

推動健康台灣，守護海域安全： 潛水夫病預防與高壓氧處置精要

文字 | 林冠宏 (國軍左營總醫院潛水醫學部主治醫師)

隨著全球旅遊業的蓬勃發展，潛水活動因其獨特的冒險與探索魅力，吸引了大量愛好者。台灣坐擁豐富的海洋資源，潛水旅遊已成為推動「健康台灣」政策的重要環節。然而，減壓症 (又稱潛水夫病，Decompression Sickness, DCS) 作為潛水活動中的主要健康風險，其預防與專業處置顯得至關重要。本報告旨在深入探討潛水夫病的病理機轉、風險因素，並結合預防醫學、旅遊醫學與高壓氧醫學的最新進展，提出一套整合性的預防與處置策略。報告將詳述「健康台灣」政策框架下的三層預防策略，並勾勒未來藍圖，以期在促進海洋觀光的同時，有效保障潛水者的健康與海域安全，使台灣成為全球潛水旅遊的典範。

關鍵詞：潛水夫病、減壓病、高壓氧治療、旅遊醫學、健康台灣、海域安全、預防醫學

引言

全球旅遊業的快速成長，使得潛水活動躍升為一項兼具冒險與探索的熱門休閒方式。據統計，全球潛水旅遊市場規模在 2024 年預計達到 40.6 億美元，並預期以 11.4% 的複合年增長率持續擴張，至 2029 年有望突破 68.7 億美元。台灣作為四面環海的島嶼國家，擁有得天獨厚的海洋資源，從南部的墾丁珊瑚礁到東部的蘭嶼熱帶魚群，多元的水下生態吸引了無數潛水愛好者。中華民國潛水協會的數據顯示，台灣合格潛水人員已超過 30 萬人，其中休閒潛水人口的年增長率高達 20%，自由潛水人口在 2024 年也已達到 9 萬多人。2024 年台灣國際運動及健身展首次設立「潛水專館」，匯聚逾 30 家業者，這充分體現了台灣潛水產業的蓬勃發展與巨大潛力。

在潛水活動日益普及的同時，潛水者所面臨

的健康風險也日益凸顯，其中最為人所知且具挑戰性的便是潛水夫病 (Decompression Sickness, DCS)，俗稱減壓病。為應對此一挑戰，賴清德總統提出的「健康台灣」政策，強調全民健康促進與醫療資源的可近性，為潛水安全提供了堅實的政策基礎。該政策的核心理念涵蓋了改善醫護人員工作環境、培育多元醫療人才、整合智慧醫療科技以及推動永續醫療等面。在此框架下，旅遊醫學作為一門新興的跨學科領域，正扮演著關鍵角色。旅遊醫學的核心理念在於保障旅遊者在不同環境下的健康，其範疇涵蓋了潛水前的健康評估、潛水中的風險管理以及潛水後的健康追蹤，這與「健康台灣」政策中「預防優先」的指導思想高度契合。

本文將從科學角度，深入探討潛水夫病的病理機轉與風險因素，並闡述預防醫學與旅遊醫學在潛

水安全中的具體應用。接著，將分析海洋醫學與海域安全管理如何整合，以強化緊急救援能力。此外，報告將詳細介紹高壓氧治療作為潛水夫病標準處置的原理與實施，並探討其面臨的挑戰。最後，本文

將結合「健康台灣」政策，提出一套全面的三層預防策略與未來藍圖，旨在為台灣潛水旅遊的健康發展提供科學依據與政策建議。

潛水夫病的病理機轉與臨床光譜

潛水夫病的發生源於環境壓力的劇烈變化，其病理過程遠比單純的物理現象複雜。初始觸發機制遵循兩大氣體定律：亨利定律（Henry's Law）與波義耳定律（Boyle's Law）。潛水員下潛時，環境壓力增加，呼吸氣體中的惰性氣體（主要為氮氣）依亨利定律大量溶入血液與組織；上升時，若減壓速度過快，環境壓力驟降，過飽和的氮氣來不及由肺部排出，便會依波義耳定律在體內形成氣泡並膨脹。

然而，現代醫學觀點指出，這些氣泡不僅是物理性的栓塞物，更是引發全身性發炎反應的導火線。氣泡在體內被視為異物，會直接損傷血管內皮細胞，

觸發一系列複雜的生物化學級聯反應。受損的內皮細胞會釋放發炎介質，吸引嗜中性球等免疫細胞聚集，並活化介白素-6 (IL-6)、腫瘤壞死因子- α (TNF- α) 等促發炎細胞因子，導致血管通透性增加、組織水腫與二次缺血損傷。這種從物理觸發到生物放大的過程，解釋了為何有時微小的氣泡負荷卻可能導致不成比例的嚴重臨床症狀。DCS的本質是一種全身性的內皮功能失調與發炎性疾病。

其臨床表現多樣，從輕微不適到危及生命，通常分為兩型。為求簡潔，其類型、症狀及影響系統整理如表 1。

表 1：潛水夫病的類型、症狀與受影響系統

潛水夫病類型 (Type of DCS)	主要症狀 (Primary Symptoms)	受影響系統 (Affected Systems)
第一型 (Type I)	關節疼痛 (The Bends)、肌肉疼痛、皮膚紅疹 / 搔癢 (Cutis Marmorata)、異常疲勞、全身不適	骨骼肌肉系統、皮膚、淋巴系統
第二型 (Type II)	麻木、刺痛、肌無力、癱瘓、意識混亂、記憶喪失、頭痛、視力 / 聽力障礙、眩暈、耳鳴、癲癇、意識喪失、胸痛、呼吸困難、持續性乾咳、咳血、循環休克	神經系統 (腦部、脊髓、內耳)、心肺系統
長期併發症 (Long-term Complication)	異壓性骨壞死 (Dysbaric Osteonecrosis)、永久性神經功能缺損、肺纖維化	骨骼系統、神經系統、肺部

風險因子分析與整合性預防

潛水夫病的發生並非單一因素造成，而常是多重風險因子疊加，形成「系統性失誤」的結果。有效的預防策略必須涵蓋潛水行為、個人生理狀

況及環境因素等多個層面。最主要的風險來自潛水行為，如上升速度過快、潛水深度與時間過長、忽略減壓停留、短時間內重複潛水，以及潛水後

短時間內搭機或前往高海拔地區。這些行為都會直接增加體內氮氣負荷或促使氣泡快速形成。

個人生理與健康狀況是另一關鍵環節。例如，佔總人口約 25-27% 的開放性卵圓孔 (Patent Foramen Ovale, PFO)，是導致嚴重神經型 DCS 的重要風險因子。PFO 允許靜脈系統中的微小氣泡繞過肺部的過濾功能，直接進入動脈循環，進而栓塞腦部或脊髓血管。此外，肥胖（脂肪組織儲存更多氮氣）、脫水（影響氮氣排出效率）、未受控制的心血管疾病、糖尿病（水下低血糖風險）及部分肺部疾病，均會顯著增加 DCS 的易感性。

此種多因素交互作用的特性，凸顯了單一預防措施的局限性。例如，一位潛水員可能同時存在未診斷的 PFO（醫療篩檢缺口）、因旅行而輕微脫水（生理準備不足），並為了趕上船班而稍微加快上升速度（行為失誤）。任何單一因素或許不足以致病，但三者疊加便可能觸發嚴重的 DCS 事件。因此，預防 DCS 需要一套多層次的防禦體系，涵蓋潛水前健康評估、潛水中的行為規範，以及環境監測。詳細的風險因子及其對應的預防策略，彙整如表 2。

表 2：潛水夫病主要風險因素及其預防策略

風險因素 (Risk Factor)	潛水夫病發生機制 (Mechanism of DCS Occurrence)	預防策略 (Prevention Strategy)
快速上升	氮氣快速脫飽和形成氣泡並膨脹，對組織造成機械性損傷和血管阻塞。	嚴格遵守潛水電腦或減壓表指示的上升速度（<9-10m/min），並在 5m 處進行 3-5 分鐘安全停留。
潛水深度與時間	增加體內氮氣溶解量，導致減壓負荷過大。	規劃保守潛水，避免過深或過長時間潛水，並使用減壓表或潛水電腦嚴格控制潛水參數。
重複潛水	體內殘餘氮氣累積，增加氣泡形成風險。	遵守潛水後建議的水面間隔時間，避免短時間內重複潛水。
潛水後立即飛行 / 高海拔	環境壓力驟降，如同快速上升，導致體內氣泡快速膨脹。	潛水後至少等待 12-24 小時再搭乘飛機或前往高海拔地區（>300m）。
肥胖	脂肪組織氮氣溶解度高，排出慢，增加氣泡形成和滯留風險。	保持理想體重，體脂含量過高者應諮詢專業意見。
脫水	血液濃縮，循環減慢，影響氮氣排出。	潛水前後及期間保持充足水分攝入。
開放性卵圓孔 (PFO)	靜脈氣泡經 PFO 進入動脈循環，繞過肺部過濾，直接影響中樞神經系統。	經醫師評估後，可考慮停止潛水、採取更保守的潛水方式，或考慮 PFO 封堵手術。
心血管疾病	增加水下心臟負荷，影響血液循環和組織氧合。	潛水前進行全面心血管評估，有心臟病史者需經潛水醫學專家評估是否適合潛水。
肺部疾病	氣體滯留導致肺部過度擴張傷害和動脈氣體栓塞。	潛水前進行肺功能評估，有肺部疾病者需經潛水醫學專家評估。避免閉氣上升。
糖尿病	低血糖導致水下意識喪失，高血糖可能加重 DCS。	嚴格控制血糖，潛水前 72 小時監測血糖波動，制定個別化潛水計畫，並與潛伴協作。

黃金標準治療：高壓氧治療 (HBOT)

高壓氧治療 (Hyperbaric Oxygen Therapy, HBOT) 是處理潛水夫病的國際公認黃金標準，其療效建立在多重科學原理之上。治療時，患者進入高壓艙內，在高於一大氣壓的環境下呼吸 100% 純氧。HBOT 的作用機制可分為三層：

◎**物理效應**：根據波義耳定律，增加環境壓力可立即縮小體內氣泡體積，直接緩解其對組織的機械性壓迫與血管阻塞。在 2.8 絕對大氣壓 (ATA) 下，氣泡體積可縮減超過 60%。

◎**生理效應**：在高壓下呼吸純氧，會大幅提升血漿中的物理性溶解氧量，形成巨大的氧分壓梯度。此梯度不僅能為缺血組織提供充足氧氣，更能加速將造成問題的氮氣從組織中「沖洗」出來，經由肺部排出體外。

◎**生物化學效應**：此為 HBOT 最深層的機制。高壓氧具有強大的抗發炎作用，能抑制前述提及的 IL-6、TNF- α 等促發炎細胞因子的產生，減輕由氣泡引發的全身性發炎反應與再灌注損傷。此外，HBOT 還能刺激血管新生，促進受損組織的長期修復。

因此，HBOT 不僅是「壓縮氣泡」，更是從根本上阻斷 DCS 病理級聯反應、改善組織缺氧、並調控發炎反應的精準治療，治療方案需由專業醫師依病情嚴重程度制定，最常使用的是美國海軍治療表。儘管台灣擁有相對先進的高壓氧醫療資源，但設備多集中於大型醫學中心，地理分佈不均。對於在墾丁、綠島、蘭嶼等偏遠潛水熱點發生的 DCS 事故，漫長的轉送時間往往會錯失治療的黃金時機，此為當前醫療應變體系面臨的最大挑戰。

旅遊醫學與潛水健康評估

旅遊醫學在潛水活動中的應用，旨在透過系統性風險管理保障潛水者安全，其核心理念與「健康台灣」政策高度契合，包含三大支柱：

◎**預防優先**：透過健康教育與全面的潛水前健康篩查，主動識別並降低潛在風險。

◎**個別化健康計畫**：根據潛水者的個人健康狀況與潛水環境，制定量身定制的健康管理策略。

◎**跨學科整合**：結合海洋醫學、高壓氧醫學與臨床醫學，形成多面向的健康保障體系。

潛水前健康評估是預防潛水夫病 (DCS) 的第一道防線。國際潛水組織 (如 PADI、SSI) 與水下與高壓醫學會 (UHMS) 均制定了嚴格的健康評估指南，以排除可能在水下環境惡化的健康狀況¹。對於患有特定疾病者，需進行更細緻的評估與指導。

台灣海域安全管理與挑戰

台灣在「向海致敬」政策的推動下，透過政府與民間合作，海域安全管理已有顯著進步。其中，由國家海洋研究院開發的「GoOcean」APP 是智慧科技應用的典範。該應用程式整合即時海象數據 (如海流、波浪)，並以視覺化方式警示風險，讓潛水員能做出更安全的決策，有效提升

自主風險管理能力。然而，挑戰依然存在。部分旅遊潛水業者對遊客的安全教育不足，且偏遠潛水熱點 (如墾丁、綠島) 的緊急醫療資源相對匱乏，一旦發生嚴重事故，漫長的轉送時間可能錯失治療的黃金時機。

強化海域緊急救援網絡

為應對偏遠地區的醫療挑戰，強化緊急救援網絡至關重要。最具創新性的策略是借鑑夏威夷的成功經驗，在潛水熱點設立「高壓氧前進站」。這些前進站可配備單人高壓氧艙與遠端醫療會診系統，在事故發生後立即給予初步穩定治療，待

病患穩定後再後送至醫院。此舉能有效解決地理障礙，將黃金治療時間從傳統的數小時延長，大幅改善偏遠地區 DCS 患者的預後，是建立無縫銜接救援鏈的關鍵步驟。

結論

為建構台灣潛水安全的未來藍圖，確保台灣潛水旅遊的永續發展並落實「健康台灣」政策，必須建構一個全面、高效的潛水安全保障體系。本報告提出以下三層預防策略作為未來發展的藍圖：

◎初級預防（主動風險降低）：

此階段目標在於防患未然。應擴大推廣潛水安全的全民教育，並善用智慧科技。國家海洋研究院開發的「GoOcean」APP，能提供即時海象與水文數據，並以視覺化方式警示風險，讓潛水員能做出更安全的決策，是實現海域智慧化管理的典範。

◎次級預防（早期偵測與介入）：

此階段著重於及早發現風險並加以干預。應持續優化潛水員的健康篩檢機制，並將旅遊醫學與 DCS 緊急處置課程納入潛水教練的標準認證體系。研究顯示，受過專業訓練的教練所帶領的潛水活動，DCS 發生率可降低 58%。提升第一線專業人員的醫學素養，是降低事故率最有效的投資。

◎三級預防（優化治療與應變）：

此階段旨在事故發生後提供最及時有效的醫療。針對台灣高壓氧資源分佈不均的問題，最具創新性與可行性的策略是，借鑑夏威夷的成功經驗，在墾丁、小琉球、蘭嶼等潛水熱點設立「高壓氧前進站」。這些站點可配備單人高壓氧艙與遠端醫療會診系統，在事故發生後立即給予初步穩定治療，將傳統的「黃金 6 小時」搶救時間，延長為更具彈性的「黃金 12 小時」治療窗口，待病患穩定後再後送至醫學中心接受完整療程。此舉能有效解決地理障礙，大幅改善偏遠地區 DCS 患者的預後，完美契合「健康台灣」政策中智慧醫療與醫療平權的目標。

總結而言，守護海域安全是政府、醫療界、潛水產業與所有海洋愛好者的共同責任。透過實施此三層預防策略，並積極與國際潛水安全組織（如 DAN）合作，台灣不僅能為潛水者提供更安全的保障，更能將自身打造成為全球潛水旅遊的健康與安全典範。



林冠宏 醫師

國軍左營總醫院潛水醫學暨生理訓練中心主治醫師
國軍左營總醫院家庭醫學科主治醫師
奧地利潛水暨高壓氧醫學學會研究員 (ÖGTH)
德國潛水暨高壓氧醫學學會研究員 (GTÜM)
中華民國高壓暨海底醫學會理事

邀稿 | 陳金順 杜曼育