

# 永續化學與生活—— 回收與再利用

劉廣定

生活上製造的垃圾，工業生產過程造成的廢棄物必須設法減少，是追求永續發展之正道，前文〔註一〕已曾說明。然無論生活上或工業上幾乎不能避免造成廢棄物。以往常用以處理垃圾或無用的廢棄物的方式是掩埋或焚燒。唯掩埋可能造成土地及河川的汙染，焚燒則多是消耗能源又可能產生有毒廢氣（如戴奧辛）及煙霧和粉塵等，若不嚴加控制，也將造成環境汙染與毒害。從另一方面來看，廢棄物無論是否有害於人類環境、人體健康，其製造時除原料來自天然資源，也消耗了能源。應設法回收後再利用。於是，1990年代出現了協調工業與保護自然的「工業生態學」（industrial ecology），是永續發展重要的一支。

## 工業生態學

前文〔註一〕也提過，先進國家化學工業早有3R原則。其中「重製」（Recycle）和「再用」（Reuse）都是有關廢棄物處理的，盡可能避免運送而就地解決。例如以廢鹼液中和廢酸液，或將可燃性物焚化，除去有毒氣體，產生能量以供使用。再者，製造各種與食衣住行等相關的民生用品都是利用天然資源直接或間接為之。製造時會產生廢棄物，不當使用產品也會造成廢棄物。這些廢棄物之形成，除原料來自天然資源，也都曾消耗能源。應設法回收後再利用為資源或能源，才符合永續發展的要求。依據美國環保署的統計，2010年該國工業產生了約兩千萬噸有害廢棄物，其中11%

轉換成可利用的能量，36%回收後再利用。〔註二〕台灣的行政院主計處公布2010年「有害事業廢棄物」約130萬噸，回收及再利用者約74萬噸，但再利用的百分率不詳〔註三〕。

工業上有系統大量回收再充分發揮廢棄物的價值有如下四種方式。

1. 將未完全反應的原料直接輸入反應器。
2. 將在某製程中是廢物的物質，作為原料轉移到另一製程。
3. 再利用以處理其他廢棄物。例如上文所說的以廢液進行中和。
4. 從易燃有機廢棄物的燃燒（放熱反應）中回收能量。

其中回收後可以再利用的主要有：

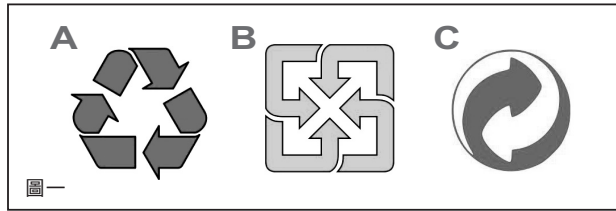
(a) 主要含鐵的金屬，大多用作電弧熔爐的原料；(b) 非鐵金屬，包括鋁、銅與銅合金、鋅、鉛、鎳、錫、銀和汞等；(c) 金屬鹽類與多種無機物，包括一些酸和鹼；(d) 玻璃類；(e) 紙類；(f) 塑膠類；(g) 橡膠類；(h) 有機溶劑和油性物如潤滑油等；(i) 農業廢棄物，如用於改良酸化土的廢石灰或用為肥化貧瘠土的磷酸鹽汙泥。

另外還有各別工業不同特殊用品的回收再利用，例如石化工業所用之觸媒劑。

## 日常生活廢棄物之回收與再利用

為了加強民眾注意「回收再利用」的重要性，1970年一位美國人依上述3R的循環利用原則設計如（圖一A）的黑白圖案，後改用綠

色以為「回收再利用」的標誌而為許多國家所採用。其他一些國家有採不同式樣的，唯都是綠色：如台灣所用圖案為（圖一B），德國為（圖一C）。

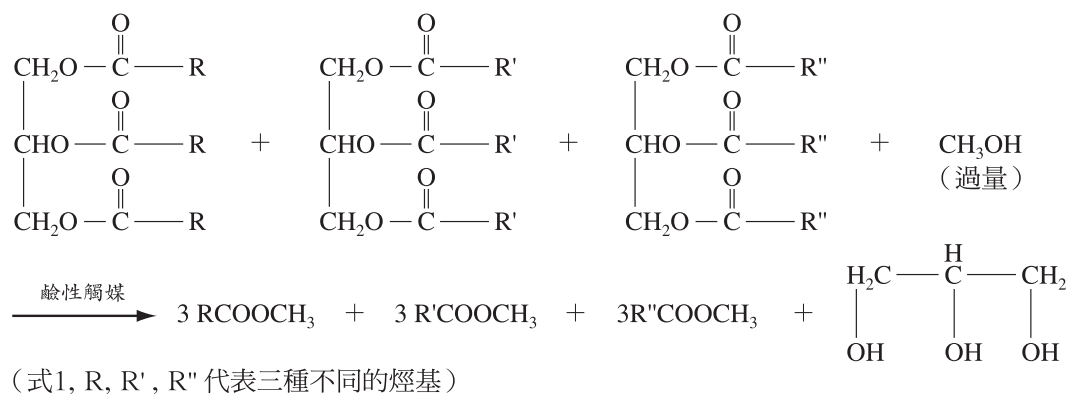


日常生活中有許多廢棄物（垃圾）是對環境有害的，不可任意拋棄。以用電的現代化隨身用品為例，行動電話、隨身聽、筆記型電腦、電動玩具和新出的各種手機與iPad等都需要電池，電池依其不同充電放電之化學性質分為不能再充電使用的一次電池和可再充電使用的二次電池。無論是那一種，其中的化學成分，尤其是金屬化合物多會汙染環境、有害人體，故不可隨意拋棄而必須回收處理。《科學月刊》2006年6月號已有楊奉儒等合著「廢電池回收與處理」一文〔註四〕，請讀者參考，本篇不贅。唯須補充一點：不同種類的電池應分類回收以利處理。

例如：分類10號為鎳鎘電池（NiCd），11號為鎳-氫化金屬電池（Ni-MH），12號為鋰電池（Li）。日本的電池會標明種類，如SONY的Ni-MH AAA及Ni-MH AA，而其回收分類的圖案為：

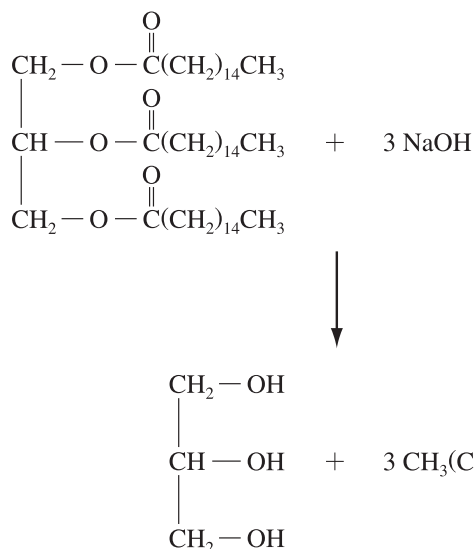


有許多垃圾是有再利用價值的。例如廢棄的食用油類即是含有少量不同雜質之三酸甘油酯〔註五〕。廢食用油傾入下水道，除排出後滋養蟲類細菌、汙染環境，還可能會因滯留與其他廢棄物在下水道中起作用形成難以除去的污垢，造成下水道之阻塞。然廢棄的食用油是可以再利用的。如「生質柴油」是將脂肪酸甘油酯成份，經過「鹼性觸媒酯交換反應」而和甲醇形成之脂肪酸甲酯混合物（fatty acid methyl esters 簡稱FAME）。（式1）食用油也是脂肪酸甘油酯的混合物，家庭的廢食用油量有限，但餐飲業，尤其是美式速食店炸雞塊，炸薯條，煎製漢堡、魚堡等，廢食用油量就很大。2003年筆者赴美京華盛頓參加美國永續化學與工程聯合會時，就看到北達科達州（美國最北方州之一）某大學學生的壁報論文，即報告將「麥當勞」回收的廢油製成FAME（RCOOCH<sub>3</sub>, R'COOCH<sub>3</sub>, R''COOCH<sub>3</sub> 混合物），代替柴油當做卡車及巴士的燃料。





廢食用油的另一用途是製造肥皂。傳統的肥皂是由主要含飽和脂肪酸甘油酯高的牛脂，椰子油及棕櫚油與氫氧化鈉或氫氧化鉀加熱反應，所產生的脂肪酸鈉鹽或鉀鹽即是。鹼性的酯分解亦稱「皂化反應」，棕櫚油的皂化反應如下頁之式。

由於廢食用油含有雜質，難以除盡，故製成的肥皂較宜用在工商業、機關及家事清潔上。例如南僑公司所生產顏色比較深的「合作牌肥皂」即由回收之廢食用油製成。

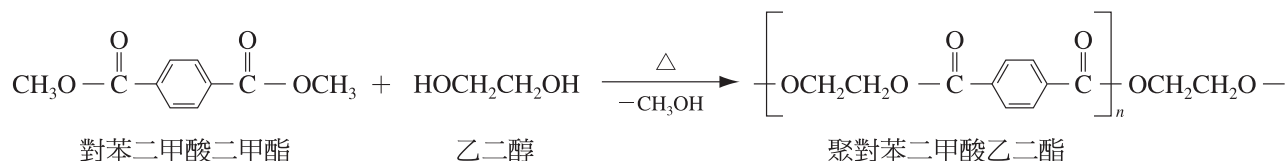


可回收的日常用物種類很多，例如澳洲為推廣回收，自1998年起每年訂一「回收週」今（2012）年預定為十一月12-18日。回收的項目有，鋁、玻璃、塑膠袋、普通紙、飲料盒紙（內有塑膠膜）、紙盒、電腦印表機用碳粉夾、軟木塞、玻璃、一般電池、鉛酸電池、鐵器以及整理庭園後的廢棄物等。〔註六〕限於篇幅，下文只簡介塑膠類的回收再利用。

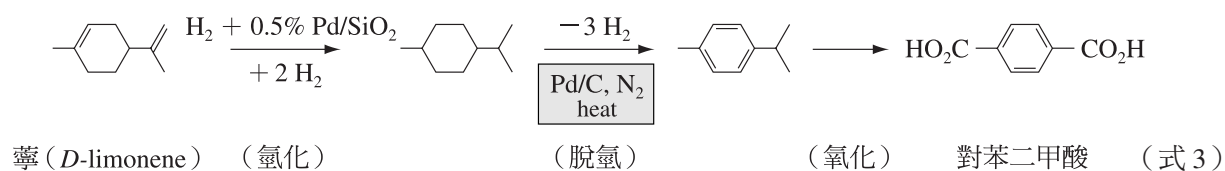
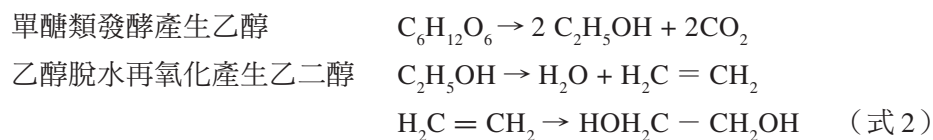
### 飲料瓶之回收與再利用

早期市售的飲料大多為玻璃瓶裝，而玻璃瓶也多是回收再用的。以「可口可樂」為例。1960年左右一瓶6盎司（約180毫升）售價5美分，退瓶可得2分。可見當時玻璃價格頗高。玻璃是金屬矽酸鹽與金屬氧化物，或類金屬氧化物的混合物，結構甚為安定。同類廢玻璃（常依顏色判斷，註七）可混合碾碎，融化後再利用。生活垃圾中之玻璃約佔10%，其標示例如： 透明玻璃  青綠色玻璃。故廢飲料瓶可以此法重製，也可以加溫洗淨後再用。

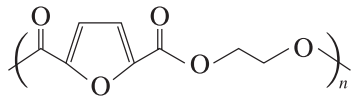
但自1980年代聚酯（聚對苯二甲酸乙二酯）瓶，即保特瓶（PET瓶）起始取代玻璃瓶後，幾乎各種非酒精飲料皆漸改在保特瓶中交易。保特瓶裝「可口可樂」，美國每年售出約1000億瓶。其中只約16%回收後將瓶蓋、標籤除去，再利用重製成其他產品！例如將聚酯抽絲再製成纖維產品。但不可用於食品類的盛器或包裝。如需重製盛飲料的保特瓶，則須將聚酯加入甲醇分解成對苯二甲酸二甲酯與乙二醇，純化後再重新聚合，成本頗高。



由於保特瓶的消耗量如此大，「可口可樂」公司與自2009年起與其他公司合作，以印度自醱類發酵生產的生質乙醇脫水成乙烯再製成乙二醇（式2），與對苯二甲酸製造聚酯保特瓶。也就是說，其所用的保特瓶已有部分得自「可再生原料」，符合「永續化學原則」之要求。因該公司另外還有生產瓶裝水DASAN也需要大量保特瓶，對苯二甲酸則試由植物精油中之「萜（limonene）」轉變而得（式3）。這一完全自可再生性原料代替石化原料製造的寶特瓶可能於2020年上市。



與可口可樂公司合作的荷蘭 Avantium 公司正在開發一種新聚酯，由六碳醣類（如葡萄糖與果糖）發酵先製成呋喃二甲酸，再與乙二醇製成新聚合物聚呋喃二甲酸乙二酯（polyethylene furanoate, PEF），預期將來可以代替現在用的保特瓶。



Polyethylene furanoate (PEF)

另一有趣的例子是約三年前台灣有一家興采實業公司，將咖啡店用剩的咖啡渣回收研發取出某些成份，與回收的保特瓶重製的聚酯纖維，以及礦石粉製成的「咖啡紗」。此項產品使用回收再利用的原料製成，據說擁有速乾涼爽、異味控制以及抗紫外線等功能外，最明顯的差異在於穿著此產品的冰涼感可使室內空調調高1-2°C，節省不少電費。已獲得很多國家的專利。可見研究開發新產品（新聚合物）才是追求永續發展之正途。

## 常用塑膠的分類

日用塑膠的種類很多，用量最多的有聚酯（聚對苯二甲酸乙二酯，PET）高密度聚乙烯（HDPE），聚氯乙烯（PVC），低密度聚乙烯（LDPE），聚丙烯（PP）聚苯乙烯（PS）等是目前環保回收塑膠類的主要對象。不同種類的塑膠回收時必須避免混在一起，新製的塑膠產品通常都會加上不同的符號說明其屬性。

聚酯	高密度聚乙烯	聚氯乙烯	低密度聚乙烯	聚丙烯	聚苯乙烯	其他
1.38-1.39	0.95-0.97	1.16-1.35	0.92-0.94	0.90-0.91	1.05-1.07	(密度)

近來又有建議將手機、電視機，電腦外殼，顯示器外框等所用的ABS（丙烯腈-丁二烯-苯乙烯聚合物）另列為第9項。但舊製的塑膠產品卻因無標示而不易分辨。以下介紹一種用簡單實驗以區分的方法：由於聚酯，聚氯乙烯和聚苯乙烯的密度都大於水，故可由在水中浮沈將這六種塑膠分成兩類。浮在水面的三種都沈在70%乙醇（密度0.87）中，慢慢滴入水後乙醇溶液密度增大，故密度最小（0.90-0.91）的聚丙烯將先浮起，繼續滴加水後浮起的是低密度聚乙烯（密度0.92-0.94）剩下就是高密度聚乙烯。取出沈在水下的三種，放進沸水中30秒，發生捲縮的是聚酯，因其玻璃遷移溫度較低（60-85°C）。將另兩種浸入丙酮中，會軟化變形的是聚苯乙烯，不變化的是聚氯乙烯。（參考 *Journal of Chemical Education*, Vol. 87, No. 2, 2010, pp. 147-149.）

註一：《科學月刊》第43卷（第4期）314-318頁。

註二：2010 TRI National Analysis Overview（2012年1月5日公布）。

註三：綠色國民所得帳編制報告（民國100年12月）。

註四：又見：《益智化學》頁131~140. 台灣商務印書館，2012年。

註五：參閱《科學月刊》第40卷（第11期）866-869頁；又見：《益智化學》頁61~69，台灣商務印書館，2012年。

註六：<http://recyclingweek.planetark.org/>

註七：通常分青綠色、黃褐色及無色三類，但無色的普通鈉玻璃與含硼的Pyrex（也有稱為Kimax的）玻璃必須分開，不得混合處理。

劉廣定 台灣大學化學系名譽教授