

出國報告（出國類別：開會）

第11屆火災與爆炸危險國際研討會  
(International Seminar on Fire  
and Explosion Hazards 2025,  
ISFEH 11)

服務機關：環保署化學物質管理署

姓名職稱：陳宥廷技士

派赴國家：義大利

出國期間：114年6月12日至6月21日

報告日期：114年8月27日

# 摘要

第11屆火災與爆炸危險國際研討會(ISFEH 11)，於2025年6月15日至20日在義大利羅馬薩皮恩札大學土木與工業工程學院舉行，ISFEH 國際研討會是工業火災爆炸危害分析重要國際研討會之一，主要探討氫氣儲能的安全性、鋰電池熱失控行為、工業火災爆炸預防等等相關專業領域。主題涵蓋「火災與爆炸基本原理」、「爆燃爆轟及其緩解措施」、「兩相爆炸」、「氫氣安全」、「電池安全」、「工業風險與可持續性」、「材料的可燃性與阻燃性」、「火災抑制與緩解系統」、「特殊環境下的燃燒」、「火災與爆炸建模及計算機代碼」、「關鍵和瞬態燃燒現象」、「特定行業的火災與爆炸研究」、「野火」、「火災毒性和污染物」及「疏散」等，本署南區環境事故應變專業技術小組（下稱南區專業技術小組）陳政任教授、蔡曉雲助理教授分別於6月16日口頭發表投稿論文「Characteristics of Gas Venting and Detection During Thermal Runaway of LiFePO<sub>4</sub> Battery」及6月16日、17日分享海報「The Initiation and Suppression of Organic Peroxide Dust Explosion」。

藉由本次國際交流、跨域學習，並透過專家學者分享研究成果、數據模擬分析、預防應對措施等成果發表，瞭解先進國家之危害性化學物質災害預防、整備，從乾淨氫能安全到火災、爆炸燃燒特性現象模擬、預防和應對措施等作法與經驗，以提昇我國環境事故應變能量之規劃，精進化學品管制策略，強化國內災害應變高階專業技術創新之重要參考資訊。

# 目次

|              |      |
|--------------|------|
| 一、目的.....    | -3-  |
| 二、過程.....    | -5-  |
| 三、心得及建議..... | -23- |
| 四、附錄.....    | -25- |

## 一、 目的

目前我國現有列管毒化物運作廠家計有5,000餘家，如發生重大毒化物災害恐造成人體健康及周遭環境危害，基於持續強化我國環境事故災害應變能量之需求，針對毒化災之預防、整備、應變、監測、訓練及除污復原等運作現況及重要經驗成果進行蒐集，並結合參與毒化災與危險物品緊急應變相關研討會的行程，輔以實務驗證與技術交流，透過資料蒐集與國際專家討論，彙整以作為提昇國內應變能量之規劃、推動國內全國性聯防組織體系籌設及強化毒化災高階專業技術與設備建置之重要參考資訊。

火災爆炸是產業最常發生的災害事故，在過去十多年中僅台灣的石化、半導體等產業所發生的火災爆炸事故即造成數百億台幣的直接損失與數十人的人員傷亡，由於產業的發展迅速，如何預防火災爆炸的發生便有賴提高對火災爆炸危害的瞭解，本研討會便是以促進火災爆炸危害的研究，以期降低火災爆炸的危害。

本次參加第11屆火災與爆炸危險國際研討會目的包含：

- (一)藉由國際交流增廣公部門視野、培養宏觀思維、拓展國際專業諮詢管道，與各國建立長久合作關係並接軌國際。
- (二)蒐集各國專家學者研究成果，汲取其專業經驗與發展技術，瞭解目前發展重點與進度，以提升國內應變單位之應變能力與實際訓練的工作。
- (三)蒐集國際應變技術與科技新知等資訊，包括氫氣儲能的安全性、鋰電池熱失控、工業火災爆炸預防、工業安全風險，評估引進國際先進技術精

進國內專業知能、納入既有現地應變模式與風險管理或應用於訓練課程，  
藉以強化提升國內毒化災應變能力。

## 二、 過程

本次出國計畫由本署危害控制組承辦人（計畫主辦單位）、北區環境事故專業技術小組（國立聯合大學）、中區環境事故專業技術小組（國立雲林科技大學）及南區環境事故專業技術小組（國立高雄科技大學），共計6員（如表1所示），前往義大利參加研討會。

表1、義大利出國人員名單

| 編號 | 單位名稱                  | 姓名  | 職稱         |
|----|-----------------------|-----|------------|
| 1  | 環境部化學物質管理署            | 陳宥廷 | 技士         |
| 2  | 國立聯合大學/北區環境事故專業技術小組   | 莊凱安 | 計畫協同主持人    |
| 3  | 國立聯合大學/北區環境事故專業技術小組   | 林澤聖 | 教授/協同主持人   |
| 4  | 國立雲林科技大學/中區環境事故專業技術小組 | 易逸波 | 教授/協同主持人   |
| 5  | 國立高雄科技大學/南區環境事故專業技術小組 | 陳政任 | 教授/計畫主持人   |
| 6  | 國立高雄科技大學/南區環境事故專業技術小組 | 蔡曉雲 | 助理教授/協同主持人 |

本次出國行程共計10天（含往返交通時間），以參加第11屆火災與爆炸危害國際研討會，相關行程如表2。

表2、義大利出國行程

| 天數   | 日期              | 地點    | 行程說明                                                   |
|------|-----------------|-------|--------------------------------------------------------|
| 第1日  | 114.6.12<br>(四) | 臺灣→羅馬 | 臺灣桃園國際機(TPE)→義大利羅馬費米齊諾機場(FCO)                          |
| 第2日  | 114.6.13<br>(五) | 羅馬    | 【路程】<br>(1) AM07:55抵達義大利羅馬費米齊諾機場(FCO)<br>(2) 搭乘火車至羅馬市區 |
| 第3日  | 114.6.14<br>(六) | 羅馬    | 資料彙整、研討議題                                              |
| 第4日  | 114.6.15<br>(日) | 羅馬    | 【研討會】<br>參加「第11屆火災與爆炸危害」國際研討會第1天                       |
| 第5日  | 114.6.16<br>(一) | 羅馬    | 【研討會】<br>參加「第11屆火災與爆炸危害」國際研討會第2天                       |
| 第6日  | 114.6.17<br>(二) | 羅馬    | 【研討會】<br>參加「第11屆火災與爆炸危害」國際研討會第3天                       |
| 第7日  | 114.6.18<br>(三) | 羅馬    | 【研討會】<br>參加「第11屆火災與爆炸危害」國際研討會第4天                       |
| 第8日  | 114.6.19<br>(四) | 羅馬    | 【研討會】<br>參加「第11屆火災與爆炸危害」國際研討會第5天                       |
| 第9日  | 114.6.20<br>(五) | 羅馬→臺灣 | 【路程】<br>義大利羅馬費米齊諾機場(FCO)→臺灣桃園國際機場(TPE)                 |
| 第10日 | 114.6.21<br>(六) | 臺灣    | 抵達臺灣桃園國際機場                                             |

## 第11屆國際火災與爆炸危害研討會(ISEFH 11)

第11屆火災與爆炸危險國際研討會(International Seminar on Fire and Explosion Hazards 2025, ISFEH 11)於 2025年6月15日至20日在義大利羅馬薩皮恩扎大學土木與工業工程學院舉行，本研討會每3年辦理1次，主要參加對象為各國學術研究單位，主辦方安排每日先進行大會演講及重點報告，再以不同主題在2間教室平行展開，由各國代表口頭發表投稿論文內容並與與會者交流討論，研討會議程如表3。

主題涵蓋「火災與爆炸基本原理」、「爆燃爆轟及其緩解措施」、「兩相爆炸」、「氫氣安全」、「電池安全」、「工業風險與可持續性」、「材料的可燃性與阻燃性」、「火災抑制與緩解系統」、「特殊環境下的燃燒」、「火災與爆炸建模及計算機代碼」、「關鍵和瞬態燃燒現象」、「特定行業的火災與爆炸研究」、「野火」、「火災毒性和污染物」及「疏散」等。本署南區技術小組陳政任教授於114年6月16日口頭發表投稿論文，磷酸鋰鐵電池(LiFePO<sub>4</sub>)熱失控過程中氣體洩壓與偵測特性之研究，監測系統的準確性及反應時效性；蔡曉雲教授助理教授則是於114年6月16日和17日分享海報，以明揚案為例，探討有機過氧化物潛在的爆炸風險並提出減災預防建議。

主辦單位每日皆有準備午餐及點心時間，還有2天於研討會後安排河邊船宴和社交晚宴，讓與會的人員有充分的時間互動、交流；另外也安排1場次城市導覽，聘請專業解說員充分介紹聖伯多祿鎖鏈堂及羅馬競技場，帶大家重回古羅馬時代，了解這些建築的歷史與魅力，以擴大國際城市行銷效益。



表3、研討會議程表

| 時間          | 內容                               |                        |
|-------------|----------------------------------|------------------------|
| 6/15(日)     |                                  |                        |
| 16:00-19:00 | 註冊/報到                            |                        |
| 17:30-19:30 | 迎賓                               |                        |
| 6/16(一)     |                                  |                        |
| 8:30        | 註冊/報到                            |                        |
|             | Room Chiostro                    |                        |
| 9:20-10:00  | 開幕式                              |                        |
| 10:00-11:00 | 大會演講                             |                        |
| 11:00-11:30 | 休息/海報時間                          |                        |
| 11:30-12:20 | 重點報告：氫氣安全                        |                        |
| 12:20-14:00 | 午餐                               |                        |
|             | Room Chiostro                    | Room 1                 |
| 14:00-15:40 | 氫氣安全1                            | 電池安全1                  |
| 15:40-16:10 | 休息/海報時間                          |                        |
| 16:10-17:30 | 氫氣安全2                            | 電池安全2                  |
| 6/17(二)     |                                  |                        |
|             | Room Chiostro                    |                        |
| 9:00-10:00  | 大會演講                             |                        |
| 10:00-10:30 | Session in memory of prof. James |                        |
| 10:30-11:00 | 休息/海報時間                          |                        |
| 11:00-11:50 | 重點報告：野火                          |                        |
|             | Room Chiostro                    | Room 1                 |
| 11:50-12:50 | 火災與爆炸的基本原理<br>+兩相爆炸              | 野火1                    |
| 12:50-14:00 | 午餐                               |                        |
| 14:00-15:40 | 特定行業的火災與爆炸研究                     | 野火2                    |
| 15:40-16:10 | 休息/海報時間                          |                        |
| 16:10-17:10 | 工業風險與可持續性                        | 關鍵和瞬態燃燒現象<br>+特殊環境下的燃燒 |
| 19:00-22:30 | 船宴                               |                        |

| 時間          | 內容                 |                     |
|-------------|--------------------|---------------------|
| 6/18(三)     |                    |                     |
|             | Room Chiostro      |                     |
| 9:00-10:00  | 大會演講               |                     |
| 10:00-10:50 | 重點報告：火災與爆炸建模及計算機代碼 |                     |
| 10:50-11:20 | 休息/海報時間            |                     |
|             | Room Chiostro      | Room 1              |
| 11:20-12:40 | 火災與爆炸建模<br>及計算機代碼1 | 爆燃、爆轟<br>及其緩解措施1    |
| 12:40-14:00 | 午餐                 |                     |
|             | Room 1             |                     |
| 14:00-14:50 | 重點報告：爆燃、爆轟及其緩解措施   |                     |
|             | Room Chiostro      | Room 1              |
| 14:50-16:10 | 火災與爆炸建模<br>及計算機代碼2 | 爆燃、爆轟<br>及其緩解措施2    |
| 16:45-19:00 | 城市導覽               |                     |
| 6/19(四)     |                    |                     |
|             | Room Chiostro      |                     |
| 9:00-10:00  | 大會演講               |                     |
| 10:00-10:50 | 重點報告：火災與爆炸的基本原理    |                     |
| 10:50-11:20 | 休息/海報時間            |                     |
|             | Room Chiostro      | Room 1              |
| 11:20-13:00 | 火災與爆炸的基本原理2        | 火災抑制與緩解系統1          |
| 13:00-14:00 | 午餐                 |                     |
|             | Room Chiostro      |                     |
| 14:00-14:50 | 重點報告：氫氣安全          |                     |
|             | Room Chiostro      | Room 1              |
| 14:50-15:50 | 氫氣安全3              | 材料的可燃性與阻燃性<br>+火災毒性 |
| 15:50-16:10 | 休息/海報時間            |                     |
|             | Room Chiostro      | Room 1              |
| 16:10-17:10 | 關鍵和瞬態燃燒現象2         | 電池安全3               |
| 19:30-22:30 | 晚宴                 |                     |

| 時間          | 內容            |        |
|-------------|---------------|--------|
| 6/20(五)     |               |        |
|             | Room Chiostro |        |
| 9:15-10:15  | 大會演講          |        |
| 10:15-10:35 | 致詞與介紹義大利消防隊活動 |        |
| 10:35-11:00 | 休息時間          |        |
| 11:00-11:50 | 重點報告：電池安全     |        |
|             | Room Chiostro | Room 1 |
| 11:50-12:40 | 野火3           | 電池安全4  |
|             | Room Chiostro |        |
| 12:40-13:15 | 閉幕式及頒獎        |        |

本次透過聽取專家學者數據分析、模擬技術、預防應對措施等成果發表，瞭解各國在災害防救科學研究領域發展趨勢，團隊成員所蒐集各國論文發表重點，摘述如下：

1. 磷酸鋰鐵電池 (LiFePO<sub>4</sub>) 熱失控過程中氣體洩壓與偵測特性之研究  
(Characteristics of Gas Venting and Detection During Thermal Runaway of LiFePO<sub>4</sub> Battery)

本篇研究來自國立高雄科技大學陳政任、蔡曉雲老師等人所做研究之分享。磷酸鋰鐵(LiFePO<sub>4</sub>)電池是鋰離子電池(LIB)的一種，因其成本低、儲存容量大而主要用於能源儲存。然而，磷酸鋰鐵電池也有與鋰離子電池相同的缺點，就是能量密度高及電解質易燃。在不正常的使用或儲存條件下，分隔陽極和陰極的聚烯烴基隔離層可能會被破壞，並發生內部短路，產生過量的熱量並引發電化學副反應，不利的反應和熱量會增加電解質的蒸氣壓力，產生大量易燃氣體，導致鋰離子電池內部壓力增加和外殼膨脹。如果沒有足夠的冷卻，溫度和壓力就會攀升。電池中的所有揮發性成分都可能逸出，造成火災或爆炸。

在該研究中，以每分鐘5~6°C 的恆定加熱速率，直接加熱磷酸鋰鐵電池，進行熱失控實驗。使用廣泛的氣體偵測方法，包括電化學氣體偵測器、半導體氣體偵測器、傅立葉轉換紅外線(FTIR)及煙霧偵測器，來量測潛在的氣體/粒子逸散。電池的額定容量為50Ah，重量約為1.6kg。透過額定功率為360w 的薄膜加熱器加熱，加熱導致電池膨脹、閥門變形和排氣，而氣體檢測結果與目視觀察到的閥門變形一致，這導致了電解質的洩漏，氣體的 FTIR 取樣證實為碳酸鹽的混合物。因此，電解質的檢測被證明是早期偵測 LiFePO<sub>4</sub>電池異常熱狀態的有效方法。在該研究中，此檢測可在電池完全洩漏前提供長達5分鐘的時間以提早預警。

## 2. 有機過氧化物粉塵爆炸的引發與抑制 (The Initiation and Suppression of Organic Peroxide Dust Explosion)

本篇研究來自國立高雄科技大學蔡曉雲、陳政任老師等人所做研究之分享。2023年9月22日，台灣南部一家生產高爾夫球的工廠發生致命爆炸。事故的起因是三個托盤中的一個棧板的固態有機過氧化物發煙，每個棧板堆疊了50個紙箱，每個紙箱有20公斤。消防局接到通知後趕到現場，在消防隊進入倉庫之前，爆炸發生，導致嚴重傷亡，生產大樓遭到嚴重破壞。有機過氧化物是一種白色粉末，含有約40%的1,1-Di(tertbutylperoxy)cyclohexane(DTBCH)、40%的二氧化矽和平衡異鏈烷烴。根據《聯合國危險品運輸建議》(UN DG, 2019)，它被歸類為 D 型固體過氧化物。根據製造商提供的資料，最高儲存溫度和自加速分解溫度(SADT)分別為30°C 和60°C。然而，倉庫並未進行溫度控制。很明顯，包裝過氧化物發生了熱失控。

研究對事故批次中三個相似批次的過氧化物樣品進行了廣泛的熱能和爆炸測試，包括 DSC、ARC、GC-MS、FTIR-ATR、粉塵 MIE、粉塵最小 AIT (MAIT) 和炸彈熱量計。這三個樣品經過篩選後，95%（重量百分比）的樣品為粒度小於 ASTM Mesh No.80的細粉末。在這些經過篩選的樣品中，有40%的顆粒尺寸小於 ASTM 目數 No.200，其餘為 ASTM 目數 No.80-200。DSC 分析顯示只有中等熱危險，平均分解能為 $1399.8 \pm 120.8 \text{ J/g}$ 。ARC 測試顯示起始溫度約為123°C，峰值絕熱溫度為466°C。測得的塵埃 MIE 小於10mJ，證實過氧化物粉末具有高點火靈敏度。測得的粉塵 MAIT 為447-512°C，視批次和顆粒大小而定。此外，過氧化物中的平衡異鏈烷烴含有長鏈烷，其 AIT 低至205°C。顯然，在儲存條件不佳的情況下，過氧化物的熱失控可能會引發分解並產生氣體。氣體的產生也會使過氧化物粉末散佈到空氣中。根據初步的 MAIT 數據和峰值絕熱溫度，直接點燃過氧化物粉

塵是可能的，但可能取決於樣品和顆粒大小。

研究也使用惰性二氧化矽稀釋過氧化物進行了額外的研究。分解熱和 MAIT 隨著惰性成分的增加而呈線性變化，這將大幅降低粉塵爆炸的風險。因此，用水濕潤後再加入砂子等惰性固體，是安全處理過氧化物粉塵的有效方法。

### 3. 液氫儲槽「BLEVE」之壓力多峰結構數值研究 (Numerical investigation on the pressure multi-peaks structure of a LH<sub>2</sub> storage tank “BLEVE” )

氫燃料電池重型車輛(HDV)在減少溫室氣體排放方面具有巨大潛力，有助於實現淨零排放目標。為了滿足高效快速的加氫需求，產業界提出一種新型液態氫(LH<sub>2</sub>)站設計方案，該站配備一個高流量泵，可在1.6MPa 壓力下輸送400kg/h 的氫。2021年清潔能源夥伴關係(CEP)發布了一份白皮書，進一步詳細說明了加氫程序和硬體規格，這些規格目前正由 ISO/TC197 WG35標準化為《液氫陸地車輛加氫協議》。目前，液氫儲槽加氫的三維計算流體力學(CFD)建模主要側重於罐內動力學，而忽略了液氫加氫站(HRS)的關鍵部件及其對壓力和溫度的影響。這一缺陷阻礙了對加氫安全性和效率的可靠評估。

液氫儲槽系統配備了壓力釋放裝置(PRD)，用於排出氫氣，避免儲槽內壓力超過其承受範圍，從而避免破裂或大量洩漏。如果在氫氣釋放前儲槽結構完整性或壓力釋放裝置失效，儲槽可能會爆裂，並產生衝擊波、火球和拋射物。此類事故的一個例子是1975年發生的一起事故，當時一個76立方公尺的液態氫儲槽由於破裂片爆裂而釋放出冷氣態氫。幾分鐘後，排出的氫氣被點燃，並從排氣管噴出火焰。消防員趕到現場用水滅火，水進入排氣管後結冰，堵塞了氫氣

的釋放通道。由於真空度下降，儲槽中的氫氣繼續以較快的速度蒸發和升溫。壓力的積聚最終導致儲槽破裂。儲槽破裂導致所謂的沸騰液體膨脹蒸汽爆炸 (BLEVE)。

該研究提出了一種新穎的三維計算流體力學模型，該模型在作者先前研究中描述的模型的基礎上進行了進一步改進，納入了液氫蒸發對爆炸波壓力動力學的影響，能夠深入分析並模擬文獻中實驗觀察到的被稱為「BLEVE」的超壓多峰結構。此三維計算流體力學模型使用大渦模擬 (LES) 來處理湍流，並透過有限速率模型和渦流耗散模型的組合來處理氫氣蒸氣與空氣接觸面處氫氣燃燒的貢獻。最終目標是開發並驗證/確認一個三維計算流體力學模型，使其成為評估液氫設施及 BLEVE 應用後果和危險距離的現代工具。

該研究的獨創性在於開發了一個全面的三維多相 CFD 模型，該模型首次能夠模擬爆炸波從破裂儲槽向外傳播的整個過程中的峰值。此 CFD 模型模擬了儲槽中液氫相蒸發過程中液相和氣相之間的質量傳遞，以解釋其對爆炸波強度的貢獻。這對於在實施液氫儲存系統和基礎設施的氫氣安全工程過程中評估熱危害至關重要。事實上，與未模擬燃燒的情況相比，這些峰值中的最大過壓增加了兩倍以上。未來的研究計畫將評估火球的熱危害，並將其與壓力危害進行比較，從而得出基於科學的、與液氫儲存基礎設施之間的危害距離的準確評估結論。

#### 4. 管道中的矽粉塵爆炸 (Silicon dust explosions in ducts and pipes)

粉塵爆炸對製程工業的各分支部門都構成危害，包括生產、處理及運輸矽及矽合金的設施。純矽(Si)是一種用於光電和電子領域的非金屬半導體。工業級矽是矽有機化合物（如有機矽和功能性矽烷）的起始原料。矽鐵(FeSi)、鎂矽鐵(FSM)和其他富矽合金是生產優質鋼的關鍵材料。工業設施中用於收集和提取揚塵的系統包括連接到管道和導管的罩子（用於捕獲和運輸粉塵），以及鼓風機或風扇和空氣淨化裝置（旋風分離器和過濾器）。一些研究人員已經研究過管道和導管中的粉塵爆炸，但先前關於矽粉塵提取系統的研究卻很少。

該研究主要目標是透過此項試驗加深對粉塵爆炸，特別是涉及矽和矽合金粉塵的粉塵爆炸的理解，從而提高通風管道和除塵系統中的安全性。為此研究透過分析一系列實驗裝置，包含不同長度和直徑的管道中的爆炸壓力和火球長度，來探討爆炸特性和火球動力學。透過深入了解粉塵爆炸行為背後的控制機制和影響因素，以提供寶貴的見解，為矽和矽合金加工產業制定更有效的粉塵爆炸預防和緩解策略提供參考。

實驗中使用了兩種不同類型的粉塵。一種是工業級矽粉 (>99%)，另一種是收集了來自旋風集塵過濾器中來自四種不同產品的冶金矽鐵鎂合金 (FSM) 混和物。研究發現有高爆炸過壓可能是由幾種物理現象組合引起的：(1)燃燒產物的膨脹與未反應混和物中湍流產生之正回饋；(2)揚塵增加質量；(3)未反應的粉塵空氣懸浮的預壓縮；(4)較小管徑於最後壓縮之流動阻力；(5)可能是火焰的不穩定；(6)可能過渡到不穩定的快速爆燃或準爆震。

這顯示在管道內進行的實驗結果具有一定的限制和潛在的誤差來源。這些因素可能會影響結果的準確性和可靠性，因此需要仔細解釋並進一步驗證。如



粉塵層分佈的變化、測試之間檢查是否有殘留灰塵沉積、有限的測試次數、分析儀器不足、壓力感測器振動、季節天氣條件等。

#### 5. 在住宅空間尺度中量化電動車爆炸的危害 (Quantifying the Hazard from E-Scooter Explosions in a Residential Scale Compartment)

隨著電動車(E-Scooter)在城市交通中的普及，其鋰離子電池的火災與爆炸風險引起了廣泛關注。該研究旨在量化一台電動車在住宅規模空間內發生爆炸時所產生的壓力、熱量及有害氣體，並探討其對人員與建築結構的潛在威脅。透過在受控的實驗室環境中引發電動滑板車的鋰電池熱失控，團隊測量了爆炸瞬間的超壓、火焰溫度、熱通量及氣體濃度，並分析了不同空間條件下危害的變化。

鋰離子電池因其高能量密度被廣泛應用於個人運輸裝置，如電動滑板車與電動自行車。然而，這些電池在遭受過充電、機械損壞或製造缺陷等條件下，可能進入熱失控狀態。熱失控不僅會釋放大量熱能，還可能產生爆炸性氣體與高壓波，進而造成一次爆炸，以及在氣體積聚後引發的二次爆炸。在都市居住環境中，許多使用者會在室內為電動車充電或存放，這意味著爆炸發生時，能量將在相對密閉的住宅空間內釋放。

研究結果顯示，鋰電池爆炸在住宅空間中可能造成多重危害，如壓力波直接破壞結構、高溫火焰引燃可燃物、有毒氣體導致逃生時間所短及造成人員中毒等。因此若想降低風險，應針對含鋰電池裝置設計專用充電空間，並配備釋壓口、通風設計與火災偵測系統，並避免長時間在室內充電。

## 6. 野火引起的科技性災害：系統性回顧與暴露途徑分析 (Wildfire NaTech Accidents: A Systematic Review and Exposure Pathways Analysis)

隨著氣候變遷加劇，野火事件的頻率與強度顯著增加，特別是在野地與工業設施交界 (Wildland-Industrial Interface, WII) 區域，野火可能引發自然災害觸發的技術性事故 (NaTech, Natural Hazard Triggering Technological Accidents)，造成嚴重的次生災害。該研究旨在識別並分析野火在野地與工業設施交界區域內，自然災害觸發的技術性事故的暴露途徑，以利風險評估與防災規劃。研究透過案例分析與模擬方法，歸納野火對工業設施的多種威脅機制，並探討不同工業類型下的關鍵暴露因素。

在野地與工業設施交界區域，工業設施與可燃植被相鄰，野火可透過多種方式影響工業生產、儲存與基礎設施安全，進而導致火災、爆炸及有害物質外洩。野火可能影響工業設施的暴露途徑，包括：直接熱輻射 (Direct Thermal Radiation)，野火火焰直接對設施產生高熱通量，可能導致儲槽、管線及設備失效；火星與燃燒顆粒傳輸 (Firebrands and Burning Particles)，可引燃設施周邊可燃物，造成間接火災威脅；煙霧與腐蝕性氣體 (Smoke and Corrosive Gases)，可能損害電子控制系統與電氣設備；基礎設施中斷 (Infrastructure Disruption)，例如停電、通訊中斷、道路封閉影響交通；人員安全威脅 (Personnel Safety Impact)，阻礙疏散與救災行動。

以過去事故案例進行分析，西班牙化工園區火災 (2014)，野火直接引燃化工儲槽，造成大規模有毒煙霧釋放；加州能源儲存站爆炸 (2019)，火星點燃儲能設施外部材料，引發鋰電池熱失控；義大利物流倉儲火災 (2021)，野火導致停電，使冷凍化學品失效並釋放有害氣體。結果顯示，火星與熱輻射是最常見

且破壞性高的暴露途徑，而基礎設施中斷則是加劇事故後果的重要間接因素。

單一野火事件可能同時觸發多條暴露途徑，形成複合型災害，必須針對不同暴露途徑制定專門的防護措施，如增加防火間距、安裝火花捕捉器、強化外殼耐熱性、配置獨立電源與通訊系統等。研究所建立的暴露途徑分析框架可作為風險評估工具，提供工業區作為規劃與緊急應變計畫制定；後續研究可將此框架與火災行為數值模擬結合，以更精確預測風險。

## 7. 從燃燒發展至爆炸的解析研究：用於爆炸防護決策支援系統的應用 (Analytical Study of Developing Combustion to Explosion for Explosion Protection Decision Support Systems)

針對現代潛在爆炸性設施（如工廠、特定作業區與專用設備）之自動控制，主要目的是防止或即時抑制意外引燃與自燃。然而，在許多因生產條件特殊的情況下，無法保證完全沒有火災發生。多數工廠在這些情況下，可以考慮採用『決策支援系統 (Decision Support System, DSS)』，來協助決策者評估燃燒轉變為爆炸的可能性與潛在的類型（爆轟或發展性爆燃），判定該轉變的時間點，並提出可行措施以及時預防爆炸。

該研究即在建立可供即時應用的數學模型與估算公式，使用於『決策支援系統 (DSS)』中，計算出爆轟發生前的燃燒區段長度及燃燒轉爆炸所需時間，透過線性化流體力學方程的特解，並設定通道壁面與火焰前緣邊界條件，可求得最速增長擾動波長( $L_m$ )。已知  $L_m$  可用來估算火焰加速度  $g_f$  (假設為常數)，因火焰速度與燃燒表面積成正比，進一步可由  $g_f$  推算出(1)爆轟前區段長度  $X_s$  (起火點至產生震波點的距離)(2)燃燒轉爆炸所需時間  $t_s$ 。此等有助於即時監控潛

在爆炸風險設施，可降低計算資源與成本，並提升控制系統可靠度。此外，模型預測結果與實驗數據與其他研究成果吻合良好。雖模型主要適用於均相介質（如可燃氣體混合物與液體），但在特定假設下亦可延伸應用至單分散粉塵與氣膠懸浮物。

該模型針對燃燒轉變為爆炸（特別是爆轟）的過程解析，適合整合進安全儀控系統(SIS)或智慧安全模組，做為預爆偵測指標，也可配合 CFD 模擬驗證火焰加速風險區段，輔助防爆設施設計與優化，若搭配壓力感測器或熱感器數據，更可用於早期預警判斷與區域風險分級。

#### 8. 提升氫能安全與簡化許可流程：以挪威加氫站設置許可為例的初步探討 (Enhancing Hydrogen Safety and Streamlining Permit Processes: A Preliminary Investigation into Permitting Hydrogen Refueling Stations in Norway)

在當前從傳統燃料轉向更綠色、更永續能源的過程中，氫能被視為一項極具潛力的替代方案。與化石燃料不同，氫燃燒時不排放二氧化碳，副產物僅為水蒸氣。氫的質能比高，且可以從如水等豐富資源中製得。預估到2050年，全球對氫的需求將達到每年1.8億噸，因此氫能處理設施將扮演關鍵角色。

然而，氫能基礎建設的發展面臨諸多挑戰，其中包括許可程序冗長且複雜等問題。作為「北歐氫能谷：能源樞紐」計畫的一部分，「氫能安全與許可流程優化」(H2SIPP)專案旨在解決這些阻礙。其主要目標是制定一項策略，以克服氫能在北歐地區實施的障礙，重點聚焦在許可程序、安全性與社會接受度上。該專案特別強調「安全距離」規定在許可程序中，被視為氫能技術無法廣泛採

用的一大關鍵問題。

該團對以挪威設置加氫站的設置許可流程進行研究，當中最重要的關鍵，是「量化風險分析」，這可識別並評估與加氫設施相關的潛在風險，其步驟包括：了解設施特性、選擇適當的方法與技術、考慮外部環境條件、設計與安全防護的整合等皆納入評估，並使用 HyRAM+ (Hydrogen Plus Other Alternative Fuels Risk Assessment Models) 的工具輔助，是一套用於氫能及其他替代燃料（如甲烷與丙烷）使用、運輸與儲存之安全風險評估工具，再以加氫站公開數據整合，評估風險因子，包括設備故障機率、熱通量與超壓對人體的影響。

本研究實務應用的風險評估模型可呈現出(1)當處理氫氣等危險物質時，可需採取專業的儲存與處理方式，(2)在氫能產業中實施標準化與系統化，全面採用「量化風險分析」方法，才能有效評估並降低風險，並提升設計安全性。而研究也關注社會接受度與流程簡化，主張建立一套標準化、清楚、可量測的許可流程，使氫能設施不會因曠日廢時的行政程序而無法建置。

## 9. 浸入式冷卻劑對熱失控抑制的定量研究 (Quantitative Investigation of Immersion Cooling Agents for Thermal Runaway Suppression)

鋰離子電池(LIB)因其高能量密度和易於充電而被廣泛使用，使其成為電動汽車和能源儲存解決方案的關鍵。然而，鋰離子電池的固有風險，例如易燃電解質和高溫敏感性元件，所帶來的安全挑戰限制了其更廣泛的應用。由於電池故障可能導致嚴重的熱事故，因此有效抑制熱失控對於確保安全性至關重要。傳統的冷卻方法，包括空氣和液體冷卻、熱管、相變材料 (PCM) 和絕緣材料，在效率、成本或效能上都有其限制。

直接液體冷卻，特別是使用非導電介質流體的浸入式冷卻，因其優異的冷卻性能和緩解熱失控的潛力，已成為一種很有前途的技術。然而，有關其防止熱失控的有效性的研究卻相當有限。本研究透過在圓柱型18650電池上進行浸入式冷卻實驗，探討直接液體冷卻在防止熱失控方面的有效性。該研究檢視冷卻劑類型、電池/冷卻劑體積比以及電池剩餘電量對電池溫度與質量演變的影響，並找出可抑制熱失控的冷卻參數。研究旨在加強對熱失控抑制方法和緊急冷卻策略的理解和優化。

為了研究不同冷卻劑的性能，其分析了四種不同劑量的冷卻劑。結果顯示，在冷卻劑／電池體積比較小的情況下，HFE-7200無法抑制熱失控的發生，但最大冷卻率卻很高。這說明冷卻功率並非抑制熱失控發生的唯一條件。之後進行了進一步的實驗，研究在不同的電池剩餘電量條件下，使用 HFE-7200對電池進行冷卻的限制劑量，並使用歸一化評估法來評估不同電池剩餘電量條件下的電池安全狀態。

最後，研究對系統進行了簡單的熱傳分析，發現是冷卻液的吸收能量和冷卻能力在抑制電池發生熱失控方面發揮了關鍵作用。在此基礎上，對四種冷卻液的性能進行了簡單的評估，並建立了一個初步的評分系統，可用於指導冷卻液的選擇。

#### 10. 鋰離子電池儲能系統中熱失控與火災蔓延的觀察 (Insights on thermal runaway and fire propagation in a lithium-ion battery energy storage system)

鋰離子電池(LIB)儲能系統(BESS)在再生能源產業中的部署日益增多，導致熱失控和火災事故頻發，也使得開發高效且經濟的電池儲能系統和火災危險評估方法變得愈發緊迫。儘管單電池和多電池研究已取得了顯著進展，但很少有研究涉及更大規模的應用和實際的複雜性。此外，現有研究通常僅呈現熱失控傳播(TRP)，而未深入探討其詳細機制。該研究進行了系統性調查，旨在擴大工業儲能系統的火災危險評估規模。初步的電池級測試確定了導致熱失控及其在電池內部傳播的條件，隨後對兩個電池模組進行的測試探討了塑膠外殼和蓋子等組件如何影響傳熱和熱失控傳播，以及火焰加熱在模組間熱失控傳播的作用。基於這些發現，使用相同的鋰離子電池進行大規模機架級測試，深入了解模組間傳熱、火災動力學以及對周圍環境的熱暴露。

結果發現火焰是模組間熱失控傳播的主要驅動因素，火焰同時在機架的前方和內部形成。隨著測試的進行，這項工作將有助於深入瞭解冷凝和氣相的主要機制，並作為開發和驗證工具的基礎，以評估電池儲能系統中的火災危險。

### 三、 心得及建議

1. 本次研討會涵蓋鋰電池、氫能、粉塵爆炸、野火蔓延、材料燃燒特性等領域，突顯產業發展與能源轉型過程中潛在的火災與爆炸風險。許多案例（如電動滑板車室內爆炸、鋰電池儲能系統火災、矽粉塵爆炸等）都顯示高科技產品與新材料應用都逐漸廣泛運用於居家、都市、工業設施等，貼近民眾生活，而傳統的安全規範已難以涵蓋其複雜的風險，建議政府與產業應建立相關的風險評估及安全規範或法規，以確保民眾財產、人身安全及環境永續發展。
2. 現今科技持續發展所導致的潛在火災爆炸問題，藉由相關的模擬、評估、技術開發等配套考量，以提升產業安全性及持續性，對整體發展是相當重要的，包括新能源如氫能、鋰電池等皆須仔細考慮設計、材料、法規和技術進步，以確保人員、設施和周圍環境的保護。然而熱失控、火災爆炸風險引發的安全問題也在漸漸地增多，未來相關研究也應納入教育訓練之課程，增進救災相關之知識量，提升災害現場環境的判讀，以提高在災害現場對應的安全判斷。
3. 藉由國際研討會的參與，能瞭解各國目前對於研討會主軸研究的方向、進度及實際案例，來學習新知、汲取經驗，盼能提升我國應變能力，並透過交流互動來拓展國際視野。建議未來我國辦理研討會可多收集各國實際案例，例如本次研討會：電動載具火災問題反映當地高密度都會生活與外送文化；地底油槽火災則揭示社會對安全距離概念的不同理解，這些實例有助於與會者瞭解技術發展、應變處置等，也能進一步理解當地制度背景與行為習慣，有助於跨文化技術落地與轉移。



4. 災害風險的評估與防範，已從原先的「反應後救援」逐漸朝向「預測預警與系統性防控」發展，這對公司第一線的員工、管理階層乃至主管機關都提出了新的專業需求。因此建議持續推動跨領域、模組化、持續性的相關訓練，建立分層級的訓練架構，針對不同角色設計對應課程。以鋰電池為例，基層操作人員應掌握熱失控前兆與操作指引，設備設計者需理解氣體釋放動態與模擬工具應用，消防單位則應受訓於火焰壓力與有毒煙霧行為的實驗資料解析，主管機關可配合提供「國際案例模擬教案」，讓學員從真實案例學習決策應變流程。另可整合 AI 與模擬技術，建構虛擬訓練平台，進行情境模擬、感測器即時反應及壓力波衝擊等動態訓練，將有助於高風險場域應變管理能力的提升。
5. 目前臺灣消防安全與工業安全相關法規尚未明確納入氫能安全規範，建議針對「氫氣之定量熱輻射、超壓風險」建立彈性化、安全距離參數，使空間規劃更為安全合理，來作為未來高壓氫氣設備與救災訓練模組的採購、開發與設計之參考。

## 四、 附錄

### (一) 第11屆國際火災與爆炸危險研討會(ISEFH 11)網站議程表

|                                                                                                      |               |                                                     |                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-----------------------------------------------------|--------------------------|
| <br><b>ISEFH 11</b> | Time          | <b>Sunday, June 15</b>                              |                          |
|                                                                                                      | 16.00 - 19.00 | Registration                                        |                          |
|                                                                                                      | 17.30 - 19.30 | Welcome cocktail                                    |                          |
|                                                                                                      | Time          | <b>Monday, June 16</b>                              |                          |
|                                                                                                      | 08.30         | Registration                                        |                          |
|                                                                                                      |               | <b>Room Chiostro</b>                                |                          |
|                                                                                                      | 09.20 - 10.00 | <b>OPENING SESSION</b>                              |                          |
|                                                                                                      | 10.00 - 11.00 | <b>PLENARY LECTURE</b><br>Vladimir Molkov           |                          |
|                                                                                                      | 11.00 - 11.30 | Coffee break and poster viewing                     |                          |
|                                                                                                      | 11.30 - 12.20 | <b>HIGHLIGHTED PRESENTATIONS</b><br>Hydrogen safety |                          |
|                                                                                                      | 12.20 - 14.00 | <i>Lunch</i>                                        |                          |
|                                                                                                      |               | <b>Room Chiostro</b>                                | <b>Room 1</b>            |
|                                                                                                      | 14.00 - 15.40 | <b>Hydrogen safety I</b>                            | <b>Battery safety I</b>  |
|                                                                                                      | 15.40 - 16.10 | Coffee break and poster session                     |                          |
|                                                                                                      | 16.10 - 17.30 | <b>Hydrogen safety II</b>                           | <b>Battery safety II</b> |

|                                                                                                        |               |                                                                                                                                                         |                                                                                                                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <br><b>ISEFH 11</b> | Time          | <b>Tuesday, June 17</b>                                                                                                                                 |                                                                                                                    |
|                                                                                                        |               | <b>Room Chiostro</b>                                                                                                                                    |                                                                                                                    |
|                                                                                                        | 09.00 - 10.00 | <b>PLENARY LECTURE</b><br>Franco Tamanini                                                                                                               |                                                                                                                    |
|                                                                                                        | 10.00 - 10.30 | <b>Session in memory of</b><br><b>Prof. James G. Quintiere</b>                                                                                          |                                                                                                                    |
|                                                                                                        | 10.30 - 11.00 | Coffee break and poster viewing                                                                                                                         |                                                                                                                    |
|                                                                                                        |               | <b>Room 1</b>                                                                                                                                           |                                                                                                                    |
|                                                                                                        | 11.00 - 11.50 | <b>HIGHLIGHTED PRESENTATIONS</b><br>Wildland fires                                                                                                      |                                                                                                                    |
|                                                                                                        |               | <b>Room Chiostro</b>                                                                                                                                    | <b>Room 1</b>                                                                                                      |
|                                                                                                        | 11.50 - 12.50 | <b>Fundamentals of Fires and Explosions I +</b><br><b>Two phase explosion</b>                                                                           | <b>Wildland fires I</b>                                                                                            |
|                                                                                                        | 12.50 - 14.00 | <i>Lunch</i>                                                                                                                                            |                                                                                                                    |
|                                                                                                        | 14.00 - 15.40 | <b>Industry-specific</b><br><b>fire and explosion research: renewable</b><br><b>energy, aerospace, oil and gas,</b><br><b>nuclear, process industry</b> | <b>Wildland fires II</b>                                                                                           |
|                                                                                                        | 15.40 - 16.10 | Coffee break and poster session                                                                                                                         |                                                                                                                    |
|                                                                                                        | 16.10 - 17.10 | <b>Industrial risk and sustainability</b>                                                                                                               | <b>Critical and Transient Combustion</b><br><b>phenomena I + Combustion in extraordinary</b><br><b>environment</b> |
|                                                                                                        | 19.00 - 22.30 | River Boat standing aperitif dinner                                                                                                                     |                                                                                                                    |



ISFEH 11

|               |                                                                                  |                                                        |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Time          | Wednesday, June 18                                                               |                                                        |
|               | Room Chiostro                                                                    |                                                        |
| 09.00 - 10.00 | PLENARY LECTURE<br>Akiko Matsuo                                                  |                                                        |
| 10.00 - 10.50 | HIGHLIGHTED PRESENTATIONS<br>Fire and explosion modelling in computer codes      |                                                        |
| 10.50 - 11.20 | Coffee break and poster session                                                  |                                                        |
|               | Room Chiostro                                                                    | Room 1                                                 |
| 11.20 - 12.40 | Fire and explosion modelling in computer codes I                                 | Deflagration, DDT, detonation, and their mitigation I  |
| 12.40 - 14.00 | Lunch                                                                            |                                                        |
|               | Room 1                                                                           |                                                        |
| 14.00 - 14.50 | HIGHLIGHTED PRESENTATIONS<br>Deflagration, DDT, detonation, and their mitigation |                                                        |
|               | Room Chiostro                                                                    | Room 1                                                 |
| 14.50 - 16.10 | Fire and explosion modelling in computer codes II + Evacuation                   | Deflagration, DDT, detonation, and their mitigation II |
| 16.45 - 19.00 | Walking tour of ancient city                                                     |                                                        |



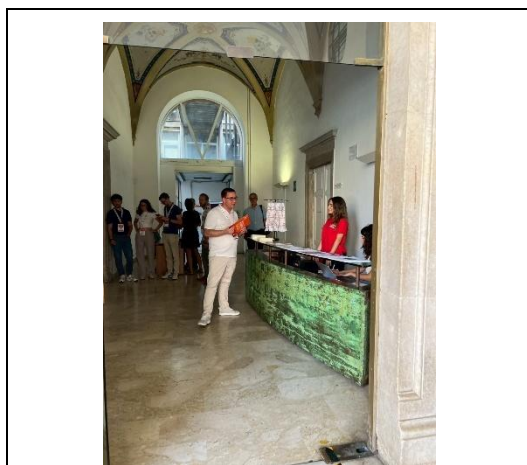
ISFEH 11

|               |                                                                   |                                                            |
|---------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Time          | Thursday, June 19                                                 |                                                            |
|               | Room Chiostro                                                     |                                                            |
| 09.00 - 10.00 | PLENARY LECTURE<br>Mikhail Liberman                               |                                                            |
| 10.00 - 10.50 | HIGHLIGHTED PRESENTATIONS<br>Fundamentals of fires and explosions |                                                            |
| 10.50 - 11.20 | Coffee break and poster viewing                                   |                                                            |
|               | Room Chiostro                                                     | Room 1                                                     |
| 11.20 - 13.00 | Fundamentals of fires and explosions II                           | Fire suppression and mitigation systems                    |
| 13.00 - 14.00 | Lunch                                                             |                                                            |
|               | Room Chiostro                                                     |                                                            |
| 14.00 - 14.50 | HIGHLIGHTED PRESENTATIONS<br>Hydrogen Safety                      |                                                            |
|               | Room Chiostro                                                     | Room 1                                                     |
| 14.50 - 15.50 | Hydrogen safety III                                               | Material flammability and flame retardancy + Fire Toxicity |
| 15.50 - 16.10 | Coffee break and poster session                                   |                                                            |
|               | Room Chiostro                                                     | Room 1                                                     |
| 16.10 - 17.10 | Critical and Transient Combustion Phenomena II                    | Battery safety III                                         |
| 19.30 - 22.30 | Social dinner                                                     |                                                            |



|               |                                                                                       |                    |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Time          | Friday, June 20                                                                       |                    |
|               | Room Chiostro                                                                         |                    |
| 09.15 - 10.15 | PLENARY LECTURE<br>Albert Simeoni                                                     |                    |
| 10.15 - 10.35 | Greeting and Introduction to the activities of the Italian Fire Corps<br>Eros Mannino |                    |
| 10.35 - 11.00 | Coffee break                                                                          |                    |
| 11.00 - 11.50 | HIGHLIGHTED PRESENTATIONS<br>Battery Safety                                           |                    |
|               | Room Chiostro                                                                         | Room 1             |
| 11.50 - 12.50 | Battery safety IV                                                                     | Wildland fires III |
|               | Room Chiostro                                                                         |                    |
| 12.50- 13.30  | Closing session.<br>Best presentation / poster awards                                 |                    |

## (二) 研討會參與情形照片



研討會報到情形



研討會合照



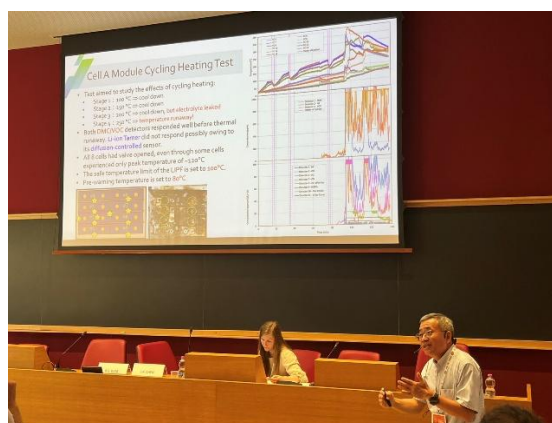
研討會分組討論室(Chiostro)



研討會分組討論室(ROOM 1)



研討會海報發表



研討會口頭發表-陳政任教授





研討會廠商展覽



研討會海報展示



研討會船宴



研討會晚宴

### (三) 本署南區專業技術小組口頭發表論文簡報



南區毒化災專業訓練中心  
SOUTHERN TAIWAN TOXIC SUBSTANCE  
EMERGENCY RESPONSE TRAINING CENTER

## Characteristics of Gas Venting and Detection During Thermal Runaway of LiFePO<sub>4</sub> Battery

P.H. Huang<sup>1</sup>, Y. P. Huang<sup>2</sup>, L. Y. Yeh<sup>1</sup>, H. C. Peng<sup>1</sup>, H. Y. Tsai<sup>1</sup>,  
J. R. Chen<sup>\*1</sup>, D. H. Chang<sup>2</sup>, K. C. Lin<sup>2</sup>, P. H. Hsieh<sup>2</sup>, Y. T. Chu<sup>2</sup>

1. Department of Safety, Health and Environmental Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology (NKUST), Kaohsiung, Taiwan
2. Taiwan Semiconductor Manufacturing Company, Tainan, Taiwan

\*Corresponding author's email: [jrc@nkust.edu.tw](mailto:jrc@nkust.edu.tw)



國立高雄科技大學  
National Kaohsiung University of  
Science and Technology



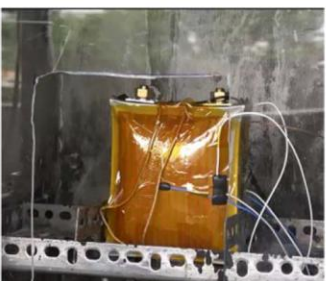


1



## Background

- Among various LIB technologies, **Lithium iron phosphate (LiFePO<sub>4</sub>)** battery is extensively used in energy storage owing to its low cost and large storage capacity.
- However, LiFePO<sub>4</sub> battery suffers the same drawbacks of LIB due to their high energy density, high flammability of electrolytes, and susceptibility to heat.
- Upon heating, the LiFePO<sub>4</sub> cell will vent with/without fire:

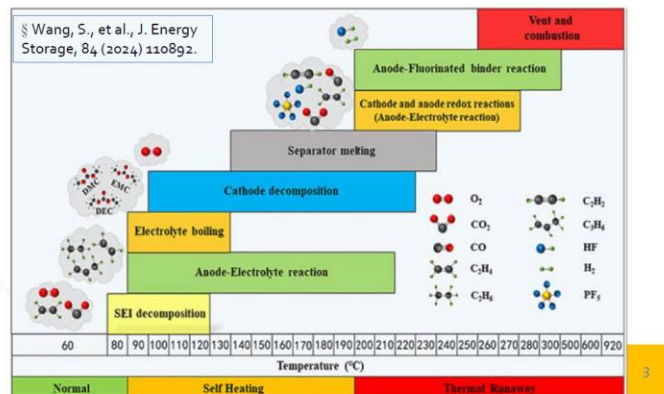


Thermal runaway test for Cell B

2

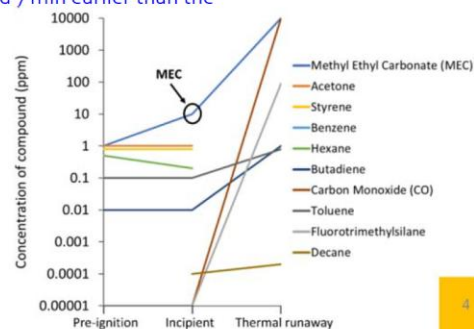
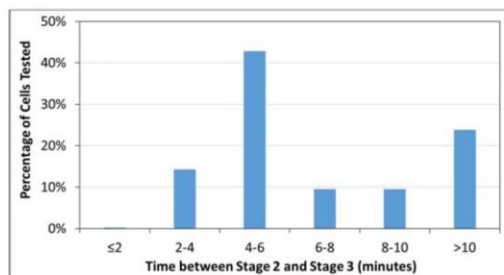
## Background – characteristics and hazards of vent gases

- Extensive work have been done, such as review by Wang et al. (2024)<sup>§</sup>, to characterize the components and hazards of the off-gases from LIB
- The gas vented mainly related to the reactions inside the LIB, including:
  - SEI(Solid electrolyte interface) decompositions
  - Anode-electrolyte reactions
  - Electrolyte boiling
  - Cathode decomposition
  - Separator melting
  - Cathode and anode reactions
  - Anode-fluorinated binder reactions
  - Vent and combustion
- The above reactions may take place simultaneously
- The monitoring of different vent gas also lead to development of early warning sensors



## Background – early warning sensors

- A patent by Cummings et al. (2020) proposed a thermal runaway automatic detection system for lithium-ion battery cells or modules based on monitoring the gas components.
- Cummings and Swartz (2017) found that the gas sensor of carbonates can detect the fault signal around 7–8 mins before the actual occurrence of thermal runaway, which is around 2 min earlier than the voltage sensor and 7 min earlier than the temperature sensor.





## Objectives

- What's the **characteristics of gas venting** from LiFePO<sub>4</sub> cells subjected to heat?
  - Battery expansion before the venting
  - Components of the vent gases
  - Concentration range of the vent gases
  - Dynamic variation of vent gases
- Can gas detection **reliably detect abnormal cells before runaway?**
- Which gas detector is the most suitable one for LiFePO<sub>4</sub> cells?

5

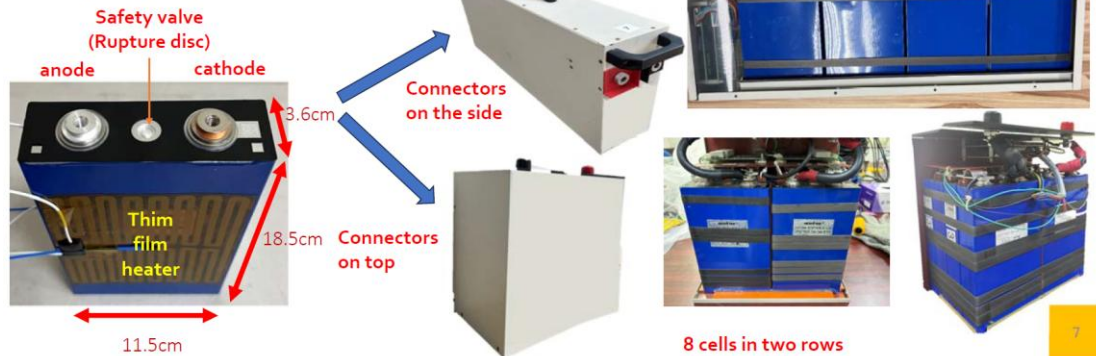
## Detectors used

| No. | Maker         | Model         | Sensor type          | Gas            | Range                               |
|-----|---------------|---------------|----------------------|----------------|-------------------------------------|
| 1   | Riken Keiki   | SD-D58 GH     | Semiconductor        | DMC            | 0-3000 ppm                          |
| 2   | Riken Keiki   | GD-70D-EA     | Semiconductor        | H <sub>2</sub> | 0-2000 ppm                          |
| 3   | Riken Keiki   | SG-8541       | Semiconductor        | H <sub>2</sub> | 0-100 ppm                           |
| 4   | Riken Keiki   | SG-8260       | Semiconductor        | VOC            | 0-1000 ppm                          |
| 5   | Riken Keiki   | GD-70D        | Electrochemical cell | HF             | 0-10 ppm                            |
| 6   | Riken Keiki   | GD-70D-EA     | Electrochemical cell | CO             | 0-150 ppm                           |
| 7   | City Tech.    | 3EF           | Electrochemical cell | CO             | 0-100 ppm                           |
| 8   | Honeywell     | SPM Flex      | Color tape           | HF             | 0-20ppm                             |
| 9   | Xtralis VESDA | VEP-A10-P     | Light obstruction    | Smoke          | 0-20% obs/m for 0-5V voltage output |
| 10  | Honeywell     | B114LP        | Light obstruction    | Fire Smoke     | 1-3.18%/ft                          |
| 11  | Xtralis       | Li-ion Tamer® | -                    | Carbonate      | < 1 ppm/sec                         |

6

## Cell A and its modules

- Manufactured by **Jiangsu Highstar Battery Manufacturing Co., Ltd.**, China, Model number IFpP36115200-50 with a normal capacity of **50 Ah**, normal voltage of **3.2 V** and weight **1350 g**.
- Module for cell A is supplied from Changs Ascending Enterprise Co., Ltd., Taiwan.



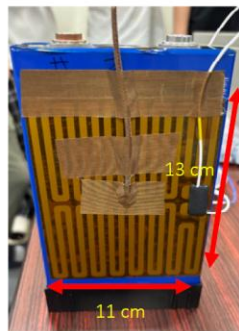
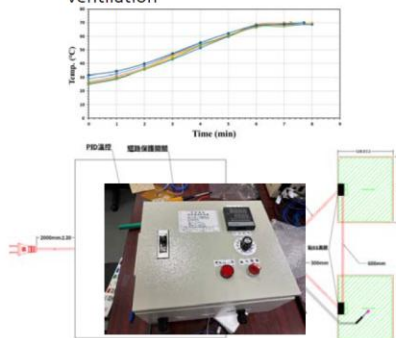
## Cell B and its modules

- Manufactured by **Jiangsu Chunlan Clean Energy Academy Co., Ltd.** Model number IFPP50 with a normal capacity of **50 Ah**, normal voltage of **3.2 V**, weight **1380 g**.
- Module for cell B is supplied from Taiwan Truewin Technology Co., Ltd.



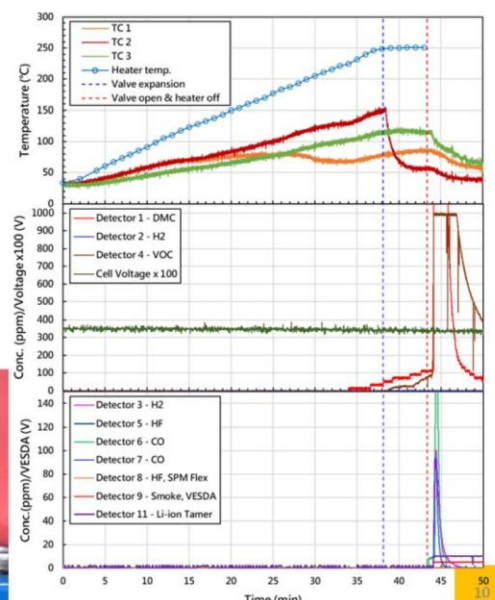
## Thin-film heater & test chamber

- Polyimide film, temperature rating ~400°C
- Each film is laminated with heater 345 W  $\pm$  10% · 35Ω
- Two films per cell
- Heating rate setting: 6°C/min
- Cell was placed inside a 2-hr fire resistant cabinet with constant ventilation



## Cell A Thermal Runaway

- Heating led to cell expansion. After reached 250°C, temperature hold steady for 5 min and then strong venting occurred at 43.35min. Heating was then aborted and cell cooled down. No visible fire was observed.
- At 34.06min, Riken DMC detector had first reading, followed by Riken VOC detector at 38.2 min.
- All other sensors/detectors had reading only after valve full open, except for both HF detectors.

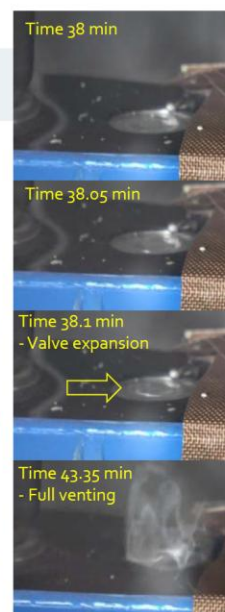
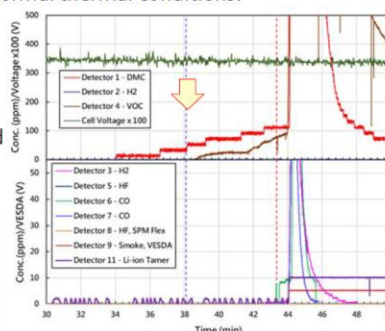






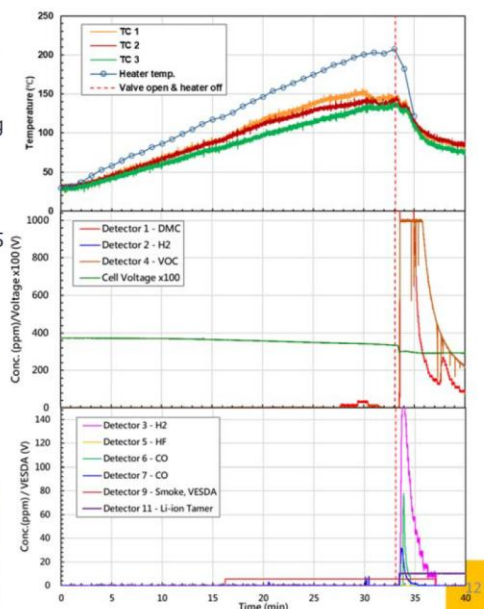
## Cell A Thermal Runaway

- Minor valve expansion/distortion was observed near 38.1 min, which was 5 min before full valve opening
- H<sub>2</sub> and CO were not detected before valve full open, indicating that **thermal runaway was not yet reached**.
- Thus, the detection of carbonate electrolytes *can* be a useful way of early detection of LiFePO<sub>4</sub> battery under abnormal thermal conditions.
- In the present study, the detection may provide up to **5 min** window before the battery runs into a full venting.
- White, polymeric materials were also vented out. FTIR-ATR analysis confirmed to be PP/PE/carbonates mixture



## Cell B Thermal Runaway

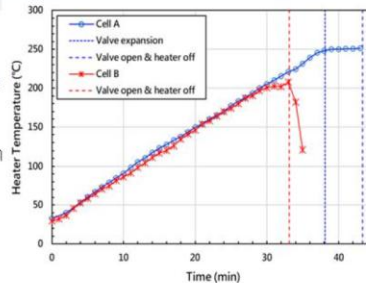
- Heating led to cell expansion. After reached **200°C**, strong venting occurred at 33.11 min. Heating was then aborted and cell cooled down. No visible fire was observed.
- At 33.43min, **Li-ion Tamer** detector had first reading, followed shortly by **Riken VOC/H<sub>2</sub>/DMC** detectors at 33.55 min. All readings were after valve opening.
- Very minor **VOC** detected near 29 min which was attributed to the VOC from tape wrapped around heater.
- **VESDA** detector recorded smoke at 16.2 min, which was also attributed to fuming from the tape.
- No visible valve expansion or distortion was observed.
- **Gas detectors were not useful for early warning of thermal runaway.**
- **No polymeric materials vented**





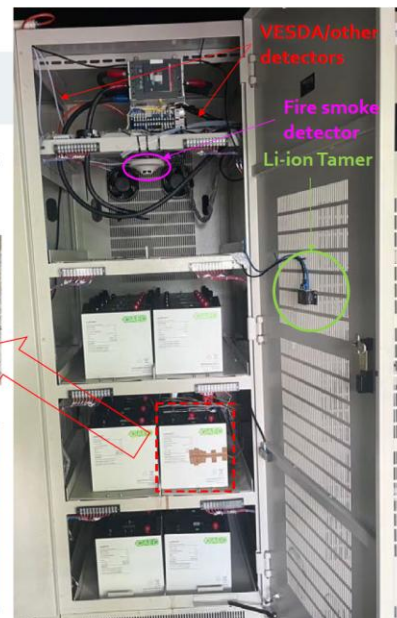
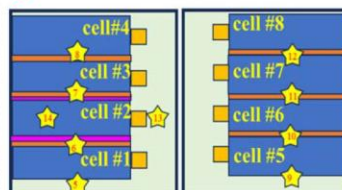
## Comparison of cells after tests

- Heater temperature at venting of cell A is approximately **50°C lower** than cell B.
- The cut sections of both cells showed that the **PE/PP separator** was not only used to separate anode and cathode sheets but also covered the electrodes for electrical insulation from the aluminum casing.
- Both separators were analyzed by DSC. Both samples exhibited a similar, large fusion peak with peak temperature of **163.71°C** and **167.96°C**, respectively for **cell A** and **cell B**.
- Thus, it is suspected that venting of PE/PP separator from cell A was a result of higher venting temperature in comparison with cell B.
- It is also likely that cell B valve opening pressure setting is lower than the one of cell A. Thus, there was no valve deformation and leak of electrolyte in cell B until valve full opening.
- Therefore, **gas detection is not applicable for pre-warning of thermal runaway of cell without minor leaks of electrolyte**. This occurs mostly in cells with low venting pressure/temperature setting.



## Cell A Module Thermal Runaway

- The module test follows closely the UL 9540A Module Test Method
- Cell #2 was heated until temperature reached 300°C. Temperatures of remaining cells and nearby modules were monitored
- Venting was observed but no visible flame.
- After the test, **Cell #1~3 had valve opened** indicating runaway propagated to nearby cells.
- Nearby modules **remained intact and cool**.
- The module is considered **to pass** the UL 9540A Module Test

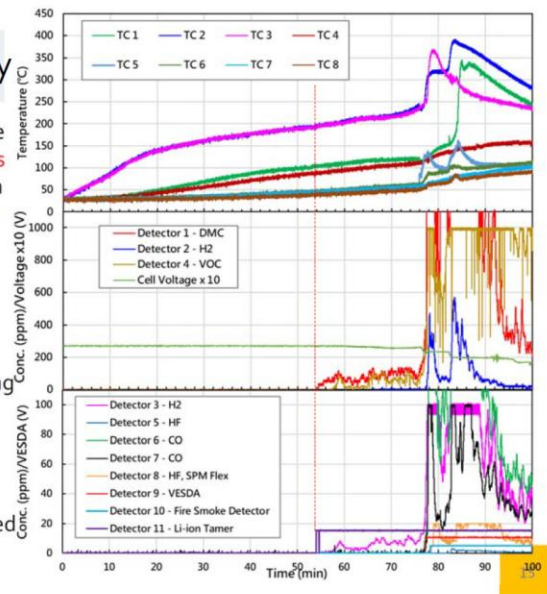






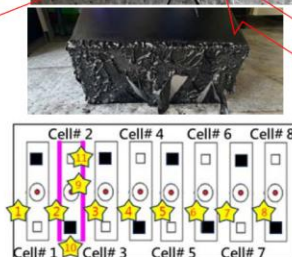
## Cell A Module Thermal Runaway

- Peak temperature reached  $\sim 400^{\circ}\text{C}$ .
- The results of gas detection were similar to single cell test with **DMC**, **VOC** and **high-sensitive H<sub>2</sub>** detectors starting to record approximately **20 min** earlier than valve full opening and temperature runaway, which indicates early leakages.
- **Li-ion Tamer** detectors responded at the same time with DMC detector as it was installed close to the heating module.
- **HF** was also detected by SPM Flex color-tape detector approximately 2 min after valve full opening and reached the full-scale concentration of 20 ppm.
- The electrochemical cell HF detector responded  $\sim 4$  min slower than the SPM detector and peak concentration reached only 2.9 ppm.
- Surprisingly, typical **Fire Smoke Detector** also worked and only 2 min slower than the sensitive VESDA.
- Test results were similar for the other type module.



## Cell B Module Thermal Runaway

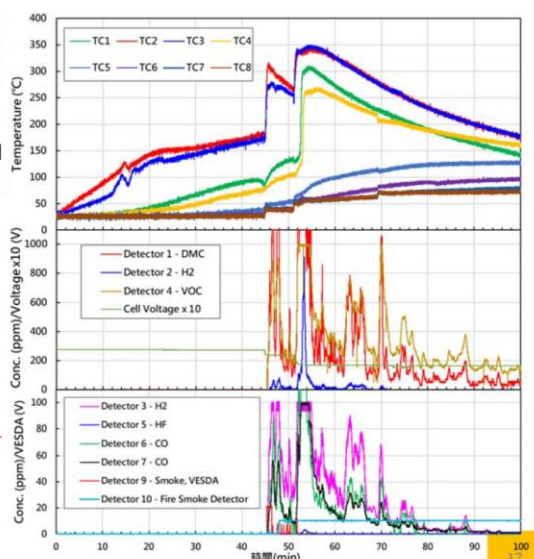
- Cell #2 was heated until temperature reached  $300^{\circ}\text{C}$ . Temperatures of remaining cells and nearby modules were monitored.
- Venting was observed but no visible flame.
- After the test, **Cell #1-4 had valve opened**.
- Nearby modules **remained intact and cool**.
- The module is considered **to pass** the UL 9540A Module Test





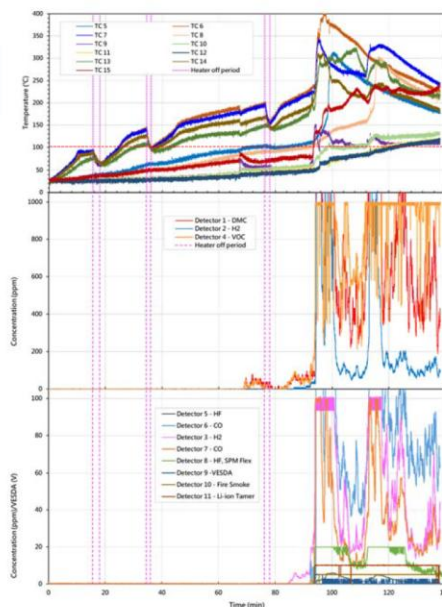
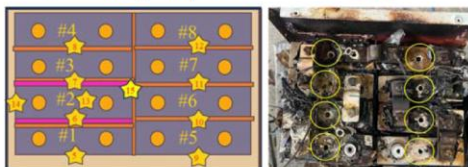
## Cell B Module Thermal Runaway

- Peak temperature reached  $\sim 350^{\circ}\text{C}$ ,  $50^{\circ}\text{C}$  lower than cell A module.
- The results of gas detection were similar to single cell test with **NO** detection for all detectors prior to valve opening and temperature runaway.
- Upon valve opening, all detectors including electrochemical cell HF detector showed positive recordings.
- Again, typical **Fire Smoke Detector** also worked and only 2 min slower than the sensitive VESDA.
- In multi-cell modules, full valve opening and thermal runaway take place almost at the same time.
- It is concluded that gas detection is not applicable for pre-warning of thermal runaway of cell without minor leaks of electrolyte.
- Test results were similar for module with 8 cells in two rows.



## Cell A Module Cycling Heating Test

- Test aimed to study the effects of cycling heating:
  - Stage 1 :  $100^{\circ}\text{C} \Rightarrow$  cool down
  - Stage 2 :  $150^{\circ}\text{C} \Rightarrow$  cool down
  - Stage 3 :  $200^{\circ}\text{C} \Rightarrow$  cool down, but electrolyte leaked
  - Stage 4 :  $250^{\circ}\text{C} \Rightarrow$  temperature runaway!
- Both **DMC/VOC** detectors responded well before thermal runaway. **Li-ion Tamer** did not respond possibly owing to its **diffusion-controlled** sensor.
- All 8 cells had valve opened, even through some cells experienced only peak temperature of  $\sim 120^{\circ}\text{C}$
- The safe temperature limit of the LIPF is set to  $100^{\circ}\text{C}$ .
- Pre-warning temperature is set to  $80^{\circ}\text{C}$



## Conclusions

- Minor leak of electrolytes were carbonates, and their detection can be a pre-warning for abnormal LiFePO<sub>4</sub> cells.
- Valve deformation and opening characteristics of LiFePO<sub>4</sub> cells, which are unique to each manufacturer, dictate the applicability of gas monitoring as an early warning method of thermal runaway.
- Temperature remains the preferred choice for thermal runaway pre-warning indication
- Gas and smoke detectors still can provide passive warning for abnormal LiFePO<sub>4</sub> cells with venting.
- Simple VOC or Fire Smoke detectors are found to be effective in comparison with other proprietary detectors

19

## Thank you for your attention!



國立高雄科技大學  
National Kaohsiung University of  
Science and Technology



南區毒化災專業訓練中心  
SOUTHERN TAIWAN TOXIC SUBSTANCE  
EMERGENCY RESPONSE TRAINING CENTER

20



#### (四) 本署南區專業技術小組分享海報



國立高雄科技大學  
National Kaohsiung University of  
Science and Technology



## The Initiation and Suppression of Organic Peroxide Dust Explosion

Hsiao-Yun Tsai\*, Hsiang-Ching Peng, Li-Yu Yeh, Pao-Hsun Huang, Jenq-Renn Chen

Department of Safety, Health and Environmental Engineering  
Southern Taiwan Toxic Substance Emergency Response & Training Center (SERT)  
National Kaohsiung University of Science and Technology, Kaohsiung, Taiwan  
\* sharon21@nkust.edu.tw

### INTRODUCTION

- On September 22, 2023, a deadly explosion occurred in a production plant manufacturing golf balls in southern Taiwan.
- The incident was initiated from fuming of one of three pallets of a solid organic peroxide each stacked with 50 paper boxes and 20 kg in each box.
- Before the fire department entering the warehouse, explosion occurred which resulted in **10 fatalities** including 4 firemen, more than 100 injuries, and very extensive damage to the production building.
- The organic peroxide contained **40% of 1,1-Di(tert-butylperoxy) cyclohexane (DTBCH)**, 40% of silicon dioxide, and balanced isoparaffin.
- It is classified as type D solid peroxide with maximum storage temperature 30°C and SADT 60°C.
- The warehouse was however not temperature controlled. Clearly, a thermal runaway occurred in the boxed peroxide.
- This work aims to reproduce the initiation of the explosion and propose possible mitigation measures.



The pellet of organic peroxide.  
Two weeks before the explosion.



55 min before the explosion.  
Melting of PE film was visible.



The explosion: visible flame observed.



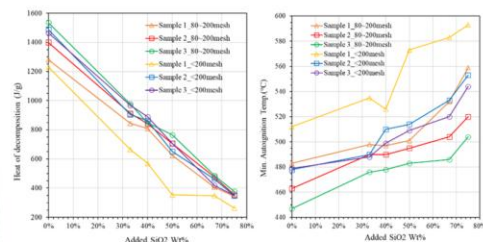
The damage after the explosion.

### RESULTS

- Extensive testing, including DSC, ARC, GC-MS, FTIR-ATR, dust MIE, dust minimum AIT (MAIT), and bomb calorimeter, were performed on the peroxide samples taken from three similar batches of the incident batches.
- 40% of the sample were fine powder with particle size less than ASTM Mesh No. 200, and remaining being ASTM Mesh No. 80-200.
- DSC analyses showed only medium thermal hazards with average decomposition energy of 1399.8 J/g.
- ARC tests showed onset temperature around 123°C and the peak adiabatic temperature of 466°C.
- Measured dust MIE was less than 10 mJ confirming that the peroxide powder has high sensitivity to ignition.
- Dust MAIT was measured to be 447-512°C, depending on the batches and particle sizes.
- The lowest MAIT is lower than ARC adiabatic temperature confirming that direct initiation and ignition of the dust is possible during thermal runaway, leading to a dust explosion.
- Test with 10 g sample in plastic bag reproduced the ignition:



- Heat of decomposition and MAIT varied with addition of inert solid such as SiO<sub>2</sub>.
- For a fuming peroxide, wetting and cooling by water is the best practice. Safe disposal is possible by diluting with inert solid such as sand to < 20wt%.



### CONCLUSIONS

- Direct initiation and ignition of Type D solid organic peroxide is confirmed through ARC, MAIT and small-scale heating tests.
- The organic peroxide explosion incident was confirmed to be a dust explosion from direct ignition of the fuming dust during thermal runaway.
- Action regarding to fuming and safe disposal is proposed.