

76年10月創刊 111年07月出版

瓦斯季刊 140期

Fuel Gas Quarterly

瓦斯季刊

(一四〇期)

中華民國一十一年七月出版



風雨中

踏浪前行

柴山多杯孔珊瑚是 2012 年被發表的世界新種
2017 年大潭藻礁發現了它的身影
但學術界對它認識不多……

中油出錢出力監測調查柴山多杯孔珊瑚

2018 年，三接動工前
中油調查發現 75 個群體



調查人員紀錄柴山多杯孔
珊瑚生長狀況

2020 年，三接動工後
中油調查發現 100 個群體以上

沒有調查 就沒有保護

10年換表

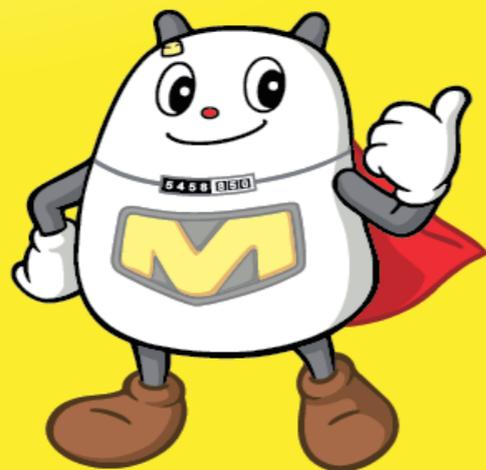
首選

微電腦瓦斯表

你們家的瓦斯表幾歲了？

一天只多1.3元，加買家人的安全

3 **漏氣** **超時** **地震**
大安全遮斷功能



換表增好 安全沒煩惱



微電腦瓦斯表

三大安全功能

-  漏氣遮斷
-  超時遮斷
-  地震遮斷



更多資訊請上微電腦瓦斯表官網查詢或洽詢天然氣公司服務專線

目錄



封面說明：

拖船帶纜協助LNG船舶靠泊

資料來源：

18萬立方公尺級液化天然氣船--成功靠卸台灣中油公司台中液化天然氣廠

發行人：尚永強

編輯委員：（以姓氏筆劃為序）

王文一 李正明 林登章

蔡三郎 盧東岳 謝俊雄

執行編輯：唐惠英

發行所：欣然氣體燃料事業研究服務社

地址：台北市松山區南京東路四段100號12樓

電話：(02)2579-1137

E-mail: sjgrtw@gmail.com

印刷所：鼎順印刷有限公司

地址：新北市中和區景平路703巷2弄1號

電話：(02)2309-1319

E-mail: a638177@yahoo.com.tw

本刊收編印費每本新台幣140元

全年四期收編印費新台幣480元

郵政劃撥0178888-3號 欣然研究社帳戶

中華郵政台北雜字第1633號執照登記為雜誌交寄

本刊電子網頁 facebook.com/sjgrtw/

國際瞭望

2 俄烏戰爭對全球天然氣市場之影響分析

臺灣經濟研究院助理研究員/徐瑋成

21 以天然氣為過渡期能源--印度積極發展自主能源

作家/高永謀

能源探討

27 漫談天然氫氣--未來新的天然氣資源

臺灣中油公司探採研究所前所長暨中國文化大學地質系
兼任副教授/翁榮南

能源知識

41 從本質安全與功能安全設計談瓦斯公司整壓站的保安裝置

退休人員/李正明

能源展望

58 18萬立方公尺級液化天然氣船--成功靠卸臺灣中油公司臺中液化天然氣廠

作者 文/陳品蓁 照片/陳鈞廷

俄烏戰爭對全球天然氣市場之影響分析

作家 徐瑋成

一、議題緣由

俄羅斯與烏克蘭於 2014 年「克里米亞危機」即有嫌隙，2022 年烏克蘭欲加入北約 (North Atlantic Treaty Organization, NATO) 及歐盟 (European Union, EU)，此舉引發俄羅斯不滿，遂於 2022 年 2 月 24 日對烏克蘭發動戰爭，進而使歐洲市場面臨動盪局面。

戰爭爆發後，各國皆譴責俄羅斯，包含美國、英國、歐盟、日本等均挺身為烏克蘭發聲，呼籲俄羅斯停止戰爭。然而，時至今日，雖戰事已相對趨緩，但未完全停歇，軍事活動仍持續發生。

俄羅斯為全球能源生產大國，包含石油及天然氣皆有大量出口，其管道天然氣 (PNG) 可滿足歐洲市場約 4 成之需求，顯示歐洲地區高度仰賴其天然氣。受俄烏戰爭影響，歐洲各國憂心戰事會導致天然氣供應中斷，造成供氣不穩，進一步使市場緊張；歐洲天然氣價格基準 TTF 持續飆漲，亞洲 LNG 價格亦因歐洲市場動盪，連帶受影響，打亂國際市場行情。

受俄烏戰爭的影響，全球市場及各國政府紛紛提出相關策略、措施及改革方案，以因應市場及產業帶來之衝擊。本文將探討俄烏戰爭對全球天然氣市場之影響及衝擊，並提出研析觀點。

二、俄烏戰爭對國際天然氣市場之影響

(一) 歐洲天然氣市場簡介

1、歐洲管道天然氣貿易概況

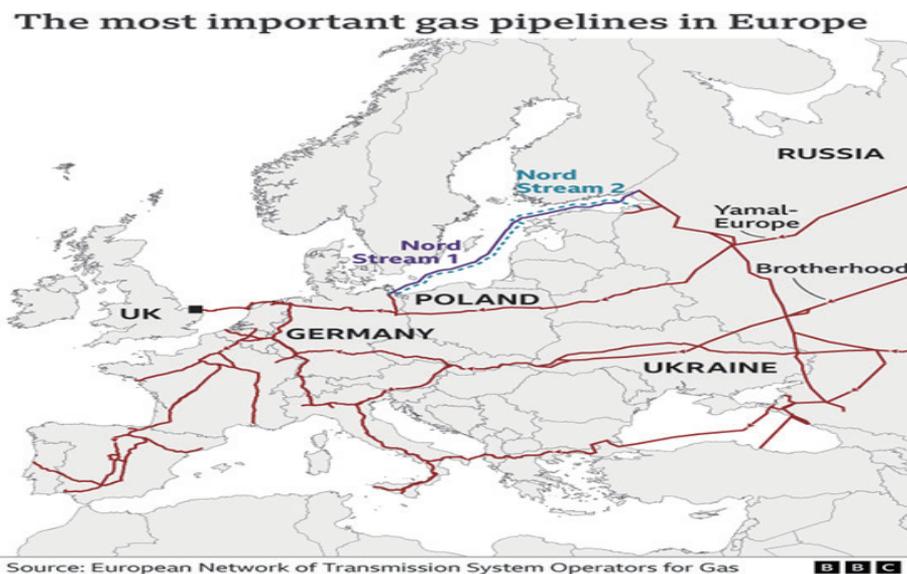
歐洲為全球第二大天然氣市場，僅次於亞太地區，貿易主要為管道天然氣 (Pipeline Natural Gas, 以下簡稱 PNG)，其他需求則透過液化天然氣 (Liquefied Natural Gas, 以下簡稱 LNG) 供應。歐洲 PNG 最大供應來源為俄羅斯，其中又以俄羅斯天然氣工業股份公司 (以下稱 Gazprom) 為首，透過多條管線供應至市場，包含北溪 1 號 (Nord Stream1)、亞馬爾管線

(Yamal)、Brotherhood 管線、土耳其溪管線 (Turk stream) 等，而主要為北溪 1 號 (直接從俄羅斯供應至德國) 及亞馬爾管線 (途經白俄羅斯、波蘭等國供應西歐國家)。

俄羅斯 PNG 供應歐洲市場約 4 成，等同直接掌握能源命脈，除俄羅斯外，挪威及荷蘭等天然氣資源豐盛之國家，亦供應歐洲市場，如挪威依靠開發北海氣田 (North Sea Field)，荷蘭倚靠格列羅寧氣田 (Groningen Field)，將天然氣輸往歐洲。除歐洲國家外，非洲國家如阿爾及利亞，亦有供應 PNG 予歐洲市場，主要供應義大利等國。

德國為歐洲市場中 PNG 進口大國，其中約 55% 來自俄羅斯，其他國家如義大利、土耳其、英國、法國、比利時等皆倚靠 PNG 滿足國內市場需求。上述國家除德國外，皆有進口 LNG 補足 PNG 供應之不足。德國政府積極推動能源轉型政策，逐步汰除高碳化石能源 (煤炭及石油)，致力發展再生能源、核能及天然氣，惟天然氣完全仰賴 PNG 供應，故俄羅斯能源供應及政治局勢的改變，將大幅影響該國能源安全情勢。有關俄羅斯供應歐洲地區主要管線參見圖 1：

圖 1 俄羅斯供應歐洲地區主要管線分布圖

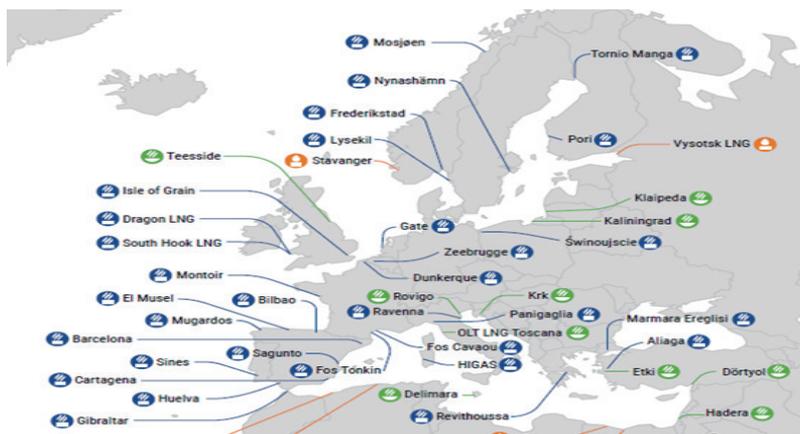


資料來源 :BBC-Ukraine war:Russia halts gas exports to Poland and Bulgaria 2022.

2、歐洲液化天然氣貿易概況

除 PNG 外，歐洲諸多國家亦有進口 LNG，其中以英國、法國、西班牙、比利時及義大利等國為主要進口國家。依據 GIIGNL 年度報告資料，2021 年全球 LNG 進口量約為 3.72 億噸，其中歐洲市場總進口量約為 7,505 萬公噸，占全球進口量約 20%，主要進口國分別為西班牙 (18%)、法國 (16%)、英國 (15%)、土耳其 (13%) 及義大利 (9%)。歐洲地區 LNG 主要由中東地區 (卡達)、美洲地區 (美國)、非洲地區 (阿爾及利亞) 及俄羅斯供應。因以 PNG 作為主要天然氣貿易方式，故部分國家會將 LNG 作為商品交易，如購入 LNG 船貨後，再進行轉賣，或天然氣庫存水平足夠，則透過接收站以 re-loading 之方式進行復出口，賣至其他地區 (如溢價較高的亞太地區) 進行套利。有關歐洲地區天然氣接收站之分布參見圖 2：

圖 2 歐洲地區天然氣接收站分布圖



資料來源：GIIGNL- The LNG industry GIIGNL Annual Report 2022.

(二) 國際天然氣價格變化情勢

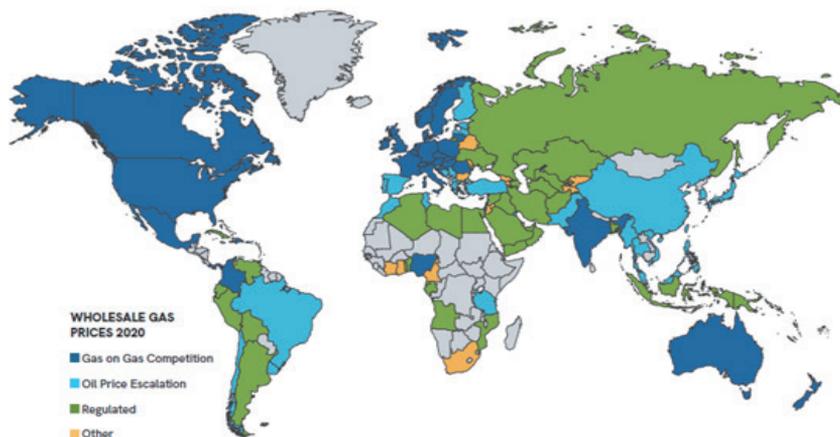
國際天然氣市場主要劃分三大區域，分別為北美、歐洲及亞太市場，各區域有明顯價格差異，其中 LNG 以亞太地區為關鍵指標。

LNG 貿易價格通常與競爭燃料價格掛鉤，並透過定價公式定期調整。全球 LNG 進口計價方式，分為油價連動 (Oil Price Escalation, OPE) 及氣對氣競爭 (Gas on Gas, GOG) 兩類。

其中 OPE 機制以原油價格 (如 JCC 或 Brent)、GOG 則以天然

氣市場競爭價格為基礎訂價指標，包含天然氣交易中心之現貨價格及 LNG 採購價格，如北美 HH 價格 (Henry Hub)；歐洲 TTF (Title Transfer Facility)、NBP(National Balancing Point)；亞洲 JKM (Japan & Korea Markers)、EAX (East Asia Index) 等。有關全球天然氣價格指標分布參見圖 3:

圖 3 全球天然氣價格定價機制 (區域別)



資料來源：IGU-Wholesale Gas Price Survey 2021.

1、歐洲市場：

(1) 主要計價指標：

歐洲天然氣市場主要以 PNG 為主，交易依據兩大價格指標，分別為英國 NBP(National Balancing Point) 及荷蘭 TTF(Title Transfer Facility)，其中 TTF 掛牌於洲際交易所 (Intercontinental Exchange, ICE)。歐洲市場多為虛擬交易，NBP 價格指數以英國 GDP 成長、油價及西北歐淨進口天然氣為基礎，TTF 則由荷蘭天然氣輸送系統運營商 Gasunie Transport Services BV 所營運，為虛擬交易平台。近年 TTF 由於長約交易之便利性，具高度優勢，與 NBP 價差逐年減少，成為計價指標主流。

(2) 俄烏戰爭之影響

自 2022 年 2 月 24 日俄烏戰爭後，歐洲市場即陷入恐慌，因俄羅斯掌握歐洲地區能源命脈，尤其以天然氣供應最

為重要。歐洲各國憂心俄羅斯恐中斷天然氣供應，且可能作為政治或軍事談判籌碼，市場於不安之情況下，導致價格飆升。當日 TTF 價格即上升至約 44.0 美元 /MMBTU(2022 年 2 月 23 日價格 29.5 美元 /MMBTU，增長 50%)，NBP 亦從 28.9 美元 /MMBTU 飆升至 43.1 美元 /MMBTU(增長 49%)；而 2022 年歐洲地區 2 月份天然氣平均價格與去年同期相比上升 3 倍以上。

自俄烏開戰以來，全球多個國家即發聲譴責俄羅斯之軍事行為，並提出眾多反制手段，以促使停止軍事行動，如聯合國召開安理會要求俄軍停止攻擊；實施經濟與金融制裁，包含停止金融交易、凍結海外資產及剔除環球銀行金融電信協會（SWIFT）支付系統；中止外交關係等。

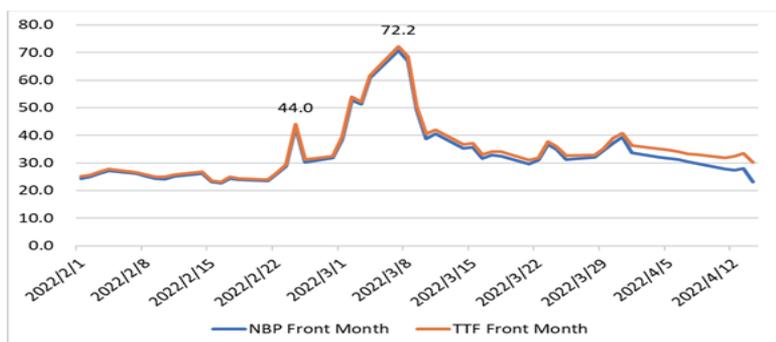
2022 年 3 月戰爭持續延燒，歐洲市場仍籠罩不安與恐慌之氛圍。同年 3 月 7 日美國將制裁項目進行升級，與英國合作禁止俄羅斯的石油商品運輸與販售。此舉使歐洲市場陷入新一波恐慌，當日 TTF 價格飆漲至 72.2 美元 /MMBTU，成為近期歐洲天然氣價格之高峰。2022 年 3 月歐洲天然氣平均價格增加至 42.3 美元 /MMBTU，相較去年同期成長 6 倍。

俄羅斯面對西方盟國的制裁亦提出反制手段，2022 年 3 月 24 日起針對「不友善國家」購買天然氣須以盧布支付。若買家不以盧布支付，將於截止日(2022 年 3 月 31 日)後停止供應。惟依據後續觀察，俄羅斯於截止日後，並未停止對不友善國家的天然氣供應，往西向的管線流量仍保持正常，對市場價格影響不大。

2022 年 4 月歐洲天然氣價格隨著俄烏戰事逐漸趨緩，呈現下降趨勢，惟價格與過往相比，仍處於高位。有關歐洲地區天然氣價格變化參見圖 4：

圖 4 歐洲地區天然氣價格變化趨勢

單位：美元 / MMBTU



資料來源：路透社資料庫，本文繪製。

2、亞太市場：

(1) 主要計價指標：

亞太市場主要以東北亞等國為主，代表國家為日本、中國、韓國及臺灣，東北亞諸國多為天然氣資源稟賦不足，且受限地理條件，係以進口 LNG 作為交易模式。目前價格指標為日本進口原油加權平均價 (JCC) 或布蘭特原油指數 (Brent Index)，因氣價與油價連動，較難反映市場供需變化。

亞太 LNG 計價早期多為「油價連動」，因日本為亞太地區第一個進口 LNG 之國家，且進口量相對較其他國家龐大，故天然氣價格 (長約) 多以 JCC 作為計價基準。LNG 進口價格公式經過數十年的演變，從早期單一與原油直接掛鉤，發展至今的直線、S 曲線價格公式等。

近年亞洲正逐漸朝向「氣對氣」定價發展，買家要求定價機制符合區域市場，如標普全球普氏 (S&P Global Platts) 之 JKM (Japan Korea Marker)，即亞洲普遍使用之 LNG 基準價格 (主要為現貨)，惟與國際原油價格連動之定價模式，短期內仍占主導地位。

(2) 俄烏戰爭之影響

亞太地區為全球第一大 LNG 市場，依據 GIIGNL 年度報告進口約 2.72 億噸，占全球交易量約 73%，而全球前五大進口國皆位於亞洲，包含中國、日本、韓國、印度及臺灣。

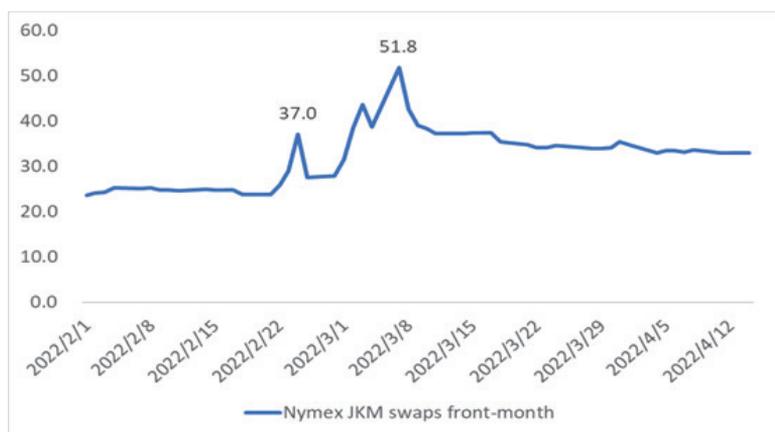
俄烏戰爭使歐洲地區天然氣價格上升，買家擔憂俄羅斯不預警中斷供應，轉向大量購買 LNG，以確保用氣需求，因此間接推高全球 LNG 價格。亞太地區作為 LNG 貿易重鎮，面臨歐洲買家大規模搶貨，且 2 至 3 月時值冬季，仍有大量供暖需求，亞太與歐洲市場無論價格或數量皆處於競爭關係，因此受歐洲市場影響，導致價格飆升。

俄烏戰爭爆發當日，亞洲天然氣價格即上升至 37.0 美元 /MMBTU(2022 年 2 月 23 日價格為 29.0 美元 /MMBTU，增長 28%)；2022 年 2 月份平均價格與去年同期相比上升 2.4 倍以上。同年 3 月 7 日美、英兩國宣布將對俄羅斯石油商品實施制裁，造成新一波的價格高峰，當日飆漲至 51.8 美元 /MMBTU，成為近期之高峰。2022 年 3 月平均價格上升至 37.2 美元 /MMBTU，相較去年同期成長近 5 倍。

2022 年 4 月俄烏戰事逐漸趨緩，亞洲與歐洲市場之價格競爭壓力逐漸下降，且因冬季結束，供暖需求減少，加之中國(全球第一大 LNG 進口國)因 COVID--19 疫情爆發，國內經濟活動減少，使用量下降。總體而言，亞太地區 LNG 進口需求減少，天然氣價格亦同步下降，惟平均仍維持 30 美元 /MMBTU 之高水平價格(相對過往價格)。有關亞太地區天然氣價格變化參見圖 5：

圖 5 亞太地區天然氣價格變化趨勢

單位：美元 /MMBTU



資料來源：路透社資料庫，本文繪製。

3、北美市場：

(1) 主要計價指標：

北美天然氣市場與歐洲相同，以 PNG 交易為主，代表國家為美國、加拿大及墨西哥，而天然氣交易價格以 Henry Hub(HH) 作為計價指標。HH 位於路易斯安那州伊拉斯鎮 (Erath) 的天然氣管線配氣中心，該處之天然氣結清 (settlement) 價格被選為北美天然氣市場基準 (benchmark)。HH 之價格係由現貨及期貨交易所決定，反映區域內天然氣之供需情況，主要為實體交易。

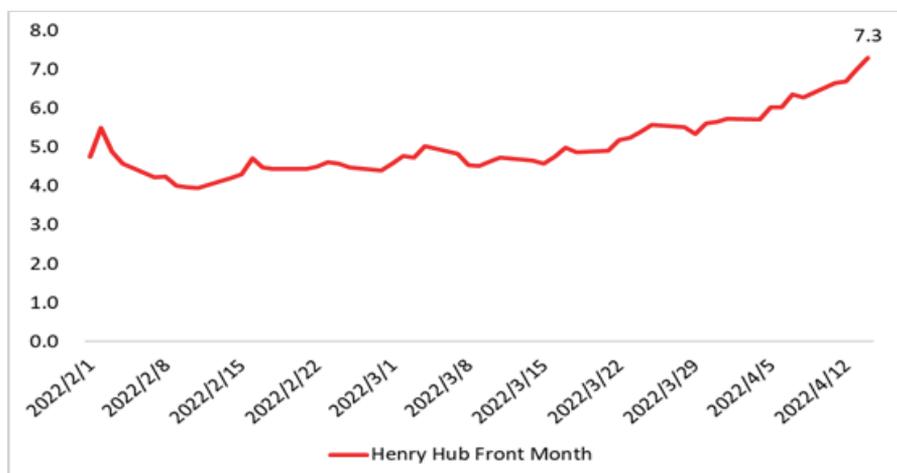
(2) 俄烏戰爭之影響

北美市場價格相對亞太與歐洲地區而言，受俄烏戰爭影響較小，美國作為全球第一大天然氣生產國與消費國，除自給自足，國內市場需求供應無虞外，另將多餘天然氣透過 PNG 與 LNG 形式出口，較未受國際高氣價影響。

北美 HH 價格於 2002 年 2 至 3 月未見大幅度波動，價格約落在 4 至 6 美元 /MMBTU 區間。歐洲市場為擺脫對俄羅斯天然氣之依賴，大量自其他國家進口 LNG，美國因豐富的天然氣資源及強大的出口產能，自俄烏戰爭起即大量出口 LNG 至歐洲市場，因 LNG 出口之增加，帶動原料氣 (Feed Gas) 需求之成長，導致 HH 呈現溫和成長趨勢，至 4 月 HH 價格上升超過 7 美元 /MMBTU(另有天然氣庫存水平下降及寒冷天氣之因素)，達到近 10 年來歷史新高；北美 2 至 3 月 HH 價格相較去年同期成長約 2 倍以上。有關北美地區天然氣價格變化參見圖 6：

圖 6 北美地區天然氣價格變化趨勢

單位：美元 / MMBTU



資料來源：路透社資料庫，本文繪製。

(三) LNG 市場流向變動與版圖重塑

亞太市場為 LNG 進口重鎮，且適逢冬季高峰季節，因 LNG 溢價因素，對 LNG 出口商有套利誘因，船貨多往亞太市場流動。俄烏戰爭爆發，歐洲市場對天然氣需求之急迫性大幅提高，為因應俄羅斯中斷天然氣之可能性，買家轉向大量購買 LNG。

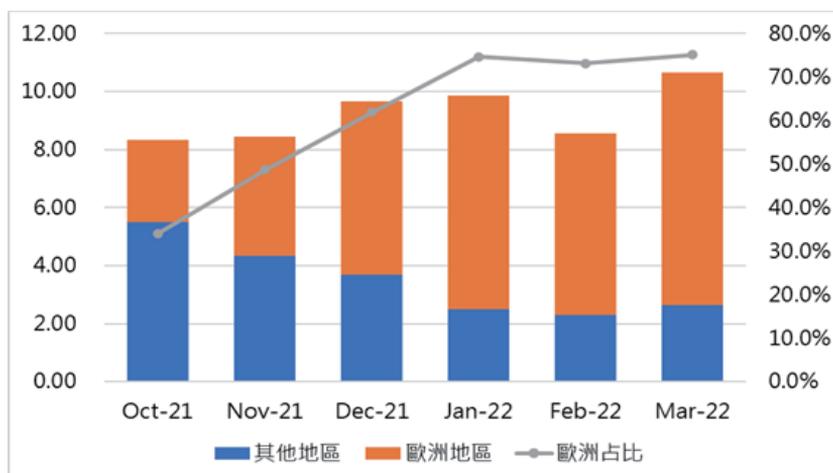
歐洲以往 LNG 主要來源為美國、卡達及非洲國家，但美國與卡達主要出口流向仍以亞太地區（需求龐大且價格較高）為大宗，但俄烏戰爭導致 LNG 需求攀升，致現貨價格大幅飆漲，部分出口商開始轉移出口流向。

卡達 LNG 出口多數為長期合約，且簽約方大多是東北亞國家，因合約綁定之故，較無法將船貨轉向歐洲地區，且 2022 年 3 月適逢出口廠須進行季節性維修，無多餘產能滿足買家需求。

美國 2022 年擁有 7 座 LNG 出口廠，且多數產能未有合約綁定，加之無目的地港條款 (Destination Clauses)，且能進行轉售 (Resale) 等競爭優勢，可大量出口至歐洲地區。自 2021 年 4 月起美國出口至歐洲地區數量及占比逐漸增加，同年 12 月出口數超過 6 成，2022 年 1 至 3 月占比皆達 7 成以上，同年 3 月出口約 80 億立方公尺（總出口量約 106 億立方公尺），有關美國 LNG 出口情勢參見圖 7：

圖 7 美國 LNG 出口情勢 (2021Q4-2022Q1)

單位：Bcm(10 億立方公尺)

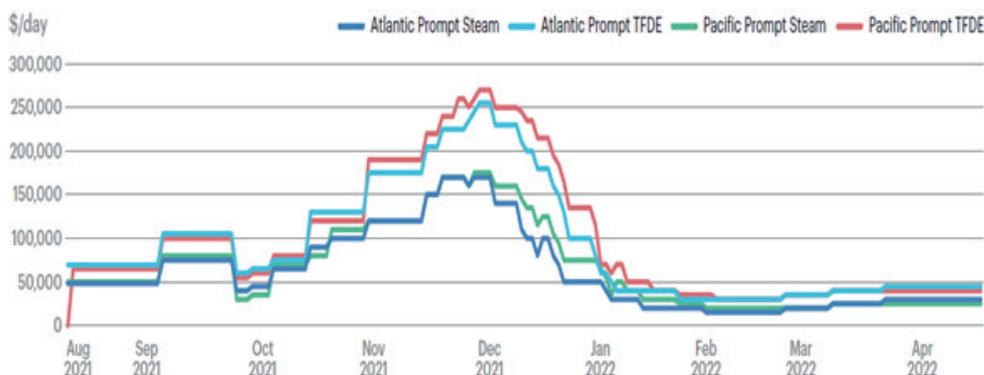


資料來源：路透社資料庫 (2022)，本文繪製。

歐洲多數國家自俄烏戰爭後增加美國 LNG 進口量，依 2022 年 3 月各國進口數據，包含英國、西班牙、葡萄牙、法國、比利時及立陶宛等，皆比同年 2 月大幅成長，其中英國、葡萄牙及立陶宛增加幅度可達 1 至 2.5 倍。歐洲 LNG 需求之增加亦反映在 LNG 船運市場，一般而言，LNG 出口多流向亞太地區，太平洋航線 (Pacific) 租船費率 (Charter Rate) 相對大西洋 (Atlantic) 航線高。俄烏戰爭使得大西洋與太平洋航線租船費率產生交叉，至 2022 年 4 月已超過太平洋航線。

依據上述跡象顯示，歐洲地區 LNG 需求之提升，間接導致市場流向之變動，及出口版圖之重塑。有關租船費率變化參見圖 8：

圖 8 全球 LNG 租船費率變化趨勢



資料來源：ICIS -Global LNG Market (2022)。

(四) 亞太區域之影響與衝擊

1、部分亞洲國家減少用氣需求

自 2021 年 9 月起歐洲爆發能源短缺危機，導致 LNG 價格飆升 (落在 20 至 40 美元 /MMBTU 區間)，因亞太市場與歐洲市場互為競爭關係，連帶使 LNG 價格上升，俄烏戰爭使全球 LNG 價格又邁向新高峰，市場買家為滿足用氣需求，被迫支付高額價格購買現貨，進而大幅增加進口成本 (2020 至 2021 年間不超過 10 美元 /MMBTU)。

亞太市場為 LNG 貿易重鎮，除進口量龐大的東北亞國家外 (中國、日本及韓國)，另新興市場亦為近幾年天然氣需求成長的驅動引擎，包含南亞 (印度、巴基斯坦及孟加拉)、東南亞國家 (泰國及緬甸等)。

新興市場國家以往皆推動能源轉型政策，從原有的燃油、燃煤逐漸轉向使用燃氣。近期過高的 LNG 現貨價格，對買家造成嚴重衝擊，部分國家 (如印度及泰國) 因天然氣價格過高，轉向減少天然氣用量，並考量恢復燃煤及燃油發電設施。市場預期 LNG 價格於 2022 年仍會維持高水平，需求下降之情勢恐非短暫情形，仍須再進一步觀察其動向。雖然亞洲部分國家已開始減少 LNG 進口，惟越南預計 2022 年底前將啟用 FSRU 進口 LNG，以滿足需求。

2、中國或將成為俄烏戰爭下之受益者

由於各國對俄羅斯實施相關制裁及譴責，遂於 2022 年 3 月將西方盟國及與西方勢力關係友好之國家列入「不友善國家」名單，包含美國、加拿大、歐盟、澳洲、日本及南韓等國。中國與俄羅斯關係密切，於俄烏戰爭後始終保持友善態度，且對外所發表的看法、聲明，亦呈現中立及保守角度，故未被列在名單中。

在西方國家紛紛制裁俄羅斯之際，歐洲企業除停止購買該國能源外，並逐步撤出油氣業務與資產，中國卻逆向操作，與俄羅斯維持友善關係。為滿足市場用氣需求，推動能源轉型及達成 2060 年淨零排放目標，可預期天然氣用量仍會持續成長。

中國與俄羅斯天然氣貿易關係深厚，Gazprom 於 2019 年啟用西伯利亞力量管線 (Power of Siberia Pipeline)，每年供應 380 億立方公尺天然氣；2022 年 3 月 Gazprom 發布與中國簽署為期 30 年的天然氣供應協議，將興建西伯利亞力量 2 號管線 (或稱 Soyuz Vostok 管線)，進一步擴大貿易關係。

未來西伯利亞力量 2 號管線啟用後，預期每年可供應 500 億立方公尺天然氣 (包含 1 號及 2 號管線)。全球市場預期 LNG 未來仍將維持高價之際，中國大舉向俄羅斯進口 PNG，並簽署合作協議，除有助於滿足國內需求，另可避開國際 LNG 高氣價之影響，以降低進口成本。綜觀中國與俄羅斯能源貿易舉動，在全球能源市場籠罩於俄烏戰爭影響之際，或許將成為唯一受益者。有關中俄西伯利亞力量管線供應路徑參見圖 9：

圖 9 西伯利亞力量管線供氣路徑



資料來源：Bne IntelliNews - Gazprom starts designing \$20bn gas pipeline to China.

三、國際因應俄烏戰爭之策略與作為

(一) 歐盟因應俄烏戰爭策略

1、聯合採購策略與提高儲存水平

俄烏戰爭爆發對歐洲天然氣市場影響及衝擊深遠，歐盟國家首當其衝，因戰事結束仍未明朗化，歐盟擔憂俄羅斯突然中斷天然氣供應之可能性，或將其作為政治談判籌碼，以阻止各國對烏克蘭伸出援手。

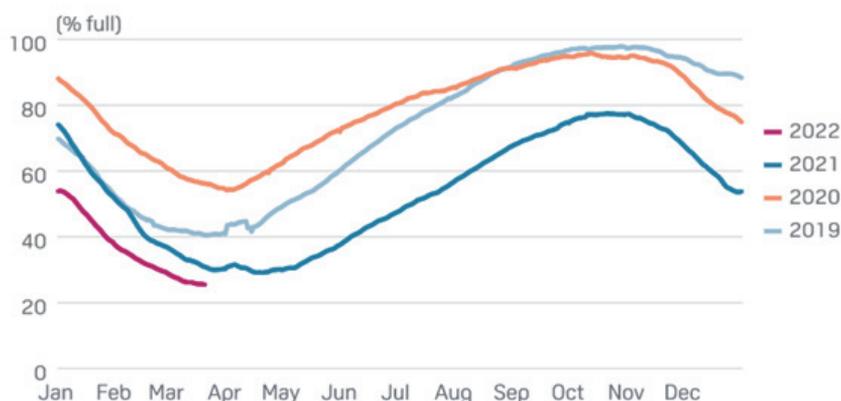
天然氣在歐洲係關鍵能源，可作為發電來源、工業原料及住宅用戶的供暖燃料，若無法維持穩定供應，將對經濟發展及

國民生計產生巨大影響。歐盟鑑於俄烏戰爭之衝擊，須防範未然，減少對俄羅斯天然氣之依賴，2022年3月22日峰會發布聲明，同意歐盟會員國在2023年冬季來臨前進行能源聯合採購，包含PNG、LNG及氫能。歐盟將成立能源平台，作為協調各會員國之需求及合作模式，加速採購效益。透過聯合採購，將可大量進口天然氣，且有利於進行議價，減輕進口成本之負擔。

除聯合採購策略外，歐盟亦提出天然氣儲存水平草案，要求會員國於2023年冬季前(11月前)儲存水平維持90%以上，而今年(2022年)至少維持80%以上。透過上述草案推動，預期將可透過提高天然氣庫存，因應未來發生供氣中斷之可能性，且藉由供應量的穩定，降低天然氣價格受市場或突發事件的影響，不致產生過大波動。

冬季一般為歐洲地區用氣高峰時節，故於注入季節(注入季節為4至10月)各國皆會將天然氣注入儲存設施(儲氣窖或氣槽)，以滿足冬季(提取季節為11月至翌年3月)用氣需求。歐洲地區自2021年9月發生能源短缺危機後，致天然氣用量激增，須大量提取庫存，導致庫存水平大幅下降。俄烏戰爭發生後，為防止俄羅斯中斷天然氣，並同時滿足市場需求，多數國家須提取天然氣庫存以因應，致使庫存水平達近年新低。有關近年歐洲天然氣庫存水平概況參見圖10:

圖 10 2019 至 2022 年歐洲天然氣庫存水平概況



資料來源：S&P Global- EC proposes 80% minimum gas storage obligation by Nov 1 2022.

2、增加非俄羅斯之進口氣源

俄羅斯 PNG 約供應歐洲市場 4 成需求，為因應俄烏戰爭之影響，歐盟提出新能源戰略，期望 2022 年減少三分之二天然氣進口量。為彌補俄羅斯天然氣供應缺口，歐盟尋求其他天然氣出口國協助，如歐洲第二大 PNG 出口國--挪威，同意幫助歐盟，提升氣田生產量，增加對歐洲市場的管輸量。

挪威最大天然氣供應商 --Equinor，其 Troll、Oseberg 與 Heidrun 氣田之增產申請已獲得該國石油及能源部批准，規劃維持高產量水平至今年 (2022 年) 夏季，預期可供應歐盟約 876.6 億立方公尺；另 LNG 出口計畫 --Snhvit，於 2020 年 9 月因設備事故停止營運，預計 2022 年上半年將恢復啟用，更有利於滿足歐洲進口需求。

除挪威外，歐盟亦尋求其他天然氣出口國之協助，包含美國、卡達、阿爾及利亞、埃及及亞塞拜然 (中亞)，規劃從上述 LNG 進口國進口約 500 億立方公尺，另從 PNG 出口國進口約 100 億立方公尺天然氣。美國為協助歐盟，2022 年 3 月 25 日與歐盟針對能源安全發布聯合聲明，規劃保障用氣需求，2022 年預計供應 150 億立方公尺 LNG，且未來將持續提升出口量。

為增加對歐盟 LNG 出口量，美國政府加速出口計畫申請審核流程，並放寬申請限制，以順利獲得批准。此外，2030 年前歐盟保證每年向美國採購 500 億立方公尺，以長期保障會員國之用氣，並符合能源轉型策略與淨零排放目標。

歐盟透過推動多項策略，期望短期內能安然度過 2022 年冬季需求，長期下逐步達成擺脫對俄羅斯天然氣之依賴，並於同年 3 月研議新草案後發布聲明，規劃 2027 年完全停止自俄羅斯進口石油及天然氣。有關現行歐洲天然氣進口管線與天然氣接收站分布參見圖 11：

圖 11 歐洲主要天然氣管線與接收站分布



資料來源：ICIS- EU can cut 2/3 of Russian gas imports in 2022 - European Commission。

(二) 德國因應俄烏之策略

1、北溪 2 號夢碎

德國為歐洲第一大 PNG 進口國，現行透過俄羅斯北溪 1 號管線進口天然氣，該管線總長約 1,200 公里，於 2011 年完成，供氣量為 550 億立方公尺 / 年。德國積極推動能源轉型政策，因天然氣需求龐大，考量 PNG 供應穩定，且價格相對 LNG 便宜，傾向自俄羅斯進口更多天然氣以滿足需求。

為滿足未來天然氣需求之成長，俄羅斯興建北溪 2 號管線（以下稱 Nord Stream 2）增加對德國之管輸量，該管線於 2018 年興建，2021 年 9 月竣工，共耗資近 100 億歐元（約新臺幣 3,200 億元），由 Gazprom 主導管線計畫，負擔 50% 費用，剩餘費用由歐洲能源企業出資，包含殼牌（Shell）、法國蘇伊士集團（Engie）、奧地利國家石油集團（OMV）及德國 Wintershall 等公司，有關 Gazprom 北溪 2 號管線參見圖 12：

圖 12 Gazprom 北溪 2 號示意圖



資料來源：Gazprom 官網。

Nord Stream 2 從開工迄今即爭議不斷，外界認為德國此舉將加深對俄羅斯天然氣之依賴，進一步加劇能源供應風險；美國更告誡德國應放棄 Nord Stream 2 計畫，考量改進口 LNG 分散風險，再者認為俄羅斯興建 Nord Stream 2，有利該國鞏固歐洲天然氣供應之領導地位，逐步達成市場獨占，並作為商業與政治談判籌碼。然而德國政府仍堅持推動北溪 2 號計畫，以符合能源發展策略。

雖然 Nord Stream 2 於 2021 年 9 月即建成，但此計畫須經德國聯邦網路局 (BNetzA) 及歐盟審核後始可啟用，審核過程冗長 (最長達 10 個月)，外界預期 Nord Stream 2 須至 2022 年 7 月後始可啟用。然因俄烏戰爭，使德國面臨接踵而至的壓力，經考量過度依賴俄羅斯供應天然氣，可能面臨龐大能源安全風險，於是中止 Nord Stream 2 審核，自此藉由管道輸送的美夢幻滅。

2、德國提出能源改革政策

德國於俄烏戰爭後喚起能源危機意識，如逐步汰除核能及燃煤電廠，以符合能源轉型策略之改革，可能因此暫緩或擱置；另仍需進口天然氣以滿足國內需求，為擺脫俄羅斯天然氣供應之情形，將興建天然氣接收站進口 LNG，規劃設置於布倫斯比特爾 (Brunsbüttel) 及威廉港 (Wilhelmshaven)。以往德國即有興建天然氣接收站之想法，惟一直以來被擱置，在面臨新危機後，進口 LNG 成為確保能源安全的新方案。

基於用氣的急迫性，規劃於 2022 年底前在威廉港啟用浮式天然氣接收站 (Floating Storage Regasification Units,FSRU)，預計建成後每年可供應 100 億立方公尺 / 天然氣予國內市場，未來幾年內供應量可擴大至 280 億立方公尺 / 年。考量急迫性與時程 (若要於 2022 年底啟用)，僅能採用租用方案 (新建或改造至少耗費 1.5 至 3 年)，但僅靠接收站之供應產能仍不足。

Nord Stream 2 管輸量為 550 億立方公尺 / 年，即使 2022

年底順利啟用 FSRU，供應量仍無法與北溪 2 號相比。除前述之天然氣接收站外，尚需尋求其他方法，如擴大大自挪威或荷蘭進口 PNG、改變能源消費占比，以減少天然氣用量。期望經由推動能源改革政策，逐漸強化國家能源安全。

(三) 波羅的海國家策略

鄰近俄羅斯的波羅的海國家 (Baltic States)，包含愛沙尼亞、拉脫維亞及立陶宛，於俄烏戰爭後，考量能源供應危機，紛紛提出新的因應策略；2022 年 4 月宣布逐步停止從俄羅斯進口天然氣，尤其立陶宛更即刻停止進口，成為三個國家中的領頭羊，且是歐盟會員國中第一擺脫俄羅斯天然氣供應。觀察俄羅斯 PNG 流量資訊，同年 4 月起即停止對立陶宛的天然氣供應。

立陶宛過往仰賴俄羅斯 PNG 供應，惟自 2014 年位於克萊佩達 (Klaipeda) 的 FSRU 啟用後，為降低對俄氣之依賴奠定基石，而該國 LNG 主要來自挪威及美國，目前規劃擴大 FSRU 供應產能 (期望提高至 50 億立方公尺 / 年)，透過提高產能替代俄羅斯 PNG。

拉脫維亞未來將逐步停止進口俄羅斯 PNG，短期內倚靠立陶宛 FSRU 卸收 LNG 之轉輸，及調動天然氣庫存以滿足需求。因冬季需求已過，預期至少可安然度過 2022 年夏季。

愛沙尼亞正積極推動天然氣接收站計畫，將聯合芬蘭引進 FSRU 進口 LNG，規劃設置於帕爾迪斯基 (Paldiski)，期望於 2023 年啟用，以滿足該年度冬季需求。以往愛沙尼亞即有興建天然氣接收站之規劃，惟未獲歐盟經濟援助，最終投資決定 (FID) 不斷被推遲，但因俄烏戰爭之影響需加快興建腳步；芬蘭除與愛沙尼亞合作外，亦規劃於南部設置 FSRU。綜合上述顯示，波羅的海國家因鄰近俄羅斯，及眼見烏克蘭境遇，欲擺脫俄羅斯能源掌控，FSRU 與 LNG 將成為新的因應方案。

俄烏戰爭爆發促使歐洲國家尋求新的能源供應管道，FSRU 則被視為新救星。考量需求及時程的急迫性，多數國家規劃採用 FSRU 作為因應方案，進一步使市場水漲船高，俄烏戰爭後，租船費率達 150,000 至 180,000 美元 / 日，Rystad Energy 估計每年租

用成本為 4,000 至 6,000 萬美元。

FSRU 市場長期處於供過於求之狀態，未有新建之必要，但近期需求提升，導致訂單大幅增加，Flex LNG 表示若新建一艘 FSRU，預期須至 2027 年才能交付，顯示市場對 FSRU 的渴求。有關波羅的海國家天然氣接收站參見圖 13:

圖 13 波羅的海國家天然氣接收站示意圖



資料來源：Skulte LNG Terminal 官網資料。

四、綜合結論

俄烏戰爭為全球能源市場投下一顆震撼彈，同時亦為近年最嚴重的能源危機事件。全球天然氣價格之飆升及能源供應之穩定度成為關注焦點，針對此議題提出研析論點如后：

(一) 氣價飆升造成之影響

因俄烏戰爭之影響，天然氣價格大幅上升，除嚴重影響歐洲市場外，並使 LNG 價格達到近年的高水位。一般而言，LNG 買家大多為購買長期合約氣源（多與國際油價連動），另搭配市場現貨採買，昔日現貨價格不超過 10 美元 /mmbtu，但 2022 年上半年與之相較，已達 2 至 3 倍以上，因市場買家仍有需求，尤其在面臨冬季高峰時節，為維持用量穩定，只能高額進口。

現貨價格之提高，增加多數買家的進口成本，進而使天然氣終端價格上升，因天然氣為電力、工業及住宅部門的必要能源，將對產業與國民生計產生衝擊。雖然多數國家設有價格調幅上限機制，

若 2022 年全球市場仍維持高價，企業面臨進口成本的提高，預期可能將逐漸將成本轉嫁至消費者，導致電力與民生部門之負擔提高，對市場及產業產生不良影響。

(二) 全球能源與淨零轉型之隱憂

天然氣身為潔淨能源 (Clean Energy) 之一，在能源轉型與淨零排放 (Net Zero) 政策中扮演關鍵角色，可作為電力與民生部門的穩定供應能源及綠色能源發展的過渡橋梁。因俄烏戰爭之影響導致天然氣價格過高，此舉將增加能源轉型的成本，且部分國家擔憂高氣價成為未來常態，延遲傳統化石能源 (燃油、燃煤) 的汰除計畫，甚至重啟燃煤電廠，以兼顧成本考量及能源供應的穩定性。

綠色能源的發展為淨零轉型之基石，但再生能源有供應不穩定之本質存在，仍須搭配排碳相對較低且穩定的天然氣，逐步推動轉型路程。目前全球大部分國家仍未將淨零轉型目標入法，多為政策或目標宣示階段，若未來天然氣仍維持高價格，各國政府或企業可能重新思考淨零策略、期程目標，拖延淨零轉型的腳步，將不利全球達成溫室氣體降低 1.5°C 目標，減緩全球暖化的道路可能逐漸偏離。各國政府應在兼顧能源供應及淨零轉型下，審慎思考能源發電配比和發展策略。

(三) 危機之發生喚起能源安全意識

俄烏戰爭雖然對全球市場造成龐大衝擊，但同時也因危機的發生，讓各國政府與企業省思能源安全之重要性。諸如文章前述所提，歐盟採取天然氣聯合採購、提高天然氣庫存水平，歐洲部分國家將興建天然氣接收站，進口 LNG 作為替代來源，或推動能源改革策略，皆為增加能源安全，降低對俄羅斯天然氣依賴之良善方案。

全球多數國家都須仰賴進口能源以滿足市場需求，惟進口氣源多元化，減少單一進口來源之占比，為降低能源風險的發展趨勢與必要條件。雖然歐洲國家短期內仍無法完全擺脫俄羅斯天然氣，但經歷危機後，將進一步提升歐洲的能源危機意識，且有利於健全天然氣產業。若未來再度發生能源危機，預期可減輕對市場與產業之衝擊，降低天然氣供應與價格之波動。

以天然氣為過渡期能源 -- 印度積極發展自主能源

作家 高永謀

在全球數個大國裡，印度未來的經濟發展，最易受能源短缺的影響。其他幅員廣大的國家，如澳大利亞、俄羅斯、加拿大、巴西、美國等，幾乎都是石化能源輸出國；印度石化能源的蘊藏量，雖也相當可觀，但因人口頗眾，加上大力發展製造業，消耗量驚人，故進口比例居高不下。

依據若干人口專家估算，在不久將來即 2030 年前，人口總數第 2 多的印度，將取代中國，成為全球人口最多的國家，然而這並非值得驕傲的榮耀，而是沉重負擔。

其實，早在 1952 年印度政府便開始提倡計畫生育，不過顯然成效不彰；20 世紀 50 年代初人口數約 3.6 億，迄今已達 13.9 億，直逼 14 億大關，成長將近 4 倍之多。近年因經濟快速起飛，民生、商業、工業用電激增，能源消耗量呈跳躍式成長。

印度能源消耗量增長驚人

依據國際能源總署（International Energy Agency, IEA）統計：2030 年印度能源年消耗量將超越歐盟會員國總和，成為全球第 3 大消費國，僅次於美國、中國。2040 年將達 2019 年之 2 倍，每日石油需求量將從 500 萬桶，增加至 870 萬桶，增長幅度相當驚人。

目前印度已是全球第 2 大石油淨進口國，僅次於中國，現約 76% 原油來自進口。雖然持續強化石油探勘、開採的量能，但境內石油生產量仍停滯不前，對進口原油的依賴度，必有增無減。國際能源總署預估，2030 年對進口原油的依賴度，將升至約 90%，2040 年更將增至約 92%。

然而印度迄今仍高度仰賴燃煤，自也是燃煤進口大國，現為世界第 2 大煤炭進口國，進口量僅次於中國；但因其製造業、火力發電設備老舊，且企業效率低落，加上環保法規早已過時、疏漏，且行政部門執行不力，導致諸多城市籠罩在恐怖的空氣污染中，嚴重危及民眾健康、生活品質與外商投資意願。

不少經濟新興國家深受霧靄之擾，印度的空氣污染更令人憂心，有些工業

城甚至已不適人居。依據調查在全球空氣品質最糟的 20 座城市排行榜中，印度有 15 座城市名列榜中，雖是舉世無兩，卻也意謂著防範空氣污染，已是刻不容緩、迫在眉睫的課題。

為降低空氣污染，並符合國際社會對減碳的要求，印度一如其他國家，計劃以碳排放量較低的天然氣為「中繼投手」，擬定「Green India」政策，逐步取代石油、燃煤，下修對其依賴度，終極目標則是全面使用再生能源，致天然氣消耗量屢創新高；2019 年天然氣佔消耗能源的比例約 6.2%，政府更設定目標希望 2030 年可提升至 15%。

國際能源總署預估 2030 年印度液態天然氣（Liquefied Natural Gas，LNG）進口量將達 760 億立方公尺，約佔年度天然氣消耗量的 58%；2040 年預計將增至 1240 億立方公尺，約佔年度天然氣消耗量的 62%。

液態天然氣第 4 大進口國

印度雖是天然氣生產國，但因食指繁浩、糧食需求甚殷，自產天然氣主要用於製造肥料，民生、商業、工業、公共運輸、火力發電所需則仰賴其他國家進口。石油、天然氣蘊藏量雖豐沛，但自產天然氣遠不及消耗量的增長速度，故進口量不斷創造新紀錄。

近年在全球液態天然氣進口排行榜上，印度皆居第 4 名，前 3 名依次為日本、中國、韓國。與韓國的處境類似，雖不是島國，而是半島，且距天然氣輸出大國不遠，但因地理、歷史、宗教、政治等因素，無法以陸地管道輸入氣態天然氣，只能從海運進口液態天然氣，成本、風險也隨之升高。

位於印度西方的中東諸國，不僅以出口石油著稱，也是天然氣輸出大國。然因中東諸國相互歧見甚多，就連與印度距離最近的伊朗，中間也隔著巴基斯坦，印度、巴基斯坦兩國素來存有矛盾，除非兩國皆可同時獲利，否則印度不願讓「能源生命線」行經巴基斯坦國，巴基斯坦也不會允許天然氣管道通往印度。1996 年伊朗曾提出修建途經巴基斯坦的天然氣管道計畫，總長約 2775 公里，以供應印度氣態天然氣，後因總總考量及諸多歧見，最終無法付諸行動。

位於印度東方的緬甸，也靠輸出天然氣，賺取外匯；印度、緬甸雖直接接壤，卻難以擘建連接兩國的天然氣管道。首先在地理上，印度東部國土形狀猶如橫躺的臺灣野柳女王頭，在不丹、尼泊爾、孟加拉等國的夾擠下，中間地帶頗為狹窄、蜿蜒，實不利興建管道；若借道孟加拉國境，因與該國關係不睦，

可能性近乎零，另印、緬兩國亦不甚友好，由該國進口天然氣，更是倍加困難，因此曾經計劃興建經孟加拉至緬甸之天然氣管道，也以失敗收場；21 世紀初印度、韓國等 4 家企業在緬甸實兌港（Sittwe port）附近海床，共同探勘到天然氣礦，主導者為韓國大宇集團；2005 年緬甸、印度及孟加拉等 3 國達成修建「緬甸--孟加拉--印度」天然氣管道的共識，由於談判簽署正式合約過程中，孟加拉有所堅持，而印度只願意支付「緬甸--孟加拉--印度」天然氣管道之「過路費」，致最終不歡而散，計畫就此擱置。

聯外天然氣管道仍是夢想

位於印度西北方的哈薩克、土庫曼、俄羅斯等國，亦是全球重要天然氣輸出國之一，若要興建通往印度的天然氣管道，得途經阿富汗及巴基斯坦，此更為「不可能之任務」，雖印度多次接觸俄羅斯，共謀興建印俄天然氣管道，但因任務過於艱鉅，相關計畫猶如空中樓閣，無法實現。

攤開亞洲地圖，印度的窘境一窺即知，除以高聳的喜馬拉雅山脈橫亙北境，與不丹、中國、尼泊爾等國分界，東、西線皆被伊斯蘭教國家包圍。境內之伊斯蘭教徒近 2 億人，單論人口數，遠超過大多數伊斯蘭教國家，僅次於印尼、巴基斯坦，但與印度教人口相較，仍是少數。

因印度、巴基斯坦之間存在甚多歧見，恐無法於短期化解，雖多次以「伊斯蘭教人口在全球名列前茅」為由，申請加入「伊斯蘭會議組織（Organization Islamic Conference）」，希望化解緊張局勢，但屢遭拒絕；由美國、日本主導的亞洲開發銀行（Asian Development Bank, ADB）曾居中調和、折衝諸國，支持興建「土庫曼--阿富汗--巴基斯坦--印度天然氣管道（Turkmenistan - Afghanistan - Pakistan - India Pipeline，簡稱 TAPI 天然氣管道）」，試圖解開僵局，此管道起自土庫曼，行經阿富汗、巴基斯坦，終點站為印度鄰近巴基斯坦的小鎮法濟爾加（Fazilka），總長約 1814 公里，每年可輸送 330 億立方公尺氣態天然氣，興建成本約 100 億美元。其中約 214 公里位於土庫曼、774 公里位於阿富汗及 826 公里位於巴基斯坦，管道若完工，土庫曼不僅供應印度天然氣，阿富汗、巴基斯坦同時也是受惠國，因而阿富汗、巴基斯坦、印度才首肯此計畫。依規劃阿富汗、巴基斯坦、印度依次可分潤 16%、42%、42% 天然氣，位於管道中途之阿富汗、巴基斯坦，每年還能收取 4 億美元、2.17 億美元「過路費」。

2015 年 TAPI 天然氣管道開始動工，率先動土為土庫曼的管道，接著 2018 年阿富汗的管道開始動工，然因阿富汗政權易幟等種種原因，管道被迫停工，復工之日遙遙無期，所以印度只能繼續仰賴液態天然氣，期望聯外天然氣管道能再度興建。

臺商奪得印度接收站標案

2020 年印度進口的液態天然氣中，以國家別進行排行，卡達佔比最高，約達 38%，美國居次席，約為 17%，第 3 位是阿拉伯聯合大公國，約為 14%，奈及利亞、埃及分佔第 4、5 位，佔比約為 7%、6%。

若要進行能源轉型，並以天然氣為過渡能源，印度就得持續擴大液態天然氣的進口量，並推動相關基礎建設，如興建液態天然氣的接收站及建立區域性的天然氣管道等，讓更多民眾享用天然氣，並因應日益增加的民生、商業、工業、交通能源需求。

向以全球最大民主國家自豪的印度，佈建天然氣基礎建設必定較為緩慢，且衍生更多爭議。以城市內興建民生用的天然氣網絡為例，光是徵收土地就可能曠日廢時，並遭地主、豪強的拖延與抵抗，所付出代價頗為高昂；可喜的是，縱使有諸多不利因素，天然氣基礎建設仍徐步向前，特別是東北部 8 個邦，其網絡已愈發綿密。

值得提的是我國最大統包工程承攬商中鼎集團，由母公司結合旗下中鼎印度（CINDA）公司共同取得印度阿達尼（Adani）集團在達姆拉（Dhamra）港的液態天然氣接收站工程，為推動「新南向政策」以來，臺資企業在南亞國家所標下最高金額的工程訂單。

達姆拉港位於印度半島東岸，隸屬奧里薩省（Odisha），其液態天然氣接收站完工後，年接收量為 500 萬噸，可提供周遭地區更潔淨的能源。阿達尼集團是印度前幾大企業之一，事業版圖擴及數個國家，擁有 10 餘個港口的經營權，被譽為「港口之王」。中鼎集團在眾多競爭者脫穎而出，絕非僥倖，實為深耕市場多年所致。

2008 年中鼎集團成立中鼎印度公司，開始投入工程市場，並陸續取得數個液態天然氣接收站建廠與擴廠工程標案；經過 10 餘年努力，已躋身興建石化、工業廠房與天然氣接收站的績優廠商，興建達姆拉液態天然氣接收站，當是創造該公司於企業史的新里程碑。

多元化進口源已略有小成

在政治、經濟等方面，印度希望超越巴基斯坦等周遭國家，而在天然氣上，周遭國家亦是其競爭對手。當俄羅斯、土庫曼通往中國的天然氣管道皆已建成啟用，2021年7月俄羅斯與巴基斯坦亦達成協議，將興建一條長約1100公里的「巴基斯坦溪」天然氣管道，以利取得天然氣，然較惋惜的是，巴基斯坦未直接毗鄰俄羅斯，「巴基斯坦溪」天然氣管道需途經哈薩克、烏茲別克、塔吉克及阿富汗等中亞國家，其中最大的困難為經過阿富汗，因而管道建成的機率實微乎其微。

為降低對中東國家能源的依賴，印度刻正積極強化與其他石油及天然氣輸出國的貿易關係，確保能源安全，以石油為例，擴大向西非洲的奈及利亞、安哥拉與南美洲的委內瑞拉進口，並特別著力於委內瑞拉，足見對能源需求之殷切。

在液態天然氣方面，則擴大向澳洲、美國等不同國家的購買量，以增加全球市場的談判籌碼。2018年最大民營天然氣公司蓋爾（Gail Limited）與美國能源巨擘錢尼（Cheniere Energy）公司簽訂一項20年合約，其中包括從美國進口液態天然氣。

在多元化液態天然氣進口國前，印度的液態天然氣超過60%產自卡達，一旦該國局勢生變，或天然氣礦衰竭，或其他國家哄抬價格，搶奪天然氣，必遭池魚之殃，此乃能源安全的一大隱憂，現今天然氣進口源朝多元化的努力，已略有小成，未來勢必朝此方向繼續前進。

印度國、民營石油企業也勤於收購各大洲不同國家的石油、天然氣資產股分，佈局範圍遍及秘魯、葉門、阿曼、澳洲、印尼、越南、蘇丹、利比亞、加彭、東帝汶、奈及利亞、莫三比克、哥倫比亞、馬達加斯加等國，雖海外佈局的動作積極，成效卻不甚理想，因上述國家或基礎建設落後，或長年處於動亂，致產量不穩定，對緩解能源需求窘境，助益甚微。

立志當全球綠氫產業中心

濫觴於2019年年底的新冠肺炎疫情，全球幾無國家可倖免於難，印度則是受創最嚴重的國家之一，經濟連帶遭到重擊。2021年8月政府宣佈為振興經濟，將推出規模100兆盧比（約1.35兆美元，折合37.71兆新台幣）之「國家基礎建設計畫」，除更新道路、公共設施，也擴大使用潔淨能源的比例，並大力發展相關產業，依據規劃將大力發展天然氣、太陽能及氫能、電動車等產

業，目標在 2030 年實現「淨零碳排（又稱碳中和，carbon neutrality）」，並在 2047 年前（即獨立 100 周年前）達成能源獨立、自主，並成為「全球市場中心」，只是「國家基礎建設計畫」的目標相當亮麗、美好，完全實現的機率近乎於零，但已揭櫫未來的能源政策方向。

2021 年前印度每年約以 12 兆盧布（約 4.4 兆新臺幣）代價，進口燃煤、石油、天然氣等各式能源，不僅成本相當高昂，且受制於人，實為邁向「全球市場中心」的最大絆腳石之一，「國家基礎建設計畫」宣示日後將致力興建壓縮天然氣（Compressed Natural Gas, CNP）的供應網絡，並朝全球「綠氫（製程未衍生溫室氣體的氫）」生產及出口中心的方向前進。

韓國、新加坡等國也都制定類似的能源政策，皆視氫能產業為重要戰略產業，但相較前述天然氣技術領先國，印度發展氫能產業實無任何優勢可言，不過縱使未成為全球「綠氫」生產、出口中心，只要能以氫能取代部分進口能源，就已跨出發展自主能源的一大步。

太陽能產業發展已遇瓶頸

自 2021 年 9 月起世界若干國家陷入嚴重的限電危機，不久後印度也傳出能源危機，更堅定其發展自主能源、準自主能源之決心（如氫能、太陽能、核能發電等產業），以期早日達到自給自足、不再受制於他國的階段。

印度位於熱帶，夏季時平原地區氣溫常超過攝氏 40 度，深具發展太陽能產業潛力，在大力發展的幾年後，即躍居全球太陽能設備前 3 大市場，但瓶頸也隨即湧現，導致普及率停滯不前，原因為廠商太過仰賴政府補貼，且慣以低價搶標，終因技術、商業競爭力皆不足之情況下，發電量、普及率與政府預估的目標，尚有一大段距離。

身為全球「核武俱樂部」的一員，印度的核能技術不容小覷，不過因為核能武器技術無法轉移至核能發電，故仍是核能發電技術後進國。預期未來受法國電力集團（lectricit de France S.A., EDF）及美國奇異集團的協助下，將可在西部傑塔普爾（Jaitapur）建造全球規模最大的核能電廠。

同時美國、俄羅斯等國也輸出核能發電技術，協助印度興建數座核能電廠，但是大力發展核能發電，已引發環保人士、團體群起抗爭，加上與國際能源產業趨勢背道而馳，日後發展前景不甚樂觀。

綜觀全貌，將印度之核能、氫能及太陽能等產業加總，極可能仍無法成為電力產業的「脊梁骨」，提供足夠電力；天然氣雖被定位為過渡能源，卻可能將長時間扮演能源供應的主角！

漫談天然氫氣 -- 未來新的天然氣資源

臺灣中油公司探採研究所前所長暨中國文化大學地質系兼任副教授 翁榮南

摘要

氫氣比天然氣燃燒更乾淨，是再生能源外最佳的替代氣體。現今的氫氣都是工業生產，主要用水或碳氫化合物製造，生產過程耗能成本高，且有碳排放問題。過去由於分析不足，普遍認為天然氫是罕見，且大部分天然氣中氫氣含量甚微，一直未考慮天然氫的能源價值。近年來甚多調查在全球多種地質環境中發現天然氫，對其生成和儲聚系統取得初步認識，甚至在西非馬里已有成功的開採發電實例，天然氫的研究和探勘逐漸受到科學界及能源界的重視。探究天然氫的生成 -- 移棲 -- 聚集機制，釐清天然氫系統，有助於進一步探勘天然氫。

一、前言

人類使用能源的演進從低效、昂貴逐漸轉為清潔、便宜、高性能的燃料，化石能源在近數百年成為最主要能源，近來由於溫室氣體及空氣汙染考量，朝向低碳或無碳的綠色能源發展。在能源轉型中，天然氣（主要係甲烷組成）由於儲量大，便宜又清潔實用，成為現今最重要的能源之一，廣泛應用於發電、加熱、烹飪，並作為製造化學品和塑料等原料。

嚴格來說天然氣屬於含碳的化石能源，有碳排放問題，就解決全球氣候暖化而言，仍需要更清潔的無碳燃料，氫氣比天然氣燃燒更乾淨，除再生能源外是最佳的替代氣體。現今的氫氣都是工業生產，主要是用水或碳氫化合物製造，生產過程耗能成本高，且有碳排放，尋找有如天然氣一樣存在於地質環境中的天然生成氫氣（簡稱天然氫 natural/native hydrogen），逐漸受到科學界及能源界重視。

二、氫氣概述

氫是宇宙中最豐富的元素，但很少以氣體分子狀態自然存在，通常與其他原子結合。地球大氣中的氫氣濃度非常小，約為十億分之 500（500ppb 或 0.5 ppm）。地球上除地球表面及大氣中微量氣態氫外，氫多分別與氧及碳結合成

水 (H₂O) 和碳氫化合物 (CH₄、C₂H₆ 等)。

現今氫氣主要用作工業原料，也是種受重視的能源儲存方式，但利用電力電解水轉化為氫，再通過燃料電池、渦輪機或發動機（稱為端到端 power-to-gas-to-power 或 P2G2P）的經濟效益不太理想，即便電動汽車已主導主要汽車製造商的投資預算，但在某些國家，如亞洲地區中國和韓國汽車製造商仍專注於發展氫氣汽車，以氫作為運輸燃料。

（一）工業氫氣

2018 年底全球生產 7000 萬噸氫氣，用於各種用途，主要用於製造生產化肥所需之氮，及煉油廠的原油減碳和脫硫。預計至 2050 年氫氣需求將增長 8 倍，以滿足超過 5.5 億噸需求，不僅作為原料，而且還用於運輸、建築供熱和發電。

氫氣有多種工業生產方式，其決定氫能系統對全球碳的影響。業界分別以不同的顏色 -- 綠色、灰色、藍色、黑色、綠松石色、粉紅色及黃色代稱不同生成的氫氣。

綠色氫是利用可再生能源（如太陽能、風能或地熱）的電力，電解水分子產生氫氣。

灰色氫是利用蒸汽重整技術，在高壓下以水蒸氣將天然氣中的甲烷分離釋出氫氣，這種廣泛使用的方法每生產 1 公斤氫氣，約排放 9.3 公斤二氧化碳；若將此排放的二氧化碳捕獲和隔離（碳捕獲封存 CCS），避免釋放到大氣中，則特稱為藍色氫。

黑褐色氫為煤轉化（氣化）的天然氫，煤在 700C 下加熱（不燃燒），並加入氧氣或水蒸氣，轉化生成二氧化碳和氫氣。

綠松石色氫指甲烷在非常高的溫度下分解，釋放出的氫氣體及固體碳，固體碳可以很容易地隔離，或以不同的形式使用，不會造成二氧化碳釋放到大氣中，這個過程的氫也屬於低碳。

粉紅色氫是以核電電解水生產的氫氣。

黃色氫是以再生能源，如太陽能電力和不可再生能源電力混合電解水生產的氫氣。

以上工業製氫方法多會排放二氧化碳，或需要大量的能量輸入，或兩者兼有。現今大部分氫氣是以蒸汽重整技術從由甲烷製成的灰色氫，只有不到 5% 是用生產成本高的電解水產氫。

利用再生能源如初級風能和太陽能生產氫，都需先採礦提取許多自然資源，建造設備才能轉化為電力，這些原料及設備很多僅在少數幾個國家生產，成為戰略上的關鍵資源，因此，尋找一種不排放二氧化碳、不依賴戰略材料，且可穩定生產的天然氫氣非常重要。

(二) 天然氫氣

有別於工業生產的氫氣，來自於地質環境中的天然氫氣被稱為白色氫或金色氫。

在太陽系地球形成過程中，最初於地幔中，甚至在地核中保存的大量原始氫氣，這個氫氣資源幾乎是無限，卻無法觸及。除此之外地質環境中有很多非生物及生物作用可以生成天然氫，如蛇紋石化的水和岩石相互作用、水的輻射分解中的氫與氧分離、斷層面的摩擦和細菌的活動。這些天然氫的來源和資源是新的能源發展領域。

多年來為瞭解地球生命，科學家對大西洋中洋脊的噴發煙柱作大量觀察研究，發現有氫氣量逸流，但由於水深和離岸距離等條件被認為開發困難，所以沒有引起太大的商業興趣。預計氫氣探採行業，將類似其他自然資源一樣，可能會在陸地開始，所幸陸上也有很多此種類型的地質環境和天然氫被發現，如紅海、亞丁灣及東爾非洲裂谷的三叉匯接處，或冰島裂谷中軸新火山帶的噴氣孔都含有氫氣。

此外很多地熱流體含有氫氣，目前的地熱發電廠僅使用熱水的熱能含量，如在義大利托薩卡尼 (Tuscany) 等許多地區的地熱，但除使用地熱能外，還可以考慮從熱水中提取生產天然氫氣。

三、天然氫氣開採實例 -- 西洲馬里天然氫的探採

相對於傳統的天然氣，天然氫氣較為罕見，現今大量使用的天然氣，主要成分是氣體碳氫化合物 (hydrocarbons)，此外還有非碳氫化合物，如二氧化碳、氮氣、硫化氫、稀有氣體（氫氣等）及微量的氫氣。一般天然氣成分中，氫氣含量甚稀微，其存在和重要性一直受到忽視，鮮少量測，直到最近才有許多項證據表明，其資源比以前想像的還要豐富，可能開發作為清潔能源，甚至有西非馬里 (Mali) 天然氫氣的開採應用實例。

1987年在非洲馬里南部陶德尼巨型盆地 (Southern Taoudeni Megabasin) 布爾克布古 (Bourakebougou) 的一口水井出乎意料地產生大量的氫氣，Petroma 石油公司（現更名為 Hydroma）董事 Aliou Diallo 投入探採氫氣，於 2011 年成功在 Bougou-1 淺井深度 110 公尺的火成岩（粗粒玄武岩 dolerite）開採幾乎是純淨的（超過 96%）氫氣，直接在燃氣輪機中燃燒發電提供布爾克布古村莊使用。截至 2020 年最初的井已生產 4 年，其壓力至今未下降，意味著地下持續有氫氣補給，可能存在積累氫氣的密封岩石。依據地質地物資料及鑽井取得的氣體數據，確認存在至少 5 個含氫儲層，面積超過直徑 8 公里的區域，地球化學研究表明，氫逸出範圍最多可達 150 公里。氫氣生產成本低於每公斤 1 美元，遠低於傳統以電解或蒸汽甲烷重整生產氫氣的成本，證明開採天然氫可產生足夠規模，且 100%綠色電力為房屋供電，對未來能源系統非常有吸引力（如圖 1 及圖 2）。

2019 年美國天然氫公司在內布拉斯加州 Fillmore 縣完成第一口天然氫探井，並成功提取氫氣和氮氣，再次為天然氫的進一步發展提供支撐。

四、天然氫的分布存在

天然氫曾經被認為是一種罕見的游離氣體，但最近的研究顯示，氫在自然界中的分佈實際上比以前認為的要廣泛得多。過去造成誤解游離氫稀有的原因，首先是先入為主的觀念，認為它不存在或是稀有的。沒有人期望找到游離氫，也就不會有人為尋找它而取樣分析，即使在今日也很少有系統地去檢測天然氫氣的存在。阻礙天然氫發現的另一個因素是世界上大多數油氣井都在沉積層中鑽探開採石油和天然氣，然而這些岩石並不是最有可能富含氫氣的地方。最後氫氣是地球上最輕的元素，容易逸散。

即便如此，多年來在世界各地已有甚多地表氫氣的排放，如滲漏或仙女圈的報導，顯示天然氫氣普遍存在自然界地質環境中（如圖 3）。

位於土耳其西南部安塔利亞 (Antalya) 附近的奇美拉山 (Chimaera)，氫氣一直在逸散和燃燒超過 2500 年（如圖 4），被認為是希臘時期第一場奧運聖火的源頭。奇美拉山氣體的化學成分及同位素分析，包括甲烷（約 87%v/v； $\delta^{13}C_1$ -7.9 至 -12.3）、氫氣（7.5 - 11%）、二氧化碳（0.01 - 0.07%； $\delta^{13}CCO_2$:-15）、氮氣（約 80 ppmv；R/Ra:0.41），顯示含有古生代和中生代第 III 類型有機熱成因氣體，混合蛇綠岩的低溫蛇紋石化產生的非生物氣。非生物成因氣約佔總氣體一半，估計遠遠超過每年 50 噸。蛇綠岩和石灰

岩沿著構造交錯接觸，導致氣體移棲到地表混合。奇美拉山是迄今為止發現的陸地上最大的非生物甲烷排放量，深層的氣體維持氣流數千年，並且仍可能有持續的無機源補充。

東歐莫斯科東南部的航拍照片上可以清晰看到大致圓形的輕微凹陷，當地稱之為仙女圈 (fairy circle；如圖 5)，植被通常會在這些圓圈處死亡，應用氣體檢測器可以明顯測量到氫氣以非恆定和非連續的方式逸出。美國、巴西、加拿大、澳大利亞和南非的納米比亞，也觀察到類似的特徵 (如圖 6)。

新喀裡多尼亞位於普羅尼灣瀉湖的水下噴泉釋放出富含氫氣 (12% 至 34% 之間) 的鹼性 (pH>11) 溫暖 (43°C) 水。

另外在比利牛斯山脈等也發現多處的氫氣排放。通常這種氫氣會立即與大氣中的二氧化碳反應並沉澱為碳酸鹽，展現出自然而壯觀的碳捕獲過程。其他陸上產氫氣的地質環境，包括超過 5 億年歷史的前寒武紀克拉通，如俄羅斯莫斯科周圍、美國南卡羅來納州、堪薩斯州及其他許多地方，這些氫氣來源機制可能是富含鐵岩礦材料的氧化，而釋放水的氫氣，氫氣源自基底非常古老且富含金屬的區域。

五、天然氫的生成來源和匯存 (sinks)

天然氫存在於一系列地質環境中，如結晶基岩、火山岩、超鎂鐵質和過鹼性火成岩、地熱和礦物系統、石墨、蒸發岩沉積物和缺氧沉積物中，也存在於傳統和非傳統油氣田和煤層氣中。氫氣是天然氣的成分之一，但來自沉積盆地的天然氣中的氫氣含量甚微，極少高過 10mol%，這可能是因為採樣分析的偏差，一直都沒有檢測天然氣的氫氣濃度。照說氫氣具有很強的流動性和化學活性，天然氣藏在漫長的儲存時間中應該有氫氣持續補充，可是有趣的是，氣田和油田中的氫氣含量通常低於圍岩，這顯示氫氣可能與有機質之間發生化學反應。

(一) 天然氫氣的生成來源

天然氫氣的來源大分為兩類，儲存在地球核心和地幔中的原始 (primordial) 初級 (primary) 氫，及地幔和地殼內化學反應產生的次級 (secondary) 氫。次級天然氫氣又有非生物源或生物源，後者包括來自有機質熱裂解和來自微生物代謝。氫氣 $\delta^2\text{H}$ 的範圍廣泛，約為 -850 至 -100，取決於氫氣生成過程，穩定同位素特徵可用於鑑識其來源。

初級的原始氫

地球上的氫和氦起源於宇宙和太陽系的形成。大約在 45.4 億年前地球形成期間原始氫氣最初被捕獲，存在於氫化核 (hydridic core) 和下地幔，一般認為，可以取得的話，初級氫氣資源對於人類來說是無可限量。

超鎂鐵質岩石是地幔中的主要組成，下地幔中的流體可能含有甲烷、氫氣和水，而在上地幔中，則是二氧化碳 (CO₂) 和水，原始的氫源以初級金屬氫化物的形式儲存，被認為是地球上氫的主要形式，這些金屬氫化物在連續和間歇性猛烈注入上地幔和地殼的過程中釋放氫氣。大規模的流體遷移對上層的岩石圈、生物圈、水圈和大氣中的所有地球過程造成重大影響。

次級氫

次級氫氣又分為非生物源 (abiogenic sources) 及生物源次級氫，非生物來源的天然氫則可能是最大的尚未發現的資源。

非生物來源

目前已知有多種天然氫氣的非生物來源，其中蛇紋石化 (serpentinization)、輻射分解 (radiolysis) 及火山和熱液噴發被認為是最重要的地質生氫作用。非生物來源中流體 -- 岩石的相互作用涉及亞鐵 (Fe²⁺) 與氫氣的化學反應，亞鐵與氫氣化學計量比為 3:1 和 2:1。

蛇紋石化是研究最多的天然氫氣生成途徑。深海海床熱液噴口的海底鎂鐵質 -- 超鎂鐵質岩石和大陸蛇綠岩的熱液循環造成蛇紋石化釋放氫氣。一般橄欖石和輝石等礦物的含水蝕變產生蛇紋石、水鎂石 (brucite)、磁鐵礦和氫氣，Fe: 氫氣保持在 3:1 比例。蛇紋石化可在略高於環境常溫到 330 - 400°C 的高溫下發生，具體取決於壓力。地幔岩石圈也可能發生蛇紋石化。儘管蛇紋石化反應的最佳溫度深度可能在 10 公里左右，實際的反應可能受限發生在地殼淺層 4 至 6 公里（溫度攝氏 400 度）。

在長英質岩石（例如花崗岩）中，黑雲母也可以水合生成氫氣，但由於其 Fe²⁺ 含量較基岩中礦物的 Fe²⁺ 含量低，每單位體積花崗岩的氫氣生成效率不如鎂鐵質 -- 超鎂鐵質岩石，然而高氧化還原電位、低溫和補充 CO₂ 可以提高花崗岩的氫氣產量。

地質環境中水的輻射分解是產生天然氫氣的另一個重要機制，有趣的是，與純水相比，金屬離子 (Fe²⁺ 和 Fe³⁺) 存在會抑制水輻射分解的氫氣產率。地殼中水的供給深度，可能因岩石裂縫癒合和水的流動顯著延遲，而限制在深度

10 公里左右。

火山和熱液噴發的天然氫氣產率很高，因此碎屑岩源 (cataclastic sources) 的天然氫氣很重要，有認為從流體包裹體中釋放出來的氫氣廣泛存在於前寒武紀基底岩石中，特別是花崗岩及其侵蝕殘餘物在沉積盆地中的沉積，可能是重要的氫氣資源。鑽井作業和金屬腐蝕等相關的人為活動，通常會造成低濃度的氫氣發生，也偶爾會產生高濃度（高達 90 mol%）的氫氣。理論上，來自下地幔和地核的氫化物源是最大的“H”資源儲量，氫氣可以持續向上移棲或通過間歇性噴流注入上地幔 / 地殼，所釋出的金屬氫化物 (metal hydrides) 再發生交代作用 (metasomatism) 和水解作用 (water hydrolysis)。

生物來源

天然氫的生物來源包括熱成熟生成和微生物代謝，前者氫氣是沉積有機質成岩作用和熱成熟的副產物，而後者中產氫及耗氫微生物通常是聯合工作並提供重要的氫氣匯。

在成岩過程中，碳氫化合物的碳鍵聚合作用導致油母質 (kerogen) 的形成，並釋放少量的氫氣，後續的熱裂解階段 (catagenesis) 油氣和煤層氣生成過程中，烴的碳鍵分解斷裂釋放出熱生成的氫氣。在最後沉積變質階段 (metagenesis)，殘餘油母質逐漸芳構化 (aromatization) 主要生成甲烷和一些氫氣。烷烴和甲烷熱裂解分別發生在 200°C 和 500°C 以上的溫度，也導致氫氣釋放。

認識天然氫的生成機制，除有助於天然氫探勘和開採活動，也可以拓展出新的零碳、低成本製備氫氣方式，科學家已經開始在實驗室探索橄欖石蝕變產生氫氣的可能性，以較低的原料成本，大量生產提供氫氣。

(二) 天然氫氣的匯存 (sinks)

岩石圈 -- 水圈 -- 大氣中的氫匯，使得超過地質氫氣匯的氫氣被微生物或其副產品有效利用，這導致源和匯之間的平衡，將大氣的氫氣濃度穩定維持在約 0.5ppm 的痕量水平。土壤中的碳和非生物（即穩定在土壤基質中，但不再與活細胞相關的催化）對氫氣的吸收被認為是主要的氫氣匯。估計地球深處被微生物消耗的氫氣、溶解在水中的氫氣和非生物反應消耗的氫氣（如被 OH 氧化）總和體積，約為比氫氣土壤匯低一個數量級。由於氫氣的高反應性，油氣藏是潛在的氫匯，油氣可能因為有加氫作用，而提高品質和體積，

也掩飾任何氫氣的輸入現象以致油氣藏中的氫氣含量不高。此外，甚至有認為烴生成帶內富含有機物的生油岩因化學反應而成為氫氣無法穿透的匯。

六、天然氫系統

地球形成以來，氫氣就無處不在，早期大氣中的氫氣濃度可能高達30mol%，目前約為濃度 5.31×10^{-5} mol%，主要是地表和空中化學過程的氫氣輸入，與離開進入高層大氣和太空的氫氣的損失相平衡。地球早期非生物源氫氣是化學營養 (chemotrophic) 生態系統的能量來源，可能有助於地球早期甚至太陽系中其他行星的生命發展。土壤是氫氣的主要匯，吸收天然氫的供應輸入。當氫氣的輸入量大於匯量時，就發生氫氣滲漏排放，成為地下氫系統的直接指標。

海水滲入地幔與橄欖岩發生蛇紋石化反應產生氫氣，莫霍面是蝕變的橄欖岩和未蝕變的橄欖岩之間的界面。氫氣被單細胞微生物利用進行新陳代謝，此地球內部發生的生物過程規模過去被大大低估。

自然環境中天然氫氣生成之後，另外兩個值得研究的重要問題是氫氣在地下的移棲及聚集，是否存在足以密封氫氣儲層的緻密岩石。氫氣是一種輕質氣體，易以氣態形式垂直移棲。此外雖然氫氣在淺層不太溶於水，但當溫度壓力增加時它變得非常可溶，以致在幾公里的深度，氫氣可在含水層中以溶解形式，橫向移棲到遠離源頭的地方，而不僅僅是在源頭上方被發現。

西洲馬里鑽獲的天然氫氣是在輝綠岩 (火山岩) 蓋層下，一種非常不透水的粗粒玄武岩，其他地區在粘土層下也發現氫氣儲集，地下鹽洞和含水層中被認為是工業氫氣的儲藏點。這些發現顯示天然氫氣可能存在於多種地質封閉內，但迄今為止沒有證據表明這些密封層對氫氣會像油田那樣在數百萬年內保持不滲透。

一般石油天然氣探勘所倚賴的石油系統概念 -- 油氣生成、移棲、聚集、密封、保存，也適用於探勘非生物性氣，但要商業探勘非生物的天然氫氣，還需要另外建立適當的探勘指南。氫氣和氣態碳氫化合物的移棲和聚集所需的地質環境條件有別，如氫氣易被捕獲於含水層，火成岩是氫氣的有效密封岩，天然氣則不然，厚碳酸鹽更能保留碳氫化合物氣體。粘土礦物是氫氣的有效吸附劑，氫氣可被封存在蒸發岩內或其下方，在漫長的構造活動期間，鹽岩可作為緩衝層，承受儲層破裂，氫氣更可被有效封存於鹽和粘土的交替層中。

氫氣含量異常的現象常與斷層有密切相關性，尤其是進入結晶基底的斷層，斷層被認為是氫氣和氦氣的重要地質來源管道。氫氣來源的潛在位置可能與礦床有關，可使用地球物理技術（重力和磁異常）遙測識別出來。全球多處報導觀察到地下氫氣源在地表形成仙女圈 (fairy circle)-- 圓形到橢圓形凹陷。相較於源自生物有機質的石油天然氣，氫氣資源主要優勢在可於更長的時間及更寬的溫度範圍內連續生成。

七、全球天然氫氣資源

利用目前已有市售的氫氣傳感器，可以在給定時刻準確測量土壤中的氫，另外為估算通量以進一步估算儲量，也新開發永久性傳感器，持續每小時測量土壤中的氫氣濃度，並將數據通過衛星直接發送研究人員。在巴西的舊金山盆地安裝一百多個這樣的傳感器，發現相當高比例的氫氣，並且可看到女巫環（仙女圈的另一個名稱）。經過近兩年的觀測，在 2020 年底首次公佈證實在地質構造上有顯著，但不連續和非恆定的氫氣排放流動，測量到的累計氫氣流量約每天 7000 立方公尺，相當於 0.4 平方公里的構造區排放 680 公斤，大致與俄羅斯公佈的數量級相同。重要的是，第一次在仙女圈上連續記錄顯示，流量在每天有系統的規律性變化，以非常高的氫氣脈沖開始，然後是 24 小時循環的常規流量，這個循環規律或許與活動斷層有關，持續監測可能是未來評估和生產天然氫的基本要素。

在俄羅斯、美國或巴西測量的氫氣排放量，每平方公里每天 50 至 1900 公斤之間。值得注意的是，地表的氫氣洩漏量，並不代表地下的氫氣儲量，就如同石油地質學家不會根據地表油氣滲漏排放量來確定地下的油氣儲量體積，因為油氣藏只有很小的一部分會逸出，二者之間未必有正相關性。

輻射分解和蛇紋石化被認為是產生氫氣的主要反應，通過適合的地質模型和地質地化參數可以估算氫氣產量，例如在澳大利亞陸地深度 1 公里以內的地層，氫氣產生資源量約在每年 1.6 至 58 百萬立方公尺之間。

下地幔中的原始非生物氫氣被認為分佈廣泛但體積未知，而上地幔 -- 地殼的主要次生氫氣年產量，估計約為 2540 ± 910 億立方公尺 (8.97 ± 3.21 Tcf)，但另有估計表明，全球來自大陸和海洋地殼來源、水輻射分解、火山作用和火山脫氣的氫氣資源量則低得多，為每年 310 億立方公尺 (1.1Tcf)，這兩個估計中，明顯低估碎屑岩源的氫氣產率，儘管如此，氫氣資源量估計仍遠低於商業天然氣的產量，比 2019 年的天然氣產量 4.15 兆立方公尺 (145Tcf) 低

約兩個數量級。上述天然氫氣的年產量並不令人印象深刻，但必須考慮非生物氫氣產量連續數百萬至數十億年，並且發生在很寬的溫度範圍內，有別於石油生成在特定的狹窄溫度範圍內，且時間跨度較短，而油氣田的氫氣儲量並不大，以全球天然氣探明儲量 197 兆立方公尺，估計約為 200 億立方公尺（平均氫氣含量約為 0.01mol%），故天然氫氣資源仍是很神秘。

雖然尚無法確定天然氫的資源，最近在西非成功開採天然氫氣用於小規模發電的案例，受到極大的關注，也引發天然氫的探勘。

八、天然氫的探勘

天然氫是一種自然生成的無碳資源，大規模測勘天然氫的挑戰包括：氫氣無色、無味，且自身具有質量輕，溶解度小，極易揮發遷移等特點；在自然系統中，天然氫的產生和消耗是緊密耦合，可能導致其濃度較低；研究多指向大規模的天然氫被封存在地球深處，一般的地質探勘或化石能源開採甚少；氫氣的檢測和技術分析不足，有可能低估當前天然氫的逸出量。

天然氫的探採有可能重複石油和天然氣探採的歷程，石油和天然氣探採始於對油氣的生成、生油岩和油氣移棲聚集所知甚少的 19 世紀中葉，卻迅速取得成功。

考量這些問題有需要整合全球已發現的天然氫數據以及探勘活動，探究天然氫的「生成 -- 移棲 -- 聚集」機制，釐清天然氫系統，進一步製定初步的探勘指南。

九、天然氫氣探勘指南

氫氣極具流動性，很容易受浮力和濃度梯度驅動，藉由擴散及平流機制從深處向淺儲層移棲，但基本上需要氫氣的生成速率超過被吸附到匯（如層狀矽酸鹽、鹽層和富含有機物沉積層）的速率。直接測量或間接觀察到的表面氫氣滲流（如圓形橢圓形凹陷和仙女圈）表示缺少有效的封閉蓋層或密封層有洩漏，從氫氣滲漏中收集到的最重要參數是其量級，指示氫氣資源的潛在規模及其持續性。一般建議在多個緊密間隔的監測點進行至少 24 小時的連續監測。種類繁多的氫氣來源及其伴隨的岩石類型和流體，使得未來的天然氫氣探勘者需要更多樣的探勘指南。

富含氫氣的氣體主要出現在以探勘石油為重點的沉積盆地之外，然而富含氫氣的天然氣地區也漸受重視。最近的研究指出發現富含氫氣的天然氣地點，為未來潛在的天然氫氣資源探勘提供明確方向，敘述如后：

- 陸上火成岩 - 提供廣泛的環境，富含氫氣的氣體以游離氣體、溶解氣體的形式出現，被困在蛇綠岩、裂谷帶、斷層中的流體包裹體中，氣體脫氣到火山氣體、間歇泉、溫泉和地表氣體滲漏。
- 礦床是火成岩和沈積岩中富含氫氣的主要場所。
- 煤層（吸附 absorbed）/或碳酸鹽（吸附 adsorbed）提供高氫氣儲存能力。
- 在氣 - 水流體包裹體中，岩石越老，氫氣豐度越高，因為時間是涉及 $^{235,238}\text{U}$ 、 ^{232}Th 和 ^{40}K 放射性衰變的水輻射裂解程度的主要控制因素。
- 蒸發的硫酸鹽可儲存高豐度的氫氣（體積高達 20 至 30%），而具有高鉀含量的岩鹽（例如鉀礦床）也可以通過鈣 (Ca) 金屬中間體，提供氫氣的輻射水解來源，加上鹽岩是很好的封閉層。
- 油氣田通常不具高含量氫氣，但對於氫氣含量較高的天然氣藏，或許可通過天然氣液化相關作業，富集生產天然氣中的氫氣。

氫氣的反應性質會影響所穿過的岩石結構和化學成分，如降低碳酸鹽的機械強度，可能因此在應力狀態下加速裂縫發展，增加額外的遷移路徑。氫氣含量通常隨地層深度增加，但因氫氣擴散性及反應性太強，不易以高濃度大量聚集在地質圈閉中，有待針對其特有的生成、移棲和保存特徵制定適用探勘指南找出潛在目標（如圖 7）。

初步的氫氣研究指出與陸上高氫氣含量相關的三個主要地質條件，敘述如后：

- 富鐵岩石的存在，特別是太古宙基底岩石作為輻射分解和水解生成氫氣的潛在來源。
- 可以提供氫氣擴散移棲路徑的深根基底斷層。
- 基底與沈積岩交界處的深層儲層潛力，裂縫火成岩基底中可能賦存直接被沉積岩覆蓋的富氫天然氣。

其他與超鎂鐵質岩石和斷層均無關聯的氫氣，則需要更廣泛的指導原則。

另外天然氫氣的保存輸送可能影響探勘決策，液化對甲烷很有效，可通過船舶運輸到全球市場，但對氫氣而言則更昂貴，且效率更低。氫氣液化壓縮放熱，溫度必須非常低，以現今最先進的技術，液化氫保存輸送可能會損失約三分之一能量。運送氫氣有其困難，靠近消費者的小型氫氣氣田將較具有經濟吸引力，與非洲馬里的例子相似。

十、結語

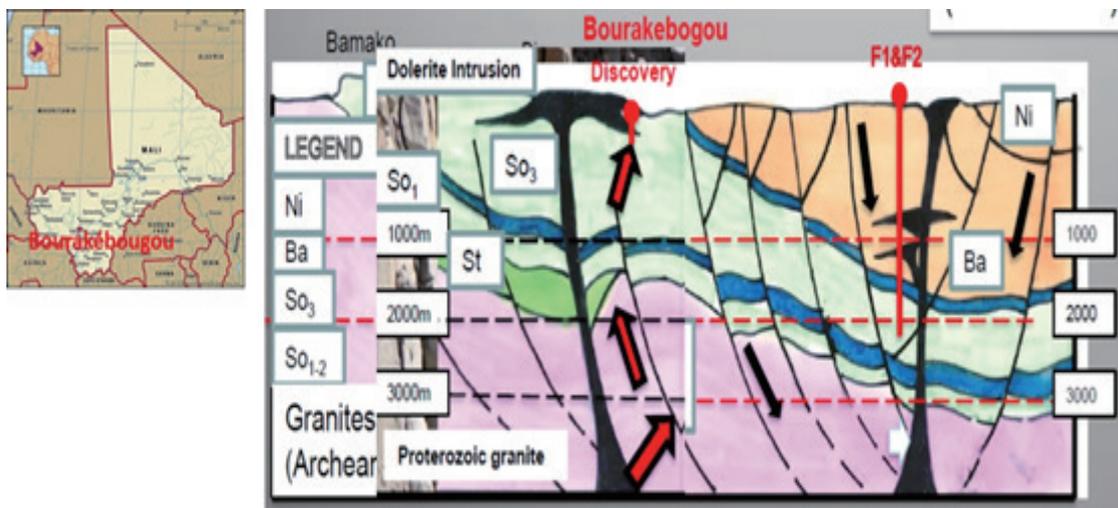
大多數天然氣都含有天然氫氣，儘管這些氣體中的氫氣濃度多低至痕量水平（低於 0.01mol%），但仍有少數氣體具有非常高的氫氣含量（即 >10mol%），主要與非生物來源有關。天然氫氣源的廣泛範圍，需要多種探勘策略。探勘氫氣的一個有效出發點是結合遙感技術與實地樣品採集來尋找地表的氫氣滲流，儘管氫氣的地表流速相對較低，但其存在強度指示地下氫氣資源的潛在規模。

地球圈中產生氫氣的兩個主要反應為蛇紋石化和輻射分解，鑑於全球已知大量的氫氣發現研究指出，寒武紀基底岩是明顯的探勘選擇，可整合地球化學、地球物理及岩石物理技術，確定基底上方的大量沉積厚度及相關的岩漿侵入探勘天然氫氣。此外，斷層可接近的儲層很容易接受深層平流氫氣，而擴散的氫氣可能由於高反應性，而不一定會提高石油儲層中的氫氣濃度。

氫是無碳，但與化石燃料不同，在更廣泛的深度和溫度範圍內不斷地從同一來源產生，從而提供“永恆的氫”。鑑於自地球形成以來產生大量的氫氣，很可能有潛在的大型氫氣儲藏，等待有效的探勘發現。

圖目

圖 1 非洲馬里南部陶德尼巨型盆地布爾克布古 (Bourakebougou) 的一口 Bougou-1 淺井於深度 110 公尺的火成岩中開採到純度超過 96% 的天然氫氣，成功用於發電，Bougou-1 井位及地質剖面。



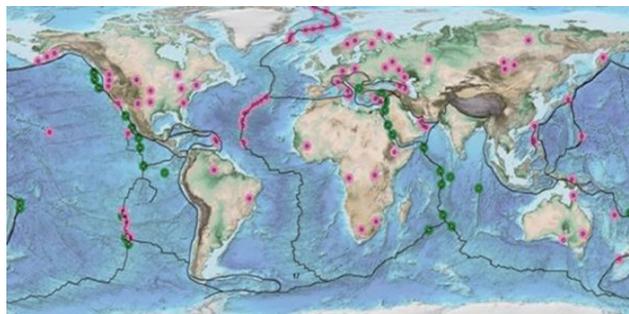
資料來源 :<https://doi.org/10.1190/ice2016-6312821.1>。

圖 2 非洲馬里南部陶德尼巨型盆地布爾克布古 (Bourakebougu) 的一口 Bougou-1 淺井於深度 110 公尺的火成岩中開採到純度超過 96% 的天然氫氣，成功用於發電，Bougou-1 井位地層岩性及露頭。



資料來源 :<https://doi.org/10.1190/ice2016-6312821.1>。

圖 3 全球各地的地表天然氫氣排放，如滲漏或仙女圈的報導，顯示天然氫氣普遍存在自然界地質環境中。



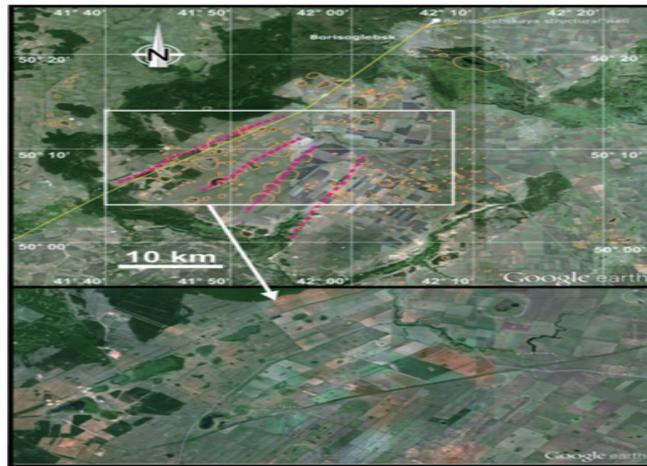
資料來源 :<https://www.renewablematter.eu/articles/article/natural-hydrogen-a-geological-curiosity-or-the-primary-energy-source-for-a-low-carbon-future>。

圖 4 土耳其西南部安塔利亞 (Antalya) 附近的奇美拉山 (Chimaera)，天然氫氣逸散燃燒超過 2500 年，被認為是希臘時期第一場奧運聖火的源頭。



資料來源 : https://www.searchanddiscovery.com/documents/2014/80415etiope/ndx_etiope.pdf。

圖 5 莫斯科東南部的航拍照片上可以清晰看到大致圓形的輕微凹陷，當地稱之為仙女圈（fairy circle），是地表天然氫氣排放的特徵。



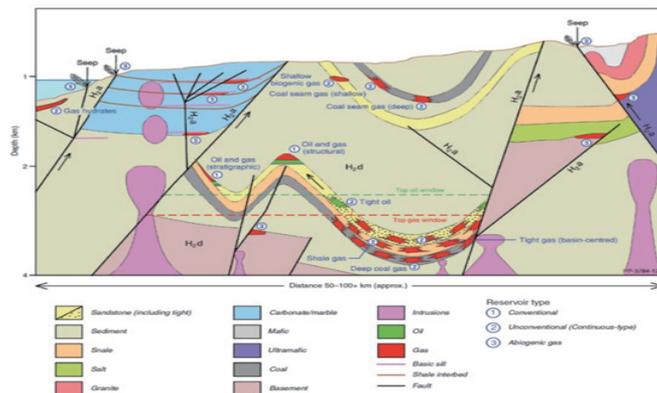
資料來源 :doi:10.1007/s11053-014-9257-5。

圖 6 巴西觀察到的地表仙女圈，直徑約 500 公尺，曾偵測到有氫氣排放現象。



資料來源 :<https://www.renewablematter.eu/articles/article/natural-hydrogen-a-geological-curiosity-or-the-primary-energy-source-for-a-low-carbon-future>。

圖 7 傳統和非傳統油氣藏中天然氫氣探勘的生成來源 - 移棲 - 聚集系統示意圖。油田（1 及 2）中的氫氣可能來自非生物源的補充（3）。 $H_2 a$ = 氫氣平流移棲和 $H_2 d$ = 氫氣擴散移棲。



資料來源 :<https://doi.org/10.1071/AJ20044>。

從本質安全與功能安全設計談 瓦斯公司整壓站的保安裝置

退休人員 李正明

一、前言

多年來應各級政府機關之邀，至各個瓦斯公司實施輸儲設備安全查核，目睹大大小小整壓站，包括場站型、路邊箱型、地下箱型及大樓簡易型等不同型態、功能、供應條件的設備，學習到很多知識與常識，也發現一些供氣系統安全設計等單元可供探討的題目。以下就個人從事瓦斯事業的經歷、經驗及查核過程所見現象，從本質和功能安全面向提出對整壓站及用戶端設備的看法。

二、本質與功能安全設計應用於瓦斯公司輸儲設備概念

本質安全 (Instinct Safety) 指設備、設施或技術工藝因已內建，能夠從根本防止事故發生的功能。本質安全設計是指一套操作系統在設計時透過人因工程學的考量，採取工藝手段消除各單元潛在失誤或外界導入不利因素的方式。也就是利用設備單元設計等方式使系統本身具有安全性及自我保護功能，即使在失誤或系統被外在不利因素攻擊的情況下，能自我防衛而不發生事故，包括失誤安全功能（失誤操作不會導致事故發生或自動阻止失誤操作）、故障安全功能（設備、工藝發生故障時，暫時停止工作或自動轉變安全狀態）。如天然氣是可燃性氣體，在一座整壓站所使用的電器設備一定是密閉（天然氣或水分不能進入）+ 防爆（被引爆時有足夠的強度抵抗，或設計有脆弱點將壓力釋出）器材，其使用電源為直流 24V DC，甚至更低，信號電流以毫安培 (mA) 計。密閉 + 防爆的環境中所產生的能量非常小，不至引發火災，同時全系統接地，將操作過程可能產生的靜電疏導到大地電容器，此即本質安全設計。

功能安全 (Functional Safety) 指和一個系統或設備整體安全的組成部份。其達成安全性的方式是靠系統或組成設備單元在接受輸入訊號後，可以正常的動作或接受命令停止動作。瓦斯公司整壓站系統入口端設置之安全閥 (Safety Valve)，如進口壓力大過整壓站系統最大常用壓力 (MOAP) 設定值 1.1 倍時，安全閥自行開啟，將超過壓力透過天然氣排放減壓至設定值以下，此類機能屬於功能安全，即耳熟能詳的安全機制 (Mechanism)。

一座天然氣整壓站的本質與功能安全設計，係綜合設備、設施、技術等面向，可以是獨立功能，也可以是連鎖機制 (Inter-lock)。同時整壓站雖有本質與功能安全設計，仍不能脫離以人為本。透過其功能將瓦斯輸送至使用者所提

供的設施，是一營利工具，當然就有供應安全的責任。是以瓦斯公司都會設置 SCADA 監控系統平台，各整壓站設施透過網路平台，將真實狀態 (real-time, real-status) 資訊回傳監控平台，由值班人員 24 小時監視與調控，使系統在平穩狀態下運作。因此依靠整壓站一些數據的收集 (picking-up)、感應 (sensing)、計量 (Measuring)、監看 (Monitoring)、傳輸 (transmitting)、雙向訊息回饋 (networking) 等功能。如一座瓦斯公司整壓站系統中的超壓遮斷裝置 (Over Pressure Shut Off, OPSO) 當其上下游壓力感測超過設定值，即將管路流通的天然氣關閉，同時信號透過遠端傳輸器送至全系統監控中心，由監視人員判斷狀況後下達命令，採取矯正措施。

然而前述設計及功能只表現在天然氣通過的處所 (即管道與配件總成)，對於所處環境是否有不利因素存在、受到突如其來的攻擊 (如火警、淹水、雷擊)、或系統故障 (如未被查覺的洩漏) 等，因此整壓站都會在天然氣輸送及供應系統的外圍環境設置環境監視與監測系統 (Measuring & Monitoring) 功能單元，包括：(一) 洩漏偵測器 (二) 火焰或煙霧偵測器 (定溫式、火焰式、光電式等) (三) 攝影機 CCTV (四) 地震感知器 (五) 水位感知器 (六) 門禁管理器及 (七) 其他。這些功能設備單元是用低功率信號收集到遠端信號裝置 (RTU)，以 SCADA 系統回傳公司的監控中心，可稱之為輸儲設施的輔助系統或環境監視系統。因各功能設備單元均不與輸配氣系統直接接觸，也不會觸動前述天然氣功能安全設計設備。以現代 ICT 技術，這些功能單元的信號傳輸頻寬與速度夠快，監控中心可以得到即時現場資訊，而依智慧與經驗判斷後下達命令。一般而言，現場發生的狀況，監控中心不採取立即復歸動作，而必須經過系統研判、現場勘查、排除原因後，採人工方式復歸，故監控系統是決策支援系統 (Decision Support System)。整壓站的功能設備單元也少有可以遠端復歸的設計，以避免遠端操作的失誤。

此外，還有一看似獨立，實則與供氣系統聯結一起的加臭子系統。在用戶安全方面需仰賴加臭系統，但如有洩漏卻難以處理。瓦斯加臭是利用人類知覺恆常性 (Perceptual constancy) 與對應態度 (Behavior) 而設計。瓦斯公司供氣到家戶端，壓力已降至 200mmAq(0.02kg/cm²)，如有些微洩漏，因無影無聲，不留痕跡，唯有添加臭劑，隨瓦斯飄移，讓鼻子聞到後產生不適感，引發警覺 (Alert!)，而採取行動 (關閉瓦斯等行為)，所以把加臭子系統列為整壓站功能安全設備單元，應是以人為本設計的輔助系統。

本質與功能安全設計的整壓站就是透過天然氣操作流程、融合以人為本、結合設備單元、環境單元、控制系統、法規制度等諸要素的安全可靠與和諧運

作，使各種操作條件與危害因素始終處於受監視與控制狀態。

將此觀念引申至天然氣使用者端，也是相同的道理，只是具體而微，可以推而廣之。如使用天然氣當 VOC 廢氣焚燒助燃的半導體生產廠的簡易整壓設施、一棟大樓供應裝置、家戶使用瓦斯設備等，都可以看到本質與功能安全設計。大樓裝置緊急遮斷器 (Emergency Shut-off Valve, ESV) 及在監控中心 (值班台) 設控制盤，甚至將控制功能併入消防系統、家用微電腦瓦斯表、炊煮爐具上的熄火停氣裝置，都是本質型與功能型安全設計，這些設備都被認證機構 (如 UL、NEMA、JIS、TUV、NFPA 及 TAF 等) 認證及取得證書。

三、整壓站供氣系統設備單元的功能安全設計

整壓站供氣系統設備單元的功能安全設計有一定的功能及順序，順序不正確，功能就打折，甚至失效，說明如下：

- (一) 消除：採用本質安全的單元，如採用防爆認證的電器、開關、信號傳輸器、RTU 及氣動式 ESV 等。
- (二) 遠離：整壓站市電供應源以防爆箱裝設在站外，排放管直立突出 4 公尺以上，遇屋頂上需再加 1 公尺以上。
- (三) 阻絕：ESV 閥將外來超壓氣源隔離，不使之進入系統中破壞各元件。超壓遮斷閥 OPSO 將往下游過壓供氣阻絕，不使下游接受端 (用戶) 遭受不安全入侵。
- (四) 預警：洩漏偵測器、火焰 (感溫) 偵測器、地震感知器、CCTV、水位感知器、門禁感知器及加臭等。基本上不控制功能單元，而由監控人員判斷後採取行動。但用戶端則與供氣功能單元連動，如使用天然氣當 VOC 廢氣焚燒助燃的半導體生產廠，其整壓站可能裝設 3 套地震感知器，以 3 取 2 (2 on 3) 的邏輯決定關閉 ESV，以避免生產線受損。
- (五) 避免與疏導：如裝設接地線疏導靜電進入大地電容器、裝設避雷裝置等。
- (六) 失效安全：如為提升天然氣儲槽儲量的壓縮機 (轉動機械)，遇運轉條件不正常時自動跳、設置備用電源 (不斷電系統)，避免外來電力中斷導致系統無法運作。
- (七) 減緩：釋壓閥 (Pressure Relief Valve) 排放壓力、釋放能量，減緩能量傳遞到接收方。
- (八) 降低能量：電氣系統使用低電壓的電流設備。

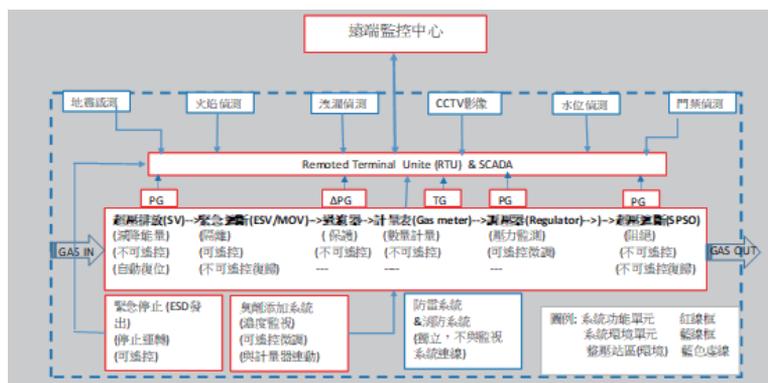
四、從天然氣事業法觀察整壓站(器)本質與功能安全設計

《天然氣事業法》第 13 條第 2 項「天然氣事業應依主管機關規定，於輸儲設備裝置防災相關設施」。依本項規定主管機關制定子法《天然氣事業輸儲設備防災相關設施裝置維修辦法》定義相關系統，敘述如下：

- (一) 監控系統：監視輸儲設備操作狀態，含天然氣流量、壓力、溫度之狀態，具備異常顯示與警告、地震偵測、漏氣偵測、火災偵測或其他功能。
- (二) 遮斷裝置：輸氣管線遇緊急狀況時，可自動或手動阻斷管線內天然氣輸送。
- (三) 緊急停止裝置：輸儲設備遇緊急狀況時，可自動或遙控停止設備運作。
- (四) 壓力排放裝置：輸氣管線或設備遇緊急狀況時，可將設備內之氣體排放至安全地點。

前述設施定義，帶入本質與功能安全設計觀念，以圖解方式表達(如圖 1)。採用圖解結果可將《天然氣事業輸儲設備防災相關設施裝置維修辦法》的定義予以系統化、歸類，將更容易瞭解整壓站系統，而依性質不同的整壓站，選用功能安全設備單元時能有更合適的選擇。

圖 1 整壓站設備單元架構依功能安全設計圖解



資料來源：李正明繪製。

- (一) 供氣系統的操作單元：過濾器、計量表、調壓器、壓力表、傳輸器 (PT)、溫度傳輸器 (TG)、差壓傳輸器 (Δ PT)、計量傳輸器 (VT)、RTU/SCADA。→與監控中心連線。
- (二) 供氣系統的功能安全單元：安全閥 (SV)、緊急遮斷閥 (ESV)、超壓遮斷閥 (OPSO)，當中除 SV 外，ESV 一定連線，OPSO 也有可能與監控中心連線，替代 ESV 的一部分功能。
加臭系統列入此類，以便連線將數據傳回監控中心。

- (三) 環境監測單元：洩漏偵測器、火焰(感溫)偵測器、地震感知器、CCTV、水位感知器、門禁感知器等。→與監控中心連線。
- (四) 外加保安系統：消防設備、防雷裝置。→不與監控中心連線。防雷裝置不一定要設置，但露天儲氣槽依消防法令及高壓氣體設施相關法令需設置，空曠場域的高壓整壓站亦應考慮設置。

《天然氣事業輸儲設備防災相關設施裝置維修辦法》雖無明訂是否依單元功能安全設計的邏輯，但法規文字上已充分表達此邏輯觀念，令人惋惜的是法規無提及消防和防雷設備。在消防法《各類場所消防安全設備設置標準》及《建築技術規則設備篇》均有要求。

五、整壓站供氣系統設備單元功能安全設計探討議題

- (一) 壓力排放裝置 -- 安全閥 (SV): 輸儲系統輸入壓力大過 SV 彈簧設定壓力時，透過 SV 開啟，將氣體放空，使壓力降至設定壓力值後自行關閉，不使後方設備因超壓而受損，是一種保護裝置。此壓力設定值是依當下系統操作壓力允許最大值 (MOP, max operation pressure) 設定，而不是以 SV 的最大允許工作壓力 (MAWP, Max. Allowable Working pressure)。MAWP 在 SV 的銘牌顯示說明可裝設在此壓力值以下系統。如一個 MAWP=40fk g/cm^2 的 SV，可在 MOP=15fk g/cm^2 的系統當作壓力排放裝置，但此時 SV 作動壓力應以 MOP+ Δp 設定， Δp 通常為 MOP 5 至 10%。往往瓦斯公司把整壓站的 SV 以銘牌標示值 40fk g/cm^2 設定，上游供應壓力不過 25fk g/cm^2 ，SV 在此操作條件下，永遠不會作動。
- (二) 依法規天然氣使用壓力 $\geq 10\text{kg}/\text{cm}^2$ (職安法規定義之高壓)，需設置壓力排放裝置、安全閥 (SV) 或壓力釋放裝置 (Pressure Relief Valve, PRV)，裝設位置應在系統進氣總關斷閥 (手動閥) 之後第一道防護，如有上游不正常，超過設定壓力入侵，將過高壓力洩放，但常見 SV 或 PRV 裝在系統中間或最後，導致失去原有功能。
- (三) SV、PRV 尺寸與壓力匹配及設置規則，常見於危險機械與高壓氣體設備相關法規中。在各地整壓站常見 SV 的前閥門被誤關，使其完全不作用。另外比較特殊案例為天然氣高壓 ($\geq 10\text{kg}/\text{cm}^2$) 進站，分 6"+8" 兩路接到高壓配氣總管 (Head)，以 2 吋 SV 及 50mm 管轉 3 個 90 度當排放管，此設計不甚理想，因排放時會產生尖銳的噪音。正確設計 SV 排放管需大於或等於被排放氣體的輸送管截面積，而且最好是直排，不宜轉彎。

(四) 緊急遮斷閥 (ESV) 與超壓遮斷閥 (OPSO) 間地位之混淆：當進氣條件不正常時，ESV 以連線遙控方式將氣源遮斷，使之不入侵系統。OPSO 是裝在系統調壓器之後，其設定作動壓力大於系統輸出壓力 [$POPSO = P_{set} + \Delta p$]，當整壓器失效，透過壓力引導管感應到輸出端壓力大過設定值 POPSO，經作動將輸出端關閉，不使過壓 Δp 的天然氣進入接受端 (用戶)。有些瓦斯公司整壓站未裝置 ESV，理由為已裝置 OPSO，另外亦有公司認為 OPSO 可遠端遙控，必要時即可下令關斷，OPSO 即 ESV。唯當進口端的不利因素已入侵至整壓器時，千萬不能把 ESV 和 OPSO 的功能混淆。

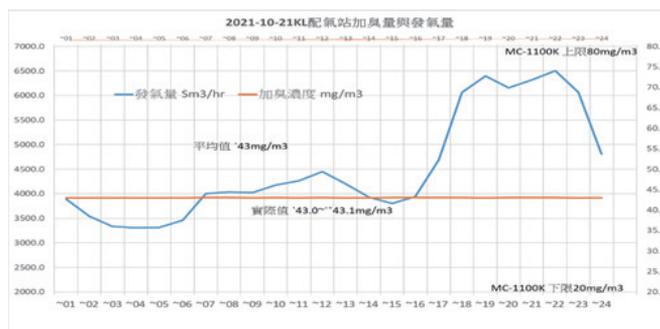
(五) 供氣系統功能安全設備單元在整壓站不但需裝置 (Do the right thing)，也要安裝正確，才能發揮功能 (Do the thing right)。以天然氣洩漏偵測器為例：依《各類場所消防安全設備設置標準》天然氣相對空氣的比重小於 1，所以裝設在房屋天花板下方 30 公分處、感應口朝下 (向地心)，如有大於 60 公分的橫樑阻隔，須在阻隔兩側各裝置一套，如屬整壓站棚架式，大致可符合此規則，但水泥構造站體大多緊貼天花板裝置，有些橫置於樑上感應口 (水平方向)，這些安裝方式都將導致偵測器功能降低。又如火警偵測器有火焰偵測 / 煙霧偵測器 (定溫式、火焰式、光電式等)，整壓站常見的定溫式感溫棒 (Thermal stick) 和光電式偵測器 (UV/IR)，各有裝置條件。一般感溫棒裝在密閉或半密閉空間，能感應空間溫度，大於 65°C 時發出警號，UV/IR 可測 120 度 xN 公尺的 3 度空間 (N 視火源燃料及可測有效距離而定，通常大於 15 公尺)，如 N 在 9 呎 (3 公尺以內) 效果不佳，可能測不到 3 度空間的死角。常見感溫棒和 UV/IR 裝設場所則相反，即在棚架式的整壓站使用感溫棒，而在密閉狹小空間的整壓箱裝設 2 具 UV/IR，以致距離和角度都失效。另外，在射角範圍內如有金屬鹵素燈具時，將產生光譜干擾及熱源，而使信號顯示不正常或錯誤，此現象已於數處整壓站出現 (在陽光下未遮蔽，讓日光直射亦同)。正確裝置方法參見原廠使用說明書或《各類場所消防安全設備設置標準》相關裝置規則。

又如簡易型整壓站的 ESV，其裝置應直立，且與垂直重力方向一致，常見受限空間與配管技術而橫置或倒置，都會降低作動時閥座的密合性。

(六) 臭劑系統：其功能安全設計原理為電腦加臭系統必須與天然氣計量

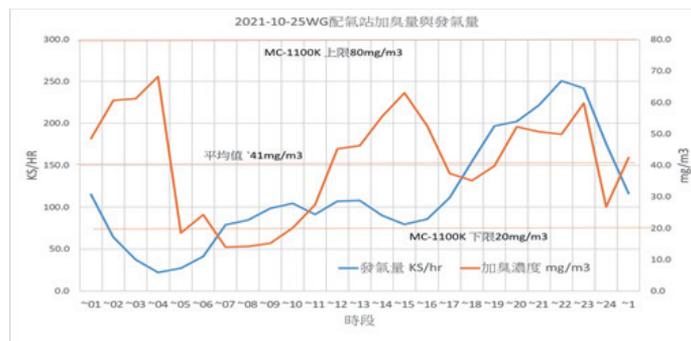
部連線，依流率決定噴入 CC 數，24 小時後可得到濃度平均值 (mg/m^3)= $[(\text{總發出臭劑量 kg})/(\text{總發氣量 } \text{m}^3)]$ ，以保障天然氣中濃度均勻且足夠。天然氣除非特殊情況(加濃查漏)外，各瓦斯公司都會依照天然氣事業法規定添加臭劑(整壓站電腦加臭系統功能正常設定，如圖 2、3)。一般上游供應公司交貨的第一階整壓站於加臭系統設定添加濃度，濃度在年度開始前與上年度後需將預計添加及已實現濃度 (mg/m^3) 報送主管機關備查。透過監控中心收回臭劑系統每小時的濃度，可以檢視是否正常運作。舉兩個不同瓦斯公司同一廠牌加臭系統案例，以 EXCEL 所作的圖形，可見第二案例加臭濃度一整天下來是符合規定濃度範圍 ($20 \leq 41\text{mg}/\text{m}^3 \leq 80$)，但分時濃度就有過高或過低 ($17 < 20\text{mg}/\text{m}^3$, min, 早上 7 至 9 點) 的情形，初步研判是未與瓦斯流量計連線或整壓站未裝計量器，顯然忽略系統功能安全設計，如轄區發生事故在早上 7 至 9 點，瓦斯公司很可能因加臭濃度不足 ($< 20\text{mg}/\text{m}^3$) 而被問責，並依天然氣事業法 60 條罰則，處新臺幣三十萬元以上，一百五十萬元以下罰鍰。

圖 2 整壓站電腦加臭系統功能正常設定 (顯示加臭率一致)



資料來源：李正明繪製。

圖 3 整壓站電腦加臭系統功能不正常設定 (顯示加臭率不一致)



資料來源：李正明繪製。

瓦斯公司常用的臭劑，以日本理研 CP-1100K 為例，由 30% 第三丁基硫醇 (Tertiary Butyl Mercaptan)+15% 硫化二甲基 (Dimethyl Sulfide)+55% 正庚烷 (n-Heptane，稀釋劑)=100mol% 所混合組成，在空氣中的密度為 2.76(20°C，空氣 =1.00)，爆炸下限 (LEL) 約 1.2%、上限 (UEL) 約 15%。比空氣重，又比天然氣低 (5%v/v)，依照《各類場所消防安全設備設置標準》可燃性氣體如比重比空氣重，氣體洩漏偵測器應裝設在距地面約 20 至 30 公分，然瓦斯公司整壓站加臭系統的洩漏偵測器往往比照天然氣供氣系統裝設，尚有討論空間。

(七) 地震感知器:屬於環境功能安全設計，與天然氣輸送操作無直接關係，但和遠端監控系統連線，將地震發生時最大震度傳回監控中心，以供採取必要作為 (如下令關斷天然氣通路)。

臺灣中央氣象局於 2020 年 1 月 1 日起實施的震度分級表中，對於戶外瓦斯發生影響的震度為 5 弱：「部分建築物牆磚剝落、部分山區可能發生落石、少數地區電力、自來水、瓦斯或通訊可能中斷」(如表 1)。

表 1 地震震度階級對照最大地動加速度 (PGA) 範圍表

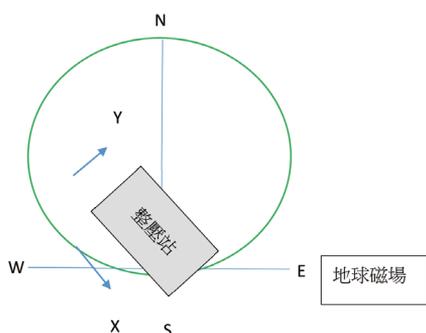
地震震度階級對照最大地動加速度 (PGA) 範圍表										
震度階級	0 級	1 級	2 級	3 級	4 級	5 弱	5 強	6 弱	6 強	7 級
PGA (cm/sec ²)	<0.8	0.8 ~2.5	2.5 ~8.0	8.0 ~25	25 ~80	80 ~140	140 ~250	250 ~440	440 ~800	>800

資料來源：中央氣象局，李正明整理。

整壓站所裝設的地震感知器大致有兩種類型：1、落球型：當地震達到設定震度時，鋼珠自盛盤上掉落觸發信號，只告知地震 Y/N?，而不顯示強度，作動後必須人工復歸。2、磁簧式：X-Y 軸或 X-Y-Z 軸，當地震時彈簧上磁性球體晃動在內建 X-Y，X-Y-Z 方向作磁力線切割，產生不同的微電流，經惠斯登電橋 (Wheatstone bridge) 將信號放大，表示其 3 向的加速度，取 3 向加速度合成一向量波，送出信號及震度到監控中心。此震度向量值與地震學上計算最大地動加速度 (PGA, Peak Ground Velocity) 的定義不盡相符。依官方定義最大地動加速度，以 gal (cm/s²) 為單位，區分地球重力垂直向 (G)、地球南北向 (NS) 及地球東西向 (EW) 等 3 個分量，於合成後成為向量，差異在於整壓站的磁簧式偵測器安裝時有無執行水平 (G) 和方向校正 (NS+EW)。大致上整壓站或監控中心的地震儀裝設因地制宜，如圖 4 所示。

整壓站裝設地震感知器除種類品牌眾多外，在裝置方面也有所不同，如同一平面 (地面或樓層) 裝 2 套或 3 套相同設備，或不同樓層各裝一套，或在 3 根橫樑各貼 1 套等情形。

圖 4 整壓站地震儀裝置 X-Y 軸與地震震度量測的 EW+NS 軸關係示意圖



資料來源：李正明繪製。

依據天然氣事業法子法《天然氣事業輸儲設備防災相關設施裝置維修辦法》第三條第一款第(三)項第3目：「於同一供氣區域內，應設置監控系統之場所逾一處者，得僅擇一場所設置具備地震偵測功能之監測設備。」意指以行政區域之鄉、鎮、區為一個單位，如區內有多個整壓站則擇一裝置即可。

綜觀目前中央氣象局裝設的地震偵測點，如表 2:

表 2 中央氣象局設置地震系統數量統計

地震資訊來源	數量
中央氣象局臺灣地球物理觀測網 TGNS	163 個 GNSS 觀測站 6 個地下水位觀測站 12 個地球磁場觀測站 20 個大地電場觀測站
中央氣象局地震觀測網 TTSN	即時觀測站超過 170 個
中央氣象局強地動觀測網 TSMIP	約 700 個自由場強震站 即時強震站超過 350 個

資料來源：中央氣象局網站，李正明整理。

表 2 所列觀測系統設有各種先進感測儀器超過 1000 多套，涵蓋全國山川平原、城鄉都市、沿岸外海，提供高效率的地震預警系統，為國家寶貴公共資源，其中「即時強震站可迅速提供以鄉鎮市區為尺度的細緻化震度資訊，強化中央及各縣市防救災單位地震救災決策擬定與動員配置所需的研判資訊，擴大速報資訊應用範圍與效益。(抄錄自中央氣象局網站/地震)」，這些資訊網已涵蓋上述「於同一供氣區域內，應設置監控系統之場所逾一處者，得僅擇一場所設置具備地震偵測功能之監測設備。」之要求，瓦斯公司可以透過中央氣象局免費提供的地震預警系統，外掛於監控系統上資源共享，可取得全國一致、即時的地震資訊，而不必在各整壓站裝設地震偵測器。

(八) 火焰偵測器：火焰偵測器也是整壓站安全功能單元的環境監測系統之一，如依《各類場所消防安全設備設置標準》係屬光電型的偵測器，

透過紫外光線或紅外光線達到偵煙，偵熱、偵焰的功能，隨各品牌與需求而有不同組合。

《各類場所消防安全設備設置標準》第 123 條「光電式分離型探測器，依下列規定設置：

- 1、探測器之受光面設在無日光照射之處。
- 2、設在與探測器光軸平行牆壁距離 60 公分以上之位置。
- 3、探測器之受光器及送光器，設在距其背部牆壁 1 公尺範圍內。
- 4、設在天花板等高度 20 公尺以下之場所。
- 5、探測器之光軸高度，在天花板等高度 80% 以上之位置。
- 6、探測器之光軸長度，在該探測器之標稱監視距離以下。
- 7、探測器之光軸與警戒區任一點之水平距離，在 7 公尺以下。

前項探測器之光軸，指探測器受光面中心點與送光面中心點之連結」。

個人屢次至各個瓦斯公司整壓站所見火焰偵測器，大多數為美製品牌，這些產品均獲得本質安全認證標誌，無需贅述。從現場看到的火焰偵測器所顯現的功能指示 LED，發現許多現象，陳述如后：

- 1、探測器未使用戶外型，受光面直接日射，或掃射範圍內有金屬鹵素燈具，或監試鏡頭上有灰塵污物等，以致 LED 信號顯示不正確。
- 2、安裝角度不正確，未能涵蓋應監視的標的範圍。
- 3、警戒狀態的 LED 信號燈顯示不正確，但被視為正常。

如 LED 信號顯示每 10 秒閃爍一次或定格亮紅燈，依各廠牌的操作說明書當偵測到火警熱源，正常狀態下應顯示藍色或綠色的信號。依《各類場所消防安全設備設置標準》第 123 條「光電式分離型探測器設置規定」是有一定的要求及規範，同時應配合整壓站的環境裝置，因此瓦斯公司及供應商都應對設備的設置及要求有足夠的瞭解；各廠牌說明書對 LED 燈號的指示如表 3:

表 3 各廠牌說明書對 LED 燈號指示表

狀態	Rosemount	Honeywell	Net Safety	Sharp Eye
正常待命	綠燈(定)	綠燈(閃)5 秒	綠燈(定)	綠燈(定)
錯誤鏡頭汙損	黃燈(閃) 紅燈(閃)	黃燈(閃) 紅燈(閃)10 秒	黃燈(測試， 閃後熄)	黃燈(閃)
火警作動	紅燈(定)	紅燈(定)	紅燈(定) 藍燈(定)	紅燈(定)
說明：定：長亮，閃：閃爍				

資料來源：李正明整理。

六、用戶端供氣設備本質和功能安全設計

如同先前所述，瓦斯公司輸儲與供氣系統的設備單元應有本質和功能安全設計，基本上採取(一)預防(二)阻絕(三)隔離(四)停止(五)釋放能量等工藝，從根本上防止發生不良或致災事件時得以做最有效的控制。

用戶端為大型用戶，如醫院、飯店或工業用戶工廠用氣，供應設施有如一瓦斯公司的整壓站，都具上述基本工藝與設計。但家庭或小型用戶，在用戶端已是使用天然氣的使用末端，由於生活起居、工作或旅遊，發生異常狀況時，不能等待使用者判斷後採取動作，而必須由功能安全設計將供氣停止，待異常狀況排除後才復氣，所以於異常時系統自動鎖閉，是使用設備單元功能設計的主軸，而不會有釋放能量(排放)的設計。

常見家庭用戶的天然氣使用設備功能安全設計與裝置態樣歸納如表 4:

表 4 不同建物裝置瓦斯表及 ESV 的組合

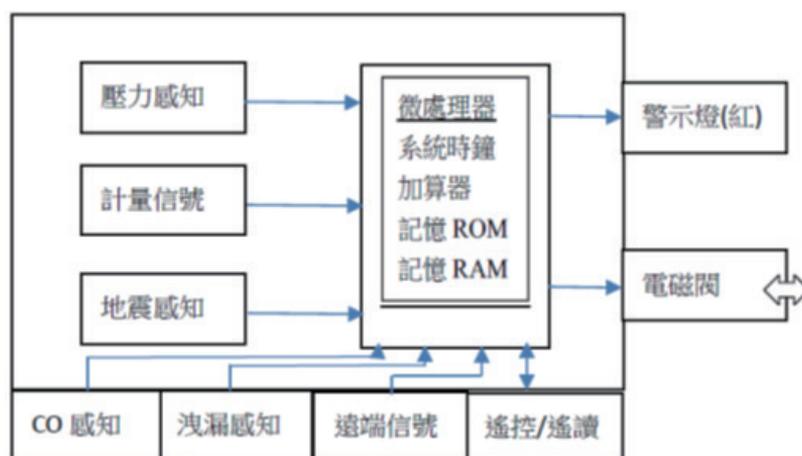
用戶類別	ESV 裝置 Y/N?	使用機械計量表	使用微電腦瓦斯表	系統安全評鑑
用戶獨立或公寓式住宅	(未裝設)	是	--	建議更換
		--	是	安全
大樓住宅	(未裝設)	是	--	懷疑
		--	是	懷疑
	裝設	是	--	懷疑
	裝設	--	是	安全

資料來源：李正明整理。

從上表比對住宅中設備功能安全單元，以(一)微電腦計量器(二)大樓裝設緊急遮斷器(ESV)及(三)天然氣進入大樓或家戶前的中壓 B 整壓器(1.5 kg/cm² 200mmAq)的超壓遮斷閥(OPSO)，才能發揮用戶天然氣供應系統功能安全設計，保障整體安全。

(一)微電腦計量表：具本質安全設計，如計量部與運算部隔離，皆為密閉，且防爆設計，任意開啟將無法重置的弱點設計；電子運算部使用低電壓(3.5V DC)、微電流、負極接地、正極觸發後才作動的長效電池。其功能單元安全設計如圖 5。另有關微電腦瓦斯表的功能與組件介紹，參見瓦斯季刊第 131 期之閒話微電腦瓦斯表一文。

圖 5 功能單元安全設計



資料來源：李正明繪製。

(二) 大樓緊急遮斷裝置：符合本質安全設計，如同整壓站 ESV，是被動的功能設計，接獲外來信號後才作動，將瓦斯流路阻斷，需人工復歸。其控制信號來自於 1、地震感知器 2、氣體洩漏偵測器 3、大樓管理室接收災害信號(如火警、住戶不正當行為〔引爆〕、公用管線損壞洩漏)下令遙控關斷。其遙控方式有電磁彈簧式和氣動式，二者均可以信號遙控，只是驅動方式不同而已，也可以現場操作遮斷。遠端操作是以低電壓電磁開關(Solenoid, 9 至 14VDC)釋放彈簧，啟動機械落下而關閉。另一是氣動式(Pneumatics)，是以一組低電壓電磁開關釋放彈簧撞針致動組(Actuator)，將高壓(25bar)CO₂小鋼瓶封口擊破，推動氣動關斷閥門，而達到阻斷目的。通常後者用在較大口徑的中壓 A 整壓站，一般大樓較多使用前者。

(三) 中壓 B 整壓器：符合本質安全設計，沒有電氣配件，一般型式如 1883 型都附有一 OPSO，屬功能安全設計，一旦整壓器故障，如皮膜破損超過設定壓力，OPSO 就將下游阻斷，避免超壓天然氣進入用戶爐具。整壓器與 OPSO 是以讀表壓力，而不是絕對壓力設定，所以都設有大氣平衡口，以平衡調壓皮膜內壓力，成為設定表壓力，如整壓器設在戶外未有遮雨之處，此二大氣平衡口應朝地面，以免雨水進入調壓艙內，影響調壓準確度。

七、微電腦瓦斯表及緊急遮斷器在法規之定位

本節將敘述 2 種功能性安全供氣設備在同一層面涉及的法規，並討論其定位與現況對比，將重點置於緊急遮斷器。

(一) 微電腦瓦斯表

《天然氣事業法》第 36 條：「為促進消費者居家安全，中央主管機關應自本法施行之日起，擬定公用天然氣事業推動具有地震

遮斷、壓力過低遮斷及通信等功能之微電腦瓦斯表推廣計畫，並逐年實施。」

政府在 2018 年訂定《公用天然氣事業微電腦瓦斯表推廣考核作業要點》及《縣市微電腦瓦斯表推廣計畫書評選作業要點》兩項鼓勵積極推動措施，旨在促進消費者居家用氣安全，強化微電腦瓦斯表推動工作，辦理瓦斯公司裝置微電腦瓦斯表數量及相關服務品質考核，並遴選績優之公用天然氣事業給予嘉獎。同時直轄市、縣（市）微電腦瓦斯表推廣計畫績優單位予以獎助推廣費用。

雖在《天然氣事業法》中將之定位於推動與推廣，包括縣市政府的推動、瓦斯公司的努力推廣及使用者對於居家與公共安全的體認、接受等，目前推行裝設績效卓著。

原裝設初期外加通訊信號功能因技術限制並未要求，時至今日，ICT 技術發展快速，各家瓦斯公司刻正測試此項功能，假以時日定能置於網站。

（二）緊急遮斷系統

緊急遮斷系統 (ESV) 的功能安全設計涉及的法規，除天然氣事業法的《天然氣事業輸儲設備防災相關設施裝置維修辦法》及《公用天然氣事業營業章程》外，尚有《建築技術規則》和《各類場所消防安全設備設置標準》等。以下就所提 3 項法規逐一敘述與比較當中的競合：

1、公用天然氣事業營業章程

2021 年 8 月 2 日政府頒布之營業章程範本第十一條「本公司對下列場所之新申請用戶，於確認已裝置正常運作之緊急遮斷設備後，始得供氣：(1) 十樓以上之建築物。(2) 位於地下室或總樓地板面積在五百平方公尺以上之餐廳、旅（賓）館、百貨商場、超級市場等場所。(3) 與用氣設施同棟建築之人數達一百以上之各級政府機關（構）、學校或國防軍事單位之建築。(4) 醫院、療養院、養老院等場所。(5) 其他經主管機關指定供公眾使用之場所。」

本公司基於安全考量，得視用戶管線設備裝置環境及建物狀況，向用戶建議採用前項設備。」

舊版營業章程範本「第十條本公司對下列場所之新申請用戶，於確認已裝置緊急遮斷設備，或已裝置自動遮斷功能之計量表，始得供氣：(1) 十樓以上之建築物。(2) 位於地下室或總樓地板面積在五百平方公尺以上之餐廳、旅（賓）館、百貨商場、超

級市場。(3) 與用氣設施同棟建築之員工人數達一百以上之各級政府機關（構）、學校或國防軍事單位之建築。(4) 其他經主管機關指定供公眾使用之場所。

本公司基於安全考量，得視用戶管線設備裝置環境及建物狀況，向用戶建議採用前項設備或計量表。」

前後章程比較，除適用對象增加醫療養護機構外，舊版章程第十條「對下列場所之新申請用戶，於確認已裝置緊急遮斷設備，或已裝置自動遮斷功能之計量表，始得供氣」，對於「已裝置緊急遮斷設備」或「已裝置自動遮斷功能之計量表」相互混淆情事，新的章程範本易懂、明確，免除過去可以緊急遮斷系統或微電腦表 2 擇 1 的困惑，裝置「緊急遮斷設備」是大樓公共供氣系統的保安裝置，裝置「自動遮斷功能之計量表」為終端用戶（個體家庭）的保安裝置，以 {and} 的邏輯觀念，二者並存，公共場域與私人領域的保安功能相輔為用，成為一完整體系。

2、建築技術規則

《設施篇》第 227 條所稱高層建築物，係指高度在五十公尺或樓層在十六層以上之建築物。第 259 條高層建築物應依規定設置防災中心：四、高層建築物各種防災設備，其顯示裝置及控制應設於防災中心（六）燃氣設備及使用導管瓦斯者，應設置之瓦斯緊急遮斷設備。

《施工篇》第 206 條地下建築物內不得存放使用桶裝液化石油氣。瓦斯供氣管路應依規定：二、瓦斯供氣幹管應儘量減少而單純化，表面顏色應為鉻黃色。四、中央管理室應設有瓦斯漏氣自動警報受信總機及瓦斯供氣緊急遮斷裝置。第 210 條地下使用單元等使用瓦斯之場所，均應設置瓦斯漏氣自動警報設備：一、瓦斯漏氣探測設備：依燃氣種類及室內氣流情形適當配置。二、警報裝置。三、受信總機。第 213 條地下建築物內設置各項設備應接至緊急電源：五、瓦斯漏氣自動警報設備。各緊急供電設備之控制及監視系統應集中於中央管理室。

從建築技術規責施工篇與設施篇節錄條文得知，高層樓集中住宅必須裝設 (1) 瓦斯供氣緊急遮斷裝置 (2) 瓦斯漏氣自動警報設備、受信總機 (3) 控制及監視系統應集中於中央管理室 (4) 緊急供電設備等要求，係建築法的強制要求。對應天然氣事業法舊版營業章程第十條「本公司對下列場所之新申請用戶，於確認已裝置緊急遮斷設備，或已裝置自動遮斷功能之計量表，始得供氣」一

文，顯示之前訂定章程時忽略建築技術規則的要求。

3、各類場所消防安全設備設置標準

該辦法第四節瓦斯漏氣火警自動警報設備第 140 條瓦斯漏氣火警自動警報設備依第 112 條之規定劃定警報分區。前項瓦斯指下列氣體燃料：一、天然氣二、液化石油氣三、其他經中央主管機關指定者。第 142 條瓦斯漏氣受信總機，依規定裝置於值日室等平時有人之處所。但設有防災中心時，設於該中心。第 145 條瓦斯漏氣火警自動警報設備之緊急電源應使用蓄電池設備，其容量應能使 2 迴路有效動作 10 分鐘以上，其他迴路可監視 10 分鐘以上。

《各類場所消防安全設備設置標準》節錄條文中都強調 (1) 瓦斯漏氣及火警自動警報設備 (2) 緊急備用電源 (3) 設瓦斯漏氣受信總機專人監控。《各類場所消防安全設備設置標準》也是強制性法規，指定場所未符合規定，不得使用。

綜合以上 3 種法規，對於天然氣的使用場所與建物，其供氣設施必須有 (1) 異常感應 (2) 監控者 (3) 遮斷 (4) 備援電力的要求，作為供氣設施的完整性保安系統，也就是一個功能安全設計的系統完整性。

4、天然氣事業法《營業章程》與《建築技術規則》競合

天然氣事業法《營業章程》第 11 條「本公司對下列場所之新申請用戶，於確認已裝置正常運作之緊急遮斷設備後，始得供氣：一、十樓以上之建築物。」合併說明《建築技術規則 -- 設施篇》227 條與 259 條、《建築技術規則 -- 施工篇》第 206 條，旨意略以：16 層大樓 ($H \geq 50M$) 以上需裝置天然氣緊急遮斷裝置與監控系統。二者在裝設 ESV 系統要求的樓層數 (10or16F) 不一致，可能導致建築業與瓦斯公司引用的法規不同而有爭議。個人認為保障公共、社會、財產安全是政府的責任與義務，應作更強制、有利於上述人民利益的選擇。

《建築技術規則》第 259 條及《天然氣事業法》第 13 條旨意為保障使用安全，且具強制性，同法第 36 條微電腦瓦斯表推廣，不具強制性，致強度不對等。

現今一棟大樓住戶常見 100 戶以上，每一戶的市場價格動輒數千萬元，一套 ESV 約 50 萬元，每戶分攤約 2000 元，即可讓生命與財產獲得安全，是項非常值得的投資。

八、結論與建議

- (一) 供氣系統功能安全設備單元在整壓站不但需裝置 (Do the right thing)，也要裝對才能發揮功能 (Do the thing right)。依規定裝置此類設備是必要條件，要能發揮功能才是充分條件，於事件發生前提供信號、訊息、影像予監控中心作研判，採取應對措施，使整個供氣系統執行必要之 1、預防 2、阻絕 3、隔離 4、停止及 5、釋放能量。
- (二) 平常對於供氣系統功能安全設備單元要定期維護與檢查，使之維持一定水準的功能。如感應式 CH₄ 氣體偵測器，其感應部位可能長期處在潮濕、灰塵、戶外環境，致使性能衰退，UV/IR 火焰偵測器的感應鏡頭也會有相同問題，而出現不正確信號。又如 SCADA 系統傳輸箱內部溫度過高、UPS 效能降低等，都需要長期執行定期維護，必要時更新。
- (三) 整壓站平時巡檢，通常是目視檢查，除非是明顯故障失效，才會在檢查表上列出不合格，否則都是” V” 合格。然而是否功能衰退或已無效，目視很不容易判斷，因此，建議瓦斯公司除常用的偵漏儀器之外，最好有各項設備之模擬儀器 (Simulator) 或材料實施測試，掌握可靠度，並增加測試的頻率，留下記錄。如火焰偵測器的紅外光線模擬器、試驗洩漏偵測器的甲烷氣體等。設備需依年度進廠由專業機構檢測維修，不應廢弛。
- (四) 從瓦斯公司整壓站的設計規劃及現場查核中，發現強化對於供氣系統功能安全設備單元的功能、特性的知識及工藝技術的認知很重要。因此，希望相關業管機關就供氣系統功能安全設備單元開班授課，重拾失傳的技術與知識，並藉以澄清錯誤觀念。
- (五) 供氣系統功能安全設備單元的環境監測之一地震感知器，在安裝地點與方式一直存在爭議性議題，有必要進一步釐清。

政府機關如能將地震感知器裝置要求於法規中明訂，如各瓦斯公司「監控系統得外掛中央氣象局建置的地震預警系統為替代」等，諸如此類取得全國一致的資訊。
- (六) 天然氣事業法營業章程第 11 條「十樓以上之建築物緊急遮斷設備」與《建築技術規則》略以：高層大樓 16 層樓 (H ≥ 50M) 以上需裝置天然氣緊急遮斷裝置與監控系統。二者在裝設 ESV 系統要求的樓層數 (10or16F) 不一致的疑義，個人認為現代建築的安全設施不但要以樓層考量，更應增列群聚狀態、使用密度、強度、環境互動關係及社會條件等，而不從單一樓層數字決定裝置與否，直接引用《建築技術規則》和《各類場所消防安全設備設置標準》中對於場所分類作適當

的選配。

(七) 供氣系統設備單元的功能安全設計有其使用條件，最常見的失誤是安裝時的方向性與其他物件的距離及安裝的先後順序。前已舉例 ESV 的重力方向性，甲烷氣體偵測器開口應朝下，不要裝在橫樑側邊，地震感知器應水平裝置，而不側貼在橫樑側邊，又如為取得足夠的管路穩流段，將過濾器裝在整壓器之後等，這些都不是設備功能安全設計時的條件，更減損其功能或無作用。瓦斯公司的設計及裝置部門應對設備功能安全設計與裝置方法重新認知，探討正確設計與安裝方式，另外承包商的教育與訓練也很重要，避免將就施工或錯誤傳遞。

(八) 瓦斯供氣系統中往往被忘記或忽略的一項設備單元為氣體溫度計，目前尚未列入《天然氣事業輸儲設備防災相關設施裝置維修辦法》，在瓦斯供氣系統中穩定的氣體流動，並沒有能量的交換，與管線內外的溫差也僅止於潛熱交換，沒有變相的潛熱存在，故與防災無關，但此裝置是有作用，在瓦斯計量過程，溫度、壓力與被計量體積有絕對相關，常態的 (Site conditions) 表溫度 (TG) 與表壓力 (PG) 都需回歸基準狀態 (Standard conditions, 1atm=101.325kPa, T=15°C=288.15K) 計量，未來瓦斯由體積計量改為能量計量時更少不了氣體溫度計 (天然氣溫度、壓力、與體積之間關係，請參見瓦斯季刊第 137 及 138 期之天然氣小理化、天然氣小理化 (二) 文章)。

個人認為系統功能安全和供應壓力的相關性比較小，而與系統規模、內外環境複雜度和災害因果關係比較有關，建議由瓦斯公司各類型整壓站逐一自行評鑑及選配。

(十) 最後，瓦斯公司的供氣系統無論裝置得再建全，供氣設備單元多麼完善都與時間相關，時間主宰地球上的一切活動。

各瓦斯公司設置監控系統 (DCS 或 SCADA)，已可透過外部通訊網路系統執行遠端遙控及運轉數據傳輸，並可將資訊網路傳輸至主管及工作人員的行動裝置 (手機、i-Pad、Note-book 等)，所以基本上不是封閉系統，且應能與 GPS 自動對時。而 CCTV 或類似類比信號儀器可能沒有對時功能，需要工作人員經常校正，讓出現畫面的時間與 SCADA 系統一致。

對天時 (時鐘校準) 在事業法或相關子法尚無說明及解釋，純粹是人類從事活動時尋求一致的時間基準，也是自訂共同行為與態度的規律，將規律轉化紀律，也就成為公司管理的一部分。

18 萬立方公尺級液化天然氣船 成功靠卸臺灣中油公司臺中液化 天然氣廠

作者 文：陳品蓁 照片：陳鈞廷

111 年 5 月 20 日上午 8 點 40 分，在眾人的殷殷期盼下，作為貨艙容量 18 萬立方公尺級液化天然氣 (LNG) 船試航計畫之第一船次，LNG 船「Global Sealine」成功靠卸於臺灣中油公司臺中液化天然氣廠；並在結束卸收後，於 5 月 21 日上午 10 點安全離港，達成大型 LNG 船首度試航臺中港之重要里程碑。



LNG 船「Global Sealine」成功靠卸臺中液化天然氣廠

臺中液化天然氣廠位處於臺中港區內之西 13 號碼頭。臺中港自民國 65 年開始營運以來，因具有地理位置優越、港區土地遼闊、聯外交通便利等優勢，多年來已發展成為商港、工業港、漁港之綜合性國際商港；另因與臺灣西岸沿海優良風場距離較近，近年臺中港更配合政府能源政策，提供離岸風電產業所需專用碼頭、產業專區土地，成為國內主要風機組裝、生產、運維基地。而臺中港區內關於天然氣相關設施之增建近年來更是方興未艾，不僅臺灣中油公司正在西 11、12 碼頭區興建第二席液化天然氣卸收碼頭、增建 LNG 儲槽及相關氣化設施，並且進行港外擴建（四期）計畫；臺電公司亦將於臺中電廠既有 9 號、10 號燃煤機組之南側位置新建兩部大型燃氣機組，以達成其增氣減煤的供電規畫。

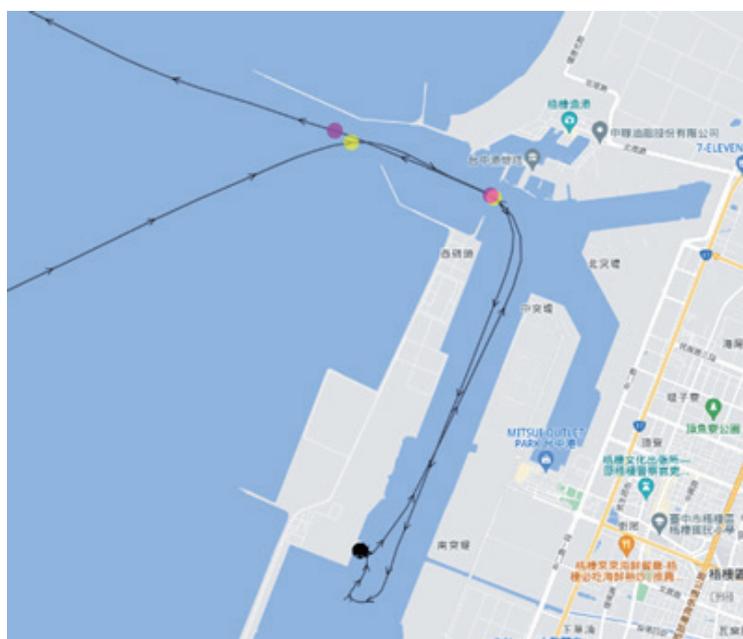


臺中港全景及臺中液化天然氣廠

臺中液化天然氣廠既處於臺中港內，即須遵守臺中港之船型限制，以及進港、繫泊、裝卸等作業規定。依照現行「臺中港船舶繫泊作業要點」規定，LNG 船如欲進入臺中港，受有船長 300 公尺、船寬 50 公尺、吃水深 12 公尺及貨艙容量 14.9 萬立方公尺之船型限制；另依據 108 年修訂之「臺中港液化天然氣船進出港與繫泊作業規定」，LNG 船進港時受有平均風速需小於 15m/s、能見度需大於 2 海浬、北防波堤遮蔽區內示性波波高需小於 2.5 公尺、海流流速須小於 2.5 節及限於白天且天候良好情況下進出港等天候條件限制。

LNG 船會在距臺中港 20 海浬、10 海浬、5 海浬、3 海浬及開始進港時，分別執行各階段聯絡任務，於確認天候、海象均符合條件限制後，臺中港之航管中心 (VTS) 始允許 LNG 船舶進港。另因 LNG 船進港時必須有兩位引水人引領，因此船舶會在距離臺中港南防波堤燈塔約 2 海浬處等候引水人登輪，待其登輪後接受指令以進行進港作業。

LNG 船經由進港航道進入臺中港之內港範圍後，依序通過南外堤、南內堤，在北迴船池右轉進入南北主航道向南航行至南迴船池，於南迴船池 (直徑 1,100 公尺，空間較為足夠) 由拖船以拉船艙、推船身的方式協助迴船，最後以船艙朝外的狀態，在拖船的協靠下靠泊西 13 號碼頭。LNG 船進出港時會有 4 至 5 艘拖船依照引水人之指示帶纜協靠，臺中港航管中心 (VTS) 亦會令航行中 LNG 船之前方 2 海浬、後方 1 海浬及左右兩舷各 150 公尺範圍內保持淨空。



LNG 船舶進出港軌跡示意圖



拖船在北外堤處等候 LNG 船進入航道



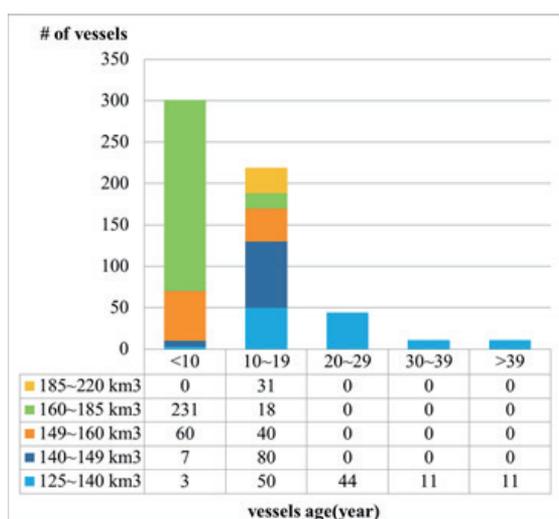
拖船帶纜協助 LNG 船舶進港



拖船帶纜協助 LNG 船舶靠泊

依照現行規定，LNG 船進入臺中港受有貨艙容量需在 14.9 萬立方公尺以下之船型限制，惟隨著全球天然氣需求逐年增加，國際 LNG 船皆朝大型化方向發展。船舶大型化除了能降低單位運輸成本外，亦具有節省燃油、減少船員

配置、節省總靠泊在港時間與費用等優點，因此 LNG 航商在船隊規劃上多以大型化船舶為主；且近年國際航運市場上之大型 LNG 船多為新造船隻，具有較優越的操縱性能、設備先進新穎、污染排放量低及故障機率低等優勢，隨著全球對於船舶污染防治的愈發重視，在效能、減排不如新造大型船舶的老舊小型船舶，面臨越來越大的環保壓力。根據 2021 年 4 月 IHS Markit 資料，目前還活躍於航運市場的 LNG 船中，貨艙容量在 14 萬 ~14.9 萬立方公尺之 LNG 船僅有 80 多艘。在可調度船舶數量少，而市場供應量急速增加的情況下，近年來安排靠卸臺中液化天然氣廠 LNG 船之難度愈來愈高。



營運中的 LNG 船統計資料

此外，為配合政府能源政策，2025 年天然氣發電佔比須達 50% 以上，該年度臺中液化天然氣廠之年營運量預估將可能達 1,200 萬噸左右。未來臺中港如能開放大型 LNG 船進港，在進口量不變的假設條件下，可減少臺中港每年進口之 LNG 船艘次。不僅提升船運調度彈性、增加供氣穩定度，亦可減輕臺中港船舶進出負荷，有助於港區未來發展。

因此臺中港務分公司、臺中港引水人辦事處及臺灣中油公司自 108 年起即開始著手進行 18 萬立方公尺 (Conventional) 級及 21 萬立方公尺 (Q-Flex) 級 LNG 船之操航安全評估，在完成兩階段、共約 3 百多次的操船模擬之後，於 110 年底決議先以 18 萬立方公尺級 Membrane Type LNG 船在平均風速 10m/s 以下進行 10 次試航，並達成第 1 次試航以平均風速 6m/s 為原則、試航時程須提前兩週通知、試航前一個月必須完成船岸匹配及第一次試航進港時全

面管制船舶進出港等初步共識，開始進行擬定試航計畫、風險應變計畫等前置作業，並約定於今 (111) 年上半年正式啟動大型船試航，以確認其進出臺中港靠卸作業之可行性。

在確認所有前置作業均準備完成，並獲得臺中港務分公司同意後，臺灣中油公司立即開始安排試航船隻，惟事情的發展卻一波三折。雖時序已進入春季，東北季風卻有較歷年同期強勁的現象，在終於排定好初次試航日程後，遭遇到氣象預報顯示進港當日及後續幾日之預估風速會有超過風速限制的情形，為免該 LNG 船因風速限制無法進港而可能須於外海等待數日，以致影響其後續航程，最後只好將該船轉往永安液化天然氣廠卸收；而 5 月 20 日，即 LNG 船「Global Sealine」進港當日，也遭遇到風速大於預估值，有略微超過 6m/s 的狀況。最終是在臺中港引水人的大力協助下將 LNG 船帶進港，首次試航任務才得以順利完成，這次的試航經驗也在在顯示，海事作業的成功需要天時、地利、人和，三者缺一不可。



「Global Sealine」船尾及協靠拖船

未來待 10 航次之試航均順利結束後，臺中港務分公司將再邀集臺中港引水人辦事處、交通部運輸研究所港灣技術研究中心等港區相關單位及專家學者召開檢討會議，以研議是否同意該船型於相關限制條件下可常態性進靠臺中港碼頭。

雖然目前仍屬試航性質，但 LNG 船「Global Sealine」成功完成靠卸並安全離港，已初步顯示臺中港具備靠泊大型 LNG 船之能力；卸收作業之順利進行，亦驗證臺中液化天然氣廠現有繫靠設施可承受大型 LNG 船舶之靠泊強度。期待完成試航後，臺中港能夠正式開放貨艙容量 18 萬立方公尺級 LNG 船進港，以提升國內天然氣之供應穩定。