

液化石油氣海運燃料之 發展

2022 年 5 月

2022Q2 知識物件—評析

財團法人台灣綜合研究院 | TAIWAN RESEARCH INSTITUTE

為遵守國際海事組織(International Maritime Organization; IMO)要求 2020 年全球海運燃油含硫量應不超過 0.5% 的規範，全球海運業者主要採取使用低硫燃油、加裝脫硫器與改用替代燃料等方式來因應。其中液化天然氣 (Liquefied Natural Gas; LNG) 因具低污染排放特性且已有成熟輸儲經驗，成為業者改用替代燃料的主流選項。不過同屬低污染排放燃料，且在相同體積下能提供更多能量的液化石油氣 (Liquefied Petroleum Gas; LPG) 船舶亦開始受市場矚目，世界液化石油氣協會 (World LPG Association; WLPGA) 更大力提倡使用 LPG 作為海運替代燃料，並看好其未來發展潛力，樂觀評估 2040 年海運用 LPG 需求有望占全球海運燃料需求量約 3%。

一、LPG 燃料船舶發展概況

2016 至 2017 年間，DNV 曾攜手現代重工 (Hyundai Heavy Industries)、Wärtsilä 公司等國際造船業者以及希臘 Consolidated Marine Management 航運公司執行 LPGreen 計畫，針對可航行於遠洋的大型 LPG 船舶，其船身、氣艙及燃料供應系統 (LPG Fuel Supply System) 進行設計規劃，不過該計畫係處於概念設計階段，並未實際製造出 LPG 燃料船舶。直至 2018 年，德國 MAN Energy Solutions 公司推出全球首項可使用 LPG 作為燃料的船舶引擎—MAN B&W ME-LGIP，才使新造及改裝大型 LPG 燃料船舶具有實際可行性。以下分別說明 LPG 燃料引擎開發方向，以及應用於海運船舶的實際案例。

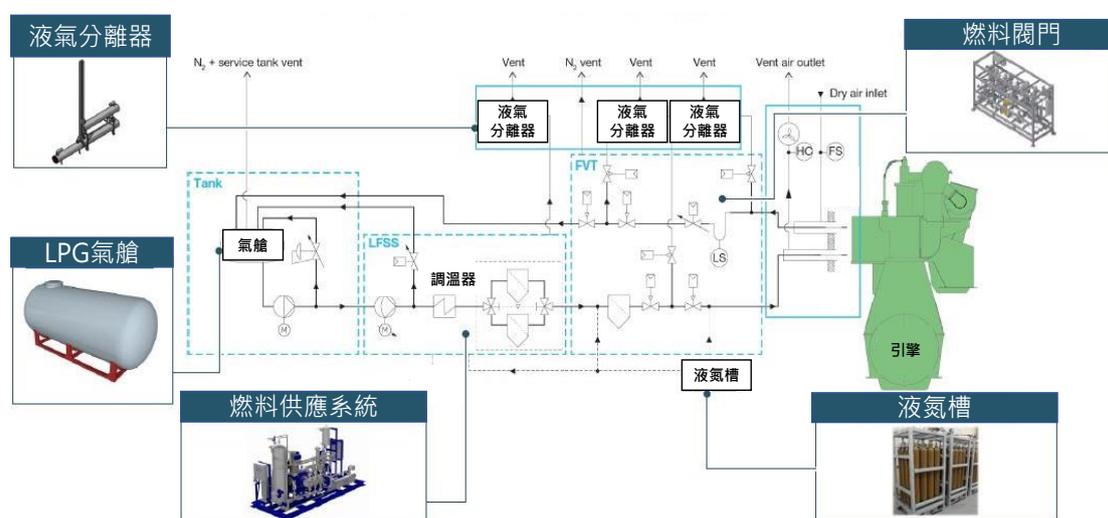
(一)引擎開發方向

於 2018 年問世的 MAN B&W ME-LGIP 引擎是全球首項且至今唯一的 LPG 燃料引擎，其採用雙燃料設計，駕駛者可將船舶動力調整為 LPG 燃料模式或一般海運燃油模式，在以 LPG 為燃料的情況下，除需保留約 3% 的柴油或燃料油用於維持引擎燃燒¹外，其餘 97% 皆使用 LPG，且無須限制丙、丁烷混摻比例²。

¹ 大型船舶引擎多是以柴油及燃料油等中重質油品燃料為基礎設計，其引擎係透過壓縮空氣產生高溫引發燃油自燃來運作，而 LPG 自燃點高於柴油及燃料油，故若完全使用 LPG 作為燃料，可能會發生壓縮空氣溫度不足以使 LPG 自燃，且缺乏其他火源點燃 LPG，導致引擎無法運作的情況。參考台灣中油公司、鴻奇煤氣分裝有限公司網頁之安全資料表，海運輕柴油 (Marine Gasoil; MGO) 與低硫燃料油 (Low Sulphur Fuel Oil; LSO) 自燃點分別為 177oC 與 330oC；而 LPG 隨著混摻比例不同，自燃點介於 405~549oC。

² 若摻配乙烷，則混摻上限為 25%。

MAN Energy Solutions 公司針對 MAN B&W ME-LGIP 引擎規劃了 LPG 燃料船舶從氣艙、引擎至廢氣排放系統的參考配置(見圖 1)。基於 MAN B&W ME-LGIP 引擎係使用加壓常溫 LPG 燃料³，故其氣艙內的 LPG 需先進入燃料供應系統⁴調整壓力及溫度，隨後再進入燃料閥 (Fuel Valve Train; FVT)，該區會利用閥門及液氮槽控制 LPG 流動方向，船舶航行時閥門會打開讓 LPG 燃料得以進入引擎。如果轉換成由一般海運燃油提供動力或者停止航行時，燃料閥區域的閥門會關閉，停止 LPG 的輸送，而連結液氮槽的閥門則會開啟，讓氮氣灌進燃料閥，將殘留的 LPG 推往液氣分離器 (Knock-out drums)，該處 LPG 可能會與氮氣一同排放，或者與殘留於燃料供應系統的 LPG 經由管線回收至氣艙，完成燃料循環利用。



註：本圖為 MAN Energy Solutions 公司規劃範例，並省略 MGO 與 LSFO 燃料供應部分。

資料來源：Klaus Rasmussen (2019), LPG as future bunker fuel。

圖 1 LPG 船舶燃料系統配置

除 MAN B&W ME-LGIP 引擎外，參考 WLPGA (2021a)，有望跟進 MAN Energy Solutions 公司推出 LPG 雙燃料引擎者有 Wärtsilä 公司及 Caterpillar 公司等，其中 Wärtsilä 公司亦與 MAN Energy Solutions 公司合作開發可同時使用

³ LPG 於該引擎的適用條件為壓力值 50bar、溫度 25~55oC。而目前 LPG 儲存方式主要分為：(1) 冷凍式 (refrigerated)：儲存環境約為壓力值 1bar、溫度-50oC；(2) 半冷凍式 (semi-refrigerated)：儲存環境約為壓力值 4~8bar、溫度-10oC；及(3) 加壓式 (under pressure)：儲存環境約為壓力值 17bar、溫度 45oC。

⁴ MAN Energy Solutions (2019) 說明 LPG、LNG、甲醇等低閃點的替代海運燃料皆需透過該系統確保壓力、溫度調整時的安全性，故其又統稱為低閃點燃料供應系統 (Low-flashpoint fuel supply system; LFSS)。

LNG/LPG、柴油及燃料油的三燃料引擎技術。另外日本 Iino Gas Transport 公司、大阪燃氣公司 (Osaka Gas)、泉鋼業公司 (Izumi Steel Works) 與三浦造船公司 (Miura Shipbuilding) 則另闢蹊徑，利用 LPG 重組技術 (reforming)，將進入引擎前的 LPG 轉換成甲烷確保引擎穩定運作，該項技術已獲日本海事協會 (ClassNK) 頒布原則認可 (Approval in Principle; AIP)⁵證書，後續可能進一步將該項技術應用於雙燃料引擎產品，並安裝於小型 LPG 氣輪進行試航。

至於 LPG 單燃料引擎，目前是主攻船外機 (outboard) 市場，供充氣艇、帆船等小型船舶使用，包括美國 Lehr 公司、Tohatsu America 公司及水星海事公司 (Mercury Marine) 皆有商業量產之 LPG 燃料船外機，直接透過軟管連接小型桶裝瓦斯即完成燃料安裝作業，惟在遠洋船舶層級，對於 LPG 單燃料引擎未有具體的技術開發進展。

(二)船舶實際案例

全球第 1 艘 LPG 燃料船舶於 2020 年 10 月啟航，截至 2022 年 2 月，已實際使用 LPG 作為燃料的船舶至少 25 艘，各國已公開的 LPG 燃料船舶新建及改裝計畫彙整如表 1。在歐洲區域，比利時 Exmar 公司為全球首家宣布採購 LPG 雙燃料船舶的海運業者，該筆訂單於 2018 年上半年 MAN B&W ME-LGIP 引擎面世不久後即成立，並由中國船舶集團有限公司承包製造 2 艘 88,000m³ 的 VLGC 級船舶⁶，並相繼於 2021 年 6~8 月完成，分別命名為 Flanders Innovation 與 Flanders Pioneer，2 艘船舶亦已由挪威國家石油公司 (Equinor) 承租，為期 5 年。德國 Hartmann 所採購的 LPG 雙燃料船舶訂單內容則為新造 3 艘裝載容量 5,000m³ 的小型 LPG 氣輪，第 1 艘 GasChem Homer 於 2021 年底完成交船手續，其餘 2 艘 GasChem Iliad 與 GasChem Odyssey 則預計於 2022 年上半年完成試航，不過因 3 艘船舶已確定由澳洲 Origin Energy 公司承租使用，故其實際航運路線將以亞太區域為主。

至於日本、中國大陸及新加坡等亞太國家亦已有業者採購 LPG 雙燃料船舶，如日本 Kumiai Navigation 船舶公司委由川崎重工公司 (Kawasaki Heavy Industries) 製造 4 艘 VLGC 級船舶，首艘為 Crystal Asteria，裝載容量 84,229m³，其餘 3 艘預計於 2022~2023 年完成，前述船舶皆會透過長期租賃方式納入

⁵ AIP 是指各驗船協會對於某項新開發技術的安全性進行評估，確認無虞後所頒發的證書。

⁶ 依 WLPGA (2021)，LPG 氣輪裝載容量介於 1,000~100,000m³，裝載容量達 50,000m³ 以上即可歸類為 VLGC 級。

Astomos 能源公司的 LPG 氣輪船隊，市場亦傳出 Astomos 有意將該船隊的 LPG 雙燃料船舶數量擴增至 20 艘之消息，不過尚未有更具體的採購計畫。

表 1 新造及改裝 LPG 燃料船舶案例

國家	船東	船舶數	類型	進度
比利時	Exmar	2	新建	2021 年已全數完成交船
德國	Hartmann	3	新建	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2021 年已交船 1 艘 ▪ 另 2 艘船舶預計於 2022 上半年完成
日本	Kumiai Navigation	4	新建	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2021 年已交船 1 艘 ▪ 其餘 3 艘船舶預計於 2022 年第 2 季後完成
	飯野海運	2	新建	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2022 年 2 月已交船 1 艘 ▪ 另 1 艘船舶預計於 2023 年完成
	日本郵船	2	新建	預計於 2024 年完成
中國大陸	西南海運	5	新建	2022 年 1 月已全數完成交船
	交通銀行融資租賃	1	新建	2021 年已完成交船
新加坡	BW LPG	15	改裝	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2020 年 10 月完成第 1 艘改裝作業，至 2022 年 2 月已改裝 12 艘船舶 ▪ 其餘 3 艘船舶預計於 2022 年底前完成
美國	Dorian LPG	4	新建	預計於 2023 年完成
合計		38		<ul style="list-style-type: none"> ▪ 新建船舶數 23 艘、改裝數 15 艘 ▪ 截至 2022 年 2 月，確認已製造及改裝完成的船舶數 25 艘

註：本表係依市場公開資訊彙整，故船舶數量未必符合 DNV (2021) 統計結果。
資料來源：本專題分析彙整。

飯野海運 (Iino Kaiun Kaisha) 所採購的 2 艘 LPG 雙燃料船舶則分別委由川崎重工與韓國大宇造船與海洋工程公司 (Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering; DSME) 建造，其中由川崎重工公司建造的 VLGC 級船舶—Calluna Gas 已於 2022 年 2 月底啟航，裝載容量 84,000m³，由飯野海運自行營運管理；另 1 艘 DSME 建造的 VLGC 級船舶則預計於 2023 年 3 月完成，預定裝載容量

91,000m³，將由歐洲化工業巨擘 Borealis AG 公司承租，用以為該公司於比利時 Kallo 的丙烷脫氫工廠 (Propane Dehydrogenation; PDH) 運送原料。

日本最新宣布採購 LPG 雙燃料船舶的海運業者另有日本郵船公司 (Nippon Yusen Kabushiki Kaisha)，該公司於今 (2022) 年初向川崎重工公司訂購 2 艘裝載容量 86,700m³ 的 VLGC 級船舶，預定於 2024 年交船，2 艘船舶將配置可裝載如 LPG、液態氨的獨立貨艙及油 (氣) 艙，以便未來能裝載並使用更多元的新興海運替代燃料。

中國大陸業者的 LPG 雙燃料船舶採購計畫，則有西南海運公司委託中國船舶集團有限公司建造 5 艘裝載容量 86,000m³ 的 VLGC 級船舶，其中 2021 年 3 至 10 月陸續完工 Gas Venus、Gas Pisces、Gas Virgo 與 Gas Sagittarius 等 4 艘船舶，最後 1 艘 Gas Capricorn 則於 2022 年 1 月初交船，西南海運公司用於擴大經營美國經巴拿馬運河至亞太區域航線的 LPG 船運業務。另外交通銀行融資租賃公司亦委由韓國現代重工公司製造 1 艘裝載容量 90,000m³ 的 VLGC 級船舶，該船舶名稱為 Bellavista Explorer，已於 2021 年 7 月交船。

總部位於新加坡的國際 LPG 船運業者—BW LPG 公司經評估後發現，船舶改裝平均耗時 4~5 個月，成本約 800~900 萬美元/艘，較新造船隻更具效益⁷，故不同於其他業者購買新船之作法，而是選擇將旗下部分裝載容量約 84,000m³ 的 VLGC 級船舶置換引擎，改造成 LPG 雙燃料船舶。該公司宣布要改造的船舶數量從 2018 年底的 4 艘逐漸增加至 2020 年第 4 季的 15 艘，實際改造作業從 2020 年 6 月起展開，同年 10 月首艘改裝船舶 BW Gemini 於中國大陸深圳啟航；截至 2022 年 2 月，BW LPG 已有 12 艘 VLGC 船舶完成改裝⁸，其餘 3 艘亦將於 2022 年底前改裝完畢，航運路線包括新加坡、英國、荷蘭、美國等地的主要油港。

⁷ 依本文所彙整案例，如日本 Kumiai Navigation 公司從傳出訂單消息到第 1 艘船舶交船耗時約 2 年，比利時 Exmar 公司則因原先委託的造船業者韓國韓進重工 (Hanjin Heavy Industries) 經營困難而售出菲律賓造船廠，導致該船舶製造計畫一度中斷，隨後再重新由中國船舶集團有限公司接下訂單，若從後者接下訂單開始計算，耗時約 2 年 3 個月，至於其餘案例並未揭露下訂時間。造船費用部分，各案例皆未揭露金額，依 BW LPG 評估採購每艘新船需約 8,000 萬美元。

⁸ 2020 年先完成 BW Gemini 與 BW Leo 2 艘，2021 年依序完成 BW Orion、BW Libra、BW Balder、BW Njord、BW Var、BW Brage、BW Tucana、BW Volans、BW Frigg 與 BW Freyja 等 10 艘，各船舶裝載容量從 83,839~84,196m³ 不等。

美洲地區則是有美國 Dorian LPG 公司傳出採購 4 艘 VLGC 級的 LPG 雙燃料船舶，預計 2023 年完成，但除確認其中 1 艘由川崎重工製造外，市場上並未揭露更多詳細資訊。

綜上分析，LPG 燃料船舶引擎開發部分，2018 年 MAN B&W ME-LGIP 引擎問世已為 LPG 雙燃料引擎商業化樹立里程碑；在單燃料引擎至今尚無法應用於遠洋船舶，且雙燃料引擎所需的一般海運燃油占比並不高的情況下，可預期未來 LPG 燃料船舶仍會以雙燃料引擎為主。另綜整 LPG 燃料船舶新建及改造案例，包括歐美亞皆已有航運業者使用 LPG 燃料，但基於燃料取得便利性，現有船舶皆為 LPG 氣輪，而尚未打入貨櫃船、散裝船等其他類型船舶市場。

二、LPG 海運燃料之優勢與挑戰

據 WLPGA (2019、2022) 評估，2022 年全年海運用 LPG 需求量估計約 10 萬噸，若假設 2028 年以後全球所有新造的 LPG 氣輪皆將使用 LPG 燃料，且使用替代燃料引擎的新造貨櫃船與油輪占比亦達到 20~30%，則 2040 年海運用 LPG 需求量占全球海運燃料市場份額有望達到約 3%⁹。然 DNV (2020) 卻認為各類替代燃料的競爭優勢不同，且全球低碳轉型政策推動方向及速度皆將衝擊未來海運替代燃料市場發展，故依其針對 2050 年海運燃料市占率之情境評估結果¹⁰，包括已實際使用的 LNG、甲醇，以及氨、氫能等技術開發中燃料未來較可能成為主流，並排擠 LPG 在海運燃料市場的發展空間¹¹。考量 LPG 於海運替代燃料市場發展前景之不確定性，以下進一步從燃料減排效果、加油(氣)基礎設施及船舶儲存便利性，以及經濟效益等面向，分析目前 LPG 相較於其他海運替代燃料的優勢，以及未來推廣使用所面臨的挑戰。

(一)減排效果

IMO 除管制海運燃料的硫氧化物 (SO_x) 及氮氧化物 (NO_x) 等空氣污染物之外，亦提出 2050 年國際航運溫室氣體 (Greenhouse Gas; GHG) 排放量較

⁹ WLPGA (2019) 參考天然氣輸出國家論壇 (Gas Exporting Countries Forum) 的估計，以 2040 年全球海運燃料 3.19 億噸油當量為基礎計算，並假設每艘 VLGC 級船舶 LPG 用量約 1.1 萬噸/年、每艘貨櫃船依其載運量，LPG 用量約 0.3~1.5 萬噸/年，總計該年度海運用 LPG 需求量逾 950 萬噸。另與 LPG 總需求量相比，則 2040 年海運用 LPG 需求量約占全球 LPG 需求量的 2~2.5%。

¹⁰ DNV (2020) 根據全球減碳措施執行強度、船舶數量成長速度，以及生質能、電力、化石燃料等能源價格水準等因素，模擬 30 種情境下的 2050 年全球海運燃料市占率。

¹¹ 其中 24 種情境評估 LPG 將退出海運燃料市場。

2008 年減少 50%的目標，根據日本經產省 (Ministry of Economy, Trade and Industry) (2022) 評估，於燃料使用階段，LNG 及 LPG 分別較燃料油 GHG 排放量減少約 29%及 16%；WLPGA(2021b)則表示 LPG 較燃料油減排約 25%。

A. Foretich et al. (2021) 從燃料生命週期 (life cycle) 的角度所進行的比較分析則發現 (表 2)，在以原油、天然氣等化石能源為原料，計算生產及使用海運燃料排放量的假設下，LPG 的 GHG 排放量約 84g CO₂e/MJ，較燃料油減少 13%；其他替代燃料因為 LNG 原料皆來自天然氣礦區，GHG 排放更易受探採階段甲烷洩漏問題的影響，另從天然氣合成甲醇的製程亦容易排放 GHG，故 LNG 及甲醇 2 者於整體燃料生命週期的 GHG 排放量估計分別約 93 及 94g CO₂e/MJ，僅較燃料油減少約 2~3%。至於其他空氣污染物項目，LNG、LPG 及甲醇等海運替代燃料相較燃料油的減排效果皆較明顯，其中 LNG 的 SO_x、NO_x 及 PM_{2.5} 減少比例分別為 96%、29%及 88%，是海運替代燃料中減排表現最優異者；至於 LPG 的 SO_x、NO_x 及 PM_{2.5} 減少比例分別為 96%、6%及 75%，減排效果僅次於 LNG。

表 2 海運燃料溫室氣體及空氣污染物排放情形比較

燃料	GHG		SO _x		NO _x		PM _{2.5}	
	排放量*	減少比例#	排放量	減少比例	排放量	減少比例	排放量	減少比例
燃料油 (0.5%S)	96	-	0.25	-	0.35	-	0.08	-
海運輕柴油 (0.1%S)	95	1%	0.06	76%	0.33	6%	0.02	75%
LNG	93	3%	0.01	96%	0.25	29%	0.01	88%
LPG	84	13%	0.01	96%	0.33	6%	0.02	75%
甲醇	94	2%	0.02	92%	0.33	6%	0.02	75%

註：* GHG 排放量單位為克二氧化碳當量/百萬焦耳 (g CO₂e/MJ)，其餘空氣污染物單位為克/百萬焦耳 (g/MJ)。

#減少比例以燃料油 (0.5%S) 為基準比較。

資料來源：A. Foretich et al. (2021), Challenges and Opportunities for Alternative Fuels in the Maritime Sector；本專題分析彙整。

換言之，單就燃料使用來說，LNG 減排效果應稍優於 LPG，但若納入原料探採及燃料生產階段的 GHG 排放量，則相較 LNG、甲醇而言，LPG 可能更具減碳優勢。至於氨及氫能，參考 DNV (2021) 的見解，因為氨及氫的化學成分皆無碳，故於燃料使用階段，其燃燒產物主要是氮氣與水，不會排放任何 CO₂，

因此，氨及氫能亦於 2021 年被世界銀行 (World Bank) 評為未來開發中國家航運部門邁向零碳目標的重要替代燃料。

(二)使用便利性

海運替代燃料的便利性，可從供給端 (加油 (氣) 基礎設施的遍及程度) 及使用端 (船舶燃料油 (氣) 艙的所需空間多寡) 兩面向進行討論。在基礎設施部分，據 WLPGA (2019、2021a) 評估，全球至少有逾 150 個港口具備 LPG 卸收能力，前述港口加總的卸收碼頭 (terminals) 數量則更多，惟目前尚未有港口實際設立 LPG 燃料船舶加氣站；以 LPG 為燃料的 LPG 氣輪通常是在卸收碼頭載貨時，利用碼頭裝置及船舶管線連接至氣艙，連帶補充 LPG 燃料。根據報導，2021 年 5 月 VLGC 級船舶 BW Balder 號於東南亞公海以船對船 (Ship to Ship; STS) 方式接收由 BW Epic Kosan 公司船舶提供的 LPG 燃料，是全球首次在 LPG 卸收碼頭以外的區域完成加氣作業。

至於其他替代燃料，LNG 已有可供貨櫃船、散裝船及郵輪等各類船舶使用的加氣站，據 statista 網站統計，2021 年 9 月全球共有 34 個 LNG 船舶加氣站，其中歐洲 24 個、美洲 6 個、亞太 4 個，若加計規劃中的站數則達 52 個，包括中東及非洲皆會設立加氣站。另在荷蘭鹿特丹、中國大陸深圳及新加坡等全球主要港口皆已提供 STS 加氣服務。甲醇燃料船舶原多為化學品運輸船 (Chemical Carrier)，其加油方式同於前述 LPG 氣輪，利用載貨過程補充燃料。但因應 Wärtsilä 公司及瑞典 Stena Line 航運公司合作開發改裝的全球首艘甲醇燃料載車渡輪—Stena Germanica 啟用，Stena Line 航運公司在該渡輪航行港口—瑞典 Gothenburg 港及德國 Kiel 港分別興建加注燃料設備，並向 Methanex 公司採購甲醇；Gothenburg 港另有 1 艘引水船 (Pilot Boat) 改裝成甲醇燃料船舶。此外，2021 年荷蘭鹿特丹亦出現全球首次甲醇 STS 加油案例，由 Waterfront Shipping 公司與 Royal Vopak 公司共同完成。

另在船舶燃料油(氣)艙所需空間多寡方面，由於各燃料的能量密度(energy density) 不同，同樣體積或重量的燃料可供船舶航行的距離有落差，連帶將影響船舶燃料油 (氣) 艙空間配置以及燃料補充頻率。根據 DNV (2021) 盤點各海運燃料於相同體積下的能量密度(見表 3)，海運輕柴油能量密度值為 36.6GJ/m³，而 LPG、LNG 及甲醇等目前已使用的海運替代燃料，能量密度值分別為 25.4、23.4 及 15.8GJ/m³。意即在燃料油 (氣) 艙容量相同的情況下，使用 LPG、LNG

及甲醇的可航行距離，分別為海運輕柴油的 69%、63%及 43%；在航行距離相同時，則 LPG、LNG 及甲醇燃料艙所需容量分別為海運輕柴油的 1.4、1.6 及 2.3 倍，而氨及液態氫等所需容量則更多。

表 3 海運替代燃料能量密度比較

燃料	能量密度 (GJ/m ³)
海運輕柴油	36.6
LPG	25.4
LNG	23.4
甲醇	15.8
氨	12.7
液態氫	8.5

註：GJ 指十億焦耳 (gigajoule)。

資料來源：DNV (2021), Maritime forecast to 2050 - Energy Transition Outlook 2021。

整體而言，若從供給端分析燃料便利性，LPG 加氣基礎設施開發進展相對 LNG 仍有落差；於使用端比較，LPG 能量密度高，故其於各類海運替代燃料中，船舶所需占的油(氣)艙空間最少。MAN Energy Solutions (2019) 以載運量 7.5 萬噸的 LR1 級¹²油輪為例，若比照遠洋船舶航程，以單趟航行 40 天、不補充燃料為原則進行設計，則 LPG 氣艙總容量需至少約 2,600m³，而實際上相同載運量的燃料油船舶，油艙設計容量約 2,300 ~ 2,500m³，兩者差異有限，故使用 LPG 無需頻繁靠岸補充燃料，對於船體配置的影響亦可能相對其他替代燃料來得輕微。

(三)經濟效益

MAN Energy Solutions 公司曾於 2018 年以巴拿馬級 (Panamax) 船舶為基準，進行不同燃料的資本支出與成本回收期比較分析，據其評估與船舶改用含硫量 0.1%燃料油的方案相比，改裝成 LPG 雙燃料船舶的資本支出多出約 400 萬美元 (回收期約 5 年)，改裝成 LNG 雙燃料船舶則多出約 700 萬美元 (回收期約 7 年)，顯示改以 LPG 為燃料較 LNG 更具經濟誘因。

總結來說，LPG 於海運替代燃料市場具有相對低 GHG 排放、低污染、船舶所需氣艙空間少且無需頻繁補充燃料的優勢，惟目前其發展主要面臨加氣基礎設

¹² 載運量約 4.5~8 萬噸。

施不足的挑戰。對於該項問題，WLPGA 考量 LPG 燃料引擎的使用方式，認為可利用既有的加壓式儲槽氣輪¹³作為 LPG 燃料駁船，以 STS 方式提高供給端便利性，以便推廣使用至 LPG 氣輪以外的船舶。然而，加氣基礎設施及 LPG 燃料船舶的數量規模能否增長，其間因果關係往往難以釐清，箇中關鍵仍應是倚靠提供經濟誘因帶動供需兩端發展。儘管在排除政府補助因素的情況下，LPG 燃料船舶相對於 LNG，資本支出較少並更快回收成本，但因 LNG 作為海運替代燃料更早受市場關注，許多國家都匡列相關補助以推廣 LNG 在海運部門的使用，故實際上建造 LPG 燃料船舶及基礎設施相較 LNG 未必具成本優勢。此外，相較被國際機構視為零碳燃料的氨、氫能源，LPG 的減排效果仍相對有限，一旦使用氨、氫能源的內燃機及燃料電池技術在商業化應用於海運船舶方面取得進展，恐將使船舶轉用 LPG 海運燃料增添更嚴峻的挑戰。

三、結語

近年來 IMO 針對 SO_x、NO_x 等空氣污染物管制政策逐漸加嚴，連帶促使海運替代燃料興起。LPG 因低污染排放且輸儲方便，使其成為船舶業者使用替代燃料的新興選項，並獲得 WLPGA 提倡使用且看好其海運燃料需求前景。

檢視 LPG 燃料船舶發展情況，直至 2018 年方有 MAN Energy Solutions 公司開發出全球首項及至今唯一的 LPG 船舶引擎—MAN B&W ME-LGIP，產品問世後已陸續吸引歐洲、亞太及美國等地航運業者新建及改裝成 LPG 燃料船舶。綜整市場資訊，自 2020 年 10 月首艘船舶落成啟航後，截至 2022 年 2 月，全球已啟用的 LPG 燃料船舶至少有 25 艘；在船舶類型部分，因燃料取得方便，目前的 LPG 燃料船舶皆為 LPG 氣輪。

另一方面，隨著船舶新建及改裝計畫完成，LPG 海運燃料需求浮現，惟海運替代燃料市場發展前景未明。從減排效果、使用便利性及經濟效益等面向，探討 LPG 於海運替代燃料市場之競爭優勢及未來挑戰，雖 LPG 擁有低污染、能量密度高等優點，然加氣基礎設施規模擴張受限，以及氫、氨等零碳海運燃料興起後可能引發的排擠效果，仍將成為影響 LPG 海運燃料未來發展的不確定因素。

¹³ 主要是裝載容量介於 3,500~11,000m³ 的中小型 LPG 氣輪。

參考資料

- 吳東明、張育嘉，2004年，「國際貨輪的重燃油艙佈置設計研析—降低海上意外所致溢油污染損害」，航運季刊，第13卷，第3期，頁1-28。
- A. Foretich et al. (2021), "Challenges and Opportunities for Alternative Fuels in the Maritime Sector".
- BW LPG (2022), "Navigating through volatilities in the VLGC market".
- DNV (2018), "LPGreen: LPG Carrier of tomorrow, Concept Design".
- DNV (2019), "Comparison of Alternative Marine Fuels".
- DNV (2020), "Maritime forecast to 2050 - Energy Transition Outlook 2020".
- DNV (2021), "Maritime forecast to 2050 - Energy Transition Outlook 2021".
- JLPGA (2022), "LP Gas as Energy to Support Sustainable Society and Living".
- Klaus Rasmussen (2019), "LPG as future bunker fuel".
- MAN Energy Solutions (2018), "Costs and Benefits".
- MAN Energy Solutions (2019), "MAN B&W ME-LGIP Dual-Fuel Engines".
- Methanol Institute (2021), "Methanol: An Emerging Marine Fuel".
- METI (2022), "LP Gas in Japan".
- SEA-LNG (2022), "LNG - A Fuel in Transition".
- S. Wang et al. (2022), "Governmental subsidy plan modeling and optimization for liquefied natural gas as fuel for maritime transportation".
- UBS (2019), "Global Refining - IMO 2020 update: new survey points to higher compliance, VLSFO preference".
- WLPGA (2019), "Guide for LPG Marine Fuel Supply".
- WLPGA (2021a), "LPG for Marine Engines - The Marine Alternative Fuel - Commercial, Passenger, Offshore Boats/Ships, Recreational Crafts and Other Boats".
- WLPGA (2021b), "Towards sustainable shipping with LPG".
- WLPGA (2022), "Energising Tomorrow".
- World Bank (2021), "The Potential of Zero-Carbon Bunker Fuels in Developing Countries".