

氣候變遷對水利工程挑戰與調適

陳仲賢

經濟部技監、博士

一、前言

近年來全球氣候變異劇烈，幾乎逐年都在氣象紀錄史上破紀錄。台灣在 2002 年出現嚴重的乾旱與五十年來最熱的夏季；2003 年歐洲夏天出現熱浪，僅法國就有約二萬人死亡；2005 年美國佛羅里達州颶風肆虐，當年九月份侵襲美國紐奧良的卡翠娜颶風造成大規模破壞與傷亡；2006 年三月，一個超大型熱帶風暴侵襲澳洲昆士蘭地區，帶來時速高達 300 公里的暴風，造成澳洲近數年來的最大天災。但是，澳洲大多數地區竟然是乾旱年年，出現千年來最嚴重的乾旱，農牧業大受打擊。中國大陸與南亞地區出現洪水的次數則是異常頻繁，2007 年夏季大陸淮河流域水患肆虐，重慶市出現破百年紀錄的豪雨；同時南亞豪雨不止，上萬人避難，上千人死亡。而在北歐，則是低氣壓長期籠罩英國群島，並往北擴及瑞典、丹麥，持續性地豪雨造成河川暴漲洪災肆虐，打破過去數十年記錄。全球氣候變化已成爲全球各地人民必需面對新問題。大風暴、森林火災、乾旱和洪水，在全世界不斷刷新紀錄，今年（2010 年）巴西大淹水及大陸雲南大旱等旱澇極端同現現象，已成常態，爲全球帶來愈來愈多的災難，已造成無數死傷和

損失。依據聯合國氣候變遷小組(IPCC)第二分組在 2007 年提出的評估報告，氣候變化所導致的後果，主要在：水資源與其管理、生態環境、糧食、纖維與森林物品、海岸與臨海區域、經濟、居住和社會以及健康等六個領域。其中，在水資源方面，預估熱帶地區的水量可能會增加 10 至 40 %而造成淹水災難，其他地區的水量反而會減少 10 至 30%而帶來乾旱等問題。幾乎所有區域在水資源管理方面會逐漸遭到困難。在亞洲，氣候暖化將會加重淹水問題，再加上該地區在人口、發展等領域上的壓力，很有可能會造成飢荒以及死亡率的上升，也會妨礙許多國家的對永續發展之追求，而災害仍不斷發生中。

惟台灣地區水利環境近年來已大幅改變，產業之水資源問題日趨複雜，加上氣候變遷影響日益明顯，2008 年卡玫基及 2009 年莫拉克等颱風均爲台灣帶來莫大衝擊，造成生命及財產巨大損失，台灣面臨複合型災害時代已將來臨，亟需以永續利用之新思維，規劃前瞻性與整體性的全方位水利政策，帶領我們邁向 21 世紀之挑戰。

二、台灣水環境特性

(一)台灣先天條件

1.地型特性

台灣河川短促、坡陡流急，將造成洪峰到達時間快，蓄水空間不足等不利防洪及水資源的問題。

2.地質特性

台灣地質年輕脆弱，自 1999 年 921 集集大地震後山區土石鬆動，颱風豪雨過後大量土砂淤積河川野溪或水庫，釀致重災。2004 年艾利颱風重創石門水庫，2009 年莫拉克颱風後新增崩塌共 39,492 公頃，推估泥砂生產量有 12 億立方公尺，其中坡面殘餘量 8 億立方公尺，土砂流出量 4 億立方公尺。土砂問題恐影河川排洪、水庫淤積及原水高濁度問題。

3.水文特性

臺灣地區年平均降雨量約 2500mm，為世界平均年降雨量 3 倍，惟因山區特性分別形成若干小型閉合式降雨中心，年雨量集中於 4 月至 10 月，降雨的時間與空間

分布頗不平均，亦因為高山降雨及時空分配不均，影響防洪甚巨。

4.水資源

臺灣地區之平均年雨量約為 2,493 毫米，平均年總逕流量約為 644.92 億立方公尺，全島平均豐枯比例為 8：2，南部地區則高達 9：1。台灣目前用水結構(1997～2006 年平均值)，其總用水量約 206 億，其用水以農業用水為主(占 75%)，其次為生活用水(占 17%)，工業用水(占 8%)。而供水來源方面，地下水水源則占 27%，餘為地面水水源，詳如圖 2-2。其中地下水仍處於超抽情況，而地面水水源中，水庫供應量僅占 21%，屬於偏低的國家。

由圖 2-2 之河道逕流量及地下水入滲量合計得到年可更新水資源量為 690 億立方公尺，此量代表我國水資源可利用的極限，若除以我國人口數 2,300 萬，可得我國人均水資源量為每人每年 3,000 立方公尺，此量約為全世界平均值之 1/3，參見圖 2-3 所示。

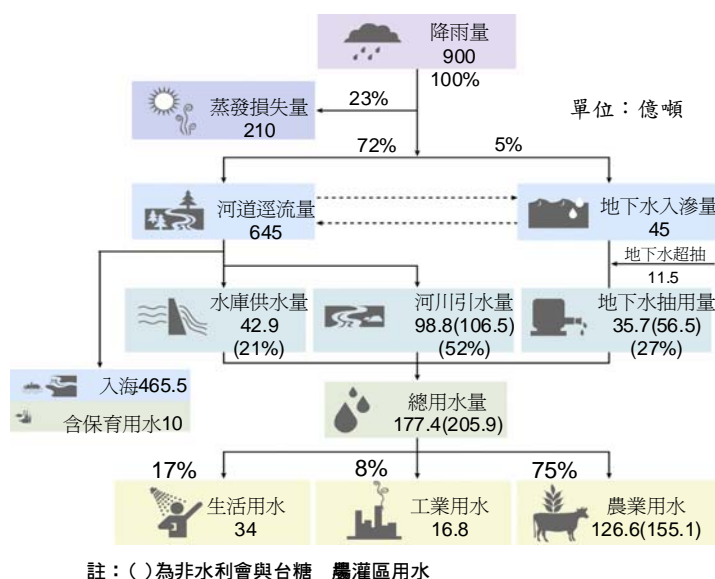
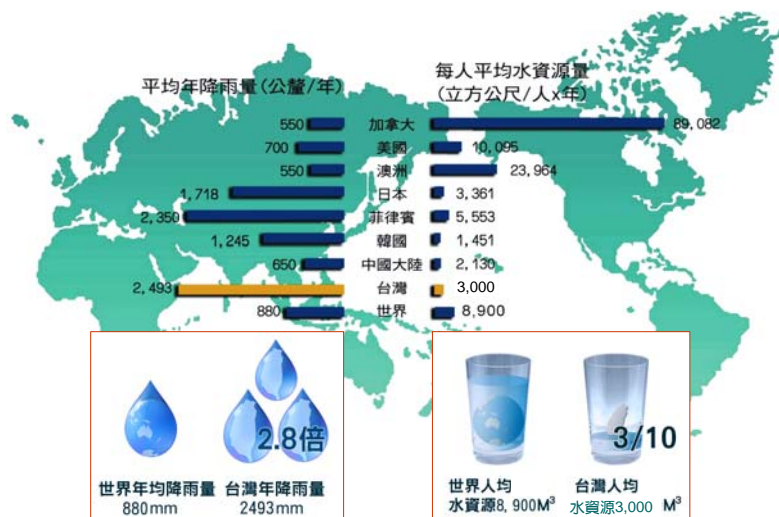


圖 2-2 水資源利用結構



資料來源：1.日本國土交通省，「平成 21 年水資源白書」2.韓國國土海洋部。3. FAO，「AQUASTAT」。

圖 2-3 台灣地區人均可用水資源量

(二)台灣後天問題

60 年代起水利建設以供應量足質優之公共給水為主要目標，因而成為主要公共建設項目，各項建設促使國內工商業發達，經濟快速起飛；到了 70、80 年代，科技文明急遽發展，生活水準大幅提升，水資源需求更加殷切，快速的開發帶來的問題，包括：

- 1.上游土地不當開發，超限利用，致使森林面積快速縮減，破壞水土涵養，土石流發生機率大幅增加；尤其集水區，一但沖蝕量大，泥沙淤積的問題，使水庫

壽命減短。

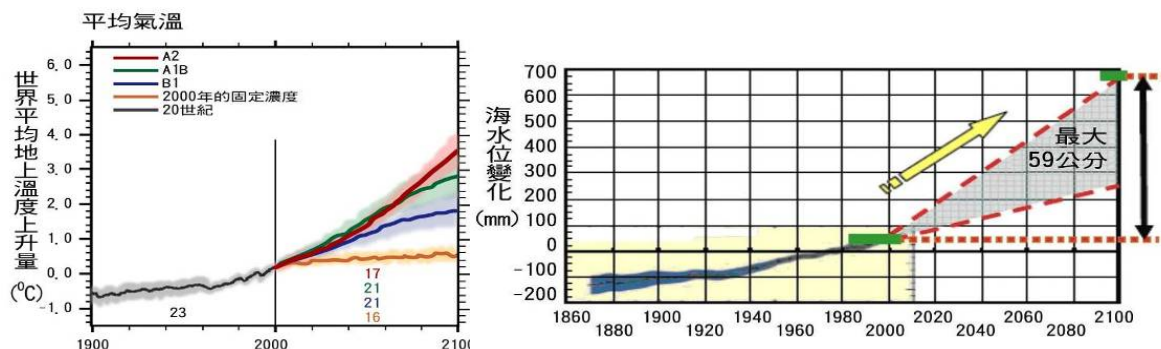
- 2.中游土地過度開發，與水爭地，河道束縮，綠地減少，不透水區域不斷擴大，地表逕流量迅速集中，都市化效應浮現。
- 3.人口過度集中於都市，成長快速，不僅水的需求量大增，用水未合理分配，廢水及污水量亦大為增加，加速河川水質惡化，降低水資源可利用量。
- 4.台灣西南沿海地層下陷，嚴重淹水、土壤鹽化及水土資源流失等問題，面對氣候變遷降雨形態變化及海平面上升等衝擊，恐將成為高脆弱度地區。

三、氣候變遷的現象

(一)全球暖化趨勢已無可避免

1. 聯合國政府間氣候變遷委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 2007 年發表的第 4 次報告指出，從氣候變遷的直接觀測資料顯示，全球平均溫度及海水溫度的上升、

全球海平面的上升、冰川及極地等覆冰面積的減少。全球暖化之其他的徵兆，包括北極氣溫和冰的變化造成各地降雨量的改變、以及極端天氣發生的頻率及嚴重程度增加等，這種異常氣候導致全球各地不斷發生破紀錄的水旱災害。



2.美國時代雜誌每年皆對全球大自然災難統計，如 2007 年全球 10 大自然災難，其中水旱災佔 7 成，包括(1)孟加拉國超級氣旋風暴「錫德」、(2)美國東南部乾旱、(3)墨西哥洪水、(4)颶風「弗利克斯」、(5)南亞洪水、(6)朝鮮洪水及(7)中國南方洪水等均造成重大的生命及財產損失。近年，全球各地近期水旱災依舊頻繁，包括中國北方多個省分、美國加州旱災及澳洲等地區發生嚴重乾旱，去年（2009 年）菲律賓首都馬尼拉接連三個颱風肆虐，全市泡於水中一個多月，除了造成嚴重傷亡、居民無家可歸外，更導致傳染病在當地流行。今年（2010 年）4 月初巴西里約熱內盧遭暴雨襲擊，引起土石流造成許多房屋與基礎建設毀

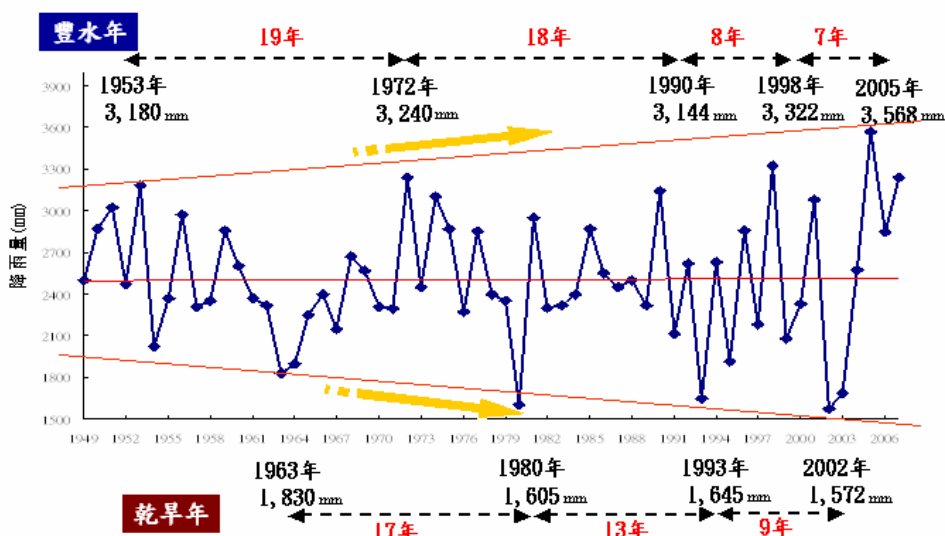
損，死亡人數達 200 多人，超過 5000 人無家可歸。

3.島國受氣候變遷影響，為高脆弱度地區：氣候變遷對島國的衝擊，無論是位處熱帶或高緯度的島國，都特別容易受到氣候變遷、海平面上升及極端事件的影響；海平面上升將加劇洪水、暴潮、海岸侵蝕及其他沿海危險，從而威脅島嶼賴以維生的重要基礎建設；另氣候變遷將導致許多島國水資源的減少。

(二)台灣察覺到的現象

1.旱澇加劇之趨勢

我國年雨量受每年颱風影響甚大，年平均雨量為 2,493 毫米，而從近 50 年雨量觀測紀錄可知，年雨量呈現旱澇加劇的情況呈不斷持續。



2. 降雨型態改變

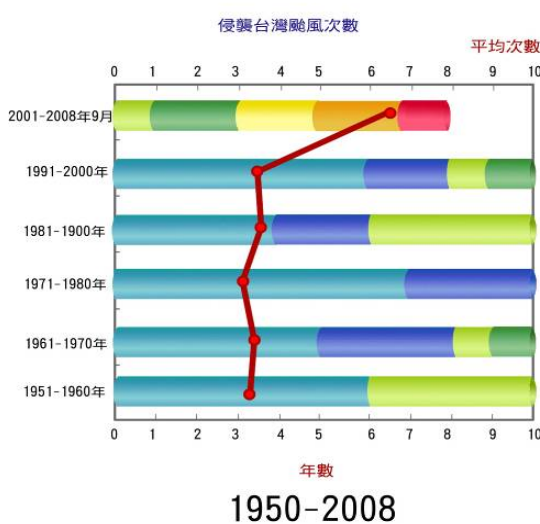
台灣地區之降雨型態受氣候變遷影響，年總降雨日數逐年減少，以台北站為例約少 27.8 天，而年總雨量呈增加趨勢，約增加 268 mm，平均每日暴雨量增加約 30%。

3. 颱風次數及暴雨增加

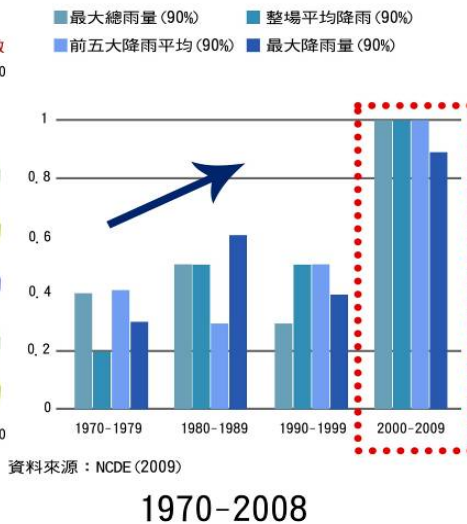
氣候變遷造成颱風及降雨型態的改變，台灣地區颱風生成次數過去每年 3 次增為每年 7 次，河川流量則有豐愈豐、枯

愈枯的趨勢，導致淹水及缺水的風險及損失變大。而中研院劉紹臣 2009 年發表的「全球暖化與極端降雨密切相關」指出，全球溫度每增加 1°C，台灣前 10% 強降雨就會增加約 140%，而至 2030 年時，全球溫度約增加 0.7°C，故 2030 年台灣前 10% 強降雨在未來 25 年左右會再增加 100%。由於台灣前 10% 強降雨大都來自颱風，更大、更多的摧毀性水災、土石流，未來將無可避免。

侵台颱風次數每10年變化



極端降雨(90%)頻率每10年變化



資料來源：NCDE (2009)

4. 台灣颱風特性改變

台灣颱風型態近年受東北季風共伴與西南氣流影響，加以地型效應，延時及強

度增強，如莫拉克颱風，前所未有的特性，接近世界包絡線極端值，為台灣帶來前所未有的災害。

四、台灣面臨問題

以往的水利建設的安全需求與功能需求大致採用水環境既往的特性作為其規劃設計的參考，然在全球氣候變遷的因子加入後，原本的降雨量、降雨強度、洪水量、暴潮、乾旱歷程、用水需求，都將有不同程度的改變，此也將直接或間接影響到水利建設的功能與安全性，在先天條件不良，後天又開發不當等問題下，台灣受氣候變遷衝擊影

響將更加嚴重，近年風災除帶來水災，土石流等典型災害外，很難想像的是，大量泥砂及漂流木亦帶來另類災害—缺水，而對水利設施的破壞力更加嚴重，以往的設計條件及經驗，都需重新思考，河川不再是清流條件，水文條件及歷線分佈也不同，種種都將是新的考驗與問題，水將更大、更枯、更濁，需要我們積極面對。

水利建設	現 況	未 來	
		氣候變遷 (致災外力)	社經環境變動
水資源	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 水庫淤積與延壽 ◆ 集水區土砂災害 ◆ 蓄水設施不足 ◆ 水源備援系統缺乏 ◆ 地下水超抽 ◆ 水源需求增加 ◆ 水價偏低 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 枯水期降雨減少 ◦ 土砂災害增加 ◦ 水質惡化 ◦ 蒸發量增加 ◦ 作物生長期變動 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 人口與產業 ◦ 用水需求變動 ◦ 糧食策略、國際糧食波動 ◦ 缺水忍耐度降低 ◦ 農業政策
防洪	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 都市化與不透水化 ◆ 缺乏淹水經濟調查資料 ◆ 地層下陷加重水患災情 ◆ 超過洪水的災害變應 ◆ 災害弱者(老幼婦孺) ◆ 治水預算不足 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 降雨強度增加 ◦ 洪水量增加 ◦ 颱風強度增強 ◦ 土砂災害增加 ◦ 海水位上升 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 都市化程度增加 ◦ 土地利用 ◦ 災害脆弱度增加

五、我們因應對策

氣候變遷下之暴雨洪水、暴潮與海岸侵蝕及土砂災害等致災外力，將伴隨地球暖化而逐漸加重，連帶使流域內的海岸、河川、排水系統承受防護能力降低的危

機，而受到區域土地使用與國家經濟財力等主客觀條件制約，應該以永續發展的觀念，以新思維取代舊思維，

	舊思維	新思維
整體性	<ol style="list-style-type: none"> 1.人定勝天 2.以支持經濟發展為主 3.以工程手段(硬體)為主 4.流域管理事權明確分工 	<ol style="list-style-type: none"> 1.尊重及順應自然 2.永續發展(兼顧環境生態、經濟發展及社會公義) 3.強化非工程(軟體)措施 4.流域整體規劃及分工執行
水資源	<ol style="list-style-type: none"> 1.充裕水源供應 2.需求導向管理(以需定供) 3.以傳統水源開發為主 	<ol style="list-style-type: none"> 1.天然水資源開發總量管制(落實世代公平原則) 2.供給導向管理(以供定需) 3.多元化水源發展(推動海淡及水再生利用等新興水源)
防洪排水	<ol style="list-style-type: none"> 1.傳統治水對策(築堤束洪、與水爭地) 2.集中處理(依賴河道排洪) 3.興建防洪排水工程為主 	<ol style="list-style-type: none"> 1.綜合治水對策(增納保水、滯洪、分洪、減洪、雨水貯留及耐洪建築物興建等措施) 2.分散風險(流域共同分擔雨水) 3.增納非工程防洪措施(土地利用管制、防災預警)

學術天地

整體方面應該尊重及順應自然，在防洪排水方面，現有的防洪設施不可能全部無限制地採取工程手段來提升防災能力，而是以流域內的國民、建築物及其他固定資產等保全對象為核心，走向軟體與硬體並重的管理手段，並以流域為單元，結合災害風險管理理念，以風險分攤的方式，降低各種災害造成的損害，並強化現有災害緊急應變及避災，避免產生國家中樞機能癱瘓或大量人命傷亡的狀況。在水資源管理方面，主要目標為滿足未來國民與各種產業的用水需求，使水資源能達到供需平衡，以避免氣候變遷下的乾旱風險，再建置備援供水網絡，以提升國民用水安全度，並進一步健全水循環體系，使我國邁向節水型社會。

(一)防洪面向

1.合理國土規劃

國土、水資源、農業、防災、保護區或環境敏感地區之土地使用管制等，應依國家發展定位，合理規劃利用，才可避免在高脆弱區作高度開發，增加致災風險及公共投資等不合理現象，如廬山溫泉，在辛樂克颱風重創後，因地方觀光產業發展

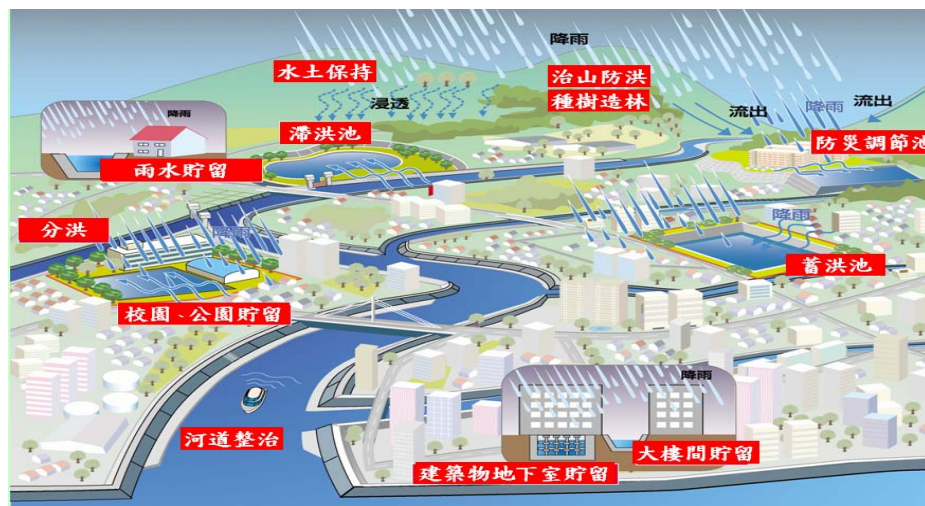
仍需投入廣大資源重建，此舉與天抗衡決策，難保日後不再遭受更大強颱侵襲而造成災害，如能事先在國土利用上合理規範，才能讓民眾生命財產真正受到保障，安居樂業。

2.推動流域整體規劃與綜合治水

以全流域為治水之基本單位進行整體規劃，在生態治河及綜合治水等理念下，有效整合坡地與平地及防洪排水與雨水下水道系統（設計標準、相容性及安全性），消除系統間之界面。

(1)以全流域觀點進行整體規劃：流域內水與土砂為一連動系統，必須以全流域的觀點進行規劃，包括流域綜合治水、統籌水源水質水量及流域內土砂綜合處理。

(2)推動流域綜合治水，運用上游保水(加強水源涵養及抑制雨水流出)、中游滯洪(規劃滯洪區或擴大洪泛區)及下游雨水貯留(都會區善用公園綠地或公共設施廣設雨水貯留設施)與降低低窪地區土地利用強度(興建耐洪性建築或低度使用)，共同分擔河川負擔，減免淹水災害及損失。



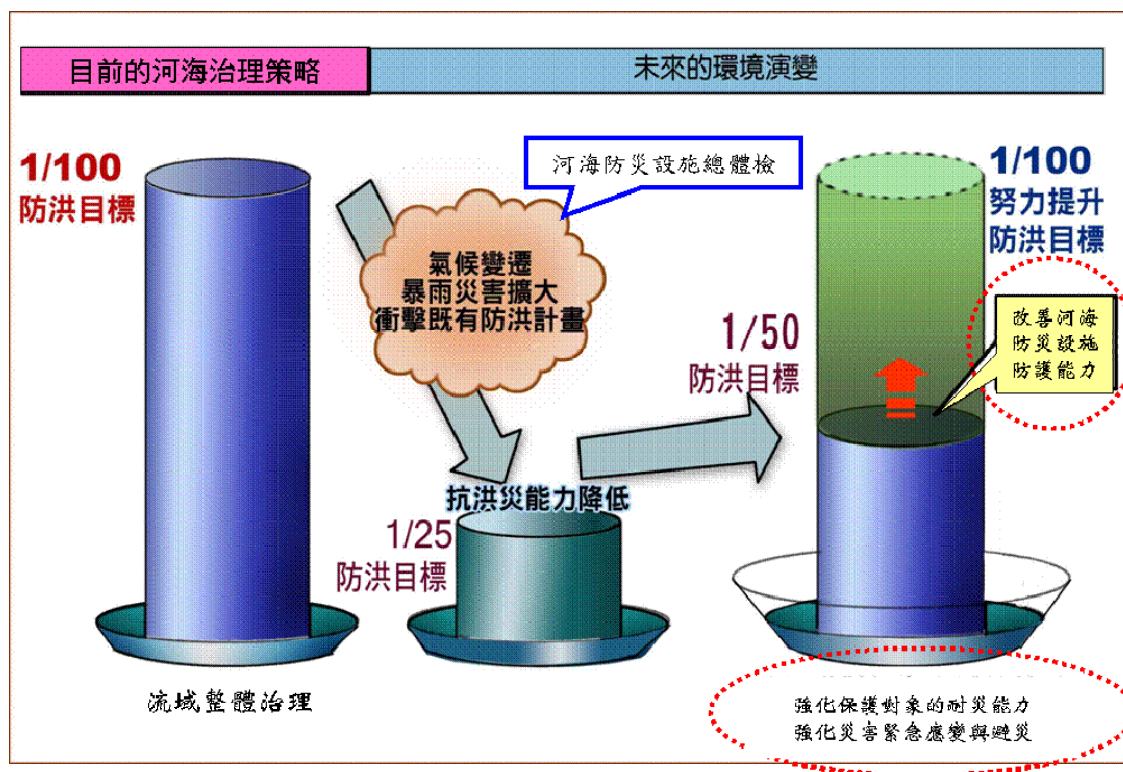
3.工程及非工程手段並重

氣候變遷衝擊下，將導致防洪保護標準降低，且工程有其極限，人定勝天的思維必需改變，惟政府須考量國家財政能力及氣候變遷之不確定性，僅能適度提升基本防洪保護標準，再輔以配套之非工程防災措施來降低災害損失。外界對水患治理的保護程度存有必須達到不淹水的誤解，此一部份必須透過加強與民眾溝通及教育宣導來改善，以預警、疏散及避災來降低災害損失，如美國卡翠娜颶風因無啟動疏散避災，造成 2000 人死亡，而隔年颶風來

襲，立即疏散避災，大幅降低死亡人數至 14 人。

4.檢討並提升防洪保護標準

大台北防洪保護標準為 200 年、中央管河川防洪保護標準為 100 年、地方管河川防洪保護標準為 50 年，但在氣候變遷衝擊下，極端水文事件一再發生，防洪保護標準大幅下降，如下圖所示，必須適度提升，原則維持現有保護標準，在工程方面河道需採加高、加寬方式，不足部分再輔以相關配套，如滯洪池、部落圍堤等方式加強。



5.堤防設計強度檢討

以往土堤因土砂及漂流木等複合型災害對於堤防凹岸攻擊面或容易受災面之衝擊，容易發生潰堤，造成大區域淹水災情，故堤防強度亦須適度強化，如迎水面及背水面，需加強堤防強度，原則溢堤不潰堤，

確保基本的保護程度。

6.生態復育，創造親水空間

以往隨著都市急速發展，為求安全度提高，且易於養護與管理，除土堤增加施作混凝土鋪面外，為因應在都市地區土地取得困難而興建防洪牆，以降低臨近地區

學術天地

淹水風險，然隨著全球性永續發展思潮，對生態與環境保護要求日高，在安全無虞之下，生態工法治理河川、海岸，創造親

水空間將是未來永續工法之趨勢，如花蓮七星潭海岸復育、屏東武絡溪水質改善及台東卑南溪整治等，都見相當之成效。



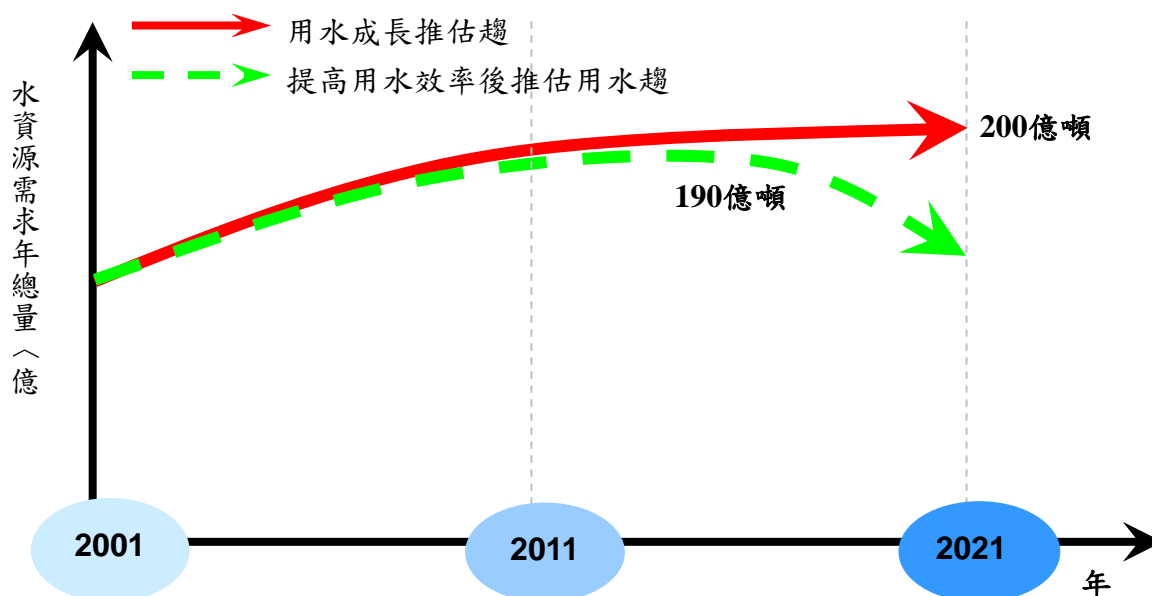
7.強化災害緊急應變與避災

落實全民防災教育，尤其是對民意代表、民眾及媒體的教育宣導，促使了解工程手段無法完全解決氣候變遷衝擊所衍生的災害。另建立防災預警及疏散避難的標準作業程序(S.O.P.)，落實防災教育演練，提高民眾應變能力，並結合社區民眾防災組織，建立全民防救災體系。

(二)水資源面向

1.天然水資源開發總量

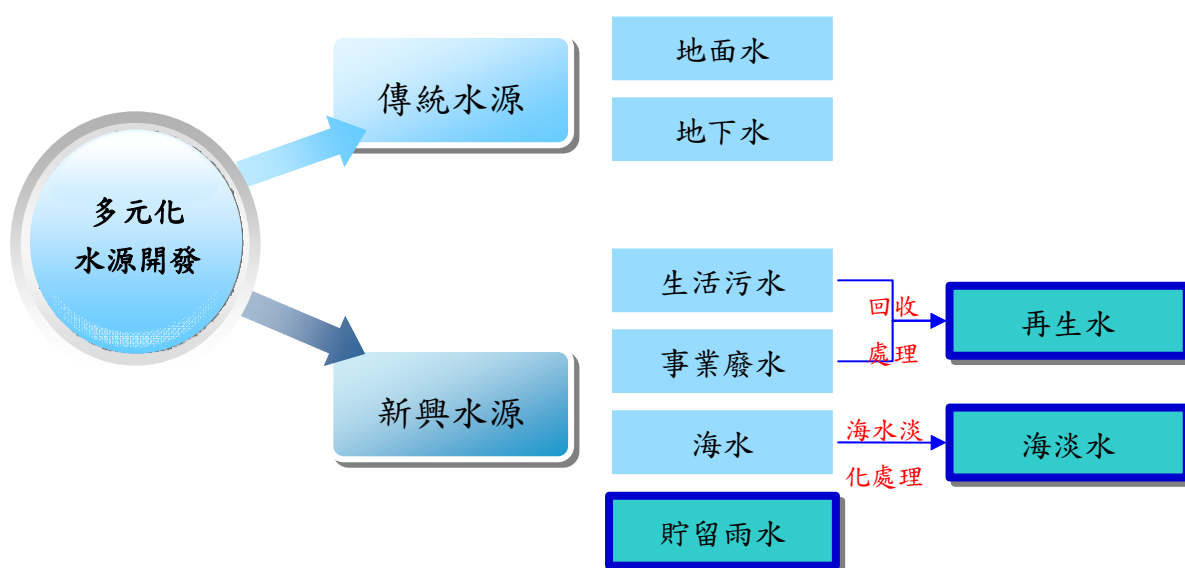
考量社會經濟成長趨勢及未來生活品質提升之需要，經評估河川潛能量、未來需求量、水資源計畫開發之期程、減抽地下水、增加備用水量、地區水源供需情勢之不同，以 2021 年總量為每年 200 億噸作為現階段台灣地區天然水資源開發利用總量管制之目標。惟若用水供需提前達成平衡時，此一上限值亦可視情況進行調整，如尚有開發水資源需求，不足的部分，則可以水權移轉方式，有效調度活用水源或以再生水方式，將污廢水再生利用，增加水源，讓後代子孫有更多的選擇。



2. 多元化水資源發展

氣候變遷衝擊及去年（2009 年）莫拉克為台灣帶來大量土砂，本人亦不贊同再以傳統方式開發水源，除提高用水效率，以節約用水、有效管理及彈性調度等方法之下，不足時再適度以多元方式開發新水

源及發展水再生利用、海水淡化及貯留雨水利用等新興水源，其中水再生利用有減少污染排放以及節能減碳的效果，對於環境保育、水資源循環利用，以及增加水資源利用效率具有多重效益，除提升整體供水可靠度，同時促進水利產業發展，符合前瞻永續性之政策，促進水源發展多元化。



3.既有設施永續經營與活化

- (1)台灣不應再開發水庫，惟既有水庫應永續經營利用，如果石門水庫不能再使用，將對北部造成莫大影響，而南部水庫亦面臨相同問題，應優先永續活化現有水庫，確保穩定供水。
- (2)對既有蓄水設施經營管理面上應加強上游集水區環境保育，減少土地超限利用，建置監測系統，減少集水區土砂沖蝕進入水庫。
- (3)水庫庫區應以水利排砂方式，加強水庫排淤、清淤及減淤等，減少淤積問題，維持蓄水空間及水庫壽命。
- (4)因應氣候變遷，配合未來降雨歷線，檢討操作規線，彈性調整蓄水空間及防洪操作。

(5)在活化水庫方面應辦理既有水庫更生計畫，如水庫加高，延長水庫壽命，提升水庫分層取水及蓄水能力，推動綜合整治計畫，增加庫容及提高既有水資源設施利用效率。

(6)檢討溢洪道容量，原設計 PMF 是否足夠，去年莫拉克時南部水庫就面臨此危機，石門水庫亦然，應全面總體檢，以防患未然，避免潰壩危機。

4.建置備援供水網絡

利用區域水源聯通調度，地表及地下水聯合運用，建立備用水量及備援系統，如電力系統皆有 15% 備援電力，避免尖峰時段超載無法負荷，而造成重大社經損失，在水資源日溢嚴峻的未來，亦有必要建置備援供水網絡，互調有無，才能確保供水穩定。



5.推動虛擬水庫及水足跡概念

- (1)推動虛擬水庫概念，結合調水（農業用水移撥）與省水（節約用水及降低輸水管線漏水率）等方式，來達到供需滿足，節省的部分就可以提供出來，將原本要興建水庫的公共投資轉用於節約用水等部分，如此就無需再蓋水庫，除可以減少開發、破壞環境外，亦避免造成社會的對立衝突。
- (2)根據聯合國的報告統計顯示，生產 1 公斤的米需要 2 千至 5 千公升的水；1 公斤的罐裝咖啡需要 2 萬公升的水。未來可加強虛擬水資源概念之落實，透過水足跡了解產業或產品的耗水量，對於耗水且低經濟價值的產品，採取進口的方式，並少用高耗水產品。參考水足跡概念，推動產業建立節水製程，在單位產能下有效降低耗水量，並獎勵達成節水目標之企業；另可透過水足跡標示，轉

變消費觀念，減少使用高耗水產品，達到全球化節約用水，促進永續經營與利用。

6.推動節水及水價合理化

我國水價大概是世界各國 1/3~1/8 間，也遠低於亞洲鄰近國家，日本是 65 元/噸，新加坡是 55 元/噸，水價較高者，每人每日用水量相對較低，水價合理化為推動節水之關鍵，為避免水價調整對民眾太大影響，我們可以基本用水量以下水價低廉方式，維護民眾基本用水權益，拉大累進式費率價差，以價制量，訂定季節差別水價，促成旱季節約用水，另合理的水價亦可提供再生水產業、工業製程改善及省水器材研發等誘因，並促進水利產業發展提昇節水意識，調整社會整體用水型態，並獎勵節水設施與裝置之設置，以達到節水之目的，如此台灣的水資源問題即可解決泰半。

六、結語

水是生命的要素，亦為生活、生產、生態三生所必須之關鍵資源，21 世紀最重要的課題將是水的議題，洪水、缺水、水污染及環境生態保育等水問題將制約國家社經發展，當政府因應時勢，以新思維從事水利建設之際，民眾也必須以新思維，身體力行來珍惜水資源及避免災害。首先必須體認的是，能有優質、便利的水為我們所用，並非是必然，當我們只要扭開水龍頭就有水可用時，世界上卻至少有十億人連喝水這麼小的需求往往都很難獲得滿足。而今我們省下水，就是省去開發，不僅節省公共建設的費用，更節省了天然資

源。省下來的這些，就是給後代子孫的本，就是地球、人類文明永續發展的資本；另自古以來人定勝天的定律，但 921 大地震，已打破此定律，2009 莫拉克更帶來無比震撼，氣候異常讓我們深切反思如何與自然共生，適應未來。唯有政府與民眾攜手合作，共同貫徹永續發展的理念，在氣候變遷愈變愈激烈的狀況之下，我們需要更多的智慧、更多思考、更多改變，以適應氣候變遷，藉由強化全民的水知識，結合各項水利事業的調適行動，將危機化為轉機，共同創造真善美的水環境。