

廢棄物與永續資源管理之國際發展趨勢

- ▶ 劉坤興 / 工業技術研究院 研究員
- ▶ 楊博傑 / 工業技術研究院 副研究員
- ▶ 呂穎彬 / 工業技術研究院 資深工程師
- ▶ 蔡振球 / 工業技術研究院 正工程師兼組長

前言

近年來永續發展概念盛行，先進國家認知到廢棄物與物質管理必須整合生命週期的概念，而自經濟合作與發展組織 (Organization for Economic Co-operation and Development, OECD) 於 2004 年成立永續物料管理 (Sustainable Materials Management, SMM) 工作領域以來，積極推動相關工作，並發表包括 2012 年的 SMM 更新報告，及 2015 年剛出版的「物料資源、生產力與環境」(Material Resource, Productivity, and the Environment) 報告等。其對 SMM 的操作型定義為「永續物料管理是一種方法，其目的為促進永續物料使用，採用物料生命週期概念貫穿、整合各式行動，以降低環境負面衝擊及維護自然資源，同時將經濟效率和社會公平納入考量」。

此外，歐盟方面也提出與 SMM 相同理念的策略與計畫，如歐盟執委會於 2010 年 3 月提出「歐洲 2020 (Europe 2020)」策略中，以「成長」為主軸，設定 3 項優先成長目標領域和 7 項旗艦倡議 (Flagship Initiatives)，分別為：

1. 智慧性成長：發展以知識及創新、教育及數位化為基礎之經濟。配合之倡議為歐洲數位化進程 (A Digital Agenda for Europe)、創新聯盟 (Innovation Union)、青年行動計畫 (Youth on the Move)。
2. 永續性成長：促進低碳、具資源效率與競爭力之經濟。配合之倡議為具資源效率之歐洲 (Resource Efficient Europe)、為達全球化之產業政策 (An Industrial Policy for the Globalization)。
3. 參與性成長：提高勞動市場參與率及技職



之取得，對抗貧窮並促進就業及區域整合。配合之倡議為新技職與就業之進程 (An Agenda for New Skills and Jobs)、歐洲對抗貧窮平台 (European Platform Against Poverty)。

其中永續性成長領域與 SMM 目標相同，藉由資源效率的提升，減少環境衝擊，並增加經濟競爭力。歐盟 2011 年 9 月提出資源使用效率進程計畫 (Resource Efficiency Roadmap)，訂出具體目標：「2020 年時，廢棄物被當作資源來管理、人均廢棄物產生量持續下降、分類回收普及與二次料有效市場的發展等，廢棄物回收再利用成為具經濟效益的選項；回收對環境造成顯著衝擊或關鍵性原物料等更多物質，而能源回收僅適用於不可回收物質，基本上已不使用掩埋手段...」。2012 年評估對特定產品實施最低回收物質率、耐用性和可重用性標準及延伸生產者責任等；在 2013 和 2014 年，促進歐盟成員國間在廢棄物回收和處理最佳做法之交流，並制定措施來更有效地抑止違反歐盟廢棄物法規的行為。

過去，廢棄物管理以強化 3R 為主，包括：減量 (Reduce)、再利用 (Reuse)、資源回收 (Recycle)，其管理精神仍以廢棄物為主，探討各種利用方向，以避免最終處置。而永續物質管理，則以資源利用為思考重要面向，從預防角度切入，再由生命週期觀點檢視分析物質的各種利用階段，當達到資源利用最大化時，各物質利用

會進入適當的循環路徑，自然而然降低廢棄物產量與相關環境衝擊。本文將由 OECD 的作法為始，闡述國際永續物料的管理邏輯和做法，並提出國際建議在執行面可用的工具，最後對整體永續物料管理方式做一總結。

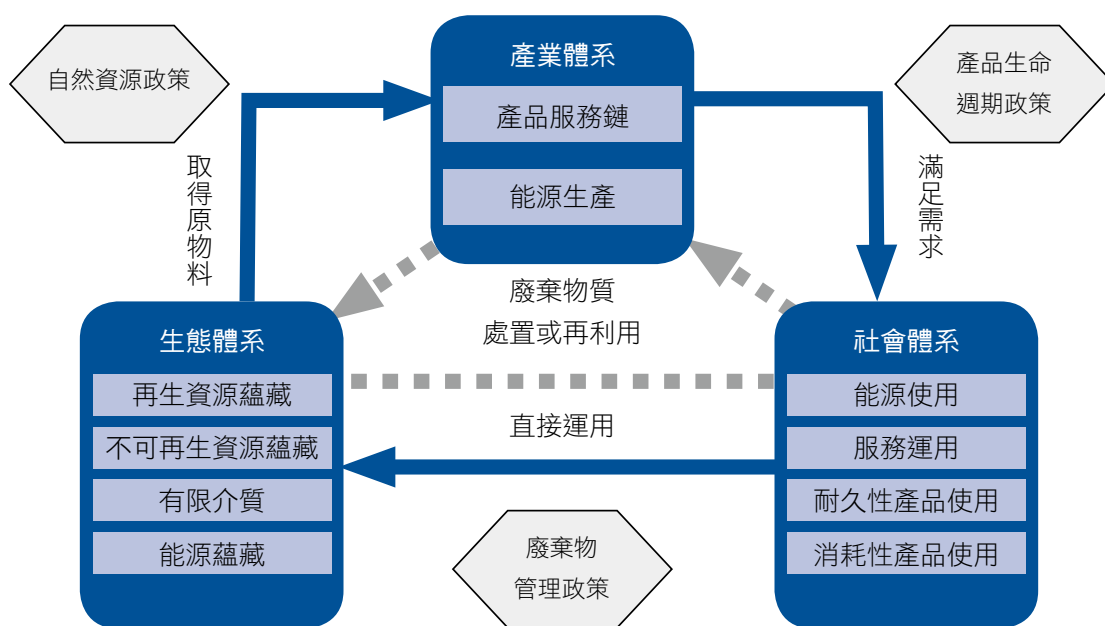
國際永續物料的管理邏輯和作法

OECD 於永續物料管理的主要目標為資源效率極大化與環境衝擊最小化，而在管理範疇定義上，總體物料與關鍵物料的管理層次有所不同。在關鍵物料 (Critical Raw Materials) 層面，國際間各先進國家依考量角度不同，管理範圍與原則亦有所不同，但共同推動循環經濟 (Circular Economy) 的做法則相同，以下說明永續物料管理實行的重要構成要點。

OECD 的架構與精神

OECD 於 2004 年成立永續物料管理工作領域，建議物質流和對應政策架構如圖 1 所示。由該圖顯示物料在世界或各國層級的運作上，可以分成產業、社會及生態三個體系，包括物質與能源的交互流動，對應需要「自然資源政策」、「產品生命週期政策」及「廢棄物管理政策」三個部分，而管理的目標包括：物料使用效率最大化和環境衝擊最小化等兩個目標。

考量三個政策的交互影響，因此永續物料管



資料來源：行政院環境保護署，2013

圖 1 OECD 建議政策架構與物質流系統

理的成功關鍵，須倚賴跨部會間、公私部門間的合作及相關政策工具之運用；因此，OECD 將永續物料管理的操作型定義為：「永續物料管理是一種方法，其目的促進永續物料使用，採用物料生命週期概念貫穿、整合各式行動，以降低環境負面衝擊及維護自然資源，同時將經濟效率及社會公平納入考量。」

為能成功建立 SMM 相關政策，OECD 建議須詳實了解下列三項要素：

1. 經濟面的物料基礎
2. 國際或國內物質流的流布狀況
3. 在時間、國家及部門別角度下，改變資源使用效率的驅動因子

總體物料與關鍵物料

總體物料的角度，最常用於觀察一個國家整體物料運作情形，如利用資源生產力判斷是否往經濟成長與環境負荷脫鉤的方向進行，且藉由生物質、金屬礦物、非金屬礦物及化石燃料等不同的分類基準，了解物料轉變進行的方向，如生物質與農業相關、礦物類與工業相關、化石燃料與國家能源政策相關等。近年來各國於永續物料管理發展上，除長期趨勢觀察分析外，亦進行特定物料管理推動方案，該特定物料通常稱為關鍵物料。

物質在永續物料管理下，大都以下列兩個層面來建構執行（可參考圖 2 所示）：

前述物料皆與薄膜太陽能、風機、交通載具及照明等產業未來發展極相關。最近一次討論會議為 2014 年所舉辦之第四次會議，由美國、歐盟及日本三方進行關鍵物料與清淨能源未來的討論。而日本經濟產業省考量該國之稀貴資源使用量甚大，亦指定鎳、鉻、錳、鈮、鎵等 31 種稀貴資源作為管理標的。國際上其他國家，包括：中國、韓國、澳洲及加拿大皆有關鍵物料或稀貴資源的管理目標，相關物料列表也多類似。

其他世界先進國家所納入的關鍵物料，與其管理目標如表 1 所示。而日本、中國、韓國、澳洲及加拿大等國家，對相關物料管理的態度多以「穩定供應鏈需求」為主，其中加拿大較表中其他國家多納入永續發展與環境保護等兩項重要目標。

循環經濟概念的興起

為實現關鍵物料使用效率的提升，推行循環經濟已為現今最熱門的議題。循環經濟概念是繼承「從搖籃到搖籃 (Cradle to Cradle, C2C)」的發展概念，再進行延伸並行產業化和經濟化。

「從搖籃到搖籃」的觀念是由化學家 Michael Braungart 與建築學家 William McDonough 於 2002 年於同名書本所提出，由過去線性的「從搖籃到墳墓 (Cradle to Grave)」生命週期，進步到「搖籃到搖籃」的全循環思維，強調掌握物質從產生、利用到最後處置的過程，使物質進入工業循環或生物循環中，減低影響人體健康或環境的可能性。

而艾倫麥克阿瑟基金會 (Ellen MacArthur Foundation) 進一步提出循環經濟，推動搖籃到搖籃中的「工業循環」與「生物循環」兩個概念。

表 1 各國關鍵物料

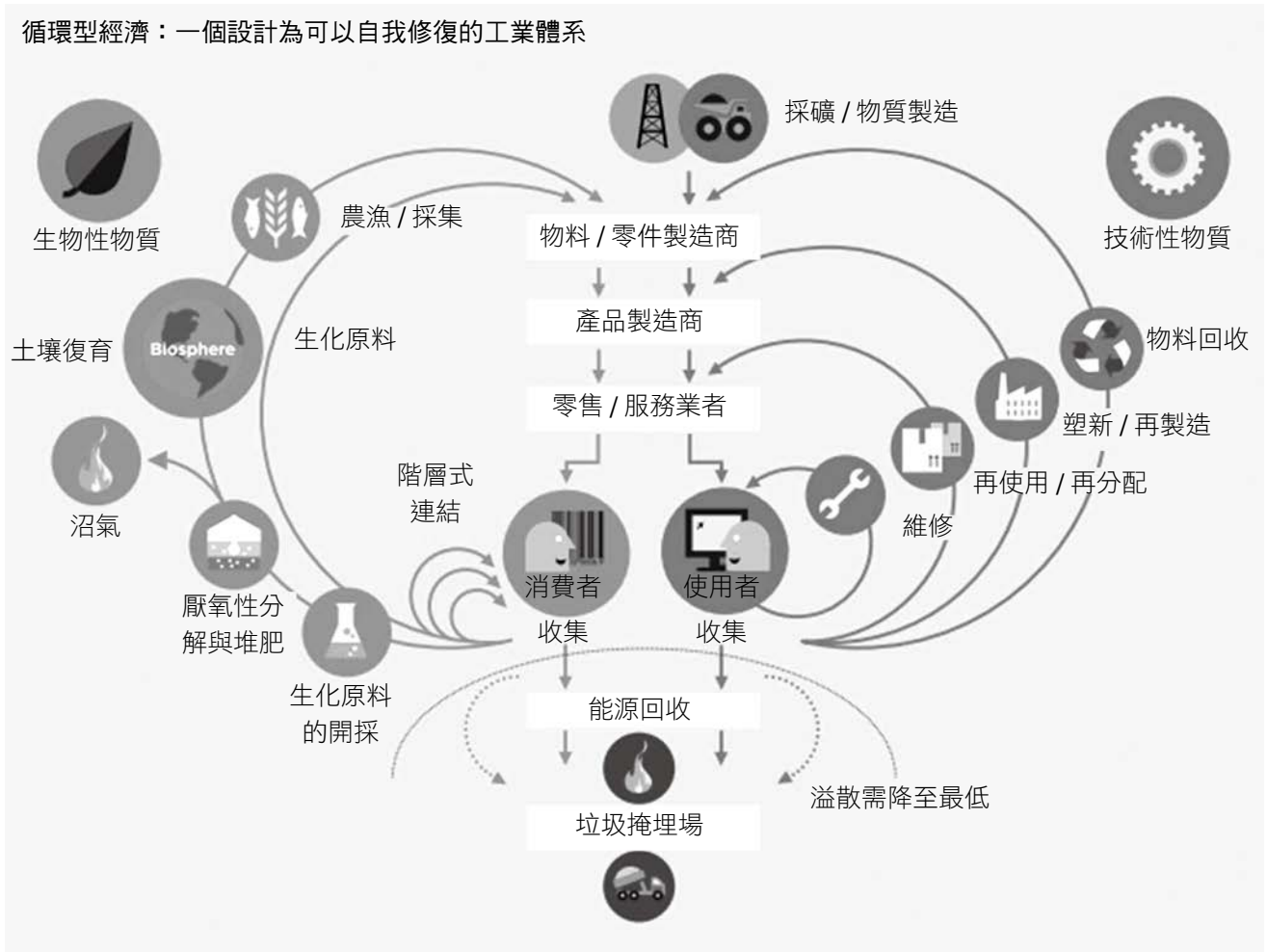
國家	目標	篩選物料
日本	以日本企業為主，穩定相關原物料供應	鈷、鎳、錳、鈮、稀土元素、鎢、鈳、鈮、鎵等共 31 類
中國	穩定內需原物料供應、減緩生產過剩及減少非法貿易	銻、錫、鎢、鐵、汞、鋁、鋅、鈳、鈮、稀土元素
南韓	確保企業重要原物料穩定供應	砷、鈦、鈷、鈮、鈮、錳、鈮、鎵、鈳、鎢、鋰、稀土元素
澳洲	保持礦業投資且在自然資源課以合適稅率	鈮、鈮、鈳、鋰、稀土元素
加拿大	推動永續發展與資源利用、保護環境與公眾健康、確保投資環境吸引力	鋁、銀、金、鐵、鎳、銅、鉛、鈮

資料來源：彙整自 US Department of Energy, 2010；財團法人中技社，2013



循環經濟概念如圖 3 所示，首先其概念核心在於設計，在設計之始就要考量廢棄物問題，利用工業循環與生物循環的概念，令廢棄物問題不復存在。首先，要考量在循環中拆解與再利用的可能，以形成循環經濟，減少過去在回收 (Recycling) 與廢棄 (Disposal) 階段耗費的能源與人力資源。再來，循環經濟在消耗性部件 (Consumable

Component) 與耐久性部件 (Durable) 上，有嚴格的區別，消耗性部件應以可進入生物循環的材料為主，亦即在一般環境中可自然分解，成為生態養分的材料。而耐久性部件如金屬或大部分的塑膠而言，則應考量設計為可進入工業循環的方式，且避免難以拆解、降級回收等過去常見的缺點。最後，則是利用再生能源維持循環經濟，以



資料來源：翻譯自艾倫麥克阿瑟基金會 2014 年循環經濟報告

圖 3 循環經濟於生物循環與工業循環之概念圖

降低對化石能源的依賴。

目前相關計畫透過世界經濟論壇 (World Economic Forum) 建立的執行平台，與麥克阿瑟基金會共同協助，合作成員包括參與此平台的不同企業領袖、學者及研究者。透過世界經濟論壇互相合作，讓企業間 (如飛利浦、雷諾汽車等) 互補，而產生更大的環境與經濟效益。

該平台關切的物料分為四類，簡要說明如下：

1. 第一類：Golden Oldies；已經有大回收量，但純化上仍待努力的物質，如紙、紙板、PET、玻璃及鐵等。
2. 第二類：High Potential；使用量很大，但缺少系統性再利用的方案，例如高分子聚合物 (Polymer)，這些物料蒐集率目前都較低。
3. 第三類：Rough Diamonds；量大的副產品，如食品廢棄物 (Food Waste)、飛灰或爐渣等。
4. 第四類：Future Blockbusters；主要為新創材料 (Innovative Materials)，這些可能帶來具潛力的資源生產力改善，例如 3D 列印的材至於循環經濟所帶來的效益，艾倫麥克阿瑟基金會於 2013 年的報告中，是基於循環經濟的成功案例，如米其林 (Michelin，輪胎相關技術改善與租賃模式)、開拓重工 (Caterpillar，機件再利用)、雷諾汽車、理光 (Ricoh) 與 Desso (地毯產品獲得搖籃到搖籃認證) 等，先作產品面

之評估，評估項目包括物料輸入 (Material Inputs)、勞力輸入 (Labor Inputs)、能源輸入 (Energy Inputs)、溫室氣體排放 (Carbon Emissions) 與貿易平衡 (Balance of Trade) 五個經濟與環境的考量方向，之後以產品面效益出發，藉由成功案例推廣到類似產業的假設基礎上，推估相關產業面的效益。

基金會輔以歐盟 2007 年產業關聯表的資訊進行產業面效益推估，以運輸載具 (Motor Vehicles)、機械設備 (Machinery and Equipment) 等八個產業部門為推估對象，分析其於過度情境 (Transition Scenario，該情境下只考量產品設計的改變與一般回收情境) 下，在歐盟層級可達每年 0.34 到 0.38 兆美金 (340~380 billions USD) 的潛力，而在進階情境下 (Advance scenario，該情境考量更深入的改變，包括回收產業鏈的設計，法規的改變，跨產業鏈或跨部門合作等)，可有每年 0.52 到 0.63 兆美金 (520~630 billions USD) 的潛力。而同年稍晚的報告，則轉以民生部門為主，分析具快速變動特性之消費者產品 (Fast-moving Consumer Goods) 與相關產業部門的效益，推估全球的潛力約在每年 0.7 兆美金 (700 billions USD) 左右。

在效益推估上，循環經濟頗具潛力，而在計畫規劃上，基金會則較為務實謹慎，如艾倫麥克阿瑟基金會的 2014 報告中，說明若能共同努



力實行循環經濟，以五年為計畫執行計算基準，設定其五年目標為創造五億美金 (500 millions USD) 的效益，當計畫成功時，未來可創造 100,000 個新的工作機會，並避免浪費一億噸物料的浪費。

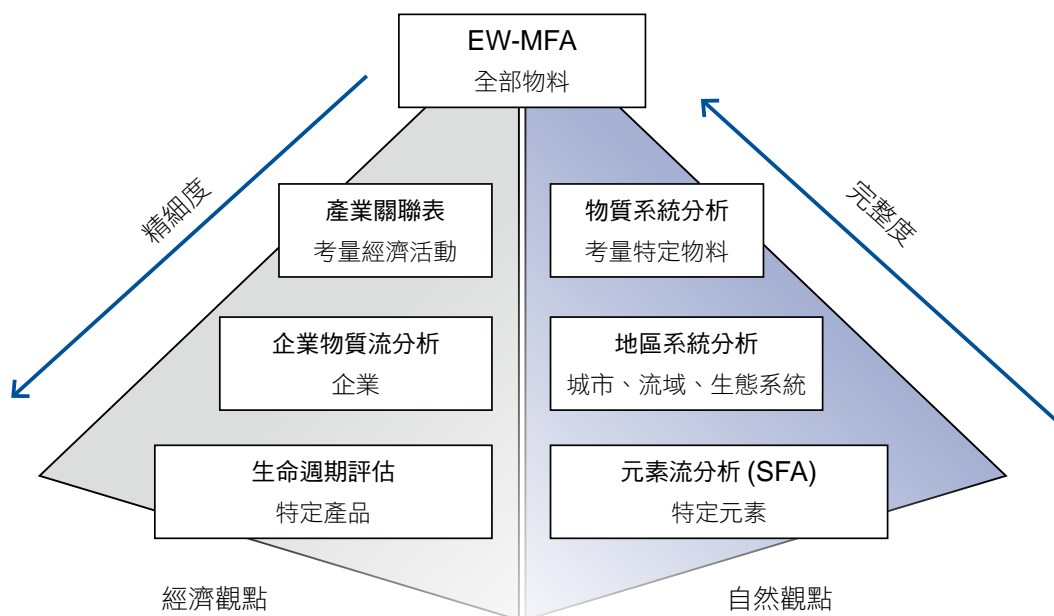
執行面：由物質流管理工具開始

永續物料管理背後有一重要的概念為物質流分析，因應情境與尺度不同，而有不一樣的工具型態產生，OECD 所建議的工具層級，如圖 4 所示，最頂層為 EW-MFA (Economic-Wide

Material Flow Analysis)，而後，依照經濟觀點與自然觀點，又有相關的物質流因應相關需求，本文著重介紹 EW-MFA，以及經濟觀點下的產業關聯表與企業物質流分析工具。

在 EW-MFA 部分，以歐盟發展為例，主要分為生物質、金屬礦物、非金屬礦物及化石燃料四大類物質，計算直接物質輸入 (Direct Material Input, DMI) 等七大物質流指標，其架構如表 2 所示，主要藉此自我比較物料使用的效率，並藉由資源生產力等指標，觀察是否達到經濟發展與環境衝擊脫勾的目標。

而國家層級工具，多利用經濟上常見的產



資料來源：翻譯自 OECD, 2008

圖 4 物質流工具架構

業關聯表，整合資源和污染資訊，包括聯合國 SEEA (System of Environmental-Economic Accounting)、荷蘭 NAMEA、德國 PIOT、全球 EXIOPOL 與 EORA、日本廢棄資源投入產出表 (Waste Input-Output Table, WIO) 等，皆以國家經濟面既有的產業關聯表為基礎，增加環境資源考量因素 (如表 3 所示)，其特色包括可估算產業物質使用量、污染產生量、環境衝擊評估及外部成本計算等，由於建構在產業關聯表上，通常較適合分析國家物質流布的大致情況。

在企業物質流部分，近年日本專注推行物質流成本會計 (Material Flow Cost Accounting,

MFCA)，幫組織深入了解物質與能量在製程中的使用情形，以評估其在環境與經濟上的影響。物質流成本會計是以物質流概念為核心，了解物質在公司或供應鏈的流動，並在流動分析過程中納入經濟面考量。

日本因為導入物質流成本會計，而獲得重大的成功，在日本政府支持下，2010 年有將近 300 家公司導入物質流成本會計，2011 年 ISO 組織通過了 ISO14051 標準「物質流成本會計標準」，將物質流動的關鍵點與相關成本整合，令管理人員、財務人員及技術人員間可以彼此對話並深入討論，成功找出關鍵因素，提升物料使用效率。

表 2 EW-MFA 指標架構

目標	指標名稱		計算方式
資源使用效率最大化	投入面	直接物質投入 Direct Material Input (DMI)	$DMI = \text{國內所有開採並使用之物質} + \text{進口物質}$
	消費面	國內物質消費 Domestic Material Consumption (DMC)	$DMC = DMI - \text{出口物質}$
	產出面	直接物質輸出 Direct Material Output (DMO)	$DMO = DPO + \text{出口物質}$
	效率面	資源生產力 Resource Productivity (RP)	$\text{資源生產力} = GDP/DMI$
	環境負荷密度	每單位直接物質輸入或消費所產生之污染排放，簡單表示 DPO / DMI 或 DPO / DMC	$\text{環境負荷密度 (物質輸入)} = DPO / DMI$ $\text{環境負荷密度 (物質消費)} = DPO / DMC$
環境衝擊最小化	產出面	國內空水廢等污染排放 (含溫室氣體) Domestic Processed Output (DPO)	$DPO = \text{空氣污染物} + \text{水污染物} + \text{掩埋廢棄物}$
	循環度	每單位直接物質輸入之資源循環度 Cyclical Use Rate (CUR)	$CUR = \text{循環利用量} / (\text{循環利用量} + \text{天然資源等投入量})$

資料來源：行政院環境保護署，2013



表 3 國際上主要環境資源帳表比較

帳表 / 資料庫	相關環境及資源帳 (含投入與產出)	特色
SEEA	能源、水、漁業資源、土地及生態系統、農業資源、	為聯合國制定架構，國內綠色國民所得帳亦參考該系統設計
NAMEA	CO ₂ 、N ₂ O、CH ₄ 、CFCs、NO _x 、SO ₂ 、NH ₃ 、P、N、廢棄資源、廢水	以傳統污染角度設計環境帳
PIOT	Waste for recycling, Waste for Treatment, Waste for Landfill	行業間之交易以物質流量計算
EXIOPOL	30 種污染物排放和 80 種資源使用	可用於計算衝擊與外部成本
EORA	35 種環境指標：空污、能耗、溫室氣體、水、生態足跡、初級生產力人類占用 HANPP	分析國際貿易流動與資源足跡
WIO	79 種廢棄資源或回收資源、CO ₂ 、掩埋空間需求、能源使用	廢棄資源及資源回收部門明確

資料來源：行政院環境保護署，2013

結語

從國外永續物質發展反觀國內物質 / 廢棄物的管理發現，國內主管機關已成熟建置了廢棄物管理制度和完整的靜脈產業系統，配合環境保護與資源永續利用，近年更逐漸導入城市礦山、搖籃到搖籃及永續物料管理等概念，如何將現有管理措施從廢棄物管理走向資源永續物料循環，未來在精進作為上，宜加強有：

建立資源使用信心

藉由公證認可的第三者驗證保證執行，讓工業循環或生態循環的資源永續利用，在符合環境與健康因子的情形下，建立公眾信心並讓產業與社會大眾認可，以利後續物料管理之推行。或也

可參考艾倫麥克阿瑟基金會的效益推估方式，評估我國資源循環潛力。

提升資源使用效率

強化 3R，引導產業逐漸加重再生料使用比例，促進循環經濟並降低原物料進口需求，藉由循環經濟促使靜脈產業升級與高值化。

強化環境效益

以全生命週期觀念來評估資源利用之環境效益，減少單一作為對整體環境之影響性。(如考量灰渣再利用時，做為掩埋覆土、路基材料、營建材料或填海造陸等，全生命週期之環境影響性)



引入循環經濟概念

包括租賃模式、提升資源循環相關技術、建立平台促使產、官、學、研對話等，讓經濟、技術及環境三方面共生共榮。

建立資訊基礎與相關應用工具

包括指標、分析工具與共同的基礎資訊平台，並以國家層級、城市層級、企業層級、產品層級及元素層級等不同尺度，建立適當的評析工具，不論是由上到下或由下到上，形成完整的物質流追蹤資訊網。



參考文獻

1. Ellen MacArthur Foundation, “Towards the Circular Economy – Accelerating the scale-up across global supply chain,” 2014.
2. Ellen MacArthur Foundation, “Towards the Circular Economy – Economic and business rationale for an accelerated transition,” 2013.
3. Ellen MacArthur Foundation, “Towards the Circular Economy – Opportunities for the consumer goods sector,” 2013.
4. European Commission, “A strategy for smart, sustainable and inclusive growth,” 2010.
5. European Commission, “Moving toward a circular economy,” http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index_en.htm , 2015
6. European Commission, “Raw materials, metals, minerals and forest-based industries,” <http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/> , 2015
7. European Commission, “Sustainable growth - for a resource efficient, greener and more competitive economy,” http://ec.europa.eu/europe2020/europe-2020-in-a-nutshell/priorities/sustainable-growth/index_en.htm , 2012
8. Fraunhofer ISI, “Study on Critical Raw Materials at EU Level,” 2013.
9. OECD, Material Resources, Productivity and the Environment, 2015.
10. OECD, Measuring material flows and resource productivity, 2008
11. U.S. Department of Energy, “Critical materials strategy,” 2011.
12. U.S. Department of Energy, “THE DEPARTMENT OF ENERGY’ S



CRITICAL MATERIALS STRATEGY,”
[http://energy.gov/epsa/initiatives/
department-energy-s-critical-materials-
strategy](http://energy.gov/epsa/initiatives/department-energy-s-critical-materials-strategy) ,2011

13. 行政院環境保護署，「永續物料管理制度與相關運作機制規劃及推動專案工作計畫」，2013。

14. 行政院環境保護署，「規劃推動永續物料管理制度專案工作計畫」，2014。

15. 財團法人中技社，「臺灣稀有資源循環發展策略」，2013。

