

國立交通大學

環境工程研究所

碩士論文

容器回收之減碳與環境永續效益評估

**Assessment of Carbon Footprint Reduction and
Environmental Sustainability Benefits for Recycling
Used Containers**

研究生：鍾佩樺

指導老師：高正忠教授

中華民國 一百零二年 五月

容器回收之減碳與環境永續效益評估
**Assessment of Carbon Footprint Reduction and Environmental
Sustainability Benefits for Recycling Used Containers**

研究生：鍾佩樺

Student : Pei-Hua Chung

指導教授：高正忠

Advisor : Jehng-Jung Kao

國立交通大學
環境工程所
碩士論文

A Thesis

Submitted to Institute of Environmental Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Environmental Engineering

May, 2013

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國 一 百 零 二 年 五 月

摘要

回收容器是資源回收的重要政策之一，且已執行多年，唯國內回收容器可減少多少碳足跡及具有多大的環境永續效益，目前尚未有適當的方法或數據可供用以評估，本研究因而建立一套方法評估之。

本研究所擬建立的方法主要包括減碳和環境永續效益評估分析等兩大部分，首先界定本研究的範疇，含選定研究標的容器，然後依據所收集各容器原料與能源投入、製造、運輸、回收再利用與廢棄處置等過程中之投入及所排放之廢棄物等資料以軟體進行生命週期評估，再依據所得數據進行減碳和環境永續效益評估。減碳與環境永續效益採用一次回收法、回收路徑法及循環回收法等方法評估。除了分析及比較各方法所得到之結果，最後亦進行情境分析。

研究結果顯示，以 1kg 為功能單位時，製作鋁容器的排碳環境衝擊皆最高，因而回收效益亦最高，但總效益則以玻璃最好，PET 容器次序之，最後為 PE 容器。當以 1L 為功能單位時，仍以鋁容器的衝擊及效益最高，其次為玻璃，最後為鐵容器。所得成果除了可供評估容器回收減碳量和環境永續效益以外，亦可作為相關決策的參考數據，所建立的方法也預期可供進行其他回收相關評估時使用。

關鍵字：容器回收、減碳、環境永續效益、生命週期評估、永續環境系統分析。

Abstract

Container recycling is one of the important policies for resource recovery and has been implemented for many years in Taiwan. However, so far no appropriate method is available for estimating the carbon footprint reduction and environmental sustainability benefits for recycling containers. This research is thus initiated to establish methods to assess these benefits.

The methods to be developed in this study include two major parts for estimating the carbon footprint reduction and environmental sustainability benefits, respectively, for recycling containers. First, the containers to be studied are selected and their recycling and reuse scopes are defined. A software, SimaPro, is used to perform the life cycle assessment (LCA) of each container recycling, based on the data collected for material and energy inputs, production, transportation, recycle, reuse, and waste disposal. The carbon footprint reduction and environmental sustainability benefits are estimated based on the LCA results. The carbon footprint reduction and environmental sustainability benefits are evaluated by three methods: one-time recycling, recycling pathway, and recursive recycling. Finally, several possible scenarios with different material flow ratios for major life cycle stages are analyzed.

According to the LCA results for the functional unit of 1kg, the aluminum container has the highest impact and thus has the highest recycling benefit too. However, for the total overall recycling benefit, the top three are glass, PET, and PE containers instead. For the impact estimated based on the functional unit of 1L, the top three are aluminum, glass and iron containers. The results provide not only the estimations of carbon footprint reduction and environmental sustainability benefits, but also useful reference data for making related decisions. The methods established are also expected to be applicable for assessing other recycling tasks.

Keywords: container recycling, carbon footprint reduction, environmental sustainability benefit, life cycle assessment, sustainable environmental systems analysis.

致謝

本論文經多位人士協助、指導與修定，終於於 2013 年五月定稿完成。非常感謝指導教授高正忠老師於求學期間對我的教誨，包括在研究上不厭其煩的協助、生活處事方面教導以及自我時間管理的重要性，讓我得以在畢業典禮之前定稿完成。也非常感謝陳鶴文教授、陳維燁教授與潘子欽博士於口試時給我的指導與建議，使本論文更加完整及嚴謹，學生受益匪淺，對此深表感激。

感謝實驗室學姊宥禛於本論文相關之生命週期理論及軟體應用給予指導及幫助，協助解決研究遇到之問題，還有實驗室學長們維祐、彥宏、嘉仁幫助我解決生活上所遇到的困難，讓我研究過程得以順利；同屆好友蒨涵，在研究期間互相扶持及加油打氣；學弟妹們泓翔、柏鈞及詩雅，在我趕論文期間的幫忙，以及貼心協助訂便當與飲料。感謝本所所有協助過我的同仁、學長姐、同屆同學及學弟妹。感謝在我沒動力做研究時，給予我衝勁一同玩樂及辦活動的會長婉宇，讓我碩士班生活增添更多色彩。

另外感謝遠東化纖廠蔡榮桂協理、陳金新經理與陳慶彥主任、台灣再生陳副理、榮成紙業劉長雄先生、宏聚塑膠宏哲彥先生和資源回收基管會馬念和執行秘書等於研究期間相關容器之資料提供。感謝以上諸位的幫忙與指導，讓我的論文能更加順利完成。

最後要感謝我爸爸、媽媽及妹妹，因為有你們在我背後做支柱，故在我求學期間可以無憂無慮，專心於研究上；感謝爺爺奶奶、外公外婆、叔叔姑姑、表姊表弟及其他親戚，在我研究期間的關懷與照顧。僅將此論文獻給所有人。

鍾佩樺 謹誌於交大

民國一百零二年五月

目錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
致謝.....	iii
目錄	iv
表目錄	vi
圖目錄	ix
符號說明	xi
第一章 前言	1
1.1 研究緣起	1
1.2 研究目的	3
1.3 論文內容	4
第二章 文獻回顧	5
2.1 台灣容器回收發展政策與歷史	5
2.2 容器回收的減碳效益評估	5
2.3 容器回收的生命週期與環境永續效益評估	7
第三章 研究流程與方法	10
3.1 研究流程	10
3.2 回收容器研究範疇界定	13
3.2.1 國內容器回收現況	13
3.2.2 研究標的容器界定	15
3.2.3 玻璃容器生命週期與研究內容	17
3.2.4 PET 容器生命週期與研究內容	20
3.2.5 PE/PP 容器生命週期與研究內容	23
3.2.6 紙盒包生命週期與研究內容	26

3.2.7	鐵/鋁容器生命週期與研究內容.....	28
3.3	減碳效益評估範疇界定.....	32
3.3.1	減碳效益評估範疇界定.....	32
3.3.2	各容器回收之減碳效益評估.....	32
3.4	環境永續效益評估.....	33
3.4.1	LCIA 方法-Impact2002+.....	33
3.4.2	一次回收法.....	36
3.4.3	回收路徑法.....	36
3.4.4	循環回收法.....	37
3.5	情境分析.....	40
第四章	結果與討論.....	42
4.1	各容器回收相關資料收集與初步分析.....	42
4.2	玻璃容器回收減碳及環境永續效益評估與情境分析.....	44
4.3	PET 容器回收減碳及環境永續效益評估與情境分析.....	54
4.4	PE 容器回收減碳及環境永續效益評估與情境分析.....	60
4.5	紙盒包回收減碳及環境永續效益評估與情境分析.....	63
4.6	鐵/鋁容器回收減碳及環境永續效益評估與情境分析.....	67
4.7	綜合分析.....	73
第五章	結論與建議.....	81
5.1	結論.....	81
5.2	建議.....	84
參考文獻	86
附錄 A	循環回收法原始公式推導.....	92

表目錄

表 3.1	各容器回收情形及費率	14
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	16
表 3.3	IMPACT 2002+ 的中間及危害面向.....	35
表 3.4	各回收容器所分析之情境.....	41
表 4.1.1	發電所參考之 SimaPro 資料.....	43
表 4.1.2	SimaPro 本土發電資料與台電公布排放碳係數比較.....	43
表 4.2.1	玻璃容器各情境下各主要原料之單位使用量	45
表 4.2.2	玻璃容器生命週期評估所參考之 SimaPro 資料.....	45
表 4.2.3	玻璃容器主要階段與路徑的生命週期評估結果	46
表 4.2.4	玻璃容器一次回收法生命週期評估結果及效益	47
表 4.2.5	玻璃容器五個回收路徑其過程之百分比	48
表 4.2.6	玻璃容器五個回收路徑生命週期評估 Midpoint 結果.....	48
表 4.2.7	玻璃容器五個路徑的生命週期評估結果及效益	49
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.....	50
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	50
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.....	51
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.....	52
表 4.3.1	PET 容器各情境下各主要原料之單位使用量	55
表 4.3.2	PET 容器生命週期評估所參考之 SimaPro 資料.....	56
表 4.3.3	PET 容器主要階段與路徑的生命週期評估結果	57

表 4.3.4	PET 容器回收路徑其過程之百分比	58
表 4.3.5	PET 容器一次回收法生命週期評估結果及效益	58
表 4.3.6	PET 容器回收路徑生命週期評估各 Midpoint 類別之結果	59
表 4.4.1	PE/PP 容器主要原料之單位使用量	60
表 4.4.2	PE/PP 容器生命週期評估所參考之 SimaPro 資料	61
表 4.4.3	PE/PP 容器主要階段與路徑的碳排放結果	61
表 4.4.4	PE/PP 容器回收路徑其過程之百分比	62
表 4.4.5	PE/PP 容器一次回收法碳排放結果及效益	62
表 4.5.1	紙容器生命週期評估所參考之 SimaPro 資料.....	63
表 4.5.2	紙容器主要階段與路徑的生命週期評估結果	64
表 4.5.3	紙容器回收路徑其過程之百分比.....	64
表 4.5.4	紙容器一次回收法生命週期評估結果及效益	65
表 4.5.5	紙容器回收路徑生命週期評估 Midpoint 結果.....	66
表 4.6.1.1	鐵容器主要原料之單位使用量.....	67
表 4.6.1.2	鐵容器生命週期評估所參考之 SimaPro 資料.....	67
表 4.6.1.3	鐵容器主要階段與路徑的生命週期評估結果	68
表 4.6.1.4	鐵容器回收路徑其過程之百分比	68
表 4.6.1.5	鐵容器一次回收法生命週期評估結果及效益	68
表 4.6.1.6	鐵容器回收路徑生命週期評估 Midpoint 結果.....	69
表 4.6.2.1	鋁容器主要原料之單位使用量.....	69
表 4.6.2.2	鋁容器生命週期評估所參考之 SimaPro 資料.....	70
表 4.6.2.3	鋁容器主要階段與路徑的生命週期評估結果	70
表 4.6.2.4	鋁容器回收路徑其過程之百分比	71
表 4.6.2.5	鋁容器一次回收法生命週期評估結果及效益	71

表 4.6.2.6	鋁容器回收路徑生命週期評估 Midpoint 結果.....	72
表 4.7.1	各容器近況回收一次回收法生命週期評估結果	74
表 4.7.2	各容器一次回收法生命週期評估結果	75
表 4.7.3	各容器相單位體積回收生命週期評估結果	77
表 4.7.4	各容器單位體積回收生命週期評估結果	78
表 4.7.5	各容器單位體積 Midpoint 結果.....	80



圖目錄

圖 3.1(a)	研究架構	12
圖 3.1(b)	單一容器生命週期示意圖	12
圖 3.2	1997 年至 2010 年廢容器回收量	13
圖 3.3	玻璃容器生命週期	19
圖 3.4	PET 容器生命週期	22
圖 3.5	PE 容器生命週期	25
圖 3.6	紙盒包生命週期	27
圖 3.7	鐵容器生命週期	29
圖 3.8	鋁容器生命週期	31
圖 3.8	玻璃循環回收之生命週期	37
圖 4.2.1	不同 Closed-loop 回收再製率下各原料之用量	44
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)	49
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)	52
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)	53
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)	54
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)	74
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)	76
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)	76
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)	77

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)

.....78



符號說明

- A : 情境 A
- $A_{c,p,i}$: 容器 c 路徑 p 回收方式(含未回收)i 所佔的比例
- AE : aquatic ecotoxicity (unit : PDF*m2*yr)
- B : 情境 B
- B_{OL} : 所估算之 OL 效益
- Bl_c : 容器 c 依據一次回收法所算之減碳和環境永續效益值
- $BP_{c,p}$: 容器 c 回收路徑 p 之減碳和環境永續效益值
- C : 情境 C
- C_r : 依據碳排放量數據所估算用以推估其他類衝擊的比例值
- C_{OM} : OM 專案之碳排放量
- C_{RM} : 遠東新世紀公司所提供以回收 PET 再製聚酯粒的碳排放量
- C_{VM} : VM 專案之碳排放量
- CA : carcinogens (unit: DALY)
- CC : climate change (unit : $kg_{eq} CO_2$ into air)
- CL : closed-loop recycle, including CR and re-production
- CR : container recycle
- CT : current typical practice
- EB : empty bottle reuse

- EQ : ecosystem quality (unit : PDF*m²*yr)
- E[β] : 容器回收總排碳量和環境衝擊量
- E[β_i] : 經過生命週期中階段 i 的排碳量或環境衝擊量
- E[n_i] : 循環經過生命週期中階段 i 的總量
- F : 循環回收法中容器使用後回收之比例
- G : 情境 G，為近期台灣的回收狀況
- GW : global warming (unit : kg eq CO₂ into air)
- HH : human health (unit: DALY)
- I_{c,n} : 每公斤容器 c 未回收下的碳排放量或環境永續衝擊量
- I_{c,r} : 每公斤容器 c 典型回收下的碳排放量或環境永續衝擊量
- I_{c,p,n} : 每公斤容器 c 路徑 p 未回收下的碳排放量或環境永續衝擊量
- I_{c,p,i} : 每公斤容器 c 回收路徑 p 回收方式 i 的碳排放量或環境永續衝擊量
- I_{OR} : 回收 PET 再製成聚酯粒之衝擊估算值
- I_{OM} : OM 專案之衝擊值
- I_{VM} : VM 專案之衝擊值
- IN : 焚化
- IR : ionizing radiation (unit: DALY)
- L、LF : 掩埋

LO : land occupation (unit : PDF*m2*yr)

M.C. : midpoint category

ME : mineral extraction (unit : MJ)

MP : 原料準備階段

MSW : 都市廢棄物

NR : non-renewable energy (unit : MJ)

NC : non-carcinogens (unit: DALY)

OD : ozone layer depletion (unit: DALY)

OL : open-loop

OM : the original raw materials used in production, replaced by open-loop recycled containerse

OR : 開環回收

P : 製造階段

PN : container production from virgin materials without using recycled containers.

PR : container production without recycling, but including landfill.

$Q_{c,r}$: 容器c總回收量，如 $Q_{g,r}$ 為玻璃容器的總回收量

R : 回收階段

R_c : 閉環回收

- R_u : 空瓶直接再利用
- R_o : 開環回收
- RE : resources (unit : MJ)
- RI : respiratory inorganics (unit: DALY)
- RO : respiratory organics (unit: DALY)
- r_c : 閉環回收所佔的百分比
- r_u : 空瓶直接再利用所佔的百分比
- r_o : 開環回收所佔的百分比
- TA : terrestrial acid/nutria (unit : PDF*m2*yr)
- TE : terrestrial ecotoxicity (unit : PDF*m2*yr)
- u_o : 循環回收法中開環回收的比例
- VM : major virgin materials for container production
- w : 廢棄比例
- W_s : 循環回收法中回收後之廢棄比例
- α : 循環回收法中空瓶再利用的比例
- β_i : 單位容器經過階段 i 的排碳量或衝擊量