

理事長開講：攔油索的神話與現實～外海型充氣式攔油索 貨櫃組規格的二個提問

陳彥宏*

提問一：外海型攔油索貨櫃組之材質選用評估

說明：就攔油索本體材質(橡膠與 PVC)之性能差異進行專業評估，包含耐候性、抗浪能力、耐久性、維護成本及實際操作適用性等面向，研議最適材質選用方案。

- 1 若要去分辨橡膠跟塑膠那個比較適用在外海型攔油索。除了「無毒與有毒」、「可回收與不可回收」，這二個議題考量外，其實都差不多，但是，重點應該還是拉回來討論哪一種外海型攔油索在現場環境不失效(Survivability)、哪一種在操作過程可控制(Operability)、哪一種在回收與維護上可持續(Maintainability)之上。具體來說要從下面幾個角度來看：
 - .1 在海上溢油應變中，攔油索的材質選擇(material selection)表面上看似屬於材料工程(materials engineering)的問題，實際上卻是一項高度整合性的決策。其本質並不在於選擇性能最高或最先進的材料，而是在特定環境條件(environmental conditions)、作業任務(operational objectives)與後勤能力(logistics capability)之間，建立一種能維持整體效能的適配關係(system compatibility)。換言之，材質選擇並非單一性能的優化，而是一種跨領域限制下的工程平衡(engineering trade-off)。在選型時需額外考量：
 - .1 物理邊界與動態應力：海面是動態系統，材質必須具備極佳的抗疲勞性與抗撕裂能力，以承受波浪、流速與風場施加的持續應力。

* 陳彥宏 Solomon CHEN，英國威爾斯大學海洋事務與國際運輸學博士，台灣海事安全與保安研究會理事長，新台灣國策智庫諮詢委員，國家運輸安全調查委員會諮詢委員，海洋委員會海巡艦隊分署海損評議審查會委員，海事仲裁人。曾任教於臺灣海洋大學、澳大利亞海事學院國家港埠與航運中心、高雄海洋科技大學。曾客座於上海交通大學凱原法學院國際海事研究中心、廈門大學南海研究、澳大利亞海運學院。EMAIL: solomonyhchen@gmail.com。

- .2 化學滲透與滲漏控制：油品中的芳香烴或溶劑成分會產生化學侵蝕；若材料吸油性過高，將增加自重並破壞浮力與幾何穩定性。
- .3 全生命週期效能：除了耐候性，材質還必須具備高度的「可清洗性」(Decontamination)與「可修補性」，否則會大幅增加後勤維護成本並降低資產的再利用能力。
- .4 結論：真正有效的材質，並非性能指標最高者，而是在環境載荷、油品特性與操作需求之間達成系統適配(System Compatibility)的那一種。

3 環境載荷條件：材質性能的物理邊界

- .1 材質必須能承受現場的環境載荷(environmental loading)，這構成選型的基本邊界。海面並非靜態系統，波浪、流速與風場(wind forcing)會持續對攔油索施加動態應力，使材料長時間處於反覆變形與受力狀態。因此，良好的抗疲勞性(fatigue resistance)與抗撕裂能力(tear resistance)是基本要求。在高流速條件下，拖曳所產生的張力(tension load)會集中於結構節點，若材料或內部張力構件(tension member)不足，極易導致結構失效。此外，溫度亦是一項關鍵因子，在高溫環境中材料可能軟化(thermal softening)，在低溫環境中則可能發生脆化(embrittlement)，進而影響攔油索的操作穩定性(operational stability)。

4 油品相容機制：化學穩定與滲透控制

- .1 材質必須具備良好的油品相容性(oil compatibility)。不同油種，特別是含有芳香烴(aromatics)或溶劑成分(solvent fractions)的油品，會對材料產生化學侵蝕(chemical degradation)或滲透效應(permeability effect)。若材料吸油性過高，不僅會增加自重(weight gain)，影響浮力(buoyancy)與幾何穩定性(geometric stability)，也可能導致結構劣化。因此，具備耐油性(oil resistance)與低滲透性(low permeability)的材料，是確保攔油索在污染環境中長時間維持功能的關鍵。近年透過疏水塗層(hydrophobic coating)與複合材料設計(composite structure)，已能有效降低油污附著(oil adhesion)與滲透問題。

5 操作適應能力：柔順性與結構穩定的平衡

- .1 即使材料在環境與化學層面表現優異，若無法在實際操作中被有效控制(operability)，仍然難以發揮價值。攔油索在部署與回收過程中，必須兼顧重量(weight)、柔軟性(flexibility)與隨波性(conformity)。過重的材料可能超出小型

船舶的操作能力，而過硬的材料則無法貼合水面波動，導致飛越失效(splash-over)或底部滲漏(underflow)。相反地，若材料過於柔軟，則可能在波浪作用下形成皺摺或袋狀渦流(pocket formation)，增加夾帶(entrainment)與排水失效(drainage failure)的風險。因此，材質必須在柔順性與結構穩定性之間取得平衡，使其既能貼合動態水面，又能維持導流與圍控功能。

6 耐久與老化行為：全生命週期的性能維持

- .1 材料的耐久性(durability)與老化行為(aging behavior)，直接影響攔油索的全生命週期效能(lifecycle performance)。長期曝露於紫外線(UV radiation)、機械磨損(abrasion)與海生物附著(biofouling)環境中，會逐步改變材料的物理特性。若抗紫外線能力不足，將導致材料老化與脆化；若抗磨損能力不足，則在岸際或港區操作中容易損壞。海生物附著則會增加重量並改變流體特性，進一步影響攔油索的幾何形態與水動力表現(hydrodynamic behavior)。因此，具備抗UV、耐磨與低附著特性的材料，對於維持長期穩定性至關重要。

7 後勤維護考量：可操作性與再利用能力

- .1 從後勤角度來看，材質選擇亦涉及維護性(maintainability)與再利用能力(reusability)。攔油索在回收後往往附著大量油污，若材料不易清洗(decontamination)，將增加處理成本並降低再部署效率。此外，若材料修補困難(repairability low)或需依賴專業設備，將進一步限制其實際可用性。因此，材料是否易於清潔、修補與儲運(storage and transportability)，是影響整體應變效率的重要因素。

8 任務導向材料：特殊情境下的性能要求

- .1 在特定任務情境下，材質亦需具備專門功能(specialized performance)。例如，在現地焚燒(in-situ burning)作業中，攔油索需具備耐高溫能力(fire-resistant property)，通常採用金屬與耐熱纖維的複合結構；在岸灘或潮間帶環境中，則更強調密封能力(sealing capability)與地形貼合性，而非抗浪性能。這些任務導向的差異，進一步說明材質選擇不存在單一最佳解，而必須依據應變情境進行調整。

9 綜合結論：材質選擇的系統整合邏輯

- .1 攔油索的材質選擇並非單一性能的競逐，而是一種在環境載荷(environmental loading)、油品特性(oil characteristics)、操作需求(operational requirements)與後勤能力(logistics constraints)之間進行整體匹配(system integration)的工程決策。真正有效的材料，不是性能指標最高者，而是在特定場景中，能維持結構完整性(structural integrity)、操作穩定性(operational stability)與功能持續性的那一種。也正是在這個意義上，材質選擇已從單純技術問題，轉化為整體應變系統中的關鍵一環。換言之，材質選用應由「規格導向(specification-driven)」轉為「情境導向(context-driven)」，並納入應變計畫之標準決策流程，而非僅作為採購階段之技術選項。
- 10 另外就本案由為題的橡膠與 PVC 材質討論，橡膠與 PVC 材質並不存在絕對優劣，其適用性應依環境條件與任務需求進行區分。就實務操作而言：
- .1 橡膠材質攔油索的優點：
 - .1 橡膠材質(如 neoprene 或 nitrile rubber)在外海型攔油索的應用中，最大的優勢在於其優異的動態適應能力(dynamic adaptability)與能量吸收特性(energy absorption capacity)。海洋環境本質上是一個高變動的流體系統，攔油索在實際操作中需長時間承受波浪、流速與風場所造成的反覆載荷(cyclic loading)。橡膠材料具備較高的延展性(elongation)與內部阻尼(damping)，能有效吸收瞬間張力(shock loading)，降低結構在高應力條件下的破壞風險。
 - .2 橡膠在疲勞抗性(fatigue resistance)方面表現優異，能在長時間反覆變形的情境下維持材料完整性，這對於外海拖曳(towing operations)或長時間佈放尤為關鍵。其抗撕裂能力(tear resistance)亦普遍優於一般塑膠材料，使其在受到漂浮物撞擊或局部受力集中時，不易產生快速擴展的破壞。
 - .3 從環境耐受性來看，橡膠材料通常具有良好的耐候性(weather resistance)與耐紫外線能力(UV resistance)，在長期曝露於海洋環境下，其性能衰減較為緩慢。此外，其破壞模式多為漸進式(progressive failure)，即在完全失效前會出現明顯變形或性能下降，提供操作人員預警空間，提升整體作業安全性(operational safety)。
 - .2 PVC 材質攔油索的優點：

- .1 PVC (polyvinyl chloride)材質攔油索則在操作便利性(operability)與後勤效率(logistics efficiency)方面展現出明顯優勢。其材料密度較低，整體重量相對輕量化(lightweight structure)，使其在運輸、部署與回收過程中對船舶與人力的負擔較小，特別適用於港內或中低能環境的快速反應任務(rapid deployment scenarios)。
 - .2 PVC 攔油索通常採用織物強化結構(reinforced fabric structure)，如聚酯纖維(polyester)或尼龍(nylon)作為內部骨架，使其在保持一定抗拉強度(tensile strength)的同時，兼顧柔軟性(flexibility)與可折疊性(foldability)。這種結構設計使其具備良好的收納效率(storage efficiency)，可壓縮至較小體積，便於貨櫃化或模組化管理(containerized handling)。
 - .3 在維護層面，PVC 材質通常具有較佳的可清洗性(decontamination capability)，油污較不易滲入材料內部，清潔作業相對簡便，亦有助於提升再利用率(reusability)。此外，其製造成本與維修成本相對較低(cost-effectiveness)，在大規模配置或預置部署(pre-positioning)時具有經濟上的優勢。
 - .4 在實務應用上，PVC 攔油索因其輕便與易操作特性，特別適合用於岸際防護(shoreline protection)、港區圍控(harbour containment)或短時間應變任務。然而，其性能較依賴結構強化層與接縫品質(seam integrity)，在高能環境下需特別注意其使用限制。
-
- .3 橡膠與 PVC 的差異，不在於誰比較「強」，而在於誰在海浪之中「撐得久」。前者吸收能量，後者承受能量；而在外海環境中，決定成敗的，往往不是最大強度，而是對反覆衝擊與循環載荷(cyclic loading)的耐受能力。
 - .4 在材料本體特性上，橡膠通常具有較高之抗撕裂能力(tear resistance)與裂紋擴展抑制能力(crack propagation resistance)，相較於 PVC 材料更能在局部受損後維持結構完整性。然而，在攔油索系統中，抗撕裂性能並非單由外層材料決定，而是由外覆材料、織物強化層(reinforcement fabric)及接縫設計(seam integrity)共同構成之複合結構行為。因此，雖然橡膠系統在整體抗撕裂表現上通常較具優勢，特別是在高能海況與動態載荷條件下，但高品質之強化 PVC 攔油索，在適當設計與製造條件下，仍可達到相當程度之抗撕裂性能。最終效能，仍須回歸整體結構設計與使用環境加以判斷。

- 5 材質選擇不應再以單一強度指標或型錄規格作為主要判準，而應回歸「環境載荷×任務型態×作業條件」之整體評估架構。具體而言，外海高能環境應優先考量具備高疲勞抗性與能量吸收能力之系統，而中低能或快速部署情境，則可採取輕量化與高操作效率之配置。換言之，攔油索材質選用應由「規格導向(specification-driven)」轉為「情境導向(context-driven)」，並納入應變體系之標準決策流程，建立「任務導向配置(mission-based configuration)」或「分級配置(tiered equipment strategy)」之概念，而非僅作為採購階段之技術選項。唯有如此，材質選擇方能真正服務於整體應變效能，而非停留於設備性能的比較。

提問二：外海型攔油索貨櫃組尺寸規格之適切性檢討。

說明：針對採用 10 呎貨櫃作為載具之設計，評估其是否屬特殊規格，並就運輸便利性、裝卸效率、標準化程度及與現行設備之相容性進行整體檢討。

- 1 依據「海洋油污染應變資材量能建構計算指引」之「陸、海上圍攔汲油回收系統組成需求建議」：「若運用充氣式攔油索，建議配置專用充氣機 1 部、捲索機 1 部、動力機 1 部，以 20 呎貨櫃套裝儲存於作業船舶。」這裡講的是「20 呎貨櫃」，與本案所陳不同。
- 2 在討論採用 10 呎貨櫃做為載具的規範是否適宜前，重點應該是如何上船？船上如何固定？上哪種船？哪裡上船？船員是否會操作佈放？這些是工作前提。
- 3 退萬步言，貨櫃只是一個儲存空間，真正需要使用的是捲索機及油壓設備。如果去掉儲存空間，僅把需要的捲索機或攔油索直接搬上船，是否更適合操作？
- 4 就外海型攔油索而言：
 - 1 10 呎櫃最大的疑問不是「能不能裝」，而是「裝進去之後是否仍能形成有效作業系統」。
 - 2 外海型攔油索通常牽涉較大浮力體、較深裙襬、張力構件、連接件、充氣設備、捲索機、液壓動力、吊放裝置、修補包與安全附件。若要進行海上佈放，貨櫃多半需具備「開頂」或「側開」功能，否則捲盤(Reel)的進出與管路連接會受到極大限制，導致其僅能作為「存放箱」，而非有效的應變裝備。

- .3 如果 10 呎貨櫃只是作為「存放箱」，可能勉強可行；但若宣稱是一套完整外海型 oil boom handling system，則必須檢查是否犧牲了攔油索長度、捲收直徑、充氣效率、快速佈放能力或後勤維修空間。
 - .4 10 呎貨櫃可作為機動化、模組化、岸基快速反應單元(Quick Response Unit)，但不宜直接假定其適合作為完整外海型攔油索系統的主要載具。其適切性必須由攔油索長度、滾筒容量、吊放介面、運輸模式與現有 OSRV/碼頭設備相容性共同驗證。
- 5 因此，10 呎貨櫃之適切性評估，不宜僅以容積或可裝載性作為判斷基準，而應建立系統性評估架構(system-based evaluation framework)，至少應涵蓋以下構面：
- .1 系統完整性(System Integrity)：是否能容納完整之攔油索作業鏈(包含捲索機、充氣設備、動力系統及相關附件)？
 - .2 部署效率(Deployment Efficiency)：是否支援快速佈放與回收作業(rapid deployment & retrieval)？
 - .3 平台相容性(Platform Compatibility)：是否可與現有 OSRV、港口吊裝設備及船舶甲板配置相容？
 - .4 操作安全性(Operational Safety)：是否能降低人工作業風險並提升作業穩定性？
 - .5 後勤可持續性(Logistics Sustainability)：是否利於維修、替換、儲運與再部署？
- 6 若無法「同時滿足」上述條件，則該貨櫃尺寸即不宜視為外海型攔油索系統之適當載具。
- 7 現行「海洋油污染應變資材量能建構計算指引」建議採用 20 呎貨櫃套裝配置，其核心目的在於確保設備容量、操作空間及標準化物流體系之相容性。若改採 10 呎貨櫃，除非能證明其在不降低系統完整性與作業效率之前提下，仍具備等效性能(equivalent operational capability)，否則不建議作為外海型攔油索系統之主要載具。
- 8 必須強調，貨櫃本質上僅為儲存單元(storage unit)，而非作業單元(operational unit)。若設計思維過度以貨櫃尺寸為核心，而非以攔油索作業流程與系統需求為出發點，將可能導致「系統為容器服務」，而非「容器為系統服務」的設計偏差。外海型攔油索之配置，應回歸其作業本質，優先確保佈放效率、操作安全與系統完整性。

- 9 外海型攔油索系統的設計，本質上不在於「裝得下多少設備」，而在於「能否在現實海況中形成可運作的系統」。當設計開始以貨櫃尺寸為核心，而非以作業流程與環境條件為出發點時，工程邏輯便已經發生偏移。此時，設備不再服務於應變，而是應變被迫遷就設備。在海上應變這種高不確定性的環境中，真正需要被優先確保的，不是形式上的配置完整，而是系統在壓力之下仍能維持功能的能力。因此，任何載具規格的選擇，都必須回到一個更根本的問題，要回頭檢視，它是否讓整個應變系統更有效運作，還是僅僅讓設備看起來更完整。在風浪之中，系統的價值從來不在於它被如何包裝，而在於它在極限條件下，是否仍然能夠運作。