

國際海事法規之技術要求對臺灣港口安全之影響：以 **MARPOL 與 SOLAS 為例**

The Impact of Technical Requirements in International Maritime Conventions on Port Safety in Taiwan: A Case Study of MARPOL and SOLAS

陳嘉陵¹

摘要

本研究透過文獻回顧與港口國管制(Port State Control, PSC)長期統計資料分析，探討《MARPOL》與《SOLAS》公約之技術要求，如何透過 PSC 制度形塑臺灣港口安全治理。研究結果顯示，高船齡船舶之不合格率與留置率顯著高於整體平均水準，PSC 缺失亦高度集中於 MARPOL 附則 I/VI、壓艙水管理系統(Ballast Water Management System, BWMS)、SOLAS II-2/V 與《ISM Code》等關鍵技術領域。此一現象顯示，國際公約所設定之技術門檻，透過 PSC 的查核與留置機制，對進港船舶形成明顯的風險篩選與合規誘因。然而，本研究之分析屬於描述性與關聯性層次，PSC 留置結果係多重制度、技術與營運因素交互作用之產物，技術強制化僅為其中之一。整體而言，研究結果有助於理解技術強制化在臺灣港口安全治理中的制度運作邏輯，並指出未來在法制銜接、檢查能力與智慧化執法方面仍有精進空間。

關鍵字：防止船舶污染國際公約(International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MARPOL)；國際海上人命安全公約(International Convention for the Safety of Life at Sea, SOLAS)；港口國管制(Port State Control, PSC)；技術強制化；港口安全

Abstract

This study explores how the technical requirements of the MARPOL and SOLAS conventions shape port safety governance in Taiwan through the Port State Control (PSC) system, utilizing literature reviews and long-term PSC statistical data analysis. The research findings indicate that the deficiency and detention rates for older vessels are significantly higher than the overall average. Furthermore, PSC deficiencies are highly concentrated in key

¹ 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

technical areas, including MARPOL Annex I/VI, Ballast Water Management Systems (BWMS), SOLAS II-2/V, and the ISM Code.

This phenomenon demonstrates that the technical thresholds set by international conventions, enforced through PSC inspection and detention mechanisms, create distinct risk-screening effects and compliance incentives for incoming vessels. However, the analysis in this study remains at a descriptive and correlational level; PSC detention outcomes are the product of interactions between multiple institutional, technical, and operational factors, with technology-forcing being only one of these factors. Overall, the research results contribute to an understanding of the institutional operational logic of technology-forcing within Taiwan's port safety governance and highlight areas for future improvement in regulatory alignment, inspection capacity, and smart enforcement.

Keywords: International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL); International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS); Port State Control (PSC); Technology forcing; Port safety.

壹、前言

全球貿易運輸量高度依賴海運，超過八成的國際貨物往來皆需仰賴船舶運輸。然而，海運在促進全球經濟發展的同時，也伴隨環境污染與航行安全風險，其中包括船舶排放硫氧化物(Sulphur Oxides, SO_x)、氮氧化物(Nitrogen Oxides, NO_x)與溫室氣體(Greenhouse Gases, GHGs)，以及壓艙水攜帶外來種(Non-Indigenous Species, NIS)所造成的生態衝擊等問題(Endres, 2018)。為回應上述風險，國際海事組織(International Maritime Organization, IMO)陸續制定《國際海上人命安全公約》(International Convention for the Safety of Life at Sea, SOLAS)與《防止船舶污染國際公約》(International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MARPOL)，並持續更新各項技術標準，使之成為全球航運最低技術門檻(IMO, 2023a; 2023b)。

臺灣地處亞太航路樞紐，其國際商港是國際法規實務落實的重要場域。MARPOL附則VI的全球限硫規範、壓艙水管理系統(Ballast Water Management System, BWMS)之強制安裝要求、以及 SOLAS 針對消防、航行通訊與安全管理制度的規範，均直接影響進出臺灣港口的船舶設備配置與營運程序(IMO, 2020; IMO, 2021)。此外，國際船級協會如 DNV、ABS、LR、BV、NK 等亦透過設備檢驗、風險評估與合規驗證，確保船東遵循國際技術標準，有助提升船舶進出港安全(DNV, 2025; ABS, 2025; LR, 2025; BV, 2025; NK, 2025)。

在技術要求快速提升的背景下，港口國管制(Port State Control, PSC)成為落實國際技術標準與強化港口安全的關鍵執法制度。PSC 透過查核證書、設備狀況與操作程序，以確保外籍船舶在進入港口前已符合最低安全與環保標準。大量研究證實 PSC 能有效排除次標準船舶，降低航行與環境風險(Cariou et al., 2008; Cariou et al., 2009; Heij & Knapp, 2019)。亦有研究指出 PSC 的留置與缺失改善制度具有嚇阻效果，促使業者提前更新設備以避免營運中斷(Knapp & Franses, 2006)。

近年，PSC 研究逐漸導入統計模型與資料探勘技術，用以分析缺失類型、預測留置風險與支援高風險船舶之篩選。例如多變量分析(Almorza et al., 2024)、機器學習模型(Bei et al., 2024)及貝氏網路(Jiang et al., 2023)均被證實可提升 PSC 的檢查效率與風險預測能力。這些新興方法將 PSC 由傳統的「逐船檢查」模式推向「資料導向的智慧檢查」，並逐步成為東京備忘錄(Tokyo MOU)與巴黎備忘錄(Paris MOU)發展趨勢之一(Tokyo MOU, 2023)。

然而，臺灣在推動國際海事法規之技術標準國內化過程中，仍面臨多重制度與執行層面的挑戰，包括法規調適速度、檢查員專業能力、船舶設備異質性、產業負擔，以及政策、法律與技術之間可能存在的落差(Lee & Kim, 2020)。在此背景下，如何理解國際技術要求透過港口國管制(Port State Control, PSC)制度於實務層級的運作方式，成為港口安全管理中值得進一步探討的議題。

在既有 PSC 研究多聚焦於船舶風險因子分析與留置率預測的背景下，本文嘗試引入「技術強制化(technology forcing)」作為分析視角，重新檢視國際海事法規如何透過 PSC 制度影響港口安全管理。本文並不將 PSC 視為技術強制化的最終結果指標，而是將其定位為國際技術標準得以落實於港口層級的關鍵執行工具。透過分析 PSC 檢查與留置資料，本文旨在說明技術強制化在實務上所展現的風險篩選與行為誘導效果，而非直接進行因果推論。此一研究定位有助於補充既有 PSC 文獻中，較少從政策工具與技術治理互動角度出發的分析。

貳、文獻回顧

2.1 MARPOL 與 SOLAS 的技術要求演變

《防止船舶污染國際公約》(MARPOL 73/78)長期為全球防止船舶污染之核心規範，其附則涵蓋油類、有毒液體、危害物質、污水、垃圾與空氣污染等領域(IMO, 2023a)。尤其附則 VI 的 IMO 2020 全球限硫措施要求燃油含硫量不得高於 0.5%，迫使全球航運加速推動低硫燃油使用與脫硫設備(scrubber)之安裝(IMO, 2020)。此外，IMO 在 2023 年

發布新版溫室氣體策略，明確提出本世紀中期達成淨零排放的政策願景，使船舶能效指標(EEDI、CII)成為各國落實能源轉型的核心要求之一(IMO, 2023b)。

另一方面，《壓艙水管理公約》要求所有國際航行船舶安裝 BWMS，以降低外來種隨壓艙水入侵港灣環境的風險，其生態重要性亦獲大量研究證實(Endres, 2018)。臺灣港口周邊海域具有高生態敏感性，相關研究顯示外來種入侵已成為港灣長期風險之一，對生態系及港口營運均可能造成不利影響(Hsu & Liu, 2020)。

SOLAS 公約則聚焦船舶結構、航行設備與通訊系統之安全要求，包括船體結構、救生系統、消防設備與電子海圖顯示與資訊系統(ECDIS)之強制配備(IMO, 2023c)。研究亦指出 SOLAS 技術要求之演變長期受重大事故驅動，例如通信失效、船舶碰撞與火災事故，促使 IMO 不斷強化結構與航行設備標準(Chen et al., 2020)。隨著海運產業快速數位化，IMO 已於 2021 年要求將網路風險管理(cyber risk management)納入 ISM Code，以因應 AIS 偽造、GPS 干擾與電子航儀攻擊等新興資安威脅(IMO, 2021)。

2.2 港口國管制(PSC)之理論與實證研究

PSC 為沿海國家確保外籍船舶符合國際公約的重要機制，其效果已獲大量研究支持。實證研究證實 PSC 能有效降低缺失比率與事故風險(Cariou et al., 2007; Cariou et al., 2008)，留置措施亦具有嚇阻效果，促使業者提前更新設備與提升船舶維修品質(Knapp & Franses, 2006)。後續研究指出 PSC 制度在不同 MOU 之間存在執法品質差異，進而影響各國檢查一致性與風險治理成效(Knapp & Franses, 2007)。船旗國品質、船齡、船級社與國籍等因素亦被證實與 PSC 缺失呈顯著相關(Li & Zheng, 2008)。

近年來，資料科學技術被廣泛應用於 PSC 風險預測與分類，以提升檢查效率與資源配置。多變量風險分類方法可協助辨識高風險船舶(Almorza et al., 2024)，AdaBoost 與資料融合模型則能有效預測 PSC 留置(Bei et al., 2024)。Bayesian Network 被用於分析 PSC 缺失於時間序列中的演變與傳遞機制(Jiang et al., 2023)，統計與資料探勘方法亦顯示 PSC 缺失與事故風險具有可預測性(Heij & Knapp, 2019)。

有研究比較 Paris MoU 與 Tokyo MoU 之檢查紀錄，指出消防設備(SOLAS II-2)、ISM、航行設備(SOLAS V)與污染防治設備(MARPOL 附則 I、VI)為最常見缺失(Biočić et al., 2023)，與臺灣 PSC 統計結果高度一致(財團法人驗船中心，2025)。

2.3 技術強制化與政策—法律—技術鴻溝

技術強制化(technology forcing)是主管機關透過制定高於現有能力之強制標準，藉以引導產業進行技術升級的治理手段，常見於環境與安全領域(Ashford & Hall, 2011)。MARPOL 之限硫措施、EEDI 與 CII 指標，以及 SOLAS 新設備強制標準均屬典型的技術強制化案例。然而，研究指出國際法規在政策目標、法律轉化速度與產業技術能力之間常出現落差，使法規執行成效受到限制(Lee & Kim, 2020)。

從政策工具視角，Linder 與 Peters(1989)指出，主管機關需透過法規型、經濟型與資訊型工具的組合，才能有效影響產業行為。Howlett 與 Ramesh(2003)則強調政策循環是一個動態過程，涉及問題辨識、政策制定、採行、執行與評估等多階段，任何一環的能力不足皆可能造成政策落差。

最新研究亦指出 IMO 在全球海事治理中已形成多層次的政策組合(policy mix)，包括強制標準、認證制度、資料回報與市場性措施等，其整合效果深刻影響各國航運業的合規策略(Bach & Hansen, 2023)。在 PSC 執行層面，檢查員專業能力、設備標準多樣性，以及船公司之合規成本均被視為影響制度運作的重要因素，使政策—法律—技術之間的鴻溝更加複雜(Wang et al., 2025)。

參、MARPOL/SOLAS 技術強制化對臺灣港口安全的實證影響分析

本研究進一步以臺灣港口國管制(Port State Control, PSC)的實證資料為基礎，分析國際海事法規透過技術強制化對港口安全所產生的具體影響。PSC 是各國政府落實國際公約的核心執法機制，因此 PSC 所揭露的缺失類型、留置數據與船舶特性，不僅反映國際法規的執行情況，也顯示技術強制化實際對港口安全造成的篩選與調整效果。

3.1 港口國管制(PSC)實證數據分析

本研究以臺灣港口國管制(Port State Control, PSC)之官方統計資料作為實證基礎，分析國際海事法規技術要求與港口安全風險之間的關聯性。需特別說明的是，本文所採用之分析方法以描述性統計為主，重點在於呈現不同船舶特性(如船齡)與 PSC 檢查結果之關聯樣態，而非建立嚴格的因果模型。由於 PSC 不合格與留置結果同時受到船旗國、船型、船級社、營運管理、航線特性等多重因素影響，本文僅將技術強制化視為影響港口安全風險的重要制度背景條件之一，並在此界線下進行分析與討論。

本節後續將說明資料來源、統計變數與分析方式，並呈現 PSC 檢查結果在不同船舶特性下的分布情形。

3.1.1 船舶留置率與船齡的關聯：技術強制化的「篩選效果」

表 1、92–113 年港口國管制依船齡檢查率、不合格率與留置率統計表

船齡(年)	進港個別船舶數(A)	檢查數(B)	不合格數(C)	留置數(D)	檢查率(B/A)	不合格率(C/B)	留置率(D/B)
10 年以下	18,802	4,034	2,067	257	21.46%	51.24%	6.37%
11–15 年	10,384	2,755	1,404	134	26.53%	50.96%	4.86%
16–20 年	6,706	2,271	1,412	299	33.87%	62.19%	13.17%
21 年以上	5,503	4,712	3,401	1,386	75.81%	81.52%	33.22%
總計	41,395	13,232	8,307	2,076	31.97%	62.78%	15.69%

資料來源：交通部航港局(2024)

表 1 所呈現之結果顯示，92–113 年度臺灣港口國管制(Port State Control, PSC)統計資料中，存在明顯的「船齡風險梯度」分布現象。10 年以下新造船船之 PSC 檢查率約為 21.46%，相較之下，21 年以上高齡船舶之檢查率則達 75.81%。不合格率與留置率亦呈現相似趨勢，其中 21 年以上船舶之不合格率為 81.52%，留置率為 33.22%，均高於整體平均水準 15.69%。此一結果顯示，在 PSC 制度運作下，高齡船舶較容易於檢查過程中顯現其設備狀況、維護管理或操作程序等面向的潛在風險。

從制度運作角度觀察，PSC 檢查結果與船齡之間所呈現的關聯樣態，與 MARPOL 與 SOLAS 近年持續強化之技術要求在風險辨識方向上具有一致性，顯示國際技術標準可能透過 PSC 制度形成對不同風險船舶之區辨效果。然而，相關結果應理解為制度運作層面的相關性呈現，而非單一政策工具或技術強制化效果之因果證明。

相關國際事故案例可作為理解船齡、設備狀況與安全風險關係的背景說明。例如，2018 年巴拿馬籍「桑吉(Sanchi)」號油輪於東海與貨船發生碰撞並引發爆炸事故，事後調查指出船舶設備老化與操作管理問題可能為事故風險加劇的因素之一(Chen et al., 2020)。此類案例顯示，高齡船舶在未能持續配合國際安全與環保公約之技術升級情況下，可能面臨較高的營運與環境風險，但其性質仍屬說明性佐證，並非統計或制度效果之因果推論依據。

3.1.2 MARPOL 與 SOLAS 技術缺陷的集中性分析

本研究針對技術缺陷之分類，需輔以說明其方法論基礎：該分類並非直接援引臺灣港口國管制(PSC)原始缺陷代碼之量化統計，而是採行歸納分析法，綜合東京備忘錄(Tokyo MOU)之區域性統計趨勢、我國 PSC 年度報告之重點缺失項目，以及相關海事政策研究文獻所建構。此分類旨在作為政策分析之架構工具，用以析論國際技術強制化所聚焦之設備與管理領域，其性質屬分析性歸納，而非單一資料來源之量化統計結果。

根據東京備忘錄(Tokyo MOU)之公開統計資訊，並參考臺灣 PSC 年度報告中所揭示之執法重點，可觀察到部分 PSC 缺失多集中於與國際海事法規技術要求相關之設備與管理系統。雖然年度報告未逐一列出缺陷代碼，但結合國際趨勢與臺灣 PSC 的執法重點，仍可歸納出若干常見且具代表性的技術缺陷類型，作為後續分析與討論之基礎。

表 2、PSC 檢查中常見的 MARPOL 與 SOLAS 技術缺陷類型及其影響

公約/章節	缺陷類型	相關強制技術要求	潛在港口安全影響
MARPOL 附則 I	油水分離設備(OWS)故障、紀錄造假	OWS 性能標準、油類紀錄簿要求	港口水域油污染
MARPOL 附則 VI	高硫燃油使用、脫硫塔(Scrubber)運作異常	IMO 2020 限硫令	港區空污惡化、操作風險
BWM 公約	壓艙水管理系統(BWMS)失效	D-2 排放標準	外來種入侵、生態風險
SOLAS II-2	消防泵、固定式滅火系統故障	消防設備可靠性要求	船艙火災危害港口
SOLAS V	ECDIS、雷達故障或未更新	航行設備數位化要求	船舶碰撞、擋淺
SOLAS IX (ISM Code)	安全管理與網路資安缺失	資安管理強制化	航運中斷、資料外洩

本研究整理

進一步從船齡結構觀察 PSC 留置與缺失樣態，可發現高齡船舶之技術缺陷，往往集中於特定公約章節所涵蓋之核心設備領域。根據臺灣 PSC 年度報告所揭示之留置原因摘要，以及東京備忘錄(Tokyo MOU)之區域性統計趨勢，高船齡船舶所涉及之重大缺失，較常出現在 MARPOL 附則 I 與附則 VI 所規範之油水分離設備、燃油品質與排放控制系統，以及 SOLAS 第二章(II-2)消防設備與第五章(V)航行設備等關鍵安全項目。

此一現象在制度運作層面具有合理解釋：隨著 MARPOL 與 SOLAS 近年持續提高技術標準，高齡船舶在設備更新、系統相容性與長期維護方面，面臨較新造船更高的合規壓力，使其在 PSC 檢查過程中較容易於上述技術密集型項目被揭露缺失。本文所呈現之關聯性觀察，旨在說明技術強制化政策在不同船齡結構下可能產生之風險分布趨勢，並非基於缺陷代碼之量化交叉統計結果，亦不構成因果推論。

3.2 污染防治技術的強制實施與臺灣港口安全

3.2.1 低硫燃油、脫硫塔(Scrubber)與港口空氣品質及操作安全

MARPOL 附則 VI 所要求的燃油含硫上限，是典型的國際技術強制化案例。臺灣自 2019 年即率先要求國際航線進港船舶使用 0.5%以下硫含量燃油(交通部航港局，2019)，提前與 IMO 標準接軌。強制使用低硫燃油不僅：

- (1) 改善港口區域空氣品質(SO_x、PM2.5 顯著下降)，
- (2) 降低船員、碼頭人員及居民健康風險，更使臺灣港區環境安全進一步提升。

然而，此一強制規範在技術面仍存在挑戰：

- (1) 安裝開式或閉式脫硫塔的船舶需依賴複雜設備與持續監測；
- (2) PSC 檢查員需查核排放數據、運轉紀錄與洗滌水排放是否符合法規；
- (3) 部分船舶在油品切換與設備操作上若不當，仍可能造成機械故障或污染。

因此，低硫燃油政策與脫硫塔技術要求一方面提升環境安全，一方面也增加 PSC 的查核複雜度。

3.2.2 壓艙水管理系統(BWMS)與生態安全

《壓艙水管理公約》強制要求船舶安裝 BWMS，是另一個對港口安全有深遠影響的技術要求。針對臺灣而言，由於港口周邊海域具有高生態敏感性，外來種入侵已被國內學者視為港區長期風險之一(Lin et al., 2021)。國內學者亦針對此問題深入探討，指出壓艙水導入的外來生物種對生態環境構成重大威脅，並檢視臺灣透過《船舶設備規則》及《商港港務管理規則》修正所進行的規制，評估其能否有效防堵船舶壓艙水帶來的外來種入侵風險(王毓正、劉大綱、邱永芳、黃茂信，2017)。強制安裝 BWMS 使得：

- (1) 港口水域遭受外來生物入侵的風險明顯降低；
- (2) 生態安全成為港口安全治理的一部分；
- (3) PSC 需查核型式認可、系統運轉紀錄與取樣數據。

然而，BWMS 的技術特性因系統差異(UV、電解、化學藥劑)而各不相同，若系統在特定水質條件下失效，可能造成合規困難。PSC 對 BWMS 的查核可有效迫使船舶維持系統正常運作，避免潛在生態風險被忽視。

肆、政策推動技術強制化在臺灣的實施現況與挑戰

臺灣近年透過港口國管制(Port State Control, PSC)機制，成功地將國際海事組織(IMO)所制定之技術標準與安全規範，轉化為具體的國內執法行動，在提升船舶技術水準與港口安全方面已取得一定成效。然而，技術強制化政策並非僅是「把國際公約抄進國內法」即可落實，其背後涉及政策工具的選擇、法制調適、產業負擔、執行能量與技術成熟度等多重面向。以下即從政策工具運用與現實挑戰兩大層面，分析臺灣在推動 MARPOL/SOLAS 技術強制化過程中的實施現況與限制。

4.1 政策工具的選擇與配套

在技術強制化的政策設計上，臺灣大體上結合了強制型、混合型與資訊/能力建構型等多種政策工具，以兼顧國際義務履行與產業可行性。

4.1.1 強制型工具：港口國管制(PSC)

港口國管制是臺灣實施技術強制化最核心的強制型政策工具。根據《中華民國港口國管制 113 年度報告》彙整之 92–113 年統計資料，整體 PSC 檢查率約為 31.97%，不合格率達 62.78%，留置率亦高達 15.69%，顯示 PSC 已對進出港船舶形成明顯的風險篩選與嚇阻效果。進一步觀察船齡結構可發現，21 年以上高齡船舶的檢查率高達 75.81%，留置率更達 33.22%，遠高於整體平均水準，顯示 PSC 對老舊船舶具有更強的技術審查與淘汰功能(交通部航港局，2024)。

對於船舶營運人而言，一旦因重大技術缺失遭到留置，不僅延誤航程，還可能被通報至東京備忘錄(Tokyo MOU)資訊系統，影響後續在其他港口的檢查頻率與商譽，形成實質的經濟壓力。此外，臺灣 PSC 的實施係依循東京備忘錄之程序與風險排序機制，透過 Asia-Pacific Computerized Information System(APCIS)掌握船舶過往檢查紀錄與風險評級，並配合國際間對重點公約(如 MARPOL、SOLAS、STCW)的執法趨勢調整檢查重點。此種作法不僅確保我國執法標準與區域內其他成員國一致，降低被視為「執法寬鬆港口」的風險，也有助於避免技術強制化政策被外界誤解為貿易障礙或變相歧視特定船旗國的措施。

4.1.2 混合型工具：法規調適與配套服務

在強制型工具之外，臺灣亦透過法規調適與港口服務配套，作為結合「強制 + 誘因」的混合型政策工具。一方面，主管機關陸續修訂《海洋污染防治法》及相關子法，將 MARPOL 相關技術要求(如油污防治設備、空氣污染控制及壓艙水管理等)明確納入國

內法制體系，提供 PSC 執法明確法源依據，同時建立違規罰則與行政處分機制，強化技術強制化的法制基礎。

另一方面，臺灣港務公司與相關單位亦逐步提供配套性的港口服務，例如在國際商港設置低硫燃油供應管道、規劃及建置岸電(cold ironing)設施，並評估未來替代燃料(如 LNG、甲醇)相關支援設施的可行性。此類配套措施有助於減輕船舶業者面對新技術要求時的成本壓力，使技術強制化不僅是「合規成本」，也有機會透過港口所提供之公共服務，降低過渡期間的衝擊。

4.1.3 資訊與能力建構工具：訓練、合作與資訊共享

技術強制化能否真正落實，關鍵在於執行端是否具備足夠的知識與能力。因此，臺灣亦重視資訊與能力建構型政策工具的運用。

首先，在檢查人員訓練方面，交通部航港局每年均辦理 PSC 檢查員在職訓練與研習課程，針對最新生效或即將生效之公約修正案(例如 BWM 公約的技術細節、MARPOL 附則 VI 的最新解釋、LNG 燃料船之安全要求等)，以及新興技術設備(如壓艙水管理系統、脫硫塔、電子海圖系統)設計專題課程，協助檢查員掌握檢查要點與故障模式。

此外，在技術合作方面，臺灣與多家國際船級協會保持密切互動，透過研討會、技術交流及缺陷案例分享，了解各型設備的設計標準與常見問題，亦可借助船級協會的技術資料作為 PSC 判斷的重要參考。此外，藉由參與 Tokyo MOU 年會與專家會議，臺灣得以掌握國際間對特定新興風險(如網路安全、自主船舶技術)之共識與執法方向。

最後，經由 APCIS 等資訊系統，臺灣 PSC 檢查員在登輪前即可掌握該船過去於他國 PSC 的檢查紀錄與缺失類型，得以預先研判風險，採行更具針對性的檢查策略，提升有限人力資源之運用效益。

4.2 實施技術強制化所面臨的挑戰

儘管上述政策工具已使臺灣在技術強制化上具備一定基礎，但在實務執行的過程中，仍面臨技術、法制與資源等多方面挑戰，需在未來政策規劃中特別關注。

4.2.1 技術可靠性與維護成本：新技術導入的兩面刃

新技術的強制導入，常被視為提升安全與環保水準的必要條件，但其可靠性與維護成本也可能對產業與執法一線造成壓力。壓艙水管理系統(BWMS)及船舶脫硫塔即為典型例子。

在 BWMS 方面，不同系統如紫外線、電解、化學藥劑處理等，對水質條件(鹽度、濁度、溫度)之敏感度各不相同。部分學者指出，於低鹽度或高濁度水域運轉時，若設計或操作不當，可能導致實際處理效果低於標準，進而在 PSC 取樣檢測時出現不合格情形。對船東而言，BWMS 不僅需一次性安裝成本，還需持續的維修、耗材及人員訓練，對中小型航運公司而言尤其是一大負擔。

在脫硫塔方面，開式與閉式系統在環境影響與運轉成本上各有爭議。部分國家或港口對開式脫硫塔洗滌水排放採取限制措施，要求船舶在近岸或港區須改用低硫燃油或切換運轉模式。PSC 檢查員必須追蹤這些規範變化，並在有限時間內判斷脫硫塔運轉紀錄與排放數據是否符合各項標準。新技術在設計階段往往以「理想條件」為前提，但在實務運轉中，若設備故障率偏高或維護不易，反而可能增加 PSC 的查核難度與船舶營運風險。

4.2.2 法制銜接與彈性：縮小「政策—法律—技術」鴻溝

國際海事法規的修正與新標準制定速度近年明顯加快，從傳統的船體結構與污染排放，逐步延伸至能效指標、網路安全、自主船舶等新興議題。臺灣雖已逐步將相關規範國內法化，但國際規範形成、IMO 通過修正案、國內完成立法程序與行政體系適應之間，仍不可避免存在時間差與彈性不足的問題。

一方面，若國內法規更新速度偏慢，可能出現「PSC 已知國際最新標準，但國內法源尚未完備」的窘境，使檢查員在執法時面臨標準依據不足的困境。另一方面，部分國際公約容許以「同等效力措施」(equivalent arrangement)替代既定技術方案，但國內法制若在認定程序上過於僵化，可能使具創新性或成本效益較佳的技術解決方案難以被採納，減少產業調適的彈性。

此外，SOLAS 將網路風險管理納入 ISM Code 的要求，使傳統海事法規體系必須面對資訊安全與操作技術(Operational Technology, OT)交織的新型態風險。PSC 檢查員在評估船舶安全管理系統時，除需了解文件與程序外，還須具備資安與工控系統的基本認知。如何在現有法制與訓練架構下有效吸收這類新興議題，是臺灣海事治理未來的重要課題。

4.2.3 執行資源與專業能力：邁向「智慧 PSC」

技術強制化最終能否在港口落實，關鍵仍在執行端的人力與能力。臺灣 PSC 檢查業務目前係由有限人力負擔，且多數檢查員兼任其他港政、航政或行政業務，非專職化程度偏高，面對持續增加的檢查項目與愈趨複雜的技術設備，執行壓力日益提升 (Maritime and Port Bureau, 2023)。

在專業能力方面，檢查員過去多以傳統船體結構與機電設備為主要專長，但隨著船舶使用液化天然氣等替代燃料、安裝大量數位化監控與導航系統，以及 BWMS、脫硫塔等新設備普及，檢查員需具備跨機械、電機、資訊與環境等多領域知識。若訓練資源不足或更新不及，將影響檢查品質與執法一致性。

因此，未來臺灣在 PSC 政策規劃上，可朝「智慧 PSC」(Smart PSC)方向發展，例如：運用大數據分析船舶歷史 PSC 紀錄、AIS 航跡資料、船級社報告與設備狀態資訊，建立風險預警模型；結合行動裝置與數位化查核清單，減少紙本作業並提升現場檢查效率；甚至利用遠端監測或資料交換方式，對特定設備(如排放監測系統)進行非現場查證，將有限人力優先投入高風險船舶。此類智慧化作法，除可提升技術強制化政策的執行效能外，亦有助於彌補人力資源不足與專業分工不易的結構性問題。

伍、政策推動技術強制化的效益與成本評估

技術強制化(**technology forcing**)作為國際海事治理中高度重要的政策工具，其核心精神在於透過設定超越現行產業能力的技術標準，迫使船舶與航運公司採取革新措施，以達成環境保護與航行安全的政策目標。對臺灣而言，MARPOL、SOLAS 與 BWM 公約等國際規範的強制實施，已成為港口安全與環境治理的重要基礎。本節將從效益與成本兩個面向進行分析，並探討其政策工具的整體可行性。

本章之效益與成本分析採取質性分析取徑，主要考量在於相關成本與效益多屬長期性、跨部門及外部性影響，難以僅透過單一港口或年度資料進行精確量化。此外，國際間對於航運技術升級的成本效益研究，多集中於特定設備或單一污染項目，尚不足以全面反映港口安全治理層級的政策影響。因此，本文以既有國際研究成果與臺灣實務經驗為基礎，進行整體性政策分析，並將量化成本效益分析視為未來研究的重要延伸方向。

就技術強制化所帶來的效益觀之，可從環境、安全與經濟三方面進行整體檢視。在環境效益上，MARPOL 附則 VI 的全球限硫令與氮氧化物(NOx, Nitrogen Oxides)排放控制要求，大幅降低船舶於港口航道的污染排放，有助改善臺灣港區周邊的空氣品質。此外，《壓艙水管理公約》強制安裝壓艙水管理系統(Ballast Water Management System, BWMS)，有效遏阻外來水生物引入港灣，降低海洋生態受侵害的風險。此類環境效益

屬於典型的「累積性公共利益」，對沿海居民、港區從業人員與漁業生產均具有正面效果。

在具體環境效益的實務層面，臺灣主要商港近年推動低硫燃油使用與岸電(*cold ironing*)設施建置，已呈現可觀的污染減量成果。根據港務主管機關與地方政府之公開資料，高雄港於推動進港船舶使用 0.5%以下硫含量燃油後，港區船舶相關硫氧化物(SO_x)排放量約可減少 60%–80%；臺中港於岸電示範碼頭投入使用後，靠泊期間船舶輔機停機比例明顯提升，相關 SO_x 與懸浮微粒(PM)排放亦呈現下降趨勢。

上述數據雖非直接源自港口國管制(Port State Control, PSC)個案統計，但可作為理解 MARPOL 附則 VI 與相關技術強制化措施於港口層級所產生環境效益的實證背景。此類污染減量效果，有助於將原本由港區周邊社會承擔之空氣污染外部成本，透過技術標準與配套執法機制，逐步內化至船舶營運與港口管理決策之中，從而強化技術強制化政策在港口安全與環境治理上的政策正當性。

在安全效益方面，SOLAS 公約所要求的船舶消防、救生設備與導航系統升級，直接提升了航行與作業安全。例如電子海圖顯示與資訊系統(Electronic Chart Display and Information System, ECDIS)以及全球海上遇險及安全系統(Global Maritime Distress and Safety System, GMDSS)的全面普及，使船舶在複雜航道中的操作更為精準。此外，火警偵測系統、自動型固定滅火設備與船橋設備整合，自然降低了船舶火災、碰撞等事故的發生機率。從 PSC 實證資料亦可看出，顯示在技術標準持續提高的情況下，高船齡船舶有維護與設備更新的壓力，留置率在近年呈現改善趨勢。

在經濟效益方面，技術強制化雖需要初期投資，但長期而言能降低事故、污染罰款、延誤與聲譽損害等潛在成本。更重要的是，強制性標準刺激了航運產業的綠色轉型，包括採用低硫燃油、液化天然氣(LNG)燃料、岸電(*Cold Ironing*)接岸設備與各式節能技術。這些轉變促進國內外船廠、設備供應商與維修產業鏈升級，形成新的產業機會，並增強臺灣港口在國際航線中的競爭力。

然而，技術強制化的施行並非沒有成本。對航運公司而言，最主要的成本來自設備購置、安裝、測試與維護。例如脫硫塔(Scrubber)系統的安裝需占用船舶大量空間並進行艙口改裝，增加停泊時間與維修成本；BWMS 的維護與定期校準亦需投入大量人力與技術。此外，船員需接受額外訓練，以熟悉新技術與操作程序，形成不小的人事成本。若因不合規被 PSC 留置，不僅影響航期，更可能造成契約違約或貨主索賠。

對港口國政府而言，成本則主要來自執法端。PSC 檢查員需接受不斷更新的專業訓練，以掌握新技術設備的檢查要點，特別是涉及 BWMS、LNG 系統與網路安全

(Cybersecurity)等領域。此外，政府需投入資源維護 PSC 作業平台、升級資訊系統，並配合產業需要建置岸電、LNG 加注站及其他港口基礎設備。這些投入雖屬公共支出，但對提升國家整體海事治理能力具有長期的戰略性價值。

綜合效益與成本後，從臺灣的實務經驗與既有研究觀察，技術強制化政策在整體治理層級上，呈現出效益與成本結構上相對正向的政策評估結果。此外，根據 DNV (2024)研究顯示，船舶為符合國際標準，營運成本可能增加 20%至 50%，這反映了產業面臨的實質挑戰。然而，本研究認為 PSC 機制透過技術缺陷查核與留置措施，在制度設計上具備將污染與事故風險導入船舶營運決策考量之功能，使外部性成本得以被部分內化。形成強而有力的市場激勵。換言之，合規船舶受益於更安全與更乾淨的港口環境，而不合規船舶則必須承擔延誤與技術升級成本，形成正向的治理循環。然而，為降低產業的成本負擔，政府仍需透過混合型政策工具，例如稅賦優惠、低息貸款、環保設備補助與岸電費率調整等方式，協助本國船隊進行技術升級，使其在全球綠色航運競爭中保持韌性。

整體而言，技術強制化在臺灣港口治理中，展現出與其政策設計目標相符的制度運作特徵。未來若能結合智慧監測、風險預警與跨部門合作，以提升 PSC 的精準度與效率，將有助於臺灣在國際海事安全與環境保護領域中維持更高的治理水準與國際聲望。

陸、結論與建議

6.1 結論

本研究從政策推動技術強制化的視角，分析了 MARPOL 與 SOLAS 公約對臺灣港口安全的影響，主要發現如下：

1. 技術強制化可作為理解港口安全治理的重要政策分析視角：

本研究之實證分析顯示，臺灣港口國管制(Port State Control, PSC)檢查結果中，高風險船舶(特別是高船齡船舶)之留置率顯著高於整體平均水準，其風險分布方向與國際海事法規所設定之技術強制化政策目標呈現一致性。此一發現有助於說明 PSC 制度在港口治理實務中，可能具備風險篩選與行為誘導之制度功能，並支持將技術強制化視為分析港口安全治理運作邏輯的有用政策視角。然而，本文之結果仍應理解為制度運作層面的關聯性觀察，而非對技術強制化政策成效之因果證明。

2. PSC 是技術強制化的關鍵執行者：

我國 PSC 的機制是國際技術標準國內化的核心環節。透過對低硫燃油、脫硫塔和壓艙水管理系統等技術的重點檢查，確保了船舶在進入臺灣港口時，必須符合最新的污染防治技術要求。

3. 實施面臨多重挑戰：

在實施技術強制化時，面臨新技術的可靠性、國內法規與國際公約的銜接、以及 PSC 檢查員專業能力與資源配置等挑戰。這些挑戰若未能妥善解決，將可能影響政策的長期有效性。

6.2 政策建議：強化海事技術強制化之實施策略

基於本研究對國際技術強制化法規實施挑戰的分析，為有效應對海事安全與保安的發展趨勢，本研究提出以下四項政策建議，以強化我國在海事技術強制化政策上的治理效能：

1. 強化跨領域專業訓練，培養新世代 PSC 檢查主力

為縮小檢查員在面對新興技術時的專業鴻溝，應革新現行 PSC 檢查員的培訓體系：

- (1) 建立常態性技術進修機制：將船舶壓艙水管理系統(BWMS)、脫硫塔(Scrubber)等環保設備，以及船舶網路安全(Cybersecurity)等新興領域，納入常態性的跨領域專業訓練課程。
- (2) 深化產官學合作：積極與國際船級協會(Classification Societies)、主要設備製造商及學術單位建立合作培訓機制，確保檢查員能掌握最新的技術原理、故障模式及判斷標準，進而提升第一線執法的專業性與權威性。

2. 建構彈性法規調適機制，加速法規本土化轉譯

為應對 IMO 公約頻繁修訂的特性，我國法規體系應具備更高的敏捷性與彈性：

- (1) 設置快速反應小組：針對國際公約的重大修正，建立跨部會/機關的法規快速反應與研擬機制，縮短國際標準轉化為國內法規(子法、檢查指南)的時間。
- (2) 鼓勵替代性技術方案：在符合國際公約基本安全與環保目標的前提下，國內法規應保留適當的彈性空間，接受和鼓勵航運業者採用經 IMO 認可的等效或

替代性技術方案(Alternative Arrangements)，促進國內航運界的技術創新。

- (3) 優先完善新興法規：優先針對船舶網路安全、數據傳輸安全等新興、強制性領域，儘速完善相關的國內法規與配套檢查指南，以符合國際最新要求。

3. 全面推動 PSC 檢查數位化與智慧化(Smart PSC)

導入先進技術是提升 PSC 執法效率與準確性的必然趨勢：

- (1) 發展高風險船舶精準篩選模型：積極開發並應用「智慧 PSC」(Smart PSC)系統，利用大數據、人工智慧(AI)與物聯網(IoT)技術，整合分析船舶的歷史檢查數據、AIS 軌跡、船級社報告、設備運行監測數據等資訊。
- (2) 實施風險導向檢查策略：系統應能即時運算出高風險船舶名單，輔助檢查員進行精準的篩選與鎖定。同時，逐步發展非現場檢查(Remote Inspection)的可行性，將有限的人力資源集中投入於最具潛在風險的船舶上，以提升整體檢查效率與準確性。

4. 積極參與國際標準制定，爭取國家技術話語權

為確保國際法規的制定能夠符合我國實務執行上的可行性與合理性，我國應深化國際參與：

- (1) 強化 IMO 參與力度：應更積極地參與國際海事組織(IMO)下屬的海事安全委員會(MSC)與海洋環境保護委員會(MEPC)等重要委員會的工作。
- (2) 輸出實施經驗與技術需求：在國際場域中，主動分享我國在實施 MARPOL、SOLAS 等公約的具體經驗、技術挑戰與創新做法，藉由積極發聲，在國際標準的制定過程中反映國內實施成本與技術需求，以爭取對我國航運有利的技術話語權。

6.3 未來研究方向

基於本研究對國際海事法規技術強制化與港口安全的探討，未來研究可針對以下關鍵、新興議題進行更深入的分析：

1. 綠色航運轉型與新興燃料安全議題

隨著全球航運業邁向脫碳目標，液化天然氣(LNG)、甲醇、氨燃料等新興或低碳燃料的使用將成為主流。因此，未來研究應探討：

- (1) 新興燃料在港口端的基礎設施與安全標準：分析臺灣港口為配合新興燃料船舶(如 LNG 動力船)靠泊及燃料補給(Bunkering)所需的儲存設施、操作規範及應急管理標準，並評估其對港口與周邊環境安全的影響。
- (2) 新興燃料的技術操作與人員培訓：探討 IMO《國際氣體燃料船舶安全章程》(IGF Code)等法規對船員和港口操作人員在處理和儲存高風險燃料時的安全操作程序、風險評估(HAZID/HAZOP)與緊急應變能力的要求，並評估臺灣的符合程度。

2. 技術強制化政策的成本效益與市場影響評估

將政策的經濟合理性與市場競爭力納入考量：

- (1) 技術強制化政策的成本效益分析：量化分析船舶採用新技術(如 BWMS、脫硫塔、未來氨燃料引擎等)的資本支出(CAPEX)與營運成本(OPEX)，並將其與政策所帶來的港口環境效益(如空污減量、生態保護)進行貨幣化比較，以評估政策實施的經濟合理性。
- (2) 政策對航運供應鏈的影響：分析國際技術強制性法規對臺灣國籍船隊的結構調整、港口競爭力以及貨運成本的影響。

3. 港口國管制(PSC)執法品質的量化與優化研究

為避免使用主觀的問卷與訪談，未來研究可採用客觀數據分析方法來探討 PSC 檢查員的專業能力：

- (1) PSC 檢查結果的非均質性分析：蒐集並分析不同 PSC 檢查員在檢查新技術項目(如 BWMS 系統、網路安全文件)時，缺失項目的分布、重複檢查的結果差異或留置率的波動，藉此間接量化評估檢查員在面對新興技術規範時的專業認知與執法標準的一致性(或稱非均質性)。
- (2) 檢查員培訓與檢查效率的關聯性：建立檢查員的技術培訓時數/專業證照資料庫，並將其與其平均檢查時間、有效留置率等指標進行迴歸分析，以科學方法驗證專業培訓對提升執法效率與品質的助益。

4. 網路安全技術強制化對港口安全的影響

此研究方向應擴大對技術面與管理面的探討：網路安全技術強制化對港口營運與供應鏈中斷的風險評估：隨著 SOLAS 公約將網路安全納入安全管理體系(ISM Code)，未來可研究船舶網路安全技術的強制性要求對臺灣港口自動化營運、海事資訊交換系統(MIS)與物流供應鏈帶來的技術挑戰與安全機遇。

參考文獻

1. Endres, A. (2018). International environmental law: The MARPOL Convention and the control of ship pollution. Springer.
2. International Maritime Organization. (2023a). MARPOL and its Annexes.
[https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx)
3. International Maritime Organization. (2023b). SOLAS Convention.
[https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-\(SOLAS\),-1974.aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-(SOLAS),-1974.aspx)
4. International Maritime Organization. (2020). IMO and the Sustainable Development Goals.<https://www.imo.org/en/About/Pages/SDGs.aspx>
5. International Maritime Organization. (2020b). Sulphur 2020 – Cutting sulphur oxide emissions.<https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx>
6. International Maritime Organization. (2023c). Decarbonization of shipping.
<https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Decarbonization-of-shipping.aspx>
7. Chen, X., Wang, Y., & Li, Z. (2020). Environmental impact of the “Sanchi” collision: Lessons learned from the condensate spill accident. Marine Pollution Bulletin, 154, 111052.
8. International Maritime Organization. (2021). Maritime cyber risk management in safety management systems (MSC.428(98)).
<https://www.imo.org/en/OurWork/Security/Pages/Cyber-security.aspx>
9. Lin, Y.-J., Chen, S.-H., & Hsieh, S.-L. (2021). Evaluating potential invasive species risks along the coastline of Taiwan: A focus on ballast water discharged near ports. Marine Pollution Bulletin, 167, 112328.
10. 王毓正、劉大綱、邱永芳、黃茂信(2017)。臺灣港灣壓艙水污染問題管理制度之研究。《港灣季刊》，108，1–16。
11. Linder, S. H., & Peters, B. G. (1989). Instruments of government: Perceptions and contexts. Journal of Public Policy, 9(1), 35–58.
12. Howlett, M., & Ramesh, M. (2003). Studying public policy: Policy cycles and policy subsystems. Oxford University Press.
13. Ashford, N. A., & Hall, R. P. (2011). Technology, globalization, and sustainable development: Transforming the industrial state. Yale University Press.
14. Bach, H., & Hansen, T. (2023). Flickering guiding light from the International Maritime Organisation's policy mix. Environmental Innovation and Societal Transitions, 46, 100687.
15. Tokyo MOU. (2023). About Port State Control.https://www.tokyo-mou.org/about_psc/
16. Cariou, P., & Wolff, F.-C. (2015). Port State Control and the quality of ships. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 77, 1–13.

17. Cariou, P., Mejia, M. Q., & Wolff, F.-C. (2007). An econometric analysis of deficiencies noted in Port State Control inspections. *Maritime Policy & Management*, 34(3), 243–258.
18. Cariou, P., Mejia, M. Q., & Wolff, F.-C. (2008). On the effectiveness of Port State Control inspections. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(3), 491–503.
19. Cariou, P., Mejia, M. Q., & Wolff, F.-C. (2009). Evidence on target factors used for Port State Control inspections. *Marine Policy*, 33(4), 847–859.
20. Heij, C., & Knapp, S. (2019). Shipping inspections, detentions, and incidents: An empirical analysis of risk dimensions. *Maritime Policy & Management*, 46(7), 874–898.
21. Li, K. X., & Zheng, H. (2008). Enforcement of law by the Port State Control (PSC). *Maritime Policy & Management*, 35(1), 61–71.
22. Biočić, T., Frančić, V., Hasanspahić, N., & Jolić, N. (2023). The analysis of the deficiencies resulting from Paris MoU PSC inspections. *Naše More*, 70(4), 194–202.
23. Almorza, D., Prieto, J. M., Amor-Esteban, V., & Turias, I. J. (2024). Additional risk classifications for PSC under Paris MoU using multivariate techniques. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(4), 533.
24. Bei, H., Yang, F., Wang, W., Liu, X., & Zhang, Y. (2024). Maritime safety through multi-source data fusion: An AdaBoost-based approach for predictive ship detention by Port State Control. *Maritime Policy & Management*.
25. Jiang, H., Chen, Y., Lou, N., Zhang, T., Wang, X., & Xu, Q. (2023). Dynamic evolution analysis of ship Port State Control inspection based on Bayesian networks. In *2023 International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)* (pp. 1–7). IEEE.
26. Knapp, S., & Franses, P. H. (2006). Effect and improvement areas for Port State Control inspections to decrease the probability of casualty. Working paper.
27. Knapp, S., & Franses, P. H. (2007). A global view on Port State Control: Econometric analysis of differences across regimes. *Maritime Policy & Management*, 34(5), 453–482.
28. Prieto, J. M., Amor, V., Turias, I. J., Ruiz-Aguilar, J. J., & Porras-Bernárdez, F. (2021). Evaluation of Paris MoU maritime inspections using a STATIS approach. *Mathematics*, 9, 2092.
29. Wang, W., Jian, H., & Wang, J. (2025). Hazards in the port system and their impact on safety performance. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*.
30. Yan, R., & Wang, S. (2019). Ship inspection by Port State Control—Review of current research. In *International Conference on Transportation Systems* (pp. 233–241). Springer.
31. Yilmazel, M., & Asyali, E. (2005). An analysis of Port State Control inspections related to the ISPS Code. Technical report, Transportation Research Board.
32. 交通部航港局(2019)。推動船舶使用低硫燃油 Q&A。
<https://www.motcmpb.gov.tw/Information/Detail/c0ff56a6-99af-4463-8f23-9265bb07f52d?SitId=1&NodeId=103>
33. 交通部航港局(2023)。港口國管制。
<https://www.motcmpb.gov.tw/Convention?sitId=1&nodeId=10461>
34. 交通部航港局(2024)。《中華民國港口國管制 113 年度報告》。(政府公開資料)
35. 財團法人驗船中心，網址：<https://www.crclass.org/>，最後瀏覽日期：2025 年 10 月 27 日。
36. 國際海事組織(IMO) 網站：www.imo.org，最後瀏覽日期：2025 年 10 月 27 日。
37. 挪威船級社(DNV) 網站：www.dnv.com，最後瀏覽日期：2025 年 10 月 27 日。
38. 美國船級社(ABS) 網站：www.eagle.org，最後瀏覽日期：2025 年 10 月 27 日。
39. 中國驗船中心(China Corporation Register of Shipping, CR) 網站：www.ccrs.org.tw，最後瀏覽日期：2025 年 10 月 28 日。
40. DNV (2024). Energy Transition Outlook 2024: Maritime Forecast to 2050.