



浮式風機：臺大浮臺開發歷程

吳冠逸／國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系 碩士生研究助理

馬開東^{*}／國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系 教授

台灣的綠能政策吸引大量國外開發商進入台灣，幫台灣進行風電建設，讓台灣的離岸風電裝置量快速成長，超越日韓，成為亞洲領頭羊，然而我們自己的產業呢？除了製造產業鏈，台灣留下了哪些設計能量？

2021 年，現任臺大工學院院長江茂雄教授邀請，在美國、加拿大具有 30 年海洋工程業界經驗的馬開東博士回台受聘為玉山學者，開創台灣浮動式離岸風電研究的新局面。

從淺水區邁向賦有風能潛力的深水區

台灣現階段的離岸風場開發均是採固定式風機，但淺水海域面積有限，且深水區蘊藏穩定又強勁的風力資源，因此風電開發商開始涉足深度大於 65 m 的深水海域，浮動式風機開始成為優於固定式風機的首選方案（圖 1）。在世界各個設計開發團隊中，已經有好幾個浮式風機設計進入了建造規劃的階段。

國立臺灣大學、臺灣國際造船公司（CSBC）、財團法人船舶暨海洋產業研發中心（SOIC）的研究人員和工程師聯合，響應經濟部創新前瞻計畫以及科技部綠能研發計畫，共同組成了一個研發團隊，目標是設計可以承載 15 MW 風機的浮臺，孕育臺灣本土的浮式風機設計能量。未來期待風電開發商，於臺灣海峽水深 60 至 100 公尺的風場規劃時，能以本土設計與建造的浮臺為首選，為開發商參與風場競爭的方案加值。

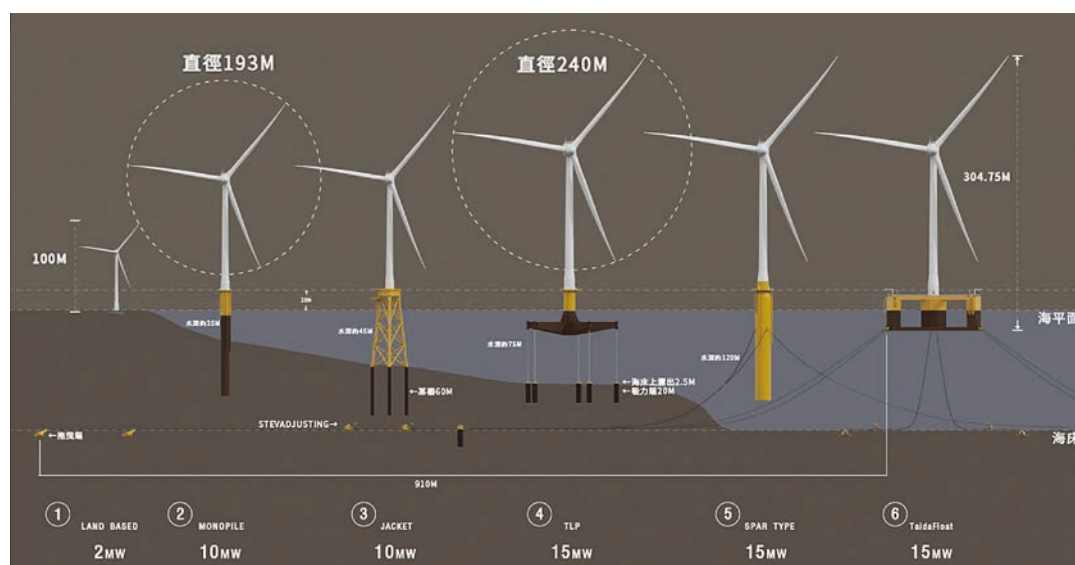


圖 1 固定式與浮動式風機比較圖
圖片來源：浮式風機科普漫畫 / 御風任務

^{*} 通訊作者，kaitungma@ntu.edu.tw

最適合台灣海峽的浮臺種類—半潛式浮臺

在過去 50 年，浮動平臺已應用於石油和天然氣探勘產業中，且獲得充分實證。浮式風機的浮動平臺是基於風機的運轉需求加以設計改良，因此浮式風機的技術具有十足的可行性（圖 2）。

國際上常見的浮動平臺有四種

半潛式（Semi-Submersible）

半潛式平臺是由三或四個浮筒組成一個半沉潛的平臺，具有足夠的穩度，且安裝較方便，目前最廣為應用。半潛式平臺的吃水深，可以隨著壓載水量多寡調整吃水，適用於水深相對淺的台灣風電安裝港口，以及水深為 100 公尺以內的台灣海峽。

張力腿式（Tension-Leg, TLP）

張力腿式的繫泊錨鏈會完全垂直地被拉緊，連接於海床，施工安裝技術要求非常高，且需要可提供高拉力的大型安裝船，在現今安裝船緊缺的大環境下，施工安裝會是一大挑戰。由於繫泊錨鏈長時間處於高張力狀態，錨鏈受損斷裂的風險較大，任何一條錨鏈斷裂，將直接導致浮臺傾覆，造成風機無法挽回地傾倒入海中。張力腿式平臺適合水深 300 公尺以上的深水海域，較不適合水深為 100 公尺以內的台灣海峽。

浮筒式（SPAR）

浮筒式是一個很長的大直徑柱狀浮筒，浮筒底部藉由高密度物質壓載提高配重，藉由降低浮筒的重心，使

其具有良好的穩定性，類似不倒翁的原理，因此幾乎不會傾覆。由於浮筒很長，且壓載使浮筒吃水很深，因此對於安裝港口的水深要求高，在台灣發展風電產業的台中港水深不足，且台灣海峽的風場水深亦不足。

駁船式（Barge）

駁船式是一個大型的肥胖狀浮動平臺，由於受力表面積大，易受風、浪、流影響，因此須更粗的錨鏈承受拉力，且浮臺的飄移、起伏幅度大。在颱風等極端狀況，更容易發生傾覆或錨鏈斷掉的危險情況，鮮少列入浮式風機的設計選項。

在世界各個設計開發團隊中，已經有好幾個浮式風機設計進入了建造規劃的階段。2009 年，挪威國家石油公司（Equinor）進行了全球首個離岸浮式風機的原型機安裝，自那時起，至少有 13 個裝置容量超過 2 MW 的浮式風機原型機示範計畫（圖 3），其設計主要來自 7 個國家：挪威、美國、日本、法國、中國、丹麥及西班牙^[1]。

最具代表性的示範計畫是 WindFloat，因為這個計畫是許多計畫所效仿的榜樣。其原型機在葡萄牙外海示範運行的 3 年期間，遭遇了波浪達 17 公尺的風暴，仍順利度過比設計浪高要嚴苛的考驗。這個原型機計畫促使 2 個浮式風場成功執行，這兩個風場分別為葡萄牙外海的 WindFloat Atlantic 風場，有 3 架浮式風機，以及蘇格蘭外海的 WindFloat Kincardine 風場，有 5 架浮式風機。總結世界各地的示範計畫，13 個計畫中有 6 個採用半潛式浮臺，具代表性的 WindFloat 示範計畫同樣採半潛式浮臺，可知目前浮式風機的設計以半潛式浮臺為主流。

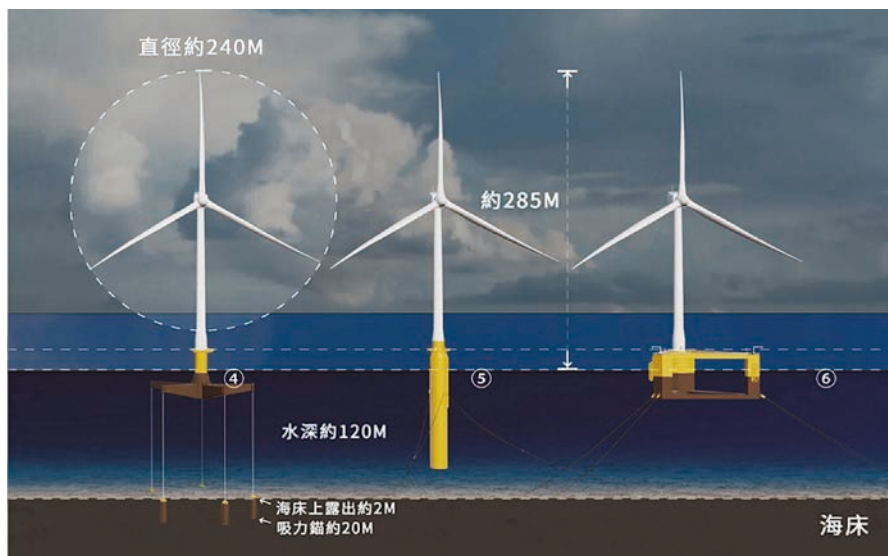


圖 2 浮臺種類（由左至右：半潛式、張力腿式、浮筒式）

圖片來源：浮式風機科普漫畫 / 御風任務

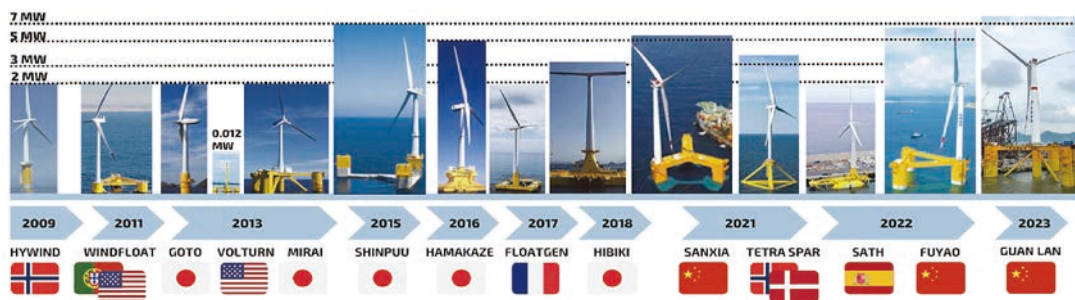


圖 3 全球浮式風機示範計畫發展歷程

圖片來源：臺灣大學離岸結構與錨泊工程實驗室

研發團隊在設計之初，即針對臺灣海洋環境、港口限制等條件，評估各式浮臺應用於臺灣的優劣勢，並審察世界現有具代表性的浮臺設計，總結目前常見的浮臺之中，以「半潛式」技術最為成熟，且適合台灣海峽 100 公尺內的水深，無疑是最適合台灣設置的浮動式平臺。

經過對世界知名設計的深入瞭解與分析，團隊隨即根據半潛式平臺的設計概念，決定浮臺的主要參數，從各個層面考量，進行一系列的深層設計，進而取得了現今最佳的優化產品「臺大浮臺」(Taida Float)，可承載 15 MW (兆瓦) 裝置容量的離岸風機 (圖 4)。

可 100% 國產化的臺大浮臺設計特色

相對於石油產業使用的 4 個立柱構成的方形海洋產油半潛式平臺，三個立柱的三角形結構配置已經成為離岸風電業界最典型的設計安排，可以減少鋼鐵材料的使用量。在臺大浮臺的設計配置中，風機將會由三個立柱之一承載，該柱稱為主柱，而未放置風機的稱為外柱，這種設計使得碼頭的起重機能相對輕鬆地將風機安裝上浮臺，減小對安裝碼頭設備的要求 (圖 5)；相反地，有些設計將風機放置在浮臺的正中心，但起重機和浮臺中心的距離較遠，也就是吊重力臂會增長，這使得港口必

須大規模整建，配置具有極高起重能力的吊重機，嚴重限制生產浮臺的便利性。

傳統上，半潛式浮式風機平臺的三個立柱都是圓柱體，2021 年下旬設計團隊提出結構外型具有獨創性的臺大浮臺，浮臺的三個立柱都是不規則的六角柱 (圖 6)，沒有弧形板或圓柱體，全部結構均由平板接合而成。此創新設計由臺大、台船和船舶暨海洋產業研發中心的設計團隊合作，共同完成浮臺前端工程設計，於 2022 年 3 月申請中華民國 (台灣) 專利與美國專利，並獲得中華民國 (台灣) 智慧財產局 (Intellectual Property Office, R.O.C. (Taiwan)) 的專利核准。

六角柱的平板浮臺設計優點在於有辦法 100% 國產化，且大幅縮短製造工時；大型圓柱構成的浮臺需要使用彎板機，建造流程非常耗時又耗工，且台灣目前並沒有足夠大型的彎板機可供使用。由於平板不需使用彎板機，易於採用自動或半自動的面銲接，一週的時間就可以銲接完成，在地上銲接完成後，到船屋屋塢裝配即可，因此可將製造流程充分簡化，大幅縮短製造工時以達成量產規模。平板設計除了便於製造，六角形立柱也方便工作船停靠，平板平臺更提供人員寬敞且連續的作業空間 (圖 7)。



圖 4 臺大浮臺

圖片來源：浮式風機科普漫畫 / 御風任務

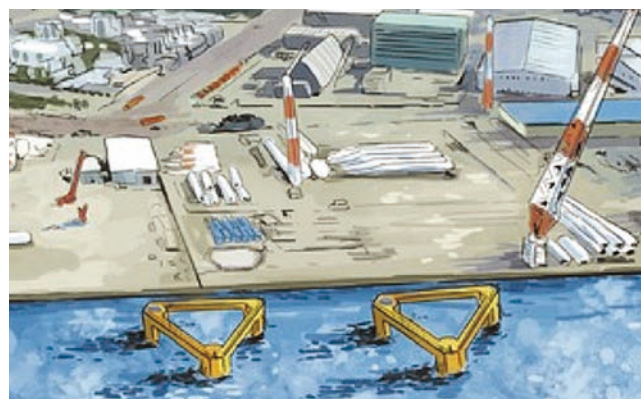


圖 5 浮臺主柱鄰近碼頭方便風機安裝

圖片來源：浮式風機科普漫畫 / 御風任務

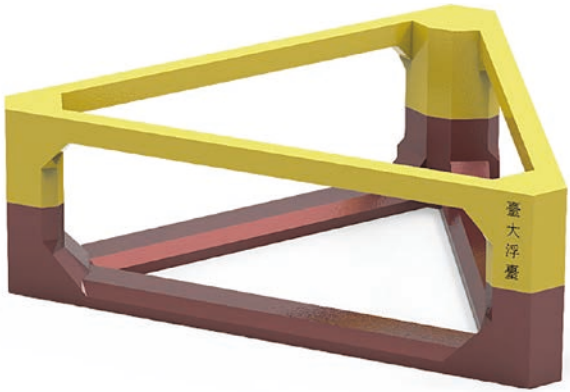


圖 6 臺大浮臺六角形立柱結構
圖片來源：臺灣大學離岸結構與錨泊工程實驗室



圖 7 臺大浮臺寬敞的甲板空間
圖片來源：浮式風機科普漫畫 / 御風任務

從經濟成本的角度來看，一個重要的指標是總排水量與風機（亦即葉片、塔架和 RNA（Rotor, Nacelle, Assembly）等）重量的比值。在下圖所示的各種設計中，實際安裝項目的比值大約在 9.0 和 15.0 之間。臺大浮臺的比值為 10.6，在該範圍中，屬於優質。另一個重要指標是浮臺空船重量與總排水量的比值，也就是鋼材重量（不包含風機）佔排水量的百分比，設計目標是盡可能節省鋼材的使用，並透過使用幾乎零成本的海水壓載，來獲得所需的排水量，臺大浮臺指標估計為 0.2，明顯地優於其他的設計（圖 8）。

如前述，在臺大浮臺的設計中，風機並非放置在浮臺的正中心，風機將會由三個立柱之一的主柱承載，風機重量會造成浮臺重心偏移。設計團隊針對 20 多種尺寸組合，進行詳細評估，考量船舶的穩定性，以及建造設備的限制，選定初版尺寸（圖 9）。

團隊在完成內部結構佈置後，為了確保有足夠的強度面對不同的作業條件和環境載荷，在設計期間即使用有限元素分析軟體對結構進行應力分析，依照滿載

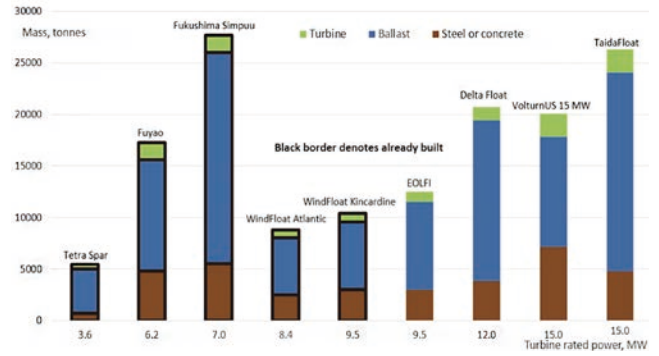


圖 8 臺大浮臺 (TaidaFloat) 與世界各國其他設計之重量分布的比較
圖片來源：臺灣大學離岸結構與錨泊工程實驗室

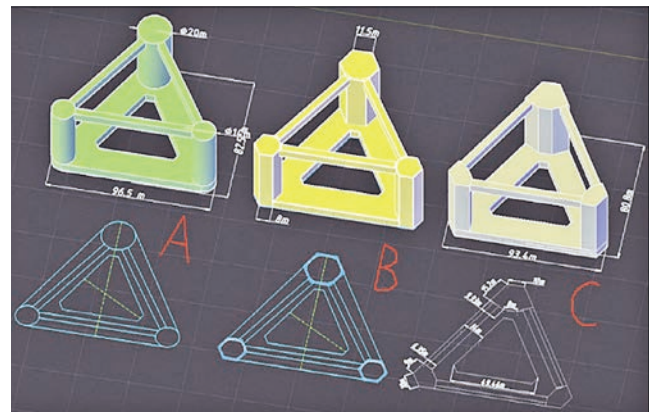
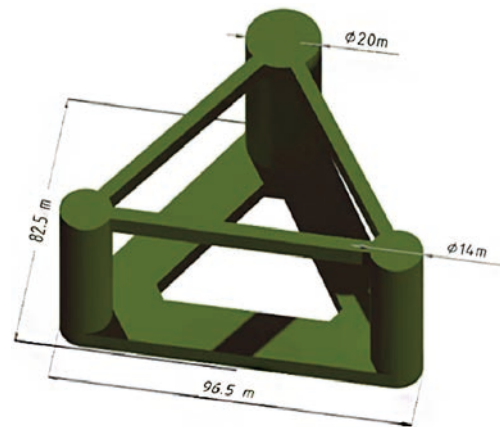


圖 9 臺大浮臺初版之 3D 模型圖
圖片來源：臺灣大學離岸結構與錨泊工程實驗室

工作吃水情況，對結構進行大量的系列分析（圖 10）。

設計團隊所設計開發的半潛式浮臺繫泊系統，完全是以台灣的產業環境、生產製造能量、供應鏈與港口為設計，並能抵禦 50 年一遇的強烈颱風，即使在風浪中，浮臺也能保持平衡。對於整體浮臺結構的設計，在符合實際工程應用需求的前提下，設計團隊致力於在建造成本與結構外型之間取得最佳平衡，增加浮臺在船廠大量製造的可行性，同時有辦法 100% 國產化，推動台灣造船及重工產業的高質量轉型。

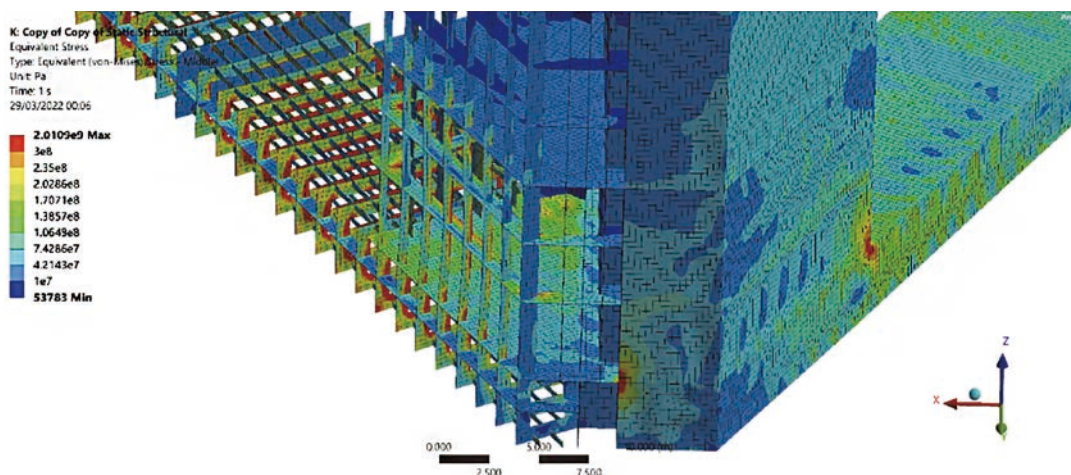


圖 10 臺大浮臺有限元素模型

圖片來源：臺灣大學離岸結構與錨泊工程實驗室

臺大浮臺設計獲得美國船級社的原則認可證書

為了使浮臺的設計滿足公認標準，設計團隊多方參考船級社規則，例如美國船級社（ABS）的設計規範。船級社的設計指南對浮動式風機在設計、建造、安裝和調查各方面都提供相對應的標準，設計指南主要涉及三個主要領域：浮臺結構、繫泊錨碇系統以及機械設備，大部分的船級社都有發布類似的規範。另外，船級社將提供相關設計工具，提高工作效率和完整性，幫助檢查新設計是否符合規範要求。設計團隊有系統地運用設計工具，遵循船級社規範中的設計公式進行內部構造設計，並通過有限元素分析，以提高細部設計的工作效率，實現最高效的浮臺結構設計。

2023 年 9 月臺大工學院江茂雄院長、玉山學者馬開東教授及台船副總經理周志明共同組成團隊^[2]，合力研發的「臺大浮臺」（Taida Float），在美國船級社（ABS）退休的吳顧問以及美國休士頓海洋工程專家陳顧問、程顧問的輔導下，浮臺結構和繫泊系統的設計獲得美國船級社的原則認可證書（圖 11），為台灣在離岸風電浮式風機領域寫下新里程碑。

臺大浮臺原型機實際海域驗證 JIP 計畫

根據 ISO 的技術成熟度等級（Technology Readiness Level, TRL），臺大浮臺的技術研發已經達到 TRL 第四級，研發團隊下一步計畫打造臺大浮臺的原型機（Prototype），於實際海域驗證設計（圖 12），同時搜集



圖 11 臺大浮臺獲得美國船級社（ABS）的原則認可證書（圖片來源：台船）

參數以優化設計，目標達成 TRL 第七級，確立臺大浮臺於實際場域作業的可行性，最終邁向商業化量產。

基隆海洋大學外海為實際海域驗證的候選場域之一，目前已經完成基礎海域調查，掌握海床地形、水深、地質剖面等關鍵數據，近期將展開鑽探調查。由於風機裝置容量預計採用 2 MW 至 8 MW，較原浮臺設計承載的 15 MW 風機小，且基隆外海的海氣象與浪高較台灣海峽更加嚴苛，因此設計團隊針對基隆外海的環境數據與新的風機尺寸，客製化設計臺大浮臺原型機，持續推動原型機實際海域驗證計畫的實踐。

團隊期待以產業聯合開發計畫（Joint Industry Project, JIP），聯手產業界的能量一同參與，共同合作完成臺大浮臺的原型機海上驗證計畫，讓台灣成為浮式風機的第八大工業強國！誠摯邀請各界加入臺大浮臺原型機 JIP 計畫。

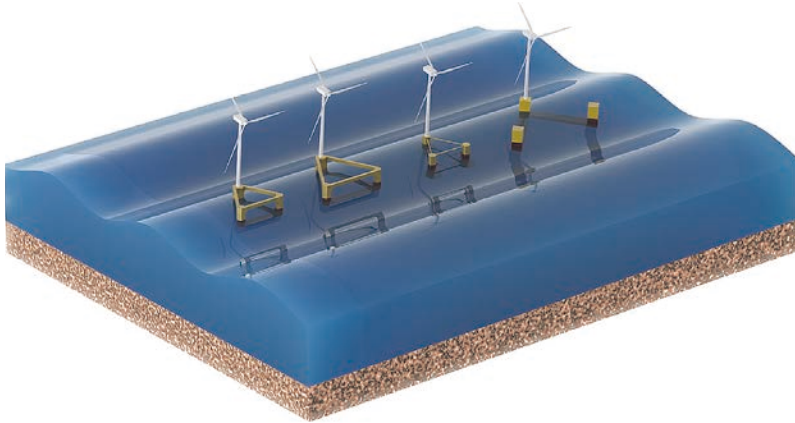


圖 12 臺大浮臺原型機與其他設計之外型尺寸比較
(左至右：臺大浮臺原型機、臺大浮臺、WindFloat、日本 Shinpuu)
圖片來源：臺灣大學離岸結構與錨泊工程實驗室

參考文獻

1. 馬開東、雲在天、劉怡秀、吳冠逸 浮式風機的全球技術競賽—台灣急起直追 2023.03.09 WindTAIWAN (https://www.windtaiwan.com/ArticleView.aspx?ID=ART01113&adminView=24771935&fbclid=IwAR056ev_fi-0Etq6dXz1iLpYiMzSCpLMTJeA8tg_cm2xdY-Z0WnYtrgldYU_aem_AbDVtjgZzPC-kufz1WWJBXNzO1Ct5J_4UDiXAAr3x_iYvHJ7072pbOjRBAXK6YbtHg)
2. 馬開東、周志明、周顯光、江茂雄，浮動式風機平臺—嶄新的台灣綠能科技產品 2022.04.22 WindTAIWAN (<https://www.windtaiwan.com/ArticleView.aspx?ID=ART00607>)



SINOTECF

- 刊行工程科技技術書刊 / 專題研究、工程技術書刊編撰、翻譯。
- 工程科技及學術交流活動 / 專題演講、參訪交流。
- 工程建設研參活動 / 工程技術現地觀摩活動、海外重要工程現地見習活動。
- 提供獎助學金 / 國內研究生獎助學金及其他具體贊助、培養本國高階工程建設人才。

科普 / 獎學 / 工程交流

Sinotecf

創設宗旨
中興工程科技研究發展基金會係由中興工程顧問社
捐助成立之非營利、經濟事務財團法人。
以提升我國工程科技水準，配合國家政策
促進經濟建設之發展及科技之普及推廣為宗旨。

財團法人
中興工程科技研究發展基金會
SINOTECH FOUNDATION FOR RESEARCH & DEVELOPMENT
OF ENGINEERING SCIENCES & TECHNOLOGIES

10595 臺北市松山區南京東路四段186號4樓之9
電話：(02) 2577-4567 傳真：(02) 2577-3667
E-mail: sinotecf@ms32.hinet.net <https://www.sinotecf.org.tw>