綠色生命週期設計中產品回收再生特性之永續性評估模式研究

杜瑞澤* 陳振甫**

* 大葉大學工業設計研究所
** 明志工專工業設計科

（收件日期:86年12月18日；接受日期:87年5月30日）

摘要

本研究從綠色生命週期設計觀點中發展產品回收再生特性之永續性評估模式。從永續性（ sustainability ）的角度而言，回收再生的目標即在維持未來所需資源的長期供應。然而，自然資源經過一連串的加工製造過程後，產品原料的回收再生性質乃對環境產生負荷並對產品品質有所影響。因此若能於產品開發設計之早期階段，即將原料之影響性融入產品的綠色生命週期設計之中，則可增進產品原料回收再生之效益。本研究所採行的方法與步驟是針對相關主題的文獻加以研討，探討綠色生命週期設計之相關重要研究，其後規劃評估模式發展架構；並應用電腦輔助產品環境評估工具 Simapro3 及綠色生命週期中各階段評估表格與設計參考原則分析產品回收再生原料之各項特性以及評估產品原料選擇價值性；並透過專家學者的意見諮詢，共同來評估模式建立之可行性，最後作評估模式的產品實例應用與說明。

關鍵詞：綠色生命週期；回收再生；綠色設計；產品開發；評估模式

一、前言

自環境保護意識抬頭後，環保問題在各國逐漸受到重視，各國政府一致皆在強調與宣導環保的重要性。平時我們提到環保問題，總是會單從材料本身或是製造過程中所產生的環境破壞與污染去注意，卻忽略了資源利用的損耗、包裝運輸、回收再生的價值等環保相關重要因素〔26〕。而如何減少資源之損耗及可能造成的環境污染，以及增加產品的壽命、減少廢棄物的數量，並使產品原料到易於回收再利用，則有賴綠色設計的方法與策略的深入研究與探討〔6〕。實在也唯有從源頭控制，使廢棄物減量，再配合資源回收，徹底將產品的生態衝擊降至最低，才是根本解決之道〔5〕。

目前，有關消費產品的環保探討，以綠色生命週期分析（ Life Cycle Analysis - LCA ）或生至死（ From cradle to grave ）之分析評估研究爲主。其評估方式均嘗試從原料、生產、

運輸、使用至廢棄等階段來研究產品的環保程度，並且輔以各項測試，以產生科學性參考數值作爲環保評估的可靠依據〔25〕。如今，綠色生命週期更是以產品回收再生爲綠色設計的重要努力目標，尤其是原料流程急需更進一步之協調與管理並強調污染防治。換言之，即透過各種方法之發展進行全面性之分析，探討各項原料之回收再生性，以增加原料之使用性，進而減輕整體環境負荷〔24〕。

有鑑於此，本研究目的希望藉由探討與分析產品回收再生原料之特性，以及諮詢、探討與分析產品回收再生原料選擇之價值性及處理流程，進而提供產品開發設計中回收再生原料之選擇原則（ Guidelines ），並建立綠色生命週期設計之產品回收再生特性之永續性評估模式，以幫助設計人員在從事設計工作時能將產品生命的開端和末端連接起來，考慮材料循環再生價值，而選擇適當的材料，有效地達成產品環保設計之目標〔23〕。

二、文獻探討

諸多環保的觀念或常識多屬單向考量，或是較爲淺顯地認識環保，而不知探討產品與環境的互動是複雜的，各項環保評估應以生產、配銷、使用、廢棄等階段爲其多方面的考量〔12〕。設計師於不同的設計階段，可使用不同的設計工具及方法來協助進行產品生命週期之環保分析，這些方法可區分爲質化與量化〔20〕；質化的分析可經由常識、書面資料記載及專家建議而獲得，這些於前階段非常有幫助；而當產品設計與分析進入更細部階段時，量化的分析方式(數據化)提供了更好的支援，通常細部分析時是參考產品做比較，如果數量多頗爲耗時，則常需要相關電腦軟體提供資料庫及分析之協助〔3,7〕。

產品綠色設計裡是以生命週期設計（ Life-Cycle Design ）爲主要中心思想。從綠色環保產品發展中，可由產品「生命週期」的角度來探討，其主要的觀念在於儘可能透過再利用或回收再生的方式，使廢棄物質再利用或完全回收再生，成爲新產品,設計師已不再只是單獨設計產品本身〔10〕，而是循環鏈狀的產品生命週期。設計師就是在綠色生命週期的輸入與輸出之間，尋求能將其廢棄與傷害性降到最低的解決方案〔1,22〕。

綠色生命週期是由各階段所組成，同時各階段依邏輯次序排列。一件產品經由設計與製造後，再予以包裝及配裝，當產品已不再需要或使用時則丟棄。而不同產品種類，對環境有不同的影響。設計師於設計過程中，評估產品對環境的影響時，應有系統的經由各階段之環保效應分析，找出主要的環保問題後，設定綠色設計目標〔13〕。如圖 1 所示爲一產品處理程序，設計師可依此找出那些處理程序對環境傷害較大，而針對這些處理程序予以重新改良設計。

在傳統的綠色生命週期分析中通常以產品爲導向，並強調一次性生命週期，而對於後續循環之間所造成的環境負擔問題，並未格外注意與重視。從永續性發展的觀點而言，實有必要瞭解不同產品生命週期之間對環境所產生的影響程度。譬如在所謂原料生命週期評估（ Material Life Cycle Assessment, MLCA ）模式中，便是以原料爲導向之生命週期途徑，藉由產品處理及其回收再生原料之永續性價值關係探討，提出了材料使用關鍵性的聯接（ Critical Links ）〔17〕。

由圖 2 MLCA 的概念模式中可得知製造之前與綠色產品生命週期之後的原料改變情形；以及自然與人造原料在合理的環境負擔下，可升級至有用的狀況，達到永續性的價值〔19〕。

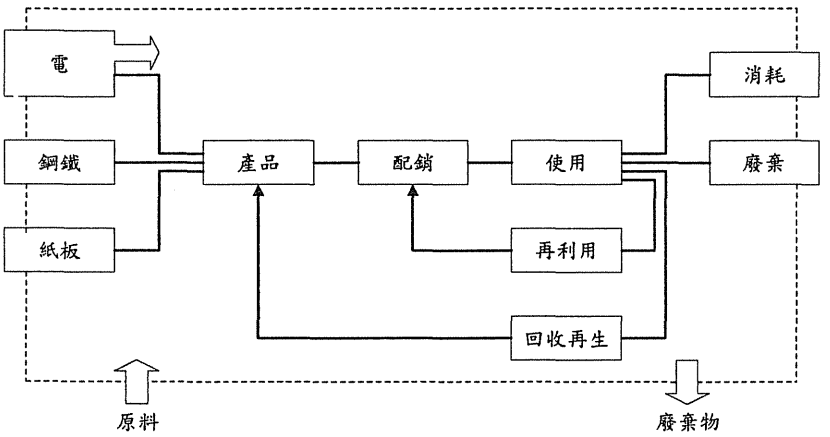

圖 1 產品處理程序

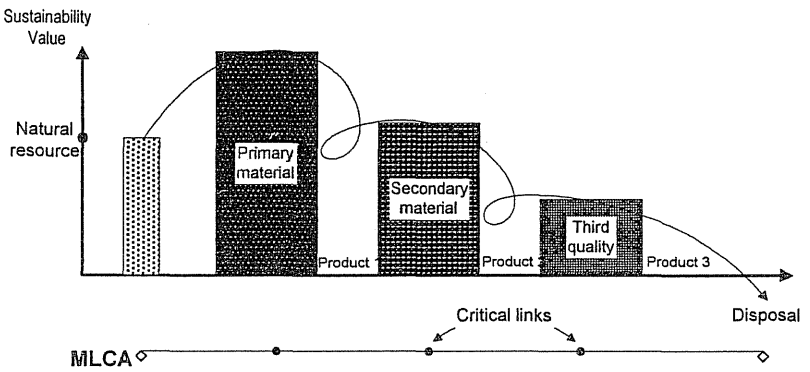

圖 2 原料生命週期評估（ MLCA ）模式

三、研究方法與架構

在整體產品回收再生特性之永續性評估模式發展中，應用了 Simapro3 環境分析電腦軟體及綠色設計中各階段的設計參考原則與表格等工具，以分析產品的材料回收再生特性，同時配合專家諮詢，進而建立綠色生命週期設計中產品回收再生的永續性評估模式，作爲設計師進行產品綠色設計時之重要參考和依循。

3-1 研究架構

本研究產品回收再生原料特性之永續性評估模式之發展係採用結構化模式分析觀念，進行分析、研究、發展、應用及評估。其模式發展架構說明如下：

1. 研究進行之初，先針對相關主題的文獻加以研討，尤以產品與環境互動關係、產品綠色設計、綠色生命週期、產品回收再生原料與永續性價值之重要文獻爲主，其後規劃模式發展架構，並依據發展架構的需求選取發展模式評估工具。
2. 應用電腦輔助產品環境評估工具"Simapro3"及綠色生命週期中各階段之評估表格與設計參考原則分析產品回收再生原料之各項特性，以及評估產品原料選擇之價值性。

3.配合專家學者意見之諮詢，共同評估、研究模式建立之可行性。
4.建立綠色生命週期設計中產品回收再生原料特性之選擇原則 （ Guidelines ）以及永續性評估模式。
5.最後作評估模式的產品實例應用與說明，同時評估其應用可行性並作改善。

3-2 研究工具

在本研究整體產品回收再生原料特性之永續性評估模式發展中，採用了數項重要之評估工具，其中包括有〝Simapro3〞電腦輔助產品環境評估工具以及綠色生命週期中各階段之評估表格與設計參考原則。在產品的複雜性日益劇增，未來的綠色生命週期分析將必依賴電腦的處理。Simapro 是目前開始被用於評估產品對環境衝擊的一種電腦軟體，它可計算一件產品從原料選擇、製造過程、運輸銷售到廢棄、焚燒或回收的整個生命週期消耗的資源和能源，並提供專業且正確的環境影響評估數據資料。如此便可在設計過程中加強分析環境衝擊的效率與能力，使設計師和製造業者在設計及製造產品時，避免發生錯誤的判斷。

在 Simapro 的應用上，設計者必須列出在產品生命週期中材料、能源和製程等對於環境影響的單位數量，然後觀查分析材料和製程的環境指標以瞭解那些重要環保問題需要改進，而這是透過一致的環境重要性指標的價值評估數據，如此便可以分析對其產品生命週期各過程的所有環境影響程度〔21〕。

研究透過綠色生命週期中各階段之評估表格與設計參考原則之應用並配合 Simapro 評估工具分析，可探討產品原料之回收再生性質，確定原料之可用性，並避免有毒物質之累積與品質特性之下降。同時探討原料之永續性價值，評估原料於回收再生過程中的效果。進而建立綠色生命週期設計中產品回收再生原料特性之選擇原則(Guidelines)以及永續性評估模式與方法。

四、分析結果與討論

4-1 綠色產品設計的生命週期評估分析

生命週期的評估必需依循以下兩個準則：

(一)在同一目標下比較產品與設計的替代品，決定對環境的整個影響程度。在產品與替代物或不同成份的原料的選擇上，設計者可從 LCA 獲得一個解答〔14〕。

(二)決定一個產品對環境影響較重要的問題，例如材料的應用是設計該產品符合環保的較重要因素則設計者將可先專心的針對這些問題去加以完成改進〔11〕。

另外設計者如果希望在設計過程中應用生命週期的評估，則必須面對以下兩個主要的問題：

(一)生命週期評估的結果是很難去解析的。在生命週期評估的範圍內，所能做的是決定產品的貢獻在溫室效應、酸性和其他的環境問題對於環境所留下的無法估計的影響。其原因是因爲在對於環境的影響上缺乏共通的重量或計算單位。

(二)產品的生命週期其詳盡的環境資料的收蒐集是很複雜的、昂貴的且浪費的。因此，大部份

的環境影響評估的方法通常不能被運用在設計的過程中〔8〕。

設計師希望在從事設計時能對於環境的影響先有所評估，而其判斷的準確度與可靠度則需有一較明確的指標，用以幫助目標的達成。不具指標性的評估或純粹的靠猜測來判斷，在對於減少環境衝擊的真正效果上，是會有所折扣的〔4〕。

4-2 產品回收再生原料特性與原料選擇價值性評估分析

地球的資源有限，人類不能等到地球的資源漸漸的枯竭耗盡後，才開始著手環境的保護與資源的廢棄再利用。然而由於任何的廢棄物再利用，都必須耗費掉某些物質或能源，因此在做產品的回收再生的工作時，也需要考慮其再生的效率與經濟效益。因而在產品的回收再生中，設計者必需先了解原料的特性與原料選擇價值性評估分析，才能有效地評估產品對於環境的影響〔2,16〕。

在一般常用材料的選擇方面，當相同的重量條件之下，依據環境指標關係指數評比結果，其影響環境輕重的順序爲 PE High Density (HDPE)、PP 、PE Low Density (LDPE)、PPE\PS 、PET (amorphous)、PET(bole/grade)、PP 、PPE/PS 、ABS 、PC 、PA ，PS ，依序在前者爲環境指標較低者，即此等材料對環境的影響與破壞較低。(參閱表 1)

表 1 材料環境指標關係指數雖可作爲原料選擇價值性評估依據，但若是有一較完整之價值評估系統與流程，將更有助於產品原料選擇的正確性。因此本研究探討分析了一原料選擇價值性評估流程，提供設計者於材料選擇時考慮材料價值性高低的一種合理判斷程序，以符合產品環保設計之準則與要求。

圖 3 原料選擇價值性評估流程圖主要即是以環境的需求爲材料選擇的起點，接著考量系統的需求、設計的需求、製造與花費等相關因素進行材料的初步選取，之後對初步選取的材料再針對其使用需求、環境指標、原料特性等因素進行分析，進而完成環境影響的評估，同時配合使用環境的評估軟體及參考專家的意見來幫助環境影響評估的進行並增加評估的正確性及效率。最後依據評估的結果同時進行生產效益、製造技術等方面的分析以選定材料，進而達成材料選擇價值性的合理判斷。

表 1 材料環境指標表

材料名稱	環境指標關係(mPt)
PE(HDPE)	2.9
PP	3.3
PE(LDPE)	3.8
PPE/PS	5.8
PET(amorphous)	7.1
PET(bottle/grade)	7.4
PS-High Impact (HIPS)	8.3
ABS	9.3
PA	13
PC	13
PS-rigid foam	13

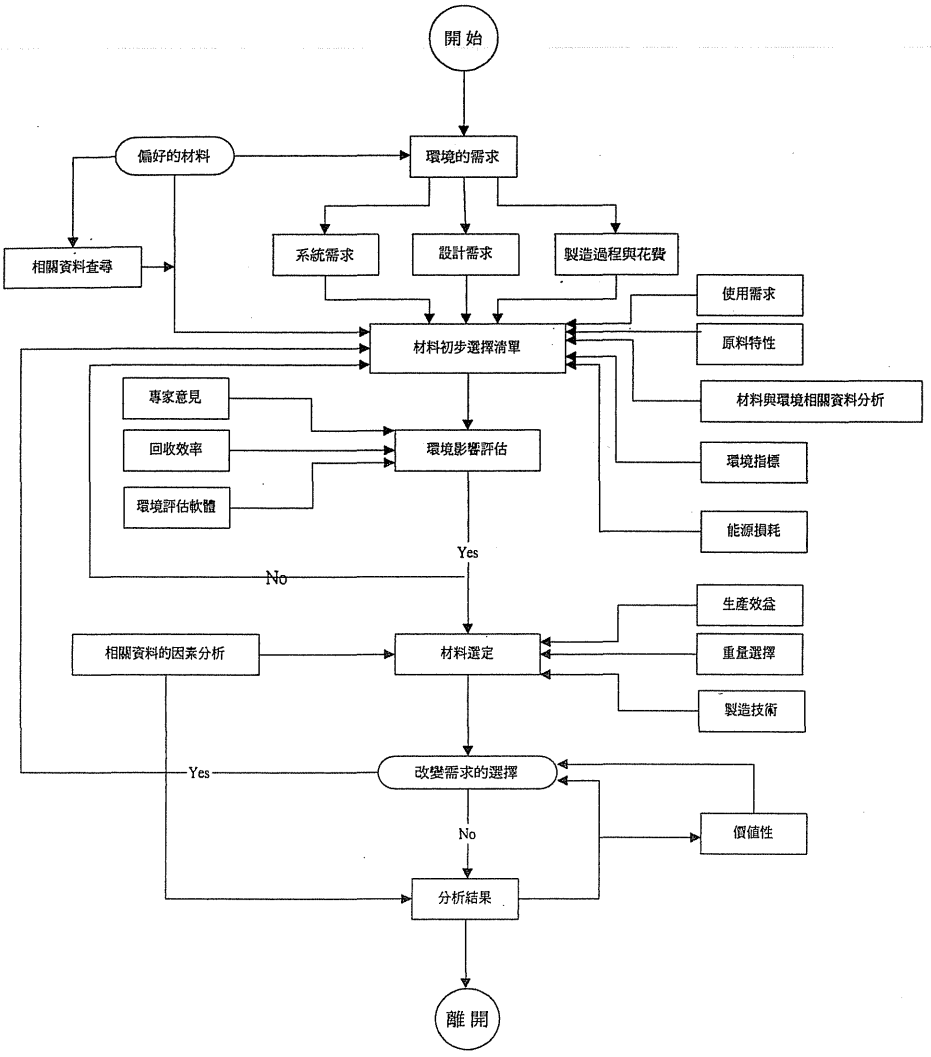

圖 3 原料選擇價值性評估流程圖

4-3 生命週期的檢核與永續性的評估模式

如前面所敘述，要設計出具符合綠色生命週期的產品，是必須反覆綠色生命週期方法(LCAs)的評估工作，在初期也就是構想發展階段來說，其最有效且最快速的方法就是以綠色生命週期各個階段的檢核表來作爲初期設計的依據〔18〕。之後，可再依據合理之生命週期評估模式及配合環境影響評估工具，以有效地達成產品環保設計之目標。

而本研究也透過相關文獻的探討與專家學者的意見提供，建立了生命週期各階段的檢核表以及產品回收再生的評估系統架構，提供綠色生命週期設計之產品回收再生特性分析路徑，進而完成了一產品回收再生之永續性評估系統模式，以做爲從事綠色產品設計及回收再生原料之選擇原則(Guidelines)的參考。(見圖 4)

在綠色生命週期的產品回收再生之永續性評估系統模式中，於產品設計之初，設計者首先應當考慮整體環境的需求，從環境、設計、及生產等方面做確實的通盤考量。而整體環境的需求分爲三個項目：系統需求、設計需求、製造過程與花費。在完成三項的個別及整體的考量後，

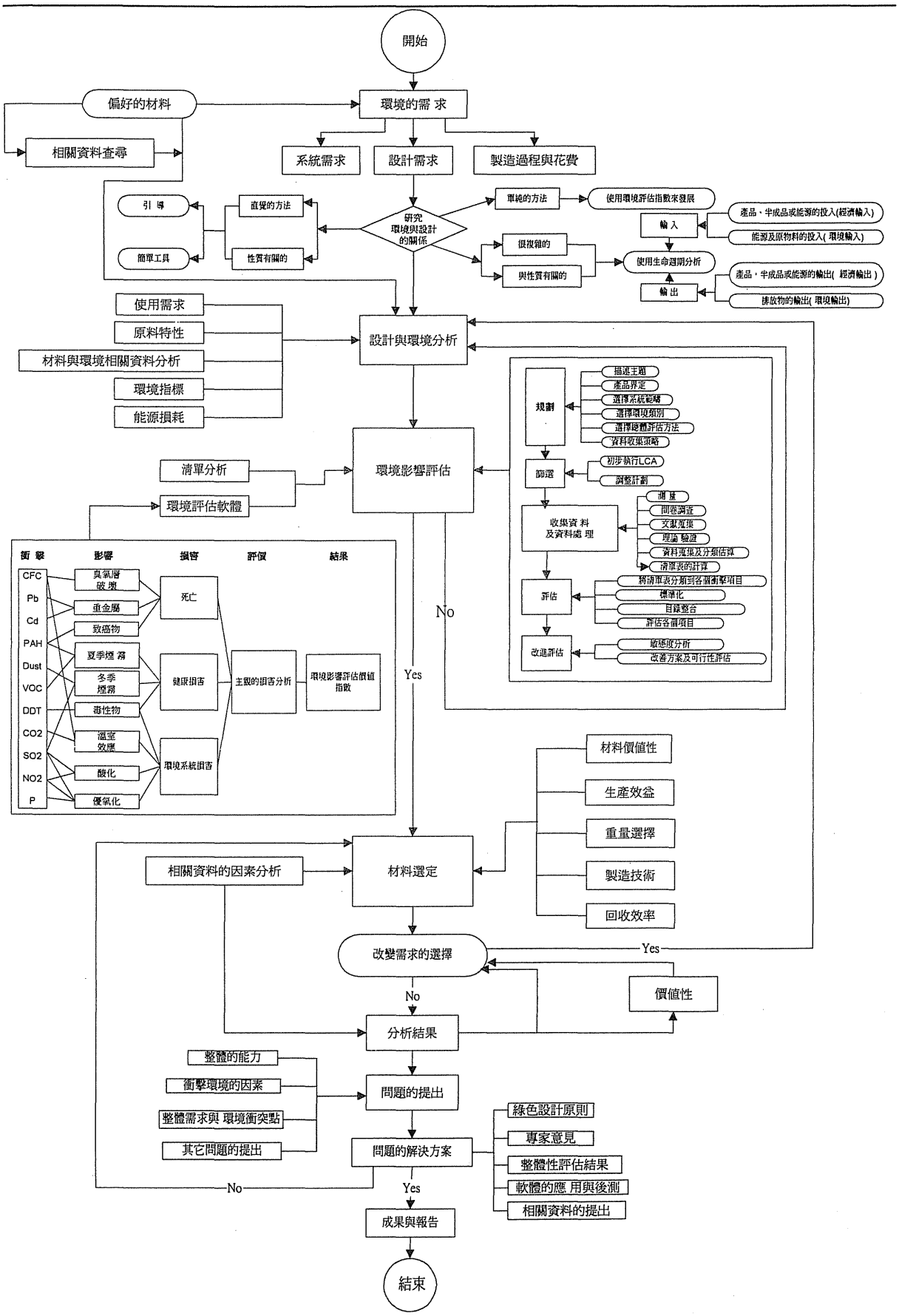

圖 4 產品回收再生之永續性評估系統模式

接著必須研究環境與設計間的關係。在這個階段凡是直接與研究性質有關的事物則可採用引導及簡單工具的方法進行探討分析，或則可使用單純的環境評估指數的方法。而對於很複雜且與性質有關的部份則可採用生命週期的分析方法〔15,9〕。

評估中確立環境與設計的關係後，接著還需要作更深入的設計與環境分析，而這與上個階段的不同之處是，前階段主要在探討環境與設計的關係程度，而後階段著重在深入討論設計對環境的影響因素，譬如使用需求、原料特性、材料與環境關係、環境指標、能源損耗等因素。經由上述幾個步驟的分析探討後，設計者可以更明確的了解到進行綠色設計時對環境的影響應注意的要點。

接著，設計者要根據所定的設計方向進行環境影響評估。這個階段主要分爲兩個部份：(一)主要以清單分析和環境評估軟體兩個項目的應用。清單分析就是按照環境影響因素所整理、規納出的參考準則清單進行評估分析。而在環境評估軟體方面主要分爲衝擊、影響、損害、評價、結果五大步驟作分析。針對環境系統的損害影響作較主觀的損害評價分析，然後推衍出環境影響的評估價值指數，以作爲分析的基礎;(二)是透過規劃、篩選、資料整理、評估、改進等五個項目，進行生命週期評估分析與調查驗證，透過研究方法完成評估方案的確立同時進行評估工作〔5〕。

評估後選出對環境影響最低的設計發展方案，同時配合材料價值性、生產效益、重量選擇、製造技術、回收效率等重要因素考量，即進行材料的選擇。在選出所欲採用的材料之後，爲了確定材料的價值性，因此必須進行分析檢測，以證實材料選擇的正確性與價值性。

接著進一步再以相關問題的探索評估，以協助設計方向的調整，而其問題考量的要點包含有整體能力的評量(設計、製造與技術等)、環境衝擊的因素、整體需求的程度等方面。有了問題發掘之後，即刻要做的工作無疑就是問題的解決。此時設計者便可依循綠色設計的原則、專家的意見、整體性的評估結果、軟體的後測、相關資料的提出等要則規納整理出問題的理想解決方案〔7〕。

經過多方面及多次反覆的產品設計與材料應用對環境影響的考量和評估，其主要目的是希望設計者能在產品設計過程中獲得不但符合設計要求且對環境的影響衝擊減至最低的設計方案。總之，在設計的過程中環境影響的評估本來就是相當繁複而且需要付出相當關心與努力的。本研究建立此一綠色生命週期中產品回收再生之永續性評估系統模式，相信能對設計者在從事產品綠色設計時能有所幫助，可提供其更具體且完整的環保設計考量。

4-4 產品實例應用說明

本研究爲了進一步瞭解綠色生命週期中產品回收再生特性以及其永續性評估系統模式的應用可行性，而作了產品實例應用與說明。研究中提出了一個咖啡機，針對其生命週期及其原料回收再生特性指數進行分析，從中以瞭解產品材料和製造程序的環境影響指標指數在產品環保設計的重要性。在分析中清楚的發現咖啡機的問題所在，是在於所使用的濾紙和電能使用有過度消耗現象，這表示設計者理應重新考慮減少濾紙使用數量以及電能使用的方式，且需試著在設計上找出替代的解決方案，並從環境影響的觀點來分析證實所替代的是較爲合宜的。

在產品實例分析過程中爲幫助瞭解咖啡機整個生命週期的關係要素，特研討咖啡機的材料使用及製程樹狀關係圖，其中方塊面積代表過程中使用程度重要性關係(見圖 5)。這使用程度

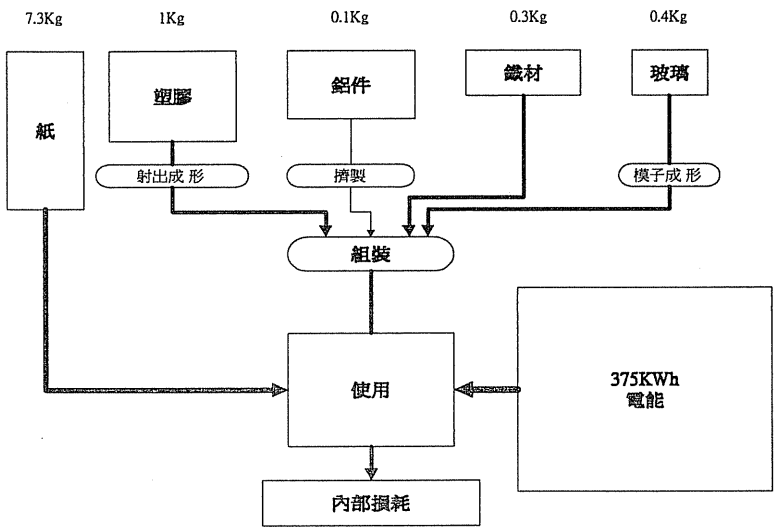

圖 5 咖啡機使用關係重要性過程樹狀圖

關係樹狀圖說明了設計師在進行產品綠色設計時只要列出產品生命週期中原料使用量、能源消耗量以及製造程序與方式，然後再將這些量乘上環境影響指數單位，便可得知各部對環境所造成的影響程度。

當咖啡機開始進行產品回收再生特性分析時，首先需從原先建立的生命週期各階段之通用檢核表中，淬取出符合咖啡機該項產品特性的檢核項目並發掘問題，做爲咖啡機初期設計的綠色生命週期各階段的檢核標準。之後將咖啡機分爲幾個方面作材料的評選：包括外殼、玻璃瓶、鋁豎管、加熱盤等幾個主要部份作材料的特性分析和評選。同時分別針對製造程序與方法作深入探討分析，以作爲後續產品綠色生命週期設計之回收再生材料選擇之參考和依循。

在針對一般咖啡機材料應用之特性分析瞭解後，並經由咖啡機產品生命週期各重要階段之環境影響檢核和評估，依據材料特性及環境需求等因素，得知了咖啡機回收再生材料所應具有之特性。此後再藉由電腦輔助產品之環境評估工具應用 Simapro ，透過內部資料庫的查詢，建立相同特性材料的比較選擇原則，最後依據整理所得之材料環境影響評估指數，作爲產品綠色生命週期設計之回收再生材料選擇依據。

一般咖啡機的產品生命週期各階段所評估的項目包括有：

一、原料：(1)金屬；(2)塑膠；(3)橡膠與彈性物；(4)其他

二、加工：(1)鋁；(2)塑膠；(3)鋼

三、能源：(1)電力；(2)加熱；(3)用機械的

四、運輸：(1)空運；(2)火車運輸；(3)道路運輸；(4)水運

而本研究爲要得知咖啡機產品綠色生命週期設計中回收再生材料應用之標準和依循，特別針對咖啡機原料部份進行探討分析。在經由環境評估 Simapro 內部資料庫的查詢與分析結果，整理出了回收再生材料於選擇時所需之相同材料特性的其他比較要項以及環境影響評估指數，分別歸類並敘述如下：

(1)金屬：從以下的表格中顯示了咖啡壺所需之屬性相同的金屬原料之環境指數，此使得設計師能從中選取比較符合環保條件的金屬原料。

(2)塑膠：塑膠原料是咖啡壺組件的主要原料而且種類繁多，因此以獨立表格做列示可以很清

表 2 金屬環境指標

名稱	單位	mPt（環境指標）
鋁	kg	18
鋁（爲次要的）	kg	1.8
銅（佔主要的 60%）	kg	60
銅（爲主要的）	kg	85
銅（爲次要的）	kg	23
鋼	kg	4.1
鋼（爲次要的）	kg	1.3
鋼（爲包覆用的）	kg	4.3
鋼（未用過的）	kg	17

表 3 塑膠環境指標

名稱	單位	mPt（環境指標）
ABS	kg	9.3
PA	kg	13
PC	kg	13
PE High Density(HDPE)	kg	2.9
PE Low Density(LDPE)	kg	3.8
PET,(無定形的)	kg	7.1
PET,瓶類	kg	7.4
PP	kg	3.3
PPE/PS	kg	5.8
PS, High Impact(HIPS)	kg	8.3
PS, rigid foam	kg	13
PUR, energy absorbing	kg	8.7
PUR, flexible foam	kg	5.9
PUR, rigid foam	kg	8.4
PUR, semi-rigid foam	kg	6.9
PVC	kg	4.2
PVCD	kg	9.1

楚的瞭解其環保特性。

(3)橡膠與彈性物：橡膠等彈性物在咖啡壺中雖然用量少，但是它是防漏密封而不可或缺的材料，一般其使用的地方相當多，以下列出原料及半成品的綜合比較。

表 4 橡膠與彈性物環境指標

名稱	單位	mPt（環境指標）
EPDM 產品	kg	4.1
自然橡膠產品	kg	4.3
自然橡膠原料	kg	1.5

(4)其他：以下所列之原料爲選擇性較少且非主要組件，其兩兩相比可以很容易選取出所需之理想原料。

經由實例咖啡機生命週期的回收再生材料之評估分析，可以瞭解到整個分析的過程和方法。透過所建立的永續性評估模式進行產品回收再生原料之特性分析，以及產品原料選擇之價值性評估，並參照標準化之環境影響指數，進而提供該產品回收再生原料之選擇原則，以作爲

表 5 其他原料環境指標

名稱	單位	mPt（環境指標）
木板，硬紙板	kg	14
木板，纖維素	kg	3.4
陶瓷	kg	0.47
玻璃	kg	2.1
玻璃，羊毛，纖維	kg	2.1
紙	kg	3.3
紙，再利用	kg	1.5
振動羊毛	kg	4.3
木材	kg	0.74

咖啡機綠色產品設計上之參考依據。

4-5 產品綠色設計之評估分析

而爲了證實這些參考依據是否達到產品環保設計的目標與要求，本研究進一步針對現今咖啡機所使用的原料部份，也模擬設計出同樣爲十杯裝的保溫型（ Model Pro ）咖啡機之產品條件來與傳統型（ Model Sima ）咖啡機做比較分析（參見表 6 ）。其比較方法乃根據咖啡機綠色生命週期的五個重要階段分別作環境影響評估，並以對照方式作判別，其整個架構步驟如圖 6 所示。其中將產品生命週期各重要階段的分析結果個別分開，爲要便利設計時的修正，以達到環境影響最理想狀態。

咖啡機綠色生命週期的環境影響評估可分爲組成物(Assembly)、生命週期部份輸入(Life cycle)、處置程序(Disposal scenario)、拆解部份(Disassembly)、再使用部份(Reuse)等五個重要階段，進行環境影響指數的分析比較。而各階段皆以表 6 模擬案例輸入資料的 Sima 及 Pro 兩種模式來進行分析比較，並分別敘述如下：

表 6 模擬案例輸入資料分析比較

model sima		model pro	
1.0 kg	PS(聚苯乙烯)	0.2 kg	PP(聚丙烯)
0.3 kg	鋼	0.3 kg	PS(聚苯乙烯)
0.1 kg	鋁	1.0 kg	鋁
0.4 kg	玻璃	0.25 kg	玻璃
375kWh	電力(使用期間)	250kWh	電力(使用期間)
特徵：10 杯，慣例的型式		特徵：10 杯，保溫罐	

1.組成物(Assembly)分析：

將產品的組成物資料輸入，除了可以瞭解設計產品上的組成資料，也可以藉由軟體的應用來分析物質組成及使用程序中的能量，其資料輸入運算結果如圖 7 所示，使原料與製程輸入分析時讀取了咖啡機的基本資料。

在圖中，縱軸的 Pt 即環境影響指數，橫軸則 Sima 及 Pro 兩個不同成份組成的例子。在圖中透過兩個不同組成物來比較兩者之間的環境影響指數，其環境影響指標包含著溫室效應、臭

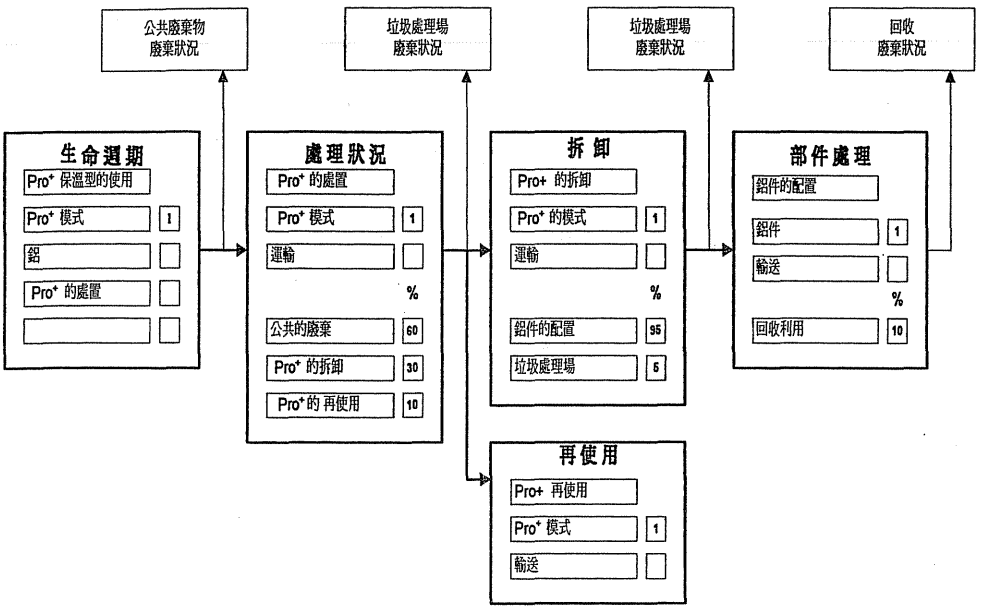

圖 6 保溫型咖啡機之回收再生部份分析圖

氧層破壞、酸化、優氧化、重金屬污染、致癌物、冬季煙霧、夏季煙霧、毒性物、能源損耗、固體廢棄物等幾個部份環境影響指數的累加。在圖中可清楚看出 Sima 部份的環境影響指數比 Pro 的部份低，這即代表在組成物的部份對環境的污染 Sima 比 Pro 較低。

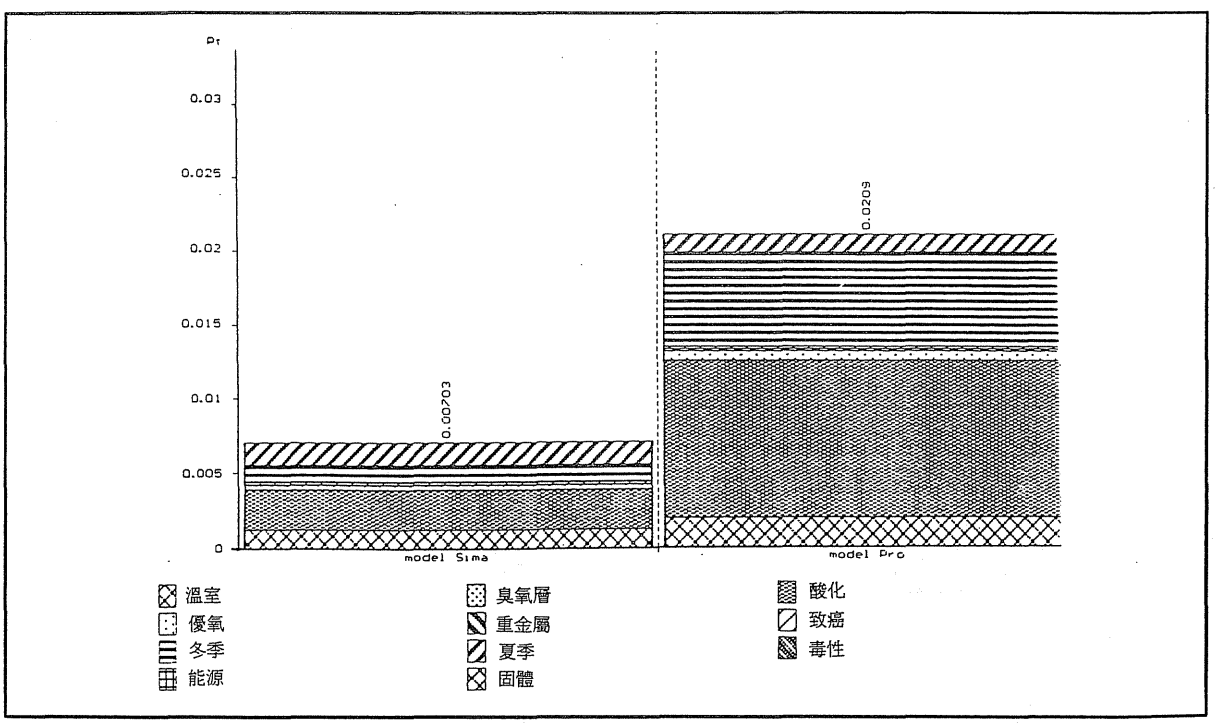

圖 7 組成物分析的環境影響指數比較

2.生命週期部份輸入(Life cycle)分析：

此部份乃指經設計後的成品，從使用到丟棄的整個產品生命週期之間，所使用的搬運、耗

用附屬使用產品及能源等要素。在此咖啡機案例中，使用階段所需要的處理有咖啡機所耗的電能、成品的運輸、使用時的附屬產品耗損如濾網等。在圖 8 顯示縱軸的 Pt 即環境影響指數，橫軸即 Sima 及 Pro 兩個不同的成份組成例子。在圖中透過生命週期的分析，從兩個不同組成物來比較兩者之間的環境影響指數。圖中可看出 Sima 部份的環境影響指數比 Pro 的部份高，即代表在生命週期的部份 Sima 比 Pro 對環境的污染較高。

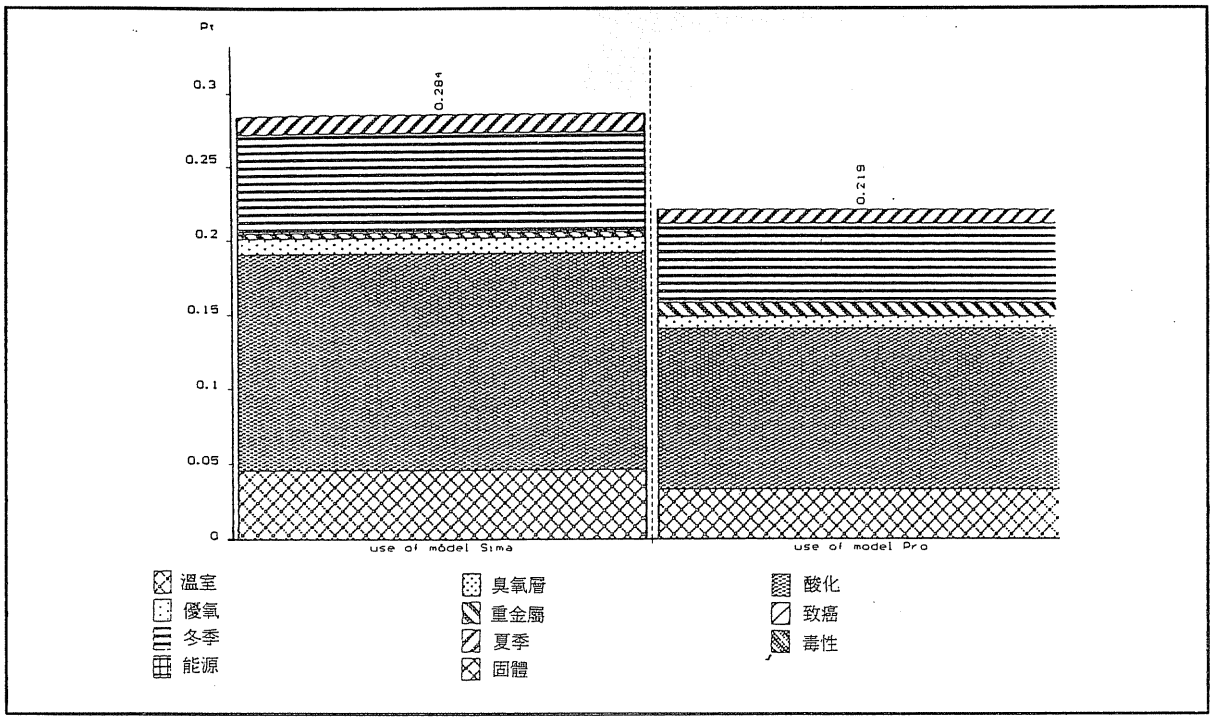

圖 8 生命週期部份的環境影響指數比較

3.處置程序(Disposal scenario)分析：

包括廢棄物的載運以及按廢棄物材質的不同，予以分類後再個別處理，其環境影響之比較可參見圖 9 。以咖啡壺來說，從保溫型的咖啡機(pro)例子可得知，是呈現由棄置點至處置場之間的轉運與經分類拆解後的鋁材回收(30%)、部份材料的再使用(10%)、而其餘直接棄置的部份佔 60%的比例。(參見圖 9)

從圖中，縱軸的 Pt 即環境影響指數，橫軸即鋁件及 Pro+兩個不同成份的組成例子。圖中透過處理程序的分析，比較兩者之間對環境影響的指數。於圖中可看出鋁件部份的環境影響指數比 Pro+的部份低，即代表在處理程序中鋁件的部份比 Pro+對環境的污染較低。而圖中負值的部份代表經回收後對環境衝擊產生正面的影響。

4.拆解部份(Disassembly)分析：

在經由第三步驟工作處理之後，接續還必須完成細部拆解工作，而其對環境衝擊的影響比較可參見圖 10 。從圖 6 了解到，咖啡機欲回收部份的拆解工作以及二次材料的轉運，會區分出可再利用(95%)及不符使用(5%)的比例；譬如咖啡機的鋁材回收，便會訂定出部份可再次使用，以及部份卻要丟棄無法使用的比例。

在圖中，縱軸的 Pt 即環境影響指數，橫軸即 Pro+的成份組成，因爲拆解部份只有 Pro+進

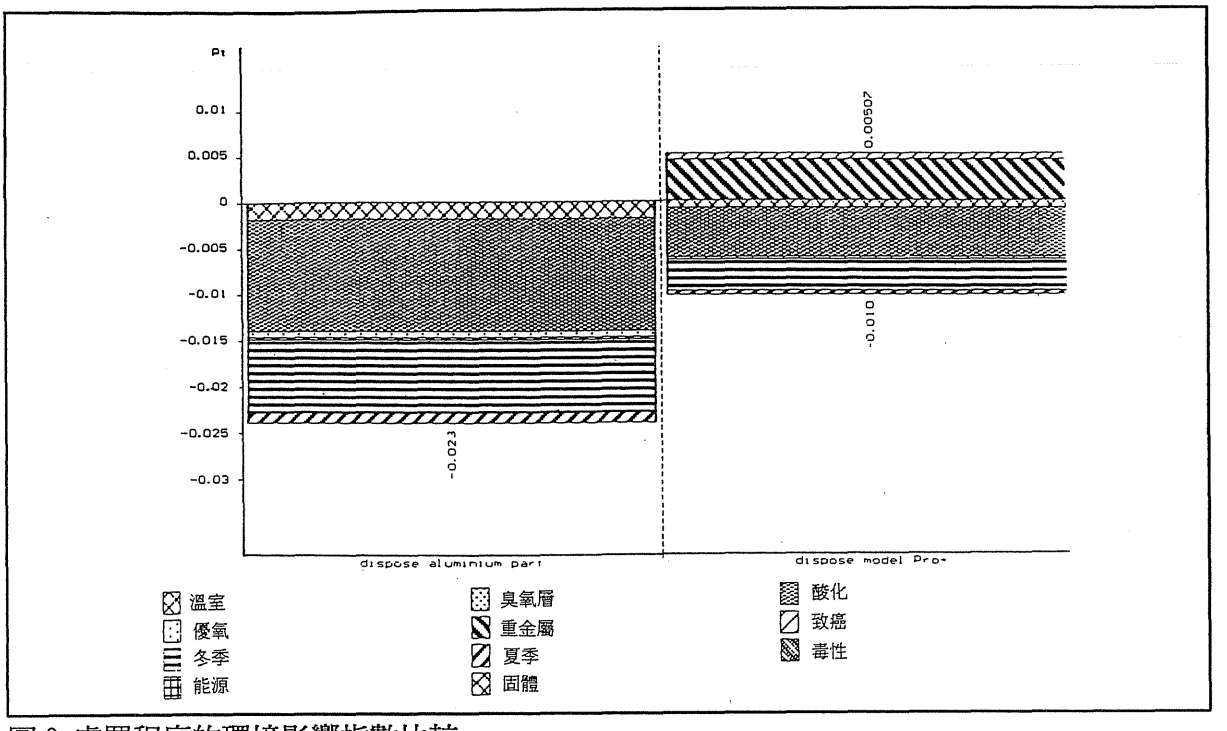

圖 9 處置程序的環境影響指數比較

行回收再生的拆解工作，所以圖中出現的只有 Pro+的環境影響指數。在圖中可看出 Pro+部份對環境影響指數爲負值的部份遠大於正值的部份，即代表在此部份，回收對環境所造成的正面影響遠大於所帶來的污染。(在圖中負值的部份代表經回收後對環境產生正面的影響，因此對環境污染的影響指數變爲負值)。

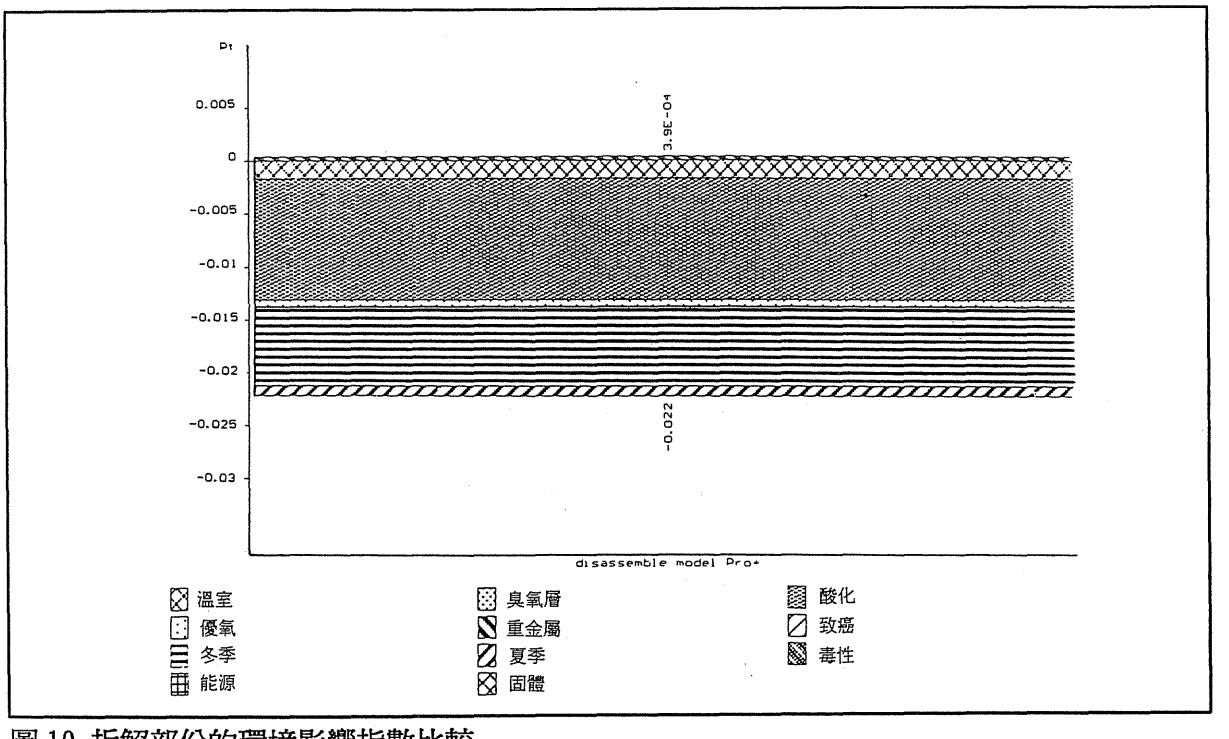

圖 10 拆解部份的環境影響指數比較

5.再使用部份（ Reuse ）分析：

再使用的部份是由 Disposal scenario 所定義的。當廢棄的產品被拆解時，分離出可直接再次使用的部份，是綠色設計重要的程序之一。有良好的回收再利用途徑，才能有效的減少地球資源／能源因過度使用而面臨耗竭。此部份主要的工作是要確實的利用再回收材料部份。咖啡機在此階段的工作內容是列出從棄置場到再利用廠的運送距離與運送所耗的燃料轉換造成對環境污染的數值。在咖啡機的週期中，有了此一步驟，可使鋁材重複的使用，以減少此產品長期以來對環境的衝擊。（參見圖 11 ）

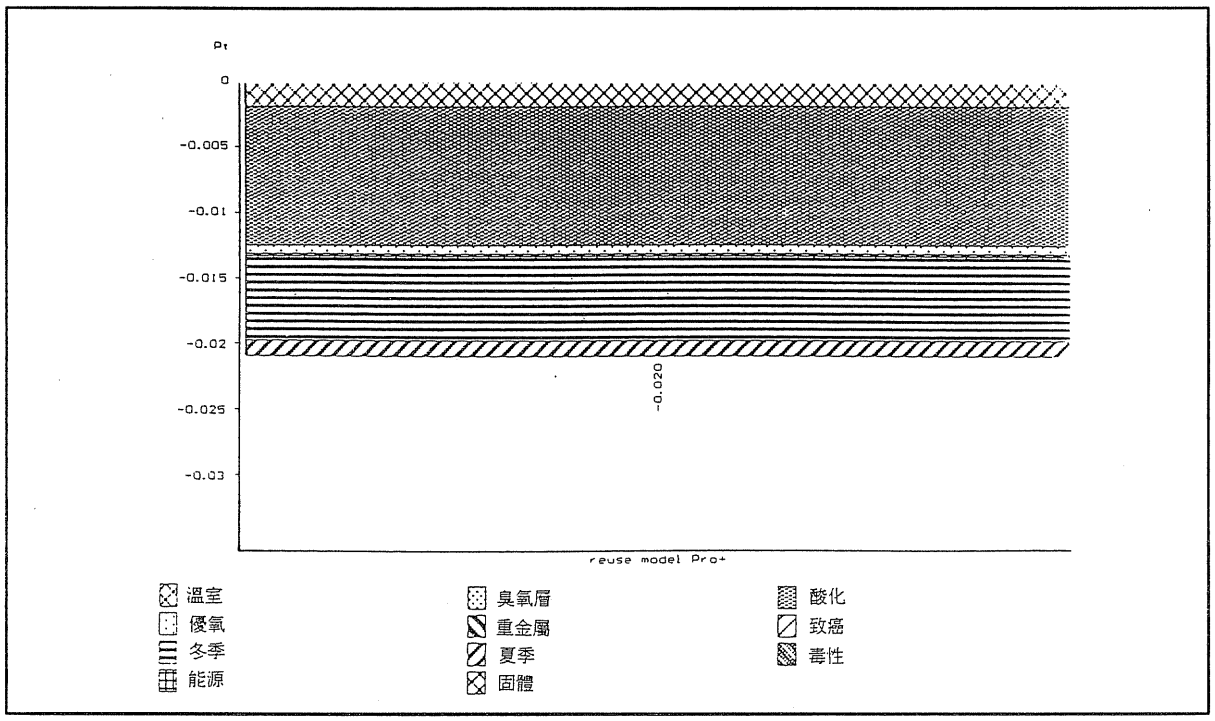

圖 11 再使用部份的環境影響指數比較

在圖中，縱軸的 Pt 即環境影響指數，橫軸即 Pro+的成份組成，因爲這部份只有 Pro+進行回收再生再使用，所以圖中出現的只有 Pro+的環境影響指數。在圖中可看出 Pro+部份對環境影響指數儘有負值的部份，即代表在環境的污染上，回收再使用對環境所造成的儘有正面影響而未帶來污染。(在圖中負值的部份，代表經回收後對環境產生正面的影響，因此對環境污染的影響指數變爲負值)。

對於產品回收再生特性的分析架構，以咖啡機(pro)爲例，其可回收再生的(pro+)部份之簡要架構描述，可以從圖 6 中了解。並且經過了圖表的分析說明，可以容易的瞭解到回收再利用的架構，同時其數值比較分析結果，亦可由柱狀圖明白地簡易表示出來。其輸出的結果是以生命週期各重要階段爲單位，分別列出 Assembly 、 Life Cycle 、 Disposal Scenario 、 Disassembly 與 Reuse 之分析數據與圖形面積分佈。其主要原因在於，分析一產品生命週期各階段對環境所產生的衝擊輕重都各不相同，譬如以傳統型咖啡機(Sima)與保溫型咖啡機(Pro)的 Assembly 與 Life Cycle 二階段爲例，在組成份(Assembly)分析階段， Pro 的衝擊大於 Sima 的衝擊量(見圖 7) ，但以生命週期(Life Cycle)的環境影響分析中，卻以 Sima 佔的污染量較

多(見圖 8)。據分析結果顯示，因保溫型的咖啡機(Pro)有進行回收的工作(環境指標 0.2399 = 0.0209 + 0.219)，而傳統型的(Sima)卻完全棄置(環境指標 0.29134 = 0.00703 + 0.284)，所以明顯地知道保溫型的咖啡機較傳統型的要更符合環保的條件；這也同時證明了本研究產品生命週期之回收再生永續性評估模式的可行性。

五、結論與建議

本研究的主要目的，在於探討綠色生命週期設計的產品回收再生特性之永續性評估模式，透過實例的探討分析評估模式中彼此間之關係，使綠色生命週期設計的產品回收再生特性之永續性評估模式的適用性與否得到了印證。經由研究分析結果發現，產品因其特性的差異而有不同的分析方法與過程，因此要導引出適用於多數產品的綠色設計評估模式，深入探討產品綠色生命週期與產品原料回收再生特性是極爲重要且是必須的課題。

透過 Simapro3.0 環境指標軟體的應用，進行產品整個生命週期的分析，從生產的原料、製程、使用階段的附屬用品、使用消耗的能量，一直到回收再生或棄置一系列的生命週期皆有詳細的分析。然而由於其內建的運算公式及可變因子太多，以至於在進行分析時會出現如因環境的變動，造成內建值無法依當時需要而獲得適當修改的狀況。但是其所得之結果，的確可作爲進行綠色產品設計時，在對環境污染的考量方面提供必要的參考。在使用時，可針對同一種產品做出多種不同的設計方案，進行分析評估，最終可獲得一種最適合、最無害的綠色設計方法。

針對本研究過程中所得之研究結果與心得，提供了業界設計師從事綠色產品設計開發以及相關研究人員的重要參考依據，同時也建議了未來後續可行的綠色設計及研究方向：

1. 以往設計師與相關專業人員從事綠色設計時都只是依照粗略的綠色設計原則來執行，較缺乏有力的根據與證明，而本研究以電腦輔助軟體 Simapro 來分析綠色生命週期各階段的影響，提供了較客觀且正確的分析資料，以作爲設計最終階段之環保特性的成果檢測，此種綠色設計方法是值得重視並採用的。
2. 透過永續性評估模式的建立將能有效提供設計師及各種專業人員對綠色產品生命週期設計的全盤瞭解，此有助於產生系統性思考的觀念，以此爲基礎更可廣泛地運用於產業的綠色設計研究發展，而有利於設計決策之判定。
3. 綠色設計所含蓋的相關範圍相當廣泛，從材料的選擇、綠色產品的設計、以至包裝與運輸等種種的考量均是，而本研究僅從綠色生命週期的角度來探討產品回收再生特性之永續性評估模式進行研究，故建議將來有興趣從事此一方面研究的研究者可針對本研究未涵蓋的部份，如運輸包裝、能源使用、工業減廢以及回收再生工程等方面進行專題研究，這將有助於產品綠化的落實及腳步。

本研究重點較偏重在綠色生命週期之永續性的評估模式上，在實例應用部份只以條件模擬的方式做應用分析說明，其完整性及說服力較不足些，因此後續將以本研究爲一基礎，並尋求與廠商合作，將本研究成果做更有效的實務產品綠色設計應用。

誌謝

感謝國科會提供專題研究計畫經費補助，以及陳振甫老師和徐福麟、吳聰林研究生的協助與參與，此計畫方能順利完成並發表。國科會專題研究計畫經費補助編號： NSC 86-2213-E-212-008 。

參考文獻

1. 王鴻祥， 1993 ，"工業設計的生態觀"，《工業設計第八十期》 ，PP.15-21 。
2. 石樹勳， 1991 ，"當前廢棄物回收處理之對策"，《 Living Environment Protection magazine 》 ，PP.66-76 。
3. 杜瑞澤， 1994 ，"產品環保設計之整合系統研究"，《大葉學報第三卷第一期》 ，PP.103-115 。
4. 杜瑞澤， 1995 ，"綠色設計資源回收系統之研究"，《工業設計第 92 期》 ，PP.10-18 。
5. 杜瑞澤、陳振甫， 1997 ，"產品回收再生之評估模式研究"，《 86 年技術與教學研討會論文集》 ，PP.135-144 。
6. 官政能、陳源德， 1993 ，"綠色環保觀念於產品開發之策略研究"，《 82 年工業設計技術及學術研討會論文集》 ，PP.12-14 。
7. 陳振甫， 1995 ，"綠色設計之迷思與綠色生命週期分析之探討"，《工業設計第九十期》，PP.15-16 。
8. 曾漢壽， 1992 ，"以環保爲觀點之包裝設計"，《產品設計與包裝第五十四期》 ，P.52 。
9. 鄭源錦等編， 1995 ，《綠色設計》 ，經濟部工業局， PP.83-104 。
10. Baumann, H., Karisson, R., Tillman, A. M., Svensson, T. and Wolff, R., 1994, "Environmental Consequences of Products - A pilot study on methodology for LCA Inventory and the role of LCA indecision making", AFR-report 28, The Swedish Waste Research Council, Stockholm, Sweden.
11. Bor, A. M. and Brouwer, J., 1995, "Design for Recycling European Design Center", Ltd., Eindhoven.
12. Borsboom, J., 1991 ，"環保對設計的影響"，《贏的策略第十四期》 ，PP.2-7 。
13. Bret, H. S., 1996, ， ccessing Ecodesign, Materials & Processes¡, Innovation Spring, PP.36-38.
14. Brouwer, J., 1995, "Material and the environment", European Design Center, Ltd., Eindhoven.
15. Burall, P., 1993, ？ ow to be green¡, Design, PP.22-23.
16. Chen, R. W., 1995, "In Selection---An Approach for Material Selection that Integrates", Mechanical Design and Life Cycle Environmental Burdens, IEEE, PP.68-74.
17. Deborah, L., 1995, "Uses of Tool in the Design for the Environmental", Innovative, IEEE, PP.113-117.
18. Dillon, P. S., 1994, "Salvageability by design", IEEE SPECTRUM, PP.18-21.

19. Goedkoop, M., 1994, "Life-cycle Analysis for Designers", European Design Center, Ltd., Eindhoven.
20. Karisson, R., 1994, "LCA as a guide for the improvement of recycling, recycling, Proceedings of European workshop on allocation in LCA", CML, Leiden 24-25 February, SETAC-Europe, Brussels, Belgium.
21. Kassahun, B., 1995, "Green design tool", IEEE, PP.118-119.
22. Mackenzie, D., 1991, "Green Design", Laurence King Ltd., PP.68-80.
23. Philip, W., 1996, "Accessing Ecodesign, Materials & Processes", Innovation, PP.32-35.
24. Ryding, S. O., Steen, B., Svensson, G., Karisson, L., Karisson, R., Neven, C. O. and Westerlund, G., 1994, "The EPS System - A Joint Scientific and Industrial Effort to Develop an Sustainability Based Managerial Tool for Life-Cycle Design of Products", Int. conf. on EcoBalance Oct. 25-27 Tsukuba, Japan.
25. Tillman, A. M., Baumann, H., Ekvall, T. and Rydberg, T., 1994, "Choice of System Boundaries in Life-cycle Assessment", J. Cleaner Production Vol2, 1, PP.21-30.
26. Tom Borsboom，1992，"綠色設計的影響"，《設計趨勢第十四期》，PP.3-7。

A Study of Sustainability Assessment Model for the Characteristics of Recycling Materials in the Life Cycle Design

Jui-Che Tu* Jen-Fu Chen**

* Graduate School of Industrial Design, Da Yeh University
** Department of Industrial Design, Mingchi Institute of Technology

(Date Received : December 18,1997 ; Date Accepted : May 30,1998)

Abstract

This study develops a sustainability assessment model for the characteristics of product recycling materials from the life cycle design point of view. According to the concept of sustainability, the goal of recycling is to maintain a long-term supply for the resources needed in the future. However, after the natural resources run through conversion or manufacturing process, their nature might be destroyed. Then the recycling of those materials perhaps affect environmental load and product quality. If the potential influence of materials and the method of green design of products could be taken into account on the early stage of product development, the effectiveness of recycling material will be highly increased. The methodology and procedure of this study begins with important literature review about the life cycle design and then plan the developing structure of assessment model. In addition the characteristics and the value of selection of recycling materials are analyzed by the computer-aided environmental assessment tool named "Simapro 3", assessment forms and referring guidelines on different stages of life cycle. Furthermore, the study evaluates the possibility of establishing an assessment model by consulting experts and scholars. It also establishes the guidelines for selection of recycling materials and a sustainability assessment model in life cycle design of products. At the end of study, it illustrates the application of this established assessment model and evaluate its developing potential.

Keywords: Life cycle design; Recycling; Green design; Product development; Sustainability assessment model