

# 循環材料科技研發 - 以漁業廢棄物增值運用為例

撰文/賴森茂·江佳純

聯合國永續發展目標 (SDGs) 兼顧「經濟面」成長、「社會面」進步與「環境面」保護。SDGs 的 17 項永續發展目標當中有 10 項的發展，高度仰賴資源使用效率的提升。2017 年環境部長會議也強調為了促進長期經濟競爭力和繁榮、並提高就業動能，帶來環境和社會效益，改變資源使用方式，包含資源使用效率、3Rs (Reduce, Reuse and Recycle)、循環經濟和永續物料的管理十分重要。根據 2017 年 1 月發布的《Better Business, Better World》報告，在 2030 年前 SDGs 在全球將產生超過 12 兆美元市場機會，「循環經濟」為未來全球經濟模式的新主流。我國政府已宣示「要讓台灣走向循環經濟的時代，把廢棄物轉換為再生資源」，循環經濟列為「五加二產業創新」政策之一。英國艾倫·麥克阿瑟基金會 (EllenMacArthur Foundation)，將循環經濟定義為具可恢復性及可再生性，透過設計，將材料、組件及產品分別納入生物循環與工業循環中，目的為達到最高效能及價值。傳統線性的「取用、製造、丟棄」經濟模式仰賴大量能輕易取得的資源（與能源），這樣的模式有違現今生態環境面臨的狀態，減量耗費顯然不夠，系統上的改變是必需的。

循環經濟模式的興起，「廢棄物」的定義為之改變。該論述強調：在循環經濟中，我們學習大自然的法則「只有放錯地方的資源，沒有真正的廢棄物」。因此，除了減少垃圾量之外，如何回收再利用成為另一個重要的課題。全球性環境與發展智庫 -- 世

界資源研究所 (World Resources Institute) 就曾提出目前人類對於廢棄物再利用處理的技術與能力還不夠是循環經濟發展的障礙之一。近年來除了生活週遭的廢棄物外，全球也將焦點放在海洋廢棄物上。海洋除了塑膠汙染，根據聯合國糧農組織 (FAO) 統計，每年約有 64 萬噸遺失或棄置的幽靈漁撈具沉入海底，成為全球 1/10 的海廢來源，在聞名的太平洋垃圾帶 (great pacific garbage patch) 有超過一半的海洋垃圾為廢棄漁網。幽靈漁撈 (Ghost Fishing) 是指遺失或棄置漁具持續捕捉並殺死魚類、甲殼類、海洋哺乳動物、甚至海龜及海鳥，估計影響時間可能長達數年。

廢棄物的循環運用關係材料配方的重新設計以及後端的增值。形狀記憶高分子材料具有環保及智慧功能等優勢，本文將針對該基本材料背景進行介紹，以及國內外針對廢棄漁網再利用的應用，共同探討漁業廢棄物增值運用發展的可能。

## 高分子（奈米）複合材料

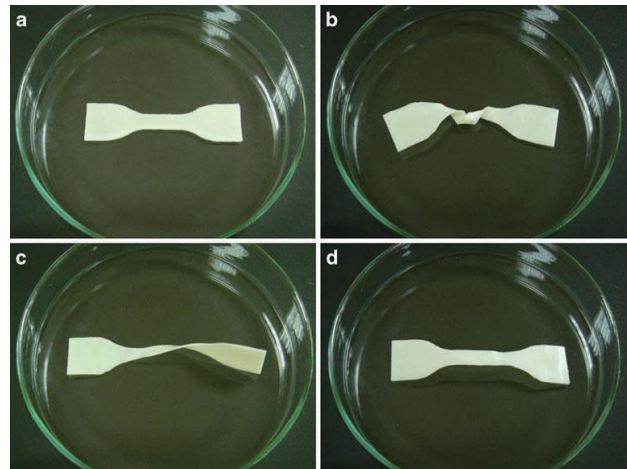
高分子複合材料或合膠用途相當廣泛，主要是兼取兩種不同材料之優點作混合來達到最後產品之某一特定需求，而此種需求又常非單一高分子材料所能提供的。奈米級之高分子複材或有機-無機混成材料中有幾個重要之製備方式，包括黏土 (Clay)、石墨烯 (Graphene) 剝離 (Exfoliated) 分散於高分子材料中，以及利用溶膠法 (Sol-gel method) 製備有機高分子與  $\text{SiO}_2$  等無機物之混合物等。在 Clay 系

統中，最早商品化材料為日本的豐田中央研究所 (Toyota Central Research) 提出之 Nylon 6 / Clay 奈米複材 (也是廢棄漁網的主要材料之一)，低填充量之 clay 能使耐熱變形溫度提高約 2 倍，其加工性也不受填充劑之影響而變差。另外，奈米碳管由於具有高長徑比，因此，具有較低之導熱、導電門檻填充量。Bhattacharya 及 Mittal 等最近則針對這些奈米材料製備方法進行系列回顧。雖然，文獻上已有不少研究進行高分子 / 碳管奈米複材研究，但在奈米複材混成材料製備中，相容性 (Compatibility) 仍是最重要的考量。如何利用這些無機材料特性，來補強並改善新型高分子材料的導熱性質，藉以調控形狀記憶智慧材料的行為，有待進一步的研究。

## 形狀記憶高分子之發展 (Shape memory polymer) (Ratna *et al.*)

大自然中的動植物具有因環境變化可產生行為的變化，例如，松果的鱗片會因為空氣中的濕度變化開闔、高強度蜘蛛絲依受潮程度不同而收縮，可視為人造肌肉的仿生應用，其他如植物因應光變化產生的形變 (如含羞草、太陽花)、或變色龍、蚌、壁虎等均是常見生物仿生案例。形狀記憶高分子屬於智慧型高分子材料 (Smart polymer) 種類中的一種，也是仿生自我修復高分子 (Self-healing polymer) 的一類 (一般自我修復偏向裂痕的修復，嚴格來講有別於一般形狀記憶材料，主要是表面受力變形及回復情形)，通常這種形狀記憶高分子材料具有嵌段共聚物 (Block copolymer) 的型態，並具有一定的切換溫度 (Switching temperature,  $T_s$ )，在溫度高於切換溫度 (Switching temperature) 時，施一定作用力可使材料產生變形，在迅速冷卻到室溫時，應力釋放後，仍可維持此變形，當再次將溫度提高於切換溫度時，上述變形便可回復到原來未變形或較低變形的狀態，形狀記憶高分子因為具受熱回復現象，因此可藉由形變受熱時來，作為偵測溫度變化，其他的環境變化如光，電性，磁性方面，也有相關研究。圖一為本實驗室首次製備 PLA/TPU 形狀記憶

合膠的形狀固定及回復示意圖：



說明：(a) original sample, (b) 0 sec, (c) 1 sec, (d) 2 sec.

圖一 Shape memory process at 90 °C.

Mu *et al.*, H. Meng *et al.* 及 Lu *et al.* 對於形狀記憶高分子 (奈米) 材料的應用進行回顧。之後許多研究便開始朝向各種不同記憶材料發展，特別是以改變溫度做為誘發因素 (Thermally induced process)，在這些材料分類中，根據分子運動切換段 (Switching segment) 種類，可包含兩大類，一為無定形切換段 (Amorphous switching segment)，此時  $T_s = T_g$ ，另一類為結晶切換段 (Crystalline switching segment)，此時  $T_s = T_m$ 。因形狀記憶高分子材料屬於智慧型高分子材料，因此近年來的應用逐漸增加，例如智慧纖維、醫療零組件、感應器等。由於形狀記憶高分子材料因受力變形的狀態，可以再後續經由溫度改變回復使用，而不用因為變形而丟棄，因此，這種再使用概念，也符合綠色環保材料的使用概念。

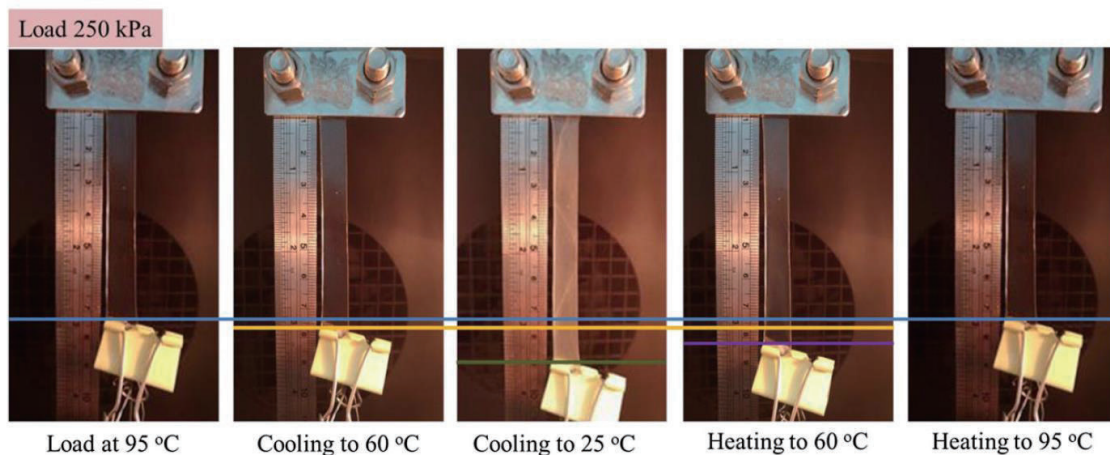
## 形狀記憶合膠奈米複材之發展 (Q. Meng *et al.*)

透過合膠及複合材料的製備方式，來發展新型形狀記憶高分子合膠及複合材料，已成為近年來此領域的重點。Q. Meng *et al.* 及 Mu *et al.* 最近對於此

類合膠及複合材料進行系列回顧。以合膠方式製備形狀記憶高分子材料時，一般包含低  $T_g$  的無定形高分子或低熔點的結晶性高分子來作為切換相 (Switch phase)，而另一相為具有回復能力的固定相 (Fixed phase)，如結晶型，彈性體，熱固性)。Li *et al.* 最早進行 Nylon/PE 合膠系統的形狀記憶效果探討，經由馬來酸酐接枝 PE 來增進相容性，nylon 6 約 5-20% 作為固定相，PE 作為切換相。Mather group 針對多種無定形 (Switch phase)/ 結晶型 (Fixed phase) 合膠所具有的形狀記憶效應，有系列的專利發表及文獻探討。除了上述不同組成的混煉方式外，以綠色高分子材料增韌角度出發，而意外發現，某些增韌合膠也另具有形狀記憶合金效果，Choi *et al.* 以此為出發點進行尼龍 12 與馬來酸酐接枝之 metallocene POE 之形狀記憶合膠製備。前述文獻大多著重於單向形狀記憶材料 (1W-SME) 開發，有關雙向形狀記憶材料 (2W-SME) 研究最近受到相當重視，之後 Mather's group 及 Lendlein's group 則將其擴展到新型結晶性熱固性高分子，使其更具智慧材料概念，Pandini 則製備交聯 PCL 的雙向形狀記憶高分子。由於環保意識增加，本實驗室則進一步使用熔融合膠系統，首次探討 EVA/PCL 雙向多重形狀記憶合膠系統結晶及交聯程度效應，如圖二所示。Fan *et al.*

則利用 EVA 纖維製備具有雙向形狀記憶的仿生人造肌肉。另外，透過特殊的預處理流程或交聯程序方式，其他無應力的雙向高分子系統則於近年來受到高度重視 (Bothe *et al.*, Qian *et al.*, L. F. Fan *et al.*)，而利用熔融合膠方式製備的無應力系統相當少，本實驗室則首次製備了高回復性雙向 EVA/silicone 形狀記憶合膠系統 (Lai *et al.*)。

另外，3D 列印系統(或稱為 Additive manufacturing, rapid prototyping)，雖然發展於 80 年代，但近年來由於新的材料及設備技術的進展，進一步受到高度重視。利用此 3D 系統主要藉由不同製程設備(例如：Stereolithography (SL), fused deposition modeling (FDM), selective laser sintering (SLS) 等) (ASTM) 可製備複雜形狀的產品，其中，由於 FDM( 熔融沉積成型) 有機會可利用商業化材料，例如 ABS、TPU、PLA 等原料進行印刷，因此近年來文獻上也探討包含這些相關環保材料之 3D 列印系統研究 (Marek *et al.*, Liu *et al.*, Goyanes *et al.*, Zhang *et al.*)。特別是，2013 年 MIT Tibbits 最早在 TED Talk 中提到 4D 概念，利用 3D 列印製成的產品，加上 +1D 形狀隨時間改變，製備具有 4D 功能的產品設計，藉此增加 3D 列印的應用，同時也擴展了形狀記憶應用範圍，Zarek *et al.* 為首次探討 3D 印刷形狀記憶系統



圖二 EVA/PCL 雙向多重形狀記憶合膠系統結晶及交聯程度效應

於軟質電子設備的應用。Leist *et al.* 則使用 FDM 印刷 PLA 在 nylon fabric 上來製備 4D 智慧形狀記憶紡織品。在奈米複材發展方面，Leng *et al.* 對於形狀記憶高分子奈米複合材料進行詳細回顧。Hou *et al.* 則利用溶劑蒸氣驅動雙向形狀記憶。Wei *et al.* 搭配 3D 系統製備氧化鐵磁性顆粒雙向 PLA 狀記憶奈米複材，形成前述的 4D 系統。結合仿生智慧、環保、3D 的趨勢，有機會將環保形狀記憶材料的應用擴大。

目前國際間針對廢棄漁網循環使用，從民生用品、再製時尚、運動產品皆有案例，主要的合作模式為漁村、非營利組織專案項目、循環材料製造商、品牌商之間的結合。

## 義大利尼龍製造商 Aquafil

義大利尼龍製造商 Aquafil 透過 ECONYL® Regeneration System 技術將廢棄漁網處理再製為再生尼龍線 Econyl，包含戶外品牌 Patagonia 與 Ternua、運動品牌 Adidas 與 Speedo、方塊地毯商 Interface、精品商 Stella McCartney 等皆有產品採用該循環材料進行產品設計。廢棄漁網的收集源自多方組織的合作，包含 Aquafil 與荷蘭襪商 Star Sock 結合海洋保育團體幽靈漁撈基金會 (Ghost Fishing Foundation) 所啟動的「Healthy Seas」項目收集北海、亞德里亞海以及地中海區域的廢棄漁網、Interface 結合倫敦動物園學會 (Zoological Society of London) 啟動的「NET-WORKS™」項目收集菲律賓與非洲喀麥隆漁村的廢棄漁網、Ternua 結合 OPEGUI, Guipuzcoa Inshore Fish Producers Organization 收集西班牙巴斯克地區漁村廢棄漁網等。

## B型企業 Bureo

運用從南美洲 50 個漁村所收集的廢棄漁網，從

智利發跡的 Bureo 結合品牌再製成滑板、衝浪板、太陽眼鏡、腳踏車用水壺、椅子，甚至是益智遊戲疊疊樂，並將總銷售額的 1% 捐助於國際環境守護組織「1% For The Planet Network」。

## 英國新創公司 Fishy Filaments

康沃爾郡 (Cornwall) 是英國著名且歷史悠久的漁業郡，Fishy Filaments 運用當地的廢棄漁網及相關零件，重製為工程級 3D 列印之回收尼龍材料，已有公司運用該線材製作科技漁網，避免「混獲 (bycatch)」的發生。

在台灣，塑膠中心運用廢棄漁網所產出再生尼龍粒製作海廢再生眼鏡，台灣化學纖維、福懋興業等公司也有針對廢棄漁網再製紗線提供解決方案。

2018 年台灣海洋委員會海洋保育署公佈去年上半年各縣市海洋垃圾清除成果，「非資源垃圾」比例達九成，「當中則以廢棄漁具及保麗龍的比例為多，海洋垃圾大多屬無法回收之物質，除須付出清運成本，還須負擔焚化處理費用等，所需之高社會成本凸顯出海洋垃圾問題之急迫性。」環保署於 2018 年公佈「臺灣海洋廢棄物治理行動方案 (第一版)」，當中列為重要的「未來行動」中，希望設立「漁具及漁網鼓勵回收機制」，除了在漁港設置漁網具暫存區、協調回收商、清理機構或清潔隊定時或定點清運並宣導漁民將廢棄物帶回陸地外，「拓展廢漁網具再利用途徑」，也是重要目標。廢棄漁網(刺網、拖網、流袋網、扒網等)以 Nylon 為主，除了目前世界上已知的處理方式與應用外，或許用另一個角度，從大自然中找尋靈感，有可能為漁業廢棄物循環材料的開發找出新契機。

AgBIO

賴森茂 國立宜蘭大學 化學工程與材料工程學系 特聘教授  
江佳純 台灣仿生科技發展協會 秘書長

### 參考文獻

1. 康廷嶽 (2017), 台灣應持續關注聯合國永續發展目標。台灣經濟研究院網站 Retrieved 2019/02/01 From [www.tier.org.tw/comment/pec5010.aspx?GUID=f63469f1-965d-49df-b7c4-50736dc6bee3](http://www.tier.org.tw/comment/pec5010.aspx?GUID=f63469f1-965d-49df-b7c4-50736dc6bee3)
2. 邁向台灣2030永續發展, 財團法人資源循環台灣基金會。

## 參考文獻

3. Ellen MacArthur Foundation (2015), *Delivering the circular economy a toolkit for policymakers*, Retrieved 2019/02/01 From [www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/EllenMacArthurFoundation\\_PolicymakerToolkit.pdf](http://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/EllenMacArthurFoundation_PolicymakerToolkit.pdf)
4. Mathy Stanislaus (2018), *Barriers to a Circular Economy: 5 Reasons the World Wastes So Much Stuff (and Why It's Not Just the Consumer's Fault)*, World Resources Institute, Retrieved 2019/02/01 From [www.wri.org/blog/2018/05/barriers-circular-economy-5-reasons-world-wastes-so-much-stuff-and-why-its-not-just](http://www.wri.org/blog/2018/05/barriers-circular-economy-5-reasons-world-wastes-so-much-stuff-and-why-its-not-just)
5. FAO, *Our oceans are haunted - How "ghost fishing" is devastating our marine environments*, Retrieved 2019/02/01 From [www.fao.org/fao-stories/article/en/c/1099596/](http://www.fao.org/fao-stories/article/en/c/1099596/)
6. 李宣緯、鄭如忠 (2012), 神奇的高分子：有記憶的高分子，科技部科技大關園，Retrieved 2019/02/01 From [scitechvista.nat.gov.tw/c/zv7J.htm](http://scitechvista.nat.gov.tw/c/zv7J.htm)
7. M. Bhattacharya (2016) *Materials*, 9, 262
8. G. Mittal, V. Dhand, K. Y. Rhee, S.-J. Park, W. R. Lee (2015), *J Ind Eng Chem*, 21, 11
9. D. Ratna, J. Karger-Kocsis (2008) *J Mater Sci*, 43, 254
10. S.-M. Lai, Y.-C. Lan, (2013) *J Polym Research*, 20, 140
11. T. Mu, L. Liu, X. Lan, Y. Liu, J. Leng (2018) *Compos Sci Technol*, 160, 169
12. H. Meng, G. Li (2013) *Polymer*, 54, 2199
13. H. Lu, M. Lei, Y. Yao, K. Yu, Y.Q. Fu (2014) *Nanosci Nanotechnol Letts*, 6, 772
14. Q. Meng, J. Hu (2009) *Composites: Part A*, 40, 1661
15. F. Li, Y. Chen, W. Zhu, X. Zhang, M. Xu (1998) *Polymer*, 39, 6929
16. P. T. Mather, C. Liu, C. J. Campo (2007) *US Pat* 7, 371, 799.
17. O. B. Arnoult, P. T. Mather (2007) *ANTEC 2007*, 2, 839
18. M. C. Choi, J.-Y. Jung, Y.-W. Chang (2014) *Polym Bullet*, 71, 625
19. D. Thomsen, P. Keller, J. Naciri, R. Pink, H. Jeon, D. Shenoy, B. Ratna (2001) *Macromolecules*, 34, 5868
20. A. R. Tajbakhsh, E. M. Terentjev (2001) *Eur Phys J E*, 6, 181
21. T. Chung, A. Rorno-Urbe (2008) P. T. Mather, *Macromolecules*, 41, 184
22. J. Zotzmann, M. Behl, D. Hofmann, A. Lendlein (2010) *Adv Mater*, 22, 3424
23. S. Pandini, F. Baldi, K. Paderni, M. Messori, M. Toselli, F. Pilati, A. Gianoncelli, M. Brisotto, E. Bontempi, T. Riccò (2013) *Polymer*, 54, 4253
24. J. L. Han, S.-M. Lai, Y. T. Chiu (2018) *Polym Adv Technol*, 29, 2010
25. S. M. Lai, P. Y. You (2018) *Macromol Res*, 26, 984
26. J. Fan, G. Li (2017) *RSC Adv*, 7, 1127
27. ASTM: F2792-12a (2013) *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*
28. M. Zarek, M. Layani, I. Cooperstein, E. Sachyani, D. Cohn, S. Magdassi (2015) *Adv Mater*, 28, 4449
29. F. Liu, C. Vyas, G. Poologasundarampillai, I. Pape, S. Hinduja, W. Mirihanage, P. J. Bartolo (2018) *Macromol Mater Eng*, 303, 1800173
30. A. Goyanes, U. Det-Amornrat, J. Wang, A. W. Basit, S. Gaisford (2016) *J Control Release*, 234, 41
31. W. Zhang, F. Zhang, X. Lanc, J. Leng, A. S. Wud, T. M. Brysond, C. Cottone, B. Gua, B. Suna, T.-W. Choub (2018) *Compos Sci Technol*, 160, 224
32. S. Tibbitts, The emergence of "4D printing" (2013) TED Talk
33. S. K. Leist, D. Gao, R. Chiou, J. Zhou (2017) *Virtual Phys Prototyp*, 12, 290
34. J. Leng, X. Lan, Y. Liu, S. Dua (2011) *Prog Mater Sci*, 56, 1077
35. G. Hou, F. Wang, Z. Qu, Z. Cheng, Y. Zhang, S. Cai, T. Xie, X. Feng (2018) *Macromol Rapid Commun*, 39, 1700716
36. H. Wei, Q. Zhang, Y. Yao, L. Liu, Y. Liu, J. Leng (2017) *ACS Appl Mater Interfaces*, 9, 876
37. Aquafil, Retrieved 2019/07/09 From <https://healthyseas.org/about-us/>
38. Econyl, Retrieved 2019/07/09 From <https://www.econyl.com/about-us/>
39. Healthyseas, Retrieved 2019/07/09 From <https://healthyseas.org/about-us/>
40. O. Burke (2019) *11 ocean-friendly companies like Patagonia and Adidas that are removing plastic from our seas and transforming it into cool new products*. Business Insider, Retrieved 2019/06/0 From <https://www.businessinsider.com/companies-that-use-recycled-ocean-plastic-in-products#captain-blankenship-7>
41. Bureo, Retrieved 2019/07/09 From <https://bureo.co/>

## 參考文獻

42. Fishy Filaments, Retrieved 2019/07/09 From <https://fishyfilaments.com/>
43. 彭暄貽 (2019) 台塑、台化、福懋啟動尼龍回收及食安可分解投資計畫。工商時報, Retrieved 2019/07/09 From <https://www.chinatimes.com/realtimenews/20190709002575-260410?chdtv>
44. 財團法人塑膠工業技術發展中心 (2019) 海廢再生專案計畫。Retrieved 2019/02/01 From <https://pidcsdl.tilda.ws/mdp>
45. 海洋保育署 (2018) 海洋委員會海洋保育署公布107年上半年各縣市海洋垃圾清除成果- 九成海洋垃圾無法回收。Retrieved 2019/02/01 From <https://www.oac.gov.tw/GipOpen/wSite/ct?xItem=126831&ctNode=10450&mp=oac>
46. 環境保護署 (2018) 臺灣海洋廢棄物治理行動方案(第一版)。Retrieved 2019/02/01 From <http://m.greenpeace.org/taiwan/PageFiles/817496/document.pdf>

