

環境管理規劃類

鋰電池儲能系統潛在環境衝擊分析初探

黃建中*

摘 要

鋰電池儲能系統案場隨著能源結構改變，近幾年在台灣大量建置，目前總數已超過 1GW，然而儲能電池熱失控將導致環境危害風險，並造成社會負面觀感。為釐清此一議題，本研究回顧了國內外相關的研究，彙整鋰電池可能的環境危害物質與相關污染途徑，經比對國內既有法規與污染管制標準，重點項目是鎳、鉻、銅、鋅、氫氟酸、氰化氫、六氟磷酸、四氟硼酸、六氟砷酸鋰、五氟磷酸、揮發性有機物，新興污染物則須留意 PFAS 等氟化物。

在可能的污染途徑部分，以儲能案場熱失控的情境下風險較高，除了燃燒生成產物直接排放到大氣，用於事故現場的滅火劑或消防用水，也可能是承載來自鋰電池釋放的所有污染物的媒介，這可能擴大影響範圍，影響到案場周界的土壤與地下水。未來可以導入其他安全性更高的儲能系統，並且強化儲能案場管理規範，將可降低儲能電池潛在環境衝擊。

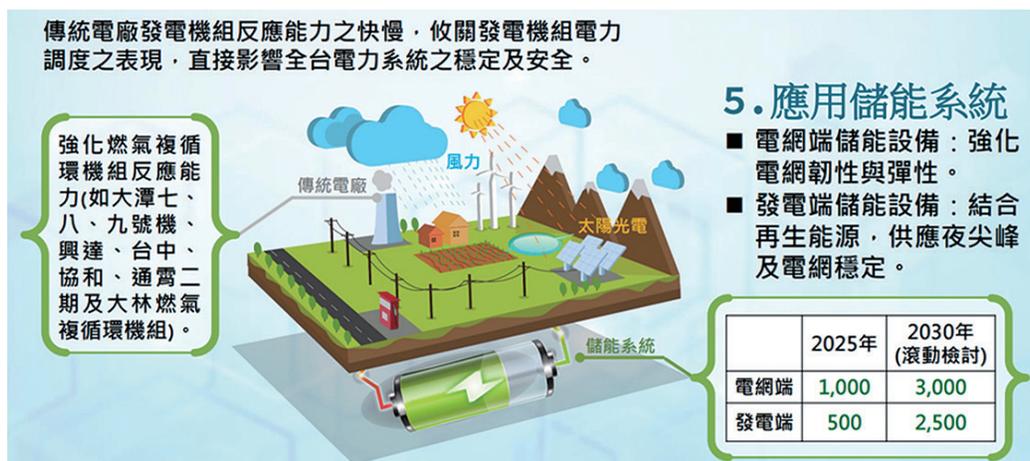
【關鍵字】儲能系統、鋰電池、環境衝擊

* 工業技術研究院綠能與環境研究所電池儲能研究室

專案經理

一、儲能系統的重要性

國發會「臺灣 2050 淨零排放路徑」的規劃中，再生能源裝置容量於 2025 年預期達到 25.6GW，並以 2030 年以前太陽光電每年增加 2GW、風力發電每年增加 1.5GW 為目標。為維持電網穩定，需要大量的儲能系統在電網端搭配再生能源，以減少再生能源發電併網時對電網造成的衝擊。儲能系統亦是電力系統中輔助服務的供應來源之一，相較於燃氣機組可以在更短時間內完成建置及上線，且可同時提供多樣功能。目前我國規劃 2025 年電網端儲能設置 1,000MW 以上，包含自建儲能系統 160MW 以上、建立電力交易平台採購輔助服務 840MW 以上；另推動發電端儲能系統 500MW。2030 年的電網端與發電端儲能建置量則分別為 3,000MW 和 2,500MW，如圖 1 所示(行政院國家永續發展委員會，2022)。



資料來源：行政院國家永續發展委員會 (2022)

圖 1 儲能系統設置目標量 (MW)

為了符合電力交易平台輔助服務的響應時間需求，國內目前參與此平台的儲能案場均為鋰電池儲能系統，組成單元可分成電池模組、電池管理系統、能源管理系統、電池保護與滅火系統。其中電池模組單元還可依據正負極材料區分為鋰三元（主流為鎳鈷鋁錳 NCM、鎳鈷鋁錳 NCA）、磷酸鋰鐵（LFP）和鋰鈦氧（LTO），由於鋰鈦氧負極材料成本較高，而磷酸鋰鐵相較於鋰三元鋰電池擁有較高的安全性與循環壽命，因此在國內儲能案場的應用上以磷酸鋰鐵電池為大宗。

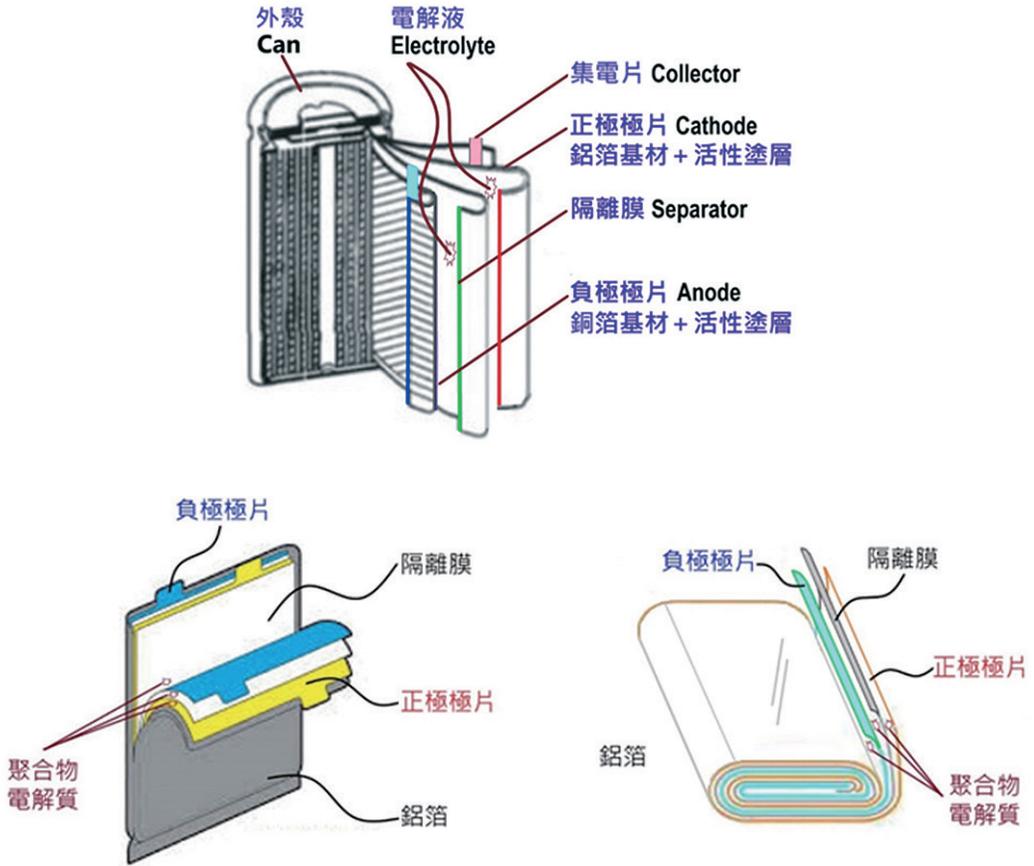
國內鋰電池儲能案場建置量近年來快速增加，根據台電資料，目前電網端儲能建置量約為 1,216.9MW（截至 113 年 10 月 30 日），其中 dReg（動態調頻備轉）：809MW，E-dReg（電能移轉複合動態調節備轉容量）：391.2MW，sReg（靜態調頻備轉）：16.7MW。在發電端主要是推動儲能系統結合太陽光電發電設備，目前已有 3 個案場上線（截至 113 年 10 月 1 日），設置容量總計為 30.5MW。

然而儲能系統的事故也時有所聞，根據全球公開數據庫 EPRI BESS Failure Incident Database 統計，全球迄今已發生超過 80 起併網型儲能系統安全事故案件，大部分事故都在運轉 2 年內發生，台灣也有 3 起事故被列在內，分別是 2022 年 3 月 30 日的台電龍井案場、2023 年 7 月 4 日龍井的民間儲能貨櫃、2023 年 12 月 28 日的台電蘭嶼案場。而一旦發生事故，造成的損失與危害重大，亦將造成環境衝擊，並造成社會負面觀感，因此有必要針對儲能電池潛在環境衝擊進行分析。

二、儲能電池材料分類與潛在危害物質

2.1 儲能電池潛在危害物質

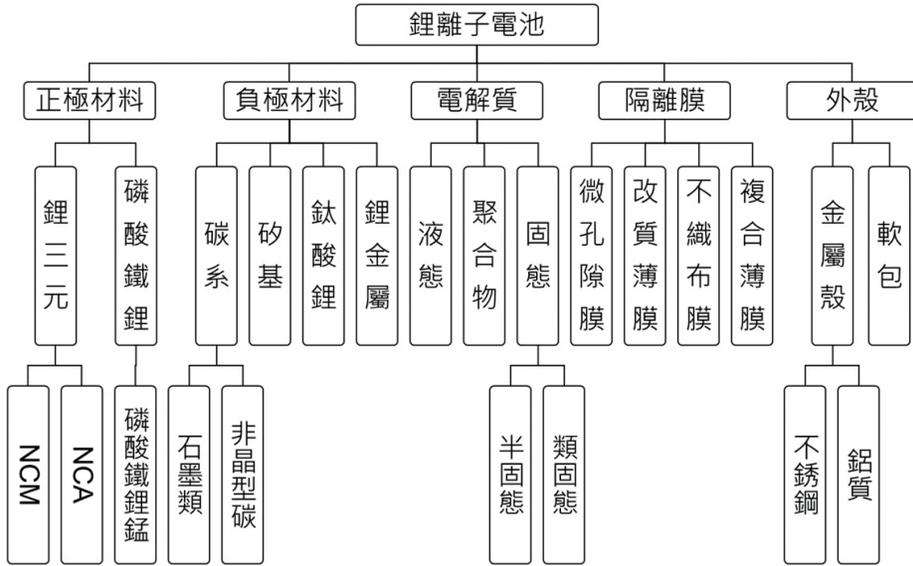
電池污染物會隨電池材料配方與製程而有所不同，包括：鋰電池正極材料、負極材料、電解質、隔離膜和外殼，如圖 2 所示（羅得良，2023）；鋰離子電子材料分類，如圖 3 所示（羅得良，2023），包括金屬鹽類、揮發性有機電解質和添加劑（導電劑和黏著劑等）；後者通常是商業機密，因此它們的毒性和燃燒產物大部分是未知的。



資料來源：羅得良 (2023)

圖 2 圓柱形與方型電池 (堆疊式 + 捲繞式) 構造

此外，電池火災可能會將有害物質釋放到空氣中，或使有害物質滲入土壤、地下水和地表水中。一旦釋放出來，將會單獨或與其他污染物相結合，對周圍環境造成風險。



資料來源：羅得良

圖 3 鋰離子電池材料分類

2.2 儲能電池潛在危害物質文獻彙整

在文獻中記載 (張明杰等, 2023), 實際燃燒過程中, 電池各組分材料並非獨立燃燒, 而是各材料之間相互反應。電池在高溫條件下會發生固態電解質介面膜 (Solid Electrolyte Interface, SEI) 的分解、負極嵌入鋰與電解液的反應、電解液的自分解反應、隔膜溶化、脫鋰正極的分解反應、電極活性材料與電解液的氧化還原反應等, 這些電池內部複雜的化學反應共同影響電池的最終燃燒產物。

經分析, 電池內部的氣體主要從電解液熱分解階段開始迅速累積, 正負極與電解液反應產生的各種可燃性氣體同電解液蒸氣混合在一起, 使得電池內部壓力急劇增大。當電池體系內壓力達到一定值後, 可燃氣體便會衝破安全閥, 有足夠的點火能量後可能發生熱失控。燃燒煙氣中含有 HF、CO、醛類等毒性氣體, HF 主要來自電解質的水解、燃燒以及與正極之間的反應; 溶劑燃燒後可生成甲醛、甲醇、乙醛、乙醇、甲酸等小分子有機物; 軟包外殼的鋁塑膜的燃燒或分解也會產生毒性物質 CO、NO₂ 等。目前對於電池燃燒煙氣的分析, 大多針對於燃燒前的熱失控階段產氣研究,

在 UL 9540A 評估電池儲能系統大規模熱失控火蔓延情況的測試方法中，除了會觀察電芯、模組和機櫃的燃燒特性之外，也會蒐集電池熱失控之後的燃燒氣體成分與特性。電池污染物的文獻如表 1 和表 2 所示。

表 1 電池組成材料與化學性質及燃燒產物

電池組成	材料名稱	化學特性及危害
負極材料	碳材料、石墨	燃燒前 SEI 膜的分解基本不影響負極燃燒產物種類，主要也是 CO 與 CO ₂ ，但在 SEI 膜分解後電解液與負極接觸，與負極中嵌入鋰發生反應，生成 Li ₂ CO ₃ 和小分子碳氫化合物氣體。
正極材料	LiFePO ₄ 、三元材料	LiFePO ₄ 化學性質相對穩定，燃燒後產氣成分 CO 和 CO ₂ ，為三元材料受熱易分解產生氧氣，與電解液反應放熱並助燃電池。
電解質	LiPF ₆	強腐蝕性，受熱分解成 PF ₅ ，遇水分解成 HF，燃燒生成 P ₂ O ₅ 等有毒物質。
電解質溶劑	EC、PC、DMC、EMC、DME	電解液與負極之間：由於 SEI 膜的分解不僅會加熱電池，還會使負極失去 SEI 膜的保護作用而導致電解質和碳負極之間發生反應。有機溶劑與碳負極嵌入鋰接觸後反應，釋放出易燃的碳氫化合物，例如 C ₂ H ₄ 、C ₃ H ₆ 和 C ₂ H ₆ 。燃燒產生 CO 和 CO ₂ ，受熱分解產生醛、酮等有害氣體，部分會水解產生甲醇等有機污染物。
隔膜	PP、PE	商用隔膜材料主要是聚乙烯 (PE)、聚丙烯 (PP) 以及二者的複合材料，PE 和 PP 隔膜材料的熔點分別約為 135 和 166 °C。隔膜燃燒可產生 CO、CO ₂ 、醛、有機酸等。
黏合劑	PVDF	PVDF 六氟丙烯共聚物粉末在 350 °C 下與金屬鋰或 Li _x C ₆ 快速反應，產生了 H ₂ ，電池在密閉環境中熱失控燃燒過程就有了爆燃性，增加了鋰離子電池的危險性。燃燒產生 HF 和 CO ₂ ，與嵌鋰碳反應生成 H ₂ 。
鋁塑膜	尼龍、聚丙烯	鋁塑膜燃燒後產生的毒性氣體 NO ₂ 主要來自尼龍材料，燃燒不完全還會生成 CO，燃燒後也會產生 CO ₂ 。

資料來源：張明杰等 (2023)

表 2 電池潛在污染物文獻彙整

作者	年份	污染物
李飛	2017	鋰離子電池含有錳、鎂、鋅，電解質主要包括能與水或與酸反應的 PF_6 、 BF_4 、 LiClO_4 、 LiAsF_6 等物質，生成 HF 、 PF_5 等有毒氣體或其他有毒物質，產生氟污染及砷污染；電解質溶劑主要是有機酯溶劑碳酸丙烯酯 (PC)、二乙基碳酸酯 (DEC) 和醋酸乙酯 (EA)。
榮如一	2018	廢棄電池中的酸鹼電解質會使土壤酸鹼化造成土壤污染，且廢棄電池內的重金屬元素，如汞、鎘等會被動植物吸收。
LIU Xiaobei 等	2022	退役鋰電池放電廢水含有：磷酸三(2-氯乙基)酯具有毒性，2,4-二甲基苯甲醛、二乙二醇單 [(1,1,3,3-四甲基丁基) 苯基] 醚等有機物具有持久性和生物毒性，對人類健康、環境有重大影響。
張磊等	2021	三元鋰電池熱失控會產生 CO 、 SO_2 、 THC 等氣體， CO 的體積分率最高，超過 1×10^{-2} ， THC 濃度次之，約 2×10^{-3} ， SO_2 最少。
王超	2022	在鋰電池回收的製程中，鋰電池拆解成電池碎片後，會被送入熱解爐中以火法冶金進行熱解後進行金屬回收。在 $150^\circ\text{C} \sim 300^\circ\text{C}$ 的溫度下，殘留的電解液會被蒸發或熱解，產生含有 VOCs 的廢氣。VOCs 是指烴類、鹵代烴等對環境大氣有污染的物質，它是二次污染物形成的最主要前驅體，會導致嚴重的環境污染，例如：光化學煙霧、灰霾等。
Wojciech Mrozik 等	2021	鋰電池含有各種化學物質，包括金屬鹽類、揮發性有機電解質和添加劑；後者通常是商業機密，因此它們的毒性和燃燒產物大部分是未知的。一旦發生熱失控等異常狀態，將產生有毒的混合氣體 (包括氫、一氧化碳、二氧化碳、氫氟酸、短鏈烷烯和烷烴、氰化氫、氮氧化物和溶劑氣膠等)
黃建彰	2023	熱失控噴出毒性氣體種類包含 CO 、 HCN 、 POF_3 等氣體，其中 HCN 為鋰三元電池噴出氣體， POF_3 為磷酸鐵電池噴出氣體

2.3 毒性化學物質清單比對

以下彙整上列的潛在污染物，並針對在電池中的主要應用、對人體的危害、污染產生階段，與國內相關規範進行比對，如表 3。

經比對國內既有法規與污染管制標準，重點項目是鎳、鉻、銅、鋅、氫氟酸、氰化氫、六氟磷酸、四氟硼酸、六氟磷酸鋰、五氟磷酸、揮發性有機物。新興污染物則須留意 PFAS 等氟化物。

表 3 毒性化學物質清單比對

法規 / 計畫名稱	比對清單
毒性及關注化學物質管理法	環境部化學物質管理署 / 毒性及關注化學物質快速查詢 https://www.cha.gov.tw/sp-toch-list-1.html?query=&type=all
固定污染源空氣污染物排放標準	固定污染源有害空氣污染物種類及排放限值附表一、附表二
放流水標準	附表十一 其他工業區專用污水下水道系統放流水水質項目及限值
有害事業廢棄物認定標準	附表四毒性特性溶出程序 (TCLP) 溶出標準
土壤污染管制標準	第 5 條 污染物之管制項目及管制標準值
地下水污染管制標準	第 4 條 污染物之管制項目及管制標準值
勞工作業場所容許暴露標準	附表一 空氣中有害物容許濃度
職業安全衛生法	特定化學物質危害預防標準第 3 條特定管理物質、附表一：特定化學物質
全國土壤品質特性及關切污染物調查與管理計畫	鄰苯二甲酸酯類、多環芳香烴類和農藥
監測井水質評析及工業區預防管理計畫	全氟辛烷磺酸 (PFOS)、全氟辛酸 (PFOA)、全氟丁酸 (PFBA)、全氟戊酸 (PFPeA)、全氟己酸 (PFHxA)、全氟庚酸 (PFHpA)、全氟丁烷磺酸 (PFBS)、全氟己烷磺酸 (PFHxS) 等 8 種物質，以及鎘、鉍、銀、鋇、銻、硒、鋁、鈷、鋰、鉍、鈳、鈳、鎢等 12 種金屬與兩性元素。

三、儲能電池潛在污染物產生階段

以下說明鋰電池不同的處置情境 (如：回收、掩埋) 或意外情況 (如：火災)，其潛在污染物。

3.1 鋰電池回收

主要是火法 (乾式) 冶金 (pyrometallurgy) 和濕式冶金 (hydrometallurgy)，兩者的回收程序、優缺點與環境考量面比較如表 4。

表 4 鋰電池材料回收方法與比較

回收方法	火法 (乾式) 冶金 (pyrometallurgy)	濕式冶金 (hydrometallurgy)
回收程序	乾式冶金法是將廢鋰電池從回收站收集回來後，以高溫的方式進行燒結後回收。破碎後的電池被導入高溫爐中，進行高溫約 700~800°C 處理。在處理過程中，能夠藉由熔點及比重的差異，分別將 Co、Ni、Fe、Al 等金屬回收。而鋰金屬則是以 Li ₂ O 的形式逸出，然後再與 H ₂ O、Na ₂ CO ₃ 反應形成 Li ₂ CO ₃ 予以回收。	濕式冶金法主要是以無機酸溶液作為處理液，將廢電池中欲回收之成分進行萃取後再予以純化回收。電池破碎後放進吸收室以無機酸溶液噴淋，再將鋰電池所含之電解液和鋰金屬成分予以萃取吸收，而其餘殘渣的部分則依照各種金屬之特性不同進行分離純化。
優點	為開發成熟之技術。 塑膠外殼及其他有機成分都可能回收。 從爐渣中提取稀土元素與從原生礦石的處理步驟相同。	能源消耗較少。 投資成本低。 可從陰極、陽極材料和殼體金屬回收廢棄物的不同成分，可以分別在市場上銷售。
缺點	能源消耗大。 高溫爐的投資成本高。 稀土元素需要從爐渣中提取。 得到的稀土元素混合物，需再進一步分離。	產生之廢棄物需再進行處理。 消耗大量化學品。 需要許多人工拆卸電池和不同組件的分離操作。
環境考量面	能源消耗大，導致溫室氣體排放和產生有毒氣體或含有有害成分的爐渣，如烷基氟磷酸鹽 (alkylfluorophosphates)，也會導致光化學臭氧形成、致癌和非致癌效應、臭氧層破壞和優養化。	可回收石墨和電解液，溫室氣體排放較少，但需要廢水處理，對淡水和陸地的酸化造成環境風險。

資料來源：張添晉 (2018)、Mohr(2020)

3.2 鋰電池掩埋

鋰電池在掩埋場可能造成火災，也會有滲出液產生，相關潛在的污染分析如表 5。台灣過去幾年也發生過掩埋場起火悶燒，如 110 年 3 月在新北八里掩埋場、113 年 5 月在台東縣綠島掩埋場，都被懷疑跟廢棄鋰電池自然有關 (自由時報，2021&2024)。

表 5 鋰電池於掩埋場中的污染風險

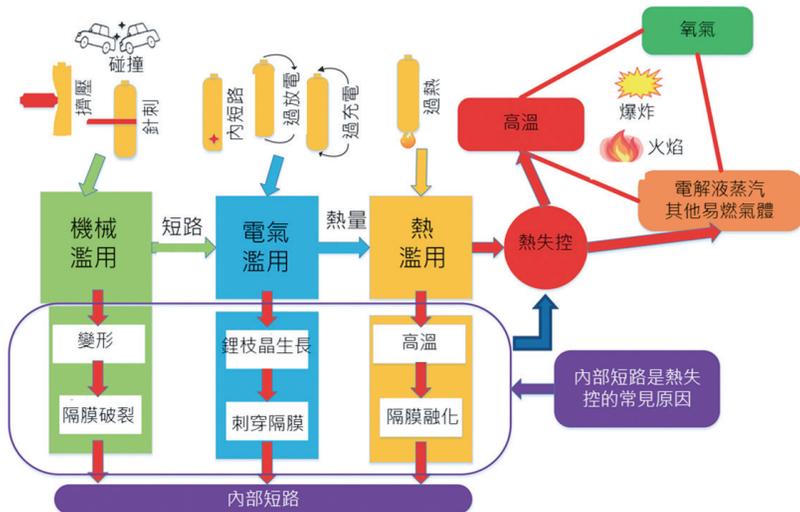
	掩埋場火災	掩埋場滲出液
潛在污染	掩埋場鋰電池火災產生了混合有毒氣體和煙霧的混合物，如多環芳烴 (PAH)、戴奧辛 / 呋喃 (dioxin/furan)、揮發性有機化合物 (VOC)、重金屬、多氯聯苯或有機氯農藥、粒徑小於 0.1 微米的氣溶膠顆粒，導致呼吸道疾病和心血管疾病。	掩埋場滲出液是一種高度污染的底層水，其中含有有機和無機污染物，如重金屬、鹽、氮氮、氰化物、酚和揮發性有機化合物。含有鋰電池的掩埋場可能會因此產生更大的滲出液量，因為電池中的電解質和有機電解液具有溶解其他污染物的能力。

資料來源：Mrozik(2021)

3.3 鋰電池熱失控

3.3.1 鋰電池熱失控原因

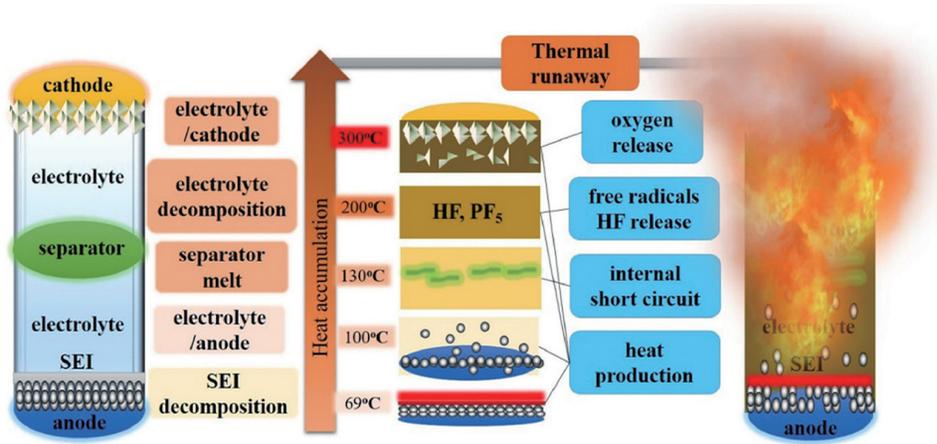
儲能系統發生意外，原因之一是鋰電池電芯會發生熱失控，一般有幾種可能，包括 (1) 機械濫用：擠壓、碰撞，導致電芯結構受損，隔離膜破裂，導致內部短路。(2) 電氣濫用：過充電、過放電導致鋰枝晶生長刺穿隔離膜。(3) 熱濫用：使用環境或電芯本身溫度過高，導致材料老化或隔膜融化，如圖 4 所示 (Wang, 2019)。



資料來源：Wang (2019)

圖 4 鋰電池熱失控事故原因示意圖

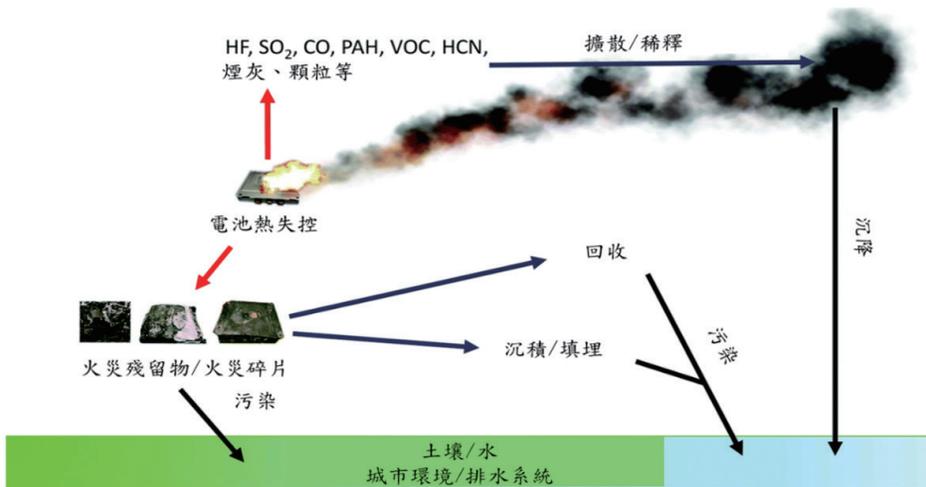
鋰電池熱失控過程，主要會因內部短路導致溫度升高，造成 SEI 膜融化，同時石墨與電解液反應產生熱，熱累積之後造成隔離膜溶解與電解液解離，並持續升溫，導致正極材料崩解，若正極材料為三元鋰氧化物則會釋放出氧氣，造成火災，引發後續的熱失控，如圖 5 所示 (Wang, 2019)。



資料來源：Wang (2019)

圖 5 鋰電池熱失控過程

3.3.2 熱失控氣體釋放



資料來源：Mrozik(2021)

圖 6 鋰電池熱失控對環境影響的途徑

鋰電池的熱失控對環境影響的途徑如圖 6(Mrozik, 2021)，主要的影響集中在熱失控時有毒氣體的釋放上，Larsson(2018) 等通過對鋰離子電池熱失控過程氣體釋放的即時檢測發現，揮發性電解液溶劑是熱失控之前從電池中排出的主要氣體成分。另外還檢測到了 CO、C₂H₄、CH₃OCHO、HF 和 CH₃OCH₃，Golubkov(2014) 等使用氣相色譜儀分析了 100% 荷電狀態 (SOC) 不同正極材料電池熱失控採樣氣體的成分。H₂、CO₂、CO、C₂H₄ 為主要成分，可做為熱失控初期氣體偵測告警的依據。

除了熱量、火災或有毒且潛在爆炸性的蒸氣雲外，還有一種污染的可能性，即物質在空氣中的運輸，並隨著時間在其他遠處地方的沉積。火災的近距離環境還受到火災殘骸、滅火劑傳輸的污染以及燒毀的殘骸中剩餘污染物的釋放的影響，這取決於處置的類型和地點。

實質上，鋰電池在熱失控時產生的氣體是一種混合物，包括氫、一氧化碳、二氧化碳、氫氟酸、短鏈烷烯和烷烴、氰化氫、氮氧化物和溶劑微滴。

從整體上看，白色氣體的組成在不同的電池化學組成、形狀和製造商之間變化不大。當電池安全閥 / 防爆片破裂時，氣體混合物會被排放出來：在高 SOC(高荷電狀態) 且存在足夠的氧氣時，白色氣體會點燃形成火焰。在低 SOC 或缺乏足夠空氣的情況下(例如，氣體或滅火劑取代了空氣)，白色氣體不會點燃，這種情況下，在封閉空間內，可能出現閃光火災、火球發展，或在極端情況下，甚至是蒸汽雲爆炸。

3.3.3 滅火劑的使用

用於緩解事故的滅火劑(水、泡沫等)將是承載來自鋰電池釋放的所有污染物的媒介。這可能擴大影響範圍。但是目前在考量滅火劑時，仍以滅火效果為考量，如全氟己酮滅火效果良好，但可能產生環境衝擊，如加速臭氧層破壞。

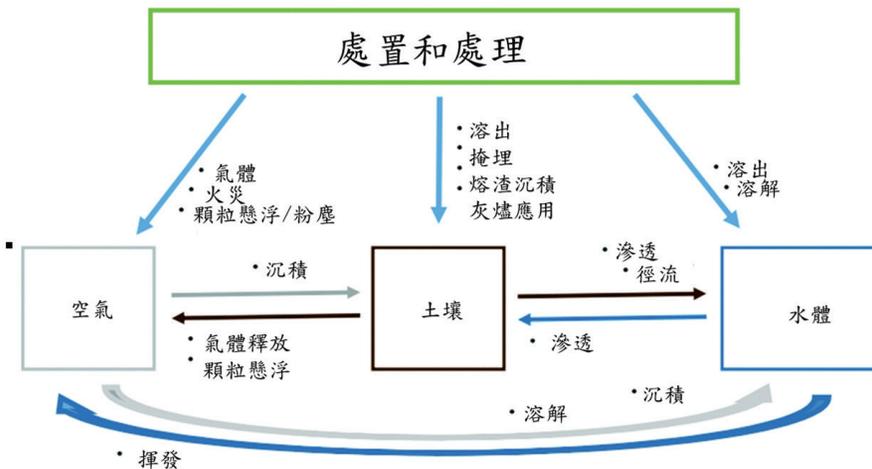
在火災期間釋放的氫氟酸可能會與滅火劑形成溶液，在濃度低至 0.01% 的情況下，即使暴露時間短至 5 分鐘，也可能對人體皮膚的敏感區域造成傷害。如果考慮到每瓦時 (Wh) 的電池組可能釋放 20~200 毫克的氫氟酸，在設計和使用處理更大量鋰電池的滅火系統時，應考慮到這一點。第一線應急人員也必須意識到額外的危害，因此應建立適當的個人防護裝備和操作程序。

3.3.4 熱失控電池殘骸

當火災熄滅後，留下的是燃燒過的電池殘骸。除了可能有一些鋼製零件，如電池包外殼、模組外殼等，沒有回收價值，容易被丟棄或掩埋。目前沒有直接顯示此類廢棄物可能釋放出哪些污染物的數據。根據典型的火災後分析和鋰電池的組成，文獻 (Mrozik, 2021) 推測這些可能是奈米氧化物、金屬、多環芳烴和揮發性有機化合物的殘骸。

四、儲能電池之可能污染排放途徑

廢棄的鋰電池被認為是有害廢棄物，因為與重金屬相關的潛在環境和人體健康風險。處理和處理鋰電池，跟化學組成有關，將對各種環境介質產生顯著影響，如圖 7(Mrozik, 2021)。鋰電池含有各種化學物質，包括鹽類、揮發性有機電解質和添加劑：後者通常是商業機密，因此它們的毒性和燃燒產物大部分是未知的。此外，電池火災與垃圾填埋場的生物氣體結合，可能會將危害物質釋放到空氣中，或使有害物質滲入土壤、地下水和地表水中。一旦釋放出來，它們對周圍環境造成風險，單獨或與其他污染物相結合。



資料來源：Mrozik(2021)

圖 7 廢棄鋰電池之可能污染排放途徑

圖 7 顯示了鋰電池對環境可能造成的污染途徑，以及不同介質之間可能的交叉污染。一旦污染物從鋰電池釋放出來，可能首先進入一個介質，然後被運輸到另一個介質。例如，重金屬可能會被垃圾填埋場滲出液收集，然後被運輸到初始場地外的土壤或地下水中。另一方面，如果電池洩漏到露天地面，重金屬可能隨著雨水流入附近的河流或湖泊。仍有更多污染途徑需要被進一步研究。下列僅列出幾項說明 (Mrozik, 2021)。

4.1 污染物傳輸途徑：排放到大氣

4.1.1 粉塵

在拆解和回收鋰電池的過程中，細微粉塵顆粒可能釋放到空氣中；來自垃圾掩埋場或垃圾掩埋場的衰變或火災 / 熱失控也會釋放粉塵，被視為總粉塵排放的一部分。一般來說，粉塵是一種由各種尺寸 (奈米到幾微米) 和化學成分的固體顆粒和液體微滴組成的混合物，全部懸浮在大氣中。小於 10 或 $2.5 \mu\text{m}$ 的懸浮微粒 (PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$) 可能危害人體健康，並降低局部和區域尺度的能見度。懸浮微粒可能含有與電池相關的金屬成分，如砷、鎘、鉻、鈷、銅或鉛。粉塵可能進入呼吸系統，導致心血管和呼吸系統疾病、致癌性或破壞內分泌系統等不良健康影響。

在鋰電池的拆解和材料回收過程中，機械破碎可能產生粉塵排放。這些排放可能對回收拆解中心的工人以及居住或工作在附近的人造成呼吸危害。

此外，從電池釋放的粒子和化學物質 (例如 PAHs) 可能在大氣中聚集在一起，被運輸到更遠的地方，然後沉積下來，造成土壤污染等問題。

由於鋰電池顆粒可能由不同的材料和尺寸組成，可能導致不同的毒性和呼吸危害。

另一個產生粉塵和粒狀物的來源是熱失控和火災。在熱失控過程中，粒狀物首先隨其他氣體一起從安全閥噴出，產生黑煙。冷卻後，它們會沉積為表面粉塵。Liao(2020) 的研究顯示，來自鋰鎳鈷錳 (NMC) 電池的這些粉末的組成主要是碳、氧、

鋁、錳和氟。這表示在鋰電池安全閥噴出的氣體，主要是電池的負極碳粒子以及正極材料。

另一項研究發現 (Wang, 2020)，經過溫度濫用的汽車用鋰三元 NMC 方型電池釋放了含有重金屬的懸浮微粒。作者發現鎳和銅在所有收集懸浮微粒 (1.45~500 μm) 中都有檢測到，而鋅和鉻則在更大的粒狀物 (50~500 μm) 中沉積。鎳所占的重量百分比最大，其次是銅、鋅和鉻。就總排放量而言，懸浮微粒占電池質量的 1.7%。一旦沉積，這些顆粒可能與周圍的水和土壤產生交互作用，最終對農作物構成威脅。其他相關的研究亦可參考 3.3.2 節的描述。

4.1.2 氫氟酸

在從鋰電池釋放到空氣中的各種有害氣體中，氫氟酸是最令人關切並且必須高度警惕的。它可以通過皮膚或呼吸系統進入人體，並引起嚴重的腐蝕作用和系統性毒性。吸入僅幾 ppm 的氫氟酸就可能產生嚴重的毒性效應。氫氟酸很容易穿透皮膚，迅速移動到更深層的組織層，釋放游離氟離子。這種離子由於其強烈的反應性而極具毒性。此外，氫氟酸氣體具有吸濕性，容易溶於水中。濃度較高的氫氟酸溶液對皮膚和底層組織具有強烈的腐蝕性，意外的皮膚暴露已被報告導致人類死亡。

鋰電池如果發生電解液洩漏，含有 LiPF_6 的電解液若接觸到水氣，可能形成氫氟酸：



除了 LiPF_6 與水的直接反應外，在所使用的碳酸酯類的電解液溶劑中， LiPF_6 在平衡時存在於其分解產物中，如下所示：



PF_5 在暴露於微量水、濕氣或醇類時容易分解，形成極具毒性的 HF：



為了減輕反應式 (3) 的影響，商用電解液通常含有添加劑，占質量或體積的 5%，可抑制 PF_5 的形成。其他添加劑則用於防止過充、提升耐燃性或改善固體電解質界面膜 (SEI) 的形成或質量。

Sturk 等人 (2015) 檢測到鋰三元 (NMC) 和鋰鐵電池燃燒後釋放出大量氫氟酸煙霧，雖然 LFP 電池因為正極材料分解溫度較高，被認為是安全性高於鋰三元電池，但是熱失控之後卻產生了較多的氫氟酸煙霧。

Larsson 等人 (2017) 估計，每瓦時 (Wh) 的電池組可能釋放 20~200 毫克的 HF。因此，這個 HF 的量可能超過美國國家職業安全與健康研究所 (NIOSH) 的立即生命危險或健康 (IDLH) 水平的 80 至 800 倍。

4.1.3 蒸氣和氣體

Exponent(2020) 報告發現，熱失控在排氣時產生了 1 種白色蒸氣，基本上與化學組成、形狀和製造商無關。這種白色蒸氣包含 H_2 、 SO_2 、 NO_2 、HF、HCl、CO、 CO_2 、有機溶劑微滴 (使蒸氣呈白色) 以及大範圍的短鏈烷烯和烯烴。這種白色蒸氣的精確組成似乎取決於充電狀態 (SOC) 和電池化學組成。白色蒸氣是電池在不同溫度下噴出時產生的，在電池的化學結構崩潰時產生。如果白色蒸氣接觸到引火源，可能發生閃燃、火球發展，甚至在極端情況下發展成蒸氣雲爆炸。

4.2 污染物傳輸途徑：排放到土壤與地下水

一旦鋰電池被處置，它們會將其內容物滲入周圍的土壤，滲透到更深的層次，污染地下水並可能流入地表水。由於水體往往是土壤中污染物的載體，因此很難確定鋰電池對這 2 個領域的單獨影響。

4.2.1 掩埋場滲漏液

與掩埋和非法棄置相關的最重要的危害之一是滲漏液的產生。它是由於各種生物和化學降解過程以及雨水滲入垃圾而形成的。與鋰電池不相關的滲漏液是由大量

溶解的有機物、無機鹽、氨、重金屬和異構的有機化合物組成，這些物質是個人護理產品、藥品、工業、家用化學品及其轉化和降解產物，特別是來自垃圾場的。滲漏液可能對環境產生嚴重影響，因為它可以作為危險物種的載體。它可能污染土壤或地下水，並將污染物運輸到相當遠的距離，通常離原地數公里遠，有可能污染地下水 (Samadder,2017)。

鋰電池滲漏液可能攜帶各種污染物，如重金屬、添加劑、電解質分解產物以及溶解氣體。這些溶解氣體包括 HF、HCl 或 SO₂(以硫酸形式)，不僅具有直接的毒性作用，還會改變土壤中接收水體和溶液的特性。由這些腐蝕性物種引起的酸化作用可能會像「酸雨」一樣降低 pH 值，從而強烈影響植物和動物。它們還會增加土壤中固定重金屬的釋放。在更酸性的條件下，重金屬的實際毒性比僅從金屬濃度本身預測的毒性更高。

4.2.2 重金屬

電池中的金屬含量取決於其設計和尺寸 (例如圓柱形、方型或軟包電池)，以及其化學成分 (例如 NMC、LCO 等)。通常，每千瓦時 (kWh) 的鋰電池中含有約 0.05~0.37 公斤的鈷，0.25~0.86 公斤的鎳和 0.46~0.9 公斤的鋰 (Nelson,2019)。這些數據意味著，如果進行不當處置，鋰電池電池中的材料可能會釋放到環境中，對人類健康和環境造成一系列威脅。

釋放到環境中的鎳會強烈結合到固體微粒上，尤其是含有鐵或錳的顆粒。鎳在魚類和小動物中的累積能力較低。從人類健康的角度來看，鎳是最常見的過敏性金屬。在較高濃度下，它還可能引起呼吸系統疾病甚至癌症。鋰的毒性相對較低，小劑量對生物體的各個營養層次有益。然而，在更高濃度下，鋰可能導致消化和神經系統障礙。小劑量的鈷對人體有益 (維生素 B₁₂ 的合成)，但較大劑量會導致呼吸系統問題和皮膚疹。總的來說，對鈷暴露的不良反應主要取決於其化學形式 (Leysens,2017)。

鋰電池滲漏液通過掩埋場的滲透作用，將攜帶各種金屬，包括鋰、鈷、鎳、錳、鐵、鉻和銅。一些研究已經整理了不同鋰電池類型的典型質量組成與其污染潛力之間的相關性。這些研究中，發現滲漏液 (真實和人工滲漏液) 中超過毒性限值的金屬有鉛、汞、

鈷、銅、鎳、鉻和鉍，這取決於所使用的測試類型。其中一項研究 (Richa,2017) 分析了包含 NMC 電池的掩埋場滲漏液：作者發現來自電池的總鈷、鎳、鋁、銅和鐵中不到 4% 溶解，而錳和鋰分別占 11.45% 和 42.50%。

來自鋰電池的重金屬，也可能由於材料回收過程以及合法 / 非法的掩埋途徑進入自然環境。

4.2.3 添加劑

最後，鋰電池可能還會滲出電解質及其添加劑的殘留物。最常見的添加劑包括聚合物、路易斯酸、含硫和含磷的添加劑、多氟代烷基取代的乙烯碳酸酯或離子液體 (ILs)。其中，離子液體 (ILs) 值得關注，因為它們可以在電池系統中發揮多種作用：作為純電解質；與一般溶劑混合；作為凝膠聚合物電解質或粘合劑。因此，這些化合物的環境影響範圍非常廣泛，取決於它們的結構。但由於它們的性質，它們的暴露途徑和潛在危害受到限制，主要是與溶液的相互作用。離子液體在環境中的分布取決於它們的結構，例如，具有較長烷基鏈的離子液體更容易吸附在土壤表面。因此，某些離子液體在水或土壤中可能流動非常好，而其他離子液體可能會強烈結合到各種環境介質中，成為持久性污染物。此外，土壤的特性，如高陽離子交換容量和 / 或有機物含量，將大大增加對離子液體的吸收。儘管它們被限制只能少量使用，但離子液體仍然可能對野生動植物和人類健康產生重大的負面影響。例如，電池系統中的大多數離子液體被認為是有毒且難以生物降解的化合物。在毒性和傾向性方面，離子液體的長烷基鏈衍生物通常具有更強的毒性，但還受到對離子的強烈影響，特別是氟化的影響 (Vieira,2019)。

Maria(2023) 評估了鋰電池消防用廢水的生態毒性評估，針對全新的 3 個樣品：汽油車、電動車 (含 50kWh)、50kWh 電池模組 (NMC, SOC 90%)，引燃後以灑水系統壓制，蒐集產生的氣體和廢水，在滅火劑中發現了幾種金屬和離子的濃度超過標準。全氟烷基物質的濃度範圍在 200~1,400 ng/ L。沖洗電池後，全氟烷基物質的濃度增加至 4,700 ng/ L。電池電動車輛和電池組的滅火劑中含有更高濃度的鎳、鈷、鋰、錳和氟化物，沖洗電池導致滅火水中 PFAS(全氟 / 多氟烷基物質) 大量增加，但無法區分出 PFAS 來自電池模組中的哪個組件。

綜合以上，儲能案場徑電池污染物與土水流布影響可能污染途徑彙整如表 6 所示。

表 6 電池污染物與可能污染途徑

電池組件	污染物來源	特定污染物	排放途徑	受影響環境	危害
包裝殼	鋼材	Fe、Al、Ni、Cr	淋溶作用	土地、自然水體	超量對野生動物有毒積聚在植物和作物中
模組殼	鋼材、鋁	Fe、Ni、Cr、Al	淋溶作用	土地、自然水體	超量對野生動物有毒積聚在植物和作物中
電芯包裝	鋁箔、聚合物、鍍鎳鋼材	Al、Ni、PET、PP	淋溶作用、火災	自然水體、土地、空氣	超量對野生動物有毒積聚在植物和作物中
正極	金屬、金屬氧化物	Al、鋰錳氧化物、鋰鐵磷酸鹽、鋰鎳錳鈷氧化物、鋰鈷氧化物、鋰鎳鈷鋁氧化物	淋溶作用、粉塵	土地、自然水體、空氣	對各種生物有毒 如果吸入，對人類有毒 超量對野生動物有毒積聚在植物和作物中
負極	銅、石墨	Cu、C (奈米材料)、鋰鈦氧化物	淋溶作用	土地、自然水體	超量對野生動物有毒積聚在植物和作物中 如果吸入，對人類有毒
隔離膜	聚合物	Polyethylene (PE) Polypropylene (PP)	淋溶作用、火災、粉塵	土地、自然水體、空氣	微塑料積聚
黏合劑	聚二氟乙烯	HF	火災	空氣	如果吸入，對人類有毒 如果接觸，對人類有毒
電解質	乙烯碳酸酯、丙烯碳酸酯、碳酸二甲酯、碳酸二乙酯、鹽類：LiPF ₆ 、添加劑	HF, SO _x , HCN, H ₂ , CO, CO ₂ , NO _x , COS, HCl、電解液的降解產物、未知添加劑/降解產物	火災、氣體/蒸氣 淋溶作用	空氣 土地 自然水體	如果吸入，對人類有毒 如果接觸，對人類有毒 如果吸入，對野生動物有毒 積聚在土壤中

資料來源：Mrozik(2021)

五、結論

依據國發會「臺灣 2050 淨零排放路徑」的規劃，未來台灣的能源結構中，再生能源的占比將會越來越高，為了減少再生能源發電併網時對電網造成的衝擊，儲能系統的重要性也會越來越高，目前的併網型儲能技術短期內仍以鋰離子電池電化學儲能系統較能同時符合快速響應的輔助需求，同時兼具經濟可行性。但是目前商業化的鋰電池儲能系統，由於材料特性，本質安全仍有待加強。本研究回顧了國內外相關的研究，彙整鋰電池可能的環境危害物質與相關污染途徑，經比對國內既有法規與污染管制標準，重點項目是鎳、鉻、銅、鋅、氫氟酸、氰化氫、六氟磷酸、四氟硼酸、六氟砷酸鋰、五氟磷酸、揮發性有機物。新興污染物則須留意 PFAS 等氟化物。

未來可以導入其他安全性更高的儲能系統，如固態（電解質）電池、液流電池等電池種類，並且強化儲能案場管理規範，將可降低儲能電池潛在環境衝擊。

參考文獻

行政院國家永續發展委員會 (2022)，「電力系統與儲能關鍵戰略行動計畫」。

EPRI(2024)，BESS Failure Incident Database，https://storagewiki.epri.com/index.php/BESS_Failure_Event_Database。

羅得良 (2023)，鋰離子電池基礎與應用，五南出版社。

張明杰等 (2022)，鋰離子電池燃燒與滅火產物分析，電源技術，Vol.46，No.2。

李飛 (2017)，廢鋰資源化技術及污染控制研究，西南交通大學碩士論文。

榮如一 (2018)，廢舊鋰電池重金屬污染及其防治對策，管理及其他期刊。

LIU Xiaobei, ZHANG Xihua, XIONG Mei, et al.(2022) Analysis on the characteristic organic pollutants from discharge wastewater of spent lithium batteries [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(10): 5619-5629.

張磊等 (2021)，三元鋰電池過充誘導燃燒特性的試驗研究，消防科學與技術，第 40 卷第 2 期。

王超 (2022), 淺析 TO 焚燒爐在鋰電池回收廢氣中的應用, 模型世界, 第 9 期。

Wojciech Mrozik, Mohammad Ali Rajaeifar, Oliver Heidrichab and Paul Christensena, (2021) “Environmental impacts, pollution sources and pathways of spent lithium-ion batteries,” *Energy Environ. Sci.*, Issue 12, 2021,14, 6099-6121

黃建彰 (2023), 鋰離子電池儲能站安全重點介紹 (上), <https://www.asmag.com.tw/showpost/12779.aspx>。

環境部 (2019), 毒性及關注化學物質管理法, 民國 108 年 01 月 16 日修正。

環境部 (2023), 固定污染源空氣污染物排放標準, 民國 112 年 06 月 14 日修正

環境部 (2019), 放流水標準, 民國 108 年 04 月 29 日修正。

環境部 (2020), 有害事業廢棄物認定標準, 民國 109 年 02 月 21 日修正。

環境部 (2011), 土壤污染管制標準, 民國 100 年 01 月 31 日修正。

環境部 (2013), 地下水污染管制標準, 民國 102 年 12 月 18 日修正。

勞動部 (2018), 勞工作業場所容許暴露標準, 民國 107 年 03 月 14 日修正。

勞動部 (2019), 職業安全衛生法, 民國 108 年 05 月 15 日修正。

瑞昶科技股份有限公司 (2023), 全國土壤品質特性及關切污染物調查與管理計畫成果報告, 112 年 12 月。

瑞昶科技股份有限公司 (2023), 監測井水質評析及工業區預防管理計畫第一次工作進度報告, 112 年 11 月。

張添晉 (2018), 鋰離子電池高值化循環利用技術, 2018 年 10 月 23 日。

M. Mohr, J. F. Peters, M. Baumann and M. Weil, (2020) *J. Ind. Ecol.*, 2020, 24, 1310–1322.

自由時報 (2021), 八里掩埋場燒 4 天 消防、環保強進場 歷 82 小時今傍晚終撲滅, <https://reurl.cc/VzMQvQ>

自由時報 (2024) , 綠島睡美人垃圾場起火悶燒 疑似廢電池引燃 , <https://reurl.cc/Ej6LNn> , 2024/05/13

Q.S.Wang, et al.(2019) A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2019, 73: 95-131.

F. Larsson et al.(2018) Gas explosions and thermal runaways during external heating abuse of commercial lithium-ion graphite-LiCoO₂ cells at different levels of ageing[J]. Journal of Power Sources, 2018, 373: 220-231.

A.W. Golubkov, et al.(2014) Thermalrunaway experiments on consumer Li-ion batteries with metaloxide and olivine-type cathodes[J]. RSC Adv, 2014, 4(7): 3633-3642.

Z. Liao, S. Zhang, K. Li, M. Zhao, Z. Qiu, D. Han, G. Zhang and T. G. Habetler,(2020) J. Energy Storage, 2020, 27, 101065

H. Wang, Y. Zhang, W. Li, C. Li and M. Ouyang,(2020) WSEAS Trans. Syst. Control, 2020, 15, 30–38.

D. Sturk, L. Hoffmann and A. Ahlberg Tidblad,(2015) Traffic Inj. Prev., 2015, 16, S159–S164

F. Larsson, P. Andersson, P. Blomqvist and B.-E. Mellander,(2017) Sci. Rep., 2017, 7, 10018.

I. Exponent,(2020) Progress Report, APS McMicken, <https://docket.images.azcc.gov/E000007939.pdf>, 2020

S. R. Samadder, R. Prabhakar, D. Khan, D. Kishan and M. S. Chauhan,(2017) Sci. Total Environ., 2017, 580, 593–601.

P. Nelson, S. Ahmed, K. Gallagher and D. Dees,(2019) Modeling the Performance and Cost of Lithium-Ion Batteries for ElectricDrive Vehicles, Argonne National Laboratory, USA, 2019.

L. Leyssens, B. Vinck, C. Van Der Straeten, F. Wuyts and L. Maes,(2017) *Toxicology*, 2017, 387, 43–56

K. Richa, C. W. Babbitt and G. Gaustad, (2017)*J. Ind. Ecol.*, 2017,21, 715–730

Q.Maria , Ola Willstrand, Tove Mallin, and Jonna Hynynen,(2023)” *Ecotoxicity Evaluation of Fire-Extinguishing Water from Large-Scale Battery and Battery Electric Vehicle Fire Tests.*” *Environ. Sci. Technol.* 2023, 57, 4821–4830.

