

# 中華民國第 57 屆中小學科學展覽會 作品說明書

---

國小組 化學科

080209

攔截記憶碼— PLA 形狀記憶效果之研究

學校名稱：國立臺中教育大學附設實驗國民小學

作者：  小六 葉亮均  小五 陳采萱  小五 黃翊婷	指導老師：  簡辛如  黃尚偉
---	-----------------------------

關鍵詞：PLA、形狀記憶、4D

## 摘要

3D 列印技術在近幾年來快速興起，然而在應用及研發的過程中，往往會產生大量的 PLA 廢材。PLA 是一種熱塑性塑膠，聚乳酸。為了嘗試解決廢材問題，我們意外在加熱測試中發現 PLA 具有形狀記憶的效果，也就是 PLA 遇熱後會軟化得以塑形，當它冷卻變硬後，再放回熱水，竟然會回到原來的初始狀態！

為此，我們進一步設計實驗，了解溫度、厚度、顏色對 PLA 形變效果的影響，並意外發現只要利用「溫度、時間」加以定型，就能任意更改 PLA 作品原有的形狀記憶效果，重新載入新記憶。有了這些新發現與技術，我們利用溫度將 3D 帶入 4D，增加了 3D 列印的應用與價值。同時，我們也嘗試進行 PLA 改質的測試，發現以皆為聚脂類的 PCL 混合效果較佳。

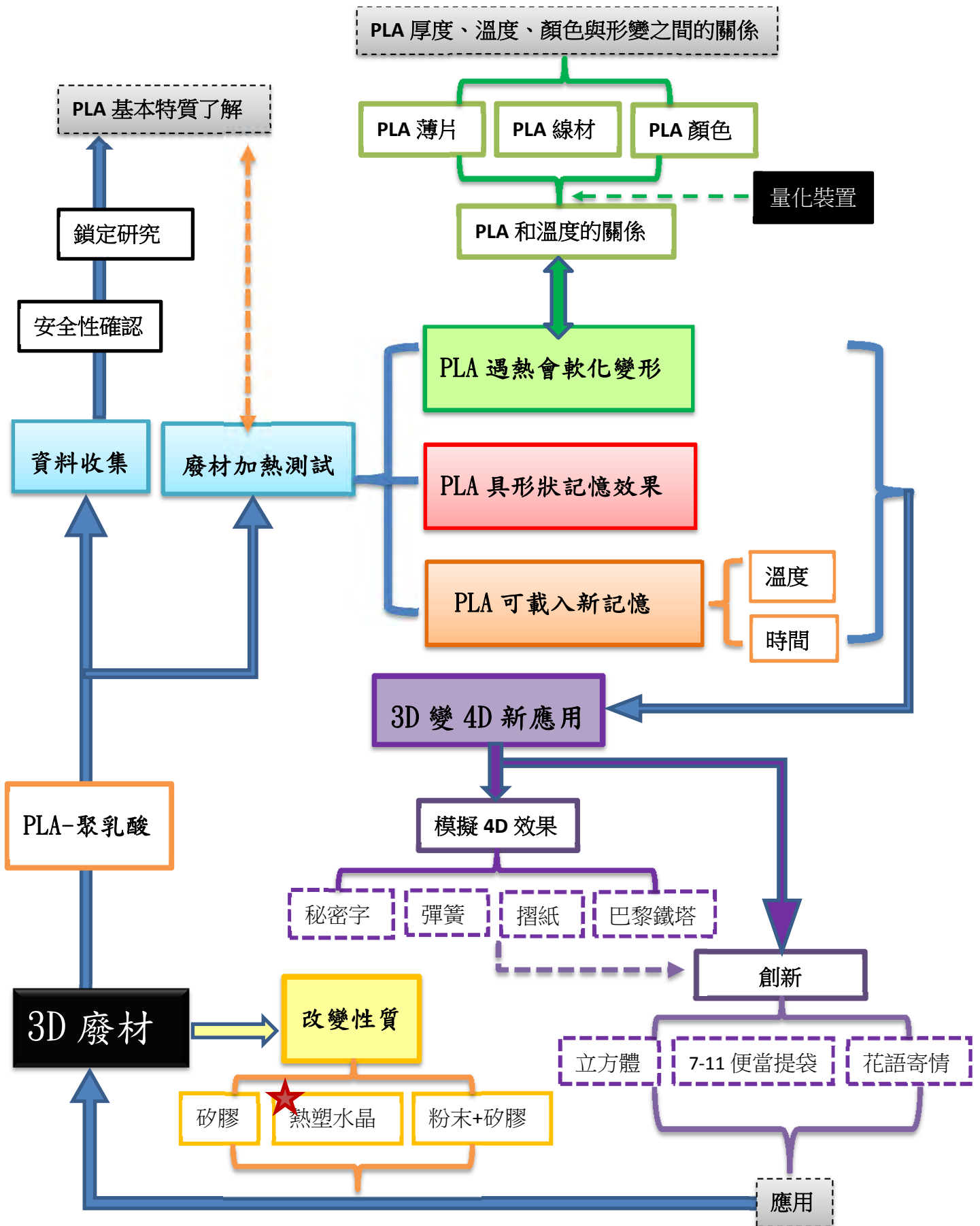
## 壹、研究動機

在學校的 3D 列印實作中，往往因為檔案設計不良、校正、列印時的失敗…等各種原因，產生大量的 3D 廢材。雖然，這些廢材—PLA 是一種可分解的綠色塑料。但，除了等待他分解之餘，我們還是希望可以替這些 PLA 找到新的價值和應用。所以，我們試著將這些廢材加熱、加入不同物質，看其變化與效果，進而嘗試將 PLA 延伸出更多的應用和可能。

## 貳、研究目的

1. 了解溫度、厚度、顏色對 PLA 形變效果的影響。
2. 找出 PLA 形狀再記憶的方式、效果及其限制。
3. 混入不同材料，嘗試改變 PLA 原有特質。
4. 以數據和變化作參考，進行 PLA 新產品的設計與應用。

### 參、研究概念流程圖



## 肆、研究過程及結果

### 一、3D 廢材-PLA：

#### (一)、研究原因：

老師拿了一大包 3D 列印產生的廢材，不同形狀、厚薄，如果這些廢材不處理，最後只能直接丟掉。為此，我們開始搜尋 PLA 的相關資料，嘗試加熱，試著找出 PLA 的新應用。

#### (二)、基本資料蒐集：

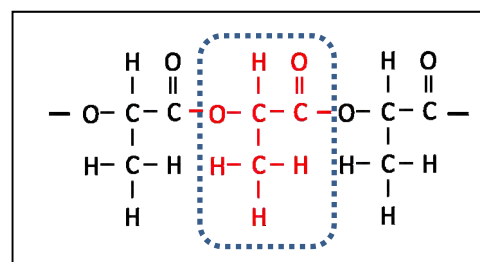
3D 列印的發明，讓人類擁有一個實踐思維的實作舞台。在大量產業、材料的融入，其涵蓋的範圍不斷增加。目前 3D 列印材料的選擇上，也逐漸趨向多元，最常見的為 PLA 和 ABS，其中 PLA 更因為是無毒的綠色塑料而成為主要首選。〔18〕

#### 1. **PLA 基本特性探討**

PLA 就是**聚乳酸**(Polylactic Acid)，是一種**熱塑性聚酯**。PLA 是一種**高分子聚合物**，由眾多的單體-**乳酸**(C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O<sub>3</sub>)聚合而成的**線性結構**(如圖一)。

化學式為(C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>)<sub>n</sub>。其玻璃轉化溫度為：55°C~60°C。

熔點為：175°C~170°C。



圖一：聚乳酸的化學結構式

以環保觀點來看 PLA，聚乳酸是由玉米、馬鈴薯、甘藷等**澱粉作物**中提煉出來，所以就能降低塑膠產業對石化原料的需求。同時 PLA **無毒、能快速降解**，和其他種類線材比起來是一種**可分解的綠色塑料**，應用性更高〔9〕。但，在蒐集資料的過程，我們發覺網路上有提到 PLA 可能有毒的訊息〔10〕。為此，我們花了一些時間寫信問各家有販賣 PLA 線材的廠商，進一步確認 PLA 的安全性與注意事項 (如圖二)。

#### XX 瑪公司(20160930) Gorn Chung

其實依照正式的研究，目前並沒有證實 3D 列印有毒的任何報告，如果以 PLA 來說的話，材料是工業玉米，雖然為了讓 PLA 更適合 3D 列印，成份裡一定還有一些添加劑和色素，但比較知名的材料商製作的 PLA，幾乎都有符合 FDA 的認證，確保對人體是安全的，

不過值得探討的是，材料本身有經過 FDA 認證，但經過印表機的噴頭，接觸過了金屬材質、高溫、某些積碳，列印出來的物件，是否還適合直接接觸食物，我相信只是皮膚上的接觸等等並不會有甚麼問題。以上提供給您參考。最後也介紹一下，純的 PLA 沒有毒性且可以完全分解，是很環保的材料，連時下年輕人最愛喝的星巴克、7-11 思樂冰的杯子都是用 PLA 做的唷！

圖二：其中一家廠商的完整回復

分析網路資料和各家廠商的回覆後，發現 PLA 無毒，但需要注意通風和賣家的品質。

因此，我們的研究只鎖定在 PLA，不再研究其他種類的 3D 線材。

另 PLA 雖硬、耐熱性高，但 容易脆掉、不耐衝擊！我們發現歷屆科展中，高中化學組有試著將 PLA 混入能發光的因子〔5〕；也試著將 PLA 和 PET 混合 研究其降解的效果〔3〕或將 PLA 混入咖啡渣〔4〕。但鮮少去處理 PLA 加熱的議題，因此我們試著從 PLA 的加熱出發





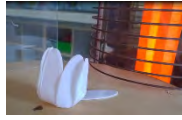

### （三）、實驗測試紀錄及結果：

#### 1. PLA 的加熱測試

(1)、研究原因：3D 列印本身是透過噴嘴將 PLA 加熱到 178 度以上，讓線材熔化後再重新塑形的歷程。那，沒有 3D 印表機，我們將可以如何進行加熱。

(2)、研究方法：我們以各種加熱方式加熱 PLA 線材及廢材，並嘗試分析其優缺點。

(3)、實驗記錄：

加熱方式	直接加熱	刀片加熱	熱水	吹風機	暖氣	鐵盤加水
功能	熔化 PLA		★ 軟化 PLA			
目的	混合物質	切割修補	軟化塑形	單點軟化	啟動 4D 效果	
照片						
備註	矽膠避免沾碗	會有破粒沾黏	穩定度高	風力影響	速度慢	速度快

圖三：不同加熱方式及效果

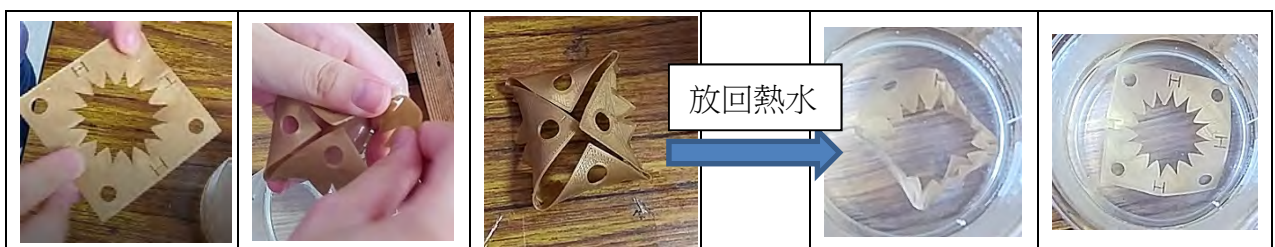
(4)、實驗結果：

① 加熱的方式很多，我們可以因應我們的需要(功能和目的)，選擇適合的加熱方式。

② 加熱過程的意外發現：

甲、若加熱超過 140 度 C，PLA 會直接熔化，沾黏在鐵碗上。

乙、若不超過 100 度 C，PLA 會變軟但不熔化。軟化後的 PLA 像紙柔軟，可重新替它塑形，冷卻後會乾掉變成新的形狀。若再度放回熱水，則會回到原來形狀！(如圖四)



圖四：PLA 遇熱軟化塑形成新形狀後，放入熱水再度恢復的效果。

### (三)、實驗結果討論：





1. PLA 是無毒、可分解的綠色塑料，安全性高，所以，我們的研究只聚焦在無毒的 PLA。
2. 加熱過程中，我們意外發現 PLA 除了固態、液態變化之外，還有一個玻璃轉化溫度：只要溫度高過玻璃轉化溫度，就能讓 PLA 這樣線性結構的聚合物鏈結鬆綁→產生軟化可塑形，但又不至於熔化的效果〔7〕。這部分的發現開啟了我們研究的新方向。。
3. 加熱方式各有其優缺點，以目標而言主要有兩種(熔化或軟化)，所以可視需求選擇使用。

## 二、PLA 厚度與溫度的關係 - 初試啼聲：

### (一)、研究原因：

在 PLA 加熱的測試中，我們發覺不同厚薄的 PLA 廢材丟入熱水時，它們的變化也不太一樣。因此，我們決定設計實驗測試 PLA 厚度與溫度之間的關係。

### (二)、研究方法：

❶列印不同厚度的薄片	➡	❷切割薄片	➡	❸固定薄片	➡	❹放入熱水觀察
一層為 0.2mm(0.2mm~1.4mm)		考量燒杯大小(0.5x5cm)		油土→橡皮擦		固定水溫(50~90 度 C)
						

圖五、PLA 厚度與溫度測試流程

### (三)、實驗測試紀錄：

#### 1. 實驗記錄

厚度 0.2mm	50 度 C	60 度 C	70 度 C	80 度 C	90 度 C
開始形變時間	3 分鐘	19 秒	3 秒	2 秒	2 秒
形變現象	捲曲	歪	塌	塌	波浪、脆裂
厚度 0.4mm	50 度 C	60 度 C	70 度 C	80 度 C	90 度 C
開始形變時間	3 分鐘	26 秒	5~6 秒	5~6 秒	3 秒
形變現象	歪.捲.旋	歪.旋.全軟	微扭捲	扭捲	扭捲
厚度 0.6mm	50 度 C	60 度 C	70 度 C	80 度 C	90 度 C
開始形變時間	無	1 分鐘	5~6 秒	4 秒	10 秒
形變現象	無	微歪	歪	軟	彎、塌
厚度 0.8mm	50 度 C	60 度 C	70 度 C	80 度 C	90 度 C
開始形變時間	無	3 分鐘	5~6 秒	4 秒	7 秒
形變現象	無	軟掉沒變形	歪	軟	彎、塌

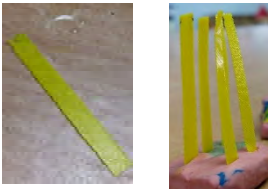

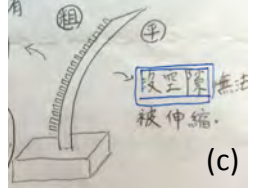


厚度 1.0mm	50 度 C	60 度 C	70 度 C	80 度 C	90 度 C
開始形變時間	無	無	3 分鐘	3 秒	3 秒
形變現象	無	軟掉沒變形	微歪	微彎	微彎

表一、PLA 厚度與溫度的第一次測試結果

## 2. 其他新發現：

我們發現 PLA 薄片在熱水中有時往右、有時往左邊傾倒。研究後我們發現：3D 列印出來的薄片，放入熱水後傾倒的方向通通都是「往平滑的那一面倒」。

原始 PLA 薄片	加熱後，會歪斜或扭轉(不同厚度效果不同)	
		
列印紋路不平滑有凹凸紋路	彎曲，甚至捲、旋轉來	我們的推測圖

圖六、PLA 薄片放入熱水的效果及原因推測(a)凹凸面和平滑面(b)PLA 捲旋(c)原理推測圖

## (四)、實驗結果討論：

### 1. 厚度會影響 3D 列印成品遇熱後的反應：

- ❶ PLA 遇到 50 度 C 的熱水，只有 0.2mm、0.4mm 會產生反應。
- ❷ 水溫若超過 80 度 C 以上，都能在極短的時間都能讓 0.2~1mm 的 PLA 快速軟化。
- ❸ 厚度越厚，PLA 薄片變形的幅度越少。越薄，一碰熱水就會整個捲旋起來(如圖六(b))。
- ❹ 0.2mm 過薄(只有一層)，易斷裂不適合做為我們研究的資料。

### 2. 實驗紀錄，我們只能用文字來描述「形變」(如表一)，實在很不具體。因此決定重新設計一個比較客觀的量化裝置來記錄 PLA 形狀的變化。

### 3. PLA 薄片「凹凸面」的縫隙比「平滑面」縫隙多(如圖六(a))，所以凹凸面的❶受熱面積多、❷可被拉開的空間多。因此，遇熱後就會往「平滑面」彎曲(如圖六(c))。

## 三、量化裝置設計：

### (一)、研究原因：

在進行 3D 測試時，我們很難形容這些線材在熱水中的變形狀況。所以，我們決定將量角器加入裝置中，同時不斷進行測試、修正，試著做出適合進行檢測的裝置。

### (二)、研究方法：透過操作的歷程發現幾個量化裝置應該修正的問題，進行一連串的修正

(三)、實驗測試紀錄及結果：

1. **固定基座** →目的：固定我們檢測物的裝置

	第一代	第二代	第三代	第四代
相片				
方式	用油土固定	用橡皮擦固定	以木板、熱融膠加入量角器	使用 ABS 樂高積木
缺點	油土會融掉	無法評估彎度	熱融膠不耐熱→裝置解體	拍攝角度、時間難抓

表二、角度測量架的進化史

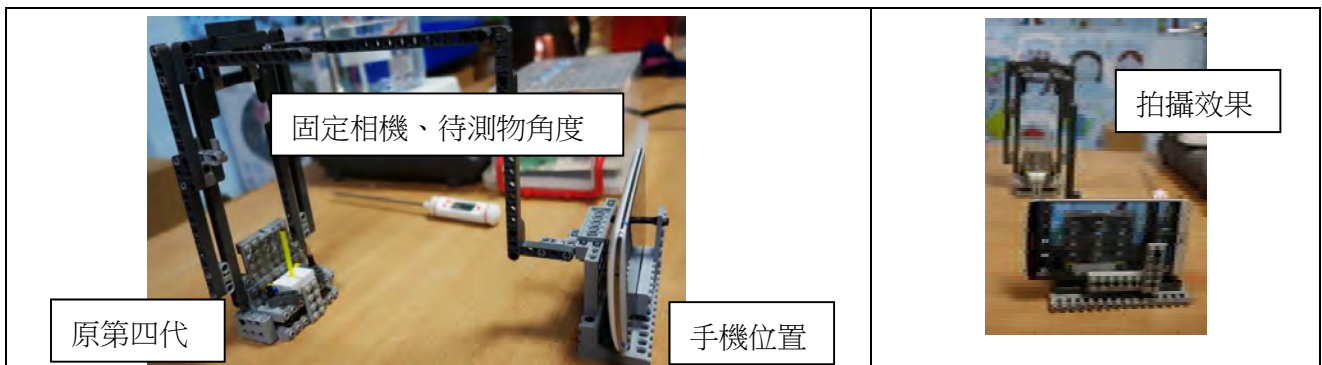
2. **焦距固定架** →目的：固定相機和基座的位子(角度的對焦固定)

完成基本基座(第四代)後，我們進行了幾次的測試。

發現：①我們要測量角度，所以**基座(物體)與相機的角度、相對位置應該要保持相同**。

②相機和待測物的**落水時間要一致**。

因此，我們決定繼續利用 LEGO 的零件將支架往外延伸，變成一個可放置手機的手機架，來確保相機和基座一同入水的時間差。形成我們的第五代裝置：**角度測量架**(如圖七)。



圖七、我們自型設計製作的角度測量架

(四)、實驗結果討論：

1. 角度測量架，由樂高組成，**拆卸和應用性都比較高**(可隨時替換橡皮擦、零件或重物)
2. 為了因應樂高零件為 ABS 的材料，耐熱性有限，**因此我們對溫度的測量範圍改成 50 度 C~80 度 C。不進行超過 80 度 C 的檢測工作**

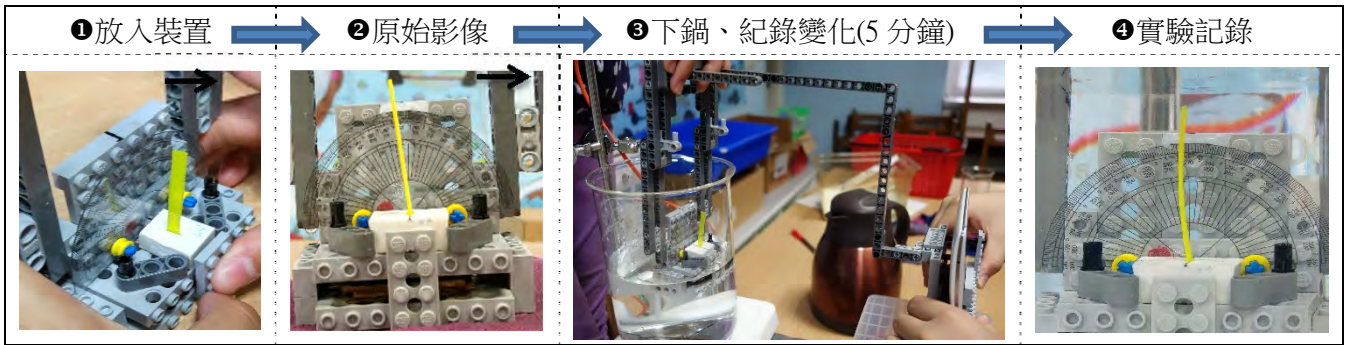
四、PLA 厚度與溫度的關係 - 進階版：

(一)、研究原因：

我們利用自製的檢測裝置 - 角度測量架，重新替不同厚度的 PLA 薄片進行檢測。



(二)、研究方法：



圖八、使用角度測量架進行實驗的檢測流程及方式

(三)、實驗測試紀錄及結果：

1. 溫度與厚度關係

◎水溫：50 度 C

厚度	0.4mm		0.6mm		0.8mm		1.0mm		1.2mm		1.4mm	
標準	時間	方向/角度	時間	方向/角度	時間	方向/角度	時間	方向/角度	時間	方向/角度	時間	方向/角度
紀錄	原始	右 1°	原始	左 4°	原始	左 7°	原始	右 6°	原始	左 4.5°	原始	左 1°
	1 分	右 1°	1 分	左 4°	1 分	左 7°	1 分	右 6°	1 分	左 4.5	1 分	左 1°
	2 分	右 1°	2 分	左 4°	2 分	左 7°	2 分	右 6°	2 分	左 4.5	2 分	左 1°
	3 分	右 2°	3 分	左 4°	3 分	左 7°	3 分	右 6°	3 分	左 4.5	3 分	左 1°
	4 分	右 2°	4 分	左 5°	4 分	左 7°	4 分	右 6°	4 分	左 4.5	4 分	左 1°
	5 分	右 4°	5 分	左 6°	5 分	左 6°	5 分	右 7°	5 分	左 4.5	5 分	左 1°
總度數	3 度		2 度		1 度		1 度		0 度		0 度	
備註	4 分 30 秒軟化加速		緩慢傾斜移動		變化小		變化小		無反應		無反應	

表三、0.4~1.4mm 厚度之 PLA 在 50 度 C 熱水裡的變化情形。

◎水溫：60 度 C

厚度	0.4mm		0.6mm		0.8mm		1.0mm		1.2mm		1.4mm	
標準	時間	方向/角度	時間	方向/角度	時間	方向/角度	時間	方向/角度	時間	方向/角度	時間	方向/角度
紀錄	原始	左 7°	原始	左 3°	原始	左 3.5°	原始	左 6°	原始	左 4.5°	原始	左 6°
	8 秒	左 5°	1 分	右 28°	1 分	右 16°	1 分	左 5°	1 分	正 0°	1 分	左 5°
	16 秒	右 5°	2 分	右 43°	2 分	右 26°	2 分	左 5°	2 分	左 1°	2 分	左 2°
	24 秒	右 30°	3 分	右 53°	3 分	右 27°	3 分	左 2°	3 分	右 2°	3 分	正 0°
	32 秒	右 60°	4 分	右 57°	4 分	右 27°	4 分	左 1.5°	4 分	右 3°	4 分	右 1°
	40 秒	到底	5 分	左 70°	5 分	右 27°	5 分	左 1°	5 分	右 4°	5 分	右 1.5°
總度數	傾斜到底 90 度		傾斜到底 90 度		30.5 度		5 度		8 度		3.5 度	
備註	全軟掉傾斜		全軟掉傾斜		傾斜有限度		傾斜角度小		先右再左再右		傾斜角度小	

表四、0.4~1.4 mm 厚度之 PLA 在 60 度 C 熱水裡的變化情形。

◎水溫：70 度 C

厚度	0.4mm		0.6mm		0.8mm		1.0mm		1.2mm		1.4mm	
標準	時間	方向/角度	時間	方向/角度	時間	方向/角度	時間	方向/角度	時間	方向/角度	時間	方向/角度
紀錄	原始	正 0°	原始	左 5°	原始	左 4°	原始	左 3°	原始	右 12°	原始	右 8°
	1 秒	扭轉	5 秒	左 63°	1 分	右 18°	1 分	右 3°	1 分	右 14°	1 分	右 10°
	2 秒	扭轉至底	10 秒	左 73°	2 分	右 19°	2 分	右 5°	2 分	右 15°	2 分	右 9°
			15 秒	左 78°	3 分	右 15°	3 分	右 2°	3 分	右 16°	3 分	右 6°
			20 秒	左 83°	4 分	右 13°	4 分	右 1°	4 分	右 17°	4 分	右 4°
		25 秒	左 88°	5 分	右 13°	5 分	左 1°	5 分	右 18°	5 分	右 3°	
總度數	傾斜到底 90 度		傾斜到底 90 度		29 度		12 度		6 度		9 度	
備註	全軟掉傾斜		全軟掉傾斜		傾斜幅度大		先向右再向左		傾斜幅度小		先向右再向左	

表五、0.4~1.4mm 厚度之 PLA 在 70 度 C 熱水裡的變化情形。

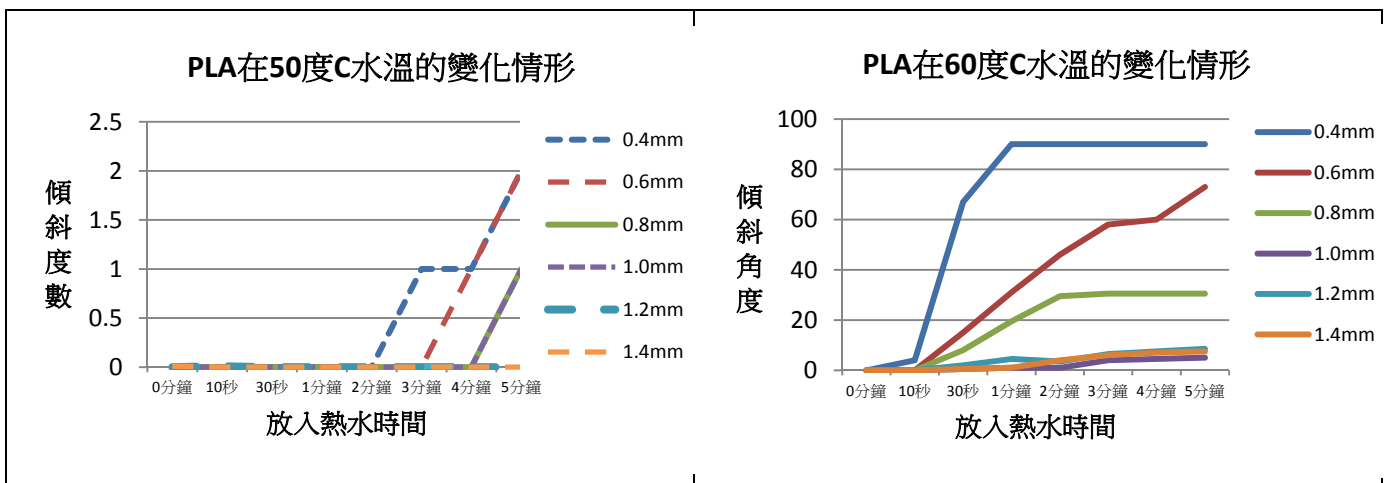
◎水溫：80 度 C

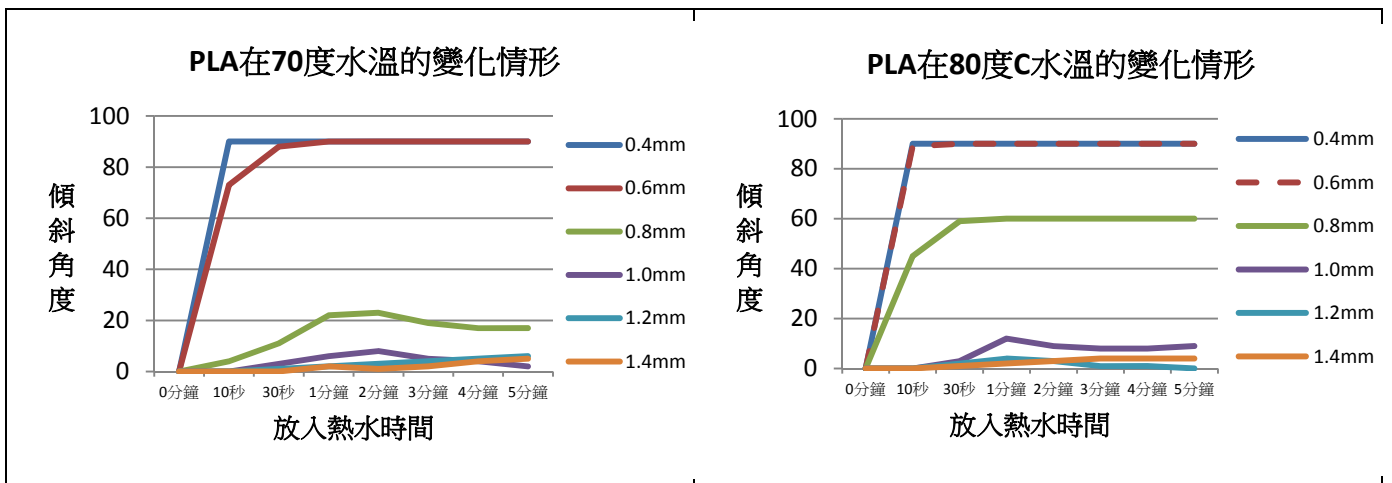
厚度	0.4mm		0.6mm		0.8mm		1.0mm		1.2mm		1.4mm	
標準	時間	方向/角度	時間	方向/角度	時間	方向/角度	時間	方向/角度	時間	方向/角度	時間	方向/角度
紀錄	原始	右 10°	原始	右 10°	原始	左 4°	原始	左 9°	原始	右 7°	原始	左 2°
	1 秒不到	到底	1 秒	左 20°	5 秒	右 35°	1 分	右 3°	1 分	右 11°	1 分	左 4°
	2 秒	到底	2 秒	左 85°	10 秒	右 45°	2 分	正 0°	2 分	右 10°	2 分	左 5°
			15 秒	右 51°	3 分	左 1°	4 分	右 8°	3 分	左 6°		
			20 秒	右 52°	4 分	左 1°	5 分	右 8°	4 分	左 6°		
25 秒			右 55°	6 分	正 0°	6 分	右 7°	4 分	左 6°			
總度數	傾斜到底 90 度		傾斜到底 90 度		59 度		11 度(右 9 左 1 右 1)		8 度(右 4 左 4)		4 度	
備註	全軟掉傾斜		全軟掉傾斜		傾斜角有限度		先向右再向左		先向右再向左		傾斜角度小	

表六、0.4~1.4mm 厚度之 PLA 在 80 度 C 熱水裡的變化情形。

(四)、實驗結果與討論：

為了方便討論，我們將上面的數字，重新繪製成折線圖來呈現薄片的變化情形，如下：





備註：因為有些線段數據資料剛好一樣重疊，為了讓線段顏色都出現，因此會以虛線呈現。

圖九、0.4~1.4mm 厚度 PLA 在 50~80 度 C 熱水中的變化折線圖

### 1. 溫度對 PLA 產生的影響：

- (1) 60 度 C 是一個對 PLA 產生較大幅度變化的關鍵溫度。(50 度 C 頂多傾斜 2 度)
- (2) 溫度越高，變化速度越快，開始變化的時間越早。

### 2. 不同厚度 PLA 遇熱的差異：

- (1) PLA 越厚，遇到熱水軟化時間越久、傾斜角度越少。且傾斜角度會因厚度而有限制。
- (2) PLA 越薄，遇到高溫(70 度以上)，幾乎都立即軟化捲曲，沒有形狀記憶效果-變不回來
- (3) 1mm、1.2mm、1.4mm 厚度對溫度的反應相似，而 0.4mm 和 0.6mm 的效果反應類似。

### 3. 其他發現：

- (1) 在實驗過程中，我們發現有一些薄片會先向右傾斜再向左傾斜回來。(1mm~1.4mm 都有出現類似狀態)。我們推測是這些較厚的 3D 列印產品(1mm 相當於 5 層)的紋路在軟化後不同層的紋路開始出現互相拉扯的狀態。
- (2) 1mm 是 PLA 的關鍵厚度，它遇熱(70 度 C)能軟化塑形但不會讓薄片扭曲變形的溫度。

## 五、PLA 線材與溫度的關係！

### (一)、研究原因：

3D 列印出來的薄片，多多少少會因為列印的層數、結構，產生差異。因此，我們決定直接用 3D 列印的線材(粗細大小一致)。再觀察這些線材在不同溫度中的變化。

### (二)、研究方法：

1. 直接將線材切成 5 公分一段(線材直徑皆為 1.75mm)
2. 將線材放入我們自製的角度測量架(0.5 公分插入橡皮擦中)，進入不同溫度熱水，5 分鐘後記錄其過程的變化。

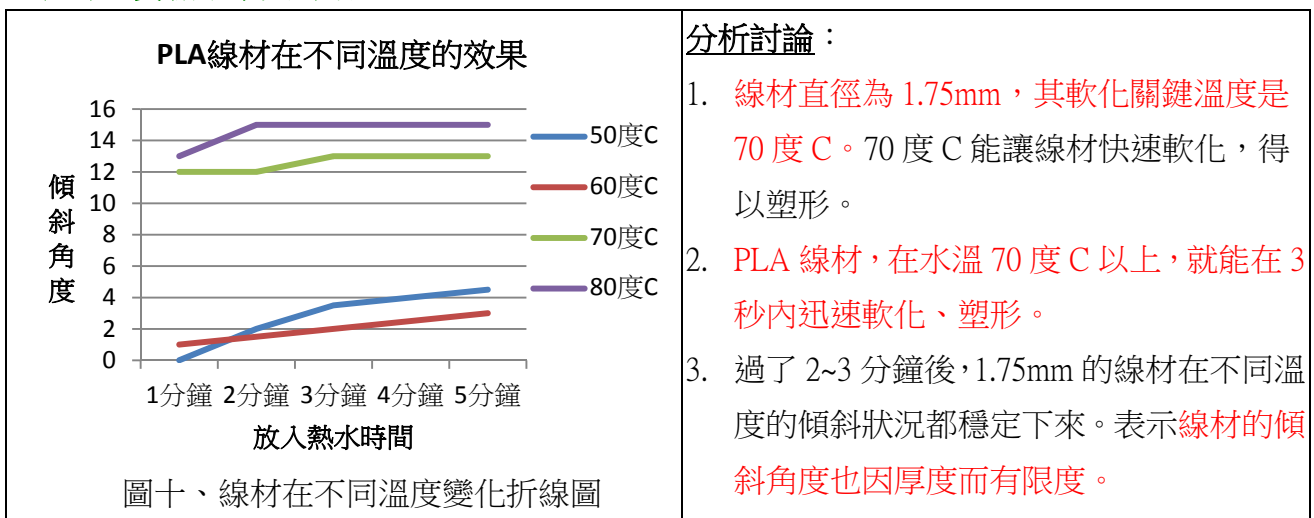
### (三)、實驗測試紀錄及結果：

#### 1. 線材與溫度的關係

溫度	50 度 C		60 度 C		70 度 C		80 度 C	
標準	時間	方向/角度	時間	方向/角度	時間	方向/角度	時間	方向/角度
紀錄	原始	右 1.5 度	原始	右 3 度	原始	0 度	原始	0 度
	1 分	右 1.5 度	1 分	右 2 度	1 分	左 12 度	1 分	右 13 度
	2 分	左 0.5 度	2 分	右 1.5 度	2 分	左 12 度	2 分	右 15 度
	3 分	左 2 度	3 分	右 1 度	3 分	左 13 度	3 分	右 15 度
	4 分	左 2.5 度	4 分	右 0.5 度	4 分	左 13 度	4 分	右 15 度
	5 分	左 3 度	5 分	正 0 度	5 分	左 13 度	5 分	右 15 度
總度數	4.5 度		3 度		13 度		15 度	
照片								
備註	1 分鐘後開始軟化		14 秒後開始軟化		3 秒後開始軟化		一下鍋就迅速軟化(1 秒內)	

表七、線材在不同溫度的變化情形

### (四)、實驗結果與討論：

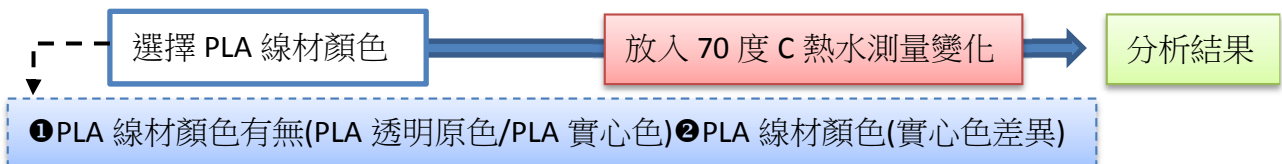


## 六、PLA 線材顏色與溫度的關係

### (一)、研究原因：

PLA 線材的顏色種類十分多，究竟 PLA 添加色素對溫度軟化效果會產生什麼影響？

### (二)、研究方法：

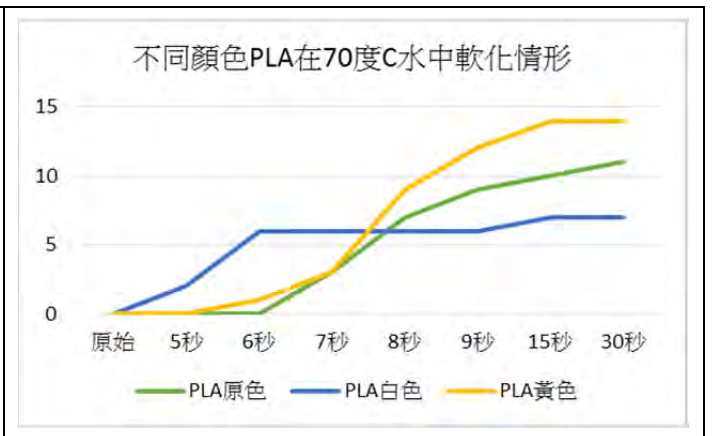
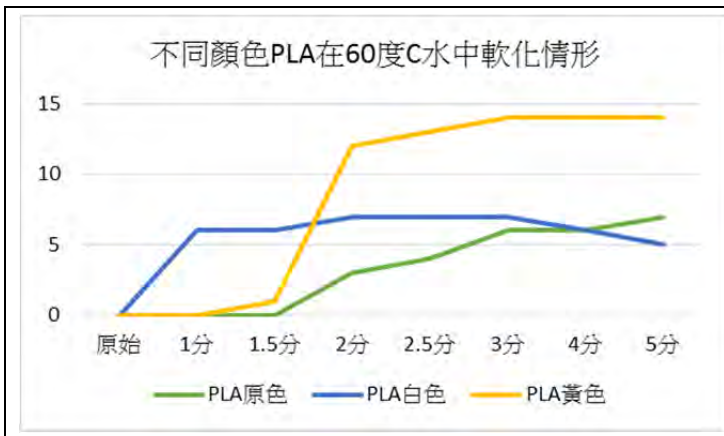


### (三)、實驗測試紀錄及結果：

#### 1. 不同顏色 PLA 與 60、70 度 C 水溫的關係

表八、線材顏色在不同溫度變化

60 度 C							70 度 C							
透明原色		實心白色		實心黃色			透明原色		實心白色		實心黃色			
意義		完全不加色素		添加色素			意義		完全不加色素		添加色素			
標準		時間	方向/角度	時間	方向/角度	時間	方向/角度	標準		時間	方向/角度	時間	方向/角度	
紀錄	原始	右 28	原始	右 9	原始	左 9	紀錄	原始	右 23	原始	左 4	原始	右 16	
	1分	右 28	1分	右 3	1分	左 9		5秒	右 23	5秒	右 2	5秒	右 16	
	2分	右 25	2分	右 2	2分	右 3		7秒	右 20	7秒	右 2	7秒	右 13	
	3分	右 22	3分	右 2	3分	右 5		9秒	右 14	9秒	右 2	9秒	右 4	
	4分	右 22	4分	右 3	4分	右 5		15秒	右 13	15秒	右 3	15秒	右 2	
	5分	右 21	5分	右 4	5分	右 5		30秒	右 12	30秒	右 3	30秒	右 2	
總度數	7 度		10 度		14 度			總度數	11 度		9 度		12 度	



圖十一、線材顏色在不同溫度變化折線圖

### (四)、實驗結果與討論：

- 線材顏色的選擇上，我們透過 FB 和 3D 印表機廠商(X 瑩科技)進行諮詢，決定選擇三種關鍵顏色：①PLA 的原色為乳黃偏透明(完全不加)、②PLA 的實心色(白色)(添加色素)、③PLA 的實心色(黃色)(添加色素)。藉由這三種 PLA 比較添加色素的多寡對 PLA 的影響。
- 不論是 60 或 70 度 C，這三種線材的軟化速度：白色 > 黃色 > 透明原色，可見沒有添加色素的原色 PLA 其玻璃軟化溫度比較高。而添加較多色素的白色，軟化的速度最快。

## 七、PLA 的形狀記憶效果分析

### (一)、研究原因：

在實驗過程中，很明顯發現 PLA 對溫度有高敏感的反應。同時，也會出現形狀記憶的效果：A 形狀→遇熱塑形→B 形狀→再遇熱→回到 A 的形狀。這讓我們十分驚豔！我們開始上網搜尋各項 PLA 和 SMP 的相關資料，比對我們的實驗經驗，試著解開這個概念的原理。

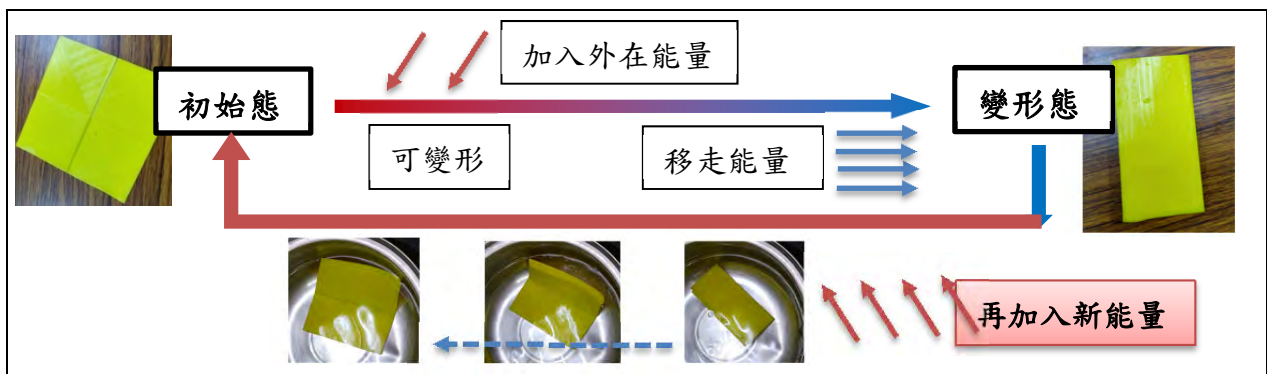


## (二)、研究結果與討論：

### 1. 「形狀記憶材料」與「智能材料」：

「智能材料」是一種可以感應外界刺激，自我判斷產生回應或變化，甚至具有自行修補和修復特質的材料。而「形狀記憶材料」是一種智能材料，他是因為有外加的能量，使材料本身由初始狀態產生變化成變形狀態。當我們移走能量時，他只會暫時停留在變形後的狀態。當我們再次給予相同的外在能量時，就能恢復到初始狀態。〔6〕

我們試著把形狀記憶和我們實驗時的效果進行比較，畫出形狀記憶流程(如圖十一)



圖十二、形狀記憶流程圖

### 2. PLA 高分子聚合物的特性：

PLA 是「線性結構的聚合物」而這類聚合物的鏈結類似手拉著手，而非互相交錯的網狀或結晶結構。因此，當 PLA 遇熱時，鏈結之間的流動機會較高，就比較容易產生形變。而使鏈結開始流動的溫度就是「玻璃轉化溫度」，也是我們啟動形變的關鍵溫度。

### 3. 3D 變 4D：

我們用 3D 列印時使用的線材—PLA，就能透過「熱」能量的給予和移除，讓 PLA 出現形狀記憶的效果。原形狀記憶和 3D 變 4D 原來不是遙不可及的素材。

## 八、PLA 載入新記憶—線圈與彈簧

### (一)、研究原因：

我們將 PLA 廢材丟入熱水測試的歷程中，意外發現有些 PLA 重新加熱後，竟然變不回原來狀態，這表示 PLA 的「初始態」可以改變！我們推測溫度和時間會是影響的關鍵，因此，進一步試著幫 PLA 找出重新載入新記憶的方式。

### (二)、研究方法：

1. 70 度 C 是線材軟化的關鍵溫度，所以我們將重新載入新記憶的溫度訂在 70~80 度 C。
2. 製作線圈(短)和彈簧(長)，利用其圈數、直徑和高度做為形狀記憶能力的量化依據。
3. 增加「耐受力測試」，將載入新記憶後的線圈(彈簧)放入熱水軟化後給予外力拉直，再重新丟回熱水。重複三次，看其效果。



4. 線圈/彈簧製作及實驗流程：

圖十三、載入新記憶實驗流程



備註：線圈為利用白板筆管(R=2cm)繞三圈的成品。彈簧有兩種：①10圈(R=2cm) 和 ②1圈(R=0.7cm)

(三)、實驗測試紀錄及結果：

1. 不同水溫、時間載入新記憶的定型效果 PART1 - 線圈

溫度	直徑 2 公分 / 70 度 C 水定型					直徑 2 公分 / 80 度 C 水定型				
	30 秒	1 分鐘	1.5 分鐘	2 分鐘	2.5 分鐘	30 秒	1 分鐘	1.5 分鐘	2 分鐘	2.5 分鐘
原始照片										
圓圈	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
直徑 cm	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
高度 cm	0.6	0.6	0.6	0.8	0.6	0.8	0.8	1.1	0.6	0.6
一次放入 70 度 C 熱水，看其效果										
後來照片										
圈數	1	2	3	3	3	3	3	3	3	3
直徑 cm	4	2.7	2.25	2.25	2.2	2.3	2	2	2	2
耐受力測試→加熱拉開→重複放入 70 度 C 熱水 3 次，看其效果										
拉開三次後照片										
圈數	1	1.5	3	3	3	3	3	3	3	3
直徑 cm	5	3.1	2	3	2.3	2.5	2.4	2.1	2.1	2.1
高度 cm	0.15	0.75	2.1	2.7	2.25	2.5	2.5	2.6	1.8	1.7

表九、不同水溫時間載入新記憶效果(線圈部分)

結果：70 度 C 的熱水定型效果並不好，要幫 PLA 載入新記憶，**基本定型溫度為 80 度 C**

2. 80 度 C 水溫載入新記憶的定型效果 PART2 - 彈簧

溫度	直徑 0.7 公分 / 80 度定型			直徑 2 公分 / 80 度定型		
	3 分鐘	5 分鐘	7 分鐘	3 分鐘	5 分鐘	7 分鐘
原始照片						
長度	8 公分	3.7 公分	3.9 公分	2.5 公分	2 公分	2 公分
圈數	21 圈	21 圈	21 圈	10 圈	10 圈	10 圈

第一次放入 70 度 C 熱水，看其效果						
照片						
長度	11.5 公分	6.5 公分	5.2 公分	11.3 公分	2.2 公分	2 公分
圈數	11 圈	21 圈	21 圈	7 圈	10 圈	10 圈
耐受力測試→加熱拉開→重複放入 70 度 C 熱水 3 次，看其效果						
照片						
長度	23 公分	13.4 公分	8.5 公分	14.1 公分	5.4 公分	4 公分
圈數	14 圈	19 圈	19 圈	6 圈	9 圈	10 圈

表十、不同水溫時間載入新記憶效果(彈簧部分)

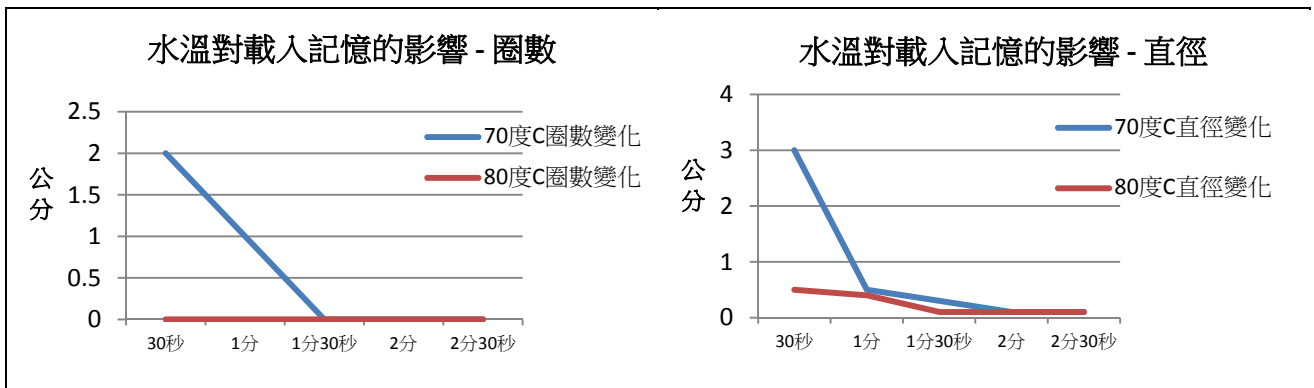
3. **小插曲**：定型過程中因為鐵夾子直接夾到 PLA 上，持續定型後→我們的 PLA 彈簧竟然有熔掉變形的情形(如圖十四)。



圖十四、融掉變形的 PLA

(四)、實驗結果與討論：

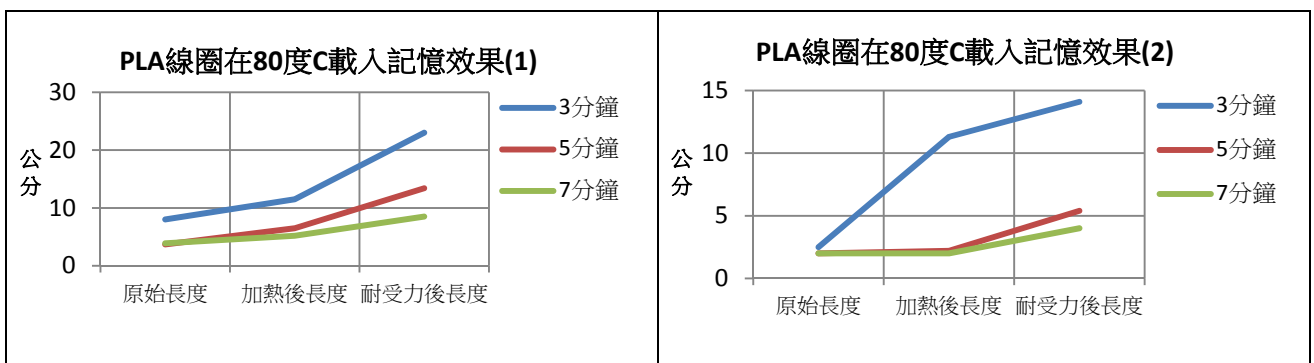
1. 水溫對定型效果的影響：



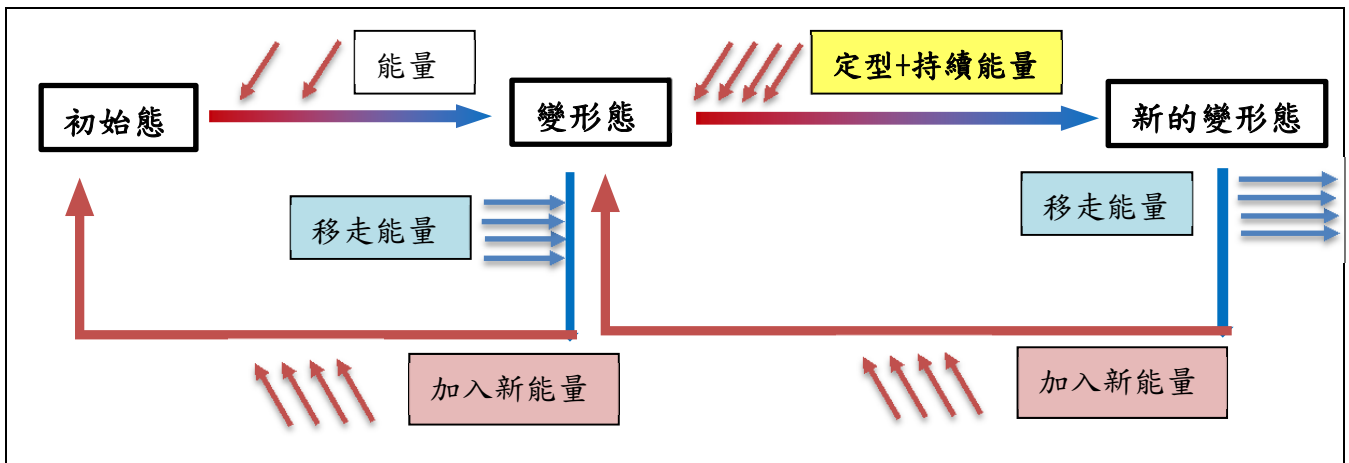
圖十五、水溫對載入新記憶效果的影響(圈數、直徑)

- (1) 80 度 C 的熱水能在 30 秒內將 PLA 線圈的圈數固定，且直徑的變化幅度小。  
 (2) 溫度越高、時間越久，載入新記憶的效果會越好(但，溫度過高，注意熔掉變形的問題)。

2. 時間對 80 度 C 的熱水載入新記憶效果測試：圖十六、加熱時間對載入新記憶效果的影響



- (1)以 80 度 C 的熱水載入記憶，放入熱水的時間越長，載入記憶的效果越好。
- (2)耐受力測試中發現，當我們一直重複用熱水軟化→拉開冷卻→再度丟入熱水的歷程。他原有的記憶會出現類似彈簧「彈性疲乏」的狀態，記憶效果還是會越來越差。
- 3.當我們把載入新記憶的模式放入形狀記憶效果的概念，PLA 可應用的範圍又會再度增加！



圖十七、載入新記憶與形狀記憶的概念結合

- 4.載入新記憶除了溫度和時間，如何「定型」也是關鍵(我們通常都用膠帶或鋁片協助)。

## 九、3D 變 4D — PLA 的形狀記憶效果

### (一)、研究原因：

在搜尋形狀記憶與 3D 時，常能看見 4D 的字眼。4D 簡單的說是除了基本三維之外，再增加一個新的維度，讓物品具有「活」起來的效果〔24〕。這個維度不是空間，可能是時間、溫度、壓力、水分…等。因此我們練習操作 PLA 形狀記憶的效果，試著發覺其使用限制。

### (二)、研究方法：

我們搜尋網路比較有特色的 4D 成品資料。重新利用 PLA 嘗試製作，看其效果及問題。

### (三)、實驗測試結果：






#### 1. 巴黎鐵塔，變直！

**網路資料來源**：MIT NEWS (2016.8.26)

**說明**：這是 MIT 在 2016 年發表的資料〔8〕。圖片中原本彎曲的巴黎鐵塔，竟慢慢變直。

**研究方法及結果**：

- (1)我們直接用 3D 列印的網路圖庫列印出巴黎鐵塔的模型。(圖來自 [www.thingiverse.com](http://www.thingiverse.com))
- (2)將巴黎鐵塔頭部泡熱水讓其軟化後，折彎。
- (3)將巴黎鐵塔放置在透明的圓桶中，利用吹風機加熱。看其效果。

原有網路效果	我們的實驗測試結果			
<a href="https://www.youtube.com/watch?v=SpgHwtdRdCI">https://www.youtube.com/watch?v=SpgHwtdRdCI</a>	10 秒	20 秒	30 秒	40 秒
				

**實驗討論：**

圖十八、巴黎鐵塔變直測試

(1) PLA 巴黎鐵塔在吹風機加熱下，的確能慢慢恢復彎曲度。但：**❶**鐵塔頭部無法像影片大幅度彎曲、**❷**我們復原的狀態沒有很好，彈回來需要較久的時間。

(2)思考差異：巴黎鐵塔頸部無法摺下去和體積的大小、繪圖結構、材質都有影響。

**❶**巴黎鐵塔可列印小一些，讓遇熱反應變迅速。頸部要多留一些空間，才容易折彎它。

**❷**PLA 雖然具有形狀記憶的效果，但越立體的東西我們在形狀改變上的限制較多。

**2. 自動升起的彈簧！**

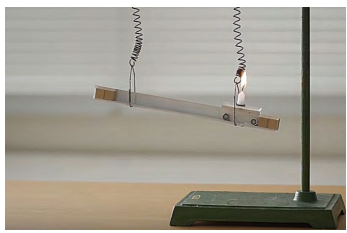




**網路資料來源：**未来の科学者たちへ(2013)〔17〕

**說明：**這個影面呈現的是形狀記憶合金的效果，我們覺得 PLA 線材應該也可以試試看。

**研究方法及結果：**

(1)我們利用重新記憶載入的方式，將 PLA 線材繞成像彈簧的形狀。

(2)將彈簧下方夾上鐵夾子，當作重物，以吹風機加熱，看重物是否順利移動。

原有網路效果	我們的實驗測試結果				
<a href="https://www.youtube.com/watch?v=Aycf46ocKxA">https://www.youtube.com/watch?v=Aycf46ocKxA</a>	一開始	10 秒後	20 秒	30 秒	結果
					<b>❶</b> 前 10 秒反應迅速，鐵夾快速往上移動！ <b>❷</b> 20 秒後開始下拉

圖十九、彈簧裝置製作

**實驗討論：**

(1)PLA 彈簧的效果：

**❶**彈簧經過吹風機加熱，會慢慢往上縮回，同時將下方的重物-鐵夾子往上移動。只是，PLA 加熱時間一長，彈簧就軟掉，加上重物(鐵夾子)往下拉，PLA 反而被拉長。

**❷**吹風機有缺點：它的風力，會讓彈簧晃動，反而對彈簧產生拉扯。

(2)思考差異：

**❶**記憶合金耐高溫，所以，遇到蠟燭的熱會加速縮回原樣，不至於產生另一次形變。但，PLA 若接受過高的溫度，反而會引發另一次形變的產生-除非改變 PLA 的性質。





### 3. 秘密字

**網路資料來源**：MIT VIEDO(2013)〔8〕

**說明**：這是 MIT 針對 4D 列印發表的想法和成品，我們覺得 PLA 應該也做得到。




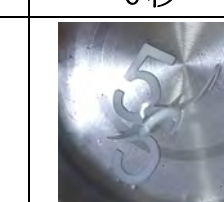
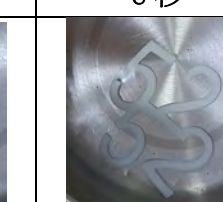
**研究方法**：(1)我們自己設計字，以 3D 列印機列印出來。

(2)放入熱水，讓字軟化得以隨意捏塑變形。最後重新丟入熱水，看其恢復效果

原有網路效果	我們的研究方法		
	列印字(1mm)	加熱後重塑型	再放回熱水
<a href="http://digi.163.com/13/0228/06/8OPFROJA001665EV.html">http://digi.163.com/13/0228/06/8OPFROJA001665EV.html</a> 			

圖二十、秘密字的製作方式(522 和 Jill)

**實驗記錄**：

時間	一開始	2 秒	4 秒	6 秒	8 秒
照片					

圖二十一、秘密字「522」放入熱水的效果

**實驗討論**：

(1)PLA 秘密字的效果：看著字自動在熱水中翻轉打開，真是令人驚豔！原來，這就是所謂利用「溫度」當一個維度產生的 4D 效果。

(2)思考差異：

- ①我們發覺字型的設計需要朝「一筆畫」方向前進。例如：照片中的 522 軟化塑形模式是揉成一團，但 JILL 則可以拉成一條線。所以秘密性更高。
- ②未來可嘗試利用粗細差異來連結或放置轉彎處，避免拉成直線時被轉彎處卡住或斷裂。


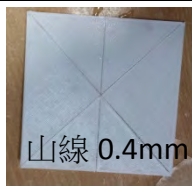



### 4. 天啊！自動摺紙

**網路資料來源**：壹讀：塑料片遇熱水，瞬間變身「千紙鶴」(2016.1)〔21〕

**說明**：這是浙江大學提出的一種新型形狀記憶塑料，能「植入」多次複雜的形狀記憶，產生的塑料放入 60 度 C 熱水中，會自動摺紙，變成紙鶴的效果。

### 研究方法：






- (1)我們試著將摺紙和 3D 列印結合，利用 PLA 的厚薄做為摺紙的山線谷線(0.4mm)。
- (2)放入熱水，整張 PLA 薄片(1mm)得以軟化捏塑變形。重新丟入熱水，看其恢復效果。
- (3)透過載入新記憶，讓平整的 PLA 丟入水中產生自動摺紙的效果。

原有網路效果	我們的研究方法			
<a href="https://read01.com/KDkmPO.html">https://read01.com/KDkmPO.html</a>	PLA 1mm	→	放入熱水塑形	
				

### 實驗記錄：



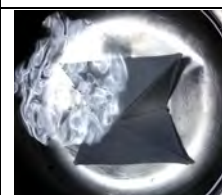
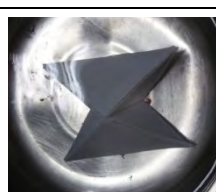
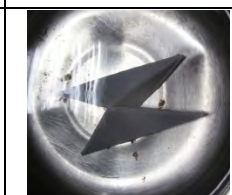
圖二十二、摺紙實驗的研究流程

#### (1)摺紙「打開」

1 秒	2 秒	3 秒	4 秒-結束	PLA 的厚度為 1mm 若太薄會整個捲起
				

圖二十三、摺紙實驗 - 放入熱水打開的效果

#### (2)水中「自動摺紙」

載入新記憶	1 秒	4 秒	7 秒	13 秒-結束
				

### 實驗討論：

圖二十四、摺紙實驗 - 放入熱水自動摺紙的效果

#### (1)摺紙效果分析：

- ①我們真的能用厚薄來控制 PLA 摺紙效果！以整張 PLA(1mm)來看，我們只需把摺線那一部分的 PLA 變薄(0.4mm)，就能在軟化後自動成為摺紙時的山線或谷線！
- ②PLA 摺紙厚度若太厚，無法產生摺線。但，若厚度小於 1mm 時，PLA 一遇到熱水就立即捲曲，無法摺紙。因此，建議厚度不要低於 1mm，溫度不要超過 70 度 C 為宜。

(2)思考差異：我們在繪製 123design 時只要多加變形，應該也有機會做出自動摺紙的紙鶴。



## 十、PLA 的創新應用

### (一)、研究原因：

從 PLA 形狀記憶效果研究開始，到嘗試模擬網路上形狀記憶金屬或塑料的實驗，其實 PLA 真的是一個值得研發又簡單成形的形狀記憶塑料。因此我們想進一步找出其他新應用。

### (二)、研究方法：從 PLA 的特性切入，我們將研究的方式鎖定在生活應用的主題。




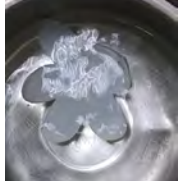





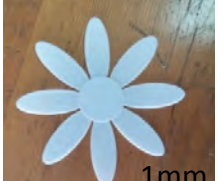
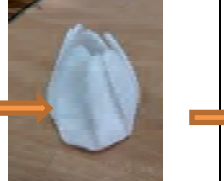

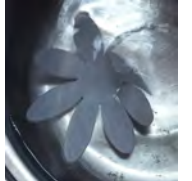

### (三)、實驗測試結果：

#### 1. PLA 新應用(1)- 花語寄情：

**研究原因與方法**：因 PLA 薄片遇熱時會軟掉展開，讓我們想到「花朵綻放」概念。因此，我們繪製花朵的平面圖，透過載入新記憶的方式，讓花遇熱後可打開或閉合。

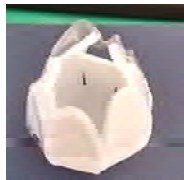




#### **實驗結果**：

(1)花朵繪製的效果：我們嘗試了幾種花朵的繪製模式，檢驗其開花效果！

原始列印(1mm)	塑形(摺好的)效果	放入熱水			效果分析
		剛入水即打開	1 秒	2 秒恢復	
					花朵太胖 難塑形
					速度太快 花密合度差
					密合度及速度佳，效果最好。

圖二十五、不同花形設計的效果

(2)平面變立體 - 花朵立體化：我們以 1mm，8 片花瓣為基礎。試著逆向操作！

熱水塑形	載入新記憶	熱水軟化	放回熱水	
膠帶固定	(15 分鐘)	壓克版壓平	一下水	8 秒恢復
				






圖二十六、花朵載入新記憶流程

### (3)新加熱方法：

在實作的歷程，我們發現以「熱水」進行實驗的缺點：**水的浮力**，花朵放入水中時，往往因浮力太大，讓花倒掉。**水的高度**，水必須整個蓋住立體的花朵，不然無法順利變形。**水的壓力**：水本身的壓力，也會影響到花朵打開的狀態。







因此，我們增加了另外兩種不同的加熱方式，來減少水加熱造成的問題。

- ① 暖爐加熱：木板導熱速度慢，加上透明的壓克力罩子來維持一定的溫度。

暖爐加熱 透過木板和壓克力板	花朵→開花效果			
	10 秒	20 秒	30 秒	40 秒~1 分 10 秒
				

圖二十七、暖爐加熱法：利用暖爐進行花朵的加熱

- ② 鐵盤加熱：先在鐵盤鋪上一層水(避免 PLA 花沾在盤子)，再置於黑晶爐上快速加熱。

鐵盤加熱 鋪一層水，防 PLA 熔掉	花朵→開花效果			
	一開始	2 秒	3 秒	5 秒結束
				
平面的花朵→閉合產生立體效果				
一開始	4 秒	8 秒	12 秒	14 秒結束
				

圖二十八、鐵盤加熱法：利用鐵盤上加水再加熱。

### 實驗結果分析：

- (1) PLA 花語寄情是一個很成功的產品！我們選擇厚度 1mm、8 片花瓣、中心保留圓形的花為基礎，在 70 度 C 水溫中因形狀記憶和載入新記憶的效果可自由綻放或閉合。
- (2) 鐵盤加熱效果最好，加熱速度快、開花效果佳！PLA 除底部外，都不會沾到水！




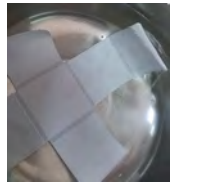
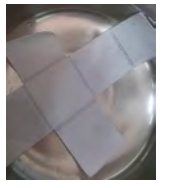
2. **PLA 新應用(2) - 立方體展開**：

**研究原因與方法**：這樣平面、立體的轉換很像我們數學課裡的「立方體 $\leftrightarrow$ 展開圖」的概念。

所以，我們試著繪製正立方體的平面圖，觀察其變形效果。

**實驗結果**：

(1) 立方體 $\rightarrow$ 平面展開圖

熱水軟化後 $\rightarrow$ 將立體圖定型	放回熱水-變回立方體效果			
	4 秒	6 秒	11 秒	14 秒
				

圖二十九、PLA 立方體在水裡自動張開的效果

(2) 展開圖 $\rightarrow$ 立體圖

定型加熱 $\rightarrow$ 載入記憶完畢	加熱軟化後 壓扁塑形	放回熱水 - 立方體展開		
		1 秒	2 秒	5 秒(無法變回)
				



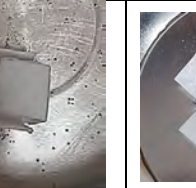
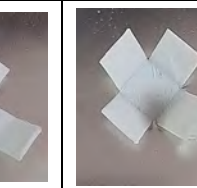


圖三十、PLA 展開圖自動在水裡摺起來的效果

這一塊太重，翻不了

**實驗結果分析**：

(1)由立體變成平面容易，但要從平面變成立體很難。特別是立方體因為水壓和 PLA 本身的重量，讓最後閉合的動作就很困難。

(2)為了解決問題，我們進行修正 $\rightarrow$ 縮小減輕重量。立體方在水中的展開效果就很好。

縮小重量放回熱水 - 立方體展開			減少水的壓力-改用鐵盤加熱		
一入水	不到 1 秒	4 秒(蓋上了)	1 秒	8 秒	20 秒(不動了)
					

圖三十一、縮小 PLA 體積改變加熱方式後的立方體效果

(3)未來我們可以嘗試加入一些磁性物質在邊線，讓立方體的密合度更好。



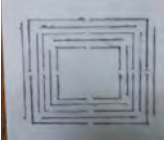

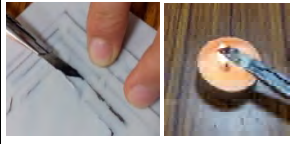


3. **PLA 新應用(3) - 7-11 便當提袋**：

**研究原因**：我們試著從生活中尋找需要平面↔立體互換的物品，突然想到 7-11 布織布的便當提袋。它很方便，但用一次就會變形。也許，PLA 能解決不織布變形的問題。





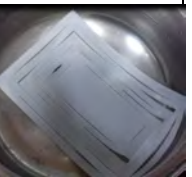
**研究方法**：(1)製作 PLA 提袋(直接切割或用 123Design 繪圖)。(2)加熱嘗試效果。

**實驗結果**：(1)PLA 便當袋製作過程

7-11 便當袋		(一)PLA 上畫線切割	(二)用 1.23D 繪圖	修正錯誤
原樣	使用後被撐開	切割→慘!裂開	產圖測試	美工刀+蠟燭
				

圖三十二、PLA 便當提袋歷代製作方式及效果

(2)測試結果

拉開後成品	放回熱水效果			
每次都有不同造型、可裝重物	1 秒	7 秒	13 秒	20 秒-結束
				

圖三十三、PLA 便當提袋的效果及收納






**實驗結果分析**：

- PLA 的便當袋效果很棒！我們一直重複測試發現：
  - 它可以提重物。
  - 一冷卻乾掉就變得很硬。
  - 遇熱可立即回復平整。
 只可惜，我們的鍋子太小了，3D 印表機無法畫更大的來嘗試。但，這絕對是可以繼續開發的好產品！
- 除了可以用繪圖軟體繪製我們需要的圖來製作 PLA 圖形之外，我們發現。我們也能用蠟燭將美工刀刀片加熱就能輕鬆的劃開/壓開 PLA，也不用擔心 PLA 破裂的問題。甚至，當 PLA 破裂時，加熱的刀片壓上去也是一個好方法。

4. **其他廢材的再應用**：

**研究原因與方法**：回到廢材的應用，我們覺得最值得發揮的是印表機下底盤的底線。寬度、形狀固定。因此，我們將它拆下來，進行測試

**實驗結果分析**：取材方便，但因較細較薄，因此，拉太用力反而容易在轉折處斷裂。

底盤的線	軟化拉開	再度放回熱水(不到 1 秒)			分析
					1 秒內底線快速變回，適合取代「橡皮筋或打包帶」唯，易於轉折處斷裂！

圖三十四、3D 列印廢材的應用

#### (四)、實驗結果與討論：

1. **PLA 形狀記憶的特性在薄片上的應用較廣**。因當我們再加入發現的「形狀再記憶」後，就能把焦點放在「平面變成立體」、「立體變成平面」互換的應用。整個 PLA 的價值就會提升更多。其中：**便當提袋、花語寄情，是效果最好的產品，值得被推廣出去。**
2. 從這些應用中，我們延伸出新的加熱方式。
  - (1) **暖氣加熱**：速度較慢，但能保持完全乾燥的狀態。
  - (2) **鐵盤加熱**：水量少、加熱速度快，且無須克服水壓問題，僅底部沾濕，效果極佳。
 掌握這些加熱方式的優缺點，我們就能配合設計，產出更適合的作品。

### 十一、改不改 - 學問大不同：PLA 性質的改變

#### (一)、研究原因：

PLA 除了形狀記憶能力之外，我們發現 PLA 的作品在本身性質上的缺失，例如：太硬易脆，比起一般的塑膠，PLA 的彈性和延伸能力的確不足。難怪，歷屆科展大多為改變性質而努力。因此，我們也試著加入各種可能產生反應的物質(如：白膠、PVA、關華豆膠、麵粉……等)，慢慢鎖定三大類：**矽膠、粉末類(加入矽膠)、熱塑水晶**，進行深入研究。





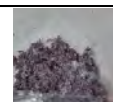






#### (二)、研究方法：

1. 我們將 **PLA 的廢材** 以鐵碗直接在黑晶爐上加熱至 140 度 C 以上
2. PLA 熔化後再分別加入矽膠、粉末與矽膠、熱塑水晶〔1〕，攪拌均勻壓製成「片」測試

#### (三)、實驗測試結果：

##### 1. **PLA 與矽膠**

我們將矽膠混入 PLA 中，因為**矽膠耐高溫又無毒**。所以，變成我們測試時的第一考量。





PLA：矽膠		純 PLA	8：1	8：2	8：4	8：8	
照片	肉眼						
	放大鏡						
效果	硬度	硬					軟
	矽膠殘留	無	無	少	多	超多黏手	
	表面	光滑	有紋路	紋路	粗糙	顆粒	

入熱水	散開	無	無	無	無	不成形 無法檢測
	變軟	有	有	有	有	
	纖維狀	無	無	有層理	明顯層理	

表十一、PLA 與不同比例矽膠結合效果

## 2. PLA 混合粉末與矽膠

有人因為塑膠的成本貴，就會改放一些澱粉〔14〕，增加體積來降低成本。很難想像澱粉和塑膠的混合，因此，我們以矽膠做為中介，混合幾種粉末看其效果。其中，高嶺土和麵粉有較佳的效果，如下。

粉末	PLA+高嶺土+矽膠		PLA+麵粉+矽膠	PLA+麵粉+矽膠
配方	PLA 多	PLA 少	麵粉量少	麵粉量多
照片				
效果	很軟會裂開 像紙漿效果/防水	很硬 像磁磚/防水	很硬 龜裂少乾黏土/防水	很硬 裂成一塊塊/防水

圖三十五、PLA 與不同粉末和矽膠混合後效果

## 3. PLA 與熱塑水晶

PLA 和熱塑水晶本身都是一種聚酯，所以它們混合的效果比其他的都好很多。

PLA : PCL	純 PLA	8 : 4	8 : 6	8 : 8	8 : 12	8 : 18	8 : 24	8 : 36	純 PCL
軟硬	硬	→							軟
延展	無		一點點		→				佳
熱水中	仍維持形狀					不成形			
形狀記憶	有		一點點		無				
軟化速度	大於 1 分鐘		30 秒內						5 秒內
乾掉速度	超快	1 分 02	1 分 29	1 分 22	2 分	4 分 38	5 分 02	6 分 19	6 分 40
黏性	無法檢測 - 無法黏在木頭上					2 分 21	2 分 09	32 秒	21 秒

註：黏性的測量是將混合物夾在兩片木板中，吊掛重物，測兩片木板分開的秒數

表十二、PLA 和不同比例 PCL 混合效果

### (四)、實驗結果與討論：

#### 1. PLA 加入矽膠效果分析：

- (1) 矽膠加入 PLA 加熱時，優點是：① PLA 較易攪拌、② 鐵碗變得容易清理。因此我們之後的實驗都會在鐵碗上塗上一小層矽膠，方便清理。
- (2) 矽膠量越多，「矽膠 PLA」越軟，成品表面越粗糙，推測是矽膠隔絕了 PLA 之間相融



(3) 最特別的是只要以高於 8：2 的比例，成品竟然會出現「層理」- 像肉乾一樣(如圖三十六)，我們用放大鏡觀察，發現中間藏了很多的乾掉的矽膠(白)。也因為如此，才會讓結構變軟鬆散。



圖三十六、肉乾狀結構

## 2. PLA 加入粉末與矽膠效果分析：

雖然加入粉末這一塊，並沒有出現令人驚奇的成效。但，其中高嶺土加熱後不但不會產生豆膠或麵粉的臭味，他的成品可因為矽膠含量而有軟硬的差異，能產生類似紙漿的效果同時又能防水。反而讓人覺得真的可以用來取代掉塑膠，值得繼續開發。

## 3. 熱塑水晶加入PLA效果分析：

(1) 熱塑水晶(PCL)和 PLA 很多特性幾乎是在天平的兩端，所以混合後各有其優缺點

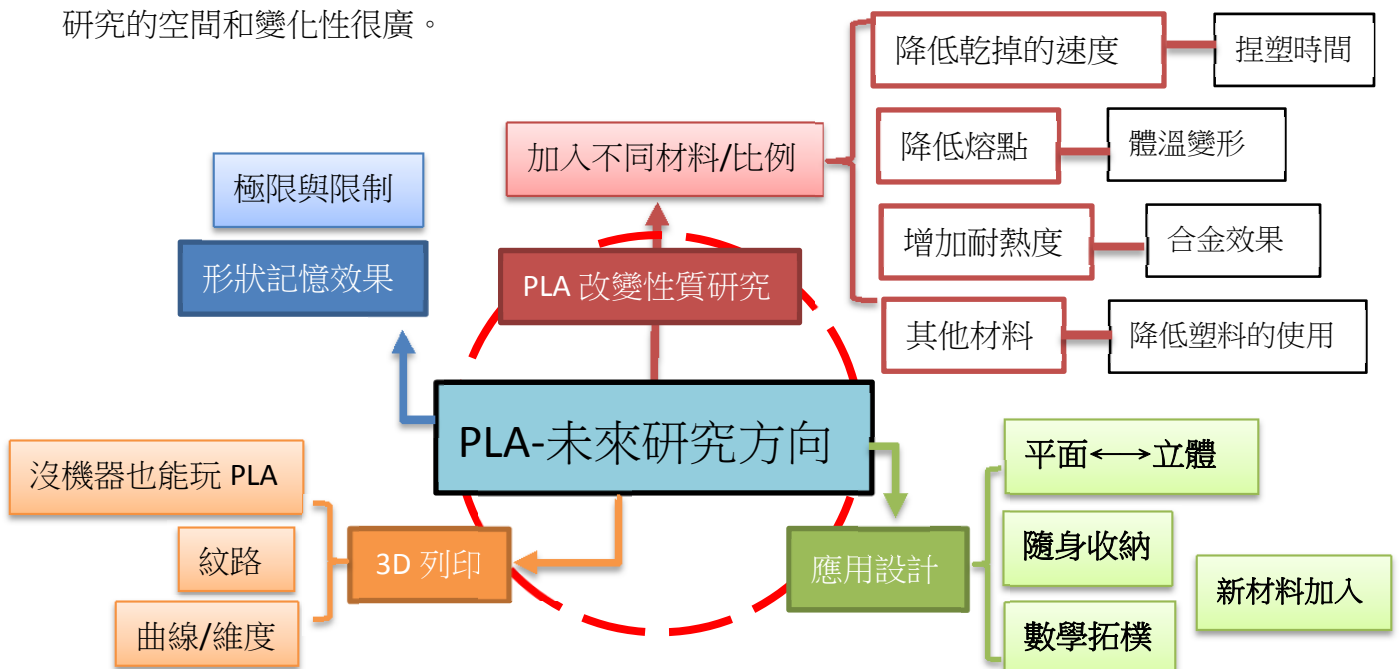
	PLA	PLA 混合熱塑水晶	熱塑水晶
硬度	硬	—————>	軟
延展	差	—————>	佳
形狀記憶	有	—————>	無
黏性	無	—————>	有
乾掉速度	快	—————>	慢
加熱軟化速度	慢	—————>	快

(2) 若 PLA：熱塑水晶在 8：12 ~ 8：18 的比例時，剛好會介於能在熱水中維持一定形狀，又能有黏土捏塑狀態的效果，值得我們未來繼續研究。

## 十二、未來研究方向

### (一)、未來研究架構：

PLA 這一部分的研究，從原來覺得變化性應該不大。到一堆檢驗和測試後，發覺其實 PLA 研究的空間和變化性很廣。



## 伍、結論

我們本次的研究以 PLA 為中心，首次發現 PLA 透過溫度就能產生形狀記憶的效果。延續這個發現，我們進一步找出溫度對 PLA 厚度、顏色的形變影響，如下：

### 一、溫度對 PLA 厚度、顏色的形變效果：

#### 1. PLA 厚度與溫度的關係：

- (1) 60 度 C 是讓 PLA 產生軟化、形變的基本溫度。
- (2) 水溫越高，PLA 開始軟化的速度越快！
- (3) PLA 越薄，形變的角度越大。越厚，則能維持一定的形變角度---穩定度高。
- (4) PLA 線材直徑為 1.75mm，使用時水溫高於 70 度 C 較適合，其形變也有限度。

#### 2. PLA 線材顏色與溫度的關係：

- (1) PLA 色素的量：PLA 原色 < PLA 實心色(黃) < PLA 實心色(白色)。而這些顏色線材產生形變的速度剛好是 PLA 實心色(白色) > PLA 實心色(黃) > PLA 原色，可見色素含量越高，反而會讓 PLA 的玻璃轉化溫度降低。因此，實心色(白色)PLA 的軟化速度都會最快！

#### 3. 其他：以 3D 列印機列印的 PLA 薄片會有一面凹凸、一面平滑，遇熱時，凹凸面受熱面積大，軟化較快。所以，PLA 遇熱都會往平滑面傾斜。

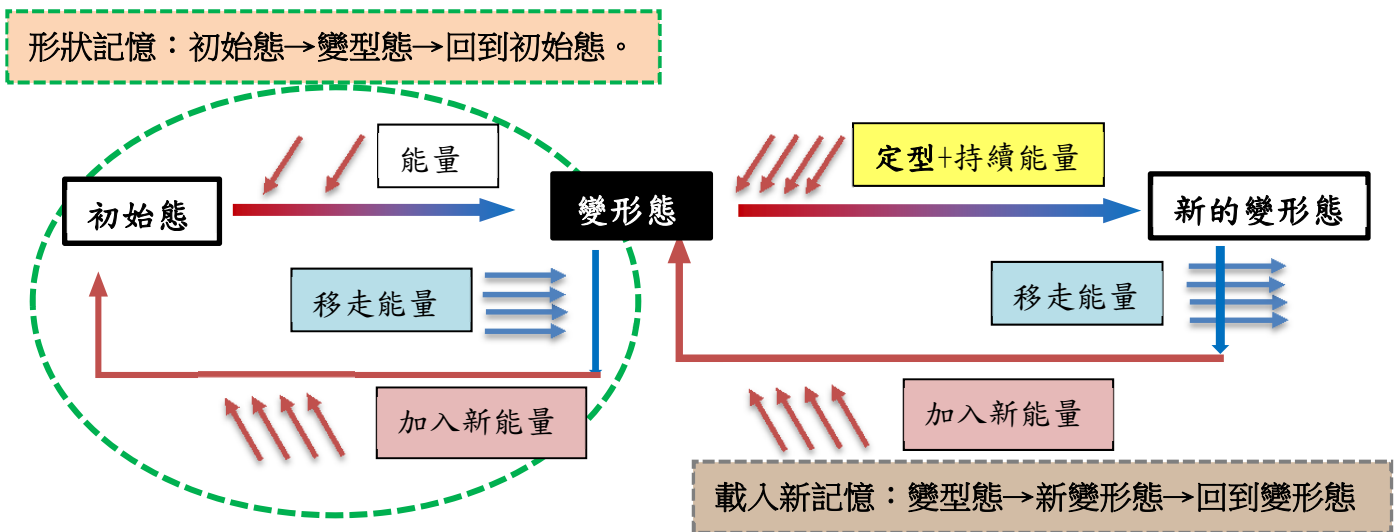
除此之外，我們再加熱 PLA 的過程中，還意外發現 PLA 能透過「溫度」、「時間」和定型方式，讓 PLA 重新載入新的記憶。也就是，我們可以任意改變 3D 列印出來的成品！進而試著將形狀記憶和和再入新記憶的概念進行整合，如下：

### 二、談形狀記憶與載入新記憶：

#### 1. PLA 載入新記憶的方式

需要「溫度」(80 度 C 以上)、「時間」(依 PLA 量決定)，與 PLA 軟化時的「固定」方式，三方的整合就能幫 PLA 載入新記憶！

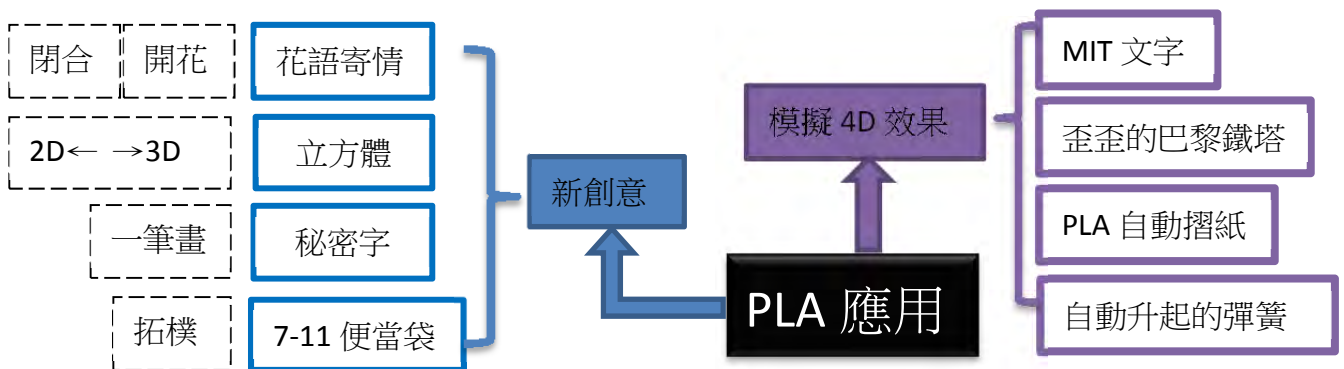
## 2. 形狀記憶與載入新記憶的概念：



從我們發現的兩大特色：①PLA 的形狀記憶效果、②PLA 載入新記憶的方式，及量化溫度、厚度的關係，我們試圖幫 PLA 原有記憶載入新記憶，讓 PLA 的應用和變化度更大。

## 三、 PLA 的新應用：

維度的轉換：透過 PLA 形狀記憶的效果，配合溫度的啟動，我們可進行 2D、3D、4D 的轉換，進行各種創新的設計，如下圖



## 四、 PLA 的改質：

PLA 性質改變的測試中，我們發現將 PLA 加入 PCL(熱塑水晶)的效果最佳！它們都是熱塑性聚酯，比較容易產生混合。混合後也能因為比例的差異，我們發現當 PLA：熱塑水晶介於 8：12~8：18 的比例時，會讓混合物剛好會介於能在熱水中維持一定形狀(類似 PLA 的特質)，又能像黏土具可捏塑的效果(類似 PCL 的特質)。

## 陸、心得

這半年多，在科展實驗的歷程中，說輕鬆不輕鬆，應該是酸甜苦辣什麼都有。在實驗的歷程，我們常做了一堆實驗，卻看不出、想不出好的結論，只能一步步去探索我們從來沒有經歷過的事情。

實驗中，我們常需查詢各種網站，甚至依自己的直覺推測結果再跟老師進行討論。歷程雖然很「燒腦」，但我們都學到了一些事。例如：做實驗必須講求精準數據，不斷重做、紀錄、回顧、思考、發明。特別是 PLA 與溫度的關係，實驗常因一些誤差因素得不斷重做。過程中，我們還必須和伙伴們分工和才能達到最高效率。雖然有時還是會出現爭工作的情況，但我們吵完，總是會乖乖回到自己的工作崗位上，做自己應該完成的事。

在科展的歷程中，我們最害怕的莫過於「常常得讓手在水深火熱的環境中做實驗」，老師彷彿練過鐵砂掌，但我們每次碰到剛從熱水裡拿出來的實驗品時，心裡都會忐忑不安。而最麻煩的是我們很害怕「做改變 PLA 性質的實驗」，因為碗底總是留下一些黏死人的成品殘留物。洗碗精、熱水、熱能全下了，但有些就是打死不離開我們的實驗用具。最後我們只能跟他拚了，拿我們的手指甲下去摳。呼~過程慘不忍睹，不堪回首啊！

雖然辛苦，但我們也發明了使用 NXT 樂高器材製作的第五代量化裝置「角度測量架」。在改造的過程中，除了彼此的手藝和創新，就是信任！本來以為實驗完成就好了，沒想到最困難的接檔戲就要上演了-整理數據。每次整理時，都會發現一些遺漏或不完整的照片或數據數據。我們解決的方法就是「重作」！面對那些常出乎意外的數據資料，我們還得想破頭思考「為什麼？」解釋原因。科展真是一連串有害怕、困難、驚奇和挑戰的生活。我們也常在這樣的挑戰中，去創造自己的無限可能。我們會很珍惜一起打拼、趕實驗、整理數據資料的日子，雖辛苦也常充滿笑聲。這段時間彼此的激勵成長、老師給予的修練回饋，是我們留下最重要的經驗了。

「喔！原來這就叫做一成長啊！」



## 【評語】 080209

本作品聚焦在 3D 列印材料熱塑性塑膠聚乳酸的形狀記憶效果之研究，主要是在探討它的厚度、線材與溫度的關係，發現聚乳酸遇熱後會軟化得以塑形，當它冷卻變硬後，再放回熱水，會回到原來的初始狀態，本實驗內容豐富完成度高，實驗報告的撰寫也相當完整，運用量角器、LEGO 零件設計角度測量架的創造能力也值得嘉許。然而，新應用中的- 花語寄情，以及立方體展開，均已有新進的成果報導，較難稱之為新的應用。在報告中，表的抬頭位置應在表前，而圖的解說文字應在圖後，有所區別。

作品海報



# 摘要

3D列印技術在近幾年來快速興起，在應用及研發的過程中，往往會產生大量的PLA廢材。PLA是一種熱塑性塑膠，聚乳酸。為了嘗試解決廢材問題，我們意外在加熱測試中發現PLA具有形狀記憶的效果，也就是PLA遇熱後會軟化得以塑形，當它冷卻變硬後，再放回熱水，竟然會回到原來的初始狀態！

為此，我們設計實驗，了解溫度、厚度、顏色對PLA形變效果的影響，並意外發現只要利用「溫度、時間」加以定型，就能任意更改PLA作品原有的形狀記憶效果，重新載入新記憶。有了這些新發現，我們利用溫度將3D帶入4D，增加了3D列印的應用與價值。同時，也嘗試改變PLA的性質，發現聚脂類的PCL混合效果較佳。

## 壹、研究動機

在學校的3D列印實作課程中，往往因為檔案設計不良、校正、列印失敗...等各種原因，產生大量的3D廢材。

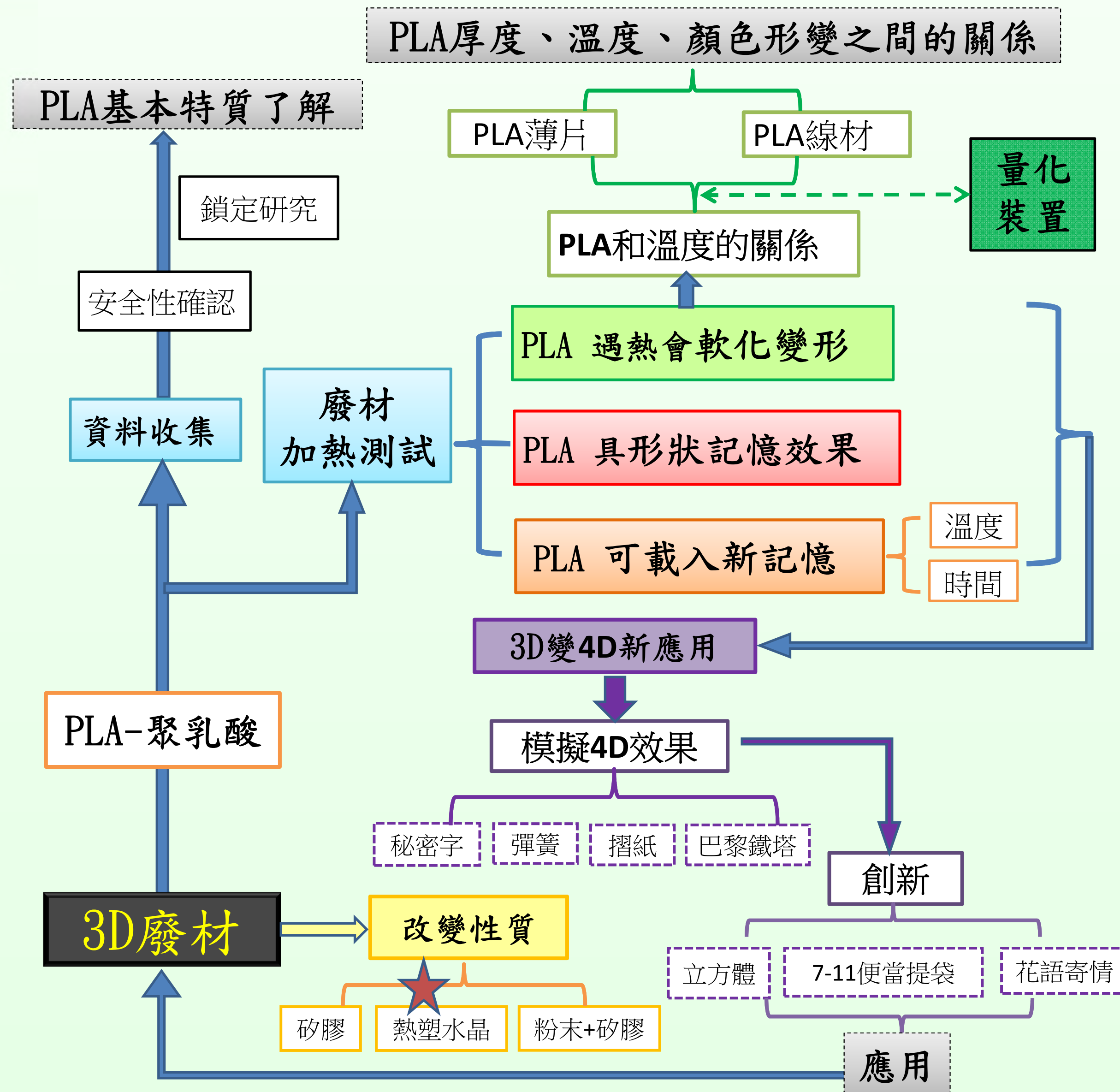


雖然，這些廢材-PLA是一種可分解的綠色塑料。但，除了等待PLA分解之餘，我們希望可以替PLA找到新的價值和應用。因此，我們試著將這些廢材加熱、加入不同物質，看其變化與效果，進而嘗試將PLA延伸出更多的可能和應用。

## 貳、研究目的

- 一、了解溫度、厚度、顏色對PLA形變效果的影響。
- 二、找出PLA形狀再記憶的方式、效果及其限制。
- 三、混入不同材料，嘗試改變PLA原有特質。
- 四、以數據和變化作參考，進行PLA新產品的設計與應用。

## 參、研究流程概念圖



## 肆、研究過程及結果

### 一、3D廢材 - PLA：

**研究原因：**學校使用的3D線材是PLA，那PLA究竟是什麼？除了讓它自然分解，我們還能做些什麼呢？

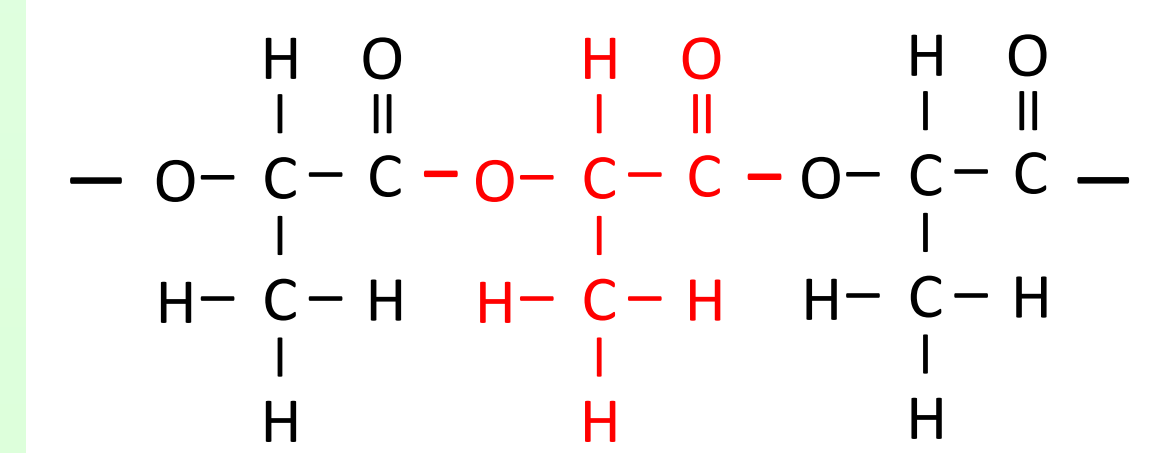
**研究方法：**3D廢材試驗與研究→①3D材料的基本特質(尋找PLA資料)、②加熱PLA，並試著進行相關研究及測試。

**研究結果：**

#### 實驗測試(1)：3D線材-PLA的基本特性

- ①PLA是聚乳酸(Polylactic Acid)是一種熱塑性聚酯，為高分子的聚合物。
- ②PLA無毒，PLA能快速降解，是一種良好使用性的綠色塑料。
- ③PLA的玻璃轉化溫度為：55°C~60°C。熔點為：155°C~170°C。
- ④我們透過廠商確認PLA的安全性(唯注意廠商品質與通風)，進而鎖定PLA為研究主體。

聚乳酸：長鏈型(線性)的結構



#### 實驗測試(2)：加熱3D廢材-PLA

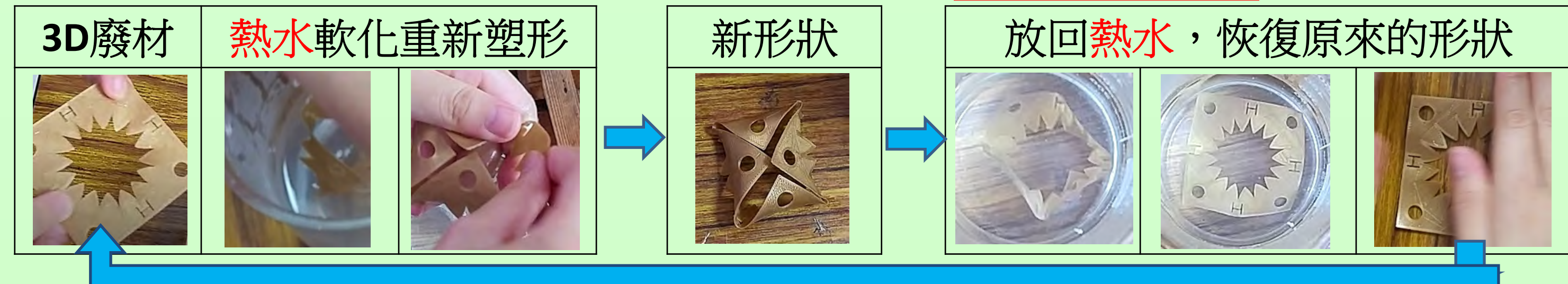
**研究原因：**PLA線材和廢材，一旦沒有3D印表機噴嘴的加熱，我們還能夠用什麼方式進行加熱呢？

**研究結果：**1.加熱方式：

加熱方式	直接	刀片加熱	熱水	吹風機	暖器	鐵盤+水
功能	融化PLA		使PLA遇熱軟化，溫度不超過100度C			
目的	混合物質	切割修補	軟化塑型	定點軟化	4D效果	4D效果
照片						
備註	矽膠免沾碗	碳粒沾黏	穩定度高	風力影響	速度慢	速度快

2. PLA加熱方式多，可根據不同目的和功能，選擇較適合的工具。

3. 我們把3D廢材PLA放入熱水時，竟然出現「形狀記憶」的效果！



### 二、PLA薄片測試實驗：

**研究原因：**既然PLA會對溫度產生變化反應，我們試著利用3D列印機印出不同厚度的薄片進行基本實驗測試。

**研究方法：**3D列印一層就是0.2mm，所以我們以一層為基本單位往上層，進行測試。

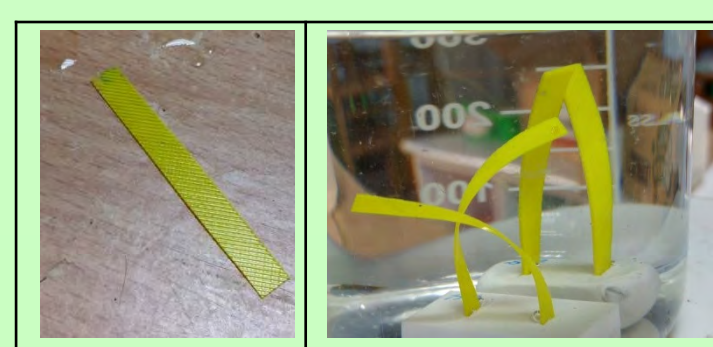
**研究結果：**1. 實驗記錄：

	0.2mm		0.4mm		0.6mm		0.8mm		1.0mm	
50度C	3分鐘	捲曲	3分鐘	捲曲	無反應	無反應	無反應	無反應	無反應	無反應
60度C	19秒	歪	26秒	歪	1分鐘	微歪	3分鐘	軟	無反應	無反應
70度C	3秒	塌	6秒	扭捲	5秒	歪	5秒	歪	3分鐘	微歪
80度C	立即	塌	5秒	扭捲	4秒	軟	4秒	軟	3秒	微彎
90度C	立即	脆裂	立即	塌	立即	塌	立即	塌	3秒	微彎

2. 薄片變形的狀態，很難用文字記錄其差異。

3. 薄片扭曲的方向，都是往平滑面彎曲！

我們推測是凹凸面有較多受熱和延展的空間。

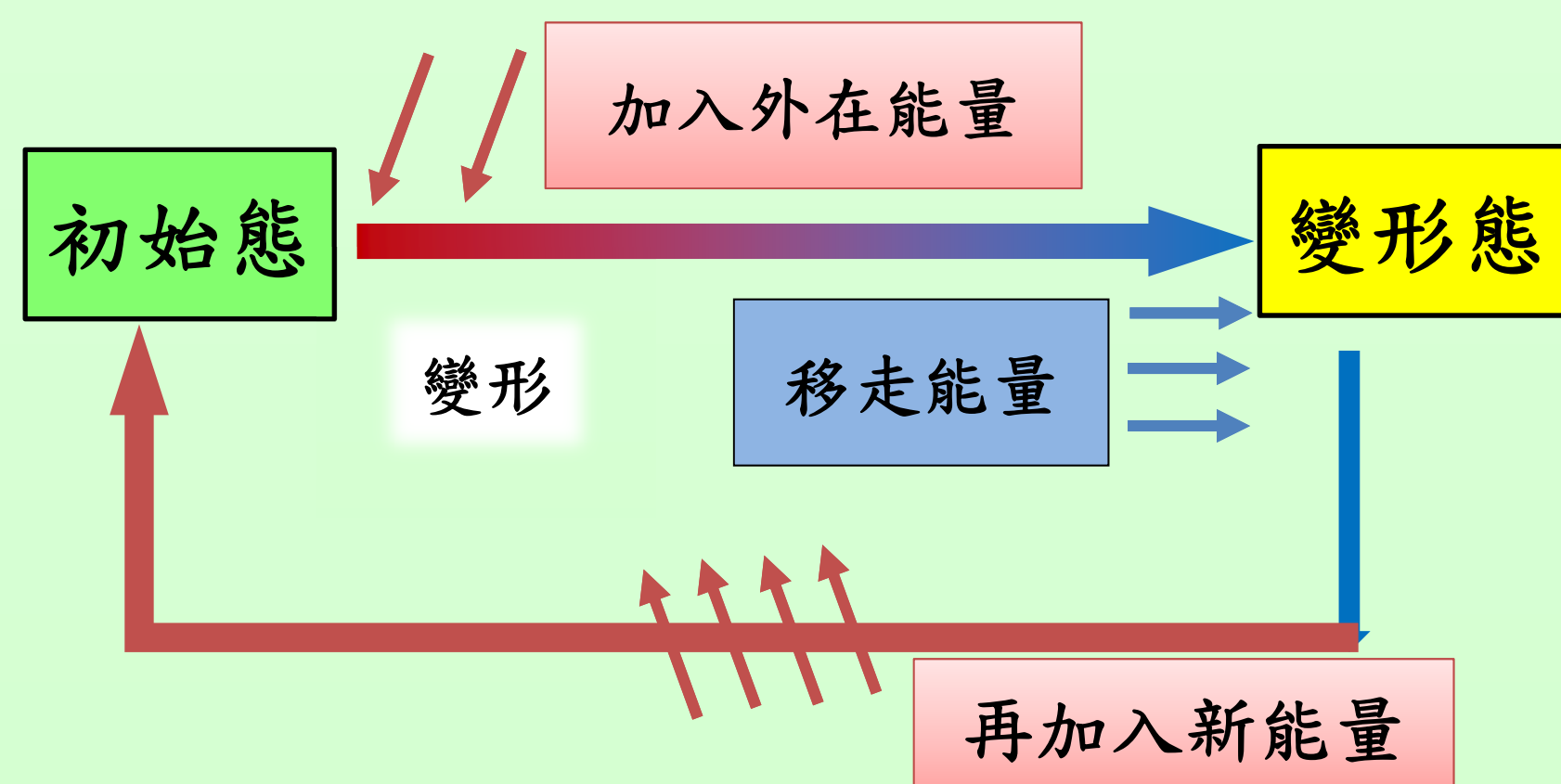


4. 60度C水溫是關鍵變形溫度。

5. 水溫越高反應愈快。但90度C反應過於激烈。

6. PLA厚度0.2mm，變形嚴重，不適合進行實驗。

#### 4. NEW發現→形狀記憶效果：



★PLA是「線性結構的聚合物」。

單體之間手拉著手，而非交錯網狀或結晶的鏈結。

★PLA形狀記憶效果分析：

PLA遇熱鏈結之間產生流動→變軟。此時可外力塑型，冷卻後定型。當再將塑形後的PLA放回熱水時，鏈結會再度打開，回到原始狀態。



### 三、量化裝置 - 監測PLA變形角度

**研究原因**：由實驗二，我們發現無法用文字表達PLA薄片的變形狀態。因此我們設計測量變形程度的量化裝置，協助量化實驗。

**研究結果**：1. 角度測量架進化史 2. 由樂高組成，拆卸和應用性都比較高(可隨時替換橡皮擦、零件或重物)

	第一代 油土	第二代 橡皮擦	第三代 量角器基座	第四代 LEGO基座	第五代-角度測量架 加入手機連結架
相片					
缺點	油土會融掉	無法評估彎度	熱熔膠融化	量角器：測量角度 夾子：卡住橡皮擦 重物：抵抗水浮力	LEGO基座

3. 樂高零件為ABS的材料，耐熱性有限。測量溫度不能超過90度C的水溫，以免變形。

### 四、PLA薄片與溫度的關係！

**研究原因**：實驗測試中，我們發現溫度會對PLA造成很大的影響和變化。所以，想進一步研究溫度和3D廢材-PLA之間的關係！

**研究方法**：我們將研究分成兩大部分 ①PLA薄片的厚度(0.4mm~1.4mm)、②溫度(50~80度C)。分別以我們「角度測量架」進行研究。

**流程**

**研究結果**：1. 實驗結果：

PLA在50度C水中變化情形	PLA在60度C水中變化情形	PLA在70度C水中變化情形	PLA在80度C水中變化情形
● 50度C，PLA角度變化小 ● 只有0.4、0.6mm有產生形變	● 60度C開始對PLA產生軟化形變效果，到達70度C、80度C時形變差異不大(只有厚度0.8mm差異較大)。 ● 溫度越高，形變速度越快。當PLA厚度大於1.0mm時，傾斜角度也會有限制而較小。		

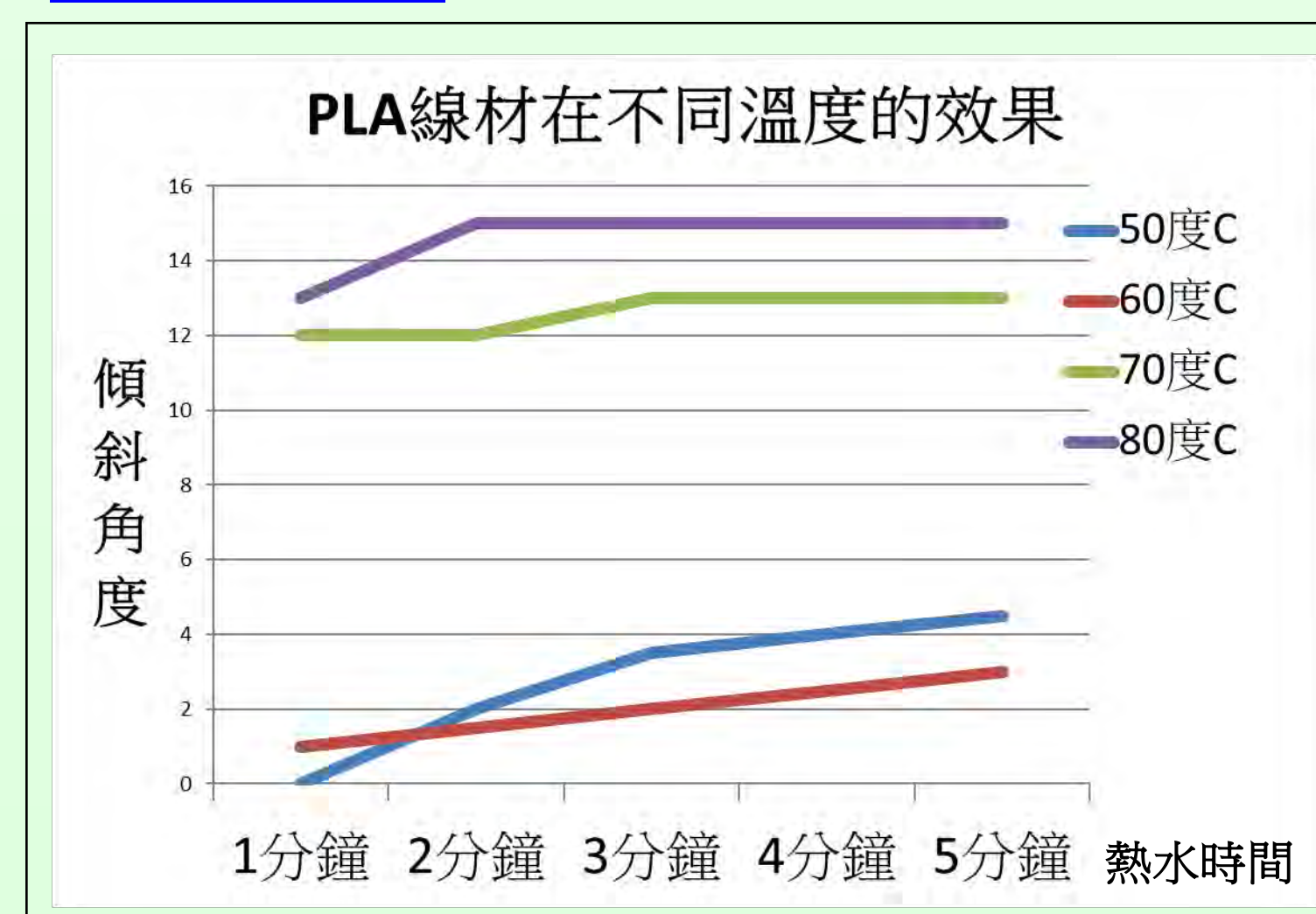
### 五、PLA線材與溫度的關係：

**研究原因**：為了減少PLA薄片因列印結構、機器等影響。

我們直接以線材(直徑皆為:1.75mm)，進行實驗測試。

**研究方法**：1. 將線材裁切5公分，放入角度測量架測試。  
2. 溫度範圍50~80度C熱水。

**研究結果**：實驗數據紀錄及分析



- 線材(1.75mm)軟化溫度是：「70度C」。
- 70度C以上的熱水，能讓PLA在3秒內軟化塑形。
- 將PLA放在熱水持續2~3分鐘，線材傾斜狀況也會停滯。表示線材的傾斜角度會因「線材厚度」而有限制。

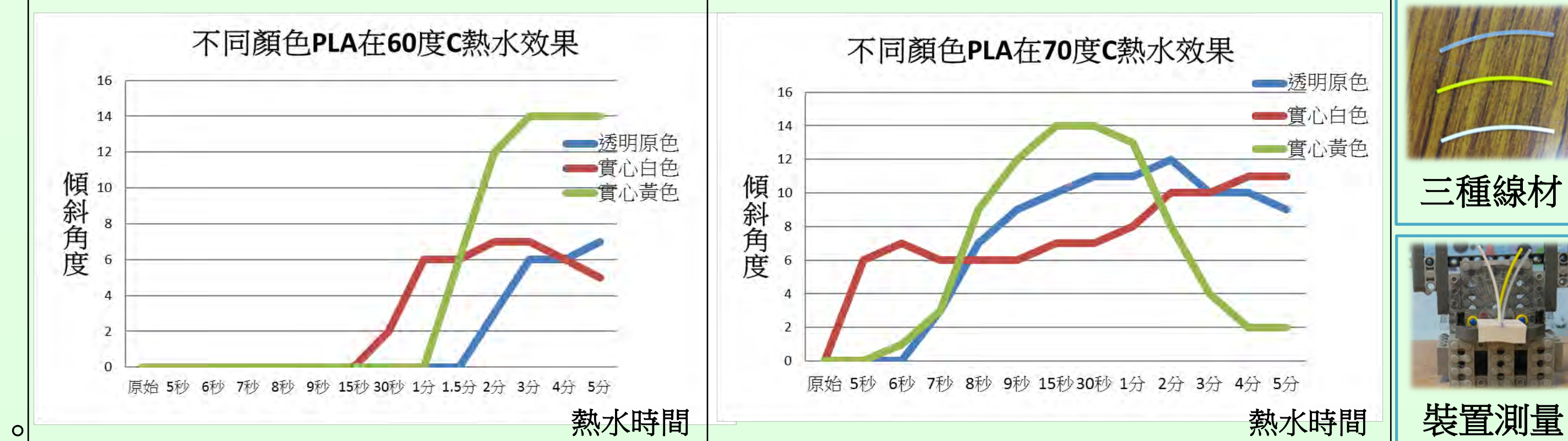
### 六、PLA線材顏色與形變的關係：

**研究原因**：PLA線材有很多種顏色，不同顏色會有不同影響嗎？

**研究方法**：1. 我們選擇三種主要顏色

- 透明原色(無色素) ②實心黃色(有色素) ③實心白色(色素多)
- 溫度範圍60、70度C熱水。

**研究結果**：實驗數據紀錄及分析



- 三種線材軟化速度：白色 > 黃色 > 透明原色。
- 原色PLA，軟化溫度最高。白色PLA，軟化溫度最低。
- PLA的添加物越多，玻璃軟化溫度會降低。

### 七、PLA → 載入新記憶：

**研究原因**：在3D廢材丟入熱水的測試中，意外發現有些廢材重新加熱後，竟然變不回來！

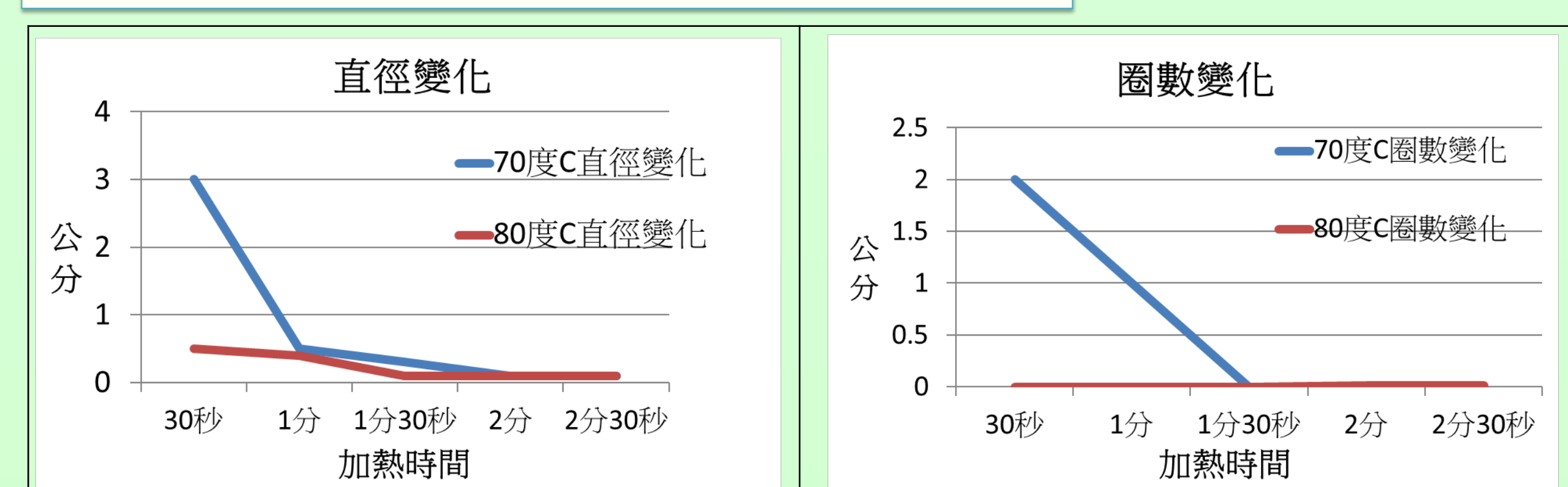
表示PLA的「初始態」應該可以被改變，因此我們試著從溫度、時間，找出替PLA重新載入新記憶的方式。

**研究方法及流程**：

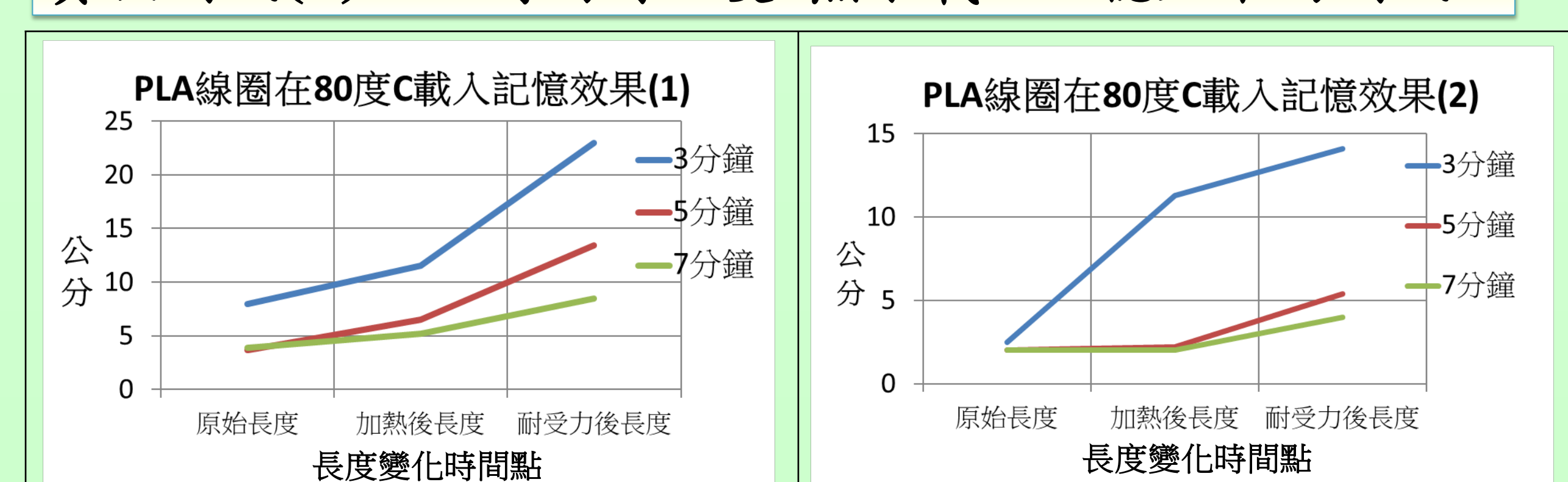
- 將PLA定型後以溫度、時間的變化載入新記憶
- 我們以線圈及彈簧的造型放入熱水後測量其「直徑、圈數」的變化，進行數據資料的量化。

**研究結果**：1. 實驗數據紀錄

**實驗測試(1)：水溫對定型效果的影响**



**實驗測試(2)：時間對80度C熱水載入記憶效果的測試**

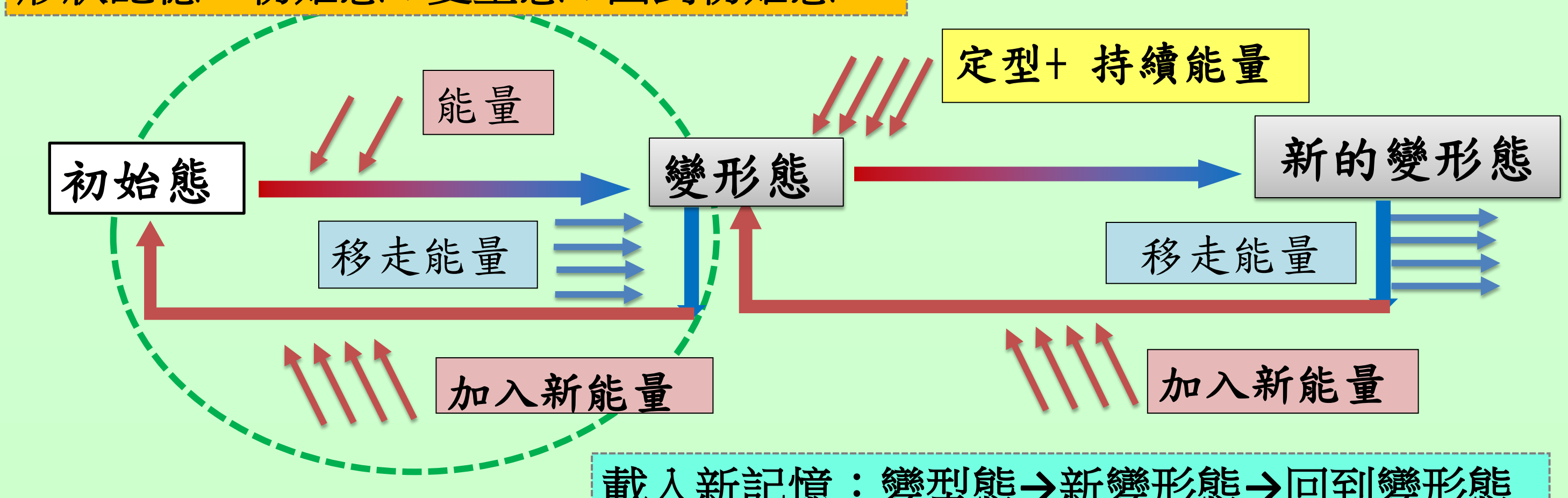


2. 實驗數據分析：

- 80度C熱水定型效果佳。
- 加熱溫度越高(小心融掉變形)、時間越久，載入新記憶的效果越好
- 加熱時間越久效果越加，PLA量越多，加熱時間需增加。
- 耐受力測試中，測試越久會出現「記憶疲乏」的狀態。

3. 整合形狀記憶的概念，形成新的「PLA形狀記憶」概念

形狀記憶：初始態→變型態→回到初始態。





## 八、3D變4D – PLA的形狀記憶效果：

**研究原因：**4D是除了基本的3維空間外，再增加新的維度，讓物品具有「活」起來的效果。這個維度，可能是時間、溫度、壓力、水分、空氣...等。在實驗測試中，我們覺得有機會透過「熱」啟動PLA的新維度，轉換成4D。


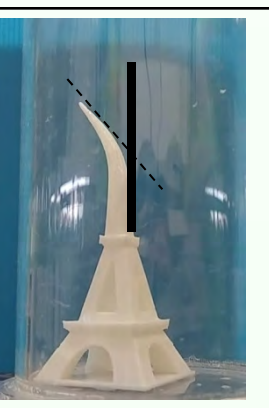



**研究方法及結果：**我們上網搜尋幾個比較有特色的4D產品，嘗試利用PLA製作類似模型，看其效果及問題。

### 實驗測試(1)：巴黎鐵塔，變直

**來源說明：**MIT(2016)發表

**研究方法：**列印巴黎鐵塔→加熱軟化頭部測試

**研究結果：**1. 實驗結果：

MIT發表的效果	我們的實驗測試結果			
<a href="https://www.youtube.com/watch?v=SpofhtdRtCI">https://www.youtube.com/watch?v=SpofhtdRtCI</a>	10秒	20秒	30秒	40秒
				

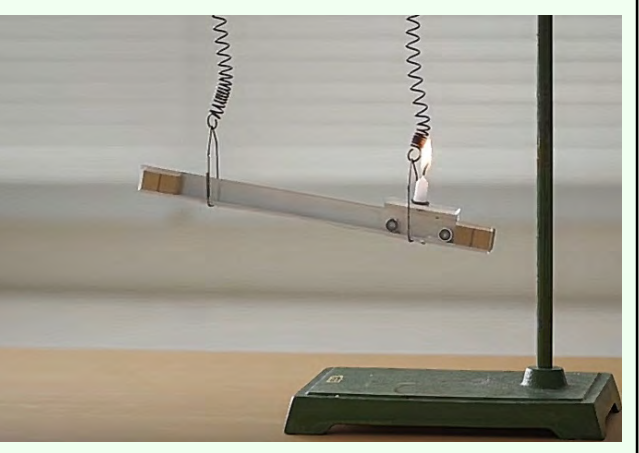

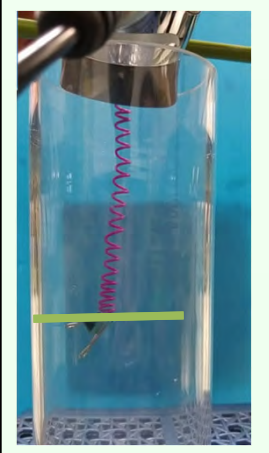


2. PLA鐵塔延展性不佳，不易彎曲但仍能出現類似效果。

### 實驗測試(2)：自動升起的彈簧

**來源說明：**日本未来の科学者たちへ(2013)。

**研究方法：**PLA線材繞成彈簧狀載入新記憶→測試

**研究結果：**1. 實驗結果：

来の科学者たちへ	我們的實驗測試結果			
<a href="https://www.youtube.com/watch?v=Ayfcf46ocKxI">https://www.youtube.com/watch?v=Ayfcf46ocKxI</a>	一開始	10秒後	20秒	30秒
				



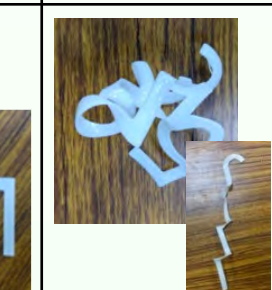





2. 前10秒上升迅速，唯20秒後加熱溫度可達80度，整個PLA彈簧反而因軟化被拉開。而合金耐熱不會有軟化問題

### 實驗測試(3)：秘密字

**來源說明：**MIT VIEDO(2013)

**研究方法：**我們自己設計字→軟化捏塑變形→測試

**研究結果：**1. 實驗結果：

原有網路效果	製作		放入熱水				
<a href="http://digi-163.com/13/0228/06/80FF803A001663E1.html">http://digi-163.com/13/0228/06/80FF803A001663E1.html</a>	列印	變形	一入水	2秒	4秒	6秒	8秒
							




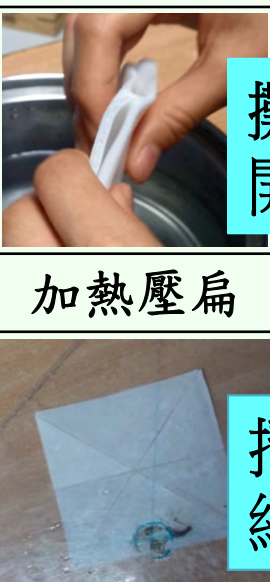



2. 字的設計：若能以一筆畫的概念來設計，隱密效果會更加。

3. 字的線段粗細，可再進行變化，讓字的轉折處寬度減少更易變形。

### 實驗測試(4)：自動摺紙

**來源說明：**塑料片遇熱水，瞬間變身「千紙鶴」(2016)

**研究流程及結果：**1. 實驗結果：





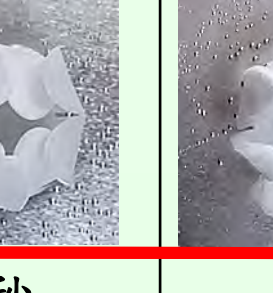
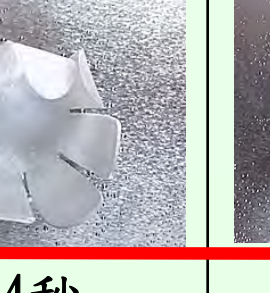
原有網路效果	製作		放入熱水！			
<a href="https://read01.com/KDKmPO.html">https://read01.com/KDKmPO.html</a>	列印1mm	加熱變形	1秒	2秒	3秒	4秒
						
	載入新記憶	加熱壓扁	1秒	4秒	7秒	13秒
		摺紙				

2. 進行PLA摺紙時，PLA的厚度以1.0mm效果較佳。太薄會捲曲、太厚較難摺。而摺痕的地方以PLA的厚、薄來呈現山線、谷線。

## 九、PLA的形狀記憶效果產品創新應用

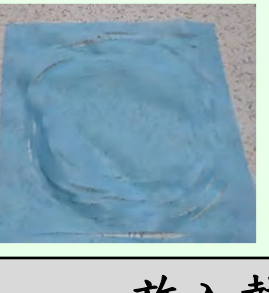
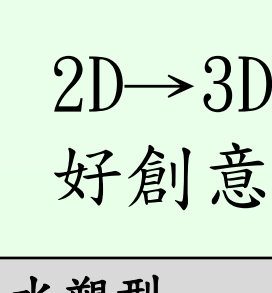

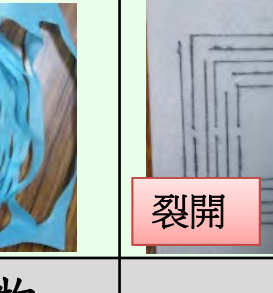
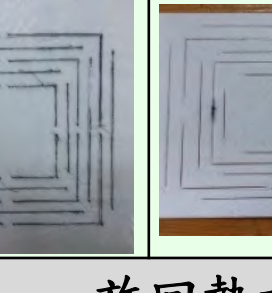

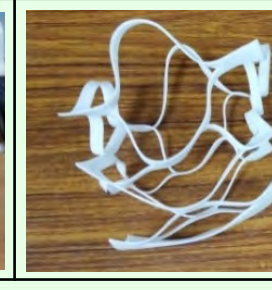




**研究原因：**我們試著以PLA的形狀記憶及載入新記憶的效果，研發出更多新產品。

**研究結果：**實驗測試(1)：花語寄情

製作		放入熱水！			
列印花朵	加熱軟化塑型	1秒	2秒	3秒	5秒
					
膠帶固定載入新記憶	軟化壓扁塑型	2秒	4秒	8秒	12秒
		開花			閉合

●鐵盤加熱效果佳，能以溫度及載入新記憶來掌控花朵的開闔

**實驗測試(2)：7-11便當提袋**

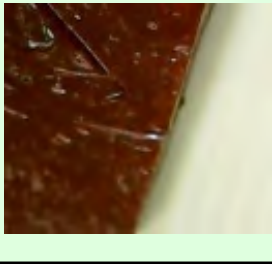
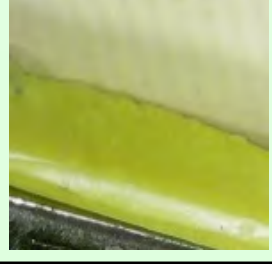



研究原因		製作PLA便當提袋			
7-11便當提袋用過就變形！		用刀子切割	直接3D列印	加熱刀子	修整PLA
	2D→3D 好創意				
	放入熱水塑型	可裝重物	放回熱水→3D恢復平整的2D狀況		
					

●PLA比原先不織布更堅固，且恢復2D平面效果佳！

## 十、PLA性質的改變測試：

**研究原因：**PLA除了對溫度的反應之外，我們還是嘗試改變它的性質。因此，開始將廢材加入各種可能產生反應的物質(如：白膠、PVA、關華豆膠、麵粉.....等)，最後鎖定三大類：矽膠、熱塑水晶、粉末類(+矽膠)，進行研究。

**研究結果：**實驗測試(1)：PLA + 矽膠

PLA：矽膠	純PLA	8:1	8:2	8:4	8:8
放大鏡照片					
硬度	硬	→ 軟			不成形
矽膠殘留	無	無	少	多	黏手
放入熱水	散開	皆會軟化，但不會散開			不成形 無法測
	纖維	無	無	層理	層理

●PLA不容易和其他物質結合，但皆為聚酯類的熱塑水晶，卻十分容易結合，效果最佳。

**實驗測試(2)：PLA + 熱塑水晶**

	PLA	PLA+熱塑水晶	熱塑水晶
硬度	硬	→ 軟	
延展	差	→ 佳	
形狀記憶	有	→ 無	
黏性	無	→ 有	
乾掉速度	快	→ 慢	
軟化速度	慢	→ 快	

**實驗測試(2)：PLA + 粉末+矽膠**

粉末	PLA+高嶺土+矽膠	PLA+麵粉+矽膠		
配方	PLA多	PLA少	麵粉多	麵粉少
照片				
軟硬	軟會裂	很硬	很硬	很硬
防水	皆會防水			
類似	紙漿	磁磚	裂成塊	乾黏土

## 十一、未來研究方向：



## 伍、結論

(一)溫度對PLA厚度、顏色的形變效果：

	效果分析
PLA厚度	1. PLA越薄，形變角度越多，越厚則越穩定。 2. 啟動PLA軟化、形變的基本溫度為60度C。 3. PLA越厚，溫度越高，啟動速度越快。
PLA顏色	1. 軟化速度：實心白色 > 實心黃色 > 透明原色 2. 添加物越多，PLA軟化溫度越低。

(二)新發現：PLA形狀記憶與載入新記憶

形狀記憶	●PLA遇熱水可軟化塑形 → 冷卻新形狀 → 放回熱水 → 再回到原來的形狀！
載入新記憶	●除了PLA的形狀記憶能力外，我們進一步利用「溫度」(80度C以上)、「時間」(PLA量越多，時間越長)「固定方式」，來改變PLA的初始狀態，載入新的記憶與應用。

(三)價值：

- 由形狀記憶、載入新記憶，可將PLA由3D轉換成4D維度，產生新應用。
- 顛覆3D列印的立體限制，用熱即可將平面變立體，以取代機器列印圓弧的困難。

(四)PLA性質的改變：

以混入熱塑水晶效果最佳。