

從MRS看循環經濟分析法及高端材料發展

葉正緯/工研院材化所研究員

一、前言

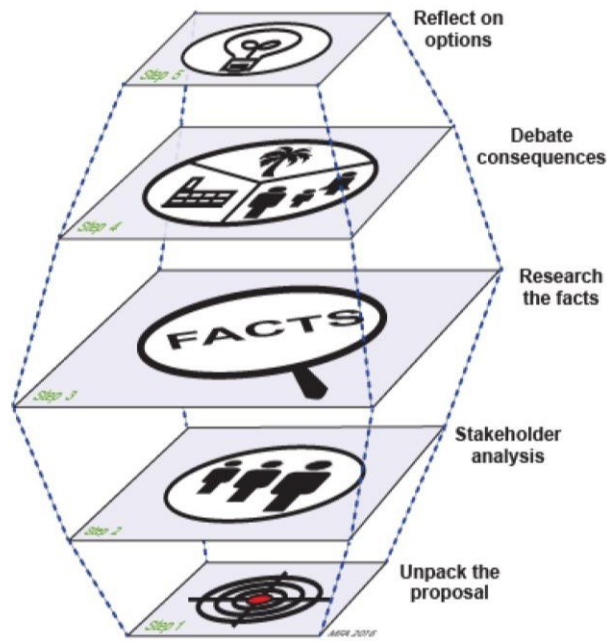
美國材料學會(Material Research Society, MRS)每年會舉辦兩次研討會，分別於春季及秋季舉辦。如此半年一會的頻率，自然是引領材料發展趨勢風向的會議，該會議現今於永續材料、電磁材料、奈米材料、軟性機器人、3D列印材料、生醫材料乃至於核能材料領域皆有不少新穎的發表。與會人員除了美國當地，亦包含不少日、韓產學界之學者專家前往發表研究成果及獲取資訊。

2017年秋季會議值得注意的是，研討會特別設立永續材料的主題論壇來討論其方法論及案例，可推知是以往的線性經濟(Linear Economy)無法永續地兼顧經濟及環境問題，因此循環經濟(Circular Economy)及永續材料(Sustainable Materials)等概念才能愈來愈受到重視。本文彙整循環經濟評估方法、案例以及高端材料應用等相關資料，供讀者參考。

二、循環經濟分析法及案例

循環經濟評估時涉及產品的生命週期評估(Life Cycle Assessment, LCA)，往往在評估以及形成決策時需要大量的數據需求來估算，此一需求隨即形成了一間新創公司Granta。該公司為劍橋大學的分拆(Spin-off)公司，為循環經濟建立評估方法、輔導個案分析以及提供軟體及數據服務，以供個案分析時使用，該公司的Marc Fry(Director, Education Division)於循環經濟論壇提供了個案分析的SOP以及案例說明，其中的方法學說明如下。

該評估方法為五步法進行分析，其步驟由下而上分別是(1)建立標的、(2)利害關係分析、(3)確認影響因子、(4)形成判斷以及(5)反饋構思。在此以電動車為例做說明(圖一)。



圖一、循環經濟評估方法流程

1. 建立標的

建立標的之第一步須先設立評估目標(objective)、規模尺度(size scale)、時間尺度(time scale)、功能單位(functional unit)。以電動車而言，其目標為不排碳的公路運輸工具，規模大小則設定為取代現行全球自用車產量的10%，相當於每年生產800萬輛電動車，目標達成的時間點設定為2020年，功能單位則與預估的規模相同，以取代10%全球自用車換算出的800萬輛電動車。

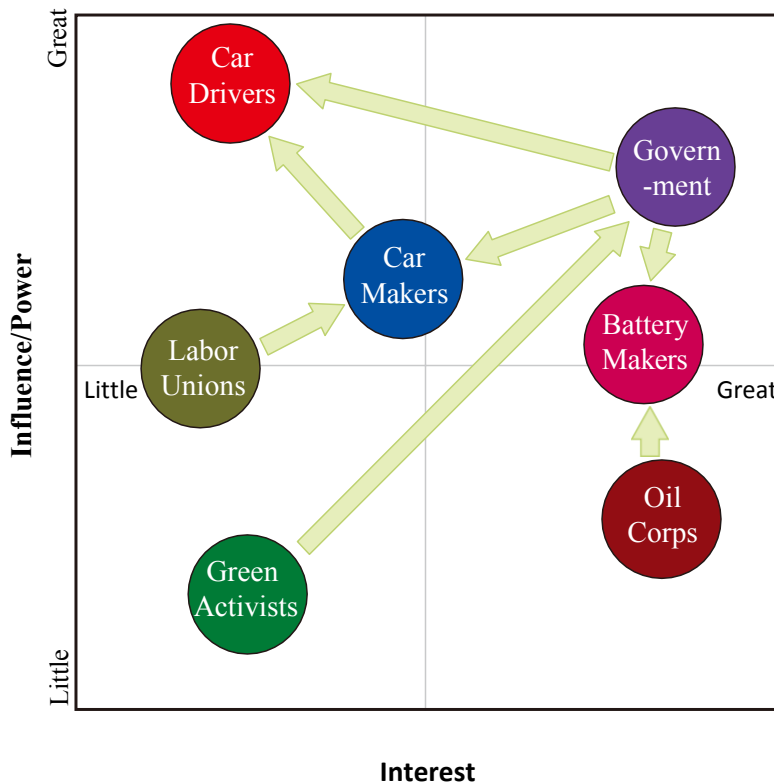
完成標的建立之後，隨即產生的關鍵問題是，現行大部分國家是以火力發電的電網對電動車進行充電，如此是否真的能減少碳排放？另外，發電容量對於每年10%成長的電動車需求而言是否充足？再者，目前電動車使用鋰電池來驅動永久磁鐵的電動馬達，該電動馬達是以釹(neodymium)硼合金作為磁鐵，全球的鋰礦及釹礦是否足以應付每年8百萬輛電動車的生產需求？這些問題將整合評估方法的第二步分析結果於第三步一併確認。

2. 利害關係分析

該方法接著於第二步中進行利害關係分析，依據政府公報及相關的揭露訊息，對於表一的利害關係人填入各角色的考量點，並繪出以利害關係人的利益-影響力分析圖如圖二所示。

表一、電動車利害關係分析表

利害關係人	考量面向
中央政府	達到減碳目標以及減少對於石化能源的依賴
地方政府	設定充電站點以及批准回收設施，尤其是電池回收機構
車輛製造商及其供應商	政府政策的支持、基礎材料的穩定供應以及公眾對於電動車的接受度
電池製造商	確保電池原料供應鏈的穩定度，其包含鋰礦以及稀土元素
資源豐沛國家	維持及控制材料供應鏈的穩定及保護當地的電動車以及電池製造商
石油公司	維持運輸系統中使用燃料的比例
勞工	電動車部門創造的就業機會、薪資成長以及穩定就業
駕駛	最大行車距離、電池壽命、零件成本以及電動車的折舊
環保人士	減少來自燃油車對於環境的衝擊



圖二、利害關係人之利益-影響力分析圖

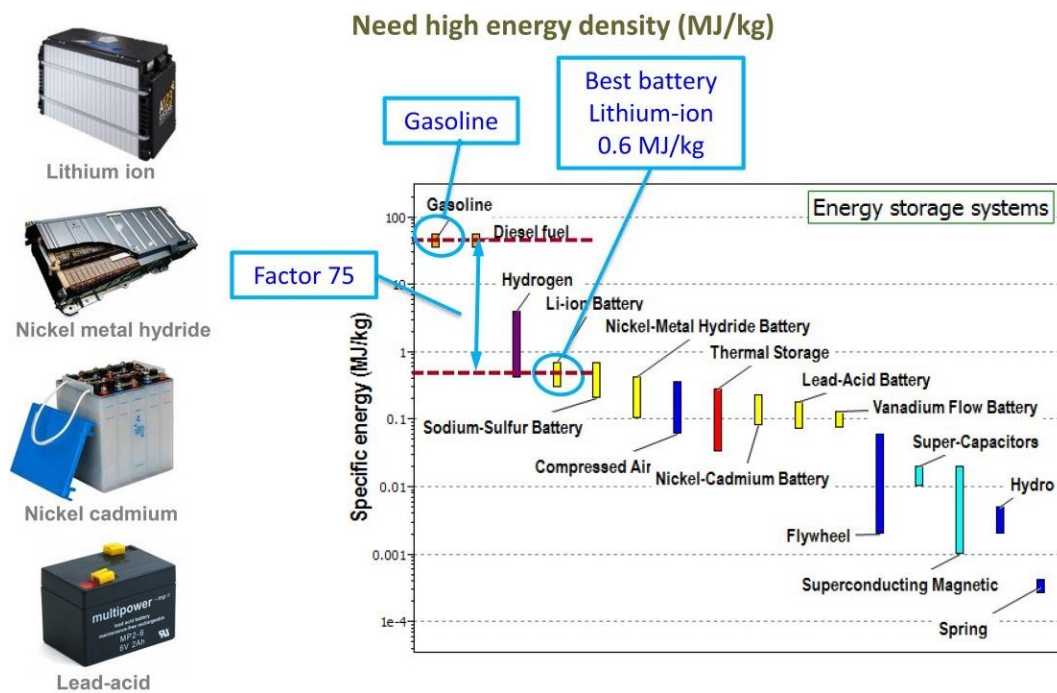
3. 確認影響因子

表一中所列舉出的考量是否可以被支持或是被反駁？為了合理討論上述因子，評估方法中的第三步(確認影響因子)即是尋求各種計算依據與討論。以電動車而言，需要考量的是能源與動力、材料來源、環境、法規、經濟性與社會影響等。

(1) 能源與動力

以能源與動力(energy and power)的角度來分析電動車，圖三是各種能源的能量密度(energy density)¹，鋰電池的能量密度為0.6MJ/kg，雖然已高於其他型態的電池，但鋰電池仍然比汽油或柴油的能量密度低了75倍。

全球有十億部車於公路上行走，若其中的10%為電動車，每年行走17,000km，每部車消耗0.6MJ/km，則全球消耗 $10^8 \times 0.6 \times 17,000 = 10^{12}$ MJ/year。以國家電網來計算，平均每個電廠產能 4×10^{10} MJ/year，故全球需要新增23個額外的電廠來為電動車充電，以英國、法國或德國而言，該些國家需要增加至少一座電廠。



圖三、能源vs.替代儲能系統圖

(2) 材料來源

(a) 鋰

接著從材料供需面進行分析，現行電動車的電池主要為鋰電池系統，其關鍵材料為鋰及鈳，假設每年製造800萬輛電動車，每部車配備16kWhr的鋰電池需要7.3kg的鋰，若電池設計並未變更，則需要 $7.3 \times 8,000,000 = 58 \times 10^6 \text{kg} = 58,000$ 噸/年，為全球鋰產能的170%，若行走距離對應消費者的需求，此數字可能會再上修。

表二、全球鋰礦產能(2012年)

國家	產能(噸/年)
智利	12,600
澳洲	11,300
中國	5,200
玻利維亞	5,000
阿根廷	3,200
葡萄牙	820
辛巴威	470
巴西	160
全球	34,000

(b) 鈳

以類似上述的方法來評估電動車電池的另一個關鍵材料-鈳原料的需求量，目前全球的稀土礦產能為134,000噸/年，產能中平均15%為原料鈳，約為2萬噸。以每年生產800萬部電動車為例，若每部車需要1.5公斤的原料鈳，則鈳原料的需求為 $1.5 \times 8,000,000 = 12 \times 10^6 \text{kg} = 1.2$ 萬噸/年，由於鈳礦來源95%以上為單一國家供應(中國)，雖然現行的需求/供應比的60%已滿足，但是供應鏈幾乎被單一來源所掌握。

(c) 環境

進一步對於環境的影響進行評估，現行全球的主要發電方式仍是以燃氣或燃煤的火力發電居多，其碳足跡為500g/kW·hr或140g/MJ，小型汽/柴油動力車所需推動力為2MJ/km。而機軸傳動的效率為1/3，故其以電動車的內燃(Internal Combustion, IC)引擎來取代時，必須達約0.6MJ/km，考量電池的回充情形時，鋰電池/電動引擎結合效率最佳為85%，那麼，電動能($0.6/0.85=0.7$ MJ/km)必須藉由電網來提供，因此其碳排(carbon penalty)為 $140 \times 0.7 = 100$ g/km。

現行中度碳排放的油動力車約200g/km，但目前已有低碳排放油動力車種(100g/km)出現，因此在火力發電為主的電網下，使用電動車的碳排與油動力車其實不相上下，然而，當電網使用核能或是綠能時，電動車則具有碳排效益。

(d) 法規

進一步對於法規、經濟性及社會影響進行分析。以歐盟法規而言，包含了EUautomotivefuel economy policy on carbon emissions、Fuelexes、EUbatterydirective(禁止傾倒掩埋電池，必須全數回收)、End-of-lifevehiclesdirective(ELV)，其中根據TelensPeiro等人的報導¹，只有3%的鋰電池被回收，成為法規的潛在問題。美國方面的法規則包含CAFERules、Fuelexes。

(e) 經濟性與社會影響

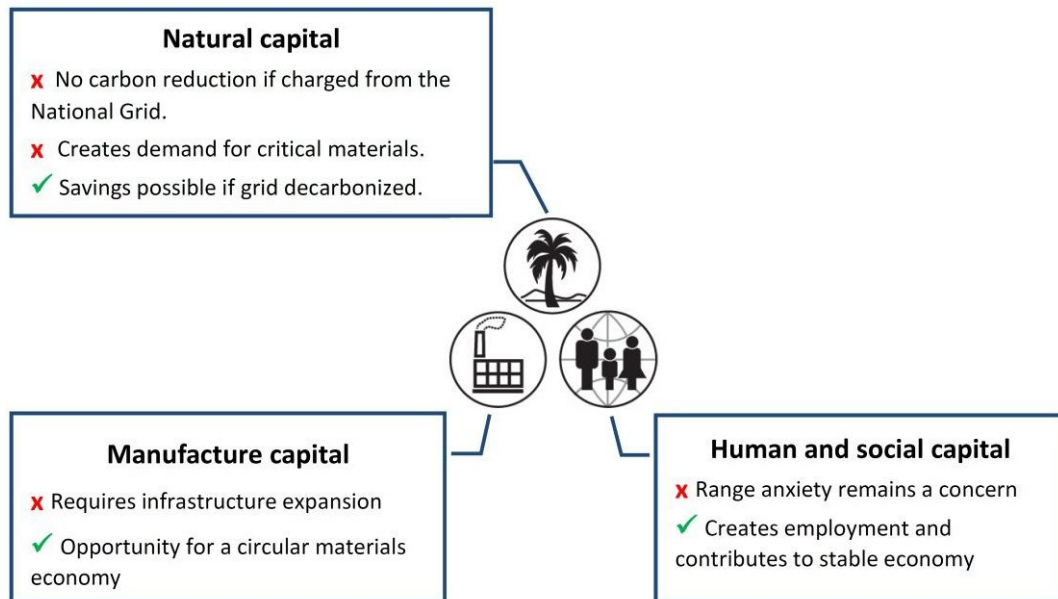
至於電動車的經濟性分析，由於電動車電池仍較昂貴(10,000~15,000美金/輛²)，但鋰原料備受看好，產能逐漸開出，並考量油價仍可能逐漸推升，推測2020年可降價至\$200/kW.hr。在社會影響方面，電動車產業可提供電動車相關就業機會，並帶來降低噪音的好處，並可有效集中碳排放的管理。

綜上所述，評估方法第三步，對於影響因子進行分析，並以Granta公司的資料庫得出如下需解決的問題點：

- 目前的鋰礦、鈹礦的供應鏈不足以支應每年800萬輛電動車的製造需求
- 以國家電網作為動力來源的電動車，其碳足跡為100gCO₂/km
- 電池的重量及成本侷限於每次充電循環只能行走160公里
- 販售電動車需要政府補貼至20%
- 目前缺乏鋰原料及鈹原料的回收設施

4. 形成判斷

此部分將從自然資本、製造資本以及社會資本三個面向進行判斷（圖四）。



圖四、以各種資本面向評斷循環經濟

以自然資本而言，今日的電動車至少使用兩種關鍵元素：元素鋰及元素鈹。鋰元素於2020年的需求將會超過現今產能而呈現短缺，至於元素鈹，雖然於2020年的目標需求是2011年產能的一半，已足以應付未來的需求，但是其供應被掌握在單一來源，因此，對於電動車鋰及元素鈹的回收，不論是在技術上或是商業模式策略上皆有精進的必要。商業模式上，現行電動車設計的使用年限約為12年，若電動車是以租賃方式使用，那麼回收電動車的關鍵原料則容易管理，若是如現今的主要模式(賣斷)，回收電動車的關鍵原料雖然仍可行，但將提高原料回收的困難。技術發展上，發展鋰及鈹元素的回收或開採技術，以穩定關鍵材料的供應鏈將會成為電動車產業發展的要點。

另外，電動車是否能達到其首要目標-減碳的公路運輸工具呢？以現行西方國家的電網而言，電動車的碳排放量為100gCO₂/km，此目標在現行以火力發電為主的能源來源而言，無法於短期(6年)內達成。

以製造資本分析，必需滿足三個要素才能落實電動車的普及，包含能提供關鍵材料的生產基地、關鍵材料回收的預備能力以及提升電網供應容量，這些都有賴於電動車生態基礎建設的建立。

以人力資本而言，電動車產業的落實能增加就業、創造更多收入以提升人民福祉，而社會對於電動車的接受仍然不高，將限制電動車產業的發展。

5. 反饋構思

(1). 短期目標:

電動車基於能量密度低，單次充動可行走的距離較短，加上材料的可得性也受到限制，短期內無法完全取代油動力車，較為可行的方式是發展電動車的 usage 模式來強化電動車的效益，例如使用於通勤或以共享模式經營等。

(2). 長期目標:

經過上述的分析，可知電池能量在技術上需先解決的問題是提高電池的能量密度，可將技術開發的重點聚焦於電池能量密度的提高，以提高電動車的效益。

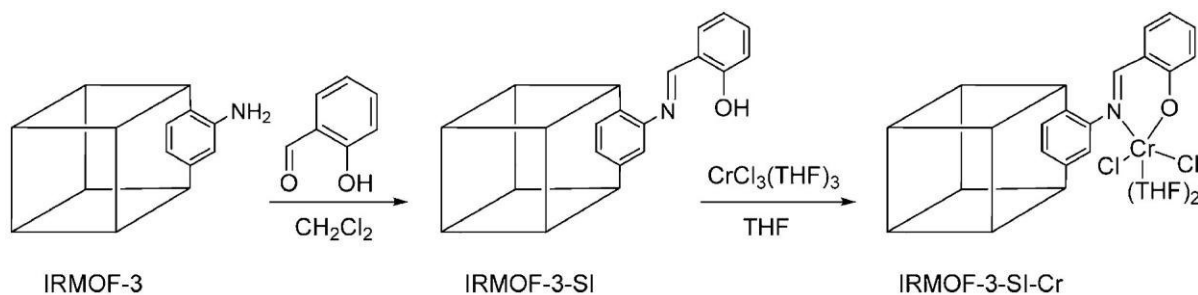
三、高端材料

高端應用材料方面，金屬有機骨架、生物可降解材料為材料學界受到關注的材料，其分別可應用於烯烴單體、軟性機器人以及電動車領域，從來源、製造、用途乃至廢棄之後對於環境友善的開發趨勢已然形成，可作為國內產業之案例及未來發展之標的，簡介如下。

1. 金屬有機骨架(Metal Organic Frameworks, MOFs)

金屬有機骨架材料(以下簡稱MOFs)是從沸石衍生的一種材料，其最初被合成出的結構是由配基(ligand)與金屬飽和配位的MOFs，後來逐漸發展出後修飾法形成的MOFs，此結構因為可讓金屬裸露，因此可對於一些不同的基質產生影響，因而應用於氫氣吸附、催化反應以及藥物釋放等不同的應用。其中，MOFs作為觸媒時，其相當於異相觸媒，並且相較於其他的異相觸媒，MOFs更容易調整孔洞大小以及缺陷密度，這些特性應用於催化反應時，反應的位點會較為平均，也就是會使產物的選擇性或聚合物的形態更均勻，因此，鉻金屬中心的MOFs(圖五)因為可以進行乙烯低聚合(oligomerization)反應而受到了矚目。

大陸中石化因此開發了使用不同配基合成的MOFs進行乙烯的低聚合反應，其用以製造 α -olefin。由該團隊發表的結果可知，Cr-MOF應用於乙烯寡聚反應時的確類似Shell的SHOP法，產物並非完全單一選擇，呈現C4-C10的分布，以C8(辛烯)或C10(癸烯)為主要選擇產物(圖六)。



Scheme 1. The covalent post-synthetic modification of IRMOF-3 to yield a MOF-supported Cr(III) catalyst (IRMOF-3-SI-Cr).

圖五、鉻金屬中心金屬有機骨架原型

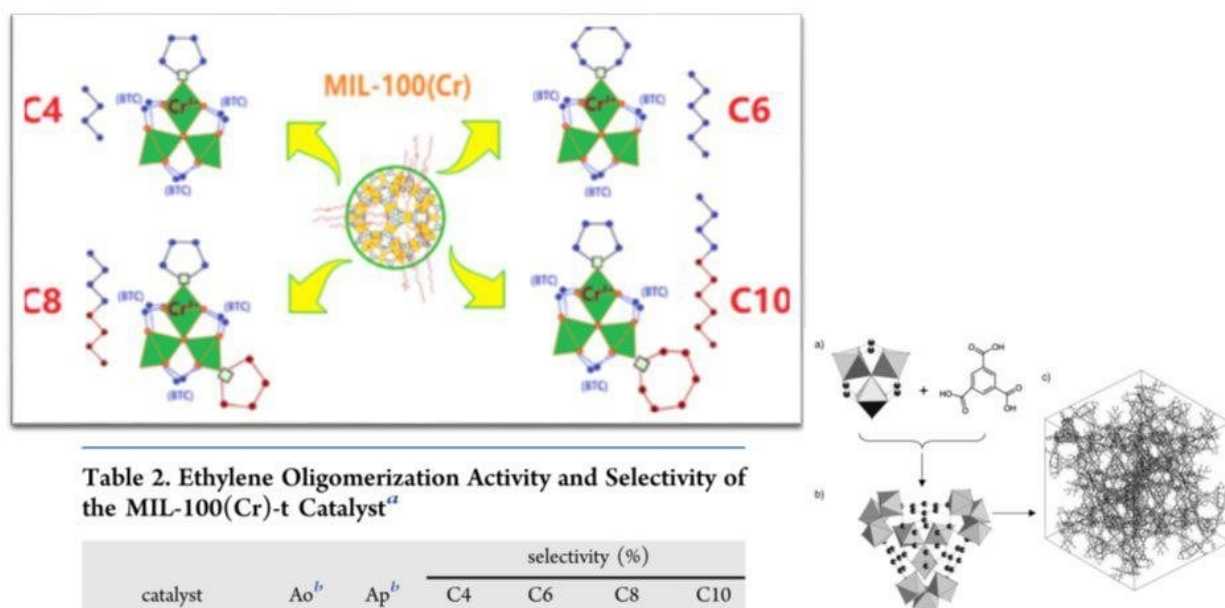


Table 2. Ethylene Oligomerization Activity and Selectivity of the MIL-100(Cr)-t Catalyst^a

catalyst	Ao ^b	Ap ^b	selectivity (%)			
			C4	C6	C8	C10
MIL-100(Cr)-150	5.13	—	0.27	26.36	69.15	4.22
MIL-100(Cr)-200	7.07	0.11	7.03	0.02	52.26	40.69
MIL-100(Cr)-250	9.27	0.99	1.07	18.98	40.14	39.81
MIL-100(Cr)-300	3.94	0.42	2.18	2.81	38.62	56.39
MIL-100(Cr)-350	3.44	—	0.98	0.98	59.44	39.58

^aNote: AlEt₂Cl as cocatalyst [Cr] = 5 × 10⁻⁵ mol/L, n(Al)/n(Cr) = 500, P = 10 atm, t = 1 h, T = 10 °C. ^bAo and Ap represent the activities for oligomers and polymer respectively, with the same unit of 10⁵ g/(molCr·h).

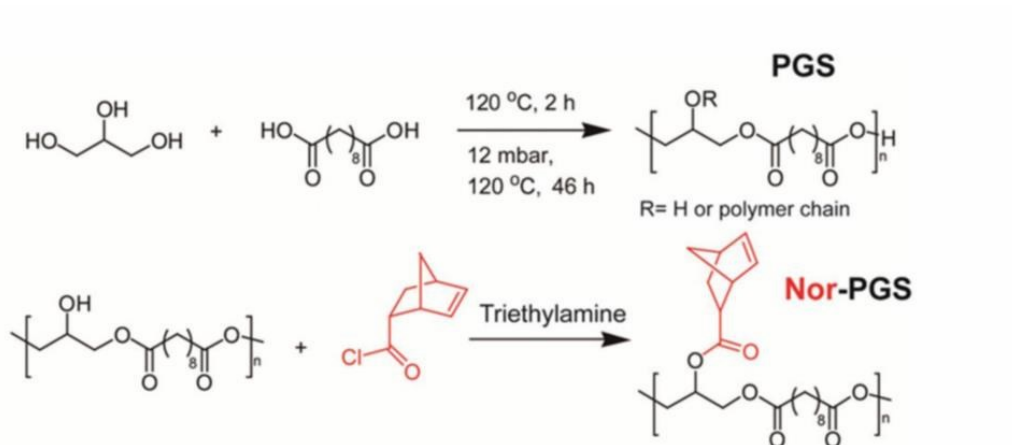
圖六、中國中石化開發的Cr-MOF材料

2. 生質來源高端應用材料

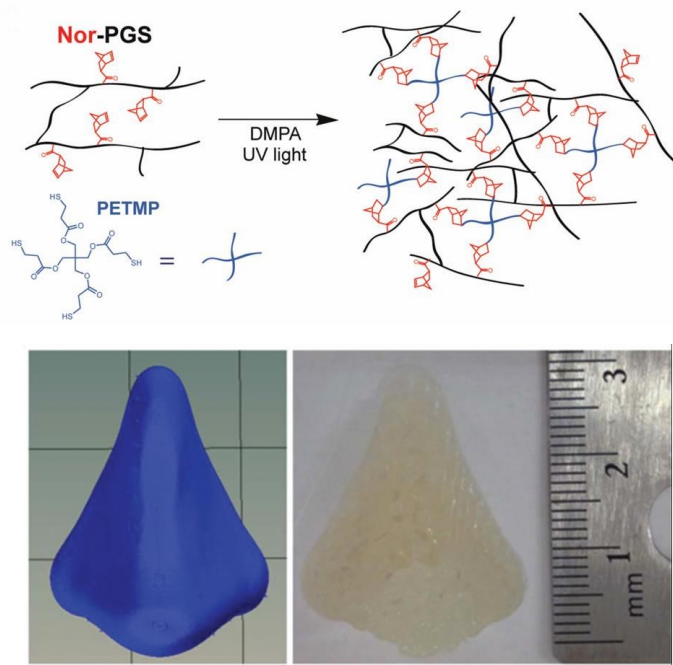
3D列印技術於前瞻終端的應用已將軟性機器人作為技術的載具。由於軟性機器人可透過模仿生物的型態，進入危險地域的探勘、人工關節以及人體的藥物等高端運用，其中，Oregon State University的軟性機器人團隊，使用可循環使用的生物可分解聚合物形成複合材料，作為軟性機器人材料的運用以及評估方法，並發展了一系列此複合材料的製造技術應用於不同的用途，在此說明如下。

(1). 可3D列印及可分解的人工軟組織材料

Oregon State University團隊以甘油(glycerol)、癸二酸(sebacic acid)進行縮合聚合(圖七)後，形成脂肪族聚酯材料，會選用此兩種單體的原因是其人體毒性甚低，且皆可以從生質料源取得，其聚合物降解後能給植物作為養料再利用。脂肪族聚酯再以norbornene-based acyl chloride修飾OH官能基之後，具有官能化的C=C不飽和鍵，此不飽和鍵經由自由基反應(光化學反應)後，可產生交聯反應而使材料交聯成型(圖八)，可應用於光敏型(SLA)3D列印技術，目前已驗證了材料結構、物性以及可分解性，後續會持續開發SLA型3D列印技術的結果。



圖七、3D列印生質脂肪族聚酯(PGS)合成路徑



圖八、PGS材料交聯及3D列印材料demo(鼻軟骨)

(2). 可降解的軟性機器人材料

上述團隊中材料的雛型為脂肪族聚酯及碳酸鈣的可分解複合材料，脂肪族聚酯的單體是於設計時透過毒性資料挑選可生質來源以及低毒性者，合成之後以雷射切割方式製造零件，組裝之後即可形成氣動式的軟性機器人元件(圖九)。

該團隊進一步導入帶有雙鍵的生質來源單體-衣康酸，使脂肪族聚酯具有雙鍵官能基，可使材料經過照光後交聯硬化，並可進行3D列印以製造仿生機器人(圖十)。

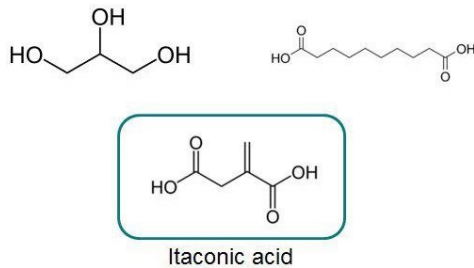
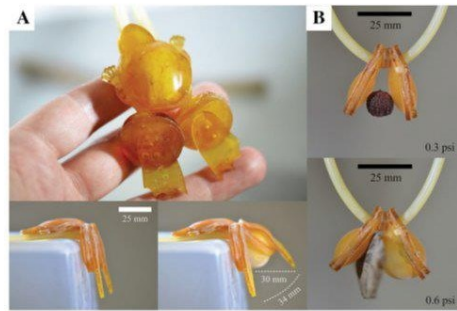
四、結語

1. MRS 2017 fall meeting以材料開發為主題，包含永續材料、電磁材料、奈米材料、軟性機器人、3D列印材料、生醫材料乃至於核能材料，其中今年特別放入永續材料及循環經濟的相關論壇，從來源、製造、用途乃至廢棄之後對於環境友善的開發趨勢已然形成。

- 應用
 - 軟性機器人
- 材料特性需求
 - 單體來源為生質來源
 - 材料可降解
 - 材料降解後低毒性
- 達成手段
 - 取得毒性資料篩選合適單體
 - 脂肪族聚酯
 - CaCO₃複合材料
 - 雷射切割

OCC(O)CO
OC(=O)CCCCCCCCC(=O)O

圖九、脂肪族聚酯複合材料及其軟性機器人元件



圖十、可3D列印的生物可分解聚酯材料

- 應用
 - 軟性機器人
- 材料特性需求
 - 單體來源為生質來源
 - 材料可降解
 - 材料降解後低毒性
 - 可3D列印(SLA)
- 達成手段
 - 取得毒性資料篩選合適單體
 - 脂肪族聚酯
 - CaCO₃複合材料
 - 雷射切割

2. 循環經濟案例於電動車的評估案例及其問題解析是值得借鏡的評估方法，也有助於關鍵問題的發掘、經濟可行性及商業模式布局的參考。
3. MOFs作為石化業的異相觸媒材料具有良好選擇性、活性等性質，中國中石化已投入資源進行開發，可作為異相觸媒領域開發方向的參考。
4. 生質來源的生物可分解材料應用於軟性機器人材料的議題，應是塑膠領域中值得發展的循環經濟與高端應用材料兼顧的極佳案例。

參考資料：

1. Mac Kay, D.J.C.(2009)“Sustainable energy-without the hot air” UIT press
2. Telens Peiro,L.Villalba Mendez, G. and Ayres, R.U.(2013)“Lithium: sources, production, uses and recovery outlook” JOM Vol 65, pp.896-996.
3. The Wall Street Journal, April 17, 2012