

環境規劃與管理類

公告應回收廢電子電器及廢資訊物品 再生料的碳足跡計算與其低碳利益

朱志弘*、黃文輝**

摘 要

全球每年約丟棄 3,000~5,000 萬噸的廢棄電機與電子設備(WEEE)，且每年以 3~5%的速度增長，因此廢電子電器及廢資訊物品的管理已成為當今世界的一個重要問題。在國內，包含廢電視機、廢冰箱、廢洗衣機、廢冷暖氣機及廢電風扇等廢電子電器；廢顯示器、主機、筆記型電腦、廢印表機及廢鍵盤等廢資訊物品，已經為法定公告應回收之廢棄物，於103年度的回收率分別為 66.24% 及 43.13%，對於降低天然資源的依賴和環境衝擊，均有相當的助益，但在碳足跡方面，雖較開採天然資源有較低的數值表現，但至今仍缺乏定量的論述。

有鑑於此，本研究依照碳足跡盤查與計算的國際標準 ISO/TS 14067，先凝聚同業及管理單位的共識，建立起行業產品類別規則、標準計算程序以及工具，之後使用上述規則與工具，實際針對國內超過半數廢電子電器及廢資訊物品處理數量的業者，分別針對各業者在回收、處理產出的再生料過程中，因使用能源、耗材以及產生廢棄物的清運處置等，而累計的碳足跡數值進行盤查計算；再將各業者所算出同性質再生料的碳足跡數值，以其產出之重量比例進行加權平均，以獲得該類型再生料的碳足跡我國平均值。

74 公告應回收廢電子電器及廢資訊物品再生料的碳足跡計算與其低碳利益

再生料碳足跡經加權平均後碳足跡數值(單位為 $\text{kgCO}_2\text{e/kg}$)分別如下：廢鐵(0.125)、廢銅(0.107)、廢鋁(0.148)、廢塑膠(0.132)、廢玻璃(0.120)、錐管玻璃(0.098)、冷媒(R11)-活性碳冰水機法(6.385)、冷媒(R11)-液態氮法(16.039)、冷媒(R12)(0.901)、冷媒(R22)(0.484)、潤滑油(0.096)、待再處理二次料(0.117)、廢鐵(延伸製程)(0.152)、廢銅(延伸製程)(0.144)、廢鋁(延伸製程)(0.150)。比起開採天然資源生產出的材料，再生料均呈現出相對較低的碳足跡數值，此對推動國內外再生料的使用、亞太地區廢電子電器及廢資訊物品資源回收政策及完善永續物料管理，將有相當大的助益。

【關鍵字】 碳足跡排放係數、公告應回收廢電子電器及廢資訊物品、再生料

* 財團法人工業技術研究院綠能與環境研究所 研究員

** 財團法人工業技術研究院綠能與環境研究所 資深工程師

一、前言

全球每年約丟棄 3,000~5,000 萬噸的廢棄電機與電子設備(WEEE)，且此數字每年以 3~5% 的速度增長，因此回收這些產品，產生可再用的物料(以下稱為再生料)有著龐大商機。歐盟已有研究團隊針對14種常見的電子產品類別進行物料回收之經濟價值評估，採用103年3~8月在網路上取得的原物料價格，並根據文獻資料與市場報告，計算各類別產品的總潛在收益，發展出2種情境：現況情境(即以103年廢棄物產生量計算)與未來情境(即依109年的估計值計算)。結果發現，倘若收集和回收量與廢棄物產生量相對應，僅在歐洲便能產生21.5億歐元的收益，其中以智慧型手機、手機、陰極射線管(CRT)螢幕、液晶顯示器(LCD)筆記型電腦與電視等廢棄物流的回收經濟價值最高。到109年，此14種電子產品類別的總回收價值將提高至36.7億歐元，其中智慧型手機、發光二極體(LED)螢幕與電視、液晶顯示器螢幕與電視等將成為最有價值的廢棄物流。

在國內，包含廢電視機、廢冰箱、廢洗衣機、廢冷暖氣機及廢電風扇等廢電子電器；以及廢顯示器、主機、筆記型電腦、廢印表機及廢鍵盤等廢資訊物品，已被列為公告應回收廢棄物，自100年起的廢電子電器的回收率都在6成以上，廢資訊物品的回收率也有4成以上，對於紓緩天然資源的耗竭以降低天然資源煉製過程中的環境衝擊有相當的效益。

為宣示企業社會責任、落實溫室氣體管理承諾及降低在產品生命週期的碳足跡，近年來許多品牌廠、大型通路商或量販業者對於其零組件或是商品之採購，皆已陸續要求須揭露產品碳足跡或碳管理等相關資訊，國內公共工程亦逐漸要求執行工程碳管理。由廢棄物經回收處理程序所取得的材料，一般以為將比由開採天然資源製造得到材料有低碳的優勢，但目前尚無定量之佐證，透過計算再生料的碳足跡可以量化其低碳貢獻，對於協助國內的企業或廠商採用低碳材料，以爭取全球性綠色商機有相當重要的影響。

國內外廢電子電器及廢資訊物品再生料的碳足跡數值，理應為使用再生料為原料的業者欲呈現產品較低碳足跡效益時使用。但迄今僅發現在日本有類似之探討，然該

篇文章是討論將再生料用到商品上可呈現的低碳效益，並未呈現各式再生料自身的碳足跡數值。業者於再生料無碳足跡係數可用下，不得不將其直接視為與由天然資源取得所製造的原料碳足跡數值等量，對於推廣使用再生料不啻一項利空。

有鑒於此，本團隊以國內公告應回收廢電子電器及廢資訊物品(以下稱為廢四機一腦)回收處理數量超過 50% 以上的業者，先計算出各家業者產出各式再生料碳足跡數值，再將各種再生料依照產出之方法歸類，同類別的再生料則以重量比例為權重，估算國內廢四機一腦回收處理產出各種再生料的我國平均值。最後將此數值與從天然礦物或原油開採所做出的材料探討相較，以展現出其在低碳議題上的優勢。

二、再生料碳足跡的計算方法

2.1 選取再生料的生產廠商

國內共有16家的廢電子電器及廢資訊物品類受補貼處理業者(具備廢電子電器類受補貼資格者12家、廢資訊物品類受補貼資格者15家，103年統計資料)，為了讓建構出的我國廢電子電器及廢資訊物品再生料碳足跡平均值能夠具備代表性，需要透過蒐集各受補貼機構100~102年度之稽核認證處理數量資訊，並從中挑選出本次盤查計算的受補貼處理業者，讓被挑出的業者在廢電子電器或是廢資訊物品之稽核認證處理數量的加總，均超過受100~102年度補貼回收處理總數量的 50% 以上。依此原則，本次挑選了6家業者實際進行盤查計算。

各業者處理廢電子電器與廢資訊物品的方式差異不大，多是先以手工卸除部分零組件，再由機械設備進行破碎、分離及壓縮減容等。較大的差異在於回收廢冰箱泡棉中的 R11 冷媒方式、渦電流設備的有無，以及是否有進行延伸製程(將取自廢電子電器或廢資訊物品的廢馬達或廢壓縮機再進一步拆解，產出再生料的製程)。此6家處理業者在這3個部份的差異，整理如表1。

表 1 碳足跡盤查計算對象處理方式的差異

廠商代碼	回收廢 R11 冷媒方法	渦電流設備	延伸製程
1	液態氮	有	皆有
2	液態氮	有	僅有馬達
3	活性碳加上冰水機	有	僅有馬達
4	活性碳加上冰水機	無	皆無
5	液態氮	有	皆有
6	液態氮	無	皆有

2.2 決定再生料的計算邊界

計算設定邊界採用瑞典 International EPD system(瑞典環保署所支持)所出版的 General programme instructions for the international EPD system 中，區分二階段生命週期的劃分法，以物品被廢棄時的價值為零做為區分點，當廢棄物被回收(欲再利用)開始有價值，成為另一生命階段的起點，如圖1所示。

圖1左邊框線內的活動，為廢電子電器或廢資訊物品上一階段的生命週期，依照多數產品類別規則的說明，當該物品被使用者拋棄，運輸至回收場所後即結束，下一生命週期就從回收場所開始。此概念類似將回收場所視為礦場，也類似為生命週期評估概念中的「基本流」。也就是未經開採前的價值為零(如礦場)，經人為開始挖掘、運輸與生產出礦物後，才開始有價值，城市礦場之概念也依循此種觀點。

然而，廢電子電器回收業者也有多層次之盤商，廢電子電器/廢資訊物品處理廠簽約合作的回收業盤商多為大盤商，大盤上游的中、小盤商或零星供應者之行為，迄今尚難以掌握，因此，設定處理廠所合作的回收業者所在位置為本研究回收階段的開始。另一方面，處理業者產出的再生料於客戶買受後之行為(如重新熔煉)等，已非處理業者能夠掌握，因此將再生料運出處理業者大門設定為本研究處理階段的結束。

2.3 再生料碳足跡的盤查與計算

碳足跡的盤查與計算皆是依據生命週期評估之方式進行，僅因產品別的不同，在執行盤查的手法上會有所差異。廢電子電器及廢資訊物品再生料碳足跡計算所需要蒐集與整理的活動數據內容，可將其分開為以下9種類型：

1. 各類廢電子電器及廢資訊物品被處理量
2. 各類廢電子電器及廢資訊物品處理後，各自的再生料及廢棄物產生量
3. 處理廢電子電器及廢資訊物品時，燃料、電力使用量
4. 處理廢電子電器及廢資訊物品時，各機具的用電度數
5. 耗材種類及用量
6. 廢棄物種類、產生量與去向
7. 現場作業人力工時
8. 配合的回收業者，廠內燃料與電力使用量
9. 配合的回收業者，送貨到處理場的運輸方式與距離

各再生料來自不同的公告應回收廢棄電子電器暨資訊物品，因處理過程不盡相同(如：同樣是廢鐵，可透過人工拆解、減容機器壓縮，或把廢電子電器及廢資訊物品內的馬達或壓縮機取出後，再將其拆解等多種方式取得)，因此使用的電力、燃料(主要為柴油)、輔助原物料等的用量及衍生廢棄物的種類與數量必然也有相當程度的差異，計算碳足跡時，需要清楚分辨各再生料與廢電子電器及廢資訊物品之關聯性，並逐一計算各處理過程產生再生料的碳足跡數值。各再生料與廢電子電器及廢資訊物品之關聯性分辨完成後，將為後續各式不同來源再生料碳足跡計算時分配基礎。

為進行個別再生料的碳足跡計算，需要先整理出每公斤再生料生產過程的活動數據，再與適合的碳排放係數相乘。其步驟為：

1. 收集該再生料來源的廢電子電器及廢資訊物品，運送至廠內的運輸資訊
2. 收集廠內處理過程中的燃料使用量(包含暫存區與處理區)

3. 收集廠內處理過程中的電力使用量(包含暫存區與處理區)
4. 收集廠內處理過程中的耗材使用量
5. 收集處理後產生的廢棄物種類、數量與流向。流向若非作為他廠再利用者，另需收集清除距離資料

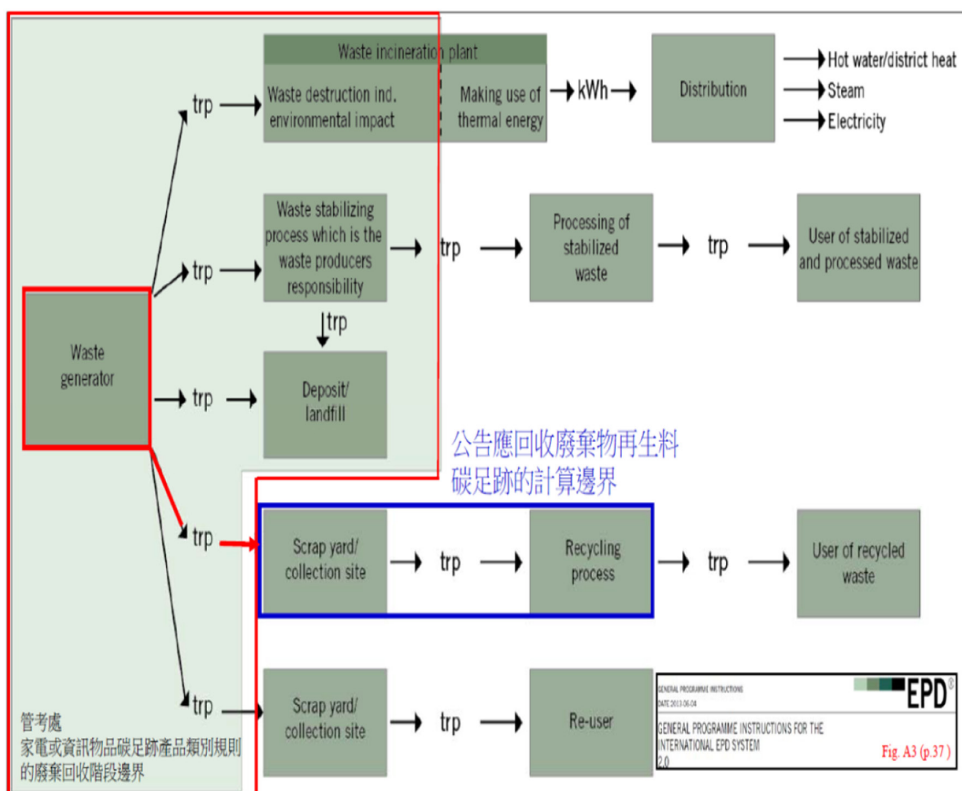


圖 1 不同廢棄物回收 / 處理責任終點劃分

有關處理業者廠區內燃料、電力與處理後產生廢棄物量的分配。其處理過程說明如下：

處理廠內的燃料消耗，多只有使用於產品或原料的運送之堆高機所耗用之柴油。因用量與輸送物品的重量有關，在取得處理廠的總用量後，先依照各應回收廢棄物類別的重量比例關係，分配給該類廢電子電器或是廢資訊物品；再依照該類廢電子電器或廢資訊物品所產出各種再生料總重量，平均分攤給再生料。

處理廠內的用電整理方面，若廠內依照處理區域裝設分表時，可以使用電表抄錄值為比例，區分出各個區域用電量。但多數的處理廠只有一個電表，需要同時採測定與分配之手法，逐一獲得各處理過程中，各種來源的再生料攤提的設備用電與公共用電度數。

各再生料分配到的設備用電度數盤查手法，為測定並記錄某種廢電子電器或廢資訊物品在處理時，會通過的設備種類及使用電力總度數。並將用電度數，依重量分配給由該設備所產生出的再生料。若廢電子電器或廢資訊物品通過該設備的產出物為需要被處理的廢棄物(如：螢光粉、冰箱泡棉及玻璃纖維)者，則由該廢電子電器或廢資訊物品所有再生料承擔該設備的用電。由廢壓縮機或廢馬達拆解(延伸製程)產生的再生料，需承擔由廢電子電器及廢資訊物品拆解出壓縮機或馬達的用電度數，再加上廢壓縮機或廢馬達拆解過程所使用之設備消耗的電力度數。

廢電子電器及廢資訊物品處理區域總用電量，扣除所有列舉的設備用電量累加結果後，視為公共用電量。此部分的用電量係依照各廢電子電器及廢資訊物品拆解作業所需的人力工時比例，先分配給該類廢電子電器或廢資訊物品產出再生料的總重量，再依照重量平均分配給該公告應回收廢電子電器產出的所有再生料。

最後再將各再生料每公斤生產過程中，所需承擔之設備用電、公共用電及延伸製程用電三者加總，以得到該再生料在生產過程中的總用電量。

廢電子電器及廢資訊物品處理後所產生的廢棄物，在清除運輸、處理過程的活動量，由該廢棄物產出所有再生料依據重量比例，分配給該種類再生料，如：將廢液晶面板在清除處理過程的活動量(輸送過程燃料消耗量、被掩埋的重量)，分配給其產生

來源的廢液晶電視、廢液晶顯示器或筆記型電腦。若是無特定產生來源的廢棄物，如廠區生活垃圾，則依照再生料產出重量的比例，分配至每公斤再生料上。

每公斤的特定來源再生料(如：自廢 CRT 電視機處理所產生的廢鐵)各活動的活動數據收集完畢後，檢索可供計算的排放係數，即可算出該種再生料的碳足跡數值。在本研究中，主要的排放係數出處為環保署碳足跡計算服務平台的係數資料庫，以及工研院 DoITPro 資料庫。

處理業者銷售再生料多只論產物的品質，而不論其來源的公告應回收廢棄物為何者，買家購買到的再生料係混合自不同來源的廢家電或資訊物品的拆解產物，因此同廠區所生產、同類型且被廠商視為同品質的再生料，碳足跡的數值，將需要以平均值呈現，以使得再生料的買家計算碳足跡時，能夠將該筆再生料算出的碳足跡數值作為係數，運用在其被使用的產品上。

碳足跡計算範圍除廠房與資本財的不定時消耗品更換未納入計算考量範疇外，其餘投入產出項目的盤查，已涵蓋設定邊界內所有相關流程。

三、再生料碳足跡的計算結果

再生料在各階段之活動盤查結果，以及算出的碳足跡數值，分述如下：

3.1 回收業者整理公告應回收廢棄物過程的燃料與電力

由於業者處於商業競爭關係，所有處理業者對於其配合回收商的名稱、所在地點以及其所提供的資料都有營業秘密考量，因此回收商提供的活動數據只能由處理業者自行進行整理。

由各處理業者整理出配合的回收業者電力、柴油使用量資訊得知，回收業者整理其收受的公告應回收廢棄物過程中所使用柴油與電力數量的差異並不大。在各式再生料碳足跡的熱點分析結果顯示，此部分的碳足跡貢獻度在再生料碳足跡中均不到 5%。

3.2 由回收業者到處理廠的運輸

Menikpura et al.(2014)的研究，提及日本福岡縣的廢四機清運過程貢獻之碳足跡於再生料碳足跡比例偏高，與回收業者到處理業者需要經過長途輸送有關。在國內，多數的廢電子電器及廢資訊物品處理業者位於臺灣中南部，然而廢電子電器及廢資訊物品主要在人口密集的地方產出，因此廢四機一腦由回收業者到處理廠的運輸活動量，與配合處理業者位置離臺北、臺中及高雄三大都會區的距離有關。

本次配合處理業者1與2位於臺中以北，其餘則在臺南、高屏地區，兩類型業者運輸活動量顯現出重大差異，如表2。在臺南、高屏地區的處理業者產出的再生料碳足跡，也有類似 Menikpura et al.(2014)的研究結果，運輸有重要的貢獻比例；而業者1與2，運輸貢獻的碳足跡在再生料內的比例就不顯著。

表 2 廢四機一腦由回收業者到處理廠的運輸

廠商代碼	1	2	3	4	5	6
運輸值	3.31E-02	6.14E-02	0.12	0.25	0.33	0.20

單位：延噸公里/每公斤再生料

3.3 使用耗材貢獻的碳足跡

廢四機一腦在各處理業者處理過程中，使用的耗材種類會因再生料生產手法而稍有差異。如：廢 R11 冷媒回收可能使用液態氮，也可能使用活性碳，因此需要就各廠實際使用種類與數量盤查整理。表3為各處理業者幾乎都有使用到的耗材，在盤查時可列出通用清單讓業者進行蒐集。但因處理手法差異所使用的特定耗材(如表1所述之液態氮或活性碳回收廢冷媒的差異)，則需要到業者工廠訪視時就實際使用狀況進行調查整理。

盤查後之耗材用量，特定用途者將只分配給特定用途產生的再生料；非特定用途的則依照產出重量比例關係，分配給所有再生料。各家處理廠內各再生料分攤使用耗材用量經過整理之後，乘上引用 DoITPro 資料庫的耗材排放係數，得到如表4所列出之計算結果。

每單位再生料分配到的各種耗材碳足跡中，以廢 R11 冷媒回收過程使用液態氮或活性碳，因使用量多又屬於該類再生料專用之耗材，貢獻出最多的碳足跡，並成為該類再生料碳足跡之熱點。其餘耗材的使用則無此特性，其貢獻加總後，在各再生料的碳足跡貢獻度中，大多未超出 10%。

表 3 處理廠 - 製程使用耗材

指定用途耗材	非特定用途的耗材
切割用電熱線 吸塵器碳刷組 液態氮 活性碳	口罩(N95 / 一般) 手工具 太空袋 噴漆、油漆 機油 砂輪片 氧氣 乙炔 破布 保鮮膜

表 4 廢四機一腦使用耗材貢獻的碳足跡

廠商代碼	1	2	3	4	5	6
再生料種類	分配到的碳足跡數值(kg CO ₂ e)/每公斤再生料					
廢鐵	3.86E-03	3.45E-02	8.95E-03	1.19E-02	7.74E-04	6.08E-03
廢銅	3.88E-03	3.45E-02	8.95E-03	1.19E-02	7.75E-04	5.90E-03
廢鋁	3.86E-03	3.45E-02	8.95E-03	1.19E-02	7.74E-04	6.29E-03
廢塑膠	3.85E-03	3.45E-02	8.95E-03	1.19E-02	7.74E-04	6.08E-03
廢玻璃	3.89E-03	3.46E-02	8.95E-03	1.19E-02	7.76E-04	6.44E-03
錐管玻璃	3.96E-03	3.46E-02	8.97E-03	1.19E-02	7.78E-04	7.54E-03
冷媒(R11)	17.94	18.56	3.49E-01	6.28E-01	11.46	11.52
冷媒(R12)	3.83E-03	3.45E-02	8.94E-03	1.19E-02	7.73E-04	5.35E-03
冷媒(R22)	3.83E-03	3.45E-02	8.94E-03	1.19E-02	7.73E-04	5.35E-03
潤滑油	3.83E-03	3.45E-02	8.94E-03	1.19E-02	7.73E-04	5.35E-03
待再處理 二次料	3.89E-03	3.45E-02	8.95E-03	1.19E-02	7.74E-04	6.08E-03

84 公告應回收廢電子電器及廢資訊物品再生料的碳足跡計算與其低碳利益

廠商代碼	1	2	3	4	5	6
再生料種類	分配到的碳足跡數值(kg CO ₂ e)/每公斤再生料					
廢鐵 (延伸製程)	6.42E-03	3.45E-02	8.95E-03	-	5.13E-04	5.35E-03
廢銅 (延伸製程)	9.56E-04	3.45E-02	8.95E-03	-	5.13E-04	5.35E-03
廢鋁 (延伸製程)	9.36E-04	3.45E-02	8.95E-03	-	5.13E-04	5.35E-03

3.4 處理業者廠內使用 B2 生質柴油

處理業者廠區內使用的柴油雖多半是用在堆高機，但因處理業者不一定僅將柴油用於輸送廠區內的公告應回收廢電子電器與廢資訊物品，也可能用於其他廢棄物的運輸，或用於自有車輛至外部與其他回收業者進行競爭獲得廢棄物來源…等，此時使用柴油的量就需要與業者討論區分之方式。若業者未建立區分的歷史資料，需要在盤查期間陸續建立。

經整理後的數據顯示，6家處理業者其各式再生料分配到的柴油使用量差異不大，但減少廢四機一腦在廠內輸送的距離，確能降低柴油使用量。

3.5 處理業者廠內用電

處理業者廠區內的用電是多數再生料碳足跡貢獻的主要的來源。在本研究的盤查過程中，將處理廠內的用電區分為設備(公告應回收廢棄物在處理時使用到的機具)用電與公共用電兩種。多數處理業者在設備與公共用電的比例落於7：3。

公共用電的分配與處理線作業的工時有關，越倚賴手工具拆解的公告應回收廢棄物，其產出再生料分配到的公共用電會越多。此類電力使用主要為廠區內的照明、空調與有動力輸送帶等，或可由綠建築的日常節能指標建議中，選取適合各廠特性之方法加以改善，以降低用電量。

各配合處理廠所提供的各式處理線設備與其用電量資料，如表5至表9。處理廠內用電最多的幾個單元多是破碎、切割等設備。各式再生料會分攤到的設備用電量，與

拆解過程中使用到設備的電功率及操作時間有關，因此增加設備定時保養頻率與更換老舊零件，以提升節能效果；或避免增加用到這類設備的機會(如：避免儲存不當導致銹蝕，而無法使用手工具拆解)，這些方法都有可能降低再生料的碳足跡。

產品在設計時就已經對再生料碳足跡造成影響，若設計時未考慮到產品成為廢棄物時難以使用手工具拆解的問題，將會增加使用設備強行破壞的機會，此過程必然增加用電量、產出的再生料與廢棄物又互相摻雜，還需要增加處理單元加以分離，此皆會增加再生料的碳足跡。

表 5 廢 CRT 電視機 / 監視器處理設備的用電情形

每公斤再生料經此設備處理分攤的用電度數(kWh)					
設備名稱 廠商代碼	CRT 電加熱 分離器	輸送帶	螢光粉抽除 、集塵設備	廢玻璃、錐管玻璃 再生料輸送帶	防爆帶減容機
1	1.21E-02	8.08E-04	7.26E-03	-	4.43E-03
2	4.75E-03	6.17E-03	2.37E-03	-	-
3	3.03E-03	2.67E-02	9.44E-03	-	-
4	1.09E-03	7.02E-04	1.74E-03	7.20E-04	-
5	7.53E-03	4.88E-04	7.85E-05	-	-
6	3.96E-02	6.18E-04	2.84E-03	-	-

表 6 廢冰箱處理設備的用電情形

設備名稱	每公斤再生料經此設備處理分攤的用電度數(kWh)
立式輸送機	0.0005~0.0018
輸送機	0.0031~0.04
升降機	0.003~0.007
轉向輸送機	0.00011~0.0032
二軸破碎機	0.046~0.103
粉碎機	0.018~0.165
磁選機	0.0021~0.065
R12 冷媒回收機	0.5~3.8

表 7 廢冷暖氣機處理設備用電情形

每公斤再生料經此設備處理分攤的用電度數(kWh)				
設備名稱	電離子切割機	減容機	R22 冷媒回收機	輸送帶
廠商代碼				
1	-	-	0.29	6.75E-04
2	-	-	0.74	-
3	9.60E-03	1.38E-02	0.89	1.92E-03
4	9.91E-03	3.34E-03	0.20	-
5	1.95E-02	8.29E-03	0.47	9.54E-04
6	3.63E-03	2.62E-05	1.42	-

表 8 廢洗衣機處理設備用電情形

每公斤再生料經此設備處理分攤的用電度數(kWh)					
設備名稱	輸送帶	電離子切割機	減容機	壓蕊機或 沖軸機	塑膠粉碎機
廠商代碼					
1	1.03E-03	-	1.22E-02	-	9.93E-05
2	-	-	1.40E-02	-	2.57E-02
3	2.70E-03	-	4.56E-03	1.28E-02	-
4	-	-	7.06E-03	3.22E-02	-
5	1.80E-03	3.89E-02	1.29E-02	4.18E-02	-
6	-	-	1.30E-02	-	-

表 9 延伸製程使用設備用電情形

通過此設備的再生料每公斤用電度數(kWh)							
設備名稱	電離子 切割機	油壓機	高速 砂輪切斷機	拉銅線機	偏向線圈 破碎機	IC 板 破碎機	集塵器
廠商代碼							
1	2.40E-02	3.31E-03	-	-	2.04E-02	-	-
2	-	-	7.96E-03	-	-	9.71E-03	-
3	2.38E-03	-	-	-	-	-	-
4	-	-	6.94E-03	-	-	-	-
5	2.29E-03	-	9.63E-03	-	4.25E-03	5.84E-02	4.52E-03
6	4.87E-03	-	3.27E-03	4.79E-03	7.25E-01	3.01E-01	1.39E-02

3.6 處理業者廠內廢棄物的清除與處理

廢四機一腦處理過程產生之廢棄物，包含了來自廢 CRT 電視機、監視器之螢光粉、廢 LCD 顯示器液晶面板、廢洗衣機的玻璃纖維、廢冰箱泡棉等。最終處置方式主要為焚化、掩埋、固化及物化4種。

整理各廠每公斤再生料分配到的清除運輸活動量如表10。處理過程產生的廢棄物多寡不僅涉及到購入物料的金錢損失，產生後還需另付費請人清除處理，因此各處理業者莫不主動儘量減少其產生量；另在委託處理時通常都會選擇離處理廠較近的處理場所，使得廢棄物清除運輸的貢獻於各式再生料的碳足跡貢獻比例均低。

表 10 廢四機一腦在處理廠產生廢棄物的清運量

廠商代碼	1	2	3	4	5	6
廢棄物清除運輸	9.89E-04	5.80E-03	1.10E-03	2.82E-03	9.87E-04	1.14E-03

註：單位：延噸公里/每公斤再生料

各業者產出之再生料平均分攤到廢棄物量與處理方式如表11。廢棄物處理的碳足跡排放係數以焚化最高，固化次之，因此若將處理過程所產生之廢棄物送入焚化爐，將會使產生的再生料分攤到較高的碳足跡數值。

表 11 廢四機一腦在處理廠產生廢棄物的處理量與處理方式

處理方式	焚化	掩埋	固化	物化
廠商代碼	分攤產生廢棄物的處理量(公斤/每公斤再生料)			
1	7.55E-02	7.01E-03	6.07E-04	-
2	2.39E-02~ 1.95E-01	9.53E-02~ 2.12E-01	1.45~1.62E-04	-
3	1.00E-02~ 1.83E-01	-	2.55E-04	4.95E-03
4	3.16E-02	5.00E-01	2.18E-04	-
5	-	4.10E-02	3.88E-04	-
6	1.76E-02~ 2.28E-01	1.24E-01	6.59E-04	2.55E-03

註：*依再生料種類別與其來源的廢四機一腦，會分配到不同的量

目前基管會其他委辦計畫，已嘗試從現行處理業者視為廢棄物的物品，如廢液晶電視/顯示器面板、廢 CRT 電視機或監視器的螢光粉等，提取出高單價的金屬、液晶以及面板玻璃等，這些新發展的技術普及後，可增加再生料的產量，並減少廢電子電器及廢資訊物品經處理業者拆解後還需要被清除與處理的廢棄物重量，或可成為減碳的新契機。另於經濟部工業局所推廣的物質流成本會計(Material Flow Cost Accounting，簡稱 MFCA)方法，或可協助處理業者檢視其處理過程是否有改善的機會，以增加廢四機一腦轉換為再生料的效率。

3.7 各式再生料的碳足跡我國平均值

各處理業者產出各式再生料分攤到的活動量確認完成後，乘上排放係數，即可計算出其在上述各活動過程中的碳足跡數值，最後再將其加總，得到特定業者產出特定來源、種類再生料的碳足跡數值；再以產出重量平均後，該處理業者產出各種類再生料碳足跡數值均能夠得到。

在建構國內某類型再生料平均值時，將會採用該種再生料各家產生重量之加權平均。而同一種再生料若使用不同處理技術獲得(如：R11 冷媒有採用液態氮回收或活性碳回收2種技術)時，只將相同處理技術產生的再生料碳足跡數值一起進行加權平均。

各再生料於回收廠貯存、運輸到處理廠以及處理廠產出再生料等3個階段碳足跡數值及計算加總結果，如表12所示。

表 12 國內廢電子電器及廢資訊物品再生料的碳足跡平均值

再生料種類	碳足跡數值(kg CO ₂ e /每公斤再生料)			
	回收廠貯存	回收廠運至處理廠的運輸	處理廠處理	加總值
廢鐵	1.27E-02	3.85E-02	7.36E-02	0.12
廢銅	9.81E-03	2.67E-02	7.17E-02	0.11
廢鋁	1.40E-02	4.90E-02	8.46E-02	0.15
廢塑膠	1.33E-02	4.00E-02	7.86E-02	0.13
廢玻璃	1.22E-02	4.30E-02	6.54E-02	0.12
錐管玻璃	1.33E-02	4.17E-02	4.31E-02	0.10

再生料種類	碳足跡數值(kg CO ₂ e /每公斤再生料)			
	回收廠貯存	回收廠運至處理廠的運輸	處理廠處理	加總值
冷媒 (R11)- 活性碳冰水機法	4.49E-01	4.02E-02	5.90	6.38
冷媒 (R11)- 液態氮法	14.95	3.52E-02	1.15	16.04
冷媒 (R12)	1.27E-02	0.04	8.51E-01	0.90
冷媒 (R22)	1.28E-02	3.57E-02	4.36E-01	0.48
潤滑油	3.36E-02	1.71E-02	4.49E-02	0.10
待再處理二次料	1.20E-02	3.37E-02	7.18E-02	0.12
廢鐵 (延伸製程)	1.26E-01	-	2.54E-02	0.15
廢銅 (延伸製程)	1.23E-01	-	2.10E-02	0.14
廢鋁 (延伸製程)	1.24E-01	-	2.57E-02	0.15

3.8 再生料碳足跡對應原生料之效益

所計算出的國內廢電子電器及廢資訊物品產生再生料的碳足跡如表12，若能取得以天然礦物或原油所做出的材料(或稱為原生料)，以及從再生料製成材料過程的碳足跡相關資料進行對比，即能夠展現出採用再生料做成材料時，有較低碳足跡的優勢。

但現階段並非各種再生料製成材料過程與其相對的原生料的碳足跡數值資料都存在可供參考的文獻，部分國內流通之商品(如：玻璃製品)多是原生料摻配再生料所製造，比較並無意義，因此本研究選定每年國內廢電子電器及廢資訊物品所產出再生料總重量中，相對產量較高的種類如：廢鐵、廢銅、廢鋁(不含延伸製程產出者)以及廢塑膠，搜尋是否有相關可供作為比對的資料，以展現出再生料的減碳效益。

目前取得之資料彙整如表13，顯見再生料作為材料生產原物料的確顯著較開採天然資源有低碳足跡的優勢。若以103年度國內由廢電子電器與廢資訊物品拆解產出此4種再生料的總重量估計，當再生料全數被做成材料時，比起開採天然資源做成同種材料，可降低229,781公噸的碳足跡排放。

細繹原生料鋁錠的碳足跡組成，可區分為鋁礦開採，經由氧化、電解、熔融、配料、精煉、澆鑄後製成型等階段；而再生料鋁錠的碳足跡，是回收運輸、拆解廢棄物

產生再生料、再生料精煉、澆鑄產生。資料庫的數據顯示原生料鋁錠的碳足跡熱點主要發生於將鋁礦氧化、電解、熔煉的過程，佔全生命週期貢獻 97.95%，以環保署碳足跡計算服務平台資料庫內原生料鋁錠的碳足跡數值推測，熔煉鋁礦石過程碳足跡貢獻 9.65 kg CO₂e，遠大於熔煉鋁再生料過程的貢獻，因此，再生料作為原料遠較天然礦物具有低碳的優勢。

表 13 以廢四機一腦產生再生料與以天然礦物、原油做成材料的碳足跡數值比較

單位：kgCO₂e /kg

材料別	以天然礦物或原油所製造出的碳足跡	以再生料所製造出的碳足跡			再生料展現的低碳優勢(倍)
		再生料碳足跡	做成材料過程的碳足跡	加總	
鐵	3.27 ¹	1.25E-01	5.30E-01 ⁵	6.57E-01	5.0
銅	3.65 ²	1.07E-01	5.90E-01 ⁶	6.97E-01	5.3
鋁	9.85 ³	1.48E-01	6.95E-01 ⁷	8.44E-01	11.7
塑膠	3.26 ⁴	1.32E-01	4.20E-01 ⁶	5.52E-01	5.9

註1：DoITPro 資料庫(2015)編號16035，為國內業者一貫作業鋼胚平均值

註2：日本 JEMAI CFP Program，編號 B-JP317077，電氣銅(電器銅)

註3：環保署碳足跡計算服務平台公用資料庫，鋁錠

註4：經濟部工業局製造業產品環境足跡與資源永續資訊專區，本土化排放係數，ABS 塑膠(資訊產品用，防火級)

註5：環保署碳足跡計算服務平台公用係數資料庫，碳鋼鋼胚(電弧爐製程)

註6：Menikpura et al.(2014)等人之研究發表

註7：環保署碳足跡計算服務平台公用係數資料庫，再生鋁錠

四、結論

本研究基於我國實際運作的公告應回收廢電子電器與廢資訊物品制度，實際進行國內總處理量過半數業者調查的結果。再生料的計算範疇從回收業整理收到的廢四機一腦開始，經過運輸、處理業拆解產出再生料為止。主要的前三名的貢獻者分別為處理業者拆解過程中的用電、回收廠運輸至處理廠過程使用化石燃料，及處理過程產生的廢棄物委外處理的排放。

各處理廠內的電力多是用在拆解過程中使用的機械設備，用電量較大的設備大多是用於破碎、切割，冰箱處理線還會再加上冷媒回收系統；再生料的碳足跡內運輸過程貢獻的比例則取決於處理業者從遠處取得原物料(公告應回收廢棄物)的總重量。位處國內中、南部的處理廠，若從北臺灣的回收廠獲取原料的比例越高，其再生料碳足

跡就越高；廢電子電器及廢資訊物品拆解處理後仍有無法資源化的廢棄物，需要以焚化、掩埋、物化、固化等方式處理，需要處理的廢棄物重量越大，造成的碳足跡數值就越高。再生料做成材料後，相對於開採天然資源做成的材料，在碳足跡的表現上明顯具有優勢。

研究結果顯示，廢四機一腦產生再生料不僅有利於世界資源永續利用，而且對降低國家/全球的溫室氣體排放將有顯著的貢獻。此研究之結果已納入環保署碳足跡計算服務平台公用係數資料庫內，以供學界及使用再生料為原物料的業者計算碳足跡時使用。在國內可協助推廣再生料的使用，在國際上可協助亞太地區加強推廣或實施適當的政策，以提高廢電子電氣及廢資訊物品的回收率，和完善永續物料管理(Sustainable Materials Management ,SMM)。另本研究只針對國內廢電子電器及廢資訊物品所產生的再生料碳足跡效益進行計算與比對，對於再生料使用可能造成產品其他環境足跡(Product Environmental Footprint, PEF)的變化、對經濟和社會面的影響，仍待進一步的研究。

誌謝

感謝行政院環境保護署資源回收基金管理委員會計畫(EPA-103-HA14-03-A068, 2015)對本研究之配合業者協調以及經費補助。

參考文獻

- 行政院環境保護署資源回收基金管理委員會回收率統計資料(2016)，<http://recycle.epa.gov.tw/recycle/epa/ShowPage2.aspx?key=6&sno=1010&subsno=293&subsubno=252>
- 行政院環境保護署資源回收基金管理委員會回收處理流程介紹(2016)，<http://recycle.epa.gov.tw/recycle/epa/ShowPage2.aspx?key=3&sno=11&subsno=17>
- 電子廢棄物管理新契機-逆向供應鏈管理，經濟部工業局產業永續發展整合資訊網(2015)，<http://proj.ftis.org.tw/isdn/News/Detail/2E286C524F15E257?dataIndex=11>
- Cucchiella F., D'Adamo I., Koh S. C. L., & P. Rosa (2015). Recycling of WEEEs: an economic assessment of present and future e-waste streams. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51: p263-272.
- S.N.M. Menikpura, Atsushi Santo, and Yasuhiko Hotta (2014). Assessing the climate co-benefits from Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) recycling in Japan, *Journal of Cleaner Production* 74: p183-190
- The International EPD® System (2015), General programme instructions for the international EPD system, ver2.5, <http://www.environdec.com/tr/The-International-EPD-System/General-Programme-Instructions/>