

LNG 燃料船用於臺灣近海航運 之環境效益分析

THE ENVIRONMENTAL ANALYSIS OF LNG-FUELED SHIP FOR OFFSHORE SHIPPING IN TAIWAN

張瀨之 Ching-Chih Chang¹

鄭惠方 Hui-Fang Cheng²

(105 年 12 月 23 日收稿，106 年 3 月 7 日第 1 次修改，106 年 6 月 3 日定稿)

摘 要

現今海運已成為國際間運輸的主流，全球貿易有 90% 都透過海上運輸，然而大部分的商用船舶多使用重油為燃料，造成大量環境汙染。船舶運輸產生的 SO_x 、 NO_x 及 CO_2 排放量分別占全球的 12%、13%、2.8%，對於環境的影響衝擊甚大。液化天然氣 (LNG) 因具有環保、安全性高且符合國際排放量標準，在國際上已成為船舶替代燃料的最佳選擇。因此，本研究探討臺灣區域兩岸及近海 5 艘營運中的客貨滾裝船，以 EPA 及洛杉磯港模型導出船舶以 LNG 替代傳統燃料對環境影響之差異，並以 SO_x 及 NO_x 每延噸海裡排放量進行載運率與排放量之情境分析。實證分析結果為，不論以 EPA 模型推估或是以洛杉磯港模型推估，以 LNG 替代傳統燃料， SO_x 排放量將降低 90% 以上、 NO_x 排放量將降低 70% 以上、 CO_2 排放量將降低 13% 以上，顯示出 LNG 對於降低環境汙染確有明顯效益。在情境分析中，研究結果得出，以航線類型區分，應以兩岸航線優先推動 LNG 較具效益；若以船舶類型區分，應以傳統船優先推動 LNG 較具效益。

-
1. 國立成功大學交通管理科學系及能源科技與策略研究中心教授（701 臺南市大學路 1 號 成功大學交通管理科學系；電話：886-6-2757575 分機 53225；E-mail: chan5305@mail.ncku.edu.tw）。
 2. 國立成功大學交通管理科學系碩士。

關鍵詞：重油；二氧化硫；LNG；客貨滾裝船；兩岸航線

ABSTRACT

Today, maritime transport has become an international mainstream. 90% of global trade depends on maritime transport, but most of the merchant vessels use Heavy Fuel Oils(HFOs) for ship propulsion, causing heavy environmental pollution. The contribution of ships to global emissions can be indicated as being in the following: sulfur oxides(SO_x), 12% ; nitrogen oxides(NO_x), 13% ; carbon dioxide equivalent(CO_{2e}), 2.8%. Liquefied natural gas (LNG), due to environmental friendly, safely and meet international emissions standards , has become the best choice for ship alternative fuel. The aim of the research presented in this paper is to analyse five offshore ships which operating in Taiwan, and to explore the environmental influences of using LNG alternative to traditional fuels by EPA and PLOA models, and further to carry on scenario analysis of SOX and NOX emissions of per ton-miles. Results show that LNG leads to a reduction of 90% SOX emissions and 70% NOX emissions and 10% CO₂ emissions in at least both modes. In scenario analysis, results show that in order to distinguish the type of route, the cross-strait routes should be a priority to promote LNG fuel; in order to distinguish the type of ship, traditional vessels should be a priority to promote the LNG fuel.

Key Words: Heavy fuel oils (HFOs); Sulfur oxides (SO_x); Liquefied natural gas (LNG); Offshore ships; The Cross-Strait routes

一、緒 論

地球表面積的四分之三是海洋，海運成為國際間運輸的主流，全球貿易有超過 90%是透過海上運輸，根據國際海事組織 (International Maritime Organization, IMO) 第 3 期溫室氣體報告書指出，2007 年至 2012 年海洋運輸所帶來的 CO₂ 排放量占全球的 3.1%，如果不採取任何措施，預估在 2050 年 CO₂ 排放量會比 2012 年增加 50%至 250%。若將不同溫室氣體 (含 CO₂、CH₄、N₂O) 的影響程度轉換成二氧化碳當量 (CO_{2e}, carbon dioxide equivalent)，則海洋運輸所帶來的 CO_{2e} 占全球的 2.8%。在非溫室氣體排放部分，船用燃料的燃燒亦會因船舶發動機性質、燃料性質等不同，帶來硫氧化物 (SO_x)、氮氧化物 (NO_x)、顆粒物 (PM) 及非甲烷揮發性有機物 (NMVOCs) 的排放。歐洲政策中心指出，航運工業是 SO_x 排放主要來源之一，航運所帶來 NO_x 及 SO_x 排放分別約占全球總排放的 13%及 12% [1]。

另國際上有許多對於船舶污染之相關規範，其中規範較為詳盡的屬 1973 年 IMO 所通過「國際防止船舶污染國際公約」(International Convention for the Marine Prevention of

Pollution From Ships，簡稱 MARPOL)，MARPOL 公約對船舶污染訂有 6 項附則，分別規範油污、散裝有毒液體物質、海運包裝或貨櫃、可移動罐裝或公路或鐵路槽罐車載有害物質、船舶生活污水及船舶垃圾、空氣污染等。另外，IMO (2015) 亦規範了硫氧化物 (SO_x) 及顆粒物 (PM) 之排放準則，在排放管制區³內 (emission control area, ECA) 之排放標準在 2015 年 1 月 1 日後已降為 0.1%；區外之排放限制在 2012 年 1 月 1 日後至 2020 年 1 月 1 日前為 3.5%、2020 年 1 月 1 日後為 0.5%。對於氮氧化物 (NO_x)，IMO 之排放規範依柴油引擎 (diesel engine) 裝置年份，將引擎管制分為 3 期 (引擎轉速 $n < 130$ 時)，分別為第 1 期 (Tier I) 適用於 2000 年 1 月 1 日之後至 2011 年 1 月 1 日之前，排放的標準為 17g/Kwh (克／千瓦小時)、第 2 期 (Tier II) 適用於 2011 年 1 月 1 日之後，排放的標準降至 14.4g/Kwh、第 3 期 (Tier III) 適用於 2016 年 1 月 1 日之後，船舶航行至指定的 ECA 內標準將降至 3.4g/Kwh，非 ECA 內，則採第 2 期 (Tier II) 標準。另外，國際海事組織 (IMO) 亦針對減少二氧化碳排放量訂定了各種指標，包括「能源效率設計指數 (energy efficiency design index, EEDI)」和「船舶能效管理計畫 (ship energy efficiency management plan, SEEMP)」兩項船舶能效標準的強制性規定，其規定從 2015 年開始，所有 400 總噸或以上的新船必須降低碳排放量 10%；2020 至 2024 年間再減少 10%；2024 年後要達到減排 30% 的目標。

船舶污染之來源主要在於船用燃油，傳統商用船舶燃料分為兩大類，分別為殘油 (residual fuel oil) 與蒸餾油 (distillates)，前者通常被稱為重質燃油 (HFO)，是屬高黏度及含硫量最重的船用燃料；蒸餾油又可分為兩類：海運輕柴油 (MGO) 及海運重柴油 (MDO)。全世界商船燃油每年約消耗 3.3 億噸，其中有 80%~85% 燃油屬高硫含量，隨著海洋燃油含硫量限制日益嚴格，不管在排放管制區或非管制區，低硫燃油的需求將日益增加。挪威船級社 (DNV.GL⁴) 於 2014 年 1 月份所出版之「LNG as Ship Fuel」^[2] 文中指出，在 2020 年後，LNG 將可能成為第一個替代傳統重質燃料的船用燃料，而英國勞氏船級社在「2030 年全球海運燃料趨勢」^[3] 中亦指出，LNG 在 2030 年海運市場占有率將達 11%，其中又以小型船舶為主。由表 1「LNG 與傳統燃料的排放比較」^[4]，可發現使用 LNG 當作船用燃料可相對減少污染排放，因為 LNG 不含硫及殘留物，其應用於船舶上應可降低氮氧化物 90%、硫氧化物 100%、顆粒懸浮物和二氧化碳 25% 的排放量。

根據 DNV.GL 統計發現，截至 2015 年 10 月 16 日，排除 LNG 運輸船及內河船舶，全世界營運中 LNG 燃料船共有 73 艘，若以目前及未來手持訂單來看，截至 2015 年 10 月 16 日，正在建造中 LNG 燃料船新船共計 80 艘。由圖 1 LNG 燃料船之船舶類型觀之，營運中

3. 排放管制區 (ECA)：範圍是由國際海事組織 (IMO) 的各會員國所擬定並同意之。目前，排放管制區含波羅的海 (自 2006 年 5 月起實施)、北海到英吉利海峽南端的連續海域 (自 2007 年 11 月起實施)、北美 (自 2011 年 8 月起實施) 以及美國加勒比海 (自 2013 年 1 月起實施) 等地區，設定排放管制區的目的，是在人口稠密的地區減少有害物質的排放。

4. DNV 挪威船級社 (Det Norske Veritas) 與 GL 德國勞氏船級社 (Germanischer Lloyd) 於 2014 年 9 月合併建立了 DNV.GL 集團。

之船舶以渡輪為主，其次為平台船；目前及未來新訂單上，亦是以渡輪、平台船等類型為主，而未來訂單成長則以貨櫃船成長幅度最大，顯示出未來使用 LNG 作為船用燃料是以渡輪、平台船及貨櫃船為主。

表 1 LNG 與傳統燃料排放比較

燃料類型	SO _x (g/kwh)	NO _x (g/kwh)	PM (g/kwh)	CO ₂ (g/kwh)
HFO (含硫 3.5%)	13	9-12	1.5	580-630
MDO (含硫 0.5%)	2	8-11	0.25-0.5	580-630
MGO (含硫 0.1%)	0.4	8-11	0.15-0.25	580-630
LNG	0	2	~0	430-480

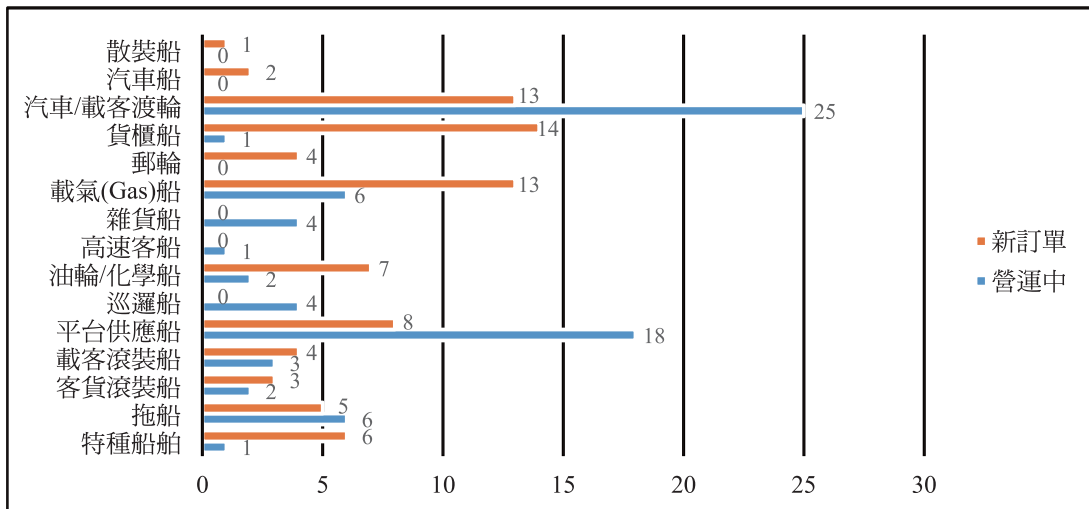


圖 1 LNG 燃料船之船舶類型

臺灣是以海運為導向的國家，政府航運政策應有所因應及發展，以符合國際航運新趨勢，未來不論是臺灣船舶靠泊於世界各港口，或各國船舶在臺灣港口停靠，排氣標準必然受國際相關公約之規範。為符合國際公約的規範，交通部陸續於 2010 年公告採用「防止船舶污染國際公約 (MARPOL)」附錄 III「防止海上載運包裝型式有害物質污染規則」、2012 年訂定採用附錄 I「防止油污染規則」第 20 條及第 21 條規定、於 2013 年公告採用附錄 V「防止船舶垃圾污染規則」^[5]，顯示臺灣已逐漸隨著國際腳步執行綠色航運。

臺灣自 2001 年開放兩岸小三通間接通航、2008 年兩岸簽訂「海峽兩岸海運協議」正式實施兩岸直航政策後，兩岸第一艘客貨滾裝船「中遠之星」於 2009 年首航廈門至臺中，繼而增加廈門至基隆、基隆至大麥嶼等航班，其他客船亦相繼投入，船舶均屬客貨兩用高

速船，致使兩岸旅客人次由 2009 年 84,948 人次，攀升至 2014 年 293,179 人次，兩岸直航貨櫃量部分，由 2009 年 1,566,860TEU，攀升至 2014 年 2,478,541TEU^[6]。綜觀以上，在兩岸航運發展之時，本研究希望以目前航行於兩岸及近海的客貨滾裝船為研究對象，探討以 LNG 替代傳統燃料所帶來對於環境之效益，希望藉由新的研究領域，增加近海航運的營運效益，並同時兼顧環境守護，讓航行於近海客滾渡輪更具環境及經濟效益。因此歸納本研究目的如下：

1. 藉由探討國際上使用 LNG 燃料船之觀點及經驗，以了解 LNG 成為替代船用燃料之趨勢，並作為我國綠色航運發展之參考。
2. 探討兩岸及近海客貨滾裝船，以 LNG 替代傳統燃料所帶來對於環境影響之差異，並期望研究成果能帶來亞洲地區，對於海運運輸船舶汙染排放之重視，並在具有環境效益之前提下，加速亞洲各國推動使用 LNG 燃料船，漸進取代傳統重柴油燃料船，以符合未來國際公約日趨嚴格之排放管制標準。
3. 提供未來 LNG 燃料用於臺灣近海航運可行性評估之參考。
4. 以船舶基本資料及載運條件推估船舶排放量，提供建立國內船舶排放或制訂排放規範之參考。

二、文獻回顧

文獻回顧部分首先回顧 LNG 燃料船效益之文獻，接著回顧以生命週期評估法探討各類船用燃料之效益，及船舶汙染排放推估相關文獻。LNG 燃料船效益之相關文獻中，Sadek 等人^[7]以高速客船 (high-speed passenger ship) 為研究對象，根據美國環境保護署 (US Environmental Protection Agency, EPA) 對於燃料排放之估計方式，探討船舶於巡航階段、機動階段及待機階段時，以柴油為燃料及以雙燃料 dual-fuel (即 95%的天然氣+5%的柴油) 之發動，對於環境及經濟效益之不同。研究結果顯示，在環境效益部分，以天然氣替代傳統之柴油，將使氮氧化物 (NO_x) 降低 72%、硫化物 (SO_x) 降低 91%、顆粒物 (PM) 降低 85%、二氧化碳 (CO₂) 降低 10%；另作者亦指出，若以天然氣當作船用燃料，以航行於短程航運之船舶效益最大。

Baumgart 與 Olsen^[8]以供應船、渡輪及散裝船為研究對象，分別探討於挪威近海航運中，將燃料由船用柴油 (MGO) 轉換為 LNG 時，考量成本效益下，如何兼具環境法規之限制。研究結果顯示，使用 LNG 作為燃料的船舶，在空氣品質及氣候變遷方面，提供了顯著的改善；在經濟上，當石油價格大約 60 美元／桶時，LNG 作為燃料可以與傳統的船用燃油 (MGO) 競爭。

Tzannatos 與 Nikitakos^[9]以希臘國內客船為研究對象，調查自 2001 年至 2010 年間，船舶燃料以天然氣替代傳統船用重油或輕油，對於空氣品質及氣候變遷的影響。研究結果顯示，將船用燃料改變至天然氣，對於希臘國內客船來說，減少近 10 倍的空氣汙染，而

廢氣排放所造成的外部成本也降低了 85%。

在各類船用燃料效益分析之文獻中，Bengtsson 等人^[10]指出，隨著全球環境保護議題逐漸升溫，傳統船用燃料顯然已不足以應付更加嚴格的排放標準，因此在成本與環境的考量下，船用的替代燃料也愈趨多元。因此作者研究了短程船用燃料中重質燃料 (heavy fuel oil, HFO)、船用柴油 (marine gas oil, MGO)、生物液體燃油 (biomass-to-liquid, BTL)、油麻菜籽甲基酯 (rapeseed methyl ester, RME)、液化天然氣 (liquefied natural gas, LNG)、液化沼氣 (liquefied biogas, LBG) 等替代燃料。根據生命週期評估法 (life cycle assess, LCA)，探討了各類燃料從原料之開採，至原料之生產、分配及運送過程中所帶來的環境影響，並評估每種燃料對於地區性環境影響、整體環境影響、基礎設施、燃料成本及消耗之結果。研究結果顯示，液化天然氣與其他燃料相較，將顯著降低對地區性環境之影響。Bengtsson 等人^[10]也利用 LCA 探討了液化天然氣、液化沼氣、甲醇及生物性甲醇等船用燃料之環境評估，研究結果顯示，使用液化天然氣及甲醇會顯著提高對整體環境之影響，但對於氣候變遷的影響幅度，與使用重質燃油相較是相同的。

在船舶排放的推估部分，蔡鎮遠^[11]為探討高雄港區商船排放二氧化硫之推估與管理策略，分別用我國全國性排放清冊 (Taiwan Emission Data System, TEDS) 估算法、美國長堤港估算方法、歐洲比利時估算方法，估算高雄港區 2006 年至 2010 年間商船所產生的二氧化硫排放量與高雄市排放總量之比較，並且分析 3 種推估方法的排放差異性。研究結果顯示，利用臺灣 TEDS 方式推估 2006 年至 2010 年商船二氧化硫排放，分別占高雄市二氧化硫總量的 9%、10.2%、10%、8.3%、8.3%；利用長堤港方式推估 2006 年至 2010 年商船二氧化硫排放，分別占高雄市二氧化硫總量的 4.9%、4.6%、3.7%、4%、4.4%；利用比利時港方式推估 2006 年至 2010 年商船二氧化硫排放，分別占高雄市二氧化硫總量的 3.9%、3.7%、3%、3.1%、3.4%。另作者亦指出 TEDS 主要參數為貨物吞吐量，因 2006 年至 2008 年的貨物吞吐量明顯高於 2009 年與 2010 年的貨物吞吐量，所以二氧化硫的推估值高出後兩年許多；而長堤港推估方式是蒐集船舶進港後的調度與停泊時間、船舶功率、負載因子等因素，推估船舶主引擎、輔助引擎與鍋爐的排放量；比利時的推估方式除不考量鍋爐的排放外，其他考量因素與長堤港估算方法相似。

許真瑜、陳桂清、葉雨松^[12]參考美國洛杉磯港年度船舶空氣污染排放量排放清冊建置方法，探討臺灣港埠遠洋船舶硫氧化物排放量推估，該研究針對行駛高雄港之遠洋船舶採取重油 (residual oil) 及柴油 (diesel oil) 部分分析油品中之硫含量，據以修訂遠洋船舶排放硫氧化物 (SO_x) 的排放係數，再推估高雄港每年遠洋船舶硫氧化物之排放量。研究結果顯示，以 20 艘船舶進行硫含量分析，得到的重油平均硫含量為 2.4%，最大值為 3.2%，最小值為 1.4%；硫氧化物排放量部分，高雄港進出船舶的 SO_x 排放量，在民國 98、99 兩年都達到 12,000 公噸以上，且靠泊時皆使用高硫含量的重油燃燒，因此船舶污染，將是未來各港口城市 SO_x 管制的一大課題。

隨著全球環保法規對於船舶的溫室氣體排放、含硫燃料之限制及硫氧化物排放的規範標準越來越嚴苛，尋找船用替代燃料成為新趨勢；由前述文獻回顧可知，國外已有許多 LNG

燃料船之相關研究，研究結果也證實以 LNG 替代傳統船用燃料，確實具有環境上之效益。臺灣目前雖未列為排放管制區 (ECA)，惟身為以海運為導向的國家，也已逐步邁入世界腳步，因此期望本研究能作為臺灣未來發展綠色航運之參考。

三、研究方法

國際上對於船舶排放的推估模型大都採用間接推估法 (即排放係數推估法)，其中美國長堤港估算方法、歐洲比利時估算方法及我國的全國性排放清冊 (Taiwan Emission Data System, TEDS) 估算法，多為參考美國環境保署 (EPA) 的推估模型。本研究嘗試以國內與國外不同的推估模型，估算 2014 年近海客滾輪以 LNG 作為船用燃料，與傳統船用燃料相較，對於臺灣近海航運在 NO_x 、 SO_x 及 CO_2 的排放比較效益分析。本文 3.1 為研究資料，3.2 為 CO_2 、 SO_x 與 NO_x 排放模型，3.3 為以 LNG 作為船用燃料的排放係數分析。

3.1 研究資料

本研究採用的推估方法，包括美國環境保護署及美國洛杉磯港的推估估算模型。推估前首先蒐集及彙整資料如圖 2。

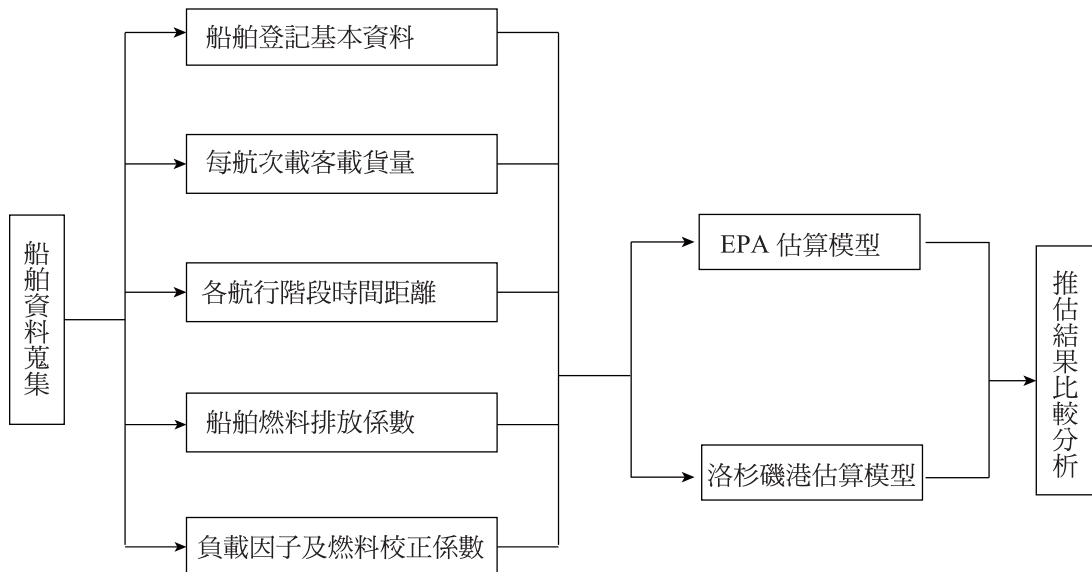


圖 2 船舶資料蒐集圖

3.2 CO₂、SO_x 與 NO_x 排放模型

根據行政院環境保護署 TEDS8.1 版指出，排放清冊一般是指國家、區域或公司／事業單位等所有活動產生的污染排放總量，涵蓋的污染源包括區域內的所有固定污染源及移動污染源。TEDS 指出，空氣汙染之排放推估可分為直接推估法、質量平衡法、工程計算法及間接推估法等 4 種^[13]，本文採用間接推估法，並經相關文獻探討，海運汙染排放之推估大多採用美國環境保護署及洛杉磯港之推估模型（如式 1、6）。臺灣 TEDS 之排放推估模型，即參照美國環境保護署之模型加以修改，故本文實際推估時僅就美國環境保護署與美國洛杉磯港兩種排放模型，探討 LNG 燃料船用於臺灣近海航運之環境效益比較分析。

3.2.1 美國環境保護署排放推估

美國環保署針對一般空氣污染物發展了一套相當龐大、完整的排放係數手冊，即美國環保署的空氣汙染排放係數手冊（Compilation of Air Pollutant Emission Factors，簡稱 AP-42）。因 AP-42 對於排放係數背景資料之記載較為詳細且涵蓋之污染源類別較多，故國內在應用上，無本土係數者主要係參考美國 AP-42 係數資料為優先。美國環保署排放推估模型為^[14]：

$$E = A \times EF \times \left(1 - \frac{ER}{100}\right) \quad (1)$$

其中，

E ：emissions 排放量；

A ：activity rate 活動率；

EF ：emission factor 排放因子；

ER ：overall emission reduction efficiency（減排效率）。

國內環境保護署的空氣污染物排放量推估手冊 TEDS8.1 版，其排放估算為參照美國 EPA 模型進行修正。TEDS 針對商船船舶燃燒之污染源排放，指出商船排放型式主要包括主引擎排放及柴油發電機排放。商船主引擎為商船用於航行推進之用，其在進港裝卸貨期間會關閉，使用燃料為燃料油（重油）；柴油發電機組則供應船上除航行以外的其他動力，在航行及裝卸貨期間均有操作，以柴油燃燒為主，故推估排放量時將區分為此兩類分別進行推估。式 (2) 為船舶燃燒重油排放模型，式 (3) 為船舶燃燒柴油發電機排放模型^[13]。

$$\text{排放量} = \text{活動強度（油耗量）} \times \text{排放係數} \times \text{控制因子} \quad (2)$$

$$\text{排放量} = \text{活動強度（發電機發電量）} \times \text{排放係數} \times \text{控制因子} \quad (3)$$

本模型僅就 SO_x 及 NO_x 排放量進行推估。活動強度依船舶燃燒重油或船舶燃燒柴油發電機不同，分為耗油量或發電機發電量，模型分別為：

$$\text{油耗量 (KL)} = \text{船舶吞吐量 (公噸)} \times \text{能源密集度} \left(\frac{\text{公升}}{\text{延噸公里}} \right) \times \text{航行距離 (公里)} \times \frac{1\text{KL}}{1000} \quad (4)$$

$$\text{發電機發電量} = \text{進港艘數} \times \sum (\text{發電機負載 (kw)} \times \text{停留時間 (hr)}) \quad (5)$$

3.2.2 美國洛杉磯港的推估模型

美國洛杉磯港排放推估之方法為^[15]：

$$E = \text{Energy} \times EF \times FCF \quad (6)$$

其中，

E ：船舶引擎的排放（單位為公克，統計時轉換為公噸）；

Energy ：消耗的能量（單位：kwh）；

EF (emission factor)：排放係數（單位：g/kwh）；

FCF (fuel correction factor)：燃料校正係數。

能量需求推估模型為：

$$\text{Energy} = \text{MCR} \times \text{LF} \times \text{Act} \quad (7)$$

其中，

MCR (maximum continuous rate)：船舶引擎最大輸出功率(單位：kw)；

LF (load factor)：負載係數（無單位）；

Act ：活動時間，即船舶航行小時數（單位：小時）。

排放係數 EF 之推估，依據船舶進出港口，可分為 3 種航行狀態，亦即港外航行 (cruise)、港內調度 (maneuvering) 以及停泊 (standby)。港外航行一般僅以主引擎為推進動力；港內調度時是指船舶進入港內至停靠碼頭這段時間之運作，加上船舶離開碼頭至出港這段時間，此階段主引擎的負載極低，此時輔助引擎會開啟；停泊時僅靠輔助引擎及鍋爐持續運轉，輔助鍋爐的作用為提供熱源，以加熱管線中的油品，當船舶停靠碼頭時，主引擎關閉，提供發電的輔助引擎不足加熱，故需鍋爐提供熱源^[16]。主引擎與輔助引擎所採用的排放係數，是依據船舶進港速度與引擎的製造年份、引擎轉速快慢而不同，若船舶實際採用的燃料不同時，則須以燃料校正係數加以校正。

引擎負載因子與船舶的航速有密切關係，推估模型如下：

$$\text{LF} = \left(\frac{\text{AS}}{\text{MS}} \right) \quad (8)$$

其中， AS 為實際船速 (節)； MS 為最大船速 (節)，此為主引擎之負載。

當負載小於 20%時 (例如船舶在港區內移動或調度時)，為改善引擎在低負載時的效率，另需採用 EPA 所發展的低負載校正公式，適用於引擎負載介於 1% ~ 20%之間的排放推估，其校正計算方法為：

$$y = a(LF)^{-x} + b \quad (9)$$

其中， y 為排放值 (g/kW-hr)； a 為參數； b 為截距； x 為指數，低負載引擎排放迴歸校正係數如表 2。將表 2 的值帶入 (9) 式，再以 y 值作為修正後的排放係數。為方便推估時使用，可將此公式推估出 1% ~ 20%的值，再除以 20%的值，以作為低負載的調校係數 (low-load adjustment factor, LLA)，實際計算時只要將結果再乘以調校係數，即可得到正確推估值；低負載調正係數表如表 3^[14]。

表 2 低負載引擎排放迴歸校正係數

	PM	NO _x	CO	VOC
指數 (X)	1.5	1.5	1.0	1.5
截距 (b)	0.25	10.45	0.15	0.3
參數 (a)	0.0059	0.1255	0.8378	0.0667

表 3 低負載調整係數表

污染源	PM	NO _x	SO _x	CO	HC	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
1%	19.17	11.47	1.00	19.32	59.28	1.00	59.28	11.47
2%	7.29	4.63	1.00	9.68	21.67	1.00	21.67	4.63
3%	4.33	2.92	1.00	6.46	11.95	1.00	11.95	2.92
4%	3.09	2.21	1.00	4.86	7.87	1.00	7.87	2.21
5%	2.44	1.83	1.00	3.89	5.73	1.00	5.73	1.83
6%	2.04	1.6	1.00	3.25	4.49	1.00	4.43	1.6
7%	1.79	1.45	1.00	2.79	3.59	1.00	3.59	1.45
8%	1.61	1.35	1.00	2.45	2.99	1.00	2.99	1.35
9%	1.48	1.27	1.00	2.18	2.56	1.00	2.56	1.27
10%	1.38	1.22	1.00	1.96	2.23	1.00	2.23	1.22
11%	1.3	1.17	1.00	1.79	1.98	1.00	1.98	1.17
12%	1.24	1.14	1.00	1.64	1.78	1.00	1.78	1.14
13%	1.19	1.11	1.00	1.52	1.61	1.00	1.61	1.11
14%	1.15	1.08	1.00	1.41	1.48	1.00	1.48	1.08
15%	1.11	1.06	1.00	1.32	1.36	1.00	1.36	1.06
16%	1.08	1.05	1.00	1.24	1.27	1.00	1.27	1.05
17%	1.06	1.03	1.00	1.17	1.19	1.00	1.19	1.03
18%	1.04	1.02	1.00	1.11	1.12	1.00	1.12	1.02
19%	1.02	1.01	1.00	1.05	1.05	1.00	1.05	1.01
20%	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

另輔助鍋爐因船舶停靠於港區時開啟，鍋爐資料由船舶登記資料中無法得知，因此鍋爐的能量消耗值，係參考文獻中依不同船舶種類所假設之預設值^[17]，如表 4。

表 4 輔助鍋爐能量值

船舶類型	輔助鍋爐能量預設值(kw)	船舶類型	輔助鍋爐能量預設值(kw)
汽車船 (auto carrier)	371	拖船 (ITB)	0
散裝船 (bulk)	109	冷藏船 (reefer)	464
貨櫃船 (containership)	506	駛上駛下船(oro)	109
客船(cruise)	1000	油船 (tanker)	3000
一般貨船 (general cargo)	106	其他 (others)	371

燃料校正係數依據引擎所使用的燃料不同，各汙染排放量也會隨之不同，當使用低硫燃油時，需乘以燃料校正係數^[17]，如表 5。

表 5 燃料校正係數表

	NO _x	VOC	CO	SO ₂	PM10	PM2.5	DPM	CO ₂	N ₂ O	CH ₄
HFO(1.5%S)	1	1	1	0.56	0.82	0.82	0.82	1	1	1
MGO(0.5%S)	0.9	1	1	0.18	0.39	0.39	0.39	1	0.	1
MDO(1.5%S)	0.9	1	1	0.56	0.47	0.47	0.47	1	0.9	1
MGO(0.1%S)	0.9	1	1	0.04	0.35	0.35	0.35	1	0.9	1

活動時間之推估模型為：

$$Act = D \div AS \quad (10)$$

其中，

D ：distance 距離 (單位 miles)

AS ：actual ship speed 實際船速 (單位 knots)

3.3 以 LNG 作為船用燃料的排放係數分析

現行 LNG 燃料船基於實際運作及技術層面之考量，多以雙燃料⁵ (dual fuel engine) 為主，故本研究以雙燃料 (LNG 與柴油) 進行推估。前述 3.2 小節排放推估模型係以重油為船舶燃料予以分析，將重油轉換為 LNG 後，原模型中相關之變數及係數因燃料不同而隨之不同，差別在於排放係數、能源密度與燃料校正係數，說明如下：

(一) 排放係數

以 LNG 與柴油為船舶燃料之係數將參考 Banawan 等人^[7] 所採用的排放係數，假設船舶燃料為 95% LNG+5%柴油，故排放係數之推估之模型為：

$$\text{排放係數} = (0.05 \times \text{柴油排放係數}) + (0.95 \times \text{LNG 排放係數}) \quad (11)$$

為能實際比較轉換前後之差異，若船舶燃料只含有 5%的柴油，係數如表 6。

表 6 船舶燃料 5%柴油排放係數

單位:g/kwh

	NO _x	SO _x	PM	CO ₂	HC
港外航行	2.59	0.2	0.015	533	—
港內調度	12.7	4.5	0.9	710	0.6
港內停泊	12.7	4.5	0.9	710	0.6

(二) 活動強度

活動強度依船舶燃燒 LNG 或船舶燃燒柴油發電機不同，分為耗油量或發電機發電量，推估方式與 3.2.1 中活動強度模型相同，惟控制效率部分，經參考 Banawan 等人^[7] 根據美國環境保護署 (EPA) 對於船舶燃料的排放模型所推估之結果，以 LNG 替代傳統船用燃料，能降低 91%的 SO_x 排放及 72%的 NO_x 排放，顯示 LNG 能有效控制汙染之排放，故 SO_x 與 NO_x 控制效率將分別帶入 90%與 70%。

(三) 燃料校正係數

LNG 雖不含硫氧化物，惟本研究中採用雙燃料分析，仍有部分柴油燃料的使用，故燃料校正係數部分採用表 5 中 MGO (0.1%S) 之校正係數。

5. 雙燃料引擎 (dual fuel engine) 定義：以液體或氣體為燃料的往復式內燃機 (中華民國驗船協會)。

四、實例分析

為探討兩岸及近海客貨滾裝船以 LNG 替代傳統燃料所帶來對於環境之影響，本研究蒐集了 5 艘船舶 2014 年資料進行實例分析，並根據圖 2 船舶排放推估架構進行推估。本章 4.1 節先描述船舶資料蒐集；4.2 節實證 SO_x 排放量推估；4.3 節實證 NO_x 的排放量推估；4.4 節實證 CO_2 的排量推估；4.5 節進行 SO_x 與 NO_x 情境分析；最後為本章之小結。

4.1 船舶資料蒐集

本研究利用美國環境保護署 (EPA) 及洛杉磯港的船舶排放推估方法，估算 2014 年航行於兩岸及臺灣近海客貨滾裝船，於燃料轉換時所產生的二氧化硫、氮氧化物及二氧化碳排放之比較分析。本研究蒐集了 5 艘目前正在營運中之船舶資料，為使研究更具參考價值，將 5 艘船舶依高速船/非高速船、兩岸航線/近海航線等二大類進行比較分析，期望研究結果可作為我國未來推動綠色航運政策，及提供航商業者經營之參考。5 艘船舶之相關基本資料簡述如下：

1. 船舶 A：為香港籍之客滾船，建造於西元 1993 年，全長 186 公尺，寬 25.5 公尺，總噸位 26,847 噸，航速 22.85 節，船艙共 8 層，可容納 683 名旅客，裝載 256 只標準貨櫃，可停放 150 輛車，為目前海峽兩岸直航最大且最豪華之定期客貨滾裝輪。2008 年兩岸直航開放後，本船舶為第一艘航行於兩岸之定期客貨船航線，以夕發朝至，吸引兩岸民眾搭乘。
2. 船舶 B：為中國籍船舶，屬全鋁合金雙體穿浪型高速客滾船，由澳大利亞製造，船長 97.22 公尺，寬 26.6 公尺，船舶總噸位 6,556 噸，時速高達 43 節，可容納 760 名旅客、小汽車 260 輛。大陸為推動海峽西岸經濟區發展，於平潭設置平潭綜合實驗區，具有距臺灣本島最近之地理優勢，吸引臺商於平潭投資，本船舶乃在於配合本項大陸政策而開通航行，為兩岸定期客貨船航線。
3. 船舶 C：為國輪，船籍港為基隆港，為雙體穿浪型鋁合金高速客貨輪，全長 112.6 公尺，寬 30.5 公尺，總噸位 10,712 噸，航速 38 節，船艙共 4 層，可容納 800 名旅客，停放 355 輛小汽車，因特殊雙體設計，不受地形以及氣候因素限制，平均可承受 7 級到 12 級風、4 米到 7 米高的海浪，是相當安全的海上運輸與交通工具。
4. 船舶 D：為國輪，船籍港為基隆港，製造於日本白杵船廠，於 1985 年興建完成，屬於航行於內海的駛上駛下型渡輪，全長 102.7 公尺，寬 16 公尺，總噸位 5,039 噸，航速 20 節，可容納 500 名旅客及 20 個貨櫃。政府為照顧離島民眾，往返臺灣本島及離島交通需要，交通部每年編列預算，補貼該船舶營運，為離島定期客貨船航線。
5. 船舶 E：為國輪，船籍港為高雄港，於 1990 年日本長崎建造竣工，耗資新臺幣 7 億 2,000 餘萬元。船長 120 公尺，船寬 19.30 公尺，總噸位 8,134 噸，航速 22 浬，載客量 1,150

人，載車能量小客車約 100 部。本船舶如同 D 船，屬政府照顧離島民眾，交通部每年編列預算補貼經營，以維持臺灣本島與離島之交通需要，為離島定期客貨船航線。

美國環境保護署 (EPA) 之推估模型，是以船舶的活動強度 (即載貨載客量) 及發電機發電量為基礎；洛杉磯港推估模型是以船舶引擎的活動時間為基礎，兩模型所需的參數彙整如圖 3 及圖 4。本研究將所需要之參數資料分為船舶登記資料、文獻參考資料及調查資料等資料類型。

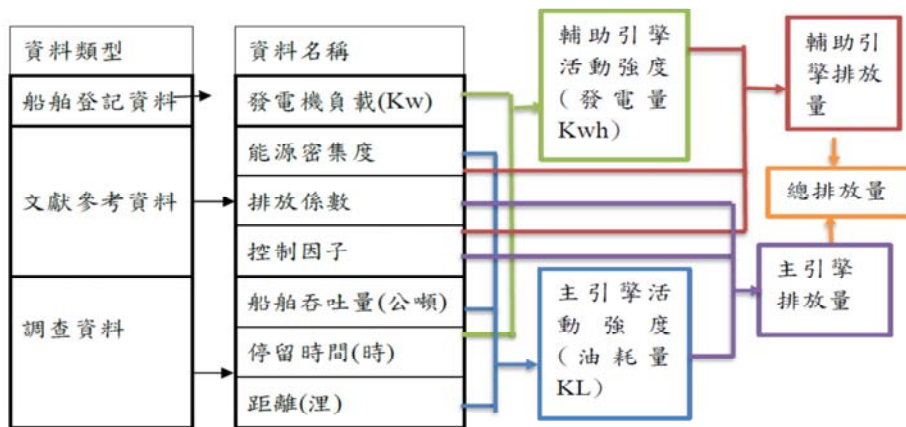


圖 3 美國環境保護署排放量推估資料圖

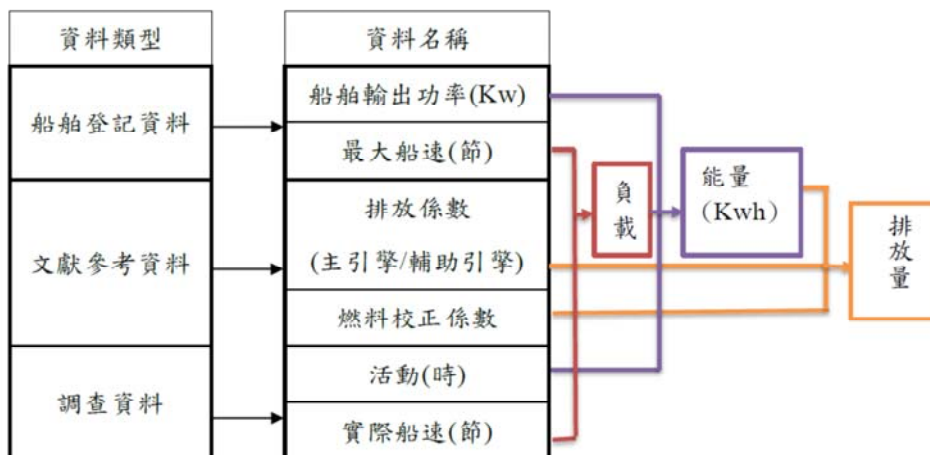


圖 4 洛杉磯港排放推估資料圖

實例分析將以臺灣地區航行臺中－廈門航線、高雄－馬公航線及基隆－馬祖航線等 3 艘傳統客貨滾裝船；臺中－平潭航線及蘇澳－花蓮航線等兩艘高速客滾船進行實證分析，期能以降低環境污染為目標，導出臺灣地區最適 LNG 替代船舶，讓政府及亞洲地區航商業者參考，以加速 LNG 船舶之商業營運。

研究所需要資料，係取自於港口經營機構現場作業單位之統計量及相關航商業者，其中各航行狀態時間及距離之資料，依船舶的航行狀態分為 3 種，即：港外航行 (cruise)、港內調度 (maneuvering) 及停泊 (standby)。各航行階段依船舶動態系統資料加以定義，如圖 5。因不同航行狀態使用的燃料及推進引擎也不同，故排放量的推估係依船舶航行狀態的不同進行估算。由第三章船舶推估模型可知，進行推估時須先取得港外航行及港內調度航行的速度及距離，與船舶於碼頭的停泊時間等資料，相關資料來自於港口經營事業機構。

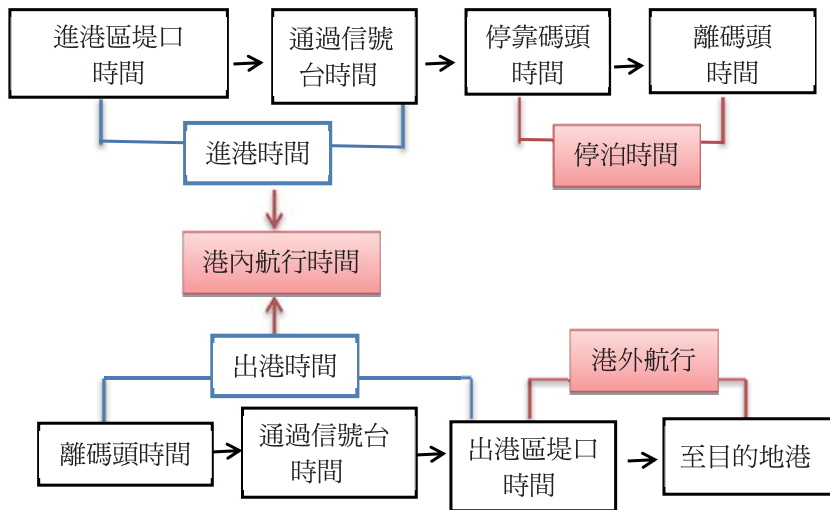


圖 5 船舶各航行階段示意圖

4.2 實證 SO_x 排放量推估

EPA 模型 SO_x 排放量推估結果如表 7，將排放量依主引擎及輔助引擎的活動強度分別試算。表 7 所列係為主引擎與輔助引擎分別使用重油與柴油及分別使用 LNG 與柴油之下，5 艘船舶之硫排放量；以 LNG 替代部分傳統燃料後，SO_x 排放量有明顯減少之現象。以 A 船舶為例，使用 LNG 後，硫排放減少 97.10%，每延噸海裡排放量減少 96.84%，其主要原因因為 LNG 被公認是地球上最乾淨的能源^[18]。

整體而言，若目前之主引擎燃油可轉換為 LNG，硫之排放相較前後之差異，至少可有 90% 以上之效益。

洛杉磯港模型 SO_x 排放量推估結果如表 8。由表 8 可發現，以此模型推估研究中的 5 艘船舶，若以 A 船舶為例，以 LNG 替代傳統燃料所將使 SO_x 排放量有明顯降低之效益，

平均減少 99.90%。若以每延噸海裡排放量觀之，5 艘使用傳統燃料的每延噸海裡排放量，平均為 0.1062g，轉換為 LNG 燃料後，每延噸海裡排放量平均為 0.0001g，排放量減少幅度亦為 99.90%，減量效益明顯。

表 7 EPA 模型的 SO_x 排放推估結果

重油+柴油					
船舶	燃料	主引擎 排放量 (公噸/年)	輔助引擎 排放量 (公噸/年)	總排放量 (噸/年)	延噸海裡排放量 (g/延噸海裡)
A	主引擎：重油 輔助引擎：重柴油	11.5184	4.6943	16.2127	0.0095
B	主引擎：重油 輔助引擎：輕柴油	1.6709	1.0841	2.7550	0.0056
C	主引擎：重油 輔助引擎：輕柴油	0.1319	1.9837	2.1156	0.0301
D	主引擎：重油 輔助引擎：重柴油	0.1347	7.9192	8.0539	0.0903
E	主引擎：重油 輔助引擎：重柴油	1.0612	6.7203	7.7815	0.0150
LNG+柴油					
船舶	燃料	主引擎 排放量(公噸)	輔助排放量(公噸)	總排放(噸)	延噸海裡排放量 (g/延噸海裡)
A	主引擎：LNG 輔助引擎：重柴油	0.0002	0.4694	0.4696	0.0003
B	主引擎：LNG 輔助引擎：輕柴油	0.0000	0.1084	0.1084	0.0002
C	主引擎：LNG 輔助引擎：輕柴油	0.0000	0.1984	0.1984	0.0028
D	主引擎：LNG 輔助引擎：輕柴油	0.0000	0.7919	0.7919	0.0089
E	主引擎：LNG 輔助引擎：重柴油	0.0000	0.6720	0.6720	0.0013
總排放量的差異百分比(%)					
A	-97.10%(兩岸航線)				
B	-96.06%(兩岸航線)				
C	-90.62%(國內藍色公路)				
D	-90.17%(國內外海航線)				
E	-91.36%(國內外海航線)				

總結以上 EPA 模型與洛杉磯港模型 SO_x 排放量，使用 EPA 模型，轉換前後 5 艘船舶的總排放量分別為 16.2127 噸／年與 0.4696 噸／年、2.7550 噸／年與 0.1084 噸／年、2.1156 噸／年與 0.1984 噸／年、8.0539 噸／年與 0.7919 噸／年、7.7815 噸／年與 0.6720 噸／年；洛杉磯港模型所得的總排放量分別為 52.4564 噸／年與 0.0522 噸／年、31.6416 噸／年與 0.0244 噸／年、21.2692 噸／年與 0.0179 噸／年、8.6357 噸／年與 0.0256 噸／年、9.5614 噸／年與 0.0181 噸／年。排放總量之差異在於兩模型推估基礎不同，EPA 是以貨物吞吐量為基礎，而洛杉磯港模型是利用船舶功率、活動型態所需時間及引擎係數推估為基礎，惟以兩模型推估 5 艘船舶，以 LNG 替代傳統燃料，對於 SO_x 的排放均明顯降低。

表 8 洛杉磯港模型 SO_x 排放推估結果

重油+柴油						
船舶	港外航行排放量 (噸／年)	港內調度排放量 (噸／年)	港內停泊排放量 (噸／年)	港內停泊鍋爐排放量 (噸／年)	總排放量 (噸／年)	延噸海裡排放量 (g／延噸海裡)
A	52.2585	0.0864	0.0996	0.0118	52.4564	0.0307
B	31.5199	0.1113	0.0092	0.0013	31.6416	0.0639
C	21.2462	0.0044	0.0168	0.0017	21.2692	0.3028
D	8.4413	0.0396	0.1394	0.0154	8.6357	0.0968
E	9.4191	0.0159	0.1183	0.0082	9.5614	0.0184
LNG+柴油						
船舶	港外航行排放量 (噸／年)	港內調度排放量 (噸／年)	港內停泊排放量 (噸／年)	港內停泊鍋爐排放量 (噸／年)	總排放量 (噸／年)	延噸海裡排放量 (g／延噸海裡)
A	0.0364	0.0014	0.0026	0.0118	0.0522	0.0000
B	0.0219	0.0017	0.0007	0.0013	0.0244	0.0000
C	0.0148	0.0001	0.0014	0.0017	0.0179	0.0003
D	0.0059	0.0006	0.0036	0.0154	0.0256	0.0003
E	0.0066	0.0002	0.0031	0.0082	0.0181	0.0000
總排放量的差異百分比(%)						
A	-99.90%					
B	-99.92%					
C	-99.92%					
D	-99.70%					
E	-99.81%					

4.3 實證 NO_x 的排放量推估

EPA 模型 NO_x 排放量推估結果，如表 9。EPA 模型中 NO_x 推估方式與 SO_x 推估方式相同，差異在於排放係數之不同，主引擎與輔助引擎分別使用重油與柴油及分別使用 LNG 與柴油，5 艘船舶之氮排放，以 LNG 替代部分傳統燃料後，排放量有明顯減少之現象。以 A 船舶為例，使用 LNG 燃料後，氮排放每延噸海裡減少 70.90%；若使用傳統用油為 0.0040 公克，改由 LNG 後，為 0.0012 公克／每延噸海裡，每延噸海裡排放減少 70%。

一般來說，輔助柴油引擎的運轉會產生大量的 NO_x 排放，為了管制 NO_x 的排放量，IMO 於 2008 年 10 月修正 MARPOL 公約附則 VI，規定船舶柴油機的 NO_x 排放標準。由表 9 中發現，輔助引擎的排放量大於主引擎排放量，主因為輔助引擎柴油的氮排放係數大於重油的氮排放係數。

表 9 EPA 模型的 NO_x 排放推估結果

重油+柴油				
船舶	主排放量(公噸)	輔助排放量(公噸)	總排放(公噸)	延噸海裡排放量 (g／延噸海裡)
A	0.5149	6.3455	6.8604	0.0040
B	0.0747	2.1981	2.2728	0.0046
C	0.0059	4.0221	4.0280	0.0573
D	0.0060	10.7046	10.7107	0.1201
E	0.0474	9.0840	9.1314	0.0176
LNG+柴油				
船舶	主排放量(公噸)	輔助排放量(公噸)	總排放(公噸)	延噸海裡排放量 (g／延噸海裡)
A	0.0929	1.9036	1.9966	0.0012
B	0.0135	0.6594	0.6729	0.0014
C	0.0011	1.2066	1.2077	0.0172
D	0.0011	3.2114	3.2125	0.0360
E	0.0086	2.7252	2.7338	0.0053
總排放量的差異百分比 (%)				
A	-70.90%			
B	-70.39%			
C	-70.02%			
D	-70.01%			
E	-70.06%			

洛杉磯港模型的 NO_x 排放推估結果，如表 10。排放推估模型如同 SO_x，分別依照船舶航行階段，並考量引擎製造年份及轉速估算排放量。

由表 10 可發現，以此模型推估研究的 5 艘船舶，若以 A 船舶為例，以 LNG 替代傳統燃料所帶來 NO_x 排放量減少 79.33%，有明顯降低之效益。若以各延噸海涅分析之，使用傳統燃料平均延噸海涅排放量為 0.1296g，以 LNG 替代後，平均延噸海涅排放量為 0.0218g，排放量減少幅度亦為 83.17%，減量效益明顯。

以各航行階段分析之，港外航行階段受到船舶負載之影響，當引擎在接近全負荷狀態下運作，引擎所消耗的能量較大，汙染也相對較大。

總結以上，分別採 EPA 模型與洛杉磯港模型估算 NO_x 排放量；使用 EPA 模型，轉換前後 5 艘船舶的總排放量分別為 6.8064 噸／年與 1.9966 噸／年、2.2728 噸／年與 0.6729 噸／年、4.0280 噸／年與 1.2077 噸／年、10.7107 噸／年與 3.2125 噸／年、9.1314 噸／年

表 10 洛杉磯港模型 NO_x 排放推估結果

重油+柴油						
船舶	港外航行排放量 (噸／年)	港內調度 排放量 (噸／年)	港內停泊 排放量 (噸／年)	港內停泊 鍋爐排放量 (噸／年)	總排放量 (噸／年)	延噸海涅排放量 (g／延噸海涅)
A	52.2585	0.0864	0.1914	0.0190	52.5553	0.0308
B	31.5199	0.1113	0.0486	0.0063	31.6861	0.0640
C	23.4716	0.0049	0.0890	0.0085	23.5739	0.3356
D	15.7519	0.0739	0.2677	0.0248	16.1184	0.1807
E	18.8768	0.0318	0.2272	0.0131	19.1489	0.0368
LNG+柴油						
A	10.5926	0.0859	0.1653	0.0190	10.8628	0.0064
B	6.3889	0.1106	0.0475	0.0063	6.5471	0.0132
C	4.3065	0.0044	0.0869	0.0085	4.4064	0.0627
D	1.7110	0.0394	0.2313	0.0248	2.0065	0.0225
E	1.9092	0.0158	0.1963	0.0131	2.1344	0.0041
總排放量的差異百分比(%)						
A	-79.33%					
B	-79.32%					
C	-81.31%					
D	-87.55%					
E	-88.85%					

與 2.7338 噸／年；洛杉磯港模型得出的總排放量分別為 52.5553 噸／年與 10.8628 噸／年、31.6861 噸／年與 6.5471 噸／年、23.5739 噸／年與 4.4064 噸／年、16.1184 噸／年與 2.0065 噸／年、19.1489 噸／年與 2.1344 噸／年。排放總量之差異，在於兩模型推估基礎不同，EPA 是以貨物吞吐量為基礎，而洛杉磯港模型是利用船舶功率、活動型態所需時間及引擎係數推估為基礎，惟以兩模型推估 5 艘船舶以 LNG 替代傳統燃料，對於 NO_x 的排放均明顯降低。

4.4 實證 CO₂ 的排量推估

由於 EPA 模型所列排放係數尚無 CO₂ 排放係數，故本研究僅就洛杉磯港模型進行 CO₂ 排放推估。推估結果如表 11。由表 11 可發現，若以 A 船舶為例，使用傳統燃料之排放量為 3,119.96 噸／年，以 LNG 替代傳統燃料，排放量降低為 2,438.92 噸／年，排放量降低

表 11 洛杉磯港模型 CO₂ 排放推估結果

重油+柴油						
船舶	港外航行排放量 (噸／年)	港內調度 排放量 (噸／年)	港內停泊 排放量 (噸／年)	港內停泊 鍋爐排放量 (噸／年)	總排放量 (噸／年)	延噸海涅排 放量 (g／延 噸海涅)
A	3,103.70	5.13	9.88	1.24	3,119.95	1.83
B	1,699.33	6.00	2.84	0.41	1,708.59	3.45
C	1,145.45	0.24	5.19	0.55	1,151.44	16.39
D	501.4	2.35	13.82	1.62	519.13	5.82
E	559.41	0.94	11.73	0.86	572.94	1.10
LNG+柴油						
A	2,422.07	5.34	10.27	1.24	2,438.92	1.43
B	1,460.88	6.87	2.95	0.41	1,470.70	2.97
C	984.72	0.27	5.40	0.56	990.95	14.11
D	391.23	2.45	14.37	1.62	409.67	4.59
E	436.55	0.98	12.19	0.87	450.58	0.87
總排放量的差異百分比(%)						
A	-21.83%					
B	-13.92%					
C	-13.94%					
D	-21.09%					
E	-21.36%					

21.83%。以延噸海裡排放量觀之，使用傳統重油的每延噸海裡 CO₂ 排放量平均為 5.7180g，使用 LNG 的平均排放量為 4.7927g，降低幅度為 16.18%。與前述同模型中 SO_x 與 NO_x 的排放效益相較，總排放量之差異較少，惟對於降低 CO₂ 仍具效益，降低幅度與國外文獻研究結果一致。

洛杉磯港模型所推估的 CO₂ 排放量，比同模型中的 SO_x 及 NO_x 排放量高出許多，主因為單位 CO₂ 的排放係數，比起其他兩種污染源的排放係數高出許多，惟以 LNG 替代傳統燃料所造成的排放量差異來看，CO₂ 所減少的百分比低於 SO_x 及 NO_x 所減少的百分比，顯示出使用 LNG 燃料仍會排放部分 CO₂。

4.5 情境分析

EPA 的排放量推估主要是以船舶的活動強度（即船舶載運量）為主要變數，前述分析主要是依據船舶的實際資料進行排放量推估，惟為探討船舶載運率與排放量間之關係，本研究另將 5 艘船舶區分為同為兩岸航線但航程不同（船舶 A、B）、同為國內近海航線但船型不同（船舶 C、D）、同為高速船但航程不同（船舶 B、C）、同為傳統船但航程不同（船舶 A、E）等 4 類，假設船舶在同時且不同載運率（情境設為 10%至 100%之載運率）的情況下，所得的延噸海裡排放量差異。

研究結果得出，以硫排放而言，若以兩岸航線、國內外海航線（或藍色公路）航線來區分，哪個航線哪種類型應先替換燃油，假設在其他條件不變情況下，根據各載運率延噸海裡 SO_x 排放量差異，本研究建議如下：(1) 若同為傳統船，以兩岸航線應優先推動 LNG 較具效益；(2) 若同為高速船，以兩岸航線應優先推動 LNG 較具效益；(3) 若同為兩岸航線，以傳統船應優先推動 LNG 較具效益；(4) 若同為國內外海航線，以傳統船應優先推動 LNG 較具效益。

綜上說明，以航線類型區分，應以兩岸航線優先推動 LNG 較具效益；若以船舶類型區分，應以傳統船優先推動 LNG 較具效益。

以硫排放而言，若以兩岸航線、國內外海航線(或藍色公路)航線來區分，哪個航線哪種類型應先替換燃油，假設在其他條件不變情況下，根據各載運率延噸海裡 NO_x 排放量差異，本研究建議如下：(1) 同為傳統船，以兩岸航線應優先推動 LNG 較具效益；(2) 同為高速船，則兩岸航線或國內外海及藍色公路航線排放量無明顯差異；(3) 同為兩岸航線，當載運率大於 50%時，以傳統船應優先推動 LNG 較具效益；(4) 同為國內外海或藍色公路航線，則不論高速船或傳統船排放量無明顯差異。

綜上說明，若需減少延噸海裡的 NO_x 排放量，應以兩岸航線的傳統船優先推動 LNG 較具效益。

五、結論與建議

本研究以行於兩岸及國內外海或藍色公路航線之 5 艘客貨滾裝船進行研究，並以實際船舶載運資料推導出 EPA 模型的 SO_x 、 NO_x 排放量及洛杉磯港模型的 SO_x 、 NO_x 、 CO_2 排放量，接著以載運率情境分析每延噸海裡硫與氮之排放，有別於國內以往文獻，僅就港口進出港船舶總排放量進行略估。研究中之 5 艘船舶資料皆來自業界，為目前實際運行之船舶。本研究除以目前實際用油探討 SO_x 、 NO_x 、 CO_2 的排放量，更探討以 LNG 燃料替代傳統燃料所造成的排放量，並進一步探討燃料轉換對於環境效益之影響。本研究所得結論整理並分述如下：

1. 以 SO_x 分析之，在 EPA 模型中，分別以主引擎及輔助引擎的活動強度為基礎進行推估，使用傳統燃料與以 LNG 替代傳統燃料，A、B、C、D、E 等 5 艘船舶之 SO_x 的總排放量，分別為 16.2127 噸／年與 0.4696 噸／年、2.7550 噸／年與 0.1084 噸／年、2.1156 噸／年與 0.1984 噸／年、8.0539 噸／年與 0.7919 噸／年，以及 7.7815 噸／年與 0.6720 噸／年，以 LNG 替代傳統燃料後，總排放量平均減少 93.06%。在洛杉磯港模型中，以船舶各航行階段、引擎年份等分別推估排放量，使用傳統燃料與以 LNG 替代傳統燃料，A、B、C、D、E 等 5 艘船舶之 SO_x 總排放量，分別為 52.4564 噸／年與 0.0522 噸／年、31.6416 噸／年與 0.0244 噸／年、21.2692 噸／年與 0.0179 噸／年、8.6357 噸／年與 0.0256 噸／年，及 9.5614 噸／年與 0.0181 噸／年，總排放量平均減少 99.85%。由 EPA 模型及洛杉磯港模型所推估的 SO_x 排放量可知，以 LNG 替代傳統燃料後，對於降低環境污染具有明顯效益。另 EPA 的排放量推估主要是以船舶的活動強度（即船舶載運量）為主要變數，總排放量主要是依據船舶的實際資料進行推估，本研究另將 5 艘船舶區分為傳統船與高速船（船舶 A、B）、同為高速船但航程不同（船舶 B、C）、同為傳統船但航程不同（船舶 B、E）等 3 類，假設船舶在不同載運率的情況下，所得的延噸海裡排放量差異。研究結果發現，以船舶類型區分，應以兩岸航線優先推動 LNG 較具效益；以航程區分，應以傳統船優先推動 LNG 較具效益。
2. 以 NO_x 分析之，在 EPA 模型中，使用傳統燃料與以 LNG 替代傳統燃料，A、B、C、D、E 等 5 艘船舶之 NO_x 的總排放量，分別為 6.8604 噸／年與 1.9966 噸／年、2.2728 噸／年與 0.6729 噸／年、4.0280 噸／年與 1.2077 噸／年、10.7107 噸／年與 3.2125 噸／年，及 9.1314 噸／年與 2.7338 噸／年，以 LNG 替代傳統燃料後，總排放量平均減少 70.28%。在洛杉磯港模型中，使用傳統燃料與以 LNG 替代傳統燃料，A、B、C、D、E 等 5 艘船舶之 NO_x 的總排放量，分別為 52.5553 噸／年與 10.8628 噸／年、31.6861 噸／年與 6.5471 噸／年、23.5739 噸／年與 4.4064 噸／年、16.1148 噸／年與 2.0065 噸／年，及 19.1489 噸／年與 2.1344 噸／年。以 LNG 替代傳統燃料後， NO_x 的總排放量平均減少 83.27%。由 EPA 模型及洛杉磯港模型所推估的 NO_x 排放量可知，以 LNG 替代傳統燃料後，對於降低環境污染具有明顯效益。另延噸海裡的 NO_x 排放分析部分，

如同 SO_x ，亦將 5 艘船舶區分為傳統船與高速船（船舶 A、B）、同為高速船但航程不同（船舶 B、C）、同為傳統船但航程不同（船舶 B、E）等 3 類，假設船舶在不同載運率的情況下，所得的延噸海裡排放量差異。研究結果發現，若需減少延噸海裡的 NO_x 排放量，應以兩岸航線的傳統船優先推動 LNG 較具效益。

3. 以 CO_2 分析之，因 EPA-AP-42 所列排放係數表無 CO_2 排放係數，故本研究 CO_2 排放量推估僅以洛杉磯港模型進行推估。研究結果得出 5 艘船舶使用傳統燃料與以 LNG 替代傳統燃料之 CO_2 排放量，分別為 3,119.9558 噸／年與 2,438.9167 噸／年、1,708.5854 噸／年與 1,470.6995 噸／年、1,151.4389 噸／年與 990.9462 噸／年、519.1325 噸／年與 409.6682 噸／年，及 572.9408 噸／年與 450.5841 噸／年。以 LNG 替代傳統燃料後，平均降低 CO_2 排放量 18.24%。以 LNG 替代傳統燃料所帶來的排放量差異來看， CO_2 所減少的百分比低於 SO_x 及 NO_x 所減少的百分比，顯示出使用 LNG 燃料仍會排放部分 CO_2 。
4. 根據實證分析，以 LNG 燃料替代傳統燃料，確實可降低排放汙染，特別是在 SO_x 排放，因此建議政府相關單位，從船舶技術、港口設施、加氣設備及法令規範等事項建立系統性之完備 LNG 推動計畫，以徹底推動使用 LNG。另巴黎氣候會議中碳價格已成為會議討論重要議題之一，碳價格會反應在稅費或碳排管制上，國際貨幣基金 (IMF) 估算，巴黎協定通過後，每噸 CO_2 的平均最低交易價格是 30 美元。因此建議政府針對船舶排碳應建立付費機制，透過法令強制徵收，航商自然會改變船舶燃油用料，以達成以價制量之成效。

參考文獻

1. International Maritime Organization, "Third IMO GHG Study 2014 Final Report", <http://www.imo.org>, 2015.
2. DNV.GL, "LNG as Ship Fuel: A Focus on the Current and Future Use of LNG as Fuel in Shipping", <https://www.dnvgl.com/maritime/lng/ships.html>, 2015.
3. Lloyd's Register, "Global Marine Fuel Trends 2030", http://www.lr.org/en/_images/213-34172_Global_Marine_Fuel_Trends_2030, 2015.
4. Jerzy, H., "Consequences of Using LNG as a Marine Fuel", *Journal of KONES Powertrain and Transport*, Vol. 20, No. 2, 2013, pp. 159-166.
5. 交通部，「航政業務採用國際公約資訊」，<http://www.motc.gov.tw>，民國 104 年。
6. 環科工程顧問股份有限公司，「臺灣港務公司 102~105 年推動綠色港口及港區環境管理之整體規劃報告」，交通部臺灣港務股份有限公司委託研究報告，民國 104 年。
7. Banawan, A. A., El Gohary, M. M., and Sadek, I. S., "Environmental and Economical Benefits of Changing from Marine Diesel Oil to Natural-Gas Fuel for Short-Voyage High-Power Passenger Ships", *Journal of Engineering for the Maritime Environment*, Vol. 224, No. 2, 2010, pp. 103-113.

8. Baumgart, M., & Olsen, J. H. B., “LNG-Fueled Vessels in the Norwegian Short-Sea Market: A Cost-Effective Response to Environmental Regulation”, <http://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/168425>, 2015.
9. Tzannatos, E. and Nikitakos, N., “Natural Gas as a Fuel Alternative for Sustainable Domestic Passenger Shipping in Greece”, *International Journal of Sustainable Energy*, Vol. 32, No. 6, 2013, pp. 724-734.
10. Bengtsson, S. K., Fridell, E., and Andersson, K. E., “Fuels for Short Sea Shipping: A Comparative Assessment with Focus on Environmental Impact”, *Journal of Engineering for the Maritime Environment*, Vol. 228, No. 1, 2013, pp. 44-54.
11. 蔡鎮遠，「高雄港港區商船排放二氧化硫之推估與管理策略」，成功大學海洋科技與事務研究所碩士論文，民國 100 年。
12. 葉雨松、陳桂清、許真瑜，「臺灣港埠遠洋船舶硫氧化物排放量推估」，*臺灣報導季刊*，第 94 期，民國 102 年，頁 1-5。
13. 行政院環境保護署，*臺灣空氣污染排放量[TEDS8]面源—排放量推估手冊*，民國 104 年。
14. EPA, “Analysis of Commercial Marine Vessels Emissions and Fuel Consumption Data”, <http://www3.epa.gov/otaq/models/nonrdmdl/c-marine/r00002.pdf>, 2015.
15. Starcrest Consulting Group, “2010 Expanded Greenhouse Gas Inventory”, <http://starcrestllc.com/projectnews.html>, 2015.
16. 交通部運輸研究所，*臺灣港埠節能減碳效益提升之研究(1/4)*，民國 101 年。
17. Puget Sound Maritime Air Forum, “Maritime Air Emissions Inventory”, <http://www.pugetsoundmaritimeairforum.org/>, 2015.
18. 臺灣中國石油股份有限公司，「燃料類產品規範」，<http://new.cpc.com.tw/division/mb/product.aspx>，民國 105 年。