

出國報告（出國類別：開會）

參加第15屆國際工業爆炸危害預防與  
削減研討會(The 15th International  
Symposium on Hazards, Prevention, and  
Mitigation of Industrial Explosions,  
ISHPMIE 2024)

服務機關：環境部化學物質管理署

姓名職稱：洪靜宜技正

派赴國家：義大利

出國期間：113年6月9日至6月18日

報告日期：113年9月18日

## 摘要

國際工業爆炸危害預防與削減研討會每2年辦理1次，為跨國學術界與產業界相關領域專家學者建置交流平臺，本次所參加為第15屆研討會，訂於113年6月10日至14日於義大利那不勒斯召開，由那不勒斯費德里科二世大學與當地國家研究委員會、羅馬大學、博洛尼亞大學和都靈理工大學共同合作辦理，議題涵蓋化學物質危害風險管理、人工智慧與資料庫應用、電池安全、易燃性與惰化、點火與滅火、爆炸模擬、排爆與緩解、粉塵與混合爆炸、歷史案例、氫氣與氣體安全等，共約250名國際專家學者參與。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、楊惠甯經理分別於113年6月10日、12日及13日口頭發表投稿論文，以臺灣半導體產業製程常用的矽源、明揚大火案及高雄煉油廠大火等案例，探討矽烷類、有機過氧化物、硫化物等化學物質潛在爆炸風險並提出減災預防建議，因有別於單純實驗數據分析與模擬而受到各國專家學者高度關注。

本次公務出國期間除參加研討會瞭解國際間災害防救科學研究領域發展進程以外，另參訪該國具30年經驗以上之生化放核(Cheical, Biological, Radiological, and Nuclear, CBRN)應變設備與除污產品研發製造商，瞭解國際間化

學災害搶救資材、設備市場供需及先進科技發展情形，汲取適用於我國之科技與技術，作為未來毒化災災害防救相關設施、設備或訓練模組採購、開發、設計之參考，並持續關注國際科技防救災發展趨勢，以多元化預防整備應對复合型災害。

# 目次

|     |                                          |        |
|-----|------------------------------------------|--------|
| 一、  | 目的 .....                                 | - 5 -  |
| 二、  | 過程 .....                                 | - 6 -  |
| (一) | 第15屆國際工業爆炸危害預防與削減研討會(ISHPMIE 2024) ..... | - 9 -  |
| (二) | 參訪義大利 Cristanini 公司.....                 | - 19 - |
| 三、  | 心得及建議 .....                              | - 24 - |
| (一) | 心得 .....                                 | - 24 - |
| (二) | 建議 .....                                 | - 26 - |
| 四、  | 附錄 .....                                 | - 29 - |
| (一) | ISHPMIE 2024網站公開研討會議程表.....              | - 29 - |
| (二) | 研討會參與情形照片 .....                          | - 32 - |
| (三) | 本團隊參訪 Cristanini 公司情形照片.....             | - 34 - |
| (四) | 本署南區技術小組口頭發表論文簡報 .....                   | - 37 - |

## 一、 目的

我國依災害防救法將災害依性質分成22種類別，分由7個中央部會依業管作用法推動災害防救工作，其中，本部為災害防救法所定之毒性及關注化學物質中央災害防救業務主管機關，透過定期檢討修正毒性及關注化學物質災害防救業務計畫函頒地方政府據以實施推動轄區防災業務，並依毒性及關注化學物質管理法督導地方政府透過宣導、訓練、演訓、無預警測試及籌設聯防組織，促進毒性及關注化學物質運作人落實自主防災管理。自110年8月起南區毒化災訓場啟用，為國內首座毒化災專業訓場，除積極推動國內專業應變人員訓練以外，亦通過國際 TEEEX 認證，使國內毒化災專業應變技術接軌國際。111年起完成專業應變諮詢機構認證，促進毒化災應變產業化，使整體毒化災應變機制除了自助、互助以外更增加他助能量；透過中長程個案計畫維運精進本署毒化災應變體系，全年無休24小時協助環境事故監控、專業諮詢、現場環境偵檢，整合自助、互助、他助及公助量能，使環境事故危害風險及社會成本降低。

鑑於科技發展迅速，國際間化學品種類、製程發展日興月異，化學工廠一旦發生事故，其燃燒、洩漏所產生之爆炸、火災恐導致現場救災人員危害風險；此外，因應日益嚴峻之氣候變遷，極端天氣與氣候事件恐影響現行救災作

業，是以，提升災害防救、預警及應變能力刻不容緩。

本次參與國際工業爆炸危害預防與削減研討會目的如下：

**(一) 增進專業知識與技術能力：**蒐集各國針對化學物質相關爆炸機制、防

爆及災害控制等研究成果與技術發展，深入瞭解爆炸性化學物質行為

模式，參考國際先進預防應變技術，進一步提升國內運作風險管理。

參訪國外除污設備廠商，瞭解國際市場趨勢，以作為精進我國毒化災

體系應變資材參考。

**(二) 推動國際合作與資訊共享：**工業爆炸及化學災害具跨國界影響，災害

預防應變亦需國際間協作。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。

**(三) 加強化學物質災害防救管理：**透過借鑒國際經驗，學習先進國家良好

作法，以作為我國毒性及關注化學物質災害防救政策與措施制定參

考，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，提升國內毒化災應變能力。

## 二、 過程

本次出國行程共計10天，主要參加第15屆國際工業爆炸危害預防與削減研

討會，並於研討會後參訪當地除污設備廠商，出國計畫行程如表1：

表 1 出國計畫行程表

| 天數   | 日期              | 地點       | 行程說明                                                         |
|------|-----------------|----------|--------------------------------------------------------------|
| 第1日  | 113.6.9<br>(日)  | 臺灣→羅馬    | 路程：搭機出發前往義大利                                                 |
| 第2日  | 113.6.10<br>(一) | 羅馬→那不勒斯  | 1. 路程：搭乘火車前往那不勒斯<br>2. 參加「第15屆國際工業爆炸危害預防與削減」研討會第1天           |
| 第3日  | 113.6.11<br>(二) | 那不勒斯     | 參加「第15屆國際工業爆炸危害預防與削減」研討會第2天                                  |
| 第4日  | 113.6.12<br>(三) | 那不勒斯     | 參加「第15屆國際工業爆炸危害預防與削減」研討會第3天                                  |
| 第5日  | 113.6.13<br>(四) | 那不勒斯     | 參加「第15屆國際工業爆炸危害預防與削減」研討會第4天                                  |
| 第6日  | 113.6.14<br>(五) | 那不勒斯→維羅納 | 1. 參加「第15屆國際工業爆炸危害預防與削減」研討會第5天<br>2. 路程：搭乘火車前往維羅納<br>3. 整理資料 |
| 第7日  | 113.6.15<br>(六) | 維羅納      | 參訪當地化災除污設備器材廠商                                               |
| 第8日  | 113.6.16<br>(日) | 維羅納→羅馬   | 1. 路程：搭乘火車前往羅馬<br>2. 整理資料                                    |
| 第9日  | 113.6.17<br>(一) | 羅馬→臺灣    | 路程：搭機返臺                                                      |
| 第10日 | 113.6.18<br>(二) |          |                                                              |

本次出國計畫由本署危害控制組承辦人（為計畫主辦單位）、北、中、南區

專業技術小組團隊等共計10名人員共同參與，同行名單如表2：

表 2 出國計畫人員名單

| 項  | 服務機關（構）                  | 姓名  | 職稱              |
|----|--------------------------|-----|-----------------|
| 1  | 環境部化學物質管理署               | 洪靜宜 | 技正              |
| 2  | 本署北區專業技術小組<br>（國立聯合大學）   | 陳星佑 | 技術專家            |
| 3  | 本署北區專業技術小組<br>（國立聯合大學）   | 陳湧盛 | 宜蘭隊隊長           |
| 4  | 本署北區專業技術小組<br>（國立聯合大學）   | 莊牧庭 | 臺北隊隊員           |
| 5  | 本署北區專業技術小組<br>（國立聯合大學）   | 秦睦耕 | 桃園隊隊員           |
| 6  | 本署中區專業技術小組<br>（國立雲林科技大學） | 洪肇嘉 | 教授<br>（計畫主持人）   |
| 7  | 本署中區專業技術小組<br>（國立雲林科技大學） | 廖光裕 | 協同主持人           |
| 8  | 本署南區專業技術小組<br>（國立高雄科技大學） | 陳政任 | 教授<br>（計畫主持人）   |
| 9  | 本署南區專業技術小組<br>（國立高雄科技大學） | 蔡曉雲 | 助理教授<br>（協同主持人） |
| 10 | 本署南區專業技術小組<br>（國立高雄科技大學） | 楊惠甯 | 協同主持人           |



### (一) 第15屆國際工業爆炸危害預防與削減研討會(ISHPMIE 2024)

國際工業爆炸危害預防與削減研討會每2年辦理1次，主要參加對象為各國學術研究單位，113年由那不勒斯費德里科二世大學主辦，會議地點位於該大學會議中心，期間共5日，主辦方於每日議程先安排專題演講後，再分別以2至3項主題在主會堂、A 廳及 B 廳等3個會議室平行展開，由各國代表口頭發表投稿論文內容並與與會者進行交流討論。

研討會議程如表3，討論主題涵蓋化學物質危害風險管理、人工智慧與資料庫應用、電池安全、易燃性與惰化、點火與滅火、爆炸模擬、排爆與緩解、粉塵與混合爆炸、歷史案例、氫氣與氣體安全等。本署南區專業技術小組陳政任教授、蔡曉雲助理教授、楊惠甯經理分別於113年6月10日、12日及13日進行投稿論文口頭發表，以臺灣半導體產業製程常用矽源、明揚大火案及高雄煉油廠大火等案例，探討矽烷類、有機過氧化物、硫化物等化學物質潛在爆炸風險並提出減災預防建議。主辦國義大利於每日研討會結束後安排與會人員參與沙灘派對、披薩晚餐、社交晚宴等不同形式之交流活動，另安排城市導覽，聘請專業解說員充分介紹當地因應火山災害與避難設施建設，透過學術交流充份結合當地風土民情，擴大國際城市行銷效益。

表 3 研討會議程表

| 日期              | 時間              | 議程                                                                                  |                                                                           |             |
|-----------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 113.6.10<br>(一) | 09:15-10:15     | 報到註冊                                                                                |                                                                           |             |
|                 | 10:15-10:35     | 主會堂<br>開幕式                                                                          |                                                                           |             |
|                 | 10:35-11:20     | 主會堂<br>全體會議<br>為什麼粉塵爆炸會發生?<br>Paul Amyotte, 加拿大達爾豪斯大學(Dalhousie University, Canada) |                                                                           |             |
|                 | 11:20-12:00     | 休息                                                                                  |                                                                           |             |
|                 |                 | 主會堂                                                                                 | A 廳                                                                       | B 廳         |
|                 | 12:00-13:00     | 風險管理                                                                                | 人工智慧與資料<br>庫應用於爆炸                                                         |             |
|                 | 13:00-14:40     | 午餐                                                                                  |                                                                           |             |
|                 | 14:40-16:00     | 電池安全                                                                                | 易燃性與惰性化                                                                   |             |
|                 | 16:00-16:30     | 休息                                                                                  |                                                                           |             |
|                 | 16:30-17:30     | 點燃與滅火                                                                               | 釋放與擴散                                                                     | 爆炸建模        |
|                 | 17:30-19:00     | 歡迎招待會                                                                               |                                                                           |             |
|                 | 20:00-23:00     | 國際組織委員會會議                                                                           |                                                                           |             |
|                 | 113.6.11<br>(二) | 09:00-09:45                                                                         | 主會堂<br>主題演講<br>電池安全<br>Wei Gao, 中國大連理工大學(University of Technology, China) |             |
| 09:45-10:10     |                 | 主會堂<br>紀念 Piotr Wolański 教授<br>波蘭華沙工業大學(Warsaw University of Technology, Poland)    |                                                                           |             |
|                 |                 | 主會堂                                                                                 | A 廳                                                                       | B 廳         |
| 10:10-11:10     |                 | 易燃性與惰性<br>化                                                                         | 氫氣及氣體安<br>全                                                               | 爆轟與 DDT     |
| 11:10-11:30     |                 | 休息                                                                                  |                                                                           |             |
| 11:30-12:30     |                 | 爆炸通風及緩<br>解                                                                         | 粉塵及混合爆<br>炸                                                               |             |
| 13:00-14:30     |                 | 午餐                                                                                  |                                                                           |             |
| 14:30-15:30     |                 | 氫氣與氣體安<br>全                                                                         | 火焰傳播                                                                      | 粉塵與爆炸緩<br>解 |
| 15:30-16:00     |                 | 休息與海報展示                                                                             |                                                                           |             |
| 16:00-17:00     |                 | 爆炸緩解                                                                                | 粉塵與混合爆<br>炸                                                               |             |

|                 |                 |                                                                                              |                                                                                                |               |
|-----------------|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
|                 | 17:00-18:00     | 工業爆炸青年<br>研究委員會圓<br>桌會議                                                                      |                                                                                                |               |
|                 | 19:30-23:30     | 沙灘派對                                                                                         |                                                                                                |               |
| 113.6.12<br>(三) | 09:00-09:45     | 主會堂<br>主題演講<br>使用 K <sub>St</sub> 指標定義大規模粉塵爆炸測試反應性的<br>限制<br>C. Regis Bauwens, FM Global, 美國 |                                                                                                |               |
|                 |                 | 主會堂                                                                                          | A 廳                                                                                            | B 廳           |
|                 | 09:50-11:10     | 失控反應                                                                                         | 氫氣與氣體安<br>全                                                                                    |               |
|                 | 11:10-11:50     | 休息與海報展示                                                                                      |                                                                                                |               |
|                 | 11:50-12:50     | 爆轟與 DDT                                                                                      | 粉塵與混合爆<br>炸                                                                                    | 氫氣與氣體安<br>全   |
|                 | 13:00-14:30     | 午餐                                                                                           |                                                                                                |               |
|                 | 14:30-15:50     | 粉塵與混合爆<br>炸                                                                                  | 氫氣與氣體安<br>全                                                                                    | 爆炸預防          |
|                 | 15:50-16:20     | 休息與海報展示                                                                                      |                                                                                                |               |
|                 | 16:30-17:00     | 自由時間                                                                                         |                                                                                                |               |
|                 | 17:00-18:30     | 城市導覽                                                                                         |                                                                                                |               |
|                 | 19:00-21:00     | 披薩晚餐                                                                                         |                                                                                                |               |
|                 | 113.6.13<br>(四) | 09:00-09:45                                                                                  | 主會堂<br>主題演講<br>氫氣安全技術進展<br>Vladimir Molkov, 北愛爾蘭阿爾斯特大學(Ulster<br>University, Northern Ireland) |               |
|                 |                 | 主會堂                                                                                          | A 廳                                                                                            | B 廳           |
| 09:50-11:10     |                 | 易燃性、惰化<br>及預防                                                                                | 粉塵與混合爆<br>炸                                                                                    |               |
| 11:10-11:50     |                 | 休息與海報展示                                                                                      |                                                                                                |               |
| 11:50-12:50     |                 | 粉塵與混合爆<br>炸                                                                                  | 粉塵與混合爆<br>炸                                                                                    | 歷史案例          |
| 13:00-14:30     |                 | 午餐                                                                                           |                                                                                                |               |
| 14:30-15:30     |                 | 爆炸模式                                                                                         | 氫氣及氣體安<br>全                                                                                    | 粉塵混合及噴<br>灑爆炸 |
| 15:30-16:20     |                 | 休息與海報展示                                                                                      |                                                                                                |               |
| 16:20-17:20     |                 | 粉塵與爆炸                                                                                        | 氫氣及氣體安<br>全                                                                                    | 爆炸及 DDT       |
| 19:00-23:00     |                 | 社交晚宴                                                                                         |                                                                                                |               |
| 113.6.14<br>(五) | 09:00-09:45     | 主會堂<br>主題演講<br>21世紀教學過程安全                                                                    |                                                                                                |               |

|             |         |                                                      |     |  |
|-------------|---------|------------------------------------------------------|-----|--|
|             |         | Trygve Skjold, 挪威卑爾根大學(University of Bergen, Norway) |     |  |
|             |         | 主會堂                                                  | A 廳 |  |
| 09:50-10:50 | 氫氣及氣體安全 | 電池安全                                                 |     |  |
| 10:50-11:20 | 休息      |                                                      |     |  |
| 11:20-12:00 | 海報展示及討論 |                                                      |     |  |
| 13:00-14:30 | 午餐      |                                                      |     |  |
| 14:30-15:00 | 閉幕式     |                                                      |     |  |

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. 小規模甲苯池火研究(Small scale pool fires case of toluene)

池火為石化工業儲槽潛在危害風險之一，可能發生於常壓儲槽之槽內燃燒或外洩燃燒，其中，甲苯液池火災因其包含可能涉及之大多數耦合物理過程，如浮力流向控制、湍流燃燒、熱輻射和煙灰生成等，可作為火災發展過程標準情境的代表。流體力學計算(Computational Fluid Dynamics, CFD)被廣泛應用於各種流體動力學現象之模擬，其中亦包括池火。發表者應用流體力學計算模擬技術進行小規模且參數控制良好甲苯之液池火災實驗，測量不同環境條件下甲苯質量燃燒速率、火焰高度、脈動頻率、熱釋放率、輻射分數、燃料表面中心總熱通量、溫度統計及平均煙灰體積總量等。前述實驗數據可用來持續發展煙灰形成和輻射熱傳之模型，研究實驗之結果有助於預測甲苯火災之火勢發展、熱能

傳遞、煙霧生成和燃燒過程中之其他相關資料，提高甲苯火災安全措施。

使用流體力學計算模擬池火災害可使火災動力學模擬（火焰形狀以及區域溫度分佈）更為精確，有助於瞭解池火燃燒模式，改善火災預防控制之措施；提升情境模擬靈活度，例如不同燃料之類型、池火尺寸與環境條件等，將有助於相關從業人員對各種可能發生之火災狀況進行預測和危害分析，據以調整其災害防救計畫，提升應變安全及效率。

綜上，以流體力學計算技術作為火災科學、製程設計及安全運作管理等領域之輔助工具，可大幅提升化學災害防救效能。未來期許科技發展提升運算能力，可提升其精確度並擴大應用於各類火災模擬，為化學品運作廠場災害預防控制、安全管理及應變能量建置提供更強而有力之協助。

## 2. 含能材料產業的爆炸排氣通風技術(Explosion Venting in the Energetic Materials Industry)

本篇研究論述推進劑、炸藥、煙火等含能材料與可燃性氣體間的化學反應將釋放大量熱能，在密閉或通風不足的環境條件下，可能使熱量與壓力迅速累積而導致爆炸。研究指出，雖然國際間已有 NFPA 68、NFPA 69、歐盟標準規範14491等多項標準指導防護措施，但即使在最佳條件下，也無法完全消除爆炸的可能性。因此，適當的通風設計及爆炸

壓力模擬為必要之減災措施。

研究顯示，壓力衝擊對於粉塵與可燃氣體混合物的反應時間通常小於1秒，這意味任何爆炸或燃燒過程可能發生得極為迅速，給予現場人員反應與疏散時間極其有限，尤其當材料表面積較小時，其反應時間會進一步縮短。這樣的高速反應過程，對於工業設施及人員的安全性造成了巨大的挑戰。研究指出以下三項關鍵差異，特別強調化學反應、壓力衝擊及材料表面積的關聯性。這些差異在實際應用中的含義尤為重要：

- (1) 差異1：額外氧氣需求的預測顯示化學反應的複雜性及其對操作條件的敏感性。即使微小的計算誤差，也可能導致過量氧氣累積，引發失控的燃燒或爆炸。
- (2) 差異2：壓力衝擊下的反應速度強調可燃性物質與壓力波相互作用的風險。在混合物反應的瞬間，可能會產生不可預測的劇烈變化。
- (3) 差異3：表面積與反應時間的關係進一步顯示材料的顆粒尺寸對於反應速度的影響，這提醒我們必須在工業操作中謹慎控制材料的物理特性。

當涉及高風險化學反應時，科學的精確性與實驗數據驗證均有必

要，可為制定更嚴格的安全標準提供依據，減少事故的發生。因此，本篇研究為含能材料與可燃性氣體的反應提供科學基礎，並強調工業製程強化風險管理的必要性。

### 3. 鋰電池氣體釋放及潛在後果的緩解措施(Gas release from lithium-ion batteries and mitigation of potential consequences)

本篇研究鋰電池於運作期間，因過充或過放電可能發生的化學反應及釋放氣體而影響電池性能及安全性，並探討相關保護措施有效性，使電池在使用的過程風險降低。相關措施包含：防止熱失控、防止熱傳播、電池放置位置考量、保護電池儲存區域不受外部火災影響、減少熱失控後果、制定應變計畫（含災害初期與相關消防計畫）；透過材料改進、電池管理系統精進及外部安全設備的使用方式來強化電池設計，以達到預防及控制熱失控目的。

### 4. 防爆外殼中鋰電池熱失控：內部表面與氣體混合物的影響(E Thermal Runaway of Lithium-Ion Batteries in Flameproof Enclosures: Effect of Internal Surface and Gas Mixture)

本篇研究探討鋰電池在防爆外殼中發生熱失控時的行為及風險。鋰電池熱失控的定義為電池內部元件之間的放熱反應，以及可能發生的反應結果如溫度升高、氣體產生、壓力升高、火花的產生。藉由研究不同防爆外殼的內部表面材料與氣體混合物，瞭解對鋰電池熱失控過程的影響，透過分析放熱過程的氣體排放與壓力變化，作為更安全的外殼設計

參考。

#### 5. 氣體自燃程度評估(Assessing the Degree of Pyrophoricity for Gases)

本篇研究由國立高雄科技大學（本署南區專業技術小組）陳政任教授口頭發表，探討半導體製程中常用的自燃氣體矽烷( $\text{SiH}_4$ )、二矽烷( $\text{Si}_2\text{H}_6$ )與單氯矽烷( $\text{SiH}_3\text{Cl}$ )之自燃性及其在空氣中的點火行為，並比較三者的可燃性限度、自燃溫度及蒸氣雲爆炸風險。透過實驗確定前述氣體在不同條件下的臨界流速，據以評估其延遲點火與爆炸的可能性。研究結果顯示，二矽烷自燃性最高，可能因其較弱的 Si-Si 鍵結構，更易於與氧氣反應，容易導致即時點火，較少引發爆炸；矽烷洩漏後常會延遲點火，常引發蒸氣雲爆炸；而單氯矽烷自燃性最低，在高濃度下才可能導致延遲點火。

#### 6. 氨/氫混合物的爆炸和點火行為(Explosion and ignition behavior of $\text{NH}_3/\text{H}_2$ mixtures)

氨氣為全球產量最多之無機物之一，目前各國研究其作為混合燃料，以作為減少對石化能源高度依賴的途徑。氨氣混合燃料主要優勢在於高能量密度(以少量之質量儲存大量的能量)且不含碳原子，可作為高效的碳中和能源載體。此外，據研究指出，氨氣在所有進口至德國電轉化(Power-to-X)的燃料中，最具有成本效益。且因其被廣泛運用，許多產業已具備豐富的安全管理與應變經驗。

研究顯示，氨/空氣混合燃料與典型燃料相比，其反應性較低，需要更



高的點火溫度和更長的燃燒時間，於未來實務上恐不利推廣。添加不含碳的氫氣則有助於提升氨混合燃料的燃燒效率，同時可減少因氨氣燃燒不完全產生氮氧化物而對環境與人體健康影響之風險。這些發現不僅對氨作為乾淨燃料之推動具有積極意義，也為未來相關技術發展奠定堅強之基礎。

#### 7. 有機過氧化物爆炸事故研究(Investigation of an Organic Peroxide Explosion Incident)

本篇研究由國立高雄科技大學（本署南區專業技術小組）蔡曉雲助理教授口頭發表，以臺灣明揚工廠大火作為案例，探討固態有機過氧化物因儲存不當引發的熱失控與粉塵爆炸最終導致工廠爆炸事故。該事故係因工廠倉庫未進行溫度控制，導致所儲存的過氧化物(C40-P)在超過其最大儲存溫度(30°C)後發生熱失控，釋放出具有低自燃溫度的揮發性有機化合物及大量氣體，將過氧化物粉塵分散於空氣中，最終在自燃氣體的自燃下引發粉塵爆炸。值得注意的是，儘管過去研究主要強調有機过氧化物的熱失控危險而未進一步探討引發粉塵爆炸的風險，本次事故顯示，在不當儲存條件下，固態有機过氧化物的粉塵爆炸的風險也不容忽視。

#### 8. 透過真實規模爆炸測試探討20英尺 ISO 集裝箱門與內部行為(Study of the behavior of walls and doors of 20 ft ISO containers through real-scale explosion tests)

本篇研究探討以氫氣與空氣混合物透過真實規模爆炸測試探討20英尺 ISO 集裝箱內之氫氣濃度、通風面積、通風裝置類型及內部擁擠程度對爆燃之影響。在進行了14次通過集裝箱門通風及20次通過屋頂開口通風的試驗，

結果顯示，集裝箱內部擁擠程度對爆燃有顯著影響，特別是對高反應性的氫氣混合物，並突顯了通風設備設計與集裝箱門在風險評估中的重要性。

這些試驗數據有助於驗證工程模型及計算流體力學(CFD)工具，提升對通風氫爆燃的物理與化學現象的理解，以及對改進國際爆炸防護標準的潛在貢獻。

#### 9. 塑膠材質管線對氫氧混合物抗爆強度研究(Study on strength of plastic piping against detonation of hydrogen/oxygen mixture)

本篇研究係評估聚乙烯(PE)和聚氯乙烯(PVC)塑料管線在不同濃度氫氧混合物爆炸條件下的強度與損壞模式。研究結果顯示，聚乙烯材質管線延展性較好，在高氫氣濃度下出現裂縫及破裂；聚氯乙烯材質在低濃度下表現較佳，然而在高濃度下發生更嚴重的管線脆性破裂。反射波的影響導致封閉閥門相鄰的管道破裂，顯示該部分是影響管道強度的關鍵。研究為塑膠管線設計與安全評估提供依據，建議使用延展性較高的材料並加強管線結構以提升安全性。

#### 10. 工業聚合物生產製程混和物爆炸(Hybrid mixture explosions in an industrial polymer production process)

本篇研究主要探討工業聚合物生產過程中由可燃氣體與可燃粉塵混合物引發的爆炸機制，並研究不同混合物濃度、點火源位置及環境條件對爆炸行為的影響。研究結果顯示，混合爆炸的火焰傳播速度與峰值壓力顯著高於單一氣體或粉塵爆炸，尤其是在氫氣濃度達到20%時爆炸強度最大。火

源靠近粉塵聚集區域及高溫環境(>50°C)均會加劇爆炸強度，引發材料破壞。針對上述情況提出的安全建議包括於廠場安裝爆炸抑制和排氣系統、定期監測氣體與粉塵濃度、改進生產製程、選用耐高壓材料及制定詳細的緊急應變計畫，以降低爆炸風險。

11. **重油脫硫過程中氫氣爆炸和火災的事故調查(Incident Investigation of Hydrogen Explosion and Fire in a Residue Desulfurization Process)(國立高雄科技大學-口頭發表)**

本篇研究由國立高雄科技大學（本署南區專業技術小組）楊惠甯經理口頭發表，以臺灣一家煉油廠在重油脫硫(Residue desulfurization, RDS)過程中發生大規模爆炸與火災為案例進行事故災因之分析。重油脫硫是一種高壓催化加氫處理過程，用於生產低硫與高價值的燃料油，製程中會產生硫化氫、氨及反應產物硫氨等物質而有腐蝕問題。本事故起因為設備內部硫化物引發的腐蝕及焊接缺陷，特別是雙相不銹鋼2205在焊接過程中出現的肥粒鐵與沃斯田鐵比例失衡，導致應力開裂及大規模氫氣洩漏，引發爆炸與火災。研究亦發現冷卻器集管箱的焊接不良及裂縫是事故的直接原因。

針對重油脫硫過程事故預防，建議強化雙相不銹鋼焊接和檢驗標準、對現有的冷卻器進行定期檢查、完善防火系統、於事故初期透過電腦化控制系統迅速檢測溫度與壓力及早採取隔離措施，以防止氫氣洩漏及自燃。

(二) 參訪義大利 Cristanini 公司

## 1. Cristanini 公司介紹

Cristanini 公司成立於 1972 年，位處義大利北部威尼托區(Veneto)維羅納(Verona)，在高壓技術領域擁有豐富的國際經驗，產品及服務範圍涵蓋化學性、生物性、放射性、核防護(Cheical Biological Radiation Nuclear, CBRN)、高壓清洗設備、緊急應變及救援設備領域，提供國防、民防、淨化、化生核解毒、衛生、特殊工業及城市環境應用。

## 2. 參訪內容

本次參訪 Cristanini 公司目的係為瞭解國際市場救災設備供需與最新技術研究發展趨勢，評估引進國內以作為未來毒化災災害防救相關設施設置、設備採購或訓練課程參考。

參訪當（113年6月15）日，由該公司負責人Adolfo Cristanini引導本團隊進行廠區整體介紹，區域經理 Dott Gnaccarini Claudio 及工程師 Nicoletta Codiferro 協助說明救災設備之研發技術面。當日所見滅火設備、除污產品、車輛說明如下：

- (1) 小型攜帶式水霧滅火設備(Marine Small Portable Fire Stop, Marine SPFS)：滅火時間及所需水量相較於傳統消防設備須以大量清水或泡沫來得更少且更迅速，優點為體積小、電池可更換，可應用於海上船舶發生火災初期快速滅火（圖1）。



圖 1 小型攜帶式水霧滅火設備示意圖

- (2) 攜帶式滅火設備(WJ.FE 300)：為該公司專利噴槍，具混合磨料與水的特殊系統，可快速鑽孔或切割木材、鋼材、塑膠、玻璃、混凝土等各種材料。鑽孔後，從特製噴嘴噴出高壓(350 bar)水霧，使產生的水霧瞬間變成蒸汽，在飽和情況下增加體積約1,700倍，減少氧氣並迅速降低溫度，達到快速滅火目的（圖2）。



圖 2 攜帶式滅火設備示意圖

- (3) 小型滅火設備(FIRE STOP 200/30)：針對市區交通擁擠巷道設計之滅火設備，搭配該公司自行研發之滅火劑，可大幅減少消防用水量；因體積小，可裝載於機動車輛或船舶等交通工具，以快速移動至現場，縮短火災初期應對時間，避免事故擴大，維護公共安全（圖3）。



圖 3 小型滅火設備示意圖

- (4) 除污噴劑組(SX 34 COMPLETE KIT)：該公司專利研發用於面板、光學設備、駕駛艙、個人電子設備、精密儀器之除污噴劑。噴灑

於受污染儀器或設備，靜置後再以吸附或擦拭等方式收集可能的有害物質，以達到除污目的，避免人為操作使用導致二次污染（圖4）。



圖 4 除污噴劑組示意圖

- (5) 環衛清洗車輛(MINI SANIMATIC)：裝載機械臂，可展開抓取人行道上之垃圾箱進入車廂內部密閉空間，以高壓熱水與清潔劑自動清潔垃圾箱，使用後之污水於車廂內部收集循環再利用，避免污染環境（圖5）。



圖 5 環衛清洗車輛(MINI SANIMATIC)示意圖

### 三、 心得及建議

#### (一) 心得

1. **會議觀察與我國貢獻：**本次研討會主要聚集各國工業爆炸與製程安全領域學者，其發表內容多以實驗室數據分析與模擬運算為主，較少研析實際事故；本署南區專業技術小組結合臺灣近期的環境事故案例進行危害風險分析，使與會者印象深刻，並在會後持續與國際專家交流。此外，本署南區專業技術小組亦為臺灣爭取到2026年第16屆工業爆炸危害預防與削減國際研討會之主辦權，期間不遺餘力宣傳與推廣，積極提升臺灣國際能見度。
2. **結合學術與文化交流：**本次除參與研討會瞭解不同國家在環境保護、化學工程、工業爆炸、災害防救等領域經驗，亦配合參與主辦方於研討會結束後為與會者安排之多元化交流活動，如沙灘派對、披薩晚餐、城市導覽等，介紹義大利當地因應火山災害與相關避難設施建設，各國均踴躍參與並互相交流，成功將學術交流與當地風土人情結合，擴大城市行銷效益。類此召開國際會議交流擴大城市行銷與效益作法，並汲取不同國家在環境保護、化學工程、工業爆炸、災害防救等領域的經驗，對於未來我國環境事故的防救有很大



的助益。

3. **火災預防與控制：**池火是石化工業儲槽的潛在風險之一，運用科技模擬技術能有效預測火勢發展，可提供工業區防災管理參考，強化場所的災害預防和應變能力。鋰電池熱失控可能導致火災風險增加，國內外多有案例，透過防爆設計與正確使用宣導，可在火災初期減災，降低爆炸及有毒氣體如氟化氫的危害。安裝爆炸抑制及通風排氣系統、定期監測氫氣與粉塵濃度、加強製程與管線材料選擇、強化工廠內部的應變計畫，可有效降低工業製程中氫氣與粉塵混合引發的爆炸風險。
4. **爆炸預防：**透過模擬技術預測爆炸風險、設計安全的通風排氣系統，能減少爆炸事故的影響。定期訓練與演練，可提升防災系統的穩定性與安全性。歐洲各國發展氫氣能源，氫氣的儲存與運輸安全至關重要，通過改進通風設備並納入國際標準，可顯著提高工業氫氣應用的安全性。聚乙烯材料的延展性使其在抗爆性能上具優勢，選用合適材料可以提高工業管線安全性，降低爆炸風險。
5. **能源管理與綠能應用安全：**全球面臨淨零碳排挑戰，氫氣與氨氣成為各國在替代能源減碳研究上的重點工具，而氫氣的添加雖可顯著

提升氨氣混合燃料之燃燒效率，惟可能產生爆炸風險，因此在發展多元綠能過程中亦須防範其潛在災害對環境與人體健康的影響。

6. **技術發展與需求對接**：與外國救災設備廠商交流中，瞭解國際防救災設備市場趨向便攜性與機動性發展，故國際貿易在以適用該國環境條件之需求進行客製化研發，以小型攜帶式滅火設備裝載於機動車輛迅速抵達火災現場為例，在地狹人稠的情況下顯得尤為重要，小型設備靈活便捷，在交通阻塞或災害現場移動困難環境仍可發揮其效用，縮短初期應對時間，避免事故擴大，使災害防救推動工作更能因地制宜。

## (二) 建議

1. **產業安全與永續發展**：能源材料、氧化性、自燃性氣體等化學品廣泛應用於半導體業、石化產業、替代性能源及綠能產業，熱失控及爆炸風險增加，故企業在自主防災的落實尤為重要。本署依毒管法推動專業應變人員訓練制度，培養業界自主防救災能力；以科學化風險分級管理推動臨場輔導分級制度，與跨部會合作全面檢視企業自主管理落實程度。建議除了作用法以外，可透過與業界溝通場合導入安全設計、材料選擇及相關技術觀念，並結合實地培訓與演

練，提升業界應變能量。透過行政指導、防救災設備技術提升，可減少事故擴大風險，並有效降低社會成本。



2. **持續強化事故案例分析與專業訓練：**本次所參與之國際研討會議題聚焦於爆炸科研領域，建議未來輪我國主辦時可適度增加相關案例分享，使工業、毒化災危害預防經驗交流更為全面。此外建議蒐集與整理國際間常見事故案例如鋰電池、化災等並更新納入技術類教育學程以作為借鑑，或可於會議交流活動中分享，例如目前定常性辦理之全國環境事故案例研討會，亦可邀請與我國理念相近國家來臺交流分享，均有助於整體災害防救體系能量強化。
3. **教育結合生活與預防措施：**科技進步為生活帶來便利性，其中3C 電子產品中常使用的鋰電池可能因為含水量過高、過度充電或內外部短路引發熱失控而爆炸，鑑於國內外均有類此案例，除了研發更安全的設計以外，更重要的應從生活上避免不安全使用。透過化學品安全使用宣導教育，培養民眾基礎危害辨識能力，預防危害發生。
4. **強化設備除污流程標準化：**本署所採購的偵檢機器人可替代人力進行災害現場偵蒐，惟儀器設備在偵檢過程中易遭受污染，故需進行除污並蒐集有害物質避免引發二次污染。建議針對類此高科技設備

之除污應有標準除污程序，使操作簡便及有效避免二次污染，並因應現場實際狀況所使用之不同偵檢儀器其表面材質與污染源而有對應選擇之除污劑與操作流程細節。

5. **技術結合文化深化交流：**定期參與國際性會議活動，瞭解各國在環保、化工、工業發展、防救災等跨領域發展趨勢與相關經驗，在交流互動中拓展國際視野；此次所體驗到的國際交流作法，係結合當地人文與美食等特色，以活潑生動的方式深化跨國與跨域間交流。建議未來辦理類此國際交流會議或活動時可納入參考，適度結合在地城市風土民情，以多元化推展業務及軟實力深耕國際關係，以提升臺灣的國際能見度。







## 四、 附錄

### (一) ISHPMIE 2024網站公開研討會議程表







|                        |               |                                                                                                                                              |                                       |                     |
|------------------------|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------|
| MONDAY   JUNE 10, 2024 | 09.15 - 10.15 | Registrations                                                                                                                                |                                       |                     |
|                        | 10.15 - 10.35 | <b>AULA MAGNA</b><br><i>Opening</i>                                                                                                          |                                       |                     |
|                        | 10.35 - 11.20 | <b>AULA MAGNA</b><br><i>Plenary Lecture</i><br><b>Why Do Dust Explosions Happen?</b><br>Paul Amyotte, Dalhousie University, Canada           |                                       |                     |
|                        | 11.20 - 12.00 |  <i>Coffee break</i>                                        |                                       |                     |
|                        |               | <b>AULA MAGNA</b>                                                                                                                            | <b>ROOM A</b>                         | <b>ROOM B</b>       |
|                        | 12.00 - 13.00 | Risk Management                                                                                                                              | AI & databasing applied to explosions |                     |
|                        | 13.00 - 14.40 |  <i>Lunch</i>                                               |                                       |                     |
|                        | 14.40 - 16.00 | Battery Safety                                                                                                                               | Flammability & inerting               |                     |
|                        | 16.00 - 16.30 |  <i>Coffee break</i>                                        |                                       |                     |
|                        | 16.30 - 17.30 | Ignition & Extinction                                                                                                                        | Release & Dispersion                  | Explosion Modelling |
|                        | 17.30 - 19.00 | <i>Welcome reception</i>                                                                                                                     |                                       |                     |
|                        | 20.30 - 23.00 |  <i>Meeting of the International Organizing Committee</i> |                                       |                     |

|                         |               |                                                                                                                                                                                                                              |                          |                  |
|-------------------------|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------|
| TUESDAY   JUNE 11, 2024 | 09.00 - 09.45 | <b>AULA MAGNA</b><br><i>Plenary Lecture</i><br><b>Safety of Batteries</b><br>Wei Gao, Dalian, University of Technology, China                                                                                                |                          |                  |
|                         | 9.45 - 10.10  | <b>AULA MAGNA</b><br><i>In memoriam of for Professor Piotr Wolański</i><br>Warsaw University of Technology, Poland                                                                                                           |                          |                  |
|                         |               | <b>AULA MAGNA</b>                                                                                                                                                                                                            | <b>ROOM A</b>            | <b>ROOM B</b>    |
|                         | 10.10 - 11.10 | Flammability & Inerting                                                                                                                                                                                                      | Hydrogen and gas safety  | Detonation & DDT |
|                         | 11.10 - 11.30 |  <i>Coffee break</i>                                                                                                                      |                          |                  |
|                         | 11.30 - 12.30 | Explosion venting & mitigation                                                                                                                                                                                               | Dust & hybrid explosions |                  |
|                         | 13.00 - 14.30 |  <i>Lunch</i>                                                                                                                             |                          |                  |
|                         | 14.30 - 15.50 | Hydrogen and gas safety                                                                                                                                                                                                      | Flame Propagation        |                  |
|                         | 15.30 - 16.00 |  <i>Coffee break &amp; Work-in-progress posters</i>  |                          |                  |
|                         | 16.00 - 17.00 | Explosion Mitigation                                                                                                                                                                                                         | Dust & hybrid explosions |                  |
|                         | 17.00 - 18.00 | <b>AULA MAGNA</b><br><i>Round Table Chaired by Industrial Explosion Young Researchers Committee</i>                                                                                                                          |                          |                  |
|                         | 19.30 - 23.30 |  <i>Beach party</i>                                                                                                                       |                          |                  |





**WEDNESDAY | JUNE 12, 2024**

|               |                                                                                                                                                                                                                                                                          |                          |                         |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 09.00 - 09.45 | <p><b>AULA MAGNA</b><br/> <b>Plenary Lecture</b><br/>                 Understanding the Limitations of Using <math>K_{St}</math> to Define the Reactivity of Large-Scale Dust Explosion Tests<br/>                 C. Regis Bauwens, <i>FM Global, United States</i></p> |                          |                         |
|               | <b>AULA MAGNA</b>                                                                                                                                                                                                                                                        | <b>ROOM A</b>            | <b>ROOM B</b>           |
| 09.50 - 11.10 | Runaway Reactions                                                                                                                                                                                                                                                        | Hydrogen and gas safety  |                         |
| 11.10 - 11.50 | <p> <i>Coffee break &amp; Work-in-progress posters</i> </p>                                          |                          |                         |
| 11.50 - 12.50 | Detonation & DDT                                                                                                                                                                                                                                                         | Dust & hybrid explosions | Hydrogen and gas safety |
| 13.00 - 14.30 | <p><i>Lunch</i></p>                                                                                                                                                                                                                                                      |                          |                         |
| 14.30 - 15.50 | Dust & hybrid explosions                                                                                                                                                                                                                                                 | Hydrogen and gas safety  | Explosion Prevention    |
| 15.50 - 16.20 | <p> <i>Coffee break &amp; Work-in-progress posters</i> </p>                                          |                          |                         |
| 16.30 - 17.30 | <p><i>Free time</i></p>                                                                                                                                                                                                                                                  |                          |                         |
| 17.30 - 18.30 | <p> <i>Guided tour to "Galleria Borbonica"</i></p>                                                                                                                                      |                          |                         |
| 19.00 - 21.00 | <p> <i>Pizza dinner</i></p>                                                                                                                                                             |                          |                         |

**THURSDAY | JUNE 13, 2024**

|               |                                                                                                                                                                                                                                     |                          |                                   |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| 09.00 - 09.45 | <p><b>AULA MAGNA</b><br/> <b>Plenary Lecture</b><br/>                 Advances in Hydrogen Safety Technologies<br/>                 Vladimir Molkov, <i>Ulster University, Northern Ireland</i></p>                                 |                          |                                   |
|               | <b>AULA MAGNA</b>                                                                                                                                                                                                                   | <b>ROOM A</b>            | <b>ROOM B</b>                     |
| 09.50 - 11.10 | Flammability, Inerting and Prevention                                                                                                                                                                                               | Dust & Hybrid Explosions |                                   |
| 11.10 - 11.50 | <p> <i>Coffee break &amp; Work-in-progress posters</i> </p> |                          |                                   |
| 11.50 - 12.50 | Dust & Hybrid Explosions                                                                                                                                                                                                            | Dust & Hybrid Explosions | Case hystories                    |
| 13.00 - 14.30 | <p> <i>Lunch</i></p>                                                                                                                             |                          |                                   |
| 14.30 - 15.50 | Explosion Modelling                                                                                                                                                                                                                 | Hydrogen and gas safety  | Dust, hybrid and spray explosions |
| 15.30 - 16.20 | <p> <i>Coffee break &amp; Work-in-progress posters</i> </p> |                          |                                   |
| 16.20 - 17.20 | Dust & hybrid explosions                                                                                                                                                                                                            | Hydrogen and gas safety  | Detonation & DDT                  |
| 19.00 - 23.00 | <p> <i>Social Dinner</i></p>                                                                                                                     |                          |                                   |

FRIDAY | JUNE 14, 2024

|               |                                                                                                                                                                                                                        |                |  |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|--|
| 09.00 - 09.45 | <p style="text-align: center;"><b>AULA MAGNA</b><br/> <b>Plenary Lecture</b><br/>         Teaching process safety in the twenty-first century<br/>         Trygve Skjold, <i>University of Bergen, Norway</i></p>      |                |  |
|               | AULA MAGNA                                                                                                                                                                                                             | ROOM A         |  |
| 09.50 - 10.50 | Hydrogen and gas safety                                                                                                                                                                                                | Battery Safety |  |
| 10.50 - 11.20 |  <i>Coffee break</i>                                                                                                                  |                |  |
| 11.20 - 12.00 |  <i>Work-in-progress posters &amp; Discussion</i>  |                |  |
| 13.00 - 14.30 |  <i>Lunch</i>                                                                                                                         |                |  |
| 14.30 - 15.00 | <i>Closing</i>                                                                                                                                                                                                         |                |  |

(二) 研討會參與情形照片



研討會報到情形



研討會參與人員合照



研討會分組討論室(主會堂)



研討會分組討論室(A 廳)



研討會分組討論室(B 廳)



研討會廠商展覽





研討會海報展示



陳政任教授口頭發表



蔡曉雲助理教授口頭發表



楊惠甯經理口頭發表



研討會晚宴交流情形



研討會晚宴交流情形

(三) 本團隊參訪Cristanini 公司情形照片

|                                                                                     |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|    |    |
| <p>本團隊合照</p>                                                                        | <p>廠商簡報介紹產品設備</p>                                                                    |
|   |   |
| <p>廠商負責人介紹除污車功能</p>                                                                 | <p>工廠除污設備零件組裝區域</p>                                                                  |
|  |  |
| <p>廠商展示除污設備防水性能</p>                                                                 | <p>廠商穿戴消防裝備示範攜帶式滅火設備(WJ.FE 300)使用方式</p>                                              |



移動式生化實驗室內部設備



移動式生化實驗室外部



小型滅火機車(MINI FIRE STOP MOTORCYCLE)車體展示



廠商穿戴消防裝備示範小型滅火機車(MINI FIRE STOP MOTORCYCLE)使用方式



廠商示範車廂除污消毒系統使用方式



參訪小型環衛清洗車輛(MINI SANIMATIC) 運轉情形



小型攜帶式水霧滅火設備(Marine Small Portable Fire Stop, Marine SPFS)



工作人員穿戴消防裝備示範小型攜帶式水霧滅火設備使用方式



參訪當日團隊與廠商交換之名片



參訪當日團隊與廠商交換之名片



參訪當日團隊與廠商交換之名片

(四) 本署南區技術小組口頭發表論文簡報

# Incident Investigation of Hydrogen Explosion and Fire in a Residue Desulfurization Process



Ting-Chia Kao<sup>a</sup>, Yuan-Chen Lin<sup>a</sup>, Hui-Ning Yang<sup>a</sup>,  
Hsiao-Yun Tsai<sup>a,b</sup> & Jenq-Renn Chen<sup>a,b</sup>



<sup>a</sup> Southern Center of Emergency Response of Toxic Chemical Substance (SERT), National Kaohsiung University of Science and Technology (NKUST), Kaohsiung, Taiwan



<sup>b</sup> Department of Safety, Health and Environmental Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology (NKUST), Kaohsiung, Taiwan



## Contents

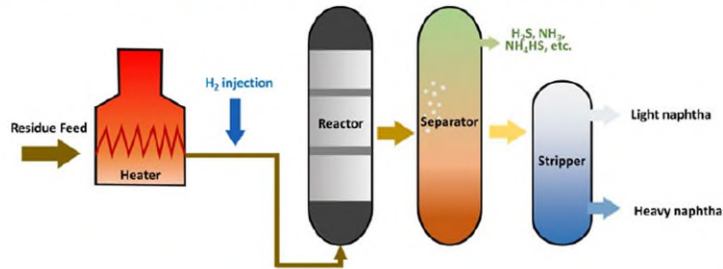
- 01 Introduction
- 02 On-scene incident investigation
- 03 Consequence analysis
- 04 Cause of leak
- 05 Conclusions & Recommendations



## Introduction

### Residue desulfurization (RDS) process

- High-pressure catalytic hydrotreating process.
- Producing low sulfur and high-value fuel oil.
- These technologies experienced similar corrosion issues associated with hydrogen sulfide ( $H_2S$ ) and ammonia ( $NH_3$ ), and their reaction product ammonium bisulfide ( $NH_4HS$ ).
- Corrosion led to equipment rupture, severe fires, and explosions (API, 2002).
- Extensive studies have been conducted on selecting corrosion-resistant alloys.



3

## On-scene incident investigation (1/7)

### Incident information

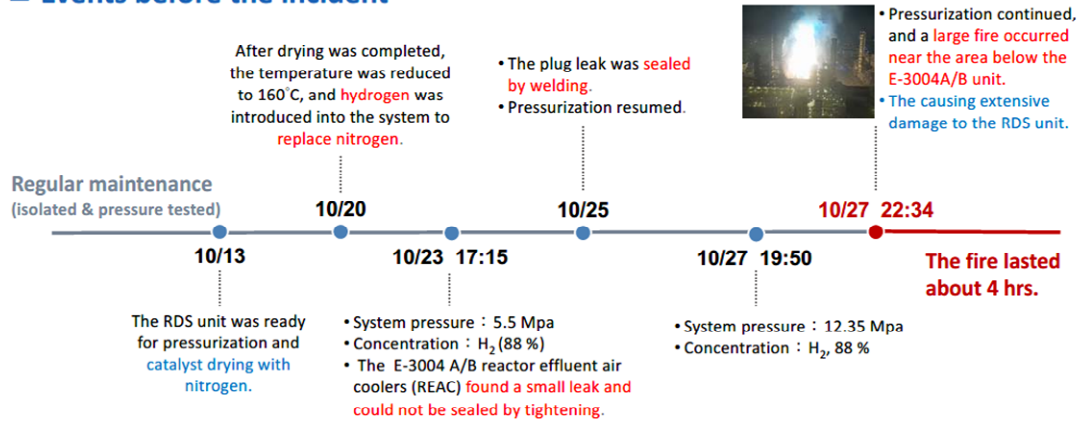
- **Date & time** : 2022.10.27 PM 10:34
- **Location** : A refinery in Kaohsiung, Taiwan.
- **Incident** : Large explosion and fire during pre-startup pressurization of the RDS reactors and downstream coolers with hydrogen.
- **The damage** : Significant damage to the downstream coolers and parts of the RDS reactors.



4

## On-scene incident investigation (2/7)

### Events before the incident



5

## On-scene incident investigation (3/7)

### Incident Investigation

- **Investigation team:** NKUST SERT team.
- **Focus:** Cause of the incident and consequence analysis.
- **Analysis tools:**
  1. Actual damage assessment.
  2. Security videos.
  3. Process DCS data.
  4. Leak and dispersion modeling.



#### Actual damage assessment

- The damage to the RDS unit.
- On-scene photos.



#### Security videos

- Video cameras in the plant.
- In another plant elevated camera.



#### Process DCS data

- Pressure and temperature data were recorded in DCS system.



#### Leak and dispersion modeling

- Release modelling.
- Fire and explosion modelling

6

## On-scene incident investigation (4/8)

### Actual damage assessment



Photo of damage on RDS reactors

#### • Damage to RDS Reactors:

1. The damage to the RDS reactors, with signs of flash fire extending as far as R-3002.
2. The damage to REAC E-3004A was more extensive.

#### • Comparison of Damage Between E-3004A and E-3004B:

1. The tube bundle of E-3004A was bent, and its forced draft fan unit was detached and destroyed.
2. E-3004B and its fan unit remained intact.
3. There was extensive damage to the steel structure and pipeline beneath the REAC.



Photo of damage on E-3004A/B REAC and nearby steel structure and pipeline

7

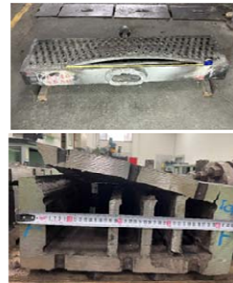
## On-scene incident investigation (5/7)

### Actual damage assessment



#### ■ Characteristics of REAC:

- A special type of heat exchanger that uses forced airflow to cool the process fluid on the tube side.
- The tubes are arranged and fitted into rectangular header boxes.
- Each tube has fins on the outer surface to maximize heat transfer.
- Each E-3004 unit has a total of 138 tubes, with a tube length of 9.136 m and an internal diameter of 22.1 mm.



#### ■ Internal Inspection of E-3004A:

- Both header boxes of E-3004A were cut out for internal inspection.
- There were four stiffening plates inside the rectangular header box.
- One stiffening plate was completely detached from the box, while the remaining three plates had at least one side weld cracked.



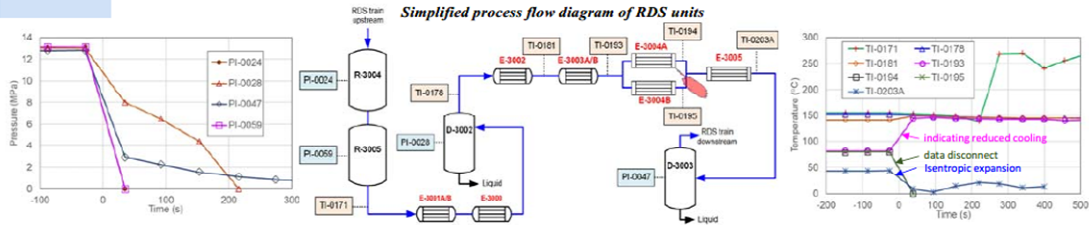
#### ■ Removal and Findings of E-3004A/B:

- After removal from the site, a large crack was found on the outlet side of the rectangular header box of E-3004A.
- The crack measured around 1.2 m in length, with a maximum opening width of about 6 cm.
- Several tubes were ruptured, but the number of ruptured tubes was limited, making it unlikely that tube rupture was the cause of the leak.

8



## On-scene incident investigation (6/7) Process DCS data



### Pressure Data Analysis:

- PI-0024/R-3004 and PI-0059/R-3005 dropped to zero after the incident, indicating broken data connections.
- The pressure drop rate is higher at PI-0028/D-3002 than at PI-0047/D-3003, suggesting the leak is closer to D-3003.

### Leak Location Inference

- The leak occurred downstream of TI-0193/E-3003A/B, possibly near TI-0194/TI-0195 for E-3004A/B.
- This is consistent with the crack in the E-3004A outlet header box, located between TI-0193 and TI-0194.

### Temperature Data Analysis :

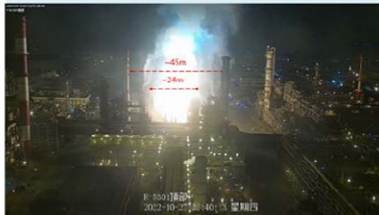
- TI-0193 increased, indicating reduced cooling.
- TI-0194 and TI-0195 dropped to zero, indicating broken data connections.
- TI-0203A dropped close to ambient temperature, indicating rapid cooling near the crack.

9

## On-scene incident investigation (7/7) Security videos

### 1 Video recording near RDS unit

- Based on the distance between the two distillation columns bracketing the fireball, the fireball size at 22:40:13 is estimated to be about 24 meters.



### 2 In another plant elevated camera

- The fireball size in the remote video at the same time should be the same, with the largest fireball diameter estimated to be approximately 85 meters.



Light damage to the inlet pipe to R-3002, about 41 m from E-3004, is roughly consistent with the observed fireball radius.

10

## Consequence analysis (1/5)

### Software:

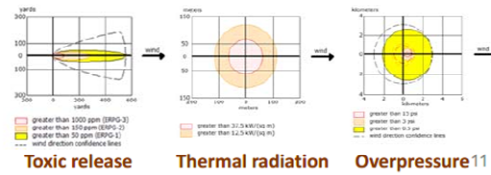
- **ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres).**
- It is a hazard modeling program developed by the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).
- It can simulate toxic and flammable gas clouds, BLEVEs, jet fires, pool fires, and vapor cloud explosions for single-component chemicals.

### Simplify the simulation conditions:

- The RDS unit is simplified into a single vessel, representing the combined volume of all vessels from R-3000 to D-3002.
- Volume of connecting piping, internal structure of vessels/reactors, and catalyst are disregarded.
- The simplified vessel is assumed to have pre-incident pressure and temperature.



<https://www.epa.gov/cameo/aloha-software>

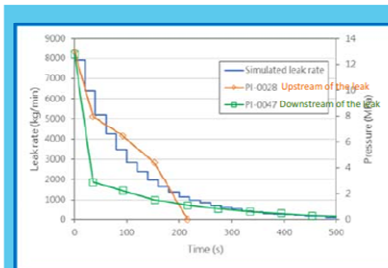


## Consequence analysis (2/5)

### Release modeling & Simulation condition setting

- **Equivalent volume:** 2,053.9 m<sup>3</sup>
- **Pressure:** 12.97 MPa
- **Temperature:** 152.11 °C
- **Wind speed:** 2 m/s
- **Env. temperature:** 30 °C
- **Chemical:** H<sub>2</sub> (100 %)
- **Hole size:** 0.036 m<sup>2</sup> (area of the measured triangular crack)

| Vessels      | ID (m) | TT (m) | V (m <sup>3</sup> ) |
|--------------|--------|--------|---------------------|
| R-3000       | 5.30   | 20.80  | 536.6               |
| R-3001       | 4.57   | 7.67   | 175.9               |
| R-3002       | 4.57   | 12.25  | 250.8               |
| R-3003       | 4.57   | 18.05  | 345.9               |
| R-3004       | 4.57   | 18.05  | 345.9               |
| R-3005       | 4.57   | 18.05  | 345.9               |
| D-3002       | 2.90   | 6.10   | 53.0                |
| <b>Total</b> |        |        | <b>2,053.9</b>      |

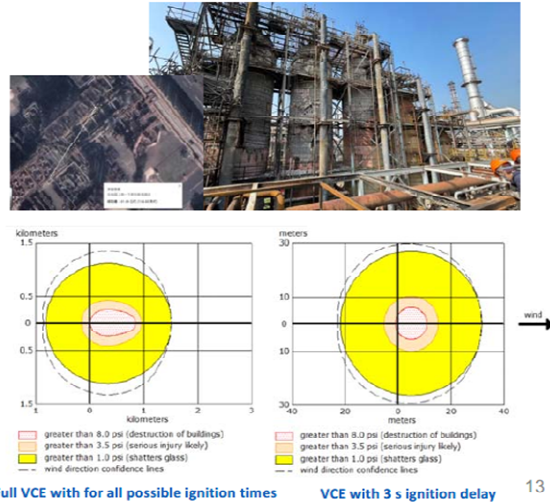


- The calculated leak rate matches well with upstream pressure data at PI-0028/D-3002, while downstream PI-0047/D-3003 shows lower pressure.
- Peak leak rate is estimated at 8,670 kg/min.

## Consequence analysis (3/5)

### Explosion modeling

- The current fire and explosion modeling aims to reproduce the results to uncover the precise release consequences.
- The release resulted in a flash fire rather than an explosion and overpressure.
- Flames affected areas up to 41 meters from the leak.
- For pressurized release, ALOHA can model gas clouds, jet fires, and vapor cloud explosions (VCE).
- The difference lies in the ignition time. VCE is possible only with an ignition delay of 3 seconds or more.
- In a full VCE scenario, the overpressure of 8 psi capable of destroying buildings extends over 800 m, which is clearly inconsistent with the actual damage.
- With a 3-second delayed ignition, the 8 psi overpressure is limited to a short range of 11 meters. This is a more plausible scenario as the structural damage was limited to the area near E-3004A.

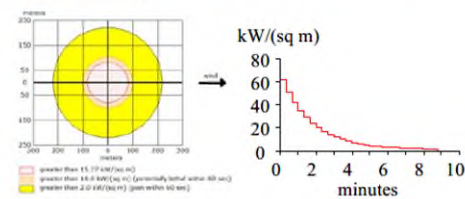


Full VCE with for all possible ignition times      VCE with 3 s ignition delay      13

## Consequence analysis (4/5)

### Jet fire modeling

- 15.77 kW/m<sup>2</sup> is the thermal radiation level considered safe for structure when sizing flare stack height (API, 1997).
- The thermal radiation range of 15.77 kW/m<sup>2</sup> extends up to 82 m.
- At 41 meters, the thermal radiation peaks at 61.3 kW/m<sup>2</sup> but decays rapidly.
- The effect of thermal radiation depends not only on the radiation level but also on the radiation duration.
- The observed limited range of thermal radiation damage and the absence of overpressure damage suggest that the leak resulted in spontaneous ignition and jet fire.
- The current RDS pressure (12.35 Mpa) was well above the critical value, making spontaneous ignition likely, resulting in a jet fire rather than a vapor cloud explosion (VCE).

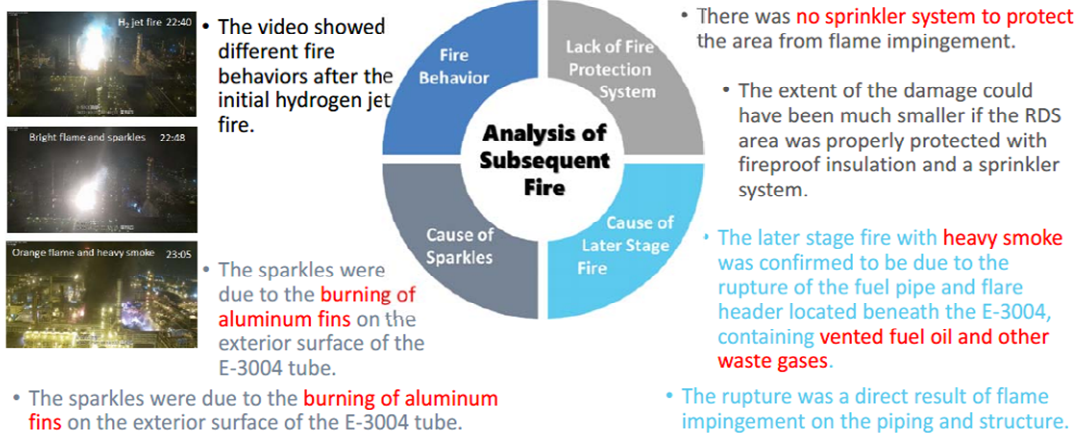


### Spontaneous Ignition

- Pressurized releases of hydrogen into air can lead to spontaneous ignition (Dryer et al., 2007; Golub et al., 2007).
- Spontaneous ignition is due to shock heating causing autoignition of hydrogen-air mixtures and the presence of a critical volume capable of flame propagation.
- Spontaneous ignition requires the right combination of downstream geometry and sufficiently high failure pressure. Dryer et al. (2007) reported a critical value of 2.27 MPa for spontaneous ignition.

14

## Consequence analysis (5/5)



15

## Cause of leak

- Corrosion** has been a major issue in RDS units due to the presence of sulfur.
- Lower grade steel performs poorly in this environment.**

### Duplex stainless steel 2205

- It's proposed for better corrosion resistance. (50% ferrite & 50% austenite)
- Special welding requirements and inspections are needed (API, 2015).
- Proper phase balance of ferrite and austenite in weld deposits and heat-affected zones **must be verified by ferrite measurements on weld procedure qualification samples.**



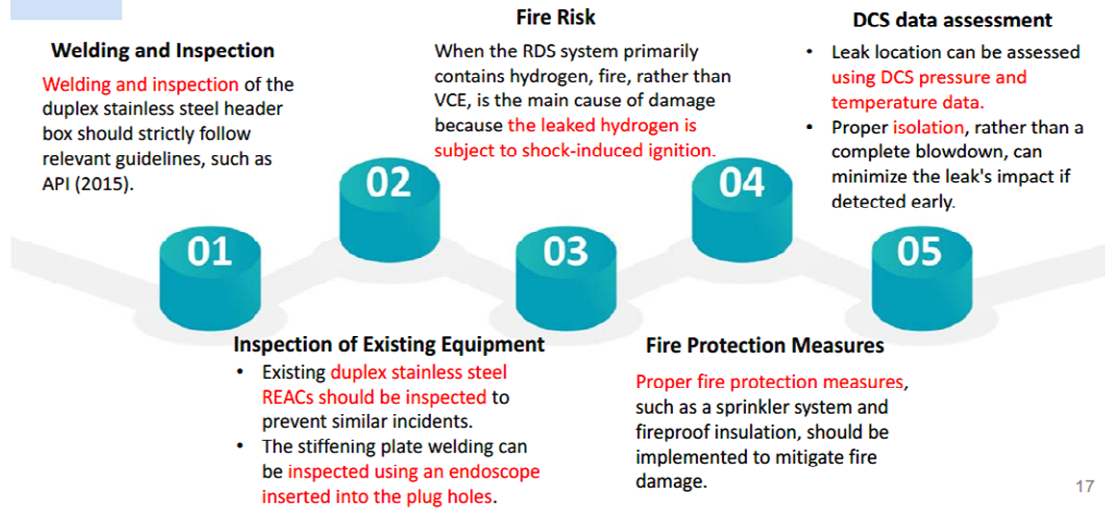
- The ruptured header box revealed poor welding of stiffener plates with significant defects, including imbalanced ferrite.
- Sulfur was found on the cracked welding surface.
- The failure was caused by sulfide stress cracking (SSC).
- Duplex stainless steel REACs have been linked to many fires and explosions in RDS processes worldwide (Lin and Risse, 2013; API, 2002; He et al., 2016; Volfson, 2018).

### Recommendations

- Replace duplex stainless steel with **Alloy 825** or **perform strict inspections and analyses of the welding.**
- Conduct visual inspections** of all existing duplex REACs through tube plug holes to identify major welding defects and premature cracking of the stiffener plates inside the header box.

16

## Conclusions & Recommendations



17

# Thanks for your listening!

## Q & A

