

NAMR110050

20 吋級浮游式洋流發電機製作及實海域測試

正式報告書

國家海洋研究院委託研究

中華民國 110 年 12 月

「本研究報告僅供國家海洋研究院施政參考，並不代表該院政策，該院保留採用與否之權利。」

20 歐級浮游式洋流發電機製作及實海域測試

正式報告書

受委託單位：國立臺灣大學
研究主持人：郭振華
協同主持人：邱逢琛、蔡進發、李坤彥、李佳翰、辛敬業
研究員：洪于婷、黃盛煒、穆凌吉
研究助理：侯天恩、黃柏鈞、林伯松、馬裕齊、許宇成
研究期程：中華民國 110 年 4 月至 110 年 12 月
研究經費：新臺幣 1,889.5 萬元

國家海洋研究院委託研究

中華民國 110 年 12 月

「本研究報告僅供國家海洋研究院施政參考，並不代表該院政策，該院保留採用與否之權利。」

摘要

為發展洋流發電技術，推動自主的海洋再生能源開發，並促進台灣海流發電產業發展，因此建立浮游式黑潮發電渦輪機系統(Floating Kuroshio Turbine, FKT)設計與分析等關鍵技術，目標導引產業發展0.5 MW級以上商用示範機組並完成實海域測試驗證，最後以無碳綠島為目標進行數MW乃至於數十MW級小型示範電廠開發規畫及建置作為下一階段落實產業的里程碑。本計畫團隊於2015~2017年間以三年為期在科技部第二期能源國家型計劃(NEP-II)之支助下，執行第一階段研發工作，完成800 W浮游式洋流發電渦輪機系統整合設計與分析之關鍵技術開發，同時產出專利並完成20 kW級浮游式洋流發電先導示範機組設計及經濟性分析，確認海流發電技術及經濟上的可行性；另外亦於2019~2020年間在海洋委員會國家海洋研究院的支持下，分別執行10 kW(單一發電機組)直驅式永磁同步發電機設計製造、海流發電FRP葉片設計分析與製造技術、被動式油壓補償水密軸封設計製造技術等三項海流發電關鍵技術之開發，並整合此三項關鍵技術完成具單一轉子之10 kW浮游式洋流發電渦輪機設計與組裝，最後於台南安平商港外海進行10 kW洋流發電機拖曳與耐壓測試工作，並成功獲得10 kW的額定發電量，且發電機艙亦通過水下60 m之耐壓測試，達成本計畫團隊之設計目標。

本團隊本年度已完成20 kW洋流發電機組之實海域拖曳測試作業，並驗證發電機與浮力控制模組之工作效能。本年度為接續2020年度之研發成果，以10 kW機組為基礎，進行20 kW洋流發電機組之細部設計與改裝，並於翼型浮體內部導入發電機組沉浮調控機制，籌建具備完整功能之浮游式洋流發電渦輪機組，最後利用作業母船協助進行實海域之船拖發電測試驗證。本文第一章簡述國內外洋流發電技術發展現況，並於第二章說明本計畫團隊現有技術能量；隨後第三章針對20 kW FKT機組進行參數建模與模擬；第四章解說20 kW FKT機組之細部設計與加工過程；第五章完整說明20 kW FKT內部電力與訊號配置，並簡介各項設備可量測的對應資訊；第六章則針對本年度實海域測試執行內容進行分析討論；最後第七章為本年度計畫之期末討論與建議。

Abstract

To promote ocean current power generation technique and renewable energy development, a Floating Kuroshio Turbine (FKT) is proposed. The target is to guide local industry, industries' involvement shall be strong enough to take the lead to the development of turbines of 0.5 MW or even higher power capacities. The project goal will be providing solid foundations for future planning and promotion for the low-carbon Green Island idea that includes a number of 10 MW power plants which utilizes energy from the ocean current. A full scale power plant supported by Kuroshio energy will be the eventual aim. The FKT development team had finished the first stage research and development task based on the support of National Energy Program – Phase II from Ministry of Science and Technology (MOST), which was to develop the 800 W FKT, patent application and design the main structure of 20 kW FKT. This is to demonstrate the technical and economical feasibility for the current power generation technique. By the support of National Academy of Marine Research (NAMR) during 2019 to 2020, three critical technique were proposed including the design and manufacturing of a 10 kW direct drive permanent magnet synchronous generator, a passive oil compensated shaft seal system, and FRP turbine blades. Moreover, a 10 kW FKT was established based on aforementioned key techniques, which had also finished sea trial and underwater pressure test. The preliminary target of the FKT development team was then achieved.

The FKT development team had finished the sea trial of the 20 kW and verified the capacity of the internal power generator and buoyancy control module of FKT in 2021. Based on foundation of previous 10 kW FKT and to improve the system capability, we modified the detail design and install an additional buoyancy control module into the hydrofoil float. A towing vessel was utilized for the sea trial to demonstrate the power generating capacity. In this study, the current international development status of the current power generation technique is introduced in chapter 1. Chapter 2 and Chapter 3 describe the technical ability of FKT development team and simulate the 20 kW FKT numerical model, respectively. Chapter 4 provide the detail design and the process of manufacturing 20 kW FKT. Chapter 5 describes the FKT system wiring arrangement for power/signal transmission, and provides the information of the internal sensor and relative measurement data. Chapter 6 gives a comprehensive information of the result of the 20 kW FKT sea trial in 2021. Finally, Chapter 7 concludes this annual project and also provides some suggestions for the near future.

第一章 研究背景

本計畫團隊在過去科技部第二期能源國家型計劃(NEP-II)之支助下，執行「浮游式黑潮發電(Floating Kuroshio Turbine, FKT)先導機組設計開發關鍵技術之研究」計畫已建立一定基礎，依據團隊過去研擬的黑潮發電渦輪機技術路徑與產業發展進程規劃(如表1-1所示)，預計於2019~2021三年期間完成浮游式黑潮發電20 kW先導示範機組的建置以及實海域船拖發電測試驗證，並目標於2022年完成20 kW 洋流發電渦輪機之錨繫運作測試，至此完成1/5縮尺之所有研發與測試項目，FKT最新發展進程規劃如圖1-1所示。其中第一年(2019年)以完成10 kW單一機艙內三個主要元件為目標，三項主要工作分別為(1)10 kW直驅式永磁同步發電機設計、製造與測試；(2)FRP葉片設計分析與製造；(3)被動式油壓補償水密軸封設計與製造。其後，於第二年(2020年)繼續完成傳動系統、電力後處理系統及控制系統規劃設計與建置，以及10 kW發電渦輪機組整合細部設計、製造與組裝，至此即完成一組10 kW渦輪發電機組，並利用實海船拖測試來驗證單一組10 kW渦輪發電機組之工作效能。第三年(2021年)執行複製第二組10 kW發電渦輪機組，並研發製作包含浮力調控功能之翼形浮體，以及垂直支柱、水平橫桿等連結件以完成20 kW機組的建置，同年再次利用實海域船拖試驗來驗證20 kW機組於水中運行之發電效能與穩定性，並確認發電渦輪機組之沉浮控制功能是否滿足設計需求。第四年(2022年)開始籌建20 kW機組實海域錨繫測試機具與監控系統，並規劃執行發電渦輪機之錨繫測試驗證。

本計畫團隊自2019~2020年間進行1/5縮尺之10 kW洋流發電機測試，首次將發電機實體自1/25縮尺推進至1/5縮尺為執行計畫的初步挑戰，此時技術成熟度(Technology Readiness Level, TRL)處於5的階段；自2021年起將完整建置20 kW機型，並目標於2022年完成20 kW洋流發電機實海域錨碇發電測試，藉由1/5縮尺原型建置與完整的實測驗證，將技術成熟度推進到6的階段，隨後便可開始規劃商轉機型之建置。

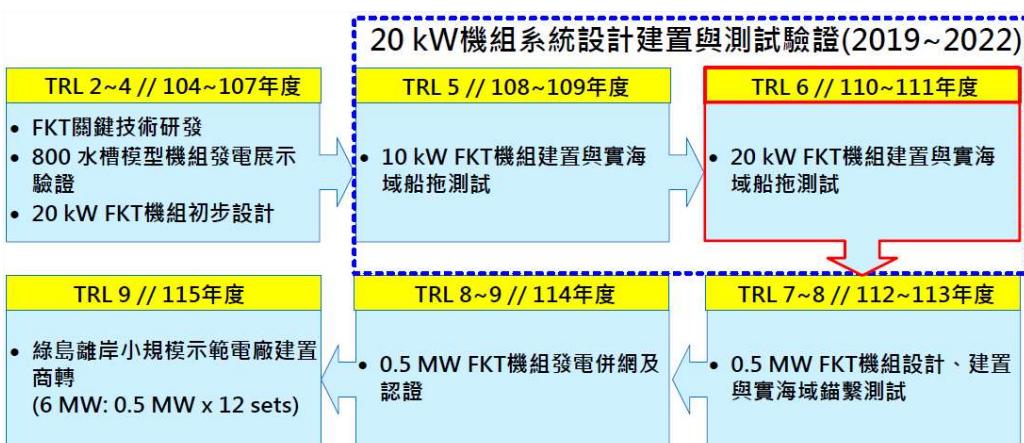


圖 1-1 黑潮發電渦輪機技術路徑與產業發展進程規劃

表 1-1 20 級浮游式洋流發電機於 2015~2022 期間之發展歷程

年度	計畫名稱	執行成果
2015	浮游式黑潮發電先導機組 設計開發關鍵技術之研究 (I)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 建立 FKT 先導示範機組外型幾何模型參數化設計及靜力分析工具，並初步完成先導示範機組之外型設計與靜力分析； 2. 建立結構分析模型，並初步完成了先導示範機組結構分析與最佳化設計； 3. 建立直驅式發電機設計分析工具，並初步完成 400 W 直驅式發電機規格研擬及性能分析； 4. 初步整合多項軟體，建立了渦輪機本體之系統動力模擬分析工具及完成建模； 5. 建立包含繫纜的全系統動態模擬工具，並初步完成先導示範機組準動態分析； 6. 建立轉子葉片設計分析工具，包含升力線法、升力面法、勢流邊界元素法以及黏性流計算法，並初步完成 20kW FKT 先導示範機組轉子葉片設計與性能分析； 7. 完成 1/25 縮尺模型轉子葉片單獨性能及 FKT 機組水槽實驗規畫，並陸續建置所需儀器設備和校正以及進行模型、夾具等製作； 8. 完成浮游式黑潮發電渦輪機組構想設計、確認其在佈放回收及運轉之可行性及優越性，並向美國提出先期專利申請； 9. 於 2015 年 9 月下旬完成了與日本東京大學高木健教授團隊雙方的黑潮發電學術交流備忘錄 (MOU) 之簽署； 10. 藉由國際資料蒐集及參考潮流發電發展，初步建立了海流發電發展藍圖及經濟性評估模式，並著手進行產業技術研發聯盟的籌組。
2016	浮游式黑潮發電先導機組 設計開發關鍵技術之研究 (II)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 進行繫纜系統分析與連結元件設計之資料蒐集與人力訓練； 2. 完成浮游式黑潮發電渦輪機組構想設計並確認可行性； 3. 完成 1/25 縮尺 FKT 機組穩定性及轉子葉片性能水槽實驗，並建置可設定機組姿態之轉子葉片性能實驗設備； 4. 完成翼形浮體壓載水艙設計，並完成 10 kW 直驅式發電機製造規劃； 5. 完成全系統在洋流速度變動及擾動狀態下的動

		<p>態反應模擬計算分析；</p> <ul style="list-style-type: none"> 6. 完成在機艙及翼形浮體效應下之轉子葉片設計與性能分析； 7. 召開洋流發電技術交流會議； 8. 完成先導示範機組整合設計與調整，以及包含結構動態反應與疲勞強度分析； 9. 建立包含錨繫在內之全機組之系統動力模擬分析工具； 10. 完成軸封設計與分析以及複合塗層開發； 11. 完成全系統在壓載控制下的動態反應模擬計算分析； 12. 完成各國推動潮流/海流發電產業化發展課題與對策蒐集，並蒐集國內外系統元件與關鍵技術商源相關資料，更新海流發電技術與成本參數及架構，建立本上海流發電經濟性評估模型。
2017	浮游式黑潮發電先導機組 設計開發關鍵技術之研究 (III)	<ul style="list-style-type: none"> 1. 完成20 kW FKT概念設計與性能分析並取得智財權[2017年12月取得中華民國發明專利(名稱: 海流發電裝置；證書號數:I608165)；美國發明專利”Ocean Current Power Generation Device”也已於2019年7月取得, Patent No.:US 10,355,557 B2。] 2. 建立直驅式發電機及輸電設計與分析技術； 3. 建立機組佈放回收及運轉作業規劃與模擬技術； 4. 建立油壓補償式水密軸封技術； 5. 為開發兼具抗蝕及抗生物腐蝕之複合塗層，確認有效的殺菌劑及其有效濃度； 6. 建立錨繫機組系統動力分析技術； 7. 建立轉子葉片設計與分析技術； 8. 建立機組性能水槽模型試驗分析技術； 9. 完成洋流發電經濟分析與產業鏈建構； 10. 召開「2017黑潮發電前瞻技術國際研討會」(2017年8月15日於集思台大會議中心)及翌日的台日黑潮計畫團隊雙邊交流會議。
2019	洋流能關鍵技術開發與推動 - 洋流發電機研發	<ul style="list-style-type: none"> 1. 完成國內外洋流能發電研發現況資料蒐集與探討； 2. 建立 10 kW 直驅式永磁同步發電機設計製造技術，並完成 10 kW 發電機建置與效能測試； 3. 建立洋流發電 FRP 葉片設計分析與製造技術，並完成 1/5 縮尺之 FRP 葉片製作； 4. 建立被動式油壓補償水密軸封設計製造技術，並

		完成被動式油壓補償水密軸封之建置與測試。
2020	浮游式洋流發電機製作與 實海測試	<ol style="list-style-type: none"> 完成 10 kW 永磁同步發電機(1 號發電機)陸地上性能測試； 完成 10 kW 浮游式洋流發電機(具單一防水機艙)建置，為本計畫團隊首次建立之 1/5 縮尺 FKT 機型； 完成 10 kW 浮游式洋流發電機實海域拖曳測試，初次驗證 10 kW 永磁同步發電機之發電效能，並確認 10 kW 之構型於實海中運作之穩定性； 完成 10 kW 浮游式洋流發電機防水機艙耐水深測試，佈放水深為 60 m(測試時間為 30 min)。
2021	20 庚級浮游式洋流發電機 製作及實海域測試	<ol style="list-style-type: none"> 完成 10 kW 永磁同步發電機(2 號發電機)陸地上性能測試； 完成 20 kW 浮游式洋流發電機(具兩個防水機艙)建置； 根據 20 kW 浮游式洋流發電機實際組件，建置模擬測試環境並完成實海拖曳測試效能模擬； 完成浮力控制模組設計、製作與測試，浮力控制模組內含 18 組浮力引擎，單一元件可控水量為 14 kg，故總控制水量為 252 kg； 完成 20 kW 浮游式洋流發電機港內測試工作，確認翼型浮體可供浮力約介於 1,790~2,076 kg 間； 完成 20 kW 浮游式洋流發電機實海域拖曳測試，驗證兩組 10 kW 永磁同步發電機之發電效能，並確認浮力控制模組之工作效能作為未來系統改善設計參考依據； 完成 20 kW 浮游式洋流發電機錨繫測試初步規畫。
2022	20 庚級浮游式洋流發電機 實海域錨繫測試 (非正式暫訂名稱)	<ol style="list-style-type: none"> 預計完成 20 kW FKT 實海域錨繫測試。

第一節 國際洋流發電技術發展現況

國際在洋流發電渦輪機技術發展上，目前仍以日本、美國為主，詳如表1-2所示。雖然目前多數仍停留在實驗室或縮尺原型機測試驗證階段，但企圖將洋流發電裝置在實海域測試驗證的趨勢則是相當明顯[1]。

表 1-2 美日兩國洋流發電研發計畫概況

裝置名稱	研發機構	研發時期	特徵	目標額定輸出規模
loop 型海流發電機	日本機械系統振興協會	2008~	實現渦輪葉片的大型化。以直徑33 m、額定輸出2 MW、既有葉片型的一半以下旋轉速度達到同等輸出效率、以實機的1/50進行水槽實驗。	小規模 400 W
佛羅里達海流計畫	美國 Ocean Renewable Power	2011~	Ocean Current OCGen Project，計畫以額定輸出 65 kW×8座進行約500 kW 的實證實驗。	約 500 kW
日本 NEDO 黑潮發電渦輪機開發計畫	東大、IHI、Toshiba、三井物產戰略研究所	2011/11 ~ 2015/3	適用海域設定為水深200~1000 m、離岸距離20~50 km。海流寬度可達100 km 以上。一台2座Turbine、發電容量2 MW 的發電裝置，在10 km見方面積中設置600台（橫30台×縱20台）的話，可發電量約相當於1座核能電廠。	2 MW
日本 NEDO 黑潮發電渦輪機開發計畫	東大、IHI、三井物產戰略研究所	2015/4 ~ 2018/3	開發葉片直徑11 m，額定功率100 kW (@ 1.5 m/s)的示範展示機組「Kai-Ryu」，並於鹿兒島縣Tokara Islands的口之島(Kuchino-shima)外海實測發電達30 kW	100 kW
日本 NEDO 黑潮發電渦輪機開發計畫	IHI	2018/4 ~ 2020/3	預計進行長期(1年)的發電，驗證機組耐久性及經濟性。目標2030年商業化。	約 500 kW

其中，在美國有J. Robson針對海流速度更高的墨西哥灣流能源利用而發明的Gulf Stream Turbine，如圖1-2所示，並成立了擁有該設計專利權的GST LLC公司[2]。該機組的設計和分析雖已有相當高的成熟度，惟尚未見到有實際機組的實績，其後續的實際應用和發展仍有待觀察。而鄰近黑潮下游的日本對於黑潮能源開發也同樣十分關注，日本與我國同樣受惠於部分黑潮流段，因此日本也極其重視海洋能源的開發，Katsuoshi等人曾發表了用於黑潮海流的單轉子浮游式海流渦輪機的實海拖曳驗證[3]，其渦輪機設計頂部有橢球浮體構造，底部亦配有配重，浮體與配重對渦輪機所造成之力矩可平衡抵消單一轉子所產生之轉矩，避免渦輪機於水中運行時翻覆。其中為了確認浮體和配重的方式可行，因此進行了實海拖曳實驗，最終驗證了擬議渦輪機的於水中運作的穩定性和發電能力(如圖1-3所示)。

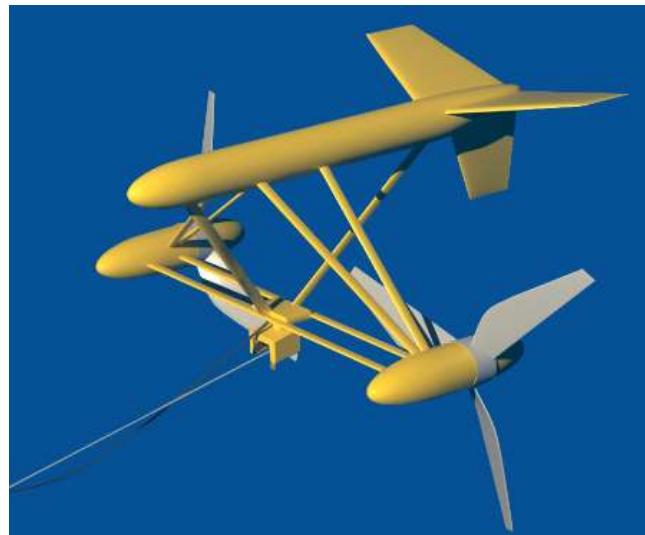


圖 1-2 Gulf Stream Turbine (引用自 <http://www.gulfstreamturbine.com/>) [2]

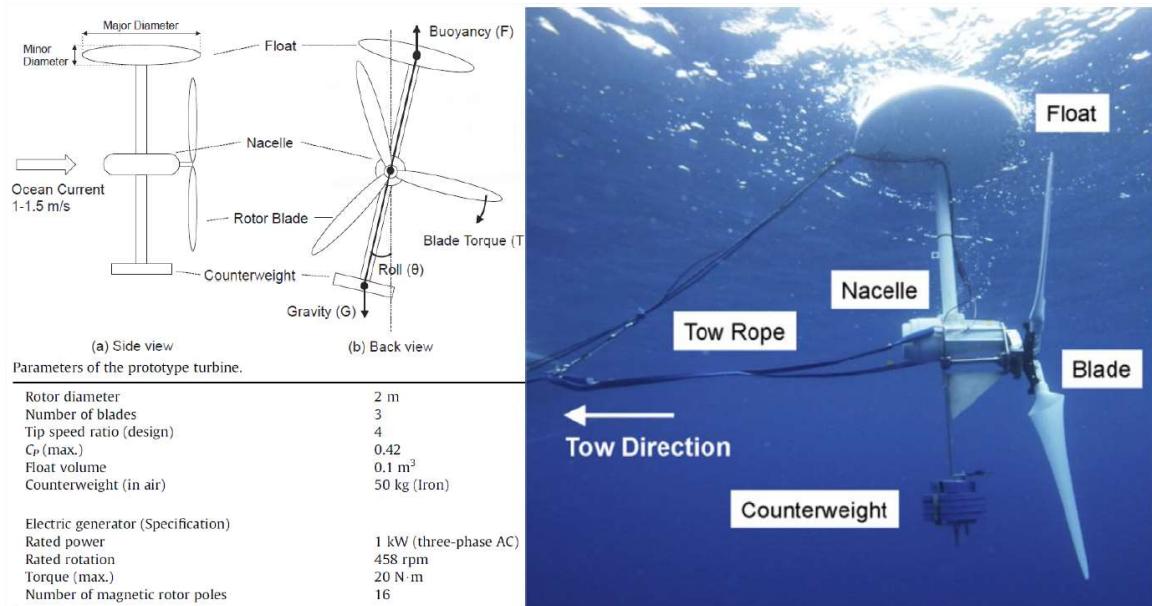


圖 1-3 單轉子浮游式海流渦輪機 [3]

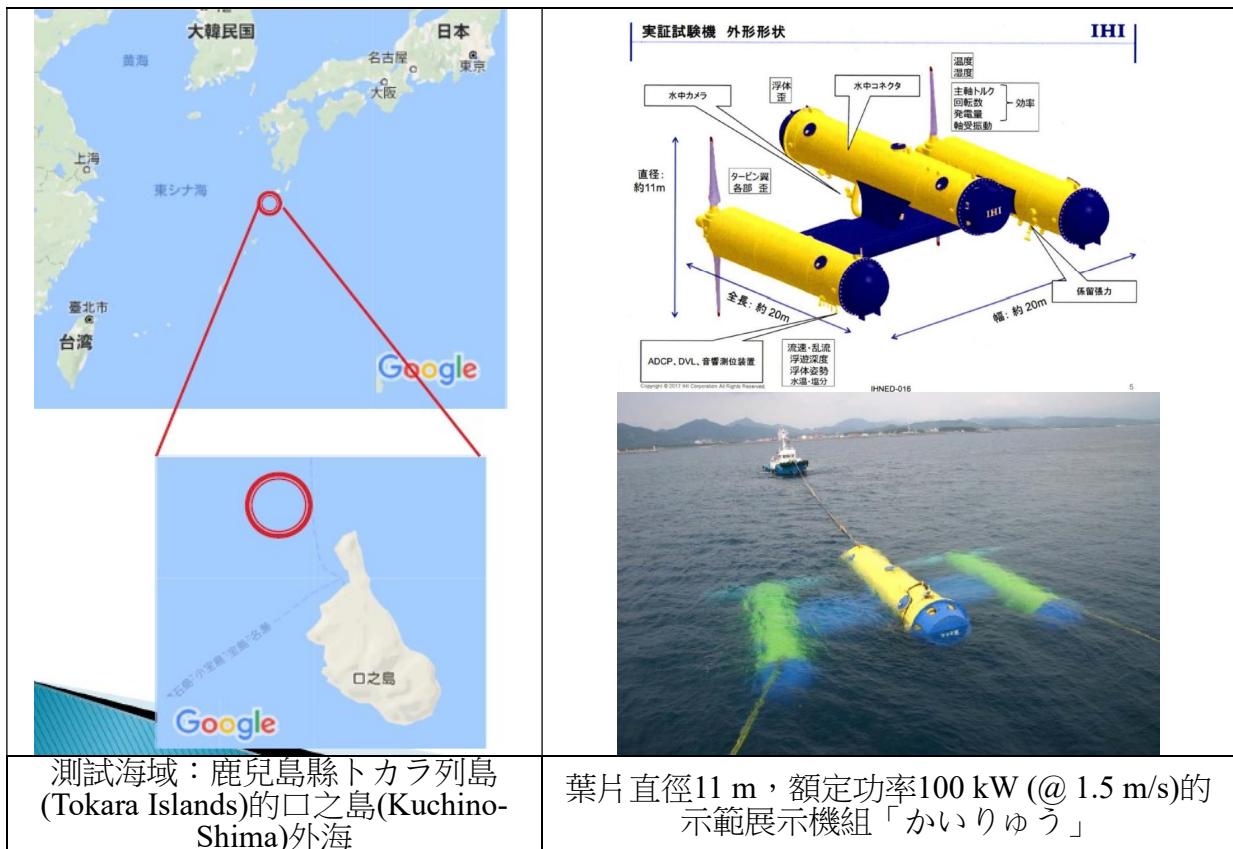
此外，同樣在日本，2011~2014年期間日本獨立行政法人新能源產業技術總合開發機構 (New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO)委託IHI、東芝、東京大學、三井物產戰略研究所等四個單位合組的團隊進行(如圖1-4所示)雙機對轉的浮游式洋流發電渦輪機系統技術的研發。該機組系統以流速1.5 m/s為額定流速，額定功率2 MW為目標規格，葉片直徑約達40 m，並預期系統達實用時，由400組所構成的800 MW電廠可將發電成本控制在每度20日圓[4-7]。依據日本NEDO支助的黑潮發電渦輪機組研發團隊成員的說明，NEDO推動的海洋再生能源研發計畫有二類，其一屬技術發展(Technology Development)計畫，另一屬示範計畫(Demonstration Projects)，前者既使有業界參與，也是由政府百分之百出資，而後者的示範機組計畫則由業界主導，且由業界出資三分之一，政府出資三分之二的方式推動，而NEDO支助的黑潮發電渦輪機組研發計畫的第一階段(2011~2015)即屬於技術發展計畫。另一方面，日本船級協會Class NK也將依循NEDO計畫執

行與實測成果，積極發展洋流發電系統的技術指引(Guideline)。

2015~2018年期間NEDO再次委託IHI、東京大學、三井物產戰略研究所等三個單位合組的團隊開發了雙機對轉的浮游式洋流發電渦輪機組かいりゅう(Kairyu)，如圖1-5所示。該機組系統以流速1.5 m/s 時，額定功率100 kW為目標規格，葉片直徑約達11 m，並於2017年8月在口之島外海完成實海域錨碇測試，惟在短暫數日的測試期間因黑潮流軸偏離，機組只得約30 kW的發電功率，但也驗證該機組可於低流速下運轉發電。在此初步成果之基礎上，NEDO進一步支助IHI於2018年4月至2020年3月執行500 kW機組開發並進行長期(1年)的發電測試，以驗證機組耐久性及經濟性，然而直至2020年11月為止尚未有洋流發電機Kairyu海測之最新消息發佈，儘管如此NEDO團隊仍目標於2030年達商業化程度。



圖 1-4 NEDO 發展的 2 MW 雙機對轉浮游式海流發電渦輪機系統示意圖
(引用自 <http://www.otpe.k.u-tokyo.ac.jp/project.html?key=1352350809>) [4]



測試海域：鹿兒島縣トカラ列島
(Tokara Islands)的口之島(Kuchino-Shima)外海

葉片直徑11 m，額定功率100 kW (@ 1.5 m/s)的示範展示機組「かいりゅう」

圖 1-5 NEDO 與 IHI 發展的 100 kW 雙機對轉浮游式海流發電渦輪機組實海域測試

另外英國開發海洋能已久，但相較於洋流能，由於在蘇格蘭最北端海岸和奧克尼群島之間的彭特蘭海峽(Pentland Firth)擁有著快速流動的潮汐流，所以英國近年來較著重於開發潮汐能，其機組形式也是值得我們所參考的對象之一。例如於Orbital公司2016年在歐洲海洋能源中心推出了全商業規模的SR2000 2MW[8] (原為 Scotrenewables Tidal Power)，其認為船隻對於終身維護是一種更好的解決方案，發電機組採用固定間距葉片的可變速度之轉子，直徑為16 m，參考額定流速為3 m/s，啟動流速1 m/s，最大轉速為16 rpm，可安裝在水深超過25 m的地方，並可配置一系列錨碇系統，以適應大多數海底類型，而船體長74 m，已在12個月內產生了超過3.25 GWh的發電量，且於2018年9月完成驗證。

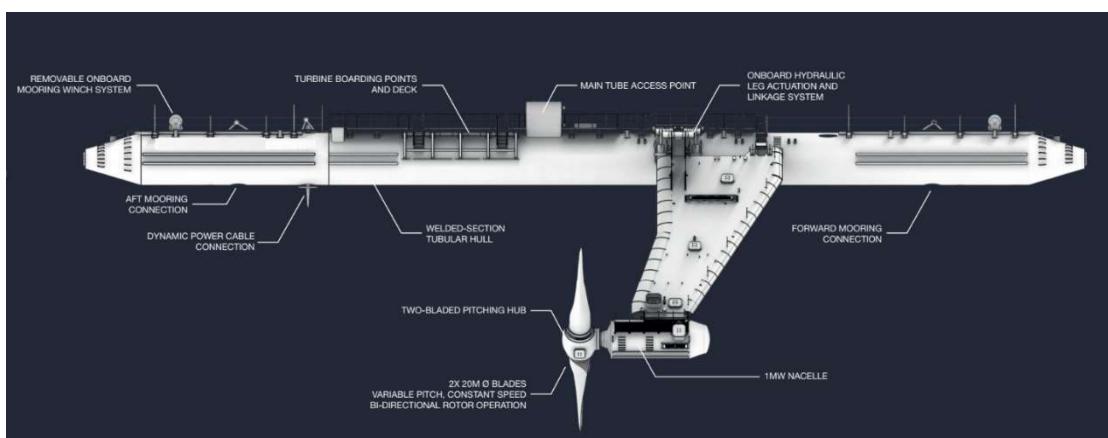


圖 1-6 Orbital SR2000 潮汐能發電機 [8]

第二節 國內洋流發電技術發展現況

台灣近年在能源國家型計畫第一、二期(NEP-I & II)以及國家海洋研究院支助下所執行的黑潮資源調查及海/潮流發電渦輪機相關研究如表1-3所示。包含2011年委託國立臺灣大學海洋研究所唐存勇教授的團隊針對台灣東部海域進行自然資源綜合性研究，從(1)海流的分布、強度、穩定度；(2)地理及地質條件；(3)化學及生態環境等條件，調查研究台灣東岸黑潮海域的海洋環境條件設置發電平台的可行性，提出綠島北面海域適合海流發電的位址。該計畫執行了綠島北側海脊群上五組聲波都卜勒流剖儀 (Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)錨碇測站的海流量測(如圖1-7所示)，並依據調查結果歸納出綠島北面海脊群是天然環境下最佳的發電站址之結論，同時展望未來若於綠島設立黑潮發電基地，則足以建設綠島成為無碳島示範地區，還可促進地方觀光發展[9]。此外，國科會(現名科技部)為因應後續黑潮發電渦輪機組的開發測試所需，更已於2013年委託海洋大學著手規劃建置綠島海域的黑潮發電測試場[10]。此外，國立中山大學與海洋大學則分別在2011~2012年間針對潮流發電機進行開發，中山大學是以澎湖海域潮流為目標，開發數kW級之潮流發電機；海洋大學亦以基隆海檻上方被加速的潮流為目標開發數kW級發電機組雛形，以期可應用在高於黑潮流速的潮流發電上。

一如前述，縱使工程技術仍有挑戰，但國內外仍有前瞻者已著手洋流發電機組開發工作，值得持續保持關注。近年，我國民間企業萬機鋼鐵股份有限公司有鑒於黑潮發電的潛力，已自行挹注資金，研發海流發電機組多年，開發出太陽行星式葉片的水車機構並建置了15 kW機組系統[11-12]，於第三代50 kW級機組實海域船拖測試階段，達成流速1.43 m/s條件下發電32.6 kW的測試結果[13]，並在NEP-II計畫支助下，由成大、中山及國研院團隊協助先後於屏東外海執行短期船拖(2015.03)及深海錨繫(2016.07)測試驗證。目前萬機團隊之洋流發電機組已進行至第四代200 kW級，在國家海洋研究院經費支持下，已於2020年3月完成實海域發電機測試，短期目標將於2021年於綠島海域進行實海域發電測試工作。

此外，本計畫團隊在NEP-II支助下，於2015~2017年三年期間，整合了包含台大、海大、台經院等學研團隊及台灣國際造船公司進行的產學合作計畫，完成了20 kW浮游式黑潮發電先導機組系統整合設計與性能綜合評估、系統動態模擬分析、轉子葉片設計與計算流力分析、經濟性與供應鏈分析等研究項目，且此設計已於2017年12月取得中華民國發明專利(名稱：海流發電裝置；證書號數：I608165)，隨後並於2019年7月取得美國發明專利(Ocean Current Power Generation Device, Patent No.: US 10,355,557 B2)。機組構型及錨繫示意圖分別如圖1-8與圖1-9所示。此外，為了驗證和展示技術成果，本計畫團隊並於2018年1月9日下午在台灣大學工程科學及海洋工程系館內拖曳水槽公開舉行了「800 W浮游式黑潮發電渦輪機(FKT)模型機組水槽拖曳發電展示會」，完成技術驗證與公開的性能展示，如圖1-10及圖1-11所示。此外，該計畫亦初步建立了數項關鍵技術，包含直驅式發電機設計與分析技術、水密軸封系統設計技術、轉子葉片設計與性能分析技術、FRP葉片結構疲勞強度分析技術、機組佈放及回收作業規劃與模擬技術、系統動態模擬分析技術、兼具抗蝕及抗生物腐蝕之複

合塗層開發技術、機組性能水槽模型試驗與分析技術[14]。同時，本計畫團隊亦於2019年在國海院計畫支助下完成10 kW(單一發電機組)直驅式永磁同步發電機設計製造、海流發電FRP葉片設計分析與製造技術、被動式油壓補償水密軸封設計製造技術等三項海流發電關鍵技術之開發工作，並於2020年持續推動完成具單一轉子之10 kW洋流發電機實海域拖曳測試與機艙水60 m耐壓測試，如圖1-12與圖1-13所示。

綜合以上關於國內外潮流及海流發電發展現況回顧以及對於海流發電關鍵技術課題的考察[15-16]，本計畫團隊為發展黑潮發電自主技術，推動自主的海洋再生能源開發，並促進台灣海流發電產業發展之目的，即著眼於開發浮游式黑潮發電渦輪機系統整合設計與分析之自主技術，產出智財並以達成20 kW級浮游式黑潮發電先導機組設計及經濟性分析為目標，以期作為下一階段導引產業投入推動示範機組實現及實海域驗證計畫之基礎，逐步建構產業鏈並放眼國際，最終以促成台灣海流發電產業技術的發展以及黑潮發電的實現為目標。

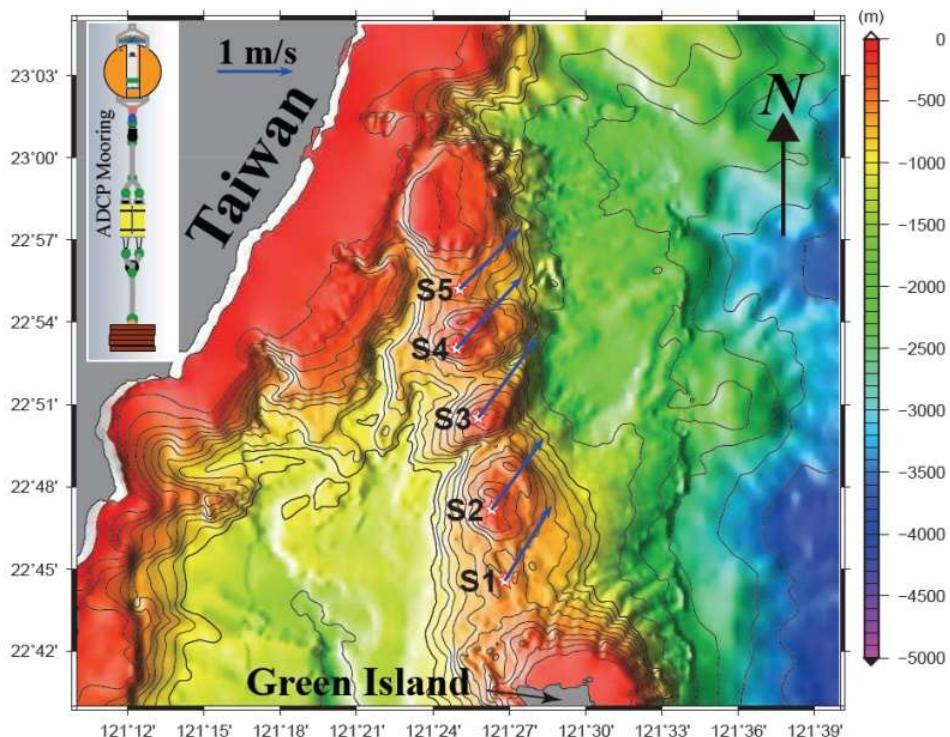


圖 1-7 綠島北側海域地形及測流錨碇布置(引用自國家型能源計畫第一期「台灣東部海域自然資源綜合性研究」成果手冊，計畫主持人：唐存勇教授) [9]

表1-3 台灣近年在NEP-I、NEP-II與海委會支助下的海/潮流發電相關研究

計畫名稱	委託機關	執行單位	執行年度
我國沿海潮流發電評估與發電機組雛形研發	行政院國家科學委員會	國立臺灣海洋大學	2011~2012
台灣東部海域自然資源綜合性研究	行政院國家科學委員會	國立臺灣大學海洋研究所	2008~2010
澎湖海域海潮流能源開發研究(開發海潮流發電平台)	行政院國家科學委員會	國立中山大學	2011~2012
海流發電系統效能驗證	行政院國家科學委員會	國立成功大學	2012~2016
建置國家級臺灣海洋能測試場第二階段計畫	行政院國家科學委員會	國立臺灣海洋大學	2013~2014
浮游式黑潮發電先導機組設計開發關鍵技術之研究	行政院科技部	國立臺灣大學、國立臺灣海洋大學、台經院、台船公司	2015~2017
吋級黑潮發電先導機組研發與實海域測試平台建置計畫	行政院科技部	成功大學水工試驗所、中山大學海洋科技研究中心、國研院海洋中心、萬機鋼鐵公司	2014~2018
洋流能關鍵技術開發與推動	海洋委員會 國家海洋研究院	國立中山大學、國立臺灣大學、國研院海洋中心、成功大學水工試驗所、萬機鋼鐵公司、中華經濟研究院	2019
浮游式洋流發電機製作與實海測試委託專業服務案	海洋委員會 國家海洋研究院	國立臺灣大學、國立臺灣海洋大學	2020
洋流發電機自走式載具與避颱方案研擬委託專業服務案		國立臺灣大學	
數百KW級洋流發電機組實海域發電測試委託專業服務案		國立中山大學、萬機鋼鐵公司	
洋流發電配套方案與基地港規劃委託專業服務案		國立中山大學	
臺灣洋流能海域測試場規劃評估		國立中山大學	

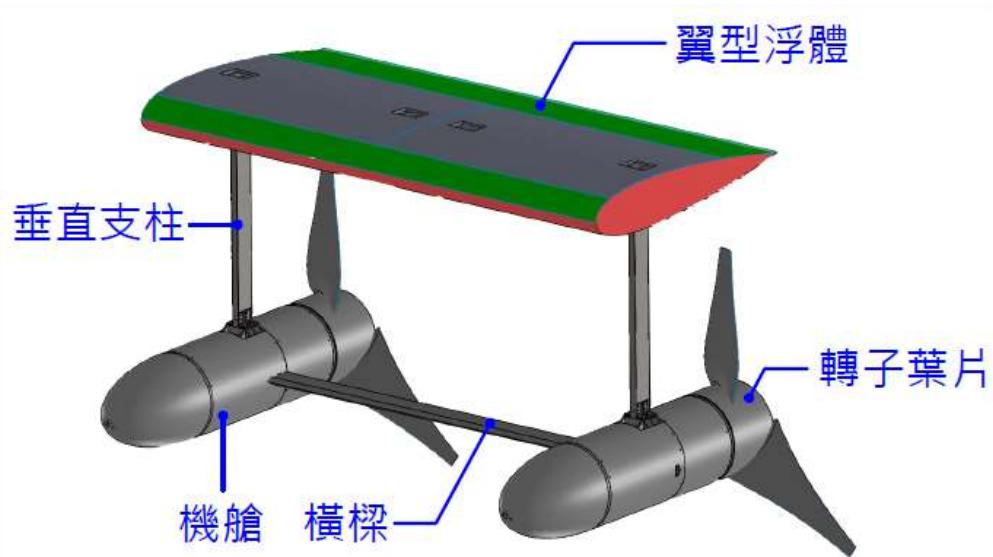


圖 1-8 浮游式黑潮發電渦輪機(FKT)構型

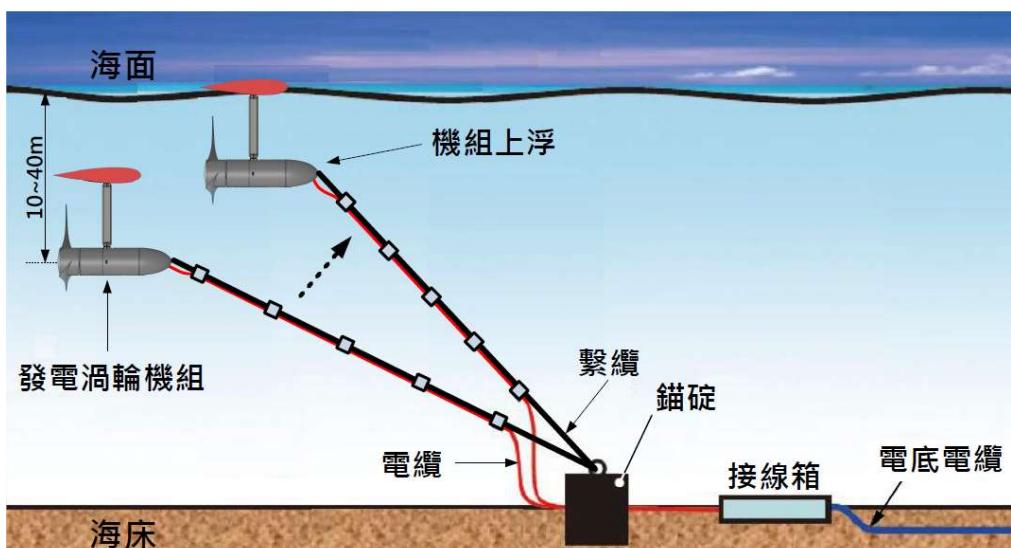


圖 1-9 浮游式黑潮發電渦輪機組及錨繫



圖 1-10 800 W 水槽試驗模型機組



圖 1-11 拖曳試驗時機組的水下影像



圖 1-12 10 kW 洋流發電渦輪機實海拖曳測試

圖 1-13 防水機艙耐壓測試

第三節 本年度工作目標與實際達成項目

本計畫團隊已於本年度完成 20 kW FKT 系統組裝與測試，其中包含：新製一組 10 kW 發電機防水機艙、完成既有 10 kW 發電機防水機艙維護、完成浮力控制模組製作與測試、完成翼型浮體整修與浮力擴充，最後亦順利於 2021 年 10 月 23 日與 26 日完成兩次 20 kW FKT 實海拖曳測試工作，並獲得許多寶貴經驗與實驗數據，無論對於即將執行之 FKT 鐨碇測試，亦或是未來商業機型之籌建皆有極大的助益。對比本計畫團隊於本年度計畫執行之初所提交「執行工作報告書修正版」之工作預定進度(第七章之預定進度甘梯圖)，本案除浮力控制系統之專利仍在申請流程中之外，其餘項目之執行進度均為 100 % (如表 1-4 所示)，並對照本案之「需求說明書」與實際工作項目可另外歸納出表 1-5。

表 1-4 2021 年度工作進度

項次	工作事項	預定達成日期	執行進度
1	實海測試船隻洽詢	110.05.31	100 %
2	發電機專用橫桿與拖曳點設計製作	110.05.31	100 %
3	既有設備維護(10 kW 發電機組)	110.06.30	100 %
4	20 kW 洋流發電機細部設計與模擬	110.06.30	100 %
5	發電機組設計製作(第二組新製品)	110.07.31	100 %
6	具浮力調控機制之翼型浮體設計製作	110.07.31	100 %
7	相關感測器測試與校正	110.06.30	100 %
8	遠端監控與電力傳輸迴路規劃設計	110.06.30	100 %
9	發電機組水密與動態測試	110.06.30	100 %
10	實海測試前評估與方案研擬	110.06.30	100 %
11	實海測試專用機構設計與製作	110.07.31	100 %
12	發電機狀態資料即時回授測試	110.07.31	100 %
13	20 kW 洋流發電機整合安裝	110.08.31	100 %
14	20 kW 洋流發電機浮力平衡測試	110.09.30	100 %
15	實海域測試性能驗證	110.09.30	100 %
16	20 kW 洋流發電機可行性與效益評估	110.10.31	100 %
17	發電機沉浮機構專利申請	110.12.31	90%

表 1-5 2021 年度工作項目

項次	需求說明書 - 研究內容	工作項目
1. 研製 10 眇(含)以上之浮游式渦輪發電機組系統		
1.1	本採購須包含組立浮游式渦輪發電機組所需之零配件。	<p>本年度已完成下列五項 FKT 重要零組件之採購(百萬購案)，其中包含：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 洋流發電機 FRP 葉片； ● 發電機防水機艙與相關組件； ● 10 kW 永磁同步發電機； ● 20 kW 洋流發電機浮力控制模組； ● 20 kW 洋流發電機浮力擴增與整流套件組。 <p>其餘 FKT 零組件與測試用設備亦皆完成建置，並順利達成 20 kW FKT 實海拖曳測試之需求。</p>
1.2	發電機相關規格應為：額定功率10矇(含)以上。	本團隊之 20 kW FKT 由兩組 10 kW 發電機組成，其中 1 號發電機為本團隊既有之設備(2020 年 10 kW 機型所使用)，2 號發電機為本年度採購之新品，兩部發電機均經過陸上與實海域之測試，其發電效能均可達 10 kW，與設計相符。詳細測試結果請參考本文第五章第三節「發電機陸上性能測試」與第六章「20 kW 洋流發電機實海域性能測試」之內容。
1.3	渦輪發電機組須包含：發電機、葉片、連軸器、壓力補償裝置、機組上錨碇接點設計、資料傳輸接收系統、電力接收系統、防水機艙與機架防蝕設計等，其他必要零配件須由廠商負責。	20 kW FKT 之外部主要組件均由 SUS 304 不鏽鋼製成，其具備抗腐蝕之效能，另外翼型浮體大樑、垂直支柱與水平橫桿之材質因有強度需求故並非以不鏽鋼製作，然其外層均有三層防鏽塗料，除底漆噴塗外，最外層均採用與船殼相同等級之塗料進行噴塗，而其餘 FRP 組件均不受海水腐蝕影響。需求說明書提及之餘相關組件與實際成品安裝位置之說明如圖 1-14 所示。

2. 20 眓級浮游式洋流發電機浮潛機構設計與組裝

2.1	規劃與驗證20瓩之發電機組系統具自主上浮下潛設計。	本計畫團隊已完成 20 kW FKT 專用浮力控制模組之設計與製作，並分別整合於翼型浮體內部前段(500 浮力桶)與後段(600 浮力桶)，其中浮力控制模組之性能模擬、系統製作與組裝、廠內性能測試與實海測試可分別參閱本文第三章第三節(P.103)、第四章第二節(P.131)與第六章第三節(P.212)之說明。
2.2	本院提供 109 年測試之 10 眓浮游式渦輪發電機組一組(含防水機艙)、扇葉三片、翼型浮體一組及垂直連桿一組，由廠商依行政程序現況借用，相關既有零件損壞部份由廠商負責修復；廠商需整合既有零組件與今年採購零件完成 20 眓發電機組之系統組立。組裝中所需之零配件由廠商負責。	本計畫團隊已完成 10 kW FKT 受損部位修復，並與本年度新採購永磁發電機、防水機艙、浮力控制模組與其他零組件整合擴充為 20 kW FKT。

3. 進行浮游式渦輪發電機組實海船拖實驗

3.1	組立 20 眓渦輪機組後於實海域測試驗証，採用拖曳方式或其他可行方案，驗証機組之上浮、下潛測試(試驗方式於服務建議書中說明)。	本年度於高雄港洲際碼頭執行 20 kW FKT 之港內測試工作，並利用拖船於高雄港二號港口外完成 20 kW FKT 實海拖曳測試，其中無論港內或是實海測試過程均透過浮力控制模組進行運作水深調整，詳細測試說明請參閱本文第六章第三節第三項「浮力引擎效能測試」(P.226)之說明。
-----	---	---

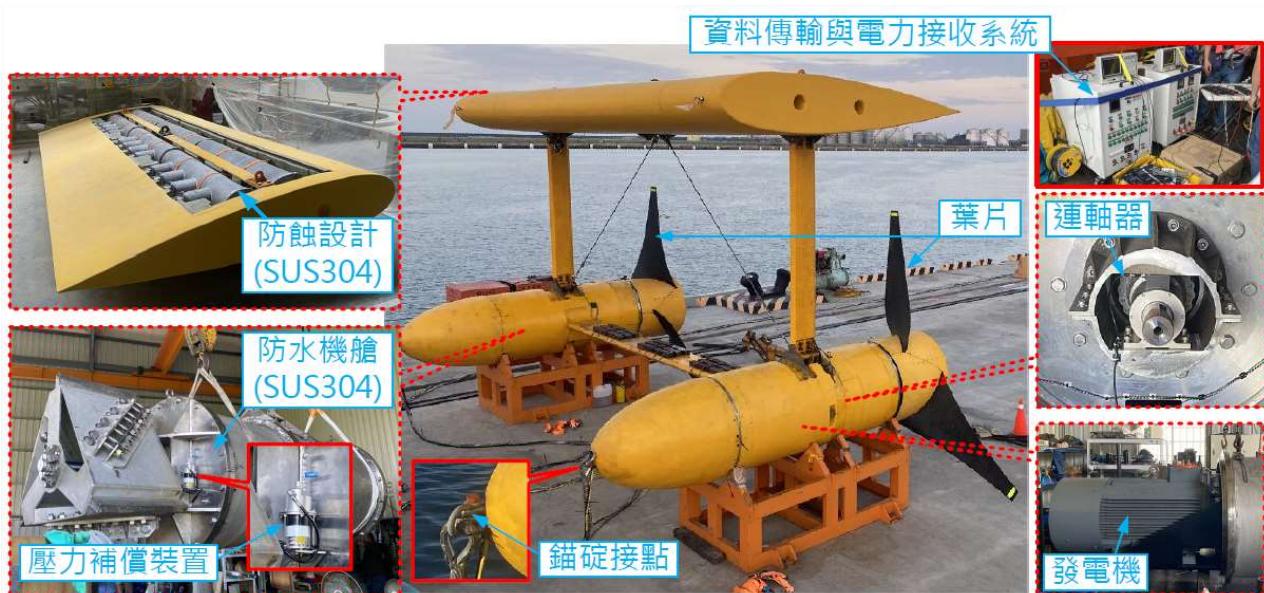


圖1-14 需求說明書指定設備安裝位置對照圖

相較於 10 kW FKT 建置與測試，本年度之 20 kW FKT 建置與測試有許多新的挑戰必須一一克服，於 2020 年執行 10 kW FKT 時所需面臨的主要問題為發電機體積過大之問題，由於本計畫團隊過去於執行 NEPII 計畫時之 FKT 體積僅為商用機型之 1/25，故提升至 1/5 縮尺之 10 kW FKT 將使得系統建置、組裝與吊掛過程艱難許多，且危險性也相對提高，另外實際將 10 kW FKT 以船隻拖曳至海上又是另外一項考驗；本年度 20 kW FKT 所需面對的問題與過去完全不同，其首要的考驗為於水中進行 FKT 拖曳，因此本計畫團隊必須於水中建置一拖曳支點以模擬 FKT 繫錨狀態，經多方考量後最終採用吊掛重塊方式進行，此時 FKT 與重塊於拖曳之深度、姿態與相對位置皆須經過仔細計算與設計，才可安全進行 FKT 水中拖曳作業，本年度另外一項較困難的考驗為浮力控制系統，由於本計畫團隊採用控制效率較差但控制精度較高之浮力引擎陣列進行整體 FKT 控制，因此如何可有效地改變 FKT 於水中運作的樣態對執行本年度計畫又是另一項新的考驗，所幸 20 kW FKT 於建置過程中雖遇到許多組裝上的問題，但最終系統仍順利完成建置，且本計畫團隊所設計之浮力控制模組於實海拖曳測試中之用作毫無異常，雖經實海拖曳過程得知 20 kW FKT 運作深度於現有設備架構下難以進行調整，但透過實海拖曳測試亦獲得許多寶貴的經驗與數據可供後續執行計畫做為參考依據，是團隊於今年執行本計畫的最大收穫。

有關專利申請部份，根據本年度之工作成果，本計畫團隊已於 2021 年 11 月 05 日正式委由台一國際智慧財產事務所向經濟部智慧財產局提出發明專利申請，申請專利名稱為「洋流發電裝置」，申請專利案號為「110141400」，其主要概念為洋流發電機之整體姿態可藉由翼型浮體內部之浮力控制系統進行調整，進而達到改變發電機作業深度之效果，目前狀態仍於「專利申請中(Patent Pending)」。

第二章 浮游式洋流發電機發展進程

本計畫團隊自2015年起便開始執行科技部委託之浮游式洋流發電機相關研發工作，至2017年已完成1/25縮尺之800 W FKT機型製作與水槽拖曳測試，透過水槽拖曳測試成功獲得許多有關FKT構型的技術資料；隨後自2019年起受國海院委託進行1/5縮尺之20 kW FKT研發，並於2020年首次完成10 kW FKT之實海域拖曳測試，成功驗證10 kW發電機(單一機艙)、翼型浮體與葉片之工作效能，以下將針對本計畫團隊過去所完成之800 W FKT之拖曳試驗、10 kW發電機設計與模擬、10 kW FKT實海域拖曳測試進行成果分享。

第一節 1/25洋流發電機模型拖曳試驗

一、浮游式洋流發電機性能參數

當要評估黑潮發電機葉輪之性能時，普遍以無因次的特性係數來表示其性能，運用在黑潮發電機性能評估上的性能係數有葉尖周速比、軸向力係數、扭矩係數及功率係數，本研究設計一流體動力量測系統，以量測葉輪之性能係數，此四種性能係數的概述及公式如下：

(A) 葉尖周速比(Tip Speed Ratio, TSR)

葉尖周速比為黑潮發電機葉片尖端的切線速度與入流速度的比值，如式(2-1)所示：

$$\lambda = \frac{\text{Tip Speed of Blade}}{\text{Inflow Velocity}} = \frac{R\omega}{U} \quad (2-1)$$

(B) 軸向力係數(Axial Force Coefficient, C_A ；一般稱推力係數 Thrust Coefficient)

軸向力可想像像是流體作用在黑潮發電機上，將黑潮發電機往後方推擠的力，此力為升力及阻力在軸向分量的總和，升力所造成的軸向力稱為推力，此推力一般比阻力造成的軸向力大一階(Order)，因此一般稱此係數為推力係數。本研究在實驗量測上是量測軸向力總和作為式(2-2)中的軸向力 F_A ，因此本文中為了精確表示量測數據，以軸向力係數 C_A 來表示量測結果：

$$C_A = \frac{\text{Axial Force}}{\text{Dynamic Force}} = \frac{F_A}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (2-2)$$

(C) 扭矩係數(Torque Coefficient, C_Q)

升力型黑潮發電機的扭矩是由葉輪旋轉面產生的升力所造成的力矩，扭矩係數可表示為式(2-3)：

$$C_Q = \frac{Torque}{Dynamic\ Torque} = \frac{Q}{\frac{1}{2}\rho U^2 AR} \quad (2-3)$$

(D) 功率係數(Power Coefficient, C_P)

黑潮發電機可以從流體中取出的功率比例，稱為功率係數，如式(2-4)所示，功率係數的理論最大值為 0.593，此值由貝茲(Betz)發現[17]，因此一般稱為貝茲極限。黑潮發電機主要由翼型葉片組成，葉片的設計目的是為了有效地將流動流體的動能轉換成帶動發電機旋轉的機械能，此轉換效率受葉片幾何形狀影響，因此最佳化之葉片外型設計對一黑潮發電機的功率係數極為重要，目前葉片設計在發電效率的追求上不再一味追求單一設計流速的最佳化，而是在一個流速的區間裡有較佳的效率。

$$C_P = \frac{Rotor\ Power}{Power\ in\ the\ flow} = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U^3 A} \quad (2-4)$$

本研究設計一流體動力量測系統來量測單獨葉輪之性能，並計算出上述葉輪性能係數，流體動力量測系統中包含發電機、轉速計、荷重元及扭矩計，由式(2-1)、(2-2)與(2-3)可知，量測出轉速(ω)、扭矩(Q)及軸向力(F_A)，及實驗所記錄之拖車速度(U)，可計算出葉輪葉尖速度比(λ)及其對應之扭矩係數(C_Q)、軸向力係數(C_A)，並利用扭矩係數及葉尖速度比的乘積計算出功率係數(C_P)，計算方法詳見式(2-5)。

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U^3 A} = \frac{Q\omega}{\frac{1}{2}\rho U^3 A} = \frac{Q}{\frac{1}{2}\rho U^2 AR} \times \frac{R\omega}{U} = C_Q \lambda \quad (2-5)$$

本研究建立 1/1 FKT 商用機型的 1/25 縮尺模型，其尺寸如表 2-1 所示。並設計流體動力量測系統，分別在拖曳水槽進行 800 W FKT 機組之性能姿態實驗、800 W FKT 機組單邊失效性能及姿態實驗及 800 W FKT 機組波浪中性能及姿態實驗，目的是以模型試驗驗證 FKT 的設計值並量測其運動姿態。

表2-1 1/25與1/5 FKT縮尺模型之規格比較

	800 W (1/25 縮尺)	10 kW (1/5 縮尺)	20 kW (1/5 縮尺)
發電功率	400 W X 2	10 kW X 1	10 kW X 2
翼型浮體 NACA0018	弦長 0.8 m 翼展 2.1 m	弦長 4 m 翼展 8 m	弦長 4 m 翼展 8 m
機艙外徑	0.27 m	1.25 m	1.25 m
船艤端距	1.25 m	5 m	5 m
葉片直徑	1 m	5 m (一組)	5 m (二組)
葉片翼型	NACA66 a=0.8	NACA66 a=0.8	NACA66 a=0.8
軸心距	1.5 m	---	7.5 m

二、800 W洋流發電機組發電效能

本研究在拖曳水槽進行以下三種實驗：

- 一、800 W 洋流發電機組正常運作之性能及姿態實驗
- 二、800 W 洋流發電機組單邊失效之性能及姿態實驗
- 三、800 W 洋流發電機組波浪中之性能及姿態實驗

分別分析及討論如下：

(一) 800 W洋流發電機組正常運作之性能與姿態試驗

測試流速(U)以 1.5 m/s 來模擬黑潮的入流速度，而發電機的額定轉速為 150 rpm，為此 800 W FKT 在流體動力量測中設計額定功率的流速情況，實驗本應以 1.5m/s 之流速情況來驗證其設計性能，然而因流體動力量測系統中發電機有四個負載可進行調整，且其功率係數最大值約在 TSR 5 左右，為量測較完整的性能曲線，測試流速依序以 0.6~1.5 m/s 來模擬黑潮的入流速度。本研究之浮游式黑潮發電機組為左右對轉葉輪，因此本實驗必須製作及使用兩套流體動力量測系統，分別稱為右旋機組(Clockwise)及左旋機組(Counter-Clockwise)，本實驗依序以 0.6~1.5 m/s 的拖車速度來模擬黑潮的入流速度，由發電機會產生一扭矩負荷(Q)，葉輪會依其流體動力特性轉出一對應的轉速(ω)，並產生一對應的軸向力(F_A)，800 W FKT 機組之流體動力量測系統可量測出此實驗條件下的扭矩、轉速，加上實驗中記錄的拖車速度(U)，以及已知的水槽水密度(ρ)和葉輪半徑(R)，便可得知葉輪之性能。如前節所述，當要評估 FKT 機組葉輪之性能時，會以無因次的葉尖周速比(TSR)、軸向力係數(C_A)、扭矩係數(C_Q)及功率係數(C_P)等特性係數來表示其性能，且一般會將上述特性係數以葉輪性能曲線表示，葉輪的性能曲線有功率係數與周速比曲線($C_P - \lambda$ Curves)、扭矩係數與周速比曲線($C_Q - \lambda$ Curves)及軸向力係數與周速比曲線($C_A - \lambda$ Curves)，右旋機組量測的扭矩、轉速及軸向力，以及經由計算得出的 TSR、 C_A 、 C_Q 及 C_P ；左旋機組的量測數據及計算後的性能係數，將不同負載下的性能係數繪製在同一張性能曲線的圖上，並與雷諾平均納維-斯托克斯方程式(Reynolds-Averaging Navier-Stokes Equations, RANS)的計算結果做比較，計算結果如表 2-2 所示[18]。

表 2-2 葉輪主要性能參數

TSR	C_A	$C_Q * 10$	C_P
9.817	0.631	-0.010	-0.009
8.727	0.693	0.227	0.198
7.854	0.727	0.394	0.309
6.545	0.758	0.624	0.408
5.236	0.759	0.850	0.445
4.620	0.741	0.941	0.435
3.570	0.653	0.919	0.328
2.454	0.520	0.709	0.174
1.510	0.391	0.515	0.078
0.500	0.195	0.235	0.012

本實驗依序以 $0.6 \sim 1.5$ m/s 的拖車速度來模擬黑潮的入流速度，機組在不同速度下產生一對應之軸向力、浮力及纜繩張力，浮游式黑潮發電機組之姿態量測系統可量測出此實驗條件下的拖車速度(U)、下潛深度、俯仰(Pitch)、橫搖(Roll)及拖曳力，藉由下潛深度我們可以推算出纜繩的拉扯角度，並用其及纜繩張力推算出軸向力，分別討論如下：

(A) 速度與拖曳纜繩角度曲線($V - \theta$ Curves)

本實驗依序以 $0.6 \sim 1.5$ m/s 的拖車速度來模擬黑潮的入流速度，下潛深度和流速成正比，速度越快下潛深度越深，所產生之纜繩角度也越小，此乃由於 800W FKT 機組模型之浮力固定，流速越快產生的軸向力越大將發電機組下拉使得纜繩角度變小，如圖 2-1 所示。

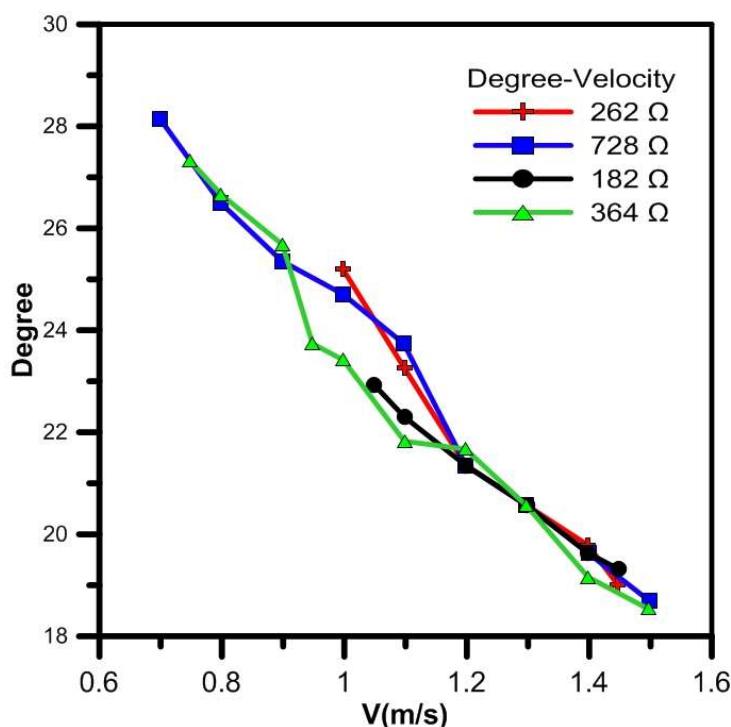


圖 2-1 纜繩角度與速度

(B) 速度與橫搖曲線 ($V - Roll$ Curves)

本實驗依序以 $0.6 \sim 1.5$ m/s 的拖車速度來模擬黑潮的入流速度，隨著速度的增加和發電機負載的改變，橫搖並沒有明顯的趨勢，如圖 2-2 所示左右機組在製作本就有所差異，再加上左右發電機扭矩的不同，導致機組運行時有橫搖現象。

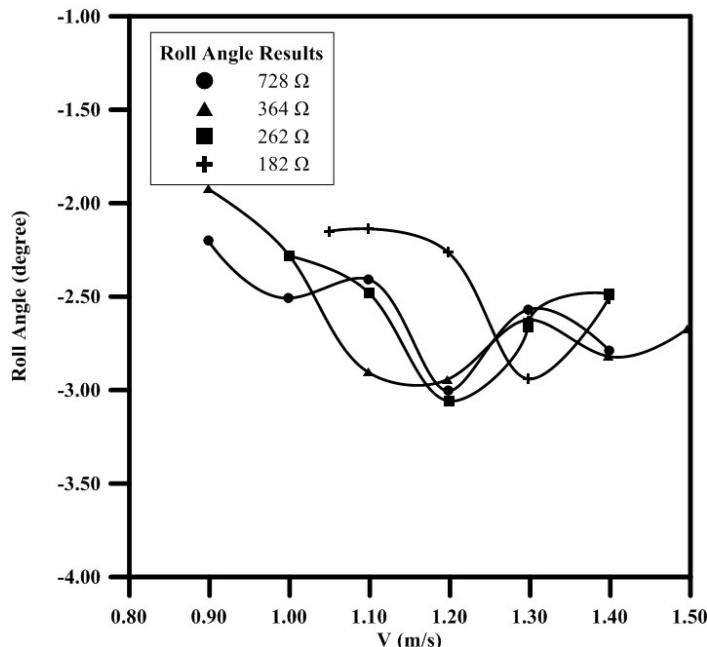


圖 2-2 橫搖角與速度試驗結果

(C) 速度與俯仰曲線 ($V - Pitch$ Curves)

本實驗依序以 $0.6 \sim 1.5$ m/s 的拖車速度來模擬黑潮的入流速度，隨著速度的增加，俯仰的角度稍微變小，其中俯仰在不同負載下 728Ω 、 364Ω 時趨勢相同，隨速度增加，前傾角度微微下降，如圖 2-3 所示。

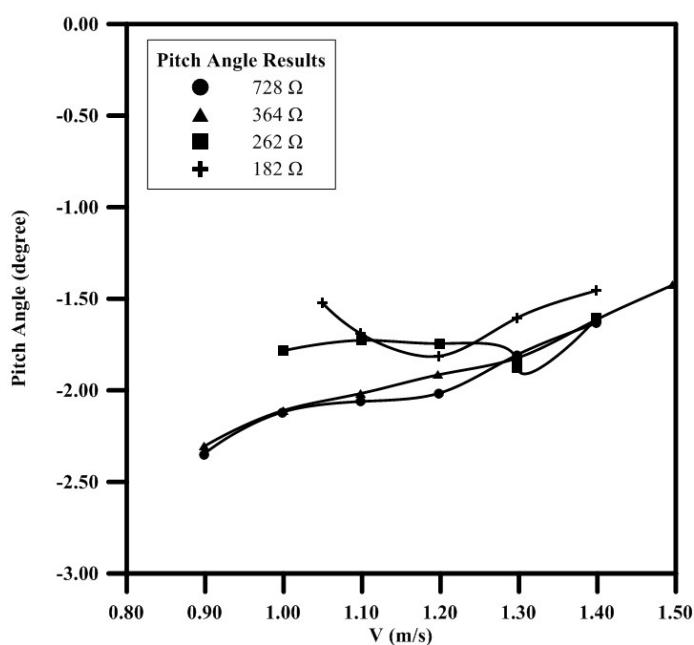


圖 2-3 俯仰角與速度試驗結果

(D) 扭矩係數與周速比曲線($C_Q - \lambda$ Curves)

右旋機組及左旋機組的扭矩係數與周速比曲線之結果分別如圖 2-4 及圖 2-5 所示，因流體動力量測系統中發電機的扭矩負荷(Q)能使流速條件量測到最低的 TSR 為 4.27，若再降低流速扭矩負荷會使葉輪停止旋轉而無法量測，上述原因導致本實驗無法量測到完整的性能係數，實驗的 TSR 在 4.5~8 之間，各流速中大部分扭矩係數之實驗結果與設計計算吻合，右旋機組及左旋機組的扭矩係數與周速比曲線和設計計算結果方均根誤差分別為 5 % 和 1 %。

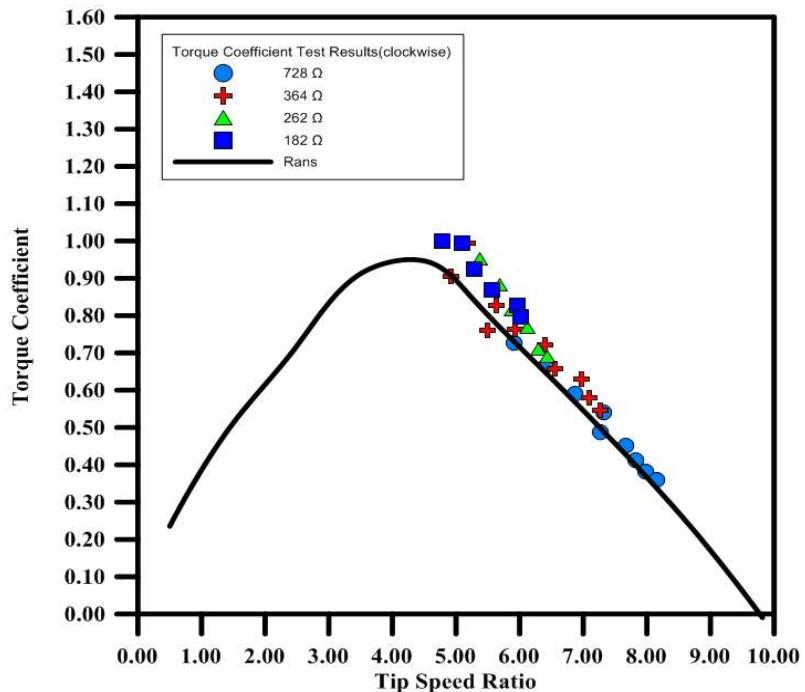


圖 2-4 扭矩係數與周速比(右旋機組)

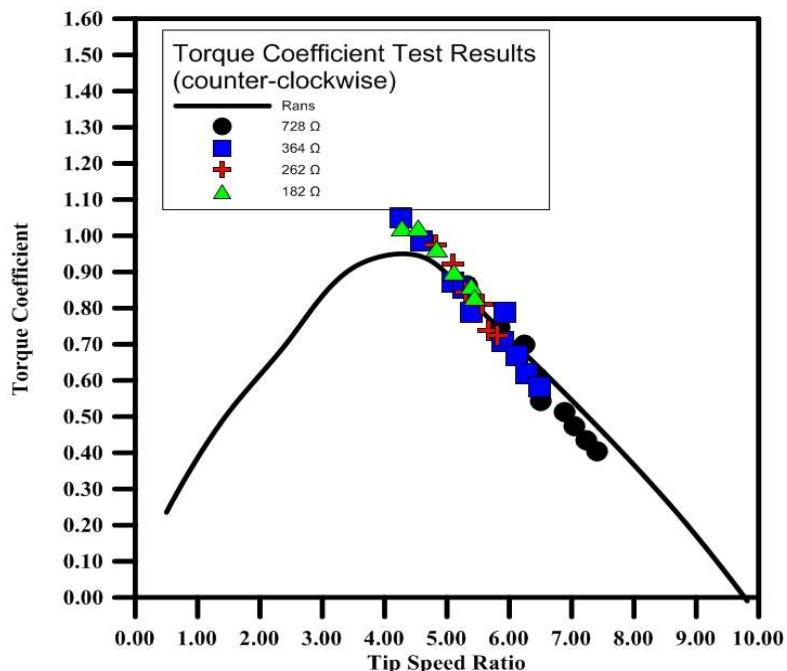


圖 2-5 扭矩係數與周速比(左旋機組)

(E) 功率係數與周速比曲線($C_p - \lambda$ Curves)

右旋機組及左旋機組的功率係數與周速比曲線之結果分別如圖 2-6 及圖 2-7 所示，設計計算值的最大功率係數為 0.445；右旋機組的實驗結果最大功率係數約 0.51，發生在 $TSR=5.18$ ，而左旋機組的實驗結果最大功率係數約 0.47，發生在 $TSR=4.82$ ，右旋機組及左旋機組的功率係數與周速比曲線和設計計算結果均方根誤差分別為 3 % 和 1 %。由上述實驗結果與計算結果的比較可知，在實驗量測儀器的誤差範圍內，功率係數的實驗結果與計算結果吻合，最高功率係數約為 0.5，發生在 TSR 約等於 5 左右。

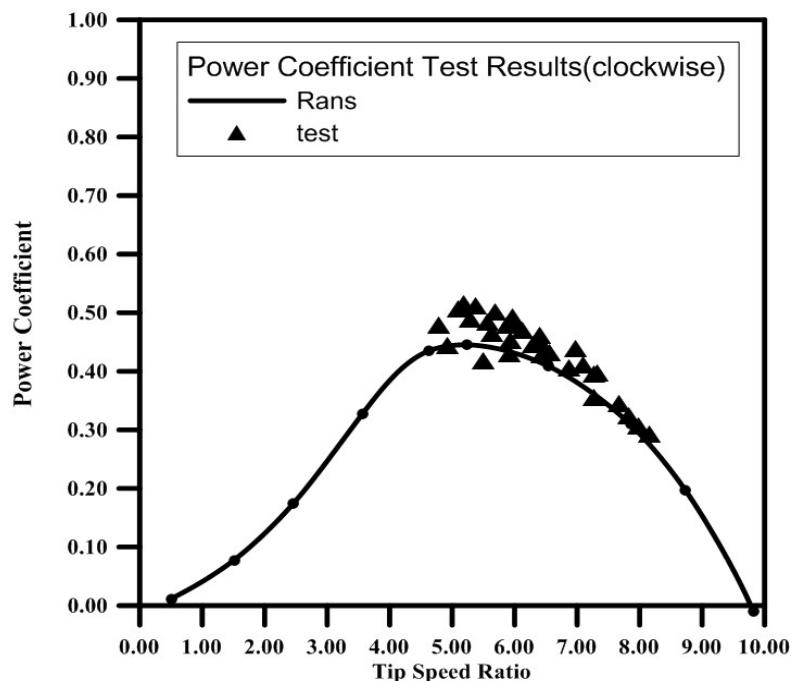


圖 2-6 功率係數與周速比(右旋機組)

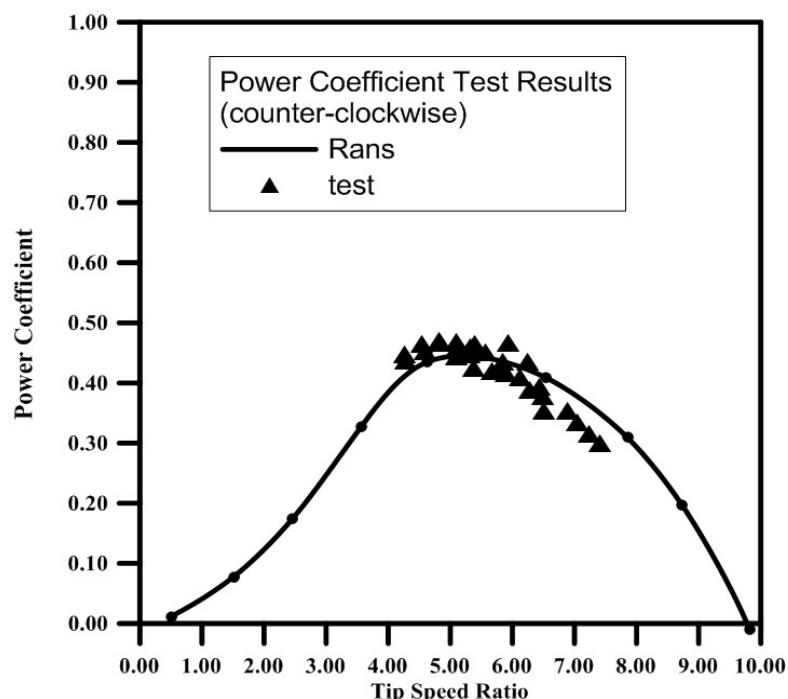


圖 2-7 功率係數與周速比(左旋機組)

(F) 軸向力係數與周速比曲線($C_A - \lambda$ Curves)

右旋機組的軸向力係數與周速比曲線之結果如圖 2-8 所示，軸向力係數的計算，在計算時我們會做一些資料前處理，根據軸向誘導因子[19]，藉由 C_p 求得誘導係數，來分配左右旋的軸向力並根據表 2-3 扣除機組其他部分阻力，此表根據文獻資料[20]與[21]估算而出，由功率係數推出求得誘導係數：

$$C_{p1} = 4a_1(1-a_1)^2 \quad C_{p2} = 4a_2(1-a_2)^2 \quad (2-6)$$

由誘導係數推出求得軸向力係數：

$$C_{a1} = 4a_1(1-a_1) \quad C_{a2} = 4a_2(1-a_2) \quad (2-7)$$

依左右邊軸向力係數比例對實際軸向力分配，可得單邊實際軸向力：

$$A1 = \frac{C_{a1}}{C_{a1} + C_{a2}} \times T_A \quad A2 = \frac{C_{a2}}{C_{a1} + C_{a2}} \times T_A \quad (2-8)$$

由實際軸向力求得實際軸向力係數：

$$C_{A1} = \frac{A1}{\frac{1}{2}\rho U_0^2 A} \quad C_{A2} = \frac{A2}{\frac{1}{2}\rho U_0^2 A} \quad (2-9)$$

如圖 2-8 所示右旋機組軸向力係數實驗結果與設計計算相同，亦即在各流速狀態下的 TSR 5~9 之間時，軸向力係數隨著 TSR 上升而緩慢下降，從圖?可明顯看出軸向力係數實驗結果略高於設計計算，最大設計軸向力係數達到 0.88，右旋機組的軸向力係數與周速比曲線和設計計算結果方均根誤差為 8%。左旋機組的軸向力係數與周速比曲線之結果如圖 2-9 所示，在各流速狀態下的 TSR 4~8 之間時，軸向力係數隨著 TSR 上升而緩慢下降，從圖 2-9 可明顯看出軸向力係數實驗結果略高於設計計算，最大設計軸向力係數達到 0.84，左旋機組的軸向力係數與周速比曲線和設計計算結果方均根誤差為 5 %。在各流速下可以發現左右機組 TSR 的範圍並不相同，這個原因來自發電機的特性不同，其中我們量測的是整體 800 W FKT 機組的總阻力，雖然在計算時我們有扣除翼型浮體及機艙各部位阻力，但實際阻力應該更大，若可得知實際阻力，軸向力係數與周速比曲線之結果會更加準確。

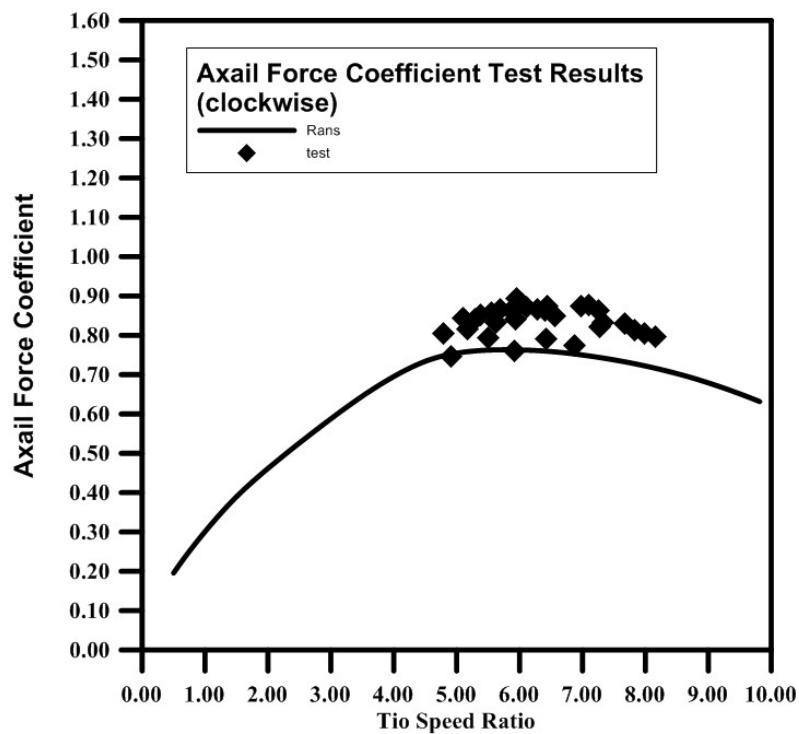


圖 2-8 軸向力係數與周速比(右旋機組)

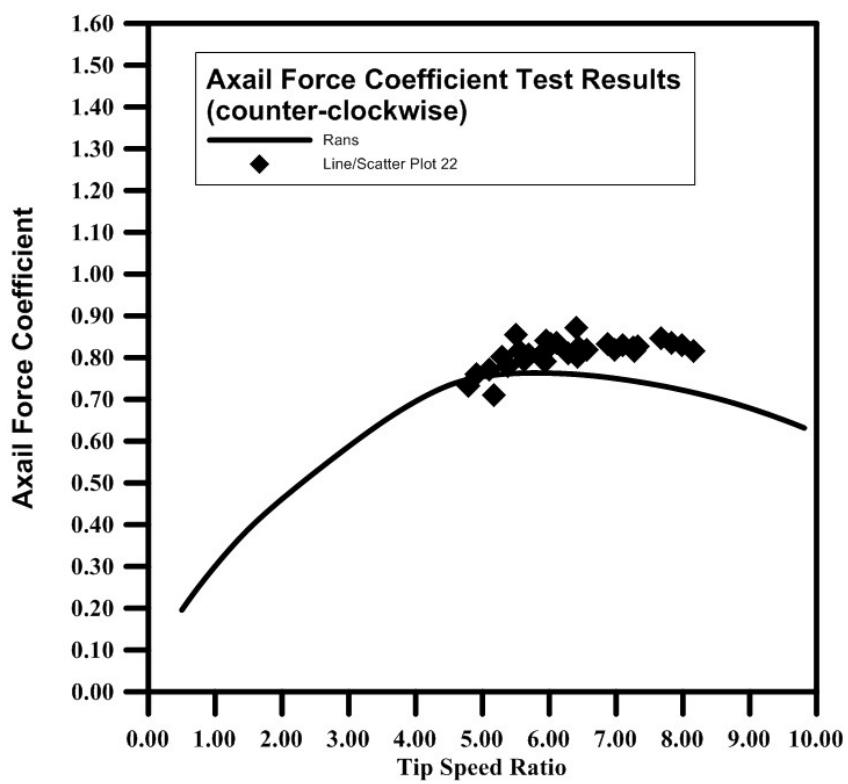


圖 2-9 軸向力係數與周速比(左旋機組)

表 2-3 800 W FKT 各組件之阻力係數、阻力面積及阻力

V (m/s)	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
翼型浮體	0.394	0.518	0.655	0.807	0.973	1.152	1.345	1.550	1.769	2.001
橫樑	0.091	0.119	0.150	0.184	0.221	0.261	0.304	0.350	0.398	0.449
直柱	0.058	0.075	0.094	0.115	0.138	0.163	0.189	0.217	0.246	0.277
機艙	0.350	0.460	0.583	0.719	0.867	1.028	1.201	1.386	1.583	1.792
總阻力(kg)	0.894	1.172	1.483	1.825	2.200	2.604	3.039	3.503	3.997	4.519

(G) 整體發電效率和轉速曲線($\eta - RPM$ Curves)

本實驗依序以 0.6~1.5 m/s 的拖車速度來模擬黑潮的入流速度，隨著速度的增加和發電機負載的改變，將馬力係數乘上發電機轉換效率，最高整體的發電效率約 0.4，比較左右兩邊機組右旋機組比左旋效率佳，實驗結果如圖 2-10 及圖 2-11 所示，而在負載 262 Ω 、182 Ω 時，發電效率曲線出現交叉，比對過發電機的效率曲線如圖 2-12 及圖 2-13 所示，是發電機本身的製作上的問題，產生特性不同的結果，右旋機組的發電機最高效率達 0.88，而左旋機組僅有 0.73。

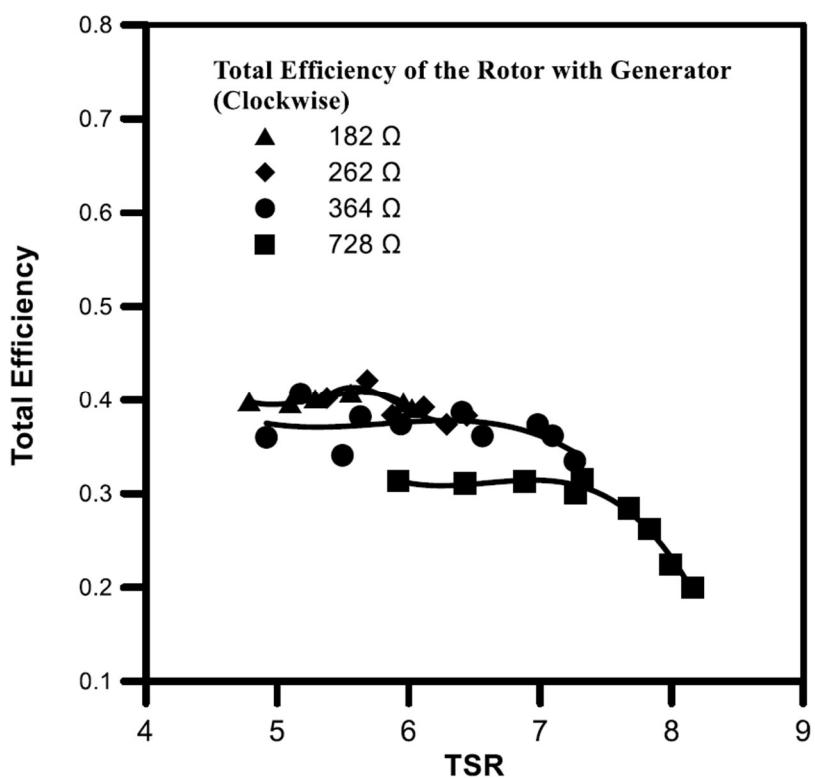


圖 2-10 整體效率與周速比(右旋機組)

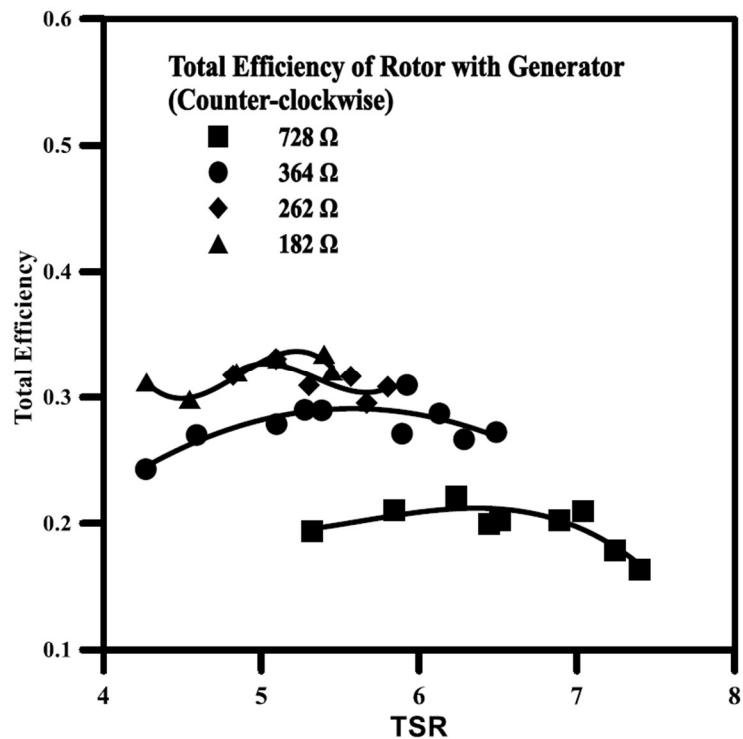


圖 2-11 整體效率與周速比(左旋機組)

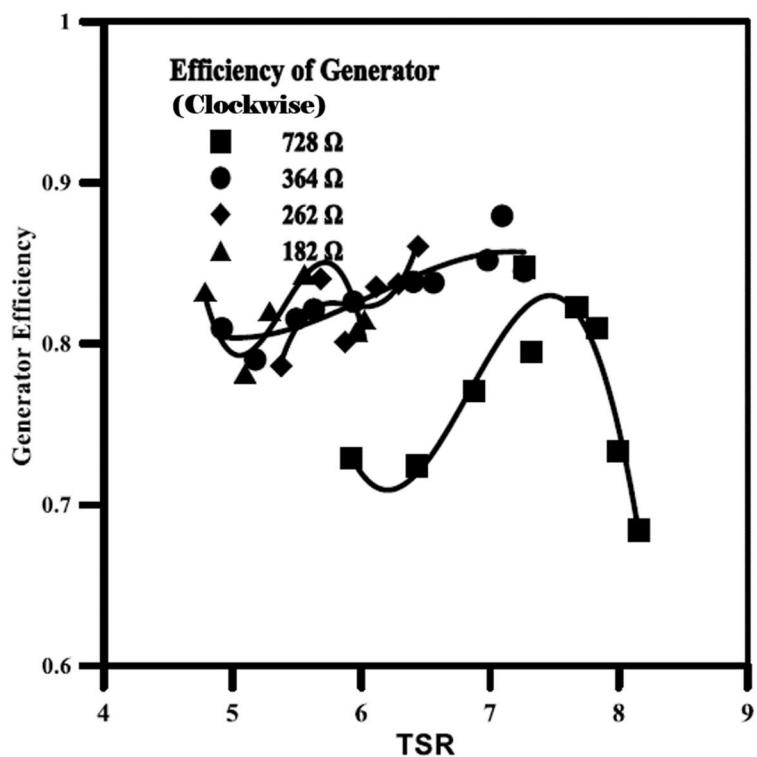


圖 2-12 發電機效率與周速比(右旋機組)

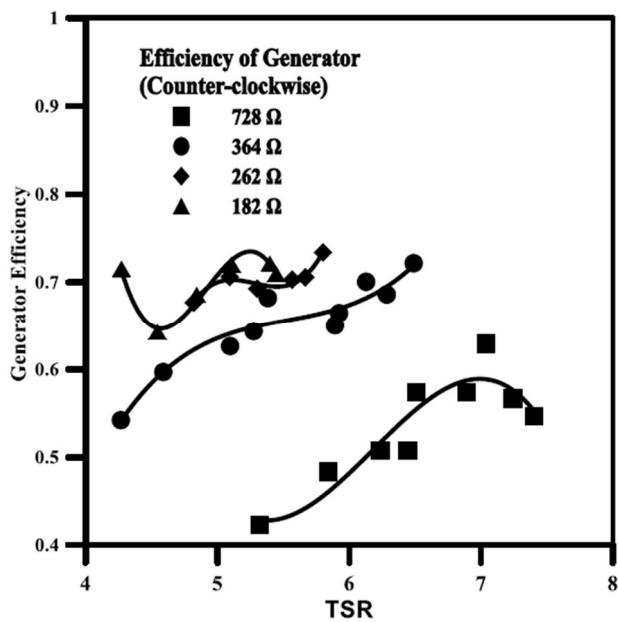


圖 2-13 發電機效率與周速比(左旋機組)

(二) 800 W洋流發電機組單邊失效之性能與姿態試驗

本實驗的條件和 800 W FKT 機組性能及姿態實驗相同，依序以 $0.6 \sim 1.5$ m/s 的拖車速度來模擬黑潮的入流速度，由發電機會產生一扭矩負荷(Q)，葉輪會依其流體動力特性轉出一對應的轉速(ω)，並產生一對應的軸向力(F_A)，800 W FKT 機組之流體動力量測系統可量測出此實驗條件下的扭矩、轉速，為模擬 800 W FKT 機組單邊失效的狀況，實驗時將單邊的葉輪鎖死進行測試如圖 2-14 所示，以驗證其狀況下性能及姿態。如前所述，當要評估黑潮發電機葉輪之性能時，會以無因次的葉尖周速比(TSR)、軸向力係數(C_A)、扭矩係數(C_Q)及功率係數(C_P)等特性係數來表示其性能，且一般會將上述特性係數以葉輪性能曲線表示，葉輪的性能曲線有功率係數與周速比曲線 ($C_P - \lambda$ Curves)、扭矩係數與周速比曲線($C_Q - \lambda$ Curves)及軸向力係數與周速比曲線($C_A - \lambda$ Curves)，右旋機組量測的扭矩、轉速及軸向力，左旋機組的量測數據及計算的性能係數將不同負載下的性能係數繪製在同一張性能曲線的圖上，並與雷諾平均納維-斯托克斯方程式的計算結果做比較，分別討論如下：

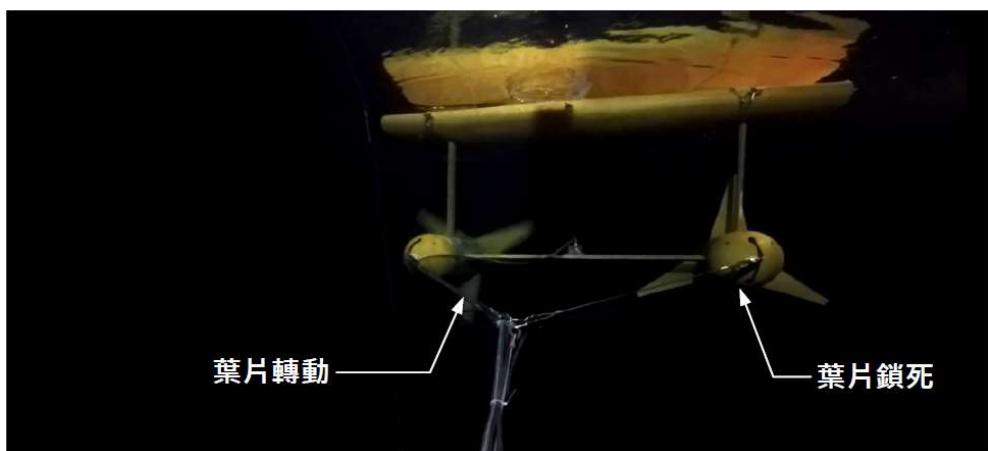


圖 2-14 單邊葉輪鎖死之水槽拖曳測試

右旋機組(左邊鎖死)

(A) 扭矩係數與周速比曲線($C_Q - \lambda$ Curves)

當左邊機組鎖死，右旋機組的扭矩係數與周速比曲線之結果如圖 2-15 所示，因流體動力量測系統中發電機的扭矩負荷(Q)能使流速條件量測到最低的 TSR 為 3.57，若再降低流速扭矩負荷會使葉輪停止旋轉而無法量測，上述原因導致本實驗無法量測到完整的性能係數。實驗數據 TSR 分布在 3.5~7.5 之間，各流速中所有扭矩係數之實驗結果和設計計算比都向左平移，實驗結果擬合線和設計計算擬合線相比差距近一單位 TSR，明顯得看到平擺會對葉輪的扭矩產生明顯的影響，使其扭矩降低，將平擺的角度反推回去可以看到數據點分布接近設計計算結果但還是略小，將進入葉輪的水流角度已非均勻流也列入考量，此結果是非常合理的。

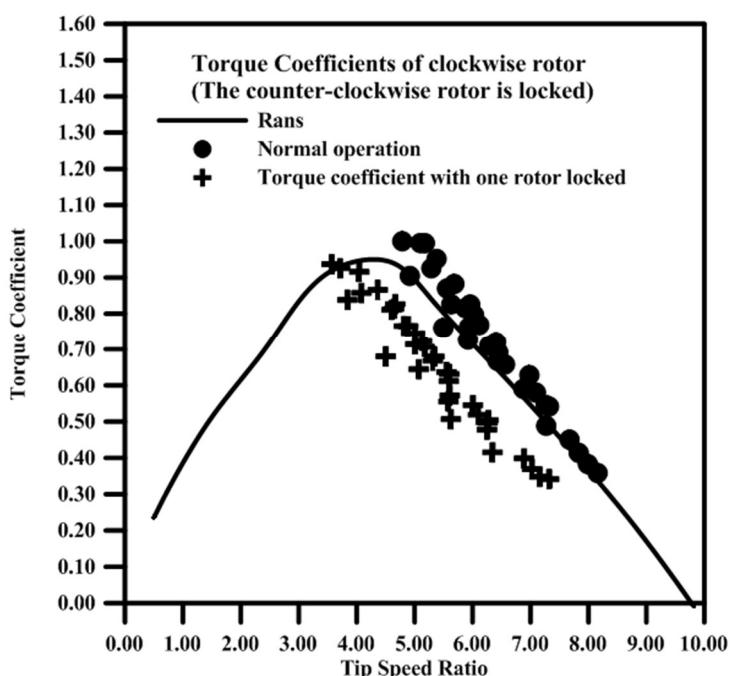


圖2-15 扭矩係數與周速比(右旋機組)

(B) 功率係數與周速比曲線($C_P - \lambda$ Curves)

當左邊機組鎖死，右旋機組的功率係數與周速比曲線之結果如圖 2-16 所示，依據扭矩係數之實驗結果算出功率係數，明顯得看到平擺會對葉輪的功率產生明顯的影響，使其效率降低約 24%，為驗證確實為平擺產生的影響，將平擺角帶入入流，結果如圖 2-17 所示。由式(2-5)可知功率係數(C_P)的算法是利用扭矩係數及葉尖速度比的乘積計算出功率係數(C_P)，此實驗中我們會量測出一扭矩(Q_{yaw})、轉速(ω)及實驗所記錄之拖車速度(U)，由式(2-10)算出 $C_{P(yaw)}$ ，如圖 2-17 之紅色數據點，

$$C_{P(yaw)} = \frac{P_{yaw}}{\frac{1}{2} \rho U^3 A} \quad (2-10)$$

由式(2-10)將入流速度考慮平擺角算出 C_p ，如圖 2-17 黑色數據點，證實功率係數下降為平擺產生的影響。

$$C_p = \frac{P_{yaw}}{\frac{1}{2} \rho (U \cos \theta)^3 A} \quad (2-11)$$

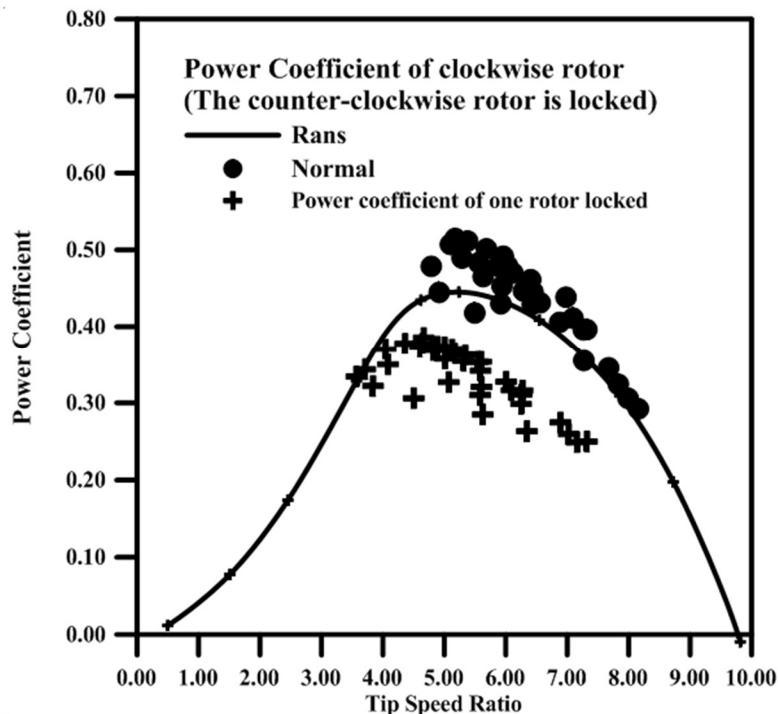


圖 2-16 功率係數與周速比(右旋機組)

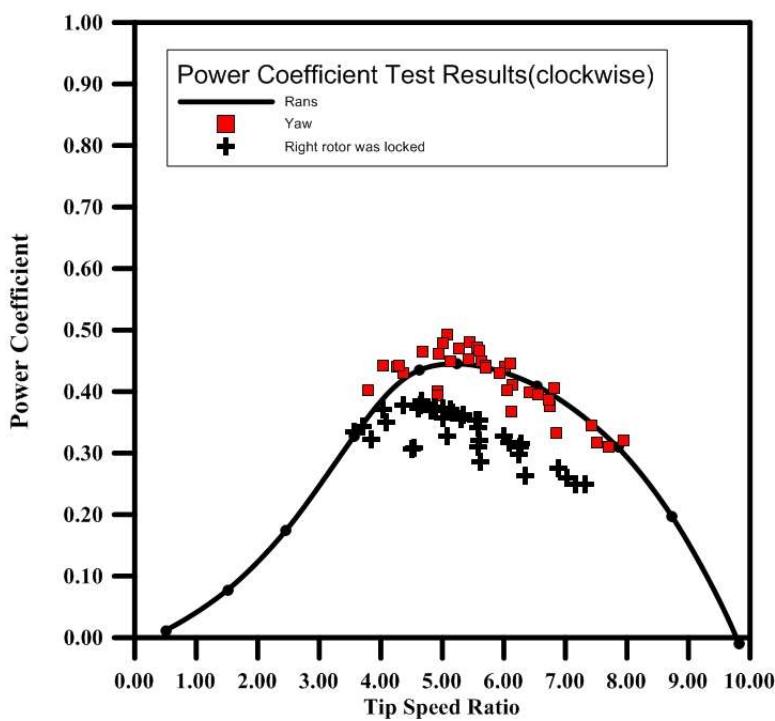


圖 2-17 功率係數與周速比(左旋機組考量平擺角)

(C) 軸向力係數與周速比曲線($C_A - \lambda$ Curves)

右旋機組的軸向力係數與周速比曲線之結果如圖 2-18 所示，亦即在各流速狀態下的 TSR 5~9 之間時，軸向力係數隨著 TSR 上升而緩慢下降，從圖可明顯看出軸向力係數實驗結果略高於設計計算，因為這是包含左旋(鎖死)機組的軸向力，故會比正常狀況下得量測結果大。

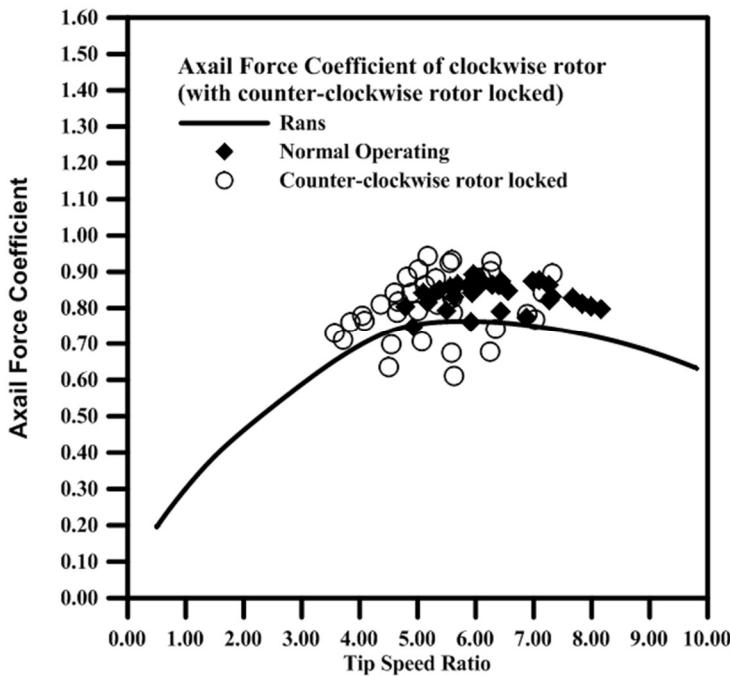


圖 2-18 軸向力係數與周速比(右旋機組)

(D) 周速比與平擺、俯仰、橫搖曲線(TSR-Yaw、Pitch、Roll Curves)

本實驗依序以 $0.6 \sim 1.5$ m/s 的拖車速度來模擬黑潮的入流速度，隨著速度的增加和發電機負載的改變，周速比與平擺、橫搖、俯仰曲線如圖 2-19 所示，平擺和預期的一樣，向著沒有轉動的那側擺過去但隨著流速的上升沒有明顯增加的趨勢，右側旋轉的狀況下平擺向左平均約 22 度，橫搖和預期的一樣，向著有轉動的那側傾斜並隨著流速的上升有明顯增加的趨勢，右側旋轉的狀況最多傾斜到約 5 度，俯仰呈現二次曲線趨勢，起初在速度不快時，受到水表面的浪影響，俯仰的角度很小，隨著速度增加俯仰角度漸漸增大，直到 1 m/s，下潛量加深角度又開始變小，但和正常狀況運轉下相比，橫搖及俯仰得差異並沒有那麼明顯，所以影響扭距係數和馬力係數的是平擺角度。

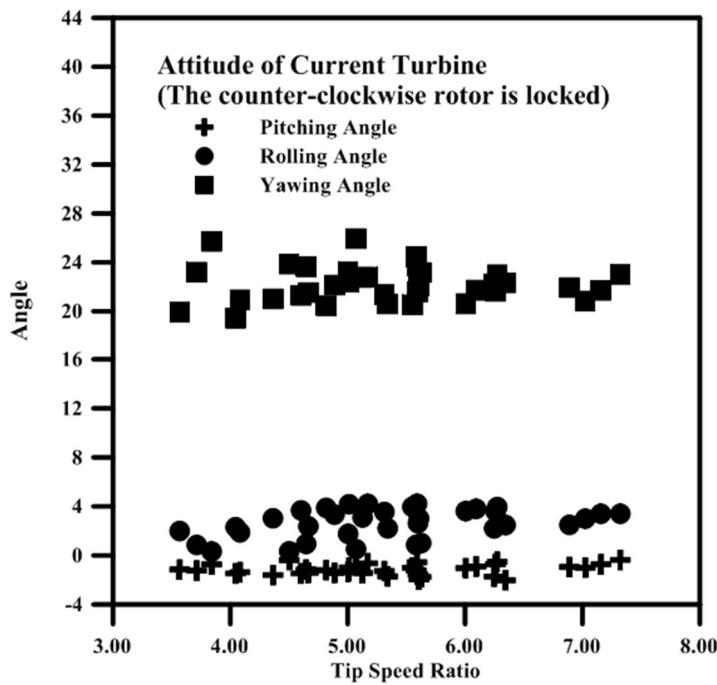


圖 2-19 角度量測結果(左邊鎖住)

(E) 發電機效率與轉數曲線($\eta - RPM$ Curves)

本實驗依序以 0.6~1.5 m/s 的拖車速度來模擬黑潮的入流速度，隨著速度的增加和發電機負載的改變，造成扭矩係數和馬力係數受影響，位於機構末端的發電機應該不受入流改變影響，所以我們繪出發電機效率與轉數曲線，實驗結果符合我們實驗的想法，實驗結果如圖 2-20 所示。

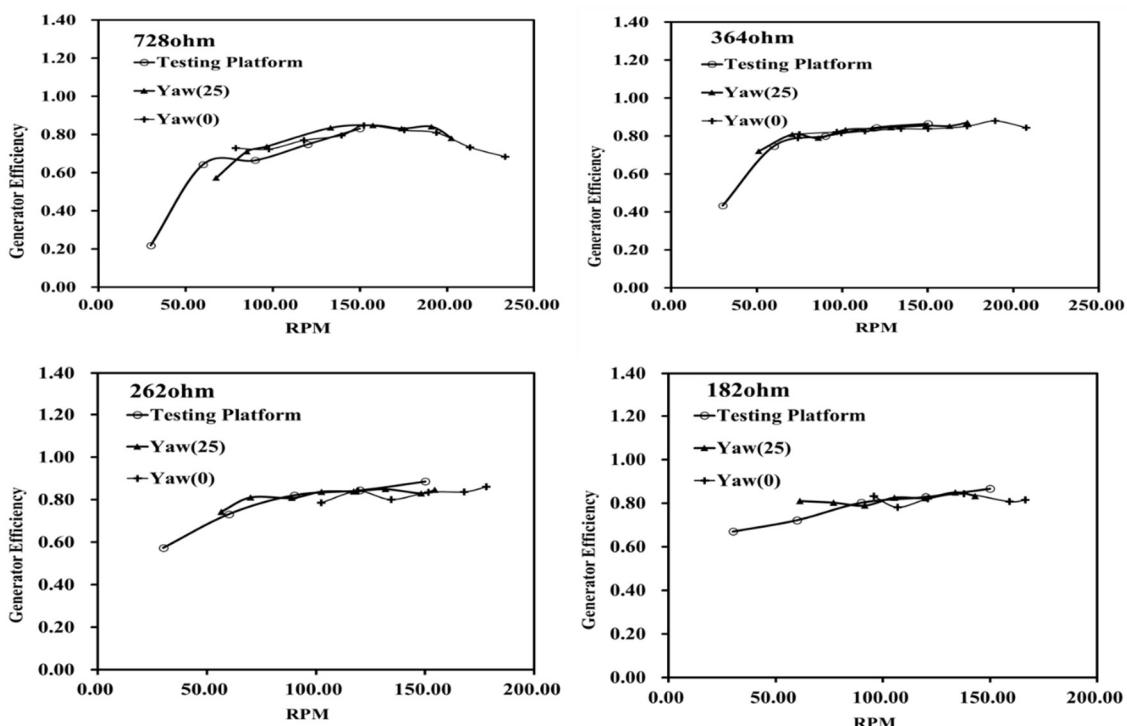


圖 2-20 發電機效率與轉數曲線

左旋機組(右邊鎖死)

(A) 扭矩係數與周速比曲線($C_Q - \lambda$ Curves)

當右邊機組鎖死，左旋機組的扭矩係數與周速比曲線之結果如圖 2-21 所示，因流體動力量測系統中發電機的負載，扭矩負荷(Q)能使流速條件量測到最低的 TSR 為 3.91，若再降低流速扭矩負荷會使葉輪停止旋轉而無法量測，上述原因導致本實驗無法量測到完整的性能係數。實驗數據 TSR 分布在 3.9~7.2 之間，各流速中所有扭矩係數之實驗結果和設計計算比都向左平移，實驗結果擬合線和設計計算擬合線相比差距近一單位 TSR，明顯得看到平擺會對葉輪的扭矩產生明顯的影響，使其扭矩降低，將平擺的角度反推回去可以看到數據點分布接近設計計算結果但還是略小，將進入葉輪的水流角度已非均勻流也列入考量，此結果是非常合理的。

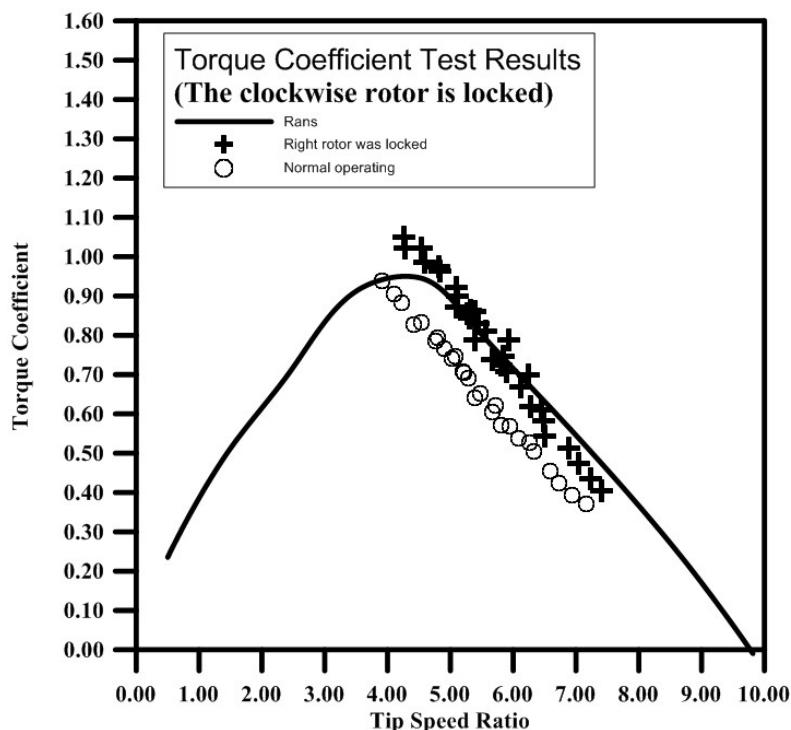


圖 2-21 扭矩係數與周速比(左旋機組)

(B) 功率係數與周速比曲線($C_P - \lambda$ Curves)

當右邊機組鎖死，左旋機組的功率係數與周速比曲線之結果如圖 2-22 所示，依據扭矩係數之實驗結果算出功率係數，明顯得看到平擺會對葉輪的功率產生明顯的影響，使其效率降低約 16 %，為驗證確實為平擺產生的影響，將平擺角帶入人流，結果如圖 2-23 所示。

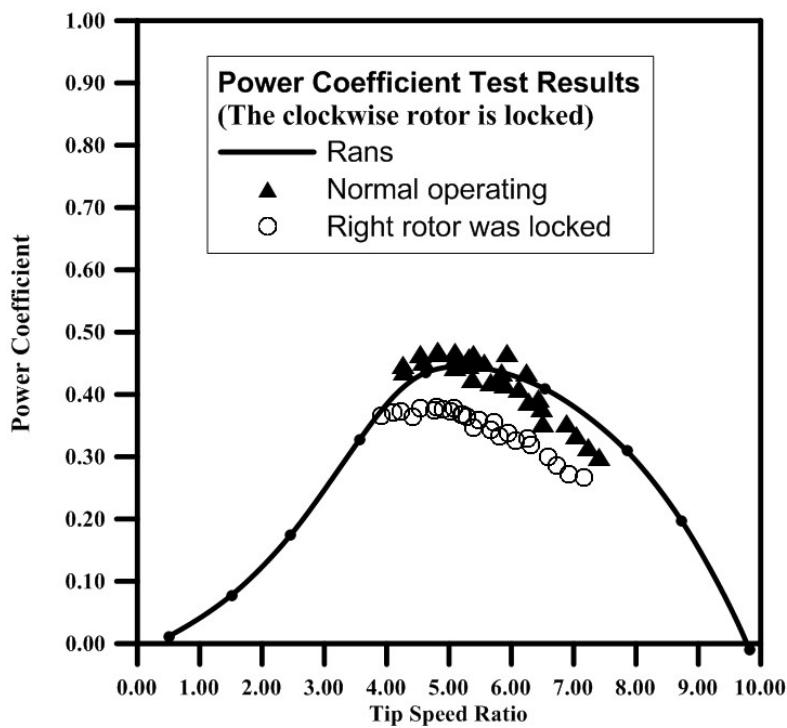


圖 2-22 功率係數與周速比(左旋機組)

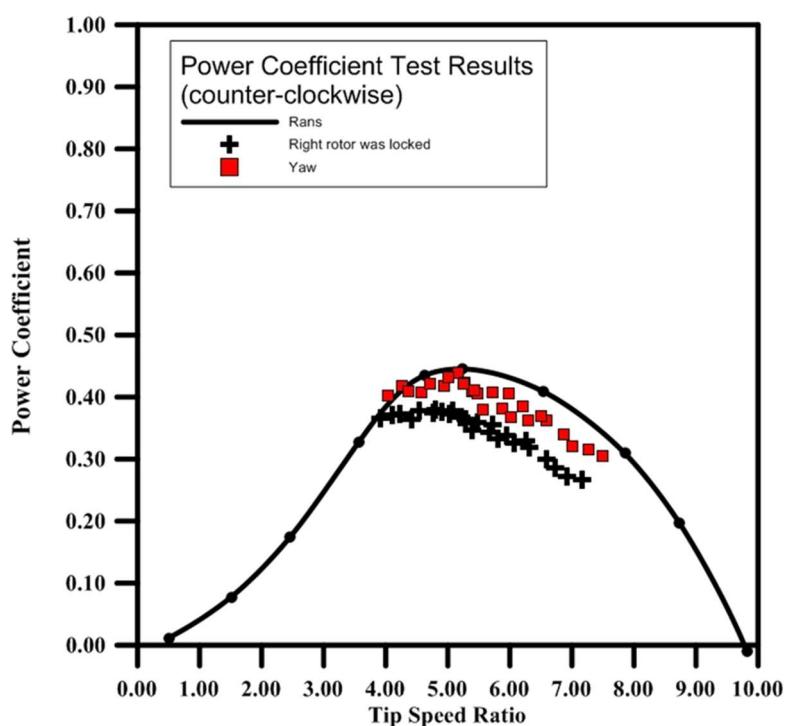


圖 2-23 功率係數與周速比(左旋機組考量平擺角)

(C) 軸向力係數與周速比曲線($C_A - \lambda$ Curves)

右旋機組的軸向力係數與周速比曲線之結果如圖 2-24 所示，亦即在各流速狀態下的 TSR 3.9~7.2 之間時，軸向力係數隨著 TSR 上升而緩慢下降，從圖可明顯看出軸向力係

數實驗結果略高於設計計算，因為這是包含左旋(鎖死)機組的軸向力，故會比正常狀況下得量測結果大，這組數據明顯比右旋機組集中，因張力計剛換新，而右旋機組是經過了一連串的浸在水中和多次實驗後量測。

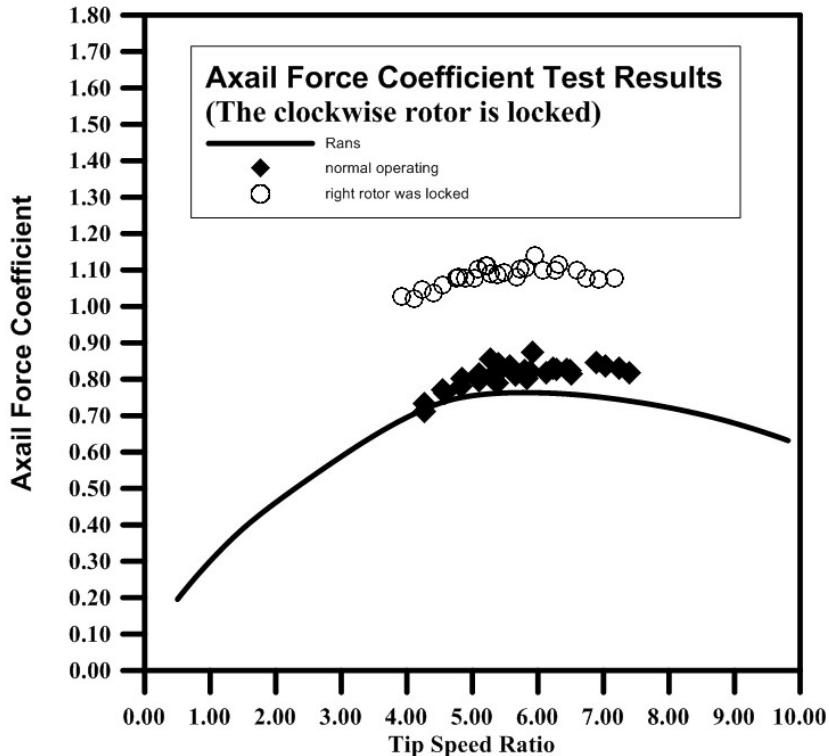


圖 2-24 軸向力係數與周速比(左旋機組)

(D) 周速比與平擺、橫搖、俯仰曲線(TSR-Yaw、Pitch、Roll Curves)

本實驗依序以 $0.9 \sim 1.5$ m/s 的拖車速度來模擬黑潮的入流速度，隨著速度的增加和發電機負載的改變，周速比與平擺、橫搖、俯仰曲線如圖 2-25 所示，平擺和預期的一樣，向著沒有轉動的那側擺過去但隨著流速的上升沒有明顯增加的趨勢，左側旋轉的狀況下平擺向右平均約 15.8 度，橫搖及俯仰得差異並沒有那麼明顯，所以影響扭矩係數和馬力係數的是平擺角，橫搖的角度約有 -7 度，橫搖和預期的一樣，向著有轉動的那側傾斜並隨著流速的上升有明顯增加的趨勢，而俯仰對於左右邊鎖死的情況，俯仰角度的差異都不大。

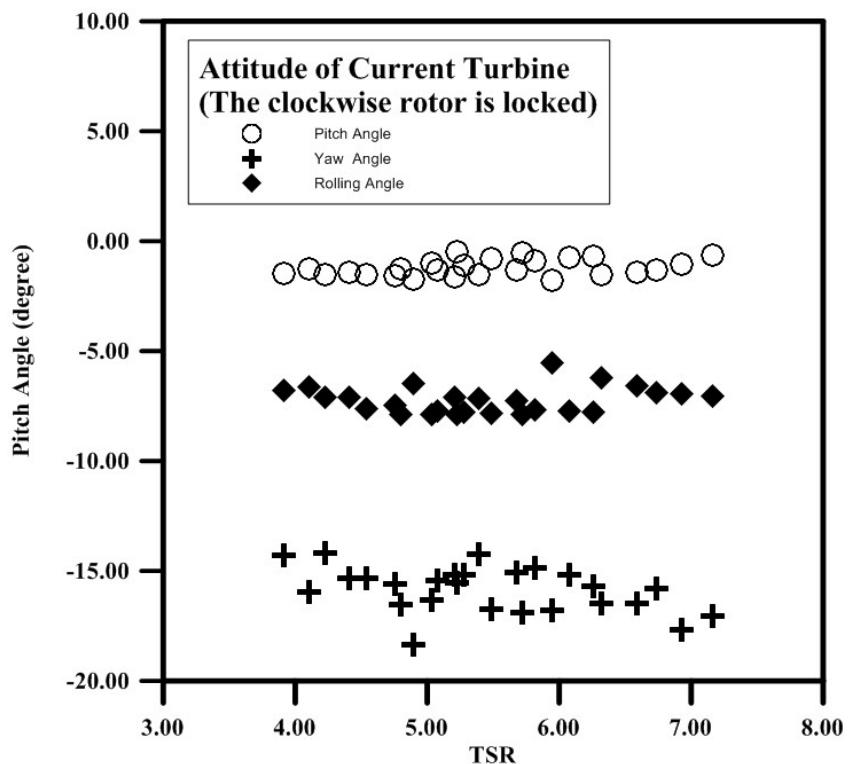


圖 2-25 角度量測結果(右邊鎖住)

(三) 800 W洋流發電機組波浪中之性能與姿態試驗

測試流速(U)以 1.45 m/s 來模擬黑潮的入流速度，而發電機的額定轉速為 150 rpm，為此 800 W FKT 機組在流體動力量測中設計額定功率的流速情況，並在發電機滿載的情況下進行實驗，固定波浪斜率下調整不同波長及波高，並考量到造波機性能所得，浪況如表 2-4 所示，由發電機給定一負載，葉輪會依其流體動力特性轉出一對應的轉速(ω)，並產生一對應的軸向力(F_A)，浮游式黑潮發電機組之流體動力量測系統可量測出此實驗條件下的扭矩、轉速，加上實驗中記錄的拖車速度(U)，以及已知的水槽水密度(ρ)和葉輪半徑(R)，可得知葉輪之性能。並量測起伏(Heave)、縱移(Surge)、俯仰(Pitch)、橫搖(Roll)，分析機組受波浪影響之運動情形。如表 2-5，八種浪況實際的情形，由圖 2-26 的資料擷取圖中，看出荷重元及線性位移計受波浪作用最明顯，以 10 秒的運動資料來做分析如圖 2-27 所示，確保儀器擺放和重心是在同一個平面上，藉由兩台線性位移計量得長度，已知三邊長，再用餘弦定理可求出角度，算出機組的位置坐標，量測方法如圖 2-28 所示，運動過程中可知線性位移計 a 邊、c 邊長度，而 b 邊已知，已知三邊根據餘弦定理式(2-12)

$$\cos A = \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc} \quad (2-12)$$

可知角 A，將 c 邊乘上 $\sin A$ 及 $\cos A$ 如式(2-13)、式(2-14)，即可求出機組座標位置，座標位置可以繪製軌跡圖，

$$s = c \times \cos A \quad (2-13)$$

$$h = c \times \sin A \quad (2-14)$$

如圖 2-29 所示，圖 2-30 為波高 6 cm 周期 3.27 s 波高計之訊號，其他浪況的訊號均類似。

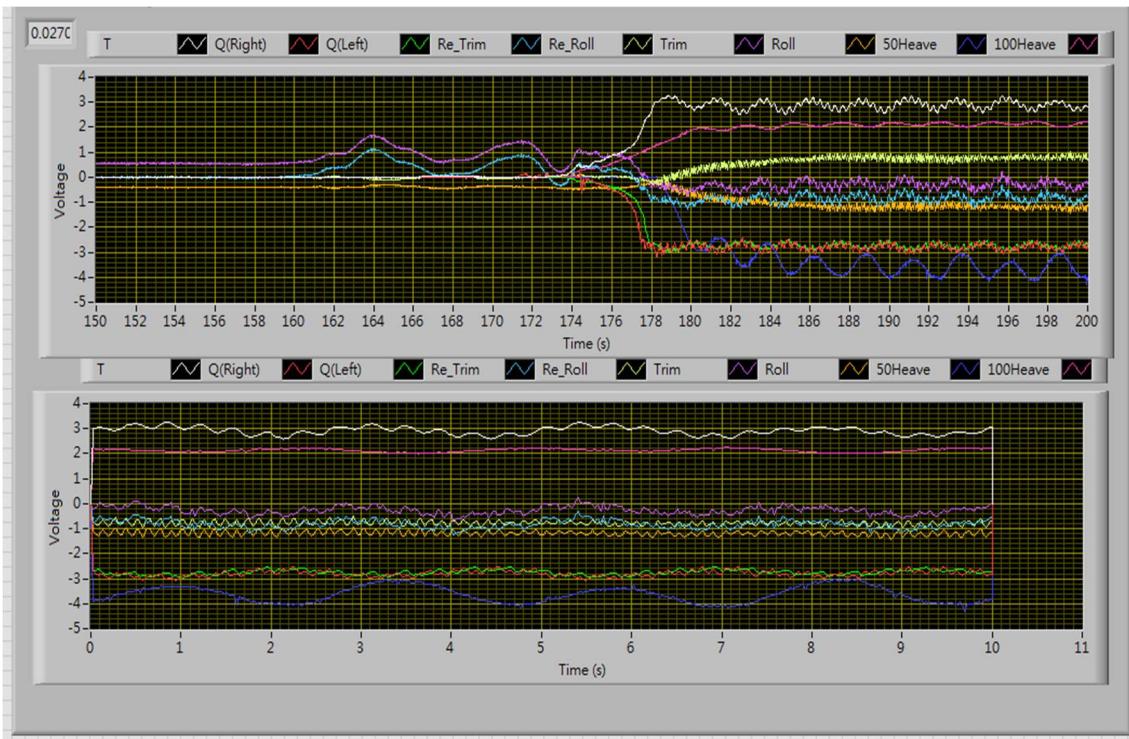


圖 2-26 波浪中資料擷取圖

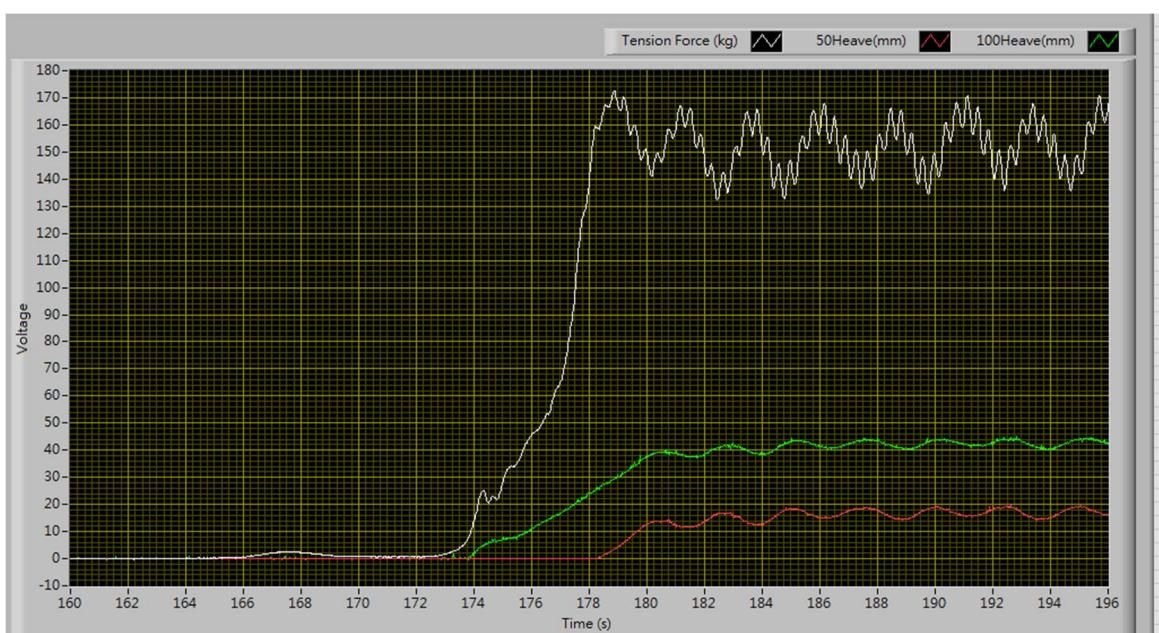


圖 2-27 受浪影響線性位移計和荷重元資料擷取圖

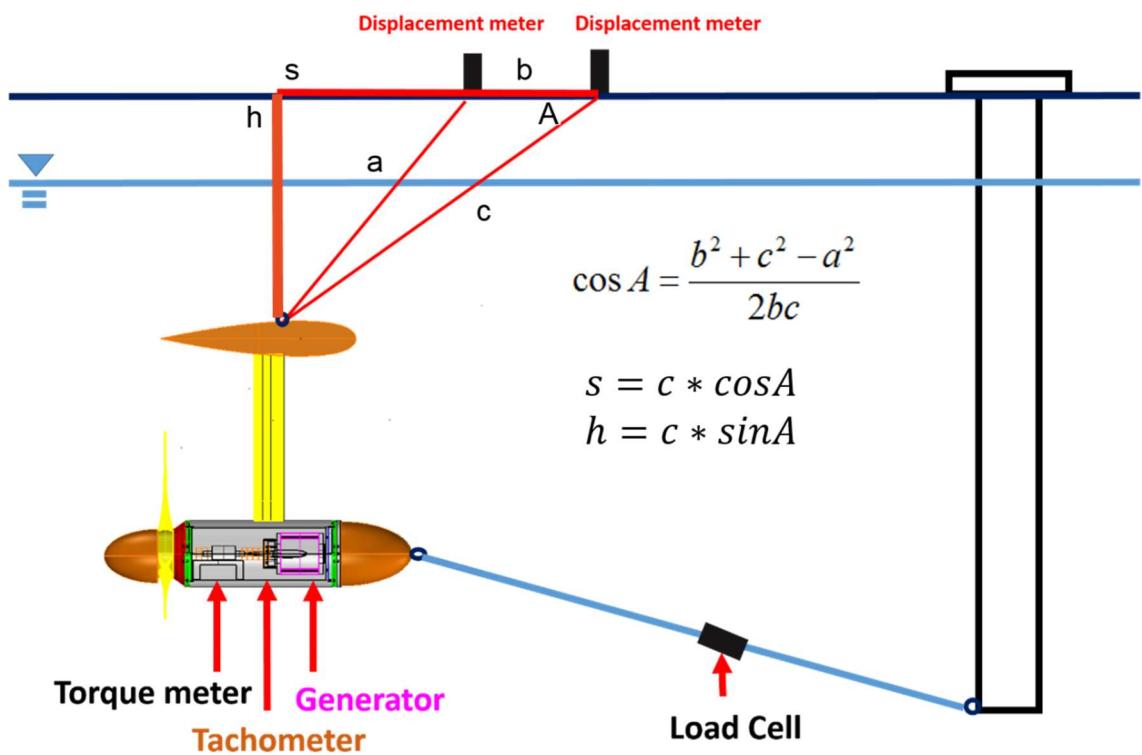


圖 2-28 線性位移計量測示意圖

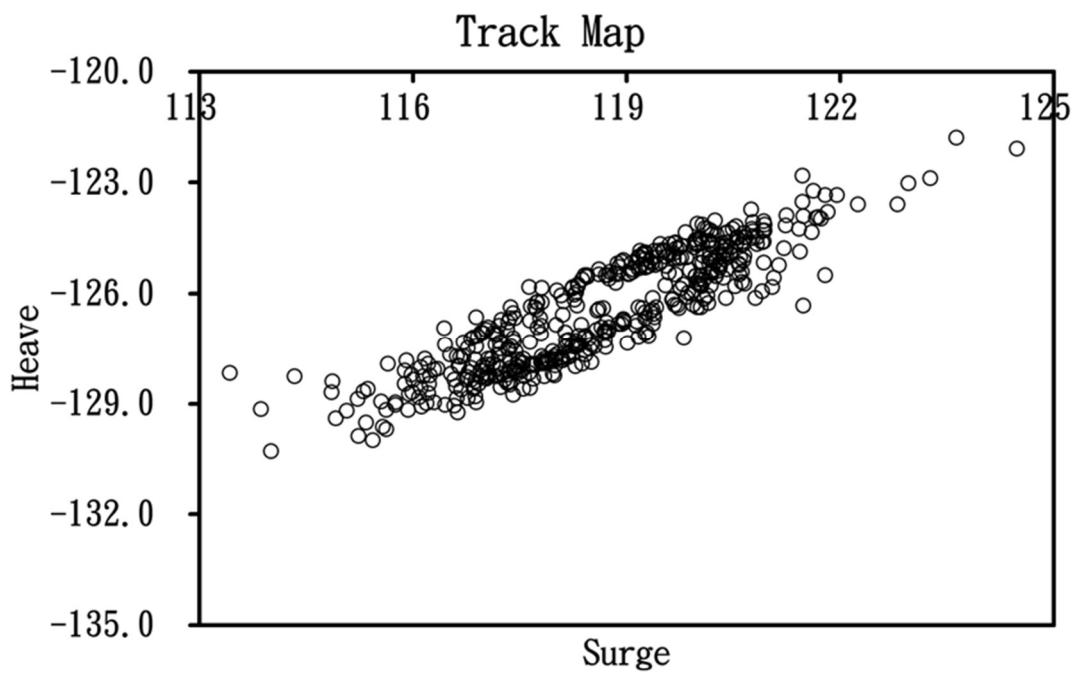


圖 2-29 波高 4.19 cm，周期 2.55 s 軌跡圖

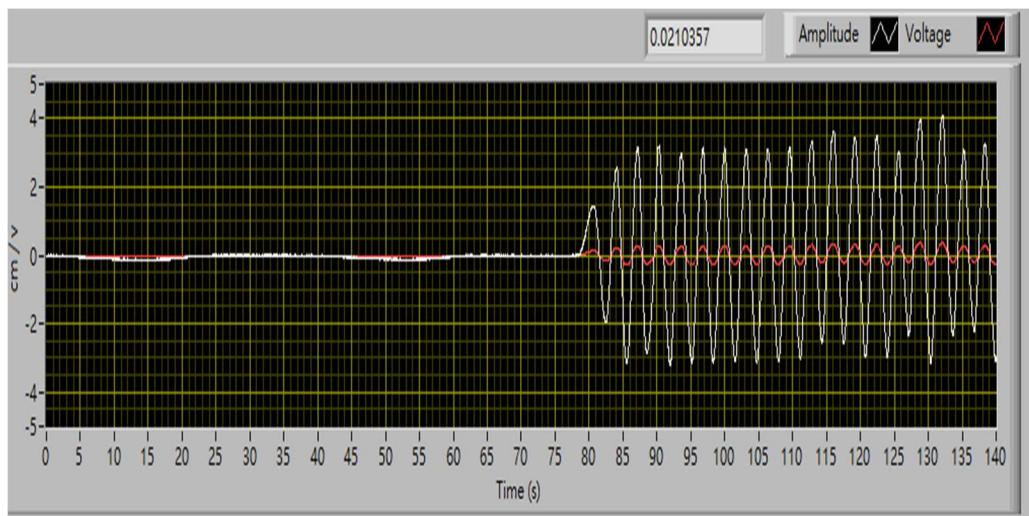


圖 2-30 波高 6 cm，周期 3.27 s 波高計之訊號

表 2-4 設定波浪條件

λ/H	40.000	40.000	40.000	40.000	40.000	40.000
λ (m)	50.000	60.000	70.000	80.000	100.000	120.000
H (m)	1.250	1.500	1.750	2.000	2.500	3.000
Hd (m)	0.250	0.300	0.350	0.400	0.500	0.600
λd (m)	10.000	12.000	14.000	16.000	20.000	24.000
Td (s)	2.532	2.774	2.996	3.203	3.581	3.922
Fd (1/s)	0.395	0.361	0.334	0.312	0.279	0.255

表 2-5 實際波浪條件

Wave Condition	f=0.312 h=6.4	f=0.334 h=5.6	f=0.361 h=4.8	f=0.395 h=4.0	f=0.312 h=5.3	f=0.334 h=4.7	f=0.361 h=4.0	f=0.395 h=3.3
Td	3.203	2.996	2.774	2.532	3.203	2.996	2.774	2.532
Fd	0.312	0.334	0.361	0.395	0.312	0.334	0.361	0.395
Hd	0.064	0.056	0.048	0.040	0.053	0.047	0.040	0.033
λd	16.000	14.000	12.000	10.000	16.000	14.000	12.000	10.000
$\lambda d/Hd$	250.0	250.0	250.0	250.0	300.0	300.0	300.0	300.0
Tm	3.291	3.024	2.801	2.553	3.270	3.051	2.839	2.533
Fm	0.304	0.337	0.331	0.392	0.306	0.328	0.352	0.395
Hm	0.066	0.060	0.053	0.042	0.060	0.049	0.044	0.033
λm	16.891	14.263	12.237	10.165	16.677	14.523	12.575	10.011
$\lambda m/Hm$	255.738	238.555	231.427	242.564	278.305	294.513	288.708	307.133

(A) 波浪與張力時序圖(Time-Force Curves)

八種浪況下，張力曲線具有不同的振幅，基本上波高越高會造成越大的張力振幅，在 6.6 cm 波高下張力振幅達到 18 kg，而在 3.2 cm 波高下張力振幅達到 11 kg，但平均出來張力的大小差異不大，其中大振幅中還有小振幅，小振幅的頻率約為 2.5-2.6 Hz，轉子轉動的轉速是 155 rpm 頻率為 2.58，其頻率和小振幅波相同，故張力時序圖中的振幅波為波浪造成之波和轉子震動波的疊加，八種浪況的實驗結果，如圖 2-31 至圖 2-38 所示，造波機打出之浪況頻率和傅立葉級數擬合後的頻率不同，其是受都普勒效應，計算後的遭遇波浪頻率符合複利葉級數擬合後的頻率，遭遇波浪頻率的公式如式(2-15)

$$\omega_e = \frac{U\omega^2}{g} \cos \mu + \omega \quad (2-15)$$

其中 ω_e 為遭遇頻率， ω 為頻率， U 為拖車速度， g 為重力加速度， μ 為聲源波源的夾角。遭遇波浪頻率如表 2-6 所示。波長張力振幅圖在相同波長下波高越大張力振幅越大實驗結果如圖 2-39 所示，而在相同波長下，波高較高對張力振幅影響也相對較大，為了探討波高與振幅關係，將振幅做無因次化，波長也針對轉子做無因次化，結果如圖 2-40 所示，無因次化後看到趨勢略為向下，應是拖曳直柱產生的波造成影響，使其前後波浪對翼型福體產生的壓力不均。

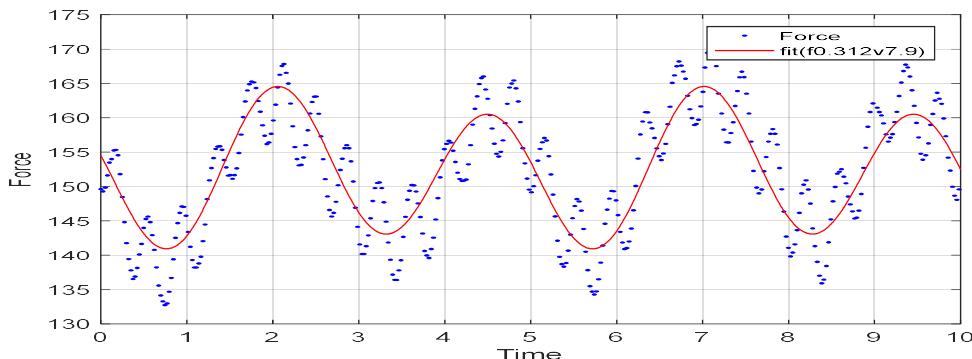


圖 2-31 波高 6.60 cm，周期 3.29 s 張力時序圖

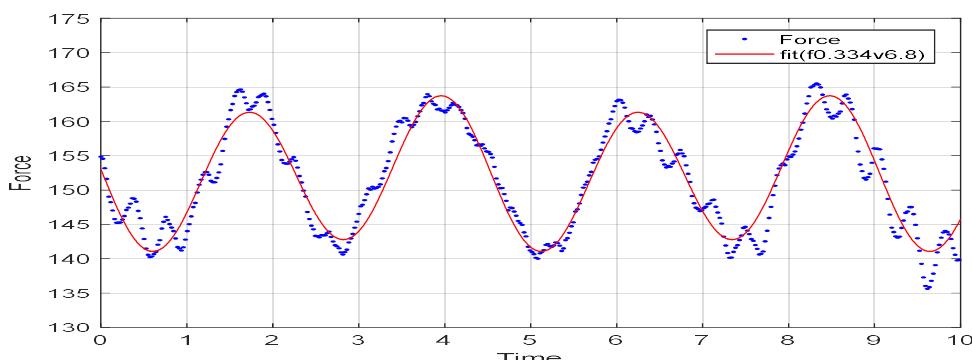


圖 2-32 波高 6.26 cm，周期 2.96 s 張力時序圖

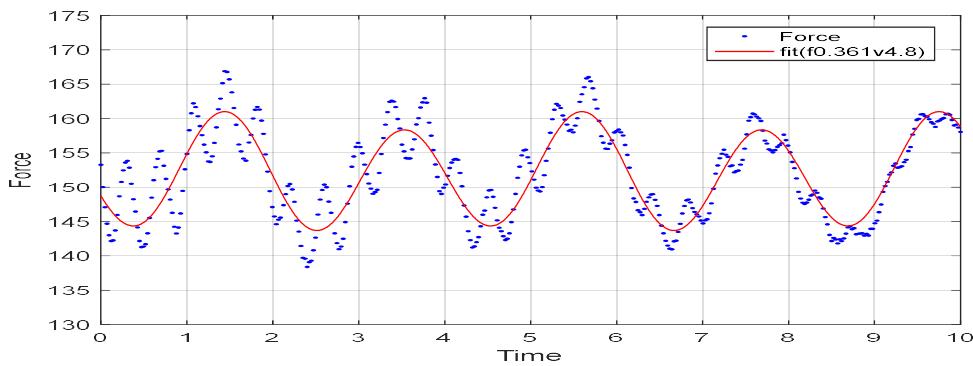


圖 2-33 波高 5.29 cm，周期 2.80 s 張力時序圖

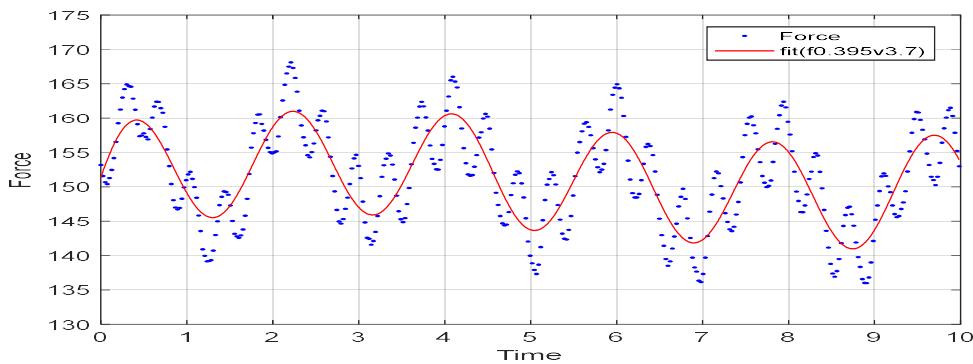


圖 2-34 波高 4.19 cm，周期 2.55 s 張力時序圖

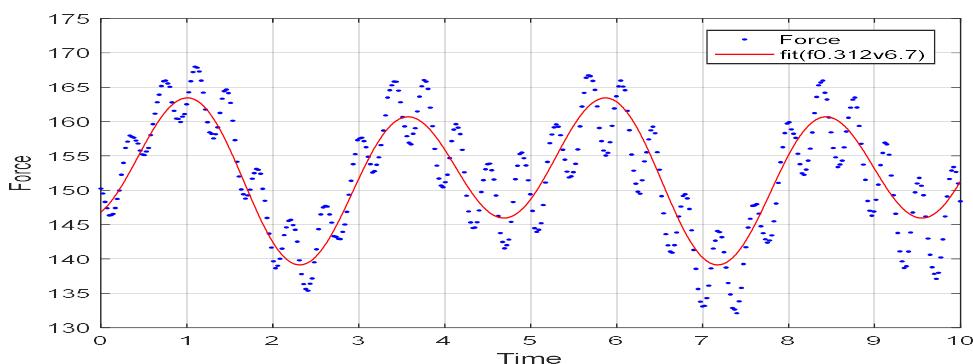


圖 2-35 波高 6.00 cm，周期 3.27 s 張力時序圖

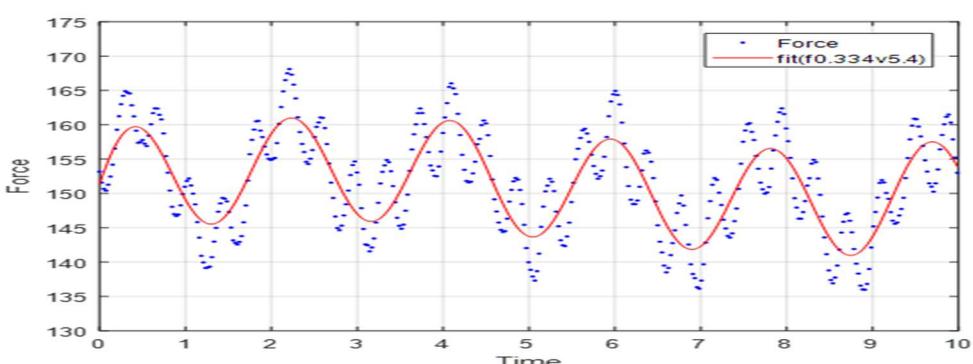


圖 2-36 波高 4.85 cm，周期 3.05 s 張力時序圖

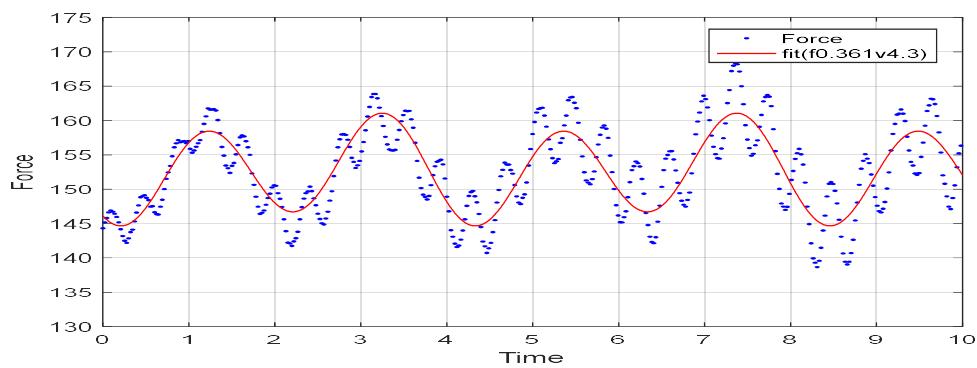


圖 2-37 波高 4.36 cm，周期 2.86 s 張力時序圖

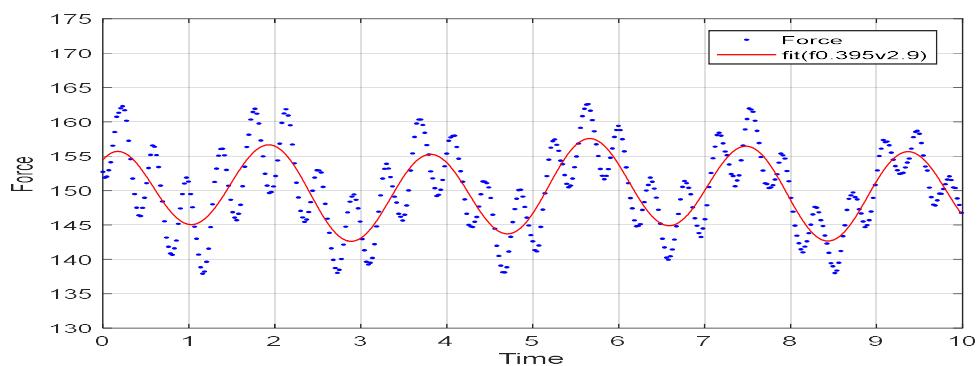


圖 2-38 波高 3.25 cm，周期 2.53 s 張力時序圖

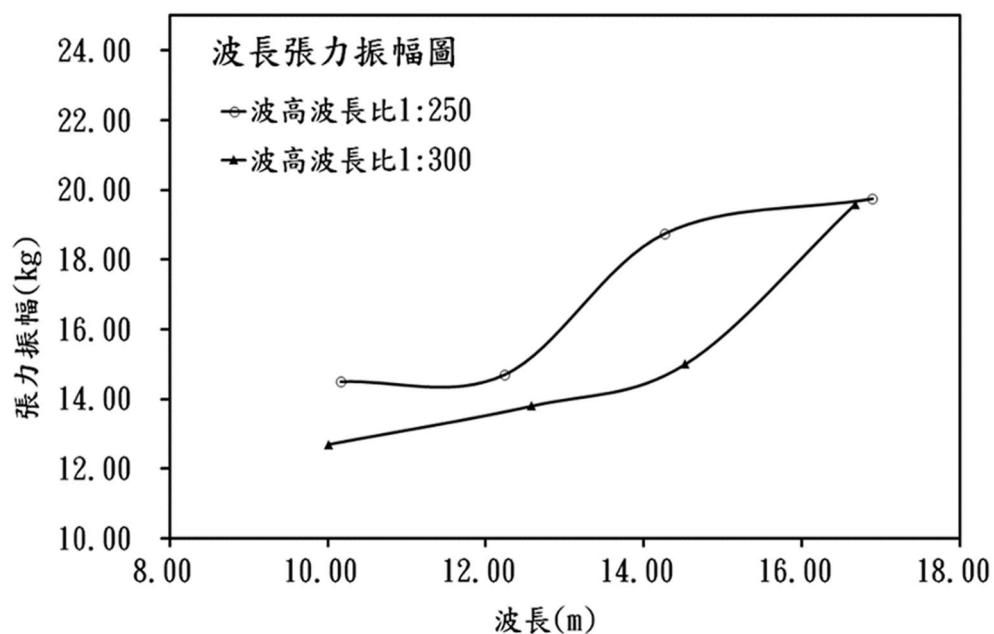


圖 2-39 波長張力振幅圖

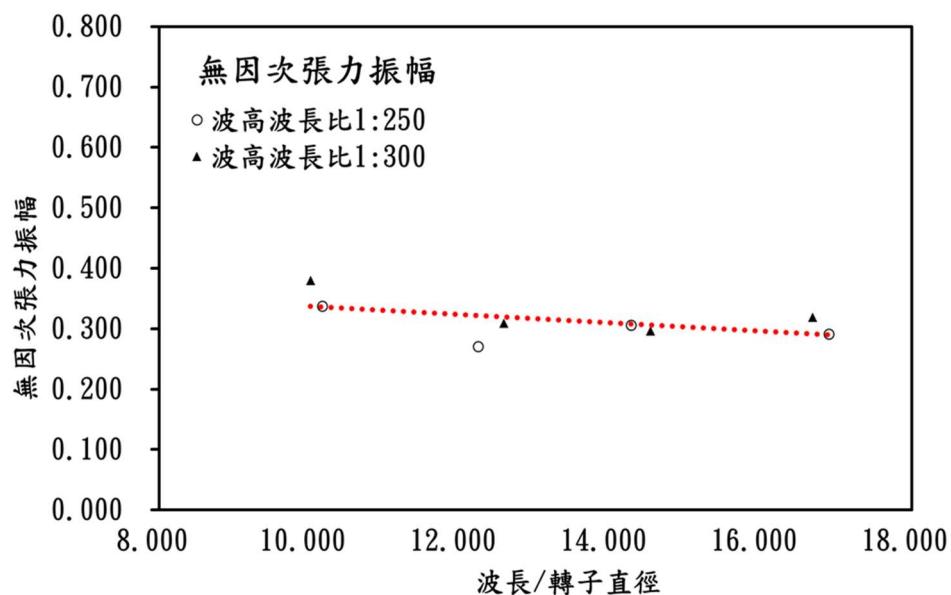


圖 2-40 無因次張力振幅

表 2-6 張力時序圖擬合參數

$f(x) = a_0 + a_1 \cos(x \cdot w) + b_1 \sin(x \cdot w) + a_2 \cos(2x \cdot w) + b_2 \sin(2x \cdot w)$									
force	a0	a1	b1	a2	b2	w	wf	we(cal.)	we(test)
f0.312v7.9	151.900	-1.493	2.004	-7.095	-7.235	1.263	1.960	2.509	2.526
f0.334v6.8	151.100	-3.442	-0.844	-7.352	-5.307	1.281	2.099	2.727	2.562
f0.312v6.7	150.900	-2.088	3.354	3.413	8.657	1.279	1.960	2.509	2.558
f0.334v5.4	150.000	1.472	-0.683	3.679	7.268	1.385	2.099	2.727	2.770
f0.361v4.8	151.900	-0.515	1.280	-2.709	-7.321	1.511	2.268	3.002	3.022
f0.361v4.3	152.700	-0.620	-1.537	-5.970	-3.661	1.524	2.268	3.002	3.048
f0.395v3.7	151.300	2.170	7.497	-0.095	0.034	3.379	2.482	3.361	3.379
f0.395v2.9	150.200	-0.224	0.158	-6.238	-0.707	1.700	2.482	3.361	3.400

(B) 縱移(Surge)及無因次縱移曲線

固定波浪斜率調整不同波長及波高，實驗結果如圖 2-41 所示，在相同波長下波高越大軸向位移越大實驗結果如圖 2-42 所示，而在相同波長下，波高較高對軸向位移振幅影響也相對較大，為了探討波高與振幅關係，將振幅對波高做無因次化，波長也針對翼型弦長做無因次化，結果如圖 2-43 所示，無因次化後看到趨勢略為向下，應是拖曳直柱產生的波造成影響，使其前後波浪對翼型福體產生的壓力不均。

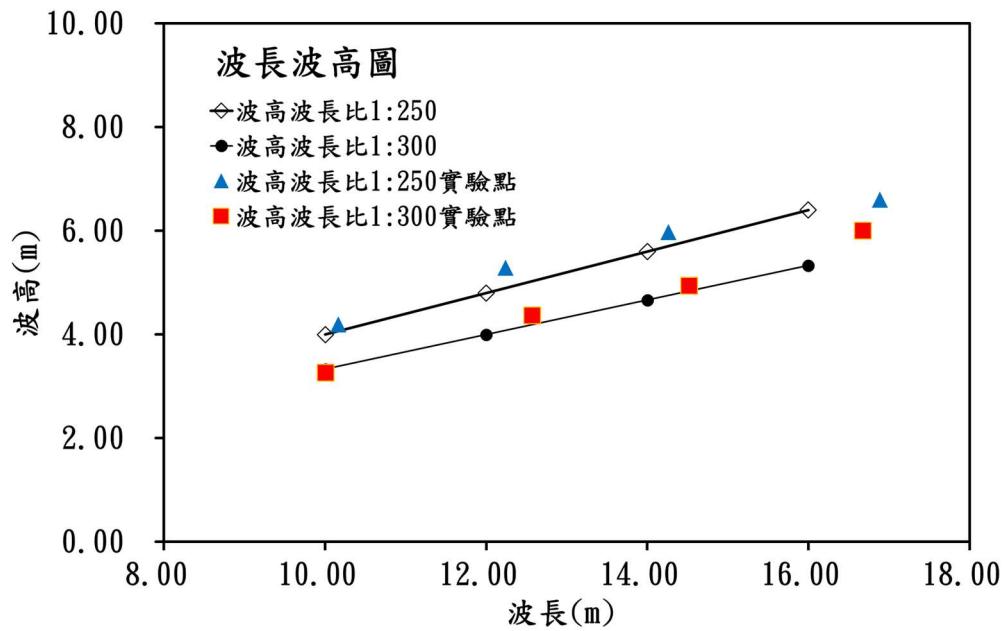


圖 2-41 固定波高波長比實驗圖

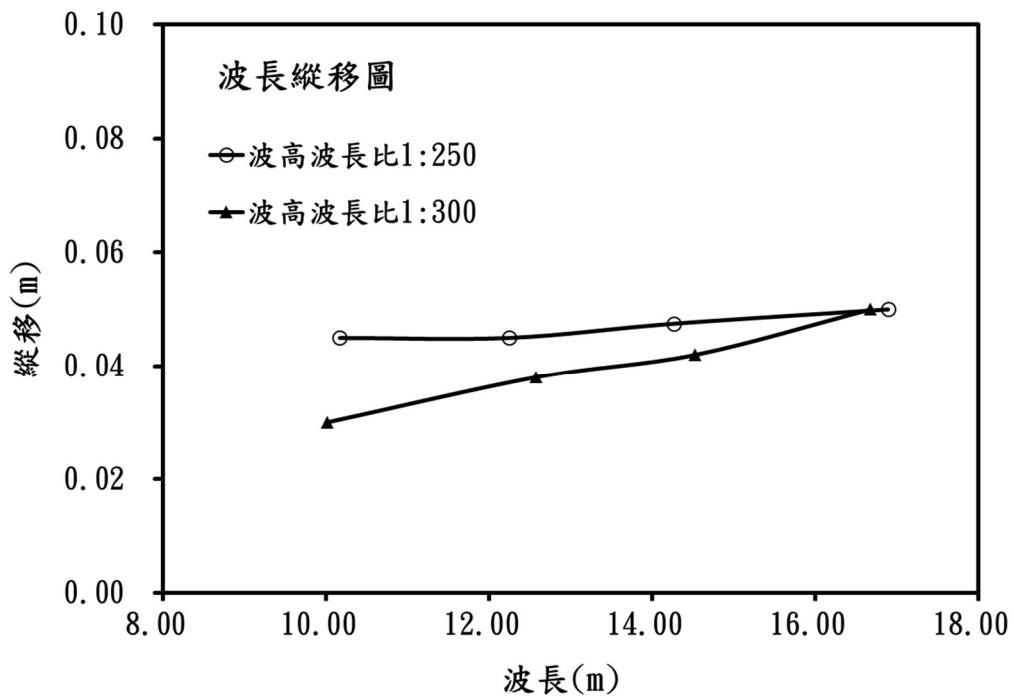


圖 2-42 波長與縱移(Surge)圖

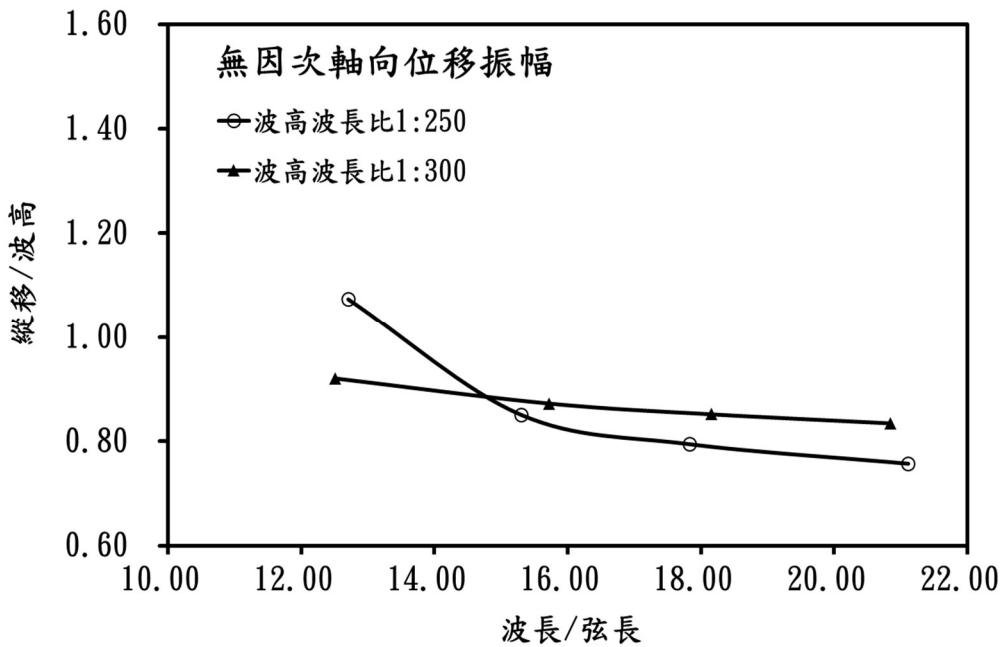


圖 2-43 無因次縱移曲線

(C) 起伏(Heave)及無因次起伏曲線

在相同波長下波高越大垂向位移越大實驗結果如圖 2-44 所示，而在相同波長下，波高較高對垂向位移振幅影響也相對較大，為了探討波高與振幅關係，將振幅對波高做無因次化，波長也針對翼型弦長做無因次化，結果如圖 2-45 所示，當波高波長比很大時，機組似質點運動，無因次起伏曲線值應為 1 的常數，實驗結果顯示，其值相當接近 1，其誤差可能來自阻尼。

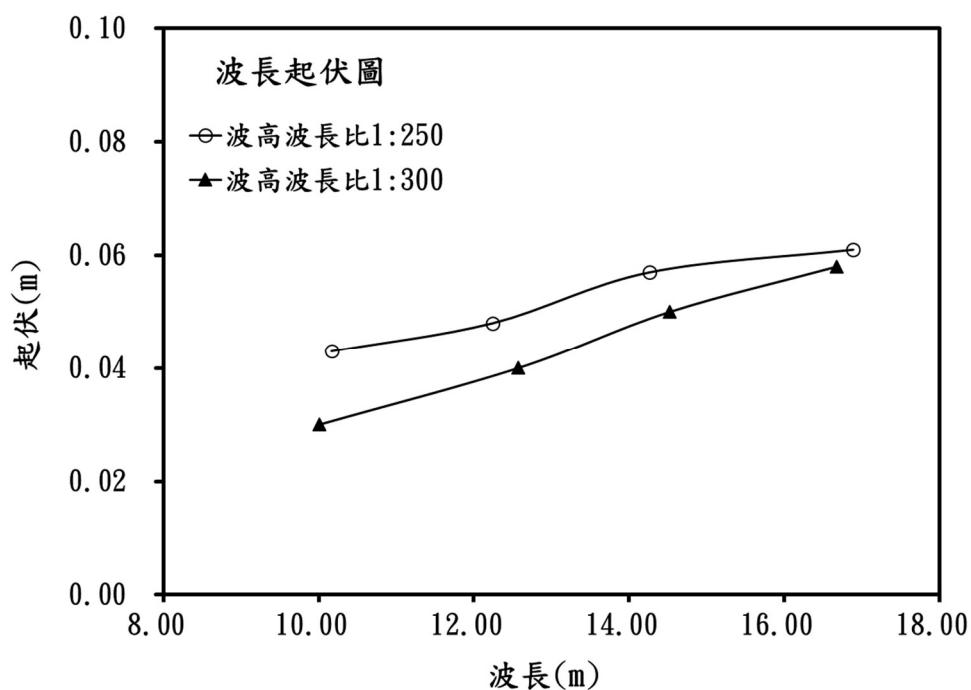


圖 2-44 波長與起伏(Heave)圖

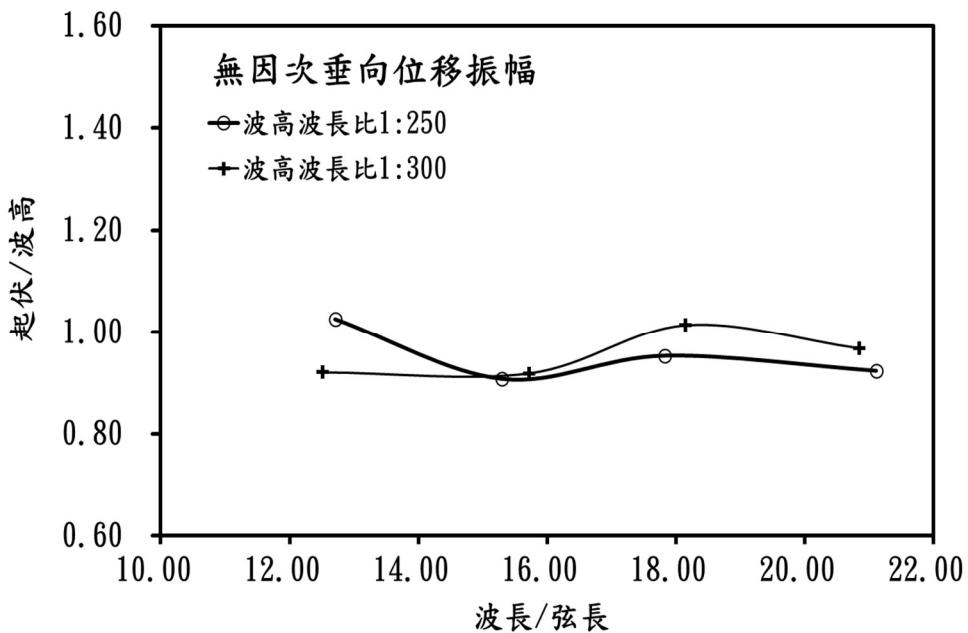


圖 2-45 無因次起伏曲線

(四) 小結

本研究建立商用型浮游式黑潮發電黑潮發電機 1/25 縮尺模型，其容量為 800 W，並設計流體動力量測系統，在拖曳水槽分別進行 800 W FKT 機組性能及姿態實驗、800 W FKT 機組單邊失效性能及姿態實驗、800 W FKT 機組波浪中性能及姿態實驗，並進行後續的實驗分析，實驗結果綜之結論如下：

- (A) 本研究完成 800 W FKT 機組模型流體動力量測系統的建置，並完成浮游式黑潮發電機機組性能及姿態量測。
- (B) 由 800 W FKT 機組性能實驗結果與雷諾平均納維-斯托克斯方程式計算結果比較可知，在 0.6-1.5 m/s 的模擬入流下，右旋及左旋機組的功率係數(C_p)、扭矩係數(C_Q)及軸向力係數(C_A)的實驗結果皆與設計計算值吻合，此葉輪的最高功率係數都在 0.45 以上，而兩邊發電機得效率明顯有差距，總體發電效率最高達 0.3 以上。
- (C) 由 800 W FKT 機組姿態實驗結果可知，在 0.6-1.5 m/s 的模擬入流，下潛深度和流速成正比，速度越快下潛深度越深，所產生之纜繩角度也越小，橫搖並沒有明顯的趨勢，隨著速度的增加，俯仰的角度稍微變小，其中俯仰在負載 728 Ω、364 Ω 時趨勢相同，在負載 262 Ω、182 Ω 時，中間有不自然前傾。
- (D) 由 800 W FKT 機組單邊失效性能實驗，結果與雷諾時均法(RANS)計算結果比較可知，在 0.6-1.5 m/s 的模擬入流下，右旋及左旋機組的功率係數及扭矩係數的實驗結果皆比設計計算值小，明顯得看到平擺角會對葉輪的扭矩產生明顯的影響，使其扭矩降低效率變差。

- (E) 由800 W FKT機組單邊失效姿態實驗結果可知，在0.6~1.5 m/s的模擬入流，平擺並沒有因為速度的增加而改變，右旋的狀況下平擺向左平均約22度，左旋的狀況下平擺向右平均約16度，橫搖隨著速度的上升向著有轉動的那側傾斜，有增加的趨勢，俯仰的角度則變化很小。
- (F) 由800 W FKT機組波浪中性能及姿態實驗可知，波浪對機組運動的影響，會產生起伏(Heave)與縱移(Surge)，此外也量測機組的運動軌跡和纜繩受力情形。
- (G) 不同浪況具有不同的振幅，張力振幅，起伏、縱移在相同波長下波高越大振幅越大，而在相同波長下，波高較高振幅也較大，起伏振幅大小比縱移略大。

第二節 10 kW洋流發電機實海拖曳試驗

本計畫團隊自2015年起進行浮游式洋流發電渦輪機模組FKT關鍵技術式發電機艙與轉子葉片，FKT設計由繫纜錨碇於海床並長時間浮游於水層中運作，當遭遇劇烈天氣時，可透過翼型體浮力調節的功能下沉至較深水層，以避開風浪可能對FKT所造成之破壞(如圖1-9所示)，其中800 W機型(1/25縮尺)已於2017年完成水槽技術驗證與展示(如圖1-10與圖1-11所示)，且於2018年起開始進行20 kW之FKT(1/5縮尺)研發工作，最終目標引導產業朝向0.5 MW之商用機組發展，並進行數十MW級示範電廠開發與建置。本計畫團隊在國家海洋研究院的經費支持下，已於2020年度完成10 kW單轉子之FKT設計、製作與實海拖曳測試等工作，10 kW FKT之設計圖與完成實體如圖2-71所示。後續研發之20 kW發電機組將以現有系統為基礎增加另一組發電機，20 kW機組之構型與800 W水槽試驗模式之構型相同，其中前述各模型之FKT規格已於表2-1中進行比較。此外，10 kW FKT之效能亦於實海域拖曳完成驗證，本計畫團隊利用研究船於水面拖曳FKT，並透過安裝於船上的負載箱給予發電渦輪機10 kW負載(其對應電阻值約為 $15.87\ \Omega$)，同時量測轉子葉片在不同轉速下之發電效率是否滿足設計需求，另外因1/5縮尺FKT之工作水深至少需達水下50 m，因此在執行實海拖曳測試的同時也完成了FKT防水機艙之耐壓測試。以下將針對10 kW FKT之設計細節、測試過程與結果進行解說。

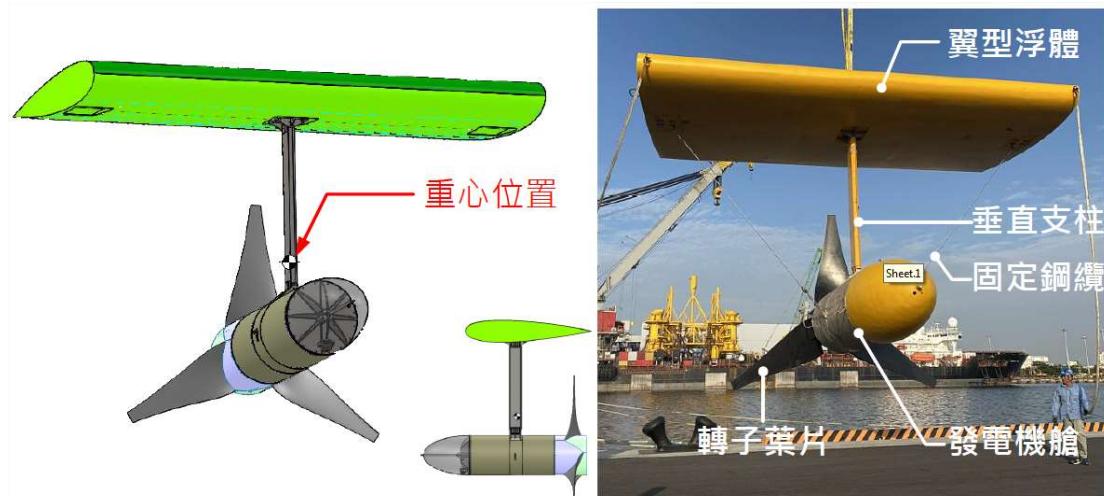


圖2-71 10 kW FKT實體

一、10 kW FKT 設計與製作

10 kW FKT之發電機機艙由前後兩組SUS 304不鏽鋼所組成，並分別以艙蓋進行密封(如圖2-72所示)，由於1/5縮尺之FKT設計工作水深位於10 m至50 m之間，因此機艙與前後艙蓋須可承受至少6 bar的外部壓力，以確保FKT可正常運作，考量機組整體重量之限制與耐壓條件後，機艙壁厚設計為10 mm，根據Solidworks模擬結果，兩組機艙與兩個艙蓋分別皆可達到11 bar與9 bar的耐壓效果(安全係數>2)，可滿足10 kW FKT於實海域之工作需求。此外，10 kW FKT機艙透過垂直支柱與上方翼型浮體連結，為求FKT整體結構之安全，除垂直

支柱採用兩組工字樑併列組裝外，機艙兩側亦採用線徑16 mm之不鏽鋼纜進行補強(如圖2-71所示)，同時亦於垂直支柱上下兩端進行結構強化，以防止FKT在水中拖曳過程中因轉矩過大導致垂直支柱受損。另外為使機艙外型平整化，故於機艙外部黏貼一層可額外提供約400 kg浮力之浮材，最後機艙外部利用玻璃纖維FRP包覆，以維持機艙外部造型平整化，避免不穩定的入流影響FKT於水中的發電效能，組裝完成之機艙如圖2-73所示。

機艙內部主要零組件包含10 kW永磁同步發電機、傳動系統、扭力計、相關感測零組件與FRP葉片等，其中葉片設計於額定入流速度為1.5 m/s時，發電機轉速可達30 rpm，同時也產生10 kW的輸出功率，另外考量平均流速(設1.5 m/s)、軸向力係數與葉片掃掠面積後，可計算出葉片推力約為2,027 kg，故傳動系統採用兩組滾錐軸承以協助支撐轉軸之軸向與徑向荷載，滾錐軸承之動態荷載達17,600 kg，可滿足葉片轉動所造成推力之荷載所需。此外，由於懸掛於機艙外部的三個葉片與轉子之總重約為520 kg，故轉軸採630不鏽鋼材料製作，並以H1150之熱處理與表面鍍硬鉻方式強化轉軸強度並維持其耐用性，其中10 kW FKT傳動系統之內部設計與組裝完成實體如圖2-74所示。

經計算發電機艙相關零組件於水中重量約3,933 kg，為使FKT在無外力作用下其翼面仍可浮於水面，故翼型浮體扣除自體所需浮力外仍須額外提供4,000 kg之浮力，以滿足10 kW FKT實海拖曳測試所需。翼型浮體外部蒙皮與蓋板皆由FRP製成，內部包覆高壓浮材，其中浮材之抗壓能力超出FKT最大工作水深，因此FKT在潛深至水下50 m處，浮材之體積不受水壓影響而導致浮力變化，另外為增強翼型浮體的結構安全，浮體中心設計一H型鋼為骨幹(如圖2-75所示)，其用途除可強化浮體結構外，亦為FKT整體吊掛施力點以及翼型浮體與垂直支柱連接之媒介。由於未來20 kW機型將與10 kW共用翼型浮體，且20 kW機型預計將具備自動調整FKT工作水深之能力，故在H型鋼前後各預留空間以供安裝浮力控制模組，而預留空間頂部則由兩個FRP蓋板封蓋，保持上層翼面之平順。

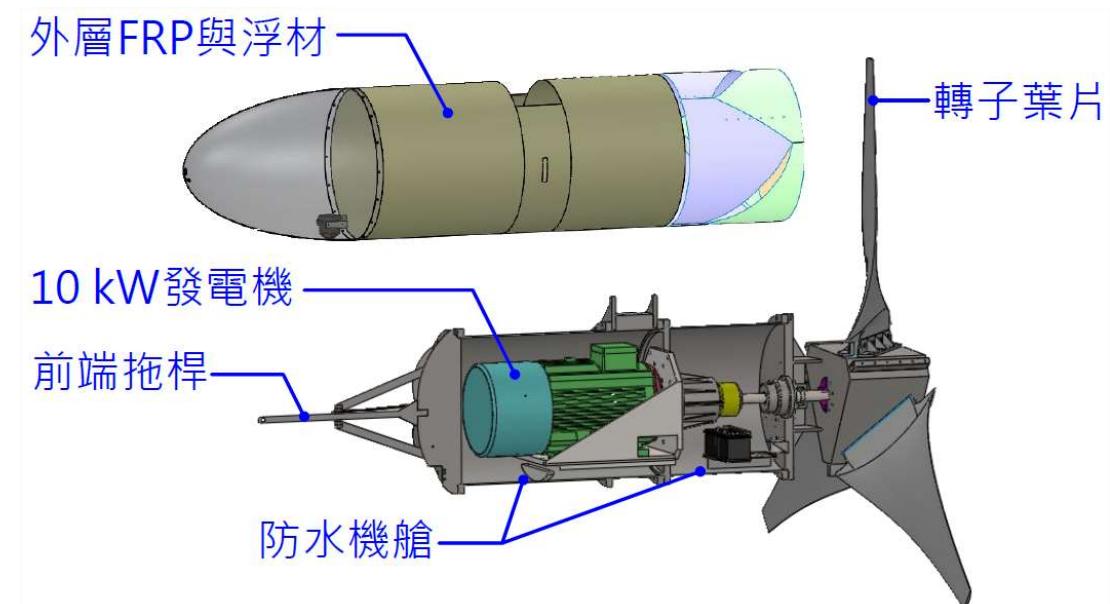


圖2-72 10 kW FKT防水機艙設計剖視圖



圖2-73 10 kW FKT防水機艙完成組裝之實體

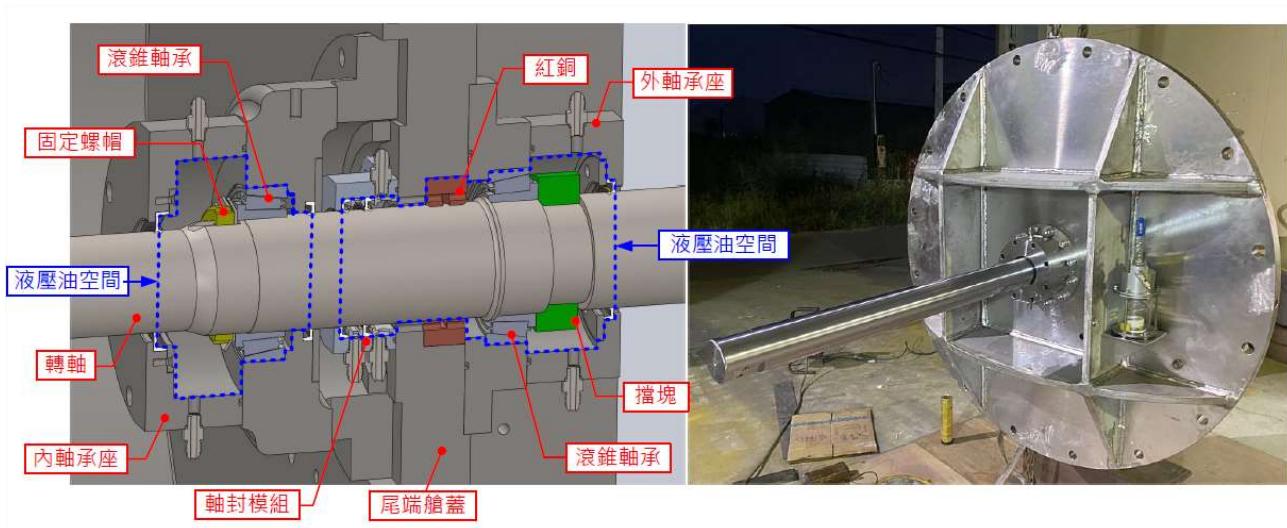


圖2-74 (左)傳動與軸封系統設計圖；(右)尾端艙蓋總成實體圖

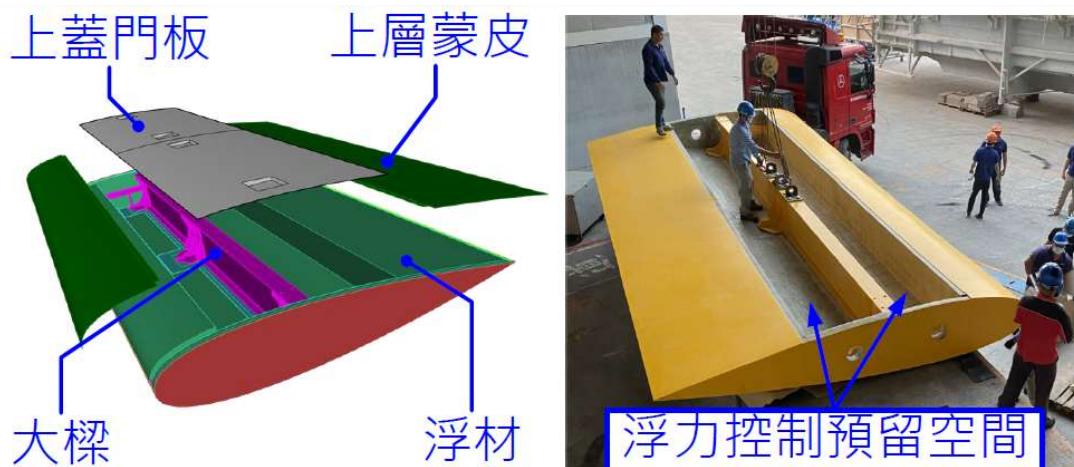


圖2-75 (左)翼型浮體設計圖；(右)翼型浮體實體圖

二、10 kW FKT 測試驗證工作

由於防水機艙外徑達1,250 mm、壁厚為10 mm，且艙體並非以模具製作之無縫管，而是以鋼板滾捲與焊接方式加工完成，其耐壓能力雖通過Solidworks軟體模擬，且焊道皆已通過放射線檢測(Radiography Testing, RT)，但加工過程可能仍有微小缺陷進而影響艙體之真圓度與實際耐壓能力，為滿足未來20 kW之FKT最大工作水深約50 m之需求，故在執行發電機實海測試前利用工作母船甲板絞機將防水機艙佈放至水深分別為30 m, 50 m與60 m處，並以機艙上方之壓力感測器(深度計)記錄實際到達水深，其中防水機艙於水深60 m之測試時間為30 min(如圖2-76所示)，防水機艙回收至甲板時艙體無受損跡象，漏水感測裝置顯示正常，且開啟防水機艙之漏水測試孔亦無發現艙體內有進水現象，故防水機艙通過耐壓測試並滿足1/5縮尺之FKT所需。

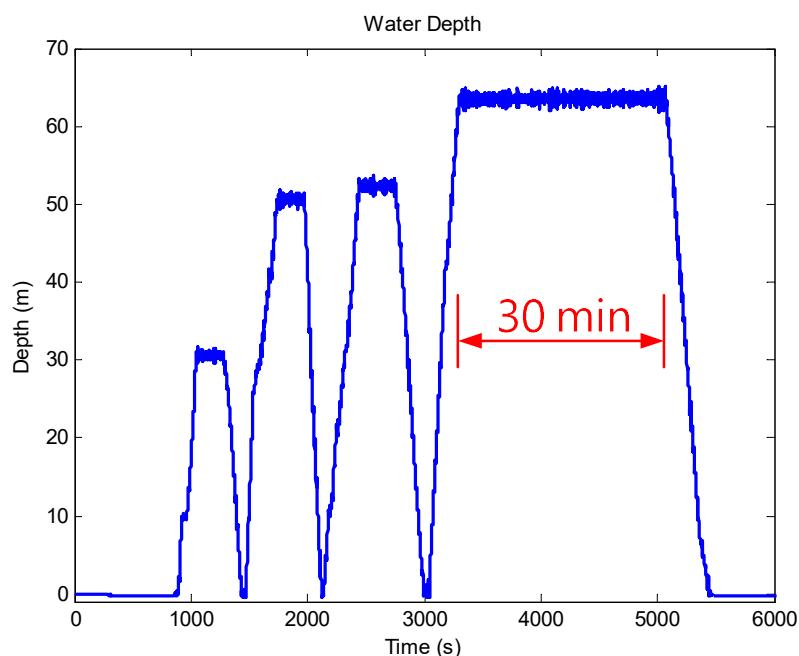


圖2-76 10 kW FKT防水機艙耐壓測試結果

為驗證FRP葉片與發電機整體之工作效能，以及10 kW FKT於水中運作的穩定性，故進行FKT實海拖曳測試。實海測試於2020年10月6-7日於臺南安平商港外約5~7海浬海域進行，工作母船為國研院海洋中心之勵進研究船(如圖1-12所示)，利用後甲板之Dyneema(HMPE)複合纖維繩索於船艉拖曳FKT，拖曳過程以不同船速調整FKT對水速度，藉此量測在不同流速下FKT之發電能力。為量測FKT之發電功率，故於勵進電儀室內放置一組20 kW負載箱與示波器分別進行電壓、電流與波形之量測，負載箱可依照需求給予1~20 kW間任一整數負載，透過不同負載的給定可獲得不同條件下的發電功率，同時FKT轉軸串聯一組扭矩感測器，可即時提供轉軸扭矩與轉速，FKT產生之電力由電纜回傳至船上，而其他資訊如扭矩、轉速與機艙漏水狀態之傳輸則由光纖網路傳輸，其中測試系統架構如圖2-77所示。

執行實海拖曳測試期間之主要測試負載採用1 kW (158.7Ω)、2 kW (79.35Ω)、3 kW (52.9Ω)

Ω)、5 kW (31.74 Ω)、8 kW (19.84 Ω)與10 kW (15.87 Ω)，其中測得負載為5 kW且轉速達40 rpm時以及負載為8 kW且轉速達33 rpm時可達成10 kW發電量，甚至於負載為10 kW且轉速為32 rpm時可達到近12 kW的發電量，FKT隨轉速增加所產生之電壓與電流亦隨之升高，符合發電機之基本性質，其中實海拖曳測試所獲得之發電電壓與發電功率如圖2-78所示。不過同時可看出實海測試之發電機轉速較實際設計轉速高，推測主要導致此現象之原因有兩個，其一是葉片設計效能因保有餘裕，故在相同流速條件下可實際帶動發電機轉速較預估值還高；另一原因係發電機葉片入流受研究船之推進器艉流(Wake)影響(如圖2-79所示)，導致實際入流速度較量測值高。經資料比對後發現當船對水速度為2.5節(約1.286 m/s)時，FKT之葉片轉速便可達30 rpm，當船對水速度達到3節時葉片轉速已接近40 rpm，設計之葉片與發電機於實海域之搭配應用已獲得驗證，但由於葉片效能較發電機運轉需求高，故於未來執行海域測試時將嚴密調控入流速度，如此應可獲得較穩定的功率輸出。

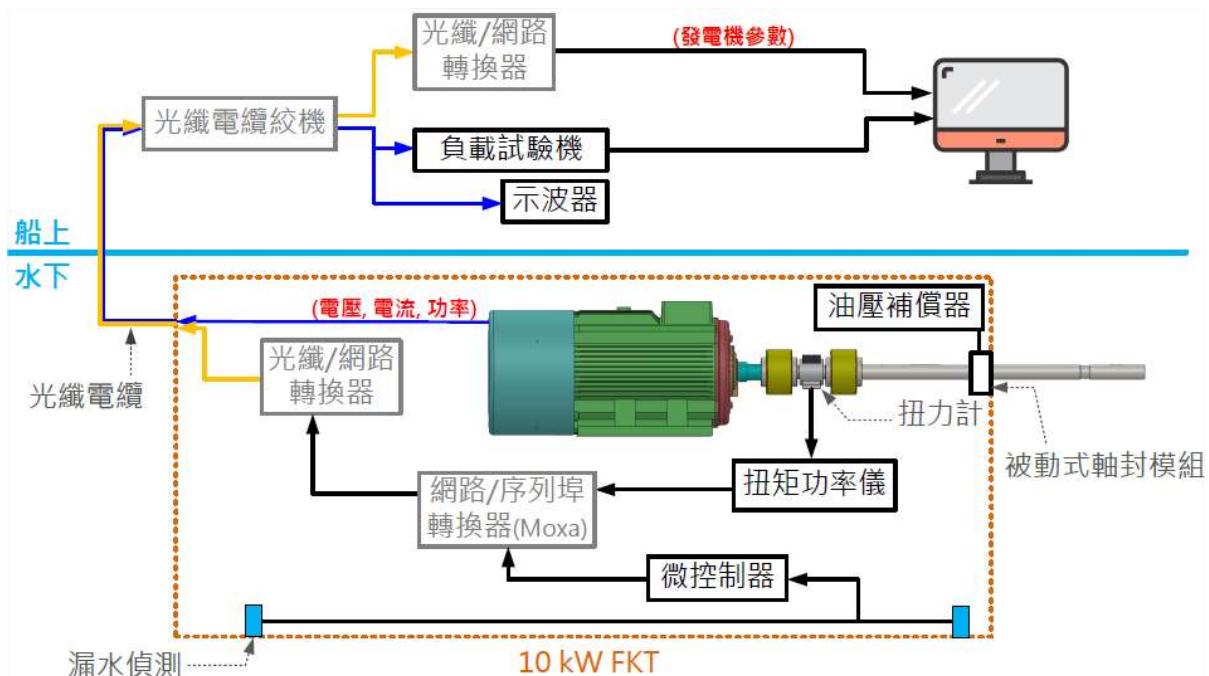


圖2-77 10 kW FKT實海拖曳測試相關線路配置

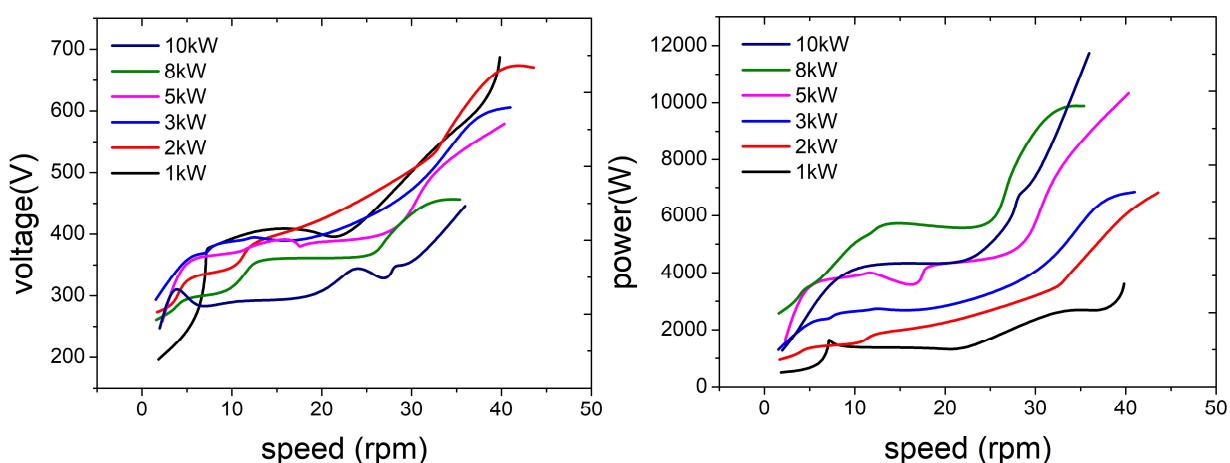


圖2-78 (左)不同轉速與負載變化下之電壓曲線；(右)不同轉速與負載變化下之功率曲線

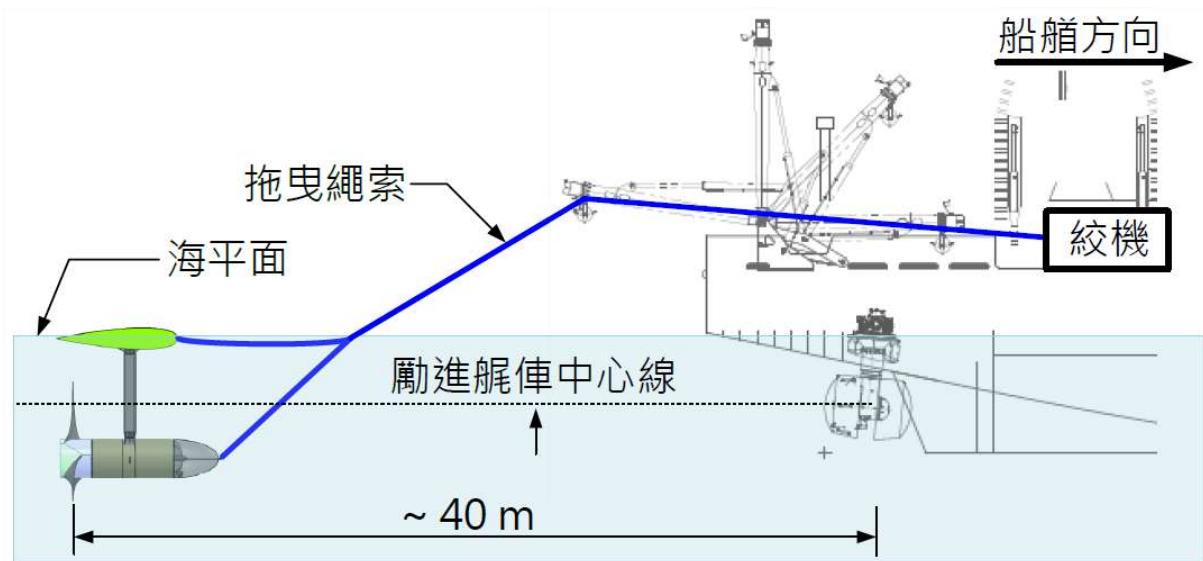


圖2-79 船艉流可能影響發電機之入流速度，導致實際轉速較預估值高

第三章 20 kW 洋流發電機實海域性能測試

相較於 2020 年於水面拖曳 10 kW FKT 進行實海測試，20 kW FKT 之實海域測試除發電機尺寸與重量皆較 2020 年放大外，為更正確的模擬未來洋流發電機錨碇於海床上並浮游運作於水層中(如圖 1-9 所示)，因此本年度之實海測試規劃將由水中進行拖曳作業，即拖曳洋流發電機之支點由工作船之甲板上方變更至水中，且本年度之實海域測試另一項重要工作項目為驗證發電機自動改變運作深度之功能，這些改變相較去年的實驗而言可以很明顯的看出整體作業的難度向上提升許多，也在在考驗著全體洋流發電機組研發團隊的能力。

於第一章中提到日本 NEDO 所開發的浮游式黑潮發電渦輪機「かいりゅう」，其設計構想與本計畫團隊所提出之洋流式發電機極為相近，因此洋流發電機體積與重量極大，故該團隊於 2017 年委託平台船與拖船共同完成洋流發電機之實海域船拖測試(如圖 6-1 所示)，其船拖測試之架構如圖 6-2 所示，可看出該團隊於水裡佈放一重塊作為拖曳發電機之支點，並由拖船拉著平台船共同完成了洋流發電機的水中拖曳測試，日本團隊的成功或許可作為 20 kW FKT 實海域拖曳測試的參考依據。



圖 6-1 「かいりゅう」浮游式黑潮發電渦輪機實海測試

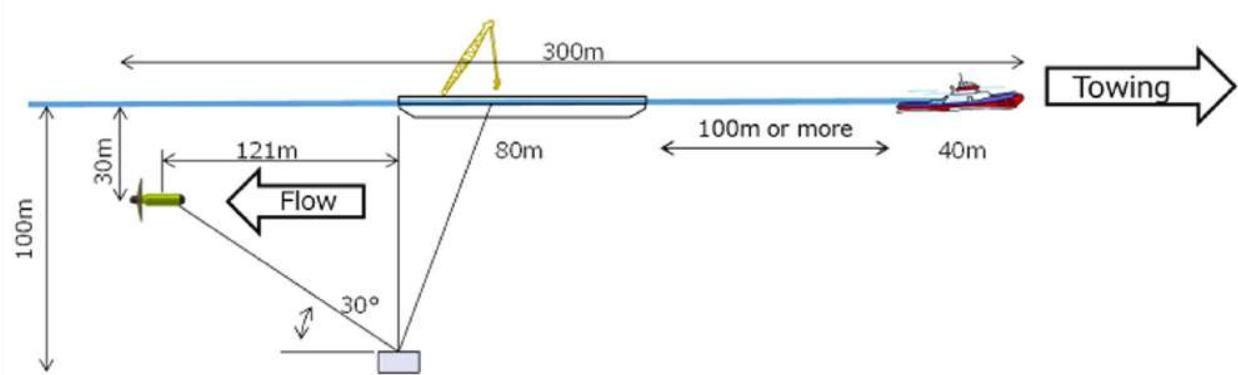


圖 6-2 「かいりゅう」浮游式黑潮發電渦輪機船拖測試架構[39]

本計畫團隊於 10 月份之工作內容如表 6-1 所示，10 月初逐漸完成 FKT 主要零組件之加工與組裝(如：翼型浮體整修、浮力引擎組裝、發電機艙配線等。)，隨後分別於 10 月 14 日完成翼型浮體與浮力控制系統整合組裝，於 10 月 17 日完成所有防水外殼真空測試、於 10 月 19 日於碼頭進行 20 kW FKT 組裝、於 10 月 20 日完成港內測試，並分別於 10 月 23 日與 26 日執行兩次 20 kW FKT 實海拖曳測試。實海測試完成後，於 11 月 2 日將 FKT 所有零組件用送回國海院於高雄湖內鄉之庫房進行存放。

以下針對今年度之實海測試執行內容進行詳細解說，並針對測量數據進行分析與探討。

表 6-1 20 kW FKT 之 10 月份工作時程表

星期日	星期一	星期二	星期三	星期四	星期五	星期六
10/3	10/4	10/5	10/6	10/7	10/8	10/9
發電機艙配線、設備安裝、浮力控制系統組裝						國慶日
10/10	10/11	10/12	10/13	10/14	10/15	10/16
國慶日		浮力控制系統最終確認	浮力桶組裝	浮力桶組裝	發電機艙封艙	機艙真空測試
10/17	10/18	10/19	10/20	10/21	10/22	10/23
機艙真空測試	出廠行前確認	發電機系統組裝	港內測試	發電機系統整備	行前會議	第一次實海測試
10/24	10/25	10/26	10/27	10/28	10/29	10/30
光纖電纜修復	防水接頭修復	第二次實海測試	設備撤收			
10/31	11/1	11/2	11/3	11/4	11/5	11/6
	發電機拆卸	設備入庫存放				

一、測試海域

依據執行 10 kW FKT 實海測試之經驗，本計畫團隊今年目標原規劃於臺南安平商港與其外部海域執行實海拖曳測試，但為配合實際使用船隻臺灣先鋒輪之母港位置(旗津大汕頭工作船專用碼頭)與出海作業航程，最終與宏華公司借用尚未開放位於高雄港二港口旁之洲際碼頭，並於二港口至小琉球間之安全水域執行 FKT 拖曳測試。

第二節 港內靜水域測試

20 kW 機組於主要零組件製作完成後將於港區內碼頭邊進行最後組裝，隨後以吊車協助將發電機組吊掛入水進行浮力測試與系統配重，由於 10 kW 機型係由研究船自甲板絞機直接於水面上方進行拖曳，故 2020 年度 10 kW 機型於港內進行測試之主要目標為驗證翼型浮體所供之浮力足夠整體系統需求(如圖 6-17 所示)，然因 20 kW 機型目標將以浮力引擎陣列為主要的沉浮調控機制，受限於浮力引擎可控制之重量較小(20 kW FKT 空氣中重將近 20 tons，而浮力控制模組可變水量僅約 252 kg)，故 20 kW FKT 於港內佈放下水時須更嚴謹調配發電機整體浮力(使其密度與海水接近)，但配重完成後其翼面仍須可部份浮出水面，其主要原因有兩項：其一為縮小發電機本體與海水之密度差異以降低浮力引擎控制作業深度之難度，使浮力引擎所改變之重量可更加有效的作用在發電機組上方；其二為維持部份翼面浮於水面可方便人員進行吊掛與維修相關作業，免除發電機組沒入水中無法作業之窘境。

因此本年度於進行 20 kW FKT 之拖曳測試前，預計將於港內進行浮力調配之前期作業，以利後續於實海域可順利完成發電機組之沉浮控制，以下針對本年度 20 kW FKT 於高雄港洲際碼頭所執行之港內測試進行說明。



圖 6-17 10 kW 機組港內測試

一、測試內容規畫

20 kW FKT 於碼頭組裝完成後將吊掛入水進行配重，配重完成後規劃於港內平靜水域進行浮力控制系統之初步測試，目的為測試所有浮力引擎之運作能力，並嘗試調整 20 kW FKT 之下潛與上浮功能。浮力控制模組之控制介面如圖 6-18 所示，由於 CoolMuscle 伺服馬達可進行位置精準控制，透過馬達轉速與減速機可得知輸出轉動圈數，再根據滾珠螺桿之導程可計算浮力引擎活塞實際位移量，換算位移量與活塞有效作用面積可得到單一浮力引引擎改變之水量與工作速度，此時藉由觀察 20 kW FKT 實際水深變化便可獲悉浮力控制系統之工作效率，作為後續實海拖曳測試與未來錨碇測試之參考。

FKT 於執行港內測試前必須完成出下水前測試(即廠內測試)，確認所有零組件之功能均與設計相符後才可吊掛入水，其中下水前測試與港內測試流程規畫如表 6-4 所示。



圖 6-18 浮力控制模組之控制介面

表6-4 20 kW FKT下水前與港內測試流程規畫

下水前測試(廠內)		
項次	測試項目	測試目的
1	發電機拖曳姿態與穩定性模擬	確認實海域之測試方式
2	第二組發電機艙焊道放射線測試	檢測新製品焊道品質
3	兩組發電機艙之轉軸動態測試 (既有機艙於更新軸封與軸承後須再次測試)	測試軸承與軸封效能
4	兩組發電機艙水密測試(抽真空)	測試機艙本體防水效能
5	500浮力桶與600浮力桶水密測試(抽真空)	測試浮力桶防水效能
6	陸域感測儀器效能測試	確認所有儀器正常運作
港內測試		
1	20 kW FKT機吊掛穩定度測試	確認重心位置正確
2	20 kW FKT靜水域浮力測試	確認翼型浮體浮力狀態
	測量設備 Arduino	
3	20 kW FKT港內配重	調整發電機密度近似於海水
	測量設備 吊秤	
	FKT水中浮力	
4	水域感測儀器效能測試	確認所有儀器可正常運作
	測量設備	
	INS	
	Arduino	
	各艙體漏水狀態、FKT實際水深、艙體溫度、海水溫度	
	ADCP	確認回傳數值

	扭力計(甲板測試)	葉片轉速、轉子扭矩	
5	20 kW FKT浮力引擎靜水域測試 ➤ FKT本體下潛測試 ➤ FKT本體上浮測試		確認浮力引擎工作效能 ➤ 確認浮力引擎工作速度 ➤ 確認FKT下潛速度 ➤ 確認浮力控制系統耗電量 ➤ 測試FKT定深懸浮能力 ➤ 確認浮力桶漏水狀態
	測量設備	測量資訊	
	伺服馬達	確認伺服馬達轉速、浮力引擎活塞位置	
	Arduino	確認FKT實際水深	

透過港內測試得知 **20 kW FKT 實際可提供之額外浮力介於 1,790~2,076 kg 間**，遠比初期預估之 400~500 kg 大得多，推測主因為 2020 年度執行 10 kW FKT 測試時之翼型浮體額外浮力亦遠高於預期，因 10 kW FKT 係於水面拖曳，在確定 FKT 整體為正浮力後，其正浮力之大小便較不影響後續的拖曳測試，故 10 kW FKT 下水後無特別經過浮力配置程序，因此本年度設計 20 kW FKT 系統時以既有浮力約為 300~400 kg 進行概估，然透過本年度港內測試結果得知原翼型浮體既有浮力遠大於 400 kg。經本計畫團隊審慎考量後，參考系統模擬之結果並配合後續工作期程，故最終於 20 kW FKT 水平橫桿安裝總重量約為 760 kg 之配重鐵塊(如圖 6-20 所示)，並開始執行 FKT 實海域拖曳測試(經過配重後之 20 kW FKT 浮力約為 1,000 kg)。



圖6-20 20 kW FKT水平橫桿之配重塊

第三節 實海域拖曳測試

為真實模擬浮游式洋流發電機實際於水中運作之樣態，本年度之實海拖曳測試預計將採用水中拖曳方式進行。相較於本計畫團隊過去所執行1/5縮尺800 W機組之水槽拖曳測試，20 kW機組之體積與整體重量均遠大於800 W機組，故相關測試設備與事前的計畫推演也相對複雜與困難許多，如要如何於水中一定深度下產生一組穩定且近似於錨碇的拖曳支點便是首要克服的難題。參考過往日本NEDO團隊之發電機拖曳測試，本計畫團隊規劃於工作船艦以重絞機或深海絞機(Deep Sea Winch)下放一組用以模擬錨碇之重塊，另於重塊上方安放另一組拖曳支點用以拖曳20 kW FKT(如圖6-21所示)，當研究船往前推進時可透過重塊於水中之支點向20 kW FKT組產生一向前與向下之分力，如此當發電機葉片轉動後所產生之自體阻力，配合翼型浮體之效應便可使發電機自水面微幅下潛至水中，配合一定的船速則發電機預估將可穩定維持於固定水深並開始發電，隨後便可利用浮力控制模組以吸排水機制來調節發電機組之工作深度。然而確保20 kW FKT於拖曳過程與設計相符是極為關鍵的要素，因此許多在拖曳過程中的變數都透過模擬進行演練，最終找尋最適合20 kW機組之方案執行實海測試是最保守且穩當的做法，其中應考慮的重要變數包含：**重塊重量、重塊深度、拖纜長度、發電機水中浮力等**，目標找出最佳配套方案執行實海測試。

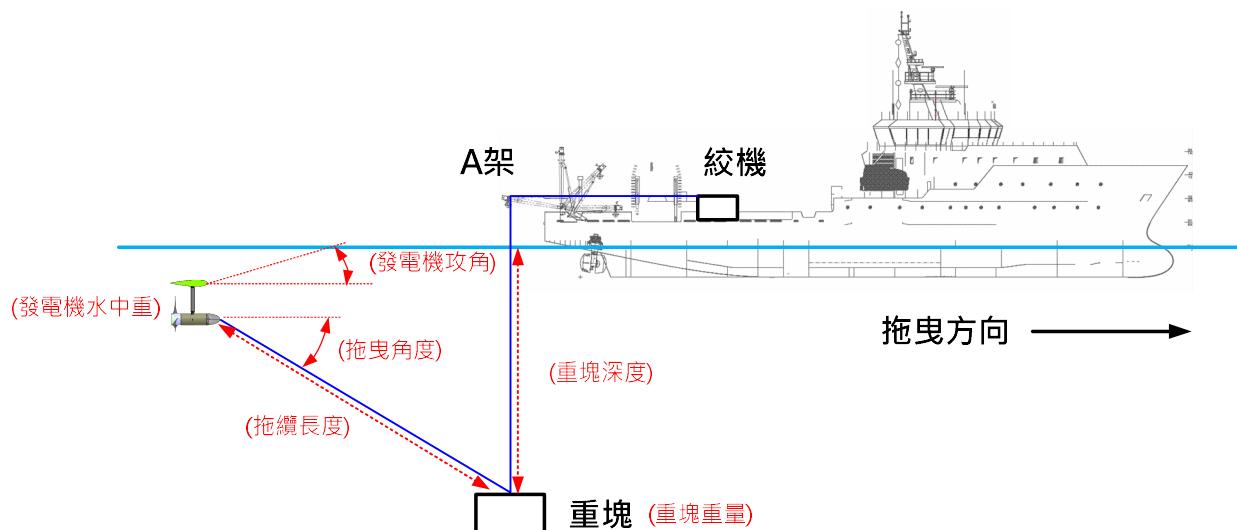


圖 6-21 20 kW FKT 實海拖曳示意圖

一、測試內容規畫

表6-7 20 kW FKT 實海拖曳測試流程規畫

實海拖曳測試		
1	20 kW FKT一般拖曳效能測試 <ul style="list-style-type: none">➤ 發電機本體姿態穩定性測試➤ 發電機轉子葉片啟動流速測試➤ 不同船速對應發電機運作水深	測試本年度搭配重塊進行發電機拖曳之可行性

	(浮力引擎尚未作動)		
	<u>測量設備</u>	<u>測量資訊</u>	
	INS	FKT運作姿態	
	Arduino	各艙漏水狀態、FKT工作水深、各艙溫度、海水溫度	
	ADCP	FKT現地流速	
	扭力計	葉片轉速、轉子扭矩	
	張力計	FKT拖曳總阻力	
	DAQ資料截取設備	電壓、電流、功率、頻率	
2	流速於3 knots時，對應不同負載(1 kW、2 kW、3 kW、5 kW、8 kW、10 kW)之發電效能測試		
	<u>測量設備</u>	<u>測量資訊</u>	
2	INS	FKT運作姿態	
	Arduino	各艙漏水狀態、FKT工作水深、各艙溫度、海水溫度	
	ADCP	FKT現地流速	
	扭力計	葉片轉速、轉子扭矩	
	張力計	FKT拖曳總阻力	
	DAQ資料截取設備	電壓、電流、功率、頻率	
3	20 kW FKT浮力引擎實海域測試 ➤ 發電機本體下潛測試(階段性) ➤ 發電機本體上浮測試(階段性)		
	<u>測量設備</u>	<u>測量資訊</u>	
	INS	FKT運作姿態	
	Arduino	各艙漏水狀態、FKT工作水深、各艙溫度、海水溫度	
	ADCP	FKT現地流速	
	扭力計	葉片轉速、轉子扭矩	
	張力計	FKT拖曳總阻力	
	DAQ資料截取設備	電壓、電流、功率、頻率	
	伺服馬達	馬達轉速、浮力引擎活塞位置	

二、發電機效能測試

(一) 2020 實海測試

此節說明本計畫團隊於 2020 年執行 10 kW FKT 實海拖曳測試所量測到的 10 kW 發電

機發電效能數據，並探討船對水在速度下，FKT 於不同轉速與不同負載之電流、電壓、功率的關係。量測時，當船對水速度 2.5 knots (約 1.286 m/s) 時，發電機葉片之轉速已可達 30 rpm，比原先預期的海水流速須達 1.5 m/s 效果還佳。

(A) 不同轉速與不同負載下的電壓曲線

圖 3-35 為不同負載下的電壓與不同轉速的關係曲線，隨著葉片轉速的增加發電機所產生的電壓也逐漸升高，符合發電機之基本性質。理論上當給定負載功率越大，即電阻較小時量測到電流會較大，所以形成的電壓壓降導致量測到的電壓略小，由圖 6-27 可看出負載 1 kW 與 2 kW 在低轉速稍不穩定，推測原因為當時海況因素導致葉片在低轉速時轉換效率不穩定，因此實際電壓較理論值低，而圖 6-27 中亦能看到負載 3 kW 至 10 kW 與理論吻合，10 kW 時的輸出電壓也有達到額定電壓值 400 V，可以得知發電機的輸出電壓成效良好。

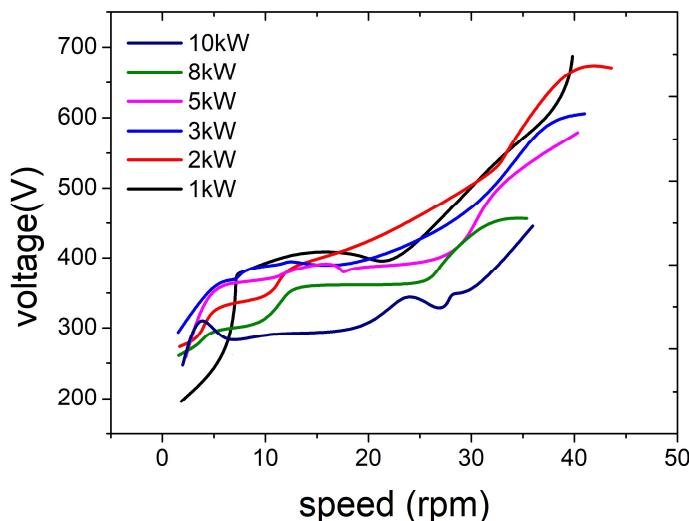


圖 6-27 不同轉速與負載變化下之電壓曲線(2020 實海測試)

(B) 不同轉速與不同負載下的電流曲線

圖 6-28 為不同負載下的電流與不同轉速的關係曲線，圖中可以看到當發電機操作在相同轉速下，因為歐姆定律的關係，會使發電機隨著負載箱給予負載越大時，意即是負載電阻愈低時，輸出電流就愈大。由圖 6-28 中可看到當負載為 10 kW 時，轉速在 30 rpm 以上時發電機輸出電流已達到 15 A，符合額定的電流。

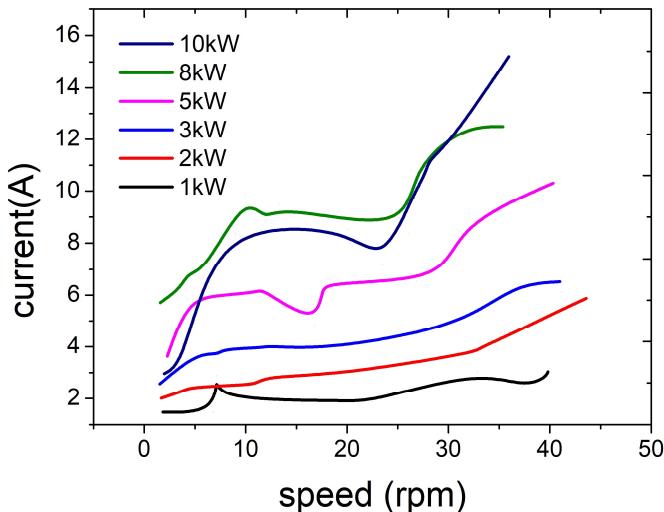


圖 6-28 不同轉速與負載變化下之電流曲線(2020 實海測試)

(C)不同轉速與不同負載下的功率曲線

圖 6-29 為不同負載下的功率與不同轉速的關係曲線，可看出轉速越高輸出功率越大，同時亦能觀察到輸出功率會隨著負載功率減少而逐漸減少。從圖 6-29 中可以看到如負載為 5 kW 時，當轉速達到 40 rpm 亦可以達成 10 kW 的發電量；在負載為 8 kW 時，轉速約為 33 rpm 時亦可達成 10 kW 的發電量；而當負載為 10 kW 時，轉速於 30 rpm 時可達成近 10 kW 的發電量，相同負載下在轉速約 31 至 32 rpm 時甚至可以達到近 12 kW 的發電量。當船對水速度 3 節時，發電機甚至能轉到接近 40 rpm，以實際測試結果來看發電機與負載箱沒有因此有損壞的情形發生，還能提供更高的輸出功率，由此可知，發電機的發電成效良好，功率海測結果符合設計。

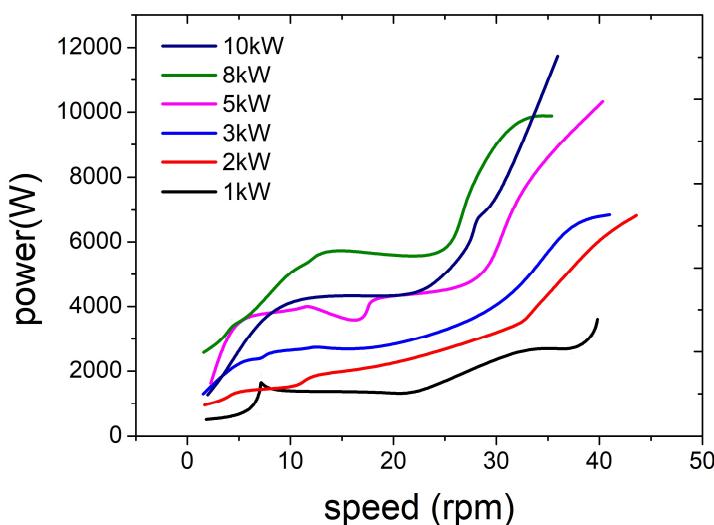


圖 6-29 不同轉速與負載變化下之功率曲線(2020 實海測試)

於執行陸上發電性能測試時，藉由驅動馬達帶動 10 kW 發電機來觀測其發電效果，在與模擬軟體 Ansys 相互比較後，可以發現發電機的輸出與模擬非常接近，據此我們知道發電機性能良好，與設計條件幾乎吻合。另外在海上量測時，當船對水速度 2.5 knots (約 1.286 m/s)時，發電機轉速已達 30 rpm，超越預期，原因推測為發電機受到研究船槳葉艉流影響，導致實際通過發電機之流速不只有 1.286 m/s；出海測試的發電機實測結果顯示發電機在轉速 30 rpm 之上時能達到輸出 10 kW 的設計需求，可以得知發電機在海測時性能達成預期要求。

(二) 2021 實海測試

基於 2020 年 10 kW FKT 實海測試之基礎，儘管發電機的電壓、電流等資訊能順利量測與擷取並進行後續分析，但由於係以手動來存錄示波器內容效率較差，為改善此一狀況，本年度採取 DAQ 擷取卡與其擷取設備進行發電機電壓與電流之量測，並且撰寫 Labview 程式來完成其人機介面(如圖 6-30 所示)與其背後邏輯撰寫，以利於實海測試時於船上實時監控兩台 10 kW 發電機的電壓、電流、輸出相位、振幅與頻率等資訊，並將資訊搭配電壓勾表、電流勾表之放大倍率以每秒存取十筆的頻率存成 TDMS 檔案，以利後續研究談討分析。

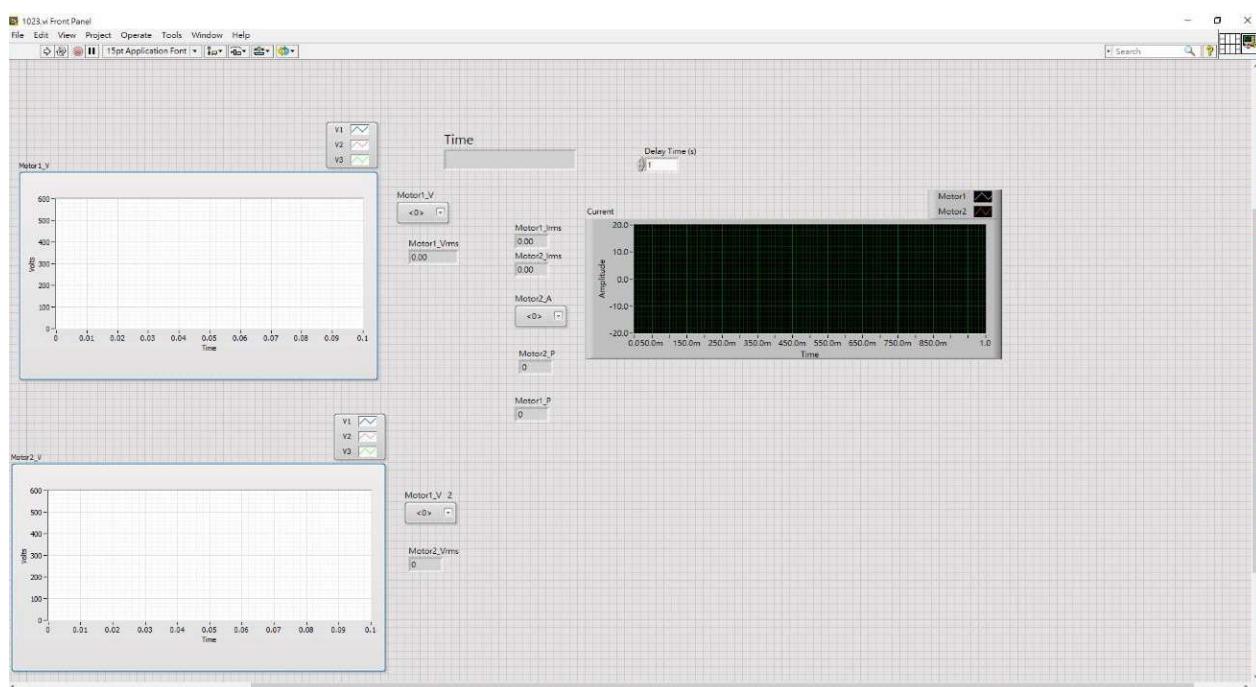


圖 6-30 電壓電流截取人機介面

本年度共執行兩次 20 kW FKT 實海拖曳測試，其中第一次實海測試於 10 月 23 日進行，拖曳測試過程中可由潛水俠於水中近距離拍攝之畫面得知 FKT 之運行狀態良好(如圖 6-31 所示)，兩組葉片以向外對轉方式持續運作，且 FKT 姿態平衡穩定，滿足本計畫團隊之

設計需求。



圖 6-31 20 kW FKT 於水中運行之狀態

以下為實海測試時不同轉速與不同負載下的電壓、電流、功率曲線圖，其中負載分別以 1 kW、2 kW、3 kW、5 kW、8 kW 與 10 kW 做負載切換實驗，然而當在做負載 1 kW 與 2 kW 實驗，又因葉片轉速較低時，接收資料頻率太低且因負載較大，導致雜訊太多，造成在 25 rpm 以下之數據無法精確分析，故以下電壓、電流、功率曲線僅繪製負載 3 kW 至 10 kW。

第四章 期末討論與建議

一、結論

根據本年度所執行之經驗與測試結果，可歸納出以下幾點結論：

1. 本計畫團隊完成 20 kW 浮游式洋流發電機實體製作與實海拖曳測試，除驗證此一構型之洋流發電機結構安全可於水層中穩定運作外，其內部兩組發電機與葉片之工作效能亦獲得驗證；此外浮力控制模組可微幅改變 FKT 之橫搖角，對整體運作深度之調整效能有限；
2. 本年度實海拖曳測試海況明顯較 2020 年度佳(海表面無白浪)，因此測得之發電機電壓、電流與功率曲線均較 2020 年度之結果合理；
3. 本計畫團隊所設計之浮力控制模組於本年度實海測試過程運作相當穩定，且浮力桶內無漏水狀況發生，可靠度極高；
4. 經實海測試後發現現行浮力控制模組總可改變水量相對於 FKT 本體之尺寸而言仍然過小，因此其成效相當有限，未來可嘗試調整 FKT 之重浮心配置或加大整體可

控水量，以加大整體控制效能；

5. 浮力控制模組之實海測試分為三個，分別為兩個 FKT 沉浮控制(重塊佈放水深 40 m、重塊佈放水深 50 m)與 FKT 橫搖角控制，雖浮力控制模組之效能於重塊佈放水深為 40 m 時較不明顯，但仍可於重塊佈放水深 50 m 之測試中看出 FKT 之運作深度有微幅的變化，此外透過改變翼型浮體內部左右兩側浮力引擎之吸排水量，亦可一定程度改變 FKT 浮游於水中之橫搖角；
6. 經實際測試，20 kW FKT 內部之浮力控制模組與其他所有感測設備之耗電量僅約 375 W(觀測岸端 375 VDC 電源供應器總耗電量約為 1 A)；
7. 經實海拖曳測試後發現 FKT 於水中之運動模式與原先考量之水下滑翔機 Glider 有極大不同，因 Glider 於水中為自由體，故可單純依靠配重平衡與重浮力的改變達到沉浮控制的效果，然 FKT 除前端有拖曳纜繩對 FKT 本體所施加之作用力，其後端亦有葉片之推力，因此整體運動模型較 Glider 複雜，經團隊內部再次討論後發現 FKT 俯仰角如絕對值後接近 0 度時，因受力平衡關係 FKT 之運作深度將與重塊達成一致，如 FKT 欲自水面下潛則浮力控制模組應使 FKT 俯仰角調整為正值，反之亦然；
8. 經實測後發現如欲利用浮力控制模組改變 FKT 俯仰角效果相當有限，故未來進行 FKT 運作水深之控制應優先以改變本體比重(即 FKT 下潛時浮力引擎全吸水，FKT 上浮時浮力引擎全排水)，以獲得最佳控制效果；
9. 本年度實海測試所採用之重塊內部由水泥材質構成，其比重相對金屬小許多，因此空氣中重為 5 tons 之重塊於下水後，扣除排開水體積後其於水中重僅剩約 2.7 tons，未來如有類似測試應針對物體於水中重量進行仔細計算，避免與模擬過程有過大的差異導致測試效果不彰；