

理事長開講：當貨物走進海洋～六起 Plastic Pellets 海難 事故留下的課題

When Cargo Enters the Sea: Lessons from Six Plastic Pellets Marine Casualties

2026.09.07 海保署「海洋保育參與國際交流專業服務案」－教育訓練補充教材

陳彥宏*

PART A：概說

1 什麼是塑膠顆粒？(What Are Plastic Pellets?)

- .1 基本定義與形態：塑膠顆粒是塑膠製造最基礎的工業原料，直徑約 2 至 5 毫米，單顆重約 15 至 30 毫克，外觀多為扁豆狀或圓柱狀。
- .2 產業生命週期：石化/再生原料 ⇨ 塑膠顆粒 ⇨ 加工成型 ⇨ 終端塑膠製品 ⇨ 全球消費使用。
- .3 本質轉變的起點：微粒在物流系統中屬於標準的工業原料商品(Commodity Cargo)。材料本身的化學特性未變，但一旦發生包裝破損、貨櫃落海、火災或沉船，微粒脫離人為控制系統進入海洋，其功能身分便由「商業貨物」轉化為「持久性的海洋塑膠污染來源」：石化/再生原料 ⇨ 塑膠顆粒 ⇨ 加工成型 ⇨ 終端塑膠製品 ⇨ 全球消費使用。

2 從單一微粒到全球供應鏈(Global Supply Chain Scale)

- .1 數量規模龐大：全球每年生產的塑膠顆粒以千萬億顆計。依全球塑膠產量與單顆重量推估，每年約達 1.5×10^{16} 顆以上，平均每秒約有數億顆進入全球供應鏈。
- .2 跨國高度流動：原料產地與加工市場多分隔兩地，必須仰賴袋裝(Bags)、柔性集裝袋(Flexible Intermediate Bulk Containers, FIBCs)、箱裝(Octabins)或貨櫃內襯

* 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。

(Dry Bulk Container Liners)，透過全球海運網絡大規模流通。

- .3 風險高度集中：標準化與大型化海運提高了效率，卻也使數以億計的微粒高度集中在單一貨櫃與單艘船舶上。一旦運輸單元在海上失效，原本分散的供應鏈風險將在短時間內集中爆發。

3 慢性流失 vs. 急性逸散(Chronic Losses vs. Acute Losses)

比較維度	慢性流失(Chronic Losses)	急性逸散(Acute Losses)
發生場域	陸域工廠、倉儲、裝卸及陸運操作	海難事故(碰撞、火災、落海、沉船)
流失特徵	被認為占整體顆粒流失的主要部分，來源分散且統計不完整	歐洲供應鏈估算顯示，海運環節占塑膠顆粒總損失量不到 1%，但大型海難可形成低機率、高衝擊的急性污染
風險特徵	低單次量、高頻率、日常持續累積	低機率、高衝擊(Low Probability, High Consequence)
逸散模式	連續微量滲漏	瞬間大量逸散或水下延遲/持續逸散
治理方式	場區清掃、排水過濾、操作規範(日常減量)	緊急應變、漂流預測、岸際清除、跨國協調

4 從普通貨物到海洋污染物(Ordinary Cargo to Marine Pollutant)

- .1 分類制度的盲點：現行危險品規則，如《國際海運危險貨物章程》(International Maritime Dangerous Goods Code, IMDG Code)，主要依據物質固有危險性(如易燃、易爆、毒性)進行分類。聚乙烯(PE)與聚丙烯(PP)顆粒通常不因其本身性質被列為危險貨物。IMO 已於 2024 年提出包裝、運輸資訊與積載等專門建議，但截至目前仍缺乏全球統一的強制性專門運輸規範。
- .2 海洋環境行為的脫節：法律與物流制度將其視為「普通貨物」，但海洋物理機制只依微粒的密度、粒徑、浮力與海流風向運作。一旦外洩，微粒展現出廣泛漂移、沙層埋藏、長期不降解與極難回收等環境特性，形成治理規範與環境後果之間的落差。

5 封存系統與控制連續性(Continuity of Containment)

- .1 塑膠顆粒能安全運送，仰賴整條供應鏈建立的多層封存防線(Multi-barrier System)：商業內包裝 ⇒ 貨櫃結構 ⇒ 棧板繫固 ⇒ 甲板積載 ⇒ 船舶與港口安全。
- .2 屏障承接機制：
 - .1 成功防護：第一道屏障失效 ⇒ 第二道屏障接住 ⇒ 控制維持(例如：袋裝破裂但貨櫃密封未漏)。

- .2 全面崩解：第一道失效 ⇒ 後續屏障相繼失效 ⇒ 封存中斷 ⇒ 微粒進入海洋。
- .3 核心問題：決定是否形成海洋污染的關鍵，不在於是否有單一設備損壞，而在於「前一道防線失效後，下一道防線能不能接得住」。

6 環境逸散與歸宿(Environmental Release and Fate)

- .1 逸散後的兩條環境路徑
 - .1 低密度(PE/PP) ⇒ 漂浮海面 ⇒ 長距離漂移 ⇒ 岸際熱點擱淺 ⇒ 埋藏與再移動；
 - .2 高密度/生物附著 ⇒ 水柱沉降 ⇒ 海床沉積 ⇒ 長期底棲殘留(難以回收)。
- .3 空間維度擴張：事故現場 ⇒ 海面漂移 ⇒ 沿岸輸送 ⇒ 海灘/潮間帶熱點聚集 ⇒ 海床沉積。
- .4 時間維度循環：微粒登岸後不會固定停留，會隨風暴潮汐經歷「擱淺 ⇒ 埋藏 ⇒ 重新暴露 ⇒ 二次漂移再擱淺」的長期循環，使清污時間大幅拉長。
- .5 治理成本規律：
 - .1 事故前(集中狀態)：貨物集中於袋裝與貨櫃，位置明確，控制成本最低。
 - .2 事故後(分散狀態)：化為數億顆微米/毫米顆粒散落海域與沙層，追蹤困難，回收邊際效益極低且治理成本最高。

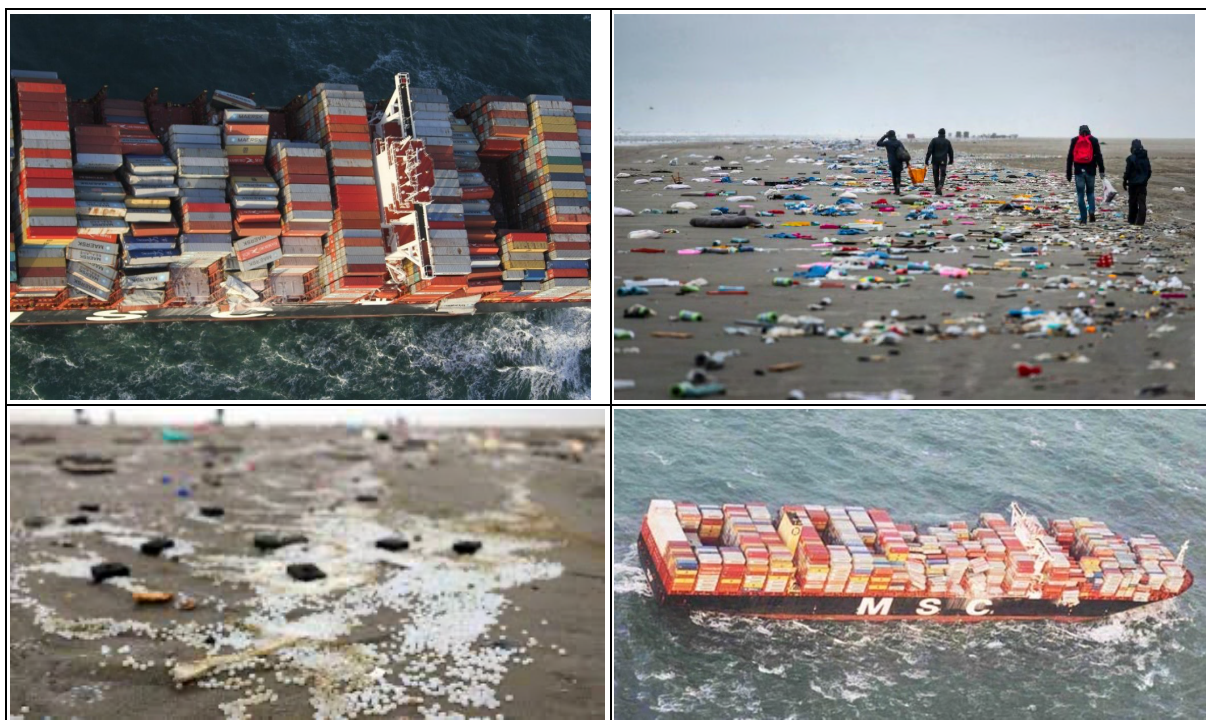
7 六起案例的觀察視角(Analytical Framework)

- .1 後續六起案例並非單純的事故敘述，而是依循標準的系統分析架構展開：觸發事件 (Trigger) ⇒ 首要屏障失效 ⇒ 封存連續性中斷 ⇒ 環境逸散 ⇒ 應變與復原 ⇒ 制度演進。
- .2 六大案例視角：
 - .1 MSC Zoe (2019)：極端海象與甲板繫固連鎖失效(積載悖論)。
 - .2 Trans Carrier (2020)：無海難事故，櫃內袋裝破損與乾貨櫃防護不足引發漸進滲漏。
 - .3 X-Press Pearl (2021)：單一危險品洩漏引發火災沉船，導致微粒受熱熔融變性。

- .4 Solong / Stena Immaculate (2025)：船舶高能量碰撞，引發搜救、滅火、燃油與微粒的多重危害管理。
 - .5 MSC Elsa 3 (2025)：船舶進水沉沒，海床殘骸成為「暫時水下封存」的長期源頭控制課題。
 - .6 MSC Susanna (2017)：港內暴風僅掉落 2 只貨櫃，演變為長達近七年的岸際清理與「清理終點」決策。
- .3 六案的選擇不以污染規模排序，而在於分別代表積載、包裝、火災、碰撞、沉船與長期岸際復原等不同封存失效型態。

PART B：案例

- 1 **MSC Zoe (2019)**：極端海象下貨櫃落海，引發「積載悖論」與海洋污染





.1 情境與背景：

- .1 船舶與航程：巴拿馬籍超大型貨櫃輪(19,224 TEU)，全長約 395.4 公尺，由葡萄牙 Sines 航往德國 Bremerhaven。
- .2 事故時間與地點：2019 年 1 月 1 日至 2 日，於荷蘭瓦登群島(Wadden Islands)北側海域遭遇冬季強烈風暴與大浪。

.2 失效機制與事故鏈

- .1 惡劣海況引發劇烈船體運動，甲板高層貨櫃承受極大的側向與垂直加速度。
- .2 扭鎖、綁紮桿、花籃螺絲及角件組成的繫固系統超出負載極限，局部結構損壞後引發連鎖失效(Cascading Failure)，導致數百只貨櫃落海。
- .3 封存失效鏈：極端海象 ⇒ 船體劇烈運動 ⇒ 繫固系統過載與連鎖失效 ⇒ 貨櫃落海破損 ⇒ 塑膠顆粒(Plastic Pellets)外洩。

.3 污染型態與應變挑戰

- .1 不同密度分流：逸散微粒可依聚合物密度、生物附著及海況產生不同環境歸宿；低密度顆粒較易長距離漂移並登岸，部分顆粒則可能進入水柱或沉積海床，增加後續追蹤與回收難度。
- .2 敏感生態受脅：污染擴及瓦登海(Wadden Sea)敏感潮間帶，重型機械清理會破壞棲地，清理作業受到限制。
- .3 資訊落差：微粒屬一般商業貨物，艙單識別度不足，導致初期難以迅速確認哪些落海貨櫃載有微粒及數量。

.4 核心治理意涵

- .1 積載悖論(Stowage Paradox)：塑膠顆粒長期依一般貨物制度運輸，目前 IMO 雖已提出專門積載建議，強制性規範仍在制定中。然而一旦落海，其環境危害遠高於普通貨損。治理重點在於貨櫃的甲板積載位置與空間防護。
- 2 **MV Trans Carrier (2020)**：無海難、無落海，內部包裝與貨櫃防護雙重失效的漸進滲漏



.1 情境與背景

- .1 船舶與航程：巴哈馬籍滾裝/雜貨船(Ro-Ro/General Cargo)，由荷蘭 Rotterdam 航往挪威 Stavanger 途中遭遇惡劣海況。
- .2 事故特徵：全船無碰撞、無擱淺、無火災，貨櫃完好留在船上，但載運的 26 公噸聚丙烯(PP)微粒中有約 13.2 公噸外洩。

.2 失效機制與事故鏈

- .1 第一層(商業包裝)失效：船體顛簸震動導致櫃內棧板貨物移位，25 公斤裝商業袋反覆擠壓摩擦而破損，微粒在櫃內游離。

- .2 第二層(貨櫃封存)失效：標準 ISO 乾貨櫃屬運輸單元(Transport Unit)，非密閉容器(Containment Vessel)；櫃門縫隙、排水孔與通風孔在海水或雨水滲入帶動下，成為微粒向外滲漏的通道。
- .3 封存失效鏈：動態搖晃 ⇒ 櫃內貨物移位擠壓 ⇒ 袋裝破損游離 ⇒ 水流帶動 ⇒ 經貨櫃結構縫隙持續逸散海中。

.3 污染型態與應變挑戰

- .1 跨境漂移與熱點聚集：PP 密度低於海水，經海流長距離擴散至挪威、瑞典及丹麥沿岸，並集中於海灣與植被區等低能量環境。
- .2 再移動(Remobilisation)：已登岸微粒因風暴潮汐反覆被捲回海中，造成多次污染。
- .3 應變工程化：挪威海岸管理局(Norwegian Coastal Administration, NCA)耗時 16 個月、調查近 900 處地點、清理 431 處熱點，動用篩分法、吸葉機、水浴分離等技術，最終僅回收約 4.4 公噸(約三分之一)。

.4 核心治理意涵

- .1 重大海洋污染不一定伴隨重大海難。治理焦點必須由「外層貨櫃」向前推移至「包裝袋強度與櫃內防護」。

3 **X-Press Pearl (2021)**：單一危化品滲漏引發火災沉船，導致微粒熔融變性的複合災難





.1 情境與背景

- .1 船舶與航程：新加坡籍新造貨櫃輪(全長約 186 公尺)，2021 年 5 月抵達斯里蘭卡可倫坡(Colombo)外海錨地。
- .2 載運貨物：裝載 1,486 只貨櫃，內含 81 只危險品貨櫃(含硝酸)及大量低密度聚乙烯(LDPE)微粒。

.2 失效機制與事故鏈

- .1 控制窗口喪失：初期單只硝酸貨櫃洩漏未及時隔離或卸除，局部異常惡化引發全船大火與連續爆炸。
- .2 多層封存崩解：高溫大火破壞裝載塑膠顆粒的貨櫃與包裝，大量顆粒隨消防水、海浪及後續沉船過程進入海洋。

- .3 封存失效鏈：危化品洩漏 ⇒ 錯失早期處置窗口 ⇒ 火災爆炸失控 ⇒ 空間結構防線全毀 ⇒ 微粒受熱變性並隨消防水及沉船外洩。

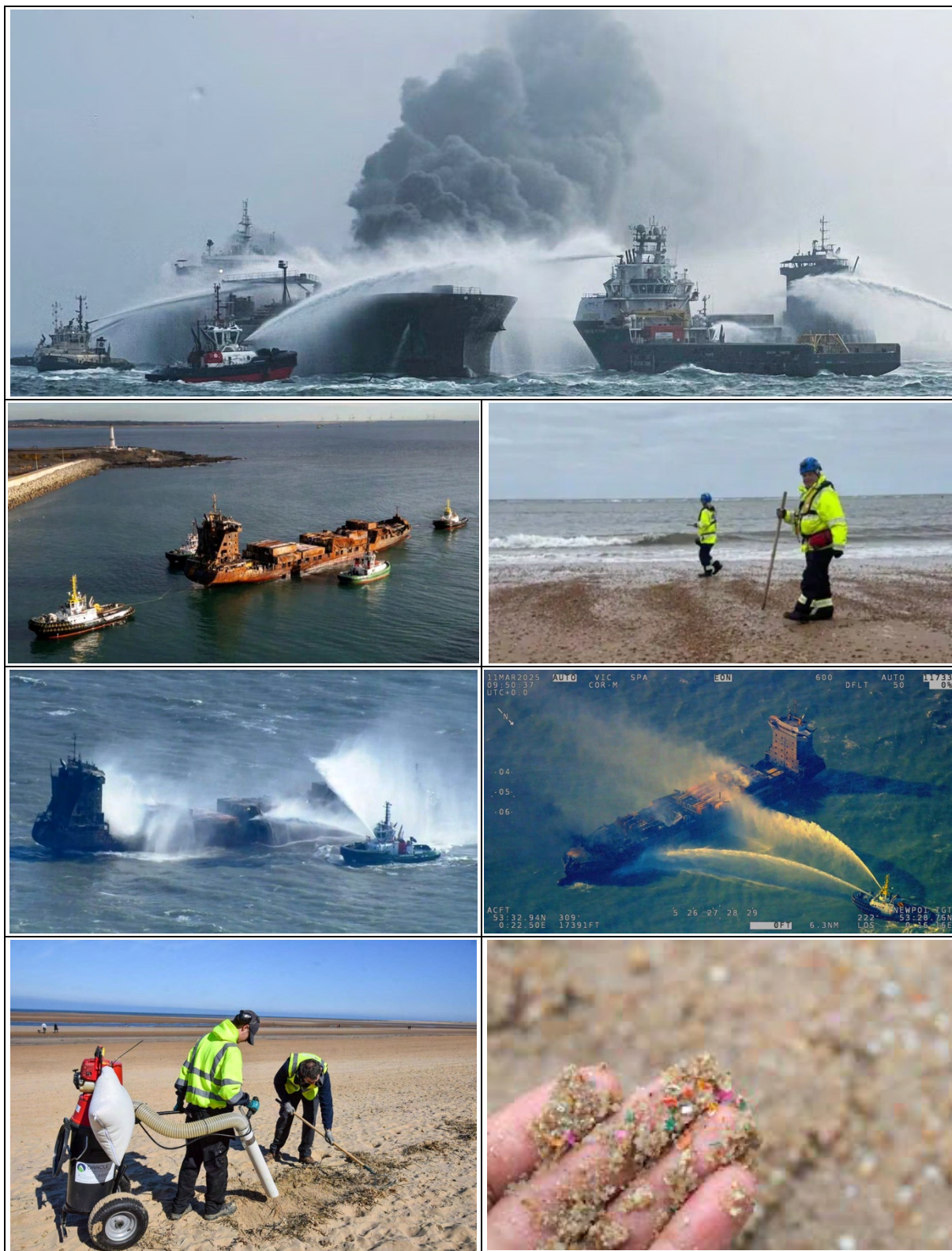
.3 污染型態與應變挑戰

- .1 污染物物理變性(Transformation)：除原始微粒外，高溫產生大量「燃燒黑化顆粒」、「高溫熔融聚結物(Fused mats)」及易碎粉末，大幅增加毒理鑑識與清除難度。
- .2 近岸急性衝擊：錨地緊鄰海岸，微粒數小時內大舉登岸，海上攔截窗口極短。

.4 核心治理意涵

- .1 治理轉折點：X-Press Pearl 事故促使 IMO 將塑膠顆粒海運風險納入專案審議，2024 年通過《海運貨櫃運輸塑料顆粒建議》(Recommendations for the Carriage of Plastic Pellets by Sea in Freight Containers, MEPC.1/Circ.909)，建立包裝、運輸資訊與積載等第一階段預防措施。2026 年 MEPC 84 同意發展強制性章程，並朝納入《國際防止船舶造成污染公約》附則 III《防止海運包裝有害物質污染規則》(MARPOL Annex III: Regulations for the Prevention of Pollution by Harmful Substances Carried by Sea in Packaged Form) 及/或《1974 年國際海上人命安全公約》(International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, SOLAS 1974)之強制性規範架構發展。塑膠顆粒治理因此逐步由事故經驗轉化為預防性海運規則。
- .2 終點區分：明確劃分「海事事故終點(火滅、船沉)」與「污染風險終點(沉船與殘骸長期釋放風險)」。

- 4 **Solong / Stena Immaculate (2025)**：高能量碰撞引發火災、油污與微粒逸散，多重危害並發的管理衝突



.1 情境與背景

- .1 船舶與事故：2025 年 3 月 10 日，葡萄牙籍貨櫃船 Solong 以約 16 節航速，在英格蘭 Humber Estuary 外海撞擊依指示錨泊的美國籍油輪 Stena Immaculate 左舷。
 - .2 涉案貨物：油輪載有約 3.5 萬立方公尺航空燃油；貨櫃船載有危險品貨櫃與塑膠顆粒。
 - .2 失效機制與事故鏈
 - .1 人為疏失與高能量撞擊：事故發生時海域能見度受限，Solong 與錨泊中的 Stena Immaculate 發生高能量碰撞，造成船體結構與油艙受損，並引發燃油外洩與火災。火勢進一步波及貨櫃與所載貨物，使原本集中於包裝及貨櫃內的 Plastic Pellets 失去封存保護並進入海洋。
 - .2 多重危害同步展開：人命搜救、船舶滅火、燃油清污、船體拖救與塑膠顆粒防控同時爆發。
 - .3 封存失效鏈：瞭望失效導致碰撞 ⇒ 油艙破裂噴濺 ⇒ 燃油起火波及貨櫃 ⇒ 包裝受熱破損 ⇒ 微粒及熔融殘骸漂散。
 - .3 污染型態與應變挑戰
 - .1 複合污染擴散：燃油與微粒在幾天內隨海流擴散至 Norfolk 與 Lincolnshire 沿岸，岸際同時出現一般微粒與受熱熔融的塑膠塊(Fused mats)。
 - .2 資源排擠與優先序衝突：初期搜救與滅火作業佔據全部拖船與指揮資源，塑膠顆粒的監測與攔截被迫延後。
 - .4 核心治理意涵
 - .1 整合性事故管理(Integrated Incident Management)：重大海難中多種危害會同時爆發，應變體系必須具備跨機關協調能力，合理設定處置優先序(人命 ⇒ 船舶滅火 ⇒ 油污控制 ⇒ 微粒長期環境清除)。
- 5 **MSC Elsa 3 (2025)**：進水沉沒引發污染源分化，海床沉船作為「暫時水下封存」的長期風險



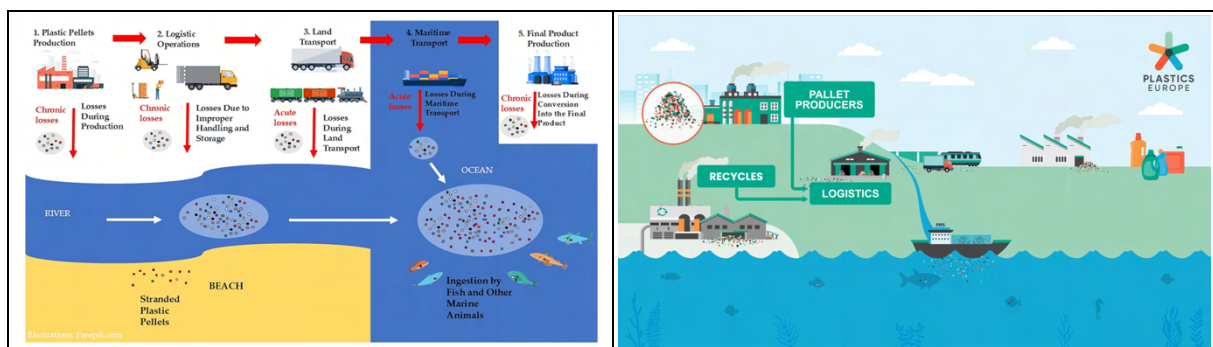
.1 情境與背景

- .1 船舶與航程：船齡近 30 年的賴比瑞亞籍貨櫃船，2025 年 5 月 24 日由印度 Vizhinjam 航往 Kochi 途中發生嚴重進水與右傾，翌日晨於 Kerala 外海沉沒。
- .2 載運貨物：載有約 640 只貨櫃(含碳化鈣危險品、大量聚乙烯與聚丙烯原料)及 450 餘公噸燃料油。

.2 失效機制與事故鏈

- .1 船體結構失效與全損：船舶失穩進水後棄船沉沒，原集中於船上的貨物瞬間發生空間解構與分化。
- .2 封存失效鏈：船體進水 ⇒ 橫傾失穩 ⇒ 船舶沉沒全損 ⇒ 貨櫃分裂為浮游、登岸與水下沉積三種狀態 ⇒ 水下微粒面臨長期滲漏風險。
- .3 污染型態與應變挑戰
 - .1 污染空間三分化：
 1. 海面：燃油洩漏與漂流貨櫃威脅航安。
 2. 岸際：約 46 只貨櫃漂抵海岸，微粒大面積登岸衝擊當地漁民生計。
 3. 海床(最核心)：沉船本體與隨之沉入 51 公尺深海底的貨櫃。
 - .2 水下工程挑戰：動用多波束測繪、遙控無人潛水器(Remotely Operated Vehicle, ROV)及飽和潛水技術，先封堵油艙開口並抽除殘油(Hot Tapping)。
- .4 核心治理意涵
 - .1 暫時水下封存(Temporary Submerged Containment)：沉入海底的乾貨櫃與商業包裝並非永久儲存設備，長期海水腐蝕仍有遲延釋放風險。船舶沉沒非事故終點，治理責任必須延伸至海床殘骸監測與源頭控制(Source Control)。

6 **MSC Susanna (2017)**：港內暴風僅掉落兩只貨櫃，演變為近七年岸際治理與「清理終點」決策





.1 情境與背景

- .1 船舶與事故：2017 年 10 月 10 日停泊於南非德班港(Port of Durban)，遭遇極端雷暴強風，港內多艘船舶走錨斷纜，該船 2 只 40 呎貨櫃落入港池。
- .2 載運貨物：兩只貨櫃內共裝載 1,980 袋、合計約 49.5 公噸的聚乙稀 (HDPE/LDPE)微粒。

.2 失效機制與事故鏈

- .1 港口繫泊失效引發貨櫃墜海，內部包裝袋在撞擊與浸泡下破裂，微粒脫離港區控制。
- .2 封存失效鏈：港區極端暴風 ⇨ 繫泊失效與貨櫃墜入港池 ⇨ 包裝破裂逸散 ⇨ 潮流帶出港外 ⇨ 沿岸 160~300 公里廣域擴散。

.3 污染型態與應變挑戰

- .1 極端時間反差：落水僅幾分鐘，清理作業卻橫跨 2017 至 2024 年(近七年)，主要承包商投入 110 萬工時，累計回收約 35.8 至 38.8 公噸。
- .2 微粒再補給(Recharge)：已埋入沙層的微粒隨季節風浪反覆暴露並再次擱淺，導致第一階段清理後又多次重啟清除。
- .3 邊際效益遞減：初期單人每日可回收約 380 公克，兩年後降至約 50 公克，過度翻動沙灘反而破壞海岸生態。

.4 核心治理意涵

- .1 清理終點(Clean-up End-point)：確立「不可能 100%完全回收」的實務共識，導入淨環境效益分析(Net Environmental Benefit Analysis, NEBA)與合理可行最低原則(As Low As Reasonably Practicable, ALARP)，以「每人每日 50 公克」作為終止大規模清除之基準，轉入低度長期監測。
- .2 港口介面防護：港口不僅是物流節點，更是封存責任交接介面，須建立港內即時圍堵能力。

PART C：綜評

六起案例在發生時間、水域、船舶類型與初始原因上各有不同，但整合比對後呈現出明確的內在系統規律：

1 事故規模與環境後果並非等比關係

- .1 反差對比：MSC Zoe 掉落數百只貨櫃，是典型高度可見的大事故；MSC Susanna 僅掉落 2 只貨櫃(49.5 公噸)，卻因海洋動力擴散與沙層埋藏，導致長達 160~300 公里、耗時近七年的清理作業；MV Trans Carrier 甚至連一只貨櫃都沒掉，依然造成 13.2 公噸微粒跨國污染。
- .2 本質結論：污染嚴重度取決於「封存何時被突破」與「微粒擴散路徑」，而非單純取決於海難本身的受損畫面。

2 核心共性：封存連續性(Continuity of Containment)的斷裂

- .1 塑膠顆粒從出廠到交付，依賴多重防線共同保護：商業內包裝 ⇨ 貨櫃結構 ⇨ 甲板積載繫固 ⇨ 港口/船體安全 ⇨ 事故後水下控制。
- .2 六起事故的本質，都是「前一道屏障失效後，下一道屏障未能有效接手」：
 - .1 包裝破了，乾貨櫃無法阻擋微粒隨水流滲漏(Trans Carrier)。
 - .2 繫固斷了，一般乾貨櫃落海即失去保護(MSC Zoe)。
 - .3 單一危化品漏了，防護空間被火災全面擊穿(X-Press Pearl)。
 - .4 船沉入海底了，深海貨櫃僅屬暫時水下封存，無法視為永久受控(MSC Elsa 3)。

- .3 六起事故也顯示，Plastic Pellets 治理已跨越單一污染物管制問題，並與 IMO 海洋環境治理的六項功能相互連結：事故前涉及預防(Prevention)、保護(Protection)與準備(Preparedness)，事故後進入應變(Response)、責任與賠償(Liability & Compensation)，最終再回到供應鏈、包裝、積載與運輸制度的永續改善(Sustainability)。六起事故留下的共同課題，仍然是當一道防線(Barrier)失效時，下一道防線能否接得住。

3 三個維度上的不對稱與治理規律

維度	物理現象與演化特徵	治理與管理啟示
形態轉換	集中貨物 ⇨ 廣域分散顆粒 事故前是集中、位置明確的棧板與貨櫃；封存失效後瞬間分散為數以億計的微米/毫米顆粒，並伴隨漂移、埋藏與再移動。	治理槓桿前移：在前端(包裝加固、積載改善、港口圍堵)投入資源的控制效率，遠高於在後端海岸逐顆篩分回收。
時間尺度	事故時間 ≪ 污染與治理時間 碰撞、落海、失穩往往發生於數分鐘至數小時內；但岸際清污、海床調查與環境復原動輒延續數月至數年(如 Susanna 案歷時近七年)。	終點分離原則：船舶事故終點(火滅、船沉、人員獲救) ≠ 環境污染終點 ≠ 治理終點。
危害類型	單一貨損 ⇨ 多重危害耦合(Multi-hazard) 微粒外洩常伴隨船員搜救、船舶滅火、燃油清污與水下救撈同時爆發(如 Solong 案、X-Press Pearl 案)。	整合性事故管理：不可將微粒孤立看待，需在多重危害並發時，建立動態的應變資源優先序協調機制。

4 六起塑膠顆粒(Plastic Pellets)海難事故綜合比較總表

案例船舶與年份	事故空間與情境	觸發事件與首要失效屏障	封存斷裂與逸散機制	污染型態與時間尺度	應變挑戰與核心治理課題	核心啟示
MSC Zoe (2019)	外海運輸 北海 / 荷蘭瓦登海	極端海象與船體劇烈運動 首要失效：甲板繫固與堆疊系統	繫固連鎖失效引發數百只貨櫃落海，落海貨櫃撞擊受損後封存破裂。	浮沉分流(低密度漂浮登岸、高密度沉降海床) 時間尺度：急性逸散 + 長期擴散。	積載悖論：普通貨物身分缺乏特殊積載保護；生態敏感區機械清理受限；艙單資訊不足延誤應變。	貨櫃落海不只是貨損，能將一般商品直接變成跨區域海洋污染。
MV Trans Carrier (2020)	沿岸運輸 北海(荷蘭至挪威)	惡劣海況船舶搖晃震動 首要失效：櫃內 25kg 商業包裝袋	貨物位移摩擦導致袋裝破裂游離，微粒隨櫃內滲入之水流經貨櫃接縫與通風孔持續漏出(貨櫃非密閉容器)。	跨境漂移與熱點聚集(波及挪威、瑞典、丹麥沿岸) 時間尺度：漸進/持續逸散(官方清理歷時 16 個月)。	包裝與封存完整性：無海難亦會漏；登岸微粒反覆再移動；需建立調查、篩分、水浴分離等場址工程化應變。	貨櫃不必掉進海裡，內部包裝與貨櫃次級封存失效就足以形成跨境污染。
X-Press Pearl (2021)	近岸錨地 斯里蘭卡可倫坡外海	單一危化品(硝酸)洩漏 首要失效：危	錯失早期處置窗口引發全船大火與爆炸，	污染物高溫物理變性(原始顆粒、燃燒黑化顆粒、	事故升級與複合污染：近岸反應窗口極短；微粒	局部貨物異常若每一道屏障都接不住，就

案例船舶與年份	事故空間與情境	觸發事件與首要失效屏障	封存斷裂與逸散機制	污染型態與時間尺度	應變挑戰與核心治理課題	核心啟示
		險品隔離與多層安全屏障	高溫燒毀 442 只微粒貨櫃，消防水與船舶沉沒將受熱微粒沖入海中。	熔融聚結物 mats 並存) 時間尺度：急性登岸 + 長期殘留。	與危化品/燃油交織；推動 IMO 建立塑膠顆粒獨立強制性治理規範。	會一路升級成全球矚目的複合災難。
Solong / Stena Immaculate (2025)	外海航道/錨地 英國 Humber 外海	高能量航行碰撞 首要失效：船體結構、貨艙與貨櫃屏障	撞破油輪油艙引發航空燃油大火，火勢迅速延燒貨櫃船甲板，微粒包裝熔融並隨海流漂散。	複合危害擴散(燃油污染+微粒及熔融殘骸漂抵 Norfolk 等岸線) 時間尺度：急性爆發 + 持續清理。	多重危害應變優先序 (Multi-hazard)：人命搜救、船舶滅火、燃油清污與微粒治理同時爭奪資源，需跨機關整合指揮。	重大事故不會只照一種污染物或一套法規發展，撞開的是多套交織的風險系統。
MSC Elsa 3 (2025)	海面至海床 印度 Kerala 外海	船體進水、傾斜與沉沒 首要失效：船體浮力與水下貨物封存	船舶沉沒全損，貨櫃分化為「海面漂流」、「漂抵岸際」與「隨船沉入 51 米深海底」三種狀態。	污染源三維空間分化(海面油污、岸際微粒、水下沉船殘骸) 時間尺度：長期/水下潛在延遲釋放。	暫時水下封存 (Temporary Submerged Containment)：沉沒貨櫃非永久封存，需動用 ROV 與飽和潛水進行水下源頭控制與抽油。	船沉了不代表風險沉睡；海事事故有物理終點，但水下污染源的治理責任必須跟著下潛。
MSC Susanna (2017)	港口/陸海介面 南非德班港 (Port of Durban)	港區極端暴風與船舶失控 首要失效：港口繫泊、貨櫃與包裝屏障	僅 2 只貨櫃落入港池(約 49.5 公噸微粒)，撞擊浸泡破裂後，微粒被潮汐與沿岸流帶出港外廣域擴散。	長距離擴散與沙層再移動(波及 160~300 公里海岸，歷經多次再擱淺) 時間尺度：治理長達近七年 (2017-2024)。	合理清理終點 (Clean-up End-point)：邊際效益遞減(回收率由 380g 降至 50g/人/日)，導入 NEBA 與 ALARP 決定何時合理結案。	兩只貨櫃落水只需幾分鐘，但要清到什麼程度才算合理乾淨，人類花了近七年回答。

5 總結：

塑膠顆粒的海洋治理，核心不在於發生事故後「如何撿拾微粒」，而在於能否在整條陸海物流鏈中，建立一套「一道防線失效時、下一道防線能即時接住」的連續性封存機制。因此，塑膠顆粒治理真正有效的投資點，必須由海岸清除向前移至包裝、貨櫃、積載、事故預警與源頭控制。