

出國報告（出國類別：開會）

管線維護研討及檢測技術業務交流

服務機關：台灣中油公司天然氣事業部南區營業處

姓名職稱：謝東昇 副處長

江郁芳 管線組 產品管理師

派赴國家/地區：馬來西亞、新加坡

出國期間：108年11月11日至108年11月15日

報告日期：108年12月13日

目錄

一、摘要.....	1
二、目的.....	1
三、行程.....	1
四、過程.....	1
五、心得及建議事項.....	13
六、參考文獻.....	14

一、摘要

本次出國赴馬來西亞拜訪ROSEN公司，就該公司地下管線裂紋檢測、NIMA多數據整合系統和最新檢測技術等議題進行交流，拜訪BHI公司，就地下管線裂紋檢測、IP檢測數據比對和管線數據完整性管理等議題進行交流，隨後赴新加坡拜訪DNVGL公司，就安全案例、設施描述及氣體安全規定和地質災害對管線的威脅與風險管控等議題進行交流。

二、目的

天然氣管線利用磁通漏(MFL)原理進行智慧型通管器(IP)腐蝕檢測，本次出國任務在於研討檢測工具技術及檢測資料分析與應用、管線安全準則、量化風險評估及完整性管理工具等議題。

1. 瞭解管線IP檢測工具技術及資料分析與應用，作為管線維修之參考。
2. 瞭解管線風險評估及完整性管理技術與應用，用以管控管線之風險。

三、行程

日期	行程
108/11/11	啟程及抵達(台北→馬來西亞)
108/11/12	拜訪ROSEN公司
108/11/13	上午拜訪BHI公司，下午前往新加坡
108/11/14	拜訪DNV GL公司
108/11/15	返程及抵台(新加坡→台北)

四、過程

(一)ROSEN 公司（馬來西亞辦公室）

ROSEN公司於1981年由Hermann Rosen 在德國Lingen創立，本次拜訪ROSEN公司馬來西亞辦公室，主要就地下管線裂紋檢測技術、NIMA多數據整合系統及最新檢測技術等議題進行交流。

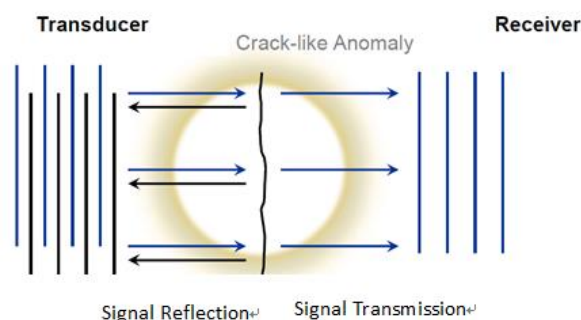
1.裂紋檢測技術：

ROSEN公司透過完整性管理計算裂紋的臨界尺寸，決定檢測方法，最後再進行適用性評估。管線在直管段、環焊縫、直焊縫處不同尺寸裂紋的嚴重程度不同，分不開縫裂紋 (PLANAR CRACKS) 與開縫裂紋 (VOLUMETRIC CRACKS)檢測。



(1) 不開縫裂紋檢測：

ROSEN公司對氣體管線不開縫裂紋是採用EMAT電磁超音波檢測技術，EMAT是針對輸送管線上出現的所有裂縫種類的診斷技術，對氣體輸送管線裂紋檢測是一種技術的突破，因為EMAT檢測不需要液體耦合劑，其檢測工具從直徑4吋至48吋，檢測實績超過50,000公里，已驗證超過4,254個裂紋，2016年6月完成最長EMAT檢測，管線長度超過400公里。



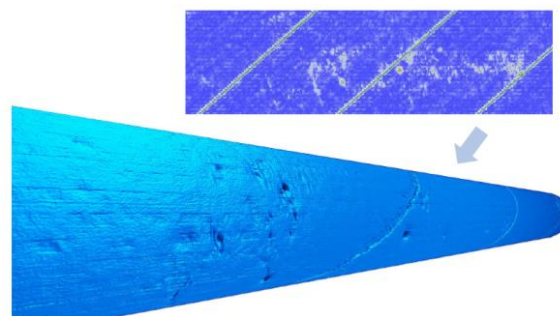
EMAT能夠產生橫波，當遇到裂紋時會產生信號反射，遇到塗層也會產生信號傳送，除了可檢測軸向裂紋缺陷，EMAT也能檢測出環向裂紋、環向焊縫缺陷、塗層剝離及塗層辨識等。

(2) 開縫裂紋檢測：

ROSEN公司對氣體、液體管線開縫裂紋缺陷檢測則是採用MFL-Ultra超高解析磁通漏檢測工具。

MFL-Ultra是透過增加傳感器頻道(sensor channel)的數量、縮小傳感器的間隔距離及增加取樣頻率來提高辨別率。

MFL-Ultra圖像近似右圖雷射掃描報告，辨別率可達周向1.6mm和軸向1mm的取樣速度。



以下為各檢測工具與辨別率：

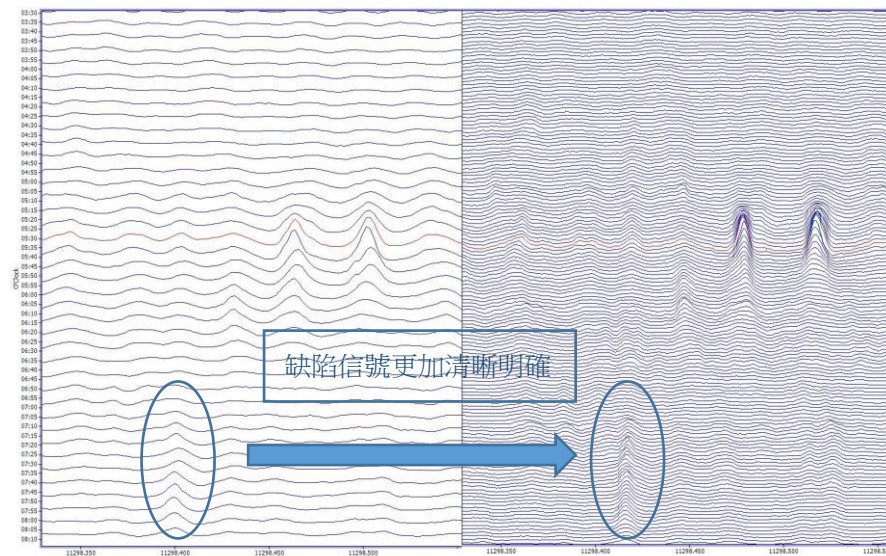
MFL 高解析磁通漏	UTWM 超音波	MFL-Ultra 超高解析磁通漏	Laser Scan 雷射掃描
4-6mm	4mm	1.6mm	1mm

傳統MFL，檢測工具整圈都是單一探頭的設計，且探頭間至少2mm的間隔，但MFL-Ultra檢測工具則是整圈雙探頭列排設計，採雙排探頭輕微交錯方式提高周向的辨別率，還有更先進的軸向設計。

MFL-Ultra有ROSEN公司研發的超高密度傳感器元件，除1.6mm周向排列密度用於高解析度的周向、角度及軸向的測量及1.0mm的軸向分辨率外，霍爾傳感器到管線的距離也被大幅的減小，具備雙層霍爾傳感器的設計增強了數據及腐蝕成長率分析的準確度。



以下為傳統MFL跟MFL-Ultra的對比圖形：



2.NIMA 多數據整合系統：

ROSEN公司的NIMA系統目的在於提高安全性，而所有企業經營努力的目標就是零事故。NIMA系統透過技術和工程的專業知識協助全球各地企業作出決策，NIMA系統需要下列框架要素：

(1) 平台：

定義和執行完整性相關程序，如適用人員，含現場團隊、數據或GIS工程師、完整性管理或風險評估工程師，又如採用NIMA系統的程度，是僅有NIMA完整性管理還是提升到NIMA完整性管理及數據管理。

(2) 程序：

企業透過數據資料庫（營運企業、ROSEN或其他資源）訂定相關程序，從程序、程序模組到資料庫，資料庫內容包括直接評估、風險評估、結構評估、報告和開挖方案及分析等，透過執行NIMA系統的完整性管理，可利用現有的程序模組，開發內部自有的程序模組，可為公共資料庫提供程序模組或與其他營運同業分享優良案例。

(3) 人員：

執行工作並將工程判斷作為決策的一部分。透過雲端技術分享任務更具效率，解決人員缺乏資源的問題、現場培訓課程與線上學習計畫，解決人員培養核心能力的需求。

故NIMA系統是一種多數據的支援框架，完整性管理的應用可整合原有資料庫、文件、其他資料庫及紀錄系統的所有資料，這些資料透過數據管理，可於移動式載具上查看員工、導航、測驗、收集、電子地圖、事故地圖等資料，更具實用性與便利性。

3.管線檢測新技術

有些管線在建造時沒考慮到內部檢測的需求，在現有管線上連接新管線，還有複

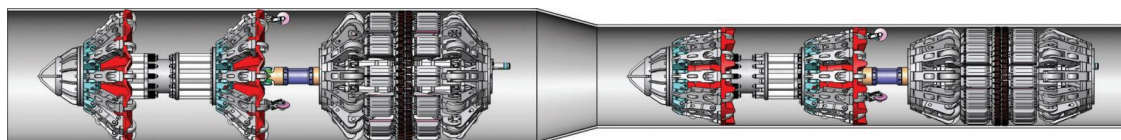
雜的海底管線檢測，這些都是管線檢測時面臨的問題，管線檢測常見的挑戰如下：

- (1) 設計導致通過管線的限制，例如管線彎曲度、長度、T管以及沒有發射端和接收端。
- (2) 輸送管線的狀況，例如壓力、流量、清潔度。
- (3) 輸送產品的性質，例如溫度、多相性。

ROSEN公司將旗下具豐富經驗的工程師、專家、技術人員組成高難度管線診斷部門，依據客戶需求提供或開發有效的解決方案，如自由游動設備(Free-swimming)、系留裝置(Tethered)、機器人或自動推進設備(Robotic/ self-propelled)、雙向探測器(Bi-directional)、MFL、EMAT等。

(1)異徑管檢測

ROSEN公司磁通漏及幾何變形檢測工具有自由壓縮、擴大的檢測能力並確保工具保持在中心位置，其特殊密封碟片確保在密封的同時把摩擦力控制到最低，可通過1.5D彎管半徑，檢測前進行模擬、牽拉試驗。

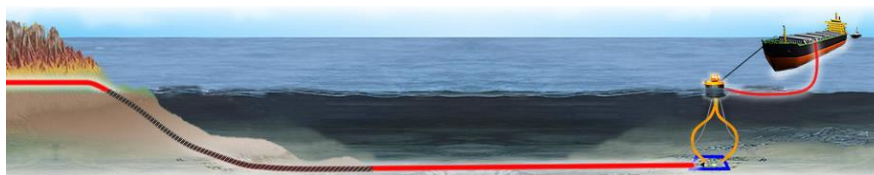


(2)氣體流速偏差檢測

ROSEN公司在氣體管線低流速裝載PDL裝置，PDL裝置測量溫度、壓力強度、壓差及加速度，在清潔檢測階段裝載PDL裝置可有效評估管線輸送狀況，而雙向磁通漏(BiDiMFL)檢測工具則具有高分辨率、低摩擦磁鐵配件、拉動裝置(最佳密封效果)、強化杯狀(Cup)設計(使摩擦更低更平穩)、客製化配件支撐系統、低摩擦計時器、機載電池滿足通行時間、輕巧設計等特性。

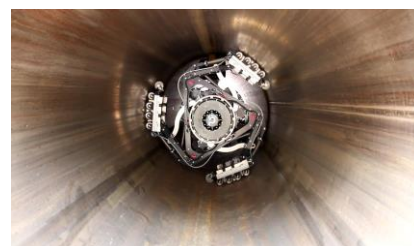
(3)單向管線檢測

單一入口，無法置放追蹤器，終點在海底，停滯留會導致如瀝青、石蠟沉澱，沒有清潔歷史的原油裝卸管線案例，ROSEN公司先用單向清潔、雙向移動的RCP進行清管，然後反向清潔，再連結雙向磁通漏(BiDiMFL)檢測與海底工具監控系統。



(4)無收發出口管線檢測

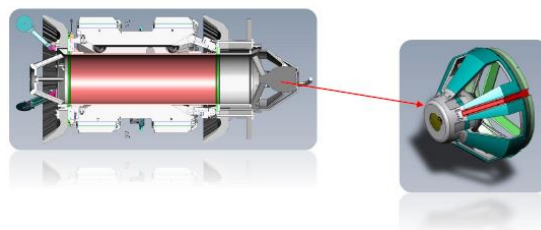
在收發接口無法使用管線內部檢測工具，沒有可供管線內部檢測工具操作的流量及兩端均為球型設計的氣體儲存管線(Gas Storage tube)，ROSEN公司提供RoHelix雙向磁通漏(BiDiMFL)機器人檢測工具，這工



具有高分辨率、雙向型低摩擦配件、機載電源、圖示化監控、電耗監控、多直徑檢測能力。ROSEN公司曾在馬來西亞用10吋機器人進行檢測，2018年用機器人檢測了5個區域。

(5) SCU速度調控設備

ROSEN公司SCU速度調控設備，適用於無法提供穩定流速的氣體管線，最小12吋最大56吋。



(6) 管線錄影

ROSEN公司可提供12吋到56吋ROVISUAL管線錄影服務，共可錄製 22小時。

(二) Baker Hughes Inc. (馬來西亞辦公室)

Baker Hughes 為美國一家為全球石油開發和加工工業提供產品和服務的大型服務公司，對於長途輸送管線的服務範圍有試車(pre-commission)、維護(maintenacne)和管內檢測(ILI)。

2017 年奇異(General Electric Company, GE)公司的能源業務與貝克休斯合併後，BHI 成為 GE 集團下的子公司之一，於 2019 年 GE 公司釋出 BHI 公司部分持股，並將所有油氣事業相關服務轉由 BHI 公司執行，目前 BHI 公司已不再屬於 GE 集團旗下的子公司。

GE 和 BHI 公司在長途輸送管線 ILI 檢測有多元的產品線和超過 45 年以上豐富檢測經驗，全球累計管線檢測里程數超過 2,200,000 公里。

本次拜訪 BHI 公司馬來西亞辦公室，主要就地下管線裂紋檢測、IP 檢測數據比對和管線數據完整性管理等議題進行交流。

1. 裂紋檢測

BHI 公司在長途輸送管線上提供裂紋檢測的工具分別有 UltraScan CD/CDP/CD Edge、UltraScan DUO 和 EmatScan，主要用來找出管線上存在的嚴重裂紋類型缺陷(crack-like defects)。

以下三種設備適用的管徑和能力如下：

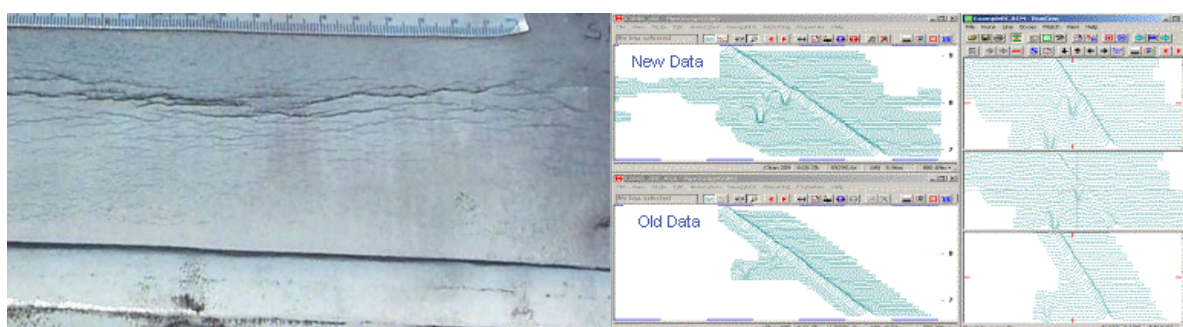
	UltraScan CD/CDP/CD Edge	UltraScan DUO	EmatScan CD
檢測技術	超音波 (Ultrasonic technology)	陣列超音波 (Phased array technology)	電磁超音波 (EMAT technology)
管徑	10 吋-34 吋	24吋-36吋	24吋, 26吋, 30吋, 34吋, 36吋
特點	<ul style="list-style-type: none"> 可檢測微小裂紋(15mm) 適用於液體管線 	<ul style="list-style-type: none"> 可同時檢測厚度和裂紋 適用於液體管線 	<ul style="list-style-type: none"> 可用於氣體管線或液體管線

		<ul style="list-style-type: none"> • 可檢測凹陷上的裂紋 • SCC colonies • Longitudinal fatigue cracks • Toe and hook cracks • Lack-of-fusion cracks • Cracks in or adjacent to long seam weld
--	--	---

BHI 在裂紋檢測評估有超過 20 年的經驗(Post Inspection Crack Assessment, PICA) , 依據業界所建議裂紋評估方法進行平評估, 對檢測中所發現裂紋對管線的危害性進行計算和報告(Engineering Critical Assessment), 包括裂紋形狀(Crack profile)、裂紋比對(Crack comparison)、裂紋評估(crack assessment)、裂紋發生可能性(Crack susceptibility) 層壓評估(lamination assessment)等, 協助客戶對於瞭解裂紋的嚴重度, 提供裂紋維修篩選最佳化建議。

BHI 專家表示, 近幾年來國際上許多長途輸送管線意外事故發生後的調查結果顯示, 其原因與裂紋有關, 如管線危害評估中顯示管線可能存在裂紋問題或過往有類似狀況時, 可考慮進行裂紋的檢查。

經詢問裂紋 ILI 檢測的價格, BHI 回覆依管線特性有所不同無法提供價格, 但如與常見 MFL 腐蝕檢測比較, 價格將高出甚多(3 倍以上)。



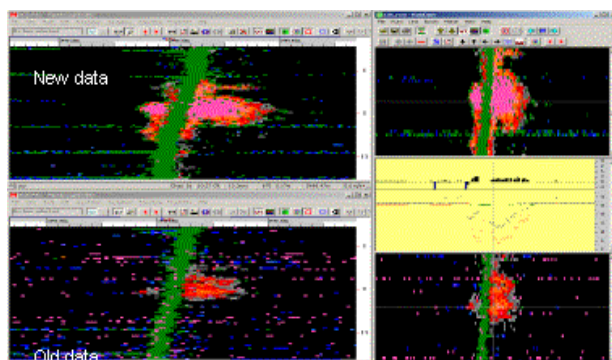
2.IP檢測數據比對

除管線 ILI 檢測服務外, BHI 亦提供客戶 ILI 檢測後數據比對和評估服務, 針對已完成過 2 次以上的管線進行詳細數據比對分析, 包含腐蝕(Corrosion)、裂紋(Crack)以及機械損傷(Mechanical damage)和天候及外力影響(Weather & Outside Force)。

- (1) 腐蝕評估：主要針對兩次 IP 檢測數據進行比對、計算腐蝕成長速率和完整性計算。
- (2) 裂紋評估：參考 BHI 1.裂紋檢測內容。
- (3) 機械損傷和天候及外力影響：主要針對凹陷應變評估(dent strain assessment)和整體彎曲應變評估(global bending strain assessment(IMU))

考量管線檢測廠商每次可能不相同, BHI 說明不同檢測廠商的數據可以進行比對,

但因各家 IP 的檢測系統本身就存在一定的偏差和檢測誤差，所以選擇的比對分析方法將會影響比對結果的準確度，通常採用的方法如 featureing matching, box matching 和 signal matching 等，其中 feature matching 的誤差較大，Signal matching 則最準確但需要兩次檢測為同一家 IP 公司。ILI 比對是相當有技術的工作，建議進行比對前應能有較深入瞭解。



3.管線檢測數據完整性管理 PipeView™ Integrity (PVi)

系統化數據管理是管線完整性管理的趨勢，BHI 在管線完整性管理上也提供相對應的解決方案，透過軟體平台整合管線大量數據，進行分析、評估和協助企業管理，評估、量化風險並協助企業決策，提高管理成效和減少年度檢查費用。



(三)DNVGL 公司（新加坡辦公室）

本次拜訪 DNVGL 公司新加坡辦公室，主要就安全案例、設施描述及氣體安全規定和地質災害對管線的威脅及風險管控等議題進行交流。

1.安全案例(Safety Case)

源自於 1974 年，英國通過法令來管理工作場所中人員的健康和安全，管理者需提供安全的設備、工作環境、工作系統以及確保安全和無風險，執行這些降低風險的標準是在合理可行的範圍內降低造成損害的可能性。

安全案列如 1988 年英國 Piper Alpha 在北海的石油平台發生大規模之爆炸與火球，僅 22 分鐘該平台即被炸毀，平台上的 226 人有 165 人死亡。

英國海上(offshore)法規即是依據 Piper Alpha 災難（1988）的直接結果，每個英國設施的營運商都必須向英國衛生安全機構(HSE)提交安全案例：

- (1) 公司有足夠的安全管理體系

- (2) 定義所有重大事故風險
- (3) 評估風險並將其降低到最低合理可行(ALARP)的程度

安全案例條例（SCR）的主要目標是降低重大事故風險對設施或相關活動中員工的健康和安全。

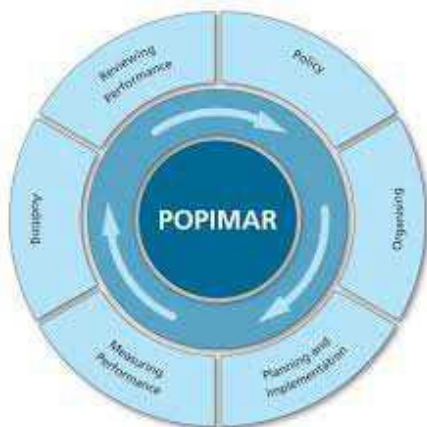
而規定和目標設定不同，規定是遵照規範和規則確保安全，而目標設定則是定義危害並決定要採取什麼措施來管理風險。使用“合理可行”可為管理者設定目標，而不是規定性，“合理可行”的概念是英國健康與安全體系的核心，也是 1974 年法案對工作健康與安全一般性責任的主要部分。

這種靈活性有優勢，但也有其缺點，確定風險是否為 ALARP 可能具有挑戰性，因為這需要管理者擁有判斷力。在大多數情況下，我們可以透過與利益相關者討論建立現存好的做法來做出決定，以達成 ALARP 的共識。但對於高風險、複雜或新的情況，要使用更正式的決策技術（包括風險評估，成本效益分析）來為判斷提供依據。

ALARP 不代表零風險，有時仍可意識到由危害引起的風險，因此即使危害為 ALARP，也會造成傷害。當然，管理者還是應該努力降低並保持 ALARP 的風險，但除非停止一項活動，否則永遠不能完全消除一項活動帶來的風險。

安全案例應定期審查，安全案例反應目前的操作與安裝，安全案例的更新應是變更管理（MOC）流程的例行部分，重大變更（材料改變）是指根本上改變安裝風險或安全基礎需要高層管理者的核准，整體上，安全案例應每 5 年接受一次正式的技術審查（定期審查）。

安全過程和表現需要持續改善，源自英國 HSE 的 POPIMAR 模型：政策(Policies)、組織(Organizing)、計劃(Planning)、實施(Implementing)、衡量(Measurement)、審核(Audit)、審查(Review)，旨在提供有效的健康和安全管理，但自 2013 年以來，英國 HSE 指南已從使用 POPIMAR 模型轉變為 PDCA 方法：計劃(Plan)、執行(Do)、檢查(Check)、行動(Action)，PDCA 在系統和管理的行為方面實現了更好的平衡，健康和安全管理視為整體管理的組成，而非獨立的系統。



Plan, Do, Check, Act Benchmark



計劃(Plan)：確定策略，制定管理安全的策略及組織(Organizing)要執行的人及如何做，在實施計劃(Planning & Implementing)識別並控制風險，考慮將安全管理方式與其他業務領域的管理方式聯繫的需求。

執行(Do)：分析組織的健康和安全風險，這包括風險評估及獲得這些重要權力不被跨大，實施計畫(Implementing)確定風險控制措施並將其落實，確保每個人都有能力執行其任務。

檢查(Check)：衡量(Measurement)績效，在此階段安全審核非常有用，因為需要檢查計劃是否正在實施，風險是否得到控制以及目標是否實現。調查事故和事端，監控過程的重要組成部分，徹底的事故調查（由內部事故小組或外部顧問進行）將有助於更正任何安全遺漏部分及展現對安全的承諾。

行動(Action)：審核(Audit)/審查(Review)績效，PDCA模型是周期性的，這個階段從事故、經驗和其他組織中學習，便於重新查看計劃、政策和風險評估並在必要時進行更新。學習課程並採取相對應的行動，出現問題時找出常見因素，包括人為因素和組織學習的機會。

2.設施描述及氣體安全規定

描述設施的性質和類型、資產和與其相連的下游資產的地理範圍，所有辦公室（包括子公司）的位置，以及在每個位置進行活動的簡要說明，對加工或生產過程的描述，提供相關的流程圖（PFD）和管線&儀表圖（P&ID）。

設施描述還要詳細說明對設施中存儲或使用的所有危險物質，包括設施內危險物質位置的平面圖，傳遞和配送運營商，對網絡壓力層、地面設施控制系統（SCADA）的描述等，以及任何危險物質的所有屬性，包括閃點，沸點。另外，重大事故期間危險物質的行為，如液化天然氣(LNG)發生蒸氣雲或城市瓦斯(Gas)工廠發生洩漏期間的行為，安全案例應定義暴露致命濃度的最大允許濃度及討論造成損失或污染時危險物質可能的危害途徑。

設施描述含危險物質的材料安全資料表（MSDS），操作條件和安全操作極限的說明，及對工廠效能程序的描述，例如電力和所有備用系統。安全案例應明確指出可能發生重大事故的活動地點，包括發生重大事故時可用的減緩系統。另外，對現場障壁、排水系統的描述，包括平面圖、圖說等，如果沒有可能會造成現場或其他地點重大事故。設施描述也包括對鄰近設施的描述，可能導致或導致重大事故環境特徵的詳細資料。

重大事故中危險物質的行為，如新加坡城市燃氣(Town Gas)是混合氣體，主要是氫氣（50%）、甲烷（27%）和二氧化碳（13%）以及氮氣、一氧化碳和乙烷，城市燃氣與天然氣的反應類似，比空氣輕，又如在大气壓下，LNG會在-162°C時沸騰，存在低溫危險，會引起碳鋼結構脆化（持續時間足夠），並有可能使裸露的人員燙傷，LNG少量洩漏可能導致大部分LNG蒸發，大量溢出將導致形成液體池，從LNG池中蒸發或逸散的甲烷氣體由於其低溫（最初為-162°C）而會形成緻密的氣體流（即比空氣重），因

此會在重力作用下擴散，低溫的LNG蒸氣將顯示為白色的雲，而氣體濃度高於LFL而低於UFL的任何地方，均可點燃散佈的天然氣或城市燃氣，點燃的雲將在其所有易燃物質上閃回，從而導致閃火，且回火幾乎總是到達源頭，並導致殘留的射流，在密閉或部分密閉的空間中點燃大量易燃氣體或城市燃氣時，可能會發生蒸氣雲爆炸（VCE）。

危險區域是指可能存在或可能存在易燃氣體的區域（三維空間），並且在安裝和使用設備時需要採取特殊的預防措施。無論生產、使用、儲存和處理易燃氣體和可燃粉塵，均應進行危險區域分類，以確定潛在火源適用的禁區範圍。

2002年的《危險物質和爆炸性空氣法規》（DSEAR）首次規定了進行危險區域研究的特定法律要求，並以區域的形式記錄了結論，其主要目的是促成正確的選擇。安裝在該環境中安全使用的設備，要考慮到將存在的易燃材料的特性。

Zone0—危險區域是指連續或長期或經常存在易燃氣體的區域。

Zone1—危險區域是在正常操作中偶爾可能發生易燃氣體的區域。

Zone3—危險區域是在正常操作中不太可能出現易燃氣體的區域，但如果確實發生，它將僅存在很短的時間。

3.地質災害對管線的威脅及風險管控-以馬來西亞 SSGP 天然氣管線為例

(1)背景

馬來西亞沙巴薩瓦拉克(Sabah Sarawak)天然氣管線（SSGP）是一條512公里的天然氣管線，將沙巴的Kimanis與沙撈越的民都魯(Bintulu, Sarawak)連接起來，2009年開始建造，2013年完工。外徑為36英寸的螺旋焊接管線，使用API 5L X70鋼管建造的，厚度在14至20mm之間。管線埋設於沙巴州約90公里，沙撈越州約422公里，有多個交叉路口，海拔較高的山坡，茂密的森林，河流，沼澤和棕櫚油種植園。該管線的設計目的是將750 MMscfd的天然氣從沙巴海上天然氣接收站（SOGT）輸送到位於沙撈越民都魯的馬來西亞液化天然氣（MLNG）綜合設施。

SSGP穿越了許多不同類型的地形，2014年6月和2018年1月發生了兩次管線破裂事故，導致PETRONAS公司重新評估其在地質災害中建造的管線的維修和維護。

管線破裂事件觸發了整個SSGP管線沿線對地質災害活動環境的銲接堅固性的重新評估。SSGP故障事件中需要解決的問題之一是銲接強度不符合的現象。實際已盡可能地減小對管線受地質災害的影響，但這是一項艱鉅的任務，SSGP也將進行永無止境的維修工作。

為了管理、降低風險並減輕對銲接的影響，已經設計了一種新的銲接程序，並進行了全面測試和合格。目的是要提供一種具有更高應變能力的銲縫，以使管材的金屬應變能力得以提高。新的環銲技術也打算用於所有SSGP銲接維修和維護上。

在地質災害活動區發生SSGP管線破裂事故的直接原因為管線建造原始銲縫的應變能力和銲縫強度不符合情況，新的改進銲縫設計及銲接程序，已通過全尺寸彎曲測試，修復段的銲接過程面臨的挑戰以及在受溫度波動影響的下進行的銲接預防措施會

影響管線的膨脹和收縮。

PETRONAS公司在改進焊接應變能力方面，以提升焊接SSGP管線在地質災害活動環境中的堅固性。完成的額外工作和進行的改進有：

- 1) 改善焊接應變能力的選項
- 2) 全面測試，用於驗證和鑑定新的焊接設計和焊接程序。

(2)管線設計標準

SSGP管線根據ASME B31.8：2007版進行設計，可在其25年的設計壽命內提供非酸性服務，並通過熔融粘合環氧塗料在內部進行了防腐蝕保護。

在施工階段，採用API Std 1104使用管線和相關設施的焊接來建立所有相關的WPS，符合規格的參數。根據API Std 1104，應考慮在施工、操作和環境條件下向管線提供軸向載荷的應力。該管線是根據API Std 1104設計的，能夠承受高達0.5%的應變。因此，施加0.5%應變的地質災害活動區將對該管線構成嚴重威脅。

(3)地質災害活動區

SSGP管線路線具有不可預測的地質災害威脅，尤其是在大雨期間。地質災害研究確定了多個位置需要封閉監測和加固斜坡以最大程度地減少對管線的不良應變影響。

(4)管線事故記錄

2014年6月和2018年1月分別記錄了2起管線事故。

第一次事件發生在砂拉越的拉瓦斯市(Lawas, Sarawak)，預估管線橫向推移1.3公尺，運營被暫停了將近2年，以便進行全面的故障調查、技術研究和現場維修工作。在此期間進行的調查如下：

- 1) 整個管線路徑的地質災害研究。
- 2) 重新審查在施工階段拍攝的所有射線相片。
- 3) 斷裂的管線環焊縫的實驗室分析。

第一次事故發生後，數百個焊接接頭已成功修復，然後重新使用。該管線已成功恢復，2016年恢復了天然氣出口。

第二次管線破裂事件發生於2018年1月在沙撈越州拉瓦斯的朗盧平(Long Luping)，預估管線橫向推移3公尺，管線作業再次暫時停止，以便進行土壤研究和現場焊接修復工作。在此期間進行的調查包括：

- 1) DNV GL新加坡辦公室進行故障調查



2)高應變能力焊接（WPS）的開發和鑑定

3)高應變能力焊接的焊工鑑定

除此之外，所有識別出的地質災害風險區域都已進行非接觸磁力法(MTM)和管線內部檢查 (ILI)，以識別出管線變形和應變變形狀態的區域。透過超音波測試(PAUT, ToFD)、磁粉測試(MT)、渦流測試(EC)和射線照相測試(RT)，對檢查出的高風險焊接接頭進行重新檢查，以確認是否存在缺陷。

(5)符合API 1104標準的原始焊接的全面模擬測試（現有WPS）

使用來自SSGP的多餘管線，在存在內部壓力的情況下模擬外部載荷下的焊接強度。產生的焊縫存在焊縫未對準和根部缺陷的情況，這些缺陷模擬了失效的管線環焊縫的狀況。

DNV GL新加坡實驗室進行夏比衝擊試驗和拉伸性能機械測試，這兩個參數將有助於符合條件下的焊接，從而提高焊接承受環境軸向載荷的能力。

實驗室按照原始的WPS複製了許多焊接，以進行全面的彎曲測試。根據機械測試報告，拉伸強度記錄在83,541-92,098 psi之間，而API驗收為82,671-110,228 psi，因此被接受。同樣，對於衝擊性能，焊接金屬，熱影響區（HAZ）和基本金屬的記錄能量值分別為62.7焦耳，127.3焦耳和262.7焦耳，滿足衝擊性能的最低接受標準。

全刻度彎曲試驗的結果表明該管線在平均拉伸應變低於0.5%的情況下因全孔破裂而開始破裂，並存在一個半橢圓形表面破裂根部缺陷，尺寸為高3.0mmx長190mm，2mm高低(hi-lo)的存在。

通過從位於測試管的張力側的應變儀記錄的平均測量值來計算平均拉伸應變。斷裂瞬間記錄的水壓和環焊縫的最大撓度分別為92.04 bar和200.94mm，發生了全孔不穩定斷裂。斷裂開始後，環焊縫沒有殘留的斷裂能力，並且發生了全孔斷裂。



(6)高應變能力焊接的全尺寸模擬測試

使用基本的SMAW塗層，即用於根焊道的E7016-H4和用於熱，填充和蓋焊道的E9045P2 H4R，並且在蓋焊道後在外表面上額外增加了至少3mm的高度和60mm寬度的焊縫。焊縫的根部缺陷為長190mm，高2.9mm和寬0.7mm以及2mm的未對準(根處為hi-lo)。

討論除了最小化地質災害風險外，還需要解決符合條件下的焊接強度，定義了不當的焊接，其中具有比母材低的拉伸值的焊接金屬。在特定時間存在較高應變時，焊縫金屬的屈服超出其彈性極限，這會導致焊縫剪切撕裂。



考慮的改善應變的策略包括使用更好、適當的電極處理方法，例如儲存(storage)、

烘烤和固定，這將使焊接過程中氫脆和延遲開裂的風險降到最低。使用鹼性覆蓋電極代替纖維素電極，與用於原始填充和封蓋的纖維素電極相比，鹼性電極的抗拉強度有所提高，從80,000 psi (E-8010) 到90,000 psi (E-9045)，以符合基本金屬的抗拉強度。使用E-8010纖維素電極將E-6010根處和E-8010熱度，填充和封蓋結合使用，可提供0.48%的最大應變能力。與焊接過度一起使用時，正確選擇焊條可以使整個環焊縫能夠承受高達3%以上的較高應變，這證明通過3D非線性FEA分析和內壓全尺度彎曲測試。對於高應變需求的管線沿線位置，應使用基於應變的設計來替代傳統基於應力的設計。

基於應變的設計利用CTOD斷裂韌性和應變標準來開發具有高應變容量環焊縫焊接規範的接頭設計，實際監測地質災害的影響，這樣可以通過識別土壤移動來快速採取行動，並在有需要時動員執行減災工作，改善地質災害管理，如邊坡的加固和阻止土壤的移動，且在確定的戰略位置使用地質災害感知器或振弦式應變儀感知器，可以實現有效的地質災害管理。

焊接修復解決方案的其他選項：1) 鉚接套筒 2) 灌漿連接 3) 複合包覆

五、心得及建議事項

天然氣輸氣管線負責輸送天然氣供應用戶使用，為本公司相當重要之輸送管線，但管線受應力或環境作用容易產生腐蝕、變形、裂縫及管壁薄化等缺陷，會降低管線之強度，進而造成管線破損洩漏導致工安事故，故管線之檢測、維護工作極為重要。

近幾年來國際上許多長途輸送管線意外事故發生後的調查結果顯示，其原因與裂紋有關，雖然裂紋檢測費用較高，但如管線危害評估中顯示管線可能存在裂紋問題或過往有類似狀況時，可考慮進行裂紋的檢查。

BHI公司說明不同檢測廠商的數據可以進行比對，但因各家IP的檢測系統本身就存在一定的偏差和檢測誤差，所以選擇的比對分析方法將會影響比對結果的準確度，建議進行比對前應能有較深入瞭解。

IP檢測作業時天然氣輸氣管線若無法提供穩定流速則可考慮裝置速度調控設備，如ROSEN公司的SCU。

系統化數據管理是管線完整性管理的趨勢，透過軟體平台整合管線大量數據，進行分析、評估和協助企業管理，評估、量化風險並協助企業決策，提高管理成效和減少年度檢查費用。

DNVGL公司說明安全案例必須證明重大事故危害風險已得到控制且為ALARP(最低合理可行)，可降低重大事故危害對危險設施或相關設施對員工健康和安全的風險，且安全案例是活的文件，應經常反應設備現行操作方式，旨在提供員工使用，以作為參考文件，而不是束之高閣。

設施描述需要提供包含有用信息的可讀文件檔案和包含太多細節以至於文件檔案很快過時需要頻繁修訂需取得平衡，安全案例必須說明設施的工作方式以及為何採用特定的安全設計解決方案。

所有長途輸送管線皆經過適當的設計、施工，啟用前也經過適當測試，以確保其預定的持壓能力，但對於高應變需求的管線沿線位置，應使用基於應變的設計來替代傳統基於應力的設計。由PETRONAS公司案例了解在地質災害活動區發生天然氣管線(SSGP)管線破裂事故的直接原因為是管線建造原始焊縫的應變能力和焊縫強度不符合所造成，PETRONAS公司也將進行永無止境的維修工作。

高應變能力的環焊縫可以作為在地質災害活躍環境中提供更高管線應變能力的替代選擇，在地質災害活躍的環境中，由於各種類型的地質災害，應變預計將超過0.5%，如果發生地質災害的風險超出了允許的範圍，則可以使用現場維修作為替代解決方案，但是，當環焊縫承受的應力超過彈性極限時，應進行鑑定、測試和有限元素（FE）的模擬。

六、參考文獻

1. ROSEN-Girth Weld Crack Inspection, NIMA Introduction, New Technologies & Challenging Pipeline Inspections
2. BHI-Process & Pipeline Services
3. DNVGL-Singapore Gas Safety Case Presentation, Proceedings of the Conference on Asset Integrity Management-Pipeline Integrity Management Under Geohazard Conditions AIM-PIMG2019 March 25-28, 2019, Houston, TX, USA