

東 海 大 學

工業工程與經營資訊學系

碩士論文

考量不確定性之正逆向物流整合型永續
供應鏈網絡設計 — 以太陽能產業為例

研 究 生：王中俊

指 導 教 授：王立志 教授

中 華 民 國 一〇一 年 六 月

**Integrated Forward and Reverse Sustainable Supply
Chain Network Design under Uncertainty – A Case Study
of Solar Energy Industry**

By
Chung-Chun Wang

Advisor: Prof. Li-Chih Wang

A Thesis
Submitted to the Institute of Industrial Engineering and Enterprise
Information at Tunghai University
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science
in
Industrial Engineering and Enterprise Information

June 2012
Taichung , Taiwan , Republic of China

考量不確定性之正逆向物流整合型永續供應鏈網絡設計 — 以太陽能產業為例

學生：王中俊

指導教授：王立志 博士

東海大學工業工程與經營資訊學系

摘 要

本研究提出一套整合正、逆向物流之供應鏈設計模式，考量環境永續議題與市場供需資訊之不確定性，決定逆物系統之建置，包括流潛在廠區位置(location)、運輸流量(flow)、產能(capacity)與技術(technology)投資設計，並過穩健多目標最佳化方法(Robust Multi-objective Programming Model; RMOP)，權衡整體供應鏈設計之總成本(total cost)與二氧化碳排放約當量(CO₂e)。

數值分析結果指出，逆物流系統建置會依據不同的原物料取得成本與市場不確定性而呈現不同的經濟效益；並透過柏拉圖最適解集合(Pareto-optimal Set)，分析成本與二氧化碳排放之間的影響，並依據不同的碳排放上限(Cap)給予企業兼具成本與環境效益的供應鏈設計結果。除此之外，本研究亦驗證穩健最佳化模型(robust model)與確定型模型(deterministic model)，於不同市場不確定下，供應鏈設計之穩健性績效。最後，以矽晶太陽能產業為案例，說明正逆向物流整合型永續供應鏈設計於實務上之重要性與可行性。

關鍵字詞：永續供應鏈設計、逆物流、穩健最佳化、不確定性、矽晶太陽能產業

Integrated Forward and Reverse Sustainable Supply Chain Network Design under Uncertainty – A Case Study of Solar Energy Industry

Student: Chung-Chun Wang

Advisor: Prof. Li-Chih Wang

Department of Industrial Engineering and Enterprise Information
Tunghai University

ABSTRACT

This paper studies an integrated forward and reverse supply chain network design problem with sustainable concerns under the uncertain environment. We are interested in the logistics flows, capacity expansion and technology investments of existing and potential facilities, and consider the uncertainty occurred in raw material supply, customer demand and return quantity. A robust multi-objective programming model (RMOP), that captures the trade-off between the total cost and the carbon dioxide (CO₂) emission, is developed from the economic and environmental perspective, respectively.

In the numerical evaluation and results, we analyzed the relationship between the total cost and carbon emission in integrated supply chain network and robustness of the proposed RMOP model by the generated Pareto-optimal set. Finally, a case study of crystalline solar energy industry is applied to illustrate the importance of developing an integrated forward and reverse supply chain network design model in practice.

Keywords: Sustainable Supply Chain Design, Reverse Logistics, Robust Optimization, Uncertainty, Crystalline Solar Energy Industry

誌謝

研究所兩年生涯即將邁入終章，並開啟另一扇人生旅程之大門。過程中，除了專業領域上的知識外，更要秉持的積極與謙卑之態度面對未來之挑戰。

能夠順利地完成這份論文，首先感謝指導教授 王立志老師的殷勤指導；除了研究方面之外，亦時常叮嚀學生做人、做事的方法與態度，使學生在兩年研究所學程中獲益良多。感謝輔仁大學 陳子立老師的大力幫助，每當學生研究陷入瓶頸時，陳老師皆會適時地給予意見，並幫助學生找出解決方案。另外，亦感謝鄭辰仰老師、虎尾科大 陳盈彥老師，以及雲科大 袁明鑑老師於學生口試時給予學生寶貴之意見，使學生之研究論文能夠更臻完善，並拿到本屆全國工業工程與管理碩士論文競賽佳作之殊榮，學生由衷感謝各位先進之指教。

感謝忠軒、悅清、立楷與卜元等研究夥伴們，因為有你們，使我的研究所之路途上不無助；因為有你們，使我的研究所之路途上充滿歡笑與回憶。亦感謝心恕、聖傑、承攻、玉潔、依柔、梓皓、駿威等企業電子化暨自動化實驗室的學弟妹們，以及輔仁大學資管系的仲揚，給予我的學習與生活上的協助。

感謝我的家人與女朋友 孟珊在我這段時間給我的包容與鼓勵，並在我背後給予心靈上的支持，使我可以全心全力完成我的研究；亦感謝在天上的祖母，雖然您在這段時間離開了，也無法邀請您參加我的研究所畢業典禮，但有您的保守，使我在學業與人生之路能夠一切順利。

最後，謹將這份成果獻給每一位曾幫助過我的貴人，包括在最後階段幫助我找出論文中小錯誤的依君助理。因為有大家的協助與鼓勵，才能完成此論文。衷心地感謝大家。

王中俊 謹致於
東海大學工業工程與經營資訊學系
民國一〇一年七月

目錄

| | |
|---|-----------|
| 摘要..... | I |
| ABSTRACT..... | II |
| 誌謝..... | III |
| 目錄..... | IV |
| 圖目錄..... | VI |
| 表目錄..... | VIII |
| 第一章 緒論 | 1 |
| 1.1 研究背景與動機..... | 1 |
| 1.1.1 研究背景..... | 1 |
| 1.1.2 研究動機..... | 2 |
| 1.2 研究目的..... | 3 |
| 1.3 研究步驟與方法..... | 5 |
| 第二章 文獻探討 | 6 |
| 2.1 永續供應鏈..... | 6 |
| 2.1.1 永續供應鏈介紹..... | 6 |
| 2.1.2 正逆物流整合型供應鏈架構..... | 9 |
| 2.1.3 碳資產管理..... | 13 |
| 2.1.4 永續供應鏈建模與求解..... | 15 |
| 2.2 穩健化設計(ROBUSTNESS DESIGN) | 18 |
| 2.2.1 隨機規劃(Stochastic Programming; SP)..... | 18 |
| 2.2.2 穩健最佳化(Robust optimization; RO)..... | 19 |
| 2.3 太陽能產業介紹..... | 24 |
| 2.3.1 矽晶太陽能產業鏈現況..... | 24 |
| 2.3.2 太陽能電池種類..... | 26 |
| 2.3.3 太陽能電池製程地圖(Process Map) | 28 |
| 2.3.4 太陽能電池回收趨勢..... | 31 |
| 第三章 正逆向物流整合之永續供應鏈設計模式 | 33 |
| 3.1 問題描述..... | 33 |
| 3.2 一般化模型(GENERIC MODEL)..... | 36 |
| 3.2.1 假設條件..... | 36 |
| 3.2.2 已知資訊..... | 37 |
| 3.2.3 符號定義..... | 38 |
| 3.2.4 數學模式..... | 43 |

| | |
|---|------------|
| 3.3 穩健最佳化模型(ROBUST OPTIMIZATION MODEL) | 52 |
| 3.3.1 確認不確定參數..... | 52 |
| 3.3.2 定義不確定參數範圍..... | 52 |
| 3.3.3 ROBUST 轉換..... | 54 |
| 3.3.4 ROBUST 模型..... | 57 |
| 3.4 多目標求解方法 | 58 |
| 3.4.1 限制法(Constraint Method)..... | 58 |
| 3.4.2 妥協規劃法(Compromise Programming Method)..... | 60 |
| 3.5 模式範例 | 62 |
| 第四章 模式分析與評估 | 66 |
| 4.1 一般化模型分析 | 66 |
| 4.1.1 回收率對經濟與環境之影響..... | 66 |
| 4.1.2 市場不確定性對供應鏈設計之影響..... | 73 |
| 4.1.3 確定型模式與穩健型模式績效評估..... | 83 |
| 4.2 太陽能產業案例 | 90 |
| 4.2.1 產業案例情境介紹..... | 90 |
| 4.2.2 產業案例分析與整合型網絡設計..... | 93 |
| 第五章 結論與未來發展方向 | 98 |
| 5.1 結論..... | 98 |
| 5.2 未來發展方向..... | 99 |
| 參考文獻..... | 100 |
| 附錄一..... | 103 |
| 附錄二..... | 105 |
| 附錄三..... | 107 |
| 附錄四..... | 112 |

圖目錄

| | |
|---|----|
| 圖 1.1 二氧化碳排放趨勢..... | 2 |
| 圖 1.2 本研究之架構與流程..... | 5 |
| 圖 2.1 多階多廠之供應鏈網絡架構..... | 7 |
| 圖 2.2 永續供應鏈管理架構圖..... | 8 |
| 圖 2.3 逆物流功能與封閉式供應鏈架構..... | 10 |
| 圖 2.4 逆物流系統組成元素..... | 11 |
| 圖 2.5 京都議定書規範之溫室氣體排放量..... | 14 |
| 圖 2.6 考量耗用與排放之永續供應鏈架構..... | 16 |
| 圖 2.7 ROBUST OPTIMIZATION 轉換流程..... | 19 |
| 圖 2.8 矽晶太陽能電池產業鏈..... | 24 |
| 圖 2.9 太陽能產業鏈結構..... | 25 |
| 圖 2.10 國內太陽能廠商概況..... | 26 |
| 圖 2.11 太陽能電池種類..... | 26 |
| 圖 2.12 太陽能電池種類比例估計..... | 27 |
| 圖 2.13 太陽能電池構造與發電原理..... | 27 |
| 圖 2.14 矽晶太陽能產業製程地圖..... | 29 |
| 圖 2.15 產品 IM156 外觀與規格..... | 30 |
| 圖 2.16 德國廢太陽電池預估產生量..... | 31 |
| 圖 2.17 矽晶太陽能電池再製製程..... | 32 |
| 圖 3.1 正逆向物流整合之永續供應鏈架構..... | 33 |
| 圖 3.2 逆向物流廠區特徵..... | 34 |
| 圖 3.3 正向生產單位特徵..... | 34 |
| 圖 3.4 限制法解流程圖..... | 59 |
| 圖 3.5 妥協解示意圖..... | 60 |
| 圖 3.6 範例模式之柏拉圖前緣..... | 63 |
| 圖 3.7 模式範例之供應鏈設計結果 (經濟最佳化)..... | 64 |
| 圖 3.8 模式範例之供應鏈設計結果 (妥協解)..... | 64 |
| 圖 3.9 模式範例之供應鏈設計結果 (環境最佳化)..... | 65 |
| 圖 4.1 各原物料價格水準之與回收率之總成本趨勢..... | 68 |
| 圖 4.2 各原物料取得價格與回收率之成本組成比例..... | 69 |
| 圖 4.3 各回收率之柏拉圖前緣 ($pcsr_m=\$1000$)..... | 71 |
| 圖 4.4 各回收率之柏拉圖前緣 ($pcsr_m=\$500$)..... | 72 |
| 圖 4.5 各回收策略於不同不確定水準之供應鏈設計成本趨勢..... | 74 |
| 圖 4.6 各回收策略於不同不確定水準之碳排放趨勢..... | 75 |
| 圖 4.7 回收策略一網絡設計結構 ($UL=0.2$)..... | 76 |
| 圖 4.8 回收策略一網絡設計結構 ($UL=0.4$)..... | 77 |
| 圖 4.9 回收策略一網絡設計結構 ($UL=0.8$)..... | 78 |
| 圖 4.10 回收策略二網絡設計結構 ($UL=0.2$)..... | 79 |

| | |
|----------------------------------|----|
| 圖 4.11 回收策略二網絡設計結構 (UL=0.4)..... | 80 |
| 圖 4.12 回收策略二網絡設計結構 (UL=0.8)..... | 81 |
| 圖 4.13 太陽能產業供應鏈架構..... | 91 |
| 圖 4.14 產業產能技術示意圖..... | 92 |
| 圖 4.15 太陽能產業供應鏈預設結構..... | 93 |
| 圖 4.16 太陽能產業案例之柏拉圖前緣..... | 94 |
| 圖 4.17 太陽能產業供應鏈網絡 (經濟最佳化)..... | 95 |
| 圖 4.18 太陽能產業供應鏈網絡 (妥協解)..... | 96 |
| 圖 4.19 太陽能產業供應鏈網絡 (環境最佳化)..... | 97 |

表目錄

| | |
|---|-----|
| 表 2.1 近期供應鏈設計相關研究彙整..... | 22 |
| 表 3.1 供應鏈結構參數..... | 62 |
| 表 3.2 模式範例求解結果..... | 63 |
| 表 4.1 原物料成本水準..... | 67 |
| 表 4.2 回收率水準 (顧客需求 $rc = 100$)..... | 67 |
| 表 4.3 各回收率之經濟最佳化、妥協解、環境最佳化結果 ($pcsr = \$1000$)..... | 70 |
| 表 4.4 各回收率之經濟最佳化、妥協解、環境最佳化結果 ($pcsr = \$500$)..... | 72 |
| 表 4.5 穩健最佳化模型參數..... | 73 |
| 表 4.6 回收情境參數..... | 73 |
| 表 4.7 各不確定水準之固定建置成本與固定碳排放 (單位：千)..... | 83 |
| 表 4.8 確定型模型與穩健型模型求解績效差異..... | 84 |
| 表 4.9 確定型模型與穩健型模型處理真實供需數據..... | 85 |
| 表 4.10 太陽能產業模型求解結果..... | 94 |
| 附表 1 一般化模型相關參數表..... | 103 |
| 附表 2 各回收率之雙目標求解結果 ($pcsr = \$250$)..... | 105 |
| 附表 3 各回收率之雙目標求解結果 ($pcsr = \$500$)..... | 105 |
| 附表 4 各回收率之雙目標求解結果 ($pcsr = \$750$)..... | 106 |
| 附表 5 各回收率之雙目標求解結果 ($pcsr = \$1,000$)..... | 106 |
| 附表 6 不確定水準為 0.2 之供需參數亂數表..... | 107 |
| 附表 7 不確定水準為 0.4 之供需參數亂數表..... | 108 |
| 附表 8 不確定水準為 0.6 之供需參數亂數表..... | 109 |
| 附表 9 不確定水準為 0.8 之供需參數亂數表..... | 110 |
| 附表 10 不確定水準為 1.0 之供需參數亂數表..... | 111 |
| 附表 11 產業案例之相關參數表..... | 112 |
| 附表 12 產業案例之產能擴充成本參數表..... | 114 |

第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

1.1.1 研究背景

兼具 3E (Effective, Efficient, Environmental; 3E)與穩健(robust)的供應鏈，除了可做為企業永續經發展的優勢外，還可幫助企業應付日益嚴重的環境動盪與更加激烈的競爭壓力。一般而言，學者們所探討供應鏈的網絡設計議題多是專注在成員決定、廠區位置與產能，以及各成員節點之間的物流數量(Pishvae *et al.*, 2011)。除此之外，供應鏈設計亦是供應鏈管理議題中最重要的策略決策之一。然而，供應鏈設計的關鍵與困難點在於它是一個考量長期的決策過程，因新廠區的設立或產能的擴充並非如短期營運策略可隨時因應環境而做調整，故供應鏈設計的穩健性與適應未來長期趨勢的能力尤為重要。

近年來，為因應全球因應氣候變遷的發展，「低碳」之永續供應鏈已成為產品競爭力的保證，而碳資產管理成為國際間高度重視之議題。由於二氧化碳被認為是全球暖化造成的元兇且有逐年增長之趨勢，如圖 1.1 所示。1997 年 12 月於日本京都簽定議訂書之後，確立了溫室氣體過量排放所可能引發的氣候變遷，為全球共同面臨的重要環境問題之國際共識。因此溫室氣體排放管制的實施，應該具體落實在國家、產業、和企業等不同層次，採取符合經濟效益的排放減量方式，以降低溫室效應造成全球氣候變遷的影響。另一方面，有鑑於不可再生資源之消耗趨勢逐漸遞增，企業間興起一波逆物流熱潮。透過回收生命週期結束(End-of-Life; EOL)之產品，經過拆解、翻修或重製等程序後投入供應鏈中進行生產，進而形成一套封閉式迴路(closed-loop)的供應鏈架構。此營運模式不但可幫助企業提供一條另類的原物料供應管道，並降低新物料採購之營運成本外，更有助於減緩有限資源之消耗。

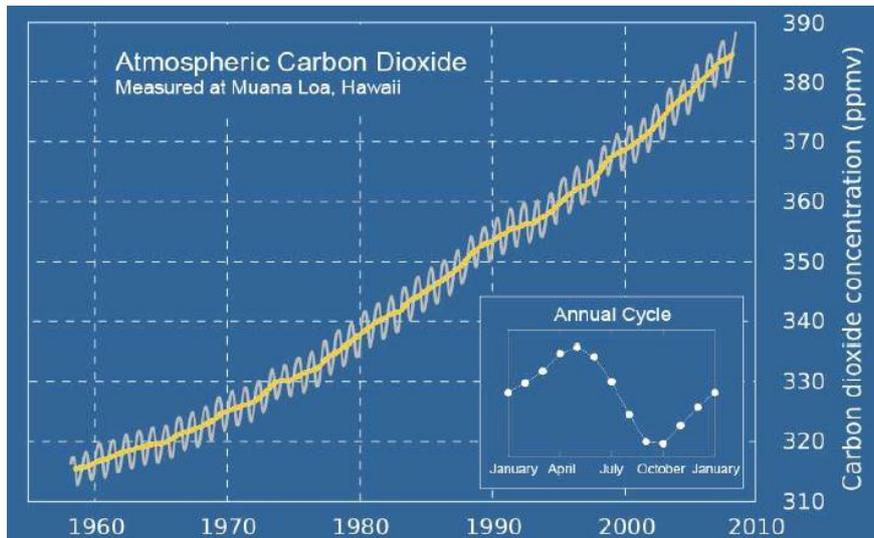


圖1.1 二氧化碳排放趨勢

以矽晶太陽能電池產業現況為例，由於中下游廠商如雨後春筍般蓬勃發展，但多晶矽原料廠商因投資門檻高與擴廠前置時間長之影響，多數矽原料供應廠商不敢貿然擴廠。因此，中下游廠所面臨原物料供不應求的問題在短時間內無法獲得解決。而透過逆物流回收取得再生矽原料與其他稀有金屬，以目前技術而言是一個可行方案。然而，企業如何掌握從逆物流回收之二手模組數量趨勢，以建置一套穩健、符合成本效益，並結合碳資產管理議題之「正逆向物流整合之永續供應鏈」將成為一大挑戰。

1.1.2 研究動機

承如上節所述，企業為了避免市場波動而造成原物料供應短缺，以及減少對環境有害的物質與固體廢棄物的產生等環保意識的崛起，開始針對生命週期末端之退役產品進行回收。當企業從原本正向開放式迴路(open-loop)供應鏈架構走向封閉式迴路(closed-loop)後，供應鏈設計所考量的策略勢必因為新功能設施的加入而有所改變，進而影響整體供應鏈管理的效益。正逆向物流整合之供應鏈設計須考量該產業鏈中供需方面的不確定因素下，決定逆物流成員之位置選擇與流量分配，以及因應逆物流的加入而調整既有的正向供應鏈成員之產能。除此之外，面臨到碳權與碳交易機制等政策，企業必須提出更有效益的節能手段，以降低二氧化碳排放量。因此，正向與逆向物流進行整體上的設計過程中，對環境所造成的影響必

須被考量。相較於傳統的供應鏈設計只以經濟面做為單一目標的建模方法，並不適用於現行所提倡之永續供應鏈設計，而是必須同時優化經濟與環境兩項層面。

從過去文獻中歸納出一般學者們所探討供應鏈的網絡設計議題多是專注在成員決定、廠區位置與產能，以及各成員節點之間的物流數量；目前亦已有文獻針對供應鏈設計進行經濟面與環境面之多目標規劃。然而，對於此類多目標永續供應鏈設計文獻中，鮮少考量市場端供需之不確定性，以設計「現存廠區」與「潛在廠區」之產能，並進行正向與逆向物流之整合；而在經濟與環境層面的取捨中，也少有文獻提出透過不同生產技術之投資以衡量營運活動對於環境所造成之影響，而這些因素對於長期的供應鏈設計決策來說，是相當重要的。

因此本研究將提出一套穩健的正逆向物流整合之永續供應鏈設計，並可透過此模型提供企業進行產能擴充時，不同技術與環境衝擊之評估。簡而言之，本研究所包含之特性如下：

1. 經濟與環境層面之多目標規劃
2. 整合正逆向物流之供應鏈網絡設計
3. 市場端供給與需求之不確定性
4. 既有與潛在廠區之產能設計與技術投資

1.2 研究目的

基於上述背景與動機，本研究將針對多階多廠之供應鏈架構下，探討供應鏈網絡設計(Supply Chain Network Design; SCND)，並整合既有之正向物流與潛在之逆向物流，以及經濟與環境層面之取捨問題，提出以多目標規劃(Multi-objective Programming; MOP)為基礎的正逆物流整合之永續供應鏈設計模式。

本研究除了考量到一般長期需求下供應鏈設計應具備之因素，包括運輸限制(物流平衡、運輸能力與運輸批量)、潛在廠區之廠址選擇，與既有廠區之產能限制外，另外還加入了市場供需之不確定性，以及產能擴充與技術選擇所對應之二氧化碳排放，並以矽晶太陽能產業為例，說明與驗證本

研究所提出模式之適用性。具體而言，本研究主要目的歸納如下：

1. 歸納過去供應鏈設計相關文獻所考量之特性。
2. 發展一套多目標的正逆物流整合之多階多廠供應鏈網絡設計模式，考量因素及限制如下：
 - (1) 成本與二氧化碳排放量最小化為目標。
 - (2) 市場供需之不確定性。
 - (3) 潛在逆物流成員廠址選擇。
 - (4) 整合型物流之運輸規劃。
 - (5) 既有與潛在廠區之產能設計與技術投資。

並以此模式決定在不同的不確定水準下，整體供應鏈運籌成本之影響，包括逆物流成員之增設與產能擴充程度；以及不同技術投資所產生之碳排放量，以做為決策人員在進行產能擴充與特定設施廠址選擇時之參考依據。

3. 經由模式評估與分析，探討以下結果：
 - (1) 透過實驗驗證本模式之正確性及合理性，並進行最佳回收率探討、市場供需不確定性程度影響等敏感度分析。
 - (2) 以太陽能產業案例驗證本模式之適用性及可行性。

1.3 研究步驟與方法

為達到上述之研究目的，本研究依據圖 1.2 的研究步驟進行。

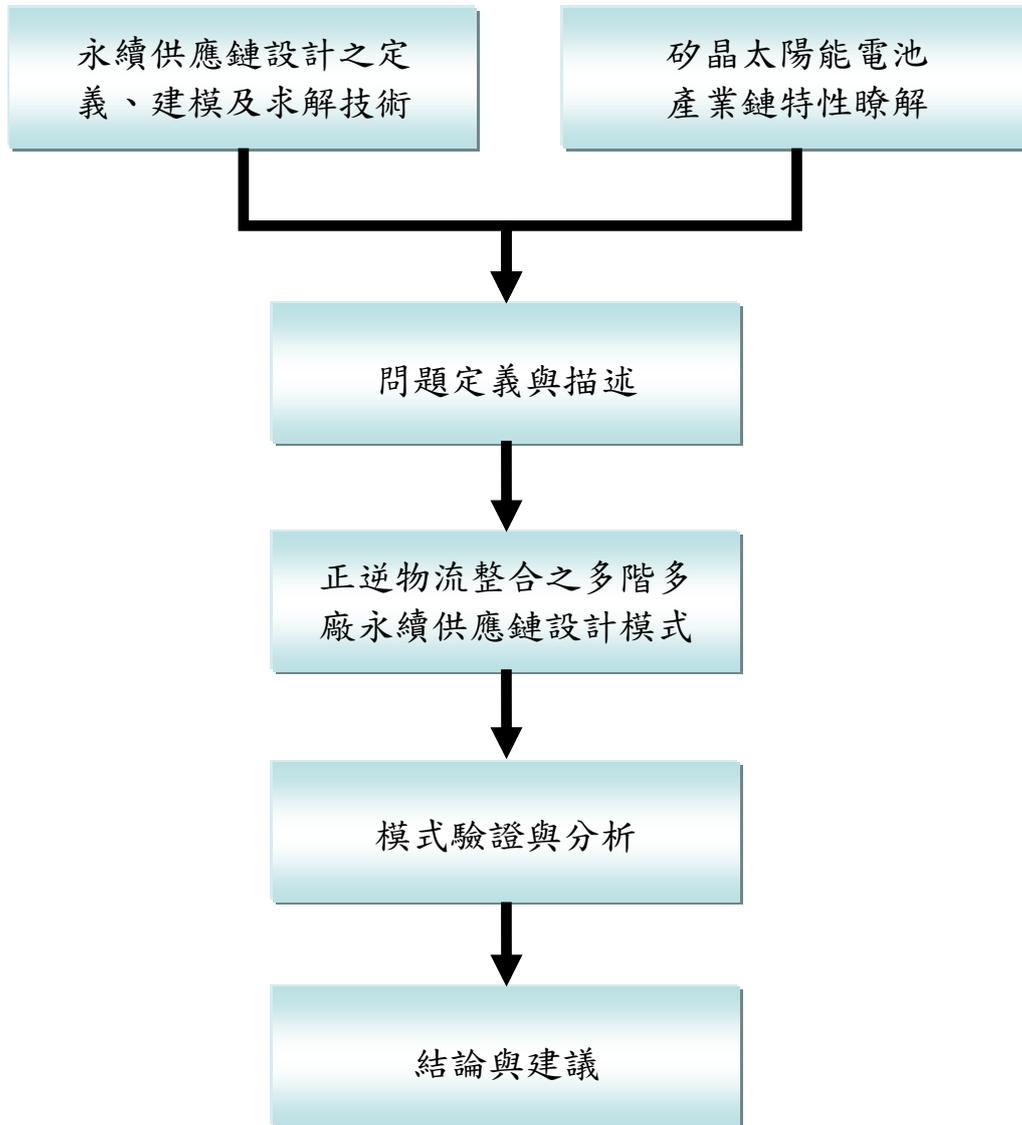


圖1.2 本研究之架構與流程

第二章 文獻探討

本章針對過去文獻進行回顧，一共分為三個主軸，首先探討永續供應鏈管理議題，並強調企業永續必要之條件與趨勢，包括探討逆物流議題與整合正、逆向物流運籌架構，並引用過去學者所設計之正、逆物流整合型供應鏈網絡；以及結合到碳資產議題，發展多目標最佳化模式；第二，承接永續供應鏈架構，探討參數包含到不確定性因素時之建模與解法，並介紹隨機規劃與穩健最佳化方法之文獻；最後引入太陽能產業之現況介紹，並針對該產業正面臨到退役太陽能模組回收問題與供需方面之不確定性，銜接至第三章之研究方法。

2.1 永續供應鏈

本章節主要分為四個小節，敘述永續供應鏈管理(Sustainable Supply Chain Management; SSCM)或稱為綠色供應鏈(Green Supply Chain Management; GSCM)議題中，眾所探討之範疇。從永續供應鏈之概念、逆物流與碳資產管理議題之興起，到如何透過數學模式設計封閉式迴路供應鏈(Closed-loop Supply Chain; CLSC)並納入環境議題，形成經濟與環境兩層面之取捨，最終成為多目標規劃問題。

2.1.1 永續供應鏈介紹

面臨全球化競爭的壓力，企業對於供應鏈網路設計之重視程度與日俱增，除了提供良好的服務水準外，亦必須同時兼顧成本以維持獲利。Chaabane等人(2012)認為傳統的供應鏈網路設計策略著重於整體供應鏈經濟績效最佳化。

供應鏈管理係探討產品從原物料的取得到最終客戶之間的整體運籌活動，包括與供應商採購、生產/製造、配銷與最終顧客等。Gunasekaran等人(2004)指出，在供應鏈活動中，由於商品從供應端到顧客端之間會經過多個階層，而每個階層又可能包括多個採購、生產或配銷單元，如圖2.1所示。

近年來，由於全球暖化與有限資源耗之環境危機意識，再加上對於企

業所排放的固、液與氣態之廢棄物已有相關法規與盤查機制，以規範企業活動對於環境衝擊之影響，使企業必須重新思考其營運策略，供應鏈逐漸被「綠化(greening)」，朝向永續供應鏈結構發展，目的是在滿足經濟效益下，同時兼顧企業活動對環境造成影響的雙贏局面。

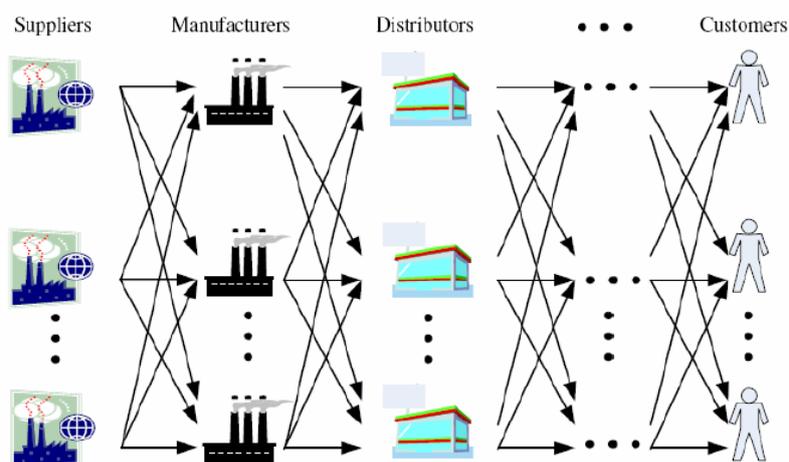


圖2.1 多階多廠之供應鏈網絡架構

Srivastava (2007)鑒於環境永續議題之興起，提出一套供應鏈管理結合永續概念之架構圖，如圖2.2所示。依據此架構，永續發展必須考量之三個關鍵相依層面，分別為經濟面、環境面與社會績效面。進而發展到綠色供應鏈(Green Supply Chain; GCS)之範疇，包括綠色產品設計(green design)、綠色營運(green operations)與新市場開發(new market development)。針對上述三個相依層面皆有相對應的評估標準，而衡量永續的績效指標在評估供應鏈的建模與適用性是很重要的(Gunasekaran *et al.*, 2004)。

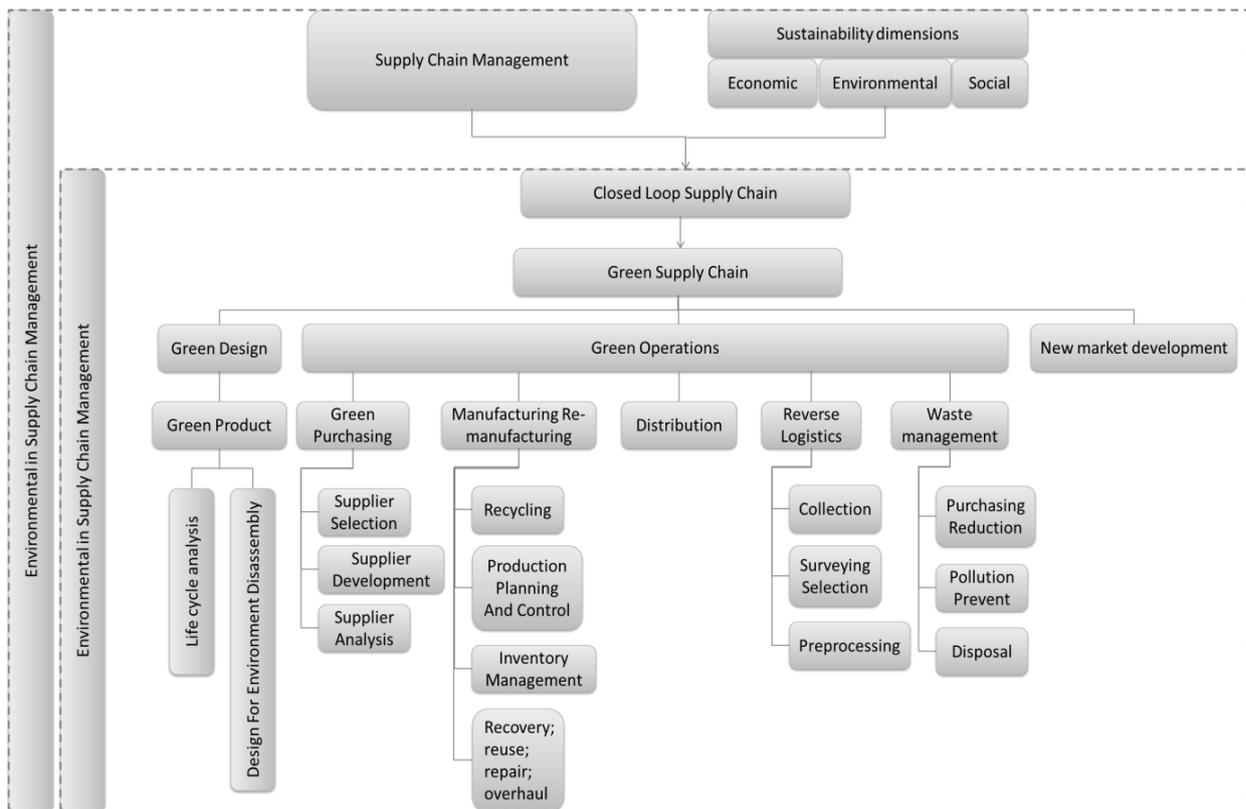


圖2.2 永續供應鏈管理架構圖

資料來源：Srivastava (2007)

經濟面關鍵指標主要有成本(Chaabane *et al.*, 2012; Özceylan and Paksoy, 2012; Ramudhin *et al.*, 2009; F. Wang *et al.*, 2011)、利潤(Sheu *et al.*, 2005; Subramanian *et al.*, 2010)或是它們的淨現值(Guillén-Gosálbez and Grossmann, 2010)等。環境層面而言，目前已有多項衡量指標評估企業營運對環影響之程度，其中二氧化碳排放是目前最熱門的指標之一(F. Wang *et al.*, 2011)。其他環境績效指標如能源消耗、物料回收、有毒物質排放(相關法規可參考危害物質限用指令—RoHS)，以及固/液態廢棄物排放等。除了熟知的碳足跡盤查之外，企業亦可以透過對環境友善的投資，如廢氣淨化、汙水處理等設備以降低直接排入大氣中的二氧化碳，進而減緩全球暖化趨勢。社會績效則是較偏重質化研究，例如以噪音、生活品質等衡量準則作為指標。

當企業從原本正向開放式迴路(open-loop)供應鏈架構走向封閉式迴路(closed-loop)時，所考量之因素從產品本身設計到營運策略皆與傳統供應鏈架構思維大異其趣。從產品設計走向拆解便利性，以利於回收與重製等逆

物流階段的處理；營運策略從採購端、生產、配銷至顧客端，甚至最終回收等逆物流階段皆會考慮到環境因素，如綠色採購即是透過供應商盤查，購買對環境影響較小的原物料(Lee, 2011)；生產與配銷過程中考慮到對環境造成的衝擊，如溫室氣體排放(Chaabane *et al.*, 2012; Ramudhin *et al.*, 2009; F. Wang *et al.*, 2011)、環境相關法規，如RoHS、ISO14000、Eco-indicator 99等；而逆物流與廢棄物管理即是強調之「環保5R (Rethink、Reduce、Repair、Reuse、Recycle; 5R)」，以減少廢棄物之焚化量與掩埋量，進而減少地球資源之消耗。下一小節將介紹正逆物流整合之封閉式迴路供應鏈架構。

2.1.2 正逆物流整合型供應鏈架構

近年來，由於環境意識抬頭，逆物流相關領域之議題也隨之興起。依據美國物流管理協會，將逆物流(Reverse Logistics; RL)定義為：「以廣義的觀點說明來源減量(source reduction)、回收(recycling)、替代(substitution)、再利用(reuse)與最終處理(disposal)等方法進行物流相關活動，並扮演將物品再製、廢棄物處理與有害物質管理之角色。」從程序的觀點，Toffel (2003)定義逆物流為有效率的規劃、實施與控制之過程，目的是將消費端至原點的原物料(raw materials)、在製品庫存(in-process inventory)、完成品(finished goods)回復其價值或妥善的處置；此外，逆物流可防止與減少生命週期結束(End-of-Life; EOL)產品對環境造成的汙染。

逆物流為企業價值鏈中特殊的一環，與正向物流有明顯差異。依據郝皓 (2002)所提出正逆物流之差異包括以下幾項：

1. 逆物流所產生的時間、地點和數量都是難以預測的，而正向物流則是依照指定的時間、地點及數量為其基本要求。
2. 逆物流地點較為零散無序，不會一次性的轉移至下一層通路。
3. 逆物流發生的原因通常與產品的質量與數量之異常有關。
4. 逆物流系統複雜且多樣，不同的處理程序與技術對於資源價值之恢復有顯著差異。

Pagel 等人 (2007)提出的一套通用逆物流供應鏈架構，如圖 2.3 所示。從此圖可知原物料供應商至顧客端後，EOL 產品可透過維修、拆解或再製

造，進入二手市場或回到正向物流，形成一個封閉式(closed-loop)的供應鏈；若當二手產品無法透過上述還原價值時，則透過焚化或掩埋等最終處置(disposal)離開系統。作者以此架構為基礎，分析企業主動回收與外包回收兩種不同的收集模式，以及產品是否具有拆解特性對於回收策略的影響。結果顯示企業透過主動回收之回收率相較於外包更高，但相對必須多付更多成本，且對於原物料供應商存在高衝突；而產品拆解特性影響到產品設計與創造新價值機會，但在外包策略上必須考量到產品組裝之商業機密等信任問題。

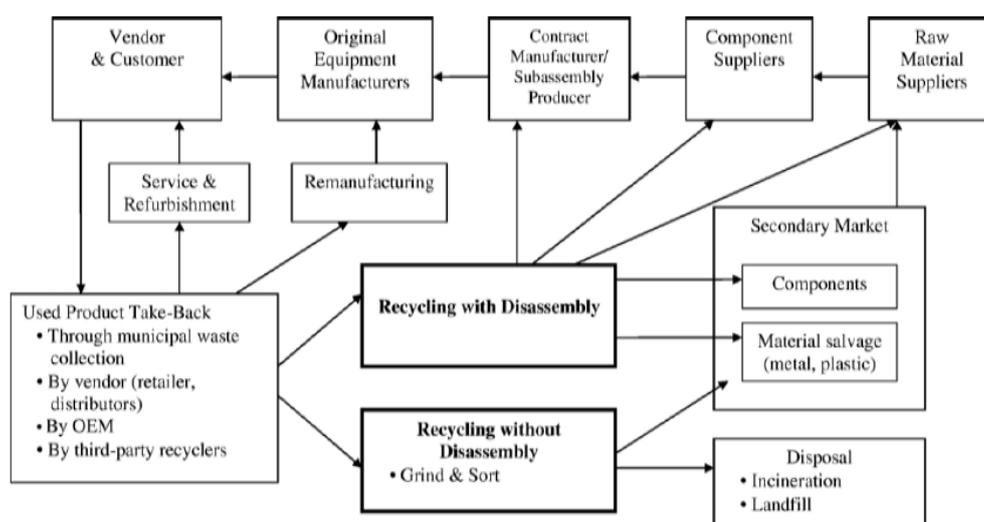


圖2.3 逆物流功能與封閉式供應鏈架構

資料來源：Pagell *et al.* (2007)

往後，Lambert 等人 (2011)針對過去學者所提出的逆物流功能，彙整出一套更詳細地概念架構，並指出逆物流依據策略、戰略與營運三個不同層次，提出七項逆物流系統之重要組成元素，包括協同系統、回收把關、收集、分類、再製處理、資訊整合系統與最終處置系統，並定義每一元素之功能，如圖 2.4 所示。

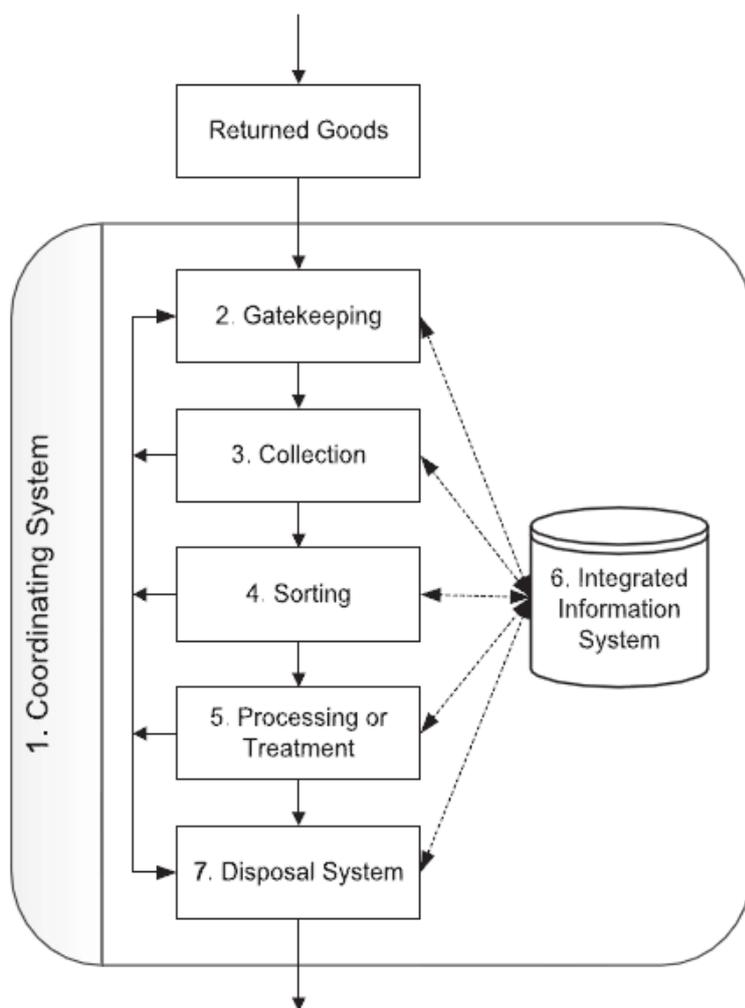


圖2.4 逆物流系統組成元素

資料來源：Lambert *et al.* (2011)

歸納上述幾點，逆物流設計除了考慮產生 EOL 產品之顧客群位置；在實務上，可透過不同的收集策略，如直接回收、透過零售商間接回收，或直接外包給第三方物流，以因應逆物流的複雜性(Gupta and Palsule-Desai, 2011)。另一方面，Pishvae 等人 (2010)認為，無論是正向或逆向供應鏈，在設計上應避免分別的最佳化(sub-optimality)，而是整體上的規劃。除此之外，由於供應鏈設計屬於 NP-Hard 問題，在求解規模較大之問題上運算效益不彰，因此除了以數理規劃之最佳化模式外，處理大型問題上可透過啟發式演算法進行有效率的求解。本研究將近期整合型供應鏈設計之文獻彙整於表 2.1。

Sheu 等人 (2005)以筆記型電腦產業為例，從利潤最大化角度探討正逆向供應鏈中各週期的新原物料與二手原物料的使用數量，優化正向與逆向物流兩目標之利潤，並考量到正逆物流之產能限制、運輸平衡、顧客需求與外部津貼機制，提出一套正逆物流整合之供應鏈架構，以多目標線性規劃(Multi-objective Linear Programming, MOLP)進行建模與最佳化求解。分析結果指出筆記型電腦製造商利用此模式相較於現有經營業績提高了21.1%，並給予企業最佳回收率與政府津貼補助之決策。

Üster 等人 (2007)在既定的正向供應鏈架構下，考量多種產品，透過班德氏分解法(Benders' Decomposition; BD)，決定逆物流成員之收集點(collection)與回收中心(recovery centers)位置。Lu and Bostel (2007)同時考慮正向與逆向物流，透過混整數線性規劃(Mixed-integer Linear Programming; MILP)建模，解決再製廠(remanufacturing)位置與物流網絡配置問題，並以Lagrangian 為基礎的啟發式演算法求解。

Srivastava (2008)分析不同類型產業，提出一套逆物流概念之基本框架，與最佳產品回流之兩階段啟發式流程，強調逆物流網絡設計包含部屬(disposition)、位置(locations)、產能(capacities)與流量(flows)設計之重要性。第一階段為依據策略與顧客端位置決定回收中心營運；第二階段為依據逆物流成員之部屬、位置與產能，決定逆物流其他成員之地點(site)與物流配置。作者考量運輸限制與顧客至回收中心距離，以混整數線性規劃為基礎建置模型，並以不同的產業類型，分析顧客至回收中心距離與逆物流網絡運輸成本之關係。

Min and Ko (2008)於多商品的封閉式供應鏈結構下，針對第三方物流(Third Party Logistics; 3PLs)供應商，提出一套多週期的混整數規劃(MILP)模型，並結合基因演算法(Genetic Algorithm; GA)以決定從顧客端回收之二手商品維修設施的最佳位置與數量。

Wang and Hsu (2010)提出一套一般型整合物流架構，考量顧客需求、供應商與製造商之產能，以及正逆物流之營運與運輸成本，於總運籌成本最小化的目標之下，決定供應鏈成員的配置與運輸數量，並以生成樹(spanning-tree)為基礎的基因演算法(Genetic Algorithm, GA)，達到有效率的求解。

Özceylan and Paksoy (2012)則是提出一套以生產為導向之一般化封閉供應鏈設計模型，將正向物流分成供應商、工廠、零售與客戶端四個階段；逆物流分為收集(collection)、拆解(disassembly)與翻修(refurbishing)三個階段。建模過程中考慮到最終產品之組成物料清單(Bill of Material, BOM)與多週期(multi-period)，透過混整數線性規劃，決定正向與逆向物流廠區營運與物流運輸數量，並分析運輸、採購、整修與營運成本佔總成本之比重與調整各廠區產能與總成本之關係。

逆物流的加入，使傳統的正向供應鏈走向封閉式迴路供應鏈架構，為企業組織為環境與供應鏈綠化之其中一項努力。現行已有許多企業在強化逆物流營運付出努力，如 IBM、Xerox 等知名企業(Zhu *et al.*, 2008)。然而，除了環境法規之規範外，更重要的是企業理念與願景對於環境維護之體悟與認知，才是促成企業永續經營的關鍵。

2.1.3 碳資產管理

為因應全球因應氣候變遷的發展趨勢，「低碳」永續供應鏈已成為產品競爭力的保證。由於碳交易已成為國際新興的「碳產業」，透過碳交易可以有效降低減碳成本，已成為企業重要的資產管理項目之一，並日益受到企業的重視。

近年來，碳資產管理成為國際間高度重視之議題。申永順 (2007)指出，於1997年12月在日本東京召開聯合國氣候變化框架公約第3次締約國會議通過「京都議訂書(Kyoto Protocol; KP)」，溫室氣體過量排放將引發的氣候變遷為全球共同面臨的重要環境問題之國際共識。因此，溫室氣體排放管制的實施，應具體落實在國家、產業和企業等不同層次，採取符合經濟效益的排放減量方式，以降低溫室效應造成全球氣候變遷的影響。京都議訂書經過七年折衝，終於在2005年2月16日正式生效，目前已有一百四十國和歐盟批准的京都議定書，要求全球三十九個主要工業國家與地區，必須在2012年前，降至1990年的排放標準，包括二氧化碳、甲烷在內的六種溫室氣體5.2%的排放量，並根據個別國家污染程度設定減量目標，此舉表示全球溫室氣體減量工作已進入執行階段，減碳已成為不可避免之趨勢。

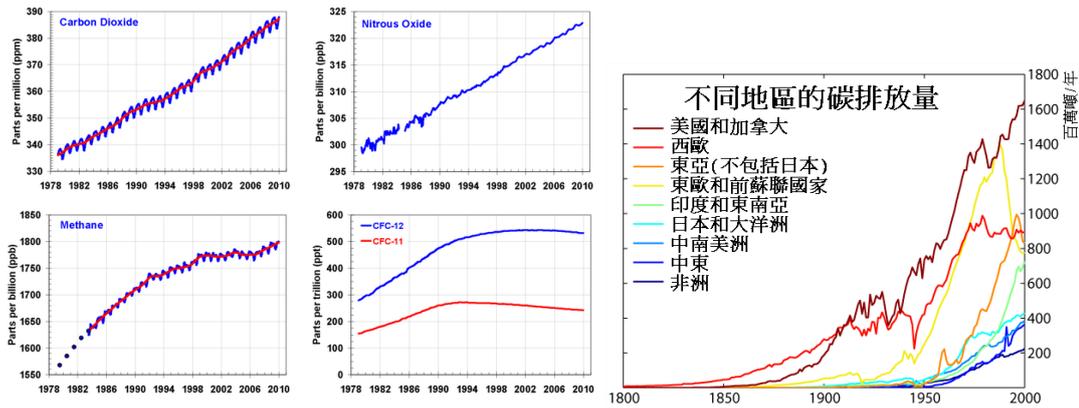


圖2.5 京都議定書規範之溫室氣體排放量

(資料來源：Wikipedia, 2012)

根據京都議定書所訂定之「共同執行」、「清潔發展機制」及「排放交易」三項規範，明確定義溫室氣體所衍生出來的「碳資產」，及企業可尋求藉由溫室氣體減量的方式，將碳資產作為公司有價資產的一部份。因此，企業應改變以往將溫室氣體視為污染物的觀念，而有效加以管理與運用。根據高毅民 (2007)指出，目前國際間已有部份國家對溫室氣體進行課稅，如英國在2001年4月開始徵收的氣候變化稅。而國際間亦有許多國家或地區開始對碳資產進行交易，最早的國家級交易體系為英國排放交易體系 (United Kingdom Emissions Trading Scheme; UKETS)。而目前全球最大也是強制性的溫室氣體交易體系為歐盟排放交易體系 (European Union Emissions Trading Scheme, EUETS)。無疑地，「碳」已成為企業資產的一部份。

由於二氧化碳盤查與評估機制成熟，林文華 (2010)指出目前已有多个國家針對碳足跡(Carbon Footprint; CFP)給予明確規範，如PAS 2050標準是第一個針對碳足跡評估準則，內容並未包括碳宣告的要求；英國標準協會預計於2010年進行改版更新，主要為增加碳宣告的要求。目前除了PAS 2050標準外，日本經濟產業省於2009年6月已公告「TSQ 0010產品碳足跡評估與標示之一般原則」，內容規範包括計算及標示原則；ISO組織於2011年公佈ISO14067標準，共分為ISO14067-1計算要求及ISO14067-2碳宣告要求；世界永續發展協會於2010年公告「產品生命週期計算及報告標準」；台灣環保署於2009年責成專案擬定我國碳足跡計算準則，並預定於2010年正式推行碳標籤制度。

2.1.4 永續供應鏈建模與求解

以上兩小節文獻中指出，企業正面臨到供應鏈結構之改變；無論是碳資產或其他環境之相關規範，相較於過去典型的供應鏈網路設計問題多以單一目標進行建模並求解，永續供應鏈之網路設計必須同時考量經濟層面與環境層面議題，因此採用多目標是較為適當。以下將介紹諸位學者透過雙目標建模技術進行永續供應鏈設計。

Alçada-Almeida等人 (2009)以多目標混整數規劃技術，決定焚化工廠之避設施廠址選擇問題，並分析經濟與環境衝擊的影響。Guillen-Gosalbez and Grossmann (2010)以淨現值與環境影響為考量指標，利用混整數非線性規劃(Mixed-integer Non-linear Programming; MINLP)，考量供應鏈成員之間的配置問題。Frota Neto等人 (2008)針對造紙業之企業活動對於營運成本與環境之間的效益分析，利用多目標規劃 (Multi-objective Programming, MOP)，以成本與環境衝擊最小化，進行歐洲紙漿與造紙工業之永續供應鏈設計。

Subramanian等人 (2010)提出一套環境與決策管理的架構，考量企業產能、生產與庫存與環境之間的因素，利用非線性數理規劃技術，決定碳信用額度的買賣策略(Emission Trading Schema; ETS)。而後，Chaabane等人 (2012)延續碳信用額度的買賣策略議題，以煉鋁產業的供應鏈架構，透過多目標線性規劃(Multi-objective Linear Programming; MOLP)技術，同時考量經濟面與環境面兩個目標之間的影響，並認為每階供應鏈成員除了金流與實體物流之外，亦必須考慮能源消耗(input)與排放(output)，提出一套永續供應鏈模型，如圖2.6所示。作者針對原物料採購、生產/製造及其技術、配銷、最終顧客與回收之正逆物流運籌數量、運輸模式、廠址選擇問題與碳信用額度(carbon credits)進行最佳決策。結果指出，企業碳管理成本佔總成本的7%，且當二樣化碳邊際成本低於生產效益時，企業會優先選擇購買碳信用額度，而不會減緩生產活動，即在強調經濟效益為推動逆物流系統建置之關鍵。

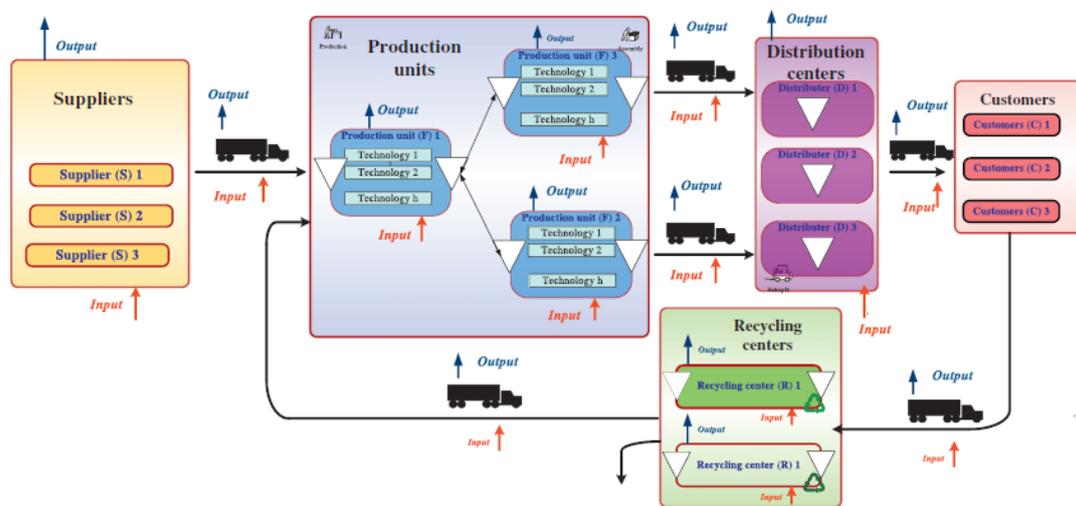


圖2.6 考量耗用與排放之永續供應鏈架構

資料來源：Chaabane *et al.* (2012)

Ramudhin 等人 (2009) 以鋼鐵產業為例，考量企業之碳權買賣策略，透過多目標混整數規劃，進行供應鏈設計與運籌規劃，並取得二氧化碳排放與運籌成本之間的損益平衡。分析結果指出，公路、鐵路與空運三種運輸模式，運輸每單位貨物所造成的碳排放量為鐵路最低，公路次之，而空運則為鐵路運輸碳排放量的34倍之多，物流之運輸速度與碳排放量很明顯成正比；並透過目標規劃(Goal Programming; GP)，分析最佳效益(efficient)、最佳環境(environmental)，以及兩者平衡(trade-off)三種情境下，各成本之比例關係，包括生產、運輸與碳排放成本。

Wang 等人 (2011) 則提出「透過對環境有善之投資(environmental investment)降低碳排放」的概念，引入環保水準(environment protection level)變數，並決定各生產廠區的環保程度、廠區位置與物流數量。作者認為生產設施可透過資本投入，如更精良的生產設備，使生產的能源耗用與污染排放下降，以雙目標混整數規劃建置供應鏈網絡設計模型，並透過柏拉圖最適前緣(Pareto-optimal frontier)，分析各廠區在不同產能與供給率之下，相對應之最低二氧化碳排放量。結果顯示，決策者可依據規劃出來的結果決定各個生產廠區的環保水準程度，使整體二氧化碳排放最小化，以及給予每個不同的碳排放量上限(cap)，與其相對應的供應鏈總成本。

根據上述文獻得知，永續供應鏈網路設計的目標函數以多目標居多，考量因子多是以經濟面與環境相關之因素，以尋求例如成本最小或利潤最大化，以及對環境的衝擊最小化；所採取之建模與求解方式主要以整數/混整數之最佳化為主，本研究彙整近期學者考量經濟與環境議題之永續供應鏈設計文獻於表2.1。另一方面，在建模與求解過程中，多是將參數設定為確定性，較少透過不確定性參數加以分析模式之適用性。然而在實際產業運用中，市場供需等相關建模參數多為不確定性資訊，因此在長及策略性規劃之供應鏈設計議題中，除了包含永續經營之外，求解之可靠度與適用性也是相當重要的(Pishvae et al., 2011)。

下一小節將介紹一些處理不確定性參數之技術，包括隨機規劃(Stochastic Programming; SP)，以及穩健最佳化(Robust Optimization; RO)。其中，穩健最佳化在計算的效率上更優於隨機規劃，且在無任何歷史資訊與參數之機率分配下依然可有穩健性(robustness)的求解品質，因此特別適用於前瞻性研究，如目前尚未成形之太陽能產業逆物流系統建置與永續供應鏈設計與管理。

2.2 穩健化設計(Robustness Design)

供應鏈設計問題屬於長期的決策過程，因新廠區的設立或產能的調整並非如短期營運策略可隨時因應環境而做調整，換言之供應鏈設計是針對未來趨勢動向以調整現有資源的設置，並牽涉到龐大的資本投資。因此，如何處理不確定性參數，如未來顧客需求、回收數量之能力，以及供應鏈設計的穩健性(robustness)尤為重要。

2.2.1 隨機規劃(Stochastic Programming; SP)

承如上段所述，有學者提出以隨機模型處理不確定性(uncertainty)參數問題，如Listeş and Dekker (2005)針對廢棄砂石的回收網絡模型，考量產能與處理成本之不確定性，以隨機混整數規劃(Stochastic Mixed-integer Programming, SMIP)，優化逆物流網絡總利潤。

Salema等人 (2007)以個案公司為例，考量其產能限制、多產品與顧客需求的不確定性，利用隨機混整數規劃模型解決正逆流網絡設計問題。

Bidhandi and Yusuff (2011)則是將營運成本、客戶需求和廠區產能視為隨機分佈之不確定性參數，以最小化總成本為目標，發展兩階段的隨機規劃。其中第一階段為供應鏈架構的決定，第二階段則是在此架構下決定製程與運輸數量，再以樣本平均近似技術(Sample Average Approximation; SAA)與班德氏分解法(Benders' Decomposition; BD)進行求解。

從以上一些文獻中可發現，面對處理參數不確定性問題，隨機規劃可提供一個更靈活之解決方案。然而，Listeş & Dekker (2005)認為隨機規劃在多情境問題之求解計算上相當複雜，對於求解規模也相當有限。除此之外，亦有其他學者，如Alonso-Ayuso等人 (2003)、Santoso等人 (2005)、Pishvae等人 (2011)提到透過隨機規劃建立數學模型之困難，尤其以第三點最為棘手：

1. 在許多實際情況下，不確定性參數並無足夠的歷史數據，因此難以估計出該參數之機率分配。
2. 隨機最佳化，某些規劃結果在隨機意義上是可行的，但由於發生機率極低且成本極高，因此在現實中是不可行的。

3. 隨機規劃係透過情境為基礎(scenario-based)建立不確定性參數，因此在大量的情境下造成模型過於龐大且複雜，導致運算效益不彰。

2.2.2 穩健最佳化(Robust optimization; RO)

穩健最佳化處理不確定性參數的方法是將其定義為不確定尺度(scale)與不確定水準(level)所圍成的半無限集合(semi-infinite set)，相較於隨機模型，穩健最佳化(RO)則不需要指定參數的機率分佈。以下將介紹穩健最佳化之數學概念與形式。本研究歸納出由原本確定性(deterministic)線性最佳化轉換成穩健最佳化之流程，如圖2.7所示。

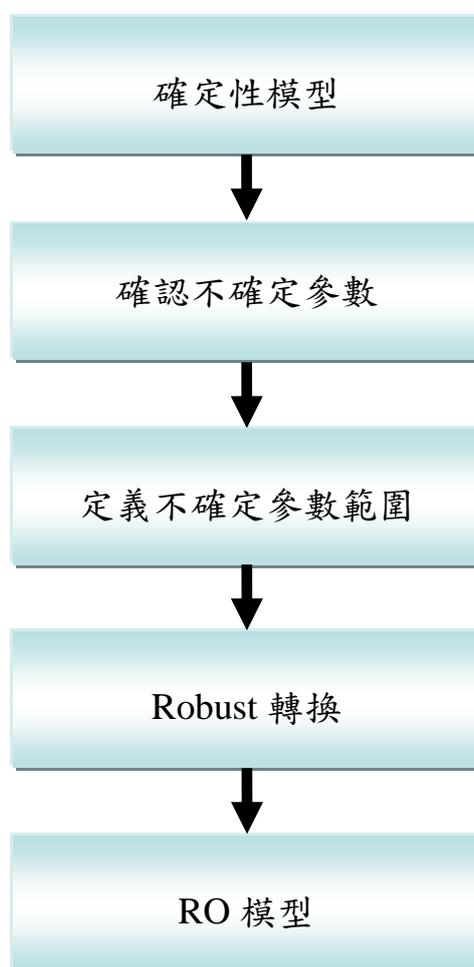


圖2.7 Robust optimization 轉換流程

(資料來源：本研究整理)

一般確定性線性最佳化(deterministic linear optimization)模型之基礎數學結構可寫成以下形式：

$$\begin{aligned} & \text{Min } cx + d \\ & \text{s. t. } Ax \leq b \end{aligned}$$

依據 Ben-Tal and Nemirovski (1998, 2000)之定義，不確定性(uncertainty)之線性規劃(Linear Programming; LP)模型，可被定義為以下形式：

$$\begin{aligned} & \text{Min } cx + d \\ & \text{s. t. } Ax \leq b \\ & c, d, A, b \in U \end{aligned} \tag{A}$$

其中，形式(A)之參數 c 、 d 、 A 與 b 為包含於不同的不確定集合(uncertainty set)中；而變數 x 若滿足所有不確定集合 U 的限制，則 x 為形式(A)的一個穩健可行解(robust feasible solution)。

Ben-Tal and Nemirovski (1998)定義形式(A)之穩健互補(Robust Counterpart; RC)為以下形式：

$$\text{Min } \{\hat{c}(x) = \sup_{c,d,A,b \in U} [cx + d] : Ax \leq b \quad \forall c, d, A, b \in U\} \tag{B}$$

而形式(B)之最佳解(optimal solution)即為形式(A)的穩健最佳解(robust optimal solution)。其中，每一參數之不確定集合 U ，分別被定義為以下形式：

$$u_{Box} = \{\xi \in \mathfrak{R}^n : |\xi_t - \bar{\xi}_t| \leq \rho G_t, t = 1, 2, \dots, n\}$$

其中， $\bar{\xi}_t$ 為變數 t 所屬參數 ξ_t 之平均值(nominal value)； G_t 為一個正數，表該變數 t 之不確定尺度(uncertainty scale)， $\rho > 0$ 表不確定水準(uncertainty level)。 G_t 與 ρ 所圍成的封閉有限區間(closed bounded box)即為不確定性參數之平均 $\bar{\xi}_t$ 的延展範圍。根據以上定義，可將確定性線性最佳化模型轉換成為穩健最佳化模型。

近年來，穩健最佳化已經運用在一些領域，如庫存管理(Adida and Perakis, 2006)、投資組合之選擇(Ghaoui *et al.*, 2003)，以及供應鏈設計與管理相關議題(Piplani and Saraswat, 2011; Pishvae *et al.*, 2011; Realff *et al.*, 2004)，以下舉例一些學者透過穩健最佳化設計供應鏈網絡之文獻。

Realff等人 (2004)以美國地區之地毯回收為例，考慮到運輸、收集、重製與庫存等營運成本之不確定性，以最大淨利為目標，透過穩健混整數規劃(Robust Mixed-integer Programming; RMIP)，決定逆物流成員之位置與流量之策略設計，並分析地毯的回收數量與回收價格對於整體獲利之影響。

Piplani and Saraswat (2011)則是以消費性電子產業為例，以總成本最小化為目標，並考量回收數量與EOL產品狀態的不確定性，發展穩健混整數規劃模型(RMIP)，以提供電腦製造商之服務據點與配銷中心設點決策。結果顯示考量回收量不確定性所設計的供應鏈架構，在不同情境下之總成本表現上普遍優於一般MILP模型。

Pishvae *et al.* (2011)考量運輸成本、需求數量與回收數量的不確定性，針對收集點、回收中心與再配銷點三種逆物流成員發展穩健混整數規劃模型(RMIP)模型，其目標函數為營運成本、運輸成本與缺貨罰款成本最小化，決定其位置與物流配置。結果顯示，當不確定性是從運輸成本與需求延伸至回收數量，RMIP模型可以妥善的處理這些問題；而確定型(deterministic)混整數規劃則會因為確定參數下的規劃結果，無法處理回收數量的不確定性，而造成整體逆物流廠區產能無法負荷之情況。

綜合上述，無論是傳統的正向供應鏈，或是正逆向整合型的供應鏈設計，在建立模型之方法上多數學者仍以數理規劃為主流，本研究將近期整合型之永續供應鏈設計，並考量環境不確定性之文獻彙整於表2.1。然而，由於顧客端方面，如需求量、回收數量上充斥著不確定因素，影響整體供應鏈設計之績效；另一方面，過去有學者嘗試透過隨機規劃方法建立數學模型，但對於運用到現實世界，亦存在諸多挑戰，如資料量上能否足以提供不確定性參數真實的機率分配，以及求解效率上的問題。因此以穩健最佳化之概念建模，除了能更有效率的處理不確定性參數問題之外，求解品質亦優於確定性數理規劃模型。

表2.1 近期供應鏈設計相關研究彙整

(資料來源：本研究整理)

| 學者(年份) | 供應鏈結構 | 方法 | 目標函數 | 考量特性 | | | |
|--------------------------|-------------|---|-------------------------|--------|--------|---------|------|
| | | | | 正逆物流整合 | 市場不確定性 | 產能/技術投資 | 環境影響 |
| Realf et al. (2004) | Open-loop | RMIP | 單目標 (供應鏈總利潤) | | ✓ | | |
| Sheu et al. (2005) | Closed-loop | Mixed-integer linear programming (MILP) | 多目標 (正向物流利潤; 逆向物流利潤) | ✓ | | | |
| Listeş and Dekker (2005) | Open-loop | Stochastic mixed-integer programming (SMIP) | 單目標 (供應鏈總利潤) | | ✓ | | |
| Lu and Bostel (2007) | Closed-loop | MILP; Lagrangian | 單目標 (供應鏈總成本) | ✓ | | | |
| Salema et al. (2007) | Closed-loop | Stochastic mixed-integer programming (SMIP) | 單目標 (供應鏈總成本) | ✓ | ✓ | | |
| Frota Neto et al. (2008) | Closed-loop | Multi-objective programming (MOP); EDA | 多目標 (環境影響; 供應鏈總成本) | ✓ | | | ✓ |
| Min and Ko (2008) | Closed-loop | MILP; GA | 單目標 (供應鏈總成本) | ✓ | | | |
| Ramudhin et al. (2009) | Open-loop | MILP | 多目標 (供應鏈總成本; 碳排放) | | | | ✓ |

表2.1 近期供應鏈設計相關研究彙整 (續)

(資料來源：本研究整理)

| 學者(年份) | 供應鏈結構 | 方法 | 目標函數 | 考量特性 | | | |
|-------------------------------|-------------|---|---------------------|--------|--------|---------|------|
| | | | | 正逆物流整合 | 市場不確定性 | 產能/技術投資 | 環境影響 |
| Bidhandi and Yusuff (2011) | Open-loop | SMIP; SAA; Benders' decomposition | 單目標 (供應鏈總成本) | | ✓ | | |
| Piplani and Saraswat (2011) | Closed-loop | RMIP | 單目標 (供應鏈總成本) | ✓ | ✓ | | |
| Pishvae <i>et al.</i> (2011) | Closed-loop | Robust mixed-integer programming (RMIP) | 單目標 (供應鏈總成本) | ✓ | ✓ | | |
| Wang <i>et al.</i> (2011) | Open-loop | MILP | 多目標 (供應鏈總成本；碳排放) | | | ✓ | ✓ |
| Chaabane <i>et al.</i> (2012) | Closed-loop | MILP | 多目標 (供應鏈總成本；碳排放) | ✓ | | ✓ | ✓ |
| Özceylan and Paksoy (2012) | Closed-loop | MILP | 單目標 (供應鏈總成本) | ✓ | | ✓ | |
| 本研究 | Closed-loop | RMIP | 多目標 (供應鏈總成本；碳排放) | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

2.3 太陽能產業介紹

太陽能電池在 1954 年時由 BELL 實驗室所製造，迄今已有 50 餘年。太陽能電池是一種能量轉換的光電元件，它是經由陽光的照射後，把光的能量轉換成電能，此種光電元件稱為太陽能電池(solar cell)，從物理學的角度來看，有人亦稱之光伏特電池(photovoltaic)。以下將針對太陽能電池產業、太陽能電池種類，以及矽晶太陽能電池回收趨勢加以說明。

2.3.1 矽晶太陽能產業鏈現況

矽晶太陽能產業鏈中，原物料為矽(Si)，係由多晶矽(poly-silicon)材料長晶成晶棒(ingot)再切割成晶圓(wafer)，成為太陽能電池(solar cell)的主要原料，再加以組裝成模組(module)，最後搭配負責直/交流電轉換電力之調節器(inverter)，建置成太陽能光電系統(PV system)，如圖2.8所示。

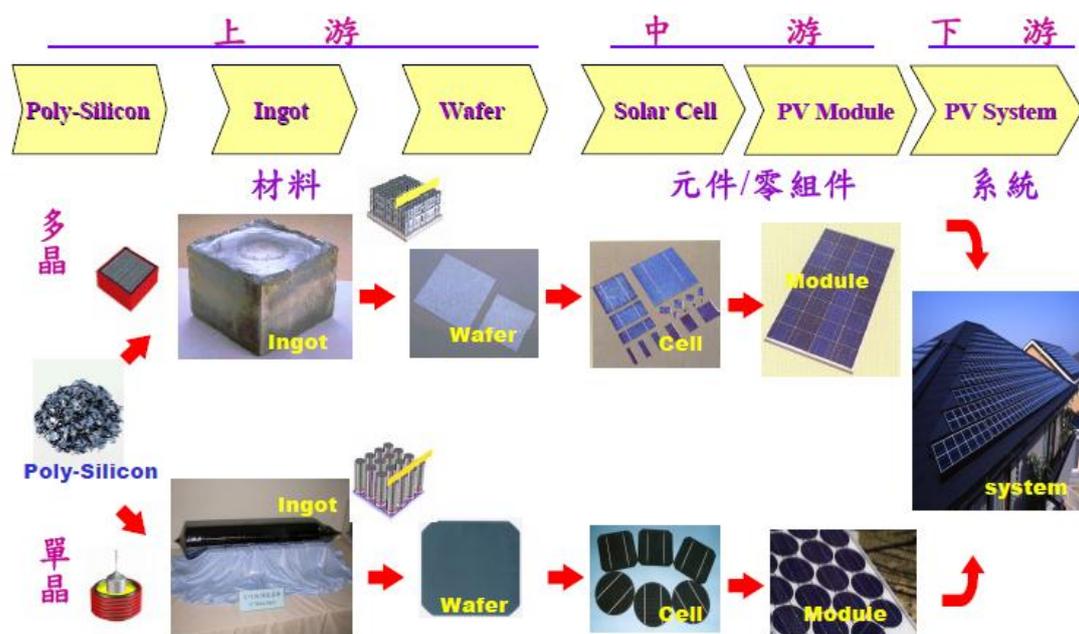


圖2.8 矽晶太陽能電池產業鏈

(資料來源：工研院材料所，2005)

由於太陽能光電產業鏈在資本支出影響下，愈是上游的廠商家數愈少；就產業特性來看，最上游的太陽級矽原料生產由於製程與技術上的難度，加上龐大的投資金額，已被美、日、德等大廠壟斷，前五大廠達85%的市

佔率，如圖2.9所示。而國內目前仍屬研發與試產階段。

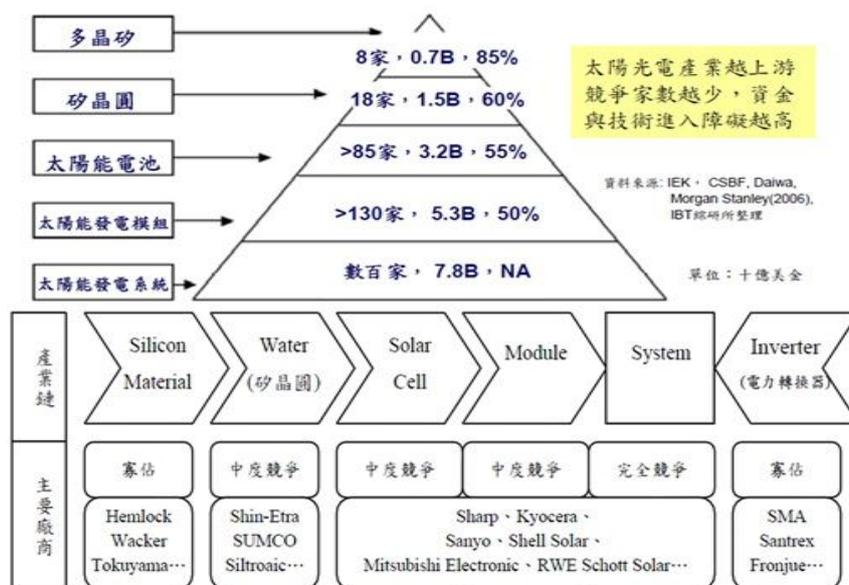


圖2.9 太陽能產業鏈結構

(資料來源：工業技術研究院，2006)

由於2006年底至2008年間，各國綠色能源政策推動、油價高漲與環保意識等因素，對於太陽能電池需求大幅成長，中下游廠商大量擴張，使上游矽原料供應不及，導致多晶矽價格不斷上漲，甚至產生缺貨與斷貨危機。廠商為了確保在生產過程中能夠順暢，矽料源品質、價格、數量之穩定性、掌握度尤其重要。

另外，同屬上游產業鏈之矽晶圓廠商，大多數為半導體領域之背景，具有長晶、切晶等方面的專業技術，因此要跨入此領域，存在相對高的門檻。台灣太陽能電池廠商因循半導體產業之發展模式，多以專業分工角色為主，強調營運上之彈性與製程上之專精，與日本、德國等國際大廠挾資本、技術優勢朝向上游矽原料、下游系統整合發展，並進一步深入垂直整合而有所差異。在下游系統端的部分，由於門檻相對較低，進入廠商數量眾多，但具備太陽能系統整合規劃仍為少數，且大多數系統廠缺乏國際系統標案之實務經驗，有部份因素在於國內再生來源法案推延及政策絮亂所致(林志偉，2010)。有關於國內太陽能產業之生態如圖2.10所示。



註：加底線為量產廠商，其餘為尚未量產廠商

| | | | | | |
|---------|----|-----|-----|-----|-----|
| 2005廠商數 | 0家 | 2家 | 8家 | 5家 | 25家 |
| 2006廠商數 | 0家 | 2家 | 13家 | 8家 | 27家 |
| 2007廠商數 | 2家 | 7家 | 24家 | 14家 | 29家 |
| 2008廠商數 | 8家 | 10家 | 28家 | 18家 | 36家 |
| 2009廠商數 | 7家 | 10家 | 28家 | 19家 | 37家 |

圖2.10 國內太陽能廠商概況

(資料來源：工研院產業經濟與趨勢研究中心，2009)

2.3.2 太陽能電池種類

太陽能電池的種類主要可分為晶圓型、薄膜型及第三代，其中比較普遍的種類為矽晶類及矽薄膜類，如圖2.11所示。而其中又以矽晶類的單晶矽(mono-crystalline silicon)及多晶矽(multi-crystal silicon)太陽能電池為大宗，雖然薄膜型的太陽能電池目前已快速發展，但未來仍會以矽晶類為太陽能電池的主流，如圖2.12所示。

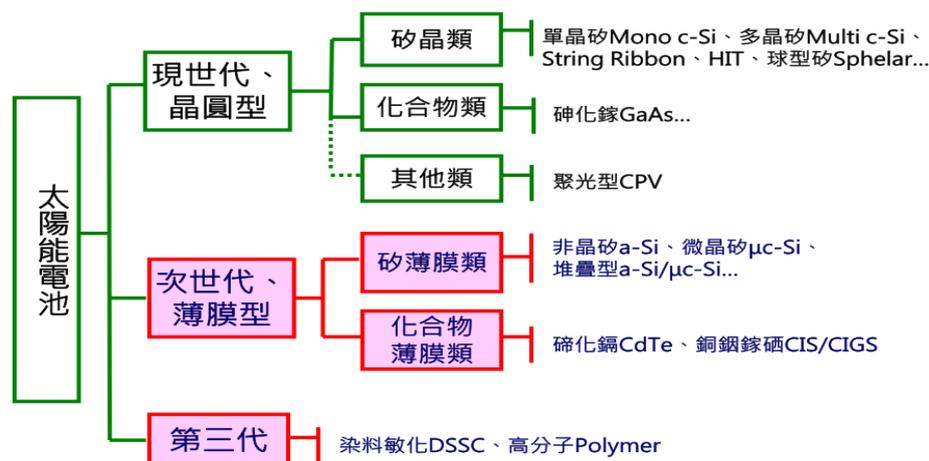


圖2.11 太陽能電池種類

(資料來源：工研院產業經濟與趨勢研究中心，2008)

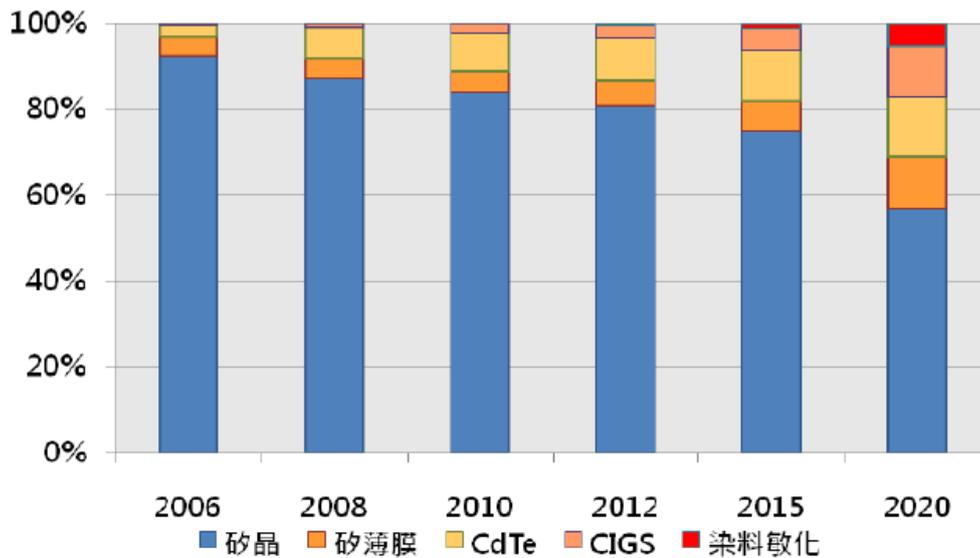


圖2.12 太陽能電池種類比例估計

(資料來源：工研院產業經濟與趨勢研究中心，2009)

矽晶太陽能電池發電原理是藉由P型與N型半導體材料接合構成正極與負極。當陽光照射太陽電池時，陽光的能量會使半導體材料內的正、負電荷分離，即產生電子-電洞對。電洞(hole)和電子(electron)會分別往正極(P型)和負極(N型)方向移動並且聚集。當正、負極接上負載時，即有電流產生，並可對負載進行作功。圖2.13為太陽能電池之構造與發電原理。

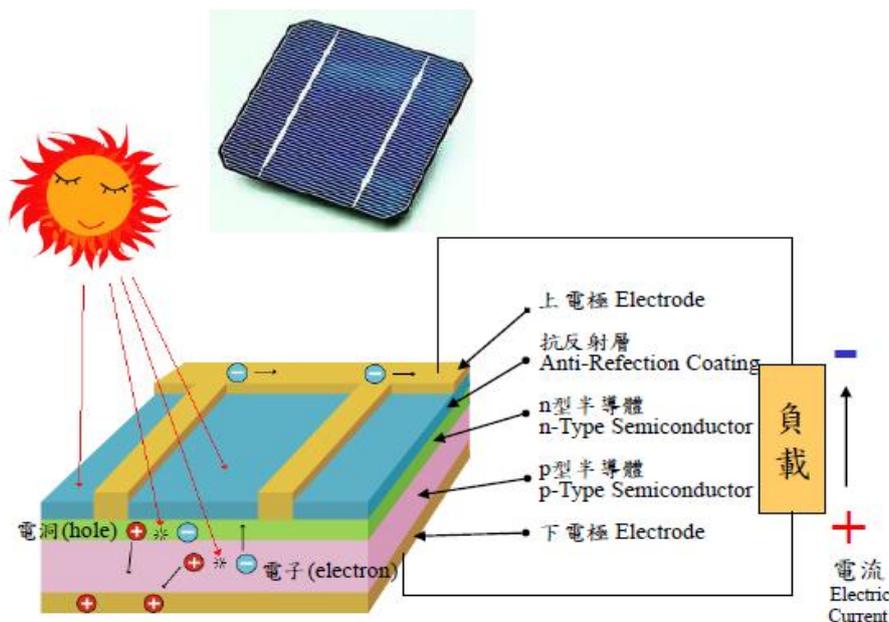


圖2.13 太陽能電池構造與發電原理

2.3.3 太陽能電池製程地圖(Process Map)

從製造程序之角度，矽晶太陽能產業主要分成五大階段，分別為多晶矽材料(Poly-silicon)、晶圓(Wafer)、電池(Cell)、模組(Module)與系統(System)。

多晶矽材料(poly-silicon)廠商主要負責矽原料之開採與純化成為冶晶級矽，在依照純度不同，供應給半導體廠商(矽純度： 10^{-9})或太陽能廠(矽純度： 10^{-6})。矽砂經過還原與純化後，由晶圓廠(Wafer)進行長晶/拉晶製程得到晶棒(ingot)，再經過研磨、切割等程序成為片狀之晶圓。

太陽能電池(Cell)係將晶圓經過化學蝕刻與磷擴散形成p-n接面(p-n junction)，目的是將太陽能電池照光後產生的電子與電洞有效分離。由於太陽光從空氣入射到矽表面會有反射現象發生，因此於表面進行抗反射沉積(anti-reflection coating)，以減少太陽光的反射量。之後，矽晶片正面與背面以銀膠或鋁膠網印及燒結形成金屬電極，正面與背面金屬電極的功用在於能將太陽能電池照光後，所產生的電子、電洞以最少的損失引出，產生光電流以供利用。

模組製程(Module)是透過乙烯基醋酸(EVA)^{註1}將太陽能電池密封，目的為耐紫外線老化與環境老化，以維持太陽能電池可靠度；之後將電極進行串接並加以封裝成為模組。而系統商(System)將模組搭配直/交流電轉換電力之調節器(inverter)並配合當地法規，將模組安裝置固定地點。本研究彙將上述製程彙整為較詳細之製程地圖(Process Map; PM)，如圖2.14所示。

^{註1}：乙烯基醋酸(Ethylene Vinyl Acetate; EVA)為無色可燃性液體，有強烈氣味，其透光率大於90%、粘接強度大於20N/cm、密度0.93g/cm、分解溫度為400°C。使用在太陽電池的低鐵質玻璃，有良好透光性與支撐保護，使用壽命長等優點。

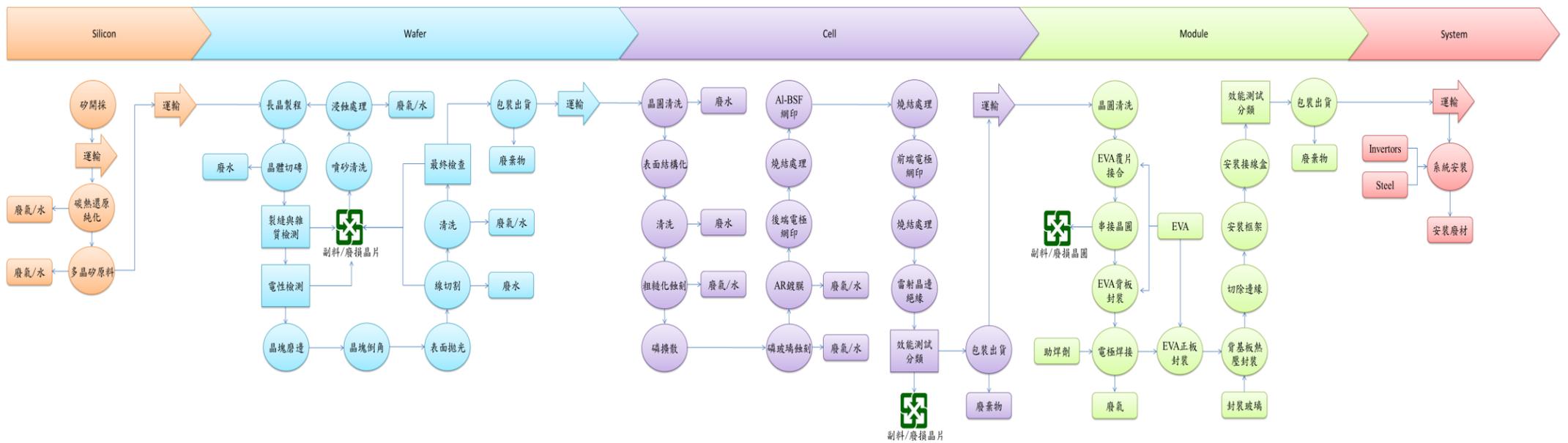


圖2.14 矽晶太陽能產業製程地圖

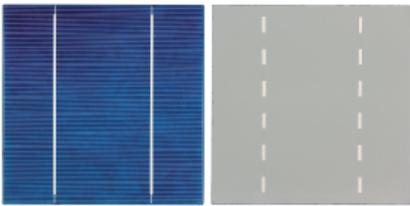
(資料來源：本研究整理)

相較於傳統的石化燃料發電產生能源，太陽能電池對於環境造成的影響相對微小許多。陳亮榮(2011)透過生命週期分析法(Life Cycle Assessment; LCA)研究結果顯示單晶矽太陽能電池之碳排放量為92g-CO₂e/KWh，多晶矽太陽能電池之碳排放量為77g-CO₂e/KWh，兩種太陽能電池碳排放量皆遠低於能源局公告之98年電力排放係數(623 g-CO₂e/KWh)。單晶與多晶矽太陽能電池的碳排放量差異主要來自於單晶矽太陽能晶片的拉晶製程耗費較多的能量之故。除此之外，單晶矽及多晶矽太陽能電池能源回收期分別是2.37及1.957年，以現今太陽光電系統20年以上之使用壽命來看，20年內每1KWp約可淨生產19710KWh的電力，每年約985.5KWh，節能效益十分顯著。

另一方面，依據上市M公司之環境永續環境報告書(2011)，以型號IM156之太陽能電池為例，其生產過程中溫室氣體(Green House Gas; GHG)來源集中在多晶矽材料(Poly-silicon)與晶圓(Wafer)之生產，占總體溫室氣體排放約70%以上；電池製程(Cell)階段約有10%，配銷部分約佔0.4%，圖2.15為IM156之外觀與規格。

而從太陽能電池之製程地圖中亦可知，Poly-silicon、Wafer與Cell製程中包含多道熱熔煉、化學蝕刻等偏重於設備投資之製程，因此可推估矽晶太陽能產業中對環境影響較大之部分主要為上游多晶矽原料與晶圓之生產，其次為太陽能電池製造。

IM156 Multicrystalline I-Cells



| | |
|---------------|--|
| Dimension | 156 mm x 156 mm ± 0.5 mm |
| Thickness(Si) | 180µm ± 30µm |
| Front | Blue silicon nitride anti-reflection coatings 1.8mm silver busbars |
| Back | Full-surface aluminum back-surface field 2.7mm (silver / aluminum) discontinuous soldering pads |

圖2.15 產品IM156外觀與規格

(資料來源：上市M公司，2011)

2.3.4 太陽能電池回收趨勢

太陽能電池的量產大約始於25年前，由於國際認證規範太陽能電池之可靠度必須至少有20年使用壽命，太陽能電池使用壽命相較於其他電子產品更長，因此在太陽能電池剛萌芽時，產業間並未思考回收的範疇。如今，第一批太陽能電池已相繼到達除役階段。Wambach等人 (2005)針對德國回收二手太陽能電池之成分加以預估，結果顯示2020年預估可回收的二手Cell約165噸、2030年增加至531噸，至2040年則約有1338噸。廢太陽電池產生趨勢如圖2.16，可知太陽能電池廢棄量將在2015年後有明顯成長。然而，隨技術進步效率增加，除正常更新淘汰外，有更是因電池成本降低效率增加而遭淘汰，屆時太陽能電池回收與逆物流將成為重要的環保課題。

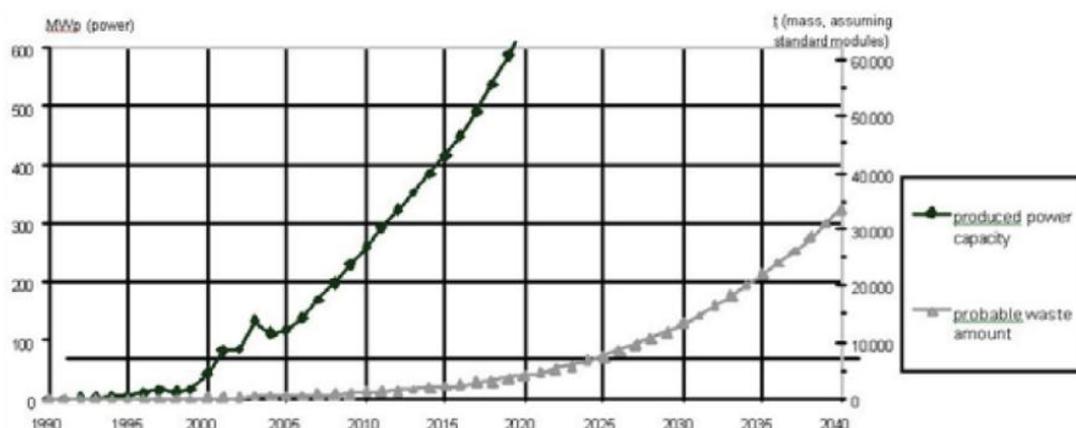


圖2.16 德國廢太陽電池預估產生量

資料來源：Wambach *et al.* (2005)

太陽電池模組有85%的元件是可以回收再利用的，若技術層次許可，能將零件分離至原物料的階段，將是最符合回收成本效益的原則(Zangl, 2004)。Klugmann-Radziemska and Ostrowski (2010)亦認為，考量矽原料的供貨水平與購買成本，太陽能電池的回收是最符合經濟效益的，且以目前的技術而言，太陽能電池之重製是可行的。有關於矽晶太陽能電池的回收與再製製程如圖2.17所示。

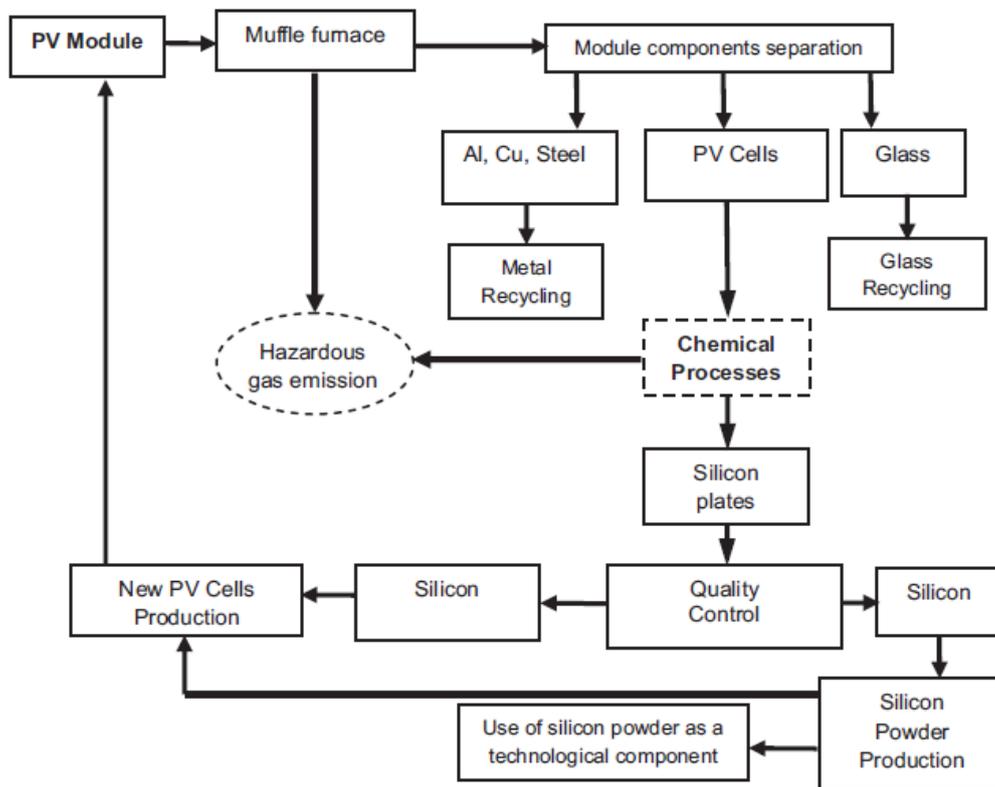


圖2.17 矽晶太陽能電池再製製程

資料來源：Klugmann-Radziemska and Ostrowski (2010)

歸納本節所述，太陽能產業正面臨到 EOL 產品之廢棄物處理問題，而回收並重製矽晶太陽能電池不論是從經濟層面或技術層面而言皆是可行的。透過逆物流系統之建置，不但可提供矽原料供給之另一條有效管道，亦能夠同時收取太陽能電池製程中所使用的貴重金屬，如銀(Ag)製電極等不可再生之資源。另一方面，使用再生矽原料所耗用之邊際能源亦低於新矽礦開採、熔煉與純化，因此對於環境影響亦較低，並符合永續環保之概念。因此，下一章研究方法將介紹一套正、逆向物流整合之永續供應鏈設計模式，並以太陽能產業作為驗證對象，評估此模式之適用性。

第三章 正逆向物流整合之永續供應鏈設計模式

本章節介紹正逆物流整合之永續供應鏈設計模式。3.1 節針對本模型之問題描述加以說明； 3.2 節提出一套一般化的模型(Generic model)，並敘述其假設、已知資訊、符號定義與數學模式；3.3 節延續 3.2 節將一般化模型轉為穩健最佳化模型；3.4 節介紹本研究所使用的多目標求解方法； 3.5 節以簡單的一般化模型範例說明並驗證本研究所提出之數學模式。

3.1 問題描述

一般以生產為導向之多階多廠供應鏈結構包含原物料供應商、生產單位(Production Unit; PU)成員，再透過配銷運輸至終端顧客。近年來，為兼顧環境規範與永續發展，企業透過逆向供應鏈(Reverse Chain; RC)回收生命週期結束(End-of-Life; EOL)之產品，並透過拆解、重製整一系列的處理程序，將可重新利用之原物料、半成品或成品投入於特定的正向生產單位中進行生產。除了透過主動回收外，亦可透過其他二手物料通路商取的可用的二手物料；而逆物流過程中若有無法還原或不符合本效益之 EOL 產品則必須經過最終處理(disposal)，如焚燒或掩埋離開供應鏈。因此，整體供應鏈網絡為一封閉式迴路(closed-loop)之多階多廠架構，如圖 3.1 所示。

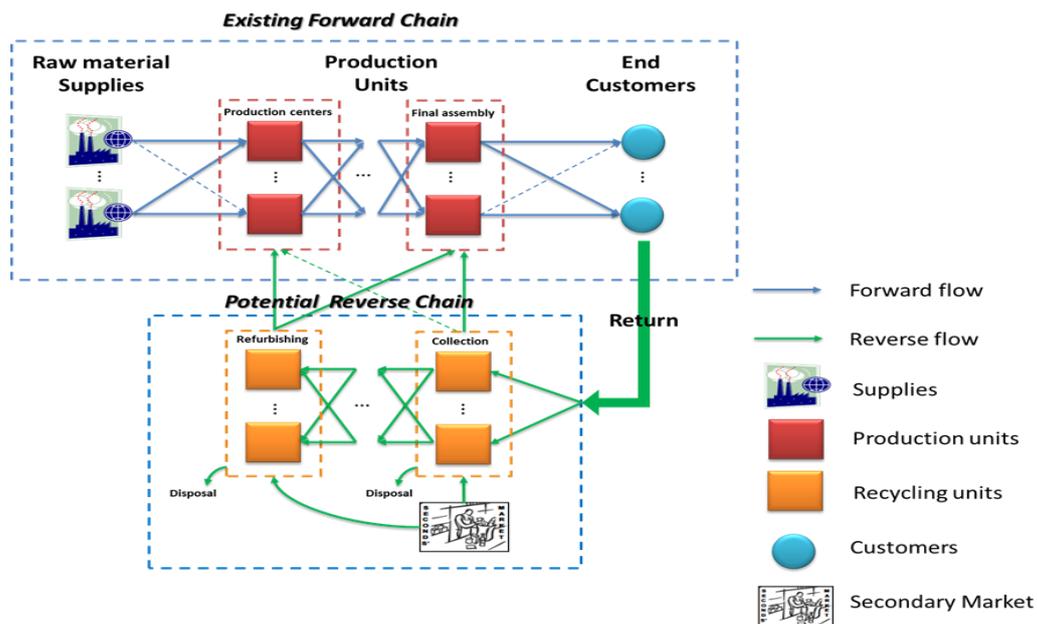


圖3.1 正逆向物流整合之永續供應鏈架構

圖 3.1 的架構中包含到既有(existing)的正向供應鏈與潛在(potential)的逆物流成員，決策者必須決定潛在逆物流廠區設廠位置與數量，並依據顧客端回收數量設計產能大小，如圖 3.2 所示。另一方面，由於未來市場的變化如原物料供給、顧客需求或回收數量等趨勢難以掌握，因此正向生產單位亦有可能在既有的產能條件下進行產能擴充(capacity expansion)，以應付未來市場需求，如圖 3.3 所示。

然而，當供應鏈結構從原本開放式架構改變為封閉式架構後，由於逆物流加入，並導入更多產能使生產活動更為頻繁，導致排放出更多的二氧化碳，面臨到碳權與碳交易機制等政策，企業必須提出更有效益的節能手段，以降低二氧化碳排放量。因此，在設計供應鏈成員之產能投資時，必須考量到各地區不同的碳排放限制，並使用更低碳的製程技術(technology)來達到生產過程中每個環節的節能減碳，但相對投資成本亦較高。

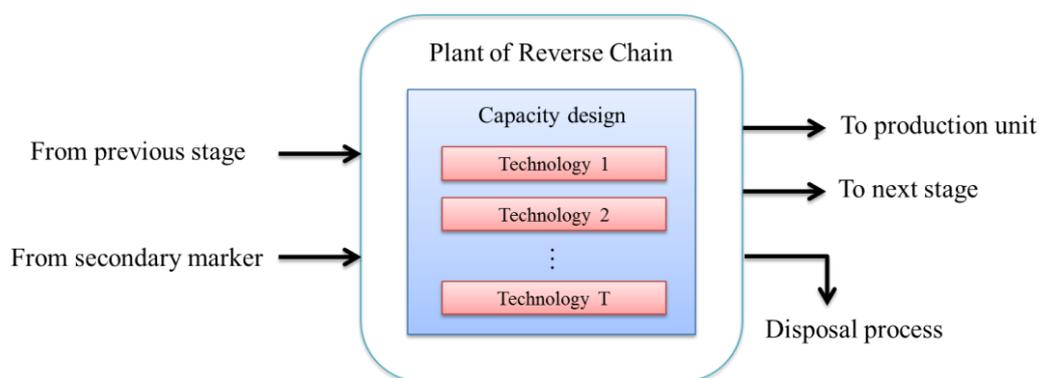


圖3.2 逆向物流廠區特徵

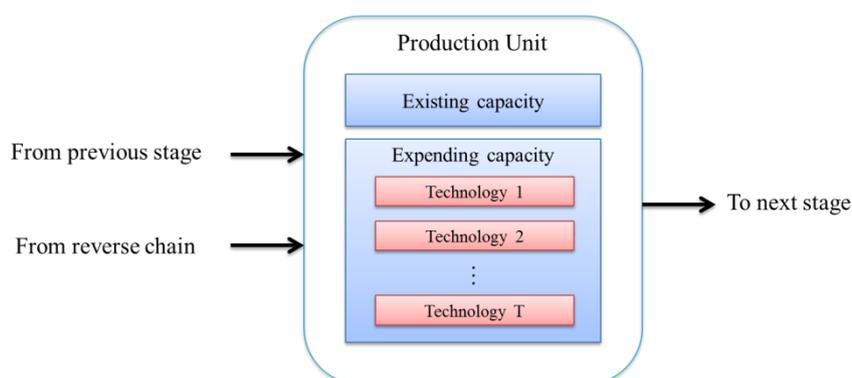


圖3.3 正向生產單位特徵

歸納上述，本研究之問題在於市場供需之不確定性以及既有正向供應鏈結構下，決定逆物流廠區位置、正逆向物流整體物流關係，以及調整正、逆向廠區之產能，並同時考量碳排放議題，透過不同程度的減碳製程或技術投資，以降低供應鏈結構改變下所產生的二氧化碳，使整體供應鏈設計結果兼具經濟與環境效益。

3.2 一般化模型(Generic model)

以生產為導向的多階多廠供應鏈架構下，原物料供應商供應生產活動所需關鍵原物料，經過一系列的生產過程後配銷給各區終端顧客。此模型以確定的(deterministic)建模參數進行正逆向物流整合型供應鏈設計，即未考量到市場供需之不確定性。以下介紹本模式之假設條件、已知資訊、符號定義與數學模式。

3.2.1 假設條件

本研究在碳排放估計方面，由於既有生產單位之營運成本與既有產能所產生的碳排放之平均估計值可視為常數，因此本研究模型是依照生產單位產能擴充規模來估計生產碳排放；而逆物流廠區因本身無既有產能，因此在設計產能時已包含逆物流廠區營運之碳排放。除此之外，供應鏈設計屬於長期(long-term)的策略規劃之範疇，原物料採購數量與顧客需求數量視為規劃週期內之總數量；而規劃週期之時間長度依據各產業特性而定，本研究並不硬性規範。本研究之建模假設彙整如下：

1. 既有廠區之營運成本與碳排放視為常數。
2. 規劃時間為單一週期，且不限制規劃週期長度。
3. 企業會將顧客市場潛在的 EOL 產品全部回收。
4. 若 EOL 產品可還原至可再利用階段，則優先選用二手產品。
5. 減碳效益愈高之技術或設備成本愈高，所耗能源與汙染排放愈低。
6. 正、逆向物流廠區之產能設計僅限於單一技術與水準。
7. 正、逆向物流不可跨階運輸，但逆物流廠區可運輸給不同階生產單位。
8. 本模型不探討二手市場取得二手物料之運輸與通路。
9. 不考慮產品組成物料清單(Bill of Material; BOM)。
10. 顧客端、最終處理中心(disposal center)與二手原物料供應商位置為已知，其中二手原物料供應商為單一供應商。

3.2.2 已知資訊

1. 市場供需資訊

- (1) 原物料供應商供應數量
- (2) 二手物料供應商供應數量
- (3) 顧客端主動回收數量
- (4) 顧客端需求數量

2. 成本相關資訊

- (1) 原物料、二手物料購買成本
- (2) 正、逆向物流廠區間運輸成本
- (3) 逆向物流廠區建置固定成本
- (4) 逆向物流廠區最終處理成本
- (5) 顧客端缺貨罰款成本
- (6) 正、逆向物流廠區產能擴充成本

3. 環境相關資訊

- (1) 正、逆向物流廠區以不同技術進行生產之二氧化碳約當量
- (2) 正、逆向物流廠區運輸之二氧化碳約當量

4. 其他資訊

- (1) 正、逆向物流廠區運輸經濟批量
- (2) 正向物流各階層間運輸能力
- (3) EOL 產品需最終處理比率
- (4) 重製產品可投入不同正向物流階層之比率

3.2.3 符號定義

本小節將定義與說明本研究所發展之正逆物流整合型永續供應鏈設計模型數學符號，包括下標、參數與決策變數。

1. 模式下標(*Indices*)

| | | |
|-----------|----------------------|----------------------------------|
| s | 供應商 s 固定位置 | $s = 1, \dots, S$ |
| i | 生產單位(PU)階段 i | $i = 1, \dots, I$ |
| $\Phi(i)$ | 生產單位階段 i 設廠數量 | $\Phi(i) = \{1, \dots, Num(i)\}$ |
| (i, k) | 生產單位階段 i 廠區位置 k | $k \in \Phi(i)$ |
| c | 顧客端 c 固定位置 | $c = 1, \dots, C$ |
| j | 逆物流(RC)階段 j | $j = 1, \dots, J$ |
| $\Psi(j)$ | 逆物流階段 j 潛在設廠數量 | $\Psi(j) = \{1, \dots, Num(j)\}$ |
| (j, p) | 逆物流階段 j 潛在廠區位置 p | $p \in \Psi(j)$ |
| l | 產能擴充/設計水準 l | $l = 1, \dots, L$ |
| t | 技術投資水準 t | $t = 1, \dots, T$ |

2. 參數(*Parameters*)

(1) 成本相關參數

| | |
|---------------------|--|
| pc_s^{rm} | 供應商 s 供應原物料單位成本 |
| pc_j^{sm} | RC 第 j 階購買二手物料單位成本 |
| $dc_{(j,p)}$ | RC 第 j 階 p 廠最終處理單位成本 |
| SC_{Sk} | 供應商 s 運輸至 PU 首階 k 廠之單位成本 |
| $SC_{(i,k)(i',k')}$ | PU 第 i 階 k 廠運輸至 i' 階 k' 廠之單位成本 |

| | |
|---------------------|---|
| SC_{kc} | PU 末階 k 廠運輸至顧客端 c 之單位成本 |
| SC_{cp} | 顧客端 c 運輸至 RC 首階 p 廠之單位成本 |
| $SC_{(j,p)(j',p')}$ | RC 第 j 階 p 廠運輸至 j' 階 p' 廠之單位成本 |
| $SC_{(j,p)(i,k)}$ | RC 第 j 階 p 廠運輸至 PU 第 i 階 k 廠之單位成本 |
| nc_c | 顧客端 c 缺貨罰款單位成本 |
| $bc_{(j,p)}$ | RC 第 j 階 p 廠建置固定成本 |
| $CC_{(i,k)tl}$ | PU 第 i 階 k 廠之產能擴充為 l 於技術 t 下之成本 |
| $CC_{(j,p)tl}$ | RC 第 j 階 p 廠之產能擴充為 l 於技術 t 下之成本 |

(2) 產能相關參數

| | |
|----------------|-------------------------------------|
| $ca_{(i,k)}$ | PU 第 i 階 k 廠之產能上限 |
| $cl_{(i,k)tl}$ | PU 第 i 階 k 廠使用技術 t 擴充 l 之產能 |
| $cl_{(j,p)tl}$ | RC 第 j 階 p 廠使用技術 t 擴充 l 之產能 |

(3) 供需相關參數

| | |
|------------|---------------------|
| s_s^{rm} | 原物料供應商 s 之供應上限 |
| s_j^{sm} | 逆物流階段 j 購買二手原物料上限 |
| d_c | 顧客 c 需求數量 |
| r_c | 顧客 c 主動回收數量 |

(4) 環境相關參數

| | |
|----------------------|---|
| $pce_{(i,k)t}$ | PU 第 i 階 k 廠投資技術 t 之單位碳排放量 |
| $pce_{(j,p)t}$ | RC 第 j 階 p 廠投資技術 t 之單位碳排放量 |
| tce_{sk} | 供應商 s 運輸至 PU 首階 k 廠之單位碳排放量 |
| $tce_{(i,k)(i',k')}$ | PU 第 i 階 k 廠運輸至 i' 階 k' 廠之單位碳排放量 |
| tce_{kc} | PU 末階 k 廠運輸至顧客端 c 之單位碳排放量 |
| tce_{cp} | 顧客端 c 運輸至 RC 首階 p 廠之單位碳排放量 |
| $tce_{(j,p)(j',p')}$ | RC 第 j 階 p 廠運輸至 j' 階 p' 廠之單位碳排放量 |
| $tce_{(j,p)(i,k)}$ | RC 第 j 階 p 廠運輸至 PU 第 i 階 k 廠之單位碳排放量 |

(5) 運籌相關參數

| | |
|---------------------|---|
| ta_{sk} | 1 : 供應商 s 可將原物料送至 PU 首階 k 廠 0 : 供應商 s 不可將原物料送至 PU 首階 k 廠 |
| $ta_{(i,k)(i',k')}$ | 1 : PU 第 i 階 k 廠可將半成品送至 PU 第 i' 階 k' 廠 0 : PU 第 i 階 k 廠不可將半成品送至 PU 第 i' 階 k' 廠 |
| ta_{kc} | 1 : PU 末階 k 廠可將完成品送至顧客端 c 0 : PU 末階 k 廠不可將完成品送至顧客端 c |
| ta_{ji} | 1 : RC 第 j 階可將完成品送至 PU 第 i 階 0 : RC 第 j 階不可將完成品送至 PU 第 i 階 |
| t_{sk} | 供應商 s 至 PU 首階 k 廠之運輸批量 |
| $t_{(i,k)(i',k')}$ | PU 第 i 階 k 廠至 i' 階 k' 廠之運輸批量 |
| t_{kc} | PU 末階 k 廠至顧客端 c 之運輸批量 |

| | |
|--------------------|---|
| t_{cp} | 顧客端 c 至 RC 首階 p 廠之運輸批量 |
| $t_{(j,p)(j',p')}$ | RC 第 j 階 p 廠至 j' 階 p' 廠之運輸批量 |
| $t_{(j,p)(i,k)}$ | RC 第 j 階 p 廠至 PU 第 i 階 k 廠之運輸批量 |

(6) 比例參數

| | |
|-------------------------|---------------------------------------|
| $\lambda_{(j,p)}^{dis}$ | RC 第 j 階 p 廠之二手產品需最終處理比率 |
| γ_{ji}^{ret} | RC 第 j 階將 EOL 產品翻修後投入 PU 第 i 階之比率 |

3. 決策變數(Decision Variables)

(1) 連續變數

| | |
|---------------------|--|
| TQ_{sk} | 供應商 s 至 PU 首階 k 廠運輸數量 |
| $TQ_{(i,k)(i',k')}$ | PU 第 i 階 k 廠至 i' 階 k' 廠運輸數量 |
| TQ_{kc} | PU 末階 k 廠至顧客端 c 運輸數量 |
| TQ_{cp} | 顧客端 c 至 RC 首階 p 廠運輸數量 |
| $TQ_{(j,p)(j',p')}$ | RC 第 j 階 p 廠至 j' 階 p' 廠運輸數量 |
| $TQ_{(j,p)(i,k)}$ | RC 第 j 階 p 廠至 PU 第 i 階 k 廠運輸數量 |
| $P_{(j,p)}$ | RC 第 j 階 p 廠向二手市場購買數量 |
| $D_{(j,p)}$ | RC 第 j 階 p 廠最終處理數量 |
| N_c | 顧客端 c 缺貨數量 |

(2) 二元變數

| | |
|---------------------|---|
| $X_{(j,p)}$ | 1 : RC 第 j 階 p 廠之位置被選擇 0 : 其他 |
| $AC_{(i,k)tl}$ | 1 : PU 第 i 階第 k 廠使用技術 t 進行產能擴充 l 0 : 其他 |
| $AC_{(j,p)tl}$ | 1 : RC 第 j 階第 p 廠使用技術 t 進行產能擴充 l 0 : 其他 |
| TA_{sk} | 1 : 供應商 s 將原物料送至 PU 首階 k 廠 0 : 供應商 s 未將原物料送至 PU 首階 k 廠 |
| $TA_{(i,k)(i',k')}$ | 1 : PU 第 i 階 k 廠將半成品送至 i' 階 k' 廠 0 : PU 第 i 階 k 廠未將半成品送至 i' 階 k' 廠 |
| TA_{kc} | 1 : PU 末階 k 廠將完成品送至顧客端 c 0 : PU 末階 k 廠未將完成品送至顧客端 c |
| TA_{cp} | 1 : 顧客端 c 將 EOL 產品送至 RC 首階 p 廠 0 : 顧客端 c 未將 EOL 產品送至 RC 首階 p 廠 |
| $TA_{(j,p)(j',p')}$ | 1 : RC 第 j 階 p 廠將翻修品送至 j' 階 p' 廠 0 : RC 第 j 階 p 廠未將翻修品送至 j' 階 p' 廠 |
| $TA_{(j,p)(i,k)}$ | 1 : RC 第 j 階 p 廠將翻修後產品送至 PU 第 i 階 k 廠 0 : RC 第 j 階 p 廠未將翻修後產品送至 PU 第 i 階 k 廠 |

3.2.4 數學模式

藉由上述的符號定義，本小節提出一個混整數線性規劃(Mixed-integer linear programming, MILP)數學模式，其適用於正逆物流整合之永續供應鏈設計問題，以下將詳細描述及說明此數學模式的目標函數及限制式。

目標函數(*Objective Function*)

$$\text{Min } F1 = PC + BC + CEC + TC + DC + NC$$

$$\text{Min } F2 = PCOE + TCOE$$

其中 $F1$ 為經濟目標， $F2$ 為環境目標；以下說明兩目標之組成元素。

經濟目標(*Economic objective; F1*)

1. 物料採購成本(PC)

$$\sum_{s \in S} \sum_{k \in \Phi(1)} pc_s^{rm} \times TQ_{sk} \quad (1)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{p \in \Psi(j)} pc_j^{sm} \times P_{(j,p)} \quad (2)$$

目標式(1)為正向物流生產單位第一階段採購原物料成本；目標式(2)為逆物流每一階段採購二手物料成本。採購成本(PC)為目標式(1)與(2)加總。

2. 逆物流廠區建置成本(BC)

$$\sum_{j \in J} \sum_{p \in \Psi(j)} bc_{(j,p)} \times X_{(j,p)} \quad (3)$$

目標式(3)為逆物流廠區建置包括土地、廠房等固定成本。在此並不包含生產設備(產能/生產技術)之投資。

3. 產能設計成本(CEC)

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in \Phi(i)} \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} cc_{(i,k)tl} \times cl_{(i,k)tl} \times AC_{(i,k)tl} \quad (4)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{p \in \Psi(j)} \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} cc_{(j,p)tl} \times cl_{(j,p)tl} \times AC_{(j,p)tl} \quad (5)$$

目標式(4)為正向物流生產單位產能擴充成本；目標式(5)為逆物流廠區產能投資成本。產能設計成本(CEC)為目標式(4)與(5)加總。

4. 運輸成本(TC)

$$\sum_{s \in S} \sum_{k \in \Phi(1)} sc_{sk} \times TQ_{sk} \quad (6)$$

$$\sum_{i=2}^I \sum_{k \in \Phi(i-1)} \sum_{k' \in \Phi(i)} sc_{(i-1,k)(i,k')} \times TQ_{(i-1,k)(i,k')} \quad (7)$$

$$\sum_{k \in \Phi(I)} \sum_{c \in C} sc_{kc} \times TQ_{kc} \quad (8)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{p \in \Psi(1)} sc_{cp} \times TQ_{cp} \quad (9)$$

$$\sum_{j=2}^J \sum_{p \in \Psi(j-1)} \sum_{p' \in \Psi(j)} sc_{(j-1,p)(j,p')} \times TQ_{(j-1,p)(j,p')} \quad (10)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{p \in \Psi(j)} \sum_{i \in I} \sum_{k \in \Phi(i)} sc_{(j,p)(i,k)} \times TQ_{(j,p)(i,k)} \quad (11)$$

目標式(6)-(8)為正向物流之運輸成本；目標式(9)與(10)為逆物流之運輸成本；而目標式(11)為逆向與正向物流間之運輸成本。

5. 最終處理成本(DC)

$$\sum_{j \in J} \sum_{p \in \Psi(j)} dc_{(j,k)} \times D_{(j,k)} \quad (12)$$

目標式(12)為逆物流廠區將無法還原之 EOL 產品進行最終處理(disposal)所需支付之成本。

6. 缺貨罰款成本(PC)

$$\sum_{c \in C} nc_c \times N_c \quad (13)$$

目標式(13)為企業未滿足終端顧客需求，須支付之缺貨罰款成本。經濟目標(FI)即為目標式(1)-(13)加總之總和。

環境目標(*Environmental objective; F2*)

1. 生產碳排放量(*PCOE*)

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in \Phi(i)} \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} pce_{(i,k)t} \times cl_{(i,k)tl} \times AC_{(i,k)tl} \quad (14)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{p \in \Psi(j)} \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} pce_{(j,p)t} \times cl_{(j,p)tl} \times AC_{(j,p)tl} \quad (15)$$

由於本研究將既有產能進行生產所產生的碳排放平均視為常數，因此在生產碳排放量部分是考慮生產單位之產能擴充與逆物流廠區之產能設計規模所產生的碳排放。目標式(14)為正向生產單位透過不同的技術進行產能擴充，並透過該技術進行生產，所產生的碳排放量；目標式(15)為逆物流成員透過不同的技術進行重製處理，所產生的碳排放量。生產碳排放量(*PCOE*)為目標式(14)、(15)之總和。

2. 運輸碳排放量(*TCOE*)

$$\sum_{s \in S} \sum_{k \in \Phi(1)} tce_{sk} \times TQ_{sk} \quad (16)$$

$$\sum_{i=2}^I \sum_{k \in \Phi(i-1)} \sum_{k' \in \Phi(i)} tce_{(i-1,k)(i,k')} \times TQ_{(i-1,k)(i,k')} \quad (17)$$

$$\sum_{k \in \Phi(I)} \sum_{c \in C} tce_{kc} \times TQ_{kc} \quad (18)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{p \in \Psi(1)} tce_{cp} \times TQ_{cp} \quad (19)$$

$$\sum_{j=2}^J \sum_{p \in \Psi(j-1)} \sum_{p' \in \Psi(j)} tce_{(j-1,p)(j,p')} \times TQ_{(j-1,p)(j,p')} \quad (20)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{p \in \Psi(j)} \sum_{i \in I} \sum_{k \in \Phi(i)} tce_{(j,p)(i,k)} \times TQ_{(j,p)(i,k)} \quad (21)$$

目標式(16)-(18)為正向物流間運輸所產生之碳排放量，目標式(19)與(20)為逆物流間運輸所產生之碳排放量；而目標式(21)為逆向與正向物流間運輸所產生之碳排放量。目標式(14)-(21)加總之總和即為環境目標(*F2*)。

限制條件(Constraint)

1. 物料供給限制

$$\sum_{k \in \Phi(1)} TQ_{sk} \leq s_s^{rm}, \forall s \in S \quad (22)$$

$$P_{(j,p)} \leq s_j^{sm}, \forall j \in J, \forall p \in \Psi(j) \quad (23)$$

限制式(22)為第一階生產單位項原物料供應商購買原物料之上限。限制式(23)為逆物流各階廠區可向二手原物料供應商購買二手物料之上限。

2. 物流平衡限制

$$\begin{aligned} \sum_{s \in S} TQ_{sk} + \sum_{j \in J} \sum_{p \in \Psi(j)} TQ_{(j,p)(i,k)} &= \sum_{k' \in \Phi(i+1)} TQ_{(i,k)(i+1,k')}, \\ \forall i &= \{1\}, \forall k \in \Phi(1) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \sum_{k' \in \Phi(i-1)} TQ_{(i-1,k')(i,k)} + \sum_{j \in J} \sum_{p \in \Psi(j)} TQ_{(j,p)(i,k)} &= \sum_{k'' \in \Phi(i+1)} TQ_{(i,k)(i+1,k'')}, \\ \forall i &= \{2, \dots, I-1\}, \forall k \in \Phi(i) \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \sum_{k' \in \Phi(I)} TQ_{(i-1,k')(i,k)} + \sum_{j \in J} \sum_{p \in \Psi(j)} TQ_{(j,p)(i,k)} &= \sum_{c \in C} TQ_{kc}, \\ \forall i &= I, \forall k \in \Phi(I) \end{aligned} \quad (26)$$

以上為正向生產單位物流平衡限制。限制式(24)為第一階生產單位接收從供應商流入數量(TQ_{sk})與逆物流流入數量($TQ_{(j,p)(i,k)}$)之總和，必須等於流出至下一階數量($TQ_{(i,k)(i+1,k')}$)之總和；限制式(25)為生產單位間(不包括第一階)，從上階流入數量($TQ_{(i-1,k')(i,k)}$)與逆物流流入數量($TQ_{(j,p)(i,k)}$)之總和，必須等於流出至下一階數量($TQ_{(i,k)(i+1,k'')}$)之總和；限制式(26)為最末階生產單位接收上階流入數量($TQ_{(i-1,k')(i,k)}$)與物流流入數量($TQ_{(j,p)(i,k)}$)之總和，必須等於配銷給各區顧客端之數量(TQ_{kc})之總和。

$$\sum_{k \in \Phi(I)} TQ_{kc} + N_c = d_c, \forall c \in C \quad (27)$$

限制式(27)表示顧客需求必須被滿足，但若需求大於供給時可允許缺貨。

$$\sum_{p \in \Psi(j)} TQ_{cp} = r_c, \forall c \in C \quad (28)$$

限制式(28)表示企業將全部回收顧客端所產生之 EOL 產品。

$$\begin{aligned} \sum_{c \in C} TQ_{cp} + P_{(j,p)} &= \sum_{p' \in \Psi(j+1)} TQ_{(j,p)(j+1,p')} + D_{(j,p)} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in \Phi(i)} TQ_{(j,p)(i,k)}, \\ \forall j &= \{1\}, \forall p \in \Psi(1) \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \sum_{p' \in \Psi(j-1)} TQ_{(j-1,p')(j,p)} + P_{(j,p)} &= \sum_{p' \in \Psi(j+1)} TQ_{(j,p)(j+1,p')} + D_{(j,p)} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in \Phi(i)} TQ_{(j,p)(i,k)}, \\ \forall j &= \{2, \dots, J-1\}, \forall p \in \Psi(j) \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \sum_{p' \in \Psi(j-1)} TQ_{(j-1,p')(j,p)} + P_{(j,p)} &= D_{(j,p)} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in \Phi(i)} TQ_{(j,p)(i,k)}, \\ \forall j &= J, \forall p \in \Psi(J) \end{aligned} \quad (31)$$

以上為逆物流廠區物流平衡限制。限制式(29)表示，逆物流第一階接收從顧客端主動回收數量(TQ_{cp})與二手物料購買數量($P_{(j,p)}$)之總和，必須等於流出至下一階數量($TQ_{(j,p)(j+1,p')}$)、最終處理數量($D_{(j,p)}$)，以及可供給正向物流數量($TQ_{(j,p)(i,k)}$)之總和；限制式(30)表示，逆物流間(不包括第一階)，從上階流入數量($TQ_{(j-1,p')(j,p)}$)與二手物料購買數量($P_{(j,p)}$)之總和，必須等於流出至下一階數量($TQ_{(i,k)(i+1,k'')}$)、最終處理數量($D_{(j,p)}$)，以及可供給正向物流數量($TQ_{(j,p)(i,k)}$)之總和；限制式(31)表示，逆物流最末階接收上階流入數量($TQ_{(j-1,p')(j,p)}$)與二手物料購買數量($P_{(j,p)}$)之總和，必須等於最終處理數量($D_{(j,p)}$)與可供給正向物流數量($TQ_{(j,p)(i,k)}$)之總和。

$$\begin{aligned} \sum_{k \in \Phi(i)} TQ_{(j,p)(i,k)} &\leq \gamma_{ji}^{ret} \times (\sum_{c \in C} TQ_{cp} + P_{(j,p)} - D_{(j,p)}), \\ \forall i &\in I, \forall j = \{1\}, \forall p \in \Psi(1) \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \sum_{k \in \Phi(i)} TQ_{(j,p)(i,k)} &\leq \gamma_{ji}^{ret} \times (\sum_{p' \in \Psi(j-1)} TQ_{(j-1,p')(j,p)} + P_{(j,p)} - D_{(j,p)}), \\ \forall i &\in I, \forall j = \{2, \dots, J\}, \forall p \in \Psi(j) \end{aligned} \quad (33)$$

限制式(32)與(33)分別表示，逆物流第一階與其他階層廠區供給生產單位之數量，為總流入數量扣除最終處理數量後，乘以投入比例(γ_{ji}^{ret})，意即表示依據投入比例，決定重製後產品投入正向生產單位之數量。

$$D_{(j,p)} = \lambda_{(j,p)}^{dis} \times (\sum_{c \in C} TQ_{cp} + P_{(j,p)}), \forall j = \{1\}, \forall p \in \Psi(1) \quad (34)$$

$$D_{(j,p)} = \lambda_{(j,p)}^{dis} \times (\sum_{p' \in \Psi(j-1)} TQ_{(j-1,p')(j,p)} + P_{(j,p)}), \forall j = \{2, \dots, J\}, \forall p \in \Psi(j) \quad (35)$$

限制式(34)與(35)分別表示逆物流廠區第一階與其他階層最終處理數量為總流入數量乘以最終處理比率($\lambda_{(j,p)}^{dis}$)。

3. 產能擴充限制

$$\sum_{s \in S} TQ_{sk} + \sum_{j \in J} \sum_{p \in \Psi(j)} TQ_{(j,p)(i,k)} \leq ca_{(i,k)} + \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} (cl_{(i,k)tl} \times AC_{(i,k)tl}), \quad \forall i = \{1\}, \forall k \in \Phi(1) \quad (36)$$

$$\sum_{k' \in \Phi(i-1)} TQ_{(i-1,k')(i,k)} + \sum_{j \in J} \sum_{p \in \Psi(j)} TQ_{(j,p)(i,k)} \leq ca_{(i,k)} + \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} (cl_{(i,k)tl} \times AC_{(i,k)tl}), \quad \forall i = \{2, \dots, I\}, \forall k \in \Phi(i) \quad (37)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{l \in L} AC_{(i,k)tl} \leq 1, \forall i \in I, \forall k \in \Phi(i) \quad (38)$$

以上為正向生產單位產能擴充限制。限制式(36)與(37)分別表示，生產單位第一階與其他階層廠區之物流輸入量，必須小於該廠區之既有產能($ca_{(i,k)}$)。若面臨到產能不足之問題時，則該廠區應進行產能擴充。限制式(38)表示，正向生產單位只能選擇一種技術下之產能水準進行擴充。

$$\sum_{c \in C} TQ_{cp} + P_{(j,p)} \leq \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} (cl_{(j,p)tl} \times AC_{(j,p)tl}), \forall j = \{1\}, \forall p \in \Psi(1) \quad (39)$$

$$\sum_{p' \in \Psi(j-1)} TQ_{(j-1,p')(j,p)} + P_{(j,p)} \leq \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} (cl_{(j,p)tl} \times AC_{(j,p)tl}), \quad \forall j = \{2, \dots, J\}, \forall p \in \Psi(j) \quad (40)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{l \in L} AC_{(j,p)tl} = X_{(j,p)}, \forall j \in J, \forall p \in \Psi(j) \quad (41)$$

以上為逆向物流廠區之產能設計限制式。限制式(39)與(40)分別表示，逆物流第一階與其他階層廠區之物流輸入量必須小於該廠區之產能；由於逆物流成員為潛在廠區，沒有既有產能上限，因此直接針對產能大小進行設計。限制式(41)表示若該廠區有投資產能，則該廠區必營運，且只能選擇一種技術下之產能水準之邏輯限制。

4. 運輸限制

$$t_{sk} \times TA_{sk} \leq TQ_{sk} \leq TA_{sk} \times M, \forall s \in S, \forall k \in \Phi(1) \quad (42)$$

$$t_{(i-1,k)(i,k')} \times TA_{(i-1,k)(i,k')} \leq TQ_{(i-1,k)(i,k')} \leq TA_{(i-1,k)(i,k')} \times M, \quad (43)$$

$$\forall i = \{2, \dots, I\}, \forall k \in \Phi(i-1), \forall k' \in \Phi(i)$$

$$t_{kc} \times TA_{kc} \leq TQ_{kc} \leq TA_{kc} \times M, \forall k \in \Phi(I), \forall c \in C \quad (44)$$

$$t_{cp} \times TA_{cp} \leq TQ_{cp} \leq TA_{cp} \times M, \forall c \in C, \forall p \in \Psi(1) \quad (45)$$

$$t_{(j-1,p)(j,p')} \times TA_{(j-1,p)(j,p')} \leq TQ_{(j-1,p)(j,p')} \leq TA_{(j-1,p)(j,p')} \times M, \quad (46)$$

$$\forall j = \{2, \dots, J\}, \forall p \in \Psi(j-1), \forall p' \in \Psi(j)$$

$$t_{(j,p)(i,k)} \times TA_{(j,p)(i,k)} \leq TQ_{(j,p)(i,k)} \leq TA_{(j,p)(i,k)} \times M, \quad (47)$$

$$\forall j \in J, \forall p \in \Psi(j), \forall i \in I, \forall k \in \Phi(i)$$

以上為物流運輸批量之限制。限制式(42)為原物料供應商運輸至生產單位第一階之運輸批量限制；限制式(43)為生產單位第一階運輸至最末階之運輸批量限制；限制式(44)為生產單位最末階運輸至顧客端之運輸批量限制。限制式(45)為顧客端運輸至逆物流第一階之運輸批量限制；限制式(46)為逆物流第一階運輸至最末階之運輸批量限制；限制式(47)為重製後產品送回正向生產單位之運輸批量限制。

$$TA_{sk} \leq ta_{sk}, \forall s \in S, \forall s \in S, \forall k \in \Phi(1) \quad (48)$$

$$TA_{(i-1,k)(i,k')} \leq ta_{(i-1,k)(i,k')}, \forall i = \{2, \dots, I\}, \forall k \in \Phi(i-1), \forall k' \in \Phi(i) \quad (49)$$

$$TA_{kc} \leq ta_{kc}, \forall k \in \Phi(I), \forall c \in C \quad (50)$$

以上為正向物流運輸能力之限制式。由於正向物流為既有存在的，因此在物流部分須包含到上下階廠區是否可互相運輸之限制。限制式(48)為原物料供應商運輸至生產單位第一階之運輸能力限制；限制式(49)為生產單位第一階運輸至最末階之運輸能力限制；限制式(50)為生產單位最末階運輸至顧客端之運輸能力限制。

$$TA_{(j,p)(i,k)} \leq ta_{ji}, \forall j \in J, \forall p \in \Psi(j), \forall i \in I, \forall k \in \Phi(i) \quad (51)$$

限制式(51)為逆物流各階段運輸至正向物流各階段之運輸能力。由於經過逆物流翻修與重製等製程，並可投入於正向物流中。然而 EOL 產品還原階段各有不同，例如某 EOL 產品還原至原物料階段後，只能投入正向生產單元第一階，而不能運輸給最終裝配廠，因此在正逆向整合物流中必須考量到逆向與正向物流階段互相運輸之能力。

5. 符號限制

$$TQ_{s(i,k)}, TQ_{(i,k)(i',k')}, TQ_{(i,k)c}, TQ_{c(j,p)}, TQ_{(j,p)(j',p')}, TQ_{(j,p)(i,k)}, P_{(j,p)}, D_{(j,p)}, N_c \geq 0, \quad (52)$$

$$\forall s \in S, \forall i \in I, \forall k \in \Phi(i), \forall c \in C, \forall j \in J, \forall p \in \Psi(j)$$

$$X_{(j,p)}, AC_{(i,k)tl}, AC_{(j,p)tl}, TA_{s(i,k)}, TA_{(i,k)(i',k')}, TA_{(i,k)c}, TA_{c(j,p)}, TA_{(j,p)(j',p')}, TA_{(j,p)(i,k)} \in \{0,1\}, \quad (53)$$

$$\forall s \in S, \forall i \in I, \forall k \in \Phi(i), \forall c \in C, \forall j \in J, \forall p \in \Psi(j)$$

以上為變數之符號限制。限制式(52)表示連續變數之範圍；限制式(53)表示二元變數範圍。

3.3 穩健最佳化模型(Robust optimization model)

由於供應鏈設計屬於長期的決策過程，並牽涉到龐大的資本投資且難以因應實況而做更改，因此特別講究模型的穩健性。由於 3.2 節已介紹了確定型之數學模式之，本節將說明如何將確定型模式透過定義不確定性參數範圍，並修改為穩健最佳化模型。

3.3.1 確認不確定參數

由於實際產業供應鏈中，物料供給、顧客需求，以及回收數量是難以精確估計的統計分佈，本研究於文獻探討中回顧了過去學者透過穩健最佳化方法設計供應鏈模型，歸納出市場供需資訊為最主要的不確定性參數如下：

1. 原物料供應商供給上限(s_s^{rm})
2. 二手物料供應商供給上限(s_j^{sm})
3. 顧客需求數量(d_c)
4. 主動回收數量(r_c)

3.3.2 定義不確定參數範圍

本研究假設以上的不確定性參數之實際值以一個特定的名目值(nominal value)為中心，並在一個封閉區間(closed bounded)範圍之內，意即表示決策者掌握市場供需資訊需包括其概略平均與上下限(極端值)。這些不確定性參數被定義為多維度且對稱(symmetrical)的範圍(box)，以原物料供應商供給上限(s_s^{rm})而言，其不確定範圍定義如下：

$$U_{box}^{s^{rm}} = \{s^{rm} \in \mathcal{R}^{s^{rm}} : |s^{rm} - \overline{s_s^{rm}}| \leq \rho_s^{s^{rm}} \times G_s^{s^{rm}}, \forall s \in S\}$$

其中 s_s^{rm} 為不確定的原物料供給上限之實際值， $\overline{s_s^{rm}}$ 為其名目值(平均值)。 $\rho_s^{s^{rm}}$ 與 $G_s^{s^{rm}}$ 為非負參數，分別表示「原物料供給上限不確定水準(uncertainty level)」與「原物料供給上限不確定尺度(uncertainty scale)」。本研究將 $G_s^{s^{rm}}$ 設定為 $\overline{s_s^{rm}}$ ，即 $G_s^{s^{rm}} = \overline{s_s^{rm}}$ 。這表示 $\rho_s^{s^{rm}}$ 是使名目值的產生偏差

之主因，並可透過調整 $\rho_s^{s^{rm}}$ 探討不確定性對整體供應鏈設計之影響。根據以上定義，原物料供給上限之實際值 s_s^{rm} 會隨著不同的不確定水準 $\rho_s^{s^{rm}}$ 而改變。因此，可將不確定範圍寫成以下型式：

$$\overline{s_s^{rm}} - \rho_s^{s^{rm}} \times G_s^{s^{rm}} \leq s_s^{rm} \leq \overline{s_s^{rm}} + \rho_s^{s^{rm}} \times G_s^{s^{rm}}, \forall s \in S$$

同理，二手物料供應商供給數量(s_j^{sm})之範圍定義如下：

$$U_{box}^{s^{sm}} = \{s^{sm} \in \mathfrak{R}^{s^{sm}} : |s_j^{sm} - \overline{s_j^{sm}}| \leq \rho_j^{s^{sm}} \times G_j^{s^{sm}}, \forall j \in J\}$$

根據以上定義，二手物料供給上限之實際值 s_j^{sm} 會隨著不同的不確定水準 $\rho_j^{s^{sm}}$ 而改變。因此，可將不確定範圍寫成以下型式：

$$\overline{s_j^{sm}} - \rho_j^{s^{sm}} \times G_j^{s^{sm}} \leq s_j^{sm} \leq \overline{s_j^{sm}} + \rho_j^{s^{sm}} \times G_j^{s^{sm}}, \forall j \in J$$

同理，顧客需求數量(d_c)之範圍定義如下：

$$U_{box}^d = \{d \in \mathfrak{R}^d : |d_c - \overline{d_c}| \leq \rho_c^d \times G_c^d, \forall c \in C\}$$

根據以上定義，顧客需求數量之實際值 d_c 會隨著不同的不確定水準 ρ_c^d 而改變。因此，可將不確定範圍寫成以下型式：

$$\overline{d_c} - \rho_c^d \times G_c^d \leq d_c \leq \overline{d_c} + \rho_c^d \times G_c^d, \forall c \in C$$

同理，主動回收量(r_c)之範圍定義如下：

$$U_{box}^r = \{r \in \mathfrak{R}^r : |r_c - \overline{r_c}| \leq \rho_c^r \times G_c^r, \forall c \in C\}$$

根據以上定義，顧客需求數量之實際值 r_c 會隨著不同的不確定水準 ρ_c^r 而改變。因此，可將不確定範圍寫成以下型式：

$$\overline{r_c} - \rho_c^r \times G_c^r \leq r_c \leq \overline{r_c} + \rho_c^r \times G_c^r, \forall c \in C$$

3.3.3 ROBUST 轉換

根據以上所定義之原物料與二手物料供給上限、顧客需求量，以及主動回收數量之不確定參數範圍，可將正逆物流整合型供應鏈設計之一般化模型寫成以下型式：

目標函數(Objective Function)

$$\text{Min } F1 = PC + BC + CEC + TC + DC + NC$$

$$\text{Min } F2 = PCOE + TCOE$$

限制條件(Constraints)

$$\sum_{k \in \Phi(1)} TQ_{sk} \leq s_s^{rm}, \forall s \in S, \forall s_s^{rm} \in U_{box}^{s^{sm}} \quad (54)$$

$$P_{(j,p)} \leq s_j^{sm}, \forall j \in J, \forall p \in \Psi(j), \forall s_j^{sm} \in U_{box}^{s^{rm}} \quad (55)$$

$$\sum_{k \in \Phi(I)} TQ_{kc} + N_c = d_c, \forall c \in C, \forall d_c \in U_{box}^d \quad (56)$$

$$\sum_{p \in \Psi(j)} TQ_{cp} = r_c, \forall c \in C, \forall r_c \in U_{box}^r \quad (57)$$

(24)-(26)、(29)-(53)

其中，限制式(54)對應限制式(22)，並將原物料供給數量上限之參數(s_s^{rm})定義在一個不確定範圍內；同理，限制式(55)、(56)與(57)分別對應限制式(23)、(27)與(28)，並定義其參數所包含的不確定範圍。然而，其他不包含不確定參數之限制式則維持不變。以限制式(54)為例，供應商運輸至第一階生產單位數量不可超過原物料供應上限，而原物料供應上限(s_s^{rm})透過該參數的不確定尺度($G_s^{s^{rm}}$)與不確定水準($\rho_s^{s^{rm}}$)定義成一個封閉區間($U_{box}^{s^{sm}}$)，如下所示：

$$\overline{s_s^{rm}} - \rho_s^{s^{rm}} \times G_s^{s^{rm}} \leq s_s^{rm} \leq \overline{s_s^{rm}} + \rho_s^{s^{rm}} \times G_s^{s^{rm}}, \forall s \in S$$

由於穩健最佳化目的在於，規劃過程中盡量避免參數的不確定性，造成無法求解之結果，在此即表示考量到原物料供應最極端狀況之規劃結果，必能包含到所有實際發生之情況。因此，以數學式表達如下：

$$\sum_{k \in \Phi(1)} TQ_{sk} \leq \min_{s_s^{rm} \in U_{box}^{s^{rm}}} s_s^{rm}, \forall s \in S$$

綜合以上述，可得到以下結果：

$$\sum_{k \in \Phi(1)} TQ_{sk} \leq \overline{s_s^{rm}} - \rho_s^{s^{rm}} \times G_s^{s^{rm}} \quad (58)$$

限制式(58)即取代限制式(54)，成為穩健最佳化模型限制式。

同理，二手物料供應上限(s_s^{sm})依據其參數之不確定尺度($G_j^{s^{sm}}$)與不確定水準($\rho_j^{s^{sm}}$)定義成一個封閉區間($U_{box}^{s^{sm}}$)，如下所示：

$$\overline{s_j^{sm}} - \rho_j^{s^{sm}} \times G_j^{s^{sm}} \leq s_s^{sm} \leq \overline{s_j^{sm}} + \rho_j^{s^{sm}} \times G_j^{s^{sm}}, \forall j \in J$$

根據上式，考量到二手物料供應最極端狀況之規劃結果，必能包含到所有實際發生之情況。因此，以數學式表達如下：

$$P_{(j,p)} \leq \min_{s_j^{sm} \in U_{box}^{s^{sm}}} s_j^{sm}, \forall j \in J, \forall p \in \Psi(j)$$

綜合以上所述，可得到以下結果：

$$P_{(j,p)} \leq \overline{s_j^{sm}} - \rho_j^{s^{sm}} \times G_j^{s^{sm}}, \forall j \in J, \forall p \in \Psi(j) \quad (59)$$

限制式(59)即取代限制式(55)，成為穩健最佳化模型限制式。

同理，顧客需求數量(d_c)依據其參數之不確定尺度(G_c^d)與不確定水準(ρ_c^d)定義成一個封閉區間(U_{box}^d)，如下所示：

$$\bar{d}_c - \rho_c^d \times G_c^d \leq d_c \leq \bar{d}_c + \rho_c^d \times G_c^d, \forall c \in C$$

根據上式，考量到顧客需求數量最極端，即最少與最多之間的規劃結果，必能包含到所有實際發生之情況。因此，以數學式表達如下：

$$\min_{d_c \in U_{box}^d} d_c \leq \sum_{k \in \Phi(I)} TQ_{kc} + N_c \leq \max_{d_c \in U_{box}^d} d_c, \forall c \in C$$

綜合以上所述，可得到以下結果：

$$\bar{d}_c - \rho_c^d \times G_c^d \leq \sum_{k \in \Phi(I)} TQ_{kc} + N_c \leq \bar{d}_c + \rho_c^d \times G_c^d, \forall c \in C \quad (60)$$

限制式(60)即取代限制式(56)，成為穩健最佳化模型限制式。

同理，主動回收數量(r_c)依據其參數之不確定尺度(G_c^r)與不確定水準(ρ_c^r)定義成一個封閉區間(U_{box}^r)，如下所示：

$$\bar{r}_c - \rho_c^r \times G_c^r \leq r_c \leq \bar{r}_c + \rho_c^r \times G_c^r, \forall c \in C$$

根據上式，考量到主動回收數量最極端，即最少與最多之間的規劃結果，必能包含到所有實際發生之情況。因此，以數學式表達如下：

$$\min_{r_c \in U_{box}^r} r_c \leq \sum_{p \in \Psi(j)} TQ_{cp} \leq \max_{r_c \in U_{box}^r} r_c, \forall c \in C$$

綜合以上所述，可得到以下結果：

$$\bar{r}_c - \rho_c^r \times G_c^r \leq \sum_{p \in \Psi(j)} TQ_{cp} \leq \bar{r}_c + \rho_c^r \times G_c^r, \forall c \in C \quad (61)$$

限制式(61)即取代限制式(57)，成為穩健最佳化模型限制式。

3.3.4 ROBUST 模型

依據 Robust 轉換之結果，本研究之正逆向物流整合型永續供應鏈設計之穩健最佳化模型如下所示：

目標函數(*Objective Function*)

$$\text{Min } F1 = PC + BC + CEC + TC + DC + NC$$

$$\text{Min } F2 = PCOE + TCOE$$

限制條件(*Constraints*)

(24)-(26)、(29)-(53)、(58)-(61)

3.4 多目標求解方法

本小節將介紹本研究所使用之多目標求解方法。一般而言，多目標問題主要目的是使決策者在特定的限制條件下，可同時考量多個目標之數學規劃法，並找出一組較為滿足各目標之折衷解。換言之，多目標問題並非如單一目標規劃問題只存在一組最佳解，而是包含無限多組等效解集合，即所謂柏拉圖解(Pareto Set，或稱 Non-dominated Set)。

多目標最佳化問題中，各單一目標之間必互相存在衝突(trade-off)。一般情況下幾乎找不到一組最佳解，且由於各目標之衡量單位、數值大小與目標求解方向之差異，容易造成各單一目標對整體目標函數之影響存在強弱之分。因此，多目標最佳化問題欲決定其整體目標函數是相當困難之事。

多目標求解方法，常見的包括妥協規劃法(Compromise Programming Method)、權重法(Weighting Method)、限制法(Constraint Method)，與目標規劃法(Goal Programming Method)。為考量到求解效率與真實決策數據取得不易之限制，本研究主要以限制法(Constraint Method)與妥協規劃法(Compromise Programming Method)進行多目標求解。由於限制法(Constraint Method)求解結果為一組等效解之近似(approximate)柏拉圖解集合，優點在於決策者容易使用其結果進行決策，然而缺點在於因求解結果為多組等效解集合，故難以透過求解結果進行相關的敏感度分析。然而，妥協規劃法(Compromise Programming Method)是依據各目標的權重來決定一組單一各目標之最佳折衷解，因此可透過其結果進行相關的數值分析。以下介紹此兩種方法之求解流程。

3.4.1 限制法(Constraint Method)

限制法(Constraint Method)，又稱 ϵ -限制法(ϵ -Constraint Method)，目的在於產生一組柏拉圖解集合。其概念為先進行單一目標求解，並將其他目標式做為該單一目標問題之限制式，並藉由調整這些限制式之上下限參數(ϵ)，即可得到另一組單一目標之解。重複以上動作，即可得到一組近似柏拉圖解集合。圖 3.4 為限制法之求解流程。

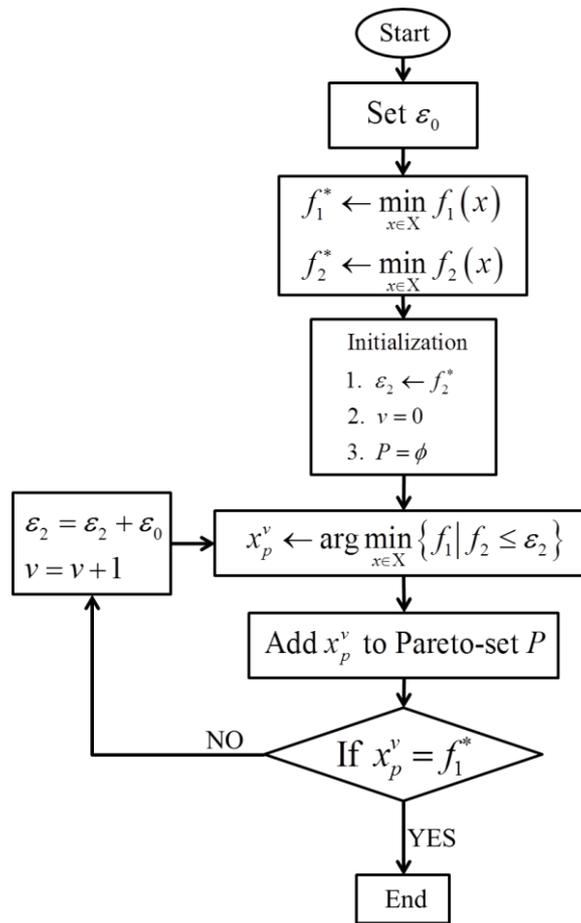


圖3.4 限制法解流程圖

限制法求解說明：

(假設針對 $f_1(x)$ 進行最佳化，同時賦予 $f_2(x)$ RHS 加入限制式)

1. 給定 ϵ_0 初始值。
2. 分別針對 $f_1(x)$ 與 $f_2(x)$ 進行最佳化，取得 f_1^* 與 f_2^* 。
3. 進行初始化動作。
 - (1) 設定 ϵ_2 為 $f_2(x)$ 之 RHS。 ϵ_2 初始值為最佳化 $f_1(x)$ 值 f_1^* 。
 - (2) 設定計數器值 v 為 0。
 - (3) 設定柏拉圖最適解集合 P 為空集合。
4. 求解目標式 $f_1(x)$ 。 x_p^v 為目標式 $f_1(x)$ 最佳解。
5. 將 x_p^v 加入柏拉圖最適解集合。
6. 判斷 x_p^v 是否與最佳化 $f_1(x)$ 值 f_1^* 相同。若無，則將 ϵ_2 加上 ϵ_0 且計數器值 $v + 1$ ，回到之前求解步驟繼續執行；反之，結束流程。

3.4.2 妥協規劃法(Compromise Programming Method)

有別於限制法(Constraint Method)所求出一組近似的柏拉圖解集合，妥協規劃法(Compromise Programming Method)所求出僅唯一解。妥協規劃法是延續柏拉圖解集合的概念，先求出所有目標共同的最佳解(ideal solution)，即每目標的最佳解，而理想解至柏拉圖解之最短距離即為此多目標問題之妥協解，如圖 3.5 所示。

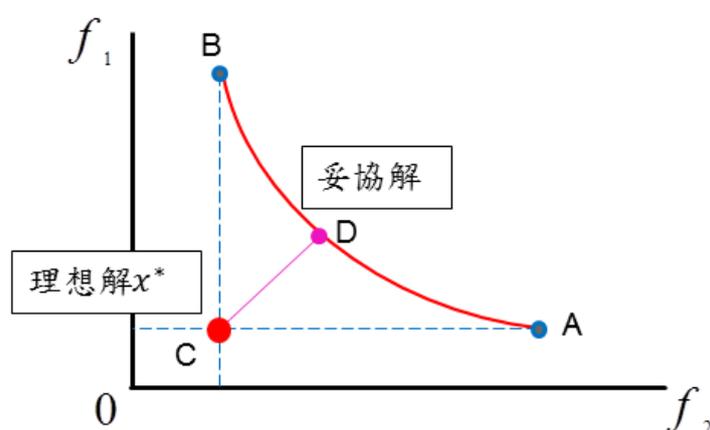


圖3.5 妥協解示意圖

以上圖 3.5 為例，假設為求解最小化問題，A 為 $f_1(x)$ 之最佳解，B 為 $f_2(x)$ 之最佳解，而兩目標所共同的最佳解為 C，而 C 至兩目標 $f_1(x)$ 與 $f_2(x)$ 所求得的柏拉圖解(紅色曲線部分)即為妥協解。

基於以上的說明，妥協規劃法嚴格而論是為最短距離之單目標求解問題。然而，在多目標問題中往往面臨各目標的衡量單位並不一致。以本研究為例，經濟目標之衡量單位為成本(幣值)，而環境目標之衡量單位為二氧化碳排放約當量(噸)，兩者不可同一而論，故直接計算其距離是無意義的。因此，妥協規劃法需先將兩點之間之距離進行一般化，其公式如下：

$$d_p = \left[\sum_{i=1}^n w_i |x_i^* - x_i|^p \right]^{\frac{1}{p}}, p = 1, 2, \dots, \infty$$

其中， $x_i^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ 為一組理想解； w_i 為第 i 座標中附加在距離的權重，且 $0 \leq w_i \leq 1$ ， $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ ；而當 $p=2$ 時，即為直線幾何距離。

假設多目標問題的理想解為 $f^* = (f_1^*, f_2^*, \dots, f_n^*)$ ，則可定義單一目標問題之解為妥協解，其公式如下：

$$\begin{aligned} \text{Min } d_p &= \left[\sum_{i=1}^n \left| w_i \frac{f_i^* - f_i(x)}{f_i^*} \right|^p \right]^{\frac{1}{p}} \\ \text{s.t } x &\in S, p \in N \end{aligned}$$

其中 w_i 對應第 i 個目標函數之權重， f_i^* 為第 i 個目標函數之最佳解所對應的目標值。由於本研究基於線性規劃求解，因此將 p 設定為1。

藉由以上所介紹的兩種多目標求解方法，本研究於下一章節中可透過限制法所求得的柏拉圖解進行決策建議，以及相關的經濟與環境分析；另一方面，以妥協規劃之單一結果來進行不同不確定水準下之供應鏈網絡設計，並分析該供應鏈網絡之穩健性。

3.5 模式範例

本小節將示範本研究所提出的數學模式規劃結果。透過本模式，決策者可依據不同的環境限制，決定傳統開放式供應鏈架構改為封閉式供應鏈架構後，各正逆向廠區產能之設計，以及廠區之間物流配置狀況。本研究以 ILOG CPLEX 11.0 最佳化軟體求解進行求解。求解之作業系統為 64 位元之 Windows XP Professional SP3；其他硬體相關為 Intel® Core(TM) i7-2600K CPU @ 3.40GHz 3.39GHz，以及 3.42GB 的 RAM。

基本上，以一個簡單的正逆物流網絡，包括兩個供應商、兩階段生產單位，而每個生產單位為兩個存在廠區、四個顧客端位置；而逆物流為兩階，每一階段包括兩個潛在廠區，以及一個既有的二手原物料供應商。模式範例將回收率設定為 0.5，即回收數量為顧客需求量之半。而供應鏈結構參數如表 3.1；而其他如成本、產能等相關參數如附錄一所示。

表3.1 供應鏈結構參數

| 節點名稱 | 節點數量 |
|----------|------|
| 原物料供應商數量 | 2 |
| 生產單位階數 | 2 |
| 第一階廠區數量 | 2 |
| 第二階廠區數量 | 2 |
| 顧客端數量 | 4 |
| 逆物流成員階數 | 2 |
| 第一階廠區數量 | 2 |
| 第二階廠區數量 | 2 |
| 產能水準 | 3 |
| 技術水準 | 3 |

表 3.2 為經濟最佳化(F1*)、妥協解(C)與環境最佳化(F2*)之求解結果。而柏拉圖前緣如圖 3.6 所示。依據柏拉圖前緣，可知成本與環境之間的關係為互相衝突的，表示兩者難以兩全其美，因此透過妥協規劃結果，將經濟與環境權重設為相同之下，所求得之妥協網絡。另一方面，決策者可參考設點位置之碳排放上限，來決定該廠區應投資何種減碳等級之製程設備，其中 $t=1$ 為成本最低，但碳排放最高之普通製程， $t=2$ 為成本與碳排放折衷的製程，而 $t=3$ 為碳排放最少，但成本最高之低碳製程。

表3.2 模式範例求解結果

| | 總成本(\$) | 碳排放(ton) |
|-------------|-----------|----------|
| 經濟最佳化 (F1*) | \$359,830 | 54272 |
| 妥協解 (C) | \$442,615 | 26805 |
| 環境最佳化 (F2*) | \$506,614 | 23305 |

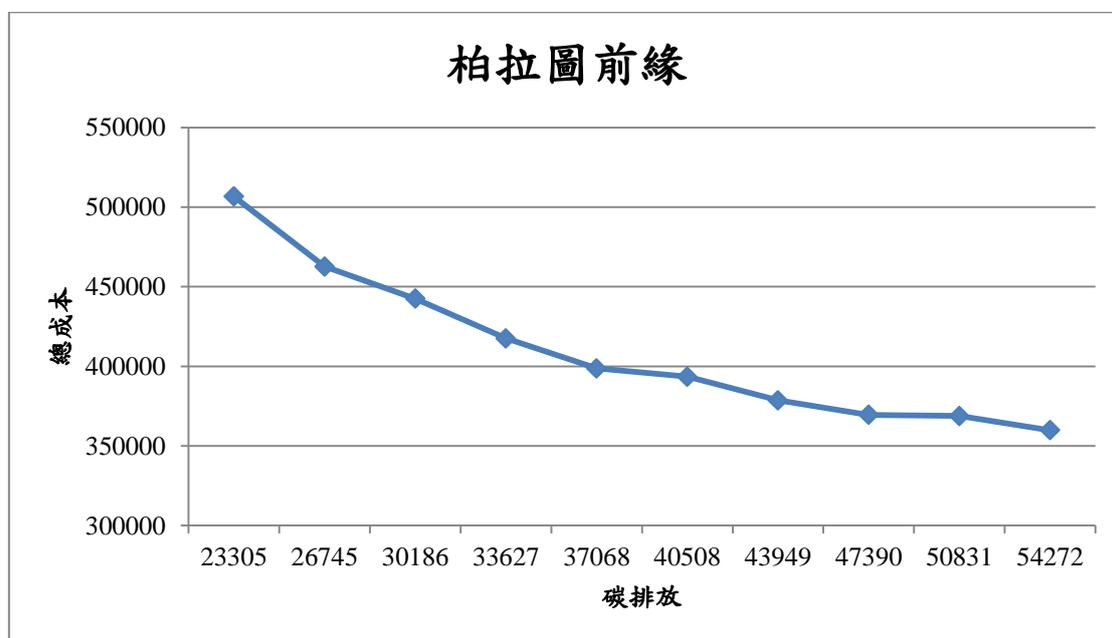


圖3.6 範例模式之柏拉圖前緣

圖 3.7 為經濟最佳化結果，由圖可知增設之逆物流廠區皆為普通製程；而圖 3.8 為經濟與環境並重之妥協規劃之折衷結果；而圖 3.9 為環境最佳化結果，可由圖看出所投資的製程技術皆為碳排放最少之製程設備。

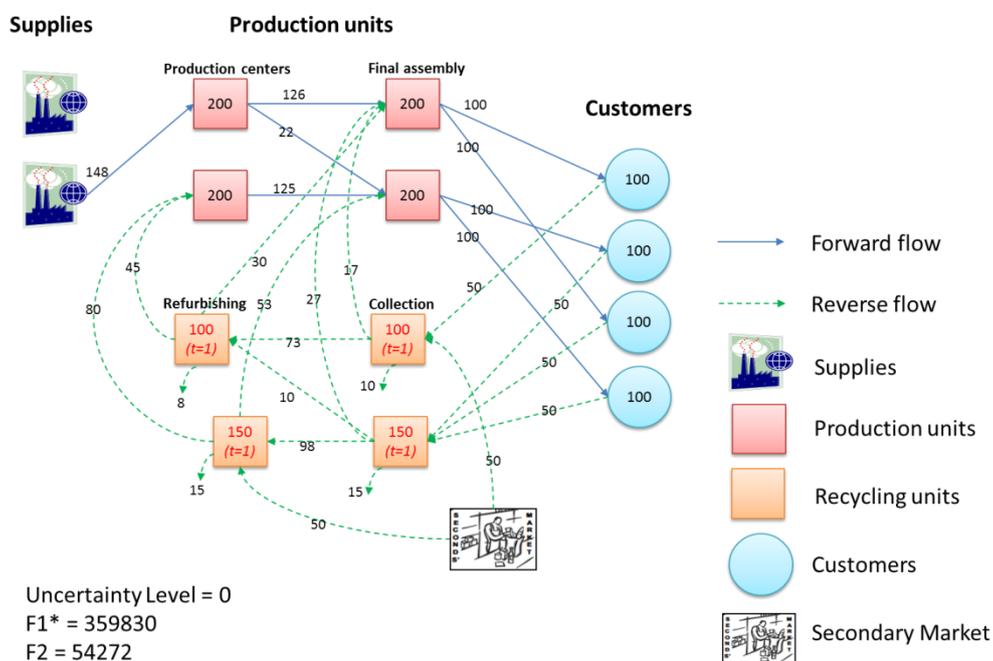


圖3.7 模式範例之供應鏈設計結果 (經濟最佳化)

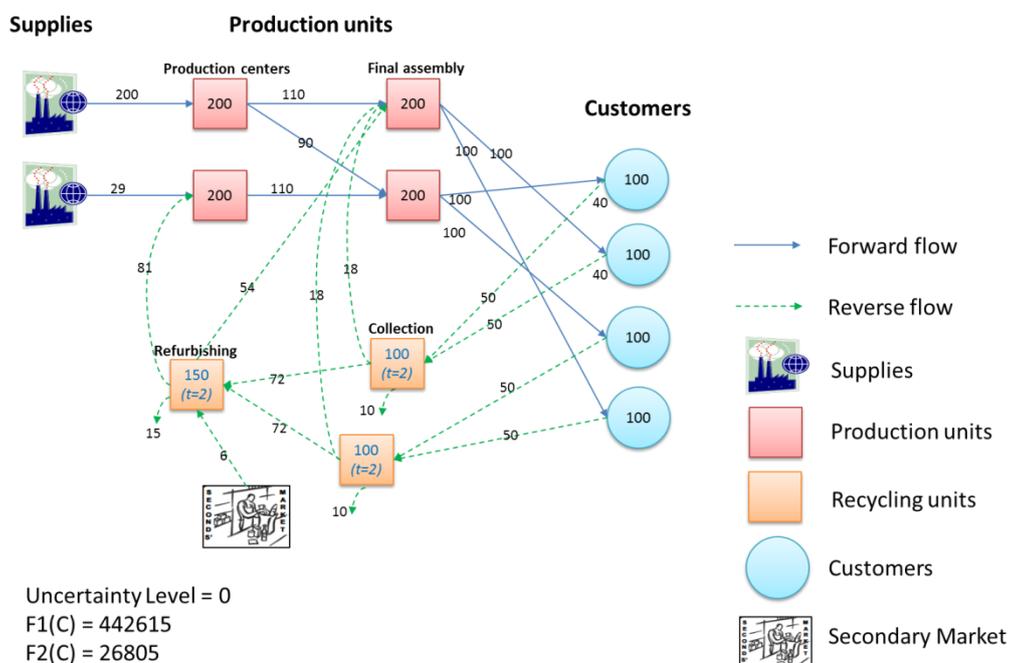


圖3.8 模式範例之供應鏈設計結果 (妥協解)

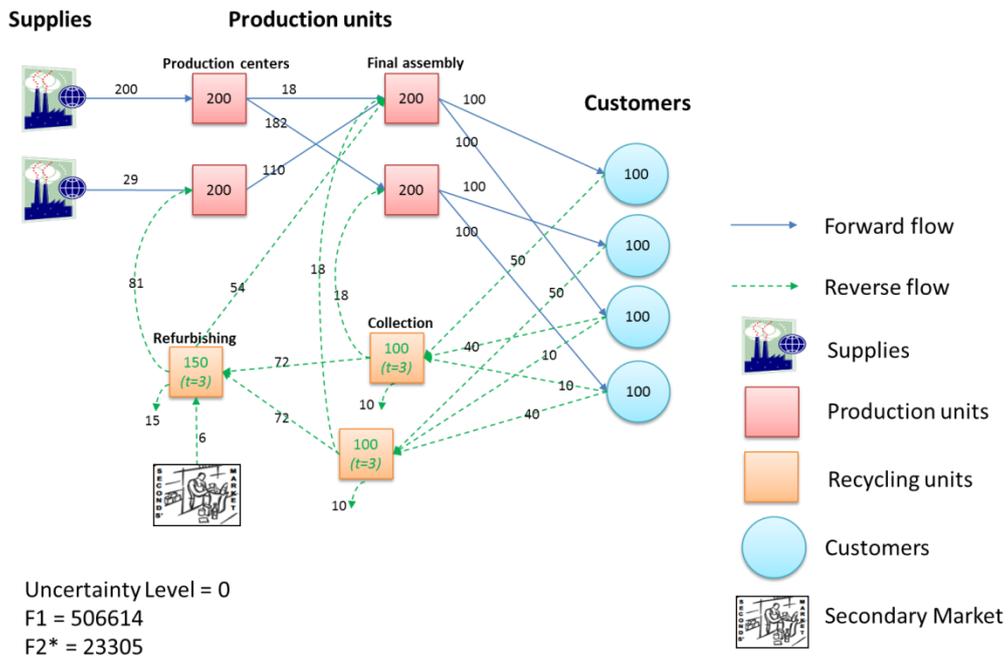


圖3.9 模式範例之供應鏈設計結果 (環境最佳化)

第四章 模式分析與評估

本章節主要在分析本研究所提出之正逆物流整合型永續供應鏈網絡設計。首先，針對一般化模型進行的模式分析；之後將一般化模型延伸為符合太陽能產業供應鏈特性之模式，並透過一般化模型之分析結果，給予決策者在進行最佳的經濟與環境層面權衡時的參考依據。

4.1 一般化模型分析

由於供應鏈網絡設計已被證明屬於 NP-Hard (Non-deterministic Polynomial Hard)問題，求解時間隨問題規模呈指數成長。為兼顧求解以及敏感度分析效益，因此透過一套簡化模型(一般化模型)以驗證並分析本研究所提出之正逆物流整合型永續供應鏈網絡設計的適用性。而後，不同的產業可依照其供應鏈之結構與特性修正本模型，成為符合該產業供應鏈網絡設計之參考依據。

4.1.1 回收率對經濟與環境之影響

本節首先以經濟目標為基礎，探討開放式(open-loop)供應鏈結構與封閉式(closed-loop)供應鏈結構之經濟效益；再以多目標妥協解與柏拉圖前緣(Pareto frontier)探討封閉式供應鏈架構下，經濟與環境之間的變化趨勢。

本研究將回收率(Return Rate; RR)定義為企業主動回收 EOL 產品數量(r_c)與顧客需求數量(d_c)之比值。然而，企業仍可透過其他通路或品牌商的 EOL 產品，使回收率大於 1，但基於逆物流系統本身容量上限，以及實際企業難以透過主動回收以滿足顧客需求量，本研究將回收率之範圍設定為 0 到 1，其中 0.5 為模式範例之基本參數(primary)。在此實驗中，假設供需可完全平衡，即不會產生缺貨罰款，以及暫不探討二手物料供應市場對整體成本造成的影響；其他參數如同模式範例。

4.1.1.1 回收經濟效益分析

本實驗透過兩種不同原物料供應成本為情境基礎，分析不同的回收率下傳統開放式供應鏈與加入逆物流回收之封閉式供應鏈之間的經濟效益比較。表 4.1 與表 4.2 分別為不同原物料成本水準與回收率水準。

表4.1 原物料成本水準

| | | | | |
|-------------------------|-------|-----------------|-------|---------|
| 原物料取得成本 (pc_s^{rm}) | \$250 | \$500 (primary) | \$750 | \$1,000 |
|-------------------------|-------|-----------------|-------|---------|

表4.2 回收率水準 (顧客需求 $r_c = 100$)

| | 回收率 (r_c/d_c) | 主動回收數量 (r_c) |
|----|-------------------|------------------|
| 水準 | 0 | 0 |
| | 0.2 | 20 |
| | 0.4 | 40 |
| | 0.5 (primary) | 50 |
| | 0.6 | 60 |
| | 0.8 | 80 |
| | 1.0 | 100 |

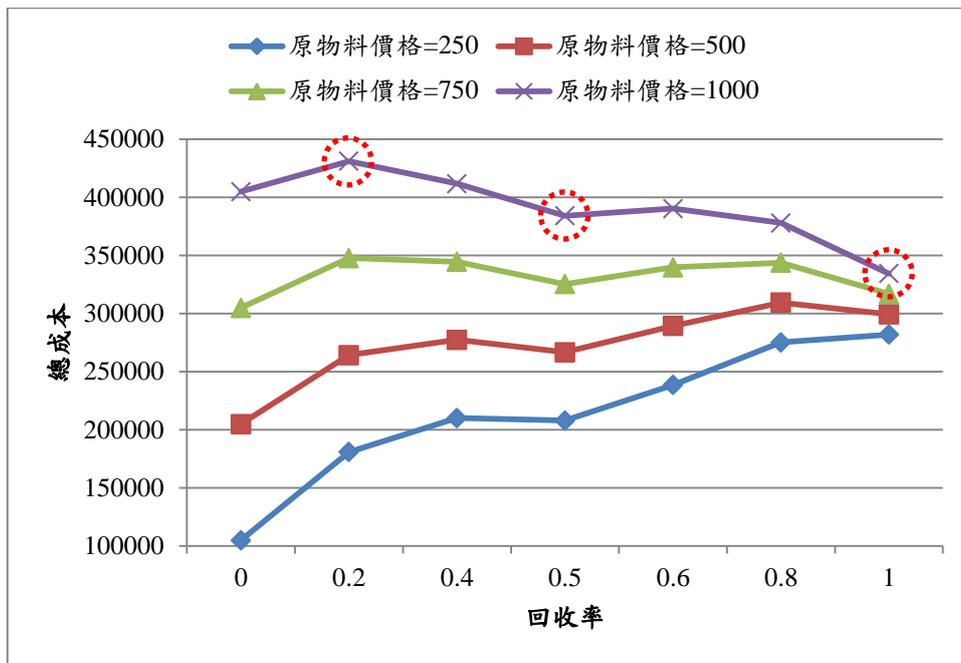


圖4.1 各原物料價格水準之與回收率之總成本趨勢

圖 4.1 為不同原物料價格水準，各回收率下之整體供應鏈總成本曲線。由圖可知不同的原物料取得成本，直接影響逆物流系統建置之經濟效益。當原物料成本低廉時，建置逆物流系統並透過回收取得二手原物料之經濟效益並不顯著；反之，當原物料成本昂貴時，透過回收取得二手原物料，以取代購買新原物料之經濟效益隨著回收率愈高，而呈現整體成本降低之趨勢。以原物料價格為\$1,000 為例，圖 4.1 所標示處反應出三個重要的決策點：

1. 當回收率在 0.2 之前時，由於建置逆物流系統之邊際成本大於購買原物料邊際成本，因此儘管建置逆物流系統進行回收，但對於總體成本不減反增；但回收率超過 0.2 後，總體成本趨勢開始下降。
2. 當回收率超過 0.5 以上之經濟效益更優於未採取回收。換言之，表示建置逆物流系統必須達到回收數量上的經濟規模。
3. 當顧客需求可完全被回收之再生產品滿足時(回收率為 1)，整體供應鏈系統有最佳的經濟效益。

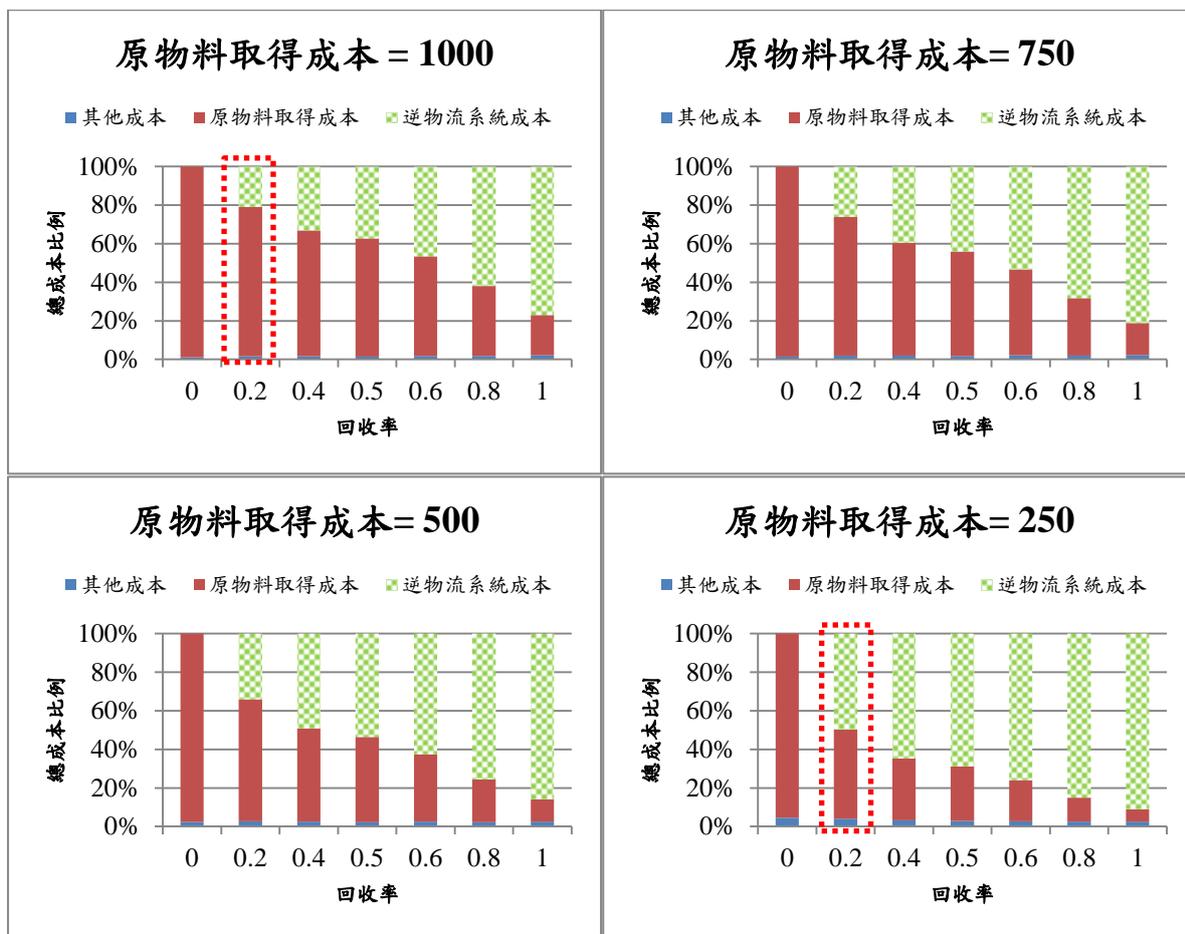


圖4.2 各原物料取得價格與回收率之成本組成比例

另外，圖 4.2 為各原物料取得成本與回收率之總成本組成比例。由圖可知，當回收率提升，逆物流系統建置之成本比例亦愈高；且當原物料取得成本愈低，建置逆物流系統所佔的成本比例愈高。舉例而言，比較原物料為\$1,000 與\$250 兩種取得價格於回收率 0.2 之成本組成比例(圖 4.2 之左上與右下)，可知原物料取得價格為\$1,000 之逆物流建置成本佔總成本比例約為 20%，而原物料取得價格為\$250 之逆物流建置成本佔總成本比例提升至 50%；換言之，當原物料取得成本愈高，建置逆物流系統之邊際成本則愈低，經濟效益愈顯著。

由以上實驗結果，可知當回收率愈高，使逆物流建置成本相對提高。此時若正向原物料取得較便宜，則隨著回收率提升，企業必須支付更多成本，以維持逆物流系統營運；然而，正向原物料取得昂貴時，由於可透過回收取得較便宜之二手原物料，封閉式迴路之供應鏈結構之經濟效益則優於開放式結構。

4.1.1.2 考量經濟與環境效益之最佳供應鏈決策

上一節已分析原物料取得成本對建置逆物流建置之經濟效益。因此本節探討逆物流建置對於不同的回收率下，經濟與環境之間的關係。本實驗之多目標求解方法先採用妥協規劃法，並以經濟與環境效益並重(權重各為0.5)，求出不同回收率下的妥協規劃結果；再透過限制法，將環境目標(F2)設為經濟目標(F1)之限制式，計數器(v)設定為5，即取出5組環境門檻，並透過柏拉圖前緣(Pareto frontier)制定供應鏈設計決策。

由於建置逆物流系統牽涉到更多的設施營運；而當回收數量愈多，必須導入更多產能處理、重製 EOL 產品，因此產生更多的二氧化碳排放量。然而，企業可透過導入更環保的製程，如節能設備來降低對環境的衝擊與二氧化碳排放量。表 4.3 為原物料取得成本為\$1000 之情境下，各回收率之經濟最佳化、妥協解與環境最佳化之目標函數值。整體經濟與環境目標求解結果彙整於附錄二。

表4.3 各回收率之經濟最佳化、妥協解、環境最佳化結果 ($pc_5^{rm}=\$1000$)

| 回收率 (r_c/d_c) | 經濟最佳化 | | 妥協解 | | 環境最佳化 | |
|----------------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|
| | 經濟目標 | 環境目標 | 經濟目標 | 環境目標 | 經濟目標 | 環境目標 |
| 0.2 | \$431,110 | 27,648 ton | \$471,110 | 19,648 ton | \$511,110 | 17,648 ton |
| 0.4 | \$411,768 | 41,538 ton | \$472,269 | 27,538 ton | \$532,768 | 24,038 ton |
| 0.5 | \$384,080 | 40,931 ton | \$448,081 | 26,931 ton | \$512,081 | 23,431 ton |
| 0.6 | \$390,236 | 50,355 ton | \$471,928 | 32,428 ton | \$552,428 | 27,928 ton |
| 0.8 | \$377,895 | 64,245 ton | \$482,395 | 40,245 ton | \$586,894 | 34,245 ton |
| 1 | \$334,362 | 73,062 ton | \$450,362 | 45,062 ton | \$566,362 | 38,061 ton |

另一方面，可透過柏拉圖前緣說明經濟與環境層面之關係。以原物料取得價格為\$1,000 之情境為例，圖 4.3 為各回收率之柏拉圖解集合。此圖可做為不同環境法規限制下的決策準則，舉例而言，當環境法規要求企業碳排放上限限制(Cap)時，以 Cap 規範在 40,000 ton 而言，虛線右側的決策點是不可行的，且最佳的經濟效益為回收率 0.5，或是透過更低碳的製程技術導入，獲取更高的回收率。而將 Cap 規範放寬至 65,000 ton 時，產業可將回收率提高至 0.8 或 1 時最具有經濟效益；反之，若將 Cap 規範嚴格規範在 25,000 ton 時，最佳經濟之回收率降至 0.2，或透過更低碳的製程技術導入，獲取更高的回收率。

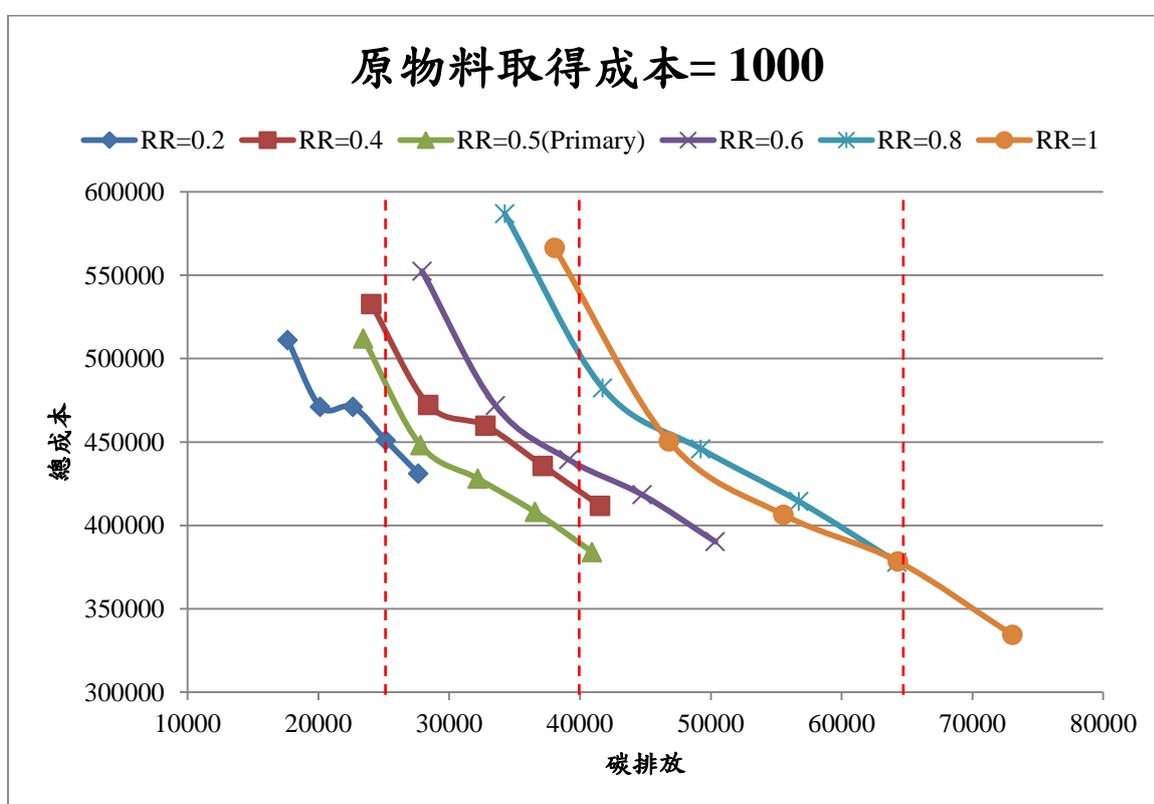


圖4.3 各回收率之柏拉圖前緣 ($pc_s^{rm}=\$1000$)

同理，其他原物料取得成本皆可產生出對應的柏拉圖解集合。在此，本研究僅列出主要預設參數之結果，即原物料取得成本為\$500 之情境，如表 4.4 與圖 4.4 所示。整體而言，透過本模型可提供決策者當法令要求企業進行回收 EOL 產品時，制定適合的回收策略與產能投資之依據，以配合環境規範。

表4.4 各回收率之經濟最佳化、妥協解、環境最佳化結果 ($pc_s^{rm}=\$500$)

| 回收率 (r_c/d_c) | 經濟最佳化 | | 妥協解 | | 環境最佳化 | |
|----------------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|
| | 經濟目標 | 環境目標 | 經濟目標 | 環境目標 | 經濟目標 | 環境目標 |
| 0.2 | \$264,210 | 27,648 ton | \$304,210 | 19,648 ton | \$344,210 | 17,648 ton |
| 0.4 | \$277,318 | 41,538 ton | \$337,819 | 27,538 ton | \$398,318 | 24,038 ton |
| 0.5 | \$266,581 | 40,931 ton | \$330,581 | 26,931 ton | \$394,581 | 23,431 ton |
| 0.6 | \$289,286 | 50,355 ton | \$370,978 | 32,428 ton | \$451,478 | 27,928 ton |
| 0.8 | \$309,395 | 64,245 ton | \$413,895 | 40,245 ton | \$518,394 | 34,245 ton |
| 1 | \$299,362 | 73,062 ton | \$415,362 | 45,062 ton | \$531,362 | 38,061 ton |

由表 4.4 可知，原物料取得成本僅影響經濟目標，而環境目標並無差異，即表示原物料取得成本不影響碳排放量。而圖 4.4 為原物料取得價格為\$500 情況下，各回收率之柏拉圖解集合。由此圖可知，由於原物料取得成本降低，使供應鏈設計成本低於原物料取得成本為\$1,000 之情況；而其他依據環境法規之決策結果大致上與圖 4.3 相似，因此不再贅述。

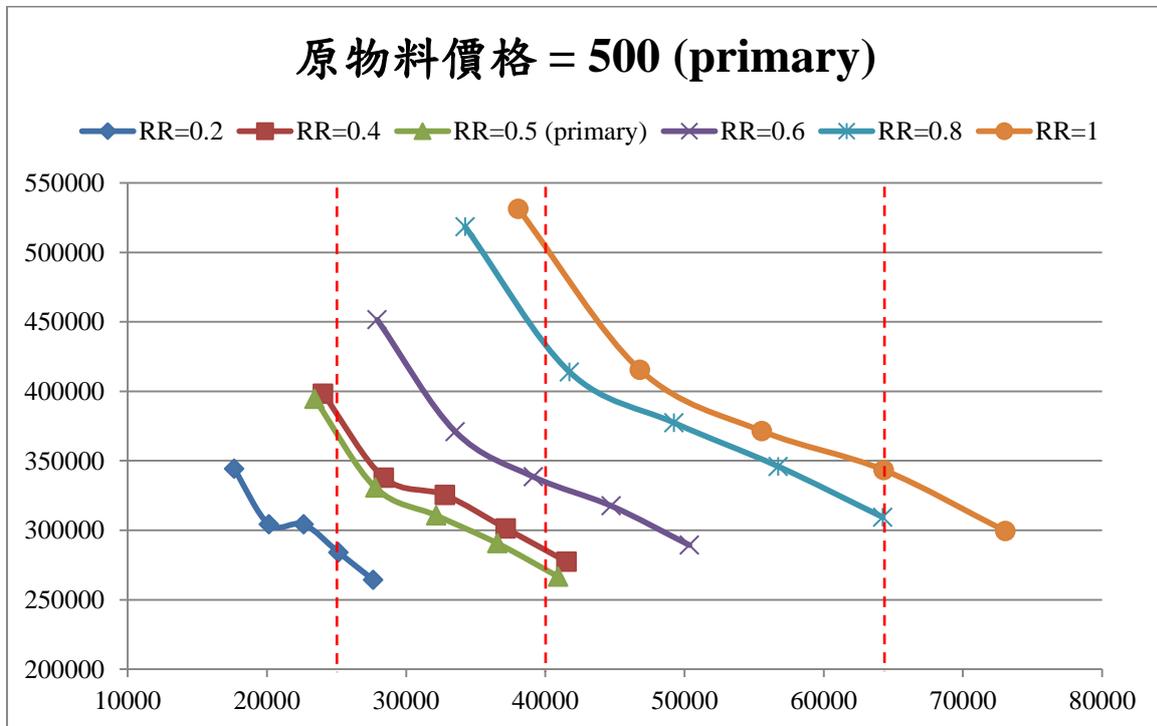


圖4.4 各回收率之柏拉圖前緣 ($pc_s^{rm}=\$500$)

4.1.2 市場不確定性對供應鏈設計之影響

由於實際企業所面臨的市場環境，如原物料供給、顧客需求，以及回收數量皆是不確定的。透過本研究之穩健最佳化模型，設定兩種不同的回收策略，分別為 RR=0.5 (回收策略一)與 RR=1.0 (回收策略二)，並在此兩種回收策略下以不同的不確定水準(Uncertainty Level; UL)，探討供應鏈設計之影響。

本研究測試以下六種不確定水準，分別為 0 (確定性模型)、0.2、0.4、0.6、0.8、1 (完全不確定)，並假設兩種回收策略下各供需參數不確定水準皆相同，即 $\rho_s^{s^{rm}} = \rho_j^{s^{rm}} = \rho_c^d = \rho_c^r$ ；多目標求解方法採用限制法，將環境目標(F2)設為經濟目標(F1)之限制式，計數器(v)設定為 5，即各水準下透過均勻分配取出 5 組環境門檻。回收策略情境與穩健最佳化模型所需參數如表 4.5 與表 4.6 所示。

表4.5 穩健最佳化模型參數

| 不確定參數 | 名目值 |
|--------------------------|-----|
| 原物料供給數量上限 (s_s^{rm}) | 200 |
| 二手物料供給上限 (s_j^{sm}) | 50 |
| 顧客端需求數量 (d_c) | 100 |

表4.6 回收情境參數

| | | |
|-----------------------|-----------------|-----|
| 原物料價格 (pc_s^{rm}) | \$500 (primary) | |
| 主動回收數量 (r_c) | 50 | 100 |

圖 4.5 為兩種不同回收策略在妥協規劃下不同不確定水準之供應鏈網絡設計成本趨勢，由圖可知當不確定水準為 0 和 0.2 時，由於市場環境較為穩定，包括原物料供給平穩，且顧客需求無大幅波動，回收策略二因為建置逆物流系統需投入大量資金，且邊際成本大於直接購買原物料，因此並無經濟效益；然而當不確定水準大於 0.4 後，由於原物料供給開始出現

嚴重短缺現象，而顧客端潛在需求明顯成長，此時回收策略二之回收策略相較於回收策略一能夠透過主動回收取得較多的EOL產品並加以處理後提供正向供應鏈進行生產，以彌補原物料供應不足之問題，因此避免掉龐大的缺貨罰款。

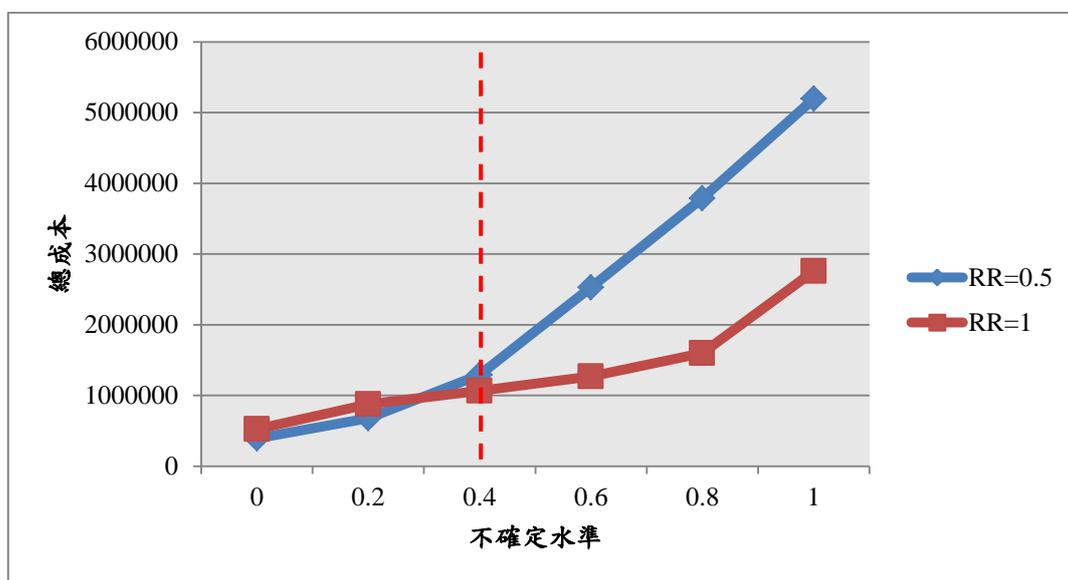


圖4.5 各回收策略於不同不確定水準之供應鏈設計成本趨勢

從環境的觀點，圖 4.6 為兩種回收策略於妥協規劃下不同不確定水準之碳排放趨勢。當市場不確定性小於 0.4 時，此兩種回收策略因市場供給與需求成長穩定，因隨著顧客需求數量提高而導致生產活動更為頻繁，因此使整體供應鏈設計後所產生的碳排放趨勢往上遞增。然而，當不確定水準超過 0.4 之後，由於原物料供給數量範圍波動劇烈，導致可供應數量下限愈低。以回收策略一而言，因透過逆物流取得的 EOL 產品數量較低，造成生產活動因缺乏生產所需原物料而無法進行生產，使正向生產單位不進行產能擴充決策，故整體供應鏈設計所產生的碳排放量降低。然而，回收策略二因為顧客端潛在需求成長，正向生產單位必須導入更多的產能，且從顧客市場回收取得較多的生產所需原物料，使逆物流系統建置更為複雜，相較之下較不會壓抑生產活動，而使碳排放量穩定上升。

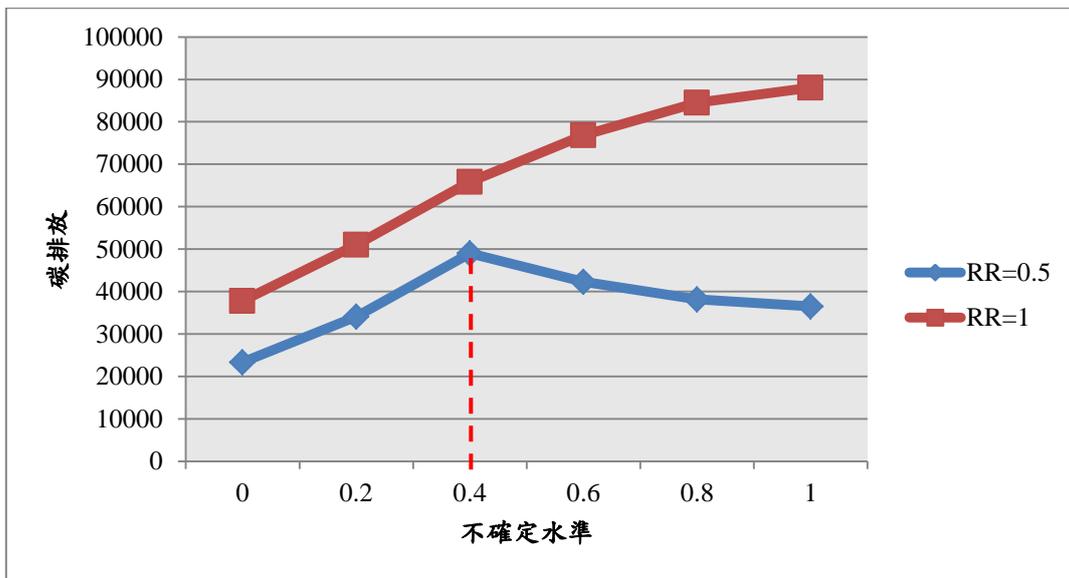


圖4.6 各回收策略於不同不確定水準之碳排放趨勢

另一方面，透過妥協規劃所得到的供應鏈設計網絡圖中也可發現，不同的不確定水準對於供應鏈設計的影響。以回收策略一為例，當市場不確定為 0.2 時，為了滿足需求市場的變化且原物料供給充足，正向生產單位產能擴充 100 單位，如圖 4.7 所示；當市場不確定為 0.4 時，由於顧客需求與逆物流回收數量波動更為劇烈，相較於不確定性為 0.2 之逆物流系統更為複雜，且正向生產單位產能擴充更多，也產生較多的碳排放量，如圖 4.8 所示；然而，當市場不確定為 0.8 時，由於原物料供給與回收數量仍無法滿足需求，故正向生產單位並未進行產能擴充，因此碳排放量相對降低，如圖 4.9 所示。而回收策略二因可透過逆物流回收更多產品，因此在正向產能擴充決策上相較於回收策略一顯得更為樂觀，且因回收數量多，逆物流系統也更為複雜，故導致碳排放量穩定上升。此結果可從圖 4.10、圖 4.11 與圖 4.12 得知。

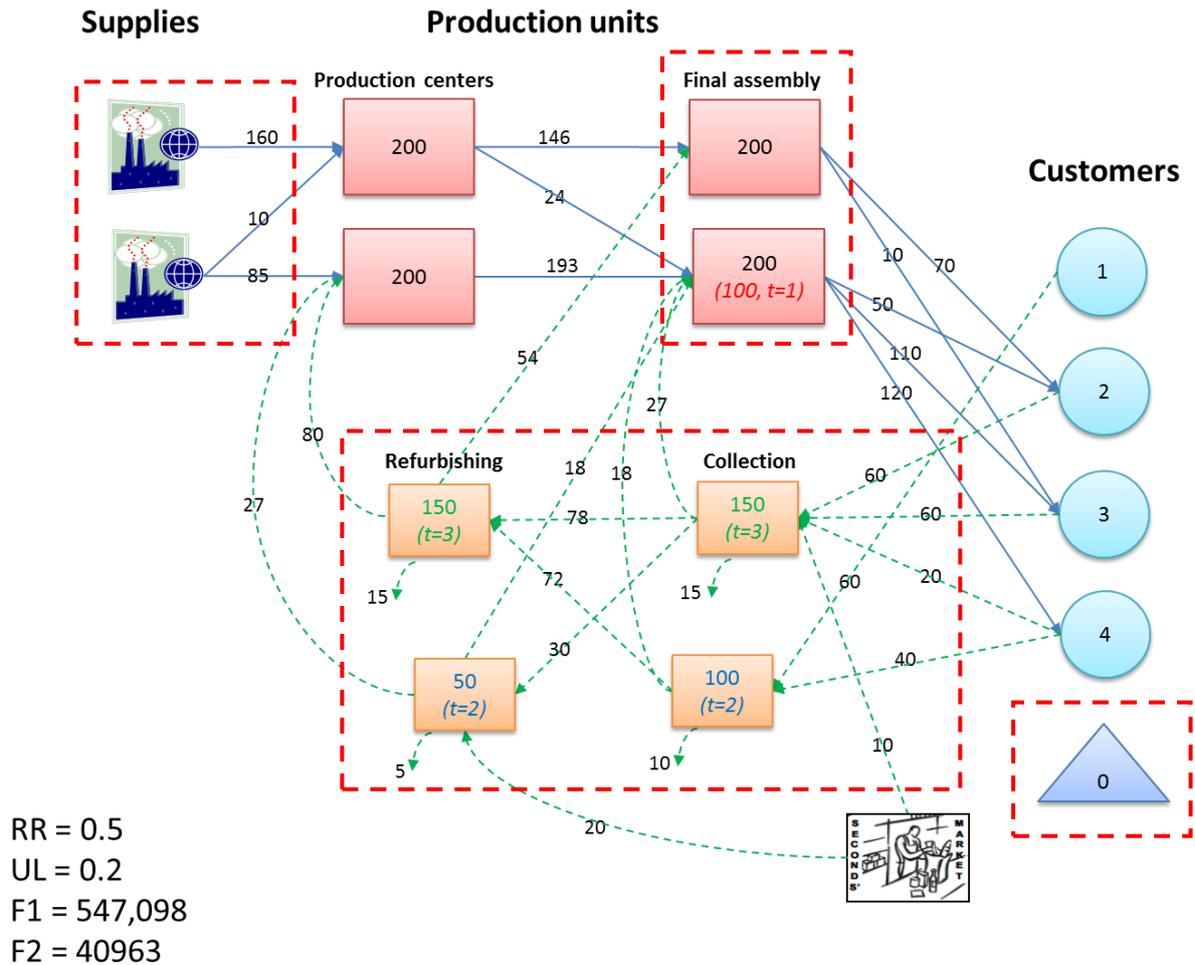


圖4.7 回收策略一網絡設計結構 (UL=0.2)

從圖 4.7 可知，因市場供需不確定性較低，導致原物料與顧客需求變化幅度低，使正向生產單位產能擴充較少，亦無產生缺貨數量；又因 EOL 產品回收數量平穩，因此可從網絡設計圖發現逆物流設計較為簡單。

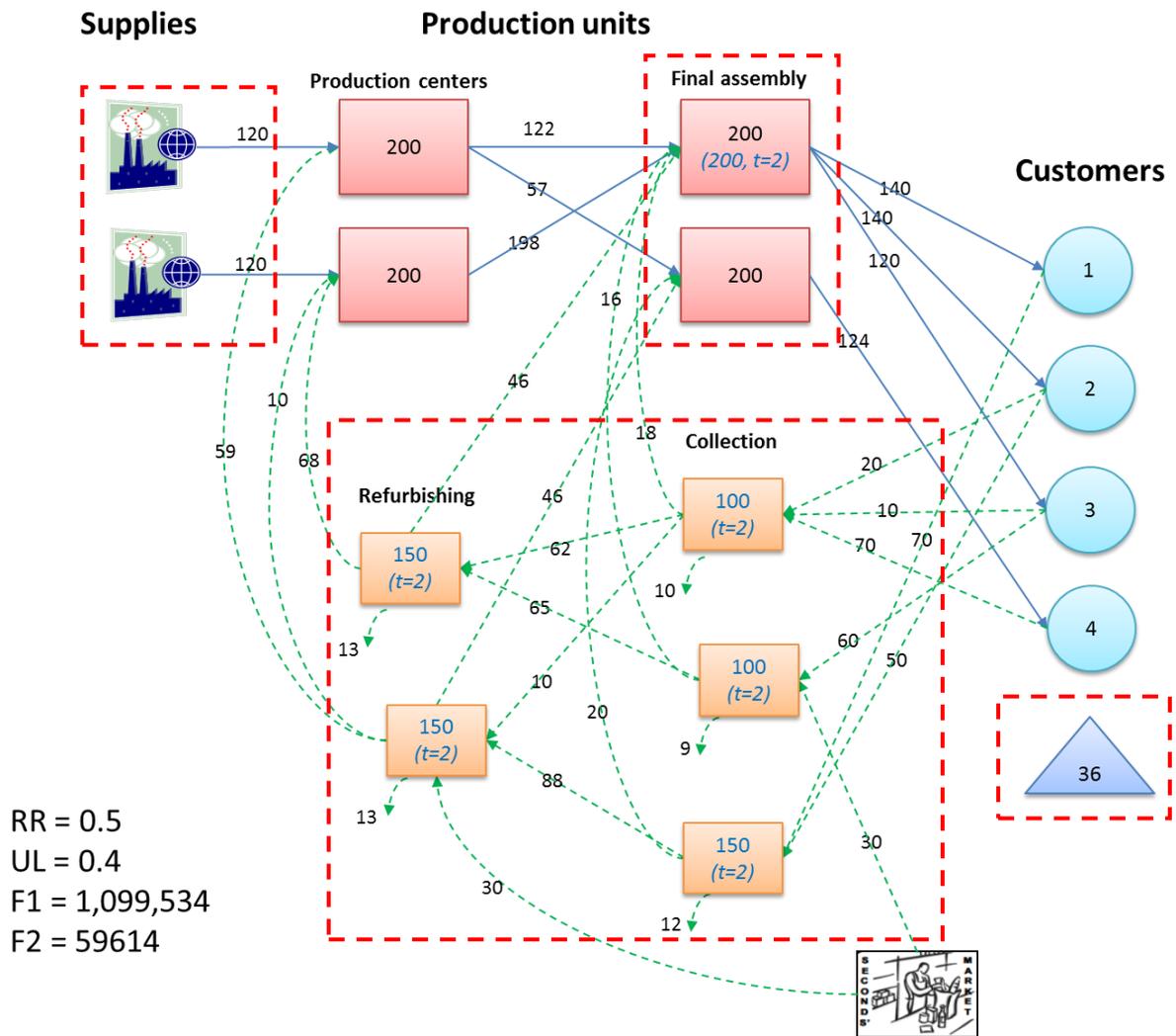


圖4.8 回收策略一網絡設計結構 (UL=0.4)

由圖 4.8 可知，雖然市場不確定增加，使原物料供給數量的範圍更寬，即表示供應下限更為緊縮。然而從逆物流回收的 EOL 產品數量的上限增加，使逆物流系統建置較為複雜；儘管出現少量的缺貨數量，但仍不至於壓抑生產活動，使正向生產單位擴充相較於圖 4.7 多出 100 單位。

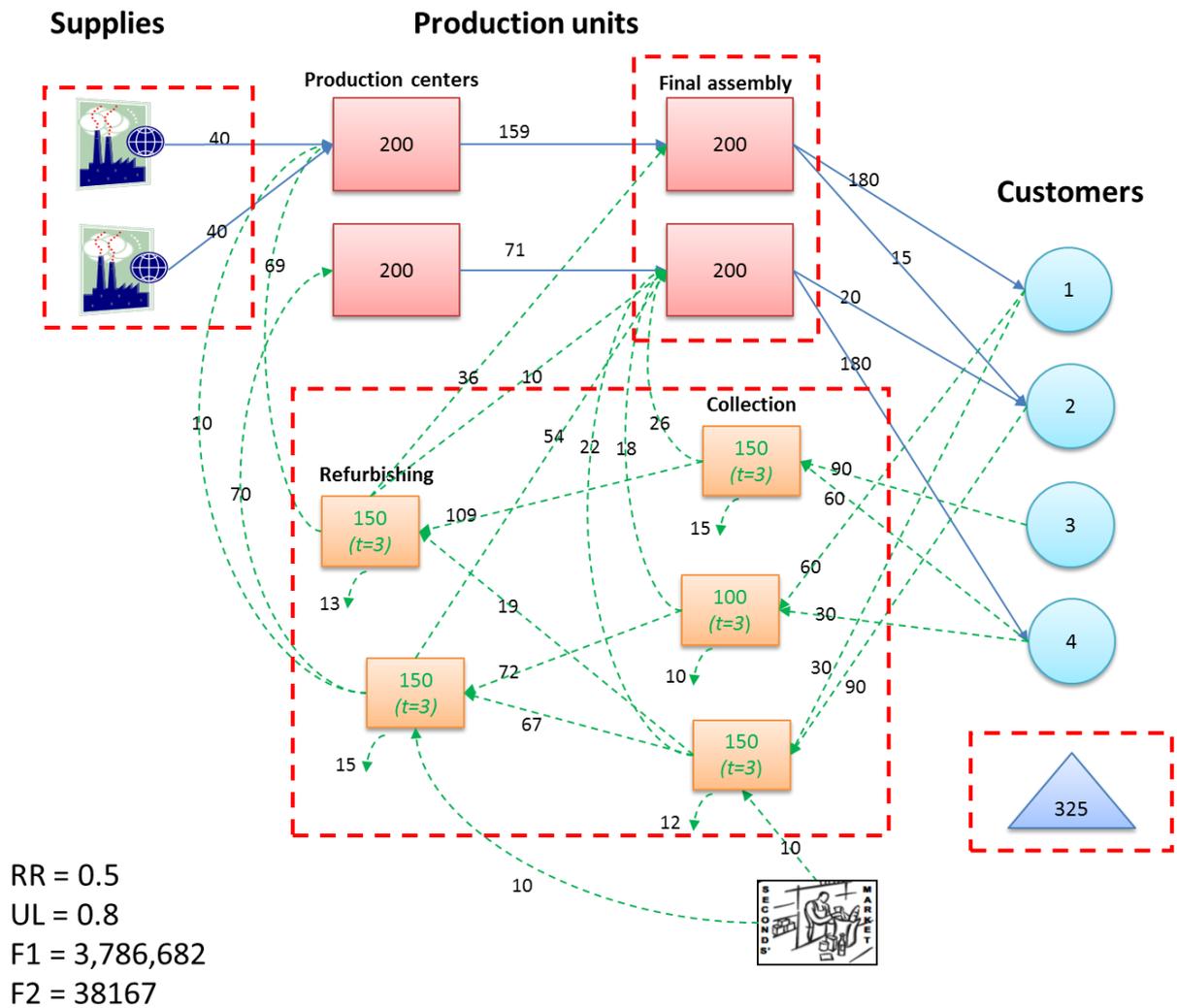


圖4.9 回收策略一網絡設計結構 (UL=0.8)

由圖 4.9 可知，當供需環境面臨高度不確定性時，由於物料短缺機會大幅提高，且透過逆物流所收取的再生原物料仍無法滿足顧客需求，因此不進行正向生產單位的產能擴充決策。而顧客缺貨狀況亦因上述緣故，產生較多的缺貨量。

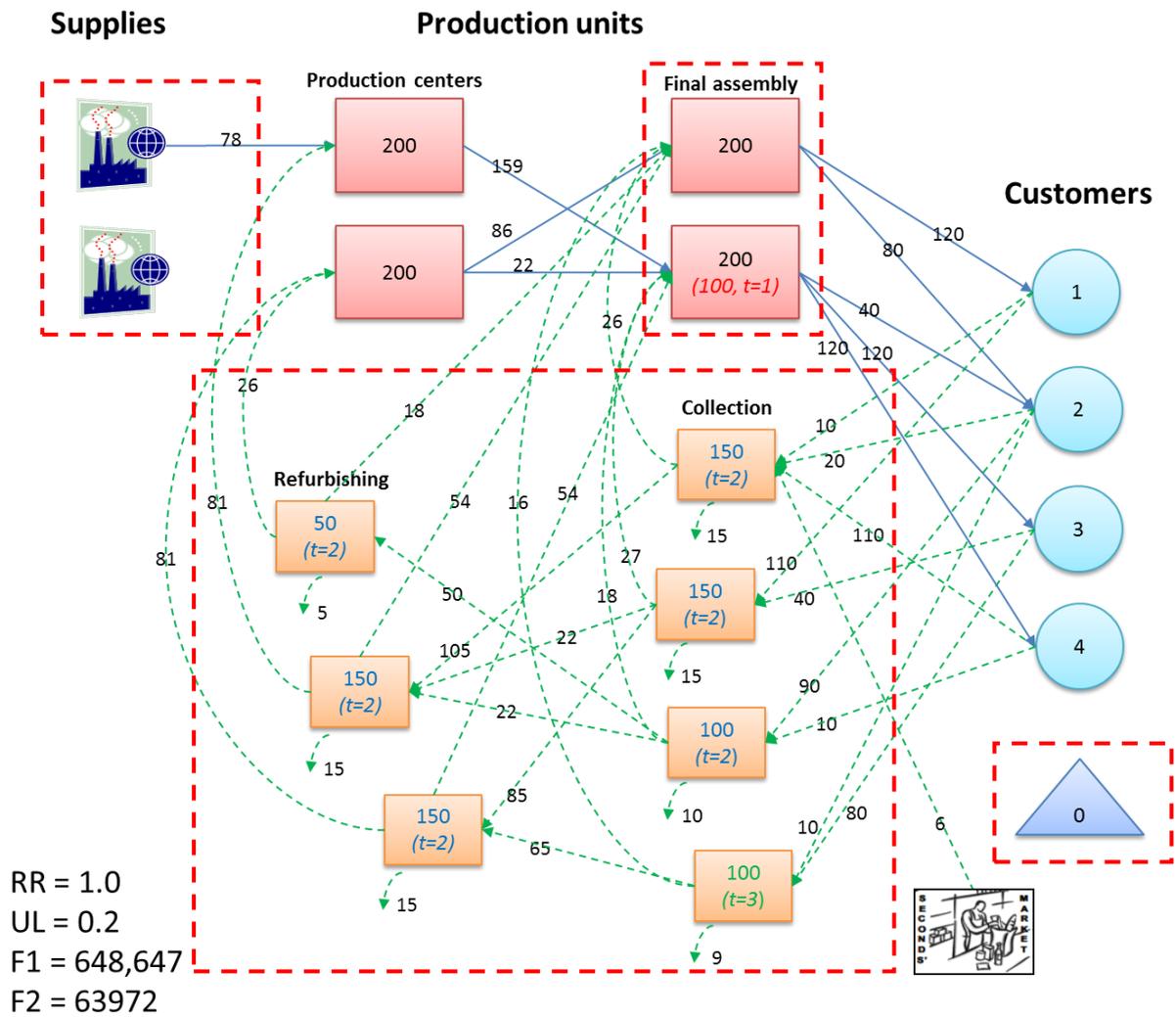


圖4.10 回收策略二網絡設計結構 (UL=0.2)

圖 4.10 之結論大致上與圖 4.7 相同。然而，因回收數量提高至回收率為 1，導致須處理的 EOL 產品數量更多，使逆物流系統建置更為複雜。

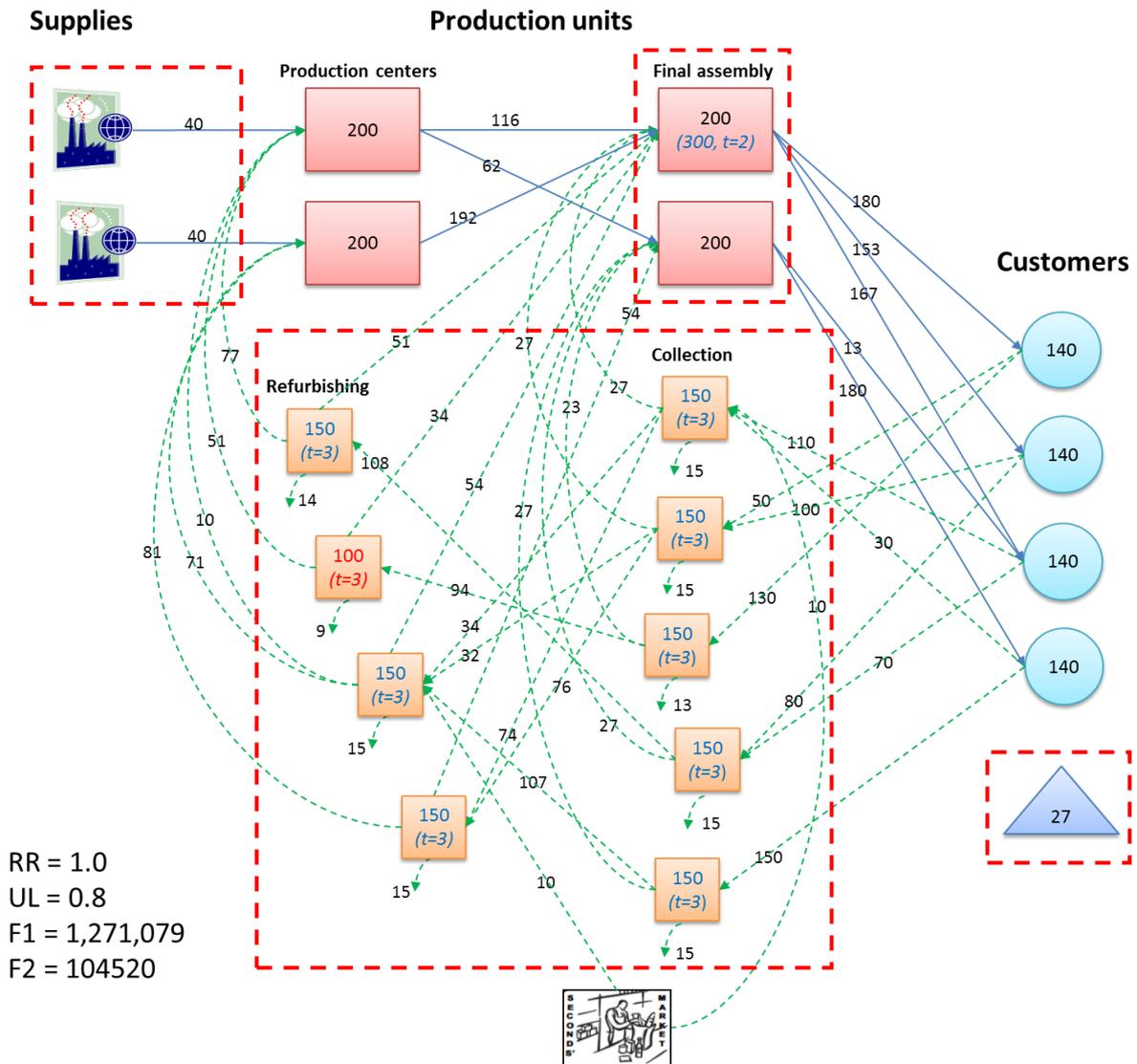


圖4.12 回收策略二網絡設計結構 (UL=0.8)

圖 4.12 相較於圖 4.9，由於回收率提高了，儘管原物料缺貨的風險高，但可透過逆物流回收以取得較多的再生原物料，以彌補正向原物料供應不足的問題，故仍然將正向生產單位進行產能擴充，以應付變化更大的顧客需求。

透過以上分析兩種不同回收策略情境與不同水準的市場不確定性，供應鏈網絡設計結果可得到以下結論：

1. 不同的市場供需不確定性，使供應鏈設計產生不同結果。一般而言，當市場供需不確定水準小於 0.4 時，回收率較低與較高的回收策略並不影響正向生產單位的產能擴充策略。

2. 若 EOL 產品回收率低，當市場不確定水準提高，所導致的顧客缺貨風險亦隨之提高，而造成龐大的缺貨罰款。從環境的觀點，企業因缺乏原物料進行生產，故使供應鏈設計所產生的碳排放下降。
3. 若企業可透過提高回收率，並取得更多的 EOL 產品，可大幅降低市場不確定性所造成的缺貨罰款問題。另一方面，因為逆物流系統所處理的 EOL 數量增加，導致逆物流系統建置愈複雜，所產生的碳排放也相對提高。

實務上，企業所面臨的市場型態為關鍵原物料供應掌握在特定供應商，且顧客需求在未來有成長趨勢時，可透過逆物流系統的建置與主動回收，以大幅降低缺貨而造成的風險。另一方面，決策者可依據供應鏈設計結果，決定逆物流成員設廠位置、數量與物流配置，並考量到環境影響，導入符合成本與環境效益之製程技術，降低整體供應鏈結構調整後企業營運所產生的碳排放。除此之外，企業可以透過實際產業所面臨之不確定性程度，制定回收策略與進行產能上的調整，即使面臨到最極端的供需不平衡，亦不至於產生缺貨或產能不足的問題。

4.1.3 確定型模式與穩健型模式績效評估

本實驗探討確定型模型與穩健型模型面臨到市場不確定性下，供應鏈設計之績效。實驗程序為先透過一般化之確定型模型($UL=0$)與穩健型模型，分別求解出確定參數下的供應鏈網絡模型與穩健網絡結構，包括逆物流成員設點數量與產能，以及正向生產單位之產能擴充，因此為一混整數規劃問題。透過利用均勻分配隨機產生不同不確定水準下之供需參數之亂數表，如附錄三所示，以此亂數參數模擬真實環境之供需參數，並分別套入確定型供應鏈網絡與穩健型供應鏈網絡求解，因此並不包含廠址選擇與產能設計之二元變數，故為線性規劃問題。

本研究測試以下六種不確定水準，分別為 0 (確定性模型)、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 (完全不確定)，並假設各供需參數不確定水準皆相同，即 $\rho_s^{srm} = \rho_j^{srm} = \rho_c^d = \rho_c^r$ 。表 4.7 為妥協解之固定建置成本與固定碳排放量。其中固定建置成本包括逆物流廠區建置成本(BFC)與正、逆向生產單位產能擴充成本(CEC)；固定碳排放則為產能投資透過不同技術進行生產所產生的碳排放($PCOE$)。然而，本研究之模式所定義之產能投資所產生的碳排放應為變數，但由於本研究之模型在計算產能設計時已包括該產能下生產所產生的碳排放估計值，而本實驗主旨為探討供應鏈設計之穩健性，因此假設產能投資之生產碳排放為固定。

表4.7 各不確定水準之固定建置成本與固定碳排放 (單位：千)

| | 求解方法：妥協解 | | | | | |
|------------|----------|--------|--------|--------|---------|---------|
| 不確定水準 (UL) | 0 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1.0 |
| 固定建置成本 | \$207 | \$412 | \$686 | \$783 | \$1,051 | \$1,099 |
| 固定碳排放量 | 21 ton | 33 ton | 51 ton | 60 ton | 78 ton | 84 ton |

所有實驗之求解結果彙整於表 4.9，其中變動成本為扣除逆物流廠區建置成本(BFC)，以及正、逆向生產單位產能成本(CEC)之所有成本，即原物料採購成本(PC)、運輸成本(TC)、最終處理成本(DC)與缺貨罰款成本(PC)之總和；變動碳排放為扣除產能投資碳排放($PCOE$)之其他碳排放，即運輸碳排放($TCOE$)。名目值為模式範例之固定參數，而真實數據為亂數產生之實際供需參數。

另外，表 4.8 彙整不同不確定水準下，確定型與穩健型模型的求解績效。可由表得知，確定型模式處理實際供需數據時，當不確定水準愈高時，產生 *infeasible* 之比例愈高，原因在於確定型模型並未考量到未來 EOL 回收產品數量之變化，以至於 EOL 產品數量超過建模參數之名目值後，整體供應鏈即出現產能不足之問題，導致出現供應鏈設計不穩健之情況；反之，穩健型模型在處理任何不確定水準下，皆不會產生上述情況。

表4.8 確定型模型與穩健型模型求解績效差異

| 不確定水準 (UL) | | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1.0 |
|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| <i>Infeasible</i> (%) | 確定型 | 40% | 50% | 60% | 60% | 70% |
| | 穩健型 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |

由此結論可知，當執行供應鏈設計時，因建廠或產能擴充等策略並非短期可上線，而是一個前置時間長且資金投入龐大的決策活動，因此必須考量到未來市場面化趨勢。透過穩健最佳化方法，相較於一般確定型模式能夠更有效的處理市場不確定性問題。

表4.9 確定型模型與穩健型模型處理真實供需數據

| 不確定水準 | 變動成本 (名目值) | | 變動碳排放 (名目值) | | 變動成本 (真實值) | | 變動碳排放 (真實值) | |
|-------|------------|-----------|-------------|-----------|-------------------|-----------|-------------|-----------|
| | 確定型 | 穩健型 | 確定型 | 穩健型 | 確定型 | 穩健型 | 確定型 | 穩健型 |
| 0 | \$235,615 | \$235,615 | 5,805 ton | 5,805 ton | — | — | — | — |
| 0.2 | \$235,615 | \$187,738 | 5,805 ton | 4,788 ton | \$230,825 | \$184,301 | 5,692 ton | 4,701 ton |
| | | | | | \$246,515 | \$191,003 | 5,795 ton | 4,826 ton |
| | | | | | \$233,119 | \$185,242 | 5,733 ton | 4,716 ton |
| | | | | | <i>infeasible</i> | \$172,468 | — | 4,459 ton |
| | | | | | <i>infeasible</i> | \$172,940 | — | 4,487 ton |
| | | | | | \$229,859 | \$185,759 | 5,603 ton | 4,658 ton |
| | | | | | <i>infeasible</i> | \$174,042 | — | 4,508 ton |
| | | | | | <i>infeasible</i> | \$189,672 | — | 4,833 ton |
| | | | | | \$227,137 | \$181,966 | 5,600 ton | 4,635 ton |
| | | | | | \$235,705 | \$189,440 | 5,804 ton | 4,818 ton |
| 0.4 | \$235,615 | \$163,830 | 5,805 ton | 4,272 ton | \$456,425 | \$192,543 | 5,796 ton | 4,868 ton |
| | | | | | <i>infeasible</i> | \$154,338 | — | 4,183 ton |

表 4.9 確定型模型與穩健型模型處理真實供需數據 (續)

| 不確定水準 | 變動成本 (名目值) | | 變動碳排放 (名目值) | | 變動成本 (真實值) | | 變動碳排放 (真實值) | |
|-------|------------|-----------|-------------|-----------|-------------------|-----------|-------------|-----------|
| | 確定型 | 穩健型 | 確定型 | 穩健型 | 確定型 | 穩健型 | 確定型 | 穩健型 |
| 0.4 | \$235,615 | \$163,830 | 5,805 ton | 4,272 ton | <i>infeasible</i> | \$119,064 | — | 3,319 ton |
| | | | | | \$275,795 | \$184,000 | 5,803 ton | 4,702 ton |
| | | | | | \$437,505 | \$194,489 | 5,784 ton | 4,869 ton |
| | | | | | <i>infeasible</i> | \$174,043 | — | 4,523 ton |
| | | | | | <i>infeasible</i> | \$109,474 | — | 3,157 ton |
| | | | | | \$238,023 | \$202,138 | 5,745 ton | 4,971 ton |
| | | | | | <i>infeasible</i> | \$117,711 | — | 3,412 ton |
| | | | | | \$406,065 | \$163,998 | 5,800 ton | 4,264 ton |
| 0.6 | \$235,615 | \$163,831 | 5,805 ton | 4,272 ton | <i>infeasible</i> | \$152,207 | — | 4,065 ton |
| | | | | | <i>infeasible</i> | \$138,844 | — | 3,883 ton |
| | | | | | \$359,755 | \$185,695 | 5,759 ton | 4,597 ton |
| | | | | | \$296,515 | \$174,852 | 5,795 ton | 4,485 ton |
| | | | | | \$556,335 | \$197,044 | 5,797 ton | 4,970 ton |

表 4.9 確定型模型與穩健型模型處理真實供需數據 (續)

| 不確定水準 | 變動成本 (名目值) | | 變動碳排放 (名目值) | | 變動成本 (真實值) | | 變動碳排放 (真實值) | |
|-------|------------|-----------|-------------|-----------|-------------------|-----------|-------------|-----------|
| | 確定型 | 穩健型 | 確定型 | 穩健型 | 確定型 | 穩健型 | 確定型 | 穩健型 |
| 0.6 | \$235,615 | \$163,831 | 5,805 ton | 4,272 ton | \$218,839 | \$156,851 | 5,393 ton | 4,056 ton |
| | | | | | <i>infeasible</i> | \$168,367 | — | 4,370 ton |
| | | | | | <i>infeasible</i> | \$132,056 | — | 3,689 ton |
| | | | | | <i>infeasible</i> | \$116,113 | — | 3,283 ton |
| | | | | | <i>infeasible</i> | \$204,669 | — | 5,179 ton |
| 0.8 | \$235,615 | \$163,831 | 5,805 ton | 4,272 ton | \$186,387 | \$118,261 | 4,723 ton | 3,275 ton |
| | | | | | \$509,755 | \$216,810 | 5,759 ton | 5,272 ton |
| | | | | | <i>infeasible</i> | \$137,735 | — | 3,765 ton |
| | | | | | <i>infeasible</i> | \$133,744 | — | 3,698 ton |
| | | | | | <i>infeasible</i> | \$156,967 | — | 4,370 ton |
| | | | | | \$190,301 | \$143,854 | 4,746 ton | 3,765 ton |
| | | | | | <i>infeasible</i> | \$152,021 | — | 4,159 ton |

表 4.9 確定型模型與穩健型模型處理真實供需數據 (續)

| 不確定水準 | 變動成本 (名目值) | | 變動碳排放 (名目值) | | 變動成本 (真實值) | | 變動碳排放 (真實值) | |
|-------------------|------------|-----------|-------------|-----------|-------------------|-----------|-------------|-----------|
| | 確定型 | 穩健型 | 確定型 | 穩健型 | 確定型 | 穩健型 | 確定型 | 穩健型 |
| 0.8 | \$235,615 | \$163,831 | 5,805 ton | 4,272 ton | \$408,284 | \$214,632 | 5,794 ton | 5,284 ton |
| | | | | | <i>infeasible</i> | \$185,673 | — | 4,789 ton |
| | | | | | <i>infeasible</i> | \$144,168 | — | 3,947 ton |
| 1.0 | \$235,615 | \$163,831 | 5,805 ton | 4,272 ton | <i>infeasible</i> | \$119,348 | — | 3,599 ton |
| | | | | | <i>infeasible</i> | \$135,610 | — | 3,916 ton |
| | | | | | \$234,537 | \$224,486 | 5,684 ton | 5,473 ton |
| | | | | | <i>infeasible</i> | \$144,502 | — | 3,967 ton |
| | | | | | \$255,744 | \$211,011 | 5,866 ton | 5,117 ton |
| | | | | | \$754,072 | \$249,105 | 5,825 ton | 5,940 ton |
| | | | | | <i>infeasible</i> | \$126,235 | — | 3,642 ton |
| | | | | | <i>infeasible</i> | \$166,626 | — | 4,398 ton |
| <i>infeasible</i> | \$162,765 | — | 4,299 ton | | | | | |

表 4.9 確定型模型與穩健型模型處理真實供需數據 (續)

| 不確定水準 | 變動成本 (名目值) | | 變動碳排放 (名目值) | | 變動成本 (真實值) | | 變動碳排放 (真實值) | |
|-------|------------|-----------|-------------|-----------|-------------------|-----------|-------------|-----------|
| | 確定型 | 穩健型 | 確定型 | 穩健型 | 確定型 | 穩健型 | 確定型 | 穩健型 |
| 1.0 | \$235,615 | \$163,831 | 5,805 ton | 4,272 ton | <i>infeasible</i> | \$129,738 | — | 3,745 ton |

4.2 太陽能產業案例

依據文獻探討 2.3 節所介紹，太陽能產業供應鏈結構包括五大階層，分別為矽原料供應商(Suppliers)、晶圓廠(Wafers)、太陽能電池製造廠(Cells)、模組廠(Modules)與系統廠(Systems)等四階生產單位，最終配銷給不同區域的顧客端。

4.2.1 產業案例情境介紹

由於太陽能電池本身屬於可再生之產品，且具有回收潛在的利益。因此規劃未來逆物流成員時，除了依照產品本身的特性外，回收之經濟效益與環境影響最佳化是相當重要的。太陽能模組與系統為組裝式產品，透過各地區收集據點(Collections)所收集之 EOL 太陽能模組，經過拆解廠(Disassembles)拆解後取出廢棄的太陽能電池及其他廢料，再經由重製廠(Re-manufacturing; Re-Ms)還原成矽原料與其他可用物料，並投入正向供應鏈進行生產。歸納上述，太陽能產業之正逆向物流整合型供應鏈成員如下：

1. 矽原料供應商：提供太陽級多晶矽原物料。
2. 晶圓廠：太陽能電池第一階生產單位，純化多晶矽原料，並製成晶圓。
3. 太陽能電池製造廠：太陽能電池第二階生產單位，將矽晶圓製成電池。
4. 太陽能模組廠：太陽能電池第二階生產單位，將電池封裝成模組。
5. 太陽能系統廠：太陽能電池最末階生產單位，將模組配置成為系統。
6. 回收據點：第一階逆物流成員，收集 EOL 太陽能系統與模組。
7. 拆解廠：第二階逆物流成員，將 EOL 模組拆解為廢棄太陽能電池。
8. 重製廠：最末階逆物流成員，將廢棄電池重製為可用矽原料。
9. 二手原物料市場：其他可提供逆物流成員二手物料之潛在通路。

歸納以上太陽能產業供應鏈成員，該產業之整合型供應鏈結構及其運輸關係如圖 4.13 所示。

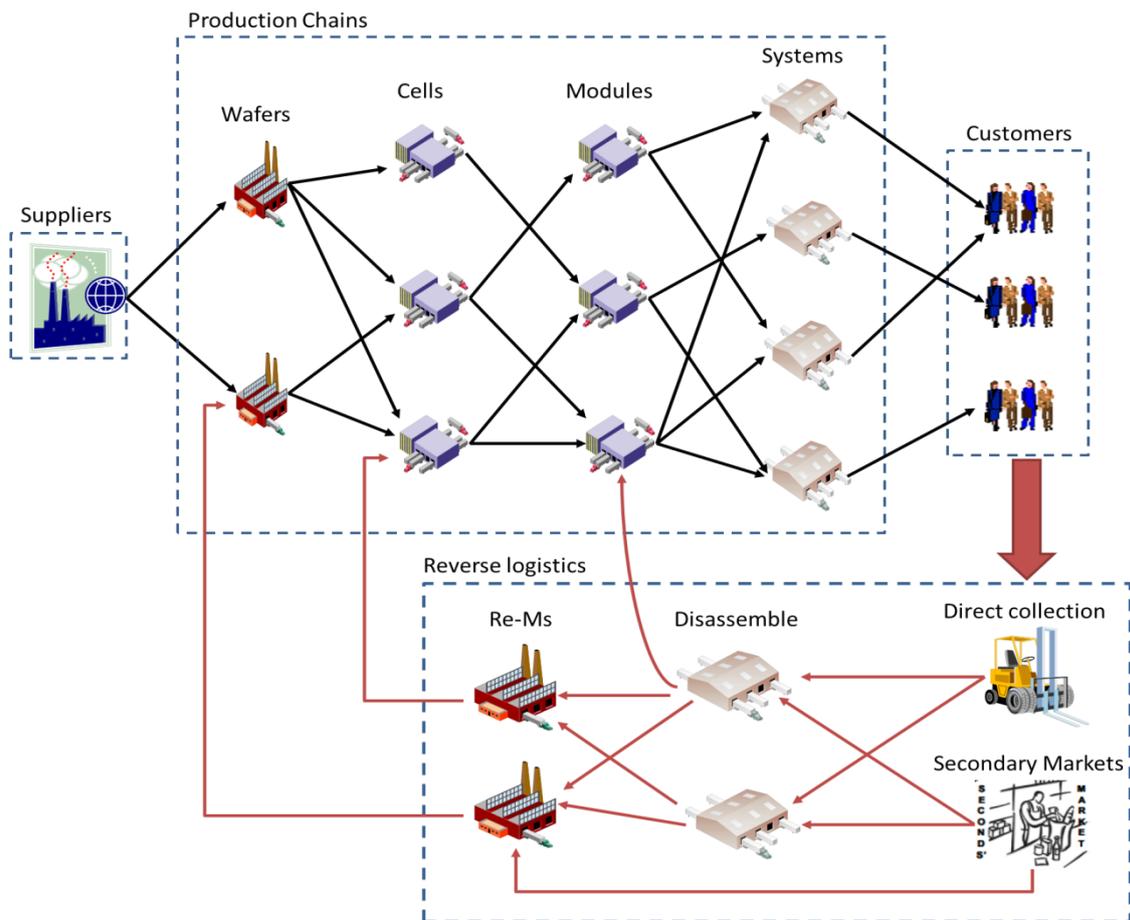


圖4.13 太陽能產業供應鏈架構

在不確定參數方面，由於太陽能產業蓬勃發展，帶動下游廠商擴張快速，而矽原物料供應商由於產能有限，無法快速滿足下游龐大的需求，因此常發生矽原料短缺或原物料價格波動劇烈等情況。而未來在廢棄太陽能電池模組回收也會因為顧客需求提高，而有更多的EOL產品回收量。因此，本研究認為該產業所面臨之市場供需不確定性參數包含以下：

1. 矽原料供給的數量
2. 顧客市場需求數量
3. 未來 EOL 模組的回收數量
4. 從其他回收通路所取得的二手物料，如廢模組、廢電池等產品數量

在環境參數上，本研究考量太陽能產業對於環境衝擊最大的生產階段，分別為晶圓廠(Wafers)、太陽能電池製造廠(Cells)，以及重製廠(Re-Ms)，並彙整以上成員可用產能技術，如圖 4.14 所示。

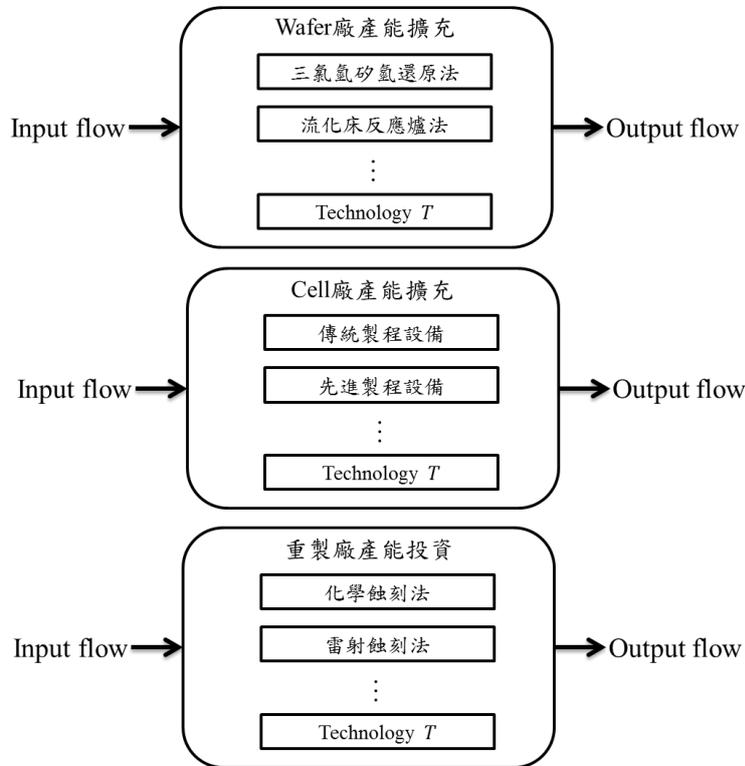


圖4.14 產業產能技術示意圖

不同製程技術所產生的碳排放量皆不相同。由於以上製程技術之單位碳排放相關數據必須透過實際量測，也難以透過文獻取得，因此本研究依據上市 M 公司之環境永續報告書中產品品號 IM156 之碳足跡盤查，合理估計太陽能電池於晶圓廠與太陽能電池製造廠生產所產生之碳排放；而重製廠之生產碳排放則為本研究假設。其他成本、產能等相關參數則是依據上市 N 公司年報，及其他太陽能產業相關報導等資料來源。太陽能產業案例之建模所需參數如附錄四所示。圖 4.15 為產業供應鏈預設結構，其中節點之間虛線表示不可互相運輸。

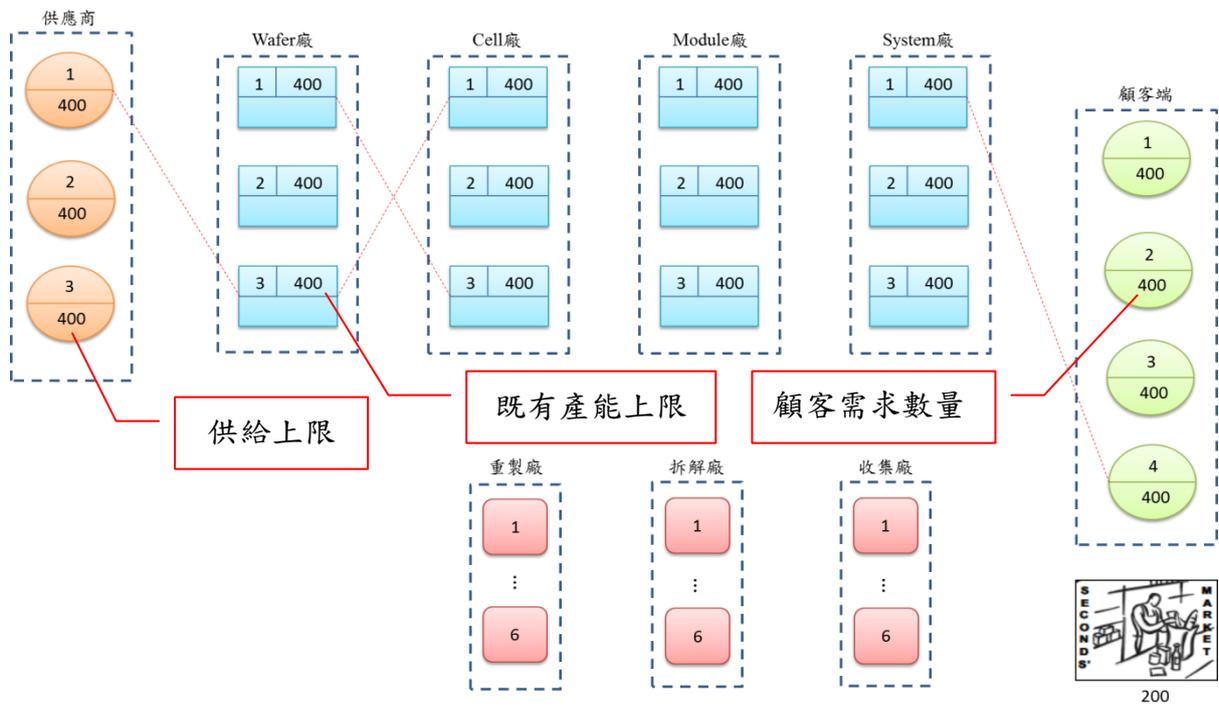


圖4.15 太陽能產業供應鏈預設結構

4.2.2 產業案例分析與整合型網絡設計

太陽能產業案例之求解環境如同模式範例。然而，產業模型相較於一般化模型更為複雜，造成最佳化求解上會造成時間效益的延遲，甚至導致無法求解。由於本研究強調模型特殊性，且企業並不會因為求解上的些微誤差而影響整體決策結果。依據本研究實驗經驗，以 600 秒為求解時間之近似解與最佳解差距(Gap)已相當接近最佳化結果，因此本研究在產業案例之運算時間設為 600 秒所求得之近似最佳解作為分析基礎。往後更可透過更精良的運算設備、平行化運算或發展演算法以增進求解時間效益。

產業案例求解結果，包括經濟最佳化(F1*)、環境最佳化(F2*)與妥協解(C)如表 4.10 所示。求解方法採用限制法求出柏拉圖前緣，計數器(v)設定為 10，而妥協解採用經濟與環境目標權重各 0.5 為基準。

表4.10 太陽能產業模型求解結果

| | 總成本 | 碳排放 |
|-------------|---------------|-------------|
| 經濟最佳化 (F1*) | \$214,708,938 | 309,618 ton |
| 妥協解 (C) | \$262,708,938 | 261,618 ton |
| 環境最佳化 (F2*) | \$358,708,938 | 189,618 ton |

由表 4.10 可知當太陽能產業若要兼顧經濟與環境效益，依據妥協解結果，必須多支出比經濟最佳化約 22% 的成本，可降低約 16% 的碳排放；若要使碳排放最小化，則必須多支出成本約 67%。然而，企業並不會主動支出更多成本減少碳排放，除非環境政策強制規範碳排放上限。依據圖 4.16，企業可依據不同的碳排放上限規範，進行供應鏈設計與正逆物流廠區應導入何種程度之低碳製程之決策。

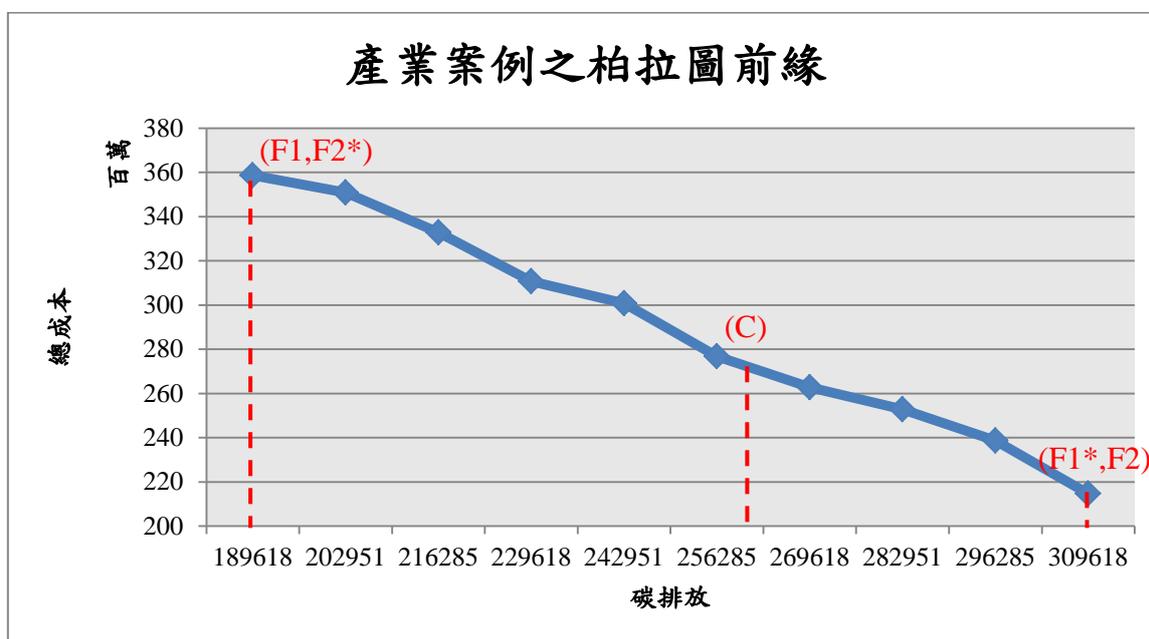


圖4.16 太陽能產業案例之柏拉圖前緣

圖 4.17 為經濟最佳化結果下的供應鏈設計網絡。由圖可知，正向物流需進行產能擴充成員包括太陽能電池製造(Cell) 2 廠、模組(Module) 1 與 2 廠，以及系統(System) 2 與 3 廠；而逆物流必須增設收集廠(1, 5, 6)、拆解廠(2, 5, 6)，以及重製廠(1, 5)。其中，太陽能電池製造廠與重製廠皆導入成本最低但碳排放最高之製程技術。當企業必須被要求降低環境影響時，圖 4.18 為經濟與環境之妥協網絡，由圖可知碳排放比例較高之太陽能電池製造(Cell)廠導入碳排放最低之製程，而碳排放比例相對較低的重製廠依然維持不變，以取的經濟和環境上的最佳效益。而圖 4.19 為環境最佳化結果下的供應鏈設計網絡，由圖可知所有的廠區皆導入碳排放最低之製程技術。此結果可作為太陽能產業進行逆物流建置與正向生產單位進行產能擴充時，兼顧經濟與環境效益之參考依據。

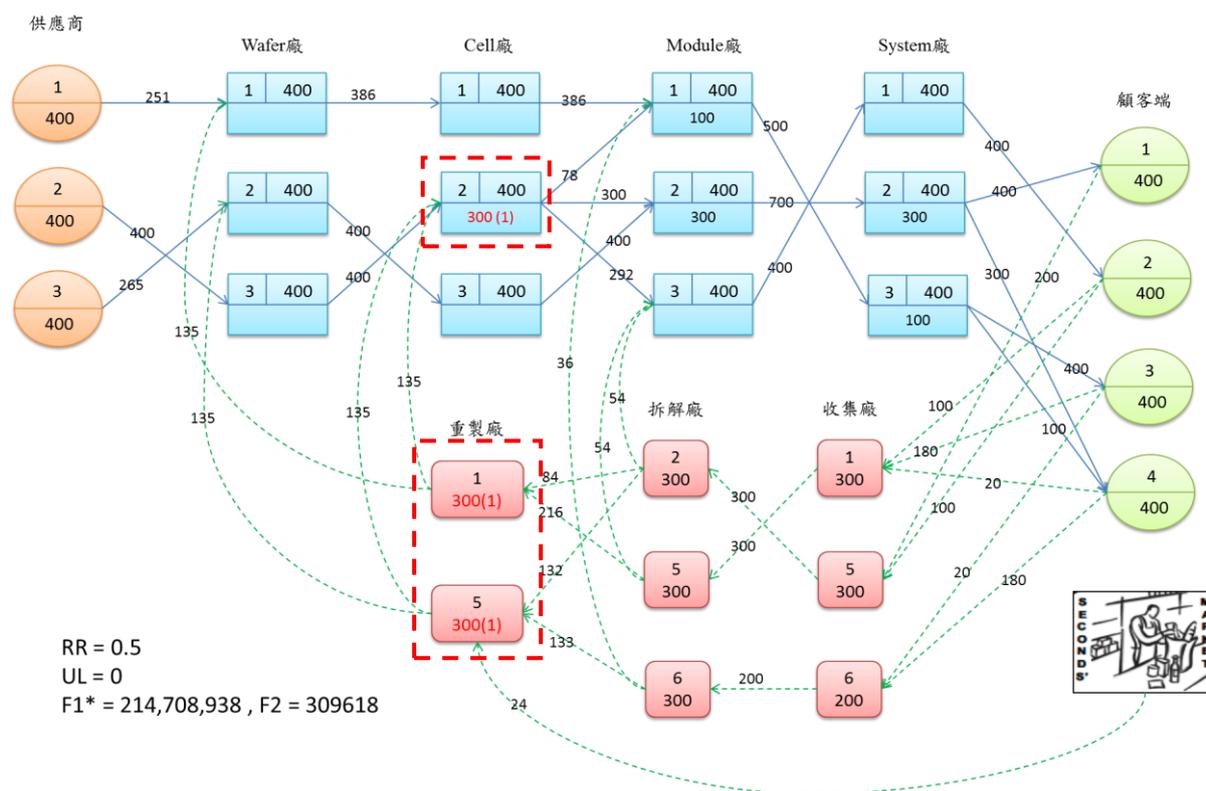


圖4.17 太陽能產業供應鏈網絡 (經濟最佳化)

可由圖 4.17 得知，當企業並無環境規範下，為追求最低的供應鏈設計總成本，所有導入的產能皆為 $t=1$ ，即為成本最低，但碳排放量最高的一般製程設備。

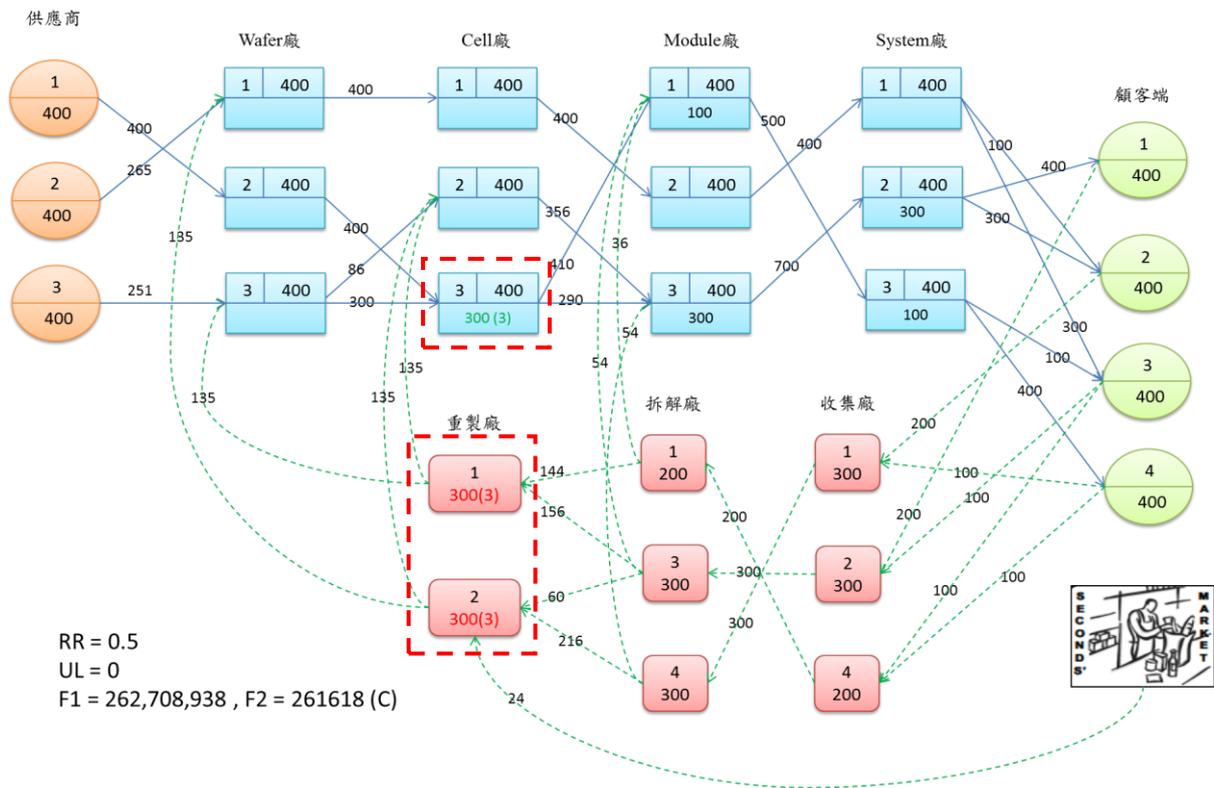


圖4.18 太陽能產業供應鏈網絡 (妥協解)

可由圖 4.18 得知，當企業同時考量經濟與環境情況下，以權重各為 0.5 所規劃之妥協供應鏈網絡設計。可看出碳排放量較高的太陽能電池製造 (Cell) 廠選擇導入 $t=3$ 之產能，即最為低碳的製程設備。然而，所需支付之成本將對較高。

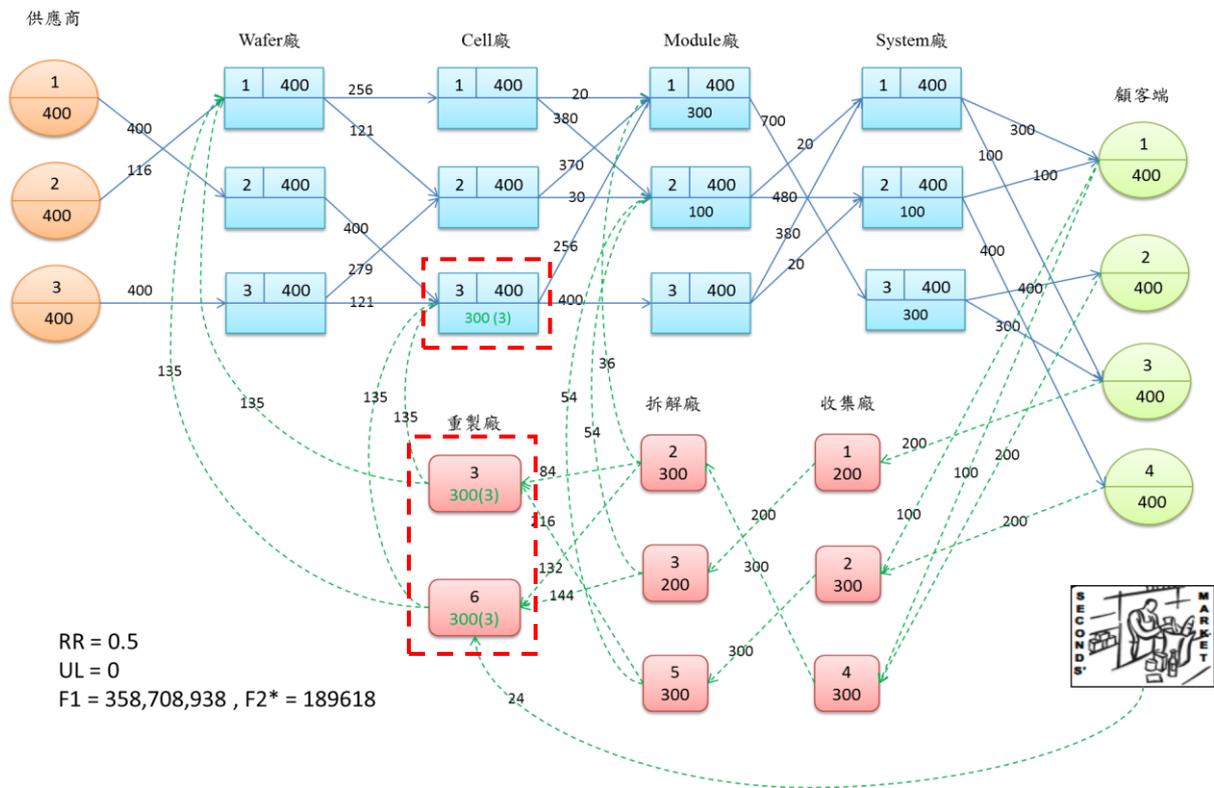


圖4.19 太陽能產業供應鏈網絡 (環境最佳化)

可由圖 4.19 得知，當企業極力要求降低碳排放，因此於各重製廠與太陽能電池製造(Cell)廠接導入了 $t=3$ 之產能，即表示所有導入的產能皆為最低碳的製程設備；然而，所需支付的產能導入成本也最高。

透過本研究所提出之模式，太陽能產業可依據環境規範，或企業本身對於環境保護之願景，選擇適當的製程技術投資，使整體供應鏈設計結果能夠同時滿足經濟與環境上的效益。除此之外，亦可透過調整經濟與環境權重參數，與實際所面臨之產業不確定性，輔助決策者決定最佳的供應鏈設計結果。對於其他以生產為導向之產業而言，可透過修改本模式之相關參數，如成本、不同製程技術之碳排放數據等資訊，依然可產生適合該產業之永續供應鏈設計結果。

第五章 結論與未來發展方向

5.1 結論

本研究提出一套考量市場供需不確定性之正逆物流整合型永續供應鏈設計模型，並考量到環境議題，使供應鏈結構由原本開放式(open-loop)架構變為封閉式(closed-loop)架構時，能夠同時兼顧經濟最佳化與最少的二氧化碳排放。本研究係以不同等級的低碳製程導入於正向與逆向廠區進行產能上的調整，並透過多目標混整數規劃，分析不同情境下逆物流建置規模與EOL產品回收數量對於之經濟與環境之影響。本研究結果指出，EOL產品回收數量多寡導致逆物流建置規模而有不同，並直接影響整體成本與二氧化碳排放。從經濟層面角度，當原物料供應平穩且價格低廉時，逆物流系統並無經濟效益，反而因為回收數量愈多，需支付更高的成本以維持逆物流系統營運；相反的，若原物料供給不確定程度愈高且價格昂貴時，建置逆物流之經濟效益相當顯著。從環境層面角度，當逆物流規模愈大，由於有更多的逆物流廠區營運，導致二氧化碳排放量上升；而透過本模式所產生的柏拉圖前緣，可幫助企業依據不同的碳排放法規，進行產能擴充之技術選擇之參考，以及供應鏈設計相關之廠址選擇與物流配置之依據，並以太陽能產業案例為背景，給予太陽能產業進行正逆物流整合時兼具經濟與環境效益之供應鏈設計藍圖。

除此之外，本研究亦比較確定型模型(deterministic)與穩健型模型(robust)兩種模式所設計之供應鏈營運績效。結果顯示穩健最佳化方法在處理市場供需不確定性問題時，相較於確定型有更穩健(robustness)的供應鏈網絡設計結果，並對於回收數量的不確定上有更佳的處理能力，並隨著市場環境不確定愈高，處理能力之差異愈顯著。

5.2 未來發展方向

本研究站在中心企業之立場，以整體成本與碳排放最小化發展供應鏈設計模型。實際上，企業間存在競合、協同等策略關係，整體之最佳化並不保證其他關係企業，甚至子公司等廠區之個體最佳化。因此建議往後研究方向可考量到企業與企業之間策略關係，除了中心企業之外，亦能顧及周邊關係企業之個體最佳化。

除此之外，本模式是以一些基本假設及限制為前提下所建立，且僅以單一物料作為考量依據，實務上應包含到多種物料與產品及其物料組成關係；同理，在 EOL 產品回收方面亦必須考量到其他回收零組件。以太陽能產業為例，除了矽基板之外，包括其他關鍵回收料，如貴金屬電極之回收。

另一方面，本研究在探討市場不確定方面考量到供給、需求與回收數量上的不確定性，往後更可考量其他不確定性因素，如運輸成本、物料採購成本等不確定性參數；更可加入碳交易機制(Carbon Emission Trading Scheme; CETS)所衍伸的相關問題，使模式更能貼近實際產業現況。

最後，由於供應鏈設計問題已被證實屬於 NP-Hard 問題，本研究所發展之模式於小規模問題下有較佳的求解效率。然而，面臨到實際產業問題時即造成求解效益上的延遲。因此建議未來可透過啟發式之演算法，以增進求解效益。整體而言，本研究建議未來發展方向包括以下：

1. 成本等其他相關參數的不確定性考量。
2. 發展多目標演算法，以增進大規模問題之求解效率與品質。
3. 考量多物料、多產品與多回收料等議題，使整體供應鏈網絡設計更具實務價值。
4. 進一步將碳排放議題加以延伸，如碳交易、碳稅等因素，使更為強調環境保護的重要性。

參考文獻

中文文獻

- 申永順(2007)，國內外溫室氣體減量管理實務之施行現況與發展趨勢。「中技社 96 年度春季環境與能源研討會」發表之論文，台北市。
- 林文華(2010)，PSA2050:2008 產品及服務生命週期溫室氣體排放評估標準介紹。BSI 英國標準協會台灣分公司。
- 郝皓(2002)，逆向物流，*IT 經濟世界*，15，44-45。
- 高毅民(2007)，企業碳資產管理。「中技社 96 年度春季環境與能源研討會」發表之論文，台北市。
- 陳亮榮(2011)，太陽光電系統減少碳排放量之可行性研究(碩士論文)，國立臺中教育大學，台中市。

英文文獻

- Adida, E. and Perakis, G. (2006). A Robust Optimization Approach to Dynamic Pricing and Inventory Control with no Backorders. *Math. Program.*, 107(1), 97-129.
- Alçada-Almeida, L., Coutinho-Rodrigues, J. and Current, J. (2009). A multiobjective modeling approach to locating incinerators. *Socio-Economic Planning Sciences*, 43(2), 111-120.
- Alonso-Ayuso, A., Escudero, L. F., Garín, A., Ortuño, M. T. and Pérez, G. (2003). An Approach for Strategic Supply Chain Planning under Uncertainty based on Stochastic 0-1 Programming. *Journal of Global Optimization*, 26(1), 97-124.
- Ben-Tal, A. and Nemirovski, A. (1998). Robust convex optimization. *Mathematics of Operations Research*, 23(4), 769-805.
- Ben-Tal, A. and Nemirovski, A. (2000). Robust solutions of Linear Programming problems contaminated with uncertain data. *Mathematical Programming*, 88(3), 411-424.
- Chaabane, A., Ramudhin, A. and Paquet, M. (2012). Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme. *International Journal of Production Economics*, 135(1), 37-49.
- Frota Neto, J. Q., Bloemhof-Ruwaard, J. M., van Nunen, J. A. E. E. and van Heck, E. (2008). Designing and evaluating sustainable logistics networks. *International Journal of Production Economics*, 111(2), 195-208.
- Ghaoui, L. E., Oks, M. and Oustry, F. (2003). Worst-Case Value-At-Risk and Robust Portfolio Optimization: A Conic Programming Approach. *Oper. Res.*, 51(4), 543-556.
- Guillén-Gosálbez, G. and Grossmann, I. (2010). A global optimization strategy for the environmentally conscious design of chemical supply chains under uncertainty in the damage assessment model. *Computers & Chemical Engineering*, 34(1), 42-58.
- Gunasekaran, A., Patel, C. and McGaughey, R. E. (2004). A framework for supply chain

- performance measurement. *International Journal of Production Economics*, 87(3), 333-347.
- Gupta, S. and Palsule-Desai, O. D. (2011). Sustainable supply chain management: Review and research opportunities. *IIMB Management Review*, 23(4), 234-245.
- Klugmann-Radziemska, E. and Ostrowski, P. (2010). Chemical treatment of crystalline silicon solar cells as a method of recovering pure silicon from photovoltaic modules. *Renewable Energy*, 35(8), 1751-1759.
- Lambert, S., Riopel, D. and Abdul-Kader, W. (2011). A reverse logistics decisions conceptual framework. *Computers & Industrial Engineering*, 61(3), 561-581.
- Lee, K.-H. (2011). Integrating carbon footprint into supply chain management: the case of Hyundai Motor Company (HMC) in the automobile industry. *Journal of Cleaner Production*, 19(11), 1216-1223.
- Listeş, O. and Dekker, R. (2005). A stochastic approach to a case study for product recovery network design. *European Journal of Operational Research*, 160(1), 268-287.
- Lu, Z. and Bostel, N. (2007). A facility location model for logistics systems including reverse flows: The case of remanufacturing activities. *Computers & Operations Research*, 34(2), 299-323.
- Min, H. and Ko, H.-J. (2008). The dynamic design of a reverse logistics network from the perspective of third-party logistics service providers. *International Journal of Production Economics*, 113(1), 176-192.
- Mohammadi Bidhandi, H. and Mohd Yusuff, R. (2011). Integrated supply chain planning under uncertainty using an improved stochastic approach. *Applied Mathematical Modelling*, 35(6), 2618-2630.
- Özceylan, E. and Paksoy, T. (2012). A mixed integer programming model for a closed-loop supply-chain network. *International Journal of Production Research*, 1-17.
- Pagell, M., Wu, Z. and Murthy, N. N. (2007). The supply chain implications of recycling. *Business Horizons*, 50(2), 133-143.
- Piplani, R. and Saraswat, A. (2011). Robust optimisation approach to the design of service networks for reverse logistics. *International Journal of Production Research*, 1-14.
- Pishvae, M. S., Farahani, R. Z. and Dullaert, W. (2010). A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design. *Computers & Operations Research*, 37(6), 1100-1112.
- Pishvae, M. S., Rabbani, M. and Torabi, S. A. (2011). A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Applied Mathematical Modelling*, 35(2), 637-649.
- Ramudhin, A., Chaabane, A. and Paquet, M. (2009). Carbon market sensitive sustainable supply chain network design. *International Journal of Management Science*, 5(1), 30-38.
- Realf, M. J., Ammons, J. C. and Newton, D. J. (2004). Robust reverse production system

- design for carpet recycling. *IIE Transactions*, 36(8), 767-776.
- Salema, M. I. G., Barbosa-Povoa, A. P. and Novais, A. Q. (2007). An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 179(3), 1063-1077.
- Santoso, T., Ahmed, S., Goetschalckx, M. and Shapiro, A. (2005). A stochastic programming approach for supply chain network design under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 167(1), 96-115.
- Sheu, J.-B., Chou, Y.-H. and Hu, C.-C. (2005). An integrated logistics operational model for green-supply chain management. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 41(4), 287-313.
- Srivastava, S. K. (2007). Green Supply-Chain Management: A State-of-the-Art Literature Review. *International Journal of Management Reviews*, 9(1), 53-80.
- Srivastava, S. K. (2008). Network Design for Reverse Logistics. *Omega*, 36(4), 535-548.
- Subramanian, R., Talbot, B. and Gupta, S. (2010). An approach to integrating environmental considerations within managerial decision-making. *Journal of Industrial Ecology*, 14(3), 378-398.
- Üster, H., Easwaran, G., Akçali, E. and Çetinkaya, S. (2007). Benders decomposition with alternative multiple cuts for a multi-product closed-loop supply chain network design model. *Naval Research Logistics (NRL)*, 54(8), 890-907.
- Wambach, K., Schlenker, S. and Jäger-Waldau, A. (2005). A voluntary take back system for PV modules in Europe. *Proceedings of the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 3165-3168.
- Wang, F., Lai, X. and Shi, N. (2011). A multi-objective optimization for green supply chain network design. *Decision Support Systems*, 51(2), 262-269.
- Wang, H.-F. and Hsu, H.-W. (2010). A closed-loop logistic model with a spanning-tree based genetic algorithm. *Computers & Operations Research*, 37(2), 376-389.
- Zangl, S. (2004). Regulation Scenarios for Waste PV Modules, Workshop on Life Cycle Analysis and Recycling of Solar Modules-The Waste Challenge. *European Communities Brussels*, 18-19.
- Zhu, Q., Sarkis, J. and Lai, K.-h. (2008). Green supply chain management implications for “closing the loop”. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(1), 1-18.

附錄一

附表1 一般化模型相關參數表

| 供需參數 | 參數值 | | |
|------------------------------|--------|-------|-------|
| s_s^{rm} | 200(2) | | |
| s_j^{sm} | 50(2) | | |
| d_c | 100(4) | | |
| r_c | 50(4) | | |
| 比例相關參數 | 參數值 | | |
| $\lambda_{(j,p)}^{dis}$ | 0.1 | | |
| γ_{ji}^{ret} | | $j=1$ | $j=2$ |
| | $i=1$ | -- | 0.6 |
| | $i=2$ | 0.2 | 0.4 |
| 產能參數 | 參數值 | | |
| $ca_{(i,k)}$ | 200 | | |
| $cl_{(i,k)tl}, cl_{(j,p)tl}$ | $l=1$ | $l=2$ | $l=3$ |
| | 50 | 100 | 150 |

| 成本相關參數 | 參數值 | | | |
|--|--------|-------|-------|-------|
| pc_s^{rm} | 500 | | | |
| pc_j^{sm} | 100 | | | |
| $dc_{(j,p)}$ | 20 | | | |
| sc_{sk} | 10 | | | |
| $sc_{(i,k)(i',k')}, sc_{kc}, sc_{cp}, sc_{(j,p)(j',p')}, sc_{(j,p)(i,k)}$ | 1 | | | |
| nc_c | 10,000 | | | |
| $bc_{(j,p)}$ | 5,000 | | | |
| $cc_{(i,k)tl}$ | | $l=1$ | $l=2$ | $l=3$ |
| | $t=1$ | 1,000 | 800 | 640 |
| | $t=2$ | 1,500 | 1,200 | 960 |
| | $t=3$ | 2,000 | 1,600 | 1,280 |
| $cc_{(j,p)tl}$ | | $l=1$ | $l=2$ | $l=3$ |
| | $t=1$ | 500 | 400 | 320 |
| | $t=2$ | 750 | 600 | 480 |
| | $t=3$ | 1,000 | 800 | 640 |
| 環境相關參數 | 參數值 | | | |
| $pce_{(i,k)t}, pce_{(j,p)t}$ | $t=1$ | $t=2$ | $t=3$ | |
| | 100 | 60 | 50 | |
| tce_{sk} | 20 | | | |
| $tce_{(i,k)(i',k')}, tce_{kc}, tce_{cp}, tce_{(j,p)(j',p')}, tce_{(j,p)(i,k)}$ | 1 | | | |

附錄二

附表2 各回收率之雙目標求解結果 ($pc_s^{rm}=\$250$)

| 回收率 | 0.2 | | 0.4 | | 0.5 (primary) | | 0.6 | | 0.8 | | 1 | |
|-----------|---------|--------|---------|--------|---------------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
| 目標函數 | \$F1 | F2 ton | \$F1 | F2 ton | \$F1 | F2 ton | \$F1 | F2 ton | \$F1 | F2 ton | \$F1 | F2 ton |
| (F1, F2*) | 260,760 | 17,648 | 331,093 | 24,038 | 335,831 | 23,431 | 399,428 | 27,928 | 484,144 | 34,245 | 516,488 | 38,061 |
| . | 220,760 | 20,148 | 270,593 | 28,413 | 271,831 | 27,805 | 318,928 | 33,535 | 379,645 | 41,745 | 397,861 | 46,811 |
| . | 220,760 | 22,648 | 258,094 | 32,788 | 251,831 | 32,181 | 286,428 | 39,142 | 343,145 | 49,245 | 353,862 | 55,562 |
| . | 200,760 | 25,148 | 234,094 | 37,163 | 231,831 | 36,556 | 262,428 | 44,748 | 311,644 | 56,745 | 325,862 | 64,312 |
| (F1*, F2) | 180,760 | 27,648 | 210,094 | 41,538 | 207,831 | 40,931 | 238,427 | 50,355 | 275,145 | 64,245 | 281,862 | 73,062 |

附表3 各回收率之雙目標求解結果 ($pc_s^{rm}=\$500$)

| 回收率 | 0.2 | | 0.4 | | 0.5 (primary) | | 0.6 | | 0.8 | | 1 | |
|-----------|---------|--------|---------|--------|---------------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
| 目標函數 | \$F1 | F2 ton | \$F1 | F2 ton | \$F1 | F2 ton | \$F1 | F2 ton | \$F1 | F2 ton | \$F1 | F2 ton |
| (F1, F2*) | 344,210 | 17,648 | 398,318 | 24,038 | 394,581 | 23,431 | 451,478 | 27,928 | 518,394 | 34,245 | 531,362 | 38,061 |
| . | 304,210 | 20,148 | 337,819 | 28,413 | 330,581 | 27,805 | 370,978 | 33,535 | 413,895 | 41,745 | 415,362 | 46,811 |
| . | 304,209 | 22,648 | 325,318 | 32,788 | 310,580 | 32,181 | 338,478 | 39,142 | 377,395 | 49,245 | 371,362 | 55,562 |
| . | 284,100 | 25,148 | 301,319 | 37,163 | 290,581 | 36,556 | 317,478 | 44,748 | 345,895 | 56,745 | 343,362 | 64,312 |
| (F1*, F2) | 264,210 | 27,648 | 277,318 | 41,538 | 266,581 | 40,931 | 289,286 | 50,355 | 309,395 | 64,245 | 299,362 | 73,062 |

附表4 各回收率之雙目標求解結果 ($pc_s^{rm}=\$750$)

| 回收率 | 0.2 | | 0.4 | | 0.5 (primary) | | 0.6 | | 0.8 | | 1 | |
|-----------|---------|--------|---------|--------|---------------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
| 目標函數 | \$F1 | F2 ton | \$F1 | F2 ton | \$F1 | F2 ton | \$F1 | F2 ton | \$F1 | F2 ton | \$F1 | F2 ton |
| (F1, F2*) | 427,660 | 17,648 | 465,544 | 24,038 | 453,330 | 23,431 | 500,761 | 27,928 | 552,645 | 34,245 | 550,837 | 38,061 |
| . | 387,659 | 20,148 | 405,044 | 28,413 | 389,331 | 27,805 | 420,261 | 33,535 | 448,144 | 41,745 | 432,862 | 46,811 |
| . | 387,659 | 22,648 | 392,544 | 32,788 | 369,331 | 32,181 | 387,760 | 39,142 | 411,645 | 49,245 | 388,862 | 55,562 |
| . | 367,659 | 25,148 | 368,544 | 37,163 | 349,330 | 36,556 | 363,761 | 44,748 | 380,145 | 56,745 | 360,862 | 64,312 |
| (F1*, F2) | 347,660 | 27,648 | 344,544 | 41,538 | 325,331 | 40,931 | 339,761 | 50,355 | 343,645 | 64,245 | 316,862 | 73,062 |

附表5 各回收率之雙目標求解結果 ($pc_s^{rm}=\$1,000$)

| 回收率 | 0.2 | | 0.4 | | 0.5 (primary) | | 0.6 | | 0.8 | | 1 | |
|-----------|---------|--------|---------|--------|---------------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
| 目標函數 | \$F1 | F2 ton | \$F1 | F2 ton | \$F1 | F2 ton | \$F1 | F2 ton | \$F1 | F2 ton | \$F1 | F2 ton |
| (F1, F2*) | 511,110 | 17,648 | 532,768 | 24,038 | 512,081 | 23,431 | 552,428 | 27,928 | 586,894 | 34,245 | 566,362 | 38,061 |
| . | 471,110 | 20,148 | 472,269 | 28,413 | 448,081 | 27,805 | 471,928 | 33,535 | 482,395 | 41,745 | 450,362 | 46,811 |
| . | 471,109 | 22,648 | 459,768 | 32,788 | 428,080 | 32,181 | 439,428 | 39,142 | 445,895 | 49,245 | 406,362 | 55,562 |
| . | 451,000 | 25,148 | 435,769 | 37,163 | 408,081 | 36,556 | 418,428 | 44,748 | 414,395 | 56,745 | 378,362 | 64,312 |
| (F1*, F2) | 431,110 | 27,648 | 411,768 | 41,538 | 384,080 | 40,931 | 390,236 | 50,355 | 377,895 | 64,245 | 334,362 | 73,062 |

附錄三

附表6 不確定水準為0.2之供需參數亂數表

| 不確定水準 | 0.2 | | | | | | | | | | | |
|-------|------------|-------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | s_s^{rm} | | s_j^{sm} | | d_c | | | | r_c | | | |
| # | $s=1$ | $s=2$ | $j=1$ | $j=2$ | $c=1$ | $c=2$ | $c=3$ | $c=4$ | $c=1$ | $c=2$ | $c=3$ | $c=4$ |
| 1 | 204 | 196 | 45 | 56 | 109 | 101 | 105 | 80 | 55 | 51 | 44 | 47 |
| 2 | 161 | 192 | 52 | 46 | 103 | 97 | 90 | 111 | 49 | 48 | 47 | 46 |
| 3 | 235 | 219 | 57 | 43 | 83 | 116 | 107 | 91 | 43 | 44 | 56 | 51 |
| 4 | 237 | 195 | 57 | 43 | 84 | 93 | 95 | 113 | 47 | 59 | 43 | 52 |
| 5 | 164 | 234 | 47 | 42 | 111 | 92 | 89 | 94 | 42 | 59 | 55 | 51 |
| 6 | 162 | 210 | 53 | 58 | 83 | 119 | 91 | 99 | 48 | 42 | 41 | 43 |
| 7 | 210 | 180 | 57 | 43 | 97 | 107 | 82 | 101 | 57 | 44 | 55 | 50 |
| 8 | 211 | 210 | 54 | 44 | 112 | 83 | 99 | 108 | 48 | 41 | 53 | 59 |
| 9 | 162 | 233 | 40 | 46 | 103 | 95 | 83 | 110 | 45 | 51 | 52 | 45 |
| 10 | 235 | 199 | 42 | 49 | 116 | 83 | 108 | 93 | 46 | 55 | 42 | 56 |

附表7 不確定水準為0.4之供需參數亂數表

| 不確定水準 | 0.4 | | | | | | | | | | | |
|-------|------------|-------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | s_s^{rm} | | s_j^{sm} | | d_c | | | | r_c | | | |
| # | $s=1$ | $s=2$ | $j=1$ | $j=2$ | $c=1$ | $c=2$ | $c=3$ | $c=4$ | $c=1$ | $c=2$ | $c=3$ | $c=4$ |
| 1 | 266 | 275 | 60 | 42 | 126 | 119 | 63 | 114 | 66 | 39 | 38 | 48 |
| 2 | 124 | 174 | 50 | 55 | 124 | 138 | 87 | 66 | 63 | 68 | 54 | 50 |
| 3 | 272 | 274 | 53 | 30 | 83 | 95 | 90 | 79 | 58 | 51 | 33 | 64 |
| 4 | 179 | 183 | 50 | 32 | 136 | 68 | 112 | 88 | 47 | 68 | 46 | 37 |
| 5 | 180 | 181 | 56 | 53 | 119 | 121 | 111 | 69 | 40 | 67 | 36 | 36 |
| 6 | 238 | 180 | 51 | 62 | 135 | 83 | 118 | 91 | 48 | 53 | 41 | 66 |
| 7 | 169 | 204 | 41 | 54 | 62 | 91 | 71 | 136 | 43 | 66 | 68 | 44 |
| 8 | 228 | 243 | 40 | 49 | 83 | 107 | 136 | 73 | 41 | 39 | 44 | 38 |
| 9 | 183 | 234 | 54 | 42 | 98 | 80 | 97 | 106 | 67 | 56 | 59 | 60 |
| 10 | 120 | 187 | 64 | 70 | 105 | 95 | 82 | 135 | 60 | 51 | 44 | 40 |

附表8 不確定水準為0.6之供需參數亂數表

| 不確定水準 | 0.6 | | | | | | | | | | | |
|-------|------------|-------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | s_s^{rm} | | s_j^{sm} | | d_c | | | | r_c | | | |
| | $s=1$ | $s=2$ | $j=1$ | $j=2$ | $c=1$ | $c=2$ | $c=3$ | $c=4$ | $c=1$ | $c=2$ | $c=3$ | $c=4$ |
| 1 | 268 | 244 | 47 | 49 | 57 | 77 | 139 | 124 | 62 | 52 | 65 | 35 |
| 2 | 190 | 223 | 74 | 63 | 142 | 61 | 104 | 129 | 77 | 65 | 55 | 44 |
| 3 | 251 | 198 | 64 | 72 | 75 | 53 | 156 | 128 | 33 | 54 | 26 | 41 |
| 4 | 95 | 133 | 72 | 34 | 46 | 149 | 159 | 52 | 46 | 24 | 74 | 46 |
| 5 | 301 | 180 | 61 | 47 | 97 | 140 | 124 | 71 | 55 | 21 | 44 | 72 |
| 6 | 137 | 84 | 25 | 75 | 127 | 105 | 103 | 47 | 31 | 61 | 45 | 47 |
| 7 | 317 | 210 | 33 | 59 | 106 | 122 | 59 | 114 | 45 | 45 | 71 | 41 |
| 8 | 270 | 304 | 41 | 55 | 152 | 77 | 113 | 51 | 64 | 39 | 54 | 76 |
| 9 | 193 | 201 | 52 | 49 | 141 | 62 | 93 | 69 | 64 | 33 | 59 | 58 |
| 10 | 154 | 116 | 44 | 44 | 154 | 82 | 143 | 58 | 48 | 46 | 41 | 72 |

附表9 不確定水準為0.8之供需參數亂數表

| 不確定水準 | 0.8 | | | | | | | | | | | |
|-------|------------|-------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | s_s^{rm} | | s_j^{sm} | | d_c | | | | r_c | | | |
| # | $s=1$ | $s=2$ | $j=1$ | $j=2$ | $c=1$ | $c=2$ | $c=3$ | $c=4$ | $c=1$ | $c=2$ | $c=3$ | $c=4$ |
| 1 | 263 | 202 | 71 | 30 | 46 | 120 | 165 | 20 | 55 | 45 | 52 | 44 |
| 2 | 303 | 174 | 60 | 56 | 36 | 131 | 82 | 178 | 53 | 37 | 34 | 30 |
| 3 | 109 | 318 | 32 | 73 | 64 | 45 | 130 | 157 | 48 | 24 | 62 | 86 |
| 4 | 310 | 182 | 28 | 27 | 131 | 47 | 55 | 125 | 85 | 63 | 14 | 65 |
| 5 | 213 | 250 | 88 | 83 | 141 | 172 | 75 | 83 | 50 | 70 | 66 | 82 |
| 6 | 141 | 77 | 80 | 14 | 135 | 72 | 58 | 88 | 28 | 84 | 29 | 34 |
| 7 | 191 | 158 | 77 | 38 | 73 | 111 | 81 | 165 | 66 | 50 | 47 | 76 |
| 8 | 222 | 181 | 20 | 59 | 36 | 148 | 88 | 145 | 46 | 38 | 17 | 76 |
| 9 | 198 | 225 | 85 | 38 | 34 | 90 | 179 | 141 | 58 | 36 | 47 | 67 |
| 10 | 143 | 187 | 32 | 58 | 164 | 56 | 159 | 21 | 63 | 49 | 88 | 32 |

附表10 不確定水準為1.0之供需參數亂數表

| 不確定水準 | 1.0 | | | | | | | | | | | |
|-------|------------|-------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | s_s^{rm} | | s_j^{sm} | | d_c | | | | r_c | | | |
| # | $s=1$ | $s=2$ | $j=1$ | $j=2$ | $c=1$ | $c=2$ | $c=3$ | $c=4$ | $c=1$ | $c=2$ | $c=3$ | $c=4$ |
| 1 | 188 | 307 | 70 | 62 | 68 | 164 | 133 | 70 | 88 | 55 | 49 | 92 |
| 2 | 243 | 254 | 38 | 25 | 22 | 174 | 136 | 75 | 74 | 97 | 73 | 34 |
| 3 | 373 | 161 | 46 | 7 | 86 | 101 | 87 | 122 | 12 | 64 | 24 | 67 |
| 4 | 353 | 34 | 97 | 19 | 97 | 192 | 69 | 55 | 17 | 62 | 73 | 76 |
| 5 | 140 | 208 | 12 | 76 | 124 | 44 | 144 | 89 | 27 | 29 | 34 | 62 |
| 6 | 135 | 196 | 27 | 82 | 86 | 121 | 190 | 54 | 40 | 16 | 26 | 66 |
| 7 | 184 | 128 | 58 | 63 | 38 | 180 | 108 | 97 | 38 | 62 | 92 | 62 |
| 8 | 75 | 248 | 21 | 67 | 113 | 16 | 105 | 180 | 82 | 62 | 20 | 59 |
| 9 | 208 | 202 | 7 | 91 | 50 | 198 | 62 | 107 | 64 | 74 | 18 | 64 |
| 10 | 278 | 41 | 65 | 94 | 31 | 81 | 191 | 136 | 42 | 97 | 64 | 58 |

附錄四

附表11 產業案例之相關參數表

| 成本相關參數 | 參數值 |
|--|-----------|
| pc_s^{rm} | 960 |
| $pc_{j=1}^{sm}$ | 450 |
| $pc_{j=2}^{sm}$ | 540 |
| $dc_{(j,p)}$ | 50 |
| nc_c | 1,000,000 |
| $bc_{(j,p)}$ | 100,000 |
| $SC_{sk}, SC_{(i,k)(i',k')}, SC_{kc}, SC_{cp}, SC_{(j,p)(j',p')}, SC_{(j,p)(i,k)}$ | 1 |
| 供需相關參數 | 參數值 |
| s_s^{rm} | 400 (3) |
| s_j^{sm} | 100 (2) |
| d_c | 400 (4) |
| r_c | 200 (4) |
| 生產單位既有產能 | 參數值 |
| $ca_{(i,k)}$ | 400 |

| 運輸碳排放參數 | 參數值 |
|--|-----|
| $tce_{sk}, tce_{(i,k)(i',k')}, tce_{kc}, tce_{cp}, tce_{(j,p)(j',p')}, tce_{(j,p)(i,k)}$ | 1 |
| 運輸比例參數 | 參數值 |
| $\lambda_{(j,p)}^{dis}$ | 0.1 |
| $\gamma_{j=2,i=3}^{ret}$ | 0.2 |
| $\gamma_{j=3,i=1}^{ret}, \gamma_{j=3,i=2}^{ret}$ | 0.5 |

| 產能碳排放參數 | 技術水準 | 參數值 |
|------------------|-------|-------|
| $pce_{(i=1,k)t}$ | $t=1$ | 1,000 |
| | $t=2$ | 800 |
| | $t=3$ | 600 |
| $pce_{(i=2,k)t}$ | $t=1$ | 400 |
| | $t=2$ | 320 |
| | $t=3$ | 240 |
| $pce_{(j=3,p)t}$ | $t=1$ | 300 |
| | $t=2$ | 240 |
| | $t=3$ | 180 |

附表12 產業案例之產能擴充成本參數表

| 產能投資成本 | 技術水準 | 產能水準 | | |
|------------------|-------|--------------|--------------|--------------|
| | | $l=1$ (產能額度) | $l=2$ (產能額度) | $l=3$ (產能額度) |
| $CC_{(i=1,k)tl}$ | $t=1$ | 300,000(100) | 270,000(200) | 240,000(300) |
| | $t=2$ | 400,000(100) | 360,000(200) | 320,000(300) |
| | $t=3$ | 500,000(100) | 450,000(200) | 400,000(300) |
| $CC_{(i=2,k)tl}$ | $t=1$ | 200,000(100) | 180,000(200) | 160,000(300) |
| | $t=2$ | 300,000(100) | 270,000(200) | 240,000(300) |
| | $t=3$ | 400,000(100) | 360,000(200) | 320,000(300) |
| $CC_{(j=3,p)tl}$ | $t=1$ | 100,000(100) | 90,000(200) | 80,000(300) |
| | $t=2$ | 200,000(100) | 180,000(200) | 160,000(300) |
| | $t=3$ | 300,000(100) | 270,000(200) | 240,000(300) |

附表 12 產業案例之產能擴充成本參數表 (續)

| 產能投資成本 | 產能水準 | | |
|------------------|--------------|--------------|--------------|
| | $l=1$ (產能額度) | $l=2$ (產能額度) | $l=3$ (產能額度) |
| $CC_{(i=3,k)tl}$ | 100,000(100) | 90,000(200) | 80,000(300) |
| $CC_{(i=4,k)tl}$ | 50,000(100) | 45,000(200) | 40,000(300) |
| $CC_{(j=1,p)tl}$ | 50,000(100) | 45,000(200) | 40,000(300) |
| $CC_{(j=2,p)tl}$ | 50,000(100) | 45,000(200) | 40,000(300) |