

鈣鈦礦太陽能電池全資源循環回收

Circulation of Resources from Spent Perovskite Solar Cells

學生：成功大學資源工程學系 呂建陞

指導老師：成功大學資源工程學系 李政翰 博士



摘要

本計畫旨在建立全無機鹵化鈣鈦礦太陽能電池中鉛、銻及鹵素之回收與循環利用流程。首先以溶劑溶解廢棄鈣鈦礦材料並回收其中的金屬與鹵化物，再透過氧化、選擇性溶解及溶劑萃取等方式，依序分離碘、鉛、銻與溴。回收之鉛進一步與碘或溴反應並經再結晶純化，製得高純度碘化鉛與溴化鉛；銻則經萃取、反萃與轉化後製備為碘化銻。整體流程可有效回收鈣鈦礦材料中的主要金屬與鹵素資源，並將回收產物重新製備為鈣鈦礦太陽能電池所需原料，具材料循環再利用及製程放大之潛力。

研究動機

近年來，無機鹵化物鈣鈦礦因具良好的熱穩定性與光電轉換潛力，在太陽能光電領域受到高度關注。其中，CsPbI₂Br鈣鈦礦太陽能電池除具高效率外，亦具有弱光發電、輕薄可撓及可與矽晶電池整合等優勢，在未來具廣泛應用潛力。然而，其模組壽命仍較商用矽晶電池短，若大規模商業化，預期將衍生大量含鉛與鹵素之廢棄物。目前相關回收技術仍不成熟，尤其在鉛、銻與鹵素的分離及材料再利用方面仍存在技術缺口。因此，本岩產業大規模發展前，建立CsPbI₂Br鈣鈦礦太陽能電池之資源循環流程，回收碘化銻、碘化鉛及溴化鉛等關鍵材料，並以回收率、純度及生命週期評估驗證其可行性，以降低未來廢棄物處理之環境負荷，促進鈣鈦礦產業朝循環經濟與永續發展。

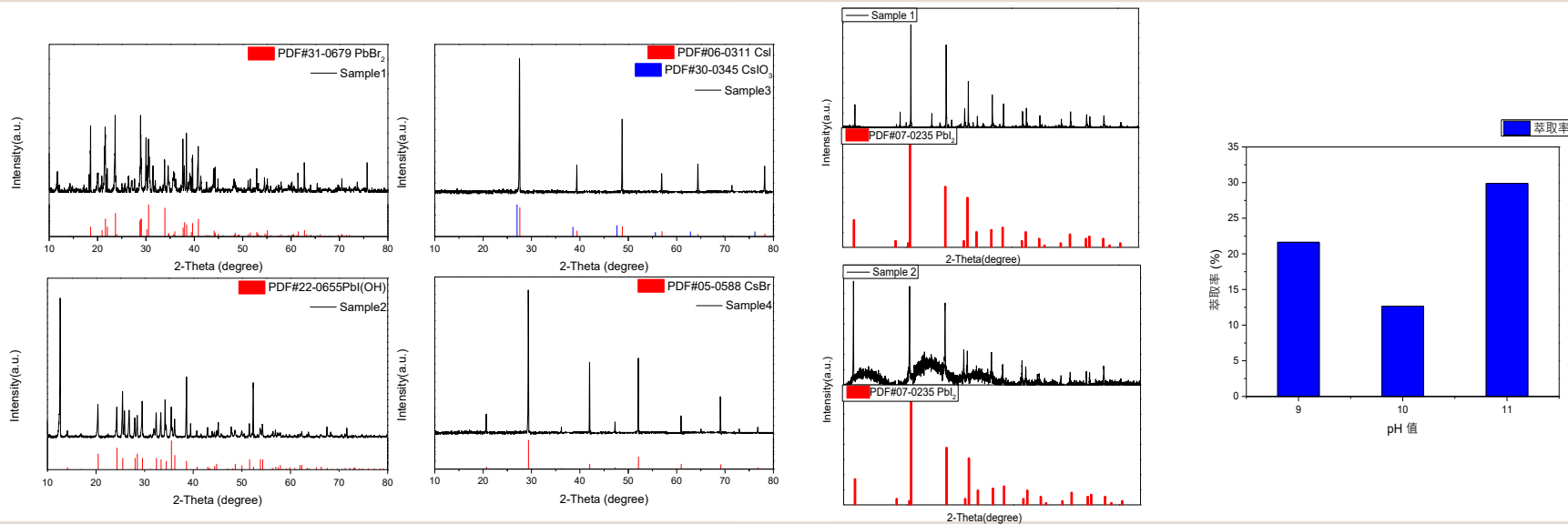
預期效果

目的是建立一套可由實驗室逐步放大至可商業化之鈣鈦礦光電模組資源回收流程，針對其中含鉛、銻與鹵素之有價材料，例如 PbI₂、PbBr₂ 與 CsI，進行分離、純化與再利用。此流程以提升回收物純度與回收率為目標，期望降低含鉛與鹵素廢棄物之環境風險，並促進鈣鈦礦光電材料之循環利用。在廢棄物處理與經濟效益方面，本流程可減少掩埋與焚化需求，降低含鉛廢棄物處理及監管成本。同時，回收所得之高價金屬鹵化物可作為再製程原料，降低對進口或一次性原料之依賴，減少採購成本與供應鏈風險，並具備發展在地循環材料產業之潛力。在環境與減碳效益方面，回收再利用可降低原生礦物開採、冶煉與精製所需之能源消耗與碳排放，進一步減少產品生命週期碳足跡。此外，妥善回收 Pb、I、Br 與 Cs 等成分，可有效降低有害物質外洩至土壤與水體之風險，減輕後續環境修復負擔。整體而言，本研究有助於提升鈣鈦礦光電產業之資源效率、供應韌性與低碳循環發展潛力。

實驗流程



結果與討論



- 經過H₂O₂ 處理後，鉛物種主要轉化為 Pb(OH)Br 與 Pb₂OBr₂·H₂O 等鹼式鉛溴固相，有利於後續固液分離；然而 CsIO₃ 的反應過程中可能發生過氧化反應，使部分碘以 IO₃⁻ 形式殘留於固相或水相中。
- 在 pH 9–11 條件中，pH 11 之 Cs 萃取率最高，約 29.88%，顯示較高鹼性有助於 Cs⁺ 轉移至 t-BAMBP/煤油之有機相 (文獻中此萃取季萃取之最佳參數大約在10.5左右，故以此設定實驗參數)；然而萃取後水相中仍殘留 2954–3680 ppm Cs，且因與文獻萃取之數據有較大落差，代表單次萃取尚不足以達到高效分離，或將pH值向上調整，會再進行更多實驗以找出最佳參數。
- 針對 PbI₂ 回收方向，已驗證此實驗流程能有效回收，由XRD圖可看出其在純化前及純化後的雜質影響有效的減少，後續會再以其他相關分析(如SEM-EDS) 去完整純化前後的落差。
- HNO₃反萃效率不彰，推測是硝酸將萃取劑給破壞掉，反萃大約在0.5~1% 左右，因此會再尋找合適之反萃劑。
- 本研究目前為條件篩選階段，重點在於評估模擬鈣鈦礦材料中 Pb、Cs、I、Br 分流回收之可行性，並確認影響 Cs 萃取與反萃效率之關鍵限制因子。後續將進一步優化 NaOH 濃度、O/A 比、反萃酸濃度與多段萃取條件，並以完整質量平衡評估整體回收率與純度，以利後續實驗最佳化。