

廢棄電子產品逆物流網路模式設計

廖彩雲

國立嘉義大學行銷與運籌學系

副教授

tyliao@mail.ncyu.edu.tw

阮政陽

國立嘉義大學行銷與運籌研究所

碩士

s1001219@mail.ncyu.edu.tw

摘要

本研究以電子廢棄物 (electronic waste, e-waste) 回收後並再生處理作為考量，設計一成本最小化之電子廢棄物逆物流網路模式，以求解電子廢棄物逆物流網路中，拆解處理中心、回收中心、維修中心、及再製工廠之設施區位選擇，與再生產品之最適數量規劃，以達成廢棄物減量及保護自然資源之目標。此模式為一混合整數規劃模式 (Mixed Integer Programming, MIP)。其逆物流網路階層分為收集中心 (collection center)、拆解處理中心 (disassembly center)、回收中心 (recycling center)、維修中心 (repairing center)、焚化廠 (含垃圾掩埋場) (disposal sites)、再製工廠 (assembly factory)、主要市場 (primary market) 及二手市場 (secondary market) 等。此模式，針對不同產業之處理流程，調整相關階層及參數，並轉換成合適的逆物流供應鏈網路架構，達成資源回收與再利用之妥善規劃。

關鍵詞：逆物流網路、電子廢棄物、混合整數規劃

Abstract

This research develops a mixed integer programming (MIP) to solve the optimal design of reverse logistics for e-waste. The objective of the model is to minimize the total operation cost considering variety of resource recovery, multi-echelon, and demand. The reverse logistics network comprised of collection centers, disassembly centers, recycling centers, repairing centers, disposal sites, assembly factories, primary markets and secondary markets. The total cost includes facility cost, recovery cost, processing cost, remanufacturing cost, and transportation cost. Numerical experiments are conducted to illustrate the model capability for reverse logistics. The proposed model could also

assist in determining the facility location, route and flow of different varieties of recyclable products in the multi-product, multi-echelon and multi-facility decision making framework through proper parameter settings.

Keywords: Reverse logistics network, Electronic waste, Mixed integer programming.

1. 前言

隨著經濟快速的發展及科技的進步，電子電器及資訊產品逐漸成為人民生活必需品，根據財政部關務署 100 年關務年報顯示台灣主要出口貨物價值最高為電機、電子產品；次之為積體電路及微組件。而高科技產品的日新月異，除了帶給人們生活上的便利，卻也造成了許多負面的影響。例如：產品快速的淘汰使得大量的電子廢棄物 (electronic-waste) 產生而造成生活環境被破壞、產品可回收再利用卻未妥善處理而造成資源浪費等。

面對此議題，各國政府開始對電子產品進行立法，來落實電子廢棄物資源回收，如 1992 年的巴塞爾公約 (Basel Convention)、廢電機電子設備指令 (Waste Electrical and Electronic Equipment, WEEE)、危害物質禁用指令 (RoHS)、及能源使用產品生態化設計指令 (Energy-using Products, EUP) 等三大歐盟環保指令及美國制定的電子產品環境評估工具 (The Electronic Product Environmental Assessment Tool, EPEAT) 等。

鑑於上述國際間之法律、條款約束，「綠色」兩字之思維遂逐漸成為企業、政府或者是個人日漸關注的議題，因此，逆物流已普遍受到重視。根據美國物流管理協會 (Council of Logistics Management, CLM) 以廣義觀點說明逆物流為「產源減量、再生、替代、物料再利用、及廢棄物清理等方法進行物流相關活動，在物流程中扮演物品再生、廢棄物清理及有

害物質管理的角色」。全球對於廢棄物的處理概念由妥善處理之方式，轉變成為減少廢棄物的產生、並將有用的廢棄物資源回收在利用後，再生成為新的綠色產品以降低汙染，達到保護環境之目的。

台灣行政院環保署自 1998 年起即推動了廢電子電器（廢電視、冰箱、冷暖氣機、洗衣機）及廢資訊物品（主機、監視器、筆記型電腦、印表機及鍵盤等）之回收工作。更於 2011 年 1 月 4 日公布「應設置資源回收設施之電子電器物品販賣業者範圍、設施設置、規格及其他應遵行事項」，來落實指定的電子電器物品販賣業者之回收責任，並加以管控廢棄後產品之流向，意旨業者社會責任之落實，將回收產品處理的責任轉移至生產者之概念 [1]。

依循上述所提出之企業社會責任之落實以及逆物流概念的重要性，逆物流網路的設計好壞將成為企業競爭的關鍵 [4]。企業不僅需設計並開發新的綠色產品以符合國際間之法規，亦需考慮產品的回收及監控管理。因此本研究擬設計一電子廢棄物逆物流模式，並思考相關再生產品所需之項目，另外考量相關利潤之面向，以符合實務上逆物流之總成本，期盼達成資源回收再利用及保護環境之目標。

2. 文獻回顧

2.1 電子廢棄物之回收與再利用問題現況

基於世界對於電子廢棄物議題的重視，各國對於產品回收與再利用逐漸開始立法以及頒布資源回收之相關計劃。

歐盟於 2006 年實施「限用特定危害物質於電機電子設備指令」，強制規定各會員國須在 2006 年 7 月完成立法禁用六種有害物質，要求停止使用含有重金屬鉛、鎘、汞、六價鉻及溴化耐燃劑 PBBs 與 PBDEs 等六種化學物質的電子產品。而於同年通過的「廢電機電子設備指令」是針對十大類廢電機電子產品，規定製造商需負責報廢資訊、電子及家電產品的回收責任，建立回收體系，並達成法定一定的回收率 55% 至 75%，並要求至 2006 年 12 月，每年每人回收達四公斤之目標。第三個環保指令「能源使用產品生態化設計指令」則為歐盟為達到向生產者推廣「整合性產品政策」(Integrate Product Policy) 之訴求而提出的法令架構。歐盟鼓勵生產者在他們的整個產品生命週期對環境的衝擊設計產品，以提升能源使用

產品之環境績效為主。

而我國監察院於民國 99 年出刊之「資訊廢棄物減量、處理與再利用專案調查研究報告」[5] 中提及許多國外與我國關於廢棄電子電器與資訊物品之資訊。其中，日本依「資源有效利用促進法」規範生產者及輸入業者對自行製造或輸入之電腦製品，有將其回收、再資源化之責任，製造業者須設置回收據點進行回收工作。2001 年 1 月全面實施「循環型社會形成促進基本法」，依該法之精神，對於廢棄物處理之優先順序訂為減量、再使用、再生利用、能源回收、適當處理。韓國自 2002 年實施廢棄物再利用責任制，其採用三種方式回收和處理廢棄物，生產單位自行回收和處理廢棄物，自行負擔回收處理費用；生產單位將回收和處理廢棄物交由回收處理廢棄物的合作社負責；生產單位與廢棄物再利用機構簽訂合約，按廢棄物的重量繳納處理費，並由再利用機構負責廢棄物的回收和處理。

我國自 77 年修正廢棄物清理法之前，一般廢棄物之回收方式是完全藉由自由經濟市場運作，直至 86 年再次修正廢清法後，才以法令方式強制要求列管之物品或容器需相關業者負責進行回收及推動相關工作。環保署亦於 86 年 1 月制訂了資源回收四合一制度，內容主要是透過整合過去各地方政府各自其政的資源回收方式，改變為推動由「社區民眾」透過家戶垃圾分類，將各類自家戶產出之小型資源垃圾，結合「地方政府清潔隊」將資源垃圾與一般垃圾分開收集清運以及變賣後之所得依一定比例回饋參與之單位及人員、鼓勵民間企業發展並向民眾、社區及清潔隊收購資源物質之「回收商」及督導責任業者繳交回收清除處理費、運用獎助及補貼機制而成立「回收基金」之力量予以回收再利用。透過此四者合一，建立完整回收網路，確保資源垃圾確實回收再利用或妥善處理，並使參與民眾、清潔隊及回收商獲得合理利潤或獎勵，以確保回收體系之完整循環。

另外，環保署於 87 年 2 月 27 日公告「廢資訊物品不易清除、處理及長期不易腐化成分之一般廢棄物」，內容主要包括筆記型電腦、主機板、硬式磁碟機、電源器、機殼及監視器等六項應回收清除、處理之廢資訊物品。並公告業者自 87 年 6 月 1 日起開始回收清除處理廢資訊物品 [3]。而根據環保署基管會所出版之「2007 年資源回收管理基金管理委員會年鑑」指出：廢資訊物品回收處理量每年達 200 萬件

以上。而國內核可的廢資訊物品處理機構已有13家14廠，在回收處理技術方面，已經可將廢電腦的95%以上的零組件都回收再利用，使資源可確實回收再利用獲妥善處理 [2]。

2.2 逆向物流之網路設計

逆向物流之問題有別於傳統的物流配送，根據謝佳蓉 [6] 提出正向物流與逆向物流其擁有不同的差異，例如產品價格的決定因素、隱藏成本的高低、階層的複雜度等皆有不同的考慮觀點，如表1所示。

表 1 逆向物流與正向物流的比較

正向物流	逆向物流
數量大批量	數量小批量
要做相關的預測較容易	要做相關的預測較困難
物流是由單個製造商到許多消費者	物流是從許多消費者到單個製造商
物流中的商品品質較具統一性	物流中的商品品質較不具統一性
產品追蹤採自動化	產品追蹤採自動化與人員方式
商品包裝具統一性	商品包裝多被拆卸掉
目的地與路線較明確	目的地與路線不明確
整個物流中的元件都必須被標準化	物流的驅動常是因為意外與不確定性
產品的處置比較明確	產品的處置比較不明確
產品的價格明確	產品價格的決定因素非常多
產品的價值高	產品的價值低
正向物流中的成本可以被會計系統嚴密的掌控	逆向物流的成本有時不是很明顯的，不能夠被掌握
隱藏成本低	隱藏成本高
產品流以拉為主	產品流以拉及推為主
階層較不複雜	階層較複雜

資料來源：[6]

而就以逆向物流網路成本方面，其成本的透明度相較於正向物流是非常低的，因此有許多學者即針對逆向物流之成本進行研究，思考逆向物流網路當中應考慮的成本項目，並以總成本最小為目標。

Dat et al. [9]提出電子電器產品 (electrical and electronic products) 的快速增長，且產品生命週期的縮短，若不妥善處理將造成環境的負面影響。作者針對此議題提出一數學規劃模型，此模型為一多階層、多產品之逆向物流網路模型。其階層包括有收集點、拆解中心、回收點、維修點、垃圾場、主要市場及二手市場)；

產品則包括有電腦、手機以及電視三種。此模型假設產品可拆解出不同數量的模組，並於維修點進行重新組裝再生成二手產品或是進行回收。透過CPLEX軟體求解後，顯示運輸成本佔有較高之比例，因此若要降低總逆向物流成本，則應先考慮運輸成本之降低。Achillas et al. [8] 提出歐洲每年約產生8.3萬噸的電子廢棄物，但在2008年經過妥善處理的卻只有1.5萬噸，回收比率不到20%。而在廢棄物管理成本上，逆向物流約佔有50-70%的比例，相較於新產品，其價值只佔有10-15%，可知逆向物流成本占有很大的比例。因此若能有效降低其逆向物流成本，則企業會更具有競爭力。作者提出一混合整數線性規劃方法，考慮現有的設施，如收集點、回收中心之設置及管理成本、回收成本、儲存成本、及各點間之運輸成本，求解最小化成本之目標，透過CPLEX軟體，以希臘馬其頓為例。結果顯示當廢棄物總量增加時，總物流成本亦會增加，若要降低總物流成本，則可與第三方物流業者重新協商並訂定契約。此外，其總運輸成本約佔總物流成本的63%，若要降低總物流成本，運輸成本將是最先考慮的重要因素。此模式應用於小型或中型規模時較為穩定，可求解大部分問題。

此外，Hu et al. [10]、魏凡峰 [7]、Kim et al. [11]、Mutha et al. [12]、謝佳蓉 [6]、Vahdani et al. [14]、Schweiger et al. [13]等學者皆以最小化成本為目標進行逆向物流供應鏈網路之設計。而一個國家、地區的經濟規模對於逆向物流成本亦是重要的因素，當國家經濟規模越高，其回收量相對愈高。本研究針對台灣之現況，探討電子廢棄物回收後並再生處理之問題，設計一成本最小化之電子廢棄物逆向物流網路模式並求解，以達成廢棄物減量及保護自然資源之目標。

3. 研究方法

3.1 問題定義與研究方法

本研究參考Dat et al. [9] 的研究並加以修正為如圖1之電子廢棄物逆向物流網路。其物流層級分為收集中心、拆解處理中心、回收中心、維修中心、垃圾場、主要市場、及二手市場等。流程為將回收的電子產品自收集中心收集完後運往拆解處理中心進行拆解處理成不同的模組或組件，並將模組與組件分為四種種類，分別為丟棄的模組或組件、可直接使用的

模組或組件、可回收的模組或組件、及可維修的模組或組件，並分別根據這四種種類的不同條件，分別運往垃圾場、二手市場、回收中心、及維修中心。無法使用或者不可修復之模組或組件直接運往垃圾場進行處理；可直接使用的模組或組件則直接運往二手中心販賣；老舊或損壞的模組或組件將運往維修中心進行維修及翻新等動作，而後運往二手市場販賣；可回收的模組或組件如塑膠、玻璃或者貴金屬等將運往回收中心進行不同之處理，處理完後運往主要市場販賣，不可回收的模組則運往垃圾場進行處理。而本研究與Dat *et al* [9] 不同處在於本研究根據環保署提出之「愛心電腦轉贈計畫」，於模式中加入再製工廠，將拆解處理中心處理過後的模組或組件，選取能夠直接使用的模組或組件進行再生處理成為再生產品，目的為在最小成本的目標下可額外販賣二手再生電腦增加營收亦或是增加愛心二手電腦捐贈之數量，達到資源環境保護及永續之目的。

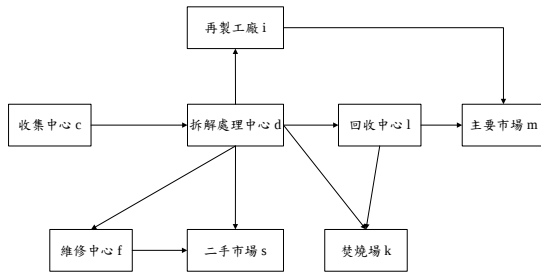


圖 1 電子廢棄物逆物流網路結構

電子廢棄物之逆物流網路之問題定義與模式假設如下：

1. 電子廢棄物回收與再利用的主要目的是提高回收率及增加其再生利用的價值。因此本研究以最小成本為目標，探討廢電子產品之處理與再利用。成本項目包括了再製再生產品及其他相關所需之成本，並考量再生產品之利潤部分，以符合總逆物流之成本。
2. 此逆物流階層包括有收集中心、拆解處理中心、垃圾場、回收中心、維修中心、二手市場、再製工廠、及主要市場等。
3. 每個拆解處理中心、維修中心、回收中心、及再製工廠皆有固定成本，而運輸成本即為各階層之運輸成本，包含回收產品的運輸成本以及產品拆成模組或組件之運輸成本。
4. 每個拆解處理中心、維修中心、回收中心皆設有容量上下限。
5. 於再製工廠再製完成後所剩餘的模組或組

件有其相對應的存貨成本。

6. 每個收集中心僅作收集之功能，不產生處理成本。分類、拆解、及破碎等功能於拆解處理中心進行處理，產生處理成本。
7. 產品於再製工廠進行再製，因此產生組裝成本。不可使用的模組或組件以及不可回收的模組及組件運往垃圾場進行處理，皆產生垃圾處理成本。
8. 可直接使用的模組及自維修中心維修後的產品運送至二手市場進行販賣而產生利潤。自回收中心回收並再生成的新模組可運送至主要市場進行販賣而產生利潤。

根據上述之問題定義與假設，本研究擬設計一混合整數規劃模式。此模式為一多產品、多模組、及多階層之電子廢棄物逆物流供應鏈模式，於最小成本之目標下求解模式中所需之拆解處理中心、回收中心、維修中心、及再製工廠之設施區位設置，與再生產品之最適數量規劃。總成本包括回收產品之回收成本；拆解處理中心、回收中心、維修中心、及再製工廠之固定成本、運輸成本、處理成本等。限制條件包括各階層之處理條件、各階層之流量守恒、各中心之容量上下限制及主要市場、二手市場之客戶需求量限制等。

3.2 模式建構

1. 符號定義

- c : 收集中心, $c = 1..C$;
- d : 拆解處理中心, $d = 1..D$;
- f : 維修中心, $f = 1..F$;
- s : 二手市場, $s = 1..S$;
- k : 焚燒場, $k = 1..K$;
- l : 回收中心, $l = 1..L$;
- i : 再製工廠, $i = 1..I$;
- m : 主要市場, $m = 1..M$;
- p : 產品, $p = 1..P$;
- a : 半成品, $a = 1..A$;
- u : 可直接使用的模組或組件, $u = 1..U$;
- g : 直接丟棄的模組或組件, $g = 1..G$;
- o : 可維修的模組或組件, $o = 1..O$;
- n : 可更新或修復後的模組或組件, $n = 1..N$;
- r : 可回收並再生的模組或組件, $r = 1..R$;

b : 不可回收並再生的模組或組件，
 $b=1..B$

h : 再生產品， $h=1..H$

2. 參數

F_d : 拆解處理中心 d 的固定成本；

F_l : 回收中心 l 的固定成本；

F_f : 維修中心 f 的固定成本；

F_i : 再製工 i 的固定成本；
產品、模組或組件及再生產品的

C_q : 單位運輸成本，
 $q \in p, a, u, g, o, n, r, b, h$ ；

D_{vw} : 由 v 至 w 的距離，
 $v \in c, d, l, f, i$ $w \in d, l, f, k, m, s, i$ ；

ε_l : 回收中心 l 的處理效率；

ε_f : 維修中心 f 的處理效率；

SR_{su} : 二手市場 s 對可直接使用的模組
或組件 u 的需求量；

SR_{sn} : 二手市場 s 對可更新或修復後的
模組或組件 n 的需求量；

DP_{mr} : 主要市場 m 對可回收並再生的
模組或組件 r 的需求量；

DM_{mh} : 主要市場 m 對再生產品 h 的需求
量；

CAP_{dp} : 產品 p 在拆解處理中心 d 可容納
的容量；

CAP_{la} : 半成品 a 在回收中心 l 可容納的
容量；

CAP_{fo} : 可維修的模組或組件 o 在維修中
心 f 可容納的容量；

U_q : 直接丟棄的模組或組件 g 及不可
回收並再生的模組或組件 b 的單
位垃圾處理成本， $q \in g, b$ ；

B_q : 直接可使用的模組或組件 u 、可
更新或修復後的模組或組件 n 、
可回收並再生的模組或組件 r 及
再生產品 h 販賣的利潤，
 $q \in u, n, r, h$ ；

HD_{dp} : 產品 p 在拆解處理中心 d 的處理
成本；

HD_{la} : 半成品 a 在回收中心 l 的處理成
本；

HD_{fo} : 可維修的模組或組件 o 在維修中
心 f 的處理成本；

HD_{ih} : 再製產品 h 再 i 的處理成本；

BC_{cp} : 產品 p 於收集中心 c 的回收產品
數量；

AP_{ar} : 半成品 a 可回收的模組或組件 r
的數量；

AP_{ab} : 半成品 a 不可回收的模組或組件
 b 的數量；

AP_{on} : 可維修的模組或組件 o 維修後轉
變為可更新或修復後的模組或
組件 n 的數量；

AP_{pa} : 產品 p 可拆解成半成品 a 的數量；

AP_{pu} : 產品 p 可拆解成直接可使用的模
組或組件 u 的數量；

AP_{pg} : 產品 p 可拆解成直接丟棄的模組
或組件 g 的數量；

AP_{po} : 產品 p 可拆解成可維修的模組或
組件 o 的數量；

IC_{iu} : 於再製工廠 i 完成再製後剩餘的
可直接使用的模組或組件 u 的存
貨成本；

IC_{ig} : 於再製工廠 i 完成再製後剩餘的
直接丟棄的模組或組件 g 的存貨
成本；

IC_{ia} : 於再製工廠 i 完成再製後剩餘的
半成品 a 的存貨成本；

IC_{io} : 於再製工廠 i 完成再製後剩餘的
可維修的模組或組件 o 的存貨成
本；

α : 可直接使用的模組或組件從拆
解處理中心運送至二手市場的
比例；

β : 直接丟棄的模組或組件從拆解
處理中心運送至垃圾場的比例；

γ : 半成品從拆解處理中心運送至
回收中心的比例；

δ : 可維修的模組或組件從拆解處
理中心運送至維修中心的比例；

3. 決策變數

Y_d : 為二元決策變數，1表設置拆解
處理中心 d ，否則為0；

Y_l : 為二元決策變數，1表設置回收
中心 l ，否則為0；

Y_f : 為二元決策變數，1表設置維修
中心 f ，否則為0；

Y_i : 為二元決策變數，1表設置再製
工廠 i ，否則為0；

X_{cdp} : 產品 p 由收集中心 c 運送至拆解
處理中心 d 的數量；

X_{dsu} : 可直接使用的模組或組件 u 由拆

- 解處理中心 d 運送至二手市場 s 的數量；
- RX_{diu} : 剩餘的可直接使用的模組或組件 u 的數量；
- X_{dla} : 半成品 a 由拆解處理中心 d 運送至回收中心 l 的數量；
- RX_{dia} : 剩餘的半成品 a 的數量；
- X_{lkb} : 不可回收並再生的模組或組件 b 由回收中心 l 運送至焚燒場 k 的數量；
- X_{dkg} : 直接丟棄的模組或組件 g 由拆解處理中心 d 運送至焚燒場 k 的數量；
- RX_{dig} : 剩餘的直接丟棄的模組或組件 g 的數量；
- X_{dfo} : 可維修的模組或組件 o 由拆解處理中心 d 運送至維修中心 f 的數量；
- RX_{dio} : 剩餘的可維修的模組或組件 o 的數量；
- X_{fsn} : 可更新或修復後的模組或組件 n 從維修中心 f 運送至二手市場 s 的數量；
- X_{lmr} : 可回收並再生的模組或組件 r 從回收中心 l 運送至主要市場 m 的數量；
- X_{imh} : 再生產品 h 自再製工廠 i 運送至主要市場 m 的數量；
- X_{ih} : 再生產品 h 於再製工廠 i 組裝的數量；
- IRX_{iu} : 於再製工廠 i 完成再製後剩餘的可直接使用的模組或組件 u 的存貨數量；
- IRX_{ig} : 於再製工廠 i 完成再製後剩餘的直接丟棄的模組或組件 g 的存貨數量；
- IRX_{ia} : 於再製工廠 i 完成再製後剩餘的半成品 a 的存貨數量；
- IRX_{io} : 於再製工廠 i 完成再製後剩餘的可維修的模組或組件 o 的存貨數量；

4. 模式建構與說明

Min

$$\sum_{d \in D} F_d Y_d + \sum_{l \in L} F_l Y_l + \sum_{f \in F} F_f Y_f + \sum_{i \in I} F_i Y_i +$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{d \in D} \sum_{p \in P} X_{cdp} (D_{cd} C_p + HD_{dp}) +$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{l \in L} \sum_{a \in A} X_{dla} (D_{dl} C_a + HD_{la}) +$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{k \in K} \sum_{b \in B} X_{lkb} (D_{lk} C_b + U_b) +$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{k \in K} \sum_{g \in G} X_{dkg} (D_{dk} C_g + U_g) +$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{f \in F} \sum_{o \in O} X_{dfo} (D_{df} C_o + HD_{fo}) +$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{i \in I} \sum_{u \in U} RX_{diu} (D_{di} C_u) +$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{i \in I} \sum_{g \in G} RX_{dig} (D_{di} C_g) +$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{i \in I} \sum_{a \in A} RX_{dia} (D_{di} C_a) +$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{i \in I} \sum_{o \in O} RX_{dio} (D_{di} C_o) + \sum_{i \in I} \sum_{h \in H} X_{ih} OI_{ih} +$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{u \in U} IRX_{iu} IC_{iu} + \sum_{i \in I} \sum_{g \in G} IRX_{ig} IC_{ig} +$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{a \in A} IRX_{ia} IC_{ia} + \sum_{i \in I} \sum_{o \in O} IRX_{io} IC_{io} -$$

$$\sum_{f \in F} \sum_{s \in S} \sum_{n \in N} X_{fsn} (B_n - D_{fs} C_n) -$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{m \in M} \sum_{r \in R} X_{lmr} (B_r - D_{lp} C_r) -$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{s \in S} \sum_{u \in U} X_{dsu} (B_u - D_{ds} C_u) -$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in M} \sum_{h \in H} X_{imh} (B_h - D_{im} C_h) \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_d X_{cdp} = BC_{cp} \quad \forall p \in P, \forall c \in C \quad (2)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{p \in P} X_{cdp} * AP_{pu} * \alpha = \sum_{s \in S} X_{dsu} \quad (3)$$

$$\forall d \in D, \forall u \in U$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{p \in P} X_{cdp} * AP_{pu} * (1 - \alpha) = \sum_{i \in I} RX_{diu} \quad (4)$$

$$\forall d \in D, \forall u \in U$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{p \in P} X_{cdp} * AP_{pg} * \beta = \sum_{k \in K} X_{dkg} \quad (5)$$

$$\forall d \in D, \forall g \in G$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{p \in P} X_{cdp} * AP_{pg} * (1 - \beta) = \sum_{i \in I} RX_{dig}$$

$$\forall d \in D, \forall g \in G$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{p \in P} X_{cdp} * AP_{pa} * \gamma = \sum_{l \in L} X_{dla}$$

$$\forall d \in D, \forall a \in A$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{p \in P} X_{cdp} * AP_{pa} * (1 - \gamma) = \sum_{i \in I} RX_{dia}$$

$$\forall d \in D, \forall a \in A$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{p \in P} X_{cdp} * AP_{po} * \delta = \sum_{f \in F} X_{dfo}$$

$$\forall d \in D, \forall o \in O$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{p \in P} X_{cdp} * AP_{po} * (1 - \delta) = \sum_{i \in I} RX_{dio}$$

$$\forall d \in D, \forall o \in O$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{a \in A} X_{dla} * AP_{ar} * \varepsilon_l = \sum_{m \in M} X_{lmr}$$

$$\forall l \in L, \forall r \in R$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{a \in A} X_{dla} * AP_{ab} = \sum_{k \in K} X_{lkb}$$

$$\forall l \in L, \forall b \in B$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{o \in O} X_{dfo} * AP_{on} * \varepsilon_f = \sum_{s \in S} X_{fsn}$$

$$\forall f \in F, \forall n \in N$$

$$\sum_{d \in D} X_{dsu} \leq SR_{su} \quad \forall u \in U, \forall s \in S$$

$$\sum_{f \in F} X_{fsn} \leq SR_{sn} \quad \forall n \in N, \forall s \in S$$

$$\sum_{l \in L} X_{lmr} \leq DP_{mr} \quad \forall r \in R, \forall m \in M$$

$$\sum_{i \in I} X_{imh} \leq DM_{mh} \quad \forall m \in M, \forall h \in H$$

$$\sum_{c \in C} X_{cdp} \leq y_d * CAP_{dp} \quad \forall p \in P, \forall d \in D$$

$$\sum_{d \in D} X_{dla} \leq y_l * CAP_{la} \quad \forall a \in A, \forall l \in L$$

$$\sum_{d \in D} X_{dfo} \leq y_f * CAP_{fo} \quad \forall o \in O, \forall f \in F$$

$$(6) \quad X_{ih} = \text{Min} \left\{ \frac{RX_{diu}}{AP_{pu}}, \frac{RX_{dig}}{AP_{pg}}, \frac{RX_{dia}}{AP_{pa}}, \frac{RX_{dio}}{AP_{po}} \right\}$$

$$(7) \quad \begin{aligned} &\forall i \in I, \forall h \in H, \forall d \in D, \\ &\forall i \in I, \forall p \in P, \forall u \in U, \\ &\forall g \in G, \forall a \in A, \forall o \in O \end{aligned}$$

$$(8) \quad X_{ih} = \sum_m X_{imh} \quad \forall h \in H, \forall i \in I$$

$$(9) \quad \begin{aligned} &RX_{diu} - (X_{ih} * AP_{pu}) = IRX_{iu} \\ &\forall h \in H, \forall i \in I, \forall p \in P, \\ &\forall d \in D, \forall u \in U \end{aligned}$$

$$(10) \quad \begin{aligned} &RX_{dig} - (X_{ih} * AP_{pg}) = IRX_{ig} \\ &\forall h \in H, \forall i \in I, \forall p \in P, \\ &\forall d \in D, \forall g \in G \end{aligned}$$

$$(11) \quad \begin{aligned} &RX_{dia} - (X_{ih} * AP_{pa}) = IRX_{ia} \\ &\forall h \in H, \forall i \in I, \forall p \in P, \\ &\forall d \in D, \forall a \in A \end{aligned}$$

$$(12) \quad \begin{aligned} &RX_{dio} - (X_{ih} * AP_{po}) = IRX_{io} \\ &\forall h \in H, \forall i \in I, \forall p \in P, \\ &\forall d \in D, \forall o \in O \end{aligned}$$

$$(13) \quad \sum_{d \in D} Y_d \leq D, \sum_{l \in L} Y_l \leq L, \sum_{f \in F} Y_f \leq F, \sum_{i \in I} Y_i \leq I$$

$$(14) \quad \forall d \in D, \forall l \in L, \forall f \in F, \forall i \in I$$

$$(15) \quad Y_d, Y_l, Y_f, Y_i \in (0, 1)$$

$$(16) \quad X_{cdp}, X_{dla}, X_{lkb}, X_{dkg}, X_{dfo}, X_{fsn}, X_{lmr},$$

$$(17) \quad X_{dsu}, X_{imh}, X_{ih}, RX_{dia}, RX_{diu}, RX_{dig},$$

$$(18) \quad RX_{dio}, IRX_{iu}, IRX_{ig}, IRX_{ia}, IRX_{io}, IRX_{ig} \geq 0$$

本研究之目標式(1)以最小化成本為目標，總成本項目中包括了設施之固定成本及各階層之間的運輸成本、回收電子廢棄物產品之回收成本、各個設施的處理成本、再生產品的組裝成本及再製完成後剩餘的模組數量之存貨成本等，並且考慮了利潤面向以符合現實之

情形。限制式之 (2) 式為流量守恒限制，即電子廢棄物從收集中心運送至拆解處理中心的數量要等於總產品的回收量；(3)、(5)、(7)、(9) 式為產品從收集中心運送至拆解處理中心後，運送至二手市場、焚燒場、回收中心、維修中心的模組或組件的數量；(4) 式為直接可使用的模組或組件的剩餘數量；(6) 式為直接丟棄的模組或組件的剩餘數量；(8) 式為半成品的剩餘數量；(10) 式為可維修的模組或組件的剩餘數量；(11) 式為從拆解處理中心運送至回收中心的半成品，再運送至主要市場的數量；(12) 式為從拆解處理中心運送至回收中心的半成品，再運送至焚燒場的數量；(13) 式為從拆解處理中心運送至維修中心的可維修模組或組件，再運送至二手市場的數量；(14) 式至 (17) 式為需求量之限制式，假設為小於等於之情況係因為本研究是以逆物流之概念為考量，並以回收產品之數量，藉由逆物流網路中各個環節的妥善處理後，提供再生產品、模組或組件的數量於市場，因此不會滿足市場的需求量。(18) 至 (20) 式為各中心的最大容量限制；(21) 式為再生產品之製造量，即選取剩餘的可直接使用的模組數量、剩餘的直接丟棄的模組或組件數量、剩餘的半成品數量、及剩餘的可維修的模組或組件數量，並以其最小化可進行再製之模組數量進行再製成為再生產品；(22) 式為再製工廠再製出的再生產品要等於運送至主要市場的總數量；(23) 式至 (26) 式為在再製工廠再製後剩餘的可直接使用的模組或組件、可直接丟棄的模組或組件、半成品及可維修的模組或組件之數量限制；(27) 所有的拆解處理中心、回收中心、維修中心、及再製工廠皆不能超過最大設置數量；(28) 式為二元變數限制；(29) 式為非負限制。

4. 數值例分析

為驗證本研究提出之模式可行性與實用性，本研究以一數值例詳細定義相關之參數值並分析結果。設計之逆物流網路各階層級為收集中心有 4 個、拆解處理中心 3 個、回收中心 2 個、維修中心 2 個、焚燒場 1 個、主要市場 2、二手市場 2 個及再製工廠 1 個，如圖 2 所示。

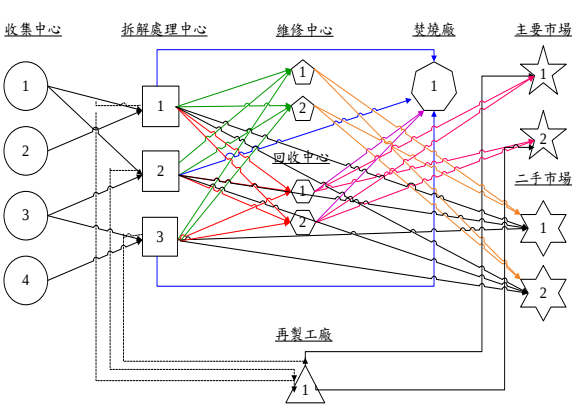


圖 2 電子廢棄物逆物流網路

回收產品共分為三種，分別為電腦、電視以及手機，而這三種產品經過各中心處理後假設其可再製成再生產品也為 3 種，分別為再生電腦、再生電視及再生手機。數值例之資料設計主要參考 Dat et al. [9] 之研究，再應用 Visual C++ 套裝軟體產生隨機亂數之基準，個別針對這些數值進行區間設置，產生介於設計之區間裡的亂數，再將產生的亂數值作為本研究模式的參數值，進行模式之求解並分析結果。各項參數設置區間如表 2 所示。

表 2 範例資料-各項參數設置區間

項目	參數	矩陣	範例數據	自行假設	區間設置 (Uniform)	Visual C++ 數據
運輸單位成本	C_p	$p=1$ $p=2$ $p=3$	20 14 4		(18,22) (10,14) (2,6)	20 12 4
	C_a	$a=1$ $a=2$	10 7		(8,12) (5,9)	10 9
	C_u	$u=1$ $u=2$ $u=3$ $u=4$	6 3 4 3		(4,8) (1,5) (2,6) (1,5)	6 2 2 5
	C_g	$g=1$ $g=2$ $g=3$	4 3 3		(2,6) (1,5) (1,5)	2 5 2
	C_r	$r=1$ $r=2$	3 3		(1,5) (1,5)	2 2
	C_n	$n=1$ $n=2$	4 3		(2,6) (1,5)	5 1
	C_o	$o=1$ $o=2$	4 3		(2,6) (1,5)	5 2
	C_b	$b=1$	3		(1,5)	3
	C_h	$h=1$ $h=2$ $h=3$	未有		(18,22) (16,20) (14,18)	18 16 16

			數據			
回收數量	BC_{cp}	$c=1, p=1$	50		(45,55)	47
		$c=1, p=2$	95		(90,100)	90
		$c=1, p=3$	62		(57,67)	63
		$c=2, p=1$	90		(85,95)	85
		$c=2, p=2$	80		(75,85)	75
		$c=2, p=3$	38		(33,43)	36
		$c=3, p=1$	84		(79,89)	79
		$c=3, p=2$	72		(67,77)	76
		$c=3, p=3$	64		(59,69)	61
		$c=4, p=1$	91		(86,96)	89
		$c=4, p=2$	86		(81,91)	91
		$c=4, p=3$	20		(15,25)	21

綜合上述產生之數據，利用 Lingo 12.0 軟體進行模式之求解，結果為逆物流總成本 2,431,426 元，開啟的設施如下：拆解處理中心開啟 3 個 ($d1, d2, d3$)、回收中心 2 個 ($i1, i2$)、維修中心 2 個 ($f1, f2$)、及再製工廠 1 個 ($i1$)。各項成本之細項如表 3 所示。

表 3 範例結果-成本細項表

成本項	數值
固定成本	762
運輸成本	2,338,444
處理成本	48,083.31
垃圾處理成本	88,820.14
存貨成本	1,563.968
利潤	46,246.52
總成本	2,431,426

5. 結論與建議

本研究以混合整數規劃模型，建構一以總成本最小為目標之多產品、多模組、及多階層之電子廢棄物逆物流網路模式，來求解電子廢棄物網路中，拆解處理中心、回收中心、維修中心、及再製工廠之設施區位選擇，與再生產品之最適數量規劃，以達成廢棄物減量及保護自然資源之目標。為驗證模式之可行性，本研究以設計之參數求解，以確認模型的合理性及實用性。由結果顯示，本研究之模型，可求得電子廢棄物逆物流網路之最小成本及設施之最佳設置區位與再生產品之數量。

然而，本研究模式中之參數在實驗設計之數值例分析，仍有許多數據與資料未能有效的獲得，僅能依靠相關文獻或參考其他學者之研究資料進行推估，亦或是自行假設，造成整體逆物流之成本較不接近現實情況。因此未來能夠蒐集更完整且精確的統計資料及供應鏈上

下游之相關業者，以便更進一步讓國人了解廢電子電器物品之現況，並且輔助相關研究於規劃與分析評估之參考，以提升廢電子電器物品之成效。此外，本研究發展之模式考量之因素並未周全，未來可以考慮車輛載重問題、模組之重量等，以獲得更精確的逆物流總成本並提高再生產品之再利用率。

參考文獻

- [1] 行政院環境保護署 (2013)，中華民國環保法規資料中心，擷取日期：2013 年 1 月 17 日，網址：<http://law.epa.gov.tw/zh-tw/laws/>。
- [2] 行政院環境保護署 (2012)，環保統計資料庫，擷取日期：2013 年 3 月 1 日，網址：<http://210.69.101.110/epa/stmain.jsp?sys=100>。
- [3] 江國瑛 (2006)，廢資訊物品資源回收制度與現況，擷取日期：2013 年 1 月 6 日，網站：<http://www.ier.org.tw/html/newsletter/9/nl9-2.htm>。
- [4] 李惠卿 (2008)，多處理廠環境下逆物流最適訂單接受量與處理量之研究，政治大學資訊管理學系碩士論文。
- [5] 監察院 (2010)，資訊廢棄物減量、處理與再利用專案調查研究報告，初版。
- [6] 謝佳蓉 (2009)，廢棄物回收之逆物流網路設計與運送規劃—以廢電腦為例，淡江大學運輸管理學系運輸科學碩士班碩士論文。
- [7] 魏凡峰 (2002)，逆物流對供應鏈體系成本與時間之影響，成功大學工業管理研究所碩士論文。
- [8] Achillas, Ch., Vlachokostas, Ch., Aidonis, D., Moussiopoulos, N., Lakovou, E., and Banias, G. (2010)，“Optimizing Reverse Logistics Network to Support Policy-making in the Case of Electrical and Electronic Equipment,” *Waste Management*, Vol. 30, pp. 2592-2600.
- [9] Dat, L. Q., TrucLinh, D. T., Chou, S. Y., and Yu, V. F. (2012)，“Optimizing Reverse Logistic Costs for Recycling End-of-Life Electrical and Electronic products,” *Expert System with Applications*, Vol. 39, pp. 6380-6387.
- [10] Hu, T. W., Sheu, J. B., Huang, K. H. (2002)，“A Reverse Logistics Cost Minimization Model For The Treatment Of

Hazardous Wastes,” **Transportation Research Part E**, Vol.38,pp.457–473.

- [11] Kim, K., Song, I., Kim, J., and Jeong, B. (2006) , “Supply planning model for remanufacturing system in reverse logistics environment,” **Computers & Industrial Engineering** 51, pp. 279–287.
- [12] Mutha, A. and Pokharel, S. (2009) , “Strategic network design for reverse logistics and remanufacturing using new and old product modules,” **Computers & Industrial Engineering** 56, pp. 334–346.
- [13] Schweiger, K. and Sahamie, R. (2013), “A hybrid Tabu Search approach for the design of a paper recycling network” **Transportation Research Part E**, Vol. 50, pp. 98-119.
- [14] Vahdani, B., Tavakkoli-Moghaddam., R., Jolai, F. (2013), “Reliable design of a logistics network under uncertainty: A fuzzy possibilistic-queueing model,” **Applied Mathematical Modelling**, Vol. 37, pp.3254-3268.