

中華民國第 59 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高級中等學校組 化學科

第三名

050212

發光基團與巴克球作為二氧化碳還原光觸媒之
研究

學校名稱：臺北市立第一女子高級中學

作者： 高二 解宛芸	指導老師： 許名智
---------------	--------------

關鍵詞：發光基團、巴克球、二氧化碳還原

摘要

本研究使用巴克球(C₆₀)或巴克球衍生物(PC₆₁BM)作為主催化劑，發光基團(DTBT)作為副催化劑，兩者混摻成複合催化劑並進行各種變因調控，製成催化效果最佳的有機光觸媒，應用於還原二氧化碳生成有用的燃料，達到開發再生能源與減緩溫室效應的目的，另外也可以應用於殺菌與分解汙染物。

利用氣相層析儀進行二氧化碳還原產物的定性及定量分析，複合催化劑光催化二氧化碳還原產物以一氧化碳為主、甲烷為輔，主、副催化劑混摻的催化效率遠優於單一催化劑，複合催化劑的主催化劑選用 PC₆₁BM 優於選用 C₆₀，DTBT 與 PC₆₁BM 混摻莫耳比為 1：1 時一氧化碳的產率最佳，而莫耳比為 2：1 時甲烷產率較佳，若在反應瓶中添加氫氣或增加水量，皆有助於提高甲烷的產率。

壹、前言

一、研究動機

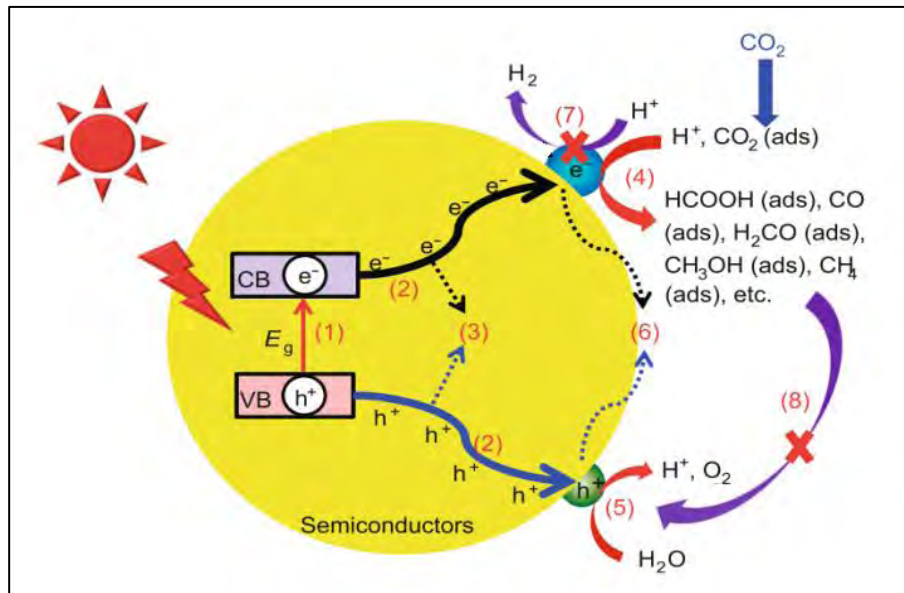
自十八世紀工業革命以來，科技蓬勃發展，人類對於化石燃料的需求與日俱增，然而化石燃料是有限的資源，無法永續使用，我們終究要正視地球的資源一天天減少的事實，再加上大量使用化石燃料加劇了溫室效應，日益嚴重的全球暖化帶來了越來越頻繁且嚴重的災害，這也是我們不能逃避的問題。因此尋找合適的替代能源，並試圖減緩接踵而至的氣候災害，是人類非常迫切的課題。替代能源包括太陽能、生質能、風力、海洋能以及地熱等等，其中以太陽能最為取之不盡且用之不竭，並擁有相當強的能量，是近年來各國研究單位所重視的研究方向。因此本研究利用光觸媒還原二氧化碳之機制，期望能設計出效果最佳之催化劑，並以太陽光作為能量來源，將二氧化碳還原產生高附加價值之產物，以緩解溫室效應與化石燃料貧乏之問題。

本研究將巴克球或富勒烯衍生物泛用導電材料與發光基團作為染料混摻使用，探討依不同比例混合所製成之元件，作為二氧化碳還原反應光觸媒對於效率之影響，更進一步以太陽光作為能量來源，如此取之不盡用之不竭的天然資源，可以有效地

降低成本，除此之外，有機催化劑的部分，亦能透過化學合成的方式，改良光觸媒的結構設計，更能大大提升二氧化碳還原之轉換率或產率。若能達成本研究之目的，並大力推廣，那往後不只能夠減少人類燃燒化石燃料所排放之二氧化碳，只要搭配適當的光催化劑並給予照射足夠時間的太陽光，即可產生更高附加價值的經濟燃料，實是人類一大福祉。

二、研究原理

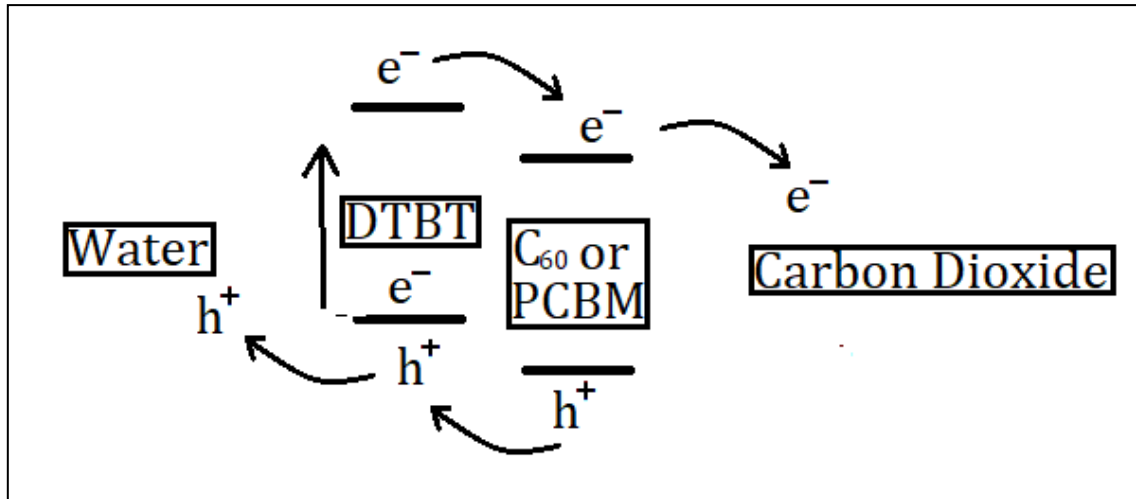
由於光觸媒還原二氧化碳之反應機制(如圖一所示)，是利用半導體材料照光後，產生一個受庫倫作用力所牽引之電子-電洞對，並透過擴散作用移動至半導體表面，電子於表面與二氧化碳作用可能產生一氧化碳(CO)、甲烷(CH₄)、乙烷(C₂H₆)以及甲醇(CH₃OH)、乙醇(C₂H₅OH)和丙酮(C₃H₆O)等產物，電洞則會移至催化劑表面與水反應生成氧氣。



圖一 光觸媒還原二氧化碳之反應機制圖

有研究團隊於 2018 年，將最常應用於高分子太陽能電池中作為電子受體材料的 PC₆₁BM 進行二氧化碳電化學還原反應，得到少量的甲酸為產物。截至目前，尚無使用 C₆₀ 催化二氧化碳光還原反應之報導。而在本研究中，除了使用 C₆₀ 衍生物 PC₆₁BM 之外亦擴充碳材的選擇，使用 C₆₀ 本身作為 CO₂ 光驅動反應的催化劑。由於 C₆₀ 球體具有對稱性球體結構，其吸光範圍大都侷限於紫外光區，難以利用可見光區之光能產生激子，因此亦將有機共軛發光基團(Chromophore)與其混用，增加吸光能力。

而以半導體(C_{60} 、 $PC_{61}BM$)作為主催化劑，再將螢光基團(DTBT)作為副催化劑摻入混合，其反應機制(如圖二所示)是利用兩者間不同的氧化還原電位，排列形成如電子樓梯般的途徑，使電子更容易到達二氧化碳表面，並將其還原，進而得到其他更有附加價值的產物。



圖二 主副催化劑參與二氧化碳還原反應機制圖

而以往類似的研究多半以無機化合物作為催化劑，並以電能作為能源，本研究則使用發光基團與巴克球或巴克球衍生物之混合物，取代造價較為昂貴的氧化金屬或硫化金屬，並期許能以太陽光作為能量來源，希望以較低成本但取得更高附加價值的產物與轉換效率。

貳、研究目的

- 一、合成發光基團 Dithiophene benzothiadiazole (DTBT)作為副催化劑。
- 二、以 C_{60} 、 $PC_{61}BM$ 與 DTBT 為材料，設計二氧化碳還原反應之半導體光觸媒。
- 三、比較單一催化劑、 C_{60} 與 DTBT 或 $PC_{61}BM$ 與 DTBT 混摻複合光觸媒進行二氧化碳還原反應之效率。
- 四、探討主、副催化劑混摻比例對光觸媒催化二氧化碳還原產率的影響。
- 五、探討水量及加氫對光催化二氧化碳還原產物 CO 、 CH_4 產率的影響。

參、研究設備及器材

一、研究設備：

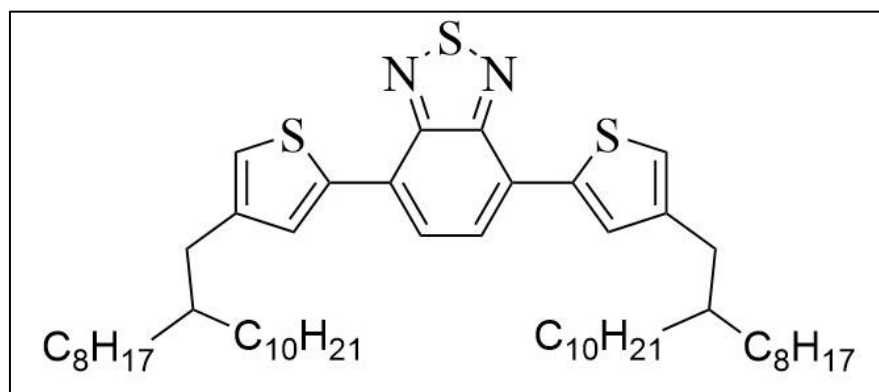
1. 超音波震盪機
2. 氣相層析儀(SRI-GC)
3. 氙氣燈(Xe lamp)
4. 真空烘箱

二、器材：

1. 2×2 公分之塑玻璃
2. 真空球
3. 微量吸量管(Micropipette)
4. 5 毫升氣密針

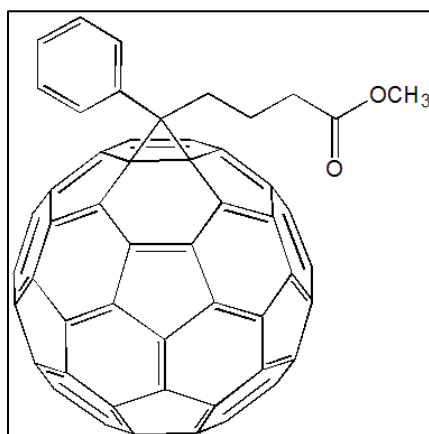
三、藥品：

1. 巴克球 Fullerene (C_{60})，分子量 720。
2. 發光基團 Dithiophene benzothiadiazole(DTBT)，分子量 860。



圖三 發光基團 Dithiophene benzothiadiazole(DTBT)

3. [6,6]-phenyl- C_{61} -butyric acid methyl ester([60]PCBM)，分子量 910。



圖四 [6,6]-phenyl-C₆₁-butyric acid methyl ester (PC₆₁BM)

4. 去離子水(DI water)
5. 氯苯 Chlorobenzene(PhCl)
6. 丙酮 Acetone
7. 異丙醇 Isopropanol

肆、研究過程或方法

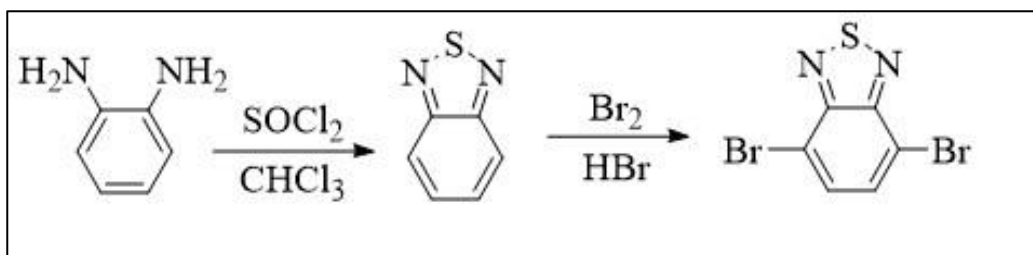
一、研究方法

- (一) 合成發光基團 Dithiophene benzothiadiazole (DTBT)。
- (二) 將 DTBT 與 C₆₀ 或 PC₆₁BM 依不同比例混合配置，並塗佈於塑玻璃上製成二氧化碳還原光觸媒之元件。
- (三) 將元件放入反應瓶中，灌入二氧化碳，照光反應 24 小時。
- (四) 產物檢測與產率計算。

二、步驟

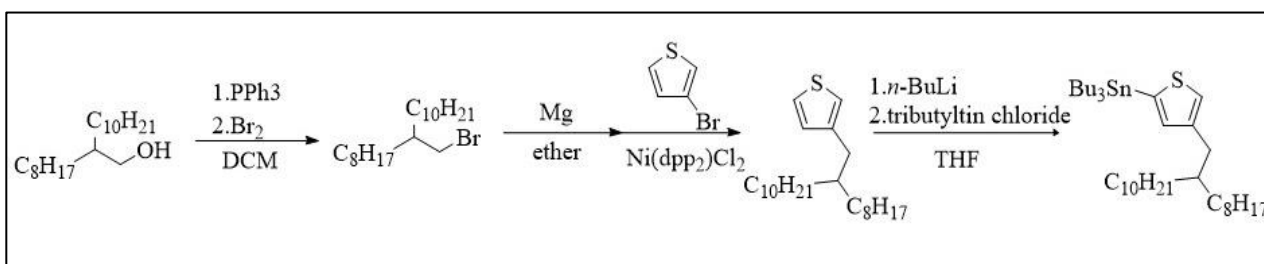
(一) 合成發光基團 Dithiophene benzothiadiazole (DTBT)

1. 如反應式一，以氯化亞砷試劑(Thionyl chloride reagent)將雙胺苯進行硫環化，再以溴水將硫環化之雙胺苯進行雙邊溴化。



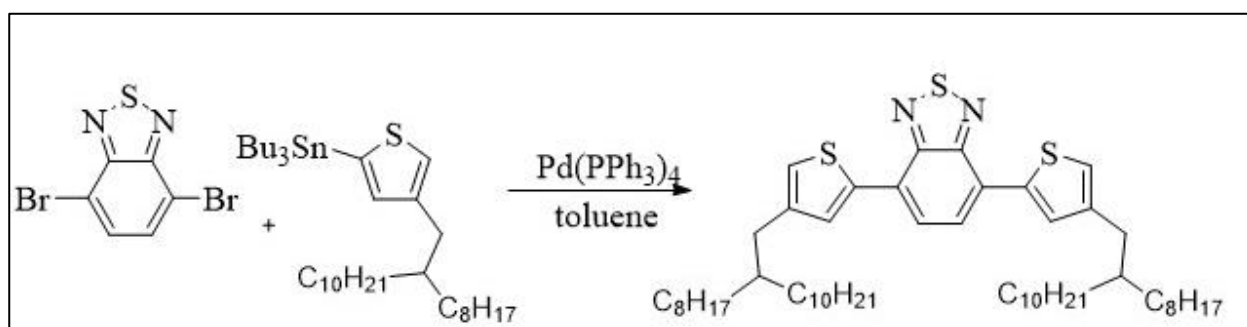
反應式一：雙胺苯硫環化以及雙邊溴化

2. 如反應式二，要將帶有羥基之碳鏈 ($C_{20}H_{41}OH$) 進行雙分子親核取代 (S_N2) 之溴化反應，再以鎂片製成格利納試劑 (Grignard reagent試劑)，將其完成溴化之碳鏈接入噻吩 (Thiophene)，並以正丁基鋰 ($n-BuLi$) 將二號位子加上正電後，再加入三丁基錫氯試劑 (Tributyltin chloride) 進行錫化。



反應式二：碳鏈溴化、接入噻吩以及錫化

3. 如反應式三，以四(三苯基膦)鈀 ($Pd(PPh_3)_4$) 作為催化劑，將前二步驟所製備而得之產物，進行施蒂勒偶合反應 (Stille coupling)，將兩者相連接，便能得到最終之目標產物——發光基團 Dithiophene benzothiadiazole (DTBT)。



反應式三：將反應式一及反應式二之產物連接成發光基團 DTBT

(二) 製備光觸媒元件

1. 製備 DTBT、C₆₀與 PC₆₁BM 單一材料光觸媒元件

(1) 如表一所列重量，分別秤量 5 mmol 的 DTBT、C₆₀與 PC₆₁BM。

表一：DTBT、C₆₀與 PC₆₁BM 秤量的重量

DTBT(mg)	C ₆₀ (mg)	PC ₆₁ BM(mg)
4.3	3.6	4.6

(2) 將三種材料分別加入三個樣品瓶中。

(3) 分別加入 0.2mL 氯苯(PhCl)於樣品瓶中作為溶劑。

(4) 以超音波震盪機震盪使其均勻混合。

(5) 吸取混合液滴至塑玻璃上(Drop-casting 製程)後自然風乾一天。

(6) 將風乾後的元件放入真空球或真空烘箱中抽真空。

2. 製備 DTBT 與 C₆₀ 混摻的複合光觸媒元件

(1) 將 DTBT 與 C₆₀ 依表二所列重量分別秤重。

表二：DTBT：C₆₀ 莫耳數比0.7:1時秤量的重量。

DTBT：C ₆₀ 莫耳數比	DTBT(mg)	C ₆₀ (mg)
0.7:1	2.9	3.6
0.7:1	1.2	1.4

(2) 秤量規劃量的 DTBT分別加入各樣品瓶中。

(3) 秤量規劃量的 C₆₀ 加入已裝有 DTBT 的樣品瓶中。

(4) 加入 0.2mL 氯苯 (PhCl) 作為溶劑。

(5) 以超音波震盪機震盪使其均勻混合。

(6) 吸取混合液滴至塑玻璃上 (Drop-casting 製程) 後自然風乾一天。

(7) 將風乾後的元件放入真空球或真空烘箱中抽真空。

3. 製備 DTBT 與 PC₆₁BM 混摻之光觸媒元件

(1) 將 DTBT 與 PC₆₁BM 依表三所列重量分別秤重。

表三：DTBT：PC₆₁BM 不同莫耳比所需之量

DTBT：PC ₆₁ BM莫耳數比	DTBT(mg)	PC ₆₁ BM(mg)
0.7:1	2.9	4.6
0.7:1	1.2	1.8
1:1	1.7	1.8
1.5:1	2.6	1.8
2:1	3.4	1.8
0.5:1	0.9	1.8

(2) 秤量規劃量的 DTBT 分別加入各樣品瓶中。

(3) 秤量規劃量的 PC₆₁BM 加入已裝有 DTBT 樣品瓶中。

(4) 分別加入 0.2mL 氯苯 (PhCl) 作為溶劑。

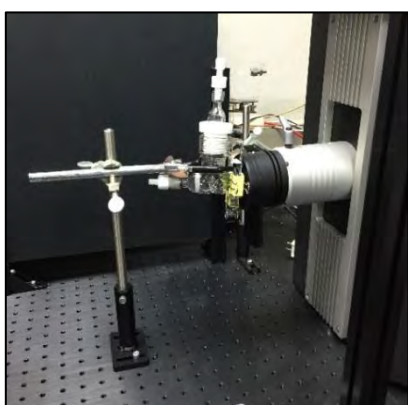
(5) 以超音波震盪機震盪使其均勻混合。

(6) 吸取混合液滴至塑玻璃上 (Drop-casting 製程) 後自然風乾一天。

(7) 將風乾後的元件放入真空球或真空烘箱中抽真空。

(三) 二氧化碳光催化還原反應

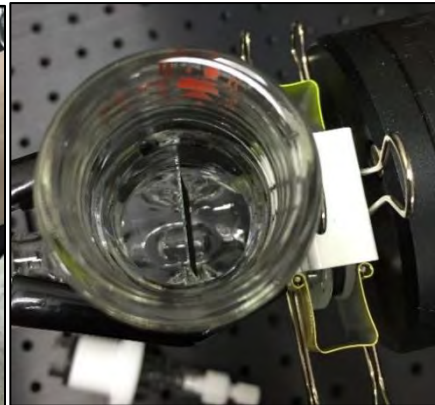
1. 將製備完成的光觸媒元件放入反應瓶中，並加入0.2 mL去離子水，作為電洞受體。



氙燈與反應瓶



反應瓶近圖



反應瓶內部

2. 以極高純度二氧化碳氣體清除反應瓶內空氣，使瓶內充滿二氧化碳氣體。
3. 以 5 mL 氣密針取樣 3 mL 反應瓶內氣體，注入氣相層析儀(GC)中，測反應前各氣體的含量作為背景值。
4. 將 300 W 氙燈的光強度調至一個太陽光強度，照射玻璃基材上的光觸媒，持續照光24小時，進行二氧化碳光催化還原反應。

(四) 產物檢測與產率計算

1. 氣體之定性及定量分析：

將不同配置的氣體鋼瓶依次注入氣相層析儀(GC)中，逐一進行定性及定量分析。

2. 產物檢測：

完成定性及定量分析後，將照光反應 24 小時之產物，以 5 mL 氣密針取樣 3 mL，注入氣相層析儀(GC)中，鑑定產物及計算產量、產率。

3. 產率計算：

產率計算方式為「GC 圖之曲線所圍之面積」÷「定量分析圖直線斜率」×「反應瓶之容積」÷「定溫定壓下氣體莫耳體積」÷「催化劑之質量」÷「24 小時」，故本研究所選擇單位為 $\mu\text{mole} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24\text{hr}^{-1}$ 。

(五) 探討加入氫氣對還原產率的影響

1. 選用 DTBT 與 PC₆₁BM 莫耳數比為1：1(重量分別為1.7mg及1.8mg) 的光觸媒元件，如同以上方法進行二氧化碳光催化還原反應。
2. 改變反應條件，在灌入二氧化碳之後，再以氣密針注入3mL氫氣，之後才照光。

(六) 探討水量對還原產率的影響

1. 選用 DTBT 與 PC₆₁BM 莫耳數比為1：1(重量分別為1.7mg及1.8mg) 的光觸媒元件，如同以上方法進行二氧化碳光催化還原反應。
2. 改變反應條件，將原本加入0.2 mL去離子水，分別改為加入 0.4 mL 及 2.0 mL 去離子水。

伍、研究結果

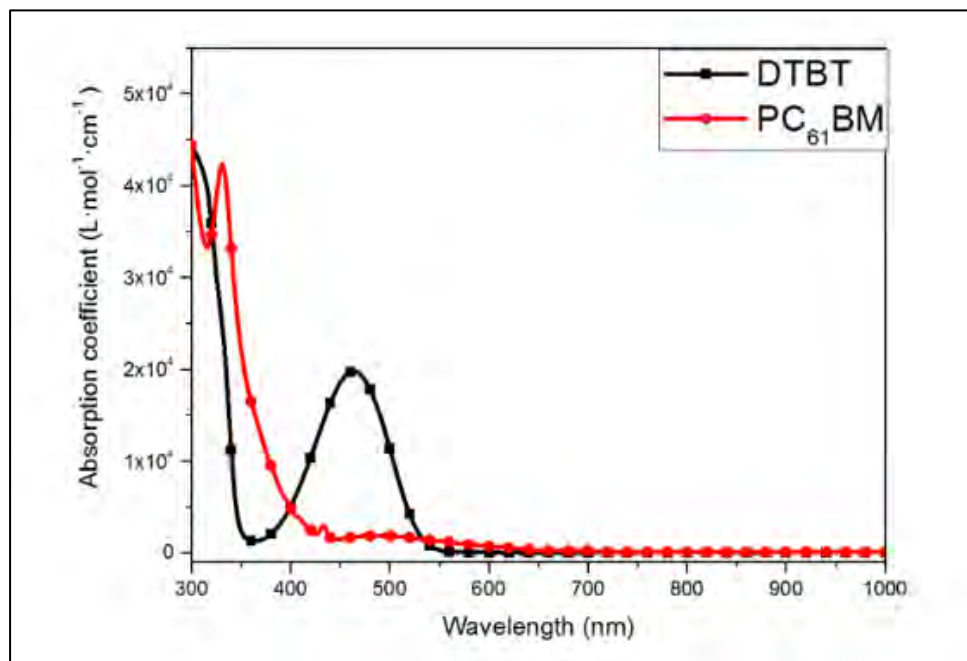
一、合成發光基團 Dithiophene benzothiadiazole (DTBT)

1. 合成所得之發光基團 DTBT 為螢光橘色、且十分黏稠之液體，如圖五照片所示。



圖五 發光基團 DTBT

2. DTBT 的吸收光譜圖如圖六黑線所示，在 350 nm 以下、與 350 nm 至 550 nm 之間，各有一個相當顯著之吸收峰。



圖六 PC₆₁BM 與 DTBT 發光基團的吸收光譜圖

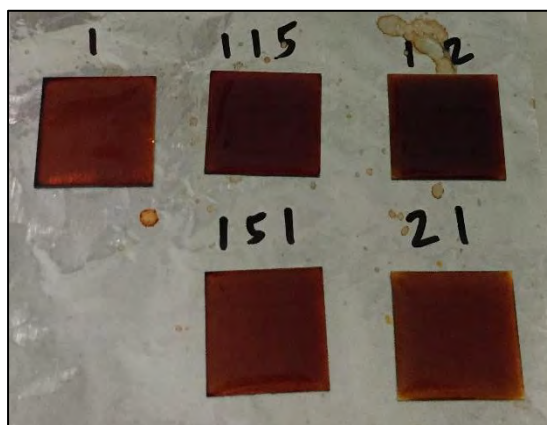
3. 表四為 DTBT 之最高占據分子軌域 (HOMO)、最低未占分子軌域 (LUMO)與能隙 (Energy gap)。

表四：DTBT、PC₆₁BM 與 C₆₀ 的分子能階 (HOMO、LUMO) 與能隙(Eg)

Compound	HOMO	LUMO	Eg
DTBT	-5.30 eV	-3.00 eV	2.3 eV
PC ₆₁ BM	-6.47 eV	-3.67 eV	2.8 eV
C ₆₀	-5.87 eV	-4.18 eV	1.7 eV

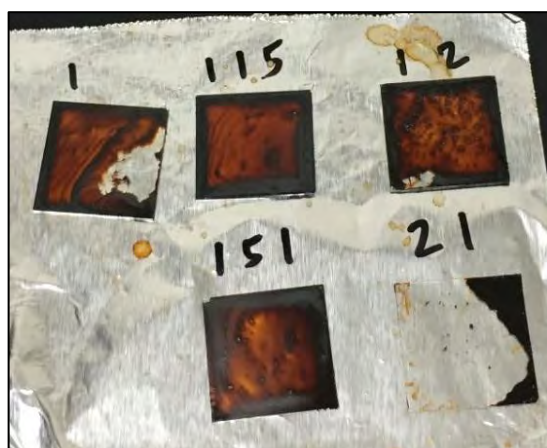
二、製備光觸媒元件

1. 超音波震盪後的溶液，以滴塗(Drop-casting)方式塗布在塑玻璃上，如圖七所示。



圖七 Drop-casting 後尚未風乾之元件半成品

2. 塗布後經風乾及抽真空完成的元件，如圖八所示。



圖八 風乾後並抽完真空之元件成品

三、二氧化碳光催化還原反應

1. 單一材料催化劑的產率比較

- (1) 分別將 5 mmol 的 DTBT、C₆₀ 與 PC₆₁BM 製成單一材料光觸媒元件，並各自進行 24 小時光催化二氧化碳還原反應。反應完成後，將產物以氣密針取樣 3 mL 注入氣相層析儀(GC)中分析，再將所得結果換算成產率並製成表格以便比較。
- (2) 由表五可見：單一材料光觸媒的催化效率非常差。

表五：DTBT、C₆₀、PC₆₁BM 單一材料光觸媒的光催化產率

Catalysts	Catalysts Weight(mg)	CO Yield ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$)	CH ₄ Yield ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$)
DTBT	4.3	15.55	0.04
C ₆₀	3.6	≐0	≐0
PC ₆₁ BM	4.6	≐0	≐0

2. 以 C₆₀ 或 PC₆₁BM 作為二氧化碳還原反應主催化劑之比較

- (1) 分別將 C₆₀ 與 DTBT、PC₆₁BM 與 DTBT 以莫耳比 0.7:1 混合，並各自進行 24 小時之光催化二氧化碳還原反應。反應完成之後，將產物以氣密針取樣 3 mL 注入氣相層析儀(GC)中分析，再將所得結果換算成產率並製成表格。
- (2) 由表六可以看出：不論是一氧化碳或甲烷之產率，皆是 PC₆₁BM 與 DTBT 組較 C₆₀ 與 DTBT 組為高。

表六：DTBT 與 C₆₀ 混摻組和 DTBT 與 PC₆₁BM 混摻組之產率

Catalysts	Catalysts Weight(mg)	CO Yield ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$)	CH ₄ Yield ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$)
DTBT + C ₆₀ (0.7:1)	6.5	57.38	0.09
DTBT + PC ₆₁ BM (0.7:1)	7.5	66.55	0.19

3. 單位面積上塗佈催化劑的重量對還原產率的影響

- (1) 由於考量到之後會調整主副催化劑之莫耳比例，本研究為了避免因比例導致催化劑的量超過 2×2 公分之塑玻璃所能承載之上限，故而決定進行減量。
- (2) 由表七可以看出：塗佈之催化劑量控制在 5mg 以內之元件進行反應所得之產率，較催化劑量控制在 10mg 以內之元件更高。
- (3) 無論塗佈催化劑的重量多寡，DTBT 與 PC₆₁BM 混摻組的一氧化碳產率與甲烷產率皆較 DTBT 與 C₆₀ 混摻組為高，故後續本研究將選用 PC₆₁BM 作為主催化劑，繼續進行研究。

表七：DTBT 與 C₆₀ 組和 DTBT 與 PC₆₁BM 組減量前後之產率

Catalysts	Catalysts Weight(mg)	CO Yield ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$)	CH ₄ Yield ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$)
DTBT + C ₆₀ (0.7:1)	6.5	57.38	0.09
DTBT + C ₆₀ (0.7:1)	2.6	59.59	0.02
DTBT + PC ₆₁ BM(0.7:1)	7.5	66.55	0.19
DTBT + PC ₆₁ BM(0.7:1)	2.9	88.68	0.32

4. 主、副催化劑混摻莫耳數比例對二氧化碳還原產率的影響

- (1) 不同的主、副催化劑的混摻比例，會造成薄膜型態的不同，因此本研究改變主副催化劑混摻比例，探討其對二氧化碳還原產率的影響。

表八：不同莫耳比之 DTBT 與 PC₆₁BM 混摻組之產率

DTBT 和 PC ₆₁ BM 的莫耳數比	Catalysts Weight(mg)	CO Yield ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$)	CH ₄ Yield ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$)
0.5 : 1	2.7	51.46	0.30
0.7 : 1	2.9	88.68	0.32
1 : 1	3.5	92.23	0.25
1.5 : 1	4.4	67.34	0.23
2 : 1	5.2	6.27	0.41

- (2) 主、副催化劑的混摻莫耳比為 1:1 時，其一氧化碳產率最高、而莫耳比偏離 1:1 時，一氧化碳產率均降低。
- (3) 主、副催化劑的混摻莫耳比對甲烷產率的影響沒有規律性，本實驗組別中以莫耳比 2:1 組的甲烷產率最高、莫耳比 1.5:1 組的甲烷產率最低。

5. 加入氫氣對還原產率的影響

表九：DTBT 與 PC₆₁BM 莫耳比 1 : 1，加氫對產率的影響

H ₂ (mL)	CO Yield ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$)	CH ₄ Yield ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$)
0	92.23	0.25
3.0	77.16	0.67

6. 水量對還原產率的影響

表十：DTBT 與 PC₆₁BM 莫耳比 1 : 1，水量對產率的影響

H ₂ O(mL)	CO Yield ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$)	CH ₄ Yield ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$)
0.2	92.23	0.25
0.4	89.91	0.37
2.0	84.08	0.97

陸、討論

一、複合光觸媒的設計原理

1. 本研究合成所得的發光基團 DTBT 為螢光橘色膠體，由吸收光譜 (圖六) 顯示 DTBT 在 350nm 以下與 460nm 附近 (350nm 至 550nm 之間) 各有明顯的吸收峰。而主催化劑 PC₆₁BM 僅在波長 400nm 以下的紫外光區有吸收峰。太陽光主要是波長 390nm 至 700nm 之間的可見光，因此主催化劑 PC₆₁BM 無法有效吸收太陽光，而發光基團 DTBT 做為副催化劑，則能有效吸收太陽光而使電子激發至高能階。
2. 發光基團 DTBT 的激發電子可轉移至主催化劑 PC₆₁BM 或 C₆₀，然後電子再轉移至二氧化碳使其還原，由表四得知 PC₆₁BM 的 LUMO 比 C₆₀ 的 LUMO 能階高，且 PC₆₁BM 的能隙比 C₆₀ 的能隙大，所以主催化劑選用 PC₆₁BM 比選用 C₆₀ 的效果佳。
3. 由表五結果得知，單獨使用主催化劑 PC₆₁BM 或 C₆₀ 完全沒有光催化效果，因為它們幾乎不吸收可見光，而單獨使用 DTBT 雖然有催化效果，但效果不佳，唯有將發光基團 DTBT 做為副催化劑混摻主催化劑 PC₆₁BM 或 C₆₀ 製成複合光觸媒，才能提高光催化效率。

二、製備光觸媒元件

混摻副催化劑 DTBT 與主催化劑 PC₆₁BM 或 C₆₀，並以氯苯作為溶劑，所配置的混合溶液，以超音波震盪 1 小時之後，混合得非常均勻。再用微量吸量管 (Micropipette) 吸取、以滴落塗佈 (Drop-casting) 製程均勻滴佈在塑玻璃片上，如圖七所示。自然風乾約一天後秤重，扣除塑玻璃片重量，所秤得的淨重略大於原本規劃的催化劑重量，這是由於溶劑殘留的緣故，因而需要再將風乾後的元件抽真空以完全除去溶劑，最後製成的光觸媒元件，如圖八所示。

三、進行二氧化碳光催化還原反應

(一) 單一材料催化劑的產率比較

根據表五，C₆₀、PC₆₁BM 單獨做為光觸媒使用時，幾乎沒有光催化效果，儀器無法偵測到一氧化碳或甲烷的生成。而單獨使用 DTBT 製成的光觸媒，僅有些微催化效果，一氧化碳產率為 15.55 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ ，甲烷產率為 0.04 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ 。

(二) 以 C₆₀ 或 PC₆₁BM 做為二氧化碳還原反應主催化劑的比較

1. 將主、副催化劑混摻後，光催化效果大增。如表六所示，主、副催化劑以莫耳數比 0.7:1 混摻製成光觸媒元件，比較 DTBT 與 C₆₀ 混摻組以及 DTBT 與 PC₆₁BM 混摻組，兩組照光進行二氧化碳還原後的主要產物，均為一氧化碳及甲烷。
2. 比較生成物一氧化碳的產率，DTBT 與 C₆₀ 混摻複合光觸媒的一氧化碳產率為 $57.38 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ ，而 DTBT 與 PC₆₁BM 混摻複合光觸媒的一氧化碳產率為 $66.55 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ ，以 PC₆₁BM 當主催化劑比以 C₆₀ 當主催化劑，一氧化碳產率高出 $9.17 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ 。
3. 比較生成物甲烷的產率，DTBT 與 C₆₀ 混摻複合光觸媒的甲烷產率僅有 $0.09 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ ，而 DTBT 與 PC₆₁BM 混摻複合光觸媒的甲烷產率卻能達到 0.19，以 PC₆₁BM 當主催化劑甲烷產率是以 C₆₀ 當主催化劑甲烷產率的兩倍多。

(三) 單位面積上塗佈催化劑的重量對還原產率的影響

1. 光催化生成物產率是以單位質量催化劑所得生成物的莫耳數表示，因此本研究探討單位面積上塗佈催化劑的重量對還原產率的影響，仍然維持主、副莫耳數比為 0.7:1 混摻製成複合光觸媒，但將塑玻璃片滴佈的複合光觸媒重量減為原來的 0.4 倍，DTBT 與 C₆₀ 複合光觸媒的重量由 6.5 mg 減為 2.6 mg，DTBT 與 PC₆₁BM 複合光觸媒的重量由 7.5 mg 減為 2.8 mg。
2. 根據表七結果，減量後，DTBT 與 C₆₀ 複合光觸媒的一氧化碳產率從 $57.38 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ 提升至 $59.59 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ ，增加 $2.21 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ ，甲烷產率則從 $0.09 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ 降至 $0.02 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ 。
3. 根據表七的結果，減量後，DTBT 與 PC₆₁BM 複合光觸媒的一氧化碳產率由 $66.55 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ 提升至 $88.68 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ ，增加了 $22.13 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ ，而甲烷產率則從 $0.19 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ 提升至 $0.32 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ ，增加了 $0.13 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ 。
4. 因為光催化二氧化碳還原反應僅在催化劑的表面進行，塗佈層太厚會造成內層催化劑無法有效作用，塗佈稀薄反而使單位質量催化劑有較高的產率，因此本研究接續的實驗都是以稀薄塗布進行，且選用效率較佳的 DTBT 與 PC₆₁BM 複合光觸媒進行研究。

(四) 主、副催化劑混摻莫耳數比對還原產率的影響

1. 主、副催化劑的混摻比例不同，會造成薄膜型態的改變，因此本研究改變副催化劑 DTBT 與主催化劑 PC₆₁BM 的混摻比例，分別為 0.5:1、0.7:1、1:1、1.5:1、2:1，以探討其對二氧化碳還原產率的影響。
2. 由表八可知，DTBT 和 PC₆₁BM 等莫耳數混摻，也就是主、副催化劑的混摻莫耳數比為 1:1 時，其一氧化碳產率最高，高達 $92.23\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ ，而莫耳數比偏離 1:1 時，一氧化碳產率均降低。
3. 由表八可知，DTBT 和 PC₆₁BM 的混摻莫耳數比對甲烷產率有影響，但沒有規律性變化，本實驗組別中以莫耳比 2:1 組的甲烷產率最高，產率為 $0.41\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ ，莫耳比 1.5:1 組的甲烷產率最低。
4. 實驗結果中，並非提高 DTBT 的比例便能提高產率，因為 DTBT 主要是做為副催化劑，利用它有效吸收太陽光，激發出電子轉移至主催化劑 PC₆₁BM，而主催化劑 PC₆₁BM 再傳遞電子給二氧化碳，本實驗固定主催化劑 PC₆₁BM 的莫耳數，而副催化劑 DTBT 的莫耳數由 0.5 倍增至 1 倍時，生成二氧化碳的量隨著增加，然而副催化劑 DTBT 的莫耳數由 1 倍增至 2 倍時，生成二氧化碳的量不再增加，反而因催化劑總重量增加，而使得計算得的產率降低。
5. 光催化還原二氧化碳生成甲烷的產率仍然偏低，為提高甲烷產率，本研究在進行二氧化碳光催化還原反應時，又調控兩變因，分別是加入氫氣與改變水量。

(五) 加入氫氣對還原產率的影響

1. 根據表九，DTBT-PC₆₁BM (1:1) 複合光觸媒進行二氧化碳還原反應，反應瓶中除了二氧化碳之外，另外添加少量(約 3mL)氫氣，一氧化碳產率從 $92.23\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ 下降至 $77.16\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ ，而甲烷產率則從 $0.25\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ 增加至 $0.67\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ ，甲烷產率增為 2.7 倍。
2. 上述結果，一氧化碳產率減少量遠多於甲烷產率增加量，顯示加入氫氣後，應該有其它有機物生成，只是本實驗只定量偵測二氧化碳及甲烷而已。

(六) 水量對還原產率的影響

1. 反應裝置照光進行催化反應時，反應瓶也因吸熱而升溫，瓶內的去離子水會大

量氧化，添加的水量越多，瓶內水的蒸氣壓也越大。

2. 由表十可知，DTBT-PC₆₁BM (1:1) 複合光觸媒進行二氧化碳還原反應，反應瓶中的水量由 0.2mL 增加為 2.0mL 時，一氧化碳產率從 92.23 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ 下降至 84.08 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ ，而甲烷產率則從 0.25 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ 增加至 0.97 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ ，甲烷產率增為 3.9 倍。
3. 上述結果，隨著添加的水量增加，一氧化碳產率下降，而甲烷產率則增加，水做為反應中的電洞受體和氫原子的來源，增加水蒸氣濃度有助於提升甲烷的產率，同樣地，一氧化碳產率減少量遠多於甲烷產率增加量，表示有更多其它的有機物生成。

柒、結論

- 一、合成出的發光基團 DTBT 為螢光橘色膠體，其在 350 nm 至 550 nm (可見光內) 之間有很強的吸光，而主催化劑 PC₆₁BM 的主要吸光區位在波長 400 nm 以下，因此 DTBT 可更有效的吸收太陽光，更多電子激發至激發態並轉移至 PC₆₁BM，以便進行光催化反應。
- 二、固定主、副催化劑莫耳比為 0.7:1 混摻製成元件，主催化劑選用 PC₆₁BM 比 C₆₀ 光催化產率高，DTBT 與 PC₆₁BM 混摻組照光反應後，生成一氧化碳的產率為 66.55 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ ，生成甲烷的產率為 0.19 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ 。
- 三、單位面積上催化劑的量影響每克催化劑的產率，在 4 cm² 的塑玻璃上塗抹催化劑由 7.5 mg 減為 2.9 mg，一氧化碳產率從 66.55 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ 提升至 88.68 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ ，而甲烷產率從 0.19 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ 提升至 0.32 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ 。
- 四、主、副催化劑的混摻比例差異，會造成薄膜型態上的不同，進而影響光催化產率，DTBT 與 PC₆₁BM 莫耳比 1:1 混摻時，一氧化碳產率最高，達 92.23 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ ；DTBT 與 PC₆₁BM 莫耳比 2:1 混摻時，甲烷產率最高，達 0.41 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ 。
- 五、反應瓶中添加氫氣，有利於提高甲烷的產率，提升產物的附加價值。
- 六、反應中去離子水做為電洞受體及氫原子來源，增加水量有助於提高甲烷產率，將水量由 0.2 mL 增至 2.0 mL，甲烷產率變為 3.88 倍，提升 0.72 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{hr}^{-1}$ 。

捌、參考資料及其他

1. Xiaoxia Chang, Tuo Wang and Jinlong Gong, *Energy Environ. Sci.*, 2016, 9, 2177, Pages 2161–2472
2. Shunji Xie, Qinghong Zhang, Guodong Liu and Ye Wang, *Chem. Commun.*, 2016, 52, 35, Photocatalytic and photoelectrocatalytic reduction of CO₂ using heterogeneous catalysts with controlled nanostructures
3. Severin N. Habisreutinger, Lukas Schmidt-Mende, and Jacek. Stolarczyk, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2013, 52, 7372 – 7408
4. Zhipeng Chen, Kaiwen Mou, Shunyu Yao and Licheng Liu *J. Mater. Chem. A*, 2018, 6, 11236

【評語】 050212

本研究使用巴克球(C60)或巴克球衍生物(PC61BM)作為主催化劑，發光基團(DTBT)作為副催化劑，兩者混摻成複合催化劑並進行各種變因調控，製成催化效果最佳的有機光觸媒，應用於還原二氧化碳生成有用的燃料，達到開發再生能源與減緩溫室效應的目的，另外也可以應用於殺菌與分解污染物。二氧化碳還原觸媒之研究為現今學術界熱門研究領域，研究主題有潛在實用價值，可持續研究不同巴克球衍生物或金屬離子，降解二氧化碳的效果。

壹、研究動機

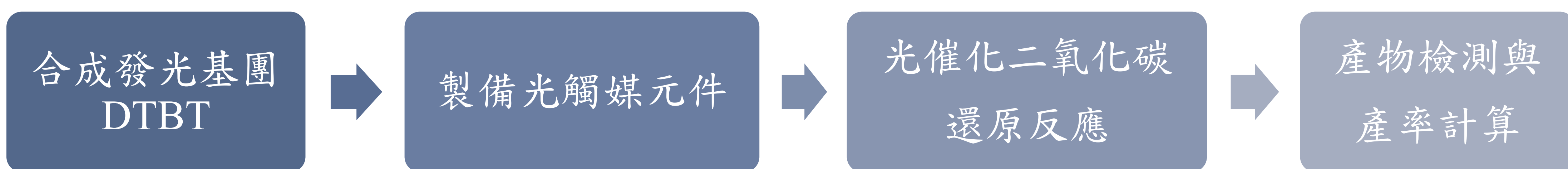
近年來，能源逐漸耗竭與全球氣候變遷是所有人類關心的兩大議題，而再生能源的開發與溫室效應的減緩更被視為刻不容緩的解決方向，若能利用太陽能進行光觸媒催化還原大氣中的二氧化碳、進而生成能源產物，便得以同時解決此二問題。

目前大多數研究皆集中於無機光觸媒的開發，而本研究則選用巴克球、巴克球衍生物和發光基團DTBT製成有機光觸媒，並進行各種變因調控，期許能設計出催化效果最佳的光觸媒。

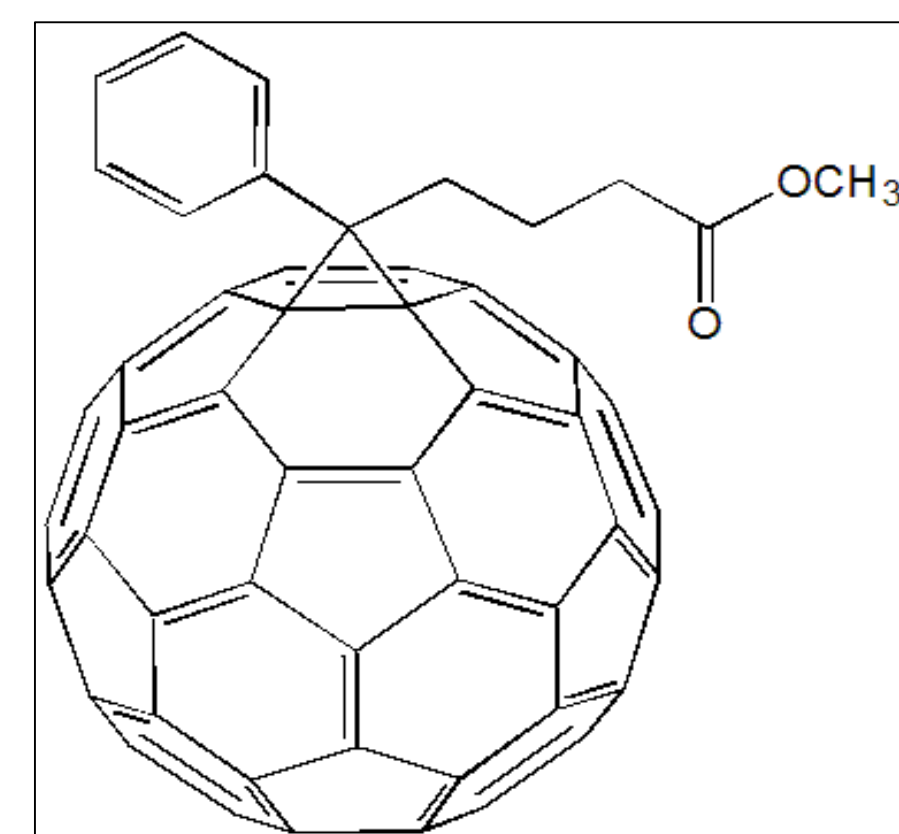
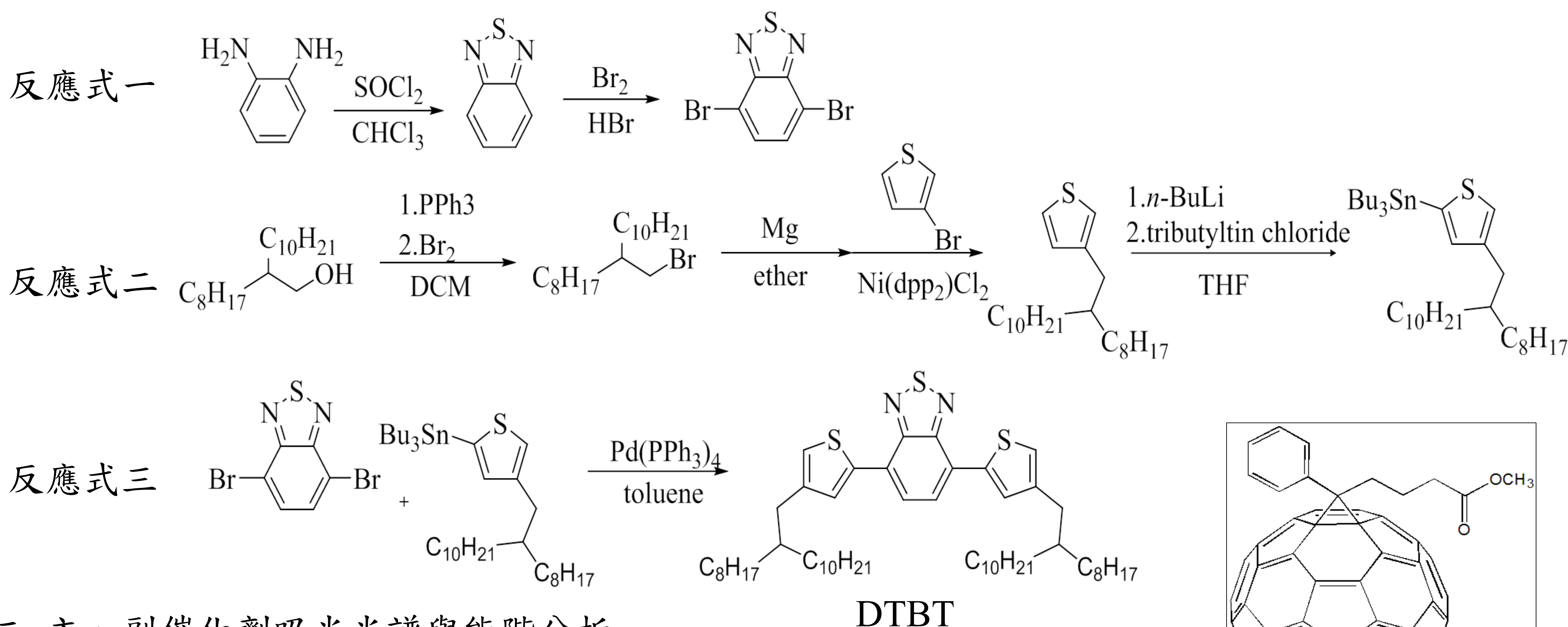
貳、研究目的

- 一. 合成發光基團 Dithiophene benzothiadiazole (DTBT) 作為輔助光觸媒(副催化劑)
- 二. 以C₆₀、PC₆₁BM與DTBT為材料，設計各種催化二氧化碳還原反應的有機半導體光觸媒
- 三. 比較單一催化劑及DTBT混摻C₆₀或PC₆₁BM製成光觸媒的還原產率
- 四. 探討主、副催化劑混摻比例對光觸媒催化還原產率的影響
- 五. 探討水量及加入氫氣對光催化二氧化碳還原產物CO、CH₄產率的影響
- 六. 探討加入奈米銀製成三元光觸媒元件催化二氧化碳還原的產率

參、研究方法及過程



一. 合成發光基團DTBT



圖一：PC₆₁BM結構

二. 主、副催化劑吸光光譜與能階分析

- (一) DTBT、PC₆₁BM (圖一) 的吸光光譜比較
- (二) DTBT、C₆₀、PC₆₁BM 的HOMO、LUMO能階分析

三. 製備光觸媒元件

(一) 製作元件：

1. 秤量所需藥品，倒入樣品瓶。
2. 加入 0.2mL 氯苯(PhCl)作為溶劑
3. 以超音波震盪機震盪1小時。
4. 滴落塗布(Drop-casting)在塑玻璃上，自然風乾。

表一：DTBT與C₆₀混摻所需的重量

莫耳數比	DTBT(mg)	C ₆₀ (mg)
0.7:1	2.9	3.6
0.7:1	1.2	1.4

(二) 元件製作的變因

1. 單一材料之元件：
分別秤量相同莫耳數之DTBT、C₆₀、PC₆₁BM。
2. DTBT與C₆₀混摻元件：
依表一秤量DTBT與C₆₀混摻重量。
3. DTBT與PC₆₁BM混摻元件：
依表二秤量DTBT與PC₆₁BM混摻重量。
4. DTBT與PC₆₁BM與Ag混摻元件：
依表三秤量DTBT與PC₆₁BM與Ag混摻重量。
5. DTBT與PC₆₁BM混摻、Ag塗布表面之元件：
將Ag旋轉塗布(Spin-coating)在DTBT與PC₆₁BM混摻元件的表面上。

表二：DTBT：PC₆₁BM不同莫耳比混摻的重量

莫耳數比	DTBT(mg)	PC ₆₁ BM(mg)
0.7:1	2.9	4.6
0.7:1	1.2	1.8
1:1	1.7	1.8
1.5:1	2.6	1.8
2:1	3.4	1.8
0.5:1	0.9	1.8

表三：DTBT、PC₆₁BM與Ag混摻的重量

DTBT(mg)	PC ₆₁ BM(mg)	Ag(mg)
1.7	1.8	0.2

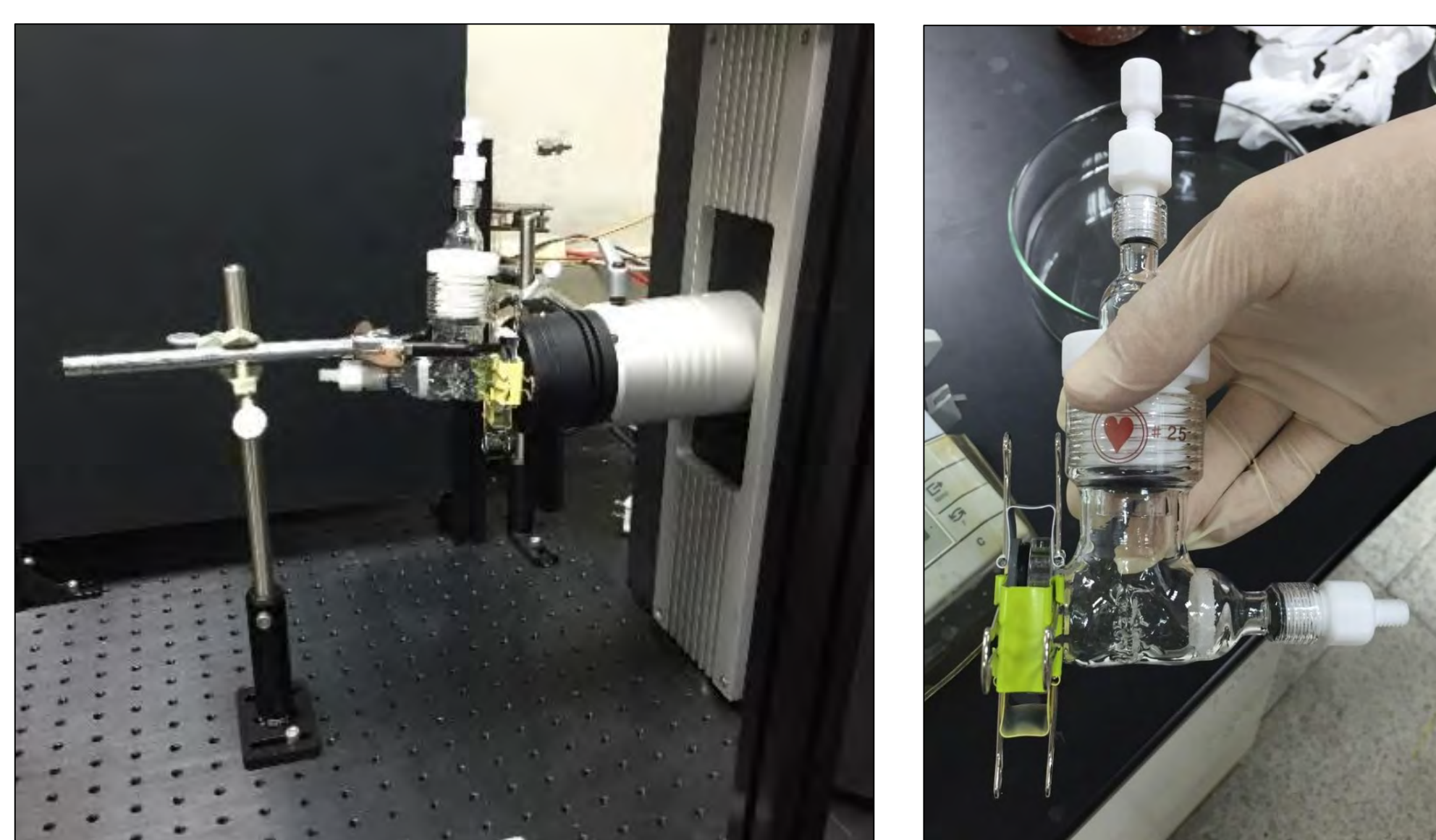
四. 二氧化碳光催化還原反應、產物的檢測

(一) 光催化還原反應與產物的檢測

1. 將光觸媒元件置於反應瓶中，並加入0.2 mL純水
2. Purge CO₂後，照光反應24小時
3. 以氣密針取樣3 mL後，注入氣相層析儀

(二) 反應條件變因

1. 加入氫氣：
DTBT與PC₆₁BM莫耳比1：1，並注入3mL氫氣。
2. 改變水量：
DTBT與PC₆₁BM莫耳比1：1，改變水量分別為 0.2mL、0.8mL、2mL。



圖二：反應系統裝置(左)及反應瓶(右)

肆、研究結果及討論

一. 合成發光基團DTBT

- DTBT為螢光橘色膠體(圖三)。

二. 主、副催化劑吸光光譜與能階分析

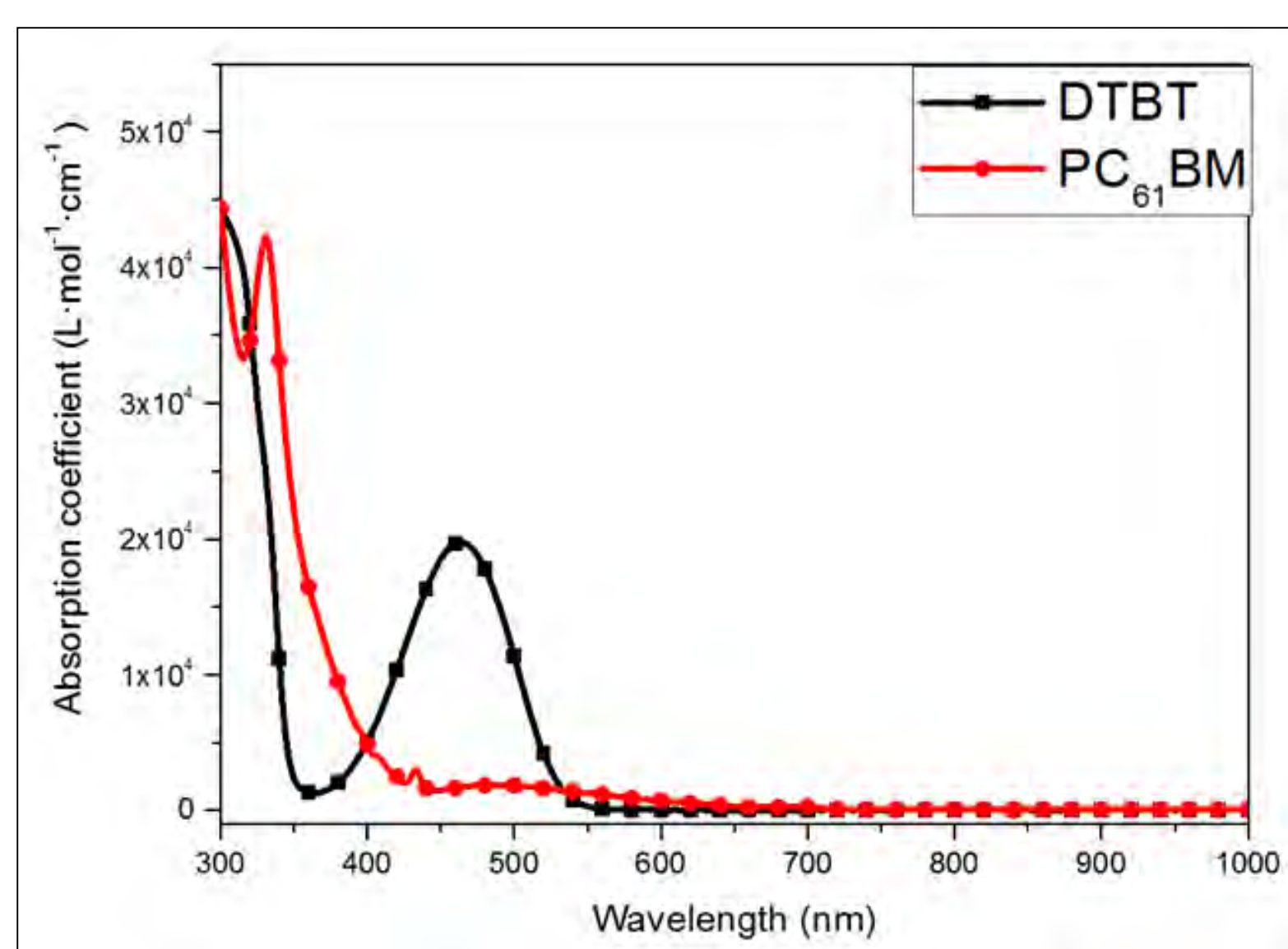
- 如圖四吸收光譜，DTBT與PC₆₁BM在紫外光區(350nm以下)，均有明顯吸收峰；而在藍光區附近(350nm至550nm)，僅DTBT有明顯吸收。
- 由表四和圖五得知，DTBT的LUMO能階高於C₆₀及PC₆₁BM的LUMO能階，所以電子可由副催化劑轉移至主催化劑，再轉移至CO₂使其還原。

表四：主副催化劑之HOMO、LUMO與Eg

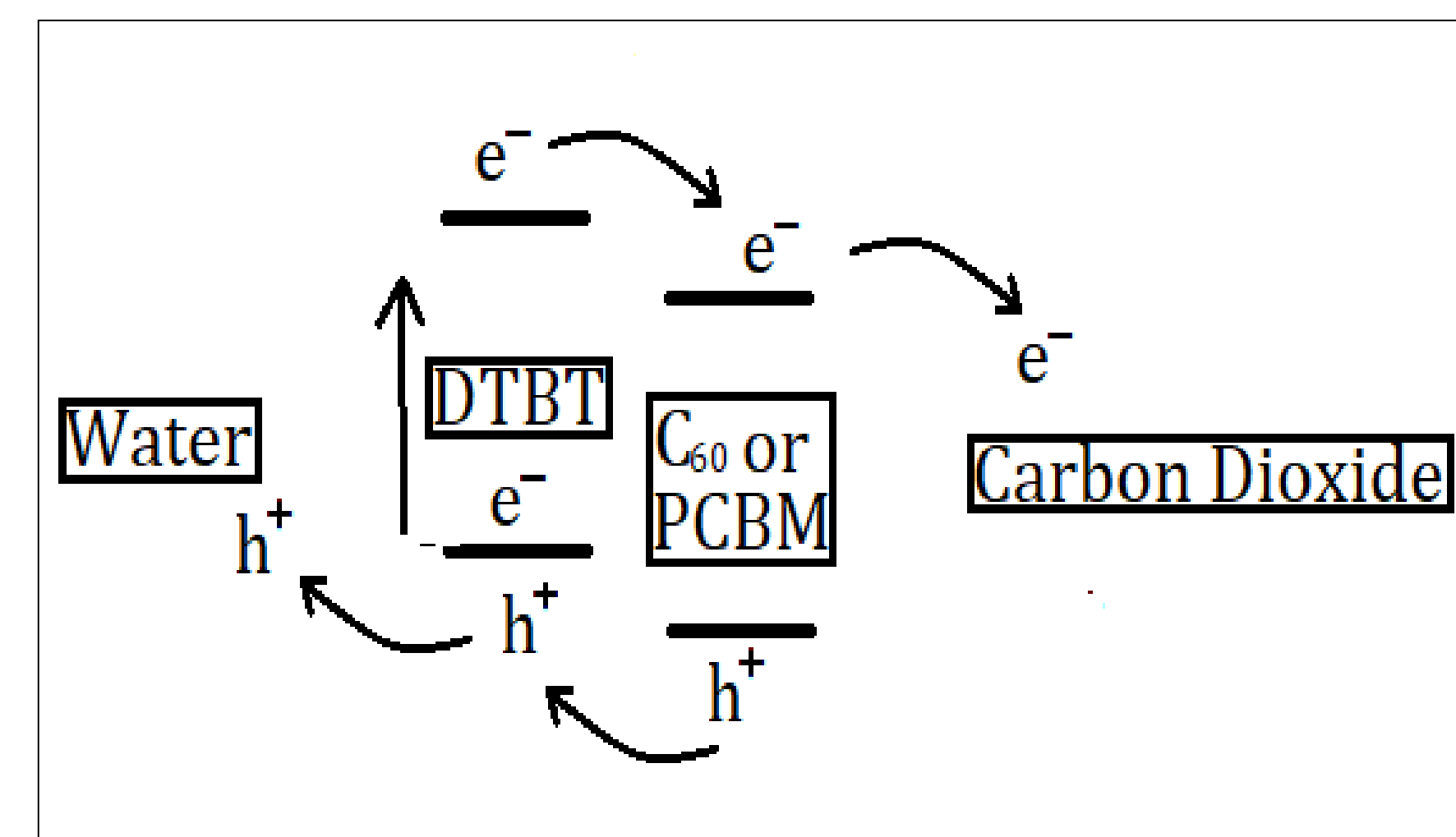
Compound	HOMO	LUMO	Eg
DTBT	-5.30 eV	-3.00 eV	2.3 eV
PC ₆₁ BM	-6.47 eV	-3.67 eV	2.8 eV
C ₆₀	-5.87 eV	-4.18 eV	1.7 eV



圖三：DTBT



圖四：PC₆₁BM與DTBT之吸收光譜



圖五：二氧化碳還原能階圖

三. 製備光觸媒元件

- 將主、副催化劑以一定比例混摻，以氯苯作為溶劑，震盪1小時後混合均勻，再滴佈於塑玻璃上，得到元件半成品。
- 靜置自然風乾約一天後仍有少量溶劑殘留，必須再將元件放入真空球或真空烘箱中抽真空，才能製成元件成品。

四. 產物檢測與產率計算

產率計算方式：

「GC圖曲線下面積」÷「檢量線斜率」×「反應瓶容積」÷「氣體莫耳體積」÷「催化劑質量」÷「24小時」單位則使用μmole·g⁻¹·24hr⁻¹

五. 二氧化碳光催化還原反應

(一) 單一材料催化劑的產率比較

表五：DTBT、C₆₀、PC₆₁BM單一材料催化劑之產率

催化劑種類	催化劑重	CO 產率	CH ₄ 產率
DTBT	4.3	15.55	0.04
C ₆₀	3.6	≐0	≐0
PC ₆₁ BM	4.6	≐0	≐0

- C₆₀、PC₆₁BM單獨使用幾乎沒有光催化效果，儀器無法偵測到CO或CH₄生成。
- DTBT單獨使用僅有些微催化效果，生成微量的CO和極微量的CH₄。

(二) DTBT混摻C₆₀或PC₆₁BM作為主催化劑的產率比較

表六：副、主催化劑莫耳數比0.7：1混摻，不同主催化劑之產率

催化劑種類	催化劑重	CO 產率	CH ₄ 產率
DTBT + C ₆₀	6.5	57.38	0.09
DTBT + PC ₆₁ BM	7.5	66.55	0.19

- 主、副催化劑混摻後光催化效率大增，生成物主要是CO，還有微量CH₄生成。
- 主催化劑使用PC₆₁BM的光催化產率，略大於使用C₆₀的光催化產率。

(三) 單位面積上塗布催化劑的重量對還原產率的影響

表七：副、主催化劑莫耳數比0.7：1混摻，不同塗布密度之產率

催化劑種類	催化劑重	CO 產率	CH ₄ 產率
DTBT+C ₆₀	6.5	57.38	0.09
DTBT+C ₆₀	2.6	59.59	0.12
DTBT+PC ₆₁ BM	7.5	66.55	0.19
DTBT+PC ₆₁ BM	2.9	88.68	0.32

- 因為產率的計算是以單位質量的催化劑所能生成產物的莫耳數來計算，所以催化劑塗布較稀薄，單位質量的催化劑所接觸的CO₂及吸收的光能越多，光催化產率因而越高。

(四) 主、副催化劑混摻莫耳數比對還原產率的影響

表八：DTBT與PC₆₁BM不同的混摻莫耳比之產率

莫耳數比	催化劑重	CO 產率	CH ₄ 產率
0.5:1	2.7	51.46	0.30
0.7:1	2.9	88.68	0.32
1:1	3.5	92.23	0.25
1.5:1	4.4	67.34	0.23
2:1	5.2	56.27	0.41

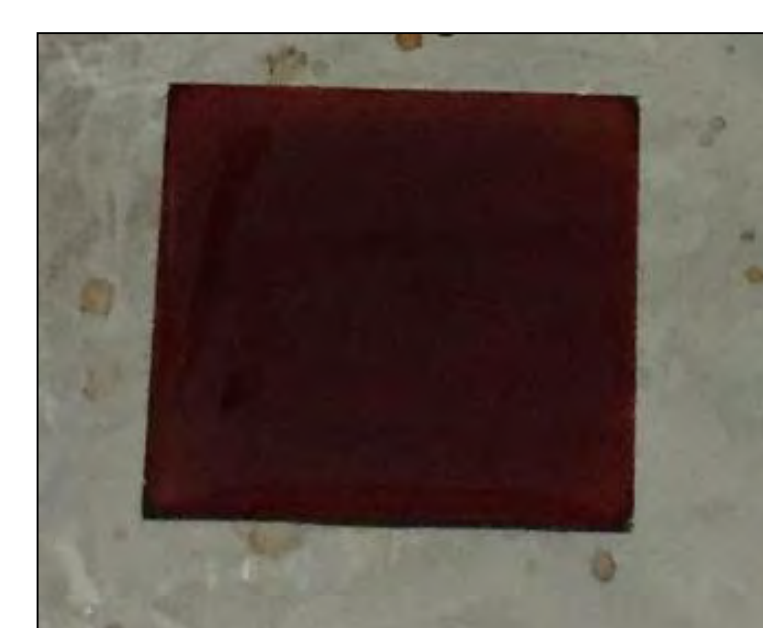
- DTBT與PC₆₁BM混摻莫耳數比越接近1：1，生成CO的產率越高；莫耳數比越遠離1：1，生成CO的產率越低。
- DTBT與PC₆₁BM混摻的莫耳數比對生成CH₄的產率影響沒有明顯的趨勢。
- 光催化的最初、也最容易生成之產物是CO，僅非常微量的CO還原至最終產物CH₄。

(五) 加入氫氣對還原產率的影響

表九：DTBT與PC₆₁BM莫耳比1：1，加入氫氣之產率

H ₂ (mL)	CO 產率	CH ₄ 產率
0	92.23	0.25
3.0	77.16	0.67

- 加入少量氫氣的反應，CO產率下降，CH₄產率微量增加，但增幅很大。
- 加入氫氣後減少的CO，有可能還原成CH₃OH等其他有機物，待進一步確認。



圖六：風乾前(左)後(右)之光觸媒元件

(六)水量對還原產率的影響

表十：DTBT與PC₆₁BM莫耳數比1：1，不同水量之產率

水量(mL)	CO 產率	CH ₄ 產率
0.2	92.23	0.25
0.8	32.96	0.62
2.0	14.08	0.97

- 照光催化時，反應瓶吸熱升溫，瓶內的去離子水也會汽化，添加的水量越多，瓶內水的蒸氣壓也越大。
- 隨著添加的水量增加，CO產率下降，而CH₄產率增加。
- 水作為反應中的電洞受體和氫原子來源，因此增加水蒸氣濃度有助於提升CH₄的產率。
- CO產率大幅下降，應該有其他有機物產生。

(七)加入奈米銀的三元混摻元件之還原產率

表十一：DTBT與PC₆₁BM莫耳數比1：1，混摻同莫耳數奈米Ag之產率

催化劑種類	CO 產率	CH ₄ 產率
奈米Ag	44.05	≡0
DTBT+PC ₆₁ BM	92.23	0.25
DTBT+PC ₆₁ BM+Ag	172.5	2.08

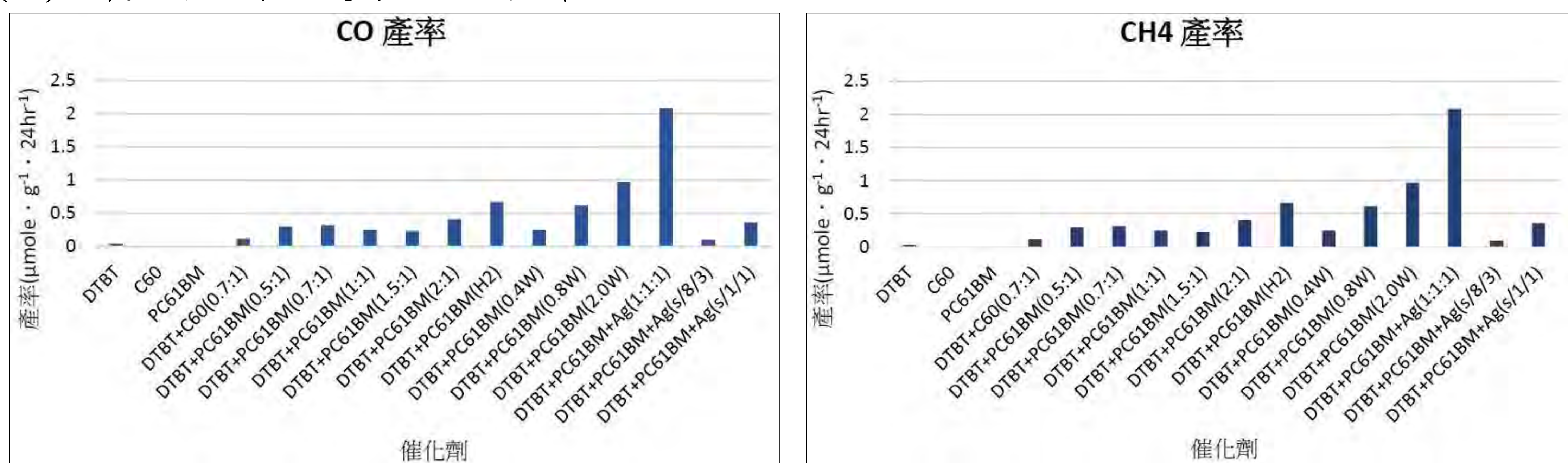
- 僅以奈米銀作為二氧化碳還原光觸媒之CO產率較低，且無CH₄生成。
- 混摻奈米銀後產率大幅提升，CO產率約增為1.8倍，CH₄產率約增為8.3倍。
- 混摻奈米銀後，被光激發的電子可轉移至奈米銀，且銀易吸附CO₂，使CO產率提高，初步生成的CO也會吸附在奈米銀表面，進一步還原成其它有機物，使CH₄產率隨著提高。

表十二：奈米銀旋轉塗布於DTBT與PC₆₁BM混摻元件表面上之還原產率

轉速(rpm)	時間(sec)	CO 產率	CH ₄ 產率
800	180	50.85	0.10
1000	60	25.35	0.36

- 將奈米銀旋轉塗布於DTBT與PC₆₁BM混摻元件的表面上，反而造成DTBT無法有效吸收太陽光，而使產率下降。

(八)二氧化碳光催化還原反應之產率統整



圖七：各種催化劑與反應條件之光催化二氧化碳還原產率：CO產率(左)、CH₄產率(右)

伍、結論

- DTBT為螢光橘色膠體，在可見光區有很強的吸收，而主催化劑PC₆₁BM的吸光在紫外光區，因此摻入DTBT可輔助PC₆₁BM更有效的利用太陽能。
- 主、副催化劑莫耳數比 1:0.7 混摻製成之元件，主催化劑選用 PC₆₁BM 比選用 C₆₀的產率高。
- 單位面積上催化劑的量影響每克催化劑的產率，在4 cm²的塑玻璃上DTBT與PC₆₁BM重量由 7.5 mg減為2.9 mg，CO產率提升22.13 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24\text{hr}^{-1}$ ，而CH₄產率提升0.13 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24\text{hr}^{-1}$ 。
- 混摻比例差異會造成薄膜型態不同，進而影響產率，DTBT與PC₆₁BM莫耳數比 1:1 混摻時，CO產率最高，達92.23 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24\text{hr}^{-1}$ ；莫耳比 2:1 時，CH₄產率略高，達0.41 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24\text{hr}^{-1}$ 。
- 反應中去離子水作為電洞受體及氫原子來源，增加水量有助於提高CH₄產率，將水量由0.2 mL增至2.0 mL，CH₄產率變為3.9倍，提升0.72 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24\text{hr}^{-1}$ 。
- 氫氣作為氫原子來源，反應瓶中添加氫氣，有利於提高CH₄的產率，提升產物的附加價值。
- 將奈米銀塗布在DTBT與PC₆₁BM莫耳數比1:1之元件表面上，反而阻礙DTBT有效吸光，無法提升CO與CH₄產率。
- 奈米銀與DTBT與PC₆₁BM以莫耳數比1:1:1混摻製成之光觸媒元件，可大幅提高光催化二氧化碳還原的產率，尤其是CH₄產率增為8.3倍之多。

陸、參考文獻及其他

未來展望與應用

- 本研究的光觸媒，除了進行光催化生成CO及CH₄之外，應該還有其它有機產物。
- 本研究的光觸媒，除了催化二氧化碳還原之外，也可應用於殺菌和分解污染物。
- 本研究的光觸媒可催化CO和H₂混合氣體，將來可嘗試光催化水煤氣生成CH₃OH或CH₄。
- 奈米銀混摻製成之催化劑產率斐然，未來亦可嘗試混摻其它金屬，更進一步提升產率。

參考文獻

- Xiaoxia Chang, Tuo Wang and Jinlong Gong, Energy Environ. Sci., 2016, 9, 2177, Pages 2161–2472
- Shunji Xie, Qinghong Zhang,* Guodong Liu and Ye Wang*, Chem. Commun., 2016, 52, 35, Photocatalytic and photoelectrocatalytic reduction of CO₂ using heterogeneous catalysts with controlled nanostructures
- Severin N. Habisreutinger, Lukas Schmidt-Mende, and Jacek. Stolarczyk, Angew. Chem. Int. Ed. 2013, 52, 7372 – 7408
- Zhipeng Chen, Kaiwen Mou, Shunyu Yao and Licheng Liu, J. Mater. Chem. A, 2018, 6, 11236