

以鯨豚聽力閾加權計算打樁水下噪音累積影響評估

Cumulative Impact Assessment of Pile-driving Underwater Noise Prediction Based on Cetacean Hearing Threshold and Weighting

湛翔智¹

¹ 湛翔智*，知洋科技股份有限公司總經理

摘 要

離岸風場水下基礎安裝工程常使用衝擊式打樁機，撞擊樁柱產生水下噪音值相當大，恐對鯨豚產生聽覺影響及傷害。因此在環境影響評估中，必須模擬打樁噪音影響範圍、聽力傷害閾值發生情況及減輕措施效果等預測資料。本研究採用水下噪音虛擬實境數值模式，原理是將打樁特定功率所產生的水下噪音聲源值，以頻譜加權方式計算減噪後量值，再結合水下音傳模式計算各方位及深度上的接收聲壓量，並疊合及轉換為水下噪音聲波，可符合國內外規範所需的水下噪音指標計算，例如Leq、Lss、LE30s、Lpk及L5s等。由於打樁全程產生水下噪音對鯨豚的累積影響問題複雜，本研究進一步提出打樁情境分析，以撞擊間隔及撞擊次數等條件，計算水下噪音對鯨豚的累積壓力，並計入鯨豚聽力閾加權，以水下噪音地圖呈現及分析影響範圍、聽力受損閾值的距離，並探討多個風場同時打樁的累加影響問題。

關鍵字：離岸風場、水下噪音、打樁、累積影響、水下噪音地圖

Abstract

Impact-driven piles are often used in subsea foundation installation in offshore wind farms. The underwater noise generated by piling is quite loud, which may cause auditory effects and injury to cetaceans. Therefore, in the environmental impact assessment (EIA), it is necessary to simulate the forecasting such as the impact range of piling noise, the occurrence of hearing threshold shift, and the effect of mitigation measures. In this study, the numerical model, Virtual Acoustic Reality of Underwater Noise (VARUN) is used. The received sound pressures at the depths and azimuths are superpositioning and converted into sound waves for underwater noise calculation, which can be calculated in accordance with the underwater noise indicators required by the standards, such as Leq, Lss, LE30s, Lpk and L5s. Since the cumulative impact of underwater noise on cetaceans during the whole process of piling is complex, this study further proposes a piling scenario analysis, and calculates the cumulative pressure of underwater noise on cetaceans based on the conditions of strike intervals and strike numbers, and includes the cetacean hearing weighting as well. Hearing threshold weighting is used to present and analyze the noise impact ranges and the distance of hearing threshold shift in the underwater noise map. The cumulative impact of simultaneous piling in multiple wind farms will be discussed in the conclusions.

Keywords：Offshore wind farm、Underwater noise、Piling、Cumulative impact、Underwater noise map

一、 研究背景

水下噪音對海洋哺乳類動物(如鯨豚)的影響程度可分為5級：傷亡、聽力受損、行為改變、噪音遮蔽、可聽見(累積壓力)等(Richardson et al., 1995)。從科學研究上已知，各種海洋哺乳類動物有聽力閾值，鯨豚可分為三類，分別是體型大且發聲低頻的鬚鯨 *Mysticeti*、高頻發聲的大部分齒鯨 *Odontoceti* (如海豚科 *Delphinidae*)、超高頻發聲的小體型海豚(如鼠海豚科 *Phocoenidae*)等；在對鯨豚保護上，已推估出三類鯨豚聽力受損的水下噪音管制閾值(Southall et al., 2019)。離岸風場施工階段產生水下噪音影響時間約在1至2年，進行基礎打樁、風機安裝、鋪設電纜、相關海事工程及施工船舶等，皆會產生水下噪音影響海洋動物(Nedwell and Howells, 2004)。固定式水下基礎常使用衝擊式打樁(Impact-driven Piles)，將樁柱置入海床。由於打樁產生衝擊噪音相當大，造成水下噪音傳遞相當遠的距離。在打樁施工期間，因打樁產生脈衝波水下噪音，可能對海洋動物造成傷亡、聽力受損、行為改變等問題(Boyd et al., 2008)。

歐盟MSFD GES研究報告(Graaf et al., 2012)提到，對水下噪音脈衝波(Impulse)問題評估方式主要有3種：(1)以海洋動物聽力傷害閾為依據(避免直接傷害動物)；(2)依照影響風險評估(控制影響的時空範圍)；(3)根據聲源特性限制(控制水下噪音聲源強度)等，許多國家已依照國情再訂定相關規範與實施細則(湛等人，2017)。因此，從國外實施多年的離岸風場環評制度內容可發現：多數國家為了加強打樁噪音影響海洋環境的風險管理，並完整地分析不同海洋物種或族群的影響程度差異，常採取最嚴重情況(Worst Case)來界定影響範圍(DEA, 2022、Dekeling et al., 2020)；這樣的方式在環境影響評估階段，較可充分掌握水下噪音直接影響及累積影響問題。而對於鯨豚聽力閾加權計算方式，多參採美國NMFS指引(2018)或科學研究成果(Southall et al., 2019)。

德國環評法規StUK4 (BSH, 2013a)對於打樁水下噪音管制已有明訂，主管機關規定在距離打樁位置750公尺以外的水下噪音聲曝值單次撞擊 L_{ss} 不超過160 dB re. $1\mu Pa^2s$ ，且最大水下聲壓零對峰值 L_p 不超過190 dB re. $1\mu Pa$ 。因此，在德國水下噪音預估指引(BSH, 2013b)要求中，僅規定模擬打樁噪音在750公尺及5,000公尺處的結果，不需要納入海洋動物的聽力閾加權。德國採用的評估方式為歐盟指引所提到的影響風險評估，主要是根據德國經濟海域內的離岸風場生態調查實證經驗，從2009年第1個離岸風場(Alpha Ventus)開始，到2013年陸續完成8座風場，實證過程以目視、空拍、被動聲學等科學方法，調查港灣鼠海豚(Harbour Porpoise)受到打樁噪音影響範圍，也據此訂出水下噪音160 dB的管制閾值(Brandt et al., 2016)。因此，德國環評方式是認為，既有資料已經可以掌握德國經濟海域主要鯨豚物種是港灣鼠海豚，其族群數量且可受水下噪音影響範圍明確。因此，在施工過程中，僅須妥善控制打樁噪音不超過管制閾值即可。

我國離岸風電開發的政策目標現分為3個階段，在第1階段的示範獎勵計畫及第2階段潛力場址開發階段，預計在2025年完成裝設5.5 GW的發電裝置容量，在臺灣西部外海將興建14座離岸風場(湛等人，2018)。而在後續第3階段的區塊開發中，預定到2035年前，每年開放1.5 GW申請，目前在2022年將審查2026-2027年併網的3 GW開發案(湛，2022a)。國內離岸風電開發速度在初期2019年為108 MW，隨後每年約完成600 MW至1 GW，預期後續可擴大到每年有1.5 GW目標。以離岸風機單部裝置容量持續提升的趨勢來看，2025年前大多採用8至14 MW風機，2026年後可能加大到20 MW以上，初估每年安裝風機有大概60至100組水下基礎進行打樁工程，如果工程延後則可能往後累積更多。各風場依照併網當年往前推1至2年安裝水下基礎，2022年已經發生有2座風場的水下基礎安裝延宕，致使從原本的2座風場打樁，增加為4座。而這樣的情況，將改變水下噪音累積影響問題，已非原本環境影響評估可預期(湛，2022b)。顯見法規制度已經不足面對這樣的環境風險管理，應由科學證據來滾動式檢討對策與制度。

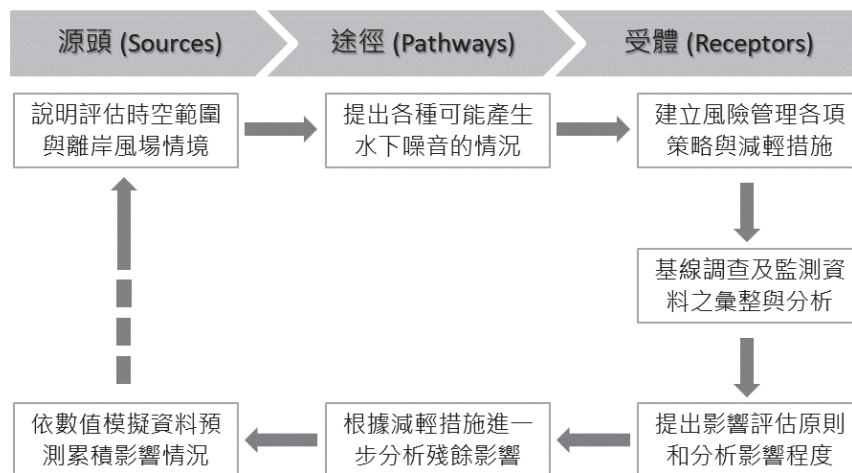
由於國內尚無海洋動物受水下噪音影響評估規範，本研究參採德國海事局(BSH, 2013b)、瑞典環保署(SEPA, 2017)、丹麥能源局(DEA, 2022)所公告的規範內容，以國內離岸風場打樁水下噪音問題為研究標的，進一步提出打樁情境分析結果。對於離岸風場環境影響評估方式，則以水下噪音地圖來呈現，模擬打樁單次撞擊最大影響範圍、鯨豚聽力閾加權後噪音影響範圍、多座風場同時打樁的累加影響、緩啟動功率及減噪工法成效等。水下噪音評估指標可根據國際標準ISO 18405、ISO 18406，國內外相關規範如德國StUK4規定之指引(BSH 2011、BSH 2013b)、美國NMFS指引(2018)、NIEA P210.21B(環境保護署，2019)，本研究參照使用Leq、Lss、LE30s、Lp及L5s等水下噪音指標，分析打樁噪音對鯨豚相關影響問題。

二、 水下噪音影響評估方法

參考國內外水下噪音影響評估方法之相關規範及報告，說明本研究評估方法如下。

(一)、 評估流程與原則

評估離岸風場施工階段產生水下噪音的複雜環境影響問題，可包含開發前基線調查、水下噪音模擬及預測，並提出風險評估、減輕對策、殘餘影響監測。有關水下噪音影響問題評估流程分為7項工作，如圖1所示(湛，2020)，源頭所指為離岸風場引起的人為水下噪音來源及影響情況，如表1(Boyd et. al., 2008)，從開發場址的時空範圍及開發情境來說明，經由分析水下噪音傳遞途徑可能對受體產生相關影響問題後，從水下噪音數值模擬來預測累積影響情況。若預期會發生長期負面且無法排除受體遭受傷害之情況，應採行更多避免及降低措施，達到預防效果。



資料來源：湛，2020。

圖1 水下噪音影響評估流程

表1 離岸風場產生水下噪音對海洋動物影響情況分析表

資料來源：Boyd et. al., 2008。

影響情況 噪音來源	身 體 傷亡	聽 力 受損	遮 蔽 效應	行 為 改變	行為間 接影響	棲 地 位移
衝擊式打樁	●	●		●	●	
施工船舶			●			●
風機運轉			●			●
浚挖或沉吸工程				●	●	●

衝擊式打樁過程會產生脈衝性水下噪音，聲源強度與打樁功率、鋼管樁長度與直徑有關。打樁工時越久對受體產生影響可能越大，而工時則與樁柱鋼管樁長度、水下基礎型式、打樁功率大小、海床地質軟硬度、打樁工法序等條件有關(湛等人，2020a)。水下噪音影響評估原則應考量以下分析項目(湛，2020)，本研究主要討論打樁脈衝噪音的影響，包含直接、累積及殘餘等影響問題。

1. 直接影響問題：對受體產生顯著壓迫；例如產生行為改變、聽力傷害等。
2. 間接影響問題：先改變了周遭環境再壓迫受體；例如受體食餌減少。
3. 累積影響問題：各種壓迫有加乘的效果，例如同時多處打樁。
4. 殘餘影響問題：減輕措施後減少壓迫的程度；殘餘影響必須監測效果。
5. 暫態影響問題：水下噪音在短期或有限時間發生的壓迫。

(二)、 鯨豚聽力閾及管制閾

水下噪音對海洋動物的最嚴重影響是身體傷害導致死亡，其次是聽力受損，因生理性緊迫而失去生存能力，如無法用回聲定位尋找食餌、與同伴聲音溝通等(Southall et al., 2019)。參考相關文獻(湛等人，2019、湛等人，2020a)，在表2列出臺灣西海岸外發現的鯨豚，並依據國際上對鯨豚聽力閾分類，主要屬於高頻發聲鯨豚(HF)及超高頻發聲鯨豚(VHF)。本研究分析鯨豚直接影響並預防發生暫時聽力傷害(Temporary Threshold Shifts)為依據，以表2的暫時性聽力受損為水下噪音閾值。

表2 鯨豚聽力閾分類及脈衝噪音產生聽力受損閾值(資料來源：Southall et al., 2019)

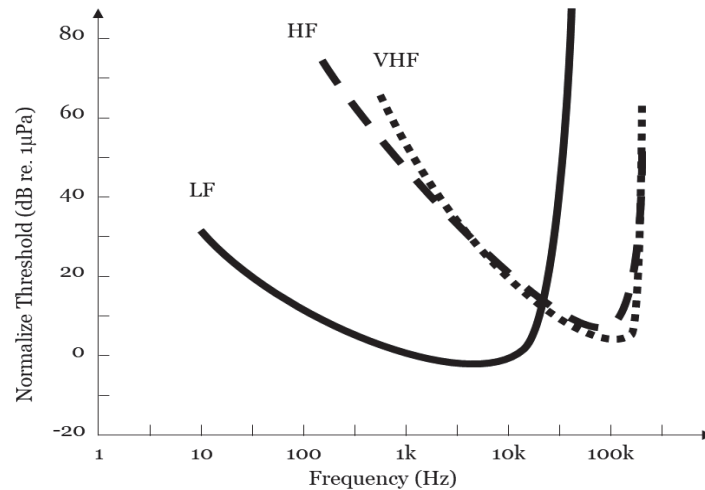
聽力閾分類	在 臺 灣 海 峽 發 現 的 鯨 豚 物 種 (參考湛等人，2019、湛等人，2020a)	聽力範圍	暫時聽力受損 TTS	
			Lcum	Lp
高 頻 發 聲 鯨豚 HF Cetaceans	臺灣白海豚(<i>Sousa chinensis taiwanensis</i>)、糙齒海豚(<i>Steno bredanensis</i>)、小虎鯨(<i>Feresa attenuata</i>)、瓶鼻海豚(<i>Tursiops truncatus</i>)、印太平洋瓶鼻海豚(<i>Tursiops aduncus</i>)、熱帶斑海豚(<i>Stenella attenuata</i>)、偽虎鯨(<i>Pseudorca crassidens</i>)	150 Hz – 160 kHz	140	196
超 高 頻 發 聲 鯨豚 VHF Cetaceans	寬脊鼠海豚(<i>Neophocaena phocaenoides</i>)、窄脊鼠海豚(<i>Neophocaena asiaeorientalis</i>)、小抹香鯨(<i>Kogia breviceps</i>)、侏儒抹香鯨(<i>Kogia sima</i>)	275 Hz – 160 kHz	170	224

(三)、 水下噪音可能影響預測方法

水下噪音對受體(鯨豚)可能影響受體所指的是海洋動物有接受到水下噪音影響之可能性，而每一種海洋動物對水下噪音的感受不同，其差異性及定義說明如下。

1. 鯨豚對不同噪音頻率的聽覺反應或感受，稱為聽力閾曲線(如圖2)。
2. 鯨豚生理反應對聽力保護或其他器官保護作用，以聲壓增加表示。
3. 鯨豚感應到水下噪音的累積聲壓或聲強大小反應，以影響程度分級。

本研究採用表3的水下噪音指標(湛，2021)來計算水下噪音數值模式或測量數據計算結果。在基線或背景噪音調查時，使用Leq或L5s，對於打樁水下噪音影響距離或範圍之比較採用Leq。在評估鯨豚聽覺反應時，使用LE30s、Lss、Lp之加權計算，德國StUK4及NIEA P210.21B規定可用LE30s代表Lss；分析減噪效果及殘餘影響同樣使用LE30s、Lss、Lp，但監測時不計聽力加權。評估累積影響主要使用Lcum，其採用Lss或LE30s聽力閾及M次累計撞擊次數，作為累積聲壓計算方式。



資料來源：湛，2020；參考Southall et al., 2019。

圖2 三種鯨豚分類的聽力閾曲線

表3 水下噪音指標計算公式 (資料來源：湛，2021)

指標名稱	計算公式	基線背景	聽力加權	殘餘影響	累積影響
均能音量	$L_{eq} = 10 \log_{10} \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p_t}{p_0} \right)^2 dt$	●			
5秒聲曝值	$L_{5s} = 10 \log_{10} \int_0^5 \left(\frac{p_t}{p_0} \right)^2 dt$	●			
30秒平均撞擊聲曝值	$L_{E30s} = 10 \log_{10} \int_0^{30} \left(\frac{p_t}{p_0} \right)^2 dt - 10 \log_{10}(N)$		●	●	
單次撞擊聲曝值	$L_{ss} = 10 \log_{10} \int_{T_1}^{T_2} \left(\frac{p_t}{p_0} \right)^2 dt$		●	●	
最大聲壓值	$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{p_{0-p}}{p_0} \right)^2$		●	●	
累積聲曝值	$L_{cum} = L_{ss} + 10 \log_{10}(M)$				●
說明	T ：計算時間秒數(s) N ：打樁30秒內撞擊次數 p_{rms} ：均方根聲壓 p ：聲壓(Pa) T_1 ：撞擊起始時間 p_{0-p} ：在30秒內最大聲壓 p_0 ：參考聲壓 1×10^{-6} (Pa) T_2 ：撞擊結束時間 M ：累計撞擊次數				

三、 水下噪音預估模式

為評估水下噪音影響範圍或預估影響程度時，將利用水下噪音預估模式計算。

(一)、 規範要求比較

歐洲針對打樁水下噪音影響評估的預測要求，至少已有德國、瑞典、丹麥等國家建立規範要求，如表4。將規範要求分為打樁聲源條件、水下音傳計算規定、模擬分析要求、噪音地圖及預測項目等比較內容。德國環評已經明訂打樁噪音管制，因此在預測模擬要求上較注重減噪成效。瑞典和丹麥要求評估更多海洋哺乳類動物，因此，對模擬分析要求及噪音地圖呈現上，比德國規範內容更多，例如分析水下噪音的聽力加權、聽力損失及行為影響等。我國因臺灣海峽出現的鯨豚多達10種，且有白海豚及露脊鼠海豚等瀕危物種，應參照瑞典或丹麥的規範要求，才能完整地評估水下噪音影響問題。本研究使用知洋科技公司開發的水下噪音虛擬實境軟體VARUN來模擬，其功能與計算方式亦納入表4，進一步比較差異。

表4 打樁水下噪音預測模擬之規範要求比較

國家及規範 功能要求		德 國 BHS (2013b)	瑞 典 SEPA (2017)	丹 麥 DEA (2022)	本 研 究 VARUN
打樁 聲源 條件	點聲源假設	●	●	●	●
	頻率範圍 (Hz)	10~20k	10~25k	40~150k	10~20k
	打樁能量變化	●	●	●	●
	累計撞擊次數	●	●	●	●
	撞擊頻度設定	●	●	●	●
水下 音傳 計算	數值模式計算	●	●	●	●
	水深地形變化	●	●	●	●
	海水聲速變化	●	●	●	●
	海床地質條件	●	●	●	●
	水文海況影響	●	●	--	--
模擬 分析 要求	最糟情境分析	--	●	●	●
	動物聽力加權	--	●	●	●
	聽 力	TTS	●	●	●
	受損	PTS	●	●	--
	行為影響分析	--	●	●	●
	減噪(殘餘)影響	●	●	●	●
噪音 地圖 及 預測	累積影響分析	●	●	●	●
	模擬範圍 (km)	30	30	50	50
	特 定	750 m	●	●	●
	距離	>750 m	●	●	●
	計算方位變化	--	●	●	●
	計算深度變化	--	●	●	●
	1/3八音度值	--	●	●	●
	輸出噪音頻譜	●	●	●	●
	顯示閾值距離	--	●	●	●

(二)、 數值方法概述

本研究採用的數值模式為VARUN，其模組化項目包含水下噪音聲源、聲場環境(聲速、水深、密度、吸收)、噪音傳播損失計算等，在輸出的分析計算中，則包含了聲壓位準值、聲壓時序計算等，可參見先前研究發表(湛，2007、湛等人，2020b、湛，2021)。計算水下噪音聲場時，分為聲源計算及音傳損失計算(湛，2007)，打樁噪音聲源為1點聲源(Monopole Source)，分布在平均海面下5公尺，以3,000 kJ。音傳損失計算則是利用美國海軍研究室開發的RAM程式碼(Collins, 1995)，輸入聲源深度、傳遞距離、接收深度、聲波頻率、海水聲速、水深變化、海床地質聲學參數等。在本文中採用的數值模式之初始與邊界條件列於表5。

表5 水下噪音數值模式之初始及邊界條件設定

參數名稱(單位)	初始/邊界條件	參數名稱(單位)	初始/邊界條件
主要計算頻率(Hz)	10-2,000	打樁脈衝時長(s)	0.1
聲源深度(m)	5	打樁噪音功率(kJ)	3,000
計算網格(m)	水平50；垂直1	聲源值(dB re. 1uPa ² @1m)	232.1
接收深度(m)	20	打樁撞擊間隔(s)	2
最大計算距離(m)	50,000	累計撞擊次數	1、15、7,200
模擬海水聲速	8月	減噪方式	氣泡幕

四、打樁水下噪音模擬分析

以VARUN計算打樁噪音最大影響範圍(最嚴重情況)、減噪效果預測、鯨豚聽力加權後噪音影響範圍及累積影響分析，並探討鯨豚保護的風險評估與對策。

(一)、打樁噪音影響範圍預測

計算打樁噪音最大影響範圍時，以噪音能量衰減到基線背景值為依據。水下噪音基線背景值係參考海洋委員會國家海洋研究院在臺中港外調查結果(湛等人，2019)，水下聲曝值L5s的百分位90位準值為131.9 dB re. 1μPa²s，概估水下噪音基線值Leq約125 dB re. 1μPa²s。在水下噪音地圖上以10 dB為分級，因此水下噪音基線採較保守的120 dB re. 1μPa²s表示。本研究模擬彰化一處離岸風場的打樁影響，圖3的左圖為緩啟動60 kJ及右圖為全功率3,000 kJ的單次撞擊所產生的水下噪音地圖。預測模擬結果顯示：緩啟動在750公尺處的Lss約158.2 dB re. 1μPa²s，Lp約191.7 dB re. 1μPa；全功率打樁Lss約175.9 dB re. 1μPa²s，Lp約208.8 dB re. 1μPa，皆已超過我國環保署現行規定標準值Lss < 160 dB re. 1μPa²s，Lp < 190 dB re. 1μPa。

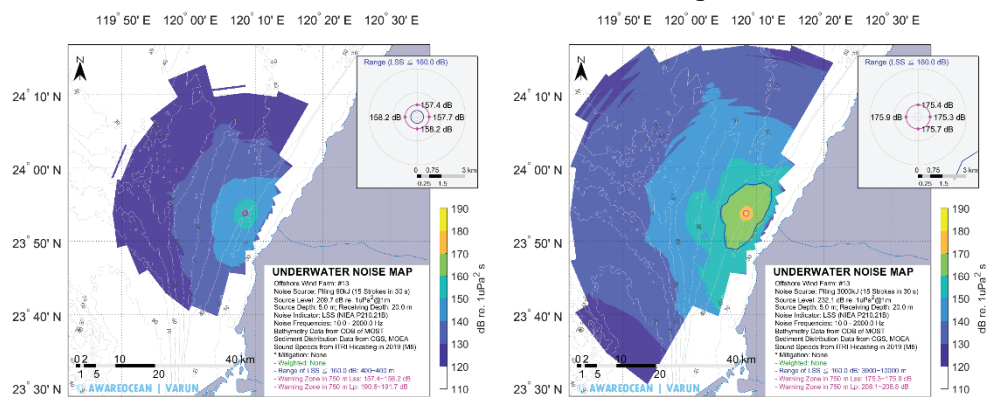


圖3 打樁水下噪音在緩啟動60 kJ(左)及全功率打樁3,000 kJ(右)的單次撞擊之水下噪音地圖

(二)、減噪效果預測

VARUN參考國外使用氣泡幕為打樁減噪工法(Verfuss et al., 2019)，圖4的左圖為雙層氣泡幕的減噪效果(無聽力閾加權)，單次打樁撞擊在750公尺處的Lss為153.3 dB re. 1μPa²s，Lp為180.0 dB re. 1μPa，尚符合規範。圖4的右圖為單層氣泡幕(部分失效模擬)狀態下，打樁外750公尺處Lss增加到163.1 dB re. 1μPa²s，Lp提高至192.5 dB re. 1μPa，已發生超標風險，長時間打樁更可能傷及鯨豚，應避免發生。

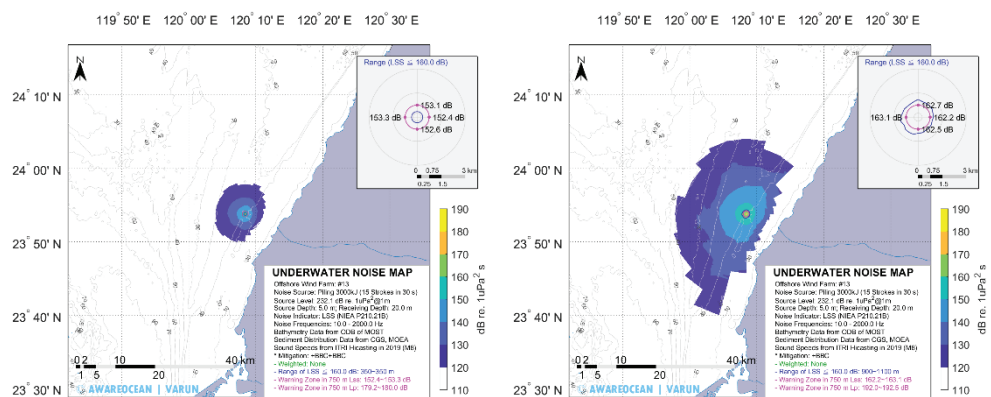


圖4 打樁水下噪音經雙層氣泡幕減噪(左)及單層氣泡幕(右)之水下噪音地圖

(三)、聲曝值加權聽力閾

以打樁3,000 kJ產生的噪音量(圖3右圖)加入高頻及超高頻發聲鯨豚之聽力閾加權(圖2)，如圖5所示，雙氣泡幕減噪下單次撞擊，鯨豚發生TTS範圍約50公尺內。

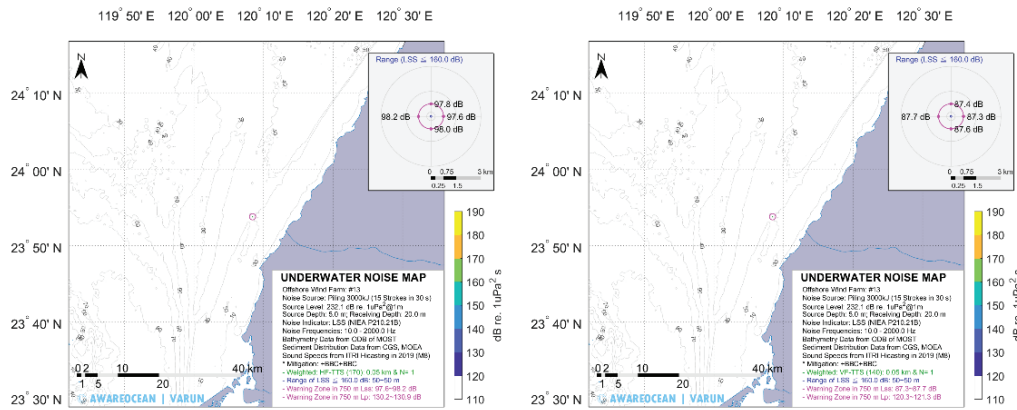


圖5 打樁水下噪音減噪後以高頻(左)及超高频(右)發聲鯨豚聽力加權後之水下噪音地圖

(四)、 打樁累積影響計算

實際打樁會產生連續脈衝噪音，對鯨豚影響採用聲壓累計，也就是將撞擊次數加權；以往簡易作法是直接將打樁最大功率的噪音乘上撞擊次數，但跟實際打樁情況不同。參考丹麥能源局規範(DEA, 2022)建議，將打樁全程情境設定在打樁功率分為由低至高的6個階段，各階段輸出為總能量依序百分比15、20、40、60、80、100，撞擊次數分別為400、1,400、1,400、1,400、1,400、1,200，合計7,200次累計聲壓計算；打樁每2秒撞擊1次，連續打樁可在4小時完成，全程預計6小時。

當減噪措施成功執行時，則在打樁750公尺外造成鯨豚發生TTS的機率不高，如圖5。若氣泡幕部分失效時(單層氣泡幕)，則在750公尺處噪音 $L_{ss} > 160 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa}^2 \text{ s}$ ，進一步評估鯨豚聽力受損的風險。參考丹麥能源局規範(DEA, 2022)建議設定鯨豚游離速度為1.5 m/s；假設在打樁前有鯨豚出現在打樁位置，以緩啟動開始到打樁功率逐漸加強的游離狀態下，鯨豚每小時游離5.4公里。估算連續撞擊對高頻及超高频發聲鯨豚產生聽力受損的範圍，約50公尺及2,200公尺，如圖6所示。根據連續4小時打樁預測，如表6所示，用於評估鯨豚聽力聲壓累計及受損範圍。以上算例依我國環評規範採用的管制閾值(參照德國StUK4)為評估方式，而在連續打樁撞擊噪音影響下，超高频發聲鯨豚(鼠海豚科)如在打樁處附近徘徊未及時游離，打樁後一段時間仍有產生TTS的風險，應進一步加強管制連續打樁時數和撞擊次數。

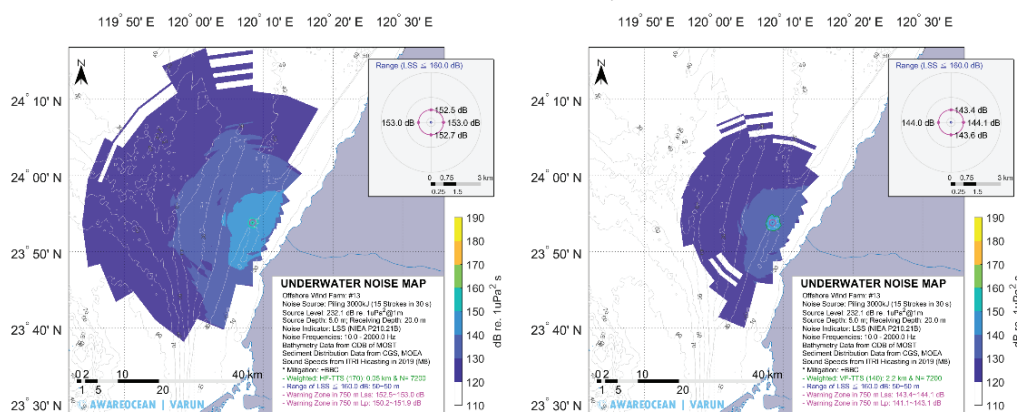


圖6 打樁全程水下噪音對高頻(左)及超高频(右)發聲鯨豚之累積影響範圍預測

表6 超高频發聲鯨豚受到打樁噪音累計聲壓影響與游離距離之評估

打樁時間(小時)	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
打樁撞擊次數	0	900	1,800	2,700	3,600	4,500	5,400	6,300	7,200
聽力受損範圍(公尺)	0	<50	<50	<50	350	800	1,100	1,700	2,200
鯨豚游離距離(公尺)	0	2,700	5,400	8,100	10,800	13,500	16,200	18,900	21,600

(五)、 多處打樁累積影響評估

在2022年有4座風場進行打樁施工，分別位於苗栗1處、彰化2處及雲林1處，各以一組水下基礎打樁累計聲壓(如圖6)來評估影響。打樁位置以各風場面積的重心座標，套疊水下噪音地圖如圖7所示，高頻發聲鯨豚(如白海豚)受到打樁噪音影響範圍較大，超過比風場面積的2-3倍，顯見在施工期間對於鯨豚生態監測調查範圍應擴大，以防範鯨豚生態受到多處打樁及減噪失效的累積不良影響問題。

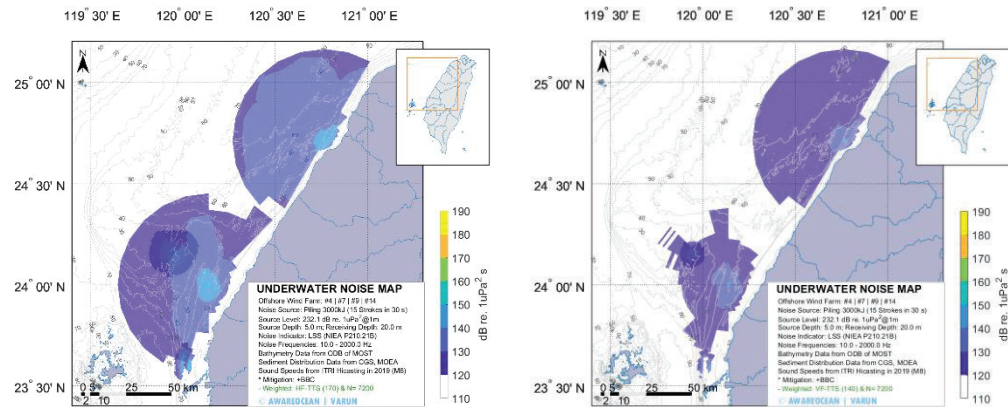


圖7 2022年4座風場打樁水下噪音對高頻(左)及超高頻(右)發聲鯨豚之累積影響範圍預測

五、 結論與建議

本研究探討離岸風場打樁噪音對鯨豚生態的影響問題，從德國、瑞典及丹麥等國的規範開始探討，打樁水下噪音影響的預測要求及分析方式。為強化水下噪音數值模式應用到環境影響評估功能，將減噪聲壓納入打樁聲源值計算中，並以鯨豚聽力閾曲線值計入水下噪音加權結果，有效地分析鯨豚受打樁單次撞擊的影響程度。而為進一步探討打樁全程的水下噪音累積影響問題，參照丹麥2022年規範建議，將打樁功率條件模擬設定為實際打樁過程，也就是將打樁功率變化由低而高分成6個階段，且累計各階段的撞擊次數，轉換為鯨豚感受到的聲壓加權結果，確切評估打樁噪音影響範圍。

從水下噪音影響評估不同鯨豚種類的風險結果來看，超高頻發聲鯨豚(如鼠海豚)受到打樁造成的聽力傷害(140 dB)風險較高，尤其是打樁撞擊次數越多或打樁時數越久，則影響範圍越大。如以鯨豚行為改變為可能避險條件，假設鯨豚從打樁警戒區游離速度每秒1.5公尺(每小時5.4公里)，在6小時撞擊7,200次(每2秒1次)的打樁施工條件下，當有超高頻發聲鯨豚(鼠海豚)在彰化外水域徘徊，若未躲避足夠距離(>2公里)的情況下，仍有可能發生聽力受損(TTS)，因此環評應管制每日打樁時數和次數。然而在本研究中，有關鯨豚的游離速度及物種或族群密度的假設乃參考國外相關研究，國內應盡快調查已知鯨豚物種受到打樁噪音的行為影響，並以科學方法加強風險管理。

本研究以2022年同期4座風場打樁產生的水下噪音地圖來探討累積影響問題，從結果已知，當鄰近風場同時打樁產生噪音會出現加乘效果，對鯨豚生態有負面影響，影響範圍已經超過單一離岸風場面積數倍以上。因此，建議相關政府機關應從科學層面的量化與質化數據，來檢討累積影響問題，進一步建立水下噪音管制要求。或從環評審查納入管理構面，在打樁施工前3個月提出打樁噪音預測模擬及減輕措施計畫，並參考歐盟、英國、德國所實施的人為水下噪音發生布告(Underwater Noise Registry)，以利主管機關可適時追查水下噪音影響問題，妥善運用預測模式以務實管理海洋環境保護。

謝誌

本研究使用科技部海洋學門資料庫所提供的海床水深數據，海床沉積物分布數據由經濟部中央地質調查所提供，在此一併致謝。

參考文獻

1. Richardson, W.J., C. R., Jr. Greene, C. I. Malme and D. H. Thomson, "Marine mammals and noise," New York: Academic Press, 576 pp. 1995.
2. Southall, B.L., Finneran, J.J., Reichmuth, C., Nachtigall, P.E., Ketten, D.R., Bowles, A.E., Ellison, W.T., Nowacek, D.P., and Tyack, P.L., "Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Updated Scientific Recommendations for Residual Hearing Effects," *Aquatic Mammals*, Vol. 45, pp. 125-232, 2019, DOI: 10.1578/AM.45.2.2019.125.
3. Boyd, I. et. al. "The effects of anthropogenic sound on marine mammals: A draft research strategy," Marine Board – ESF, Position Paper 13, p.13, 2008.
4. Nedwell, J.R. and D. Howellm, "A review of offshore windfarm related underwater noise sources," Subacoutech Report ref: 544R0308, 57 pp., 2004.
5. Graaf, A.J. Van der, Ainslie, M.A., André, M., Brensing, K., Dalen, J., Dekeling, R.P.A., Robinson, S., Tasker, M.L., Thomsen, F., Werner, S., "European Marine Strategy Framework Directive - Good Environmental Status (MSFD GES): Report of the Technical Subgroup on Underwater noise and other forms of energy," 2012.
6. 湛翔智、蕭婷宇、潘柔安、連永順、王珮蓉、胡芳瑜、林子皓，「以國際技術指引探討我國離岸風場水下噪音監測評估適用方法」，2017台灣風能學術研討會暨科技部成果發表會論文集，2017。
7. Danish Energy Agency (DEA), "Guidelines for underwater noise, Prognosis for EIA and SEA assessments," *Energistyrelsen maj 2022*," 2022.
8. Dekeling, R.P.A., Ainslie, M.A., Anderson, M., Borsani, J.B., Le Courtois, F., Hedgeland, D., Kinneging, N.A., Leaper, R. Liebschner, A., Merchant, N.D., Prospathopoulos, A., Sigray, P., Taroudakis, M., Tougaard, J., Weilgart, L., Tasker, M.L., Ferreira, M., Sanchez, M., "Towards threshold values for underwater noise-Common methodology for assessment of impulsive noise," TG Noise Technical Advice report DL.1, 2020.
9. National Marine Fisheries Service (NMFS), "Revision to: Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing (Version 2.0), Underwater Thresholds for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts," U.S. Dept. of Commer., NOAA. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-59, 167 pp., 2018
10. BSH, "Investigation of the Impacts of Offshore Wind Turbines on the Marine Environment (StUK4)," Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Federal Maritime and Hydrographic Agency, 2013a.
11. BSH, "Offshore Wind Farms: Prediction of Underwater Sound Minimum Requirements on Documentation," Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Federal Maritime and Hydrographic Agency, 2013b.
12. Brandt, M., Dragon, A.; Diederichs, A., Schubert, A., Kosarev, V., Nehls, G., Wahl, V., Michalik, A., Braasch, A., Hinz, C., Ketzer, C., Todeskino, D., Gauger, M., Laczny, M., Piper, W., "Effects of Offshore Pile Driving on Harbour Porpoise Abundance in the German Bight: Assessment of Noise Effects," Report by BioConsult SH. Report for Offshore Forum Windenergie, 2016.
13. 湛翔智，「負壓沉箱基礎真的是打樁噪音的救星嗎？」環境資訊中心，公共論壇，<https://e-info.org.tw/node/234414>，2022/6/28發表，2022a。
14. 湛翔智，「四個提問-談離岸風場開發的累積影響效應」環境資訊中心，公共論壇，<https://e-info.org.tw/node/234307>，2022/6/14發表，2022b。
15. Swedish Environmental Protection Agency (SEPA), "A framework for regulating underwater noise during pile driving," 2017.
16. ISO 18405, Underwater acoustics — Terminology, 2017
17. ISO 18406, Underwater acoustics — Measurement of radiated underwater sound from percussive pile driving, 2017.
18. BSH, "Offshore wind farms: Measuring instruction for underwater sound monitoring, Current approach with annotations," Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Federal Maritime and Hydrographic Agency, 2011.
19. 環境保護署，「水下噪音測量方法(NIEA P210.21B)」，2019。
20. 湛翔智，「離岸風場水下噪音指標之探討」，台灣聲學學會第三十四屆學術研討會論文集，2021。
21. 湛翔智，「鯨聲鯨視必修課系列-離岸風場施工期水下噪音評估」，知洋科技股份有限公司，海洋調查人員培訓技術中心發行，2020。
22. 湛翔智、邱侑蓮、魏瑞昌，「鯨豚減輕措施指引 Cetacean Mitigation Measure Guideline (CMMG)」，知洋科技股份有限公司發行，TCD-2006-CMM-G01，2020a。
23. 湛翔智等人，「臺灣周邊海域水下噪音與被動式聲學監測網先期規劃委託專業服務案—期末報告」，海洋委員會國家海洋研究院委託，2019。
24. 湛翔智，「臺灣鄰近海域環境噪音之資料分析及數值模擬」，國立臺灣大學工程科學及海洋工程學研究所博士論文，166頁，2007。
25. 湛翔智、邱侑蓮、連永順、王珮蓉、高國璋、胡凱程，「離岸風場施工及營運階段之水下噪音地圖模擬分析」，第32屆中國造船暨輪機工程研討會暨科技部成果發表會論文集，2020b。
26. Collins, M. D., "Users Guide for RAM Versions 1.0 and 1.0p", Naval Research Laboratory, Washington, DC. 1995.
27. Verfuss, U.K., Sinclair, R.R. & Sparling, C.E., "A review of noise abatement systems for offshore wind farm construction noise, and the potential for their application in Scottish waters," Scottish Natural Heritage Research Report No. 1070, 2019.