

專 論

臺金地區潮力發電可能性的探討

Possibility of Tidal Power Generation in Taiwan and Kinmen Areas

經濟部水資源統一規劃委員會工程師
臺灣大學土木工程學系教授

吳 建 民

Chian Min Wu

Abstract

Power has been an important infrastructure of the overall development of a nation. Following the oil crisis and the endless spiral of oil prices, the development of replacement of energy sources has become an increasingly urgent requirement, and in a true global perspective of the power demand, it can be said with certainty that all the countries of the world are facing "energy crisis" and are busy formulating methods and devices to explore the various possibilities of energy generation to satisfy the growing demand.

The tides in the sea are the result of the universal gravitational effect of heavenly bodies, which show a periodic rise and fall in levels. This large scale up and down movement of water represents an unlimited source of energy. If some part of this vast energy can be converted into electrical energy, it would be an important sources of hydro-power.

Distribution of the global tide range shows that Taiwan and Kinmen areas are located in the zone of spring tide ranges of more than 5 m (giving a mean tide range of more than 3.5 m). In this paper, the feasibility of the tidal power schemes in these two areas is examined. The energy production cost is estimated and its feasibility is compared with other alternative sources as regards their costs and overall benefits. As a result of the comparison it is concluded that, for the time being, in all cases, it would appear that the KWH production cost would be greater than 0.7 French Francs (1980 price level), which is well above the value of 0.55 FF that is considered to be the maximum feasible limit. It would therefore seem to be premature to envisage the construction of small tidal plants. However, in the particular case of Kinmen area where there is an urgent shortage of energy but not of power, and with existing damming dykes for alternative use, the annual expenditure

related to electrical/mechanical equipment would amount to 32 French centimes per KWH or equivalent to NT\$ 2.75 per KWH, only. This makes the use of tidal power not only competitive to that of the thermal sources in the Kinmen area, but also shows to be an economical justifiable project. Though, it is premature in Taiwan areas, however, as it has now up-to-date industry and the largest shipyards in the world, the use of these facilities makes it possible to build large completely equipped caissons both for the power plant and gate blocks. This would lead to reduction in construction costs. With the standardisation effect, possibility of using high-powered earth moving machines and new methods of conception design it would lead to an economical justifiable project in the near future.

一、潮力發電的歷史

自古以來，海岸居民，尤其是北大西洋沿岸居民，都試圖利用漲潮及退潮所產生的能量為他們工作。他們將磨坊置於蹼輪上，藉海水帶動，以完成碾磨工作。潮力磨坊的最早記錄始於十一世紀。其後幾世紀裡，在英、法及西班牙等三國均有間斷性的歷史記載，其中有一部份至今仍有遺跡可循，甚至仍在操作中；美國方面最早的潮力磨坊記錄為1734年在麻省 Chelsea 地方所建的15馬力磨坊，這些潮力磨坊的出力介乎50~100瓩(KW)。潮力亦被利用於倫敦地區自來水的供應與漢堡地區下水道的抽水上。但自從工業革命以後，人類對於能源以及電力的需求不斷擴大、幅度增加，大型廉價能源和電廠不斷出現後，小型的潮力電廠逐漸無法與其相對抗而從人類的腦海中及海灣附近完全消失了。

在二十世紀初葉加拿大的 O. Turnbull，美國的 D. P. Cooper 及蘇聯的 N. Davey 等重新對於潮力發電作有系統的研究，1922年 Davey 氏出版第一部有關潮力發電的專著，1933年英國政府積極推動 Severn 溪潮力電廠的規劃工作，而美國方面亦於同一時刻開始 Passamaguddy 灣的研究工作，不幸均因成本過大而於1935年胎死腹中，無法實現。在其後的25年間，可謂潮力發電的黑暗時代，毫無進展可言。直至50年代末，燈泡型渦輪機發明後，潮力發電的研究方重新抬頭，蘇聯的 L. B. Bernstein 及法國的 R. Gibrat 在這方面有不可磨滅的貢獻。1961年法國 Rance 地方的潮力電廠規劃完成，在拉蘭斯(La Rance)

河河口開始建立世界聞名、唯一的最大商業潮力電廠，1966年開始正式供電，建立了人類在電力史上的另一里程碑。該廠是利用蘭斯河河口附近最大潮差13.5公尺、平均潮差8.5公尺、及河口長750公尺、高25公尺建堤築成的22平方公里、1.84億立方公尺容量的人工湖與24部一萬瓩機組而將潮力轉換為電力，裝置容量共24萬瓩(240 MW)，年發電量約5.4億度、經費約一億美元，總計最終容量可擴充至32萬瓩，該廠自成立迄今，已有14年歷史，運用極為成功。1968年蘇聯亦在 Kislaya Guba 建立一400瓩(400 KW)的潮力試驗電廠，其後各地均掀起海潮發電的研究熱潮，尤其是能源危機出現後，世界各國重新積極進行此方面的開發工作，成果甚為輝煌。

二、潮力發電的困難

由潮力發電發展的歷史相當緩慢看，它的原因除有其他廉價的能源以外，潮力發電本身有下列特殊困難：

(一)潮力發電本身依賴內灣及外海的潮位差，因此僅能作間斷性的發電，亦即僅有在潮汐過程的某一階段為可行。這種間斷性可利用雙庫或多庫，雙效應發電機組改善之。

(二)潮差有限，僅及數公尺，因此潮力發電需使用低水頭、高比速的水輪機。在燈泡型及管式水輪機未開發前，慣用的卡氏(Kaplan)轉輪為唯一可利用者，但由於潮差過小，卡氏轉輪並無法發生效用。迄至戰後工業界已成功地開發水平、軸流而具有高比速的水輪機，使上部結構(Super structure)所需的高度與寬度、和所需開挖的深

度均大幅度變小，因而電廠變為紮實小巧後，潮力發電的困難才被克服。

(三)潮差的季節性變化甚大，因此水輪機需要在大幅度的水位變化下操作，將降低發電效率。

(四)潮汐的漲退雖然有秩序，而發電量可望穩定，但潮峯有每天延緩約1小時之現象，故某一天如中午12點到下午3點可發電者，第二天將變化為下午1點到4點鐘，圖1示潮位變化，此種變化將導致供電上的困難，如電源多元化時此種困難可克服，亦可用多庫雙效應發電調整之。

(五)海水的侵蝕性較大，機械的壽命較短，這種顧慮因材料方面的改善，亦有一部份可克服。

(六)河口及海岸之營建工作，相當困難，需有良好之施工機械與技術始能克服。

(七)潮力電廠之投資額相當大，不但成本高，維護費亦高，但自從能源危機後，經濟效益似已經提高而變為可行。

(八)潮力發電可能改變河口或海岸的環境而影響魚類及其它海洋生物的生長，並可能對航運發生阻礙。

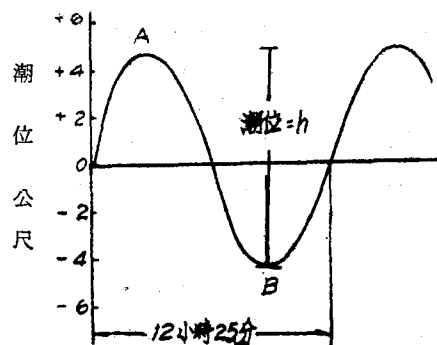


圖1. 潮位變化

三、潮力電廠廠址的條件

由上述潮力發電的困難條件知，最好的電廠廠址為海灣或河口，將海灣或河口圍以堤後，內陸潮庫則可形成，內陸潮庫的存水與海洋的海水聯合運用，則可產生電力，茲將選擇廠址的要點摘要如下：

(一)潮差需整年都合乎開發的要求，全年的變化幅度不應過大，而潮差愈大為愈佳。

(二)河口或海灣需易於開發，圍堤的長度以愈短愈佳，同時潮庫的容量以愈大為愈佳。海灣週邊的地勢及地質均能供經濟建廠條件。

(三)計畫廠址不宜有太多泥沙，河口泥沙負荷過大時，潮庫將被埋沒而壽命將甚為短暫，無開發價值。

(四)計畫廠址以不受波浪直接侵襲為佳。

(五)河口堵塞後，以不過份改變環境為佳。

總括而言，潮力電廠的廠址以潮差大，潮汐變化穩定，地形上能以短堤提供大潮庫，且地質上能建閘及電廠而投資額小，發電成本低的河口或海灣為佳。

四、潮力電廠的構成

組成潮力電廠的三大要素為：

(一)電廠

(二)構成潮庫或潮庫羣的圍堤

(三)溝通海與潮庫的閘道 (Sluiceway)，藉閘道的運用可蓄滿或放空潮庫。

電廠中有水輪機 (Turbine)，發電機 (Generator) 及其他附屬設備。閘道藉閘門的控制，可在漲潮過程中蓄滿潮庫，亦可在退潮時放空潮庫，它可為單向閘門，亦可為雙向閘門，亦可為自動閘門或控制閘門，視電廠的種類及運用方式而異。圍堤的功用在隔離潮庫與海洋，使河口或海灣形成為一人工的濱海水庫；也可利用它來構成潮庫羣，造成不同水位的濱海水庫羣，以穩定發電的負荷變化。一般電廠、閘道以與海堤同一方向為宜。

電廠的操作方式除可藉流向的不同從事一般的發電外，尚可配合以抽蓄設計。如果所採用的水輪機為可逆型抽水水輪機 (Reversible pump turbine)，更可在任何一時刻，以同一機組從事抽水，尤以近年來現代化的管狀水輪機更可同時充作抽水及水輪機的雙重且雙向用途，除此之外，管狀水輪機亦可利用停機位置充作閘道的用途，因此它的運用方式較慣用的電廠更為多彩多姿，就以閘門的開關次數而言一年中至少有730次之多。這是一般慣用水力發電廠所沒有的。

五、潮力發電的模式

由於流向的變化，潮汐的升降及潮庫多寡的不同，潮力發電的實用方式將有不同的模式，最簡單的方式為單庫單效應系統，它的缺陷是發電量不穩定且發電時間短；為穩定化並延長發電就有單庫、雙庫及合庫佈置等三種方式。

(一)單庫系統

在單庫佈置中只有一個潮庫與海洋發生作用，雙者被圍堤相隔離而潮流則由閘道溝通，圖2為其佈置示意圖。有名的法國拉蘭斯潮力電廠為單庫型式，它的閘道為了分期施工的需要，是建在圍堤的一端。

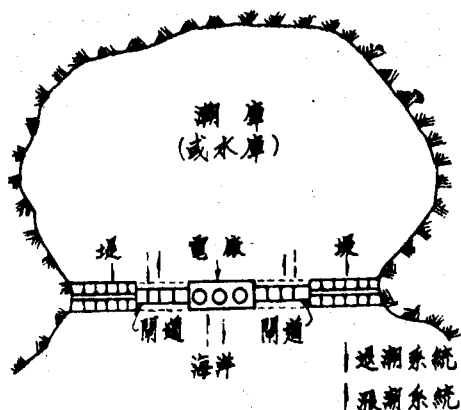


圖2. 單庫佈置

單庫佈置電廠的發電方式可採用退潮單向系統，漲潮單向系統或雙向系統等三種，茲分述如下：

1. 退潮單向系統

退潮單向系統又稱單庫退潮單效應發電系統。本系統中發電係在退潮過程中運用。發電時潮庫充作上池而海洋則充作下池，水由潮庫洩向海洋。在漲潮過程中海水經由閘道流向潮庫，故只能利用單方向的潮流發電。發電在上池及下池的水位差達發電機組所需的最小水頭時始能開始，圖3示潮汐變化與發電過程的曲線關係。

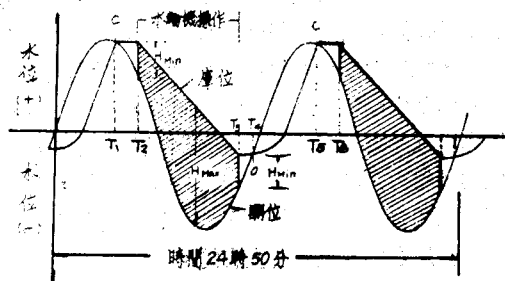


圖3. 單庫退潮系統

水輪機在上下游兩池的水位差達最小水頭標準的時刻， T_2 及 T_3 的時刻間運轉發電，在 T_0 及 T_4 時刻間則閘道開放，利用漲潮的時刻從事蓄水工作，在 T_1 及 T_5 時刻，閘道則關閉，以待上、下兩池的水位達發電所需的最小水頭。

2. 單向漲潮系統

單向漲潮系統又稱單庫漲潮單效應發電系統。本系統係在漲潮過程中發電，海水經水輪機而流入潮庫。圖4示潮位與潮庫水位的相對關係，並表示蓄庫發電與等待期間的次序。由該圖知：發電在潮位與庫位差達發電機組所需的最小水頭時開始，在水位差未達此標準時以前水輪機則需關閉。

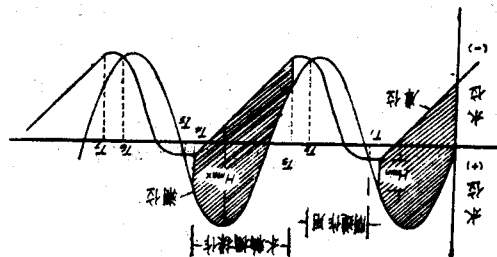


圖4. 單庫漲潮系統

由該圖亦可知：在退潮開始時瞬間將水流洩入水輪機時並無任何「水頭」足以帶動水輪機，這種情形在水輪機的開度恰使潮庫水位洩降與潮位下降的速率相同時為然。為造成水輪機運用所需的水頭，潮庫水位的洩降需緩於潮水的下降，因此，發電開始時間的延滯需慎重為之。發電時間的延滯亦可藉流經水輪機的流量及水輪機的種類調整，以期在低水頭時仍能獲得良好的效率。減少水輪機的水流量，延長發電時間亦可稍為加大電力出力，因上述變數的組合亦可提供大幅的操作條件。

雖然退潮與漲潮過程可能相當相似，但一般而言，退潮過程可能對發電更為有利。其原因為電廠位於溪口或河口，其退潮時間將較漲潮時間為長；同時，潮庫的表面積並非常數，而係水位愈高表面積將急劇增加，這種表面積的變化特性對於單向漲潮系統與單向退潮系統電廠的操作有很大的影響。漲潮系統需有較深的潮庫，因此需將閘道底高設置於較深處，結果施工成本將相對變高。一般而言，退潮系統的發電量可超出漲潮系統的1.5倍以上。

兩系統共同的缺點為間斷性發電亦即發電無法持續全日。但由於間斷性具有規則性。因此可藉其它系統的輔助，而維持供電的連續性。

3. 雙向系統

此系統又稱為單庫雙效應發電系統，藉單潮庫或水庫的作用，分別在漲潮及退潮過程中，從事雙向發電工作。水輪機本身為雙向兼用，可同時適用於退潮及漲潮不同方向的交遞運用而發電。假如兼具雙向抽蓄設計則能增加潮庫的蓄水容量或增加水

位落差，以提高發電出力和延長發電時間。

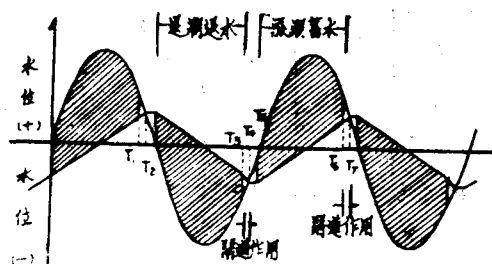


圖 5. 單庫雙效應系統

本系統可在洩空及蓄水過程中發電，如圖 5 所示，在 T_1 時刻當潮庫水位與潮位相同時將閘門關閉；在 T_2 時刻，當潮位洩降到水輪機的最小作業水頭（Minimum Working Head）時，則可開始發電，同時潮庫水位也開始洩降。迄至退潮末期潮位開始上升，潮庫水位與潮位間的水位差達到最小作業水頭的時刻 T_3 來臨時，就得停止發電。在此時刻閘門就開放，以使潮位與潮庫水位提早達到平衡的時刻。當潮庫水位與潮位相等的時刻 T_4 ，來臨時需重新關閉閘門，以等待兩者的水位差達到最小作業水頭時刻 T_5 的來臨，屆時水輪機開始轉運而從事發電的工作。當兩者的水位差又變至最小作業水頭的時刻，即 T_6 時，就得開放閘門，以便提早平衡潮庫水位與潮位；當兩者相等的時刻 T_7 ，來臨時，就得關閉閘門以重複上述退潮時間的發電。本系統中閘門的有效開度需大於上述退潮或漲潮單向系統的開度。

雙向系統雖然縮短停電時間的距離，但仍舊無法提供整日連續性的發電。

(二) 雙庫系統

本系統需有聯結的兩個潮庫，其中一庫在海洋漲潮時（即蓄水過程）發電，而另一庫在退潮時發電，雙者交遞運用以期獲得穩定且連續的發電。雙庫可並用單一電廠，亦可採用個別的兩個電廠，如電廠容量配量得當，則可獲得穩定的發電，圖 6—a 及 6—b 表示具有兩座電廠雙庫系統的操作原理，由於採取單向發電，故一般又稱為雙庫聯結裝置單效應發電系統。本系統可視為後兩個單庫系統的並聯，其中一庫專司漲潮發電，而另一庫則專司退潮發電。

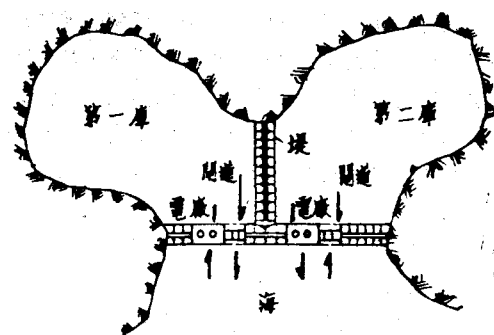


圖 6. (a). 雙庫系統

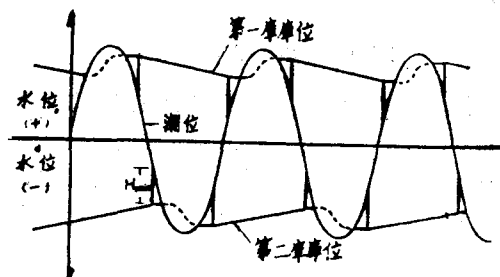


圖 6. (b). 雙庫系統之操作

(三) 雙庫合作系統

本系統的特性為有二個高程不一的潮庫，以水輪機相連，將高庫水排到低庫發電，高潮庫及低潮庫均分別是有個別的閘道與海洋聯結，前者稱為進水閘而後者則稱為排水閘。

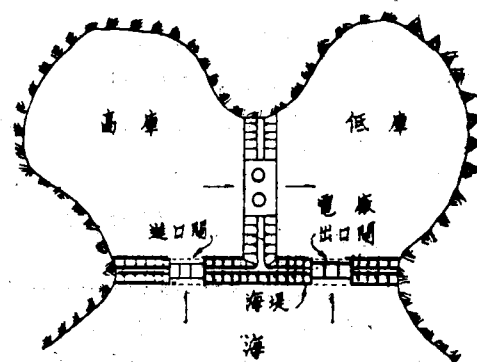


圖 7. (a) 合作雙庫系統

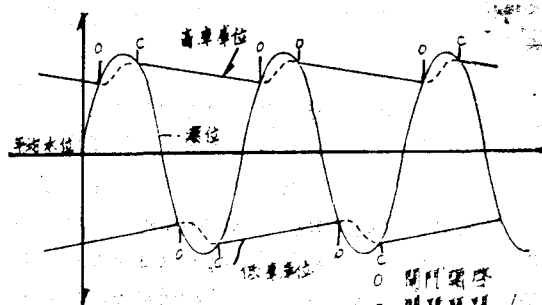


圖 7. (b). 雙庫合作系統之操作

發電後進水閘關閉時，利用高潮庫先前儲蓄的潮水，經水輪機轉換為電能而排入低庫，於是高庫的水位逐漸降低而低庫的水位則相對上升。當低庫的水位上升至與潮位相等時，排水閘則關閉。當潮位上升到與高庫逐漸下降的水位相等時，高庫的進口閘則開放，使高庫的水位上升，同時水輪機接受自高庫的水流，將庫水排至低庫並發電，於是低庫的水位又逐漸上升。當潮峯來臨時，進口閘則關閉，於是第二個循環週而復始，圖 7-a 及 7-b 為其佈置及變化現象。

六、能量與電力的估計

潮力電廠可獲得的能量與潮差及潮庫容量的大小有關；電廠的發電量則又視發電時間的長短而定，一般而言，其發電時間在漲潮過程中為 3 至 3½ 小時，如採取雙循環系統時，退潮時又可獲得同一發電時間。

潮水水庫的體積 (V) 可用：

$$V = AH_0 \dots\dots\dots (1)$$

示之，式中 A 為潮庫平均面積，以平方公尺計； H_0 為最高及最低水位差，以公尺計。故平均流量 (Q) 為：

$$Q = \frac{AH_0}{T} \dots\dots\dots (2)$$

式中 T 為一儲蓄或放水過程中發電時間的長短，以秒計。每一時刻電廠的電力 (P) 為：

$$P = \eta_0 \frac{wQH}{75} \quad hP \dots\dots\dots (3)$$

式中 H 為該水頭。在一潮汐過程中的總能量為：

$$\begin{aligned} \text{總能量} &= \int_0^T p dt = \int_0^T \frac{wQH}{75} \\ &\times 0.736 \text{ kw / 潮汐} \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

在一年 365 天中約有 705 次完整的潮汐現象，故一年內的總出力亦可估得，式中水頭 (H) 為時間的函數，故 $\int_0^T H dt$ 需用圖解法或其他統計方式獲得之。

一般潮汐除每日週期外，尚有半月週期，亦即所謂半月潮，其中一週期屬於大滿及一週期屬小滿。兩種潮間的潮差亦有顯著的差異。以拉蘭斯廠為例，大潮週 (Spring-tide week) 的潮差為 9—12 公尺。但小潮週 (Neap-tide week) 則變小為 5—9 公尺。圖 8 示拉蘭斯廠實際的單效應與雙效應循環操作實績。

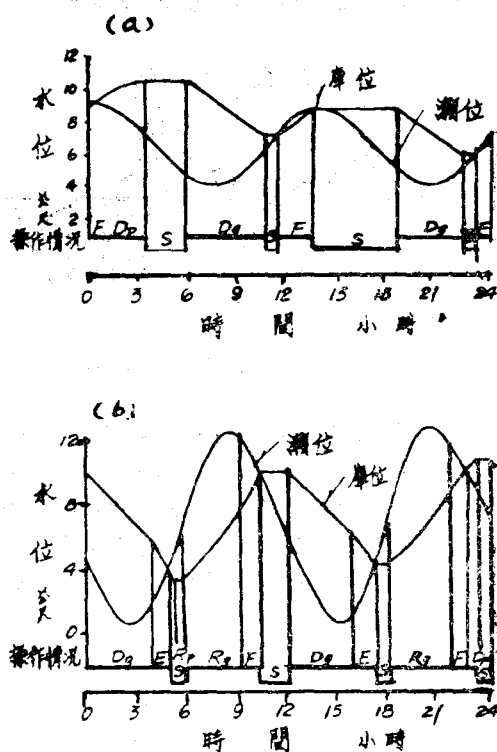


圖 8. 蘭斯潮力電廠發電計畫

大潮週與小潮週電廠每天的能量出力差異相當大，拉蘭斯廠的典型例為大潮時其出力為每天 2940 Mwh，而小潮時僅為 738 Mwh，相差達 4 倍。

假定潮庫的表面積為常數時，每一潮汐過程的潛能 (potential energy) 將與潮差的平方成正比。因此特殊大潮 (exceptional spring tide) 之潛能將為特殊小潮之 36 倍；而平均大潮之潛能將比平均低潮大約 4 倍。因此在衡量某一地區的可開發量，或比較不同地區的開發優先次序時，常有「單位高度」潮或「潮差常數 100」的比較尺寸。「單位高度」稍高於平均大潮潮差。平均大潮潮差的潮差常數為 95。當估計能量產量時不需將全年之潮汐過程一一積算，一般初估時可用平均潮差為準計算之 (平均潮 (mean tide) 的潮差常數約為 70)。平均潮的潛能僅為潮差常數 100 潮的一半，但此種估計方式可平衡大、小潮間潮力出力的平衡。利用此種方式初估可開發能量的多寡時，可用：

$$E = \frac{1}{2} \eta wAR \dots\dots\dots (5)$$

計算之。

式中 E = 一潮汐過程的總能量，以 kw 計； w = 水的單位重量，海水一般以 1025kg/m^3 計； A = 潮庫的表面積，以平方公尺計； R = 潮差，以公尺計； η = 效率，以 20 至 30 % 計。

另一種估計方式為採用下列半經驗公式，即電力可用：

$$P = 311 AR^3 \dots\dots\dots (6)$$

式中 P 為電力容量，以 kw 計。

經過潮庫的最大流量則可用：

$$Q_{\max} = 57 AR \dots\dots\dots (7)$$

計算之。假定出力為 30 %，由上述公式可獲得每年能量出力的估計公式為：

$$E = 5.9 \times 10^5 AR^3 \dots\dots\dots (8)$$

上述公式可供潮力電廠發電量初步估計之用。

雖然利用上述初估法可衡量一地區的潮力開發量，但仍以能夠獲得至少一年的潮位記錄為佳。潮力發電雖然有上述變動性，但其變化週期早為我所掌握，其預測及預報的準確性極高，在施工、在運轉上均較一般水力電廠為可靠。同時潮力電廠不受乾旱年、潮濕年等氣象因素的影響，因此潮位的變化已成為次要因素，規劃時僅需考慮潛能之多寡、潮庫之大小及潮差之平方及海堤之體積等參數。

七、潮力電廠的施工與維護

(一) 施工技術：

潮力電廠成本昂貴的原因主要是圍堤施工的困難所致。以法國拉蘭斯廠為例，隔離電廠及圍堤基礎所需之臨時施工圍堤 (Coffer Dam) 的建造費，佔總成本的約 29 %。近年來各界均努力從事於降低成本施工方法的開發研究。在蘇聯 Kislaya Guba 電廠的上結構部份則在海岸上建造完成後，再遷移到廠址。其基礎工程則在水中施工，上結構則利用鑄錠聯結於基礎上，利用此法時可節省成本高昂的臨時施工排水，建造成本可大幅降低，此種浮漂沉箱法亦被其他潮力電廠採用。

(二) 混凝土品質與侵蝕控制

潮力電廠之異於慣用水力電廠主要在潮力廠在海洋環境中操作。致各種結構物如閘道、閘門、水輪機等的腐蝕性極高。同時混凝土亦需耐蝕、且需耐溫、耐濕、耐溫變、耐乾、耐旱、耐波等。因此混凝土的砂礫骨材，水泥等均需為高級品。侵蝕現象可用防蝕合金為表層，或塗以防腐蝕油漆，或採

用電鍍保護等方式減輕之。雖然近來採用碳鋼、合金鋼、錳青銅、鎳—鋁青銅耐腐材料，但不銹鋼仍為最佳的耐腐蝕材料。拉蘭斯計畫中，卡氏 (Kaplan) 輪軸、輪片 (24 部中 12 部) 導版及外殼所採用的不銹鋼為 17 % 鉻、4 % 鎳、1.5 % 銅及 0.1 % 碳所組成。另一種材料為鎳—鋁青銅，其組成為鋁 9 %，鎳 5 %、鐵 4 %、錳 1 % 而其餘為銅，此材料用於其他 12 部水輪機的輪片。

防腐表層可採用油漆、金屬表層、鍍鋅、陰極化瀝青、橡皮層、玻璃物質及無機表層等。拉蘭斯計畫中被腐蝕部份則採用塑膠漆保護之。

其他的保護措施有陰極化，在拉蘭斯計畫中，陰極化係以每平方公尺 100 毫安培 (milliamper) 的強度為之，其陰極係欲作為保護層的金屬，並連接於直流外電源，陽極則遍佈於被保護體。潮力電廠結構物所用的混凝土需為高級水泥，適當的水灰比，充分的混和與良質淡水所鑄成。以期有良好的加工性 (workability)、經濟性強度、耐久性及不透水性。水泥需控制鋁鹽的含量，所用骨材需為不與海水起變化者。鋼筋需覆以低透水性混凝土。施工需迅速，混凝土強度並需能抗寒所致拉力，根據 Kislogubsk 廠 (蘇聯) 的經驗，深層的最低水溫達 -1°C ，而表層的水溫則曾最低低到 -35°C ，其所採用混凝土為含有抗硫水泥的高級品，結構物的水面變動部份則蓋以一層 5 公分厚的泡膜 Epoxy 並以玻璃纖維補強，以充作熱水絕緣之用。機件與海水接觸部份的保護與混凝土耐腐蝕及防止海生物附著等則利用乙炔基氣 (chloro vinyl) 表層化及陰極化保護等方法。

八、電力出力的調整

由於潮汐現象的起伏與電力市場的時間變化不一致，且潮汐有每日遲緩現象，故潮力電廠的出力需經過調整。一般其調整法有：

(一) 組合兩個或多個不同潮相 (tidal phase) 的潮力電廠。

(二) 採用二個互相相連而與海溝通的潮庫，一作高庫，另一為低庫。

(三) 潮力電廠補以抽蓄計畫。

(四) 與水力電廠配合。

(五) 採用補助火力電廠。

(六) 普通潮力電廠與抽蓄潮力電廠之組合。

當二個或多個潮力電廠組合時其出力將較為規

則化，且發電時間亦可延長。但大潮及小潮時的出力差將仍舊無法調整；同時在短距離內尚無法尋獲潮相有顯著差異的地址。

雙庫橫貫相連系統 (Double-basin transconnected system) 可產生連續的電力，兼具單庫及雙庫互相相連系統的優點，因為橫貫相連系統的操作綜合單庫發電及雙庫發電的電力於單一系統；亦即不管水流系由高庫流向海洋，或由海洋流向低庫，只要其流動如單庫系統，流經水輪機則可發電；同時水流如雙庫系統，只要水流由高庫經水輪機流向低庫，則亦可發電，雙者綜合則可延長發電時間，並穩定出力。此種系統亦可利用夜間休閒時間的電力，供作抽水之用以降低或提高潮庫水位，以供晝間從事發電工作。除此之外此系統亦可利用外來電源。本系統較其他各種慣用方案需有更多的閘道。但就出力而言，增加閘道較增加發電系統為低廉。圖 8—a~8—d 示本系統在各種不同潮汐階段的操作情況。本橫貫聯結系統的優點為：發電機組較少，簡單而固定的輪片 (Blade) 單向機組，連續發電，較大尖峯電力容量，自產抽水能量及施工較易等。

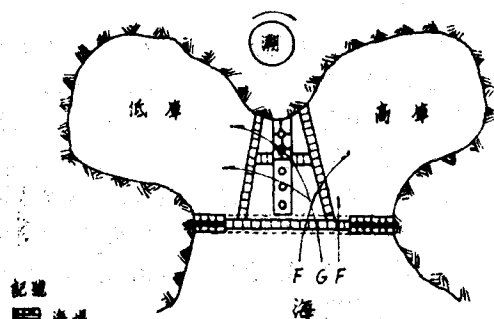


圖 9 (a). 雙庫橫貫系統

記號
 海平面
 發電機
 閘道
 抽水機
 放水
 蓄水

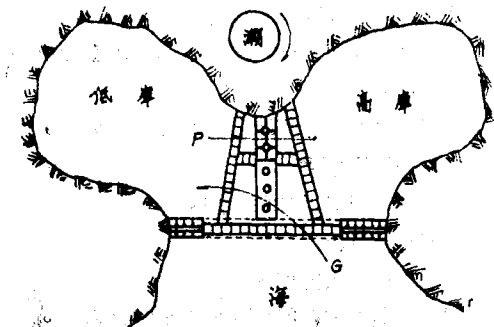


圖 9 (b). 雙庫橫貫系統

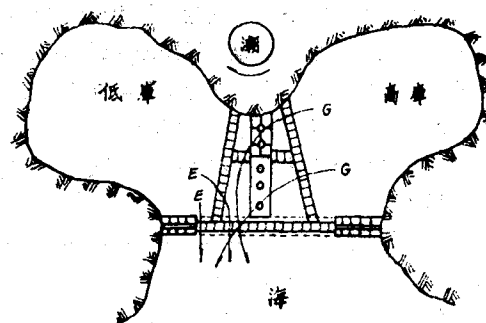


圖 9 (c). 雙庫橫貫系統

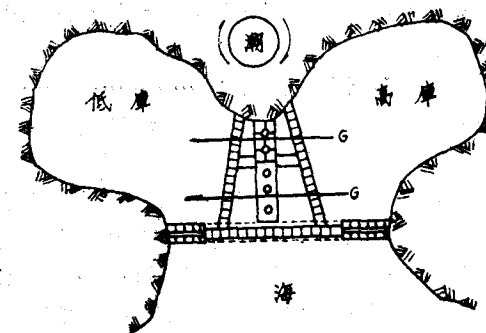


圖 9 (d). 雙庫橫貫系統

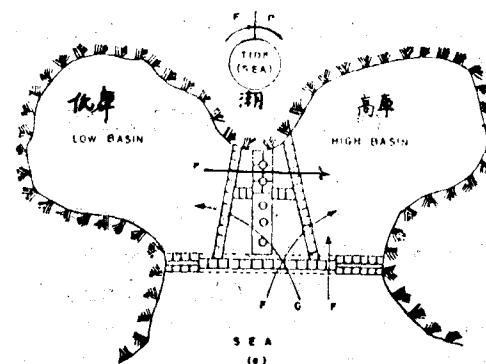


圖 9 (e). 雙庫橫貫系統

本系統的另一特點為潮力電力可與抽蓄系統相聯利用剩餘或休閒時間從低水位水庫抽水到高水位水庫的能量變換，將其剩餘能量吸收於負荷系統中。但根據實際運轉紀錄，抽蓄調整後的潮力電力損失將高達 20%，由於電力損失較大，且抽蓄調整措施的總成本亦相當昂貴，故可能流於不經濟，但在特殊情況下，亦可獲得相當的成效。抽水可加速高潮時的蓄水或低潮時的空庫，在較小水位差抽蓄的水量，可以在較大的水頭下發電，因此即使電力損失大，所獲電力將大於抽水電力之 2~3 倍。

潮力發電亦可與一般慣用水力系統相連，並由

水力電廠司每日及 2 週性潮不穩定性的調節。潮力電廠亦可減輕火力電廠網的負荷，當有足夠的潮差可供發電時，潮力發電可取代油料的消耗，同時亦可減少火力機組的磨損與消耗。

雖然上述調整理論上可相對助長電力的穩定性，但實際操作經驗顯示迄目前為止，因限於天然及機械條件，在尖峯用電時，仍無法保證可靠的電力，有待進一步的改善。

拉蘭斯 (La Rance) 潮力電廠利用各種不同的方式調整它的電力。在低潮時期因水頭較低採用退潮單向發電，惟經常輔以直接抽水，以加大水頭。抽水亦可將潮水庫位降低至海平面以下，以增加逆向發電時的水頭。在平均潮及大潮時，採用雙循環(向)操作，在該情況下發電相當穩定且連續。

逆向發電改善出力情況並降低最大潮庫水位。圖 8 (a)及(b)示此二種不同操作方式。但逆向發電並不常用。拉蘭斯廠運用之概況如下：

直接發電 (Dg)	56 %
逆向發電 (Rg)	11.7%
直接抽水 (Dp)	14.7%
逆向抽水 (Rp)	1.4%
溢流 (直接及逆向)	16.2%

上述百分比係由相當於每月平均操作時間為 500 小時 (或每年 6,000 小時) 的發電資料統計而得。

九、潮力電廠的經濟可行性

潮力電廠每度電的單價受潮庫規模的大小、天然條件的良惡及機組的大小而有懸殊的變化。例如以下節所述金門慈湖的潮力電廠而言，因潮庫為現成，如不計土木工程部份的成本，僅計電機部門的成本時，22 部 410 kw、17 秒立方公尺、3 公尺水頭的總成本約為 59.84×10^3 法幣 ($\div 13.9 \times 10^3$ 美金或 506×10^3 新臺幣) 如壽命以 30 年計，利息以 9% 計，年償還係數為 0.0887，或年償還金為 5,309,600 法幣。年運轉及維護費以成本的 3% 計算，計需 1,795,200 法幣，故年計成本為 7,104,800 法幣，因年發電量為 22.15×10^3 度，故折合每度電為 0.32 法幣或 2.75 新臺幣。

一般而言，潮力電廠的工程費與一般水力廠相似，以土木工程佔大宗，上述規模的潮力電廠如包括土木工程或在臺灣地區建造時，每度電的單價將介乎 0.7~1.0 法幣或 0.16~0.23 美金 (5.94~8.46

新臺幣) 之間。此較 1980 年火力電廠的單價標準 0.5 法幣稍貴，故在臺灣地區如建設潮力電廠時，在現階段可能尚不合格。

一般水力電廠的經濟效益均以同一規模的火力或其它替代計畫的成本比較之。潮力電廠的經濟評估亦同，由於潮力發電在自然條件發電時數及穩定性上均較一般水力、火力甚或核能電廠不利，故在油價低廉時期，根本無法與其他電廠抗衡。但自從能源危機發生後，自產能源或邊際能源的開發也成為非產油國家脫離困境，能源多元化爭取的目標。能源多元化後，能源的運用需有一套最適運用計畫。尤以採用潮力發電時由於其影響變數甚多，故更需一套有效而經濟的最適運用計畫 (Optimization Programme)，潮力發電所產生能量的價值，可能由 0 變到某一限制時間內之最大。一般而言，潮力電廠的裝置容量係取決於經濟上的考慮，而非流量的可獲性。

由於潮力發電受各種不同之不利條件的限制，在多元性電力系統中，其價值一般僅能以其所能發生的最小可靠尖峯電力，視之為備用火力廠的替代計畫衡量。拉蘭斯廠在系統中僅提供總發電量中的 20% 納入電力系統中作為尖峯電力。儘管如此，潮力發電的貢獻在於油料的節省。以拉蘭斯為例，其最大與最小出力的比是 4 : 1，因此潮力發電可謂係在缺乏能量的系統中最為有效，而非在缺乏電力的系統中有效。

十、有望的潮力電廠廠址

當今世界上已有 50 餘所有望的潮力電廠廠址被發掘出來，近年來能源危機後各國競相研究低水頭水輪機，幾項不利條件已陸續被克服，再者施工技術的改進，亦助長新廠址的不斷發現。

已有的二個電廠，一為較大型的拉蘭斯 (La Rance) 電廠，另一為較小型的 Kislogubsk 電廠均已為成功的運用史。根據法國國立高級科技學院 (Nationale Supérieure de Techniques Avancées) 之分類，世界上有望的潮力電廠可分為二級：其中以加拿大的 Fundy, Shepody bay, Minas basin, Cumberland basin, 阿拉斯加灣 (Gulf of Alaska) 英國的 Solway Firth, Bristol Channel, Severn Creek, 蘇聯的 Lumbouskaya, Mezensk, Tugursk, Penzhinsk 等，美國的 Passamaquoddy bay, 阿根廷的 San Jose Gulf, 法國

Brittanyi 海岸的 L'Aber Vrach, Chausey and Mont st. Michel, 北愛爾蘭的 Carlingford 及 Strang-ford 河口, 及印度的Cambay 灣及 Kutch 灣等為潮差高於 10 公尺以上者。

表 1 示世界上一級潮差發生地點及有希望開發為潮

力電廠廠址的有關資料。

第二級則大潮潮差之超高 5 公尺 (平均潮差超過 3.5 公尺) 者, 其地點包括阿根廷、智利、韓國、澳洲部份海岸、印尼、印度半島西北角, 而臺灣地區亦包括於此第二級的範圍內。

表一 世界一級潮差發生地點及有希望潮力電廠資料

國 家	地 名 或 廠 名	平均大潮 公 尺	平均潮差 公 尺	開 發 現 況
法 國	La Rance	10.96	8.45	1966 年發電, 裝置容量 24 萬瓩 (240 MW)
	Chausey	10.96	8.4	規劃階段, 潛在容量 150 萬瓩
	Granville	11.77	6	
蘇 聯	Kislaya Guba	3.9	1.3	1969 年發電, 裝置容量 400 瓩
	White Sea	7.0	5.65	規劃中, 每年 40×10^9 KWH
英 國	Severn	14.5	9.9	規劃中, 潛在容量 198 萬瓩
	Solway Firth	9.14	6.03	規劃中, 每年 3.2×10^9 KWH
美 國	Passamaquoddy	7.9	5.65	規劃中, 每年 1×10^9 KWH
印 度	Cambay 灣	10.8	8	調查中, 600~700 萬瓩
	Kutch 灣	7.5	4	調查中, 100 萬瓩
加 拿 大	Jordan	最大潮差 15.4		
	Moncton	19.6		
	Fort Chimo	11.7		
韓 國	仁 川	13.2		

十一、臺金地區潮力發電可能性的探討

臺灣地區的電力系統開發歷史已久, 電源可謂已多元化, 對於潮力發電等尚不確定邊際能源的殷切性可能尚不及金門地區迫切; 再加以上述經濟分析的成果知潮力發電的單價尚高於公認的火力電廠單價, 故下就金門地區的潮力發電探討之:

(一) 金門潮力發電的必要性

金門地區於民國 56 年創設金門電力公司, 其後陸續擴建, 現有電廠四座, 裝置容量達一萬瓩, 惟全部為火力電廠, 一則對外來油源的依賴甚大外, 一則近年來該地區的能源消耗急增, 在能源危機聲中, 亟需另研究開發取之不盡、用之不竭的自產能源。金門地區可能的自產能源有風力、海浪力及潮力等, 其中以潮力為最有望的自產能源。其原因

為:

1. 潮汐現象穩定, 潮差 5 公尺, 足夠經濟發電之需。
2. 金門地區缺乏能源甚於電力, 需物盡其用。
3. 有現成濱海水庫, 尚未充份發揮用途, 可改進為發電用潮庫。
4. 有望廠址尚無嚴重的泥沙問題。
5. 對於海洋環境的影響不顯著, 但可促進金門地區的發展。

(二) 金門地區有望電廠廠址及容量的推估

金門地區不乏濱海水庫, 既有水庫十四座中除太湖、擎天水庫等已淡化, 標的確定外, 其他各水庫尚可考慮其他更有利的用途, 各水庫中以慈湖最有望改為潮力發電之用。該水庫完成於民國 59 年

7 月，集水面積 550 公頃，滿水面積 120 公頃，蓄水量 300 萬立方公尺，原擬灌溉農地 70 公頃及海埔地 30 公頃，並兼作養魚之用。完成後控制海潮的水閘迄未裝妥，庫水鹽分尚高，因其灌溉面積有限，且尚有其他水源，故現階段尚可改為其他用途。根據初步觀測其最高潮差為 5.8 公尺，平均潮差為 5.0 公尺。潮庫面積則有 1.2×10^7 平方公尺，以單庫單效應水庫估計，每天可發電 3 小時，假定發電效率為 75 %，則其可能電力及全年的發電量可計算如下：

$$\begin{aligned}\text{潮庫容量 } V &= AH_0 \\ &= 1.20 \times 10^7 \text{ m}^2 \times 2.5 \text{ m} \\ &= 3 \times 10^6 \text{ m}^3 \\ \text{平均流量 } Q &= \frac{V}{t} = \frac{3 \times 10^6 \text{ m}^3}{3 \times 3600 \text{ sec}} \\ &= 277.7 \text{ m}^3/\text{pse} \\ \text{瞬時電力出力 } P &= \eta_0 \frac{wQH}{75} \text{ HP} \\ &= 0.75 \times \frac{1025 \times 277.7 \times 5}{75} \\ &= 14,232.1 \text{ HP} \\ &= 10,474.8 \text{ kw}\end{aligned}$$

在一潮汐過程中的總能量 (kwh/tidal cycle) 則：

$$\begin{aligned}E &= 14,232.1 \times 0.736 \times 3 = 31,424.5 \text{ kwh} \\ \text{每年共有 705 次潮汐循環，故一年的總能量爲：} \\ E &= 31,424.5 \times 705 = 22.15 \times 10^6 \text{ KWH/} \\ &\quad \text{Year}\end{aligned}$$

(三)金門地區潮力發電單價的估算：

爲達成上述發電量，潮力電廠可暫時採用單庫廠，水輪機的設計水頭可選用 3 公尺定水頭（較小水頭現階段仍爲不經濟），現階段符合此水頭的機組爲開槽式佛蘭西斯 (Open Chamber Francis Turbine)。根據法國廠商的出品適合於該條件的機組爲：

水頭…………… 3 公尺

流量…………… 17 秒立方公尺

容量…………… 410 kw

水輪機距水面 1.75 公尺，因平均流量為 280 秒立方公尺，故需 17 部機組，一般安全係數為 1.25，總計需 22 部機組。

根據 1980 年物價標準此種水輪機組的單價約爲每部 2.72×10^5 法幣 (French Francs, F. F.)，22 部共需 59.84×10^5 法幣。假定發電設備的壽命以 30 年計，利息以 9 % 計算時，年計還本係數為 0.0887，故年計還本額為 5,309,600 法幣。年計維護及運轉費用以總成本的 3 % 計算，共需 1,795,200 法幣；故年計成本為 7,104,800 法幣。因年發電量為 22.15×10^6 度 (kwh)，故每度電之單價約為 0.32 法幣 (32 centimes 或 0.075 US\$) 合 2.75 新臺幣。上述估計僅包括發電機組的價格而言，機組係根據耐浸、耐蝕水輪機、發電機、調整機組及變電系統就地交貨價格估計，未包括建堤及閘道等土木工程的成本在內。由於金門地區濱海水庫爲既有，故上述估計最能反映金門地區的實際情況。

按金門電力公司現有電廠四座，其裝置容量為 10,000 瓩，如將慈湖改為潮力電廠時其裝置容量亦可達此標準，且每年的發電量可達 2,200 萬 KWH，除單價可低至每度新臺幣 2.75 元外，將可取代外來油源，節省開支甚大。

另金沙水庫容量有 519,000 立方公尺，估計可裝置 1,810 KW 瓩，年發電量可達 3.83×10^6 KWH/year，又小金門方面，西湖水庫，陵水湖水庫容量分別為 88,000 及 270,000 立方公尺，分別可裝置 307 及 943 KW；年發電量亦分別可達 0.64×10^6 及 1.99×10^6 KWH。

(四)潮力發電在臺灣地區發展的展望。

潮力發電的可行性主要視其單價之高低，例如上述金門地區，潮力電廠的電價，則因水庫已有，故電價已合乎經濟開發標準。在臺灣地區則需另建潮庫，成本尚高。今如將規模類似的各種電費單價比較之，則如表一所示。

表一 臺灣地區各種新建電廠電價（年成本）的比較

發電方式	裝機容量	年負荷率 (%)	油 價 US\$	輸 電 系 統		送 發 電 單 價	
				長度 Km	電度 KV	US\$/KWH	NT\$/KWH
石 油 火 力(1)	4@600 MW	70	22.7	300	500	0.055	2.10
(2)			27.3			0.083	2.34
(3)			31.8			0.070	2.60
內 燃 氣 電 廠(1)	5@1 MW	50	22.7	—	—	0.158	6.01
(2)			27.3	—	—	0.166	6.33
(3)			31.8	—	—	0.175	6.66
水 力 電 廠	1@5 MW	75	—	15	30	0.025	0.95
潮力電廠（臺灣）	22@410 KW	95	—	15	30	0.16~0.23	6.0~8.5
潮力電廠（金門）	22@410 KW	95	—	15	30	0.074	2.75

上述不同發電方式的年成本均係以新建廠為準，由於物價的波動，油價的暴漲，廠商的不一，中日美法幣匯率的變動，及比較規模的不一，實難與實際年成本相互比較。今為概念性的比較，以臺灣電力公司的實績成本為例，則其年成本水力、核能及火力分別為新臺幣 0.29, 0.33 及 0.78 元/度，新建廠的年成本均在實績成本的 3 倍左右。但由上表的比較可知潮力電廠的電價已可與內燃機電廠匹敵。

根據法國及蘇聯等研究潮力電廠實用化的經驗，均以建廠成本的降低及系統上、技術上效率提高為追求的目標。根據法國的研究新建潮力電廠的成本可大幅降低，初估經費可降低至慣用施工法的 1/2，如此則潮力電廠的年成本，亦可降低至水力電廠的低廉標準。臺灣地區潮力電廠的建造成本可望大幅降低的因素可歸納如下：

1. 高速、大規模施工機械可縮短施工時間，降低施工成本；同時減低施工期間的風險。機械施工亦可減少勞力，加速水中施工的速度。

2. 電機組的標準化使電廠可商品化，節省個別製造、組合、試車等複雜過程。

3. 臺灣地區具有高級製船工業與船塢，可轉供潮力電廠製造之用。

4. 新式機電組具有可變速、廣幅度、高效率發電機能。

5. 新式施工方法可減少海中作業。

6. 海洋骨材 (marine aggregates) 及耐蝕材料可大量獲得。

臺灣地區西海岸有不少濱海湖泊或小型海灣可供潮力電廠之用，如東港湖、興達港等均是，惟大部份均另有用途，故在電力需要非緊迫時，潮力電廠的開發可能居於次要地位，惟離島之缺乏電源者，則可能佔極重要的地位。故今後發展的方向，應以離島為起步的重心，吸取先進國家如法國等之經驗，積極提高潮力發電的科技水準，利用我國高級製船技術，從事潮力電廠的合作製造以便發展潮力電廠輸出事業，以期提高自產能源的利用率，更可促進高級科技工業的轉移。

十二、結 論

潮力磨坊之所以被淘汰係因技術落後，而潮力發電在本世紀的東山再起，則歸功於發電技術的改進，耐蝕材料的發明，水輪機服務範圍的擴大及海洋工程建設技術進步之所賜，相信未來工業技術不斷革新，電力系統更加資訊化後，在化石燃料日漸枯竭的將來，將更加促進海潮發電的開發與利用。

參 考 資 料

1. 吳建民；「金門地區潮力發電可能性的探討」 經濟部水資源統一規劃委員會，民國 70 年元月。
2. 吳建民；「臺灣地區黑潮發電可能性的探討」 臺灣水利 29 卷 1 期 民國 70 年 3 月。
3. C. T. Advani; "Micro Tidal Power plants"- Annex 1 to Paper-Innovation In Design of Low Head Small Hydro-Power Plants, Sogreah Consulting Engineers, March 1981.
4. C. T. Advani; "Criteria For Construction of

Hydro-Electric Power Plants on Existing Dams"-Annex 1 to Paper-Technical Innovations in the Methods of Construction of Tidal Power, Plants, Sogreah Consulting Engineers, March 1981.

5. Gray, T. J. and Gashugs, O. K. (Edited), "Tidal Power", Proc. of International Conference on utilization of Tidal Powers", Nova. Scatia, May 24~29, 1970.
6. Richards, B. D, "Tidal Power: Its Development and Utilization", J. Institute of Engineers (London), April 1948.
7. Fentzloff, H. E. "A Fundamental Approach to Tidal Power", WPDC Aug. 1967.
8. Sporn, Philip "The Rance and After" WPDC, Jan., 1967.
9. M. M. Dandekar, K. N. Sharma, "Water Power Engineering", Vikas Publishing House PVT. Ltd, 1979.

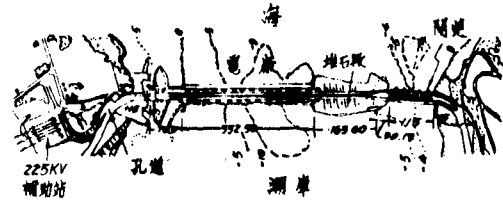
附錄一 拉蘭斯潮力電廠簡介

(一) 前言：

法國的拉蘭斯 (La Rance) 潮力電廠是世界上第一座利用海水發電的，此一 24 萬瓩尖峯潮力電廠是建在拉蘭斯河口。該河原注入介於 St. Malo 及 Dinard 的峽區，潮差變化甚大，為世界之最。其平均大潮差為 10.9 公尺，春分大潮 (equinoctial spring tide) 為 13.5 公尺。發電所用潮水水庫的表面積達 22 平方公里，其有效容量，即標高 0 至 13.5 公尺間或最高至最低潮位間的容量達 184×10^3 立方公尺。根據已有資料知最大大潮流量為 18,000 秒立方公尺，而其相當流速在未建圍堰時為 2~2.5 秒公尺，河口原寬 50 公尺，在距右岸 150 公尺處並有一小島。河床最深處的標高為 -13 公尺，亦即在春分高潮 (equinoctial spring tide) 時的最大水深有 26 公尺。茲將拉蘭斯潮力廠的各部份簡介如下：

(二) 閘道段 (Sluice Section)

圖 1 示拉蘭斯廠主要構造物的佈置。右岸處為控制潮流加速流入或流出水庫的通道。閘道斷面共有 6 個 15 公尺寬的閘孔，現有 15 公尺×10 公尺的固定轉輪閘門 (Fixed wheel Gate)，6 個閘道的通孔面積為 900 平方公尺，在海與庫間的水位



附圖 1. 蘭斯潮力、電廠之佈置

差為 1 公尺時可通過 5,000 秒立方公尺的水流。此種海壩所受的外力與一般壩所受者不一樣，即此種壩上、下游都受到壓力；在潮水升降過程中，兩面將交遞受到水壓。閘道運用的次數一日可能有數次，亦較一般水壩閘道一年數次者恒為多。

(三) 堆石段 (Rock-fill Section)

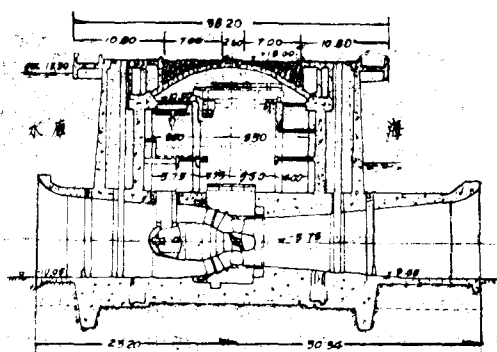
閘道左端接以長 163 公尺的堆石段，緊接堆石段為電廠，堆石段上、下游面的坡度均為 2:1，中央有坡度為 1:55 的混凝土心牆。濾層以大塊岩石構成係供消波之用。

四 電 廠

電廠為長 386 公尺的隧道型構造物。有三個裝配間 (Erection bay)，24 組發電機及一個控制室，均納入電廠機械廳 (machine hall) 中。面臨潮流的兩面牆每隔 13.3 公尺加一道扶牆 (Buttress) 以加強其安全性。發電系統係由 24 部 1 萬瓩燈泡型水輪機 (Bulb turbine)，3 個 380 MVA 變電器將電壓由 3.5 KV 調至 225 KV，3 部調速機每部由 8 組組成，並以 225 KV 浸油電纜連接變壓器與外界輸配站。

燈泡組的正常速率為每分 94 轉，轉開速率 (Run away speed) 為每分 380 轉。轉輪 (Runner) 的直徑為 5.34 公尺，定電屋 (Stator Housing) 直徑為 4.35 公尺，而每組的總長為 13.4 公尺，轉輪由四轉片構成，各片均可由位於機殼 (hub) 的伺服機 (Servometer) 調整偏角至 $42^{\circ}15'$ 。進入轉輪的流量用 24 個伺服機控制的導板控制之。燈泡型外殼用 12 個固定導板 (fixed stay vane) 定位，並輔以 4 根複力拉桿穩定之。

該機組在海向發電時可發出 537 Gwh 的能量，而河向發電時則為 71.5 Gwh ($1\text{GW}=10^3\text{KW}$)，上述總能量 608.5 Gwh 中 64.5 Gwh 則再用於抽水。圖 2 示電廠橫斷面的佈置。



(五) 船 閘 (Lock)

(六) 施工圍堤 (Coffer Dam)

圍堤施工時引導潮流之用，並非主圍堤。

圍堤的施工相當困難且複雜，因此在過程中隨時藉水工模型試驗的協助，以解決困難。其困難可以由混凝土的用量判別之，根據統計，電廠、閘道及船閘的總混凝土方為 350,000 立方公尺，但圍堤耗費 40,000 立方公尺混凝土方，90,000 立方公尺（13,000 噸）板樁及 460,000 立方公尺的砂以填充沉箱等。

海水對於混凝土及機械均有腐蝕作用，因此在規劃之前，曾經在 St. Serran 及 St. Malo 港間先裝設水輪機輪片的模型比較各種不同合金的耐蝕性。結果以高鉻含量及微量銅及鉛青銅的不銹鋼為最耐蝕，同時證實塑膠漆具有良好的防蝕效果。

混凝土亦先在廠址附近設立試驗室，比較各種不同組成試樣的強度，以獲得強度強，收縮小，最大夯實及有效耐蝕性的混凝土。

歡迎會員先生