



廢棄物回收之逆物流網路設計與運送規劃

—以廢電腦回收為例

溫裕弘^{*a}、謝佳蓉^b

^a淡江大學運輸管理學系助理教授

^b淡江大學運輸管理學系碩士

摘要

本研究建構廢棄物回收之逆物流網路結構設計與回收運送規劃模式，分為廢棄物回收逆物流設施區位選擇與運送規劃兩階段模式。第一階段模式運用灰色聚類進行廢棄物回收逆物流區位選擇，包含回收廠、拆解/處理廠、再生廠和最終處理廠的區位設置選擇，而評選指標為設置成本、運輸成本、和人口曝露風險。第二階段為廢棄物回收流通運送規劃模式，目標函數為總成本及總風險最小，其中，總逆物流成本包含有運輸成本、作業成本以及處理成本，總逆物流風險則為運送風險與儲存風險；限制式考慮流量守恆限制、設施容量與數量限制。最後，本研究以廢棄電腦回收為例進行範例分析，驗證模式之可行性，並進行敏感度分析。本研究結果可輔助第三方廢棄物回收逆物流運送業者在複雜、多變的逆物流規劃環境中，因應不同規劃考量，進行更具決策彈性之規劃參考。

關鍵字：逆物流網路、逆物流運送規劃、廢棄物回收、網路模式

*通訊作者：溫裕弘
E-mail: yhwen@mail.tku.edu.tw





壹、緒論

綠色供應鏈管理(green supply chain management)除了在正向物流程序進行時強調從原物料取得的產源減量、物料替代外，亦應著重於終止產品(end-of-life, EOL)完成其生命週期後所伴隨的再生、物料再使用、廢棄物處理以及有害物質的管理等活動，可提升經濟利益以及增加物料效益 (He et al., 2006)。儘管如此，許多公司本身無法處理複雜的逆物流網路，所以需建立完善的逆物流程序(Krumwiede & Sheu, 2002)，且大部份企業多把廢棄物逆物流回收活動以委外方式委託專業的第三方廢棄物逆物流回收處理業者來處理(Cottrill, 2000)。逆物流(reverse logistics)項目包括：產品的回收、存貨的退回、保固的回收、可再利用容器、損壞產品季節性產品、存貨的調整以及有害物料(Krumwiede & Sheu, 2002)。其中，廢棄物回收常伴隨有害特性，故影響層面很廣，具有深入探討之重要性。廢棄物逆物流網路結構包含回收點、回收廠、拆解/處理廠、再生廠和最終處理廠（垃圾掩埋場與焚化爐）等節點及相對應的逆物流運輸節線，其關係為回收運送過程，即廢棄物從回收點收集後送到回收廠，再送至拆解/處理廠，經由處理、拆解等程序後分別送至再生廠或最終處理廠。廢棄物逆物流網路規劃必須考慮逆物流設施廠的相關區位、市場範圍與影響、逆物流運送之最適規劃，係屬於第三方逆物流回收業者之中、長期規劃決策，亦可作為其短期營運規劃之基礎。因此，逆物流網路規劃是一個多目標、高隨機性、不確定性之動態、複雜的網路規劃最佳化問題。由過去文獻(Shih, 2002)亦可以發現，將設施區位決定、路線選擇與配送流通問題同時進行決策已是一種研究之趨勢。

過去逆物流網路規劃相關文獻，則大多屬於網路模式最佳化問題，如：Bloemhof-Ruwaard et al. (1999), Fleischmann et al. (1997, 2000, 2002), Krikke et al. (1999), Barros et al. (1998), Shih (2002), Krumwiede & Sheu (2002), Jayaraman et al. (2003), Sheu (2007), Du & Evans (2008), Srivastava (2008)，過去相關模式均需先將設施區位數或是物流網路結構(network structure)設定為已知，同時文獻中多以混合整數規劃為主，大多未考慮面臨需求、成本項目、數量以及其他參數的高度不確定(Shih, 2002; Ahluwalia & Nema, 2006; Salema et al., 2007; 洪千琇, 2007)。但在廢棄物回收逆物流網路之規劃與決策過程中，往往並非只單純考慮成本最小化之單一目標，主要是因現實所處環境日趨多元與複雜，必須從多方面加以考量，在諸多相互衝突的目標中權衡取捨，方能符合實際問題的需要，進而達到審慎規劃之目的。

綜合上述，廢棄物回收逆物流網路規劃十分複雜且具不確定性，有別於過去的研究，本研究嘗試採兩階段方式進行模式建構。第一階段為灰色聚類(grey clustering)基礎之逆物流網路結構設計，以成本與風險作為灰色聚類指標，利用灰聚類決策方法，判斷與決定地點區位與網路型態，以建立最佳廢棄物回收之逆物流網路結構。灰色聚類可處理資訊不完全與不確定性問題，應用於設施區位聚類上，可不須先決定設施數目。第二階段則是數學規劃基礎之逆物流運送規劃模式，在考慮總成本與總風險最小之目標下，求解廢棄物回收之逆物流運送網路規劃問題，進行最適的逆物流網路運送流通規劃。本文結





構如下：第二節為廢棄物回收逆物流網路結構設計模式之構建，第三節則構建廢棄物回收逆物流網路運送規劃模式，第四節進行數值範例分析，並於第五節彙整結論與建議。

貳、廢棄物回收逆物流網路結構設計模式

本研究廢棄物回收逆物流網路結構設計旨在於進行回收廠、拆解/處理廠、再生廠和最終處理廠區位設點選擇。令逆物流網路為 $G(N, A)$ ，其中 N 為所有節點(回收點)之集合，亦即所有廠址(包括所有回收點、回收廠、拆解/處理廠、再生廠和最終處理廠)之集合， A 則為節點至節點間之節線。本研究先針對所有節點選出回收廠，再針對所選出之回收廠，再選出拆解/處理廠、再生廠和最終處理廠。本研究應用灰色聚類模式進行區位選點，主要是因為灰色聚類之特性可處理資訊不完全與不確定性問題；並應用於設施區位聚類上，可不須先決定設施數目。灰色聚類係以灰色統計為基礎，其方法為將聚類對象對於不同聚類指標所相對應之值，按幾個類別進行歸納，以判斷聚類對象所屬之類別，這些類別由於不明確性即稱為灰類，亦即高成本、中成本、低成本；或高風險、中風險與低風險等分類；另外，聚類指標即是用以量化及評估這些初步區位候選之決策考量因素。在第一階層灰色聚類區位候選中，灰色聚類對象為回收點，即為由回收點選出回收廠。第二階層候選區位之篩選，以回收廠作為灰色聚類對象，進而從第一階層選出的回收廠中再選出拆解/處理廠以及再生廠或是最終處理廠。

一、評估準則指標

回收廠是由回收點收集廢棄物至回收廠暫置，即是回收點與拆解/處理廠之間的中介站，俟回收量達到回收車之經濟載運量時，再利用較大型貨車，將廢棄物運至拆解/處理廠。區位設置適當的回收廠，可以提升收益和降低成本，亦可兼具轉運之功能。

選擇回收廠之區位是利用成本面來考量，其中考慮運輸成本與設施設置之固定成本為指標，參考 Shih (2002)的公式，並作適當修正。運輸成本指標是指將廢棄物從回收點運送到回收廠的成本，計算方式為單位運輸成本乘以運送的距離，並且以回收廠為中心，到各個回收點的距離加總。設施設置之固定成本則是考慮節點 j 設置回收廠之土地成本與建置成本。在第一階層灰色聚類中，其回收廠之指標函數 β_j^{11} 表示如下：

$$\beta_j^{11} = S_j + \sum_i T^j L_{ij} \quad (1)$$

$$L_{ij} = L_{ji} \quad (2)$$

其中， S_j 為回收廠 j 的固定成本， T^j 為每單位距離的運輸成本， L_{ij} 為回收點 i 至





回收廠 j 的距離。上述 L_{ij} 為回收點至回收廠的距離，假設具對稱性，即任回收點 i 至回收廠 j 的運輸成本與回收廠 j 至回收點 i 相同，本研究在此不考慮道路特性、行駛道路突發狀況等造成運輸成本增減的因素。

第二階層主要針對回收廠中，再選出拆解/處理廠、再生廠和最終處理廠之節點，其之間的關係為拆卸/處理廠可以進行拆除、拆解、粉碎與分類之工作；如果處理完物料是有害的，需要更進一步的處置，若物料是有用的則送至再生廠，其它無用的物料可能在離開拆卸/處理廠後，直接送到最終處理廠。選擇上述的區位須考量成本面與風險面因素，其中成本面仍係考慮運輸成本與設施設置固定成本指標；而風險面則考慮人口曝露風險指標 (Alumur & Kara, 2007)，但暫不考慮運送流量的情形，並採用灰色聚類法將最佳的廠址決定出來。Shih (2002) 假設運送路徑不同（如：回收廠到拆解/處理廠、從處理廠到再生廠和最終處理廠），其運輸成本不盡相同，故本研究假設節點與節點間因為運送到的區位不同而有不同的運輸成本。在第二階層灰色聚類中，成本指標函數如下：

$$\begin{aligned} \beta_k^{21} = & (S_k^{\text{Dis}} + \sum_j T^{\text{Dis}} L_{jk}) \delta_k^{\text{Dis}} + (S_k^{\text{Re}} + \sum_j T^{\text{Re}} L_{jk}) \delta_k^{\text{Re}} \\ & + (S_k^{\text{Tr}} + \sum_j T^{\text{Tr}} L_{jk}) \delta_k^{\text{Tr}} \end{aligned} \quad (3)$$

其中， δ_k^{Dis} 、 δ_k^{Re} 、 δ_k^{Tr} 分別為節點 k 選為拆解/處理廠、再生廠、最終處理廠之二元決策變數，如下列式：

$$\delta_k^{\text{Dis}} = \begin{cases} 1 & \text{當 } k \text{ 被選為拆解/處理廠} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$$\delta_k^{\text{Re}} = \begin{cases} 1 & \text{當 } k \text{ 被選為再生廠} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$$\delta_k^{\text{Tr}} = \begin{cases} 1 & \text{當 } k \text{ 被選為最終處理廠} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

而 S_k^{Dis} 、 S_k^{Re} 與 S_k^{Tr} 分別為拆解/處理廠、再生廠與最終處理廠的設施設置固定成本， T^{Dis} 、 T^{Re} 、 T^{Tr} 分別為運送至拆解/處理廠、再生廠與最終處理廠的每單位距離運輸成本， L_{jk} 為 j 至 k 的距離。同理，亦假設任兩點返回的運輸成本相同。

風險指標函數則參考 Alumur & Kara (2007) 所建立之人口曝露風險函數，作適當修正，建立節點 k 所在區域範圍內各分區人口曝露風險函數，拆解/處理廠以及再生廠或是最終處理廠之風險指標函數如下：

$$\beta_k^{22} = (R_k^{\text{Dis}} \delta_k^{\text{Dis}} + R_k^{\text{Re}} \delta_k^{\text{Re}} + R_k^{\text{Tr}} \delta_k^{\text{Tr}}) \times \mu_k \times \pi \times (L_k^p)^2 \quad (7)$$





其中， R_k^{Dis} 、 R_k^{Re} 、 R_k^{Tr} 分別為拆解/處理廠、再生廠和最終處理廠所對應之風險值， μ_k 為節點 k 區域範圍內之平均人口密度，單位為人/平方公里， L_k^p 為污染的影響半徑，單位為公里。

綜上，本研究廢棄物回收逆物流網路結構設計的目標中，第一階層為運輸成本與固定成本最小，第二階層則是追求較低的固定成本、運輸成本與人口曝露風險。因此，決策偏好為運輸成本、固定成本以及人口曝露風險指標越小；然而，有些偏好條件本身並非十分明確，同時小至哪種範圍也不明確。表示本研究在決策上判斷這些網路結構時，面臨資訊不完全和不確定性，故以灰色聚類判斷聚類對象經由聚類指標評估所屬之類別，這些類別分別定義為低成本、中成本、高成本，及低風險、中風險與高風險等灰類。

二、灰色聚類網路結構評選

本研究利用兩階層的聚類指標分別決定出回收廠以及拆解/處理廠、再生廠和最終處理廠。灰類為歸納出各候選點所屬之成本分類及風險分類，並在第一階層的部份，根據第 i 個聚類對象 ($i=1,2,3,\dots,n$) 對應於一聚類指標 ($\zeta=1$ ，運輸成本與固定成本指標) 運算所得的數值，建立白化矩陣；第二階層的部份，根據第 j 個聚類對象 ($j=1', 2', 3', \dots, n'$ ， $n' < n$) 對應於二聚類指標，固定成本與運輸成本 ($\zeta=1$) 以及人口曝露風險指標 ($\zeta=2$) 運算所得的數值，建立白化矩陣，如下所示：

$$\begin{array}{c}
 \text{指標 } \zeta = 1, 2 \\
 \left[\begin{array}{cc}
 d_{11} & d_{12} \\
 d_{21} & d_{22} \\
 \cdot & \cdot \\
 \cdot & \cdot \\
 \cdot & \cdot \\
 d_{n1} & d_{n2}
 \end{array} \right] \\
 \text{對象 } j = 1', 2', \dots, n'
 \end{array} \quad (8)$$

本研究為簡化分析，僅以高、中、低成本與高、中、低風險進行聚類，依照聚類指標的相似程度將聚類對象分類成不同的群聚，以使得聚類對象在相同灰類中有較高的相似度，而不同的聚類對象具有較低的相似度，如此可將資料整理為有條理的資訊，利於進行分析與比較。而為評判各個聚類對象相對於各聚類指標為屬於高、中、低成本或風險，須針對各聚類指標 ($\zeta=1,2$) 分別構建低成本或低風險 ($\kappa=1$)、中成本或中風險 ($\kappa=2$) 與高成本或高風險 ($\kappa=3$) 三灰類的白化權函數，白化權函數即用以歸納白化矩陣中各列數值為高、中、低成本灰類之歸屬函數，亦即，以白化權函數來描述對聚類指標而言何種情況為灰類 κ (高、中、低成本或風險)。

假設為灰類 κ 指標 ζ 的白化權函數，一般白化權函數表示有「低於某數」、「大約等於某數」及「高於某數」三類型，構建白化權函數之原則如下：

1. 當灰類 κ 指標 ζ 表示「低於某數 λ_ζ^κ 」時，白化權函數為





$$f_{\zeta}^{\kappa}(d_{i\zeta}) = \begin{cases} 0, & d_{i\zeta} < 0 \\ 1, & 0 \leq d_{i\zeta} \leq \lambda_{\zeta}^{\kappa} \\ \frac{1}{(\oplus \lambda_{\zeta}^{\kappa} - \lambda_{\zeta}^{\kappa})} (\oplus \lambda_{\zeta}^{\kappa} - d_{i\zeta}), & \lambda_{\zeta}^{\kappa} \leq d_{i\zeta} < \oplus \lambda_{\zeta}^{\kappa} \\ 0, & d_{i\zeta} \geq \oplus \lambda_{\zeta}^{\kappa} \end{cases} \quad (9)$$

其中， λ_{ζ}^{κ} 為灰類 κ 指標 ζ 之臨界值， $\oplus \lambda_{\zeta}^{\kappa}$ 為指標 ζ 相對於灰類 κ 之上限值。

2. 當灰類 κ 指標 ζ 表示「大約等於某數 λ_{ζ}^{κ} 」時，白化權函數為

$$f_{\zeta}^{\kappa}(d_{i\zeta}) = \begin{cases} 0, & d_{i\zeta} < 0 \\ \frac{1}{\lambda_{\zeta}^{\kappa}} d_{i\zeta}, & 0 \leq d_{i\zeta} \leq \lambda_{\zeta}^{\kappa} \\ \frac{1}{(\oplus \lambda_{\zeta}^{\kappa} - \lambda_{\zeta}^{\kappa})} (\oplus \lambda_{\zeta}^{\kappa} - d_{i\zeta}), & \lambda_{\zeta}^{\kappa} \leq d_{i\zeta} \leq \oplus \lambda_{\zeta}^{\kappa} \\ 0, & d_{i\zeta} > \oplus \lambda_{\zeta}^{\kappa} \end{cases} \quad (10)$$

λ_{ζ}^{κ} 與 $\oplus \lambda_{\zeta}^{\kappa}$ 亦分別為指標 ζ 相對於灰類 κ 之臨界值與上限值。

3. 當灰類 κ 指標 ζ 表示「高於某數 λ_{ζ}^{κ} 」時，白化權函數為

$$f_{\zeta}^{\kappa}(d_{i\zeta}) = \begin{cases} 0, & d_{i\zeta} < 0 \\ \frac{1}{\lambda_{\zeta}^{\kappa}} d_{i\zeta}, & 0 \leq d_{i\zeta} \leq \lambda_{\zeta}^{\kappa} \\ 1, & d_{i\zeta} \geq \lambda_{\zeta}^{\kappa} \end{cases} \quad (11)$$

其中， λ_{ζ}^{κ} 為灰類 κ 指標 ζ 之臨界值。另外「低於等於某數」、「大約等於某數」、「高於等於某數」三類型白化權函數圖形，如圖 1 所示。

將白化矩陣中聚類對象經聚類指標運算得出之白化值 $d_{i\zeta}$ 代入各灰類 κ 指標 ζ 之白化權函數 $f_{\zeta}^{\kappa}(d_{i\zeta})$ 中，可由白化權函數運算出各聚類對象經聚類指標評估偏向屬於各類的程度，即白化權函數運算出之函數值 $f_{\zeta}^{\kappa}(d_{i\zeta})$ 代表聚類對象 i 於指標 ζ 評估之結果 $x_{i\zeta}$ 歸類為灰類 κ 之程度， $0 \leq f_{\zeta}^{\kappa}(d_{i\zeta}) \leq 1, \forall d_{i\zeta}, \forall \zeta, \kappa$ 。

由白化權函數運算出之函數值為聚類對象在某一指標評估之結果歸類為某一灰類的程度，進一步將每個聚類對象各白化權函數值，針對同一灰類加總，以進行判斷各聚類對象所屬之灰類別。



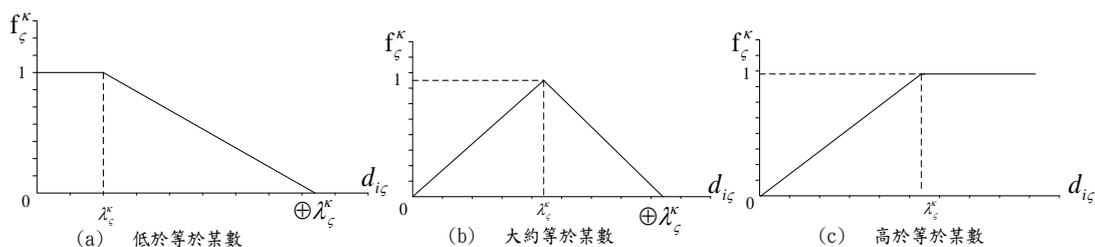


圖 1 指標 ζ 灰類 κ 「低於等於某數」、「大約等於某數」、「高於等於某數」三類型白化權函數

根據以往經驗或定性分析給定各灰類各聚類指標之聚類權重，假設灰類 κ 聚類指標 ζ 之聚類權重為 O_ζ^κ ，聚類權重代表在灰類 κ 的各聚類指標間之相對重要性，且 $\sum_{\zeta} O_\zeta^\kappa = 1, \forall \kappa$ 。若設計規劃者認為對於各灰類中，各聚類指標之相對重要性一致，則聚類權重可改寫為 $O_\zeta^1 = O_\zeta^2 = O_\zeta$ 。

聚類權重之給定可採用主觀權重 (subjective weight) 之層級分析法，由規劃者、決策者針對聚類指標的重要性進行兩兩成對比較，以求得各聚類指標之相對權重值。傳統方法常把各指標以相同權重看待，但實際上，因為不同的節點所考慮的指標未必同等重要，應依照不同廠址之特性，給予不同的權重。計算聚類對象 j 相對於灰類 κ 之聚類係數 σ_j^κ ，如下式：

$$\sigma_j^\kappa = \sum_{\zeta=1}^2 f_{j\zeta}^\kappa(d_{j\zeta}) O_\zeta^\kappa \quad (12)$$

各聚類對象可由相對於各灰類之聚類係數判定所屬灰類，若三灰類聚類係數的最大值，則判定聚類對象 j 屬於灰類 κ^* 。判定式如下：

$$\sigma_j^{\kappa^*} = \max_{\kappa} \{ \sigma_j^\kappa \} \quad (13)$$

參、廢棄物回收逆物流網路運送規劃模式

依第一階段所擇定的網路結構 (即選定回收點、回收廠、拆解/處理廠、再生廠和最終處理廠節點)，進一步進行廢棄物回收運送規劃模式之建構。數學規劃模式考慮總成本和總風險目標下，求解廢棄物回收逆物流運送規劃問題。

一、流量變數

本研究逆物流網路結構記為 $G(N, A)$ 。定義符號如下，其主要區分在節點或節線上





之廢棄物流量，以及其決策變數所代表之意義分別為：

X_{ijv} ：使用 v 車型從回收點 i 運送至回收廠 j 之流量（公噸），

X_{jdv} ：使用 v 車型從回收廠 j 運送至拆解/處理廠 d 之流量（公噸），

X_{drv} ：使用 v 車型從拆解/處理廠 d 到再生廠 r 之流量（公噸），

X_{dtv} ：使用 v 車型從拆解/處理廠 d 到最終處理廠 t 之流量（公噸），

YI_i ：由回收點 i 收集到的總量（公噸），

YJ_j ：經過回收廠 j 的總量（公噸），

YD_d ：經過拆解/處理廠 d 的總廢棄量（公噸），

YR_r ：到再生廠 r 的廢棄量（公噸），

YT_t ：到最終處理廠 t 的廢棄量（公噸），

YJ'_j ：置於回收廠 j 未處理而未流出的總廢棄量（公噸），

YD'_d ：置於拆解/處理廠 d 未處理而未流出的總廢棄量（公噸）。

並引入二元變數 $\delta_d^{j,d}$ 、 $\delta_r^{d,r}$ 、 δ_R^{HC} 、 δ_R ：

$$\delta_d^{j,d} = \begin{cases} 1 & \text{if } j \neq d \\ 0 & \text{if } j = d \end{cases}$$

$$\delta_r^{d,r} = \begin{cases} 1 & \text{if } d \neq r \\ 0 & \text{if } d = r \end{cases}$$

$$\delta_R^{HC} = \begin{cases} 1 & \text{低風險包裝運送} \\ 0 & \text{一般包裝運送} \end{cases}$$

$$\delta_R = \begin{cases} 1 & \text{妥善處理} \\ 0 & \text{一般(未妥善)處理} \end{cases}$$

依據一般 EOL 廢棄物回收處理程序，廢棄物回收逆物流網路之節線流量與節點流量間之關係，可分為三種類型討論。第一類型為回收點，即為供給端流出節點，節線流量與節點流量間之關係如下式：

$$YI_i = \sum_v \sum_j X_{ijv} \tag{14}$$





第二類型為回收廠與拆解/處理廠，即為中途節點，回收廠節線流量與節點流量間之關係如下式：

$$YJ'_j = \sum_v \sum_i X_{ijv} - \sum_v \sum_d X_{jdv} \quad (15)$$

回收廠與拆解/處理廠節線流量與節點流量間之關係如下式：

$$YD'_d = \sum_v \sum_j X_{jdv} - (\sum_v \sum_r X_{drv} + \sum_v \sum_t X_{dvt}) \quad (16)$$

第三類型為再生廠與最終處理廠，即為需求端流入節點，再生廠節線流量與節點流量間之關係如下式：

$$YR_r = \sum_v \sum_d X_{drv} \quad (17)$$

最終處理廠節線流量與節點流量間之關係如下式：

$$YT_t = \sum_v \sum_d X_{dvt} \quad (18)$$

二、成本與風險目標函數

本研究廢棄物回收逆物流網路運送規劃模式之目標式，係考量逆物流總成本與總風險之最小化。逆物流成本包含：處理成本、運輸成本與作業成本；逆物流風險則為運送風險與儲存風險。其中，在成本函數建立上，主要參考 Shih (2002)所考慮之成本項目；在風險函數建立，則參考 Ahluwalia & Nema (2006); Alumur & Kara (2007)所考量之運送風險以及儲存風險函數。

在處理成本的部份，則依據 Shih (2002)所探討的處理成本，考慮廢棄物在拆解/處理廠 d 進行分選、拆解、粉碎等處理方式所需的成本，處理成本函數如下：

$$C^D = \sum_d Q_d \times YD_d \quad (19)$$

其中， Q_d 為拆解/處理廠 d 處理廢棄物所需的單位平均成本，以元/公噸為單位， YD_d 為經過拆解/處理廠 d 的總量，以公噸為單位。

廢棄物回收逆物流之運送流通過程包含從回收點到回收廠、從回收廠到拆解/處理廠、從拆解/處理廠到再生廠或最終處理廠，所以運送過程一共有四種流量類型。本研究更進一步探討不同車型運輸設備派遣情形，以車型 v 表示，假設逆物流運輸成本隨著車型大小而變動。令二元變數 $\delta_d^{j,d}$ 、 $\delta_r^{d,r}$ ，分別代表從回收廠 j 或拆解/處理廠 d 是否送出流量，





具流量流出則為 1；而節點本身就同時兼具有回收廠 j 或拆解/處理廠 d 時，則設為 0。因此，回收點到回收廠的運輸成本為：

$$C_{(i,j)}^T = \sum_v \text{TC}_v^{i,j} \times L_{ij} \times X_{ijv} \quad (20)$$

其中， $\text{TC}_v^{i,j}$ 為使用 v 車型從回收點 i 運送至回收廠 j 之單位運輸成本，以元/延噸公里為單位， L_{ij} 回收點 i 與回收廠 j 之間的距離，以公里為單位， X_{ijv} 為使用 v 車型從回收點 i 運送至回收廠 j 之流量，以公噸為單位。

從回收廠到拆解/處理廠的運輸成本為：

$$C_{(j,d)}^T = \sum_v \text{TC}_v^{j,d} \times L_{jd} \times X_{jdv} \times \delta_d^{j,d} \quad (21)$$

其中， $\text{TC}_v^{j,d}$ 為使用 v 車型從回收廠 j 運送至拆解/處理廠 d 之單位運輸成本，以元/延噸公里為單位， L_{jd} 為回收廠 j 與拆解/處理廠 d 之間的距離，以公里為單位， X_{jdv} 為使用 v 車型從回收廠 j 運送至拆解/處理廠 d 之流量，以公噸為單位，是否送出流量的二元變數為 $\delta_d^{j,d}$ 。

從拆解/處理廠到再生廠的運輸成本為：

$$C_{(d,r)}^T = \sum_v \text{TC}_v^{d,r} \times L_{dr} \times X_{drv} \times \delta_r^{d,r} \quad (22)$$

其中， $\text{TC}_v^{d,r}$ 為使用 v 運具從拆解/處理廠 d 運送至再生廠 r 之單位運輸成本，以元/延噸公里為單位， X_{drv} 為使用 v 運具從拆解/處理廠 d 到再生廠 r 之流量（公噸）， L_{dr} 為拆解/處理廠 d 與再生廠 r 之間的距離，以公里為單位，是否送出流量的二元變數為 $\delta_r^{d,r}$ 。

拆解/處理廠到最終處理廠的運輸成本為：

$$C_{(d,t)}^T = \sum_v \text{TC}_v^{d,t} \times L_{dt} \times X_{dvt} \quad (23)$$

其中， X_{dvt} 為使用 v 運具從拆解/處理廠 d 到最終處理廠 t 之流量（公噸）， $\text{TC}_v^{d,t}$ 為使用 v 運具從拆解/處理廠 d 運送至最終處理廠 t 之單位運輸成本，以元/公里*公噸為單位， L_{dt} 拆解/處理廠 d 與最終處理廠 t 之間的距離，以公里為單位。

因此，本研究考慮所有於節線上的總運輸成本即為從回收點到回收廠、從回收廠到拆解/處理廠、從拆解/處理廠到再生廠以及從拆解/處理廠到最終處理廠之運輸成本加總：

$$C^T = \sum_{i,j} C_{(i,j)}^T + \sum_{j,d} C_{(j,d)}^T + \sum_{d,r} C_{(d,r)}^T + \sum_{d,t} C_{(d,t)}^T \quad (24)$$





作業成本則包含廠址儲存成本以及運送途中儲存作業成本，依據 Shih (2002)所探討的廠址作業成本，包含回收點、回收廠、拆解/處理廠、再生廠和最終處理廠所產生的儲存成本。運送途中儲存作業成本 HC_{drv} 或 HC_{dv} 則為運送途中之持有成本 (holding cost)，並考慮因有害物質儲存之作業保護程度不同其運送儲存成本亦不同，由於從拆解/處理廠到再生廠或最終處理廠之運送過程其物料可能為有害的，故本研究僅考慮拆解/處理廠到再生廠或最終處理廠間運送過程的節線，才具此項成本。本研究作業成本包含有節點與節線所產生的作業成本，回收點的作業成本函數如下：

$$C_i^S = SC_i \times YI_i \quad (25)$$

其中， SC_i 為回收點的單位作業成本，以元/公噸為單位， YI_i 為由回收點 i 收集到的總量，單位為公噸。在回收廠的作業成本方面，即為回收廠上的單位作業成本乘以收集到回收廠上廢棄物總量，並將各節點加總，其函數如下：

$$C_j^S = SC_j \times YJ_j \quad (26)$$

其中， SC_j 為回收廠的單位作業成本，以元/公噸為單位， YJ_j 為經過回收廠 j 的總量，單位為公噸。

在拆解/處理廠的作業成本方面，本研究考慮拆解/處理廠對廢棄物之作業處理分為一般處理與環境友善(environmental benign)低風險妥善處理兩種作業方式，分別表示為其單位作業成本 SC_d 與 SC_d^R ，在拆解/處理廠的作業成本函數如下：

$$C_d^S = YD_d \times [SC_d \times (1 - \delta_R) + SC_d^R \times \delta_R] \quad (27)$$

其中， SC_d 為拆解/處理廠中一般處理作業的單位作業成本，以元/公噸為單位；而 SC_d^R 為拆解/處理廠中環境友善、低風險妥善處理作業之單位作業成本，以元/公噸為單位； YD_d 為經過拆解/處理廠 d 的總廢棄量，單位為公噸， δ_R 代表採用低風險妥善處理作業與否之二元變數。

在再生廠的作業成本，亦考慮處理作業是否採用低風險妥善處理作業，其函數如下：

$$C_r^S = YR_r \times [SC_r \times (1 - \delta_R) + SC_r^R \times \delta_R] \quad (28)$$

其中， SC_r 為再生廠以一般處理作業之單位作業成本，以元/公噸為單位；而 SC_r^R 為再生廠以環境友善、低風險妥善處理作業之單位作業成本，以元/公噸為單位； YR_r 為到再生廠 r 的總總廢棄量，單位為公噸， δ_R 為二元變數。

最終處理廠的作業成本亦分為一般處理與環境友善低風險妥善處理作業，其函數如下：





$$C_i^S = Y T_i \times [S C_i \times (1 - \delta_R) + S C_i^R \times \delta_R] \quad (29)$$

其中， $S C_i$ 為最終處理廠之一般處理作業之單位作業成本，以元/公噸為單位；而 $S C_i^R$ 為最終處理廠之環境友善、低風險妥善處理作業之單位作業成本，以元/公噸為單位； $Y T_i$ 為到最終處理廠 i 的總廢棄量，單位為公噸， δ_R 為二元變數。

從拆解/處理廠 d 到再生廠運送過程中產生的作業成本，主要考慮運送程中之包裝成本，本研究假設分為一般包裝與低風險包裝其衍生之運送途中儲存作業成本部分分別為 $H C_{drv}$ 與 $H C_{drv}^R$ ，其函數如下：

$$C_{(d,r)}^S = X_{drv} \times [H C_{drv} \times (1 - \delta_R^{HC}) + H C_{drv}^R \times \delta_R^{HC}] \quad (30)$$

其中， $H C_{drv}$ 為使用 v 運具從拆解/處理廠到再生廠運送途中採用一般包裝之儲存作業成本，以元/公噸為單位； $H C_{drv}^R$ 為拆解/處理廠至再生廠具低風險妥善包裝下之運送途中儲存作業成本，以元/公噸為單位； X_{drv} 為拆解/處理廠到再生廠的廢棄物流量，以公噸為單位， δ_R^{HC} 代表採用低風險包裝與否之二元變數。

拆解/處理廠到最終處理廠作業成本亦考慮不同程度包裝成本之運送途中儲存作業成本，其函數如下：

$$C_{(d,t)}^S = X_{dtr} \times [H C_{dtr} \times (1 - \delta_R^{HC}) + H C_{dtr}^R \times \delta_R^{HC}] \quad (31)$$

其中， $H C_{dtr}$ 為使用 v 運具從拆解/處理廠到最終處理廠運送途中採用一般包裝之儲存作業成本，以元/公噸為單位； $H C_{dtr}^R$ 拆解/處理廠到最終處理廠中具低風險妥善包裝下之運送途中儲存作業成本，以元/公噸為單位； X_{dtr} 為拆解/處理廠到最終處理廠的廢棄物流量，以公噸為單位， δ_R^{HC} 為二元變數。

本研究節點上的作業成本為回收點、回收廠、拆解/處理廠、再生廠和最終處理廠的加總，以及拆解/處理廠到最終處理廠上或再生廠的作業成本，其總作業成本公式如下：

$$C^S = \sum_i C_i^S + \sum_j C_j^S + \sum_d C_d^S + \sum_r C_r^S + \sum_t C_t^S + \sum_{d,r} C_{(d,r)}^S + \sum_{d,t} C_{(d,t)}^S \quad (32)$$

風險函數則轉為貨幣化之風險成本，依據 Ahluwalia & Nema (2006) 考慮運送與儲存時風險的顧慮，並透過相關有害廢棄物運送評估方法，進行分析不同的運送作業所衍生之風險與可能的環境影響。然而，風險成本與作業(包裝)成本之間存有權衡取捨，若具備相關保護或低風險妥善包裝時將能降低運送時有害廢棄物可能所造成的風險，但是增加包裝的同時卻可能增加處理與包裝之作業成本。另外，因交通事故導致有害廢棄物運送車翻車或起火等，更會造成安全上莫大的威脅，同時運送時可能會對人們帶來影響，因此本研究依循 Ahluwalia & Nema (2006) 討論的運送時交通事故機率及人口衝擊。





從拆解/處理廠 d 到再生廠的運送風險函數如下：

$$R_{(d,r)}^T = X_{drv} \times RC_{drv} \times PAD^{d,r} \times PD^{d,r} [H_{non}^{d,r} \times (1 - \delta_R^{HC}) + H^{d,r} \times \delta_R^{HC}] \quad (33)$$

其中， RC_{drv} 為這段過程之單位風險成本， $H_{non}^{d,r}$ 代表從拆解/處理廠 d 到再生廠 r 採用一般包裝儲存作業所產生危害的可能性， $H^{d,r}$ 為運送途中採取低風險包裝之儲存作業，從拆解/處理廠 d 到再生廠 r 產生危害的可能性， $PAD^{d,r}$ 即是從拆解/處理廠 d 到再生廠 r 之交通事故機率，與運送範圍之交通事故有關， $PD^{d,r}$ 為從拆解/處理廠 d 到再生廠 r 所經過路線範圍內影響之人口衝擊。

從拆解/處理廠 d 到最終處理廠 t 之風險函數如下：

$$R_{(d,t)}^T = X_{dtv} \times RC_{dtv} \times PAD^{d,t} \times PD^{d,t} [H_{non}^{d,t} \times (1 - \delta_R^{HC}) + H^{d,t} \times \delta_R^{HC}] \quad (34)$$

其中， RC_{dtv} 為這段過程之單位風險成本， $H_{non}^{d,t}$ 代表從拆解/處理廠 d 到最終處理廠 t 採用一般包裝所產生危害的可能性， $H^{d,t}$ 即是從拆解/處理廠 d 到最終處理廠 t 採用低風險包裝所產生危害的可能性， $PAD^{d,t}$ 為從拆解/處理廠 d 到最終處理廠 t 之交通事故機率，與運送範圍之交通事故有關， $PD^{d,t}$ 為從拆解/處理廠 d 到最終處理廠 t 所經過路線範圍內影響之人口衝擊。總運送風險即為從拆解/處理廠 d 到再生廠 r 的運送風險和從拆解/處理廠 d 到最終處理廠 t 之風險之加總，函數如下：

$$R^T = \sum_{d,r} R_{(d,r)}^T + \sum_{d,t} R_{(d,t)}^T \quad (35)$$

再者，拆解/處理廠、再生廠和最終處理廠作業時則具有儲存風險，如同 Ahluwalia & Nema (2006) 討論的事故機率及人口衝擊，隨著作業時的儲存情形來變動，越完善的處置、儲存方式，勢必可以降低產生的風險，反之，若未妥善處理，可能造成重大的風險危害，也就是業者未對風險有完善措施。人口衝擊評估方式以 Alumur & Kara (2007) 所提出的人口曝露影響，建立節點 k 所在區域範圍內各分區人口曝露函數如下：

$$PD = R_k^p \times \mu_k \times \pi \times (L_k^p)^2 \quad (36)$$

其中， R_k^p 為風險值，與所設的廠址特性有關， μ_k 為節點 k 區域範圍內之人口密度，單位為人/平方公里， L_k^p 為污染的影響半徑，單位為公里。

拆解/處理廠 d 之儲存風險函數如下：

$$R_d^S = YD_d \times PAD^d \times PD^d \times RC_d [(1 - \delta_R) \times H_{non}^d + \delta_R \times H^d] \quad (37)$$

其中， YD_d 為經過拆解/處理廠 d 的總廢棄量， PAD^d 為拆解/處理廠 d 之事故機率，





PD^d 為拆解/處理廠 d 之人口衝擊； RC 為儲存單位風險成本值， H_{non}^d 為一般處理作業時，拆解/處理廠 d 產生危害的可能性； H^d 為環境友善、低風險妥善處理作業時，拆解/處理廠 d 產生危害的可能性。

再生廠 r 之儲存風險函數為：

$$R_r^S = YR_r \times PAD^r \times PD^r \times RC[(1 - \delta_R) \times H_{non}^r + \delta_R \times H^r] \quad (38)$$

其中， H_{non}^r 為再生廠 r 採用一般處理所產生危害的可能性， H^r 為再生廠 r 採用低風險妥善處理作業所產生危害的可能性， PAD^r 為再生廠 r 之事故機率， PD^r 為再生廠 r 之人口衝擊， YR_r 為到再生廠 r 的總廢棄量。

最終處理廠 t 之儲存風險為：

$$R_t^S = YT_t \times PAD^t \times PD^t \times RC[(1 - \delta_R) \times H_{non}^t + \delta_R \times H^t] \quad (39)$$

其中， H_{non}^t 為最終處理廠 t 採用一般處理所產生危害的可能性， H^t 為最終處理廠 t 採用低風險妥善處理作業所產生危害的可能性， PAD^t 為最終處理廠 t 之事故機率， PD^t 為最終處理廠 t 之人口衝擊， YT_t 為到最終處理廠 t 的總數。總儲存風險為拆解/處理廠、再生廠和最終處理廠之儲存風險成本之加總，如下：

$$R^S = \sum_d R_d^S + \sum_r R_r^S + \sum_t R_t^S \quad (40)$$

三、規劃模式

本研究以數學規劃模式為基礎，以總成本和總風險最小化目標下，求解廢棄物逆物流運送流通規劃，其中目標式涵蓋處理成本、運輸成本、作業成本、運送風險與儲存風險，限制式參考 Shih(2002)與何家豪(2003)之考慮，包含流量守恒、容量守恒、數量限制、非負限制、環保法規等相關資訊的限制式。其中，未避免總成本與總風險之數值差異過大，故將總成本和總風險分別作正規化（如式(41d)），再進行加總；並以權重代表決策者對兩者目標的重要性。

$$\text{Min } U = W_C \times \bar{C} + W_R \times \bar{R} \quad (41a)$$

$$C = C^D + C^T + C^S \quad (41b)$$

$$R = R^T + R^S \quad (41c)$$

$$\bar{C} = \frac{C}{C^{\text{MAX}}}, \quad \bar{R} = \frac{R}{R^{\text{MAX}}} \quad (41d)$$

Subject to

$$\sum_v \sum_j X_{ijv} = YI_i \quad (41e)$$





$$YJ'_j = \sum_v \sum_i X_{ijv} - \sum_v \sum_d X_{jdv} \quad (41f)$$

$$YD'_d = \sum_v \sum_j X_{jdv} - (\sum_v \sum_r X_{drv} + \sum_v \sum_t X_{dtv}) \quad (41g)$$

$$\min S_i \leq YI_i \leq \max S_i$$

$$\min S_j \leq YJ_j \leq \max S_j$$

$$\min S_d \leq YD_d \leq \max S_d$$

$$\min S_r \leq YR_r \leq \max S_r$$

$$\min S_t \leq YT_t \leq \max S_t \quad (41h)$$

$$\sum_d \delta_d^{\text{Dis}} \leq E_1$$

$$\sum_r \delta_r^{\text{Re}} \leq E_2$$

$$\sum_t \delta_t^{\text{Tr}} \leq E_3 \quad (41i)$$

$$\sum X_{ijv} \leq X_v^{\text{cap}} \quad \forall i, j, v$$

$$\sum X_{jdv} \leq X_v^{\text{cap}} \quad \forall j, d, v$$

$$\sum X_{drv} \leq X_v^{\text{cap}} \quad \forall d, r, v$$

$$\sum X_{dtv} \leq X_v^{\text{cap}} \quad \forall d, t, v \quad (41j)$$

$$\forall X_{ijv}, X_{jdv}, X_{drv}, X_{dtv}, YI_i, YJ_j,$$

$$YD_d, YR_r, YT_t, YJ'_j, YD'_d \geq 0 \quad (41k)$$

其中，式(41a)-(41c)為目標函數；式(41d)為總成本和總風險的正規化目標式。式(41e)為回收點*i*的流量守恆限制，即表示從回收點送出廢棄物總量等於回收點*i*的回收總量；式(41f)為回收廠*j*的流量守恆限制，即表示流入回收廠*j*的廢棄物量減去回收廠*j*流出廢棄物量等於未送出的廢棄量，由於回收廠可能兼具拆解/處理廠或拆解/處理廠與再生廠之功能；式(41g)為拆解/處理廠*d*的流量守恆限制，即為流入拆解/處理廠*d*廢棄物量減去分別送到再生廠*r*以及最終處理廠*t*兩者流量加總，表示拆解/處理廠可能兼具再生廠之功能。式(41h)為回收點、回收廠、拆解/處理廠、再生廠、最終處理廠之容量限制。式(41i)為拆解/處理廠、再生廠、最終處理廠的數量限制。式(41j)為配送車隊容量限制；式(41k)為非負限制式。





肆、數值範例分析

為驗證本研究模式之可行性，本研究以國內北台灣區域廢棄電腦回收業為應用範例。相關資料蒐集包含：回收點(共 26 個節點)位置、廢棄量、各類成本值與風險值等相關資料，為減化分析運具則僅分為大貨車(17 噸)與小貨車(3.5 噸)。廢棄物回收量資料係根據中華民國環境保護統計 97 年年報，主要為各縣市環保局稽核認證量之統計資料。運送成本與作業成本、及風險成本相關參數，則參考過去文獻(Shih, 2002; 何家豪, 2003)之數值資料，作合理之假設。

本研究第一階層進行回收廠之選擇，各評選臨界值主要以各初步候選區位對應各指標之白化數值分佈而訂，分別設定為第 30 百分位數、中位數、第 70 百分位數之近似值，由白化值及白化權函數，計算各初步候選區位相對於高、中、低成本之灰類，由白化值判斷初步候選航線所屬於之成本灰類，選擇評定為低成本之候選區位為回收廠，回收廠擇定為節點 6、10、11、16、17、22、25、26。第二階層則於這些回收廠中進行拆解/處理廠、再生廠和最終處理廠之選擇，除了考慮總成本指標外，還有人口曝露風險指標。由於國內法規指出廢棄電腦在處理階段、輸出與再利用是有害的，故本研究將風險納入考慮。本研究由白化值、白化權函數及聚類權重設為相等，計算各初步候選區位相對於高、中、低成本與高、中、低風險之灰類之聚類係數，由聚類係數判斷候選區位所屬於之灰類，選擇評定為低成本之候選區位為最適候選區位，進行廢棄物回收逆物流網路結構設計，結果示意如圖 2，拆解處理廠選定為節點 17、25、26，再生廠選定為節點 17、26，最終處理廠選定為節點 11、26。圖 2 中，其中回收廠有 8 個、拆解/處理廠有 3 個、再生廠有 2 個與最終處理廠有 2 個。本研究應用灰色聚類選定的回收廠、再生廠與拆解/處理廠與最終處理廠，從結果發現由於選定範圍特性，有些回收廠、再生廠與拆解/處理廠為同一節點，也有最終處理廠、回收廠與拆解/處理廠為同一節點，實務上表示可成立多功能廠，或是在同一地點附近分別設置這些廠址。對照本研究結果之實際地理區位，顯示所選定之回收廠、再生廠、拆解/處理廠與最終處理廠多分布在桃竹苗地區，與現況比較發現節點分布在桃園地區是相似的。另外，其他節點分布在新竹與苗栗的原因，可能是本研究僅討論北臺灣範圍而未探討到中部地區，使得原本現況分布在中區變為新竹與苗栗地區。推論本研究廢棄物回收逆物流網路結構設計結果與實務現況比較，結果尚屬合理。



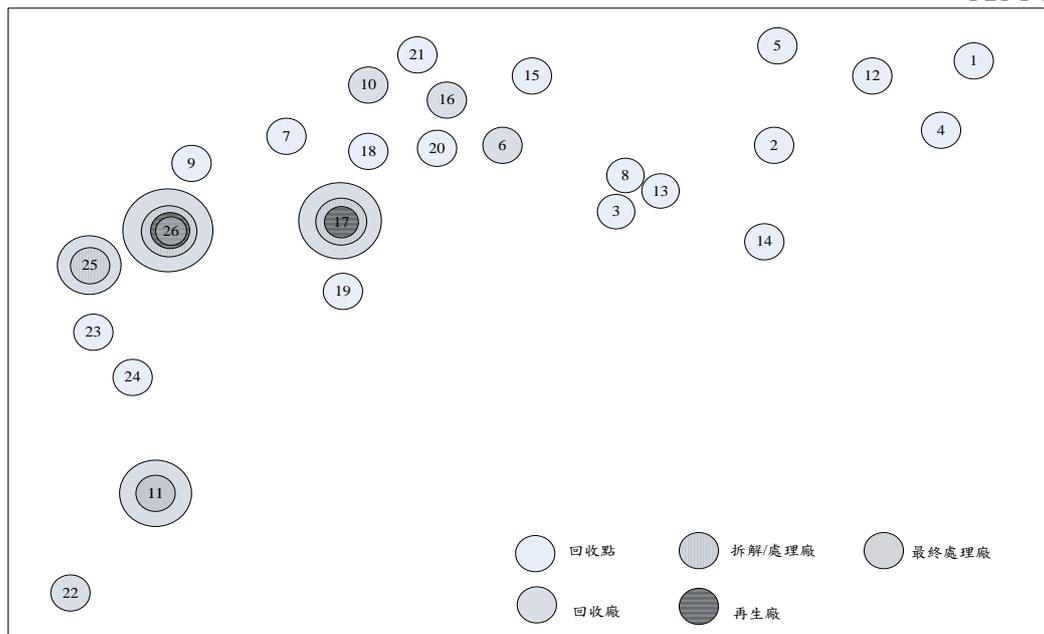


圖 2 廢電腦回收逆物流網路結構設計結果示意圖

本研究以 Lingo 求解廢棄物回收運送規劃之數學規劃模式，以目標函數正規化加總效用值最小為目標，求得最佳解，結果如表 1。

表 1 廢棄物回收逆物流網路運送流通規劃結果

目標函數	數值 (元)
總成本	3420825000
總運輸成本	3802409
拆解/處理廠之處理成本	47916400
總作業成本	2166407000
回收點之總作業成本	400900000
回收廠之總作業成本	801800000
拆解/處理廠、再生廠與最終處理廠之作業成本	2147786000
運送時的儲存作業成本	18620610
總風險貨幣值	985.9602
總儲存風險貨幣值	983.0123
總運送風險貨幣值	2.947858





表 1 廢棄物回收逆物流網路運送流通規劃結果 (續)

節線	運具	流量 (噸)	節線上運送成本 (元)	節線	運具	流量 (噸)	節線上運送成本 (元)
(3,17)	大車	239.4929	50054.0161	(5,25)	大車	373.7366	170423.8896
(3,25)	大車	5.471156	2002.443096	(2,10)	大車	1200.000	346800
(3,26)	大車	9.627592	3234.870912	(2,16)	大車	509.8784	140726.4384
(8,6)	大車	166.1657	20438.3811	(2,17)	大車	0.3233438	100.5599218
(8,17)	大車	78.21152	18457.91872	(2,26)	大車	0.2491418	109.1241084
(8,25)	大車	4.977680	1951.25056	(14,17)	大車	254.4248	91847.3528
(8,26)	大車	5.645121	2049.178923	(14,26)	大車	0.1757980	85.789424
(13,6)	大車	82.18454	9779.96026	(12,16)	大車	557.1159	177719.9721
(13,16)	大車	133.0057	27665.1856	(12,17)	大車	0.3233438	114.4637052
(13,17)	大車	6.349465	1606.414645	(12,26)	大車	0.2491418	119.8372058
(13,25)	大車	5.607744	2299.17504	(1,17)	大車	1.421879	634.158034
(13,26)	大車	27.30149	10374.5662	(1,25)	大車	253.0083	152564.0049
(15,17)	大車	103.8221	14638.9161	(1,26)	大車	0.1757980	100.732254
(15,25)	大車	2.675720	797.36456	(4,17)	大車	254.4283	102280.1766
(15,26)	大車	0.5022187	134.5946116	(4,26)	大車	0.1754973	92.8380717
(18,17)	大車	1.759765	98.54684	(17,11)	大車	0.1521036	48.5210484
(18,25)	大車	104.9426	21513.233	(6,26)	大車	0.2933088	66.5810976
(20,22)	大車	107.0000	60241	(25,17)	大車	0.2551493	42.0996345
(21,22)	大車	107.0000	57780	(10,26)	大車	0.2514333	52.0466931
(19,22)	大車	107.0000	54356	(16,26)	大車	0.2531498	46.832713
(7,17)	大車	1.395041	22.320656	(22,26)	大車	0.2392622	86.8521786
(7,25)	大車	105.0083	18166.4359	(26,11)	小車	8.062110	2547.62676
(7,26)	大車	0.1757980	25.139114	(3,17)	小車	0.2441493	71.2915956
(9,17)	大車	5.229434	360.830946	(3,26)	小車	0.1642199	77.183353
(9,25)	大車	34.76702	3963.44028	(13,17)	小車	0.3146056	111.684988
(9,26)	大車	0.1857065	12.8137485	(13,26)	小車	0.2365026	125.8193832
(23,17)	大車	4.419596	1069.542232	(18,17)	小車	0.1874407	14.8078153
(9,26)	小車	0.1836000	17.6256	(2,26)	小車	0.2354883	144.3543279
(23,17)	小車	0.8171463	277.0125957	(14,17)	小車	0.2387651	120.5763755
(23,25)	小車	64.80488	6415.68312	(14,26)	小車	0.1606622	109.5716204
(23,26)	大車	0.1939766	26.3808176	(18,26)	小車	0.1101959	26.9979955
(24,22)	大車	71.00000	14413	(7,17)	小車	0.2495319	5.4897018
(25,11)	小車	329.3185	82000.3065	(25,17)	小車	3144.745	726436.095
(22,26)	小車	0.2279494	115.7982952	(16,26)	小車	0.2473763	64.0704617
(5,6)	大車	951.6498	230299.2516	(7,26)	小車	0.1713509	34.27018
(1,17)	小車	0.2361125	147.3342	(12,26)	小車	1152.999	775968.327
(4,17)	小車	0.2371381	133.5087503	(1,26)	小車	0.1579315	126.661063
(6,26)	小車	0.2428511	76.9837987	(4,26)	小車	0.1590351	117.685974
(10,26)	小車	310.8447	89834.1183	(17,11)	小車	0.1421951	63.4190146
(5,22)	大車	385.6136	302321.0624	(9,17)	小車	0.2478154	24.0380938
(23,26)	小車	0.7643998	146.0003618	(12,17)	小車	0.3122650	154.88344
(2,17)	小車	0.3135913	136.7258068				





由表 1，結果顯示運送途中儲存作業採用低風險包裝，拆解/處理廠、再生廠與最終處理廠進行環境友善、低風險妥善的處理作業，即業者必須友善管理廢棄物，方能讓整體目標值最小。運送流通規劃結果，運具派遣以大貨車為主，可能由於本研究為中、長期逆物流網路運送規劃決策，加上廢棄物回收運送沒有及時性之需求，故主要利用大貨車派遣較能達規模經濟效果。

進一步進行敏感度分析，以探討參數變動對於成本值與風險值的影響，包含作業成本、運送時的儲存作業成本、運輸風險與儲存風險，並將這些參數作{-30%、-15%、+15%、+30%}的變化幅度。敏感度分析結果發現，運送規劃決策結果(即節線流量)不變，僅影響目標式值改變，參數變動對總成本與總風險目標式值影響如表 2 所示。而其中，作業成本參數變動的敏感度較大，其他儲存成本、運輸風險與儲存風險之敏感度相對較小。

再者，本研究利用目標函數之權重作不同情境分析，分為低成本導向情境(總成本之權重為 0.8，總風險之權重為 0.2)與低風險導向情境(總成本之權重為 0.2，總風險之權重為 0.8)，最適化解目標函數值結果如表 3。在低成本導向情境下，結果顯示運送途中儲存作業較不採用低風險包裝，拆解/處理廠、再生廠與最終處理廠則僅採一般處理作業，以降低作業成本。另一方面，在低風險導向情境下，結果顯示運送途中儲存作業採用低風險妥善包裝，拆解/處理廠、再生廠與最終處理廠則偏向進行環境友善、低風險妥善的處理作業。在整體正規化總計目標值之比較，以低風險導向之總計目標值為最小，表示廢棄物回收之逆物流網路規劃更應著重廢棄物對環境、社會之影響，並可藉規劃結果進行顧慮風險下之運送策略。在低風險導向中，若能提升運輸成本，則能促使總運送風險與總儲存風險下降；然以低成本導向考量下，為有效降低各種相關成本，卻反而增加風險貨幣值並且對環境的影響甚大。

表 2 參數變動對總成本與總風險目標式值之影響

參數值變動百分比	-30%	-15%	0%	15%	30%
總成本(元)	2774127000	3105152000	3420825000	3740174000	4064594000
總風險(元)	974.20510	976.04930	985.96020	974.19830	976.04280

綜合上述之範例分析結果，驗證本研究廢棄物回收逆物流網路結構設計與廢棄物回收運送規劃模式確為可行，可提供廢棄物回收逆物流運送規劃上更具決策彈性之結果，同時本研究可延伸作為輔助相關第三方廢棄物回收逆物流運送業者之策略規劃與決策支援的參考。





表 3 原始最佳解及不同情境下最佳解之結果

目標與成本函數	原始設定 (成本：風險 權重比=0.5：0.5) 最佳解數值	低成本導向 (成本：風險 權重比=0.8：0.2)	低風險導向 (成本：風險 權重比=0.2：0.8)
總成本	3420825000	3240635000	3420251618
回收點之總作業成本	400900000	400900000	400900000
回收廠之總作業成本	801800000	801800000	801800000
總運輸成本	3802409	3566884	3972188
拆解/處理廠之處理成本	47916400	47916400	47916400
總作業成本	2166407000	1986452000	216566000
拆解/處理廠、再生廠、 最終處理廠之作業成本	2147786000	1985321000	2147363000
運送時的儲存作業成本	18620610	1130777.	18300030
總風險貨幣值	985.9602	2744327	975.8490
總儲存風險貨幣值	983.0123	2744312.	973.1386
總運送風險貨幣值	2.947858	14.28978	2. 710385

伍、結論與建議

本研究探討廢棄物回收之逆物流網路設計與運送規劃，以兩階段方式進行模式建構與求解。第一階段以灰色聚類為基礎進行廢棄物回收逆物流網路結構設計，即確定節點之數量及位置，其利用成本與風險的考量，決定回收廠、拆解/處理廠、再生廠和最終處理廠之最適節點及其區位；第二階段採用數學規劃來求解逆物流運送規劃之最佳解，其中目標式為總成本與總風險最小，在考慮處理成本、運輸成本、作業成本、運送風險與儲存風險目標下，且涵蓋流量守恆、容量守恆、數量限制、非負限制、環保法規等相關資訊的限制式，求解最適的廢棄物回收逆物流網路運送規劃。

本研究利用二階層灰色聚類來選定回收廠、再生廠與拆解/處理廠與最終處理廠節點，本研究從結果發現由於選定範圍特性，有些回收廠、再生廠與拆解/處理廠為同一區位，也有最終處理廠、回收廠與拆解/處理廠為同一區位，即表示可以成立多功能的廠區，或是在同一地點附近分別設置回收廠、再生廠與拆解/處理廠與最終處理廠。實務現況上，亦有這種情形出現，如：佳龍科技工程股份有限公司之營運據點網路，可能是由於平均每日產能低，故多功能的廠區可降低成本，如固定成本與運輸成本。本研究節點選擇結果對應其實際地理區位，顯示回收廠、再生廠與拆解/處理廠與最終處理廠分布多在桃竹苗地區，與實際現況區域是相似的，可推論本研究廢棄物回收逆物流網路結構設計模式應為可行。

本研究第二階段以數學規劃模式求解廢棄物回收運送規劃，以目標函數正規化加總





效用值最小為目標，求得最佳解。運送規劃結果顯示運送途中儲存作業採用低風險包裝，拆解/處理廠、再生廠與最終處理廠進行環境友善、低風險妥善的處理作業，即業者必須友善管理廢棄物，方能讓整體目標值最小。而規劃結果中，運具派遣以大貨車為主，可能由於本研究為中、長期逆物流網路運送規劃決策，加上廢棄物回收運送沒有及時性之需求，故主要利用大貨車派遣較能達規模經濟效果。而敏感度分析結果發現，作業成本參數變動的敏感度較大，其他儲存成本、運輸風險與儲存風險之敏感度相對較小。另一方面，本研究利用目標函數之權重作不同情境分析，分為低成本導向情境(總成本之權重為 0.8，總風險之權重為 0.2)與低風險導向情境(總成本之權重為 0.2，總風險之權重為 0.8)。整體而言，以低風險導向之總目標值為最小，表示廢棄物回收之逆物流網路規劃更應著重廢棄物對環境、社會之影響，並可藉規劃結果進行顧慮風險下之運送策略。綜合上述之範例分析結果，驗證本研究廢棄物回收逆物流網路結構設計與廢棄物回收運送規劃模式確為可行，可提供廢棄物回收逆物流運送規劃上更具決策彈性之結果。

本研究模式與分析過程可提供相關第三方廢棄物回收逆物流業者在複雜、多變之逆物流業務流程下，藉由不同的決策考量，具規劃基礎與決策彈性，並提供相關之策略規劃與決策支援的參考。

參考文獻

1. 何家豪 (2003)。有害廢棄物逆向物流聯合處理營運模式之研究。國立交通大學交通運輸研究所碩士論文。
2. 洪千琇 (2007)。考慮可靠度與逆物流成本下回收不確定性決策之研究。中原大學工業工程學系碩士論文。
3. Ahluwalia, P. K. & Nema, A. K. (2006). Multi-objective reverse logistics model for integrated computer waste management. *Waste Management and Research*, 24, 514-527.
4. Alumur, S. & Kara, B. (2007). A new model for the hazardous waste location-routing problem. *Computers & Operations Research*, 34(5), 1406-1423.
5. Barros, A. I., Dekker, R. & Scholten, V. (1998). A two-level network for recycling sand: a case study. *European Journal of Operational Research*, 110, 199-214.
6. Bloemhof-Ruwaard, J. M., Fleischmann, M. & van Nunen, J. (1999). Reviewing distribution issues in reverse logistics. In: Speranza, M. G. & Stahly, P. (Eds.), *New Trends in Distribution Logistics*. (PP. 23-44). Berlin: Springer-Verlag,
7. Cottrill, K. (2000). Return to sender. *TraNc World*, 262(7), 17-18.
8. Du, F. & Evans, G. W. (2008). A bi-objective reverse logistics network analysis for post-sale service. *Computers and Operations Research*, 35(5), 2617-2634.





9. Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Dekker, R., van der Laan, E., van Nunen, J. A. E. E. & van Wassenhove, L. N. (1997). Quantitative models for reverse logistics: a review. *European Journal of Operation Research*, 103(1), 1-17.
10. Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Dekker, R. & Flapper, S. D. P. (2000). A characterization models for logistics networks for product recovery. *Omega*, 28(6), 653-666.
11. Fleischmann, M., Beullens, P., Bloemhof-Ruwaard, J. M. & van Wassenhove, L. N. (2002). The impact of product recovery on logistics network design. *Production & Operations Management*, 10(2), 156-173.
12. He, W., Li, G., Ma, X., Wang, H., Xu, M. & Huang, C. (2006). WEEE recovery strategies and the WEEE treatment status in China. *Journal of Hazardous Materials*, 136(3), 502-512.
13. Jayaraman, V., Patterson, R. A. & Rolland, E. (2003). The design of reverse distribution networks: models and solution procedures. *European journal of Operational Research*, 150, 128-149.
14. Krumwiede, D. W. & Sheu, C. (2002). A model for reverse logistics entry by third-party providers. *Omega*, 30(5), 325-333.
15. Krikke, H. R., van Harten, A. & Schuur, P. C. (1999). Business case OCE: reverse logistics network re-design for copiers. *OR Spectrum*, 21(3), 381-409.
16. Salema, M. I. G., Barbosa-Povoa, A. P. & Novais, A. Q. (2007). An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertain. *European Journal of Operational Research*, 179, 1063-1077.
17. Shih, L. H. (2002). Reverse logistics system planning for recycling electrical appliances and computers in Taiwan. Resources. *Conservation and Recycling*, 32(1), 55-72.
18. Sheu, J. B. (2007). A coordinated reverse logistics system for regional management of multi-source hazardous wastes. *Computers and Operations Research*, 34(5), 1442-1462.
19. Srivastava, S. K. (2008). Network design for reverse logistics. *Omega*, 36, 535-548.





Reverse logistics network design and distribution planning for waste computer recycling

Yuh-Horng Wen^{*a}, Chia-Jung Hsieh^b

^aAssistant Professor, Department of Transportation Management, Tamkang University

^bGraduate Institute of Transportation Science, Tamkang University

ABSTRACT

Reverse logistics network design for waste recycling encompasses decisions on reverse logistics network shape, the topological relationships among reverse logistics plants, and reverse distribution planning. This study develops a series of models to design a network structure of waste reverse logistics and to determine distribution flow for waste recycling. In the first part of this study, the reverse logistics network shape is designed and formed into a network structure by applying grey clustering. This study defines transportation cost index and risk index. Using grey clustering, the locations of recycling plants, disassembling plants, recycling companies and the final treatment plants are chosen and determined. In the second part of the study, on the basis of the designed network shape (structure), this study proposes a mathematical programming model to determine the optimal distribution flows on all of the links forming the designed reverse logistics network for waste recycling. The objective function is to minimize the total reverse logistics cost of waste recycling as well as the total risk value. Finally, a case study with a waste computer recycling was provided to illustrate the results and the application of the models. Sensitivity analysis was also discussed. The results of this study verify that the models are practicable, and also provide higher flexibility on decision-making for reverse logistics services providers.

Keywords: Reverse Logistics Network, Distribution and Flow Programming, Waste Recycling, Network Modeling

* E-mail: yhwen@mail.tku.edu.tw

