

引領大型貨櫃船進港之風險評估—以基隆港為例

Risk Assessment on Piloting Inbound Large Container Ships in Keelung Harbour

黃智泉 (Chih-Chuan Huang)¹、翁順泰 (Shuen-Tai Ung)^{2*}

摘要

本文參考 IMO 正規安全評估方法，以引領基隆港大型貨櫃船進港為研究案例，了解其風險是否在可接受範圍之內。研究中識別出引領過程可能遭遇之危險，以問卷收集 10 位執業引水人意見，求得風險矩陣之頻率指數、嚴重性指數以及風險指數，發現風險雖皆在容許範圍內，但仍應盡可能且實際地將風險降低(as low as reasonably practicable, ALARP)至可接受的合理範圍。研究中所識別出的危險及其風險管控措施可供後續研究參考，而以風險排序後，挑選最高的人員落海風險項目為例，建立故障樹分析(fault tree analysis, FTA)情境，計算頂端事件(Top Event)發生機率，由風險管控措施前後之風險機率降幅，比較風險管控措施成本效益高低，研究歷程顯示 IMO 正規安全評估方法分析引領船舶進港之議題可行，並可供相關單位實施港口風險評估時採用。

關鍵字：風險評估、正規安全評估、引水作業

Abstract

The paper refers to IMO Formal Safety Assessment methodology for the risk

¹ 國立臺灣海洋大學商船學系碩士班研究生，現為基隆港引水人。

^{2*} 通訊作者，國立臺灣海洋大學商船學系教授；聯絡地址：202基隆市北寧路2號商船大樓309A；電話: 02-24622192轉3020；E-mail: shuentai@mail.ntou.edu.tw。

assessing of piloting a large container vessel entering Keelung Port and figures out whether the risk is within the acceptable level. The study identified the possible hazards that may be encountered in piloting large container ships entering the port, and collected opinions from 10 practicing pilots by the questionnaires survey to obtain the frequency, severity, and risk indices of the piloting operation risk matrix. The result of study revealed that the identified risks are all within ALARP (as low as reasonably practicable) tolerable zone, but risk control measures are still required to reduce the risk further down to an acceptable level. Those identified hazards and risk control measures could be a reference for further study and the highest risk item is selected as an example to establish a Fault Tree Analysis (FTA) calculating the occurrence probability of Top Event so as to appreciate the current risk levels of the scenarios. This is followed by the evaluation of risk reductions resulting from the implementation of risk control options and cost-benefit assessment. Finally, the study process shows that the IMO formal safety assessment is feasible to analyze issues of piloting inbound ships and can be used by relevant authorities when implementing risk assessments.

Keywords: Risk assessment, Formal safety assessment, Pilotage operation

壹、緒論

近年來航運業競爭激烈，為降低營運成本，貨櫃船大型化突破 20,000 TEUs 超大型貨櫃船新船陸續下水，使得海運公司將船隊替代配置新超巴拿馬極限型貨櫃船(Neo Panamax, 8,000-13,500 TEUs)由各區域主港(hub)下放至次一級港口。儘管港口碼頭改建、靠泊設施更新及水深浚深等，使更大的貨櫃船舶得以安全裝卸貨作業，但大型貨櫃船舶進出港作業操船水域可

運用之空間尺寸仍然不變，意味著操船的困難度增加，提高了可能發生海事的風險。

在此情況下，當港口規劃新船席和新船型靠泊時，關於整個進出港作業，應有適當且完整之風險評估，來評斷外部環境如風力、潮流、海浪的影響、靠泊輔助能量如拖船，或其他各種危險因素等，此種船型及其所靠泊碼頭的進出港操船作業是否仍在安全作業的範圍之內。至於如何維持安全作業，Hensen (2018)說明安全是經由各種有足夠功能的風險管控措施以去除意外事件，故為達到此目的應有一定

的方法來檢視作業安全是否在可接受的程度，以及評量風險管控措施之成效。

依據 ISM Code 1.2.2 (IMO, 2008) 之法規要求，所有已識別出涉及船舶、人員及環境之風險，須要進行風險評估並建立適當的防護措施，所以當船舶在進出港時，從引水人上船一直至離船的這段時間，船上主管人員除了實施駕駛臺資源管理 (Bridge Resource Management) 外，ICS (2016) 建議船上人員在航行計畫中實施的引水作業時，應在已符合所建立的安全標準規範之內執行，亦即船上人員應做相對應之風險評估。

然而航運相關管理人員在引領船舶進港作業方面，卻未有相對應要求實施風險評估之海事法規，在港區作業安全理應由港口管理機關如航港局，或港口營運機關如臺灣港務股份有限公司等監督，而 IMO 的 Formal Safety Assessment (FSA) (IMO, 2018) (以下簡稱為 IMO FSA) 方法正是以此為目的，以利相關主管單位制定法規或營運政策。本文即針對評估新式大型貨櫃船舶進港是否能夠接受議題，以國際海運社會承認之制式方法，理性、透明且有系統地實施風險評估，使得研究結果有足夠公信力，日後可將此研究方法應用在相關議題，亦可探討該港所能容納各式船舶的最大船型。

因此本研究藉由 IMO FSA 中：識別風險 (Identification of Hazards)、風險評估

(Risk Assessment)、風險管控措施 (Risk Control Option)、成本效益評估 (Cost-Benefit Assessment) 及決策建議 (Recommendation for Decision-Making) 等五項步驟之風險評估方法，來評估引領大型貨櫃船舶進港作業之各樣風險 (Risk)，藉此亦可識別出在作業中各階段之可能遭遇危險項目 (Hazard)，以 FTA (Fault Tree Analysis) 故障樹分析風險情境，量化實施管控風險選項 (Risk Control Option/RCO) 前後之風險機率降幅 (risk reduction)，以評估在現行標準下對船舶的操作限度是否在 ALARP (As low as reasonably practicable) (UK HSE, 2023) 合理範圍之內，其所得研究結果提出建議可供相關管理單位修訂規定，及引水人辦事處參考以增進操船作業安全。

此外由於篇幅關係，本文識別出可能遭遇危險及提出風險管控措施後，僅就風險指數最高之〈人員落海〉一項風險演示 IMO FSA 流程，闡述此研究方法之可行性，其他風險部分未來仍可進一步研究分析。

貳、文獻回顧

進港船舶在基隆港之引水作業始於到港前以無線電 VHF 頻道與基隆港引水公會聯繫申請引水作業，引水人搭乘引水艇出發至登輪地點登輪，直至船舶於指定船席完成靠泊，引水人下船為止。於此期

間引水人及被引航船舶船長之共同目標皆為安全、有效率地完成靠泊作業；另外相對於進港作業而言，出港作業是由靜止狀態改變成運動狀態，而操作的水域也是由狹窄到寬闊空間，所以在相同的外力環境之下，進港作業的風險通常會高於出港作業。

此種情況也反映在港口船舶操船作業安全研究上面，如袁順光(2010)，其研究以當時所能引領的各類型最大船舶所做之船舶進港安全評估方法，其研究為分成兩部分，分別為引水人登輪地點至進出防坡堤口是否能夠安全通過；以及通過堤口後之其衝止距是否在安全範圍之內，藉以判斷能否安全引航。然而經過多年來貨櫃船舶持續大型化、港口設施及港勤拖船裝備改善等等，就來港貨櫃船而言，已經從該研究的貨櫃裝載數目 4,252 TEUs 到研究期間的 11,167 TEUs，船舶全長也從 268.8 公尺，增加到目前的 330 公尺級距，所以應有重新評估之需求。

與基隆港進港相關風險評估研究尚有 Nieh et al. (2019)，該研究以 AIS (Automatic Identification System)大數據資料庫之進港航跡，分類小型船舶(船長 160 至 220 公尺)及大型船舶(220 至 350 公尺)，區別靠泊位置在內港(W19 碼頭以西)、西 19 碼頭或內港以外之西岸碼頭，再依季節夏季(4 月至 9 月)及冬季(10 月至 3 月)來

分析船舶進港動態模式及船位偏移量，藉此來評估船舶進港風險，惟該研究僅探討船位偏移風險議題，尚未完整評估引水作業程序。

而其他與港口操船安全相關的研究，多數是以 AHP (Analytic Hierarchy Process) 層級分析法為研究方法，而非以 IMO 之 FSA 架構來研究，如廖永發(2007)，以 AHP 層級分析法探討大型船舶安全靠泊作業各項因素之重要性，其中<船舶操縱性能>一項有最高之權重 0.414，其次為<地理環境條件>之權重 0.214，而在整體影響因素之重要性分析方面，以<引水人>一項達 6.1176(該文採用 Likert 量表共 1 至 7 個等級)最為重要，該研究排序各項因素重要性，能使操船者瞭解各項影響因素，至於在風險管控措施方面，則尚未進一步分析討論。

劉正恩(2008)是以 AHP 層級分析法求得進出港口船舶碰撞事故人為因素之權重資料，以乳酪理論為研究方法，建立碰撞事故防禦層，與 FSA 方法之 RCO 概念相似，其評估之風險在於碰撞意外事故，但未涉及進港引航過程中其他風險，如人員落海或是帶纜人員受傷等情況。

孫暉炫(2008)比較各種風險管理論述，FSA 歷史背景介紹，但未完全採用其方法研究，使用以敘述統計分析嚴重性指數、交叉分析、風險矩陣(5x5)分析方法，自訂風險等級區間，找出高風險項目及對應建

議，後續在風險管理措施之成效檢驗方面，需要進一步分析評估。

陳正華、方泉根(2005)及 Hu et al. (2006)研究中，採用 FSA 方法就上海港船舶引航安全進行調查，統計 1995 年至 2003 年事故後，設計問卷收集上海港引航員之意見，了解不同引航區段航行或船舶靠離該區段泊位時之風險程度，進而提出建議。其研究之範圍包括整個引航範圍及各式船型船舶，在風險方面著重於航道性質與交通密度問題，與本研究之評估單一船型、指定泊位之引水作業安全及可行性有所不同。

在引航作業人員安全方面，引水人員受傷及人員落海事故皆屬於重大事故，近年來於 2020 年發生和平港引水人登輪時遭船舶夾傷(國家運輸安全調查委員會，2023a)，以及 2022 年於臺中港發生引水人登貨櫃船時落海罹難之不幸意外事件(國家運輸安全調查委員會，2023b)，突顯了引水人登輪安全之重要性，值得深入分析以提出解決方案。

關於 FSA 之實施，IMO 於 2002 年發佈 MSC/Circ.1023 MEPC/Circ.392 「Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO Rule-Making process」(5 April, 2002)，定義 FSA 評估所需之 5 個步驟，其後歷經 MSC/ Circ.1180 MEPC/Circ.474 (25 August, 2005) 增訂 3.2.3 及 3.2.4 章節，強調 FSA 方法之主動

性，可補足歷史資料中罕見事件之分析，並考量近期發展對歷史資料的有效性的影響；至 2013 年 MSC-MEPC.2/ Circ.12 提出「Revised guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process.」修正版，於 2015 年提出 MSC-MEPC.2/ Circ.12/Rev.1.版本，針對風險管控措施(RCO)提出 SMART (specific, measurable, achievable, realistic, time-bound) 原則的檢驗方法；至 2018 年更新為 MSC-MEPC.2/ Circ.12 /Rev.2.版本，於 FSA 研究審查章節中增列之流程圖，本研究即以此最新之 2018 年版本使用為研究方法，具備前述各版本之所有特色，以符合 IMO FSA 的原則。

IMO FSA 自從 2002 年初版後，Kontovas (2005)及 Kontovas and Psaraftis (2009)針對 FSA 提出使用同樣的方法，卻有不同的結果，然而不同的結果爭議，會使決策過程更透明化；另外 IMO FSA 中運用頻率(frequency)基準與計算風險時的機率(probability)是有所不同，尚未發生的頻率並不代表沒有發生的機率，而在識別危險(hazard)階段，若還有未被識別出的危險，對 FSA 的結果可能會有極大的影響。研究中所指出之頻率及機率差異，在實施 FSA 研究時，因採取專家意見時，專家回饋不易以機率表示，故以機率統計，但回歸 FTA 計算時，仍應轉換成機率以利計算；此外建議專家意見人數應有 10 人以上，

以避免極端值意見影響結果，其專家人數之建議可供借鏡。

其他運用 FSA 的研究，如丹麥的 IMO MSC 83/INF.8 - FSA container vessels Details of the Formal Safety Assessment (IMO, 2007) 針對總噸位 100 噸以上的各類型貨櫃船實施 FSA 評估，研究中採用 1,706 TEUs 及 4,444 TEUs 兩型貨櫃船為研究標的，使用失效模式效應與關鍵性分析法(Failure Mode, Effects and Criticality Analysis, FMECA)及事件樹(Event Tree Analysis, ETA)方法分析，其 ALARP 標準為 $1.0E-3 \sim 1.0E-6$ ，研究範圍包括：在碼頭裝卸貨、在港口/限制水域/沿岸水域及大洋航行，研究結果提出風險管控措施(RCO)成效，以供決策判斷。該研究完整實施 FSA 步驟，惟研究範圍廣泛，涵蓋船舶航行各個階段，所需時間及成本極大，若以個人研究資源，宜限縮範圍，專注在單一主題為宜。

Wang (2001)提及 UK MCA 說明 FSA 的優點為：全面性的處理所有安全問題、考量成本有效性以獲得最大利益、主動探索未被發現的危險、符合對風險嚴重性所要求標準之信心以及理性看待科技變化所衍生之風險。另外也提出 the Cost of Unit Risk Reduction (CURR)「降低每單位風險成本」概念，以利比較風險管控選項(RCO)之優先順序。此 CURR 概念可運用在當因

風險造成的損失無法明確估算時，即可利用降低風險之成本來評判 RCO 優劣。

Hermanski and Daley (2010)研究表示 FSA 於國家立法層面上可以作為支持決策過程的工具，並在新船設計階段在可負擔的成本範圍之內最佳化風險與安全，適用於為特定船型或是通用船型，研究單一船舶系統或作業分析；然而 FSA 方法亦會有以下爭論，如缺乏 IMO 建議的風險標準、研究費時會拖慢決策過程(大部分研究會超過一年)、研究應該獨立且透明不然有可能會被操縱方向(風險、成本、不確定性應明確說明)、成本效益會因時間與地點而異、缺乏事故歷史資料故需以專家意見估計風險水平/機率/成本效益等數據、以及需要較高成本來實施此類研究。故實施 FSA 時，其研究目標宜限定合理範圍，以爭取時效及成本。

綜合上述各種考量，本研究採用 FSA 方法的理由為：正規安全評估提供了結構化、系統化的評估步驟，能夠客觀對待假設風險及識別危險的不確定性，而其研究結果可量化排序，理性地以成本效益(Cost-Benefit Assessment)比較風險管控選項(RCO)之成效優劣，並能以透明的流程來建議適用的法規修訂或作為參考資料制定作業程序，同時研究範圍應控制在首要關切的主題上，以方便掌控研究時程。

參、方法論

以FSA步驟為研究架構，首先定義研究標的及研究範圍：統計2021年整年度進基隆港靠泊西22/23碼頭之所有10,000

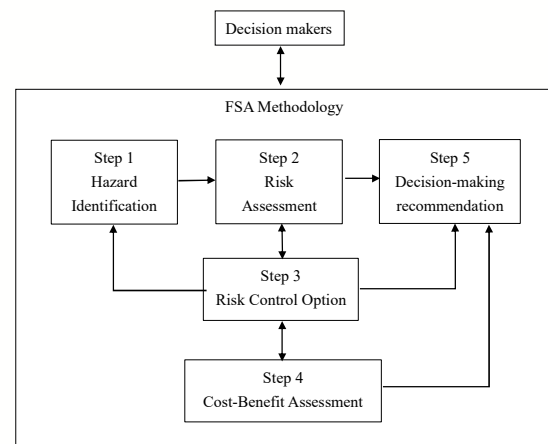
TEUs級大型貨櫃船航次(共計42航次)及各型船長寬尺寸及進港時吃水後，挑選出適合研究之代表船型為雙島式/ LOA: 330公尺/ B:48.3公尺/ D: 12.0公尺(略大於到港平均吃水11.14公尺)(如圖1所示)。



資料來源：本研究拍攝。

圖 1 研究船型

本研究將整個進港操作過程區分為三階段，分別為：第一階段：<引水人登輪地點>至<防波堤>、第二階段：<防坡堤>至<迴船池>、第三階段：<迴船池>至<W22/23碼頭>，進行FSA方法的5項步驟：識別風險(Identification of Hazards)、風險評估(Risk Assessment)、風險管控措施(Risk Control Option/RCO)、成本效益評估(Cost-Benefit Assessment/CBA)及決策建議(Recommendation for Decision-Making)，其流程圖如圖2所示。



資料來源：IMO FSA (2018)。

圖 2 IMO FSA 流程圖

3.1 識別風險 (Identification of Hazards)

以實務經驗配合腦力激盪 (Brain Storming) 方法將引領船舶進港作業各個階段過程中可能發生之危險 (Hazard)，列出共計 11 類事故、40 項危險，以此製作風險評估各項事故的頻率 (Frequency) 及嚴重性 (Severity) 問卷 (問卷 1/風險評估問卷)，並提供船舶明細、碼頭設施及環境資料 (港研中心氣象資料)，採用專家意見方法 (IMO FSA/3.3 Expert judgement)，邀請 10 位臺灣港口之引水人填寫「問卷 1-風險評估問卷」，分別為基隆港 5 位、臺北港 1 位、臺中港 1 位、麥寮港 1 位、高雄港 2 位，引水人年資範圍為 4 到 10 年，挑選要件為曾經在其擔任船長期間有過 ISM code 的 risk assessment/Resolution MSC.273(85) 作業經驗，了解風險評估過程和風險矩陣，並具有引水業界的操作知識背景。

此風險評估問卷主要調查之項目為事故可能發生頻率 (Frequency) 及嚴重性 (Severity)，乃採用 IMO FSA (2018) (Appendix 4) 指數量表，來量化事故之頻率及嚴重性，此外問卷中亦有欄位供填寫問卷者增列在初始階段未識別出的危險，在最後共增列 2 項危險。

此外此問卷須考量各專家意見是否偏離程度太高，以一致性係數 W (算式 1) (IMO FSA/Appendix 9, 2018)，數值範圍自

0 到 1 (完全一致)，來判斷專家意見一致性程度，檢視此問卷之可信度，而一致性指數代表程度，可參考表 1 中各區間所代表之個別意義。

$$W = \frac{12 \sum_{i=1}^{I-1} \left[\sum_{j=1}^{J-i} x_{ij} - \frac{1}{2} J(I+1) \right]^2}{J^2(I^3-I)} \dots\dots\dots (1)$$

J：參與意見調查之專家人數

I：可能發生之事故數目

W：一致性係數

表 1 一致性指數量表

Concordance coefficients		
W	>0.7	Good agreement 看法相近
W	0.5-0.7	Medium agreement 看法無顯著不同
W	<0.5	Poor agreement 看法差異大

資料來源：IMO FSA/Appendix 9 (2018)。

3.2 風險評估 (Risk Assessment)

風險係數 (Risk Index/RI) 是由頻率指數 (Frequency Index/FI) (表 2) 和嚴重性指數 (Severity Index/SI) (表 3 及表 4) 經風險矩陣 (Risk Matrix) (表 5) 求得，其中在風險中涉及油污染事故之嚴重性 (Severity) 則採取表 4 專用之油污染度量。依 IMO FSA/Appendix 4 (2018) 中之說明，風險係數之運算方式為：

$$\text{Risk} = \text{Probability} \times \text{Consequence} \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{Risk} = \text{Probability} \times \text{Consequence} \dots\dots\dots (3)$$

在<算式3>中，Log (Risk)即為Risk Index風險指數(RI)、log (Probability)為Frequency Index 頻率指數 (FI)、log (Consequence)為Severity Index嚴重性指數 (SI)，故 $RI=FI+SI$ 。在收集專家們對於頻率指數(FI)和嚴重性指數(SI)的意見後，採用其頻率指數(FI)和嚴重性指數(SI)之平均

值，以求出風險指數(RI)。以危險項目<1.1.1 惡劣天候>為例(請參見附錄一)，FI平均值為2.9、SI平均值為2.7，則該項之 $RI=FI+SI=2.9+2.7=5.6$ 。再從最後考量的陳述句中，挑選最後考量的陳述句填入。反覆操作，剩餘的陳述句就是普通。

表 2 嚴重性指數量表

嚴重性指數				
SI	嚴重性	對人員安全的影響	對船舶的影響	S (Equivalent fatalities)
1	輕微	單一或輕微受傷	局部設施損壞	10^{-2}
2	明顯損害	多處或嚴重受傷	非嚴重船舶受損	10^{-1}
3	嚴重損害	單一死亡或多處嚴重受傷	船舶嚴重損壞	10^0
4	災難事故	多人死亡	船舶全損	10

資料來源：IMO FSA/Appendix 4 (2018)。

表 3 頻率指數量表

頻率指數			
FI	頻率	定義	F (per Ship year)
7	時常發生	每個月有一艘船會發生	10
5	有可能發生	每年在 10 艘船之中有一艘船會發生	10^{-1}
3	不太可能發生	每年在 1000 艘船之中有一艘船會發生	10^{-3}
1	非常不可能發生	每 20 年在 5,000 艘船之中有一艘船會發生	10^{-5}

資料來源：IMO FSA/Appendix 4 (2018)。

表 4 油污染嚴重性量表

油污染嚴重性指數		
SI	Severity	DEFINITION
1	Category 1	Oil spill size < 1 tonne
2	Category 2	Oil spill size between 1-10 tonnes
3	Category 3	Oil spill size between 10-100 tonnes
4	Category 4	Oil spill size between 100-1000 tonnes
5	Category 5	Oil spill size between 1000-10000 tonnes
6	Category 6	Oil spill size > 10000 tonnes

資料來源：IMO FSA/Appendix 4 (2018)。

表 5 風險矩陣

FI	Frequency	Risk Index (RI)			
		Severity (SI)			
		1	2	3	4
		Minor	Significant	Severe	Catastrophic
7	Frequent	8	9	10	11
6	between 7 and 5	7	8	9	10
5	Reasonably probable	6	7	8	9
4	between 5 and 3	5	6	7	8
3	Remote	4	5	6	7
2	between 3 and 1	3	4	5	6
1	Extremely remote	2	3	4	5
		Intolerable	ALARP	Acceptable	

資料來源：本研究整理。

在統計「問卷1-風險評估問卷」資料後，增列專家建議之2項危險，以風險矩陣求得之風險指數(Risk Index/RI)，再挑選有超出 ALARP (As Low As Reasonably Practicable)(如圖3所示)範圍之風險項目或是風險指數最高之項目實施進一步的評估。

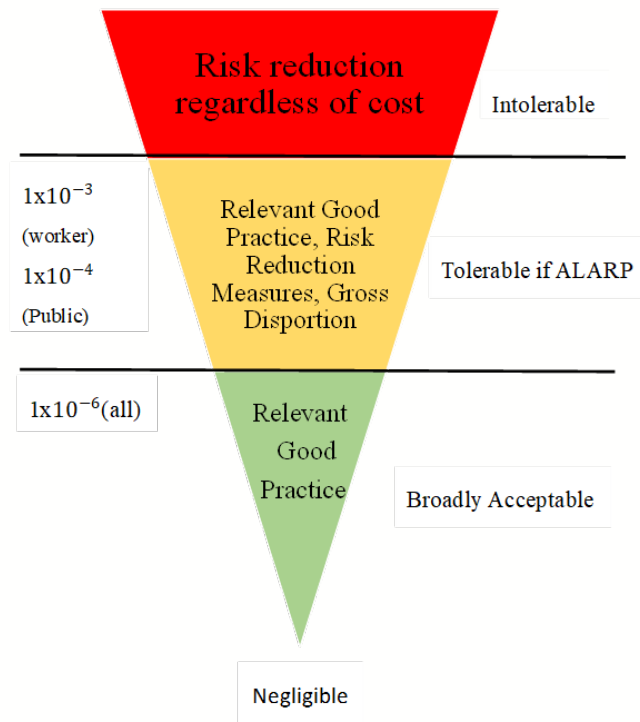
ALARP範圍顯現於風險矩陣的方法，是由單一死亡事故(single fatality)在UK HSE可接受的發生頻率之ALARP界限介於 1×10^{-3} 至 1×10^{-6} 之間 (IMO FSA/Appendix 5, 2018)，在UK HSE (2023) 的ALARP定義中，上限標準 1×10^{-3} 是個人風險中之船員(crewmember)的部分，其他如旅客、陸地上第三方人員等，上限標準則為 1×10^{-4} ，但本研究所探討之作業僅與實際參與工作人員有關，故採取

1×10^{-3} 之標準。而在IMO FSA中，單一死亡事故之嚴重性指數為SI=3(表2)，可接受的發生頻率上界限為 1.0×10^{-3} ，相對應於頻率指數為FI=3，故風險指數RI=6，意即風險指數RI<7為ALARP的上界限(Upper Limit)；而可接受的發生頻率下界限為 1.0×10^{-6} ，相對應於頻率指數為FI=1，配合單一死亡事故之嚴重性指數為SI=3，得出風險指數RI<4，意即風險指數RI>4為ALARP的下界限(Lower Limit)，故得知ALARP範圍為 $4 < \text{風險指數(RI)} < 7$ 。由於風險矩陣(Risk Matrix)之座標參數是SI與FI匯集得出RI，矩陣中每一格代表一個單位的RI，例如RI=6代表著落在此格中 $6 \leq \text{RI} < 7$ 之範圍。故上述ALARP範圍為 $4 \leq \text{RI} < 7$ 在風險矩陣中代表意義分別為RI=4及RI=6這兩格的位置，依此可以在矩陣中區分ALARP

紅、黃、綠不同顏色之區間。

在評估所有風險之風險係數(RI)後，可排序(ranking)將需要進一步分析的風險挑選出來做Fault Tree Analysis(FTA)故障樹分析方法。而採用FTA方法之理由為在前一步驟已有識別出的風險及危險，得依此向下探討造成的原因，採用FTA方法之

理由為在前一步驟已有識別出的風險及危險，得依此向下探討造成的原因，而從每項危險及其下一層的事件可以看出造成此項危險的模式，這有利於對危險之間關係的理解，並了解危險導致頂端事件(TE)的邏輯和基本原因(Eswara, 2013)。



資料來源：UK HSE (2023)。

圖 3 ALARP

此外根據美國NASA之Fault Tree Handbook with Aerospace Applications (Vesely et al., 2002)，使用FTA方法在決策制定上有下列優點：

1. 了解導致頂端事件的邏輯
2. 可排序造成頂端事件的各項因素
3. 是主動預防頂端事件的工具
4. 可監控被分析系統的表現狀況

5. 減少及最佳化可用資源
6. 協助設計新系統
7. 可作為診斷工具來判別及修正導致頂端事件的原因

FTA方法是先清楚明確地定義頂端事件(Top Event)，針對該項風險以由上往下方式 (Top-down approach) 以演繹 (deductive)方法列出可能造成該項意外事故之危險，定義出造成事件的最直接的原因，以邏輯閘AND gate或OR gate方式連接同一階層各事件，然後以相同步驟，直至向下找到所有基本事件(Basic Event/BE)為止。

找出基本事件(BE)及其可能發生之機率後，以邏輯閘AND gate (算式4)或是OR gate (算式5)方式運算向上一層的機率，在歷經基本事件(BE)、中間事件 (Intermediate Event)等，逐層向上一路發展至頂端事件(TE)，便可求得頂端事件(TE)之可能發生機率。此外各個基本事件(BE)延伸至頂端事件(TE)即為一種該風險可能發生之情境，由此可瞭解FTA架構的風險模式組成。

AND gate 運算

$\Pr \{A \cap B\}$:

$$R = \overline{P_s} = \prod_{i=1}^n \overline{P_i} = \overline{P_1} \times \overline{P_2} \times \overline{P_3} \dots \times \overline{P_n} \dots\dots\dots (4)$$

OR gate 運算

$\Pr \{A \cup B\}$:

$$R = \prod_{i=1}^n P_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \overline{P_i})$$

$$R = 1 - (1 - \overline{P_1})(1 - \overline{P_2})(1 - \overline{P_3}) \dots (1 - \overline{P_n}) \dots\dots (5)$$

Pr：事件與事件組合發生之機率

A：事件 A

B：事件 B

$\Pr \{A \cap B\}$ ：事件 A 與事件 B 交集組合發生機率

$\Pr \{A \cup B\}$ ：事件 A 與事件 B 聯集組合發生機率

R：AND gate 或 OR gate 運算上層事件機率結果

P_i ：第*i*個單一事件機率

舉例說明計算方式如下：<BE6浪高大於4M>及<BE7 船舶重載吃水大於12M>為AND gate運算，之後再與<BE 8引水艇因浪高抬升高於主甲板>做OR gate運算，求得<IE 6 登輪(side door乾舷)過低>之發生機率。

- <BE6浪高大於4M>發生機率為：
2.3240E-02 = a
- <BE7 船舶重載吃水大於12M>發生機率為：2.0684E-02 = b
- <BE 8引水艇因浪高抬升高於主甲板>發生機率為：2.0882E-02 = c
- 所以<IE 6 登輪(side door乾舷)過低>發生機率為：1-(1-a*b)*(1-c) = 2.1353E-02

以此類推逐步計算FTA各階層項目，即可求得各項基本事件(BE)、中間事件(IE)以及頂端事件(TE)之發生機率

3.3 風險管控措施(Risk Control Option)

在前一步驟建立FTA架構後，便能列出可改善危險的各種風險管控選項(RCO)，並製作以事故風險發生頻率為主的「問卷2-實施風險管控選項前後之風險頻率評估問卷」，來收集專家(成員與問卷1相同)對於FTA架構中基本事件(Basic Event/BE)在實施相對應風險管控選項前後之發生頻率(per ship year)的意見，然後除以每年的到港次數將其轉換成機率後，以邏輯閘運算(算式4及算式5)由下往向上計算出中間事件(IE)和最終的頂端事件(TE)的發生機率，藉此得知實施風險管控選項前後風險機率降低的幅度(Risk Reduction)，以及各個風險管控選項的成效優劣。

此外此問卷2之頻率指數(FI)可結合前一份「問卷1風險評估」中統計之嚴重性指數(SI)，再以風險矩陣求得風險指數(RI)來評判實施風險管控選項(RCO)之後是否仍超出ALARP之容許上界範圍($RI > 7$)，超出者則應停止該項作業，直至有足夠的風險管控措施能夠將風險指數降至要求標準以下。最後再根據FTA情境的分析，實施風險管控措施的風險降低成效等，提出

有關建議作為研究結果。而在此步驟採用「問卷1風險評估」嚴重性指數(SI)以求得風險指數(RI)之原因為在實施風險管控措施之後難以估算損失金額節省成效，再者，在未實施風險管控措施時對於嚴重性評估已是可能發生的最嚴重情況，即便風險管控措施沒有任何成效，也不應大於此嚴重性程度。故以此第一次問卷之SI配合第二次問卷之FI，求得RI外，亦可評估RCO之效益為FI在RCO前後的變化，RCO前後之FI兩者則可推算採取風險管控選項前後對於RI風險指數的改善情況，來瞭解所採取的風險管控選項是否有效改善，並落在ALARP可接受之範圍內。

3.4 成本效益評估(Cost-Benefit Assessment/CBA)

依IMO FSA (2018)要求在此步驟應分五個階段實行：

1. 考量步驟2 (風險評估Risk Assessment)
中表列風險之可能發生頻率及嚴重性以定義需要考量風險等級之基本事件(base case)。
2. 瞭解步驟3 (風險管控選項Risk Control Options)定義之每一項風險管控措施(RCO)實施的成本與效益。
3. 估計所有風險管控選項(RCO)的相關成本及效益。
4. 估算及比較完成各項風險管控選項

(RCO)後，以降低每單位風險之淨成本來評估風險管控選項(RCO)的有效性。

5. 以風險管控選項(RCO)之成本效益來排序，以供在步驟 5 (決策建議 Recommendations for decision making) 時判斷，但應去除未具成本效益或實際不可行之風險管控選項。

其中估算風險管控選項(RCO)的有效性是以降低每單位風險之淨成本來評量，亦可稱為 CURR (Cost of Unit Risk Reduction) (Wang, 2001; Wang and Foinikis, 2001)，其中降低風險幅度(Risk Reduction)的部分，是在實施風險管控措施之前的原始情況(base case)，與在實施風險管控措施之後所得到的效益(benefit)，視為採取措施可以減少風險損失的金額，或是降低風險的機率，而在本研究乃採用降低每單位風險機率之成本來分析成本效益評估。

$$CURR_i = \frac{C_i}{RR_i} \dots\dots\dots (6)$$

C_i ：第*i*個風險管控選項成本

RR_i ：第*i*個風險機率降幅

$CURR_i$ ：第*i*個風險管控選項降低每單位風險機率之成本

i ：第*i*個風險管控選項

以<IE2 引水梯瑕疵>舉例說明之成本USD 2,179.01，預期該項危險所採取之

風險管控選項之後所能達成之風險機率降幅為3.0059E-01，所以其「降低每單位風險機率之成本」為：USD 2,179.01/3.0059E-01=USD 7,249.04。依此可計算出所有其他風險管控選項降低每單位風險機率之成本，藉由比較成本得以評估風險管控選項之效益。

3.5 決策建議(Recommendation for Decision-Making)

基於所有的危險(Hazard)、危險發生原因(FTA)以及風險管控選項(RCO)之排序與比較，以降低風險(Risk)至最低且依實際合理可行(ALARP)原則，做可稽核、可追蹤的安全評估建議。而排序標準就風險指數而言，為依專家評估各項風險之頻率指數(FI)及嚴重性指數(SI)所得之風險指數(RI)平均值，由此判斷位於ALARP之區間；就風險管控選項(RCO)而言，則為每項風險管控選項之「降低每單位風險機率之成本」高低，來做進一步的決策建議。此安全評估建議應以即使沒有風險或成本效益分析經驗的人也能明白意思之方式呈現，並且能夠公開查閱相關文件，以及建立收集評論機制。

由於風險的容許條件有許多標準，且並非全為受到一致接受的，在制定新規則時應說明風險評估的標準。本研究乃採用單一死亡(single fatality)發生機率，及英國

HSE Health and Safety Executive ALARP之的上界 10^{-3} 及下界 10^{-6} ，以該標準設定作此FSA研究。

3.6 小結

綜合上述研究方法說明，IMO FSA之主要優點為此研究方法官方認證，為國際海運社會接受，具有公信力；再者可量化風險程度、風險管制措施成效，以及成本效益，提供決策者有明確的判斷資訊。

缺點為其研究方法一般風險評估方法多出風險管控措施以及成本效益評估，研究費時且意外造成損失後果難以估算，僅能以風險機率降幅取代比較。採用專家意見時，可能會因專業程度不足形成品質不良；或是專家人數不多時受個別極端值影響較大。

本研究所採取的決策指標值為UK HSE (2023) ALARP標準，但此標準基本上是針對人命傷亡安全議題所設，有不可容忍之上限，若評估標的為財產損失時，則為評估單位對於損失金額的可接受程度。

本文在此研究議題上，以IMO FSA (2018)作為引進新船型的風險評估而言，是符合研究需求的，除識別出危險外，亦達成量化風險、風險管控措施成效及成本效益。而在收集專家意見時，亦刻意挑選有ISM code風險評估經驗的現職引水人，以期兼顧風險評估概念及引領船舶之專業經驗。

肆、課題分析

收集「問卷 1-風險評估問卷」及「問卷 2-實施風險管控選項前後之風險機率評估問卷」後，依 IMO FSA (2018)步驟分析結果如下：

4.1 識別風險 (Identification of Hazards) 結果

識別出的風險如下：包含「問卷 1-風險評估」收集後，又增列專家建議之 2 項危險，共計有 11 類風險 (Risk)、42 項危險 (Hazard) (參見附錄一)，而問卷中專家意見之一致性指數 W 為 0.533909 (medium agreement 0.5-0.7) (算式 1 及表 1)，表示專家的看法無顯著不同。此外由於篇幅關係，本文識別出可能遭遇危險及提出風險管控措施後，僅就風險指數最高之〈人員落海〉一項風險演示 IMO FSA (2018) 流程，闡述此研究方法之可行性。

4.2 風險評估 (Risk Assessment) 結果

統計 10 位專家所量化之頻率指數 (FI) 及嚴重性指數 (SI)，依 FSA 風險矩陣 (7x4) 求出各項風險指數 (RI) 之後排序 (Ranking)，如〈1.1 人員落海〉之風險指數 5.25 則為各項為危險之 FI 及 SI 求得 RI 之平均值，如以下表 6 所示。

表 6 <1.1 人員落海>風險之 SI/FI/RI 列表

1.1 人員落海	SI	FI	RI
1.1.1 惡劣天候(船舶搖晃/引水梯底端拖水/低乾舷船或組合式引水梯乾舷過低)	2.7	2.9	5.6
1.1.2 引水梯瑕疵(引水梯不符合標準/引水梯繩索或踏板斷裂)	2.7	3.6	6.3
1.1.3 船舶航向/航速(未能保持良好的下風區域/船速過快或過慢)	2.3	2.6	4.9
1.1.4 其他可能造成人員落海之因(補充增列：引水船船長之操船船藝)	1.9	2.3	4.2
平均			5.25

資料來源：本研究整理。

以上述同樣方法求得其他各項風險之風險指數(RI)，在依照各項風指數高低排序得出表7之風險排序，以利判斷各項風險之危險程度。

表 7 風險排序列表

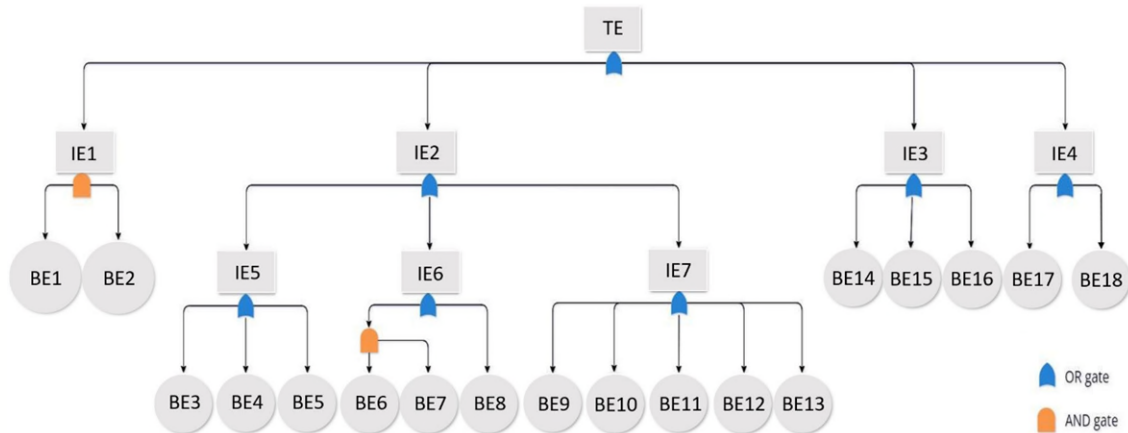
風險名稱	風險指數 RI
1.1 人員落海	5.25
1.4 碰撞防波堤	5.18
1.3 擱淺	4.78
2.4 帶纜人員受傷	4.74
1.2 與他船碰撞	4.70
2.3 與協助拖船碰撞造成損壞	4.63
2.2 與靠泊碼頭船舶或碼頭設施碰撞	4.60
1.5 油汙染事故	4.55
3.1 碰撞碼頭設施	4.54
2.1 與出港船碰撞	4.38
2.5 港內擱淺	4.30

資料來源：本研究整理。

由風險指數結果發現所有評估的風險皆落在ALARP範圍之內，意指雖然容許以現行作業方法繼續該項作業，但仍應盡

可能地降低風險。此外由表7風險排序可知，識別出風險排名最高之前三項：<1.1 人員落海>、<1.4碰撞防波堤>、<1.3擱淺>，皆落在引航作業的第一階段，亦即從引水人登輪地點至防坡堤口之區域。其風險較高之原因，除<1.1人員落海>外，另外二項<1.4碰撞防波堤>及<1.3擱淺>則與貨櫃船舶大型化有關。由於船舶尺寸加大之後，其所受風壓及流壓亦同時加大，與其他較小型船舶相比，以相同的偏流角(drift angle)而言，以大型貨櫃船舶會占用更大的航跡寬度，然而防波堤口開度寬度依然固定不變，故大型貨櫃船舶進入堤口前之船位、艏向及迴轉率(Rate of Turn)餘裕更小，需要更高的控制精準度，也因此提高了操船風險。

本研究挑選風險指數最高之「人員落海」一項作進一步的FTA分析，以實行IMO FSA (2018)完整步驟。<1.1人員落海>依 FTA架構列表如圖4，而各事件內容可參考表8。



資料來源：本研究繪製。

圖 4 人員落海 FTA 架構圖

表 8 風險<1.1 人員落海>FTA 之 TE/IE/BE 列表

TE 人員落海 (IE1-4)	BE6 浪高>4M
IE1 因天候不佳落海 (BE1-2)	BE7 船舶重載吃水>12M
IE2 引水梯瑕疵 (IE5-7, BE3-13)	BE8 引水艇因浪高抬升高於主甲板
IE3 船舶航向/航速 (BE14-16)	BE9 扶手欄杆未固定牢固
IE4 引水船船長之操船船藝 (BE17-18)	BE10 扶手欄杆位置、型式不適當
IE5 引水梯安裝太高或太低 (BE3-5)	BE11 踏板歪斜、鬆脫或間距長短不一
IE6 登輪甲板(side door乾舷)過低 (BE6-8)	BE12 引水梯繩索/踏板缺損或斷裂
IE7 引水梯不符合標準 (BE9-13)	BE13 照明不足
BE1 船舶和引水艇搖晃造成爬梯困難	BE14 未能保持良好的下風區域
BE2 引水人爬梯時間點不佳/未在最高點登梯	BE15 船速過快或過慢
BE3 誤解引水人指示	BE16 船舶與引水艇溝通不良
BE4 準備引水梯人員施放長度判斷錯誤	BE17 無法穩定貼住船舶船身
BE5 船舶因波浪橫搖	BE18 引水艇夾住引水梯並搖晃造成斷裂

資料來源：本研究整理。

關於FTA架構，頂端事件<TE人員落海>是在<IE1因天候不佳落海>、<IE2 引水梯瑕疵>、<IE3 船舶航向/航速>或<IE4 引水船船長之操船船藝>之中的任何一種中間事件情況發生時(OR gate)，便可能會

導致人員落海的頂端事件(TE)發生；而<IE1因天候不佳落海>的情況，是當<BE1 船舶和引水艇搖晃造成爬梯困難>和<BE2 引水人爬梯時間點不佳/未在最高點登梯>同時發生時(AND gate)，此<IE1因天候不

佳落海>的情況才會發生；<IE2引水梯瑕疵>是在當<IE5引水梯安裝太高或太低>、<IE6登輪甲板(side door乾舷)過低>或<IE7引水梯不符合標準>之中的任何一種中間事件情況發生時(OR gate)，才會形成<IE2引水梯瑕疵>；<IE3 船舶航向/航速>是在當<BE14未能保持良好的下風區域>、<BE15船速過快或過慢>或<BE16船舶與引水艇溝通不良>之中的任何一種中間事件情況發生時(OR gate)，便會導致<IE3船舶航向/航速>的條件發生；<IE4引水船船長之操船船藝>是<BE17無法穩定貼住船舶船身>或<BE18引水艇夾住引水梯並搖晃造成斷裂>之中的任何一種中間事件情況發生時(OR gate)，才會形成<IE4引水船船長之操船船藝>。自此是由頂端事件(TE)向下一層與IE1、IE2、IE3至IE4所組織之FTA架構。

以此類推，再往下一層<IE5引水梯安裝太高或太低>是由<BE3誤解引水人指示>、<BE4準備引水梯人員施放長度判斷錯誤>或<BE5船舶因波浪橫搖>的任何條件之一所形成的(OR gate)；<IE6登輪甲板(side door乾舷)過低>是由<BE6 浪高>4M>和<BE7 船舶重載吃水>12M>同時發生(AND gate)後，與<BE8引水艇因浪高抬升高於主甲板>之間任何條件之一發生時(OR gate)，才會形成<IE6登輪甲板(side door乾舷)過低>的情況；<IE7引水梯不符合標準>是由<BE9扶手欄杆未固定牢固

>、<BE10扶手欄杆位置、型式不適當>、<BE11踏板歪斜、鬆脫或間距長短不一>、<BE12引水梯繩索/踏板缺損或斷裂>或<BE13照明不足>之間任何條件之一發生時(OR gate)，即會形成<IE7引水梯不符合標準>的情況。

如圖4所示，FTA架構由下往上分別為基本事件(BE)、中間事件(IE)及頂端事件(TE)(表9)，由2個或2個以上之最底層基本事件(BE)經過AND gate(須同時符合條件)或是OR gate(擇一符合條件)之邏輯匣判斷運算(算式4及算式5)，向上一層一層逐步演算，最後求得頂端事件(TE)之可能發生機率，而將進行評估之風險<1.1人員落海>FTA之TE/IE/BE則如表8所示。

4.3 風險管控措施(Risk Control Option)結果

依評估風險之危險成因所採取的各項風險管控措施(Risk Control Measure/RCM)所組成的風險管控選項(RCO)如表9所示。

經<人員落海>FTA之IE/BE邏輯閘運算後(算式4及算式5)，計算出Top Event<人員落海>在實施RCO前之機率為 $3.6538E-01$ ，實施RCO之後為 $4.5812E-03$ ，因RCO使風險機率的降幅為 $3.6080E-01$ 。而<人員落海>TE之發生機率之運算過程取其中一條故障樹分支BE6-IE6-IE2-TE計算(表

10)，作為示範說明如下。

表 9 <1.1 人員落海>之 RCO 列表

	RCO	RCM	RCM	RCM	RCM	RCM
IE1因天候不佳落海 (BE1-2)	1	PPE 個人防護裝備	調整船舶航向航速	引水艇重新作業	船舶救生裝備	
IE2 引水梯瑕疵 (IE5-7 / BE3-13)	2	PPE 個人防護裝備	調整船舶航向航速	船舶迴轉重新作業	重新安排引水梯	引水人登輪前MPX
IE3 船舶航向/航速 (BE14-16)	3	引水人登輪前MPX	調整船舶航向航速	船舶迴轉重新作業		
IE4 引水船船長之操船船藝 (BE17-18)	4	PPE 個人防護裝備	調整船舶航向航速	引水艇重新作業	船舶迴轉重新作業	重新安排引水梯

資料來源：本研究整理。

表 10 FTA 中 BE 至 TE 運算路徑示範

Tier 1	TE			
Tier 2	OR	OR	OR	OR
	IE1	IE2	IE3	IE4
Tier 3	OR	OR	OR	
	IE5	IE6	IE7	
Tier 4	AND			OR
	BE6	BE7	BE8	

資料來源：本研究整理。

在實施RCO之前：

- BE6、BE7：AND gate BE6+7
 $BE6 = 2.3240E-02$, $BE7 = 2.0684E-02$,
 $BE6 \cap BE7 = BE6 * BE7 = 4.8070E-04$
- $BE6 \cap BE7$ 、BE8：OR gate IE6
 $BE8 = 2.0882E-02$, $IE6 = 1 - (1 - (BE6 \cap BE7)) * (1 - BE8) = 2.1353E-02$

- IE6、IE5、IE7：OR gate IE2
 $IE5 = 2.1872E-01$, $IE7 = 9.0086E-02$,
 $IE2 = 1 - (1 - IE5) * (1 - IE6) * (1 - IE7) = 3.0428E-01$
- IE2、IE1、IE3、IE4：OR gate TE
 $IE1 = 6.3825E-07$, $IE2 = 3.0428E-01$,
 $IE3 = 6.5484E-02$, $IE4 = 2.3901E-02$
- $TE = 1 - (1 - IE1) * (1 - IE2) * (1 - IE3) * (1 - IE4) = 3.6538E-01$

以同樣方式計算實施RCO後之各BE-IE-TE機率，即可求出表11之結果。在實施風險管控選項(RCO)前後所估算之可能發生的風險機率及其降幅，可視為每項風險管控選項的功效。

表 11 實施 RCO 前後之風險機率列表

		Before	After	Difference
IE1 因天候不佳落海 (BE1-2)	RCO 1	6.3825E-07	5.2128E-09	6.3304E-07
IE2 引水梯瑕疵 (IE5-7 / BE3-13)	RCO 2	3.0428E-01	3.6874E-03	3.0059E-01
IE3 船舶航向/船速 (BE14-16)	RCO 3	6.5484E-02	5.7470E-04	6.4909E-02
IE4 引水船船長之操船船藝 (BE17-18)	RCO 4	2.3901E-02	3.2258E-04	2.3579E-02

資料來源：本研究整理。

4.4 成本效益評估(Cost-Benefit Assessment)結果

各項成本有關資料定義如表12所示，其中船期耽擱成本(Loss of use)，是以 Alphaliner 2022-46 資訊(15Nov, 2022)所示：8,500 TEUs船型日租金為52,000 USD，而5,600 TEUs船型日租金為38,000 USD，由於10,000 TEUs級以上貨櫃船之租約皆為長約，無法獲得相關資訊，故僅能以外插法來計算每增加1 TEU 所增加之金額，

(增加1 TEU約為USD 4.24)，求得本研究之船型(11,167 TEUs)估算日租金約為63,315 USD，換算成每小時成本為 2,638 USD/hour。至於其他救生設備相關成本則為洽詢基隆港當地船舶救生設備供應商，所得之臺灣送船價格(臺幣計價)，以 21/NOV/2022 之臺幣匯率 USD 1:31.2 NTD，換算成美元以利共同比較。

此外因為執行風險管控措施(RCM)所需時間牽涉到船期耽擱損失，故定義各項風險管控措施如表13所示。

表 12 RCO 相關成本

RCO 相關成本	成本金額(USD)
船期成本(Alphaliner 2022-46)	
5,600 TEUs/38,000 USD/day	8s500 TEUs/ 52,000 USD/day
11,167 TEUs 船期成本(每小時)	2,638 USD/hour
PPE 個人防護裝備	
充氣式救生衣	4,253 NTD = 136.10 USD
安全帽	2,000 NTD = 64.31 USD
船舶救生裝備	
救生圈連自燃燈	1,800 NTD = 57.69 USD
臺灣送船價格 (21/NOV/2022 匯率 USD 1:31.2 NTD)	

資料來源：本研究整理。

表 13 執行各項風險管控措施所需時間

RCM 名稱	所需時間
引水艇重新作業	1/4 hour
重新安排引水梯	1/4 hour
迴轉重新作業	1/2 hour
延後進港	12Hrs

資料來源：本研究整理。

以上述定義之數據列出各項RCO成本及降低單位風險機率總成本如表13所列，其中風險管控選項(RCO)是由各風險管控措施(RCM)所組成，所以RCO之成本為所有RCM之成本總和，以<IE2 引水梯瑕疵>為例，RCO成本為PPE個人防護裝備，加上調整船舶航向航速、船舶迴轉重新作業、及重新安排引水梯及引水人登輪前船長/引水人資訊交換(MPX)之成本，其總成本及降低每單位風險機率之成本(算式6)計算如下

$$\begin{aligned} C &= RCM1 + RCM2 + RCM3 + RCM4 + RCM5 = \\ &= 200.42 + 0.00 + 1319.06 + 659.53 + 0.00 \\ &= 2,179.01 \text{ USD} \end{aligned}$$

再以算式6計算降低每單位風險機率之成本為：

$$\begin{aligned} CURR &= C / RR = 2,179.01 \text{ USD} / 3.0059E-01 = \\ &= 7,249.04 \text{ USD} \end{aligned}$$

同理繼續計算所有RCO降低每單位風險機率之成本，結果統整於表13所示。

表 13 實施 RCO 成本及降低單位風險機率總成本列表

		Diff/Benefit	RCM	RCM	RCM	RCM	RCM	Cost USD	CURR in USD
IE1 因天候不佳落海	RCO 1	6.4346E-07	PPE 個人防護裝備 200.42	調整船舶航向航速 0.00	引水艇重新作業 659.53	船舶救生裝備 57.69		917.64	1,426,102,713.57
IE2 引水梯瑕疵	RCO 2	3.0059E-01	PPE 個人防護裝備 200.42	調整船舶航向航速 0.00	船舶迴轉重新作業 1319.06	重新安排引水梯 659.53	引水人登輪前MPX 0.00	2179.01	7,249.04
IE3 船舶航向/ 航速	RCO 3	6.4909E-02	引水人登輪前MPX 0.00	調整船舶航向航速 0.00	船舶迴轉重新作業 1319.06			1319.06	20,321.78
IE4 引水梯船長之操船船藝	RCO 4	2.3579E-02	PPE 個人防護裝備 200.42	調整船舶航向航速 0.00	引水艇重新作業 659.53	船舶迴轉重新作業 1319.06	重新安排引水梯 659.53	2838.55	120,386.16

資料來源：本研究整理。

4.5 決策建議(Recommendation for Decision-making)結果

以成本效益(CBA)分析後，得知RCO 2針對<IE2引水梯瑕疵>因其降低每單位風險機率之成本為USD7,249.04是所有項目中最低，意即該RCO所得效益最佳；反之RCO 1應對<IE1 因天候不佳落海>其降低每單位風險機率之成本為USD1,426,102,713.57，是所有項目中成本最高的，代表其效益最差，依此本研究提出針對<人員落海>風險依其成因之決策建議為：

1. 對應<IE2引水梯瑕疵>/FTA之BE9-BE13項目(圖4及表8)：PSC主管機關應定期抽驗到港船舶之引水梯狀況，並統計分析缺失項目。此舉可使到港船舶增加警惕，落實引水梯安全。
2. 對應<IE2引水梯瑕疵>：建立引水梯缺失報告系統(如UKMPA英國引水人協會所發布之行動裝置應用程式)，在引水人發現缺失後，得以即時通告相關人員注意。依現行的做法為在引水人發現引水梯缺失後，以異常報告通知當地航港主管機關，如航港局北部航務中心，主管機關會以PSC方式檢查缺失，直至符合安全標準之後才放行。由於此類次

標準船經常往返臺灣各港連續進出，如果友港同業之其他引水人在缺失發生之後及時知情該船狀況，遇到要執行該船業務前，能夠提高警覺。

3. 對應<IE3 船舶航向/航速>、<IE4 引水船船長之操船船藝> / FTA之BE14-BE18項目(圖4及表8)：AIS之資訊限制及使用風險、引水梯法規要求、引水梯常見缺失及使用引水梯之登輪技巧等，應納入引水人及引水船船長訓練之中。因引水船安裝附有AIS信號的電子海圖，在引水艇出發至登輪地點登輪前這段時間，通常是以船舶的AIS資訊來判斷相會的時間與地點，並提供進港船船長之航向航速建議，惟接收AIS訊號有時會因天候、距離、設備等因素而有所停頓，且AIS資訊會因船舶航行狀態、船速有不同的更新間隔，故使用此資訊的引水人及引水船船長應對此風險有所了解。
4. 對應<IE1 因天候不佳落海> / FTA之BE1-BE2項目(圖4及表8)：檢討暫停引水作業服務之天候標準。以現行<基隆港船舶交通服務指南>規定：「如因天候不良等特殊情況(浪高達4公尺或風速達到30節(蒲福風級表平均7級以上)，引水人停止出堤外接引航作業，待海況平穩後即恢復外接引航作業」，但是因白天與夜晚的能見度不同，於夜間時引水船船長不易判斷浪高與波浪來

向，故建議白天與夜間分開規定，夜間作業宜再降低浪高標準。

4.6 小結

由於篇幅關係無法將所有識別出的風險完整評估呈現於此，僅能節錄<人員落海>一項風險加以詳細闡述，但經研究中腦力激盪方法所識別出之危險，統計各種風險之風險指數，將其排序後得知風險高低，可成為決策判斷中處理的優先順序，此外也列出相對應的風險管控措施，需要時可進一步評估其風險機率降幅之成效。

如同第二章文獻回顧所提之國家運輸安全調查委員會報告，引水人登輪時人員受傷，甚至人員落海意外事件，屬於重大意外事故外，研究發現其風險程度亦高於其他風險，值得相關單位重視並深入檢討。此外基隆港引水人登輪地點位於距離堤口1.5海浬處，但在實務上因為引領大型貨櫃船需要更長的距離來調整船位、船速及航向，所以當地引水人通常會在2海浬以外，甚至是到3海浬處登輪，然而在天候狀況不佳時，距離堤口愈遠有可能湧浪愈大，也提高了引水人登輪的風險。

然而研究結果呈現<人員落海>風險為最高風險，但並非代表引領大型貨櫃船之其他風險，如碰撞防波堤(RI=5.18)、碰撞碼頭設施(RI=4.54)(表7)等與其他船型

相同，僅能說明引領該尺度大型貨櫃船時，即便在整體風險提高的情況下，<人員落海>風險仍為引水人最擔憂的情況

伍、結論與建議

本研究依照 IMO FSA (2018) 規範實施引領大型貨櫃船進港之風險評估，完整得出各步驟要求之結果，證明 IMO FSA 方法是可行的，研究結果中得到<人員落海>一項為最高的風險，並根據統計數據分析出<IE2 引水梯瑕疵>一項在風險管控選項實施前與實施後，該項危險皆為人員落海風險之最大因素，且在風險管控選項後之風險機率降幅最大，所以要改善風險威脅時，應優先考慮從此著手。

而研究結果中風險最高的<人員落海>，其研究結果頂端事件(TE)機率為 $4.85E-03$ ，與另一引水梯人員落海相關研究「Quantitative risk analysis for operational transfer processes of maritime pilots」(Tunçel et al., 2023)之結論 $3.98E-03$ 相近，雖然研究方法不同但結果相近，足見本研究具有參考價值。

此外本研究在實施 IMO FSA (2018) 方法時，發現下列之研究限制及應注意事項為以下說明：

1. 首先在 Step 1<識別風險>之研究方法可以使用歷史資料，但因資料有限，根據研究問題屬性而採用專家意見，

如研究議題不同時，尚有失效模式與影響分析 (Failure Mode And Effect Analysis, FMEA)、貝氏網路 (Bayesian Network) 等等其他研究方法 (IMO FSA/Appendix 1, 2018)。然而採用專家意見時，填寫問卷人數可能會影響研究結果，依「Formal Safety Assessment: a critical review」(Kontovas et al., 2009) 建議，專家人數應有 10 人為佳，以減少意見中的極端值 (extreme swap) 影響結果。所以在後續的 FSA 研究，採用專家意見方法時，專家人數應盡可能地增加。

- 其次本研究在 Step 2 <風險評估>中使用之風險矩陣(Risk Matrix)是以 IMO FSA 7x4 矩陣為範本，其中頻率指數 (FI) 的發生頻率 (frequency) 是以每船-每年 (per-ship-year) 為標準，但是與風險機率的計算 (算式 2 及算式 3) 以每次事件發生機率 (probability) 不同，可能的考量為 IMO FSA 以每年-每船的頻率標準能使專家較容易判斷以減少誤差，然而在統計專家意見後，仍須轉換成機率後再進行 FTA 架構運算。
- 關於 ALARP 上限與下限範圍界定問題，本研究採用 UK HSE (2023) 標準 10^{-3} 至 10^{-6} 區間是基於單一死亡所能容忍之發生機率，並以此轉換至風險矩陣求得可接受之風險係數，若所評估的風險事故未牽涉人命傷亡，損壞後果僅有

造成金錢損失時，ALARP 變成界定可接受的損壞程度或是願意付出多少金額的範圍。

4. 另外在 Step 4 <成本效益評估>中，因事故情境發展會有許多不同程度的損害，而其損害金額不易估計，即便是採用歷史資料，也可能沒有切確的成本數據，故以各項風險管控措施(RCO)所能減少風險機率降幅相互比較，是為實際有效率做法。
5. 本研究之初衷為當前所未有的大型貨櫃船舶規劃來港時，是否有科學、理性且透明的方式來評估風險，故採取 IMO FSA 方法評估，並得到的結果顯示出目前的引領大型貨櫃船舶進港作業模式雖然在 UK HSE 建議之容許範圍內，但是已識別出的危險仍需盡可能降低風險，以增進作業安全。此外研究中識別出的風險情境的資訊可供相關單位在擬訂安全作業程序(safe procedure)時的參考，若在改善作業狀況經費或時間有限的情況下，則可參考 FSA 研究結果的風險排序及成本效益等資訊，來判斷需要優先處理的風險項目。
6. 然而要完成 IMO FSA (2018)的完整研究相當費時，依據FSA的流程圖(圖2)，評估的流程共有步驟 1-2-5、1-2-3-5、1-2-3-4-5 等三種模式，研究單位可視其可利用的資源或時間期限，選擇合適的流程模式。另外在考量定義研究範圍、

研究問題上，可選用單一主題、單一船型或單一航段作業等，以爭取研究效率及更多的研究細節。

7. 本研究僅挑選風險指數最高的<人員落海>做完整分析，但並不代表可以忽略在此作業中的其他風險，後續應進一步分析其他值得評估的風險項目，包括風險管控措施/選項(RCM/RCO)的成本效益評估(CBA)分析，以利做出最佳的決策建議。

參考文獻

孫暉炫，2008，風險管理應用在船舶航行作業安全之研究-以高雄港為例，國立高雄海洋科技大學航運管理研究所碩士論文，高雄市。

袁順光，2010，大型船舶進港安全評估-以基隆港為例，國立臺灣海洋大學商船學系研究所碩士論文，基隆市。

國家運輸安全調查委員會，2023a，國家運輸安全調查委員會重大運輸事故調查報告-花蓮縣和平港引水人登輪時遭船舶夾傷，調查報告編號：TTSB-MOR-23-01-002/發布日期：民國 112 年 01 月 17 日。

國家運輸安全調查委員會，2023b，國家運輸安全調查委員會重大運輸事故調查報

告-中華民國 111 年 2 月 21 日一名引水人於臺中港登香港籍曉洋貨櫃船時落海罹難，報告編號：TTSB-MOR-23-09-001 報告日期：民國 112 年 9 月。

陳正華，方泉根，2005，規範化安全評估 (FSA) 在上海港船舶引航安全工作中的應用，*中國航海*，第 1 期，1-6。

廖永發，2007，運用層級分析法與重要性表現分析法評估大型船舶操縱因子之研究-以高雄港為例，國立臺灣海洋大學商船學系研究所碩士論文，基隆市。

臺灣港務股份有限公司-基隆港務分公司，2022，基隆港船舶交通服務指南。

劉正恩，2008，船舶進出港口人為碰撞過失及乳酪模式之研究-以高雄港為例，國立高雄海洋科技大學航運管理研究所碩士論文，高雄市。

Eswara, A.K., 2013. Formal Safety Assessment in Maritime Industry-Explanation to IMO Guidelines, Indian Maritime University.

Hensen, H., 2018. *Tug Use in Port - A Practical Guide Including Ports, Port Approaches and Offshore Terminals*, 3rd Edition, The ABR Company Limited: Wiltshire, UK.

Hermanski, G. and Daley, C., 2010. On

formal safety assessment (FSA) procedure. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Claude-Daley/publication/44057113_On_formal_safety_assessment_FSA_procedure/links/02e7e524aa530e6470000000/On-formal-safety-assessment-FSA-procedure.pdf (Accessed 20 July, 2023).

Hu, S.P., Fang, Q.G., Xia, H.B. and Xi, Y.T., 2006. Formal safety assessment based on relative risks model in ship navigation. *Reliability Engineering & System Safety*, 92(3), 369-377. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2006.04.011>

International Chamber of Shipping (ICS), 2016. *Bridge Procedures Guide*, 5th Edition, Marisec Publications: London.

International Maritime Organization (IMO), 2007. MSC 83/INF.8, FSA container vessels Details of the Formal Safety Assessment.

International Maritime Organization (IMO), 2008. RESOLUTION MSC.273(85), Adoption of amendments to the International Management Code for the safe operation of ships and for pollution prevention (International Safety Management CODE).

International Maritime Organization (IMO),

2018. Revised guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO Rule-Making process - MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2.
- Kontovas, C.A. and Psaraftis, H.N., 2009. Formal safety assessment: A critical review. *Marine Technology*, 46(1), 45–59. DOI:10.5957/mtsn.2009.46.1.45.
- Kontovas, C.A., 2005. Formal Safety Assessment - Critical Review and Future Role, [Unpublished diploma Thesis], National Technical University of Athens, School of Naval Architecture & Marine Engineering, Division of Ship Design and Maritime Transport, Athens.
- Nieh, C.Y., Lee, M.C., Huang, J.C. and Kuo, H., 2019. Risk Assessment and traffic behaviour evaluation of inbound ships in Keelung Harbour based AIS data. *Journal of Marine Science and Technology*, 27(4), 311-325.
- Tunçel, A.L., Akyuz, E. and Arslan, O., 2023. Quantitative risk analysis for operational transfer processes of maritime pilots. *Maritime Policy & Management*, 50(3), 375-389.
- UK HSE, 2023. ALARP at a Glance. Available at: <https://www.hse.gov.uk/enforce/expert/alarp-glance.htm> (Accessed 20 July, 2023).
- Vesely, W., Dugan, J., Fragola, J., Minarick III, J. and Railsback, J., 2002. Fault Tree Handbook with Aerospace Applications, NASA Office of Safety and Mission Assurance NASA Headquarters: Washington, DC, USA.
- Wang, J., 2001. The current status and future aspects in formal ship safety assessment. *Safety Science*, 38(1), 19-30.
- Wang, J. and Foinikis, P., 2001. Formal safety assessment of containerships. *Marine Policy*, 25(2), 143-157.

附 錄一

第一階段 <引水人登輪地點至防波堤口>

1.1 人員落海

- 1.1.1 惡劣天候(船舶搖晃/引水梯底端拖水/低乾舷船或組合式引水梯乾舷過低)
- 1.1.2 引水梯瑕疵(引水梯不符合標準/引水梯繩索或踏板斷裂)
- 1.1.3 船舶航向/航速(未能保持良好的下風區域/船速過快或過慢)
- 1.1.4 引水船船長之操船船藝

1.2 與他船碰撞

- 1.2.1 無適當瞭望(未點燈漁船/海釣船)
- 1.2.2 違反避碰規則(未遵照分道航行制規則橫越航道)
- 1.2.3 能見度受限制(濃霧/大雨)
- 1.2.4 與會遇船溝通不良(錯誤判斷會遇船舶之意向)
- 1.2.5 引水船無正當瞭望

1.3 擱淺

- 1.3.1 機械故障(失去動力/舵效失靈)
- 1.3.2 受風流影響(船速不足或舵效不夠)
- 1.3.3 能見度不良
- 1.3.4 船舶位置偏離過大(未能及時轉向)

1.4 碰撞防波堤

- 1.4.1 機械故障(失去動力/舵效失靈)
- 1.4.2 受風流影響(船速不足或舵效不夠)
- 1.4.3 船舶位置偏離過大(需要大角度轉向進港)
- 1.4.4 能見度不良
- 1.4.5 操舵錯誤

1.5 油污染事故

- 1.5.1 與他船碰撞
- 1.5.2 擱淺
- 1.5.3 碰撞防波堤

第二階段 <防波堤口至迴船池>

2.1 與出港船碰撞

- 2.1.1 出港船未能留有足夠會遇空間
- 2.1.2 風力過強造成艏向偏轉(拖船協助能量不足)
- 2.1.3 機械故障(船舶倒車不來)
- 2.1.4 拖船故障或斷纜

2.2 與靠泊碼頭船舶或碼頭設施碰撞

- 2.2.1 風力過強造成艏向偏轉(拖船能量不足)
- 2.2.2 機械故障(船舶倒車不來)
- 2.2.3 拖船故障或斷纜

2.3 與協助拖船碰撞造成損壞

- 2.3.1 拖船操作失誤
- 2.3.2 港內風浪過大(拖船無法穩住船位)
- 2.3.3 拖船因船舶內凹舷弧大協助不易

2.4 帶纜人員受傷

- 2.4.1 拖船纜斷纜
- 2.4.2 拖船纜機操作失誤(人員夾傷)
- 2.4.3 拖船拉力大於纜樁極限
- 2.4.4 拖船被橫反拖(Girding)

2.5 港內擱淺

- 2.5.1 機械故障(船舶倒車不來)
- 2.5.2 風力過強造成艏向偏轉(拖船能量不足)
- 2.5.3 拖船故障或斷纜

第三階段 <迴船池至碼頭船席>

3.1 碰撞碼頭設施

- 3.1.1 拖船操作失誤(或未能及時執行命令)
- 3.1.2 拖船斷纜
- 3.1.3 陣風風力過大超出拖船能量
- 3.1.4 岸壁效應(bank effect/blockage effect)使得船舶發生偏轉