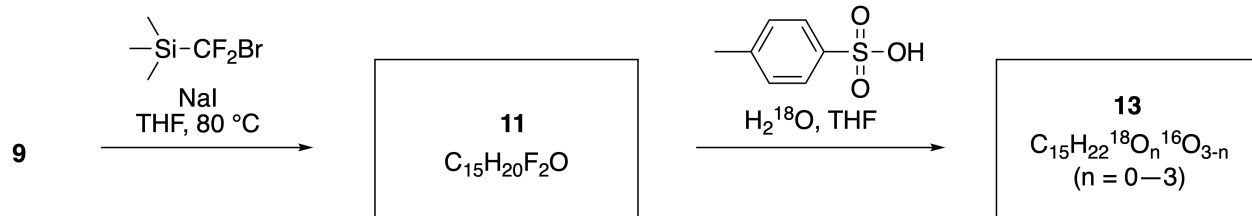
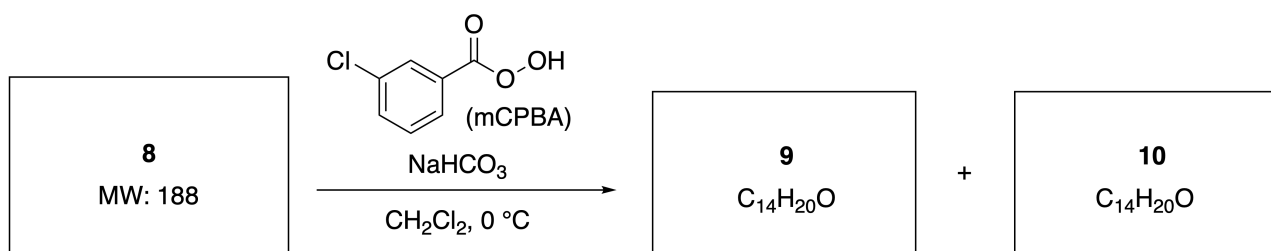
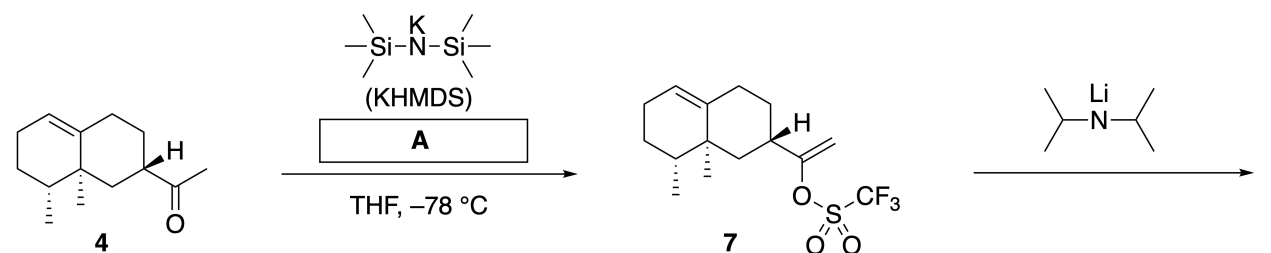
*Inula linariifolia*



**A.1** Draw the structures of **2** and **6** and clearly identify the stereochemistry where necessary. 5pt

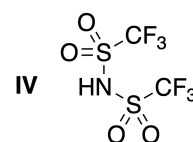
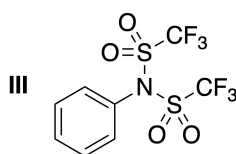
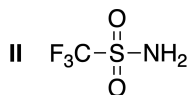
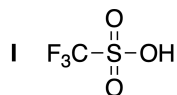
Then, ketone **4** is converted into ester **15**. Compound **8** (molecular weight: 188) retains all the stereocenters in **7**. Compounds **9** and **10** have five stereocenters and no carbon-carbon double bonds. Assume

that  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  is used instead of  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  for the synthesis of  $^{18}\text{O}$ -labelled-linearifolianones **13** and **14** from **11** and **12**, respectively. Compounds **13** and **14** are  $^{18}\text{O}$ -labelled isotopomers. Ignoring isotopic labelling, both **13** and **14** provide the same product **15** with identical stereochemistry.



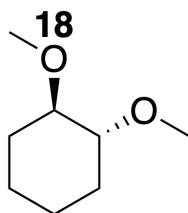
**A.2** Choose the appropriate structure for **A**.

2pt



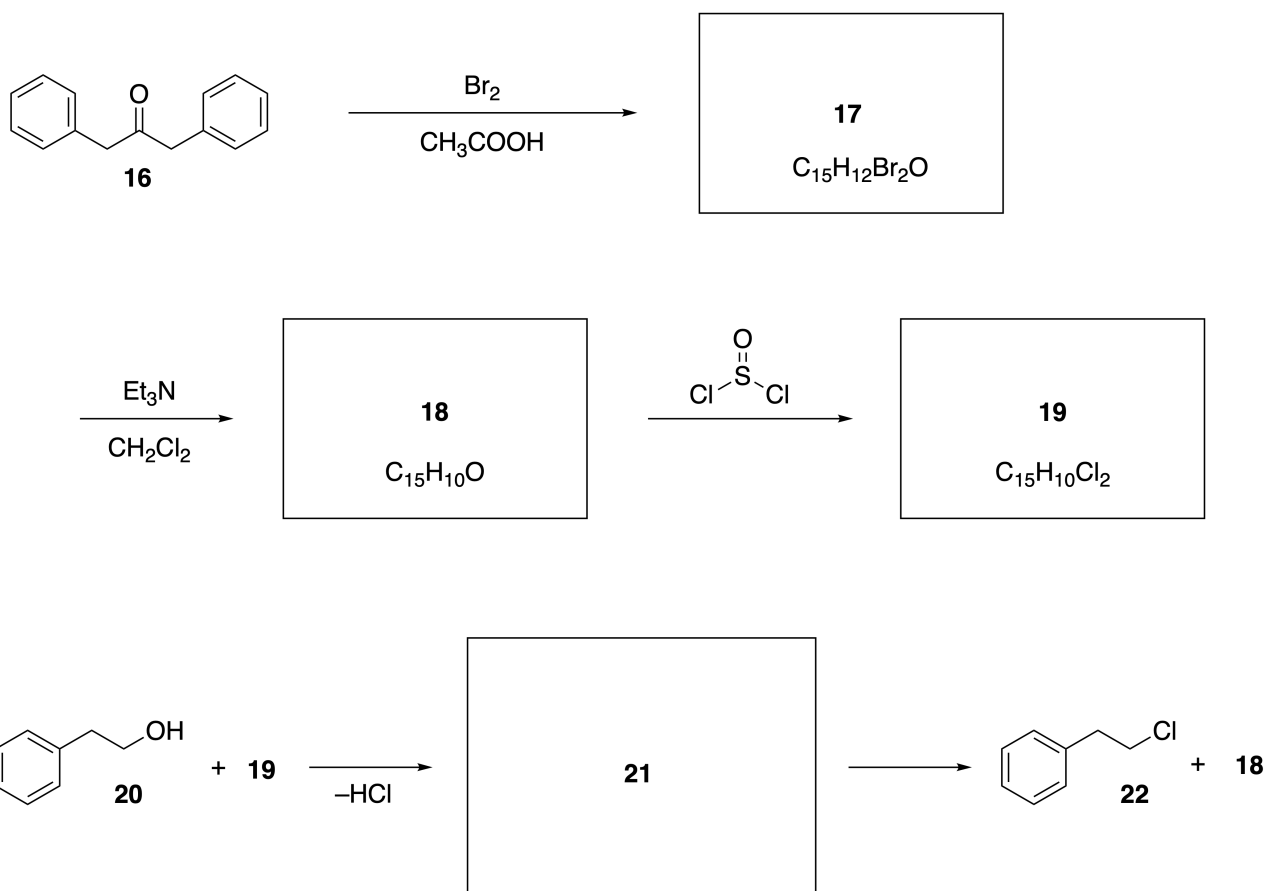
**A.3** Draw the structures of **8-14** and clearly identify the stereochemistry where necessary. Also, indicate the introduced  $^{18}\text{O}$  atoms for **13** and **14** as shown in the example below.

19pt



Part B

Compound **19** is synthesized as shown below. In relation to non-benzenoid aromaticity, **19** can be used as an activator for alcohols, and **20** was converted to **22** via ion-pair intermediate **21**. Although the formation of **21** was observed by NMR, **21** gradually decomposes to give **18** and **22**.



$^1\text{H}$  NMR ( $\text{CD}_3\text{CN}$ , ppm) **20**:  $\delta$  7.4–7.2 (5H), 3.7 (2H), 2.8 (2H), 2.2 (1H)

**21**:  $\delta$  8.5–7.3 (15H), 5.5 (2H), 3.4 (2H)

**B.1** **Draw** the structures of **17–19** and **21**. Identifying the stereochemistry is not necessary. 10pt



OMN-1 C-7 A-1

# A7-1

Arabic (Oman)

## اللعب بعطرية غير البنزينويد

الجزء A

(5 pt) **A.1**

pt) 3) 6

pt) 2) 2

(2 pt) **A.2**



OMN-1 C-7 A-2

# A7-2

Arabic (Oman)

(19 pt) **A.3**

**8** (3 pt)



**9** (2 pt)

**10** (2 pt)



**11** (2 pt)

**12** (2 pt)



**13** (4 pt)

**14** (4 pt)



OMN-1 C-7 A-3

**A7-3**  
Arabic (Oman)

**الجزء B**

(10 pt) **B.1**

pt) 2) <b>18</b>	pt) 2) <b>17</b>
pt) 3) <b>21</b>	pt) 3) <b>19</b>



OMN-1 C-8 C-1

**OMN-1 C-8 C**  
MARYAM AL-HATMI

**ICHO**  
**Problem 8**  
**Cover sheet**

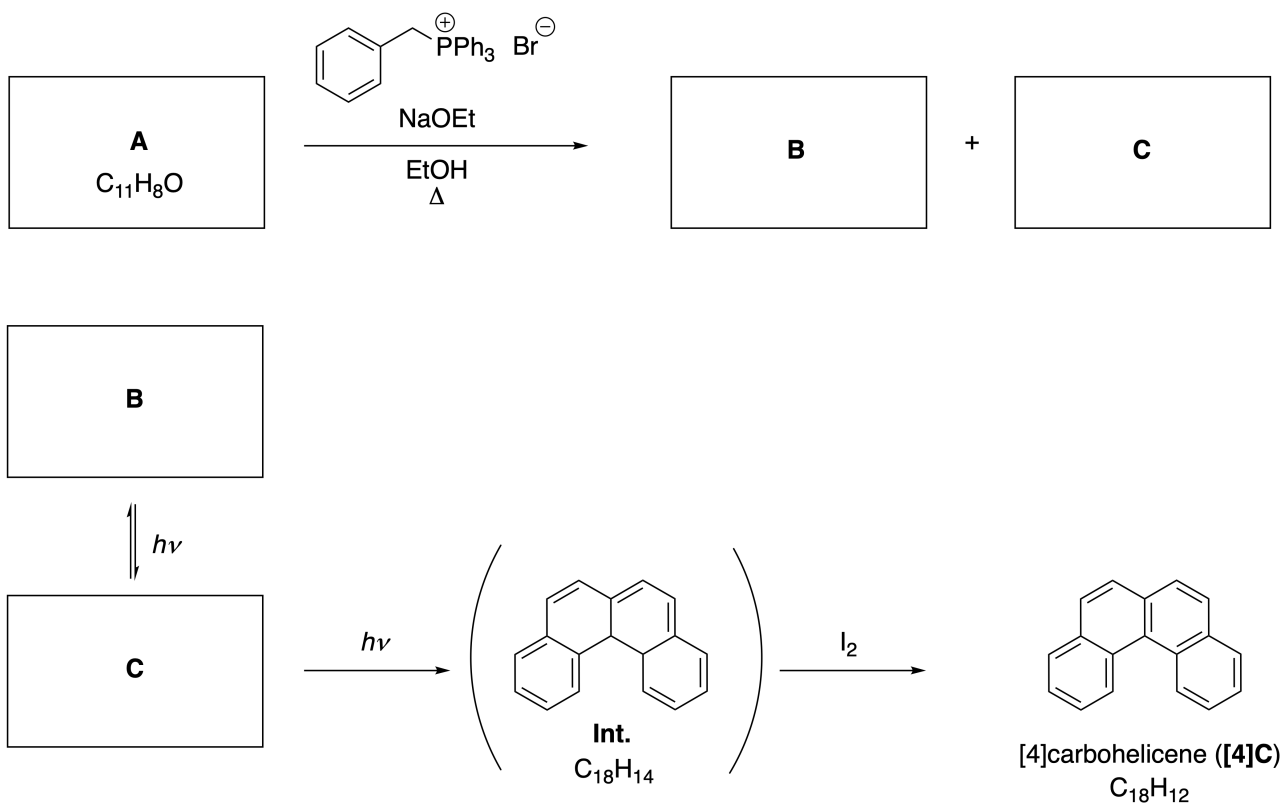
Please return this cover sheet together with all the related question sheets.

## الجزئيات العضوية الديناميكية و الكيرالية Chirality Their and Molecules

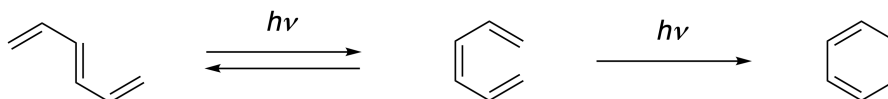
11% من إجمالي الدرجات						
المجموع	B.2	B.1	A.3	A.2	A.1	السؤال
26	4	3	7	3	9	الدرجات
						درجة

### الجزء A

تسمى الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات ذات الوصلات المتتالية من نوع التفرع أرثو تسمى ن-كاربوهيليسين n-carbohelicenes (هنا ، n تمثل عدد الحلقات السداسية) (انظر أدناه). يتم تحضيره ([4]C) بكفاءة عن طريق مسار باستخدام تفاعل ضوئي كما هو موضح أدناه ، عبر وسيط (Int) الذي يتأكسد بسهولة بواسطة اليود.



تجري عملية التفاعل الضوئي بطريقة مشابهة للمثال التالي.

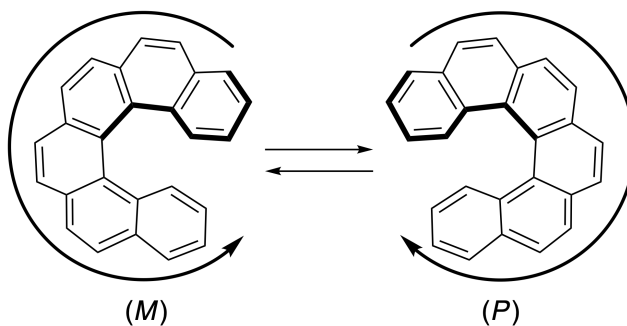


ملاحظة: لجميع الأسئلة 8 ، يرجى رسم روابط مفردة ومزدوجة متبادلة في إجاباتك على المشكلات كما هو موضح في أمثلة. carbohelicene لا تستخدم الدائرة لأنظمة  $\pi$  المتعاقبة التي تكتب وسط حلقة البنزين.

**A.1** ارسم التركيب البنائي للمركبات من A إلى C. يجب التمييز بين المتشابهات الفراغية المجسمة. 9pt

**A.2** محاولات تصنيع 5carbohelicene من نفس ملح الفوسفونيوم ومركب بدء مناسب أدت إلى تكوين كمية ضئيلة من 5carbohelicene ، بدلاً من إنتاج الناتج **D** الذي كان وزنه الجزيئي أقل بمقدار 2Da من 5carbohelicene . يتم ذكر الإزاحات الكيميائية للرنين المغناطيسي للبروتون NMR 1H للمركب **D** أدناه. **ارسم** التركيب البنائي للمركب **D**. [D ( $\delta$ , ppm in  $CS_2$ , r.t.), 8.85 (2H), 8.23 (2H), 8.07 (2H), 8.01 (2H), 7.97 (2H), 7.91 (2H)] 3pt

[5] - والكربوهيلينات الأكبر n-arbohelices لها كيرالية حلزونية والتحول البيني بين المتشابهات الأناشومر enantiomers من هذه المركبات helicenes يكون بطيئاً بشكل ملحوظ في درجة حرارة الغرفة. يتم تعريف الكيرالية للمركبات chirality ل n-arbohelices على أنها (M) أو (P) كما هو موضح أدناه.

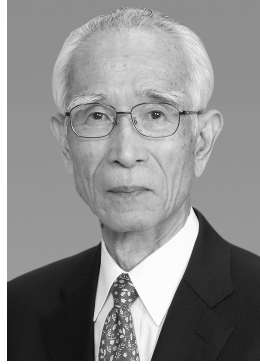


يمكن فصل الكربوهيليسين n-arbohelices التي تحتوي على n أكبر من 4 بشكل متماثل عن طريق كروماتوغرافيا العمود الكيرالي ، والتي طورها البروفيسور يوشيو أوكاموتو.



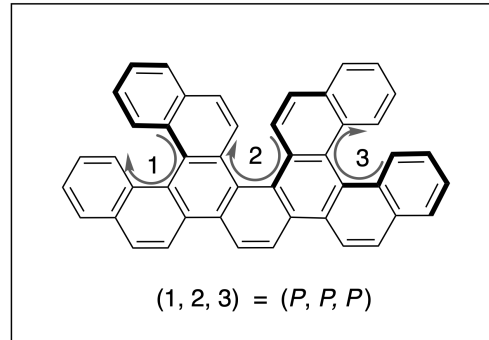
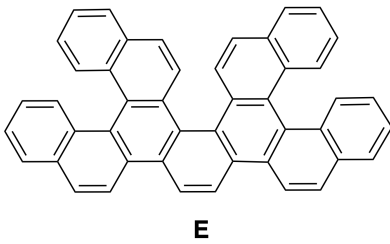
OMN-1 C-8 Q-3

**Q8-3**  
Arabic (Oman)

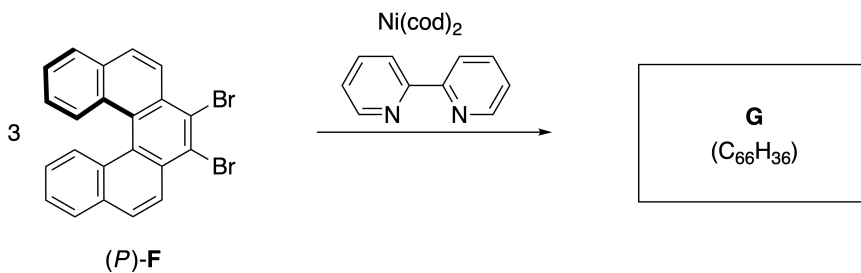
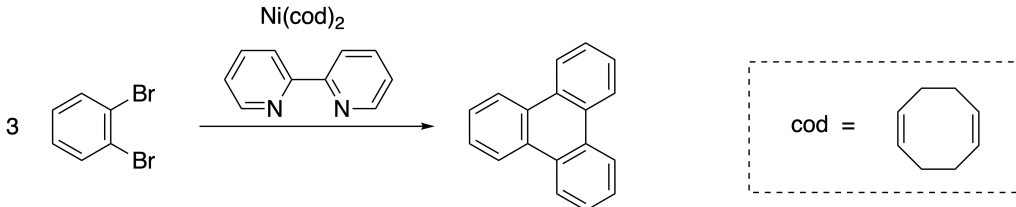


صورة البروفيسور يوشيو أوكاموتو: الحاصل على جائزة مؤسسة اليابان

المركبات الهيليسينية المتعددة helicenes Multiple عبارة عن جزيئات تحتوي على اثنين أو أكثر من التراكيب الشبيهة بالهيلين. إذا تم أخذ الكيرالية الحلزونية helical chirality في الاعتبار ، فإن العديد من المتشابهات الفراغية موجودة في المركبات الهيليسينية المتعددة. على سبيل المثال ، يحتوي المركب **E** على ثلاثة شقوق من نوع 5carbohelicene شبيهة بالكربوهيليسين في جزيء واحد . يوصف أحد المتشابهات الفراغية بأنه  $(P, P, P)$  كما هو موضح أدناه.



- 7pt **A.3** ينتج عن عملية القطع بواسطة النيكل لـ 1,2-ثنائي بروموبينزين triphenylene. عندما يتم تطبيق نفس التفاعل على منتج مركب ثلاثي فينيلين triphenylene. يتم الحصول على هيلين متعددة helicene multiple من **F** و **(P)-F** ، المتشابهات من **G** . بالنظر إلى أن التحويل البيني بين المتشابهات الفراغية لا يحدث أثناء التفاعل للمركب **G** ، حدد جميع المتشابهات الفراغية الممكنة للمركب **G** المتكونة في هذه العملية ، بدون ازدواجية. يجب رسم متشابه واحد بالكامل باستخدام الكيرالية المحدد كما في المثال أعلاه حتى يكون كمرجع ، مع وضع بيانات الأرقام العددية ؛ يجب أن يتم سرد المتشابهات الفراغية الأخرى بأرقام الموقع وتسميات P و M وفقاً لنفس الترتيب. على سبيل المثال ، يجب إدراج المتشابهات الفراغية الأخرى للمركب **E** على النحو التالي  $(1, 2, 3) = (P, M, P), (P, M, M), (P, P, M), (M, M, M), (M, M, P), (M, P, P),$  and  $(M, P, M)$ .





OMN-1 C-8 Q-5

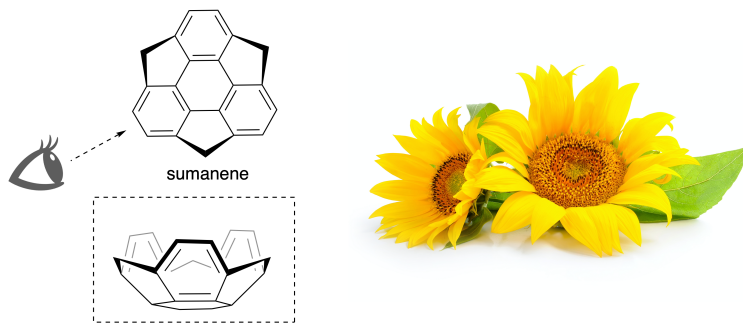
# Q8-5

Arabic (Oman)

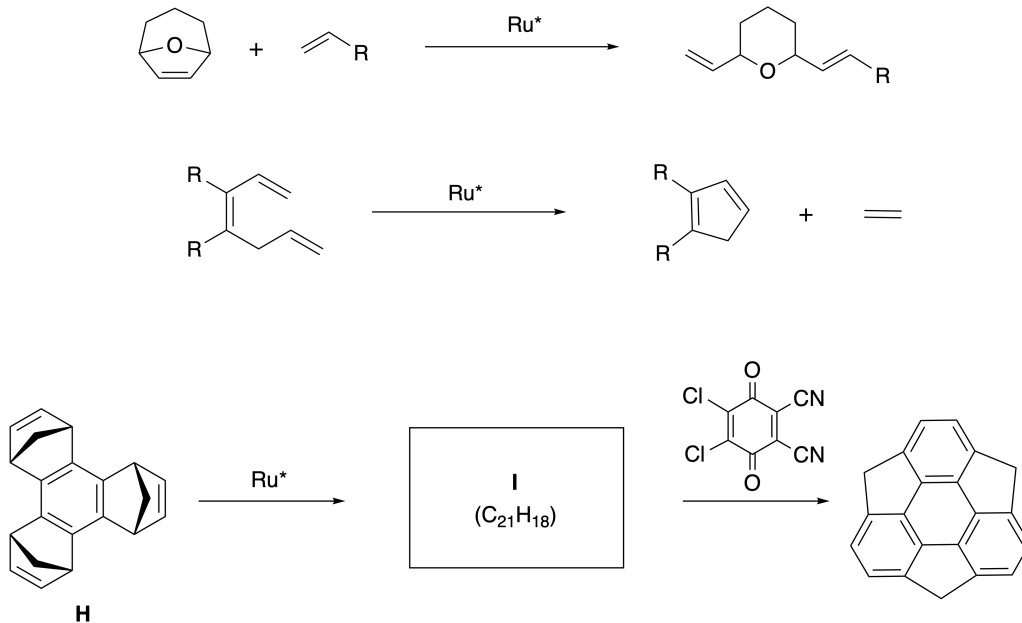
---

**الجزء B**

سومانين Sumanene هو عبارة عن هيدروكربون على شكل وعاء تم الكشف عنه لأول مرة في اليابان في عام 2003. اسم "سومانين" Sumanene مشتق من الكلمة السنسكريتية الهندية "سومان" والتي تعني عباد الشمس. تم التوصل إلى تصنيع توليف السومانين Sumanene من خلال تسلسل تفاعل يتكون من فتح الحلقة وإغلاق الحلقة في تفاعل التصنيع التبادلي الكيميائي مزدوج التبادل.



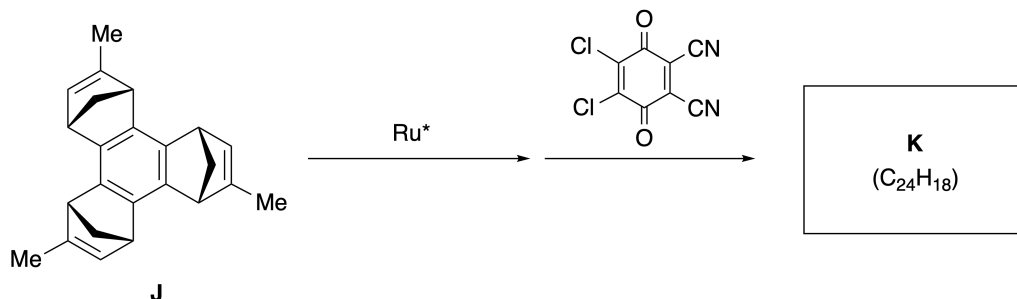
تفاعلات التصنيع التبادلي الكيميائي مزدوج التبادل التمهيلية المحفزة بواسطة العامل الحفاز الروثينيوم ( $Ru^*$ ) موضحة أدناه.



3pt

**ارسم التركيب البنائي للمركب الوسيط I (الكيمياء الفراغية الخاصة به غير مطلوبة).**

**B.1**



**B.2** 4pt بدءًا من المركب **J** الذي يستخدم كمركب مبدئي لإنتاج المركبات الأخرى وهذا مركب نشط ضوئياً ، يعطي تسلسل التفاعل نفسه مشتق السومانين النشط بصرياً **K**. ولا تعاني المراكز الكيأريلية الفراغية في **J** من أي انعكاس أثناء تفاعل التصنيع التبادلي الكيمياءى مزدوج التبادل. **ارسم** التركيب البنائى للمركب **K** واستخدام الكيمياء الفراغية المناسبة.

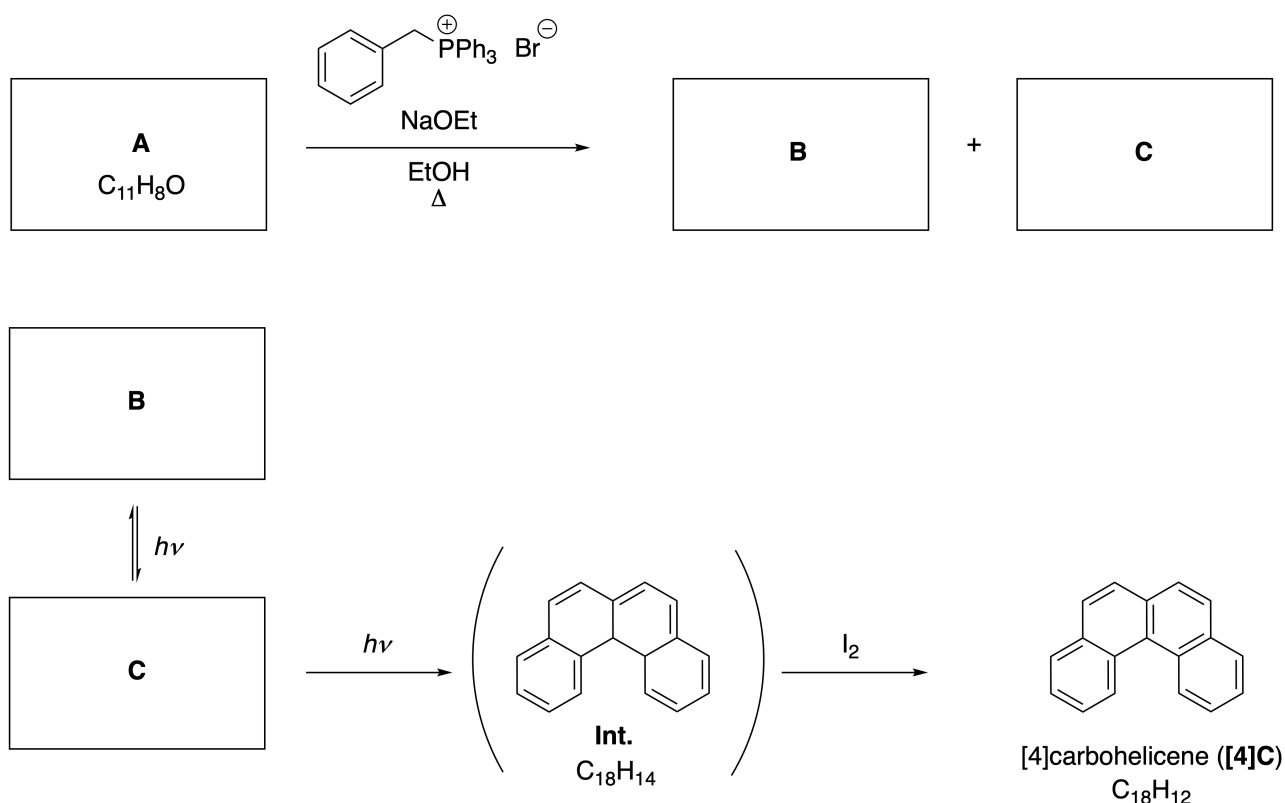


## Dynamic Organic Molecules and Their Chirality

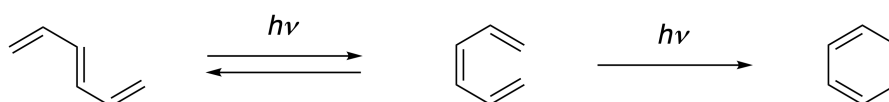
11 % of the total						
Question	A.1	A.2	A.3	B.1	B.2	Total
Points	9	3	7	3	4	<b>26</b>
Score						

### Part A

Polycyclic aromatic hydrocarbons with successive ortho-connections are called [n]carbohelicenes (here, n represents the number of six-membered rings) (see below). [4]Carbohelicene (**[4]C**) is efficiently prepared by a route using a photoreaction as shown below, via an intermediate (**Int.**) that is readily oxidized by iodine.



The photoreaction proceeds in a manner similar to the following example.

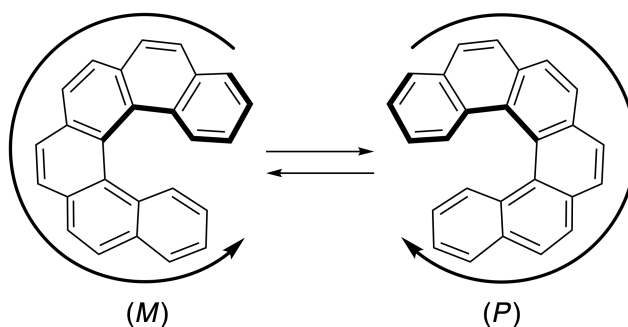


**Note:** For all of Question 8, please draw alternating single and double bonds in your answers to the problems as depicted in the examples of carbohelicene. Do not use circles for conjugated  $\pi$  systems.

**A.1** **Draw** the structures of **A-C**. Stereoisomers should be distinguished. 9pt

**A.2** Attempts to synthesize [5]carbohelicene from the same phosphonium salt and an appropriate starting compound resulted in the formation of only a trace amount of [5]carbohelicene, instead affording product **D** whose molecular weight was 2 Da lower than that of [5]carbohelicene. The  $^1\text{H}$  NMR chemical shifts of **D** are listed below. **Draw** the structure of **D**.  
**[D** ( $\delta$ , ppm in  $\text{CS}_2$ , r.t.), 8.85 (2H), 8.23 (2H), 8.07 (2H), 8.01 (2H), 7.97 (2H), 7.91 (2H)]

[5]- and larger [n]carbohelicenes have helical chirality and interconversion between enantiomers of these helicenes is significantly slow at room temperature. The chirality of [n]carbohelicenes is defined as (*M*) or (*P*) as shown below.



[n]Carbohelicenes with n larger than 4 can be enantiomerically separated by a chiral column chromatography, which was developed by Prof. Yoshio Okamoto.

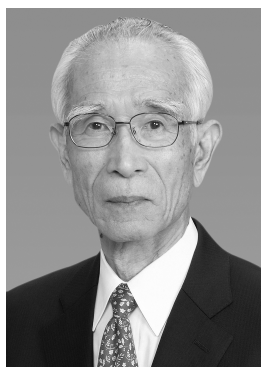
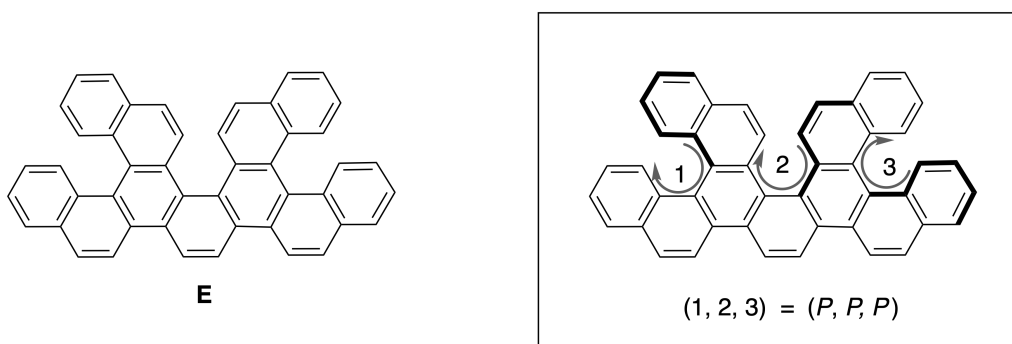
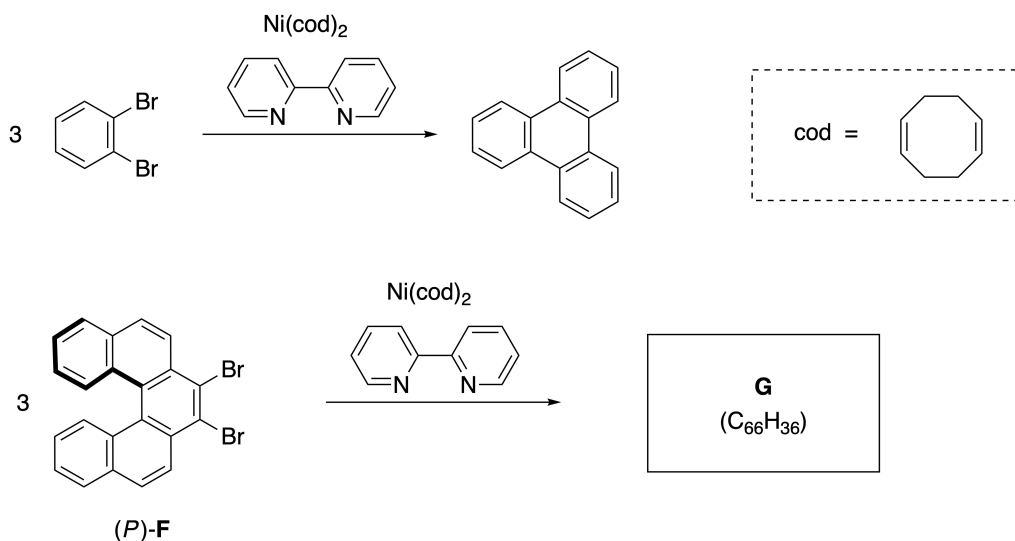


Photo courtesy: The Japan Prize Foundation

Multiple helicenes are molecules that contain two or more helicene-like structures. If its helical chirality is considered, several stereoisomers exist in a multiple helicene. For example, compound **E** contains three [5]carbohelicene-like moieties in one molecule. One of the stereoisomers is described as  $(P, P, P)$  as shown below.

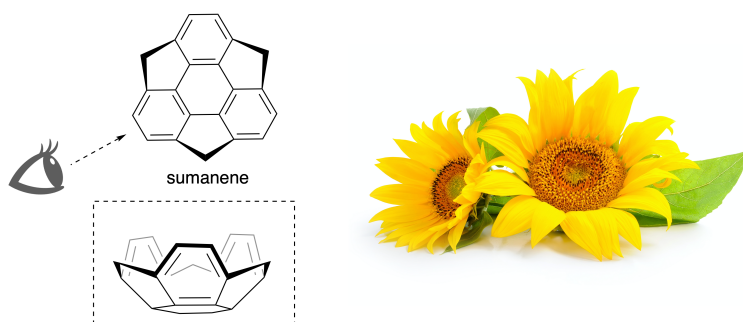


- A.3** The nickel-mediated trimerization of 1,2-dibromobenzene generates triphenylene. When the same reaction is applied to an enantiomer of **F**,  $(P)$ -**F**, multiple helicene **G** ( $C_{66}H_{36}$ ) is obtained. Given that interconversion between stereoisomers does not occur during the reaction, **identify all** the possible stereoisomers of **G** formed in this process, without duplication. As a reference, one isomer should be drawn completely with the chirality defined as in the example above, with numerical labels; the other stereoisomers should be listed with location numbers and *M* and *P* labels according to the same numbering. For instance, the other stereoisomers of **E** should be listed as (1, 2, 3) = (P, M, P), (P, M, M), (P, P, M), (M, M, M), (M, M, P), (M, P, P), and (M, P, M). 7pt

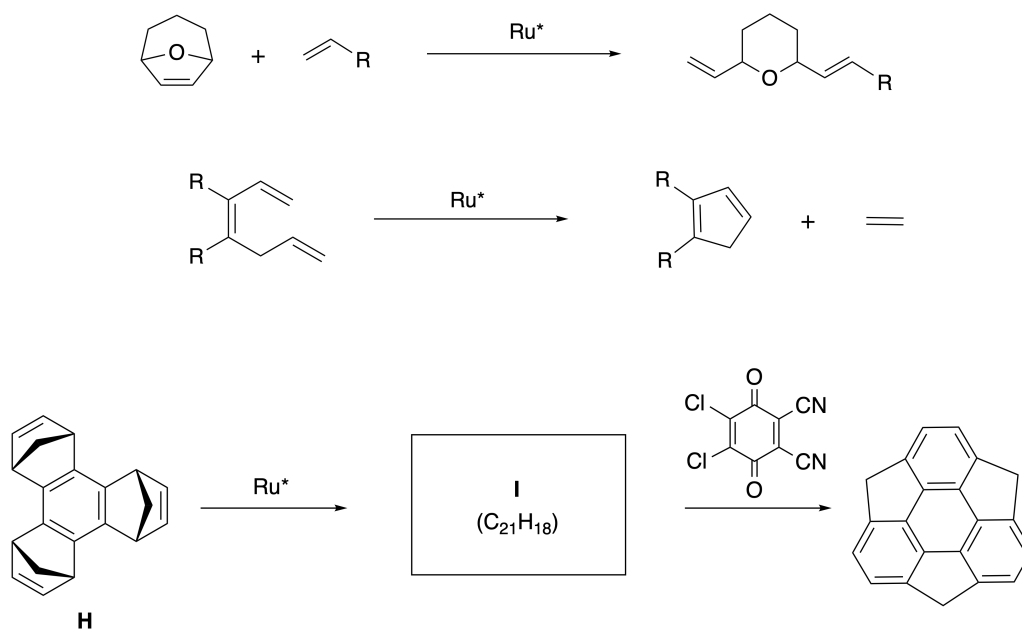


Part B

Sumanene is a bowl-shaped hydrocarbon that was first reported in Japan in 2003. The name "sumanene" derives from a Sanskrit-Hindi word "suman" that means sunflower. The synthesis of sumanene was achieved by a reaction sequence that consists of a ring-opening and a ring-closing metathesis.

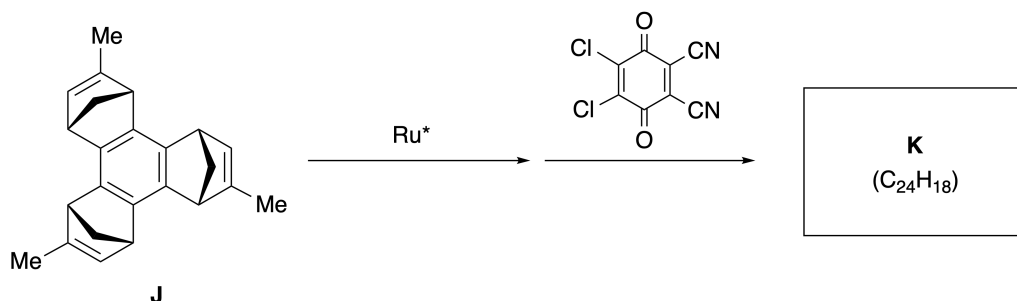


Representative metathesis reactions catalyzed by a ruthenium catalyst ( $\text{Ru}^*$ ) are shown below.



B.1 **Draw** the structure of intermediate **I** (its stereochemistry is not required).

3pt



- B.2** Starting from the optically active precursor **J**, the same reaction sequence gives the optically active sumanene derivative **K**. The stereocenters in **J** suffer no inversion during the metathesis reaction. **Draw** the structure of **K** with the appropriate stereochemistry. 4pt



OMN-1 C-8 A-1

# A8-1

Arabic (Oman)

## الجزئيات العضوية الديناميكية وتناقضها

الجزء A

(9 pt) **A.1**

pt) 3) **C**

pt) 3) **B**

pt) 3) **A**

(3 pt) **A.2**



OMN-1 C-8 A-2

**A8-2**  
Arabic (Oman)

(7 pt) **A.3**



OMN-1 C-8 A-3

**A8-3**  
Arabic (Oman)

**الجزء B**

(3 pt) **B.1**

(4 pt) **B.2**



OMN-1 C-9 C-1

**OMN-1 C-9 C**  
MARYAM AL-HATMI

**IChO**  
**Problem 9**  
**Cover sheet**

Please return this cover sheet together with all the related question sheets.

## يحب ويكره الكبسولة Capsule of Dislikes and Likes

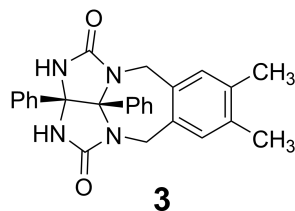
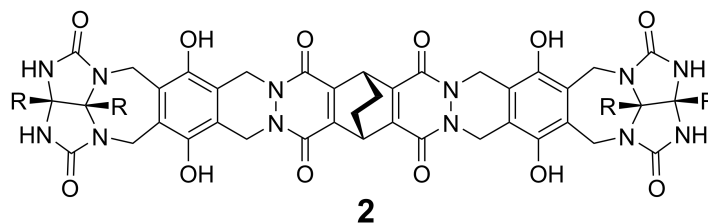
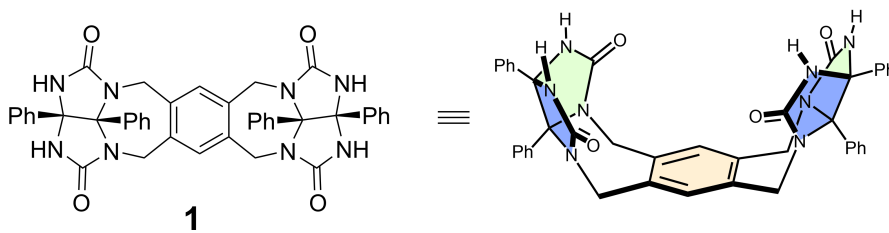
10% من إجمالي الدرجات						
المجموع	A.5	A.4	A.3	A.2	A.1	السؤال
23	3	3	2	2	13	الدرجات
						الصف

### الجزء

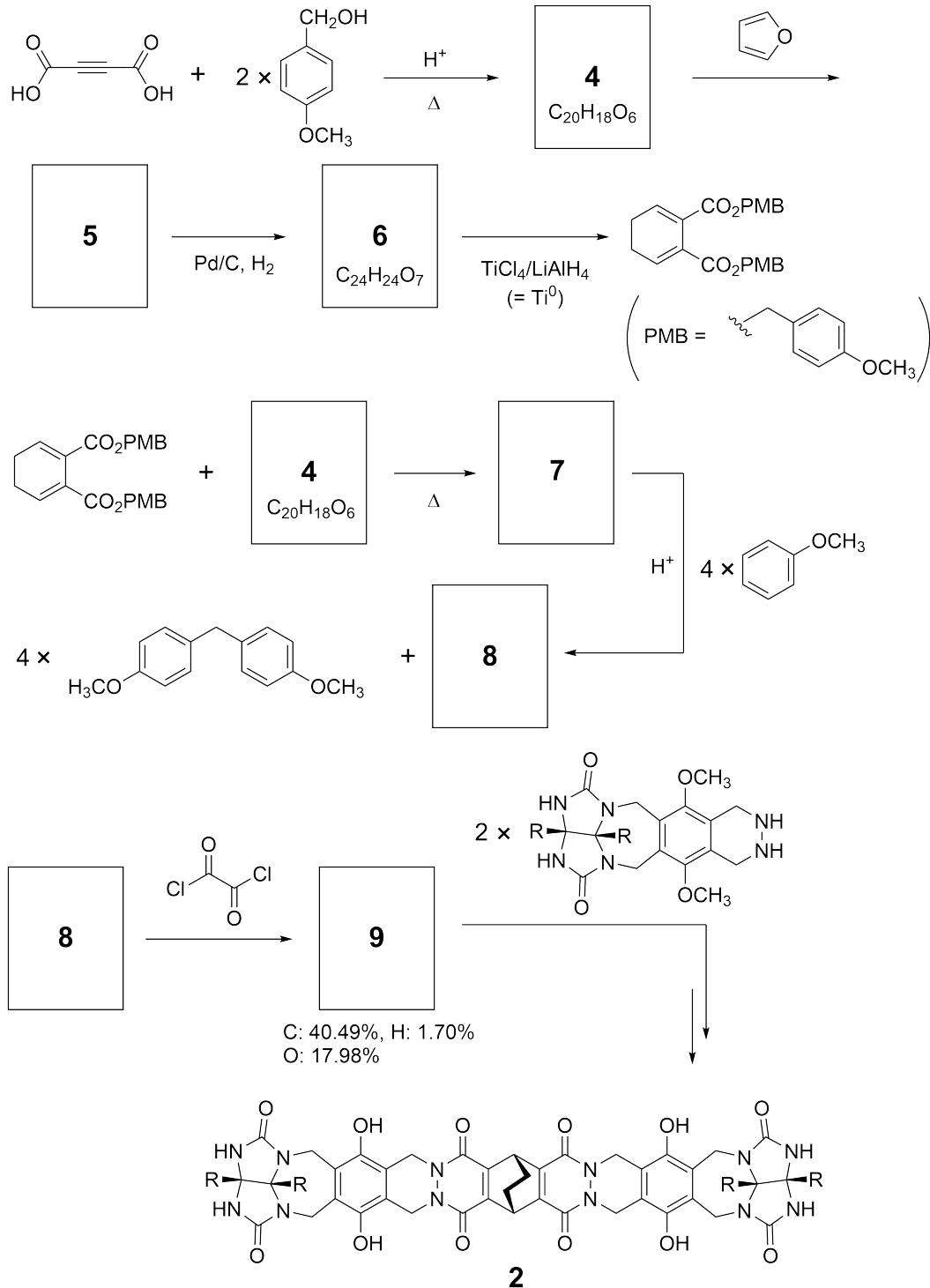
الأولاد الجيدون لا يفعلون ذلك, لكن اذا قمت بقص كرة التنس يمكنك فصل قطعتين على شكل حرف (U) بالانجليزية.



طبقا لهذه الفكرة: تم تحضير مركب 1 و مركب 2 على شكل حرف (U) جزيئات بأحجام مختلفة, تم تحضير مركب 3 للمقارنة مع مركب 1 وتمت دراسة مدى قدرة المركبات على الكبسولة "encapsulation"



يتم عرض المسار الاصطناعي المنتجة إلى المركب 2 أدناه. التركيب العنصري للمركب 9: C : 40.49% ؛ H : 1.70% ؛ O : 17.98% بواسطة الكتلة.



**A.1** أرسم المركبات من 4 – 9 ليس من الضروري توضيح (الكيمياء الفراغية), استخدم الرمز 13pt "PMB" كإختصار بدلا من رسم تركيبة المركب كاملة لل ( p- methoxybenzyl ) الموضح في المخطط بالأعلى

في الطيف الكتلي للمركب 1 , لوحظ بوضوح قمة الأيون المتعلقة بالجزيء ثنائي الجزيء (1<sub>2</sub>) , بينما لم يتم ملاحظة قمة الأيون ل 3<sub>2</sub> في طيف المركب 3. في أطياف الرنين النووي المغناطيسي للبروتون NMR 1H لمحلول 1<sub>2</sub> , كل بروتونات NH لوحظ أنها مشتقة من 1 ولوحظ أنها متكافئة كيميائياً , وكانت الإزاحة الكيميائية مختلفاً بشكل كبير عن ذلك الخاص ببروتونات NH للمركب 3 . تشير هذه البيانات إلى أن الروابط الهيدروجينية تتشكل بين شقوق NH من 1 والذرات X لجزيء آخر من 1 إلى تشكيل كبسولة ثنائية الجزيء.

**A.2** ضع دائرة حول كل الذرة (الذرات) المناسبة X في المركب 1. 2pt

**A.3** اكتب عدد الروابط الهيدروجينية في الكبسولة ثنائية الجزيء (1<sub>2</sub>). 2pt

تحتوي الكبسولة ثنائية الجزيء **1** ( $1_2$ ) على مساحة داخلية حيث يمكن تغليف الجزيء الصغير المناسب Z. يتم التعبير عن هذه الظاهرة بالمعادلة التالية:

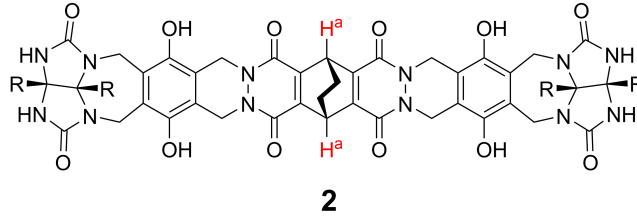


يتم إعطاء ثابت الإتزان لتغليف Z بالكبسولة إلى  $1_2$  على النحو التالي:

$$K_a = \frac{[Z@1_2]}{[Z][1_2]} \quad (2)$$

يمكن مراقبة تغليف الجزيء في كبسولة بواسطة التحليل الطيفي بالرنين المغناطيسي النووي. على سبيل المثال ، أعطى  $1_2$  في  $C_6D_6$  إشارات (قمم ) مختلفة في أطراف الرنين النووي المغناطيسي للبروتون  $1H$  قبل وبعد إضافة  $CH_4$ .

يشكل المركب **2** أيضًا كبسولة قاتمة صلبة وأكبر ( $2_2$ ). تم قياس طيف  $1H$  NMR للكبسولة  $2_2$  في  $C_6D_6$  ،  $C_6D_5F$  ومزيج المذيب  $C_6D_6/C_6D_5F$  ، مع الحفاظ على جميع ظروف التفاعل الأخرى ثابتة. تم تلخيص الإزاحات الكيميائية للبروتون  $H^a$  للمركب **2** في المذيبات أعلاه ، ولم يتم ملاحظة أي إشارات (قمم ) أخرى من  $H^a$  في **2** ، باستثناء ما هو مذكور. افترض أن الجزء الداخلي من الكبسولة ممتلئ دائمًا بأكبر عدد ممكن من جزيئات المذيب وأن كل إشارة (قمم ) تتوافق مع نوع واحد من الكبسولة المملوءة.



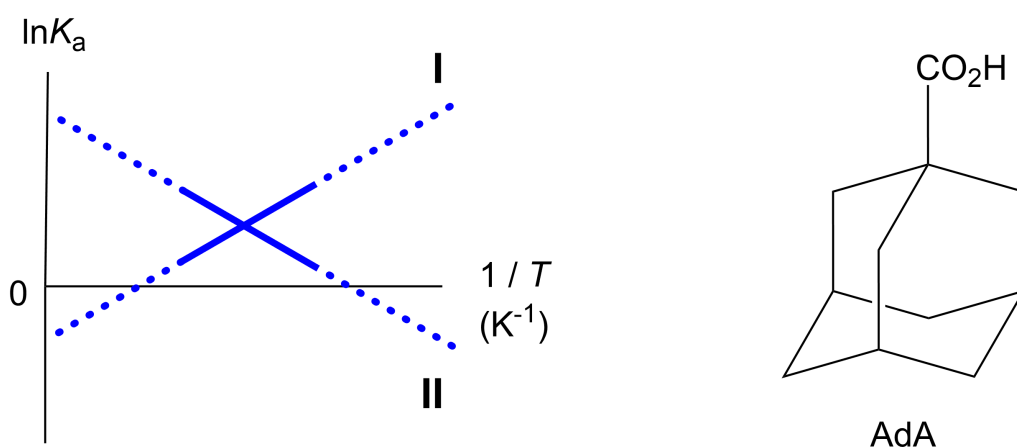
$\delta(ppm)$ of $H^a$	المذيب
4.60	$C_6D_6$
4.71	$C_6D_5F$
4.60 , 4.71 , 4.82	$C_6D_6 / C_6D_5F$

**A.4** حدد عدد جزيئات  $C_6D_6$  و  $C_6D_5F$  المغلفة والمكبسة في  $2_2$  لإعطاء كل إشارة (قمم ) ل  $H^a$  3pt

كشفت قياسات  $1H NMR$  في  $C_6D_6$  أن  $2_2$  يمكن أن يشتمل على جزيء واحد من حمض 1-adamantanecarboxylic (AdA) ، وتم تحديد ثوابت الإلتزان للحمض ( $K_a$ ) التي يتم التعبير عنها أدناه لدرجات حرارة مختلفة. يشير [المذيب @  $2_2$ ] إلى نوع يحتوي على جزيء واحد أو أكثر من جزيئات المذيب.

$$K_a = \frac{[Z@2_2]}{[Z][solvent@2_2]} \quad (3)$$

وبالمثل ، تم أيضاً تحديد قيم  $K_a$  لـ  $CH_4$  و  $1_2$  المعطاة كمعادلة (2) عند درجات حرارة مختلفة في  $C_6D_6$  وكذلك تم تحديدها بواسطة قياسات  $1H NMR$ . يتم عرض قطع ثوابت الإلتزان (مثل  $\ln K_a$  مقابل 1 مقسوماً على  $T$  أدناه).



لم يتم تغليف أي جزيء  $C_6D_6$  في  $1_2$ . في السطر **II** ، يكون التغير في العشوائية ( $\Delta S$ ) هو (1) وتغير المحتوى الحراري ( $\Delta H$ ) هو (2) ، مما يشير إلى أن القوة الدافعة للتغليف في السطر **II** هي (3). لذلك ، السطر **I** يقابل (4) ، والسطر **II** يقابل (5).

3pt

**A.5** اختر الخيارات الصحيحة في الفراغات (1) - (5) في الفقرة التالية من A و B.

الصف	A	B
(1)	positive موجب	negative سالب
(2)	positive موجب	negative سالب
(3)	$\Delta S$	$\Delta H$
(4)	$CH_4$ and $1_2$	AdA and $2_2$
(5)	$CH_4$ and $1_2$	AdA and $2_2$

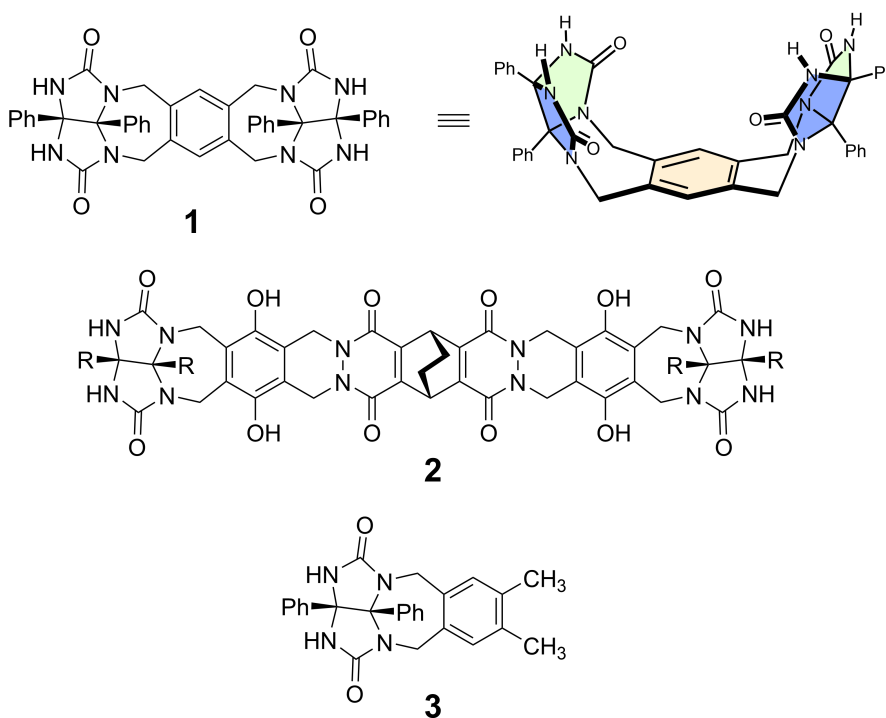
## Likes and Dislikes of Capsule

10 % of the total						
Question	A.1	A.2	A.3	A.4	A.5	Total
Points	13	2	2	3	3	<b>23</b>
Score						

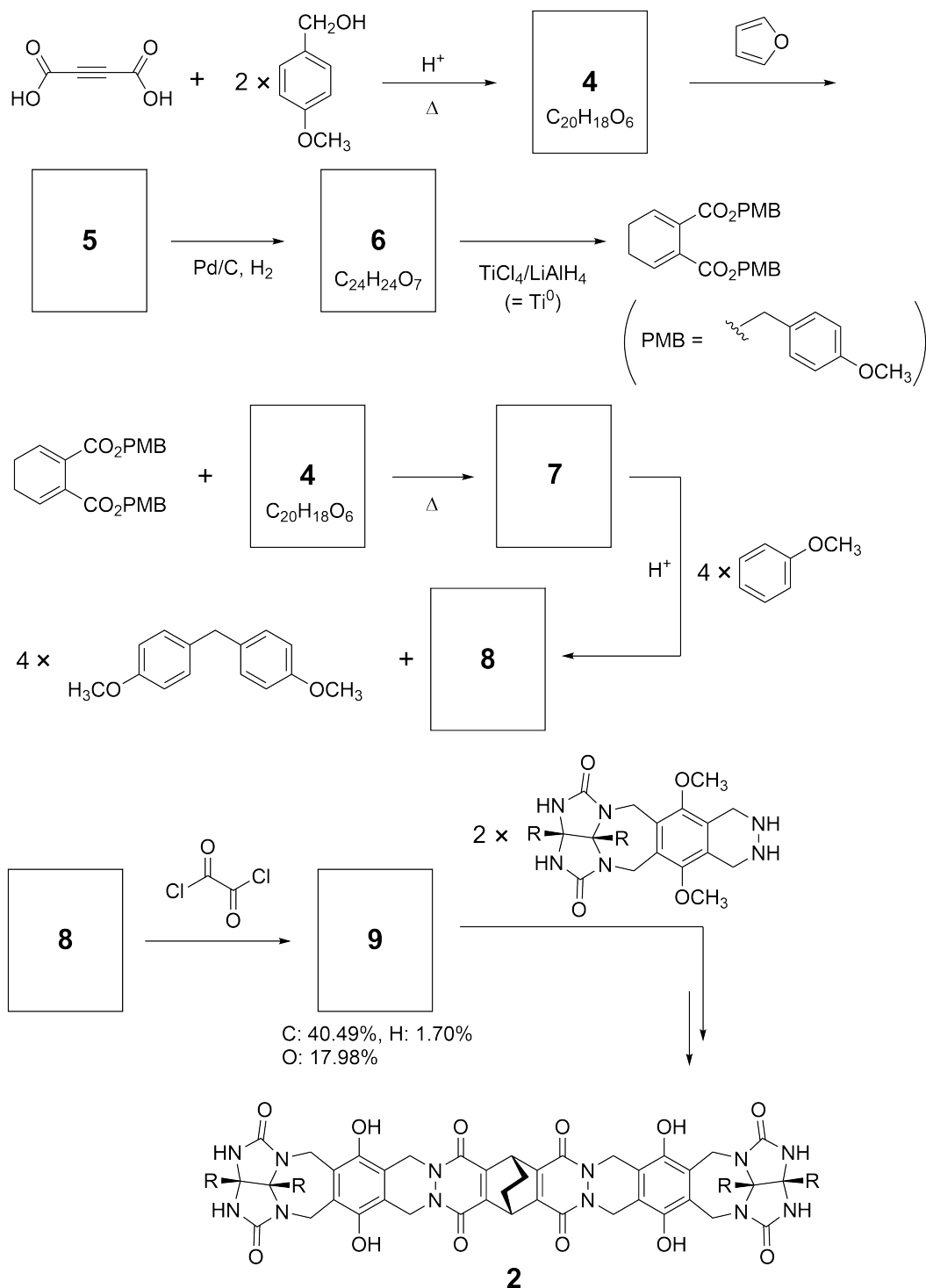
Good kids don't do this, but if you unseam a tennis ball, you can disassemble it into two U-shaped pieces.



Based on this idea, compounds **1** and **2** were synthesized as U-shaped molecules with different sizes. Compound **3** was prepared as a comparison of **1** and the encapsulation behavior of these compounds was investigated.



The synthetic route to **2** is shown below. The elemental composition of compound **9**: C; 40.49%, H; 1.70%, and O; 17.98% by mass.







**A.1** **Draw** the structures of **4-9**; the stereochemistry can be neglected. Use "PMB" as a substituent instead of drawing the whole structure of *p*-methoxybenzyl group shown in the scheme above. 13pt

In the mass spectrum of **1**, the ion peak corresponding to its dimer (**1<sub>2</sub>**) was clearly observed, whereas an ion peak for **3<sub>2</sub>** was not observed in the spectrum of **3**. In the <sup>1</sup>H NMR spectra of a solution of **1<sub>2</sub>**, all the NH protons derived from **1** were observed to be chemically equivalent, and their chemical shift was significantly different from that of the NH protons of **3**. These data indicate that hydrogen bonds are formed between the NH moieties of **1** and atoms **X** of another molecule of **1** to form the dimeric capsule.

**A.2** **Circle** all the appropriate atom(s) **X** in **1**. 2pt

**A.3** **Give** the number of the hydrogen bonds in the dimeric capsule (**1<sub>2</sub>**). 2pt

The dimeric capsule of **1** ( $1_2$ ) has an internal space wherein an appropriate small molecule Z can be encapsulated. This phenomenon is expressed by the following equation:

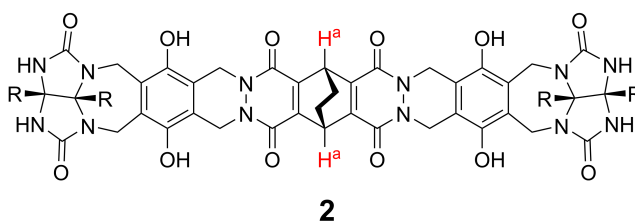


The equilibrium constant of the encapsulation of Z into  $1_2$  is given as below:

$$K_a = \frac{[Z@1_2]}{[Z][1_2]} \quad (2)$$

Encapsulation of a molecule into a capsule could be monitored by NMR spectroscopy. For example,  $1_2$  in  $C_6D_6$  gave different signals in the  $^1H$  NMR spectra before and after addition of  $CH_4$ .

Compound **2** also forms a rigid and larger dimeric capsule ( $2_2$ ). The  $^1H$  NMR spectrum of  $2_2$  was measured in  $C_6D_6$ ,  $C_6D_5F$ , and a  $C_6D_6/C_6D_5F$  solvent mixture, with all other conditions being kept constant. The chemical shifts for the  $H^a$  proton of **2** in the above solvents are summarized below, and no other signals from the  $H^a$  in **2**, except for the listed, were observed. Assume that the interior of the capsule is always filled with the largest possible number of solvent molecules and that each signal corresponds to one species of the filled capsule.



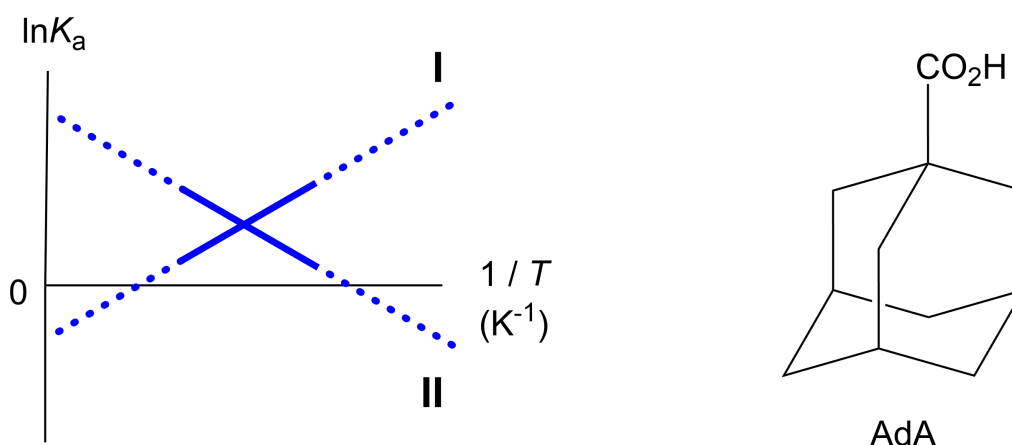
solvent	$\delta$ (ppm) of $H^a$
$C_6D_6$	4.60
$C_6D_5F$	4.71
$C_6D_6 / C_6D_5F$	4.60, 4.71, 4.82

**A.4 Determine** the number of  $C_6D_6$  and  $C_6D_5F$  molecules encapsulated in  $2_2$  giving 3pt each  $H^a$  signal.

$^1\text{H}$  NMR measurements in  $\text{C}_6\text{D}_6$  revealed that  $\mathbf{2}_2$  can incorporate one molecule of 1-adamantanecarboxylic acid (AdA), and the association constants ( $K_a$ ) which are expressed below were determined for various temperatures.  $[\text{solvent@}\mathbf{2}_2]$  denotes a species containing one or more solvent molecules.

$$K_a = \frac{[\text{Z@}\mathbf{2}_2]}{[\text{Z}][\text{solvent@}\mathbf{2}_2]} \quad (3)$$

Similarly, the  $K_a$  values of  $\text{CH}_4$  and  $\mathbf{1}_2$  given as eq (2) at various temperatures in  $\text{C}_6\text{D}_6$  were also determined by  $^1\text{H}$  NMR measurements. The plots of the two association constants (as  $\ln K_a$  vs  $1/T$ ) are shown below.



No  $\text{C}_6\text{D}_6$  molecule is encapsulated in  $\mathbf{1}_2$ . In line **II**, the entropy change ( $\Delta S$ ) is ( 1 ) and enthalpy change ( $\Delta H$ ) is ( 2 ), indicating that the driving force for the encapsulation in line **II** is ( 3 ). Therefore, line **I** corresponds to ( 4 ), and line **II** corresponds to ( 5 ).

**A.5** **Choose** the correct options in gaps (1)-(5) in the following paragraph from A 3pt and B.

	A	B
(1)	positive	negative
(2)	positive	negative
(3)	$\Delta S$	$\Delta H$
(4)	$\mathbf{1}_2$ and $\text{CH}_4$	$\mathbf{2}_2$ and AdA
(5)	$\mathbf{1}_2$ and $\text{CH}_4$	$\mathbf{2}_2$ and AdA



OMN-1 C-9 A-1

# A9-1

Arabic (Oman)

## يحب ويكره الكبسولة

(13 pt) **A.1**

pt) 3) **5**

pt) 2) **4**

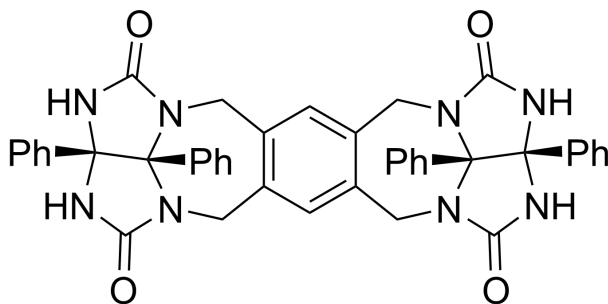
pt) 2) **7**

pt) 2) **6**

pt) 2) **9**

pt) 2) **8**

(2 pt) **A.2**



(2 pt) **A.3**

(3 pt) **A.4**

عدد جزيئات $C_6D_5F$ غير المكبسلة	عدد جزيئات $C_6D_6$ غير المكبسلة	$H^a$ of (ppm) $\delta$
		ppm 60.4
		ppm 71.4
		ppm 82.4

(3 pt) **A.5**

(1) : \_\_\_\_\_ (2) : \_\_\_\_\_ (3) : \_\_\_\_\_  
 (4) : \_\_\_\_\_ (5) : \_\_\_\_\_