

# 利用輻射催化劑於光催化降解有機物之應用

## The Application of Photocatalytic Degradation of Organics Induced by Radio-Catalyst

余慶聰、陳姿瑜、張雅婷、王竹方

Ching-Tsung Yu, Tzu-Yu Chen, Ya-Ting Chang, Chu-Fang Wang

利用二氧化鈦之光催化分解反應降解環境中的有機污染物為相當吸引人研究之領域。一般使用紫外與可見光光源來激發  $\text{TiO}_2$  能階 (3.2 eV)，而產生光激發電子-電洞對及光催化功能，但文獻上極少數直接利用高於 100 keV 輻射能來進行光催化反應。本研究以合成方式將奈米級二氧化鈦及無機閃爍劑微粒燒結於陶瓷粉末上，形成可以利用輻射能之輻射敏感型光催化劑，利用其中的無機閃爍劑作為吸收輻射能，並轉換為可以激發二氧化鈦之敏感劑。利用 SEM、BET 及 ICP 等儀器做光催化劑性能鑑定，並以甲基藍及粒狀樹脂探討光觸媒功能，實驗結果可以證明：同時含有閃爍劑及二氧化鈦之奈米複合體可以在無光條件下，有效藉由  $^{60}\text{Co}$  射源引發光催化分解有機物之反應。

A  $\text{TiO}_2$  based photocatalytic reaction has greatly attracted many interests in environmental research. There is little literature to describe the photocatalytic reaction induced by radiation in comparison to the ultra-violet energy that can directly excite the  $\text{TiO}_2$  energy gap (3.2 eV). This paper describes the synthesis of radio-sensitive photocatalyst ( $\text{BaF}_2/\text{TiO}_2/\text{ceramic}$ ) in which the co-existence of nano-phase titania and scintillator on the ceramic powder. The photocatalyst properties were characterized by SEM, BET and ICP. Meanwhile, the results showed that photocatalytic degradation of methylene blue and resin was carried out by  $\text{BaF}_2/\text{TiO}_2/\text{ceramic}$  under dark condition.

### 一、前言

以奈米  $\text{TiO}_2$  作為光觸媒的奈米複合體材料應用在環境復育技術，一直是相當吸引人的研究領域。由於二氧化鈦在環境中相當安定，無毒、價

廉、易於製作，並具有良好的物化特性，其激發能階約為 3.2 eV<sup>(1-3)</sup>，可以直接使用紫外-可見光激發等特性，自 1972 年日本科學家 Fujishima 氏<sup>(4)</sup> 發現其分解水產製氫氣以來，其光催化方面的性質與應用即受到相當多文獻上的探討。

二氧化鈦光催化劑已經被證實在紫外-可見光照射下具有光催化性質。但是二氧化鈦的激發能階約為 3.2 eV (約為 380 nm 波長能量)，此能量為紫外光範圍的能量。太陽光中只有約 5% 的紫外光可被 TiO<sub>2</sub> 吸收，絕大多數的光能無法直接被吸收而激發二氧化鈦產生光催化功能，因此一些研究專注於負載 Pt、Ag、Fe、ZnO 及 CdS 等微粒於二氧化鈦，希望改善其可見光方面的應用<sup>(5-7)</sup>。另外，一些多成分或是混合型的氧化物，如 SrTiO<sub>3</sub>、BaTiO<sub>3</sub> 與 K<sub>2</sub>La<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub> 及矽礦上負載 TiO<sub>2</sub>，也具有優良之光催化性能<sup>(8-13)</sup>。但是，由於紫外光能的強度穿透性較差，因而限制其在工業及許多環境方面的應用。

以光的放大目的而言，負載過渡金屬或是稀土元素以形成氟化物也已經被發展<sup>(14)</sup>。在這些化合物中，氟化鋇在可見光及近 IR 區域具有透明性，吸光後之衰減時間短 (sub-nanosecond)，高密度且非吸水性等，因此在光偵檢應用上被視為優良閃爍劑。此外，當氟化鋇被游離輻射激發後，放出 220 nm 與 310 nm 波長可以有效激發 TiO<sub>2</sub>。因此預期在複合體上同時負載適當閃爍劑晶體與 TiO<sub>2</sub> 時，利用加馬輻射線能量可以有效進行光催化反應。

文獻上對於直接使用加馬射線進行光催化反應的討論並不多見，Nobuyuki 氏將放射性 <sup>106</sup>Ru 負載於 TiO<sub>2</sub> 進行自發性產製氫氣之研究<sup>(15)</sup>，S. Seino 等人利用  $\gamma$  射線作用於 TiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等奈米粒子分解水溶液中的酚等有機物，其分解效率可以達 99.99%，但所需之 <sup>60</sup>Co 劑量率為 2000 Gy/h，照射時間需 10 小時，所需劑量為 20,000 Gy<sup>(16)</sup>。美國能源部使用游離輻射引發奈米級金屬氧化物催化功能研究中指出，破壞高階廢料中 EDTA 等螯合劑造成長半衰期核種遷移造成之毒性，所需的反應劑量很高，至少在 10,000 Gy 以上<sup>(17)</sup>。另外，國際原子能總署 (IAEA) 於 2003 年結合捷克、韓國等國家針對「輻射應用光觸媒於有機廢液或廢樹脂分解效能探討」研究報告中，已初步證實結合 Fenton 及 TiO<sub>2</sub> 光觸媒可以做多階段有機廢棄物降解、礦化及核種回收<sup>(18)</sup>。但是上述的例子顯示出，直接使用游離輻射於光觸媒應用時，所使用劑量相當大，即使最終可以達成光催化反應，也存在光反應效率差及曠日費時等缺點，反映在實際用途上即為反應速

率低，或是需要消耗更多光觸媒，無法有效應用在工業級廢棄物處理。

幾種製備方法例，如溶膠-凝膠<sup>(19-21)</sup>、注入<sup>(22-23)</sup>等，可以用於製備奈米 TiO<sub>2</sub> 於矽膠或是高分子材料，以避免顆粒聚集現象。而本文中使用的四氯化鈦水解方法，為具有彈性調配及便於製備均勻分散於多種材質之方法<sup>(24-28)</sup>。以 TiO<sub>2</sub> 為基底之奈米複合體製備雖然已被廣泛研究，但是合成氟化鋇與二氧化鈦共存之複合體可以顯示出輻射能有效之光催化性質則尚待發展。

本研究希望製備出一種同時含有 BaF<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> 之複合體材料，保有銳鈦礦 (anatase) 之 TiO<sub>2</sub> 晶型，並將它們同時固著於易於取得的陶瓷粉上。經過熱處理後的材料之結構性質與元素濃度，藉由 BET、SEM 與 ICP 等儀器進行探討。最後，使用加馬射線作為激光能量可以加深其穿透能力，希望藉由 TiO<sub>2</sub> 周圍的氟化鋇轉換加馬輻射，並產生可以被 TiO<sub>2</sub> 吸收之光能，因此達成促進光催化能力的目的。所製備之 BaF<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> 複合體可以因為使用輻射能之高穿透性而具有 3 度空間催化能力，並廣用於不同的工業應用領域。

## 二、實驗方法

### 1. 化學藥品與射源

TiCl<sub>4</sub>、Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>、NaF、citric acid、EDTA 與甲基藍皆購自 Merck 公司 (純度約為 > 99%)。核二廠提供球狀 Purolite NRW-100 陽離子樹脂為苯乙烯及二乙烯基苯之共聚物，帶有硫酸根官能基，平均尺寸為 300  $\mu$ m，含水量 45-55%，總含碳量 34wt.%。<sup>60</sup>Co 照射設備為核能研究所國家游離輻射標準實驗室設備，<sup>60</sup>Co 活度約為 700 Ci (2004 年 1 月)，放出 1.17 MeV (100%) 及 1.32 MeV (100%) 能量。UV 光源為 700 W 東亞水銀燈泡，波長主要為 254 nm。

### 2. 光觸媒合成<sup>(29-30)</sup>

為區分光催化、閃爍劑放光或是希望之輻射敏感型光催化，必須製備 3 種觸媒：在陶瓷粉上僅含 TiO<sub>2</sub> 微粒者稱為 T 型光觸媒，在陶瓷粉上僅含

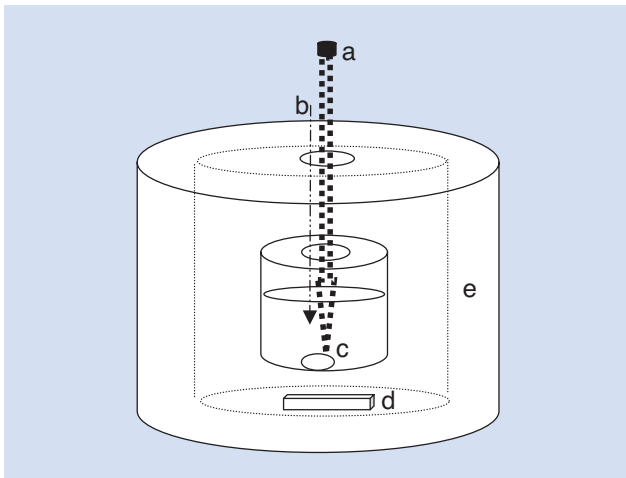


圖 1. 以游離輻射引發光催化反應之輻射照射設備  
a:  $^{60}\text{Co}$ ; b: 空氣; c: 磁石; d: 攪拌器;  
e: 鉛屏蔽。

$\text{BaF}_2$  微粒者稱為 B 型光觸媒，而在陶瓷粉上同時含有  $\text{TiO}_2$  與  $\text{BaF}_2$  微粒者稱為 BT 型光觸媒。以  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{NaF}$ 、 $\text{TiCl}_4$  及陶瓷粉四種主要材料合成，其使用重量比例依序為 0.3–1 : 0.1–0.8 : 0.5–1.8 : 2–7。變化上述比例可以在陶瓷粉上合成出不同鈦與鋇比例之觸媒<sup>(31)</sup>。在 1 M HCl 冰浴中逐滴加入  $\text{TiCl}_4$ ，並持續攪拌至溶液澄清，加入陶瓷粉末後攪拌約 2 小時，於 450 °C 鍛燒約 2 小時，收集粉末備用 (僅含有  $\text{TiO}_2$  之觸媒粉，T 型光觸媒)。在適當量 EDTA 水溶液中，加入  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$  與  $\text{NaF}$ ，劇烈攪拌至溶液澄清備用。直接加入陶瓷粉末後攪拌約 5 小時，於 450 °C 鍛燒約 5 小時，收集粉末備用 (僅含有  $\text{BaF}_2$  之觸媒粉，B 型光觸

媒)。若是加入上述含有  $\text{TiO}_2$  之觸媒粉末，以加熱方式將溶液蒸乾，在烘箱中乾燥 24 小時，最後於 450 °C 鍛燒約 5 小時即合成另一種光觸媒粉末 (同時含有  $\text{BaF}_2$  及  $\text{TiO}_2$  之觸媒粉，BT 型光觸媒即  $\text{BaF}_2/\text{TiO}_2$ /陶瓷粉)。

### 3. 光催化實驗

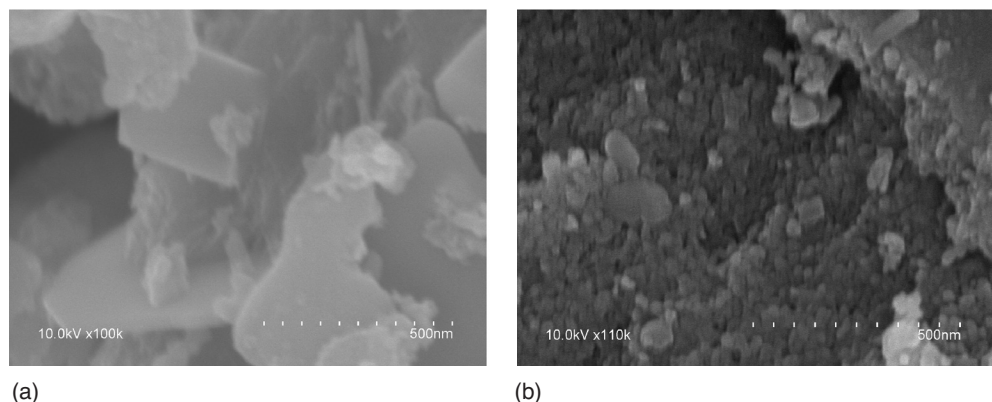
在 100 mL 反應瓶中分別置入 0.2 克觸媒 (T 型、B 型或是 BT 型) 及 70 mL 10 ppm 甲基藍溶液，樹脂分解實驗則置入 1 g 觸媒 (BT 型) 與 1 g 乾燥樹脂，反應時以磁石攪拌，反應瓶上方為  $^{60}\text{Co}$  射源，並在瓶中通入空氣，整個反應置於 4 公分鉛屏蔽中，實驗裝置如圖 1。反應器中輻射吸收劑量率須經過水吸收劑量評估<sup>(32)</sup>。以 UV 光進行實驗時，上述配比及使用材料不變，UV 燈與反應瓶距離 15 公分。

### 三、光觸媒性能鑑定<sup>(33)</sup>

以 Quantachrome NOVA 2000 BET 鑑定合成 BT 型觸媒表面積為 27  $\text{m}^2/\text{g}$ ，高於純陶瓷粉 4  $\text{m}^2/\text{g}$ ，而孔隙體積由陶瓷粉 1.2  $\text{cm}^3/\text{g}$  降為觸媒 0.1  $\text{cm}^3/\text{g}$ ，顯見微粒佔據陶瓷粉孔隙，並由微粒奈米尺寸增加光觸媒之比表面積。

純陶瓷粉基材尺寸約 30–50  $\mu\text{m}$ 。圖 2 為合成  $\text{BaF}_2/\text{TiO}_2$ /陶瓷粉光觸媒 SEM (Hitachi S-800 SEM/EDX) 圖譜，圖 2(a) 立方體 (cubic) 為  $\text{BaF}_2$  微粒，尺寸為 200–400 nm，以 XRD 鑑定屬於 Frankdicksonite 晶型 (JCPDS 04-0452)。圖 2(b) 為

圖 2.  
以 SEM 觀察 BT 型光觸媒表面型態，(a) 立方體為  $\text{BaF}_2$ ；(b) 顆粒狀為  $\text{TiO}_2$ 。



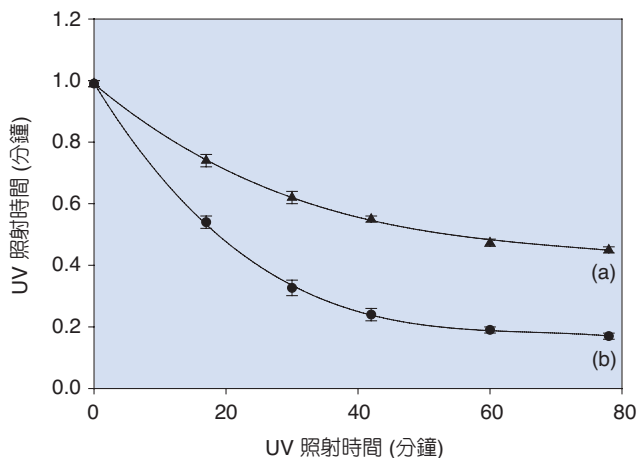


圖 3. UV 照射時間與光催化分解 10 ppm 70 mL 甲基藍之關係曲線。曲線由上至下：(a) 加入 0.2 克 BT 型觸媒 (▲)；(b) 加入 0.2 克 T 型觸媒 (●)。

10 萬倍放大圖，其中顆粒狀微粒尺寸約 10–20 nm，以 XRD 鑑定為銳鈦礦 (anatase 晶型) 二氧化鈦 (JCPDS 21-1272)。實驗結果清楚顯示合成後陶瓷基材上同時固著 BaF<sub>2</sub> 與 TiO<sub>2</sub> 微粒<sup>(34)</sup>。

本研究有 3 種型態光觸媒製備方式，為決定其中 Ti 與鉬含量。精稱 10 mg 觸媒粉末加入 8 mL HNO<sub>3</sub> + HClO<sub>4</sub> + HF(5 : 3 : 2 v/v) 混酸置於鐵氟龍瓶中於 100 °C 消化，再以 PE-Optima 3000DV ICP-AES 測得消化後樣品中鈦與鉬元素含量，以 mg/g 表示粉體中含有之元素濃度。對於 T 與 BT 型觸媒，由於研究中要比較在 UV 及輻射下之光催化效能，因此在一系列不同之鈦與鉬含量中，取出含有相同鈦濃度之光觸媒做實驗，T 型光觸媒中 Ti 的濃度為 41.2 ± 2.5 mg/g (n = 3)，B 型光觸媒中 Ba 的濃度為 139 ± 3 mg/g (n = 3)，BT 型光觸媒中 Ba 與 Ti 成分濃度分別為 140 ± 5 (n = 3) 及 41.1 ± 2.3 (n = 3) mg/g。

## 四、可溶性有機物分解實驗

### 1. 甲基藍分解實驗

圖 3 為 UV 照射時間與光催化分解 10 ppm 70 mL 甲基藍之關係曲線。使用的 T 型與 BT 型光觸

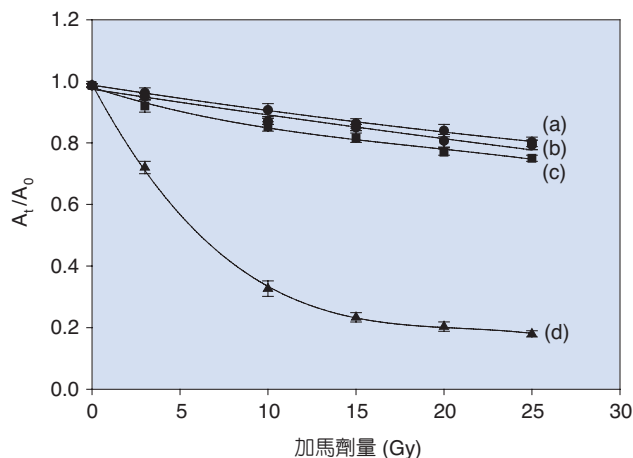


圖 4. 加馬照射劑量 (Gy) 與光催化分解 10 ppm 70 mL 甲基藍之關係曲線。曲線由上至下：(a) 反應中不加入觸媒 (radiolysis)；(b) 加入 0.2 克 B 型觸媒；(c) 加入 0.2 克 T 型觸媒；(d) 加入 0.2 克 BT 型觸媒。

媒有相同的 Ti 濃度，其中的 A<sub>1</sub> 與 A<sub>0</sub> 分別代表在不同照射時間與照射前所量到的甲基藍吸收值。由圖中可見，甲基藍濃度開始即快速下降，並逐漸緩慢下降，顯示異相光催化反應發生於 TiO<sub>2</sub> 表面，並依照甲基藍在溶液中的濃度而定。在相同的 UV 照射時間下，顯然 T 型光觸媒對於 UV 的光分解效果優於 BT 型，可能是因為 BaF<sub>2</sub> 堆疊於 TiO<sub>2</sub> 表面造成遮蔽所致。

圖 4 為加馬照射劑量 (Gy) 與光催化分解 10 ppm 70 mL 甲基藍之關係曲線。顯然藉由輻射 (曲線 a) 不能對於甲基藍產生有效降解。曲線 b 的用意為輻射引發氟化鉬產生之 220、315 nm 波長能量是否可以直接用來降解甲基藍。另外，由曲線 c 可以說明僅有二氧化鈦存在時，輻射能無法有效激發並產生光催化反應。觀察圖中曲線 d 趨勢與圖 3 類似，明顯量的甲基藍將隨著輻射劑量增加而逐漸被降解，其降解方式與圖 3 異相光催化反應類似，此時由於 <sup>60</sup>Co 射線可以產生有效穿透，堆疊於 TiO<sub>2</sub> 表面的 BaF<sub>2</sub> 不再因為遮蔽而減少光催化效應，因此證明在不照光條件下，閃爍劑可以間接引發 TiO<sub>2</sub> 光催化效果。

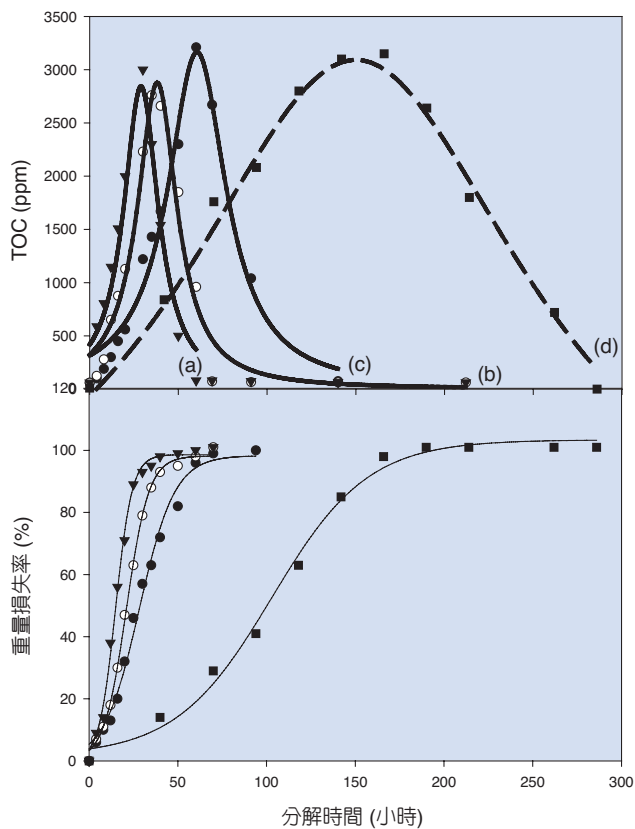


圖 5. 輻射照射 1 克 BT 型光觸媒分解樹脂 TOC (ppm) 與失重率 (%) 之關係曲線。曲線由左至右：(a) pH11 條件，1 克樹脂；(b) pH9 條件，1 克樹脂；(c) pH7 條件，1 克樹脂；(d) pH9 條件，5 克樹脂。

## 五、不溶性有機物分解實驗

一般而言，可以溶於水中的有機物會因為吸附作用，而使得光催化探討較為複雜，本文中利用不溶於水的粒狀樹脂來直接證明製備之光觸媒分解功能。

球狀樹脂為苯乙烯及二乙烯基苯交聯之有機共聚物。利用如光催化等高級氧化法產生之氫氧自由基，與樹脂表面化學反應形成碳氫斷鍵，如此球型物將逐漸解體，並有碎片或是有機分子溶入於溶液中，所以藉由觸媒粉體與樹脂殘渣之重量變化與溶液中總有機碳濃度，可以明顯判斷樹脂降解與礦化程度。通常，顆粒不斷瓦解伴隨著有機物分解，所以樹脂的失重率會在一定時間達平衡，此時具有最

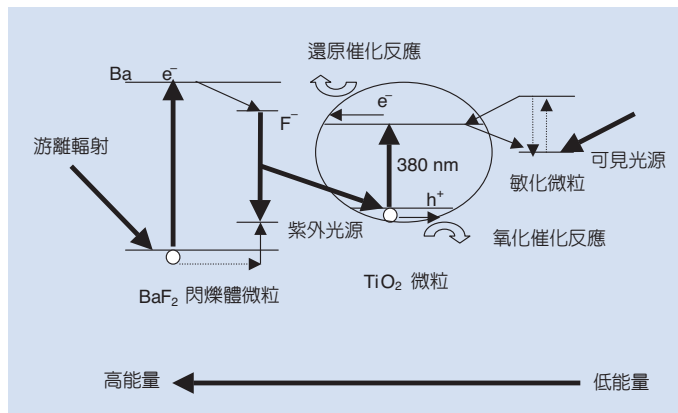


圖 6. 激發二氧化鈦能階引發光觸媒反應之能量範圍示意圖。

大的溶解有機物 (TOC) 值，代表固體已完全分解而溶入溶液中，而樹脂失重率達 100%。過此反曲點後，反應將隨著時間增加而使得 TOC 值降低，而失重率維持固定不變。

圖 5 為輻射照射 1 克光觸媒分解樹脂 TOC (ppm) 與失重率 (%) 之關係曲線。其中的 TOC 變化代表樹脂被分解產生之有機物溶於水中，而失重率 (%) 為反應後樹脂與光觸媒總重扣掉未反應前樹脂與光觸媒總重，與未反應前樹脂總重之比值百分率。圖中 (a,b,c) 顯示降解速率隨著 pH 增加而增加，到達 TOC 最高值時間隨 pH 增加而減少。此點符合 Lakshmi 氏對於染料等有機物於 Degussa TiO<sub>2</sub> 於不同 pH 之探討<sup>(35)</sup>，由於部分斷裂之分子可能保有磺酸根等碎片，導致對於高 pH 之負等電點 TiO<sub>2</sub> 表面有更高之吸附性所致。另外比較圖中 (b) 及 (d)，在相同 pH 及觸媒量下，增加 5 倍樹脂量，在一定的輻射劑量下所需之分解時間約為 5 倍。

## 六、輻射催化劑機構探討<sup>(36)</sup>

本文中嘗試解釋藉由無機閃爍體及加馬輻射能引發之光催化效應機構。如圖 6 所示為多步驟之光催化反應機制，無機閃爍體通常含有重原子序元素，藉由閃爍體微粒上重原子如鋇 (Ba)、鏷 (La) 及釷 (Y) 等元素，加馬射線經閃爍體吸收後，被激發之 Ba 原子價帶產生能階躍遷至導電帶，在晶格

中運行並逐漸損失其能量，最終被能阱中的氟離子捕捉並放出 220 或是 315 nm 波長的光，因此激發附近之 TiO<sub>2</sub> 產生光催化反應。

## 七、結論

本研究以四氯化鈦水解及 EDTA 螯合製備 BaF<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>/陶瓷粉催化劑為快速、簡便、經濟且有效之合成方法。經鑑定在陶瓷粉基材上同時含有 BaF<sub>2</sub> 與 TiO<sub>2</sub> 奈米微粒。實驗證實輻射催化劑可以有效藉由 <sup>60</sup>Co 輻射引發二氧化鈦光催化反應，將甲基藍與球狀樹脂分解減容並達到礦化目的。

本研究希望利用無機閃爍劑作為促進劑，製備出多孔性且大表面積基材光觸媒材料，可以利用游離輻射作為光源，將表面 2D 光催化效應擴展為 3D 全體積光觸媒，克服傳統光觸媒使用 UV、Vis 光源透光性不足缺點，使得基材種類於光催化應用不再受限，並有效提升光觸媒於高能游離輻射應用領域。期望對於目前環境領域上困難提供解決方法，如核能電廠放射性廢樹脂處理，以及新能源轉換，如利用游離輻射作為產氫工業技術研究，此外，例如環境中污染有機物之降解，以達成環境保育目標。

## 誌謝

本研究進行期間，感謝核能研究所化學工程組與新竹貴重儀器中心對於 BET、SEM 與 ICP 等鑑定儀器之協助。並感謝核能研究所國家游離輻射標準實驗室提供 <sup>60</sup>Co 照射設備。

## 參考文獻

1. Z. C. Jin, J. Hamberg, and C. G. Granqvist, *J. Appl. Phys.*, **64**, 5117 (1988).
2. J. B. Yoo, A. L. Fahrenbruch, and R. H. Bube, *J. Appl. Phys.*, **68**, 4694 (1990).
3. S. Major, S. Kumar, M. Bhatnagar, and K. L. Chopra, *Appl. Phys. Lett.*, **49**, 394 (1986).
4. A. Fujishima and A. Honda, *Nature*, **238**, 37 (1972).
5. C. Contescu, V. T. Popa, J. B. Miller, I. E. Ko, and J. A. Schwarz, *J. Solar Energy Eng.*, **199**, 120 (1997).
6. A. Sclafani and J. M. Herrmann, *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, **113**, 81 (1998).
7. V. Brezova, A. Blazkova, L. Karpinsky, and M. Ceppan, *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, **109**, 177 (1997).
8. S. Ahuja and T. R. N. Kutty, *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, **97**, 99 (1996).
9. T. Takata, K. Shinohara, A. Tanaka, M. Hara, J.N. Kondo, and K. Domen, *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, **106**, 45 (1997).
10. M. Anpo, H. Nakaya, S. Kodama, and Y. Kubokawa, *J. Phys. Chem.*, **90**, 1633 (1986).
11. C. Anderson and A. J. Bard, *J. Phys. Chem.*, **99**, 9882 (1995).
12. Y. Matsumoto, *J. Solid State Chem.*, **126**, 227 (1996).
13. X. Fu, L. A. Clark, Q. Yang, and M. A. Anderson, *Environ. Sci. Technol.*, **30**, 647 (1996).
14. K. T. Ranjit and B. Viswanathan, *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, **108**, 79 (1997).
15. N. S. Naka and Y. W. Mito, *United States Patent 5093302* (1992).
16. S. Seino, T. A. Yamamoto, K. Hashimoto, S. Okuda, N. Chitose, S. Ueta, and K. Okitsu, *Rev. Adv. Mater. Sci.*, **4**, 70 (2003).
17. M. A. Henderson, *Ionization Radiation Induced Catalysis on Metal Oxide Particles*, Dec. DOE Final Report (1999).
18. IAEA-TECDOC-1336, *Combined Methods for Liquid Radioactive Waste Treatment* (2003).
19. C. Cannas, M. Casu, A. Musinu, A. Lai, and G. Piccaluga, *J. Mater. Chem.*, **9**, 1765 (1999).
20. S. Lu, L. Zhang, and X. Yao, *Chin. Sci. Bull.*, **41**, 1923 (1996).
21. Z. Yongfa, Z. Li, G. Chong, and C. LiLi, *J. Mater. Sci.*, **35**, 4049 (2000).
22. W. H. Zhang, J. L. Shi, L. Z. Wang, and D. S. Yan, *Chem. Mater.*, **12**, 1408 (2000).
23. L. Khouchaf, M. H. Tullier, M. Wark, J. J. Paillaud, and M. Soulard, *J. Physique*, **IV 7**, C-267 (1997).
24. N. Ozer, H. Demiryont, and J. H. Simons, *Appl. Opt.*, **30**, 3661 (1991).
25. Y. Paz, Z. Luo, L. Rabenberg, and A. Heller, *J. Mater. Res.*, **10**, 2842 (1995).
26. M. Li, Y. Chen, *Sensors and Actuators B*, **32**, 83 (1996).
27. N. Negishi and K. Takeuchi, *Mater. Lett.*, **38**, 150 (1999).
28. P. Li, I. Kangasniemi, and K. de Groot, *Bioceramics*, **6**, 41 (1993).
29. C. J. Yu and Y. Linda, *J. of Chemical Education*, **75**, 750 (1998).
30. C. Jimmy Yu, L. Jun, W. Raymund, and M. Kwok, *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, **111** 199 (1997).
31. 余慶聰, 李振弘, 張澤民, 趙旋爾, 王竹方, 2004 年材料學會年會, 新竹市, 274 (2004).
32. L. C. Yu, S.-H. Su, J.-H. Lee, and W.-S. Hwang, Institute of Nuclear Energy Research, *Report No.2178* (2000).
33. 余慶聰, 陳連松, 王煒仁, 黃榮茂, 王竹方, 第二屆環境保護與奈米科技學術研討會, 新竹市, 364 (2005).
34. C. F. Wang, C. T. Yu, B. H. Lin, and J. H. Lee, *J. Photochem.*

*Photobiol. A: Chem.*, in press.

35. S. Lakshmi, R. Renganathan, and S. Fujita, *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, **88**, 163 (1995).
36. 余慶聰, 王竹方, 王煒仁, 趙旋爾, 第一屆兩岸能源與環境永續發展科技研討會, 中壢市, 40 (2005).

- 
- 余慶聰先生為國立台灣大學化學碩士，現任行政院原子能委員會核能研究所助理研究員。
  - 陳姿瑜小姐為國立清華大學生醫工程與環境科學研究所碩士班學生。
  - 張雅婷小姐為國立清華大學生醫工程與環境科學研究所碩士班學生。
  - 王竹方先生為美國普渡大學化學博士，現任國立清華大學生醫工程與環境科學研究所教授。

- Ching-Tsung Yu received his M.S. in chemistry from National Taiwan University. He is currently an assistant scientist in the Institute of Nuclear Energy Research.
- Tzu-Yu Chen is a master student in the Institute of Biomedical Engineering and Environmental Science at National Tsing Hua University.
- Ya-Ting Chang is a master student in the Institute of Biomedical Engineering and Environmental Science at National Tsing Hua University.
- Chu-Fang Wang received his Ph.D. in chemistry from Purdue University, USA. He is currently a professor in the Institute of Biomedical Engineering and Environmental Science at National Tsing Hua University.