



AI 技術於油氣管線與輸電線路 災防應變之應用與國際案例分析

綠能所環境與安全技術組化災應變研究室

彭子桓 thpeng@itri.org.tw 049-2345607

2025

我國災害防救管理體系



歷史經驗教訓



影像來源：攝影 / 劉學聖、程宜華

歷史經驗教訓



影像來源：攝影 / 劉學聖、程宜華

管線事故緊急應變概述

管線運輸物質特性

- 石化業產物
- 具易燃、易爆、健康危害及易導致環境污染
- 屬高壓氣體、常壓液體及兩相共存型態
- 多半以『管束』形式共存

災害可能發生地點

- 多半為人口稠密區
- 可能受到地下結構物影響

地下管線 災害特性

危險因子

- 可能因地區工程不慎，**第三方任意挖掘**造成嚴重意外事故
- 管線埋設於地下若**未實施定期檢測與維護保養**，可能造成腐蝕進而導致洩漏
- 地下工業管線內容若**未落實變更管理及安全評估時**，若發生洩漏，將可能導致情勢誤判，造成搶救人員各大風險，並肇至更大傷亡



影像來源：三立、東森新聞

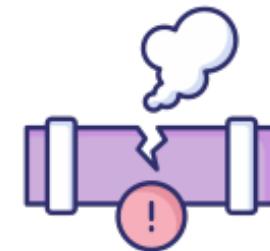
管線事故緊急應變概述

對於大多數的管線事故，
能實際停止管線洩漏的應變方案有限

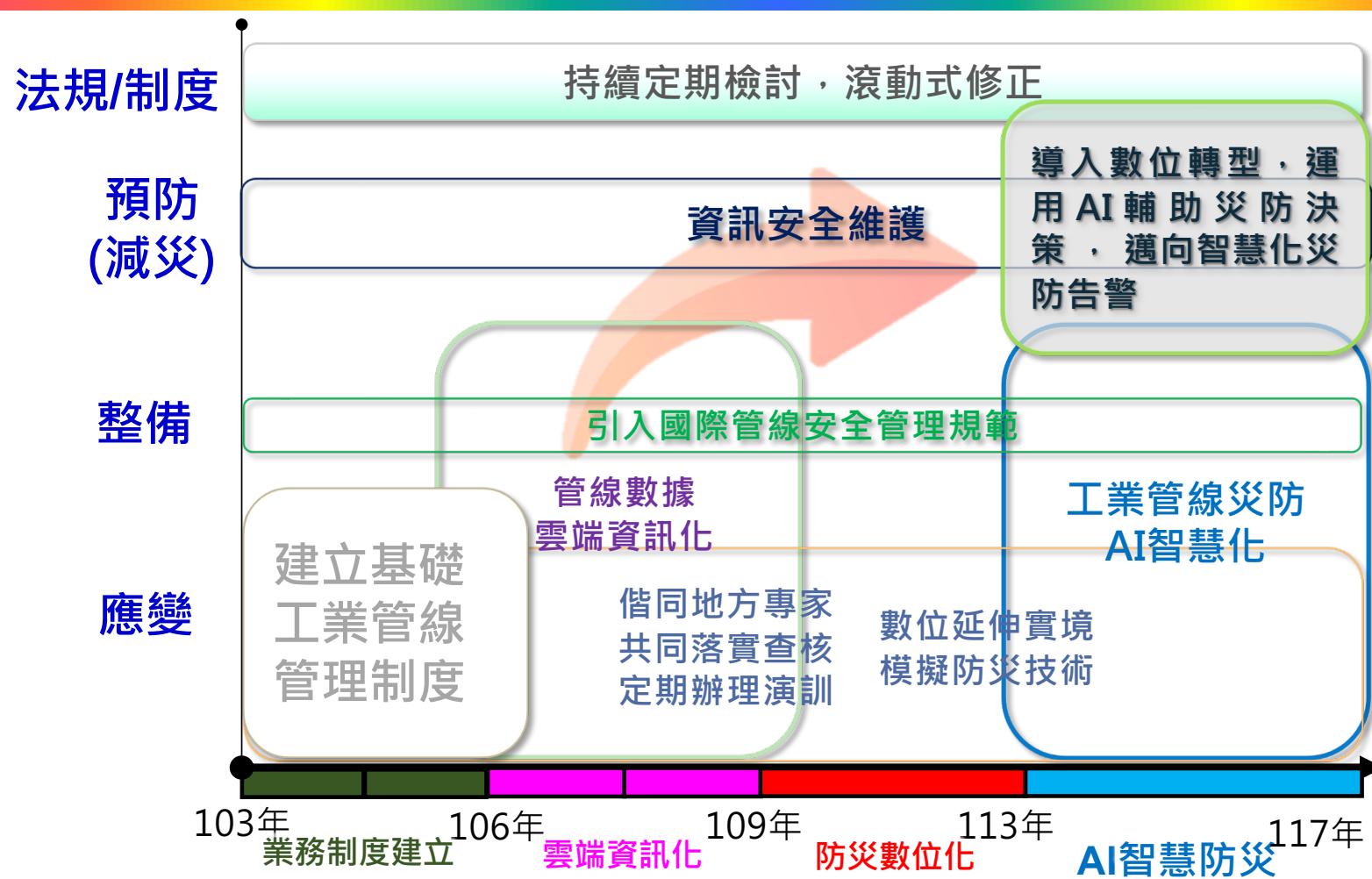


因此，緊急應變的目標：最大程度地減少應變人員、社區民眾及環境的風險

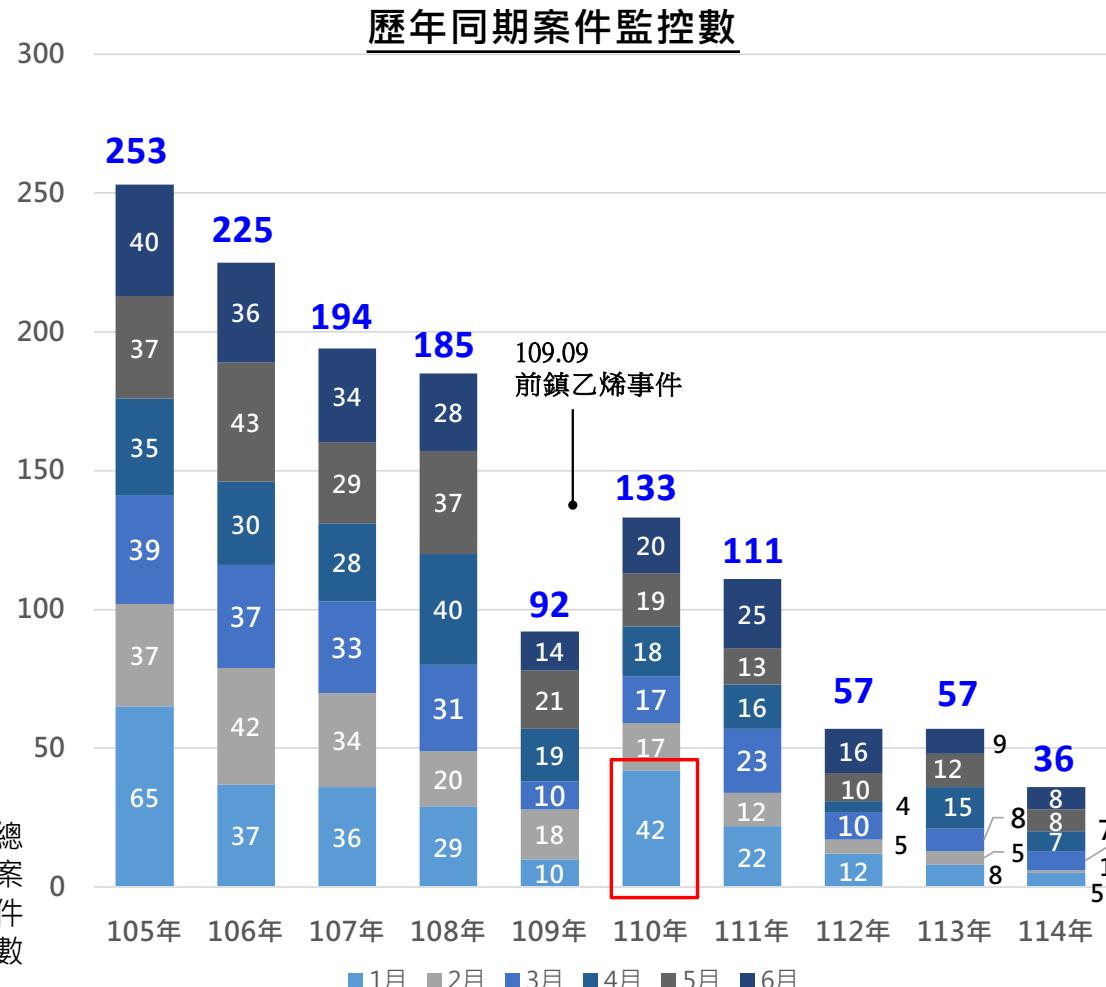
- 事前掌握必要資訊，是實現有效且安全應對的關鍵因素
 - 管線的路徑位置及其輸送的內容物
 - 管線內容物洩漏的物理跡象及其可能的危險
 - 對社區的潛在影響及為保護公眾應採取的措施
 - 相關公私單位、利害關係人聯繫資訊



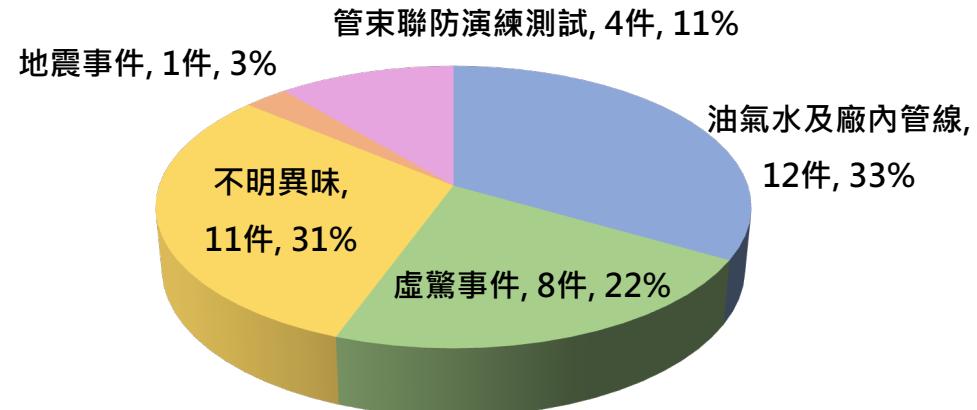
工業管線管理的里程碑



工業管線諮詢監控服務



114年工業管線監控案件數量與型態分佈
(統計時間：114/1-114/6)



■ 油氣水及廠內管線	非屬工業管線(油類、天然氣、自來水、污水、廠內管線)之管線火災/爆炸/洩漏事件
■ 虛驚事件	經消防到場查證有明確異味來源之事件、淹水及地層下陷等事件
■ 不明異味	經消防到場查證無明確異味來源之事件
■ 地震事件	高雄(楠梓/高雄/屏東)或宜蘭(冬山/蘇澳)地區震度達4級以上之事件
■ 管束聯防演練測試	OPS或計畫團隊進行管束聯防演練之測試事件

資料來源：工業管線諮詢中心

1090911翠亨北路乙烯事件

- 發生時間：109年09月11日14時55分
- 事故地點：高雄市前鎮區翠亨北路392號
(22.594072, 120.315966)

- 案件概述：經高雄市經發局管線安全辦公室通報，高雄市環保局通知無障礙之家附近使用FTIR分析疑似有乙烯之讀值，現場無人員傷亡，後續經高雄市環保局確認為地下水滲漏之含氯有機物經**厭氧反應**產生乙烯所致。



- 9月11日14:55 環保局通報原民館旁孔蓋發現乙烯讀值。
- 9月11日15:00 經發局出勤，通知管束業者到場並回報管線操作現況。
- 9月11日15:20 市長指示成立指揮中心。
- 9月11日16:20 下令管線排空，並於隔日凌晨完成氮氣吹驅。
- 9月12日17:00 狀況解除。
- 9月14日 召開第一次檢討會議，要求業者提出完整查漏報告。
- 9月15日 業者3條管線完成建壓開始查漏。
- 9月16日 召開第二次檢討會議，要求持續查漏。
- 9月18日 完成10口監測井定時監測。
- 9月21日 偕同專家學者與業者研析後續處置與管理精進作為。
- 9月23日 完成業者研析後續處置與管理精進作為審查
- 9月25日 召開第三次檢討會議。



工業管線雲端物聯系統

管線基本資料、
化學品危害特性

功能列表

應變資訊：
氣象資料、敏感受體、
應變資材等

通報定位
查詢



圖層套疊：
土壤液化潛勢、道路挖掘動態、
雨污水下水道、IP異常點位等

資料來源：工業管線諮詢中心

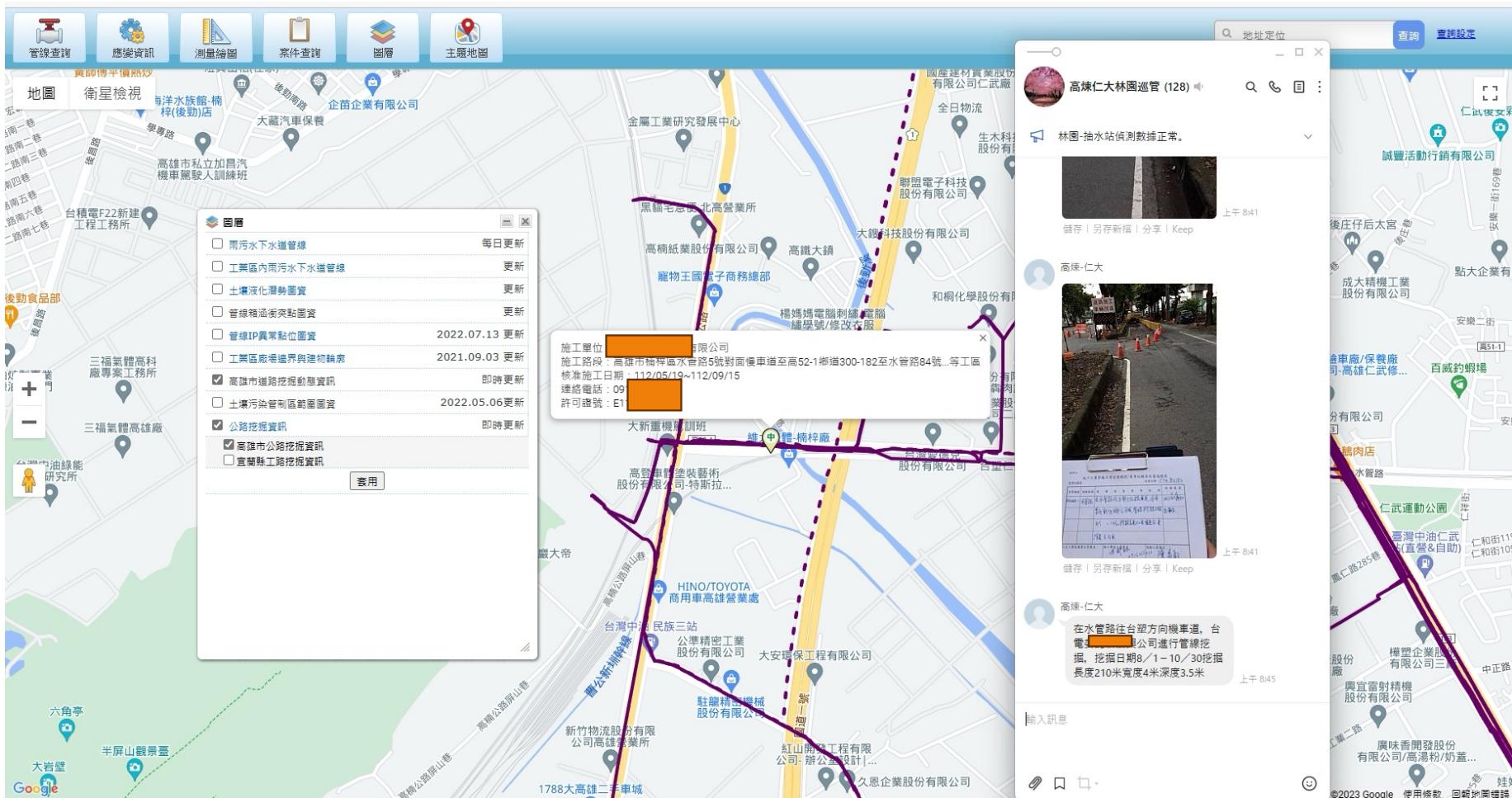
工業管線雲端物聯系統



工業管線雲端物聯系統



工業管線雲端物聯系統



工業管線雲端物聯系統

管線查詢 應變資訊 測量繪圖 案件查詢 圖層 主題地圖

地圖 衛星檢視

高達仁大林園巡管 (128)

林園-抽水站偵測數據正常。

仁大-抽水站 橋一至橋五氣體偵測數據正常 上午 10:22

仁大-抽水站

公司委外 號前進行4吋丁二 焗管線IP檢測檢修作業,挖掘長度 8米,寬度4米,深度3米。今日施工現況。 上午 10:30

林園-抽水站

輸入訊息

地址定位

查詢

查詢設定

圖層

雨污水下水道管線 每日更新

工業區內雨污水下水道管線 2021.06.12 更新

土壤液化潛勢圖資 2022.01.25 更新

管線罹患突點圖資 2021.06.23 更新

管線IP異常點位圖資 2022.07.13 更新

工業區廠場邊界與建物物資 2021.09.03 更新

高雄市道路挖掘動態資訊 即時更新

土壤污染管制區範圍圖資 2022.05.06 更新

公路挖掘資訊 即時更新

高雄市公路挖掘資訊

宜蘭縣工路挖掘資訊

套用

案件基本資料

管程工程處	第三區養護工程處	路竹核發單位	第三區養護工程處,鳳屏工務段
管市別	高雄市	路線別	省道台29線
起點樁位	104k+834	終點樁位	104k+884
路線方向	順時向	申請事宜	4吋丁二焗管線IP檢測檢修作業
施工地點說明	高雄市大寮區華中南路 377號前		
核准期間起	1120807	核准期間迄	1120818
核准時段起	09	核准時段迄	16
展延期間起		展延期間迄	
展延時段起		展延時段迄	
核准文號		管線種類	其他
申請挖掘單位		申請單位電話	09
單位連絡人		連絡人電話	09
監造單位		監造單位電話	07
施工單位	有限公司	施工單位電話	02-
路段資料			
起點樁位	104k+834	終點樁位	104k+884
長度	8.00	寬度	2.00

潮寮社區發展協會

筆記本阿母家

高達仁大林園巡管 (128)

林園-抽水站偵測數據正常。

仁大-抽水站 橋一至橋五氣體偵測數據正常 上午 10:22

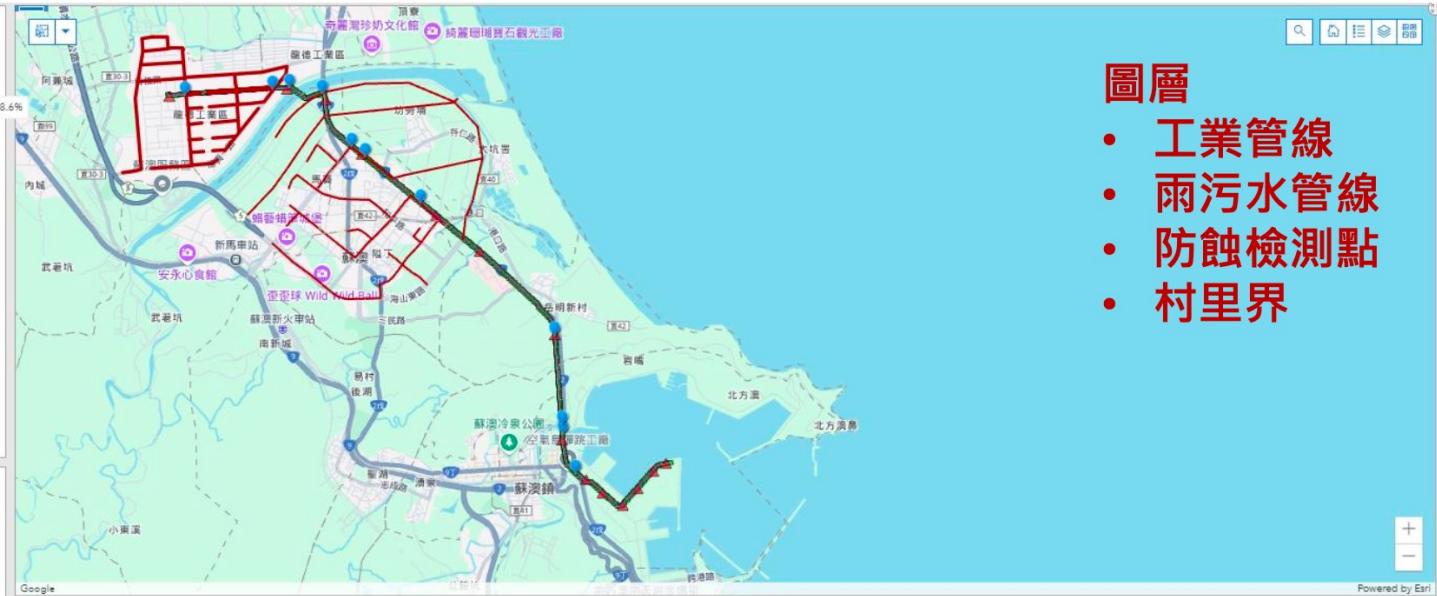
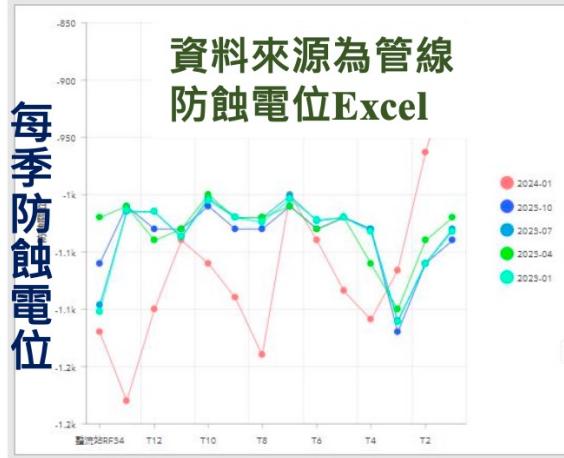
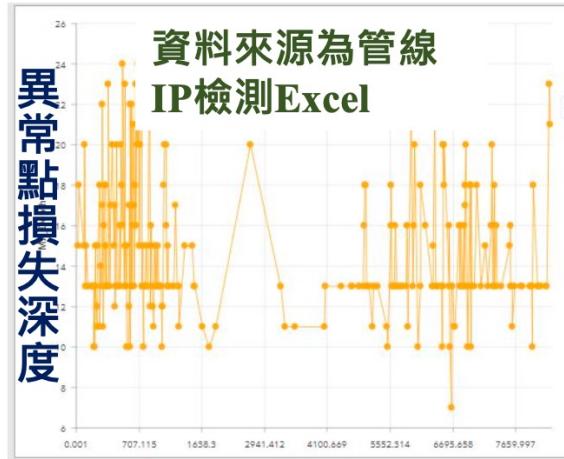
仁大-抽水站

公司委外 號前進行4吋丁二 焗管線IP檢測檢修作業,挖掘長度 8米,寬度4米,深度3米。今日施工現況。 上午 10:30

林園-抽水站

輸入訊息

管線履歷健檢資料



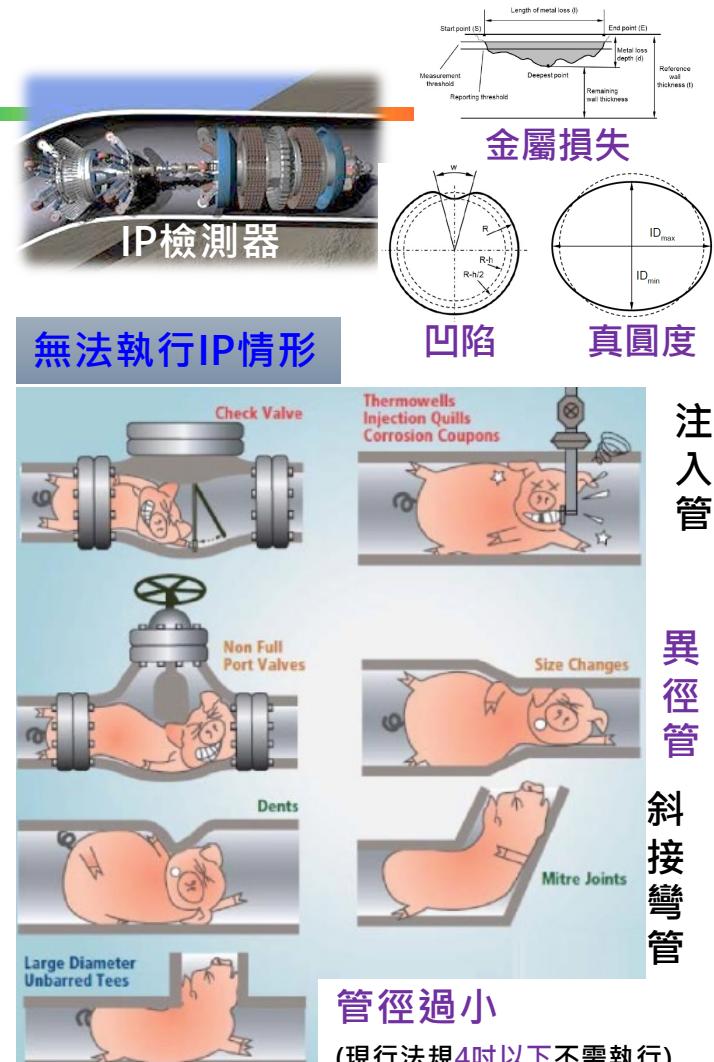
資料來源：工業管線諮詢中心

工業管線IP檢測

- IP(Intelligent PIG)為非破壞檢測技術，檢查管線內部狀況
- 整體作業分為7階段

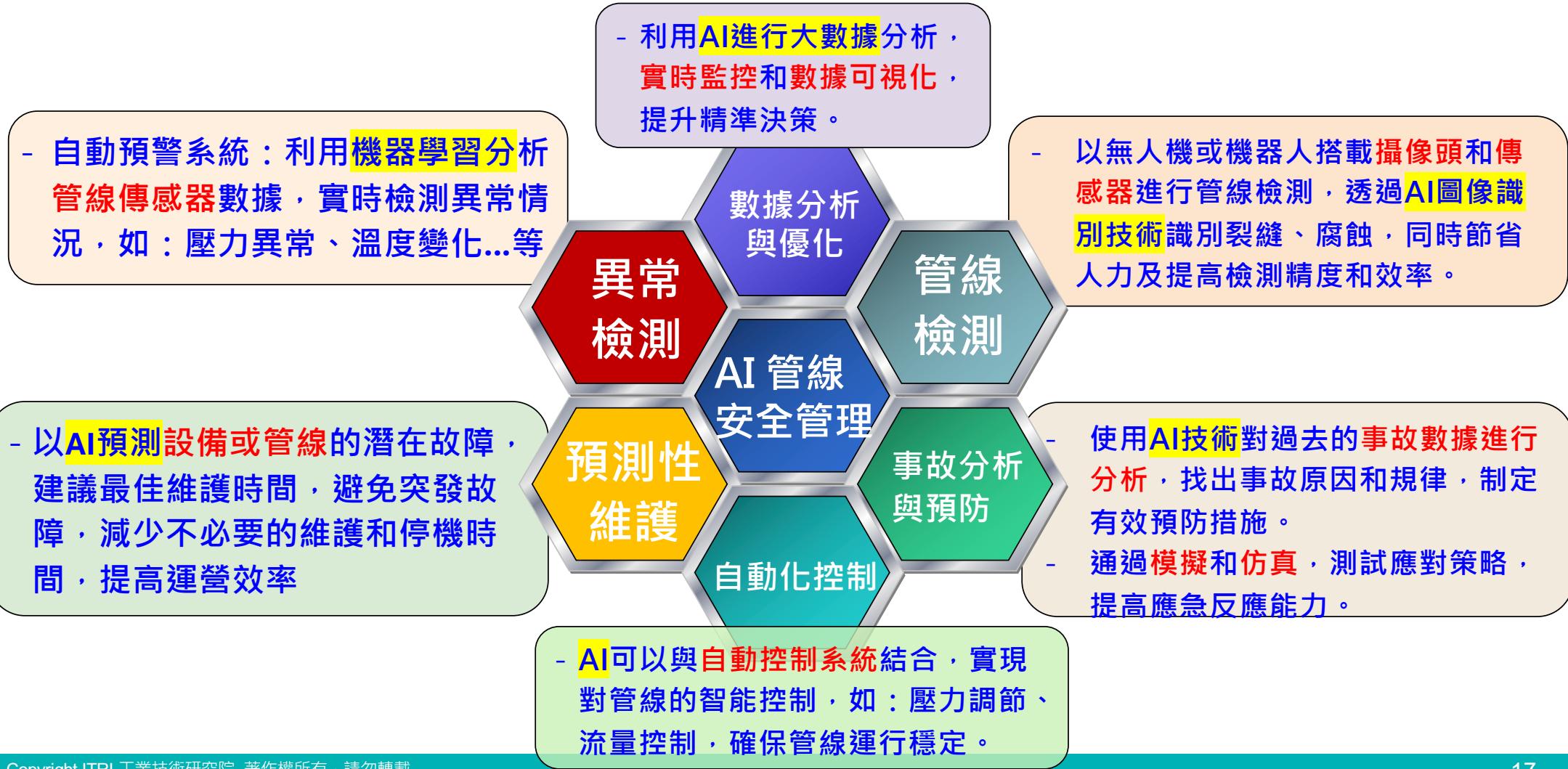
階段	工作
一、現場勘查評估	路面標記(AGM)定位、安裝清管頭
二、管線清潔檢測	管線內部清潔、量測管線變形、調整AGM位置
三、管線電子幾何變形檢測	確認焊道及彎管等位置，並檢測管線真圓度及凹陷變形程度
四、管線腐蝕檢測	檢測內外部腐蝕情況
五、管線檢測報告	結合第三與四階段，分析里程、座標及腐蝕、變形位置
六、開挖驗證	異常點確認定位及路權申請，執行管線維修或汰換
七、總結報告	完整IP檢測報告，含管線腐蝕率及剩餘壽命等

可合併進行



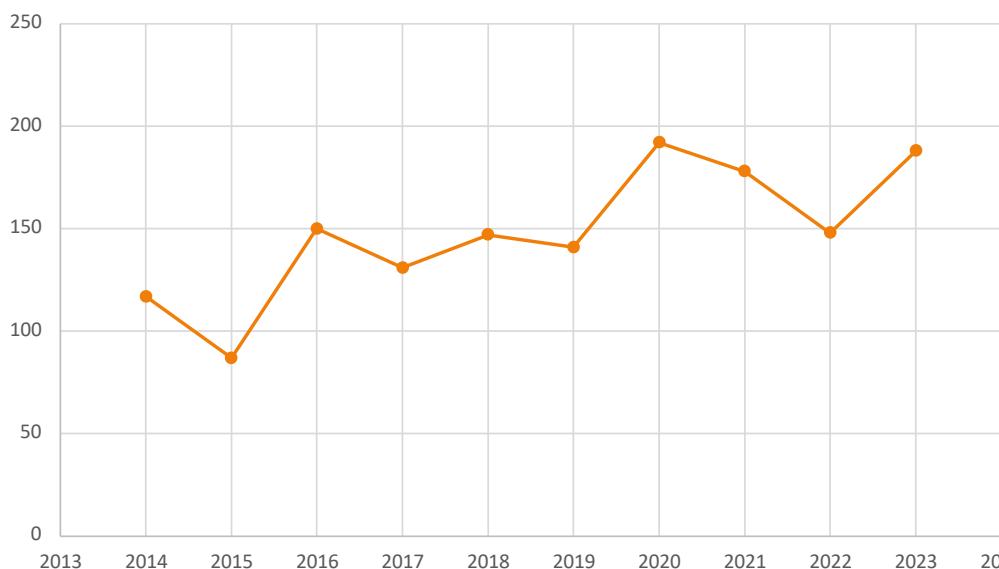
圖片來源：2012年中油公司安全衛生觀摩研討會

AI人工智慧 與 工業管線安全管理 應用領域研析

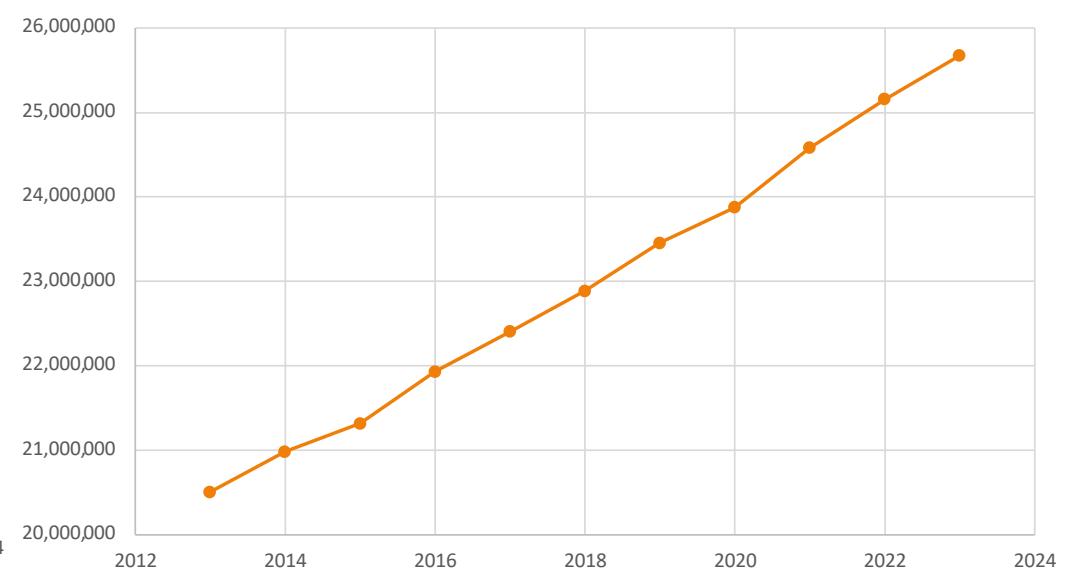


應用AI數據分析_我國天然氣事故因子

天然氣事故發生趨勢 (次/年)



天然氣總長度



統計資料來源：102-112年公用天然氣手冊，能源署諮詢中心 102-112年事故統計

天然氣事故因子研析結果

天然氣事故發生頻率 (次/公里/年)



統計資料來源：102-112年公用天然氣手冊，能源署諮詢中心 102-112年事故統計

天然氣事故因子研析結果

天然氣事故發生頻率 (次/公里/年)

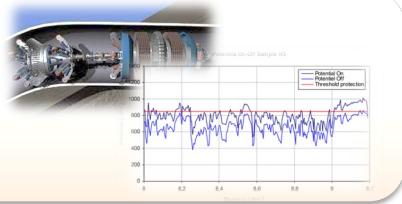


統計資料來源：102-112年公用天然氣手冊，能源署諮詢中心 102-112年事故統計

工業管線安全管理應用AI輔助研析

工業管線履歷檢測履歷雲端數據資料

- 管線運作基礎資料
- 腐蝕點位資訊
- 管線IP檢測雲端數據
- 歷年查核資料庫



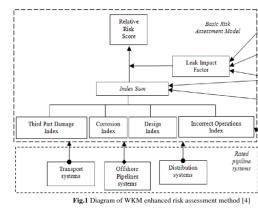
數據平台



訓練模型

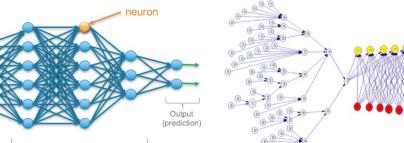
動態風險預測結果

以「風險因子」結合
「統計預測」訓練管線預測模型



Kent 管線風險評估因子

Pipeline risk assessment the definitive approach and its role in risk management (2015) Muhlbauer, W. Kent



貝葉斯網絡統計預測模型

Dynamic risk assessment model for third-party damage to buried gas pipelines in urban location class upgrading areas (2023) Zhao et al.

即時管線洩漏後果擴散模擬

- 管線洩漏擴散模擬預測
- 自動化氣象數據擷取
- 管線化學品特性資料庫
- 管線基礎資料庫



數位防災訓練

- XR數位延伸實境訓練高階指揮

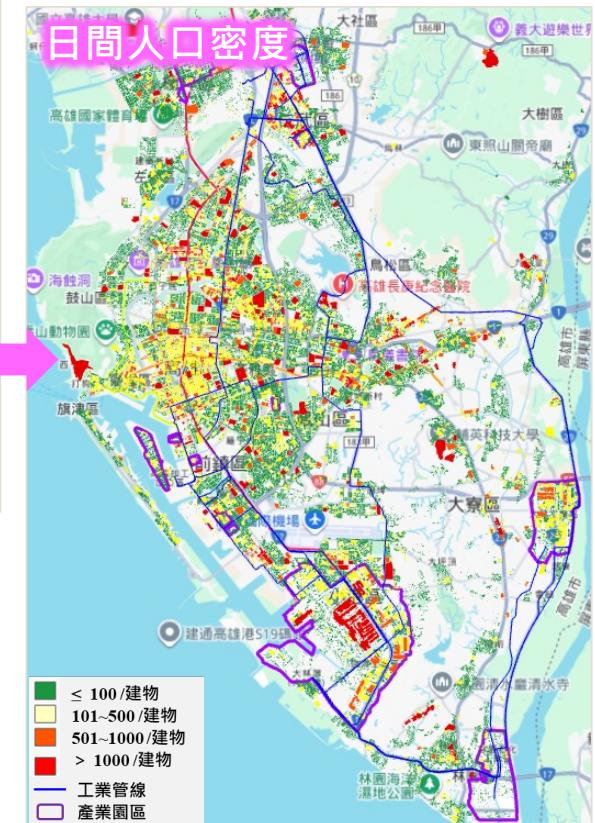
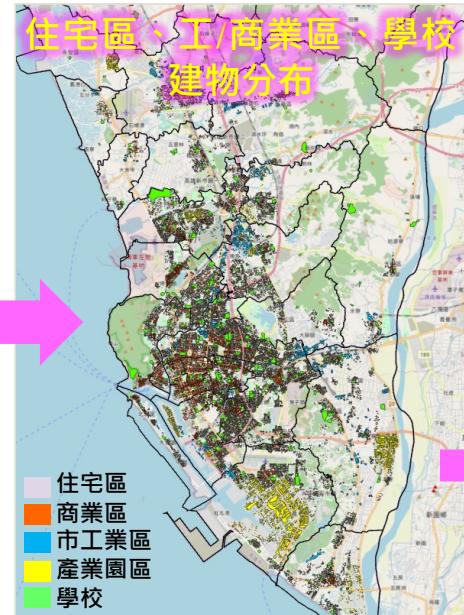
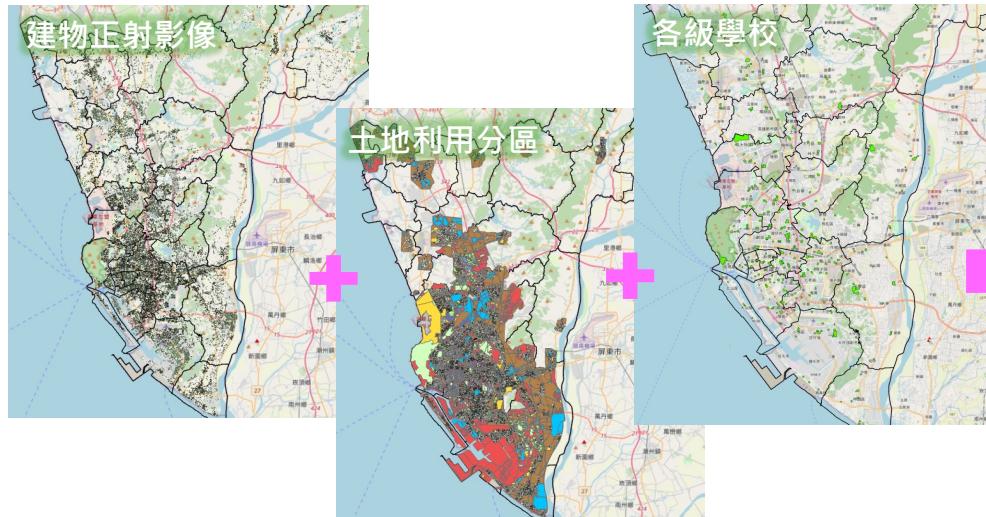


導入AI監控服務

- 事故AI文字監控辨識

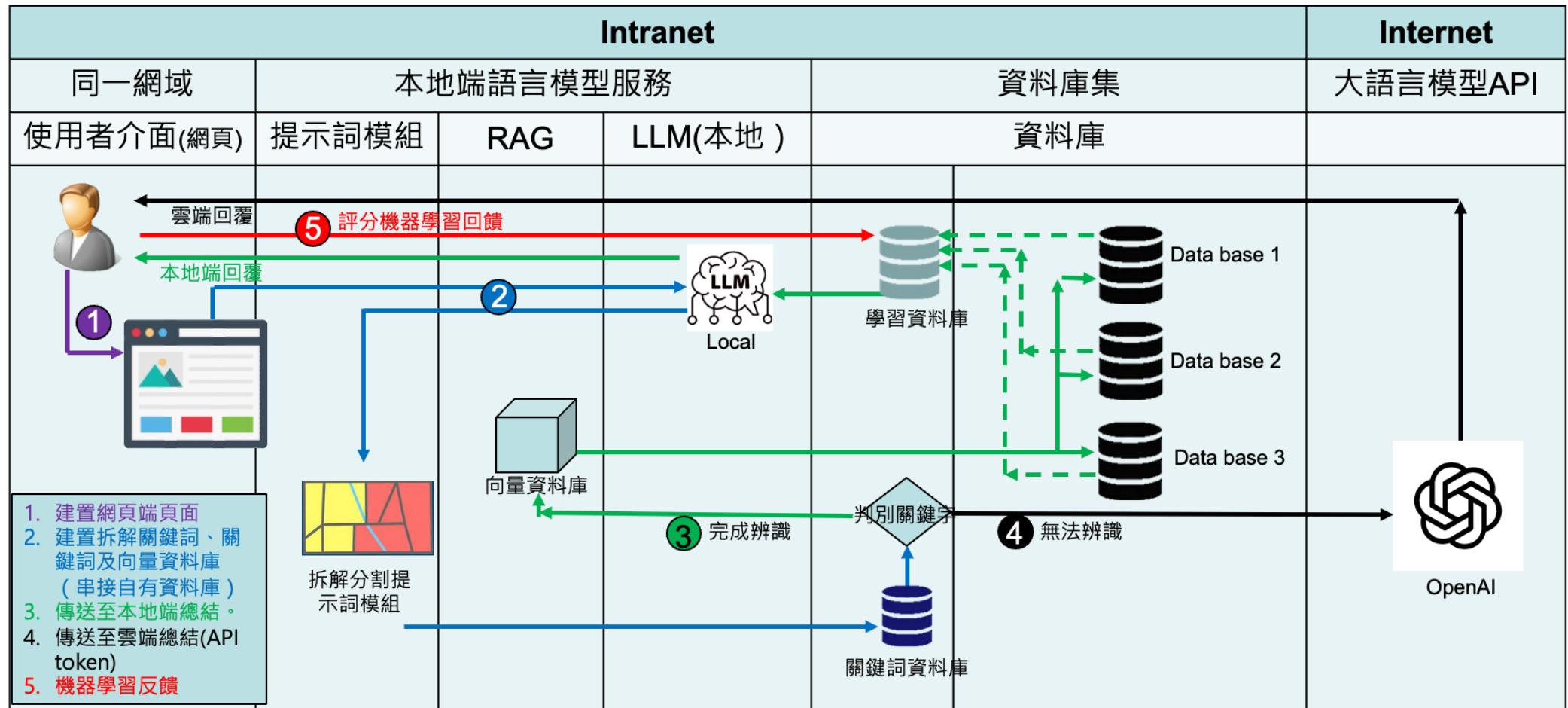
資料來源：工業管線諮詢中心

管線風險圖台研析

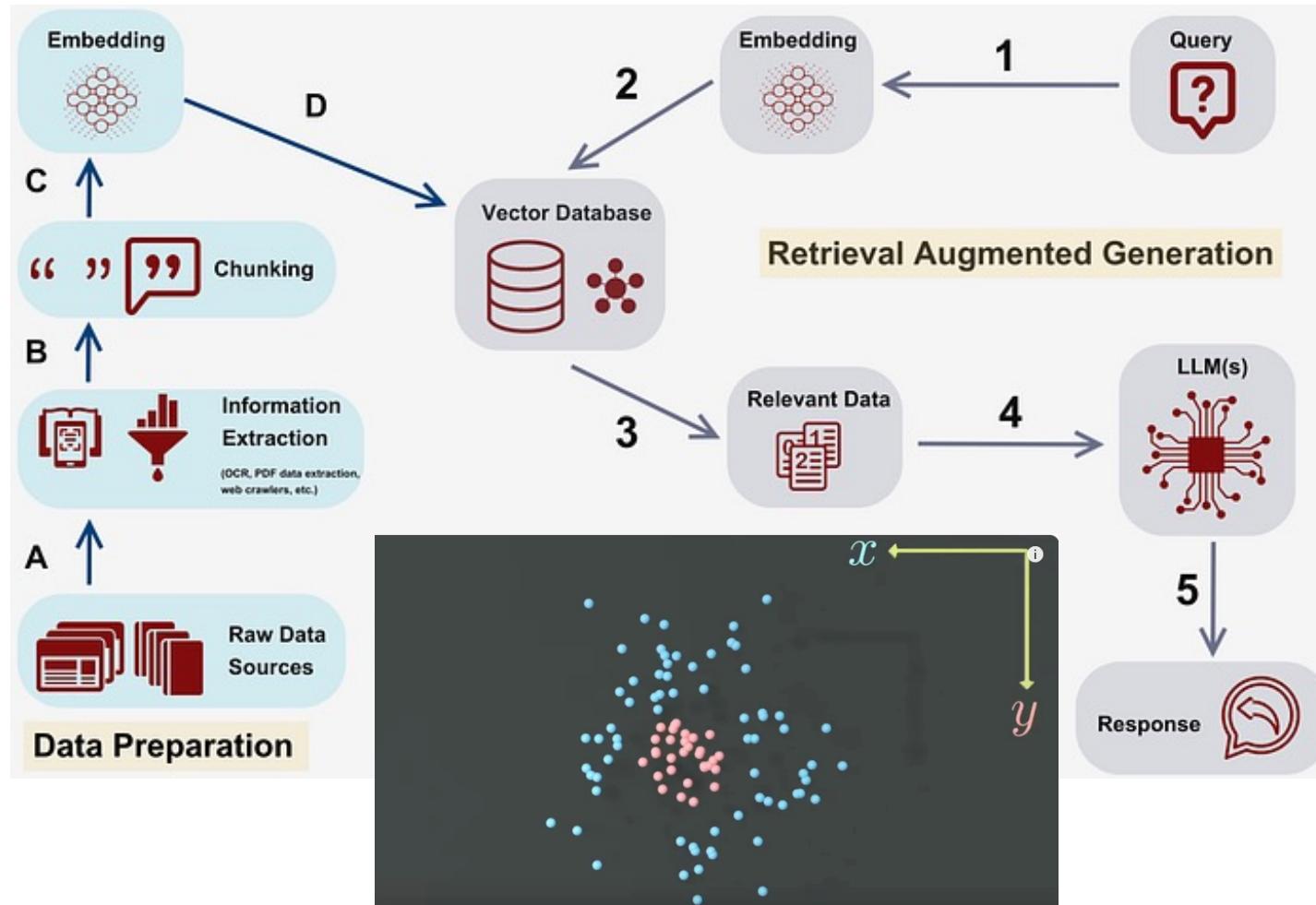


透過科學數據，搭配地理資訊整合
可獲得更細緻化的資訊，未來整合後果模擬
即可得知重點區域

AI 化災應變安全官



資料正規化 Database normalization



AI 化災應變安全官

← 返回 AI 化學安全官 事件編號：RD20250904085323 ⚙ 值班主管

現場問題描述

成大金屬鈉事故
建議格式 UNXXXX, Cas No.

於09月01日16時32分監控臺新聞，成大實驗室爆炸，2學生手灼傷送醫。經與消防局及環保局查證得知，消防局於14時37分接獲通報，國立成功大學自強校區發生金屬鈉爆炸事故，地址為臺南市東區大學路1號，事故點為化工大樓8樓，學生們在進行鈉金屬除水實驗時，不慎碰到水導致爆炸，金屬鈉為200公克，2名學生灼傷。

AI 描述建議

- 灾害事故地點：已描述
- 化學品名稱：已描述
- 現場災害類型：已描述
- 現場包裝容器預估總量：已描述

分析關鍵詞 洽詢

洽詢紀錄

當前模型：gpt-oss:120b
模型耗時：149.538478 秒

類似事件

關鍵詞辨識

分類選項參考 ⓘ ⓘ 處理時間

外觀效應 爆炸

運送型態 無資料

現場包裝容器預估總量 未辨識出相關因子

物質外觀型態 未辨識出相關因子

場所分類 固定場址

化學品名稱 鈉

化學品元素分析

原始化學品 1 金屬鈉 → 拆分元素 鈉, 氢氧化鈉, 氯化鈉, 碳酸鈉

緊急應變

當前顯示的年份時間僅供參考

應變策略

危害預警

- 化學品名稱：金屬鈉 (Na)；CAS No. 7440-23-5
- 物理狀態：固體，常溫下質軟如蠟；熔點 97.5 °C，沸點 892 °C (SDS)
- 化學危害：與水或酸劇烈反應，釋放易燃氯氣；燃燒產生的煙霧含氧化鈉，對眼、鼻、喉具有強腐蝕與刺激作用 (SDS)
- 皮膚/眼睛危害：長期接觸會造成化學性灼傷或潰瘍；直接接觸會造成二度至三度灼傷 (SDS)
- 吸入危害：吸入燃燒產生的煙霧會引起呼吸道刺激、咳嗽、呼吸困難，嚴重者可能致肺部灼傷 (SDS)
- 爆炸下限 (LEL) / 爆炸上限 (UEL)：SDS 未列出金屬鈉本身之 LEL/UEL；因與水反應產生氯氣，氯氣的 LEL 為 4% (v/v) (依 ERG 常規資料補充)
- TWA / STEL / CEILING：SDS 均未提供數值；依 ERG 處理原則，視為無可容許長期暴露限值，採最小化暴露原則 (因缺資料)

應變作業流程

1. 行動目標：快速隔離事故區，防止二次爆炸或火災蔓延。
 - 執行動作：在事故點設置 25 公尺 半徑的固體隔離區（處置原則）。
 - 具體條件：以警戒線、警示標誌圍繞；所有非救援人員必須撤離至 25 公尺外。
 - 明確數值 & 出處：25 公尺（固體）—【處置原則】



國外管線事故案例研析



ERIC
Emergency Response
Information Center

美國TC公司油管破裂事故調查報告

- 發生時間：2022年12月07日
- 發生地點：Keystone Cushing, 薩斯州 Washington 郡延伸管線破裂
- 狀況描述：36英吋管線破裂，導致約12,937桶原油洩漏，隨鄰近河川Mill Creek擴散
- 災害類別：油料管線洩漏
- 事故原因：焊縫區域因外部應力造成裂縫擴展
- 事故單位：美國TC公司



TC公司油管行經位置



管線基本資料：

管徑：36 inch

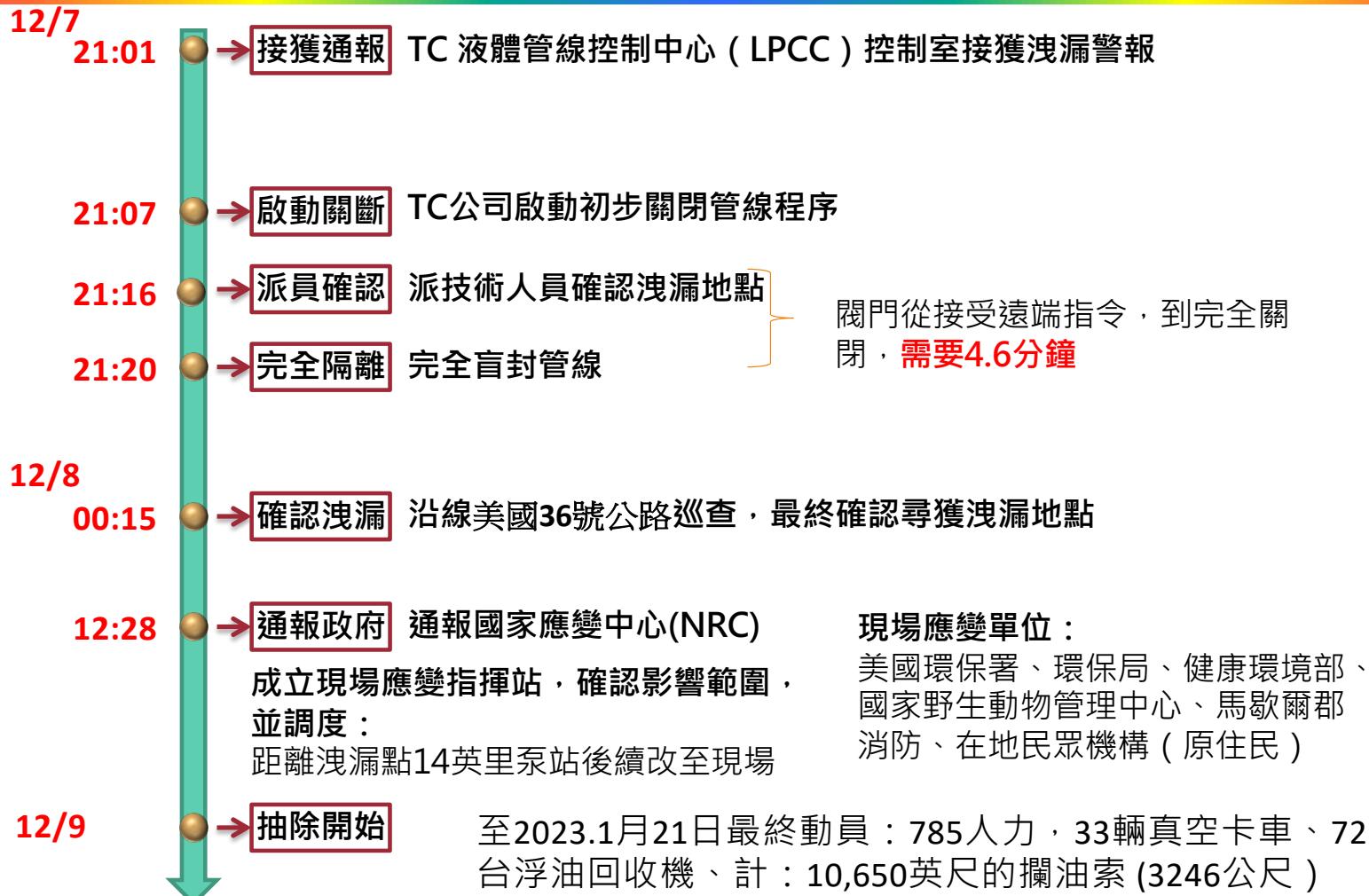
管長：1,855 英里 = 約2985 公里

最大運行壓力 (MOP)：表壓：1,440磅/平方英吋 (psig) = 約 $101.242\text{kg}/\text{cm}^2$

鋼材等級：X70 · 壁厚：0.465英吋 = 1.18公分 · 管道外層：環氧樹脂 (FBE)

Figure 1. Map of Keystone Pipeline System.

原油外洩後的處理時序

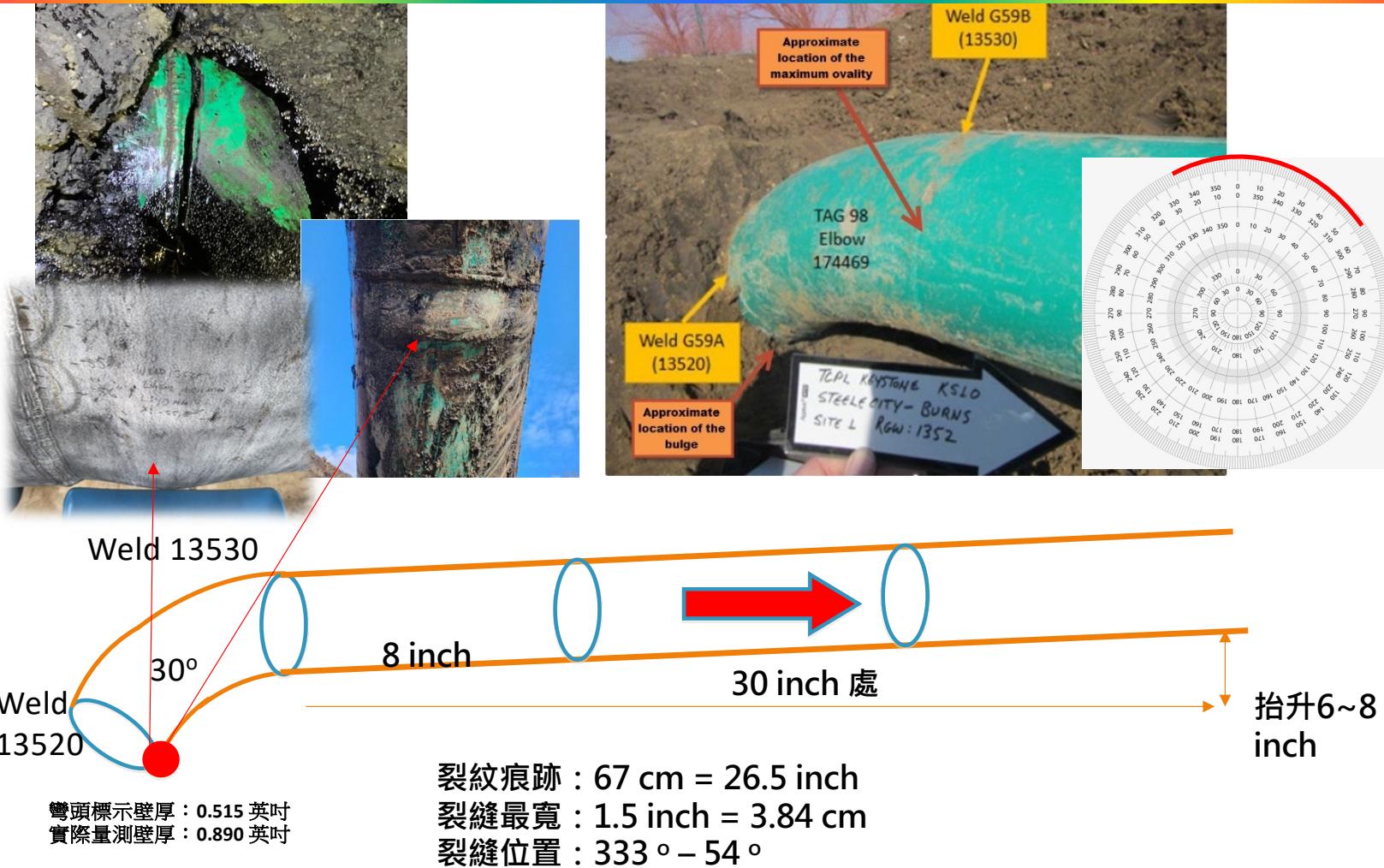




原油外洩後的處理時序



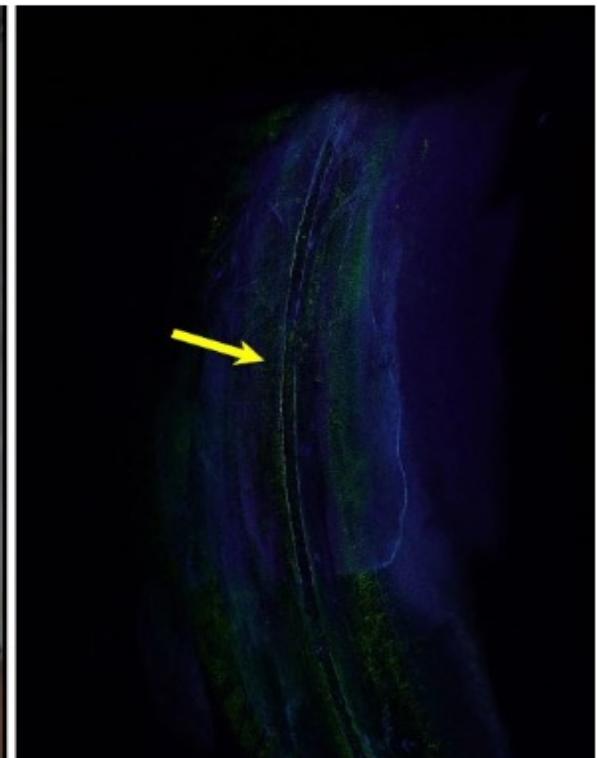
災因研析



金相分析

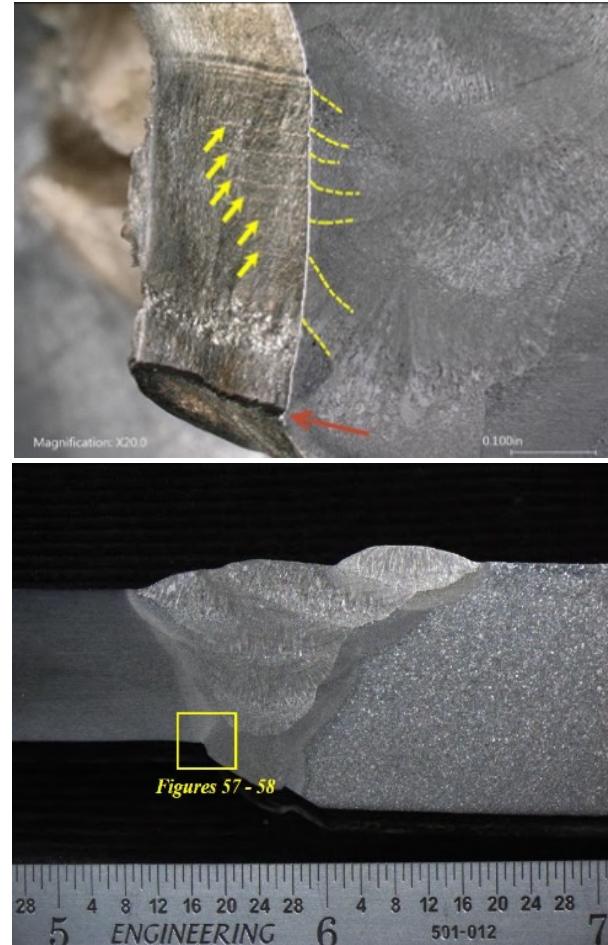
金相測試結果 (GWD 13530)

- 失效焊縫包含多個內部根焊層修補點 (root pass repair locations)，可見研磨痕跡與額外焊道沉積。
- 無文件記錄顯示焊縫曾在最初無損檢測 (RT) 中被判定不合格
- 在未修補的焊縫部分，發現大面積的熔合不良 (LOF, Lack of Fusion) 。
- 傳統射線檢測技術難以檢測到與管壁平行的 LOF 缺陷，因此 RT 測試未能識別此問題。
- 事故後，在實驗室進行的 超音波相控陣檢測 (Phased Array Ultrasonic Testing, PAUT) 才成功識別 LOF 缺陷。



斷裂表面及應力集中特徵

- 斷裂表面與應力集中特徵。
- 三個裂紋的起始點對應於焊接短管 (pup) 與環向焊縫的 LOF 缺陷。
- 疲勞裂紋擴展時在斷口表面留下海灘紋 (beach marks)，與焊道層次相對應 (黃箭頭標示)。
- 裂紋起始點的應力集中區域 (紅箭頭) 呈現深色氧化層，與磁鐵礦 (magnetite) 成分一致，這種材料僅在高於 600°C 的焊接過程中形成。



最終失效機制

📌 API 標準驗證

- GWD 13520 的金屬及焊縫材料 經過金相測試，確認其符合 API Specification 5L, 43rd Edition 的規範要求
 - 這表明，材料本身的機械性能並非失效的主要原因，而是焊接缺陷與應力累積導致了破裂

📌 PHMSA 與金相分析結論

- 環向焊縫 (GWD 13520) 破裂的主要機制為：
 - 週期性疲勞載荷 (cyclic fatigue)
 - 裂紋起始於根焊層 (root pass) 內的熔合不良 (LOF, Lack of Fusion) 缺陷
 - 裂紋擴展至無法承受管道外部應力時發生最終破裂

📌 裂紋成長機制

- 裂紋最初在 LOF 缺陷位置形成，並在管道輸送過程中逐步擴展
- 應力集中區域，特別是焊接過渡區 (焊接短管與環向焊縫的連接處)，加速裂紋成長
- 在持續運行的壓力循環影響下，裂紋最終無法承受外部載荷，導致環向焊縫完全失效，造成 Keystone Cushing Extension 的破裂事故

問題背後的問題

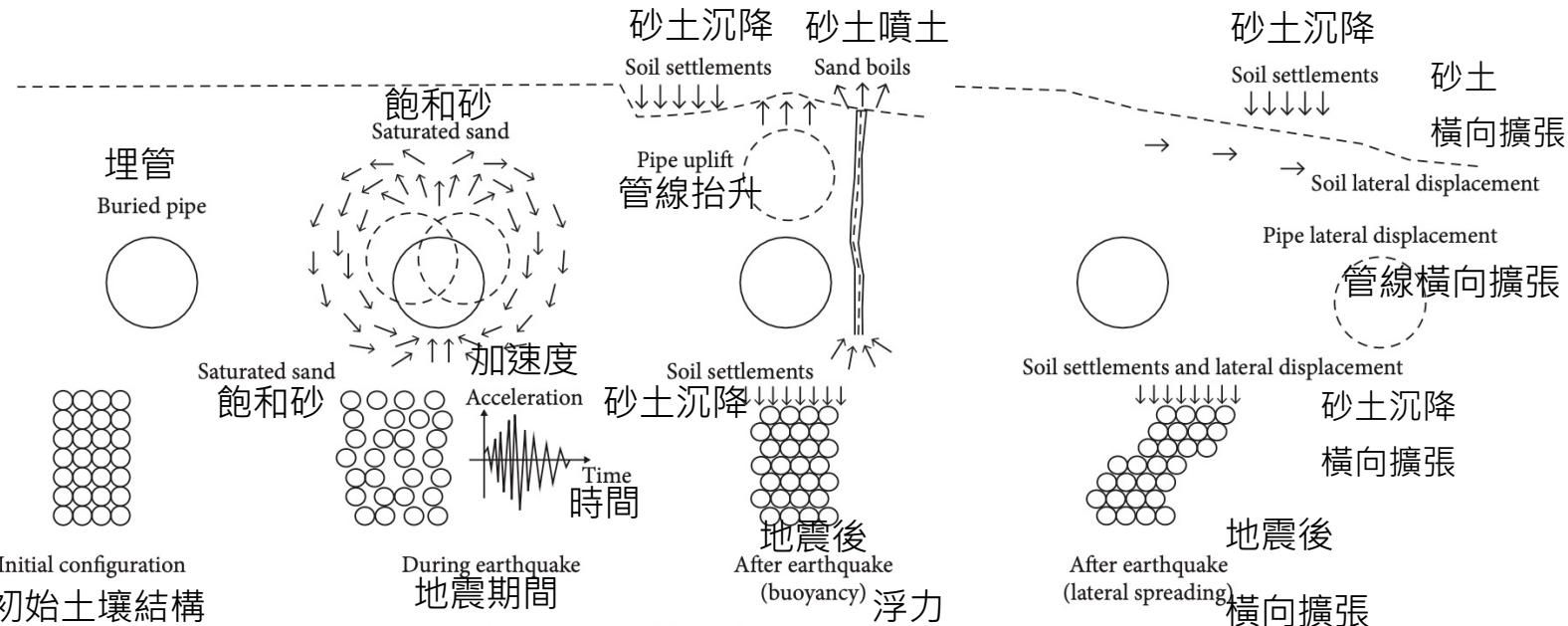
- 2010年該處曾執行更換管作業
 - 該處管線因執行過水壓測試，發現形變，經查發現該批彎頭組件未能滿足最低屈伏強度測試，故需要執行換管
 - 該處焊道因角度關係，其接縫處應要採取漸變設計，降低管線間公差及應力集中，但最終施作未採取其漸變設計
- 2010年12月11日至14日 期間，現場的挖掘土堆（ spoil pile ）暴露於低溫環境，發生凍土（ frozen soil ）現象。
 - 回填土壤壓實不足（ inadequately compacted soil ），導致管道缺乏支撐
 - 管道承受來自 8.5 英尺覆土的負載，形成額外彎曲應力
 - 可能使用了凍土回填，這些凍土回填後隨著融化導致沉降，加劇應力集中



TC 公司的回填作業規範

- TC 公司的標準程序明確規定：應採取措施防止管道下方的土壤沉降。
- 不可使用凍土作為管道下方的墊層（ padding ）
- **但TC公司未能提供當時相關防止土壤沉降措施的資訊**

土壤對管線的影響



土壤液化對埋管的影響簡圖

資料來源：Castiglia et al. (2020) Pipeline Performances under Earthquake-Induced Soil Liquefaction: State of the Art on Real Observations, Model Tests, and Numerical Simulations

經驗學習

- 其實該管線有施行過 IP (ILI)

- 2012 年 ILI 、 2013 年 3 月現場檢查、 2013 年 9 月 ILI 均顯示管道橢圓變形持續存在
- ILI 探頭
 - Baker Hughes 高解析度 MFL4 ILI : 無法檢測寬度 <0.01 英吋或深度 <30% 管壁的裂紋
 - Eclipse 超音波裂紋檢測：不適用於檢測環向焊縫裂紋或管道鼓包。
-  ILI 檢測盲點
 - 彎頭與壁厚變化處 會影響 ILI 感測器與管壁的接觸，降低檢測能力。
 - 該區段包含彎頭與壁厚變化，可能影響 ILI 檢測裂紋與變形的準確度。

應收集慣性測量單元 (IMU) 數據，可建立基準來監測未來管線變形

馬來西亞布特拉高原天然氣事故調查報告

- 發生時間：2025年4月1日 上午08時08分 至 下午15時45分完全撲滅
- 發生地點：Jalan Putra Harmoni 1/3 & 1/4, Putra Heights 布拉特高原, Selangor 雪蘭莪, (3.005913, 101.582601)
- 狀況描述：36英吋 天然氣管洩漏後，洩漏引發爆炸及大規模火勢（火焰高度約30m），燃燒約3小時
- 事故單位：馬國國油子公司國油氣體有限公司 (Petronas Gas Berhad)
- 事故傷亡及災損：145人傷 / 190棟房屋 / 159輛車

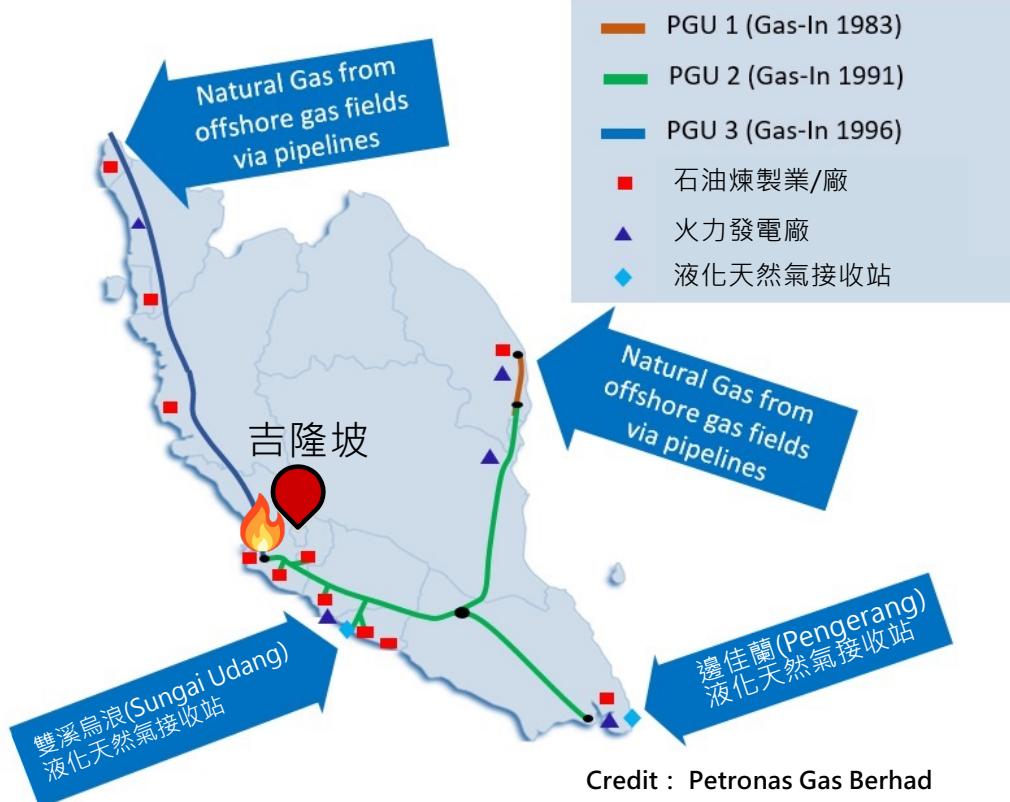


事故當下影片



Credit : CNN News

馬來西亞主要天然氣幹行經位置



管線基本資料 :

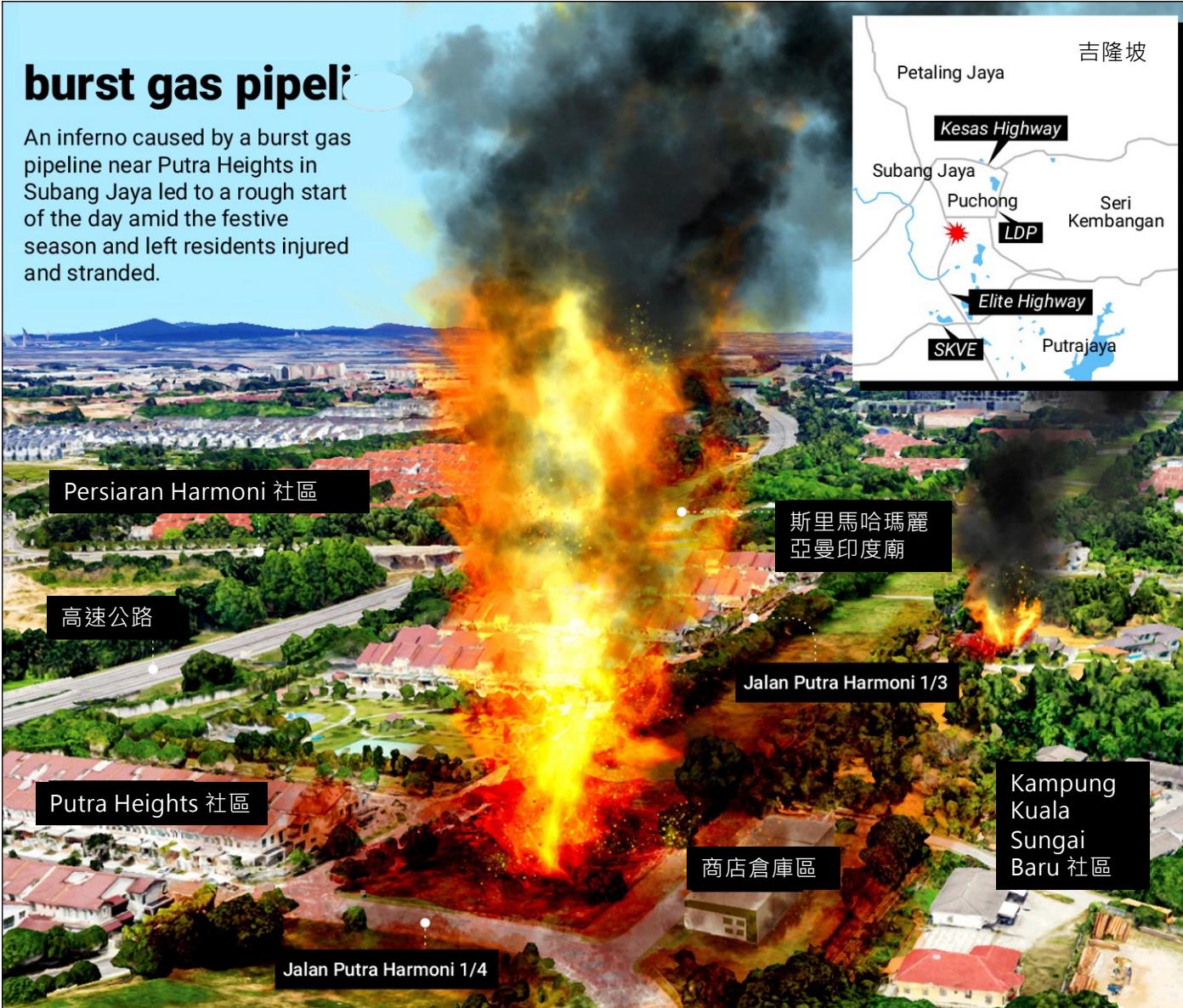
管徑 : 36 inch , 管長 : 約2,600 公里
最大運行壓力 (MOP) : 59.1 kg/cm²
鋼材等級 : API 5L X70



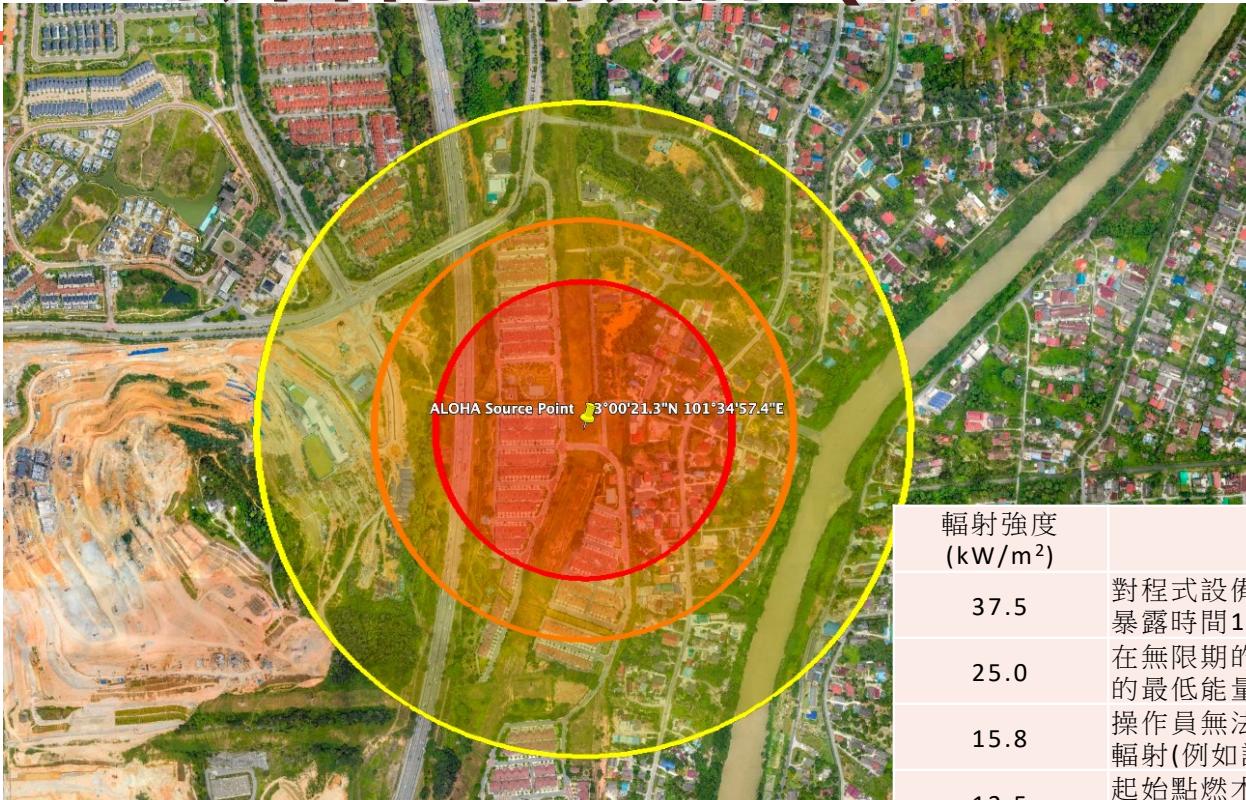
Credit : YouTube

burst gas pipeline

An inferno caused by a burst gas pipeline near Putra Heights in Subang Jaya led to a rough start of the day amid the festive season and left residents injured and stranded.



影響範圍預估 (以ALOHA為例)



輻射強度 (kW/m^2)	觀察之影響
37.5	對程式設備足夠造成損害。 暴露時間1分鐘之致死率為100%。
25.0	在無限期的長時期暴露下足以點燃木材的最低能量(非經常性點燃補助火種)。
15.8	操作員無法從事作業並藉遮蔽物隔離熱輻射(例如設備後側)之區域內的熱強度。
12.5	起始點燃木材、熔化塑膠管所需之最低能量。暴露時間1分鐘之致死率為1%。
9.5	8秒後到達疼痛極限；20秒後造成二級灼傷。
4.0	如果在20秒內無法到達掩蔽物遮蔽，對人員足以造成疼痛感；然而可能導致皮膚起泡(二級灼傷)；致死率為0%。
1.6	長時間暴露將不會造成不舒適感。

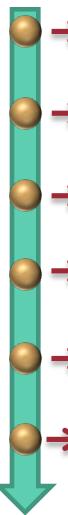
馬國天然氣事故的處理時序

4/1

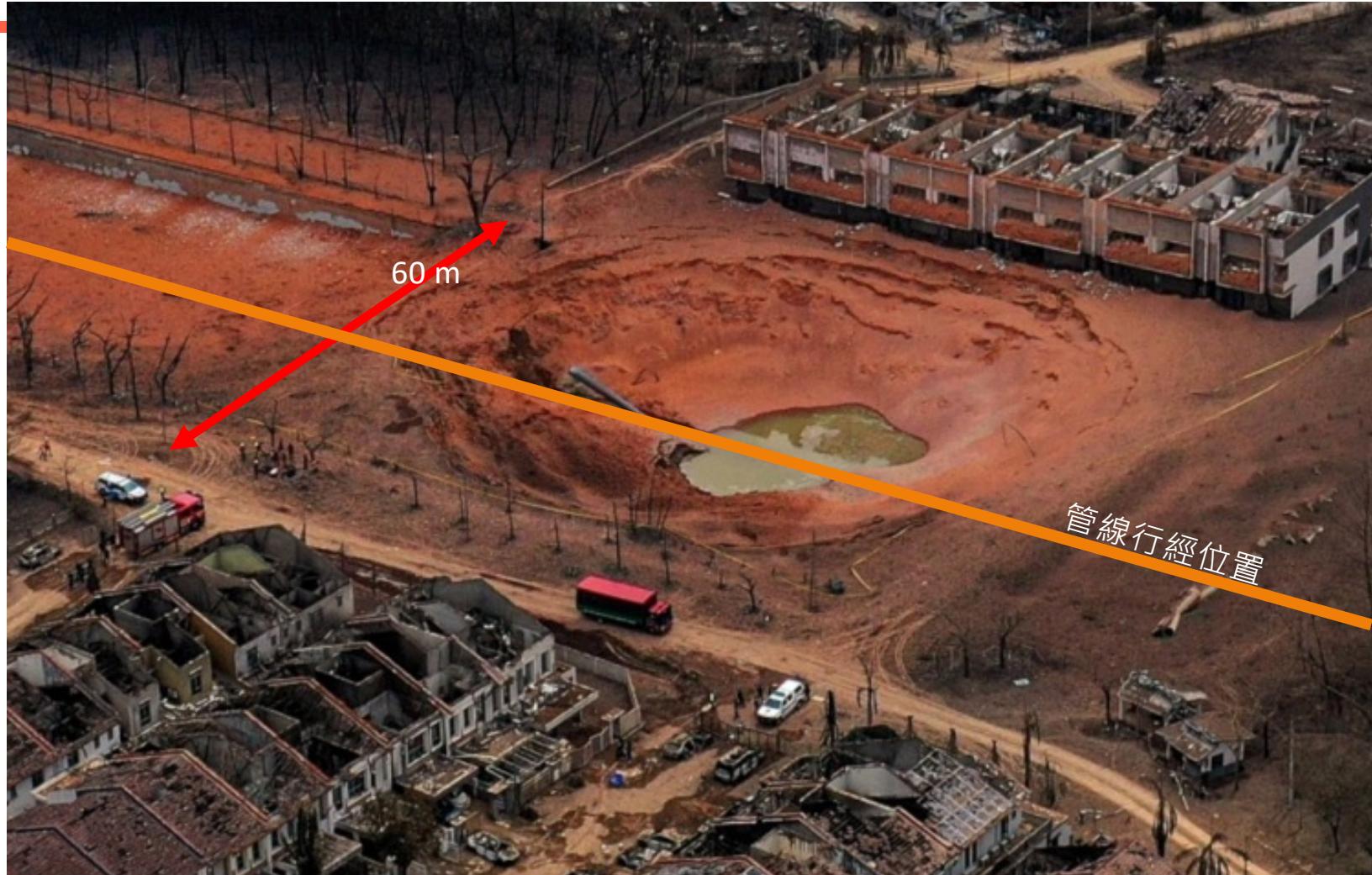
- 08:10 → 接獲通報 消防局接獲Petronas Gas公司管線火警
- 08:22 → 抵達現場 消防抵達鄰近現場，看見數十公尺高的巨型火焰
- 09:30 → 鄰近疏散 因爆炸鄰近500公尺左右的民宅，受到爆震波及破片的影響，民眾疏散
- 10:50 → 關閉閥件 Petronas Gas公司宣佈已關閉閥件
- 11:06 → 開設中心 政府開設應變救濟中心
- 11:14 → 電力中斷 馬來西亞電力公司（TNB）發現能源中斷，派員進駐現地
- 11:15 → 開放避難 鄰近廟宇開放避難收容區域
- 11:25 → 確認事故 Petronas Gas公司確認事故管線資訊
- 11:43 → 關閉道路 將臨近高速公路封閉
- 12:15 → 封閉飛行 馬國民航局將臨近飛行區域封閉
- 12:21 → 傷患救出 6名傷患後送至鄰近醫院
- 12:45 → 環境搶修 馬來西亞電力公司（TNB）搶修電力，環境部協助監測空氣污染

馬國天然氣事故的處理時序

4/1

- 
- 13:30 → 等待燃盡 管內氣體仍持續燃燒，火勢仍持續
- 13:55 → 火勢撲滅 火勢撲滅，剩些微氣體殘留
- 14:00 → 提供救濟 當地首長提供難民協助及安置
- 15:45 → 完全撲滅 當地消防確認現場火勢已完全撲滅
- 17:00 → 對外說明 馬國政府與Petronas Gas公司宣佈將負責並修復賠償所有受損財產
- 19:00 → 協助民眾 官方宣佈能協助難民回住宅處取回重要物品

天然氣事故的災後現場



災因調查手段

■ 實地勘查

■ 透過實驗室測試分析

- ✓ 拉伸、硬度、斷口及金相分析
- 透過電腦運算：有限元素法及SCADA系統資訊
- 各項標準作業程序審查

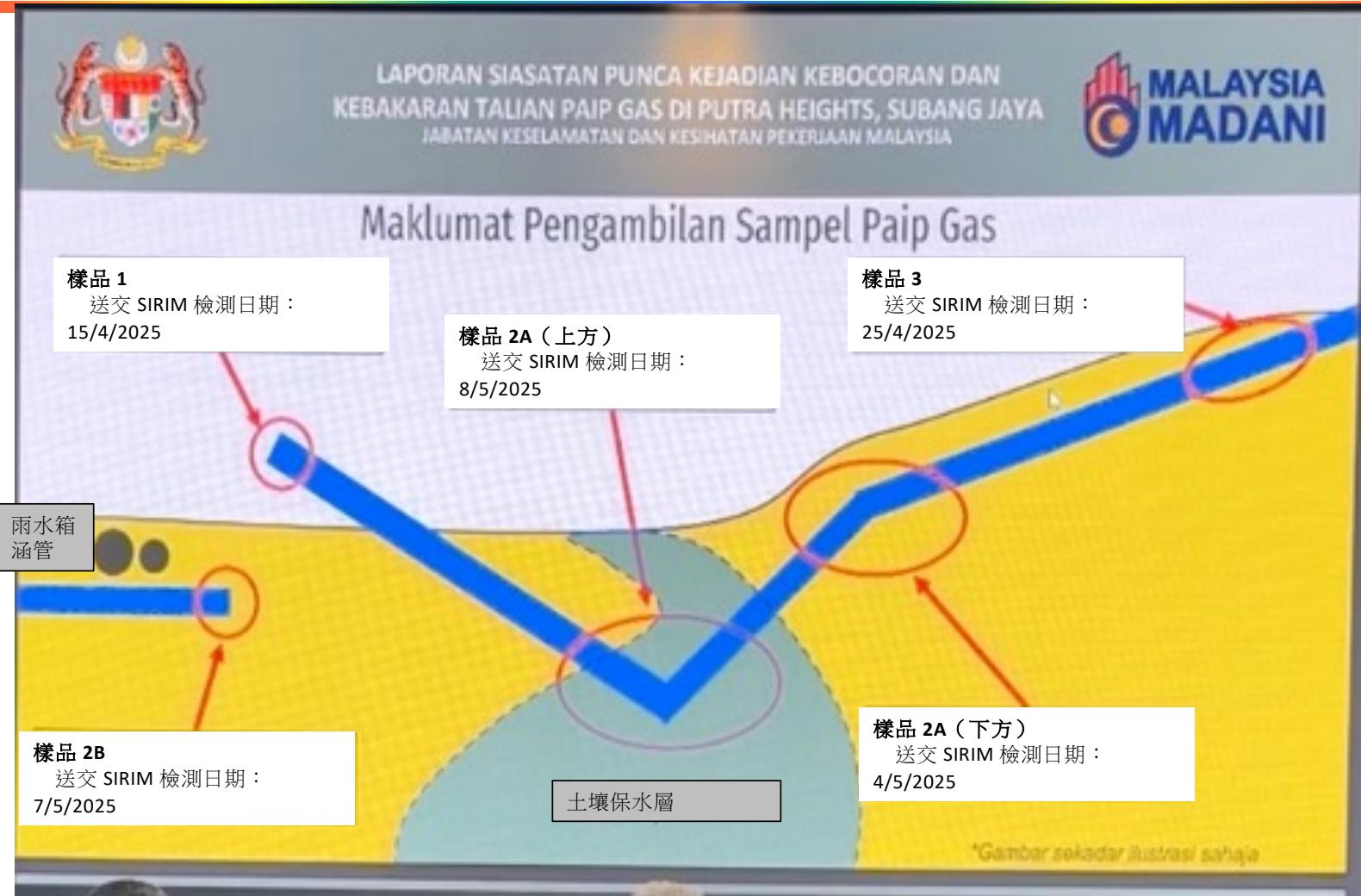


官方提出的災因研析

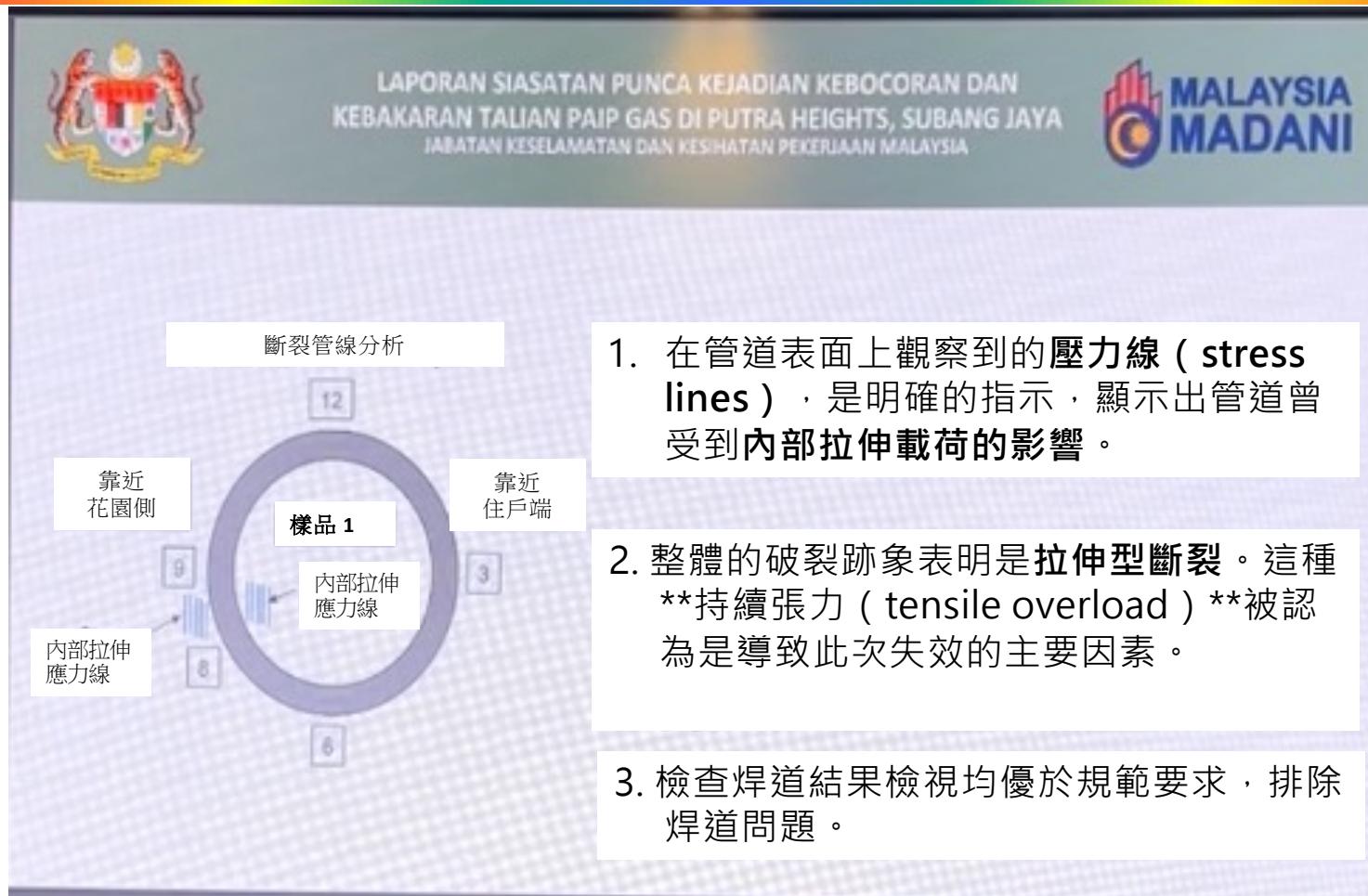
■ 第三方破壞痕跡？

- 附近是否有施工
 - ✓ 鄰近有開挖土地進行污水管線汰換
 - 3月30日已完工，事故發生當下無任何施工
 - 均按照地方政府計畫申請，施工距離天然管線至少40公尺
- 是否有恐怖活動
 - ✓ 馬國警察調查結果發現，並無相關恐怖活動痕跡

受損管線環域及採樣現況



樣本1檢查狀況



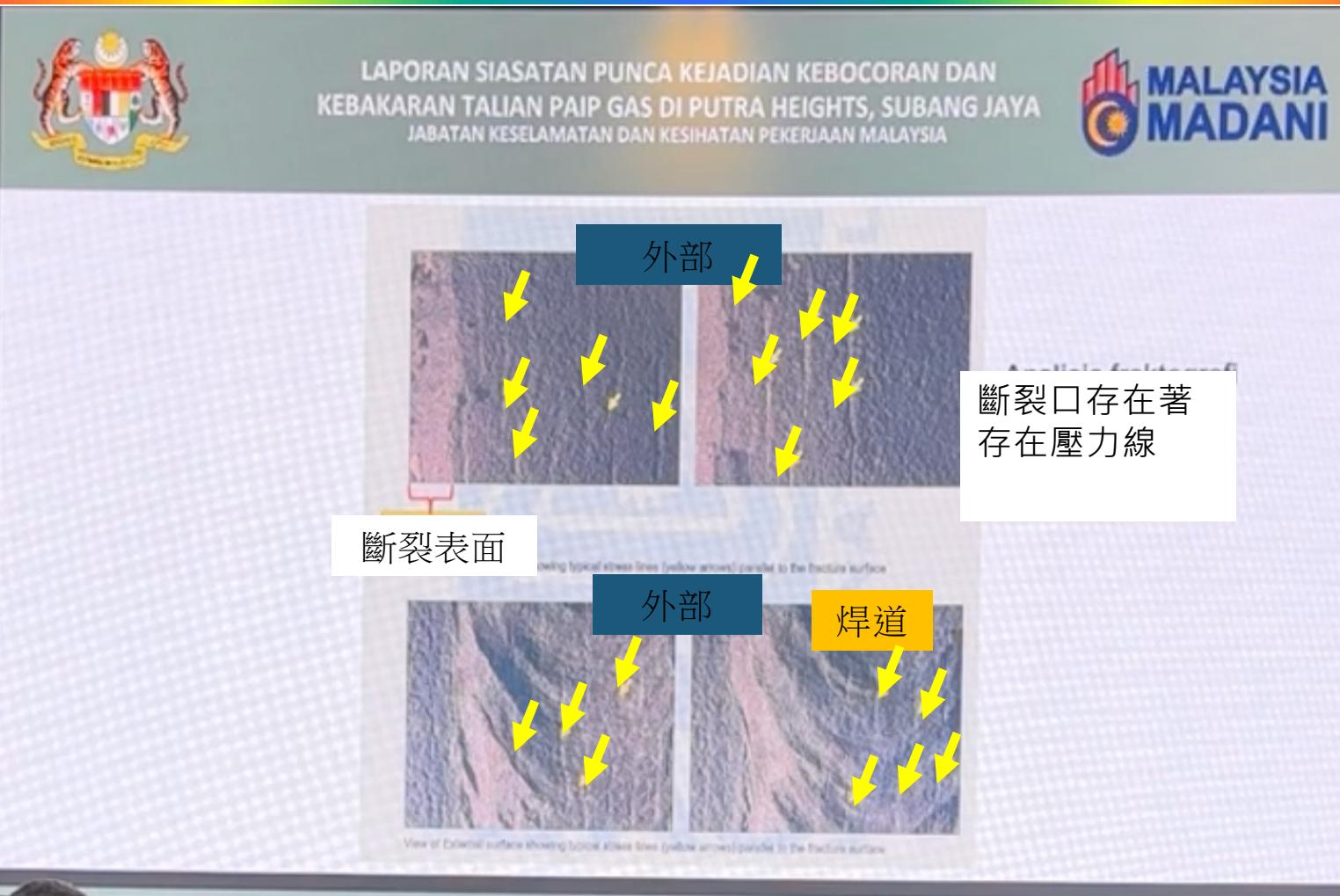
The image shows the cover of a report titled 'LAPORAN SIASATAN PUNCA KEJADIAN KEBOCORAN DAN KEBAKARAN TALIAN PAIP GAS DI PUTRA HEIGHTS, SUBANG JAYA' from 'JABATAN KESELAMATAN DAN KESIHATAN PEKERJAAN MALAYSIA' (Malaysia Occupational Safety and Health Department). The report is dated 2018. Below the cover is a diagram of a pipe sample labeled '樣品 1' (Sample 1). The diagram shows a cross-section of the pipe with various numbers (12, 9, 8, 6, 3) and labels: '靠近花園側' (Near Garden Side), '靠近住戶端' (Near Household End), and '內部拉伸應力線' (Tensile Stress Line). A callout box on the left says '斷裂管線分析' (Fracture Pipe Analysis).

1. 在管道表面上觀察到的壓力線 (stress lines) , 是明確的指示，顯示出管道曾受到內部拉伸載荷的影響。
2. 整體的破裂跡象表明是拉伸型斷裂。這種 **持續張力 (tensile overload) **被認為是導致此次失效的主要因素。
3. 檢查焊道結果檢視均優於規範要求，排除焊道問題。

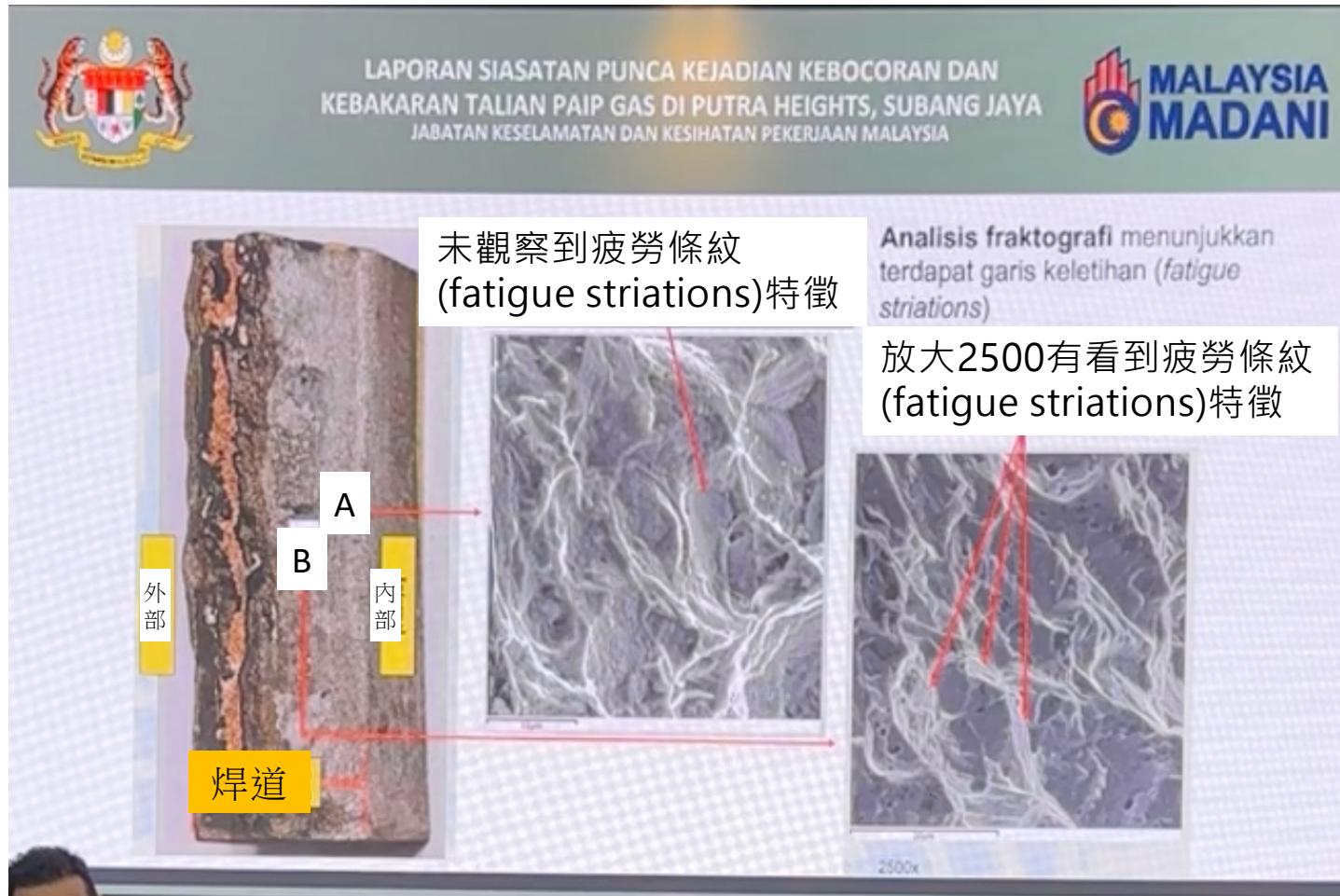
焊道及斷裂口附近金相結果



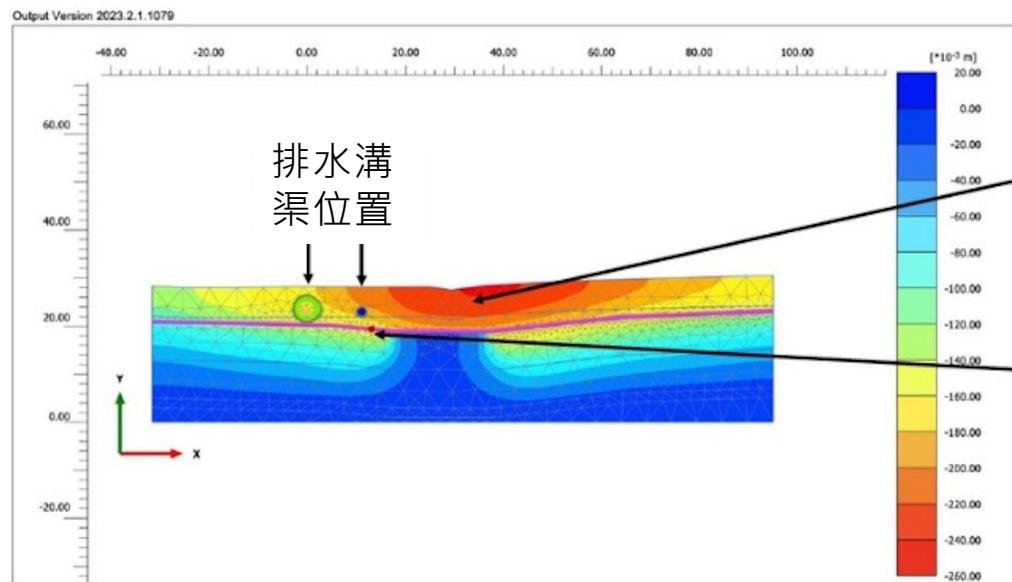
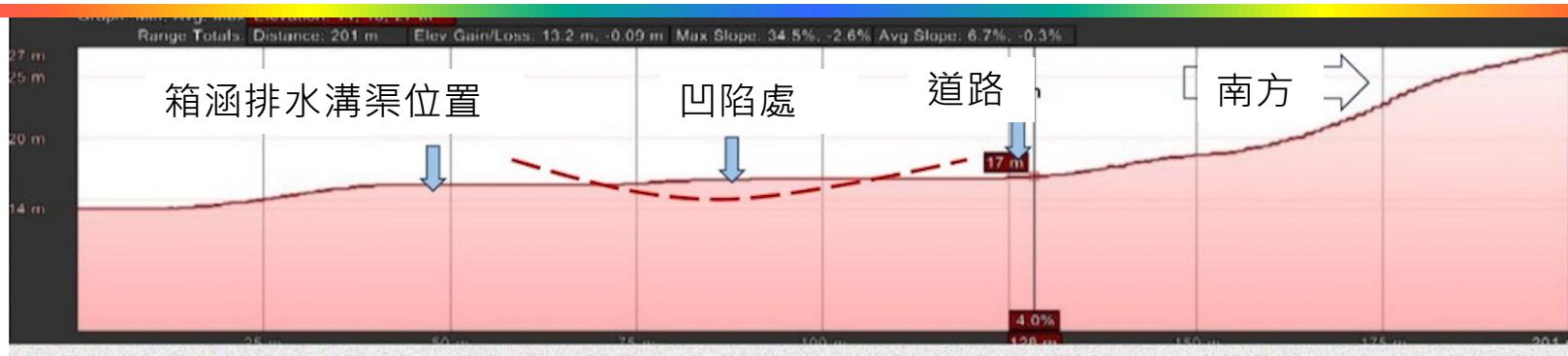
焊道及斷裂口附近金相結果



焊道及斷裂口附近金相結果



關鍵環境因素



地質沉陷模擬

9,307天(25年)，地
層沉陷了24.3 cm

樣本1位置
觀測地層側向位移
達到15.9 cm

馬國天然氣爆炸最終失效機制研判

➡ 失效機制結論

- 既有天然氣管線及施作符合既定技術規範。
- 但發現管道下方部分並未完全由土壤支撐（稱為「懸空段」），而該區域土壤狀況鬆軟潮濕，導致該段管線在該處發生物理性破壞（Physical failure），進而導致氣體洩漏並引發火災。
- 該鬆軟土壤引發管線反覆位移（Cyclic loading），進一步在管道表面產生重複應力痕跡（stress lines）與疲勞條紋（fatigue striations）。
- 金相分析顯示，**拉伸過載（tensile overload）**為主要失效原因。破壞過程為緩慢進展，最終導致延展性破壞（ductile failure），釋放天然氣並觸發火。



KEMENTERIAN SUMBER MANUSIA
JABATAN KESELAMATAN DAN KESIHATAN PEKERJAAN

KENYATAAN MEDIA

HASIL SIASATAN KES KEBOCORAN DAN KEBAKARAN TALIAN PAIP GAS DI PUTRA HEIGHTS, SUBANG JAYA

Pada 1 April 2025, sekitar jam 8.08 pagi, berlaku insiden kebocoran dan kebakaran paip gas di Putra Heights, Subang Jaya, Selangor. Kejadian ini merujuk keselamatan awam, merosakkan infrastruktur, dan menyebabkan gangguan bekalan gas serta elektrik di beberapa kawasan.

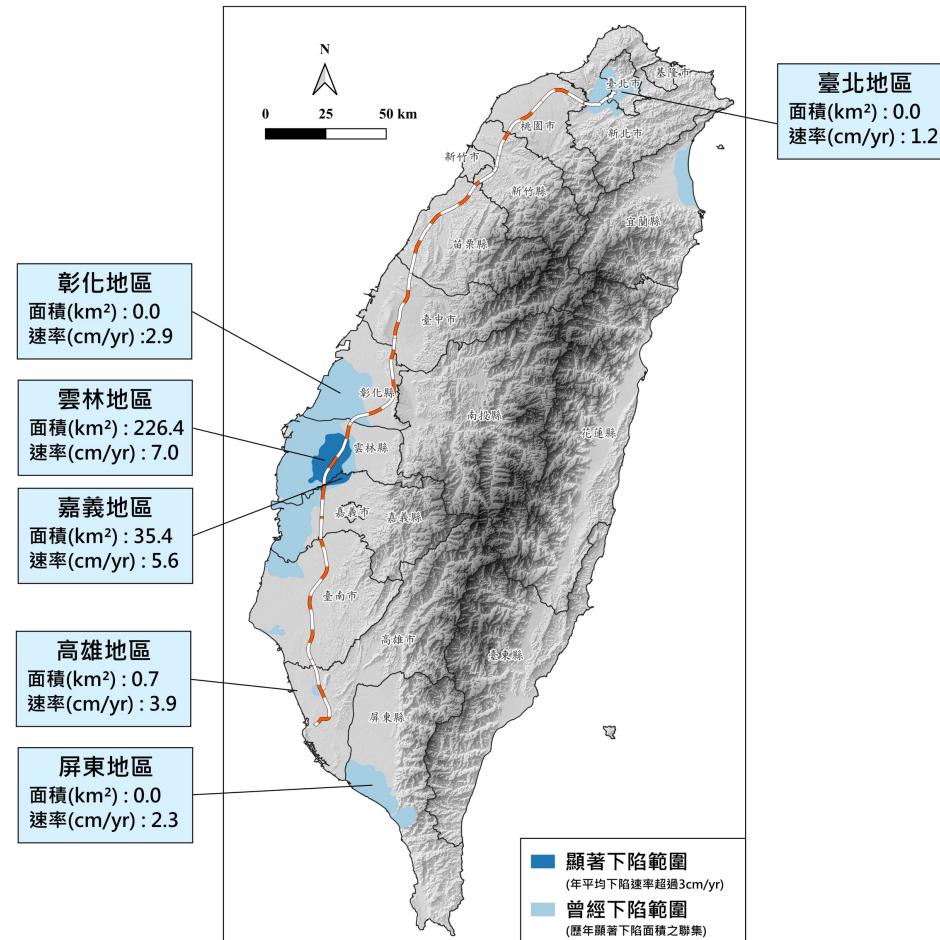
Jabatan Keselamatan dan Kesihatan Pekerjaan (JKKP) Malaysia telah menjalankan siasatan menyeluruh selama hampir tiga bulan dengan kerjasama Jabatan Mineral dan Geosains (JMG), Jabatan Kerja Raya (JKR), Jabatan Bomba dan Penyelamat Malaysia (JBPM), serta Polis Diraja Malaysia (PDRM). Siasatan ini dijalankan di bawah Akta Keselamatan dan Kesihatan Pekerjaan 1994 (Pindaan 2022) dan Akta Petroleum (Langkah-Langkah Keselamatan) 1984. Proses siasatan melibatkan pemeriksaan visual di lokasi kejadian, pengukuran dan semakan komponen paip gas, serta pengambilan sampel untuk analisis makmal.

Hasil siasatan mendapati paip gas yang terlibat memenuhi spesifikasi teknikal yang ditetapkan. Namun begitu, bahagian bawah paip didapati tidak disokong sepenuhnya oleh tanah (*unsupported segment*) yang dikenal pasti lembut dan lembap. Ini mengakibatkan kegagalan fizikal (*physical failure*) pada bahagian paip di lokasi kejadian, menyebabkan kebocoran gas yang kemudian terbakar.

Tanah yang lemah ini menyebabkan paip bergerak berulang kali (*cyclic loading*), yang menimbulkan tekanan berulang (*stress lines*) dan garis keletihan (*fatigue striations*) pada permukaan paip. Analisis metalografi menunjukkan *tensile overload* menjadi punca utama kegagalan. Kerosakan ini berkembang secara perlahan sehingga menyebabkan kegagalan *ductile failure* yang melepaskan gas dan mencetuskan kebakaran.

台灣下陷速率

113年顯著下陷面積與最大下陷速率



資料來源：經濟部水利署

Thank You !

