

電力工程技術之回顧與展望

趙芳成*

摘要

中興工程顧問在水力發電及核能、火力發電工程，不論在調查、規劃、設計及施工監造上，均能務實從工作中體驗或開發了許多新技術和工法，並將所吸取之工程經驗及技術再予回饋，因而發電工程技術有長足之進步、成長與精進。本文旨在說明 40 年來所承辦較具代表性水力及核能、火力發電工程等及其所獲工程經驗及技術，作為 40 年來之電力工程技術發展之回顧與展望。

關鍵字：電力工程、水力發電工程、核能火力發電工程

一、前言

中興工程顧問社於民國 59 年成立及至民國 82 年轉投資成立中興工程顧問公司以來，電力工程技術服務，即為中興工程顧問之核心業務之一，迄今已承辦了三百多件水力、核能及火力發電工程技術服務案件。其中以水力發電工程之設計技術最為突出，並將此技術輸出至國外，如菲律賓、印尼、多明尼加及宏都拉斯等。此外，輸電、變電及配電工程之相關技術因係配合發電工程設計業務需要，而亦有相當發展。隨著社經環境之需要，也曾參與壓縮空氣蓄能發電及海洋溫差發電等新技術之研發，惟其技術本身之發展，尚未達到商業化之境界殊為可惜，但會繼續關注並參與研發。至於垃圾焚化發電及汽電共生，亦獲相當多設計經驗及技術，近年更積極涉入再生能源之離岸風力發電領域並逐漸建立技術。

二、水力發電工程技術

(一) 工程經驗

中興工程顧問 40 年來已承辦水力發電工程

之技術服務共計約 183 個計畫，包括國內 175 個計畫及國外 8 個計畫。其中較具代表性之水力發電工程依可行性研究及設計分列於表 1 至表 3，大致可反映中興工程顧問擁有不同類型水力發電工程之開發及其調查之經驗，與可行性研究、設計及施工階段所需之工程技術。

(二) 工程技術

1. 工程項目及技術

水力發電工程係於河川築壩引水至電廠發電，發電尾水再排回河川。工程所需興建之主要土建結構物及機電設備包含下列項目：(1) 土建結構物：水庫、壩及進水口、頭水路（隧道或明渠）、沉砂池、平壓塔或前池、壓力鋼管路、電廠（地上或地下）及變壓器室、尾水路及尾水出口及開關場；控制大樓（室）及修理工場；(2) 水工機械：閘閥及壓力鋼管，以及(3) 電廠機電相關設備：水輪機及發電機與輔機及雜項機電設備。

因此，水力發電工程興建所需工程技術大致上可歸納為四大類：(1) 一般工程技術（表 4）；(2) 水力發電工程核心技術（表 5）；(3) 水工機械設備技術（表 6）；及(4) 電廠機電設備技術（表 6）。

* 中興工程顧問公司顧問

表 1 水力發電工程可行性研究計畫

編號	工程名稱	工程概要		壩		電廠		裝置容量 (MW)	服務期間
				型式	壩高 (公尺)	型式	尺寸(公尺) (寬 x 高 x 長)		
1.	多明尼加水力發電工程之可行性研究	本計畫興建調整池壩、明渠水路、前池、壓力鋼管路及電廠	La Diferencia Project	混凝土重力壩	24	地上式	9.0x19.0x23.5	2@5.5	70年9月~72年9月 (含基本設計)
			Arroyo Gallo Project		12.7	地上式	9.0x19.0x23.5		
2.	烏山頭發電研究	本計畫擬於送水管增設計畫，利用落差 24 公尺及放水閘調節放水 68CMS，設電廠發電。		(烏山頭水庫)	56.4	半地下式	27.6x30x29.5	2@4=8	73年8月~76年7月
3.	濁水溪上游支流引水發電可行性研究	本計畫原係以開發濁水溪集集上游郡大、巒大、丹大、卡社及栗栖溪等五支流水力資源為主，並為能充分利用水源預計引入日月潭水庫集中調配。由於投資龐大且對環境衝擊較大，後來調整為僅開發部分支流引水。本計畫擬於栗栖溪建壩引水 9 秒立方公尺，並於武界調整池左岸新設武界進水口，設計取水量 41.6 秒立方公尺流經新建武界引水隧道後建過河橋橫跨濁水溪再引水至日月潭以替代既有武界引水隧道之功能，而確保日月潭之水源。新武界引水隧道之設計通水量擴增為 45.6 秒立方公尺，引水隧道總長約 15 公里。本計畫完成後，年平均引水量 8.32 億立方公尺，增加日月潭發電系統淨尖峰能力 6,900KW，年發電量約 7,615 萬度。		混凝土重力壩	21	-	-	-	79年2月~82年5月
4.	大甲溪發電廠青山分廠復建計畫可行性研究	青山分廠位於大甲溪谷關壩上游，因民國 93 年 7 月 2 日敏督利颱風及 8 月 26 日艾利颱風陸續來襲，河床嚴重淤積，致地下廠房及變壓器室淹水，導致嚴重損害。本計畫擬將地下廠房整建；移設開關場為地下式；既有尾水隧道向下游延長 2,093 公尺至谷關水庫上游左岸；新建廠區對外聯絡通道約 5,620 公尺。		(青山壩)	85	地下式	17.5x36x89.5	4@92=368	94年5月~97年2月
5.	宏都拉斯 Patuca-3 水力發電計畫可行性研究	本計畫擬於宏都拉斯首都東方約 180 公里之 Patuca 河興建大壩，並於大壩右岸下游興建電廠。廠內裝設豎軸卡普蘭式水輪發電機二部。依前期之研究，本計畫水庫之集水面積達 12,330 平方公里，水庫有效容量約 5.8 億立方公尺。		混凝土重力壩	54.5	地上式	27.9x52.8x57.9	2@52=104	96年11月~98年8月 (含基本設計)

表 2-A 國內水力發電工程設計

編號	工程名稱	工程概要	壩		電廠型式	尺寸(公尺) (寬 x 高 x 長)	總裝置 容量 (MW)	服務範圍			服務 期間
			型式	壩高 (公尺)				基本 設計	詳細 設計	施工 監造	
辦理完成											
1.	翡翠電廠(翡翠水庫工程)	本工程位於新店溪支流北勢溪，利用翡翠水庫之水位落差及公共給水之放水流量新增設水力電廠以提高水庫工程效益。發電進水口位於大壩右側，分設三層取水口以備引用較佳水質之庫水，興建內徑 4.8 公尺約 264 公尺壓力鋼管至位於副壩下游約 30 公尺之發電廠發電。	雙向彎曲變厚度混凝土拱壩(翡翠大壩)	122.5	半地下式	33x47.6x35	70	✓	✓	✓	70年7月 ~75年6月
2.	新天輪水力發電工程	本工程位於大甲溪中游，利用既有天輪壩攔蓄谷關分廠尾水及溪水發電，興建一條內徑 5 公尺約 10.57 公里長頭水隧道及地下廠房。	(天輪壩)	54.0	地下式	19.8x40.3x 50.5	105.5	✓	✓	✓	76年8月 ~85年9月
3.	烏山頭水力發電計畫	本工程位於台南縣官田鄉，利用嘉南農田水利會烏山頭水庫新設送水路興建之小水力電廠。	(烏山頭水庫)	56.4	半地下式	27.6x30x 29.5	8.5	✓	-	-	84年9月 ~86年10月
4.	水里電廠(明潭抽蓄水力發電工程)	本工程位於南投縣水里鄉，係利用明潭抽蓄發電工程下池壩之水位落差及水里溪天然流量餘水所附增小水力電廠。	混凝土重力壩(水里壩)(下池)	61.5	地上式	31x16x29	12.89	✓	✓	-	76年3月 ~87年6月
5.	馬鞍水力發電工程	本工程位於大甲溪中游，興建馬鞍壩攔蓄新天輪電廠尾水及溪水，經一條內徑 6.4 公尺約 7.5 公里長頭水隧道至電廠發電。本工程成功引進魚道設計技術。	混凝土重力壩	41.0	半地下式	20.6x50.7x 59	2@66.75 =133.50	✓	✓	✓	80年7月 ~89年4月
6.	鯉魚潭水力發電工程	本工程位於大安溪上游，興建士林壩攔蓄溪水，經一條內徑 3.5 公尺約 6.5 公里長頭水隧道至電廠，發電尾水越域引入景山溪至鯉魚潭水庫。本工程為台灣使用 TBM 工法開挖隧道之第一個成功案例。	混凝土重力壩	21.0	地下式	14x36.9x 49.2	2@40.75 =81.5	✓	✓	✓	81年2月 ~91年9月
7.	新武界及栗栖水道引水工程	本工程於濁水溪武界調整池左岸與其支流栗栖溪上游右岸，分別興建引水隧道，合流後經過河橋及倒虹吸管橫跨濁水溪再引水至日月潭，以增加發電效益，引水隧道長約 13.4 公里。本工程亦成功使用 TBM 工法開挖隧道。	混凝土重力壩(栗栖壩)	24.3	-	-	-	✓	✓	人力支援	86年9月 ~97年6月

編號	工程名稱	工程概要	壩		電廠型式	尺寸(公尺) (寬 x 高 x 長)	總裝置 容量 (MW)	服務範圍			服務 期間
			型式	壩高 (公尺)				基本 設計	詳細 設計	施工 監造	
8.	大甲溪 谷關分 廠復建 工程	本工程位於大甲溪中游，因民國 90 年桃芝颱風豪雨引發土石流淤積河道，致尾水出口及地下廠房受損無法發電。本復建工程為整建地下廠房，右岸新建尾水隧道延長段 1,991 公尺至天輪調整池，左岸新建廠房通道 2,098 公尺至上谷關，發電機組及變壓器等全部換新並遷建開關場。	(谷關壩)	85.1	地下式	13.8x34.5x 86.5	4@53.2 =212.80	✓	✓	人力 支援	91 年 5 月 ~98 年 6 月
9.	名間水 力發電 廠工程	本工程位於南投縣名間鄉，係利用集集攔河堰北岸現有灌溉渠道之引水量及跌水工約 30 公尺落差發電，為台灣第一座以 BOT 方式興建完成之小水力電廠。	(集集攔 河堰)	—	半 地下式	27.6x40.6x 45.5	2@8.35 =16.7	✓	✓	✓	93 年 4 月 ~97 年 3 月
辦理中											
1.	和平溪 海力發 電工程	本工程位於宜蘭縣與花蓮縣交界之和平溪，興建南溪壩攔蓄溪水，經一條內徑 2.7 公尺長約 7.1 公里之頭水隧道至電廠，廠內裝佩爾頓水輪機，其設計流量 17cms，設計水頭 416.8 公尺。	混凝土 重力壩	43.0	地下式	16x33x22	61.2	✓	✓	人力 支援	86 年 12 月~100 年 12 月
2.	西寶水 力發電 工程	本工程於花蓮縣萬里溪建西寶壩，經一條長約 5.9 公里頭水隧道至電廠，並於馬鞍溪築大馬攔河堰引水經長約 4.5 公里隧道合併發電。	混凝土 重力壩	44.0 (西寶壩) 29.0 (大馬 攔河堰)	地下式	44.4x17.0x 37.1	74.2	✓	✓	✓	91 年 6 月 ~98 年 12 月 (因 94 年 度預算遭 立法院刪 除，服務 工作終止)
3.	萬大電 廠暨松 林分廠 工程	本工程係在既有之濁水溪霧社水庫新建進水口、頭水隧道、壓力鋼管及於萬大電廠增設第四部機組。萬大電廠發電尾水由新建松林壩攔蓄，經引水隧道至松林分廠續行發電，為有效利用流量發電，松林分廠裝置大、小機組各一部。	(霧社壩)	114.0	半 地下式	25x14x33	19.7	✓	✓	人力 支援	94 年 3 月 ~100 年 7 月
			混凝土 重力壩	9.0 (松林 壩)	半 地下式	36.1x14.7x 32.9	18.2(大) +2.7(小) = 20.9				
4.	高屏電 廠竹門 機組更 新工程	高屏電廠竹門機組位於高雄縣美濃鎮，係自荖濃溪引水發電。其廠房為近百年歷史之巴洛克式建築，已公告為國定古蹟。本工程新建前池、壓力鋼管、廠房及尾水路，於更新過程需兼顧古蹟維護。	(自荖濃溪 引水)	—	地上式	12x29x26	2.67	✓	✓	—	90 年 8 月 ~99 年 6 月

表 2-B 國外水力發電工程設計

編號	工程名稱	工程概述	壩		電廠型式	裝置容量		服務範圍			服務期間
			型式	壩高(公尺)		單機裝置容量(MW)	總裝置容量(MW)	基本設計	詳細設計	施工監造	
1.	El. Salto Small Hydropower Project	本工程位於多明尼加共和國中部，興建引水壩一座，及沉砂池、明渠、前池、壓力鋼管路及電廠。	混凝土重力壩	5.0	地上式	0.56	0.56	✓	✓	✓	73年2月~77年9月
2.	Los Toros Hydropower Project	本計畫位於多明尼加共和國西南部，係利用既有水路末端延長，設置明渠、前池、壓力鋼管路及電廠。	—	—	地上式	4.6	2@4.6=9.2	✓	—	—	75年10月~77年9月(含可行性研究)
3.	Nizao-Najayo Small Hydropower Project	本工程位於多明尼加共和國西南部，係利用現有灌溉渠道約10公尺落差及灌溉流量，興建小水力電廠發電，係中華民國贈與款協助多明尼加共和國開發之電廠。	利用灌溉渠道落差發電	—	地上式	0.35	0.35	✓	✓	✓	77年10月~83年5月
4.	Cibao Central Small Hydropower Project	本計畫位於多明尼加共和國北部，係利用現有灌溉渠道落差設置電廠發電。	利用灌溉渠道落差發電	—	地上式	0.8	0.8	✓	✓	—	81年10月~83年3月
5.	Angat Water Supply Optimization Project	本工程位於菲律賓呂宋島，係自既有 Angat 電廠 2 號主機之壓力鋼管分接新鋼管引水並擴建廠房及增建第 5 部機組，發電尾水 22cms 可增加下游公共給水。	(Angat 水庫)	—	地上式	18.0	18.0	✓	✓	✓	78年6月~81年6月
6.	Umiray-Angat Transbasin Project	本工程位於菲律賓呂宋島，築攔河堰 5 座，引水隧道一條長約 12 公里，引水量約 15cms，至 Angat 水庫，增加發電及給水效益。	混凝土重力壩	4.0	—	—	—	—	✓	—	81年11月~82年12月
7.	Cirata II Hydropower Project	本工程為印尼西瓜哇省 Cirata 河之 Cirata 電廠第 2 期工程。本工程包括二座進水口、二條內徑 4.8 公尺之頭水隧道、二座內徑 18.6 公尺之平壓塔、四條內徑 5.2 公尺之壓力鋼管、新設四部機組、四條尾水隧道與尾水出口。	(滾壓土石壩)	125.0	地下式	125	4@125=500 (二期共 1,000MW)	—	✓	✓	83年6月~86年7月

表 3 抽蓄水力發電工程

編號	工程名稱	工程概要	壩		電廠型式	尺寸(公尺) (寬 x 高 x 長)	總裝置 容量 (MW)	服務範圍			服務期間
			型式	壩高 (公尺)				基本 設計	詳細 設計	施工 監造	
1.	明湖抽蓄 水力發電 工程	本工程位於南投縣魚池鄉及水里鄉，利用日月潭作為上池，於水里溪大觀發電廠之上游興建下池壩，利用上下池間約 310 公尺落差進行抽蓄水力發電。發電水路包括二條內徑 7 公尺頭水隧道、二座平壓塔、二條埋入式壓力鋼管、四條尾水道及一座尾水出口。電廠及變壓器室建於地下，開關場及控制室大樓興建於下池壩右岸鞍部。	(日月潭)	—	地下式	21.2x40.5x 127.2	4@250= 1,000	✓	✓	—	68 年 2 月 ~75 年 1 月
			混凝土 重力壩	57.5 (下池)							
2.	明潭抽蓄 水力發電 工程	本工程位於南投縣魚池鄉及水里鄉，利用日月潭作為上池，興建水里壩作為下池，利用上下池間約 380 公尺之落差進行抽蓄水力發電，發電進水口設於日月潭西岸，發電水路包括二條內徑 7.5 公尺頭水隧道、二座平壓塔、二條埋入式壓力鋼管、四條尾水道及一座尾水出口。電廠及變壓器室建於地下、開關場及控制大樓設於下池壩右岸平台。民國 84 年完工時為亞洲第一大抽蓄電廠，世界第四大抽蓄電廠。	(日月潭)	—	地下式	21x46x156	6@267.0 =1,600	✓	✓	工地 服務	76 年 3 月 ~84 年 6 月
			混凝土 重力壩	61.5 (下池)							
3.	天荒坪抽 蓄水力發 電工程	本工程位於中國大陸浙江省安吉縣境內，利用數座小山頭興建瀝青混凝土面層堆石壩之主壩及四座副壩，圍築形成上池，另於大溪河道新建鋼筋混凝土面板堆石壩作為下池，利用上下池間約 560 公尺落差作純抽蓄發電。發電水路包括二條鋼筋混凝土壓力管路，三條壓力鋼管及六條尾水壓力管路。2000 年完工時為亞洲第一大抽蓄電廠，世界第二大抽蓄電廠。		72 (上池)	地下式	21x48x210	6@300= 1,800	—	—	技術 諮詢	83 年 11 月 ~87 年 1 月
			堆石壩	95 (下池)							

2.技術發展回顧

水力發電工程實施可分為可行性研究、工程設計及施工三個階段。惟就中興工程顧問承辦水力發電工程業務歷程而言，係以工程規劃設計為主而施工監造次之，因此，工程設計技術之發展亦最為突出。就水力發電工程設計技術之發展，大致可概分下列七項發展作為回顧。

(1) 水力發電工程技術之基石

中興工程顧問在創社之初，網羅了一批原參加石門水庫建設及任職台電多年並已具有壩工、隧道及水力電廠設計經驗豐富之工程人員，作為中興工程顧問之基本骨幹，開始公司之營運。這些幹部自民國 59 年至 66 年陸續承辦過曾文水庫（發電廠容量 50MW）、德基水庫（發電廠容量 234MW）及自力辦理完成榮華壩（義興發電廠容量 40MW）及翡翠水庫（發電廠容量 70MW）後，故不論在水文及水理分析、壩工、大地、隧道、電廠之設計及施工技術均已具有許多豐碩經驗及傑出之技術成就。由於水力發電工程相較於其他發電工程，乃是以土木工程所佔權重較大為其特點，故前述工程設計、施工技術及其累積經驗，已非常紮實，為中興工程顧問對水力發電工程規劃、設計及施工所需土木工程技術，奠定了良好之基礎，也樹立了質優之土木工程設計技術能力與形象。

(2) 水力發電計畫可行性研究

中興工程顧問最早於民國 60 年與瑞士 EWI 聯營承辦立霧溪水力發電計畫可行性研究審查，於民國 61 年提出可行性審查報告以供辦理後續之基本設計。於民國 70 年起奉政府指示組織電力技術團，常駐多明尼加擔任小水力發電技術合作任務，共辦理 16 個小水力發電工程規劃及三個水力發電計畫可行性研究與四個小水力發電工程設計。計畫地點都位在多明尼加山區，須分別指派水文、地質、壩工、隧道、水工機械及機電設備等工程師與規劃布置專家前往辦理。中興工

程顧問係第一次赴加勒比海之西班牙語國家提供技術服務，本技術合作計畫之執行，相當於水力發電工程之規劃設計技術在國外做整合性演練及展示，除達成政府指派之技術協助任務而獲得邦誼外，也培植了日後派往海外提供技術服務之工作人員。

至於其後承辦之水力發電計畫之可行性研究，計有：民國 72 年辦理石岡南幹渠小型水力發電計畫、民國 73 年辦理烏山頭水庫增設發電計畫、石門大圳水力發電計畫，以上均屬於小水力發電計畫之範疇。就辦理水力發電計畫之可行性研究且亦辦理後續之工程設計者，共有六個典型水力發電計畫：即民國 70 年至 75 年辦理多明尼加 La Diferencia、Arroyo Gallo 及 Los Toros 水力發電計畫、民國 79 年辦理濁水溪上游支流引水發電計畫、民國 94 年辦理大甲溪發電廠青山分廠復建計畫及民國 96 年辦理宏都拉斯 Patuca-3 水力發電計畫。

一般而言，為能辦好水力發電計畫之可行性研究，均須對水力發電計畫之先期調查、規劃、設計、施工及運轉等具備有相當的經驗及技術能力，始能研擬技術可行、經濟合格、財務健全及符合環保之發電計畫。為辦理可行性研究，除了須辦理氣象、水文、地質等基本資料之蒐集以及分析外，對壩工、隧道、相關之水工結構物以及發電水路、廠房等，須辦理布置、規劃與初步設計和水輪機及發電機機型、台數及容量之選定。在規設過程中，也必須辦理水力發電中最主要之水理分析，包括發電水路暫態分析、水頭損失之估算等。上述結構物布置就緒後，其土建工程與發電機組之費用都需要加以估算、納入間接工程成本、預備費、物價調整費、施工期間利息及開發電源協助金，成為計畫成本，而後對水庫或電廠模擬最佳之運轉模式，包括環保所需之最小放水量考量在內，進行其發電量估算，作為計畫完工後之營運效益估計，以供辦理計畫之經濟評估

及財務分析。在上述之分析及工程成本與工期研訂中，風險與不定性因素也都要涵蓋在內，俾作為業主進一步推動該計畫之依據。由於多年來之工程設計及完工商轉後驗證之經驗及技術回饋，中興工程顧問所辦理之可行性規劃、布置及初步設計水準，迭次獲得確認，並持續提昇規劃成果之品質，而深獲業主之認同。此外，中興工程顧問曾於民國 73 年承辦台電與水資會之台灣地區水力普查，很難得獲取了辦理水力潛能估計及流域水力開發計畫初步規劃之寶貴經驗。

(3) 抽蓄水力發電工程技術

中興工程顧問於民國 65 年開始，分別協助由台電所聘之兩家外國顧問公司，辦理明潭與明湖抽蓄水力計畫之可行性檢討及基本設計。當時台電原擬就明湖與明潭兩抽蓄計畫中，擇一進行開發。後來，俟兩計畫之檢討報告出爐後，台電邀請著名外籍專家，組成諮詢小組在日月潭涵碧樓及台電總公司，連續開了三次諮詢會議，協助台電審核該兩份檢討報告，以便在兩計畫中，評選一計畫進行開發。惟在評選會議中，台電朱總經理顧慮到台灣可資開發之抽蓄廠址很有限，說明兩抽蓄計畫最終都需要開發，而當場獲得所有專家之認同。嗣後之開會討論重點，即改為何者先行開發。經詳細之討論後，最後決定先開發明湖，隨後視電力系統之需要，再開發明潭而釐訂該姊妹抽蓄水力計畫之開發順序。

中興工程顧問於民國 69 年與日本顧問公司共同承辦明湖（1,000MW）抽蓄發電工程設計，因係國內首座抽蓄發電廠，台電決定由日本顧問公司擔任主包（Prime Consultant）而中興工程顧問為次包（Sub-consultant），與台電分別簽訂服務契約；惟相隔十年後，即在民國 76 年再辦理明潭（1,600MW）抽蓄發電工程設計時，由於中興工程顧問在辦理明湖工程設計之表現優異，深獲台電之信賴，台電遂決定由中興工程顧問領銜當主包，而日本顧問擔任次包，共同辦理明潭工程之所有詳細設計，但日本顧問之承包範圍僅限

於發電設備，且與中興工程顧問簽訂次包商之服務契約。

明湖及明潭抽蓄發電工程之規模均十分龐大，發電水路及發電機組須承受高水頭、大水量及大電流，加上計畫地質條件不十分理想，因此在發電水路系統、地下廠房、壓力鋼管路及泵／水輪機、電動／發電機等之設計及施工均面臨了相當多的技術問題待克服，由於中興工程顧問之工程師深具水力發電工程經驗與專業水準，加上努力付出，而克服了諸多工程技術上之困難，提供了非常優良之設計，並在設備招標過程中及施工管理上，克服了許多承包商間之互相配合與界面之整合問題。因此，二座抽蓄發電廠得分別於民國 74 年 7 月及 83 年 12 月順利竣工商轉，奠定了中興工程顧問在抽蓄水力發電領域之技術成就。

由於明湖及明潭兩抽蓄發電工程設計所獲取寶貴經驗及技術成就，促成民國 83 年獲得世界銀行（World Bank）之首肯，與美國哈察（Harza）顧問公司共同承辦，由世銀貸款的中國大陸天荒坪抽蓄水力發電工程之施工技術諮詢服務工作，將中興工程顧問之抽蓄水力工程施工管理技術輸至對岸。中興工程顧問於民國 72 年亦曾進行，以翡翠水庫為下池之抽蓄計畫研究、並趕辦該抽蓄計畫位於翡翠水庫之尾水出口設計，原本期望能在翡翠水庫完工蓄水前，完成該尾水出口預留設施，可惜因各種原因，以「停辦」劃下遺憾之句點。此外，於民國 72 年承辦瑪家水庫工程規劃也研提了抽蓄水力發電計畫，但因環境保護因素，致隨水庫計畫終止開發，惟經由此二個抽蓄水力發電工程計畫之方案研究、工程布置及設計，中興工程顧問工程師展現在抽蓄水力計畫之工程布置及規劃設計上之優異技術能力。

(4) 傳統水力發電工程技術

中興工程顧問最早於民國 61 年與 EWI 承辦立霧溪溪畔水力發電計畫（民國 60 年 5 月獲得

亞洲開發銀行（ADB）之貸款；係最後一年四項貸款之一，從此以後台灣列為已開發國家，只能捐款，但不能貸款）之基本設計，並於民國 63 年完成基本設計報告，後於民國 68 年辦理該工程詳細設計，並進行至廠房通道及施工道路施工時，因工程位於太魯閣國家公園預定區域，衝擊環境景觀，致使於民國 73 年奉政府指示中止開發。其後雖於民國 68 年曾承辦義興發電廠（40MW），民國 68 年西口水力（9.8MW）、71 年后里小水力（110KW）及 73 年烏山頭水力（7.2MW）之設計，但都是屬於規模較小。一直至民國 76 年承辦新天輪水力，才再度承辦台電之大型之傳統水力發電工程設計，加上其後陸續辦理馬鞍水力（80 年）及士林水力（81 年），至民國 86 年承辦新武界引水隧道及和平溪碧海水力等工程設計，而對中興顧問公司而言，成為國內水力發電工程設計工作最忙碌之十年。由於各水力工程規模及特性及工址之水文、地形、地質及環境條件互異，工程設計均需個別解決互不同層次之技術難點，由於上述各水力工程都順利完工而商轉發電，更增進中興工程顧問工程人員在水力發電工程設計之經驗與歷練，使他們之工程技術更上一層樓。

民國 78 年承辦亞銀貸款之菲律賓安佳（Angat）水力電廠機組擴建計畫（18MW）及民國 83 年參與世銀貸款之印尼基拉塔（Cirata）水力發電第二期計畫（500MW），先後完成 2 個國外水力發電工程。綜合上述，中興工程顧問共辦理了近十項水力發電工程設計，究其成功原因，不外乎人員具備豐富經驗，加上掌握了水力發電工程之核心技術及具有整合土木及機電工程之能力所致。至於民國 96 年順利完工而商轉之民間投資之水力發電廠（16.7MW），則為中興工程顧問公司首次承辦之專案管理、監造又兼辦設計技術服務之 BOT 計畫，也值得在此附乙筆報導。

（5）水力電廠復建工程設計

民國 88 年 9 月 21 日集集大地震重創台灣中部，造成了無數人民生命財產之損失、建築物及公共設施之重大災害，所幸位於鄰近震央之濁水溪及大甲溪水力發電廠，而由中興工程顧問設計完成之明湖及明潭抽蓄發電廠，新天輪及馬鞍水力發電廠除有少許輕微災損外，並未影響發電功能。此顯示承受芮氏規模（ M_L ）7.3 強烈地震之襲擊下，中興工程顧問所承辦水力發電工程構造物，還是穩如泰山，其安全及其可靠性都經歷過這重大之洗禮與考驗，令人欣慰。基於多年所建立水力發電工程設計信譽及技術能力，中興工程顧問在 921 地震襲擊後，立即受台電公司委辦，對早年興建之水力發電廠及水庫，辦理災後安全檢查、評估、包括災損勘驗與必要之緊急應變處理或修復工作等。就該等工作之服務費用而言，多數案件都無法打平，甚至賠了一些許錢，但卻獲得了極寶貴之災害復建設計經驗，同時也獲得機會檢視前人或外籍顧問之設計理念與技術。

民國 90 年 7 月 30 日桃芝颱風挾帶暴雨，大甲溪發電廠谷關分廠上游野溪、映虹橋、穿雲橋之野溪山溝發生嚴重之土石流，加上大甲溪本身上游之多處溪岸塌方，導致溪流挾帶大量土石沿溪而下，使谷關電廠附近之河床經本次一場颱風再淤高 9 公尺，造成地下廠房淹滿，發電設備嚴重受損，需全部報廢。中興工程顧問公司於民國 91 年承辦此罕見及艱巨之地下電廠復建工程設計，頗感責任重大，必須要全力以赴才能完成任務。該工作之難處在 921 地震後河川淤積過高、原地形面貌全非及地質鬆弛之不利條件下，須評估泡水後之地下廠房結構之穩定性，緊接著，辦理整建與復建之相關設計，以便所有機電設備能重新順利安裝，但為應付溪流河道情況之快速變遷，應如何選訂適當之設計標準，以便確保電廠復建後不再發生淹水仍是復建工程設計之重大課題之一。好不容易有因應上述難題之設計，進入施工時，在民國 93 年敏督利、艾利及南瑪都；

民國 94 年海棠、泰利及龍王颱風豪雨接連侵襲，再度引發土石流、河床再淤高，導致地下廠房於復建期間數次淹水或泡水，而一些舊隧道、廊道突然出現多處、大量之滲漏、湧水，且一次又一次颱風過後新建廠房通道於襯砌後之滲水量倍數增加，甚至發生湧水等之種種考驗。中興工程顧問公司之設計人員隨時因應提出調整減滲處理對策及變更止滲處理設計，以確保防災設計之安全及可靠性，甚至採用了核能電廠設計理念，即採用多重防禦設計，因此，谷關分廠復建工程終在大家同心協力下，於民國 97 年圓滿完成四部機組商轉，頗感欣慰。中興工程顧問公司復於民國 98 年再度獲得於民國 93 年遭受敏督利颱風豪雨淹水災損之大甲溪發電廠青山分廠復建工程設計，綜合前述水力發電工程設計經驗及技術以及谷關分廠復建工程設計成功的經驗，希望青山分廠復建工程會順利如期如質完成。

(6) 水工機械設備技術

水力發電工程之水工機械設備主要包括閘門、閘閥及壓力鋼管。中興工程顧問承辦水力發電工程之水工機械規劃設計，大致可分為下列三大類別：

a. 堰壩工程水工機械

中興工程顧問先後承辦義興及翡翠電廠之水源榮華及翡翠大壩、明湖及明潭抽蓄發電之下池壩、傳統水力發電計畫之馬鞍壩、士林壩、南溪壩等堰壩，堰壩之排洪閘門及排砂閘門及河道放水閘閥，不論弧型或直提式閘門、高水頭或低水頭閘閥均已獲取相當多的成功經驗及技術能力，其中較為特殊之工作經驗，簡述如下：

- 翡翠水庫排砂道入口處擋水閘門於進行緊急關閉試運轉時，發生吊門機錨碇失效狀況，經檢討後，發現在該高水壓閘門關閉過程中，產生超出預期之下拉力（Downpull Force）所致。該問題之解決對策為參照德、日所作類似閘門下拉力試驗資料，修改門扇底部形式以降低下拉力，並可使用較小容量之吊門機，進行操作。

- 民國 85 年 7 月中興工程顧問接受總部位於倫敦之歐洲開發銀行（EBRD，中興顧問公司第一次替該行服務，恐怕在台灣諸多顧問中，也算第一次吧）之委託，辦理喬治亞共和國之恩格里（Enguri）拱壩河道放水口之上游擋水閘門修復設計工作。該擋水閘門係於 1994 年 11 月電廠操作人員利用壩頂吊門機，試圖拉起置放於 1 號放水口之擋水閘門時，發生操作人員連同吊門機及固定支架，全部掉入水庫內之意外事件。經前往現場勘查，而獲得一些該閘門之設計與操作資料，特別說明如下：

- 恩格里拱壩係前蘇聯所設計、興建，拱壩高達 271.5 公尺。

- 擋水閘門由壩頂吊門機放下至放水道入口，需沿壩面行走約 180 公尺，距離相當長。

- 沿拱壩上游弧面裝設有軌道，可幫助閘門吊上或放下等操作，但閘門之兩側卻未設置任何拘束之設施。

- 擋水閘門尺寸〔10.58m（W）x11.20m（H）〕，相當大，完全關閉時，在不平衡水頭 181m 之作用下，所承受之水壓約有 16,200 噸。

- 擋水閘門設計之理念為，允許放水路在漏水量小於 2.14cms 下，仍可進行啟閉。

經探討事故原因及瞭解原閘門設計之功能、運行及操作機構後，擋水閘門之修復設計主要包含下列改善：

- 放水路允許之漏水量增為 6.0cms。

- 修改閘門之承載結構，由扭力軸系統改為碟式彈簧。

- 新擋水閘門重新布設 4 個旁通閥（Bypass Valves），並改用速率控制機，取代原設計之彈簧式之閘門關閉緩衝設施，以容許更大閘門與門框之間隙及閘閥之漏水量，並將旁通閥關閉時程延長為約 10 秒，以避免瞬間產生不平衡水頭作用，對門框、門體及壩體造成衝擊。

另於民國 95 年承辦遭受 921 地震災損之石

岡壩弧形閘門更新工程設計時，除須克服閘門災損所造成之設計難度，同時納入了先進、安全與節能等設計特色，也是國內大型閘門及其附屬之機電設備整體更新之首例。該更新工作完工後，更可確保石岡壩之蓄水功能，對於台中縣市之自來水供應，還是可勝任。

b.發電水路、進水口及尾水出口水工機械

水力發電之進水口及尾水出口所需設置之水工機械，主要包括攔污柵、耙污機、進水口控制閘門、擋水閘門（或閘板）、吸出管閘門、尾水出口擋水閘門、特殊洞口之防洪或擋水閘門等，其規劃設計，除依裝設目的、功能及操作條件加予考慮辦理外，尚須就該設備本身之維修，力求簡單、快速，以符合實際使用需要。

c.壓力鋼管及鋼襯

壓力鋼管為上承頭水隧道下接水輪機渦殼之管路，並需要承受管內水流之高水壓及水錘壓力，大都採用鋼管。該壓力鋼管通常有地面式、地下式（也稱為埋入式壓力鋼管）或前兩式之混合式等種類。近年來，水力發電都針對系統尖峰之需要，以高水頭與大機組容量加予規劃開發，故設計地下式之壓力鋼管機會很多。地下式壓力鋼管之設計理念為讓周圍岩盤協助承擔部份之內水壓，該分擔比例須依據地形及地質等條件而訂，以便節省建造費。但考慮到鋼管有時為檢查或其他原因需要放空時，周圍之地下水壓會使鋼管發生挫屈（Buckling），因此也需要針對外水壓力進行鋼管本身之安全分析，如有需要，通常都要設計加勁環（Stiffener）加予強化。為經濟面之考量，壓力鋼管須作經濟直徑分析，以便鋼管之尺寸不宜過大增加建造費，或過小導致水頭損失過大而發電量減少。因此，鋼管之管徑係自銜接頭水隧道處，漸隨內水壓力增大而漸縮至底部水平管，再配合水輪發電機組數目，須在水平管路中，設置分歧管（Bifurcator），其型式之選擇及設計，亦為重點設計技術之一。

中興工程顧問所承辦之水力發電工程大都採用埋入式地下壓力鋼管。就壓力鋼管之設計技術而言，以明湖及明潭抽蓄水力計畫之管徑及水頭之乘積值最大，設計難度高，要求技術面之考量廣泛。以明湖及明潭抽蓄水力計畫為例，都是採用二條之埋入式地下壓力鋼管；明湖之壓力鋼管每條之直徑由 7.0 公尺漸縮為 5.8 公尺，傾斜 50 度，轉為下水平段分歧後，成二支 2.7 公尺內徑，分別連接泵／水輪機渦殼，其承受水頭為 380 公尺；而明潭每條之壓力鋼管直徑均為 6.8 公尺，傾斜 48 度至下水平段後，每一條管路再分歧成三支 2.78 公尺之管路，分別連接到三部泵／水輪機渦殼，其承受之水頭高達 570 公尺。上述之明潭壓力鋼管，因所承受之內水壓過大，其管壁厚達 50mm 以上，安裝時需要管內外兩面焊接，工期與焊接品質均無法掌握，經再三研究後，最後決定採用高拉力（High Tension Steel）鋼板，因而鋼管管壁較薄，單面焊接即可。此壓力鋼管乃是台灣水力計畫中，第一次使用高拉力鋼板，但採用高拉力鋼板也添加不少施工之難度，如焊接前後分別需要預熱（Pre-heating）與後熱（Post-heating）等，以避免焊接後發生裂紋。

另外，頭水隧道或平壓塔直井常承受相當高之內水壓力，如遭遇斷層、破碎帶等地質軟弱地段或岩覆不足之處，為避免發生滲漏災害，在該地段都考慮鋼板襯砌，加予補強；另如明潭抽蓄發電工程及新武界引水工程之頭水路因布置需要，在跨過頭社溪及濁水溪處，分別採用鋼管直接布設在跨河混凝土拱橋之橋面上（如同地面式壓力鋼管）而跨越河溪。明潭頭社溪過河段之鋼管直徑 6.8m，拱橋之拱肋跨度 70m，橋面板總長度 130m，承載鋼管加水重之總重量約 6,500 噸，相當於拱橋上橋面板承載均布載重約 50t/m；如包括拱橋本身自重之總承載，則在平時，兩端之拱座各有約 8,000 噸之推力（Thrust Force），但

在地震時，其推力約 10,000 噸。在民國 88 年 921 大地震來襲時，頭社溪過河段雖然距離震央僅約 7.5 公里，仍屹立不動，並繼續發揮其輸水功能，顯示中興工程顧問擁有獨到之鋼管跨河技術及耐震設計能力。濁水溪過河段鋼管直徑 3.8m，拱橋之拱肋跨度 120m，拱橋施工時，於溪流中無法架設臨時支撐，以供安裝拱肋，故改採用合成拱預架（CLCA）工法於輸水路過河橋。先由兩岸分別吊裝鋼拱肋，俟閉合後再利用其支撐，澆置混凝土拱肋及橋面板混凝土，此為技術之創新應用案例之一。

過河段鋼管設計之特殊考慮為：

- 過河段鋼管路中，須裝置襯套式（Sleeve Type）伸縮節（Expansion Joint），使鋼管得以調適縱向之溫度變化時之伸縮。

- 過河段鋼管須設置環形支承樑，將其自重及水重傳遞至拱橋，並於支承樑底部裝置球面或輻支承座，當鋼管之溫度變化時，該支承座得於縱向自由移動，且在地震時，可隨著旋轉自動調整，以因應地震位移之實際需要。

（7）機電設備規劃設計技術

水力發電廠之機電設備主要包括架空起重機、進水閘、水輪機、發電機、調速機、激磁系統、壓油及冷卻系統，監控系統（SCADA）；主變壓器、電力電纜及開關設備，以及電源、照明、火警、消防、電話、廣播、通訊、監視以及緊急柴油發電機等雜項機電設備。

在規劃設計水力發電工程之主要機電設備，較特殊之處乃是須與蓄水、取水、水路及鋼管路等設施及電廠型式、位置，搭配或配合進行辦理。此等主要機電設備比較常受廠房空間等條件之拘束，規劃設計時，應考慮機組設備之安裝及維修空間問題，尤其開發大型水力發電計畫所常採用之地下廠房，又經常受地質條件之限制，因而需要施作昂貴之地下支撐系統，才能獲得足夠之機組設備所需空間。機電設備規設主要包括：

依可行性規劃之總裝置容量、流量及水頭，機組型式、組數及單機容量等之選定，然後研訂設計流量及水頭、轉速與水輪機中心標高，並估計水輪機及發電機之外型尺寸及辦理機電設備與附屬設備之空間配置，最後編訂所有機電設備之功能規格及採購文件。中興工程顧問在抽蓄水力發電計畫方面在早期已於辦理明湖及明潭抽蓄發電計畫之設計時，已發展出泵／水輪機及電動機／發電機選定之整套技術規格，也成功編擬並執行十數種與抽蓄發電機組及其相關設備之國際採購標書。至於傳統水力發電計畫之機電設備，就水輪機型式而論，中興工程顧問對法蘭西斯式水輪機規設之經驗最豐富，因為前後承辦並順利完成了法蘭西斯式水輪機組有義興、翡翠、新天輪、馬鞍、卓蘭及谷關復建等電廠，但對其他機型，如佩爾頓（Pelton）、卡普蘭（Kaplan）、管狀（Tubular Type）、貫流式（Cross-Flow Type）等，也並不陌生，因這些機型於碧海、名間、竹門、多明尼加小水力電廠，中興工程顧問都採用過而具有工作實績。至於發電機採用同步發電機（Synchronous Generator），最為普遍，惟有在多明尼加因系統需要，中興工程顧問採用過感應式發電機（Induction Generator），乃是比較不尋常之經驗。至於發電機之構造型式，則有懸吊式、傘型或半傘型之分，但都配合實際需要，加以選定採用。由於機電設備之細部設計及製造係由承攬廠家依照中興工程顧問所編撰之採購圖說之功能規格及型式承造。由歷年來工作經驗顯示所謂機電設備設計技術係在於所編擬之機電設備之採購圖說，必須可使不同國籍製造廠家都能參加競標為目標，以便業主可採購物美價廉之發電機組，而且履約期間不致引生規格之爭議，而廠家亦能如期如質完成合約工作。因此，採購規範及圖說等標書之準備的確充滿挑戰及考驗，中興工程顧問具有多年累積之規設經驗及技術能力，才能應付此項艱鉅任務。

三、核能、火力發電工程技術

(一) 工程經驗及工程技術

中興工程顧問歷年來承辦過核能、火力發電工程之技術服務共計約 165 個計畫，包括國內 159 個及國外 6 個計畫。其中依所使用之燃料，選擇較具代表性之核能、火力及柴油機組發電工程分列於表 7 至表 9。

中興工程顧問參與火力發電工程設計主要以電廠區及附屬設備之基樁、基礎以及發電廠區以外之外圍設施為主，通常包括循環冷卻水、生水、道路及排水系統以及油槽、處理室、管溝等之土木工程設計。至於核能發電工程以核四廠為例，辦理核島及汽輪發電機組區域以外之土木工程，包括循環冷卻水、生水、道路及排水系統等。

核能、火力發電工程之土木工程設計技術，主要可分為下列三主項：(1) 循環冷卻水及溫排水系統之規劃設計；(2) 廠房區及附屬設備之基樁及基礎設計及(3) 相關港灣工程設計技術。至於整廠之規劃設計方面，中興工程顧問曾辦理 IPP 之海渡燃煤火力計畫(2X495MW)、富保和中燃煤火力計畫(1X550MW)、馬來西亞古晉(Kuching)燃煤火力計畫(2X50MW)以及菲律賓民答那俄(Mindanao)燃煤火力計畫(2X100MW)，除古晉及民答那俄兩火力計畫外，其他兩火力發電計畫均因非工程技術因素未能完成建廠，殊為可惜，但中興工程顧問於擔任技術總顧問過程中，獲取了火力發電廠整廠之規劃、布置及基本設計之寶貴經驗及技術。另外，中興工程顧問公司於民國 88 年辦理新桃燃氣複循環 IPP 建廠營建管理工作，替民營發電業服務也相當成功而獲得業主之認同。

(二) 技術發展回顧

1. 循環冷卻水及溫排水系統之規劃設計

台灣夏季時間又長又炎熱，為提高發電效率，一般核能、火力或柴油發電廠都選在濱海地區，或甚至填海造地而後進行建廠，以便容易就地取得海水作為機組之冷卻水，以替代使用淡水，消耗有限之淡水資源。再者，此廠址之選擇，一方面選擇住民較稀少之沿海地區，對建廠之反對聲浪降低，並也不需要花大筆費用徵收土地或給予各種補償，既經濟又省事，他方面也考量到燃料運進廠內之方便性，台電一向都採用此策略興建核能、火力電廠。利用海水之冷卻系統都是採用貫流方式(One-through Type)，即通稱之循環冷卻水系統。該系統之主要設施包括取水口或進水口、抽水機房、進水暗渠(管)至汽輪機冷凝器，藉由較低溫之海水，經熱交換後，再由出水渠道及出水口，將溫水排放回海洋。本項系統之規劃設計首先要辦理水理分析以決定上述各結構物之尺寸、容量與水頭損失，接着要辦理水理暫態分析(Hydraulic Transient Study)以及出水口附近海域之熱擴散分析，以確定其排放口附近海域並無溫水之污染。此系統是否正常運作，直接影響電廠之發電量，故其規劃與設計乃是核能及火力發電工程之關鍵技術之一。此外，核能電廠另須提供獨立之緊急冷卻水系統，以確保核子反應爐之安全，其設計條件及進行方式均有更高之規定而必須嚴格遵守辦理。

中興工程顧問在此領域承辦並累積了很多經驗，尤其是在循環水路暫態水理分析方面，在國內一直保持領先之地位。中興工程顧問於成立之初即承辦核一廠抽水機房及循環水路隧道之設計(民國 61 年)、協和火力發電廠第一、二部機之抽水機房及循環水暗渠(廠內段)之設計(民國 62 年)，其後也參與核二廠出水口改善設計及循環水水鎚分析；至於循環冷卻水系統之全系統規劃設計，先後承辦完成核三廠、興達火力、台中火力、核四廠、海渡火力及澎湖尖山擴建工程。傳統之循環冷卻水系統之取排水布置，以台

中火力為例，進水口設於台中港內，直接在港內岸壁附近取水而於出水口另興建導流明渠伸出離海岸較遠之深海域，才將溫水排放，以便符合環保法規。至於澎湖尖山電廠擴建計畫及長生電力海湖電廠都在海底布設取、排水管線，而採用“近取遠排”之布置原則，除符合功能需求外，並可避免熱迴流而降低冷卻效率。至於核四廠之循環冷卻水系統更為特殊；進水口靠近海岸線興建，並布設外廓防波堤加以遮蔽外海波浪之直接入侵而影響抽水機之順利運轉；至於其溫排水係採用二條海底出水隧道，每條隧道內徑 6.7 公尺，長 1,320 公尺，以排放每部機 102cms 之溫排水至位於外海域之排水頭，藉由廣大之水體及海潮流作用，混合稀釋，使溫排水符合環保法規並減低對陸海域環境生態之影響。由於首次採用海底出水道排放溫排水，核四廠之溫排水直井、海底潛盾隧道、四噴口排水頭及海事工程之規劃設計，中興工程顧問公司作了諸多技術上之突破與創新，該出水道工程才能順利完成且品質優良，並為此設計及施工監造，獲第六屆（民國 94 年）公共工程金質獎之特優獎。

2. 廠房區及附屬設備基樁及基礎設計

火力發電廠之廠址用地面積常達上百公頃，大都仰賴抽砂浚填造地方式所成，此外火力發電廠設備荷重十分巨大又有大型轉動設備，故為減少設備基礎過度之沉陷量，防止不均勻沉陷或地震時基礎土層發生液化等現象，廠房區（Power Block）之地質鑽探與試驗、基礎改良、基樁及基礎設計，都是建廠之關鍵問題，需要嚴謹之處理或解決。典型的廠房區包含鍋爐房、汽輪發電機房及主控室等，其中鍋爐房、汽機台及主控制室通常採用筏式基礎，而汽輪發電機之廠房鋼構則採用獨立基腳與地梁連結之基礎，不論採用何種基礎型式，以基樁承載最多，都是將荷重直接傳遞到深地層。中興工程顧問最先承辦大林火力

第三、四號機（民國 59 年）及協和火力第一、二號機（民國 61 年）之部分設備基礎設計與興達火力第一、二號機（民國 67 年）廠房鋼架設計，至民國 71 年起陸續承辦興達火力第三、四號機、台中火力第一至四號機及台中火力第五至八號機土建工程設計，此等火力機組之工程設計就涵蓋了廠房區及附屬設備之基樁及基礎（但未含汽機台），因此，中興工程顧問累積了相當多之火力發電廠主要機電設備基礎之設計經驗及其他土建工程設計技術。

至於核能發電廠設備及結構物基礎設計技術層次，比火力發電廠更高，其主要原因在於核能發電廠主要設備之安全要求較高，且其大部份之基礎都是深開挖，以便其厚實之筏式基板能直接座落在堅實岩盤上而確保在地震時仍可保持穩定，原則上乃是不採用樁基。此外，核能發電廠之耐震設計要求也較為嚴苛，依結構物之用途，與其對電廠安全影響程度，分為耐震一級、二 A 級、二 B 級及二 C 級。於民國 69 年，中興工程顧問承辦核三廠緊急冷卻水系統之結構物乃是屬於耐震一級結構物，依法規必須考慮在發生安全停機地震（SSE）下，仍能維持正常運轉功能，直到安全停機為止；再者，在發生運轉基準地震（OBE）時，緊急冷卻水系統之結構物構材應力均需在彈性範圍內。依規定，耐震一級結構物需採用動力分析進行結構設計，並考慮結構物與土壤之互制作用（Interaction）以確保安全。至於民國 73 年承辦之核四廠循環冷卻水抽水機房係屬耐震二 A 級，須檢核結構物在承受 SSE 時不會損壞、倒塌為要件，而當時核四廠 SSE 之最大地表加速度為 0.4g，遠超出一般建築物之耐震設計標準。惟於民國 95 年依新頒布之耐震設計規範，採用 SAP2000 程式進行 3D 結構分析，重新評析其耐震能力，所獲結果為有部分構件需待補強。

因考量離島燃料之運輸與供應等條件，台電澎湖尖山及金門塔山擴建工程決定採用柴油發電機組。以澎湖尖山火力第二期第五至第十二機發電擴建工程為例，機電設備除採用柴油主機，其他設施有廢熱鍋爐、選擇性觸煤除硝設備、中央冷凝器、集塵設備及主變壓器及開關設備等，土建工程包括廠房及 GIS 房擴建、集合式煙囪、循環冷卻水暗渠及機電設備基礎、展示館及宿舍等。由於在既有廠址擴建，除基地範圍受限外，擴建工程規劃設計時，需要特別考慮：(i) 不能影響既有四部機組運轉；(ii) 既有架空起重機之延續使用及 (iii) 新舊管線銜接點之隔離及無礙使用等。此外，規劃設計時亦針對既有柴油機組之運維問題，提出下列改善設計：(i) 廠內配管布置由管溝配置修訂為置於擴建廠房地面層所增設樓層，以減少管溝開挖並利管路施工及容易維修與保養；(ii) 廠房通風系統增設鹽分過濾設備並在廠房內經常維持正壓，以降低鹽害並改善通風品質；(iii) 廠外設備依分區方式分別增設混凝土及鋼構房室，減少鹽害直接侵蝕及 (iv) 廠房設計複合式隔音門窗限制噪音不超出 45dB (A)，以改善廠內人員工作環境之品質。經由澎湖尖山及金門塔山擴建工程設計，中興工程顧問公司獲得了大型柴油機組發電廠建廠之整體規劃設計經驗與技術。

3. 相關港灣工程設計技術

核能、火力發電工程因建廠用地、重件設備上岸、燃料及廢棄物之運送及循環冷卻水系統臨岸結構物保護等需要填海造地、興建防波堤、碼頭、海底取、排水管、海上警示、浮標等港灣及海洋工程。中興工程顧問之港灣及海洋工程設計經驗及技術，最早可追溯至核一廠進水口防波堤（民國 60 年）、核三廠出水口防波堤（民國 69 年）；碼頭之規劃設計包括核三廠專用碼頭（民國 66 年）、蘭嶼放射物儲存場之碼頭（民國 67 年）、核二廠之明光碼頭（600 噸級貨輪）。典型之港灣工程以核四廠為例，包括循環冷卻水進

水口之外廓防波堤、迴船池、重件碼頭（4,000 噸級貨輪）、溫排水之排水頭與直井基座及海床保護工、海上警示浮標等設計技術。至於其後續之福隆海灘補救評估等所需技術尚包括海象分析、波浪分析、漂砂研究等數值模擬及水工模型試驗等技術。

四、電力工程技術展望

（一）水力發電工程規劃設計技術

水力發電工程攔溪築壩取水發電，工址大都位於山嶺區，以台灣位處環太平洋地震帶，地震頻繁又易遭受颱風挾帶暴雨侵襲，加上先天性之地形陡峭、河川短促、坡陡流急、地質脆弱等不利自然條件，興建水力發電廠必然會遭遇或牽涉到許多技術課題，並也需預謀如何確保在未來經濟壽齡內不會發生重大災害之不確定性難題。中興工程顧問承辦了十數個水力發電工程之規劃設計，已具有豐富的規劃設計經驗及技術能力尚可因應解決這些問題。規劃布置之水路選線及主要結構物之選址，除需符合功能需求外，仍續採取順乎自然、尊重自然之原則，即採取不與自然對抗之避災策略，如將主要結構遠離活動斷層、滑坡、崩塌區、土石流潛勢溪流段及河川沖淤段等風險地點，而相關之設計洪水及設計地震也應依結構物重要性採取較高之標準，以減少在經濟壽命內發生災損。尤其，近年來全球氣候快速變遷，為因應台灣水文有發生旱潦兩極端之交替趨勢，對水力發電工程之堰壩、進水口及尾水出口以及電廠區附屬通道臨溪洞口等之設計標準，宜須有嶄新之思維，即認知工程評估及分析技術有其侷限性，面對不可預測之未來氣候變遷，對目前工程設計要存有不一定安全之憂患意識。依據 921 地震後大甲溪發電廠遭受歷次颱風豪雨事件引起之邊坡坍方、土石流、河床淤積及洪水等災損經驗，未來水力發電廠規劃設計須另外特別考慮之技術課題為：

1.儘量加強導致災害及相關敏感因子之調查、研判及評析。

2.研究、訂定合宜之設計標準及檢核標準並作風險評估。

3.加強防災設計，採用多重防護設計理念及保有可配合環境變遷調整防災設計之彈性考量。

4.預估超越設計標準之異常狀況模擬及分析並研採減災設計或措施。

5.水力發電廠之運維手冊應加強土木、水利構造物及週遭潛在風險之安全檢查及防護措施、建立監測及預警措施與緊急應變計畫。

(二) 電力工程技術

1.電力工程竣工商轉後，如發生運轉問題或異常需停機檢修，必將肇致嚴重之發電損失，因此電力工程之工程設計極為著重安全性及可靠性，尤其是水力發電廠位在山區承受諸多不確定風險，工程設計上難免趨向保守，但為避免設計過度保守之批評，未來之規劃設計應朝向精進設計努力並持續改善及吸收新進技術以提昇品質。此外，設計仍應加重考量環境生態、水土保持及景觀美化。

2.電力工程建廠之發包方式近年來雖已有火力電廠整廠及變電站採用統包模式，惟一般仍以組件 (Component Basis) 分標方式發包最為普遍，也即所謂之傳統設備標發包方式，因此產生土木、機電及儀控之互相配合與界面整合之需求，例如設計、採購及施工作業時程配合、各標承包範圍及內容之劃分、完整性、功能及品質要求一致性等，常成為計畫能否如期如質完工之關鍵所在。業主常傾向由設計顧問負總責，因此除專案管理技術外，編擬技術規範及招標文件也極為重要，亦為應予加強關注之工程技術。此外，依現行區域計畫及土地法、電業法、水利法、建築法、水保法、環評法、勞工安全衛生法、採購法及行政程序法等法規、品質查核制度之規定及

要求下，電力工程設計及監造工作受到多方面之約束，可以說工程設計也要兼有此種“非工程面之技術”，始能順利辦理工程設計及監造。

3.為增進能源多元化、改善環境品質及國家永續發展，再生能源發電之開發利用已成為政府施政之重點策略。中興工程顧問除在非抽蓄式水力及垃圾廢棄物焚化發電已累積相當多之工程設計技術外，未來可著重在離岸風力發電技術之加強及提昇。此外，海洋溫差發電、潮流發電及波浪發電等亦有可能成為未來再生能源發展重點，除再生能源發電及海床輸電之技術外，相關之海岸及海洋工程之設計及施工技術亦須配合研發。

4.中興工程顧問已承辦了 40 年之電力工程，公司本身累積了可觀的經驗、資歷、技術能力與良好信譽，但公司技術人員個人之經驗及技術如何薪火相傳而延續發揮、並改善及提昇競爭力等所要採取措施及應予關注之處，試列如下：

(1) 技術人員之經驗傳承需要人員共同參與，從實際工作中吸取或加強技術訓練，二者雖均需花費相當的時間及成本，代價可能昂貴但是值得的。

(2) 技術文件及資料需要整理與保存，始能成為有用的技術知識寶庫，早期的計畫文件資料整理，應是重點工作之一。

(3) 早期自行開發之核心電腦程式須隨電腦使用環境、程式語言、電腦應用技術之演進，應予研發改善程式之使用環境，以提昇工作效率；例如採用視窗化介面改善輸入及輸出所需之前後處理，及展現更佳的技术成果等。

(4) 加強熟練應用早期工程設計較少涉及之 3D 數值模擬或分析程式：例如水力發電之進水口、特殊布置之平壓塔或水路直、斜井之流況分析、分歧管水理分析、地下廠房安定分析及發電廠之管線及設備防碰撞分析以及水流激發振動之分析等。

表 4 水力發電工程之一般工程技術

技術名稱	要項說明
1.水文及水理分析	1.計畫區雨量及洪水頻率分析、河川流量 2.堰壩規劃設計所需水文水理 3.發電進水口及尾水出口水理（流況、水位及沖淤） 4.著重永久通道洞口／平台防淹設計所需設計洪水、水位 5.冷卻水水源 6.下游河道可能於積及相關之水理演算
2.壩工	1.一般壩工規劃設計
3.工程地質調查	1.一般工程地質調查 2.著重區域性地質及水路隧道沿線與地下電廠之工程地質之探查及岩力試驗 3.重大水工結構物建造地點之地質調查
4.大地工程	1.一般大地工程規劃設計 2.著重進水口、尾水出口、廠房通道洞口之上方坡面穩定及保護工程
5.隧道工程	1.一般隧道工程規劃設計 2.針對斷層、剪裂帶等特殊地層之處理及支撐設計
6.地震評估及地震危害度分析	1.一般大壩規劃設計 2.除建築物外之構造物設計耐震參數
7.結構工程	1.一般結構工程設計
8.治山防災技術	1.水力發電計畫均位處山坡地，一般坡地沖蝕、崩坍地及土石流及落石防患、防災設計

表 5 水力發電工程核心技術

技術名稱	要項說明
1.發電水路暫態分析	1.分析電廠運轉時，負載及卸載之暫態現象包括平壓塔湧浪分析及水錘分析 2.提供發電水路、平壓塔及壓力鋼管設計及發電機組設計及安全運轉之需求條件（水位、水壓、速率變化）以確保水力電廠安全運轉
2.發電水路水頭損失計算	1.依據發電水路布置及尺寸計算各種發電出力或水輪機導翼開度之水頭損失 2.提供發電水路暫態分析、以供電力研究模擬運轉及水輪機容量選定使用
3.壓力隧道分析	1.分析發電水路經濟直徑 2.分析壓力隧道承受內水壓、外水壓及或灌漿壓力之應力以供襯砌設計（鋼筋混凝土或鋼襯） 3.依隧道沿線地質，擬 4 到 5 種不同支撐及襯砌設計，以供現場選擇
4.電力研究（模擬電廠運轉）	1.模擬川流式電廠運轉，計算電力效益（可靠出力及發電量） 2.模擬調整池式及水庫式電廠運轉，計算電力效益（尖峰出力及發電量） 3.發電量變動風險分析
5.經濟評估及財務分析	1.分析發電工程之經濟效益及成本，作為判定開發規模及計畫經濟性之基準 2.分析計畫投資之現值報酬率、投資回收年限及淨現值，及償債計畫，以判定計畫財務健全性
6.風險與不定性分析	1.分析計畫投資風險包括敏感性分析及風險分析。

表 6 水力發電工程之水工機械及機電設備技術

技術名稱	要項說明
1. 閘門設計技術	1. 依據電廠運轉條件分析並設計弧形或固定輪閘門及其必要構件、配件 2. 計算閘門重量及提吊及關閉操作方式，以供設計閘門啟閉設施
2. 壓力鋼管及分歧管設計技術	1. 分析內外水壓力下壓力鋼管之管厚、焊接及加強環等設計 2. 分析分歧管形狀、管厚設計及應力分析
3. 水輪機選定技術	1. 依計畫之水頭、流量及運轉條件評估選定機組型式、單機容量及台數以及研訂配合水路系統之水輪機中心高程
4. 水輪機規格及主要尺寸	1. 訂定水輪機出力、轉速、比速、奔逸速度；動輪、上蓋、吸出管及渦管等之尺寸及材質要求。
5. 輔機設備及系統	1. 分析或計算儲氣槽、壓油設備冷卻水系統及通風系統及排水系統之槽、坑容量；風機、抽水機及排水機之容量及揚程
6. 發電機選定	1. 依轉速、出力研選發電機型式、激磁設備
7. 發電機規格及主要尺寸	1. 訂定或計算中性點接地設備容量、二氧化碳滅火系統
8. 輔助電氣設備及系統	1. 選定或計算絕緣匯流排、廠用變壓器、柴油發電機之容量、UPS、蓄電池及充電機之容量及廠用電系統故障電流等
9. 水輪／發電機組安全性能	1. 機組壓力及速率上昇率、飛輪效應、水力穩定及系統搖擺等核算 2. 機組負載權重之選定

表 7 核能發電工程設計

工程名稱	機組型式及容量	工作內容	服務期間
1. 台電核能三廠第一、二部機	PWR 2x951MW	循環冷卻水、緊急冷卻水及生水系統、抽水機房、專用碼頭、出水口及防波堤、大型倉庫、護坡、生物槽發電機房、油槽等及循環水系統動態水理分析	66年6月~72年11月
2. 台電核能四廠第一、二部機	ABWR 2x1350MW	外圍土木工程設計包括循環冷卻水、生水、道路及排水系統、抽水機房、防波堤、重件碼頭、出水隧道及排水頭等	73年3月~98年12月

表 8 火力發電工程設計

工程名稱	機組型式及容量	工作內容	服務期間
1.台電興達火力發電廠第一、二、三、四部機	燃油/煤 2x500MW 2x550MW	1.#1/#2 廠房區及附屬設備零星土木結構設計 2.#3/#4 廠房基礎、循環水系統、道路及排水、排灰管路基礎、填灰工程	1.69年10月~71年2月 2.71年2月~74年7月
2.台電台中火力發電廠第一、二、三、四部機	燃油/煤 4x550MW	廠房區及附屬設備土木結構設計。廠房區包括鍋爐房、汽機房及主控制室。附屬設備包含油槽區、日用油槽區、生水池、循環冷卻水抽水機房、消防泵室變壓器區、地下電纜溝、電纜道、電纜隧道、管溝、煙囪基礎、輸煤及排灰系統及道路排水系統。	76年2月~81年3月
3.台電大林火力發電廠第一、二部機改燃煤	燃油 2x300MW	煤灰倉、出灰系統、輸煤設備基礎	71年3月~73年2月
4.台電台中火力緊急氣渦輪機第一、二、三、四部機	燃油 4x80MW	廠房區及附屬設備土木結構及建築設計	76年2月~81年3月
5.台電台中火力發電廠第五、六、七、八部機	燃油/煤 4x550MW	廠房區及附屬設備土木結構設計。廠房區包括鍋爐房、汽機房及主控制室。附屬設備包含油槽區、日用油槽區、生水池、循環冷卻水抽水機房、消防泵室變壓器區、地下電纜溝、電纜道、電纜隧道、管溝、煙囪基礎、輸煤及排灰系統及道路排水系統。	79年12月~89年11月
6.台電台中火力發電廠第九及十部機	燃油/煤 2x550MW	協辦鍋爐廠房、電纜隧道、循環冷卻水系統相關土木、道路及排水系統及廠區景觀設計	88年1月~98年12月
7.台電大潭燃氣火力發電廠	燃天然氣/油 6x720MW	協辦循環冷卻水系統相關土木、辦公室、宿舍、倉庫、道路及排水系統及廠區景觀設計	87年8月~98年12月

表 9 柴油機發電工程設計

工程名稱	機組型式及容量	工作內容	服務期間
1.沙烏地阿拉伯巴哈電廠	燃柴油 2x5MW 5x10MW	全廠包括土木、建築、基礎工程設計	65年8月~69年
2.台電金門水頭塔山發電廠第五至第八號機發電工程	燃柴油/重油 4x7.5MW	柴油發電機組及其附屬設備、主變壓器及其開關設備與其基礎、擴建廠房、RC 集合煙囪主體與其基礎、煙管、海水冷卻水泵及相關管路、管溝、消防、防火、給排水、通訊、通風空調、監視、接地及避雷、照明、電源系統、衛生工程、空氣與水污染防治以及維修大樓與有眷備勤宿舍。	88年2月~96年3月
3.台電澎湖尖山火力電廠第二期第五至第十二號機發電擴建工程	燃柴油/重油 8x10MW	1.土木建築及結構設計 包括擴建廠區基樁工程、廠房擴建、GIS房擴建、RC 集合煙囪主體及基礎、海水冷卻水進水、回水暗渠、設備展示館及地下防空避難室、有眷備勤宿舍等 2.機電設備工程設計 包括柴油發電機組及附屬設備、80/20/5噸架空起重機、雜項機電設備、變電及配電設備、2000KVA 全黑起動柴油發電機組設備等。	87年8月~93年6月