

電子廢棄物貴金屬回收再利用之綠循環經濟產業

馬小康¹，許景翔²

(臺灣大學機械工程研究所¹，優勝奈米科技有限公司²)

摘要:研究報告顯示電子廢棄物(PCBs)中所提煉出的金、銀、鈹、銅含量及價值遠高於由原礦所提煉出的含量及價值，因此電子廢棄物城市礦山的回收，已成為各先進國家積極爭取的戰略物資路徑之方式。再加上國際電子廢棄物(WEEE)的資源回收比例及電子產品無害化(ROHs)環保法規逐漸加嚴，使用王水法及氰化物法回收貴金屬，在歐美先進國家早已被禁用。由於兩岸過去無有效的防護和環保措施，已經造成對空氣、水體和土壤的重度污染。因此以環保無毒的方式將貴金屬回收，其過程對人員無害，同時也不會對環境造成巨大的衝擊，已成為未來發展的趨勢。面對國際電子廢棄物的資源化科技新的突破，本文提出使用非王水法及氰化物法之環保創新剝金劑及剝錫劑用於提煉貴金屬，不但可大幅度降低對空氣、水體和土壤的污染亦可增加廢棄電子產品中之金屬回收再利用率。同時，兩岸同文同種，應更進一步合作共同推動清潔生產、源頭減量、資源回收、再使用及再生利用等活動，其中包括法規要求、環保創新技術開發及創造永續物質循環型社會，除可 3C 電子垃圾轉化為城市礦山，有利於降低生產成本，並強化兩岸相關產業的國際競爭力，並達到兩岸經濟與環保雙贏(Win-Win) 策略，實踐電子廢棄物分類回收及形成永續循環型社會之目標。

關鍵字: 電子廢棄物、城市礦山、貴金屬回收、剝金劑、剝錫劑、合作開發、經濟與環保雙贏

一. 前言

近年來，廢棄電器及電子設備 (WEEE) 如電腦、電視台、冰箱和手機是歐盟增長最快的廢物流，在 2005 年產生大約 900 萬噸，並預計到 2020 年將增長到 1200 多萬噸，為提高 WEEE 的環境管理和促進循環經濟，提高資源利用效率的收集及處理和回收電子產品的改善，歐盟設立了兩條法例為關於廢棄電子電氣設備 (WEEE 指令) 和關於在電子電氣設備中使用某些有害物質的限制指令的指令 (RoHS 指令)。第一條 WEEE 指令(指令 2002/96 / EC) 於 2003 年 2 月生效，設立共同計劃，目的是提高 WEEE 的回收再利用。2008 年 12 月，歐盟委員會提出修改指令，以應對快速增長的廢物流。新的 WEEE 指令(2012/19/EU)於 2012 年 8 月 13 日起生效，於 2014 年 2 月 14 日起實施。同時歐盟立法限制使用有害物質的電子電氣設備指令(RoHS 指令 2002/95 / EC) 於 2003 年 2 月生效，該法律要求重金屬類如鉛、汞、鎘、六價鉻和阻燃劑，如多溴聯苯 (PBB) 和多溴聯苯醚 (PBDE) 被更安全的替代品取代。2008 年 12 月，歐盟委員會提出修改指令。修改後的 RoHS 指令(2011/65 / EU)生效於 2013 年 1 月 3 日。新指令回收目標為銷售的電子設備的 45%，將自 2016 年實施，2019 年的第二階段目標為銷售的電子設備的 65%，或 WEEE 產生的 85%。歐盟成員國將可以從這兩種方式來選擇並衡量他們希望的回收目標，新指令回收目標將從 2019 年起確保約 10 萬噸或 20kg per capita 回收量。

由於台灣製造業的重大投資及生產與出口活動都集中於電子零組件的半導體及印刷電路

板、光電產業的平面顯示器及太陽能電池等產業。同時，表 1 顯示全球消費型電子產品於年將高達 2675.9 百萬件。以印刷電路板為例，印刷電路板上的連接器、基板線路、電子元件焊接處、製成廢料及邊角下腳料等均富含金、銀、銅、錫等高價金屬，然而台灣 2013 年混合五金廢料的貴金屬再利用率不到 1%。歐盟兩項指令將對以輸出電子產品的台灣造成重大衝擊。由於金屬材料是前述產業鏈的最前端，若能將廢棄電子產品中之金屬回收再利用，透過資源循環再生，使 3C 電子垃圾轉化為城市礦山，供應台灣電子相關產業的物料需求，有助減少對外來資源的依賴及活絡去化管道，有利於降低生產成本，促使金屬資源有效使用，並提高台灣相關產業的國際競爭力。

電子廢棄物的資源化的研究從 1960 年代末美國礦業局(USBM)嘗試從廢棄軍事設備(包含廢棄電路板)中提取貴重金屬開始至今，已經有 40 多年的歷史了。印刷電路板(Printed Circuit Boards, PCBs)是以絕緣材料輔以導體配線所形成的結構性元件，它是由樹脂(含有 10-20%之溴成分)、玻璃纖維、金屬(銅、鐵、鋁、錫、鉛及金、銀、鈀等貴重金屬)等構成的複合材料(圖 1)，依圖 2 UN 研究報告顯示電子廢棄物(PCBs)中所提煉出的金、銀、鈀、銅含量及價值遠高於由原礦所提煉出的含量及價值，因此電子廢棄物城市礦山的回收，已成為各先進國家積極爭取的戰略物資路徑之方式。兩岸均曾因貴重金屬回收業所使用王水法及氰化物法，或是使用無有效污染設施之露天焚燒，這些方式不但耗能，也會產生嚴重強酸強鹼等水污染以及載奧辛、PM2.5 懸浮微粒等空污問題。而氰化物為劇毒品，兩岸民間仍用此法並流傳已久，但在歐美先進國家，這些方式早已被禁用。近年，在大陸河北、廣東等地調研發現，潛在的高額利益促使一個以拆解和提煉廢舊電器電子為生的地下產業迅速膨脹，形成一條完整的地下電子垃圾產業鏈，產值每年至少可達千億元。這個產業快速膨脹，僅在北京便吸納了 30 萬從業者，廣東貴嶼的深度拆解提煉出的黃金產量已佔到中國黃金總產量的 1/20，甚至影響到國際金價走勢。但由於沒有有效的防護和環保措施，已經造成對空氣、水體和土壤的重度污染。

以環保無毒的方式將貴重金屬回收，其過程對人員無害，同時也不會對環境造成巨大的衝擊，在歐美各國已使用已有不錯的成效，實為未來的趨勢；可惜在國內因缺乏相關的評估工具無法量化的投資評估以致迄今相關回收業界還是使用傳統的技術；遲遲無法更新製程，在歐盟及先進國家越來越重視環保的趨勢下，回收業沒有順應潮流更新製程勢必面臨淘汰。因此開發先進回收回收處理製程實為產業刻不容緩要作的事情。

表 1 Global Consumer Electronics Sales Situation (Unit : million units)

| Types | 2013 | 2014 | 2015 |
|------------------------------------|--------|---------------|---------------|
| PC(Desktop and NB) | 296.1 | 276.7 | 263.0 |
| Ultramobile | 195.4 | 270.7 | 350.0 |
| Cell phone | 1807.0 | 1895.1 | 2000.9 |
| Wearable electronics and others | 21.1 | 37.2 | 62.0 |
| Total | 2319.6 | 2479.8 | 2675.9 |

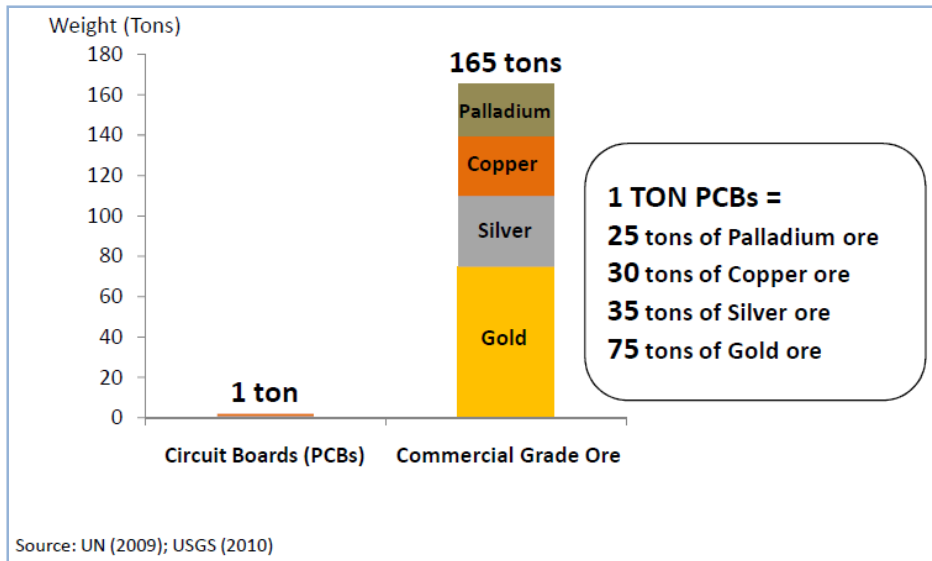


圖 1 廢棄印刷電路板(PCB)含銅、鋁、錫及金、銀、鈀等貴金屬

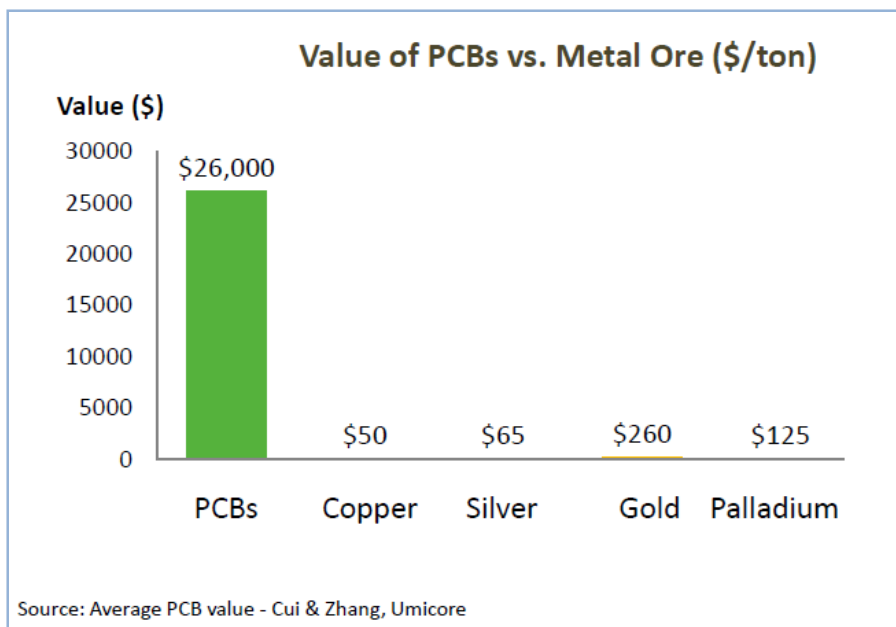


圖 2 廢棄印刷電路板(PCB)含貴金屬價格與貴金屬原礦價格之比較

二.資源回收體系

台灣人口 2300 萬，面積僅 3 萬 6190 平方公里，平均每人製造的電子產品數量全球第一。台灣回收制度發展歷程依政府介入的程度可分為四個階段，第一階段為 1988 年修正廢棄物清理法之前的時期，一般廢棄物的回收完全由市場自由運作。第二階段則始於 1988 年的廢棄物清理法修正，至 1997 年的再次修正，由列管的物品或容器業者負責回收，環保署則為監督的角色。第三階段則始於 1997 年的廢棄物清理法再修正，列管的四機一腦物品業者改由繳交回收費至環保署主導成立的資源回收管理基金，至 1998 年由環保署將回收基金納入政府預算為止。第四階段則是由 1998 年環保署成立回收基金基金管理委員會迄今(圖 3)。圖 4 為台灣回收基金管理委員會公告應回收項目，包含四機一腦等物品共 14 項目。

台灣目前資源回收工作採用「四合一」制度，為由「社區民眾」透過家戶垃圾分類，將各類自家戶產出之小型資源垃圾，結合地方 政府清潔隊、「回收商」及「回收基金」之 力量，予以回收再利用。台灣現行的環保法律主要分為，「廢棄物 清理法」、「資源回收再利用法」，其他環境法規位階低於兩法。台灣資源回收體系運作已行之有年，且回收處理成效大致良好，從源頭清潔生產設計至廢棄處置各階段，推動清潔生產、源頭減量、資源回收、再使用及再生利用等活動，以期有效達成資源循環利用、實踐全分類回收及永續循環型社會之目標。例如曾利用回收塑膠瓶而得的聚酯製成衣物，在南非舉辦世界盃足球賽時，有 9 支球隊穿上台灣廠商回收製作的球衣參賽。電子廢棄物回收處理已自淘汰電腦和智慧型手機中回收金、銀、鈹、銅等金屬，但大部分處理方式仍使用傳統王水法及氰化物法用於提煉貴金屬，雖具環保設施，仍對空氣、水體和土壤的污染造成汙染。

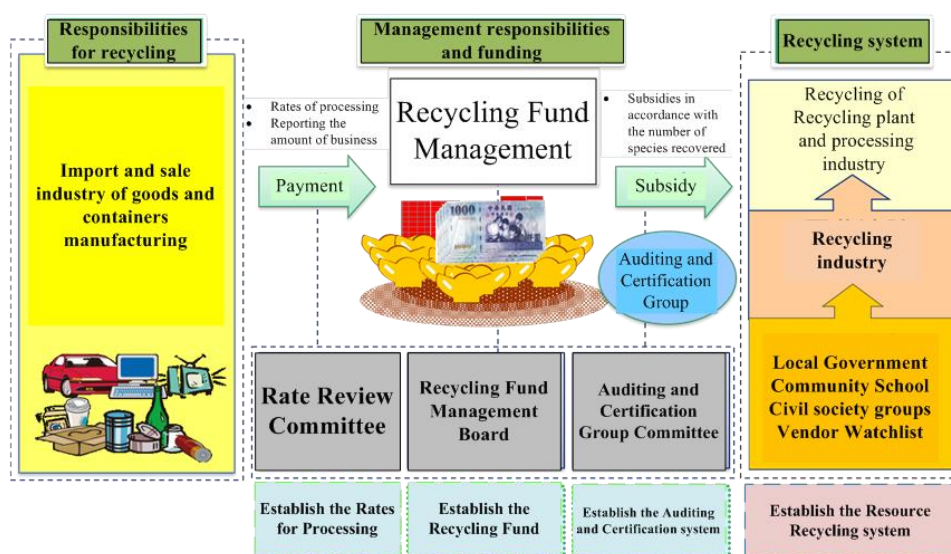


圖 3 台灣回收基金管理委員會及相關委員會架構圖



圖 4 台灣回收基金管理委員會公告應回收項目

中國是目前全球電子廢棄物之集中處理地區，中國國務院有感於電子廢棄物回收處理之急迫性，因此於 2009 年 2 月 25 日頒佈了「廢棄電器電子產品回收處理管理條例」，並於 2011 年 1 月 1 日起正式實施，本條例所稱廢棄電器電子產品的處理活動，是指將廢棄電器電子產品進行拆解，從中提取物質作為原材料或者燃料，用改變廢棄電器電子產品物理、化學特性的方法減少已產生的廢棄電器電子產品數量，減少或者消除其危害成分，以及將其最終置於符合環境保護要求的填埋場的活動，不包括產品維修、翻新以及經維修、翻新後作為舊貨再使用的活動。

中國大陸十二五期間針對有害事業廢棄物的「利用處置」、「設施建設和運行」、「規範化管理」等三項指標訂定具體目標，近來已就資源回收再利用等方面提出多項策略方案，廢棄電器電子產品隨著「廢棄電器電子產品處理目錄」不斷擴增，電子廢棄物利用處置產業規模逐步擴大，再生資源將隨著源頭分類、回收體系的建立及延伸生產責任制度的實行，再生資源回收比例亦將逐年提高。依聯合國推估，2012 年全球產生約 5,100 萬噸電子廢棄物，其中中國大陸產生量約占 13%。除中國大陸本身國內自行產生之大量電子廢棄物外，其非法進口亦為加重中國大陸電子廢棄物處理的環境壓力。依 2013 年統計，電子廢棄物約 24% 進入合法企業進行處理，約 35% 經修整後進入二手市場販售，超過一半以上則流入違法回收商，大多以手工拆解等方式處理，造成環境嚴重危害。2012 及 2013 年廢棄電器電子物品回收拆解情形統計如表 3；依 2013 年統計，中國大陸電子廢棄物總產生量約 550 萬噸，其中冷氣機及電視機分別占總產生量 26% 及 24%，四機一腦（電視機、洗衣機、冰箱、冷氣機及電腦）占總產生量 83%，另外影印機及螢光燈管之比重達 7% 及 9%，其比例也逐漸提升。2014 年已有 122 家經環境保護部核準備案，106 家企業獲得基金補貼資格，預計 2015 年，中國大陸全國廢棄電器電子產品處理業將達到 129 家。表 4 為中國大陸 2013 年廢棄電器電子產品數量審核及基金補貼統計情形。

表 3 中國大陸 2012 及 2013 年廢棄電器電子物品回收拆解統計情形

| 項目 | 2012 | 2013 |
|-------------|---------|---------|
| 回收量（萬台） | 1,274.6 | 4,277.8 |
| 拆解重量（萬噸） | 15.9 | 81.35 |
| 拆解物產值（億人民幣） | 22.4 | 100.1 |

表 4 中國大陸 2013 年廢棄電器電子產品數量審核及基金補貼統計

| 種類 | 處理業 申請數量(台) | 核定數量(台) | 補貼金額(元) | 扣減量(台) | 扣減金額(元) |
|-----|----------------|------------|---------------|-----------|-------------|
| 電視機 | 38,879,203 | 37,653,942 | 3,200,585,070 | 1,225,261 | 104,147,185 |
| 冰箱 | 616,465 | 600,889 | 49,087,760 | 15,576 | 1,246,080 |
| 洗衣機 | 1,620,962 | 1,612,150 | 56,608,895 | 8,812 | 308,420 |
| 冷氣機 | 5,482 | 4,757 | 166,495 | 725 | 25,375 |
| 總計 | 41,122,112 | 39,871,738 | 3,306,448,220 | 1,250,374 | 105,727,060 |

三. 電子廢棄物回收再生技術之探討

電子廢棄物中含大量貴金屬；由研究報告顯示電子廢棄物中所提煉出的金、銀、鈀、銅含量遠高於由原礦所提煉出的含量因此城市礦山的概念，電子廢棄物已成為各先進國家積極爭取的戰略物資。本文介紹傳統 Cyanide 或王水系列提煉貴金屬、先進國家提煉貴金屬方法、及環保剝金劑用於提煉貴金屬之方法並比較相關流程之優缺失如下：

3.1 傳統 Cyanide 或王水系列提煉貴金屬

大陸民間回收處理體系的發展以廣東汕頭貴嶼鎮和浙江台州市為典型代表。主要回收處理來自歐美及日韓等發達國家的進口電子廢棄物。雖然中國自2000年就明令禁止進口電子廢棄物，但不法商販還是通過各種途徑從香港中轉，再通過小船搬運、海關瞞報、夾帶等將電子廢棄物帶入內地。再對各類電子廢棄物進行精細的分類，由於採用人工精細拆解，廢舊電子元器件中最難處理的印刷電路板、電源板，經過拆解後，也可以分揀出大量可再利用的積體電路板、電阻、電器、變壓器等組件。由於民間回收處理體系起步早，憑藉低成本和高利潤，成為當地特色產業，甚至是地方經濟支柱。但要面臨問題為：(1)生產方式落後。民間回收處理體系是在利益的驅動下，作業技術落後。以拆解一台電腦為例，金屬和外殼被送去焚燒、融化電線包括顯像管頸上的偏轉圈都被集中燃燒以獲取銅。積體路晶片投入鹽酸與硝的混合液中，提取微量金；(2)環境污染嚴重。由於民間回收體系缺乏專業的處理設施，在處理過程中排放出大量戴奧辛等劇毒氣體，嚴重的污染了環境。處理後的廢酸液不經過任何處理就直接排入當地河流，導致當地土壤酸性增大致無法種植農作物。同時，大量有害質進入土壤和地下水，嚴重影響了人們的身體健康造成環境污染。

傳統含金、鈀事業廢棄物之回收，通常可分為8個處理製程。以破碎製程、氰化離剝製程、燒成爐製程、酸溶解製程及電解製程來進行再利用物之處理，圖5為傳統金、鈀初煉製程，並經由儀器分析成分後將含金、鈀液體送至回收精煉製程中精製，將產生出來的金粉以高溫熔解製程熔解形成金及鈀之最終產品，圖6為傳統金、鈀精煉製程。由於王水法及氰化物法具強酸性、腐蝕型及毒害性，造成對空氣、水體和土壤的污染及人體之危害性。

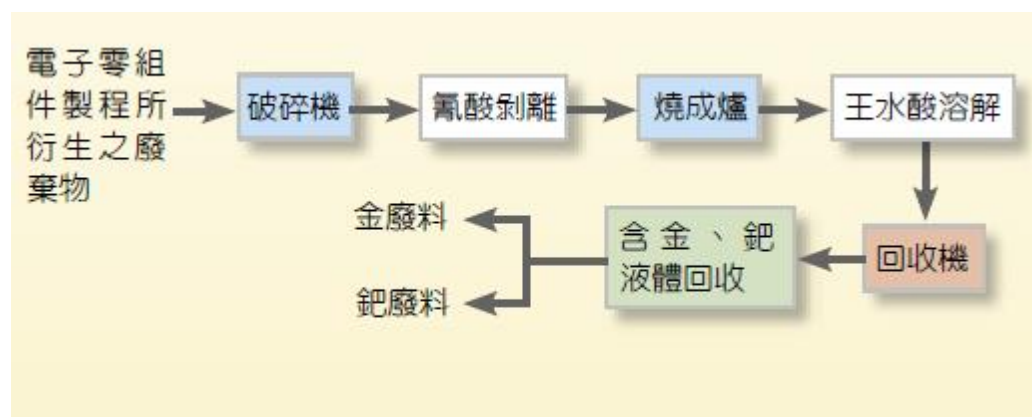


圖 5 傳統金、鈀粗煉製程

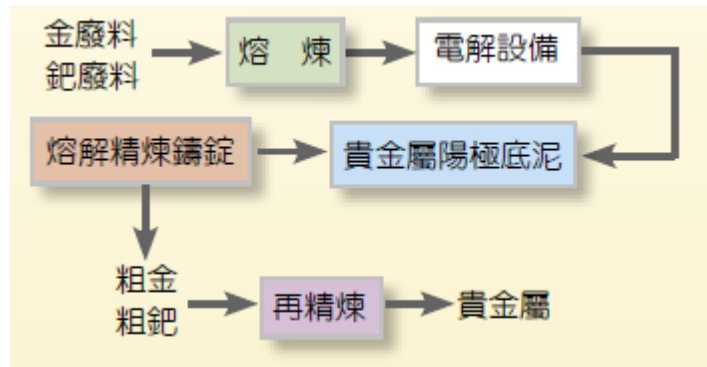


圖 6 傳統金、鈹精煉製程

3.2 目前其他國家提煉貴金屬方法

(1) 比利時 Umicore 公司[27]

Umicore 是世界上最大的貴金屬回收商之一，前身為聯盟礦業公司，是一家跨國材料技術公司，總部設在布魯塞爾。Umicore 一直以來專注於回收貴金屬和專門的產品來自貴金屬、鈷、鎳、鋅和其他金屬的製造。自 1991 年成立以來，公司一直是比利時的基準 BEL20 股票市場指數的一份子。其核心業務是回收和各種貴金屬和其它有色金屬，以及某些非金屬如硒的精煉。Umicore 回收含有貴金屬和其它有色金屬複雜的廢物流。回收和銷售貴金屬（銀、金、鉑、鈱、銻、銻、鈦），特種金屬（鈾、錒、鐳）和鹼金屬（鉛、銅、鎳）等。其 WEEE 熔煉回收技術，用於從電子廢料如印刷電路板 PCB 中回收有價金屬，應用頂吹旋轉爐 TBRC 可將 PCBs 熔煉成富含貴金屬的粗銅，然後採用橢圓形爐或反射爐進一步精煉。

(2) 日本焚燒法 [28]

日本 DOWA 集團已整合建立成日本最大的冶煉及廢物回收業務，利用冶煉技術處理廢棄物。廢物處理包括電子設備，移動電話，丟棄消費電子和電器，和 junked 汽車。子公司 DOWA ECO-SYSTEM 最初是在 DOWA 的長期開採和提煉作業中提取貴重金屬，如金，銀存在於礦石中非常小的濃度。目前從事各種報廢從個人電腦電路板，移動電話，消費電子產品和家電等設備有價金屬的回收，圖 7 為 DOWA 集團從電子廢物利用冶金技術回收不同的金屬元素，採用先進的冶金技術回收多達 22 種不同的金屬元素，將回收的金屬資源被帶回社會作為新生的產品，如配件，電基底，膜，電線等。圖 8 為 ECO-SYSTEM KOSAKA 之“金屬和蒸汽回收焚燒爐”，可將貴金屬從被處理廢棄物中提煉出來。圖 9 為日本三菱直島精煉所採用之破碎焚燒法，通常其投資規劃與金額需要超過 40 億美金以上才有可能達成。

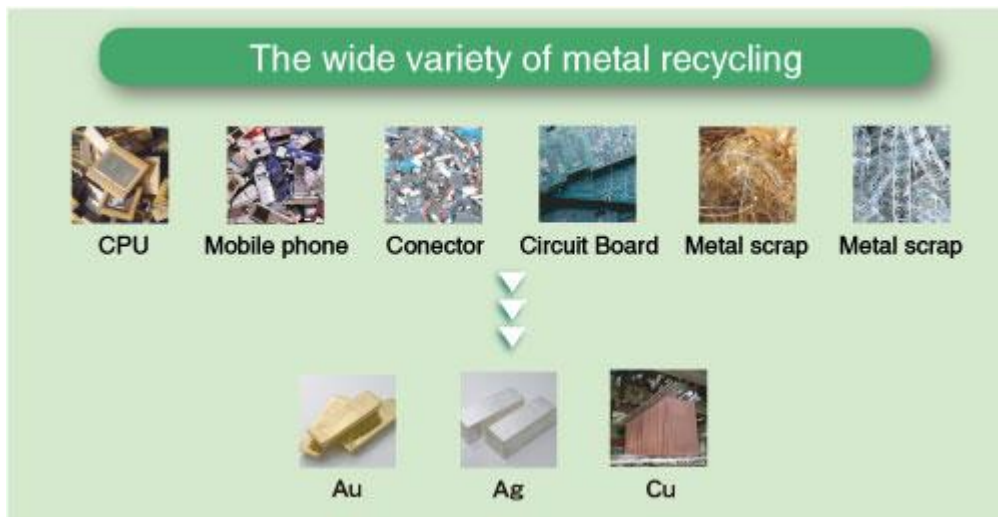


圖 7 從電子廢物利用冶金技術回收不同的金屬元素

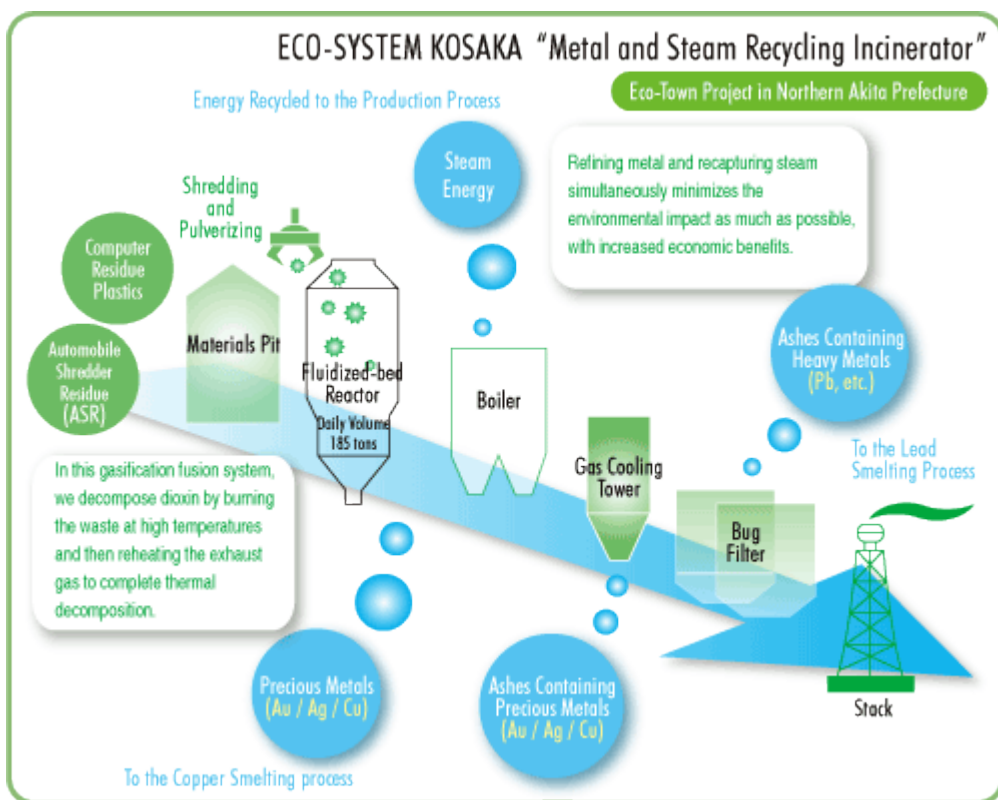


圖 8 日本 ECO-SYSTEM KOSAKA 之“金屬和蒸汽回收焚燒爐”

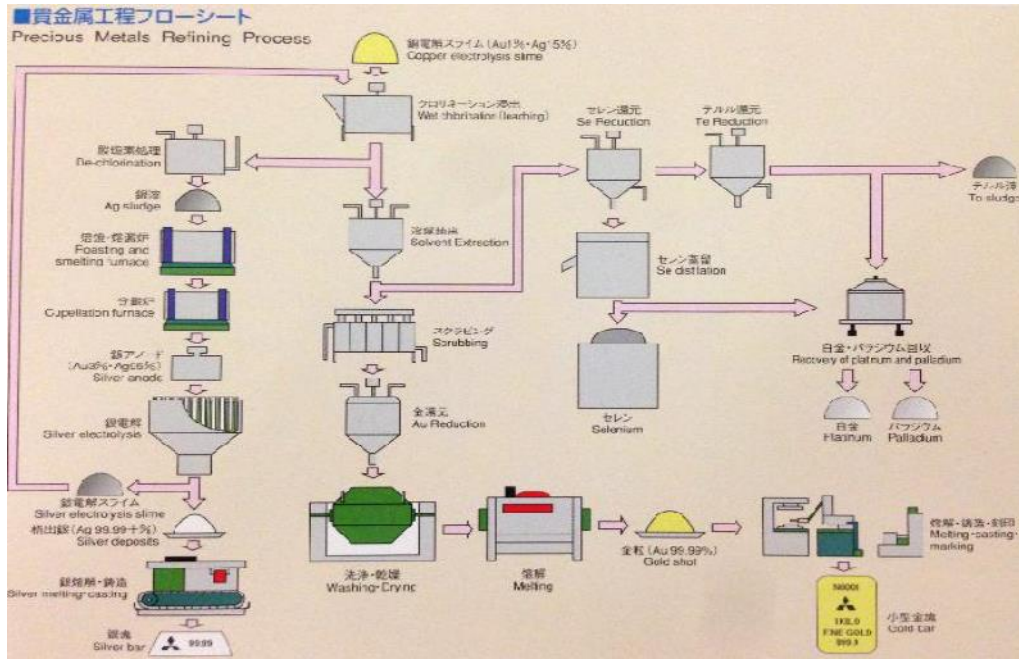


圖 9 日本三菱直島精煉所採用之破碎焚燒法

(3)美國緯創公司[29]

緯創積極進行多角化經營，緯創於 2010 年設立 100%投資子公司 Wriston Green Tech，斥資 2,100 萬美元，於美國德州北部 McKinney 市設立電子廢料回收與精煉廠，這也是緯創在回收事業布局中，繼昆山之後第二個布局點，塑料、印刷電路板與電池都被鎖定為回收標的。緯創的回收業務以大陸昆山為起點，當地以塑料回收為主要業務，美國則是以 PCB 回收為主力，有別於焚燒印刷電路板的方式，緯創採用台灣優勝奈米科技的環保剝金與剝錫製程來回收舊電腦，或是電子裝置，有別於傳統回收商所使用的 Cyanide 或王水，緯創的環保提煉貴金屬製程如金、銀、鈀等，已獲得美國 Dell 公司公開支持其回收計畫及處理方式。

3.3 非 Cyanide 或王水系列環保剝金劑於提煉貴金屬之先導技術[22-26]

電子廢棄物中含大量貴金屬已成為各先進國家積極爭取的戰略物資。本文因篇幅因素，僅簡述三項非以 Cyanide 或王水系列的環保剝金先導技術，此項技術是由台灣優勝奈米公司開發之剝金屬技術，並將擴大其實驗規模為模組化量產貨櫃型產品。分別為(1)環保化學剝錫技術;(2)環保電解剝金技術;及(3)環保化學剝金技術，其相關煉製貴金屬流程如下：

(1) 環保化學剝錫技術

環保剝錫技術是首先配製以 68% HNO₃ 溶液 250ml/L 加入 SnST-550A 剝錫劑 250ml/L 及水 500ml/L 之剝錫溶液，將印刷電路板(PCBs)置入於剝錫溶液中，保持溶液溫度介於 40-45 °C 並靜置約 40-60 分鐘，如圖 10 環保剝錫之流程。相關錫焊於印刷電路板上電子零件(如電容器 CPU)，將因剝錫劑之作用剝離於溶液中，圖 11 為環保剝錫技術用於 PCBs 電子零件之比較，剝離後之電子零件可於測試後再利用，針對含金之已不堪使用電子零件，則採用環保化學剝金技術

來分離貴金屬。原剝錫溶液則加入 NaOH 至 PH 值> 12，經過濾取出之氧化錫泥，置於通入 20% H₂ 及 80% N₂ 之 800°C 高溫爐中，則可獲得之 99.96% 純錫。

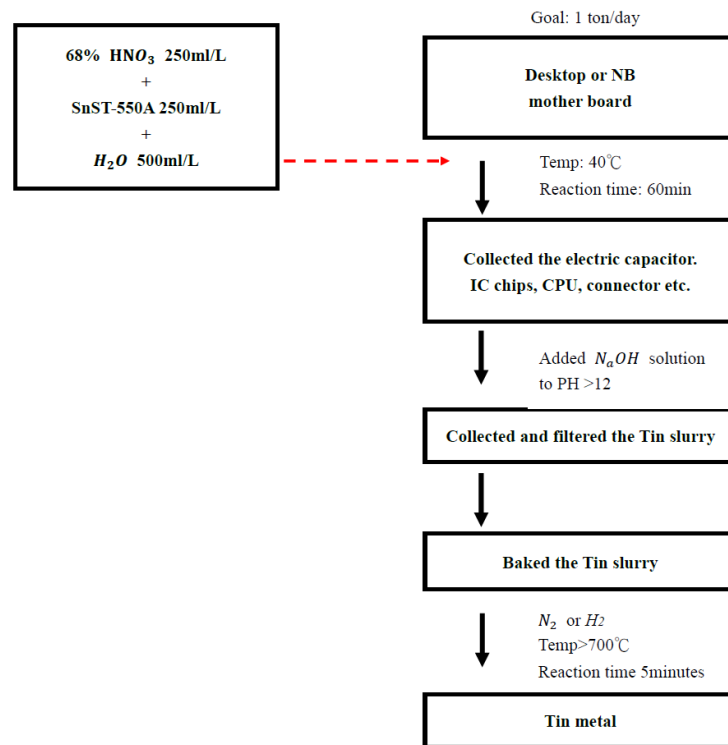


圖 10 環保剝錫之流程

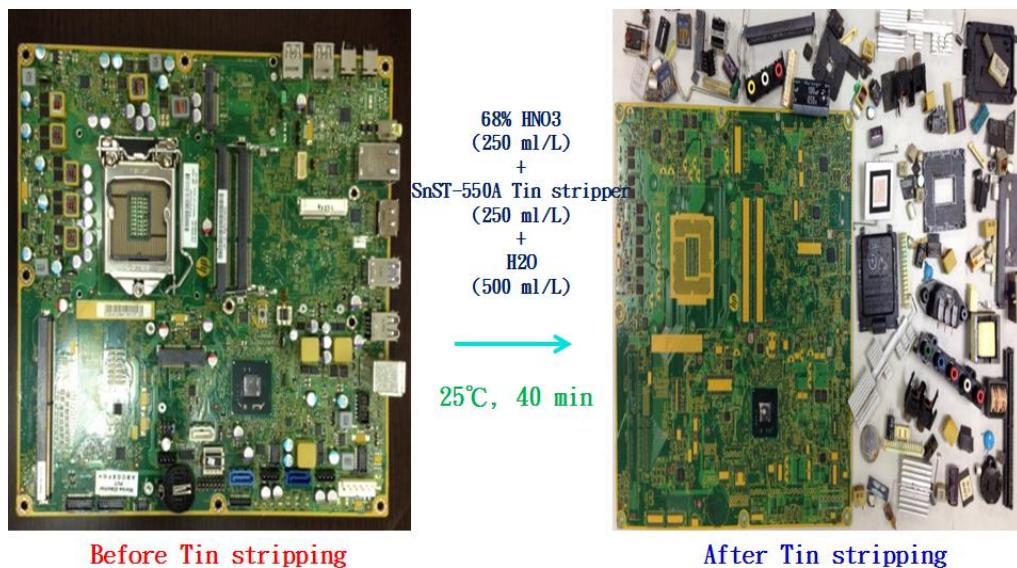


圖 11 電腦主機板經過環保剝錫前後之比較

(2) 環保電解剝金技術

環保電解剝金技術是首先配製 UW-700 剝金劑於 10L 水之剝金溶液，將可導電之含金印刷電路板(PCBs)或電子零件置入於剝金溶液中，保持溶液溫度於 40 °C 並通入電壓 2-5volts 之低電流約 30 秒(由金含量厚度決定)，如圖 12 為環保電解剝金之流程。相關含金電子零件(如連接器)，將因剝金劑之作用將金泥剝離於陰極導電板上，經收集陰極導電板上之金泥，再加入稀 HNO₃

溶液去除 Cu、Ni、Fe 等微量雜質，經水清洗並烘乾後，至於 1250°C 高溫爐中，則可獲得 99.99% 純金。環保電解剝金技術可迅速剝金，亦無空氣污染物產生及廢水排放之問題。

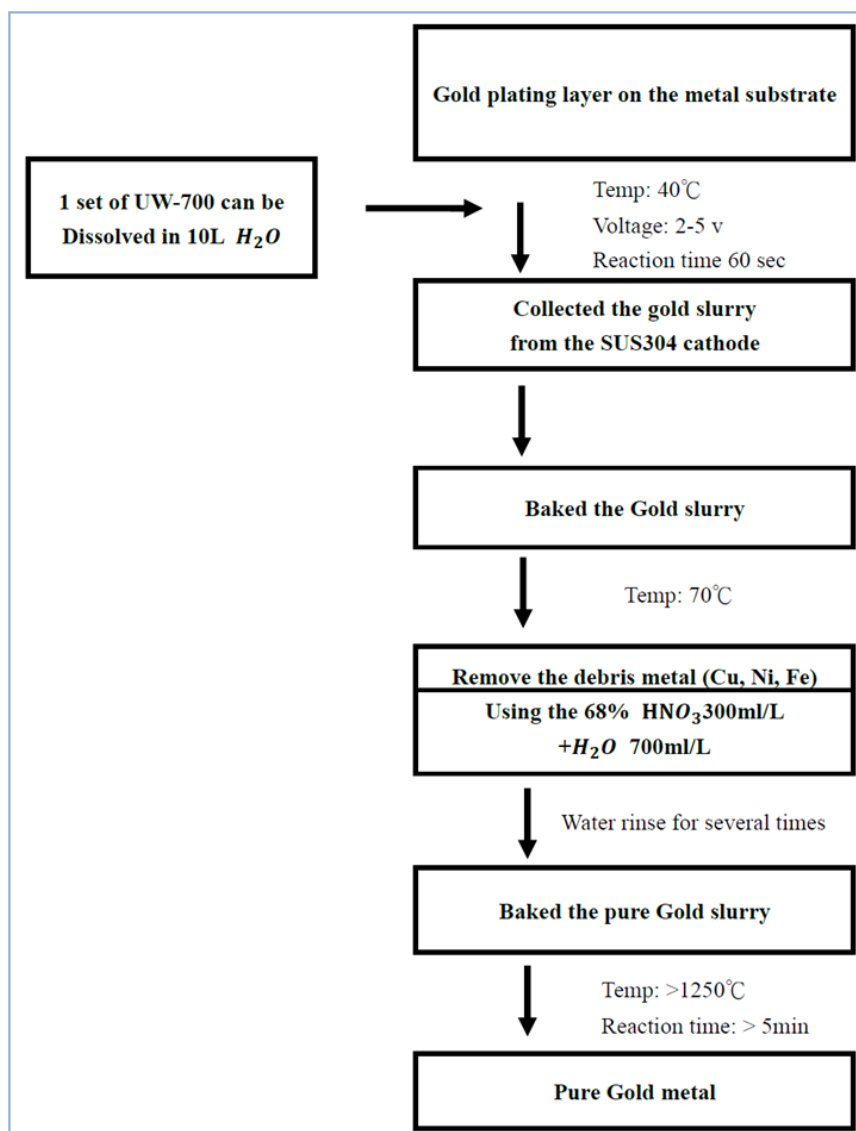


圖 12 環保電解剝金技術之流程

(3) 環保化學剝金技術

環保化學剝金技術是首先配製以 68% HNO₃ 溶液 500ml/L 加入 UW-860 剝金劑 500ml/L 之剝金溶液，將含金之印刷電路板(PCBs)或電子零件置入於剝金溶液中，保持溶液溫度於 30 °C 並靜置約 10-30 分鐘(由金含量厚度決定)，如圖 13 環保化學剝金之流程。相關含金電子零件(如 CPU)，將因剝金劑之作用剝離於溶液中，含金溶液則加入 K₂S 或 Zn 或 Sodium sulfite 產生金泥，經過濾取出之金泥，再加入稀 HNO₃ 溶液去除 Cu、Ni 等雜質，經水清洗後，至於 1250°C 高溫爐中，則可獲得之 >99.95% 純金。表 5 為環保電解剝金技術及化學剝金技術與傳統 Cyanide 或王水系列的比較表，很明顯無論毒害性、腐蝕性、空氣污染物排放、廢水排放等方面，環保電解剝金及化學剝金技術皆通過 SGS 認證。

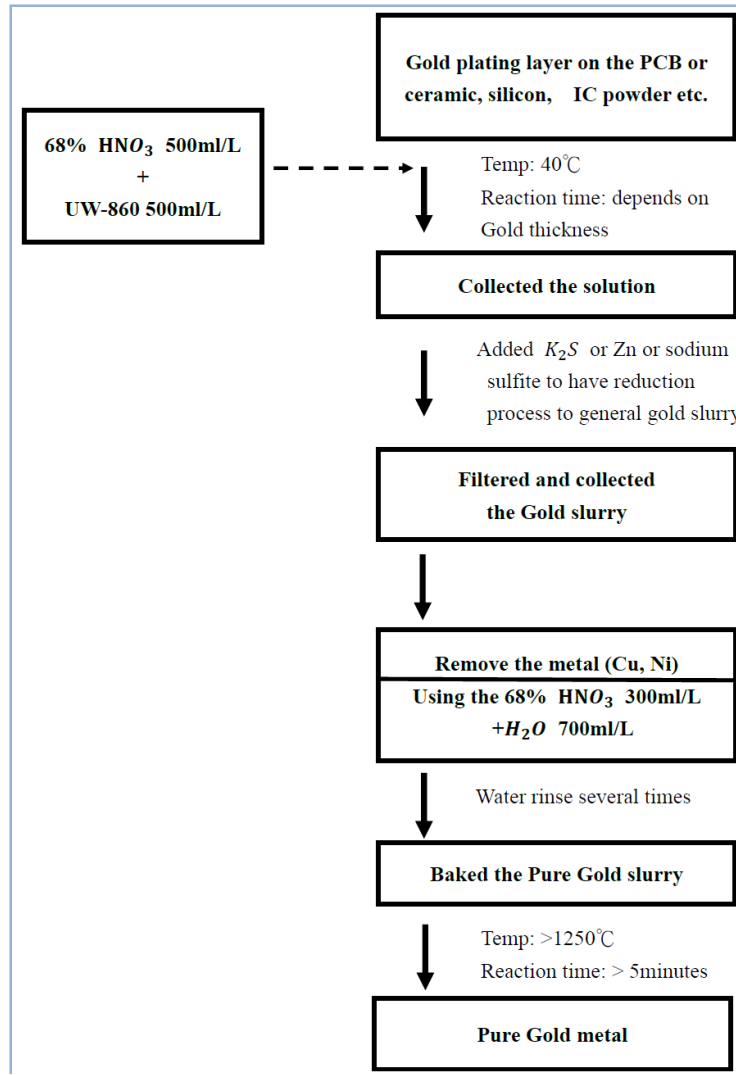


圖 13 環保化學剝金技術之流程

表 5 環保化學剝金技術與傳統 Cyanide 或王水系列的比較表

| Classification | Composition | Corrosiveness | Effect | Method | Rate of stripping | Safety |
|----------------------------------|---|---------------|-----------------------------|---------------------|-------------------|--|
| Aqua Regia | Hydrochloric acid & Nitric acid | High | Substrate destroyed totally | Chemical method | Slow | High corrosiveness with pungent smell |
| Cyanide | Potassium Cyanide + Lead acetate | Moderate | Virulent | Chemical method | Moderate | Virulent |
| UW-700 Electrolyte Gold stripper | Sulfide | Low | Non-effect on substrate | Electrolysis method | Fast | Mildness, no corrosiveness |
| UW-860 Gold stripper | Nitric acid (without any hydrochloric acid) | Moderate | Slight effect on substrate | Chemical method | Moderate | Much safer than Aqua Regia and Cyanide |

表 5 環保化學剝金技術與傳統 Cyanide 或王水系列的比較表(續)

| Classification | Au conc. | Purification rate | Cost | Treatment |
|----------------------------------|-----------|-------------------|----------|--|
| Aqua Regia | < 0.5 g/L | Slow | Low | Alkali neutralization treatment |
| Cyanide | 0.5~1 g/L | Slow | Low | Need to break the cyanide, and need to consider lead contamination |
| UW-700 Electrolyte Gold stripper | 5~7 g/L | Fast | Very low | Without any treatment |
| UW-860 Gold stripper | 1~2 g/L | Moderate | Low | Alkali neutralization treatment |

四. 開發貴金屬回收處理先導設備-貨櫃型

提煉貴金屬-金之先導設備開發是從多元應用、運輸方便、安裝簡易、及環保安全的原則，把清潔、低碳作為設計發展方向。模組化之貴金屬先導設備開發是將電子廢棄物貴金屬回收具 3R 綠環之設施設置於二十呎或四十呎貨櫃，並可依不同貴金屬煉製過程、運輸路徑、安裝方式、及環保安全考量，可快速運輸至處理場區，改善目前污染地區如大陸廣東貴嶼等地之空氣、水體和土壤的污染情形。圖 14 為四十呎貨櫃電解剝金/錫系統之 3D 圖，例如四十呎超高鋼製乾貨櫃外部尺寸為 40 呎 x 8 呎 x 9 呎 6 吋(或 12.192mx2.438mx2.896m)，亦即需要將其處理單元包括(1)剝金/錫設備單元;(2)前處理單元;(3)過爐/分離單元;(4)煅燒單元;(5)貴金屬測試單元;(6)秤重單元設置於四十呎貨櫃中。針對電解剝金系統具無廢水及空污之特性，不需加裝其他設施，可將電解剝金系統設於二十呎貨櫃中，其處理量約為 1 噸/日之電子廢棄物;但化學剝金/錫系統，則需加裝處理廢水及去除氮氧化物之綠環設備，可設於四十呎貨櫃外部，其處理量約為 3 噸/日之電子廢棄物。更由於貨櫃型設施具封閉性，可利用電子自動控制系統，提供操作人員安全可靠、舒適操作環境的保障。目前台灣優勝奈米公司及永創公司開發之模組化貨櫃型產品可作為技術基礎，並結合大陸市場發展之經濟模式，快速推廣至世界各地，形成兩岸雙贏(Win-Win)策略。

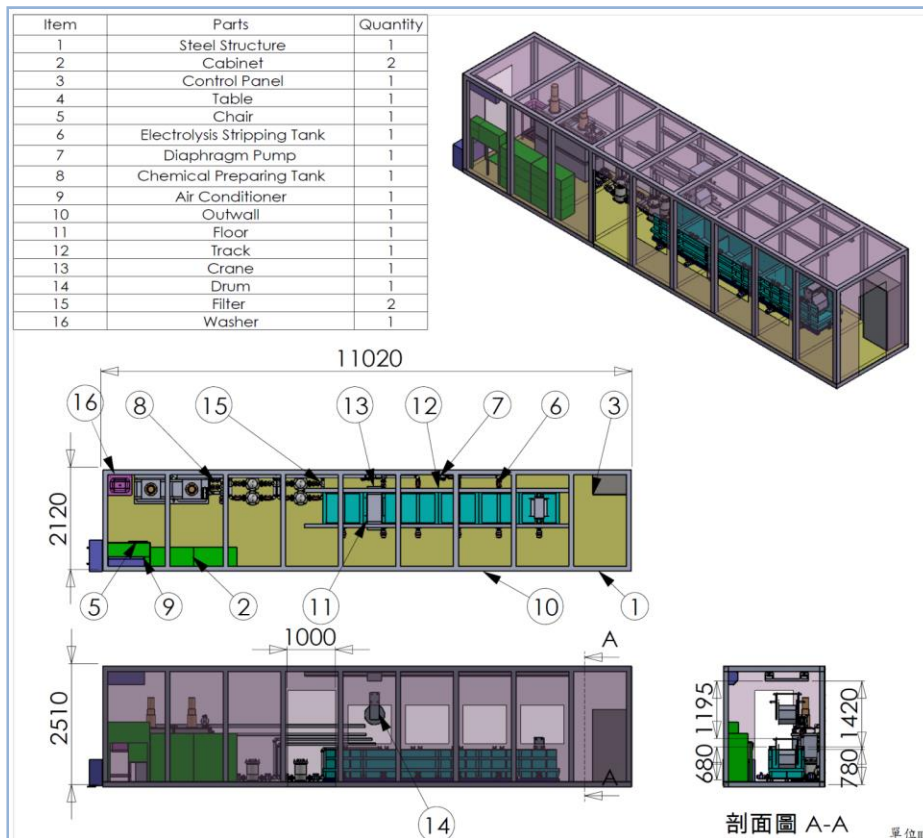


圖 14 四十呎貨櫃電解剝金系統之 3D 圖, unit: mm

五. 從電子廢棄物回收機制共創綠色循環產業

而以現況而論，兩岸資源回收再生已有具體成果，然而健全資源回收再生市場之關鍵在於市場規模，電子廢棄物種類繁多，單一類型的電子廢棄物不一定可達到市場規模，常使電子廢棄物資源回收再生市場不易建立完整回收通路，加上電子廢棄物資源再生後端市場及其去化管道之通路不完整，不易提升其資源再生之價值。由於電子廢棄物貴金屬回收產值具市場經濟性及回收數量具市場規模性。面對國際電子廢棄物(WEEE)的資源回收比例及電子產品無害化(ROHs)要求，本文提出非使用王水法及氰化物法之環保創新技術用於剝離或提煉貴金屬，不但可大幅度降低對空氣、水體和土壤的污染，亦可增加廢棄電子產品中之金屬回收再利用率。

圖 16 為建立環境友善的綠循環產業圖，從電子產業源頭清潔生產設計至廢棄處置各階段，推動清潔生產、源頭減量、資源回收、再使用及再生利用等活動，其中包括法規要求、環保創新技術開發及創造永續物質循環型社會，除可 3C 電子垃圾轉化為城市礦山，供應電子相關產業的物料需求，有助減少對外來資源的依賴，有利於降低生產成本，實踐電子廢棄物分類回收及形成永續循環型社會之目標。

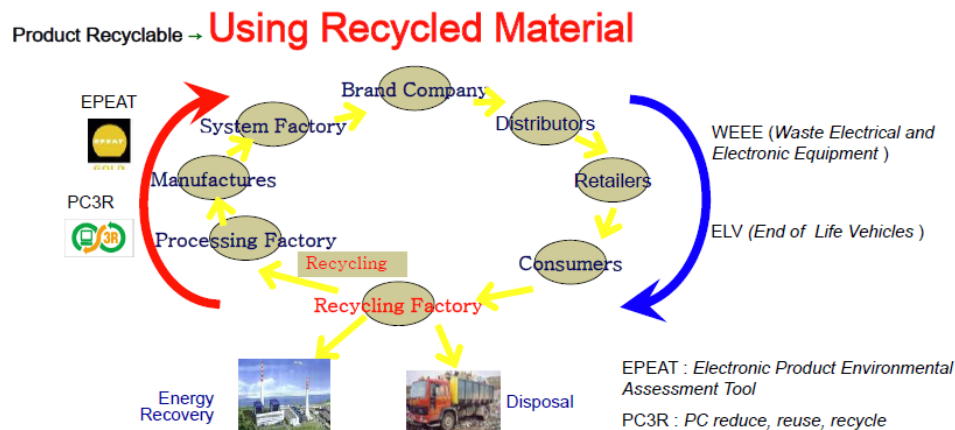


圖 16 建立環境友善的綠循環產業

六. 結論

面對國際電子廢棄物(WEEE)的資源回收比例及電子產品無害化(ROHs)要求，本文提出非使用王水法及氰化物法之環保創新技術用於剝離或提煉貴金屬，目前台灣優勝奈米公司已完成開發之模組化貨櫃型產品，可結合市場發展之經濟模式，快速推廣至世界各地，不但可大幅度降低對空氣、水體和土壤的污染，亦可增加廢棄電子產品中之金屬回收再利用率。

七. 參考文獻

- [1] W. C. Chang, N. M. Wu, and H. K. Ma, "Waste Home Appliances Recycling and Resource Recovering in Taiwan", ENERGEX 2000, The 8th International Energy Forum, Las Vegas, Nevada, USA, July 2000.
- [2] G. Y. Jiang, C. C. Chang, and H. K. Ma, "Waste Computer Components Recycling in Taiwan", ENERGEX 2000, The 8th International Energy Forum, Las Vegas, Nevada, USA, July 2000.
- [3] H.K. Ma, W. C. Chang, and N. M. Wu, "The System of Waste Home Appliances Recycling in Taiwan", East Asian Resources Recycling Technology, Kyongju, Korea, December 2001. (Invited paper)
- [4] 馬小康, "醫療廢棄物處理技術", 2003 醫療廢棄物研討會, 北京, Sep. 2003. (Invited speaker)
- [5] 馬小康, "廢棄物處理技術與減量規劃", 2004 年冬季兩岸四地環境保護研討會, 香港, Nov. 2004. (Invited speaker)
- [6] 馬小康, "都市垃圾機械爐混燒處理技術", 北京清華大學煤清潔燃燒國家工程中心, March 2004. (Invited speaker)
- [7] 馬小康, "都市垃圾處理技術與資源回收再利用之探討", 海峽兩岸能源技術與可持續發展交流研討會, 杭州, Nov. 2005. (Invited speaker)
- [8] H.K. Ma, M.C. Chen, S.H. Huang, "Present Status of Municipal Solid Waste(MSW) Policy and Bottom Ash Recycle in Taiwan", The 2nd International Symposium Thermal Science and

- Engineering, Beijing, China, Oct. 2005. (Keynote speaker)
- [9] H.K. Ma, "The Current Policy and Issues on Solid Waste Management in Taiwan", The 2nd Expert Meeting on Solid Waste Management in Asia and Pacific Islands, Kitakyushu City, Japan, Nov. 2006. (Invited speaker)
- [10] H.K. Ma, "Present Status of MSW Policy and Bottom Ash Treatment in Taiwan", The 3rd Expert Meeting on Solid Waste Management in Asia and Pacific Islands, Okayama City, Japan, Nov. 2007. (Invited speaker)
- [11] H.K. Ma, "The Recycling Scheme of Electronic Waste in Taiwan", The 5th Expert Meeting on Solid Waste Management in Asia and Pacific Islands, Songdo CONVENSiA, Incheon, Korea, Nov. 2008. (Invited speaker)
- [12] H.K. Ma, "3Rs and Cooperation among Stakeholders in Taiwan", The 4th Expert Meeting on Solid Waste Management in Asia and Pacific Islands, Yokohama City, Japan, July 2008. (Invited speaker)
- [13] H.K. Ma, "Pay-by-Bag Trash Collection Policy" for the Municipal Solid Waste Reduction in Taiwan", The 6th Expert Meeting on Solid Waste Management in Asia and Pacific Islands, Nagoya, Japan, Sep. 2009. (Invited speaker)
- [14] H.K. Ma, "WEEE Treatment and Disposal", Sustainable Waste Management Policies and Practices, The HKIE Environmental Division Annual Seminar, Theatre II, Hong Kong Convention & Exhibition Centre, Hong Kong, April 2009. (Invited speaker)
- [15] 马小康, "台湾生活垃圾之零废弃排放政策", 2010 两湖低碳经济发展论坛, 杭州, 中国, April 26, 2010 (Invited Speaker)
- [16] 马小康, "台湾生活垃圾之零废弃排放政策", 环境卫生与科学发展论坛, 广东省环境卫生协会年会, 广州, 中国, Sep. 27, 2010 (Plenary Lecture).
- [17] H.K. Ma, "Panel Discussion: Recycling: What are the business drivers in Asia?", 5th World Recycling forum WRF 2010, International Conference & Exhibition on Electronics, Battery & Car Recycling, Hong Kong, Nov. 2010. (Invited Discussant & Session chairman)
- [18] Hsiao-Kang Ma, Chun-Lin Liu, "The Mechanism of WEEE Recycling and Treatment in Taiwan", ISWA World Congress 2011, Daegu, Korea, Oct. 2011.
- [19] Hsiao Kang Ma, "Waste Reduction and resource recycling in Taipei City", 2013 Taipei-Hong Kong City Forum, Taipei, Taiwan, June 2013. (Invited Speaker)
- [20] 马小康, "台湾地区的回收处理体系与最新数据", 2013 国际电器电子产品回收处理及生产者责任延伸制度大会, Beijing, China, May, 2013. (Invited Speaker)
- [21] Hsiao-Kang Ma, "Integrated and plastic waste management in Taiwan", 2014 International Symposium of "I Act, U Act!", Education for Plastic Waste Recycling at IEd Environmental Sustainable City, Hong Kong, April 2014. (Invited Speaker)
- [22] Hsiao-Kang Ma, 2014.10, "E-waste & PET Recycling Technologies in Taiwan", E-waste treatment technologies and achievement in Taiwan, Building an Eco-friendly Recycling Society, Ho Chi-Minh City, VietNam, October 2014. (Invited Speaker)

- [23] H. K. Ma, K. Hsu, “Eco-recycling of previous metal from e-waste” , Electronics Recycling Asia, Singapore, Nov. 2014.
- [24] Hsiao-Kang Ma, “E-waste & PET Recycling Technologies in Taiwan” , Wastech, International Summit & Expo, 4R’ s: A Way to Sustainability, Mahatma, Mandir, Gandhinagar, India, Nov. 2014. (Invited Speaker)
- [25] Harvey Houng, Shu-Hung Shen, Hsiao-Kang Ma, Book Chapter: “Municipal Solid Waste Management in Taiwan: From Solid Waste to Sustainable material Management”, Municipal Solid Waste Management in Asia and the Pacific Islands, pp.317-336, 2014. (Book published by Springer Singapore)
<http://www.springer.com/environment/pollution+and+remediation/book/978-981-4451-72-7>
- [26] Hsiao-Kang Ma, “Eco-recycling of precious metal from e-waste”, 14th International Electronics Recycling Congress IERC 2015, Salzburg, Austria, Jan. 2015.
- [27] <http://www.preciousmetals.umicore.com/PMR/>
- [28] <http://www.dowa-eco.co.jp/en/recycle.html>
- [29] <https://tw.news.yahoo.com/電子廢料回收-緯創美國>
- [30] H. K. Ma, “Development of the gold/tin stripping process in a container”, Electronics Recycling Asia, Singapore, Nov. 2015.