

# 塑膠循環經濟下聚氨酯化學回收技術的發展

## The Development of Polyurethane Chemical Recycling Technology under Plastic Circular Economy

芮嘉瑋

Chia-Wei Jui

聚氨酯 (polyurethane, PU) 的用途與日俱增，其產生的廢棄物處理問題亦日形重要。基於循環經濟所指的「循環」，係以可被回收且再利用的方式開發可持續性的 PU 塑料較佳使用一種化學再循環方法。本文除了介紹 PU 主要的化學回收傳統技術 (水解法、醇解法、胺解法、磷酸酯法及酸解法) 外，為了掌握最新 PU 化學回收的產業技術現況與發展，亦就近期國內外開發具競爭力的 PU 新型化學回收技術，分享其化學回收技術上的突破。

The use of polyurethane (PU) is increasing day by day, and the waste disposal problems it generates are also becoming increasingly important. Based on the "circulation" referred to by the circular economy, it is preferable to use a chemical recycling method to develop sustainable PU plastics in a way that can be recycled and reused. In addition to introducing PU's main chemical recycling traditional technologies (hydrolysis, glycolysis, aminolysis, phosphate esters and acid hydrolysis), this article also shares recent breakthroughs in the development of competitive PU new chemical recycling technologies at home and abroad to grasp the current status and development of the latest PU chemical recycling industry technologies.

### 一、前言

工業革命以來，為了追求更好的物質生活，人們一直採用線性的生產消費模式，大量生產、大量消費、再大量廢棄，導致環境被汙染、能源逐漸枯竭。在氣候變遷、自然生態惡化、大量廢棄物、原物料需求與開採成本持續攀升等各種問題下，資源從開採、製造、使用到廢棄，呈現以生產、使用、丟棄處置為基礎之一條直線的「線性經濟」(linear economy)，並未對資源進行再利用或再生，造成資源衰竭降低了傳統製造業的競爭力<sup>(1)</sup>。

隨著永續發展、環保意識抬頭以及新興市場急速的膨脹，促使全球由過去線性經濟演進到循環經濟 (circular economy)<sup>(2)</sup>，如圖 1 所示，從線性模型轉變為提供「資源再利用」的閉環 (closed loop) 模型，目的是減少浪費和自然資源的使用<sup>(3)</sup>。

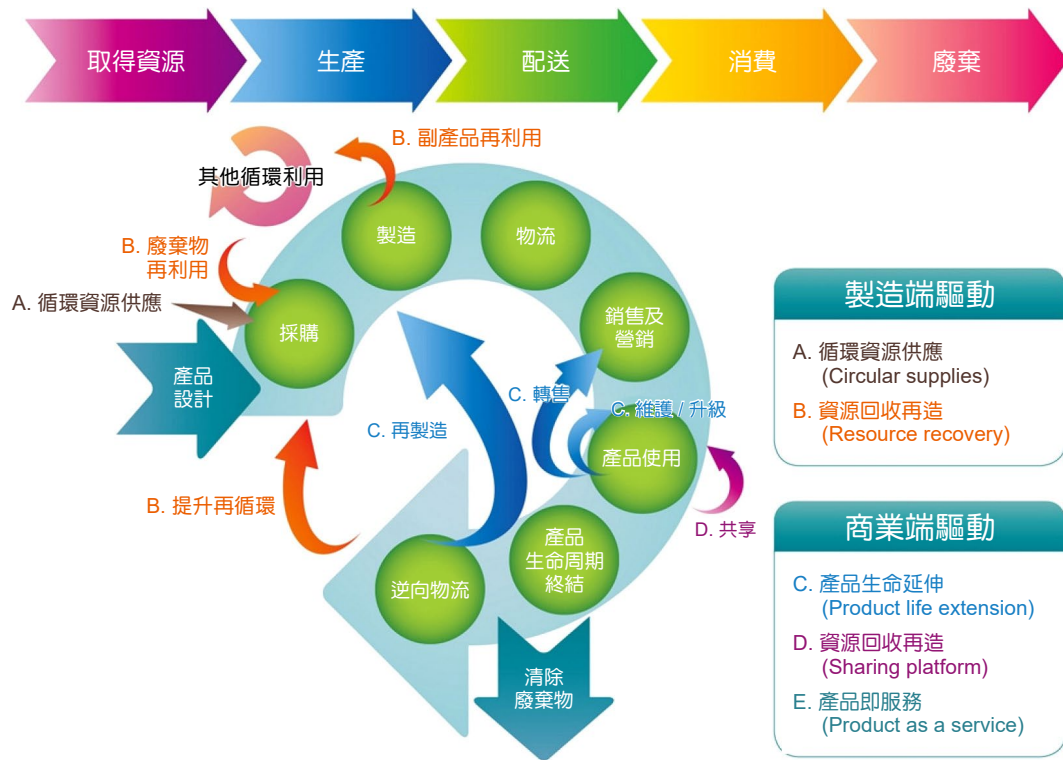


圖 1. 循環經濟的演進。(Source：台綜院)

循環經濟 (circular economy) 的概念已被喚起且在國際間不斷地被宣揚。「循環經濟」最早由英國經濟學家 K. E. Boulding 於 1966 年提出<sup>(4)</sup>，強調人類因追求經濟發展而大量開採自然資源與排放汙染廢棄物，有朝一日地球恐因資源耗盡而致毀滅，為使地球持續存在唯一的方式，就是將這些汙染及廢棄物轉換成可再利用的資源。這概念等同於必須不斷重複利用自己有限的資源，透過持續的內部資源循環自給自足延長壽命才能生存下去。1990 年英國學者 Pearce & Turner 也提出「循環經濟」的概念<sup>(5)</sup>，明確說明傳統開放式經濟並沒有納入回收的概念，反觀，循環經濟則嘗試依據永續發展的原則建立資源管理架構，使經濟系統成為生態系統的組成部分，用以創造出經濟與環境和諧共存的理想境地。致力推廣循環經濟概念的英國艾倫·麥克阿瑟基金會於 2012 年發布的《邁向循環經濟》報告<sup>(6)</sup>中也指出，「循環經濟」是透過設計具備可恢復性及再生性的產業系統，以循環再生取代生命週期結束的概念，重新定義產品和服務；同時最大程度地減少廢棄物對環境帶來的負面影響。圖 2 顯示艾倫·麥克阿瑟基金會將循環體系分成工業和生物兩大類。其中，工業循環依據 Govindan 和 Hasanagic 的觀點<sup>(7)</sup>，將原有的線性模式加上 3R (reduce、reuse、recycle) 之外，再加上另一個 3R (redefine、redesign 和 remodel)，讓產品盡可能以最高價值的方式保留在循環系統中重複使用，不會造成資源浪費；生物循環則是倡導資源在自然界中流動，由生質材料所製成之產品經過使用後，不可回收再應用的資源可再回歸到大自然成為生物養分，回歸土壤，有助於農林漁牧業之發展。

在傳統線性經濟 (linear economy) 模式中，「資源」屬於消耗材，並沒有對資源進行再利用或再生的政策，造成資源價值的浪費。但在循環經濟 (circular economy) 的概念下，資源利用率被重新思考，未來產業的理想境界將不會有真正的廢棄物，因為原先產業的廢棄物

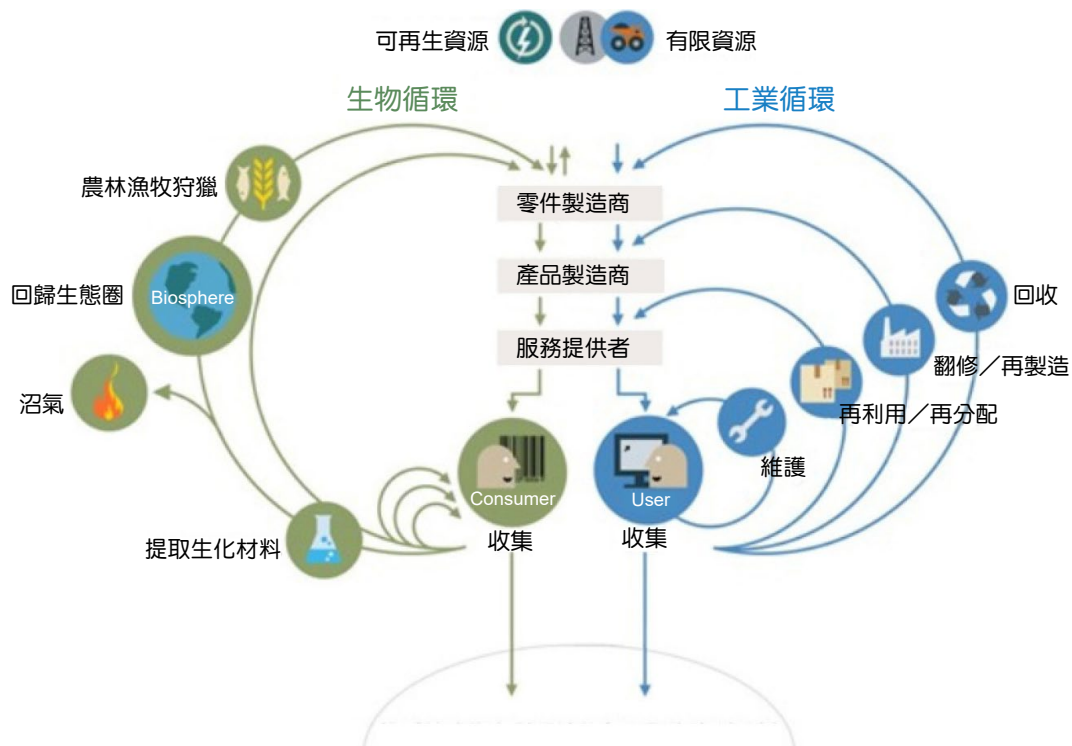


圖 2. 循環經濟系統圖<sup>(8)</sup>。(Source：塑膠中心)

可能會變成新興產業的能源，使資源價值最大化。循環經濟的新商業模式就是透過重新定義廢棄物、重新設計產品與製程，運用新科技讓資源、原材料與廢棄物回到產業鏈內不斷循環，大幅減少能源與資源的消耗和廢棄物的產生。因此，循環經濟在定義上是一個可恢復且可再生的產業體系，講求的是「再生恢復」，即使用可再生能源、拒絕使用妨礙再利用的有毒化學物質，並藉由重新設計材料、產品及商業模式，以消除或降低廢棄物產生，並促使資源更有效率地被利用，達到對環境的破壞降到最低，並藉由資源利用最大化，降低經濟發展所造成之社會成本，確保整體社會朝永續發展邁進<sup>(9)</sup>。

與循環經濟主題相關聯之材料中，塑膠是現代最被廣泛使用的材料<sup>(10)</sup>。自 1964 年代以來，全球塑料產量增長了 20 倍，2014 年達到 3.11 億噸，圖 3 顯示自 1950 年至 2014 年全球塑料產量增長趨勢，預計在未來 20 年內全球塑料產量將再次翻倍，到 2050 年幾乎是兩倍成長<sup>(11)</sup>。

儘管塑料的特性使其成為一種用途非常廣泛的材料，但其耐用性卻使其能夠在我們的生態系統中停留相當長的時間，這對海洋生物造成了嚴重影響。海洋受到塑料廢棄物的污染愈來愈嚴重，每年全球有 10% 的塑料污染最終排入海洋<sup>(12)</sup>，嚴重威脅海洋生物。塑膠製品以某種形式長期存在污染了我們的水域，成為殺死海洋野生動物的主要原因。塑膠從人類「幫手」黑化成環境「殺手」，解決因塑膠衍生的環境生態問題刻不容緩。圖 4 統計全球塑膠垃圾產生量與處理情形，儘管全球每年約可生產 3 億噸塑料並逐年有愈來愈多的趨勢，但其中僅約 9% 被回收，12% 被焚燒，有高達 79% 的塑膠垃圾在垃圾掩埋場或流入自然環境中<sup>(13)</sup>。如果依照目前產生塑膠廢棄物的速度，海洋中的塑膠垃圾總重將會大於所有魚類的重量<sup>(14)</sup>。

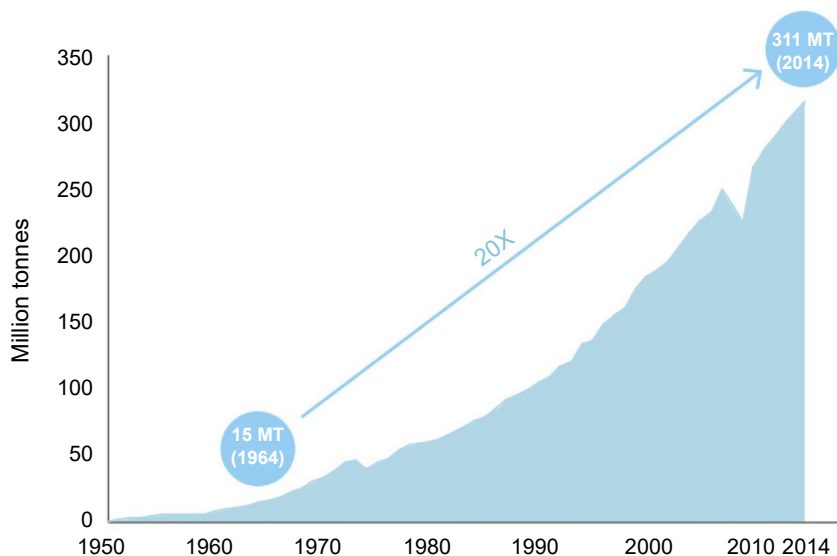


圖 3. 1950—2014 年全球塑料產量增長。(Source: PlasticsEurope)

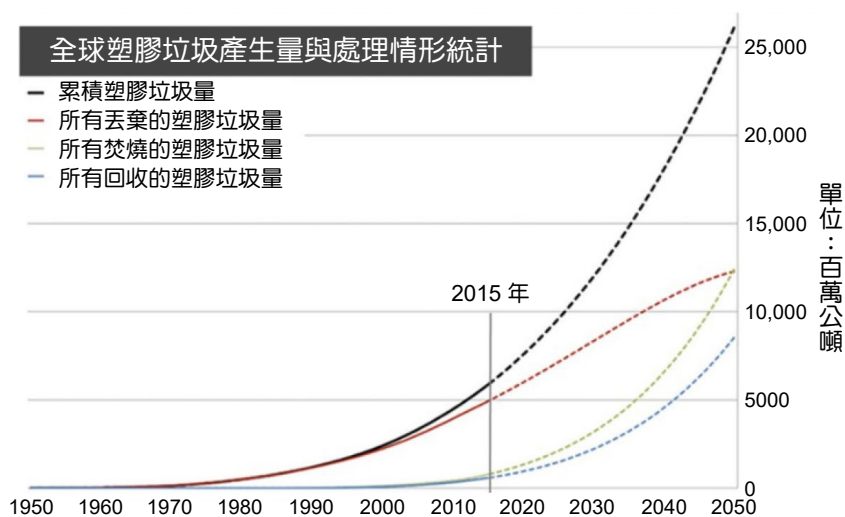


圖 4. 全球塑膠垃圾產生量與處理情形<sup>(15)</sup>。(資料來源：塑膠中心)

塑料廢物棄置多、回收少，嚴重影響全球環境生態。以歐洲為例，歐洲每年就產生了 2,580 萬噸塑料廢物，但其中只有不到 30% 的塑料廢棄物被回收利用<sup>(16)</sup>。歐洲是減塑環保政策的先行者，為了支持環保政策，歐盟在 2018 年 5 月正式宣佈將在 2030 年全面禁止一次性塑膠製品，歐洲政府並設定目標企圖以成本有效的方式對塑料進行回收再利用。聯合國環境署聯合艾倫·麥克阿瑟基金會於 2019 年 3 月與各國超過 350 家廠商聯合簽署『新塑膠經濟全球承諾』，規定在 2025 年 100% 的塑膠包裝材料需要可重複使用、可回收或可堆肥，使得塑膠循環經濟的概念在政策決策者的心中變得越來越重要<sup>(17)</sup>。因此，塑膠產業循環經濟被公認為是資源和廢棄物戰略的關鍵舉措，塑膠更是被公認為是實現循環發展的優先領域<sup>(18)</sup>。



## 二、塑料的回收與再生方法的演進

目前包括塑膠在內的聚合物的生產和處置是不可持續的，在過去的二十年中，解決聚合物可持續性問題的一項策略是使用可生物降解的聚合物，但這種類型的聚合物降解不會回收任何材料，不但在經濟上效率低，且最終進入垃圾填埋場造成過多的廢物和相關的環境問題。此外，絕大多數合成聚合物的設計目的是性能和耐用性，而非降解性和可回收性，在過去的幾十年中大量增加了聚合物廢棄物與環境的負荷<sup>(19)</sup>。塑膠是一種在一定溫度和壓力下可以塑製成形的合成高分子材料，具有很高的化學穩定性，埋在地下多年也不會腐爛，其耐酸、耐鹼、不腐蝕及難以分解的特性造就了塑膠廢棄物持續地在人類生存的環境中累積，形成嚴重的公害而有「白色汙染」之稱，這主要與塑膠材料的結構有關<sup>(20)</sup>。由於高分子是由許多的小分子(單體)以某種方式連接起來形成的聚合物，而塑膠是高分子化合物的一種。高分子化合物有一個共同特點，即分子中的碳原子與碳原子之間多是以碳碳化學鍵連接起來而形成碳鏈，這種特殊的結構和巨大的分子量使其具有高強度、高熔點、高耐腐蝕性等優異的物理、化學和力學性能，且其分子中的碳鏈十分牢固，要削弱或打斷該鏈變成小分子(即降解)是相當困難的。

面對成長迅速的塑膠廢棄物，存在三種主要的常規方法來處理它們，包括將它們掩埋在垃圾填埋場中，進行焚化和機械回收。然而，塑膠並非是可降解的綠色聚合物，以垃圾掩埋的方式更是無法回收的。而焚燒通常會產生不安全的廢氣，並且能量回收效率很低。全球的塑料回收技術大多仍以物理方式加工塑料廢物的機械回收為主(機械回收又被稱為物理回收)。機械回收涉及自其污染物分離出聚合物及經由機械方法將其再處理成顆粒。機械回收(物理回收)雖被認為是一種臨時解決方案，涉及在熔融加工以生產新的聚合物材料之前對消費後的聚合物產品進行研磨、粉碎、洗滌、乾燥和熔化，但常因廢料中殘留的催化劑、水分和其他污染物而導致在二次熔融加工過程中性能顯著的惡化；並且有色塑膠的機械回收也會帶來其他的挑戰，例如無法去除添加劑如色料、抗氧化劑等成分，且經過多次加工再製造容易造成塑料劣化，回收後的塑料通常也只能降階使用等<sup>(21)</sup>。為了最大程度地減少對環境的負面影響，理想解決方案是開發一種循環經濟的方法，以可被回收且再利用的方式開發可持續性的聚合物。這種再循環策略就是所謂的化學再循環方法(chemical recycling method)，其涉及一種解聚製程(depolymerization process)，在該解聚製程中，聚合物廢物在受控的條件下解聚回到其原料中，先進行純化，然後再進行聚合，以得到純質(virgin-quality)的聚合物材料；或者是一個再利用的製程(repurposing process)，其中該聚合物廢物可被轉化為新的增值聚合物材料的組成。圖 5 呈現的就是這種再循環策略的概念，透過解聚和再利用製程對聚合物廢料進行化學回收，以塑膠的聚合物為例，就是利用化學反應方式將塑膠高分子結構裂解成單體原料的化學再循環方法<sup>(22)</sup>。

塑料回收與再生利用的技術，從掩埋、焚燒、物理回收技術演進到了化學回收技術。最近在開發用於聚合物廢料的化學回收的再利用和解聚工藝方面的研究仍是一個新興的研究領域，面對成長迅速的塑膠使用量，全球研究人員相繼針對可循環回收再利用的議題提供技術上的解決方案，開始採用化學回收再生技術開發，使回收塑膠可轉化為更有價值的產品。

由於主導全球發泡材產量的聚合物塑料為聚氨酯(polyurethane, PU)，PU發泡材佔整個聚合物發泡材市場的一半<sup>(23)</sup>。有鑑於此，本文以PU塑料為例，分享其利用化學回收循環再利用的產業技術現況與發展。

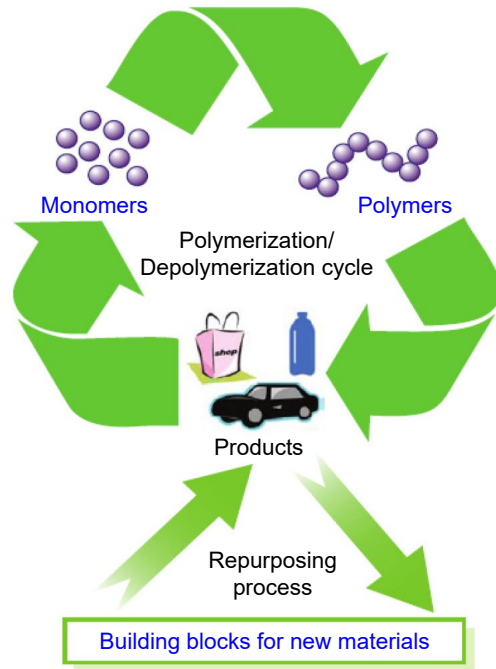


圖 5. 利用解聚與再利用製程進行聚合物廢料的化學回收。(Source : Green Chemistry, 2017)

### 三、PU 塑料化學回收技術

聚氨酯 (polyurethane, PU) 是透過多元醇的 OH (羥基) 基團與異氰酸酯的 NCO (異氰酸酯官能基) 基團之間的反應所形成的聚合物，其名稱係取自於所產生的氨基甲酸酯鍵結(urethane linkage)。如圖 6 所示，該反應為放熱反應，並導致氨基甲酸酯基的產生，其中  $r_{iso}$  係衍生自異氰酸酯單體 (isocyanate monomer)，而  $r_{polyol}$  係衍生自多元醇組分 (polyol component)<sup>(24)</sup>。

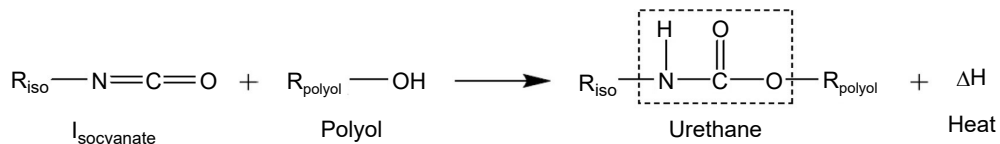


圖 6. 反應產生氨基甲酸酯基團<sup>(25)</sup>。

如今 PU 已被用作日常生活產品，且已成為不斷改變人類生活品質的重要聚合物之一，但其廢棄物的處理對環境構成挑戰。PU 的生物降解期長<sup>(26)</sup>、至少高達 10 年之久，不適合使用填埋方式處理。再者，又因物理回收法適合與熱塑性聚合物一起使用，大部分 PU 屬於熱固性，使化學回收法是用於 PU 回收的最佳工藝<sup>(27)</sup>。

#### 1. PU 化學回收傳統技術

PU 的化學回收是將 PU 的氨基甲酸酯鍵和脲鍵斷鍵，使其降解為原始多元醇、芳香多元醇及芳香胺等產物，並作為 PU 發泡原料循環利用，其應用範圍比 PU 的物理回收更廣。

目前所提出的化學解鏈製成包括水解法、醇解法、胺解法、磷酸酯法及酸解法。分述如下說明：

### 1. 水解法 (Hydrolysis)

水解法是使用鹼金屬氫氧化物作為催化劑，將氨基甲酸酯基團 (urethane group) 與水反應 (圖 7)，並在 250–340 °C 的水氣作用下產生水解反應，從而將 PU 水解為多元醇、芳香胺及二氧化碳。該反應導致多元醇 (polyol) 和不穩定的氨基甲酸 (carbamic acid) 的形成，其在反應溫度下會脫羧並導致在生成二氧化碳的同時形成二級胺。

由於 PU 的水解通常在高於 200 °C 的溫度和高於 16 bar (230 psi) 的壓力下進行，屬於高溫、高壓下嚴苛的反應條件，芳香胺不能直接用於生產異氰酸酯，且多元醇不易純化，故此法成本高而不易在實際應用中使用。

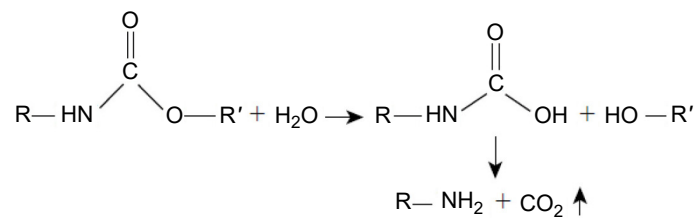


圖 7. PU 水解反應<sup>(28)</sup>。

### 2. 醇解法 (Glycolysis)

醇解法可以在大氣壓下進行，所需的反應溫度低、反應時間短，且降解效率高，從而為目前最被廣泛使用的 PU 化學回收製程。醇解產物是原始多元醇、含異氰酸酯的多元醇和殘留的醇解劑。在催化劑和高沸點多元醇的作用下，PU 可在約 180–220 °C 降解得到高品質的多元醇，副產物為氨基甲酸酯及芳香胺 (圖 8)。

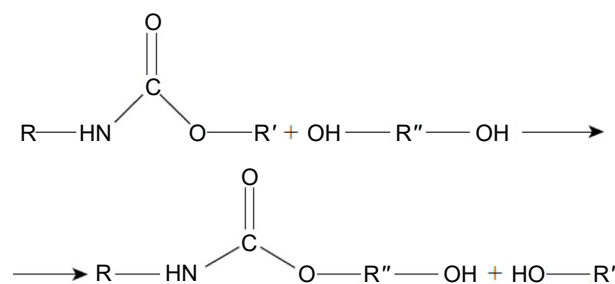


圖 8. PU 醇解反應<sup>(29)</sup>。

由於醇解反應是由酯交換反應組成，其中與氨基甲酸酯的羰基 (carbonyl) 的碳相連的酯基 (ester group) 被乙二醇的羥基 (hydroxyl group) 交換。然而，PU 結構不僅由氨基甲酸酯單元形成，而且還與其他官能基如脲基 (urea) 合成。這些脲基 (urea groups) 的出現是由於在 PU 合成之氣體形成反應中形成的胺，因胺在其步驟中可以與游離異氰酸酯 (isocyanate) 反應得到脲。如圖 9 所示，脲基也易受醇解過程的影響，從而產生低重量的氨基甲酸酯 (carbamate) 和芳香胺 (aromatic amine)。

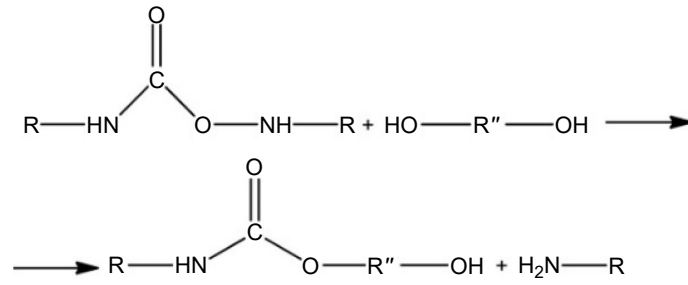


圖 9. 聚脲 (Polyurea) 醇解反應<sup>(30)</sup>。

依照醇解劑的種類可進一步將其分為單層 (single-phase) 醇解法與分相 (split-phase) 醇解法。美國的 Troy Polymers 公司發展兩步驟 PU 單層醇解製程，並於 2001 年申請一種利用醇解反應化學回收包含聚氨酯廢料的方法專利<sup>(31)</sup>。該聚氨酯廢料，例如可從汽車碎屑殘餘物 (automotive shredder residue, ASR) 中分離出。在該方法的第一步驟中，使含聚氨酯的廢料進行化學分解反應以產生化學分解多元醇產物。在該方法的第二步驟中，將化學分解多元醇產物在與環氧烷反應中用作引發劑以生產用於製備聚氨酯的烷氧基化多元醇。該回收方法係將一部分烷氧基化多元醇產物返回並在化學分解反應中用作反應物，其中環氧烷係選自環氧丙烷以及環氧丙烷與環氧乙烷的混合物。其中每 1 當量的引發劑使至少約 1 當量的環氧烷反應。Troy Polymers 公司開發了二種規格的多醇產品，分別為可用於高回彈性軟泡合成的 InfiGreen 320，以及可用於 PU 硬泡合成的 InfiGreen 420<sup>(32)</sup>。

圖 10 示出了根據該發明的化學回收方法。在大氣壓下操作，以約 14 : 1 輕質 ASR : 二丙二醇的比例操作。輕質 ASR 在反應器中進行醇解過程，以產生主要為多元醇的醇解產物。過濾醇解產物並除去固體廢物。然後，在供應有加壓惰性氣體和真空的反應器中，將醇解產物用作引發劑並與環氧丙烷和/或環氧乙烷反應以製備新型多元醇。再次過濾產物並除去固體廢物。最多返回 25% 的多元醇產物，並與輕質 ASR 和二丙二醇一起用作反應物。

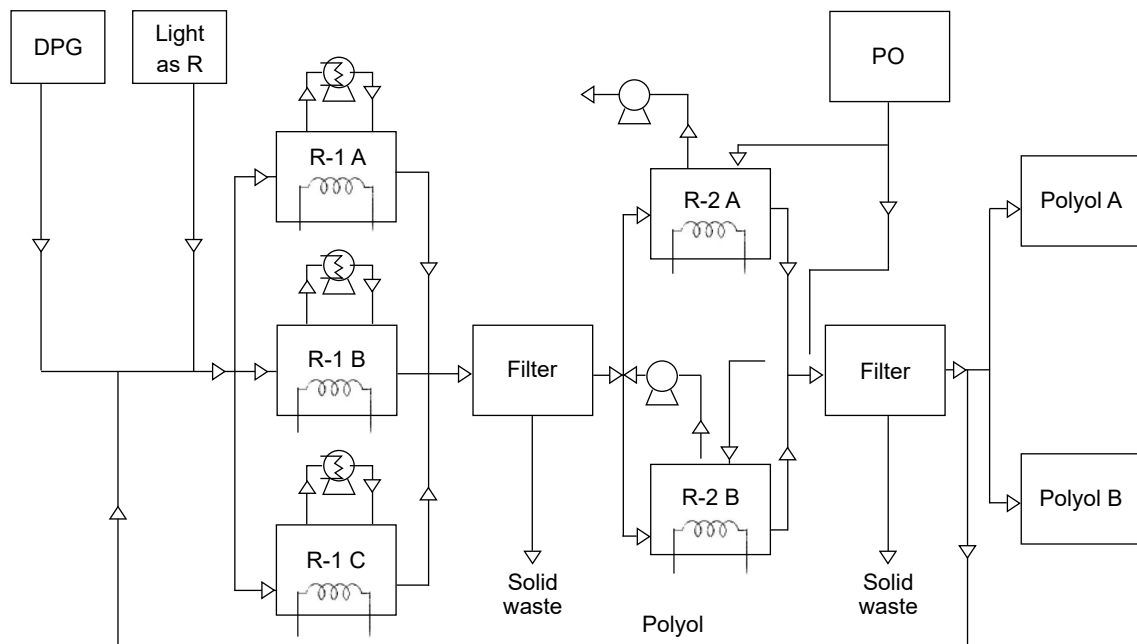


圖 10. Troy Polymers 公司化學回收含聚氨酯廢料的方法。(Source : US Patent US6750260B2)



### 3. 胺解 (Aminolysis)

氨基甲酸酯基團可以與胺反應形成脲素 (圖 11)。PU 在鹼金屬氫氧化物作為催化劑下，與一級胺或二級胺反應產生多元醇、胺基甲酸酯和芳香胺，而為了提升產品性能藉由加入環氧丙烷與胺反應，可產生胺基多元醇，最終分離多元醇與殘留的胺類即可回收多元醇。

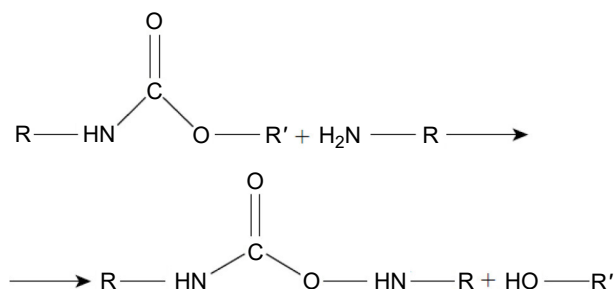


圖 11. PU 胺解反應<sup>(33)</sup>。

### 4. 磷酸酯法 (Phosphate ester)

PU 在無催化劑下，與磷酸酯發生烷基反應、自由基反應和酯交換反應，最終產物為含磷化合物及含氮寡聚物，可用作非反應性添加劑以提升阻燃性能。磷酸酯法可在相對溫和的條件下使用，但產品主要是用作包裝，因使用範圍非常有限，故實際使用量也較少。

### 5. 酸解法 (Acidolysis)

酸解法將 PU 廢料轉化為液體，其使用解鏈劑 (通常為二元羧酸) 與氨基甲酸酯基團反應並逐漸解聚成小分子 (即二氧化碳和水等反應副產物) (圖 12)。在催化劑和二羧酸的作用下，PU 可降解得到多元醇產物及異氰酸酯衍生羧酸副產物，藉由將末端為羧基之副產物轉化為異氰酸酯衍生多元醇，或是加鹼中和羧酸並過濾出產物中的無機鹽類，即可將產物應用於 PU 再製。

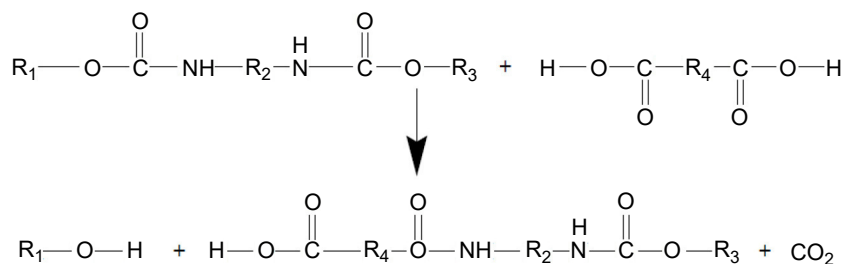


圖 12. PU 酸解反應<sup>(34)</sup>。

許多二元羧酸可用於 PU 廢料的酸解，包括草酸 (oxalic acid)、丙二酸 (malonic acid)、丁二酸 (succinic acid) 或己二酸 (adipic acid)，可單獨使用或使用至少兩種的混合物，以調節優化至回收多元醇所需的特性。溫度和反應時間是重要的參數，因為它們必須保持在特定範圍內，以使所獲得的多元醇具有適合用於生產聚氨酯發泡材的特性。低溫和短反應時間會產生具有較高酸值、較低羥值、較高分子量和較高粘度的最終產物；較高的溫度和較長的反應時間將會導致多元醇具有較低的酸值、較高的羥值、較低的分子量和較低的粘度，但會使多元醇的顏色變深<sup>(35)</sup>。

綜合前述 PU 化學法解鏈回收技術中，醇解法的反應條件較為溫和也可得到品質較佳的多元醇，有利於再循環利用至 PU 發泡製程，因此是目前化學回收的主流方法。水解法、胺解法和磷酸酯法則因不具經濟效益及應用範圍受限等原因而不具商業化規模。

## 2. PU 化學回收新技術

儘管 PU 有不少的回收方法，但因每種產品之配方皆不同，若未經分類就採用化學法進行解鏈，會得到組成複雜的產物，無法再回用至 PU 泡棉。因此目前歐美僅有中小型的回收再生廠進行 PU 發泡材的再生，以下針對國內外近期試量產的現況介紹。

### 1. RAMPF 的 PU 化學回收系統

德國 RAMPF 集團的營運模式為提供系統商或 PU 廠客製化的再生服務，而化學回收所得的多元醇則可再導回 PU 泡綿廠取代部分的原料進行發泡。圖 13 為德國 RAMPF 集團展示的一套小型的 PU 化學回收系統，包括了進入料控制、溫度均衡系統及反應系統。RAMPF 的回收製程是將 PUR 切成約 5 公分大小的小碎塊，再將其連續注入已含有長鏈多元醇、短鏈多元醇、羧酸、催化劑與脫胺劑的減壓反應器中，PUR 分子鏈在約 200 °C 下斷裂，持續反應約 7 小時後，多元醇與小分子氨基甲酸酯之混合物經雜質過濾後，即可得到回收多元醇產品 Recypol。Recypol 最高可取代約 60% 的聚醚多元醇原料製作半硬泡 PU，若用於製作軟硬泡 PU 則最高可取代 20% 聚醚多元醇原料<sup>(36)</sup>。



圖 13. RAMPF 的 PU 化學回收系統<sup>(37)</sup>。

### 2. 工研院開發 PU 泡綿分相醇解法回收技術

就回收的多元醇純度而言，分相醇解法比單相醇解能更有效地獲得高品質的回收產物。工研院開發 PU 泡綿分相醇解法回收技術，能製備高品質回收多元醇，並可順利回用至軟質或硬質發泡產品。PU 軟質泡綿一般原料為聚醚多元醇與甲苯二異氰酸酯 (TDI)<sup>(38)</sup>。藉由醇解劑的調控與產品的純化分離，可得到 OH 值相近於原始多元醇且純度 > 90% 的回收多元醇。近期更開發出無須進行繁複純化步驟之 PU 泡綿醇解回收技術，其醇解產物不僅可全部

作為多元醇回收料並應用於 PU 再製，且具零廢棄物、產物均一性及製程簡單的優點。利用此技術回收多元醇產物羰值介於 60–80 mg KOH/g，圖 14 為不同比例的回收多元醇回用進行 PU 軟泡再製的結果，最多可取代 50% 的聚醚多元醇原料製作 PU 軟泡。

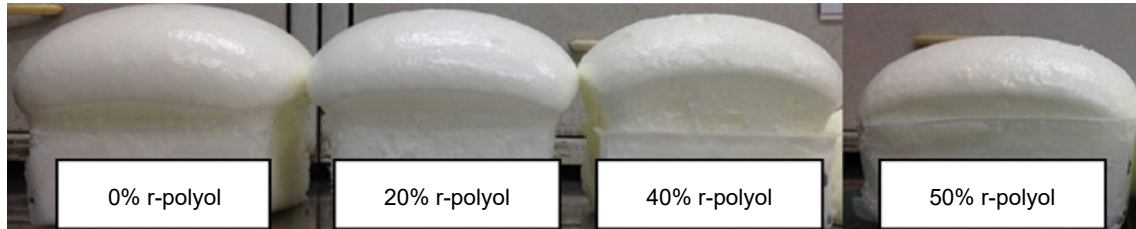


圖 14. 以 0–50% 回收多元醇進行 PU 軟泡再製<sup>(39)</sup>。

### 3. 伊利諾大學 Steven Zimmerman 教授團隊開發 PU 廢料回收新突破

PU 是透過異氰酸酯與多元醇反應形成的聚合物，因其難以分解而具有極高的穩定性，雖在商業上得到廣泛應用，但極高的穩定性也很難對 PU 進行回收。通常多元醇是問題的關鍵，因為它們提取自石油並且不易降解。為解決這困難，近來由 Steven Zimmerman 教授領導的伊利諾大學團隊在聚氨酯廢料回收方面取得了新的突破，透過化學回收方法採用了更易於降解和水溶性的化學單元縮醛，開發了一種分解聚氨酯廢料並將其轉化為其他有用產品的方法。

該新型回收技藝的特點在於聚氨酯中加入了羥基新型縮醛作為單體之一，可在沒有水的情況下溶解聚合物。方法是在室溫下使用三氯乙酸和二氯甲烷溶解聚氨酯廢料，三氯乙酸在二氯甲烷之有機溶劑中的溶液可在短短三小時內溶解聚氨酯，且經過降解後溶解形成的降解產物可以重新用作原料的產品。由於二氯甲烷會使材料膨脹，致使酸能夠到達聚氨酯分子鏈的主鏈，從而使縮醛基團化學鍵斷裂。如圖 15 顯示可降解的聚氨酯材料 (粉紅色帶) 溶脹，然後溶於與有機溶劑混合的酸液中 (兩張照片中的左小瓶)，但置於與水混合的酸液中 (兩張照片中的右小瓶) 則不會有此現象<sup>(40)</sup>。透過此化學方法改變多元醇的結構解決聚氨酯廢料問題，可將汽車和包裝中廣泛使用的彈性體轉化為黏合劑，且性能可與超強力膠相媲美。

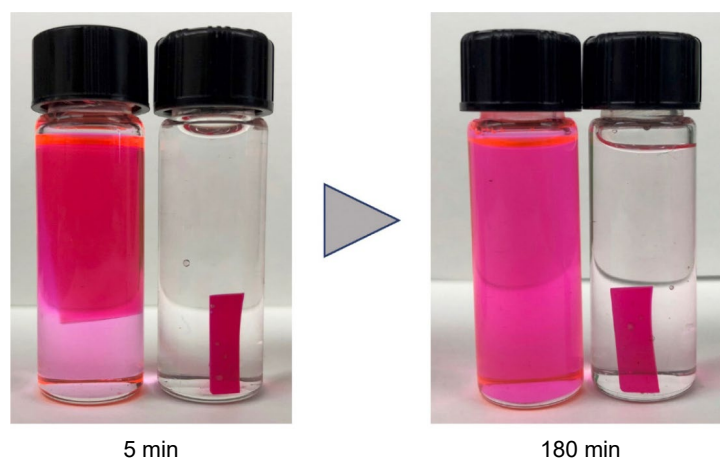


圖 15. 實驗團隊將可降解的聚氨酯材料溶脹並溶於與有機溶劑混合的酸液中。(資料來源：American Chemical Society)

然而，這種新的回收方式仍有不足之處，即用於進行反應的催化原料成本高、毒性大，團隊研究人員目前正嘗試尋找更好的方法來實現相同的降解過程，例如使用像醋這種便宜又溫和的溶劑進行降解來實現相同的過程。

## 四、結論

循環經濟的重點在創造價值，即「經濟」二字。PU 化學回收方法中往往因分離和純化過程成本過高而損害製程的經濟可行性<sup>(41)</sup>。PU 塑料在物理回收的經濟效益低，若要提高 PU 之回收率與經濟效益，勢必要在化學回收技術上克服現有缺點，諸如成本、溶劑的種類及濃度、觸媒配方及反應條件的控制，特別在製程成本上思考如何透過化學法確保塑料留在經濟中。為開發下一代 PU 化學回收循環再利用技藝，使其容易地降解並可再加工成新的材料，試圖將聚合物分解成最初的原材料，然後重新製作為相同的聚合物並投向市場，如此驅動循環回收創造再利用的循環經濟，不僅將循環經濟的價值創造最大化，使其在資源有限情況下減少資源的浪費，最終也能建立在物質的不斷循環利用上的經濟發展模式而回歸「經濟」二字。

## 參考文獻

1. Gong, Y., Putnam, E., You, W.M. & Zhao, *Journal of Cleaner Production*, **244**, 118941 (2020).
2. 陳筠淇, 王尚博, 科學發展, **543**, 6 (2018).
3. A. Bastein, E. Roelofs, E. Rietveld & A. Hoogendoorn, Opportunities for a Circular Economy in the Netherlands. TNO, Report Commissioned by the Netherlands Ministry of Infrastructure and Environment (2013), please refer to the web site: <https://www.tno.nl/media/8551/tno-circular-economy-for-ienm.pdf>
4. Kenneth E. Boulding, *The Economics of the Coming Spaceship Earth*, In: Jarrett, H., Ed., *Environmental Quality in a Growing Economy, Resources for the Future/Johns Hopkins University Press, Baltimore*, 3-14 (1966).
5. David W. Pearce and R. Kerry Turner, *Economics of Natural Resources and the Environment*, Johns Hopkins University Press, Baltimore (1990).
6. Ellen MacArthur Foundation, Towards the circular economy Vol, 1, *Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition*, Ellen MacArthur Foundation (2012), please refer to the web site: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/down-loads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Toward-the-Circular-Economy-vol.1.pdf>.
7. K. Govindan and M. Hasanagic, *International Journal of Production Research*, **56** (1-2), 278 (2018).
8. 陳婉玲, 塑膠產業循環經濟, please refer to the web site: [https://www.pidc.org.tw/news\\_column\\_show.php?id=98](https://www.pidc.org.tw/news_column_show.php?id=98)
9. 李宗銘, 工業材料雜誌, **361**, 35 (2017)。
10. 林其瑞, 鄭承熙, 工業材料雜誌, **396**, 51 (2019)。
11. *The new plastics economy: Rethinking the future of plastics*, Chapter 1 : The Case for Rethinking Plastics, Starting with Packaging, 10 (2016).
12. Yu Gong, Ellis Putnam, Weimu You, and Changping Zhao, *Journal of Cleaner Production*, **244**, 118941 (2020).
13. R. Geyer, J. R. Jambeck and K. L. Law, *Science Advances*, **3**, e1700782 (2017).
14. Please refer to the web site: <https://www.ettoday.net/news/20190801/1503052.htm#ixzz6OvQhLgVD>
15. Please refer to the web site: [https://www.pidc.org.tw/news\\_column\\_show.php?id=83](https://www.pidc.org.tw/news_column_show.php?id=83)
16. European Commission, A European Strategy for Plastic in a Circular Economy (2018), please refer to the web site: <http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/pdf/plastics-strategy.pdf>.
17. G. Brennan, M. Tennant and F. Blomsma, *Business and production solutions: closing the loop in H. Kopnina*, E. Shoreman Ouimet (Eds.), *Sustainability: Key Issues*. Earth Scan, Routledge, 219-239 (2015).
18. *Journal of Cleaner Production*, C.P., **244**, supra note 12, at 118941.
19. J. R. Jambeck, R. Geyer, C. Wilcox, T. R. Siegler, M. Perryman, A. Andrady, R. Narayan and K. L. Law, *Science*, **347**, 768 (2015).

20. 蘇明德, 科學發展, **448** · 64 (2010).
21. 林其瑞, 鄭承熙, 同註 10, 51 (2019).
22. Miao Hong and Eugene Y.-X. Chen, *Green Chemistry*, **19** (16), 3692 (2017).
23. M. Szycher, *Szycher's Handbook of Polyurethanes*, 2nd ed.; CRC Press: New York, NY, USA (2006).
24. K. Ashida, *Polyurethane and Related Foams Chemistry and Technology*; Taylor & Francis Group: Boca Raton, FL, USA (2007).
25. Ionescu, M. *Chemistry and Technology of Polyols for Polyurethanes*; Rapra Technology Limited: Shawbury, UK, ISBN 1859574912 (2005).
26. Bastian C., *A European strategy for recycling*, UTECH 94 Conference, Hague, 50 (1994).
27. Simon D, de Lucas A., Rodriguez J. F. and Borreguero A. M., *Journal of Applied Polymer Science*, **134** (32), 45087 (2017).
28. Simon D, de Lucas A., Rodriguez J. F. & Borreguero A. M., supra note 27, at 45087.
29. Simon D, de Lucas A., Rodriguez J. F. & Borreguero A. M., supra note 27, at 45087.
30. Simon D, de Lucas A., Rodriguez J. F. & Borreguero A. M., supra note 27, at 45087.
31. Vahid Sendjarevic, Troy Polymers Inc., *Process for chemical recycling of polyurethane-containing scrap*, US Patent US6750260B2 (2004).
32. Simon, D., Borreguero A.M., de Lucas A. & Rodriguez J.F., *Waste Management*, **76**, 147 (2018).
33. Simon D, de Lucas A., Rodriguez J. F. & Borreguero A. M., supra note 27, at 45087.
34. Simon D, de Lucas A., Rodriguez J. F. & Borreguero A. M., supra note 27, at 45087.
35. Nuno V. Gama, Artur Ferreira and Ana Barros-Timmons, *Materials*, **11** (10), 1841 (2018).
36. 林其瑞, 鄭承熙, 工業材料雜誌, **397**, 150 (2020)。
37. Please refer to the web site: <https://www.rampf-group.com/en/>
38. 林其瑞, 胡志明, 黃淑娟, 工業材料雜誌, **381**, 142 (2018).
39. 林其瑞, 鄭承熙, 同註 37, 頁 152.
40. Please refer to the web site: <https://www.acs.org/content/acs/en/pressroom/newsreleases/2019/august/making-polyurethane-degradable-gives-its-components-a-second-life.html>
41. Nuno V. Gama, Artur Ferreira and Ana Barros-Timmons, supra note 35, at 1841.

## 作者簡介

芮嘉瑋先生為國立清華大學奈米工程與微系統研究所博士，現任職於工業技術研究院技術移轉與法律中心執行長室。

Chia-Wei Jui received his Ph.D. in Institute of NanoEngineering and MicroSystems from National Tsing Hua University, now is working at General Director Office of Technology Transfer and Law Center of Industrial Technology Research Institute.