

從循環經濟角度談廢棄鋰鈷電池環保回收方案

胡家豪 / 優勝奈米科技有限公司課長
許景翔 / 優勝奈米科技有限公司總經理

一、前言

聯合國世界氣象組織 (World Meteorological Organization, WMO) 在報告中指出，2015 年至 2019 年間的全球平均溫度，已比 19 世紀工業化前還高出 1.1°C，大幅超出預期。在「2019 氣候行動峰會」當中，聯合國秘書長 Antonio Guterres 嚴正提及，氣候變遷和溫室效應所帶來的影響正加速擴大，碳排放量創新高，造成海平面上升、氣候異常、生態環境面臨重大改變，呼籲各國加強合作，沒有絲毫時間可以浪費。美國氣候中心 (Climate Central) 研究亦顯示，如人類不減少溫室氣體排放，到了 2050 年時，在東南亞沿海一帶，將有 2.37 億人會面臨洪水的威脅。

如何解決氣候變遷和溫室效應的問題受到全球關注，其中一塊便是發展綠色能源。汽、機車是人類日常代步極為便利的交通工具之一，但為了減少燃煤所產生的 PM2.5 (細懸浮微粒) 和高碳排等溫室氣體，以及最佳的能源轉

換效率，各國政府積極推動在未來的 30 年內禁售燃油車，將改為油電混合車款或純電動車款，由電池供電系統取代傳統燃油的方式。依據國際能源署 (International Energy Agency, IEA) 統計，在 2030 年時全球的電動車數量將超過 1.25 億輛，成長達 40 倍以上。

另一方面，手機、筆記型電腦等 3C 電子產品的數量亦呈現爆炸性的成長。聯合國國際電信聯盟 (International Telecommunication Union, ITU) 的報告中指出，2019 年全球手機總數量已經突破 80 億支，數量正式超越全球 74 億的總人口數，且手機數量的成長率依然遠高於人口數量的成長率。

因此，在新能源應用和高科技發展的時代，二次性 (充放電) 鋰電池則為重要的發展項目之一，其中，「鋰 (Lithium)」和「鈷 (Cobalt) 金屬則扮演著關鍵材料的角色。根據統計，2018 年全球金屬鋰產量為 85,000 公噸，相較於 2017 年的 69,000 公噸，產量成長約 23%，而全球最大鋰出口國之一的澳洲工業

部在報告中表示，全球約有近一半的鋰 (46%) 被用於生產電池。

同樣的，鈷也是相當重要的生產原料之一。根據美國地質調查局 (United States Geological Survey, USGS) 統計，全球有超過 5 成的儲量和開採量皆是位於非洲的剛果民主共和國 (Democratic Republic of the Congo)，其中又超過 9 成的產量皆銷售至中國大陸，經由工廠加工製造成精煉鈷、鈷鹽、硫酸鈷、草酸鈷、氧化鈷等多項化學品後，再販售給其他國家的廠商。鈷的來源也愈來愈受到國際間的關注，被列為下一個衝突礦產 (Conflict mineral) 之一。

負責任商業聯盟與全球永續議題 e 化倡議組織 (GeSI) 提出「負責任礦產」採購主張，獲得許多品牌商和製造商的全力支持，確保終端產品不會使用到在武裝衝突和侵犯人權的情形下所開採的錫 (Tin)、鎢 (Tungsten)、鉭 (Tantalum)、金 (Gold) 等衝突礦物原料。但就在 2019 年的 12 月，美國人權組織「國際權利倡議」(International Rights

Advocates) 代表剛果民主共和國 14 個家庭，對 5 家全球大型科技公司進行提告，包含特斯拉 (Tesla)、蘋果 (Apple)、微軟 (Microsoft)、戴爾 (Dell) 和 Google 母公司字母 (Alphabet)，因縱容以不人道的方式取得鈷，強迫勞動的體系導致這些家庭的小孩死亡或重傷，此 5 家知名企業共同面臨法律訴訟。

然而，各界的腳步仍需加快運作才行，如責任礦產倡議組織 (The Responsible Minerals Initiative, RMI) 和責任鈷業倡議組織 (The Responsible Cobalt Initiative, RCI) 所提出鈷熔煉廠稽核計畫，欲建立起鈷礦管理之完整架構，用以擴大檢視其供應鏈，確保無違反人權的狀況再度發生。

另一方面，各國應建立完整的廢棄鋰鈷電池回收機制，在消費者使用端，當電動車、3C 電子產品、儲能裝置不再使用報廢後，產品內皆含有大量的廢棄鋰鈷電池，內部仍有許多有價值的金屬如鋰、鈷和

鎳 (Nickel) 等，應妥善將這些金屬回收再利用，避免再次花費大量人力和物力去採礦，但僅將物質做一次性使用，進而達到物質循環永續使用，資源才能夠生生不息。

二、發展現況

以應用層面來區分，鋰電池可分為動力、消費及儲能三大主要市場，動力性鋰電池主要用於電動車等新能源交通工具，消費性鋰電池主要用於 3C 電子產品，儲能性鋰電池則為近年來新興的應用市場，其出貨量占比由高至低，分別為消費市場占 62%、動力市場占 32% 及儲能市場占 6%，在全球資源愈來愈有限且分配極為不均的條件下，能源的發展和應用更受到關注，如同美國在 2016~2045 全球科技發展趨勢報告中指出，能源即為其中一個項目。

近幾年，鋰電池相關的研發技術亦扮演關鍵角色，因具備能

量密度大、產品輕薄、工作電壓高和循環壽命長等特點，逐步取代傳統鎳鎘電池或鎳氫電池，成為二次充放電電池的主流，根據 MarketsandMarkets 的調研報告指出，2019~2025 年全球鋰電池市場複合年增長率將達到 15%，到 2025 年市場需求將比 2016 年的 374 億美金多出 1.62 倍。

鋰電池依外型區分可分為圓筒型、方型、鈕扣型及高分子軟包，不同的設計形狀來因應不同的需求，可參考圖 1。

一顆鋰電池可拆分為 4 個主要結構：正極材料 (Cathode material)、負極材料 (Anode material)、電解液 (Electrolyte) 及隔離膜 (Separator)，若依照正極材料 (Cathode Material) 的組成物來區分的話，鋰離子電池可分為磷酸鋰鐵系 (Lithium ion phosphate, LFP)、鎳酸鋰系 (Lithium nickelate oxide, LNO)、錳酸鋰系 (Lithium manganese oxide, LMO)、鈷酸鋰系



圖 1 各類型鋰電池

(Lithium cobalt oxide, LCO)、三元系的鎳錳鈷酸鋰 (Lithium nickel manganese cobalt oxide, NMC) 及三元系的鎳鈷鋁酸鋰 (Lithium nickel cobalt aluminum oxide, NCA)。

如何選擇正極材料，主要考量下列幾個重點：(1) 具較高的氧化還原電位，提供穩定的高輸出電壓；(2) 材料堆積密度高，具有較高的能量密度；(3) 充放電反應過程中的結構穩定性要佳，保有長循環壽命；(4) 導電率要佳，具有優異的充放電倍率性能；(5) 足夠的化學穩定性，不易分解放熱，具有較佳的安全性；(6) 製造工藝簡單，生產成本低廉。

其中，含有鈷金屬的鋰離子電池能在充放電、續航力及安全方面有更突出的表現，更為目前發展的主流，其他相關正極材料特性及差異可參考表 1。

不論是新能源移動工具（汽車、機車、公車等等）、3C 類消費性產品（手機、筆記型電腦、行動電源等等）或儲能裝置（能源牆、不斷電系統、太陽能儲電等等），經使用過後，終有報廢的時候，目

前各國終端處理廠不外乎以火法冶金和濕法冶金的技術來回收。

以火法冶金來說，會將廢鋰鈷電池粉末燒成合金磚，內部包含銅、鐵、鋁、鈷、鋰、鎳、錳等多項稀貴金屬，再利用多道化學工法去分離不同金屬，此製程重資本、空間需求大、能耗高且費時的產業。在濕法冶金方面，大多以硫酸和雙氧水作為酸浸漬劑，再利用有機溶劑 (P204、P205) 作反萃取，反應耗時較長，萃取損失量高，雙氧水在酸性系統中遇到重金屬離子易產生自分解反應，若在密閉的反應系統中，會有操作安全的疑慮，雖然都可以處理，但長遠考量之下，應要找尋更好的出路。

三、台灣的產業鏈

台灣的電池產業（亦稱能源元件產業）的發展已具有相當的規模，可分為上游、中游及下游相關產業，上游主要為電池原材料的製造商，包含正極材料、負極材料、電解液、隔離膜、罐體等供應商；中游為電池芯、電池模組廠商；下

游則為產品端應用，包含動力市場、消費市場及儲能市場。

產品達使用壽命後，若將內部的廢電池作為一般垃圾處理，最終會經由垃圾車載至掩埋場或焚化爐廠處理，但不論哪種作法皆很有可能因外在因素汙染環境，再經由食物鏈危害整個生態系統。另一方面，也浪費了廢電池內仍有許多的稀貴金屬資源。

自西元 1998 年起，環保署每年投入超過新台幣 1 億元以上的經費進行廢電池回收工作，除了避免汙染環境之外，更重要的是資源再利用，目前國內總共有 5 家受補貼回收業者，但多將廢電池以放電、破碎、研磨成粉狀後，出口銷售至日本或韓國作終端處理，價格容易受到市場牽制之外，也無法將稀貴金屬資源留在台灣，也減少國內電池產業原物料自主循環的良機。

四、環保回收方案

為因應全球暖化、空氣汙染、氣候變遷等議題，各國開始透過立法、減免稅務、加嚴標準、加強投

表 1 不同正極材料之特性

電池種類	成份	工作電壓	循環壽命	熱安定性
磷酸鋰鐵	LiFePO ₄	中	高	佳
鎳酸鋰	LiNiO ₂	高	低	差
錳酸鋰	LiMn ₂ O ₄	低	中	差
鈷酸鋰	LiCoO ₂	中	低	尚可
鎳錳鈷酸鋰	LiNi _x Mn _y Co _z O ₂	高	高	佳
鎳鈷鋁酸鋰	LiNi _x Co _y Al _z O ₂	高	中	佳

資技術研發等方式，針對燃油汽車列出許多政策和限制，進而造就了電動車產業的蓬勃發展，也導致鋰鈷電池、三元系電池的用量愈來愈大，成長速率快得驚人，各界亦開始着手投入回收的相關研究，然而多半僅考慮到鋰、鈷、鎳或錳(Mn)的回收，但電池內部仍有需多的稀貴金屬，例如在電池接點處有鍍金(Au)的表層，主要是因為金具有優異的抗腐蝕性和電傳導性，能提升電池使用的效率和壽命，且在生產材料時，通常會添加微量的稀土元素(Rare Earth Elements)在裡面，提供化學穩定性和結構安定。

目前優勝奈米已經成功從廢鋰鈷電池當中回收鋰、鈷、鎳和金等金屬，未來也持續朝向分離出更多有價值的元素前進，下文將簡介相關技術與應用。

(一) 環保化學剝鋰鈷技術

回收業者將廢棄鋰鈷電池製成粉末後即出口銷售，無法在國內實現循環經濟的發展，大幅的利潤也被國外終端處理業者掌握，為協助解決現況，優勝奈米開發一套廢鋰鈷電池環保回收方案，以綠色化學的思維出發，經由研究與實驗，開發出一支專門適合回收廢鋰鈷電池的藥劑 UW-530，可將廢鋰鈷電池粉末中的有價金屬：鋰、鈷、鎳等完全提取，且在常溫常壓下即有良好效果，並可減少酸性液體的使用量，後續再利用減壓蒸餾(Vacuum distillation)方式，能將廢酸回收重複使用，達到回收的內循環。

有價金屬會形成結晶物析出，可再透過電解還原的方式分別將鈷回收，剩餘的鋰藉由加入碳酸鹽類便會沉澱析出碳酸鋰，這些能再交

由電池製造的上游產業，作為材料重覆生產使用，製造成新電池，達到外部循環，也避免需不斷開採原礦造成更嚴重的汙染和資源浪費，也能確保產品來源是屬於綠色的「負責任的金屬」。

(二) 環保化學剝金技術

回收廢鋰鈷電池時，在物理製程前處理當中，電池接點的鍍金屬一般會殘留在正極材料的粉末當中，所以針對 UW-530 藥劑所不溶解的殘渣，可再利用 UW-860 無氰剝金藥劑，將殘渣內部的金全部提取出來，反應溫和且快速，剝除後含有黃金的水溶液再加入還原劑產生高純度的金泥，經清洗烘乾後，置於高溫爐中燒結，則可獲得純度 3N~4N 的純金(99.9%~99.99%)。

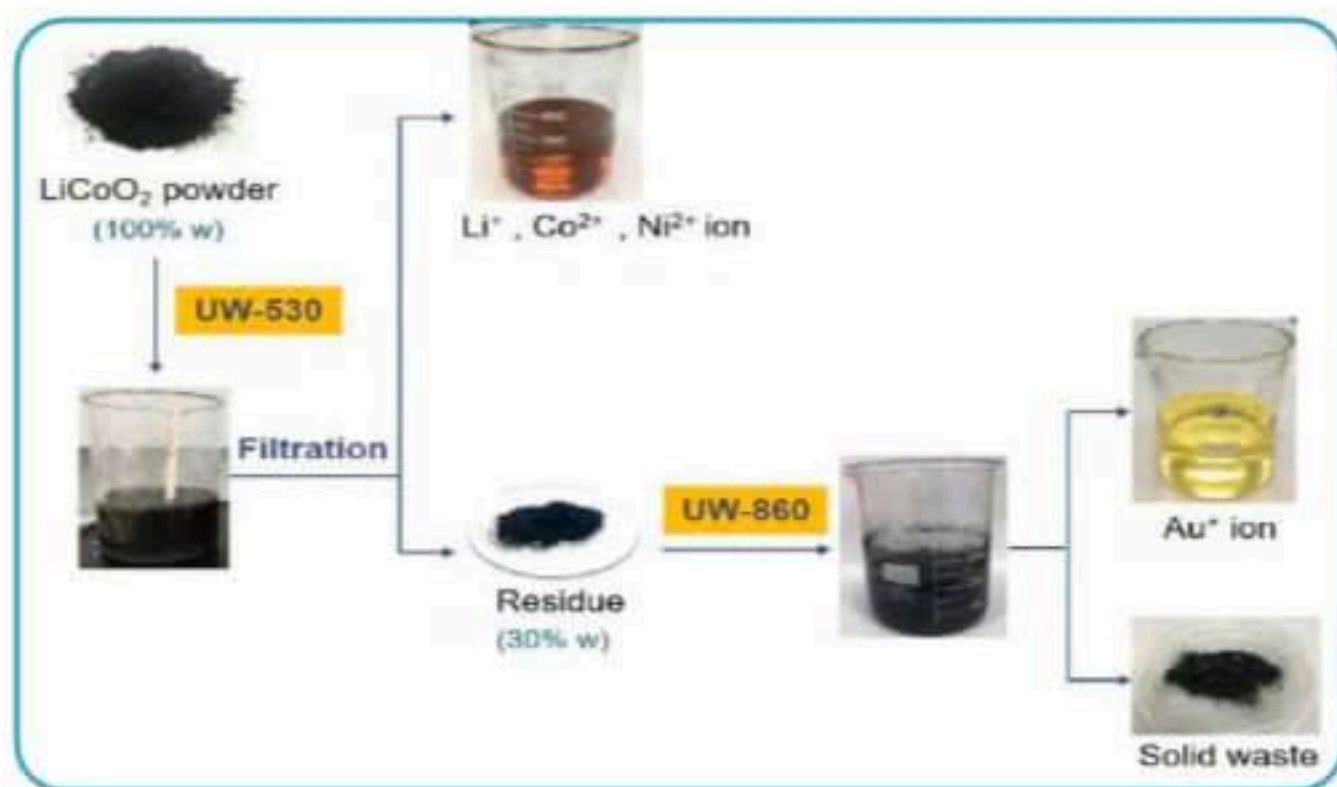


圖 2 廢鋰鈷電池正極材料粉末環保回收流程

表 2 鈷酸鋰粉末檢測結果

金屬元素	含量	提取率	價值
鋰 (Li)	32.9 (kg/ ¹ ton)	99.98%	290 (USD/ ¹ ton)
鈷 (Co)	207.0 (kg/ ¹ ton)	99.99%	7,245 (USD/ ¹ ton)
鎳 (Ni)	20.9 (kg/ ¹ ton)	99.96%	321 (USD/ ¹ ton)
金 (Au)	20.2 (g/ ¹ ton)	99.70%	1,061 (USD/ ¹ ton)

五、結果與討論

本次研究的標的物為正極材料 (鈷酸鋰) 粉末，由環保署基金管理委員會所認可的廢電池回收商提供，主要為該廠商蒐集大量的 3C 資訊產品類之鋰鈷電池，在廠內經由放電 (確保不會產生爆炸)、初破碎 (打碎外部結構)、分選 (篩選掉鐵殼、鋁殼等)、烘乾研磨 (取得正極材料之粉末) 等物理製程，最終得到鈷酸鋰粉末，將鈷酸鋰粉末浸漬在 UW-530 藥劑當中，反應數小時後將藥水過濾，可得到含有高濃度鋰、鈷、鎳等金屬離子之藥水以及無法溶解的殘渣，此殘渣主要為大量的碳和塑膠隔離膜，但仍含有貴金屬在其中，所以再浸漬於 UW-860 無氟剝金藥劑，同樣反應數小時後，過濾便可得到含金溶液，實驗的流程可參考圖 2。

檢測的結果和金屬回收價值可參考表 2，該粉末含有豐富的鋰、鈷、鎳金屬，且還有些微的金，雖然只有每公噸 20 克含量，但相較於開採金礦砂 (每噸礦砂約含 3~5 克金不等)，金的含量已高出至少 4~5 倍，亦由於採用綠色化學的概念來研發藥劑，不僅提取率非常

高之外，反應快速又能減少藥水用量，相對的設備投資額也小，對於環境負擔成本更少，獲利有 40~60% 的表現，此方式除能使企業有穩定的成長營收之外，還能將戰略金屬資源留在台灣永續循環，提升國際競爭優勢。

六、結論

全球面對數量遽增的鋰鈷電池、三元系電池，快則 3~5 年便報廢無法繼續使用，若不妥善回收處理，對生態環境會造成嚴重且不可逆的破壞，因此，要盡快找出適合的解決之道並符合企業預期營運，更重要的是，應避免使用有毒有害的方式來回收處理廢鋰鈷電池，以綠色化學思維出發，選擇環境友善與經濟發展並行的方式來回收，進而減少對水、空氣和土壤的污染。

以本研究案例而言，利用環保剝鋰鈷和環保剝金的方式在廠內自行做終端處理，具有環保安全、藥水用量少、提取效率高且設備投資金額小等優勢，獲利可達 40%~60% 以上，協助政府與企業真正落實循環經濟，提供綠色生產的負責任

金屬原物料，符合聯合國提出的 SDGs 目標。

七、文獻回顧

- [1] Office of the Deputy Assistant Secretary of the Army, "Emerging Science and Technology Trends: 2016-2045. A Synthesis of Leading Forecasts." (2016).
- [2] Ra, D.I. and Han, K.S., "Used lithium ion rechargeable battery recycling using Etoile-Rebatt technology." *Journal of Power Sources*, 163, 284-288 (2016).
- [3] Nan, J., Han, D. and Zuo, X., "Recovery of metal values from spent lithium-ion batteries with chemical deposition and solvent extraction." *Journal of Power Sources*, 152, 278-284 (2005).
- [4] Chen, L., Tang, X., Zhang, Y., Li, L., Zheng, Z. and Zhang, Y., "Process for the recovery of cobalt oxalate from spent lithium-ion batteries." *Hydrometallurgy*, 108, 80-86 (2011).
- [5] Hong, Y.H., "A Study on the Material Flow Analysis and Management of Lithium, Cobalt in Lithium Battery Industry." National Taipei University of Technology, master thesis (2019).
- [6] "Cobalt DRC case." International Rights Advocates (2019).
- [7] "Measuring the Information Society development: Facts and figures 2019." International Telecommunication Union (2019).