

# 台灣附近海域之海流發電

## Ocean Current Power in the Region around Taiwan

林勝豐

Sheng Fong Lin

台灣四面環海，所蘊藏之海流能量是一項不容忽視的可靠、自產、潔淨新能源。筆者在文中說明台灣附近海域之海流流速機率分布與發電潛能空間分布，並介紹目前國際上海流發電機的發展近況。根據觀測與模擬的海流資料，適用於台灣近海之海流發電機屬低額定流速的範疇，因此我國在發展海流發電上可採用包覆型的海流渦輪機組設計來提高發電效率，使其更具開發利用之經濟價值。

The ocean current in the sea around Taiwan is a reliable, self-generating, and clean source of energy that should not be overlooked. This article describes the probability distribution of current velocity and the potential spatial distribution of current energy in the region around Taiwan, while introducing recent international developments in ocean current generator technology. By using ocean current generators of low rated speed in accordance with observed and simulated ocean current data, we are in the process of developing ducted turbines that can be used for ocean current power generation in an effort to increase the efficiency of the generators as well as the economic value of their development and utilization.

### 一、前言

海流 (ocean current) 是海水受天體星球的吸引、風吹、太陽照射、密度差異、地球自轉等作用與地形影響而產生的流動，主要可分為受潮汐影響的潮流和非潮汐作用的洋流、風驅流、密度流及近岸流等，其中流速較為穩定且強勁，可用來進行海流發電者為潮流和洋流。潮流係因潮汐漲退所引起海水週期性的往返流動，通常以半日或一日之潮汐週期改變其流速和流向。洋流一般泛指大尺度的海流，可能為大洋環流的一部分，如北太平洋的黑潮 (kuroshio) 和親潮 (oyahio)、北大西洋的灣流 (gulf stream)、赤道海流與南極海流等，其流速與流向的變化相較於潮流穩定。

依據聯合國教科文組織 (UNESCO) 調查資料 (1981) 指出海洋能理論總蘊藏量為 76600 GW，其中海流能約 600 GW，實務上可發電量約 300 GW。近年來英國、美國、加拿大、澳洲、瑞典、挪威及義大利等擁有地利之便的國家，已積極投入海流能的研究與開發利用。1990 年末期到 2005 年之間已有不少海流發電機組投入相關之測試，並獲得不錯的成果，陸續亦有設置大型電廠之規劃，例如英國 Marine Current Turbine Ltd. (MCT) 於 2007 年在北愛爾蘭 Strangford Lough 架設一座 1.2 MW 海流發電機並連結電網，可供應 800 戶使用，並預估在 2015 年布置發電量 500 MW 的陣列式海流發電廠。

台灣四周環海，東部有北太平洋最大的洋流一

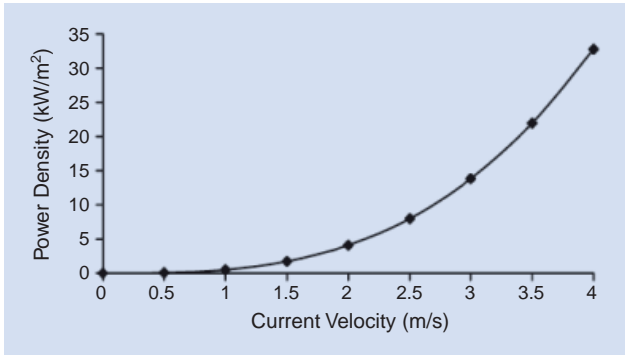


圖 1. 海流發電潛能與流速之關係圖。

黑潮，西部有因地形效應而增強的潮流，所蘊藏的海流能量是個龐大的海洋資源，根據台灣電力公司估計黑潮流域海流能蘊藏量約有 3 GW 以上。若能有效利用海流的動能來發電，將可成為台灣重要的天然、潔淨永續性能源。目前我國在海流發電的開發利用上處於剛起步的階段，2005 年 6 月間全國能源會議對海洋能發電之決議為：加強海洋溫差、波浪發電、海流發電及潮汐發電之評估與研究。並在 2006 年 1 月 17 日由立法院五十位立法委員聯名提案 (院臺經字第 0960002343)，建議請行政院積極規劃海洋能發電。目前國內已有多所研究機構開始投入海流發電的研究與開發。

## 二、流速與發電潛能

海流流速與其發電潛能 ( $P$ ) 的關係為  $P/A = 0.5 \rho v^3$  (單位為  $W/m^2$ )，與風力發電相似，其中  $A$  為海流通過之截面積 ( $m^2$ )、 $\rho$  為海水密度 ( $kg/m^3$ )，約為  $1024 kg/m^3$ 、 $v$  為海流流速 ( $m/s$ )。由於海流發電

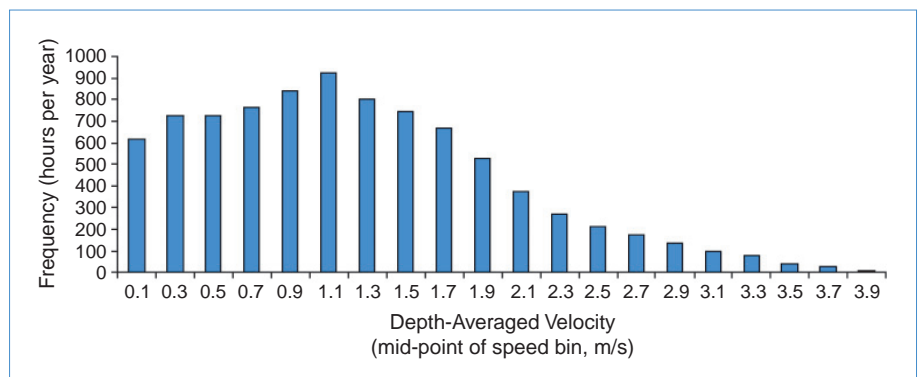
潛能正比於流速的立方，因此可隨著速度增強而迅速增大 (圖 1)，當海流流速約在 1–1.3 m/s 時，其發電潛能為  $500 - 1000 W/m^2$ 。相較於風力發電風速為 10 m/s，海流發電流速若為 2 m/s，但因為海水密度約為空氣的 800 倍，所以在相同的發電機功率係數和驅動列轉換係數條件下，海流渦輪發電機的葉輪直徑約僅風力機的五分之二，就可以獲得相同的發電量。

實際上海洋的海流流速會受種種因素影響，而隨著時間有所改變，故描述某地點之流速特性，可採用其流速機率分布來表示 (圖 2)。因為平均流速的立方並不等於流速立方的平均，因此不可以直接用平均流速來計算發電潛能，所以美國 Electric Power Research Institute (EPRI) 建議須以流速的機率分布來計算潛能<sup>(1)</sup>。如以圖 2 之流速機率分布計算其年平均發電潛能為  $2.2 kW/m^2$ ，但若直接用其平均流速 (1.2 m/s) 計算潛能，則會明顯低估為僅  $0.9 kW/m^2$ 。

台灣周圍海域的海流流況，經近年來我國多艘海洋研究船利用都卜勒流剖儀 (acoustic Doppler current profile) 的測量，而得到如圖 3 之平均流速的空間分布<sup>(2)</sup>。也由於圖 3 所顯示的是平均流速，因此無法直接使用它來適當推論台灣附近海域之海流發電潛能。再加上我國過去對海流研究缺乏大範圍長期且連續性觀測，所以也無法利用以往的海流歷史時序資料，來全面評估台灣附近海流流速的發生機率和發電潛能的空間分布。

工業技術研究院為解決目前評估台灣附近海域海流發電潛能的困境，使用一個經校驗過的三維海流數值模式，模擬台灣周圍海域的流況，並分析

圖 2. 海流流速之機率分布<sup>(1)</sup>。



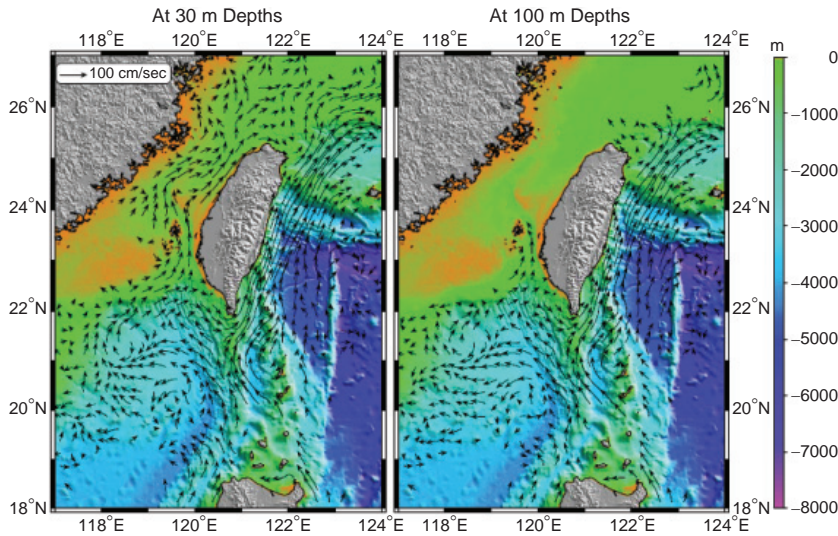


圖 3. 台灣附近海域水深 30 公尺與 100 公尺處之平均流速向量<sup>(2)</sup>。

其流速機率分布，進而評估台灣附近海域的海流發電潛能<sup>(3)</sup>。所使用的海流數值動力模式為美國普林斯頓大學海洋模式 (Princeton ocean model) 加以修改，模擬的範圍涵蓋 117–125°E、18–27°N，模式水平網格間距為 1/24° (約 4.5 公里)，垂直網格層數為 31 層，模擬時間自 2003 年至 2007 年共五年，模式之海面大氣條件取自美國海軍 Navy Operational Global Atmospheric Prediction System 大氣模式，海洋開口邊界使用美國海軍 East Asian Seas Nowcast/Forecast System 洋流模式，疊加美國 Oregon State University 全球潮汐模式之模擬結果，使該海流模式同時模擬具洋流、潮流與風驅流之近真實海洋流況。

### 1. 流速分布

根據工業技術研究院海流模擬結果 (圖 4)，顯示台灣附近海域的主要強流區是位於台灣東岸的 (I) 黑潮流域、(II) 臺灣北端的富貴角海域、(III) 台灣南端的鵝鑾鼻海域、(IV) 台灣西岸的澎湖水道、(V) 澎湖西南方的台灣灘，以及 (VI) 在中國大陸沿岸的部分峽灣區域。考慮距台灣較近的強流區，圖 5 展示黑潮流域、澎湖水道、富貴角海域、鵝鑾鼻海域之流速機率分布。這些強流區的最高流速大約都可達 2 m/s 左右，但其機率的分布型態則依其海流成分不同而有所差異。例如，黑潮流域之海流成分主要為流速較穩定的洋流，故其流速機率分布主要集中在平均流速附近，約略呈常態分布型態；

富貴角海域主要海流成分為往返變化的潮流，其流速機率分布則明顯與洋流型態不同；澎湖水道和鵝鑾鼻海域流速機率分布雖與富貴角海域較相似，但在流速接近 0 m/s (零流速) 的發生機率有顯著的降低，說明該海域除往返的潮流外，另有較穩定的洋流存在，是屬於潮流與洋流混合的型態。

### 2. 發電潛能

圖 6 為利用 2003 年至 2007 年海流模擬結果，計算水深 0 m–100 m 間之平均發電潛能。顯示台灣附近海域海流發電潛能較高的區域仍是上述的

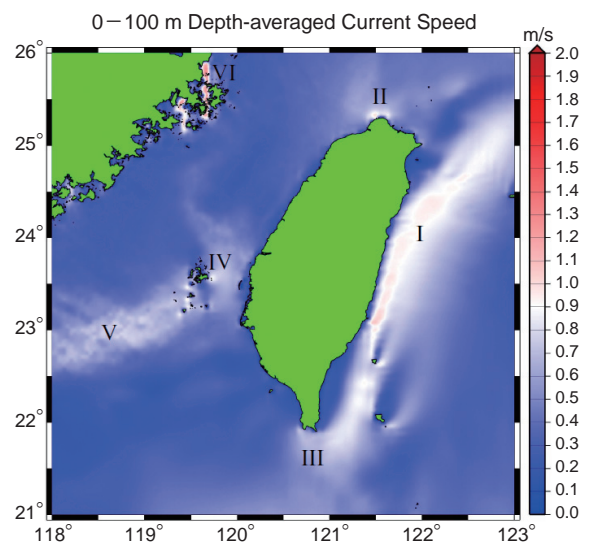


圖 4. 台灣附近海域流速模擬結果於海面至水深 100 m 間之深度平均流速空間分布。

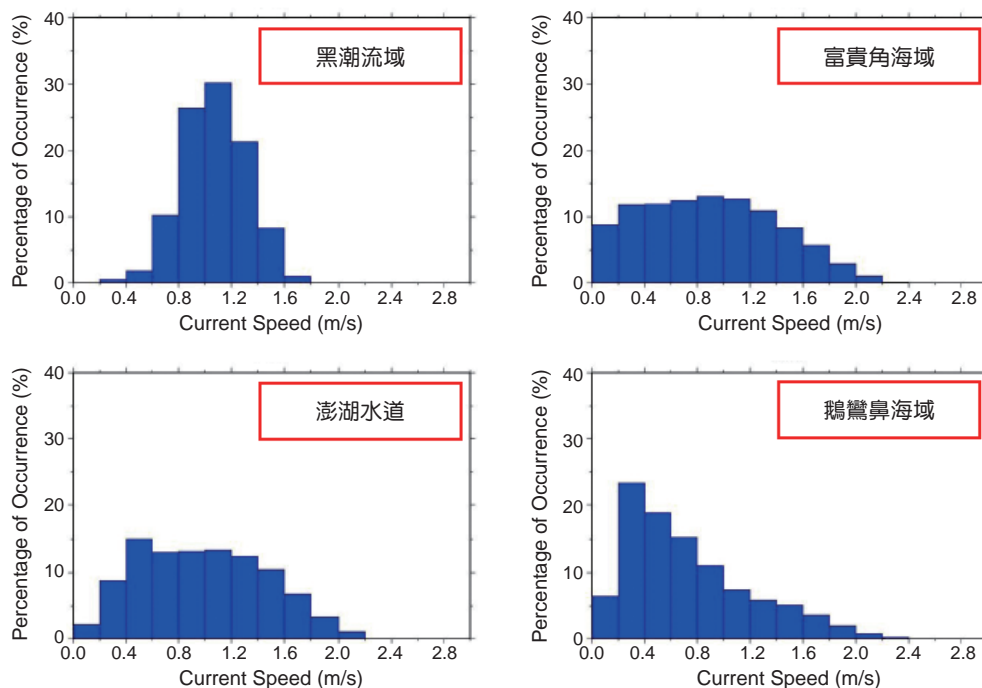


圖 5. 台灣附近海域強流區之流速機率分布。

強流區 (黑潮流域、澎湖水道、富貴角海域、鵝鑾鼻海域)，這些高潛能區的海域面積以黑潮流域最為廣闊，較高的海流發電潛能可達到  $0.7-0.8 \text{ kW/m}^2$ 。蒐集台灣附近海域海流錨碇站 (圖 7) 之觀測時序資料，計算其上層海域 (0-100 m) 深度平均流速的海流發電潛能，與模擬分析結果比對 (圖 8)，顯見大體上模擬的結果可適當地描述台灣附近海域海流發電的潛能，但在南中國海北部 (KA2、KA3)、台灣南端東方 (K1) 模擬結果之發電潛能均有明顯的低估情況，顯示在這些海域的模擬仍需加強。

### 三、海流發電機

目前國際上海流發電機尚處於產品生命週期的導入期階段，各國投入海流發電機的研發任務主要著重於建立發電機開發技術、驗證機組可靠度、累積機組機械特性、建立運轉與維修能量、建立經濟效益分析模式等<sup>(4)</sup>。下文將簡易介紹海流發電機的種類與其設計參數。

#### 1. 海流發電機種類

依據海流發電機捕獲海流能量的方式，可區分為海流渦輪機和振動葉片水翼機。

#### (1) 海流渦輪機

海流渦輪機是利用海流推動渦輪旋轉方式發電，依其葉輪轉動軸與海流行進方向的關係，可分為軸向 (axial) 和徑向 (radial) 兩類海流渦輪機。由於海流運動主要方向是在水平面上，軸向海流渦輪機之軸心方向與海流方向平行，故又稱水平軸海流渦輪機；徑向海流渦輪機的旋轉軸則垂直於海流行進方向，故又稱垂直軸海流渦輪機。軸向渦輪機又可依照渦輪葉輪外圍有無機匣包覆，分為開放型和

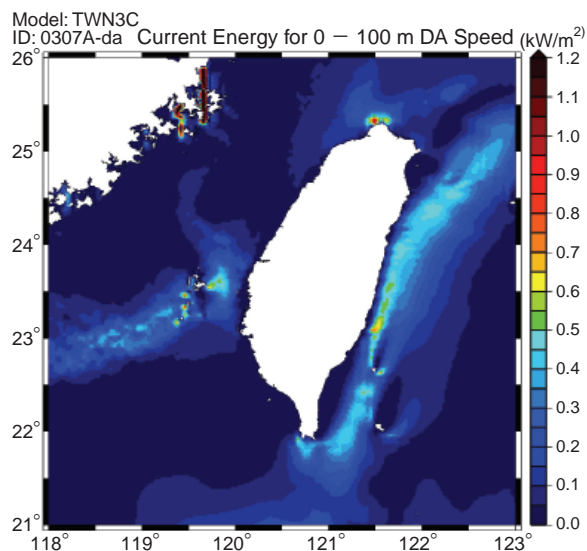


圖 6. 台灣附近上層海域海流發電潛能空間分布。

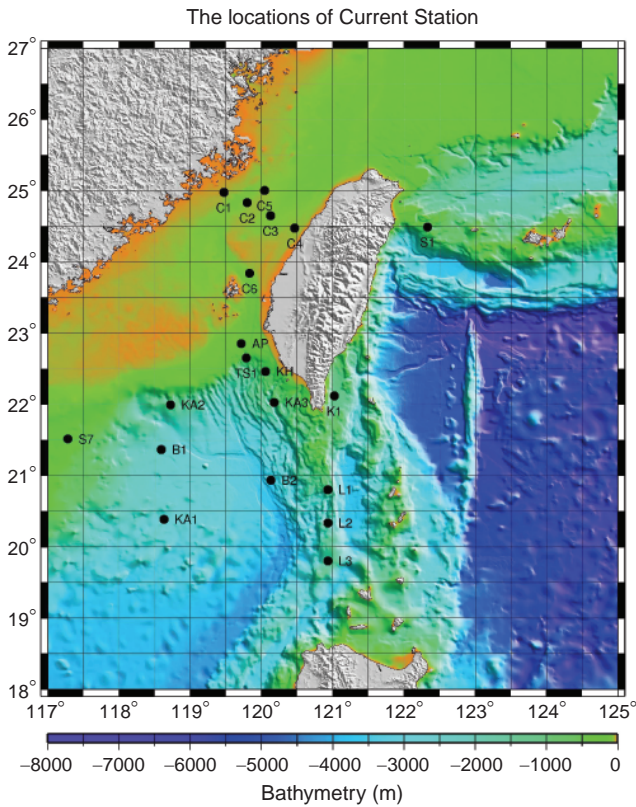


圖 7. 台灣附近海域海流觀測錨碇站位置。

包覆型兩種機組。軸向海流渦輪機其葉輪需迎向海流來向方能有效發電，而徑向海流渦輪機的機組特點，在於無論任何方向的海流來都可以旋轉葉片發電，但其缺點為機組容量較小，且僅適用於淺海區。

海流渦輪機發電功率和通過渦輪葉輪的面積和流速立方成正比。以開放式軸向海流渦輪機為例，其轉換海流能的發電功率 ( $P_e$ ，單位為 W) 為

$$P_e(v) \begin{cases} 0.5\rho AC_p \eta v^3 & \text{for } v_C \leq v \leq v_R \\ 0 & \text{for } v < v_C \text{ or } v > v_R \end{cases} \quad (1)$$

其中， $A$  為渦輪葉輪迎海流面積 ( $m^2$ )， $C_p$  為功率係數，Betz limit 理論值 = 59.3%，實際值約 30–50%， $\eta$  為驅動列轉換係數， $v$  為海流流速 (m/s)， $v_C$  為啟動流速 (cut-in speed)， $v_R$  為額定流速 (rated speed)。

決定包覆型渦輪機轉換海流能的機械功率主要有葉輪進出口壓力差和流經葉輪的流量，因此包覆型軸向海流渦輪機可採用入口聚流 (concentrated flow) 設計或是出口擴散 (diffuser-augmented) 設計來提高其發電功率，且不受限於 Betz limit (59.3%) 的限制。根據理論推導與實驗測試結果，具出口擴散型的渦輪機其輸出功率可為開放型渦輪機的 3 倍以上。

目前海流渦輪機是國際上海流發電機產品的研發主流，表 1 為 EPRI 所彙整主要海流渦輪機的特性<sup>(5)</sup>，其中 MCT 和 Lunar Energy Ltd. 兩家公司的機組最接近商業運轉。MCT 的海流渦輪機屬於開放型軸向機組，在 2002–2006 年之間已成功開發一個葉輪直徑為 11 公尺、發電量為 300 KW 的渦輪機 Seaflow，並在英國 Lynmouth 外海完成機組運轉測試。MCT 於 2007 年在北愛爾蘭 Strangford Lough 架設一座雙軸向海流渦輪發電機 SeaGen，其每個渦輪機之葉輪直徑為 16 公尺，總發電量為 1.2 MW，於維修時可將渦輪機升至海面上 (圖 9)，並預估在 2015 年以 SeaGen 布置為發電量 500 MW 的陣列式海流渦輪電廠。

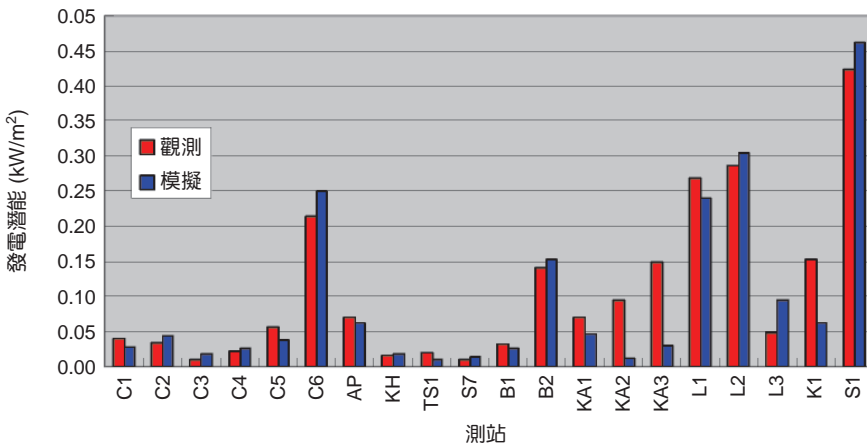


圖 8. 觀測與模擬的海流發電潛能比較。

表 1. 海流渦輪機機組特色一覽表<sup>(5)</sup>。

	GCK	Lunar	MCT	Open Hydro	Seapower	SMD Hydro	UEK	Verdant
Device Name	GHT	RTT 2000	SeaGen	OCT	Exim TTPP	TidEL	Underwater Electric Kite	RITE
Type	V-axis Helical Turbine	H-axis Ducted Turbine	H-axis Twin Turbine	H-axis Twin Open center	V-axis Savonius turbine	H-axis Twin Turbine	H-axis Augmented Turbine	H-axis Unducted Turbine
Development Status	1 m dia × 2.5 m high test in Merrimack River in Sep 2004. For others see Appendix B	1 to 1.5 m dia (1/20 <sup>th</sup> ) scale test in water tank	11 m dia 300 kW tested at sea (note 1) since May 2003 15 kW tested in 1994-5	3 m (1/5 <sup>th</sup> ) scale testing at sea	Full scale test in Sep 2003	1/10 <sup>th</sup> scale tested	7 prototypes up to 10 m in dia-see Appendix H (note 2)	Tested Pakistan 1989, Md and NY in 2002-2003
Next Development Step	Develop shaft mounted gen unit optimized for GHT	Deploy 1 MW unit in 2006 at EMEC-plan 2MW Com'l unit	Deploy SeaGen unit in 2006	Deploy 1.5 MW unit in 2006	Full scale pilot plant to be commissioned in 2005	Full scale prototype to be deployed at EMEC in 2006	10 MW – 25 unit project in DE in permitting	Pilot 6-Unit integrated System in the East River NY
Power Train Type	Direct drive permanent magnet gen connect to GHT shaft	Hydraulic based on modified COTS pump	Planetary COTS Gearbox	Direct rim drive generator	Gearbox	Gearbox	Planetary drive-proprietary	Speed Increaser COTS
Foundation/	Suspension or attached to sea floor	Gravity Base	Monopile embedded in sea bed	Gravity base or monopile	Anchors & Chains 4-fold	Anchors and chains	Via cable (note 3)	Monopile
Rotor Size	1 m dia × 2.5 m length	19.5 m (3.9 m hub diameter)	2 rotors 18 m dia	15 m	1 m dia × 3 m high – 2 pieces	8 m blades on 2.5 m dia hubs	Twin 10 ft	5 m
Rated Power (kW)	7	2,000	1,548	1,520	44	1,000	400	34
Rated Speed	2.58	3.1 m/s	3.0 m/s with MMSS of 3.5	2.57 m/s	3.0 m/s	2.3 m/s	3 m/s	2.1 m/s
Area (m <sup>2</sup> ) in P = 0.5 ρAV <sup>3</sup> equation	2.5	490.8 (cross section of 25 m dia duct)	5092	313.8	6	537	14.59	19.6
Com'l Price	Yes, turbine only	Not Com'l yet	Not Com'l yet	Not Com'l yet	Yes, but excluding site specific costs, grid.	Not Com'l yet	Yes	Yes

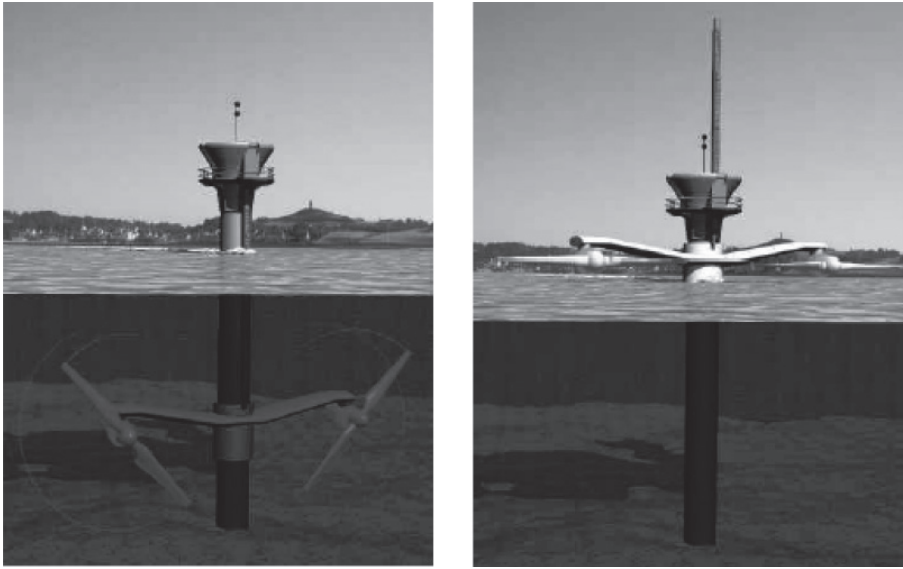


圖 9. SeaGen 海流發電機示意圖，渦輪機可升至海面以便維修和降低維修成本。

Lunar Energy Ltd. 所研發的 Rotech Tidal Turbine (RTT) 2000 屬包覆型軸向渦輪機，導管直徑為 25 公尺，發電量容量為 2 MW，維護時僅需將渦輪機部份吊起即可 (圖 10)。Lunar Energy Ltd. 目前已與 Korean Midland Power Co. 簽訂同意書，預定於 2015 年在南韓 Wando Hoenggan Water Way 裝設 300 座 RTT 2000，供二十萬用電戶使用。

### (2) 振動葉片水翼機

振動葉片水翼機以葉片受海流作用產生升力而上下擺盪進行發電，這類發電機通常需置放於海床，較適用於水深較淺的環境。英國 Engineering Business Ltd. 之 Stingray (圖 11) 水翼長為 15 m，於 1.5 m/s 的海流中發電量為 150 kW，於 2002—2003 年在 Shetland Islands 之 Yell Sound 海域完成 150 kW 設備之測試，計畫開發 5 MW 商業是運轉機組。美國 Kinetic Energy System Inc. 的 Hydrokinetic 發電機 (圖 12)，在水翼前方加裝一個海流集中器，其 15 m 長的水翼於 2 m/s 的海流條件下，約有 65% 的能源轉換效率，其發電量為 600 kW。

### 3. 海流發電機參數

海流發電機的參數選擇必須配合當地海流的狀況才能決定，以便能以較低的成本充分發揮當地海流的潛能。表 1 顯示目前國際上主要海流發電機的



圖 10. RTT 2000 海流發電機示意圖，渦輪機可與導管分離以便維護。

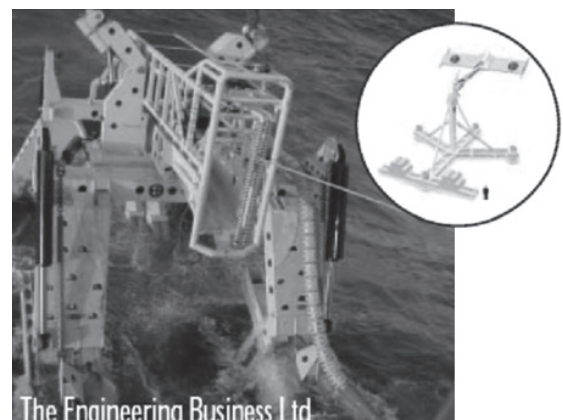


圖 11. Stingray 海流發電機。

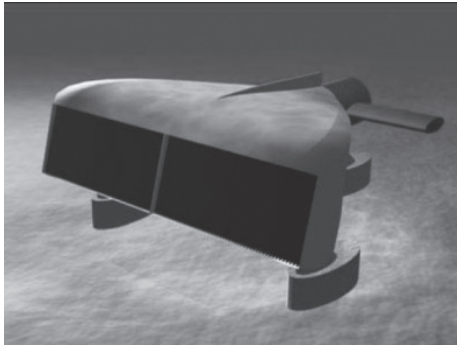


圖 12. Hydroturbine 海流發電機。

參數，額定流速約介在 2.1–3.1 m/s 之間，最大的額定容量為 RTT 2000 之 2 MW<sup>(5)</sup>。國內清雲科技大學曾統計台灣近海 5 個海流觀測站的流速錨碇時序資料，推論台灣近海流速資料的機率分布為常態分布 (normal distribution)，與風速常呈 Weibull 分布或 Rayleigh 分布不同<sup>(6)</sup>，並選擇類似風力發電機的渦輪機效能指標 (turbine performance index) 的方式當作最佳化的選擇指標，獲得在台灣近海所需使用之海流發電機的最佳額定流速約為 1.04 m/s 至 2.24 m/s 之間，屬於低額定流速的範疇，因此建議在台灣近海選擇海流發電機的參數時，不必去選用高額定流速的機種。

工業技術研究院為開發台灣東部較穩定的黑潮流洋流，提出一個包覆式軸向渦輪機組 (圖 13)，並搭配新構想的浮體載台和錨固技術，可適合黑潮流域較低流速和大水深環境，其主要優點有：渦輪機捕獲海流能功率大、錨固系統簡單、成本低、架設和維修方便，並可躲避颱風的破壞<sup>(4)</sup>。以黑潮流速為 1.5 m/s、葉輪直徑為 16 公尺、功率係數為 50% 計算，若採用包覆型機組增加入口聚流或出口擴散設計，可擴增海流能捕獲量，雙渦輪機組總發電量可從開放型之 350 kW 提升至 1050 kW。

#### 四、結論

再生能源的開發與利用，具備不污染環境、永不匱乏且可永續經營等特質，是近年來能源市場的主流。相對於目前蓬勃發展的風力發電再生能源，海流發電具有較穩定的可預測性、能量密度高、機組需求面積小等優點。台灣附近海域有強勁的潮流

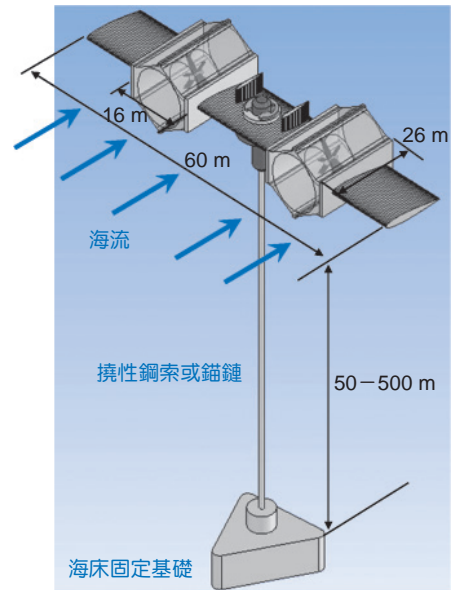


圖 13. 海流渦輪發電機創新構想圖和其錨固系統<sup>(4)</sup>。

與洋流，且強流區分布廣闊，深具開發海流發電的條件。但目前利用海流發電的相關技術仍在研發當中，尚未達到完全商業開發的層次。如果能積極推動利用海流動能發電，則不但可提供我國自然的潔淨能源，並可促進我國相關水下科技的發展，其經濟效益是無限的。

#### 參考文獻

1. EPRI, *EPRI-TP-001 NA Rev 3* (2006).
2. W.-D. Liang, T. Y. Tang, Y. J. Yang, M. T. Ko, and W.-S. Chuang, *Deep-Sea Res. II*, **50**, 1085 (2003).
3. 能源局, 98-D0108計畫執行報告 (2009).
4. 郭啟榮, 徐泊樺, 顏志偉, *機械月刊*, **34** (7), 18 (2008).
5. EPRI, *EPRI-TP-004 NA* (2005).
6. 黃厚生, 江青瓊, 廖經欣, 第二十七屆電力工程研討會 (2006).



林勝豐先生為國立台灣大學海洋博士，現任工業技術研究院能源與環境研究所研究員。

Sheng Fong Lin received his Ph.D. in oceanography from National Taiwan University. He is currently a researcher at Energy and Environment Research Laboratories, Industrial Technology Research Institute.