

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

摘要

我國政府採「先示範、次潛力、後區塊」三階段離岸風電推動策略，示範獎勵辦法在 2012 年公告，評選出 3 案離岸示範風場，接著於 2015 年公告潛力場址，目前有超過 20 件開發案提出申請，首先均需通過環評審查。然而各項環評審查項目中，風場開發產生水下噪音對海洋動物影響的問題較為複雜，主要原因是水下噪音監測方法尚無國際標準，困難處是要在海上取得足夠且有效數據，必須有詳實規劃和充分準備，才能利用測量資料來分析水下噪音影響程度。歐洲離岸風電有超過 10 個國家投入開發，但各國有不同的水下噪音影響評估方式，其中以德國政府提出的技術指引，在監測要求與開發限制上較為嚴格。而歐盟自 2008 年提出「良好環境狀態(GES)」綱要，提供給歐盟成員國作為管制參考依據，包含離岸風能開發的監測與評估要求。美國投入離岸風能的前期研究多年，直到 2016 年完成首座風場正式商轉，同年也公告「海洋哺乳類動物聽覺技術指引」，將水下噪音對數種鯨豚的各種影響程度，制訂出水下噪音傷害管制門檻。本研究將探討國際上最新的水下噪音監測與評估技術指引，並依循國內離岸風場的發展情況，提出適用方式的建議供各界參考。

關鍵詞：離岸風場、水下噪音監測、環境影響評估、技術指引、海洋動物、聽力閾值。

Abstract

The government devised the offshore wind promotion strategy with 3 phases, which include Demonstration Incentive Program, Zone Application for Planning, and Zonal Development. The demonstration incentive program was announced in 2012, and three projects have been selected accordingly. Then, the Directions of Zone Application for Planning (DZAP) was announced in 2015. More than 20 projects have applied for the DZAP, and they are required to pass environmental impact assessments (EIA) to obtain the first step approval for construction. However, the impact of underwater noise on marine mammal during construction and operation phases are very complex. The key issue is that the underwater noise monitoring method has no international standards and it is difficult to measure sufficient and valid data at sea. Moreover, EIA needs very detailed planning and comprehensive preparation to obtain data and analyze the impact assessment from underwater noise. More than 10 countries in Europe already installed offshore wind farms

and employ different assessment methods for underwater noise impact. The requirement of the German government's technical guidelines for underwater noise monitoring and assessment is most rigid and strict. Since 2008, the EU has proposed the "Good Environmental State (GES)" framework for the member states to achieve requirements for the offshore wind energy development monitoring and evaluation. The United States announced the Marine Mammal Acoustic Technical Guidance in 2016, which provides several acoustic thresholds on different species of marine mammal. This study will discuss the latest international technical guidelines for underwater noise monitoring and assessment. Finally, we carried out the report included the applicable method of underwater noise monitoring and assessment based on the development of offshore wind farms in Taiwan.

Keywords: Offshore wind farm, Underwater noise monitoring, Environmental impact assessment, Technical guidance, Marine mammal, Acoustic threshold.

I. 前言

我國在離岸風電的推動策略上採取「先示範、次潛力、後區塊」三階段，首先在 2012 年公告「風力發電離岸示範系統獎勵辦法」，據此評選出 3 案示範風場，目前已分別完成建置 3 座海氣象觀測塔，其中海洋示範風場已完成 2 座示範機組。因應後續區塊開發推動過渡期間較長，為利業者提早辦理準備作業，經濟部能源局於 2015 年公告第 2 階段「離岸風力發電規劃場址申請作業要點」，並公布 36 處潛力場址，以提供業者進行前期規劃。本階段採自由競爭機制，開發商可參考公告之潛力場址自行選定合適場址進行申請開發。且為順利銜接至第 3 階段，爰規定潛力場址開發業者需於 2017 年 12 月 31 日前取得環保署環評審查小組初審會議建議通過或有條件通過或於 2019 年 12 月 31 日前取得籌備創設登記備案，若未在上述規定期間內完成者，其備查及備查同意函自動失其效力。至今累積已有超過 20 件開發案已取得備查，並進入環境影響評估審查階段。

然而，近期在環境影響評估會議結論與公眾輿論中，離岸風場開發產生水下噪音的影響問題，成為眾多疑慮之一，且由於水下噪音對海洋生態的影響相當廣泛，且眾多的量測分析方法易造成其他領域人員的混淆、不易正確解讀。國內尚無明確指引(guidance)或法令規定，業者在環評說明水下噪音影響問題的內涵，包括海上監測方式、影響模擬結果、評估指標等，常缺少標

準程序和佐證方法，造成整個環評審議過程缺乏較客觀論述。因此，本研究將蒐研國際上最新的水下噪音監測與評估技術指引，並針對國內現況提出建議執行方向供各界參考。

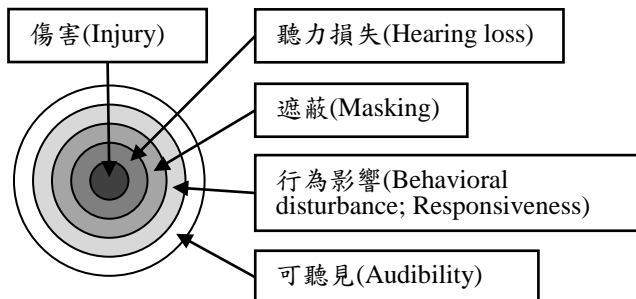
II. 水下噪音的影響問題

本文將水下噪音影響問題分為4個層面來談：

1. 不同距離的影響程度

國內外的研究報告中，在說明水下噪音對海洋動物的影響程度時，多數會引用 Richardson 等人[1]的研究方法，如圖1所示[2]，當水下噪音發生在圖中的中心位置時，在越接近中心位置則對海洋動物的潛在影響越嚴重，像是造成傷害(injury)。然而，水下噪音量會隨著傳遞距離而降低，因此，海洋動物在不同位置的影響程度，就可分為聽力損失、聽覺遮蔽、行為改變、可聽見（長期慢性壓力）等。儘管如此，Richardson 等人僅提出非常簡易的概念，但海洋動物受噪音干擾的實際影響，經常隨個體當時的生理狀態、行為與聽力而變。實際上，每一類型影響層面都是一種機率的變化，隨著遠離暴露噪音量而降低其發生之可能性。

海洋動物在水下環境中，經常高度仰賴聲音主動搜尋其獵物、被動竊聽其他動物的活動，甚至從環境噪音特性尋找其適合的棲地位置。而目前常用聽力損失作為判斷是否產生嚴重影響的項目，依照聽力損失的實際情況，可分為永久性聽力損失閾值改變(permanent threshold shift, PTS)及暫時性聽力損失閾值改變(temporary threshold shift, TTS)，大多數影響問題都是以PTS或TTS作為嚴格管制門檻或條件。



參考文獻[1]重新繪製

圖1 水下噪音對海洋動物的影響情況[2]

2. 不同物種聽力閾值的影響差異

由於各物種的聽覺差異，使得水下噪音對其影響亦有所不同，目前常用海洋動物的聽力加權值(M-weighting)或聽力閾值曲線(hearing threshold curve)來表示各物種的聽覺差異。聽力閾值表示的是動物聽到聲音的最低音量，在各頻率的感受不同。因此，實際上計算聽力閾值時，則會將最敏感頻率的閾值，設定加權值為0 dB(分貝)，其他頻率閾值的加權則是負值分貝，才能正確反應出動物最容易先損傷的聽力頻率範圍。換言之，如果水下噪音量較大的頻率範圍剛好是在最敏感的聽力曲線段，則發生TTS或PTS的風險最高，這就是為什麼需有聽力閾值的研究，如圖2[3]。原則上越瀕臨絕種的海洋動物，越需要聽力閾值及行為影響研究，才能釐清開發影響程度。

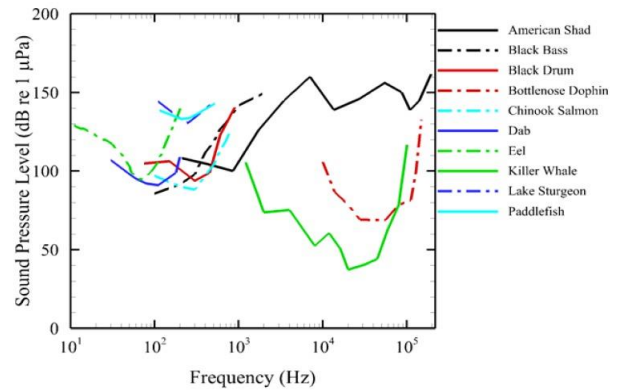
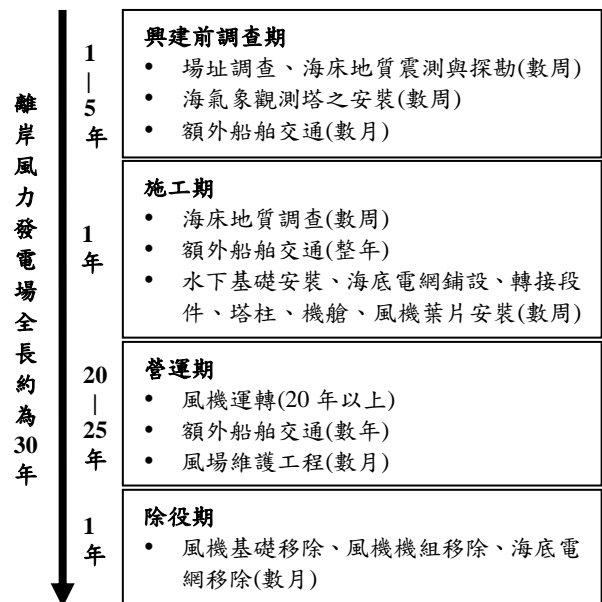


圖2 海洋動物的聽力閾值比較案例[3]

3. 離岸風場各階段的影響範圍

離岸風場可明確地分為四個階段：興建前調查期、施工期、營運期、除役期，根據文獻[4]重新整理出圖3的各種影響情況。文獻[2]曾整理出離岸風場產生水下噪音的影響問題，在興建前的調查就已經開始產生，其中以海床震測與探勘，以及海氣象觀測塔安裝，是比較顯著的項目，但目前幾乎沒有被納入環境影響評估範圍。在施工期，大多數的施工會集中在1年內完成，至多2年，其中在水下基礎安裝的打樁水下噪音，是最嚴重的直接影響，其他則是密集的船舶交通影響。營運期則是風機運轉及維護工程的影響較多，由於影響的期間至少20年，當地海域背景噪音可能因而改變。針對除役，由於目前只有丹麥第一座離岸風場(2002年興建)開始除役，因此並無明確的影響評估報告。



根據文獻[4]整理

圖3 離岸風場各階段產生水下噪音的情況[2]

4. 不同水下噪音特性的影響成因

產生水下噪音的聲源種類可分成二種：脈衝噪音(impulse noise)及非脈衝噪音(non-impulse noise)，脈衝噪音則可再分為單次脈衝噪音(single strike)或連續多次脈衝噪音(multiple strikes)，連續多次脈衝噪音是指連續發生，也就是產生的間隔非常短暫，這些噪音種類的變化特性，可以從聲波波形變化中觀察到，如圖4所示。

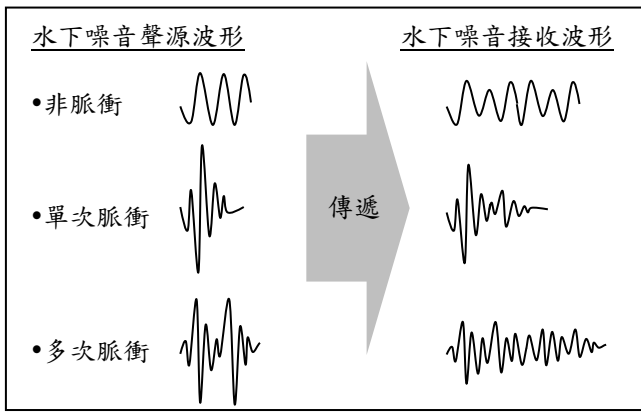


圖 4 非脈衝及脈衝水下噪音聲源與接收波形變化特性

在使用儀器或軟體分析水下噪音量時，可採用的水下聲壓值計算方式有(1)均方根值(root-mean-square, RMS)、峰值(peak value, PV)、聲曝值(sound exposure level, SEL)等。對應到前述的水下噪音種類，RMS 較適合用在非脈衝噪音或定性噪音分析；SEL 則是適合用在動物聽力感受分析，包含非脈衝與脈衝噪音，且可從 SEL 計算時間長短來因應單次脈衝或多次脈衝噪音的分析差異，PV 則只適合用來計算單次脈衝噪音的能量。另外，必須再次強調：有關水下聲壓值各種計算方式的選用，必須從評估問題的成因來研議，盡可能選擇一致的方法，但不同的分析方法仍有轉換計算方式，也保留許多彈性運用的空間，在使用上務必說明清楚選用各種計算方式的目標與適當性。

水下噪音(聲波)在水中傳遞的機制複雜，在分析判斷上，常以距離水下噪音聲源的特定位置及深度，來描述海洋動物感受到水下噪音的問題，而這段過程中，以水下噪音傳遞來形容變化過程。簡而言之，水下噪音在傳遞時，會因為海水聲速、海床聲速、海床深度等條件，發生折射、反射、幾何損失、吸收損失等機制，從接收到的水下噪音聲波來看，就會發生波形振幅(amplitude)衰減或波形擴散(spreading)，如圖 4 所示，這使海洋動物受水下噪音影響評估開始變得複雜。也就是說，在不同位置和深度評估時，一旦水下噪音超過當處背景噪音，除了要分析水下噪音振幅大小，還要有實際影響時間的長短，才能反應出對海洋動物可能影響程度(圖 1)，這就是大多採用 SEL 的原因。

III. 歐美監測指引與評估方法之比較

歐洲是離岸風電產業的發源地，歐盟組織與投入離岸風電開發的歐洲國家中，對於水下噪音影響問題，各有相關技術指引或國家標準。本研究綜整歐、美國家的技術指引、國家標準及國際組織規範，說明與比較如下。

1. 歐盟技術指引

自 2008 年開始建立綱要計畫(Marine Strategy Framework Directive, MSFD)，於 2010 年提出「良好環境狀態(Good Environmental Status, GES)」政策內容[5]，其中第 11 章節特別提出水下噪音的監測與管制要求，分為二個重要指標：人為產生的脈衝水下噪音及連續(非脈衝)水下噪音。GES 特別著重非脈衝水下噪音的影響，主要原因是歐盟認為長期累積性的影響，是造成海洋動物大量減少的關鍵因素，成因就是船舶水下噪音量

不斷地增加。為了因應 GES 大型調查計畫，許多國際組織提出船舶水下噪音的測量標準，如 ISO 17208-1、DNV GL Silent、BV NR 614 DT R01 E，文獻[6]則是綜整前述 3 項國際測量標準，並說明實務操作上的差異比較。此外，在 GES 2014 年公布的技術指引[7-9]，則是先取消了打樁產生脈衝水下噪音的監測閾值，原因是打樁工法差異性大，應先從功率範圍來釐清聲源強度，因此決議再研究後另行公布；其他脈衝水下噪音，如聲納、震測空氣槍則是從聲源強度來規範，而非脈衝水下噪音仍維持在低頻的評估門檻。在區域性歐盟的組織中，亦有提供離岸風場開發的環評技術指引[10]，內容包括水下噪音的測量與評估的項目和方法。

2. 德國國家標準

歐洲各國中，目前僅德國提出環境影響評估國家標準 StUK4 [11]，並有 2 份相對應的技術指引，分別針對離岸風場水下噪音監測[12]及水下噪音預估[13]，且須依照離岸風場四個階段(圖 3)，分別提出監測計畫與評估內容。此外，德國對打樁施工的水下噪音採取較明確且嚴格的管制閾值，不論有無使用打樁減噪措施，在 750 公尺半徑以外範圍，水下噪音聲曝值(SEL)不得超過 160 dB re. 1 μ Pa 2 s 的容許閾值[11]。根據 2011 年德國水下噪音監測技術指引內容，打樁水下噪音聲曝值係以 30 秒的累計作為判斷數值，採取全面性管制考量，沒有以特定海洋動物聽力閾值作加權計算[12]。

3. 英國技術指引

英國在 2015 年由 British Standards Institution (BSI) 公布一份離岸再生能源的環評指引[14]，其中指出水下噪音是必須評估的項目。此外，英國針對海域開發環境影響評估指引係由 CIEEM(Chartered Institute of Ecology and Environmental Management)在 2016 年所制訂[15]，其在離岸風場案例中要求，必須針對可能對生態產生影響的項目，進行基線(baseline)調查、施工與營運的影響評估，各項影響問題評估採用風險管理方式，應引用明確標準或具體研究依據。因此，英國政府另透過研究單位提出一份水下噪音測量技術指引(GPG 133) [16]，內容包括船舶水下噪音測量技術、水下聲學相關技術、打樁水下噪音測量技術等。在英國 GPG 133 的說明中，明確指出該指引沒有規定水下噪音管制閾值，但可參考相關研究(如[17])，進一步提出合理的評估閾值。

4. 美國技術指引

美國在 2016 年公告的海洋哺乳類動物聽覺技術指引(Marine Mammal Acoustic Technical Guidance)[18]，修訂以前的單一聽力閾值(Level B 的行為影響在非脈衝水下噪音為 120 dB-RMS，脈衝水下噪音為 160 dB-RMS)，將重要的海洋哺乳類動物聽力損失閾值分為 5 種：

- (1) Low-frequency Cetaceans (LF)低頻鯨豚、
- (2) Mid-frequency Cetaceans (MF)中頻鯨豚、
- (3) High-frequency Cetaceans (HF)高頻鯨豚、
- (4) Phocid Pinnipeds (PW)海豹、
- (5) Otariid Pinnipeds (OW)海獅。

表 1 則是訂出 5 種海洋哺乳類的「永久性聽力損失閾值標準 (PTS onset acoustic threshold)」。對於脈衝水下噪音

音的閾值，設定 2 種條件，分別是每次事件不得超過水下聲壓峰值(peak sound pressure level, PK)與連續 24 小時累積不得超過的水下噪音聲壓聲曝值(SEL_{cum})。而非脈衝噪音，只需符合連續 24 小時的聲壓聲曝值閾值(SEL_{cum})。美國目前尚無針對離岸風場開發的水下噪音監測技術指引，但仍有許多水下噪音測量國家標準 [19-20]及技術指引[21-23]可供參考。

表 1 美國制訂海洋哺乳類動物永久聽力損失閾值[18]

Hearing Group	PTS Onset* (Received Level)	
	Impulsive	Non-impulsive
Low-Frequency Cetaceans (LF)	PK: 219 dB SEL _{cum} : 183 dB	SEL _{cum} : 199 dB
Mid-Frequency Cetaceans (MF)	PK: 230 dB SEL _{cum} : 185 dB	SEL _{cum} : 198 dB
High-Frequency Cetaceans (HF)	PK: 202 dB SEL _{cum} : 155 dB	SEL _{cum} : 173 dB
Phocid Pinnipeds (PW)	PK: 218 dB SEL _{cum} : 185 dB	SEL _{cum} : 201 dB
Otariid Pinnipeds (OW)	PK: 232 dB SEL _{cum} : 203 dB	SEL _{cum} : 219 dB

* Dual thresholds (impulsive): Use one resulting in largest effect distance (isopleth).
• SEL_{cum} thresholds incorporates weighting functions

5. 國際標準規範

國際標準組織 ISO 在 2017 年公告 ISO 18406 規範，此為第一份提出打樁水下噪音測量方法的國際標準，內容包括各種水下聲學的名詞定義、硬體技術規格定義、校正技術、測量品質要求、水下噪音分析與計算方法等。

IV. 常見問題與觀念釐清

目前國際標準組織(如 ISO、IEC)尚未提供可涵蓋離岸風場各階段產生水下噪音的監測技術與評估方法，為了進一步釐清我國目前施行上遭遇的難題，本文比較美國國家自訂國家標準或技術指引的差異性，在圖 5 中以四項指標：離岸風場環評指引、背景(基線)調查規定、測量與模擬技術指引、水下噪音評估閾值，比較完善的程度。從本文的研究分析得知：德國 StUK4 [11-13]是目前唯一針對離岸風場環評的國家標準，且特別針對水下噪音的基線調查、打樁測量、噪音模擬及評估閾值，提出完整的技術指引。圖中的藍色圓圈內表示其他國家技術指引或國際標準，係直接針對離岸風場開發，在圓圈之外則是可被引用的國際標準、規範或閾值研究報告。以下根據四項完善指標，進一步探討常見的問題。

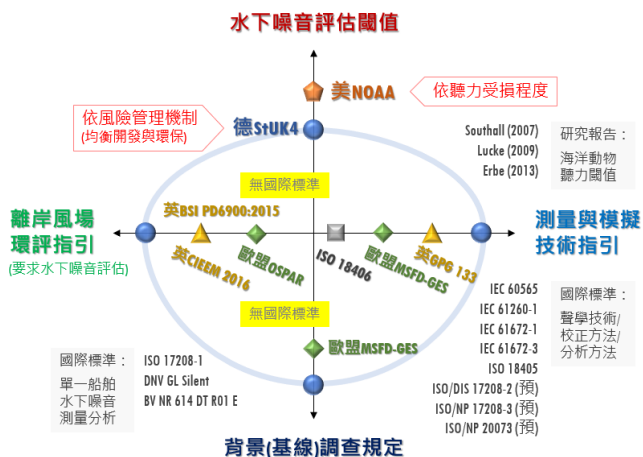


圖 5 水下噪音相關標準、規範與指引之完善程度比較

1. 離岸風場環評指引需求

我國政府單位曾委託國內研究機構，研究一份「離岸風力發電機組水下噪音評估作業要點(草案)」[24]，並有相關研究探討歐美相關作業要點之差異[25]。從國內的研究報告中發現，歐美各國對於離岸風場引起水下噪音問題，仍在持續研究與調查的階段，除了德國執行方式[11]較為明確外，歐盟[10]與英國[14-15]亦有提出指引，只規定重大的調查分析項目，目的在蒐集更多資訊。

2. 水下噪音評估閾值之差異

由於我國目前沒有水下噪音評估指引，因此在離岸風場環評資料中，較多差異問題都是出現在水下噪音評估閾值，尤其是打樁產生的脈衝噪音。參考歐盟 GES 2012 年的報告[26]，曾特別建議三種評估方式：(1)從海洋動物聽力損失來制訂閾值，(2)依照風險評估制訂閾值，(3)根據水下噪音聲源特性制訂閾值。表 2 特別整理三種評估方式的優缺點，其中以「依照風險評估方式」，對開發行為與環境保護上較均衡，也是歐洲國家中較多採用方式，像是德國、英國及愛爾蘭都採用此方式，要求開發單位必須依照技術指引提供監測計畫與對策，其中德國以較嚴格的風險評估方式制訂出閾值。

表 2 脈衝水下噪音影響評估制訂閾值的三種方式比較

制訂閾值方式	海洋動物聽力(避免直接傷害動物)	依照風險評估(控制影響的時空範圍)	根據聲源特性(控制水下噪音聲源強度)
優點	<ul style="list-style-type: none"> 可以明確對應欲評估的目標 可以提供較明確的減輕對策 近岸港灣工程較容易實施，樁徑小且工法簡單 	<ul style="list-style-type: none"> 對開發行為與環境保護的方法是較均衡的 有較充分的科學基礎 	<ul style="list-style-type: none"> 複雜度較低 對水下噪音傳播問題整體均化 對非水下聲學背景的人較容易理解 各噪音聲源閾值易取得
缺點	<ul style="list-style-type: none"> 缺乏噪音聲源訊號特性則難以評估 目前提出的閾值多以單次脈衝為主，較少連續脈衝 單一閾值過於簡化問題 	<ul style="list-style-type: none"> 實施上較複雜 當缺乏海洋環境資訊或環境條件複雜時，在風險評估上難度 	<ul style="list-style-type: none"> 不易反應出海洋環境下的變動情況 當缺乏海洋環境條件複雜時，在評估上有難度
現狀說明	<ul style="list-style-type: none"> 打樁產生的聲源特性會隨著打樁設備輸出功率、樁柱材、樁柱材與結構、樁柱材長度、樁柱材入海深度、海床深度等條件改變 各種海洋動物聽力曲線有變化，無法使用一個閾值涵蓋全部 美國 NOAA 2016 年提出的海洋哺乳類動物聽力閾值技術指引採本方式 	<ul style="list-style-type: none"> 開發單位必須提供詳盡的開發過程及各種可能的風險問題，在各種時空範圍上方提出對策 德國及英國採用本方式，要求開發單位必須依照技術指引提供監測計畫，德國以較嚴格的風險評估方式制訂出閾值 	<ul style="list-style-type: none"> 產生脈衝式水下噪音的狀況有海床震動調查、聲動式、打樁、聲波偵測等 打樁產生的聲源特性會隨著打樁設備輸出功率、樁柱材、樁柱材長度、樁柱材入海深度等條件改變 歐盟 GES 在 2014 年指引有較多相關的操作說明

美國在 2016 年提出的海洋哺乳類動物聽力閾值技術指引，屬於表 2 中的第 1 種方式，但對於離岸風場的環境評估作業上，有較困難之處，首先是打樁噪音的聲源特性雖然屬於脈衝型態，但打樁過程的聲源強度及頻譜特性，不斷在變化而難以掌握，因此在模擬及加權上十分困難。此外，歐盟 GES 2012 年報告[26]中曾討論累積影響採用 24 小時是否合理？其結論是過於冗長，許多工程並非是連續施做，且 24 小時後才有累積影響的監測數據，較難釐清水下噪音對海洋動物的具體影響。

3. 水下噪音測量與模擬技術指引之比較

離岸風電水下噪音對海洋動物影響的監測技術上，與現有空氣噪音法規仍有差異，噪音量的計算方法有部分通用，但其他國家也沒有直接引用的情況，原因說明如下：各種海洋動物聽力範圍從數赫茲(Hz)到 100 多千赫茲(kHz)，聽力加權研究資料仍十分有限，而水下噪音量差距大，測量動態範圍常超過 150 dB，現今測量設備需客製，少有標準規格，因此在硬體規格的檢驗上有難度，也就是說對監測目標掌握不足時，則設備規格就可能出錯或達不到目的。有部分國際標準或規範可用於水下噪音測量技術，如 ISO 18406:2017 是打樁水下噪音測量標準，ISO 17208-1:2016 是船舶水下噪音測量標準，ISO 18405:2017 定義水下聲學技術規範，IEC 60565:2006 為水下麥克風(hydrophone)校正方法，IEC 61260-1:2014 是八音度倍頻(octave band)及分倍頻濾波器標準，IEC 61672-1:2013 為音量計技術規格規範。

再者，在海上測量水下噪音時，規劃水下麥克風的設置位置、深度及數量，對資料分析與評估結果是重要因素。以直接影響最大的打樁水下噪音測量為例，ISO 18406 要求使用超過 1 支(>1)水下麥克風，英國 GPG 133[16]要求 2 支水下麥克風設置在水面下 1/2 及 3/4 的水深處，目的是增加測量備援(redundancy)，讓測量系統可靠度提高。在打樁水下噪音的測量距離要求中，ISO 18406:2017 建議 750 公尺，德國 StUK4[12]要求在 750 公尺，必要時最遠可延伸至 1,100 公尺，英國 GPG 133[16]建議可參考德國 StUK 的 750 公尺。

由於離岸風場開發面積大，要求設置大量監測設備既不實際也不符合成本，在各國環境影響評估方式中，多要求進行水下噪音模擬作業，以確切瞭解影響程度與範圍。目前國際標準組織尚無任何針對離岸風場水下噪音模擬技術規範，可參考其他技術指引包括歐盟 GES[9]、歐盟 OSPAR[10]、德國 StUK[13]、英國 GPG 133[16]、美國 NMFS[22]等。在這些技術指引中，大多建議使用公開的水下聲學音傳損失模式程式碼，歐盟 GES[8]提到可參考網站<http://oalib.hlsresearch.com/>。對於不熟悉水下聲學模式的使用者，歐盟 GES[9]則提供水下音傳損耗學理與經驗公式，可概估水下噪音影響範圍。

4. 水下背景噪音基線調查的重要性

德國政府單位為讓離岸風場開發時效提高，在水下噪音監測技術指引中，十分重視環境影響評估時的操作方式，以明確的測量規格及評估來要求開發單位，但實施時保留更大彈性。例如除了要求測量水下噪音資料外，需要同時蒐集測量位置、海水聲速、海面風速及船舶自動辨識系統(automatic identification system, AIS)數

據等。在風場前期調查時，必須測量超過 12 週的水下噪音，每個位置同時需有 3 支水下麥克風(hydrophone)測量，且有足夠海況 1 以下的數據，始可建立明確的水下背景噪音基線資料，以比對後續變化情況。

在環保署公開的離岸風場開發環境影響說明書中，多數水下背景噪音分析只是簡單地計算測量數據，常以平均值結果來說明這個複雜的現象，忽視應取得基線作為依據的重要性。建議採用的研究方法[27]是以統計方法中的實驗假說理論，將水下背景噪音數據與造成影響的環境數據一同比對。以風浪水下噪音的變動為例，風速或波高的變化對水下背景噪音在 500 Hz 到 50 kHz 之間有顯著影響，而基線調查需要的是低海況時的水下噪音值，像德國 StUK [12]要求在海況 1 以下；換句話說，沒有海面風速(或波高)的佐證資料，對探討水下背景噪音的基線調查實質意義不大。此外，臺灣海峽風場適合施工季節為春夏季(4-9 月)，這段時間的海況大多是低的，所以才容易施工；因此，這段時期的影響問題最嚴重，取得水下背景噪音基線才是關鍵。

IV. 結論與建議

離岸風場開發可分為 4 個階段(圖 3)，在歐洲的經驗中，施工期與營運期的水下噪音問題較為顯著。以下就分析最新國際技術指引內容，提出 5 項參考建議：

- (1) 離岸風場引起的水下噪音影響問題，逐漸受到各界重視，建議我國應著手建立技術指引，讓離岸風電產業得以順利推動，透過技術指引逐漸累積我國對水下噪音影響海洋生態的研究成果，並讓海洋生態永續發展。
- (2) 目前國際上對離岸風場環境影響評估作得最完整規定的是德國 StUK4 [11-13]，以第一座離岸風場「Alpha Ventus」為實證案例，隨後發表環境影響調查成果，依據離岸風場興建與營運的測量數據，建立完整的水下噪音監測評估指引；此外，德國同步公告在經濟海域內開發離岸風場四個階段(圖 3)都必須依照技術指引來監測水下噪音，並需提前將各監測計畫與減輕措施提交給主管機關審核。我國在建立相關技術指引時，可多參照已商業運轉離岸風電國家的發展歷程，以公開透明方式來減少爭議。
- (3) 在離岸風場開發或環境影響評估前，應確實調查風場範圍內的水下背景噪音基線。如鄰近有敏感水域(重要海洋動物棲息地或迴游水域)，則應增加調查位置，以進一步瞭解敏感水域周遭海洋動物與水下背景噪音之交互作用。在施工期針對打樁水下噪音的評估方式，建議可參考歐盟報告[26]所提的 3 種方式(表 2)，選擇一種方式作為通盤計畫，並依照該方法的原則，可自訂或參考德國 StUK[11]或美國 NMFS[18]的評估閾值，不應混用。如採用表 2 的第 2 種風險管理方式自訂評估閾值時，則應再進一步針對開發影響範圍內，各種施工情況、海洋生態變動特性提出風險評估與因應對策，例如打樁產生的聲源特性會隨著過程而改變，噪音在各種海洋環境中傳播也會變動，因此就必須提出更詳盡的演練數據，英國已有公開案例報告可參考。
- (4) 建議參考德國 StUK[12]的要求，將所有水下噪音的原始數據、後處理與評估數據提供給主管機關，並

保存至少 10 年，作為後續評估的用途。此外，適當的公開資料也將可作為其他海洋工程、人為活動與開發水下噪音之評估參考依據。

- (5) 歐美國家對於水下噪音影響海洋動物的評估，大多建議需要同時採用海洋哺乳類動物觀察員(marine mammal observer, MMO)與被動式聲學監測(passive acoustic monitoring, PAM)調查作業，我國應跟上國際技術發展趨勢，積極鼓勵此類海洋生態監測的技術研發與應用，透過深入整合工程與生態專業知識，積極降低海洋工程開發對海域生態的潛在影響。

參考文獻

- [1] W. J., Richardson, C. R., Jr. Greene, C. I. Malme and D. H. Thomson, *Marine mammals and noise*, New York: Academic Press, 576 pp. 1995.
- [2] 湛翔智, “海事工程之水下噪音量測程序與分析方法”, 第 34 屆海洋工程研討會論文集, pp.709-714, 2012。
- [3] H. Ren, M. B. Halvorsen, Z. D. Deng and T. J. Carlson, “Aquatic Acoustic Metrics Interface Utility for Underwater Sound Monitoring and Analysis,” *Sensors* 12:12, 7438-7450., 2012.
- [4] J.R. Nedwell and D. Howellm, “A review of offshore windfarm related underwater noise sources,,” Subacoustech Report ref: 544R0308, 57 pp., 2004.
- [5] M.L. Tasker, M. Amundin, M. Andre, A. Hawkins, W. Lang, T. Merck, A. Scholik-Schlomer, J. Teilmann, F. Thomsen, S. Werner & M. Zakharia, *Marine Strategy Framework Directive – Task Group 11 Underwater noise and other forms of energy*, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, DOI 10.2788/87079, 2010.
- [6] 湛翔智, “船舶水下噪音測量技術規範”, 第 19 屆水下技術研討會暨國科會成果發表會論文集, 2017。
- [7] R.P.A. Dekeling, M.L. Tasker, A.J. Van der Graaf, M.A. Ainslie, M.H. Andersson, M. André, J.F. Borsani, K. Brensing, M. Castellote, D. Cronin, J. Dalen, T. Folegot, R. Leaper, J. Pajala, P. Redman, S.P. Robinson, P. Sigray, G. Sutton, F. Thomsen, S. Werner, D. Wittekind, J.V. Young, “Monitoring Guidance for Underwater Noise in European Seas, Part I: Executive Summary,” *JRC Scientific and Policy Report* EUR 26557 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2014, doi: 10.2788/29293, 2014.
- [8] R.P.A. Dekeling, M.L. Tasker, A.J. Van der Graaf, M.A. Ainslie, M.H. Andersson, M. André, J.F. Borsani, K. Brensing, M. Castellote, D. Cronin, J. Dalen, T. Folegot, R. Leaper, J. Pajala, P. Redman, S.P. Robinson, P. Sigray, G. Sutton, F. Thomsen, S. Werner, D. Wittekind, J.V. Young, “Monitoring Guidance for Underwater Noise in European Seas, Part II: Monitoring Guidance Specifications,” *JRC Scientific and Policy Report* EUR 26555 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi: 10.2788/27158, 2014.
- [9] R.P.A. Dekeling, M.L. Tasker, A.J. Van der Graaf, M.A. Ainslie, M.H. Andersson, M. André, J.F. Borsani, K. Brensing, M. Castellote, D. Cronin, J. Dalen, T. Folegot, R. Leaper, J. Pajala, P. Redman, S.P. Robinson, P. Sigray, G. Sutton, F. Thomsen, S. Werner, D. Wittekind, J.V. Young, “Monitoring Guidance for Underwater Noise in European Seas, Part III: Background Information and Annexes,” *JRC Scientific and Policy Report* EUR 26556 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi: 10.2788/2808, 2014.
- [10] OSPAR, *OSPAR Guidance on Environmental Considerations for Offshore Wind Farm Development*, Ref. No. 2008-3, OSPAR Commission, 2008.
- [11] BSH, *Standard: Investigation of the Impacts of Offshore Wind Turbines on the Marine Environment (StUK4)*, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Federal Maritime and Hydrographic Agency, 2013.
- [12] 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.
- [13] BSH, *Offshore Wind Farms: Prediction of Underwater Sound Minimum Requirements on Documentation*, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Federal Maritime and Hydrographic Agency, 2013.
- [14] BSI, *PD6900: 2015 Environmental impact assessment for offshore renewable energy project – Guide*, The British Standards Institution, 2015.
- [15] CIEEM, *Guidelines for Ecological Impact Assessment: Terrestrial, Freshwater and Coastal*, 2nd edition. Chartered Institute of Ecology and Environmental Management, Winchester, 2016.
- [16] S.P. Robinson, P.A. Lepper, and R.A. Hazelwood, *Good Practice Guide for Underwater Noise Measurement*, National Measurement Office, Marine Scotland, The Crown Estate, Robinson, NPL Good Practice Guide No. 133, ISSN: 1368-6550, 2014.
- [17] B.L. Southall, A.E. Bowles, W.T. Ellison, J.J. Finneran, R.L. Gentry, Jr C.R. Jr Greene, D. Kastak, D.R. Ketten, J.H. Miller, P.E. Nachtigall, W.J. Richardson, J.A. Thomas, & P.L. Tyack, “Marine mammal noise exposure criteria: Initial scientific recommendations,” *Aquatic Mammals*, 33(4), 2007.
- [18] NMFS, *Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing: Underwater Acoustic Thresholds for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts*. U.S. Dept. of Commer., NOAA. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-55, 178 pp., 2016
- [19] ASA S3/SC1.4-2014, *Sound Exposure Guidelines for Fishes and Sea Turtles: A Technical Report prepared by ANSI-Accredited Standards Committee S3/SC 1 and registered with ANSI*, 2014
- [20] ANSI/ASA S12.64-2009/Part 1 (R2014), *Quantities and Procedures for Description and Measurement of Underwater Sound from Ships - Part 1: General Requirements*, 2014.
- [21] NMFS, *Guidance Document: Data Collection Methods to Characterize Underwater Background Sound Relevant to Marine Mammals in Coastal Nearshore Waters and Rivers of Washington and Oregon. Memorandum: NMFS Northwest Fisheries Science Center – Conservation Biology Division and Northwest Regional Office – Protected Resources Division*, January 31, 2012.
- [22] NMFS, *Guidance Document: Data Collection Methods to Characterize Impact and Vibratory Pile Driving Source Levels Relevant to Marine Mammals. Memorandum: NMFS Northwest Fisheries Science Center – Conservation Biology Division and Northwest Regional Office – Protected Resources Division*, January 31, 2012.
- [23] NMFS, *Guidance Document: Sound Propagation Modeling to Characterize Pile Driving Sounds Relevant to Marine Mammals. Memorandum: NMFS Northwest Fisheries Science Center – Conservation Biology Division and Northwest Regional Office – Protected Resources Division*, January 31, 2012.
- [24] 許榮均、湛翔智、林太山、許翠芬、鄭惟錡、洪梓薰、蔡岫羽、黃政浩, *開發行為噪音、振動評估審核機制之研究*, 行政院環境保護署委託研究計畫結案報告, EPA-103-F105-02-110, 2014。
- [25] 湛翔智、許榮均, “歐美制訂水下噪音評估作業建議要點”, 第 17 屆水下技術研討會暨國科會成果發表會論文集, 2015。
- [26] A.J. Van der Graaf, M.A. Ainslie, M. André, K. Brensing, J. Dalen, R.P.A. Dekeling, S. Robinson, M.L. Tasker, F. Thomsen, S. Werner, *European Marine Strategy Framework Directive - Good Environmental Status (MSFD GES): Report of the Technical Subgroup on Underwater noise and other forms of energy*, 2012.
- [27] 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。