

減少電廠入水口汲入魚類技術開發之研究

The Method Using Underwater Sound in Reducing Fish Entrainment and Impingement at the Cooling Water Inlets of Nuclear Power Plants in Northern Taiwan

吳煜慧**
Wu, Yu-Hui

余欣怡**
Yu, Hsin-Yi

邵奕達**
Shao, I-Ta

李志強**
Lee, Ze-Chang

林思瑩**
Lin, Szu-Ying

嚴宏洋**
Yan, Hong-Young

許金和*
Hsu, Chin-Ho

李建平*
Lee, Chien-Ping

江鴻虎*
Jiang, Hong-Hu

(~96~98 年度研究計畫論文~)

摘 要

核電廠抽取海水冷卻發電機組，但造成魚類「撞擊」(Impingement)。本計畫藉由了解標的魚種的聽覺靈敏曲線設計驅魚聲響，並藉由實驗設計適合台灣的水下噪音驅魚作業方式，以減少核電廠魚類撞擊。室內音響驅魚測試，結果顯示川紋笛鯛(*Lutjanus sebae*)與脂眼鯷(*Etrumeus teres*)對聲響有顯著驅避行為，但聽力差的六斑二齒魷(*Diadon holocentrus*)與褐籃子魚(*Siganus fuscescens*)則無驅避行為。2007/7-2009/1於核一與核二電廠入水口進行聲音驅魚實驗。放聲音較沒聲音時魚種數顯著減少。以個體數來看，放聲音時個體總數(核一:n=2,959；核二:n=279)較沒聲音時(核一:n=5,340；核二:n=904)少(各去除核一:2008/7/8小沙丁魚(*Sardinella* spp.)大爆發4,040尾；核二:2008/7/21小沙丁魚大爆發73,500尾)。未來若能增加水下擴音器數量並設置於入水口外圍，將更能增加音響驅魚的效用。

Abstract

The use of repellant sounds to reduce impinged fishes was evaluated as a method to reduce the impingement of fishes in the 1st and the 2nd nuclear power plants of Taiwan. By first understanding the audiograms of the targeted fishes, we designed the sound to expel the fishes around the inlets of NPPs. The indoor tests showed that snapper(*Lutjanus sebae*) and herring(*Etrumeus teres*) exhibited significant avoidance to the sound, while puffer(*Diadon holocentrus*) and spinefoot(*Siganus fuscescens*) failed to respond. During 2007/7-2009/1, the outdoor experiments were conducted in the inlets of the 1st and 2nd NPPs. The broadcasted sound resulted in the significant reduction in species numbers and fish numbers. It is suggested that for further reduction of impingement, more underwater speakers should be installed in distance further away from the inlets of NPPs to broadcast repellant sounds.

*台灣電力公司工安環保處

**中央研究院

關鍵詞(Key Words)：汲入(Entrainment)、撞擊(Impingement)、聽覺腦幹激發腦波 Auditory Brainstem Response, ABR)。

壹、前言

核能與火力電廠需使用大量冷水冷卻機組，因此大多興建在海岸邊。同時也會造成魚卵及仔稚魚之「汲入」(Entrainment)及幼魚、成魚之「撞擊」(Impingement)情形，因而造成當地漁業資源的損失 (Grimes 1975, Hanson *et al.* 1977, Stanford *et al.* 1982, Shao and Kuo 1988; Shao *et al.* 1990, Ringer 2000)。而發電廠當地海岸、海底地形、入水口之設計、流速、流量、氣候、漁況或魚群來游量之多寡，則會影響撞擊魚類之種類與數量的變動。

台灣目前已運作之三座核能電廠中，北部之第一及第二核能發電廠之因撞擊所造成的漁業損失較大，第三核能發電廠則因地形因素較少有撞擊的問題。造成撞擊的主要原因是因為許多魚類有向岸迴游或靠岸巡遊之習性，或因為覓食，或因為躲避掠食者之攻擊而不慎游入發電廠入水口內，因而導致撞擊(Hung *et al.* 1998)。林(1990)與 Shao *et al.*(1990)之研究顯示核能發電廠進水口撞擊的魚種組成和數量隨季節變化，春季時發生大量撞擊的魚種為日本鯷(*Engraulis japonicus*)；冬、春季為六斑二齒魷(*Diadon holocentrus*)；春、夏季為小沙丁(*Sardinella sp.*)；夏季主要為真鯷(*Trachurus japonicus*)、藍圓魷(*Decapterus maruadsi*)、虱目魚(*Chanos chanos*)和偶而為褐籃子魚(*Siganus fuscescens*)等。而依此估計第一核能發電廠與第二核能發電廠的漁業損失之經濟價值每年約等於新台幣 154 萬元。若能以適當方式以減低魚類撞擊或汲入的發生，不僅能降低漁業損失，同時也可減少發電廠對當地魚類資源的傷害。

以水下噪音驅趕魚類以減少撞擊的影響，在歐、美國家已有成功的案例(Kelso and Milburn

1979, Humbles 1993, Herdman 1995, Ross and Dunning 1996, Lewis and Seegert 2000)。本項計畫即在於應用已成功的案例，設計出適合於台灣的水下噪音驅魚作業方式，以減少核電廠的魚類撞擊數目。而本實驗的前提是必須要先瞭解容易撞擊魚種的聽覺能力範圍(包括音頻及音壓)，換句話說就是要先知道標的魚種的<聽覺靈敏曲線>才能設計出有效的噪音以達到驅魚的目的。<聽覺靈敏曲線>的取得可經由測量聽覺腦幹音響激發腦波的變化(Kenyon *et al.* 1998)，以得知標的魚種聽覺音頻的範圍，以及對一特定音頻的聽覺音壓閾值。因此聽覺靈敏曲線可以讓我們了解標的魚種聽覺能力的範圍，以此為根據設計的音頻訊號可以有效增加驅魚的效果。接著，利用所設計的音頻於室內水池進行測試以驗證其效果，最後再到核電廠入水口測試音響驅魚的效果。本項報告即是針對上述三個階段的作業，提出總合的執行成果資料，以供台電未來在執行噪音驅魚，在規範上有採用的依據。

貳、實驗方法與材料

一、標的魚種聽覺靈敏曲線的量取

(一) 實驗魚種部分

自第一與第二核能發電廠附近海域捕獲或從漁民購得川紋笛鯛(*Lutjanus sebae*)、六斑二齒魷、褐籃子魚與脂眼鯷(*Etrumeus teres*)等魚種作為實驗材料。這些實驗用魚都先置於活魚桶中，並給予空氣送回實驗室後，先置於實驗室水缸中馴化(25℃；12L：12D)並餵食至少一週後再進行實驗。

(二) 聽覺靈敏曲線的測定

本實驗是測量魚類聽覺腦幹的激發電位(Evoked Auditory Brainstem Potentials)的變化，以

得知標的魚種的聽覺靈敏曲線。此測試方法自 1998 年由嚴宏洋教授主持的研究室開發並發表後(Kenyon *et al.* 1998)，已被全世界從事魚類聽覺生理的學者們採用為標準的作業程序(Yan 2003)。實驗用魚以 10 ppm MS-222 浸泡麻醉後，於肌肉注射 50 μ L 的 0.1M Flaxedil(三磺季銨酚)，其目的是讓肌肉不會動作，以避免產生不必要的生理雜訊，再以流水式呼吸器插入實驗魚口中，以確保實驗過程中魚體得以存活。經麻醉後的魚體則置於流水式的記錄箱中，在實驗魚頭部設置兩支銀絲電極(直徑 0.5 mm)(一為記錄電極；一為參考電極)，讓電極與腦部表層接觸，特定音頻(Hz)與音壓(dB)的訊號則經由電腦軟體控制產生，經由置於離魚體上方 1 公尺的擴音器放出，魚腦聽覺腦幹因受聲音刺激而產生的激發電位則經由銀絲電極傳導而送入前置放大器(Pre-amplifier)，先經放大 100 倍與整流後，再傳送至第二級放大器再次放大 100 倍，然後這些腦波訊號則儲存於電腦中以做進一步的分析。特定週波的聽覺閾值(Hearing Threshold)則取決於每一音壓所產生的二次重複之腦波波形是否有再現性，而最低的音壓能產生再現性腦波即被認定為是該音頻的最低閾值。

二、研究室水槽內音響驅魚的實驗

測定實驗魚種的聽覺靈敏曲線及不同周波的聽覺閾值後，可瞭解該魚種的聽覺能力。但是，要瞭解何種音頻與音壓可實際達成驅離的效果，則必須以行為觀察方式進行。室內音響驅魚的實驗於長 7.5 公尺、寬 4.1 公尺、實際水深 1 公尺的大型水泥水槽中進行，選取核能發電廠入水口撞擊數量與頻度較多的魚種(川紋笛鯛、六斑二齒魴、褐籃子魚與脂眼鯉)為試驗對象。實驗用魚於野外捕獲後先經室內水池馴化一週後再進行實驗。要播放的聲音則經由高功率放大器(Industrial Power Amp, IPA 300T)傳送至水下擴音喇叭(Lubell Labs LL9162)，該擴音喇叭置放於遠端水池壁中心點底部。試驗的聲音係經由音頻

產生器(Function Generator)透過電腦及訊號放大器產生。實驗中以架設於試驗水槽的近端上方之攝影機(Sony DV TRV22)紀錄試驗結果，攝影機置放於距水面上方 1 公尺處，以 28 mm 廣角鏡頭瞄準遠端水池壁中心點底部，以記錄魚群對播放聲音的反應。本實驗從測定之聽覺靈敏曲線所獲得的最敏感 (Best Hearing) 的音頻給予不同的音壓加以播放，以尋求最有效驅離魚群的音壓。並使用水中音壓計及水下麥克風(Oki SW-1030)，以數位錄音機(Marantz PMD 671)進行錄音，錄音取樣頻率為 48000Hz，所得聲音檔案，再以軟體 Avisoft 及 Matlab 進行詳細的數值及頻率特性分析。

此項實驗的測試步驟如下：

實驗開始前三小時，先將水下擴音喇叭等系統放入水中，以確定魚群對播音裝置在尚未開始播放聲音時無驅避反應。測試聲音共分成四組(圖 1)：(A) 100-900Hz 低頻脈衝；(B) 0.1-24kHz 寬頻脈衝；(C) 聽力範圍內的 500Hz 純單音；與(D) 超過大多數魚種聽力範圍外的 8000Hz 純單音。每組分別記錄播放前十分鐘 (Before)、播放中十分鐘(During)、播放後十分鐘(After)魚群的反應。每組實驗共重複三次。實驗後的數據分析則利用 PowerDVD 影片自動擷取畫面的功能，每分鐘擷取一張畫面。(如脂眼鯉)，以該魚群之中央點至水下擴音喇叭的中心點的距離來比較播放聲音前與播放聲音後的差異。最後以 t-test，比較播放聲音前與播放聲音中的魚群個體數是否有顯著性差異。

三、第一與第二核能發電廠入水口驅魚實驗

在入水口前方放置水下擴音喇叭(Lubell Labs LL9162)，播放「100-900Hz 低頻脈衝」之聲音，置入水中的深度為兩米，後級放大器(Industrial Power Amp, IPA 300T)與播放聲音控制系統則設置在堤岸上的鋁製櫃內以防潮。聲音訊號則持續 24 小時連續播放，至隔日清晨十點撞擊魚收網後停止播放。並於離水下喇叭 20 公

尺處，使用水下麥克風(Benthos AQ18)記錄環境背景噪音及播放 100-900Hz 低頻脈衝音頻時入水口處的音響訊號。每次試驗以兩個 24 小時為一組，第一個 24 小時為沒有播放聲音，次 24 小時為播放聲音。並以收集到撞擊的魚種數與個體數來了解聲音驅魚的效果。

叁、結果與討論

一、標的魚種聽覺靈敏曲線的測定結果

圖 2(2-1~2-10)顯示的是本研究對 11 種魚以聽覺腦幹腦波測量方法，所獲得的聽覺靈敏曲線。

圖 3 則是前述 11 種標的魚種聽覺能力的綜合比較。很顯然的，日本鯉有最寬的聽覺音頻(300-3,000Hz)，而最靈敏的音頻範圍是落在 1k-2k Hz 之間。這意味著在設計噪音訊號時最高音頻最高可達 3,000Hz 的音頻，而音壓至少要高於 130dB 才能確保噪音能被聽到。這 11 種魚中聽覺能力最差的是河豚，其音頻上限只能到達 1,000Hz，而音壓必須高於 135dB 時才能聽到訊號。圖 2 及圖 3 所提供給我們最重要的資訊是在設計噪音音訊時，音頻最大不可高於 4,000Hz，而音壓至少要大於 135 dB。

二、室內水池音響驅魚測試

選取測試的魚種包括川紋笛鯛、六斑二齒魴、褐籃子魚與脂眼鯉。實驗結果顯示川紋笛鯛

對於三種音頻有顯著驅避行為，但對於 8000Hz 連續音波沒有反應(參見表 1)，對照川紋笛鯛的聽覺靈敏曲線發現川紋笛鯛最高只能聽到 3000Hz 的聲音，因而我們以 8000Hz 作為本實驗的「負面對照(Negative Control)」，這項結果確認了其他三種音頻的確有驅魚的效用。

但六斑二齒魴與褐籃子魚對於播放的四種類型聲音沒有明顯的驅避反應(參見表 1)，在 1.5 公尺半徑內出現的魚數量於有無播放聲音時差異不顯著，這也反映了他們聽力很差的事實(參見圖 3)。

脂眼鯉是群聚性魚種，因此比較有無播放聲音時魚群的中心點至水下擴音器的距離是否有差異，結果顯示除了 0.1-24000Hz 寬頻脈衝聲響沒有差異外，脂眼鯉對其他 3 種聲響皆有明顯驅避的行為(參見表 2)。

由六斑二齒魴與褐籃子魚的聽力靈敏曲線得知此兩種魚類的聽力較川紋笛鯛差，因此，六斑二齒魴與褐籃子魚對於聲音的播放沒有反應，而川紋笛鯛的聽覺較靈敏，因而其對於聲音的有無播放反應較明顯。而脂眼鯉對寬頻脈衝聲響無明顯反應，可能是因為寬頻脈衝音頻範圍太廣，脂眼鯉只聽的到其中某一段的音頻，而聽不到其他波段的音頻，因此聲音對此種魚沒有明顯的驅離效應。

因此由室內實驗的結果顯示，播放魚群可聽見的音響訊號可以較有效驅趕聽力較靈敏的魚種。

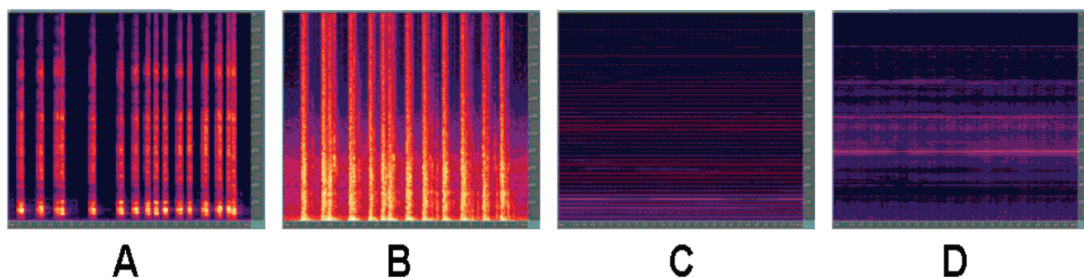


圖 1 室內驅魚實驗所使用四種噪音的圖

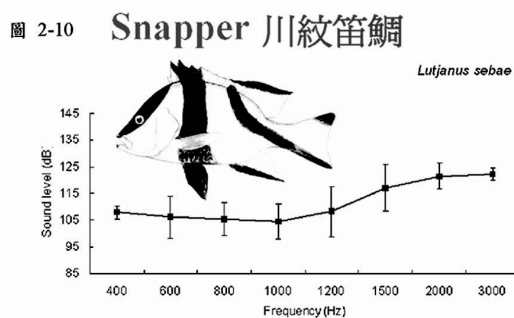
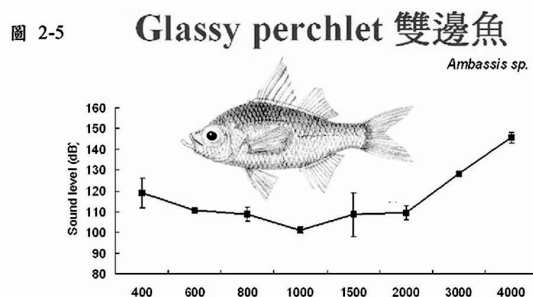
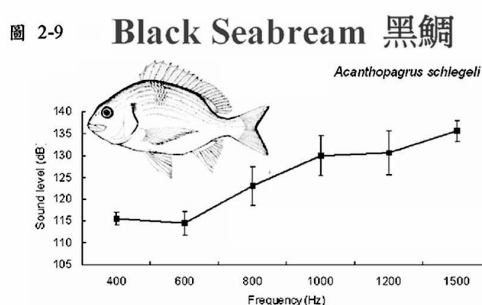
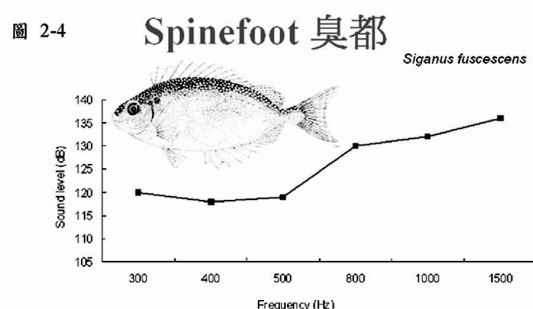
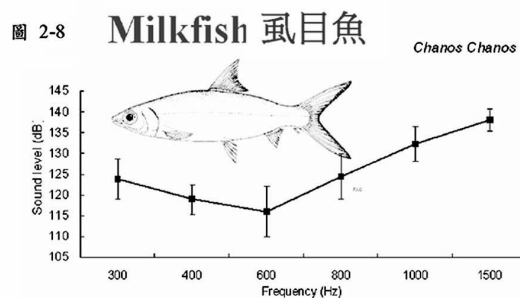
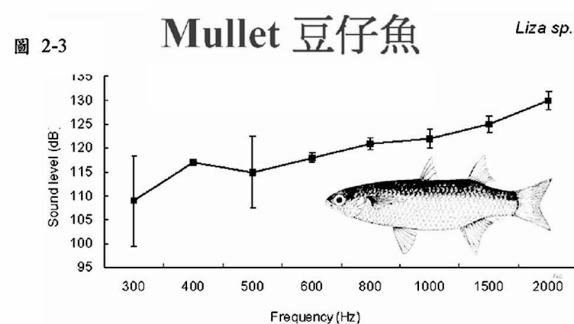
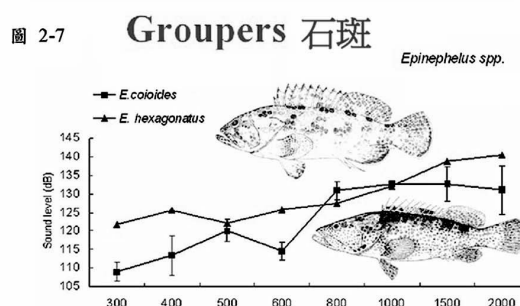
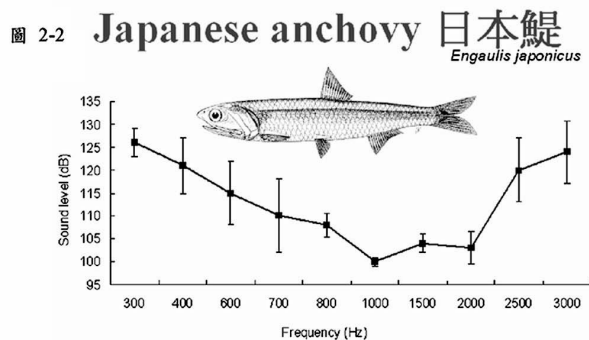
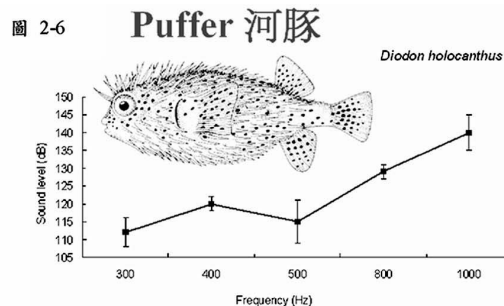
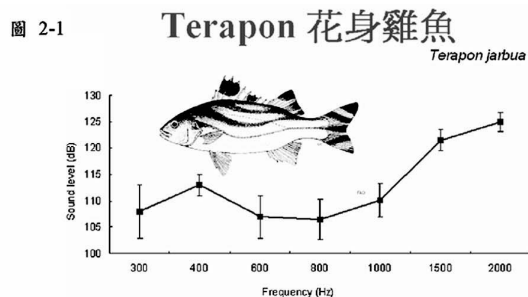


圖 2 11 種標的魚種的聽覺靈敏曲線(石斑魚共有兩種)

Summary

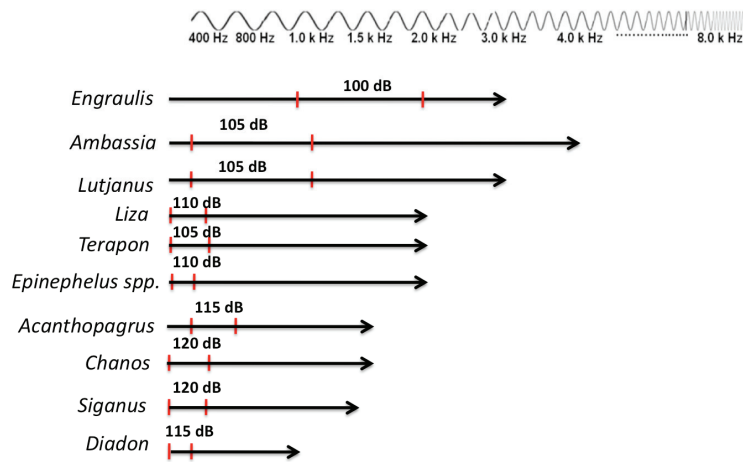


圖 3 11 種標的魚種聽覺能力的綜合比較 (*Epinephelus* 含兩種魚)；箭頭橫線表示聽覺音頻範圍，紅色雙縱線及數值表示每一種魚最靈敏的音頻範圍及音壓值。

表 1 室內測試四種音頻對川紋笛鯛、六斑二齒魷與褐籃子魚驅離之影響

魚種名	播放聲音種類	半圓內的魚個體數 (Mean±SE)	
		無聲音(Before)	有聲音 (During)
川紋笛鯛	100-900Hz 低頻脈衝	22.63±1.03	14.41±1.17*
	0.1-24kHz 寬頻脈衝	21.63±0.50	12.72±0.79*
	500Hz 連續	25.41±0.70	13.63±1.41*
	8000Hz 連續	24.69±0.85	23.44±0.62
六斑二齒魷	100-900Hz 低頻脈衝	19.2±15.1	20.1±12.1
	0.1-24kHz 寬頻脈衝	15.9±11.7	16.5±7.6
	500Hz 連續	13.1±6.1	15.5±6.9
	8000Hz 連續	17.1±14.1	18.2±13.5
褐籃子魚	100-900Hz 低頻脈衝	6.4±5.2	7.7±7.7
	0.1-24kHz 寬頻脈衝	4.4±4.4	3.3±3.3
	500Hz 連續	3.4±3.4	2.3±2.3
	8000Hz 連續	8.1±6.0	8.3±8.3

*：p<0.001 表示此一音頻有顯著的驅魚效果。

表 2 室內測試四種音頻對脂眼鯪驅離之影響

播放聲音種類	魚群與水下擴音器的距離(Mena±SD) (單位:公分)	
	無聲音(Before)	有聲音(During)
100-900Hz 低頻脈衝	101.8±17.0	108.9±10.2*
0.1-24kHz 寬頻脈衝	118.8±16.8	120.7±19.4
500Hz 連續	105.5±19.8	116.1±17.2*
8000Hz 連續	98.3±14.4*	108.6±15.6

*：p<0.05。表示此一音頻有顯著的驅魚效果。

三、第一核能發電廠入水口驅魚實驗

2007 年 7 月至 2009 年 1 月於第一核能發電廠入水口共進行 41 組聲音驅魚的實驗。於 2007 年 7 月、9 月、11 月至 2009 年 1 月各進行 2-3 組實驗，每次以兩個 24 小時為一組實驗，實驗的第一個 24 小時為沒有播放聲音，第二個 24 小時為有播放聲音，同時收集入水口當日撞擊的魚類，以了解當日撞擊的魚種與該種類之數量。撞擊總個體數為 12339 尾，辨識至種的魚種數為 120 種，辨識至屬及科的魚種數各為 15 與 17 種，有 207 尾身體不全的魚種無法辨識。實驗結果發現撞擊魚種數目最多的為小沙丁魚屬，共 5837 尾，其次為六斑二齒魷(3118 尾)，第三為褐籃子魚(910 尾)。

比較有無放聲音時的撞擊魚種數，有放聲音(n=83)較沒有放聲音(n=86)時的魚種數少。但統計分析結果顯示二者之間並沒有差異。換句話說，聲音有無播放沒影響到撞擊的種別數。

以撞擊魚個體數來看，其中沒有放聲音時的撞擊個體數為 5340 隻，放聲音時的撞擊個體數為 6999 隻。檢視資料發現其中 2008/7/8 紀錄到小沙丁魚大爆發 4040 尾，由於小沙丁魚大爆發屬於偶發事件，推測可能是因該日有颱風過境魚群躲入灣區避浪而造成撞擊。因此將此紀錄去除後，有放聲音時的個體總數則降為 2959 尾(參見圖 4)遠比沒聲音時的 5340 隻為少。

進一步以四季分別來比較有放聲音與沒有放聲音時的撞擊魚種數與個體數時，則有下述的現象：春季時有放聲音的魚種數顯著少於沒有放聲音時，但於其他三個季節時，有放聲音的魚種數略多於沒有放聲音時(參見圖 5)。當去除 2008/7/8 小沙丁魚大撞擊尾數後，有聲音時撞擊個體數於每一季皆少於沒有放聲音時(參見圖 6)。

根據以往的調查紀錄，小沙丁魚於夏季大爆發的紀錄並非每年發生，而是相隔兩年或甚至更久才發生。小沙丁魚大爆發的原因推測很可能是躲避掠食者而游入發電廠的入水口，或者躲避颱風的大浪，因此造成大量撞擊的現象。

經由室內實驗及野外的實地觀察顯示六斑

二齒魷的游泳能力很差，一但被海流送入入水口的主流後，幾乎沒有能力逆流游出，這也可以解釋何以水下噪音無法對此種魚達成驅魚的效果。

四、第二核能發電廠入水口驅魚實驗

2008 年 5 月至 2009 年 1 月於第二核能發電廠入水口共進行 17 組聲音驅魚的實驗。其中 9 月沒有進行實驗，因為 8 月時颱風將實驗器材損毀，實驗儀器送修，直到 10 月才得以繼續實驗。每個月各進行 2-3 組實驗，每次以兩個 24 小時為一組實驗，實驗的第一個 24 小時為沒有播放聲音，第二個 24 小時為有播放聲音，同時收集入水口當日撞擊的魚類，以了解當日撞擊的魚種與該種類之數量。撞擊個體數為 74683 尾，辨識至種的魚種數為 38 種，辨識至屬及科的魚種數各為 2 與 3 種，有 3 尾身體不全的魚種無法辨識。實驗結果發現撞擊魚種數目最多的為小沙丁魚屬，共 73649 尾，其次為褐籃子魚(507 尾)，第三為六斑二齒魷(318 尾)。

比較有無放聲音時的撞擊魚種數，有放聲音(n=19)明顯較沒有放聲音(n=33)時的魚種數少。

比較有無放聲音時的撞擊個體數，其中沒有放聲音時的撞擊個體數為 904 隻，放聲音時的撞擊個體數為 73779 隻。檢視資料發現其中 2008/7/21 紀錄到小沙丁魚大爆發 73500 尾，由於小沙丁魚大爆發屬於偶發事件且訪談入水口工作人員後，發現當晚入水口有開燈的狀況，因此推測除了可能是因為躲避掠食者追趕，也可能是因為燈光造成小沙丁魚大量游入入水口，造成大量撞擊的現象，因此將此紀錄去除後，有放聲音的魚個體數為 279 尾(參見圖 7)。當以這校正過後的資料來相比，可以發現到有播放聲音的確可以顯著的達成驅魚的效果。

以四季分別來比較有放聲音與沒有放聲音時的撞擊魚種數與個體數。其中於夏、秋、冬季時有放聲音的魚種數少於沒有放聲音時，但於春季時，有放聲音的魚種數略多於沒有放聲音時(參見圖 8)。撞擊個體數部分：去除 2008/7/21 小沙丁魚大撞擊紀錄後，除了春季外，有聲音時撞擊個體數於夏、秋、冬季時皆少於沒有放聲音時(參見圖 9)。

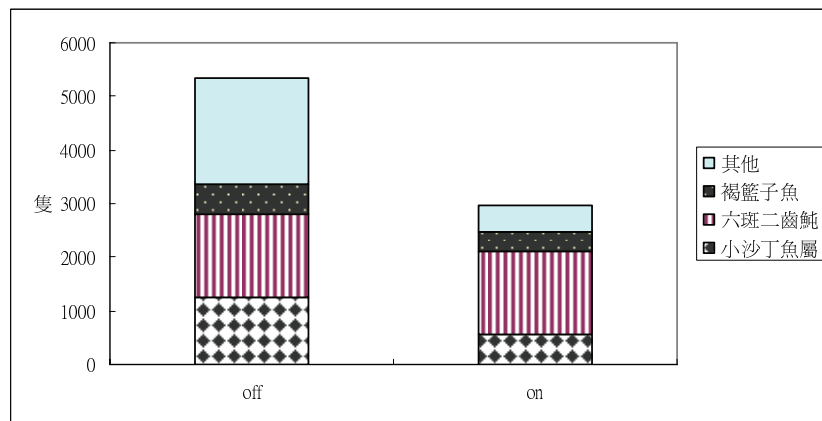


圖 4 2007 年 7 月至 2009 年 1 月於第一核能發電廠進行音響驅魚實驗，比較去除小沙丁魚屬大撞擊資料後有放聲音(on)與沒有放聲音(off)時撞擊魚個體數之結果。

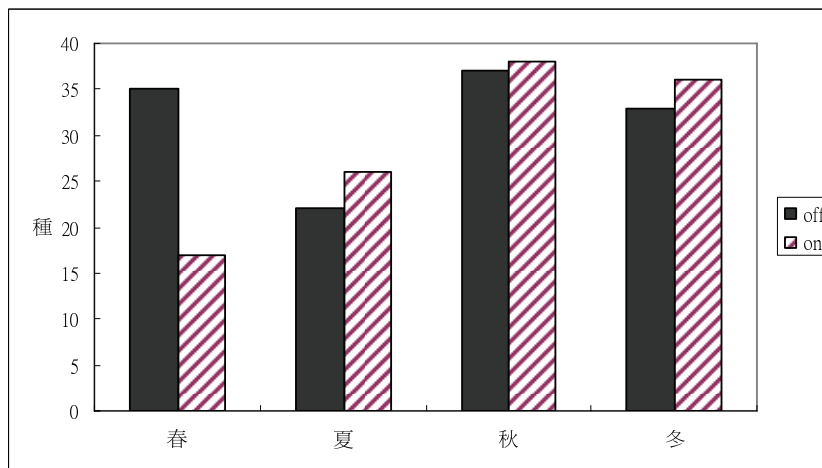


圖 5 2007 年 7 月至 2009 年 1 月於第一核能發電廠進行音響驅魚實驗，比較有放聲音(on)與沒有放聲音(off)時四季之撞擊魚種數之結果。

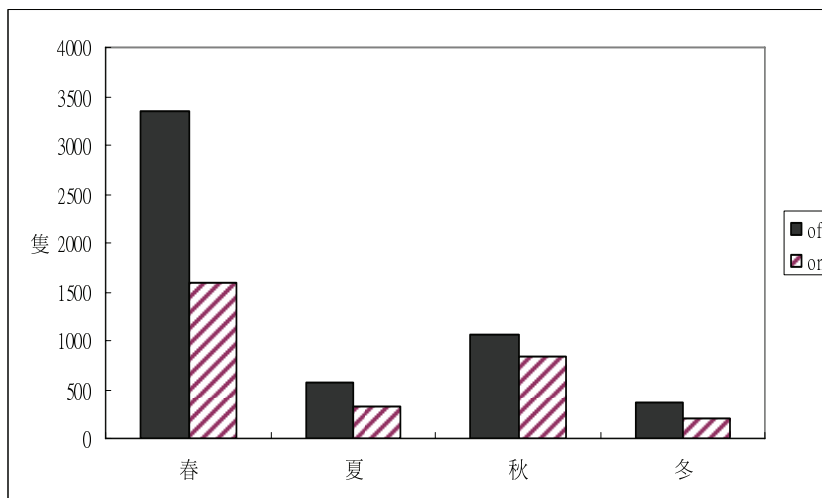


圖 6 2007 年 7 月至 2009 年 1 月於第一核能發電廠進行音響驅魚實驗，比較有放聲音(on)與沒有放聲音(off)時四季之撞擊魚個體數之結果。

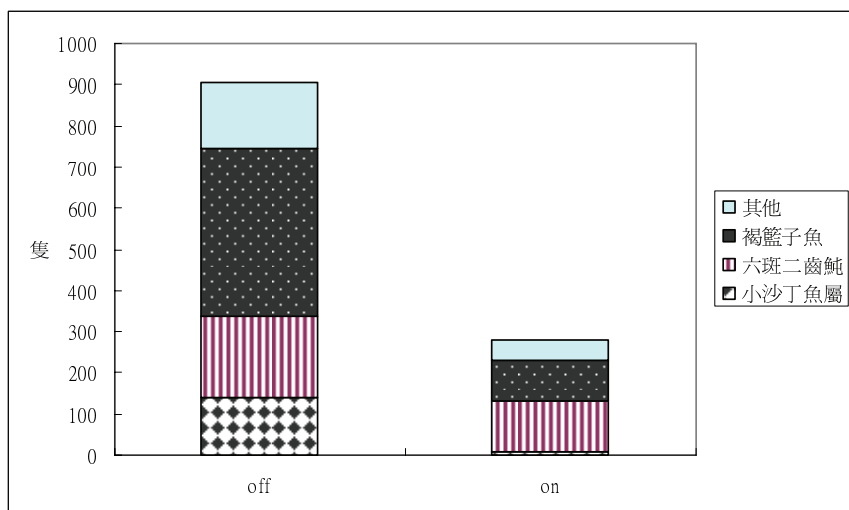


圖 7 2008 年 5 月至 2009 年 1 月於第二核能發電廠進行音響驅魚實驗，比較去除小沙丁魚屬大撞擊資料後有放聲音(on)與沒有放聲音(off)時撞擊魚個體數之結果。

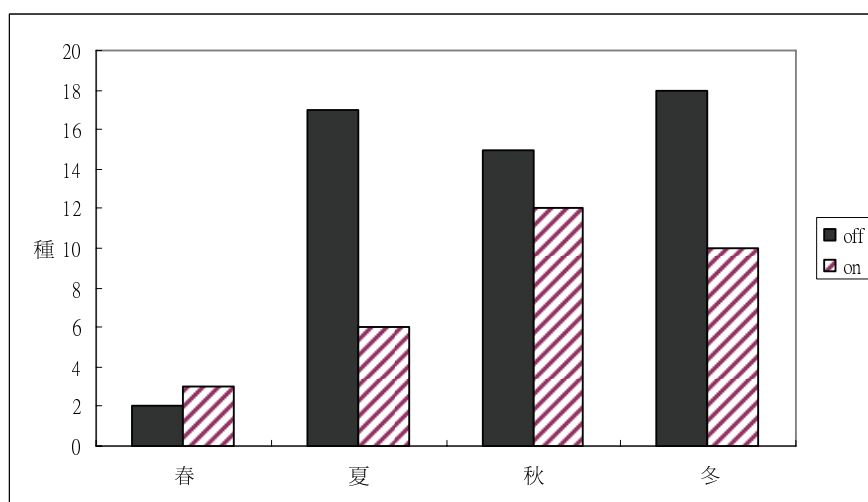


圖 8 2008 年 5 月至 2009 年 1 月於第二核能發電廠進行音響驅魚實驗，比較有放聲音(on)與沒有放聲音(off)時四季的撞擊魚種數之結果。

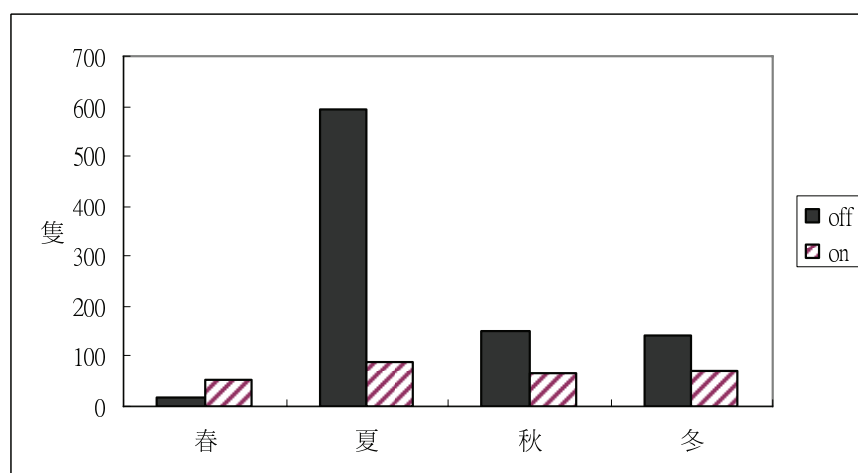


圖 9 2008 年 5 月至 2009 年 1 月於第二核能發電廠進行音響驅魚實驗，比較有放聲音(on)與沒有放聲音(off)時四季的撞擊魚個體數之結果。

肆、結論與建議

根據實驗結果，本研究所設計的播放音頻及音壓可以有效的減少核電廠的撞擊魚數量。但實驗期間因為人力與物力的限制，只能於入水口附近設置 1-2 個水下擴音器。未來如果能增加水下擴音器的數量，增加水下播放聲音的聲響強度，同時將水下擴音器設置於入水口外圍，讓游泳能力較差的魚種，如六斑二齒魷，能在流速較小的區域就能驅避，將更能增加音響驅魚的效用。

此外，如能管制入水口附近區域夜間的燈光，盡量避免燈光造成附近海域魚類的趨光性，也將更能減少魚類撞擊的情形。

伍、誌謝

感謝台電公司核一廠與核二廠的人員協助採樣與設置研究儀器的進行。部份魚類樣本的分類仰賴中研院生物多樣性研究中心邵廣昭老師實驗室之協助。本實驗的進行也要感謝實驗室其他助理的參與，讓實驗順利進行。

陸、參考文獻

- [1] C. B. Grimes, "Entrapment of fishes on intake water screens at a steam electric generating station," *Chesapeake Science*, vol. 16, pp.172-177, 1975.
- [2] C. H. Hanson, J. R. White, and H. W. Li, "Entrapment and impingement of fishes by power plant cooling-water intakes," *Marine Fisheries Review*, vol. 1266, pp.7-17, 1977.
- [3] R. M. Stanford, S. W. Jordan, D. R. Talhelm, C. R. Liston, C. Korson, and M. H. Steinmuller, "The bioeconomic impact of impingement and entrainment on yellow perch in Lake Erie," *North American Journal of Fisheries Management*, vol. 2, pp.285-293, 1982.
- [4] K. T. Shao and S. R. Kuo, "Species composition and seasonal distribution of impinged fishes at the two intakes along the northern coast of Taiwan," *Acta Zoologica Taiwan*, vol. 22, pp. 209-227, 1988.
- [5] K. T. Shao, C. P. Lin, L. T. Ho, and P. L. Lin, "Study on the fish communities from northern and southern waters of Taiwan by analyzing the impingement data," *Journal of Fisheries Society of Taiwan*, vol. 17, pp. 73-90, 1990.
- [6] T. G. Ringger, "Investigations of impingement of aquatic organisms at the Calvert Cliff's nuclear power plant, 1975-1995," *Environmental Science and Policy*, vol. 3, pp. S261-S273, 2000.
- [7] T. C. Hung, C. C. Huang, and K. T. Shao, "Ecological survey of coastal water adjacent to nuclear power plants in Taiwan," *Chemistry and Ecology*, vol. 15, pp. 129-142, 1998.
- [8] 林介屏, 「利用撞擊魚類資料探討臺灣南北海域之魚類羣聚變化」, 碩士論文, 國立台灣大學漁業科學研究所, 1990 年。
- [9] J. R. M. Kelso and G. S. Milburn, "Entrapment and impingement of fish by power plant in the Great Lakes which use the once-through cooling process," *Journal of Great Lakes Research*, vol. 5, pp.182-194, 1979.
- [10] G. Humbles, "Evaluation of Smith-Root type electric fish barrier," Yakima Project, Yakima, Washington, Jan. 28, 1993.
- [11] R. C. Herdman, "Fish passage technologies: Protection at hydropower facilities," Washington, DC., *OTA-ENV-641*, pp.167, 1995.
- [12] Q. E. Ross and D. J. Dunning, "Reducing impingement of alewives with high frequency sound at a power plant in Ontario," *North American Journal of Fisheries Management*, vol. 16, pp.548-559, 1996.
- [13] R. B. Lewis and G. Seegert, "Entrainment and impingement studies at two power plants on the Wabash River in Indiana," *Environmental Science and Policy*, vol. 3, pp.S303-S312, 2000.
- [14] T. N. Kenyon, F. Ladich, and H. Y. Yan, "A comparative study of hearing ability in fishes: the auditory brainstem response approach," *Journal of Comparative Physiology A*, vol. 182, pp. 307-318, 1998.
- [15] H. Y. Yan, "The role of gas-holding device in fish hearing enhancement," *In Senses of Fishes*, (eds) G. von der Emede and J. Mogdans. *Narosa Press*. pp. 189-209, 2003.