

離岸風場海洋生態研析

示範風場營運期海洋生態監測作業研究(摘要版)

有鑑於我國離岸風電完成108 年度的海洋示範風場後，將進入正式、大規模開發的啟動，為了解開發離岸風電之生態影響，本計畫針對海洋示範風場蒐集、彙整相關的海洋生態監測生態資料，以協助主管機關達到有效的監督與評估。

本計畫包含海洋示範風場於風場區與對照區在施工前之基線調查（107 年）、施工期間（108 年）與營運期間（109年）的監測作業研究。透過風場作業之實務，最適切地釐清如何透過合適的調查與監測方法來蒐集科學數據，以系統性彙整分析，合理評估風場開發影響並提出有效的減輕對策。整合三年之監測研析成果說明如下：

一、鯨豚

分為鯨豚目視和水下聲學監測兩大重要工作項目，目視調查工作部分，包含收集鯨豚目擊時間、地理和環境因子，以及個體履歷、體表病灶、群體行為等生物資訊，以利進一步的鯨豚目擊率和族群分布趨勢，與健康指標變化分析等。

本計畫亦搭配國際現行研究離岸風電開發與鯨豚生態影響的重要研究工具：水下聲學監測，可彌補目視調查於天候海況和夜間調查之生態資料獲取限制。

調查期間所收集彙整的相關人員意見、實務經驗回饋，滾動式修正調查設計、工作流程、資料庫建置、安全規範事項等，提供主管機關及未來相關海上鯨豚調查團隊訂定海上作業規範和資料庫倉儲管理的重要依據，強化未來應用不同開發風場的可行性。

本計畫所彙整的三年度鯨豚生態調查資料和經驗，是我國首批涵蓋離岸風場施工前、中、後的鯨豚生態監測資料和分析成果。結合盤點國外研究文獻和經驗，有助於探討我國商業規模的離岸風場施工對鯨豚族群造成的潛在影響，加強主管機關在鯨豚生態監測業務，與監測資料的了解和應用。

(一) 鯨豚目視調查實證場址

於海洋風場區其環域(buffer) 4 公里為範圍，設計 6 條穿越線，每條穿越線長度約為 39 公里，涵蓋新竹鹽寮溪至苗栗縣後龍溪間、新竹香山外海至外埔漁港外海，水深從 5 至 50 公尺的海域。

另為了解示範風場開發對鯨豚生態的潛在影響，另擇一與風場區不重疊之對照調查區域，位於苗栗縣後龍鎮至通霄鎮之間(北界為公司寮漁港，南界為苑裡漁港)，在水深 5 至 35 公尺之海域範圍設計 6 條穿越線進行調查，其每條穿越線長度約為 39 公里。

每航次的航線選取部分，採用取出不放回的簡單隨機抽樣方式，自 6 條規劃之穿越線隨機抽取 2 條。以 2 側 500 公尺為有效觀測範圍

計算，每完整航次(2 條穿越線)觀測面積約占調查區總面積的 30 %。此外，每條穿越線需航行超過 50%長度才視為有效的調查航線。船隻在調查過程盡可能依照規劃之調查航線行駛，然實際航跡將因水深、海況、天氣及海面干擾如：施工工程、海上漁具漁網等環境因素，航行航跡可能偏移既定航線。

本計畫搭乘 CT2 等級以下之娛樂漁船或小型漁船，在海洋風場區調查區及對照區域進行共 40 航次(海洋風場區：20 航次、對照區：20 航次) Z 字型穿越線調查之船隻鯨豚目視調查。內容包含在海面上搜尋鯨豚，並於目擊和追蹤期間辨識鯨豚種類、觀察群體大小、母子對數量、群體行為狀態。本計畫也透過數位錄影機拍攝鯨豚水面活動，並以數位照相機拍攝個體的身體 2 側照片以辨識群體中的不同個體。

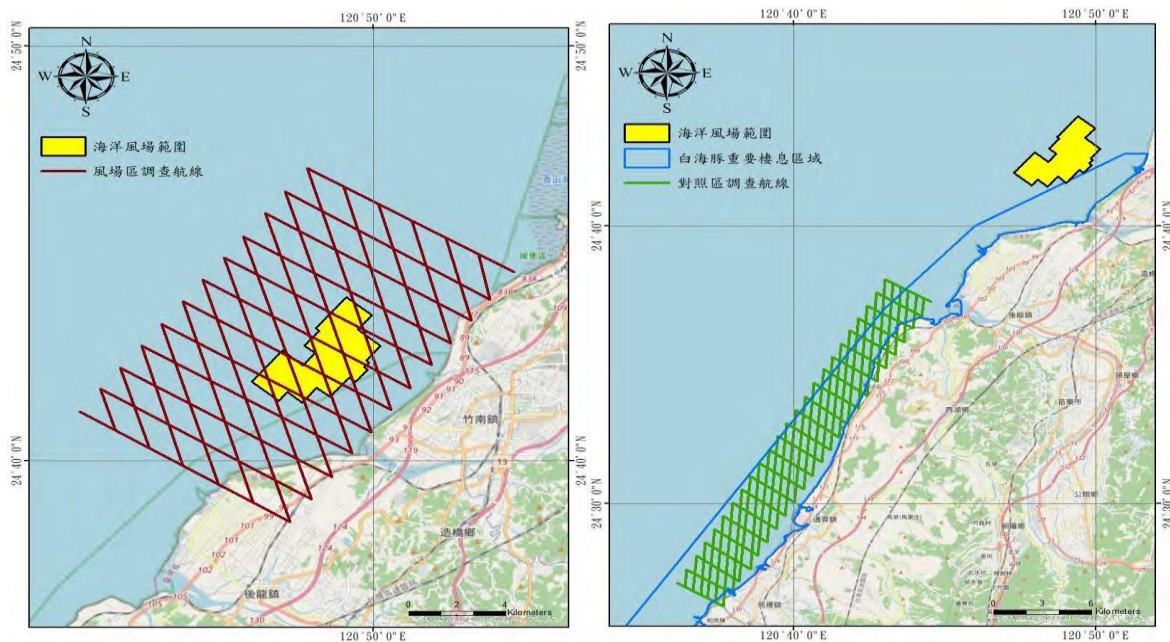


圖 1、本計畫鯨豚監測風場區(左)與對照區(右)航線示意圖

進行目視調查時，調查船隻按照規劃航線以 6-10 節之航速行駛。觀測時有至少 3 名以上具有鯨豚野外觀察經驗的人員在船上值勤，以肉眼、雙筒望遠鏡觀測船隻航行前方 180 度的海面。由於在天候差的情況下，有很高機率會誤判鯨豚是否出現，甚至低估鯨豚的活動頻度，故所有調查僅採納能見度在 1 公里以上、平均浪高在 1 公尺以下(蒲福風級 0-3 級)、無雨無霧無嚴重逆光，且沒有正在進行動物觀察時的調查航跡，為有效努力里程。

船隻目視調查的過程中，利用 GPS 定位儀紀錄每航次的所有航跡。此外，於有效觀測期間至少每 10 分鐘標定一個環境測站，並記錄當時的時間、經緯度、值勤的觀測人員姓名、觀測條件(能見度、浪高、天候、雲層覆蓋度、逆光等...)，以及海洋環境因子的監測資料(至少應包含：水深、水表溫度、鹽度、濁度、pH)。發現鯨豚時，記錄最初發現動物時的船隻所在位置(發現點)，並估測動物群體離發現點的直線距離、以羅盤測量群體位置與航線之間的夾角，以計算動物群體被發現

時距離航線的最近直線距離。慢慢接近動物群體後，再記錄群體接觸位置(接觸點)，以及採集水樣記錄動物出現時附近的環境因子資料，並以目視或照片辨識估測其群體大小與母子對數量。如動物未表現明顯的躲避行為，則嘗試追蹤至少 10~30 分鐘的群體移動軌跡，並觀察群體行為狀態(游走、覓食、社交、休息、其他)。

穿越線調查

1. 由6條是事先規劃之穿越線隨機選取航線2條航行。
2. 前方三名人員於船艙以肉眼、望遠鏡不間斷得搜索海面。
3. 船側一名人員每10分鐘採水，紀錄當下船隻經緯度及環境因子。
4. 另一人員休息，每20分鐘輪替一次。
5. 目擊鯨豚時，船上調查人員變換工作配置。



目擊鯨豚調查工作

1. 以望遠鏡羅盤紀錄群體位置與航線之間的夾角。
2. 記錄發現點及接近點(距離鯨豚200公尺以內)時間、經緯度。
3. 採水並紀錄接近點之環境因子。
4. 照片、影像資料收集，影像分析、紀錄之用。
5. 觀察紀錄鯨豚行為，每5分鐘記錄位置、行為與水深，並估算個體數。



圖 2、鯨豚目視現場調查執行流程

(二) 鯨豚水下聲學調查實證場址

本計畫依照雙重梯度原則(Ellis & Schneider 1997)，並參考中華白海豚在臺灣西部海域的分布梯度，於不同水深和緯度海域定點收集長時間水下錄音，並應用高頻脈衝波能量偵測器，搜尋水下錄音中的回聲定位聲音，藉此了解中華白海豚與其他可能出現的齒鯨，在調查樣區內的時空分布變化特性。

風場樣區設置 3 組水下聲學監測站(OWF-S1、OWF-S4、OWF-S5)，對照樣區則設置 2 組水下聲學監測站(Ref-S2、Ref-S3)。然而，由於過去 Ref-S2 監測站是當地漁民密集作業區域，導致儀器遺失或是勾到漁網之事件頻繁發生，在徵詢各方意見與內部討論後，決定將監測站移往河口南方有礁岩的海床附近(漁民會迴避在礁岩附近佈放網具)，雖與原點位置差距約 1.9 公里，但依舊在河口範圍內(圖 3)。其海床環境除了 Ref-S2 監測站附近有些許礁岩，其餘4 組監測站周遭環境之底質皆以泥沙為主。其中，Ref-S2 與 OWF-S5 監測站為河口域近海之監測站，分別佈放於後龍溪河口(Ref-S2)與中港溪河口(OWF-S5)近海位置。OWF-S1 監測站水深於 17.5~18.5 公尺，其他監測站水深約在 5.5~10 公尺之間。2 個樣區分別進行至少 3 次水下聲學監測，每次至少 20 天，透過長期監測鯨豚聲音，了解鯨豚在苗栗近海之空間分布模式。水下聲學監測站以底碇之方式建立(圖 4)，將底碇重物固定在海床上，利用繩索將底碇重物與長約 2.5 公尺的浮球相連，再將錄

音儀器固定於繩索上離海床上約 1 公尺的位置，並在佈放時依據當地海洋環境特性適當調整儀器固定的方法，以避免海面風浪噪音、海流噪音、儀器固定設備撞擊、摩擦產生的噪音干擾錄音資料。



圖 3、本計畫鯨豚水下聲學監測站分佈示意圖

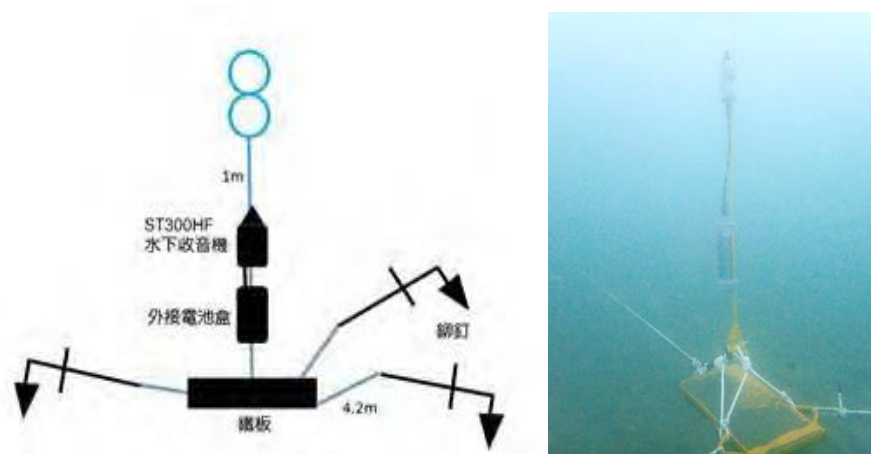


圖 4、鯨豚水下聲學監測站佈放示意圖

本計畫應用水下聲學監測調查鯨豚的活動模式，透過偵測鯨豚發出的水下聲音(回聲定位聲音)來調查鯨豚的出現時間。本計畫採用 Soundtrap 300 HF 海洋錄音機收集水下錄音，Soundtrap 300 HF 可以有效監測 20 赫茲~150 千赫茲的頻率範圍，其自有噪音在 2 千赫茲以上之頻率範圍約為 37 分貝(參考數值：1 微帕斯卡)，且最高可達 576 千赫茲的取樣頻率，因此包括：中華白海豚與露脊鼠海豚等台灣西岸主要關鍵物種的聲音皆可被有效收錄，使得 Soundtrap 300 HF 非常適合用於監測台灣西岸的鯨豚監測。而收音機排程設定與採樣頻率以每 5 分鐘錄音 5 分鐘、

取樣頻率 192 千赫茲的排程設定進行採樣。此外，由於海洋風場非常接近中華白海豚棲息地，因此本計畫以中華白海豚為主要偵測目標。

水下聲學儀器之佈放

1. 至預計佈放儀器之監測站點位，確認該點位的環境狀況(泥沙地/礁岩)。
2. 將已經綁好之鐵板、船錨及主纜繩拋至海中，並將主纜繩拉直後(垂直90°)，以GPS定位。
3. 1號潛水夫沿著主纜繩下去將纏繞的鐵板及船錨佈放呈穩定之狀態。
4. 2號潛水夫沿著主纜繩下去將錄音儀器綁在中間鐵板上，其儀器位置距離海床約1公尺。



水下聲學儀器之更換

- 至先前定點位置將掛有船錨之主纜繩投入海中，1號潛水夫沿著主纜繩擴大搜索約半徑20公尺，搜索時間約20分鐘，如有發現儀器，將主纜繩勾至鐵板上，再由2號潛水夫下去替換儀器。
- 在潛水夫搜索及更換期間皆須注意氣泡之位置，也要注意主纜繩之動靜(暗號)。



圖 5、水下聲學監測調查現場調查執行流程

(三) 三年綜合分析討論

本計畫自 2018 年至 2020 年於海洋風場區及對照區目視調查共累積 120 航次，經過 500 次重複抽樣後，若是以經緯度作為參數，白海豚於苗栗外海的 50%核心區域約在後龍溪口，而若是以經緯度和水深作為參數，白海豚於此區域偏好的水深約在 6 至 10 公尺，與歷年各研究執行之調查結果——白海豚偏好近岸河口海域相符。

彙整三年的白海豚照片辨識紀錄，海洋風場區共目擊過 9 隻個體，為老年期 2 隻、成年期 3 隻、青年期 3 隻及少年期 1 隻個體，全部在對照區有目擊紀錄，相較於海洋風場區，對照區則有較多次的白海豚目擊記錄，三年累計辨識共 26 隻可辨識個體，比起於海洋風場區目擊過的白海豚個體，年齡組成較年輕，且曾於 2019 年目擊過母子對，幼體屬於幼年期個體。

將風場施工前、中、後所有監測站的聲學資料相比，發現齒鯨在施工前的高度活動範圍位於淺水近岸以及淺水靠近河口的監測站。然而，齒鯨在施工期(2019 年 6 月 1 日至 2019 年 10 月 3 日)的活動量顯著下降，其最靠近風場之監測站在施工階段是幾乎完全沒有齒鯨活動現象。而施工後階段(2020 年 2 月 13 日至 2020 年 8 月 19 日)，齒鯨主要活動範圍從對照區轉移到中港溪口之監測站。將風場區三組監測站其施工前(2018 年)及施工後(2020 年)相同期間(6 月 1 日至 8 月 16 日)的聲學資料做比較分析，發現前後沒有顯著差異，代表齒鯨在此期間，其施工後的活動量逐漸回復至到開發前之狀況。

二、底棲生物及魚類

國內以往未有如離岸風場規模之海域開發，目前國際上認為離岸風場對底棲生物、魚類的主要影響包含打樁噪音、底質擾動、引入新棲地類型、風機及船隻噪音、電磁效應、吸引捕食者、漁法改變、鳥類排擠及底質有機物增加等，挪威的 WWF 組織於 2014 年於「Environmental Impacts of Offshore Wind Power Production in the North Sea: A Literature Overview」說明風機對環境的主要影響為風機設置時對海床的擾動，此擾動會對底棲生態群聚造成影響，並可能造成魚場(fish stock)的食物資源耗損，導致海域生態的生產量及組成產生變化。打樁時的噪音可能會造成魚類及哺乳類的暫時性或永久性的聽覺喪失，生物可能因噪音會離開打樁點位的好幾公里之外，此外，噪音也會影響很多物種的魚卵及仔稚魚時期。而引入硬底質棲地之影響，Leonhard 和 Pedersen 於 2006 年發表試驗結果顯示短期內風場區軟底質中的底棲生物與對照區的底棲生物相無顯著差異，針對風機基樁及拋石上的底棲生物多樣性大增，作者說明若原本屬於沙質海岸地形，則硬底質棲地的引入屬於非自然之改變，但作者引述 1883 年丹麥地質地圖證明海底硬底質曾經存在，認為離岸風機基樁帶來的底棲生物相改變，生物多樣性提昇屬於自然現象。

透過本計畫生態監測分析結果，顯示風場區與對照區的生態群聚結構皆受當地環境特性之影響，在底內生物及底表生物群聚結構組成方面，風場區與對照區皆能明顯地區分開來，但在底刺網捕獲的魚類群聚結構組成部分，則顯示風場區與對照區的水層魚類屬於同一魚系群(fish stock)，但將底刺網及海底籠具所採得之魚類合併分析，則發現季次、測站之間歸集性皆相當高，顯示底棲性魚類群聚結構組成亦受海域底質環境之影響。在季次部分，底棲生物及魚類皆顯示高度的季節歸集性，顯示海洋生物受季節影響程度高。此外，在前兩年的監測中，發現 2017 年即建造完成之 21 號(W21)與 28 號(W28)風機，其底棲生物生態群聚結構組成與鄰近且環境特性一致的風場區測站有明顯的差異，但 21 號風機處，原始地形為礁石，而 28 號風機處，原始海底地形主要為泥沙參半之底質，但散布著石塊，此二處海底地形與其他風場區內主要屬於泥沙底質的環境類型即有所差異。

(一) 實證場址

主要於風場區設置 9 個底棲生物測站(須規劃於基座附近)、6 個底表生物及魚類測站(以底刺網、海底籠具進行，故須避開基座)：對照區則共設置 6 個測站進行底棲生物、底刺網及海底籠具調查，整體調查位址圖如圖 6 所示。共執行底棲生物(錨錠式採泥器) 15 站次，底刺網 12 站次與海底籠具 12 站次。

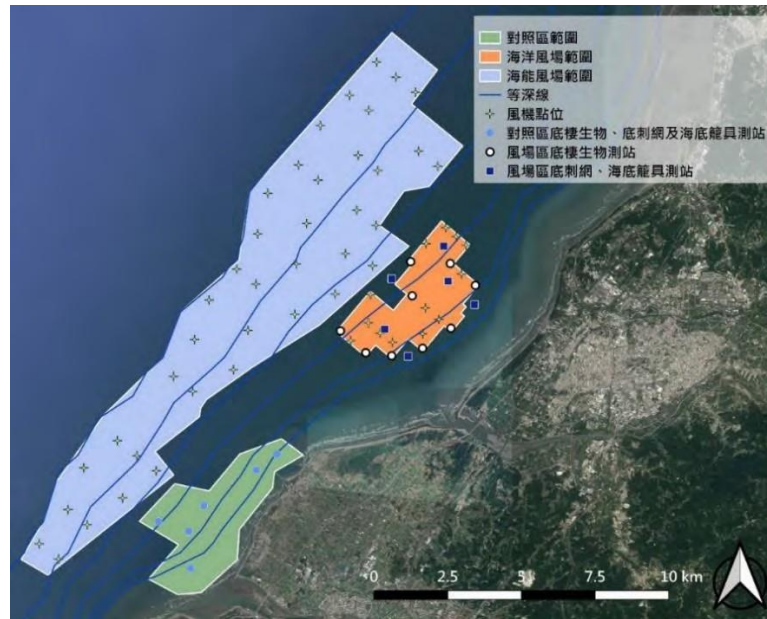


圖 6、本計畫底棲生物及魚類整體調查範圍與測站規劃圖

(二) 三年綜合分析討論

風場區與對照區 2018 年至 2020 年累計採得 327 個分類群的底棲生物。由圖 7 所示，風場區底棲生物與對照區底棲生物的分類群飽和度趨勢相當相似，由趨勢來看，2018 至 2019 年分類群新增的趨勢已漸漸趨緩，顯示在風場區與對照區，於 2018 至 2019 年共四季次（風場區減少一季施工期間調查）的調查已採獲當地大多數的底棲生物分類群，調查的分類群漸漸飽和，理論上於後續季次的調查新增分類群數會漸漸減少，但於 2020 年第一季新增的分類群數量又有較為明顯的增加，恰巧 2019 年第二季調查與 2020 年第一季調查之間為海洋竹南離岸風場打樁施工期間，而 2020 年第二季調查結果延伸此一趨勢，發現分類群數仍持續增加。

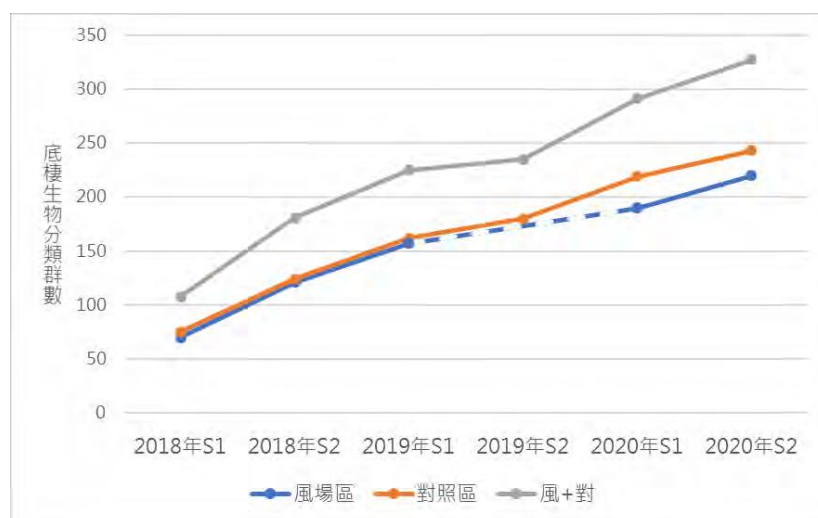


圖 7、2018 年至 2020 年第二季底棲生物物種飽和度圖

魚類生態調查結果，2018 年原於風場區設置 15 個魚類生態調查測站中，第一季採得 10 種魚類，第二季新增（指先前未曾採集到的新的物種）20 種，2019 年風場區調整為 6 個魚類生態調查測站，第一季新增 13 種魚類、第二季為打樁施工期間，未進行調查工作；2020 年為營運期間，測站與 2019 年測站位置相同，共計 6 個魚類生態調查測站，新增 6 種魚類，第二季則僅新增 4 種魚類。對照區方面，2018 年 10 個魚類生態調查測站中，第一季採獲魚類 14 種、第二季新增 8 種，2019 年調整對照區魚類生態測站為 6 個，第一季調查新增魚類 14 種、第二季新增 22 種；2020 年第一季測站與 2019 年測站數量及位置皆相同，第一季新增魚類 3 種，第二季新增 8 種，風場區與對照區於 2018 年至 2020 年第二季累計採得 93 種魚類。由圖 8 所示，風場區魚類的物種飽和度呈現漸漸趨緩的趨勢，而對照區在 2018 年至 2019 年第二季調查到的魚類物種數量呈現快速上升的趨勢，但在 2020 年第一季調查則大幅趨緩，新增的魚種數量相當少，2020 第二季延伸此一趨勢，新增物種數已慢慢趨緩。風場區與對照區合計調查到的魚種飽和度於此六季中已呈現漸漸飽和的結果，會不會因底棲生態環境改變，而有變化，則須待更長期的監測研究才能得知。

綜上，底棲生物生態於打樁施工後有較為明顯的新增分類群數量變化，然而魚類調查中並未發現到此現象。整體而言，目前海洋竹南離岸風場尚為一個完工後，營運期未滿一年之離岸風場，由於目前的監測期較短，尚無法看到整體的變化情形與長期下來風機的影響狀況，然本計畫三年度的調查，已取得施工前期、施工期間與營運初期的海域生態資料，可做為後續長期監測之背景資料。

另依據風場區三年度魚類群聚資料 PCA 分析圖，於各年度、季次與測站間皆沒有明顯的歸集性，底棲生物的群聚分析資料也顯示並未有顯著的差異或歸集性，表示受風機建置後的影響不明顯。但由風場區底棲生物的 DCA 分析圖可見各年度之間稍有歸集性，此可能與風機基樁主要影響為硬基質的引入，且影響侷限在基樁與拋石周邊（約 10 公尺內），對於風機之間原有的泥沙底質海域影響較小，是以目前為得到顯著的影響差異。

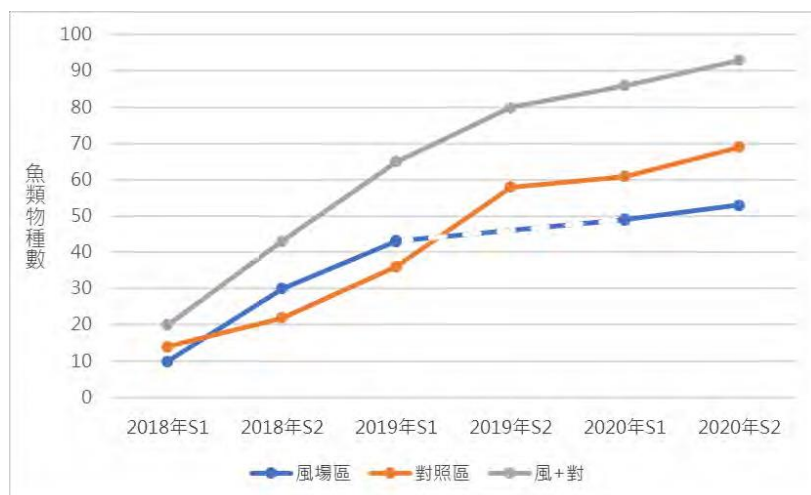


圖 8、2018 年至 2020 年第二季魚類物種飽和度圖

三、鳥類

本計畫共執行三年，2018 年參考整理國外作法並於 7 月至 12 月間於苗栗外海之海洋示範風場進行海上調查，2019 年增加對照區的設計進行海上調查，依照調查成果建議監測範圍面積應至少為風場開發區兩倍，且涵蓋至風場最外側風機基樁向外延伸至少 4 公里範圍。

據此，第三年則規劃延續 2019 年的監測範圍和對照區設計，擴大風場監測範圍以涵蓋原規劃南側對照區，係考量擴大之監測區域可同時監測可能利用風場之鄰近沿岸鳥類，整體區域進行至少 8 趟次的海上穿越線調查，蒐集並瞭解風場區與周圍緩衝區域的鳥類分布概況、比較營運前後的變化，並進一步探討影響鳥類在海上分布的環境因子，另亦持續累積調查人員與物種偵測率資料，並分析過境期之調查頻度合理性。

在儀器監測的部份，2018 年進行包括岸上雷達、熱像儀和錄音機的初步實測，除回饋建議儀器監測應提供設備型號和設定並檢附前測資料外，亦分析基線調查期利用船舶作為海上監測平台的困難。2019 年在船隻上進行海上雷達測試發現 1 公里範圍內偵測率僅 30%，小型鳥類因海面雜訊干擾造成判釋困難，船載雷達受限於雷達架設高度較低(離海面約 3 公尺)，X 波段的射線遭受水氣的影響極大，因此本年度規劃於相對穩定的陸域環境再進行雷達測試，在海洋示範風場的鄰近陸域架設雷達機組，並搭配高倍率望遠鏡觀察以交互驗證雷達的海上鳥類偵測能力，與不同氣候環境中的鳥類監測能力。錄音機的部分在 2019 年進行的測試中確認目前並無適合於海上環境使用之設備，因此建議取消本監測項目。

在繫放追蹤研究部分，在前兩年間挑選使用 3 款特性較適合風場研究之追蹤器—GPS-Argos、GPS-GSM 與 Motus—進行評估，執行共 22 隻個體的候鳥繫放追蹤，此外亦於彰化沿海架設 2 座 Motus 接收站，測試 Motus 追蹤器之無線電訊號與 Motus 系統的網路平台資訊處理。並依據研究成果提出建議中大型的物種(體重大於 120 克)改為使用以 GPS (Global Positioning System，全球衛星定位系統)定位(不可僅以 Argos 衛星進行定位)之衛星追蹤器，另外亦彙整參考近年東亞澳遷徙線的追蹤研究之成功率，提出建議有效樣本數；而針對體重輕(小於 120 克)之物種，可考量以 Motus 自動無線電系統進行追蹤，然而本計畫研究顯示，Motus 系統雖然無法提供如 GPS 衛星追蹤器相較完整且精確的移動路徑，但透過數座接收站的資料整合，能協助辨識追蹤個體進入風場範圍的時間與方向，惟接收站必須架設於離岸風場周邊，故應進一步了解於海上架設接收站之可行性，也應持續蒐集其他輕量化 GPS 衛星追蹤器之資訊，以確立針對小型鳥類(約 120 克以下)之建議追蹤方法。第三年繫放追蹤部分除了持續蒐集與分析去年繫放未斷訊個體之資料外，亦進行澎湖繁殖燕鷗的 GPS-radio 追蹤器繫放。

(一) 海上鳥類穿越線調查分析

本計畫研究地點位於苗栗外海之海洋示範風場，監測範圍涵蓋風

場最外側風機基樁向外延伸至少 4 公里範圍。穿越線以垂直於海岸線且互相平行的方式劃設，參考 Camphuysen et al., (2004)的建議穿越線間的距離設定為 2 公里，全長約 107 公里。以船隻單側 300 公尺為觀察範圍估計監測面積時，穿越線之總監測面積為 64.21 平方公里，約為海洋風場開發面積(10.2 平方公里)的六倍(圖 9)。

在調查偵測率上的結果，本研究參考加拿大的海鳥調查標準作業程序與英國離岸風場標準海鳥調查程序，以 300 公尺作為基礎的調查範圍，並以 0-50、50-100、100-200、200-300 和大於 300 公尺記錄統整 2019-2020 年的調查成果，結果顯示 0-50 公尺區間有最多筆觀察次數，而後依序遞減，但在大於 300 公尺的資料由於還有許多超過 500 公尺甚至一公里以上的紀錄，所以累計的資料筆數較多。假設海上鳥類為平均分布，可發現本研究在 0-50 公尺區間的平均觀察鳥類數量高出其他距離許多(圖 9)，顯示調查人員的偵測率受到距離影響很大。

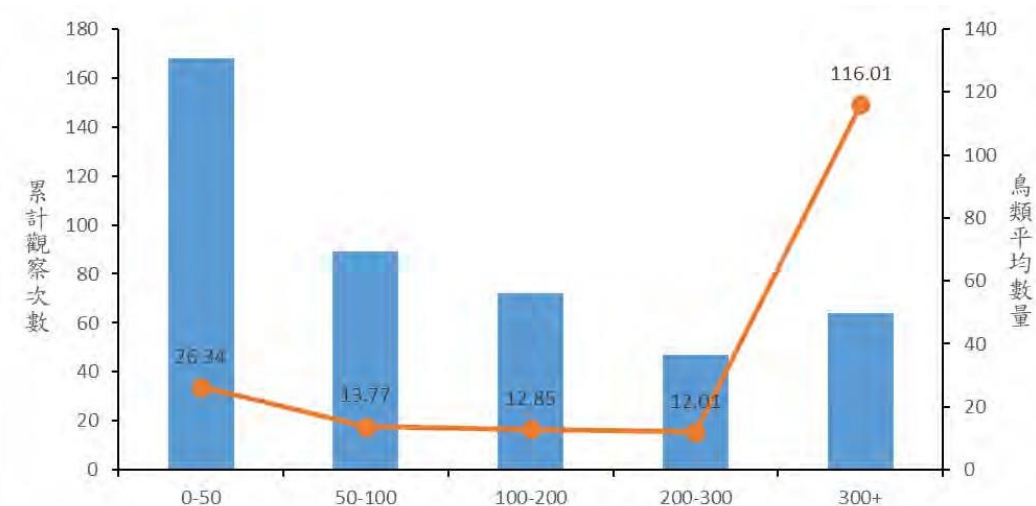


圖 9、2019-2020 年海上鳥類紀錄在各距離區間中的累計觀察次數

整理 2019-2020 年的海上調查資料，可發現各時段上的鳥類目擊情形也有差異，以上午 6-9 時有較高的平均次數(圖 10)。雖根據 2018 年調查經驗在上午會有較多的觀察次數，因此 2019 年規劃的調查中，除 8 月 26 日之外其餘都是在上午進行，但仍可在整體趨勢中發現在接近中午時的鳥類平均目擊率非常低，以近年每次調查都重複行駛一樣路線時，穿越線末端的偵測率可能便會因時間接近中午而偏低，造成結果的偏差。有鑑於此，建議在執行穿越線時應平均分配每趟次的穿越線船行方向為順行或逆行，以降低不同調查時間造成的誤差。

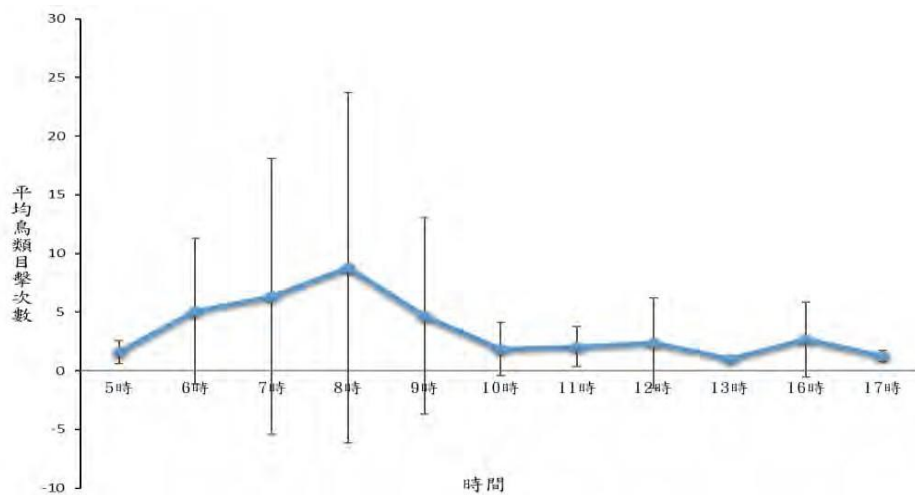


圖 10、2019-2020 年海上目擊調查記錄中日間各時段平均鳥類目擊次數變化

在鳥類的飛行高度上，整理 2019-2020 年的調查數據，10 公尺以下的紀錄佔 68.6%，10-50 公尺佔 27.4%(圖 11)，與丁宗蘇與林穆明(2019)的研究結果類似。在海上觀察由於缺乏對照地標，僅能由船隻高度、視角與距離來判斷鳥類飛行高度，飛行高度在 100 公尺以上的鳥類不僅可能因高度過高不易察覺，調查人員也不容易判斷出準確的高度。丁宗蘇與林穆明(2019)的研究也提到在其 2017-2018 年的海上調查經驗，全部 6732 筆鳥類目擊調查紀錄中，接近一半是在海面上 0-5 公尺的高度，飛行高度在 100 公尺以上的紀錄非常少，鳥類飛行高度愈高，超過目視範圍便很難被調查人員察覺。

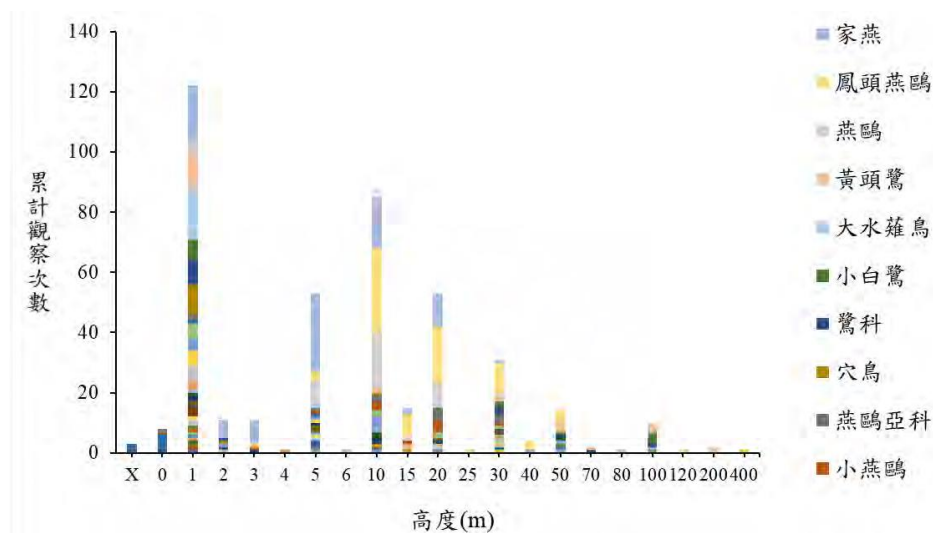


圖 11、2019-2020 年海上目擊調查記錄中各高度的鳥類觀察種類與累計次數

本計畫究利用風場與其周圍區域，利用 2 km*2 km 的網格為單位分析歷年來風場開發各階段的鳥類分佈概況，在資料分析上先呈現鳥類目擊的位置，在透過船型軌跡長度計算每個網格內的努力量，兩者相除計算實際的鳥類密度。

進一步討論歷年的鳥類觀察數量，以觀察距離在 300 公尺範圍內

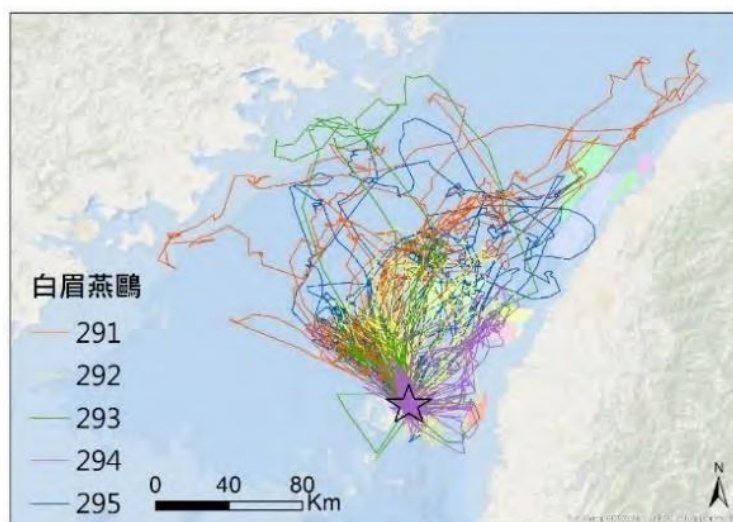
的鳥類密度。2018 年僅有調查風場區且穿越線路線只涵蓋風場及其周圍 1 公里緩衝範圍，故穿越線涵蓋範圍最小，僅有 16.66 平方公里。2019 年增加調查範圍至風場及其周圍 4 公里緩衝範圍，且在後龍溪南岸增設對照樣區，但在風機打樁期間無法進入風場開發區內，故於後續修正調查路線。2020 年風場完工後便依既定路線執行完整全區調查。

依據彙整資料顯示，2018 年的平均鳥類密度雖然為最高，但當年在 9 月份觀察到的大批黑腹燕鷗過境拉高了整體的平均值。2019 與 2020 年風場區的鳥類密度都低於對照區，且 2020 年的風場區鳥類密度又較 2019 年更低。

(二) 繫放追蹤分析

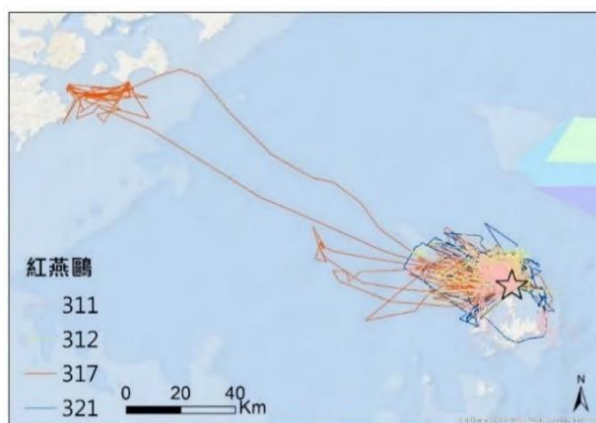
本計畫於澎湖燕鷗繁殖地進行繁殖期燕鷗繫放，於 5 隻鳳頭燕鷗、5 隻白眉燕鷗與 5 隻紅燕鷗安裝 GPS-radio 追蹤器，總計共安裝 15 顆，設定為每小時以 GPS 定位一次並儲存於追蹤器中。為回收追蹤器所儲存的定位資料，於雞善嶼架設一組自動接收器，只要追蹤個體回到巢區、進入接收器的藍芽傳輸範圍內(可達 500m)，便會將追蹤器內所儲存的定位資料傳輸至接收器，並設定每 8 小時將接收器中的資料，以行動通訊上傳至系統供研究者讀取；本計畫於繁殖季 6 至 7 月間，共進行過五次以船隻繞巡周遭島嶼搭配手持接收器的資料回收作業，扣除一隻紅燕鷗僅於放飛時接收的數筆資料外，其餘 14 隻的追蹤期間由 11 天至 67 天不等。

從 14 隻個體的追蹤路徑可發現，物種間的活動模式有明顯的差別(圖 12~圖 14)，白眉燕鷗主要往澎湖北方的海域移動，區域與彰化遠岸的風場有較大的重疊(圖 12)；紅燕鷗在繁殖期間的活動範圍較小，主要往澎湖西邊與西北邊活動，所以活動範圍與風場完全無重疊(圖 13)；而鳳頭燕鷗主要在近岸處覓食，三隻個體 N07、N16 與 P77 頻繁前往澎湖本島或西嶼的漁港覓食，活動範圍主要往西、飛行距離較短，故活動範圍與風場不重疊，而 N09 與 N13 則頻繁進入台灣本島西岸，活動範圍與允能風場與彰化近岸的風場重疊。由於追蹤個體有時路徑雖穿越風場但點位卻不在風場中，故進行路徑與風場關係的分析時，先將前後兩定位點連接作為一個路徑片段，再篩選路徑片段有一半以上落在風場範圍內的片段連接成通行風場的路徑，才進行後續分析。總共有 7 隻燕鷗個體有定位點落於風場之中，分別為 2 隻鳳頭燕鷗與全部 5 隻白眉燕鷗。追蹤個體通行於風場的時段，主要還是集中在白天(圖 15)，但是白眉燕鷗有少數路徑是在夜間通行風場。



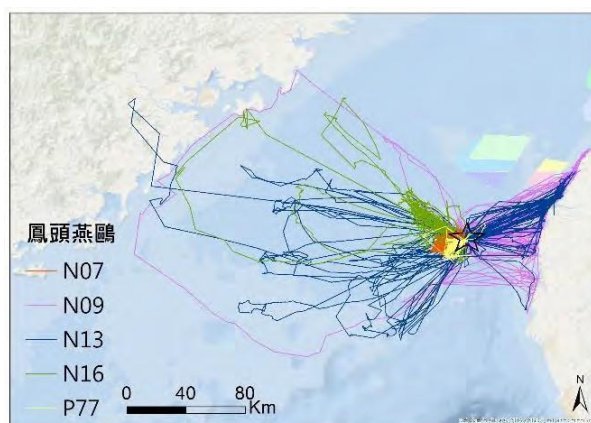
黑色空心星形為繫放地雞善嶼，背景の色塊為風場範圍

圖 12、白眉燕鷗的移動路徑



黑色空心星形為繫放地險礁，背景の色塊為風場範圍

圖 13、紅燕鷗的移動路徑



黑色空心星形為繫放地雞善嶼，背景の色塊為風場範圍

圖 14、鳳頭燕鷗的移動路徑

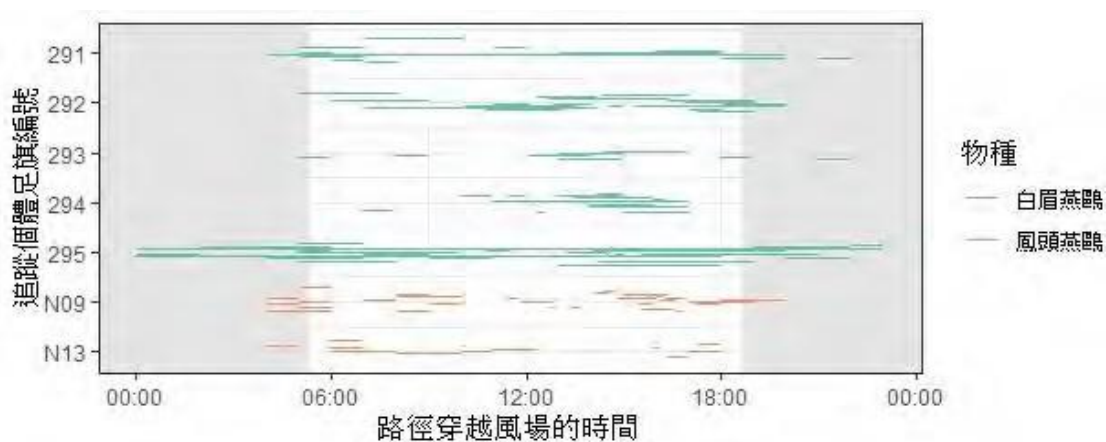
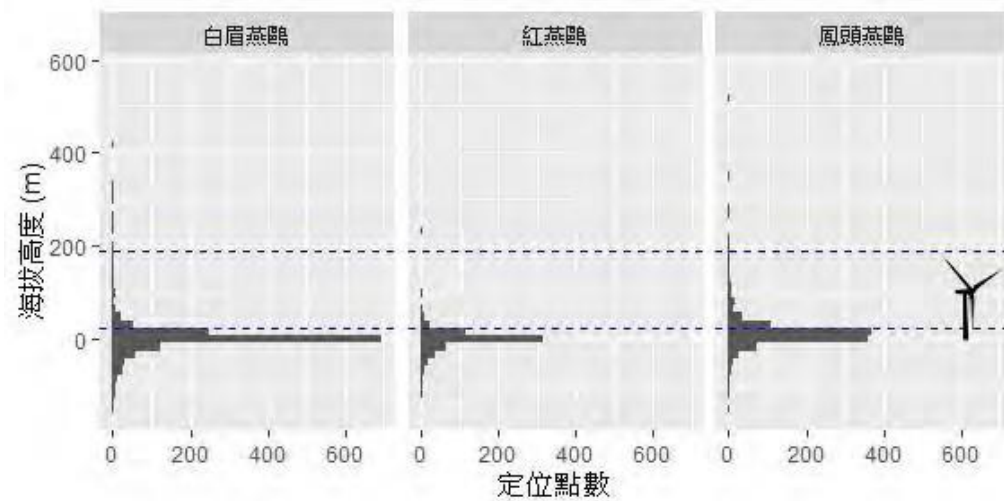


圖 15、7 隻個體追蹤路徑穿越風場的時間

以追蹤器記錄的海拔高度，可以發現燕鷗飛行時(離巢區 500 m

外、至下個點的平均速度超過 10 km/hr)主要飛在風機旋轉半徑之下(圖 16)，而鳳頭燕鷗飛行的高度在三個物種間是最高的，風機旋轉半徑內(以一支 9.5 MW 風機為例，扇葉旋轉高度為 25-190 m 間)的飛行高度比例，分別是白眉燕鷗 7.8%、紅燕鷗 6.5%與鳳頭燕鷗 18.5%。



飛行時的點位篩選位置離巢 500m 以上、至下個點的路段平均速度>10 km/hr 的點位，並僅使用排程定位的點位，避免自動觸發造成不同期間點位數不同。風機的高度是以一支 9.5 MW 風機為比例，葉面旋轉高度在 25m-190m 間。

圖 16、14 隻追蹤個體飛行時的海拔高度

本計畫實證結果顯示，GPS-radio 追蹤器能適用於澎湖繁殖燕鷗的追蹤，將接收站架設在繁殖島嶼可有效地回收定位資料。後續繁殖季可再觀察追蹤個體返回的狀況，可比較隔年從繁殖期前期便開始追蹤的路徑，是否有不同，以及未經繫放捕捉干擾的情況下的繁殖期路徑。

四、水下噪音

本計畫為釐清風場建置造成之水下噪音對於海洋生物的影響，對示範風場營運時進行水下噪音監測，作為後續參考。

(一)監測作業

水下噪音監測系統將 2 組水下麥克風設置於水深的 1/2 及 3/4 位置，將以最低潮位的水深約 20 公尺為計算依據。採用錨碇方式，以 250 公斤重的重錘固定於海床，裝設 2 組水下噪音測量系統，可參考圖 17，其中基於系統保護安全考量，將錨碇浮球固定於 5 公尺水深，2 組系統的水下麥克風設置深度為 9 公尺及 14 公尺。水下噪音監測錨碇系統設計(表 1 包含重量控制、浮力)計算及各節點連接方式等，浮球提供浮力約 100 公斤力，至少 10 公斤力向上，致使錨碇系統可在垂直向拉伸，儘量讓水下噪音計及水下麥克風保持垂直方向。

表 1、水下噪音佈放錨碇系統設計規格表

編號	項目	材質	重量(kg)	數量	總重(kg)	浮力(kgf)	備註
S1	浮球/Floating	塑膠	11.0	1	11.0	100.0	活揚/貫穿TF-450HS-Y
R1	尼龍繩/Rope	尼龍		1			Φ 10 mm
H1	水下噪音計 /Underwater Noise Instrument	鋁合金	16.1	2	32.2	12.0	AUSPICE H1 含電池及電路
F1	支架/SUS Frame	不銹鋼	7.2	2	14.4	0	
A1	重錘/Anchor	鐵	250	1	250	0	

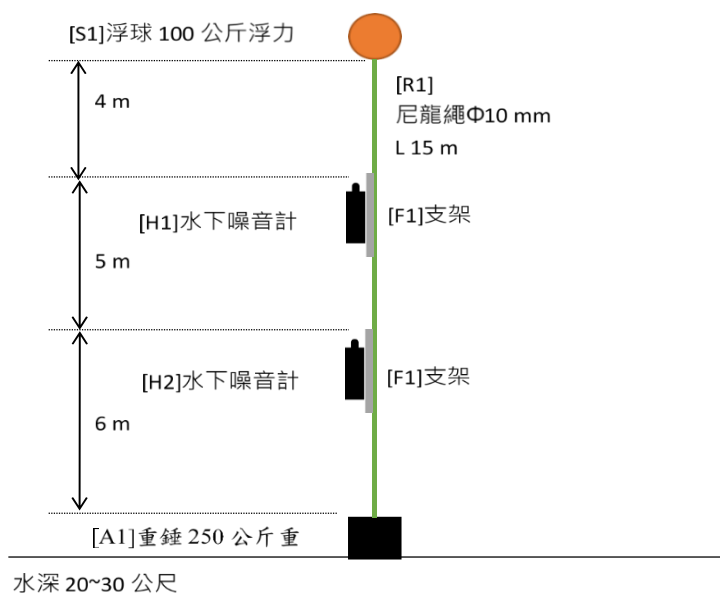


圖 17、水下噪音計佈放錨碇系統設計圖



圖 18、水下噪音監測系統佈放照片

(二)監測成果

1. 不同時期數據分析比較

運用在示範風場開發前、施工階段及營運階段之調查數據，進一步分析此三階段的資訊圖表管理與分析如下：針對三年度(107-109 年)資料進行彙整分析，並利用各項水下噪音指標探討離岸風場開發的噪音增量幅度評估；針對現場調查、資訊彙整表單以及分析圖表彙整提供三年示範風場監測相關資訊。從108 年的研究成果說明，利用水下噪音頻譜(圖 19)顯示打樁噪音顯著提升的頻段及增量，在109年則增加風機轉動噪音，可利用該研究方法來探討水下噪音增量，如可進一步取得風機發電量或轉速，更可進一步探討風機運轉在不同狀態下的水下噪音產生量。

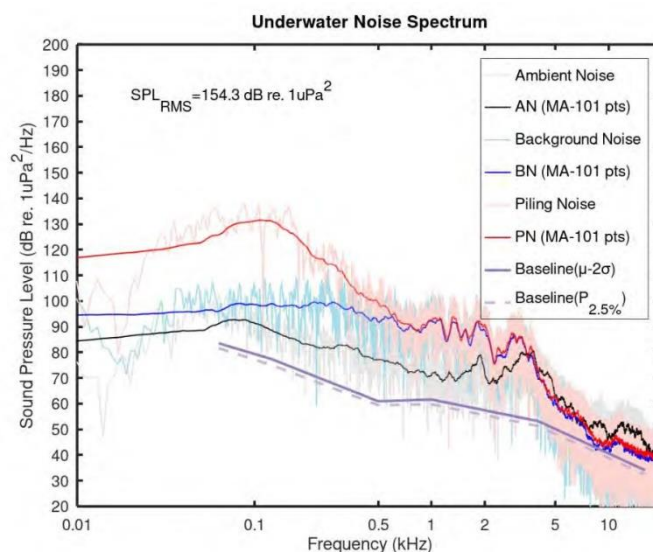


圖 19、打樁水下噪音與背景噪音和基線噪音頻譜圖之比較

與海洋示範風場可取得之監測資訊進行比對分析，將可用數據先分成海況 1 至 5，因在施工及營運期間未測量到完整海況，依照中央氣象局新竹浮標之風速分類。

以海況 1 為例，圖 20 為水下噪音聲曝值 5 秒(SEL5s)背景基線之機率分布，長條圖為分布，曲線為平均值與標準偏差值所構成的常態分布機率曲線，可用於分析噪音資料的分布範圍與差異。圖中的噪音資料分別為基線及打樁噪音(與打樁風機#5 距離約 2 公里)，目前國際上(如 StUK4)常用 SEL5s 的變化來討論水下噪音增量問題，以此研究數據為例，打樁期間約增加了 28 dB，如以二者發生機率的最高差異則約為 60 dB，此應為離岸風場環境影響評估中，必須考量的問題。

圖 21 為相同資料的累積機率分布，應由 SEL5s 累積百分比之 5%、50%及 90%來討論差異性，以打樁噪音為例，累積百分比分別為 162.4、168.7、170.7 dB re. 1uPa² s，應據此轉換為影響物種的聽力閾值管制方式，以進一步討論影響問題。此外，打樁噪音與基

線資料分別差了 32、29、41 dB re. $1\mu\text{Pa}^2/\text{s}$ ，此表示水下噪音監測數據變動有諸多不確定性因素，不應僅以平均值來表示其機率分布問題，而是完整描述變化與差異情況。

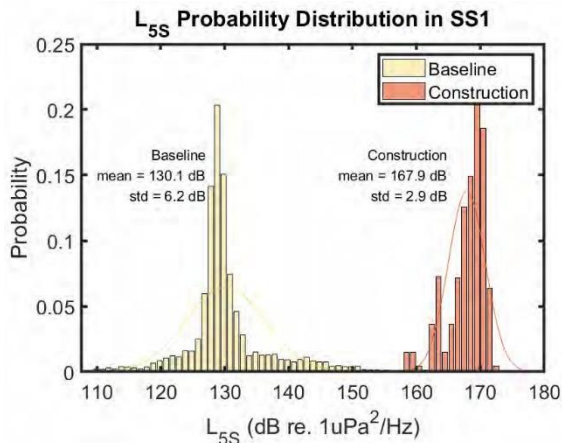


圖 20、海況 1 的水下噪音 SEL5s 之統計機率分布比較

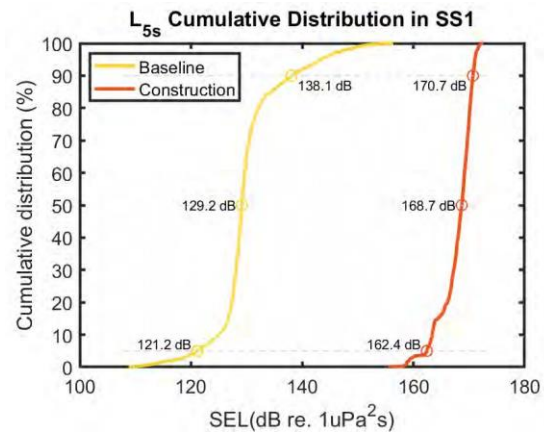


圖 21、海況 1 的水下噪音 SEL5s 之累積機率分布比較

在海況 2 的水下噪音分布中，圖 22 為基線資料、施工期間及營運期間的水下噪音分布，如用於環境影響評估用途，則可明顯看到水下噪音在離岸風場施工期間與營運期間皆會提高，應進一步評估對當處海洋動物之影響程度，例如行為影響或噪音閾值限制。

圖 23 為累積機率分布，如以累積百分比 50% 來比較，打樁噪音增加了 42 dB，與海況 1 差異不大。營運期間則增加了 7 dB，顯示當處的水下噪音已經改變，但對海洋動物影響多大，仍待進一步釐清。

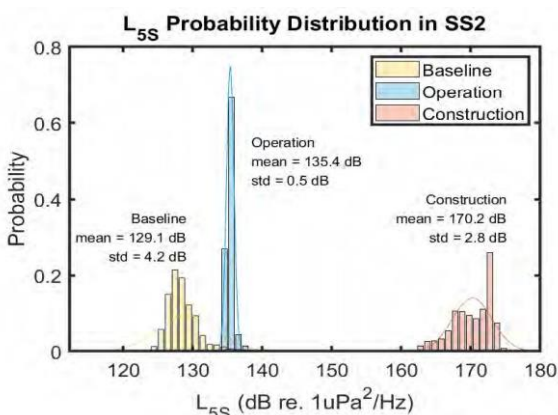


圖 22、海況 2 的水下噪音 SEL5s 之統計機率比較

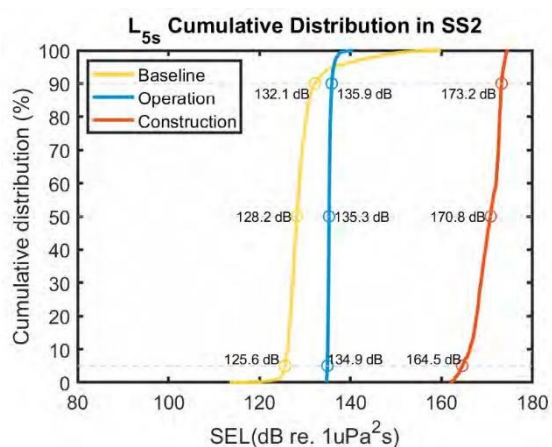


圖 23、海況 2 的水下噪音 SEL5s 之累積機率分布比較

圖 24 及圖 25 分別為海況 3 的統計機率比較，圖 26 及圖 27 為海況 4 的結果，圖 28 及圖 29 為海況 5 的比較，整體而言，欲探討離岸風場營運期間的水下噪音增量問題，應先將測量資料採海況分類，才能對照出實際的增量。過去在環境影響評估會議中，曾有開發單位提出：海況越高則水下噪音背景值也會越高，因此會蓋住風機運轉噪音。以本研究結果來看，在各種海況下，只有在累積百分比超過 95%以上，風機運轉噪音增量才會低於背景值，換句話說，風機運轉的確會增加水下噪音，各海況皆約提高至少 6 dB。

利用水下噪音地圖模式分析各項水下噪音指標計算與評估方法之差異性，例如在打樁緩啟動、全功率打樁等狀態下的水下噪音時空分布變化，探討各種監測距離(如施工區、警戒區、對照區、保護區等)的音訊差異性，及對水下噪音指標計算之合理性探討。

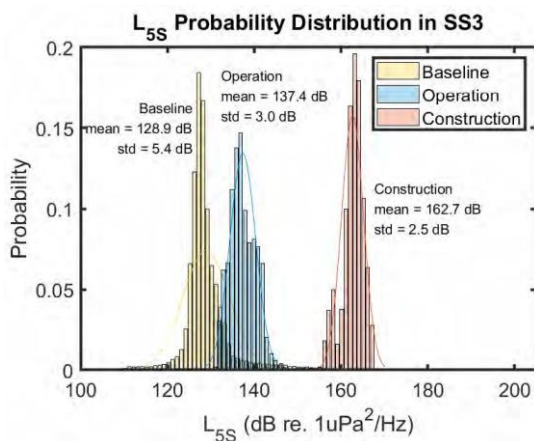


圖 24、海況 3 的水下噪音 SEL5s 之統計機率比較

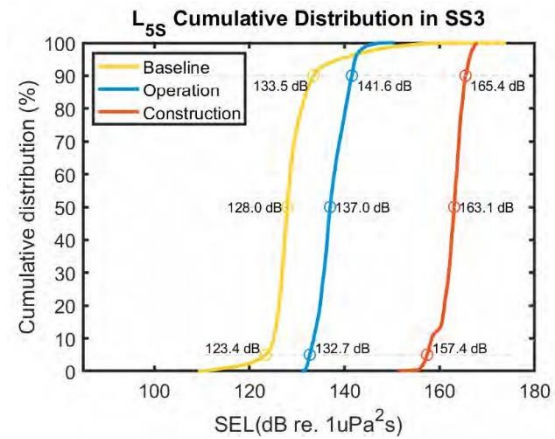


圖 25、海況 3 的水下噪音 SEL5s 之累積機率分布比較

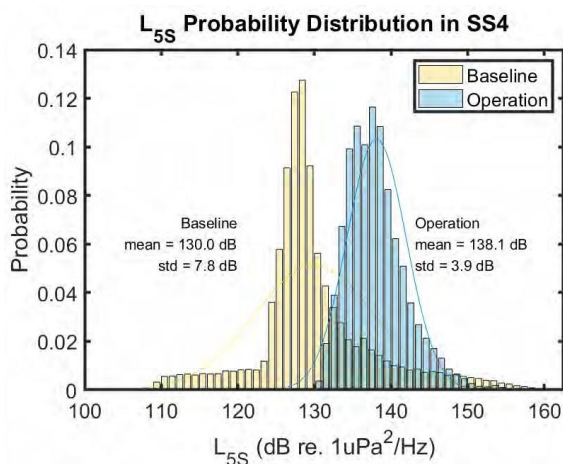


圖 26、海況 4 的水下噪音 SEL5s 之統計機率比較

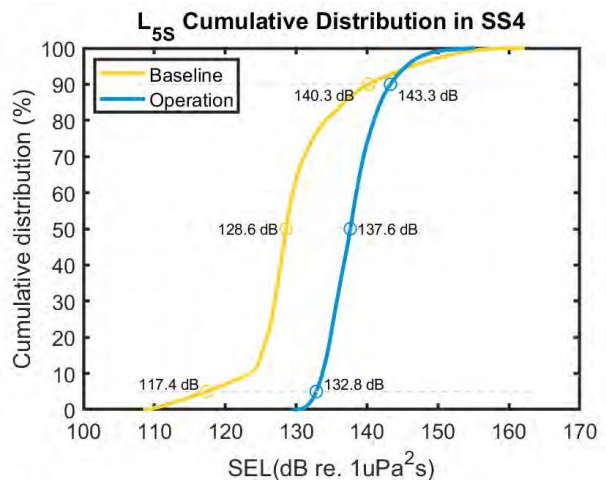


圖 27、海況 4 的水下噪音 SEL5s 之累積機率分布比較

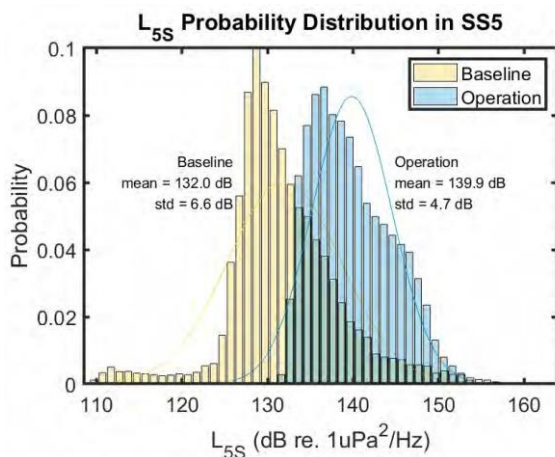


圖 28、海況 5 的水下噪音 SEL5s 之統計機率比較

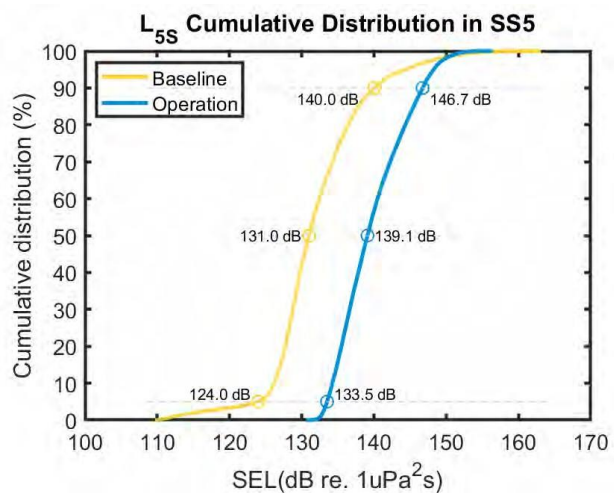


圖 29、海況 5 的水下噪音 SEL5s 之累積機率分布比較

2. 水下噪音地圖

利用水下聲學理論與數值方法，建構風場海域的水下噪音聲壓值分布計算模式，並以水下噪音地圖呈現方式，討論離岸風場建造期間施工船舶與打樁、營運期間風機轉動的水下噪音增量範圍。

從模擬結果可知，不同頻率的水下噪音傳遞結果不同，在環境影響評估時，參考國外規範至少分析 63 Hz 與 125 Hz 之低頻噪音。圖 31 為水下噪音地圖展示方式，分為左、中、右等 3 塊資訊，左側為聲源條件、水文條件(M6 表示 6 月)、地質種類、計算頻率、計算範圍等資訊，中間為半徑 30 公里，接收深度 10 公尺的水下噪音聲壓值等值分布圖，圖中左下角顯示顏色代表的水下噪音聲壓值變化。右側繪製水下噪音聲壓值在 4 個方位角隨距離改變的數值曲線。圖 30 計算頻率為 63 Hz 的施工船舶(TIV)水下噪音聲壓值，已加權 OTOBS 頻帶能量，圖 31 為頻率 125 Hz 計算結果，如預估背景噪音在 100 dB 的狀態下，施工船舶噪音在頻率 63 Hz 的影響距離約 1.5 公里左右，頻率 125 Hz 的影響距離有超過 5 公里的情況。

圖 32 為打樁水下噪音聲壓值在 125 Hz 的變化，根據計算結果分析，影響距離超過 20 公里，因海床地形變化影響，導致在各方位的聲壓傳遞不同，因此，有必要使用水下噪音地圖來完整分析。圖 33 是風機運轉(WTO)水下噪音聲壓值在 125 Hz 的變化，根據計算結果分析，影響距離約在 1 公里左右。同樣屬於非脈衝噪音，風機運轉相較於施工船舶產生的水下噪音影響範圍較小，因聲源位準值原本較低。

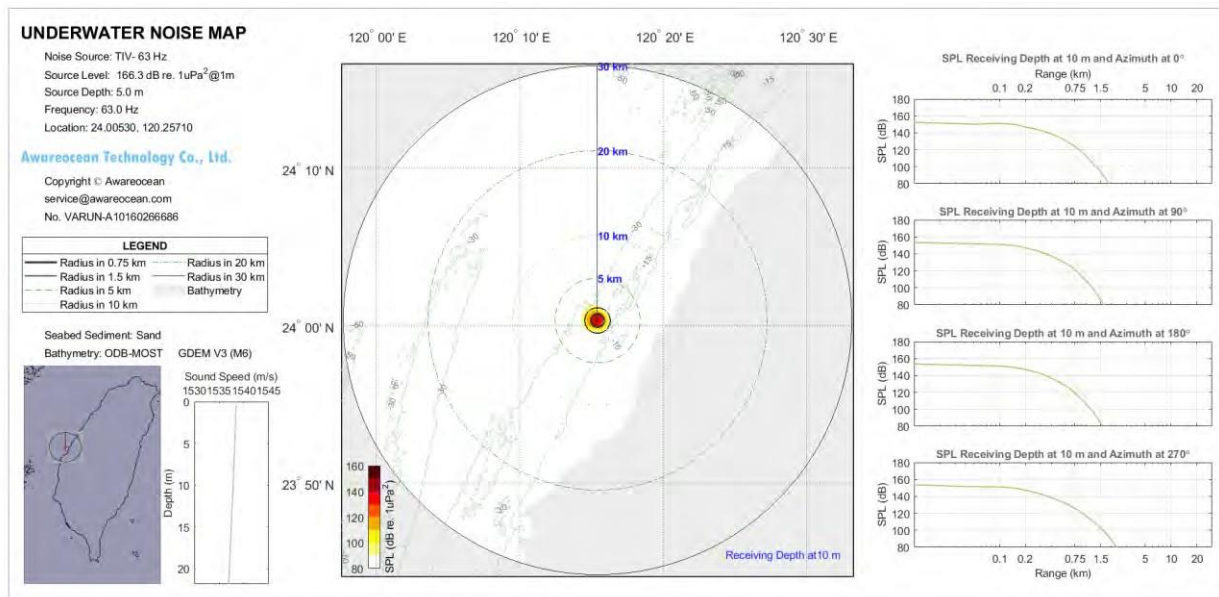


圖 30、施工船舶水下噪音地圖(63Hz)

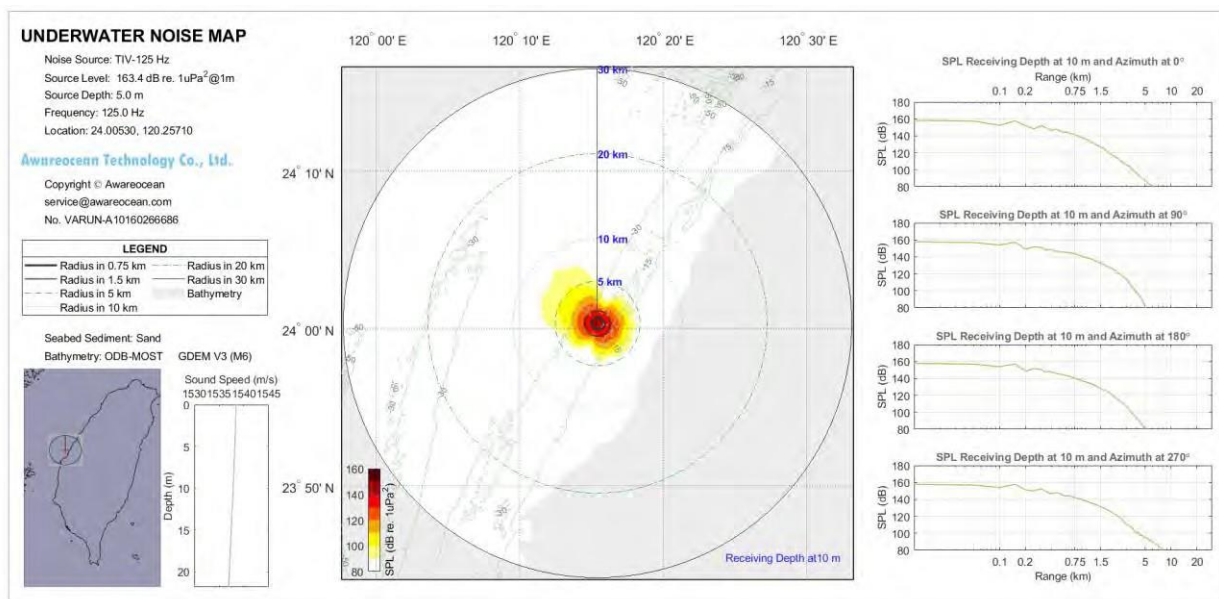


圖 31、施工船舶水下噪音地圖(125Hz)

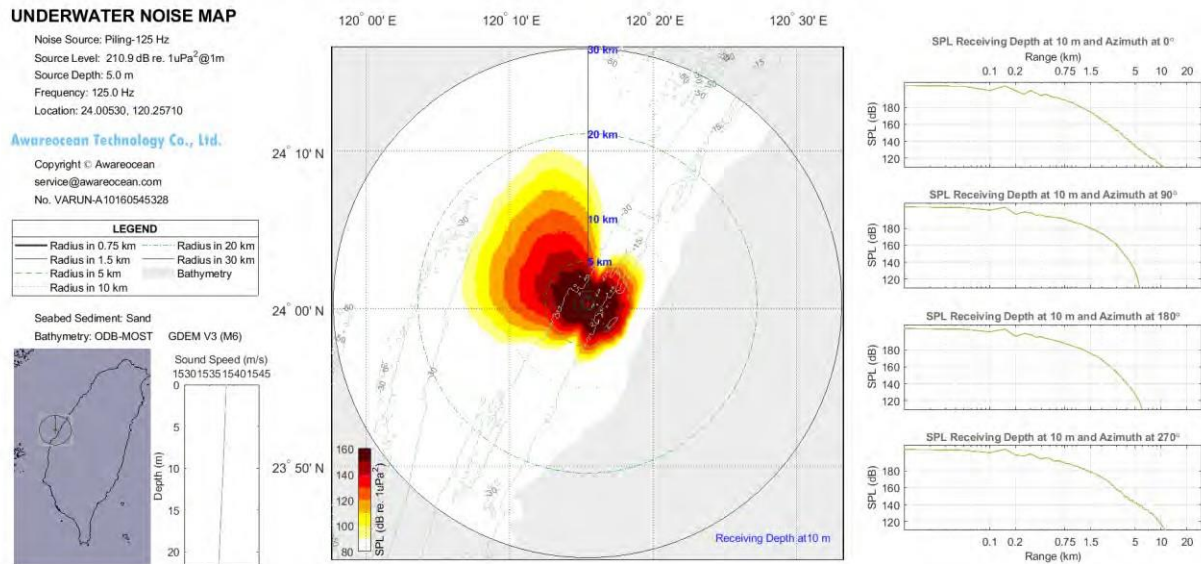


圖 32、打樁水下噪音地圖(125Hz)

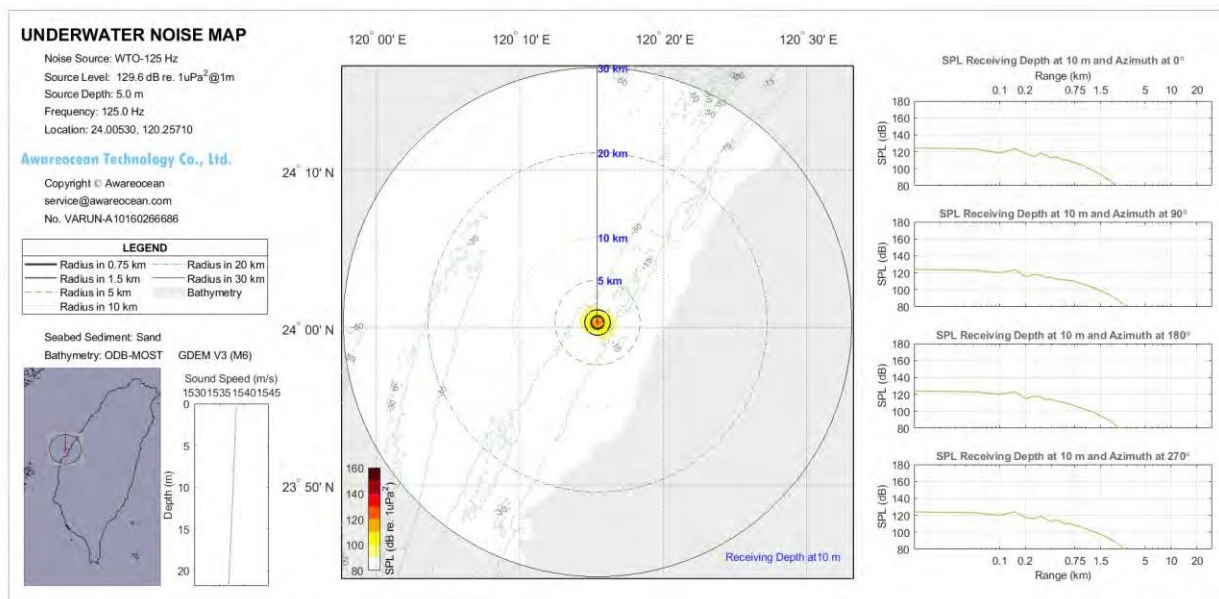


圖 33、風機運轉水下噪音地圖(125Hz)

為進一步比較模擬與實際差異，分別模擬示範風場 30 號風機之運轉水下噪音地圖(圖 34)及水下噪音聲波與聲曝值計算(圖 35)，由於水下噪音地圖模式目前採用的風機運轉噪音聲源為<1 MW 裝置容量機型，因此，模擬出的 SEL5s 與實際測量值有差異，為了修正這樣的差異，應在靠近風機處(約 100 公尺)測量風機運轉噪音，可推估出較精確的風機運轉噪音聲源。

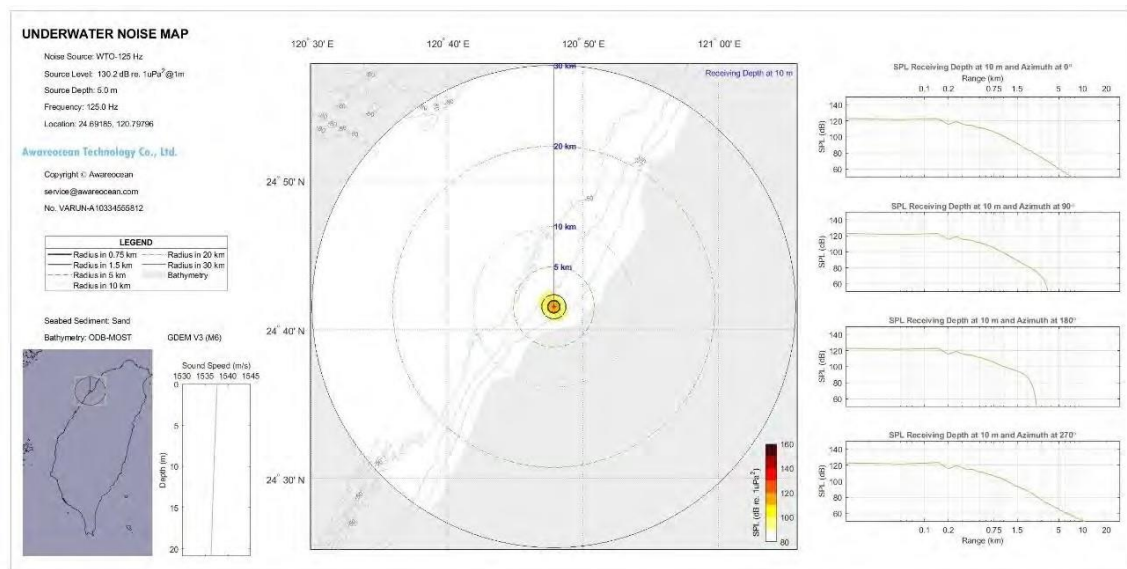


圖 34、示範風場#30 風機運轉水下噪音地圖(125Hz)

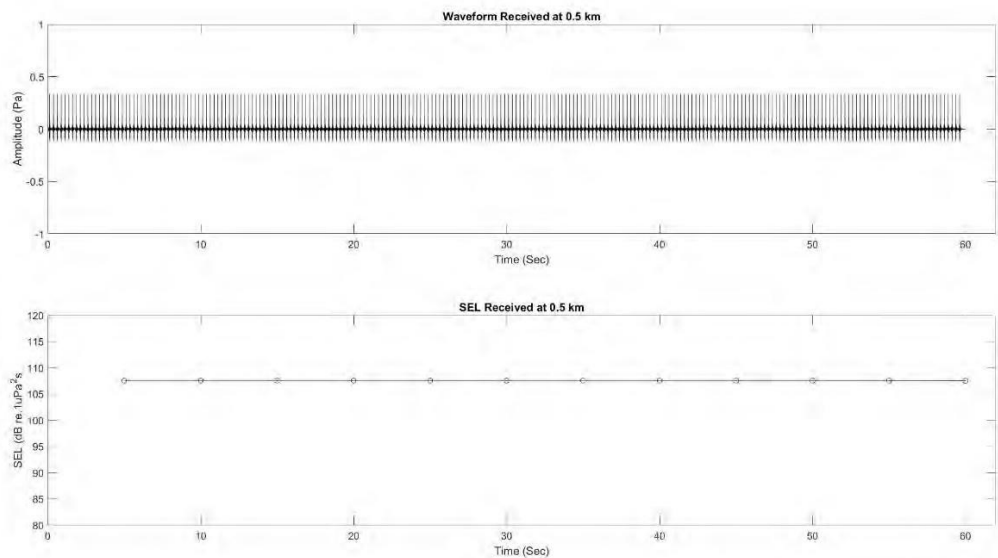


圖 35、示範風場#30 風機運轉水下噪音聲曝值(SEL5s)

此外，圖 36 為示範風場 5 號風機之打樁噪音地圖模擬，其聲源為 1,000 kJ 之打樁機，與示範風場採用 2,000 kJ 機型略有差異，因此在圖 37 的分析中，SEL5s 約為 157 dB re. $1\mu\text{Pa}^2 \text{ s}$ ，相較於圖 21 的測量結果，約低了 10 dB，建議未來的研究可從聲源位準修正。

打樁聲源必須從相關研究報告或實測數據推估，目前蒐集到的打樁設備功率可到 4,000 kJ，但並非所有機型皆有數據可參考，此問題亦是離岸風場環境影響評估報告中的難題，因沒有足夠的打樁設備規格及聲源位準，在模擬上將容易出現預測不足或失真，應加強研究改善。

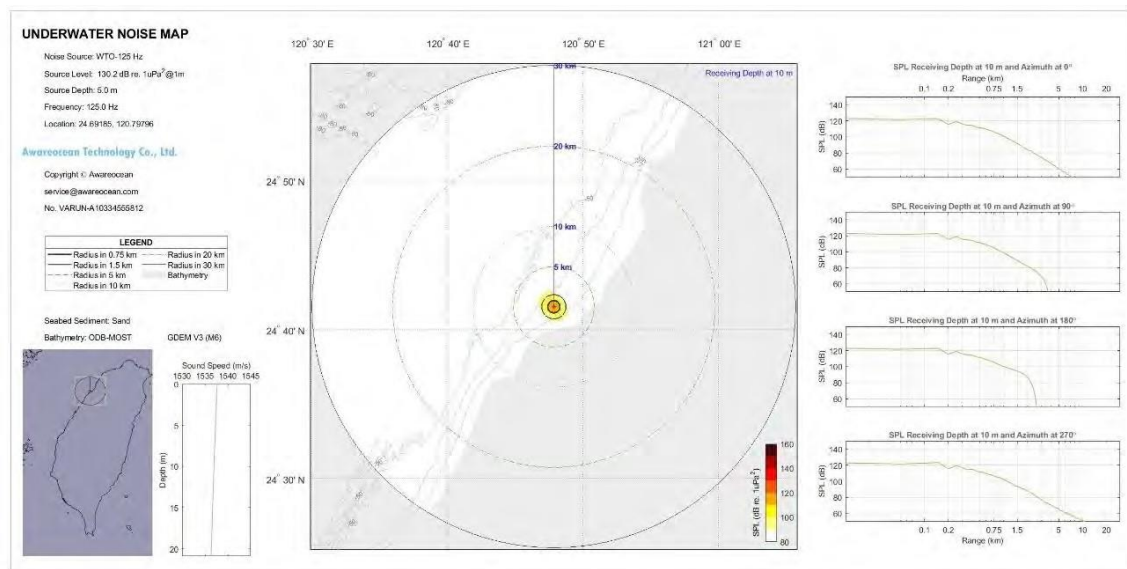


圖 36、示範風場#5 風機打樁水下噪音地圖(125Hz)

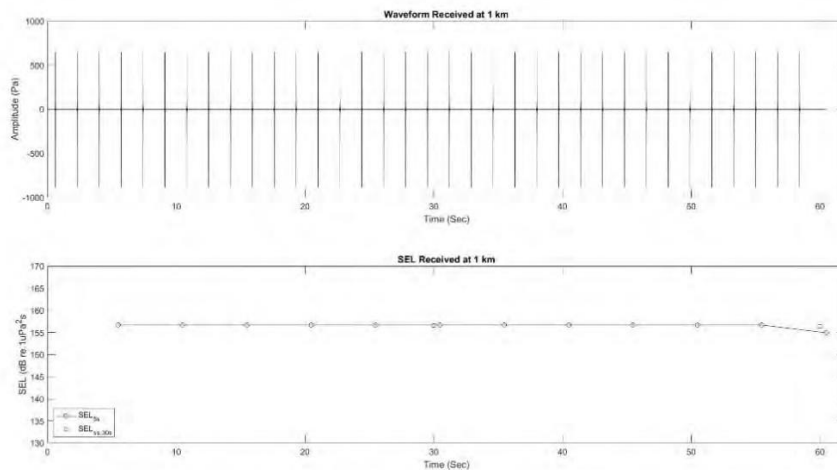


圖 37、示範風場#5 風機打樁水下噪音聲曝值(SEL5s 及 SELss)

3. 國內外近期水下調查技術開發蒐集

政府部門對於離岸風場水下噪音管理制度之需求層面較多，首先針對在 2017 年底前已通過環評審查(14 案)及至 2020 年有通過環差報告之離岸風場水下噪音監測內容，進一步表列彙整的測量方法及分析評估方式。其次，考量到各利害關係人對於資料用途和溝通等目的，本計畫將持續調查歐美國家政府單位加強管制水下噪音影響海洋生態問題，以英國政府部門為例，環境糧食農村事務部(DEFRA)及聯合自然保育委員會(JNCC)開始執行 Marine Noise Registry (海洋噪音登記)，應主動在線上登載人為低頻噪音，JNCC 每年都會將這些登記的人為水下噪音發生地點，彙整於海圖中，作為查詢與管理用途。

此外，研析各國離岸風場水下噪音管理制度(包含緩啟動與氣泡幕)並提出國內可行建議。以圖 38 為例，分析各種氣泡密度的減噪

量，其中的關鍵在於氣泡密度規範、氣泡層數等。彙整各種減噪工法的水下噪音降低量比較於表 2。

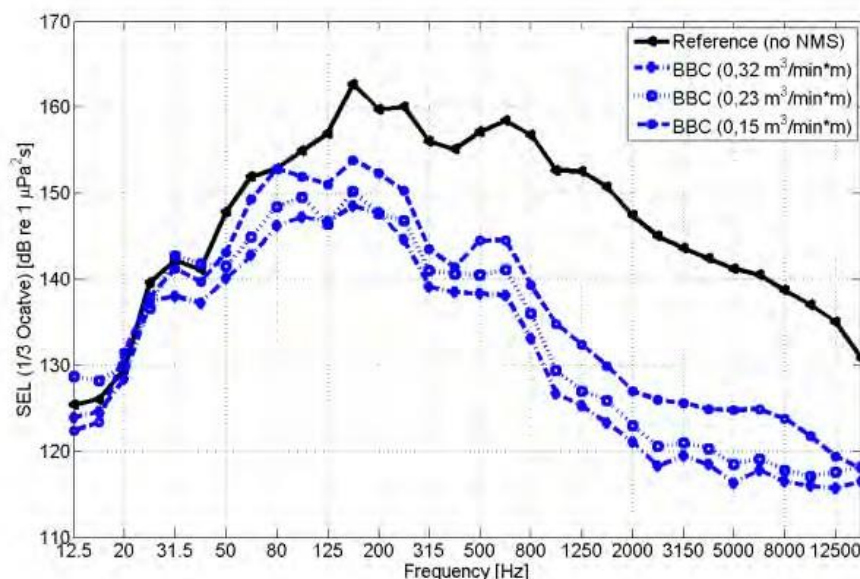


圖 38、國外研究各種打樁減噪工法之水下噪音減量比較

表 2、水下噪音減噪後降低量

減噪方式	重要(影響效能)規格	水下聲曝值 降低量 (Δ SEL)
單層大氣泡幕 Single Big Bubble Curtain(BBC)	打氣氣體量、氣泡直徑、氣泡幕管長、孔洞設計、單/雙邊注氣、配重設計、布設方式	10~15
雙層大氣泡幕 Double Big Bubble Curtain(DBBC)	除 BBC 規格外，雙層間隔至少 6 公尺至 1 倍水深	14-18
單層小氣泡幕 Small Bubble Curtain(SBC)	打氣氣體量及孔洞設計	14
水聲阻尼 Hydro Sound Damper(HSD)	HSD 的數量	8-13
減噪套管 Noise Mitigation Screen(NMS)	套管的間隙，在間隙中注入氣泡幕	10-14
圍籬 Cofferdam	樁與圍籬的間隙	10-20+
減噪套管+單層大氣泡幕 NMS+BBC		17-23

對於氣泡幕減噪規範之建議內容如下：

- a. 由空壓機(Compressor)產生氣體注入到管子在海洋中產生氣泡幕，至少(包含但不限於)應說明以下技術規格。
 - (a) 所有空壓機調度計畫(含備援)。
 - (b) 單一部空壓機輸出表頭氣體壓力(barg)及單位容量(m³/min)。
 - (c) 氣體是否為無油(Oil-free)及過濾認證方式。
 - (d) 單邊或雙邊注入氣體管子。
 - (e) 管子材質、長度、管徑、配重設計、孔洞設計(ψ 徑及間隔)。
 - (f) 管子每 50 公尺應估算氣體壓力值。
- b. 須採用大氣泡幕(Big bubble curtain, BBC)之技術要求，將管子設置於海床上(非懸空或分散於海水中)，符合以下規格。
 - (a) 氣泡幕管子總長在 400 公尺以上，布設半徑(圖 2 的 R1)不應小於 3 倍水深(D)。當海流水平速度最高達每秒 2 公尺時，管子布設半徑不應小於 6 倍水深。
 - (b) 孔洞設計應可產生單一氣泡半徑在 300 微米，孔洞分布在管子上可造成氣泡團聚集效果，亦即孔洞間隙不宜過大，所產生的氣泡密度至少為 0.2 m³/(min*m)。
 - (c) 如減噪頻率特別要求在 10 kHz 以上者，孔洞設計應可產生氣泡半徑在 1 微米。
 - (d) 孔洞氣體壓力應超過所在海水壓力之 2 倍。
- c. 當有第 2 層以上的大氣泡幕時，各氣泡幕之管子間隔應至少 6 公尺至 1 倍水深，且間隔不可小於氣泡團在水面之寬度(圖 3 中的 W)。
- d. 有關外在環境限制問題，依據本研究說明的減噪原理及技術規範之內容，額外強調外在環境可能超過預期的情況下，可能會降低氣泡幕的減噪成效。
 - (a) 當海流水平速度超過 2.5 公尺時，則氣泡幕對減噪效果可能遠低於預期。
 - (b) 水深每增加 10 公尺，水壓提高 1 bar，即增加 1 大氣壓。當空壓機表頭壓力不足時，則氣泡幕不易生成或密度不足。
 - (c) 氣泡幕管子越長，所需氣體量越大，氣體空壓機的數量應充足且有備援，避免氣泡密度不足。

- (d) 海床深度超過 50 公尺時，因氣泡團上升移動範圍加大，大氣泡幕的減噪效果可能不如預期，或需要更多氣泡層數與商業成本。

實際案例說明，參考國際研究報告，利用實測資料計算水下聲曝值(SEL)來估算大氣泡幕的減噪成效，在統計上使用百分率 50 的 SEL 值(SEL50)來估算。施工條件為水下基礎樁徑 2.4 公尺，打樁機功率 800 kJ，在 750 公尺測量水下噪音 SEL，分析出三分之一的八音度頻譜圖(1/3 Octave band spectra)之差異變化。由結果可知，BBC 運用在打樁時，水下噪音頻率在 50 至 10 kHz 有超過 5 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ 的減噪效果。BBC 的密度分別為 0.15、0.23、0.32 $\text{m}^3/(\text{min}\cdot\text{m})$ ，在頻率 2 kHz 的水下噪音聲曝值衰減量中，三者分別約為 20.5、24.5 及 26 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ 。

根據同樣研究報告可知，BBC 對水下噪音聲曝值的衰減效果中，單層 BBC 平均減噪約在 10 至 15 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ ，使用雙層 BBC 則平均可到 14 至 18 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ ，是目前國際上打樁工程中，大多數會採用的減噪工法，亦即保守估計可達 10 至 18 dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ 之減噪功效。

氣泡幕是目前離岸風場打樁工程常用的減噪工法，其減噪原理為氣泡共振效應及氣泡改變介質密度而產生聲壓消散情況。從本研究中發現，前人研究已針對單一氣泡的共振機制及聲波能量消散等，進行相當多的學理探討，亦能提出解析解計算出水中氣泡減噪量化指標。然而，實際在海上使用管子產生氣泡時，複雜程度已非單一氣泡的研究成果可以直接解釋，最接近的物理現象就是碎波氣泡的研究課題，必須採用氣泡團的概念，將氣泡團的半徑與密度等效轉換為氣泡之物理機制，使得從相關假設條件進一步提出氣泡幕的技術規範。

本研究提出氣泡幕技術規範之初步建議，其內容係參酌減噪原理之物理特性討論，以及前人相關研究調查所得到的減噪成效。著眼於商業成本考量及技術可行性之各種層面，明確提出氣泡幕密度、氣泡幕層數、氣體量生成要求等技術規格，並進一步說明外在環境限制條件，例如在海流過強或海床過深的情況下，氣泡幕的減噪效果可能不如預期。此外，各風場打樁採用氣泡幕的減噪實際效果皆有差異，建議在施工前有較詳實的海洋水文及底質條件資料，配合水下聲學傳播數值模式推估影響範圍，或是在施工前期先執行試打樁，測量與評估打樁噪音影響範圍及氣泡幕減噪效果，將有利於大量打樁施工之成效評估。