

# 基於技術創新的船舶原油污染防治策略探討

## The Exploration of Oil Pollution Prevention Strategies for Ships Based on Technological Innovation

陳嘉陵\*、黃國銘\*\*

### 摘要

全球海運業的快速發展伴隨著船舶原油污染事故的增加，對海洋環境和沿海經濟構成了重大威脅。本研究探討了技術創新在船舶原油污染防治中的重要性，特別是雙殼船體設計和惰性氣體系統在事故中減少洩漏風險的應用。臺灣雖非 IMO 會員國，但交通部已要求航運公司遵守國際規範，以提升國際競爭力。隨著清潔能源技術的發展，雙燃料船(LNG 和甲醇)已取得成功，而氫和氨燃料則代表未來的發展方向。為促進技術推廣，國際合作、基礎設施建設和船員培訓是關鍵。此外，政府應積極參與技術研發，確保臺灣船員具備國際競爭力，實現全面且有效的污染防治策略。

關鍵字：技術創新、雙殼船體、清潔能源、國際規範、船舶原油污染

### Abstract

*The rapid development of global shipping has been accompanied by an increase in marine oil pollution incidents, posing significant threats to the marine environment and coastal economies. This study examines the importance of technological innovation in marine oil pollution prevention, particularly applying double-hull design and inert gas systems to reduce leakage risks in accidents. Although Taiwan is not a member of the IMO, the Ministry of Transportation has required shipping companies to comply with international regulations to enhance global competitiveness. With the advancement of clean energy technologies, dual-*

---

\* 陳嘉陵 Chia-Ling Chen，中央警察大學水上警察學系助理教授，E-mail: chiac@mail.cpu.edu.tw。

\*\* 黃國銘 Kuo-Ming Huang，國立臺灣海洋大學輪機工程學系副教授，E-mail: kmhuang@mail.ntou.edu.tw

*fuel ships (LNG and methanol) have achieved successful operations, while ammonia and hydrogen fuels represent future development directions. To promote the adoption of these technologies, international cooperation, infrastructure development, and crew training are essential. The government should actively participate in technological research and development, ensuring that Taiwanese seafarers are internationally competitive and achieve comprehensive and effective pollution prevention strategies.*

*Keywords: Technological innovation, double-hull design, clean energy, international regulations, marine oil pollution*

## 壹、前言

全球能源需求的持續增長使得原油貿易成為現代經濟的基石之一，而油輪則是這種貿易的主要運輸工具。自 20 世紀初以來，原油和石油產品的海上運輸量大幅增加，這為世界各國帶來了經濟繁榮的機遇。然而，伴隨著這一發展的還有潛在的巨大環境風險，尤其是船舶原油污染事故對海洋生態系統的威脅。在海上運輸過程中，任何操作失誤、設備故障或船舶碰撞都可能導致大量原油洩漏，進而對海洋和沿海社區造成不可估量的損害。隨著幾次重大油污事件的發生，全球對於如何有效防止船舶原油污染的討論日益加劇，技術創新因此成為了解決這一問題的關鍵手段。

歷史上，多次船舶原油污染事故催生了技術和政策的飛速發展。例如，1967 年的“Torrey Canyon”事件是一艘超大型油輪在英國康沃爾海岸附近擱淺，洩漏了超過 100,000 噸的原油。這一事故對海洋環境和當地漁業產生了毀滅性的影響，並引發了國際社會對海洋環境保護的關注。該事故後不久，國際海事組織(IMO)迅速採取行動，對《1954 年防止海洋污染公約》(OILPOL 54)進行修訂，以加強對船舶操作中的油污染控制措施(Farrington, 2013)。這一事件還促使英國政府開展了有關油污清除和緊急應對的研究，為後來的技術創新提供了基礎。

進入 20 世紀 80 年代，全球發生了另一個震驚世界的油污事件“Exxon Valdez”事故。1989 年，美國的“Exxon Valdez”油輪在阿拉斯加州王子威廉海灣觸礁，洩漏了超過 40,000 噸的原油，導致超過 1,300 英里的海岸線遭到污染。這一事件對當地的漁業、旅遊業和海洋生態系統造成了長期的損害(Carson et al., 2003)。該事故直接促成了美國《1990 年油污染法案》(OPA90)的制定，該法案要求提高油輪的技術標準和賠償責任，並為技術創新和事故應急處置提供了新的標準(Mattson, 2006)。OPA90 推動了雙殼船體

設計的強制實施，該設計增加了一層額外的保護，防止在碰撞或損壞時原油洩漏，這標誌著技術創新在油污防治領域的重大突破。

隨著技術的不斷進步，雙殼設計和其他技術措施(如惰性氣體系統)逐漸成為現代油輪的標配。雙殼設計在《MARPOL 73/78》附錄 I 中被正式列為標準，該設計要求在新建油輪中增加一層額外的保護殼，從而降低油污事故中原油洩漏的風險(Mattson, 2006)。這一技術的成功應用大幅減少了油輪事故中的油污洩漏量，並被證明在數次重大事故中發揮了重要作用。然而，儘管這些技術顯著提升了船舶運營的安全性，重大船舶原油污染事故仍然不時發生。2018 年，巴拿馬註冊的“桑吉”號油輪在東海與另一艘貨船相撞後發生爆炸，洩漏了數萬噸的凝析油(Chen et al., 2020)。這一事故表明，隨著油輪技術和運營的複雜性增加，新的風險不斷出現，要求更先進的技術應用和防控措施。

惰性氣體系統作為另一項重要的技術創新，在降低船舶火災和爆炸風險方面發揮了關鍵作用。惰性氣體系統利用惰性氣體(如二氧化碳)來替代油艙中的空氣，從而防止油氣與氧氣接觸，避免爆炸和火災事故的發生。根據(Thomas 和 Skjong, 2009)的研究，該技術的應用顯著提高了油輪的安全性，並已成為國際標準(如 SOLAS 74)中對油輪的強制之要求。

除了這些傳統技術外，隨著科技的進步，越來越多的新技術正在被應用於油污監測和應急處置領域。例如，衛星遙感和無人機技術在油污監測中的應用大幅提升了事故發生後的響應速度和準確性。(Ye et al., 2019)指出，這些技術的引入使得應急管理人員能夠更快、更精確地定位油污源頭，並有效監控油污的擴散範圍。此外，現代化的應急處置技術，如固定甲板泡沫系統和應急拖曳系統，已在多起油污事故中證明了其重要性(Xiang et al., 2017)。

然而，儘管技術創新在減少船舶原油污染風險方面取得了長足進展，其應用和推廣仍面臨諸多挑戰。首先，技術成本依然是阻礙技術普及的重要因素。雙殼設計、惰性氣體系統和其他技術的安裝和維護成本較高，這對於資金有限的船東來說是一個重大的負擔。特別是在全球航運市場競爭激烈的背景下，許多船東更傾向於選擇成本較低的技術解決方案，這增加了技術普及的難度(Tan, 2006)。其次，全球不同地區的技术標準不一致，這導致了技術應用效果的不平衡。儘管國際海事組織(IMO)已制定了全球適用的技術標準，但許多國家和地區的執行力度不一，這使得技術創新無法在全球範圍內發揮最大效能。

隨著國際社會對環境保護的關注不斷提升，如何進一步通過技術創新來提升船舶運營的環保性和安全性成為了未來研究的重要方向。未來，隨著清潔能源技術(如液化天然氣、甲醇、氨和氫燃料技術)的推廣，船舶運營的碳排放有望顯著降低，這不僅能

減少全球氣候變化的影響，還能降低船舶原油污染事故對環境的危害(Wan 和 Chen, 2018)。然而，這些技術的推廣同樣面臨著成本、基礎設施建設和技術培訓等方面的挑戰。

基於以上背景，本文將探討技術創新在船舶原油污染防治中的具體應用及其挑戰，並提出相應的政策建議。研究將通過對雙殼船體設計、惰性氣體系統、油污應急處置技術以及清潔能源技術的分析，評估其在減少油污事故中的效果，並探討未來技術創新和政策改進的可能性。

## 貳、文獻探討

根據國際海事組織 (IMO) 的最新規定，特別是 MARPOL 附則 VI 第 22 條，在 2018 年 3 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日期間，所有總噸位超過 5000 的船舶必須制定並執行一個船舶能效管理計劃 (SEEMP)，該計劃應包含詳細的燃油消耗數據收集計劃以及數據報告流程。這項規定強調了數據收集和管理的重要性，尤其是要向船舶主管機關提交燃油消耗的報告。這一要求促進了技術創新，旨在提高船舶燃油效率，降低溫室氣體排放，而新增的要求，從 2019 年 1 月 1 日起，船旗國或船級社應驗證船舶的燃油消耗報告，並簽發符合證明 (Certificate of Compliance)，這一證明將成為船舶合規運營的重要依據，強調了船舶必須遵守的技術標準和環保要求。

以及燃油硫含量限制 IMO 在其決議 MEPC.280(70) 中決定，自 2020 年 1 月 1 日起，全球所有船舶必須遵循 0.5%*m/m* 燃油硫含量的標準，這一標準大幅度降低了船舶燃油中的硫含量，旨在減少船舶排放的硫氧化物 (SO<sub>x</sub>)，從而減少對海洋和沿海環境的污染。對於全球適用性這一規定對所有船舶有效，無論其噸位大小，都必須滿足 0.5%*m/m* 燃油硫含量的要求，這將推動船舶採用更清潔的燃油技術，或轉向使用液化天然氣 (LNG) 和其他替代燃料，並促使船東加快技術創新和技術改造。

為了更好地強調技術創新在船舶原油污染防治中的作用，雖然雙殼船體設計與惰性氣體系統不屬於最新技術，但這些技術作為歷史上重要的安全措施，仍然在現代防止原油污染中發揮關鍵作用，本文將探討如何將這些傳統技術與現代技術相結合，並進一步推動政策創新和技術進步。

面對技術創新在船舶原油污染防治中的應用中，隨著國際規範的日趨嚴格，技術創新在船舶燃料消耗和排放標準的更新過程中起到了至關重要的作用。這種創新不僅涵蓋混合動力技術、清潔能源應用及先進的能效管理系統，還包括許多針對原油污染

防治的技術，儘管雙殼船體設計和惰性氣體系統已經在現代船舶設計中成為標準，它們仍然是防止原油洩漏和事故的基礎技術。

## 一、雙殼船體設計的發展與挑戰

雙殼船體設計是應對船舶原油污染事故的一項重要技術創新，特別是在現代油輪運輸的安全保障中發揮了至關重要的作用。傳統的單殼船舶設計在船體碰撞、擱淺或其他事故中容易導致原油洩漏，從而對海洋環境和沿海地區造成嚴重的污染。而雙殼設計則通過在內殼與外殼之間增加一層額外的防護層，有效地降低了洩漏風險。根據(Mattson, 2006)的研究，雙殼設計顯著提升了船體結構的抗撞擊能力，在多起重大船舶事故中得到了驗證，成為防止船舶洩漏的重要技術之一。

### 1. 技術發展的歷史與應用

隨著全球對環境保護和航運安全的重視，雙殼船體設計逐漸成為國際標準，國際海事組織(IMO)在《MARPOL 73/78》附錄 I 中強制規定，新建油輪必須採用雙殼設計，以減少原油洩漏的風險。此標準的實施旨在降低油輪在發生碰撞或擱淺事故時對環境的破壞，並強化船舶的整體結構安全。根據該標準，雙殼設計已成為現代油輪建造的必要條件，特別是對超大型油輪(VLCC)和超大型散貨船(VLOC)等大型船舶而言，雙殼設計的作用尤為顯著。

### 2. 雙殼設計的成本挑戰

儘管雙殼設計在提高船舶安全性方面成效顯著，但其應用過程中仍面臨不少挑戰，首先是建造和維護成本問題，由於雙殼設計增加了額外的防護層，這意味著需要更多的材料和更複雜的施工技術，導致船舶的建造成本顯著上升，這對於資金有限的中小型船東來說，可能是一筆沉重的負擔(Roeder, 2009)。此外，雙殼結構的維護也更加複雜，特別是在大型船舶中，雙殼內部的檢查和維修需要更高的專業技術和設備，這進一步增加了運營成本。

### 3. 大型船舶中的雙殼設計挑戰

在超大型油輪和散貨船等大型船舶中，雙殼設計的挑戰更為突出，由於這類船舶的尺寸龐大，雙殼結構的建造需要更多的鋼材和支撐結構，這不僅增加了船體重量，還對船舶的穩定性、載重量和平衡設計提出了更高要求。這些複雜因素的結合，使得雙殼設計在大型船舶中的應用難度加大，尤其是在全球航運需求持續增長的背景下，大型船東需在安全與經濟效益之間找到平衡(Skjong, 2009)。

#### 4. 維護與應急管理挑戰

除了建造成本，雙殼設計的維護和管理也是一個挑戰，大型船舶經常在惡劣的海洋環境中運營，強風、高浪和海冰等極端海洋條件可能導致雙殼結構的損壞或變形。這樣的情況下，船東需要進行頻繁且昂貴的維護檢查，以確保船體結構的完整性。然而，這些維護工作不僅需要專業技術人員，還涉及到操作空間有限、維護難度高等問題，進一步增加了船舶運營的挑戰(Roeder, 2009)。

#### 5. 極端事故下的雙殼設計局限

儘管雙殼設計在減少輕微碰撞事故中的洩漏風險方面表現優異，但在一些極端事故中仍然存在局限。例如，2010年發生的 **Deepwater Horizon** 事故表明，即使採用了多層防護設計，當外力過於極端或伴隨設備故障時，雙殼設計仍無法完全避免原油洩漏 (Francis et al., 2019)。這說明了技術創新雖然在一定程度上能減少洩漏風險，但並不能完全杜絕事故。因此，在未來的技術發展中，仍需結合其他技術，如主動應急系統和油污處理技術，來提高雙殼船舶的整體安全性。

#### 6. 雙殼船體設計與其現代應用

雙殼船體設計自上世紀開始成為防止原油洩漏的關鍵技術，特別是在船舶發生碰撞或擱淺時，雙重結構提供了額外的防護層。雖然這項技術並不屬於最新創新，但隨著現代材料科學與結構設計的進步，雙殼設計的防護能力進一步增強。現代雙殼船體設計融入了更加靈活且耐衝擊的材料選擇，以提升船舶在極端環境中的安全性。此外，智慧智能技術的引入，使船東能夠即時監控船體狀況，提前發現潛在問題，從而有效防止原油洩漏。

雙殼船體設計作為船舶原油污染防治的重要技術創新，顯著提升了船舶運行的安全性和環境保護能力。隨著國際海事組織(IMO)強化船舶排放和污染控制標準，雙殼設計正朝著更高效、更環保及更安全的方向發展。最新的雙殼設計引入了輕量化材料、流線型設計、多層結構、自動化監測及應急響應系統等技術創新。輕量化材料如高強度低合金鋼和複合材料，不僅減少了建造和運營成本，還提升了燃油效率和耐久性。流線型設計則透過改善水動力性能，降低油耗和碳排放。這些創新技術的應用，符合全球環保法規的嚴格要求，同時提高了船舶運營的環境友好性和經濟效益。雖然雙殼設計已普遍應用，但技術仍在演進，與清潔能源技術、自動化監控技術的結合正成為未來趨勢。

## 二、惰性氣體系統的應用與效果

依據《國際海上人命安全公約》(SOLAS)和《國際防止船舶污染公約》(MARPOL)的規定，所有 8000 噸以上的新建油輪必須安裝惰性氣體系統，以確保在運輸易燃液體時的安全性。這一規定不僅大幅提高了全球航運的安全標準，還顯著降低了因火災或爆炸導致的原油洩漏風險。

### 1. 惰性氣體系統的技術背景與發展

惰性氣體系統的技術背景最早可以追溯到 20 世紀 70 年代，該技術最初是為了防止油輪火災和爆炸而引入的。隨著技術的不斷發展，惰性氣體系統已成為油輪安全標準的重要組成部分，並針對大型油輪的運營提出了強制性要求。2014 年，國際海事組織(IMO)在第 94 次海上安全委員會(MSC)會議上決定，自 2016 年 1 月 1 日起，所有 8000 噸以上的新建油輪必須安裝惰性氣體系統，以進一步提高船舶的安全運營。

### 2. 惰性氣體系統的作用與原理

惰性氣體系統的主要功能是通過向油艙內注入惰性氣體，使艙內的氧氣濃度降低到 8%以下，從而防止油氣與空氣中的氧氣接觸，減少爆炸風險。通常，惰性氣體系統使用船舶鍋爐排氣、或由惰氣產生器來生成二氧化碳，經過冷卻和清除雜質後，將其注入油艙內，達到安全防護的效果。這一系統的廣泛應用，顯著提升了全球航運業的安全標準，並確保了油輪運輸過程中的環境保護。

惰性氣體系統是油輪防火防爆的關鍵技術之一，根據(Thomas 和 Skjong, 2009)的研究，油輪的油艙內儲存大量易燃易爆的油氣，這些油氣與空氣中的氧氣接觸後，極易在碰到火花時發生爆炸。惰性氣體系統的應用已顯著減少了油輪火災和爆炸事故的發生率。然而，該系統的安裝和維護成本較高，特別是對於中小型油輪而言，這可能導致運營成本的增加。此外，該系統的有效性依賴於定期維護和操作人員的技術水平，任何設備故障或人為操作失誤都可能導致系統失效(Xiang et al., 2017)。

### 3. 國際海事組織規範下的惰性氣體系統(IGS)要求

根據國際海事組織(IMO)的要求，所有 8000 噸以上的油輪必須配備惰性氣體系統(IGS)。此規定的目的是進一步加強油輪運營的安全性，防止油輪在裝載、運輸和卸載過程中，由於油氣與氧氣接觸而引發火災或爆炸事故。惰性氣體系統利用惰性氣體(如二氧化碳或氮氣)替代油艙中的空氣，從而降低油艙內的氧氣含量，使其處於低於爆炸臨界點的水平，進而有效預防火災事故的發生。

惰性氣體系統自 2016 年開始強制應用，代表了油輪技術發展中重要的安全提升措施之一。根據 IMO《國際防止船舶污染公約》(MARPOL)和《國際海上人命安全公約》(SOLAS)的相關要求，這項技術已成為國際航運業的重要組成部分。

#### 4. 液貨艙透氣系統在油輪安全中的重要性

根據《國際海上人命安全公約》(SOLAS)、《國際油輪和碼頭安全操作指南》(ISGOTT)以及《油輪檢查問卷》(VIQ)的要求，油輪液貨艙的透氣系統及其輔助透氣系統是保障油輪液貨艙結構安全與防火安全的關鍵設備。對於液貨艙透氣系統負責調節艙內壓力，防止貨物蒸氣過度積聚，從而保證艙體結構不會因壓力過大而損壞。此外，透氣系統還在防火防爆方面發揮著重要作用，有效減少因貨物蒸氣與外部火源接觸而引發爆炸的風險。

#### 5. 液貨艙透氣系統的作用與設計要求

液貨艙透氣系統的設計旨在確保液貨艙內外壓力平衡，尤其在裝卸液體貨物時防止艙內壓力升高或降低過度。根據 SOLAS 公約第 II-2 章以及《國際油輪和碼頭安全操作指南》(ISGOTT)的規定，透氣系統必須能夠安全地排放貨物蒸氣，同時避免貨艙內部壓力超過設計安全極限。透氣系統還應配備阻火器和安全閥，以防止貨物蒸氣與火源接觸，進一步減少火災風險。

#### 6. 輔助透氣系統的重要性

除了主透氣系統外，輔助透氣系統同樣關鍵，特別是在主系統故障或維護期間。輔助系統的設計通常考慮到船舶運營的各種特殊情況，確保液貨艙內壓力的安全釋放。這些輔助系統還可以在船舶裝卸貨物的過程中，根據不同操作需求自動調節艙內壓力，進而保障液貨艙結構的完整性與運營的持續安全。

#### 7. 相關國際標準與規範

- (1). SOLAS 公約：針對液貨艙的透氣系統，SOLAS 規定所有油輪必須設置透氣裝置，確保艙內壓力始終保持在安全範圍內。透氣系統必須安裝阻火器和壓力真空閥 (PV 閥)，以防止艙內氣體遇火燃燒並確保艙體安全。
- (2). ISGOTT：國際油輪和碼頭安全操作指南強調了透氣系統在液貨裝卸和運輸過程中的安全性和合規性。ISGOTT 指出，透氣系統必須設計為能夠在操作過程中應對液貨蒸氣壓力波動，避免對艙體結構造成破壞。

- (3). VIQ(油輪檢查問卷)：VIQ 7 強調了油輪透氣系統的維護與操作必須嚴格符合國際標準，特別是在貨物裝卸期間，必須確保所有透氣系統運行正常，防止艙內過壓或負壓情況的發生。

儘管透氣系統在保證油輪安全方面發揮了關鍵作用，但其維護和運營面臨一定挑戰，系統中的阻火器、壓力真空閥等關鍵設備在長期使用中易於受到污染和損壞，從而降低其效能。因此，定期維護和檢查這些設備對於防止液貨艙事故至關重要。總結來看，液貨艙的透氣系統及其輔助透氣系統是油輪安全運營的重要組成部分，這些系統不僅保證液貨艙內外壓力平衡，還能有效防火防爆。

### 三、油污應急處置技術的挑戰

船舶原油污染事故的應急處置技術發展相對較晚，但在近年來已成為油污防治中的重要組成部分。根據(Chen et al., 2020)的研究，2018 年發生的桑吉號油輪事故暴露了現有應急處置系統的局限性，特別是在應對新型油品(如凝析油)洩漏時缺乏有效手段。這一事故顯示出全球應急處置技術亟需升級。目前，應急處置技術包括固定甲板泡沫系統、應急拖曳系統、油污回收設備等，這些設備能在事故發生後迅速控制和減少原油污染的擴散。

#### 1. 根據 SOLAS 公約的要求

根據 SOLAS 公約第 II-2 章 R10.8.1 條明確規定，所有液貨船舶都必須配備固定式甲板泡沫滅火系統，該系統應具備足夠的覆蓋範圍和持續供應泡沫劑的能力，以應對可能發生的火災場景，尤其是在運輸易燃液貨時，這一系統成為防火防爆的關鍵設備之一，泡沫滅火系統要求配置足夠的泡沫濃縮液儲存量，並且能夠在船舶的操作環境下迅速啟動。系統的設計還應考慮船舶的大小和液貨艙的配置，保證滅火時泡沫能夠迅速、均勻地覆蓋甲板火災區域。

- (1). SOLAS 公約：明確要求液貨船必須配備固定式泡沫系統，這不僅是對火災風險的基本防護要求，也是船舶安全運營的國際標準。
- (2). VIQ(油輪檢查問卷)：VIQ 7 中也要求對固定甲板泡沫滅火系統的檢查和測試進行嚴格記錄，確保設備在事故發生時能夠立即投入使用。

#### 2. 固定甲板泡沫系統的技術標準與應用

固定甲板泡沫系統一般包括泡沫混合器、泡沫產生器、供泡沫管道和泡沫噴頭等設備。這些設備的協同工作保證泡沫能夠在火災發生時快速產生，並以足夠的流量覆蓋燃燒面。根據國際油輪和碼頭操作指南(ISGOTT)的規定，油輪和液貨船的泡沫滅火系統應定期進行測試和維護，以確保其處於良好的工作狀態。定期維護應包括檢查泡沫濃縮液的質量、管道和噴頭的暢通情況，以及系統自動啟動裝置的靈敏度。

### 3. 應急拖帶裝置的規定與擴展應用

根據 1994 年 5 月國際海事組織(IMO)海上安全委員會(MSC)通過的 MSC.35(36)決議案《關於油輪應急拖帶裝置的指南》及國際海上人命安全公約(SOLAS)第 V/15-1 條的規定，應急拖帶裝置旨在當船舶失去動力或遇到突發事故時，能迅速將船舶拖離作業現場，從而減少事故的進一步惡化，保護環境。該裝置早期主要應用於油輪，但其重要性逐漸獲得了更廣泛的認可，成為各類船舶安全管理中的關鍵設備。

擴展應急拖帶裝置至所有 20,000 噸以上的新船，在 2023 年 1 月召開的 IMO 船舶設計和建造次委員會第 9 屆會議上，與會代表一致同意將應急拖帶裝置的要求擴展至所有總噸位超過 20,000 噸的新建船舶，而不再僅限於油輪。這一決定反映了國際社會對船舶安全的重視，並確保大噸位船舶在發生事故時能迅速得到應急救援，減少事故對環境和生命的威脅。

廣泛應用最早應急拖帶裝置確實是針對油輪設計和應用的，但隨著船舶運營風險的增加，該技術已不再局限於油輪。如今，所有總噸位超過 20,000 噸的新建船舶都必須配備應急拖帶裝置，以提高事故應急處理能力和環境保護效果。應急拖帶裝置的技術創新包括拖帶線纜的強度改進、自動張力控制系統以及遠程啟動裝置，這些技術使得該裝置能夠在惡劣的海況下迅速投入使用，保證事故現場的快速應對。這些技術的提升極大地增加了船舶運營的安全性。

### 4. 應急拖帶裝置對環境保護的意義

應急拖帶裝置的擴展應用不僅能減少船舶事故中的人員和財產損失，還能在船舶發生油品或化學品洩漏時，通過快速將船舶拖離事故現場，最大程度地減少污染範圍和程度，從而保護海洋生態系統。

應急拖帶裝置已不再是油輪的專屬技術，而是成為全球大噸位船舶安全管理的一項基本要求。隨著技術的不斷進步，應急拖帶裝置將在未來發揮更大的作用，進一步提升船舶運營的安全性和環境保護效果。

衛星遙感技術雖然在海上污染監測中發揮著重要作用，但其效果往往受限於衛星通過時間，尤其是衛星覆蓋範圍有限的情況下，無法提供即時數據。此外，無人機技術在遠離陸地的外海區域，訊號接收能力和持續運行時間也受到限制，使得其應用範圍和效果存在一定挑戰。因此，岸際雷達偵測與油污擴散電腦模擬技術被認為是目前最直接、快速且有效的偵測手段，特別是在需要即時監測和應急響應的情況下。

電腦模擬技術可以根據油污洩漏的初始位置、洩漏量、海洋流速、風速等參數，模擬油污的擴散方向和速度。這種技術能夠為應急響應提供決策支持，幫助相關單位提前部署防護措施，減少洩漏造成的損失。對於應急處理規劃，油污擴散模擬還能夠協助制定應急響應計劃，確定最有效的油污回收路徑和控制方案，從而提高應對效率。

通過這些技術，應急管理者能夠實時監控洩漏範圍和擴散趨勢，從而為制定應急處置計劃提供科學依據(Gopalakrishnan et al., 2020)。然而，這些技術的普及仍然面臨資金和技術門檻的挑戰，特別是在發展中國家，技術基礎設施不足限制了其廣泛應用。

#### 四、清潔能源技術的潛力與應用困境

目前海運業界在清潔能源技術方面，已經投入運營的雙燃料船主要包括使用液化天然氣(LNG)和甲醇作為燃料的船舶，這些船舶已經實現了商業化運營，並被視為減少碳排放的重要步驟。未來的發展方向則逐漸轉向氨作為燃料，因為氨具有零碳排放的潛力，並且適合長途航運。至於氫燃料，儘管它具有顯著的環保優勢，但目前仍未進入船舶設計的實際階段，主要受到技術和基礎設施的限制。

隨著全球對碳排放問題的關注日益增加，清潔能源技術在船舶運營中的應用成為未來技術創新的重要方向之一。液化天然氣(LNG)、甲醇、氨、氫和電動推進系統等清潔能源技術不僅能減少船舶運營中的碳排放，還能降低傳統燃料洩漏對環境的威脅(Wan 和 Chen, 2018)。這些技術的推廣得益於國際海事組織對船舶碳排放的嚴格規範，例如 IMO 的“2020 全球硫排放規範”對船舶使用燃料的硫含量提出了更高的要求。

然而，清潔能源技術的推廣應用也面臨諸多挑戰。首先，LNG、甲醇、氨和氫燃料技術需要大量的基礎設施建設，包括燃料加注站、儲存設施等，這對於現有的港口和航運公司來說是一筆巨大的投資(Johansdottir 和 Cook, 2019)。其次，這些新技術的操作和維護需要專門的培訓，船員需要具備新的技術技能才能確保設備的安全運行。此外，LNG、甲醇、氨和氫燃料在全球範圍內的供應鏈尚未完全建立，這進一步限制了其應用範圍。

儘管如此，清潔能源技術仍然是減少船舶碳排放和環境污染的未來發展方向。隨著技術的進一步成熟和全球合作的加強，這些技術有望在未來得到更廣泛的應用，從而顯著降低船舶運營對環境的負面影響(Tanaka, 2018)。

## 五、國際政策與法規的支持與挑戰

技術創新的推廣和應用離不開政策和法規的支持。歷史上，多項國際公約和政策的實施促進了船舶污染防治技術的發展。國際海事組織(IMO)制定的《防止船舶污染國際公約》(MARPOL 73/78)和《國際海上人命安全公約》(SOLAS 74)等法規對船舶的技術標準提出了明確要求，並推動了雙殼船體設計、惰性氣體系統等技術的強制應用(Mattson, 2006)。

然而，政策執行的難度仍然是一個重要挑戰。儘管 IMO 已制定了全球適用的技術標準，但各國的執行力度存在顯著差異。特別是一些發展中國家，由於經濟和技術條件的限制，無法完全按照國際標準進行技術升級，這導致了全球範圍內技術應用效果的不均衡(Tan, 2006)。此外，許多國家缺乏有效的監管機制來確保技術標準的貫徹執行，這進一步加劇了船舶污染防治中的挑戰。

綜上所述，各油輪公司無不投入大量人力物力及財力來爭取油輪船舶良好的檢查結果，再輔以自我公司之自主稽核，一方面因應營業需求另者更可提升公司管理水平，從根本上改善船舶操作要求，從而降低船舶操作風險，做到船舶安全、人命安全及環境保護，進而達成公司安全管理體系的目標。船舶檢查報告(SIRE)程序已獲得業界廣泛認可和油輪船舶安全獨特有價值的風險評估工具。船舶檢查報告(SIRE)程序自實施以來，現已獲得了業界的廣泛認可和參與，更是承租人、船舶經營人、碼頭運營商和政府機構，所關注油輪船舶安全獨特的有價值的風險評估工具。

## 參、案例研究方法：船舶原油污染事故的選取標準與分析構面

案例研究方法是一種廣泛應用於海洋環境保護領域的定性研究方法，通過對具體事故的深入分析，了解技術創新對船舶原油污染事故的防治效果。本文選取了六起具有代表性的船舶原油污染事故，涵蓋不同的地理區域、事故類型和技術背景，通過這些案例的詳細分析，為技術創新與政策制定提供實證依據。在本研究中，選取的六起船舶原油污染事故具有典型性和代表性，這些案例之所以被採用，主要為以下幾個原因：

### 1. 重大環境影響

這些事故對海洋環境和沿海社區產生了深遠的負面影響，原油洩漏量大且造成的環境破壞具長期性。每起事故都導致了嚴重的生態損害和經濟損失，例如 **Exxon Valdez** 事件洩漏超過 40,000 噸原油，對阿拉斯加州的海洋生態系統和當地漁業產生了不可估量的損害。這些事故的嚴重性突顯了船舶原油洩漏的潛在風險和技術應對的重要性，為技術創新提供了極具參考價值的實證資料。

## 2. 技術創新應用

這些事故後續促使了相關技術的發展與創新。例如，**Prestige** 事故暴露了單殼油輪的高風險性，促使雙殼船體設計成為標準化的技術解決方案，而桑吉號 事故則揭示了應急響應技術在新型油品洩漏方面的挑戰。通過這些事故，可以具體分析技術創新在事故中的應用效果及其對事故防控的作用。

## 3. 政策影響與推動

這些事故大多促成了國際和國內層面政策的變革。例如，**Exxon Valdez** 事件直接導致了美國《1990 年油污染法案》(OPA 90)的制定，該法案提高了技術標準並促使油輪的運營規範化。同樣，**Hebei Spirit** 事故對國際補償機制的改進起到了促進作用，進一步強化了全球對船舶污染事故賠償問題的關注。因此，這些事故不僅是技術發展的驅動力，也在政策層面上促進了規範與執行的強化。

## 4. 地理分佈多樣性

這六起事故發生在不同的地理區域，涵蓋了北美洲、歐洲、亞洲等多個地區。這種地理多樣性有助於分析不同國家和地區在面對船舶原油洩漏時的技術應用情境，並考察各國在技術創新和應急響應過程中的差異。這樣的分佈可為全球應對船舶污染問題提供更廣泛的視角和經驗教訓。

## 5. 時間跨度廣泛

這些事故涵蓋了自 1970 年代至 2018 年期間的多起事件，展示了隨著時間推移，技術創新如何隨著每一次事故而演進。例如，**Amoco Cadiz** 事故發生於 1978 年，當時油輪技術相對簡陋，這起事故促使了《國際防止船舶污染公約》(MARPOL)的修訂；而隨後的 **Deepwater Horizon** 事件(2010 年)則顯示了當代技術在深海油井爆炸後應對原油洩漏時的局限性。通過對這些案例的對比分析，能夠更全面地理解技術創新的發展歷程和政策影響。

## 6. 多種技術應用挑戰

這些事故涉及不同技術的應用挑戰，從傳統的雙殼設計到現代清潔能源技術，這些技術在不同事故背景下的表現各異。例如，Deepwater Horizon 事件突顯了海上鑽井技術的缺陷，而桑吉號事故則揭示了凝析油洩漏應急技術的空白，這些技術挑戰提供了進一步完善現有技術和制定相關政策的方向。通過這六起具有代表性的事故，我們可以更具體的理解技術創新在防治船舶原油污染中的關鍵作用，並為未來的政策和技術方向提供參考。

### 一、典型案例

本研究選取了六起船舶原油污染事故，這些事故涵蓋了從技術創新到政策制定過程中的多方面問題如表 1 船舶原油污染事故分析。

表 1、船舶原油污染事故分析

事件名稱	地點	洩漏量	技術應用	國際影響
Exxon Valdez 事件(1989 年)	美國阿拉斯加	超過 40,000 噸	暴露油輪防撞技術不足，促進雙殼船體設計的推廣，促成《1990 年油污染法案》的制定	促使全球重新審視油輪運營技術，推動國際海事組織技術標準改革，1992 年 3 月 IMO 提出了雙層殼體油船結構，以及與其等效的油船結構新規則。
Prestige 號事故 (2002 年)	西班牙	約 77,000 噸	揭示單殼油輪高風險，推動歐盟強制雙殼船體設計的立法	事件後，歐盟制定 Erika I 和 Erika II 法案，強化設計標準與應急能力
Hebei Spirit 事故 (2007 年)	韓國	約 10,900 噸	展示油污應急處置技術的重要性，強調油污回收設備的必要性	暴露國際補償機制的局限性，促使韓國加強國際補償機制參與
Deepwater Horizon 事件 (2010 年)	美國墨西哥灣	超過 500 萬桶原油	突顯技術失敗(如井口防噴器)的風險，促進全球範圍內對海洋油氣開採技術的重新評估	導致美國及全球對海洋石油鑽探技術標準與監管的加強
桑吉號事故 (2018 年)	中國東海	約 111,300 噸凝析油	暴露應急處置系統在凝析油洩漏方面的技術空白，顯示新型油品的特殊挑戰	促使中國加強危險化學品海上運輸技術標準和應急預案
Amoco Cadiz 事故(1978 年)	法國布列塔尼海岸	約 223,000 噸原油	促使國際社會認識到船體強度和油污應急處置技術創新的迫切性	引發《國際防止船舶污染公約》修訂，強化船舶建造和操作標準

本研究整理

本研究通過分析多起重大船舶原油污染事故(如表 1 所示)，能夠較為全面地呈現技術創新在防治原油洩漏中的重要作用。儘管僅憑事故分析數據難以完全展現技術創新的全貌，但這些歷史事件為技術創新與政策變革之間的緊密關聯提供了實證參考。例如，Exxon Valdez 事件推動了雙殼船體設計的普及，Prestige 號事故促成了歐盟強制雙殼油輪的立法，Deepwater Horizon 事件則強調了全球範圍內對海洋油氣開採技術標準的強化。這些技術進步不僅直接促進了防污染技術的改善，也為未來政策制定和技術標準的推廣提供了重要的經驗啟示。因此，透過表 1 所列事故的分析，我們可以更具體的理解技術創新在防治船舶原油污染中的關鍵作用，並為未來的政策和技術方向提供參考。

## 肆、未來展望建議與結論

本研究結果顯示，技術創新在船舶原油污染防治中的作用不可忽視。雙殼船體設計和惰性氣體系統等技術已經在多次重大事故中證明了其在減少原油洩漏和降低火災風險方面的有效性。例如，根據 Mattson(2006)的研究，雙殼設計在多次碰撞事故中成功避免了原油洩漏，而惰性氣體系統則顯著降低了油艙內的爆炸風險。這些技術的應用提高了船舶的運行安全性，並減少了因洩漏而對海洋環境造成的嚴重破壞。

### 一、未來展望建議

#### (一)、國際強制規範與我國海運的接軌

根據 IMO 於 1992 年提出的雙層殼體油船結構新規定，所有 1996 年以後建造的 5000 噸以上的油輪必須擁有雙層殼體設計，這一國際強制規範適用於全球所有航運公司，即使我國並非 IMO 的正式會員國，交通部也已公告國內的船舶和航運公司應該遵循此標準，以維護在國際市場中的競爭力，並確保符合國際環保和安全要求。

交通部與國內航運協會保持密切合作，確保臺灣船舶運營的技術標準與國際強制規範相符，特別是在船舶安全與環保方面。雖然我國並未直接參與 IMO 決策，但對於 IMO 的所有最新要求，政府都會參考採納，並定期發布相應的公告或法規，確保國內的船舶運營可以順利進行國際貿易往來，且不受國際航運規範的限制。

#### (二)、清潔能源技術的挑戰

海運界在清潔能源領域的發展主要集中於雙燃料船的應用，其中液化天然氣(LNG)和甲醇是目前已經投入實際運作的主流雙燃料技術。這些技術已經被廣泛應用於多種

船型，特別是在貨輪和油輪方面，LNG 和甲醇燃料的使用不僅能顯著降低二氧化碳和硫氧化物的排放，還能滿足國際海事組織(IMO)關於船舶排放的最新標準。

氨燃料被視為下一個具潛力的清潔能源，尤其是其零碳排放特性，使其在航運業的脫碳目標中具有重要地位。氨燃料的發展目前正處於技術研究和早期測試階段，儘管還沒有大規模應用的案例，但其被視為未來解決航運業碳排放問題的關鍵選項之一。全球多個航運公司和技術供應商正在積極開發氨燃料動力的雙燃料船，預計在未來數年內將有更多的氨燃料船舶投入運營。

目前海運業的清潔能源技術已經取得了一定的成果，特別是在 LNG 和甲醇雙燃料船的實際運作中已取得成功。氨燃料和氫燃料則代表著未來的發展方向，尤其是氨燃料，可能會在不久的將來成為主流的清潔燃料。隨著技術的不斷進步，航運業將能夠逐步實現碳中和目標，並大幅降低對環境的影響。

### (三)、技術創新與國際合作

技術創新的有效應用離不開國際間的合作。特別是在船舶原油污染防治領域，國際海事組織(IMO)在制定技術標準和推動技術應用方面發揮了重要作用。然而，由於各國對技術標準的接受程度不同，這些標準的推廣速度並不均衡。因此，加強國際合作，統一技術標準，將有助於推動技術創新在全球範圍內的應用。

技術監管和評估機制的建立也至關重要。通過建立全球統一的監管框架和評估機制，可以更好地確保技術的有效性和一致性。這將有助於提升技術創新的透明度和應用效率，並確保所有國家都能從中受益。

因應雙燃料船舶操作，國際氣體運送船舶規範(IGC Code)在 2016 版(Resolution MSC.370(93))第 18.2 條《貨物操作手冊》中提出了包括詳細的貨物操作手冊，涉及船舶的整體操作、貨物系統、安全處理貨物、消防系統、靜電安全裝置系統(ESDS)、最大允許操作壓力(MARVS)、緊急操作、船對船轉運(STS)等多方面內容，且不僅限於此。

國際燃料規範(IGF Code)(SOLAS 公約第 II-1 章及 II-2 章的修正案)在第 18.2.3 條《操作功能要求》中也提出了包含詳細的燃料操作手冊，內容包括加油操作、燃料儲存與轉移系統、從進船塢到出船塢的整體操作、安全系統、消防系統等，且不僅限於此。

目前，根據這些國際規範的要求，我國的各航運公司仍未能夠全面建置符合標準的操作手冊，這導致船員無法依據明確的程序進行操作，也缺乏必要的培訓計劃以應

對新型船舶技術操作的需求。特別是在雙燃料船舶操作方面，因為涉及 LNG、甲醇、氨、氫等新型燃料，操作手冊的細節與準備工作對確保船舶操作安全和合規至關重要。

我國的航運公司需儘快根據國際規範制定符合 IGC 和 IGF Code 要求的操作手冊，這些手冊應涵蓋船舶從燃料處理到安全操作的所有方面，特別是雙燃料系統的加注、儲存、轉移和應急操作。手冊應詳細列明每個操作環節的安全要求，並符合 IMO 和 SOLAS 的最新標準。

雙燃料船舶的操作涉及多種新技術與設備，要求船員具備全面的專業技能，包括雙燃料系統的操作、燃料安全處理，以及消防與應急系統的運行與維護。然而，由於技術的複雜性，目前臺灣船員在這方面經驗有限，對船舶運行的安全性和合規性構成了潛在風險。因此，政府與航運公司必須共同推動專業培訓計劃，並邀請國際專家協助，以確保船員能夠掌握操作雙燃料船舶所需的知識與技能，從而滿足不斷嚴格的國際航運標準。

船公司還應與國際技術機構和研究機構展開合作，以獲取最新技術支援，特別是在操作手冊編制與船員培訓方面。此舉將幫助臺灣航運業在技術層面與國際接軌，提升其在全球市場中的競爭力，為了加速臺灣航運業達到國際規範的要求，臺灣政府應積極推動相關政策，提供必要的資金與技術資源，支持操作手冊的制定及船員培訓制度的建立。這將不僅提升臺灣航運業的技術水準，還能確保船舶在符合國際規範的基礎上，具備更高的安全性與環保效能，從而強化我國航運業在全球市場中的競爭優勢。

#### (四)、政策建議

基於本文對技術創新與船舶雙殼設計的發展與挑戰分析，本文提出以下政策建議，既考慮到大型船舶的需求，也關注中小型船舶的技術應用和推廣，以全面提升船舶安全和環境保護水平：

##### 1. 加大對各類型船舶技術創新的支持力度

政府和國際組織應加強對各類型船舶技術創新的研發投入，特別是綠色船舶設計、船舶節能設備、清潔能源技術及自動化監測系統的發展。以及引入其他更具可行性的市場機制，以確保技術升級能夠帶來實際的環保和經濟效益，這不僅能減少船舶運營中的風險，也能提升環境保護效果，確保各種類型船舶也能有效應對洩漏事故和環境挑戰。

##### 2. 強化國際合作與技術標準的全球統一

臺灣雖然不是國際海事組織(IMO)的會員國，因此無權直接參與 IMO 的國際規範制定與技術討論，但這並不意味著臺灣在全球海運技術與規範領域沒有發揮作用的空間。臺灣擁有優秀的造船技術和豐富的海事專業人才，這些優勢使得臺灣能夠通過多種途徑，在國際舞台上提供建設性建議，並在特定的技術領域獲得國際認可與重視。

### 3. 推動船舶基礎設施建設與升級

為促進清潔能源技術如 LNG、甲醇、氨和氫燃料技術的廣泛應用，應加強港口基礎設施的建設和升級，無論是服務大型船舶還是中小型船舶。政府應投入資金並鼓勵私營企業參與投資，推動 LNG、甲醇、氨加注站、氫燃料供應網絡等基礎設施的發展，支持全球船舶業更順利地採用清潔能源技術，從而減少海上運輸對環境的負面影響。

### 4. 加強船員培訓與技術教育，兼顧各類船舶需求

臺灣船員在傳統技術操作方面擁有豐富的經驗與技能，如雙船殼船體維護、惰性氣體系統以及自動化監測系統的操作，這些技術都是 IMO 規範中的重要組成部分。臺灣船員對這些技術並不陌生，並且已經熟悉相關的國際技術標準與操作要求。然而，隨著全球航運業對清潔能源技術需求的增加，特別是雙燃料船的應用，臺灣船員面臨了一項全新的挑戰，即「清潔能源技術操作」的培訓需求。為因應未來趨勢發展，政府與航運公司應建立正確且持續的培訓計劃，以提升臺灣船員的競爭力並確保操作更安全。

建議政府與航運公司合作，為臺灣船員提供系統化、正規化的清潔能源技術培訓，並且該計劃應具有持續性，確保船員能夠跟上技術進步的步伐，培訓內容可以包括：

- (1). 雙燃料船的操作安全與應急措施。
- (2). 液化天然氣(LNG)、甲醇等清潔燃料的儲存、處理與管理。
- (3). 清潔能源技術在不同船型中的應用。
- (4). 國際最新清潔能源法規與技術標準，如 IMO 有關排放控制的規範。

這些培訓不僅可以由國內機構提供，也可以邀請國際專家進行培訓講座，或者通過與國際培訓機構合作，確保船員能夠獲得國際標準的技術知識。

### 5. 推動技術創新與應急處置系統的結合

應進一步強化技術創新與應急響應系統的結合，特別是針對中小型船舶和大型船舶在洩漏事故中的應對能力。引入智能監控系統、應急拖曳系統和油污回收技術，確保船舶在事故發生時能夠快速反應，減少環境損害。應結合全球協作框架，提升應急處置的靈活性與效率，確保各類船舶能夠有效應對不同規模的洩漏事故。

## 二、結論

技術創新在船舶原油污染防治中發揮了關鍵作用，特別是對於大型船舶的運營，雙殼船體設計、惰性氣體系統和清潔能源技術等現代技術手段大幅減少了事故風險。雙殼船體設計通過在內外殼之間提供額外的防護，有效防止了碰撞或擱淺事故中原油洩漏的風險，這對於超大型油輪(VLCC)和散貨船(VLOC)等船型尤其更為重要。惰性氣體系統則顯著降低了油艙內火災和爆炸的風險，確保船舶在極端操作情境下的安全運營。清潔能源技術，例如液化天然氣(LNG)甲醇、氨和氫燃料技術，不僅降低了碳排放，還對海洋環境保護具有長遠的積極影響，從而實現全面而有效的船舶原油污染防治策略，進一步保護全球海洋環境。

面對國際強制法規規範已經不再是費用上的考量，而是船舶運營企業必須遵循的硬性要求，不符合這些規範的企業將面臨淘汰風險，這也是為什麼國內三大航運公司積極參與並投入雙燃料船的規劃與建造，隨著國際海事組織(IMO)對船舶燃料排放標準的逐步收緊，雙燃料船已成為國際航運市場的趨勢標準配備，這些企業認識到，若不跟進國際規範，將無法在全球市場中立足。

然而，在推動新型造船革命前，對於政府來說，最大且最具挑戰性的課題是如何積極參與國際相關技術的研發與推動。技術創新不僅僅限於造船的設計與建造，還包括對技術標準的深度理解與創新應用。在此過程中，技術人才的培養與經驗的積累顯得尤為重要。船舶行業的高技術需求使得人才的培訓和經驗的熟悉成為產業發展的核心，從而實現全面而有效的船舶原油污染防治策略，進一步保護全球海洋環境。

### 1. 技術參與與研發的必要性

國際航運技術標準的發展迅速，特別是在清潔能源技術的應用和船舶燃料的轉型方面。各國航運公司必須積極參與國際相關技術的研發和標準制定，才能確保在這場全球航運技術革新中不被淘汰。對於臺灣而言，雖然非IMO會員國，但仍應加強與國際航運技術研究機構和國際造船公司的合作，積極推動技術研發，並掌握最新的技術標準。

### 2. 人才培訓與經驗積累的關鍵

技術的更新離不開人才的支持，政府和航運公司應該積極培養具備雙燃料船操作、維護和設計能力的專業人才，這樣才能應對未來的技術挑戰，培訓計劃應涵蓋從船員到工程技術人員的全方位教育，幫助他們熟悉雙燃料船操作系統、燃料管理技術以及應對緊急狀況的技能，經驗的積累同樣重要，應鼓勵船員參與實際操作，並積極引進國外的先進經驗來提升國內技術水平。

### 3. 未來的政策與規劃

在推動新型造船革命前，政府應制訂相關政策來支持國內航運企業和造船業，這不僅包括技術研發的經費補貼，還應提供人才培訓的資源，讓國內的航運企業在全球競爭中具備技術優勢。並且，臺灣雖非 IMO 成員國，但在未來的技術發展中仍需遵守國際規範並與國際接軌，從而確保船舶技術的適用性和合法性，並最終達到保護海洋環境的目標。

最後推動新型造船革命並不是一個簡單的技術問題，還涉及到國際法規的遵循、技術標準的更新、以及對專業人才的培養。我國航運業必須在技術參與與研發上積極行動，並通過人才培訓和經驗積累來提升全球競爭力，從而實現全面而有效的船舶原油污染防治策略，進一步保護全球海洋環境。政府在這一過程中的角色至關重要，需要制定有效的政策來支持航運企業的技術升級，並確保人才的技術水平能夠應對未來的挑戰。

## 參考文獻

1. 中國驗船中心，船級規範，網址: <https://www.cclass.org>，瀏覽日期 2024/08/06。
2. 中國船級社，規範指南，網址: <https://www.ccs.org.cn>，瀏覽日期 2024/08/06。
3. 國際海事組織 IMO，網址: <https://www.imo.org/>，瀏覽日期 2024/09/27。
4. 石油公司國際海事論壇 OCIMF，網址: <https://www.ocimf.org/zh/>，瀏覽日期 2024/09/27。
5. 國際散裝運輸液化氣體船舶建造和設備規則 (IGC 規則)，網址: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/IGCCode.aspx>，瀏覽日期 2024/10/08。
6. 國際船舶使用氣體或其他低閃點燃料安全規則 (IGF 規則)，網址: <https://www.imo.org/en/ourwork/safety/pages/igf-code.aspx>，瀏覽日期 2024/10/08。
7. Carson, R.T., Mitchell, R.C., Hanemann, M., Kopp, R.J., Presser, S., & Ruud, P.A. (2003). Contingent valuation and lost passive use: Damages from the Exxon Valdez oil spill. *Environmental and Resource Economics*, 25(3), 257-286.
8. Cheong, S.M. (2011). The role of government in disaster management: The case of the Hebei Spirit oil spill compensation. *Environment and Planning C: Government and Policy*, 29(6), 1073–1086.

9. Chen, J., Di, Z., Shi, J., Shu, Y., Zhang, W., & Song, L. (2020). Marine oil spill pollution causes and governance: A case study of Sanchi tanker collision and explosion. *Journal of Cleaner Production*, 273, 122978.
10. Chen, J., Zhang, W., Wan, Z., Li, S., Huang, T., & Fei, Y. (2020). Oil spills from global tankers: Status review and future governance. *Journal of Cleaner Production*, 227, 20–32.
11. Farrington, J.W., 2013. Oil pollution in the marine environment i: inputs, big spills, small spills, and dribbles. *Environment*, 55(6), 3–13.
12. Francis, O.P., Kim, K., & Pant, P. (2019). Stakeholder assessment of coastal risks and mitigation strategies. *Ocean & Coastal Management*, 179, 104844.
13. Gopalakrishnan, G., Wang, S., Mo, L., Zou, J., & Zhou, Y. (2020). Distribution determination, risk assessment, and source identification of heavy metals in mangrove wetland sediments from Qi'ao Island, South China. *Regional Studies in Marine Science*, 33, 100961.
14. Johannsdottir, L., & Cook, D. (2019). Systemic risk of maritime-related oil spills viewed from an Arctic and insurance perspective. *Ocean & Coastal Management*, 179, 104853.
15. Mattson, G. (2006). MARPOL 73/78 and annex I: an assessment of its effectiveness. *J. Int. Wildl. Law Pol.*, 9(2), 175-194.
16. Roeder, L. (2009). Coast guard issues interim final rule on oil pollution prevention equipment. *Environment Reporter*, p. 177, 4.
17. Skjong, R. (2009). Cost-benefit analysis of inert gas systems for chemical and product tankers. In *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, vol. 43420, pp. 651–660.
18. Tan, A.K.J. (2006). *Vessel-source marine pollution: The law and politics of international regulation*. Cambridge University Press.
19. Tanaka, Y. (2018). *The International Law of the Sea* (3rd ed.). United Kingdom: Cambridge University Press.
20. Thomas, M., & Skjong, R. (2009). Cost-benefit analysis of inert gas systems for chemical and product tankers. In *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, vol. 43420, pp. 651–660.
21. Wan, Z., & Chen, J. (2018). Human errors are behind most oil-tanker spills. *Nature*, 560, 161–163.
22. Ye, X., Chen, B., Li, P., Jing, L., & Zeng, G. (2019). A simulation-based multi-agent particle swarm optimization approach for supporting dynamic decision making in marine oil spill responses. *Ocean & Coastal Management*, 172, 128–136.
23. Xiang, L., Yan, L., Zheng, X., Zhao, X., & Chen, F. (2017). Monolithic carbon foam-supported Au nanoparticles with excellent catalytic performance in a fixed-bed system. *New Journal of Chemistry*, 41(24), 15027–15032.