

國立成功大學
交通管理科學系碩士班

碩士論文

港口排放清單減量策略分析-以高雄港為例

**The Analysis of Reduction Strategies on Port Emissions
Inventory -A Case of Kaohsiung Port**



研究生：蔡揖安

指導教授：張瀨之 博士

中華民國一百零七年十二月

國立成功大學

碩士論文

港口排放清單減量策略分析-以高雄港為例

The Analysis of Reduction Strategies on Port
Emissions Inventory -A Case of Kaohsiung Port

研究生：蔡揖安

本論文業經審查及口試合格特此證明

論文考試委員：

鄧金原

沈宇緯

張靜之

指導教授：張 靜 之

系(所)主管：陳 勁 甫

中 華 民 國 107 年 12 月 21 日

摘要

為了減輕港口空氣污染對港區周遭居民與環境所造成的負面影響，本研究以高雄港為研究主體，評估貨櫃船、散裝船、油輪、拖車頭與裝卸機具之排放量，並提出兩階段之港口排放清單減量策略。第一階段以《國家自訂預期貢獻》的標準為目標，希望在 2030 年將高雄港港口排放清單之排放量減低至 2005 年排放量的 80%，而減量策略包含：船舶減速、停泊船隻使用岸電、50%的拖車頭使用液態天然氣(LNG)和 50%的裝卸機具進行電氣化；第二階段則以《溫室氣體管理辦法》的標準為目標，希望在 2050 年將高雄港港口排放清單之排放量減低至 2005 年排放量的 50%。而第二階段減量策略則包含：船舶減速、使用岸電、燃料替換、所有拖車頭使用液態天然氣(LNG)和所有裝卸機具進行電氣化。

研究結果發現，與 2005 年高雄港的排放量相比，實施第一階段減量策略可以分別降低高雄港港口排放清單(CO₂、CH₄、N₂O、PM₁₀、PM_{2.5}、NO_x 和 SO_x)46%、26%、25%、77%、77%、76%和 68%的排放量，所有氣體皆可達成第一階段減量的目標。此外，與 2005 年相比，第一階段減量策略可以減少 11.1 億美元的外部成本，降幅達到 73%。繼續與 2005 年的排放量相比，實施第二階段減量策略可分別減少排放清單 (CO₂、CH₄、N₂O、PM₁₀、PM_{2.5}、NO_x 和 SO_x)57%、59%、53%、79%、79%、80%和 69%的排放量，所有氣體皆可達成第二階段的減量目標。此外，與 2005 年相比，實施第二階段減量策略，可以減少 11.6 億美元的外部成本，降幅達到 76%。

若以減少港口溫室氣體的排放為目標，本研究建議優先實施船舶燃料替換的策略，CO₂、CH₄和 N₂O 可分別降低 21%、21%和 50%。如果是以降低懸浮微粒和有害氣體為目標，本研究則建議優先實施岸電(OPS)，PM₁₀、PM_{2.5}、NO_x 和 SO_x 可分別降低 75%、75%、72%和 73%。

關鍵字：高雄港、港口排放清單、岸電、燃料替換、國家自訂預期貢獻、溫室氣體管理辦法

The Analysis of Reduction Strategies on Port Emissions Inventory -A Case of Kaohsiung Port

Yi-An Tsai

Ching-Chih Chang

Department of Transportation and Communication Management Science

SUMMARY

In order to reduce the negative impact of emissions inventory on residents and the environment around the port, this study evaluate the emission that generated by vessels, truck tractors and cranes in Kaohsiung port. Moreover, this study also drafted reduction strategies in two stages to improve the air quality of Port of Kaohsiung. First stage targets the standard of Intended Nationally Determined Contributions (INDC), hoping to decline the 20% of emissions in 2030 compared to 2005. The reduction strategies including reducing the speed and using the OPS on vessels ; transferring the fuel on half of the cranes and truck tractors. Besides, second stage targets the standard of Greenhouse Gas Reduction Act, hoping to decline 50% of emissions in 2050 compared to 2005. The reduction strategies including vessel deceleration and OPS ; transferring the fuel on all the vessels, cranes and truck tractors.

The study found that after implemented first stage reduction strategies, port emissions inventory (CO₂, CH₄, N₂O, PM₁₀, PM_{2.5}, NO_x and SO_x) in 2030 would decrease 46%, 26%, 25%, 77%, 77%, 76% and 68%, respectively compared to 2005. Moreover, the external cost could decline 1.11 billion USD. Furthermore, implemented second stage reduction strategies could decrease port emissions inventory (CO₂, CH₄, N₂O, PM₁₀, PM_{2.5}, NO_x and SO_x) 57%, 59%, 53%, 79%, 79%, 80% and 69%, respectively in 2050 compared to 2005. And the external cost could decline 1.16 billion USD.

If target to reduce greenhouse gases from the Port, this study suggests to implement fuel transfer on vessels because the emission of CO₂, CH₄ and N₂O can be reduced by 21%、21% and 50%, respectively. However, if target to reduce PM and harmful gases, this study suggests to carry out OPS, which can reduce PM₁₀, PM_{2.5}, NO_x and SO_x by 75%, 75%, 72%, and 73%, respectively.

Keywords : Port of Kaohsiung, port emissions inventory, fuel transfer, INDC, Greenhouse Gas Reduction Act

INTRODUCTION

To reduce the air pollution the produced by the port, IMO passed the agreement in 2018 which asked the CO₂ emissions of global shipping in 2050 should less than 50% of CO₂ emissions in 2008. This is the first time that IMO set a clear goal for carbon reduction in shipping, showing that decline the CO₂ emissions from shipping is an important and urgent issue. Moreover, lots of strategies about reducing the air pollution in the port have been proposed. For examples, López-Aparicio (2017) mentions that ocean-going vessels use low-sulfur fuels can effectively reduce greenhouse gas emissions; Sciberras (2016) analyzes that the apply of onshore power and LNG fuel can reduce the CO₂ emissions of vessels; Chang (2016) evaluates the strategies of vessel deceleration and fuel conversion can significantly reduce CO₂ and SO₂ emissions from vessels.

According to World Shipping Council (2018), port of Kaohsiung is the 13th biggest port in the world in 2016 which also located in the hardest hit by air pollution in East Asia. Therefore, this study set port of Kaohsiung as evaluated port to evaluate the air pollution that generated by vessels, truck tractors and cranes, hoping to estimate the amount of air pollution in port of Kaohsiung completely. In order to systematically assess the air pollution for port of Kaohsiung, this study referred to the format of emissions inventory from USEPA and established an emissions inventory for port of Kaohsiung to examine the air pollution clearly. The emissions inventory in this study covers seven gases, of which, CO₂, CH₄ and N₂O are greenhouse gases; PM₁₀, PM_{2.5} are particulate matters, NO_x and SO_x are deleterious gases. All of these gases will pose a serious threat to the environment and humans.

Regarding to the reduction strategies for port of Kaohsiung in this study, on the part of vessels including vessel deceleration, fuel transfer and the usage of onshore power. On the part of truck tractors adopts fuel transfer and the part of cranes adopts electrification. In addition, this study also estimates the external cost of emissions inventory that caused by port of Kaohsiung, specifically quantifies the negative impacts of these gases on society and the environment.

The reduction strategies in this study would divide into two stages. The first stage is based on INDC which proposed by Taiwan in 2014, targeting to reduce the emissions of greenhouse gas in 2030 to 80% of emissions in 2005. The second stage is based on Greenhouse Gas Reduction and Management Act which drew up by Taiwan in 2015, targeting to reduce the emissions of greenhouse gas in 2050 to 50% of emissions in 2005. Although neither of these two policies set a detailed process for the shipping sector, in order to cope with the action of IMO and reduce the air pollution generated by shipping. This study would targeted the standards of INDC and Greenhouse Gas Reduction and Management Act as the reduction goals.

MATERIALS AND METHODS

Referred to the regulation of Green Flag Incentive Program (POLB, 2009), this study assumed that all the vessels need to decelerate while they get into the frontier that outside 40nm of port of Kaohsiung. Therefore, the research scope in this study not only including port of Kaohsiung but also the area that extend 40nm of the port.

Based on the statistics of Annual Statistical Report Port of Kaohsiung (2018), there has 18,773 vessels called on port of Kaohsiung in 2017. Among the vessels, container ships, bulk ships, oil tankers and others accounted for 50%, 19%, 16% and 15% respectively. Due to lots of vessels called on port of Kaohsiung every year, it is impossible to evaluate the emissions for each of them. For the reason, this study divided the vessels into four groups and chose a vessel with intermediate value of deadweight tonnag from each group as research target.

This study used Activity-Based Model and Grey theory to evaluate the emissions inventory of port of Kaohsiung in 2030 and 2050. Moreover, this study also quatified these emissions inventory into external cost, hope to understand the economic loss caused by the air pollution clearly. The methodology and relevant imformation referred to IMO (2014) 、ITF Transport Outlook (ITF, 2015) 、Virginia Offshore Wind Technology Advancement Project (VOWTAP, 2014), POLB(2017), KaoMing Container Terminal Corp and Port of Kaohsiung Taiwan International Corporation.

RESULT AND DISCUSSION

The study found that after carrying out the reduction strategies in first stage, the emissions of Port of Kaohsiung in 2030 could not only achieve the standard of INDC but also reduced the emissions by 25-77% compared to 2005.

After completing the reduction strategies in first stage, this study continues to implement the reduction strategies in second stage. The result showed that the emissions of Port of Kaohsiung in 2050 could not only achieve the standard of Greenhouse Gas Reduction and Management Act but also reduced the emissions by 53-80% compared to 2005. In particular, the reduction of CO₂, CH₄ and N₂O are more significant than the first stage.

In order to evaluate the economic loss that caused by the air pollutions, this study quantified the negative impact into external cost. The result indicated that the external cost could save USD1.1 billion and USD1.16 billion, respectively in different stages, which compared to 2005.

CONCLUSION

Port of Kaohsiung generated lots of air pollution every year and caused serious threaten to the residents and environment surrounding the port. Therefore, it is important to offer an effective method to decline the air pollution from the port.

In this study, the reduction strategies were divided into two stages to discuss the possibility on reducing the air pollution in the Port of Kaohsiung. The polluters include cranes, truck

tractors, and vessels. The first stage is before 2030 and the second one is before 2050, the regulations follow INDC and the Greenhouse Gas Reduction and Management Act, respectively.

To sum up, if we can implement thoroughly, these reduction strategies are not only effectively decrease the emissions from equipment, vehicles, and vessels, but also improve the external cost from port of Kaohsiung. It contributes to make environmental quality and human health better.



致謝

雖然一直期待著取得碩士學位的那天趕快到來，但當自己符合畢業資格時，卻還是有點不捨、不敢相信。回想兩年的碩士生涯，雖然偶遇挫折，但還算一帆風順，而這一切除了歸功於自己的努力之外，更要感謝周遭一路陪伴的師長、同學和親友。

首先，我要感謝我的指導教授-張瀨之老師。謝謝老師國經的課程，讓我體認投資理財的重要性，讓我能即早擘劃投資藍圖，勇敢追求未來可能的財富。謝謝老師論文上的指導，讓我的論文從無到有，雖然有時爭論的過程充滿濃濃的煙硝味，但事後回想，也許就是這種深入的辯論，才讓當時的我更能明白論文的方向。謝謝老師給我出國參加研討會的機會，讓我可以拓展自己的國際視野，看到更多元的世界。最後，我也要謝謝老師總是把所有最好的東西分享給她的學生，時時刻刻都讓我們感受到她的關心，有妳真好。

此外，我也要謝謝博建、明禧、有聞和又肇，感謝你們的帶領，讓我的碩士進度省走好多冤枉路，讓我可以提早完成論文；我也要感謝昱偉、竺瑾、亦萱、毓淳和怡萊的包容，讓我可以不顧形象的在研究室裡隨心所欲的吵鬧，勇敢展現那最真實的我；還有，我也要感謝珪亨、騏均、柏元、柏翔、迎哲和博鈞的陪伴，讓我可以在這個偌大的系所找到第二個歸屬，吃飯、讀書、打球和玩遊戲都有人陪，讓我的碩士生活每天都感到窩心。我也要感謝怡璇的不離不棄，讓我能心無旁騖的完成論文；最後，我要感謝爸媽的全力付出，讓我的碩士生活無後顧之憂，也謝謝爸媽努力參與我人生每個重要的時刻，讓我的碩士生涯不留遺憾。

碩士生涯的結束，只是另一段人生的啟程，短短兩年的碩士生活，我深深覺得自己所獲得的回報遠超過當初想像，很慶幸自己當時選擇繼續讀研究所，這是我人生最成功的決定之一。

揖安 謹誌

民國一零八年一月 於府城

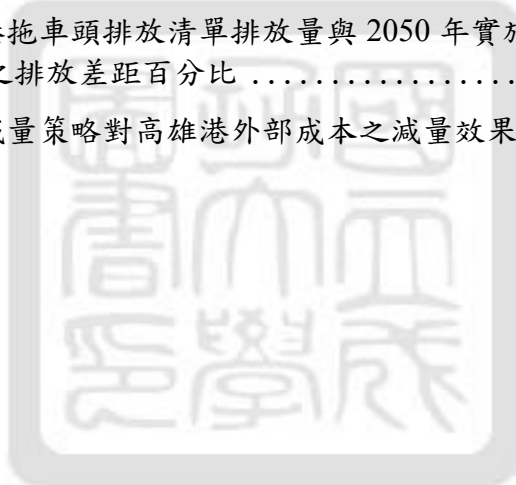
目錄

第一章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究動機	6
1.3 研究目的	9
1.4 研究架構	9
第二章 文獻回顧	11
2.1 港口空氣污染和汙室氣體排放量之計算模型	11
2.2 港口產生的空氣汙染與溫室氣體對港區周遭之負面影響與成本	12
2.3 港口溫室氣體與空氣污染之相關減量策略	14
2.4 灰預測模型	18
2.5 小結	19
第三章 研究方法	27
3.1 資料蒐集	27
3.2 變數說明	29
3.3 活動基礎模型	31
3.4 預測模型	34
3.5 小結	36
第四章 實證分析	37
4.1 基礎情境(BAU)下高雄港港口排放清單之排放量	37
4.2 第一階段港口排放清單減量策略	46
4.3 第二階段港口排放清單減量策略	53
4.4 港口排放清單之外部成本	59
4.5 小結	62
第五章 結論與建議	64
5.1 結論	64
5.2 建議	66
5.3 研究限制	67
5.4 未來研究方向	68
參考文獻	69

圖目錄

圖 1.1 2015 年全球二氧化碳排放量-以部門分	2
圖 1.2 全球經濟發展指數，(1990=100)	3
圖 1.3 1980-2017 年世界船舶載重噸數-以船型區分.....	3
圖 1.4 2012 年不同船型之二氧化碳排放量 (百萬噸).....	4
圖 1.5 高雄港每年進港船舶數量	6
圖 1.6 研究架構流程圖	10
圖 3.1 高雄港碼頭位置圖	29
圖 4.1 2005-2050 年高雄港船舶出入數量預測	37
圖 4.2 高雄港港口排放清單之排放量-BAU 情境(只包含 CO ₂).....	38
圖 4.3 高雄港港口排放清單之排放量-BAU 情境(CO ₂ 除外).....	39
圖 4.4 船舶排放清單之排放量-BAU 情境(只包含 CO ₂).....	40
圖 4.5 船舶排放清單之排放量-BAU 情境(CO ₂ 除外).....	41
圖 4.6 船舶排放清單之排放比例-以船舶種類區分	41
圖 4.7 船舶排放清單之排放比例-以船舶活動情形區分	42
圖 4.8 2005-2017 高雄港貨櫃裝卸量	43
圖 4.9 裝卸機具排放清單之排放量-BAU 情境(只包含 CO ₂).....	44
圖 4.10 裝卸機具排放清單之排放量-BAU 情境(CO ₂ 除外).....	44
圖 4.11 2011-2017 年裝卸機具數量	45
圖 4.12 拖車頭排放清單之排放量-BAU 情境	45
圖 4.13 2005 年高雄港港口排放清單排放量、INDC 排放量標準與 2030 年實施第一階段港口排放清單減量策略後之排放量	47
圖 4.14 2005 年高雄港港口排放清單排放量與 2030 年實施第一階段港口排放清單減量策略後之排放差距百分比	47
圖 4.15 第一階段船舶排放清單減量策略實施後之排放量	49
圖 4.16 第一階段船舶排放清單減量策略之排放差距百分比	49
圖 4.17 第一階段裝卸機具排放清單減量策略實施前後之排放量	50
圖 4.18 2005 年高雄港裝卸機具排放清單排放量與 2030 年實施第一階段裝卸機具排放清單減量策略後之排放差距百分比	51
圖 4.19 第一階段拖車頭排放清單減量策略實施前後之排放量	52

圖 4.20 2005 年高雄港拖車頭排放清單排放量與 2030 年實施第一階段拖車頭排放清單減量策略後之排放差距百分比	53
圖 4.21 2005 年高雄港港口排放清單排放量與 2050 年實施第二階段港口排放清單減量策略前後之排放量	54
圖 4.22 2005 年高雄港港口排放清單排放量與 2050 年實施第二階段港口排放清單減量策略後之排放差距百分比	54
圖 4.23 第二階段船舶排放清單減量策略實施後之排放量	56
圖 4.24 2005 年高雄港船舶排放清單排放量與 2050 年實施第二階段船舶排放清單減量策略後之排放差距百分比	56
圖 4.25 第二階段裝卸機具排放清單減量策略實施後之排放量	57
圖 4.26 2005 年高雄港裝卸機具排放清單排放量與 2050 年實施第二階段裝卸機具排放清單減量策略後之排放差距百分比	58
圖 4.27 第二階段拖車頭排放清單減量策略實施後之排放量	59
圖 4.28 2005 年高雄港拖車頭排放清單排放量與 2050 年實施第二階段拖車頭排放清單減量策略後之排放差距百分比	59
圖 4.29 實施兩階段減量策略對高雄港外部成本之減量效果	61



表目錄

表 1.1 高雄港每年進港船舶數量-以船型區分	7
表 2.1 文獻回顧彙整表格	20
表 3.1 本研究參數與索引說明	29
表 4.1 高雄港港口排放清單排放量之比重	39
表 4.2 排放清單之外部成本係數	60
表 4.3 高雄港港口排放清單之外部成本	60
表 4.4 各項減量策略對各種氣體之減量成效	62



第一章 緒論

1.1 研究背景

根據政府間氣候變化專門委員會(IPCC)在 2014 年所發布的第五次評估報告書指出，化石燃料的大量消耗和頻繁的人類活動不但增加全世界溫室氣體的濃度，也提高地球的平均溫度。此外，根據美國國家海洋暨大氣總署(NOAA)在 2017 年所公布的年溫室氣體指數(AGGI)為 1.6，表示地球因溫室氣體所產生的全球暖化衝擊比 1990 年多 60%。不久，美國國家海洋暨大氣總署(NOAA)也在 2018 年公布地球大氣中的溫室氣體濃度為 489 二氧化碳當量，當中 CO₂ 更高達 85%。因此，不斷增加的溫室氣體排放量將會使未來氣候變遷與全球暖化情形更加嚴重。

為了防止地球環境持續惡化，195 個聯合國(UN)會員在 2015 年 12 月 12 日以《聯合國氣候變遷綱要公約》(UNFCCC)為基礎簽署《巴黎協議》(The Paris Agreement)。巴黎協議是目前全世界最嚴苛的氣候協定，目標是希望將全球平均溫度之升幅控制在 2°C 以內，並致力朝 1.5°C 以內努力。然而，這個目標非常難以達成，除非世界各國可以立即停止化石燃料的使用。此外，巴黎協議沒有詳細的減量措施要求各國與各部門必須強制遵守，所以國際海事組織(IMO)在海運部門所扮演的角色就越趨重要，因為它必須控制海運部門的溫室氣體排放量，也必須帶領海運部門達到巴黎協議的目標。而台灣為了呼應巴黎協議之精神，也於 2014 年自動提出《國家自訂預期貢獻》(Intended Nationally Determined Contributions, INDC)，並於 2015 年通過《溫室氣體管理辦法》(Greenhouse Gas Reduction Act)，期望能為地球之永續經營盡一份心力。

另一方面，國際能源署(IEA)在 2017 年的報告指出，能源部門和運輸部門在 2015 年所產生的二氧化碳排放量大約占全球的三分之二，當中以能源部門的排放量最多(41%)，其次依序為運輸部門(24%)、工業部門(19%)、一般住宅(6%)、服務業(3%)與其他(7%)，如圖 1.1。運輸部門身為二氧化碳排放量第二

大的部門，當中又以公路排放量最多(74%)，其次依序為海運(12%)、空運(11%)、鐵路(2%)與其他(1%)。此外，國際能源署(IEA) 在 2017 年的報告也指出，2015 年運輸部門的二氧化碳排放量比 1990 年增加 68%，當中海運增加 77%，空運增加 105%，皆遠遠超過公路的 22%。

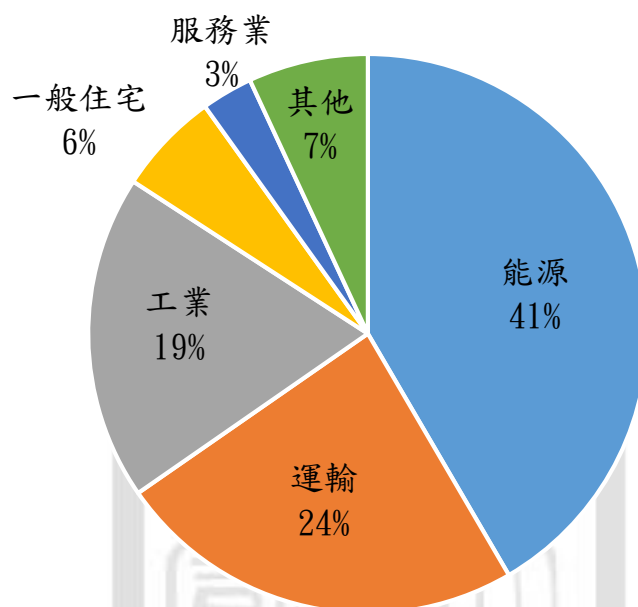


圖 1.1 2015 年全球二氧化碳排放量-以部門分

資料來源：國際能源署 (2017)

同時，根據 PBL 荷蘭環境評估局(PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2017)的報告指出，海運所產生的二氧化碳排放量雖然只佔全球總量的 2.4%，但二氧化碳的增長率卻是所有運輸部門當中第二高的 (77%)，繁榮的海上貿易是海運二氧化碳排放量增加快速的主要原因。根據聯合國貿易和發展會議(UNCTAD)在 2017 年所發布最新的海運述評(Review of Maritime Transport, 2017)，可以發現 2016 年全世界的海上貿易量比 1990 年增加 250%，如圖 1.2，且整體貨運量達到 1,030 萬噸，反映海運發展與全球溫室氣體排放有密切的關係。此外，散裝船、油輪和貨櫃船是三種海運主要的船舶，其載重噸數分別佔全球總載重噸數的 42.8%、28.7%和 13.2%，如圖

1.3；同時，根據國際海事組織(IMO)2014 年的溫室氣體報告書中指出，這三種船舶也是船舶溫室氣體排放的主要來源，如圖 1.4。

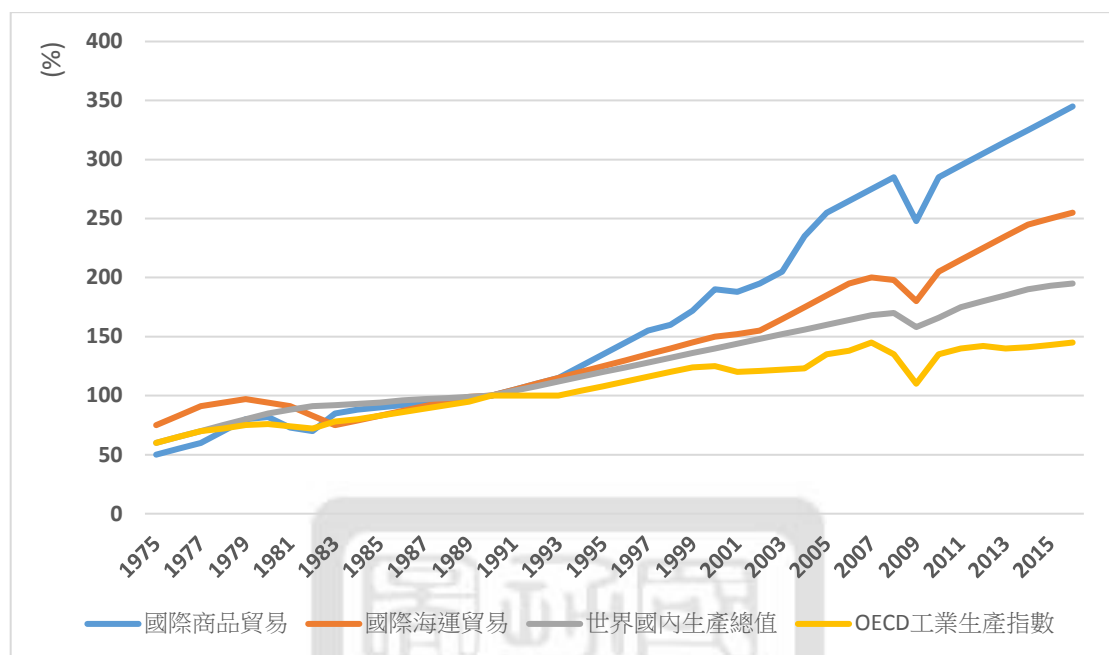


圖 1.2 全球經濟發展指數，(1990=100)

資料來源: UNCTAD (2017)

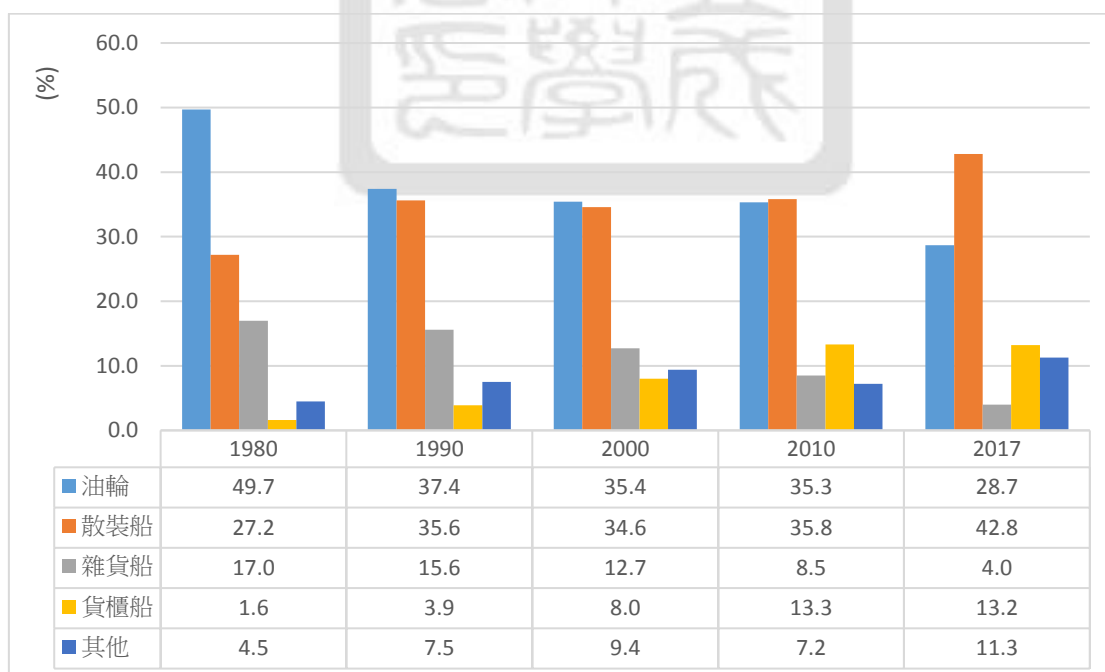


圖 1.3 1980-2017 年世界船舶載重噸數-以船型區分

資料來源: UNCTAD (2017)

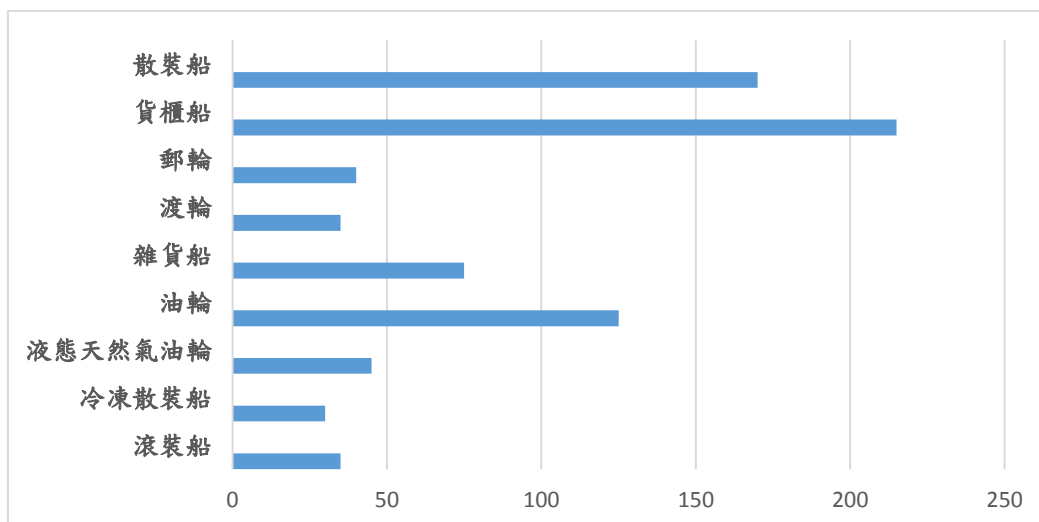


圖 1.4 2012 年不同船型之二氧化碳排放量 (百萬噸)

資料來源：IMO (2014)

因此，為了減少船舶的溫室氣體排放量，國際海事組織(IMO)在 2014 年發布三項減量措施：(1)使用再生能源、(2)改善能源使用效率、(3)應用新科技，而這些減量措施又可以分成「管理面」與「技術面」兩個部分。「管理面」的部分包含船舶減速、燃料轉換、船舶管制與港口管理；「技術面」的部分則包含船舶設計、引擎設計、推進器設計。除此之外，新船效能設計指數(EEDI)、新船效能運作指數(EEOI)與船舶效能管理計畫(SEEMP)也都是船舶減少溫室氣體排放量的重要參考指標。

港口所產生的氣體並非只有溫室氣體，還包括 PM10、PM2.5、NO_x 和 SO_x 等空氣汙染物，它們對港口周遭的環境與居民都有一定程度之負面衝擊，因此港口排放清單的建立就成為一種檢視港口汙染最適合的工具。排放清單主要記錄對當地有危害之氣體，協助決策者制定相關政策，解決空氣汙染對當地環境與居民之危害。目前美國環境署(USEPA)每年都會建立一份全國性的排放清單，供決策者參考，以改善美國的空氣品質；除了美國之外，也有一些單位會針對全球或不同地區制定排放清單，定期監測空氣汙染，例如：International Institute for Applied System Analysis (IIASA)和 National Institute for Public Health and the Environment (RIVM)。

近十幾年來，越來越多人意識到減少港口溫室氣體與空氣污染物的必要性，所以紛紛提出減量策略。美國長堤港在 2005 年提出的「綠旗計畫」(Green Flag Incentive Program)即是一個成功的案例，它致力於減少長堤港中出入船舶、拖車頭、裝卸機具與港務人員所產生的溫室氣體量。而根據海運專題 (Marine Insight, 2017)所公布的資料，可以了解長堤港從 2005 年至 2017 年的 GHG、NO_x、SO_x 和 PM 排放量，相較於 2005 年，分別下降 21%、50%、97%和 85%，顯示港口所產生的空氣污染是可以被大幅降低的。此外，美國西雅圖港在 2015 年所推出的西北港群空氣潔淨策略(Northwest Ports Clean Air Strategy)，是另一項港口減少溫室氣體排放量的計畫，它鼓勵航商在船舶入港時於副引擎使用低硫燃料，這項措施成功降低該港區 80% 的 SO₂ 和 60% 的 PM，有效提升該港區的空氣品質。另外，美國洛杉磯港與長堤港也在 2005 年提出空氣潔淨計畫(Clean Air Action Plan)，目的是要減少出入船舶、拖車頭與裝卸機具所產生的空氣污染量，其目標是希望在 2030 年之前，該計畫範圍內的港口達成零空氣污染與溫室氣體排放量，截至 2017 年為止，港區內的懸浮微粒、SO_x、NO_x 和溫室氣體已經較 1990 年，分別減少 88%、97%、56%和 22%，成效十分顯著。

隨著氣候變遷與全球暖化的問題越趨嚴重，各國也越來越正視此議題，並致力於達成巴黎協議的目標，以減緩溫室氣體對地球環境所產生的災難。海運雖然不是全球溫室氣體排放的主要來源，但它在港口所產生的溫室氣體與空氣污染仍對當地的環境與居民產生衝擊，因此減少港口所產生的溫室氣體與空氣污染排放量是不容忽視的課題。

1.2 研究動機

高雄港是台灣最大的國際港口，根據 2017 年的高雄港統計年報的資料可以發現(Annual Statistical Report of Kaohsiung port)，雖然高雄港在 2008 年遭遇金融海嘯之後進港船舶數量大幅減少，但是之後仍逐漸回穩，一路緩步成長至今(如圖 1.5)，當中貨櫃船在 2017 年約佔全部船舶數量的 50%、油輪佔 16%，而散裝船則佔 19%，這三種船型約佔所有來訪高雄港船舶數量的 85%，(如表 1.1 高雄港每年進港船舶數量-以船型區分)。根據國際海事組織(IMO)在 2014 年溫室氣體研究報告，貨櫃船、油輪、散裝船又是所有船舶中溫室氣體排放量最多的船型。因此，如何有效降低高雄港的溫室氣體與空氣汙染量是相當重要的課題。

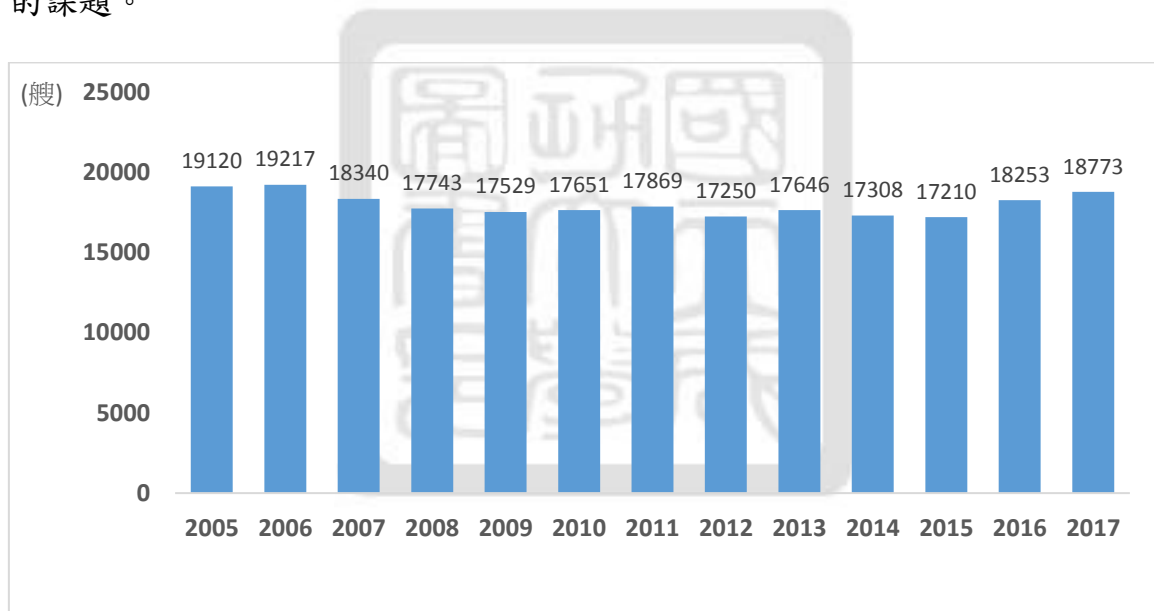


圖 1.5 高雄港每年進港船舶數量

資料來源：高雄港統計年報 (2017)

表 1.1 高雄港每年進港船舶數量-以船型區分

年/船舶類型	貨櫃船數量	(%)	油輪數量	(%)	散裝船數量	(%)
2005	8,319	43%	3,293	17%	4,866	25%
2006	8,635	45%	3,097	16%	4,694	24%
2007	8,261	45%	2,972	16%	4,365	24%
2008	7,903	45%	2,633	15%	4,167	23%
2009	8,102	46%	2,631	15%	3,817	22%
2010	8,380	47%	2,973	17%	3,834	22%
2011	8,378	47%	3,077	17%	3,968	22%
2012	8,228	48%	3,056	18%	3,792	22%
2013	8,516	48%	2,985	17%	3,932	22%
2014	8,458	49%	2,761	16%	3,781	22%
2015	8,879	52%	2,953	15%	3,553	21%
2016	9,315	51%	2,747	15%	3,442	19%
2017	9,349	50%	2,992	16%	3,583	19%

資料來源：高雄港統計年報 (2017)

過去相關文獻在評估港口所產生的溫室氣體和空氣汙染排放量時並不全面，因為它們在評估港口的排放量時，往往只考慮到出入船舶 (Berechman and Tseng, 2012; Tseng et al., 2016)，而忽略港區拖車頭、裝卸機具所造成的影響。因此，本研究的研究對象，除了包含港區的出入船舶，也包含港區內的拖車頭與裝卸機具，希望能更完整地評估高雄港所產生的溫室氣體和空氣汙染排放量。

為了完整評估高雄港所產生的汙染，本研究建立高雄港港口排放清單作為檢視港口空氣汙染的工具。港口排放清單涵蓋 7 個對象，當中 CO₂、CH₄ 和 N₂O 屬於溫室氣體，當中每一單位 CH₄ 和 N₂O 相對於 CO₂ 所造成的全球暖化影響力，分別為 25 倍和 298 倍，顯示這兩項氣體對於全球暖化具有相當大的

威脅；PM₁₀、PM_{2.5}、NO_x 和 SO_x 則屬於對環境或人類有嚴重威脅之空氣污染物。

如何減緩港口所產生的污染，是全世界都關注的重要議題，台灣也不例外。2015 年 6 月台灣通過《溫室氣體管理辦法》，規範 2050 年台灣的溫室氣體排放量低於 2005 年排放量的 50%；同年 9 月更提出《國家自訂預期貢獻》，規範 2030 年的溫室氣體排放量低於 2005 年排放量的 80%。台灣沒有針對海運空氣污染排放進行限制的法規，以上兩項法令皆沒有針對海運部門訂定詳細的減排辦法。因此，本研究參考上述法規（《國家自訂預期貢獻》與《溫室氣體管理辦法》）之減量標準，作為本研究高雄港港口排放清單兩階段之目標。

有關本研究高雄港港口排放清單減量策略，在船舶的部分將評估出入船舶減速、燃料轉換與使用岸電的減量效果；港內拖車頭的部分則是評估拖車頭燃料，由一般柴油替換為液態天然氣(LNG)對於港口污染量的影響；而裝卸機具的部分則評估裝卸機具電氣化對於減少污染量的成效。最後，本研究檢視高雄港港口排放清單減量策略的績效，並探討高雄港達成《國家自訂預期貢獻》與《溫室氣體管理辦法》標準的可能性。此外，許多研究港口溫室氣體排放的相關研究，不只評估港口的空氣污染排放量，也評估這些空氣污染所產生的外部成本(Tzannatos 2010a, McArthur and Osland 2013, Song 2014, Tichavska and Tovar 2015, Maragkogianni and Papaefthimiou 2015)。因此，本研究也會進一步探討高雄港港口排放清單的外部成本，因為外部成本可以具體量化出空氣污染物對於社會和環境之負面影響。

總而言之，本研究希望提供有效的高雄港港口排放清單減量策略，降低高雄港所產生的污染，不但可以達成《溫室氣體管理辦法》的標準，也為港區周遭居民創造友善的環境。

1.3 研究目的

根據研究背景與研究動機，本節統整本研究之目的如下：

1. 評估高雄港 2005 年、2030 年和 2050 年所產生的港口排放清單與外部成本。
2. 探討高雄港兩階段減量策略之減量效果。
3. 探討本研究之減量策略：船舶減速、船舶燃料替換、使用岸電、拖車頭燃料替換與裝卸機具電氣化，是否可以幫助高雄港港口排放清單達成《國家自訂預期貢獻》與《溫室氣體管理辦法》之標準。

1.4 研究架構

第一章詳盡闡述本研究之研究背景、研究動機和研究對象。第二章則回顧港口排放量計算方式、外部成本與減少排放量策略的相關文獻。第三章的研究方法則參考 Third IMO GHG Study (2014) 與相關文獻。第四章則呈現實證分析的結果。最後，第五章則是本研究之結論與建議，如圖 1.6 研究架構流程圖。

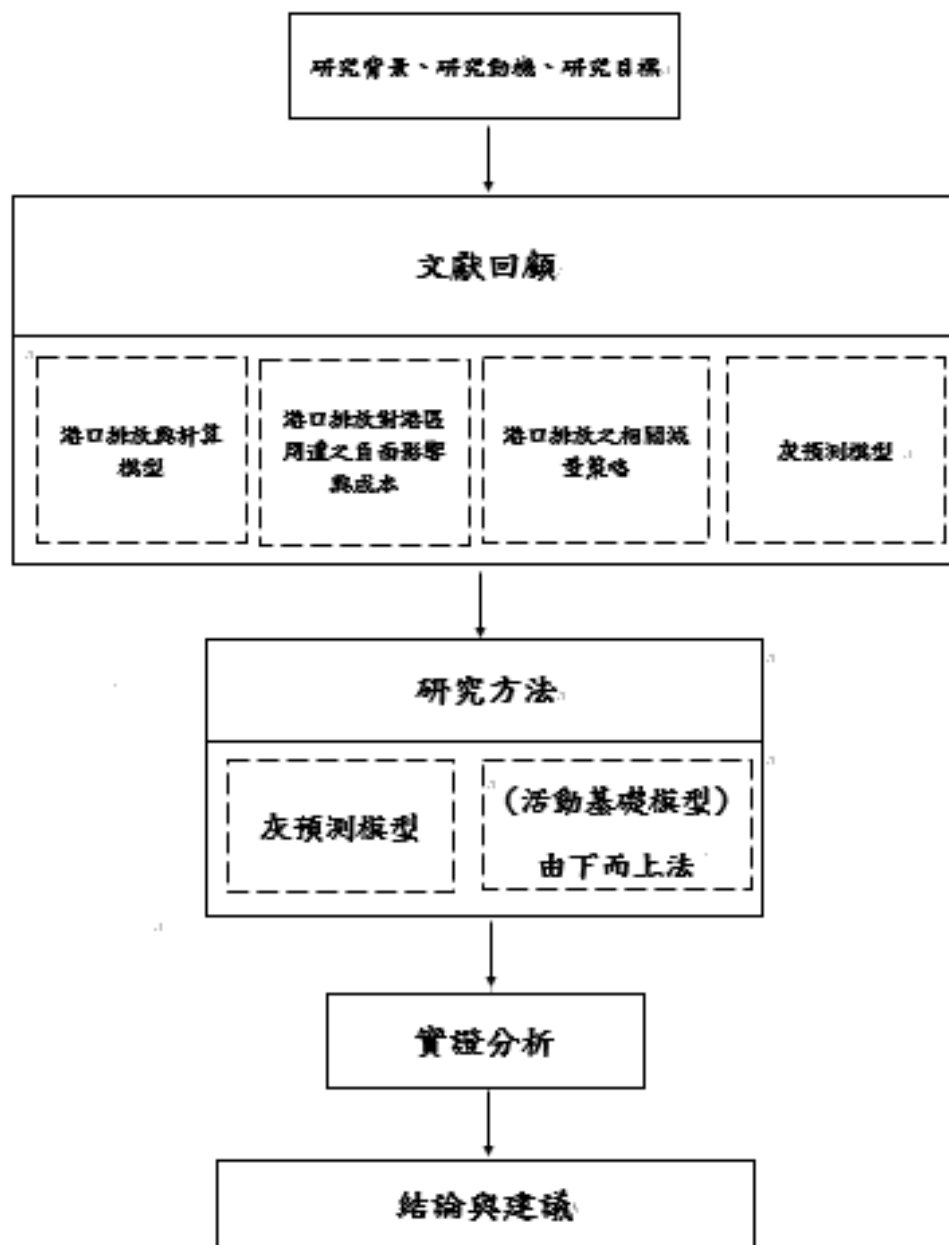


圖 1.6 研究架構流程圖

第二章 文獻回顧

本章節分成四個部分。第一部分回顧港口空氣污染和溫室氣體排放量的計算模型；第二部分則是回顧港口所產生的空氣污染對周遭環境的衝擊與成本；第三部分回顧港口空氣污染與溫室氣體之相關減量策略；第四部分回顧灰預測的相關文獻。最後，則會針對本篇的文獻回顧進行小結。

2.1 港口空氣污染和溫室氣體排放量之計算模型

Endresen et al. (2007)利用船舶活動模型(Activity-Based Model)研究1970年至2000年全世界各類型船舶的CO₂和SO₂的排放量。研究結果發現，從1970年至2000年船舶的CO₂和SO₂排放量分別大約為634,000噸和8,500噸。除此之外，研究也發現船舶的CO₂和SO₂排放量增長速度有所趨緩，主要的原因來自於船舶建造技術進步、船舶減速、船舶大型化與營運方式之改變有關。

Schrooten et al. (2009)結合船舶型態、船舶活動資料與船舶排放氣體係數，重新建構一套適用於研究歐洲船舶排放量的新系統，並以西班牙為研究對象。研究結果也指出，西班牙的船舶用油在1980年為347.8萬噸，到2000年則增加至434.8萬噸，預期2030年在其他條件不變的情況下會上升至1,283萬噸。

Han, Youn et al. (2011)利用船舶活動模型 (Activity-Based Model)研究2007年韓國仁川港 (Port of Incheon)的溫室氣體排放量，測量對象不僅包含船舶，也包含港內的裝卸機具。研究發現，仁川港的HC, CO, NO_x, PM₁₀, SO₂的整體排放量分別為229噸, 638噸, 4,681噸, 307噸, 3,995噸，其中，船舶是最主要的排放來源，HC, CO, NO_x, PM₁₀, SO₂分別佔83%, 75%, 89%, 53%；裝卸機具之排放，HC, CO, NO_x, PM₁₀, SO₂則分別佔13%, 19%, 8%, 4%。

Chang et al. (2013)以船舶活動模型 (Activity-Based Model)研究2012年韓國仁川港 (Port of Incheon)內各類型船舶活動的溫室氣體排放量。結果顯示，由船舶活動模型 (Activity-Based Model)所得出的船舶排放量約為34,000萬噸，是由上而下法(Top-down Approach)的五倍，當中又以汽車渡輪(Car Ferries)和貨櫃船

(Container Ships)的排放量最多，分別為12,000萬噸、5,000萬噸。

Chen et al. (2017)利用船舶活動模型 (Activity-Based Model)和船舶自動辨識系統(Automatic Identification System, AIS)研究2014年中國青島港船舶SO₂, NO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, HC, CO的排放量；並利用氣候研究與化學預測模型(Weather Research and Forecasting with Chemistry Model) 探討船舶排放對周遭空氣品質的影響。研究結果顯示，船舶SO₂, NO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, HC, CO的排放量分別為33,200噸, 42,900噸, 4,540噸, 4,180噸, 1,850噸, 3,660噸，當中貨櫃船是最主要的排放來源，接著依序為一般漁船, 油輪和散裝船，分別佔48.3%、13.5%、12.4%和9.3%。另外，夏天是懸浮微粒(PM_{2.5})濃度最高的季節，高達13.1%，且在人口比較稠密的地區甚至可以超過20%；冬季則最低，只有1.5%。

2.2 港口產生的空氣汙染與溫室氣體對港區周遭之負面影響與成本

Corbett et al. (2007)利用幾何空間模型(Geospatial Model)探討船舶所排放的懸浮微粒對肺癌和相關心肺疾病的致死率。研究結果顯示，船舶所排放的懸浮微粒每年約造成 60,000 人死於肺癌和相關心肺疾病，當中又以歐洲、東亞和南亞最為嚴重。除此之外，在現行法規與海運成長率不變的條件下，往後 10 年因肺癌和相關心肺疾病死亡的人數將增加 40%。

Tzannatos (2010a)利用船舶活動模型 (Activity-Based Model)分析 2008 年希臘比雷埃斯夫港(Port of Piraeus)港內沿岸載客船(Coastal Passenger Ships)和遊輪的 NO_x, SO₂ 和 PM_{2.5} 排放量，並估算其外部成本。除此之外，該研究也分析燃料種類、季節性、船舶活動情形是否會影響 NO_x, SO₂ 和 PM_{2.5} 的排放。研究結果顯示，2008 年比雷埃斯夫港所排放的 NO_x, SO₂ 和 PM_{2.5}總和達到2,600萬噸二氧化碳當量，外部成本為 5,100 萬歐元。當中又以沿岸載客船為主要排放來源，約莫 66%；夏季為排放的高峰期，約為 42%。

Berechman and Tseng (2012)以船舶活動模型 (Activity-Based Model)研究 2010 年各類型船舶和港區卡車在高雄港(Port of Kaohsiung)活動時所排放的溫

室氣體量，並將高雄港所產生的溫室氣體量化成對環境產生衝擊的外部成本。研究結果得知，高雄港所產生的溫室氣體總量約為 4 萬噸，量化後外部環境成本高達 1 億 2300 萬美元，船舶佔了 97%，港區卡車則佔 3%。另外，研究結果也發現，PM_{2.5} 雖然總量不多，但它的外部環境成本卻十分昂貴，每一噸高達 554,229 美元，顯示若要有效降低高雄港所產生的外部環境成本，可以先從 PM_{2.5} 等環境成本較高的氣體進行改善。

McArthur and Osland (2013)利用船舶活動模型 (Activity-Based Model)研究 2010年挪威卑爾根港內(Port of Bergen)停泊船隻的污染排放量，並將其轉換成外部成本。研究結果發現，卑爾根港內的CO₂和NO_x的排放量最多，分別為 663.49噸和39,387噸，外部成本則約為1,000萬歐元至2,150萬歐元左右，當中又以貨櫃船為最大的排放來源，約莫53%。因此，研究建議以提升貨櫃船引擎效能、使用岸電、減少停靠時間等方式來減少此港口的污染排放量和外部成本。

Tian et al. (2013)分析香港1998-2007年六個空氣觀測站的資料，探討船舶燃燒殘油(Residual oil)所排放的懸浮顆粒(PM)中，鎳(Nickel)和鈮(Vanadium)對於心肺相關疾病的影響程度。研究結果發現，鎳對於心肺相關疾病的影響為1.25%；鈮則是0.95%，顯示鎳對於心肺相關疾病的影響率大於鈮。雖然兩者的比例都沒有特別高，但像香港這樣的海港城市，還是必須留意船懸浮顆粒對於城市居民健康的影響。

Song (2014)利用船舶活動模型 (Activity-Based Model)和船舶自動辨識系統 (Automatic Identification System, AIS)研究中國洋山深水港的港內船舶溫室氣體排放量，再以船舶排放量評估外部社會成本和港口的生態效率 (Eco-efficiency)。研究結果發現，港區所產生的CO₂、CH₄、N₂O、PM₁₀、PM_{2.5}、NO_x、SO_x、CO 和 HC分別為578,444噸、10噸、33噸、219噸、859噸、10,758噸、5,623噸、1,136噸和519噸，總社會成本為2億8,700萬美元。至於港口生態效率，每1,000TEU的貨櫃量會產生36,528美元的社會成本；每艘到港船舶會產

生43,993美元的社會成本；和每十億美元的港口營收會產生4,400萬美元的社會成本，約為4.4%的港口營收。

Tichavska and Tovar (2015)利用由上而下船舶排放評估模型(Bottom-up Ship Traffic Emission Assessment Model)和船舶自動辨識系統(Automatic Identification System, AIS)分析2011年西班牙拉斯帕爾瑪斯港(Las Palmas Port)的船舶溫室氣體排放量與外部環境成本。研究結果發現，油輪、貨櫃船和渡輪的排放量最多，約佔所有船舶排放總量的93%。除此之外，拉斯帕爾瑪斯港的NO_x, SO_x, PM_{2.5}, VOC, CO₂外部成本則分別為5,400萬歐元、5,782萬歐元、6,197萬歐元、179萬歐元、547萬歐元。

Maragkogianni and Papaefthimiou (2015)利用船舶活動模型(Activity-Based Model)研究希臘五個旅遊港口2013年的NO_x, SO₂, PM_{2.5}排放量。結果發現，五個港口的總排放量為2742.7噸，當中NO_x排放1,887.5噸、SO₂排放760.9噸、PM_{2.5}則為94.3噸；停泊時的排放量約佔88.5%，調動則佔11.5%。港口溫室氣體排放量之外部成本為240萬歐元，每名乘客約產生2.5歐元的外部成本。

2.3 港口溫室氣體與空氣污染之相關減量策略

Eide et al. (2009)以貨櫃船和散裝船為研究對象，利用CATCH模型(CATCH model)評估多種船舶減碳方式的成本效益。CATCH模型一般以每噸50美元作為標準，如果計算結果大於每噸50美元則代表該減碳方法可能具有減碳效果，但卻不符合經濟效益；反之，如果小於每噸50美元則代表該方法不但具備減碳的作用，同時又具有經濟效益，是為可以採用的方法。研究發現，如果船商應用具有經濟效益的方法，則可以降低貨櫃船40%和散裝船30%的碳排放量。此外，所有減碳方法之中，又以船舶減速的減碳效果最佳，可以達到50%的減碳效果。

Psaraftis and Kontovas (2010)利用船舶活動模型 (Activity-Based Model)分析不同船舶政策下，歐洲船舶溫室氣體排放量的變化。研究發現，船舶減速是眾多船舶減碳策略中，對貨櫃船最具環境效益與經濟效益的減碳措施，一年大約可減少 870,465 噸的 CO₂ 和 9,000 萬美元的外部成本。然而，一般船商會在利潤成長的時候，選擇提升船舶的行駛速度，加速獲利；因此，船舶減速的措施如果沒有相關政策的支持，很難很穩定的實施。

Tzannatos (2010b)研究希臘 Piraeus 港內船舶在使用低硫燃料和岸電之後，溫室氣體的減量程度。同時，評估兩種減量方法之外部成本與私有成本。研究結果發現，使用低硫燃油可以減少船舶 33.1%的二氧化碳當量；使用岸電則可以降低 78.1%的二氧化碳當量。除此之外，低硫燃料的外部成本和私有成本分別為 1,600 萬歐元和 520 萬歐元；岸電的外部成本和私有成本則分別為 1,080 萬歐元和 140 萬歐元。

Cariou (2011)評估 2008 至 2010 年全球大於 1,000TEU 的貨櫃船，是否會因為船舶減速，而達成國際海事組織(IMO)在 2018 年降低碳排放量 15%的目標。研究結果發現，2008 年船舶排放量約為 1,500 萬噸，若採用船舶減速的做法，五年後可減少 15%的排放量。雖然可以達成國際海事組織(IMO)短期降低碳排放量的目標，但長期而言，可能無法達成更嚴苛的減排標準。除此之外，如果燃料費降低且運費和庫存成本增加，船商則會為了降低損失而提升船舶速度。因此，如果要減少船舶碳排放量，船舶減速的措施可能需要在燃料費高漲，或是實施碳稅等相關政策的支持下，才能持續進行。

Chang and Wang (2012)利用船舶活動模型 (Activity-Based Model)評估高雄港(Port of Kaohsiung)在實施「港外40海浬船舶減速至12節並使用岸電」、「港外20海浬船舶減速至12節並使用岸電」、「港外200海浬建立排放控制區(Emission Control Area, ECA)並使用岸電」三種情境下，何種情境最能有效降低港區船舶溫室氣體排放量。研究結果顯示，「港外40海浬船舶減速至12節並使用岸電」可

降低65-78%二氧化碳當量，「港外20海浬船舶減速至12節並使用岸電」可降低71-91%二氧化碳當量，「港外200海里建立Emission control area(ECA) 並使用岸電」則可降低58-77%二氧化碳當量。顯示「港外20海浬船舶減速至12節並使用岸電」是最適合高雄港當局用來降低船舶溫室氣體排放的作法。

Norsworthy and Craft (2013)探討美國維吉尼亞港(Port of Virginia)、查爾斯頓港(Port of Charleston)和休士頓港(Port of Houston)推動港區內卡車自願性升級的成效。結果發現，自願性提升卡車性能的計畫，大約只能減少1-4%的NO_x和PM的排放量。但如果將計畫改成強制性實施，則NO_x和PM的排放量分別可以減少12-15%和31-34%。

Ushakov et al. (2013)比較船舶使用 Gas to Liquid (GTL) fuels 和 Marine Gas Oil (MGO) 溫室氣體排放量的差異。研究結果得知，使用 GTL fuels 的船隻，其引擎和發電機在中度負載的情況下，NO_x, NO 和 CO₂ 的排放量分別比使用 MGO 還低 15-19%, 17-25%和 4%。

Winnes et al. (2015) 分析 2010 年，瑞典哥特堡港(Port of Gothenburg)在「BAU」、「燃料轉換」、「船舶設計」、「營運改善」四種情境之下，2030 年船舶之溫室氣體減量程度。「燃料轉換」包含船舶使用 LNG、Bio Gas；「船舶設計」則是提升船舶的能源使用效率；「營運改善」則是減少船舶速度和港區停靠時間。研究結果顯示，如果哥特堡港不進行任何改善的話，船舶溫室氣體排放量在 2030 年會增加 40%左右，但如果有實施相關減量策略的話，「燃料轉換」、「船舶設計」、「營運改善」分別比 2030 年 BAU 情境下之排放量減少 3%, 1%和 10%。

Sciberras et al. (2016) 探討港口停靠船舶使用岸電和 LNG 燃料後，二氧化碳減量的情形。研究結果指出，如果只使用岸電設備可以減少船舶 42%的二氧化碳排放量；但如果岸電和 LNG 燃料一起使用的話，停泊時的船舶所排放的二氧化碳為 58%。

Chang and Jhang (2016)評估「船舶減速」和「燃料轉換」對於高雄港(Port of Kaohsiung)中貨櫃船和散裝船的影響。主要有兩種情境，情境一：港口 20 海浬外將船速調降至 12 節；情境二：同情境一樣條件之下多實施燃料轉換的步驟，最後再利用 CATCH 模型(CATCH Model)檢視兩種情境之成本效益。研究結果發現，情境一的作法可以使貨櫃船和散裝船分別降低 41%和 14%的二氧化碳排放；而情境二則能減少貨櫃船和散裝船 48%和 43%的二氧化硫排放量。除此之外，CATCH 模型也發現，貨櫃船在實施船舶減速和燃料轉換之後皆具經濟效益，但散裝船只對船舶減速具有經濟效益。

Sen et al. (2017)比較重型卡車在使用壓縮天然氣(Compressed Natural Gas, CNG)和充電電池(Battery Electricity, BE)之後，溫室氣體排放量的差異。研究結果顯示，重型卡車使用充電電池和壓縮天然氣的溫室氣體排放量，分別會比使用傳統柴油減少 63%和 33%的排放量。

Bouman et al. (2017)回顧150篇有關減少船舶溫室氣體排放量的文獻，希望整理出最有效減少船舶溫室氣體排放量的作法。研究結果顯示，沒有任何一個單一方法可以徹底解決船舶的溫室氣體排放，但船舶溫室氣體排放量，可以透過減量方法的整合與法規的支持，在2050年達成減少2015年船舶溫室氣體排放量75%的目標。

Styhre et al. (2017)以船舶活動模型 (Activity-Based Model)評估哥特堡港(Port of Gothenburg)、長灘港(Port of Long Beach)、大阪港(Port of Osaka)和雪梨港(Port of Sydney)2015年的船舶溫室氣體排放量。研究結果顯示，哥特堡港、長灘港、大阪港和雪梨港的溫室氣體排放量分別為15萬噸、24萬噸、9.7萬噸和9.5萬噸二氧化碳當量，當中又以船舶停靠時所產生的排放量最多，皆超過 50%。因此，研究建議使用岸電來減少船舶停靠時的溫室氣體排放量。

López-Aparicio et al. (2017)利用船舶活動模型 (Activity-Based Model) 分析挪威奧斯陸港(Port of Oslo)在2013年和2020年船舶的溫室氣體排放量，並探討

使用低硫燃料(<0.1%)對船舶排放量的影響。研究結果顯示，2013年和2020年奧斯陸港的溫室氣體排放量分別為56,964噸和62,472噸，當中以遠洋船舶的排放量最多，分別佔63%和65%。除此之外，如果在2013年之後開始使用低硫燃料(<0.1%)則SO₂和PM₁₀在2020年分別可以減少90%和10%。

2.4 灰預測模型

Wang and Hao (2016)利用Grey theory (GM) 和 Auto-Regressive Moving Average Model (ARMA)來預測中國2008-2014年的工業能源消耗量，並比較兩者之間的精準度。研究結果發現，中國的2008-2014年的工業能源消耗量呈現穩定的增長，從150萬瓦特增長至230萬瓦特。而GM的MAPE值約為5.95%，ARMA的MAPE值則為15.55%，顯示GM有較高的預測精準度。

Ding et al. (2017) 利用 Grey theory(GM), Discrete Grey theory(DGM) and Auto-Regressive Integrated Moving Average Model (ARIMA)預測中國燃燒燃料所產生的二氧化碳排放量。本研究以2005-2011的資料為基礎，推估中國2020燃燒燃料所產生的二氧化碳量。研究結果顯示，GM, DGM and ARIMA的MAPE值分別為3.83%、7.08% 和 12.21%，顯示GM事三種模型中精準度較高者。因此，在利用GM去推估中國2020年燃燒燃料所產生的二氧化碳為110億噸。

Xiao et al. (2017)利用新的季節性旋轉灰預測模型來預測中國城市一個月交通流量在不同時間間隔(10分、15分)下的變化。研究結果發現，這套模型具有很好的適應性和穩定性，可以預測交通流量的季節變化。除此之外，這套模型也擁有相當高的精準度，因為用它的MAPE值分別只有8.17%和7.16%。

Xu et al. (2017) 預測 2003 - 2014 年中國電力消費情況，並比較三種灰色預測模型（Grey prediction model, Improved-response grey prediction model and Newly priority grey prediction model）的準確性。結果顯示 Grey prediction model 的 MAPE 值為 2.48%，Improved-response grey prediction model 的 MAPE 值為

2.46%，Newly priority grey prediction model 的 MAPE 值為 2.47%。這意味著這些預測模型在預測電能消耗方面具有很高的準確性。

2.5 小結

港口是連結陸地與海洋的重平台，它可以強化不同地區之間的貿易與交流。但在貿易的過程之中溫室氣體也會隨之產生，進而對港區周遭的居民與環境產生負面影響。

根據以往的文獻我們可以發現，大多數的學者都是以活動基礎模型來衡量港口的空氣汙染和溫室氣體排放量(McArthur and Osland 2013)，但當中的研究對象只侷限於船舶，只有少部分的文獻會把港區岸上設備考慮進去(Han, Youn et al. 2011, Berechman and Tseng 2012)。因此，為了更全面的評估高雄港的排放量，本研究的研究對象會包含船舶、港內拖車頭與裝卸機具，希望能建立完整的高雄港港口排放清單，並分析這些氣體對港區周遭的影響。

此外，本研究也會提出兩階段的港口排放清單減排策略，評估高雄港在採取一系列的港口排放清單減量策略之後，能否有效的降低高雄港的港口排放清單之排放量，達成本研究所設定之目標。而本研究之文獻彙整，如表 2.1。

表 2.1 文獻回顧彙整表格

作者 (年代)	研究內容簡要	研究方法
一、港口空氣污染與溫室氣體排放量之計算模型		
Endresen et al (2007)	研究 1970 年至 2000 年全世界各類型船舶的 CO ₂ 和 SO ₂ 的排放量。研究結果發現，從 1970 至 2000 年船舶的 CO ₂ 和 SO ₂ 排放量分別大約為 634,000 噸和 8,500 噸。	Activity-Based Model
Schrooten et al (2009)	建構一套適用於研究歐洲船舶排放量的新系統，並以西班牙為研究對象。研究結果也指出，西班牙的船舶用油在 1980 年為 347.8 萬噸，到 2000 年則增加至 434.8 萬噸，預期 2030 年在其他條件不變的情況下會上升至 1,283 萬噸。	Activity-Based Model
Han et al (2011)	研究 2007 年韓國仁川港 (Port of Incheon) 的溫室氣體排放量，測量對象不僅包含船舶，也包含港內的裝卸機具。研究發現，仁川港的 HC, CO, NOX, PM ₁₀ , SO ₂ 的整體排放量分別為 229 噸, 638 噸, 4,681 噸, 307 噸, 3,995 噸。	Activity-Based Model
Chang et al (2013)	研究 2012 年韓國仁川港 (Port of Incheon) 各類型船舶活動的溫室氣體排放量。結果顯示，汽車渡輪 (Car Ferries) 和貨櫃船 (Container Ships) 的排放量最多，分別為 12,000 萬噸、5,000 萬噸。	Activity-Based Model
Chen et al (2017)	研究 2014 年中國青島港船舶 SO ₂ , NOX, PM ₁₀ , PM _{2.5} , HC, CO 的排放量。研究結果顯示，船舶 SO ₂ , NOX, PM ₁₀ , PM _{2.5} , HC, CO 的排放量分別為 33,200 噸, 42,900 噸, 4,540 噸, 4,180 噸, 1,850 噸, 3,660 噸	Activity-Based Model Automatic Identification System (AIS)

作者 (年代)	研究內容簡要	研究方法
二、港口所產生之空氣汙染與溫室氣體對港區周遭之負面影響與成本		
Corbett et al (2007)	探討船舶所排放的懸浮微粒對肺癌和相關心肺疾病的致死率。研究結果顯示，船舶所排放的懸浮微粒每年約造成 60,000 人死於肺癌和相關心肺疾病，當中又以歐洲、東亞和南亞最為嚴重。	Geospatial Model
Tzannatos (2010a)	分析 2008 年希臘比雷埃斯夫港(Port of Piraeus)港內沿岸載客船(Coastal Passenger Ships)和遊輪的 NOX, SO2 和 PM2.5 排放量，並估算其外部成本。除此之外，該研究也分析燃料種類、季節性、船舶活動情形是否會影響 NOX, SO2 和 PM2.5 的排放。研究結果顯示，2008 年比雷埃斯夫港所排放的 NOX, SO2 和 PM2.5 總和達到 2,600 萬噸二氧化碳當量，外部成本為 5,100 萬歐元。	Activity-Based Model
Berechman and Tseng (2012)	研究 2010 年各類型船舶和港區卡車在高雄港(Port of Kaohsiung)活動時所排放的溫室氣體量，並將高雄港所產生的溫室氣體量化成對環境產生衝擊的外部成本。研究結果得知，高雄港所產生的溫室氣體總量約為 4 萬噸，量化後外部環境成本高達 1 億 2300 萬美元，船舶佔了 97%，港區卡車則佔 3%。	Activity-Based Model
McArthur and Osland (2013)	研究 2010 年挪威卑爾根港內(Port of Bergen)停泊船隻的污染排放量，並將其轉換成外部成本。研究結果發現，卑爾根港內的 CO2 和 NOX 的排放量最多，分別為 663.49 噸和 39,387 噸，外部成本則約為 1,000 萬歐元至 2,150 萬歐元左右，當中又以貨櫃船為最大的排放來源，約莫 53%。	Activity-Based Model

作者 (年代)	研究內容簡要	研究方法
Tian et al (2013)	分析香港 1998-2007 年六個空氣觀測站的資料，探討船舶燃燒殘油 (Residual oil)所排放的懸浮顆粒(PM)中，鎳(Nickel)和鈮(Vanadium)對於心肺相關疾病的影響程度。研究結果發現，鎳對於心肺相關疾病的影響為 1.25%；鈮則是 0.95%，顯示鎳對於心肺相關疾病的影響率大於鈮。	Generalized Additive Model
Song (2014)	研究中國洋山深水港的港內船舶溫室氣體排放量，再以船舶排放量評估外部社會成本和港口的生態效率 (Eco-efficiency)。研究結果發現，港區所產生的 CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、PM ₁₀ 、PM _{2.5} 、NO _x 、SO _x 、CO 和 HC 分別為 578,444 噸、10 噸、33 噸、219 噸、859 噸、10,758 噸、5,623 噸、1,136 噸和 519 噸，總社會成本為 2 億 8,700 萬美元。	Activity-Based Model Automatic Identification System (AIS)
Tichavska and Tovar (2015)	分析 2011 年西班牙拉斯帕爾瑪斯港 (Las Palmas Port)的船舶溫室氣體排放量與外部環境成本。研究結果發現，拉斯帕爾瑪斯港的 NO _x , SO _x , PM _{2.5} , VOC, CO ₂ 外部成本則分別為 5,400 萬歐元、5,782 萬歐元、6,197 萬歐元、179 萬歐元、547 萬歐元。	Bottom-up Ship Traffic Emission Assessment Model
Maragkogianni and Papaefthimiou (2015)	研究希臘五個旅遊港口 2013 年的 NO _x , SO ₂ , PM _{2.5} 排放量。結果發現，五個港口的總排放量為 2742.7 噸，當中 NO _x 排放 1,887.5 噸、SO ₂ 排放 760.9 噸、PM _{2.5} 則為 94.3 噸；停泊時的排放量約佔 88.5%，調動則佔 11.5%。港口溫室氣體排放量之外部成本為,240 萬歐元，每名乘客約產生 2.5 歐元的外部成本。	Activity-Based Model

作者 (年代)	研究內容簡要	研究方法
三、港口空氣污染與溫室氣體之相關減量策略		
Eide et al (2009)	利用 CATCH 模型(CATCH model) 評估多種船舶減碳方式的成本效益。研究發現，如果船商應用具有經濟效益的方法，可以達到 50%的減碳效果。	CATCH model
Psaraftis and Kontovas (2010)	分析不同船舶政策下，歐洲船舶溫室氣體排放量的變化。研究發現，船舶減速是對貨櫃船最具環境效益與經濟效益的減碳措施，一年大約可減少 870,465 噸的 CO ₂ 和 9,000 萬美元的外部成本。	Activity-Based Model
Tzannatos (2010b)	研究希臘 Piraeus 港內船舶在使用低硫燃料和岸電之後，溫室氣體的減量程度。研究結果發現，使用低硫燃油可以減少船舶 33.1%的二氧化碳當量；使用岸電則可以降低 78.1%。	Activity-Based Model
Cariou (2011)	評估 2008 至 2010 年全球大於 1,000TEU 的貨櫃船，是否會因為船舶減速，而達成國際海事組織(IMO) 在 2018 年降低碳排放量 15%的目標。研究結果認為是可行的。	Activity-Based Model
Chang and Wang (2012)	評估高雄港在實施三種不同減碳方法，何者最能有效降低港區船舶溫室氣體排放量。研究結果顯示，「港外 20 海浬船舶減速至 12 節並使用岸電」可降低 71-91%二氧化碳當量，是最適合用來降低船舶溫室氣體排放的作法。	Activity-Based Model
Norsworthy and Craft (2013)	探討美國維吉尼亞港、查爾斯頓港和休士頓港推動港區內卡車自願性升級的成效。結果發現，自願性提升卡車性能的計畫，大約只能減少 1-4% 的 NO _x 和 PM 的排放量。	Activity-Based Model

作者 (年代)	研究內容簡要	研究方法
Ushakov et al (2013)	比較船舶使用 GTL fuels 和 Marine Gas Oil 溫室氣體排放量的差異。研究結果得知，使用 GTL fuels 的船隻，NOX, NO 和 CO2 的排放量分別比使用 MGO 還低 15-19%, 17-25% 和 4%。	Activity-Based Model
Winnes et al (2015)	分析 2010 年，瑞典哥特堡港在「BAU」、「燃料轉換」、「船舶設計」、「營運改善」四種情境之下，2030 年船舶之溫室氣體減量程度。研究結果顯示，如果哥特堡港不進行任何改善的話，船舶溫室氣體排放量在 2030 年會增加 40%左右，但如果有實施相關減量策略的話，「燃料轉換」、「船舶設計」、「營運改善」分別比 2030 年BAU 情境下之排放量減少 3%, 1% 和 10%。	Activity-Based Model
Sciberras et al. (2016)	探討港口停靠船舶使用岸電和 LNG 燃料後，二氧化碳減量的情形。研究結果指出，如果只使用岸電設備可以減少船舶 42%的二氧化碳排放量；但如果岸電和 LNG 燃料一起使用的話，停泊時的船舶所排放的二氧化碳為 58%。	Activity-Based Model
Chang and Jhang (2016)	評估「船舶減速」和「燃料轉換」對於高雄港(Port of Kaohsiung)中貨櫃船和散裝船的影響。主要有兩種情境，情境一：港口 20 海浬外將船速調降至 12 節；情境二：同情境一樣條件之下多實施燃料轉換的步驟，最後再利用 CATCH 模型(CATCH Model)檢視兩種情境之成本效益。研究結果發現，情境一的作法可以使貨櫃船和散裝船分別降低 41%和 14% 的二氧化碳排放；而情境二則能減少貨櫃船和散裝船 48%和 43%的二氧化硫排放量。	Activity-Based Model CATCH Model

作者 (年代)	研究內容簡要	研究方法
Sen et al (2017)	比較重型卡車在使用壓縮天然氣(Compressed Natural Gas, CNG)和充電電池(Battery Electricity, BE)之後，溫室氣體排放量的差異。研究結果顯示，重型卡車使用充電電池和壓縮天然氣的溫室氣體排放量，分別會比使用傳統柴油減少 63%和 33%的排放量。	Activity-Based Model
Bouman et al (2017)	回顧150篇有關減少船舶溫室氣體排放量的文獻，希望整理出最有效減少船舶溫室氣體排放量的作法。研究結果顯示，沒有任何一個單一方法可以徹底解決船舶的溫室氣體排放，但船舶溫室氣體排放量，可以透過減量方法的整合與法規的支持，在2050年達成減少2015年船舶溫室氣體排放量75%的目標。	Activity-Based Model
Styhre et al (2017)	評估哥特堡港(Port of Gothenburg)、長灘港(Port of Long Beach)、大阪港(Port of Osaka)和雪梨港(Port of Sydney)2015 年的船舶溫室氣體排放量。研究結果顯示，哥特堡港、長灘港、大阪港和雪梨港的溫室氣體排放量分別為 15 萬噸、24 萬噸、9.7 萬噸和 9.5 萬噸二氧化碳當量，當中又以船舶停靠時所產生的排放量最多，皆超過 50%。	Activity-Based Model
López-Aparicio et al(2017)	分析挪威奧斯陸港(Port of Oslo)在 2013 年和 2020 年船舶的溫室氣體排放量，並探討使用低硫燃料(<0.1%)對船舶排放量的影響。研究結果顯示，2013 年和 2020 年奧斯陸港的溫室氣體排放量分別為 56,964 噸和 62,472 噸，當中以遠洋船舶的排放量最多，分別佔 63%和 65%。	Activity-Based Model

作者 (年代)	研究內容簡要	研究方法
四、灰預測模型		
Wang and Hao (2016)	利用 Grey theory (GM) 和 Auto-Regressive Moving Average Model (ARMA)來預測中國2008-2014年的工業能源消耗量，並比較兩者之間的精準度。研究結果發現，中國的2008-2014年的工業能源消耗量呈現穩定的增長，從150萬瓦特增長至230萬瓦特。	Grey theory
Ding et al (2017)	利用 Grey theory(GM), Discrete Grey theory(DGM) and Auto-Regressive Integrated Moving Average Model (ARIMA)預測中國燃燒燃料所產生的二氧化碳排放量。研究結果顯示，GM, DGM and ARIMA 的 MAPE 值分別為 3.83%、7.08% 和 12.21%，顯示 GM 事三種模型中精準度較高者。	Grey theory
Xu et al (2017)	用新的季節性旋轉灰預測模型來預測中國城市一個月交通流量在不同時間間隔(10分、15分)下的變化。研究結果發現，這套模型具有很好的適應性和穩定性，可以預測交通流量的季節變化，因為用它的 MAPE 值分別只有 8.17% 和 7.16%。	Grey Prediction Mode Newly Priority Grey Prediction Model Improved-Response Grey Prediction Model
Xiao et al (2017)	預測2003-2014年中國電力消費情況，並比較三種灰色預測模型的準確性。結果顯示 Grey prediction model 的 MAPE 值為 2.48%，Improved-response grey prediction model 的 MAPE 值為 2.46%，Newly priority grey prediction model 的 MAPE 值為 2.47%。	New Seasonal Rolling Grey Forecasting Model

資料來源：本研究整理

第三章 研究方法

本章節分成五個部分。第一部分定義研究範圍和研究對象。第二部分說明相關變數。第三部分為研究模型。第四部分為預測精準度的模型。最後則為小結。

3.1 資料蒐集

3.1.1 資料敘述

本研究將評估高雄港港區與港區外 40 海浬排放清單之排放量，並以出入船舶、碼頭之裝卸機具、與拖車頭作為研究對象。

船舶部分，根據交通部的統計資料，2017 年進出高雄港的船舶，有貨櫃船 9,349 艘合計 1,853 萬公噸，散裝船 3,583 艘合計 499 萬公噸，油輪 2,992 艘合計 2,042 萬公噸，其餘船隻共 2,849 艘合計 3,749 萬公噸。高雄港大小船舶總計約 18,773 艘，因無法逐一探討，因此本研究採用各種船型船噸之中間值，作為本研究之研究標的。於此，貨櫃船採用 37,563 噸的 EVER BALMY 作為研究對象。散裝船採用 57,809 噸的 ROADRUNNER BULKER 作為研究對象。油輪採用 9,156 噸的 BOW FULING 作為研究對象。其餘船舶，則以渡輪為代表，並以 TAI HWA 作為研究對象。

以上船舶之排放分成三部分計算，第一部分為「Fairway」指船舶從港區外 40 海浬航行至航道入口的活動情形，期間主、副引擎正常運作；第二部分為「Maneuvering」指船舶從航道入口行駛至停泊地點的活動情形，期間主、副引擎正常運作，船速最高約為 3.5 knot/hr；第三部分為「Berth」指船舶停泊在碼頭的活動情形，期間只有副引擎正常運作，船速則幾乎趨近於零。裝卸機具部分，則以橋式起重機、門式起重機和堆高機為主，根據高明貨櫃股份有限公司統計，2017 年高雄港的橋式起重機有 45 架；門式起重機 150 架和堆高機 78 架。拖車頭部分，本研究以 FUSO-380 為代表，評估拖車頭在船邊裝卸貨後往返貨櫃集散區期間，產生港口排放清單之排放量。

3.1.2 研究範圍

根據高雄港統計年報(2017)得知，高雄港是臺灣第一大港、世界第 15 大港口，2017 年高雄貨物吞吐量大約占臺灣所有港口貨物吞吐量的一半。高雄港面積約為 17,736 公頃，當中陸域面積佔全港面積的 10.55%，水域面積則佔全港面積之 89.45%。除此之外，高雄港有兩條 18 公里進出港的航道，營運碼頭約 116 座，其中貨櫃碼頭 24 座、散裝碼頭 32 座、雜貨碼頭 30 座、穀類碼頭 2 座，而其餘之軍艦、港務、工作碼頭則總計有 28 座。另外，高雄港有倉庫 96 座、貨櫃場 5 處、裝卸機具 170 架，供貨櫃轉運、儲藏、裝卸之用。目前，第六貨櫃中心是高雄港最新也最講求低碳的區域，只允許符合碳排標準的船舶與拖車頭使用，但因為相關工程還未完工，因此本研究以第六貨櫃中心以外之區域作為探討對象，並假設所有的貨櫃船會停靠在高雄港第五貨櫃中心，包含 75-81 號碼頭；散裝船會停靠在 A 區的散雜貨碼頭區，包含 71-74 號碼頭；油輪則會靠在台灣中油公司第 104 號和 105 號碼頭，而其他船舶(渡輪)則會停靠在前鎮漁港。此外，本研究參考美國 2009 年長提港“綠旗計畫”的規範，假設所有進港船舶都必須在港外 40 海浬處進行減速，因此本研究之研究範圍除了高雄港區之外，也包含港區向外延伸 40 海浬之範圍，如圖 3.1 高雄港碼頭位置圖所示。

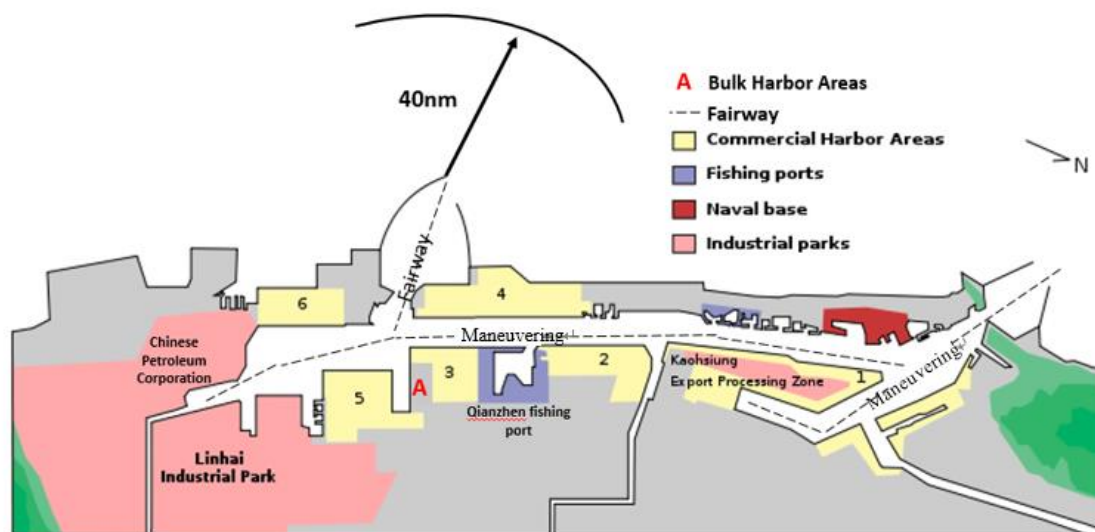


圖 3.1 高雄港碼頭位置圖

資料來源：本研究整理

3.2 變數說明

在建構計算模型之前，模型中所使用的變數整理如表 3.1 本研究參數與索引說明。

表 3.1 本研究參數與索引說明

Index	Description	Unit
i	船舶種類，其中 i= 1~4 (1= container ships, 2=bulk ships, 3= tankers, 4=ferry)	
j	活動型態，其中 j=1~3 (1=fairway, 2= maneuvering, 3=berth)	
k	排放型態，其中 k= 1~3 (1= ships, 2=trucks, 3= cargo-handling equipment)	
Decision variables	Description	Unit
E_S	總船舶排放清單之排放量	ton
E_{ij}	船舶 i 在情境 j 時排放清單的排放量	ton

E_M	船舶在調動時排放清單的排放量	ton
E_B	船舶在停泊時排放清單的排放量	ton
AS_{ij}	船舶 i 在情境 j 時實際船速	knot
MS_i	船舶 i 最大船速	knot
D_j	船舶在情境 j 下的行駛距離	km
T_j	船舶在在情境 j 下所需的時間	hour
n_i	第 i 種船舶的數量	
E_T	拖車頭排放清單的排放量	ton
T_T	拖車頭行駛時間	hour
n_T	拖車頭的數量	
E_{CHE}	裝卸機具排放清單的排放量	ton
T_{CHE}	裝卸機具運作時間	hour
n_{CHE}	裝卸機具數量	
EEC	排放清單之外部成本	USD
Parameters	Description	Unit
$\%MCR$	引擎最大持續功率	kw
LF_j	船舶在情境 j 下引擎的負載係數	%
EF_S	船舶排放清單之排放係數	(ton-kw/h)
HP_T	拖車頭引擎馬力	kw
LF_T	拖車頭引擎的負載係數	%
EF_T	貨車排放清單之排放係數	(g-kw/h)
HP_{CHE}	裝卸機具引擎馬力	kw

LF_{CHE}	裝卸機具引擎的負載係數	%
EF_{CHE}	裝卸機具排放清單之排放係數	(g-kw/h)
ECF	排放清單之外部成本排放係數	USD/ton
a	發展係數	
b	內生控制係數	
MAPE	平均絕對百分比誤差	
$real_t$	在西元 t 年來訪高雄港船舶之實際值	
$estimate_t$	在西元 t 年來訪高雄港船舶之預估值	

資料來源：本研究整理

3.3 活動基礎模型

一般而言，“Top-down approach”和”Bottom-up approach”(or “Activity-based model)是兩種計算排放量的主要方式。Top-down approach 主要根據燃料的使用情況計算排放量；而 Activity-based model 則是根據運具的活動情況來計算排放量。相較之下，Activity-based model 的計算結果通常比 Top-down approach 更準確 (Bouman, 2017; Miola and Ciuffo, 2011)。

本研究選擇使用 activity-based model 來評估高雄港內船舶、拖車頭與裝卸機具排放清單的排放量與外部成本。研究方法參考以前的相關研究，IMO (2014)、ITF (2014)、VOWTAP (2014)和 POLB (2017)進行調整。此外，本研究所需的相關資料皆來自於高雄港港務局、高明貨櫃股份有限公司、The third IMO GHG study (2014)以及 VOWTAP (2014)。

3.3.1 船舶

目前，國際上計算船舶排放清單的計算方法以 activity-based model 為主。因此，本研究使用以船舶活動為基礎，乘上排放係數，來計算船舶排放清單的排放量，如式(1)、(2)。

$$E_S = \sum (E_{ij}) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} E_{ij} &= \%MCR \times LF_j \times T_j \times EF_S \times n_i \\ &= \%MCR \times \left(\frac{AS_{ij}}{MS_i} \right)^3 \times \frac{D_j}{AS_{ij}} \times EF_S \times n_i \\ &= \%MCR \times \left(\frac{AS_{ij}}{MS_i} \right)^3 \times \frac{D_j}{AS_{ij}} \times EF_S \times n_i \end{aligned} \quad (2)$$

當中：

E_S ：總船舶排放清單的排放量(ton)。

E_{ij} ：船舶 i 在情境 j 時排放清單的排放量(ton)。

i ：船舶種類，其中 $i=1\sim4$ (1=container ships, 2=bulk ships, 3=tankers, 4=ferry)。

j ：活動型態，其中 $j=1\sim3$ (1=fairway, 2=maneuvering, 3=berth)。

$\%MCR$ ：引擎最大持續功率(kw)。

AS_{ij} ：船舶 i 在情境 j 時實際船速(knot)。

MS_i ：船舶 i 最大船速(knot)。

D_j ：船舶在情境 j 下的行駛距離(km)。

T_j ：船舶在在情境 j 下所需的時間(hour)。

LF_j ：船舶在情境 j 下引擎的負載係數(%)。

EF_S ：船舶排放清單之排放係數(ton-kw/h)。

n_i ： i 種船舶的數量(艘)。

3.3.2 拖車頭

國際上並沒有一套通用於港區拖車頭排放清單的計算方式，因此本研究參考並調整 Virginia Offshore Wind Technology Advancement Project (VOWTAP, 2014)中的相關公式，作為計算港區拖車頭排放清單的方法，如式(3)。

$$E_T = HP_T \times T_T \times LF_T \times EF_T \times n_T \quad (3)$$

當中：

E_T ：拖車頭排放清單的排放量(ton)。

HP_T ：拖車頭引擎馬力(kw)。

T_T ：拖車頭行駛時間(hour)。

LF_T ：拖車頭引擎的負載係數 (%)。

EF_T ：拖車頭排放清單之排放係數(g-kw/h)。

n_T ：拖車頭的數量。

3.3.3 裝卸機具

國際上並沒有一套通用於港區裝卸機具排放清單的計算方式，因此本研究參考並調整 Virginia Offshore Wind Technology Advancement Project (VOWTAP, 2014)中的相關公式作為計算港區裝卸機具排放清單的方法，如式(4)。

$$E_{CHE} = HP_{CHE} \times LF_{CHE} \times T_{CHE} \times EF_{CHE} \times n_{CHE} \quad (4)$$

當中：

E_{CHE} ：裝卸機具排放清單的排放量(ton)。

HP_{CHE} ：裝卸機具引擎馬力(kw)。

LF_{CHE} ：裝卸機具引擎的負載係數 (%)。

T_{CHE} ：裝卸機具運作時間(hour)。

EF_{CHE} ：裝卸機具排放清單之排放係數(g-kw/h)。

n_{CHE} ：裝卸機具數量。

3.3.4 外部成本

外部成本是指空氣汙染物體威脅人類健康和環境所產生的損害(Tichavska and Tovar 2015)。因此，本研究將船舶、拖車頭、裝卸機具排放清單的排放量，乘上排放清單外部成本係數，即可得出外部成本，如式(5)。而外部成本係數主要參考(VOWTAP, 2014；Song, 2014；VTPI, 2012；USEPA, 2010；IPCC, 2014)。

$$EEC = E_k \times ECF \quad (5)$$

當中：

EEC：排放清單之外部成本(USD)。

k：排放型態，其中 $k=1\sim3$ (1= ships, 2=trucks, 3= cargo-handling equipment)。

ECF：排放清單之外部成本排放係數(USD/ton)。

3.4 預測模型

3.4.1 灰預測模型

灰預測主要針對不完整及不明確的資訊，進行預測模型的建構與資料關聯的分析，並從原始數據中找出變動的規律，以預測未來資料發展的狀況。目前，灰預測的應用相當廣泛，國外有學者用來預測能源消耗量(Wang and Hao 2016)和二氧化碳排放量 Ding, Dang et al 2017)；國內則也有些學者用此模型來預測港口貨櫃量的變化(朱經武 2006, 郭英峰 2007)。因此本研究選擇灰預測作為預測高雄港 2030 年和 2050 年船舶櫃量的方法，如式(6~9)。

設定時間序列 $X^{(0)}$ 有 n 個觀察值：

$$X^{(0)} = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)\} \quad (6)$$

通過累加生成新序列：

$$X^{(1)} = \{X^{(1)}(1), X^{(1)}(2), \dots, X^{(1)}(n)\} \quad (7)$$

建立 GM(1,1)，並進行微分：

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = \mu \quad (8)$$

求解微分方程式，即可得預測模型：

$$\hat{X}^{(1)}(k+1) = \left[X^{(0)}(1) - \frac{\mu}{a} \right] e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (9)$$

當中：

a：發展係數。

b：內生控制係數。

3.4.2 預測精準度模型

預測精準度主要是比較預測模型依據預測者需求、歷史資料、突發事件所產生預測值與歷史實際值的吻合程度，可以用來判斷預測模型的精確程度。一般而言主要的評估方法有三種：均方誤差(mean squared error, MSE)、平均絕對偏差(mean absolute deviation, MAD)和平均絕對百分比誤差(mean absolute percent error, MAPE)。當中，MAPE 利用相對的觀點來計算誤差，且是最廣泛應用於模型精準度判斷的評估方法(Kim 2016, Nageem 2017)。根據 Lewis(1982)指出，若 MAPE 值在 10%以下，表示此預測結果具高度準確性；MAPE 值介於 10-20%則屬於優良預測；MAPE 值介於 20-50%則屬於合理預測。因此本研究選擇 MAPE 來評估模型的精準程度，模型如式(10)。研究期間分別為 15 年和 35 年，因此式(10)中的 n 值分別為 15 和 35。

$$\text{MAPE} = \frac{\sum \frac{|real_t - estimate_t|}{real_t} \times 100}{n} \quad (10)$$

當中：

MAPE：平均絕對百分比誤差。

$real_t$ ：在西元 t 年來訪高雄港船舶之實際值。

$estimate_t$ ：在西元 t 年來訪高雄港船舶之預估值。

3.5 小結

本章採用 Activity-Based Model 和 Grey theory，來預測高雄港 2030 年和 2050 年高雄港港口排放清單之排放量，並進一步將港區產生的排放量轉換成外部成本。接著，本研究再實施兩階段之港口排放清單減量策略，包含船舶減速、使用岸電和燃料轉換，探討高雄港的港口排放清單能否因實施上述措施，而達成本研究港口排放清單減量策略所設定之目標。

第四章 實證分析

為了讓高雄港港口排放清單的排放量在 2030 年和 2050 年達成《國家自訂預期貢獻》(INDC)與《溫室氣體減量與管理法》的標準，本研究分兩階段實施港口排放清單減量策略，探討高雄港港口排放清單在 BAU 和第一、二階段港口排放清單減量策略之三種情境下的減量成效。

本章節分成五個部分。第一部分評估 BAU 情境下高雄港港口排放清單之排放量。第二部分評估第一階段港口排放清單減量策略之成效。第三部分檢視第二階段港口排放清單減量策略之效果。第四部分探討排放清單之外部成本。最後則為小結。

4.1 基礎情境(BAU)下高雄港港口排放清單之排放量

本研究根據高雄港 2006-2017 年來訪的船舶數量，以灰預測模型預估高雄港 2030 年和 2050 年的進出船舶數量，發現高雄港的進出船舶未來將呈現逐年遞減的趨勢(圖 4.1)。為了評估預測的精準度，本研究利用平均絕對百分比誤差(mean absolute percent error, MAPE)作為評估方法，判斷灰預測模型之精準度。根據 Lewis(1982)之定義，若 MAPE 值在 10%以下，表示此預測結果具高度準確性，如今本研究之 MAPE 值經計算後為 0.59%，小於 10%，顯示此預估結果具高度準確性。探究往後高雄港出入船舶遞減的原因，可能與船舶大型化和亞洲鄰近港口崛起，進而瓜分高雄港船舶數量有關。

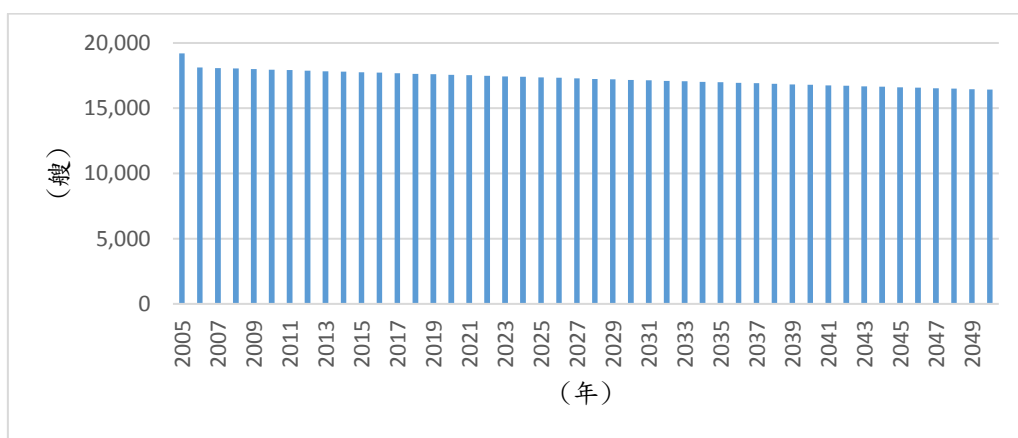


圖 4.1 2005-2050 年高雄港船舶出入數量預測

圖 4.2 說明 BAU 情境之下，高雄港 CO₂ 的排放量將隨著來訪船舶數量減少而逐年緩慢遞減。圖 4.3 說明 BAU 情境下高雄港港口排放清單(CO₂ 除外)之排放量以 NO_x 和 SO_x 最多，而歷年排放量也將隨著來訪船舶數量減少而逐年緩慢遞減。雖然高雄港港口排放清單(CO₂、CH₄、N₂O、PM₁₀、PM_{2.5}、NO_x 和 SO_x)之排放量會逐年遞減，但很明顯的，在 BAU 情境下 2030 年和 2050 年高雄港之排放量仍無法降低至《國家自訂預期貢獻，INDC》與《溫室氣體減量及管理法》的目標(如圖 4.2)。**錯誤! 找不到參照來源。**4.1 將高雄港港口排放清單排放量之比重以研究對象和年份進行區分，觀察此表可以發現在 BAU 的情境之下，船舶是高雄港港口排放清單最主要的排放來源，其次為裝卸機具和港區內的拖車頭。雖然之後船舶的排放量比重，會因為船隻停泊數量減少而略微下降，但整體而言，船舶還是高雄港最大的空氣汙染來源。根據高雄港統計年報(2017)的資料，可以知道近十年高雄港船舶噸位數有逐年大型化的趨勢，因此在船舶數量遞減的情境下，高雄港的貨櫃裝卸量仍緩慢增加，所以裝卸機具和拖車頭的排放量比重也相對提升。

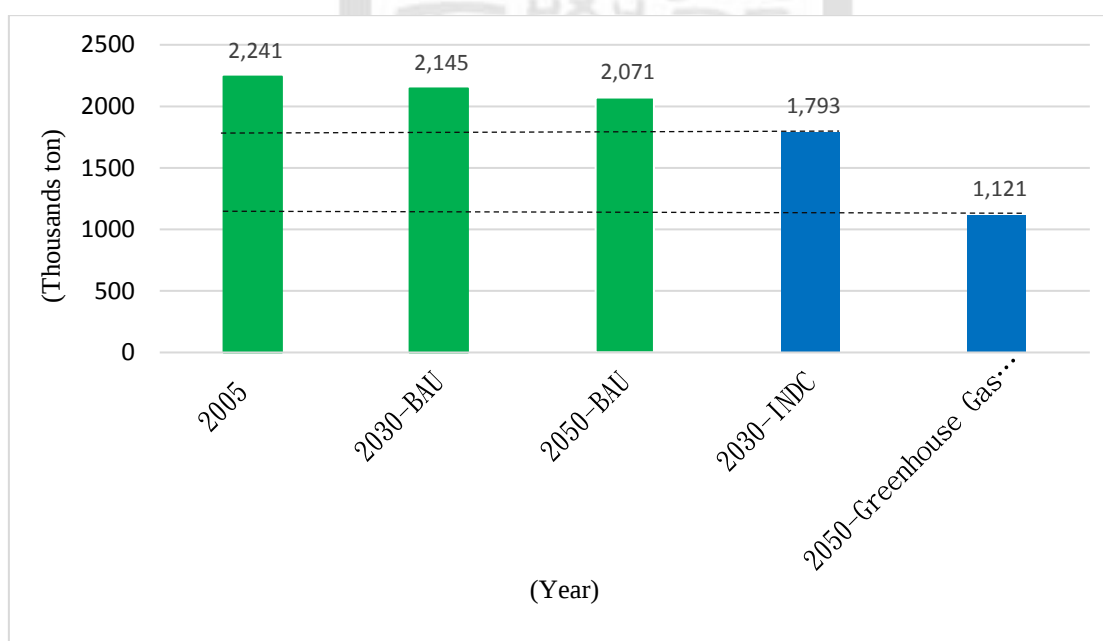


圖 4.2 高雄港港口排放清單之排放量-BAU 情境(只包含 CO₂)

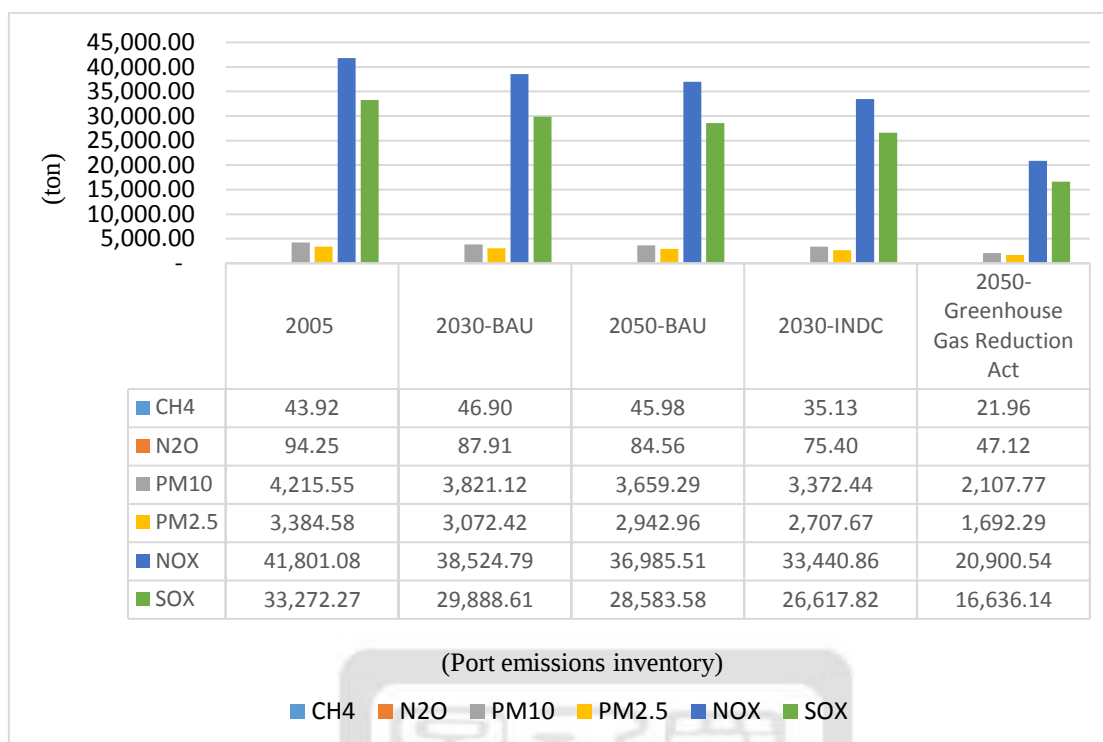


圖 4.3 高雄港港口排放清單之排放量-BAU 情境(CO₂ 除外)

表 4.1 高雄港港口排放清單排放量之比重

對象	年/氣體	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	PM ₁₀	PM _{2.5}	NO _x	SO _x
船舶	2005	84%	53%	90%	98%	98%	94%	100%
	2030	79%	45%	87%	97%	96%	91%	100%
	2050	78%	44%	87%	97%	96%	91%	100%
裝卸機具	2005	14%	40%	8%	2%	2%	6%	0%
	2030	19%	49%	11%	3%	3%	8%	0%
	2050	19%	50%	12%	3%	4%	9%	0%
拖車頭	2005	2%	6%	1%	0%	0%	0%	0%
	2030	3%	7%	2%	0%	0%	0%	0%
	2050	3%	7%	2%	0%	0%	0%	0%
	Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

4.1.1 船舶排放量

本研究主要將進出高雄港的船舶分為貨櫃船、散裝船、油輪與渡輪四種，評估高雄港 2005 年、2030 年和 2050 年的港口排放清單排放量。圖 4.4 和圖 4.5 顯示船舶所產生的排放清單排放量，在 BAU 情境之下會逐年遞減，主要是因為船舶數量逐年減少所導致。

進一步分析船舶排放清單的排放量可以發現，如果以「船舶種類」進行區分的話，貨櫃船是最主要的排放來源，約莫 79% 的船舶排放清單來自於貨櫃船，其次依序為油輪、散裝船和渡輪(如圖 4.6)。貨櫃船排放比率較高的原因，主要是因為貨櫃船進出高雄港的數量最多。圖 4.7 則是以「船舶活動」情形分析船舶排放清單之比重，可以發現「Berth」階段，也就是船舶停靠在碼頭期間所產生的空氣污染量最多，高達 59%，其次依序為「Fairway」階段，也就是船舶從港口外 40 海浬航航到水道入口期間，最後則是「Maneuvering」階段，指船舶從水道入口調動至碼頭。「Berth」階段雖會關閉船舶的主引擎，但因為所需時間最久，且過程中副引擎仍持續運作，因此排放量最多。至於「Fairway」階段，船舶行駛速度較快，油耗較高，船舶排放量自然也增多，但因為此階段的所需時間較短，因此排放量遠不及船隻停泊於碼頭時。

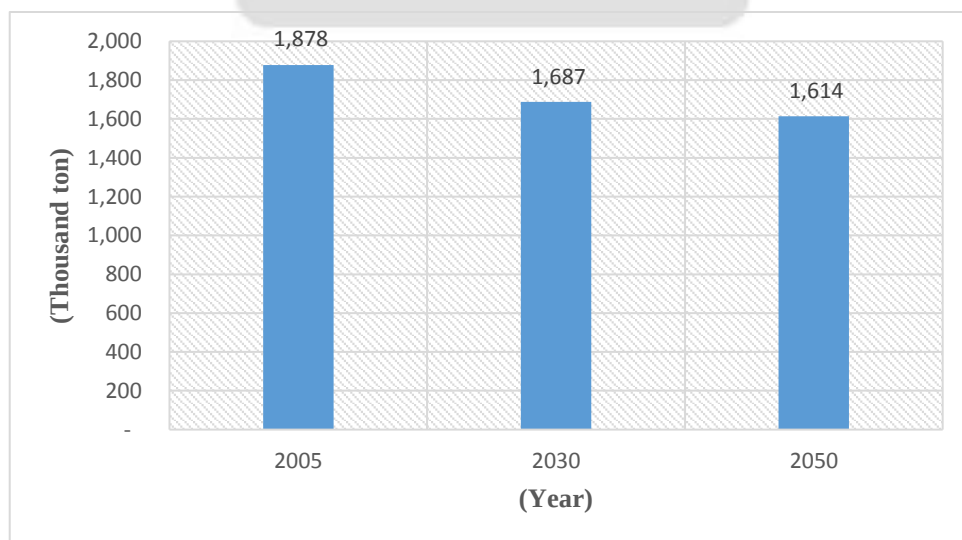


圖 4.4 船舶排放清單之排放量-BAU 情境(只包含 CO₂)

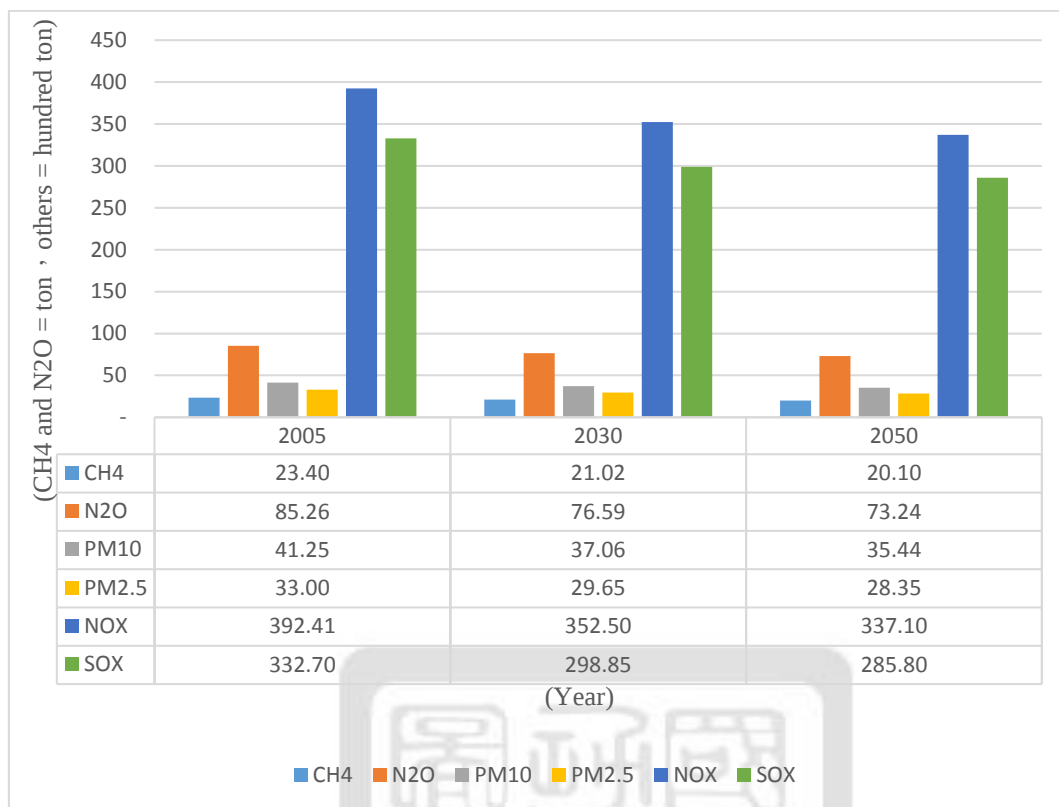


圖 4.5 船舶排放清單之排放量-BAU 情境(CO₂ 除外)

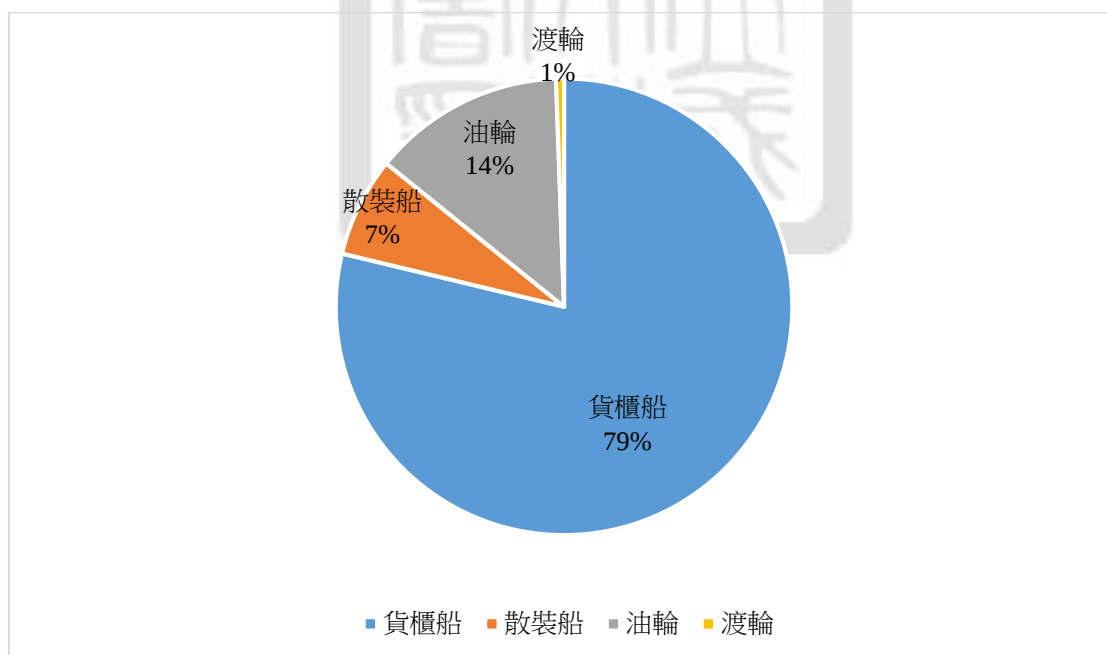


圖 4.6 船舶排放清單之排放比例-以船舶種類區分

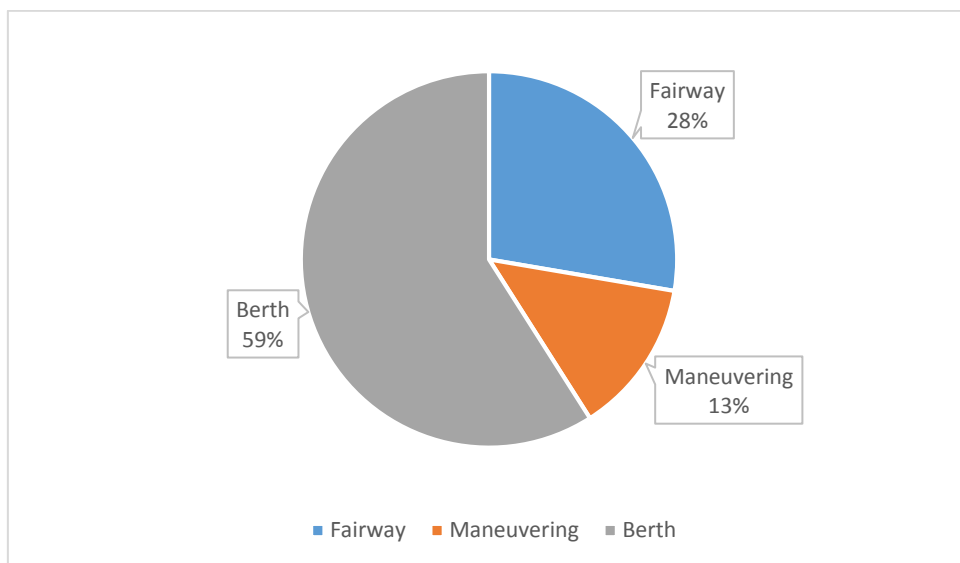


圖 4.7 船舶排放清單之排放比例-以船舶活動情形區分

4.1.2 裝卸機具排放量

受限於高雄港缺乏裝卸機具歷年統計的資料，本研究採用高明貨櫃股份有限公司提供 2011-2017 年的資料，評估高雄港使用柴油之裝卸機具排放清單的排放量。

本研究假設高雄港 2011 年的裝卸機具數量與 2005 年的裝卸機具數量相同；並假設高雄港 2017 年的裝卸機具數量與 2030 年的裝卸機具數量相同。以上假設原因有三，(1) 根據高雄港統計年報(2017)的所統計的資料可以發現 2011 年高雄港的貨櫃裝卸量與 2005 年高雄港的貨櫃裝卸量差異不大(如圖 4.8)，因此 2005 年的裝卸機具數量可利用 2011 年的裝卸機具資料進行評估。(2) 在進出高雄港船舶數量遞減與貨櫃裝卸量持平發展的條件下，本研究假設 2017 年高雄港的裝卸機具足以應付未來十餘年高雄港的貨櫃量，2030 年之前不會再增購新的裝卸機具，因此以 2017 年的裝卸機具數量作為高雄港 2030 年的裝卸機具數量。(3) 在高明貨櫃碼頭的裝卸機具皆採用電力系統運作，不使用柴油，因此本研究假設電力來自乾淨能源；同時，假設高雄港其他五個貨櫃中心在 2030 年之後所新增的裝卸機具也使用電力系統，因此高雄港在 2050 年由裝卸機具所產生的空氣污染量就會與 2030 年相同，不再增加。

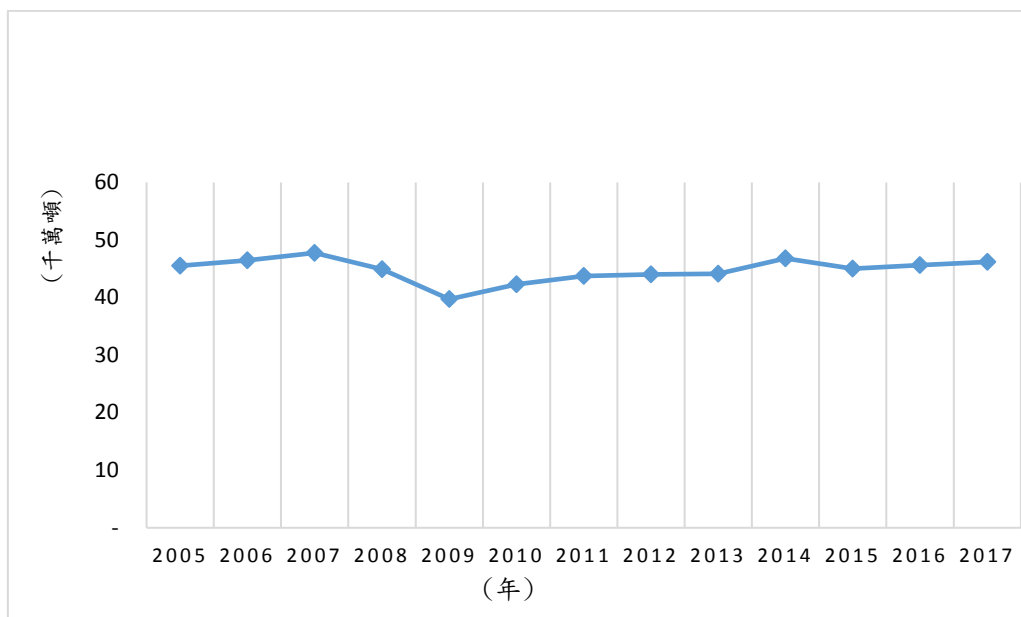


圖 4.8 2005-2017 高雄港貨櫃裝卸量

參考高明貨櫃股份有限公司所提供的資料，高雄港裝卸機具的部分，除高明貨櫃碼頭外，其餘五個貨櫃中心皆使用柴油為動能之裝卸機具，因此本研究評估這五座貨櫃中心內所有橋式起重機、門式起重機與堆高機排放清單的排放量。圖 4.9 和圖 4.10 說明在 BAU 情境之下，高雄港裝卸機具排放清單的排放量從 2005 年至 2030 年呈現成長的趨勢，主要原因和高雄港裝卸機具數量從 2011-2017 年增加有關。當中以門式起重機數量最多、成長最快，其次依序為堆高機和橋式起重機(如圖 4.11)，橋式起重機是裝卸機具最主要的排放來源，原因為橋式起重機運作時的馬力遠大於門式起重機和堆高機，因此產生的空氣汙染量自然也較多。2030 年至 2050 年期間，裝卸機具排放清單之排放量不再增加，原因是進出高雄港船舶數量遞減與貨櫃裝卸量持平發展，本研究假設 2030 年之後高雄港不會再增購新的裝卸機具。即便有購買新裝卸機具的需求，本研究也假設高雄港會參考高明貨櫃碼頭的經驗購買電力驅動之裝卸機具。

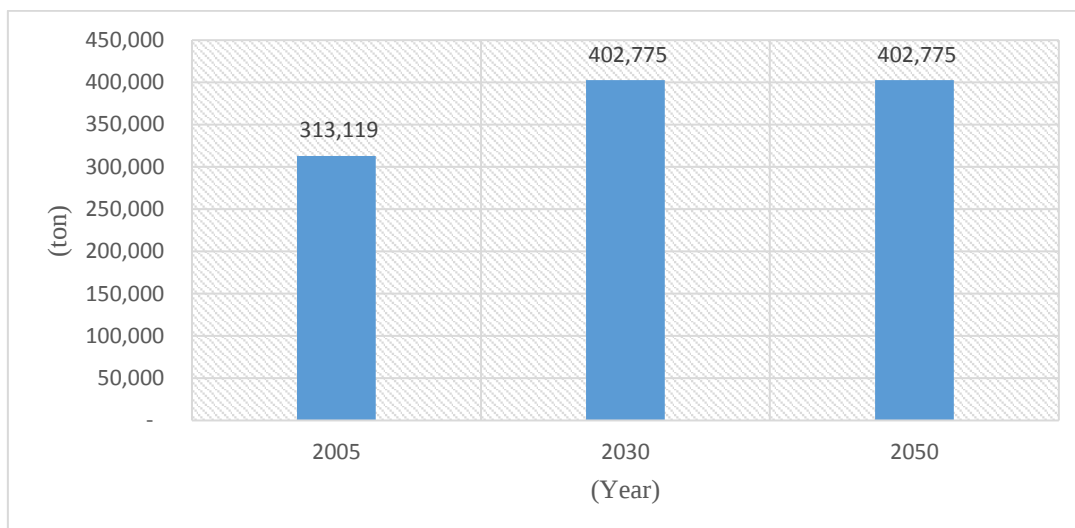


圖 4.9 裝卸機具排放清單之排放量-BAU 情境(只包含 CO₂)

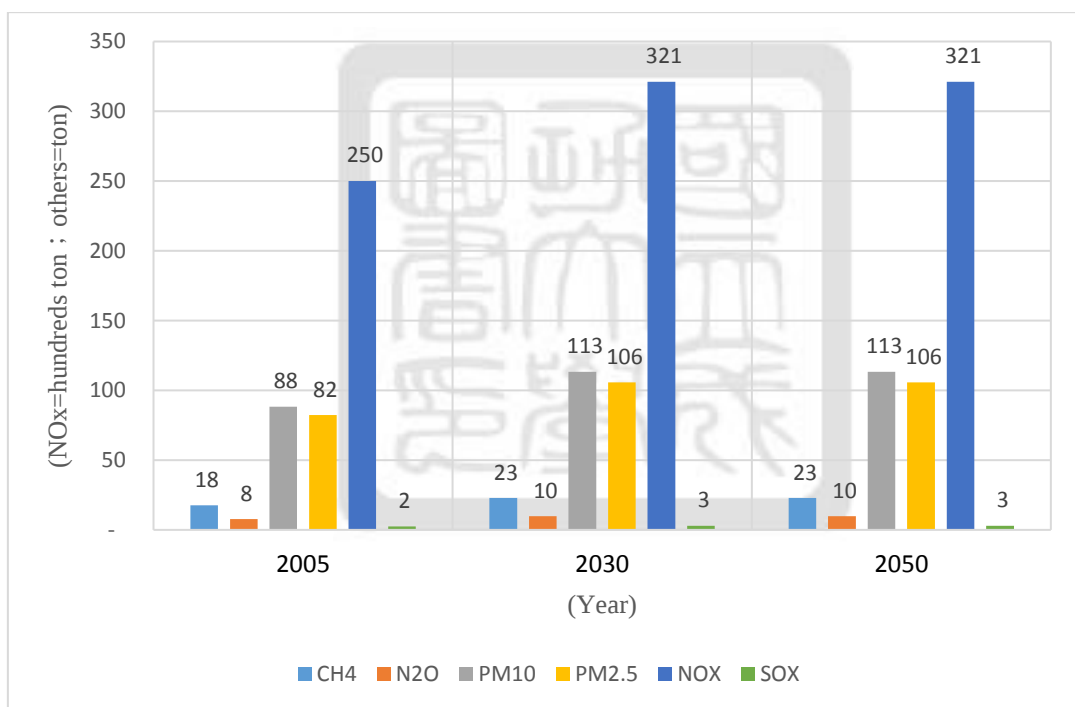


圖 4.10 裝卸機具排放清單之排放量-BAU 情境(CO₂ 除外)

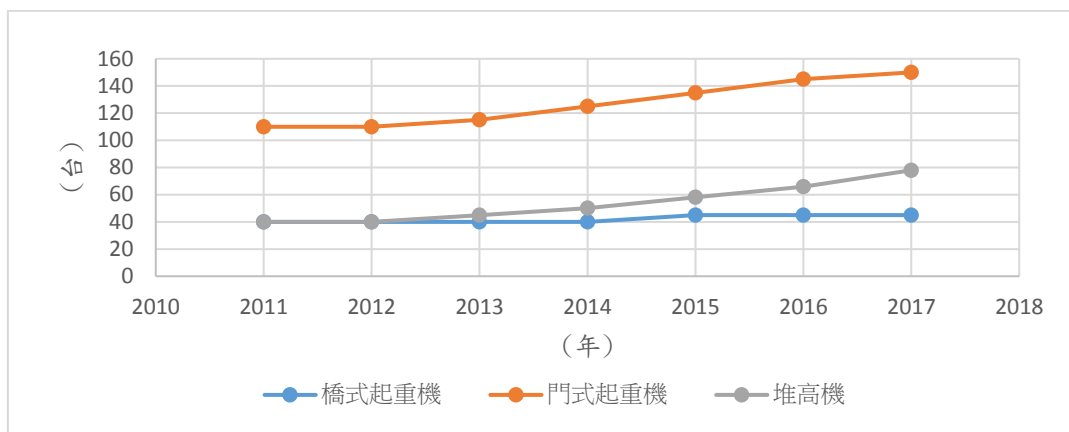


圖 4.11 2011-2017 年裝卸機具數量

資料來源：本研究以高明碼頭裝卸機具數量粗估高雄港所有裝卸機具之數量

4.1.3 拖車頭排放量

由於缺乏高雄港內拖車頭歷年的統計資料，本研究參考高明貨櫃股份有限公司相關從業人員之經驗，以一座橋式起重機配備 8 輛拖車頭為基準，評估拖車頭 2005、2030 與 2050 年排放清單之排放量。

本研究以 FUSO-380 為研究對象，評估拖車頭往返橋式起重機與儲櫃中心時所產生的空氣汙染。圖 4.12 可以發現，拖車頭的排放量從 2005 年至 2030 年呈現成長的趨勢，主要與 2011-2017 年高雄港裝卸具數量增加有關，因為裝卸機具數量增加也就表示高雄港整體配置的拖車頭數量必須增加。

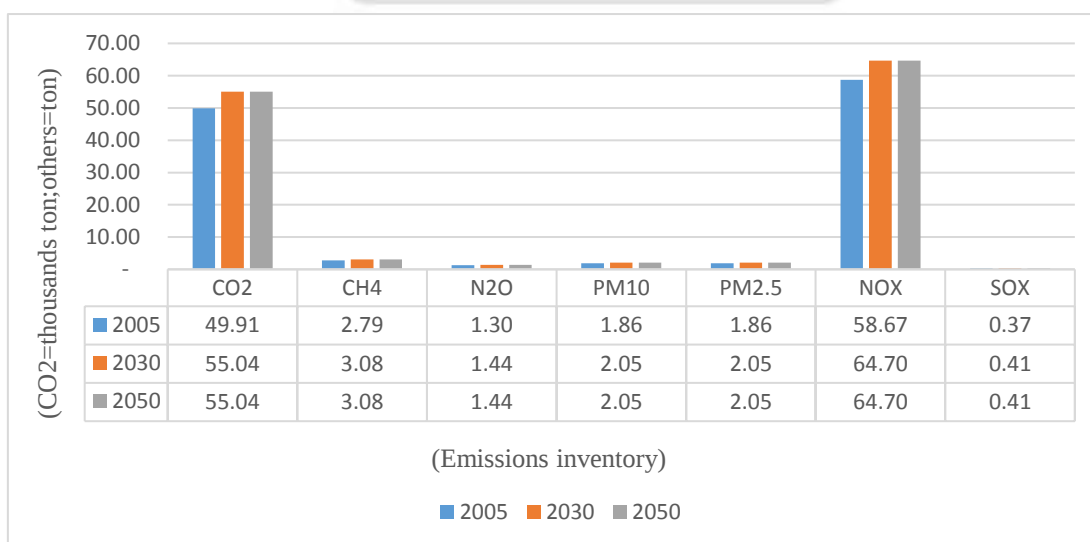


圖 4.12 拖車頭排放清單之排放量-BAU 情境

4.2 第一階段港口排放清單減量策略

為了減緩地球暖化與空氣污染所造成的諸多負面衝擊，降低高雄港港口排放清單之排放量是一件相當重要的議題。目前，台灣缺乏相關法規來限制港口的空氣污染排放，因此本研究將以《國家自訂預期貢獻，INDC》與《溫室氣體減量及管理法》的標準為目標，設計一套減緩高雄港港口排放清單的策略，協助高雄港有效的降低空氣汙染量。本研究之高雄港港口排放清單減量策略主要分成兩階段，第一階段以 INDC 之標準為目標，目標為 2030 年高雄港之港口排放清單中的每一項氣體需較 2005 年減量 20%，為 2005 年高雄港的空氣汙染量的 80%；第二階段以《溫室氣體減量及管理法》的標準為目標，目標則是 2050 年高雄港港口排放清單中的每一項氣體都必須減少為 2005 年高雄港的空氣汙染量的 50%。

高雄港第一階段的港口排放清單減量策略主要有三項。(1)針對所有進出高雄港之船舶實施船舶減速與使用岸電。(2)將高雄港內 50%的柴油裝卸機具替換成以電力發動之裝卸機具。(3) 將高雄港內 50%的柴油拖車頭替換為使用液態天然氣(LNG)之拖車頭。

圖 4.13 是 2005 年高雄港排放清單之排放量、INDC 排放量標準與 2030 年高雄港實施第一階段減量策略後之排放量，圖中可知在實施第一階段減量策略之後，高雄港港口排放清單之排放量將大幅減少，並達成第一階段減量策略設定之目標。圖 4.14 則是 2005 年高雄港排放清單排放量與 2030 年實施第一階段減量策略後，兩者之排放差距百分比，從圖中可以看出排放清單內所有氣體都可以減少至少 25%以上。說明高雄港實施第一階段減量策略後，所有排放清單之排放量皆能達到第一階段以 INDC 為標準之目標，當中 PM₁₀、PM_{2.5}、NO_x 和 SO_x 的減幅更是達到七成左右。

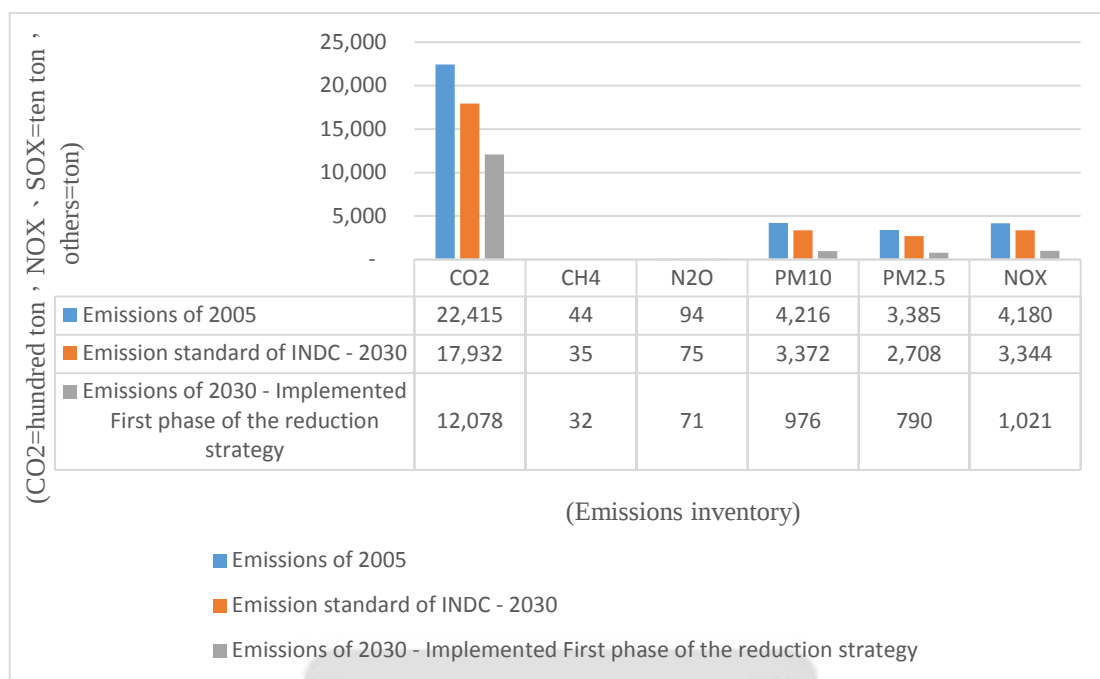


圖 4.13 2005 年高雄港港口排放清單排放量、INDC 排放量標準與 2030 年實施第一階段港口排放清單減量策略後之排放量

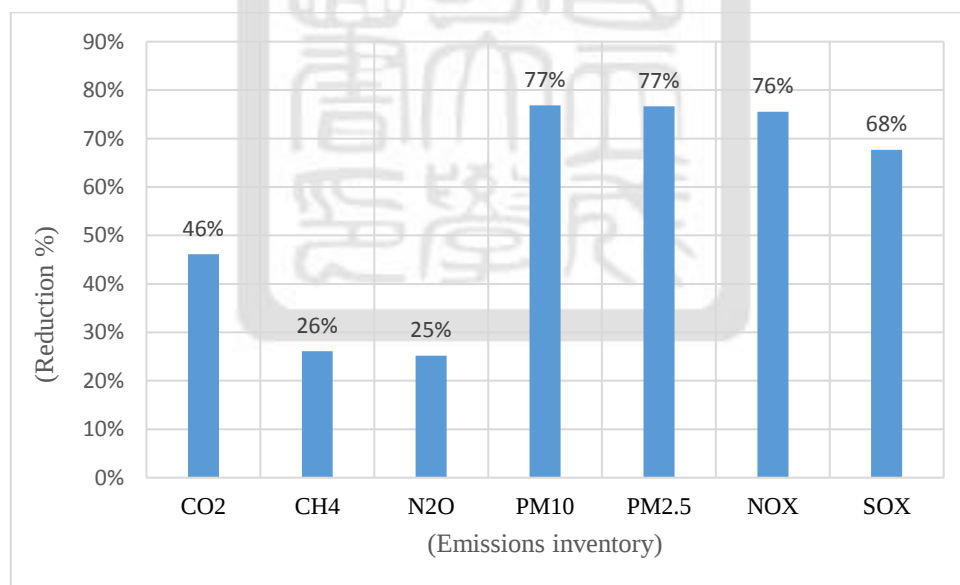


圖 4.14 2005 年高雄港港口排放清單排放量與 2030 年實施第一階段港口排放清單減量策略後之排放差距百分比

4.2.1 第一階段港口排放清單減量策略-船舶

根據活動型態進行分析，可以發現船舶在「Berth」和「Fairway」階段，所產生的空氣污染最多，兩階段排放量(59%+28%)總合佔整體排放量達 87%(圖 4.7)，因此為了讓高雄港港口排放清單排放量達成本研究第一階段的

減量目標，有效降低進出船舶在「Berth」和「Fairway」階段所產生之排放量相當重要。第一階段船舶排放清單減量策略有兩種。(1)「Fairway」是三種船舶活動型態中，排放清單之排放量第二多的階段，因此本研究採取 2017 綠旗計畫中，船舶必須在港口外 40 海浬將時速減低至 12 節的策略，假設所有進出高雄港的船舶都採用減速的策略，不但可以降低油耗，也可以有效減少船舶所產生的排放量。(2)「Berth」是三種船舶活動型態中，排放清單排放量最多的階段，因此本研究假設所有停泊船隻會使用岸電。在岸電是來自乾淨能源的前提下，使用岸電來維持船舶副引擎的運作不但可以確保船隻內部的電力能正常供應，也可以停止船舶在停泊期間所產生的空氣污染量。參考國際頂尖能源與氣候顧問公司-Ecofys 的數據，使用岸電的船舶 CO₂ 可以降低 57%、SO_x 可以降低 80%、PM₁₀、PM_{2.5} 和 NO_x 則分別可以降低 100%。

圖 4.15 是第一階段船舶實施不同減量策略後之排放量，圖中顯示若單獨實施船舶減速的減量策略，是可以降低船舶所產生之排放量，但如果一起實施船舶減速和使用岸電的話，則降低船舶排放量的效果會更好。圖 4.16 是高雄港針對出入船舶實施船舶減速，和船舶減速加上使用岸電之減量成效，與 2005 年高雄港船舶排放清單之排放差距百分比，單獨採用船舶減速的策略，可以有效降低船舶排放清單 24-26% 的排放量；但船舶減速如果加上岸電一起應用，可以大幅降低船舶排放清單 25-79% 的排放量。

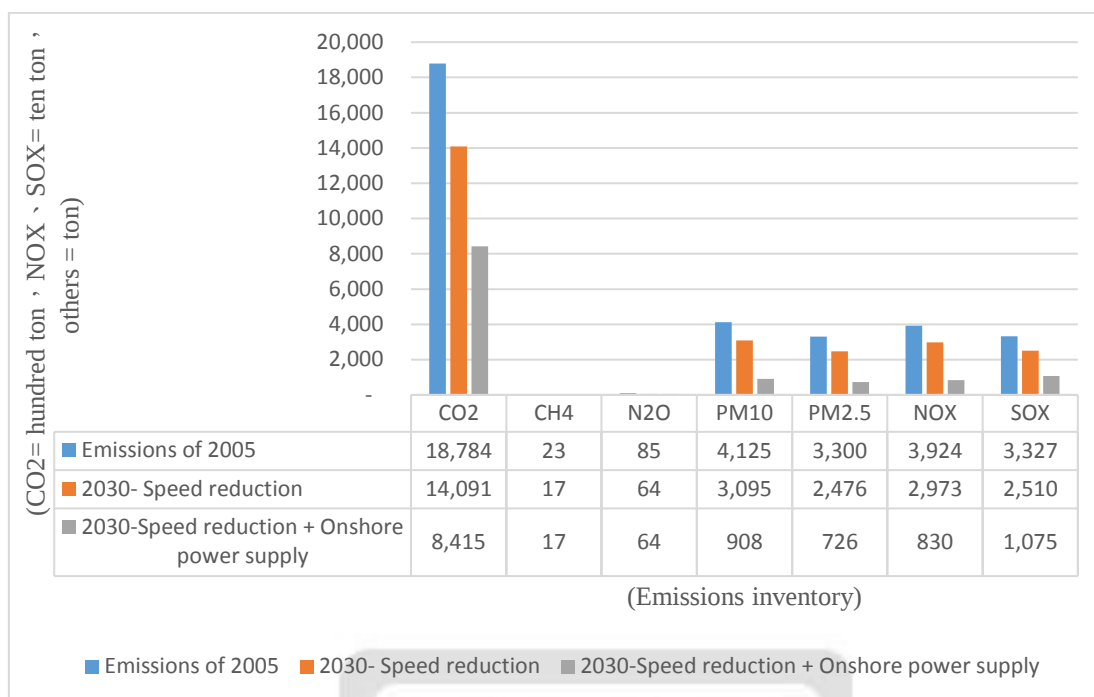


圖 4.15 第一階段船舶排放清單減量策略實施後之排放量

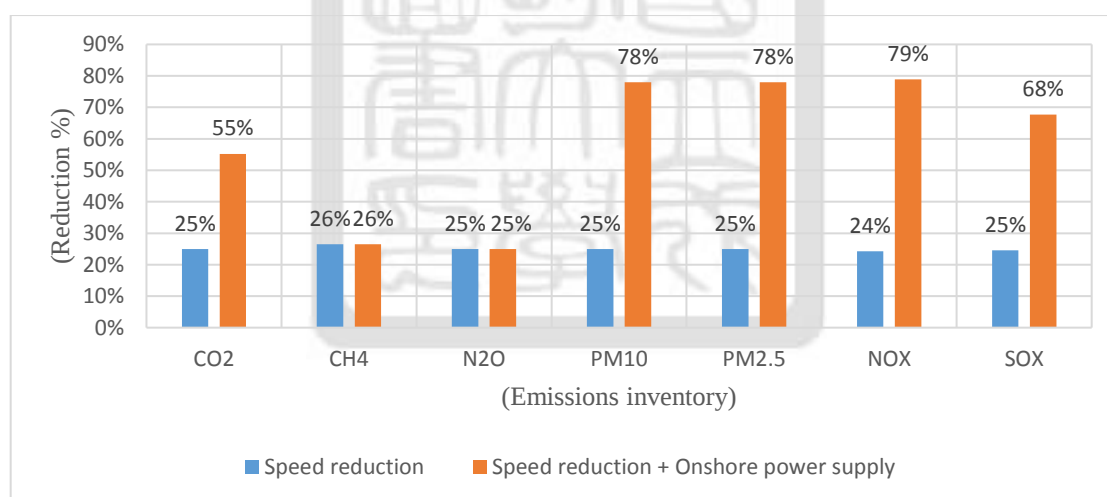


圖 4.16 第一階段船舶排放清單減量策略之排放差距百分比

4.2.2 第一階段港口排放清單減量策略-裝卸機具

由表 4.1 得知裝卸機具是高雄港港口排放清單中，第二大的排放來源。當中，裝卸機具對於 CO₂、CH₄ 和 N₂O 的排放量貢獻頗多，因此減少裝卸機具排放量的策略，主要以能夠降低這三種氣體的排放量，才有機會使高雄港港口排放清單的排放量達成第一階段的目標。

有鑑於國外越來越多港口開始進行裝卸機具電氣化，以減少裝卸機具所

產生之空氣汙染；以及參考國內高明貨櫃碼頭也是使用電氣化之裝卸機具，故本研究在第一階段排放清單減量策略，將針對港區內 50%之柴油裝卸機具進行電氣化。

根據斯里蘭卡可倫坡國際貨櫃碼頭(CICT)和美國喬治亞州的薩凡納港(Port of Savannah)使用電力驅動的裝卸機具的經驗，電力系統之裝卸機具比起柴油裝卸機具可降低 45%的 CO₂、88%的懸浮微粒和 90%的柴油消耗量，因此本研究假設在 2030 年之前，高雄港內 50%的柴油裝卸機具汰換成以電力驅動之裝卸機具。

圖 4.17 為裝卸機具實施第一階段減量策略前後之排放量；圖 4.18 則為高雄港第一階段裝卸機具實施排放清單減量策略後之成效，與 2005 年高雄港裝卸機具排放清單之排放量相比，將高雄港一半的柴油裝卸機具汰換成電力裝卸機具的策略，可以降低裝卸機具 CH₄、N₂O、PM₁₀、PM_{2.5}、NO_x 和 SO_x 25%以上的排放量。顯示使用電力裝卸機具有不錯的減量效果。雖然 CO₂ 的排放差距百分比，與 2005 年相比，因為裝卸機具增長而呈現負值；但如果與 2030 年 BAU 情境相比，實施減量策略確實能有效降低裝卸機具所產生之排放量。

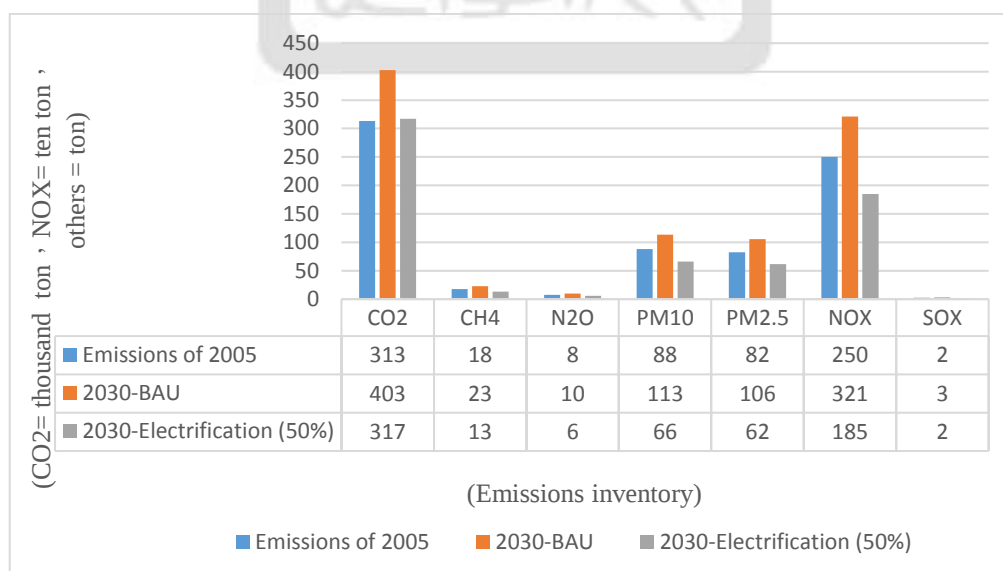


圖 4.17 第一階段裝卸機具排放清單減量策略實施前後之排放量

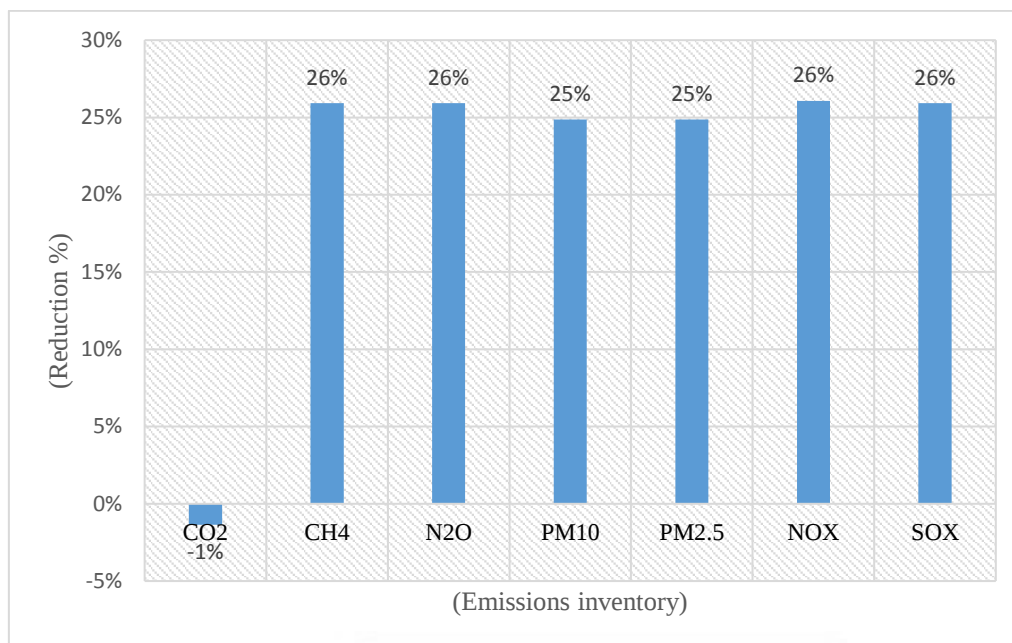


圖 4.18 2005 年高雄港裝卸機具排放清單排放量與 2030 年實施第一階段裝卸機具排放清單減量策略後之排放差距百分比

4.2.3 第一階段港口排放清單減量策略-拖車頭

由表 4.1 的排放清單中，可以得知拖車頭主要排放 CO₂、CH₄ 和 N₂O 三種氣體，因此本研究拖車頭排放清單減量策略，將著重於降低這三種氣體的排放量，以提升高雄港港口排放清單的排放量達成第一階段的目標的機會。

高雄港之拖車頭以 FUSO-380 為主，而 FUSO-380 以一般柴油為燃料。燃燒柴油會產生空氣汙染，因此越來越多的國外港口，開始針對港區內的拖車頭進行空汙管制。例如：美國聖佩羅德灣空氣潔淨計畫(CAAP)就對港區內的柴油拖車頭替換成使用液態天然氣(LNG)的拖車頭，對於減少港區內的空氣汙染有相當大的助益。

根據 IPCC 第四次評估報告(2018)所附的的排放係數表，使用液態天然氣(LNG)可以分別有效降低 CO₂、CH₄ 和 N₂O 的排放量 24%、67%和 83%。另外，Volvo 最新的 FM LNG 車款也強調，該款車輛之性能與 Volvo FM 完全相同，差別在於使用 LNG 做為燃料之後，可以節省燃料成本，更可減少該車款 20% 的碳排放量。有鑑於此，本研究在第一階段港口排放清單減量策略中，將高雄

港內 50%的柴油拖車頭汰換成 LNG 拖車頭，分析汰換後 CO₂、CH₄ 和 N₂O 所減少的排放量是否可達第一階段之目標。

圖 4.19 是第一階段拖車頭排放清單減量策略實施前後之排放量，可以看出拖車頭產生的氣體以 CO₂ 為最多。圖 4.20 則是第一階段拖車頭排放清單減量策略之排放差距百分比，與 2005 年高雄港拖車頭排放清單之排放量相比。將高雄港一半柴油拖車頭替換成 LNG 拖車頭的策略，可以分別降低拖車頭 CO₂、CH₄ 和 N₂O 的排放量，2%、23.9%和 32.1%的排放量。PM₁₀、PM_{2.5}、NO_x 和 SO_x 的排放量雖然無法降低，但因為拖車頭這些氣體的排放量不大，因此不影響第一階段減量策略的成效。

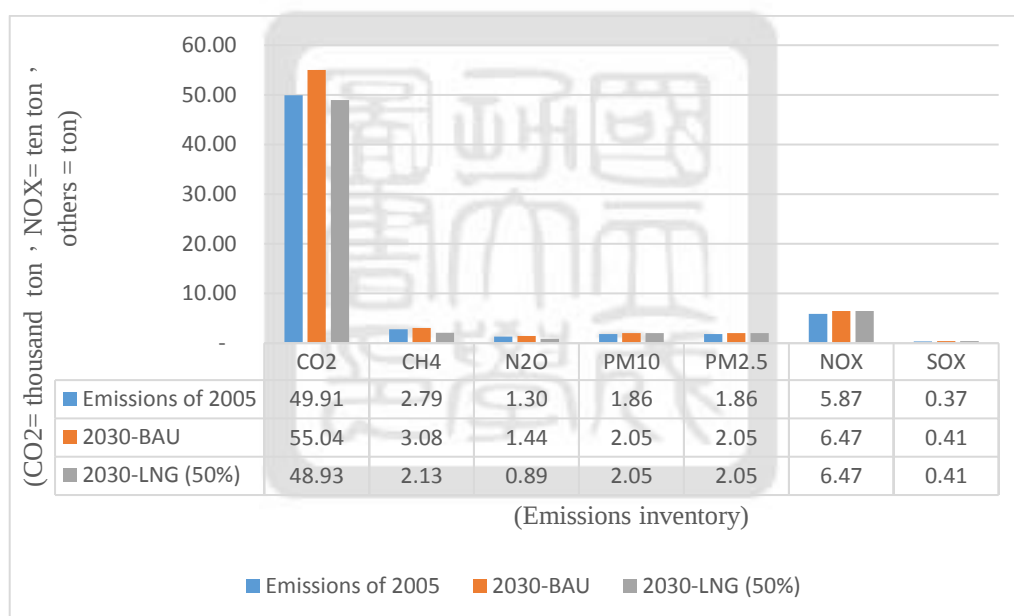


圖 4.19 第一階段拖車頭排放清單減量策略實施前後之排放量

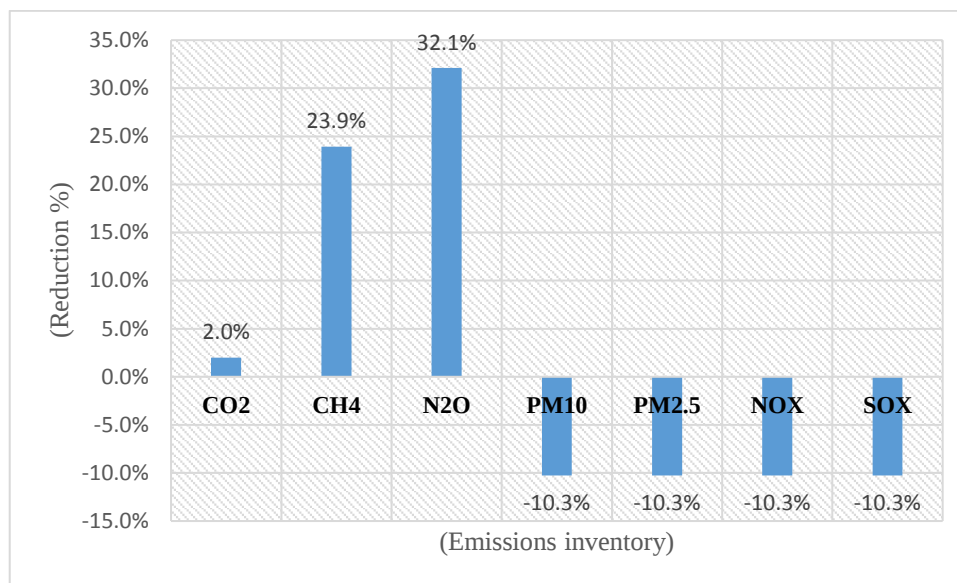


圖 4.20 2005 年高雄港拖車頭排放清單排放量與 2030 年實施第一階段拖車頭排放清單減量策略後之排放差距百分比

4.3 第二階段港口排放清單減量策略

完成第一階段高雄港港口排放清單減量策略之後，本研究將進行第二階段高雄港港口排放清單減量策略。第二階段高雄港港口排放清單減量策略將以第一階段高雄港港口排放清單減量策略為基礎，分別針對高雄港的出入船舶、裝卸機具和拖車頭進行減量策略。第二階段減量策略以《溫室氣體減量及管理法》的標準為目標，目標則是 2050 年高雄港港口排放清單內每一項氣體之排放量須減少為 2005 年高雄港港口排放清單之排放量的 50%。

高雄港第二階段減量策略主要有三項。(1)繼續對所有進出高雄港之船舶實施船舶減速與岸電使用，並假設所有船舶在 2050 年皆會使用 LNG 作為燃料。(2)將高雄港內所有的柴油裝卸機具替換成電力裝卸機具。(3) 將高雄港內所有的柴油拖車頭替換成 LNG 拖車頭。

圖 4.21 是 2005 年高雄港港口排放清單排放量、《溫室氣體減量及管理法》排放量標準與 2050 年實施第二階段港口排放清單減量策略後之排放量，圖中可清楚看出高雄港排放清單之排放量在實施第二階段減量策略後幾乎所有氣體都可以達到第二階段減量策略的目標。圖 4.22 為 2050 年高雄港實施第二階

段減量策略後與 2005 年高雄港排放量之差異，從圖中可以看出排放清單內所有氣體都可以減少 53%以上，當中 CO₂ 和 CH₄ 減幅達六成左右，PM₁₀、PM_{2.5}、NO_x 和 SO_x 的減幅更是達到七成左右，顯示第二階段的減量策略具有顯著減量效果。

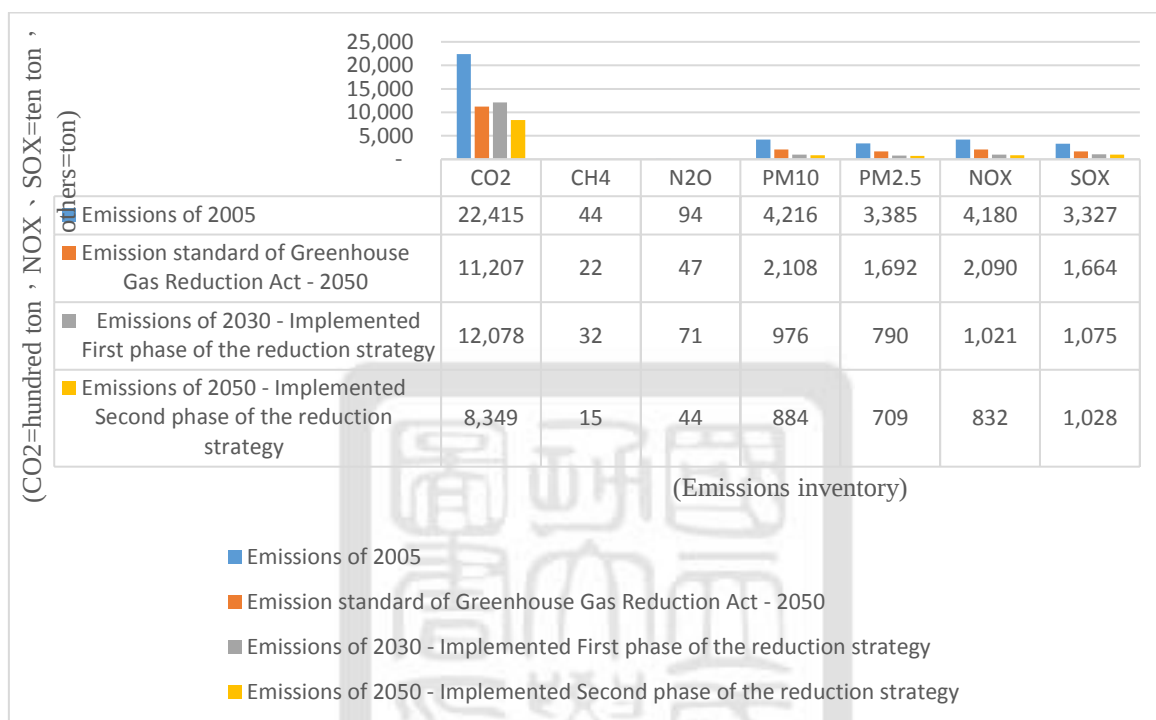


圖 4.21 2005 年高雄港港口排放清單排放量與 2050 年實施第二階段港口排放清單減量策略前後之排放量

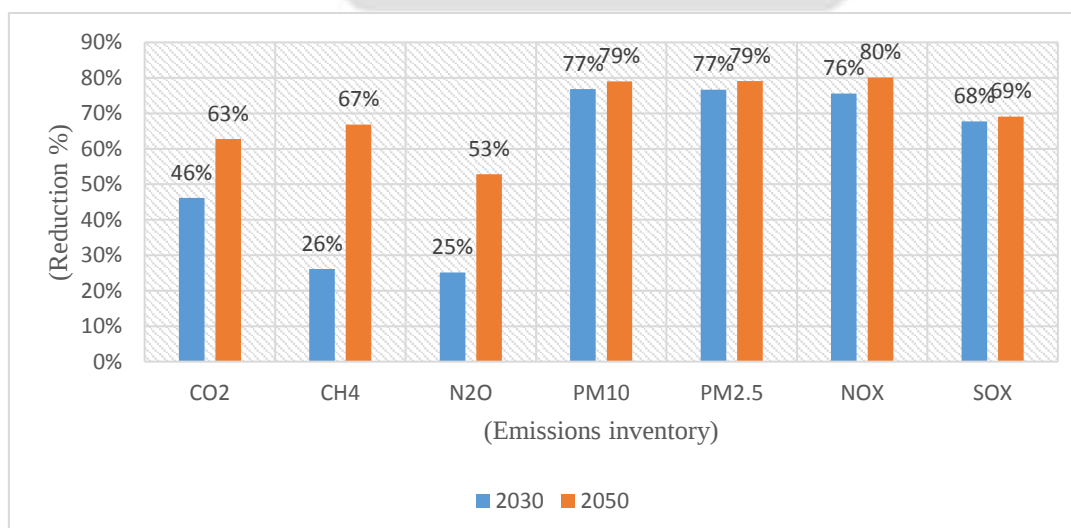


圖 4.22 2005 年高雄港港口排放清單排放量與 2050 年實施第二階段港口排放清單減量策略後之排放差距百分比

4.3.1 第二階段港口排放清單減量策略-船舶

實施第一階段的港口排放清單減量策略之後，船舶排放清單中大部分的氣體都可以減量 50% 以上，唯有 CH_4 和 N_2O 的減量比例不到 50%。為了達成第二階段較為嚴苛的港口減量標準，船舶在第二階段的減量策略中，除了繼續實施船舶減速和岸電的策略之外，更將針對船舶所排放的 CH_4 和 N_2O 進行限制。

第二階段減少船舶排放量的策略有兩種。(1)繼續針對進出港船舶實施船舶減速的策略，並提供岸電給停泊在碼頭之船舶使用(2)本研究假設 2030 年之後，全球船舶所使用之燃料會以液化天然氣(LNG)為主，因此，本研究假設進入高雄港之船舶皆使用液化天然氣(LNG)，並參考 IPCC 第四次評估報告中所附的排放係數表(2018)，得知使用液化天然氣(LNG)可以分別有效降低 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的排放量，59%、98%和 100%。

圖 4.23 是第二階段船舶排放清單減量策略實施後之排放量，圖中顯示在實施第二階段減量策略之後，船舶排放量可再進一步減少，說明第二階段船舶減量策略具有減少船舶產生空氣汙染的作用。圖 4.24 則是船舶實施第二階段減量策略之後，與 2005 年高雄港船舶排放清單之排放量之排放差距百分比，圖中可以得知船舶在採取船舶減速、使用岸電與燃料替換等策略後，船舶排放清單之排放量可有效降低 49%-80%，所有氣體的減量效果都可以達到五成以上，且 CH_4 和 N_2O 的排放量也比第一階段更少。

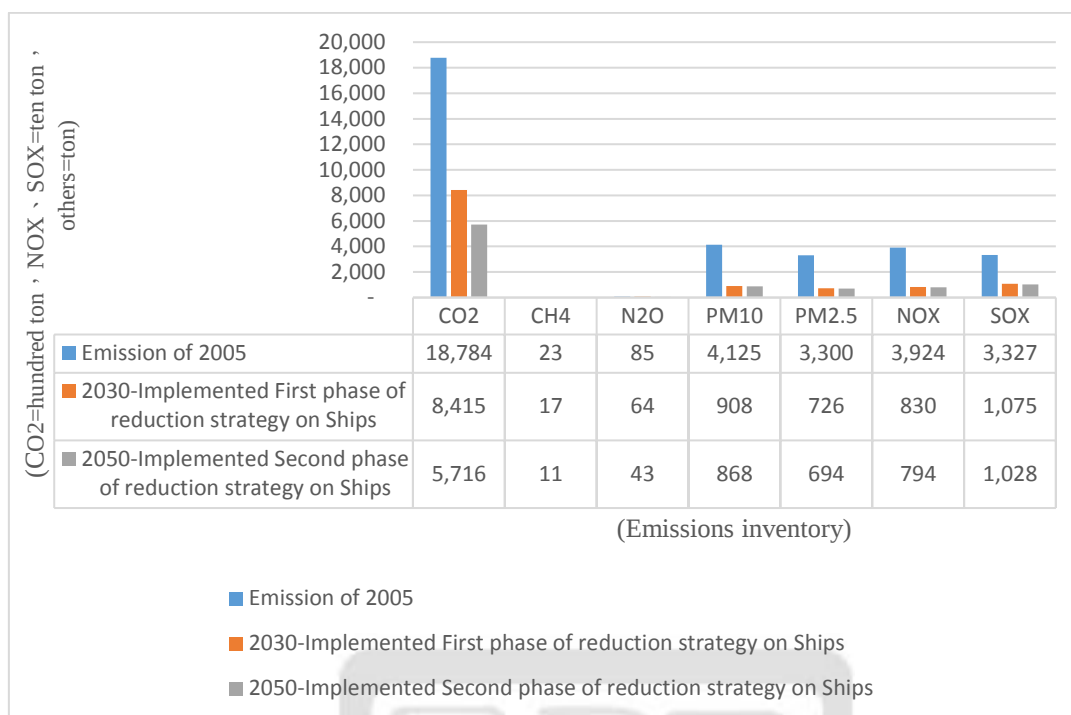


圖 4.23 第二階段船舶排放清單減量策略實施後之排放量

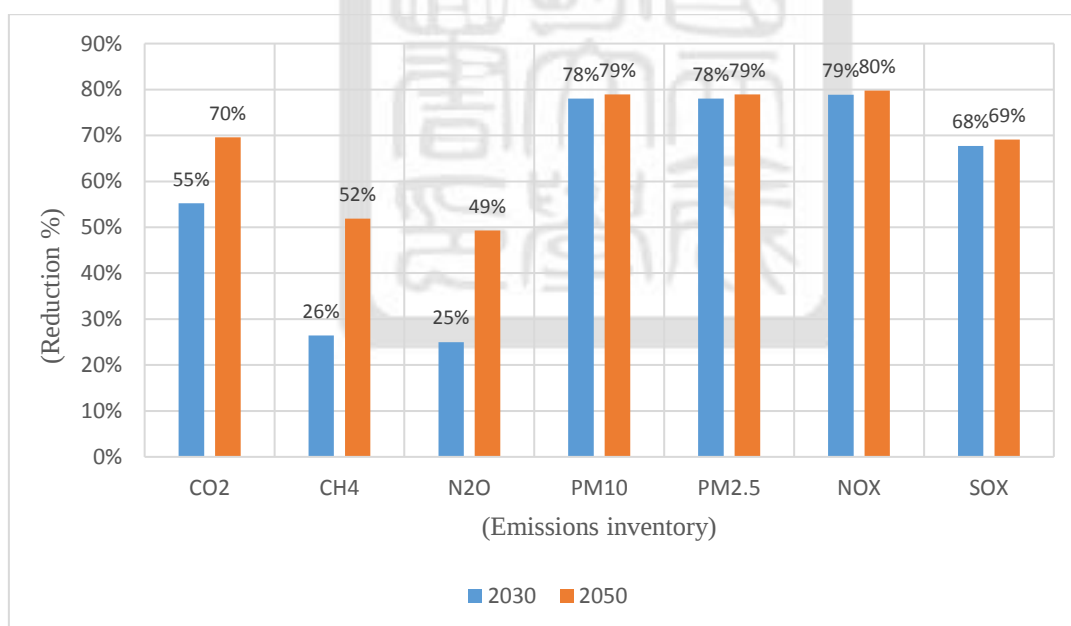


圖 4.24 2005 年高雄港船舶排放清單排放量與 2050 年實施第二階段船舶排放清單減量策略後之排放差距百分比

4.3.2 第二階段港口排放清單減量策略-裝卸機具

根據圖 4.17 與圖 4.18 可以發現裝卸機具實施第一次減量策略有助於降低裝卸機具排放清單之排放量，因此第二階段港口排放清單減量策略是將高雄港

內所有的柴油裝卸機具汰換成電力發動之裝卸機具，並評估所有裝卸機具電氣化之後，所能降低的空氣汙染量。

圖 4.25 為裝卸機具實施第一、二階段減量策略後之排放量，當中裝卸機具之排放量因為實施裝卸機具電氣化之緣故而逐年降低，顯示減量效果相當良好。

圖 4.26 為第二階段減量策略中，針對高雄港所有裝卸機具進行裝卸機具電氣化後之排放差距百分比，可以得知與 2005 年高雄港裝卸機具排放清單之排放量相比，第二階段減量策略明顯優於第一階段，主要的原因是在第一階段期間 (2030 年之前)，使用柴油之裝卸機具仍有增加且減量策略所涵蓋之對象僅 50% 的裝卸機具，因此排放量之降幅較小；相反地，在第二階段期間 (2031-2050 年)，本研究假設使用柴油之裝卸機具不再增加且減量策略會涵蓋所有的裝卸機具，因此排放量之降幅才會大幅上升。

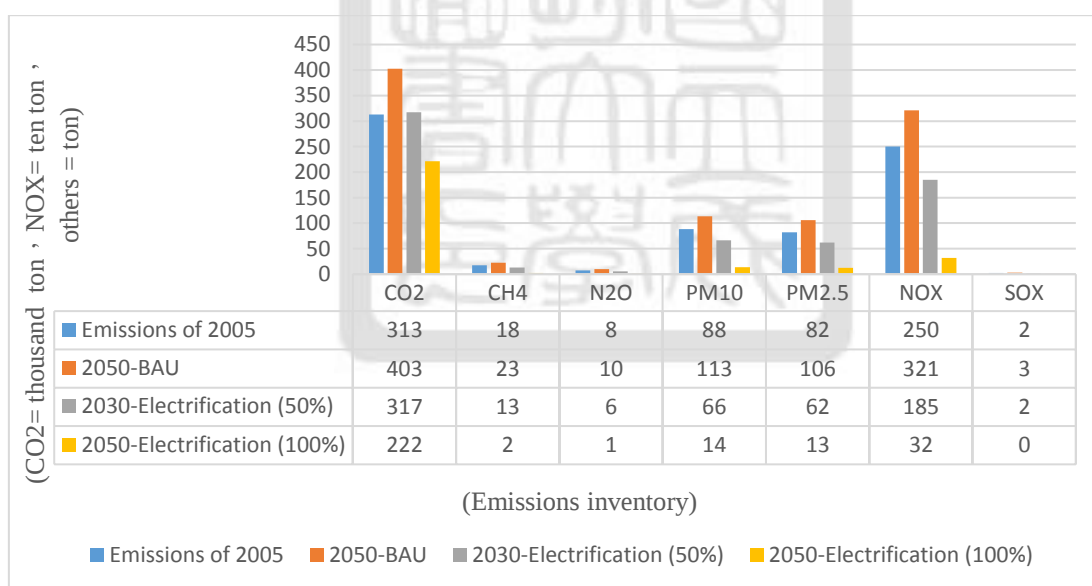


圖 4.25 第二階段裝卸機具排放清單減量策略實施後之排放量

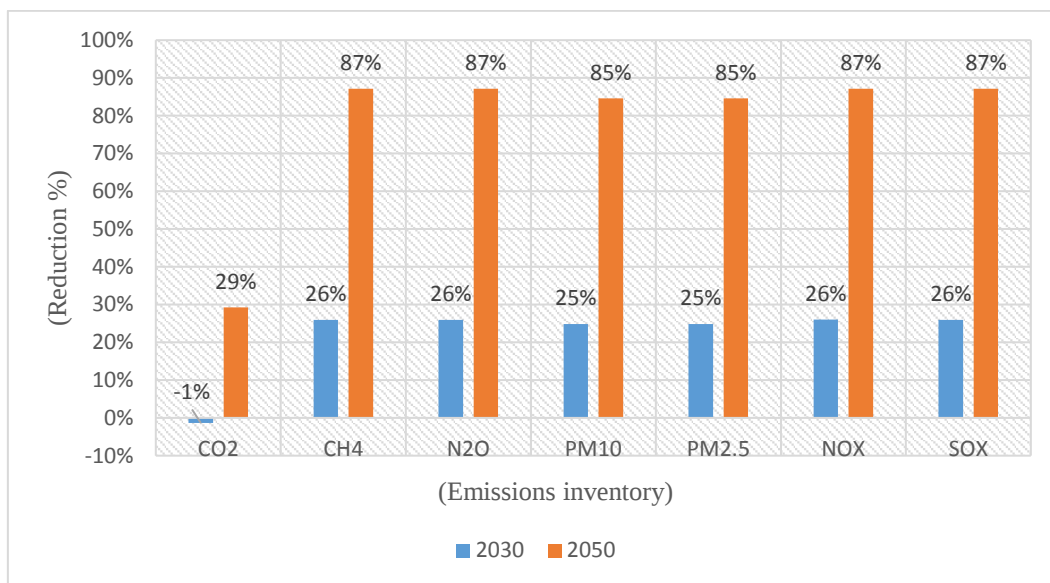


圖 4.26 2005 年高雄港裝卸機具排放清單排放量與 2050 年實施第二階段裝卸機具排放清單減量策略後之排放差距百分比

4.3.3 第二階段港口排放清單減量策略-拖車頭

根據圖 4.19 與圖 4.20 可以知道以液態天然氣(LNG)進行燃料替換的策略可以減少拖車頭 CO₂、CH₄ 和 N₂O 的排放量，因此第二階段港口排放清單減量策略會將高雄港內所有的柴油拖車頭汰換成使用液態天然氣(LNG)之拖車頭，並評估拖車頭使用液態天然氣(LNG)後，所能降低的空氣汙染量。

圖 4.27 為拖車頭實施第一、二階段減量策略後之排放量，從圖中可以看出實施第一、二階段之減量策略皆對拖車頭所產生之空氣汙染有明顯的減量效果。此外，針對拖車頭之減量策略是以降低 CO₂、CH₄ 和 N₂O 為主，因此其他氣體之排放量不會減少。圖 4.28 為第二階段減量策略中，高雄港所有柴油拖車頭替換成使用液態天然氣之拖車頭後的排放差距百分比，與 2005 年高雄港拖車頭排放清單之排放量相比，針對高雄港所有的拖車頭進行燃料替換的策略可以分別降低拖車頭 CO₂、CH₄ 和 N₂O，16%、64%和 81%的排放量，當中以 N₂O 減量效果最佳。雖然 PM₁₀、PM_{2.5}、NO_x 和 SO_x 的排放量無法降低，但因為這些氣體的排放量不大，因此對整體高雄港的減量策略並無太大的影響。

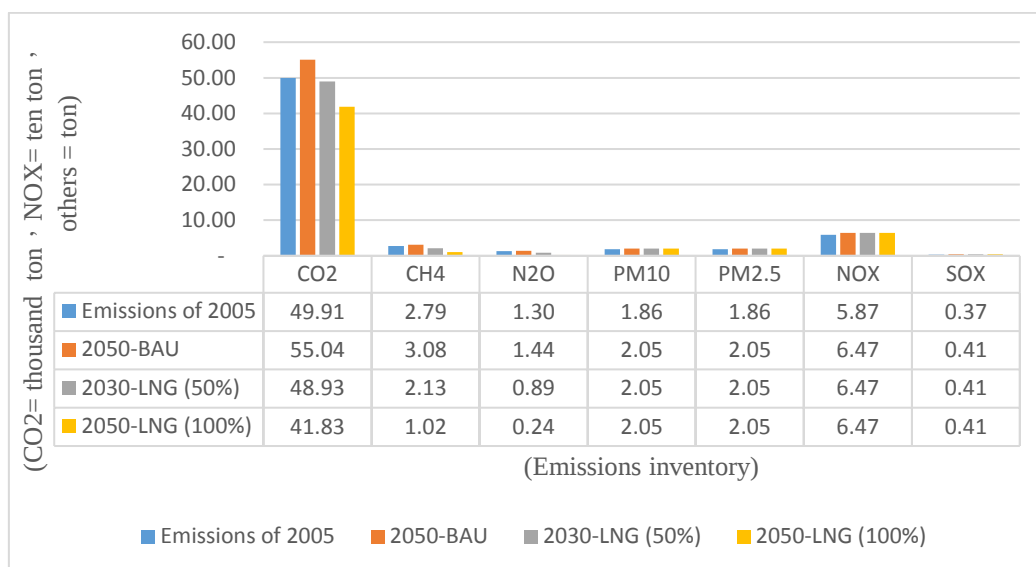


圖 4.27 第二階段拖車頭排放清單減量策略實施後之排放量

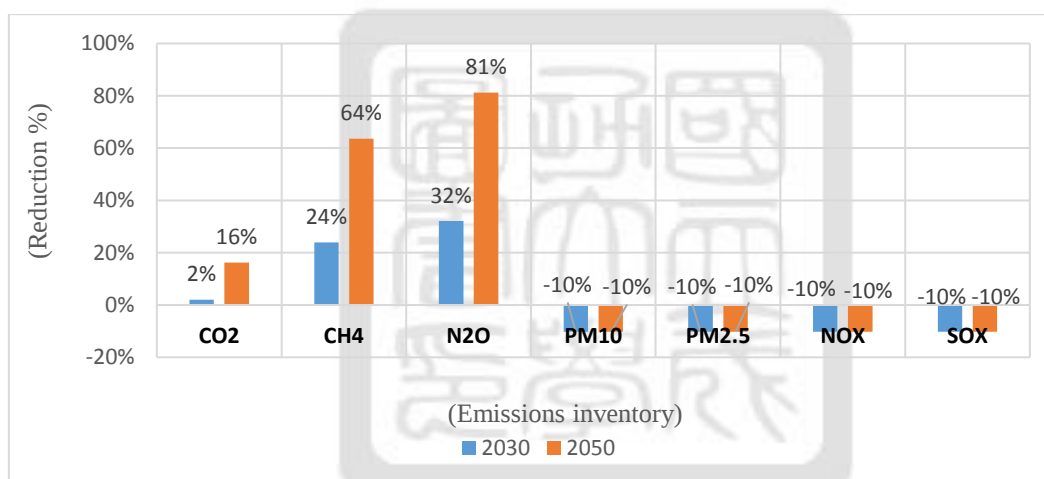


圖 4.28 2005 年高雄港拖車頭排放清單排放量與 2050 年實施第二階段拖車頭排放清單減量策略後之排放差距百分比

4.4 港口排放清單之外部成本

外部成本是指空氣汙染物體威脅人類健康和環境所產生的損害(Tichavska and Tovar 2015)。因此，本研究利用外部成本係數表，和高雄港港口排放清單之排放量，評估高雄港港口清單之排放量，對周遭居民與環境所造成的經濟損失。表 4.2 外部成本係數主要參考 VOWTAP(2014)、Song(201)、VTPI(2012)、USEPA(2010)、與 IPCC(2014)，如表 4.2。當中，NOX、SOX、PM10 和 PM2.5 的排放係數較大，是因為這些氣體對於人體健康和自然環境所產生的負面影響較大。

表 4.3 是高雄港港口排放清單之排放量所產生的外部成本，從表中可以發現在 BAU 情境下，外部成本呈現逐年遞減的趨勢，主要的原因和入港船舶減少有密切關係。當中，以 NO_x 的外部成本最高，其次依序為 SO_x、PM₁₀、PM_{2.5}、CO₂、N₂O 和 CH₄。另外，與 2005 年高雄港排放清單所產生的外部成本相比，實施第一階段減量策略後，高雄港大約可以減少 11.1(15.3 億-4.2 億)億美元由外部成本所產生的經濟損失，降幅達到 73%；另一方面，同樣與 2005 年高雄港排放清單所產生的外部成本相比，實施第二階段排放清單減量策略後，則大約可以減少高雄港 11.6(15.3 億-3.7 億)億美元由外部成本所產生的經濟損失，降幅達到 76%。

表 4.2 排放清單之外部成本係數

(排放清單)	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	PM ₁₀	PM _{2.5}	NO _x	SO _x
外部成本係數 (美元/ton)	29	812	7,461	76,867	85,771	10,687	12,329

表 4.3 高雄港港口排放清單之外部成本

(排放清單)/ (百萬美元)	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	PM ₁₀	PM _{2.5}	NO _x	SO _x	Total (十億美元)
2005 年 外部成本	65.00	0.036	0.70	324.04	290.30	446.73	410.21	1.53
2030 年-BAU 情境下之外 部成本	62.21	0.038	0.66	293.72	263.52	411.71	368.50	1.40
2050 年-BAU 情境下之外 部成本	60.07	0.037	0.63	281.28	252.42	395.26	352.41	1.34
2030 年-實施 第一階段後 之外部成本	35.02	0.026	0.53	75.03	67.77	109.15	132.56	0.42
2050 年-實施 第二階段後 之外部成本	24.21	0.012	0.33	67.93	60.83	88.95	126.75	0.37

圖 4.29 為高雄港實施兩階段減量策略後與 2005 年相比外部成本之減量效果。實施第一次港口排放清單減量策略後，高雄港排放清單中各氣體所減少的外部成本則約為 25%-77%，當中以 CO₂、PM₁₀、PM_{2.5}、NO_x 和 SO_x 的減量效果最好，都可以達到 45% 以上。實施第二次港口排放清單減量策略後，高雄港排放清單中各氣體大約可降低 53%-80% 的外部成本，當中以 CO₂、CH₄、PM₁₀、PM_{2.5}、NO_x 和 SO_x 的減量效果最好，都可以達到 55% 以上。值得一提的是，第二階段 CH₄ 和 N₂O 的減量效果之所以大幅提升，是因為第二階段的減量策略有特別針對這兩種氣體進行減量，方法則是以燃料替換的方式減少船舶、裝卸機具與拖車頭對這兩種氣體的排放，以達成第二階段減量策略中每項氣體皆減少 50% 的目標。

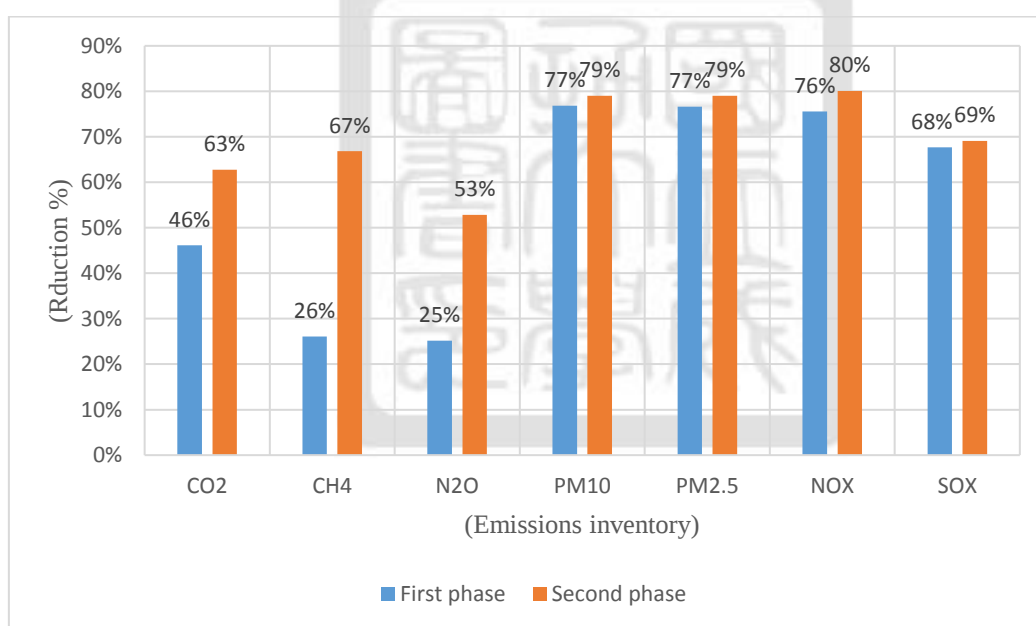


圖 4.29 實施兩階段減量策略對高雄港外部成本之減量效果

表 4.4 是各項減量策略對各種氣體之減量成效，可以發現船舶減速對於各項氣體都具有一定程度的減量成效；船舶燃料替換的部分則對於溫室氣體有良好的減量效果；岸電的部分則是對於二氧化碳、懸浮微粒和有害氣體等具有相當良好的減量效果；最後，裝卸機具電氣化的部分，則對於 CH₄ 有相當好的減量效果。

表 4.4 各項減量策略對各種氣體之減量成效

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	PM ₁₀	PM _{2.5}	NO _x	SO _x
Vessel speed reduction	21%	14%	31%	21%	21%	19%	24%
Vessel fuel transfer	21%	21%	50%	1%	1%	1%	2%
OPS	44%	0%	0%	75%	75%	72%	73%
Crane electrification	12%	56%	16%	3%	3%	8%	0%
Truck fuel transfer	2%	9%	3%	0%	0%	0%	0%
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

4.5 小結

為了讓高雄港港口排放清單的排放量達成第一階段的目標，本研究針對高雄港內的進出船舶、裝卸機具與拖車頭分別實施排放清單減量策略，評估減量策略實施前後之差異。研究結果發現，實施第一階段港口排放清單減量策略後，高雄港 2030 年港口排放清單的排放量不但可以達到《國家自訂預期貢獻，INDC》的標準，並且比高雄港 2005 年之排放量降低 25-77%。

完成第一階段港口排放清單減量策略後，本研究繼續針對高雄港內的進出船舶、裝卸機具與拖車頭分別實施第二階段港口排放清單減量策略，評估策略實施後之差異。研究結果發現，實施第二階段港口排放清單減量策略之後，高雄港 2050 年港口排放清單中所有的氣體排放量都可以達到《溫室氣體減量及管理法》的標準。且高雄港 2050 年港口排放清單之排放量在實施第二階段港口排放清單減量策略後，仍比高雄港 2005 年之排放量降低 53-80%。尤其是 CO₂、CH₄ 和 N₂O 這三種氣體的減量幅度，比起第一階段有更明顯的提升。

為了量化空氣汙染對於高雄港周遭居民與環境的負面衝擊，本研究利用外部成本係數，評估高雄港港口排放清單所造成的經濟損失，並比較港口排放清單減量策略對於減少外部成本之效果。研究結果發現，與 2005 年之外部成本相比，實施第一階段港口排放清單減量策略後，約莫可以減少 11.1 億美元的外部成本；實施第二階段港口排放清單減量策略後，則約莫可以減少 11.6 億美元的外部成本。而兩階段減量策略實施後的外部成本之所以差異不大，原因是第

二階段減量策略的實施，主要是幫助 CO₂、CH₄、N₂O 等三種氣體，達成減量 50%的目標，而受限於這三項氣體外部成本係數小且 CH₄、N₂O 排放量較少等因素，故第二階段減量策略實施後的外部成本雖有增加，但增加的幅度有限。

最後，本研究也針對不同減量策略對不同氣體的減量效果進行評估，讓相關單位屆時要降低某種氣體時，有參考的依據。



第五章 結論與建議

本章節分成四個部分。第一部分為本研究之結論；第二部分則是本研究對於高雄港排放清單減量策略之建議；第三部分為研究限制。最後，則是未來研究方向。

5.1 結論

港口所產生的空氣污染會對港區居民與環境產生極大的負面衝擊，因此，如何有效降低港口的空氣污染程度是各個港口相當重視的課題。有鑑於過去減少港區空氣污染的文獻，大多只考慮出入船舶的排放，較少著重港區岸上設備所產生的空氣污染對於港區的影響，所以，本研究以台灣最大的國際港口——高雄港內之出入船舶、岸上裝卸機具與港區內拖車頭為研究對象，評估高雄港整體所產生之空氣污染量。本研究亦參考美國環境署(EPA)建立排放清單的型式，建立港口排放清單，用以檢視港口空氣污染排放量與評估負面衝擊所造成之外部成本。目前，台灣並沒有相關法規可以限制港口的空氣污染排放量，是故本研究以《國家自訂預期貢獻》(INDC)與《溫室氣體減量與管理法》的標準為依據，為高雄港港口排放清單提出兩階段的減量策略。

5.1.1 第一階段高雄港排放清單減量策略

以《國家自訂預期貢獻》(INDC)為目標，規範高雄港 2030 年排放清單排放量與 2005 年之排放量相比，需減少 20%以上。為達此目標，減量策略即是針對高雄港所有出入船舶實施船舶減速與使用岸電的策略；對港區內 50%的裝卸機具進行燃料替換，由原本的柴油替換成電力；將港區內 50%的柴油拖車頭替換成使用液態天然氣(LNG)的拖車頭。研究結果顯示，完成第一階段減量策略之後，高雄港港口排放清單(CO₂、CH₄、N₂O、PM₁₀、PM_{2.5}、NO_x 和 SO_x)分別可以降低 46%、26%、25%、77%、77%、76%和 68%的排放量，亦即排放清單內所有氣體皆可以達成高雄港減量策略第一階段的目標。此外，實施第一階段減量策略後，高雄港港口排放清單所產生之外部成本與 2005 年相比，大

約可以減少 11.1 億美元，降幅達到 73%。

5.1.2 第二階段高雄港排放清單減量策略

以《溫室氣體減量與管理法》為目標，規範高雄港 2050 年排放清單排放量與 2005 年之排放量相比，需減少 50% 以上。此階段以第一階段減量策略為基礎，繼續針對高雄港所有出入船舶，實施船舶減速與使用岸電的策略之外，並假設所有船舶之燃料在 2050 年之前會由重油替換成液態天然氣(LNG)；港區內裝卸機具的燃料一樣由柴油替換成電力，但涵蓋對象擴大為所有裝卸機具(100%)；港區內的柴油拖車頭替換成使用液態天然氣(LNG)的拖車頭，但涵蓋對象擴大為所有拖車頭(100%)。研究結果顯示，完成第二階段減量策略之後，高雄港港口排放清單(CO₂、CH₄、N₂O、PM₁₀、PM_{2.5}、NO_x 和 SO_x)分別可以降低 57%、59%、53%、79%、79%、80%和 69%的排放量，亦即排放清單內所有氣體皆可以達成高雄港減量策略第二階段的目標。此外，實施第二階段減量策略後，高雄港港口排放清單所產生之外部成本與 2005 年相比，大約可以減少 11.6 億美元，降幅達到 76%。

本研究根據高雄港港口排放清單擬定兩階段之減量策略，不但可以有效降低高雄港所產生的空氣汙染，有效降低對港區周遭居民與環境的衝擊；也可以降低這些空氣汙染所造成的經濟損失，對於高雄港朝綠色港區發展相當有幫助。

5.1.3 各項減量策略對各種氣體之減量成效

本研究兩階段減量策略總共包含船舶減速、提供岸電給停泊船隻、船舶燃料替換、裝卸機具電氣化與拖車頭燃料替換共五種減量策略。根據本研究之減量成效，以 CO₂、PM₁₀、PM_{2.5}、NO_x、SO_x 而言，岸電成效最高；以 CH₄ 而言，機具電氣化減量最高；以 N₂O 而言，燃油轉換成效最高。

5.2 建議

高雄港作為台灣最大的國際港口，若能減少港區所產生之空氣汙染，必能提升港區周遭環境與居民之生活品質；同時，也能推動高雄港朝向綠色港口邁進，成為亞洲諸多港口中，港市並存的模範。

參照研究之研究結果，實施高雄港港口排放清單減量策略對高雄港的空氣汙染減量具有顯著成效，本研究歸納以下建議：

1. 岸電問題：船舶是高雄港最大的空氣汙染源，當中，若以「活動型態」區分，則船舶停靠在碼頭時，所產生的空氣汙染量最多。而使用乾淨能源所提供的岸電，對於降低船舶停靠時所排放的空氣汙染有顯著的效益，因此，高雄港應該多提供乾淨能源所產生之岸電，以降低高雄港之空氣汙染程度。
2. 裝卸機具電氣化：裝卸機具是高雄港空氣汙染第二大排放來源，因此本研究認為高雄港應該逐步汰換港區內使用柴油之裝卸機具，由電力驅動之裝卸機具取代。目前，高雄港內之高明貨櫃碼頭所擁有之裝卸機具，全部具備電力系統，因此其他碼頭或貨櫃中心若要引進使用電力的裝卸機具，可參考高明貨櫃碼頭之經驗。
3. 在不考慮成本的情況下，若以減少港口溫室氣體的排放為目標，本研究建議相關單位優先實施船舶燃料替換的策略，則 CO₂、CH₄ 和 N₂O 可分別降低 21%、21%和 50%。當中，一單位的 N₂O 對於全球暖化的威脅是 CO₂ 的 298 倍，威脅最大，所以採用此策略最能降低港口溫室氣體對於全球暖化的衝擊。
4. 如果是以降低懸浮微粒和有害氣體為目標的話，本研究建議相關單位可以優先實施岸電(OPS)，則 PM₁₀、PM_{2.5}、NO_x 和 SO_x 可分別降低 75%、75%、72%和 73%，效果十分良好，有助於提升港區周遭居民的健康與環境的品質。

5. 建立具強制力之空氣污染減量計畫與法規：本研究高雄港空氣污染減量計畫包含：船舶減速、使用岸電與燃料替換等措施，理論上可以有效降低高雄港所產生的空氣污染，但實務上還必須有相關法規相輔，以增加減量計畫的強制力與必要性。因此，本研究建議高雄港當局制定相關法規與減量辦法，讓減少港區所產生的空氣污染不再是口號，而是實際之行動。
6. 善用資源，減少浪費：實施本研究高雄港排放清單減量計畫，可有效減少空氣污染所造成之外部成本，因此，高雄港當局應當運用此一資源，建立相關獎勵措施和替換不適合的設備，營造減少空氣污染排放之有利環境。

5.3 研究限制

本研究歸納之研究限制如下：

1. 本研究假設無任何突發事件發生，以灰預測模型預估高雄港 2030 年與 2050 年之出入船舶數量，但實際出入船舶數量會受多重因素影響，難以準確預測。
2. 本研究缺乏高雄港裝卸機具與拖車頭的統計資料，因此只能根據灰預測結果，判斷在高雄港出入船舶遞減的情況下，高雄港內的裝卸機具與拖車頭數量不會再有明顯的增加。
3. 影響船舶減速成效的因素很多，本研究僅考慮船舶行駛距離與船速對油耗的影響，未考慮風浪、天氣等因素，因此實際耗油量可能更多。
4. 本研究假設岸電來自乾淨能源，但實際上岸電之來源可能來自火力發電廠，因此現階段岸電設備的使用可能無法達成減少空氣污染的目的。
5. 本研究相關燃料替換的策略，其減量百分比來自 IPCC 第四次評估(2018)報告所附之排放係數表，未考慮船舶、裝卸機具和拖車頭之實際狀況，

因此實際減量成效難以確切評估。

6. 目前，全球沒有公訂各項氣體之外部成本，因此在本研究港口排放清單中，各氣體之外部成本係數，是由相關文獻中台灣與大陸等鄰近港口之外部成本係數組合而成。

5.4 未來研究方向

本研究建議未來研究方向如下：

1. 出入船舶、裝卸機具與拖車頭為本研究之主要研究對象，未來如果要更詳實的評估高雄港所產生的空氣汙染量，應將港區人員、進出港區之貨車、港區內建築物和作業船隻等作為研究對象，方能更進一步的評估高雄港所產生的空氣汙染。
2. 本研究只針對港區內之拖車頭所產生的空氣汙染進行減量，未來之研究也可以將相關減量策略，應用在一般貨車上，進而降低貨車對市區所產生之空氣汙染。
3. 本研究僅探討高雄港港口排放清單之減量策略所能帶來的減量效益，未來之研究可以針對這些減量策略進行成本效益分析，探討哪些減量策略的實施能帶來低成本、高效益，作為將來實務上可優先實施之減量策略。
4. 本研究並沒有探討獎勵措施對於高雄港空氣汙染減量的影響，因此，未來之研究可以以高雄港獎勵成本最小化與空氣汙染減量最大化為目標，評估獎勵制度建立的重要性。

參考文獻

- Berechman, J., & Tseng, P. H. (2012). Estimating the environmental costs of port related emissions: The case of Kaohsiung. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 17(1), 35-38.
- Bouman, E. A., Lindstad, E., Rialland, A. I., & Stromman, A. H. (2017). State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 52, 408-421.
- Cariou, P. (2011). Is slow steaming a sustainable means of reducing CO2 emissions from container shipping? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 16(3), 260-264.
- Chang, C. C., & Wang, C. M. (2012). Evaluating the effects of green port policy: Case study of Kaohsiung harbor in Taiwan. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 17(3), 185-189.
- Chang, C. C., & Jhang, C. W. (2016). Reducing speed and fuel transfer of the Green Flag Incentive Program in Kaohsiung Port Taiwan. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 46, 1-10.
- Chang, Y. T., Song, Y., & Roh, Y. (2013). Assessing greenhouse gas emissions from port vessel operations at the Port of Incheon. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 25, 1-4.
- Chen, D., Wang, X., Nelson, P., Li, Y., Zhao, Y., Lang, J., Zhou, Y., & Guo, X. (2017). Ship emission inventory and its impact on the PM2.5 air pollution in Qingdao Port, North China. *Atmospheric Environment*, 166(Supplement C), 351-361.
- Corbett, J. J., Winebrake, J. J., Green, H. E., Kasibhatla, P., Eyring, V., & Lauer, A. (2007). Mortality from Ship Emissions: A Global Assessment. *Environmental Science & Technology*, 41(24), 8512-8518.

- Ding, S., Dang, Y. G., Li, X. M., Wang, J. J., & Zhao, K. (2017). Forecasting Chinese CO₂ emissions from fuel combustion using a novel grey multivariable model. *Journal of Cleaner Production*, 162, 1527-1538.
- Eide, M. S., Endresen, Ø., Skjong, R., Longva, T., & Alvik, S. (2009). Cost-effectiveness assessment of CO₂ reducing measures in shipping. *Maritime Policy & Management*, 36(4), 367-384.
- Endresen, Ø., Sorgard, E., Behrens, L. H., Brett, P. O., & Isaksen, I. S. A. (2007). A historical reconstruction of ships' fuel consumption and emissions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D12), 527-538.
- Environmental Protection Administration Executive Yuan. (2015). INDC in Taiwan. Retrieved Jan 5, 2018, from <https://www.bsigroup.com/LocalFiles/zh-tw/Event/2015/Sustainability-annual/02-epa.pdf>.
- FleetMon. (2018). Global Ship Tracking. Retrieved Mar 5, 2018, from <https://www.fleetmon.com/>.
- Han, S., Youn, J. S., Kim, W. J., Seo, Y. H., & Jung, Y. W. (2011). Estimation of Air Pollutant Emissions from Port-Related Sources in the Port of Incheon.
- IMO. (2014). Third IMO Greenhouse Gas Study 2014. Retrieved Feb 3, 2018, from <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Third%20Greenhouse%20Gas%20Study/GHG3%20Executive%20Summary%20and%20Report.pdf>.
- IEA. (2017). CO₂ Emissions From Fuel Combustion - Highlight. Retrieved Dec 28, 2017, from <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CO2EmissionsfromFuelCombustionHighlights2017.pdf>.
- IPCC. (2014). Climate Change 2014: Fifth Assessment Report. Retrieved Jan 20, 2018, from <http://www.ipcc.ch/report/ar5/>.
- IPCC. (2018). Emission Factors for Greenhouse Gas Inventory. Retrieved Jan 22,

- 2018, from https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-03/documents/emission-factors_mar_2018_0.pdf.
- López-Aparicio, S., Tonnesen, D., Thanh, T. N., & Neilson, H. (2017). Shipping emissions in a Nordic port: Assessment of mitigation strategies. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 53, 205-216.
- Maragkogianni, A., & Papaefthimiou, S. (2015). Evaluating the social cost of cruise ships air emissions in major ports of Greece. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 36, 10-17.
- McArthur, D. P., & Osland, L. (2013). Ships in a city harbour: An economic valuation of atmospheric emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 21, 47-52.
- Marine Insight. (2017). Port of Long Beach Green Flag Program Improves Air for 11 Years. Retrieved Dec 23, 2017, from <https://www.marineinsight.com/shipping-news/port-of-long-beach-green-flag-program-improves-air-for-11-years/>.
- MarineTraffic. (2018a). BOW FULING. Retrieved Jan 17, 2018, from <https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:5627050/mmsi:566508000/vessel:BOW%20FULING>.
- MarineTraffic. (2018b). EVER BALMY. Retrieved Jan 19, 2018, from <https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:5218155/mmsi:416031000/imo:9786944/vessel:EVER%20BALMY>.
- MarineTraffic. (2018c). ROADRUNNER BULKER. Retrieved Jan 19, 2018, from https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:713536/mmsi:538004340/imo:9441415/vessel:ROADRUNNER_BULKER.
- MarineTraffic. (2018d). TAI HWA. Retrieved Jan 19, 2018, from <https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:652924/mmsi:416100010/vessel:TAI%20HWA>.

- Norsworthy, M., & Craft, E. (2013). Emissions reduction analysis of voluntary clean truck programs at US ports. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 22, 23-27.
- NOAA. (2016). Annual Greenhouse Gas Index. Retrieved May 8, 2018, from <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/>.
- Psaraftis, H. N., & Kontovas, C. A. (2010). Balancing the economic and environmental performance of maritime transportation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 15(8), 458-462.
- PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. (2017). Trends In Global CO2 and Total Greenhouse Gas Emissions. Retrieved May 13, 2018, from http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/pbl-2017-trends-in-global-co2-and-total-greenhouse-gas-emissions-2017-report_2674.pdf.
- Port of Seattle. (2017). Northwest Ports Clean Air Strategy. Retrieved Mar 8, 2018, from https://www.nwseaportalliance.com/sites/default/files/final_2015_implementation_report_version_3-14-2017.pdf.
- Port of Long Beach & Port of Los Angeles. (2017). Clean Air Action Plan Update Released 2017. Retrieved Mar 16, 2018, from <http://www.cleanairactionplan.org/news/2017-clean-air-action-plan-update-released/>.
- Port of Kaohsiung Taiwan International Port Corporation. (2018). Annual Statistical Report of Kaohsiung Port – 2017. Retrieved May 9, 2018, from <https://kh.twport.com.tw/Upload/B/RelFile/CustomPage/201/c7975f06-bffc-4142-9d34-9c3933643db0.pdf>.
- Port of Long Beach. (2017). Press Releases. Retrieved Feb 22, 2018, from <http://www.polb.com/news/archive/2017.asp>.
- Schrooten, L., Vlieger, I. D., Panis, L. I., Chiffi, C., & Pastori, E. (2009). Emissions of maritime transport: A European reference system. *Science of The Total*

Environment, 408(2), 318-323.

- Sciberras, E. A., Zahawi, B., Atkinson, D. J., Juando, A., & Sarasquete, A. (2016). Cold ironing and onshore generation for airborne emission reductions in ports. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: *Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 230(1), 67-82.
- Sen, B., Ercan, T., & Tatari, O. (2017). Does a battery-electric truck make a difference? – Life cycle emissions, costs, and externality analysis of alternative fuel-powered Class 8 heavy-duty trucks in the United States. *Journal of Cleaner Production*, 141, 110-121.
- Song, S. (2014). Ship emissions inventory, social cost and eco-efficiency in Shanghai Yangshan port. *Atmospheric Environment*, 82(Supplement C), 288-297.
- Styhre, L., Winnes, H., Black, J., Lee, J., & Griffin, H. L. (2017). Greenhouse gas emissions from ships in ports – Case studies in four continents. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 54(Supplement C), 212-224.
- Tian, L., Ho, K., Louie, P. K. K., Qiu, H., Pun, V. C., Kan, H., Yu, I. T. S. & Wang, T. W. (2013). Shipping emissions associated with increased cardiovascular hospitalizations. *Atmospheric Environment*, 74, 320-325.
- Tichavska, M., & Tovar, B. (2015). Environmental cost and eco-efficiency from vessel emissions in Las Palmas Port. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 83(Supplement C), 126-140.
- Tzannatos, E. (2010a). Cost assessment of ship emission reduction methods at berth: the case of the Port of Piraeus, Greece. *Maritime Policy & Management*, 37(4), 427-445.
- Tzannatos, E. (2010b). Ship emissions and their externalities for the port of Piraeus – Greece. *Atmospheric Environment*, 44(3), 400-407.
- Ushakov, S., Halverson, N. G. M., Valland, H., Williksen, D. H., & Esøy, V. (2013). Emission characteristics of GTL fuel as an alternative to conventional marine

gas oil. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 18, 31-38.

UNCTAD. (2017). Review of Maritime Transport 2017. Retrieved Jan 21, 2018, from http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2017_en.pdf?user=46.

USEPA. (2010). Annual Report. Retrieved Dec 27, 2017, from <https://www.epa.gov/sites/production/files/2013-12/documents/annual-report-2010.pdf>. VOWTAP. (2017). Virginia Offshore Wind Technology Advancement Power. Retrieved Feb 9, 2018, from <https://www.osti.gov/servlets/purl/1341588>.

Wang, Z. X., & Hao, P. (2016). An improved grey multivariable model for predicting industrial energy consumption in China. *Applied Mathematical Modelling*, 40(11), 5745-5758.

Winnes, H., Styhre, L., & Fridell, E. (2015). Reducing GHG emissions from ships in port areas. *Research in Transportation Business & Management*, 17(Supplement C), 73-82.

Xiao, X., Yang, J., Mao, S., & Wen, J. (2017). An improved seasonal rolling grey forecasting model using a cycle truncation accumulated generating operation for traffic flow. *Applied Mathematical Modelling*, 51, 386-404.

Xu, N., Dang, Y., & Gong, Y. (2017). Novel grey prediction model with nonlinear optimized time response method for forecasting of electricity consumption in China. *Energy*, 118, 473-480.