



中國工程師學會會刊

中華民國112年9月 Vol.96 No.3

<http://www.cie.org.tw>

ISSN:1015-0773

工程

- ▶ 2023國際工程聯盟大會 (IEAM 2023)
- ▶ 2023產學交融活動Executive and Professional Women Meetup
- ▶ 儲能系統工程規劃實務
- ▶ 套筒式離岸風機下部結構之細部設計實務概述
- ▶ 太陽光電加強電力網工程規劃及進度
- ▶ 水面型太陽能發電廠工程規劃 - 以彰濱工業區崙尾東區發電廠為例
- ▶ 大型抗颶半潛式離岸風力機平台開發



電力 及 能源工程



CTCI 中鼎集團

CTCI 中鼎集團 (TWSE: 9933、TPEX: 5209、TPEX: 6803) 為國際級統包工程公司，承攬多元化重大工程。創立於 1979 年，總部位於台灣台北市，致力提供全球最值得信賴的統包工程服務。在全球逾 10 個國家設立約 50 個據點，集團員工總數約 8,000 人，並入選道瓊永續指數 (The Dow Jones Sustainability Indices, DJSI)。



業務領域

- 煉油
- 石化
- 環境
- 一般工業
- 電力
- 交通
- 高科技設施
- 液化天然氣

服務內容

- 專案管理
- 可行性研究及前端工程設計
- 工程設計
- 工程採購
- 設備製造
- 工程建造與維修
- 工廠試車
- 智能解決方案
- 自動化控制
- 無塵室與機電配管工程
- 智能頂進工法
- 地盤冷凍工法
- 操作及維護

產品項目

- 設備製造
- 智慧化能源管理系統
- 化學添加劑

CTCI
中鼎集團

11046 台北市士林區中山北路六段89號
Tel: (886)2-2833-9999
Fax: (886)2-2833-8833
www.ctci.com

CTCI EF
財團法人中鼎教育基金會

112037 台北市北投區福善路16號2樓
Tel: (886)2-2769-8599
Fax: (886)2-2769-9299
www.ctcief.org



電力及能源工程

能源在人類文明發展中扮演著關鍵的角色，然而傳統化石能源會引發溫室氣體效應、造成空氣污染，進而影響環境生態和人體健康。為了永續發展，我們除了需要節約能源及提升能源使用效率，更需要推動能源轉型，尤其是使用再生能源。再生能源可持續不斷的由自然過程中得到，是相對環保的電力來源。本期刊登6篇文章介紹國內在這方面相關之技術與前景，內容涵蓋風力發電、太陽能發電、地熱發電，以及電力網及儲能技術等領域，希望透過技術分享與交流，提昇國人對於電力及能源工程之了解與重視，以共同應對未來的挑戰。

活動報導

- 02 2023青年工程師聯誼交流活動
- 04 2023國際工程聯盟大會(IEAM 2023)
- 06 2023產學交融活動Executive and Professional Women Meetup
- 08 楊理事長宴請日本工學會(JFES)岸本會長及日本技術士會(IPEJ)幹部，鞏固兩會友誼

電力及能源工程

客座主編：余信遠 / 中興工程顧問股份有限公司總經理

- 12 套筒式離岸風機下部結構之細部設計實務概述 / 徐偉朝、夏瑄、郭思伶、杜昱石、林芃妤
- 26 大型抗颱半潛式離岸風力機平台開發 / 鍾承憲、周顯光、黃政彰、吳彥威
- 43 水面型太陽能發電廠工程規劃-以彰濱工業區崙尾東區發電廠為例 / 葉琮霖、余遠添、游祥益
- 64 太陽光電加強電力網工程規劃及進度 / 陳佩穎、陳建安、陳佳慶、黃子成、劉建勳、廖俊峯
- 75 談地熱資源調查與電力系統整合規劃-以新一代清水電廠為例 / 俞旗文、宋聖榮、林伯修
- 96 儲能系統工程規劃實務 / 李聖源、楊澤欣

封面授權

授權標的：辰亞能源 崙尾東一號暨二號電廠相關設施

授權範圍/授權態樣/授權期間：授權中興工程使用於中工會工程會刊投稿中必要之重製

專屬授權及再授權：此為非專屬授權及禁止再授權。

Vol. 96 No. 3

中華民國 112 年 9 月

理事長：楊正宏

常務理事：李順欽 胡湘麟 陳仲賢 楊宗興
鄭光遠 賴建信

理事：王宇睿 王錫福 伍勝園 江秀丹
余信遠 宋裕祺 李政安 李偉賢
周永暉 林聰利 莫仁維 許泰文
許鈺漳 陳守道 陳哲生 陳國隆
黃維焄 楊正君 楊慶煜 廖學瑞

常務監事：施義芳

監事：高宗正 陳玫英 歐善惠 蘇玫心

秘書長：劉國慶

副秘書長：李瑋聆

發行所：中國工程師學會出版委員會

主任委員：黃炳勳

委員：方振仁 王子安 王宇睿 余信遠
林建華 洪文玲 徐強 張人懿
莫仁維 陳守道 陳哲生 劉國慶
賴建信

總編輯：張鈺輝

客座主編：余信遠

編輯：李宥萱 李綺馨 林秀琴 袁雅玲
梁愛倫 許舜雅 蔣雪芬

聯絡地址：114710 臺北市內湖區陽光街323號

電話：(02)8797-3567轉8200、8225、8234

傳真：(02)8797-4585

會址：100026 臺北市仁愛路二段1號3樓

電話：(02)2392-5128

傳真：(02)2397-3003

網址：<http://www.cie.org.tw>

郵政劃撥：00059892

戶名：社團法人中國工程師學會

編印：英杰企業有限公司

地址：106411 臺北市大安區復興南路二段
293-3號10樓之1

電話：(02)2732-1234

行政院新聞處出版事業登記證局版臺誌0765號

中華郵政臺北誌字第721號執照登記為雜誌交寄

入會申請手續請上本會網站查詢

2023青年工程師聯誼交流活動

由本學會青年工程師聯盟主辦的「2023年青年工程師聯誼交流活動」於5月30日晚間完美落幕，活動一開始由本學會青年工程師聯盟莫仁維主委感謝所有蒞臨活動現場共襄盛舉的產官學界中生代及新生代工程師們，並期許大家能沉浸在當晚的活動安排，用放鬆的方式與工程產業的先進及同儕們互相交流。

今年度活動主題為「傑出女性工程師的跨世代傳承」，特別邀請新北市政府工務局祝惠美局長、本學會女性工程師委員會薛文珍主委以及中興工程顧問公司黃琬淇副理擔任與談人，分別分享自身經驗的體悟。



▲ 莫仁維主任委員致詞

祝局長有感於這幾年大環境對於傳統工程產業的衝擊，政府單位在薪資福利及職涯發展上雖較有穩定性，但對於仍抱有夢想與



▲ 會中交流情形



▲ 與會人員合影

衝勁的男性同仁不具備留任的誘因，相較之下女性同仁反而更能在公家穩定發展，並循序漸進的累積工作經驗。祝局長勉勵仍持續於工程產業一起努力的年輕工程師們，長期紮實的經驗積累更勝於追求短期薪資的跳躍成長。

薛主委則是藉由豐富且跨領域的多元資歷，展現出職涯發展能藉由選擇創造不同的可能性，從美國GE研發工程師到工研院創意中心主任及臺灣藝術大學副校長，從過去注重邏輯思考，至今追求創意與美感，這樣的轉變完美體現她兼具莊重及活潑的風格。

黃副理則是從環境工程領域踏入工程產業，或許因其具備大而化之的人格特質，從她的分享中能深刻感受到，即使身處傳統刻板印象嚴重的職場文化裡，仍能堅忍不拔的持續在職場上穩定傑出的發展。

三位與談人都鼓勵女性工程師應善用自

己善於傾聽、細膩及具同理心的特質，在職場團隊中擔任柔性的溝通協調者，找到適合自己發揮的舞台。

活動下半場特別與來自英國的CHAIN組織創辦人Nick Valentines 連線，與在場的各位嘉賓宣揚CHAIN組織的理念，與本學會青年工程師聯盟委員會的目的，都是希望能提供工程產業的年輕工程師一個長期產業知識交流及合作的平台，以定期舉辦論壇或交流活動的方式，持續提升專業發展。最後，特別邀請去年獲得本學會「優秀青年工程師」2位得獎人蒞會，以豐富的業界心得分享為本次座談會劃下完美的句點。

最後將聚光燈照在每一位未來指日可待的新生代工程師身上，彼此拿著啤酒杯熱絡地交談，從活動創立至今已達第四屆，希望能維持相同的熱度至下半年的第五屆青年工程師交流活動，讓每位參與的嘉賓度過一個豐收又輕鬆的一晚。

2023國際工程聯盟大會（IEAM 2023）

國際工程聯盟（IEA）2023年大會（IEAM 2023）於6月11日至6月15日在臺中林酒店召開，由本學會CIE和中華工程教育學會IEET共同主辦。為期5天的會議，計有來自全球38個工程組織約150餘位代表出席，今年是疫情過後第一次正式恢復以實體辦理大會，非常具有意義。

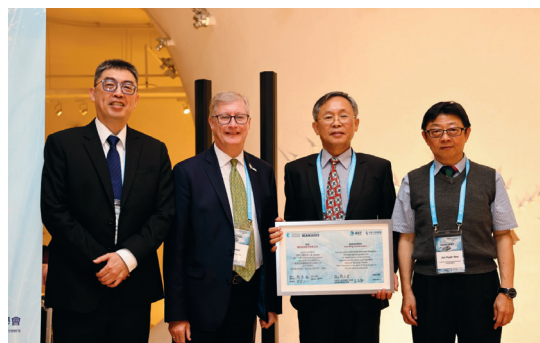
6月11日團員陸續抵達臺中林酒店報到，晚間在臺中歌劇院舉辦歡迎酒會。由王子安主委代表主辦單位致歡迎詞，並與IEET顏家鈺理事長一起向晚宴活動贊助商——負責興建臺中歌劇院的麗明營造公司致謝。席間安排台灣梧桐弦樂團演出，現場氣氛熱鬧溫馨。

6月12日上午進行開幕式，全體會員出席。本學會楊正宏理事長與IEET顏家鈺理事長代表主辦單位分別致詞。楊理事長熱烈歡迎各國代表來臺灣出席會議，並預祝會議圓滿成功。

國際工程聯盟（International Engineering Alliance, IEA）包含3項國際工程教育協定（Accords）和4項工程人員認證協議（Agreements），今年會期討論重點包括IEA發展策略、工程領域應屆畢業生核心能力及專



▲ 楊正宏理事長於大會開幕致詞



▲ 本學會亞太工程師監委會王子安主委（左一）與IEET顏家鈺理事長（右一）、IEA主席 Damien Owens（左二）與活動贊助商（右二）合影

業工程師能力標準更新（GAPC）、工程教育協定審查程序、專業工程師跨境流動（Mobility）、專業工程師協議審查規則修訂等多場研討會。



▲ 本學會亞太工程師監委會同仁與工程會代表合影



▲ 全體與會貴賓合影

本學會在行政院公共工程委員會指導下，於2005年成為亞太工程師協議（APECEA）會員、2009年成為國際專業工程師協議（IPEA）會員。本次大會由王子安主委率領CIE團隊全程出席兩項協議的會員閉門會議，針對各項議案投票，履行會員權利義務。

6月14日主辦單位安排各國代表參觀日月潭，並在雲品酒店辦理惜別晚宴，氣氛熱鬧溫馨。會議結束後，CIE和IEET收到許多會員國的感謝函，讓臺灣成為國際工程組織的焦點，活動非常順利圓滿成功。

2023產學交融活動 Executive and Professional Women Meetup

本學會女性工程師委員會與台灣女科技人學會於7月1日假台北101大樓5樓雙融域沉浸式光電展場共同主辦「2023產學交融活動Executive and Professional Women Meetup」，活動順利成功。

女性工程師委員會洪瑞華顧問與林怡欣委員結合女科技人學會，邀請中華民國光電學會與國立陽明交通大學協辦，共同邀請產學各界關心兩性議題的朋友參與。本學會楊正宏理事長、鄭光遠常務理事、薛文珍主任委員、江秀丹理事等均出席與會，雙融域沉



▲ 楊正宏理事長致詞

浸式光電展場創辦人施振榮董事長伉儷也親自出席。



▲ 雙融域沉浸式光電展場創辦人施振榮董事長（前排中）與出席人員合影



▲ 大會情形

國泰金控程淑芬投資長演講「投資長的理財101」，可應用於規劃人生的理財觀念。程投資長是大氣科學背景，其表示金融和天氣一樣都符合「測不準原理」。最後，她表達願意幫助學術界對企業界有更多的認識與溝通，擔任Mentor的角色。

本活動旨在促進跨領域、跨界交流，在活潑、放鬆的幽美氛圍下建立默契與友誼，與會者反應正面，成功建立強韌的女性網絡。希望成員們可透過交流互相扶持與提攜，發揮影響力關心社會。未來本學會將持續舉辦相關活動，並擴大參與面。

楊理事長宴請日本工學會（JFES）岸本會長及日本技術士會（IPEJ）幹部，鞏固兩會友誼

本學會楊理事長於6月12日晚間在臺中東方龍餐廳設宴款待日本工學會（JFES）岸本喜久雄會長，以及日本技術士會（IPEJ）國際關係委員會主委Satoru SASAKI、兩位副處長Akihisa MIKAMI及Yasunori TAKEMI，並致贈紀念獎座予JFES岸本會長，以及具有文創特色的紀念品予四位日籍外賓，鞏固兩會友誼。

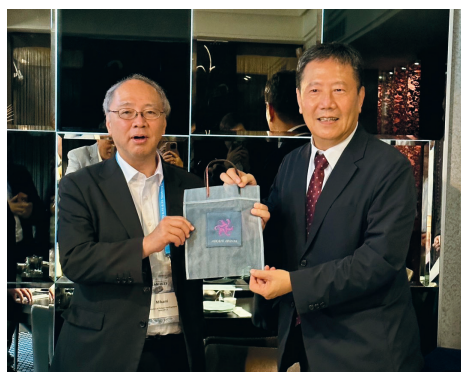


▲ 楊理事長致贈紀念獎座予 JFES 岸本會長



▲ 本學會楊理事長宴請日方貴賓

日本工學會是日本各工程學會最具代表性的整合性社團，與本學會於108年11月簽署了合作協議，共同推動兩地工程技術交流合作，兩會關係長期友好。我方出席者包括嫻熟日本事務的陳哲生理事、謝牧謙博士；本學會劉國慶秘書長、李瑋聆副秘書長；中華台北亞太工程師監督委員會王子安主委、洪向民副主委、羅懷慶執行長、鐵摩爾組長；以及工程會技術處李東陽科長。



▲ 楊理事長致贈文創紀念品



▲ 全體出席貴賓合影留念



電力及能源工程 - 專輯序言

中興工程顧問股份有限公司總經理 / 余信遠

電力與能源是人類發展文明的重要支柱，傳統的化石能源如煤炭、石油、天然氣，這些化石燃料的燃燒、提取、加工和運輸，不僅產生溫室氣體效應，也造成空氣污染與酸雨，甚至改變了地球原本的氣候型態，並影響生態環境及人體健康。因此，在持續發展文明與建設家園的目標下，必須努力減緩大氣中溫室氣體濃度之增加，短期的措施是藉節約能源及提昇能源的使用效率，長期則應降低含碳化石能源並轉而使用再生能源。若具體歸納起來，大致有四個方面的工作需要進行：

1. 減少能源浪費：通過養成節能習慣、使用節能設備和改進用電產品的能源效率，可以降低對能源的需求，同時減少因為發電產生的碳排放量，減輕溫室氣體效應。
2. 促進綠色生活：社會和個人生活層面的改變，也是實現環境保護和節能減碳的重要方法。例如將傳統使用石化燃料的交通運

具改為電能運具、房屋在設計及建造時就考慮節能、減少高耗能產品的使用、透過資源回收推動循環經濟等，讓人類的生活不再是消耗地球資源，而是一個綠色的循環。

3. 使用再生能源：再生能源可持續不斷的由自然過程中得到，是相對環保的能源來源，增加再生能源利用的投資，可以加快減少對化石能源的依賴，也可大幅降低碳排放量。
4. 推動能源轉型：減少碳排放的能源轉型，仍需要研究開發新的再生能源技術，如地熱、氫能、生質能等；但因再生能源發電具有間歇與不可控制的特性，需透過儲能與智慧電網管理系統調節並調度電力，才可強化電網之穩定度，這些都是需要持續開發與轉型的能源解決方案。

前兩項有關節能與綠色生活方面，需要



靠政府的作為，訂定各種獎勵或管理措施，也需要民眾的自律，使用節能產品及減少資源浪費；後兩項是藉由工程手段進行再生能源開發利用與轉型方面的議題，就是本期的重點。

本期共邀請6篇文章，內容涵蓋了部分再生能源利用，如風力發電、太陽光電、地熱能源，以及強化電網韌性之輸變電及儲能。在離岸風力發電方面，中興工程顧問公司針對固定式風機支撐結構，尤其是結構疲勞等重要因素的考量與因應方式，提出分析設計說明；在適用於水深較深的浮式基礎議題，則邀請船舶暨海洋研究中心以其開發大型半潛式風力發電機平台之經驗，分享建立浮式平台設計分析技術，期能為2028年後示範風場設置目標提供貢獻。

近年來在核能發電機組逐漸停止運轉後，太陽光電的適時併入電網，讓我們在今年酷夏免除了限電之苦。本期介紹全台最大的水面型太陽能發電廠-彰濱工業區崙尾東區發電廠，以及台灣電力公司為穩定電網，提出太陽光電加強電力網工程的規劃及目前進度。

在能源開發與轉型方面，說明我國過去在地熱方面的調查，也介紹新一代清水地熱發電廠的運作案例；在儲能方面，則介紹大型儲能設備之規劃實務，以瞭解未來儲能方面的前景。

由於電力與能源的發展不僅牽涉到國計民生，更涉及國家安全及經濟發展，是全球各國都極度重視之議題，未來勢必有更多的電力與能源相關的技術發展，因限於篇幅，本期僅以6篇專文介紹國內電力與能源工程技術與前景，以分享讀者。



套筒式離岸風機下部結構之細部設計實務概述

中興工程顧問股份有限公司電力及能源工程部經理 / 徐偉朝
中興工程顧問股份有限公司電力及能源工程部工程師 / 夏瑄
中興工程顧問股份有限公司電力及能源工程部工程師 / 郭思伶
中興工程顧問股份有限公司電力及能源工程部工程師 / 杜昱石
中興工程顧問股份有限公司電力及能源工程部工程師 / 林芄妤

關鍵字：離岸風電、離岸風機下部結構、套筒式結構

摘要

為減少二氧化碳排放，全世界全力發展綠色能源，而離岸風電為其中之一。近年，在政府支持下，離岸風電產業蓬勃發展。然離岸風電工程技術係基於離岸油氣工程技術，國內工程界過去並無相關經驗。本設計團隊有幸執行並主導國內離岸風機下部結構設計案，擬藉本文分享執行過程所累積之技術經驗，期對國內工程界有所助益。

一、前言

空氣從高壓區域向低壓區域移動而產生風，人類很早便利用風力做為能源。西元前

5000年，人們利用風能推動尼羅河沿岸之帆船。至西元前200年，中國已有簡單之風力水泵，波斯和中東則有帶著編織蘆葦葉片的風車用於碾磨穀物。商人和十字軍將風能技術帶到歐洲。荷蘭人發展出大型風力泵來排乾萊茵河三角洲之湖泊和沼澤，以增加陸地面積[1]。在工業革命發明蒸氣機後，人類改以石化燃料做為主要能源。1970年代之石油危機，人們開始尋找替代能源，其中包括風能。1980年代在美國加州便已設置數千部風機。近年，為減少石化能源對全球氣候之影響，發展如風力發電之綠色能源成為世界各國共識。隨著風機容量大型化與陸地發展受限，人們開始將風力發電機設置於海上。

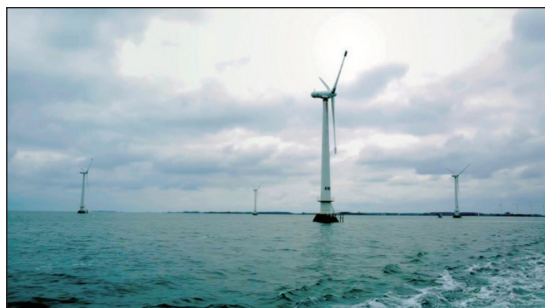


圖 1 Vindeby 離岸風場 [2]

1991年丹麥建置第一座離岸風力發電場 Vindeby Offshore Wind Farm，其裝置容量為11部450 kW風機（已於2017年除役），如圖1所示。隨後，離岸風電開始於歐洲地區蓬勃發展。後發展至亞洲、美洲。至2021年，全球已有21.1 GW容量併網，全球目標至2030年建置近380 GW離岸風機[3]。可預見離岸風電成為全球蓬勃發展之能源產業。

離岸風機支撐結構設計與傳統陸域結構設計思維極為不同[4]，離岸結構承受全天風浪作用，結構設計可能非由極端情境(如颱風、地震)所控制，而是平時長期風浪反覆作用造成之結構疲勞才是破壞主因。

離岸風電工程技術係基於已發展百年之離岸油氣工程技術，後者以美國API與歐洲DNV等兩系列標準為代表。由於離岸風電產業自歐洲開始發展，最早離岸風機支撐結構設計標準係由DNV於2004年制定DNV-OS-J101標準[5]，成為世界各國離岸風電工

程之主要設計依據。即使美國亦已發展離岸風機支撐結構設計標準[6]，但仍允許採用DNV系統標準進行設計。

風機下部結構始於初期概念設計，後續在風機商、電氣設備商、結構製造商、安裝商、運維商等加入後，將各廠商需求納入設計，使細部設計成果可符合製造、安裝與使用之需求。本文將依據本團隊執行套筒式離岸風機下部結構之細部設計過程中(其與單樁式下部結構設計有所不同)，概述其設計要點。

二、風機支撐結構組成

「離岸風力發電場址調查及設計技術指引」[7]定義套筒式(jacket)風機支撐結構係從風機以下之塔架(tower)、下部結構(substructure)與基礎(foundation)所組成，如圖2所示。其中，下部結構包括轉接段(transition piece, TP)，亦常指包括基礎(基樁)的部分。

實務上，塔架由風機商設計，下部結構則由工程顧問公司(下部結構設計者)設計，兩者分工介面在塔架底部之法蘭接頭。接頭係由兩片法蘭以螺栓結合，上法蘭與塔架銲接，而下法蘭與轉接段銲接，風機商負責法蘭接頭設計。若下部結構設計者為配合轉接段而改變風機商之下法蘭設計(如壁厚)，則下部結構設計者亦可能須承擔設計

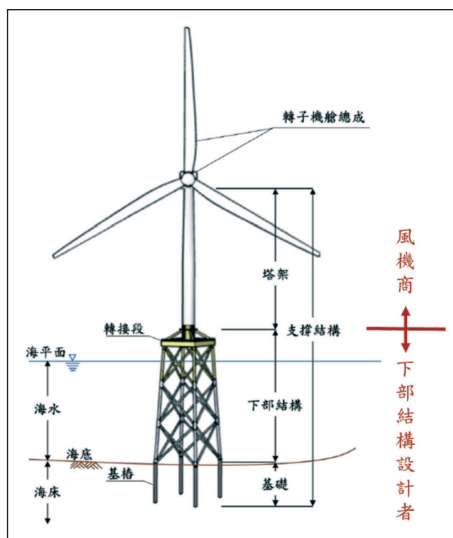


圖 2 套筒式風機下部結構組成與分工 [7]

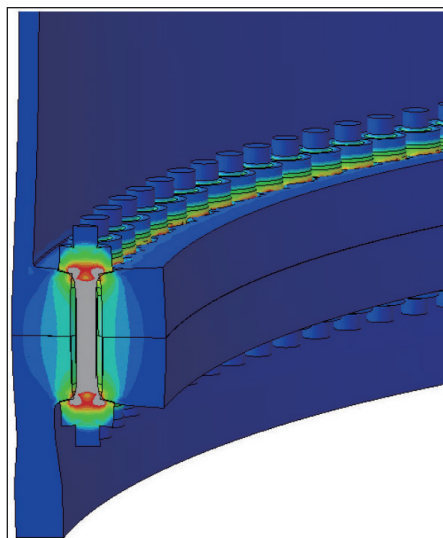


圖 3 法蘭接合之有限元素分析

責任。下部結構設計者可能須辦理包含下部結構與法蘭接頭之有限元素分析（如圖3所示），計算法蘭與螺栓應力之集中放大因子，供風機商設計。詳細分工需視風機商合約之約定。

三、設計流程

（一）設計準則

風機支撐結構細部設計流程圖可簡化如圖4所示，首先訂定設計準則，依據DNV-SE-0190第2.3節，可分為三個部分：

1. 設計準則A，通常由業主提供，用於說明場址條件、環境參數、設計需求或業主之額外需求等。

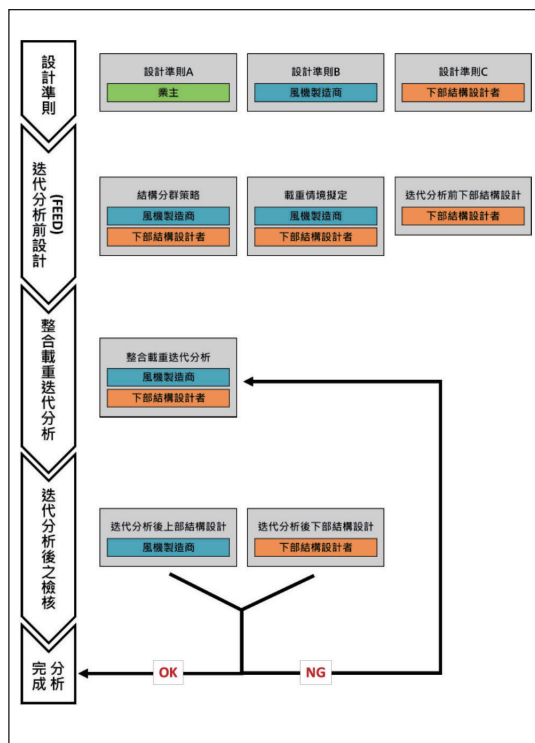


圖 4 風機下部結構設計流程概述

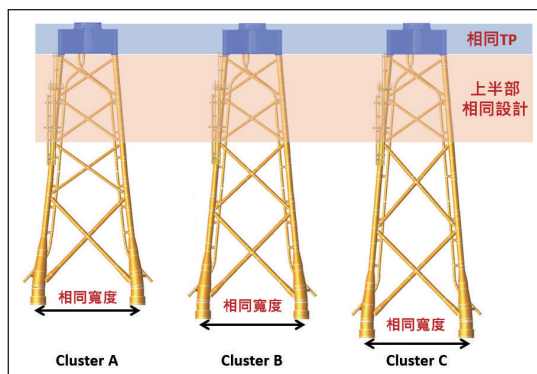


圖 5 三種群集之相同設計示意

2. 設計準則B，由風機商提供，說明風機特性、設計需求、設計方法、載重組合、風況設計參數等。
3. 設計準則C，由下部結構設計者負責，內容包括下部結構之設計需求、材料、設計方法、海況、地工設計參數等。

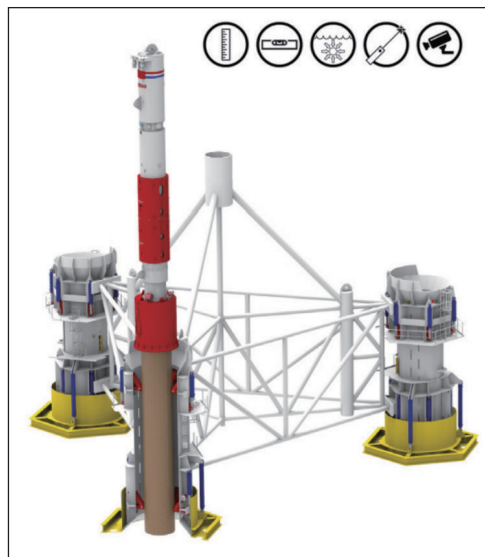
（二）分群策略

每座風機支撐結構設計所考量之載重組合可達上萬組，若針對風場內每座風機支撐結構進行個別歷時分析，雖在重量上可達最經濟設計，但極為耗時。較長之設計時程將導致較晚之併網發電時間，對整個計畫並非最經濟。為儘早併網發電，通常採用「群集策略（cluster strategy）」，以減少需設計之結構數量，以減少設計時程。

實務上，主要依據水深條件進行分群

（clustering），其次則依據土壤條件。通常位於較深處之結構承受較大之海況載重，因此選擇群集內最深處作為代表位置，為確保此位置須能完整包絡該群內之所有位置，通常採較嚴苛的環境條件（土壤參數與環境外力）作為此群集之輸入參數。同一群集內之結構設計相同，以減少分析工作量，並可採用標準化製造程序以降低生產時間與成本。此外，若在不同群集間之結構能有部分保持一致性，更能製造上之複雜度。

上述概念展示於圖5，三種群集之結構設計具有相同之轉接段、套筒桁架上部、船靠設施、與各種工作平台等，僅套筒桁架下部因高度不同而有變化。此外，離岸風機套筒式結構之基樁安裝通常採用先打法，打樁前將打樁導架（如圖6所示）放置於海床上，


 圖 6 打樁導架示意（來源：<https://www.iqip.com/>）



以便基樁可精準貫入海床。由於打樁導架之基樁間距通常不可調整，因此各群集間具有相同基樁間距，以共同使用打樁導架。

基樁間距主要由運輸船舶寬度、基樁承載力、樁頭受力所決定。此間距愈大，樁頭受力越小，基樁所需之承載力愈小，但需要之運輸船舶寬度愈大。因此，在設計之初，需進行敏感性分析，並由業主提供船舶寬度限制，以決定最適基樁間距。

（三）載重情境

風機支撐結構需承受風場運作期間之各項載重情境，包括風機操作條件、風況、海況及其作用方向，並將其組合。如前述，風機與塔架設計由風機商負責，以下之結構部分則由下部結構設計者負責。雙方須討論各自關注之設計載重，共同制定載重組合表（Load Case Table），其情境須符合IEC 61400-3-1[8]或DNV-ST-0437[9]。依據「離岸風力發電場址調查及設計技術指引」及DNV-ST-0126[10]，離岸鋼結構設計除須檢核整體結構頻率外，亦需考量極限狀態（ULS）、疲勞極限狀態（FLS）、意外極限狀態（ALS）及使用極限狀態（SLS）等四類情境。

（四）整合載重迭代分析與檢核

風機支撐結構設計係由風機商與下部結

構設計者共同完成，故雙方須交換各自分析與參數資料，供對方進行設計。下部結構設計者須提供之資料包括縮減（condense）至塔架-轉接段介面自由度之下部結構（含基樁）質量矩陣、勁度矩陣、阻尼矩陣、與外力向量等。風機商再據以進行整體模型之氣彈力分析，再將介面歷時提供予下部結構設計者，以進行結構檢核與進行結構設計調整，上述過程迭代至雙方無須再修改設計為止。

四、設計考量

（一）設計規範

決定設計所遵循之規範係設計之首要工作，除須確認所採用之規範版本（年份）是否為業主、開發商及設計驗證單位所接受外，亦須與風機商共同制定載重組合表時討論並確認。

IEC 61400-3-1為固定式離岸風機支撐結構設計之「母法」，惟其對結構設計並無太多著墨。由於DNV系列標準提供完整規劃、設計、製造、安裝等各階段之具體要求，實務上多以DNV系列標準做為依據，其中DNV-ST-0126為結構永久階段設計依據，而DNV-ST-N001[11]則為海上作業（如運輸、吊裝）之設計與檢核依據。另外，NORSOK、ISO、API、EN等標準為DNV系統標準所常引用之依據。



綜觀現行離岸風機結構設計規範，雖內容大同小異、常有相互引用之狀況，但細節仍有些微不同、或有先後交錯改版之情況發生，故建議於設計工作啟動之初，即與各方確認主要規範依據及其版本，並據以編製設計準則C。

表1展示下部結構設計規範層級架構（standards hierarchy）例，層級1為DNV-ST-0126與DNV-ST-0437標準，前者為支撐結構之設計依據，後者為載重及場址條件之擬訂依據。層級2為層級1所允用之規範，後續層級依此規則延伸。

（二）環境條件

風場範圍之環境條件需依據一系列之調查（如地質鑽探、潮位、風速、地震資料）、研究（如海氣象研究、風況分析、海床變動）與試驗（大地現場/室內試驗）等，彙整後綜合研擬訂設計條件與載重情境。

此外，除風速、波浪、海流直接影響環境載重外，水深、潮位、風浪流方向與其聯合機率分佈、結構構件尺寸、海生物附着厚度、土壤條件、與基樁伸出海床長度（stick-up length）均影響設計成果。在設計前期，須進行敏感性分析（如高、低水位情境），以瞭解前述參數對結構設計之影響，進而選用較保守之條件組合進行設計，亦能減少載重組合數量。

表1 規範/指引之階層

	項目	層級 2	層級 3
載重及載重條件	載重組合	IEC 61400-3-1	
	離岸特定荷載	IEC 61400-3-1	
	水動力參數	DNV-RP-C205	
	瑕疵	NORSOK N-004	
	地震	DNV-RP-0585 CNS 15176-1	
結構檢核	鋼結構設計 一般通則	NORSOK N-004 EN 1993 DNV-RP-C208	
	鋼結構 疲勞設計	DNV-RP-C203 NORSOK N-004	IIW recommend EN 1993- 1-9
	板殼鋼結構 強度及穩定度 設計	EN 1993-1-6 DNV-RP-C208	
	鋼結構接合設計	EN 1993-1-8	
	灌漿接合	DNV-RP-0419	DNV-ST-C502
材料	鋼材規格 （鋼板）	EN 1993	EN 10025 EN 10164
	金屬製品 - 檢驗檔案的類型	EN 10204	
	螺栓材料	ISO 898-1	
	銲接接頭 品質等級	EN 1993 EN 1090-2	EN ISO 5817
製造	製造公差	ISO 19902 DNV-OS-C401	
防蝕保護	海水中陰極保護 一般通則	ISO 24656 DNV-RP-0416	
	固定離岸結構 防蝕保護一般 通則	ISO 24656 DNV-RP-0416	
	塗層系統	ISO 12944 ISO 24656 NORSOK-M501	
註：層級 1 為 DNV-ST-0126（針對支撐結構）及 DNV-ST-0437（針對負載和場址條件）			



(三) 載重組合表

載重組合表列出風機商與下部結構設計者共同制定之所有設計情境，主要為極限限度狀態（ULS）、疲勞限度狀態（FLS）之載重情境。其內容包含下列主要設計條件：

1. 風機操作狀態、風向、風速、風況
2. 示性波高、週期、波向、波況
3. 海流流速、流向、流況
4. 潮位
5. 地震

此表格包含各種載重情境之編號、描述、載重方向、組合方式等信息，載重組合表之研擬步驟如下：

1. 確定載重條件：根據設計規範要求，確定與特定場址風機支撐結構相關之所有載重類型，包括永久載重（如結構自重）、環境載重（如風載）、臨時載重（如施工載荷）等。
2. 確定載重情境：根據設計規範和要求，確定載重條件之組合方式，主要針對極限限度狀態（ULS）、疲勞限度狀態（FLS）等。亦須考慮載重同時發生、逐步發生、最不利（保守）等組合。
3. 制定載重組合表：將前述擬訂之載重情境列在表內（通常以 excel 格式呈現）。

4. 複核與修訂：制定完載重組合表後，風機商與下部結構設計者需進行複核和修訂，確保所有重要之載重情境均納入其中，並符合規範要求。

(四) 頻率限制

風機下部結構設計時，應考量結構基本自然頻率範圍，避免與風力機運轉之頻率發生共振（如圖7所示），即避開風力機之1P與3P轉動頻率範圍。由於葉片轉速隨風速變化，1P與3P轉動頻率並非定值，而是呈現頻率範圍。若結構基本自然頻率小於1P（軟性－軟性設計），易與波浪或風速等環境頻率共振，實際上，固定式之套筒式下部結構較難設計具低自然頻率特性。若結構基本自然頻率大於3P（剛性－剛性設計），則桿件設計尺寸偏大，並不經濟。

綜合上述，通常結構基本自然頻率設計於1P與3P之間（軟性－剛性設計），並由風機商提供此區間，風機商與下部結構設計者

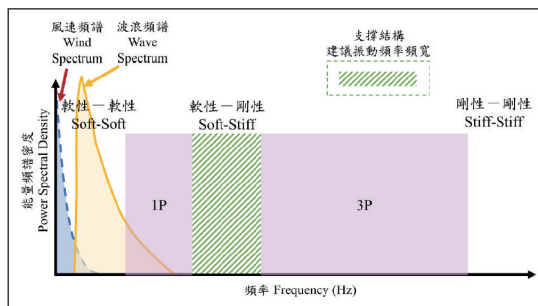


圖 7 風機整體頻率區間限制 [6]



皆需建立含塔架之完整模型，並檢核結構自然頻率核。通常，套筒式下部結構之基本自然頻率偏高，容易接近頻率上限（即接近3P頻率）。此外，頻率檢核模型需考慮整體結構系統自然頻率最高與最低之情境（此受海生物附著厚度、腐蝕、潮位、土壤等因素影響），以確認其頻率仍在限制範圍。

（五）製造限制

套筒桁架之製造限制通常包含圓管板厚、圓管長度、厚度直徑比、錐管長度、銲接型式（單邊銲、雙邊銲、內部銲道之管徑限制）與背襯板形式等。此外，國內離岸風場開發有朝深水區發展趨勢，即套筒桁架高度需隨之增加，考量製造廠房與吊裝機具限制，通常需將套筒桁架分為上、下部分，並在最後階段時進行大組接合。而接合位置通常需由下部結構設計者與製造者共同討論擬訂，並需考慮組立時之塗層修復或噴塗時之遮蔽事宜。若在結構配置許可下，於初步規劃分層時，可將塗裝區域一併考慮，以有效減少施工成本及時間。如受限於海上運輸與吊裝能力，可能需要在海上接合，則施工商亦需納入設計討論。

轉接段可能採用箱梁式結構（如圖9(b)所示），其存在密閉空間，部分銲道須採用單邊銲接，或可於低應力處設置臨時人孔進入內部銲接，完成後再將其封閉。由於銲接形式對疲勞強度具顯著影響，故在設計階段，須將製

造方法、工序與銲接形式一併納入考量。

綜上所述，製造限制影響設計成果甚鉅，若在製造階段才發現問題，可能嚴重影響計畫時程。因此，製造商應在設計初期參與設計討論，提供明確製造限制，避免日後變更設計，增加設計時程。

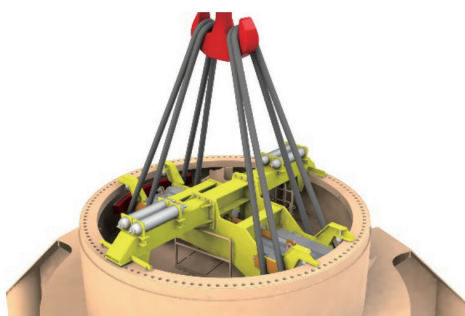
（六）施工限制

海上作業屬高技術且高風險之工作，為減少海上作業時間，通常避免在海上安裝現場進行加工，多在陸上完成整體結構組立及相關設備安裝。因此，於吊裝、運輸等階段時，即需將下部結構之幾何和重量（含設備）納入考量。尤其，其作業與吊具高度、吊重能力等因素息息相關，為關鍵控制因子。業主宜在計畫初期即提供下部結構設計者關於海上作業需求，以避免施工船舶無法配合。

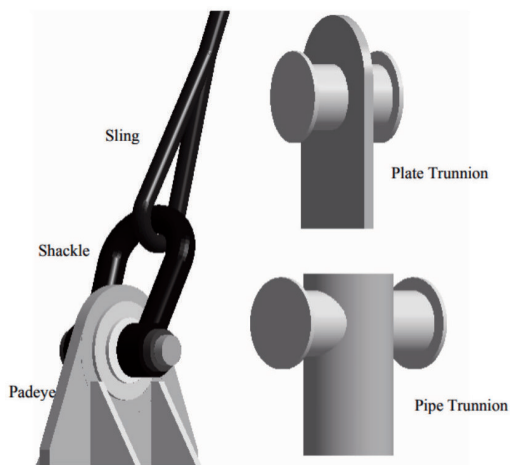
常見之套筒式離岸風機下部結構吊裝方法（如圖8所示）包含：

1. 法蘭提吊
2. 吊耳提吊
3. 耳軸提吊

可用提吊方式之選定則與轉接段幾何配置相關，通常下部結構之初步幾何及重量在基本設計完成後即可得知，因此業主宜先行



法蘭提吊(來源: www.houlderltd.com)



吊耳(左)與耳軸(右)提吊[12]

圖 8 提吊方式



支撐式(來源: <https://www.jandenul.com/>)



箱梁式(來源: <https://www.vanoord.com/>)

圖 9 常見之轉接段型式

採用此初步設計資料確認施工船舶可配合提吊作業。

(七) 轉接段結構設計

轉接段之功能係將塔架所傳遞之載重分散至下部結構，首先設計者需先確認擬採用之轉接段形式，常見之套筒式下部結構之轉接段有支撐式 (strut) 與箱梁式 (box

girder)，如圖9所示。除製造限制外，提吊需求亦會對於轉接段之幾何有所影響，須一併納入幾何選定之考量。此外，業主可能需考量成本、時程…等因素，經通盤考量後，方能決定最終採用形式。

考量設計、施工、製造、分析、安裝等成本，通常轉接段僅有一種設計，應用於整個風場。設計時，可採用包絡整體風場之設



計條件進行分析檢核。由於轉接段與與套筒桁架為一體，下部結構模型須能精確反映轉接段動態反應特性。

轉接段在營運階段主要承受來自於風機及次要結構之載重。依據DNV-ST-0126，需執行極限（ULS）、疲勞（FLS）、使用（SLS）、意外（ALS）等限度狀態及地震情境之檢核。

在ULS情境中，結構需進行降伏強度及挫屈強度檢核，由於介面載重歷時數量眾多，須在分析前先進行整理，選取包絡值作為分析載重。為考量經濟性，在非關鍵處之局部應力若略大於降伏應力，則可執行非線性分析，確保其塑性應變符合規定即可。

在FLS情境中，可採用等效損傷載重（Damage Equivalent Load, DEL）、馬可夫矩陣（Markov matrix）或時間歷時等不同形式之載重進行分析。一般而言，由於板殼模型之元素數量龐大，執行疲勞分析時，需先依節點幾何及銲接形式將接合處(joint)分類，僅針對各類接合處之關鍵元素進行檢核。惟所選定之關鍵元素須具足夠代表性，且可包絡整個生命週期之疲勞情境。進行細部設計時，需依賴自撰程式處理關鍵元素之應力歷時，依規範計算其累積疲勞損傷[4]，以進行檢核。

地震情境可能不會控制轉接段設計，惟

執行耐震設計時，須選定兩個模型進行分析，一為最軟模型、另一則為最硬模型，以確保設計模型已完整包絡整個風場之結構頻率上下界。影響結構頻率之因素包含土壤彈簧、水深、套筒桁架、海生物附著厚度等。選用分析位置所對應之套筒桁架模型及分析載重，建立有限元素模型，方能進行後續分析。

SLS情境一般考量整體結構之偏移轉角及工作平台之垂直撓度。而整體結構之偏移轉角於套筒桁架分析模型之傾角檢核時檢討，無需於轉接段分析進行檢核。工作平台屬次要結構，設計時獨自檢核其支撐梁之垂直撓度。

ALS情境主要考慮船隻撞擊，由於轉接段之設置高程並無船隻撞擊的風險，基本上不予考慮。

（八）套筒結構設計

套筒桁架設計主要受到風機載重、海況環境載重與土壤條件等影響。在各限度狀態檢核中，極限限度狀態（ULS）與疲勞限度狀態（FLS）為設計關鍵。

套筒桁架之幾何佈置與轉接段、基樁及次要結構等下部結構其他部分之設計環環相扣，故進行下部結構設計前，需先擬訂套筒桁架之幾何佈置。



對於ULS情境檢核，主要設計考量包含桿件檢核、接頭檢核、基樁受力等，皆與套筒桁架幾何佈置息息相關。相較於FLS情境，ULS情境分析時間較短，故先考量ULS情境，初步擬訂套筒桁架幾何佈置，包含套筒桁架頂部與底部寬度、斜撐數量與間距、主桿斜率與支撐腳轉折處等，其中套筒桁架之頂部寬度直接影響轉接段（TP）尺寸，底部寬度（footprint）則直接影響基樁受力，進而影響基樁尺寸與貫入深度。

對於FLS情境檢核，主要設計考量為接頭疲勞損傷檢核，其影響因素包含設計年限、接頭幾何尺寸、銲道型式、防蝕系統、載重歷時、結構動態特性…等。累積疲勞損傷須經大量時間歷時分析後，將個別疲勞損傷疊加而得。由於影響因素眾多複雜，不易直觀調整設計，故較ULS分析繁瑣耗時。

除了各情境之檢核外，接頭幾何設計亦須符合規範之限制條件，並與下部結構其他部分設計互相配合，例如與轉接段之接合方式、次要結構之配置、基樁受力回饋等，各部分彼此關聯，需互相配合來完成設計。

（九）基樁設計

無論採用何種下部結構型式，載重最終皆透過基樁傳遞至土壤，故土壤承載力須足以承擔基樁受力。土壤承載力主要受土壤條件、基樁樁徑與長度等因素影響，而基樁受

力則與套筒桁架設計及環境外力有關，尤其套筒桁架底部寬度（即基樁間距）相當於提供彎矩之力臂，直接影響樁頭受力。因此，如先前所述，在設計之始，便應綜合各種考量，進行敏感性分析，擬訂下部結構之幾何佈置。

基樁設計往往是一體兩面的，從基樁受力之角度而言，套筒桁架底部寬度與基樁受力呈反比，雖較大之基樁間距對基樁承載力需求較低，但恐增加套筒桁架尺寸與重量，需要較大之運輸與起重船機。另一方面，樁徑與淘刷深度呈正比，樁徑越大致淘刷越深，需要增加基樁長度以滿足承載需求，然可設計之樁長受限於設計前已決定之鑽探深度，亦可能受限於製造、運輸及施工條件，故設計者需在敏感性分析中找到平衡點。

（十）次要結構設計（內外部平台、靠船樁、J型管）

次要結構包含各種平台（platforms）、船撞設施（boat landing）、J型電纜管（J-tube）…等，其設計主要係使用功能性之考量。

外部平台主要用於提供作業空間供人員通行及貨物暫置；在安裝階段，提供如灌漿作業時之人員作業空間。考量維運作業需求。外部平台佈置須將平台起重機吊臂迴轉半徑及可達範圍一併檢討，包括吊臂外伸範圍是否超越下部結構投影範圍，以利吊放船



圖 10 人員運輸船靠泊方式（來源：<https://www.atlanticwindtransfers.com/>）

船上之貨物。貨物放置區位於塔架門口正前方，而塔架門口應位於背風側；臺灣海峽冬季受東北季風影響甚鉅，夏季雖有西南季風，但其強度不若前者強勁，故可設置於偏南側。另外，人員運輸船（Crew Transfer Vessel, CTV）需逆風浪頂靠於船撞設施（如圖10所示），因此，其設置方向須依場址海氣象條件而定，如前述之臺灣海峽條件，亦可設置於偏南側。為增加人員登上結構之安全性，Walk-to-Work系統可讓人員以步行方式從船舶走至外部平台（如圖11所示），如設置此系統，則外部平台須設置閘門。此外，在開口或閘門附近，須設置安全錨勾點，以防人員落海事件。

轉接段內部平台提供低壓電氣設備安置空間、臨時海纜儲放、與塔架安裝階段之人員作業空間等，涉及風機、海纜、低壓電氣等多個介面。設計時，需與各介面廠商共同討論與設計，檢核不同作業情境下之結構強度與空間衝突。因應電氣設備更換，內部平台格柵可能



圖 11 Walk-to-Work 系統（來源：<https://www.ampelmann.nl/>）

需要臨時移除，在格柵開口附近則需設置臨時欄杆支撐座，以確保作業安全。

船撞設施與J型管承受海浪、海流、船舶撞擊等載重，並傳遞至主要結構，其設計與套筒桁架相互影響，亦影響整體結構自然頻率，需一併建置於下部結構模型內，進行完整強度檢核。尤其需檢核主、次要結構接合處之疲勞損傷，主要結構可能因此需增加板厚，以提高抗疲勞能力。

五、整合載重分析

如先前所述，風機支撐結構設計係由風機商與下部結構設計者共同完成，其負責分工介面在塔架底部法蘭。結構設計涉及風機運轉控制之氣彈力分析（aero-elastic analysis），上部結構與風機模型須納入下部結構動態性質，以建立整合結構模型，以進行載重分析，即整合載重分析（Integrated Load Analysis, ILA）。



各風機商可能採用不同軟體分析，致存在不同檔案格式，為順利交換資料，下部結構設計者與風機商須先確認資料格式、內容與交換方式。由於交換資料量相當龐大，動輒數百GB位元組，無法使用電子郵件傳遞，可採用檔案傳輸協定FTP（File Transfer Protocol）進行資料交換。此外，雙方亦需確認文件檔案之編號識別與格式，正式整合載重分析前可進行少量測試，以確認此模式運作順暢。

在此少量測試裡，雙方比對各自分析（模型皆含風機、塔架）之模態頻率、振態形狀、介面載重與位移歷時等成果之一致性，以確認雙方後續交換資料、結構模型、與軟體計算程序之正確性。

完整設計過程需多次整合載重分析之迭代過程，如圖12所示。在分析之前，風機商需提供上部結構資料（含風機、塔架幾何、內部平台、設備、法蘭之質量與質心位置等）與通用介面載重，供下部結構設計者進行初步設計。與此同時，雙方須共同討論與擬訂用於後續整合載重迭代分析之載重組合表。

下部結構設計者先將下部結構模型（不含風機、塔架）與海況載重資訊濃縮（condense）至塔架-轉接段介面自由度之動態超元素（Dynamic super-element，DSE），其包含下部結構之質量矩陣、勁度矩陣、阻尼矩陣、與外力向量（不含風況載重）等（如圖13所示）。再將此動態超元素檔案提供風機商進行氣彈力分析，每個檔案對

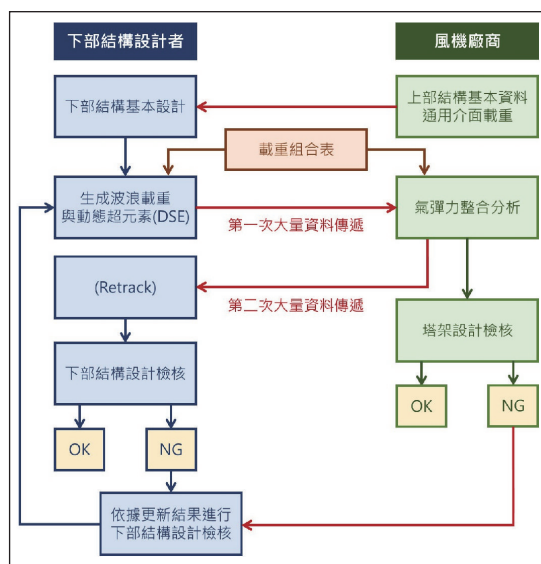


圖 12 整合載重迭代分析流程

應一組載重情境。

風機商將收到之超元素檔案配合各種風載重情境進行氣彈力分析，分析完成後，依載重組合表所列之載重情境，將介面載重與位移歷時回饋予下部結構設計者，供後續分析。

風機商依氣彈力分析成果，進行塔架強度檢核。下部結構設計者則輸入介面載重歷時，以原下部結構模型（不含風機、塔架）與環境載重條件重新分析（稱復位分析，retrack），以檢核原設計強度。若雙方檢核皆通過，則設計完成，反之，若其中一方檢核未通過，則須更新設計並調整模型，依前述程序，重新進行整合載重迭代分析。

通常在設計過程，需執行2至3次整合載

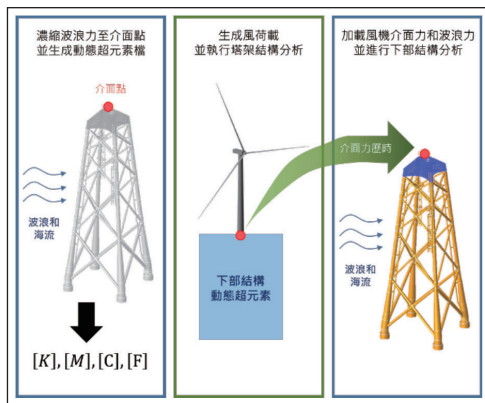


圖 13 整合載重迭代分析

重分析，每次迭代分析所需時間依據群集數量與載重情境數量而定。以4個模型為例，風機商與下部結構者之電腦計算與其準備時間可達2~4個月。

在整合載重分析過程之數月內，所有結構與環境條件必須維持一致，不得在復位分析期間改變結構或環境條件。因此，在整合載重分析前，應先確認環境條件（如海況、土壤等），以免耗費大量時間與成本後，分析成果作廢。

六、結語

離岸風機下部結構設計與傳統陸域或港灣工程極為不同，其設計涉及土木/結構、大地、海洋、大氣、電氣、機械…等領域，須考慮之製造與施工方式亦與陸域工程有極大差異。因此，下部結構設計者除須熟悉離岸結構設計規範與分析技術外，亦應對其它領域專業有所涉略，以將各項領域之功能需求

均能整合至結構設計中。

為配合政府綠能目標，通常設計時程極為有限，自動化處理大量載重組合與減少運算時間為設計最佳化之關鍵，唯有如此才有多餘時間進行測試，以調整設計。

本文概述本團隊執行細部設計過程之經驗，供國內工程界參考，期能對國內離岸風電工程技術有所助益。

參考文獻

1. "Wind explained - History of wind power", U.S. Energy Information Administration <https://www.eia.gov/energyexplained/wind/history-of-wind-power.php>.
2. "Vindeby Offshore Wind Farm: For Demonstrating the Viability of Offshore Wind as a Clean Energy Powerhouse (Most Influential Projects: #32)", PM Network, 33, 66-67 (2019).
3. Global Wind Energy Council (GWEC), "Global Offshore Wind Report 2022" (2022).
4. 徐偉朝、龔琬茜、郭思伶及夏瑄等，「離岸風機支撐結構設計之高效分析技術發展」，中興工程 147 期 P61 - 69 (2020).
5. DNV, "DNV-OS-J101 Design of Offshore Wind Turbine Structures" (2004).
6. American National Standards Institute "ANSI/ACIP OCP-1-2022 Offshore Compliance Recommended Practices, Edition 2" (2022).
7. 「離岸風力發電場址調查及設計技術指引」，經濟部標準檢驗局 (2023)。
8. International Electrotechnical Commission, "IEC 61400-3-1: Wind energy generation systems-Part 3-1: Design requirements for fixed offshore wind turbines" (2019).
9. DNV, "DNV-ST-0437 Loads and site conditions for wind turbines" (2021).
10. DNV, "DNV-ST-0126 Support Structures for Wind Turbines" (2021).
11. DNV, "DNV-ST-N001 Marine operations and marine warranty" (2021).
12. LI LIANG, "Heavy lift installation study of offshore structures", Master thesis, Dept. of Civil Eng., National Univ. of Singapore. (2004).



大型抗颱風潛式離岸風力機平台開發

財團法人船舶暨海洋產業研發中心處長 / 鍾承憲
財團法人船舶暨海洋產業研發中心執行長 / 周顯光
財團法人船舶暨海洋產業研發中心副組長 / 黃政彰
財團法人船舶暨海洋產業研發中心工程師 / 吳彥威

關鍵字：離岸風電、浮動式風力機、繫泊系統、耦合分析

摘要

本文以搭載10 MW離岸風力機之浮動平台為設計目標，假設以臺灣西部海域水深50 m以上區域為場址，根據穩度要求設計平台幾何，並對繫泊配置進行擬靜態分析，以不同纜繩直徑與加重塊進行比較，先進行浮動平台與繫泊系統的非耦合分析，假設平台運動只受環境負荷影響，而不受繫纜張力影響；之後在動態時域下考慮相同的環境條件使用耦合系統執行3小時動態分析，整理系統的極端動態響應結果，如浮體運動和繫泊張力，並將非耦合和耦合分析的結果進行比較與探討，最後於國立成功大學水工試驗進行1/70水槽模型試驗以驗證設計之可行性，針對浮式平台結構的運動反應和自由運動衰減情況進行探討與實驗，其中藉由建立浮式

平台模型與相關儀器設備，進行自由運動衰減、規則波及非規則波的試驗，量測項目為浮式平台之運動行為與繫纜繩張力，並包含分析反應振幅運算子（Response Amplitude Operator, RAO）分析及非規則波下之運動性能探討。

一、前言

根據全球風能協會（Global Wind Energy Council, GWEC）統計[1]，2019 年全球離岸風電新增裝置容量達 6.1 GW，佔總體新增裝置容量10%，創下歷史新高，離岸風電總裝置亦達到29 GW；2019年新增量前三名為中國（2.4GW，占比為 38.37%）、英國（1.8GW，占比為28.7%）及德國（1.1 GW，占比為 18.08%），全球離岸風力市場裝置

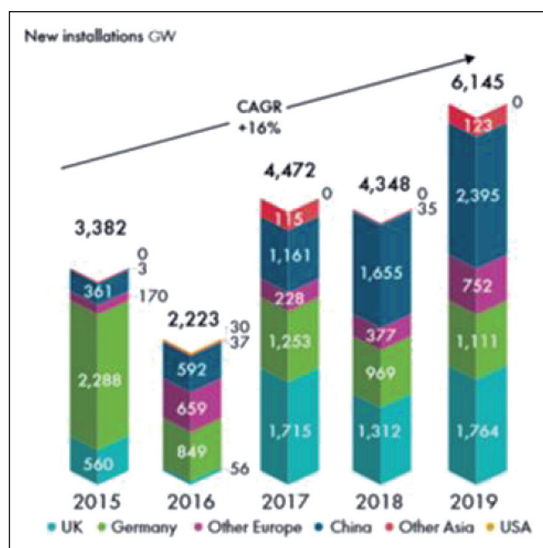


圖 1 2015~2019 全球離岸風力市場裝置容量分佈 [1]

容量分佈，如圖1所示。其中亞洲區域風能發展新增裝置容量為2.5 GW，佔全球新增量39%，東南亞將是未來發展重點區域，越南與泰國未來市場框架與政策發展頗值得關注。

目前離岸風力發電系統開發皆在50米內淺水區以底著式（bottom founded）的基礎結構，由於淺水區的離岸風電開發岸場容易與其他海洋開發用途相競合（如漁業、航運等），可開發的近岸淺水區域日益飽和，因此目標裝設範圍擴展至深水區域（50米~200米）成為各國下一階段離岸風電開發推動重點。

在美國、中國大陸、日本、挪威等國家，深水區域蘊藏相當豐富的風能潛能，隨著風場水深越深和離岸距離越大，對於風機

的功率與規格要求也越來越高，以目前固定式基礎結構技術，大於50米以上之水深區域，其水下基礎的成本以及施工難度將隨著水深增加，因此，浮式離岸風電概念隨之而生，浮式離岸風電係指安裝在浮動結構上之離岸風力發電系統，可在深水區域裝置離岸風力機，離岸風電先進國家紛紛開始積極投入深水區的浮式離岸風電相關技術研發，浮式風力發電系統有機會成為解決方案，擴大離岸風電的裝設範圍、提高風力發電量，GWEC預測至2030年[2]，浮式離岸風電將全面商業化，其全球裝置容量將達6.2 GW，且WIND Europe的報告中也評估[3]，依照目前的浮式離岸風電發展速度與進程，預估到2030年時，浮式離岸風電的均化成本將落於80-100歐元/MWh之間，已相當接近2017年度固定型離岸風電均化成本65歐元/MWh。可見浮式離岸風電在2030年前後將有機會成為大規模商業開發之標的，可預期浮式風電產業崛起，全球爭相進場卡位。

國內政府規劃離岸風電採「先示範、次潛力、後區塊」三階段開發政策；第一階段示範獎勵及第二階段潛力場址分別獲得初步成果，預計於2025年累計設置量達5.7 GW，並持續規劃第三階段區塊開發政策，自2026年至2035年間將年年釋出1GW容量，以10年10 GW規模賡續推動，在政府積極推動發展離岸風電下，開發區域勢必將涵蓋至50米水深以上區域。國際先進在浮式風電部署上亦尚在前期示範階段，國內與其技術差距尚



圖2 假設目標場址與資料浮標位置示意圖

低，若能提前投入浮式風電之研發、設計、製造和安裝上之需求，將可使國內產業及早準備，為後續國內產業切入、提升國產化比例奠下良好基礎。因此，本計畫預計建立浮式平台設計分析技術，期能為2028年後示範風場設置目標貢獻一力。

二、場址條件選用

本研究考量臺灣海峽特性，假設目標場址位於新竹外海，離岸約3.5-4公里，位於西部海域之觀測浮標，如圖1所示。綜合參考1997-2018總共11年之中央氣象局新竹浮標

實測海況，併與美國國家海洋暨大氣總署模擬數據（National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA）全球海況資料庫之環境數據[4]進行統計回歸分析，推估水深約50-100 m之新竹外海目標場址，作為研究浮動平台設計及性能評估之依據。期望建立10 MW級以上之浮式風機平台，故選擇平台場址水深為60 m，海氣象條件則參考表1、表2、表3。風速、波浪及海流等環境條件回歸值。並取95%信心度之50年回歸統計極值作為代表依據，亦即，最大示性波高 $HS = 12.72$ m，對應之尖峰週期 $T_p = 11.8$ s；海流極值取1.59 m/s，至於風速極值依信度95%回歸計



表 1 目標場址風速極值回歸值

回歸期 (年)	1	10	50
V_{130} (m/s)	36.94	44.96	49.64
195% (m/s)	35.91	42.48	45.81
u95% (m/s)	37.97	47.44	53.47 (57.0)

表 2 目標場址浪高、週期極值統計回歸值

回歸期 (年)	1	10	50
$H_{1/3}$ (m)	5.48	9.01	11.02
195% (m/s)	5.02	7.91	9.32
u95% (m/s)	5.94	10.11	12.72
$H_{1/3}$ (u95%) 對應 T_p (s)	8.89	10.77	11.80

表 3 目標場址海流極值統計回歸值

回歸期 (年)	1	10	50
海流流速 (m/s)	1.37	1.46	1.53
195% (m/s)	1.35	1.42	1.47
u95% (m/s)	1.39	1.50	1.59

算應為53.47 m/s，但考量臺灣特殊之颱風條件，故而本研究擬參照IEC-61400規範Class T之57 m/s作為風速極值[5]。

三、浮式平台構型設計與性能評估

現行市面上商轉風機詳細規格在商業機密考量下並不易取得，部份研究機構如美國國家可再生能源實驗室（National Renewable Energy Laboratory，NREL）及IEA國際能源署（International Energy Agency，IEA）等嘗試參考商轉風機開發研究用風機規格，並公

表 4 DTU 10MW 參考風機規格 [6]

型號	DTU 10MW
風機等級	IEC Class 1A
風機轉向 / 型式	順時轉，上風式
額定功率	10 MW
葉片數量	3
葉片尺寸	178.3
啟動風速 / 額定風速 / 停機風速	4 m/s, 11.4 m/s, 25 m/s
最大尖速比	90 m/s
輪轂尺寸	5.6 m
輪轂高度	119 m
葉片重量	228,962 kg
機艙重量	446,036 kg
塔架重量	628,422 kg

開其資訊作為開發研究之用，本研究使用丹麥技術大學提供之DTU 10 MW風機作為設計平台之參考風機[6]，如表4所示。

平台構型設計以半潛式為主，透過環境條件、初始設計限制及性能評估，訂定設計標準。初始設計平台吃水為20 m，乾舷設定為15米，亦即平台總深度（Depth）為35米，配合臺灣製造施工場址條件，平台全寬以不超過85 m為原則。圖2概念構型以環狀箱型浮筒（P1, P2, P3）應具備一定高度，並提昇其對平台三個頂點垂直圓柱（C1, C2, C3）之支撐力，以求盡量降減小型支撐柱（brace）之數量甚或完全避免，吃水（T）為20 m固定，分別調整浮筒平台高度（H）、垂直圓柱直徑（D）以及圓柱至平台中心（o）的距離（L）之尺寸。

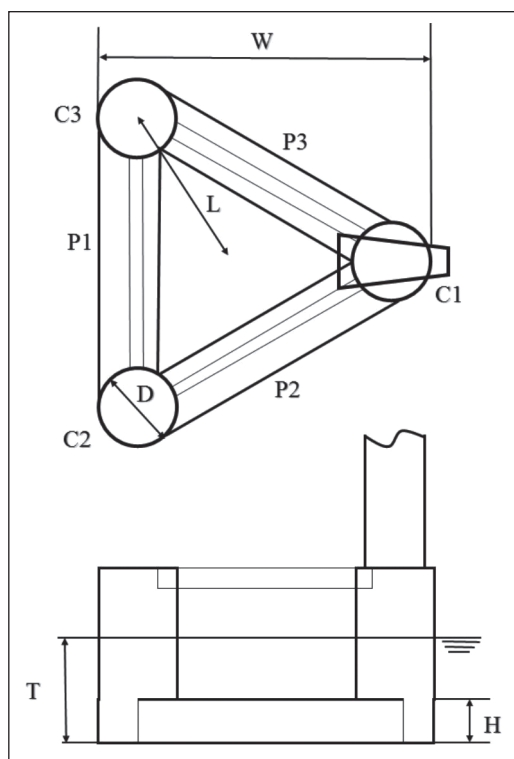


圖 3 概念浮動平台構型佈置示意圖

表5透過計算浮力穩度分析，得出定傾高 GMT、GML 需大於 1.0 m，而風機引致最大靜傾角（運轉最大推力下的傾角）需控制在 10 度以下。為了滿足設計吃水之需求，平台整體含風機、塔柱的重量必須等於平台設計吃水下之總排水量，總排水量扣除預估平台鋼構重量以及風機、塔架重量之外的差值，則需透過適當的壓艙水配置來完成，其中三個箱型浮筒（P1, P2, P3）除了預留 10% 予內部結構佔用之外，剩餘空間全數填充壓艙水；另為了平衡風機、塔柱安裝於圓柱 C1 所造成的平台整體重心偏移，故而 C2, C3 二圓

表 5 浮動平台主要尺寸與壓艙重量配置

名稱	尺寸	單位
圓柱至平台中心距離 (L)	40	m
圓柱直徑 (D)	12.5	m
浮筒平台高度 (H)	7	m
圓柱高度 (C1-C3)	35	m
吃水 (T)	20	m
排水量	19403	Tons
鋼材重	3831.7	Tons
浮筒壓載	10641.3	Tons
圓柱壓載 (C1)	338.3	Tons
圓柱壓載 (C2)	1643.3	Tons
圓柱壓載 (C3)	1643.3	Tons
GMT/GML	8.62	m
靜傾角	8.09	deg

柱內必須先配置與風機、塔架同等重量之壓艙水，若有剩餘再平均分配至平台三角形頂點之三個直立圓柱（C1, C2, C3）內。而浮動平台本身具有的抵抗傾側（Heeling）、翻覆（Moment）與外力，並回復到原來正浮位置之傾側能力，考慮平台受轉子推力作用產生之傾斜伴隨著角速度之變化，透過動穩度計算，求得平台受風作用下完整動穩度曲線，平台傾角下扶正力矩的面積，參照 DNVGL 規範建議至少需等於或大於風傾側力矩曲線下的 1.4 倍。

四、浮式平台繫泊系統設計與擬靜態評估

浮動式風力機之繫泊系統的目的是將浮動平台依設計位置保持在規定的範圍內，以

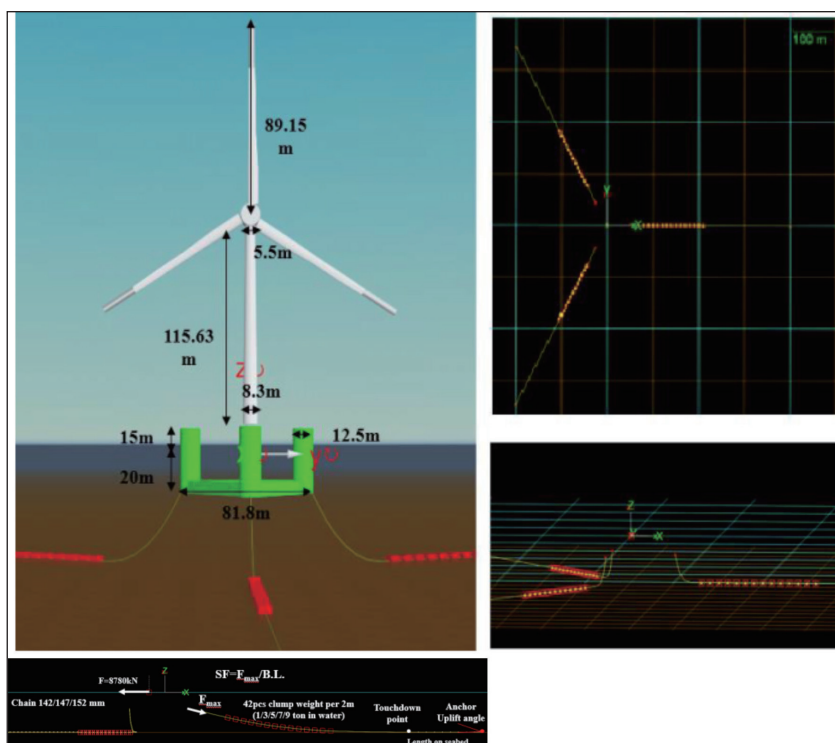


圖 4 Orcaflex 繫泊系統建模示意圖

使電纜或鄰近的風機不受損壞，並為浮動平台提供一定的穩定性。

浮動式風力機之繫泊系統選定以Orcina OrcaFlex[7]進行參數分析，見圖4為該軟體為海事工程與繫纜專業設計軟體。參考國際浮動式風力機安裝範例，繫纜資料選用國際繫纜廠商Vryhof型錄，錨鍊公稱直徑為142/147/152 mm，加重塊（clump）從繫纜著地點（touchdown point）往後每2 m間隔設置，每條錨鍊共有42個加重塊，加重塊重量為1~9 ton的沒水重量，以經驗公式計算50年回歸週期之風波流負荷下並檢核繫纜受力狀況。

分析結果主要比較係數如表6及表7所列，首先為繫纜張力之安全係數，以ABS所用之1.67為基準[8]，則需使用公稱直徑147 mm以上的錨鍊；在錨碇抬升角條件，以使用最常見之拖錨（drag anchor）情形，應不可

表 6 安全係數分析結果

直徑 加重塊 (ton)	142 (mm)	147 (mm)	152 (mm)
1	1.63	1.71	1.80
3	1.62	1.71	1.80
5	1.62	1.71	1.80
7	1.62	1.71	1.79
9	1.62	1.70	1.79



表 7 位移量

直徑 加重塊 (ton)	142 (mm)	147 (mm)	152 (mm)
1	20.88	20.25	19.56
3	17.12	16.58	15.72
5	13.05	12.31	11.60
7	12.13	11.52	11.01
9	11.65	11.12	10.31

表 8 浮動式風力機繫纜系統初步選定資料

參數	單位	值
繫纜型式	-	懸鍊
繫纜材料	-	R3 Studless Chain
斷裂強度	KN	15536
錨鍊數	-	3
水深	m	60
公稱直徑	mm	147
單位重量	Kg/m	432
錨碇點距浮體 中心水平距離	m	534
繫纜長度	m	550
繫纜預張力	KN	1537
繫纜初始剛性	KN/m	1179

產生錨碇抬升角 (zero uplift angle)，並衡量錨鍊與加重塊剩餘海床上的部分，盡可能不過度設計，加重塊較佳規格為5 ton，最後為浮動平台位移量，與後續海纜設計選定進行評估；最後整理浮動式風力機初步選定資料見表 8所列。

浮動平台與繫泊系統非耦合分析假設平台運動只受環境負荷影響，而不受繫纜張力影響，此時繫纜也只隨著平台運動改變張

表 9 環境條件計算列表

	風速 (m/s)	Hs (m)	流速 (m/s)
Case1	57.0	11.8	1.59
Case2	47.44	10.77	1.50
Case3	37.97	8.89	1.39

表 10 繫纜最大張力分析結果

	非耦合 (KN)	耦合 (KN)	誤差
Case1	9384	11080	15.3%
Case2	8010	9113	12.1%
Case3	5719	6299	9.2%

表 11 平台最大水平位移分析結果

	非耦合 (m)	耦合 (m)	誤差
Case1	12.20	13.60	10.50%
Case2	10.33	11.33	8.86%
Case3	7.17	7.65	6.21%

力。對於此時平台可使用頻域分析，節省大量計算時間，可在初步設計時使用。但在頻域分析中，運動方程式被線性化，意味著在阻力負荷、時變繫纜形狀、波浪表面高程和繫纜恢復力等非線性影響方面存在不準確性。考慮完整之動態效應，本研究使用OrcaFlex進行分析，可使用非耦合分析與時域耦合分析方法模擬繫纜系統張力與平台運動並進行比較，如表9所列；分別依回歸週期50/10/1年計算。分別為繫纜張力和平台位移分析結果，顯示非耦合分析會低估受力與運動響應，且當環境條件越嚴苛，非線性效應越顯著，最大誤差達15.3%。

表 12 耦合動態時域分析之風波流條件

		Hs (m)	Vw (m/s)	Vc (m/s)	錯位
	50 年	12.72	57.0	1.59	0
Case1	風	12.08	57.0	1.27	+ -15
Case2	波	12.72	54.2	1.27	+ -15
Case3	流	9.54	42.8	1.57	0,45

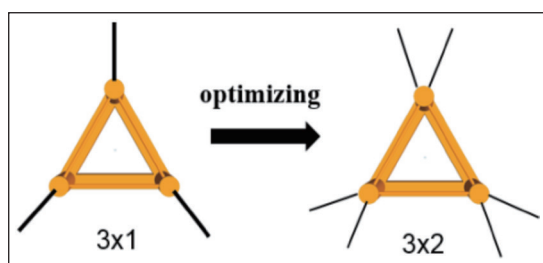


圖 5 繫纜系統優化設計

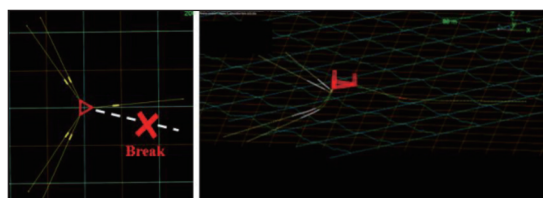


圖 6 Orcaflex 斷纜分析示意圖

接著以初步選定設計資料進行極限環境條件下耦合動態時域分析，環境條件以50年回歸週期為主，但考慮風波流不會同時發生50年狀況，參考 API-RP-2MET Annex H TableH.7[9]，設定表12作為分析條件。

以3小時進行耦合動態分析錨鍊直徑設計評估，因市面上錨鍊直徑較大的規格較少，只有特定廠家可以訂製，因此可改用錨鍊並聯來分擔負荷，如以3×2繫纜配置的方式，如圖5所示。3×2配置除了分擔負荷以外，也包

表 13 3×2 繫纜直徑 117 mm 耦合動態時域分析結果

	最大張力 (KN)	安全係數	錨仰角度 (deg)	躺海床長度 (m)	預張力 (KN)	橫搖 (m)
完整	6302	1.95	0.35	195.4	1750	12.8
斷一條	11180	1.06	0.24	170.0	2701	14.9

表 14 浮動式風力機繫纜系統選定資料

參數	單位	3×2 117 mm
繫纜型式		懸鍊 (Catenary)
繫纜材料		R3 Studless Chain
錨鍊數		3
水深	m	60
公稱直徑	mm	117
斷裂強度	KN	10547
單位重量	kg/m	274
錨碇點距浮體中心水平距離	m	534
繫纜長度	m	565
繫纜預張力	KN	1750
繫纜初始剛性	KN/m	651

含了繫纜冗餘度。對3×1的配置方式而言，任何一條繫纜斷裂皆會使系統失效，因此安全係數需為 2.0；在有繫纜冗餘度的配置下，完整系統的安全係數規範只需達 1.67，但必須多計算任一條繫纜斷裂下，安全係數仍有 1.05。3×2繫纜配置之耦合動態分析，如圖6及表13所列，ABS可滿足繫纜強度要求。最後整理浮動式風力機初步選定資料見表14所列。



五、縮尺模型規格

為了確保此設計之可行性及適用性，透過水槽試驗針對開發場址之海氣象條件測試。將對浮式平台進行縮尺模型試驗，模型試驗中，需致力於建構精確縮尺模型，以確保原尺寸於時頻域的力學反應，減少縮尺過程中失真現象，並利用數值分析交叉比對驗證，作為後續導引業界投入實海域驗證機組和測試機化之基礎。參考Maine大學在2015年發佈 VoltturnUS 1:8實海域模型試驗，與其他文獻皆以福祿數（Fr）原理為縮尺依據，確認幾何形狀、尺寸規格與實體構型相似，藉以確保物理參數之準確性。因考量風、波、流項目及成大實驗場域之限制，故本計畫縮尺比例為 1/70之模型進行水槽實驗。

模型重心量測方式採用重量量測法，以磅秤量測模型三處之重量，再以靜力平衡計算重心位置，其中垂直方向（Z）之重心量測方式採用傾角量測法，將模型傾斜至某角度，並且量測重量之變化進一步計算垂直方向（Z）之重心位置，如圖 7所示。

以Bifilar pendulum方法求得慣性矩，首先需知L懸掛長度，r懸掛點與重心之距離，以及M為懸掛物之質量，藉由量測g重力加速度與擺動之週期T得知模型慣性矩量測。而量測結果之懸掛長度L為530 mm，懸掛點與重心距離r為300 mm，分別量測三個方向之擺動週期進一步計算慣性矩，量測結果分別為

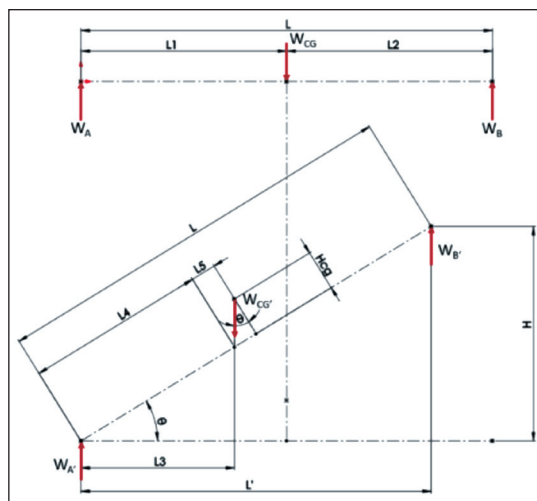


圖 7 重心計算示意圖 [10]



圖 8 模型製作完成品

$I_{xx} = 5.92 \text{ kg-m}^2$ 、 $I_{yy} = 4.84 \text{ kg-m}^2$ 以及 $I_{zz} = 10.54 \text{ kg-m}^2$ 。故本計畫縮尺比與福祿數推估相同，詳細參數及模型製作，如圖8及表15所示。在實驗前會對平台調整平台進行壓載調配和量測其重量、重心與空氣中轉動慣量。

表 15 平台實體與模型尺寸

	全尺寸	1/70 縮尺
重量 (kg)	18097000	51.67
吃水 (m)	20	0.2875
X 方向重心位置 (m)	-2.9	-0.0384
Y 方向重心位置 (m)	0	0
Z 方向重心位置 (m)	5.43	0.073
慣性 $I_{xx}(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	1.03e10	5.92
慣性 $I_{yy}(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	8.01e9	4.84
慣性 $I_{zz}(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	1.69e10	10.54

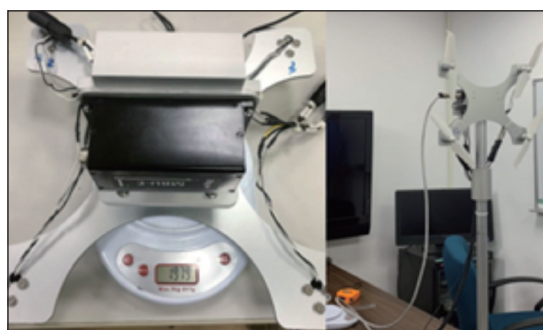


圖 9 縮尺風機及塔架

風機部分選擇DTU 10 MW參考風機模型之規格，建立質量塊的方式計算重量與質心進行縮尺與設計製作，其模型包含4顆馬達（Motor）、陀螺儀（Gyro）、荷重元（Load cell）與鋁合金骨架，如所示。為了實現DTU 10 MW參考風機之動態響應於縮尺浮動平台，產生對應於風機氣動力載重之推力與彎矩，根據陀螺儀回授風機的速度、加速度與姿態，即時更新受水動力影響後的氣動力載重，實現氣動力與水動力耦合之水槽縮尺試驗平台，縮尺模型比例，如表 16所示。

表 16 縮尺風機比例與物理參數關係

項目	比例	全尺寸	1/70 縮尺
功率	$\lambda^{3.5}$	10 MW	3.48 W
機艙重量	λ^3	446,036 kg	1.30 kg
塔架長度	λ	115.63 m	1.65 m
塔架重量	λ^3	628,400 kg	1.83 kg

表 17 試驗水槽繫纜系統尺寸

參數	單位	Line 1	Line 2 & 3
水深	cm	85.7	
公稱直徑	mm	3.0	3.5
單位重量	kg/m	0.127	0.158
繫纜長度	m	7.2	3.6
加重塊重量	kg/pcs	0.146	0.62

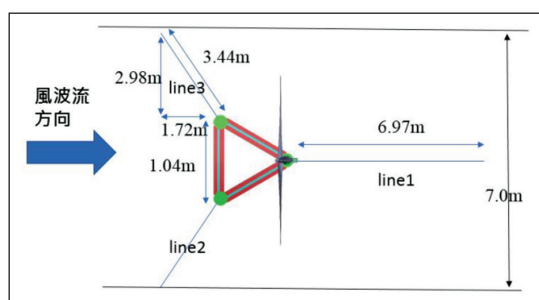


圖 10 試驗水槽繫纜配置平面圖

因受限於試驗水槽寬度7 m，在兩個側柱的繫纜長度會縮短，相對調整繫纜重量，使錨繫系統的回復力仍符合模型定律，錨繫系統縮尺模型見圖10及表17所示。

六、實驗規劃與量測項目

本計畫Delta Float 10 MW浮式平台水槽縮尺模型試驗於國立成功大學水工試驗所執



行[11]，針對浮式平台的運動及繫纜張力試驗進行探討與實驗，藉由浮式平台模型、縮尺繫纜系統與相關儀器設備，進行回復力、自由運動衰減、規則波試驗與不規則波試驗，進而量測浮式平台之運動行為與繫纜繩張力。圖11為水槽長60 m、寬7 m、深1.2 m可同時造風、造波與造流，水槽長度方向為造波與造流方向，造風機方向則可依照實驗需求進行調整。

試驗將量測浮式平台之運動行為與繫纜繩張力進行探討與分析，為量測平台運動狀態於試驗平台上方架設陀螺儀，同時觀察不同試驗條件下之姿態變化，並搭配影像處理來分析平台之動態軌跡運動情形；繫纜繩張力則透過於繫纜繩中架設張力計進行量測。量測項目依試次內容不同分為以下四個部分：

（一）平台靜態強制位移

為確認縮尺模型繫纜回復力與全尺寸平

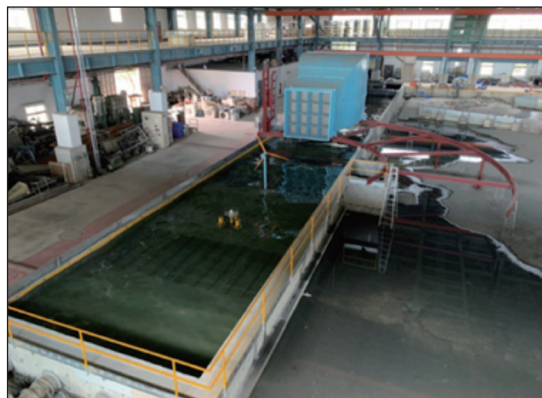


圖 11 先進新型風波流水槽

表 18 強制位移試次表

靜態強制位移測試	
靜態強制縱移 (m)	靜態強制橫移 (m)
-10	-10
-5	-5
-2.5	-2.5
2.5	2.5
5	5
10	10

台設計需求一致，將對縱移（surge）與橫移（sway）兩個方向各進行6組的強制位移，量測平台在單一自由度的強制位移下之繫纜回復力（Restoring Force），表18為模擬實尺寸之強制位移試次表。

（二）自由運動衰減試驗

對平台施加一個自由度方向初始位移後，使其自由擺動至穩定狀態，平台分為有無繫纜狀態，無繫纜平台進行起伏（heave）、橫搖（roll）、俯仰（pitch）三個自由度，有繫纜平台進行六個自由度試驗，試次如表19所試，記錄其時序列變化去推估實尺寸平台之運動自然週期與阻尼比。

（三）規則波中平台運動反應量測

有繫纜狀態之平台進行2組浪向、7組規則波的造波試驗（表20），波高固定3.5公尺、週期由7秒至20秒變化，量測平台六自由度運動時序列及繫纜張力，並透過時序列計算平台RAO。



表 19 自由衰減試次

	自由衰減測試初始位移	
	Free Hull	Moored Hull
縱移	-	7.5 m
橫移	-	7.5 m
起伏	2.5 m	2.5 m
縱搖	5°	5°
橫搖	5°	5°
偏轉	-	5°

表 20 規則波試次表

規則波測試	
Moored Hull	
波浪方向 (°)	180
	90
波浪振幅 (m)	3.5
週期 (s)	7
	10
	12
	14
	16
	18
	20

(四) 不規則波中平台運動反應量測

有繫纜狀態之平台進行2組浪向（180°、90°）、5組海況試驗（表21），環境條件組合分為純波、風+波、風+波+流，不規則波採用Jonswap波譜， $\gamma = 3.3$ ，其中sea state 2, 3之波高、週期為本研究目標海域一年回歸週期之極限波高與週期，sea state 4, 5之波高、週期為本研究目標海域五十年回歸週期之極限波高與週期特徵波高 $H_s = 12.72$ 公尺，尖峰

波週期 $T_p = 11.8$ 秒，極限風速 $V_w = 11.5$ 公尺/秒，與目標海域之回歸縮尺之極限海流流速 $V_c = 1.59$ 公尺/秒，將量測非規則環境下平台六個自由度運動、繫纜張力，並透過運動時序列計算計算平台運動時序列推算平台在不規則海況環境下之運動與繫纜張力反應之統計值。

七、實驗結果探討與數值比對

(一) 自由運動衰減試驗

以實驗整機組平台各別一組初始位置進行6個自由度之自由運動衰減試驗，分析並計算6個自由度之自然週期。其中，無繫纜繩試驗包含：Heave、Roll、Pitch之測量；有繫纜繩試次包含：Surge、Sway、Heave、Roll、Pitch、Yaw。透過分析軟體 OrcaFlex 及ANSYS AQWA，比對整體平台自由衰減時序列結果，由Ocrflex的結果來看，起伏實驗遞減速率一致，振幅較慢於數值結果，反之橫搖速率較快；其振幅大小與數值差不多，如圖12所示。為了求得整機組平台運動之自然頻率，將自由運動衰減時序列進一步

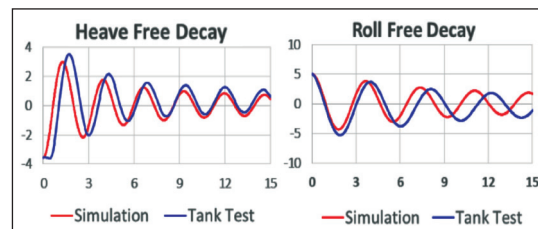


圖 12 自由衰減時序列實驗及分析比對結果



表 21 非規則波試次表

不規則波測試				
Sea State	Hs (m)	Tp (s)	Wind (m/s)	Current (m/s)
1	4	7.3	-	-
2	5.94	8.89	-	-
3	5.94	8.89	11.5	-
4	12.72	11.8	11.5	1.59
5	12.72	11.8	5.70	1.59

表 22 無繫纜之整體自然週期誤差

	Heave	Roll	Pitch
1/70 Model	2.63	4.12	4.32
Full Model	22	34.51	36.2
數值計算	21.70	33.80	34.30
誤差	1.3%	2.0%	5.2%

表 23 有繫纜之整體自然週期誤差

	Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw
1/70 Model	20.9	19.39	2.567	3.88	4.066	16.22
Full Model	174.86	162.23	31.48	32.46	34.02	135.71
數值計算	182.04	176.12	21.8	33.7	34.2	142.47
誤差	4.1%	8.75%	1.4%	3.8%	0.4%	4.98%

作快速傅立葉轉換（Fast Fourier transform，FFT）分析，可求得該自由度在頻率域上的振幅，一般定義振幅峰值所對應的頻率極為自然頻率/自然週期，比對無繫纜之整體自週週期結果，誤差在5.2%以內，而有繫纜之整體自週週期之最大為 8.75%，從實驗及數值比對結果，排除模型公差問題，兩者誤差都在合理的範圍之內，如表 22及表 23所示。

（二）平台靜態強制位移

該試驗透過給予整機平台設計之Surge與Sway初始位移距離，進行各6組實驗強制位移，分別在180度及90度方向波浪下配置，測量相對應之3條繫纜繩張力值，以呈現平台在強制位移下之繫纜繩回復力、分析回復力曲線之特性。首先初始實際配置長度為500 m，因場地限制line2及line 3之場度回推實際長度為255.5 m，OrcaFlex模擬靜態強制最大移動之情況，如圖13所示。由模擬結果與實際情況來看明顯有所誤差，進而尋找原因，發現試驗場地限制及繫纜配重塊配重無法拉緊，經有計算得知繫纜長度誤差1%，藉由模擬分析，將原設計500 m修正至505 m，從 Surge 方向看line 1及line 2更為貼切實際狀況，而Sway方向偏移正負10 m時，長度為505 m之line 1及line 2模擬的結果更貼切實際現象，如圖14及圖15所示。

（三）規則波中平台運動反應（RAO）量測

反應振幅運算子（response amplitude operator，RAO）為一工程統計值，常用於評

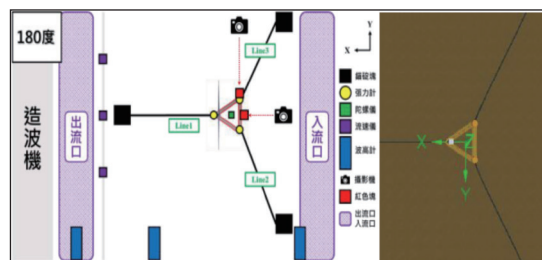


圖 13 水槽測試及 OrcaFlex 模擬配置

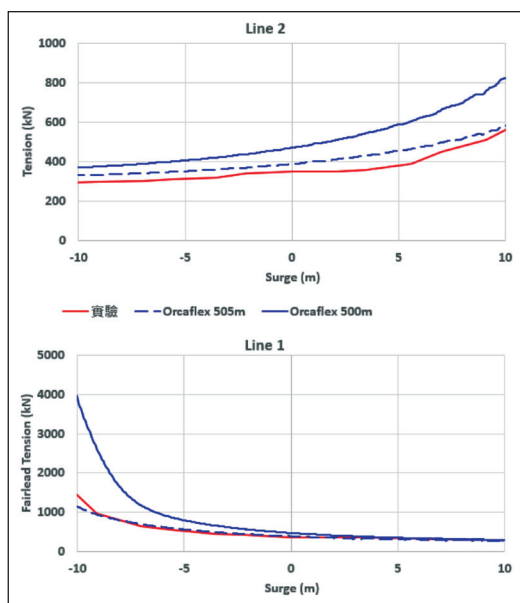


圖 14 Surge 方向 line 1 與 line 2 之強制位移

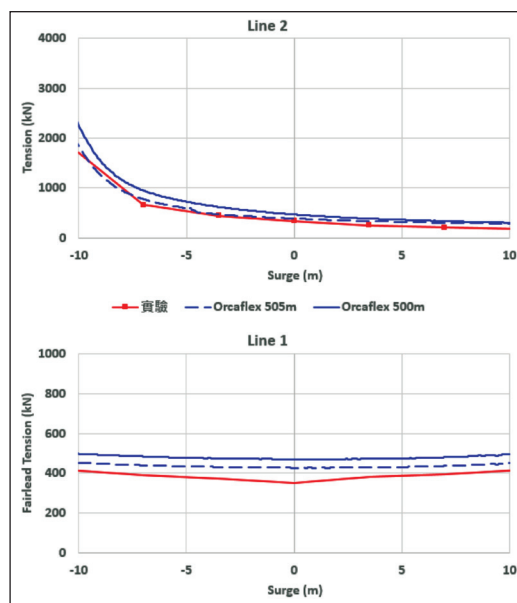


圖 15 Sway 方向 line 1 與 line 2 之強制位移

估船體或浮式結構物於海上的動態反應。在入射波浪為規則波時，RAO可定義為其與入射波的振幅比值[12]

$$RAO = \frac{Z_a}{\delta_a}$$

圖16及圖17分別為Heave和Pitch在180度方向不同週期規則波作用下RAO試驗結果與模擬比對。Heave RAO隨週期提高而漸增，主要是平台Heave時候，自然週期大約接近20秒的位置，接近共振點而提高振幅。然而Pitch自然週期大約在36秒，因實驗量測平台搖晃角度偏小不明顯，故運動變化不大。而90度方向平台擺設位置不是對稱則有Roll變化，其數值模擬分析與實驗結果趨勢大至相同，像Pitch隨週期提高而漸增，大約34秒位

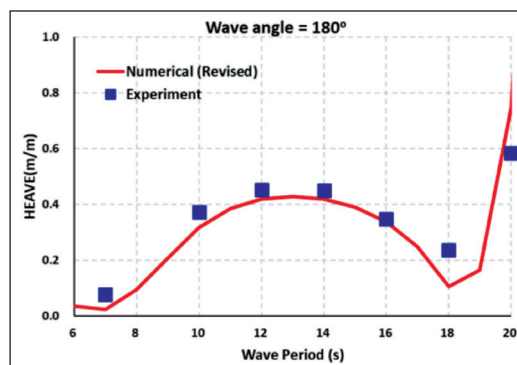


圖 16 波向 180 度 Heave 運動 RAO 比對

置產生共振點，如圖18~圖20所示。綜合2組數值分析及實驗比對結果，得知Roll和Pitch量測範圍遠低於自然週期，運動反應不明顯，量測數據較小，但平台運動反應RAO趨勢兩者都一致，符合設計目標。

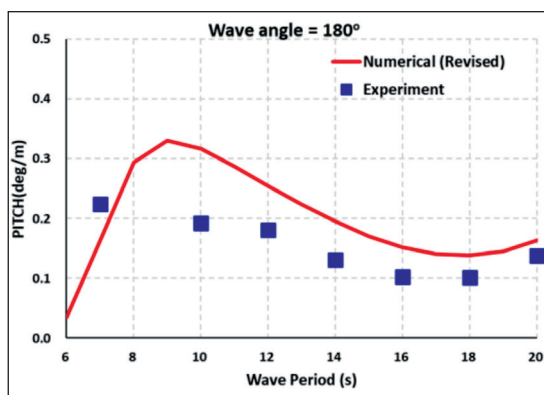


圖 17 波向 180 度 Pitch 運動 RAO 比對

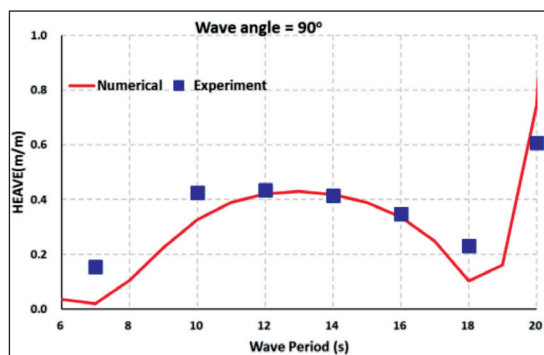


圖 18 波向 90 度 Heave 運動 RAO 比對

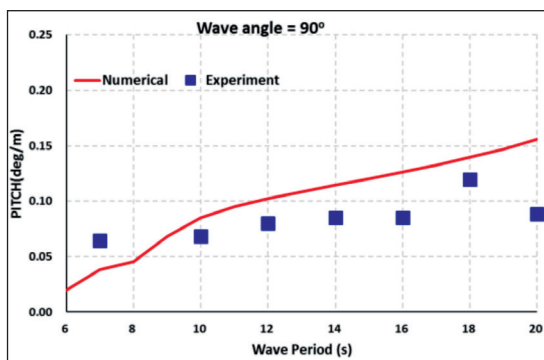


圖 19 波向 90 度 Pitch 運動 RAO 比對

(四) 非規則波中平台運動反應量測

實際波並非單一特性波浪，其海洋波浪變化極為不規則，而頻率、振幅、波長、方向皆不斷變化，不同時間所觀察之情況也不相同。假設浮動平台對波浪之反應為線性，且海洋波與浮動平台之反應可視為穩定且平均值為零之正規隨機過程（stationary normal random process with zero mean），則在實海域受不規則波作用之浮動平台，其運動之頻率反應頻譜 $SR(\omega)$ ，其中 $HR(\omega)$ 為船體在單位規則波中的轉換函數（transfer function），或稱為反應振幅運算子（Response Amplitude Operator, RAO）； $S(\omega)$ 為波浪頻譜。

$$(\omega) = |(\omega)|^2 \cdot S(\omega)$$

以 Sea State 5 極端條件狀況五十年回歸期之示性波 $HS = 12.72 \text{ m}$ ，對應之尖峰週期 $T_p = 11.8 \text{ s}$ ；分別考量風速 57 m/s 下之平台運動反應，一般而言，規則波中之運動反應 RAO 在接近自然週期附近可以看到相當明顯的運動反應，但計算極限海況之尖峰週期 T_p 與平台之自然週期有一定的距離，故非規則波下之運動反應除起伏（heave）稍為明顯變化，如圖 21 所示。然而橫搖（roll）與縱搖（pitch）之反應特徵值在 180 與 90 度波向下均不到 2 度，且同樣因為計算海況之主要波浪週期（11.8 秒）與平台之自然週期較遠，從數值及實驗趨勢比對來看大致相同，如圖 22 及圖 23 所示。

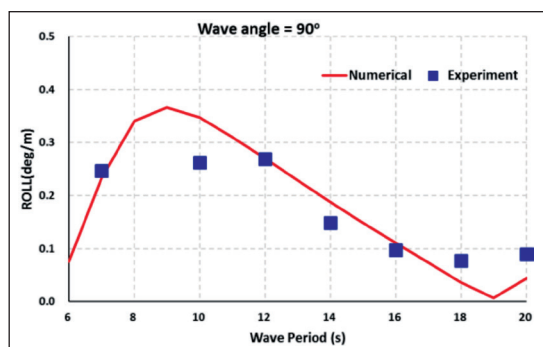


圖 20 波向 90 度 Roll 運動 RAO 比對

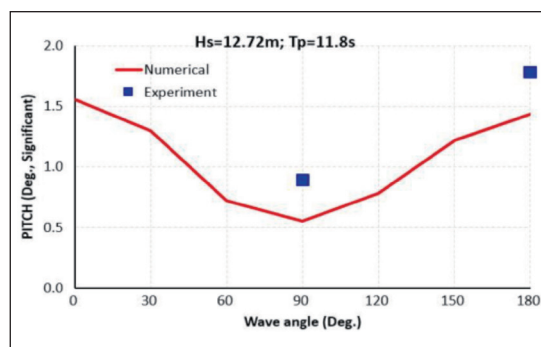


圖 23 極端條件下之平台縱搖運動特徵值

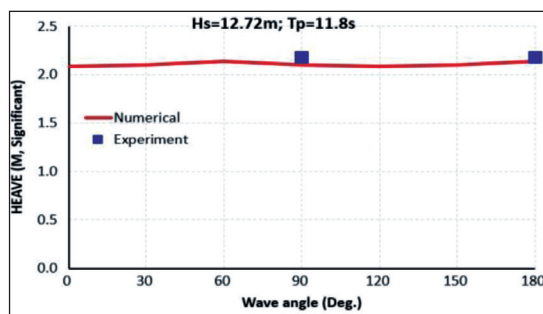


圖 21 極端條件下之平台起伏運動特徵值

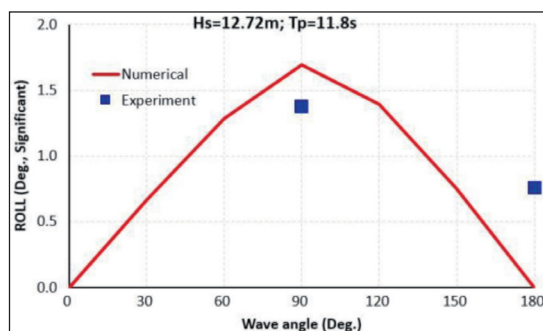


圖 22 極端條件下之平台橫搖運動特徵值

八、結論

本研究設計搭載 10 MW 離岸風力機之浮動式平台與繫泊系統，假設以臺灣西部海

域水深 50 m 以上區域為場址，依新竹浮標資料與國際海況資料庫 NOAA 進行統計回歸分析，計算風波流條件作為繫纜分析之設計值。平台構型設計考量環境條件、初始設計限制、穩度與運動性能評估，設計為浮筒和圓柱組成之半潛式平台。在繫纜設計方面，首先以擬靜態分析，比較不同錨鍊直徑與加重塊，依國際規範之安全係數與成本考量選定繫纜系統參數，便進行浮動平台與繫泊系統的非耦合與耦合分析，在非耦合分析下，非線性效應被忽略，耦合分析會低估繫纜張力與浮動式平台位移量，且當環境條件越嚴苛，非線性效應越顯著，最後規劃水槽模型試驗以驗證設計之可行性，透過自由運動衰減、規則波與不規則波之試驗，並量測浮式平台之運動行為進行驗證比對，計算海況之主要波浪週期與平台 Roll 與 Pitch 之自然週期較遠，因此搖晃的運動反應較小，並從實驗數據與模擬的結果可得知平台運動反應符合設計趨勢，完成大型抗颱風半潛式離岸風力機平台開發設計。



參考文獻

1. Global Wind Energy Council(GWEC), Global Wind Report 2019.
2. Global Wind Energy Council(GWEC), 'Offshore wind will surge to over 234 GW by 2030, led by Asia-Pacific' , August, 2020
3. WIND Europe, 'FLOATING OFFSHORE WIND ENERGY A POLICY BLUEPRINT FOR EUROPE' , October 2018.
4. BUCHMAN, Michael F. NOAA screening quick reference tables. 1999.
5. IEC, IEC 61400-1, Wind Energy Generation Systems. 20190.
6. BAK, Christian, et al. The DTU 10-MW reference wind turbine. In: Danish wind power research 2013. 2013.
7. Orcina Ltd, 'OrcaFlex user manual: OrcaFlex version 11.0f'. Daltongate Ulverston Cumbria, UK, 2020.
8. ABS, Guide for building and classing floating offshore wind turbine, 2020.
9. SANTALA, Markku J. API RP-2MET Metocean 2nd edition; Updates to the Gulf of Mexico regional annex. In: Offshore Technology Conference. OTC, 2018.
10. E. Kassarian, F. Sanfedino, D. Alazard, H. Evain, J. Montel, "Modeling and stability of balloon-borne gondolas with coupled endulum-torsion dynamics", Preprint submitted to Aerospace Science and Technology, 2021.
11. 財團法人船舶暨海洋產業研發中心,「新及再生能源前瞻技術掃描評估及研發推動—12MW級風機抗颱浮式平台與錨繫設計及評估創新前瞻計畫」,中華民國111年。
12. J Journée, J. M. J., and J. A. Pinkster. Ship Hydro-mechanics. Delft University of Technology, 2001, 70.



水面型太陽能發電廠工程規劃 - 以彰濱工業區崙尾東區發電廠為例

中興工程顧問股份有限公司計畫經理 / 葉琮霖

中興工程顧問股份有限公司副總經理 / 余遠添

辰亞能源股份有限公司總經理 / 游祥益

關鍵字：水面型太陽能發電廠、電力系統分析、PSS/E、再生能源發電系統併聯技術要點、二維水理分析、結構分析、地質鑽探分析

摘要

水面型太陽能發電廠工程之規畫以電力系統分析、二維水理分析、結構分析及地質鑽探分析等為分析主軸。中興公司為辰亞能源公司執行之電力系統分析係採用PSS/E (Power System Simulator for Engineering)為分析工具，模擬分析結果可驗證是否符合再生能源發電系統併聯技術要點相關規定。二維水理分析報告係評估設備平台及擋浪設施設置對水理變化之影響，設備平台及擋浪設施設置造成之水位湧高須符合水利署「申請施設跨河建造物審核要點」相關規定。結構分析及地質鑽探分析分別針對設備平台及自設升壓站進行相關規劃設計。

本文以彰濱工業區崙尾東區發電廠為例，說明水面型太陽能發電廠規畫之工程項目與施工工法之創新性、挑戰性、周延性及相關分析。

一、前言

為落實達成減碳目標，邁向低碳社會，政府已將綠能產業列為五大創新產業主要推動政策計畫之一，全力發展低碳綠能的再生能源，以114年規劃再生能源發電占比達20%為目標。行政院並於105年6月23日成立「能源及減碳辦公室」，目前協助經濟部完成「太陽光電2年推動計畫」，加速我國太陽能再生能源發電量，以114年達成太陽光電規劃



表 1 本工程總佔面積

地段	暫編地號	概估面積（公頃）
彰濱工業崙海段	臨 1	87.02
	臨 2	89.39
總 計		176.41

20 GW的設置目標。

國內外太陽光電以地面型太陽能電廠建置占大宗，水面型占比低因此以彰濱工業區崙尾東區發電廠為例進行相關工程規畫說明，此案為日本丸紅株式會社臺灣子公司「辰亞能源股份有限公司」經公開競標，獲得臨1區及臨2區土地投資興建為「彰濱崙尾東一號暨二號太陽光電電廠」權利。本太陽能電廠總佔面積176公頃（詳表1），總建置量高達181 MWp，鋪設超過57萬片太陽能模組，為目前全世界最大規模之水面型太陽能發電廠。

二、工程概要

（一）水面型太陽能發電廠工程項目

本太陽能發電廠於2018年開始建置，2020年11月正式併網發電，每年可發2.5億度電，並可減少13萬公噸二氧化碳排放。本案主要分為太陽能模組、海上設備平台、161 kV自設變電站及輸電線路（地下管線）等4大部分（如圖1所示）。

（二）太陽能模組

臨一案與臨二案均設置太陽能系統裝置量為85,440 kW，輸出功率300 W之雙玻模組共計約 $(284,800) \times 2$ 片，並採用浮力式太陽能浮台單片裝置型系統，每日可隨著潮汐漲退運作，浮力式太陽能電站由浮台及混凝土錨碇塊與繫纜系統組成。浮台材質為高密度聚乙烯（HDPE）類產品，浮台型式如圖2，主浮體尺寸為1060 mm × 875 mm × 420 mm，副浮體尺寸為875 mm × 410 mm × 160 mm，浮台安裝示意圖如圖3所示。

（三）海上設備平台

太陽能交直流轉換設備與高低壓變壓器放置於模組近端區域的固定設備平台上，除可放置上述設備外，亦可方便維修更換與車輛進出，設計10 m寬之平台路面，兩側可供放置設備外，中間空間尚可供小型車輛進出，並於平台末端設置迴旋區域。

設備平台起點位於崙尾西區計畫道路，總長1410公尺，寬10公尺，橋墩採最大跨度

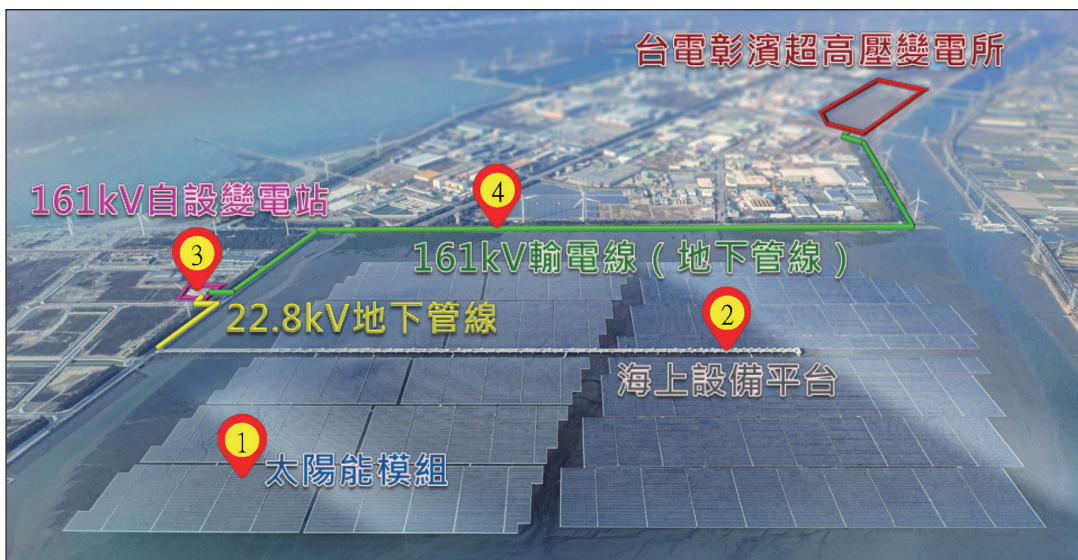


圖 1 本案太陽能工程範圍

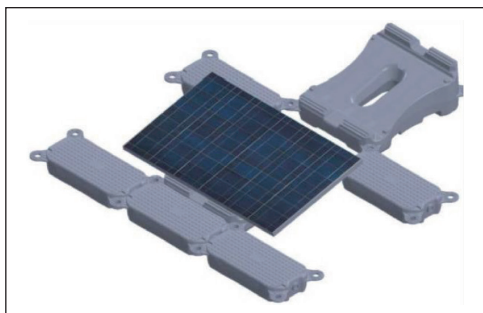


圖 2 浮台型式

25公尺及30公尺RC全套管基樁設計，提供辰亞公司崙尾東區臨一坵塊（鹿港崙海段18地號）及厚固公司臨二坵塊（鹿港崙海段17地號）案場共用。設備平台標準斷面詳圖4，海上設備平台詳圖5及詳圖6：變流器設於海上設備平台。

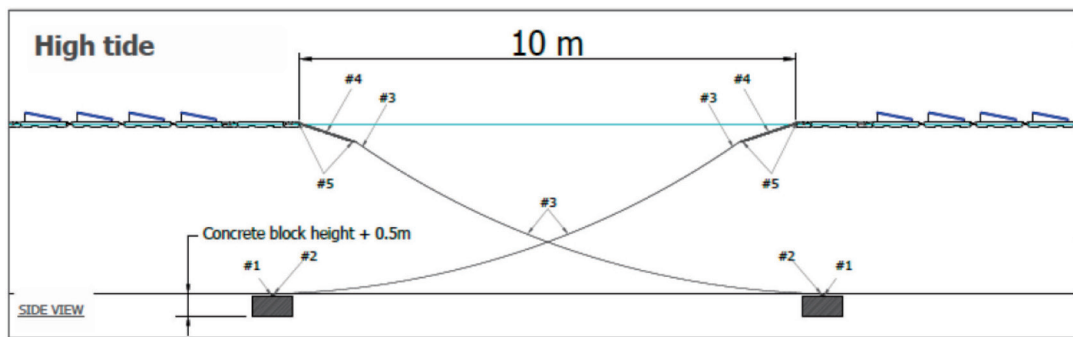


圖 3 浮台安裝示意圖

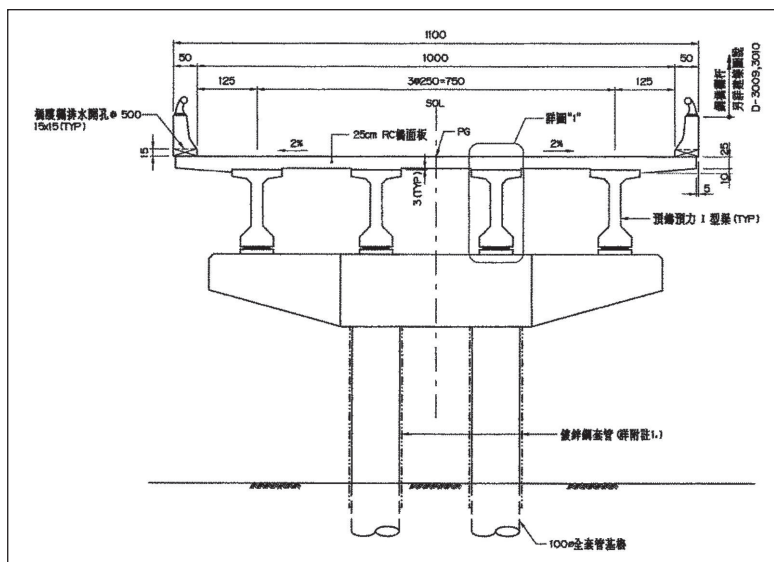


圖 4 全套管基樁斷面圖



圖 5 海上設備平台



圖 6 變流器設於海上設備平台

(四) 161kV 自設升壓站

優質的變電站設置，必須具備妥適且具有穩定的電力系統架構、合理的設備配置、良好的搬運動線、供電動線及便利的維運操作空間。此外，穩固的結構、適切的建築外觀及建物內穩定的一般機電設施亦是重要的

考量因素。以下分別詳細說明：

自設升壓站設備配置

本工程特高壓變電站為 161 kV 供電系統，變電站主要電力設備需求如下：

1. 六氟化硫 (SF_6) 氣體絕緣開關 (GIS)，如圖 7
2. 保護電驛



圖 7 SF₆ 氣體絕緣開關 (GIS)



圖 8 主變壓器

3. 161 kV 升壓變壓器，如圖 8
4. 直流電源系統及電池組
5. 161 kV 電力電纜
6. 自動切換開關 (ATS)
7. 24 kV 真空斷路器 (VCB)
8. 消防用緊急發電機組
9. 25 kV 電力電纜

考量人員便利之操作，本變電站設計為地下一層、地上二層樓，GIS、主電力變壓器及發電機配合搬運需求設置於一樓，以利人員及設備進出，便利維運操作。整體供電動線亦配合變電站設備之配置，採合理之考量，兼顧台電引進線及太陽能發電廠22.8 kV回路進線，其內部主要設備配置詳圖9所示。

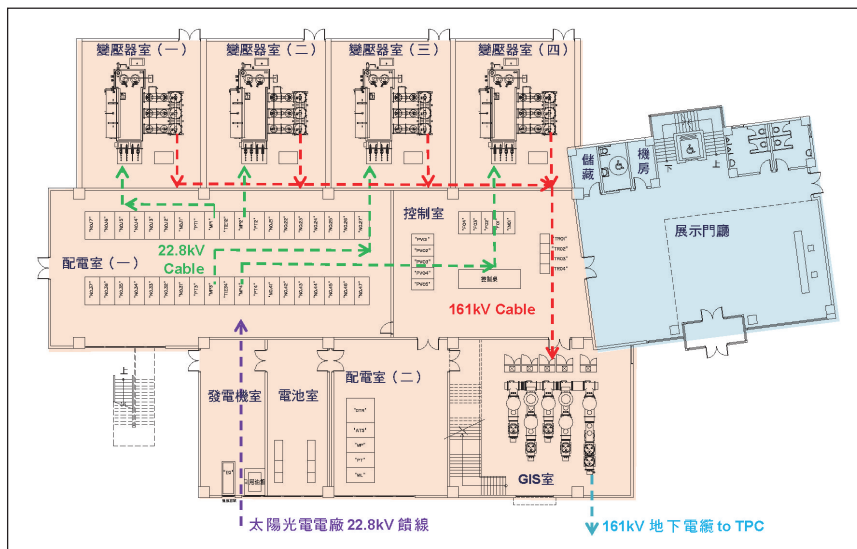


圖 9 自設變電站主要設備配置及供電動線示意圖



圖 10 161 kV 自設變電站外型



【混凝土管路施工工法】

- ☑ 標定管溝位置及切割路面。
- ☑ 挖掘管溝、清運殘土及擋土支撐。
- ☑ 鋪設碎石機處、綁紮鋼筋。
- ☑ 人孔內裝設過牆管。
- ☑ 排放隔離版及塑膠管。
- ☑ 塑膠管固定及銜接、澆灌混凝土。
- ☑ 回填沙、拆除擋土板。
- ☑ 佈設標示帶、回填夯實。
- ☑ 清除雜物及殘土。
- ☑ 穿設尼龍繩及管線試通。

①【161kV 特高壓混凝土管路】

- ☑ 實際銜接拱位須由能源局核定。
- ☑ 沿既有道路或綠帶施作。
- ☑ 採 8"X8φ 地下管路沿線。
- ☑ 採 3-1/C 2000SQ, 161kV XLPE 佈設。
- ☑ 電纜符合台電器材規範。
- ☑ 電纜須符合 IEC 60859 規範。
- ☑ 符合台電 161kV 地下管路設計標準。
- ☑ 預留試通引線，提供試通報告。

②【22.8kV 高壓混凝土管路】

- ☑ 沿既有道路或綠帶施作。
- ☑ 採 6"X16φ 地下管路沿線。
- ☑ 每週路採 3-1/C 250SQ, 25kV XLPE 佈設。
- ☑ 電纜符合 CNS 2855 標準。
- ☑ 符合一般道路地下管路設計標準。
- ☑ 預留試通引線，提供試通報告。

③【22.8kV 橋梁附掛電纜架】

- ☑ 沿新設海上設備平台佈設電纜架施作。
- ☑ 電纜架具防銹塗裝。
- ☑ 每週路採 3-1/C 250SQ, 25kV XLPE 佈設。

圖 11 混凝土施工工法及各管路電力電纜沿線路徑

(五) 輸電線（地下管線）

本案太陽光伏發電場位於彰化縣鹿港鎮崙海段海域，由於該段未填海造地，因此須施做橋梁（設備/維修平台）及混凝土管路，以構成太陽能發電廠、自設變電站及台電變

電所間之電力路徑。本案所需管路類型可分為 161 kV 特高壓管路（8" × 8 φ 混凝土地下管路）如圖 12、22.8 kV 高壓管路（6" × 16 φ 混凝土地下管路）、22.8 kV 高壓電纜架（設置於海上設備平台上）。電力電纜沿線路徑彙整如圖 11。



圖 12 161 kV 電纜設於地下洞道



圖 13 彰濱崙尾東一號暨二號電廠是臺灣首座建置於近海區域的水面型太陽光電電廠

- ◆ 161 kV 管路總長度：3,302 公尺（自設升壓站站至台電彰濱超高壓變電所）。
- ◆ 22.8 kV 管路總長度：324 公尺（設備平台至自設變電站）。

三、工程之創新性、挑戰性、周延性

（一）工程之創新性

1. 本案是臺灣首座建置於近海區域的水面型太陽光電電廠，如圖 13 所示，另於自設變電站設立「太陽光電教育展示館」，除了邀請各級學校學生前來進行戶外教學，也提供

一個國內外專家學者的交流場地，促使產學各界更進一步認識再生能源。辰亞能源公司透過「太陽光電教育展示館」，使民眾更加瞭解太陽光電的建置過程、發展軌跡，以及綠能對環境的效益，讓再生能源不僅是一項重要國家政策，更能透過實際體驗強化綠能素養，落實在日常生活中如圖 14。

2. 工程採用監造人員共享電子資訊管理系統 (PMIS)

監造建構專屬管理資訊系統 (Project Management Information System，簡稱 PMIS) 圖15，以達到標準資訊、便利資料存



圖 14 太陽光電教育展示館內展示太陽能板結構



圖 15 管理資訊系統

取、實現資源共享及提高工作效率與品質，其內容如下：

- (1) 公文管理
- (2) 會議管理
- (3) 契約管理
- (4) 文件管理
- (5) 進度管理
- (6) 報表管理
- (7) 職安衛管理
- (8) 施工管理

(二) 工程之挑戰

1. 克服惡劣天候環境

本案是迄今全世界最大規模海上型太陽能電廠，在此之前，國內外並沒有類似的施工經驗，彰濱崙尾東東北季風強烈，海上適合施工的月份只有每年3月到10月，加以本案場受潮汐影響，需要配合潮位施工，因此僅能把握每日僅有數個小時的施工時間。團隊克服嚴苛的施工環境下，每天須面對兩次潮

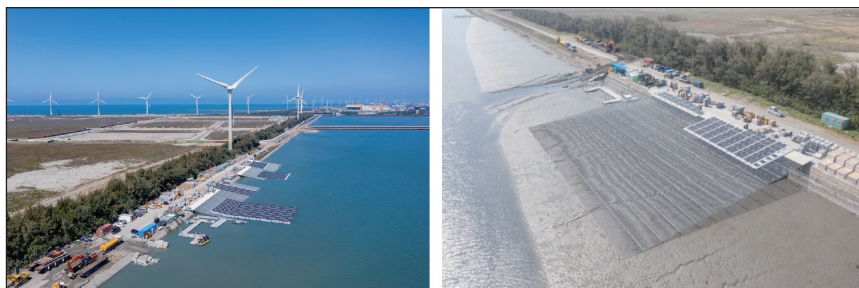


圖 16 海上型太陽能模組岸上組裝情形

汐，把握施工時間，故須投入大量人力與資源。並針對地質、潮汐、抗風及抗鹽等外在因素進行分析，以利工程順利進行如圖16海上型太陽能模組岸上組裝情形。

(1) 地質：

- 地層於地表下20公尺內土質鬆軟，N值較低。
- 平台基樁或立柱皆須打入地下25公尺。

(2) 潮汐：

- 因應漲退潮水位差異，須把握施工時間。

(3) 風力：

- 彰濱工業區平均風速約介於1.1~6.9m/s之間，歷年颱風最高瞬間風速約為50 m/s。
- 採用水上型電站可耐最高風速為58.3 m/s，設備安全無虞。

(4) 鹽害：

- 環境特性為高溫、高溼與高鹽份。
- 所有設備均須經防鹽害處理，以延長其使用壽命。

2. 海上建置的機電平台

(1) 本案基地總長約5公里，考量變流器、變壓器等機電設備之放置，發電時線纜之傳輸損耗及易於電廠的維護，故在海上設置長約1.4公里、寬10公尺、基墩深入地下30公尺的機電平台如圖17，採取創新、勇於嘗試的設計，提高太陽能電廠發電安全性。

(2) 海上設備平台設計係為提供上部結構物荷重，避免發生承載力不足、沉陷量過大、側移或不均勻沉陷等現象，常用之基礎型式計有展式基礎、樁基礎、沉箱及井式基礎。在基礎形式之選擇，應就地層種類、土層分佈、土壤液化潛能、區域性因素、結構物機能、施工技術、經濟性及工期等因素詳加考量，以選擇最適合之結構基礎。

工址附近地質資料初步研判，位於海床面~EL.-9.0 m為極軟弱之粉土質粘土或極鬆之砂質粉土，標準貫入N值為1.5~6，若採淺基礎設計恐有承載力不足之虞。因本工址位於未填造之海地，除海水可能影響穩定液

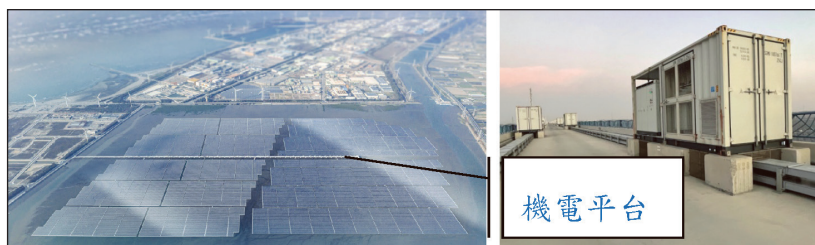


圖 17 海上設備平台

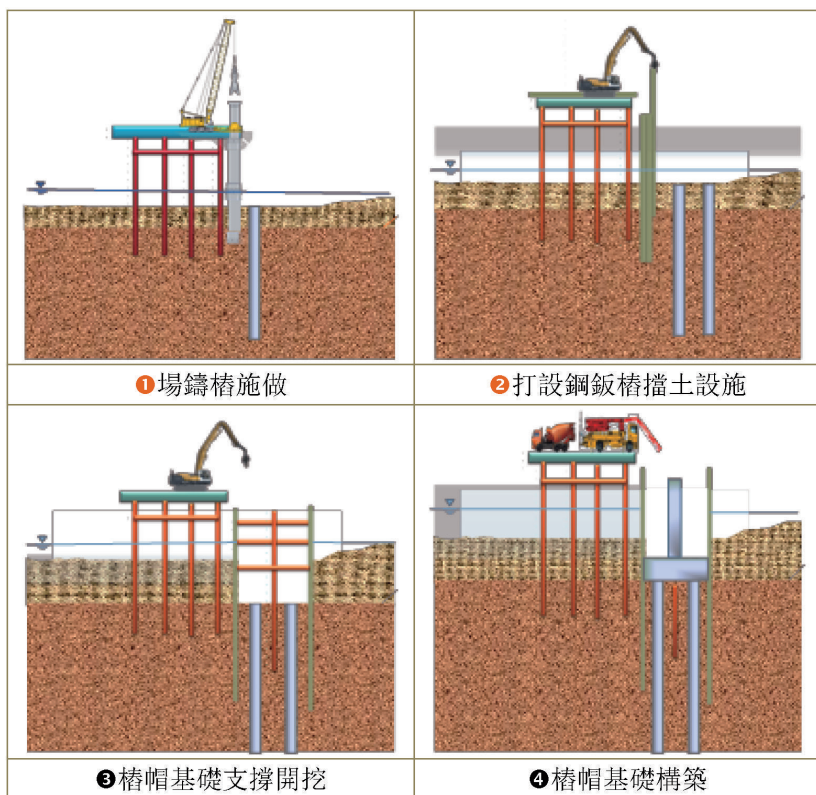


圖 18 設備 / 維修平台基礎施工構想

之比重造成孔壁穩定性不良，潮汐昇降亦可能造成坍孔，故在工程費及工期允許下建議採用全套管式基樁施工，設備/維修平台基礎施工構想詳圖18所示。

3. 友善環境及生態的設計

本工程為海上型太陽光電型式，主要考量開挖少及復原快，避免採用打樁型式之太陽能模組興建方式，避免對永久性地形地貌



圖 19 環境永續之 4 項主題



圖 20 沉錨之吊裝

載重量不高，且每個錨塊重達6噸，一般傳統工程車無法行駛於泥灘地，即使滿潮時水深也僅兩米多，無法使用海洋工作船。為了克服此難題，與廠商在多次討論後，改良出可在低水位工作的大型浮式履帶工具車圖20，圖21，在此機具有效率的作業下，比原規劃時程提早完成了所有錨固投放作業。

(三) 工程之周延性

1. 進行水理模式電腦分析

● 未造成水位及流速明顯變化

為確保設備平台基樁對水理之衝擊降至最低，檢核本工程設置前、後情境之水位與流速變化，以比較工程設施後的影響情形，圖22為模擬範圍及河道地形圖，圖23為相關參數建置並已獲得內政部營建署核准在案。

改變及大型固定設施係對環境友善的工法。以下是落實本案環境永續之4項主題，如圖19：

4. 泥灘地之投錨技術

本案施工難度最高的工程項目之一；泥灘地上的錨固作業。由於泥灘地的表土可承



圖 21 沉錨之安裝

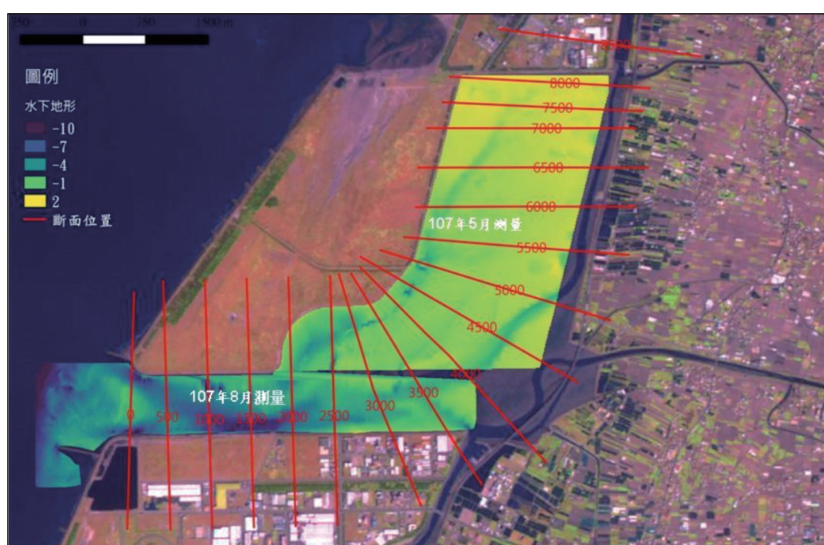


圖 22 水理模式模擬範圍及河道地形圖

由設置前後水位流速變化比較如表2及開發前後河道水位縱斷面圖（圖24及圖25）可知，

分析結果可知於25年重現期距下，並未造成水位及流速明顯變化，開發前後水理特性



表 2 計畫區開發後 25 年重現期距水位流速變化一覽表

河心累距 (m)	水位高程			平均流速			備註
	(m)			(m/s)			
	設堰前	設堰後	差異	設堰前	設堰後	差異	
8500.00	2.85	2.85	0.00	0.11	0.11	0.00	
8000.00	2.85	2.85	0.00	0.08	0.08	0.00	
7500.00	2.85	2.85	0.00	0.07	0.07	0.00	
7000.00	2.85	2.85	0.00	0.07	0.07	0.00	平台上游
6500.00	2.85	2.85	0.00	0.06	0.06	0.00	平台下游
6000.00	2.85	2.85	0.00	0.06	0.06	0.00	
5500.00	2.85	2.85	0.00	0.06	0.06	0.00	
5000.00	2.85	2.85	0.00	0.05	0.05	0.00	
4500.00	2.85	2.85	0.00	0.09	0.09	0.00	
4000.00	2.85	2.85	0.00	0.13	0.13	0.00	
3500.00	2.85	2.85	0.00	0.17	0.17	0.00	
3000.00	2.85	2.85	0.00	0.17	0.17	0.00	
2500.00	2.85	2.85	0.00	0.15	0.15	0.00	
2000.00	2.84	2.84	0.00	0.17	0.17	0.00	
1500.00	2.84	2.84	0.00	0.22	0.22	0.00	
1000.00	2.84	2.84	0.00	0.20	0.20	0.00	
500.00	2.84	2.84	0.00	0.22	0.22	0.00	
0.00	2.84	2.84	0.00	0.22	0.22	0.00	

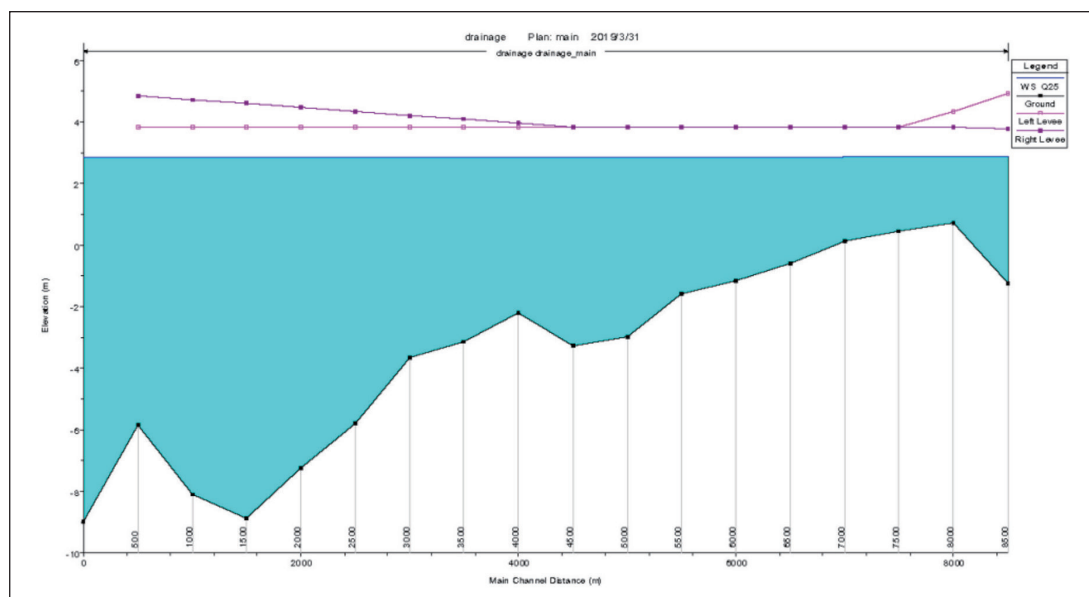


圖 24 計畫區現況河道 25 年重現期距水位縱斷面圖

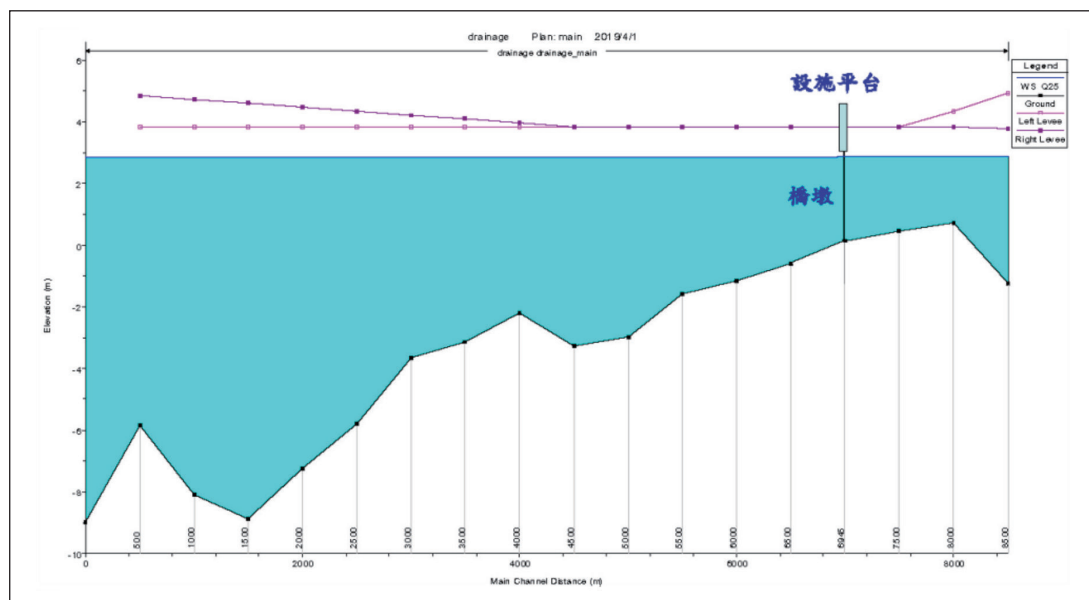


圖 25 計畫區開發後河道 25 年重現期距水位縱斷面圖

(流速及水位) 變化情形如圖26及圖27，由模擬結果亦顯示開發前後對計畫區水理特性

影響變化甚微，再次顯示本計畫開發前後對計畫區近乎於無任何影響之情況。



圖 26 計畫區現況河道 25 年重現期距流速分佈圖

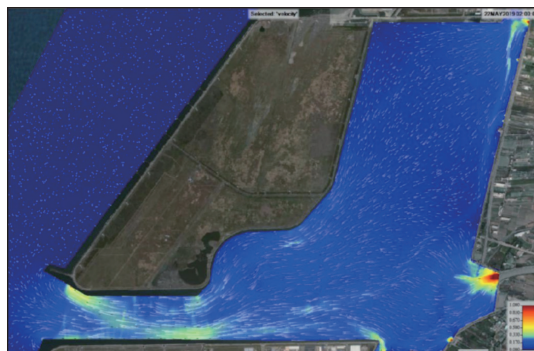


圖 27 計畫區開發後河道 25 年重現期距流速分佈圖

2. 現地環境生態衝擊

- 本工程採用浮筒型組裝模組，對環境衝擊最小：

本工程依據現地環境分析，設置太陽能電站的方式為打水泥樁圖28及水上浮力式兩種施工模式，本團隊分別就對環境的衝擊、景觀調和、氣候風險、施工技術可行性及投資效益等，做為選擇設置方式的重要指標。

本案為內海地形，每日有兩次潮汐漲退起伏，有時陸地潮間帶幾乎呈現乾涸，有時整片都是水域的狀況，考量長期的環境共生，並依據分析表（如表3）的選型結果，可知浮力型太陽能電站的建置方式，因為開挖較小、泥作量體較少，因此對於環境的衝擊較小。另就施工技術可行性而言，浮力式型水上型的設置方式在此一地太軟水不深的特殊條件下，不需使用太多大型輻重工具車進入工地施工，比打水泥樁的方式更為可行。且水上型太陽能電站的電氣安裝容量比打水

泥樁方式要高，未來現地復原，水上型的設置方式也較打水泥樁式的更容易處理。綜合上述理由，選擇以設置水上型太陽能電站做為本案投資興建太陽能電站的方式。

以1MW的案件來說，地面打樁的方式約需414支直立式地面基礎樁，浮動型僅需48支錨定即可，可參考圖29的模擬。依上述討論分析來看，施工簡易，安全性較高，維護性高則為此案採用浮力型之優點，浮台主要材質為高密度聚乙烯(HDPE)類產品，抗腐蝕力佳保用30年，此案場址無論是哪一個區域皆能輕易達成太陽光電施作之目標。

3. 發電設備耐候性考量（圖30）

- 模組的主要優點：
 - 平均壽命可達30年，比一般模組的25年更長。
 - 生命週期發電量較一般模組高21%左右。
 - 發電衰退率約0.5%，優於一般模組。



圖 28 基樁型施工示意圖

表 3 浮力型 vs. 地面基樁型比較表

程序	浮力型	地面基樁型
現場水文	內海海水 ✓	內海海水 ✓
水位落差	4 米 ✓	4 米 ✓
連續延伸大小	10 MW ☆☆☆	1 MW ☆
錨定（固定）方式	水底鑽錨 鑽孔船隻 ☆☆☆	打水泥樁 需重型機械 ☆
固定深度	10 米 ☆☆☆	>10 米 ☆
纜繩需求	必須 ☆	非必須 ☆☆☆
組裝定位	岸邊組裝船隻拖曳 鑽孔船隻 ☆☆☆	全水上組裝 材料重運輸難施工難 ×
抗風能力	貼近水面 模組開口風壓大 ☆☆☆	距水面較遠 水位下降時風壓增強 ☆
抗震能力	無須依靠地面承載 無需考慮地震因素 ☆☆☆	需依靠地面基礎樁支撐 地震震度影響基樁強度 ☆
維運能力	24HR 隨時可進入 隨時由浮筒走入 ☆☆☆	水位低於 3 米無法納運 設備在高處屬高空作業 ×
拆除方式	船隻拖回運走 安裝拆除程序相同 ☆☆☆	拆除拔樁須另行考量 拆除風險高於安裝 ×

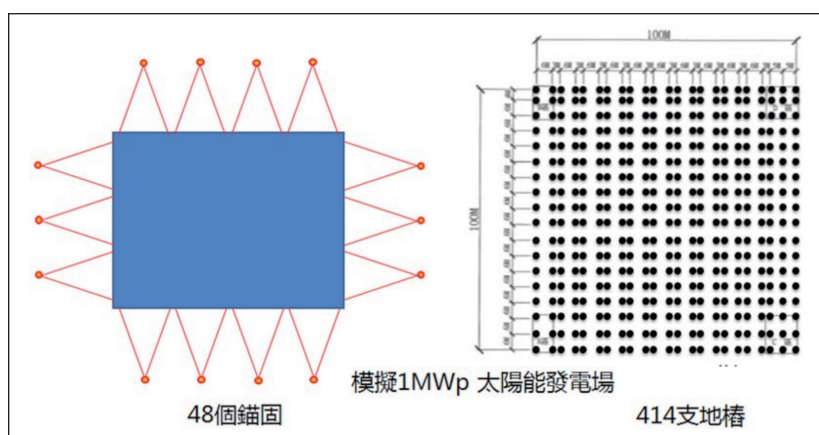


圖 29 錨固 vs. 地樁方式模擬

構件	一般的方案		適用於海水的解決方案	
分散桿	鋁質(AL7075)並進行陽極處理(15 μm)		⇒ 碳鋼加上Resin抗腐蝕層	
聯結鏈條	鋼索 	⇒	聚酯纖維繩索並加入抗紫外線的保護材料	
鏈條	鋼製鏈條 	⇒	不使用鏈條	
錨固系統	板式錨 	⇒	使用更大的板式錨增加使用壽命	
連接環(下占,卸扣)	碳鋼材質 	⇒	不使用鏈條	
連接螺栓上的自攻螺絲	A2不銹鋼材質 	⇒	316不銹鋼材質	
太陽能模組固定鋁條	鋁質6063 	⇒	鋁質6063加上Resin抗腐蝕層	

圖 30 PV 構件採耐腐蝕性配件

- 幾乎不透水、可抗腐蝕，耐候性與防火性佳，可用於高濕度地帶、多酸雨

地區、高鹽霧地區等。此外，模組比一般模組更耐磨，可抗風砂。



評估項目			彰濱E/S	
1	台電變電所GIS設備是否具拱位併接		應可提供	
2	台電變電所剩餘可供網容量		550MW	
3	辰亞自設變電站離變電所距離		3.3km	
4	併接台電特高壓管路施作難度		較易	
5	初步評估特高壓管路經費預算(8" Øx8管・含161kV 複導2000SQ電纜)		2.35億元	
6	系統衝擊初步評估	電力潮流	既有輸電線容量	有條件符合
		短路電流	既有開關設備啟斷容量	可符合
		電壓變動率	評估對電力品質之影響	可符合
		電壓閃爍	評估對電力品質之影響	可符合
		暫態穩定度	評估對系統穩定之影響	可符合
		功率因數	評估對電力品質之影響	可符合
		電力諧波	評估對電力品質之影響	可符合





圖 31 161 kV 併聯台電線路路徑圖

- 玻璃强度高，可降低蝸牛紋及PID衰減率。
- 雙玻模組可接受更高的系統電壓，可降低整體建設成本。
- 採用抗腐蝕配件：
 - 配件加上抗腐蝕層。
 - 配件採用316不鏽鋼材質。

4. 161 kV併聯台電線路問題及電力系統分析

本案鄰近道路均已佈滿既設管線，如需額外佈設161 kV線路是極大挑戰，經本團隊與彰濱工業區服務中心及台電台中供電區營運處

多次協商，克服困難佈設完成，如圖31所示已詳細評估並完成161 kV併聯台電線路。

目前臺灣地區電力系統包括發電、輸電、配電及用戶如圖32 [1]所示，因用戶端之負載不斷動態變動，依變動量大小與時間長短導致同步發電機的動態行為，為利於分析發電機通常把穩定度問題分成兩個主要範疇：穩態穩定度（Steady-state stability）及暫態穩定度（Transient stability）[2]，主要衝擊分析為暫態穩定度（Transient stability）。

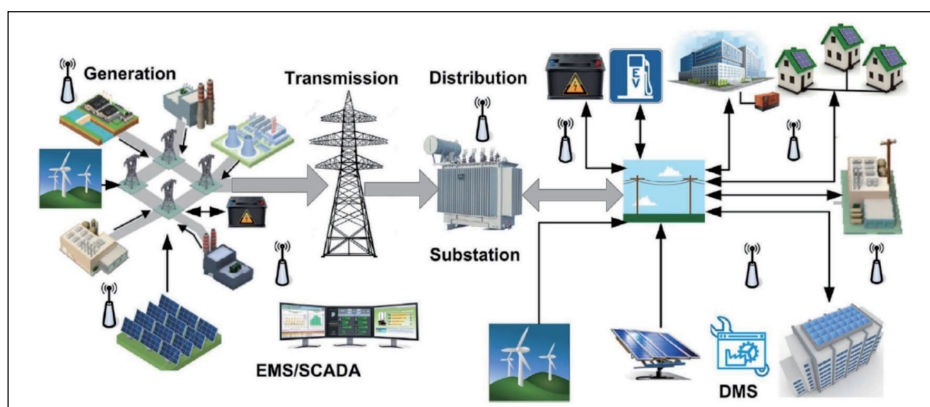


圖 32 電力系統架構圖 [1]

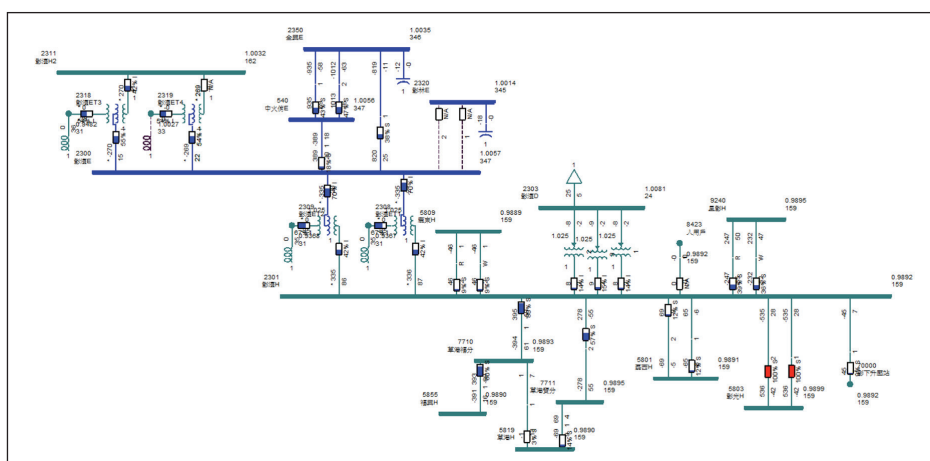


圖 33 尖載系統電力潮流單線圖

於2020年併入台電系統之前，須分析當台電161 kV及345 kV系統面臨大擾動及巨大負載突然改變狀況時之執行臨界清除時間，此為暫態穩定度（Transient stability）[2]之分析，以及加入前後尖輕載之電力潮流（Power flow analysis）N-0及N-1檢討，相關分析步驟如下說明。

模擬110年尖載、輕載之併網前後之電

力潮流，於N-0正常情況下及發生N-1線路跳脫事故時之電力潮流檢討結果，針對上述設備超載情形應加裝50+2過載保護電驛及相關卸載策略等因應措施，以維持供電安全，電力潮流完成後之單線圖如圖33所示[3]。

電力系統暫態穩定度模擬條件為太陽能發電廠加入後依系統各不同重要地點發生三



相短路故障，分別觀察北部林口機組、中部中火發電機組、南部大林發電機組轉子之角度搖擺、太陽能發電廠之出力響應情形，並檢討尖載及輕載臨界清除時間，針對161kV及345kV系統之檢討是否符合再生能源發電系統併聯技術要點[4]。

5.生態意識提昇及景觀融合

為確保施工時不影響周圍環境，應預先蒐集資訊，瞭解環境生態如圖34，定期檢測施工水域水質如圖35，避免污染影響生態為溶入環境生態，本案之景觀工程亦採當地大杓鵲之造型，生動活潑詳如圖36。



圖 34 本工程環境生態



圖 35 施工水域水質檢測

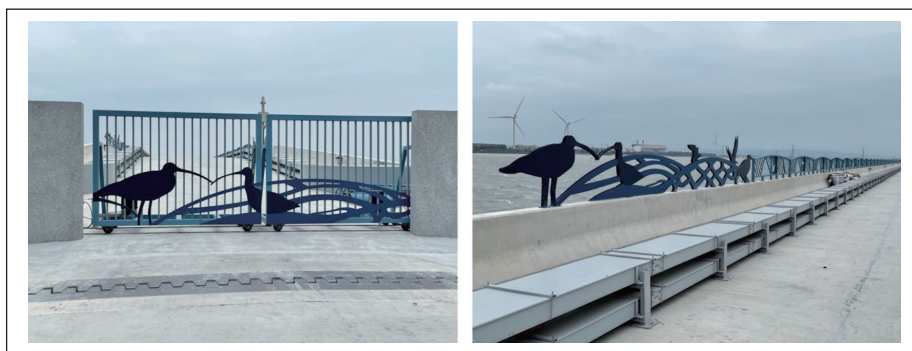


圖 36 海上設備平台景觀造型一隅

四、結論

本案的建置結合在地自然特色，兼顧環境保護及生態永續，設置水面型太陽能發電系統，總裝置容量181 MW，併接於台電公司彰濱超高壓變電所電力網絡，整體工程如期如實如質完成，係目前全球最大之水面型太陽能發電廠，併網至今已發電近3年，電力供電穩定狀況良好，每年可發電約2.5億度，約可減少13萬公噸二氧化碳排放，為政府推動綠能發展提供最佳的見證。

參考文獻

1. 現代化電網運轉與資料應用－盧展南，2020。
2. “Power System Analysis, Hadi Saadat, 2010.
3. International, Siemens Power Technology, PSS/E Program
4. 「台灣電力股份有限公司再生能源發電系統併聯技術要點」，2018年11月。



太陽光電加強電力網 工程規劃及進度

台灣電力股份有限公司系統規劃處太陽能併網專員 / 陳珮穎

台灣電力股份有限公司系統規劃處太陽能併網專員 / 陳建安

台灣電力股份有限公司系統規劃處綠能併網組組長 / 陳佳慶

台灣電力股份有限公司系統規劃處副處長 / 黃子成

台灣電力股份有限公司系統規劃處處長 / 劉建勳

台灣電力股份有限公司輸變電工程處處長 / 廖俊峯

關鍵字：太陽光電、併網熱區、再生能源加強電力網

摘要

據我國最新太陽光電開發政策，太陽光電裝置容量目標於2025年增加至20GW（其中包含8GW的屋頂型太陽光電與12GW的地面型太陽光電），當前整體電網併網容量雖仍充足，惟考量再生能源併聯過度集中於部分饋線，為紓解前揭特定區位壅塞現象，台電公司除持續於熱區規劃再生能源加強電力網工程強化系統併網能力外，並同步透過政策積極引導再生能源發電系統集結至輸電級電網併網，以降低小型零星案場併網排擠現象及分散電力系統投資並加速輸電線路容量有

效利用，同時滿足電源併網需求，擘劃太陽光電未來發展之藍圖。

一、簡介

為加速推動太陽光電專區設置發電設備併網滿足政府於2025年規劃之開發目標，經濟部持續盤點可施作大型太陽光電之潛力併網熱區（如：不適耕作區、不利農業經營區、低地力農地及水產養殖場等）。現階段能源局盤點公告之太陽光電潛力場域主要分佈於西部沿海彰化縣以南（含：彰化縣、雲林縣、嘉義縣、臺南市、高雄市及屏東縣）

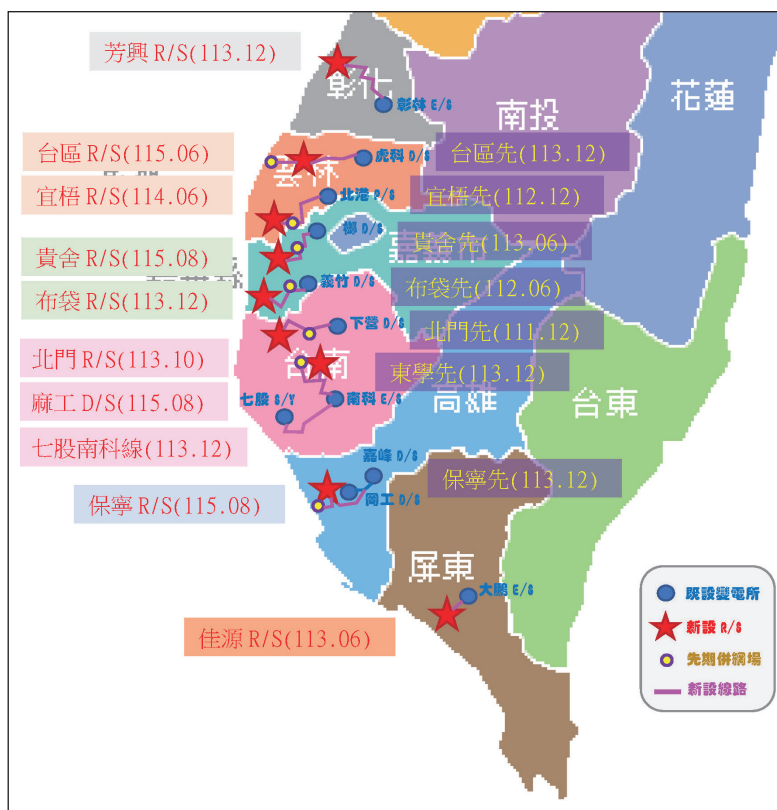


圖 1 9 站 10 線工程分布圖

等6個縣市，為因應太陽光電大量開發目標，台電公司已針對開發區位集中且併網進度明朗之太陽光電申設熱區刻正攢趕多項再生能源加強電力網工程，新設9所再生能源變電所（Renewable Substation, R/S），另為符合上級機關列管案場併網需求，位於併網熱區之R/S於正式變電所工程完成前視個案情形規劃有「先期併網場（連接站）」或「屋外型模組化變電所」以因應短期併網需求；惟先期併網場及屋外型模組化變電所規模分述如下：先期併網場裝置規模原則終期以兩回線複導

體敷設，並預留未來每回線最多可供2家再生能源業者T接併網；屋外型模組化變電所原則以161 kV GIS、23 kV GIS及所內用電設備各一套、貨櫃型控制室一式與161 kV/23.9 kV 60MVA單繞組變壓器一具；另9站10線工程分布區位則如圖1所示：

另為加速電網有效運用及提供在地小型案場併網資源，台電公司與經濟部合作推動共同升壓站併網策略，由經濟部規範共同升壓站之設置及容量分配原則，本公司盤點太



表 1 已規劃之 R/S 變電所概述

縣市	目標場域	變電所名稱	引接上游系統	預計完成時間
彰化	漁電共生專區、個案開發	芳興	彰林 E/S	113.12
雲林	漁電共生專區、個案開發	宜梧	北港 P/S	113.12
	閒置工業區、個案開發、漁電共生專區、不利耕作地	台區	虎科 D/S	115.06
嘉義	漁電共生專區、不利耕作區個案開發	布袋	義竹 D/S	113.10
	漁電共生專區、個案開發	貴舍	糠榔 D/S	115.08
臺南	漁電共生專區、不利耕作區	北門	下營 D/S	113.10
	漁電共生專區、個案開發	麻工	南科(東) E/S	115.08
高雄	漁電共生專區	保寧	161 kV 岡工~嘉峰線	115.08
屏東	漁電共生專區、個案開發	佳源	大鵬 E/S	113.06

陽光電熱區並劃設太陽光電發電業設置共同升壓站之線路併聯範圍，促使小容量及零星案場集結併網，加速太陽光電發電設備建置進度。

二、再生能源加強電力網工程新設併網點規劃

(一) 新設併網點工程概述

1. 一次配電變電所 (R/S)

變電所規模將包含上游引接線路、輸/

配電級再生能源併網使用之線路終端設備、161/22.8 kV 60MVA變壓器、電壓補償設備器等相關設備；變電所初期可提供再生能源於輸電層級 (161 kV) 及配電層級 (22.8 kV) 總計約500 MW可併網容量，後續可視再生能源併網情況擴建引接線路增加可併網容量。截至111年底，本公司已規劃新建9所R/S變電所供再生能源併網使用，如表1所示[1]。

2. 開閉所 (S/Y)

部分併網點囿於土地面積限制、工程完成期程壓力等因素，有時會採不進行電壓變換、單純設置開關設備 (即開閉所) 提供輸電級再生能源集結併網。截至111年底，規劃新建3所開閉所供再生能源併網使用，已悉數完工加入提供併網，如表2所示[1]。

3. 先期併網工程

為因應R/S變電所完成前過渡期間之再生能源併網需求，於變電所引接線路中段新建連接站 (先期併網場) 並於變電所預定地新

表 2 已規劃之開閉所概述

縣市	目標場域	開閉所名稱	電壓層級	引接系統	完成時間
臺南	將軍漁電專案、七股漁電專案、不適耕作區、漁電共生專區	將軍	161 kV	七股(乙) S/Y	110.09
		七股	161 kV	七股(乙): 南科(南) E/S 七股(甲): 南濱 D/S	111.09
屏東	高樹光電專區	高樹	69 kV	瀾力 E/S 69 kV 系統	111.09

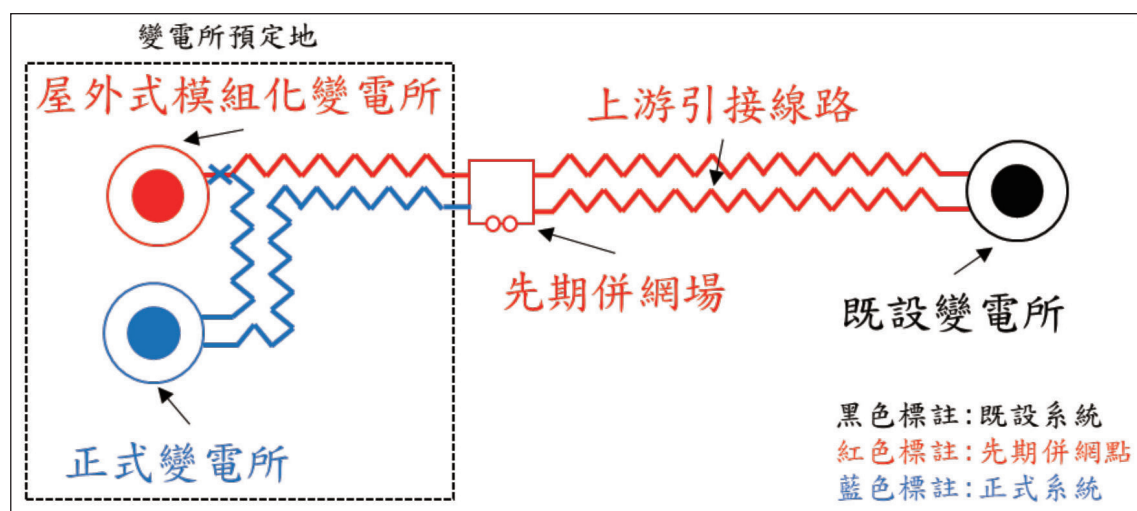


圖 2 先期併網工程系統引接方式示意圖

建臨時變電所（屋外式模組變電所），系統引接方式如圖2，另就先期併網工程規劃分項說明如下[1]：

a. 屋外式模組化變電所

因應近期併網需求，於變電所預定地空地，使用屋外式模組化之輸變電大項設備、縮小裝置規模，加速工程設置期程，以提供再生能源於正式屋內式變電所完成前之臨時併網點，變電所規模為標準化配置（包含161/23 kV 60MVA變壓器一具及輸/配電級開關設備、貨櫃型控制室、所內用電設備），過渡期階段工程完成後仍可移用它處使用。

截至111年底，已規劃新建台區臨、布袋臨、貴舍臨、北門臨及東學臨等5所

表 3 已規劃之屋外式模組變電所概述

縣市	變電所名稱	預計完成時間
雲林	台區臨	113.12
嘉義	布袋臨	112.12
	貴舍臨	113.12
臺南	北門臨	112.06
	東學臨	113.12

屋外式模組變電所以滿足再生能源先期併網需求，如表 3所示。

b. 先期併網場（連接站）

因應近期併網需求，於變電所引接線路中間增設一處併網場（連接站），可併網點多寡取決於連接站配置，倘採二回線複導體規模施設，連接站最多可供4家光電業者併網（每回線



表 4 已規劃之屋外式模組變電所概述

縣市	連接站名稱	設置線路	預計完成時間
雲林	宜梧先	161kV 北港～宜梧二回線	112.12
	台區先	161kV 台區 R/S～台區 R/S 先期併網場	113.12
嘉義	布袋先	161kV 義竹～布袋二回線	112.06
	貴舍先	161kV 糠榔～貴舍單回線	113.06
臺南	北門先	161kV 下營～北門二回線	已於 111 年 12 月完工
	東學先	161kV 東學～麻工二回線	113.12
高雄	保寧先	161kV 保寧 R/S～保寧 R/S 先期併網場	113.06

2家)。截至111年底，已規劃新建宜梧先、台區先、布袋先、貴舍先、北門先、東學先及保寧先等7處先期併網場（連接站），以滿足再生能源先期併網需求，如表 4所示。

（二）9 站 10 線工程各併網點可併網量

1. 彰化縣

為因應能源局於彰化縣沿海芳苑、漢寶一帶盤點一系列太陽光電漁電共生開發潛力場域，考量鄰近彰濱E/S轄區之漢寶D/S可併容量已趨上限，故於彰化縣芳苑地區新建芳興R/S新設併網點工程以滿足該地區併網需求，並新建兩回161 kV線路引接至彰林E/S以擴大該地區可併網容量，終期合計可為芳苑鄉王功段、永興段養殖生產區等鄰近光電潛力場域提供500 MVA可併網容量。

2. 雲林縣

a. 台區R/S

雲林縣麥寮鄉屬再生能源開發熱點地區，該區域鄰近範圍內規劃有農委會盤點不利耕作地、漁電共生先行區與工業局開發雲林離島基礎式工業區新興區及台西區專案設置之太陽光電潛力場址，為滿足當地併網需求規劃於台西地區新建再生能源變電所（即台區R/S），並以兩回161 kV線路引接至虎科D/S以擴大該地區可併網容量，終期預計可為麥寮、台西不利耕作區、台西漁電共生專區、閒置工業區等併網熱區提供500MVA可併網容量。

b. 宜梧R/S

雲林縣口湖鄉沿海一帶鄰近範圍內亦



規劃有農委會盤點之不利耕作地及漁電共生先行區等太陽光電潛力場址，惟考量鄰近嘉民北E/S轄區下四湖D/S、口湖S/S及水林S/S多個併網點之可併網容量已趨上限，為滿足當地併網需求，規劃新建宜梧R/S，並以兩回161kV線路引接至北港P/S以擴大該地區可併網容量，終期預計可為四湖、口湖不利耕作區等併網熱區提供500MVA可併網容量。

3. 嘉義縣

a. 貴舍R/S

為因應農委會於嘉義縣東石鄉盤點之漁電共生先行區及不利耕作區等太陽光電潛力案場併網需求，爰於鄰近併網熱區新建貴舍R/S，並以兩回161 kV線路引接至樟榔D/S以擴大該地區可併網容量，終期合計可為東石、布袋漁電共生專區及東石不利耕作區提供500 MVA可併網容量。

b. 布袋R/S

為因應農委會於嘉義縣布袋鎮盤點之漁電共生先行區及不利耕作區等太陽光電潛力案場併網需求，爰於嘉義縣布袋鎮鄰近併網熱區新建布袋R/S，並分別以兩回161 kV線路引接至至義竹D/S以擴大該地區可併網容量，終期合計可為布袋及義竹漁電共生區提供500 MVA可併網容量。

4. 臺南市

為因應農委會於臺南市沿海永華、學甲、下營及麻豆一帶盤點之漁電共生先行區、北門不利耕作區及民間開發案等光電併網需求規劃，故於鄰近併網熱區處新建北門R/S及東學R/S，並分別以兩回161 kV線路引接至既設電網以滿足光電業者近期併網需求。

a. 北門R/S

考量臺南市北門區及學甲區鄰近併網點永華S/S、新塢S/S及學甲S/S併網容量以區上限，故於併網熱區新建北門R/S，並以兩回161 kV線路引接至下營D/S擴大該地區可併網容量以滿足前揭太陽光電併網需求，終期合計可為鹽水、學甲、北門漁電共生專案區及北門不利耕作等併網熱區提供500 MVA可併網容量。

b. 東學R/S（以麻工D/S代替）

於臺南市麻豆區鄰近併網熱區新建東學R/S，並以兩回161 kV線路引接至南科E/S擴大該地區可併網容量以滿足前揭太陽光電併網需求；惟經相關工程單位評估因原預定興建東學R/S用地取得困難，加之時程緊迫，經研商會議商討後爰以加速趕辦鄰近之麻工D/S取代東學R/S以滿足前揭太陽光電併網需求，終期合計可為下營、麻豆漁電共生專區等併網熱區提供500 MVA可併網容量。



c. 161 kV南科~七股四回線

為因應臺南市七股一帶將軍、七股相關系統併網需求新建161 kV南科~七股四回線工程，以擴大該地區可併網容量，滿足前揭太陽光電併網需求，前揭併網工程終期合計可為將軍、七股漁電共生專區等併網熱區提供2000 MVA可併網容量。

5. 高雄市

為因應能源局於高雄市沿海永安、路竹及彌陀一帶盤點之漁電共生先行區等太陽光電潛力場域，故於鄰近併網熱區新設保寧R/S並以161 kV分歧引接至161 kV嘉峰D/S~岡工D/S兩回線，擴大該地區可併網容量以滿足前揭太陽光電併網需求，終期合計可路竹、阿蓮、岡山、永安、彌陀、茄萣、湖內等漁電共生專區提供500 MVA可併網容量。

6. 屏東縣

為因應能源局於屏東縣沿海佳冬、枋寮一帶盤點之屏東縣政府規劃之循線找地專案、農委會盤點之不利耕作區及漁電共生先行區、台糖公司林相不佳潛力場域等等太陽光電開發潛量，故於併網熱區新設佳源R/S並以161 kV兩回線引接至大鵬E/S，擴大該地區可併網容量以滿足前揭太陽光電併網需求，終期合計可為縣府循線找地專案、林邊不利耕作區及佳冬、枋寮漁電共生專區等併網熱區提供500 MVA可併網容量。

三、共同升壓站併聯適用範圍

(一) 共同升壓站概述

為使有限輸電網資源最大化利用及紓解鄰近配電饋線壅塞案件併網，經濟部能源局與台電公司除研議推動模式，並悉依經濟部核定之「太陽光電發電業設置共同升壓站及容量分配作業要點」；另台電公司亦配合訂定「太陽光電發電業設置共同升壓站注意事項」、「太陽光電發電業設置共同升壓站容量分配規定及相關作業程序」等執行規範，及盤點電網情況並公告「太陽光電發電業設置共同升壓站之線路併聯範圍」，以利再生能源開發業者集結併網。各縣市劃設之共同升壓站範圍及最新公告太陽光電熱區集結共用併網點資訊如圖3至圖12及表5至表11所示。

(二) 共同升壓站劃設範圍

1. 彰化縣



圖3 彰化縣集結併網點分布位置與可併網容量

表 5 彰化縣可供網容量及已核准之共同升壓站

太陽光電 特定範圍	可併容量 (MW)	併網點 (數量)
大城漁電區	453	161 kV 大城 D/S (1)
芳苑、大城不利 耕作區		161 kV 芳興 R/S (5+)
芳苑王功永興 養殖區	180	69k 草湖 S/S、 芳苑 S/S 相關系統 (2)

2. 雲林縣

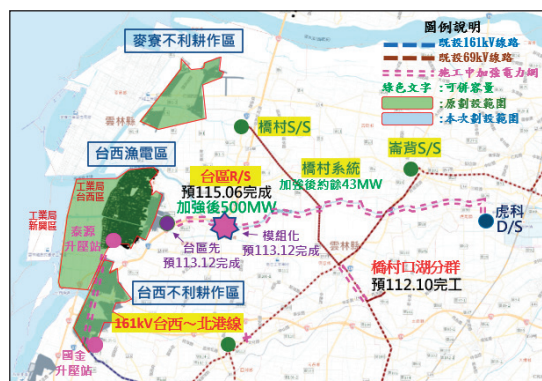


圖 4 雲林縣北邊集結併網點分布位置與可供網容量



圖 5 雲林縣南邊集結併網點分布位置與可供網容量

表 6 雲林縣可供網容量及已核准之共同升壓站

太陽光電特定範圍	可併容量 (MW)	併網點 (數量)
麥寮不利耕作區	43	69kV 橋村 S/S 相關系統 (1)
台西不利耕作區	500	161 kV 台區 R/S 相關系統 (5+)
台西漁電區	已核發 完畢	161 kV 台西 D/S 相關系統
四湖、口湖 不利耕作區	125	161 kV 四湖 D/S (1)
	已核發 完畢	69 kV 口湖 S/S 相關系統
口湖漁電區	500	161 kV 宜梧 R/S 相關系統 (5+)

3. 嘉義縣



圖 6 嘉義縣北邊集結併網點分布位置與可併網容量



圖 7 嘉義縣南邊集結併網點分布位置與可供網容量

表 7 嘉義縣可併網容量及已核准之共同升壓站

太陽光電 特定範圍	可供容量 (MW)	併網點 (數量)
東石、布袋 漁電區	423	161 kV 樟榔 D/S (5+)
	已核發 完畢	69 kV 東石 S/S、 朴子 S/S 相關系統
東石不利 耕作區	500	161 kV 貴舍 R/S 相關系統 (5+)
東石、布袋 漁電區擴大		
布袋、義竹 漁電區		
布袋漁電區 擴大		
義竹漁電區 擴大	360	161 kV 義竹 D/S (4)
		161 kV 布袋 R/S 相關系統 (5+)
	已核發 完畢	69 kV 大寮 S/S、 新塢 S/S 相關系統

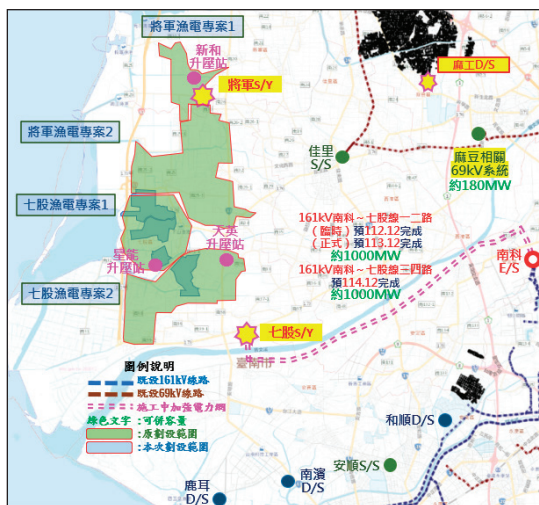


圖 9 臺南市南邊集結併網點分布位置與可供網容量

4.臺南市



圖 8 臺南市北邊集結併網點分布位置與可併網容量

表 8 臺南市北邊可併網容量及已核准之共同升壓站

太陽光電 特定範圍	可併容量 (MW)	併網點 (數量)
下營養殖區	已核發 完畢	69kV 學甲 S/S 相關系統
麻豆漁電區	180	69kV 麻豆 S/S 相關系統 (2)
鹽水漁電區	500	161kV 麻工 D/S 相關系統 (5+)
學甲漁電區		161kV 下營 D/S (3)
學甲漁電區擴大	已核發 完畢	
漁電共生專案及 海埔養殖生產區		
北門不利耕作及 漁電共生專案		
北門漁電區		



圖 10 高雄市集結併網點分布位置與可併網容量



表 10 高雄市可併網容量及已核准之共同升壓站

太陽光電 特定範圍	可併容量 (MW)	併網點 (數量)
永安、路竹 (西區)、路竹 (東區)、阿蓮、 岡山漁電區	400	161 kV 竹嶺 D/S (5+) 161 kV 北嶺 D/S (2) 161 kV 嘉峰系統 (2) 161 kV 路園 D/S (5+)
	500	161 kV 保寧先期併網場(2)
彌陀漁電區	100	69 kV 永安系統 (1)
	已核發完畢	69 kV 梓官 S/S 相關系統
茄萣、 湖內漁電區	78	69 kV 嘉定 S/S (1)
	200	69 kV 大湖 S/S 相關系統(2)
	200	161 kV 保定 D/S (3)

林邊不利 耕作區	690	161 kV 東港 D/S (5) 161 kV 大鵬~東港線(2) 161 kV 大鵬 E/S (5) 161 kV 大鵬~楓港線(1)
東港漁電區		
縣府循線 找地專案	100	69 kV 大鵬 E/S (1)
佳冬、枋寮 漁電區	500	161 kV 佳源 R/S (5+)
	20	69 kV 太源~枋寮線 (1)
	已核發完畢	69 kV 大鵬~太源線

6. 屏東縣



圖 11 屏東縣集結併網點分布位置與可併網容量

表 11、屏東縣可併網容量及已核准之共同升壓站

太陽光電 特定範圍	可併容量 (MW)	併網點 (數量)
高樹光電專區	113	69 kV 高樹 S/Y (5+)



圖 12 屏東縣沿海集結併網點分布位置與可併網容量

四、結論

綜上所述，為滿足政府推動能源轉型目標，台電公司已針對現階段盤點之再生能源併網熱區動態評估電網現況，並同步檢視電網壅塞主因，於西部沿海彰化縣以南等6個縣市加強辦理再生能源加強電力網工程因應，此外，為達再生能源發電設備各年度之推廣目標，本公司除精進長距離延伸電網之再生能源電網工程工序規劃，亦規劃先期併



網工程滿足短期再生能源併網需求；另針對配電饋線壅塞地區，積極盤點優先以漁電共生先行區及其他可施作大型太陽光電之潛力併網熱區（如：不適耕作區、不利農業經營區、低地力農地及水產養殖場等），於併網容量較充裕之輸電級併網點劃設共同升壓站之線路併聯範圍，以利再生能源開發業者集結併網，使電網資源利用最大化，以期加速達成太陽光電開發之政策目標。

後續本公司仍將依據政府政策及電業主管理機關持續滾動檢討相關輸變電設備新建、擴建及改善之需求及可行性，另同步配合於各潛力案場開發依需求適時提出相對應之強化電網工程，俾利營造友善併網環境。

參考文獻

1. 「再生能源加強電力網工程之新設併網點規劃技術彙編」，2022 年 11 月，台灣電力股份有限公司。
2. 「因應再生能源併網熱區之強化電網工程及推動集結併網規劃」，2023 年 3 月，台灣電力股份有限公司。



談地熱資源調查與電力系統整合規劃 - 以新一代清水電廠為例

財團法人中興工程顧問社 / 俞旗文
國立臺灣大學地質科學系暨研究所 / 宋聖榮
清水地熱電力股份有限公司 / 林伯修

關鍵字：地熱資源量、發電潛能、新一代清水地熱

摘要

臺灣遍佈的溫泉與地熱，長期以來除溫泉景點遊憩的開發外，其發電潛能也日漸受到重視，政府2021起鎖定火山岩型（大屯火山區為主）、變質岩型等傳統地熱區，盤點全臺具傳統地熱發電潛力27處案場，大力資助探勘研究經費或獎勵業者積極開發，以提升地熱資源的潛能的有效利用。由於政府再生能源政策，除傳統地熱的加速發展，未來地熱開發也必須尋求全島地溫梯度偏高的地熱潛能地區，進行深層地熱開發，以創造更多的地熱發電的機會，填補全臺再生能源的供應百分比。新一代清水地熱電廠（裝置容量4.2 MW），在民國110年10月27日獲得經濟部能源局核發的電業執照，成為全國目前

唯一兆瓦（MW）級商轉的地熱發電廠。新一代清水地熱電廠的成功變身，為國內地熱發電的停滯發展困境中，打了一劑強心針。本文特別整理新一代清水電廠於資源調查精進、發電潛能評估，與電力系統整合規劃方面的案例，提供讀者分享其成功經驗，期待未來後繼者持續往前邁進，有朝一日將臺灣的地熱發電推向高峰。

一、前言

在國家既定再生能源政策中，將推動地熱發電列為當中重要項目，民國98年起，地熱發電正式成為再生能源發電設備項目，其電能躉購費率從4.4655元/度上升到民國112年的5.1956元/度。民國107年4月11日，環保署

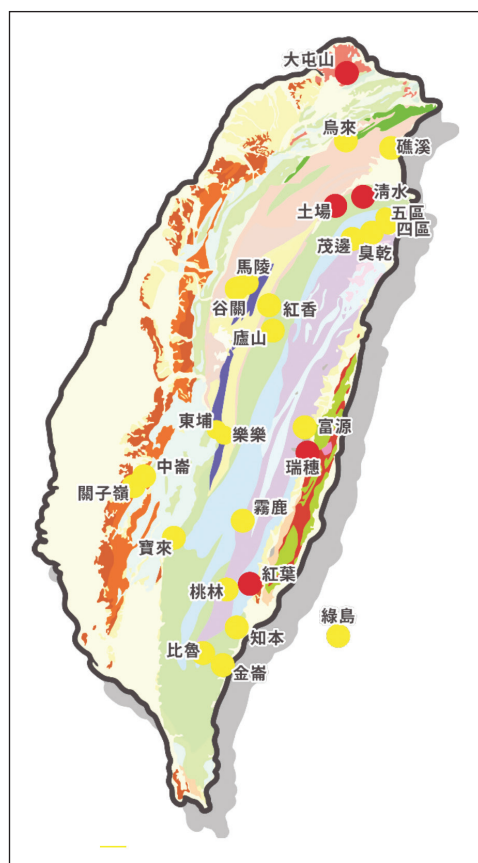


「開發行為應實施環境影響評估細目及範圍認定標準」，將地熱發電裝置容量免環評的門檻從0.5 MW（500瓩）放寬到10 MW（1萬瓩）。經濟部於111年5月20日正式公告「地熱能發電示範獎勵辦法」，考量地熱電廠前期探勘之風險高，因此透過獎勵辦法分攤業者探勘風險，另鼓勵地方政府辦理地熱招商，並增訂受獎勵者應繳交探勘與鑽井資料之規定，期能掌握我國地熱資源狀況，公開地熱潛能區域資訊，吸引廠商投資，加速達成地熱發展目標。

眾多的誘因激勵下，可惜於民國112年，台電國內地熱發電的裝置容量卻停留在6.4 MW，淨發電量也經常未能超過3 MW。裝置容量無法擴大的原因有許多討論，主要的困難，不外乎用地取得、缺乏專法、許可申辦窗口多、相關許可申辦費時等，筆者認為最大問題應該還是熱源的供應上。臺灣位於太平洋火環帶，素有地熱寶島之稱，有足夠地熱條件，但對地熱發電而言，有辦法找到規模夠大且穩定地熱的熱源供應，才是有效擴大裝置容量絕對必要的條件。

根據民國112年6月21日增訂並修正「再生能源發展條例」的條文，法規中定義的「地熱能」指源自地表以下蘊含於土壤、岩石、蒸氣或溫泉之能源。全臺具地熱發電潛力的能源案場基本上可分為火山岩型（高溫蒸氣）、變質岩型（中溫）兩類，通常簡稱為傳統地熱資源，按官方地熱發電單一服務

窗口-首頁（geothermal-taiwan.org.tw）[1]揭露資訊，全臺可開發傳統地熱具989 MW的儲量，到民國114年，政府設定的短期開發目標為20~200 MW。臺灣遍佈的溫泉與地熱，長期以來除溫泉景點遊憩的開發外，其發電潛能也日漸受到重視，圖1為全臺具地熱發電潛力案場的分布情形。對應這些潛力案場，國營事業中油公司已累積34口地熱探勘井，可供查閱。



資料來源：地熱探勘資訊平臺 geologycloud.tw [2]

圖1 全臺具地熱發電潛力案場的分布情形



表 1 全臺具地熱發電 27 處潛力案場的開發資訊

場址區位	溫度範圍(°C)	發電潛能(MW)	2021	2022	2023	2024	2025	歷史探勘 井數	2025目標 (MW)	2030目標 (MW)
大屯山	220-290	514	G5	GB	GB	GC	GC	24	20	200
清水	180-220	61	GC	GC	GC	GC	GC	21	4.5	9
仁澤土場	160-180	25	G5	GB	GB	GC	GC	18	4	8
花蓮瑞穗	140-180	16	G2	G3	G3	G4	G4	2		5.3
台東紅葉	130-190	12	G2	G3	G3	G4	G5	1	1	5
台東知本	140-200	25	G4	GC	GC	GC	GC	7	0.01	9.9
台東金甯	140-200	48	G4	GC	GC	GC	GC	13	0.5	12
台東金峰	140-200	-	G4	GA	GA	GB	GB	1		9.9
廬山	150-210	41		G3	G3	G4	G4	9		
寶來	110-160	14		G1	G2	G3	G4			
霧鹿	150-210	18		G1	G2	G3	G4			
東埔	120-180	16		G1	G2	G3	G4			
谷關	130-180	15		G1	G2	G3	G4			
關子嶺	120-190	11		G1	G2	G2				
中崙	120-185	11		G1	G2	G2				
富源	80-160	9								
紅香	130-170	11								
四區	140-210	18								
烏來	150-200	13								
礁溪	100-160	9								
樂樂	120-140	9								
五區	150-210	18								
奧乾	135-185	16								
茂邊	170-210	19								
桃林	150-210	14								
比魯	130-190	14								
馬陵	130-170	11								

G1	Undiscovered(未探勘)
G2	Inferred(有探勘構想)
G3	Measured(有探勘井)
G4	Tested(有測試井)
G5	Examined(已驗證/有產能試驗)
GA	有電廠規劃中
GB	有電廠籌設中
GC	有電廠運轉中

政府相關部門（中央地質調查所）更於民國110年（西元2021）起，盤點並揭露全臺具地熱發電27處潛力案場的開發資訊，其成果如表1所示。同時間起，政府也透過中央地質調查所編列使用政府前瞻預算開始陸續進行優先案場（臺東延平、花蓮瑞穗、廬山、谷關、東埔、寶來、關子嶺）的補充探勘，並嘗試建構「加速全面性地熱資源探查及資訊供應計畫」，以提供足夠熱源資訊，吸引開發商投資。

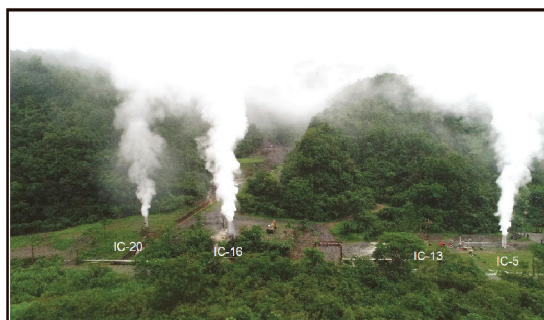
參考過去資料[3]，臺灣本島除大屯火山區屬火山蒸氣型地熱，其餘多半皆屬與中

央山脈或雪山山脈造山運動有關的變質岩區（如宜蘭、花東）內，屬裂隙傳導為主的熱水型地熱。能源局推估：大屯山具514 MW的地熱儲量，清水則具61 MW的地熱儲量。根據表1盤點資料，目前全臺已知地熱儲層溫度超過200°C且估計發電潛能排名領先的案場，第一名為「大屯山」，第二名為「清水」。剛好是上述火山岩型（高溫蒸氣）與變質岩型（中溫熱水）的典型代表（參見圖2）。

大屯山地熱的調查，早自民國55年就已展開，直到目前，大屯山地熱區內終於有1 MW的示範電廠有四磺坪地熱示範區（天籟

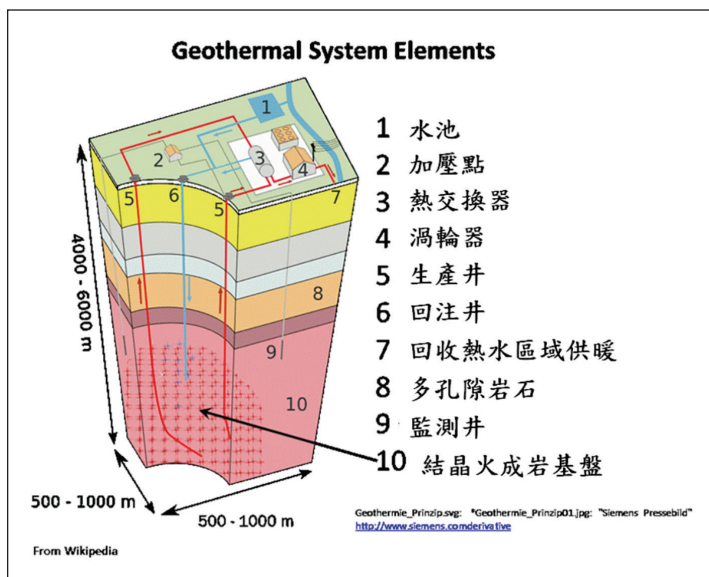


(a) 大屯山地熱 / 四磺子坪地熱區 (高溫蒸氣為主)



(b) 清水地熱區 (中溫熱液為主)

圖 2 傳統火山岩型 (大屯山)、變質岩型地熱 (清水)



資料來源：增強型地熱系統 - 維基百科 (wikipedia.org) [5]

圖 3 增強型地熱系統 (簡稱 EGS 系統)

溫泉社區附近) 即將建成。清水地熱則已於民國110年已成功開發新一代規模達4.2 MW的商轉電廠。為國內地熱發電的停滯發展困境中，打了一劑強心針。

鑒於傳統地熱資源的侷限，各國為擴大

地熱的可發電規模，紛紛倡議「深層地熱」的開發，這將是搭配再生能源推廣的未來世界趨勢。增強型地熱系統 (簡稱EGS系統) 為深層地熱的代表 (參見圖3)，有別於傳統的地熱井利用流經天然岩石的裂隙 (如裂縫和斷層) 滲透湧至地表的高溫流體



(蒸氣或水)，EGS系統通過水力破裂人工致裂方法(hydraulic stimulation)來增強深部(3-6公里)岩石的滲透性。這涉及使用深鑽井於井下以高壓注入流體來壓裂深部鑽孔岩壁(例如深埋的花崗岩)，使得更深和更高的岩石所含地熱潛力(150-200°C)可以用作熱源發電。按官方揭露資訊，全臺具高達33,640 MW(或33.64 GW)的可開發儲量。

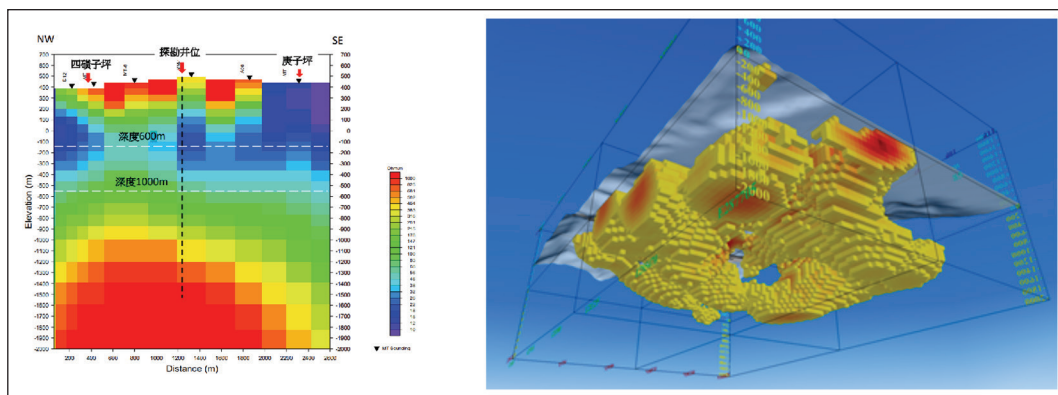
深層地熱的開發關鍵技術，需要深鑽井的能力，搭配需要大規模初期投資，目前世界各地陸續有案例出現，但仍屬萌芽階段。政府經濟部能源局於民國99年即委託財團法人工業技術研究院(以下簡稱工研院)進行「地熱能源永續利用及深層地熱發電技術開發計畫」三年計畫，以及後續民國102年進行「深層地熱發電技術研發計畫」，開始長期推動相關研究。民國102年，能源國家型科技計畫成立地熱發電主軸計畫，也開始推動進行EGS深層地熱的相關研究，惜礙於經費規模有限，在宜蘭紅柴林區試鑽了兩口深度2200 m與2800 m的探勘井(民國104~106年)後，因溫度與試產成效不佳，計畫結束。

目前則尚無針對深層地熱的第一口深鑽井出現。經濟部(能源局)於公共建設類前瞻基礎建設計畫提報「東部地區地熱鑽井計畫」，計畫已於民國111年已經蒙行政院核定，預計民國113年在宜蘭地區完成1口鑽深4,000公尺之深層地熱探勘井鑽井工作，若能成功，將能開創臺灣地熱發展新的視野。

二、地熱資源量與發電潛能

(一) 地熱資源調查

前述官方所言：「全台可開發傳統地熱具989 MW的儲量；大屯山具514 MW的地熱儲量，清水則具61 MW的地熱儲量」，這些論述或說法是對應地熱區尺度的地熱探勘的大略推估，僅能作為有限資料下的初步參考，實際可開發儲量需視新增調查資料，滾動調整。換言之，地熱資源量的開發潛能(或地熱儲量)必須根據地表地質、地球物理、地球化學等資源的探查手段，再綜合有限的鑽探成果，建立地質概念模型與熱源模式，進行有效地熱儲量、或實際可開發儲量推估。以圖4為例，於地表利用地球物理大地電磁法(簡稱MT法)取得之二維剖面式或三維逆推式地下地質構造(低電阻區)探查成果，可據以透視解析試驗場址熱源蘊藏分布空間概念模型等資訊。MT法所建立的二維電阻率剖面(工研院，2015[6])或三維概念模型是目前一般提供探勘或開發鑽探井位評選最重要的參考。概念模型是一種合理的推估，並非絕對，因此地熱資源探勘存在著許多不確定的因素，具有高度的投資風險。過去有限的探勘資料顯示若干地熱潛能區雖具備足夠溫度條件，但對地熱是否能成為發電基載，仍須進一步掌握地熱儲集層的特性與地熱流體的穩定產出能力，方有利於地熱發電的實質開發。



(a) 二維例 (磺嘴山北坡)

(b) 三維例 (瑞穗地區)

圖4 大地電磁 (MT) 法地熱資源的探查成果範例

美國、紐西蘭、日本等地熱發電先進國家常用體積法為主軸的蘊藏熱能法 (Stored Heat Method) 為基礎，來估算地熱儲量 (Q) 與地熱發電潛能 (E)，各國估算方式大同小異。地熱儲量 (Q) 通常以百萬焦耳 (MJ) 為單位。國內的評估基礎，主要亦沿用體積法的精神，引用一定的經驗方法或公式計算 (李清瑞等人，2012[7])。例如，在假設熱液型地熱系統於封閉地層壓力時，均以液態存在且無蒸汽儲熱量，其總熱蘊藏量計算主要參數包括變動參數 (儲層面積、儲層平均厚度、儲層初始溫度、孔隙率) 與固定參數 (基準溫度、岩石密度、岩石比熱、儲集層之含水飽和度)。其中變動參數中的孔隙率，可解讀為岩體的等效孔隙率，當岩石屬變質岩 (例如板岩或片岩) 時，岩石材料本身孔隙可能因變質作用而降至甚低 (孔隙率小於1%)，此時熱流於地下岩體內對流傳導時，主要是靠裂隙 (如節理面，弱面，斷

層等) 作為主要連通介質。

民國81~95年間，國內地熱資源調查限於停頓。自民國95年起，經濟部能源局先後透過經濟部能源科技研究發展計畫、研究機構能源科技專案，啟動新一波地熱發電技術開發推動計畫。表2所示為能源局 (委託工研院) 於民國95年以後對地熱資源、地熱發電研究經費的投入統計。民國95年至今，主要研究目標也是以上述清水、大屯山兩處案場為主。這些研究經費的投入，對兩處案場的地熱資源量的開發潛能，提供了必要的資訊，對於國內的商轉電廠催生，的確也帶來了巨大的影響。

(二) 發電潛能評估

發電潛能 (E，單位百萬瓩或MW) 評估方法，由地熱儲量 (Q，單位百萬焦耳或MJ)



表 2 經濟部能源局（委託工研院）地熱發電研究經費投入

報告年份	計畫名稱	研究目標	經費（仟元）
2007*	95 地熱發電技術開發推動計畫（1/1）	清水地熱區	59,000
2008*	96 地熱發電技術開發及多目標利用推動計畫（1/3）	清水地熱區	73,036
2009*	97 地熱發電技術開發及多目標利用推動計畫（2/3）	清水地熱區	54,915
2010*	地熱發電技術開發及多目標利用推動計畫（3/3）	清水地熱區	? 未執行
2011*	99 地熱能源永續利用及深層地熱發電技術開發計畫（1/4）	清水地熱區	65,283
2012*	100 地熱能源永續利用及深層地熱發電技術開發計畫（2/4）	清水地熱區	38,760
2013*	101 地熱能源永續利用及深層地熱發電技術開發計畫（3/4）	清水地熱區	44,652
2014#	102 深層地熱發電技術研發計畫	大屯火山區	52,816
2015#	103 高效能地熱發電技術研究計畫（1）（104-2 月）	大屯火山區	54,802
2015#	104 高效能地熱發電技術研究計畫（2）（104-12 月）	大屯火山區	72,934
2017#	105 高效能地熱發電技術研究計畫（1/3）	大屯火山區	79,221
2018#	106 高效能地熱發電技術研究計畫（2/3）	大屯火山區	89,072
2019#	107 高效能地熱發電技術研究計畫（3/3）	大屯火山區	89,331
2020#	108 地熱發電整合推動與技術研發計畫（1/3）	+ 仁澤土場區	88,935
2021#	109 地熱發電整合推動與技術研發計畫（2/3）	地熱發電推廣	? 不明
2022#	110 地熱發電整合推動與技術研發計畫（3/3）	地熱發電推廣	51,123
2023#	111 地熱電廠整合推動計畫（1/3）	地熱發電推廣	不提供

註：* 經濟部能源科技研究發展計畫 # 研究機構能源科技專案

資料來源：地熱發電單一服務窗口 - 臺灣地熱資源 - 資訊公開區（geothermal-taiwan.org.tw）

轉換，計算式（李清瑞等人，2012[7]）如下：

$$E = \left[\frac{Q \cdot R_f \cdot \eta_c}{F \cdot L} \right] \quad (1)$$

式（1）中， E 為發電潛能（MW）； Q 為蘊藏熱能（MJ）； R_f 為熱源回收率； η_c 為能源轉換效率； F 為電廠運轉率； L 為電廠壽命（年）。

實務上，熱源回收率（ R_f ）通常取值介於0.1~0.13；能源轉換效率（ η_c ）通常取值介於0.08~0.09；電廠運轉率（ F ）通常取定值0.94；電廠壽命（ L ）通常取定值30年。

清水地熱區則具61 MW的發電潛能，也是利用上述透過體積法地熱儲量的方法所推估出的概略值。體積法的變動參數中，儲層面積、儲層平均厚度的估計值會直接影響地熱儲量的估計結果，然而如何準確估計儲層面積與厚度，絕非易事，需要長期於案場的開發過程，通過對儲層有效管理的經驗累積，才能實際檢驗。

三、舊清水電廠與再生計畫

民國64年清水地熱區先期第一口井（IC-1）



開鑽，由工研院進行地熱資源評估及探勘，隨後（民國65年）由中油公司接續負責系列生產井鑽設及地熱流體生產。先後於清水區的鑽井，有工研院的IC-1, 2, 3, 6, 7, 8, 10, 11等8口地熱調查探勘井，深度約為450~500公尺之間；與中油公司鑽鑿的IC-4, 5, 9, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19等11口地熱生產井，平均深度約為1,980公尺。這在國內各潛能地熱區，累積的探勘井與生產井的數量，堪稱空前。清水地熱區中油公司的最後一口鑽井（IC-19井）於民國75年結束。工研院IC-11井於民國65年結束後，隔了30年直到民國95年，能源局推動清水井場再生計畫，由工研院於民國95年新鑽IC-20井（503公尺），以及民國100年新鑽IC-21井（1058公尺）。總結清水地熱區探勘井成果顯示：地熱儲層流體為鹼性（pH值8-9），水質屬（Na + K）- HCO₃水，含非凝結性氣體（NCG）比例為3-30%。

中油公司所鑽鑿11口井地熱生產井，其中8口成功成為生產井（包括IC-4, 5, 9, 13, 14, 16, 18及19號井），其生產深度自900~3,000公尺，井內溫度約攝氏200~230°C。回顧民國70年，基於熱源產能充足，清水地熱區乃因而在當時國科會的推動下建構了一座裝置容量為3MW先導型地熱發電試驗廠，由中油公司負責鑽井維護地熱流體生產，並交由臺電公司（蘭陽發電廠清熱分廠）負責操作運轉試驗。該發電機組為單閃發蒸汽發電方式，僅利用地熱總產量中

10~20%之蒸汽，大量之高溫熱水則排放未用，因供汽條件（壓力、流量）未能滿足發電機規格，自始發電效率即偏低。清水地熱區因地熱產量逐年衰減以致發電量亦隨之遞減，從先期1,600 kW發電量至關廠前剩餘177 kW。而於民國82年11月停止發電試驗，電廠關閉前累計運轉時間長達12年有餘。產能衰減原因主要為未充分掌握儲集層特性，生產過程未達最佳生產管理而過度降壓生產造成管線結垢所致（李毓仁等人，2013[8]）。

於民國99年，能源局於推展清水井場再生計畫期間，透過工研院同意陽碁及結元公司共同參與「地熱發電測試評估」計畫，豐宇鑽井工程公司參與「地熱井探測機具開發」計畫。協助推動地熱發電測試評估子計畫。經徵選及審查程序，於民國99年7月15日完成與陽碁及結元公司二家廠商簽約，分別提供有機朗肯循環（Organic Rankine Cycle）及卡里那循環（Kalina Cycle）系統發電機組，發電運轉測試於99年7月15日至100年1月30日間進行。

民國101年，工研院地熱利用技術研究室依據宜蘭清水地熱IC-21地熱井條件進行設計、開發一50 kWe地熱雙循環ORC（Organic Rankine cycle；有機朗肯熱機循環）發電機組和周邊冷熱源循環供應設備（李毓仁等人，2013[8]）。其中ORC溫差發電機組包括ORC熱力循環迴路、熱力作功元件（蒸發器、冷凝器、螺桿式膨脹機、內嵌式發電



機、工作流體升壓泵等)和機電控制系統等，於清水地熱現場進行ORC機組性能測試與運轉展示。

民國105年，工研院建置300 kW等級國產ORC發電機組研發平台，位於原宜蘭清水地熱50 kW發電示範發電系統旁，其中包含：土建鋼構工程(鋼棚)、1000 RT冷卻水塔、IC-21管線銜接、控制電力盤體、控制室、回注系統、軟水系統及450kVA受電設備建置等。該研發平台沿用50kW之軟水蓄水桶、IC-21地熱井及9噸蓄水槽，另將原受電設備90 kVA升級為450 kVA、冷卻水塔由200 RT升級為1000 RT，以提供較大型發電機組進行運轉測試。

300 kW等級發電機組研發平台於民國105年10月建置完成。測試平台藉由發電機組實機運轉進行測試，以每日出水噸數19.2 TPH之地熱水供應(地熱出口溫度142°C、壓力331 kPa-G條件下)，發電機組發電量可達208 kW。透過發電機組現地測試及實際發電輸出，以驗證此發電機組研發平台之功能性及可行性。上述機組研發平台成果技轉民間後，由結元科技股份有限公司接手。之後，宜蘭「清水300 kW地熱電廠」開發案完成再生能源發電設備同意備案，於民國107年11月與台電公司完成併網售電簽約，自民國107年11月30日開始併網送電試運轉。

四、新一代清水電廠

(一) 概述

民國82年11月停止發電試驗後，台灣中油公司乃於民國89年將清水地熱礦權歸還經濟部，並完成地熱井報廢手續，再於民國92年間將8口地熱井無償撥贈予宜蘭縣政府。宜蘭縣政府主導的清水地熱發電廠BOT及ROT案與民國106年7月14日與「宜元股份有限公司」(以下簡稱宜元公司)簽約，開啟新一代清水地熱電廠的重生里程碑。

本文以下部分，特以宜元公司經營的新一代清水地熱電廠為例，如何將昔日失敗的清水地熱電廠，從民國106年到民國110年的政府與業者BOT案的合作中浴火重生，在民國110年10月27日獲得經濟部能源局核發的電業執照，成為全國目前唯一商轉(裝置容量4.2 MW)的百萬瓩級地熱發電廠，提供讀者分享其成功經驗。

清水地熱區位於宜蘭縣大同鄉清溪段，清水地熱公園旁。台七丙線為本區唯一之聯外道路，由清水橋頭進入本廠址之產業道路，路寬僅約4~6公尺。新一代清水電廠計畫(以下簡稱本案)所在的清水地熱區場址與昔日舊清水電廠大致相同。場址緊鄰清溪水溪，現屬水利單位劃設之行水區管制區域範圍。周邊為溪谷地型，坡度頗大。圖5所示為清水地熱區內新一代兩組發電機組



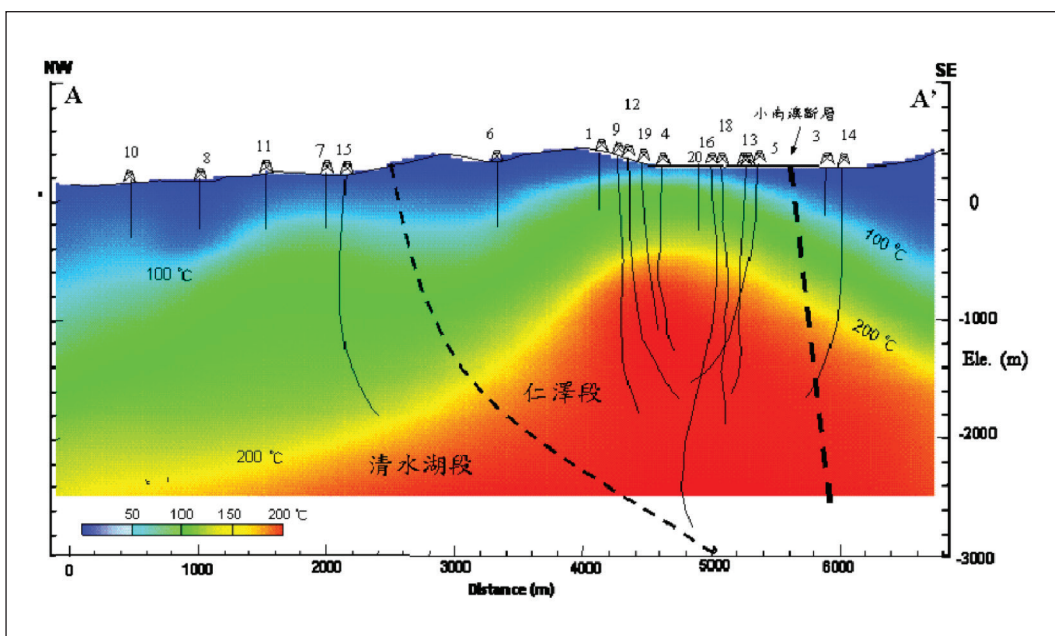
圖 5 清水地熱區內各井所在位置

(300 kW、4.2 MW) 與各既存井相關所在位置。基地範圍：北區1.9637公頃；南區5.839公頃。隨著清水溪斷層的走向，地熱流體也向北北西方向移動，既存井資料顯示，「南井場」的井中的壓力略高於「北井場」。計畫場址內之南、北井場兩塊腹地是大溪及赤鹿坑溪所沖積而成的小型河灘平原。

本案主要發電設備及地熱井頭均位於清溪段12-1號，發電廠所佔土地面積約為2公頃，發電廠所需土地使用分區為森林區。300 kW發電機組位於場址「北井場」，本案4.2 MW發電機組位於場址「南井場」，參見圖5所示。

(二) 地熱資源量

清水地熱區內的地熱資源，歷來的調查研判係一個中新世廬山層仁澤段板岩體內，由三個主要斷層地質構造所導控的變質岩熱儲層（李伯亨等人，2013[9]），斷層包括：（1）地熱區西邊沿清水溪分布的北西-東南走向的「清水溪」斷層，（2）「南井場」更南邊與「清水溪」斷層垂直的小南澳斷層，以及（3）「北井場」北側也是與「清水溪」斷層垂直的所謂G斷層（G-fault）。這三個主要的斷層所形成的破裂板岩地塊，可能也是導致高溫上湧（upflowing）和流出（outflowing）的地熱流體的可能儲層或



(摘自李清瑞等人，2012[7])

圖 6 清水地熱區地下溫度分布剖面與既存井關係圖

通道。圖6所示為清水地熱區透過工研院、中油公司歷來所有的既存井量測地下溫度分布所繪製的剖面概念模型（李清瑞等人，2012[7]），此概念模型筆者認為對於清水地熱區地熱資源分布的解釋可信高，亦能具體符合大量鑽井成果。至於地熱資源區的高溫似乎為開放型並向東北側山區延伸，擴大地熱資源量，後續仍然需要通過更多鑽井來進一步探查。

依工研院團隊（李清瑞等人，2012[7]）的估計：清水地熱具產能可逕行開採的核心區（溫度高於 180°C ），總蘊藏熱能介於 $3.7\text{E} + 11 \sim 5.6\text{E} + 11$ MJ；而潛能區（溫度高於

160°C ），其總蘊藏熱能介於 $1.2\text{E} + 12 \sim 1.8\text{E} + 12$ MJ。經熱源回收率與能源轉換效率的轉換後，由總蘊藏熱能所估算出的發電潛能在核心區約為 $3.7 \sim 7.4$ MW；潛能區之發電潛能約為 $10.4 \sim 19.7$ MW。換句話說，溫度高於 160°C 可逕行開採的發電潛能約在 $14 \sim 27$ MW左右，此結果相對前述官方所言：「清水則具61MW的地熱儲量」相對較為保守，主要差異可能源自兩者考慮的資源面積範圍不同。

（三）BOT + ROT 開發

宜蘭縣地熱資源豐富，縣府民國101年與噶瑪蘭清水股份有限公司簽約，擬在清水地



熱區設置發電機組，後因噶瑪蘭公司財務問題而解約。隨後，本案依據「促進民間參與公共建設法」，在「電業設施」類採「BOT+ROT」方式招商（促參法第8條相關規定及相關法令辦理），將清水地熱發電區委由民間投資新建、增建、改建、修建經營及管理。根據民國105年1月25日招商說明會本案用地範圍（土地權屬：宜蘭縣政府）包括宜蘭縣大同鄉清溪段7筆地號土地，面積合計5.84公頃。民國105年11月4日重啟本案「BOT+ROT」採購標案，由台灣汽電共生股份有限公司（以下簡稱台汽電）、結元科技股份有限公司（以下簡稱結元公司）合組開發團隊被評為最優申請人，取得標案承攬權。

民國106年7月14日，台汽電和結元公司合資成立之「宜元公司」完成與宜蘭縣政府BOT簽約（參見圖7）。首期規畫裝置容量1 MW（一百萬瓦），年發電量九百萬度，扣除廠區用電，可供七千戶家庭使用。最快三年後投入商轉，再視營運狀況，提出第二期計畫，二期總裝置容量4 MW，可供應兩萬

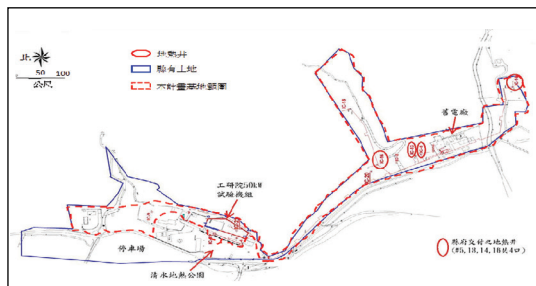
八千戶家庭用電。宜元取得發電廠廿年營運權，營運期間，預計每年要交付縣府兩百萬元左右權利金。

為達成首期與二期目標，主辦機關宜蘭縣政府共交付14筆土地，包含廠址範圍內現存4口地熱井（編號5、13、14及16）以及舊台電辦公室、警衛亭等5處水泥建築物，供本案使用，因此開發基地範圍內共有16筆土地，總面積由首期規畫5.84公頃增為7.946公頃。

發電設施係利用地熱能將熱能轉換成電能發電，為確認本案地熱能的熱源充足，宜元於民國106年1月間，除透過台灣汽電委託菲律賓EDC公司[10]評估潛在地熱蘊藏量，研究結果顯示本案廠址地熱的熱源潛能達6.7 MW；亦同步參考工研院「清水地區地熱發電系統探勘評估及利用規劃報告」及「清水地熱區開發資源蘊藏檢討報告」，兩份報告均指出清水地熱潛能範圍約3.5平方公里，發電潛能達15 MW，以廠址可供鑽井生產範圍約1平方公里（即100公頃）推估，可供本地



(a) 簽約儀式



(b) 用地交付

圖7 宜元公司與宜蘭縣政府完成簽約與交付用地範圍

熱電廠發電使用之地熱資源達5 MW以上。綜上，本案廠址開發規模業經國內外專業單位探勘研究，對於熱源規模及分佈有高度共識，廠址所在區段地下熱源足以供應本案4.2 MW發電之需求。

本案屬地熱再生能源BOT開發，使用能源為地熱能，地熱能燃料主要依賴生產井供應，可直接從廠址內地熱井提取，無需對外引接燃料管線供應及輸入。取熱後回注原地下層，亦無燃料儲存問題。本案廠區所有地熱生產井皆位於廠址之內，原BOT開發首期係規畫第一階段以修復既有4口地熱井（IC-5、IC-13、IC-16作為生產井、IC-14作為回注井），預期達成設置與運轉裝置容量達1MW之地熱發電廠。由於本案二期4.2 MW

發電計畫熱源供應量須約130公噸/小時，主要由現存4口地熱井（編號5、13、14及16）做為熱源供應，並視需要鑽鑿新井。於之前圖5所示，除包括地熱區歷來所鑽各井所在位置，亦有近期開發所新鑽鑽井，其中包括R1井、R2井、R3井為BOT案成立後新鑽探查井，除補充地質外，規劃用為回注井使用。

本案採用國際大廠ORMAT公司所出產的地熱雙循環ORC發電機組，該發電機組係利用有機工作流體（戊烷）於熱交換器內汲取地熱源的熱能，利用渦輪機將熱能轉換為機械旋轉能，再利用發電機將此旋轉動能轉換為電力輸出。本案ORC系統之基本運行原理圖，詳如圖8所示。

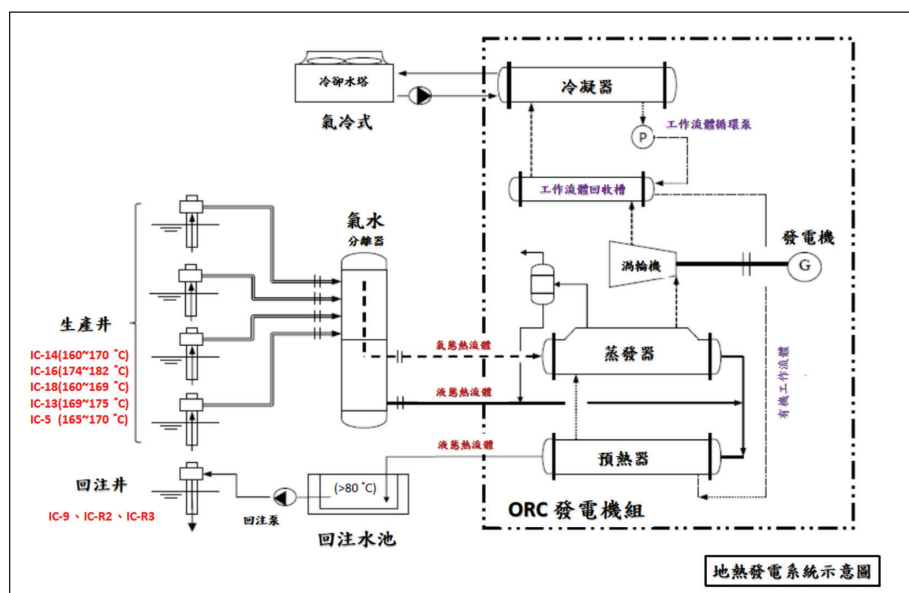


圖 8 本案 ORC 系統之基本運行原理示意圖



由於本案之地熱井皆為自湧井，熱源為雙相流體（蒸氣、熱水），上升至井頭閥時熱源之閃發蒸汽含量為9~30%，故自井頭閥出口後，規畫將熱源以管線輸送進入氣水分離器（Separator），分離後之汽態與液態熱源分別進入ORC系統之熱交換器，與工作流體進行熱交換，熱交換完成後之液態熱源輸送至回注槽，回注至原地下熱源層。圖9所示為本案地熱流體輸送管線（蒸氣、熱水混合）流路的施工情形。流體輸送管線有2支引水幹管（16吋/10吋）併入氣水分離器，熱源輸送採雙相流體設計，降低能耗。另有1支回水管（10吋）可將地熱流體輸送至回注區，泵入儲集層。

（四）電業籌設申請

由宜元按BOT合約規範所成立的「清水地熱電力股份有限公司（以下簡稱清水電）」，負責地熱發電籌設建廠與維運。本案熱源供應量充足，且經評估適合使用中溫雙循環ORC發電機的前提下，進行地熱發電建廠可行性高。建廠的過程首先需辦理電業籌設申請，由本案經驗，應辦事項至少應包括以下事項（包括各事項所需花費時間估計）：

- 簽署投資契約（105/11/4得標，106/7/14簽約）
- BOT用地營運資產點交

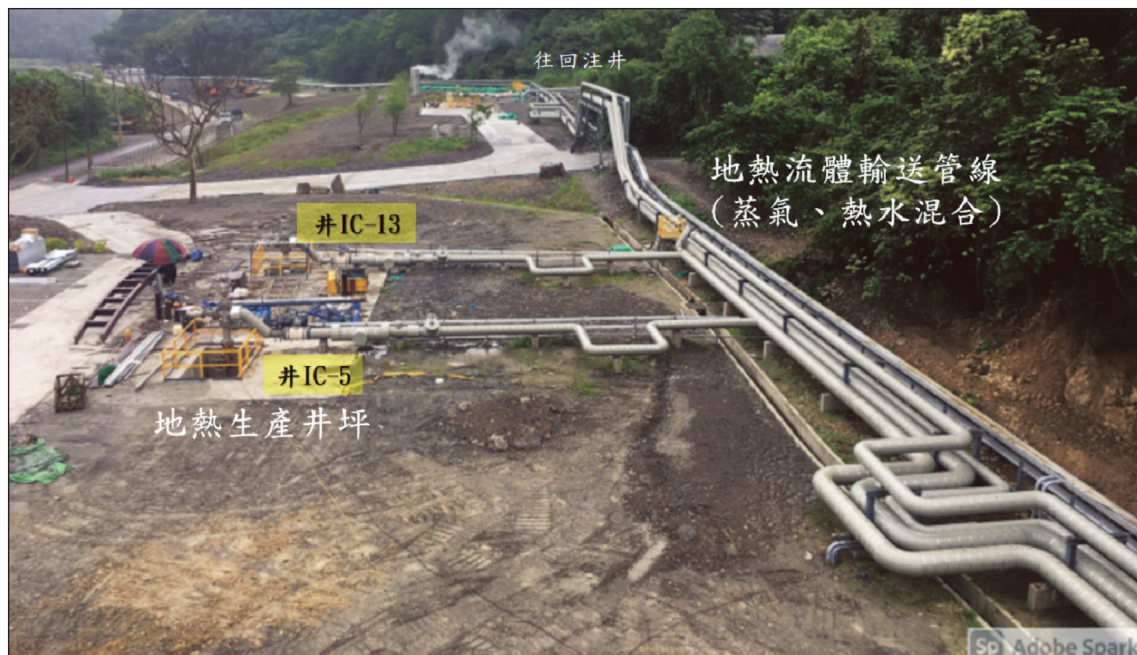


圖 9 地熱流體輸送管線（蒸氣、熱水混合）流路的施工情形



- 環境調查（7個月）
- 取得地方主管機關同意函（1個月）
- 取得發電廠土地使用同意書及地政機關意見書（1個月）
- 取得發電廠之電源線引接同意書
- 取得環保署「免環評核備函」（1個月）
- 取得能源局「電業籌設許可」（6個月）
- 能源局再生能源設備同意備案（2~3 個月）
- 台電初步併聯協商（5 個月）
- 簽訂購售電合約（1~2 個月）
- 取得電廠施工許可（7 個月）

依照經濟部「再生能源發展條例」第八條規定：『再生能源發電設備及其所產生之

電能，應由所在地經營電力網之電業，衡量電網穩定性，在現有電網最接近再生能源發電集結地點予以併聯、躉購及提供該發電設備停機維修期間所需之電力』。本案發電機產出電力，由6.6kV昇壓至11.4kV，經開關盤隔離與保護後，利用自建自備電桿，以25kV-XLPE電纜（150 mm²）併聯台電電桿（桿號：地熱#1，電力座標：E7945/GC15E7945/GC15）桿上開關，引接至台電公司11.4kV饋電系統，進入台電公司電網。

本案於民國107年7月間取得台電再生能源（地熱發電設備第一型）併聯審查意見書，如圖10所示。台電指示於加強電網工程

再生能源發電系統併聯審查意見書	
	107年5月
申請人清水地熱電力股份有限公司(籌備處)，在宜蘭縣大同鄉清溪段12-1地號興建第一型以地熱為動力之發電設備，預定民國109年商轉，申請併聯至本公司11.4 kV 系統乙案「113107GP0501」，經檢討後提出審查意見如下：	
一、 引接併聯計畫	
■（適用一般再生能源發電）	
清水地熱電力股份有限公司(籌備處)地熱發電計畫，總裝置容量4200kW。申請以一回電纜線併接到台電電桿桿號地熱#1(E7945GC15)，經審查：	
☐ 原則同意。	
■於加強電網工程E7652FB08-E7651FD36電網強化完成後同意	
（上述加強電網工程費用由本公司與申請人均攤）。	

圖 10 台電再生能源發電系統併聯審查意見書



E7652FB08-E7651FD36電網強化完成後，同意本案總裝置容量4,200 kW（4.2 MW）併聯申請。並隨後於取得能源局核發本案「電業籌設許可」函後，辦理後續併聯初步、細部協商，以及加強電網工程。

（五）實際建廠工程

清水地熱廠址為變質岩型地熱，所在地由板岩（Slate）組成，液態熱源比例較高，分析既有地熱相關探勘資料及既有井排放測試數據，熱源熱度為220-240°C，適合建置中低溫熱水型地熱發電廠，發電系統採用ORC發電機組；由ORMAT公司ORC原廠依本地區之地熱源特性（如溫度、蒸汽氣含量及流量等）提供客製化設備。本案發電廠規畫建置於南井場區（參見圖5），於電業籌設申請完成後，進入實際建廠工程，建廠完成實際商

轉前，其過程大致程序如下（包括各程序所需花費時間估計）：

- 水保報告書審核通過（10 個月）
- 水保工程施工（6 個月），參見圖 11
- 環境調查（7 個月）
- 地熱教育館施工（15~16 個月）
- 地熱蘊藏量再評估（3 個月）
- 既存舊井水權狀再申請（11 個月）
- 既存舊井診斷與洗井（13 個月）
- 結垢抑制設備建置（3~4 個月）
- 新增探勘井鑽設許可（7 個月）
- 新增探勘井鑽設併取得溫泉開發許可（11 個月）
- 發電機組訂購（7 個月）
- 發電機組製造與交貨（13~14 個月）
- 全廠設計（8 個月）
- 附屬設施施工（9~10 個月）



圖 11 水保工程施工概況



- 機組安裝、測試、試運轉（4~5 個月）
- 竣工查驗後取得電業執照（2~3 個月）
- 商轉

（六）電廠規設

由於本案發電設備需按ORMAT公司ORC原廠依本地區之地熱源特性提供客製化設備，因此ORMAT公司也提出設計界面的配套需求，包括工藝流程圖（PFD）以及管道和儀表圖（P&ID），以供地熱流體收集系統、分離系統、回注系統、有機工作流體（Working fluid）填充和排放系統、壓縮空氣系統、消防系統的控制設計等。清水電委託國內廠商負責上述設計界面整合的部分。電氣工程部

分，清水電則委託國內相關技師協助電力系統單線圖、UPS架構與箱體、電器設備配置、室內外標準箱體、高壓管路埋設標準、台電高壓電錶箱、VCB（真空斷路器）等所需設計。

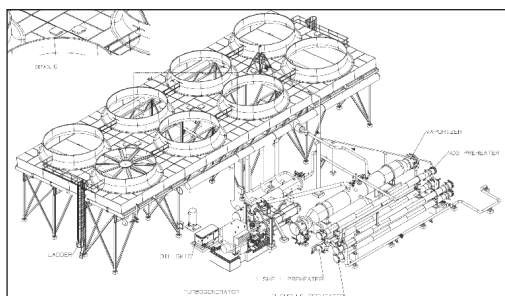
本案依設計所需建置設備主要包括：汽輪機及附屬設備、發電機及附屬設備、變壓器及其附屬設備、避雷器設備及附屬設備、蓄電池組及附屬設備、保護電驛設備及附屬設備。主要發電設施與相關數量，如表2所示，主要設施及附屬控制設備規格規劃如表3所示。圖12所示分別為發電機及附屬設備（4.2MW, ORMAT公司）的主要部分：氣冷式雙循環發電機組設計圖與完成圖。

表 2 主要發電設施

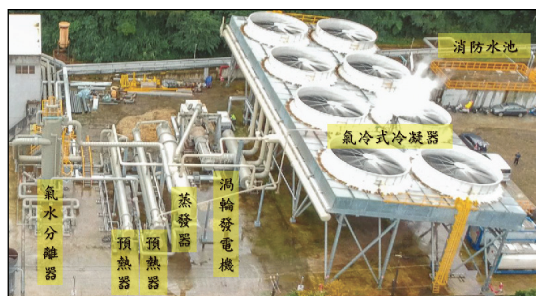
設備	數量	參考廠牌型錄
汽輪機	一部	ORMAT OEC Turbine
同步發電機	一部	Kato Engineering Turbine Generators
熱交換器	一組	ORMAT Heat Exchanger
氣冷式冷凝器	一組	ORMAT Air Cooled Exchanger
工作流體循環泵	兩台	Floway VT Pump

表 3 附屬控制設備規格

設備	數量	參考廠牌型錄
汽輪機	一部	多段脈衝式、1800 轉
同步發電機	一部	4,200 kW、6.6 kV、3 相交流、60 赫茲、同步式、1800 轉
熱交換器	一式	殼管式、不鏽鋼 TUBE
工作流體循環泵	兩台	多段離心式，200kW
冷卻系統	一部	氣冷式冷凝器
升壓變壓器	一部	6.6 kV/11.4 kV、5000 kVA
輔助變壓器	一部	6.6 kV/0.46 kV、800 kVA
馬達控制中心	一式	3 相、460 kV
控制系統	一式	PLC、HMI



(a) 電機組設計圖



(b) 發電機組完成圖

圖 12 氣冷式雙循環發電機組 (4.2 MW, ORMAT 公司)



資料來源：<https://www.youtube.com/watch?v=Y2oPEKAudu0&t=310s>

圖 13 控制系統 (PLC、HMI) 介面

電力系統部分，本案電源線採用1/C 25 kV XLPE銅導體電纜（150 mm²），每相×1條電源引接線。本計畫需建置電源線距離短，工程簡單，故依據與台電公司之細部協商結果，於電廠施工期間配合台電作業完成。

發電機發電電壓為11.4 kV，經一回電纜線，引接至台電公司11.4 kV饋電系統躉售電力。發電過程可透過嚴密控制系統（PLC、HMI）介面，可允許ORMAT原廠以遠端控制連入，進行例行偵錯、必要控管、維護作業，遠端控制系統展示介面，如圖13所示。

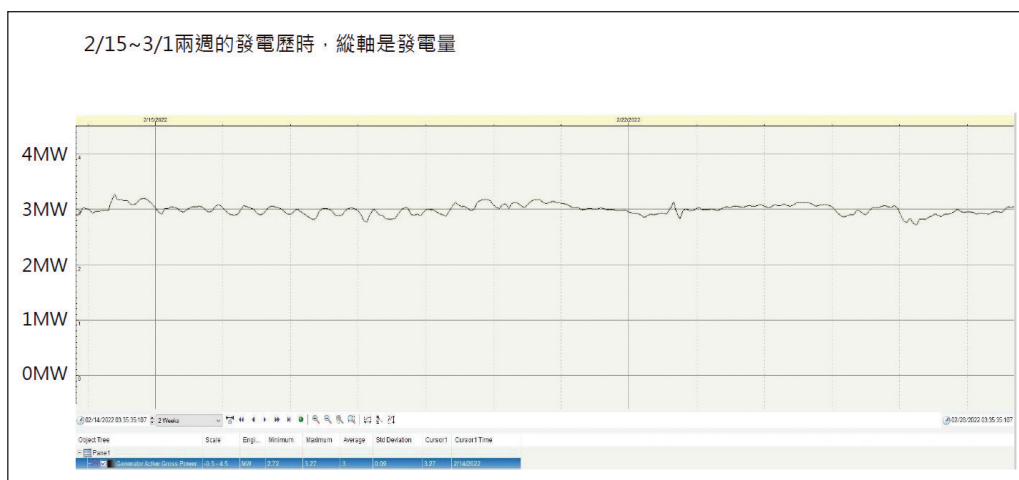


圖 14 總發電量歷時曲線例（2022 年 2 月中連續兩週）

圖14所示為，於111年2月連續兩週所記錄的資料畫面，顯示總發電量（Generator active gross power）約3 MW（2.72~3.273 MW）的歷時曲線例。

本案目前在使用五口（原本僅規畫四口）生產井情境估計可產出熱源包括：（1）高溫蒸氣與不凝結氣共35.38 TPH，與（2）高溫熱水133.62 TPH，分別可超過ORMAT機組規範需求23.5 TPH、133.5 TPH。但實際產出熱源會因生產井井況變化、管路輸送效率狀況不夠穩定等等因素，使系統無法滿載發電，因此啟用至今總發電量（約3 MW）與裝置容量（4.2 MW）尚有差距，這將需要累積系統操作經驗、監測生產回注井的動態變化、良好的熱儲層管理，或視情況新增生產井等，相信最終得以優化系統達成目標。

（七）完工運轉（試運轉）與啟用典禮

本案建置完成的新一代清水地熱電廠，本電廠於民國110年6月15日下午約4:00開始啟動機組，完成96小時連續運轉，機組穩定控制於1.8MW發電量，通過完工運轉（試運轉）。本案在民國110年10月27日獲得經濟部能源局核發的電業執照，成為全國目前唯一商轉的地熱發電廠宜蘭清水地熱電廠。民國110年11月23日重新啟用，副總統賴清德、經濟部次長曾文生、宜蘭縣長林姿妙與立委蔡壁如都到場見證這座關廠近30年（民國82~110年）的電廠啟用典禮，如圖15所示。這座耗資7.65億、經過五年重新修整、擴建，終於完成4.2MW的地熱發電容量，每年可提供約2500萬度綠電，約18萬噸的減碳效益。



(a) 啟用儀式



(b) 即時發電量 3.2 MW

資料來源：<http://news.ltn.com.tw/news/life/breakingnews/3745391>

圖 15 新一代清水地熱電廠啟用典禮（2021/11/23）

新一代清水地熱發電廠為結合發電、休閒及教育之多功能場域，預期每小時平均可發電量約3150度（每日發電量75,000度），可供約1萬戶小家庭用電。本BOT案經營運權利金方面，自營運開始，依每年電力躉售收入，宜蘭縣政府估算可收取新臺幣約200萬元營運權利金（營運權利金以乙方每年躉售電力收入之2%計算），總計20年之營運期共可收取約4千萬元。

五、結論與建議

目前在眾多的誘因激勵下，台電官網顯示國內地熱發電的裝置容量卻停留在6.4 MW，淨發電量也經常未能超過3 MW。裝置容量無法擴大的原因有許多討論，最大問題應該還是熱源的供應上無法達有效規模。短期內恐需要更多更廣的熱源探勘經費，揖注在地熱有效資源量的開發上。

目前全臺已知地熱儲層溫度超過200°C且估計發電潛能排名領先的案場，第一、二名為大屯山、清水，分別也是火山岩型（高溫蒸氣）與變質岩型（中溫熱水）的典型代表。能源局推估：大屯山具514 MW的地熱儲量（高溫蒸氣），清水則具61 MW的地熱儲量（中溫熱水）。兩案場在過往政府的經費投注下，擁有最多的資源調查的成果，其熱源特性的掌握相對清楚，在開發地熱發電的開發風險上相對低，無疑是政府再生能源發展的指標案場。

大屯山案場目前尚未成功開發地熱發電廠，刻正加速建置第一座先驅型地熱發電廠（1 MW）於四磺子坪示範地區。民國110新一代清水地熱電廠（4.2 MW）的成功變身，為國內地熱發電的停滯發展困境中，打了一劑強心針。目前清水地熱電廠總發電量（約3 MW）與裝置容量（4.2 MW）尚有差距，



這需要累積系統操作經驗、生產回注井的動態監測、與良好的熱儲層管理，相信最終得以優化達成目標。

參考文獻

1. <https://www.geothermal-taiwan.org.tw>，地熱發電單一服務窗口 - 首頁 (geothermal-taiwan.org.tw)
2. <https://geotex.geologycloud.tw/main/explorationResults>，地熱探勘資訊平臺 (geologycloud.tw)
3. 工研院能源與資源研究所 (1994)，「臺灣地熱探勘資料彙編」。經濟部能源委員會研究報告。
4. Levine Aaron, Amanda Kolker, Katherine R. Young, Anna Wall, Alex Badgett, Erik Witter, and Patrick Dobson (2022), GeoRePORT Protocol Volume I: Background Document. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-6A20-81952.
5. <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/增強型地熱系統>，增強型地熱系統 - 維基百科，自由的百科全書 (wikipedia.org)
6. 財團法人工業技術研究院 (2015)，「高效能地熱發電技術研發計畫」。經濟部能源科技研究發展計畫 104 年度執行報告
7. 李清瑞、韓吟龍、江道義 (2012)，「清水地熱區儲集層參數研究及發電潛能評估」。臺灣礦業，第 64 卷第 1 期，第 9-17 頁，民國 101 年 3 月。
8. 李毓仁、劉力維、柳志錫、郭泰融 (2013)，「宜蘭清水地熱溫差發電機組介紹」，鑛冶 57/4，第 126-131 頁，一〇二年十二月。
9. 李伯亨、凌璐璐、張可霓、王洋、郭泰融、柳志錫、歐陽湘 (2013)，「宜蘭清水地熱儲集層數值模型與生產模擬研究」，鑛冶 57/4，第 1-12 頁，一〇二年十二月。
10. Energy Development Corporation (2018)，Resource Re-Assessment and Development Strategy, CHING-SHUI GEOTHERMAL PROJECT, Report Submitted to Taiwan Cogeneration Corporation.



儲能系統工程規劃實務

中興工程顧問(股)公司系電部技術經理 / 李聖源
大同智能(股)公司綠電事業部副總經理 / 楊澤欣

關鍵字：系統衝擊分析、週期性功率調變功能、保護協調、短路故障電流、儲能管理系統、DNP 3.0、平行備援協定、自動撤水設備、自動滅火系統

摘要

目前再生能源以太陽能及風力發電為主，再生能源易受環境及氣候影響其發電量，具有供電不穩定之特性，近年來為解決電力系統間歇性及變動性的問題，儲能系統擔負著重要的角色。本文簡介台電冬山儲能系統工程領域規劃案例，藉由本規劃案說明儲能系統設計上需考量之方向。

儲能系統的建置是設備安裝與工程施作的過程，在併網及輔助設備上應包含變壓器、高壓氣體絕緣開關、消防系統、監控系統、空調系統、低壓開關箱盤、電力電纜、控制電纜、通訊線、不斷電裝置(UPS)、保護電驛及其他安全保護設備等。建置之前的評估項目繁多，從安裝場地的勘查、系統規劃、設備製造、安裝測試、驗收、教育訓練

與竣工後之維護，都需要團隊合作，確保儲能系統運轉安全及可靠。

一、前言

由於政府積極推動建置儲能系統，為期能早日併網運作，工程規劃設計及施工工期往往相當緊迫，如何有效掌控整體進度，規劃設計之良窳攸關施工進度可否如期如質完成之關鍵。

設計起始時，應調查儲能基地之環境資料，例如雨量、洪水位、鹽霧害程度等，妥適設計基礎高程及排水系統，防止設備遭水侵襲或淹水，由於儲能電池櫃及相關電力設備均設置於戶外，故應選用耐候性佳之材質、再配合塗裝及防護措施，避免設備劣化。

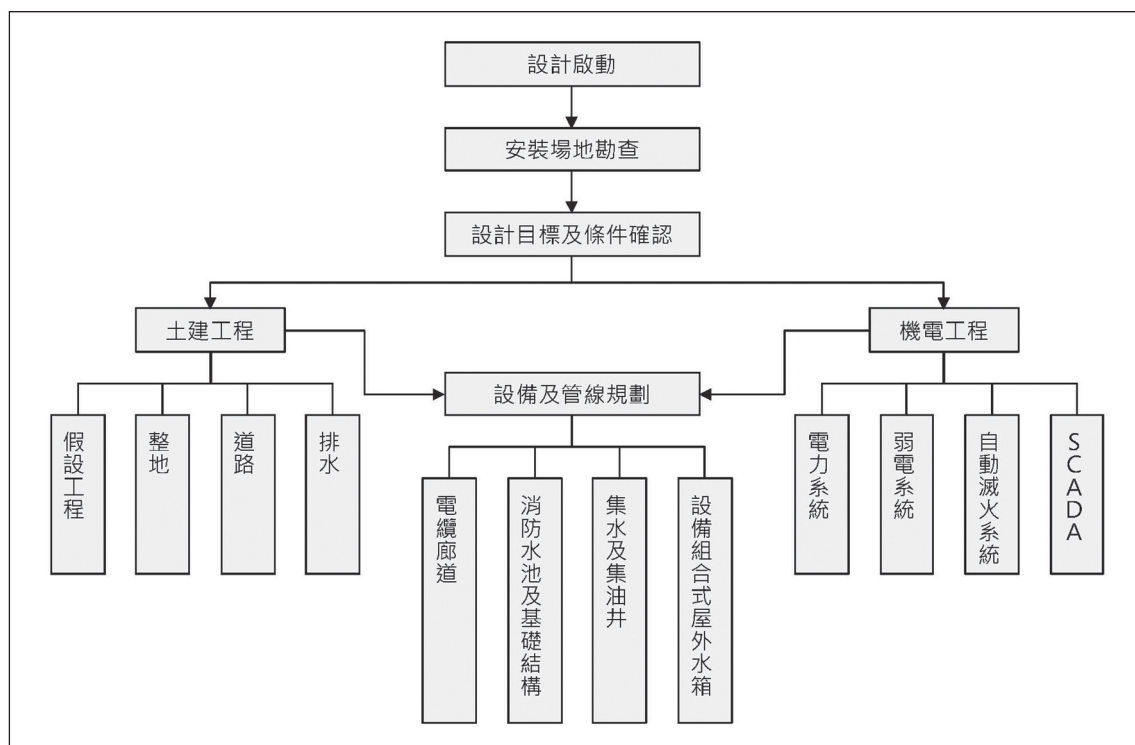


圖 1 規劃設計分工整合流程圖

依據儲能系統額定功率、額定電量、併網點、設置面積、周邊環境、系統衝擊分析等條件，妥適設計及配置儲能單元組數、功率、能量，並滿足規範之功能及需求，並應符合經濟部頒「輸配電設備裝置規則」及「用戶用電設備裝置規則」相關規定。

在規劃設計初期，須訂定設計目標及條件確認，對於土木工程及機電工程採分工進行及合作整合模式，此外，設備位置及管線路徑須妥適規劃。規劃設計分工整合流程圖如圖1所示。

二、土木工程規劃

儲能場地地形勘查須注意場地空間、地形、與台電的併接點位置等，選址應臨近升壓站或變電所，以利線路引接，設置位置應與所內電力設備、建築物間之安全距離應在3公尺以上，且不得設於架空線路路徑垂直投影之下方3公尺範圍內。儲能電池貨櫃之間距需維持人員通行及搬運之空間至少1.5公尺。

儲能場地之設備如採屋外式設備外箱設置，則毋須辦理建照申請，可縮短建置時程



及成本。土建工程規劃設計主要項目包括假設工程、整地、道路、排水、電纜管道及基礎結構等，以下分別說明：

（一）假設工程

首先須儘速辦理儲能基地之地形測量及鑽探。如需申請水土保持，應儘早辦理，以便土建及機電工程能配合進行設計工作，以利工進。假設工程主要內容包括臨時出入大門、圍籬、樹木移植保活、施工便道及設施復舊等，另外須事先做好敦親睦鄰工作，以利後續工程進行。

（二）整地、道路、排水

本案非屬山坡地，不須辦理水土保持計劃，因位於變電所內各項設計及施工界面易受到較多規範，在整地、道路、排水設計上無特殊要求。但因貨櫃式儲能之重量及體積大，考量日後維運動線，維運道路路寬應 ≥ 4 公尺。維運道路配置如圖2所示。

（三）電纜管道

儲能案場電纜管道設計有直埋管路、電纜溝及電纜管道3種型式，設置型式取決於貨櫃式儲能量體多寡及CGIS（Cubicle-type Gas Insulated Switchgear）開關室位置，以本案場60 MW容量為例，計有2只40呎及21只45呎貨櫃式儲能，其電力、控制及監控纜線繁

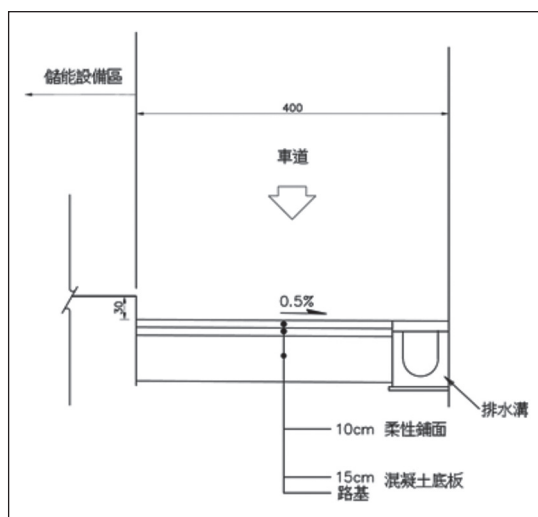


圖2 維運道路配置

多，超過CGIS室預埋管收容上限，故需設置電纜廊道分散收集纜線，經電纜架接至CGIS室及控制室，優點是後續管路擴充容易，惟電纜廊道之防水及抽水設施須配合設置，若採用預埋管路配置，雖然較無積水問題，但易受限管線數量太多不利施工的問題。

圖3及圖4分別是電纜溝及電纜管道外型示意圖。

（四）基礎結構

基礎版承載各式儲能系統設備，考量承載力、防蝕、振動、防洪等因素，經評估設備基礎結構採用鋼筋混凝土平板構造，底下土壤夯實度須達最大乾密度90%上，確保各式載重透過基礎版，以承壓方式傳遞至底下

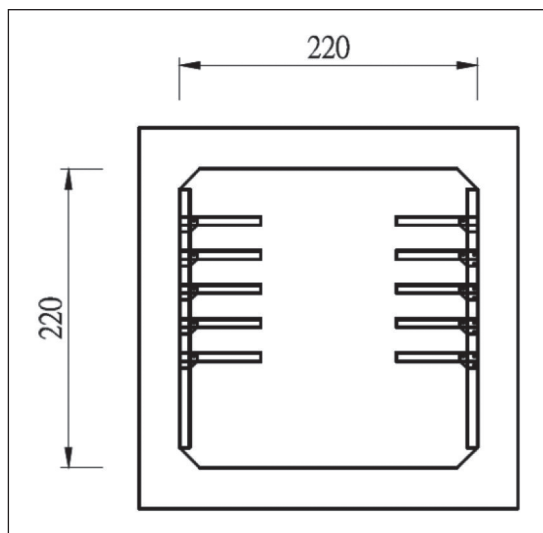


圖 3 電纜溝

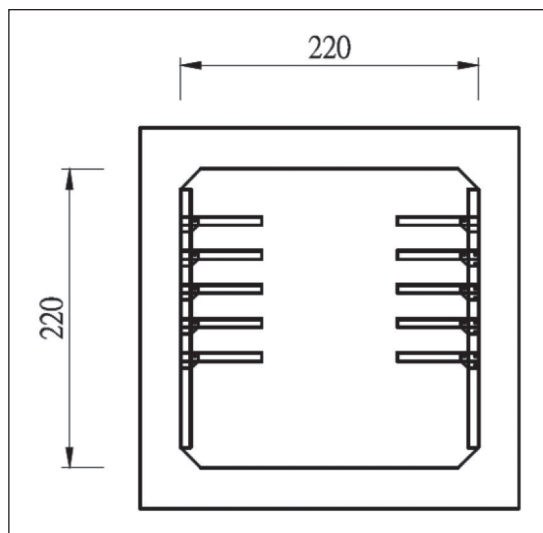


圖 4 電纜管道

土壤對於貨櫃式儲能基礎結構設計準則要求如下：

1. 本案位於宜蘭冬山鄉基本設計風速 42.5 m/s。
設計風力 $F = 0.09 \text{ tf/m}^2$ 。
2. 水平地震力 $V_d = 1.2 W$ 。
3. 短時土壤承载力檢核其應力 $< 15 \text{ tf/m}^2$ 。
4. 設備基礎抗滑安全系數 > 1.5 。
5. 設備基礎抗傾倒安全系數 > 2.0 。

三、電力系統規劃

本案係由台電提供 1 組 161 kV/23 kV 60 MVA 配電變壓器供儲能系統併入，依據儲能案場地地形及面積妥適規劃設備位置及管線路徑，電力系統主要包含 23 kV 配電系統、緊急電源系統及直流電源系統：

(一) 23 kV 配電系統規劃

本案儲能額定功率 60 MW，其中 5 MW 作為「週期性功率調變功能」，考慮二種功率用途不同，規劃採用各自獨立供電迴路及電表，如圖 5 所示。為確保 55 MW 儲能輸出迴路供電穩定，採用雙迴路環路設計，避免因線路故障致功率無法輸出。

為確保本案輔助電源供電之可靠度，設計 2 台 #1 及 #2 S.S.TR 全容量輔助電源變壓器，詳圖 5，各自提供 50% 負載電源，當有 1 台輔助電源變壓器故障時，另 1 台可以全容量提供電池輔助電源、空調電源、CGIS 室電源、交直流電源室電源、充電機電源、水霧泵浦電源等用電所需。

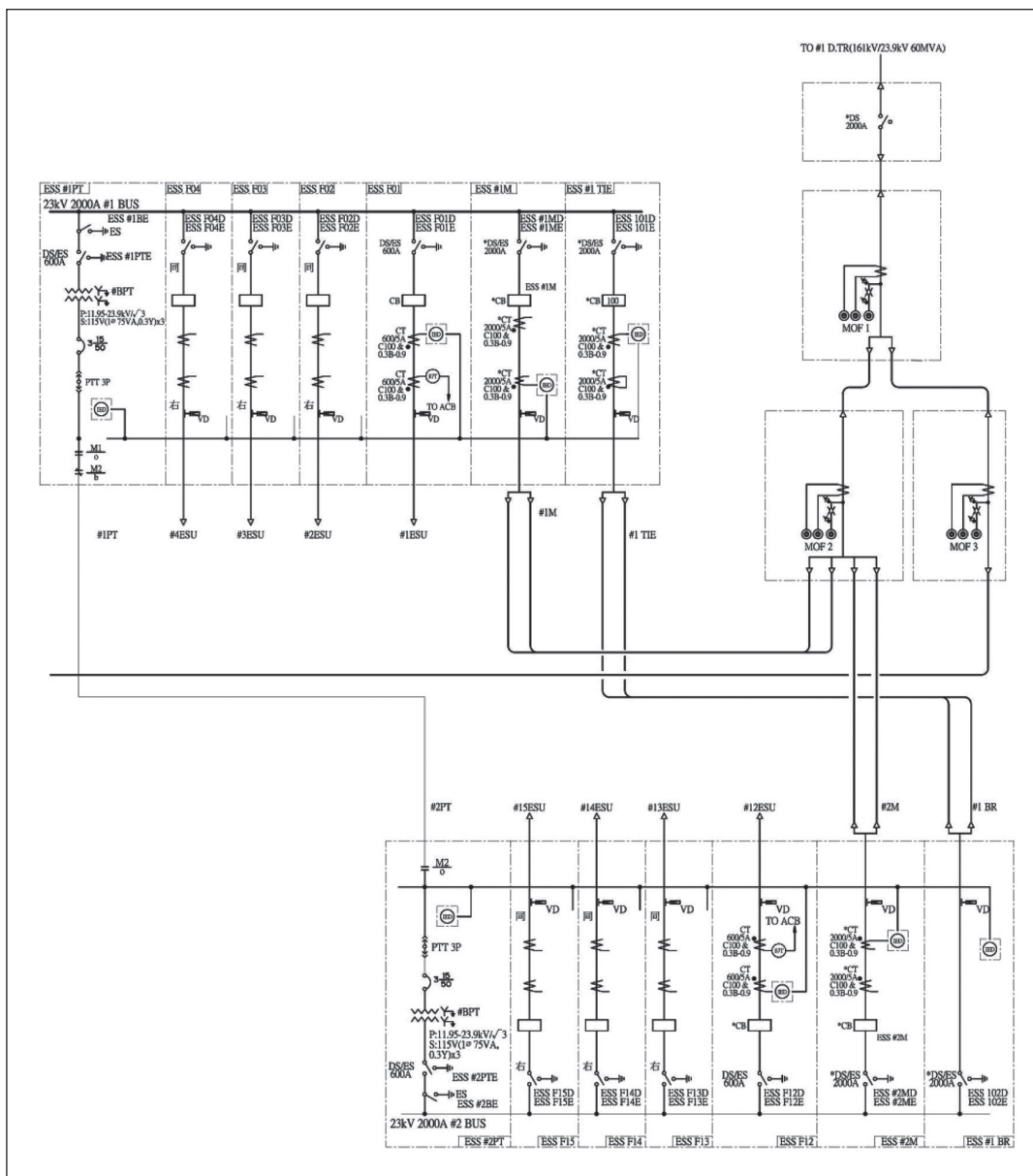


圖 5 23 kV 配電系統單線圖

本案比流器（CT）採用配電級多匝比之比流器，應標註極性點時應朝向變壓器方向，供保護電驛設定用。目前台電對於CT之

準確度採用IEEE標準，與CNS標準表示方式略有差異，相關對照說明如表1所示：

表 1 比流器額定負擔與精度說明

比流器額定負擔與精度				
Standard 標準		Burden 負擔	Acc. Class 精度	Security Factor 安全係數
CNS 11437/C4435	M (計測)	2.5/5/10/15/30 VA	0.1/0.2/0.35/0.5/1/3/5	5/10
	P (保護)		5P/10P	5/10/15/20/30
IEC 60044-1	M (計測)	2.5/5/10/15/30 VA	0.1/0.2/0.5/1/3/5/0.25/0.55	5/10
	P (保護)		5P/10P	5/10/15/20/30
IEEE C57.13	M (計測)	B-0.1/b-0.2/B-0.5/B-0.9/B-1.8	0.3/0.6/1.2	--
	P (保護)	B-1/B-2/B-4/B-8	C-50/C-100/C-200/C-400/C-800	

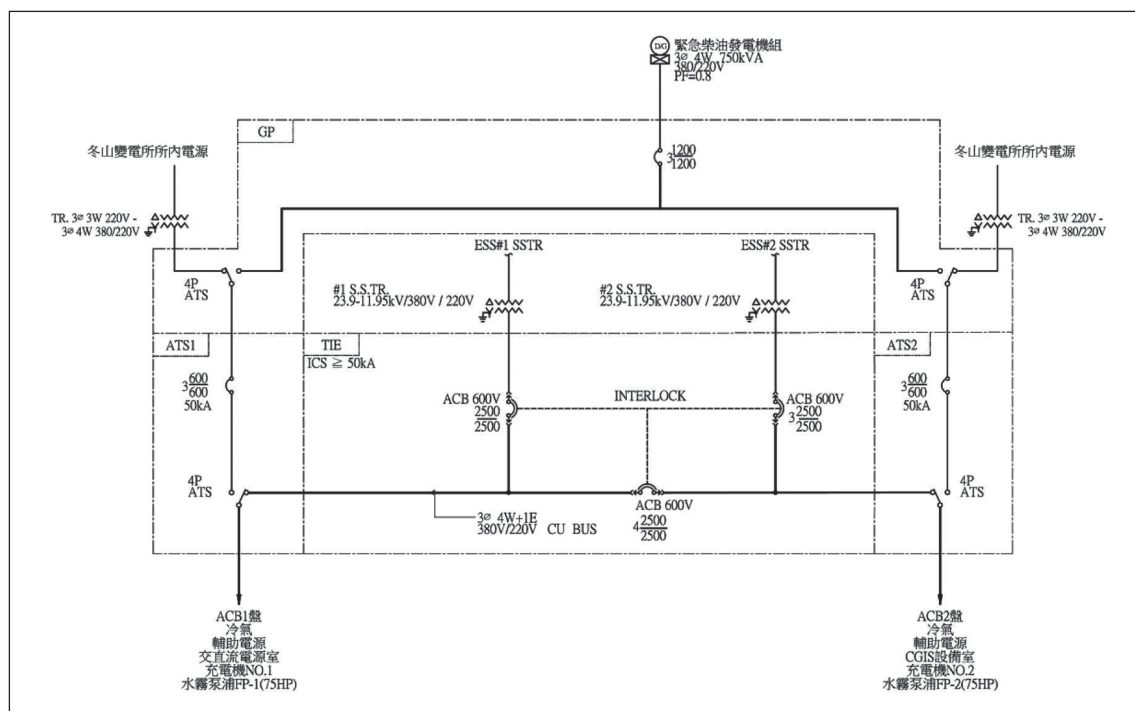


圖 6 緊急電源系統單線圖

(二) 緊急電源系統規劃

當#1及#2 S.S.TR輔助電源變壓器無法提供電源時，優先由冬山超高壓變電所之所內

電源供電，採用雙迴路設計，再加上備用發電機可提供突發狀況緊急電源，確保本案儲能系統輔助電源供電無虞，如圖6所示。

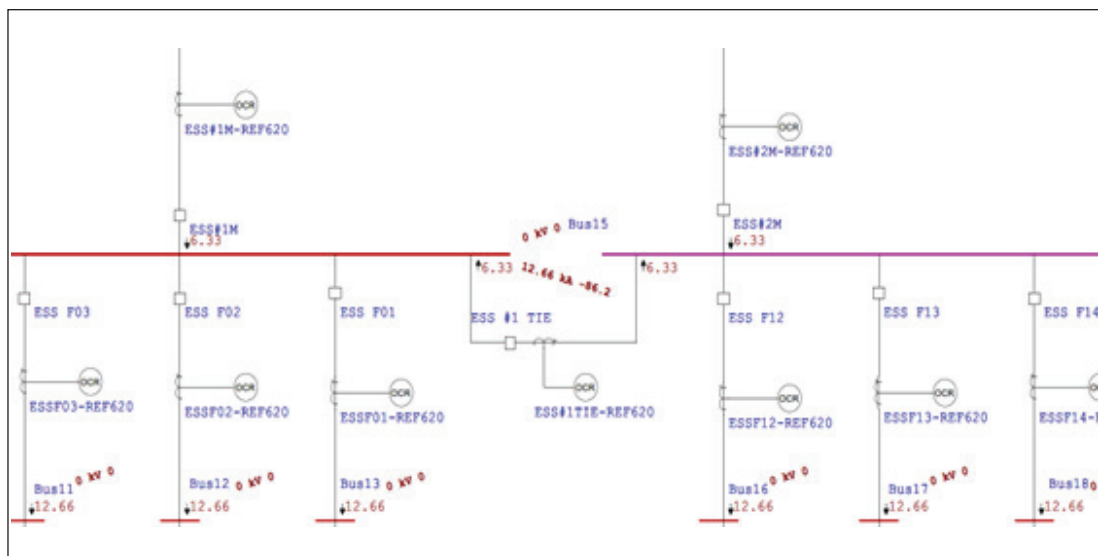


圖 7 故障電流計算

(三) 直流電源及 UPS 系統規劃

直流電源主要提供23 kV GIS、保護電驛、SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) 設備用電，配電盤內用電須獨立電源。UPS系統主要供應SCADA設備用電，監控及保護系統直流電源為DC125 V。

(四) 系統保護規劃

當電力系統發生事故（故障）時，需檢出故障源，同時迅速隔離故障區間，保護其他正常的迴路。在檢測、判斷、處理故障異常的過程中，為避免正常迴路產生錯誤動作，須對系統做保護規劃。本案儲能設備系統保護規劃，在計算短路故障電流及保護協調時，應事先蒐集以下資料：

1. 須請台電公司提供短路故障電流（kA）或短路故障容量（MVA），以及短路故障電流之 X/R 值。
2. 在電力系統單線圖中，須明確地指定各個 CT 所使用的 CT 比值和其規格。
3. 依據“台灣電力公司輸供電事業部保護電驛標置準則”，進行保護協調規劃。
4. 依上述所獲得的資料，在執行短路故障計算時，需以針對各個母線所計算出來的短路故障電流，是否小於所選擇使用的斷路器之短時間電流容量。本案故障電流說明如下，如圖 7 所示：
5. 電源側是台電公司的一次側電壓 161 kV。

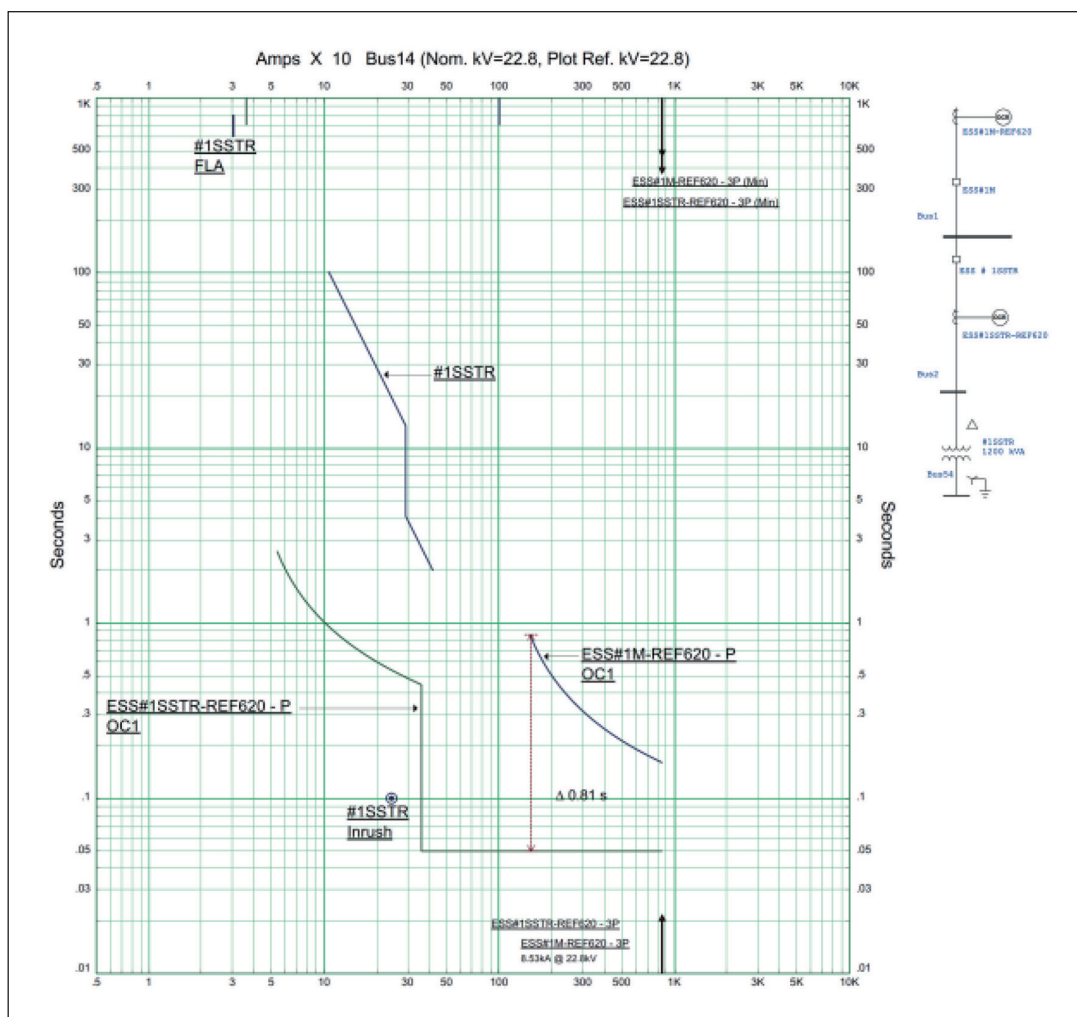


圖 8 保護協調曲線

其資料為：一次側電壓 161 kV、二次側電壓 23.9 kV、容量 60 MVA、 $Z = 17\%$ 。

$$/ (*23.9\text{kV} * (17\%)) = 8.53 \text{ kA}$$

6. 針對 23.9 kV 側的短路容量：60 MVA / (17%) = 3 53 MVA

7. 針對 23.9 kV 側的短路故障電流：60 MVA

8. 在完成保護協調之後，須依“台灣電力公司輸供電事業部保護電驛標置準則”確認 3 相及接地相的協調時間是否符合。針對 23.9 kV 之 #1M~ESS#1SSTR-P (3 相) 保護協調曲線，如圖 8 所示。

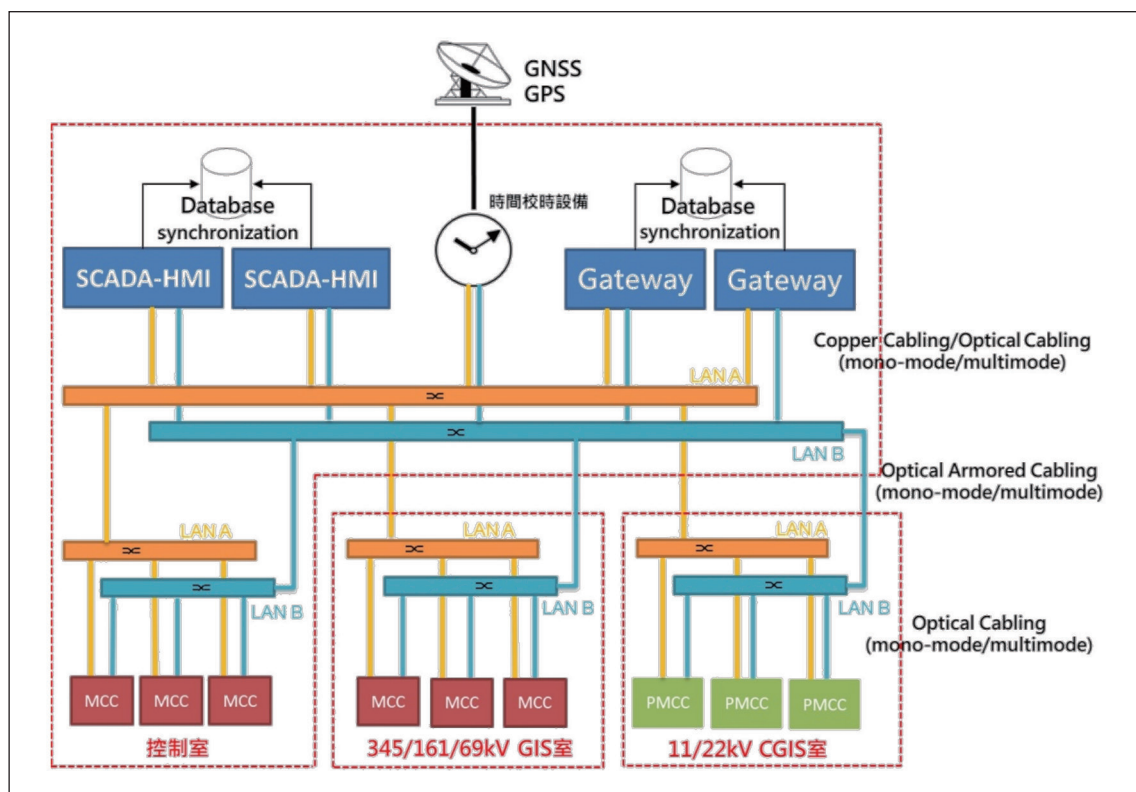


圖9 台電併網 SCADA 架構示意圖

四、監控系統規劃

冬山特高壓變電所（E/S）係採用RTU（Remote Terminal Unit）做為變電所遠端監控之介面設備，故儲能系統須於冬山E/S控制室設置符合IEC61850監控架構之儲能管理系統（Energy Storage Equipment and System SCADA），藉以監控儲能系統（含併網設備）運轉狀態，並且須設置閘道器（Gateway），將儲能系統資料以DNP 3.0通訊標準傳送至台電公司調度中心。儲能管理系統（Energy Management System，EMS）

須整合電力轉換系統及儲能電池，完成儲能系統規範要求之控制模式功能。儲能管理系統（EMS）將儲能貨櫃之設備狀態及運轉資料藉由DNP3.0及IEC61850兩種通訊協定傳輸至即時顯示在螢幕相關畫面，供操作人員充分掌握與監督儲能系統運轉情形，且能源管理系統（EMS）須具備IEC61850通訊能力，經由防火牆後，透過光纖網路使操作人員可進行遠端調度，達到頻率調節、電壓調節、功率因數調節等规范要求功能，其架構示意圖如圖9所示。



儲能監控系統主要包含儲能管理系統及通訊要求，以下分別說明：

（一）儲能管理系統

本案儲能管理系統包括儲能系統相關設備之監視、量測、控制、保護設備及附屬設備。主要由SCADA-HMI、IED、IO-Box、Gateway、時間校時設備、網路交換器、通訊網路等構成。

1. 系統功能及效能

本系統須具有IEC 61850-7-500 5. Summary of substation automation functions，監控功能分類如下：

- (1) HMI及站控層相關功能（HMI and related station level functions）
- (2) 運轉控制功能（Operational or Control functions）
- (3) 監視及量測功能（Monitoring and Metering functions）
- (4) 變電所自動化功能（保護或其他）（Local Automation functions（protection and others））
- (5) 分散式自動化功能（保護或其他）（Distributed automation functions（protection and others））
- (6) 系統輔助功能（System Support functions）

2. ESMS 監控系統架構

ESMS監控系統架構採用IEC 61850通訊協定，相關設備規格須符合「IEC 61850 變電所/開關場設備規範」需求，系統架構中Gateway、ESMS-HMI及網路交換器之硬體配置皆採複聯式架構。針對各網路交換器Management Traffic（如網路交換器組態管理等）與Substation Automation Traffic（如MMS、GOOSE等）規劃A及B VLAN，以確保網路安全，系統方塊圖如圖10所示。

儲能管理系統網路架構至少須支援IEC 62439-3第4款（平行備援協定：Parallel Redundancy Protocol, PRP）之工業自動化網路備援協定標準，並建立在可接受調度之雙向通訊模式，以接受台電遠端調度中心命令及調整儲能管理系統中各項參數，並可將各運轉資訊及狀態等數據傳送至台電遠端調度中心。

（二）通訊要求

1. 通訊協定

儲能管理系統（Energy Storage Management System，ESMS）與儲能系統23kV GIS用PMCC IED及儲能控制器、變壓器與其他設備用MCC IED（Metering Protection Protection Intelligent Electronic Device）之通訊協定為IEC 61850，與台電遠端調度中心之通訊協定為DNP 3.0或IEC 61850。儲能管理系統（ESMS）應該能夠通過標準協議進行通信，例如通過

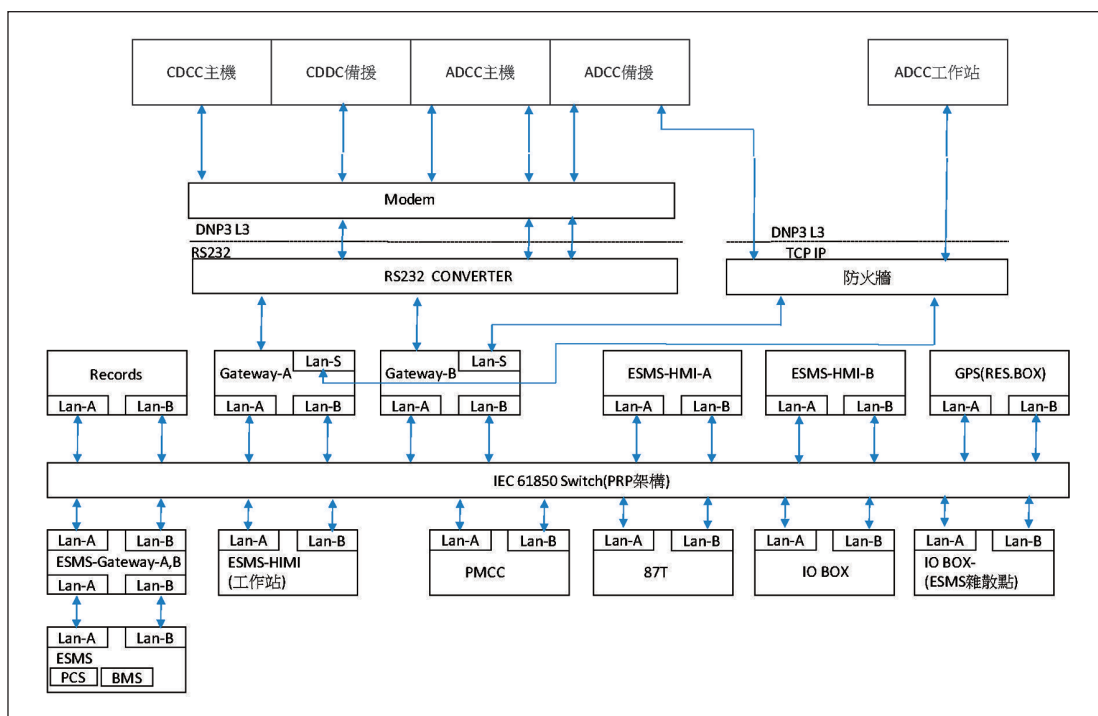


圖 10 SCADA 系統方塊圖

IEC 61850 或 DNP 3.0。儲能系統內部或對外均不可使用無線通訊，所有資料傳輸均需經由實體線路。

2. 電力電纜、控制電纜與網路線路須分開敷設以避免干擾。光纖電纜須符合 IEC 或 CNS 標準，被覆材料為 PVC（屋內）或 PE（屋外 / 跨樓層）材質並具加強抗張力材料保護。乙太網路線需選用符合鉛箔遮蔽 CAT 6 規格（含以上）。
3. 儲能電池系統、電池管理系統、電力轉換系統與儲能管理系統之雙向資料傳輸，利用光纖網路，將儲能電池系統、電池管理

系統及電力轉換系統連至本儲能系統所在變電所控制室內之網路節點。

五、供應商應提供電池管理系統、儲能電池系統、電力轉換系統與儲能管理系統之通訊協定說明書，以及資料格式之相關說明文件。消防工程規劃

由於儲能系統之運作採電化學反應原理，當事故發生時，除了發生火災和爆炸外，亦會釋放有毒化學物質危害人體，有鑑於儲能市場日益擴大，內政部消防署於111年8月17日訂定「提升儲能系統消防安全管理指引」。

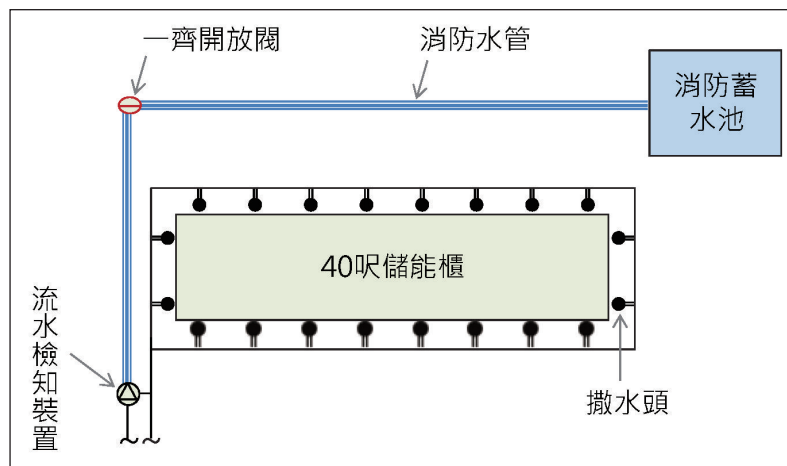


圖 11 自動撒水設備配置示意圖

儲能系統在消防安全設計上應評估火災發生之風險，包括場所危害界定、潛在火災樣態設計、評估火災情境、評估火災情境等，建立多重防火策略。

依據提升儲能系統消防安全管理指引規定，本案施工相關重點項目包括自動撒水設備、自動滅火系統及火警自動警報設備，其說明如下：

（一）自動撒水設備

1. 採用預動式。
2. 撒水頭採用快速反應型（第一種感度）。
3. 撒水密度每平方公尺每分鐘十二點二公升以上。

4. 水源容量在最遠之二十四個撒水頭連續放射三十分鐘之水量以上。但撒水頭數未達二十四個者，依實際撒水頭數計算水量，本案每一儲能櫃設置二十個撒水頭，自動撒水設備配置示意圖如圖11所示。

5. 撒水頭配置水平間隔距離在一點八公尺以上，本案撒水頭水平間隔距離3公尺。

6. 設置獨立分區之流水檢知裝置。

7. 連接緊急電源，其容量能使自動撒水設備有效動作三十分鐘以上。

8. 設置適當排水設施。

9. 依照“提升儲能系統消防安全管理指引”檢討本工程水量，每1只儲能櫃所需之水塔

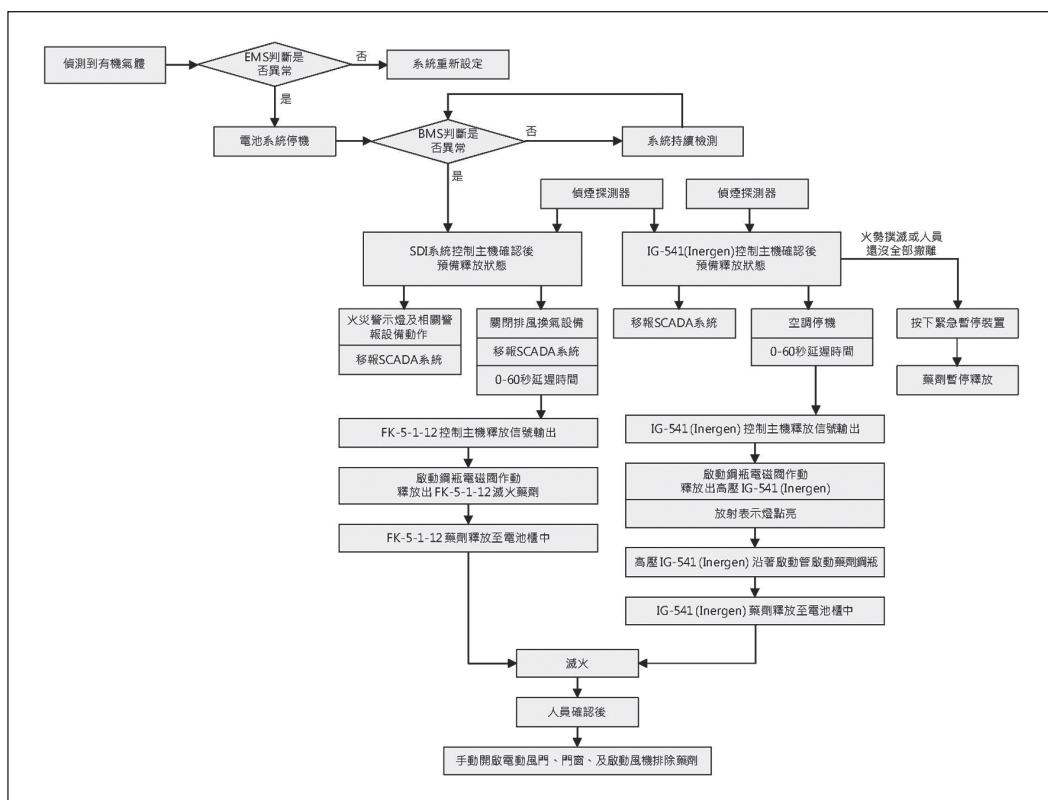


圖 12 自動滅火系統動作流程圖

最小蓄水量如下說明

- (1) 撒水密度每平方公尺每分鐘12.2公升計算
- (2) 使用20只噴頭，每只噴頭防護9 m²
- (3) 每分鐘水源容量最小需求 = $12.2 \times 9 \times 20 = 2196 \text{ L}$
- (4) 放水時間60分鐘下， $2196 \times 60 = 131,760 \text{ L}$ （本案設計放水時間60分鐘）
- (5) 水塔最小蓄水量為 $131.76 \text{ T} \div 0.8 = 164.7 \text{ T}$

10. 連接緊急電源供電說明

(二) 自動滅火系統

為確保自動滅火系統迅速撲滅儲能櫃火源，本案採用2道自動滅火防護系統，第1道自動滅火為FK-5-1-12系統，主要用於電池火源撲滅，擁有UL、FM及SNAP認證是一種（鹵碳化合物）氫氟碳化物。滅火原理為消耗燃燒自由基中斷燃燒連鎖反應。第2道自動滅火採用INERGEN系統靠窒息作用以達成滅火效果，用於儲能櫃內火源撲滅。可將氧濃度降至15%以下，大多數可燃物都將無法持續燃燒。動作流程圖如圖12所示。



1. FK-5-1-12自動滅火系統

儲能櫃內火源主要來自於電池組，當 EMS 系統偵測到有機氣體，立即回報 BMS (Battery Management System) 系統，一旦檢測到火源，將釋放 FK-5-1-12 化學藥劑。基本上在 30-40 秒內熄滅火源，期能早期偵測並撲滅火源。

2. INERGEN自動滅火系統

INERGEN 自動滅火設備適用於儲能櫃全區域放射系統環境，因常溫下無法液化，通常是以氣體狀態型式儲存於高壓鋼瓶中，較其他自動滅火設備需要更大量的鋼瓶及空間方能儲存其所需的滅火藥劑量。

當FK-5-1-12自動滅火系統無法滅火或是偵煙與定溫探測器同時動作時，INERGEN主機移報SCADA系統並停止空調運轉，釋放動作信號，INERGEN化學藥劑開始釋放達到滅火效果。

(三) 火警自動警報設備

1. 設置設火警受信總機，採用偵煙探測器或定溫探測器局限型一種或二種。
2. 外氣流通無法有效探測火災之處所，將電池管理系統或儲能管理系統等警報信號移報至火警受信總機。

3. 緊急電源使用蓄電池設備，其容量能使火警自動警報設備有效動作三十分鐘以上。

六、結論

儲能系統搭配再生能源已成為推動穩定綠能發電的主要發展方向。安全及穩定的儲能系統規劃與建置有賴妥適與周詳的工程規劃，由於儲能系統牽涉包括電氣、消防、空調、建築、結構大地及水保工程等專業領域，因此在規劃時，除了必經考量系統功能的需求外，亦須考慮系統的整合、安全性及維運的便利性，特別是「提升儲能系統消防安全管理指引」的頒訂，在消防安全防護方面，訂有多項具體的規範是規劃儲能系統的重要依循規定。

參考文獻

1. 內政部消防署訂定「提升儲能系統消防安全管理指引」
2. 台灣電力股份有限公司冬山超高壓變電所 (E/S) 儲能設備系統 1 套採購說明
3. 台灣電力股份有限公司輸變電工程處變電所儲能系統技術規範
4. 台灣電力公司輸供電事業部保護電驛標置準則
5. 東元比流器設備資料



國家品質獎
NATIONAL QUALITY AWARD

高爐石粉、高爐水泥
飛灰爐石粉、地質處理劑
氣冷高爐石級配料
轉爐石瀝青鋪面用料
氟化鈣污泥回收利用
人造螢石



中聯資源股份有限公司

總公司：高雄市前鎮區成功二路88號22樓 TEL：07-336-8377 FAX：07-336-8433 <http://www.chc.com.tw/>

中宇淨安心 600A空氣清淨機



CADR
600
最大適用22坪空間



高效抑菌 安淨守護



中鋼技術指導
改質活性碳



1. 強效活性碳濾網

- ✓ 1.3kg填充量 濾網壽命長
- ✓ 99.9%吸附各種異味
- Ex: 有害化學氣體、菸味、甲醛等...



奈米銀
不織布

99.9%有效抑菌



2. 專利菌捕手

- ✓ 奈米銀不織布
- ✓ 攔截細菌、抑制孳生

3. H12 HEPA濾網

- ✓ 過濾PM0.3極細懸浮微粒99.5%



iEN綠能管理
經營效益百分百

POWER MANAGEMENT

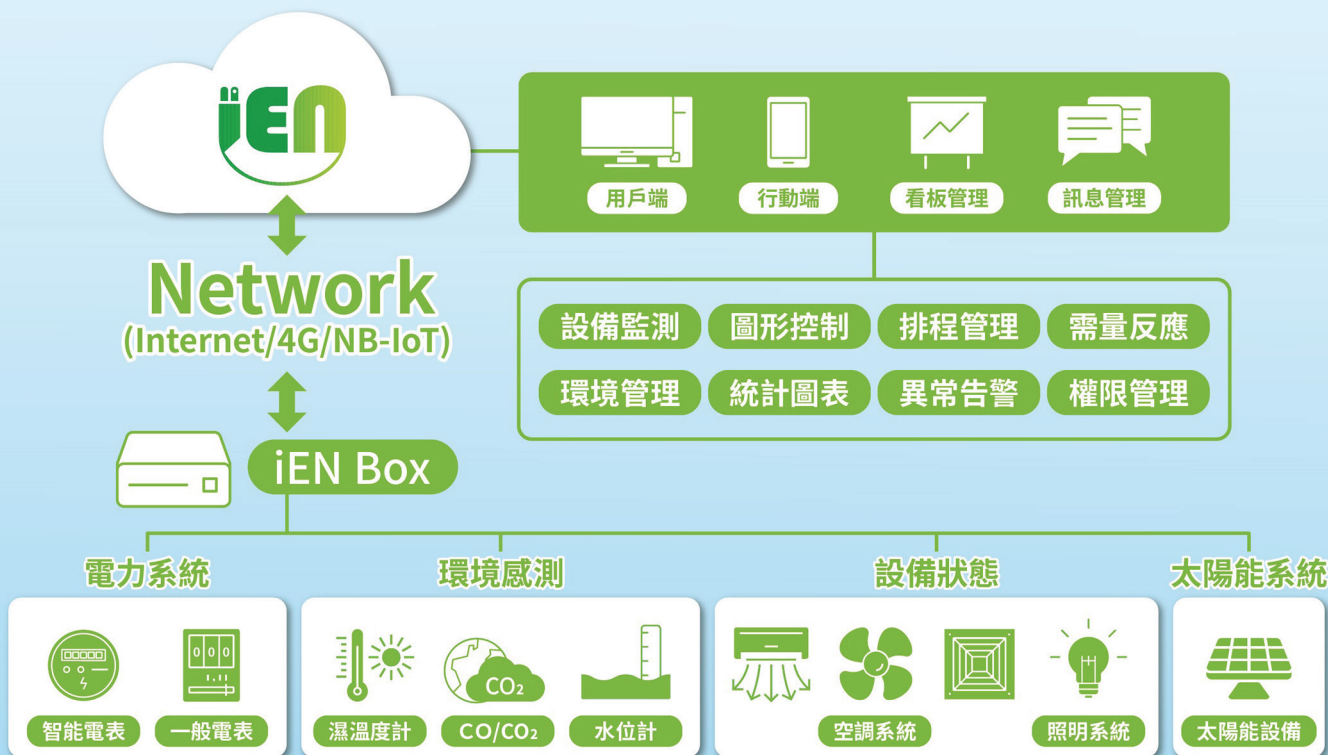
ENVIRONMENTAL SENSING

AIR CONDITIONING ENERGY SAVING

服務簡介

中華電信為具體履行對環境永續發展的承諾，累積電信機房數十年的電力環境監控及系統開發經驗，轉化為企業客戶厚實的能源管理技術支援，推出「iEN智慧節能服務」。我們運用開放的平台架構納管各式設備，提供多元的服務功能，除確保設備運轉品質外，更協助客戶建置一個最佳化能源管理環境，有效提升系統運作效率、降低企業營運成本。

平台架構



ACE1
FORMOSA

為性能而生

速克達、打檔車推薦使用

SPORT 5W-40

- 100%全合成酯類機油
- U.H.V.I.T 超高黏度抗衰科技

規範

JASO MA2、API SN PLUS



紅、黃牌重機推薦使用

RACING 5W-50

- 100%全合成酯類機油
- U.H.V.I.T 超高黏度抗衰科技
- 賽道高轉潤滑配方

規範

JASO MA2、API SN PLUS



強效抗磨系列

20W-40



強效抗磨系列

20W-50



都會長效系列

15W-40



極致動力系列

10W-40



台塑潤滑油

洽詢專線 07-6231788

CTCI 中鼎集團

CTCI 中鼎集團 (TWSE: 9933、TPEX: 5209、TPEX: 6803) 為國際級統包工程公司，承攬多元化重大工程。創立於 1979 年，總部位於台灣台北市，致力提供全球最值得信賴的統包工程服務。在全球逾 10 個國家設立約 50 個據點，集團員工總數約 8,000 人，並入選道瓊永續指數 (The Dow Jones Sustainability Indices, DJSI)。



業務領域

- 煉油
- 石化
- 環境
- 一般工業
- 電力
- 交通
- 高科技設施
- 液化天然氣

服務內容

- 專案管理
- 可行性研究及前端工程設計
- 工程設計
- 工程採購
- 設備製造
- 工程建造與維修
- 工廠試車
- 智能解決方案
- 自動化控制
- 無塵室與機電配管工程
- 智能頂進工法
- 地盤冷凍工法
- 操作及維護

產品項目

- 設備製造
- 智慧化能源管理系統
- 化學添加劑

CTCI
中鼎集團

11046 台北市士林區中山北路六段89號
Tel: (886)2-2833-9999
Fax: (886)2-2833-8833
www.ctci.com

CTCI EF
財團法人中鼎教育基金會

112037 台北市北投區福善路16號2樓
Tel: (886)2-2769-8599
Fax: (886)2-2769-9299
www.ctcief.org

綠 產業發展 能

循環經濟



再生能源

綠能科技

