

出國報告（出國類別：實習）

赴英國研習交流氫能產業發展 與安全監督管理

服務機關：勞動部職業安全衛生署
姓名職稱：黃健琨技正、曾博廉技正
派赴國家/地區：英國(倫敦、巴克斯頓)
出國期間：113年10月30至11月9日
報告日期：114年2月3日

摘要

為推動節能減碳及溫室氣體減量，全球已有 136 個國家陸續提出「2050 淨零排放」之目標及作法，我國亦於 2022 年 3 月 30 日發布「臺灣 2050 淨零排放路徑」。其中，氫能因具低污染、無碳排及增加能源使用效率等特性，各國將其發展及運用視為未來實現淨零碳排主要策略之一。惟囿於氫氣之化學特性活潑且易燃易爆，如稍有不慎易發生火災爆炸災害，亦為各國關注之危害預防重點。

英國是全球第一個為長期淨零排放目標立法的主要經濟體，業規劃於北海開發浮動式離岸風電與海上製氫之整合系統，並經由既有天然氣管線將氫氣送回陸域使用。英國安全衛生執行署(Health and Safety Executive, HSE) 係負責職業安全衛生之研究、檢查、事故調查及執法單位，並維持英國為世界上工作最安全的國家之一。HSE 科學研究中心亦針對氫能運儲安全積極展開相關研究，強化其危害預防。

為因應我國氫能發展及衍生作業危害，借鏡英國推動氫能安全監督管理相關經驗，強化我國勞動檢查員知能，爰指派檢查員赴英國安全衛生執行署汲取該國經驗，研習氫的特性、氫對材料的影響、氫能之維運安全、危險物質及爆炸性環境、危險區域分類、風險評估及控制、壓力系統等安全衛生管理及法規，系統性了解英國推動氫能安全管理相關規範，並參加聯合化學科學研討會，亦期能藉由透過雙方交流，奠定未來合作的基礎，並持續強化我國職業安全衛生，建構更安全的職場環境。

目次

	頁碼
壹、研習緣起與目的.....	1
貳、研習行程及說明.....	2
參、研習交流與心得.....	3
肆、結論與建議.....	30

表目錄

表 1. 研習行程及說明	3
表 2. 研討會議程	4
表 3. 人體熱輻射暴露接受之熱劑量及可能後果	24

圖目錄

圖 1. 聯合化學科學研討會	3
圖 2. 氫燃料之供需關係	6
圖 3. 常見之氫氣生產方法	7
圖 4. 氫儲存方式	8
圖 5. 與 HSE 首席科學家 Dr. Andrew Curran 教授合影	11
圖 6. 氫氣濃度與其爆轟室尺寸關係	13
圖 7. 氫氣與空氣排放至 1 立方公尺空間內的壓力變化	17
圖 8. 液態氫洩漏後空氣中的氧氣及氫氣因低溫而固化	18
圖 9. 氫氣及其他燃料的能量密度	20
圖 10. 氫氣火焰長度列線	23

壹、研習緣起與目的

為推動節能減碳及溫室氣體減量，共同控制全球溫升，全球已有 136 個國家陸續提出「2050 淨零排放」之目標及作法，我國亦於 2022 年 3 月 30 日發布「臺灣 2050 淨零排放路徑」。其中，氫能因具低汙染、無碳排及增加能源使用效率等特性，目前世界各國將其發展及運用視為未來實現淨零碳排主要策略之一。國際能源總署(International Energy Agency, IEA)指出，全球若要於 2050 年實現淨零碳排願景，氫能於發電、載具、工業及建築等部門之應用占全球整體能源供給比例將達 13%。我國亦將氫能納入重點研發事項，預計 2050 年氫能發電將佔我國總電力 9%~12%。

英國是全球第一個為長期淨零排放目標立法的主要經濟體，業規劃於北海開發浮動式離岸風電與海上製氫之整合系統，並經由既有天然氣管線將氫氣送回陸域使用，英國安全衛生執行署(HSE)科學研究中心亦針對氫能運儲安全積極展開相關研究計畫，為借鏡英國再生能源發展及危害評估經驗，勞動部職業安全衛生署前於 2019 年與英國安全衛生執行署(HSE)簽署合作備忘錄，合意推動職場安全與健康資訊交流及合作，並自 2020 年起，已連續 3 年舉辦台英職業安全衛生高峰論壇，深化台英安全夥伴關係。因此，鑑於氫能為我國新興產業，實有強化勞動檢查員氫能安全監督管理技術與實務必要，考量英國安全衛生執行署具有成熟政策、豐富經驗及專業技術能力，乃各國學習標竿，為因應我國氫能發展及衍生作業危害，並強化台英雙邊職業安全衛生合作，借鏡英國推動氫能安全監督管理相關經驗，強化我國勞動檢查技術及知能，爰派員赴英國安全衛生執行署汲取英國氫能危害預防相關經驗，系統性了解英國推動氫能安全管理相關規範，並參加聯合化學科學研討會，亦期能藉由透過國際交流及雙方合作，奠定未來合作的基礎，並持續強化我國職業安全衛生，建構更安全的職場環境。

貳、研習行程及說明

本署人員於 2024 年 10 月 30 日自台北出發前往英國，至 11 月 9 日返台，歷時 11 日，行程如下表所示：

日期	說明
10/30(三)	去程（台北－倫敦希斯洛機場）
10/31(四)	參加聯合化學科學研討會
11/1(五)	參加聯合化學科學研討會
11/2(六)	蒐集及整理資料
11/3(日)	自倫敦前往巴克斯頓
11/4(一)	研習事故調查之人為因素
11/5(二)	研習氫能源安全基礎知識
11/6(三)	研習壓力系統意識(氫能儲存等之壓力系統風險及法規)
11/7(四)	研習氫氣等氣體和液體之危險物質和爆炸性環境法規
11/8(五)	11/8 自巴克斯頓前往倫敦，
11/9(六)	返國（倫敦希斯洛機場－台北）

參、研習交流與心得

一、聯合化學科學研討會

本次赴英國倫敦參加聯合化學科學研討會，該研討會係由英國皇家化學會(The Royal Society of Chemistry, RSC)主辦，RSC 是歐洲最大之化學科學組織，會員約 4 萬人。本次研討會參加人員大多來自英國、歐洲、美國及日本等國(圖 1)，研討能源儲存與轉換等相關議題。



圖 1.聯合化學科學研討會

近年來世界各國關注淨零碳排的議題，其中氫氣與氧氣燃燒後僅產出水，不會產生二氧化碳與一氧化碳，因此被視為一種環保潔淨能源，為實現淨零碳排目標中的關鍵角色之一。此外，氫能可以在不依賴天氣條件的情況下實現工業規模生產，這是氫能相較於其他類型再生能源的另一優勢。英國皇家化學會對於氫能及再生能源等相關領域，如氫能技術、儲氫材料、燃料電池、催化劑開發、能源及可持續材料、碳儲存及捕捉等議題亦相當關注，持續促進其研究發展，亦經常針對能源議題發表相關論文及舉辦相關研討會。本次研討會各國講者分享再生能源等議題之最新進展，摘錄氫能相關資訊如后：（研討會議程如表 2）

表 2. 研討會議程 – 2024 年 10 月 31 日

09:00	Registration and refreshments
10:00	Welcoming remarks Helen Pain, Chief Executive Royal Society of Chemistry
	Welcome on behalf of Chemical Society of Japan Mitsuo Sawamoto, Executive Director, The Chemical Society of Japan
	Introduction May Copsey, Executive Editor, <i>Chemical Science</i>
	Session 1: Materials for energy RSC-CSJ session Introduction and chair: Andrew Cooper, University of Liverpool, Editor-in-Chief, <i>Chemical Science</i>
10:20	Rational design of liquid electrolytes for rechargeable batteries Yuki Yamada <i>SANKEN, Osaka University</i>
10:55	Understanding electrode reaction processes through operando vibrational spectroscopy of interfaces and interphases Laurence Hardwick <i>University of Liverpool</i>
11:30	Development of mesoporous carbon for fuel cell application Akari Hayashi <i>Kyushu University</i>
12:05	Lunch and posters
	Session 2 (Session chair: Sebastian Peter)
13:30	Proton-coupled electrochemistry of metal oxides: from insertion to interfacial phenomena Veronica Augustyn <i>NC State University, USA</i>
14:05	The chemistry of self-assembling molecules as selective contacts in molecular solar cells Emilio Palomares <i>ICIQ, Spain</i>
14:40	Developing photoelectrochemical water splitting devices - from understanding charge carrier behaviour to testing prototypes in the field Andreas Kafizas <i>Imperial College, UK</i>
15:15	Refreshments
	Session 3 (Session chair: Emilio Palomares)
15:45	Carbon and water recycling for sustainable energy: A journey from fundamental chemistry to green technologies Sebastian Peter <i>JNCASR, India</i>
16:20	Flash poster presentations (by invitation) – introduced by May Copsey
16:45	Poster session
18:45	Close of sessions

表 2. 研討會議程(續)–2024 年 11 月 1 日

	Session 4: Materials for energy RSC-CSJ Session (Session chair: Vincent Artero)
09:05	Nanocatalyst systems for electrochemical upgrading of ubiquitous chemicals Miho Yamauchi <i>Kyushu University, Japan</i>
09:40	Metal halide perovskites for photovoltaic applications Laura Herz <i>University of Oxford, UK</i>
10:15	Organic materials at interfaces for highly efficient perovskite photovoltaics Atsushi Wakamiya <i>Kyoto University, Japan</i>
10:50	Molecular engineering for sustainable intelligence Marina Freitag <i>Newcastle University, UK</i>
11:25	Refreshments
	Session 5 (Session chair: Laura Herz)
11:55	Flexible perovskite solar cells and modules: from fabrication to examples of possible applications Francesca Brunetti <i>University of Rome, Italy</i>
12:30	Project VITAL: Decarbonise power using integrated solar technology Libby Gibson <i>Newcastle University</i>
13:05	Lunch
14:15	Publishing session <ul style="list-style-type: none"> • Introduction – May Copsey • Associate Editor panel discussion (<i>Chemical Science, Journal of Materials Chemistry A, Sustainable Energy & Fuels</i>) • RSC Books - Merlin Fox
	Session 6 (Session chair: Marina Freitag)
15:15	Stabilize transition metal chalcogenides as novel intercalation materials by electrolyte engineering approach Alexis Grimaud <i>Boston College, USA</i>
15:50	Light-driven proton-coupled electron transfer reactions at functionalized silicon photoelectrodes for solar fuel production Jillian Dempsey <i>UNC Chapel Hill, USA</i>
16:25	Poster prizes and concluding remarks
16:45	Close of sessions

雖然多年來工業界對於生產、使用或處理氫氣，已累積不少的經驗，但是因為近年來碳排淨零目標，促使氫經濟更加活絡，氫氣的使用從工業區逐漸走進都會區，越來越接近人們的生活，在工業應用中發揮關鍵作用，並促進運輸、航空、商業及電子技術等發展（圖 2），惟因為氫氣是易燃氣體，一旦發生洩漏就可能產生火災爆炸的後果，故氫能作業安全亦為受關注之議題。

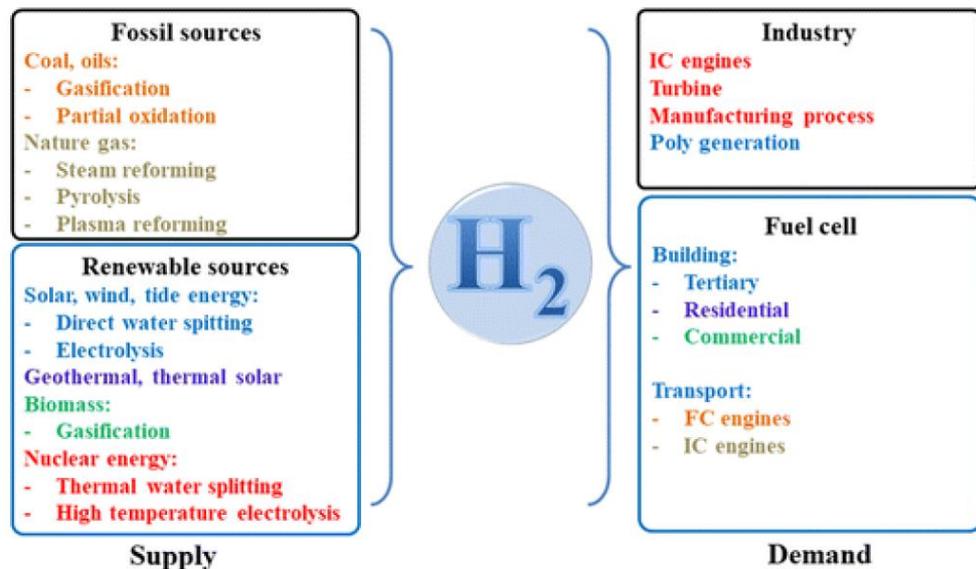


圖 2. 氫燃料之供需關係

資料來源：RSC

氫燃料可依據顏色分類，如綠氫由再生能源生產，常見技術係電解，利用電流將水分解成氧氣和氫氣，並產生綠色氫氣，而不會直接排放二氧化碳，但該技術較昂貴而難以大規模使用。藍氫由化石燃料生產並捕獲二氧化碳，灰色類型則由未捕獲二氧化碳的化石燃料生產，大多數氫燃料都是藍色和灰色類型。依據 RSC 資料顯示，目前全球氫氣生產約 48% 來自天然氣、30% 來自石油、18% 來自煤炭，及 4% 來自水的電解。

全球常見之氫氣生產方法(圖 3)，以化石燃料進行工業規模的重整 (reforming) 及熱解 (pyrolysis) 等 2 種方法為主，大部分的氫氣生產是透過碳氫化合物的蒸氣重整反應中，蒸氣和碳氫化合物的混合物在高溫下發生

反應，生成二氧化碳和氫氣，例如天然氣或輕烴類進行蒸汽甲烷重整是最常用的烴類重整技術。另熱解是在無氧或厭氧條件下進行的熱分解技術，將不同的輕液態碳氫化合物轉化為氫和其他碳元素。

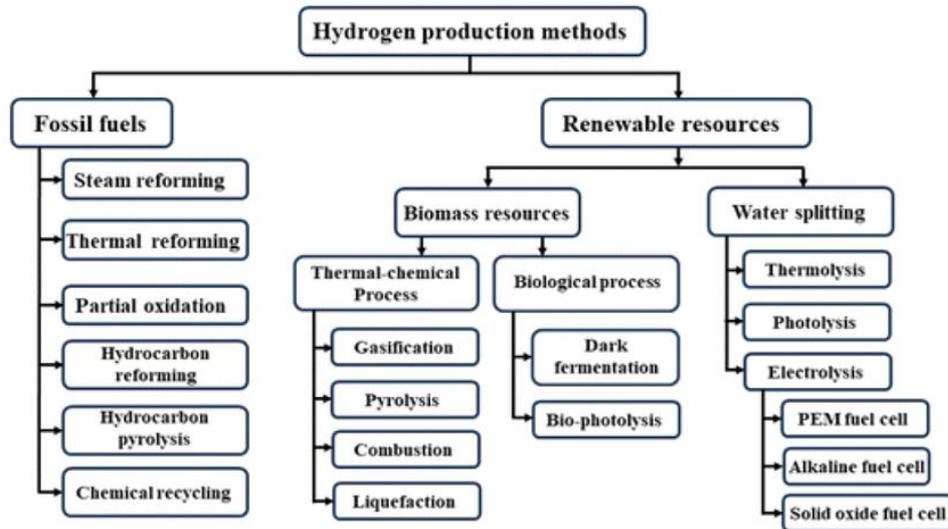


圖 3.常見之氫氣生產方法

資料來源：RSC

目前，利用水分解法生產氫燃料之研究及技術改進以降低成本為熱門議題，最終目的是開發以海水作為電解質產生氫氣和氧氣的電解系統。該技術的最大優點之一是可以獲得純度高達 95% 的氫氣。一般來說，水分解方法如下：

(一)低溫水電解：利用電能在室溫下將水分離成氫和氧的過程，電解水所需的總能量會隨著溫度的升高而略微上升。

(二)高溫水電解：高溫電解是在 500 至 1,000°C 的極高溫度蒸氣條件下將水分解成氫和氧。高溫水電解系統所需的電，比低溫水電解系統低，且效率更高，其製程正在逐步完善。

(三)光觸媒製氫：透過光催化作用將水分解為氫氣和氧氣。由於這是光合氧氣產生過程中通常發生的現象，因此需要光能（光子）、水和催化劑材料。目前，半導體及其複合材料是常用的光催化劑。水分解的工

作原理，當吸收光中能量等於或高於催化材料帶隙能量的光子時，會將價帶（VB）中的電子提升至導帶（CB），而電洞則留在價帶中，形成電子和電洞對。在此，電子和電洞會引起類似電解的氧化還原反應，產生氫氣和氧氣。

氫氣產製之未來發展，在綠氫方面持續研究改進利用再生能源進行電解水提升生產氫氣的效率，另在藍氫方面，則是專注於天然氣重整結合碳捕捉與儲存之成本降低與效率提升。

隨著全球能源轉型趨勢，氫氣儲存技術亦為發展氫能的關鍵。然而，由於氫氣具有低密度、易洩漏等特性，如何安全、高效率、經濟儲存氫氣，成為氫能應用的核心挑戰。氫氣產製後，主要以氣態或液態形式儲存。依據基礎設施及設備情形，氫儲存可分為固定式儲存和移動式儲存 2 種類型。固定式儲能技術應用於固定式發電及在生產或使用地點的現場儲存。移動設備的應用為將已儲存的氫氣移動到某個位置以供使用或儲存，或在車輛中使用氫氣。此外，氫儲存亦可分為實體儲存和材料儲存 2 大類（圖 4）：

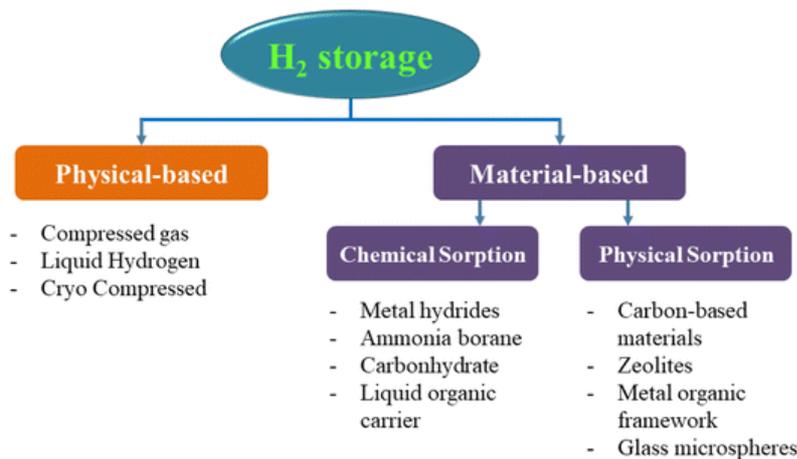


圖 4.氫儲存方式

資料來源：RSC

氫燃料之氣體儲存技術有很多種。為了方便運輸，壓縮氣體被用在

特殊的儲罐中。可以使用帶有碳覆蓋層的鋼或輕質複合材料被用來製造儲罐。常見儲氫技術是將其壓縮至壓力300 Bar以上。低溫壓縮氣體(Cryo compressed gas)技術利用溫度及壓力增加儲存系統中的體積能量密度。此外，隨著技術發展，氫氣亦被儲存在地下深層地質構造中，包括鹽礦、堅固的岩石洞穴等。該技術的優點在於即使天氣變化及氣候波動，仍能保持氫源的平衡。預計未來需求將超過目前安裝的地面基礎設施（如管道或儲槽）的儲存容量。氫氣可以在高峰需求之外生產並安全地儲存在地下，至需要時才釋放，以確保長期的能源安全和供應穩定。

氫氣可以在極低的溫度下（1 bar時為-253°C）液化，儲存在特製容器中以便長程運輸。氫氣液化需要在低於-253°C的溫度下進行，並進行預冷，需要大量的能量。因此，液氫罐系統設計複雜，用於液氫的儲存和運輸，由於罐內溫度跟隨外界溫度升高，液氫儲存面臨液體蒸發的問題。為減少外界環境的熱影響，液氫固定儲存設施傾向採用容積非常大的球形儲罐，容量可達數千立方公尺。液氫公路運輸時多採用水平管狀儲槽以平衡內部液體的排氣量，而大型液化石油氣船舶水上運輸則優先採用球形儲槽。

目前氫儲能技術分為以下幾類：

- (一)高壓儲氫：將氫氣壓縮至350~700 bar進行儲存，技術成熟，適用於燃料電池汽車，但高壓設備成本高，氣體洩漏風險較大。
- (二)低溫液態氫儲存：將氫氣冷卻至-253°C 形成液態，提高儲存密度，適合長距離運輸與航空航太應用，但極低溫需大量能耗，蒸發損失大。
- (三)低溫壓縮氫(Cryo-Compressed Hydrogen)：結合高壓與低溫技術，提升高氫儲存效率，比液氫或高壓氫更高的儲存密度，仍在技術開發階段，基礎設施有限。
- (四)固態儲氫：利用金屬氫化物吸附與釋放氫氣，安全性高，儲存密度大，

但材料成本高，吸放氫速度較慢。

(五)化學儲氫：透過液態有機化合物(如甲苯)攜帶氫氣，加氫/脫氫後釋放氫氣，常溫常壓存儲，適合長距離運輸，但脫氫反應需要催化劑，能耗較高。

(六)氨作為儲氫載體：氨作為富氫分子，可透過裂解釋放氫氣，液態儲存方便，運輸成本較低，但裂解過程能耗較高，可能產生 NO_x 排放。

(七)氫氣地下儲存：將氫氣儲存於鹽穴、枯竭氣田或含水層中，適用於大規模長期儲存，可作為電網儲能解決方案，但地質條件影響儲存安全性與經濟性。

氫儲能技術朝向高效率、安全、低成本方向發展，並將在交通、工業儲能、電網調節等領域發揮重要作用，氫儲能技術之未來發展趨勢如強化高壓與低溫技術，以提升壓縮氫與液態氫的儲存效率及安全，降低成本；開發更高效之新材料如金屬氫化物、碳納米管等固態儲氫材料；結合綠氫與儲能，透過風能、太陽能等再生能源製氫，並由儲氫技術提供穩定能源供應等。

二、英國安全衛生執行署

本次出國進行研習地點為英國安全衛生執行署（Health and Safety Executive, HSE）在巴克斯頓(Buxton)之安全衛生科研中心，HSE 是英國政府的公共機構（Public Body），該機構除負責制定和執行有關工作場所安全和健康的法規和政策外，在出現新的科學發展或新需求產生於市場實際投入運用前，該機構會先以科學化方法進行新技術的特性分析及潛在危害相關研究，並依分析結果制訂政策及規定，確保相關活動產生的風險能得到有效的控制。

英國 HSE 在核能、航太、汽車以及燃氣供應等多個產業領域提供了許多理論和實務的經驗外，該署也已關注及研究氫能源安全相關議題多年，並累積豐富經驗，不僅是國際氫安全協會（HySafe）的執行委員會成員，也是推動氫能安全應用及淨零產業群之重要機構。



圖 5. 與英國安全衛生執行署首席科學家 Dr. Andrew Curran 教授合影

研習課程介紹氫氣特性、潛在的風險以及實施風險評估可參考之標準，內容相當豐富，可供後續國內氫能源發展及後續本署執行監督管理時參考。氫與一般碳氫化合物表現相當不同，於使用氫前必須先了解氫的特性、評估風險，並依評估結果採取控制措施，摘要如下：

(一)氫的特性：

1. 氫氣的密度低：常溫常壓下氫氣密度為 0.09kg/m^3 ，甲烷及丙烷分別為 0.72kg/m^3 及 1.88kg/m^3 ，而空氣的密度為 1.2kg/m^3 ，於露天環境氫氣洩漏時會向上飛散，若於建築物內洩漏則會蓄積於高處，另外低密度也代表單位體積的能量相對較低。氫氣燃燒的火焰幾乎沒有顏色，肉眼不易察覺。
2. 更寬的爆炸界限：氫氣在大氣壓力下爆炸界限為 4%~75%，比大多碳氫化合物範圍寬很多（甲烷為 4%~15%；丙烷為 2%~10%），較寬的爆炸界限可能造成，當少量的空氣進入可燃性氣體儲槽時，一般碳氫化合物可能會因為超過爆炸上限，因氧氣濃度不足而不會燃燒，但是氫氣儲槽就可能形成可燃性環境，另外因為更寬的爆炸界線，造成當氫氣洩漏時形成的可燃性氣體雲範圍會比一般碳氫化合物更大，且在氣體雲中可被點燃的區域會更多。
3. 更容易發生爆炸：燃燒可分為擴散燃燒(Diffusion flames)、爆燃(Deflagration，燃料與空氣的混和氣體被點燃時產生的燃燒放熱反應，反應區擴延速率低於音速)及爆轟(Detonation，除燃燒放熱反應外並伴隨著震波，反應區擴延速率比音速快)，而爆轟室尺寸(Detonation cell size, DCS)常用來評估混和氣體爆炸的能力，該數值越小，對外界刺激（如衝擊、熱能等）越敏感，越容易從爆燃轉變為爆炸(Deflagration to Detonation Transition, DDT)，氫氣濃度於 30% (v/v) 時爆轟室尺寸最小為 1cm，而甲烷及丙烷分別為 25cm 及 5cm，即氫氣比甲烷及丙烷等碳氫化合物更有爆炸的傾向，下圖是不同濃度下氫氣的爆轟室尺寸變化。

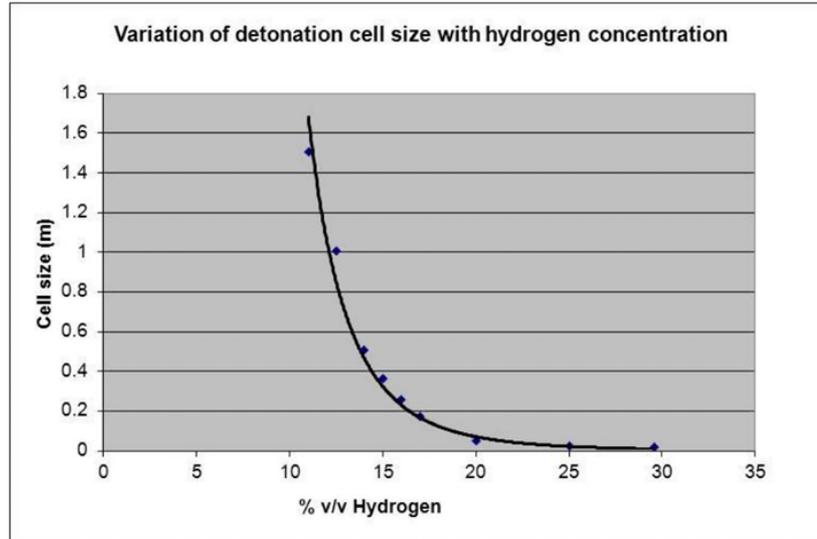


圖 6. 氫氣濃度與其爆轟室尺寸(DCS)關係

4. 更高的層流燃燒速度(Laminar burning velocity)：氫氣比碳氫化合物有更高的層流燃燒速度，例如甲烷及丙烷的層流燃燒速度最高分別為 0.4m/s 及 0.46m/s，而氫氣的層流燃燒速度最高可達 3.1m/s，較高的層流燃燒速度會使燃燒時壓力上升速度較快，所以在設計爆炸洩壓口 (Explosion vents) 時需注意此特性。
5. 氫火焰可穿過較小的間隙：比起一般碳氫化合物，氫的最大實驗安全間隙(maximum experimental safe gap, MESG)更小 (氫=0.29mm；甲烷=1.12mm；丙烷=0.92mm)，此特性也使氫火焰更難自行熄滅，使用的防爆電氣設備及火焰防阻器(Flame arrester) 的規格要求更高。
6. 更高的擴散率：氫氣在空氣中的擴散率比甲烷快 3 倍，即同樣時間下形成的爆炸性環境範圍較大，於實施危險區域劃分時應列入考量。(資料來源:data ex. Swain, Int. J. Hydrogen Safety, Vol. 17. No 10, 1992 and The Engineering Toolbox)
7. 氫氣較容易被點燃：氫氣的最小點火能量 (Minimum Ignition

Energy, MIE) 為 0.016mj (於 28%體積百分比), 而甲烷及丙烷分別為 0.21mj (於 8.5%體積百分比) 及 0.25mj (於 5.2%體積百分比), 相較與甲烷及丙烷點燃氫氣所需要的能量較小, 較容易被點燃。

(MIE 資料來源: Plant & Operations Progress, Vol 11, No 2, Briton L.)

8. 氫脆 (Hydrogen embrittlement) 現象: 氫原子可擴散並滲透入金屬、塑膠等材料導致材料機械性質下降 (如延展性下降及斷裂韌性降低), 該現象稱為氫脆現象, 影響氫脆的因素有, 暴露時間 (暴露越久越容易發生)、溫度及壓力 (暴露之溫度及壓力越高越容易發生)、材料合金種類及其製造方式、材料中缺陷的多寡、材料表面處理方式、殘餘應力及受力的狀況、材料外形是否會造成應力集中 (裂痕或凹口) 等, 而環境 (氫氣來源、外部滲透或是內部氫氣)、材料 (材料種類、表面處理狀況) 及機械狀態 (材料受力狀況、是否有循環應力) 是影響材料氫脆化的重要因子。氫原子滲透速率因材料而異, 所以可透過塗層、屏障等措施減緩氫滲透速率, 相關材料相容等資料可參考 ASME B31.12 (Hydrogen Piping & Pipelines)、PD ISO/TR 15916 (Basic considerations for the safety of hydrogen systems) 及 BS EN ISO 11114-2 (Gas cylinders-Compatibility of cylinder and valve materials with gas contents :Non-metallic materials) 等標準。

9. 氫氣實施吹驅 (Purging) 不易:

吹驅係將系統內的氣體用另一種氣體取代, 吹驅使用的吹驅氣體, 可能為空氣或惰性氣體, 當使用空氣來置換可燃性氣體時, 過程中可能會產生可燃性環境, 而使用惰性氣體 (非可燃性氣體) 作

為吹驅氣體進行吹驅也稱為惰化(Inerting)或間接吹驅，惰化可避免吹驅過程中產生可燃性環境，使用時機為，於系統導入可燃性氣體前先將系統惰化，使系統內氧氣濃度小於最小氧濃度，或在系統引入空氣前將系統內可燃性氣體清除。吹驅係將系統內的氣體用另一種氣體取代，吹驅使用的吹驅氣體，可能為空氣或惰性氣體。氫的低密度使它不易吹驅(尤其是大型設備)，需克服浮力問題(如：水平管的吹驅速度、吹驅進出口位置)。

10. 液態氫特性：液態氫為密度最高的儲存方式(液態氫密度為 70g/l，壓縮氫氣密度為 42 g/l,於 700bar)，保存溫度相當低(-253°C)，相對於壓縮氫氣，液態氫保存壓力要求較小(12 barg)，而將氫氣液化的成本很高，所以儲存容器需要良好的隔熱措施，即使於隔熱良好的狀況下，氫氣每日汽化的消耗量仍會達到 2%~3%。

(二)氫的風險：

氫主要的風險在於洩漏時造成之火災爆炸危害，而氫洩漏方式可能為自材料滲透或透過物理孔洞洩漏，其特性如下：

1. 從材料滲透(Permeation)：氫對於材料的滲透速率較一般碳氫化合物更快，在 10°C 時氫氣對於聚乙烯(Polyethylene, PE)材料的滲透速率約為甲烷滲透速率的 8 倍(參考資料：“Durability and transport properties of polyethylene pipes for distributing mixtures of hydrogen and natural gas”, Marie-Pierre FOULC et al., WHEC 16 / 13-16 June 2006 - Lyon France)，氫氣對於不同材料也有不同的滲透速率，與自物理孔洞洩漏相比，氫氣滲透出管路或儲槽壁的洩漏量非常小，通常不會有安全上的問題，不過若是滲透的氣體會蓄積時則需要特別注意，例如：因為氫氣在不同材料間有不同的滲透速率(氫氣

對於鋼鐵之滲透速率為 10^{-11} (m²/s) ，對於聚乙烯材料滲透速率為 10^{-7} (m²/s) ，滲透速率相差達 10,000 倍) ，對於擁有多重結構且由不同材料構成的儲存設備，會因為氫氣於各材料間不同的滲透速率，造成設備構造間氫氣累積的風險，於實施風險評估時應列入考量。

2. 透過物理孔洞洩漏：當氫氣儲槽或管路產生破洞時，氫氣將自孔洞洩漏出來，依洩漏之流體狀態可分為下列幾種洩漏方式：

(1) 層流 (Laminar) : 洩漏之流體呈現層流狀態，其洩漏量與流體黏度成反比，適用於低壓的小量洩漏。

(2) 紊流 (Turbulent) : 洩漏之流體呈現紊流狀態，其洩漏量與流體密度平方根成反比，適用於低壓的大量洩漏。

(3) 壓縮流 (Compressible) / 音速流 (Sonic) / 阻流 (Choked) : 當洩漏之流體流速達到音速的 0.3 倍到 1 倍 (接近音速) 之間時，流體會呈現壓縮流、音速流或阻流的狀態，其洩漏量為流體密度及比熱比 ($\gamma = C_p/C_v$) 的函數。

對於洩漏的氫，分為未點燃及發生燃燒狀況討論如下：

1. 未點燃的洩漏：

(1) 壓力峰值 (Pressure Peaking) 較高：不同於高密度氣體，當低密度氣體排放到室內 (通風不良) 區域時，因為低密度氣體沒辦法有效率的把室內氣體推出通風口，會造成該區域短時間壓力上升，產生較高的壓力峰值。

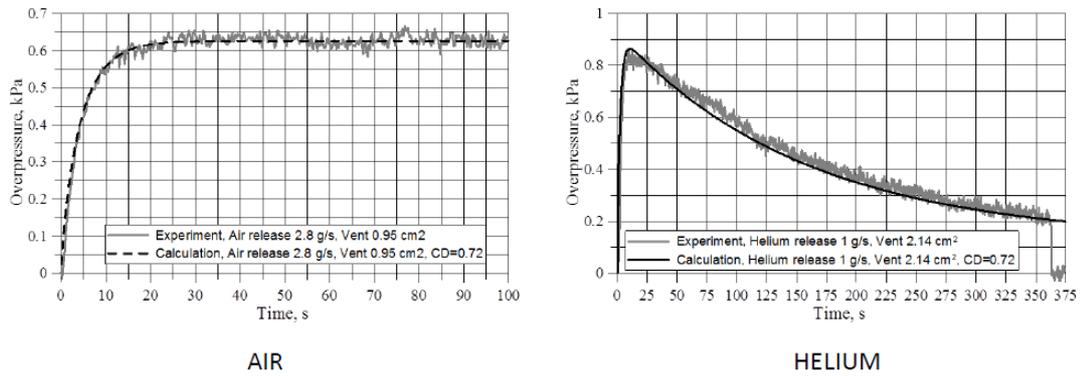


圖 7. 氦氣與空氣排放至 1 立方公尺空間內的壓力變化

(資料來源：V. Shentsov, M. Kuznetsov, V. Molkov, “The pressure peaking phenomenon: validation for unignited releases in laboratory-scale enclosure”, International Conference on Hydrogen Safety, Yokohama, October 19-21 2015)

(2)低密度的浮力：因為氦氣密度比空氣低，於洩漏時會往高處流動，所以須注意是否會在高處蓄積，另外在規劃設計強制通風或自然通風的通風口位置應考慮此特性，且電氣設備安裝位置則應避開氦氣流動路線。

(3)液態氦洩漏之危害：

A. 液態氦危害：

(a)液態氦低溫危害，液態氦溫度相當低(-253°C)，洩漏時可能會損壞現場儀器，建議透過取樣管及遠端的氣體偵測器來進行偵測，並應注意作業人員低溫接觸的危害，另現場發現有異常低溫出現時，即可能有液態氦洩漏。

(b)洩漏之液態氦也會將空氣中的氧氣(-219°C)及氦氣(-210°C)固化，即使液態氦已經汽化的狀況下，固態的氧氣形成的富氧環境與可燃性材料構築之地面（如柏油）

也會形成可燃性環境，所以儲存設備附近應避免可燃性材料構築之地面。



圖 8.液態氫洩漏後空氣中的氧氣及氮氣因低溫而固化

(c)液態氫靠近地面洩漏會形成液態氫蓄積的水窪（尤其是長時間洩漏造成地面冷卻後），地面遭液態氫浸潤時可能造成物理性爆炸。

(d)雖然液態氫洩漏時本身不會產生大量電荷，但是管路中的固態空氣被噴出或液態氫與鄰近被凝固的空氣互相作用，可能會造成電荷累積產生間歇性的靜電電壓，所以靜電也是需要被考慮的風險。

2. 洩漏後點燃：

(1)由於氫氣最小點火能量（MIE）較小，除了一般明火外，靜電或是機械摩擦都有可能點燃氫氣，另外液態氫蒸發產生之低溫氫氣仍會被低能量點火源點燃，而氫氣常見的點火源有：

A. 放電火花：電氣設備火花、靜電放電及靜電刷放電（Electrostatic Brush Discharges）都會點燃氫氣，除此之外電暈放電(Corona discharge)也被視為氫氣的點火源，一般狀況下電暈放電無法點燃碳氫化合物燃料，但是氫氣則

會被點燃，電暈放電常常出現在高壓電線周圍、變電站開關站或在雷雨天氣下高聳的凸出物都可能會出現電暈放電，所以需要注意排放氫氣的煙囪或排放口設置位置是否會被電暈放電點燃。

B. 自燃：氫氣的自燃溫度約為 560°C，而汽油及航空燃料 JET A-1 自燃溫度分別為 210°C 及 250°C，氫氣因為環境溫度達到自燃溫度而燃燒的機率較低，另外除了高溫熱表面氫氣也會被機械產生的摩擦熱點燃，其溫度接近氫氣的自燃溫度（ref. IChemE Symposium Series No.150, 2004, Ignition of explosive atmospheres by mechanical equipment），故使用氫氣時除了電氣設備的防爆要求外，也要將設備的機械摩擦納入點火源的考量。

C. 擴散點火(Diffusion Ignition)：當高壓氫氣快速釋放時，於釋放出口端會形成壓力波，該壓力波會造成局部溫度上升導致氫氣自燃，例如高壓氫氣從爆破板釋放瞬間產生的自燃現象，當氫氣壓力達到 35.5 barg 時就可能發生擴散點火的現象，而傳統碳氫化合物燃料沒有這種現象。

D. 相關引火源辨識及控制措施可參考 EN1127 (Explosive atmospheres. Explosion prevention and protection, 爆炸性環境之防爆及保護) 及 PD CLC/TR 60079-32-1:2018. (Explosive atmospheres - Electrostatic hazards, guidance, 爆炸性環境-靜電危害及指引)

除前述氫氣洩漏及火災風險外，其他潛在問題，列舉如下：

1. 氫氣除了燃燒不會產生一氧化碳及二氧化碳外，氫氣的每單位重量燃燒熱(120 MJ /kg)也高於甲烷(50 MJ /kg)及丙烷(46 MJ /kg)，

但因為氫氣的密度低的關係，氫氣的單位體積燃燒熱(11 MJ/m³)相對甲烷(36 MJ/m³)及丙烷(86 MJ/m³)低(圖7.氫氣及其他燃料的能量密度圖)，所以在使用氫時會將其加壓或是液化，使其密度提高，增加燃料儲存及輸送的效率，故使用氫能源時除了火災爆炸外，其儲存時的高壓及低溫是需要考量的風險。

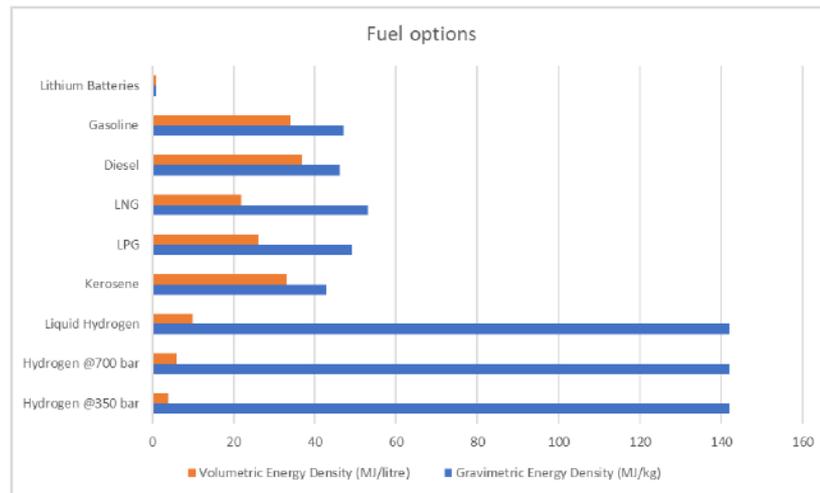


圖 9. 氫氣及其他燃料的能量密度

2. 於朝向淨零碳排的過渡期，燃料可能會使用氫氣與甲烷及丙烷的混氣，但是因為氫氣單位體積燃燒熱相對甲烷及丙烷低，於相同體積流率下，會造成燃氣的能量流率變低，因為燃氣變化造成熱值不足問題需要列入考慮。
3. 燃燒氫氣可能會造成系統排水量增加的問題，因為燃燒 1 摩爾的甲烷，會產生 2 摩爾的水及 1 摩爾的二氧化碳，而產生等量燃燒熱的氫氣燃燒時，則會產生 3 摩爾的水，因此於相同熱量產出下，相對於甲烷，燃燒氫氣水的產生量會較燃燒甲烷增加 50%，於不改變現有設備配置狀態下，使用氫氣或含有氫氣的混和氣體時，需要將此現象列入考量。
4. 雖然氫氣燃燒不會產生二氧化碳，但氫氣於空氣中燃燒，當燃燒

溫度達到 1300°C 以上時，空氣中的氮會氧化產生熱式氮氧化物 (Thermal NO_x)，而熱式氮氧化物的產生率與溫度及時間有關，溫度越高或維持高溫環境的時間越長，熱式氮氧化物產生率就越高，而氮氧化物(NO_x)是溫室氣體，對環境及人體皆有害，所以在使用氫氣作為燃料時，仍須考慮產生熱式氮氧化物帶來的問題。

(三)危害預防及控制：

對於洩漏的氫，分為未點燃及發生燃燒狀況討論如下：

1. 未點燃的洩漏：

(1)液態氫儲存設備為避免高壓破壞，需要有安全裝置，如安全閥等壓力釋放裝置，另於儲存設備附近應避免設置防液堤及障礙物，障礙物可能會造成液態氫蓄積使稀釋速度變慢，而沒有防液堤的狀況下可促使液態氫汽化速率更快，降低著火機率。

(2)液態氫儲存設備附近地面的材質應慎選，金屬鋼材或是光滑混凝土地面會優於沙子或碎石地面，因為沙子或碎石會促進凝結相的形成，並於氫氣被點燃時沙子及礫石會飛散造成危害。

(3)於發生火災時設備可能會採取水淋(water deluge)降溫，而常溫水與液態氫接觸不一定會導致液態氫猛烈的沸騰，但是須注意安全裝置（如：安全閥等）是否會因為低溫使水結冰而發生故障。

(4)液態氫相關研究專案參考資訊：

A.HSE 研究報告：RR769、RR985、RR986、RR987（可在 HSE 網站下載，<https://www.hse.gov.uk>）

B.PRESLHY 專案(<https://preslhy.eu/home>)

C.ELVHYS 專案 (<https://elvhys.eu/home>)

D.Hysafe 指引：Handbook of hydrogen safety: Chapter on LH2 safety

E.SH2IFT 專案：Safe handling of gaseous and liquid hydrogen

2.洩漏後點燃：

- (1)由於氫氣層流燃燒速度較高且容易從爆燃轉變為爆炸，一般的爆炸洩壓口的設計標準(如 BS EN14994:2007 或 NFPA 68)對於氫氣可能不適用，目前HySEA(Hydrogen Safety for Energy Applications)專案有提供氫氣爆炸的計算流體力學建模指引，另外 SH2IFT(Safe H2 fuel handling and use for efficient implementation)專案則有開發和改進模型工具以及進行氫氣泄漏、火災和爆炸的實驗與危害緩解措施的研究，於設計爆炸洩壓口時可參考相關專案。
- (2)與一般碳氫化合物燃燒火焰不同，氫氣燃燒的火焰幾乎沒有顏色，肉眼不易察覺，而一般傳統火焰探測器係由偵測二氧化碳來判斷是否有火焰，對於燃燒不會產生二氧化碳的氫氣並不適用。
- (3)偵測氫氣火焰的傳統作法是現場作業人員行走時手持棍子，並將可燃性材料用置放於棍子最前方，藉由可燃性材料的燃燒來判斷是否有氫氣火焰，而目前則有適用於氫氣的火焰探測器，其原理係以特定紅外線波長偵測環境的水蒸氣，判斷是否有氫氣正在燃燒，另外也有特殊塗料會隨著環境溫度變化而變色，當環境中有氫氣火焰產生時可藉由設備的塗層顏色變化來判斷環境溫度及火焰位置。

(4) 為避免意外釋放產生的氫氣噴射火焰及熱輻射造成其他的損壞或傷害，設備間須規劃間隔距離，而間隔距離的估算則需先評估氫氣火焰可能造成的影響範圍，評估方式可參考 Molkov 推導的公式來估算火焰長度：

A. 最接近解： $L_f = 76 \cdot (m' \cdot d)^{0.347}$

B. 保守解： $L_f = 116 \cdot (m' \cdot d)^{0.347}$

公式中： L_f 為火焰長度(m)、 m' 為氫氣洩漏之質量流率 (kg/s)、 d 為洩漏的物理孔徑(m)

C. 另外也可由查詢列線圖(圖 x)來估算火焰長度，查表時僅需知道孔口直徑及儲存壓力即可估算火焰長度，須注意該值為不考慮流量損失的保守估算結果。

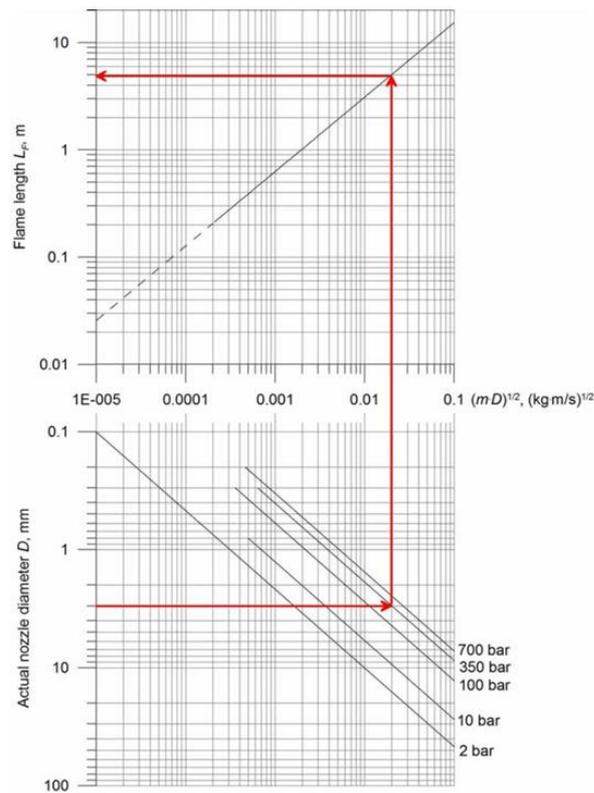


圖 10. 氫氣火焰長度列線(壓力 350bar、孔徑 3mm、氫氣火焰長度約 5m)

(參考資料：* Molkov, V.V., “Hydrogen non-reacting and reacting jets in stagnant air: overview and state-of-the art”, Proceedings of the 10th International Conference on Fluid Control, Measurements, and Visualization, 17-21 August 2009, Moscow, Russia.)

(5)另氫氣火焰的輻射熱比率(火焰輻射熱與燃燒總熱量之比值)較一般碳氫化合物低(氫氣<0.2、甲烷>0.2、丙烷>0.3、其他較重之碳氫化合物>0.4)，即氫氣與碳氫化合物相比，在相同燃燒熱量下，氫氣火焰的輻射熱較低，可接受較小的間隔距離，但於評估時需注意燃料是否僅為單純的氫氣，亦或是氫氣與其他物質的混和氣體，如果是混和氣體可能會造成熱輻射率上升，相關評估方法可參考 EIGA IGC Doc 75(Methodology for determination of safety and separation distances，安全距離及間隔距離決定方法)以及 NFPA 55 (Compressed Gases and Cryogenic Fluids Code，壓縮氣體及低溫液體規範)。

表 2.人體熱輻射暴露接受之熱劑量及可能後果

暴露程度 TDU		結果
平均	範圍	
92	86-103	疼痛
105	80-130	一度燙傷
290	240-350	二度燙傷
1000	870-2600	三度燙傷

(參考資料：HSE 網站，Methods of approximation and determination of human vulnerability for offshore major accident hazard assessment)

- (6) 氫氣於封閉系統（室內）燃燒的特性大多與空氣流入系統之速率有關，於通風良好狀況下，氧氣濃度保持較高，燃燒火焰穩定，氫氣可完全燃燒，系統中不會有氫氣累積，而在通風不良情況下，隨著燃燒造成氧氣濃度逐漸下降，氫氣變得沒辦法完全燃燒，系統中氫氣逐漸累積，當系統內氧氣濃度過低時，火焰將熄滅，而當空氣繼續自通風孔流入，氧氣濃度逐漸上升時，有可能會再次重新復燃、爆炸，所以在氧氣不足，不完全燃燒狀況下，如果突然有氧氣進入（如開門等）會造成爆炸，於緊急應變或救火時應特別注意，另外當未燃燒的氫氣自排氣口排出時，也可能會在排氣口外部產生火焰。
- (7) 為避免氫氣洩漏燃燒，應對儲存設備定期實施洩漏測試，例如氣密性測試、保壓試驗（需考慮測試期間環境溫度變化對壓力的影響，可能會造成測試結果失準）、超音波測試等或是使用洩漏偵測液（如挑選與氫氣相容的肥皂水進行洩漏測試），另於現場應設置氣體偵測器，例如於潛在洩漏點安裝可燃性氣體偵測器，提供作業人員攜帶型偵測器，對於氣體偵測器須注意應定期維護校正，攜帶型偵測器於每次使用前都應以相應之氣體進行測試(bump test)，相關偵測器的挑選可參考HSE 指引(The selection and use of flammable gas detectors)。

(四)英國法規規範：

1. 危險物質規範 (The Planning (Hazardous Substances) Regulations)及重大事故風險控制(Control of Major Accident Hazards COMAH)：為管理區域內危險性物質的使用量及減輕重大事故的影響，事業單位於儲存或使用危險性物質達到危險物質規範規定值時，需先向當地主管機關(Hazardous Substances Authority, HSA)申請取得危險性物質同意 (Hazardous Substances Consent, HSC)後才可以運作，於儲存、使用量或存放地點變更時需要申請修改危險物質同意之內容，而英國安全衛生執行署 (HSE) 角色為法定顧問，向各地主管機關(HSA)提供是否給予同意的建議，氫氣於危險物質規劃中管制量為 2 噸，另外當儲存或使用量達到 COMAH 列管量時，該場所則須遵守 COMAH 的規定，氫氣於 COMAH 中列管量(Lower-tier)為 5 噸、大量管制量(Upper-tier)為 50 噸，於達到大量管制量時需另外製作安全檢視報告等措施。
2. 壓力設備規範(Pressure Equipment Regulations, PER)、壓力系統安全規範(Pressure Systems Safety Regulations, PSSR)、工作用設備提供及使用規範 (Provision and Use of Work Equipment Regulations, PUWER)、對健康有害物質控制 (Control of Substances Hazardous to Health, COSHH)等一般性職業安全衛生規範。
3. 危險性物質及爆炸性環境規範 (Dangerous Substances and Explosive Atmospheres Regulations, DSEAR)：事業單位製造、處置、使用危險性物質形成爆炸性環境時，就需遵守該規範，摘列如下：
 - (1)危險性物質的定義：於 CLP (“Approved Guide to the

Classification and Labelling of Dangerous Substances and Dangerous Preparations” (5th edition)) 分類屬爆炸性、氧化性、極度易燃、高度易燃及可燃性物質，或於工作場所之物質，其處置或使用之條件會產生風險者(僅考量火災、爆炸及其他可能影響人身安全的能量釋放之風險)，以及可能會形成爆炸性環境的粉塵。

- (2) 相關職責：雇主對於勞工負有責任及義務，另在可行範圍內應對受影響之利害關係人承擔類似義務，而自營作業者也適用 DSEAR 規範。
- (3) 風險評估：應評估危險性物質對勞工及其他受影響之人之潛在危害，並規範其風險評估之結果應定期重新檢視，確認評估結果是否有變或者現場是否有變更發生，另於事故發生後應重新進行評估，於完成風險評估及確保符合 DSEAR 規定前不可以使用該物質，且當勞工 5 人以上則需留存評估之書面紀錄。
- (4) 消除或降低風險之措施：雇主要確保在合理可行的範圍內將風險消除或降低，將危險性物質去除，使用危害較低之替代物質，應為優先列入考量的選項，若無法將危害消除，雇主應採取降低危害之措施，本章節列舉許多消除或降低風險之措施，如減少儲存量、於工作場所儲存之規定、避免或降低危險物質洩漏量、避免產生爆炸性環境、通風設計、不相容物質隔離、洩爆、抑爆及耐壓裝置等，於實施風險評估採取控制措施時可檢視參考。
- (5) 爆炸性環境區域辨識：規定應實施危險區劃。
- (6) 事故、事件之處理及緊急應變：事故或事件發生後雇主應採取措施減輕事件的影響，使狀況回復正常以及通知可能受影響

的勞工，管制受影響之區域及提供防護具及工具供搶修、急救人員使用。

(7)危害資訊、指導及教育訓練：規定應提供勞工及承攬人相關資訊及訓練。

(8)危害物質容器及管線之標示：容器及管線標示相關規定，另如果沒辦法標示或沒有標示的部分，也應該確保可以明確的被辨識。

(9)協調義務：多個事業單位於可能產生爆炸性環境的工作場所內共同作業時，該工作場所之負責人應確保現場作業已經符合 DSEAR 相關規定。

(五)異同分析：

1. 英國的危險物質規範(The Planning (Hazardous Substances) Regulations)規定於規劃新的高風險活動或於現有高風險地點附近開發前應先取得許可才可以開發，於申請許可時申請單位除提供危險物質運作情形外，另須說明降低重大事故發生的控制措施，而 HSE 係為顧問的角色，向各地主管機關提供是否給予同意的建議，另外當儲存或使用量達到 COMAH 列管量時，該場所則須遵守 COMAH 的規定，而我國工廠管理輔導法規定石油及煤製品、化學材料或化學製品製造業之事業單位辦理工廠登記時，應檢附製造流程圖（含原料、設備、產品及可能涉及達管制量之危險物品（量）等）供消防、環保、勞動檢查機構執行相關業務參考依據，另勞動檢查法規定事業單位製造、處置、使用危險物、有害物達規定數量之工作場所，非經勞動檢查機構審查或檢查合格，事業單位不得使勞工在該場所作業。

2. 英國危險性物質與爆炸性環境管理體系包含 DSEAR 及 COMAH 等法

規，並要求企業自主評估火災爆炸風險。而台灣則依消防法、職業安全衛生法及工廠管理輔導法等法規進行監督管理。兩者皆要求事業單位進行辨識、評估和控制危險性物質及爆炸性環境之風險，並要求危害圖示、安全資料表和人員訓練等管理事項。另標準與防爆區域劃分部分，兩者都採用 IEC 60079 標準，但英國更強調企業風險管理及自主負責，而台灣則較仰賴政府之監管與檢查制度。

2. 英國的 PSSR (Pressure Systems Safety Regulations)，主要規範壓力設備與系統之安全管理，旨在保障壓力系統在運轉過程中的安全性及可靠性，避免因壓力設備失效而導致人員傷亡或財產損失。英國及台灣在壓力容器法規部分，均強調壓力容器的設計、製造、檢驗和操作安全，亦要求壓力容器符合一定的標準，並且注重對使用人員的安全訓練。英國遵循 EN 歐盟標準，且強調企業自主風險管理，但違規成本高。另台灣以 CNS 國家標準為主，台灣政府強制要求一定容量以上之危險性設備非經檢查合格，事業單位不得使用。

肆、結論與建議

- 一、英國工作安全衛生法(Health and Safety at Work Act)除了規定雇主對於其勞工的保護外，亦將非勞工但是會受其影響的人員如承攬商、訪客、公眾等納入保護範圍。另英國安全衛生執行署(HSE)講師特別說明於英國違反工作安全衛生法移送法院之判決定罪率高，且其罰鍰無上限，爰此，事業單位負責人對於其作業相關活動會更加仔細評估風險、可能影響之範圍，並積極採取控制措施，避免災害發生。目前我國職業安全衛生修法方向除加重雇主責任外，亦參考國外法律，將業主責任納入法律中，並提高罰則，督促事業單位努力防止職業災害發生。
- 二、我國法律體系主要為大陸法系，職業安全衛生相關法規等大多都有明確的規範，涵蓋相關細節及具體要求，而英國為海洋法系，相關職業安全衛生法律、規範大多為系統性、制度面的規範，例如於英國高處作業規範(The Work at Height Regulations 2005)說明只要人員有可能墜落受傷都應列入高處作業管理，並不限於 2 公尺以上才需要管制。於執法時除了有實務指引供事業單位參考外，事業單位也可以自行評估、採取適合該事業單位的方法來符合法律規定。
- 三、承上，於此差異下，英國的事業單位為符合法律規定，會在該公司合理可行範圍內，以法律的立法精神(防止災害發生)為主軸來制定公司政策、實施風險評估及採取適合之控制措施。而我國事業單位為符合法律規定，則會需要先了解法律界線，事業單位努力的主軸變成不逾越法律規定，防止災害發生變為附帶的價值，故常有事業單位詢問勞動檢查機構某設施、設備於職安法有沒有規定，要求採取的防災措施都要先問有無規定，鑽研法律文字。爰如何引導事業單位從遵守法律上字面的規定轉移到職安法立法目的，以防止災害發生為目標，讓職安衛不再只是懂職安法的人之事情，而是任何了解製程或作業流程的人都能參與的科學，是未來努力的方向。

四、氫能源是未來的趨勢，越來越多國家以政策支持加強發展力道，2019 年時，僅有 3 個國家制定氫能發展策略，到了 2023 年已有 41 國制定策略，依據國際能源總署最新發布之「2024 年全球氫能評論」(Global Hydrogen Review 2024)指出，已有 58 國政府制定策略。我國前於 2022 年 3 月公布「臺灣 2050 淨零排放路徑」並規劃「十二項關鍵戰略」，氫能為淨零關鍵戰略之一，運用於產業零碳製程原料、運輸與發電無碳燃料等面向，並逐步布建氫能基礎建設。經濟部亦於 2023 年 7 月公告指定氫燃料為能源管理法之能源，納入該法管理，以加速氫燃料在我國之運用。未來將持續了解國際氫能發展及其危害預防作法，借鏡學習先進國家作法。

五、氫的特性與一般的碳氫化合物差異相當大，氫氣無色無味極易燃燒、低引燃能量及高擴散性。氫能源發展涉及製氫、儲存、運輸及使用等，風險控管的挑戰性大，亦需國內各界共同努力控制風險。面對日新月異的科學技術，如何促使事業單位落實職業安全衛生管理，是未來值得思考的方向。

六、HSE 為監管和執行職業安全衛生相關法律、規範及研究職業相關風險，該署邀集許多科學家成立實驗室進行各種實驗，實驗成果除了能提供事業單位實施風險評估之科學依據外，HSE 實施職業災害調查時，也會提供科學實驗佐證做為法官審判案件參考，而我國類似的單位有勞動及職業安全衛生研究所，勞研所除了會發布研究成果供勞動檢查機構或事業單位參考外，於遭遇特殊職業災害時，勞動檢查機構也可以邀請勞研所協助進行調查。未來勞動檢查機構與勞研所將持續強化聯繫合作，共同保障工作者安全。

七、在英國受訓氣氛與國內不同，講師除了講解講義上的內容外，也鼓勵學員發表意見及提問，強調自主學習及獨立思考。此外，英國的事業單位推動職業安全衛生也是強調自主管理，自發性把事情做好，與我國的社會文化不同。