

空氣污染與噪音類

客輪活動強度對基隆港港區空氣污染物 排放總量及空氣品質影響之研究

莊育銘*、江康鈺**

摘 要

本研究係利用船舶噸位計算法方式，探討進出基隆港的客輪排放空氣污染物 PM₁₀、PM_{2.5}、SO₂ 及 NO_x 之總排放量，並依 2016 年至 2020 年臺灣港棧服務網，共計 1,177 艘次客輪進出港資料，建立基隆港客輪排放清冊資料庫，同時彙整基隆區域氣候條件，探討客輪活動強度排放之空氣污染物，對基隆港港區空氣品質影響。根據研究結果顯示，客輪靠泊狀態為空氣污染物排放之主要來源。2020 年受到 COVID-19 衝擊，客輪航次大幅度降低，但船舶於非營運狀態之長期靠泊，反而增加空氣污染物之排放量。研究進一步比對基隆市空氣污染源排放情況，結果顯示 PM₁₀、PM_{2.5}、SO₂ 及 NO_x 之排放，主要來自於港區外的移動污染源或固定污染源，客輪活動並非主要影響基隆區域空氣品質之因素。整體而言，客輪若能使用潔淨能源，以及靠泊時，使用岸電設備，均能有效降低船舶活動排放之空氣污染物，並達到港區空氣污染物排放減量及維護空氣品質之效果。

【關鍵字】船舶活動強度、空氣污染物、基隆港、岸電

* 臺灣港務股份有限公司	助理管理師
國立中央大學環境工程研究所碩士在職專班	碩士
** 國立中央大學環境工程研究所	教授

一、前言

臺灣的港口處於環太平洋地區，屬於海運貿易運輸重鎮，其商港服務範圍，主要以執行港埠作業、貨物裝卸及郵輪光觀業務為主，其中基隆港營運方式，則以進出口貨物、國內貨物、本地海事服務及港口運作等幾大類為主要服務對象。然而，基隆港因受到地形因素影響，導致港區產業發展受限，近年來停靠基隆港船舶總噸位與貨物吞吐量，雖有逐年下降趨勢，然客輪部分則有明顯提升。根據交通部統計資料所示，基隆港客輪占總船舶噸位，從2009年5.4%增加至2019年22.4% (交通部資料統計網，2021)，可見基隆港棧埠重心，已呈現逐步轉型的情況。

有鑑於近幾年國際郵輪停靠臺灣各港口次數日益增多，尤其進入臺灣地區的國際郵輪，超過半數以上停靠於基隆港 (交通部資料統計網，2021)。國際郵輪停靠港口數量之增加，除了船舶進出港口時，造成空氣污染物排放量的增加外；郵輪業者在靠泊時，為了服務遊客仍須開啟輔助引擎，以維持基本運作，其中包含啟動空調設備，及提供船艙室內燈光照明等，由於上述之船舶活動，所衍生空氣污染問題，亦可能造成基隆市區環境空氣污染問題 (陳又寧，2016)。

近年來，隨著商業型態改變以及船舶逐漸大型化趨勢，海運活動時，內燃機運作產生廢氣排放變化，對於日益增加的空氣污染，儼然成為全球性議題。國際港口對於船舶空氣污染管制方式，以長灘港與洛杉磯港的綠色港口政策最具代表性，主要以降低港口運營產生的負面影響為目的，計畫性減量港口內所有排放源，並結合港口責任、能力與利害關係人的期許，強化空氣清淨的執行策略 (侯佳芸，2012)。然國際各港口為了符合國際海事組織 (International Maritime Organization, IMO) 於1997年公布的國際公約 (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MARPOL) 附錄六修正案之規定，逐年限制船舶廢氣之主要空氣污染物 (包括硫氧化物、氮氧化物)，以及禁止故意排放消耗臭氧層之物質。目前我國亦透過行政管理、輔導減量技術以及自願性減量協議，以期達到臺灣港群區潔淨空氣行動計畫 (陳惠琪，2011)。

本研究查詢行政院環境保護署 (以下簡稱環保署) 於2020年在全國空氣污染物排放量清冊資訊系統中，依國內排放各類污染源排放量公告 Taiwan Emission Data

System (以下簡稱 TEDS) 之空氣污染排放清冊 TEDS 10.1 版本資料，有關移動空氣源的排放來自於內燃機燃燒後所產生，主要為 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 及 NO_x ；然基隆市移動污染源類別中，對於港區內船舶的空氣污染排放量的評估，依環保署 TEDS 公告資料 2016 年基隆港區內船舶各空氣污染物排放量，對基隆市整體的占比情況，分別為 PM_{10} 占整體排放量 11.7%、 $PM_{2.5}$ 占整體排放量 17.7%、 SO_2 占整體排放量 11.9% 及 NO_x 占整體排放量 13.1% (行政院環保署，2020)。因此，港區內船舶廢氣，會造成影響周邊環境空氣品質不良因素之一。然國內少有文獻對於客輪負荷量增加時，探討空氣污染物排放量變化情況，故本研究依循國際各港計算船舶排放廢氣方法，以船舶活動強度乘上空氣污染物排放係數推估各污染物排放量，並藉由分析臺灣港棧服務網整理基隆港船舶進出港各類資訊後，針對客輪活動強度推估空氣污染物 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 及 NO_x 的排放情況，以定量方式評估客輪在整體船舶排放量的占比，並比較近 5 年客輪活動排放之空氣污染物，對基隆市整體空氣污染物排放之貢獻度，進而探討客輪活動強度對降低空氣污染物影響，及研擬可行性策略。研究同時探討受到特殊傳染性肺炎 (COVID-19) 疫情影響，客輪活動對基隆港空氣污染物排放總量之影響。

二、文獻回顧

2.1 基隆港船舶活動發展趨勢

臺灣因四面環海，在國際上具備亞太地區的航運地理優勢，而臺灣商港以基隆港、臺北港、臺中港與高雄港為主要的海上貿易與運輸，其服務範圍以提供港埠作業、貨物裝卸、郵輪光觀業務為主。各國際商港營運方式，除了符合地區性產業需求外，還需考量港內資源與港口位置，如基隆港鄰近華中地區，處於往來亞太重要航道上 (侯佳芸，2012)，並憑著港深、潮差低、交通便利等優越因素，成為臺灣最適合發展國際郵輪港口的地方。

然而，基隆港隨著商業型態的改變，運輸船舶逐漸大型化，以及散雜貨物運送貨櫃化影響，在船舶靠泊的吃水深度不夠，與後線倉儲量不足情況下，漸漸消失天然良港優勢，因此，近年來基隆港調整以客貨雙軸心為方向發展 (鄭艾瑋，2013)。因基隆

18 客輪活動強度對基隆港港區空氣污染物排放總量及空氣品質影響之研究

港整體潮差平均約在 1 公尺內，具有毗鄰市區和交通路線便利的優點，對於國際大型郵輪而言，具有較佳靠泊的條件，所以，在港內發展受限的時刻，配合國際郵輪旅遊的蓬勃發展，所推動的業務轉變，係臺灣港群轉型發展的指標項目。

2.1.1 基隆商港港埠現況

商港口埠營運方式，以國際及國內進出口貨物裝卸、旅客服務、倉儲等維持港口運作的主要項目，基隆市區因為長期依賴港埠，維持城市運作的因素，導致產業發展瓶頸；另自 2009 年臺北港以新型現代化碼頭營運後，導致基隆港業務量發展趨遲緩（鍾添泉，2013），造成停靠基隆港貨船總噸位逐年降低。然而，2020 年度基隆港進出船舶總噸位降低，其原因為全球遭受 COVID-19 的影響，為了配合世界衛生組織國際（World Health Organization, WHO）的防疫措施，我國政府限制國際郵輪進出境臺灣商港規範，如表 1 所示，客輪總噸位從 2009 年整體總噸位占比為 5.4%，提升到 2019 年整體總噸位占比的 22.4%，2020 年 COVID-19 疫情爆發期間，客輪總噸位量則下降至 7.1%（交通部資料統計網，2021）。

表 1 基隆港 2009~2020 年度船舶總噸位比較

年度	船舶總噸位	客輪類別總噸位	占比
2009	89,600,749	4,805,517	5.4%
2010	102,400,800	5,489,860	5.4%
2011	101,716,159	5,968,941	5.9%
2012	96,511,758	5,969,084	6.2%
2013	96,762,659	8,265,515	8.5%
2014	97,699,244	10,020,344	10.3%
2015	96,720,450	12,023,894	12.4%
2016	93,679,902	14,005,064	14.9%
2017	95,474,985	18,559,153	19.4%
2018	95,584,764	19,948,891	20.9%
2019	92,491,540	20,701,103	22.4%
2020	78,284,256	5,597,043	7.1%

2.1.2 基隆港客輪活動情況分析

基隆地質是岩岸結構天然良港，有著水深、潮差小、低淤沙的優點，如表 2 所示，資料顯示每年透過基隆港進出港的旅客人數，超過臺灣其他港區整體旅客之半數以上（交通部資訊統計網，2021），而經營海上客運業務的要素，除了先天港口條件良好之外，尚需要有便利的交通動線配合，水深、港寬、交通便利以及富含交通景點，便是發展郵輪母港或掛靠港的重要元素。綜合前述條件，基隆港成為全球少數能符合停靠郵輪條件的天然港（鍾添泉，2013），但大型郵輪航行速度較慢，約低於 20 海浬/時（海浬為海上距離單位，1 海浬等同於 1.852 公里距離），故基隆港受地理位置因素，導致海上配套行程較少。經彙整交通部統計資訊網資料如表 2，發現自基隆港進、出境旅客人次，在 2016 年至 2019 年皆有明顯增加的情況，且旅客人數遠高於臺灣其他港口的情况，尤其 2019 年有超過 109 萬人次旅客的紀錄，2020 年遇到 COVID-19 疫情影響，除花蓮港、蘇澳港、安平港與臺北港國內線人數提升外，國際線商港旅客皆明顯下降。

表 2 2012 年~2020 年臺灣港群進出港旅客人數

年度	基隆港	高雄港	臺中港	花蓮港	其他	總計
2012	427,845	119,374	138,284	13,210	420	699,133
2013	524,608	141,119	172,551	94,163	58,731	991,172
2014	578,002	214,416	164,102	192,565	229,509	1,378,594
2015	693,956	207,443	134,441	132,307	183,069	1,351,216
2016	782,134	119,521	47,165	117,318	163,448	1,229,586
2017	954,536	196,616	62,566	79,450	133,922	1,427,090
2018	1,064,147	117,130	78,351	41,331	123,618	1,424,577
2019	1,091,360	151,879	99,444	27,251	134,142	1,504,076
2020	25,906	71,844	11,835	27,251	291,479	428,315

備註：其他為蘇澳港、安平港及臺北港的合計人數。

20 客輪活動強度對基隆港港區空氣污染物排放總量及空氣品質影響之研究

如前所述，基隆港是臺灣最主要的客輪停靠點，分析基隆港歷年來旅客來源（基隆港務分公司，2021），如表 3 所示，其中最大的來源是國際郵輪的造訪，隨著船舶大型化後，提高載客數以及吸引顧客的多樣化設施，直至 2020 年為止，以基隆港為郵輪母港靠泊之郵輪，主要包括麗星郵輪系列（約 5 萬噸）、星夢郵輪系列（約 10 萬噸）、嘉年華郵輪集團公主系列郵輪（7~15 萬噸），其他以掛靠港靠泊，則有皇家加勒比集團海洋系列（7~17 萬噸）、嘉年華郵輪集團歌詩達郵輪系列（5~14 萬噸）（郵輪旅遊網，2021）。基隆港郵輪停靠高峰時刻是在 2019 年 11 月期間，同時停靠 4 艘國際郵輪，帶來超過 1 萬名以上旅客進出基隆港區，然 2020 年因受到 COVID-19 疫情的影響，基隆港旅客大幅度下滑，但對照近 10 年客輪人數大幅度成長情況，加上近年來基隆港區積極改善港內不足的設施，例如改造港口碼頭設備，將現有 2 座作業碼頭增加到 5 座、增建旅客大樓加速人員通關速度，未來配合交通政策，進行臺鐵輕軌計畫強化旅客陸上交通運輸，帶動旅客人數的增加，再配合當地政府的旅客服務規劃，可藉由各項軟、硬體層面的提升，增加國際郵輪到達基隆港的意願，對基隆地區經濟結構、民生消費力帶來改變（基隆港務分公司郵輪旅遊網，2021）。

表 3 2012 年~2020 年基隆港客輪遊客人數分布

年度	郵輪	兩岸渡輪	國內航線	總計
2012	274,151	49,712	103,982	427,845
2013	398,969	29,780	95,859	524,608
2014	448,839	34,026	95,137	578,002
2015	563,345	37,427	93,184	693,956
2016	663,458	19,088	99,588	782,134
2017	829,903	29,476	95,157	954,536
2018	941,663	36,275	86,209	1,064,147
2019	946,372	34,721	110,267	1,091,360
2020	173,040	652	86,114	259,806

2.2 船舶空氣污染防治條例與規範

IMO 致力於減少國際船運活動對於環境的影響，海洋環境保護委員會 (Marine Environment Protection Committee, MEPC) 依 1997 年通過修正 MARPOL 新增附則 VI，逐步減少全球範圍內船舶廢氣中所含的氮氧化物與硫氧化物排放，並於 2005 年 5 月 19 日生效指定排放控制區 (ECA) 更嚴格的標準，以進一步減少指定海域內空氣污染物排放。

我國政府參考於 2016 年 10 月之 MEPC.280 (70) 決議案對燃料油可用性評估，修訂 MARPOL 附則 VI「防止船舶空氣污染規則」第 14.1.3 條規定 (行政院公報，2018)。限制 2020 年 1 月 1 日起，全球海域船舶使用船用燃油，應執行 0.5% 低燃油硫含量標準，控制排放區 (Emission control area, ECA) 仍嚴格管制執行 0.1% 燃油硫含量標準。對此面對日趨嚴格的硫化物減排限制，迫使全球航運業者必須採取有效控制減排方式，其中主要包括從船舶本身設備改造，如加裝空氣洗滌器、脫硫裝置等空氣淨化裝置，或者是選擇船舶燃料種類，改採用低硫燃油 (LSMGO) 或是液化天然氣 (LNG) 燃料等替代資源。

有關 IMO 對於船舶硫排放限制要求，在波羅的海、北海、北美包括美國和加拿大部分海岸、美洲加勒比海包括波多黎各和美屬維爾京群島等地，為 IMO 在全球特別設置了 4 個 ECA (廖永裕，2016)，係指要求對船舶排放採取特殊強制措施，以防止、減少和控制 NO_x、SO₂ 或粒狀污染物排放，造成空氣污染以及伴隨而來對人類健康和環境的不利影響區域，其船舶使用燃油含硫量不得超過 0.1%；而在排放控管區域以外船舶，則依照 IMO 全球適用含硫量時程規定 (船舶暨海洋產業洋發中心，2018)。

表 4 IMO 海運燃油規範

日期	海運燃油含硫極限	
	ECA	全球
2010 年 7 月前	1.5%	4.5%
2010 年 7 月	1.0%	
2012 年 1 月		0.1%
2015 年 1 月	0.5%	
2020 年 1 月		

22 客輪活動強度對基隆港港區空氣污染物排放總量及空氣品質影響之研究

交通部航港局在西元 2018 年 1 月 25 日公告 MARPOL 附則 VI 「防止船舶空氣污染規則」第 14.1.3 條及第 4 條規定，提前於西元 2019 年 1 月 1 日限制不論本國籍或外國籍船舶，只要進入我國國際商港區域者，應採用硫含量以重量計 0.5% 以下之低硫燃油，或具有同等減排效應之裝置或替代燃料案，另於高雄港率先實施國際航線船舶獎勵措施，以推動航商提早使用低硫燃油之政策，獎勵措施於西元 2018 年 7 月 23 日起，擴大至國內各國際商港實施。

行政院環保署於空氣污染防制法提及，移動污染源是以車輛運輸為管制對象，國內尚對於船舶空氣污染防制執行標準，但在交通工具空氣污染排放標準中提及，對於船舶排放粒狀物標準要求不得超過不透光率 40%，但允許主動推進動力 3,000 kW 以上之船舶，啟動時 20 秒內，以及 3,000 kW 以下之船舶啟動時 10 秒，以不超過不透光率 60% 為基準。現況主要透過臺灣國際商港管理方式要求空污防制，例如船舶減速規定、擴大岸電設施使用，配合船舶自動辨識系統 (AIS) 運用，監控船舶入港減速，以期降低空氣污染物排放來源。

2.3 港區控制船舶空氣污染物方式

有鑑於國際知名商港推動綠色港口政策，以降低港區周圍環境負荷概念，依林素如 (2014) 訪談 15 家知名貨櫃航商及 18 個國內外國際商港，認為國際知名港口推動綠色港口，有助於提升社會企業責任形象與永續發展，取自國際各港口推動綠色港口政策之經驗，找出減少棧埠作業產生空氣污染的關注項目。臺灣商港參考美國長灘港與洛杉磯港自 2005 年推動清潔空氣計畫，控制港區內 (船舶、車機與裝卸行為) 空氣污染排放減量方式。胡家聲等人 (2019) 研究高雄港對於綠色港口發展策略分析，認為綠色港口政策儼然是全球港口發展趨勢，港口永續發展的關鍵為兼顧社會、經濟、環境，透過專家訪談與研究分析，高雄港推動綠色港口之精進方案，並借鏡國際知名港口推動環境保護的成效，對於空氣污染防治部分，以船舶排放污染的改善獎勵，以及碼頭建置岸電方式，最能有效減緩港口空氣污染物排放。

根據廖永裕 (2016) 以問卷進行調查，透過單因子變異數分析及重要表現程度分析法，認為基隆港在推動綠色港灣時，防止空氣污染脆弱性層面，主要在於船舶從外港

進入碼頭靠泊時，船舶若能在航行中執行自願減速，或使用低污染海運燃油，此外，港區設置監視系統監視裝卸機廢氣排放，以及對於逸散性污染源防治，使用自動洗車設備與要求車輛覆蓋防塵網，皆能有效直接減少空氣污染物排放。

對於船舶空氣污染行為的排放行為，依 Cooper D.A. (2003) 研究哥本哈根港內靠泊船舶（渡輪、汽車船、貨船）空氣污染排放（ SO_2 、 NO_x 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ ），研究發現船舶於靠泊時，排放量大於進出港的情況。另林佩君 (2009) 研究 1999 年至 2007 年基隆地區船舶活動所產生的大氣懸浮微粒，經環保署與港區空氣品質測站進行迴歸分析後，認為基隆的地形與氣候對於空氣污染物（ PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ ）的排放濃度有明顯影響，懸浮微粒在夏季西南氣流旺盛時濃度較低，因風場受到季節變化，冬季自海上吹入北季風帶入境外懸浮微粒。曹兆凡 (2009) 研究 1999 年至 2007 年基隆港區往來商船空氣污染物排放量（ NO_x 與 SO_2 ）情況，以我國交通部國輪船舶登記噸位資料，對 27,495 艘抵達基隆港商船進行統計分析，獲得符合臺灣商港船舶總噸位數與主引擎、輔助引擎的線性回歸關係，以便提供後續臺灣學術單位進行船舶活動強度、空氣污染量排放推估依據。

依據邱永芳 (2011) 研究認為輔助引擎以燃油運作，係港區最大空氣污染來源，因船舶靠泊後，船上仍有用電需求，若以岸上電廠供電，取代輔助引擎燒燃油發電，雖可明顯削減空氣污染物排放，但須考量電力公司排放溫室氣體減量方式。但對於岸電設施使用討論，根據許淑禎 (2016) 提出臺灣港口岸電設施不足情況，肇致無法有效管控船舶在靠泊期間以輔助引擎維持運作，而且檢測空氣污染源相關設備亦有不足現象。葉倉賓 (2016) 指出郵輪種類及規模差異大、靠泊碼頭高低差、國際尚未統一插頭規格，以致岸電設施尚未全面運用於郵輪靠泊，假使能全面性以岸電替代各郵輪的輔助引擎，將可有助於大幅削減 SO_2 、 NO_x 、 PM_{10} 排放。

2.4 船舶廢氣排放量推算方式比較

港口內運輸之船舶、裝卸設備、運輸貨車等運輸工具，皆以柴油引擎方式運轉，船舶因船體本身特性不同的因素，導致引擎機械元件複雜。查閱國內外文獻資料，各單位會因取到資料的差異，導致所採用計算方式不同。將船舶廢氣污染物排放計算方

24 客輪活動強度對基隆港港區空氣污染物排放總量及空氣品質影響之研究

式彙整後，因計算參數差異可分為 3 類：手冊計算法、燃料消耗量計算法以及載重量計算法 (蔡薇，2004)；然這 3 類方法計算船舶空氣污染排放量方法量化評估，本研究收集這 3 類方法的運用單位與特點闡述如下：

1. 手冊計算法：計算方式與船舶航行中主引擎、輔助引擎狀態以及航行速度有關，討論不同內燃機負載情況下各類空氣污染物排放，統計船舶艘數、噸位、航行時間、靠泊時間，依據主引擎和輔機負載情況計算排放量，較適合船舶計算大氣污染物的方式。
2. 燃料消耗量計算法：根據船舶使用的燃油性質的差異，總計各類海運燃油的消耗量，乘上每個單位燃燒後的空氣污染物質係數，需要正確調查燃料使用量。
3. 載重量計算法：參考汽、機車移動發生源的排出量，透過分析航行船舶記載燃油耗量、航速以及載重量，統計出每噸海裡的燃料消費量，有關港區控制船舶空氣污染方式之研究整理如表 5。

表 5 廢氣排放計算方式彙整表

運用計算方式	文獻主題	使用單位或作者	國家
手冊計算法	1. 臺灣港群岸電設施設置及規劃推動可行性 2. 臺灣港埠節能減碳效益提升之研究	交通部運輸研究所	臺灣
手冊計算法	中國船舶大氣污染物排放清單報告	中國環境保護部機動車排污監控中心(上海港)	中國
手冊計算法	San Pedro Bay Ports Emissions Inventory Methodology Report	美國加州佩德羅灣港口排放清單(洛杉磯港、長灘港)	美國
手冊計算法	Exhaust emissions from ships at berth	Cooper D.A.	丹麥
燃料消耗量計算法	1. 空氣污染排放清冊 2. 台北港物流倉儲區第一、二期開發計畫環境影響說明書	行政院環境保護署	臺灣
燃料消耗量計算法	基隆港郵輪岸電系統之研究	葉倉賓	臺灣

有關船舶空氣污染物計算 3 種方式，依序為手冊計算法依內燃機的運作效率推算，能貼近船舶在航行或靠泊狀態的實際排放；燃料消耗量計算法依平均油耗推算，但每艘船舶的耗油量資料缺乏公開客觀數據；載重量計算法相關應用文獻不足。綜上述以及國際港口計算船舶空氣污染排放方式之考量，故本研究選擇使用手冊計算法，依船舶航行各狀態（入港、出港、靠泊）下，計算內燃機負載時，空氣污染物排放量。

三、研究方法

3.1 研究對象與範疇

本研究以臺灣港棧服務網收集 2016~2020 年基隆港船舶動態資料，彙集船舶停靠港區時間與船舶噸位量資訊，方能推估入港、出港輸出動力切換情況。依據 IMO 於不同年份下，對於新造船隻環保規範，導入船舶活動下使用各種海運用燃油的空氣污染物排放係數，貼近港內實際港埠作業情況，提出具合理、準確性之分析數據。因基隆港碼頭有公務用碼頭（海關、港勤）、軍用碼頭以及商用碼頭等用途（雜貨、散裝、貨櫃以及油輪類），本研究彙整商用碼頭之客輪活動船隻為主要研究對象，非本研究設定範疇討論之船舶為軍用船及港區內漁船、工作船、清潔船、拖船與港勤所屬船舶，前述類別皆不列入本次推估計算範圍。

依基隆港船舶進出港口安全評估模式（袁順光等人，2011），因受基隆商港內空間限制，為保持安全距離，建議在港內航行速度 4.5~5.5 海浬 / 時，但基隆港面朝正北，所以天候受到地形因素影響，整年大部分時間受到自東北角度的風向及海浪，以及在堤口外 0.5~1 海浬處，易遭遇橫流、亂流，導致海象惡劣不佳，船舶為了穩定航行方向，須提高航速方能突破風浪，實際上在進入到港內迴旋池前的速度，會介於 5~10 海浬 / 時之間。故本研究範疇以船隻正常進出港口港埠作業流程為基礎，為求船速一致性，以及考量海象干擾之情況，設定船隻進入港區堤口水域範圍為起始計算點（圖 1），直到船隻靠泊碼頭為移動污染源排放範圍，藉以計算船舶空氣污染物排放量。

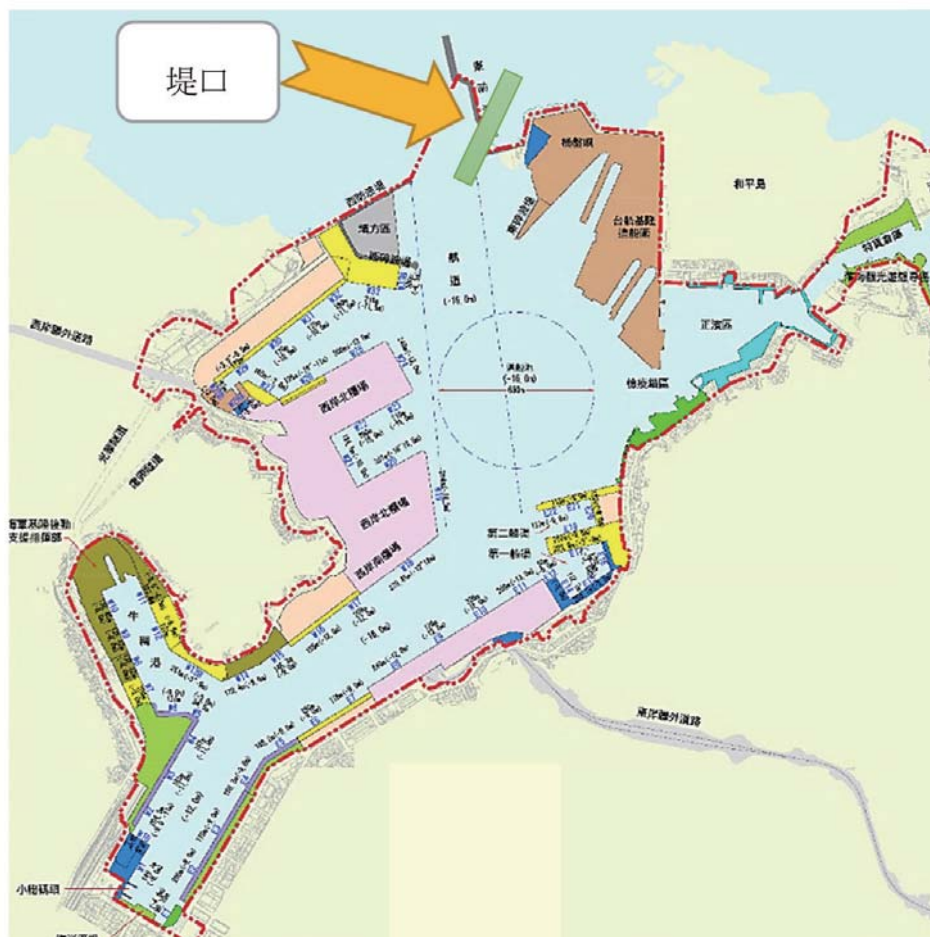


圖 1 基隆港海域航道圖

3.2 研究方法

3.2.1 船舶污染排放計算方式

參考 2019 年美國 San Pedro Bay Ports Emissions Inventory Methodology Report 報告資料，以及交通部運輸研究所臺灣船舶排放研究 (吳義林等人, 2019)，引用船舶排放量公式如下：

$$E = \text{Energy} \times \text{EF} \times \text{FCF}$$

E(Emissions by mode)：船舶排放量，單位：公克。

Energy (Energy demand by mode)：為所產生的能量，單位：kWh。

EF (Emission factor)：使用公告排放係數，單位：g/ kWh。

FCF (Fuel correction factors)：基準燃油於不同濃度、處理裝置下，燃油的校正係數，無單位。

以船舶實際運作情況所呈現輸出功率的方式，表示如下：

$$\text{Energy} = \text{MCR (AER)} \times \text{LF(LD)} \times \text{H} \times \text{FCF}$$

MCR (Propulsion engine power maximum continuous rated)：船舶主引擎最大引擎動力，單位：kW。

AER (Auxiliary engine power maximum continuous rated)：船舶輔助引擎最大引擎動力，單位：kW。

LF (Load factor)：船舶活動中主引擎運作時負載係數，無單位。

LD (Load defaults)：為輔助引擎負載預設，無單位。

H (Hour)：指活動時間，單位：小時。

船舶於航行時引擎運作模式與使用的海運燃油不一定相同；因此，在推估方法的資料取得與計算方式不盡相同，船舶負載資料與船舶行進速度有關聯性，因轉速與航速具有正向直線關係，依據螺旋槳定律一般在 20~80% 的負載時，主引擎依螺旋槳定律，可估計為實際船速與最大船速比值的 3 次方 (田文國等人，2012)：

$$\text{LF} = (\text{AS} / \text{MS})^3$$

AS (Actual speed)：實際船速，海浬 / 小時。

MS (Maximum speed)：最大船速，海浬 / 小時。

Cooper D.A. (2003) 研究結果顯示，透過經驗公式以船舶總噸位，換算空氣污染排放量，係作為推估空氣污染排放總量的有效工具方式，因此，本研究對於船舶主引

28 客輪活動強度對基隆港港區空氣污染物排放總量及空氣品質影響之研究

擎及輔助引擎馬力之推估，引用曹兆凡 (2009) 研究基隆港 1981~2006 年交通部國籍船舶登記系統之統計資料，依船舶總噸位推估主引擎、輔助引擎的馬力 (HP)，以統計學簡單迴歸方式，找出主引擎與載重噸位關係公式，得以總噸重噸位 (GT) 推估得主引擎動力 (HP)。輔助引擎馬力係利用各噸位船舶主引擎及輔助引擎之間馬力關係轉換，在判定係數 R^2 值 = 0.9577 之下，獲得主引擎係數 $HP = 1.1466 \times GT$ ，以及 R^2 值 = 0.8842 之下，獲得輔助引擎係數 = $0.0878 \times GT$ 。最大航速換算部分，依據臺灣國際造船股份有限公司歷年船舶建造實績資料表為根據，引用基隆港船舶交通管理系統船舶資料共計 27,493 筆，推估船舶總噸位與航速關係，利用迴歸分析在判定係數值 $R^2 = 0.9328$ ，獲得總噸位 (x) 與船速 (y) 呈二次曲線模式，迴歸方程式 $y = 2.3903 \ln(x) - 1.4036$ (曹兆凡，2009)。

船舶航行中受推進慣性力影響、船身狹長、港內迴轉空間有限的關係，依基隆港船舶進出港口安全評估模式 (袁順光等人，2011)，保持安全距離建議航速保持 5 海浬 / 時。船舶自入港開始，主引擎降低動力輸出，逐漸由輔助引擎動力取代，並且港勤拖船輔助配合船隻靠泊碼頭；因出港時需要較大動力輸出推動船體，並且主引擎尚需熱機運轉時間，故輔助引擎提高輸出功率，以推動船體運行。綜合前述從參考 2019 年交通部運輸研究所 3 維空氣品質模擬系統資料，對於不同類型船種的輔助引擎在入港、出港和靠泊時負載狀態 (Load defaults) 輸出形況 (如圖 2 與表 6)。

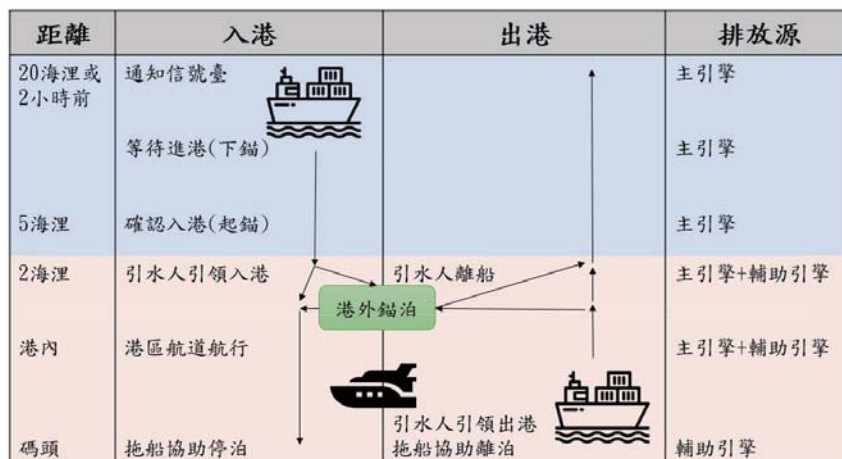


圖 2 船舶入出港示意圖

表 6 輔助引擎負載預設

船種	入港	出港	靠泊
汽車船	0.15	0.45	0.26
散裝船	0.17	0.45	0.1
貨櫃船	0.13	0.5	0.18
客輪	0.15	0.45	0.32
貨船	0.17	0.45	0.22
拖船	0.17	0.45	0.22
其他	0.17	0.45	0.22
冷藏船	0.15	0.45	0.32
駛上駛下船	0.15	0.45	0.26
油船	0.24	0.33	0.26

引用船舶排放公式 Emissions (E) = Energy × EF × FCF 綜合各狀態如下：

1. 入港 (Inbound) 與出港 (Outbound) 排放量：

Emissions (E) 來源 = 主引擎排放 (Propulsion engine emission)
+ 輔助引擎排放 (Auxiliary engine emission)

Propulsion engine emission = $MCR \times (AS / MS)^3 \times H(D / AS) \times EF \times FCF$

Auxiliary engine emission = $AER \times LD \times H(D / AS) \times EF \times FCF$

MCR (Propulsion engine power maximum continuous rated)：船舶主引擎最大引擎動力，單位：kW。

AS (Actual speed)：實際船速，單位：海浬 / 小時。

MS (Maximum speed)：最大船速，單位：海浬 / 小時。

D (Distance)：為堤口到靠泊碼頭距離，單位：海浬。

EF (Emission factor)：使用公告排放係數，單位：g / kWh。

AER (Auxiliary engine power maximum continuous rated)：船舶輔助引擎最大引擎動力，單位：kW。

30 客輪活動強度對基隆港港區空氣污染物排放總量及空氣品質影響之研究

LD (Load defaults)：為輔助引擎負載預設，無單位。

2. 靠泊 (Berth) 排放量：只有輔助引擎排放 (Auxiliary engine emission) 之運作

$$\text{Auxiliary engine emission} = \text{AER} \times \text{LD} \times \text{H} \times \text{EF} \times \text{FCF}$$

H (Hour)：為靠泊時間，單位：小時。

3.2.2 空氣污染排放因子

船舶的空氣污染主要來源為主引擎與輔助引擎，且會因船舶加裝空氣污染防制設備，或採用乾淨燃料的船舶，須考慮校正係數，但本研究無法得到各船舶空氣污染防制裝置資料，只能以 IMO 與臺灣地區要求各管制區油料管制為考量，引擎不同排放係數，參考 2019 年美國 San Pedro Bay Ports Emissions Inventory Methodology Report 中提到以 Heavy fuel oil (HFO) 含硫 2.7% 基準燃油，作為係數對應 Marine diesel oil (MDO)、Marine gas oil (MGO) 係數之調整 (參考表 7)，再根據 IMO 不同時期環保規範下，主引擎產生空氣污染物的消費量，為空氣污染物排放因子 (參考表 8)。

表 7 海運燃油校正係數

基準燃油	對應燃油	PM ₁₀	PM _{2.5}	NO _x	SO ₂
HFO (2.7%)	HFO (2.7%)	1.00	1.00	1.00	1.00
HFO (2.7%)	MDO (0.5%)	0.25	0.29	0.94	0.19
HFO (2.7%)	MGO (0.1%)	0.17	0.20	0.94	0.04

表 8 主引擎燃油污染物排放量轉換表

主引擎排放係數 (g/kW · h)						
類別	IMO Tier	規範年限	PM ₁₀	PM _{2.5}	NO _x	SO ₂
Heavy fuel oil (HFO) (含硫量 2.7%)						
慢速運轉	Tier 0	≤ 1999	1.50	1.20	18.10	10.50
慢速運轉	Tier I	2000~2010	1.50	1.20	17.00	10.50
慢速運轉	Tier II	2010~2015	1.50	1.20	15.30	10.50
慢速運轉	Tier III	2016 至今	1.50	1.20	3.60	10.50
中速運轉	Tier 0	≤ 1999	1.50	1.20	14.00	11.50
中速運轉	Tier I	2000~2010	1.50	1.20	13.00	11.50
中速運轉	Tier II	2010~2015	1.50	1.20	11.20	11.50
中速運轉	Tier III	2016 至今	1.50	1.20	2.80	11.50
Marine diesel oil (MDO) (含硫量 0.5%)						
慢速運轉	Tier 0	≤ 1999	0.38	0.35	17.01	1.94
慢速運轉	Tier I	2000~2010	0.38	0.35	15.98	1.94
慢速運轉	Tier II	2010~2015	0.38	0.35	14.38	1.94
慢速運轉	Tier III	2016 至今	0.38	0.35	3.38	1.94
中速運轉	Tier 0	≤ 1999	0.38	0.35	13.16	2.13
中速運轉	Tier I	2000~2010	0.38	0.35	12.22	2.13
中速運轉	Tier II	2010~2015	0.38	0.35	10.53	2.13
中速運轉	Tier III	2016 至今	0.38	0.35	2.63	2.13

船舶使用含硫量高海運燃油主要因素，為使主引擎於運轉中，降低燃油成本以及降低引擎損耗，不同於輔助引擎的結構，因為輔助引擎主要用於靠泊時的燈光、空調、通訊等船上電力的供應，或是船舶調度移動，運轉溫度較低使用高硫海運燃油，會導致燃燒效率不佳。在不完全燃燒情況，除了浪費油料以外，更會衍生更多空氣污染物，

故一般而言，輔助引擎會選擇低硫燃油(如表 9)。所以船舶慣性力會視作業區域情況，啟動輔助引擎協助，在各個型態的負載的變化情形參考(如表 6)。

表 9 輔助引擎污染排放消費量轉換表

主引擎排放係數 (g/kW · h)						
類別	IMO Tier	規範年限	PM ₁₀	PM _{2.5}	NO _x	SO ₂
Heavy fuel oil (HFO) (含硫量 2.7%)						
慢速運轉	Tier 0	≤ 1999	1.50	1.20	14.70	12.30
慢速運轉	Tier I	2000~2010	1.50	1.20	13.00	12.30
慢速運轉	Tier II	2010~2015	1.50	1.20	11.20	12.30
慢速運轉	Tier III	2016 至今	1.50	1.20	2.80	12.30
Marine diesel oil (MDO) (含硫量 0.5%)						
慢速運轉	Tier 0	≤ 1999	0.38	0.35	13.82	2.28
慢速運轉	Tier I	2000~2010	0.38	0.35	12.22	2.28
慢速運轉	Tier II	2010~2015	0.38	0.35	10.53	2.28
慢速運轉	Tier III	2016 至今	0.38	0.35	2.63	2.28

四、結果與討論

4.1 客輪活動強度與排放量分析

依船舶在港區海域的活動情況可分成入港、出港與靠泊 3 種型態，本研究以船隻的總噸位推算，主引擎和輔助引擎的能量消耗基礎(kW)，加上時間條件(靠泊時間與出、入港時間)、能量輸出組合係數後，計算出客輪活動強度(kWh)。

4.1.1 船舶活動強度

船舶空氣污染排放量，係透過活動強度乘上各類空氣污染排放係數，而船舶活動強度來源，來自主引擎與輔助引擎的動力，故船舶推進時的動力，主要來自於引擎的出力，所以船隻建造時，會以該船最大噸位量為考量，設計主引擎與輔助引擎的最大馬力，本研究參考曹兆凡 (2009) 依基隆港營運特性，綜合各載貨類型船隻之主引擎馬力 (hp) 係數 $HP = 1.1466 \times GT$ 以及輔助引擎係數 $= 0.0878 \times GT$ ，依據螺旋槳定律行進中馬力的負荷，主引擎的輸出，近似轉速三次方 (N^3)，航速 (V) 與轉速 (N) 為正向直線關係，因輔助引擎並非主要動力來源，因應不同型態 (入港、出港、靠泊) 參考交通部運輸研究所 (2019) 使用之輔助引擎負載表 6 之參數資料，關於船舶航行時間，依堤口到碼頭距離除以港區內最大限速 5 海浬 / 時為運算依據，本研究參考手冊計算法進行 2016 至 2020 年客輪 1,177 艘次的船舶活動強度計算，並以這 5 年停靠 625 艘次，占比最多的船型寶瓶星號郵輪為例，臚列如下：

表 10 寶瓶星號船舶資料

名稱	噸位 (噸)	主引擎馬力 (hp)	輔助引擎馬力 (hp)	主引擎 MCR (KW)	輔助引擎 AER (KW)
寶瓶星	51,309.0	58,830.9	4,504.9	43,887.9	3,360.7
備註	馬力 (hp) 乘上 0.746 係數轉換 kWh				

1. 以寶瓶星號 2016 年 1 月 1 日航次為例，計算入港各內燃機活動強度：

$$\text{主引擎入港活動強度} = MCR \times (AS / MS)^3 \times D / AS$$

$$\text{輔助引擎入港活動強度} = AER \times LD \times D / AS$$

$$\text{主引擎：} 43,887.9 \times (5 / 24.51744)^3 \times 1.92 / 5 = 142.94(\text{kWh})$$

$$\text{輔助引擎：} 3,360.7 \times 0.15 \times 1.92 / 5 = 193.58(\text{kWh})$$

$$\text{入港活動強度總和 } 142.94 + 193.58 = 336.52(\text{kWh})$$

2. 以寶瓶星號 2016 年 1 月 1 日航次為例，計算出港各內燃機活動強度：

$$\text{主引擎出港活動強度} = MCR \times (AS / MS)^3 \times D / AS$$

34 客輪活動強度對基隆港港區空氣污染物排放總量及空氣品質影響之研究

輔助引擎出港活動強度 = $AER \times LD \times D / AS$

主引擎： $44,123.2 \times (5 / 24.51744) \times 1.92 / 5 = 142.94$ (kWh)

輔助引擎： $3,360.7 \times 0.45 \times 1.92 / 5 = 580.73$ (kWh)

出港活動強度總和 $142.94 + 580.73 = 723.67$ (kWh)

3. 以寶瓶星號 2016 年 1 月 1 日航次為例，計算靠泊內燃機活動強度：

輔助引擎活動強度 = $AER \times LD \times H$

輔助引擎： $3,360.7 \times 0.32 \times 7.2 = 7,743.05$ (kWh)

4. 以寶瓶星號 2016 年 1 月 1 日航次為例，內燃機活動強度總和：

336.52 (入港) + 723.67 (出港) + $7,743.0$ (靠泊) = $8,803.19$ kWh

以 2016 年 1 月 1 日航次的寶瓶星號為例，船舶至堤口進入港區後的整體活動強度為 $8,803.19$ kWh，本研究以此方式依序計算 2016~2020 年客輪與整體船舶的活動強度總和詳表 11。

表 11 2016~2020 年客輪與總船舶活動強度統計表 (kWh)

項目	狀態	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
客輪	入港	87,082.5	114,532.9	121,429.3	126,055.4	34,618.9
	出港	190,303.8	251,789.0	267,466.9	277,446.7	76,035.8
	靠泊	2,699,688.9	3,904,430.0	4,129,666.0	4,260,158.4	4,186,395.6
	總計	2,977,075.2	4,270,751.8	4,518,562.2	4,663,660.6	4,297,050.3
總船舶	入港	395,287.7	404,010.0	402,580.4	397,701.8	305,775.2
	出港	855,526.9	870,005.0	861,037.4	847,997.7	652,130.3
	靠泊	21,354,845.1	29,125,076.7	23,612,070.0	21,541,673.2	23,014,320.2
	總計	22,605,659.7	30,399,091.8	24,875,687.8	22,787,372.7	23,972,225.7
客輪 / 總船舶 占比	入港	22.0%	28.3%	30.2%	31.7%	11.3%
	出港	22.2%	28.9%	31.1%	32.7%	11.7%
	靠泊	12.6%	13.4%	17.5%	19.8%	18.2%
	總計	13.2%	14.0%	18.2%	20.5%	17.9%

對於表 11 發現總船舶與客輪皆出現出港活動強度，較高於入港活動強度情況，原因係出港時避免受到海浪影響，需要較大的動力輸出，以及港區內低速因素，導致主引擎溫度尚無法完全運轉，需提高輔助引擎輸出功率，本研究查詢國內交通部運輸研究所資料後，作為引用的參數（詳表 6）。

因客輪靠泊的碼頭較其他商船路途距離較遠，且基隆港停靠的國際郵輪，以雲頂郵輪系列及公主遊輪系列為主，船舶總噸位約在 5 萬~13 萬噸之間。綜上述 2 項因素，使客輪進出港活動強度，在整體船舶活動較靠泊活動占比為高，整體而言，近 5 年來客輪活動約占整體船舶活動強度之 13~21%；另外對於 2020 年總船舶以及客輪入、出港活動強度明顯下降，但靠泊活動強度卻有增加之情況，屬受到 COVID-19 影響導致各類船舶停滯港區，此情況有可能會增加基隆港區環境負荷。

基隆商港依作業型態而言，以貨櫃船、雜貨船和散裝船為主，這 3 類船舶大部份依賴陸上設備（移動式起重機、橋式機）進行裝卸貨物作業，船隻僅須維持最低動力即可。然客輪在靠泊時，需要持續輸出動力維持空調、照明及其他服務旅客設施，致使客輪總噸位與輸出動力，普遍高於一般商船種類，導致空氣污染物排放量比例較高。

由船舶整體排放數據可知，空氣污染物排放最大的來源是船舶靠泊行為，活動強度隨船靠泊時隨時間累計增加，另外，2020 年客輪數量受全球疫情爆發影響，進出基隆港船舶艘次下降，使入港及出港客輪強度大幅下降，但因國際上對客輪活動的限制，導致客輪無法出港，需長時間處非營運狀態靠泊的情況，使得客輪進港及出港活動強度大幅下降，但客輪靠泊活動強度，並未有相對性的下降。

表 12 2016~2020 年客輪月平均資料

月份	總噸位	艘次	靠泊 (kWh)	入出港總合 (kWh)
1 月	947,886	17	180,375	18,965
2 月	782,950	14	511,112	15,634
3 月	1,205,738	23	250,654	24,112
4 月	1,440,142	22	306,347	28,416

36 客輪活動強度對基隆港港區空氣污染物排放總量及空氣品質影響之研究

月份	總噸位	艘次	靠泊 (kWh)	入出港總合 (kWh)
5 月	1,951,031	23	424,943	37,470
6 月	1,669,403	21	536,431	32,636
7 月	1,487,881	19	292,540	28,822
8 月	1,378,244	20	273,177	27,241
9 月	1,340,335	20	292,989	26,579
10 月	1,220,543	18	239,591	23,802
11 月	1,273,409	20	294,481	25,100
12 月	1,033,231	18	233,426	20,576

根據表 12 資料，分析客輪的航次、進出港口的總噸位，以及船舶與客輪出入活動強度，平均以 5 月為最高峰，平均在 6 月份時，客輪靠泊活動達到最高值，7 月開始基隆港外海受颱風、熱帶氣壓氣候型態影響，國際郵輪逐漸降低航次，直接反映在客輪各狀態的活動強度表現，而 10 月之後東北季風增強，海象逐漸變差，而且氣溫下降，不利於旅遊，所以大多數國際郵輪會在冬季停航，直到春、夏季天候穩定的季節開航，約在每年 5 月前後達到客輪航次的高峰期。

一般而言，2 月份因氣候因素，客輪靠泊活動強度數據，應與航次、噸位及入出港活動強度表現相同低於其他月份，但本研究發現 2 月靠泊活動強度，異常平均高於其他月份的情況，係客輪無法出港而長時間靠泊的情況。

4.1.2 各類船舶空氣污染物排放量推算

依據 2016 年 1 月 1 日航次的寶瓶星號船舶活動強度計算入港強度 336.52 (kWh)、出港強度 723.67 (kWh) 以及靠泊強度 7,743.05(kWh) 為例，參考各類內燃機空氣污染排放資料 (如表 8 及表 9)，並以寶瓶星號 2016 年 1 月 1 日航次為例，進行下列計算：

1. 主引擎活動強度 kWh 總合 (入港與出港) :
 $142.94 \text{ (入港)} + 142.94 \text{ (出港)} = 285.88 \text{ (kWh)}$
2. 輔助引擎活動強度 kWh 總合 (入港、出港與靠泊) :
 $193.58 \text{ (入港)} + 580.73 \text{ (出港)} + 7,743.05 \text{ (靠泊)} = 8,517.36 \text{ (kWh)}$
3. 依 $E = \text{Energy} \times \text{EF} \times \text{FCF}$ 公式，引用 2019 年美國 San Pedro Bay Ports Emissions Inventory Methodology Report 報告資料，以及臺灣船舶排放研究報告 (交通部運輸研究所, 2019)。本研究依國內規範以 2019 年為基準，2019 年 1 月 1 日以後船舶以含硫量 0.5% 之 MDO 計算，反之以含硫 2.7% Heavy fuel oil (HFO) 計算，而寶瓶星號建造於 1993 年，依 IMO 規範，主引擎環保規範採用 Tier 0 類別，含硫量 0.5% 之 MDO，有關 Emission factor 與 Fuel correction factors 排放係數如表 13 與表 14。

表 13 主引擎空氣污染排放係數

含硫量 2.7% Heavy fuel oil (HFO) (g/kW · h)					
IMO Tier	規範年限	PM ₁₀	PM _{2.5}	NO _x	SO ₂
Tier 0	≤ 1999	1.50	1.20	18.10	10.50

表 14 輔助引擎空氣污染排放係數

含硫量 2.7% Heavy fuel oil (HFO) (g/kW · h)					
IMO Tier	規範年限	PM ₁₀	PM _{2.5}	NO _x	SO ₂
Tier 0	≤ 1999	0.38	0.35	13.82	2.28

$$\text{PM}_{10} = 285.88 \times 1.5 + 8,517.36 \times 0.38 = 3,665.41 \text{ (g)}$$

$$\text{PM}_{2.5} = 285.88 \times 1.2 + 8,517.36 \times 0.35 = 3,324.12 \text{ (g)}$$

$$\text{NO}_x = 285.88 \times 18.1 + 8,517.36 \times 13.82 = 122,884.34 \text{ (g)}$$

$$\text{SO}_2 = 285.88 \times 10.5 + 8,517.36 \times 2.28 = 22,421.32 \text{ (g)}$$

38 客輪活動強度對基隆港港區空氣污染物排放總量及空氣品質影響之研究

以 2016 年 1 月 1 日航次的寶瓶星號為例，該客輪各空氣污染排放量總和如表 15。本研究依序計算 2016~2020 年客輪與整體船舶的空氣污染排放總和後，彙整於表 16。

表 15 寶瓶星號空氣污染排放量資料

船名	日期	入港活動強度總和 (kWh)	出港活動強度總和 (kWh)	駐港排放 (kWh)	空氣污染排放量總和 (g)			
					PM ₁₀	PM _{2.5}	NO _x	SO ₂
寶瓶星	2016/1/1	336.52	723.67	7,743.0	3,665	3,324	122,884	22,421

表 16 各年度污染物排放總量

年度	PM ₁₀ (噸)		PM _{2.5} (噸)		NO _x (噸)		SO ₂ (噸)	
	客輪	總船舶	客輪	總船舶	客輪	總船舶	客輪	總船舶
2016 年	1.21	9.03	1.10	8.24	40.95	271.33	7.37	54.75
2017 年	1.73	11.99	1.57	10.97	54.90	357.09	10.49	72.53
2018 年	1.83	9.89	1.66	9.04	57.80	288.84	11.10	59.92
2019 年	1.77	8.66	1.63	8.39	57.56	262.05	10.60	51.82
2020 年	1.63	9.11	1.50	8.39	58.74	264.56	9.79	54.55
總計	8.17	48.67	7.48	44.62	269.95	1,443.88	49.35	293.57

受到 COVID-19 影響，2020 年不少船隻長期被迫停留港口無法出航，滯留港口時間異常增加，導致客輪靠泊之空氣污染物增加，如 2020 年 1 月 25 日鑽石公主號群聚感染 COVID-19 的關係，導致部分客輪被迫長時間靠泊基隆商港內，如寶瓶星號郵輪自 2020 年 2 月 10 日無法出港的情況，使之靠泊超過 2 個月。本研究從 2016~2020 年客輪活動特性計算出各類別的空氣污染排放量，參照表 11 資料發現空氣污染排放量，受與船舶噸位與引擎運轉量成正比，客輪部分 PM₁₀、PM_{2.5} 與 SO₂ 以 2018 年的

排放量最高，自 2019 年開始降低，除了與船舶進出艘次與噸位有關係外，同時受到國內法令自 2019 年開始限制 0.5% 低硫燃油有關，惟 NO_x 在 2020 年排放量增加之原因，靠泊郵輪以寶瓶星號為主，其 1993 年建造年份屬於 IMO Tier0 的高排放係數。

依據表 16 資料所示，客輪的艘數並非主要進出基隆港的船舶，基隆商港依作業型態以貨櫃船、雜貨船和散裝船為主，這 3 類船舶大部份依賴陸上設備（移動式起重機、橋式機）進行裝卸貨物作業，此時船隻維持最低動力即可，不同於客輪在靠泊時，需要持續輸出動力維持空調、照明及其他服務旅客設施，近年來客輪以國際郵輪為大宗，因為基隆港水深限制下，難以停靠與國際郵輪等噸位的貨櫃船、雜貨船和散裝船。所以，客輪總噸位與輸出動力普遍高於一般商船種，導致空氣污染排放量比例高。

4.2 基隆地區空氣污染排放比較

船舶屬於移動式污染源一環，但船舶的廢氣排放，無法顯示對於周邊環境空氣品質有關聯性，為了探討客輪空氣污染物排放對基隆市之貢獻度，參考環保署公告資料，近 5 年 PM_{10} 對於客輪排放量約在 1.1~1.7 噸之間，小於基隆市移動污染源之 1%，主要排放源為非港區外的移動式污染源；近 5 年 $\text{PM}_{2.5}$ 部分之客輪排放量約在 1.2~1.9 噸之間，小於基隆市移動污染源之 1%，主要排放源為非港區外的移動式污染源；近 5 年 SO_2 部分客輪排放量 40~60 噸之間，小於基隆市排放總和之 1%，主要排放源為固定式污染源。近 5 年 NO_x 部分之客輪排放量約在 7~12 噸之間，小於基隆市排放總和之 1%，主要排放源為固定式污染源。雖然基隆港近年之客輪總噸位及航次，有明顯增加的情形，對於基隆市空氣污染物排放之影響並不顯著。且各單位對空氣污染排放量評估不同，如環保署以陸上移動式污染源方式評估船舶資料，對於燃油排放係數及船舶負載狀態，可能會有低估情況，運用本研究整理參考公式，可具代表性之量化客輪空氣污染物排放，有助釐清污染物對環境之貢獻度。

表 17 2016~2020 年船舶與基隆市排放量比較

0	類別	2016	2017	2018	2019	2020
PM ₁₀ (公噸/年)	客輪排放	1.21	1.73	1.83	1.77	1.63
	移動污染源	1,172.86	1,171.07	1,153.48	1,129.34	1,137.28
	全市總和	1,798.51	1,787.91	1,708.56	1,673.01	1,661.52
PM _{2.5} (公噸/年)	客輪排放	1.10	1.57	1.66	1.63	1.50
	移動污染源	455.59	457.03	445.21	440.69	443.60
	全市總和	943.15	936.77	873.82	858.92	845.09
NO _x (公噸/年)	客輪排放	40.95	54.90	57.80	57.56	58.74
	移動污染源	2,247.61	2,260.98	2,157.39	1,663.29	1,676.69
	全市總和	17,305.17	6,987.89	6,271.70	5,785.34	5,676.29
SO ₂ (公噸/年)	客輪排放	7.37	10.49	11.10	10.60	9.79
	移動污染源	2,066.20	2,078.66	1,923.11	1,909.28	1,921.87
	全市總和	12,501.24	8,273.34	7,323.50	7,175.18	6,938.96

4.3 COVID-19 對客輪空氣污染排放之影響

國際航運受到 COVID-19 疫情衝擊，更導致全球郵輪旅遊市場受到嚴重的下降情況，如表 18 所示。自 2020 年 2 月起進出基隆港的國際郵輪艘次大幅降低，同時也發生靠泊中國際郵輪受到限制無法出港情況，本研究以排放強度與總噸位比值探討，發現未受疫情影響之前，比值約在 0.21~0.23 kWh / 噸之間；2020 年疫情發生時，比值為 0.768 kWh / 噸，但是在總噸位 / 艘次的比值未出現明顯差異。經本研究發現 2020 年客輪處於非營運狀態下長時間靠泊，有鑑於船舶靠泊的活動強度為主要船舶排放量來源，故影響該年度整體排放量，然非營運狀況下的輔助引擎運轉效率，則會造成本研究高估情況。

表 18 2016~2020 年客輪活動分析 (表格樣態)

年度	艘次	總噸位 (噸)	排放強度 (kWh)	總噸位 / 艘次	kWh / 噸
2016	224	13,864,704.6	2,977,075.2	61,896.0	0.215
2017	275	18,557,335.5	4,270,751.8	67,481.2	0.230
2018	286	19,947,191.5	4,518,562.2	69,745.4	0.227
2019	305	20,691,044.5	4,663,660.6	67,839.5	0.225
2020	87	5,593,689.6	4,297,050.3	64,295.3	0.768
總計	1,177	78,653,965.5	20,727,100.1	66,825.8	0.264

4.4 客輪使用岸電對空氣污染物排放之影響

為了達到港區空氣清淨的目標，現行以環保署對於船舶空氣污染改善措施有行政管理與自願性減量 (陳惠琪，2011)，行政管理部分以切換低硫燃油和登船抽查方式，現況臺灣各港口以限制使用 0.5% 以下低硫燃油，配合登船抽查配合落實度。自願性減量部分減速計畫、推行船舶減量技術、靠泊使用岸電為主，有鑑於船舶靠泊時空氣污染排放，遠大於航行的情況，若要有效降低應採取岸電措施 (葉蒼賓，2016)，本研究依據臺灣電力公司公告每年實際空氣污染物排放資料 (如表 19)，假設客輪於靠泊時從使用鍋爐燃油方式 100% 全面轉換為臺電公司岸電提供動力之評估如表 20。

表 19 臺電歷年空氣污染物資料 (公斤 / 百萬度)

類別	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
氮氧化物	379	360	317	283	264
二氧化硫	298	278	181	125	102

因岸電設施為船舶靠泊時才能使用的裝置，故只考慮客輪靠泊狀態的空氣污染排放情況，下述以寶瓶星號 2016 年 1 月 1 日航次為例，進行下述計算：

42 客輪活動強度對基隆港港區空氣污染物排放總量及空氣品質影響之研究

1. 燃油之空氣污染排放量：

$$\text{輔助引擎活動強度} = \text{AER} \times \text{LD} \times \text{H}$$

$$\text{輔助引擎} : 3,360.7 \times 0.32 \times 7.2 = 7,743.05(\text{kWh})$$

參考表 14 輔助引擎使用含硫量 0.5% Heavy fuel oil 燃油之空氣污染排放係數，分別為 NO_x 13.82(g/kW · h) 與 SO_2 2.28(g/kW · h)。

$$\text{NO}_x = 7,743.05 \times 13.82 = 107,008.951 (\text{g})$$

$$\text{SO}_2 = 7,743.05 \times 2.28 = 17,654.154 (\text{g})$$

2. 岸電之空氣污染排放量：

以輔助引擎功率 7,743.05(kWh) 轉換為表 19 臺電公司 2016 年公告的空氣污染物排放係數，分別為 379 (公斤 / 百萬度) 與 SO_2 298 (公斤 / 百萬度)。

$$\text{NO}_x = 7,743.05 \times 379 \div 1,000 = 2,934.616 (\text{g})$$

$$\text{SO}_2 = 7,743.05 \times 298 \div 1,000 = 2,307.429 (\text{g})$$

以 2016 年 1 月 1 日航次的寶瓶星號為例，靠泊時其燃油的活動強度為 7,743.05(kWh)、 NO_x 排放量為 107,008.951 (g)、 SO_2 排放量為 17,654.154 (g)；若完全轉換為岸電後， NO_x 排放量為 2,934.616 (g)、 SO_2 排放量為 2,307.429 (g)。本研究以此方式依序計算 2016~2020 年客輪靠泊狀態下，燃油的活動強度、燃油的空氣污染排放量，與完全轉換成岸電後之空氣污染排放量總和，彙整於表 20。

表 20 客輪岸電污染物轉換評估表

年份	活動強度 (kWh)	燃油 (噸)		岸電 (噸)	
		NO_x	SO_x	NO_x	SO_x
2016	2,699,688.9	36.8	6.2	1.0	0.8
2017	3,904,430.0	49.7	8.9	1.4	1.1
2018	4,129,666.0	52.4	9.4	1.3	0.7
2019	4,260,158.4	52.2	9.7	1.2	0.5
2020	4,186,395.6	57.2	9.5	1.1	0.4
總計	19,180,338.9	248.3	43.7	6.0	3.6

若客輪靠泊時，能以燃油發電 100% 全部轉換成臺灣電力公司供電方式為例，客輪 2016~2020 年 NO_x 排放量總和，從 248.3 噸降低至 6.0 公噸，SO₂ 排放量總和，從 43.7 噸降低至 3.6 公噸的情況，推估假設客輪靠泊時，全面使用岸電設施能大幅度降低 NO_x 及 SO₂ 排放量。

本研究將 2016~2020 年停靠基隆港各系列郵輪資料彙整於表 21，雲頂郵輪、公主遊輪及歌詩達郵輪這 3 系列靠泊共計 1,030 艘次，且活動強度總和為 16,730,291 kWh，佔整體客輪數據 80% 以上，因其餘郵輪系列，並未將基隆港設定為郵輪母港，所以進出基隆港的航次不固定，故為達到有效空氣污染降低可行性目標，將這 3 系列郵輪列為岸電轉換模擬評估情境之討論對象。

1. 岸電使用之模擬評估情境一為客輪 100% 轉換岸電設施之最大減量狀態。
2. 岸電使用之模擬評估情境二為雲頂郵輪系列全部轉換岸電設施。
3. 岸電使用之模擬評估情境三為公主遊輪系列全部轉換岸電設施。
4. 岸電使用之模擬評估情境四為歌詩達郵輪系列全部轉換岸電設施。

以模擬評估情境二雲頂郵輪系列 2016 年為例，進行下述計算：

$$\text{NO}_x = 1,318,694 \times 379 \div 1,000 = 499,785.026 \text{ (g)}$$

$$\text{SO}_2 = 1,318,694 \times 298 \div 1,000 = 392,970.812 \text{ (g)}$$

表 21 2016~2020 年各系列郵輪活動強度與艘次資料

郵輪系列	靠泊排放 (kWh)						艘次 總和
	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	總計	
雲頂郵輪	1,318,694	1,373,287	1,686,347	1,449,441	4,049,380	9,877,148	746
公主遊輪	839,758	1,590,753	1,662,091	1,741,648	72,880	5,907,131	224
歌詩達郵輪	95,394	312,036	231,690	306,894	0	946,012	60
精緻遊輪	57,578	251,315	187,541	90,339	0	586,772	16
皇家加勒比郵輪	223,776	147,889	57,482	116,194	0	545,341	19

44 客輪活動強度對基隆港港區空氣污染物排放總量及空氣品質影響之研究

荷美郵輪	0	79,376	132,540	146,698	0	358,614	11
挪威郵輪	0	6,473	84,043	78,936	0	169,452	10
日本郵輪	56,897	11,298	15,432	38,647	18,914	141,188	11
地中海郵輪	0	0	31,609	74,205	0	105,814	2
赫伯羅特郵輪	0	27,918	10,757	33,409	0	72,085	5
愛達郵輪	0	34,400	0	34,473	0	68,873	4
銀海郵輪	14,787	17,127	0	6,081	11,864	49,858	6
維京郵輪	0	0	0	39,641	0	39,641	4
商船三井	5,024	4,938	4,891	18,000	0	32,853	5
世鵬郵輪	7,794	7,533	7,613	7,488	0	30,428	4
麗晶七海郵輪	19,416	10,122	0	0	0	29,538	3
皇后郵輪	21,498	0	0	0	0	21,498	1
鳳凰旅遊	0	0	0	18,689	0	18,689	1
水晶遊輪	0	0	0	13,623	0	13,623	1
其他	39,074	29,965	17,631	45,754	33,358	165,781	44
總計	2,699,689	3,904,430	4,129,666	4,260,158	4,186,396	19,180,339	1,177

以 2016 雲頂郵輪系列 2016 年為例，靠泊時其燃油的活動強度為 1,318,694(kWh)，若完全轉換成岸電後 NO_x 排放量為 499,785.026 (g)、SO₂ 排放量為 392,970.812 (g)。本研究以此方式依序計算 2016~2020 年各模擬評估情境靠泊狀態下，若完全轉換成岸電後，空氣污染排放量總和彙整於表 22。

表 22 岸電使用之模擬評估

單位：公噸

		2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	總和	相較情境一之總和占比
情境一	NO _x	1.02	1.41	1.31	1.21	1.11	6.05	
	SO ₂	0.80	1.09	0.75	0.53	0.43	3.60	
情境二	NO _x	0.50	0.49	0.53	0.41	1.07	3.01	49.7%
	SO ₂	0.39	0.38	0.31	0.18	0.41	1.67	46.5%
情境三	NO _x	0.32	0.57	0.53	0.49	0.02	1.93	31.9%
	SO ₂	0.25	0.44	0.30	0.22	0.01	1.22	33.9%
情境四	NO _x	0.04	0.11	0.07	0.09	0	0.31	5.1%
	SO ₂	0.03	0.09	0.04	0.04	0	0.20	5.4%

本研究若能達到模擬評估，情境一為最理想削減客輪空氣污染量的情況；情境二為雲頂郵輪系列（往來基隆港的客輪中最多艘次的群體），近 5 年於基隆港活動的客輪總計 1,177 航次，雲頂郵輪系列則停靠 746 航次，而轉由臺電公司所產生 3.01 噸 NO_x 以及 1.67 噸 SO₂，依岸電設施轉換空氣污染物排放情況，相較於情境一由臺電公司產生空氣污染物 NO_x 的 49.7% 以及 SO₂ 的 46.5%；模擬評估情境三，則為公主遊輪系列屬於大噸位的郵輪群體轉，船舶總噸位介於 7 萬到 15 萬噸之間，而轉由臺電公司產生 NO_x 1.93 噸以及 SO₂ 1.22 噸。依岸電設施轉換空氣污染物排放情況，相較於情境一由臺電公司所產生空氣污染物 NO_x 的 31.9% 以及 SO₂ 的 33.9%；模擬評估情境四歌詩達郵輪系列，因基隆未屬於該系列的郵輪母港，故往來基隆港航次相較少於雲頂郵輪系列與公主遊輪系列，尤其 2020 年受到 COVID-19 影響，以致未規劃航次進入基隆港，依岸電設施轉換空氣污染物排放情況，轉由臺電公司產生 NO_x 0.31 噸以及 SO₂ 0.2 噸，相較於情境一由臺電公司所產生空氣污染物 NO_x 的 5.1% 以及 SO₂ 的 5.4%。

因岸電設施受到 IMO、國際電工協會 (International Electrotechnical Commission, IEC)、國際標準組織 (International Organization for Standardization, ISO) 等國際組織訂定相關基準影響，截至目前尚未有世界統一規格之岸電插頭，國際上通用規格之岸電插頭共計 4 類 (葉倉賓, 2016)，故因國際岸電設施規格的差異因素，導致碼頭設施建置岸電設施成本造昂貴，且無法兼顧所有船舶需求，致使降低船方使用意願，此外，港區管理者對於碼頭規劃困難，以 2019 年國際客輪 305 航次靠泊基隆港為例，只有歌詩達威尼斯號 4 航次與歌詩達大西洋號 3 航次共 7 航次具備有岸電設備 (林啟燦, 2020)，據本研究推估最有效益的方式，為同時執行模擬評估方式二與三，經岸電轉換後之空氣污染排放，能達成情境一由臺電公司所產生空氣污染物 NO_x 的 81.6% 和 SO_2 的 80.4%。

五、結論與建議

5.1 結論

1. 本研究利用總噸位數推算引擎輸出動力，並計算出客輪於不同輸出功率組合下的活動強度 (kWh)。由船舶整體排放數據可知，空氣污染物排放最大來源是船舶靠泊行為，且活動強度隨船靠泊之時間增加而增加。此外，因客輪靠泊的碼頭，距堤口約 1.8~2 海浬，比起其他商船路途距離較遠，且船舶總噸位約在 5 萬~13 萬噸之間，綜上述 2 項因素使客輪進出港活動強度，在整體船舶活動較靠泊活動占比為高，整體而言，近 5 年來客輪活動約占整體船舶活動強度之 13~21%。
2. 基隆商港依作業型態而言，以貨櫃船、雜貨船和散裝船為主，這 3 類船舶大部份依賴陸上設備 (移動式起重機、橋式機) 進行裝卸貨物作業，船隻僅須維持最低動力即可。然客輪在靠泊時，需要持續輸出動力維持空調、照明及其他服務旅客設施，致使客輪總噸位與輸出動力普遍高於一般商船，導致空氣污染物排放量比例較高。
3. 經本研究統計資料所顯示，客輪排放的空氣品質污染物濃度比例，小於基隆市移動污染源 1%， SO_2 及 NO_x 主要以非移動污染源排放為主， PM_{10} 與 $\text{PM}_{2.5}$ 則以市內移動式污

染源為主。雖然基隆港近年之客輪總噸位及航次有明顯增加的情形，對於基隆市空氣污染物排放之影響並不顯著。

4. 受到 COVID-19 疫情之影響，2020 年不少船隻滯留港口時間異常增加，導致計算之靠泊空氣污染物排放增加，船舶處於非營運狀態運作，致使影響 2020 年度空氣污染物整體排放量。
5. 客輪於靠泊階段若能使用岸電設施，可有效降低 NO_x 與 SO_2 空氣污染物排放，但因岸電插頭設備種類之差異，以致現階段無法達到客輪於靠泊時，全面使用岸電之限制，可參酌模擬評估情境二、三（雲頂郵輪系列、公主遊輪系列）之情況，設定短、中期計畫逐步汰換、更新碼頭設施。

5.2 建議

1. 經研究使用潔淨能源、使用岸電，能降低船舶活動所帶來的空污問題，除此之外，建議鼓勵船公司或船東自願性減量，如：船舶限速、安裝污染防制設備（排煙脫硫系統、氮氧化物處理），以及定期汰換舊型船隻等。對於建議提高獎勵與規範措施，以及船舶遵守港區環保措施業者，提供優惠或降低港費用，或提高船舶靠泊時，使用燃油設備徵用費，減少港區設備、基礎設施，得以有效降低航運作業，對於港區周邊環境衝擊。
2. 現有陸上、海上移動污染源排放推估方式不一致，如環保署 (TEDS 10.1 版本與環境影響評估書) 不同於國際港口空氣污染排放評估方式 (洛杉磯、長灘港、上海港、臺灣交通部運輸研究所)，是以陸上移動式污染源方式評估船舶資料，對於燃油排放係數、船舶噸位以及船舶負載狀態 (入港、出港、靠泊) 會有低估情況，尤其環保署排放量清冊難以表示船舶對於空氣污染的影響程度，若要有更好的比對成果，建議使用相同評估基礎，故運用本研究整理參考公式，量化客輪空氣排放對於環境貢獻性更具代表性。
3. 依據運研所資料所示，全球目前對於確立目標以執行岸電的政策與法規部分，惟美國與中國較為積極，若政府單位能參考國際已落實岸電的政策與法規，儘速立法執行，對於相關的法規與配套措施能有完整性，方能促成岸電政策推動。

參考文獻

- Cooper D.A., 2003, Exhaust emissions from ships at berth. Atmospheric Environment 37, 3817–3830.
- Starcrest Consulting Group, 2019, San Pedro Bay Ports Emissions Inventory Methodology Report.
- Starcrest Consulting group, 2019, The Port of Los Angeles inventory of air emissions for calendar year 2018.
- 臺灣電力公司，2021 年 5 月查詢。https://www.taipower.com.tw/
- 臺灣中油股份有限公司，2021 年 7 月查詢。https://www.cpc.com.tw/
- 田文國、苗林華、簡光輝，2012，船、機、螺槳在運航操控性能運用之探討，中華海員月刊，第 701 期，頁 35- 頁 40。
- 交通部，2021 年 3 月查詢，商港法。https://law.moj.gov.tw/
- 交通部航港局，2021 年 3 月查詢。https://www.motcmpb.gov.tw/
- 交通部統計資訊網，2021 年 3 月查詢。https://stat.motc.gov.tw/
- 行政院交通部，2018，行政院公報，第 024 卷，第 020 期。https://join.gov.tw/
- 行政院環保署，2018，空氣污染防制總檢討，空氣品質改善維持資訊網，頁 45-64。
https://air.epa.gov.tw/
- 行政院環保署，2021 年 3 月查詢，空氣污染防制法。https://www.epa.gov.tw/
- 行政院環保署，2021 年 3 月查詢，空氣污染排放清冊。https://teds.epa.gov.tw/
- 吳義林、蔡德明、賴信志 楊榮元、張鴻良、邱慧真，2019，建立即時氣象模組及船舶排放之三維空氣品質模擬系統，交通部運輸研究所，頁 4-1- 頁 4-10。
- 林佩君，2009，基隆地區大氣懸浮微粒受船舶活動影響之研究，國立臺灣海洋大學，碩士論文。

- 林秋瑾，2015，臺灣港群建立之生態港之阻礙因素，國立臺灣海洋大學，碩士論文。
- 林素如，2014，綠色港口推動策略，國立交通大學，博士論文。
- 林啟燦、許浩洋、卓明遠，2020，臺灣港群岸電設施設置及規劃推動可行性，交通部運輸研究所。
- 邱永芳、陳桂清、柯正龍、葉雨松、許真瑜，2011，船舶岸電效益評估，臺灣地區港埠節能減碳研討會論文集，交通部運輸研究所，頁 6-1- 頁 6-19。
- 侯佳芸，2012，綠色港口永續發站之關鍵成功因素，國立交通大學，碩士論文。
- 胡家聲、廖宗、康翠芳，2019，高雄港綠港發展策略之探討，航運季刊，第二十八卷，第三期，頁 51- 頁 72。
- 海域資訊整合平台，2021 年 3 月查詢。<https://ocean.moi.gov.tw/>
- 袁順光、蔡奇呈、黃俊誠、林晉璋、陳志立，2011，大型船舶進入基隆港之安全評估模式，航運季刊，第二十卷，第三期，頁 19-37。
- 曹兆凡，2009，港口營運與周邊環境空氣品質關係之研究－基隆港在港商船 NO_x 及 SO_x 之排放，國立臺灣海洋大學，碩士論文，。
- 船舶暨海洋產業發展中心，2018，IMO 船舶硫排放限制之影響及對應措施(上)，323 期。<https://www.soic.org.tw/>
- 船舶暨海洋產業發展中心，2018，IMO 船舶硫排放限制規定 2020 年準時生效，317 期、319 期、320 期。<https://www.soic.org.tw/>
- 許淑禎，2016，綠色港口空氣污染指標之研究 - 以基隆港為例，國立臺灣海洋大學，碩士論文。
- 陳桂清、柯正龍、葉雨松、許真瑜、徐澄清、洪雅琪、吳明蒼、杜思蘋、陳凱莉、許茗凱、簡嘉霏、李權峰、涂致曄，2019，臺灣港埠節能減碳效益提升之研究，交通部運輸研究所，頁 3-7- 頁 3-22。
- 陳惠琪，2011，港區空氣污染物管制策略及執行經驗，行政院環境保護署。

50 客輪活動強度對基隆港港區空氣污染物排放總量及空氣品質影響之研究

黃志輝、丁焰、尹航、王宏麗、馬冬、蕭寒，2016，中國船舶大氣污染排放清單報告，中國環境保護部機動車排污監控中心。

葉倉賓，2016，基隆港郵輪岸電系統之研究，國立臺灣海洋大學，碩士論文。

廖永裕，2016，基隆港執行率色港灣防止空氣污染之脆弱性分析，國立臺灣海洋大學，碩士論文。

臺灣港務股份有限公司，2021年3月查詢。<https://www.twport.com.tw/>

臺灣港務股份有限公司基隆港務分公司，2020，臺北港物流倉儲區第一、二 -1 期開發計畫環境影響說明書，專案小組第二次審查會議。

臺灣港務股份有限公司基隆港務分公司，2021年3月查詢。<https://kl.twport.com.tw/chinese/>

臺灣港務股份有限公司郵輪旅遊網，2021年3月查詢。<https://cruise.twport.com.tw/>

臺灣港棧服務網，2021年3月查詢。<https://tpnet.twport.com.tw/>

蔡薇，2004，船舶大污染排放量的計算方式，武漢大學，博士論文，頁 191- 頁 194。

鄭艾瑋，2013，基隆港轉型之研究 - 以郵輪泊靠為例，國立臺灣海洋大學，碩士論文。