



廢塑膠循環再生複合材料

Plastic Composite Materials of Recycled Plastics

陳良哲 L. C. Chen¹、黃冠燁 K. Y. Huang²
工研院材化所(MCL/ITRI) ¹研究員、²研究主任

高分子材料為人們的日常生活帶來許多便利性，但產生的廢棄物也對環境帶來嚴重影響。雖然廢棄塑膠已進行有效分類與回收再利用，但仍有許多複雜的廢棄混合高分子材料無法有效回收利用。此篇文章將介紹廢棄塑膠回收分選機制以及產業應用。

Polymer materials have brought a lot of conveniences to people's daily life, but the wastes have also made some serious impacts on the environment. Although the plastic wastes have been effectively classified and recycled, there are still many complicated polymer-material wastes cannot be effectively recycled. In this article, the recycling mechanism and industrial application of plastic wastes are illustrated.

關鍵詞/Key Words

相容劑(Compatibilizer)、反應押出(Reactive Extrusion)、複合材料(Composites)、循環經濟(Circular Economy)

前言

高分子材料在人們的日常生活中扮演著重要的角色，如圖一，並帶來方便性，但其對生存環境的影響也日益受到人們的關注。一般而言，由於高分子材料的化學穩定性、不可降解性和低回收利用率，在高分子材料的生產、加工過程，以及高分子材料廢棄物若未妥善處理，均會對環境造成相當大的負擔。固體廢棄物處理是全球性的共通課題，應積極實施高分子材料回收與循環利用，來消除或減低其對環境的危害。

目前國內廢棄物管理體系，規劃出初

步的「零廢棄」國家目標，逐年減少廢棄物產量，建立永續發展的「零廢棄」社會。為了達到永續社會，施行了源頭減量與回收再利用的管理方式，朝向減少資源消耗、抑制源頭廢棄物產生，並強調回收再生利用之前端管理。基於愛惜資源及疼惜環境，回收並重複使用廢塑膠物品及容器有其必要。一般社區或學校進行回收工作時，通常將所有的塑膠容器歸為一個大類，回收商回收後需要進一步將之細分類為聚對苯二甲酸乙二酯(Polyethylene Terephthalate; PET)、聚氯乙烯(Poly Vinyl Chloride; PVC)、聚乙烯(Polyethylene; PE)、聚丙烯(Polypropylene; PP)、聚苯乙烯(Polystyrene;

▼表一 100~105年回收廢塑膠容器類的回收量統計

單位：公斤

年度	PET	PVC	PP/PE	PS未發泡	PS發泡	生質塑膠	合計
100年	101,437,167	1,147,251	81,526,830	6,952,375	2,484,715	-	193,548,338
101年	96,133,702	1,108,411	82,332,363	7,023,823	2,655,752	0	189,254,051
102年	101,840,726	861,762	86,158,006	6,830,392	1,886,269	913	197,578,068
103年	102,024,001	600,551	84,251,071	6,281,949	1,346,078	0	194,503,650
104年	96,274,243	401,839	80,826,689	5,637,312	1,199,738	0	184,339,821
105年	102,336,760	191,631	77,268,522	4,482,364	995,157	606,608	185,881,042

資料來源：行政院環境保護署廢物品及容器稽核認證回收量統計表

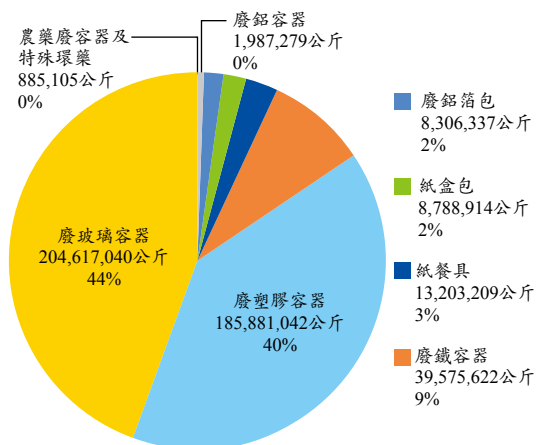


▲圖一 日常生活使用之塑膠製品

PS)、聚乳酸(Polylactic Acid; PLA)、Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)等，才能為後端再生處理廠所利用，目前這部分的工作還多倚賴人工進行分類。根據環保署資料顯示，105年廢塑膠容器總回收量約為18.5萬公噸(表一、圖二)，其中PET回收量占一半以上、PP/PE的回收量次之，此兩類材質的回收量占總回收量97%以上(圖三)，其回收量的部份亦逐年增加(表一)。

雖然政府致力於塑膠廢棄物回收再利用的推動，但由於廢塑膠製品材質複雜，每年仍有大量不可回收的混合片材、平板、塑膠廢棄物。目前尚無技術可於符合經濟效益及處理規模的情形下使用或再利用混

合廢棄塑膠，只能採取焚化進行處理，但是焚化又帶來嚴重空氣污染問題，所以廢塑膠的再生化是目前亟需解決的問題。工研院材化所目前正致力於廢塑膠再生的研究開發，透過建立①廢塑膠的純化技術，包含材質判定、分析與分類技術、雙螺桿脫揮的能力與技術；②廢塑膠體的介面相容技術，包含雙螺桿反應官能化改質/改性與溶解度參數設計；③廢塑膠體的品質測試機制，包含物性強化改性、物性驗證測試，將無經濟效益、複雜的廢棄混合高分子材料，改質開發成增強型再生相容助劑。目前與國內中/上游產業界合作，期能帶動國內許多相關產業對於廢棄塑膠材料的運



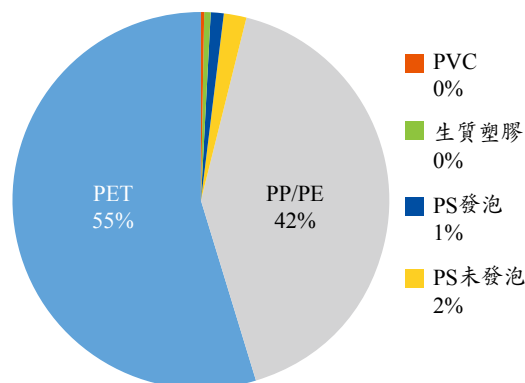
資料來源：行政院環境保護署廢物品及容器稽核認證回收量統計表

▲圖二 105年廢容器總量(463,244,548公斤)
(彩圖請見材料世界網<https://www.materialsnet.com.tw>)

用，賦予再生材料功能化、提高其運用價值，增加產品價值推行至中/下游應用端產業，有效降低陸地與海洋廢棄物，減少焚化所產生的PM_{2.5}與CO₂的排放量，朝向資源永續利用，建構循環型社會的方向邁進。

廢塑膠回收分選機制

塑膠種類繁多，回收後廢塑料型態是各種塑料的混合體，混合的廢塑料很難回用或者再利用價值不高，所以廢塑料必須先分類才能達到有效回收利用之目的。目前針對廢塑料分選技術主要分為人工分選與自動分選兩大類：人工分選是最原始、最簡單的廢舊塑料分離篩選方法，儘管相當費時、費力且效率很低，目前仍然是廣泛使用，尤其是針對在進料傳送帶上一些易於被發現的雜質；自動分選法又可以細分成密度分選、光學分選、靜電分選三種分選技術。以下就自動分選法的三種技術加以說明。



資料來源：行政院環境保護署廢物品及容器稽核認證回收量統計表

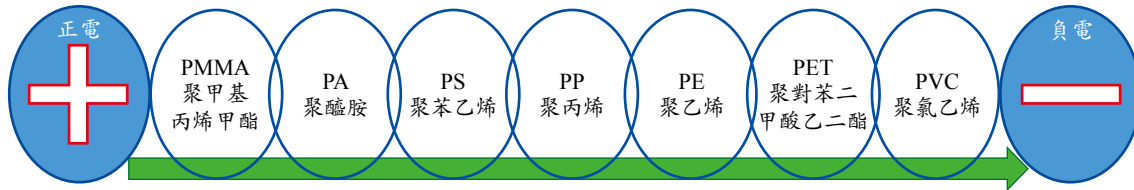
▲圖三 105年度廢容器材質比例(彩圖請見材料世界網<https://www.materialsnet.com.tw>)

1. 密度分選技術

密度分選是根據塑料密度不同進行分選的技術，主要分為風力分離和浮選分離兩種方式。塑料的密度範圍從小於1到1.5之間不等，利用密度的不同可以將混合塑料快速的分為兩組或多組，減少每組塑料中含有的種類數量。風力分離法是利用塑料不同密度造成懸浮速度的差別來分選的技術，主要應用於無法明確判定塑料材質，只能根據塑料密度區分，但如果塑料密度接近，會導致分選精密度降低，因此使用風力分離法處理量相對較小。浮選分離法是利用物質在溶液介質中的比重不同進行分選的技術，困難點在於對溶液介質的密度不易控制，還會污染溶液介質並產生泥渣等副產品需後續處理。目前密度分選法多採用工業化的氣流分選設備進行風力分選，從最初的單一氣流方向進化至多種氣流方向來增強分選效果。

2. 光學分選技術

光學分選技術是根據不同塑料在光譜



▲圖四 塑料摩擦帶電序列

性能上的差異而進行自動化分選，主要可分為①吸收光譜(Absorption Spectrum)，如紅外光(IR)、可見光(VIS)、紫外光(UV)吸收光譜；②發射光譜(Emission Spectrum)，如螢光光譜(Fluorescence Spectrum)；③散色光譜(Scattering Spectrum)，如拉曼光譜(Raman Spectrum)等三種類型，其優勢在於分選精確度高、產量大、分選靈活。

依照傳感器分選系統的檢測原理，可將自動分選技術分為以下六大類：①顏色識別(Color)傳感器：分析材料的紅外線、可見光、紫外線及其他範圍的光譜，識別材料的顏色來進行分選判斷；②近紅外(NIR)傳感器：根據不同材料所表現的不同的譜峰位置和強度進行分選判斷；③可見光譜感測器：針對透明與不透明材料進行可見光譜識別與分選判斷；④X射線透視(XRT)傳感器：根據不同種類材料的原子密度不同以及對X射線吸收程度的不同來進行分選判斷；⑤X射線螢光(XRF)傳感器：根據不同種類材料的原子特性以及釋放的螢光光譜來進行分選判斷；⑥電磁(EM)傳感器：根據材料不同的電導率和磁導率來進行分選判斷。

3. 靜電分選技術

靜電分選技術是利用各種塑膠導電率不同以及電場作用於塑膠上的靜電性能來進

行分選。先對廢塑膠進行破碎處理，使之達到合適的粒徑，雖然塑膠的電導率低，但仍可利用塑膠顆粒之間相互摩擦，使不同的塑膠帶上異種電荷，通過高壓靜電場對帶電顆粒進行分選收集。其中，荷電步驟決定了顆粒是否能得到充足的電荷而被電場吸引，而靜電分選步驟則決定了帶電顆粒的運動軌跡，從而決定了最終的純度和回收率。常見塑膠的帶電順序如圖四。

靜電分選過程原理簡單且分離效率高，適合密度相近不易分選的塑膠，但也會受到塑膠添加劑的種類及塑膠顆粒表面狀況的影響。靜電分選技術目前大多用於分離PE、PVC和Nylon的塑膠廢棄物，廢棄物回收率可高達98%，而分離後的材料純度可達95%。

廢塑膠循環再生應用

1. 相容助劑開發

在廢塑膠容器經過分類、分選回收過程後，仍會產生較無經濟效益、複雜的廢棄混合高分子材料，目前尚無技術在符合經濟成本及處理規模的前提下對這些混合片材進行有效處理再利用，只能透過焚燒掩埋處理。目前這些不可回收的混合片材、平板、塑膠板(PP、PE、PET、少量PVC等)每年約有650噸的廢棄量，對環境



造成相當大的負擔，亟需想辦法來處理。為了有效解決上述問題，工研院材化所致力於再生塑料複材助劑開發，利用低成本、高效率的改質方法，將無經濟效益的廢平板容器混合料進行回收再製，開發增強型再生相容助劑，除了可以去化廢棄的塑膠外，經過再生純化改質製程後使再生相容助劑的相容性更好、價值提升，可應用在更多高附加價值的產品。

(1) 何謂相容劑

原本不相容的兩種或多種聚合物，透過物理混煉後，增加聚合物之間的相容性，降低不同相成分之間的界面張力，減小相分離進而得到穩定的共混物的助劑，稱之為相容劑(Compatibilizer)，又稱為增容劑、界面乳化劑等。相容劑之所以能使性質不同的聚合物相容化，是因為在其分子中具有分別能與不同聚合物進行物理或化學結合的基團的緣故。根據相容劑的主體高分子之間的作用特徵，可分為兩類—非反應型相容劑與反應型相容劑。

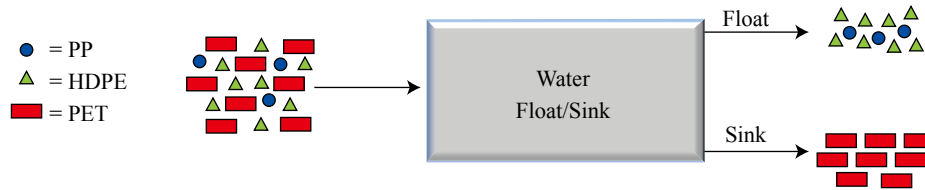
①非反應型相容劑：在不相容的高分子體系中，通過添加非反應型相容劑而達到相容化是最常見的方法。非反應型相容劑本身沒有可進行化學反應的基團，但是對於混煉的兩種聚合物都有物理上的親和性和黏接力，而使相容性差的聚合物兩相相容，形成混煉型聚合物合金，其優點為無副反應發生，缺點為所需添加量較大。非反應型相容劑一般為共聚物，分別為嵌段共聚物、接枝共聚物或無規共聚物，例如在聚酯(PC)/PS共聚物中加入相容劑PC-g-PS，由於相容劑中的PC鏈段與共聚物中的PC相容、PS鏈段與PS相容，從而將共聚物中的兩組分很好地結合在一起，得到性能優良的PC/PS共聚物。

②反應型相容劑：反應型相容劑是指本身含有反應基團的相容劑，在非極性高分子主鏈上接枝活性基團(如羥基、環氧基)組成的聚合物。由於它的非極性高分子主體能與共混物中的非極性聚合物相容，而極性基團又能與共混物的極性聚合物之活性基團反應或鍵合，故能起到很好的相容作用。一般以環狀酸酐型的馬來酸酐(MA)接枝到聚烯烴(PO-g-MA)的相容劑最為常見，其接枝率一般為0.8%~1.0%，主要應用於聚烯烴塑膠的改性，在聚合物共混物、聚合物/無機填料、聚合物/有機纖維、複合增強材料和黏結劑等方面都有廣泛的應用。除了以馬來酸酐接枝的環狀酸酐型之外，亦有以丙烯酸接枝到聚烯烴的羧酸型、環氧樹脂/環氧基的化合物接枝其他聚合物的環氧型、噁唑啉接枝PS的噁唑啉型，以及醯亞胺型、異氰酸酯型、低分子型等共七種不同類型之相容劑，可依據共混高分子材料特性選擇合適相容劑。

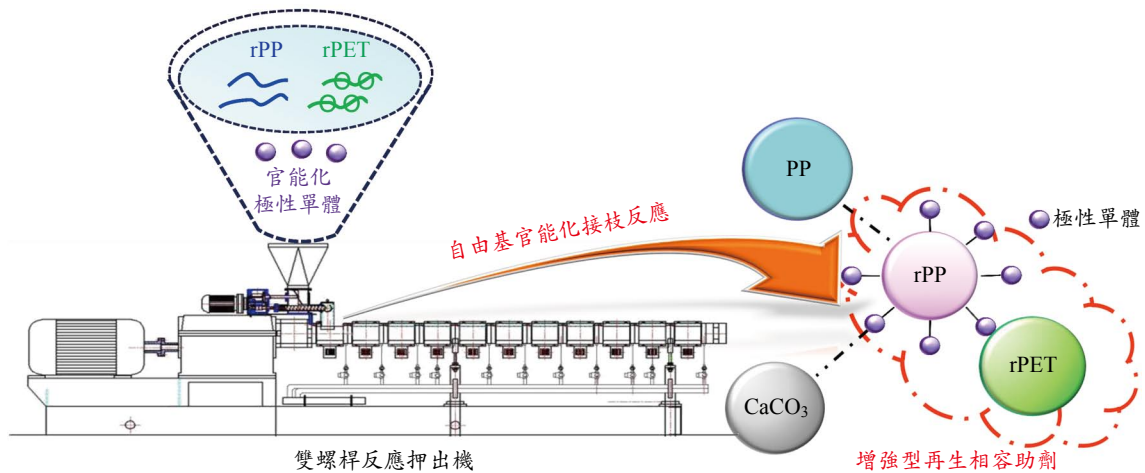
(2) rPP/PE-rPET增強型再生相容助劑開發

工研院材化所在雙螺桿反應押出(Reactive Extrusion)製程對聚烯烴進行官能化接枝改質技術已有多年研究基礎，擅長針對化學配方、螺桿組態、進料裝置設計等方面進行研究開發。從廢容器處理廠取得不具經濟效益的混合破碎片後，再次進行浮除法分選(圖五)，分別取得PP、PE (recycle PP/PE; rPP/PE)與PET (recycle PET; rPET)回收材料，先進行粗碎及細碎得到破碎片，再用雙螺桿押出機進行雜質過濾與脫揮，最後進行再生造粒得到rPP/PE、rPET再生塑膠粒子。

將rPP/PE再生粒子於雙螺桿押出機內進行極性單體接枝改質(圖六)後，接枝後PP的極性會提高，而增加和極性基材的



▲圖五 混合破碎片浮除法示意圖



▲圖六 雙螺桿反應押出官能化相容助劑示意圖

親合性，且部分的極性單體會和極性基末端的酸基（如rPET）反應形成鍵結，增加PP與極性高分子的相容性。因此，將rPP/PE-rPET系統經雙螺桿反應押出官能化改質後，形成具極性與非極性的複合材料(Composites)，非極性端可和低極性的聚烯材料親合，而極性端的可和碳酸鈣、尼龍、聚酯等高極性材料親合，且由於rPET具有苯環結構，可增強整體的剛性強度，使rPP/PE-rPET系統經由改質後可作為增強型再生相容助劑，增加複材相容性及機械性質。

產品驗證方面，將碳酸鈣加入PP原料中會導致拉伸強度、抗彎強度、衝擊強度下降（表二），但若導入工研院開發之rPP-

rPET之官能化相容助劑於PP複材系統中，對PP/碳酸鈣複材的物性均有顯著提升。且增強效果與市售的相容助劑相當，但價格估計為市售相容助劑的1/2~2/3左右。此外，將此相容劑複材配方系統應用於車用保險桿試射成形（圖七），結果顯示保險桿產品經過試射後，複材塑料的流動性良好，尖端或末端處皆能成形，表面光滑，系統材料相容性良好。

2. 廢車輛塑件回收與應用

國內目前廢棄車輛的塑件回收以廢保險桿為大宗，再製成塑膠酯粒原料。塑膠件占全車種比例25%，PC、ABS、PC/ABS

▼表二 PP複合材料的物性數值

複合材料	純PP	PP-CaCO ₃	PP-CaCO ₃	PP-CaCO ₃
相容劑-10 wt%	X	X	工研院	市售
抗張強度(kgf/cm ²)	197	186	217	217
抗彎強度(kgf/cm ²)	305	296	343	339
Izod衝擊(ft-lb/in)	3.0	1.89	2.54	2.50



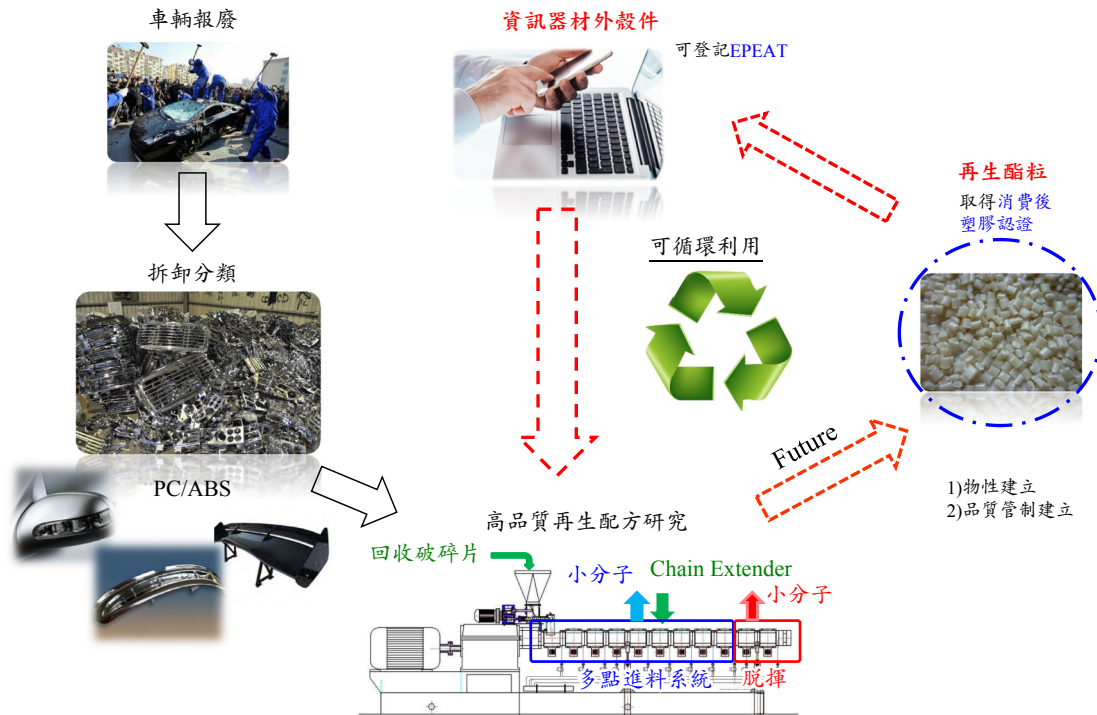
▲圖七 車用保險桿試射：正面(上)、左側(中左)、右側(中右)、背面(下)

約占塑膠件5~10%，即1.5噸車款約有375公斤塑膠，其中PC、ABS、PC/ABS約18~37.5公斤。PC在汽車中主要用於製造燈罩、左右輪罩護板、左右風框蓋、中間風框蓋(PC/ABS)、儀表擋板本體(PC/ABS)與後保險桿緩衝墊；而ABS則是主要用於汽車的內飾件與外飾件。以台灣車輛公會估算，2017

年台灣15年以上車輛約有220萬輛，若報廢數量高，則廢棄之PC、ABS、PC/ABS可達3.9~8.25萬噸，目前去化此類塑膠件多以焚化處理。為達環保訴求，工研院材化所致力於廢機動車輛塑膠(PC、ABS、PC/ABS)品質管制指標、螺桿脫揮純化技術及回收料高值化改質技術建立，開發符合資訊器材外殼部件之物性規格的ABS/PC回收再生酯粒，透過製程放大與塑膠之再生酯粒驗證(PIDC、TÜV)後，未來將可應用於資訊器材外殼件材料並取得EPEAT產品認證(圖八)。

3. 環保再生綠建材

目前全球環保意識高漲，為減少對地球環境破壞與資源浪費，世界各先進國家均致力於建築廢棄物減量與環保再生綠建材開發普及。所謂再生綠建材是指能循環再利用、使廢棄物減量之建材，通常是以廢棄物回收再製，並且能夠達到基本的安全要求。一般環保綠建材可大致分為三類：在建築物內部裝潢、地板、天花板、隔間板及各種木質家具等，以使用廢棄木材為原料者，稱為木質再生綠建材；在建築物外牆、隔間牆、地磚等以使用廢棄混凝土材料，或無機石質材料為原料所生產製造之石質建材，稱為石質再生綠建材；以木質或石質為主建材，摻配各種產業無



▲圖八 廢機動車輛衍生塑膠件再生示意圖

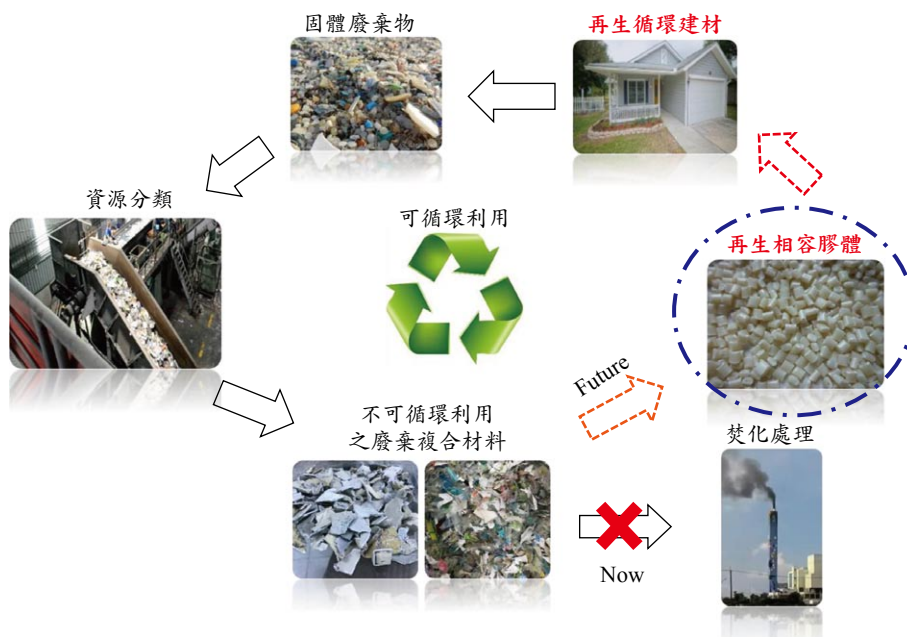
害性廢棄物（如廢塑膠、廢玻璃），以促進建材機能者，稱為混合材質再生綠建材。

全球建築業產值達到8.5萬億美元，其中綠建材產值金額約為6,068億美元，預計未來五年全球建築業市場的增長速度將達2.8%，其中亞洲經濟體將引領增長。歐美市場對永續發展建材包含了快速組裝建築材料、戶外裝潢等的應用，整體的複合材料市場預計將以20~30%的高年平均成長率持續成長。近年來政府也積極推動綠色消費，並鼓勵國內業者妥善回收所產生之廢棄物，以再利用製得具商業價值之建材產品，例如以廢塑膠與廢纖維布重生後導入建築材料中作為裝飾、結構等部件，形成循環綠建材。推廣再生綠建材之目的乃在促進建築廢棄物減量，以及不可回收之廢棄複合

材料的再利用，創造再生建材之永續循環利用，降低廢棄物焚燒的比例，減少二氧化碳排放，追求永續環境效益（圖九）。

結語

自工業革命以來，人們一直採用線性的生產消費模式，但從自然環境開採原物料到加工製造成商品，最終商品被購買使用後就直接丟棄的「線性經濟」已成為過去式。在環保意識抬頭的現今，「循環經濟」（Circular Economy）一詞成為新的產業典範。循環經濟是建立在物質不斷循環、利用上的經濟發展模式，形成「資源、產品、再生資源」的循環利用，達成零廢棄的終極目標，從根本上解決經濟發展與環境衝擊的矛盾。高分子材料雖然帶給人們極高的方



▲圖九 廢棄物永續循環利用示意圖

便性，但使用過後的高分子廢棄物卻造成環境很大傷害，形成所謂的「白色污染」。然而廢棄高分子回收利用已經和環境保護、資源回收利用和建立永續發展型社會聯繫在一起，重視廢棄高分子材料回收再利用新技術的開發研究，發展低成本、高效、無二次污染的廢棄高分子再生材料，以促進塑膠產業健康持續發展，創造龐大的經濟效益。

由工研院材化所開發之再生塑膠粒經改質後形成再生相容助劑，在複材系統中能發揮與市售產品相似的功能，除了可以去化廢棄的塑膠外，經過再生純化改質製程後能使複材系統的相容性更好、價值提升並降低PP複材系統的成本。其應用也更為廣泛，可根據調整應用在更多高附加價值的產品，未來與國內相關產業合作，將

目前無法回收之容器廢料進行回收再製，賦予再生材料功能化，形成高值化產品，有效減少廢棄物產量，建立永續發展的循環型社會。🔗

參考文獻

1. 行政院環保署資源回收管理基金管理會—回收處理流程，認識回收，2017。
2. 行政院環保署資源回收管理基金管理會，環保署統計資料庫—公告應回收廢物品及容器回收量統計表，2017/08/01。
3. 9種廢塑料分選技術，<https://read01.com/zh-tw/2dggOA.html#.W5jnJ84zbb1>
4. CPRJ中國塑料橡膠—再生塑料分選機制，2017年2月號。
5. 百度百科—相容劑。
6. 維基百科—塑膠添加劑。
7. 廢塑料分選法，<https://read01.com/2dggOA.html>
8. 生態綠建材，http://www.ats.com.tw/greenPower_ecogreen.html