

## 5 第五章：海浪發電

周國榮教授，鄧亦修，莫道民，黎紹佳  
香港大學機械工程系

### 5.1 摘要

由於全球人口不斷增長，所以能源需求日益增加。地球上大部份的能源主要來自化石燃料。不過，燃燒化石燃料發電會釋出大量二氧化碳和污染物，造成溫室效應從而導致環境破壞；而且，化石燃料是有限的能源。雖然可用核原料發電，但是核能的安全問題與風險管理不斷受人們爭論。故此，對再生能源的研究及開發是刻不容緩的。本章主要討論其中一種再生能源，海浪發電的好處及近期一些研究成果。



圖 5-1 周教授及其團隊一直致力於海浪發電的研發

### 5.2 引言

在 2010 年，地球上人口已經將近 70 億人[1]。到了 2050 年，推測更會超逾 90 億人。面對如此龐大的人口壓力，全球各國能源的需求只會與日俱增。迄今為止，地球上大部份能源的需求主要依賴化石燃料(Fossil Fuel)，例如煤炭、石油和天然氣。可是在燃燒化石燃料的過程中，會排放溫室氣體(如二氧化碳、甲烷、臭氧)外，亦會釋放大量的污染及有毒物質，造成嚴重的環境破壞和氣候轉變[2]。另外，從上世紀 70 年代初出現的石油危機已經示警，石油及其他化石燃料長期及穩定的供應是一個嚴峻的考驗。除了政治因素外，化石燃料是有限的能源，很可能在數十年以至數百年內耗盡。根據文獻資料[3]，全球的能源消耗量正以每年 2% 遞升，研究數據

更預測消耗量到了 2030 年是 1965 年的 4 倍以上。而目前全球化石燃料的儲藏量(已確認存在)與消耗量的比率是煤炭約 200 年、石油約 40 年和天然氣約 70 年[4]。因此，全球各國均面對同一議題，如何開發環保、潔淨及可再生的能源以維持人類和經濟的持續發展。

近數十年，全球化帶來工業和商業上翻天覆地的改變，面對能源短缺及需求激增，核能的應用是無可避免[5]。通過放射性物質(如鈾、鈾、氚、氚)的核裂變或核聚變鏈式反應[6]，利用少量放射性原料就能產生巨大能量。雖然核能的應用能減少對化石燃料的依賴，也不會造成空氣污染。不過，核能的安全問題比化石燃料對環境的污染問題更令人關注[7]，如輻射廢料的處理。一旦發生核事故，會導致更嚴重的核污染影響及無法預測的後果，例如著名的美國三哩島事件(1979 年)、烏克蘭切爾諾貝爾事件(1986 年)和日本福島事件(2011 年)。

鑒於以上原因，全球正積極地發展可再生能源來解決能源問題。根據國際能源總署(International Energy Agency)的定義，可再生能源是“從持續不斷地補充的自然過程中得到的能量來源”[8]，它包括風能、太陽能、生物質能、地熱能、以及水力能。本章主要探討其中一種再生能源的用途，就是海浪發電。除了潔淨及不會排放污染物外，相比太陽能和風力發電，海浪發電相對穩定，不分晝夜亦不受天氣影響。由於地球表面約 70%被海洋覆蓋，而全球的海岸線長約 356,000 公里[9]，所以海浪能幾乎是無限供應的。

### 5.3 震盪水柱

震盪水柱 (Oscillating Water Column)[10-13]，是其中一種儀器用作海浪發電。現時全球已有數個正處於測試階段的震盪水柱，其中一個著名例子位於蘇格蘭西部的艾拉島 (Islay) 海岸。根據 2001 年蘇格蘭官方的人口普查[14]，島上只有 3457 人，占地面積近 615 平方公里。該海浪發電廠 (圖表 5-3)

在 2000 年 11 月開始運作，其震盪水柱涵蓋的水面積達到 169 平方米，廠內設置了一個直徑 2.6 米的渦輪機 (Wells Turbine)，連接兩組每個 250 千瓦的發電機，電容量為 500 千瓦，而一年所發的總電容量為 1,800 百萬瓦時[15]。以香港 2010 年人均用電量計算[9](註：香港 2010 年的總用電量約是 42,640,000 百萬瓦時，而總人口是 7,122,508 人)，一個震盪水柱一年所產生的總電容量足夠為島上居民提供大約一個月的電力。

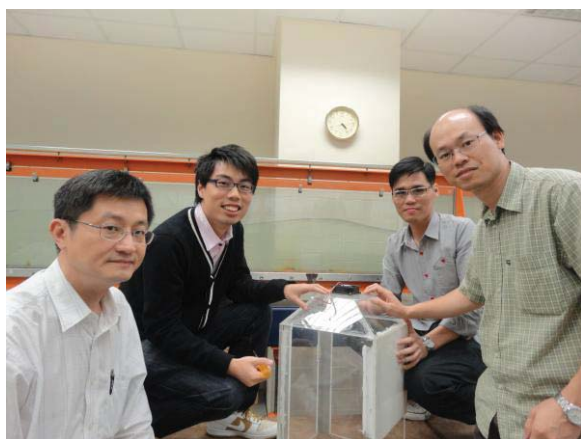


圖 5-2 周國榮教授及其海浪發電研發團隊  
(左起:周國榮教授、鄧亦修、黎紹佳、莫道民)



圖 5-3 蘇格蘭艾拉島的海浪發電  
(圖片下載自 <http://owcwaveenergy.weebly.com/wavegen.html>)

## 5.4 震盪水柱的運作原理

我們通常可以分為陸上和離岸的震盪水柱。在此研究中，我們只討論陸上的震盪水柱。陸上的震盪水柱意味著興建在海岸線上，其中一側面向大海，而另一側面向大地。震盪水柱的運作原理並不複雜(圖 5-4)，當起伏的海浪到達岸邊時，海水會經由水柱下面的通道進入，柱內的水面會隨海浪上下震動。當水面上升時，柱內空氣被壓縮，空氣隨即通過柱頂管道排出。當空氣流經管道時，便會推動管中的渦輪機，從而帶動發電機發電。相反，當水面下降時，柱

內的氣壓下降，大氣中的空氣會被吸進柱內。在上述兩個情況下，空氣會在管道以相反方向流動，然而渦輪機只會以同一方向轉動，便於帶動發電機發電。圖 5-5 清晰地闡述了震盪水柱的內部運作。

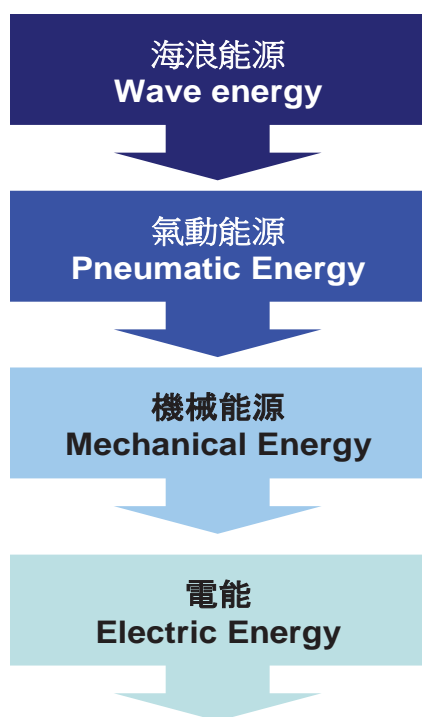


圖 5-4 震盪水柱的能量轉換原理圖

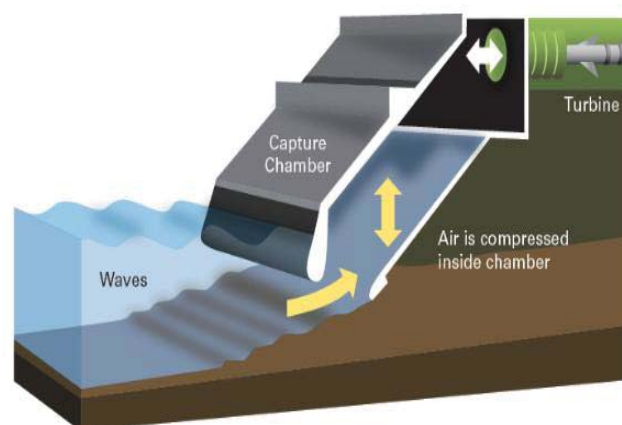


圖 5-5 震盪水柱的內部運作原理

(圖片下載自

<http://wiki.uiowa.edu/display/greenergy/Oscillating+Water+Column>)

雖然震盪水柱的確能把海浪的能量轉化為電力，其能源效益仍有很大的改善空間。因此，更進一步的研究是必須的。我們應用流體軟體程式“Fluent”建立了一個簡單的二維模型來進行震盪水柱的模擬，得到的結果可用作將來建構海浪發電廠的參考。文獻[16]研究了一些震盪水柱的結構，然後與實驗結果比較，其結果顯示模擬數值與實驗數值大致相同。在此主要討論海床深度與水柱闊度對海浪能轉化為電力的影響。

## 5.5 震盪水柱的二維模擬

圖表 5-6 是一個二維的震盪水柱模型 [17]，圖中清楚地表示了模型的尺寸。在此研究中，水柱的闊度 ( $l_f$ ) 與海床的深度 ( $h_w$ ) 是可變的。而它的模擬條件則顯示在圖表 5-7，最右方的柱體部分是震盪水柱的內部。

利用流體軟件“Fluent”，我們可以模擬震盪水柱的內部變化。如圖表 5-9 所示，水面開始時處於靜止狀態，當模擬開始，左邊產生的波浪會到達右方的岸邊，而產生的波浪必須有穩定的波振幅。經過若干時間後，我們可在圖表 5-10 中觀察到水柱內部隨波浪上下震動的變化。然後，我們把水柱內部的變化記錄下來作進一步分析。

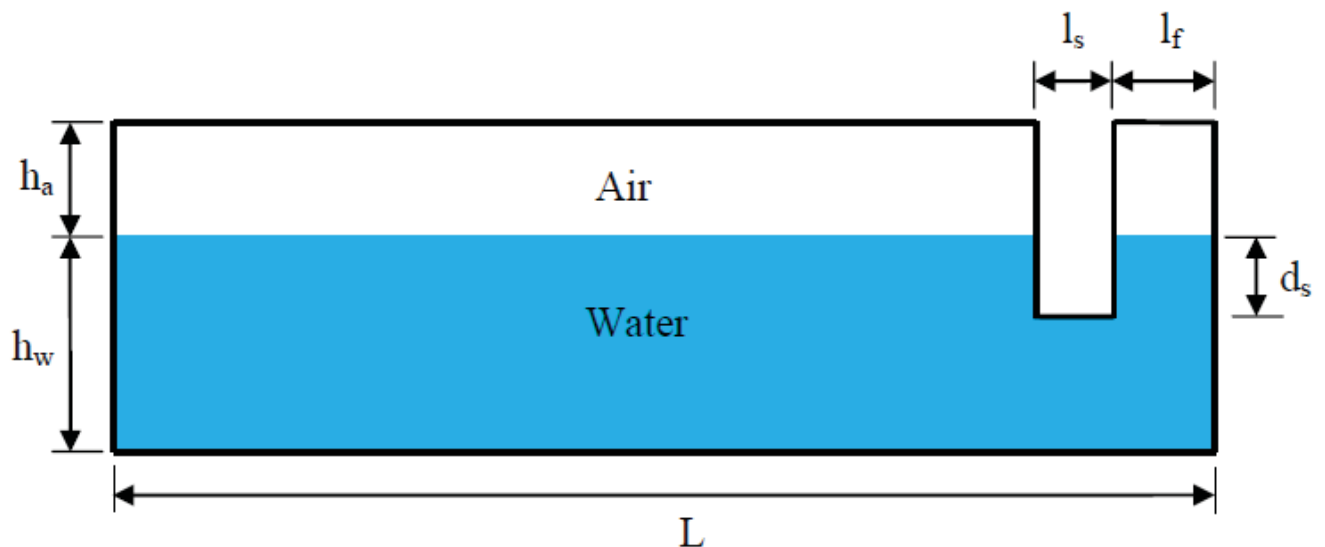


圖 5-6 二維的震盪水柱模型

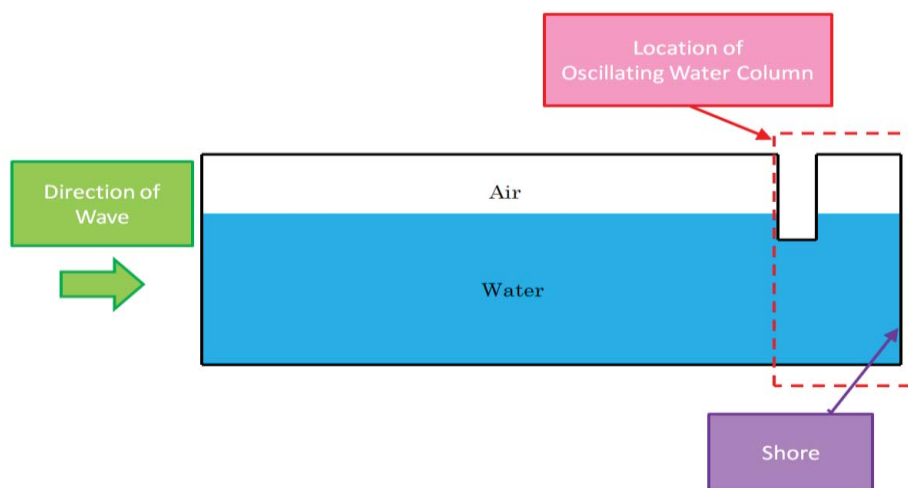


圖 5-7 震盪水柱模型的模擬條件



圖 5-8 震盪水柱模型模擬轉化海浪能為電力

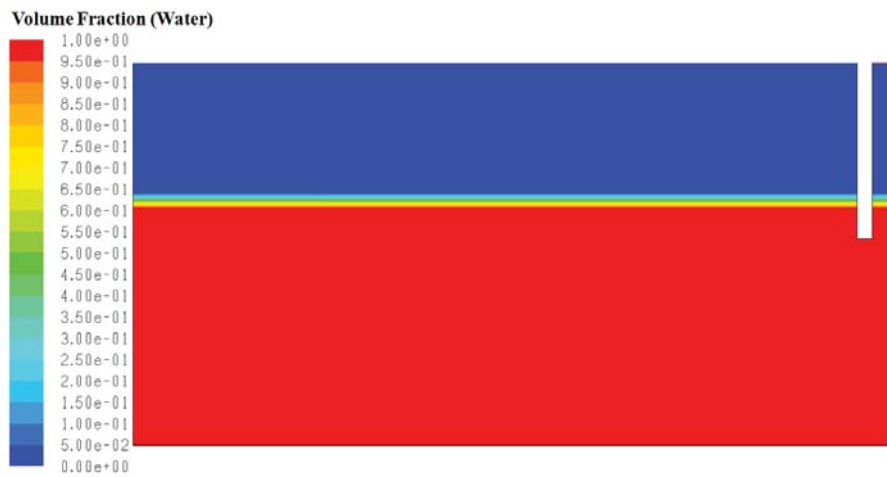


圖 5-9 靜止狀態的水面

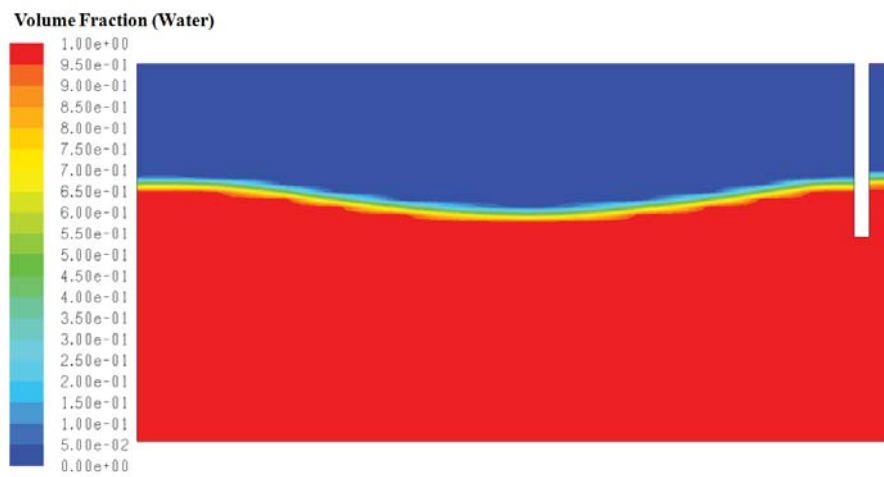


圖 5-10 模擬波浪上下震動的變化

## 5.6 模擬結果與討論

### 5.6.1 水柱的闊度研究

根據電腦模擬結果[17]，震盪水柱的闊度會影響其能源效益。在此例中，圖表 5-6 的電腦模擬設定為  $l_s=1$  米， $d_s=2.5$  米， $h_a=9$  米， $h_w=16$  米， $L=50$  米，而水柱的闊度 ( $l_f$ ) 則由 0.5 米到 8 米。如圖表 5-11 所示，震盪水柱的最大波振幅發生在 1 米。當水柱的闊度大於 1 米時，它的發電量及能源效益均已接近最高水平。因此，設計震盪水柱時應避免闊度過大，以免浪費成本。

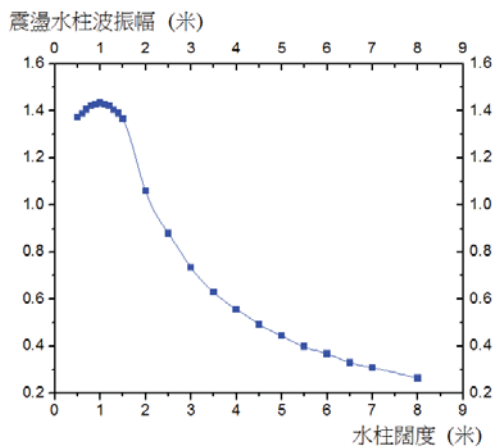


圖 5-11 震盪水柱闊度與內部波幅的變化

### 5.6.2 海床的深度研究

另一方面，電腦模擬結果[17]顯示海床的深度對震盪水柱的表現同樣有直接影響。在此例中，圖表 5-6 的電腦模擬設定為

$l_f=1.5$  米， $l_s=1$  米， $d_s=2.5$  米， $h_a=9$  米， $L=50$  米，而海床的深度 ( $h_w$ ) 則由 13 米到 27 米。圖表 5-12 表示當水深到達 19.5-20 米時，它的發電量及能源效益會達到最高水平。可惜近岸海床一般只有數米深，因此在選址興建方面只能選擇相對較深的海岸以達到震盪水柱效率的最優化。

圖表 5-4 只是一個簡單的二維震盪水柱模型，我們將構想一個更真確的電腦三維模型，使我們對這種儀器作海浪發電有更深刻的瞭解。除了震盪水柱以外，我們還可利用其他儀器來做海浪發電，例如 Tapered Channel (圖表 5-13)，Wave Dragon (圖表 5-11)，及 Archimedes Wave Swing (圖表 5-15)。文獻[18]概要地描述了各種海浪發電儀器的用途和優點。



震盪水柱波振幅（米）

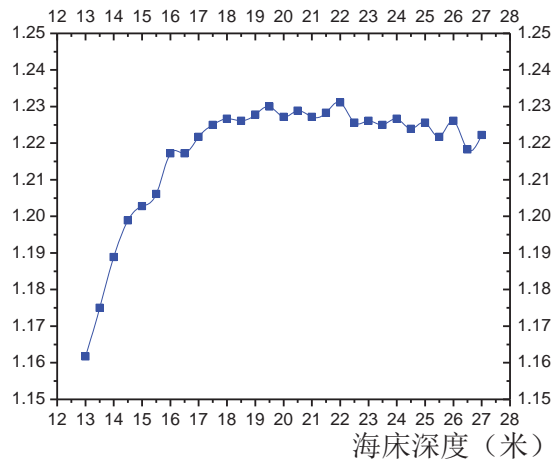


圖 5-12 海床深度與震盪水柱波振幅的變化

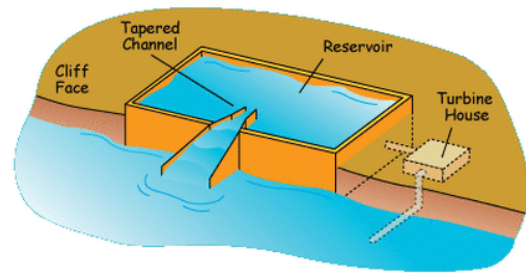


圖 5-13 Tapered Channel 的結構

(圖片下載自:

<http://taperedchannelwaveenergy.weebly.com>)

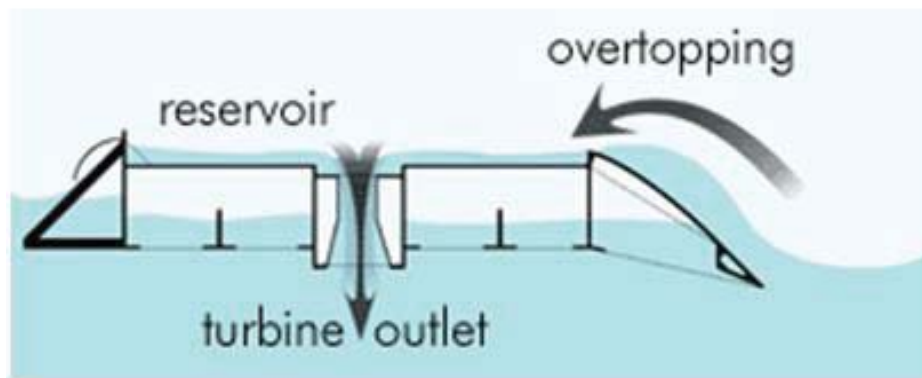


圖 5-14 Wave Dragon 的結構

(圖片下載自: <http://www.climateandfuel.com/individualpages/wavedragon.htm>)

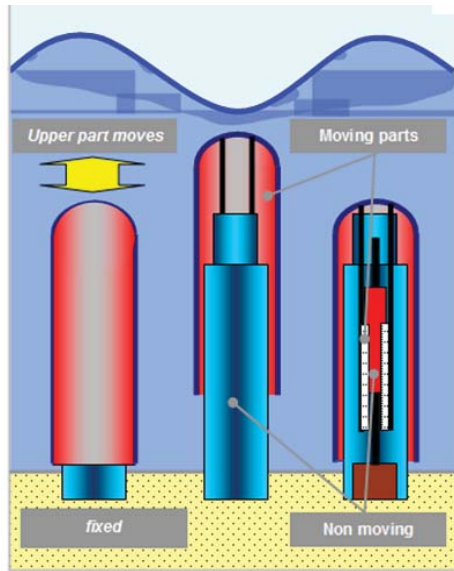


圖 5-15 Archimedes Wave Swing 的結構  
 (圖片下載自:  
[http://my.fit.edu/~swood/OE\\_topic.html](http://my.fit.edu/~swood/OE_topic.html))

## 5.7 結論

我們深信海浪發電是一個嶄新及可行的概念。利用震盪水柱的原理和電腦模擬，得出了一些結果。研究發現水柱的闊度與海床的深度對震盪水柱的表現有直接關係。在能源迫切需求的前提下，海浪發電既環保、潔淨、安全、又可再生，完全符合可持續發展的理念。

不過，海浪發電還是處於實驗階段，它的能源效益必須優先考慮。不過深入細緻的研究將可提升海浪發電的技術和發展。

## 5.8 參考文獻

1. U.S. Census Bureau:  
[http://www.census.gov/ipc/www/pop\\_clockworld.html](http://www.census.gov/ipc/www/pop_clockworld.html).
2. V. Ramanathan and Y. Feng, Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives. *Atmospheric Environment*, 43, 37-50, 2009.
3. J.E. Mason, World energy analysis: H<sub>2</sub> now or later? *Energy Policy*, 35, 1315-1329, 2007.
4. S. Shafiree and E. Topal, When will fossil fuel reserves be diminished? *Energy Policy*, 37, 181-189, 2009.
5. F.L. Toth and H.-H. Rogner, Oil and nuclear power: Past, present, and future. *Energy Economics*, 28, 1-25, 2006.
6. E.E. Lewis, *Nuclear Reactions, Fundamentals of Nuclear Reactor Physics*, Pages 1-27, 2008.
7. H. Alevritou-Goulielmou, Nuclear accidents, consumers' perspectives and demands. *Journal of*

- Environmental Radioactivity, 83, 433-435, 2005.
8. Wikipedia: <http://zh.wikipedia.org/zh/可再生能源>.
  9. Central Intelligence Agency: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook>.
  10. D.V. Evans, D.C. Jeffrey, S.H. Salter and J.R.M. Taylor, Submerged cylinder wave energy device: theory and experiment. *Applied Ocean Research*, 1, 3-12, 1979.
  11. D.V. Evans and R. Porter, Hydrodynamics characteristics of an oscillating water column. *Applied Ocean Research*, 17, 155-164, 1995.
  12. S.P.R. Czitrom, R. Godoy, E. Prado, P. Pérez and R. Reralta-Fabi, Hydrodynamics of an oscillating water column seawater pump Part I: theoretical aspects. *Ocean Engineering*, 27, 1181-1198, 2000.
  13. S.P.R. Czitrom, R. Godoy, E. Prado, A. Olvera and C. Stern, Hydrodynamics of an oscillating water column seawater pump Part II: tuning to monochromatic waves. *Ocean Engineering*, 27, 1199-1219, 2000.
  14. Scotland's Census 2001 Statistics for Inhabited Islands. General Register Office for Scotland. Published on 28 November 2003.
  15. Islay LIMPET wave power plant. The Queen's University of Belfast. Contract JOR3-CT98-0312. Publishable Report. 1 November 1998 to 30 April 2002.
  16. Z. Liu, B.S. Hyun, H. Shi and K. Hong, Practical simulation of oscillating water column chamber for wave energy conversion. *International Journal of Green Energy*, 7, 337-346, 2010.
  17. Y.S. Tang, Renewable energy from waves. Bachelor Dissertation, Department of Mechanical Engineering, The University of Hong Kong, 2010.
  18. T.K. Wong, Study on energy conversion from water current using a tapered channel. Bachelor Dissertation, Department of Mechanical Engineering, The University of Hong Kong, 2006.