

第一章 前言

1.1 研究緣起

資源回收是重要環保工作，國內由早期的鼓勵自願回收逐漸發展成訂定法令強制廠商回收，並設立基金會專責管理一些公告回收的物品(環保署，100 年)。全球每人年平均排碳量約 4.38 噸，台灣年均碳排放量為 12.08 噸(環保共識會議，99 年)，節能減碳已是當前的施政重點，唯回收容器可減少多少碳排放量，目前國內尚無相關方法可供用以評估。此外，回收容器亦具有一些環境永續效益，雖已有一些研究針對單一容器進行生命週期評估(e.g., Trifonova and Ishun’kina, 2007; Song and Hyun, 1999; Arena *et al.*, 2003; Perugini *et al.*, 2005; Nakatani *et al.*, 2010)，唯至今對國內容器回收尚未有完整的生命週期分析，亦還沒有研究同時比較分析多種容器之環境永續效益。本研究因而依據不同容器之生命週期發展一套方法分析其所具有的減碳與環境永續效益。

環保署公告回收之容器有鐵容器、鋁容器、玻璃容器、鋁箔包、紙容器、農藥廢容器和塑膠容器等七大種，其中由於農藥容器的處理方式較為不同，故本研究未納入分析。而回收之廢鐵容器多與高級鐵混合，再製成鋼、鋼胚等(再生率約 90%) (周，90 年)；廢鋁容器之再生體系與廢鐵相似，其再生產品為鋁錠(周，90 年)；廢玻璃容器除了原形再利用以外，亦可用於再製成容器、瀝青道路鋪設之表層骨材、紅磚等用途(楊，93 年)；廢塑膠容器則包括 PET、PE、PVC、PS 等材質，塑膠容器之回收通常會先將其用成碎片再進行利用(環保署，101 年)，故本研究中先考慮 PET/PE 容器，因此二材質較常被使用且資料較完整。而紙盒包及鋁箔包其主要材料為紙，其回收之後將其製成纖維再利用(環保署，101 年)。本

研究依據各容器回收的重要性及是否有足夠資料等決定納入研究的容器種類。

由於推估容器回收的減碳與環境永續效益，有必要評估整個生命週期方能作出較完整的推估，故本研究首先分析各容器的生命週期。生命週期評估法(Life Cycle Assessment, LCA)已由 ISO 公告了 14040 及 14044 規範 (ISO, 2006)，目前已廣泛的應用於很多研究，容器回收亦已有不少相關研究(e.g. Song and Hyun, 1999；Arena *et al.*, 2003；楊，93 年；Perugini *et al.*, 2005；Trifonova *et al.*, 2007；Ruth *et al.*, 2008；Vellini and Savioli, 2009；Madival *et al.*, 2009；Nakatani *et al.*, 2010；Almeida *et al.*, 2010)。一般容器的生命週期包括原料、製程、使用、回收、再利用及廢棄等過程，唯不同容器由於製造方式、回收方式、再利用用途不同，故生命週期不盡相同，例如玻璃容器再利用之方式為原形再使用、容器、紅磚及瀝青道路之表成骨材（楊，93 年）；而 PET 容器再利用方式為化學回收、熱解回收等方式（Song and Hyun, 1999），本研究一一分析各容器的生命週期。唯由於使用階段的資料不易收集，且本研究主要評估回收與否的差異，對結果影響不大，故本研究並未分析容器使用階段，唯由於國內尚無完整的生命週期資料庫可供本研究使用，故本研究採用國際上知名的 Simapro（Geodkoop *et al.*, 2010）軟體進行各容器的生命週期評估，所得結果作為後續推估容器回收的減碳量及評估環境永續效益之依據。

容器回收的減碳效益評估，主要分析容器未回收與不同回收路徑整個生命週期所排放的溫室氣體總量差異值，且轉換為二氧化碳排放當量來表示，然後依據相關的排放係數推估二氧化碳排放量（Narita *et al.* 2002），進而分別得出未回收及回收再利用之碳排放量，其間的差異即是減碳效益。而原料中有加入再生料會與原本製程所造成之碳排放量不同（Shen *et al.*, 2011），不同回收流程也會造成不同之碳排放量（Narita *et al.*, 2002），

不同容器回收的減碳效益評估面亦因而不同，本研究因而依據不同容器的回收流程分析其減碳效益。

評估容器回收減碳及環境永續效益所採用的方法大致可區分為一次回收法、回收路徑法及循環回收法等三種。一次回收法主要比較單次回收及沒有回收的差異。唯回收可能不只一次，故若只評估一次回收，可能低估回收的效益，故宜進一步依據容器回收的期望次數來評估效益（Vellini and Savioli, 2009）。此外，容器的回收路徑會隨著再利用的方式而不同，也因而會有不同的生命週期，效益亦因而不同，針對單種容器的多種回收路徑再利用方式進行能量使用及廢棄排放分析，Song and Hyun (1999) 曾提出一個分析不同回收路徑的模式。本研究採用此三個方法依據各容器及其回收再利用不同路徑下之生命週期評估其減碳及環境永續效益。

由於容器間的特性頗不同，且不同回收路徑、再利用方式、各路徑與再利用方式的比例等均讓所推估減碳及環境永續效益不同（Narita *et al.*, 2002），故本研究最後針對容器的可能情境進行分析，以比較不同情境下各項效益的差異，以供相關決策分析時參考。

1.2 研究目的

本研究主要重點是建立方法用以評估國內容器回收的減碳及環境永續效益，且進行情境分析。主要目的有以下三項：

1. 建立方法評估容器回收的減碳效益：針對各容器的生命週期及回收路徑建立適當的方法供評估容器回收的減量效益，以供節能減碳相關決策與規劃參考。
2. 建立方法評估容器回收的環境永續效益：針對不同容器及不同回收路徑建立方法分析國內容器回收對氣候(含減碳)、臭氧、毒性、酸雨、致癌、

輻射等面向的環境永續效益，比較各容器回收在這些面向的不同之效益。

3. 情境分析及比較各容器的減碳及環境永續效益：針對不同容器與不同回收路徑的減碳及各面向的環境永續效益進行情境模分析，以供比較各容器回收對於國內減碳及促進環境永續性的貢獻。

1.3 論文內容

本論文內容，第二章主要回顧台灣容器回收發展政策與歷史、容器減碳效益評估及環境永續效益評估等相關文獻；第三章說明研究流程與方法，首先說明整個研究的流程，然後說明減碳效益評估、生命週期評估及環境永續效益評估等之範疇界定及所建立的方法；第四章依所建立方法分析各容器在不同回收路徑下各種效益，並討論所得的結果，且進行情境分析，最後進行綜合評估；最後第五章為結論與建議。附錄 A 為循環回收法原始公式推導。

第二章 文獻回顧

本章中主要回顧及討論與本研究相關的文獻，相關重要文獻主要分為台灣容器回收發展政策與歷史、容器回收減碳效益評估及容器回收生命週期與環境永續效益評估，以下各節一一討論各主題之相關文獻。

2.1 台灣容器回收發展政策與歷史

周(90年)將民國90年之前的台灣地區廢容器回收制度分成四個階段：第一階段(78年至83年3月)主要依據在「廢棄物清理法」執行資源回收政策，且於77年即開始導入資源回收之概念。第二階段(83年4月至85年12月)，環保署於83年4月頒訂「廢一般容器回收清除處理辦法」，將鋁箔包、紙容器、玻璃瓶等十二種容器統稱為「廢一般容器」，於85年訂定「資源回收四合一計畫」整合各回收體系。第三階段(86年至87年6月)，環保署於86年起推動「資源回收四合一計畫」，將原本封閉式的結構改為開放式系統。第四階段(87年7月至90年)，於87年7月成立「資源回收管理基金管理委員會」，負責訂定廢容器的回收費率，促使生產廠商及回收清運廠商均有誘因共同推動回收工作。

之後環保署(101年)於91年7月公告「資源回收再利用法」，在源頭減量及物質循環再利用的原則下，減少廢棄物的產生、將資源充分有效的利用。並於91年9月發布「廢容器回收貯存清除處理方法」，說明各項容器之回收及處理辦法。96年2月修正頒布「廢容器回收貯存清除處理方法及設施標準」，97年1月實施「容器回收清除處理費率」，101年1月公告了最新的容器回收清除處理費率。容器回收政策執行至今已近二十年，雖然已頗具成效，但至今尚不太了解其減碳及環境永續效益，故本研究將建立系統性的方法評估之。

2.2 容器回收的減碳效益評估

減碳一詞之概念是從碳足跡而來，而碳足跡之定義為產品、服務或某事件在生命週期中，因人為活動而在全球釋放或累積的所有溫室氣體排放量（經濟部能源局，101年），一般我們又將所排出來之溫室氣體換算為相當於多少二氧化碳排放量。不同溫室氣體是依據其 Global Warming Potential (GWP)值來換算成二氧化碳當量有關容器回收減碳效益評估的相關研究並不算太多，以下介紹所收集到的相關文獻。

Eerhaet *et al.* (2012)曾比較PET及可取代PET的生物性PEF的能源及溫室氣體排放，其依據PlasticsEurope(2012)所公佈PET的Ecoprofile，然後依據所列入的原料及程序的溫室氣體排放量估算製造一噸PET所排放的溫室氣體，且考量不同的操作情況。在六個情況下的製作每噸PET的溫室氣體排放量約是在 2.05 至 2.38 ton eCO₂間。Shen *et al.* (2011)則曾研究PET回收再製空瓶及纖維的節能及減碳效益，且以多次回收(multiple-recycling trips)、用於製造纖維的不同比例、不同基準參考系統(reference system)及考量生物性PET等四種情境進行分析。其採用 350kg的PET瓶及 650kg的纖維作為單位(functional unit)進行LCA分析，但不考量使用階段，一般(baseline)回收情況約可減少 20%；多次回收最大約可減少 26%，但第三次再回收之後所增加的減量即不大，可忽略；製成纖維約最大可減少 25%；而生物性PET回收至少可減少 36%。可看出估算容器回收的減碳效益需要考量所投入的能源原料及回收程序，不同回收途徑與情況亦會影響所估算的減碳量。本研究利用環保署(環保署，101年)所公布之原料、能源的二氧化碳排放係數及各容器回收路徑(PlasticsEurope, 2011)等的進行估算。

Mourad *et al.* (2008)針對裝牛奶的防菌盒子(aseptic carton)分析只回收盒子及完全回收(含防菌薄片)二個不同回收情境下及五個不同回收率下的溫室氣體排放量之差異，其以LCA法及 1000 公升為單位(functional unit)進

行分析，結果顯示在回收率 22% 及 70% 下可達約 14% 及 48% 減碳量。Narita *et al.* (2002) 分析製造 PE、PP 及 PVC 三種塑膠的溫室氣體排放量，雖採用生命週期評估，但主要只考量搖籃至出廠(cradle to gate)階段，依據日本的資料，每公近分別約排放 1.3、1.4 及 1.7 kg eCO₂，其提到即使是同一種產品，其所製造之工廠不同因所使用之能源方式不同也會有不同之碳排放量。在估算減碳量時須要考量生命週期，且經常採用 LCA 方法分析，LCA 將於下一節作更詳細的回顧，唯須注意的是不同生命週期流程、不同情境及不同回收率均會影響所估算的減碳量。

2.3 容器回收的生命週期與環境永續效益評估

評估容器回收的環境永續效益，有必要針對整個生命週期進行評估，生命週期評估(Life cycle assessment, LCA)法屬於系統分析方法之一，係指產品系統自原物料的取得到最終處置的生命週期中，投入和產出及潛在環境效益之彙整與評估。環保署(100 年)指出 LCA 之研究步驟包括：定義目標和範圍，再來為將指定產品系統投入和產出，加以彙整與量化，然後為了解及評估產品系統潛在環境衝擊與顯著，最後為將盤查分析或衝擊評估的觀察結果與界定之目的和範疇整合為一致的階段。在進行 LCA 資料分析時，首先應定義生命週期範疇，Narita *et al.* (2002) 指出生命週期範疇影響了我們所要收集之資料及分析結果，之後再來進行系統分析與比較。例如 Nakano *et al.* (2007) 曾以 LCA 法針對日本家用電器回收評估其對溫室效應的影響。Razza *et al.* (2009) 分析可掩埋生物分解免洗餐具的環境效益。

針對容器回收國內目前尚未找 LCA 相關研究，但國外已有一些相關研究，以下摘要說明這些國外研究。Zabaniotou *et al.* (2003) 曾應用 EcoIndicator 95 評估以回收紙及 Polystyrene 製造的蛋盒進行 LCA，評估比較不同蛋盒之質量、能耗及對環境之衝擊。Vellini and Savioli (2009) 則應用 Boustead Model 進行玻璃容器之生命週期分析，比較不同生產情境及回

收路徑下的差異。Madival *et al.* (2009)以 LCA 法分析比較以 PLA、PET、PS 等不同材質包裝草莓的環境衝擊。Michaelangelo *et al.* (2010)則以 LCA 及綠色化學與綠色工程 12 個原則比較不同聚合物的環境衝擊，雖然此研究不是直接針對容器分析，但所分析的材質經常用以製造容器，故亦頗值得本研究參考。

不同的計算方式或回收路徑亦會顯著影響評估所得結果，例如 Shen *et al.* (2011)曾研究 PET 回收系統對環境之衝擊，其以四種回收再利用路徑進行分析，依序為將 PET 只作一次回收、多次回收、回收後製成 PET 顆粒用於製造容器或纖維及 bio-based PET 且回收一次等，不同回收途徑所產生之碳排放量不同，亦因而具有不同的減碳效益。Perugini *et al.* (2005)分析比較塑膠容器二種回收方式的差異。Song *et al.* (1999)依據六種不同之 PET 容器之回收路徑，分析其間對環境衝擊的差異。Ruth and Dell'Anno (1997)中亦使用美國工廠提供之玻璃製程及再利用資料進行評估。Nakatani *et al.* (2010)在其針對日本 PVC 物質流分析中亦指出十種不同之回收場景對環境的衝擊亦不同。由上述文獻中可看出不同回收路徑會顯著影響分析結果，故本研究亦針對各容器較常見的回收路徑進行分析。此外，Almeida *et al.* (2010)在其以 Emergy 評估巴西飲料不同包裝的研究中指出一開始之設計原則會顯著影響產品之生命週對環境的影響，唯一開始的設計雖甚為重要，但主要是針對個別容器分析，不太適用於本研究，因而未採用其方法。

至於 LCA 的分析方法，有 Ecoindicator 95、Eco indicator 99、IMPACT 2002+等方法，Ecoindicator 95 為是較早期提出的 LCA 方法，Zabaniotou *et al.* (2003)即曾使用 EcoIndicator 95 進行質量與能量對環境之效益評估，顯示出生命週期評估之重要。而 IMPACT 2002+為較新之 LCA 方法，IMPACT 2002+(Jolliet *et al.* ,2003)中說明其主要分為四個指標，包括 Human Health、Ecosystem Quality、Climate Change and Resources 等，在這四個指標下細分成十四個類別，顯示出其有較全盤之考量，固在本研

究中將使用 IMPCAT 2002+ 來進行 LCA 之分析。

SimaPro於 1990 年初發展至今已被廣泛使用多年，其為分析產品生命週期評估之資料庫 (Simapro, 2010)，由 Dutch Input Output Database95、Data Archive、BUWAL250、ETH-ESU 96 Unit process、IDEMAT2001 等 8 個資料庫聯合組成，例如Madival et al. (2009) 中使用SimaPro分析PLA、PET及PS等塑膠容器之生命週期評估；王 (94 年) 及楊 (94 年) 研究中皆使用SimaPro 5.1 並分別評估鋼鐵廠製品及HDPE塑膠製品；Zabaniotou and Kassidi (2003) 研究中使用SimaPro 4.0 來研究分析裝蛋容器。而 SimaPro畫面依照生命週期理論編排，分成盤查、衝擊評估、闡述、產品普通資料等。依照不同需要選擇不同之盤查資料，也可自行新增資料(盤查)，然後選擇適合的方法評估(衝擊評估)，對結果進行闡述及產品普通資料輸入等。且生命週期評估標準符合ISO 14040 與ISO 14044 (Goedkoop *et al.*, 2010)。該軟體包含能源與物料之投入產出、各項資料數據、包裝材料資料、油品與電力等各種產業資料及環境衝擊、碳排放等資料，且提供各種LCA評估方法，其特色為整合不同單位的資料庫，將不同來源的資料分級儲存，因此兼顧實用性與保密性，軟體資料來源清楚，選單式的指令容易學習，除了可使用其他生命週期軟體所發展之資料，也可將產品生命週期組合不同製程或產品的生命週期，對於環境衝擊評估可利用不同的特徵化、標準化及權重的方法(環保署，101 年)，故本研究中選用SimaPro作為分析工具。

第三章 研究流程與方法

本章主要說明本研究的進行流程與方法，以下首先說明研究流程架構且概要說明各主要步驟的內容，之後依回收容器研究範疇界定、減碳效益、環境永續效益評估和情境分析等一一詳細說明所建立的方法及執行流程。

3.1 研究流程

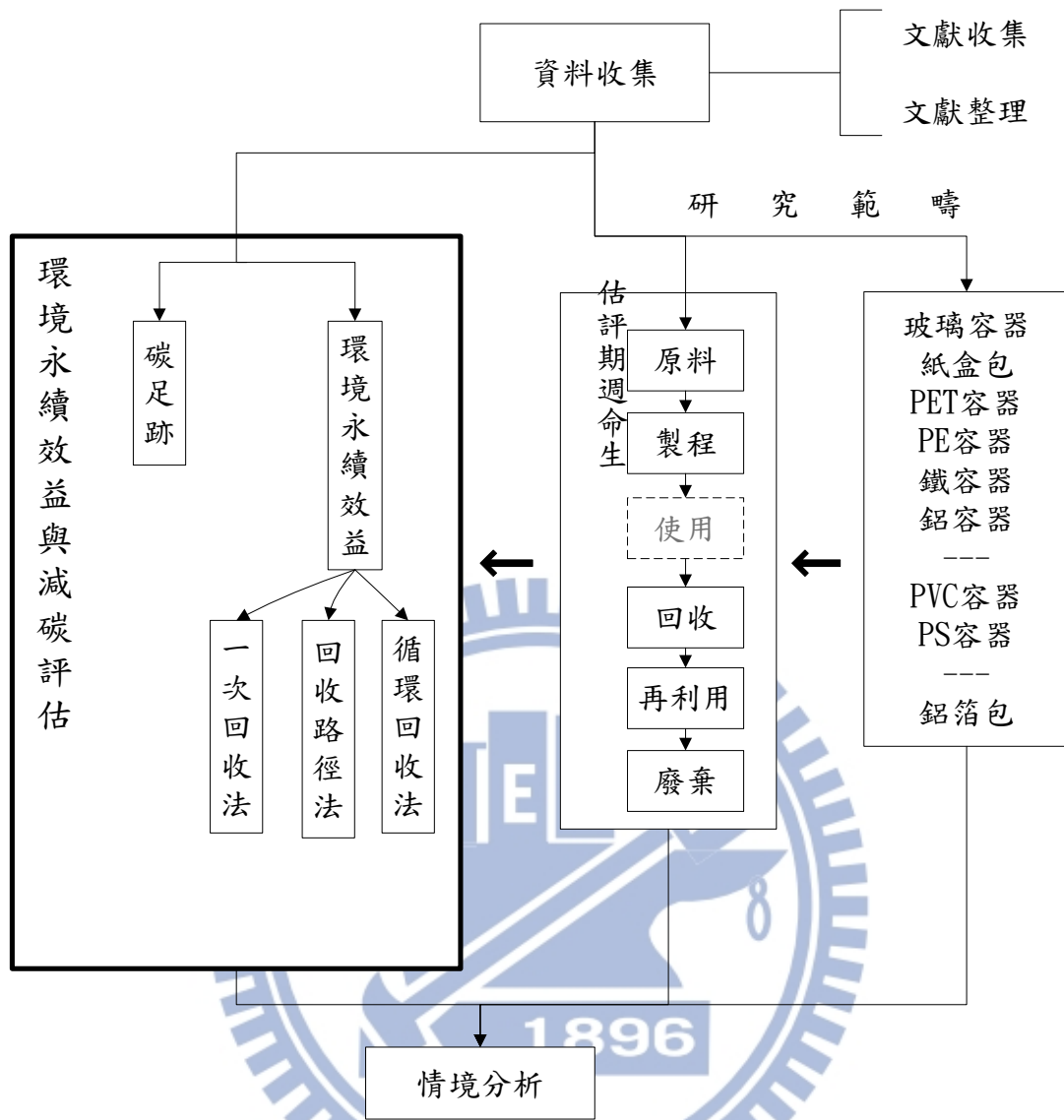
本研究之研究流程如圖 3.1 所示，主要分為資料收集、回收容器研究範疇界定、減碳效益評估、環境永續效益評估及綜合評估分析等五大步驟，茲將各研究步驟之內容分述如下：

1. 資料收集:主要收集並整理國內外各容器回收相關文獻。包括國內容器回收政策發展與現況、容器回收的生命週期(含各種回收途徑)、容器回收的減碳效益、容器回收的環境永續效益及綜合分析的相關文獻與資料。
2. 回收容器研究範疇界定：由於部分容器的資料並不是很充足，加上每種容器回收再利用的生命週期不盡相同，故本研究將依據所收集的容器回收現況及相關資料，界定所研究的容器種類，然後分析各容器的生命週期，亦包括不同的回收途徑，以作為後續步驟的依據。如圖 3.1(b) 為單一容器生命週期示意圖，為一般容器基本之生命週期圖。
3. 減碳效益評估：此步驟主要採用一次回收法（容器未回收、近況回收差異）、回收路徑法（不同回收方式差異）及循環回收法（回收方式不同比例差異）分析各容器的減碳效益，唯除了玻璃容器之外，其他容器不適用循環回收法。亦將採用生命週期軟體 Simapro (Goedkoop *et*

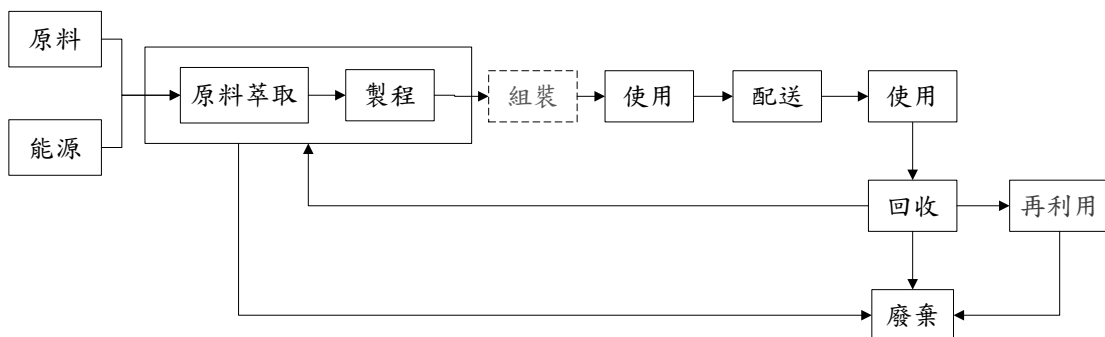
al., 2010)建立部分資料。將依據前一步驟所建立的生命週期流程界定減碳研究範疇，並分析生命週期流程各步驟的碳足跡。

4. 環境永續效益評估：與減碳效益類似，依照不同容器採用一次回收法、回收路徑法及循環回收法分析，容器回收的環境永續效益主要將評估氣候（含減碳）、臭氧、毒性、酸雨、致癌、輻射等面向，將採用一次回收法、回收途徑法及循環回收法分析，亦將採用生命週期軟體 Simapro (Goedkoop *et al.*, 2010)建立部分資料，同減碳效益，將比較未回收、回收、不同回收再利用途徑間的差異。
5. 情境分析：針對所研究的容器，且參考文獻資料及台灣現況，假想未來可能發展趨勢及參數的不確定性，並對各容器模擬所得之減碳及環境永續效益進行比較分析。





(a) 研究架構



(b) 單一容器生命週期示意圖

圖 3.1 研究流程 (a) 研究架構; (b) 單一容器生命週期示意圖

3.2 回收容器範疇界定

由於回收容器共有九種，若一一詳細分析將須要收集不少資料及花費不少時間，故本研究首先分析國內回收容器現況，然後就各容器目前所能取得資料界定本研究納入研究的容器，再據以分析納入研究容器的生命週期。

3.2.1 國內容器回收現況

臺灣實施廢容器回收已有數十年，至 100 年時廢容器回收已達 47.7 萬公噸，其中又以玻璃容器、廢塑膠容器及廢鐵容器為大宗（環保署，100 年），依圖 3.2 所示，可看出近十幾年廢容器回收量逐年上升，顯示出廢容器之回收愈來愈受到重視，其中又以 PET、PVC、PP/PE、鐵等容器為回收率最高之前四項，表 3.1 所列為 97-99 年各容器的回收量、回收率及費率。由於有一些容器的實際回收申報量大於應繳量，故可能有企業少報或是多申報回收量所致，故假設最高回收率為 99%。

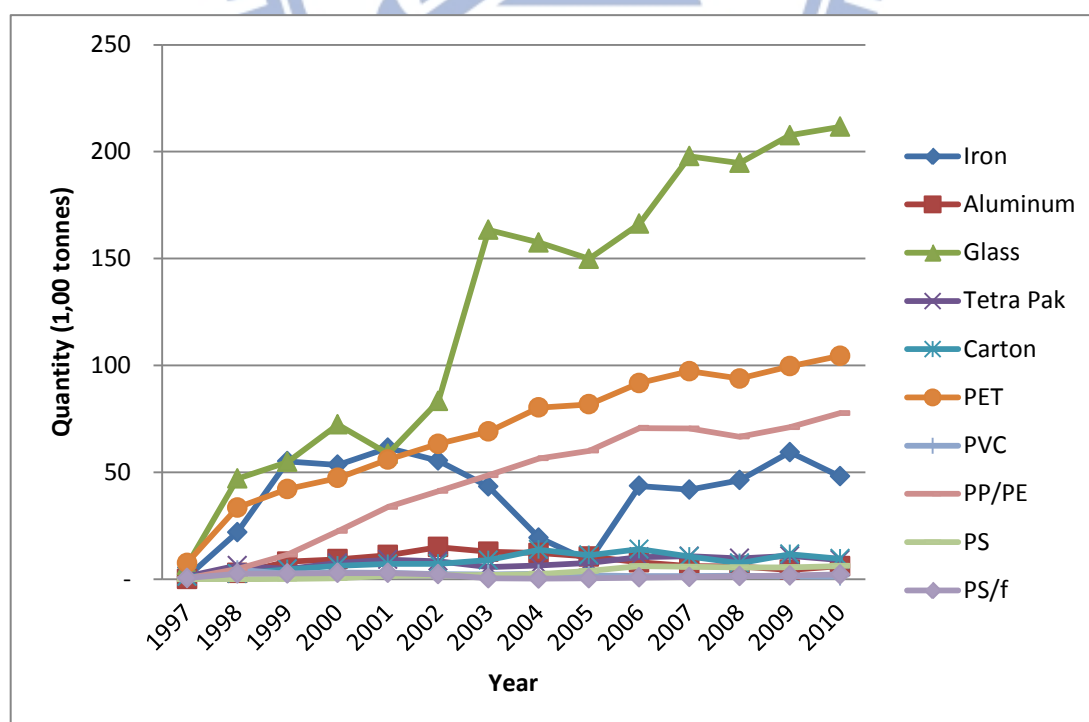


圖 3.2 1997 年至 2010 年廢容器回收

表 3.1 各容器回收情形及費率 (2008-2010)

Item	Tariff (NT\$/kg)	2010		2009		2008	
		Quantity (1,000 tonnes)	Recycle ratio (%)	Quantity (1,000 tonnes)	Recycle ratio (%)	Quantity (1,000 tonnes)	Recycle ratio (%)
Iron	1.32	48.15	70.67	59.45	93.12	46.31	65.02
Aluminum	1.23	6.12	29.62	4.40	21.56	6.07	28.64
Glass	1.55	211.61	83.98	207.7	92.55	194.69	82.46
Tetra Pak	3.93	9.09	55.35	10.97	68.25	9.80	56.51
Carton	6	9.64	36.25	11.78	35.88	7.55	26.85
PET	11.58	104.55	99	99.67	99	93.86	99
PVC	15.38	1.30	99	1.46	99	1.72	99
PP/PE	8	77.75	99	71.14	99	66.69	99
PS	7.06	6.19	89.33	56.24	87.71	5.53	81.31
PS/f	32.29	2.23	99	1.79	99	1.46	99

資料來源：環保署資源回收管理基金會

3.2.2 研究標的容器界定

在環保署公告的十種回收容器中，本研究選擇玻璃、PET、PE、紙盒、鐵及鋁等六種容器，以下說明選擇之原因。

由圖 3.2 可看出之玻璃、PET 及 PP/PE 等容器回收率逐年上升，其中玻璃容器回收量與 10 年前比大約增加了 5 倍，環保署估計回收一噸的玻璃能減少 95 公斤的二氧化碳(環保署,101 年)，故具有相當高的回收價值，且幾乎能完全再利用。PET 容器即是常見的寶特瓶，是生活中常會接觸到的容器，而 PE 為生活上應用最廣的塑膠(環保署,101 年)，其使用量也逐年增加，且 PET 與 PE 容器其相關資料較完整，故納入研究。台灣目前造紙業，約有七成的廢紙與三成原木漿作為原料，廢紙使用比例已逐年提高。而回收之廢紙有 70% 國內回收之廢紙，30% 為進口廢紙(環保署,101 年)，從 20 世紀初，鋼鐵之製程是一種消耗龐大能源及資源的行為(王, 94 年)，鋁由於較輕故回收重量雖不比鐵高，但其回收價值高，亦可完全回收再利用，因此亦將鐵及鋁容器納入。

PVC 容器，由於經過焚化爐或燃燒過程中會產生戴奧辛，許多北歐語及德語系國家已停止產含 PVC 之產品(孔, 98 年)，加上其會添加塑化劑及安定劑，故已愈來愈少用來製作容器，由表 3.1 可看出 PVC 回收量為所有容器最少，顯示出台灣已逐漸改用其他材質為填充容器裝填產品。而 PS 容器在燃燒時會釋放苯乙烯，其在高濃度下會導致呼吸道、黏膜及皮膚之刺激(楊, 97 年)，在圖 3.2 中我們也可看出近十年之 PS 回收量也不高，故亦不納入研究中。而鋁箔包雖然回收價值比廢紙容器高，但目前所收集的資料不足評估，加上量比起其他容器少，故未納入。

本研究將依各容器的生命週期評估其減碳及環境永續效益，唯生命週期中的使用階段甚不易收集到資料，且因人而異，所以不列入研究範圍內，

本研究將收集相關資料，並採用 SimaPro 7 (Madival *et al.*, 2009) 進行各容器的 LCA 分析，其提供 IMPACT 2002、Eco-indicator 99、CML (Center of Environmental Science, University of Leiden, the Netherlands)、Ecological Scarcity、EDIP、EPD、EPS、ReCiPe Endpoint 及 ReCiPe Midpoint 等評估模式，IMPACT 2002+則係由四個方法所組成 (IMPACT 2002、Eco-indicator 99、CML、IPCC)，其提供較完整的環境面向分析，故選擇 IMPACT 2002+ 進行減碳及環境永續效益評估。本研究之功能單位(functional unit)設為 1 公斤，作為後續減碳及環境永續效益之基礎單位。另外在綜合分析中，由於不同材質的質量本就不同，之後章節以單一容器分析時以 1kg 為功能單位計算，並沒有什麼問題，但在作跨容器比較時，則不太適當，故本研究另外以體積作為比較基準，因每個容器所盛裝之體積都不同，因此收集了每個容器的代表性容器之體積並秤其重量，並換算每一公升的重量，如表 3.2 所示，看出相同體積中玻璃重量最重。

表 3.2 各容器代表性容器盛裝體積與重量及單位體積(公升)的重量

Container	ml	kg	kg/l
Glass	250	0.17	0.68
PET	500	0.02	0.04
PE/PP	440	0.03	0.07
Carton	400	0.01	0.03
Iron	330	0.06	0.17
Aluminum	240	0.12	0.50

3.2.3 玻璃容器生命週期與研究內容

玻璃容器典型的生命週期如圖 3.3 所示 (Ruth and Anno, 1997; Trifonova and Ishun'kina, 2007; Vellini and Savioli, 2009; 楊, 93 年; 環保署, 101 年), 主要包括:

1. 原料(Raw materials): 生產玻璃容器需要一些原料, 原料經萃取 (Extraction)過程後送至生產工廠, 生產一噸玻璃容器所需之原料約矽砂(Sand) 0.65 噸、蘇打灰(Soda ash) 0.22 噸、石灰石(Limestone) 0.19 噸及長石(Felspar) 0.11 噸 (Ruth and Anno, 1997; 楊, 93 年)。
2. 配料混合(Batch): 原料(含回收品)經過一些準備工作及配料 (proportioning)後經由輸送帶送至轉盤或大鍋中攪拌, 均勻後才倒入鎔爐內熔化。
3. 生產(Production, Finished glass container): 包含熔鑄與純化, 其階段分成三步驟(Wooley, 1992), 第一步將原料均勻熔化成液態, 第二步驟為將泡泡從液體表面移除, 最後將玻璃容器均質化。然後進行成型及成品步驟, 即可配銷。
4. 配銷及消費(Consumer products): 容器產品, 將其配給所需要之廠商及用戶, 包括容器之使用。
5. 空瓶再利用(Empty bottle reuse) [R_u]: 空瓶再利用是最具環保效益, 最節省成本與資源的回收再利用方式。 $r_u\%$ 為空瓶再利用所佔的百分比。
6. 回收(Collection, Material recovery facility): 將使用過的容器經由回收清運系統回收。
7. 再製(Closed-loop recycle) [R_c]: 廢玻璃容器回收再製成容器使用, 又可稱為閉環回收(Vezzoli and Manzini, 2008)。 $r_c\%$ 為此部分的百分比。
8. 製成建材(Open-loop recycle, Construction materials)[R_o]: 除了再製成容器以外, 亦可作其他用途, 其中較常見的為製成磁磚或鋪路材料(楊,

93年)，因為再製成非容器之產品，故又稱開環回收（Vezzoli and Manzini, 2008）。 $r_o\%$ 為此部分的百分比。

9. 廢棄掩埋(Landfill) [L]：包括生產廠商的廢料隨一般事業廢棄物廢棄、一般垃圾及回收分選的廢料。理論上，由於法規的規定，空瓶不應隨一般垃圾廢棄，但實務上仍是會有一部分隨一般垃圾廢棄，廢棄品由於是不可燃，一般是進入掩埋場，但亦可能會有一部分不小心進入焚化，但比例不多，故在本研究中將忽略玻璃焚化部分。 $w\%$ 為廢容器進入掩埋場之比例。

依據回收再利用路徑(pathways)，本研究分為以下五種路徑組合作進一步分析：

- (1) [L]：使用的玻璃容器未回收，廢棄掩埋。此路徑將作為計算其他路徑的減碳與環境永續效益之依據。
- (2) $[R_c+L]$ ：包括廢玻璃再製造成玻璃容器及廢棄掩埋二部分。
- (3) $[R_c+R_u+L]$ ：包含再製成玻璃容器、空瓶再利用及廢棄掩埋。
- (4) $[R_c+R_o+L]$ ：包含再製成玻璃容器、將廢玻璃製成建材及廢棄掩埋。其中再製成建材，將與所取代的建材比較，以作為估算減碳與環境永續效益之依據。
- (5) $[R_c+R_u+R_o+L]$ ：包含三種回收再利用方式及廢棄掩埋。

不同回收再利用路徑的效益不同，本研究將依所取得的資料及所探討的情境推估各路徑下的減碳與環境永續效益。

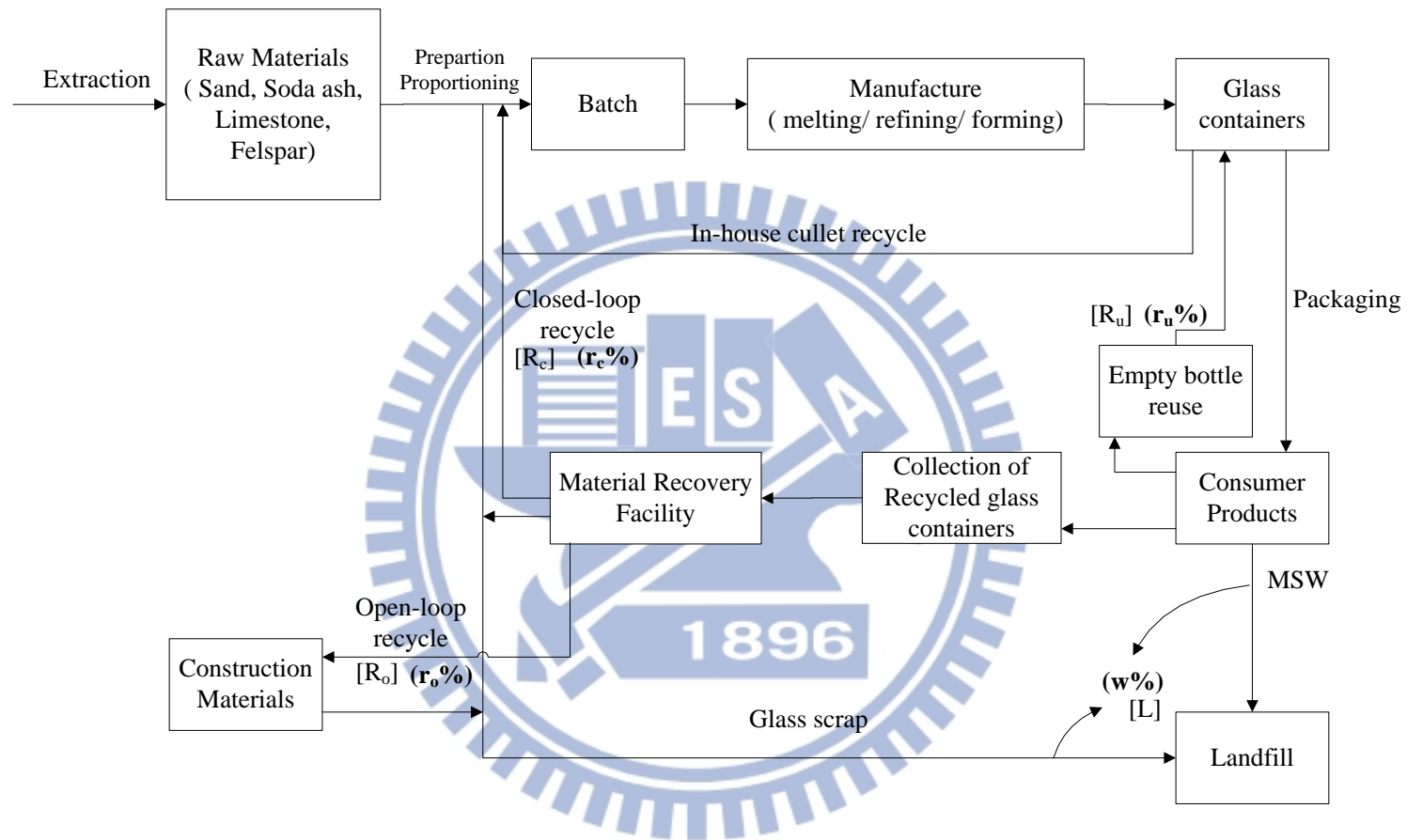


圖 3.3 玻璃容器生命週期

3.2.4 PET 容器生命週期與研究內容

PET 容器典型的生命週期如圖 3.4 所示(Song and Hyun, 1999; Madival *et al.*, 2009 ; Almeida *et al.*, 2010 ; Nakatani *et al.*, 2010 ; Shen *et al.*, 2011 ; 高等, 91 年), 主要包括:

1. PET 單體(monomer/ resin): 生產 PET 是先合成 PET 單體, 其是由對苯二甲酸二甲酯 (DMT) 和乙二醇 (EG) 為原料進行轉酯化反應或是由對苯二甲酸 (TPA) 和乙二醇為原料直接進行酯化反應 (高等, 91 年)。
2. PET 容器: 將 PET 單體擠壓成片狀, 再將片狀物體進行熱成型 (thermoforming), 塑成所要之容器形狀 (Madival *et al.*, 2009)。
3. 配銷及消費(Consumer products): 容器產品, 將其配給所需要之廠商及用戶, 包括容器之使用。
4. 回收(Collection, Material recovery facility): 使用後經由回收系統收集。
5. 溶解回收(Depolymerization, Solvolysis) (Closed-loop recycle) [R_c]: PET 是一種熱塑性及縮合型的聚酯, 因此可採化學和物理兩種方式回收再利用 PET (高等, 91 年)。廢 PET 容器回收後進行 Depolymerization 或 Solvolysis 將 PET 之聚合物分解成初級原料、單體及寡聚物, 如 TPA 和 EG, 可直接再用於製造 PET, 故可視為閉環回收, 以往雖可將回收物熱解再製成 PET 容器, 但由於品質不穩定且微生物可能依然存在, 影響食品安全 (高等, 91 年), 且根據中華民國食品器具包裝衛生標準第二條規定「塑膠製食品容器及包裝不得回收使用」, 故廢 PET 再生料在國內不可用於製造國內食品容器或填加於食品容器中。故本研究將其化成虛線, 不予討論。
6. 熱解回收(Bottle Washing + Flake Processing)(Open-loop recycle)[R_o]: 回收物品除了再製成容器以外, 亦可作其他用途, 可將回收之 PET 經清

洗破碎(包括脫標、去蓋、破碎、清洗、裝袋)成碎片(Flake)之後再經一些程序製成聚酯粒(Chip)，然後可再製成長纖維(Filament)、短纖維(Staple) (Nakatani et al., 2010)，作為製造其他產品(如地毯、枕頭、睡袋、毛衣等)之原料，為開環回收。 $r_{oc}\%$ 為此部分的百分比。

7. 廢棄掩埋及焚燒(Landfill and Incineration) [L]：包括生產廠商的廢料隨一般事業廢棄物廢棄、一般垃圾及回收分選的廢料。大部分是進焚化爐燒及一部分進入掩埋場，焚化可將其所產生之熱能進行回收當成能源一部分。 $w\%$ 為廢容器進行掩埋及焚燒之比例。

依據回收再利用路徑(pathways)，本研究分為以下兩種路徑組合作進一步分析：

- (1) [L]：使用的PET容器未回收，廢棄掩埋或焚燒。此路徑將作為計算其他路徑的減碳與環境永續效益之依據。
- (2) [$R_{oc}+L$]：包括廢PET再製造成短纖維及廢棄掩埋焚燒二部分。

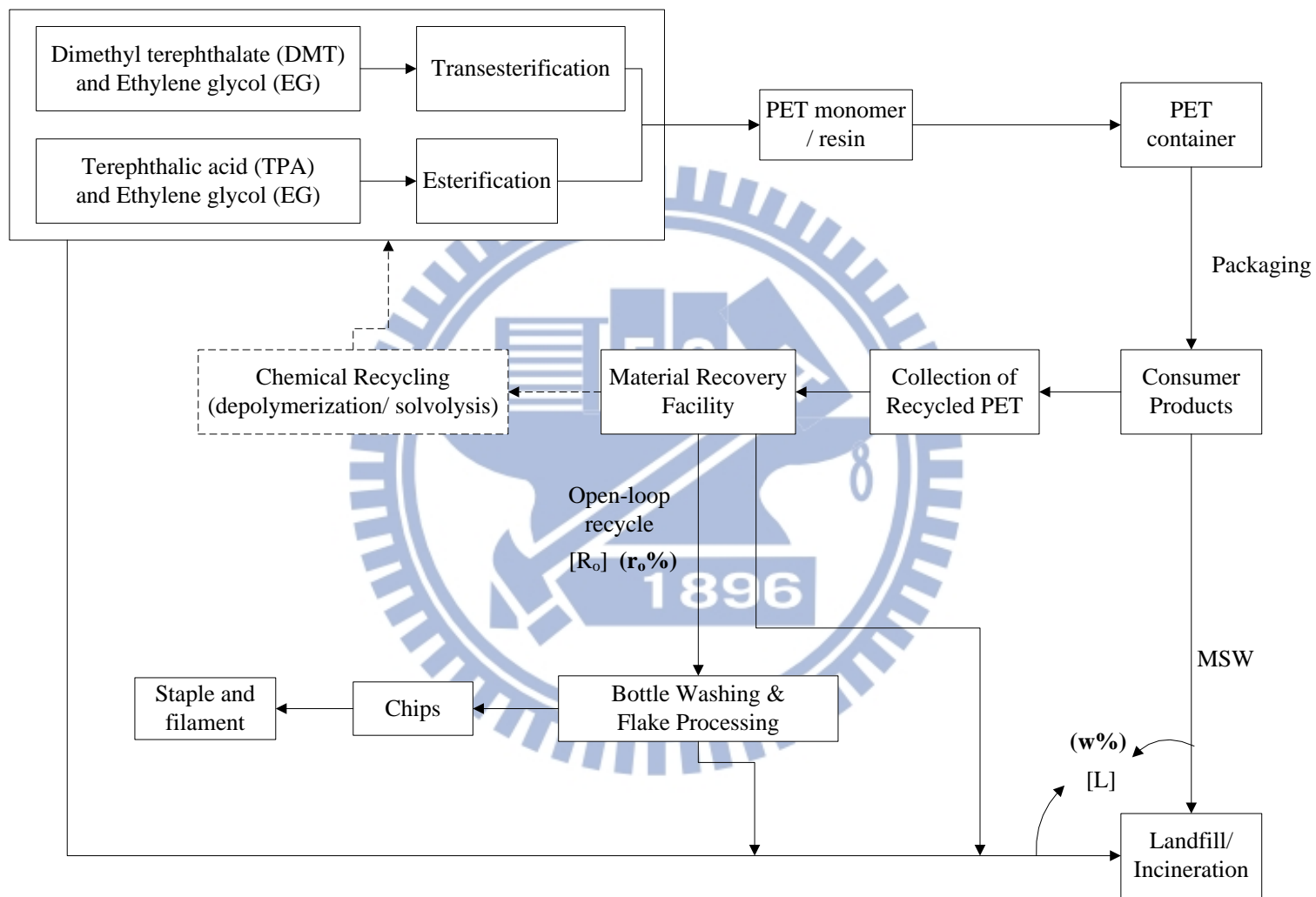


圖 3.4 PET 容器生命週期

3.2.5 PE/PP 容器生命週期與研究內容

PE/PP 容器典型的生命週期如圖 3.5 所示(Norita *et al.*, 2002;環保署, 101 年;宏恩塑膠, 102 年;華民碩, 102 年), 主要包括:

1. Polyethylene: 利用 Naphtha 加上能量如石油、電力和蒸氣等提煉出 PE 原料 (Norita *et al.*, 2002)。
2. PE/PP 容器: 利用吹塑、注塑等方法 (華民碩, 102 年), 經過押出機抽出來的軟化熱塑性塑膠管狀物插入金屬模之中, 再把空氣送入管中, 空氣的壓力使材料膨脹成金屬模具的形狀, 硬化之後就是所要之容器。PP 與 PE 可說是二兄弟, 但若干物理性能及機械性能 PP 比 PE 好, 因此製瓶商常以 PE 製造瓶身, 瓶蓋和把手用有較大硬度與強度的 PP 來製造。
3. 配銷及消費(Consumer products): 容器產品, 將其配給所需要之廠商及用戶, 包括容器之使用。
4. 回收(Collection, Material recovery facility): 使用後經由回收系統收集。
5. 開環回收[Ro]: 回收之後的 PE 容器再生碎片以抽粒為主, 做為原料使用 (環保署, 101 年), 其主要步驟有: 分類 (人工測驗及硬度)、清洗 (清洗機清洗)、混合 (依照商品需求)、壓出 (加熱、溶解與冷卻)、切割 (切割機) (宏恩塑膠, 102 年; 華民碩, 102 年)。
6. 廢棄掩埋及焚燒(Landfill and Incineration) [L]: 包括生產廠商的廢料隨一般事業廢棄物廢棄、一般垃圾及回收分選的廢料。大部分是進焚化爐燒及一部分進入掩埋場, 焚化可將其所產生之熱能進行回收當成能源一部分。w% 為廢容器進行掩埋及焚燒之比例。

依據回收再利用路徑(pathways), 本研究分為以下兩種路徑組合作進一步分析:

- (1) [L]：使用的 PE/PP 容器未回收，廢棄掩埋焚燒。此路徑將作為計算其他路徑的減碳與環境永續效益之依據。
- (2) [Ro+L]：PE/PP 容器製成抽粒及廢棄掩埋焚燒。



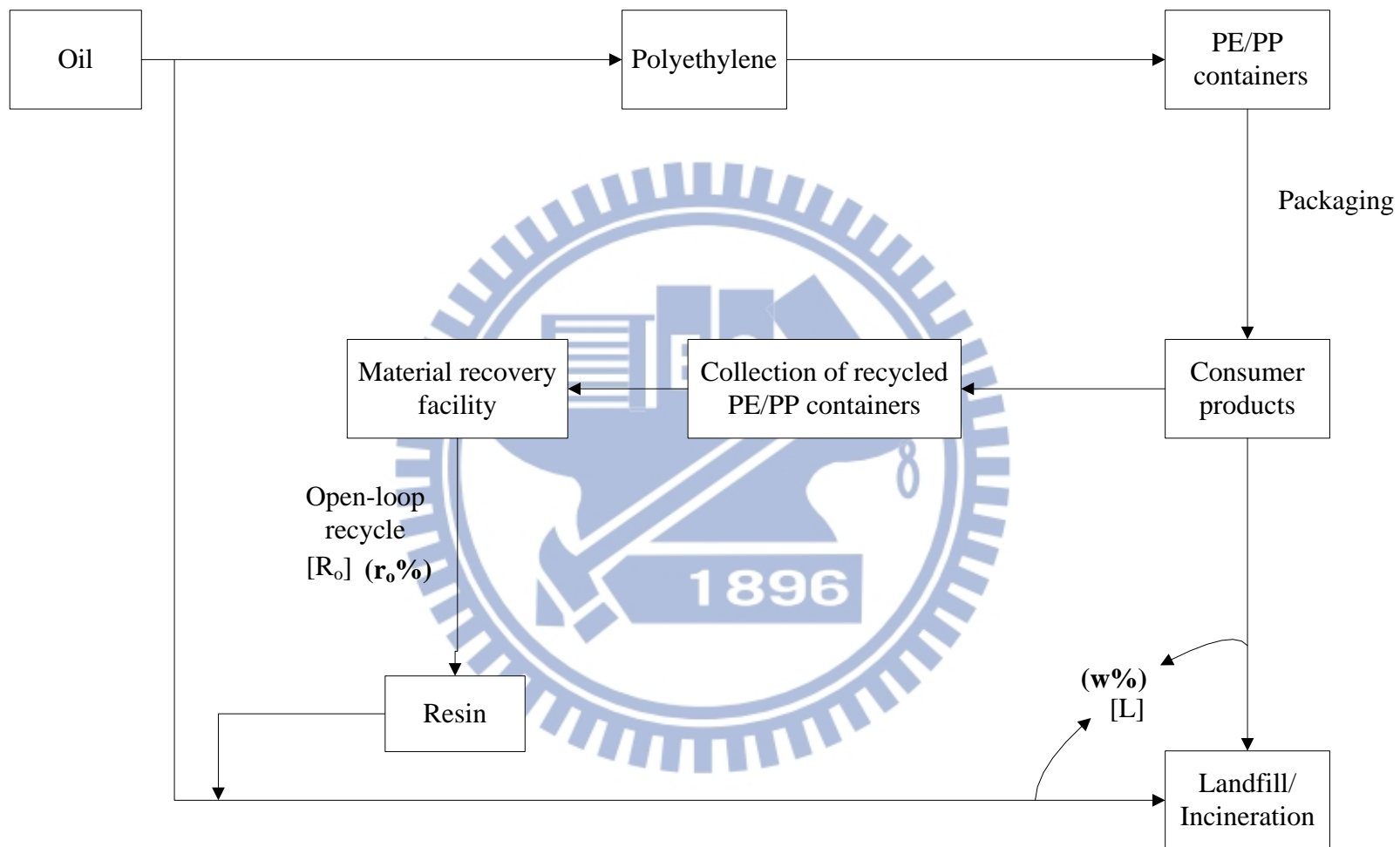


圖 3.5 PE/PP 容器生命週期

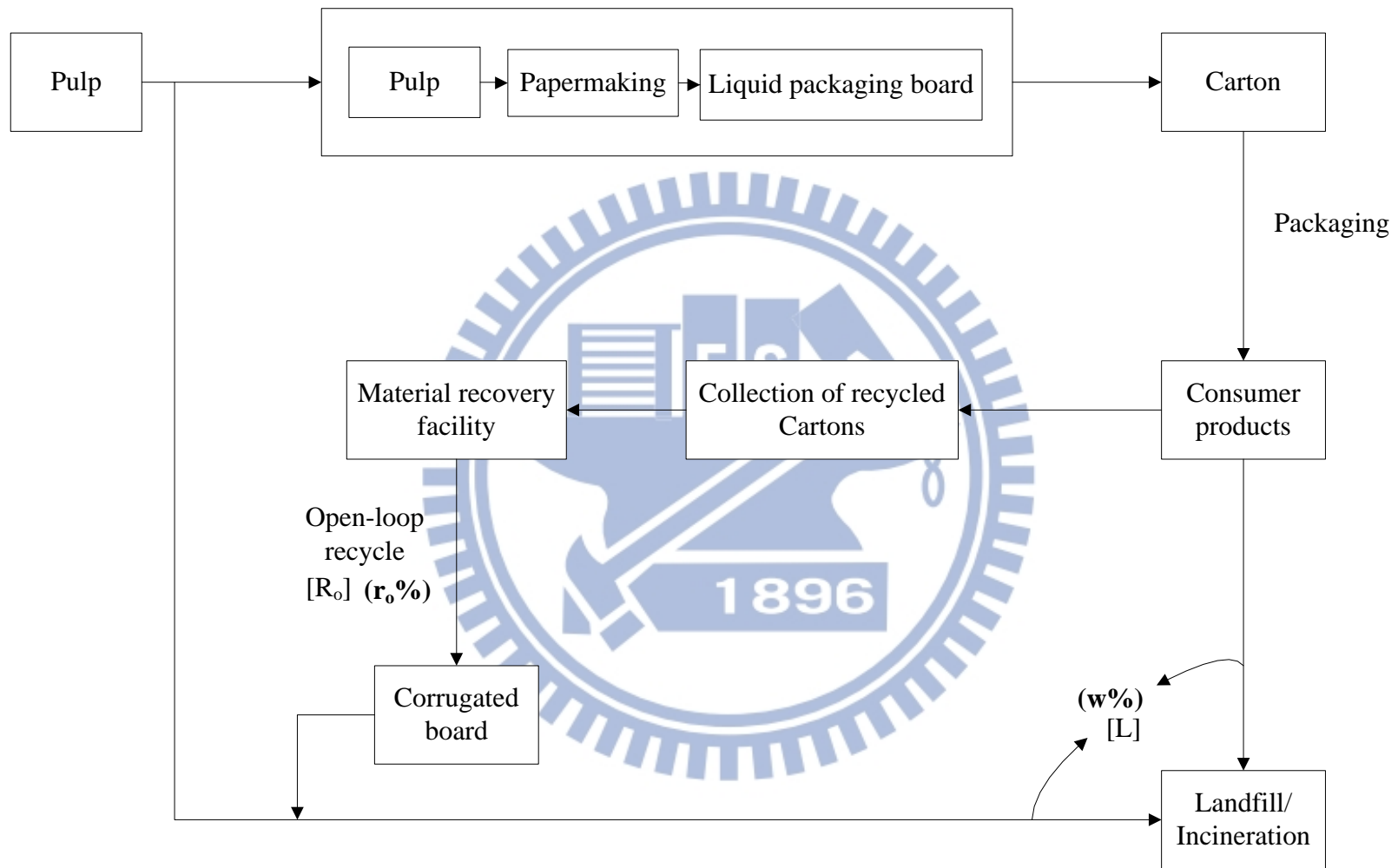
3.2.6 紙容器生命週期與研究內容

紙容器典型的生命週期如圖 3.6 所示 (Zabaniotou and Kassidi, 2003 ; 環保署, 101 年 ; 榮成紙業, 102 年 ; 中興紙業, 102 年), 主要包括:

1. Wood : 原料木頭開採。
2. 製造紙板(liquid packaging board) : 紙容器的種類頗多, 但 Simapro 可提供的資料並不多, 最後選擇製作裝液體的容器為代表, 使用化學製漿法, 將木材中大部分木質素溶除, 使纖維各自分離成紙漿。
3. 紙容器 : 將前述紙板製成紙容器 (Simapro, 2010 ; 榮成紙業, 102 年)。
4. 配銷及消費(Consumer products) : 容器產品, 將其配給所需要之廠商及用戶, 包括容器之使用。
5. 回收(Collection, Material recovery facility) : 使用後經由回收系統收集。
6. 開環回收[Ro] : 回收廢紙交給古物商或資源回收車後, 會被送到大盤的廢紙商處分類打包, 然後送到紙廠經過打漿、脫墨、抄紙、乾燥後, 做成再生紙 (環保署, 101 年) 以及紙箱紙板等(Simapro, 2010), 本研究採用皺折波浪狀板作為評估開環回收的代表性專案。 $r_o\%$ 為此部分的百分比。
7. 廢棄掩埋/焚化(Landfill/Incineration) [L] : 包括生產廠商的廢料隨一般事業廢棄物廢棄、一般垃圾及回收分選的廢料。 $w\%$ 為廢紙容器進行掩埋/焚化之比例。

依據回收再利用路徑(pathways), 本研究分為以下兩種路徑組合作進一步分析:

- (1) [L] : 使用的紙容器未回收, 廢棄掩埋/焚化。此路徑將作為計算其他路徑的減碳與環境永續效益之依據。
- (2) [Ro+L] : 回收紙容器再製成皺折波浪狀板及廢棄掩埋/焚化。



(3) 圖 3.6 紙容器生命週期

3.2.7 鐵/鋁容器生命週期與研究內容

鐵/鋁生命週期將在下列各別介紹。鐵容器典型的生命週期如圖 3.7 所示 (周, 90 年; 王, 94 年; 環保署, 101 年), 主要包括:

1. 鋼胚製備 (Billet): 其過程包括煉鐵、煉鋼及連鑄等過程。
2. 鐵容器: 主要為三片鍍錫鐵片製成, 俗稱馬口鐵 (環保署, 101 年)。
3. 配銷及消費 (Consumer products): 容器產品, 將其配給所需要之廠商及用戶, 包括容器之使用。
4. 回收 (Collection, Material recovery facility): 使用後經由回收系統收集。
5. 製成鋼片 (Open-loop recycle) [Ro]: 回收鐵容器會被壓縮成塊, 送至煉鋼廠 (環保署, 101 年), 廢鐵容器回收與其他高級廢鐵混合, 再添加石灰石、白雲石、膠碳及其他合金物等, 經電爐溶化後再製成鋼胚 (Billet), 其鋼胚可用來再加工鍛造成其他非容器之鋼鐵製品 (周, 90 年)。r₀% 為此部分的百分比。
6. 廢棄掩埋 (Landfill) [L]: 包括生產廠商的廢料隨一般事業廢棄物廢棄、一般垃圾及回收分選的廢料。w% 為廢鐵容器進行掩埋之比例。

依據回收再利用路徑 (pathways), 本研究分為以下兩種路徑組合作進一步分析:

- (1) [L]: 使用的鐵容器未回收, 廢棄掩埋。此路徑將作為計算其他路徑的減碳與環境永續效益之依據。
- (2) [R₀+L]: 由鐵容器回收製成鋼坯及廢棄掩埋。

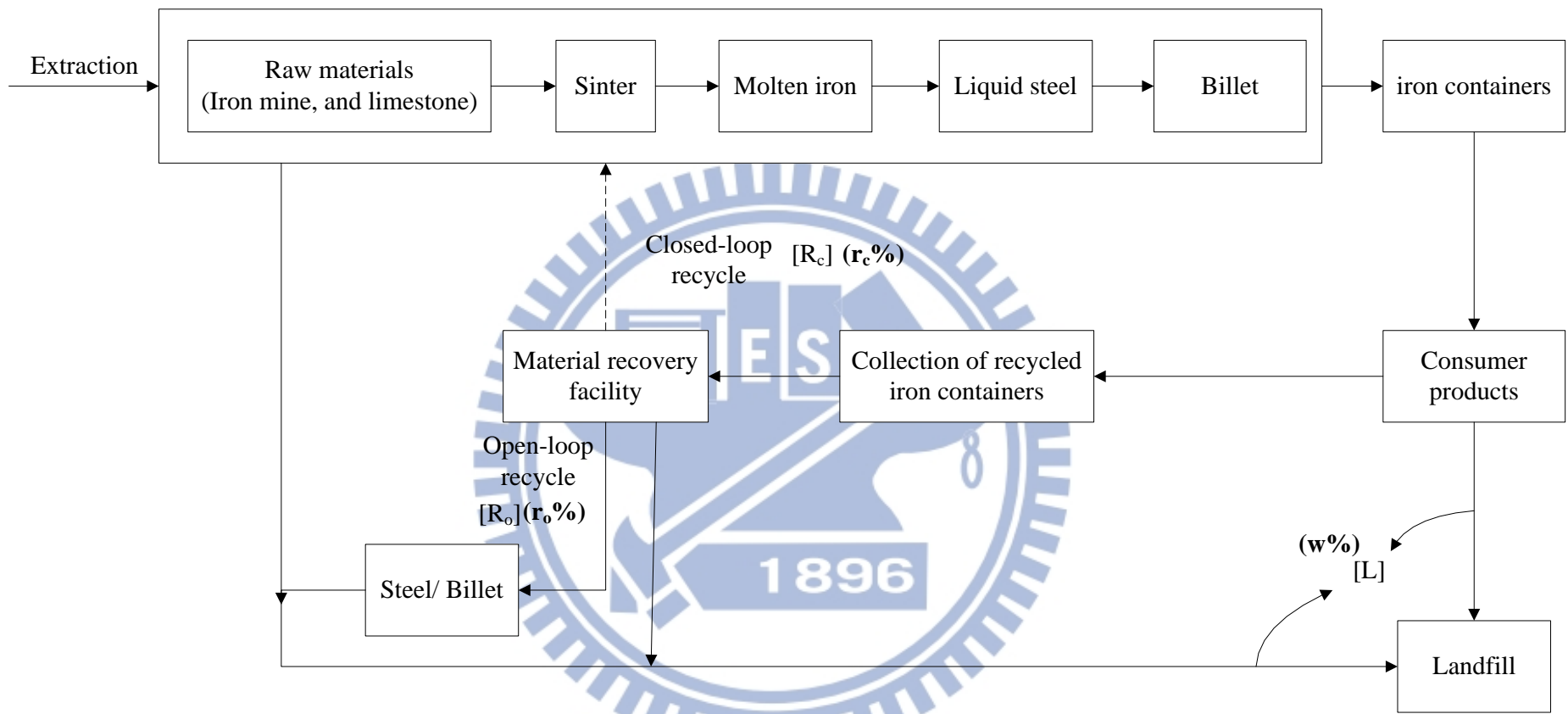


圖 3.7 鐵容器生命週期

鋁容器典型的生命週期如圖 3.8 所示 (Gatti *et al.*, 2008 ; 周, 90 年 ; 環保署, 101 年), 主要包括:

1. 鋁片製備 (sheet): 過程與鐵罐類似 (環保署, 101 年)。
2. 鋁容器: 鋁片延展性佳, 罐身係一體成型無接縫, 以兩片式包裝 (環保署, 101 年)。
3. 配銷及消費(Consumer products): 容器產品, 將其配給所需要之廠商及用戶, 包括容器之使用。
4. 回收(Collection, Material recovery facility): 使用後經由回收系統收集。
5. 製成鋁片(Open-loop recycle) [Ro]: 回收鋁容器會被壓縮成塊, 送至熔鋁廠 (Gatti *et al.*, 2008 ; 環保署, 101 年)。r_o% 為此部分的百分比。
6. 廢棄掩埋 (Landfill) [L]: 包括生產廠商的廢料隨一般事業廢棄物廢棄、一般垃圾及回收分選的廢料。w% 為廢鋁容器進行掩埋之比例。

依據回收再利用路徑(pathways), 本研究分為以下兩種路徑組合作進一步分析:

- (1) [L]: 使用的鋁容器未回收, 廢棄掩埋。此路徑將作為計算其他路徑的減碳與環境永續效益之依據。
- (2) [R_o+L]: 鋁容器製成鋁錠及廢棄掩埋。

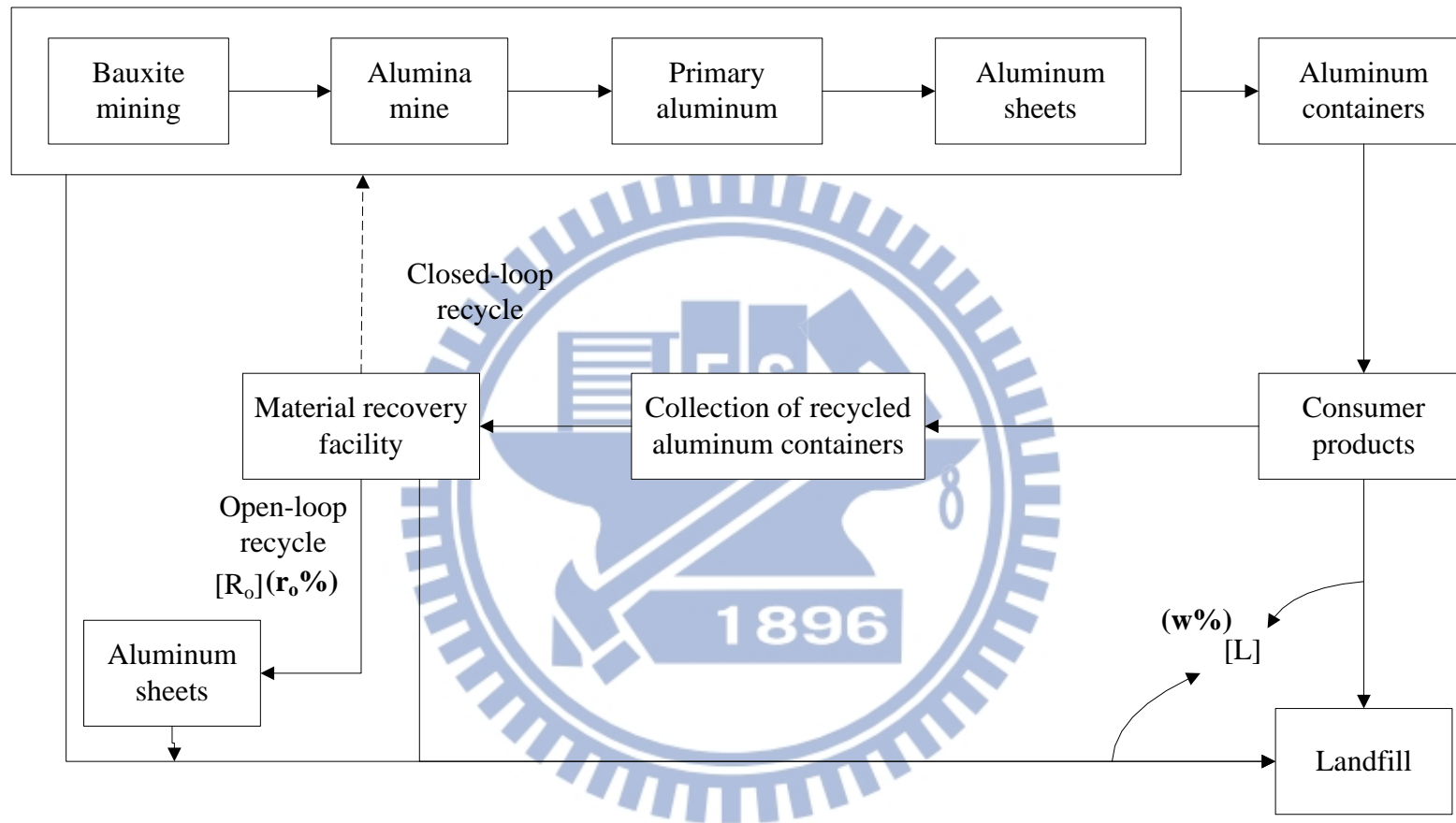


圖 3.8 鋁容器生命週期

3.3 減碳效益評估

主要分析容器不同之回收途徑與未回收下所排放之溫室氣體總量差異，且轉換成Global warming potential (GWP, eCO₂) 二氧化碳當量來表示，亦將參考環保署及電力公司等所公告之碳排放係數估算排放量。

3.3.1 減碳效益評估範疇界定

由 3.2 節可知各容器的生命週期不盡相同，但大致如圖 3.1(b)所示，可分為容器製造、運送、使用、回收、再利用及廢棄等階段。本研究主要針對製造、回收、再利用及廢棄等階段進行分析，其中運送因不同容器從不同工廠製造，其所運送之距離會不同，故暫不納入；使用部分由於因人而異，且相關資料甚不足，故不納入研究中。雖然不同容器的性質不同，但為了便於比較分析，故本研究中將功能單位(functional unit)統一設為 1 公斤。

3.3.2 各容器回收之減碳效益評估

本研究將依容器於生命週期中各階段的活動數據及相關的排放係數估算碳排放量。主要採用 Impact 2002+(Jolliet *et al.*, 2003)法計算(請參見下一節中說明)，各容器回收碳排放量主要依以下步驟估算：

1. 決定各容器的回收再利用路徑：不同回收再利用路徑的碳排放量不同，首先收集各容器的回收再利用路徑的生命週期各階段的相關數據，再據以估算碳排放量。例如玻璃容器其回收再利用之路徑本研究主要分析其中五個，如 3.2 節之說明，分別為L、R_c+L、R_c+R_u+L、R_c+R_o+L、R_c+R_u+R_o+L等路徑進行碳足跡之計算。而PET容器其回收再利用之路徑有L、R_c+L、R_{os}+L、R_{of}+L、R_c+R_{os}+R_{of}+L等五個。

2. 收集生命週期各階段的相關數據：依據回收再利用路徑，分析其生命週期中各階段的相關數據，包括能源、量、回收比例等資料，
3. 估算碳排放量：依據 SimaPro 中之 Climate change 之資料，進行碳排放之估算。
4. 估算減碳效益：原則上將以路徑 L 為對照組，以路徑 L 的碳排放為基準，不同回收再利用路徑下與路徑 L 之碳排放量差異即為減碳效益。
5. 估算總減碳量：依據各容器的量估算其總減碳量。

3.4 環境永續效益評估

本節說明本研究評估容器回收環境永續效益所採用的方法，主要是以生命週期衝擊評估(Life cycle impact assessment, LCIA)方法分析環境永續效益，以下首先說明採用的 LCIA 方法，之後再一一說明計算效益所採用的三個方法：一次回收法、回收途徑法、循環回收法。

3.4.1 LCIA 方法-Impact 2002+

環境永續效益的評估方式類似前一節的減碳效益，亦將依據生命週期分析的結果評估之，首先將採用 SimaPro (Goedkoop *et al.*, 2006) 進行 LCI 分析，將參考 Simapro 所提供的資料及相關文獻內容，建立國內各容器的 LCI 分析所須的相關數據。

完成 LCI 之後即可依據其結果進行 LCIA 分析，目前已有不少方法可供使用，如 3.2.2 節所介紹，本研究採用 IMPACT 2002+(Jolliet *et al.*, 2003) 進行此部分分析，該方法涵蓋本研究所需要的評估面向，且將溫室效應獨立作危害評估，對於本研究評估減碳效益亦甚為便利，本研究因而採用它進行 LCIA 分析。

Impact 2002+方法如表 3.2 所列，主要採用 14 個中間面向(Midpoint Category)進行評估，其中 11 個中間面向採用Eco-indicator 99 (Goedkoop and Spriensma, 2000)及CML 2002 (Guinée *et al.*, 2002)所定義的面向，包括呼吸系統(Respiratory)(主要針對為無機物)、離子輻射(Ionizing radiations)、臭氧層破壞(Ozone layer depletion)、光化學氧化(Photochemical oxidation)(主要針對為人類呼吸時吸進之有機物)、水體酸化(Aquatic acidification)、水體優養化(Aquatic eutrophication)、陸域酸化與營養鹽(Terrestrial acidification/ nitrification)、土地負荷(Land occupation)、地球暖化(Global warming)等；人類毒性(Human toxicity)、水域生態毒性(Aquatic ecotoxicity)及陸域生態毒性(Terrestrial ecotoxicity)等三個中間面向則是依據Impact 2002 (Pennington *et al.*, 2003, 2003b)方法而得，各面向都以某一定量參考物質(reference substance)作為換算的基準，例如溫室效應採用 kg eCO₂。再依據這 14 個中間面向的評估結果分為四個危害面向(Damage endpoint category)進行綜合評估，包括人類健康(Human Health)(Unit: Disability Adjusted Life Years, DALY)、生態品質(Ecosystem Quality)(Unit: Potentially Disappeared Fraction (PDF)*m²*yr)、氣候改變(Climate Change)(Unit: kg eCO₂)及資源(Resources)(Unit: MJ)等四個危害面向。

本研究將依不同容器及不同回收路徑的生命週期，依據 Simapro 所提供的結果分析生命週期各階段的溫室氣體排放量及各面向環境衝擊，以作為後續估算容器回收效益的依據。

表 3.3 IMPACT 2002+ 的中間及危害面向

Midpoint category	Midpoint reference substance	Damage category	Damage unit
Human toxicity (carcinogens + non-carcinogens)	kg _{eq} chloroethylene into air	Human health	DALY
Respiratory (inorganics)	kg _{eq} PM2.5 into air	Human health	
Ionizing radiations	Bq _{eq} carbon-14 into air	Human health	
Ozone layer depletion	kg _{eq} CFC-11 into air	Human health	
Photochemical oxidation [= Respiratory (organics) for human health]	kg _{eq} ethylene into air	Human health	
		Ecosystem quality	-
Aquatic ecotoxicity	kg _{eq} triethylene glycol into air	Ecosystem quality	PDF * m ² * yr
Terrestrial ecotoxicity	kg _{eq} triethylene glycol into water	Ecosystem quality	
Terrestrial acidification/nutrification	kg _{eq} SO ₂ into air	Ecosystem quality	
Aquatic acidification	kg _{eq} SO ₂ into air	Ecosystem quality	Under development
Aquatic eutrophication	kg _{eq} PO ₄ ³⁻ into water	Ecosystem quality	Under development
Land occupation	m ² _{eq} organic arable land year	Ecosystem quality	PDF * m ² * yr
Global warming	Kg _{eq} CO ₂ into air	Climate change (life support system)	(kg _{eq} CO ₂ into air)
Non-renewable energy	MJ Total primary non-renewable or kg _{eq} crude oil (860 kg/m ³)	Resources	MJ
Mineral extraction	MJ addition energy or kg _{eq} iron (in ore)	Resources	

Source: Jolliet *et al.* (2003).

3.4.2 一次回收法

本方法為分析容器有回收及未回收下，其減碳及環境永續效益之差異。主要依據前述所得的減碳與環境永續效益分析結果，將分析各容器未回收直接將容器棄置或焚化和進行典型回收二種情形，再計算所得結果之差異值。典型回收為當前容器閉環回收的現況，唯部分容器的現況資料可能不完整，這種情形時本研究將設定一個可能較接近現況的情形。差異量的計算公式如下式所列：

$$B1_c = (I_{c,n} - I_{c,r})Q_{c,r} \quad (3.1)$$

其中 $B1_c$ 為容器 c 依據一次回收法所估算的減碳或環境永續效益值； $I_{c,n}$ 及 $I_{c,r}$ 分別為為每公斤容器 c 進行未回收及典型回收下的碳排放量或環境永續衝擊量；及 $Q_{c,r}$ 為容器 c 的總回收量。

3.4.3 回收路徑法

本方法為分析容器不同回收路徑下，其減碳及環境永續效益。計算方式類似前一方法，但依不同途徑估算。計算公式如下列所示：

$$BP_{c,p} = (\sum_{i=1}^k (I_{c,p,n} - I_{c,p,i}) \times A_{c,p,i}) \times Q_{c,r} \quad (3.2)$$

其中 $BP_{c,p}$ 為容器 c 回收路徑 p 的減碳或環境永續效益值； $I_{c,p,n}$ 及 $I_{c,p,i}$ 分別為為每公斤容器 c 路徑比較基準與路徑 p 回收方式 i 的碳排放量或環境永續衝擊量； $A_{c,p,i}$ 為容器 c 路徑 p 回收方式(含未回收) i 所佔的比例；及 $Q_{c,r}$ 為容器 c 的總回收量。其計算方式類似Environmental burdens F (Song and Hyun, 1999)所採用的方法。比較基準若是針對closed-loop 回收，則為未回收的情形；若是針對open-loop，則是其所可取代的物質。

此方法所得結果將與一次回收法所得結果 $B1_c$ 比較不同回收路徑所得結果的差異。

3.4.4 循環回收

本方法分析容器經過無限次循環回收，其減碳及環境永續效益，採用 Vellini and Savioli (2009)所提出的方法。該方法首先將生命週期分為數個主要階段，然後在重複循環回收下，分析物質經過(或使用)各階段的次數及數量，然後相加總後再乘以單位排碳及環境衝擊量即可得各階段的總排碳量及環境衝擊，通式如下列。

$$E[\beta] = \sum E[\beta_i] = \sum E[n_i] \times \beta_i \quad (3.4)$$

其中 $E[\beta]$ 即為容器回收的總排碳量或總環境衝擊量， $E[\beta_i]$ 為經過階段 i 的排碳量或環境衝擊量， $E[n_i]$ 為循環經過階段 i 的總量， β_i 為經過階段 i 的單位排碳量或環境衝擊量。

以下先以玻璃作為範例來詳細介紹此方法，玻璃的詳細生命週期如圖 3.3 所示，依據該圖及生命週期各主要階段，可以下圖表示：

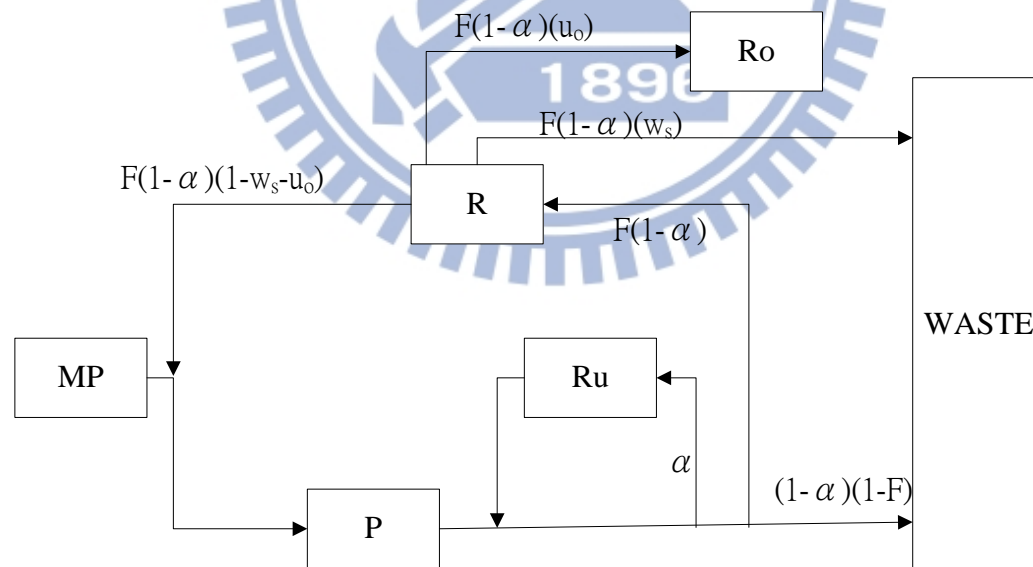


圖 3.8 玻璃循環回收之生命週期

上圖中MP為玻璃容器原料準備階段；P為玻璃容器製造階段；Ru為空瓶再利用；R為玻璃使用過後之回收；Ro為開環(open-loop)回收；WASTE為廢棄階段。 α 為用於空瓶再利用的比例率； $1-F$ 為廢棄率， w_s 為回收後之廢棄率； u_o 為用於開環回收的比例。其各階段總排碳或總環境衝擊量可以下式估算：

$$\begin{aligned}
 E[\beta] &= E[\beta_{MP}] + E[\beta_P] + E[\beta_R] + E[\beta_{Ru}] + E[\beta_O] + E[\beta_W] \\
 &= E[n_{MP}] \beta_{MP} + E[n_P] \beta_P + E[n_R] \beta_R + E[n_{Ru}] \beta_{Ru} + E[n_O] \\
 &\quad \beta_O + E[n_W] \beta_W \tag{3.5}
 \end{aligned}$$

經過各階段的量有些是依據廢棄量來估算，以P為例，第一次即廢棄的量即表示只經過P一次，第二次廢棄的量則經過P二次，依此類推，然後再加總計算，經過各主要階段的次數(或期望值)的計算式如下列：

$$E[n_{MP}] = 1 \tag{3.6}$$

$$\begin{aligned}
 E[n_P] &= 1 \times [(1-F) + (F) \times (w_s + u_o)] + 2 \times [(F) \times (1 - u_o - w_s)]^1 \times \\
 &\quad [(1-F) + (F) \times (w_s + u_o)] + 3 \times [(F) \times (1 - u_o - w_s)]^2 \times [(1-F) \\
 &\quad + (F) \times (w_s + u_o)] + \dots \\
 &= \sum_{n=1}^{\infty} n \times [(1-F) + (F) \times (w_s + u_o)] \times [(F) \times (1 - u_o - w_s)]^{n-1} \\
 &= [(1-F) + (F) \times (w_s + u_o)] \times \sum_{n=1}^{\infty} n \times [(F) \times (1 - u_o - w_s)]^{n-1} \\
 &= \frac{1}{(1-F) + F \times (w_s + u_o)} = \frac{1}{1 - F \times (1 - w_s - u_o)} \tag{3.7}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E[n_R] &= 1 \times [(F) \times (u_o + w_s) + (F) \times (1 - u_o - w_s) \times (1-F)] + \\
 &\quad 2 \times [(F) \times (1 - u_o - w_s)]^1 [(F) \times (u_o + w_s) + (F) \times (1 - u_o - \\
 &\quad w_s) \times (1-F)] + 3 \times [(F) \times (1 - u_o - w_s)]^2 [(F) \times (u_o + w_s) + \\
 &\quad (F) \times (1 - u_o - w_s) \times (1-F)] + \dots
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{n=1}^{\infty} n \times \{(F) \times [(u_o + w_s) + (1 - u_o - w_s) \times (1 - F)]\} \times \\
&\quad [(F) \times (1 - u_o - w_s)]^{n-1} \\
&= (F) \times [(u_o + w_s) + (1 - u_o - w_s) \times (1 - F)] \times \sum_{n=1}^{\infty} n \times \\
&\quad [(F) \times (1 - u_o - w_s)]^{n-1} \\
&= \frac{F}{(1-u_o-w_s) \times (1-F) + (w_s+u_o)} = \frac{F}{1-F \times (1-w_s-u_o)} \quad (3.8)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E[n_{Ru}] &= \alpha \times (1 - \alpha) \times [(1 - F) + (F) \times (w_s + u_o)] + 2 \times \alpha \times [\alpha \times (1 - \\
&\quad \alpha)] \times [(F) \times (1 - u_o - w_s)]^1 \times [(1 - F) + (F) \times (w_s + u_o)] + \\
&\quad 3 \times (\alpha)^2 \times [\alpha \times (1 - \alpha)] \times [(F) \times (1 - u_o - w_s)]^2 \times [(1 - F) + \\
&\quad (F) \times (w_s + u_o)] + \dots \\
&= \sum_{n=1}^{\infty} n \times \{\alpha \times (1 - \alpha) \times [(1 - F) + (F) \times (w_s + u_o)]\} \times \\
&\quad \{(\alpha) \times [(F) \times (1 - u_o - w_s)]\}^{n-1} \\
&= \alpha \times (1 - \alpha) \times [(1 - F) + (F) \times (w_s + u_o)] \times \sum_{n=1}^{\infty} n \times \{(\alpha) \times \\
&\quad [(F) \times (1 - u_o - w_s)]\}^{n-1} \\
&= \frac{\alpha}{(1-\alpha) \times [(1-F) + (F) \times (w_s + u_o)]} = \frac{\alpha}{(1-\alpha) \times [1-F \times (1-w_s-u_o)]} \quad (3.9)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E[n_O] &= \alpha \times (F) + [(F) \times (1 - u_o - w_s)]^1 \times \alpha \times (F) + [(F) \times \\
&\quad (1 - u_o - w_s)]^2 \times \alpha \times (F) + \dots \\
&= \sum_{n=1}^{\infty} \alpha \times (F) \times [(F) \times (1 - u_o - w_s)]^{n-1} \\
&= \alpha \times (F) \times \sum_{n=1}^{\infty} [(F) \times (1 - u_o - w_s)]^{n-1} \\
&= \frac{F\alpha}{1-[F \times (1-u_o-w_s)]} \quad (3.10)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E[n_W] &= [(1 - F) + (F) \times w_s] + [(F) \times (1 - u_o - w_s)]^1 \times [(1 - F) + \\
&\quad (F) \times w_s] + [(F) \times (1 - u_o - w_s)]^2 \times [(1 - F) + (F) \times w_s]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \dots\dots \\
& = \sum_{n=1}^{\infty} [(1-F) + (F) \times w_s] \times [(F) \times (1-u_o - w_s)]^{n-1} \\
& = [(1-F) + (F) \times w_s] \times \sum_{n=1}^{\infty} [(F) \times (1-u_o - w_s)]^{n-1} \\
& = \frac{F \times w_s + (1-F)}{1 - [(F) \times (1-u_o - w_s)]} \quad (3.11)
\end{aligned}$$

至於各階段的單位排碳量，除了由文獻中收集相關數據以外，在本研究中，主要係利用 SimaPro 所提供之資料來計算容器回收的減碳及環境永續效益，唯由於目前尚未找到 SimaPro 中間的詳細分析資料，故生命週期各階段的減碳與環境永續效益，預計將以二個情況結果的差值來推估。

其他容器或不同回收路徑循環回收下的排碳量及環境衝擊量，可依上述類似方式計算。

3.5 情境分析

情境分析主要參考未來可能發展趨勢及參數的不確定性，建立一些假想情境，再分析比較不同情境下其減碳及環境永續效益之差異。

不同容器由於有不同之回收方式及參數，如表 3.3 所列，本研究預計選用三種不同情境，主要是設定各容器在不同回收路徑 Empty bottle (r_u %)、Open-loop (r_o %)、Close-loop (r_c %) 等之比例，並與目前的情況(以 G 表示)作比較，再依各情境的數據以前述的方法計算其減碳與環境永續效益，分析各回收路徑不同比例下對玻璃容器回收效益的影響，再與目前的情況比較分析其間的差異。表 3.3 中各情境的數據為依照不同回收方式依序加 20%，藉此比較哪種回收方式較適合未來發展。玻璃容器循環回收之比例假設 w_s 為 5%，因其有 4 個未知數但我們卻只有 3 條方程式，參考 Song and Hyun (1999) 中之比例，計算公式如下：

$$\alpha = r_u \quad (3.12)$$

$$F(1-\alpha) = r_c + r_o \quad (3.13)$$

$$F(1-\alpha) u_o = r_o \quad (3.14)$$

其中由於紙容器近年來回收費率有提升，預期回收量會上升，故假設其之後回收量會增加至 95 %。

表 3.4 各回收容器所分析之情境

Container	Category	Scenarios			
	Ratio (%)	G	A	B	C
Glass	r_u	43.5	52.2	43.5	43.5
	r_c	28.5	24.1	34.2	24.7
	r_o	19	14.7	13.3	22.8
	w	9	9	9	9
	α	43.5	52.2	43.5	43.5
	u_o	40.0	36.6	28.0	48.0
	F	84	84	84	84
	w_s	5	5	5	5
Carton	r_o	85.23	95	-	-
	w	14.77	5	-	-

第四章 結果與討論

本章主要是說明根據第三章所說明之方法分析各容器的減碳與環境永續效益。以下將首先說明各容器回收相關資料收集與初步分析，然後說明如何計算各容器減碳效益與環境永續效益，且進行情境分析，再一一討論及分析所得結果一結果。

4.1 各容器回收相關資料收集與初步分析

首先收集用以估算減碳與環境永續效益之各容器回收相關資料，包括各容器回收量、回收費率、容器製程程序及其原料用量等資料，由圖 3.2 可看出所有容器回收量皆從 1997 年開始有較完整資料（環保署回收基金會，101 年），主要是因 1997 年臺灣展開了資源四合一計畫，環保署也因而對回收物品進行較有系統的統計。從圖中也可看出從 2005 年以後回收率呈穩定緩慢上升，其推測可能原因為環保署於民國九十四年頒布容器回收處理費費率表（環保署，100 年），該費率提高生產成本，因而對銷售價格上雖不直接但亦有一定的影響，故抑制一部分消費。由圖中可看出容器之回收量一直處於增加狀態，相信已具有頗顯著的減碳及環境永續效益，唯目前尚無研究可供參考，且由於不同回收途徑的減碳與環境永續效益亦可能差異頗大，故亦有必要分析之，以期能夠輔助容器回收方式相關決策與規劃。

由於用電的排放係數會顯著影響所得結果，故本研究參考相關網站（綠色能源，101 年）與台電發電裝置容量及系統負載（經濟部能源局，101 年）所提供之資料，將電排放數據進行本土化建立 SimaPro Materials 中一筆新的本土發電資料（LocalE），在臺灣市電主要由五種方式產生，所佔比例不同，火力佔 78.58%（煤 49.47%、油 3.27%及天然氣 25.84%）、核能佔 16.7%、水力佔 2.84%、風力佔 0.6%等。並參考呂錫民（101 年）所

提供之各發電之排碳量與 SimaPro 發電專案比較，如表 4.1.1 所列，最後加總再與行政院碳足跡網(101 年)所提供之電力碳排放係數比較，如表 4.1.2 所列。雖然有一點高估，但相去不遠。LocalE 將取代後續所有 SimaPro 用到的專案的電力資料。

表 4.1.1 發電所參考之 SimaPro 資料

	Source	
	Database	Name
Coal	Ecoinvent	Electricity, hard coal, at power plant/ NORDEL U
Oil	Ecoinvent	Electricity, oil, at power plant/ NL U
Gas	Ecoinvent	Electricity, natural gas, at power plant/ FR U
Nuclear	Ecoinvent	Electricity, nuclear, at power plant/CH U
Hydropower	Ecoinvent	Electricity, hydropower, at power plant/ NO U
Wind	Ecoinvent	Electricity, at wind power plant 800kw/ CH U

表 4.1.2 SimaPro 本土發電資料與台電公布排碳係數比較

SimaPro LocalE	Taiwan power company
0.584 kgCO ₂ /kwh	0.536 kgCO ₂ /kwh*

*資料來源：行政院碳足跡網（101 年）

4.2 玻璃容器回收減碳及環境永續效益評估與情境分析

本研究以 SimaPro 中之 IMPACT 2002+法分析玻璃容器再製造至回收再利用中各階段之減碳及環境效益以下說明分析的過程及討論所得的結果。

由於採用不同比例的回收碎玻璃再製時，原料的使用量亦會隨時不同，由於找不到這部分的資料，故在本研究依據 SimaPro 所提供之玻璃容器專案與文獻資料做出圖 4.2.1，以算出不同 closed-loop 回收再製比率下不同原料之用量，以利供後續研究使用。由該圖我們可以看出矽砂為玻璃容器之主要成份，回收量越少時原料的使用量越高。

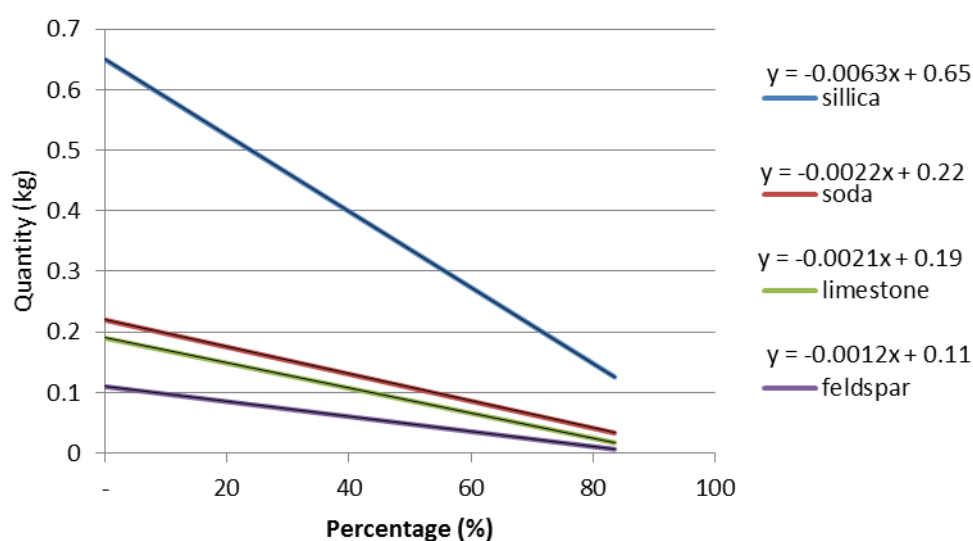


圖 4.2.1 不同 Closed-loop 回收再製率下各原料之用量

表 4.2.1 為之後要模擬之情境，依據圖 4.2.1 計算出不同 closed-loop 回收再製比率下之原料使用量。

表 4.2.1 玻璃容器各情境下各主要原料之單位使用量

Scenarios	r _c (%)	Silica	Soda	Limestone	Feldspar
	0	0.65	0.22	0.19	0.11
G	28.5	0.47	0.16	0.13	0.08
A	24.1	0.50	0.17	0.14	0.08
B	34.2	0.43	0.14	0.12	0.07
C	24.7	0.49	0.17	0.14	0.08

Unit: kg.

表 4.2.2 為本研究在圖 3.3 中所示各階段所使用之 SimaPro 程序單元 (unit process) 資料，唯電力改用本土化資料。

表 4.2.2 玻璃容器生命週期評估所參考之 SimaPro 資料

LC Stage or Pathway	Source	
	Database	Name
VM	Ecoinvent	Packaging glass, green, at plant/RER U
PN	Ecoinvent	Packaging glass, green, at plant/RER U
CL	Ecoinvent	Packaging glass, green, at plant/RER U
CR	Ecoinvent	Glass cullets, sorted, at sorting plant/RER U
OL	Ecoinvent	Sand, at mine/CH U
LF	Ecoinvent	Landfill/CH U

表 4.2.3 為圖 3.3 玻璃各階段之減碳及環境永續效益，主要分為四個危害類別 (Damage category)，其分別為人類健康 (Human health, HH)、生態品質 (Ecosystem quality, EQ)、氣候改變 (Climate change, CC) 和資源 (Resources, RE) 其中 VM 為製造玻璃容器的原始原料 (virgin materials)；PN 為玻璃容器製造；CL 為 Closed-loop 再製；CR 為回收已用過之玻璃容器的過程；因找不到空瓶直接回收再利用相關資料，參考 Mata and Costa (2001) 之說明，可看出其過程與非空瓶再利用的程序並沒有差很多，都須經過清洗之後再進入使用的過程，故空瓶再利用 (Empty bottle reuse, EB)，由於空瓶回收也是要經過回收系統回收，只有在進入使用階段略有不同，但假設差異不大，故假設 EB 的減碳及環境效益與 CR 類似；OL 為 Open-loop 再利用，本研究主要分析的 Open-loop 再利用為作為混凝土的原

料，主要取代砂砂，製作混凝土時所造成的衝擊則假設與採用砂砂相同，故主要帶來的效益是減少原料砂砂所產生的衝擊，故為負值；LF 則為掩埋。該表所列各階段的碳排放與相關衝擊，為計算後續相關結果的主要依據。可看出 IMAPCT 2002+ 四個危害類別中，玻璃容器在回收及製造過程中的影響較大。

表 4.2.3 玻璃容器主要階段與路徑的生命週期評估結果

Container	LC Stage or Pathway	Damage category			
		HH	EQ	CC	RE
Glass	VM	9.41×10^{-8}	3.6×10^{-2}	1.12×10^{-1}	1.50
	PN	9.50×10^{-7}	1.90×10^{-1}	9.31×10^{-1}	16.01
	CL	9.31×10^{-7}	1.80×10^{-1}	9.07×10^{-1}	15.71
	EB	2.95×10^{-8}	9.40×10^{-3}	2.76×10^{-2}	0.48
	CR	2.95×10^{-8}	9.40×10^{-3}	2.76×10^{-2}	0.48
	OL	-3.53×10^{-9}	-6.40×10^{-4}	-3.60×10^{-3}	-0.06
	LF	9.48×10^{-9}	2.00×10^{-3}	6.77×10^{-3}	0.20

HH : Human health (unit: DALY); EQ : Ecosystem quality (unit : PDF*m2*yr); CC : Climate change (unit : kg_{eq} CO₂ into air); RE : Resources (unit : MJ); VM: major virgin materials, including sand, soda ash, limestone, and felspar; PN: glass container production from virgin materials without using recycled cullets; CL: closed-loop recycle, including CR and re-production; EB: empty bottle reuse; CR: contain (glass) recycle; OL: open-loop, as fine sand in mortar; LF: landfill.

表 4.2.4 為一次回收法玻璃容器所得之結果，PR 為未回收的情形，故含廢棄(LF)部分；CT 則是現況下的衝擊數據，主要是依所收集的現況資料估算各主要階段所佔比例，如表 3.3 所列，再依表 4.2.3 之數據乘以各比例所得之加總結果，然後二者之差異即為減碳及環境效益值，再乘以總回收量即為總效益，減碳效益約有 1.63×10^8 公噸 eCO₂，而其他永續環境效益如人類健康有 1.67×10^2 DALY、生態品質 3.32×10^7 PDF*m2*yr 和資源 2.82×10^9 MJ。

其中玻璃回收總量 ($Q_{g,r}$) 是依照基金會公布之容器回收量為 211,610 公噸，基金會又說明回收部分佔 52%，其他為空瓶再利用，故 $Q_{g,r}$ 應為

406,942 公噸，而由於假設約有 9% 廢棄，因而 $Q_{g,r}$ 約佔總玻璃量 (Q_g) 91%，故 Q_g 為 447,189 公噸。

表 4.2.4 玻璃容器一次回收法生命週期評估結果及效益

Container	HH	EQ	CC	RE
PR	9.59×10^{-7}	1.92×10^{-1}	9.38×10^{-1}	16.2
CT	5.50×10^{-7}	1.10×10^{-1}	5.36×10^{-1}	9.27
PR-CT	4.10×10^{-7}	1.92×10^{-1}	9.38×10^{-1}	6.94
$(PR-CT)Q_{g,r}$	1.67×10^2	3.32×10^7	1.63×10^8	2.82×10^9

PR: glass container production without recycling, but including landfill.

CT: current typical practice, with 43.5% reuse, 28.5% closed loop recycle; 19% open-loop recycle; and 9% landfill. $Q_{g,r}$: recycled quantity (406,942 tonnes); HH : Human health (unit: DALY); EQ : Ecosystem quality (unit : $PDF \cdot m^2 \cdot yr$); CC : Climate change (unit : $kg_{eq} CO_2$ into air); RE : Resources (unit : MJ)

表 4.2.5 為 3.2.3 所列不同回收路徑中各階段所佔之百分比，而表 4.2.6 為不同路徑之 IMPACT 2002+ 中間的 12 Midpoint 類別之衝擊值，其中 Aquatic acidification 和 Aquatic eutrophication 這兩類別尚未發展，故資料中並沒有它們的衝擊值。由表 4.2.6 中我們可以看到路徑 (1) 不管是哪一個 Midpoint 類別所造成衝擊均最大，主要是因其並沒有進行任何回收，用完即丟棄，故衝擊最大。表 4.2.6 中顯示出路徑 (3) 是對環境最好的回收方式，原因為空瓶直接再利用比例高，次之為路徑 (5)，由於多元再利用使其再利用率高，亦因而減少衝擊，後續將再進一步分析不同情境下的影響。

表 4.2.7 為 SimaPro 依 IMPACT 2002+ 法依據 4.2.6 之結果計算四個危害類別之結果，再與未回收之路徑 (1) 相減後乘上玻璃回收量即為回收路徑法之減碳及環境總效益，其中以第 (3) 種回收路徑最好，第 (1) 種路徑未回收當然是最不好。圖 4.2.2 以 $[(1)-(5)] \cdot Q_{g,r}$ 為基準繪出該表之結果，第 (3) 種回收路徑的效益與第 (5) 路徑的相差不到 5%，由此可見若能採用多種回收方式亦可提昇效益；而第 (3) 種回收路徑效益高出第 (4) 路徑的 10 倍以上，顯示出空瓶回收之效益占相當重要之地位。

表 4.2.5 玻璃容器五個回收路徑其過程之百分比

Container	Pathway	PN	CL	EB	CR	OL	LF
Glass	(1)PR	100					100
	(2)	9	91				9
	(3)	9	47.5	43.5			9
	(4)	28	72		19	19	9
	(5)CTR	28	28.5	43.5	19	19	9

表 4.2.6 玻璃容器五個回收路徑生命週期評估 Midpoint 結果

Container	M.C.	(1)PR	(2)	(3)	(4)	(5)CT
Glass	CA	3.22×10^{-8}	3.17×10^{-8}	1.82×10^{-8}	3.19×10^{-8}	1.84×10^{-8}
	NC	9.44×10^{-8}	9.28×10^{-8}	5.28×10^{-8}	9.32×10^{-8}	5.33×10^{-8}
	RI	8.30×10^{-7}	8.06×10^{-7}	4.69×10^{-7}	8.14×10^{-7}	4.77×10^{-7}
	IR	2.40×10^{-9}	2.29×10^{-9}	1.34×10^{-9}	2.33×10^{-9}	1.38×10^{-9}
	OD	1.08×10^{-10}	1.06×10^{-10}	6.20×10^{-11}	1.07×10^{-10}	6.27×10^{-11}
	RO	5.11×10^{-10}	4.92×10^{-10}	2.79×10^{-10}	4.99×10^{-10}	3.04×10^{-10}
	AE	3.32×10^{-3}	2.85×10^{-3}	1.67×10^{-3}	2.96×10^{-3}	1.77×10^{-3}
	TE	1.60×10^{-1}	1.20×10^{-1}	7.29×10^{-2}	1.30×10^{-1}	8.24×10^{-2}
	TA	2.69×10^{-2}	2.56×10^{-2}	1.51×10^{-2}	2.60×10^{-2}	1.55×10^{-2}
	LO	3.49×10^{-2}	3.42×10^{-2}	1.95×10^{-2}	3.42×10^{-2}	1.96×10^{-2}
	GW	9.38×10^{-1}	9.10×10^{-1}	5.27×10^{-1}	9.08×10^{-1}	5.26×10^{-1}
	NR	16.2	15.7	9.12	15.9	9.27
	ME	8.26×10^{-3}	7.35×10^{-3}	4.37×10^{-3}	7.56×10^{-3}	4.57×10^{-3}

M.C.: midpoint category; CA: Carcinogens (unit: DALY); NC: Non-carcinogens (unit: DALY); RI: Respiratory inorganics (unit: DALY); IR: Ionizing radiation (unit: DALY); OD: Ozone layer depletion (unit: DALY); RO: Respiratory organics (unit: DALY); AE: Aquatic ecotoxicity (unit : PDF*m2*yr); TE: Terrestrial ecotoxicity (unit : PDF*m2*yr); TA: Terrestrial acid/nutria (unit : PDF*m2*yr); LO: Land occupation (unit : PDF*m2*yr); GW: Global warming (unit : $\text{kg}_{\text{eq}} \text{CO}_2$ into air); NR: Non-renewable energy (unit : MJ); ME: Mineral extraction (unit : MJ)

表 4.2.7 玻璃容器五個路徑的生命週期評估結果及效益

Container	Pathway	HH	EQ	CC	RE
Glass	(1)PR	9.57×10^{-7}	1.92×10^{-1}	9.38×10^{-1}	16.2
	(2)	9.34×10^{-7}	1.81×10^{-1}	9.10×10^{-1}	15.8
	(3)	5.41×10^{-7}	1.07×10^{-1}	5.27×10^{-1}	9.13
	(4)	9.42×10^{-7}	1.85×10^{-1}	9.19×10^{-1}	15.9
	(5)CTR	5.50×10^{-7}	1.10×10^{-1}	5.36×10^{-1}	9.27
Glass (Benefit)	[(1)-(2)] $Q_{g,r}$	1.05×10^1	4.44×10^6	1.14×10^7	1.85×10^8
	[(1)-(3)] $Q_{g,r}$	1.70×10^2	3.46×10^7	1.67×10^8	2.88×10^9
	[(1)-(4)] $Q_{g,r}$	7.07	2.99×10^6	7.68×10^6	1.29×10^8
	[(1)-(5)*] $Q_{g,r}$	1.67×10^2	3.32×10^7	1.63×10^8	2.85×10^9

*(1)-(5) is the base for comparison; HH : Human health (unit: DALY); EQ : Ecosystem quality (unit : $\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{yr}$) ; CC : Climate change (unit : $\text{kg}_{\text{eq}} \text{CO}_2$ into air) ; RE : Resources (unit : MJ)

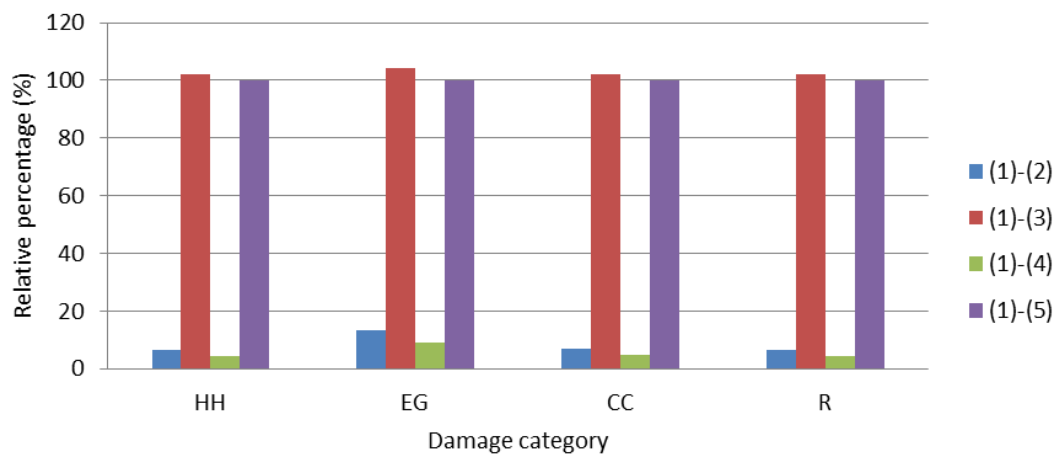


圖 4.2.2 玻璃容器不同路徑之效益比較(以(1)-(5)為比較基準)

表 4.2.8 為循環回收法中不同情境下各階段依式 3.12 至 3.14 所計算的經過次數期望值，其不同情境數據如表 3.3 所列。表 4.2.9 中 β_{MP} 效益為表 4.2.3 中的 VM； β_P 為 PN-VM； β_R 為 CR； β_{Ru} 為 EB； β_O 為 OL； β_w 為 LF，所列結果為典型情境 G（即依所收集之現況資料計算）之效益，算法為 3.5 式乘上原料當量 (M_g)， M_g 算法為 Q_g 除以循環回收所有階段之加總玻璃量，例如情境 G 一份原料經過製造(P)、空瓶再利用(Ru)、Open-loop(Ro)及廢棄分別為 1.86、1.43、0.68、0.38，加總為 4.35，亦即一份原料在循環回

收下會再製或再利用成 4.35 份的玻璃，故要製造 Q_g 玻璃量需要 $Q_g/4.35$ 份 (即表 4.2.8 中的 M_g 值)的原料。表 4.2.9 為玻璃容器各階段排碳與其他永續環境類別衝擊之結果，該表最後一列為現況情境G的效益，以前述表 4.2.7 未回收之路徑 (1) 衝擊乘上 Q_g 為基準，減去 $E[\beta]$ 所得衝擊值乘上 M_g 之結果計算而得，減碳效益約有 2.43×10^8 公噸 eCO_2 ，而其他永續環境效益人類健康有 245 DALY、生態品質 4.98×10^7 PDF*m2*yr 和資源 4.16×10^9 MJ。其結果與表 4.2.7 最後一列相比，雖其條件相同但因算法不同結果也不相同。4.2.9 中之效益較 4.2.7 較高是因 4.2.9 之回收是無限次數循環回收後之結果，其所造成之衝擊雖比只經過一次衝擊來的高，但由於每次循環使用時都比重新製造的衝擊小，因而效益較高，唯實際情形並不太可能作無限次數循環回收，故實際效益可能介於二者之間。

表 4.2.8 玻璃容器不同情境各主要階段依循環回收法所得之經過次數期望值及原料當量

Scenarios	$E[n_{MP}]$	$E[n_P]$	$E[n_R]$	$E[n_{Ru}]$	$E[n_O]$	$E[n_W]$	Quantity	M_g (Tonnes)
G	1	1.86	1.56	1.43	0.68	0.38	4.35	102,802
A	1	1.96	1.65	2.14	0.86	0.4	5.36	83,431
B	1	2.29	1.92	1.76	0.84	0.46	5.35	83,587
C	1	1.65	1.39	1.27	0.6	0.33	3.85	116,153

表 4.2.9 玻璃容器回收以循環回收法所得之生命週期評估結果

Impact	HH	EQ	CC	RE
$E[\beta_{MP}]$	9.41×10^{-8}	3.6×10^{-2}	1.12×10^{-1}	1.5
$E[\beta_P]$	8.56×10^{-7}	1.54×10^{-1}	8.19×10^{-1}	14.5
$E[\beta_R]$	2.95×10^{-8}	9.40×10^{-3}	2.80×10^{-2}	0.48
$E[\beta_{Ru}]$	2.95×10^{-8}	9.40×10^{-3}	2.80×10^{-2}	0.48
$E[\beta_O]$	-3.53×10^{-9}	-6.40×10^{-4}	-3.60×10^{-3}	-0.06
$E[\beta_W]$	9.48×10^{-9}	2.00×10^{-3}	6.80×10^{-3}	0.2
$E[\beta]$	1.78×10^{-6}	3.51×10^{-1}	1.72	30.0
G-Benefit	245	4.98×10^7	2.43×10^8	4.16×10^9

HH : Human health (unit: DALY); EQ : Ecosystem quality (unit : PDF*m2*yr); CC : Climate change (unit : $kg_{eq} CO_2$ into air); RE : Resources (unit : MJ)

表 4.2.10 為回收路徑法不同情境下之減碳與環境總效益，總效益為以表 4.2.7 路徑(1)為基準與其相減乘上 $Q_{g,r}$ 即為各情境之總效益，而圖 4.2.3 則以情境G為基準顯示該表的結果。可看出情境A之結果最好，因其超過一半以上之玻璃容器直接回收作空瓶再利用，對減碳及環境均最好，情境 B 與情境 C 效益差，顯示出靠閉環回收或開環回收再製之方式進行回收並不是最佳的方式，回收方式宜加強空瓶回收再利用。情境B效益與情境A的效益皆比現況情境G好，情境B為close-loop r_c 增加 20%，情境A為空瓶再利用 r_u 增加 20%，而由於空瓶再利用的效益較高，故情境B的效益較情境A低。由於上述方法是以單次回收結果分析，其所得結果可能較實際情況來的高，因此本研究進一步以循環回收法分析。

表 4.2.10 玻璃容器回收在不同情境下以回收路徑法所得之生命週期評估結果

	Scenario	HH	EQ	CC	RE
Glass	G	5.50×10^{-7}	1.10×10^{-1}	5.36×10^{-1}	9.27
	A	4.70×10^{-7}	9.47×10^{-2}	4.59×10^{-1}	7.84
	B	5.48×10^{-7}	1.23×10^{-1}	5.32×10^{-1}	9.13
	C	5.52×10^{-7}	1.11×10^{-1}	5.47×10^{-1}	9.18
Glass (Benefit)	G	167	3.32×10^7	1.63×10^8	2.82×10^9
	A	199	3.96×10^7	1.95×10^8	3.40×10^9
	B	167	2.81×10^7	1.65×10^8	2.88×10^9
	C	166	3.29×10^7	1.59×10^8	2.86×10^9

HH : Human health (unit: DALY); EQ : Ecosystem quality (unit : PDF*m2*yr); CC : Climate change (unit : $kg_{eq} CO_2$ into air); RE : Resources (unit : MJ)

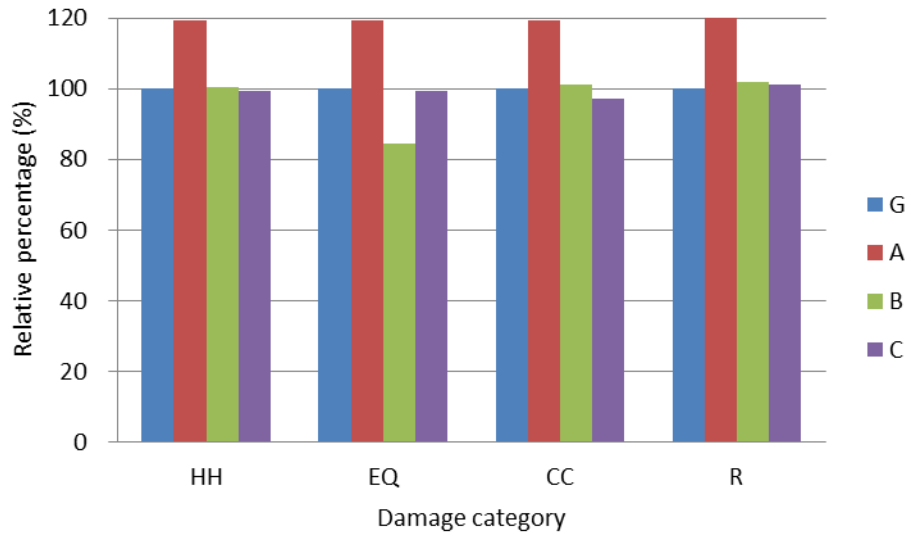


圖 4.2.3 玻璃容器回收在不同情境下以回收路徑法所得之生命週期評估結果比較
(以 G 為基準)

表 4.2.11 所列為循環回收法所得效益，Benefit 為未經任何回收之結果（即回收路徑中(1)乘 Q_g ）減各情境衝擊乘上 M_g ，圖 4.2.4 則以情境 G 為基準繪出該表的結果供比較。可看出情境 A 之效益仍是最好，情境 B 和 C 之效益則與情境 G 結果相差不多。由於是循環回收經過無限數次之回收所得到的值，但在實際情況下並不會有無限次數的回收。由表 4.2.10 及表 4.2.11 我們可以看出不管是採用那一個方法，情境 A 之效益都是最好的，顯示出空瓶再利用由於衝擊最小，可顯著提昇效益。

表 4.2.11 玻璃容器回收在不同情境下以循環回收法所得之生命週期評估結果

	Scenario	HH	EQ	CC	RE
Glass	G	1.78×10^{-6}	3.51×10^{-1}	1.72	30
	A	1.88×10^{-6}	3.74×10^{-1}	1.82	31.8
	B	2.16×10^{-6}	4.24×10^{-1}	2.09	36.5
	C	1.59×10^{-6}	3.15×10^{-1}	1.54	26.7
Glass (Benefit)	G	245	4.98×10^7	2.43×10^8	4.16×10^9
	A	271	5.47×10^7	2.67×10^8	4.59×10^9
	B	247	5.04×10^7	2.45×10^8	4.19×10^9
	C	244	4.92×10^7	2.41×10^8	4.14×10^9

HH : Human health (unit: DALY); EQ : Ecosystem quality (unit : PDF*m2*yr); CC : Climate change (unit : $kg_{eq} CO_2$ into air); RE : Resources (unit : MJ)

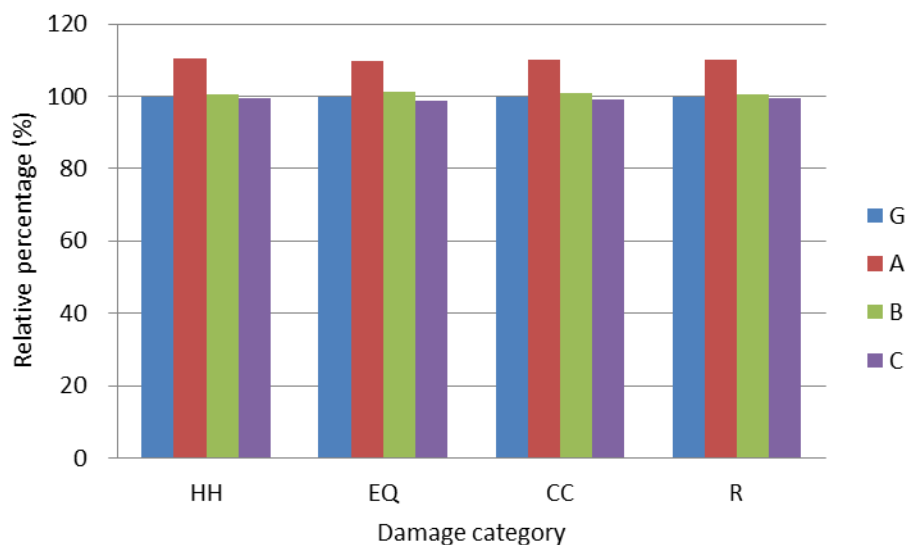


圖 4.2.4 玻璃容器回收在不同情境下以循環回收法之生命週期評估結果比較(以 G 為基準)

圖 4.2.5 為回收路徑法和循環回收法各情境之效益結果比較，以回收路徑法的情境 G 為基準作比較，由表 4.2.10 與 4.2.11 可以看出雖然一次回收單位衝擊值都較循環回收來的低，但由於循環使用時均比重新再製造的衝擊低，故最後相減效益後循環回收較高，由於實際情形不會是一次回收，但也不是無限次數的回收，故實際效益值應該介於二者間。

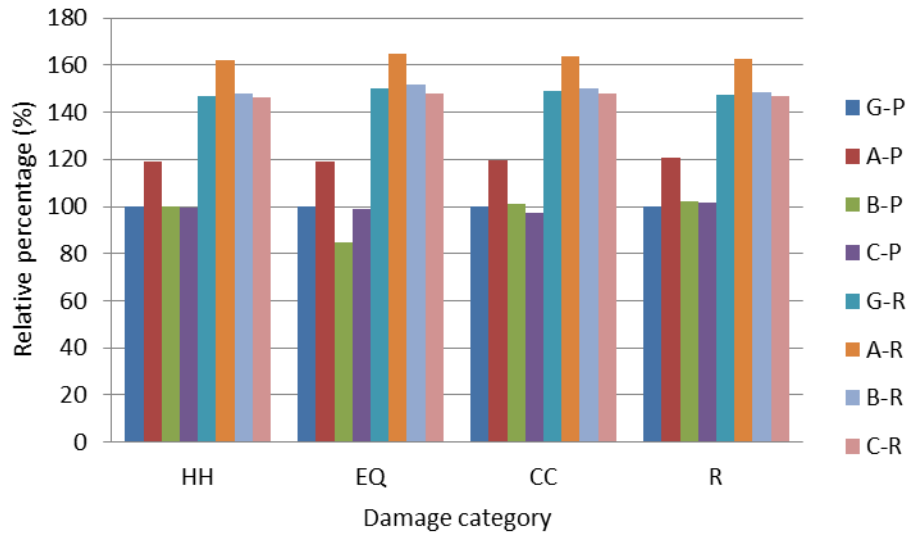


圖 4.2.5 玻璃容器回收在不同情境下回收路徑法(-P)與循環回收法(-R)之生命週期評估結果比較(以 G-P 為基準)



4.3 PET 容器回收減碳及環境永續效益評估與情境分析

本研究以 SimaPro 中之 IMPACT 2002+法分析 PET 容器再製造至回收再利用中各階段之減碳及環境效益，以下說明分析的過程及討論所得的結果。

表 4.3.1 為製成 PET 容器中各原料使用量 (SimaPro, 2010)，國內 PET 容器回收一般主要分為四類 (台灣再生, 102 年)，分別為：透明瓶、綠雜瓶、醬油瓶、沙拉油和其他 (如漱口水瓶) 等，前兩項均先抽絲，爾後繼續做其他用途使用，後兩項回收後作成短纖再利用。由於所回收的 PET 幾乎都是再利用作為長纖 (filament) 或短纖(staple)用，加上回收率已達 99% 以上，已非常高，故針對 PET 容器，未再分析其他情境。

表 4.3.1 PET 容器主要原料之單位使用量

Ethylene glycol	Terephthalic acid	Polyethylene terephthalate, granulate
0.08	0.19	0.78

Unit : Kg. 資料來源: SimaPro (2010).

表 4.3.2 為本研究在圖 3.4 中各過程所使用之 SimaPro 程序單元(unit process)資料，唯電力改用依國內資料所估算的程序單元。其中因 Simapro 找不到 PET 回收相關專案，故參考了 SimaPro 中廢棄 PET 回收空專案中之說明，名稱如表 4.3.2 所示，其專案中說明回收過程產生之減碳與環境效益約為 0.6kWh Electricity, medium voltage, production UCTE, at grid/UCTE U 專案之效益，雖其說明如果回收在研究中很重要時不建議用此法，但由於找不到更合適之專案與資料，故仍以此代之。

表 4.3.2 PET 容器生命週期評估所參考之 SimaPro 資料

LC Stage or Pathway	Source	
	Database	Name
VM	Ecoinvent	Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous, at plant/ RER U (revised)
PN	Ecoinvent	Polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade, at plant/ RER U
CR	Ecoinvent	Recycling PET/ RER U
OM	Ecoinvent	Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous, at plant/ RER U
LF	Ecoinvent	Disposal, polyethylene terephthalate, 0.2% water, to sanitary landfill/ CH U
IN	Ecoinvent	Disposal, polyethylene terephthalate, 0.2% water, to municipal incineration/ CH U

CR: container (PET) recycle; OM: the original raw materials used in producton, replaced by open-loop recycled containerse; IN: incineration.

表 4.3.3 為各階段之生命週期評估結果，由於為了保護食品安全，一些國家已禁止回收PET容器再製為食品容器，雖然國內尚未立法禁止，但亦已不再製為食品容器，故主要為開環(open-loop, OL)回收，唯Simapro並沒有找到適當的PET開環回收專案資料可供估算OL之效益，本研究因而依以下所說明方式估算OL之效益，PET開環回收再利用一般是再製成長纖或短纖，但都是先製成聚酯粒(Chips)，故本研究估算OL效益，主要依據直接由原料製成酯粒與以回收PET製成酯粒間的差異估算之，唯Simapro並沒有以回收PET製成酯粒的專案，本研究因而參考遠東新世紀(2012)所提供之資料，依該公司的碳足跡盤查，以原料製作PET酯粒的碳排放量為 2.73 kg eCO₂，但詳細計算該公司並未提供，該碳排放量與SimaPro中Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous, at plant/ RER U專案(即OM專案)製成酯粒產生之eCO₂量 2.49 kg 相近，該公司亦提供以回收PET再製成每一公斤聚酯粒之碳排放量為 1.33 kg eCO₂，本研究依據VM/OM專案、此碳排放量及以下式子估算OL效益，首先依據已知的VM、OM及回收PET再製酯粒的碳排放

量，假設其他衝擊的差異比例與碳排放量間的差異比例相近，故首先以式 4.3.1a 計算比例，然後再依式 4.3.1b 式估算回收 PET 再製酯粒的其他各類衝擊，最後再依據其與 OM 專案間的差值估算 OL 效益：

$$C_r = (C_{OM} - C_{RM}) / (C_{OM} - C_{VM}) \quad (4.3.1a)$$

$$I_{OR} = I_{OM} - (I_{OM} - I_{VM}) * C_r \quad (4.3.1b)$$

$$B_{OL} = I_{OR} - I_{OM} \quad (4.3.1c)$$

其中 C_r 為依據碳排放量所估算之比例值； C_{OM} 為 OM 專案之碳排放量； C_{RM} 為遠東新世紀公司所提供之回收 PET 再製聚酯粒的碳排放量（1.33 kg eCO₂）； C_{VM} 為 VM 專案之碳排放量； I_{OR} 為回收 PET 再製成聚酯粒之衝擊估算值； I_{OM} , I_{VM} 分別為 OM 及 VM 專案之衝擊值； B_{OL} 為所估算之 OL 效益。

由於沒有 PET 進掩埋場及焚化廠的比例資料，故取兩項衝擊之平均值，由於 PET 容器廢棄所佔比例甚小（約 < 1.5%），故誤差應不會太大。

表 4.3.3 PET 容器主要階段與路徑的生命週期評估結果

Container	LC Stage or Pathway	Damage category			
		HH	EQ	CC	RE
PET	VM	4.36*10 ⁻⁶	1.84*10 ⁻¹	1.91	68.6
	PN	4.80*10 ⁻⁶	3.13*10 ⁻¹	2.68	82.2
	CR	1.72*10 ⁻⁷	3.11*10 ⁻²	3.08*10 ⁻¹	6.46
	OM	4.63*10 ⁻⁶	2.65*10 ⁻¹	2.49	78.5
	OR	4.20*10 ⁻⁶	1.33*10 ⁻¹	1.54	62.4
	OL	-4.35*10 ⁻⁷	-1.32*10 ⁻¹	-9.45*10 ⁻¹	-16.2
	LF / IN	2.24*10 ⁻⁷	7.75*10 ⁻³	1.04	2.81*10 ⁻¹

HH : Human health (unit: DALY); EQ : Ecosystem quality (unit : PDF*m2*yr); CC : Climate change (unit : kg_{eq} CO₂ into air); RE : Resources (unit : MJ). (請參見表 4.2.3)

表 4.3.4 為 PET 容器未回收的之比例 (PR) 包含掩埋/焚化，與現況下 PET 容器回收與掩埋/焚化比例 (CT)。

表 4.3.4 PET 容器回收路徑其過程之百分比

Container	Pathway	PN	GR	OL	LF/IN
PET	PR	100			100
	CT	100	98.5	98.5	1.5

表 4.3.5 為一次回收法PET容器所得之結果，PR為未回收的情形，含廢棄(LF)部分；CT則是現況下的衝擊數據，主要是依所收集的現況資料估算各主要階段所佔比例。其減碳效益為 1.95×10^8 公噸eCO₂，而其他永續環境效益如HH有 6.10×10^1 DALY、EQ 1.43×10^7 PDF*m²*yr 和RE 1.40×10^9 MJ。Q_{p,r}為依據基金會提供資料，為 104,550 公噸。

表 4.3.5 PET 容器一次回收法生命週期評估結果及效益

Container	HH	EQ	CC	RE
PR	5.02×10^{-6}	3.21×10^{-1}	3.72	82.5
CT	4.44×10^{-6}	1.84×10^{-1}	1.86	69.1
PR-CT	5.83×10^{-6}	1.37×10^{-1}	1.86	13.4
(PR-CT)Q _{p,r}	6.10×10^1	1.43×10^7	1.95×10^8	1.40×10^9

Q_{p,r}: recycled quantity (104,550 tonnes); HH : Human health (unit: DALY); EQ : Ecosystem quality (unit : PDF*m²*yr); CC : Climate change (unit : kg_{eq} CO₂ into air); RE : Resources (unit : MJ).

表 4.3.6 為不同路徑之 IMPACT 2002+的 12 個 Midpoint 類別之衝擊值，可看出未經回收之衝擊皆較現況產生之衝擊來的大，值得注意的是 IR (Ionizing radiation, unit: DALY)在現況回收方式的衝擊值較 PR 值高，此由 SimaPro 專案中可看出是因 CR 專案值衝擊較高所造成。其餘 Midpoint 類別值，PR 值都較 CT 值高出 1%~80%。

表 4.3.6 PET 容器回收路徑生命週期評估各 Midpoint 類別之結果

Container	M.C.	PR	CT
PET	CA	$3.59*10^{-6}$	$3.56*10^{-6}$
	NC	$2.38*10^{-7}$	$5.26*10^{-8}$
	RI	$1.18*10^{-6}$	$9.13*10^{-7}$
	IR	$1.28*10^{-8}$	$1.50*10^{-8}$
	OD	$1.54*10^{-10}$	$6.68*10^{-11}$
	RO	$3.97*10^{-9}$	$3.40*10^{-9}$
	AE	$9.07*10^{-3}$	$4.19*10^{-3}$
	TE	$2.62*10^{-1}$	$1.76*10^{-1}$
	TA	$3.64*10^{-2}$	$2.73*10^{-2}$
	LO	$1.38*10^{-2}$	$7.03*10^{-3}$
	GW	3.72	2.07
	NR	82.4	72.6
	ME	$6.37*10^{-2}$	$3.31*10^{-2}$

HH : Human health (unit: DALY); EQ : Ecosystem quality (unit : PDF*m2*yr); CC : Climate change (unit : kg_{eq} CO₂ into air); RE : Resources (unit : MJ). (請參見表 4.2.6)

在 PET 容器中因其回收之容器皆進行開環回收，故並沒有循環回收可計算，而回收路徑方面，因本研究中只考量到聚酯粒，之後細分再製長纖或短纖本研究並沒有作進一步探討，一方面資料庫沒有如此詳細之資料，另一方面也無廠商可提供更清楚資料，故改為只估算至聚酯粒。由於回收率已很高了，除了源頭減少使用量，已沒有太多改善空間了，故 PET 容器部分未再進行情境分析。

4.4 PE/PP 容器回收減碳及環境永續效益評估與情境分析

本研究以 SimaPro 中之 IMPACT 2002+法分析 PE/PP 容器從製造至回收再利用中各階段之減碳及環境效益，雖然透過不同管道收集資料，但本研究仍然找不到可供比較的開環回收再利用專案，故 PE/PP 的部分改為由文獻收集排碳量的資料，推估 PE/PP 容器的減量效益，但其他環境效益則由於資料不足，本研究未能分析之。以下說明 PE/PP 容器分析的過程及討論所得的結果。

表 4.4.1 為製成一公斤容器中各原料使用量 (SimaPro, 2010; Narita *et al.*, 2002)，主要原料為石油腦。

表 4.4.1 PE/PP 容器主要原料之單位使用量

Petroleum/Naphtha	Coal
0.94-1.307	0.094

Unit : kg.

資料來源: SimaPro (2010); Narita *et al.* (2002).

表 4.4.2 為圖 3.5 中各過程所使用之 SimaPro 程序單元(unit process)資料，唯電力同前，改用依國內資料所估算的程序單元。其中要注意的是開環回收選用了兩個專案分別代表 PE 及 PP，PE 與 PP 通常是一起出現的，廠商常以 PE 製造瓶身及以 PP 製瓶蓋，其約為 70% PE 和 30% PP (宏聚塑膠, 2013)，計算 OL 之效益時，回收再製成 chip 時約有 5 至 10% 損耗 (宏聚塑膠, 2013)，由於缺乏回收再製成 chip 專案資料，故以該二個專案衝擊結果分別乘以 0.7 及 0.3 相加之後再乘上 0.9 作為 OL 之效益，此方式在計算 OL 效益時雖可能會有高估情形，但由於耗損部分亦有高估情況，可抵銷一部分誤差，故假設所估算結果與實際值相差不大。而 CR 部分則因 SimaPro 無回收再製相關專案，故本研究參考文獻提供的排碳資料來計算。

表 4.4.2 PE/PP 容器生命週期評估所參考之 SimaPro 資料

LC Stage or Pathway	Source	
	Database	name
PN	Industry data 2.0	HDPE bottles E
CR		Nishijima et al., (2012)
OL	Ecoinvent	Polyethylene, HDPE, granulate, at plant/ RER U; Polypropylene, granulate, at plant/ RER U
LF/IN	Ecoinvent	Disposal, polyethylene terephthalate, 0.4% water, to municipal landfill/ CH U ; Disposal, polyethylene terephthalate, 0.2% water, to municipal incineration/ CH U

表 4.4.3 為圖 3.5 各階段之減碳效益，因 PE/PP 容器資料不足，故在此主要分析減碳效益，由表中我們可以看出容器進行焚化處理衝擊僅低於製成容器衝擊 0.83 kg eCO₂，專案中說明焚燒所造成的衝擊不小，其中焚燒佔 95% 而掩埋 5%（環保署統計年報，101 年）。由表中我們也可看出造成最大衝擊的為製成 PE/PP 容器過程。

表 4.4.3 PE/PP 容器主要階段與路徑的碳排放結果

LC Stage or Pathway	CC
PN	2.76
CR	2.33*10 ⁻¹
OL	-1.70
LF/IN	1.93

CR: container (PE/PP) recycle; CC : Climate change (unit : kg_{eq} CO₂ into air). (請參見表 4.2.3)

表 4.4.4 為 PE/PP 容器容器未回收的之比例 (PR) 包含掩埋/焚化，與現況下 PET 容器回收與掩埋/焚化比例 (CT)。

表 4.4.4 PE/PP 容器回收路徑其過程之百分比

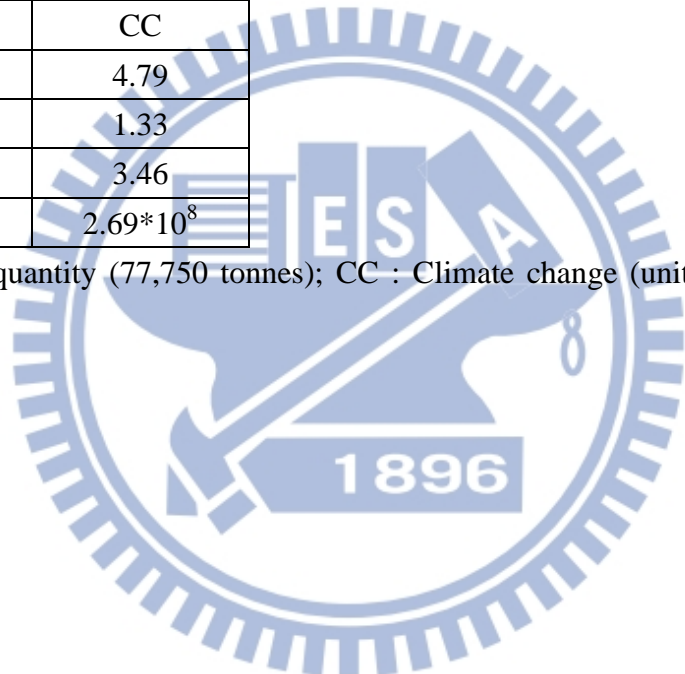
Container	Pathway	PN	CR	OL	LF/IN
CARTON	PR	100			100
	CT	100	99	99	1

表 4.4.5 為一次回收法PE/PP容器所得之結果，依照表 4.5.4 所占比例得到之衝擊結果。其減碳效益為 2.69×10^8 公噸eCO₂。Q_{i,r}為依據基金會提供資料，為 77,750 公噸。由於回收率已很高了，除了源頭減少使用量，已沒有太多改善空間了，故PE/PP容器部分未再進行情境分析。

表 4.4.5 PE/PP 容器一次回收法碳排放結果及效益

Pathway	CC
PR	4.79
CT	1.33
PR-CT	3.46
(PR-CT)Q _{i,r}	2.69×10^8

Q_{i,r}: recycled quantity (77,750 tonnes); CC : Climate change (unit : kg_{eq} CO₂ into air).



4.5 紙容器回收減碳及環境永續效益評估與情境分析

本研究以 SimaPro 中之 IMPACT 2002+法分析紙容器從製造至回收再利用中各階段之減碳及環境效益，以下說明紙容器分析的過程及討論所得的結果。

紙容器的主要原料為木材。製成一公斤紙容器（SimaPro, 2010）的木材使用量約為 0.0043m³。其

表 4.5.1 為圖 3.6 中各過程所使用之 SimaPro 程序單元(unit process)資料，唯電力同前，改用依國內資料所估算的程序單元。其中開環回收選用了兩個專案，主要是因找不到完全不使用回收紙類做原料，故選了最大與最小回收使用率其分別為 1.05 與 0.12，並將其衝擊相減並除上 0.93 作為 OL 的效益，而廢棄/焚化也參考了兩個專案並依照台灣現況算出衝擊值，焚化 95%與廢棄 5%（環保署統計年報，101 年）估算其衝擊。

表 4.5.1 紙容器生命週期評估所參考之 SimaPro 資料

LC Stage or Pathway	Source	
	Database	Name
VM	Ecoinvent	Industrial wood, Scandinavian softwood, under bark, u=140%, at forest road/NORDEL U
PN	Ecoinvent	Liquid packaging board, at plant/ RER U
CR	Ecoinvent	Waste paper, mixed, from public collection, for futher treatment/RER U
OL	Ecoinvent	Corrugated board base paper, testliner, at plant/ RER U (1.05); Corrugated board base paper, semichemical fluting, at plant/ RER U (0.12)
LF/IN	Ecoinvent	Disposal, packaging cardboard, 19.6% water, to sanitary landfill/ CH U; Disposal, packaging cardboard, 19.6% water, to municipal incineration/ CH U

表 4.5.2 為圖 3.6 各階段之減碳及環境永續效益，從 VM 與 PN 各值差異所造成之衝擊可以看出製造階段所增加的衝擊約為原料的 4.4 倍至 50 倍間，其中 RE 於製造過程中造成最多衝擊，而 RE 項中又以 NR（請參見表 4.5.5）的衝擊最大，可以知道製成紙容器對不可再生資源有顯著衝擊。

表 4.5.2 紙容器主要階段與路徑的生命週期評估結果

LC Stage or Pathway	Damage category			
	HH	EQ	CC	RE
VM	4.36×10^{-8}	1.97×10^{-1}	3.76×10^{-2}	6.46×10^{-1}
PN	1.20×10^{-6}	1.07	1.39	34.9
CR	7.10×10^{-8}	1.64×10^{-2}	6.62×10^{-2}	1.07
OL	-8.00×10^{-7}	-5.61×10^{-1}	-1.06	-32.6
LF/IN	2.79×10^{-7}	5.76×10^{-3}	3.39×10^{-2}	3.74×10^{-1}

CR: container (CARTON) recycle; HH : Human health (unit: DALY); EQ : Ecosystem quality (unit : $\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{yr}$); CC : Climate change (unit : $\text{kg}_{\text{eq}} \text{CO}_2$ into air); RE : Resources (unit : MJ). (請參見表 4.2.3)

紙容器一次回收法三個路徑比例如表 4.5.3 所列，其中 PR 路徑為紙容器 100% 未回收且包含掩埋，CT 則為近況下紙容器之回收、再利用與掩埋/焚化之比例，雖然基管會的資料只有不到四成回收率，明顯偏低，主要原因是因不少紙容器是經其他一般回收管道回收，尤其是紙餐盒的費率之前低於市場價格，故幾乎都不會進入基管會認證的回收系統，故本研究依據環保署(2012)的垃圾進場成分分析，重新估算紙容器的回收率，如 CT Pathway 所列；由於目前已提高了費率，且尚有改善空間，故本研究因而亦模擬情境 A。

表 4.5.3 紙容器回收路徑其過程之百分比

Container	Pathway	PN	CR	OL	LF
CARTON	PR	100			100
	CT	100	85.23	85.23	14.77
	A	100	95	95	5

表 4.5.4 為一次回收法紙容器所得之結果，依照表 4.5.3 所占比例所估算之衝擊結果。Q_{i,r}為依據基金會提供資料，為 9,640 公噸。台灣近況回收減碳效益為 8.44x10⁶公噸eCO₂，而其他永續環境效益如HH有 8.28 DALY、EQ4.52x10⁶ PDF*m2*yr 和RE2.62x10⁸ MJ。情境A其效益比現況多了 11% 效益，回收減碳效益為 9.41*10⁶，而其他永續環境效益如HH有 9.23 DALY、EQ5.04x10⁶ PDF*m2*yr 和RE2.92x10⁸ MJ。

表 4.5.4 紙容器一次回收法生命週期評估結果及效益

Pathway	HH	EQ	CC	RE
PR	1.48*10 ⁻⁶	1.08	1.42	35.4
CT	6.20*10 ⁻⁷	6.07*10 ⁻¹	5.48	8.18
A	5.21*10 ⁻⁷	5.53*10 ⁻¹	4.48*10 ⁻¹	5.07
PR-CT	8.59*10 ⁻⁷	4.69*10 ⁻¹	8.76*10 ⁻¹	27.2
PR-A	9.58*10 ⁻⁷	5.23*10 ⁻¹	9.76*10 ⁻¹	30.3
(PR-CT)Q _{i,r}	8.28	4.52*10 ⁶	8.44*10 ⁶	2.62*10 ⁸
(PR-A)Q _{i,r}	9.23	5.04*10 ⁶	9.41*10 ⁶	2.92*10 ⁸

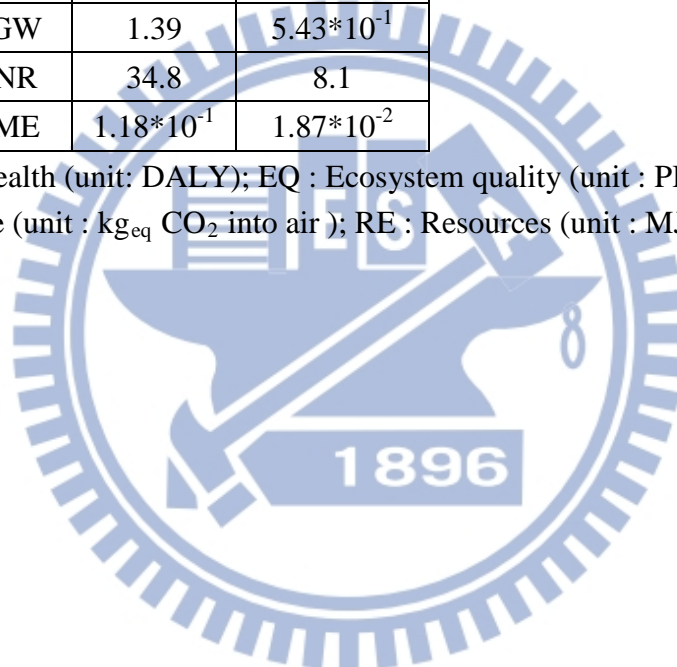
Q_{i,r}: recycled quantity (9,640 tonnes); HH : Human health (unit: DALY); EQ : Ecosystem quality (unit : PDF*m2*yr); CC : Climate change (unit : kg_{eq} CO₂ into air); RE : Resources (unit : MJ).

表 4.5.5 為不同路徑之 IMPACT 2002+的 12 個 Midpoint 類別之衝擊值，PR 約較 CT 多 60%- 650%間的衝擊，唯值得注意的是 NC、OD 與 TE 其 CT 結果為負值，其原因為所估算開環回收(OL)效益值較高，造成結果為負值，負值結果並不合理，主因可能是估算 OL 效益的專案本身資料的精確性及計算方式所造成的誤差。

表 4.5.5 紙容器回收路徑生命週期評估 Midpoint 結果

Container	M.C.	PR	CT
CARTON	CA	2.58×10^{-7}	3.46×10^{-8}
	NC	8.29×10^{-8}	-1.79×10^{-9}
	RI	8.50×10^{-7}	5.38×10^{-7}
	IR	9.25×10^{-9}	3.25×10^{-9}
	OD	6.75×10^{-9}	-1.59×10^{-9}
	RO	3.34×10^{-9}	8.95×10^{-10}
	AE	4.16×10^{-3}	1.70×10^{-3}
	TE	1.91×10^{-1}	-1.96×10^{-2}
	TA	2.48×10^{-2}	1.25×10^{-2}
	LO	8.52×10^{-1}	6.13×10^{-1}
	GW	1.39	5.43×10^{-1}
	NR	34.8	8.1
	ME	1.18×10^{-1}	1.87×10^{-2}

HH : Human health (unit: DALY); EQ : Ecosystem quality (unit : PDF*m2*yr); CC : Climate change (unit : $\text{kg}_{\text{eq}} \text{CO}_2$ into air); RE : Resources (unit : MJ). (請參見表 4.2.6)



4.6 鐵/鋁容器回收減碳及環境永續效益評估與情境分析

本研究以 SimaPro 中之 IMPACT 2002+法分析鐵/鋁容器從製造至回收再利用中各階段之減碳及環境效益，以下個別說明鐵及鋁分析的過程及討論所得的結果。

4.6.1 鐵容器回收減碳及環境永續效益評估與情境分析

表 4.6.1.1 為製成一公斤鐵容器中各原料使用量 (SimaPro, 2010)，鐵容器主要原料有鐵礦、焦炭及石灰石等。

表 4.6.1.1 鐵容器主要原料之單位使用量

Pig iron	Hard coal	Limestone
1.10	0.15	0.01

Unit : Kg.

表 4.6.1.2 為圖 3.7 中各過程所使用之 SimaPro 程序單元(unit process) 資料，唯電力同前，改用依國內資料所估算的程序單元。其中須注意，由於所有鐵產品再製造之前都先製成鐵錠，故 OL 專案只分析到鐵錠，並不分析後續的鐵產品。

表 4.6.1.2 鐵容器生命週期評估所參考之 SimaPro 資料

LC Stage or Pathway	Source	
	Database	name
VM	Ecoinvent	Pig iron, at plant/ GLO U
PN	Ecoinvent	Cast iron, at plant/ RER U
CR	Ecoinvent	Iron scrap, at plant/ RER U
OL	Ecoinvent	Cast iron, at plant/ RER U
LF	ELCO	Landfill of ferro metals EU-27

表 4.6.1.3 為圖 3.7 各階段之減碳及環境永續效益，從 VM 與 PN 各值差異所造成之衝擊我們可以看出製造階段所增加的衝擊約為原料的 70% 至

515%間，其中以 HH 於製造過程中造成最多衝擊，而 HH 項中又以 RI 造成最多衝擊，依 Simapro 輸出數值，生鐵製造過程造成了大部份的衝擊。

表 4.6.1.3 鐵容器主要階段與路徑的生命週期評估結果

LC Stage or Pathway	Damage category			
	HH	EQ	CC	RE
VM	1.38×10^{-6}	2.91×10^{-1}	1.46	22.6
PN	2.83×10^{-6}	6.26×10^{-1}	2.01	32.6
CR	1.83×10^{-7}	1.62×10^{-2}	5.91×10^{-2}	82.4×10^{-1}
OL	-1.47×10^{-6}	-3.06×10^{-1}	-1.57	-24.2
LF	1.66×10^{-8}	2.87×10^{-1}	1.19×10^{-2}	1.56×10^{-1}

CR: container (IRON) recycle; IN: incineration; HH : Human health (unit: DALY); EQ : Ecosystem quality (unit : PDF*m2*yr); CC : Climate change (unit : kg_{eq} CO₂ into air); RE : Resources (unit : MJ). (請參見表 4.2.3)

鐵容器主要比較二個路徑，如表 4.6.1.4 所列，其中 PR 路徑為鐵容器 100% 未回收且包含掩埋，CT 則為近況下鐵容器之回收、再利用與掩埋之比例。

表 4.6.1.4 鐵容器回收路徑其過程之百分比

Container	Pathway	PN	CR	OL	LF
IRON	PR	100			100
	CT	100	70.67	70.67	29.33

表 4.6.1.5 為一次回收法鐵容器所得之結果，依照表 4.6.1.4 所占比例得到之衝擊結果。其減碳效益為 5.07×10^7 公噸 eCO₂，而其他永續環境效益如 HH 有 3.93×10^1 DALY、EQ 1.76×10^7 PDF*m2*yr 和 RE 5.45×10^8 MJ。Qi,r 為依據基金會提供資料，為 48,150 公噸。

表 4.6.1.5 鐵容器一次回收法生命週期評估結果及效益

Pathway	HH	EQ	CC	RE
PR	8.48×10^{-6}	9.58×10^{-1}	2.75	38.5
CT	7.66×10^{-6}	5.93×10^{-1}	1.7	27.1
PR-CT	8.15×10^{-7}	3.65×10^{-1}	1.05	11.3
(PR-CT)Q _{i,r}	3.93×10^1	1.76×10^7	5.07×10^7	5.45×10^8

Q_{i,r}: recycled quantity (48,150 tonnes); HH : Human health (unit: DALY); EQ : Ecosystem quality (unit : PDF*m2*yr) ; CC : Climate change (unit : kg_{eq} CO₂ into air) ; RE : Resources (unit : MJ).

表 4.6.1.6 為不同路徑之 IMPACT 2002+ 的 12 個 Midpoint 類別之衝擊值，PR 約較 CT 多 5%-190% 間的衝擊，其中以 ME 的比例最高，由專案資料中可知原因為生鐵製作過程造成較高之衝擊。

表 4.6.1.6 鐵容器回收路徑生命週期評估 Midpoint 結果

Container	M.C.	PR	CT
IRON	CA	8.58×10^{-7}	8.24×10^{-7}
	NC	4.64×10^{-7}	3.17×10^{-7}
	RI	1.52×10^{-6}	7.78×10^{-7}
	IR	4.68×10^{-9}	3.51×10^{-9}
	OD	6.64×10^{-11}	5.20×10^{-11}
	RO	1.10×10^{-9}	6.29×10^{-10}
	AE	1.31×10^{-2}	7.34×10^{-3}
	TE	8.55×10^{-1}	4.73×10^{-1}
	TA	3.12×10^{-2}	1.59×10^{-2}
	LO	1.34×10^{-2}	9.68×10^{-3}
	GW	2.02	9.46×10^{-1}
	NR	32.7	16.1
ME	7.78×10^{-2}	2.68×10^{-2}	

HH : Human health (unit: DALY); EQ : Ecosystem quality (unit : PDF*m2*yr) ; CC : Climate change (unit : kg_{eq} CO₂ into air) ; RE : Resources (unit : MJ). (請參見表 4.2.6)

4.6.2 鋁容器回收減碳及環境永續效益評估與情境分析

表 4.6.2.1 為製成鋁容器中各原料使用量 (SimaPro, 2010)，鋁容器主要成分有鋁礦與鋁錠，並且由表中我們可以看出要製成一公斤的鋁容器需

要將近兩倍的鋁礦。

表 4.6.2.1 鋁容器主要原料之單位使用量

Alumina	Anode
1.93	0.46

Unit : Kg.

表 4.6.2.2 為圖 3.8 中各過程所使用之 SimaPro 程序單元(unit process)資料，唯電力改用依國內資料所估算的程序單元。其中 OL 專案在本研究只分析到鋁錠，其原因與鐵錠相似，大部分鋁製品亦都會先產生鋁錠。

表 4.6.2.2 鋁容器生命週期評估所參考之 SimaPro 資料

LC Stage or Pathway	Source	
	Database	name
VM	Ecoinvent	Bauxite, at mine/ GLO U
PN	Ecoinvent	Aluminum, primary, ingot, at plant/ RNA
CR	Ecoinvent	Aluminium scrap, old, at plant/ RER U
OL	Ecoinvent	Aluminium, secondary, from old scrap, at plant/ RER U
LF	Ecoinvent	Disposal, aluminium, 0% water, to sanitary landfill/ CH U

表 4.6.2.3 為圖 3.8 各階段之減碳及環境永續效益，由表中我們可以看出製成鋁容器其製造過程造成之衝擊為主要，PN 比原料 VM 約增加 50 倍以上的衝擊，可看出製造時所造成的衝擊頗大，且 CC 的溫室氣體排放入頗高，由專案中說明鋁容器以原料冶煉所造成的碳排放頗大，如何減少製造所造成之衝擊為鋁容器生命週期主要目標。

表 4.6.2.3 鋁容器主要階段與路徑的生命週期評估結果

LC Stage or Pathway	Damage category			
	HH	EQ	CC	RE
VM	1.67×10^{-7}	2.60×10^{-2}	1.28×10^{-2}	8.30×10^{-1}
PN	9.21×10^{-6}	3.55×10^{-1}	14.4	152
CR	9.69×10^{-7}	5.66×10^{-2}	3.63×10^{-1}	3.98
OL	-8.90×10^{-6}	-2.55×10^{-1}	-13.3	-133
LF	4.64×10^{-8}	3.19×10^{-1}	2.08×10^{-2}	5.31×10^{-1}

CR: container (ALUMINIUM) recycle; HH : Human health (unit: DALY); EQ : Ecosystem quality (unit : PDF*m2*yr); CC : Climate change (unit : kg_{eq} CO₂ into air); RE : Resources (unit : MJ). (請參見表 4.2.3)

表 4.6.2.4 為鋁容器未回收的之比例 (PR) 包含掩埋，與現況下鋁容器回收與掩埋比例 (CT)，表中顯示鋁容器回收比例並不高。

表 4.6.2.4 鋁容器回收路徑其過程之百分比

Pathway	PN	CR	OL	LF
PR	100			100
CT	100	29.62	29.62	70.38

表 4.6.2.5 為一次回收法鋁容器所得之結果，依照表 4.6.2.4 所占比例得到之衝擊結果。其減碳效益為 2.35×10^7 公噸eCO₂，而其他永續環境效益如HH有 1.45×10^1 DALY、EQ 9.38×10^5 PDF*m2*yr 和RE 2.35×10^8 MJ。Qi,r為依據基金會提供資料，為 6,120 公噸。

表 4.6.2.5 鋁容器一次回收法生命週期評估結果及效益

Pathway	HH	EQ	CC	RE
PR	9.26×10^{-6}	6.71×10^{-1}	14.4	153
CT	6.89×10^{-6}	5.21×10^{-1}	10.6	114
PR-CT	2.36×10^{-6}	1.53×10^{-1}	3.84	38.4
(PR-CT)Qi,r	1.45×10^1	9.38×10^5	2.35×10^7	2.35×10^8

Qi,r: recycled quantity (6,120 tonnes); HH : Human health (unit: DALY); EQ : Ecosystem quality (unit : PDF*m2*yr); CC : Climate change (unit : kg_{eq} CO₂ into air); RE : Resources (unit : MJ).

表 4.6.2.6 為不同路徑之 IMPACT 2002+ 的 12 個 Midpoint 類別之衝擊值，表中結果可以看出現況回收方式雖有減少衝擊，並沒有大幅減少衝擊，PR 約較 CT 多 35%- 50% 間的衝擊，其中以 AE 與 ME 的增加比例最高。其中值得注意的是，IR(-28%)、OD(-54%)、TE(-13%)及 LO(-71%)原本 CT 之衝擊皆比 PR 來的大，其原因為 OL 結果在這四個類別為正的，採用回收容器再製並沒有減少這四類的衝擊，由專案資料中推測可能原因為回收需要更多的土地來存放容器、回收容器之運輸及回收過程再製成鋁錠使用到了微量金屬（銅、鋅等），可能為合金過程，故使這四類衝擊反而較高。

表 4.6.2.6 鋁容器回收路徑生命週期評估 Midpoint 結果

M.C.	PR	CT
CA	1.56×10^{-6}	1.11×10^{-6}
NC	5.74×10^{-7}	4.27×10^{-7}
RI	7.11×10^{-6}	5.35×10^{-6}
IR	1.25×10^{-9}	1.74×10^{-9}
OD	3.01×10^{-11}	6.60×10^{-11}
RO	6.46×10^{-9}	4.72×10^{-9}
AE	3.28×10^{-1}	2.32×10^{-1}
TE	7.78×10^{-2}	8.96×10^{-2}
TA	2.66×10^{-1}	1.92×10^{-1}
LO	2.20×10^{-3}	7.59×10^{-3}
GW	14.4	10.6
NR	150	112
ME	2.55	1.8

HH : Human health (unit: DALY); EQ : Ecosystem quality (unit : PDF*m2*yr); CC : Climate change (unit : $\text{kg}_{\text{eq}} \text{CO}_2$ into air); RE : Resources (unit : MJ). (請參見表 4.2.6)

4.7 綜合分析

本節主要分析比較各容器不同回收方式之效益，因只有玻璃容器有使用循環回收法分析，故依各容器一次回收法來比較各容器之單位效益與總效益。

表 4.7.1 所列為各容器以一次回收法分析近況下每一單位(kg)所造成的衝擊值。圖 4.7.1 為以玻璃為基準的比較圖，由圖中我們可以看出玻璃容器的溫室氣體排放量及環境衝擊皆較小，鋁容器的碳排放衝擊高出玻璃容器 20 倍，原因為其製造過程衝擊較玻璃容器來的高，依 SimaPro 專案，可看出鋁容器的製作會造成較大的衝擊。HH 以鐵容器的衝擊最高，為玻璃 14 倍。鋁容器的 RE 值也高出玻璃容器 12 倍，其中 HH 由表 4.6.1.6 可知原因為 NC 與 RI 有較高之衝擊，由鐵容器專案中看出 NC 是因以原料製造鋁容器所造成的衝擊頗顯著，而 RI 亦是因製造時的耗電所造成之結果，鋁容器專案中 RE 則主要是因 NR 造成，其原因也是在製造時的衝擊。EQ 中紙容器衝擊倍數為 6 倍，原因皆為製造過程衝擊較高，由 4.5.6 中看出紙容器是因 TE 及 LO 較高，原因皆為製成包裝容器時造成較高衝擊。上述結果可知鋁容器製造過程，相較於其他容器，會造成較高之衝擊。

表 4.7.1 各容器近況回收一次回收法生命週期評估結果

Container	Pathway	HH	EQ	CC	RE
Glass	CT	5.50×10^{-7}	1.10×10^{-1}	5.36×10^{-1}	9.27
PET		4.44×10^{-6}	1.84×10^{-1}	1.86	69.1
PE/PP		X	X	1.33	X
Carton		6.20×10^{-7}	6.07×10^{-1}	5.48	8.18
Iron		7.66×10^{-6}	5.93×10^{-1}	1.7	27.1
Aluminum		6.89×10^{-6}	5.21×10^{-1}	10.6	114

HH : Human health (unit: DALY); EQ : Ecosystem quality (unit : PDF*m2*yr); CC : Climate change (unit : kg_{eq} CO₂ into air); RE : Resources (unit : MJ).

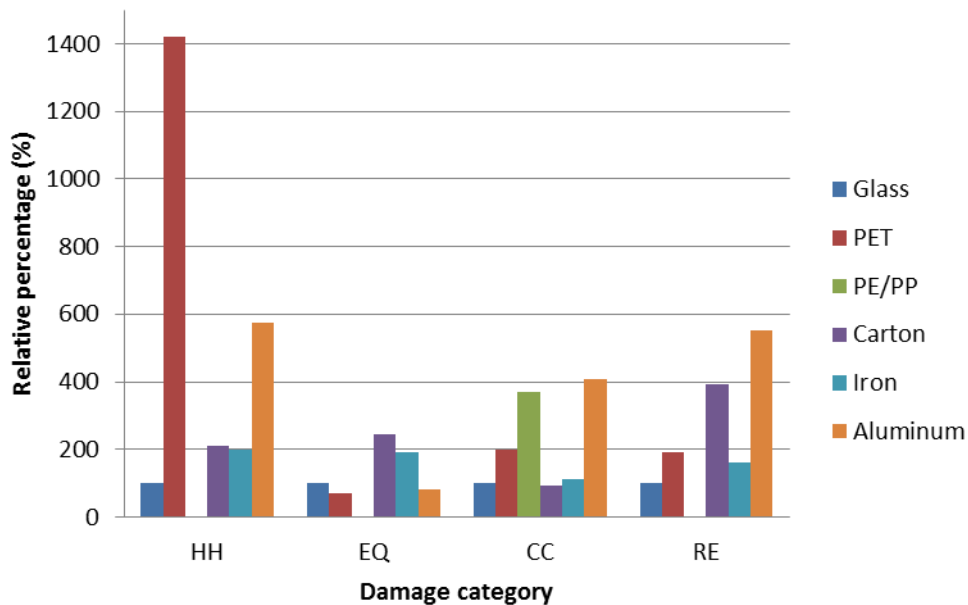


圖 4.7.1 不同容器近況回收下單位生命週期結果比值 (以玻璃容器為基準)

表 4.7.2 的為各容器進行一次回收法分析的單位效益及總效益值，圖 4.7.2 亦是以玻璃容器為基準所繪的單位效益比較圖，可看出減碳效益除了紙容器效益不如玻璃容器其他皆比玻璃容器來的高，又以鋁容器效益最高，約為玻璃容器之 4 倍，主要是因其不必再以原料製造，可減少不少衝擊。HH 以 PET 容器效益最高為玻璃容器之 14 倍，EQ 以紙容器最高，為玻璃容器 2.4 倍，RE 則以鋁容器效益最高為 5.5 倍。

圖 4.7.3 為各容器總效益比較圖，圖中我們可以明顯的看出除了 CC 中 PET 容器與 PE/PP 容器效益較玻璃容器高，分別為 1.2 倍及 1.7 倍，其他效益皆比玻璃容器低，其原因為其他容器回收量約為玻璃容器的 3% 至 50%。整體來看，玻璃容器效益最好，然後是 PET 容器，最後為 PE/PP 容器。

表 4.7.2 各容器一次回收法生命週期評估結果

Container	Pathway	HH	EQ	CC	RE
Glass	PR-CT	4.10×10^{-7}	1.92×10^{-1}	9.38×10^{-1}	6.94
PET		5.83×10^{-6}	1.37×10^{-1}	1.86	13.4
PE/PP		-	-	3.46	-
Carton		8.59×10^{-7}	4.69×10^{-1}	8.76×10^{-1}	27.2
Iron		8.15×10^{-7}	3.65×10^{-1}	1.05	11.3
Aluminum		2.36×10^{-6}	1.53×10^{-1}	3.84	38.4
Glass		(PR-CT)Q _{i,r}	1.67×10^2	3.32×10^7	1.63×10^8
PET	6.10×10^1		1.43×10^7	1.95×10^8	1.40×10^9
PE/PP	-		-	2.69×10^8	-
Carton	8.28		4.52×10^6	8.44×10^6	2.62×10^8
Iron	3.93×10^1		1.76×10^7	5.07×10^7	5.45×10^8
Aluminum	1.45×10^1		9.38×10^5	2.35×10^7	2.35×10^8

HH : Human health (unit: DALY); EQ : Ecosystem quality (unit : PDF*m2*yr); CC : Climate change (unit : kg_{eq} CO₂ into air); RE : Resources (unit : MJ).

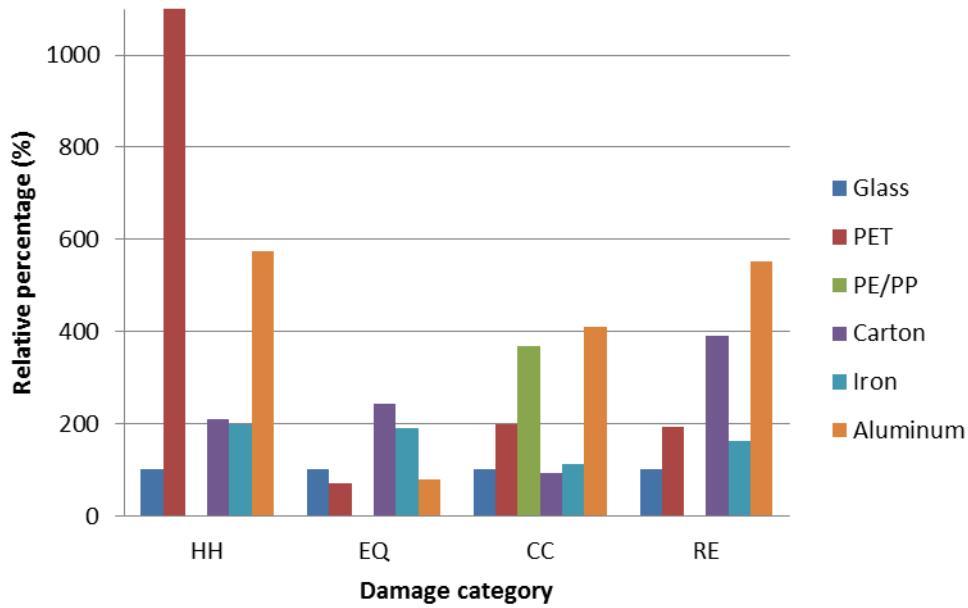


圖 4.7.2 不同容器一次回收法單位效益比較(以玻璃容器為基準)

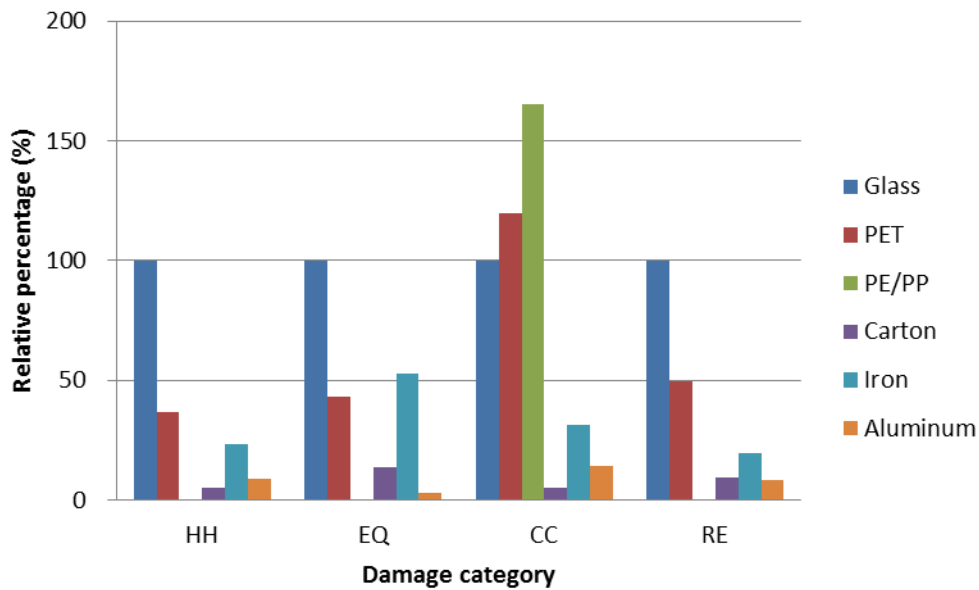


圖 4.7.3 不同容器一次回收法總效益比較(以玻璃容器為基準)

表 4.7.3 為各容器單位體積近況回收造成之排碳量及環境衝擊，由圖 4.7.4 也可看出鋁容器在單位體積下排碳量與環境衝擊皆較玻璃容器來的大，因如表 4.7.1 所示，其單位重量衝擊較高，其次為鐵容器，HH 與 EQ 也造成較高衝擊，雖其單位體體的重量並不算太重，但如圖 4.7.1 所示，

其單位重量造成衝擊亦較高。而玻璃容器因單位體積下重量較重，所造成之衝擊則排名第三。

表 4.7.3 各容器單位體積回收生命週期評估結果

Container	Pathway	HH	EQ	CC	RE
Glass	CT	3.74×10^{-7}	7.48×10^{-2}	3.64×10^{-1}	6.30
PET		1.78×10^{-7}	7.36×10^{-3}	7.44×10^{-2}	2.76
PE/PP		-	-	9.07×10^{-2}	-
Carton		1.55×10^{-8}	1.52×10^{-2}	1.37×10^{-1}	2.05×10^{-1}
Iron		1.28×10^{-6}	9.88×10^{-2}	2.83×10^{-1}	4.52
Aluminum		3.45×10^{-6}	2.61×10^{-1}	5.30	57.00

HH : Human health (unit: DALY); EQ : Ecosystem quality (unit : PDF*m2*yr); CC : Climate change (unit : kg_{eq} CO₂ into air); RE : Resources (unit : MJ).

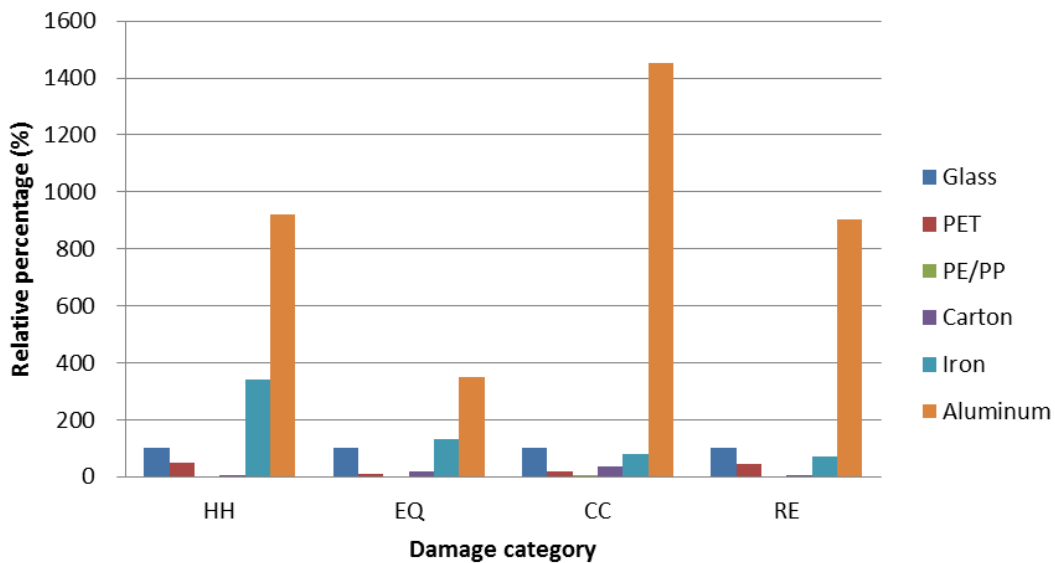


圖 4.7.4 不同容器單位體積近況回收衝擊比較(以玻璃容器為基準)

表 4.7.5 為各容器單位體積近況回收造成之減碳及環境效益，由圖 4.7.5 也可看出單位體積效益最好的為鋁容器，其 HH、EQ、CC 與 RE 效益分別為玻璃容器的 4.3 倍、0.5、3.0 倍與 4.1 倍，其他容器回收的效益皆不到玻璃容器的 50%。

表 4.7.4 各容器單位體積回收生命週期評估結果

Container	Pathway	HH	EQ	CC	RE
Glass	PR-CT	$2.79*10^{-7}$	$1.31*10^{-1}$	$6.38*10^{-1}$	4.72
PET		$2.33*10^{-7}$	$5.48*10^{-3}$	$7.44*10^{-2}$	$5.36*10^{-1}$
PE/PP		-	-	$2.36*10^{-1}$	-
Carton		$2.15*10^{-8}$	$1.17*10^{-2}$	$2.19*10^{-2}$	$6.08*10^{-1}$
Iron		$1.36*10^{-7}$	$6.08*10^{-2}$	$1.75*10^{-1}$	1.88
Aluminum		$1.18*10^{-6}$	$7.65*10^{-2}$	1.92	19.2

HH : Human health (unit: DALY); EQ : Ecosystem quality (unit : PDF*m2*yr) ; CC : Climate change (unit : kg_{eq} CO₂ into air) ; RE : Resources (unit : MJ).

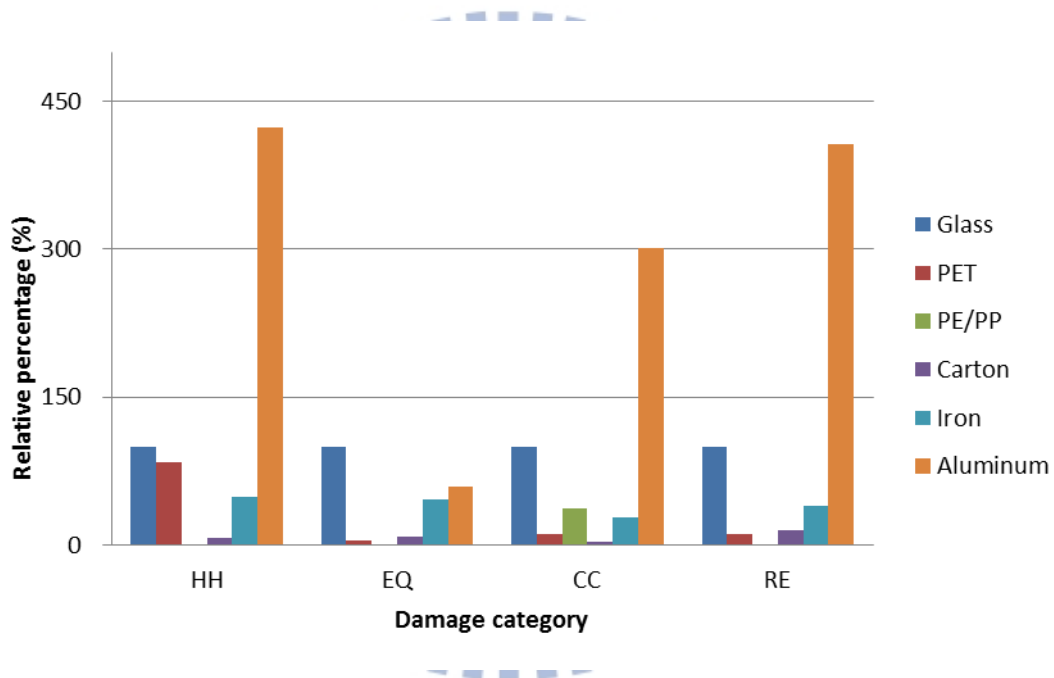


圖 4.7.5 不同容器單位體積近況回收效益比較(以玻璃容器為基準)

表 4.7.5 為各容器單位體積之 midpoint 值，先從各容器 PR 值來看，可看出單位體積之鋁容器造成較多衝擊，其 CA、NC、IR、RO、AE、TA、GW、NR 與 ME 皆比玻璃容器大 9~230 倍，其中差最多的為 ME，由 SimaPro 中也可看出是因鋁錠的製造過程造成較多的衝擊；而 PET、紙與鐵容器之 CA 分別比玻璃容器大 110、8 與 27 倍，紙容器之 OD 與 LO 分別大了 2.8 與 1.1 倍，鐵容器之 NC、TE 與 ME 分別大玻璃容器 1.2、1.3 和 2.4 倍，原因皆為原料收集與初級原料製造過程造成比玻璃高之衝擊。從 CT 值

看，各容器單位體積依舊是鋁容器衝擊最高，其 CA、NC、RI、RO、AE、TA、GW、NR 和 ME 皆比玻璃容器大 6~290 倍，其中相差最多的依舊為 ME，顯示出雖有進行回收，但鋁錠製造過程之衝擊還是有相當影響；PET、紙與鐵容器之 CA 分別比玻璃容器大 193、18.8 與 44.7 倍，鐵容器之 NC、AE、TE 和 ME 分別大玻璃容器 1.5、1.0、1.4 和 1.5 倍，原因皆因為原料製造過程造成之衝擊，但因有進行回收，我們也可看出其衝擊值有減少。



表 4.7.5 各容器單位體積 Midpoint 結果

M.C.	glass		PET		Caston		Iron		Aluminum	
	PR	CT	PR	CT	PR	CT	PR	CT	PR	CT
CA	2.19×10^{-8}	1.25×10^{-8}	2.44×10^{-6}	2.42×10^{-6}	1.75×10^{-7}	2.35×10^{-8}	5.83×10^{-7}	5.60×10^{-7}	1.06×10^{-6}	7.55×10^{-7}
NC	6.42×10^{-8}	3.62×10^{-8}	9.52×10^{-9}	2.10×10^{-9}	2.49×10^{-9}	-5.37×10^{-11}	7.89×10^{-8}	5.39×10^{-8}	2.87×10^{-7}	2.14×10^{-7}
RI	5.64×10^{-7}	3.24×10^{-7}	4.72×10^{-8}	3.65×10^{-8}	2.55×10^{-8}	1.61×10^{-8}	2.58×10^{-7}	1.32×10^{-7}	3.56×10^{-6}	2.68×10^{-6}
IR	1.63×10^{-9}	9.38×10^{-10}	5.12×10^{-10}	6.00×10^{-10}	2.78×10^{-10}	9.75×10^{-11}	7.96×10^{-10}	5.97×10^{-10}	6.25×10^{-10}	8.70×10^{-10}
OD	7.34×10^{-11}	4.26×10^{-11}	6.16×10^{-12}	2.67×10^{-12}	2.03×10^{-10}	-4.77×10^{-11}	1.13×10^{-11}	8.84×10^{-12}	1.51×10^{-11}	3.30×10^{-11}
RO	3.47×10^{-10}	2.07×10^{-10}	1.59×10^{-10}	1.36×10^{-10}	1.00×10^{-10}	2.69×10^{-11}	1.87×10^{-10}	1.07×10^{-10}	3.23×10^{-9}	2.36×10^{-9}
AE	2.26×10^{-3}	1.20×10^{-3}	3.63×10^{-4}	1.68×10^{-4}	1.25×10^{-4}	5.10×10^{-5}	2.23×10^{-3}	1.25×10^{-3}	1.64×10^{-1}	1.16×10^{-1}
TE	1.09×10^{-1}	5.60×10^{-2}	1.05×10^{-2}	7.04×10^{-3}	5.73×10^{-3}	-5.88×10^{-4}	1.45×10^{-1}	8.04×10^{-2}	3.89×10^{-2}	4.48×10^{-2}
TA	1.83×10^{-2}	1.05×10^{-2}	1.46×10^{-3}	1.09×10^{-3}	7.44×10^{-4}	3.75×10^{-4}	5.30×10^{-3}	2.70×10^{-3}	1.33×10^{-1}	9.60×10^{-2}
LO	2.37×10^{-2}	1.33×10^{-2}	5.52×10^{-4}	2.81×10^{-4}	2.56×10^{-2}	1.84×10^{-2}	2.28×10^{-3}	1.65×10^{-3}	1.10×10^{-3}	3.80×10^{-3}
GW	6.38×10^{-1}	3.58×10^{-1}	1.49×10^{-1}	8.28×10^{-2}	4.17×10^{-2}	1.63×10^{-2}	3.43×10^{-1}	1.61×10^{-3}	7.20	5.30
NR	11.0	6.30	3.3	2.9	1.04	2.43×10^{-1}	5.56	2.74	75.0	56.0
ME	5.62×10^{-3}	3.11×10^{-3}	2.55×10^{-3}	1.32×10^{-3}	3.54×10^{-3}	5.61×10^{-4}	1.32×10^{-2}	4.56×10^{-3}	1.28	9.00×10^{-1}

第五章 結論與建議

溫室氣體減量及永續環境均已是國家的重要目標，因而有必要了解容器回收的減碳與環境永續效益，再加上不同容器及不同回收路徑的效益均不同，本研究因而參考相關研究建立一些方法分析比較不同容器及不同回收路徑的減碳與環境永續效益，且根據不同情境進行模擬，以作為相關決策規劃的重要參考依據。以下說明研究成果與重要結論，並建議可繼續探討的方向及問題，以供後續研究參考。

5.1 結論

本研究主要研究成果包括方法之建立、各容器邊界界定、各容器減碳與環境效益、情境分析及綜合分析等，以下一一說明之。

1. 方法之建立：參考了 Song and Hyun (1999) 及 Vellini and Savioli (2009) 等文獻，本研究建立了一次回收法、回收途徑法與循環回收法等方法，依據所建立的方法收集所需要的資料進行分析。其優點為將容器製造與再利用過程數據規格化及統一化，並且利用不同方法估算效益，可以更清楚知道容器效益之可能範圍。唯循環回收法只適用以回收物再製容器的情形，若回收物不能再製容器，則不適用。
2. 各容器邊界界定：依據收集相關資料，評定適合研究的資料，並且選定各容器之邊界，目的是將數據統一化，採用相同的邊界及分析方法以利於比較。
3. 各容器減碳與環境效益：容器中因原料、製程與回收方式的不同，因而有不同的減碳與環境衝擊，將其過程數字化便能輕易知其衝擊大小，由數據中可以明顯的看出產品之製造佔了生命週期中主要的衝擊。以下簡述各容器回收之減碳及環境效益。

- (1) 玻璃容器：依近況一次回收及單位重量(1 kg)的HH、EQ、CC及RE的效益分別為 4.10×10^{-7} DALY、 1.92×10^{-1} PDF*m²*yr、 9.38×10^{-1} eCO₂和 6.94 MJ，而總效益則為 1.67×10^2 DALY、 3.32×10^7 PDF*m²*yr、 1.63×10^8 eCO₂和 2.82×10^9 MJ。依近況一次回收及單位體積(1000ml)下的HH、EQ、CC及RE效益分別為 2.79×10^{-7} DALY、 1.31×10^{-1} PDF*m²*yr、 6.38×10^{-1} eCO₂和 4.72 MJ。玻璃容器有回收再製成玻璃容器，因此進行循環回收計算，其HH、EQ、CC及RE的近況總效益分別為 1.67×10^2 DALY、 3.32×10^7 PDF*m²*yr、 1.63×10^8 eCO₂和 2.82×10^9 MJ，實際值預期落在此二個方法所得結果之間，因實際回收狀況不可能無數次回收，也不可能只回收一次。
- (2) PET容器：HH、EQ、CC及RE的一次回收單位重量效益分別為 5.83×10^{-6} DALY、 1.37×10^{-1} PDF*m²*yr、1.86 eCO₂和 13.4 MJ，而總效益分別為 6.10×10^1 DALY、 1.43×10^7 PDF*m²*yr、 1.95×10^8 eCO₂和 1.40×10^9 MJ。HH、EQ、CC及RE的近況一次回收單位體積效益分別為 2.33×10^{-7} DALY、 5.48×10^{-3} PDF*m²*yr、 7.44×10^{-2} eCO₂和 5.36×10^{-1} MJ。因PET回收率將近 100%，除了源頭減量，已沒有太多改善空間，故未再進行情境分析。
- (3) PE/PP容器：因資料不足以作完整的分析，PE/PP容器僅分析討論減碳效益，單位重量效益為 3.46 eCO₂，其總效益為 2.69×10^8 eCO₂。單位體積效益為 2.36×10^{-1} eCO₂。
- (4) 紙容器：HH、EQ、CC及RE的一次回收單位重量效益分別為 8.59×10^{-7} DALY、 4.69×10^{-1} PDF*m²*yr、 8.76×10^{-1} eCO₂和 27.2 MJ，而總效益分別為 8.28 DALY、 4.52×10^6 PDF*m²*yr、 8.44×10^6 eCO₂和 2.62×10^8 MJ。HH、EQ、CC及RE的近況一次回收單位體積效益分別為 2.15×10^{-8} DALY、 1.17×10^{-2} PDF*m²*yr、 2.19×10^{-2} eCO₂和

6.08×10^{-1} MJ。近況回收率 36.25%，由於之前紙餐盒費率較低，故不少回收物未進入基金會的回收系統，造成回收率較低，故本研究另以垃圾進場資料推估回收率約為 85.23%。由於目前紙容器費率已提高，且回收率逐年提高，因而亦模擬回收率 95% 的情境，效益較原本高了 11%。

- (5) 鐵/鋁容器：鐵容器的 HH、EQ、CC 及 RE 的一次回收單位重量效益分別為 8.15×10^{-7} DALY、 3.65×10^{-1} PDF \cdot m² \cdot yr、1.05 eCO₂ 和 11.3 MJ，而總效益分別為 3.93×10^1 DALY、 1.76×10^7 PDF \cdot m² \cdot yr、 5.07×10^7 eCO₂ 和 5.45×10^8 MJ，其中生鐵製造過程衝擊為製造過程中主要衝擊影響。HH、EQ、CC 及 RE 的近況一次回收單位體積效益分別為 1.36×10^{-7} DALY、 6.08×10^{-2} PDF \cdot m² \cdot yr、 1.75×10^{-1} eCO₂ 和 1.88 MJ；鋁容器的 HH、EQ、CC 及 RE 的一次回收單位重量效益分別為 2.36×10^{-6} DALY、 1.53×10^{-1} PDF \cdot m² \cdot yr、3.84 eCO₂ 和 38.4 MJ，而總效益分別為 1.45×10^1 DALY、 9.38×10^5 PDF \cdot m² \cdot yr、 2.35×10^7 eCO₂ 和 2.35×10^8 MJ，HH、EQ、CC 及 RE 的近況一次回收單位體積效益分別為 1.18×10^{-6} DALY、 7.65×10^{-2} PDF \cdot m² \cdot yr、1.92 eCO₂ 和 19.2 MJ。而在 12 個 Midpoint 類別之衝擊值，IR(-28%)、OD(-54%)、TE(-13%) 及 LO(-71%) 原本 CT 之衝擊皆比 PR 來的大，原因為回收需要更多的土地來存放容器、回收容器之運輸及回收過程再製成鋁錠使用到了微量金屬（銅、鋅等），可能為合金過程。

4. 情境分析：依照目前回收方式與比例，判斷玻璃容器與紙容器還有再修改的空間，而玻璃容器模擬了三種情境，結果顯示玻璃容器進行空瓶直接再利用之比例越多其效益越好，空瓶再利用比例最高為情境 A，HH、EQ、CC 及 RE 效益比循環回收小而大於一次回收，分別為 1.99 ~ 2.71×10^2 DALY、 $3.29 \sim 5.47 \times 10^7$ PDF \cdot m² \cdot yr、 $1.59 \sim 2.67 \times 10^8$ eCO₂ 和 2.86

~ 4.59×10^9 MJ，其他情境皆比此值差，紙容器因回收率較低還有改善空間，因此也模擬了另一種情境，效益皆比原本的多了 11%。其他容器因回收率已非常高，未來改善方向為源頭減量，唯此並不在本研究之範疇，故未進行相關分析。

5. 綜合分析：以一次回收法進行比較分析，當以 1kg 為功能單位比較時，鋁容器的衝擊最高，HH、EQ、CC 及 RE 分別為 2.36×10^{-6} DALY、 1.53×10^{-1} PDF \cdot m² \cdot yr、3.84 eCO₂ 和 38.4 MJ，除了 EQ 與其他容器差不多，其他值皆為最大，而單位減碳效益也以鋁容器最高，為玻璃容器的 4.1 倍，HH 以 PET 容器效益最高為玻璃容器 14 倍，EQ 以紙容器最高為玻璃容器 2.4 倍，RE 則以鋁容器最高為玻璃容器 5.5 倍，總效益則以玻璃容器效益較好，因其回收量遠大於其他容器；以 1L 為單位比較時，也以鋁容器衝擊為最高，HH、EQ、CC 及 RE 分別為玻璃的 9.2 倍、3.5 倍、14.5 倍和 9 倍，其次為鐵容器 HH 和 EQ 分別為玻璃的 3.4 倍與 1.3 倍，而單位效益以鋁容器效益較好，HH、EQ、CC 及 RE 分別為玻璃的 4.2 倍、0.6 倍、3 倍和 4 倍，其次為玻璃容器，最後為鐵容器，EQ 為玻璃的 0.8 倍，其餘效益皆不到玻璃的 50%。

5.2 建議

依據本研究研究過程的發現及經驗，提出下列建議，以供後續研究參考。

1. 資料盤查：由於一些容器沒有製造過程中及再製造等專案資料，各細項參數因而參考 SimaPro 相關專案與國外相關文獻進行分析，然而此方式對於推估減碳及環境效益可能誤差較大，未來應可在盤查資料盡可能地加強、補足相關資料，以求能較完整、充分呈現其所造成之衝擊，及估算更精確的效益值。

2. 生命週期評估：由於沒有本土的盤查資料，故本研究是採用 SimaPro 資料，由於 LCA 需投入相當多的時間收集相關資料，然而礙於所需盤查資料涉及廠商製程技術層面，缺乏本土性資料庫及數據流通管道，使得盤查工作更加困難。建議未來可與進一步與產學合作，建立各製程原物料投入、運輸、能源使用，以及再製造等長期統計資料，以分析降低生命週期盤查階段的數據不確定性。
3. 減碳與環境效益：未來若持續相關研究，可考量加入經濟層面，如不同費率有不同之回收率，再製造之費用與原料製成費用比較等，補足容器製程、產品及再製造產品種類之差異性，以期進行更全面性之分析。亦可考量探討環境效益整合性衝擊評估。

