



浮式風機 平台設計 製作與競賽

陳乃齊／國立成功大學水利及海洋工程學系 碩士生
孫詠鈞／國立成功大學水利及海洋工程學系 碩士生
戴紹捷／國立成功大學水利及海洋工程學系 碩士生
林奎瑱／國立成功大學水利及海洋工程學系 碩士生
鄭舜文／國立成功大學水利及海洋工程學系 碩士生
林昱蓁／國立成功大學水利及海洋工程學系 碩士生
楊瑞源*／國立成功大學水利及海洋工程學系 教授

傳統風能發電多半建立於陸地或近岸的固定基礎上，但浮動風能技術採用了更為創新的方式，它將風力發電機安裝在浮動結構上，使其能夠在深海區域進行發電。這樣的技術可以克服水深限制，開闢更多適合風能開發的區域，同時也能更好地捕捉更強的風能，提高能源產量。在浮式風機平台設計中，一般遵循著五個步驟：概念設計、數值模擬、水工縮尺模型試驗、平台安裝與運輸的可行性評估，以及效益分析。本文主要分享這次競賽平台的設計概念，並以本模型為案例，介紹數值模擬、以及進行水工縮尺實驗的必要性。同時，也將分享我們在競賽中所獲得的寶貴經驗，供大家參考。

關鍵字：浮式風能、模型試驗、數值模擬、載台設計、國際競賽

ABSTRACT

Traditional wind power generation is mostly built on fixed foundations on land or near the coast. However, floating wind energy technology employs a more innovative approach: it installs wind turbines on floating structures, allowing them to generate power in deep-sea regions. This technique can overcome water depth limitations, open up more areas suitable for wind energy development, and also enhance the capture of stronger winds, resulting in increased energy production. In platform design, there are generally five steps followed: conceptual design, numerical simulation, hydraulic scale model testing, feasibility evaluation of platform installation and transportation, and cost-benefit analysis. This article primarily aims to share the design concept of the competition platform, using our model as a case study, to introduce the importance of numerical simulation and the necessity of conducting hydraulic scale model experiments. Additionally, we will also share the valuable experiences gained during the competition for everyone's reference.

Keywords: Floating wind energy, Model experiment, Numerical simulation, Platform design, International competition

* 通訊作者，ryyang@mail.ncku.edu.tw

前言

近二十年來全球於再生能源的發展愈加蓬勃且迅速，尤其是離岸風電的部分。離岸風電是一種利用海上風力發電的技術，可以為我們的能源需求提供可持續的解決方案。隨著風場選址逐漸擴展至越來越深的海域，為了降低離岸風機的水下基礎結構成本，以及降低施工上的困難，浮式平台技術成為大家積極研究的解決方案，歐洲亦有許多有志之士舉辦浮式平台設計競賽，為這項技術的發展提供了更多創新與進步的契機。

歐洲有個 OffshoreWind4Kids (OW4K)，它是一個教育項目，旨在向孩子們介紹和推廣離岸風電的知識。2022 年 OW4K 發起了浮式平台設計建造競賽 (Floating Wind Challenge)，鼓勵全世界的年輕工程師踴躍參與。

「Floating Wind Challenge」是一個旨在推動浮動式風能技術發展的倡議和競賽活動。由於 2022 年的競賽成果獲得了廣大的反響，2023 年擴大舉行比賽，在 5 月 7 日，荷蘭的斯海弗寧恩海灘 (Scheveningen beach) 舉行。斯海弗寧恩海灘是一個緩坡海灘，據統計，當地 5

月的平均風速為 9 節 (約 5 m/s)，最大陣風可達 16 節 (8 m/s)，有效波週期為 3 ~ 7 秒。

今年 (2023 年) 的比賽要求浮式風機模型平台要能夠搭載 400W Vevor 的風力發電機，量測 30 分鐘內風機的發電量，而且安裝位置的水深超過一公尺深。我們在國立成功大學水利與海洋工程楊瑞源教授的指導下組團參加這次的競賽。本篇文章說明我們的浮式風機平台設計概念、製作、實驗測試、數值模擬以及參加競賽經驗。

浮式風機平台 - Orein

我們將參賽的浮式風機平台命名為「Orein」，它是楊瑞源教授海洋結構與可再生能源實驗室 (OSREL) 的學生自行設計出來的。Orein 的「O」象徵八邊形平台形似於圓形，「rein」顯示團隊對於平台在實海域的運轉的企圖與信心。楊教授的 OSREL 研究室主要研究離岸風電，特別是浮台繫泊系統的設計，執行過多項專案，並擁有大量水工模型實驗的經驗。

設計流程

如圖 1 所示，我們依照 8 個步驟進行) 進行風機平台設計：(1) 設計評估及初步結構設計、(2) 概念測試、(3) 全尺寸模型設計、(4) ULS 生存測試、(5) 繫覽設計^[1]、(6) 結構設計、(7) 安裝及運輸可行性評估、(8) 成本效益分析^[2]。

浮台形狀選型

考慮到出國參加競賽安裝模型地點的環境條件以及出國參加競賽運輸方式及成本後，決定使用 1 : 60 比例尺進行設計。這將導致示性週期 4 ~ 7 秒之波浪在模型放大回全尺寸時，其所面臨之示性週期約為 23 ~ 53 秒。

浮體式離岸風電適用於水深 50 ~ 150 公尺 (或延伸至 200 公尺) 之離岸風電技術。浮體式離岸風電技



圖 1 浮式風機平台設計流程圖

術核心為浮體平台，技術分類一般可分為 Spar-buoy (柱狀浮筒)、Tension Leg Platform (TLP, 張力腳平台)、Semi-submersible Platform (半浮式平台) 三類，以及不屬於上述三類之其他形式^[3]。設計參考文獻 DNV-RP-0286 是由挪威船級社 (Det Norske Veritas, 簡稱 DNV) 所制定的一個技術建議實踐文件，主題涉及風能產業中的「海上風機結構設計」。這份文件提供了有關海上風機結構設計的指導方針、建議和最佳實踐，以確保風機在惡劣海洋環境下的安全性和可靠性。該文件涵蓋了許多方面，包括結構設計的荷載計算、材料選擇、施工和安裝過程中的技術要求等。表 1 列出 DNV-RP-0286 測計參考文件中有關不同浮台型式之自然週期範圍。Spar 以及 Semi-submersible 高機率達到共振，而 TLP 受到潮汐影響，在安裝上成本昂貴且不易安裝。因此採用 Barge 型式設計並透過下部掛載改善 Barge 所面臨之缺點。

Orein 風機平台主要元件

我們的 Orein 風機平台主要元件包括：八邊形平台、阻尼池、垂盪板、下部掛載系統、模組化設計，如圖 2 所示。

(1) 八邊形平台

八邊形平台與方形結構相比，八邊形平台受到的波浪及海流影響較小，且製造過程比圓形設計簡單。此外，八邊形較不容易受到渦流引致振動 (VIV) 的影響，從而減少損壞風險並延長平台的壽命。

表 1 不同浮台型式之自然週期範圍 (DNV-RP-0286)

Type of motion	Spar	Semi-submersible	TLP	Barge
Units	[s]	[s]	[s]	[s]
Surge	~100(catenary)	~100(catenary)	15-60	~100
Heave	25-40	15-25	1-2	5-10
Pitch	25-40	25-40	2-5	9-16
Yaw	5-20	50-80	8-20	50-100

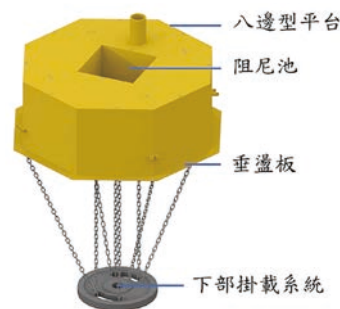


圖 2 浮式風機 Orein 平台示意圖

(2) 阻尼池

阻尼池的設計可以使得水體的振動與波浪產生的激振力相互抵銷，以降低平台上下起伏。此外，阻尼池的設計還可以減少所需材料用量，達到提高成本效益的目的。

(3) 垂盪板

為了進一步抑制平台的上下起伏，在平台底部安裝垂盪板。在平台起伏時產生一個反作用力來抑制運動，可增加平台的穩定性。

(4) 下部掛載系統

下部掛載系統可降低浮台重心，進而增加其穩定性。此外，單擺運動產生的相位差可減少平台傾仰 (pitch)，從而提高風機發電效率 [4]。

(5) 模組化設計

我們將結構體設計成相同的小單元，使其能統一製造，並且每個單元相互獨立，可以單獨進行配重。這些模組可以被視為獨立的積木，它們可以快速地組合在一起形成完整的模型，方便運輸，節省時間成本 (圖 3)。

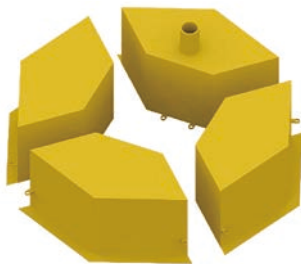


圖 3 Orein 平台模組化示意圖

數值分析

應力分析

我們使用 ANSYS Workbench 靜態結構分析來驗證模型的結構強度，確保其應力和變形水平是可接受的。通過利用有限元法 (FEM)，靜態結構分析能夠使用最小位能定理和靜態函數定理來轉換線性方程組進行計算。儘管在複雜的邊界條件及幾何形狀，FEM 也能夠提供可行的解決方案。

共振頻率分析

自由衰減實驗收集時間序列數據，並通過傅立葉變換將其轉換為頻譜。頻譜中觀察到的峰值對應於結構的自然周期，當外力的周期 (如：波浪) 與的自然周期接近時，結構的振幅將明顯增加，這被稱為共振。共振可能導致結構疲勞和損壞，對發電效率產生負面影響。因此，自然周期是浮式平台非常重要的設計參數。

由於結構體的傾仰和上下運動對發電效率影響較大，在設計時，會使結構體的傾仰和上下起伏週期避開真實海域的波浪週期範圍。我們利用 AQWA 軟體模擬後，設計傾仰和上下運動的自然周期分別為 1.879 秒和 1.291 秒，避開當地有效波週期 3 ~ 7 秒的範圍，如圖 4 及圖 5 所示。

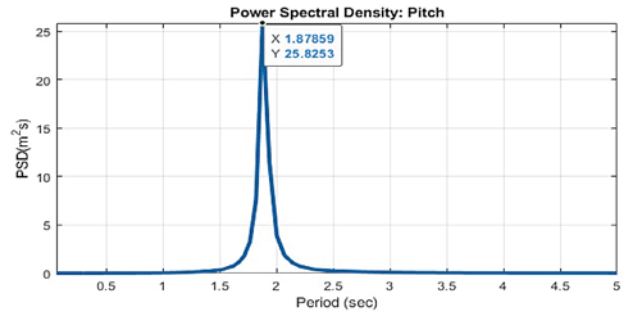


圖 4 數值模擬的能量波譜 (傾仰)

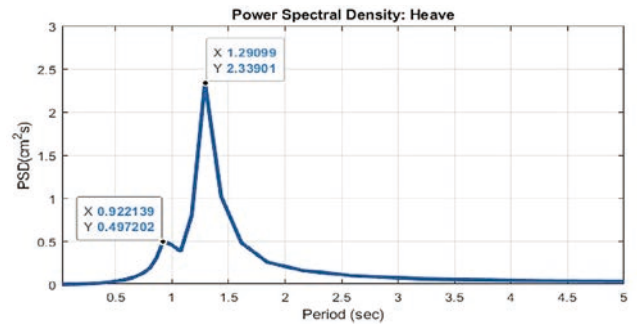


圖 5 數值模擬的能量波譜 (上下運動)

生存測試

我們使用流體動力學軟體 OrcaFlex 來模擬浮動結構的運動狀態，OrcaFlex 可應用於多種分析，包括錨泊動力系統、立管系統以及浮式平台或船舶的動態分析，OrcaFlex 以勢流理論為基礎，假設流體不可壓縮、無黏滯性和無渦旋的。

根據 DNVGL-ST-0119 標準，對浮式風機進行安全評估時，使用 50 年颱風重現期進行評估。根據 DNV-RP-0286 標準，建議進行長達 3 小時的模擬，以準確模擬非線性、二階效應和緩慢變化回饋等影響。根據 DNVGL-OS-E301 和 Corewind D2.1 標準，我們審查 Orien 平台的運動和繫泊張力性能，確保其符合規格 [5]，如表 2 所示。

表 2 數值模擬結果與 DNVGL-OS-E301 標準比較

	俯仰	前後	繩張力 (一般情況)	繩張力 (極端情況)
標準	< 15°	< 30 ~ 60 m	< 30380.8 kN	< 30380.8 kN
模擬	13.8°	30.85 m	29340.4 kN	22997.3 kN
設計檢查	Pass	Pass	Pass	Pass

水工模型試驗

本研究試驗在國立成功大學水工試驗所的大型造波水槽進行（圖 6）。試驗包含共振頻率試驗及生存測試。



圖 6 在國立成功大學水工試驗所的大型造波水槽進行試驗

共振頻率試驗

在共振頻率試驗方面，我們使用陀螺儀和影像辨識進行自由衰減試驗，以獲得浮式平台的固有周期。該實驗包含以下步驟：

1. 在浮式平台上放置陀螺儀，以測量平台的傾仰及上下運動運動資料。
2. 使用 gopro 追蹤浮式平台的運動軌跡，並使用 MATLAB 軟體進行影像分析，將平台的運動軌跡轉換成二維座標系統。
3. 導出由陀螺儀測量及影像分析得到的平台運動時間序列資料。
4. 使用傅立葉變換得到時間序列頻譜，從而得知。

水工試驗結果如圖 7 及圖 8 所示。比較數值模擬與模型試驗試驗結果，數值模擬傾仰的自然週期 1.88 秒，試驗試驗傾仰的自然週期 1.98 秒，誤差約為 5%；而數值模擬起伏的自然週期 1.29 秒，試驗試驗傾仰的自然週期 1.33 秒，誤差約為 3%，如表所示。由於 OrcaFlex 以勢流理論作為基礎，不考慮流體黏性，因此數值模擬的自然周期略小於實驗結果，符合預測（表 3）。

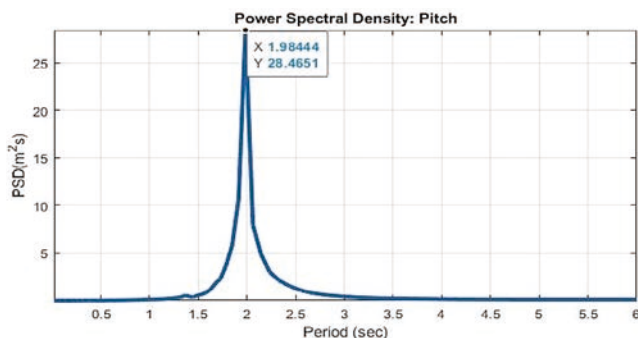


圖 7 水工實驗的能量波譜（傾仰）

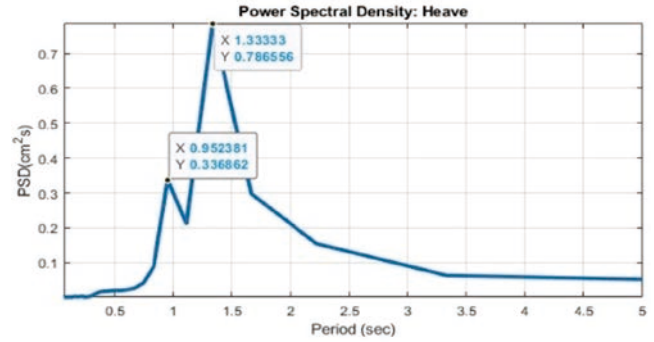


圖 8 水工實驗的能量波譜（起伏）

表 3 數值模擬結果和水工試驗結果自然週期比較

尖峰週期	數值模擬	水工試驗	誤差
傾仰	1.88 sec	1.98 sec	5.29 %
起伏	1.29 sec	1.33 sec	3.15 %

生存測試

在生存測試方面，競賽時模型被安裝在近岸水域，為了模擬競賽現場 Scheveningen 海灘的波浪狀況，我們在大型水槽中生成 3 秒和 6 秒周期的波浪，分別觀察平台對短周期和長周期的波浪反應。在沿岸區域，我們採用了 JONSWAP 頻譜，其中峰值增強係數 γ 為 1.5，我們在風浪流水槽中造風，模擬 Scheveningen 海灘平均 5 m/s 的風速，同時生成 2.4 秒週期的波浪，以測試風與波浪的耦合效應，如表 4 所示。

編號 JH15T03 實驗的最大傾仰角大約 12 度，編號 JH15T06 實驗的最大傾仰角大約 6 度，比較兩個試驗，由於 JH15T03 試驗 3 秒的波浪周期，較接近平台的自然周期，導致平台更大的傾仰及上下運動。表示 Orein 在海洋中的長周期波浪條件下具有較高的穩定性及發電效率，（圖 9、圖 10）。

編號 JH08T24 實驗為風與波浪耦合的實驗試次，我們先進行造風，在平台達到穩定後開始造波。在波流耦合的影響下，最大傾仰角為 12 度（圖 11）。

參加競賽

事前準備

回顧整個比賽的籌備過程，我們不僅限於學習與比賽有關的實驗及設計，更多的是在這之外林林總總的行前規劃細節，像是如何出關、報帳等。

表 4 試驗編號及相關參數

試驗編號	示性波高 Hs	波浪週期 Ts	峰值增強係數 γ	風速
JH15T03	15 cm	3 sec	1.5	0
JH15T06	15 cm	6 sec	1.5	0
JH08T24	8 cm	2.4 sec	1.5	5 m/s

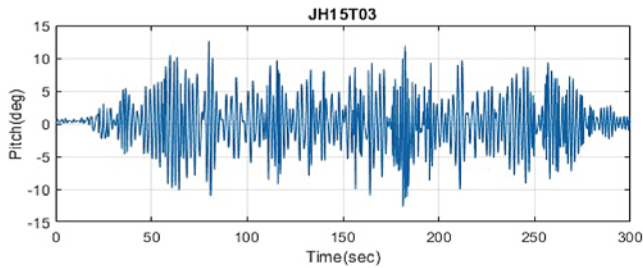


圖 9 編號 JH15T03 試驗傾仰角資料

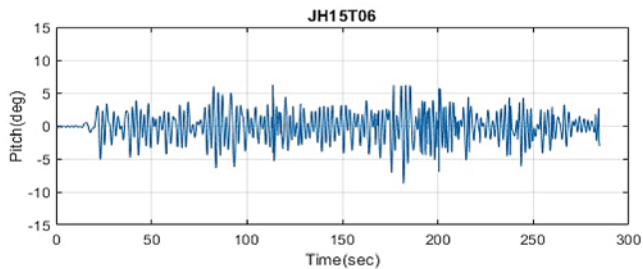


圖 10 編號 JH15T06 試驗傾仰角資料

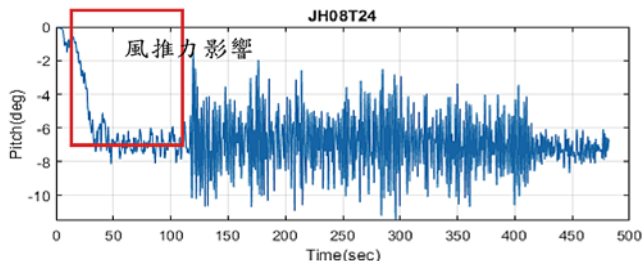


圖 11 編號 JH08T24 試驗傾仰角資料

從接獲比賽資訊後我們團隊就開始進行文獻探討，鞏固相關的背景知識，將大家獲得的資訊在第一時間透過小組會議分享，並逐步開始策畫如何將想法實體化。

首先利用 Solidworks 製圖並計算物理特性，再將結果匯入水動力軟體 AQWA、海事工程軟體 OrcaFlex 模擬來驗證猜想。由於設計出來的平台是許多新想法的融合，僅透過模擬軟體驗證，並無實際實驗過，有鑑於比賽是需要將模型實體化來進行，因此我們決定先進行初步驗證，確保實驗數值與模擬數值的差異不至於太大，在確定浮台的尺寸後，先以容易取得之材料，如水盆、塑膠桶等素材來進行簡單加工，模仿駁船式 (Barge type) 平台特有的阻尼池 (Damping Pool)，並於平台四個角及底部黏上導纜孔來掛載纜繩，另外，風機及掛載造成的力矩影響則透過加上積片的方式做可行性評估 (圖 12)。

我們將模型運至位於安南區的成大水工試驗所進行配重定位、吃水、自然衰減等測試，確認其為可行之後再啟動造波機，觀察其下部掛載在受到不同波高及週期下的規則波後，能否提供良好的抑制效果。



圖 12 浮式風機平台簡易模型及試驗

由於比賽條件是現地場域，因此可能遇到碎波、突然之側風等無法於實驗室中預期之狀況，且比賽當天有 90 分鐘之安裝時間限制，故我們盡可能地去有效擬定實地安裝之流程與分工，並評估應該要準備的耗材數量，以避免影響安裝速度。在討論過後，我們決定先前往台南市安平區漁光島，進行現地組裝及測試 (圖 13)。同時由於需走入水深約 1 米位置，對於安全的考量我們也租借救生衣等設備防止意外發生。

關於比賽模型要特別感謝金屬中心的工程師們在比賽籌備期間的大力支持，協助我們製作並對細部進行優化，大幅減少在模型製作上的問題。而對於實地安裝之比賽模型測試，我們於比賽前也有至成大水工所，於風波流水槽進行配重的定位及風推力曲線的量測，來確認於現地風況下平台受風機推力影響下，其穩定度是否可接受。

對於安裝的流程測試及水槽的造波實驗，我們於大型斷面水槽進行規則波測試，觀察當頻率接近模型之自然週期時，其運動姿態的改變是否可接受，以確認後續是否需要做改善或調整配重 (圖 14)。我們也按現地近岸浪況進行非規則波之測試，盡最大可能的確保對於比賽當天的把握度。



圖 13 在台南市漁光島進行水上測試



圖 14 在成大水工所進行 Orcin 浮式風機平台試驗

由於我們是第一次參與國際競賽，對於模型的托運、出入境等流程較為陌生，因此我們力求分工明確，各自堅守崗位並對自己的工作負責任。由於風浪的不確定性，走船運可能會有延遲等問題，因此在討論之後我們決定採用托運的方式，配合裝箱及推車將整組模型帶上飛機，也因為有部分金屬零件及尖銳物品，保險起見，出入境進行申報，得以順利通關（圖 15）。



圖 15 浮式風機模型部分金屬零件及尖銳物品托運包裝

競賽經過概要

到了荷蘭當地，從阿姆斯特丹機場拖著數十件的行李及模型移動至海牙，途中在叫計程車時，因為行李繁多，有遇到被司機拒載的窘境（圖 16）。因此，為避免比賽當天，遇到相同的情況，我們團隊決定自己在當地租車，消除可能遇到的不確定性，確保比賽當天都能順利的往返。租車之後，行動上就變的彈性許多，我們於比賽前一天先到比賽場地場勘，觀察海邊的浪況，並事先裝好用來當作錨碇的沙桶，為隔天的比賽組裝時預留更多時間應變突發狀況。

比賽當天，我們一早起來清點所有工具、模型配件、零件，並開車提早載著所有的用具到比賽場地。主辦單位承租一家沙灘邊的俱樂部，供每個參賽隊伍



圖 16 出國參加競賽浮式風機平台模型及行李

享用午餐，之後便開始了開幕儀式，總共有 10 支來自各個國家的隊伍，有日本、阿拉伯、印度及比利時等等，鄰近國家的隊伍興師動眾，人數十分眾多，而亞洲國家的隊伍大多僅一兩位導師帶隊。雖然人數不比對方，但我們對自己的團隊十分有信心。

很快地我們便開始著手組裝模型，並將組裝好的模型協力從沙灘上搬至海岸邊準備下水。而到了海岸邊，我們看到的是比平常更惡劣海況，相較前一天來場勘時惡劣許多，在碎波帶的浪況是水位在腰部而當浪打來時是會蓋過頭部的程度，這對每個隊伍的模型都是一個巨大的挑戰。本以為等待一下浪況就會漸漸好轉，但事實卻與想像的相悖，浪況反而逐漸嚴峻，所以我們六個人喊過聲：「123，成大加油！」之後，就決定放手一搏，下水！在佈設浮台的過程中，我們事先都有分工好每個人的工作，四個作為錨碇用的沙桶分別由四個人拿並抓取適當的距離定位，剩餘的兩人則是負責穩定浮台、風機以及下部的槓片掛載（圖 17）。

大家頂著風浪一步一步得朝海中前進，任由海浪的拍打才終於有驚無險得安裝完成，回到岸邊。這時觀察身旁的幾個隊伍，有的隊伍因為惡劣浪況，模型在海中解體了，有的隊伍甚至沒有下水安裝，而我們則是少數隊伍中有成功安裝並且成功在海上讓風機旋轉發電的隊伍（圖 18）。



圖 17 比賽現場進行模型安裝



圖 18 我們的風機平台在海上漂浮及發電情形

競賽結果

最後公布比賽的結果，我們獲得書面報告的第二名（圖 19）及實作安裝的第三名（圖 20）的佳績。這個結果遠遠超乎我們的預期。其實對於第一次來參賽的我們，最初給自己的設定目標就是將浮台成功安裝、風機能穩定的在海上發電，不要翻倒便大功告成，因為相較於其他歐洲國家的隊伍，我們模型需要經過長途運輸過程才能抵達荷蘭，所以模型的設計就較為受限，最後靠著模塊化的想法來克服運輸的困難，在評審視察組裝狀態時，不論對於我們的結構、下部掛載的設計、模塊化、以及浮台的選擇都有高度讚賞，能有這樣的成績每個人都功不可沒。



圖 19 比賽結果書面報告第二名



圖 20 比賽結果實作安裝第三名

結語

參加國際競賽對我們來說是一個難得且難忘的經歷。從接獲比賽資訊到預備階段，整個籌備過程充滿挑戰，但同時也讓我們團隊成員之間更加凝聚和成長。我們不僅為了比賽的規劃和設計做了充分的準備，更是在行前規劃的細節上下足了功夫。從初步的比賽會議開始，我們就展開了文獻探討和觀察商業化平台，希望能在了解整個領域的同時，增加我們設計的創新性。整個過程讓我們充分感受到了領域研究的重要性，也明白了深入了解背景知識對於設計的幫助。

面對融合多種元素及特點的離岸風機平台設計，我們深知理論上的驗證不能完全代替實體效果，於是我們著手進行平台的實驗，進行縮尺模擬，並進行不同方式的測試。在這個過程中，我們遇到了許多問題，但也正是這些問題讓我們不斷學習、調整，並找到最佳的解決方案。這種實踐的過程讓我們對於自己的設計更加有信心，也對於工程領域有了更深刻的體會。

在海上實際參賽場地和時間限制為我們帶來了新的挑戰，我們需要在限制內充分發揮，有效安排安裝流程和分工。讓我們學會了如何在壓力下保持冷靜和專注，以及在不熟悉的環境下應變突如其來的問題，更是深刻了解到團隊合作的重要性，團隊裡的任何一個人都是不可或缺的。

誌謝

能夠順利完此次離岸風機平台設計的競賽，我們要感謝楊瑞源教授研究室、成大水工試驗所、金屬中心，還有贊助廠商，在設計、製作、試驗及參賽過程中的各種支持，給予我們機會參賽和挑戰。

參考資料

1. Ma, K. T., Luo, Y., Kwan, C. T. T., and Wu, Y. (2019). Mooring system engineering for offshore structures. Gulf Professional Publishing.
2. Ghigo, A., Cottura, L., Caradonna, R., Bracco, G., and Mattiazzo, G. (2020). Platform optimization and cost analysis in a floating offshore wind farm. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(11), 835.
3. 康志堅 (2017)，浮體式離岸風電技術發展現況與未來展望，能源知識庫網頁，<https://km.twenergy.org.tw>。
4. Yang, Y., Bashir, M., Wang, J., Michailides, C., Loughney, S., Armin, M., and Li, C. (2020). Wind-wave coupling effects on the fatigue damage of tendons for a 10 MW multi-body floating wind turbine. *Ocean Engineering*, 217, 107909.
5. Chuang, T. C., Yang, W. H., and Yang, R. Y. (2021). Experimental and numerical study of a barge-type FOWT platform under wind and wave load. *Ocean Engineering*, 230, 109015. 