

中華民國第 59 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 物理科

030110

波光粼璃

學校名稱：新北市私立南山高級中學

作者： 國二 華 耘 國二 劉律辰 國二 曹芷毓	指導老師： 許靜淑
---	------------------

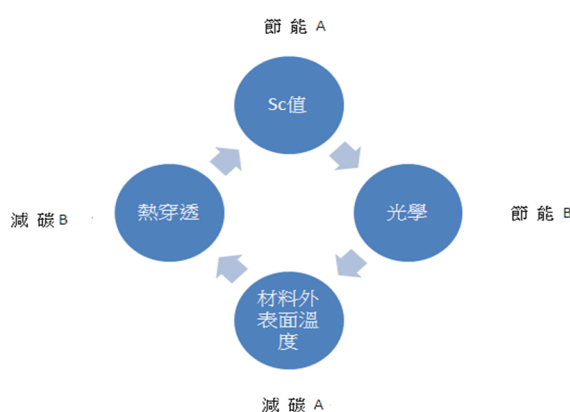
關鍵詞：隔熱玻璃、 P_{cond} 、輻射熱

壹、摘要

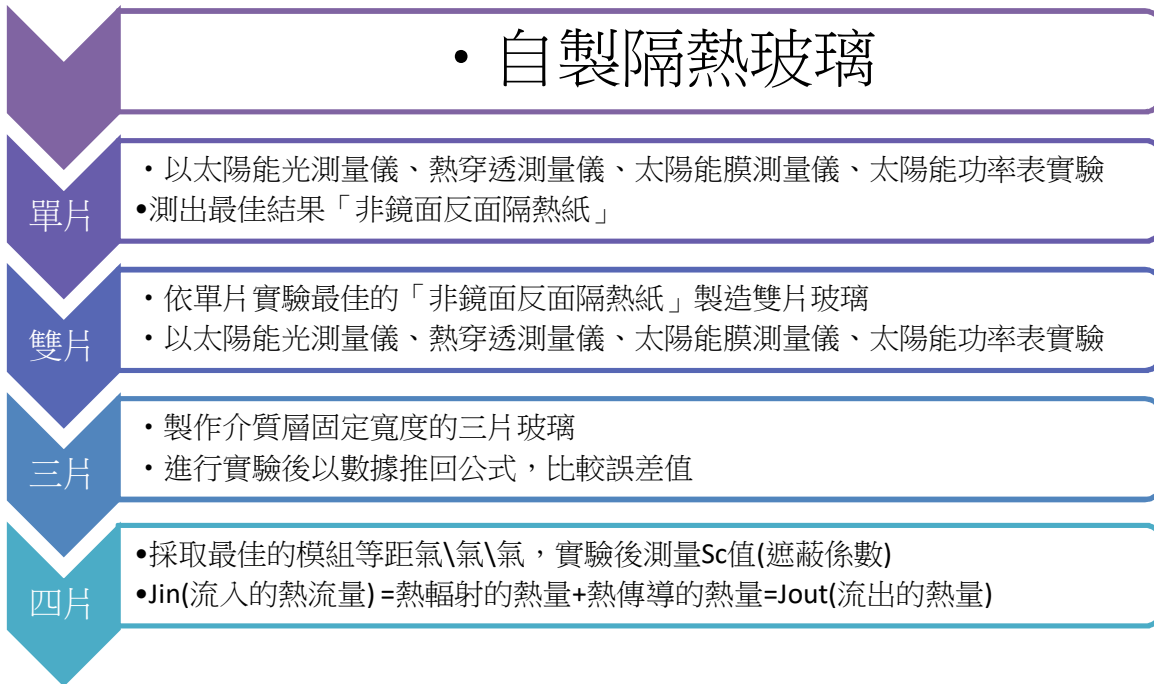
為研究出可自製的隔熱光學玻璃，我們測量了不同表面覆蓋物的單片玻璃，改變正、反，單、雙面等變因，以各種測輻射儀器找出隔熱最佳的非金屬反面隔熱紙，用其製作雙片玻璃(單層介質)。接著根據普物的多層板公式製造三片玻璃(雙層介質)之 L_1 、 L_2 等間距與不等距模組，發現以熱輻射角度而言，空氣才是最佳介質。實驗後另外計算「單位時間通過的熱量」(P_{cond})，再將數據套回公式，得出實驗誤差值。接下來製作介質為空氣的四片玻璃(三層介質)，實驗後另外計算Sc值(遮蔽係數)，並和上述各模組作Sc值比較，發現隔熱效果最好的模組是等距四片氣/氣/氣玻璃」。以普物熱輻射公式($P_{rad} = \sigma \epsilon AT^4$)來看，我們的模組有如下之等式 $J_{in} = J_{out} = J_{cond} + \sigma \epsilon AT^4(P_{cond} + \text{輻射})$ 。

貳、動機

有次搭飛機時，發現機艙窗玻璃共有三層，在高空中飛行時摸起來不冰冷，隔熱效果極佳。我們很好奇三片玻璃中間如果填入了不同材質，會不會對隔熱效果有影響?與此同時，聽理化老師敘述在第三冊自然與生活科技課本中的熱源的傳遞方式，我們便想，可不可以自製簡易的隔熱玻璃，於是以此為出發點，著手研究。在隔熱效能之外，我們也想增進玻璃的採光、節能、以及近年來成為討論焦點的Sc值(遮蔽係數)。



參、研究流程圖

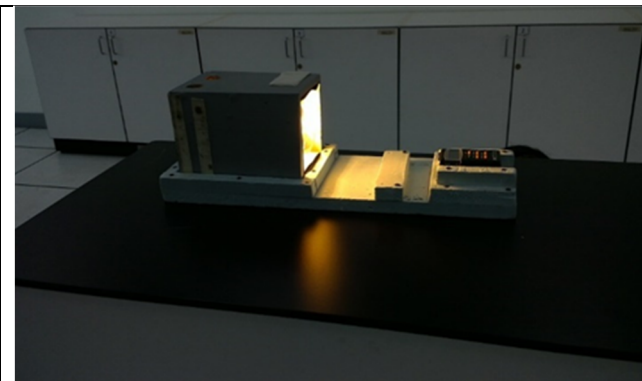


肆、研究目的

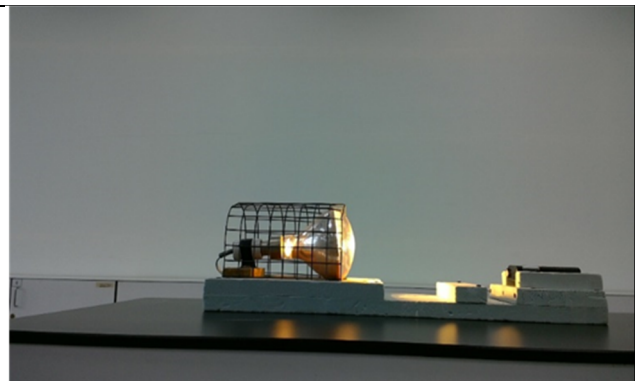
- 一、測量覆蓋物及介質對單、雙(單層介質)、三(雙層介質)、四片玻璃(三層介質)的影響
- 二、探討如何製造屬於自己的雙、三、四片隔熱玻璃
- 三、探討與公式理論值的誤差及其影響
- 四、玻璃Sc值之計算與應用

伍、實驗裝置

- 一、實驗器材：金屬隔熱紙、非金屬隔熱紙、隔熱漆、水、太白粉、玻璃片。
- 二、實驗裝置：太陽能光測量儀、熱穿透測量儀、太陽能功率表、太陽能膜測量儀。



(一) 太陽能光測量儀:此儀器可以模擬接近太陽光的光源。



(二) 熱穿透測量儀:此儀器可以產生極高的熱能，模擬受熱情況

	
<p>(三) 太陽能功率表測量光、熱的儀器，單位為W/m^2平方</p>	<p>(四) 太陽能膜測量儀:此儀器可以測量出紫外線、紅外線、透光率、太陽能總透射比(SHGC)。</p>

陸、實驗設計與公式

一、實驗設計

(一) 單片玻璃實驗

1. 將覆蓋表面的單片玻璃垂直放上儀器測量。
2. 讀寫數據，再加以改進實驗。

(二) 雙片玻璃(單層介質)實驗

1. 以最佳的單片玻璃製造雙片玻璃，並在其中填充不同介質，測量隔熱效果的優劣。
2. 讀寫數據並改進實驗。

(三) 三片玻璃(雙層介質)實驗

1. 以最佳的單片玻璃製造三片玻璃，並在其中填充不同介質，測量隔熱效果的優劣。
2. 測量熱穿透測量儀使用後，玻璃面光面和背光面的溫度。
3. 讀寫數據並改進實驗，推導公式、計算誤差值。

(四) 四片玻璃(三層介質)實驗

1. 以最佳的單片玻璃製造四片玻璃，並在其中填充三片玻璃中效果最佳的介質組合，測量隔熱效果的優劣。
2. 測量熱穿透測量儀使用後，玻璃面光面和背光面的溫度。
3. 讀寫數據並改進實驗，推導公式、計算誤差值。

二、公式

(一) 熱傳導公式: $P_{cond} = \frac{k_2 A (T_H - T_X)}{L_2} = \frac{k_1 A (T_H - T_C)}{L_1}$

1. $T_H(T_{HOT})$:以熱穿透測量儀照射20秒後，玻璃面光面的溫度
2. $T_C(T_{COLD})$:以熱穿透測量儀照射20秒後，玻璃背光面的溫度
3. L_1 :玻璃背光層間距
4. L_2 :玻璃面光層間距
5. K :熱導率， K_1 為 L_1 間距夾層的熱導率， K_2 為 L_2 間距夾層的熱導率
6. P_{cond} :單位時間傳遞的熱量

(二) 熱輻射公式:

1. $P_{rad} = \sigma \epsilon A T^4$:熱源輻射公式
2. $J_{in} = J_{cond} + \sigma \epsilon A T^4 = J_{out}$:流入熱流量=熱傳導熱量+熱輻射熱量=流出熱流量

柒、實驗步驟與研究結果

一、測量單片玻璃實驗數據

(一) 實驗步驟

1. 將實驗室玻璃(單片)，分別覆上金屬/非金屬隔熱紙/隔熱漆，而實驗中所指的反面是將隔熱紙/漆背對熱源。
2. 將玻璃分別沿著儀器邊緣垂直擺放，將太陽能光測量儀、熱穿透測量儀、太陽能功率表及太陽能膜測量儀架設在固定位置後開始測量。
3. 讀寫數據並改進實驗。

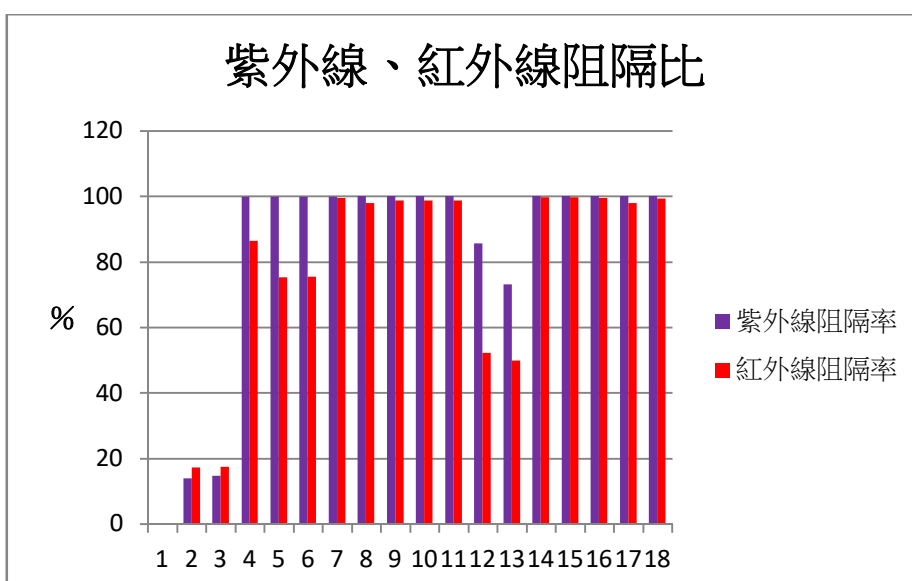
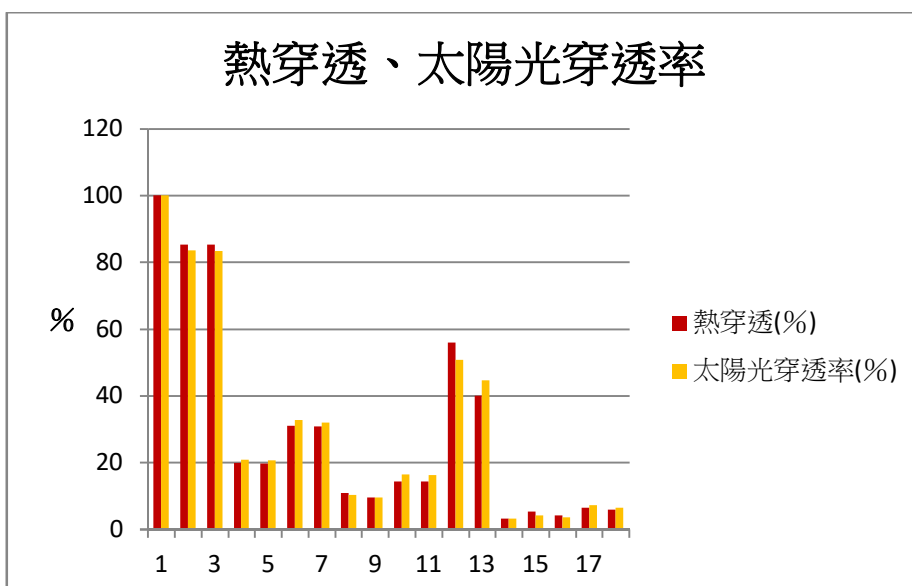
(二) 實驗結果

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	無	玻璃	膠帶	非金正	非金反	金正	金反	單片塗料正	單片塗料反
熱穿透(W/m ²)	632.1	539.3	539.2	126	124.7	195.3	194.7	68	59.9
太陽光(W/m ²)	215.2	1798	1792	524.3	519.7	823.1	803.9	259.8	240.5
紫外線阻隔比(%)	0.0	13.9	14.7	99.8	99.8	99.8	99.8	100.0	100.0
紅外線阻隔比(%)	0.0	17.2	17.4	86.3	75.2	75.5	99.4	97.9	98.6
透光率(%)	100.0	89.7	89.3	31.3	30.0	15.8	16.7	0.1	0.1
太陽能總透射比(%)	1.000	0.869	0.857	0.234	0.227	0.186	0.193	0.007	0.007

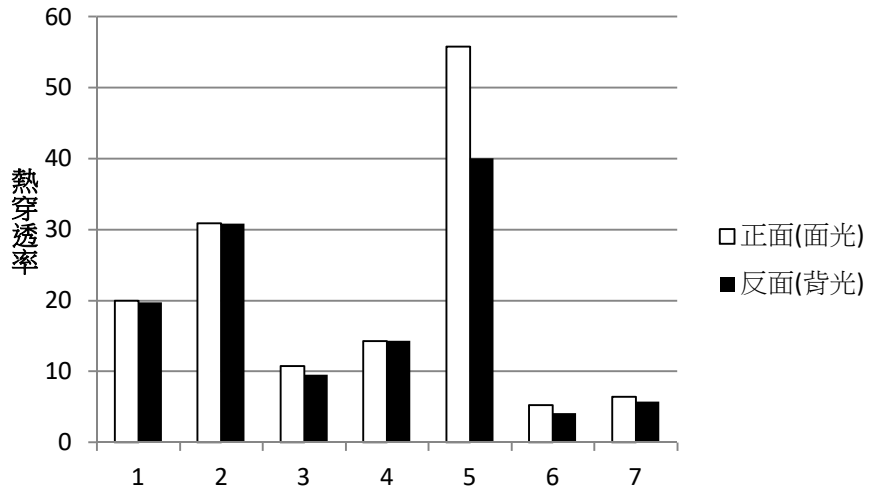
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	塗料 2:1 正	塗料 2:1 反	塗料 5:1 正	塗料 5:1 反	雙面塗料	黏貼非金屬正	黏貼非金屬反	黏貼金屬正	黏貼金屬反
熱穿透(W/m ²)	90.6	90.2	352.8	252.7	19.5	33.5	2.6	4.1	3.6
太陽光(W/m ²)	411.9	407.4	1275	1122	81.2	102.3	89.6	181.2	163.5
紫外線阻隔比(%)	100.0	100.0	85.6	73.1	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
紅外線阻隔比(%)	98.6	98.6	52.1	49.9	99.7	99.7	99.5	97.9	99.3
透光率(%)	0.1	0.2	9.1	18.8	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
太陽能總透射比(%)	0.005	0.005	0.230	0.305	0.00	0.000	0.001	0.001	0.002

(三) 研究結果

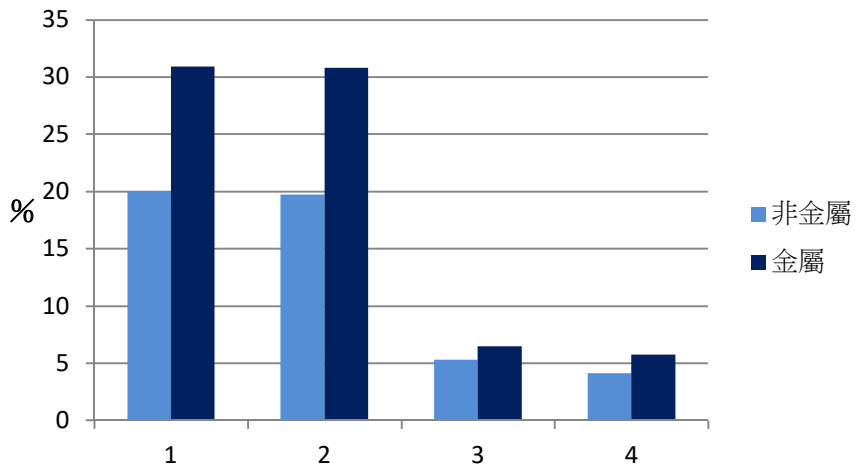
1. 在此實驗中，**熱穿透和太陽光穿透值**越小，代表此玻璃隔熱越好。
2. 在隔熱紙的比較中，含金屬的金屬隔熱紙比不含金屬的非金屬隔熱效率差。
3. 隔熱紙不論貼在正面還是反面，在紫外線和紅外線阻隔比幾乎沒有影響，對透光率及太陽能總透射比的影響比較大，不論是哪種隔熱紙效果都是**反>正**。
4. 隔熱漆幾乎可以擋掉全部的熱能，但是因為它並不透明，就算稀釋過效果也不如隔熱紙。若未來研發出透明的隔熱漆，可應用在生活上，否則在實驗中僅可採用隔熱紙。
5. 隔熱漆外效果最佳的是第五項**反面(背光)的非金屬隔熱紙**，所以在雙片玻璃(單層介質)實驗中一律採用此玻璃。
6. 由實驗可得知，膠帶對數據的影響微小，可忽略不計。



正、反面比較



金屬、非金屬比較



二、測量雙片玻璃(單層介質)實驗數據

(一) 實驗步驟

1. 將玻璃片貼上隔熱紙(非金屬，反面)並以固定間距3.1575cm。將兩片玻璃間的空隙以膠帶封起，製造出空氣層。
2. 將膠帶戳開一個小洞，灌入實驗物質後再封起，以太陽能光測量儀、熱穿透測量儀、太陽能功率表及太陽能膜測量儀進行實驗。物質種類有：

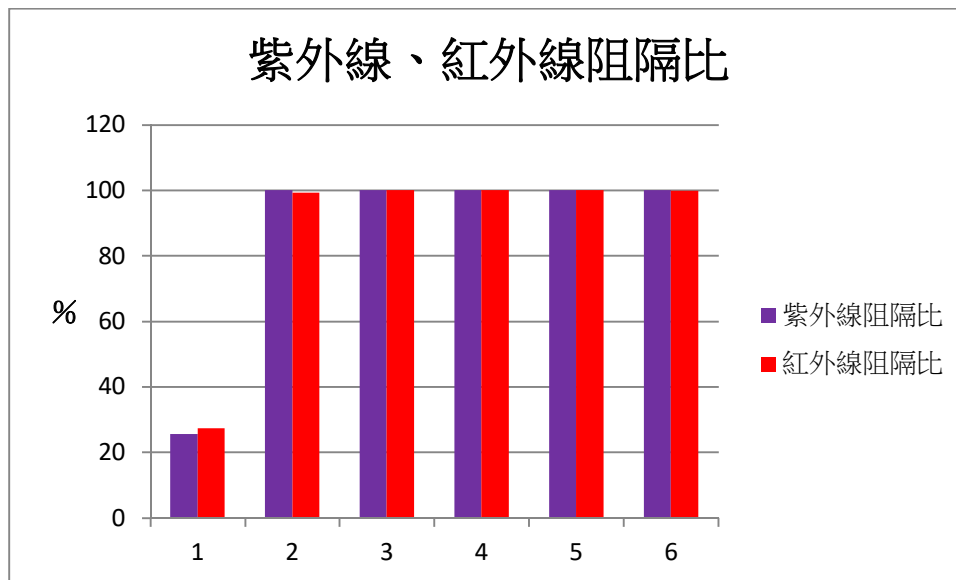
- (1) 空氣
- (2) 水
- (3) 太白粉50g+水100g之膠體(太白粉比水=1:2水溶液)
- (4) 太白粉50g+水150g之膠體(太白粉比水=1:3水溶液)
- (5) 太白粉50g+水200g之膠體(太白粉比水=1:4水溶液)
- (6) 太白粉50g+水250g之膠體(太白粉比水=1:5水溶液)

其中，太白粉水溶液按比例調配完成後，以加熱盤用攝氏三百度加熱二十分鐘，並時時攪拌，製成膠體。

3. 讀寫數據。

(二) 實驗結果

	1	2	3	4	5	6
	空氣	水	太白粉膠 1:2	太白粉膠 1:3	太白粉膠 1:4	太白粉膠 1:5
熱穿透(W/m^2)	21.9	14.9	5.2	7.3	8.3	10.1
太陽光(W/m^2)	151.8	126.4	5.69	28.9	34.2	41.3
紫外線阻隔比	25.6	100	100	100	100	100
紅外線阻隔比	27.3	99.2	100	100	100	99.9
透光率	81.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
太陽能總透射比	0.747	0.003	0.000	0.000	0.000	0.002



(三) 研究結果

1. 煮熟的太白粉成凝膠態，傳熱極慢，是生活中很好的隔熱材料。
2. 填充物的隔熱效果是太白粉膠體>水>空氣層。其中，太白粉膠體的填充，水的比例愈高，隔熱效果愈差。
3. 最佳結果為水分最少的1:2膠體，其次是1:3膠體
4. 根據實驗，凝膠態物質有極佳的阻熱效果，且水的比例越少，阻熱效果越好，可以善加應用。

三、測量三片玻璃(雙層介質)實驗數據

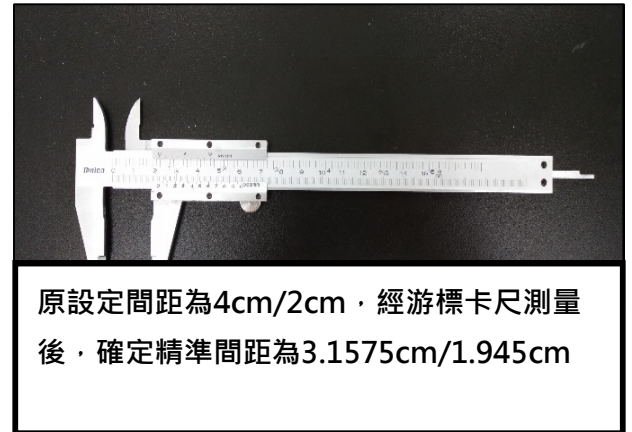
(一) 實驗步驟

1. 將三片玻璃分別固定間距後組合

- (1) (L_2 [面光]/ L_1 [背光])
- (2) (3.1575cm/3.1575cm)
- (3) (1.945cm/3.1575cm)
- (4) (3.1575cm/1.945cm)

2. 填入不同介質

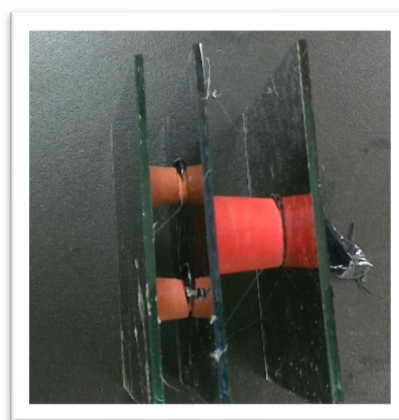
- (1) 空氣
- (2) 水
- (3) 水比太白粉=3:1膠體
- (4) 組合為:



氣/氣	氣/水	水/氣	水/水	氣/膠	膠/氣	水/膠	膠/水	膠/膠
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

3. 以太陽能光測量儀、熱穿透測量儀及太陽能功率表進行實驗。使用熱穿透測量儀後，測量玻璃面光面與背光面的溫度(T_H 、 T_C)。
4. 讀寫數據，並將其套入普物的公式，比較誤差值。

不等距的三片玻璃

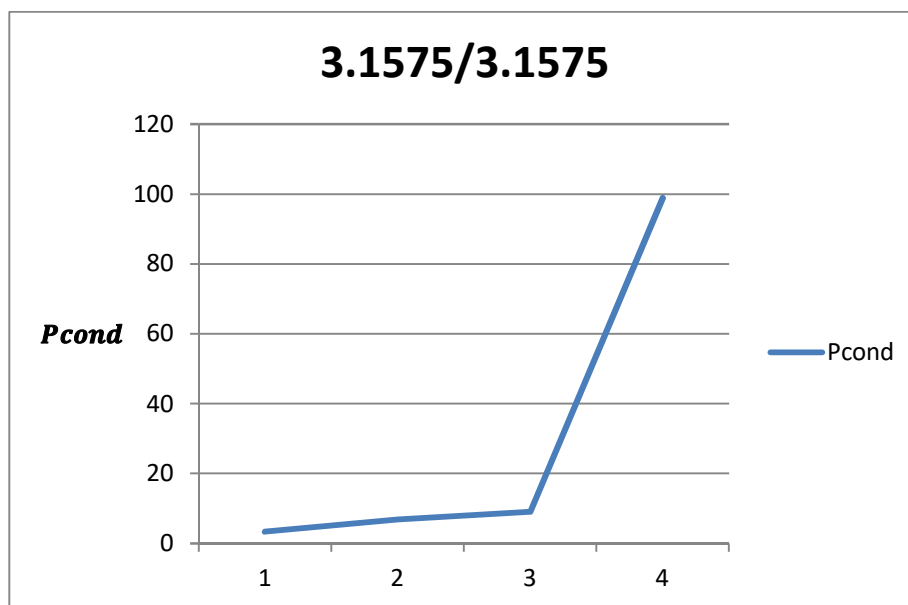


(二) 實驗結果

1. 3.1575cm/3.1575cm(L_2/L_1)

前/後 項目	氣/氣	氣/水	水/氣	水/水	氣/膠	膠/氣	水/膠	膠/水	膠/膠
T_{COLD}	22.7	22.5	22.6	23.1	22.4	22.1	22.6	22.8	22.4
T_{HOT}	31.3	31.6	34.7	34.1	31.1	34.3	31.8	35.1	35.7
熱穿透	2.8	3.9	6.9	3.0	4.2	10.7	10.3	3.6	8.8
太陽光	4.8	7.8	8.1	6.3	8.7	8.7	7.0	6.6	8.7
P_{cond}	3.3519	6.7989	9.0403	98.9380					

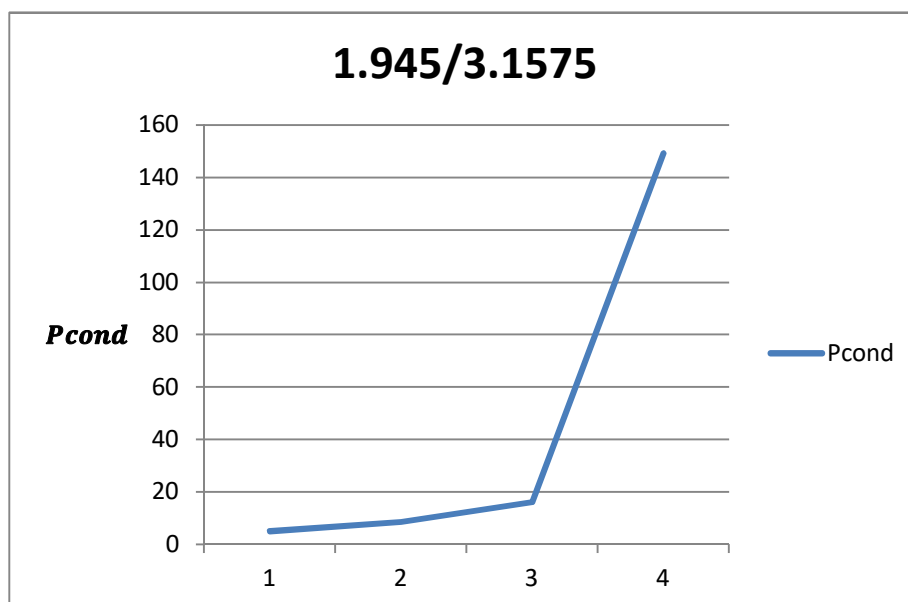
在間距固定的情況下，氣/氣模組的熱穿透及太陽光實驗數據皆最小， P_{cond} 值最低，代表單位時間通過的熱量最小，也就是隔熱效果最佳。



2. 1.945cm/3.1575cm(L_2/L_1)

前/後 項目	氣/氣	氣/水	水/氣	水/水	氣/膠	膠/氣	水/膠	膠/水	膠/膠
T_{COLD}	21.8	22.0	21.7	22.3	22.5	21.3	22.4	22.9	22.5
T_{HOT}	32.2	33.3	35.3	35.7	31.3	35.2	32.6	34.3	36.7
熱穿透	2.9	2.5	2.8	2.5	4.0	18.2	19.6	17.4	8.7
太陽光	6.1	6.6	8.0	9.5	15.5	18.3	17.9	20.2	12.7
P_{cond}	5.0167	8.5795	16.0791	149.1645					
誤差值	49.6674	26.1895	77.8602	50.7656					

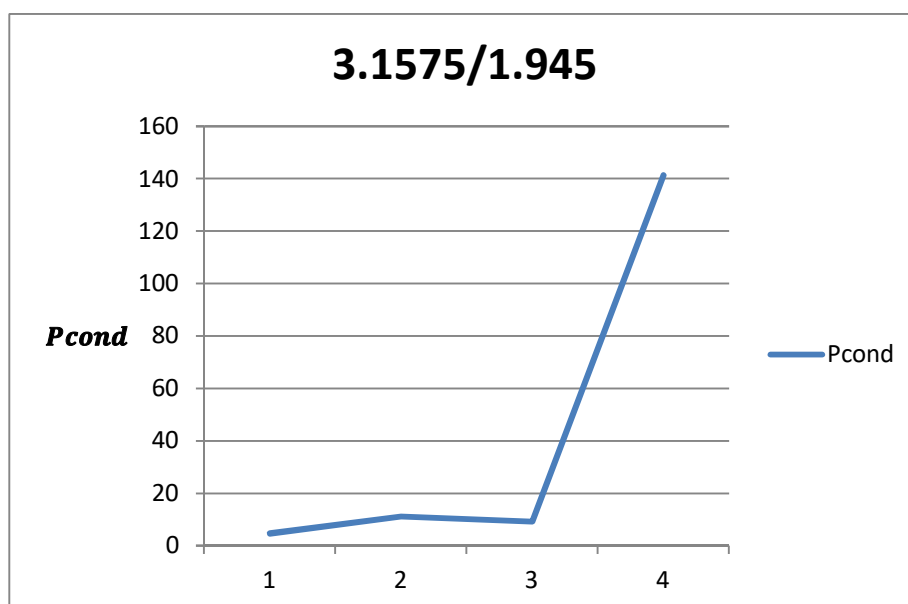
在不等距且間距前短後長的情況下，**氣/氣**模組的熱穿透及太陽光實驗數據皆最小， P_{cond} 值最低，代表單位時間通過的熱量最小，也就是隔熱效果最佳；誤差值最大的是水/氣模組。在此實驗中，誤差值較小的是氣/水模組，系統受熱較均勻、穩定。



3. 3.1575cm/1.945cm(L_2/L_1)

前/後 項目	氣/氣	氣/水	水/氣	水/水	氣/膠	膠/氣	水/膠	膠/水	膠/膠
T_{COLD}	22.6	21.8	22.3	22.5	22.3	21.9	21.5	22.6	22.5
T_{HOT}	32.3	31.0	34.4	35.2	33.9	35.1	34.3	39.1	34.0
熱穿透	3.0	8.7	6.2	7.8	1.4	3.6	2.4	4.1	1.2
太陽光	5.9	6.5	9.0	10.1	1.8	5.5	3.0	4.8	1.8
P_{cond}	4.6790	11.2317	9.1869	141.3723					
誤差值	39.5925	65.1988	1.6216	42.8898					

在不等距且間距前長後短的情況下，**氣/氣模組**的熱穿透及太陽光實驗數據皆最小， P_{cond} 值最低，代表單位時間通過的熱量最小，隔熱效果最佳。在此實驗中，誤差值最小的是水/氣模組，與其他有極顯著的差別，代表此系統極穩定、受熱非常均勻；誤差值最大的是氣/水模組；同時，此模組之熱穿透、太陽光實驗數據和 P_{cond} 皆低，也是可利用的模組。



(三) 雙層介質之 L_1 與 L_2 長短之比較

由上述各模組實驗得知，氣/氣為最佳介質層，故以下為不同長度氣/氣之模組實驗數據；此外，我們多測光通量lux = 在生活中， P_{cond} 越低，lux越高，為最佳隔熱及高進光量模組。

1. 等距(氣/氣)

前/後	1.945/1.945	3.1575/3.1575	4.3/4.3	4.95/4.95
T_{cold}	27.7	26.2	27.1	28.9
T_{hot}	31.4	32.1	33.3	35.0
熱穿透	2.5	1.4	1.3	1.8
光通量	4	4	4	4
P_{cond}	2.7135	2.6654	2.0567	1.8916
誤差值	-19.0459	-20.4809	-38.6408	-43.5663
Sc 值	0.0046	0.0026	0.0024	0.0033

證實等距模組的誤差最小，是最優良的模組。

2. 前短後長(氣/氣)

前/後	1.945/3.1575	1.945/4.3	1.945/4.95	3.1575/4.3	3.1575/4.95	4.3/4.95
T_{cold}	21.8	26.2	26.4	26.7	25.8	28.9
T_{hot}	32.2	33.3	32.2	31.8	33.2	32.2
熱穿透	2.9	1.6	2.2	1.6	1.7	1.5
光通量	7	5	9	2	6	4
P_{cond}	5.0167	3.2435	2.5281	1.9510	2.7214	1.0578
誤差值	49.6674	-3.2340	-32.9992	-41.7942	-18.8102	-68.4418
Sc 值	0.0054	0.0030	0.0041	0.0030	0.0032	0.0033

前短後長模組明顯 P_{cond} 值最高，但光通量高，為高進光量模組。

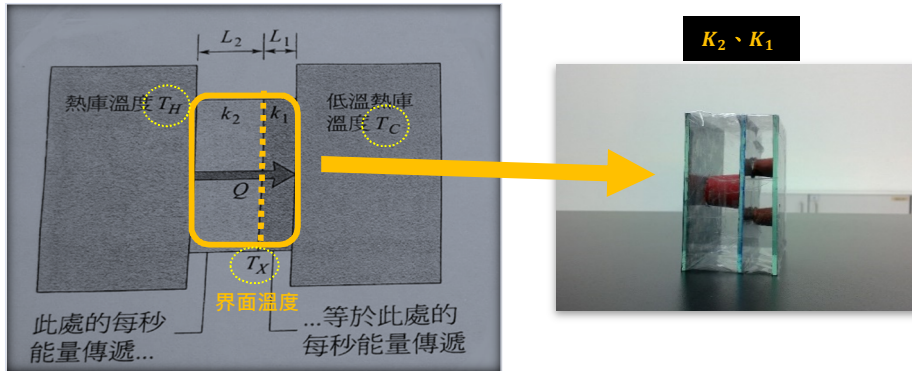
3. 前長後短(氣/氣)

前/後	3.1575/1.945	4.3/1.945	4.3/3.1575	4.95/1.945	4.95/3.1575	4.95/4.3
T_{cold}	22.6	29.0	26.4	26.4	28.0	27.1
T_{hot}	32.3	33.3	31.3	32.6	31.1	31.2
熱穿透	3.0	1.4	1.5	2.5	1.5	1.3
光通量	7	5	2	9	6	4
P_{cond}	4.6790	1.9643	1.8745	2.7025	1.1400	1.3142
誤差值	39.5925	-41.3974	-44.0765	-19.3741	-65.9894	-60.7924
Sc 值	0.0056	0.0026	0.0028	0.0046	0.0028	0.0024

P_{cond} 明顯比前短後長低，因為前長後短模組的 L_2 較長，熱能通過所需時間長，導致溫度偏低。

(四) 熱絕緣原理

兩面的溫度分別保持在 T_H 、 T_C 兩面的面積均為 A 。現在我們要導出在穩態過程中，雙層板的熱傳導率。所謂穩態，就是在任何時刻，板子裡面各點的溫度以及熱傳導率均不隨時間改變。在穩態之下，雙層板中個點的熱傳導率必相同。這相當於這麼說，在一段時間內傳過一物質之能量，必等於同一段時間內傳過另一物質之能量。否則，雙層板中的溫度即不可能保持穩定。令兩不同質料平板界面之溫度為 T_X ，則可得到公式。



$$(1) P_{cond} = \frac{k_2 A (T_H - T_X)}{L_2} = \frac{k_1 A (T_H - T_C)}{L_1}$$

$$(2) T_X = \frac{k_1 L_2 T_C + k_2 L_1 T_H}{k_1 L_2 + k_2 L_1}$$

$$(3) P_{cond} = \frac{Q}{t} = KA \frac{T_H - T_C}{L}$$

物質	熱導係數K
空氣	0.026
水	0.6

(五) 研究結果

1. 由 P_{cond} ，熱穿透和太陽能實驗可得知，不論距離長短，氣/氣的隔熱效果皆最佳。
2. 三片玻璃和雙片玻璃實驗之最佳結果相反，前者在空氣的效果最好，後者則是最差，我們推測原因是玻璃厚度影響,玻璃越厚,遮蔽係數越低,隔熱效果好
3. 由誤差值可得知，改變 L_1 、 L_2 有極大的影響，而等距(3.1575cm/3.1575cm)，效果最好。
4. 實驗中誤差值最小者，(1.945cm/3.1575cm)模組為氣/水，(3.1575cm/1.945cm)模組為水/氣；誤差值最大者，(1.945cm/3.1575cm)模組為水/氣(3.1575cm/1.945cm)模組為氣/水。誤差越大代表系統不穩定,隔熱效果不佳,。
5. 誤差值越大者，系統受熱越不均，較不適合製造隔熱玻璃。反之，誤差小代表系統穩定，較適合用於生活。

四、測量四片玻璃(三層介質)實驗數據

(一) 實驗步驟

1. 將四片玻璃分別固定間距後組合
2. 測量並讀寫數據。

(二) 實驗結果

項目 \ 前/中/後	氣/氣/氣
T_{COLD}	26.3
T_{HOT}	31.8
熱穿透	0.5
P_{cond}	1.6565
Sc 值	0.0009

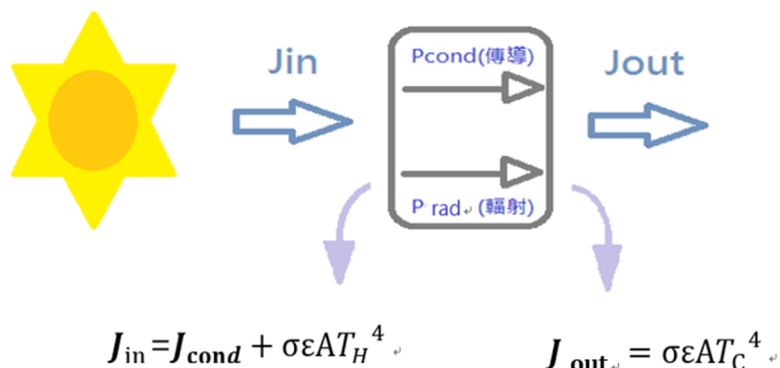
(三) 研究結果

1. 在這個實驗中我們發現四片玻璃的效果比三片玻璃的效果還要好，因為四片玻璃厚度厚，Sc值(遮蔽係數)低，所測出來的數值及 P_{cond} 也低。並且比較雙片、三片、四片玻璃，玻璃厚度越厚Sc值(遮蔽係數)越低，故隔熱效果好，

可用於生活。

- 此外，我們利用普物熱輻射公式應用在模組上，如下列等式:

$$J_{in} = J_{cond} + \sigma \epsilon A T^4 = J_{out}$$



(四) Sc值(遮蔽係數)

- Sc 值(遮蔽係數)的算法是將以熱穿透測量儀測得的數據除以原始熱度 $539.3W/m^2$ 。
- 雙片玻璃

空氣	水	太白粉：水 =1:2	太白粉：水 =1:3	太白粉：水 =1:4	太白粉：水 =1:5
0.0406	0.0275	0.0096	0.0135	0.0154	0.0188

3. 三片玻璃

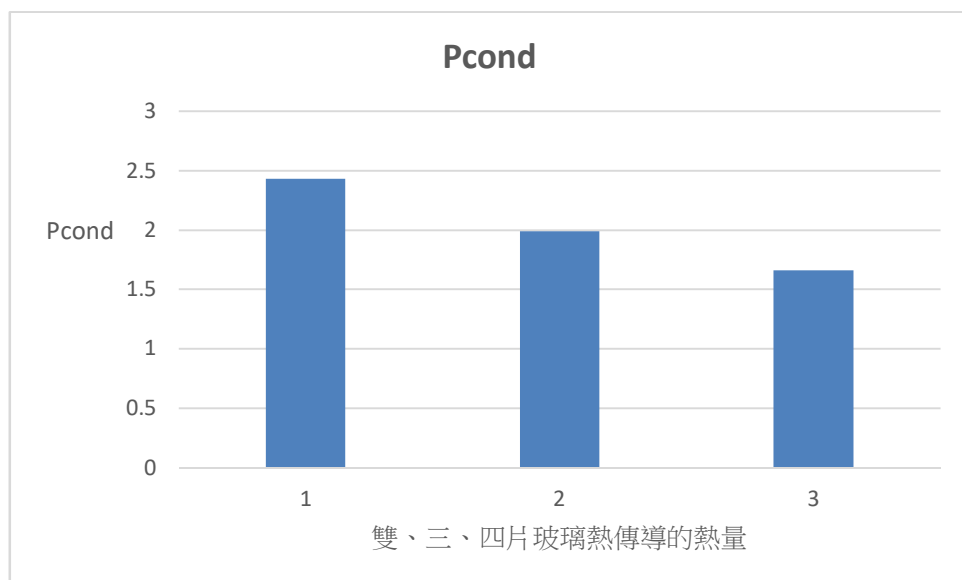
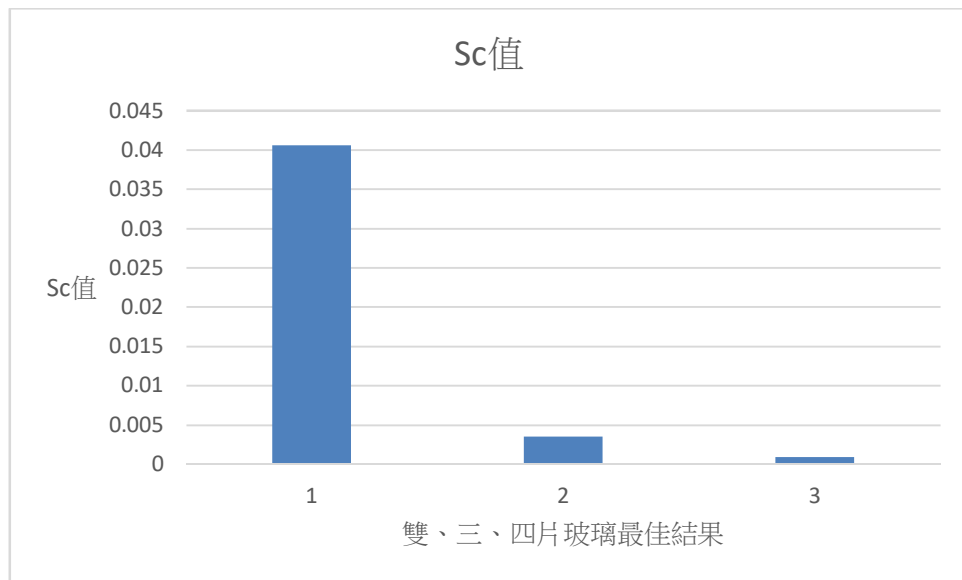
項目 \ 前/後	氣/氣	氣/水	水/氣	水/水
3.1575/3.1575	0.0035	0.0059	0.0094	0.0047
1.945/3.1575	0.0035	0.0035	0.0035	0.0035
3.1575/1.945	0.0082	0.0094	0.0129	0.0141

4. 四片玻璃

項目 \ 前/中/後	氣/氣/氣
3.1575/3.1575/3.1575	0.0009

5. 雙、三、四片空氣介質比較

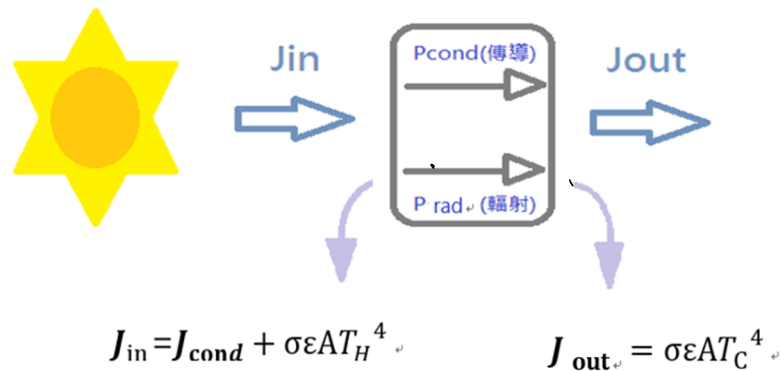
	氣	氣/氣	氣/氣/氣
Sc 值	0.0406	0.0035	0.0009
Th-Tc	2.7	4.4	5.5
Pcond	2.4291	1.9877	1.6565



(五) Sc值(遮蔽係數)之分析

1. 在 P_{cond} 實驗和Sc值的三片玻璃實驗中，前者在等距模組最好，後者則是前短後長模組，推測原因是因 P_{cond} 是理論值，Sc值是測量實際值，可能有熱量散失，導致結果不一致。
2. 紅外光遮蔽率和熱穿透率呈反比，紅外光遮蔽率越高，熱穿透率越低。
3. 太陽輻射能量透過任意玻璃的量與空白能量實驗(539.3)之比值。訂定空白實驗 Sc 值為「1」
4. 遮蔽係數越小，太陽能源流入越少，可降低冷氣房負荷，節省能源。
5. 此外，我們利用普物熱輻射公式應用在模組上，如下列等式:

$$J_{in} = J_{cond} + \sigma \epsilon A T^4 = J_{out}$$



捌、結論

- 一. 在隔熱紙的比較中，金屬隔熱紙明顯比不含金屬的隔熱效率差，且不論是哪種隔熱紙效果都是反>正。
- 二. 雙片玻璃(單層介質)的實驗中，隔熱效果是太白粉膠體>水>空氣層。其中，太白粉膠體的填充，水的比例愈高，隔熱效果愈差。最佳的結果為水比太白粉1:2膠體。
- 三. 三片玻璃實驗中，計算結果誤差值較大者，不適合製造隔熱玻璃。誤差小者系統較穩定，可多多利用。
- 四. 因為玻璃厚度是四片玻璃>三片玻璃>雙片玻璃，所以在 Sc 值的比較中，四片玻璃>三片玻璃>雙片玻璃，因此，隔熱效果是四片玻璃>三片玻璃>雙片玻璃。
- 五. 三片玻璃(雙層介質)的實驗中，兩層皆空氣的模組是隔熱效果最佳的，跟雙片玻璃(單層介質)的實驗結果相反，我們推測原因是三片玻璃的玻璃厚度厚,遮蔽係數低,測出的輻射熱值低,也就是隔熱效果好。反之,雙片玻璃厚度薄,遮蔽係數較高,測出輻射熱值高,也就是隔熱比較不好。另外，我們也補測了其他等距、前長後短、前短後長模組，並進行比較。
- 六. Sc值（遮蔽係數）即測出之熱穿透÷原始數據（539.3）。雙片玻璃厚度薄，遮蔽係數高，效果較差；反之，四片玻璃厚度厚，Sc值低，效果較佳。另外，我們可以代入雙、三、四片的Sc值來計算。我們也找到了熱輻射公式 $P_{rad} = \sigma \epsilon A T^4$ ，若要考慮穿透輻射，需計算通過玻璃層的折射和反射，因為通過玻璃的折射、反射造成的能量穿透

效應，遠大於黑體輻射($P_{rad} = \sigma \epsilon AT^4$)。

七. 倘若未來能查到貼了隔熱紙(F20)的玻璃之 ϵ ，我們就可以精準計算 J_{in} 、 J_{out} ，進一步算出熱量的散失，以改善本實驗之誤差，並精準求出 J_{cond} 的大小。

八. 在與反射、折射穿透能量大小做比較，以達到更精準的實驗模組。

玖、未來展望

- 一、希望未來可以更加精算 P_{cond} 值、並用Sc值做對照；此外，精算 J_{in} 、 J_{out} 值，求出 P_{rad} 的實際值，並和理論公式 $P_{rad} = \sigma \epsilon AT^4$ 比較，求出誤差大小，進一步了解如何改善散失熱量的大小。
- 二、未來若有機會將更準確改變L1和L2,算出誤差最小以及隔熱最佳的模組。另外若要考慮穿透輻射，需計算先通過玻璃層介質的折射和反射造成的穿透能量，因為這對光輻射的穿透效應，遠大於黑體輻射($P_{rad} = \sigma \epsilon AT^4$)。
- 三、因為輻射的反射、折射對於和角度有很大關係，我們也想往這個方向研究。

壹拾、參考資料

一、隔熱玻璃

1. <http://sa.ylib.com/MagArticle.aspx?Unit=easylearn&id=1636>
2. <https://www.courcasa.com/p/0QRm>
3. <https://www.businessweekly.com.tw/article.aspx?id=9210&type=Blog>

二、隔熱紙、漆

4. <https://carnews.com/article/info/da2361ea-4b09-11e8-8ee2-42010af00004/>
5. <http://sum168nt168.pixnet.net/blog/post/99784-%E6%B1%BD%E8%BB%8A%E8%BF%8E%E5%A4%8F-%E6%95%99%E6%88%B0%E5%AE%88%E5%89%87%E7%AC%AC%E4%B8%89%E7%AB%A0-%E7%8E%BB%E7%92%83%E9%9A%94%E7%86%B1%E6%8E%AA%E6%96%BD>
6. <http://www.csc.kth.se/~cgjoh/ambblack.pdf>

【評語】 030110

本作品以自製簡易的雙、三、四片隔熱玻璃，研究覆蓋物及介質對其隔熱效能及遮蔽係數的影響，是一件實用的科學研究，內容貼近生活有趣，能讓容易取得的材料變為實用的物品，相當值得鼓勵。

本作品用了很多高端儀器做實驗，實驗的控制變因也做得相當好，尤其是精確的熱流量測是相當困難的，同學們願意挑戰，必須給予肯定。

但是實驗結果有些不合理之處，雙片玻璃（單層介質）的實驗中最佳介質為水：太白粉為的 1:2 膠體，而非熱傳導係數小很多的空氣。我想這部分是作者把透光率和隔熱效能混淆了。

討論時若能區分出熱傳導，熱輻射，吸熱散熱等因素的主導性，將會是更有意義的結論。另外，如果實驗在熱平衡的狀態下做會更好。

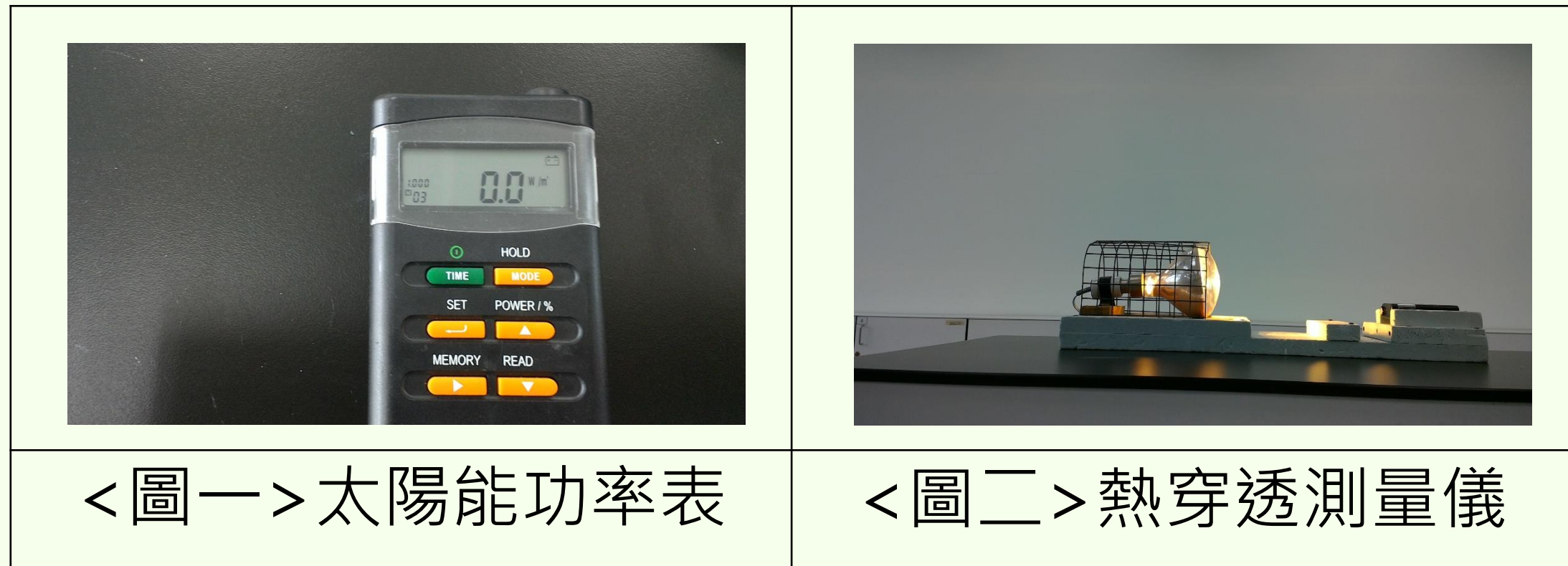
摘要

為研究出可自製的隔熱光學玻璃，我們測量了不同表面覆蓋物的單片玻璃，改變正、反、單、雙面等變因，以各種測輻射儀器找出隔熱最佳的非金屬反面隔熱紙，用其製作雙片玻璃(單層介質)。接著根據普物的多層板公式製造三片玻璃(雙層介質)之 L_1 、 L_2 等間距與不等距模組，發現以熱輻射角度而言，空氣才是最佳介質。實驗後另外計算「單位時間通過的熱量」(P_{cond})，再將數據套回公式，得出實驗誤差值。接下來製作介質為空氣的四片玻璃(三層介質)，實驗後另外計算Sc值(遮蔽係數)，並和上述各模組作Sc值比較，發現隔熱效果最好的模組是等距四片氣/氣/氣玻璃」。以普物熱輻射公式($P_{rad} = \sigma \epsilon AT^4$)來看，我們的模組有如下之等式 $J_{in} = J_{out} = J_{cond} + \sigma \epsilon AT^4 (P_{cond} + \text{輻射})$ 。

動機

搭飛機時，發現機艙窗玻璃共有三層，在高空中飛行時摸起來不冰冷，隔熱效果極佳。我們很好奇三片玻璃中間如果填入了不同材質，會不會對隔熱效果有影響?同時，聽理化老師敘述在第三冊自然與生活科技課本中的熱源的傳遞方式，我們便想，可不可以自製簡易的隔熱玻璃，於是以此為出發點，著手研究。在隔熱效能之外，我們也想增進玻璃的採光、節能、以及近年來成為討論焦點的Sc值(遮蔽係數)。

主要實驗器材

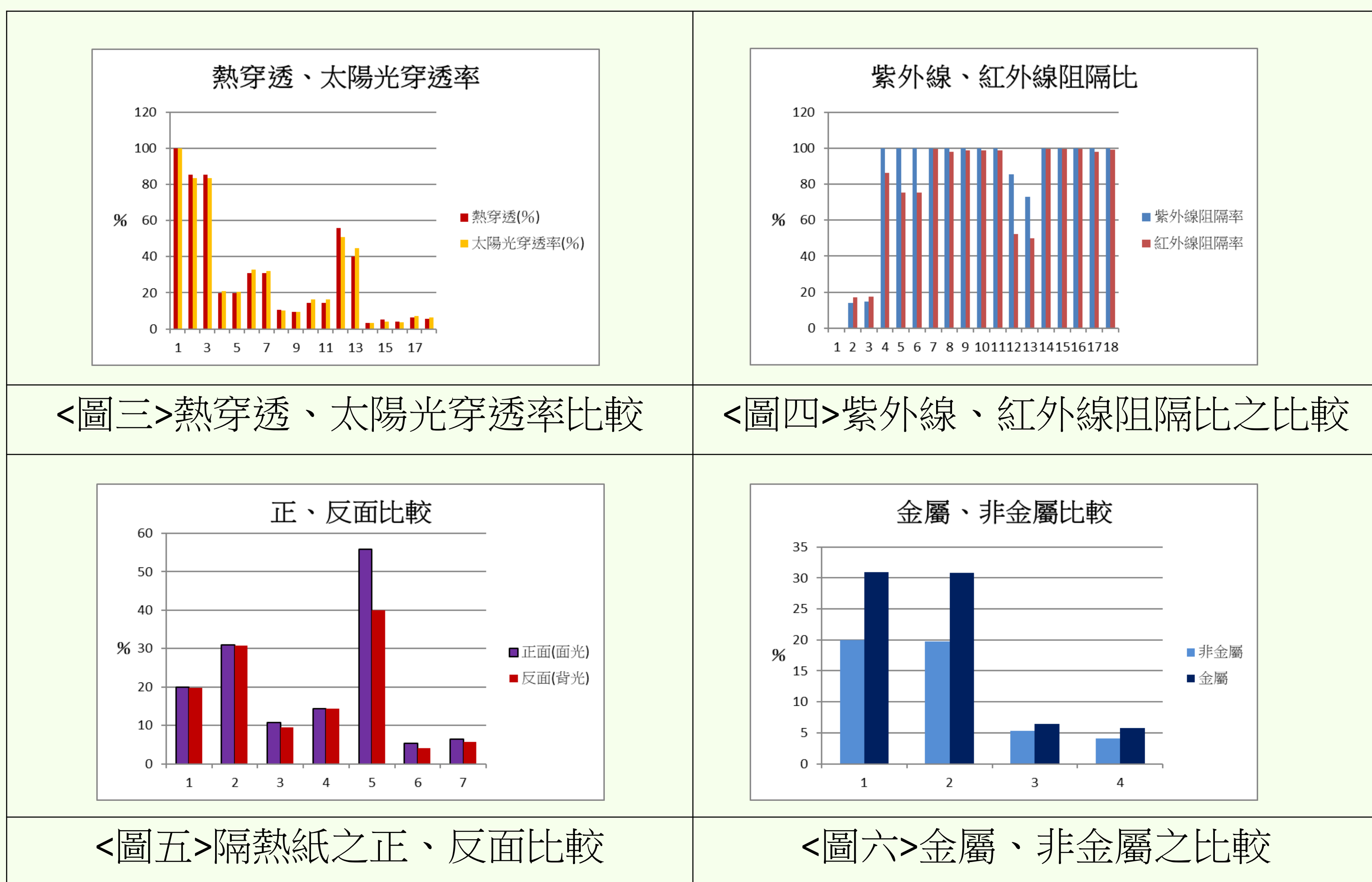


• 自製隔熱玻璃

- 單片
 - 以太陽光測量儀、熱穿透測量儀、太陽能膜測量儀、太陽能功率表實驗
 - 測出最佳結果「非鏡面反面隔熱紙」
- 雙片
 - 依單片實驗最佳的「非鏡面反面隔熱紙」製造雙片玻璃
 - 以太陽光測量儀、熱穿透測量儀、太陽能膜測量儀、太陽能功率表實驗
- 三片
 - 製作介質層固定寬度的三片玻璃
 - 進行實驗後以數據推回公式，比較誤差值
- 四片
 - 採取最佳的模組等距氣\氣\氣，實驗後測量Sc值(遮蔽係數)
 - J_{in} (流入的熱流量) = 熱輻射的熱量 + 熱傳導的熱量 = J_{out} (流出的熱量)

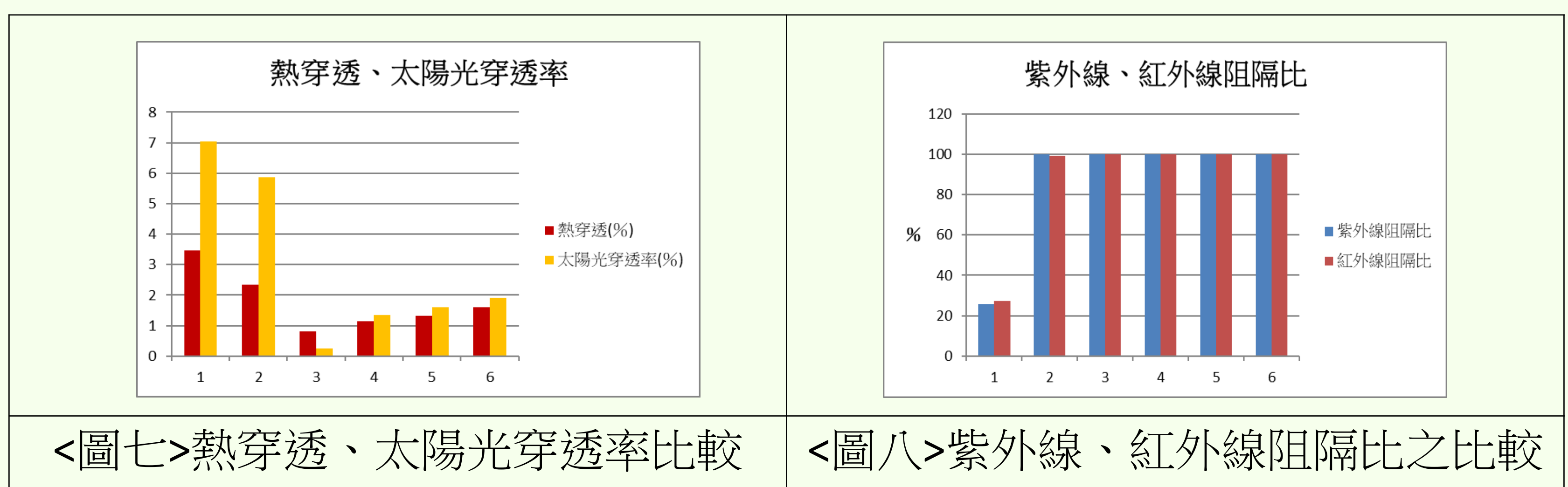
實驗步驟與研究結果

一、 測量單片玻璃實驗數據



由實驗可得知，膠帶對數據的影響微小，可忽略不計。在隔熱紙的比較中，金屬隔熱紙比不含金屬的隔熱紙效率差。隔熱紙不論貼在正面還是反面，效果大 多是反>正。隔熱漆幾乎可以擋掉全部的熱能，除隔熱漆外效果最好的是反面(背光)的非金屬隔熱紙，所以在雙片玻璃(單層介質)實驗中一律採用此玻璃。

二、 測量雙片玻璃(單層介質)實驗數據



填充物的隔熱效果是太白粉膠體>水>空氣層。其中，太白粉膠體的填充，水的比例愈高，隔熱效果愈差。

三、 測量三片玻璃(雙層介質)實驗數據

1. 介質層距離如下:

L_2 [面光]	L_1 [背光]
3.1575cm	3.1575cm
1.9450cm	3.1575cm
3.1575cm	1.9450cm

2. 填入不同介質

- ① 空氣
- ② 水
- ③ 水比太白粉=3:1膠體

氣/氣	氣/水	水/氣	水/水	氣/膠	膠/氣	水/膠	膠/水	膠/膠
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

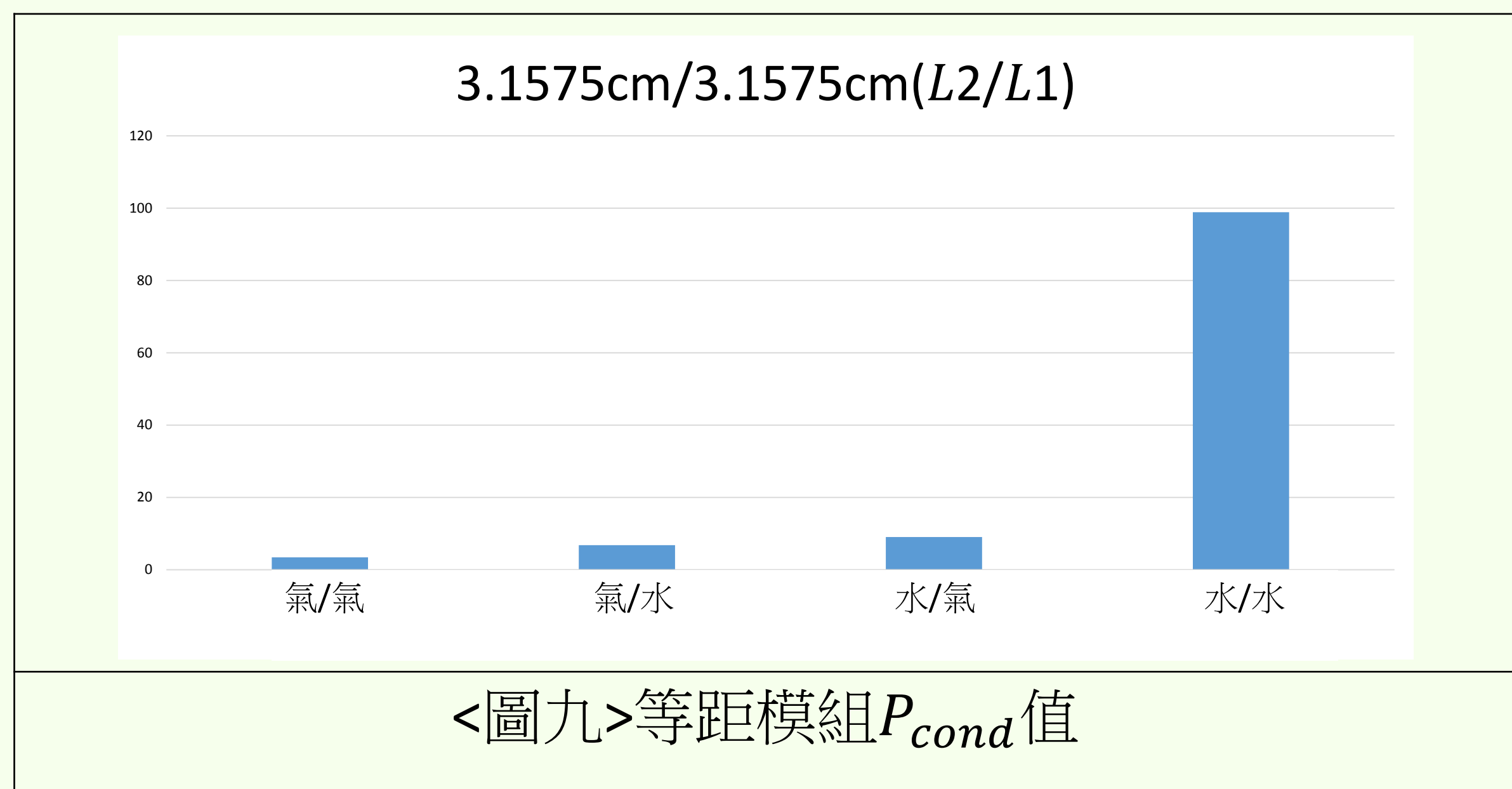
3. 以太陽光測量儀、熱穿透測量儀及太陽能功率表進行實驗。使用熱穿透測量儀後，測量玻璃面光面與背光面的溫度(T_H 、 T_C)。
4. 讀寫數據，並將其套入普物的公式，比較誤差值。

實驗紀錄：

1. 3.1575cm/3.1575cm(L_2/L_1)

在間距固定的情況下，氣/氣模組的熱穿透及太陽光實驗數據皆最小， P_{cond} 值最低，代表單位時間通過的熱量最小，也就是隔熱效果最佳。

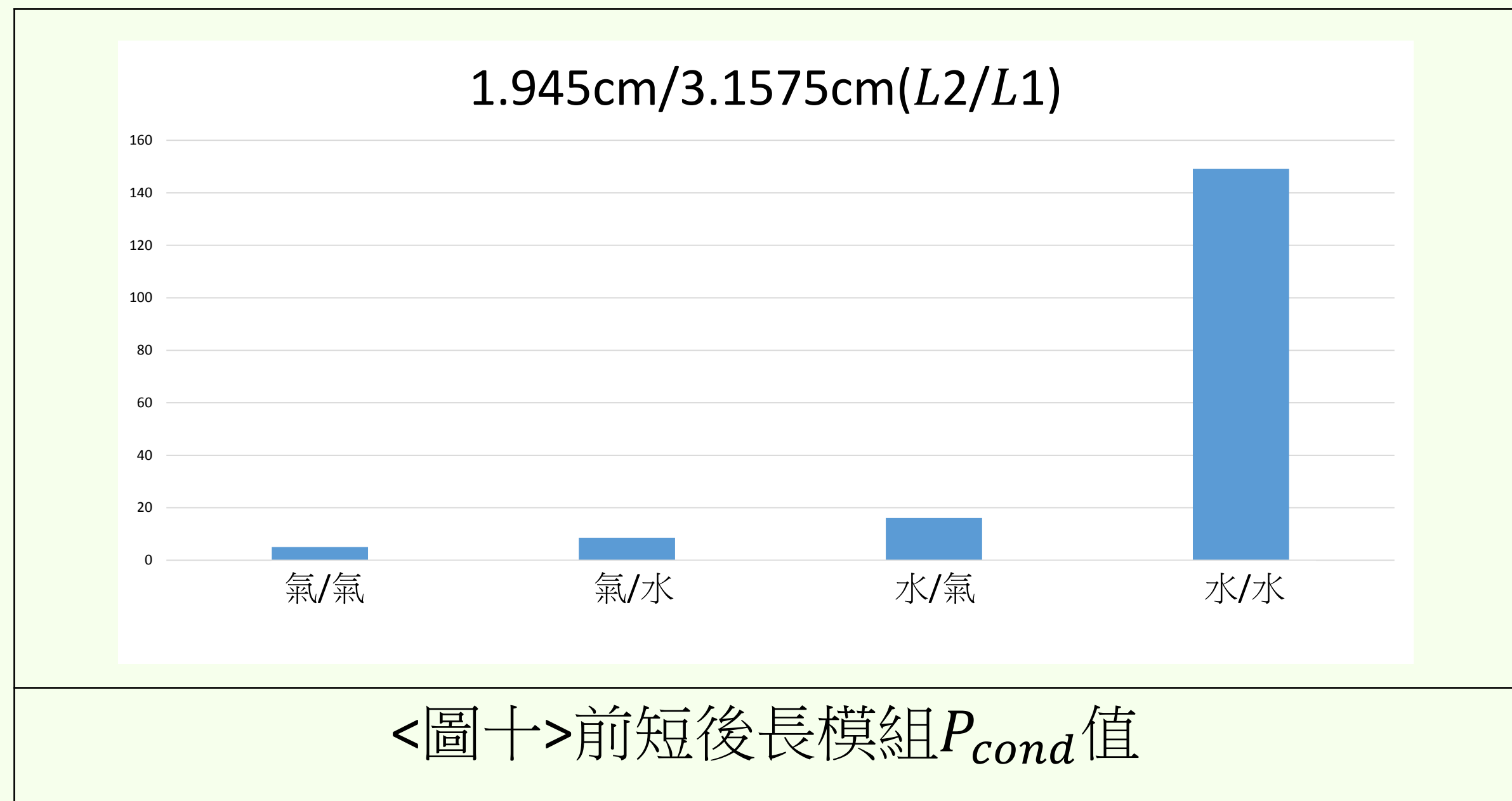
前/後 項目	氣/氣	氣/水	水/氣	水/水	氣/膠	膠/氣	水/膠	膠/水	膠/膠
T_{COLD}	22.7	22.5	22.6	23.1	22.4	22.1	22.6	22.8	22.4
T_{HOT}	31.3	31.6	34.7	34.1	31.1	34.3	31.8	35.1	35.7
熱穿透	2.8	3.9	6.9	3.0	4.2	10.7	10.3	3.6	8.8
太陽光	4.8	7.8	8.1	6.3	8.7	8.7	7.0	6.6	8.7
P_{cond}	3.3	6.7	9.0	98.9					



2. 1.945cm/3.1575cm(L_2/L_1)

在不等距且間距前短後長的情況下，氣/氣模組的熱穿透及太陽光實驗數據皆最小， P_{cond} 值最低，代表單位時間通過的熱量最小，也就是隔熱效果最佳；誤差值最大的是水/氣模組。在此實驗中，誤差值較小的是氣/水模組，系統受熱較均勻、穩定。

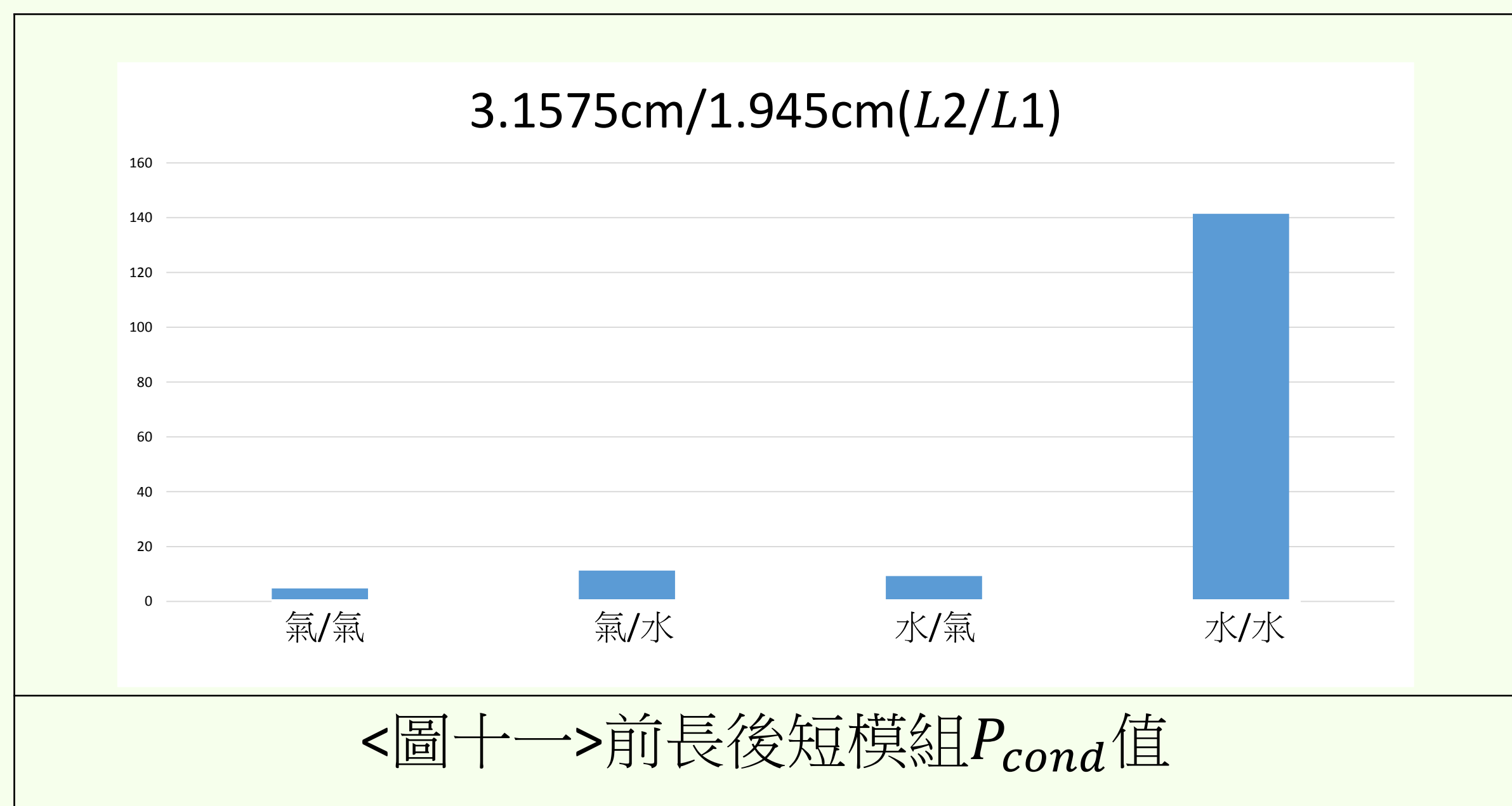
前/後 項目	氣/氣	氣/水	水/氣	水/水	氣/膠	膠/氣	水/膠	膠/水	膠/膠
T_{COLD}	21.8	22.0	21.7	22.3	22.5	21.3	22.4	22.9	22.5
T_{HOT}	32.2	33.3	35.3	35.7	31.3	35.2	32.6	34.3	36.7
熱穿透	2.5	2.7	2.8	2.5	4.0	18.2	19.6	17.4	8.7
太陽光	6.1	6.6	8.0	9.5	15.5	18.3	17.9	20.2	12.7
P_{cond}	5.0	8.6	16.1	149.2					
誤差值	49.7	26.2	77.9	50.8					



3. 3.1575cm/1.945cm(L_2/L_1)

在不等距且間距前長後短的情況下，氣/氣模組的熱穿透及太陽光實驗數據皆最小， P_{cond} 值最低，代表單位時間通過的熱量最小，也就是隔熱效果最佳。在此實驗中，誤差值最小的是水/氣模組，與其他有顯著差別，代表此系統穩定、受熱均勻；誤差值最大的是氣/水模組；同時，此模組之熱穿透、太陽光實驗數據和 P_{cond} 皆低，也是可利用的模組。

前/後 項目	氣/氣	氣/水	水/氣	水/水	氣/膠	膠/氣	水/膠	膠/水	膠/膠
T_{COLD}	22.6	21.8	22.3	22.5	22.3	21.9	21.5	22.6	22.5
T_{HOT}	32.3	31.0	34.4	35.2	33.9	35.1	34.3	39.1	34.0
熱穿透	2.9	8.7	6.2	7.8	1.4	3.6	2.4	1.4	1.2
太陽光	6.1	6.5	9.0	10.1	1.8	5.5	3.0	1.8	1.8
P_{cond}	4.7	11.2	9.2	141.4					
誤差值	39.6	65.2	1.6	42.9					



前/後	1.945/1.945	3.1575/3.1575	4.3/4.3	4.95/4.95
T_{cold}	27.7	26.2	27.1	28.9
T_{hot}	31.4	32.1	33.3	35.0
熱穿透	2.5	1.4	1.3	1.8
光通量	4	4	4	4
P_{cond}	2.7	2.6	2.1	1.9
誤差值	-19.0	-20.5	-38.6	-43.6

由以下各模組實驗得知，氣/氣為最佳介質層，故以下為不同長度氣/氣之模組實驗數據；此外，我們多測光通量lux = 在生活中， P_{cond} 越低，lux 越高，為最佳隔熱及高進光量模組。

➡ 證實等距的誤差為最小，是最優良的模組。

前/後	1.945/3.1575	1.945/4.3	1.945/4.95	3.1575/4.3	3.1575/4.95	4.3/4.95
T_{cold}	21.8	26.2	26.4	26.7	25.8	28.9
T_{hot}	32.2	33.3	32.2	31.8	33.2	32.2
熱穿透	2.9	1.6	2.2	1.6	1.7	1.5
光通量	7	5	9	2	6	4
P_{cond}	5.0	3.2	2.5	1.9	2.7	1.0
誤差值	49.6	-3.2	-32.9	-41.7	-18.8	-68.4

➡ 明顯 P_{cond} 值最高，為差的隔熱模組；但光通量高，為高進光量模組。

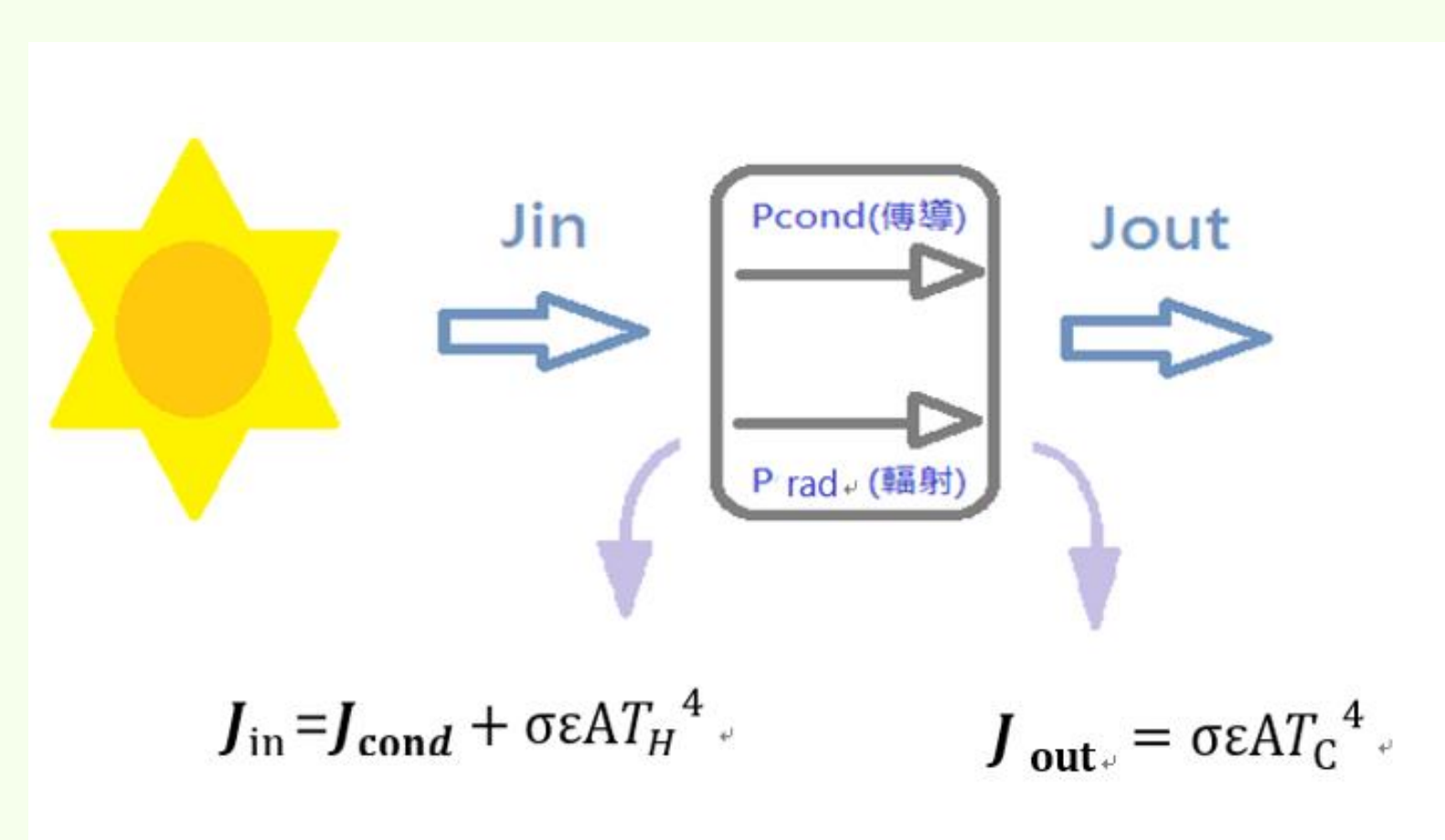
前/後	3.1575/1.945	4.3/1.945	4.3/3.1575	4.95/1.945	4.95/3.1575	4.95/4.3
T_{cold}	22.6	29.0	26.4	26.4	28.0	27.1
T_{hot}	32.3	33.3	31.3	32.6	31.1	31.2
熱穿透	3.0	1.4	1.5	2.5	1.5	1.3
光通量	7	5	2	9	6	4
P_{cond}	4.6	1.9	1.8	2.7	1.1	1.3
誤差值	39.5	-41.3	-44.0	-19.3	-65.9	-60.8

➡ P_{cond} 明顯比前短後長低，因為前長後短 L_2 較長，熱能通過所需時間長，導致溫度偏低，為較佳隔熱模組。

四、測量四片玻璃(三層介質)實驗數據

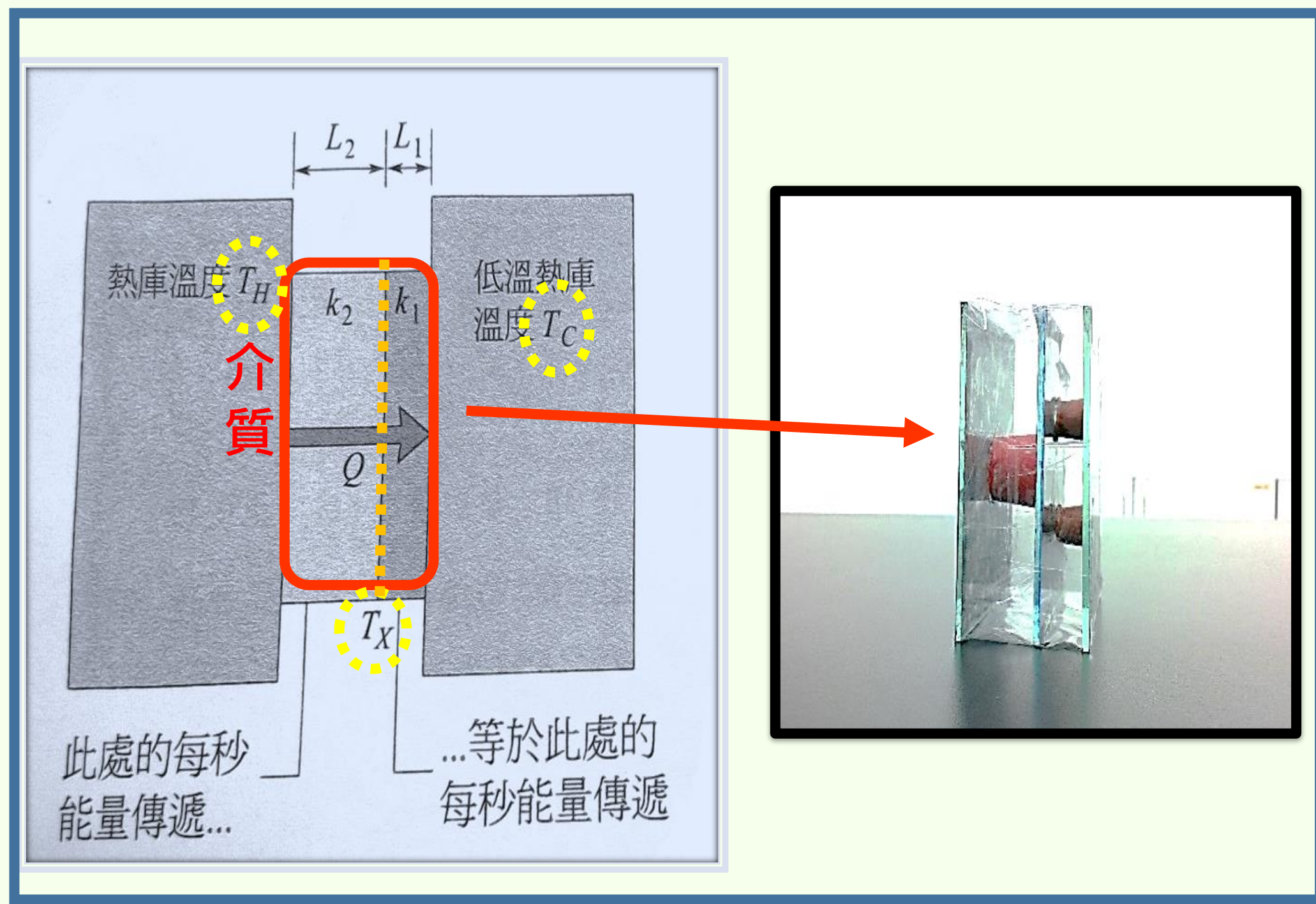
- 設定介質層為果最佳的等距3.1575cm/3.1575cm/3.1575cm，介質為空氣，並將四片玻璃分別固定間距後組合。
- 在這個實驗中我們發現四片玻璃的效果比三片玻璃的效果還要好，因為四片玻璃厚度厚，Sc值(遮蔽係數)低，所測出來的數值及 P_{cond} 也低。並且比較雙片、三片、四片玻璃，玻璃厚度越厚遮蔽係數越低，故隔熱效果好，可用於生活。
- 此外，我們利用普物熱輻射公式應用在模組上，如下列等式: $J_{in} = J_{cond} + \sigma \epsilon AT_H^4 = J_{out}$

	氣/氣/氣
T_{COLD}	26.3
T_{HOT}	31.8
熱穿透	0.5
P_{cond}	1.6565



三片及四片玻璃之熱傳導公式:

兩面的溫度分別保持在 T_H 、 T_C 兩面的面積均為 A 。現在我們要導出在穩態過程中，雙層板的熱傳導率。所謂穩態，就是在任何時刻，板子裡面各點的溫度以及熱傳導率均不隨時間改變。在穩態之下雙層板中各點的熱傳導率必相同。這等於是，在一段時間內傳過某一物質之能量，必等於同一段時間內傳過另一物質之能量。否則，雙層板中的溫度即不可能保持穩定。令兩不同質料平板界面之溫度為 T_X ，則可得到公式。



$$P_{cond} = \frac{k_2 A (T_H - T_X)}{L_2} = \frac{k_1 A (T_H - T_C)}{L_1}$$

$$T_X = \frac{k_1 L_2 T_C + k_2 L_1 T_H}{k_1 L_2 + k_2 L_1}$$

$$P_{cond} = \frac{Q}{t} = KA \frac{T_H - T_C}{L}$$

物質	熱導係數K
空氣	0.026
水	0.6

由 P_{cond} ，熱傳導和太陽能實驗可得知，氣/氣的隔熱效果皆最佳，三片玻璃和雙片玻璃實驗之最佳結果相反，前者在空氣的效果最好，後者則是最差，我們推論是儀器主要是測輻射熱，而三片玻璃的厚度越厚，遮蔽係數越低，所測出的值就越低，也就是隔熱效果好。反之，雙片玻璃玻璃厚度薄，遮蔽係數高，測出的值比較高，也就是隔熱效果差。由誤差值可得知，改變 L_1 、 L_2 有極大的影響，而等距(3.1575cm/3.1575cm)，效果最好。

Sc值實驗及分析:

- Sc值為太陽輻射能量透過任意玻璃的量與空白能量實驗(539.3)之比值，遮蔽係數越小，熱源流入越少，可降低冷氣房負荷，節省能源。
- 在實驗和Sc值的三片玻璃實驗中，前者在等距模組最好，後者則是前短後長模組，推測原因是因 P_{cond} 是理論值，Sc值是測量實際值，可能有熱量散失，導致結果不一致。

熱輻射原理分析:

我們利用普物熱輻射公式應用在模組上，如下列等式:

$$J_{in} = J_{cond} + \sigma \epsilon A T^4 = J_{out}$$

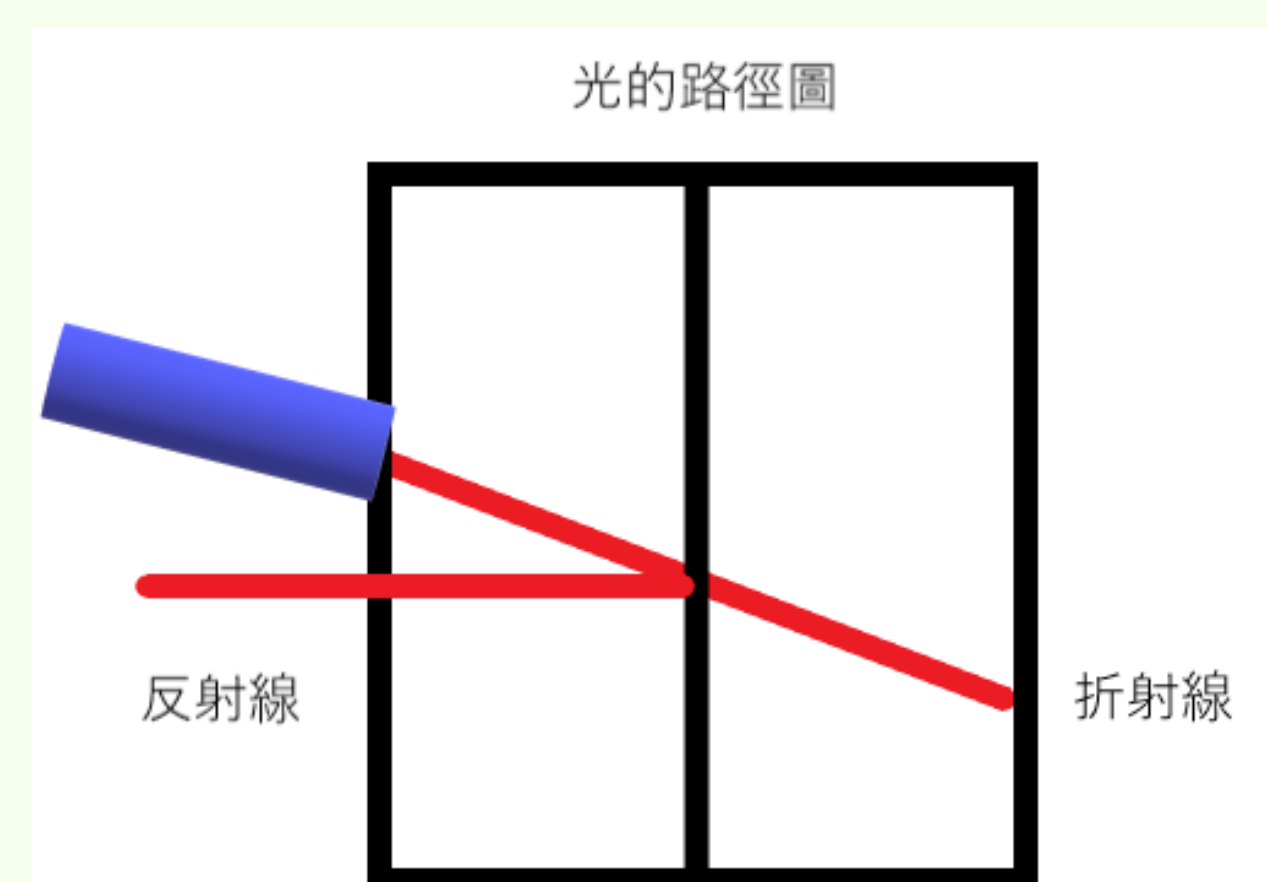
J_{in} 即熱源進入時的能量， J_{out} 為熱能射出時的能量， J_{cond} 即 P_{cond} ， σ 為斯特凡-波耳茲曼常數，放射率 ϵ 介於0~1之間， A 為面積， T 為溫度。

結論

- 雙片玻璃(單層介質)的實驗中，隔熱效果是太白粉膠體>水>空氣層。其中，太白粉膠體的填充，水的比例愈高，隔熱效果愈差。最佳的結果為水比太白粉1:2膠體。
- 三片玻璃實驗中，計算結果誤差值較大者，不適合製造隔熱玻璃。誤差小者系統穩定，可多多利用。
- 因為玻璃厚度是四片玻璃>三片玻璃>雙片玻璃，所以在Sc值的比較中，雙片玻璃>三片玻璃>四片玻璃，因此，隔熱效果是四片玻璃>三片玻璃>雙片玻璃。
- 三片玻璃(雙層介質)的實驗中，兩層皆空氣的模組是隔熱效果最佳的，跟雙片玻璃(單層介質)的實驗結果相反，我們推測原因是三片玻璃的玻璃厚度厚，遮蔽係數低，測出的輻射熱值低，也就是隔熱效果好。反之，雙片玻璃厚度薄，遮蔽係數較高，測出輻射熱值高，也就是隔熱比較不好。另外，我們也補測了其他等距、前長後短、前短後長模組，並進行比較。
- Sc值(遮蔽係數)即測出之熱穿透÷清玻璃數據數據(539.3)。雙片玻璃厚度薄，遮蔽係數高，效果較差；反之，四片玻璃厚度厚，Sc值低，效果較佳。另外，我們可代入雙、三、四片的Sc值來計算。我們也找到了熱輻射公式 $P_{rad} = \sigma \epsilon A T^4$ ，若要考慮穿透輻射，需計算通過玻璃層的折射和反射，因為通過玻璃的折射、反射造成的能量穿透效應，遠大於黑體輻射($P_{rad} = \sigma \epsilon A T^4$)。
- 以台灣氣候而言，低熱穿透且低Sc值的玻璃為優良隔熱模組，高光通量為省電模組，雖然理論上反射光越高，透射光就會減少，熱能同時減少，然而實驗數據顯示光通量越高，熱穿透也越高，不可二者兼得。
- 倘若未來能查到貼了隔熱紙(F20)的玻璃之 ϵ ，就可以精準計算 J_{in} 、 J_{out} ，進一步算出熱量散失，以改善本實驗之誤差，並精準求出 J_{cond} 的大小。
- 在與反射、折射穿透能量大小做比較，以達到更精準的實驗模組。

未來展望

- 希望未來可以更加精算 P_{cond} 值、並用Sc值做對照；此外，精算 J_{in} 、 J_{out} 值，求出 P_{rad} 的實際值，並和理論公式 $P_{rad} = \sigma \epsilon A T^4$ 比較，求出誤差大小，進一步了解如何改善散失熱量的大小。
- 若有機會將更準確改變 L_1 、 L_2 ，算出誤差最小以及隔熱最佳的模組。
- 若要考慮穿透輻射，需計算先通過玻璃層介質的折射和反射造成的穿透能量，以下的圖片中發現輻射的反射、折射和角度有很大關係，我們也想繼續往這個方向研究。



參考資料

- <http://www.csc.kth.se/~cgjoh/amsblack.pdf>