

廢塑膠再製成再生塑膠粒之水足跡研究

呂博裕^{1*} 陳欽雨² 陳志鵬¹ 張國一¹

¹明新科技大學工業工程與管理系所

30401 新竹縣新豐鄉新興路一號

²世新大學企業管理學系

11645 台北市文山區木柵路一段 111 號

*byleu@must.edu.tw

摘要

本研究係依據 ISO 14046 水足跡標準及 H₂Oe 水足跡評估法，探討再生塑膠粒進行水足跡評估之必要原則與方法，以獲致水足跡評估結果。H₂Oe 水足跡評估法結合了消耗用水與降級用水（即品質退化之水）的潛在環境衝擊，而彙整成一個以生命週期評估為基礎之指標，稱為產品之水足跡。本研究以一間環保局核可之廢塑膠再利用公司為個案，並選擇個案公司生產量最多的再生塑膠粒為標的產品，亦即選擇聚丙烯再生塑膠粒進行水足跡評估。在系統邊界上是屬於「搖籃到大門」模式，其水足跡量化包含該產品生命週期之原料取得與製造等階段，功能單位為「一袋聚丙烯再生塑膠粒（重量為 653 公斤）」。本研究結果顯示，個案公司所生產的聚丙烯再生塑膠粒每功能單位之水足跡為 514.287 KL H₂Oe（即 514287 公升 H₂Oe）。本文也探討了一個節水情境，該節水情境每功能單位之水足跡為 511.077 KL H₂Oe，與基本情境相比，節水情境每功能單位之水足跡減少了 3.21 KL H₂Oe。

關鍵詞：生命週期評估，水足跡，聚丙烯，再生塑膠粒

Study of the Water Footprint of Recycled Plastic Particles Reproduced from Waste Plastics

BOR-YUH LEU^{1*}, CHIN-YEU CHEN², CHIH-PENG CHEN¹ and KUOI CHANG¹

¹Department of Industrial Engineering and Management, Minghsin University of Science & Technology

No. 1, Xinxing Road, Xinfeng, Hsinchu 30401, Taiwan, R.O.C.

²Department of Business Administration, Shih Hsin University

No. 111, Mu-Cha Road, Sec. 1, Taipei 11645, Taiwan, R.O.C.

*byleu@must.edu.tw

ABSTRACT

In this study, the standards of the ISO 14046 water footprint (WF) and H₂Oe WF assessment methods were applied to investigate the required principles and methods for assessing the WF of recycled plastic particles. The WF of recycled plastic particles was obtained based on the relevant standards. The H₂Oe WF assessment method involves combining the potential environmental impact

of both consumptive and degradative water use and integrating them into a single LCA-based indicator called product WF. A real waste plastic recycling company authorized by the Bureau of Environmental Protection was examined as a case study, and the most popular form of recycled plastic particles (i.e., polypropylene (PP) recycled plastic particles) in the company was selected as the target product to assess the WF of recycled plastic particles. The system boundary was "cradle to gate," denoting that WF quantification must include the life cycle of the products from raw material acquisition to production. The functional unit was "a bag of PP recycled plastic particles (653 kg in weight)." The results of the study indicate that the WF of PP recycled plastic particles was 514.287 KL H₂Oe. In addition, this study investigated a water-saving scenario, in which the WF of PP recycled plastic particles was observed to be 511.077 KL H₂Oe, thereby exhibiting a reduction of 3.21 KL H₂Oe when compared with the WF in the base scenario.

Key Words: Life Cycle Assessment, Water Footprint, Polypropylene, Recycled Plastic Particles

一、前言

政府間氣候變遷委員會 (intergovernmental panel on climate change; IPCC) 第四份評估報告, 直指氣候變遷將加重目前人口增長、經濟變革和土地使用 (包含城市化) 對水資源造成的壓力。且根據高可信度的預測 (意指大約有八成機會結果正確), 在某些中緯度和乾燥的熱帶地區, 由於降水減少而蒸騰率上升, 逕流將減少 10%-30%。許多半乾旱地區 (如: 地中海流域、美國西部、非洲南部和巴西東北) 的水資源將由於氣候變化而減少。預估受乾旱影響的地區將有所增加, 並有可能對許多行業 (如: 農業、供水、能源生產和衛生) 產生不利影響 [14]。

全球重量級投資機構環境責任經濟聯盟 (coalition for environmentally responsible economics; CERES) 發表專題報告指出: 「水資源萎縮對企業的風險, 將比石油危機還大。而那些面對最大風險的, 將是必須大量用水或冷卻發電機的科技業及農業、飲料、服飾、生技製藥、林業、金屬採礦等行業」 [5]。

有鑒於目前全球水資源的不足, 世界各國皆開始推動企業水資源資訊揭露宣導或計劃, 以加強企業對水資源管理的概念。例如, 2009 年繼碳揭露計劃 (carbon disclosure project; CDP) 後, 成立之 CDP 水揭露 (water disclosure) 計劃, 透過大型企業提供關鍵性的水相關資料, 作為企業對水資源管理的認知與投資風險管控 [6]。

台灣地區年平均降雨量達 2,510 公釐, 高於世界平均值, 惟降雨分布不均, 多集中於五月至十月, 因此可資利用之降雨量僅約 20% 至 25%。因為老天爺不賞臉, 台灣 2014 年的降雨量只有往年的三分之二, 全台水庫集水區的雨量更

只有平均的 3 到 5 成, 除翡翠水庫之外, 每座水庫都喊渴。中研院地球科學研究所研究員汪中和畫出台灣從 1901 年到去年的平均雨量, 發現從 1960 年的暖化現象發生後, 台灣「風調雨順」的日子愈來愈少, 乾旱發生的節奏愈來愈快、強度也愈來愈強, 大旱的間距從 15 年、10 年, 到小於 10 年 [4]。

國際標準化組織 (international organization for standardization; ISO) 於 2014 年 8 月, 發行「ISO 14046:2014 水足跡—原則、要求、和指引」, 詳述以生命週期角度來評估產品、過程和機構水足跡的原則、要求和指引, 主要目標是推動水足跡的評估, 協助機構有效率地量度及管理用水 [16]。

石化工業是產生溫室氣體及耗用水資源的主要產業之一, 高分子聚合物為主要產品, 也就是塑膠產品。塑膠原料主要為石化工業所產生的乙烯與丙烯類產物, 丙烯 (propylene) 主要用於生產聚丙烯 (polypropylene; PP)。近幾年, 全球丙烯的需求量以年均約 3.5% 的速度成長, 北美和西歐需求增速 1% 左右, 亞洲地區需求成長率預計超過 5%, 其中中國成長率高達 8% [2]。

塑膠產品主要分熱塑性塑膠與熱固性塑膠, 熱固性塑膠經過加熱固化後硬化成塑膠材料, 為不可逆反應, 不可重複塑型再利用。熱塑性塑膠則可經過重新加熱再降溫, 使其重新軟化再固化, 而不改變其化學特性。PP 就是熱塑性塑膠之一, 它可以加熱至特定溫度使其軟化後重新造粒, 並回到資源鏈再利用。

2011 年環保署調查塑膠製品佔國人生產廢棄物的第 3 名。大量的塑膠垃圾如不能妥善回收或掩埋處理, 將對人類

生存環境造成重大威脅 [3]。因此將廢塑膠加熱至特定溫度使其軟化後重新造粒，並回到資源鏈再利用，提供了塑膠粒原料的另一種選擇，如果在水資源之耗用上再生塑膠粒 (recycled plastic particles) 比新品塑膠粒還要低的話，那麼在相同品質水準上，再生塑膠粒在塑膠粒原料所佔的比重將會逐漸提高。

本研究係依據 ISO 14046 水足跡標準及 H₂Oe 水足跡評估法，探討再生塑膠粒進行水足跡評估之必要原則與方法，以獲致水足跡評估結果。H₂Oe 水足跡評估法結合了消耗用水與降級用水 (即品質退化之水) 的潛在環境衝擊，而彙整成一個以生命週期評估為基礎之指標，稱為產品之水足跡。本研究以一間環保局核可之廢塑膠再利用公司為個案，並選擇個案公司生產量最多的再生塑膠粒為標的產品，亦即選擇 PP 再生塑膠粒進行水足跡評估。在系統邊界上是屬於「搖籃到大門」模式，其水足跡量化包含該產品生命週期之原料取得與製造等階段，功能單位為「一袋 PP 再生塑膠粒 (PP 再生塑膠粒與太空包合計 653 公斤)」。本研究結果可作為再生塑膠粒業者進行產品生命週期節水之依據，亦可提供關心環保議題之客戶在選購塑膠粒原料 (再生塑膠粒或新品塑膠粒) 之參考。

二、文獻探討

水足跡乃人類耗用淡水資源的指標，是荷蘭籍教授 Arjen Y. Hoekstra 於 2002 年所提出 [12]。Hoekstra 教授提出的水足跡原指產品水足跡，指的是生產一產品所耗用的淡水水量。其後，Hoekstra 與 Chapagain [10] 又將水足跡的概念加以擴充，並將其區分為藍水足跡 (blue water footprint)、綠水足跡 (green water footprint)、和灰水足跡 (grey water footprint) [1]。

水足跡網絡 (water footprint network; WFN) 是推動水足跡的國際組織之一，係由提出水足跡的 Hoekstra 教授主導，在 UNEP (United Nations environment programme)、WBCSD (world business council for sustainable development) 等組織的協助下成立，主要目的為推廣水足跡概念並落實水足跡的估算。WFN 並出版水足跡評估手冊 [11]，此手冊對水足跡概念、內容、估算原則和方法有詳細的說明 [1]。

根據 The SAI Platform Water Committee [23] 之歸納結果，農產品 (可擴大適用於其他產品) 主要的水足跡評估方法有以下兩種：

1. 水足跡網絡 (WFN) 法 [11]
2. 使用 ISO 標準架構之生命週期評估 (life cycle assessment, LCA) 法 [15, 16]

Ridoutt and Pfister [18, 19] 提出一種新的水足跡評估方法，稱為 H₂Oe 法或 H₂O 當量法，此方法屬於以上所提第 2 種方法，並屬於中點衝擊評估方法。最近幾年採用 H₂Oe 法之水足跡評估文獻包括：Page et al. [17]、Ridoutt et al. [21]、Ridoutt et al. [20]、Ridoutt et al. [22]、Zonderland-Thomassen and Ledgard [25]、Danielsson [7]、Huang et al. [13]、Zonderland-Thomassen et al. [26]，以下將針對這些文獻稍作說明。

Page et al. [17] 探討供應澳洲雪梨 (Sydney) 市場之番茄生產 (tomato production) 的水足跡，作者考慮三個生產系統：一個位於昆士蘭州邦德堡地區 (室外耕種)、一個位於雪梨地區 (溫室耕種)、一個位於新南威爾斯高原 (溫室耕種)。在系統邊界上是屬於「搖籃到大門」模式，其水足跡量化包含番茄生命週期之番茄種植與番茄採收等階段，功能單位為「一公斤新鮮番茄」。作者採用 H₂Oe 法，但只考慮消耗用水 (consumptive water use; CWU)，並未考慮降級用水 (degradative water use; DWU)。研究結果顯示每功能單位番茄之水足跡分別為 3.2~3.5 L H₂Oe (昆士蘭州邦德堡地)、27 L H₂Oe (雪梨地區)、3.6 L H₂Oe (新南威爾斯高原)。

Ridoutt et al. [21] 探討澳洲新南威爾斯州六處牛肉生產系統 (beef production system) 的碳足跡與水足跡，在系統邊界上是屬於「搖籃到大門」模式，其量化包含牛肉生命週期之牛隻飼養與牛肉生產等階段，功能單位為「一公斤牛肉」。在碳足跡方面，研究結果顯示每功能單位牛肉之碳足跡介於 10.1 to 12.7 kg CO₂e。在水足跡方面，本研究採用 H₂Oe 法，研究結果顯示每功能單位牛肉之水足跡介於 3.3~221 L H₂Oe。

在另一篇論文，Ridoutt et al. [20] 陳述澳洲新南威爾斯州六處牛肉生產系統的水足跡研究，在系統邊界上是屬於「搖籃到大門」模式，其水足跡量化包含牛肉生命週期之牛隻飼養與牛肉生產等階段，功能單位為「一公斤牛肉」。作者採用 H₂Oe 法，但只考慮消耗用水 (CWU)，並未考慮降級用水 (DWU)。研究結果顯示每功能單位牛肉之水足跡介於 3.3~221 L H₂Oe，這些水足跡差異反應出生產系統所在位置之水壓力指數 (water stress index; WSI) 的不同，六處生產系統所在位置之 WSI 介於 0.012~0.815。

Ridoutt et al. [22]探討羊肉 (lamb) 的水足跡，羊隻飼養與羊肉生產是在澳洲維多利亞州，然後送到美國銷售、消費，在系統邊界上是屬於「搖籃到大門」模式，其水足跡量化包含羊肉生命週期之羊隻飼養、羊肉生產、銷售、消費等階段，功能單位為「一公斤羊肉」。作者採用 H_2Oe 法，但只考慮消耗用水 (CWU)，並未考慮降級用水 (DWU)。研究結果顯示每功能單位羊肉之水足跡為 44 L H_2Oe 。

Zonderland-Thomassen and Ledgard [25]採用不同的水足跡評估方法，探討位於紐西蘭 Waikato 區域 (非灌溉、中度雨量) 與 Canterbury 區域 (灌溉、低雨量) 乳牛飼養的水足跡。研究結果顯示，採用 WFN 法所評估牛奶的水足跡分別為：Waikato 區域之 945 L H_2O/kg 及 Canterbury 區域之 1084 L H_2O/kg ，且 Waikato 區域有較高之綠水足跡，而 Canterbury 區域有較高之藍水足跡。採用 H_2Oe 法所評估牛奶的水足跡分別為：Waikato 區域之 0.011 L H_2Oe/kg 及 Canterbury 區域之 7.1 L H_2Oe/kg 。

Danielsson [7] 探討瑞典 Volvo 卡車生產 (truck production) 的水足跡，在系統邊界上是屬於「大門到大門」模式，其水足跡量化只包含卡車生命週期之車艙與框架樑製造階段 (Volvo 位於瑞典之 Umea 工廠與 Gothenburg 工廠)，功能單位為「30,000 輛卡車所需之車艙與框架樑」。作者採用三種中點衝擊評估方法： H_2Oe 法、水足跡網路 (Water Footprint Network)、生態稀缺法 (Ecological scarcity method)，這些方法皆考慮了水數量與水品質。由於這三種方法之指標與單位各異，因此作者無法將這三種方法的計算結果做比較。針對 H_2Oe 法，研究結果顯示每功能單位所消耗用水 (CWU) 為 0.973 $Mm^3 H_2Oe$ 、降級用水 (DWU) 為 1.974 $Mm^3 H_2Oe$ ，因此每功能單位之水足跡為 2.947 $Mm^3 H_2Oe$ 。

Huang et al. [13] 探討中國黑龍江省牛奶生產 (milk production) 的水足跡，在系統邊界上是屬於「搖籃到大門」模式，其水足跡量化包含牛奶生命週期之乳牛飼養與牛奶生產等階段，功能單位為「一公斤牛奶」。作者採用 H_2Oe 法，但只考慮消耗用水 (CWU)，並未考慮降級用水 (DWU)。研究結果顯示每功能單位牛奶之水足跡為 11 L H_2Oe ，此結果可與美國加州所生產牛奶的 461 L H_2Oe/kg 水足跡及紐西蘭所生產牛奶的 0.01 L H_2Oe/kg 水足跡做比較。

Zonderland-Thomassen et al. [26] 採用 H_2Oe 法，根據生命週期原則以探討紐西蘭牛隻與羊隻飼養的水足跡。在系統

邊界上是屬於「搖籃到大門」模式，但排除動物運輸或加工，資料蒐集涵蓋 2009 與 2010 年，且包括紐西蘭各地之 426 家不同型態之牛隻與羊隻牧場。研究結果顯示，牛隻的水足跡為 0.37 L H_2Oe/kg ，比文獻上記載在澳洲及英國生產之牛隻的水足跡還低。至於羊隻的水足跡為 0.26 L H_2Oe/kg ，比文獻上記載在英國生產之羊隻的水足跡還低。

三、研究架構與方法

(一) 研究架構

本研究之研究架構如圖 1 所示。研究架構之核心是「水足跡評估」，其輸入包括：原則、目的與範疇、水足跡盤查分析、水足跡衝擊評估、水足跡盤查工具、生命週期評估 (LCA) 軟體及資料庫等，其輸出為水足跡評估結果及結果詮釋，接著研擬可行的節水情境，並計算節水情境之節水績效。

(二) 水足跡評估原則

ISO 14046 水足跡標準係以生命週期為發展基礎，整體架構及要求與 ISO 14044 生命週期評估之原則一致，這些原則包括：生命週期觀點、環境的聚焦、相對的方法及功能單位、反覆的方法、透明度、關聯性、完整性、一致性、準確性、科學方法的優先使用、地理的相關性、及全面性 [15, 16]。

(三) 水足跡評估之四層面

依據 ISO 14046 水足跡標準，水足跡評估涵蓋目的與範疇的定義、水足跡盤查分析、水足跡衝擊評估、與水足跡評估結果的詮釋等四個層面 (phase)，如圖 2 所示 [16]。

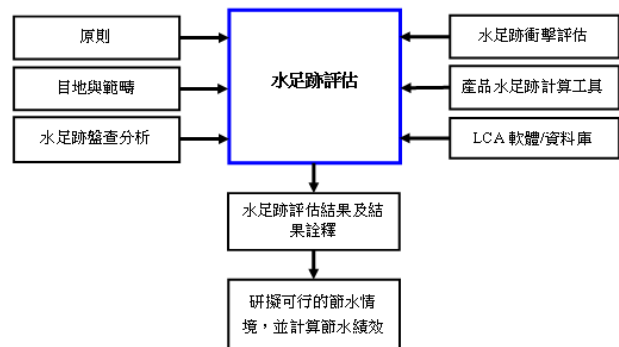


圖 1. 研究架構圖

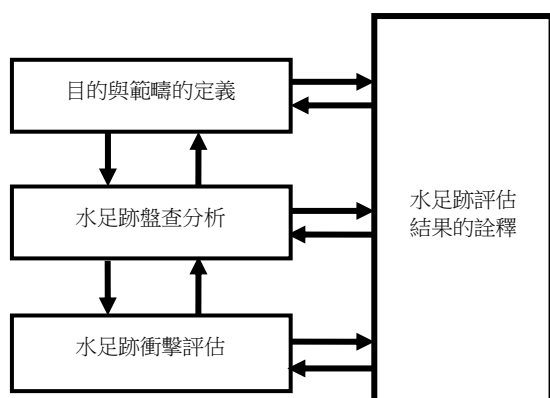


圖 2. 水足跡評估之四層面

(四) H₂Oe 水足跡評估法

Ridoutt and Pfister [18, 19]提出一種新的水足跡評估方法，稱為 H₂Oe 法或 H₂O 當量法，此方法屬於使用 ISO 標準架構之生命週期評估 (LCA) 法。此方法結合消耗用水 (CWU) 與降級用水 (DWU) 的潛在環境衝擊，而彙整成一個以生命週期評估 (LCA) 為基礎之指標 (indicator)，並以「L (公升) H₂Oe」為單位。消耗用水 (CWU) 與從水體 (water body) 移除水有關，並考慮當地的水壓力指數 (water stress index; WSI)；而降級用水 (DWU) 與影響水的品質 (water quality) 之排放有關，代表水污染程度，並以理論水體積 (theoretical water volume) 表示。H₂Oe 法比以前使用灰水 (grey water) 觀念更能充分理解且穩健地將降級用水 (DWU) 納入水足跡計算。

採用 H₂Oe 水足跡評估法，「每單位能資源或廢棄物」之水足跡的計算公式如下：

$$\text{水足跡 (H}_2\text{Oe)} = \text{CWU (H}_2\text{Oe)} + \text{DWU (H}_2\text{Oe)} \quad (1)$$

此處，

CWU (H₂Oe) 代表消耗用水

DWU (H₂Oe) 代表降級用水

$$\text{CWU (H}_2\text{Oe)} = \sum_i [(\text{CWU}_i \times \text{WSI}_i) / \text{WSI}_{\text{global}}] \quad (2)$$

此處，

CWU_i 代表地區 i 之消耗用水

WSI_i 代表地區 i 之水壓力指數

WSI_{global} 代表全球水壓力指數 (其值為0.602)

$$\text{DWU (H}_2\text{Oe)} = \text{ReCiPe}_{\text{points}} (\text{emissions to water for product system}) / \text{ReCiPe}_{\text{points}} (\text{global average for 1 L consumptive water use}) \quad (3)$$

此處，

ReCiPe_{points} (emissions to water for product system) 代表產品系統排放到水中的污染物 (即讓水的品質改變) 之總ReCiPe點數

ReCiPe_{points} (global average for 1 L CWU) 代表1 L (公升) 消耗用水之全球平均ReCiPe點數 (其點數為 1.86E-06)

公式 (2) 中，CWU (H₂Oe) 是指消耗用水之水足跡，計算方式是將地區 i 之消耗用水 (CWU_i) 乘以地區 i 之水壓力指數 (WSI_i)，再除以全球水壓力指數 (WSI_{global})，然後沿著產品生命週期將包含地區之值加總起來 (Σ_i)。CWU_i 之值可採用 “ReCiPe-water depletion 點數”。WSI_i 之值介於 0~1，而高 WSI 地區的用水較低 WSI 地區的用水來得匱乏。WSI_i 之值可利用 Growing Blue 網站之 “The Growing Blue Tool” 查詢各個國家或地區之 WSI，例如：衣索匹亞之 WSI=0.205、台灣之 WSI=0.478、美國之 WSI=0.499、西班牙之 WSI=0.715 [9]。WSI_{global} 之值為 0.602，代表在全球平均水壓力指數下，消耗 1 L (公升) 淡水對水系統的負荷。

公式 (3) 中，DWU (H₂Oe) 是指降級用水之水足跡，計算方式是將產品系統排放到水中的各種污染物 (目前包括：freshwater ecotoxicity 與 freshwater eutrophication) 之 ReCiPe 點數加總起來，再除以 1 L (公升) 消耗用水之全球平均 ReCiPe 點數 (其點數為 1.86E-06)。ReCiPe 是一種衝擊評估方法 (impact assessment methodology)，目前是第一版 [8]。

四、個案公司簡介

本研究以位於桃園市楊梅的一家環保局核可之廢塑膠再利用公司為個案 (稱為個案公司)，個案公司成立於 2007 年，主要針對桃園縣境內事業單位產生之廢塑膠進行再利用回收處理，更於 2010 年在台南縣轉投資另一分公司，積極拓展南部科學園區內之合作廠商。

個案公司 2012 年引進新設備，將部分原本需先經過粉

碎製程之廢料，改為直接進入塑膠壓出造粒成型程序，此舉可節省粉碎程序之工時，進而增加廢塑膠回收程序之效率，同時也減少廢塑膠再生所需耗能，使得回收再製更減少溫室氣體排放及水資源耗用。

個案公司生產之聚丙烯再生塑膠粒，可售予下游塑膠射出成形廠做為摻配料使用，但因原料為廢棄物回收取得，故僅可用於非食品器具原料，如 PP 材質容器，以及各類較大容積之盛裝容器，如水桶、垃圾桶、籬筐、籃子等。如已為混雜色之聚丙烯再生塑膠粒，則可做為聚丙烯材質之打包帶、汽車保險桿、塑膠棧板等。

五、再生塑膠粒水足跡評估

(一) 水足跡評估之目的與範疇定義

1. 目的

再生塑膠粒水足跡評估之目的，在於瞭解該產品在整個生命週期對和水相關之潛在環境衝擊。在水足跡溝通 (communication) 方面，水足跡評估結果可作為水足跡內部績效追蹤報告、水足跡外部溝通報告等用途。此外，針對再生塑膠粒，國內尚無適當之水足跡產品類別規則 (WFP-PCR) 可供遵循。

2. 產品系統邊界

再生塑膠粒水足跡評估在系統邊界設定上是屬於「搖籃到大門」，水足跡量化應包含該產品生命週期之原料取得與製造等階段。

3. 產品組成

再生塑膠粒的產品組成包括：廢塑膠 (或稱廢塑料)。上述主要原料於單位產品中之重量百分比已達 90% 以上，此外還有包裝材料包括：太空包 (聚丙烯材質之包裝袋)。

4. 產品機能與特性敘述

本研究選擇之標的產品為「聚丙烯 (polypropylene; PP) 再生塑膠粒」，簡稱為「PP 再生塑膠粒」，它是個案公司所生產之再生塑膠粒中數量最多的一種。回收 PP 廢塑膠後，經由押出成型程序重新造粒，再生後的塑膠粒稱為 PP 再生塑膠粒，在業界稱為二次料。再生塑膠粒可製作成多種產品，本色或白色的再生塑膠粒因賣像較佳，因此應用的層面較廣泛；帶有顏色的再生塑膠粒因已有混雜的顏色，使用範圍較小。

5. 產品功能單位

PP 再生塑膠粒之功能單位為「一袋 PP 再生塑膠粒」，

包括 PP 再生塑膠粒 650 公斤及太空包 (PP 材質包裝袋) 3 公斤，一袋 PP 再生塑膠粒合計 653 公斤，如圖 3 所示。

6. 生命週期範圍

本研究之水足跡量化應包含該產品生命週期之原料取得與製造等階段，再生塑膠粒之產品生命週期流程圖如圖 4 所示。

(1) 原料取得階段包括下列過程：

- A. 廢塑膠係回收再利用，因此其生命週期相關過程不納入計算，但個案公司回收廢塑膠之運輸過程須納入計算。
- B. 太空包生命週期相關過程。

(2) 製造階段包括下列過程：

- A. 再製過程。
- B. 包裝過程。
- C. 上述過程中之能源供應。
- D. 上述過程中之資源 (如用水) 供應。
- E. 上述過程中之廢棄物運輸與處理。



圖 3. PP 再生塑膠粒 (上) 及裝入太空包之 PP 再生塑膠粒 (下)

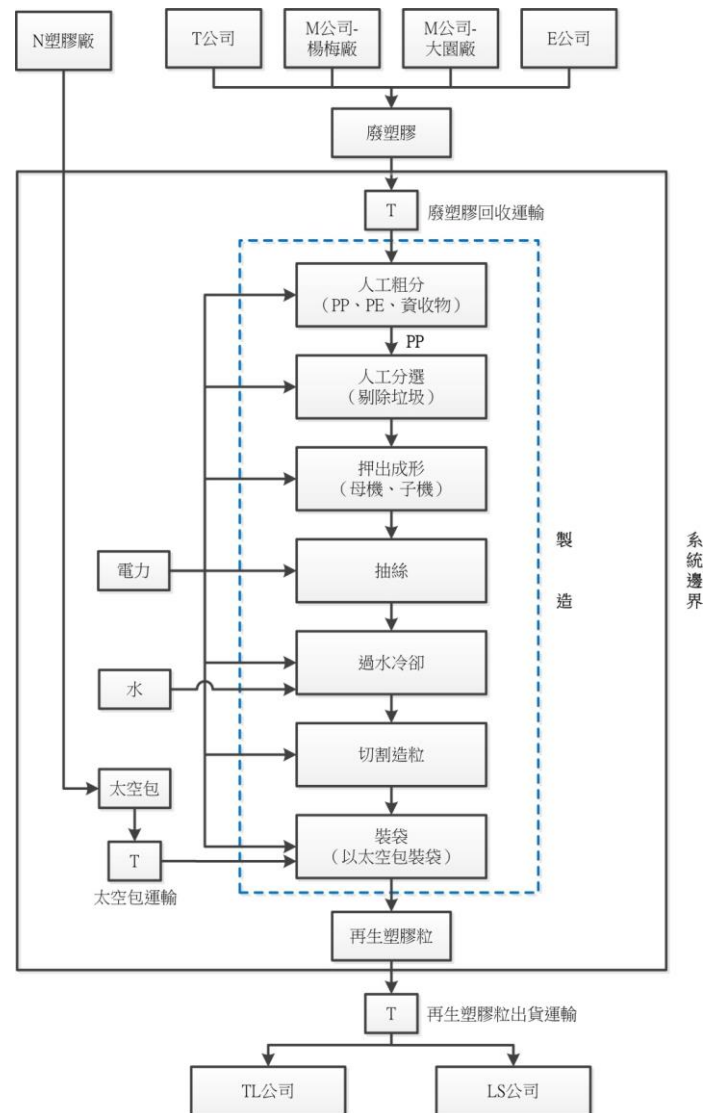


圖 4. 產品生命週期流程圖

(二) 水足跡之生命週期盤查分析

本研究所探討之產品是屬於持續性的提供，數據蒐集期間為 2013 年 1 月 1 日至 2013 年 12 月 31 日止。

生命週期各階段所選擇的水足跡評估法是根據 H_2O_e (H_2O 當量) 水足跡評估法。其中所採用 ReCiPe 衝擊評估法之 ReCiPe 點數 (ReCiPe_{points})，係取自生命週期評估軟體資料庫 GaBi 7.2 [24]。至於運輸距離是運用 Google Map 進行估算。

1. 原料取得階段

原料取得階段需蒐集的項目包括：

- A. 與回收廢塑膠（或稱廢塑料）之運輸過程相關的生命週期水足跡。

- B. 與製造太空包相關的生命週期水足跡。

原料取得階段所蒐集之數據如表 1 與表 2 所示，表 1 為原料部分，表 2 為原料運輸部分。至於各項目（原料）之 ReCiPe 點數參見表 3 之 ReCiPe 點數彙整表。

2. 製造階段

製造階段需蒐集的項目包括：

- A. 與再生塑膠粒再製相關的生命週期水足跡。
- B. 與再生塑膠粒包裝相關的生命週期水足跡。

製造階段所蒐集之數據如表 4 所示，至於各項目之 ReCiPe 點數參見表 3 之 ReCiPe 點數彙整表。

原料取得階段（含原料運輸）及製造階段所蒐集之數據（即表 1、2、4）皆是親赴個案公司盤查結果。

表 1. 原料取得階段有關原料本身所蒐集之數據

原料名稱	活動數據 (每功能單位)	單位	原料主要成份	原料供應商 (回收比例)
廢塑膠	650	公斤	聚丙烯 (PP)	M-楊梅廠 (10.67%) ; M-大園廠 (42.73%) ; E (44.61%) ; T (1.99%)
太空包	3	公斤	聚丙烯 (PP)	N

表 2. 原料取得階段有關原料運輸所蒐集之數據

原料名稱	運輸區間 (起點/終點)	距離 (公里)	載具
廢塑膠	M-楊梅廠/個案公司	3.2	輕型卡車
廢塑膠	M-楊梅廠/個案公司	3.2	重型卡車
廢塑膠	M-大園廠/個案公司	19.3	輕型卡車
廢塑膠	M-大園廠/個案公司	19.3	重型卡車
廢塑膠	E/個案公司	37.8	重型卡車
廢塑膠	T/個案公司	55.6	輕型卡車
太空包	N/個案公司	314.0	重型卡車

表 3. ReCiPe 點數彙整表

名稱/項目	ReCiPe 1.08 Midpoint (H) 點數			資料來源
	Water depletion (m^3)	Freshwater ecotoxicity (kg 1,4-DB eq)	Freshwater eutrophication (kg P eq)	
太空包 (/kg)	0.707	0.00094	3.91E-6	GaBi 7.2 資料庫
重型卡車 (/kg-km)	3.68E-6	8.25E-9	4.07E-10	GaBi 7.2 資料庫
輕型卡車 (/kg-km)	8.93E-6	2E-8	9.85E-10	GaBi 7.2 資料庫
電力 (/度 or / (3.6MJ))	1.59	0.000145	5.93E-7	GaBi 7.2 資料庫
自來水 (/度 or /ton)	1.27	0.00301	2.66E-5	GaBi 7.2 資料庫

表 4. 製造階段所蒐集之數據

名稱	屬性	活動數據 (每功能單位)	單位
外購電力	能源	364.5645	度
自來水	資源	8.3815	度

(三) 水足跡衝擊評估與結果詮釋

再生塑膠粒水足跡評估之目的，在於瞭解該產品在整個生命週期對和水相關之潛在環境衝擊。本研究採用 H_2Oe 水足跡評估法，此法結合了消耗用水 (CWU) 與降級用水 (DWU) 的潛在環境衝擊，而彙整成一個以生命週期評估為基礎之指標，稱為產品之水足跡，並以 $L H_2Oe$ (公升 H_2O 當量) 或 $KL H_2Oe$ (千公升 H_2O 當量) 表示。

將上一節水足跡之生命週期盤查分析結果加以計算與彙整，結果顯示個案公司所生產的 PP 再生塑膠粒每功能單位 (即一袋 PP 再生塑膠粒) 之水足跡為 514.287 $KL H_2Oe$ (即 514287 公升 H_2Oe)。整個生命週期水足跡中，消耗用水 (CWU) 占 91.48%，降級用水 (DWU) 占 8.52%，消耗用水為降級用水的 10.7 倍。PP 再生塑膠粒各階段水足跡如圖 5 所示，其中，原料取得階段 (含運輸) 之水足跡為 3.355 $KL H_2Oe$ (占整個生命週期水足跡之 0.65%)，製造階段之水足跡為 510.932 $KL H_2Oe$ (占 99.35%)。

根據此研究結果，PP 再生塑膠粒之水足跡為 514.287 $KL H_2Oe$ /功能單位，由於每功能單位包括 650 公斤之再生塑膠粒，因此如以每公斤 PP 再生塑膠粒為單位，則其水足跡為 791.211 $L H_2Oe$ /公斤。若與新品 PP 塑膠粒比較，從生命

週期評估軟體資料庫 GaBi 7.2 查出係數並計算後 [24]，新品 PP 塑膠粒 (PP granulate) 之水足跡為 1057.319 $L H_2Oe$ /公斤，亦即 PP 再生塑膠粒水足跡僅為新品 PP 塑膠粒水足跡之 75%。

檢視圖 5 各階段中，製造階段之水足跡排名第一 (占 99.35%)，其次是原料取得階段 (含運輸) 之水足跡 (占 0.65%)。在製造階段，能資源使用包括外購電力與自來水，故本階段節水的可能方法包括：節省電力消耗、節省自來水使用量等。在原料取得階段 (含運輸)，能資源使用包括太空包，故本階段節水的可能方法是回收太空包再利用。這些資訊可以提供給個案公司，作為降低 PP 再生塑膠粒水足跡之參考。

六、情境分析

針對上一章再生塑膠粒水足跡評估 (稱為基本情境) 結果，本章進而研擬了一個模擬情境 (稱為節水情境)。此節水情境假設，在原料取得階段，PP 再生塑膠粒所使用之「太空包」(聚丙烯材質之包裝袋) 係從客戶處回收再利用，因此與製造太空包相關的生命週期水足跡不納入計算，但與回收太空包之運輸過程相關的生命週期水足跡須納入計算，回收太空包係使用重型卡車，運輸距離為 197 公里，至於其他內容則與基本情境相同。

節水情境之水足跡評估結果顯示，PP 再生塑膠粒每功能單位 (即一袋 PP 再生塑膠粒) 之水足跡為 511.077 KL

H₂Oe (即 511077 公升 H₂Oe)。整個生命週期水足跡中，消耗用水 (CWU) 占 91.72%，降級用水 (DWU) 占 8.28%，消耗用水為降級用水的 11.1 倍。

節水情境各階段水足跡如圖 6 所示，其中，原料取得階段 (含運輸) 之水足跡為 0.146 KL H₂Oe (占整個生命週期水足跡之 0.03%)，製造階段之水足跡為 510.932 KL H₂Oe (占 99.97%)。

將 PP 再生塑膠粒的基本情境與節水情境之水足跡進行比較，如圖 7 所示，由於節水情境減少了新太空包之採購，因此節水情境之水足跡 (511.077 KL H₂Oe/功能單位) 低於基本情境之水足跡 (514.287 KL H₂Oe/功能單位)。如與基本情境相比，節水情境每功能單位之水足跡減少了 3.21 KL H₂Oe，即 3210 公升 H₂Oe。

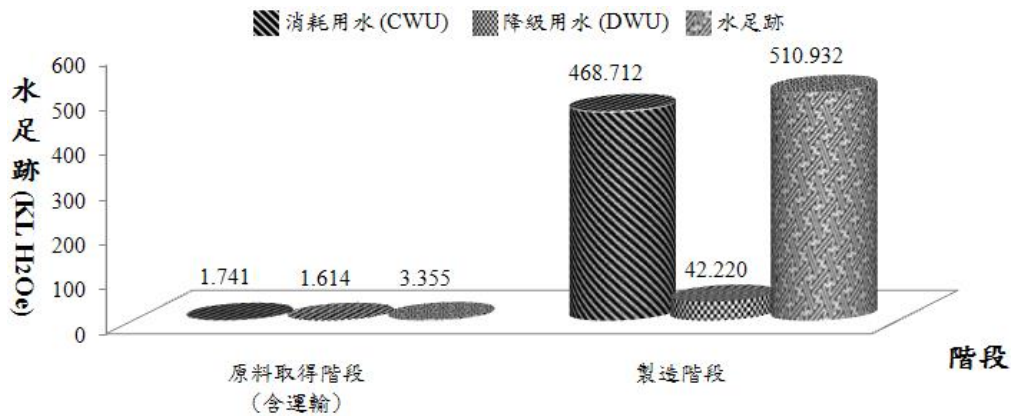


圖 5. 基本情境各階段水足跡

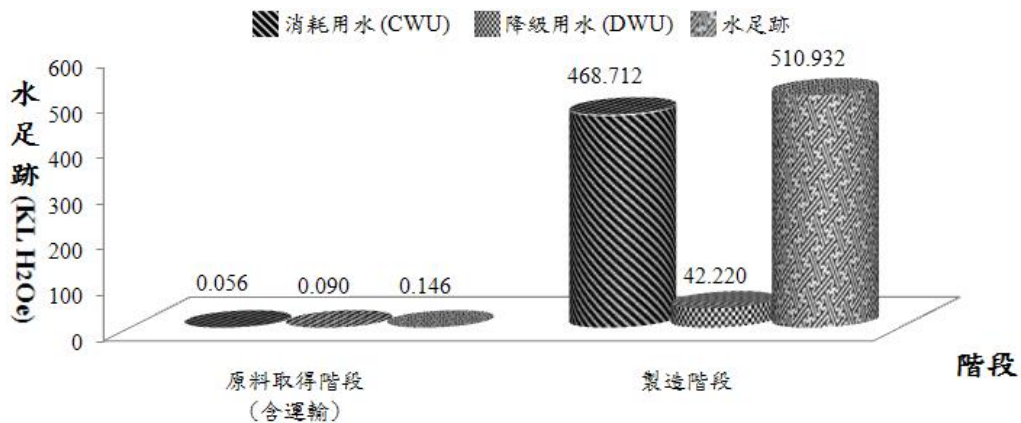


圖 6. 節水情境各階段水足跡

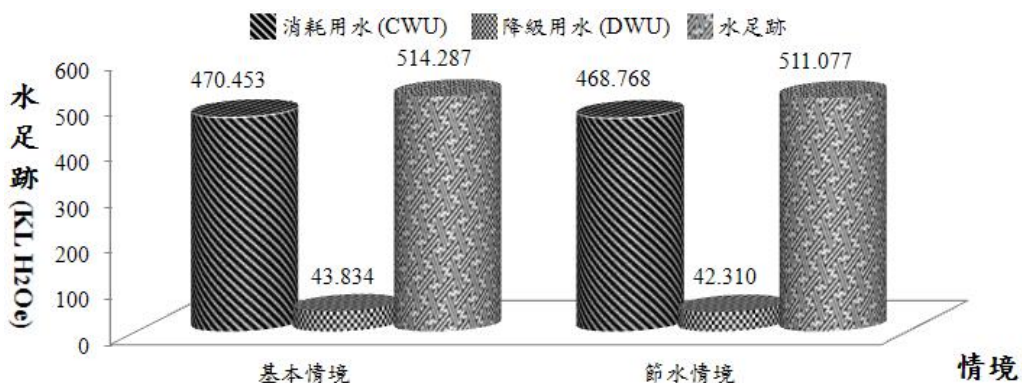


圖 7. 基本情境與節水情境之水足跡比較

七、結果與討論

本研究結果顯示個案公司所生產的 PP 再生塑膠粒每功能單位（即一袋 PP 再生塑膠粒）之水足跡為 514.287 KL H₂Oe（即 514287 公升 H₂Oe）。整個生命週期水足跡中，消耗用水（CWU）占 91.48%，降級用水（DWU）占 8.52%，消耗用水為降級用水的 10.7 倍。檢視生命週期各階段水足跡，原料取得階段（含運輸）之水足跡為 3.355 KL H₂Oe（占整個生命週期水足跡之 0.65%），製造階段之水足跡為 510.932 KL H₂Oe（占 99.35%）。

根據此研究結果，PP 再生塑膠粒之水足跡為 514.287 KL H₂Oe/功能單位，由於每功能單位包括 650 公斤之再生塑膠粒，因此如以每公斤 PP 再生塑膠粒為單位，則其水足跡為 791.211 L H₂Oe/公斤。若與新品 PP 塑膠粒比較，PP 塑膠粒（PP granulate）之水足跡為 1057.319 L H₂Oe/公斤，亦即 PP 再生塑膠粒水足跡僅為新品 PP 塑膠粒水足跡之 75%。再加上價格的差異，PP 再生塑膠粒價格僅為新品 PP 塑膠粒價格的三分之二左右，因此這些差異可提供關心環保議題之客戶在選購塑膠粒原料（再生塑膠粒或新品塑膠粒）之參考。

在評估 PP 再生塑膠粒水足跡之後，本研究並研擬了一個模擬情境（稱為節水情境），以探討 PP 再生塑膠粒進行產品生命週期節水之可能方向。此節水情境假設，在原料取得階段，PP 再生塑膠粒所使用之「太空包」（聚丙烯材質之包裝袋）係從客戶處回收再利用。

節水情境之水足跡評估結果顯示，PP 再生塑膠粒每功能單位（即一袋 PP 再生塑膠粒）之水足跡為 511.077 KL H₂Oe。整個生命週期水足跡中，消耗用水（CWU）占 91.72%，降級用水（DWU）占 8.28%，消耗用水為降級用水的 11.1 倍。

比較 PP 再生塑膠粒的基本情境與節水情境之水足跡，由於節水情境減少了新太空包之採購，因此節水情境之水足跡（511.077 KL H₂Oe/功能單位）低於基本情境之水足跡（514.287 KL H₂Oe/功能單位）。如與基本情境相比，節水情境每功能單位之水足跡減少了 3.21 KL H₂Oe，即 3210 公升 H₂Oe。本研究結果可作為再生塑膠粒業者進行產品生命週期節水之依據。

本研究研擬了一個節水情境，並探討此情境之節水成效，後續可針對更多節水情境進行探討。舉例來說，製造階段中，現今壓出成形機的暖機時間需要耗費 1~1.5 小時，機

器每日上午 8 時至下午 10 時運作，如果再製造設備能改採 24 小時不停歇的運轉方式，省去每日耗費的冗長暖機時間，減少製造階段電力消耗，將可再降低再生塑膠粒之水足跡。

參考文獻

1. 周嫦娥、楊介良、楊宗翰（民 103），產品水足跡的發展與應用，永續產業發展季刊，66，20-28。
2. 范振誠（民 101），丙烯市場展望，IBP 塑網，2016 年 7 月 1 日，取自 http://www.ibuyplastic.com/tech_center/tech_paper/tech_detailcontent.phtml?id=719&IBP_SID=becd303cc53d7f96fc7135b4d58。
3. 彭琬馨（民 105），塑膠再生開創產品的第二春，節能減碳故事賞，2016 年 7 月 1 日，取自 <http://savearth.nctu.edu.tw/index.php/environment/216-2012-11-22-16-34-07.html>。
4. 經濟部水利署（民 105），水與綠手冊，節約用水資訊網，2016 年 7 月 1 日，取自 http://www.wcis.org.tw/water_and_mountain/w_m-1.asp。
5. 謝英士、鄭份展（民 99），水—氣候變遷下企業永續發展的關鍵，永續產業發展雙月刊，50，29-36。
6. CDP (2016) Carbon Disclosure Project. Retrieved July 1, 2016, from <http://cdp.maintenancepage.accenture.com/>.
7. Danielsson, L. (2014) *Water footprint calculation for truck production*, Master thesis in the Department of Earth Sciences, Uppsala University, Sweden.
8. Goedkoop, M., R. Heijungs, M. Huijbregts, A. D. Schryver, J. Struijs, and R. van Zelm (2013) *ReCiPe 2008 Report I: Characterisation*, First edition (version 1.08).
9. Growing Blue (2016) The Growing Blue Tool. Retrieved July 1, 2016, from <http://growingblue.com/>.
10. Hoekstra, A. Y. and, A. K. Chapagain (2008) *Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resources*, Blackwell Publishing, Oxford, U.K.
11. Hoekstra, A. Y., A. K. Chapagain, M. M. Aldaya, and M. M. Mekonnen (2011) *The Water Footprint Assessment Manual*, Earthscan Publications.
12. Hoekstra, A. Y. and P. Q. Hung (2002) *Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade*, Value of Water

- Research Report Series, Vol. 11, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands.
13. Huang, J., C.-C. Xu, B. G. Ridoutt, J.-J. Liu, H.-L. Zhang, F. Chen, and Y. Li (2014) Water availability footprint of milk and milk products from large-scale dairy production systems in Northeast China. *Journal of Cleaner Production*, 79, 91-97.
 14. IPCC (2007) *IPCC Fourth Assessment: A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
 15. ISO (2006) *ISO 14044 - Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines*.
 16. ISO (2014) *ISO 14046 - Environmental management - Water footprint - Principles, requirements and guidelines*.
 17. Page, G., B. Ridoutt, and B. Bellotti (2011) Fresh tomato production for the Sydney market: An evaluation of options to reduce freshwater scarcity from agricultural water use. *Agricultural Water Management*, 100, 18-24.
 18. Ridoutt, B. G. and S. Pfister (2010) A revised approach to water footprinting to make transparent the impacts of consumption and production on global freshwater scarcity. *Global Environmental Change*, 20, 113-120.
 19. Ridoutt, B. G. and S. Pfister (2013) A new water footprint calculation method integrating consumptive and degradative water use into a single stand-alone weighted indicator. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(1), 204-207.
 20. Ridoutt, B. G., P. Sanguansri, M. Freer, and G. S. Harper (2012a) Water footprint of livestock: comparison of six geographically defined beef production systems. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 17, 165-175.
 21. Ridoutt, B. G., P. Sanguansri, and G. S. Harper (2011) Comparing carbon and water footprints for beef cattle production in southern Australia. *Sustainability*, 3(12), 2443-2455.
 22. Ridoutt, B. G., P. Sanguansri, M. Nolan, and N. Marks (2012b) Meat consumption and water scarcity: beware of generalizations. *Journal of Cleaner Production*, 28, 127-133.
 23. The SAI Platform Water Committee (2015) *Water footprinting of livestock - An overview of water footprint studies*.
 24. Thinkstep (2016) GaBi 7.2. Retrieved July 1, 2016, from <http://www.thinkstep.com>.
 25. Zonderland-Thomassen, M. A., and S. F. Ledgard (2012) Water footprinting – A comparison of methods using New Zealand dairy farming as a case study. *Agricultural Systems*, 110, 30-40.
 26. Zonderland-Thomassen, M. A., M. Lieffering, and S. F. Ledgard (2014) Water footprint of beef cattle and sheep produced in New Zealand: Water scarcity and eutrophication impacts. *Journal of Cleaner Production*, 73, 253-262.

收件：105.07.25 修正：105.09.21 接受：105.10.24