

電廠溫排水擴散模擬研究

廖 芙 嬉

環海工程顧問股份有限公司執行副總

摘要

本文主在介紹大型火力發電及核能電廠之冷卻循環水系統。台灣四面環海，就其地理地形、人口分布情形，電廠的冷卻系統傾向以溫排水排放至海洋，然一般溫排水水量甚大，有些幾近台灣幾條主要河川之平均流量，故須妥善進行排放設施之規劃，以降低對背景承受水體之影響，且溫排水須符合水污染防治法規之放流水兩項最重要的法規：其放流口溫度不可超過 42°C，且距排放口 500 公尺之表面水溫升不得高於 4°C。

因應 2025 年非核家園政策的時程下，未來能源配比將會是燃煤達 30%、燃氣達 50%、再生能源達 20%。而其中燃煤及燃氣共 80% 火力電廠仍然必須負擔電力基載及中載，全台各大型電廠目前亦在部分準備除役，部分更新擴建的轉型時期，故在電廠進行規劃到建設完成商轉前，均須將溫排水此重要因子仔細評估在內。良好的溫排水設計可以配合電廠規劃，預測較遠期的情況，降低對環境物化環境及生態環境的衝擊，亦可以讓其電廠維持穩定供電，同時又可以節省工程經費、工期，及跨越工程技術。

環海工程顧問股份有限公司成立近 30 年來年來協助台電電廠溫排水規劃及模擬約 20 個計畫，包含最近幾年林口、大林、深澳、興達及通霄等電廠之更新改建計畫，以及台灣最大天然氣裝置容量之大潭電廠新建計畫，累積此領域相當之經驗。溫排水可分為表面排放或潛式排放，排放的方式因應電廠之位置及地理條件有所不同，於規劃階段妥善運用電腦數值模式可以協助預測溫升效應。而溫排水排放時本身具有動能，於計算溫升時分為近域模擬，計算溫排水排放後因自身動量與周遭水體捲增之短時間內稀釋混合效應，以及遠域模擬溫排水長期排放下之熱累積效應。其中近域模擬經過數次水工模型試驗驗證，其結果均與模擬結果相近，可確保模擬之準確性，而遠域模擬因尺度無法於水工試驗室驗證，也較難於海域量測比對，因此模式本身於發展時以被證明其可靠性時，則通常以當地海域流況驗證之。

本文也以通霄電廠更新改建計畫及大潭電廠新建機組計畫為例，說明了溫排水系統規劃考量因素、排放方式、溫升近遠域模擬，以及水工模型試驗比對成果，期使未來電廠運轉順利，政府能源政策與環保兼顧，並確保電力需求無虞，產業永續發展。

一、緣起

因應國內外政經情勢及能源環境的快速變遷與挑戰，並兼顧國際減碳承諾，台灣政府擬定 2025 年非核家園為目標，自 2016 年起已推動新能源政策-啟動能源轉型與電業改革，包括節能、創能、儲能及智慧系統整合等措施，期盼引領自主綠能產業發展。新能源政策具體作為其中一項為「積極多元創能，促進潔淨能源開發」，主要內容為確保低碳及高效率傳統基載發電、降低現有火力電廠汙染排放、全力擴大再生能源發展於 2025 年佔比達 20% 以上、佈局新興能源/氫能燃料電池。而未來能源配比: 燃煤達 30%、燃氣達 50%、再生能源達 20%。然在積極多元創能，促進潔淨能源發展下，仍必須考慮穩定基載，台灣電力未來仍以火力電廠為最大宗。目前核一廠、核二廠、核三廠也依照目標年限分批規劃停止商轉。於此，無論是火力電廠或是核能電廠，也同時因應改建、擴建、或是持續商轉，電廠溫排水(Thermal Discharge)，或統稱為冷卻水循環系統(Cooling Water System)，皆須配合各電廠之未來規劃進行分析、模擬及研究，確保電廠運轉期間，其排放之溫排水對鄰近水體物化環境及生態系統不會造成衝擊。

二、循環水系統(Cooling Water System)與溫排水(Thermal Discharge)

簡介

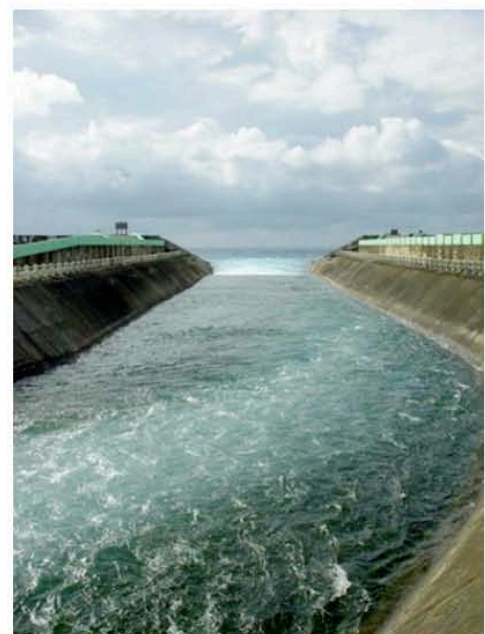
任何火力或核能的發電原理，皆先經由煤、油的燃燒或鈾的分裂過程，產生熱能，將密閉的水蒸發或水蒸汽，然後利用蒸氣推動渦輪機和發電機，而產生電力。但是因為熱效率問題，燃料所產生的熱能無法完全轉換為電力，以致多餘的熱能在渦輪機冷凝器部分必須需氣冷式或水冷式循環系統帶離。在具寬廣內陸國家，常採用氣冷式循環系統，即冷卻塔(cooling tower)方式進行降溫，然其過程中會產生大量水蒸氣，如圖一所示(Bar Watts 核電廠之冷卻塔)。由於冷卻塔量體巨大可能造成環境衝擊，發電過程中產生之大量水蒸氣可能會造成視覺影響，進而將影響交通安全，以台灣地狹人稠的條件並不適合。台灣四面環海，在相關地理條件配合下，幾乎所有的火力、核能電廠均鄰近海側，採水冷式循環系統由大海引進大量海水，經循環後帶出熱能再排放回大海，這就是所謂的溫排水(thermal discharge)，如圖二所示(台灣核二廠佈置圖及溫排水系統)。由此可知，不論核能發電或燃煤、燃油的火力發電均會產生溫排水，三種電廠的不同只是在將水加熱產生蒸汽的過程，僅使用的燃料不同而已。然而大型機組需要大量循環水量，每部機組可達約 20~40 cms，因此電廠整體需求循環水量達約 40~300cms。以目前台中電廠運轉 10 部機組為例，總循環水量約 288cms，大於台灣最大水量河川淡水河之平均流量 180cms，出水口之溫升約 6~8°C，因此排放方式不當將可能造成海域環境及生態之嚴重影響。

台灣大型火力及核能電廠均於民國 60、70 年代規劃建造，當時並無環境影響評估法規，亦無溫排水排放相關法規。放流水標準自民國 76 年發布，至民國 106 年 12 月 27 日修正發布「水污染防治法事業分類及定義」、「放流水標準」強化水質管制，為了避免電廠將通過冷凝器之溫水直接排放至海洋後溫度無法迅速擴散，依水污染防治法規，放流水直接排放於海洋者，其放流口溫度不可超過 42℃，且距排放口 500 公尺之表面水溫昇不得高於 4℃，因此溫排水須妥善規劃以符合法規標準及降低對海域環境影響。



圖一、Cooling Towers of Watts Bar Nuclear Plant near Spring City, Tenn., (國外冷卻塔案例)

圖片來源:網路提供

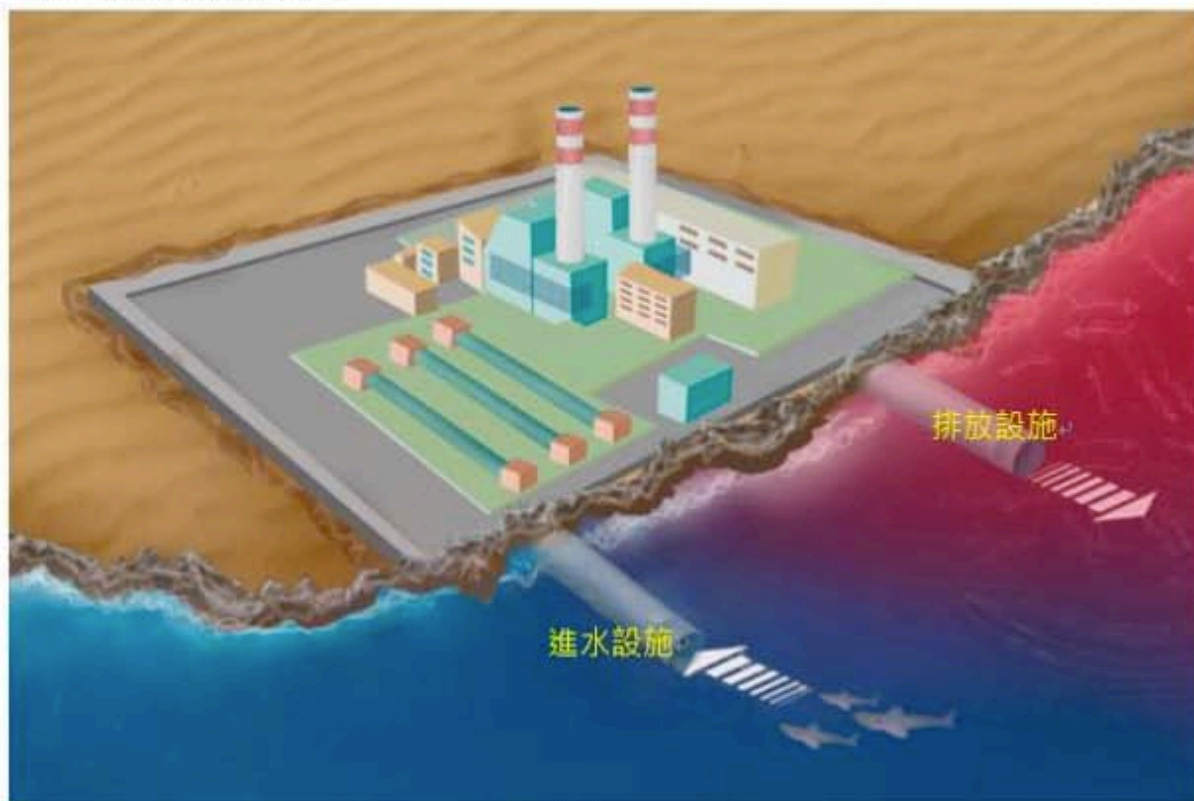


圖二、台灣核二廠電廠佈置圖與溫排水系統

圖片來源:網路提供

三、循環水系統規劃

至於溫排水與其他事業家庭廢水主要的差異是只有溫度造成的效應，而無其他污染物的介入。循環水系統規劃包含進水設施及排放設施，如圖三所示。規劃考量因素及設計方法如下：



圖三、電廠及循環水系統示意圖

圖片來源：網路提供

(一) 循環水進水口結構物規劃考量因素

此項工作考慮因素主要為：

- ◆ 取水量：取水量之決定與機組型式、大小及相關設備有關，經可行性研究計畫提供。
- ◆ 熱迴流影響：溫排水排放後溫度升高之海水汲入進水口會影響發電效率，應儘量控制小於 1°C 。
- ◆ 漂砂所引起之地形變化影響：如需設置進水灣，則將改變海流、漂砂等，進而影響海域地形；當地海域漂砂情形愈嚴重，則影響愈大。
- ◆ 進水設施受波浪衝擊：如未設置進水灣，或進水灣口開口方向及寬度不恰當，則波浪可能進入，造成進水設施損壞。
- ◆ 對環境衝擊：汲水時如進水灣開口處流速過大，則對小型魚類恐產生汲入灣後無法游出；另海域設置結構物對景觀亦有影響。
- ◆ 施工難易度、工程預算。
- ◆ 如可行可規劃多個方案，評估後採行最佳方案。

(二) 循環水進水口結構物進水口設計方法

一般進水口大致分為表面進水口及潛式進水口兩種：

- ◆ 表面取水(近岸取水)：多設有進水灣或於港內取水(設抽水機房)
優點：經費較少、工期較短、易於維護。
缺點：對環境影響較大、受熱迴流影響較大、故較受熱迴流、漂砂及波浪衝擊影響，且因設置進水灣可能對海岸造成衝擊。
- ◆ 潛式管線取水埋設於海底之潛式管線取水方式(離岸取水)
優點：對環境影響小、熱迴流影響亦較小、進水設施不受波浪衝擊。
缺點：經費高、工期長、維護不易；另於海流、漂砂嚴重地區，管線或有淘刷或掩埋之風險。

(三) 循環水出水口結構物規劃考量因素

此項工作考慮因素主要為：

- ◆ 排放量及初始溫升：基本上與取水量之決定相同，經可行性研究計畫提供。
- ◆ 符合水污染防治法中「放流水標準」水溫規定(放流口處水溫低於 42 °C、距排放口 500 公尺處表面溫升低於 4 °C)。
- ◆ 漂砂所引起之地形變化影響：如需設置溫排水導流堤，則將改變海流、漂砂等，進而影響海域地形。
- ◆ 熱迴流影響：排放口與進水口設置時應一併考量，儘量控制小於 1 °C。
- ◆ 對景觀環境衝擊：海域設置結構物對景觀影響。
- ◆ 施工難易度、工程預算。
- ◆ 如可行可規劃多個方案，評估後採行最佳方案。

(四) 循環水出水口結構物進水口設計方法

- ◆ 表面排放(近岸排放)：以導流堤將溫排水導至適當水深、地點進行表面排放(多設有導流堤)方式。
優點：經費較少、工期較短、易於維護。
缺點：排放後擴散效果較差、對環境影響較大、易產生熱迴流。
- ◆ 導流堤尾端封閉開孔潛式排放(近岸排放)：同前項，但於出口處設置封閉結構物，然後於底部開口進行射流潛式排放。
優點：經費及工期較前項增加不多但排放擴散較前者效果顯著許多。
缺點：導流堤對整體環境仍有影響、亦需考量熱迴流。
- ◆ 埋設海底管線潛式排放(離岸排放)：導水之管線埋設海底，至適當水深、地點進行潛式排放。
優點：擴散效果最佳、對環境影響小、熱迴流影響亦較小。
缺點：經費高、工期長、維護不易；另於海流、漂砂嚴重地區，管線或有淘刷或掩埋之風險。

以上進出水口各考量因素常互相關聯，且各電廠地理環境條件不同，故於規劃時必需綜合評估考慮，方能規劃出最適合各電廠之進出水口結構物佈置。

四、 溫排水數值模式說明

基本上，溫排水排放入海域時應具有一定之動能，以避免溫水流團累積於岸邊，進行溫排水模擬時，須考量此動能產生之稀釋混合效應，以及長期排放下於鄰近海域擴散累積現象，而目前所使用之海域水質擴散模式尚未發展出可合併此動能作用，因此模擬時包含以下過程：

(一) 近域混合：

近域混合模擬溫排水流團排放入海域時因自身動能與周遭水體間應力產生捲增作用而造成稀釋混合之效應，所探討的時間與空間尺度大約在數分鐘及數百公尺範圍內。

(二) 遠域擴散：

遠域擴散模擬溫排水長期排放下，於海域累積之溫升。所探討的時間大約在數週到數月之間，距離則介於數公里到數十公里之間。

(三) 綜合說明：

溫排水排放後，因屬於射流(表面排放速度約 0.5~2m/s，潛式可達 2~4m/s 以上)，因此會呈一有動力之溫水流團，愈向前行則會將周遭水體捲增進來，流團因而愈大、速度愈小，因此具有稀釋效應、水溫逐漸降低，至自身動力消失後，則將受海流帶動主導，此時為水體之擴散作用。在溫水流團失去動力前稱之為近域稀釋作用；失去動力後稱為遠域擴散(一般海域污水排放係屬放流，要研究的是長期排放累積影響，故水質模擬僅模擬遠域部分)。

由於法規放流水標準為溫排水排放後距排放口 500 公尺之表面水溫昇不得高於 4°C，此距離包含近域混合稀釋及遠域擴散，故於電廠規劃階段評估溫排水溫升時，係同時進行近域溫升模擬及遠域溫升模擬，以此二結果疊加之綜合溫升作為較保守之估算，以確保未來電廠營運時均能符合放流水標準。以下分別說明近域模式和遠域模式之原理：

(一) 近域模擬

- ◆ 原理：利用溫排水之排放動量產生捲增作用，以及因溫升產生之密度差(浮升射流)達到混合稀釋效果，時間與空間尺度大約在十幾分鐘及數百公尺範圍內。計算流團至 500 公尺處之溫升值。
- ◆ 模式：美國 E.O.Tech 公司所發展之表面排放模式 (PDS) 及潛式排放模式 (Jirka、RBJ)。
- ◆ 基本動力學方程式：質量不減、水平動量通量不減、垂直動量通量不減及溫度差通量不減解出水體稀釋倍率。
- ◆ 驗證方式：可由水工模型試驗驗證。

(二) 遠域模擬

- ◆ 原理：溫排水流團消失動力後，由背景海流(主要為潮流)之擴散作用主導，時間與空間尺度大約在數天及數公里範圍以上。計算溫排水長時間排放下達到動態穩定之背景溫升值。
- ◆ 模式：美國 E. O. Tech 公司改良美國環保署之二維有限元素法模式(WQM 模式)。
- ◆ 水理模式：二維流體力學方程式，以有限元素法求解得速度及水位高程在時間及空間上之分佈。
- ◆ 水質模式：擴散方程式及能量方程式，以有限元素法求解得水質分佈。
- ◆ 驗證方式：因海域廣大，水工模型無法設定流動邊界，故無法由水工模型驗證，一般以實際量測海流驗證流況。

五、 電廠溫排水擴散模擬研究實例

(一)「大潭電廠增建燃氣複循環機組發電計畫」

鄰近本專案區之海域潮差不大，應用表面明渠導水，及至尾端時封口，由潛式孔道排放，如此在排放後之短距離內屬於潛式射流，可增加溫排水之近域混合稀釋效果，稍過一段距離後便浮出水面成為表面熱流之擴散，此種排放效果良好。大潭電廠機組及循環水系統佈置圖如圖四所示。



圖四、大潭電廠機組及循環水系統佈置圖

圖片來源：網路提供(Google Earth)

◆ 循環水進水口規劃(如圖五所示)

- 進水灣：北堤長約 1134m，南堤約 810m，進水口寬度堤頂約 190m，堤趾約 80m；至岸邊時寬度約 400m。
- 進水流速：進水灣口水深約 -8--9m，低潮位時進水流速約 0.31m/s(200cms)，流速為背景海域潮流流速範圍，對漂砂汲入及小型魚類進出並不會造成太大影響



圖五、大潭電廠循環水進出水口規劃圖

◆ 溫排水出水口規劃

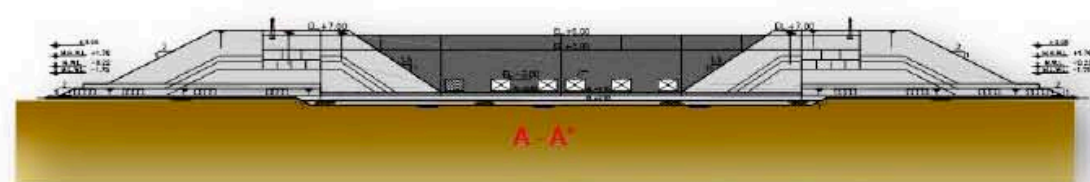
- 溫排水利用導流堤導水至水深-7.0M處排放(長度約 575 公尺)。
- 導流堤尾端封閉佈置 6 個 2.5m×4m 孔道進行潛式排放，潛式孔道高程：底部高程-5.5 公尺、頂部高程-3.0 公尺。
- 滿載時排放流速約 3.33m/s (200cms)



大潭電廠進水灣-表面取水



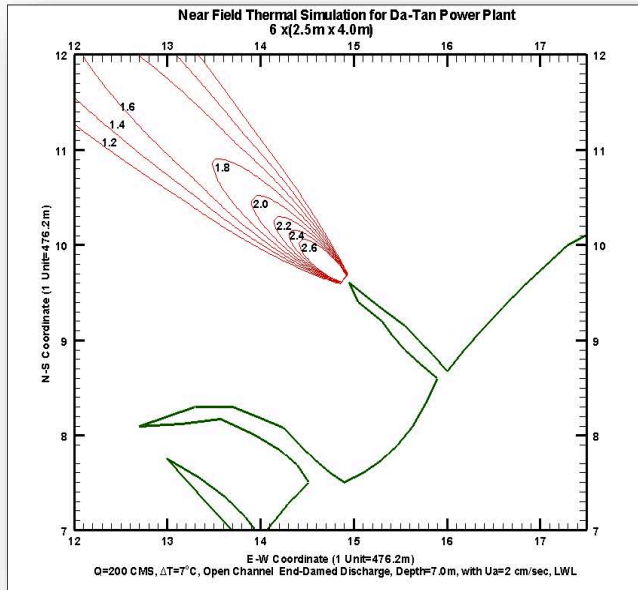
大潭電廠出水口-導流堤導水尾端封閉開口排放



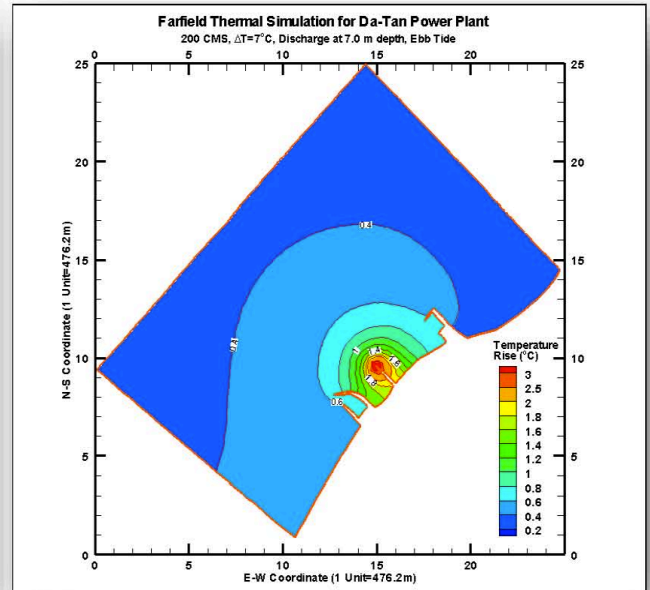
溫排水導流堤出口端設計-「尾端封口」

溫排水溫升模擬結果

潮位	流況 m/sec	距排放口 500M 處溫升 (單位: °C)		
		近域模擬	遠域模擬	綜合溫升
平均 高潮位	0.02	1.75	1.05	2.80
	0.25	1.74	1.05	2.79
	0.50	1.74	1.05	2.79
平均 潮位	0.02	2.00	1.16	3.16
	0.25	1.98	1.16	3.14
	0.50	1.98	1.16	3.14
平均低潮 位	0.02	2.24	1.25	3.49
	0.25	2.24	1.25	3.49
	0.50	2.22	1.25	3.47



大潭電廠近域數值模擬溫升結



大潭電廠遠域數值模擬溫升結

(二) 「通霄電廠更新擴建計畫溫排水擴散研究」

本計畫於規劃循環水進水方案時，考慮因通霄發電廠目前係運用潛式管線進行循環水之取水及排水，而鄰近本計畫區之海域潮差大，海岸坡度甚緩，潮間帶廣，且漂沙量較大，因此若新建表面取水及排水方式，恐需設置規模甚大之進水灣及導流堤，有相當大之困難度；在同時考慮環境條件、經費、工程技術，和比較模擬溫升及為維護現有之景觀及海岸線之穩定性，仍以潛式管線進行循環水系統。綜合考慮之下，較遠處(水深較深)取水較不易汲入漂砂，以遠取近排為規劃方案。通霄電廠機組及循環水系統之地理位置如圖五所示。其循環水取排系統概念設計如圖六所示。

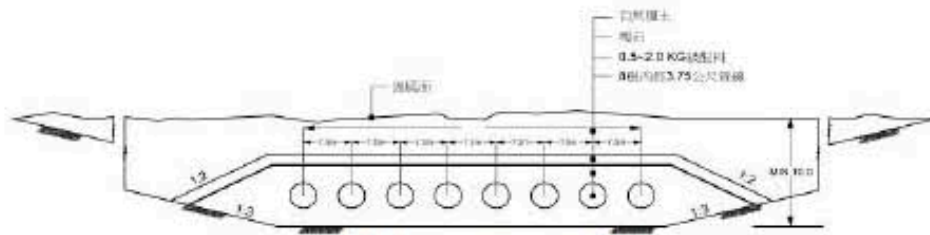


圖六、通霄電廠機組及循環水佈置圖(潛式取排)

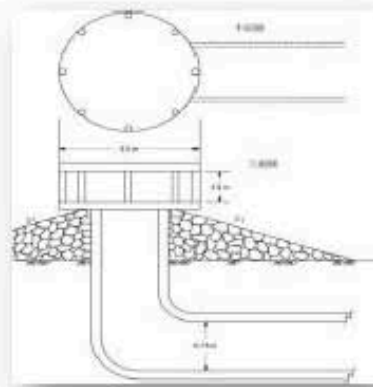
圖片來源：網路提供(Google Earth)

◆ 循環水進出水口規劃：潛式進出水口設計示意圖(如圖七所示)

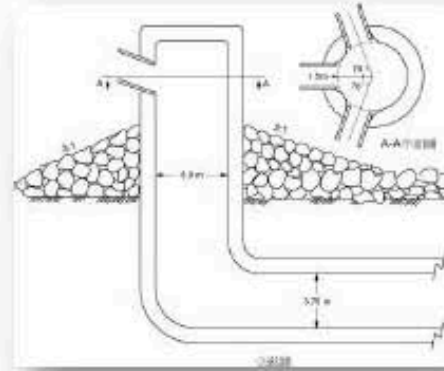
- 進出水流量：88CMS
- 進水管道數：4個
- 排水管道數：4個
- 進排水管線尺寸：內徑3.75公尺
- 進排水管線內流速：約2.00m/sec
- 進水處水深：-12.00公尺
- 排水處水深：-10.00公尺
- 直立進水設施尺寸：內徑9.00公尺，高2.00公尺
- 直立進水設施中心高程：水面下-9公尺
- 進水流速：約0.40m/sec
- 直立排水管尺寸：內徑5.00公尺
- 排水孔數目：3個
- 排水孔尺寸：1.50公尺
- 排水孔中心高程：水面下-8公尺
- 排水孔角度：仰角10~20度
- 排放速度：約4.00m/sec



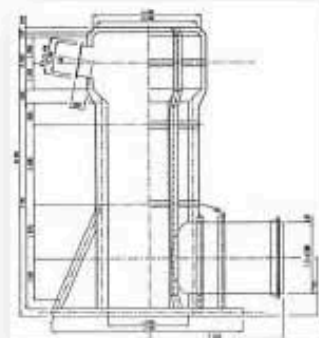
通氣電廠海底管線埋設示意圖



通氣電廠潛式管線進水頭示意圖



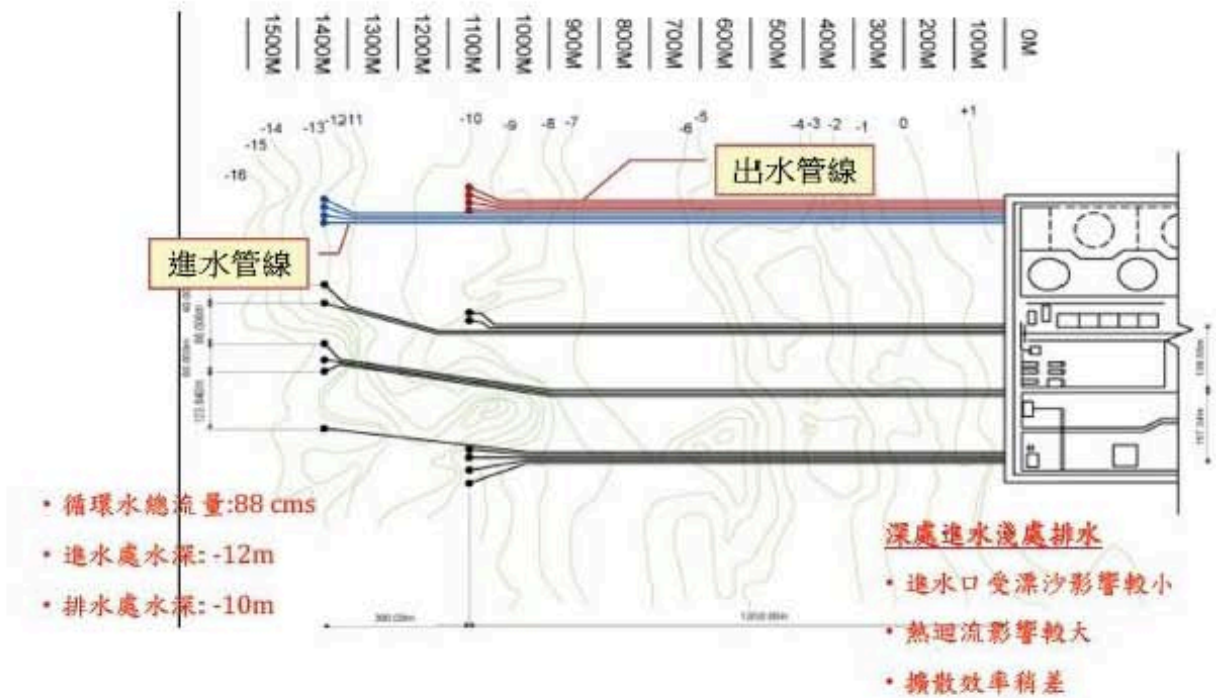
通氣電廠潛式管線排放頭示意圖



潛式出水口概念設計圖及其水工模型示意圖，仰角 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 乃是避免掏刷海床之設計

圖七、通氣電廠循環水進出水口設計示意圖(潛式取排)

◆ 循環水進出水口規劃：潛式取排佈置圖(潛式深取近排)：如圖八所示



圖八、通霄電廠潛式循環水佈置圖

溫排水溫升模擬結果

潮位	背景流況 (cm/sec)	距排放口 500m 處溫升(°C)		
		近域溫升	遠域溫升	綜合溫升
平均 高潮位	2	0.85	0.68	1.53
	25	0.87	0.68	1.55
	50	0.90	0.68	1.58
平均 潮位	2	0.95	0.84	1.79
	25	0.98	0.84	1.82
	50	1.02	0.84	1.86
平均 低潮位	2	1.06	1.00	2.06
	25	1.10	1.00	2.10
	50	1.15	1.00	2.15

六、 水工模型試驗驗證

一般而言，遠域擴散模擬大範圍海域，考慮各項比尺相似率，在水工試驗室中有實務上的困難，然以海域實測則能進行流況驗證；而近域模擬則可在水工實驗室進行驗證。

水工模型試驗是於約數十公尺之水槽中，以約 1/100 至 1/200 之比尺將現地海域地形製作模型，實驗設備規劃包含造流系統、溫水排放系統及溫度量測系統。透過給定之模型相似率、模型校驗，所得之結果分析可作為驗證比對。

於大林、深澳、台中、興達，及通霄等電廠之近域模式曾進行水工模型試驗，成果與數值模擬結果相當接近，證明以模式作為分析方式具有可靠度。

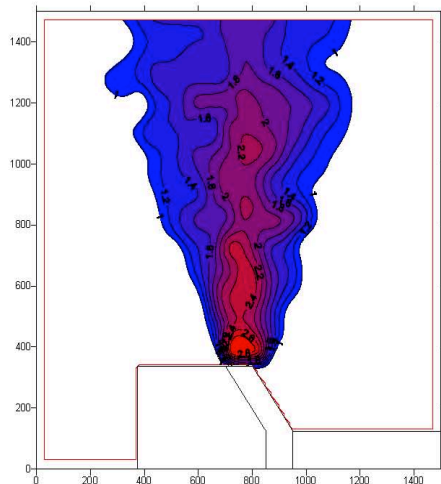


大潭電廠排放口尾端封口之水工模型

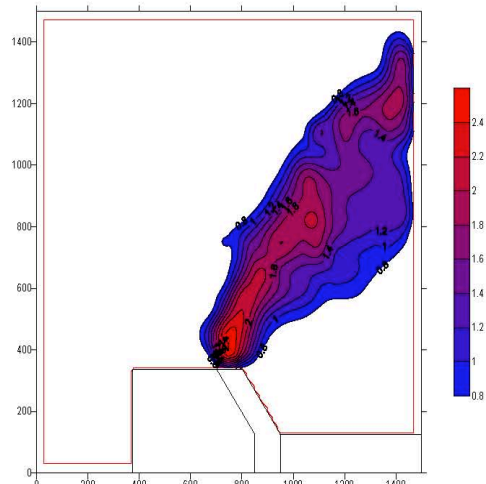


通霄電廠潛式排放出水口之水工模型

一般進行模擬或水工試驗，為涵蓋可能之背景條件，會進行不同背景海流及潮位情形。以潮位來說，一般以平均潮位、平均高潮位、平均低潮位進行；流況則以 0、0.25 及 0.5m/s，共九個情境。以通霄電廠水工試驗為例，下兩圖表示其中兩情境之模型試驗結果。（背景流速 0.02cms，平均低潮位；背景流速 0.5m/s，平均高潮位）



通霄電廠水工模型試驗結果
背景流速 0.02m/s，平均高潮位



通霄電廠水工模型試驗結果
背景流速 0.5m/s，平均高潮位

以通霄電廠水工模型試驗為例，其結果與數值模擬結果比對如下表：

	背景流速 (m/sec)	1.模擬結果 (°C)	2.實驗結 果(°C)	二者差異 (1項-2項)/1項
平均 高潮位	0.02	0.85	0.82	3.5%
	0.25	0.87	0.85	2.3%
	0.50	0.90	0.83	7.8%
平均 潮位	0.02	0.95	0.91	4.2%
	0.25	0.98	0.92	6.1%
	0.50	1.02	1.00	2.0%
平均 低潮位	0.02	1.06	1.05	0.9%
	0.25	1.10	1.05	4.5%
	0.50	1.15	1.10	4.3%

如表所示各項結果中水工模型試驗與電腦模擬結果差異極微，約在 0.9%~7.8%，均在合理範圍內。然水工模型試驗結果均較電腦數值模擬結果稍高，此現象說明了電腦數值模擬之分析在計算時，有許多參數採較保守之假設，亦為合理之結果，並進一步確保數值模擬之可靠度。

七、 結論

循環水系統為大型火力及核能電廠規劃時重要的一項設施，且其產生之溫排水量較大，與一般放流水不同，因此須運用近域混合模擬溫排水流團排放入海域時因自身動能與周遭水體間應力產生捲增作用而造成稀釋混合之效應，及遠域模式模擬溫排水流團消失動力後，由背景海流(主要為潮流)之擴散作用主導，計算溫排水長時間排放下達到動態穩定之背景溫升值。環海公司近年來配合政府能源政策，協助台電公司包含林口、大林、深澳、興達及通霄等電廠之更新改建計畫，以及大潭電廠新建計畫，本文中以通霄電廠更新改建計畫及大潭電廠新建機組計畫為例，說明了溫排水系統規劃考量因素，須以各電廠現地不同之地理環境條件分別就個案進行溫排水排放方式進行規劃，並以美國 E. O. Tech 公司發展之溫升近遠域模式進行未來溫排水排放溫升模擬分析預測，以使運轉後達到相關法規

標準。前述5項計畫進行過水工模型試驗與模擬結過比對，二者結果相當接近，以通霄電廠為例，差異在0.9%~7.8%，此準確度也確保各個電廠未來商轉後，在各項不同環境條件下溫升均能符合放流水標準。在準確的模擬下，前述電廠包含更新改建或新建計畫均獲得環評通過。在2025非核家園的能源政策下，未來仍有電廠須更新改建及新建計畫，而近年來環保意識日益升高，更嚴格要求在空氣及海域環境及生態的條件，本文說明了溫排水的特性及處理、評估，希望未來能以此適當工具配合協助當前的環境影響評估機制，期使電廠未來得以順利運轉，政策及環保兼顧，努力為台灣供電需求穩定貢獻己力，並使產業根留台灣、永續發展。

參考文獻

1. Jirka, G.H Adams, E.E., and Stolzenbach, K.D., 1981, "Buoyant Surface Jets," J. Hyd. Eng., ASCE, Vol. 107.
2. Koh, R.C.Y., 1988, "Nearshore Heat Buildup due to Coastal Power Plants," Paper presented at the Workshop held in Taipei, R.O.C. in April 1988
3. Koh, R.C.Y. and Fan, L.N., 1970, "Mathematical Models for the Prediction of Temperature Distributions Resulting from the Discharge of Heated Water into Large Bodies of Water," Environmental Protection Agency Report 16130 DWO 10/70, 219 pp. (Also Tetra Tech, Inc. Report TC-170)
4. Ng, K.Y. 1990 "Thermal Plumes from Staged Multiport Diffusers in a Uniform Quiescent Environment, "W. M. Keck Laboratory of Hydraulic and Water Resources, Caltech, Report No. KH-R-51, 263 pp.
5. Katsuo Oikawa, Chaturong Yongsiri, Kazuo Takeda, and Takayoshi Harimoto, 2003, "Seawater Flue Gas Desulfurization: Its Technical Implications and Performance Results "Environmental Progress (Vol. 22. No.1)
6. 工業技術研究院，1992，「海洋放流管概念規劃」。
7. 通霄發電廠更新擴建計畫溫排水擴散研究，2007，台灣電力公司。
8. 大潭電廠增建燃氣複巡完機組發電計畫溫排水擴散模擬研究，2012，台灣電力公司。
9. 中華民國行政院環境保護署全球資訊網。
10. 台灣環境資訊協會-環境資訊中心。

投稿 107.03.23
校稿 107.03.30
定稿 107.04.02