

# 2012 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

編號：030033

## 作品名稱

酒石酸配位掌性聚合物之自組裝合成、結構與特性研究

## 得獎獎項

大會獎：四等獎

作者姓名：曾冠霖、蔡京庭

就讀學校：臺北市立建國高級中學

指導教師：楊傑超、呂光烈

關鍵字：掌性、自組裝、有機金屬

## 作者簡介



我們是來自建國中學二年級數理資優班的曾冠霖（左）與蔡京庭（右），學校為我們班安排了不一樣的課程——「專題研究」。顧名思義，就是讓我們有更多的時間，可以投身研究我們有興趣的主題。有這麼好的機會，我們倆感到無比興奮。

一開始，對化學有濃厚興趣的我們在學校實驗室中度過了幾週的專題課，但我們漸漸發現，學校的實驗設備已漸漸不能滿足我們對實驗的渴望。於是，前往中研院拜訪教授，熱心的教授讓我們留在他的實驗室中做實驗，也安排學長指導我們。過程中，我們學到一般人不知道的技巧，接觸到一般人不會用的儀器，最後也合成出屬於自己的晶體。

一路上，很感謝學校有這樣的課程安排、很感謝老師與家長們給予的支持及鼓勵、也謝謝教授與學長的指導，讓我們有了這些成果。謝謝你們！

## 摘要

奈米技術在 20 世紀後期蓬勃發展，而具有奈米及孔洞的超分子，更為化學家所積極尋求合成上的突破與挑戰，超分子化學用來探討一些分子間較弱、可恢復性的作用力，以期製備一系列具有功能性的孔洞材料。

其主要分為以下六種：

1. 凡德瓦力 (van der Waals forces, energy  $< 5\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ )
2.  $\pi$ - $\pi$  堆疊作用力 ( $\pi$ - $\pi$  stacking interactions, energy =  $0\sim 50\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ )
3. 氫鍵 (hydrogen bonds, energy =  $4\sim 50\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ )
4. 偶極-偶極作用力 (dipole-dipole interactions, energy =  $5\sim 50\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ )
5. 陽離子- $\pi$  作用力 (cation interactions energy =  $5\sim 80\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ )
6. 離子-偶極作用力 (ion-dipole interactions, energy =  $50\sim 200\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ )

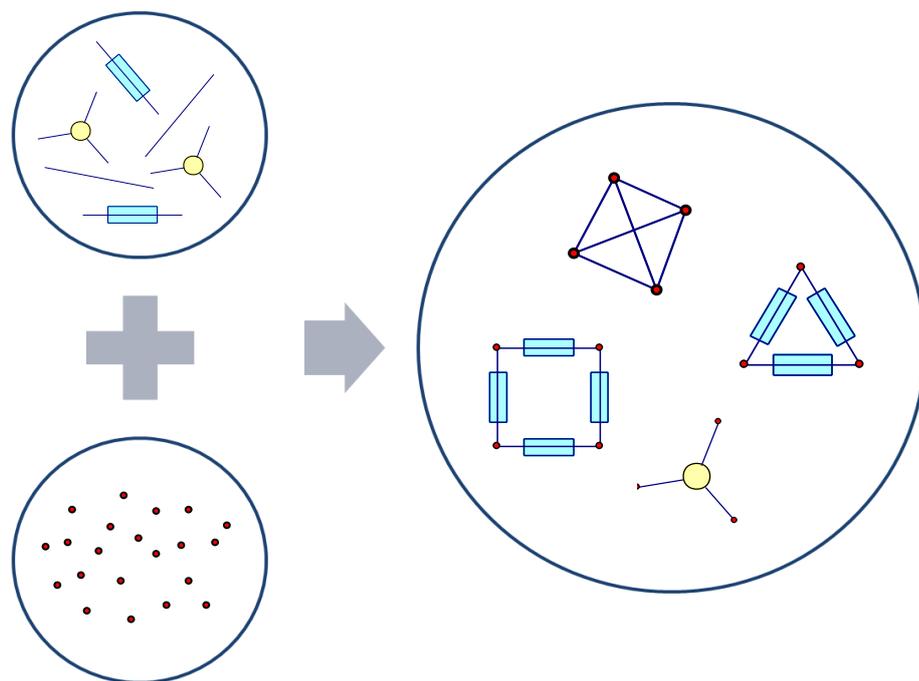
而分子自組裝即利用這些作用力，依熱力學最安定的組合，發生自然組裝排列的現象，可應用於分離、化學感應、氣體儲存、離子交換、導熱、以及光電導性。

本研究主要利用混合掌性異構物的酒石酸鉀鈉與硝酸鈣或硝酸鎂，在水與酒精的環境下進行自組裝，利用簡單與無毒的自組裝合成法，讓右旋酒石酸分子與鎂金屬配位，而左旋酒石酸分子與鈣金屬配位，分別得到掌性配位聚合物，除了將兩種掌性異構物分離，也實踐綠色化學中無毒與環保的概念。

# 介紹

## 一、自組裝 (self-assembly method)

分子自組裝是化學與生化系統中隨處可見的一種現象，有別於傳統的合成方法，透過有次序的共價鍵將小分子結合，以非常簡單但直接精確地形成奈米大小的分子，再經由其它非共價鍵的弱作用力，形成複雜而穩定的結構，具有反應快速及不需外加太多能量的特色



有機金屬超分子自組裝成奈米元件示意圖

本實驗用來合成配位聚合物的方法，可分為水熱反應及室溫自組裝兩種，說明如下：

### 1. 水熱反應 (hydrothermal reaction)

利用控制水的溫度，模擬自然環境進行反應，本實驗利用 80°C 水浴進行自組裝，一般水熱反應有必備條件，首先反應物在溶劑終須有一定溶解度(2~5%)，如果反應物不溶或微溶於溶劑，可加入助溶劑，此外，有些助溶劑可使晶體堆疊的品質更好。

水熱法的優點除了加速固體間反應，提高反應物溶解度，且提供了反應所需

的活化能，並且利用高溫時溶劑的汽化，使原本不互溶的有機溶劑互相混合。

## 2. 室溫自組裝

室溫自組裝，大致可分為兩大類，第一類型是利用室溫溶劑直接擴散反應，第二類是室溫氣體擴散反應。

(1)室溫溶劑直接擴散反應：將不同反應物溶於不同溶劑中，利用溶劑比重分層產生介面，也可加入一緩衝層，降低反應速率以養成晶體。

(2)室溫氣體擴散反應：室溫下將反應物完全溶於溶劑直接反應，再置入高揮發性有機溶劑，以擴散方式養成晶體。

## 二、配位聚合物 (coordination polymer)

配位聚合物主要包含二部分，節點(connector)與連接者(linker)，節點大部分為金屬，連接者為配位子，而其中有一些不參與配位的客分子，藉由中心金屬和連接配子，構成配位聚合物，其孔洞結構使之具有低密度、高表面積的優點，並可調節孔洞大小，未來有潛力發展分子辨識、分離、催化、離子/客分子交換、磁性等應用。

## 壹、 研究動機

某次在期刊上偶然閱讀了有關超分子化學的資料，新奇的名詞立刻吸引了我們，閱讀過相關資料後，發現原來超分子化學能夠透過自組裝，合成出許多有趣的材料，而具有許多意想不到的性質，這個從未觸及過的疆域對我們產生了極大的吸引力，於是我們決定親自動手做實驗，透過自組裝的合成方式，利用掌性分子與金屬離子的反應，藉由溫度、溶劑、濃度、酸鹼值的調控，希望能合成出一些有趣的材料。

## 貳、 研究目的

- 一、探討不同莫耳數比對製造的酒石酸-金屬聚合物之影響
- 二、找出最佳合成金屬聚合物的條件
- 三、分析合成出的酒石酸-金屬聚合物
- 四、合成出能應用於對掌異構物分離的分子

## 參、 研究設備與器材

### 一、基礎設備及器材

物品	規格	數量
室溫試管	25mL	十支
高溫試管	20mL	十支
括勺	15cm	一支
樣本瓶	25mL	數個
濾紙	直徑 55mm	數張
抽濾漏斗	內徑 55mm	一個
抽氣過濾瓶	500mL	一個
抽濾裝置		一組
塑膠滴管		數支
玻璃滴管		一支
秤量紙		數張
量筒	10mL	一個
試管架		一個
培養皿	內徑 55mm	數個

### 二、大型儀器設備

儀器	品牌	型號
水浴箱	裕德科技有限公司	BU-420
傅立葉紅外線光譜儀 (FT-IR Spectrometer)	PerkinElmer	Spectrum 100
光學顯微鏡	Meiji Techno Co., Ltd.	EMZ-5TR
CCD 單晶 X 光繞射儀 (CCD Single Crystal X-ray Diffractometer)	Bruker AXS	APEX II
粉末 X 光繞射儀 (Powder X-ray Diffractometer)	Philips	XRD MPD Philips Analytical
電子天平	METTLER TOLEDO	MS204S Analytical Balance



傅立葉紅外線光譜儀



CCD 單晶 X 光繞射儀



光學顯微鏡

### 三、實驗藥品

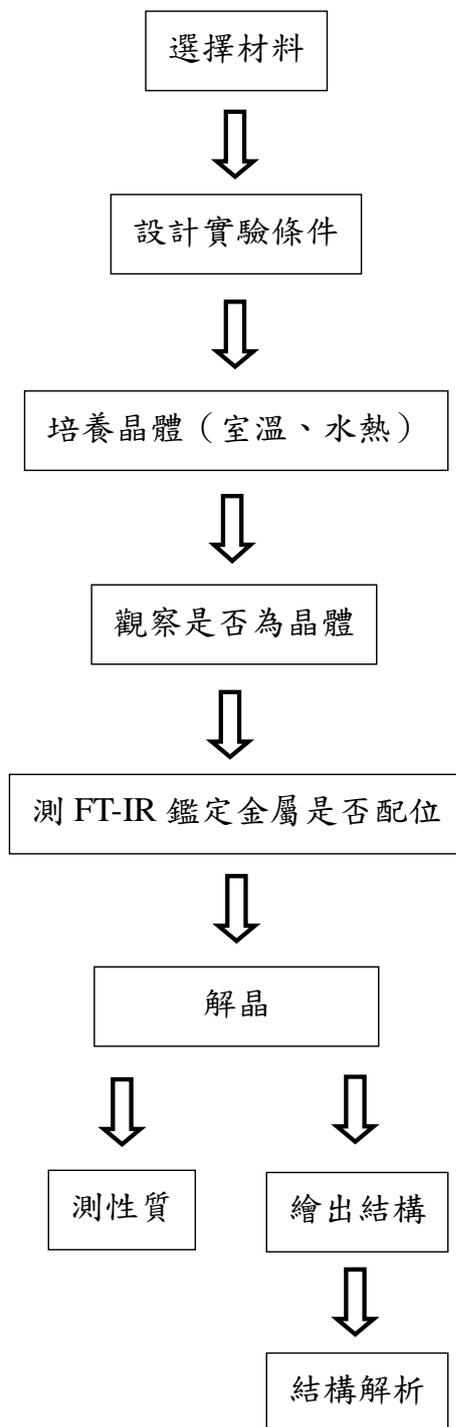
試藥	英文名稱	分子式	分子量	廠牌	純度
酒石酸鉀鈉	Potassium sodium tartrate	$\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	282.23	島久藥品株式會社	99.0%
硝酸鈣	Calcium nitrate tetrahydrate	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	236.15	昭和化學株式會社	98.5%
硝酸鎂	Magnesium nitrate hexahydrate	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	256.40	Acros Chimica N.V	98.0%
硝酸鋰	Lithium nitrate	$\text{Li}(\text{NO}_3)_2$	68.950	Acros Chimica N.V	99.0%
溴化鉀	Potassium bromide	$\text{KBr}$	119.00	Sigma-Aldrich	99.0%



#### 四、分析軟體

軟體	功能
Diamond 3.0	晶體結構的求解、視覺化、材料資料庫和材料設計。
Origin 6.0	繪圖及資料分析
Mercury	圖像處理

#### 肆、 研究過程及方法



## 一、培養晶體：

### 實驗一：酒石酸鉀鈉與硝酸鈣之水熱反應

#### 反應一：尋找最佳溶劑

1. 用電子天平分別取酒石酸鉀鈉、硝酸鈣若干克作為實驗所需之溶質（依欲配置之濃度決定）。
2. 將溶質溶於不同溶劑中。
3. 將溶液放入試管中，並放入水浴箱中（80 °C）。

反應環境：DMF + H<sub>2</sub>O、EtOH + H<sub>2</sub>O、H<sub>2</sub>O。

反應溫度：80 °C 水浴。

反應時間：一週。

溶質：

試管編號	酒石酸鉀鈉	硝酸鈣	溶劑
Ta+Ca 01	0.1mmol	0.1mmol	10mL H <sub>2</sub> O
Ta+Ca 02	0.1mmol	0.1mmol	5mL EtOH + 5mL H <sub>2</sub> O
Ta+Ca 03	0.1mmol	0.1mmol	5mL DMF + 5mL H <sub>2</sub> O

結果：

試管編號	有無晶體	晶體品質
Ta+Ca 01	V	中（柱狀）
Ta+Ca 02	V	差
Ta+Ca 03	V	差

以 Ta+Ca 01 為對照組，我們可以發現 H<sub>2</sub>O 為最佳溶劑。

#### 反應二：尋找最佳比例

1. 用電子天平分別取酒石酸鉀鈉、硝酸鈣若干克作為實驗所需之溶質（依欲配置之濃度決定）。

- 將溶質溶於 10mL H<sub>2</sub>O 中。
- 將溶液放入試管中，並放入水浴箱中（80 °C）。

反應環境：每支試管各 5mL EtOH+5mL H<sub>2</sub>O。

反應溫度：80 °C 水浴。

反應時間：一週。

溶質：

試管編號	酒石酸鉀鈉	硝酸鈣
Ta+Ca 04	0.1mmol	0.1mmol
Ta+Ca 05	0.2mmol	0.1mmol
Ta+Ca 06	0.1mmol	0.2mmol
Ta+Ca 07	0.2mmol	0.2mmol
Ta+Ca 08	0.05mmol	0.05mmol

結果：

試管編號	有無晶體	晶體品質
Ta+Ca 04	V	佳（柱狀）
Ta+Ca 05	V	中（柱狀）
Ta+Ca 06	V	中（柱狀）
Ta+Ca 07	V	差（雜亂柱狀）
Ta+Ca 08	X	

因此我們找出酒石酸鉀鈉與硝酸鈣的最佳比例是 0.1mmol：0.1mmol。

反應三：觀察鹼對條件的影響

- 用電子天平分別取酒石酸鉀鈉、硝酸鈣、氫氧化鉀若干克作為實驗所需之溶質，因酒石酸為二元酸，因此鹼的莫耳數為酸兩倍（依欲配置之濃度決定）。
- 將溶質溶於 10mL 水中。
- 將溶液放入試管中，並放入水浴箱中（80 °C）。

#### 4. 反應時間：一週

反應環境：每支試管各 10mL 去離子水。

反應溫度：80 °C 水浴。

反應時間：一週。

溶質：

試管編號	酒石酸鉀鈉	硝酸鈣	氫氧化鉀
Ta+Ca 09	0.1mmol	0.1mmol	0.2mmol
Ta+Ca 10	0.2mmol	0.1mmol	0.4mmol
Ta+Ca 11	0.1mmol	0.2mmol	0.2mmol

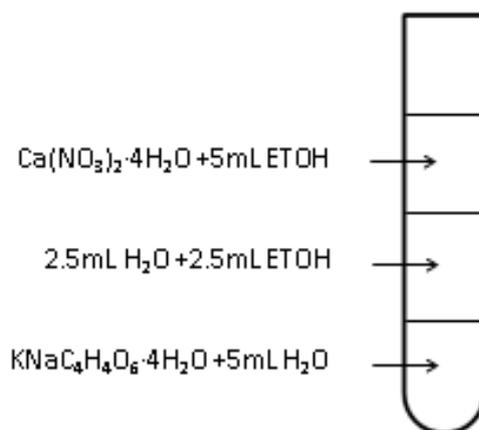
結果：

試管編號	有無晶體	有無沉澱	晶體品質
Ta+Ca 09	V	X	佳（針狀）
Ta+Ca 10	V	V	中
Ta+Ca 11	V	V	中

加鹼的最佳條件為酒石酸鉀鈉比硝酸鈣 0.1mmol : 0.1mmol，因為多餘其它條件下會產生沉澱而造成難已與晶體分離，但此方法所得的晶體較小，因此我們選擇用不加鹼的合成條件。

## 實驗二：酒石酸鉀鈉與硝酸鈣之室溫反應

1. 用電子天平秤取酒石酸鉀鈉若干克作為溶質（依欲配置之濃度決定）。
2. 將溶質溶於 5mL 水中，加入室溫試管中。
3. 接著取 2.5mL 水與 2.5mL 乙醇混和均勻後以極緩慢且穩定之速度，滴入步驟 2 之試管中，利用比重不同，使溶劑產生分層。
4. 再用電子天平秤取硝酸鈣若干克作為溶質（依欲配置之濃度決定）。
5. 將硝酸鈣溶於 5mL 乙醇中，並緩緩加入步驟 3 之試管中，使溶劑產生第三層分層。
6. 封口後，靜置於室溫一週。



反應環境：每支試管各 7.5mL Deionized water + 7.5mL Ethanol。

反應溫度：室溫。

反應時間：一週。

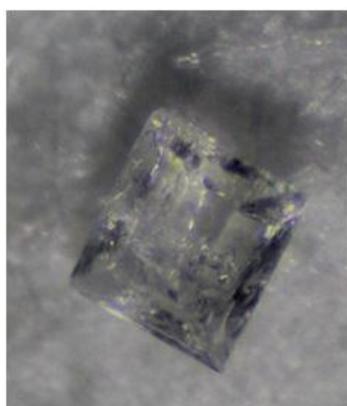
溶質：

試管編號	酒石酸鉀鈉	硝酸鈣
Ta+Ca 12	0.1mmol	0.1mmol
Ta+Ca 13	0.2mmol	0.1mmol
Ta+Ca 14	0.1mmol	0.2mmol
Ta+Ca 15	0.2mmol	0.2mmol

結果：

試管編號	有無晶體	產率
Ta+Ca 12	V	29%
Ta+Ca 13	V	佳（針環）
Ta+Ca 14	V	佳（針狀）
Ta+Ca 15	V	佳（針狀）

因此我們發現，在室溫下每一種條件品質皆佳。



Ta+Ca 01



Ta+Ca 09

### 實驗三：酒石酸鉀鈉與硝酸鎂之水熱反應

#### 反應一：尋找最佳溶劑

1. 用電子天平分別取酒石酸鉀鈉、硝酸鎂若干克作為實驗所需之溶質（依欲配置之濃度決定）。
2. 將溶質溶於不同溶劑中。
3. 將溶液放入試管中，並放入水浴箱中（80 °C）。

反應環境：DMF+H<sub>2</sub>O、EtOH+H<sub>2</sub>O。

反應溫度：80 °C 水浴。

反應時間：一週。

溶質：

試管編號	酒石酸鉀鈉	硝酸鎂	溶劑
Ta+Mg 01	0.1mmol	0.1mmol	10mL H <sub>2</sub> O
Ta+Mg 02	0.1mmol	0.1mmol	5mL EtOH+5mL H <sub>2</sub> O
Ta+Mg 03	0.1mmol	0.1mmol	5mL DMF+5mL H <sub>2</sub> O

結果：

試管編號	有無晶體	晶體品質
Ta+Mg 01	X	
Ta+Mg 02	V	中（柱狀）
Ta+Mg 03	V	中（柱狀）

與鈣金屬不同的是，鎂金屬必須要混合溶劑才能做出來，但為符合綠色化學，我們選擇溶劑用酒精加水作為合成條件。

#### 反應二：尋找最佳比例

1. 用電子天平分別取酒石酸鉀鈉、硝酸鎂若干克作為實驗所需之溶質（依欲配置之濃度決定）。
2. 將溶質溶於 5mL EtOH+5mL H<sub>2</sub>O 中。

3. 將溶液放入試管中，並放入水浴箱中（80 °C）。

反應環境：每支試管各 5mL EtOH+5mL H<sub>2</sub>O。

反應溫度：80 °C 水浴。

反應時間：一週。

溶質：

試管編號	酒石酸鉀鈉	硝酸鎂
Ta+Mg 04	0.1mmol	0.1mmol
Ta+Mg 05	0.2mmol	0.1mmol
Ta+Mg 06	0.1mmol	0.2mmol
Ta+Mg 07	0.2mmol	0.2mmol
Ta+Mg 08	0.05mmol	0.05mmol

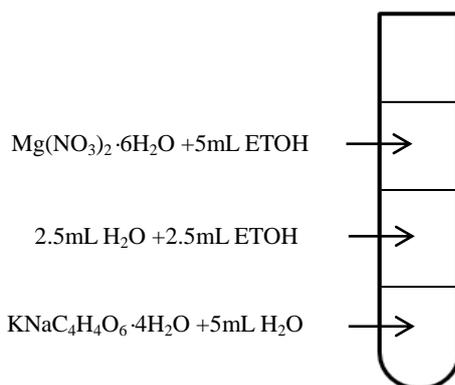
結果：

試管編號	有無晶體	晶體品質
Ta+Mg 04	V	佳（柱狀）
Ta+Mg 05	V	中（柱狀）
Ta+Mg 06	V	中（柱狀）
Ta+Mg 07	V	差（雜亂柱狀）
Ta+Mg 08	X	

因此我們找出酒石酸鉀鈉與硝酸鎂的最佳比例是 0.1mmol : 0.1mmol。

#### 實驗四：酒石酸鉀鈉與硝酸鎂之室溫反應

1. 用電子天平秤取酒石酸鉀鈉若干克作為溶質（依欲配置之濃度決定）。
2. 將溶質溶於 5mL 水中，加入室溫試管中。
3. 接著取 2.5mL 水與 2.5mL 乙醇混和均勻後以極緩慢且穩定之速度，滴入步驟 2 之試管中，利用比重不同，使溶劑產生分層。
4. 再用電子天平秤取硝酸鎂若干克作為溶質（依欲配置之濃度決定）。
5. 將硝酸鎂溶於 5mL 乙醇中，並緩緩加入步驟 3 之試管中，使溶劑產生第三層分層。
6. 封口後，靜置於室溫一週。



反應環境：每支試管各 7.5mL 去離子水 +7.5mL EtOH。

反應溫度：室溫。

反應時間：一週。

溶質：

試管編號	酒石酸鉀鈉	硝酸鎂
Ta+Mg 09	0.1mmol	0.1mmol
Ta+Mg 10	0.2mmol	0.1mmol
Ta+Mg 11	0.1mmol	0.2mmol
Ta+Mg 12	0.2mmol	0.2mmol

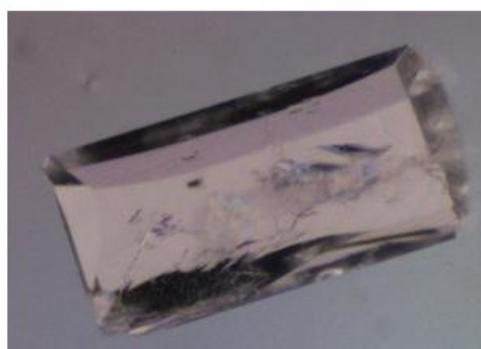
結果：

試管編號	有無晶體
Ta+Mg 09	X
Ta+Mg 10	X
Ta+Mg 11	X
Ta+Mg 12	X
Ta+Mg 13	X

因此我們可得知合成酒石酸跟鎂的配位聚合物最好的方法是水熱法。



Ta+Mg 04



Ta+Mg 02

## 二、觀察晶體：

1. 利用抽濾裝置組將晶體抽濾，與溶劑分離。
2. 靜置至晶體與濾紙乾燥後，將晶體連同濾紙放入培養皿內。
3. 利用顯微鏡觀察晶體外觀，並選出產率最佳之配方。

## 三、傅立葉紅外線光譜之測定：

利用傅立葉紅外線光譜的測定，我們可得知金屬是否有連接到配基上，其步驟如下：

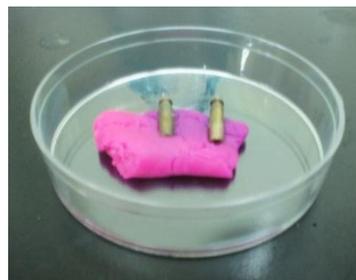
1. 先將儀器與其所連結之電腦開啟，並打開軟體。
2. 先將溴化鉀磨成細粉並測其光譜，作為去除背景訊號用。將溴化鉀磨成極細粉末，並壓成薄片。將薄片放入 FT-IR 儀器中，後啟動機器。
3. 挑選些許晶體與溴化鉀以大約 1:100 的比例磨成粉末並壓成薄片，放入儀器中。
4. 最後再將晶體之 IR 光譜去除溴化鉀訊號後，得到晶體的訊號。
5. 利用軟體 Origin 6.0 修圖，使其光譜曲線滑順，並使其訊號更加明顯。
6. 觀察晶體之訊號，與酒石酸鉀鈉之訊號圖比較，觀察鈣金屬是否確實接上。

## 四、晶體量產：

1. 將抽濾出的晶體以電子天平秤重，並計算個配方之產率。
2. 選擇產率較佳的一組，並進行量產。
3. 最後將量產的晶體收集於結晶盒內。

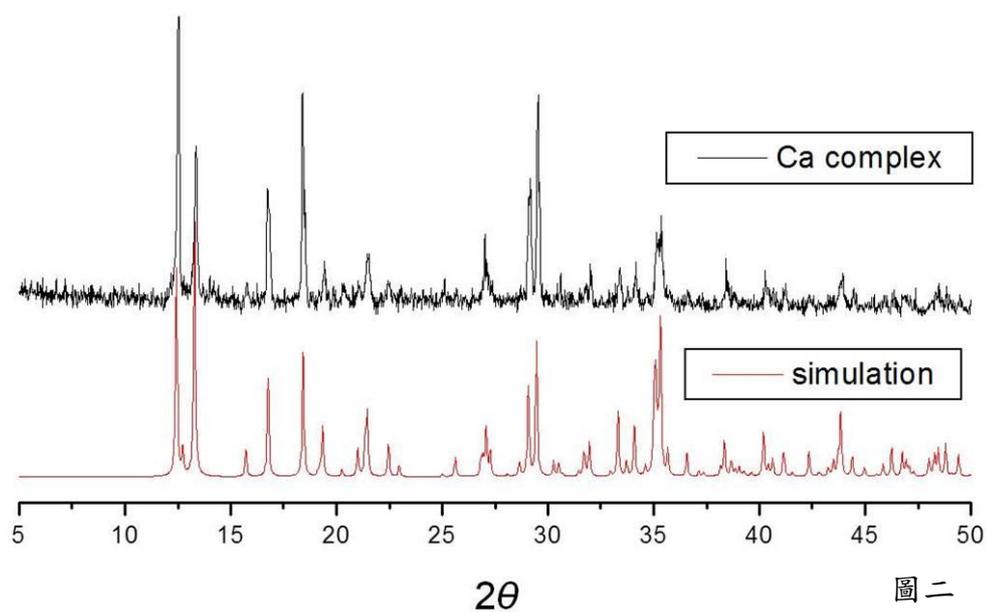
### 五、解晶：

將已確定金屬已連接上配基的三顆晶體，黏在毛細管上方送到 x-ray 實驗室，進行單晶繞射。



### 六、利用粉末 X 光繞射儀測量純度

利用高速電子撞擊銅靶，產生的 X-ray( $\lambda = 0.154 \text{ nm}$ )繞射晶體，與模擬的 powder 圖比較，發現峰的位置大致一致，因此圖二可證明化合物的純度。



## 伍、 討論

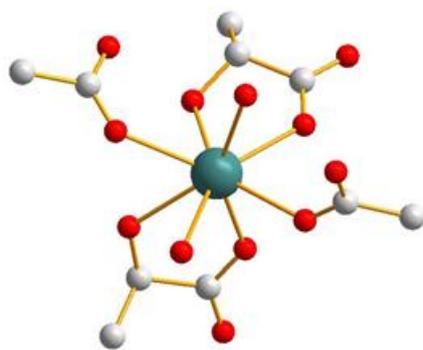
### 一、 $\{[\text{Ca}(\text{L}-\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6)(\text{H}_2\text{O})_2] \cdot 2\text{H}_2\text{O}\}_n$ (1)

#### 1. 合成：

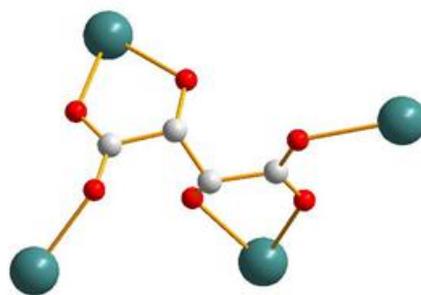
取酒石酸鉀鈉(28.2mg, 0.1mmol)、硝酸鈣(47.2mg, 0.2mmol)及去離子水(10 mL)，加入試管，放入 80 °C 水浴箱一個星期，冷卻至室溫。反應結束，收集得無色透明塊狀晶體，抽氣過濾，已去離子水沖洗，置於室溫環境下。

#### 2. 結構描述：

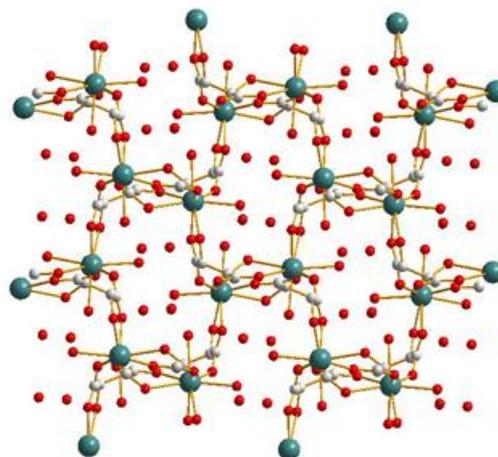
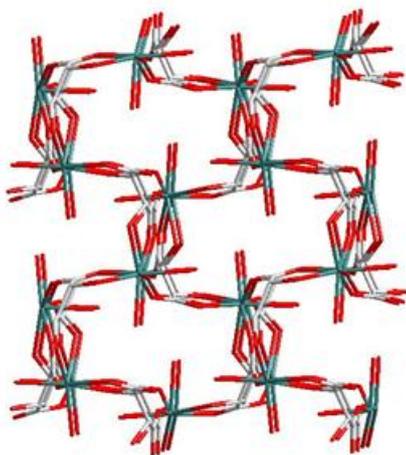
經由 X-ray 繞射證明此化合物屬斜方晶系(orthorhombic)，空間群為  $P2_12_12_1(19)$ ，如圖(a)中可見，在化合物 1 中，一個金屬連接四個配基，而在圖三(b)可見其一個配基連接四個金屬，經由這樣的連接方式，可組成一個如圖(c)三維的網狀聚合物。



圖(a)



圖(b)



圖(c)

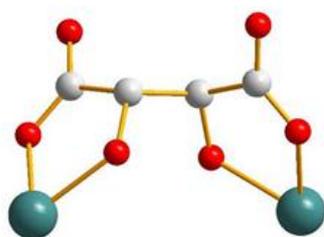
## 二、 $\{[\text{Mg}_2(\text{D-C}_4\text{H}_4\text{O}_6)_2(\text{H}_2\text{O})_2] \cdot 3\text{H}_2\text{O}\}_n$ (2)

### 1. 合成：

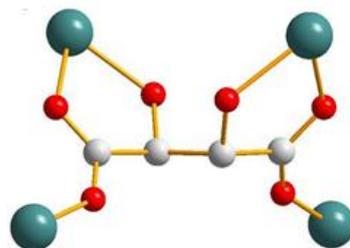
取酒石酸鉀鈉(28.2mg, 0.1mmol)、硝酸鎂(51.2mg, 0.2mmol)及去離子水(10 mL)，加入試管，放入 80 °C 水浴箱一個星期，冷卻至室溫。反應結束，收集得無色透明塊狀晶體，抽氣過濾，已去離子水沖洗，置於室溫環境下。

### 2. 結構探討：

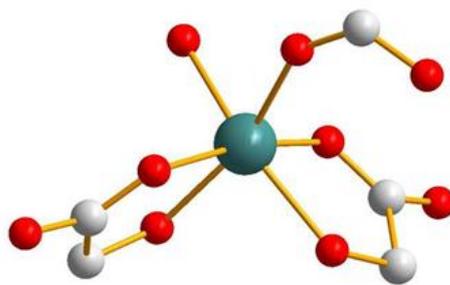
經由 X-ray 繞射證明此化合物屬斜方晶系(orthorhombic)，空間群為  $P2_12_12_1(19)$ ，如下圖五中可見，在化合物 2 中，配基具有兩種配位模式，分別是二配位及四配位，分別如圖(d)與圖(e)；金屬則是已六配位的模式與三個配基連接，如圖(f)，形成二維結構，而層跟層之間則是以氫鍵連接，如圖(g)。



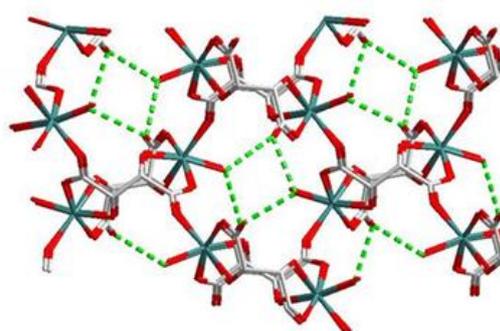
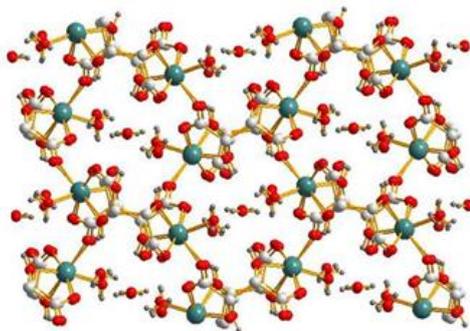
圖(d)



圖(e)



圖(f)



圖(g)

## 陸、 結論

本專題研究中，利用水熱法跟室溫擴散法養晶，選擇具有掌性的分子材料酒石酸，和無毒的鈣離子和鎂離子進行自組裝，利用兩者配位能力的差異，鈣離子在水的環境，而鎂離子在水與酒精的混合環境下可對酒石酸根進行選擇，成功的合成出二種不同對掌性的配位聚合物，並找出其合成的最佳條件，讓右旋酒石酸分子與鎂金屬配位，而其左旋分子能與鈣金屬配位，成功的分離對掌異構物，並實踐綠色化學的概念。

## 柒、 參考文獻

1. Cho S.-H., Ma B., Nguyen S. T., Hupp J. T., Albrecht-Schmitt T. E., *Chem. Commun.* **2006**, 2563 – 2565;
2. Dybtsev D. N., Yutkin M. P., Samsonenko D. G., Fedin V. P., Nuzhdin A. L., Bezrukov A. A., Bryliakov K. P., Talsi E. P., Belosludov R. V., Mizuseki H., Kawazoe Y., Subbotin O. S., Belosludov V. R. *Chem. Eur. J.* **2010**, *16*, 10348 – 10356.
3. Kesanli B., Lin W., *Coord. Chem. Rev.* **2003**, *246*, 305 – 326.
4. Kitagawa S., *Nature* **2006**, *441*, 584
5. Kitagawa S., Kitaura R., Noro S., *Angew. Chem. Int. Ed.* **2004**, *43*, 2334
6. Luo T. T., Liu Y. H., Tsai H. L., Su C. C., Ueng C. H., Lu K. L., *Eur. J. Inorg. Chem.* **2004**, 4253
7. Luo T.-T., Wu H.-C., Jao Y.-C., Huang S.-M., Tseng T.-W., Wen Y.-S., Lee G.-H., Peng S.-M., and Lu K.-L. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2009**, *48*, 9461 –9464
8. Ma L., Abney C., Lin W., *Chem. Soc. Rev.* **2009**, *38*, 1248 – 1256.
9. Yamaguchi T., Tashiro S., Tominaga M., Kawano M., Ozeki T., Fujita M., *Chem. Asian J.* **2007**, *2*, 468.
10. Yaghi O. M., O’Keeffe M., Ockwig N.W., Chae H. K., Eddaoudi M., Kim J., *Science* **2003**, *423*, 705
11. Zaworotko M. J., *Nature* **2008**, *451*, 410

## 評語

1. 題目十分有趣，化合物合成及鑑定皆相當完整。
2. 建議加強化學原理之解釋及產品實際之應用。