

行政院所屬各機關因公出國人員出國報告書  
(出國類別：出席國際會議)

出席「新加坡國際水周」  
(Singapore International Water Week)

服務機關：經濟部水利署

姓名職稱：楊偉甫署長、阮香蘭科長

派赴國家：新加坡

出國期間：101年6月30日至7月6日

報告日期：中國民國101年9月

## 摘要

第五屆新加坡國際水周 (Singapore International Water Week, 簡稱 SIWW) 暨第三屆世界城市峰會 (World City Summit)、首屆清潔環境峰會 (Clean Environ Summit Singapore) 於本(101)年 7 月 1 日至 7 月 5 日假新加坡金沙會展中心 (Singapore Convention and Exhibition Center - Marina Bay Sands) 舉行, 本署楊偉甫署長應新加坡公用事業局 (Public Utility Board, PUB) 邀請率同水再生利用政策與科技研發主辦科科長阮香蘭出席 SIWW 水務領袖峰會及參加其周邊相關活動。另 PUB 亦協助安排參訪濱海堤壩 (Marina Barrage 河口水庫) 與勿洛新生水廠 (Bedok NEWater plant)。

除參與大會演講與現場參訪外, 本次亦與多間機關與公司進行會談, 包括與海淡節能公司 ERI (7 月 2 日, 海淡事宜)、新加坡公用事業局 PUB (7 月 3 日, NEWater 與氣候變遷事宜)、日立 Hitachi 公司 (7 月 3 日, 海淡事宜與自來水管線漏水事宜)、美商傑明 MWH (7 月 4 日, NEWater 與新加坡淹水問題) 等, 以掌握國際水務科技發展與推動經驗, 並推展國際事務聯繫及技術交流。

# 目錄

摘要.....	i
目錄.....	ii
表目錄.....	iii
圖目錄.....	iv
第一章 任務與行程.....	1
1.1 緣起與目的.....	1
1.2 行程.....	2
第二章 參與新加坡國際水周活動.....	4
2.1 2012 新加坡國際水周整體概況.....	4
2.2 新加坡國際水周主要活動.....	7
2.3 水務博覽會.....	13
2.4 與新加坡公用事業局 (PUB) 會談.....	23
2.5 署長接受中央社專訪.....	24
第三章 新加坡水務管理經驗.....	25
3.1 新加坡水源供需現況.....	25
3.2 公用事業局 (PUB) 簡介.....	26
3.3 國家水龍頭之一：向外購水.....	27
3.4 國家水龍頭之二：擴大集水區與增建雨水蓄水池.....	29
3.5 國家水龍頭之三：海水淡化.....	38
3.6 國家水龍頭之四：新生水 (NEWater).....	40
3.7 深層隧道下水系統 (DTSS).....	50
3.8 各項管理措施.....	55
第四章 結論與建議.....	60
4.1 結論.....	60
4.2 建議.....	61

## 表目錄

表 1.2-1 行程表 .....	2
-------------------	---

## 圖目錄

圖 2.1-1 國際水周現場 .....	5
圖 2.1-2 開幕儀式現場 .....	6
圖 2.1-3 聯合國環境開發署署長 Helen Clark 與新加坡外交部特使 Tommy Koh 教授會談 .....	6
圖 2.2-1 「重新思考廢水的三 R – 可回收資源與可回收水」討論會現場.....	8
圖 2.2-2 與 PUB senior director Kheng Guan Yap 會後合影 .....	9
圖 2.2-3 第五屆李光耀水資源獎和第二屆李光耀世界城市獎頒獎現場與專題講座 .....	10
圖 2.2-4 紐約城市水岸改造 .....	12
圖 2.2-5 Anammox 反應 .....	13
圖 2.3-1 JETRO 日本展覽館全景 .....	13
圖 2.3-2 PUB 展示研發成果之攤位與宣傳看板 .....	14
圖 2.3-3 各類超過濾膜 (UF) .....	16
圖 2.3-4 各類前置濾器 (pre-filter) .....	17
圖 2.3-5 黎明興公司 Anammox 技術與其攤位 .....	18
圖 2.3-6 Veolia EVALED 工業廢水用蒸發器.....	19
圖 2.3-7 各類自動化控制設備廠商攤位 .....	19
圖 2.3-8 東京水道服務株式會社之攤位 .....	21
圖 2.3-9 大型挖掘機具廠商攤位 .....	21
圖 2.3-10 工程顧問公司攤位 .....	22
圖 2.3-11 日立公司 (Hitachi) 之攤位 .....	23
圖 2.4-1 與 PUB 會談現場 .....	23
圖 2.5-1 署長於大會閉幕晚宴現場接受中央社記者訪問 .....	24
圖 3.1-1 新加坡四個國家水龍頭 .....	25

圖 3.1-2	新加坡多元化水源 2020 年目標 .....	26
圖 3.3-1	馬來西亞輸水至新加坡之輸水管 .....	28
圖 3.4-1	新加坡集水區與蓄水池一覽 .....	29
圖 3.4-2	新加坡市區排水 (烏節路 Stamford Canal) .....	30
圖 3.4-3	濱海堤壩示意圖與外觀 .....	31
圖 3.4-4	濱海堤壩配水至附近之淨水場 .....	32
圖 3.4-5	濱海堤壩操作說明圖 .....	33
圖 3.4-6	幫浦室 .....	33
圖 3.4-7	濱海堤壩訪客中心 .....	35
圖 3.4-8	電動操作模型 .....	36
圖 3.4-9	濱海堤壩訪客中心頂層草地 .....	36
圖 3.4-10	2010 年烏節路溢淹問題 .....	38
圖 3.5-1	Tuas 海淡廠興建過程與示意圖 (摘自 Hyflux) .....	39
圖 3.5-2	Tuas 海淡廠位置與鳥瞰 .....	39
圖 3.5-3	Tuas 海淡廠處理流程 (摘自 Hyflux) .....	40
圖 3.6-1	NEWater 處理程序 .....	41
圖 3.6-2	污水廠與 NEWater 廠分布圖 .....	43
圖 3.6-3	NEWater 訪客中心 .....	45
圖 3.6-4	RO 膜 .....	46
圖 3.6-5	UF 膜 .....	47
圖 3.6-6	UV 殺菌燈管 .....	48
圖 3.6-7	中控室 .....	48
圖 3.6-8	一般民眾參觀 .....	48
圖 3.6-9	市區 NEWater 管線 .....	49
圖 3.7-1	DTSS 示意圖 .....	52
圖 3.7-2	樟宜水處理回收廠處理流程圖 .....	53

圖 3.7-3 樟宜水處理回收廠海放管、海放管散流口與散流口保護套頭施工過程 (摘自 PUB).....	54
圖 3.7-4 CIPP 示意圖.....	55

# 第一章 任務與行程

## 1.1 緣起與目的

先天缺乏水資源的新加坡，為解決水資源匱乏問題，近年來結合水、能源與廢物綜合作業三大面向，成功拓展水務發展的新領域，如海水淡化、新生水的開發與技術發展，都已讓新加坡成為國際水務實踐的佼佼者。為吸引國內外水務業者齊聚新加坡互相切磋交流，進一步提升新加坡水務業的水準，並有助於新加坡中小型水務公司走向國際，自 97 年(2008 年)起開辦第 1 屆國際水周(Singapore International Water Week, SIWW)，至今(101)年已邁入第 5 屆。水周係由新加坡公用事業局(Public Utility Board, PUB)主辦，並由新加坡環境與水資源部、國際水協會(IWA)、國際海水淡化學會(IDA)、李光耀公共政策學院等共同協辦，主要活動包括水務領袖峰會(Water Leaders Summit)、水務大會(Water Convention)與水務博覽會(Water Expo2012)等，已成為各國官員、業界和水資源專家交換意見之重要平台。

PUB 供水科技及培訓中心黃署長漢忠(Ng Han Tong)於去(100)年 11 月 7 日蒞本署拜會，並致送國際水周邀請函邀請本署楊署長偉甫與吳副署長約西出席前揭水務領袖峰會及參加其周邊相關活動。該領袖峰會將邀請各國部長或高級政府官員、全球水相關產業領袖、國際組織代表及相關研究人員共襄盛舉，預計將邀請 200 至 300 名代表出席。領袖峰會活動包含與聯合國開發計畫署主管 Ms. Helen Clark 就永續水環境議題進行對話、邀請李光耀水獎獲獎者專題演講，以及全體大會(Opening Plenary)、圓桌會議及水領袖高峰研討會，其中全體大會討論議題為水環境與城市之永續發展；圓桌會議研商議題則為宜居及永續城市之水資源規劃；另水領袖高峰研討會主題為永續城市之尖端水科技及水產業之推動。黃署長並於拜會時提及雙方可於水周期間安排雙邊會談，以進一步推動雙邊之水務合作。

近年來，台灣地區受到全球氣候變遷及異常氣候的影響與衝擊，水資源環境已大不如前，面對當前用水持續成長但是水資源開發困難的情況下，水資源供需逐漸失衡。為因應氣候變遷的缺水風險，本署除了全面推動節約用水、彈性調度及強化設施有效管理等措施外，如何推動穩定的替代水源措施，將海淡水、再生水等新興水源適時、適地、適量、適質供給高缺水風險地區的用水需求，來突破缺水困境，乃現階段及未來的重要施政。水周主題與本署推動中之新興水源發展政策極為相關，為掌握國際水務科技發展與推動經驗，並推展國際事務聯繫及技術交流，由本署楊偉甫署長率同水再生利用政策與科技研發主辦科科長阮香蘭共同赴會。

## 1.2 行程

表 1.2-1 行程表

日期	內容
101年6月30日(第1天)	啟程(台北→新加坡)
101年7月1日(第2天)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 上午參觀濱海堤壩</li> <li>● 下午參加水務大會 (Water Convention; WC)</li> </ul>
101年7月2日(第3天)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 水務博覽會：0930 – 1730</li> <li>● 水周、世界城市峰會 (World Cities Summit) 與潔淨環境峰會 (Clean Enviro Summit) 聯合會議 (Joint Program)： <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 0900 – 1000：水務對話 (In Conversation)</li> <li>■ 1030 – 1230：全體會議：管理和領導宜居及永續城市 (Opening Plenary: Sustainable Development – Our Cities, Water and Environment)</li> <li>■ 1330 – 1500：新加坡水務講座及李光耀世界城市獎講座 (World City &amp; Singapore Water Lecture)</li> </ul> </li> <li>● 水務大會(WC) <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 1530 – 1730：WC Poster Presentation</li> </ul> </li> </ul>
101年7月3日(第4天)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 水務博覽會：0930 – 1730</li> <li>● 水務領袖峰會 Water Leaders Summit(署長參加)： <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 0900 – 1030：水務領袖圓桌會議：宜居及永續城市的水務規劃</li> <li>■ 1100 – 1230：水務領袖峰會研討會 <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ WLS Parallel Workshops Session A: "Cutting Edge Water Technologies For Sustainable Cities"</li> <li>◆ Session B "Unlocking Innovation-Advancing the Water Industry through Portfolio Planning, Policies &amp; Project Delivery"</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>● 地區/國家商業論壇 <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Americas Business Forum</li> </ul> </li> </ul>

日期	內容
	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ India Business Forum</li> <li>■ Middle East &amp; North Africa Business Forum</li> <li>■ Industrial Water Solutions Forum</li> <li>■ Southeast Asia Business Forum</li> <li>● 水務大會(WC)：全日於各會議室</li> <li>● <b>1500-1600 與 PUB 助理總裁陳玉仁先生雙邊會談 (Assistant Chief Executive, Mr Tan Yok Gin)</b></li> </ul>
101年7月4日(第5天)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 水務博覽會</li> <li>● 地區/國家商業論壇： <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Australia Business Forum</li> <li>■ China Business Forum</li> <li>■ Korea Business Forum</li> <li>■ Europe Business Forum</li> <li>■ Japan Business Forum</li> </ul> </li> <li>● 水務大會(WC)</li> <li>● 1800 – 2100：閉幕晚宴</li> </ul>
101年7月5日(第6天)	參觀Bedok新生水廠 (NEWater 勿洛廠)
101年7月6日(第7天)	返程 (新加坡→台北)

在「國際水周」活動中，7月1日上午及7月5日上午原大會安排之濱海堤壩 (Marina Barrage 河口水庫) 與 Changi NEWater plant (樟宜水再生廠) 等兩項現場參訪，惟報名時間太晚，未能參與，因此 PUB 特地為本團安排導遊，個別導覽 Marina Barrage 與 Bedok NEWater plant (勿洛新生水廠)。

除大會演講與現場參訪外，本團本次亦與多間機關與公司會談，包括與海淡節能公司 ERI(7月2日，海淡事宜)、新加坡公用事業局 PUB(7月3日，NEWater 與氣候變遷事宜)、日立 Hitachi 公司(7月3日，海淡事宜與自來水管線漏水事宜)、美商傑明 MWH(7月4日，NEWater 與新加坡淹水問題)等。

## 第二章 參與新加坡國際水周活動

### 2.1 2012 新加坡國際水周整體概況

第五屆新加坡國際水周 (Singapore International Water Week, 簡稱 SIWW) 暨第三屆世界城市峰會 (World City Summit)、首屆清潔環境峰會 (Clean Environ Summit Singapore) 於 7 月 1 日在金沙會展中心 (Singapore Convention and Exhibition Center - Marina Bay Sands) 開幕；這是首次採「三合一論壇」方式辦理，從而聚集更多跨領域人員參與，突顯論壇想聚焦之主題，亦即「城市化進程中的永續發展問題」。

本次三合一論壇聚集了 100 多個國家，逾 15,000 名產業界、學界之人士與會，另有超過 900 家企業參與由三項活動所組織的展覽會，行業遍及水務、能源、環境、廢物處理以及建築等領域。其中台北市副市長陳威仁、桃園縣縣長吳志揚與台中市市長胡志強亦均參與世界城市峰會。



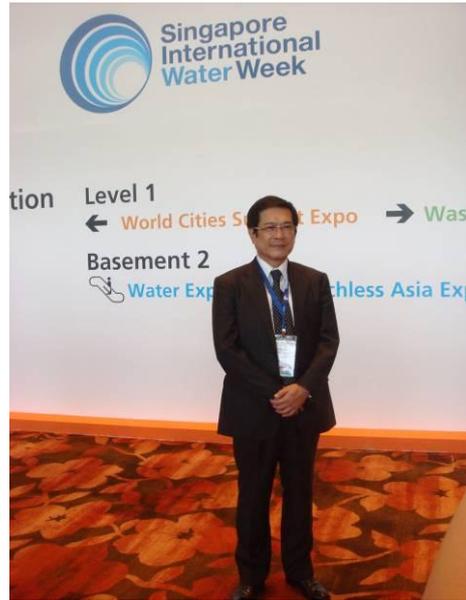
(a) 歡迎標語



(b) 大會所在地點金沙會展中心



(c) 大會展覽入口



(d) 署長於會場留影

圖 2.1-1 國際水周現場

開幕儀式邀請新加坡總理李顯龍先生發表演說，李總理提及目前世界城市化將以前所未有的速度向前邁進，目前全球有 50% 人口生活在城市，至 2050 年因新興國家邁向城市化，預計還會再有更多人口移居城市，未來的城市如何高效管理、合理規劃以及永續發展，是一大挑戰，因此有必要從整個水務行業、城市治理以及清潔環境等進行多面向的交流與探討，方能完善解決城市永續發展所面臨的挑戰。新加坡為城邦型國家，因自身資源匱乏，必須依循「適合人居」和「永續發展」的方向，採取多項措施以保障、開發水與能源等資源使用，而未來新加坡希望讓更多居民能在住家附近享受到充足的綠色空間，建構一座真正的「花園城市」。



(a) 開幕儀式現場



(b) 李顯龍總理致詞



(c) 署長與香港渠務署人員討論



(d) 署長與台中市胡志強市長討論

圖 2.1-2 開幕儀式現場

本次水周、世界城市峰會與潔淨環境峰會聯合會議之水務對話議程邀請聯合國環境開發署署長（Administrator of the United Nations Development Programme and the Chair of the United Nations Development Group）暨前紐西蘭總理克拉克女士（Helen Clark）參加，並和 Professor Tommy Koh 與談（Ambassador-at-Large, Ministry of Foreign Affairs）；與談中提到永續發展並非獨為政府之工作，需要民間一起參與，並且需要將水環境的營造與城市規劃共同考量。



(a) 對話論壇現場



(b) 提供聽眾以 APP 提問



(c) 對話論壇現場



(d) Helen Clark 與 Tommy Koh 對談

圖 2.1-3 聯合國環境開發署署長 Helen Clark 與新加坡外交部特使 Tommy Koh 教授會談

## 2.2 新加坡國際水周主要活動

國際水周的目標是提供一個全球性平台，藉以分享創新性的水務方案，以及各種可能的合作機會。水周由新加坡公共事業局（PUB）主辦，並由新加坡環境與水資源部、國際水協會（IWA）、國際海水淡化學會（IDA）、李光耀公共政策學院等共同協辦，本次主題訂為「宜居及永續發展城市的水方案」（Water Solutions for Liveable and Sustainable Cities），活動核心概念：水、水域、環境與城市的綜合規劃；水在其中扮演極重要的角色。主要活動包括水務大會（Water Convention）、水務領袖峰會（Water Leader Summit）以及李光耀獎（Lee Kuan Yew Prize）、商務論壇（Business Forums）、水務博覽會（Water Expo）等項目。

水務大會包含一系列學術論文發表，以及就國際間矚目議題，辦理多項「關注議題討論會」（Hot Issues Workshop），包括：

- 未來城市整合性基礎建設規劃（Integrated Infrastructure Planning for Cities of the Future）
- 發展中國家的技術應用（Application of Technologies in Developing Countries）
- 重新思考廢水的三 R – 可回收資源與可回收水（ReThinking the three Rs of Wastewater – Recoverable Resources and Reusable Water）
- 小型社區供水水質安全規劃（Water Safety Planning for Small Community Water Supplies- Launch and Introduction to the WSP Manual）
- 工業水處理與管理（Water Treatment and Management for Industries）。

依近期國內發展水再生之狀況，本次特參與「重新思考廢水的三 R – 可回收資源與可回收水」，討論過程與會者包括 PUB 的 senior director Kheng Guan Yap、美國加州橘郡的 Mike Wehner 等（圖 2.2-1），討論之議題除著重包括目前各國分享廢污水源的可回收性之外，同時更深入地探討到水中可以回收之能源與資源，能源包括沼氣等生質能源，資源則包括磷酸鹽、金屬鹽類，以及 PHA 等生物高分子；其中磷酸鹽因目前全球磷礦漸趨匱乏，因此從廢污水中回收磷作為肥料也引起很多注意，許多技術也對應開發（如結晶床等），惟有待市場接受。因此廢污水之角色不再侷限於要被廢棄、淨化與排放，而是從「資源」的角度，進行以水為主體之整體資源回收，但亦不侷限於單一模式（one-size-fit-all），這將是未來廢污水處理廠建構之新型理念。具體措施可能包括：

- 運用高效污水處理單元與薄膜設備，提高回收率，並降低濃縮液產生量與污染總量

- 藉由藥劑、離子交換、結晶法等，回收廢水中磷資源，補充耗竭磷礦
- 有效回收污泥消化產生之沼氣，減少廢棄污泥量，沼氣發電又可補充水再生所需能源
- 結合污水廠空間，可產出太陽能與微水力，降低再生水碳足跡
- 利用適當微生物生態，從副產物提煉產出有用物質（如 PHA）

有鑑於國內發展現況受限於水價尚未合理化，水再生之發展受限，技術取向與構想與國外有異，因此於討論會上本團提出台灣經驗，受限於目前水價，台灣的作法並非推動如 RO 等低導電度產水（一般會在 50  $\mu\text{S}/\text{cm}$  以下），而是希望由廢污水處理廠提供優質放流水，採最適單元將氮、磷、懸浮固體等降至最低，並使導電度與當地自來水接近，其他水質項目則由再生水潛在使用端進一步去除，形成公私部門合作之契機；另外在討論會中本團亦指出，台灣刻正評估水資源之碳足跡問題，包括再生水，因其對於能源之消耗無法忽視，並持續評估以再生能源作為再生水來源之可能性，與會者對此也表示認同，但認為再生能源受限於單位面積能源密度低，在典型廠區面積裡能提供的水量有待評估。



圖 2.2-1 「重新思考廢水的三 R – 可回收資源與可回收水」討論會現場



圖 2.2-2 與 PUB senior director Kheng Guan Yap 會後合影

李光耀獎亦為本次重要活動之一。「李光耀水獎」設立於 2008 年，用於表彰對世界水資源問題作出突出貢獻的人士或群體，本次為第五屆。「李光耀世界城市獎」創建於 2009 年，旨在獎勵以遠見和創新思維進行城市規劃和管理，以及解決城市面臨挑戰的傑出人士或機構，以在全世界推廣城市科學規劃管理，鼓勵城市永續發展創新思維，本次為第二屆；獎金各為 30 萬新加坡幣。

本屆獲得李光耀獎者包括城市獎之美國紐約市政府，以及水獎之荷蘭 Delft University of Technology (TU Delft) 的 Mark van Loosdrecht 教授，由新加坡副總理兼內政部長張志賢 (Mr. Teo Chee Hean) 在世界城市峰會上頒發兩個獎項，獲獎者並發表演說，向與會者分享其成功經驗。



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

圖 2.2-3 第五屆李光耀水資源獎和第二屆李光耀世界城市獎頒獎現場與專題講座

紐約市本次獲頒第二屆李光耀世界城市獎，主要是因其於過去 10 年內進行三大城市改造工程，展現都市規劃和管理的遠見和創新思維。頒獎典禮上，由紐約市公園局局長（Commissioner of Parks and Recreation, New York City）Mr. Adrian Benepe 代表紐約市領取第二屆李光耀世界城市獎（Lee Kuan Yew World City Prize），演說現場紐約市長 Michael Bloomberg 以錄影方式發表獲獎感言，介紹布魯克林大橋公園、曼哈頓空中花園和推廣自行車運動三大城市改造工程，說明如何確立城市的永續發展目標。

紐約市這類的超大型城市（megacity）一直以來即面臨交通、住屋、公共健康、安全、教育等多層面的挑戰。紐約市自遭受 911 恐怖攻擊後，積極發展永續、宜居城市生活，前述三項城市改造工程分別說明如下：

1. 布魯克林大橋公園 — 公園設置目的係城市中創造休閒空間；布魯克林大橋

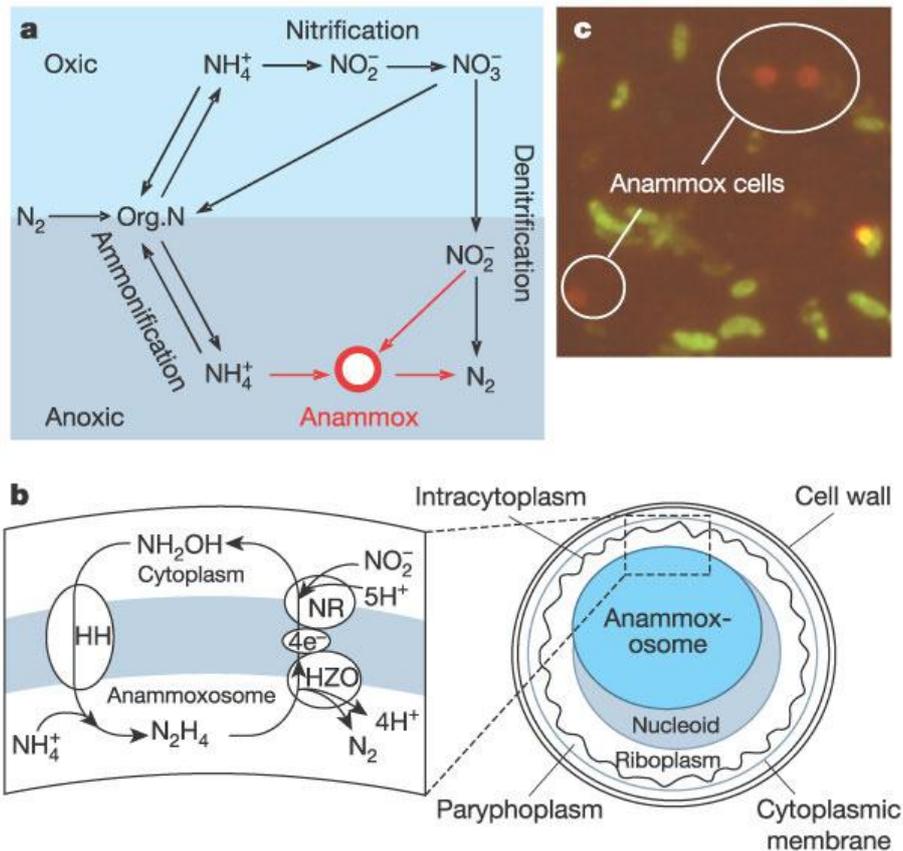
公園改造廢棄碼頭、綜合利用繁忙港口和城市設施，創造城市新型空間的典範，其亦帶入透水的理念（Sponge Park），採用低衝擊開發工法（LID），營造保水、透水、不淹水的空間，達到水的多層次運用。

2. 曼哈頓空中花園 — 由曼哈頓下中城西部一條長約 2 公里的高架鐵路改造而成，此高架鐵路作為肉類加工廠和倉庫的運輸專線懸掛在公路上方，1980 年代廢棄，原規劃拆除，紐約市政府彙集私人投資和公共資金，將其改造成曼哈頓核心區域的首座空中花園，帶動了區域房地產升值，並帶動大量遊客參訪。
3. 推廣自行車運動 — 為推廣低碳生活，減少環境污染，減輕公共交通壓力，紐約市 2007 年以來大力推行騎自行車上學上班，不僅建設環繞全市的自行車道，設立有關交通標識，並通過立法保障自行車騎士安全。



圖 2.2-4 紐約城市水岸改造

荷蘭 Mark van Loosdrecht 教授是為廢污水生物處理領域之專家，本次係從 61 個候選組織和個人中脫穎而出獲獎，其貢獻為因利用新發現的細菌，開發 Anammox 處理程序，有效利用特殊菌群分解廢水中含氮物質，將氨氮轉成氮氣，大幅簡化含氮廢水處理過程，相對於傳統所使用之「缺氧-好氧」程序，可節省處理能源以及所需化學藥劑，從而在回收廢水作出許多貢獻，因而獲得第五屆李光耀水獎 (圖 2.2-5)。因廢水除氮之需求越來越多，Anammox 程序之應用成長也十分迅速，Mark van Loosdrecht 教授已獲 16 項各國專利，Anammox 此名稱亦為 TU Delft 所註冊之商標，目前在荷蘭、中國大陸、日本等地，都有實廠案例，除了食品業之外，並已應用至半導體業等新興產業之高氮廢水之處理，其未來發展頗受矚目。而 Mark van Loosdrecht 教授所服務的 TU Delft 擅於創新結合荷蘭民間力量，是為學術界之佳話，此模式亦是為水資源產業升級之關鍵。



(a) 反應機制



(b) 實驗室級反應器



(c) 實廠 (鹿特丹)

圖 2.2-5 Anammox 反應

### 2.3 水務博覽會

本次水務博覽會 (Water Expo) 於 7 月 2 日開幕, 7 月 4 日閉幕。本次共有 650 家企業和團體參展, 內容十分豐富, 橫跨水利產業的各個面向。有下述重點:

1. 本次與會國家包括新加坡、馬來西亞、中國大陸、台灣、韓國、日本、德國、法國、美國等。其中日本是國外參展廠商中規模最大的國家, 除了日立、積水化學工業、東芝等大型企業參展之外, 東京、橫濱、神戶、福岡等城市亦有參展, 共有 30 家企業和團體參展介紹日本的環保技術, 並設有 JETRO Japan 專區 (圖 2.3-1)。



圖 2.3-1 JETRO 日本展覽館全景

2. 新加坡 PUB 亦設有攤位，宣傳其研發過程（R&D Story），包括國家四大水龍頭之研究、發展、實廠化、大規模供水之歷程，並安排各級學校學生前來了解。而 PUB 之攤位亦鄰近數間新加坡商的攤位，包括 Hyflux（凱發）、Memstar（美能）、NUS（新加坡國立大學）等，亦形成一「新加坡聚落」（圖 2.3-2）。

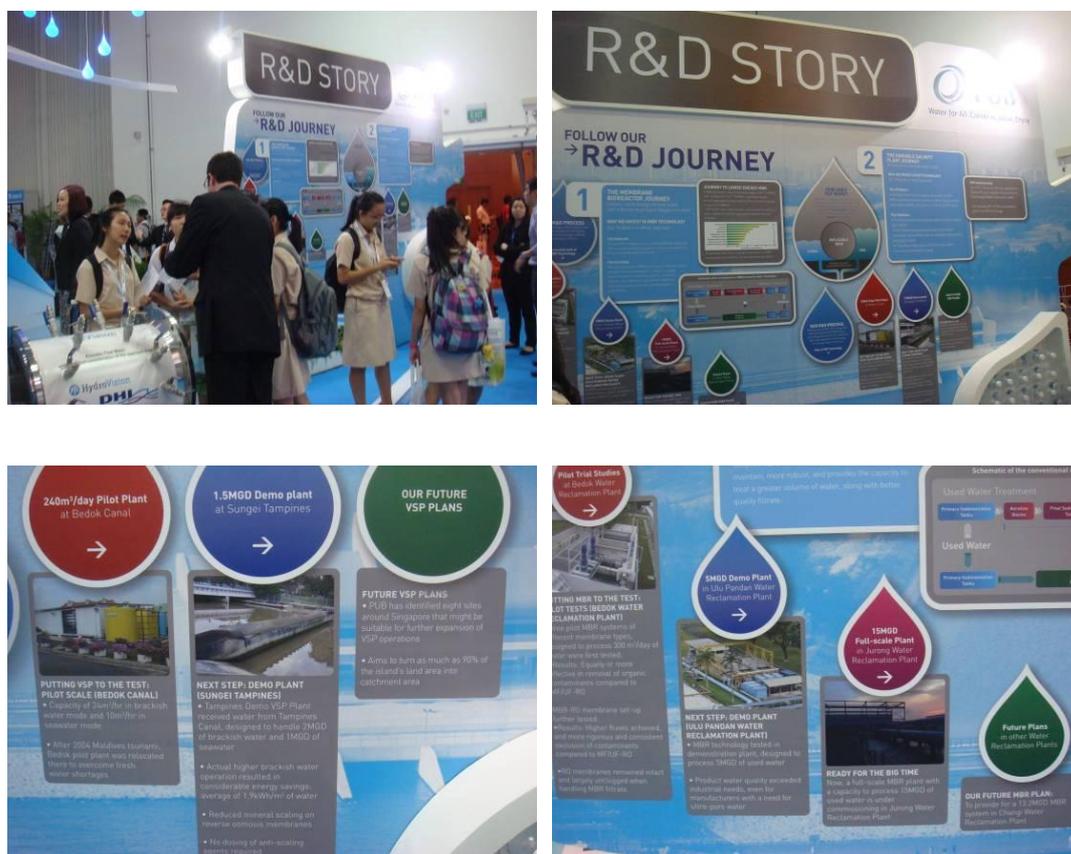


圖 2.3-2 PUB 展示研發成果之攤位與宣傳看板

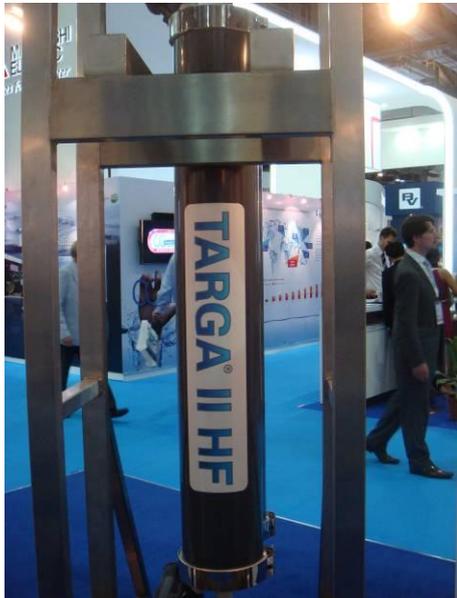
3. 在各種薄膜技術中，超過濾膜（UF）為本次展示最多者，近期薄膜設備技術蓬勃發展，由其超過濾膜之發展尚未像 RO 般規格化，故為兵家必爭之地，本次展場有超過 30 家廠商展示各類薄膜。其材料多元，而普遍以管式膜與中空絲膜為主流；除既有美商與日商外，新加坡、韓國與中國大陸俱為新起之秀，搶攻低價薄膜市場（圖 2.3-3）。



(a) 署長參觀沉浸式 UF 膜



(b) KOCH PURON 沉浸式 UF 膜



(c) 外掛式 UF 膜 (TARGA)



(d) 外掛式 UF 膜中空絲結構



(e) 管式 UF 膜 (Xylem)



(f) 沉浸式 UF 膜模組 (Mitsubishi Rayon)



(g) 沉浸式 UF 膜模組 (Hyflux)



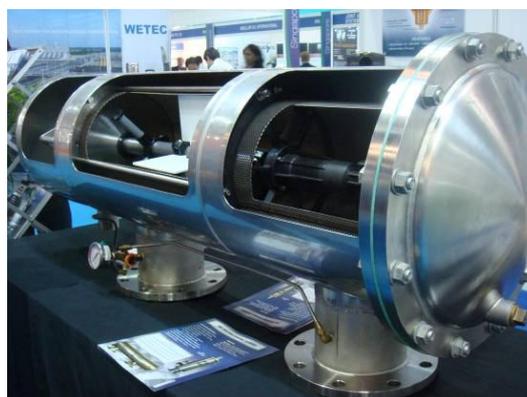
(f) 外掛式 UF 膜 (Memstar)

圖 2.3-3 各類超過濾膜 (UF)

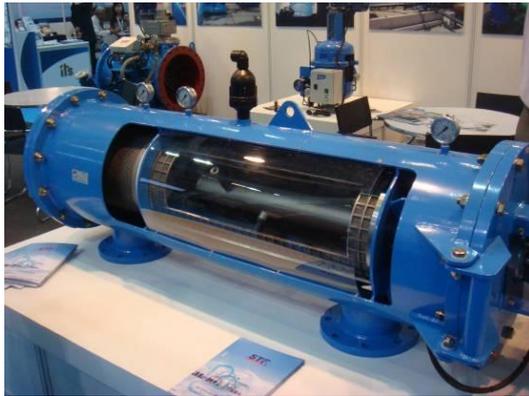
4. 前置濾器 (pre-fiter) 亦有甚多廠商展出，相對於 UF 膜過濾孔徑約為  $0.01 \mu\text{m}$ ，前置濾器之過濾範圍從  $10 \sim 1000 \mu\text{m}$ ，是為較價昂 UF 膜之保護裝置，或為在較乾淨水源（如家戶飲用水、工廠已經淨化之冷卻水的保安過濾）利用（圖 2.3-4）。



(a) 盤式濾器 (disk filter)



(b) 金屬式濾器



(c) 金屬式濾器



(d) 家用淨水器濾芯 (Grace Taiwan)



(e) 快速廢水過濾 (TETRA Filter)



(f) 快速廢水過濾 (TETRA Filter) 單一結構濾材

圖 2.3-4 各類前置濾器 (pre-filter)

- 以生物處理技術為展示標的廠商相對較少，有新加坡國立大學展示其發展之顆粒化生物處理技術 (biogranule)，或稱生物載體 (biocarrier)，作為各類污水廠生物處理單元之用，可減少污泥量，並因應低 BOD 之進水條件。國內廠商黎明興公司於現場設有攤位，展示其發展之 Anammox 技術；有鑑於氨氮會導致藻類等微生物大量孳生，使薄膜等設備堵塞，增加水再生難度，透過生物處理大幅降低有機物與氮磷等污染物濃度，是較經濟之作法；Anammox 相對於目前較普遍之 AO 活性污泥工法，因菌相不同，可適用於較低 BOD 或是含有較難分解 BOD 之進水等條件；目前黎明興公司在八里、天外天、新豐等掩埋場設有滲出水處理實廠設施，並與聯電等晶圓半導體廠商、晶發光電等發光二極體廠商合作，評估此類技術運用於高科技產業廢水除氮之可行性 (圖 2.3-5)。



圖 2.3-5 黎明興公司 Anammox 技術與其攤位

6. 本次法商 Veolia 展示其蒸發器 EVALED，可用於各類工業廢水之處理，網頁宣稱其最大處理能力為每天產出 250 噸蒸餾物，可以迴流處理並達到理想氣液分離。目前有 EVALED™ PC（熱泵真空蒸發器）、EVALED™ AC（熱水/冷水真空蒸發器）、EVALED™ RV（MVR 蒸發器）等類型（圖 2.3-6）。



圖 2.3-6 Veolia EVALED 工業廢水用蒸發器

7. 另有許多廠商以自動控制（Automation）為主要行銷重點，搭配水質水量監測器，以及控制設施；包括全廠控制、配水管網流量水壓監測管理，以及節能控制，亦即依水質水量，對幫浦或鼓風機等以變頻控制，調整其輸出功率，達到節能效果（圖 2.3-7）。

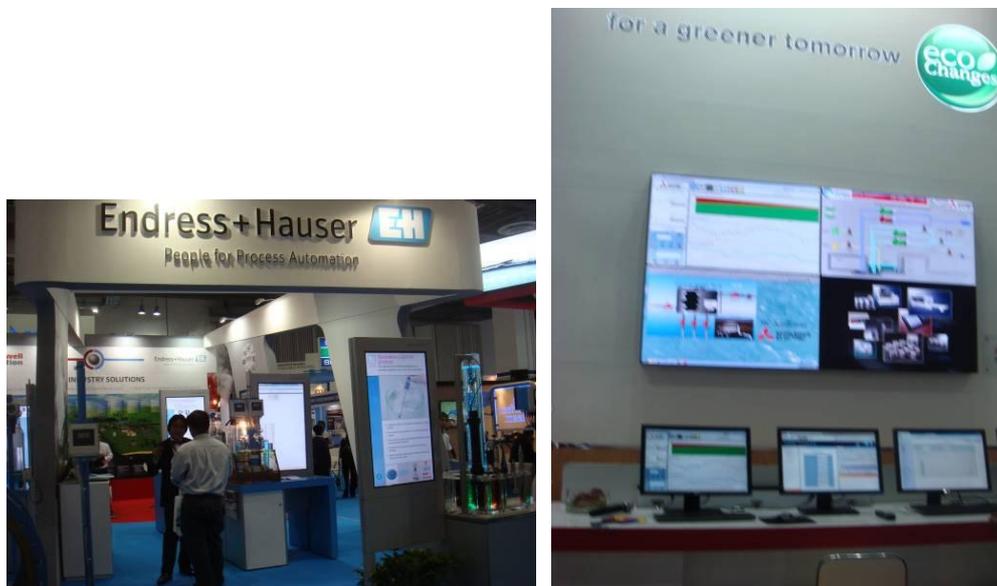
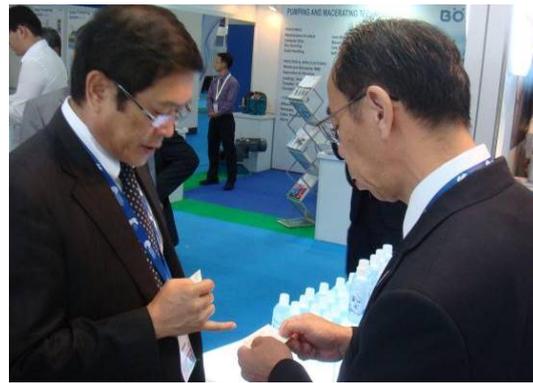


圖 2.3-7 各類自動化控制設備廠商攤位

8. 自來水漏水控制已成為各國基礎建設控制重點，流量計與壓力計之電子化，搭配軟體作全小區管網之壓力管理，為本次廠商宣傳重點。本次東京水道服務株式會社與東京都水道局共同參展，宣傳其在降低無效售水（Non-Revenue Water）可提出之全面方案，並介紹其開發之時間積分式漏水檢測器（TS Leak Checker）；其透過水力分析，評估管網壓力合理性，搭配聽音偵測裝置，確立漏水高潛勢區域，將更換管材之預算降至最低；經過近半世紀之努力，東京都更已將漏水率降至 3% 以下。現場並展示其於泰國所獲實績（圖 2.3-8）。



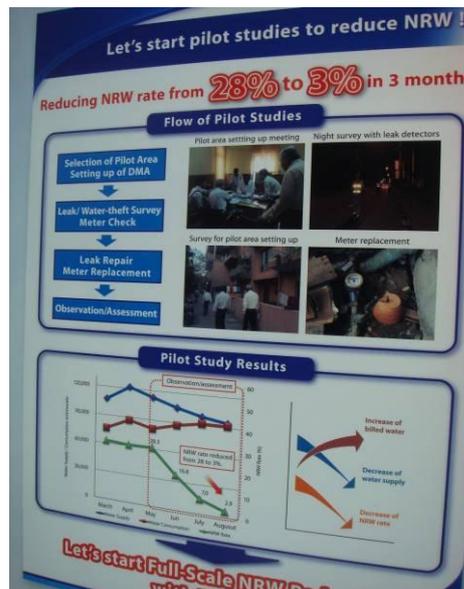
(a) 署長參觀東京水道服務社攤位



(b) 署長與東京都水道局局長交換名片



(c) 東京漏水率降低成果海報



(d) 東京水道社於泰國實績



(e) TS 聽音測漏器



(f) 便於施工之波浪管與防漏接頭

圖 2.3-8 東京水道服務株式會社之攤位

9. 本次亦有多家大型機具廠商參展，如水平導向鑽掘工法（horizontal directional drilling）機具廠商 Vermeer 等，展示其實體機械（圖 2.3-9）。



圖 2.3-9 大型挖掘機具廠商攤位

10. 本次有多家大型工程顧問公司參展，並以電影等方式展示其工程成果，包括

CH2MHILL 以及 MWH 等公司 (圖 2.3-10)



圖 2.3-10 工程顧問公司攤位

11. 日商 Hitachi 等亦於現廠展示其電機領域之能力運用於水務產業上的全方位服務，包括海淡用薄膜、海淡與電廠共構整廠輸出、漏水管理技術 (GIS 圖資、管網管理軟體 Aquamap、電子流量計與壓力計) 等 (圖 2.3-10)



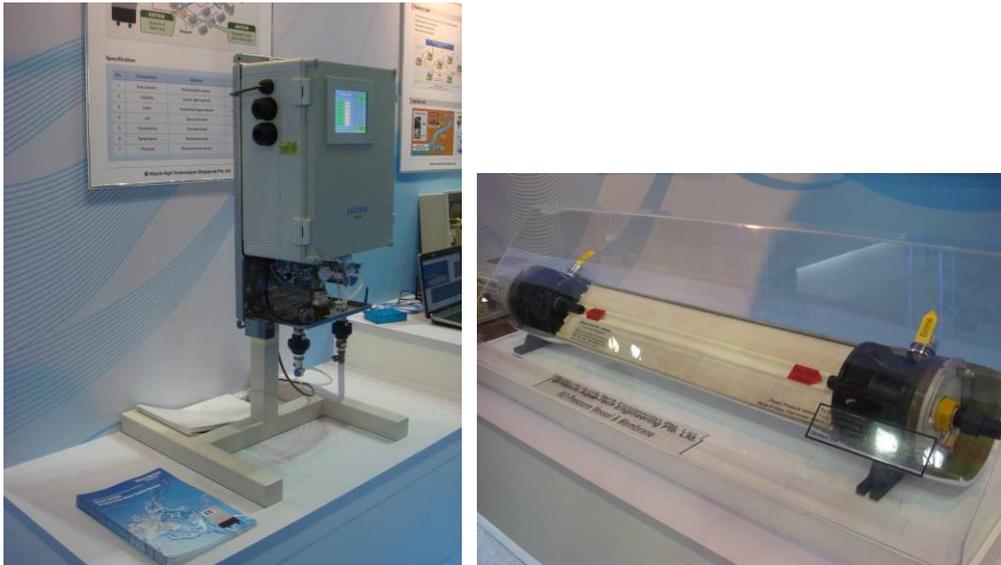


圖 2.3-11 日立公司 (Hitachi) 之攤位

## 2.4 與新加坡公用事業局 (PUB) 會談

本次經新加坡公用事業局邀請與會並安排於 7 月 3 日下午 3:00 進行雙方會談，PUB 與會代表包括陳玉仁運營助理總裁 (Yok Gin Tan, Asst Chief Executive, Operations)、林文富副署長 (Mong Hoo Lim, Deputy Director, Technology & Water Quality Office)，以及新加坡國際企業發展局 (International Enterprise Singapore) 黃慧勤處長 (Hwee Koon NG, Senior Manager, North Asia & Pacific Group)。

會談中雙方就新生水的推動經驗交流、節水的推動經驗交流、氣候變遷的衝擊與調適經驗交流等議題充分交換意見。署長並邀請 PUB 能派員前來參與本署所舉辦之氣候變遷及水再生相關研討會。

相關討論重點與心得分別整理於第三章「新加坡水務管理經驗」。



圖 2.4-1 與 PUB 會談現場

## 2.5 署長接受中央社專訪

楊偉甫署長於大會閉幕晚宴上接受中央社記者專訪（圖 2.5-1）。署長於專訪中指出，發展再生水已經是台灣必須走的一條路，特別本次論壇新加坡把城市發展和水資源利用的議題結合在一起，台北市、桃園縣和台中市都有市長或副市長出席，可以讓他們了解水資源的問題與城市發展息息相關。

署長認為台灣缺水，在水價沒調整之前，若能發展再生水，取代部分城市用水，可以降低缺水風險。台灣在這方面的技術已經相當成熟，未來水利署要和地方政府合作，水利署扮演溝通平台，提供技術或諮詢團隊，由地方政府主導，找出願意投資再生水廠的企業，並決定要給什麼樣的誘因和優惠。目前家戶污水送到再生水廠的進度稍慢，水利署已經調查全台灣的再生水廠位置，以及企業用戶端和水廠的距離，這些穿針引線和整體規劃的工作都已經在做。有的企業已經開始投資再生水廠，如果把再生水廠想成是企業自己的小水庫，未來如果缺水，對企業的影響可以降到最低。五都升格在水利署看來是一個非常好的機會，五都市長為了各自的城市發展，都會非常注重水的問題，若有 1 到 2 個城市花個 3 到 5 年，成功發展再生水，就可以帶動其他城市跟進。

對於未來台灣和新加坡合作的可能性，署長認為台灣在防治水災上很有經驗，對於新加坡 2010 年烏節路淹水，PUB 也提出許多策略改善，過去台灣在此類議題上已有許多應變策略，這是新加坡未來可與台灣交流重點。



圖 2.5-1 署長於大會閉幕晚宴現場接受中央社記者訪問

## 第三章 新加坡水務管理經驗

### 3.1 新加坡水源供需現況

新加坡面積 697 平方公里（目前仍持續透過填海造地增加面積），人口 424 萬人，工商業高度發達，淡水日用量約 130 萬 CMD，其中住宅用水約占 47%，工商農業用水占 34%，政府部門用水占 18%，船隻用水占 1%，此一用水量預期仍持續成長。自 1965 年新加坡脫離馬來西亞以來，新加坡一直生活在淡水不能自給自足的陰影裡，儘管新加坡每年平均降水量達到 2,340 mm（集中在年底與年初之雨季），由於人多地小，集水區面積非常有限，無法大量貯存雨水，當地亦幾無地下水資源，使得水資源缺乏，人均水資源只有 211 立方公尺，居世界倒數第二。

擁有持續性的水源攸關新加坡發展，新加坡原本超過 50% 的水源購自馬來西亞柔佛 (Johor) 水庫，經由 40 公里之管線引入，依賴馬來西亞提供原水，再於新加坡境內淨水場處理。為擺脫此一先天限制，在領導階層大力支持之下，新加坡政府自 1970 年代開始投入運用非傳統水源之研究中，包括污水回收與海水淡化，但限於成本難以放大規模，直至 1990 年代因薄膜合成技術進步，價格下降，產水成本漸落入可接受範圍，才逐步付諸大規模實施。

新加坡政府深知開源與節流需要並舉，除拓展水源之外，保護水源，並且減少水源之流失，實施綜合性之管理。在長年妥善規劃後，目前開發計畫包括將境內雨水蓄水池、向馬來西亞之購水、污水回收 (即新生水 NEWater)、與海水淡化等四種水源稱為「the Four National Taps」(四大國家水龍頭，圖 3.1-1)。要以綜合性的方式管理水供資源，首先必須解決各種問題。新加坡政府的最終目標是完全實現淡水的自給自足，根據目前規劃，未來新加坡的淡水供應中將有 50% 來自境內蓄水池，25% 來自 NEWater，另外 25% 則由海水淡化提供，從而完全不向其他國家購水 (圖 3.1-2)。

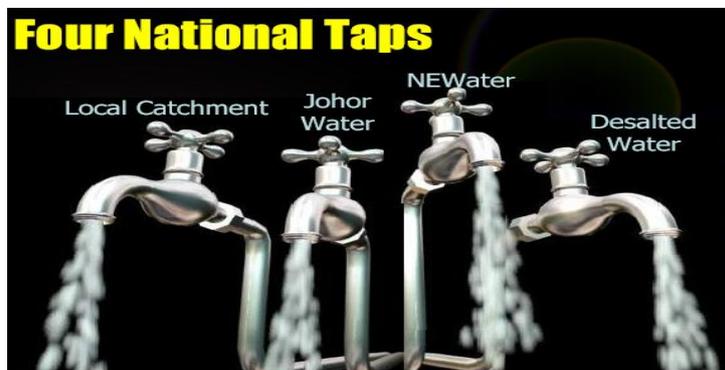


圖 3.1-1 新加坡四個國家水龍頭

## 多元化水源2020年目標

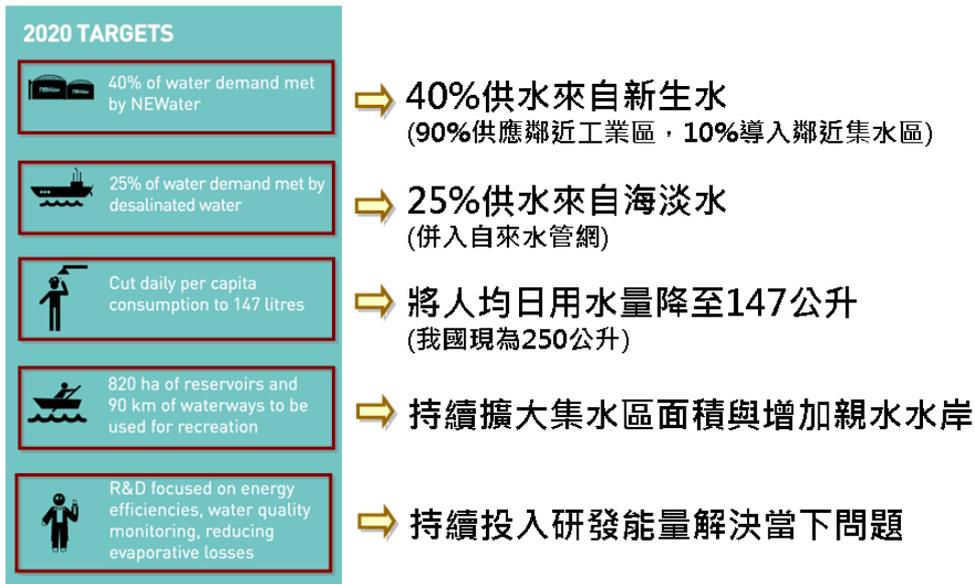


圖 3.1-2 新加坡多元化水源 2020 年目標

## 3.2 公用事業局 (PUB) 簡介

新加坡卓越的水務管理可歸功於公用事業局 (Public Utility Bureau, PUB)；不同於其他國家的水務管理部門，全國用水事務均整合由 PUB 掌管，目前約有三千名員工，業務包含水資源政策／規劃／研究、集水區管理、區域雨水排水、管網建置、淨水處理、自來水供應、污水接管、污水處理、放流水再生，以及相關營運管理事務。

PUB 於 1963 年成立，隸屬於國家貿易和工業發展部 (Ministry of Trade and Industry)，原管轄供水、電力及瓦斯的生產和供應，在 1995 年企業化後，將電力和瓦斯的生產和運作轉讓給新加坡能源公司 (Singapore Power Ltd.)，由 PUB 監督，重組後之 PUB 專責管理供水事務；2001 年 4 月 1 日，PUB 再整合環境與水資源部 (Ministry of the Environment and Water Resources，以下簡稱 MEWR) 的污水系統處理署 (Sewerage Department) 與排水系統處理署 (Drainage Department)；同年 10 月新成立「水再生利用署」(Water Reclamation Department)，負責海水淡化及水回收，另外亦設有深層隧道下水系統署 (Deep Tunnel Sewerage System Department，簡稱 DTSS) 專管 DTSS 事務；至此 PUB 遂成為新加坡專業水機構，管理新加坡整個水資源迴圈。目前 PUB 管理 17 座蓄水池集水區、9 座淨水場、4564 公里長的輸配水系統、1 座海淡廠，以及 5 座新生水廠，並設有調蓄和輸配水指揮中心 PUB-One，通過電腦收集水源運行資料，並進行調撥與應變。

設於兀里 (Woodleigh) 的 PUB-One 作為新加坡各類給水、污水工程之綜合監控與客服中心，除對全國水質狀況進行即時監測外，也包括接聽處理民眾投訴與其它需求，服務項目包括：

1. 給水工程：如停止供水、管件損壞、水壓降低、漏水、水質惡化等
2. 污水處理：如處理效能不彰、污水溢流、下水道管路毀損、管路阻塞等
3. 排水問題：如市區淹水等
4. NEWater 相關事務，包括申請、配管、水質等
5. 深層隧道下水系統 (Deep tunnel sewerage system) 相關事務

民眾如有上述各類問題，可循市內電話、傳真、手機簡訊、電子信箱、網路聊天室 (WebChat)、VoIP 網路語音服務等方式，向 PUB-One 值班人員反應。就漏水、水壓不足、管路堵塞此類問題，依規定 PUB-One 會在兩小時之內向客戶回應；而其它如接管等申請業務，將依情形在三至十二日之內予以辦理。

### 3.3 國家水龍頭之一：向外購水

歷史上新加坡一半以上的淡水都從馬來西亞進口，1942 年日軍進攻新加坡時，駐守新加坡的數萬名英軍之所以在短時間投降，其中一項重要原因是日軍先占領馬來西亞，切斷了對新加坡的淡水供應。

新加坡目前每日需從馬來西亞柔佛州購買約 60 至 65 萬噸的原水，通過橫跨兩岸的兩公里長堤上的三條大水管，輸入新加坡。新馬兩國曾於 1961 與 1962 年分別簽署兩項供水合約，有效期限分別是 50 年 (2011 年到期，最大供水量 39 萬 CMD) 和 100 年 (2061 年到期，最大供水量 115 萬 CMD)；根據這兩份合約，馬來西亞的柔佛州每天共向新加坡提供 154 萬噸的原水，每噸水為馬幣 0.67 分錢 (相當於每噸水美元 0.18 分錢，或每 1,000 加侖馬幣 3 分錢)，並規定 25 年後雙方可再議水價，但 1986 年和 1987 年時，馬來西亞方面並未對供水加價。



圖 3.3-1 馬來西亞輸水至新加坡之輸水管

另在一份 1990 年簽訂的合約中，新加坡可於馬來西亞 Sungei Lingui River 建立水庫，汲取上述 154 萬 CMD 以外的額外用水，但每噸價格高達馬幣 11.7 分錢（相當於美元 45 分錢）；另外新加坡亦於馬來西亞境內設立淨水場，經過處理後的水一部分輸往新加坡國內，另一部分則返銷給馬來西亞，價格為每噸水馬幣 11 分錢（相當於每噸水美元 3 分錢，或每 1,000 加侖馬幣 50 分錢），目前馬方購買量為 17.4 萬 CMD。

由於新加坡賣給馬來西亞的淨水價格高達每 1000 加侖馬幣 5 角，約為馬來西亞供給新加坡原水價格的 16 倍（新加坡方面稱水處理的成本為馬幣 2.4 元），引發馬來西亞方面的不滿，認為雙方的供水協定有失公平，要求政府對供水加價，事實上香港從中國大陸購水的價格是每噸 0.46 美元，約為馬來西亞向新加坡提供的水價的 260 倍。

自 1990 年代末，因 1961 年所簽之 50 年合約已近到期時間 2011 年，馬來西亞認為長久以來的低原水價格與新加坡返售飲用水之高水價不盡合理，要求自 2007 年起將水價提高至每 1,000 加侖馬幣 60 分錢，雙方持續談判而未達成定論。新加坡為爭取更多談判優勢，即積極推動前述「四大水龍頭」政策，擴大集水區、開拓非傳統水源外，同時與印尼簽訂供水協定，設置海底管線供水，但因距離較為遙遠，目前尚未成為一主要水源。

目前（2012 年）第一份供水合約已到期，新加坡向馬來西亞購水係依第二份合約（2061 年到期），如何逐步降低此塊水源之倚賴程度，成為目前新加坡政府努力之目標。

### 3.4 國家水龍頭之二：擴大集水區與增建雨水蓄水池

由於新加坡的土地有限，保護並持續增加集水區面積即成當務之急。目前全國目前建有 17 座蓄水池，總容量約一億噸，收集來自全長七千公里的排水系統之雨水，最大日供水量約 68 萬 CMD，蓄水池之所在地包括武吉知馬天然保護區 (Bukit Timah Nature Reserve，占國土面積 1/10)、其他非保護地區、以及都市居民區等三類。隨 2008 年濱海堤壩 (Marina Barrage，第 15 座蓄水池) 完工，新加坡的集水區面積從原本占總土地面積的二分之一增加至三分之二。新加坡政府希望隨著科技進步，能將集水區進一步拓展至其他地區，並使新加坡的集水區占土地面積的 90% (圖 3.4-1)。

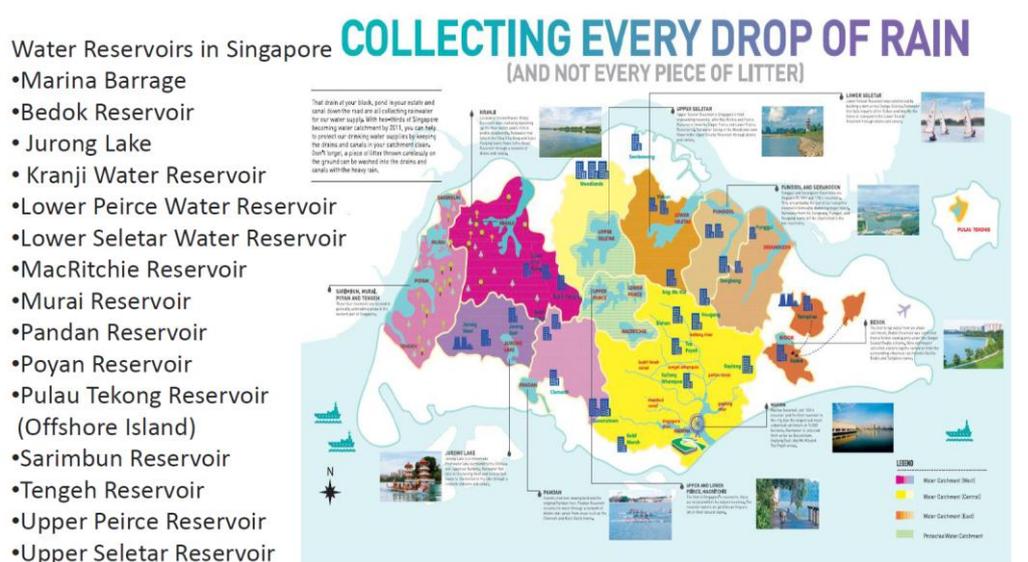


圖 3.4-1 新加坡集水區與蓄水池一覽

每當下雨，雨水會順道大大小小的水道彙集到蓄水池。水溝和水渠都是水泥砌的，在水溝兩邊的水泥板上都打有一個個的小洞，所以不光地表水會積聚在一起，就連浸入地下的雨水也會流到溝裡來。現在新加坡的水渠總長度達到了 7000 公里，大的水渠寬度和深度都達到幾米，像一條小河。在新加坡，龐大的集水系統同時也是很好的排水系統 (圖 3.4-2)。

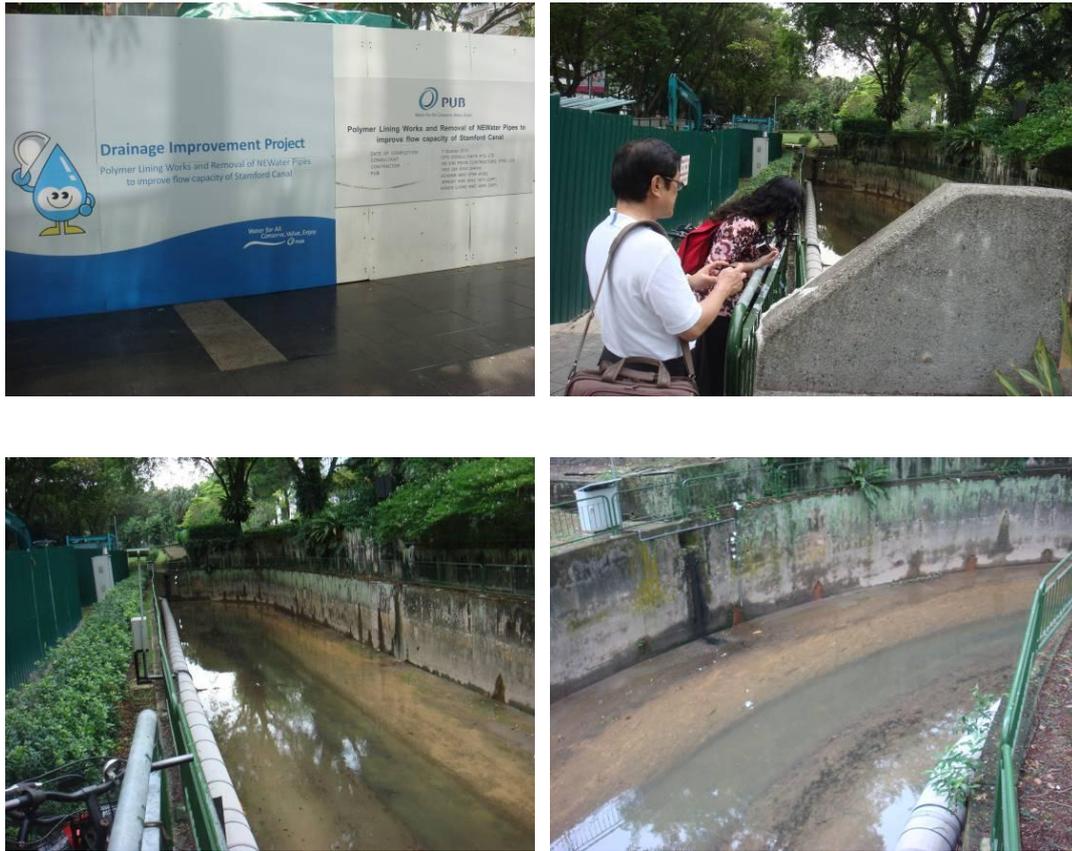


圖 3.4-2 新加坡市區排水 (烏節路 Stamford Canal)

1987 年時任新加坡總理的內閣資政李光耀提出建造濱海堤壩的構想，在南部填土地帶外的濱海灣 (Marina Bay) 灣口一帶建構大壩，形成河口堰，透過水壩隔絕海水，於新加坡河口形成一座淡水湖，儲備淡水。濱海堤壩自 2002 年正式宣布，2004 年動工，2007 年完工，2008 年 10 月 31 日正式開放，花費 2.5 億元新加坡幣，面積為 10,000 公頃，提供 1,000 萬 m<sup>3</sup> 的蓄水量，形成的集水區占新加坡 1/6 國土面積，也是新加坡在市區的第一個集水區，同時也是最城市化及最大的集水區 (圖 3.4-3)。



圖 3.4-3 濱海堤壩示意圖與外觀

濱海堤壩由 9 道冠形鐵閘（活動堤壩）組成，長 350 公尺的堤壩把濱海灣水庫和海水隔開（從東向西關閉），經由上游雨水集水的逐年稀釋，靠近市區的內灣鹽度逐漸降低，換成淡水，形成新加坡第 15 個蓄水池，其水源抽至 Upper Pierce Reservoir 附近之淨水場再作處理（圖 3.4-4）。新加坡河的水位會跟隨時雨量及壩外潮汐而調節，水位係由九扇巨大鋼製水閘（前傾或後拉）調節（圖 3.4-5）。當上游遇上暴雨且河水位高於潮位時，閘門將開啟以排除上游雨洪；當漲潮且遇上暴雨時，堤壩內外的水位處於極高水位或潮位高於河水位，這時新加坡河下游及市區一帶，將存在某種程度上的淹水風險，為排除雨洪並防洪海水溢淹，則改由堤壩內的九座抽水站（Pump House）抽汲排除雨洪，即堤壩亦具有防洪功能，

避免芽籠、牛車水一帶的淹水 (圖 3.4-6)。



圖 3.4-4 濱海堤壩配水至附近之淨水場



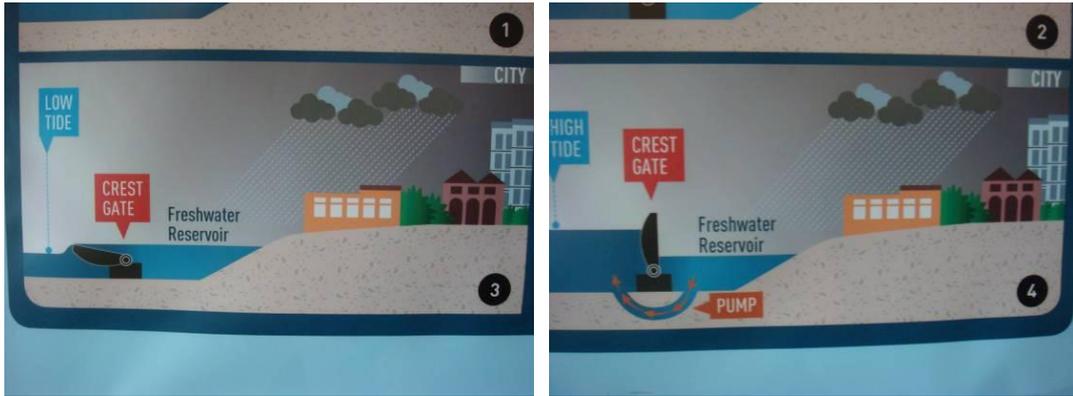


圖 3.4-5 濱海堤壩操作說明圖



圖 3.4-6 幫浦室

除了作為淡水供應外，濱海堤壩亦負有防洪、休閒（各類水上活動）、景觀（於壩上設置公園）等多項功能（圖 3.4-7）。堤壩上建有行人橋，同一時間可容納 1,800 人，橋上建有觀景亭，供旅客歇腳；PUB 在此處設有一座三層樓的訪客中心，向訪客介紹濱海堤壩設計理念。訪客中心更設有一個電動模型，協助說明整個濱海堤壩的操作原理（圖 3.4-8）。中心內開設由 6 個展廳組成的先進互動展覽館，述說新加坡水源故事，扮演一個推廣環保教育的活動中心，廠房屋頂端設

計成一個偌大的草坪，供遊客休憩、野餐或放風箏。中心上方的屋頂是一大片草坪，約為十個足球場，做為建築隔熱層，具降溫效果 (圖 3.4-9)；鄰近另有一處太陽能公園，設有 405 片太陽能板，總面積相等於一座奧林匹克泳池，功率為 70 千瓦，為展館及控制中心提供能源。

另因其上游帶下淤積之泥砂量較少，濱海堤壩較無淤砂問題，似無疏濬之規劃，是與台灣設置河口堰有不同之處。

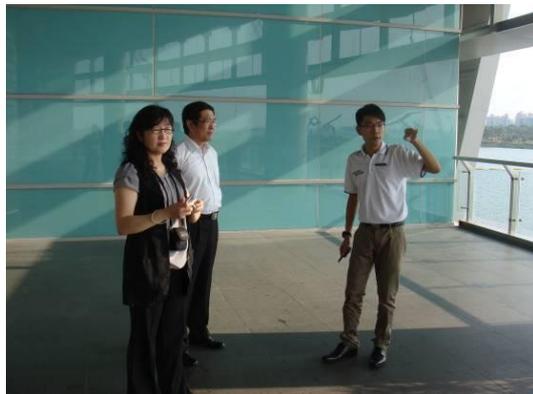




圖 3.4-7 濱海堤壩訪客中心

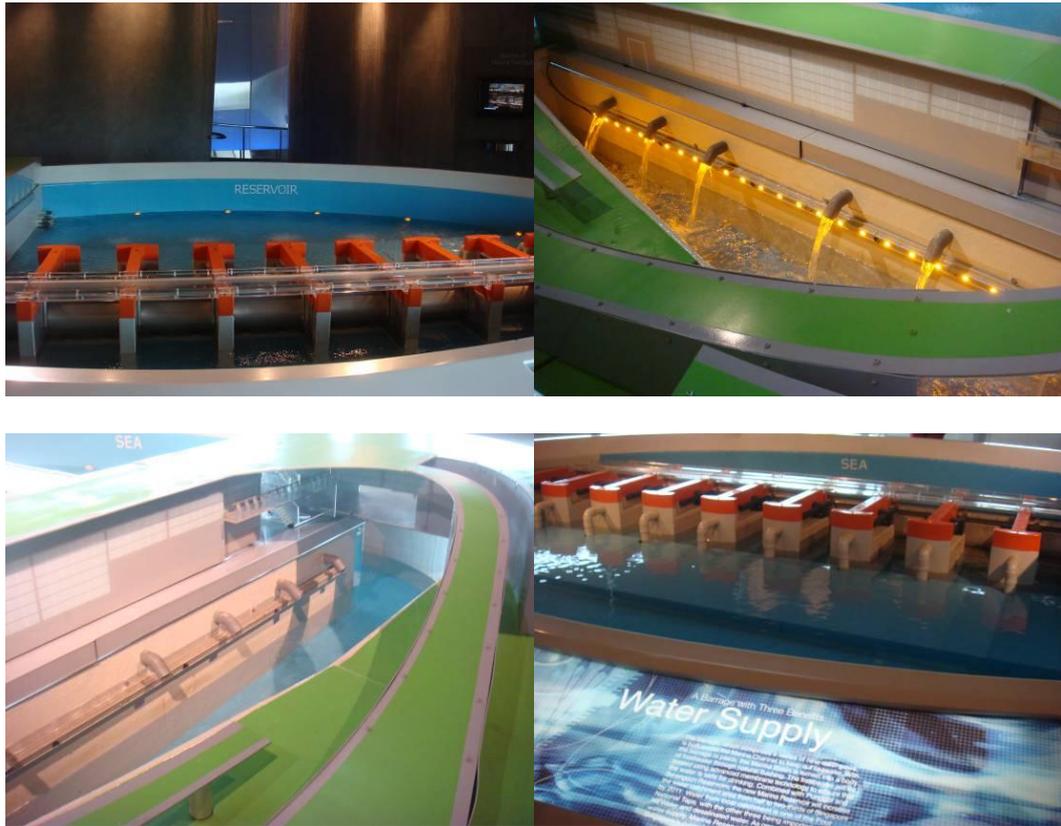


圖 3.4-8 電動操作模型



圖 3.4-9 濱海堤壩訪客中心頂層草地

新加坡為確保蓄水池水質，採取許多措施控制點源與非點源污染，茲敘述如下：

1. 新加坡污水接管率極高，通過污水系統收集所有污水減少點源污染，再分別由都市污水處理廠處理；而工業區設於西南沿海，採處理後於獨立下水道系統中排放，不接觸集水區。

2. 集水區內嚴格控制工廠成立，防止水源污染。在工業布局和用地規劃方面，需評估所在地點的環境條件，避免可能造成集水區污染之產業進駐(或消耗過多水源)，保護集水區環境以確保原水的水質，採行措施包括立法、管制土地的應用、徵用土地、遷徙非法住戶和控制污染等。
3. 新加坡河、加冷河、及芽籠河於自 1980 年代開始進行河川治理，清除淤積於河裏及河畔的垃圾與飄浮物，並遷移相關漁船與攤販，以保持河川理想水質，從而能於 21 世紀設置濱海堤壩。城市淨化專案隨著其城市規劃與更新展開，將河畔具有污染性活動遷移，重新安頓聚居在河道附近的貧民，讓 2 萬 6000 多戶家庭遷入附有衛生設施的公共住屋(或稱「組屋」)，將 2800 個小型工廠遷入工業區；逐步淘汰在河流附近之豬、鴨養殖場。
4. 徹底實施雨污分流，暴雨逕流單獨導入雨水排水系統，經排水道及匯流池導至集水區之蓄水池。
5. 控制逕流污染，包括鋪設植被、水溝蓋裝設垃圾阻截設備、以及禁止吐口香糖等法規措施。
6. 自 1971 年開始第一個非保護集水區的供水計畫時，PUB 成立了一個污染監測小組，執行調查，監視及阻止在集水區傾倒廢物等污染活動。每日由 PUB 中央供水檢驗室檢驗從原水的水源、淨水場、淨水庫、配水網路及客戶處抽取的樣本，透過日常監測，確保供水品質符合世界衛生組織 (WHO) 標準。
7. 新的蓄水池(如第十六座)尚會引入人工浮島的現地處理淨化設施。

過去亦存在討論，堤壩或可能提高新加坡河水位，可能引發洪氾問題，增加市區溢淹機會，如 2010 年 7 月 17 日，即出現多處溢淹狀況(烏節路、亞當路、武吉知馬路、麥波申、大巴窰、馬里士他、紐頓圈、湯申路上段、實龍崗北、後港、勿洛北、勿洛南、樟宜路、直落古樓、芽籠、芽籠土乃、景萬岸、巴耶利巴、加冷、丹戎加東、菜市等)，當日早上兩小時內，中部、東部的降雨量近 180 毫米，超出每月平均的降雨量 158.3 毫米，有些地區的降雨量甚至一度高達 300 毫米，但在 36 分鐘內消退。

因此，為因應氣候變遷議題，新加坡環境部亦成立專家群 (expert panel)，針對各項議題進行檢討，已經推動中之措施包括要求烏節路房屋墊高，以提高地面標高；溝渠的防洪頻率從 5 年改成 25 年；目前亦正強化市區各排水輸洪量(如塗以 polymer coating 以減少水流阻力，增加排洪速度)、排水分流 (sewer diversion)、住宅雨水貯留 (rainwater storage) 等 (圖 3.4-10)。



圖 3.4-10 2010 年烏節路溢淹問題

### 3.5 國家水龍頭之三：海水淡化

海水淡化技術已趨成熟，採用逆滲透膜造水每噸操作成本已降至 0.5~0.7 美元，新加坡政府評估其可作為一價格合理且穩定的供水來源。PUB 於 2003 年採 DBOO 方式，由新加坡水處理工程公司 Hyflux 之子公司 SingSpring 得標，於西部大士 (Tuas) 工業區建構每日供應三千萬加侖之海淡廠 (136,000 CMD)，為期二十年 (至 2025 年)，計畫金額為新加坡幣兩億元 (折合新台幣約 38 億)，其中 82.5% 來自於向國際銀行團貸款，其餘部份則採創投股權投資 (entity investment)。Tuas 海淡廠自 2004 年初動工，於 2005 年 9 月 13 日完工啟用，運轉後約提供新加坡現階段 10% 之淡水需求；這不但是新加坡第一座大規模海淡廠，也是新加坡第一個採 DBOO 模式完成之大型工程案，同時為東南亞地區現階段最大的海水淡化廠，產水價格設定為每噸 0.78 元新加坡幣 (折合新台幣 14.8 元，可能依燃料與物價等因素而檢討調整)，在二期工程完成後，產水量將達 32 萬 CMD，預期可以 0.65 元新加坡幣供應予 PUB。





Source: Hyflux



Source: Hyflux

圖 3.5-1 Tuas 海淡廠興建過程與示意圖 (摘自 Hyflux)



INDONESIA

Image courtesy of Cavendish



Image courtesy of Hyflux

圖 3.5-2 Tuas 海淡廠位置與鳥瞰

在處理程序上，海淡廠進水塔有兩條取水管，個別搭配一套粗篩機 (mechanical rake coarse screens)；進水塔中配有加藥單元，包括殺藻劑與加氯消毒，避免微生物在管路塔槽中孳長，另外亦添加混凝劑移除較大膠體粒子，以及調整 pH 值。經過加藥處理後，進水將通入匣式濾器 (cartridge filters)、溶解空氣浮除 (dissolved air flotation)、重力式砂濾槽 (primary gravity sand filters)、加壓式砂濾槽 (secondary pressure sand filters) 等一系列前處理單元，以去除懸浮固體與油脂；再進入兩段式逆滲透膜 (Two passes RO treatment)，第一段主要功能為去除溶解性固體，第二段則以去除硼為主，整體產水回收率最高可達六成。因能源消耗量極大，逆滲透系統之高壓幫浦亦配有能源回收系統 (ERS, Pelton wheel

type system and pressure exchange energy recovery) 以節省電力；另外設置深海排放管，將 RO 產生的濃縮液排入海裡，盡量減少對環境的衝擊。

RO 產水還需要再作處理以改善飲用口感，包括添加石灰調整 pH、加氯殺菌與氨水除氯、以及添加氟離子；產水將儲存在數個儲槽中，經過這些處理的淡化水將與取自蓄水池、並經處理的淨化水混合，之後輸送到用戶端（主要為新加坡西部的住宅區及工業區），其產水水質同時由 PUB 外部單位進行審核。

海淡水經與淨化水混合後以自來水模式售出，若作為家庭生活用水，則每月用水量 1 至 40 立方米，每立方米水價 1.17 元新幣，額外繳納水價 30% 的耗水稅，如果用水量突破 40 立方米，水價會提高到每立方米 1.4 元新幣，耗水稅按照總水價的 45% 收取，另不論用水量多少，每噸用水均需再收取 0.3 元新幣之污水處理費；若作為工業用水，則每立方米水價 1.17 元新幣，額外繳納水價 30% 的耗水稅及 0.6 元新幣之污水處理費。

現階段海淡廠濃縮液缺乏具經濟效益之處理方式，目前亦無興建大型回收製鹽廠的規劃，經過評估深海排放所造成的環境衝擊仍是可接受的。

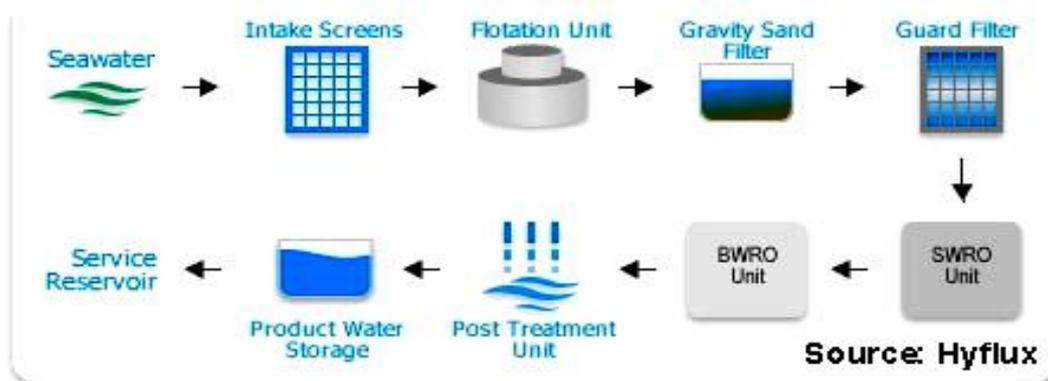


圖 3.5-3 Tuas 海淡廠處理流程（摘自 Hyflux）

### 3.6 國家水龍頭之四：新生水 (NEWater)

自 21 世紀開始，新加坡政府投資超過五十億新加坡幣，修建與供水有關的基礎建設，其中最主要為 5 座專門將污水再生為供家庭、工廠使用的新生水廠，足以應付新加坡 30% 的需水量。

污水再生在美國自 1960 年代即開始有案例。自 1976 年以來，在美國南加利福尼亞橘郡水區的 Water Factory 21 就已經將經過處理的高品質再生水注入地下水，自 1978 年以來，在美國北維吉尼亞州的 UOSA 污水處理廠也將再生水排入奧柯昆 (Occoquan) 水庫，成為華盛頓周邊地區 100 多萬人口的供水源。基於上述經驗，新加坡早在 1970 年代也開始研究新生水，受限於技術與生產成本，未

能大規模產水，但隨相關設備價格逐漸降低，於 1998 年重新展開大規模都市污水回收研究，稱為「新生水」(NEWater)，由 PUB 與環境及水資源部 (MEWR) 所共同發起倡導並形成理念，以確定 NEWater 作為水源彌補新加坡自身供水的可能性。

自 1998 年發軔後，經兩年規劃，PUB 於 2000 年 5 月與 CH2M HILL 公司簽約，在勿洛 (Bedok) 都市污水處理廠成立一新生水示範廠 (NEWater factory)，進水為經活性污泥程序處理後之二沉池放流水，以微細篩機初步去除較大懸浮顆粒後，由微過濾膜 MF 去除絕大多數之懸浮固體，進入兩組平行的三段逆滲透膜 (RO 膜) 處理，產水量約為 5,000 CMD，最高回收率為 80~85% (一般操作在 75%)，最後再以三組串聯的 UV 光消毒設備殺菌；經兩年運轉與水質監測，產水 NEWater 水質確能符合 USEPA 與 WHO 之飲用水水源標準，而健康風險評估與對動物之毒性測試 (魚與老鼠) 也顯示並無致癌效應、造成生殖突變與發展遲緩之風險、或其它毒性，水回收率穩定操作在 80~82%，單位產水耗能估計為 0.7~0.9 kWh/m<sup>3</sup>，低於原廠設計之 1.2 kWh/m<sup>3</sup>；基於如上結果，由國內外專家所組成獨立評審團認定其作為飲用安全無虞，而可作為間接飲用。



圖 3.6-1 NEWater 處理程序

NEWater 廠搭配現有都市污水處理廠設置，取其二級放流水，經過初篩 (microscreen)、微過濾 (MF)、逆滲透膜 (RO)、以及紫外線 (UV) 殺菌進行淨化再生，產水水質可符合飲用水標準。截至 2012 年 7 月，NEWater 廠計有 5 座，程序大致類似，包括：

1. 勿洛 (Bedok)，產水量 68,000CMD；PUB 自營 (污水廠部分 2009.04 關閉)。
2. 克蘭芝 (Kranji)，產水量 65,000 CMD；PUB 自營。

3. 實里達 (Seletar)，產水量 19,000 CMD；PUB 自營 (污水廠部分 2011.06 關閉)。
4. 烏魯班丹 (Ulu Pandan)，產水量 137,000 CMD，由 Keppel Engineering 採 DBOO 方式 (design-build-operate-own) 興建，為期 20 年，用地為向 PUB 租借，僅有使用權。
5. 樟宜 (Changi)，產水量 228,000 CMD，新生水廠為新加坡的第 5 座新生水廠，該廠耗資 1 億 8000 萬元，由 Sembcorp 採 DBOO 方式 (design-build-operate-own) 興建與營運。

上述 5 座新生水總產量最高可達 46 萬 CMD，可供應新加坡全國目前淡水需求達 25% (以 130 萬 CMD 計算)，從最早於 2003 年之 1.8 萬 CMD，至目前約 28 萬 CMD。各廠均有預留第二期擴建用地以提高出水量，待未來各廠擴建完成且開始運作後，NEWater 總供水量尚可再增加。這些水量絕大多數供作鄰近 NEWater 廠之工業用水，僅少數 (約 1%) 注入水庫作為飲用水水源，稱為「間接飲用」 (IPU, indirect potable water use)，目標為總用水量之 2.5%。



圖 3.6-2 污水廠與 NEWater 廠分布圖

就轉作飲用水部份，新加坡政府目前正努力推動公關與宣導工作，減輕民眾使用新加坡作為飲用水源之疑慮，並逐步提高 NEWater 注入水庫之比例。目前（自 2004 年起）NEWater 以一噸 1.22 元之價格售予工業使用（免付耗水稅及污水費）。

本次與陳玉仁助理總裁討論時，得知兩 DBOO 廠商約以每噸 0.35 元新加坡幣之單價售予 PUB（Ulu Pandan 0.37 元，Changi 0.33 元），PUB 則以 1.22 元售予使用端，主係管網部分由 PUB 投資設置自 NEWater 廠至使用端，且 PUB 在此過程需承擔兩大風險，一為基本成本之變動（如油、電、消費指數等），二為

供水水量與供水水質。但在 PUB 的角度，因其為上水、下水一起經營，對於各類價格波動較能緩衝，截至目前在財務上仍可以持續營運。

在發包時，PUB 所設定者為「功能標」，不指定程序，僅指定水質，鼓勵廠商創新，不提供融資保證。

因水價具有優勢，工業廠商自然樂意使用，而無用量波動之問題，目前亦無強制使用新生水之法規；倘若有多出之新生水，PUB 將會注入水庫，此即目前有 1~2.5% 注入水庫作為間接飲用水之緣由。近期則透過法規要求廠商設置二元供水系統，以利使用新生水。

下一個蘊釀中的新生水廠應會依附於西部之 Tuas 污水廠。值得一提的是，目前在裕廊一帶因多屬工業區，其下水道所收集污水雜有工業廢水，故目前未有規劃設置新生水廠。

本次所參觀的地點為勿洛 NEWater 廠，該廠位於新加坡東部，由 CH2M HILL 擔任總顧問，Hyflux 操作運轉，同時設有新生水訪客中心 (NEWater Visitor Centre)，作為教育宣導之用；勿洛 NEWater 廠採透明外觀，供外界人士了解其程序與運作；中心除有專業解說人員解說程序外，亦設有多種視聽設備與互動遊戲，以寓教於樂的方式讓青少年進一步了解新加坡水資源政策、NEWater 運作原理、以及 NEWater 之安全性；現場亦贈送罐裝 NEWater 供民眾試飲。





圖 3.6-3 NEWater 訪客中心

參訪期間亦與 PUB 人員就目前勿洛廠運轉情形作一討論：該廠整體工程操作幾乎為新加坡本土之工程公司自主承辦；目前有兩個 Factory，Factor 1 使用 GE 的 8 吋 RO 膜，Factor 2 則使用 Asahi Kasei 與 Siemens 的新款 16 吋 RO 膜。在維護方面，有三十名員工，該廠採用 Zenon 與 Hyflux 共同開發之浸入式 MF 系統，15 分鐘定期反洗，平均每 3~6 週藥洗一次，RO 則是採用 Hydranautics 系列，平均每 2~4 月藥洗一次；現場人員表示 UF 膜每五年會全部更換，雖無操作上之重大問題，而薄膜產生的濃縮液則導回污水下水道。目前勿洛之都市污水處理設備已拆除，併入樟宜污水處理廠處理之，當地僅剩水再生設施；由於水再生設施係以模組化方式設置，未來若有必要亦可移動至特定廠區。



圖 3.6-4 RO 膜





圖 3.6-5 UF 膜

另一項討論主題為民眾接受度，PUB 人員表示由於 NEWater 廠的程序與產水水質資訊透明而公開，配合與馬來西亞水價談判所造成的危機感，以及新加坡政府尋求淡水水源自主之用心為民眾所肯定，目前對於 NEWater 注入水庫之「間接飲用」接受度日漸提高；而未來亦會依據專家建議與民眾反應，依一般飲用水成份在 NEWater 中添加適量礦物質，以改善飲用口感，維護國民健康。



圖 3.6-6 UV 殺菌燈管

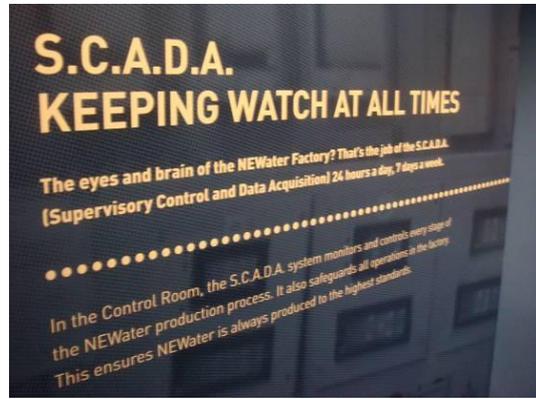


圖 3.6-7 中控室



圖 3.6-8 一般民眾參觀

勿洛與克蘭芝水供回收廠的新生水廠於 2002 年底啟用，緊接著在 2003 年 2 月，新生水就供應給位於兀蘭及淡賓尼/巴西立的晶圓製造廠及其他工業作為工業用水；2004 年 6 月，位於實里達水供回收廠的第三間新生水廠啟用，開始供應新生水給宏茂橋的晶圓製造廠。在目前的新生水供應對象中，約有半數為工業，半數為設有二元供水系統的大型商業設施。



圖 3.6-9 市區 NEWater 管線

新加坡目前有十二座晶圓廠，其消耗水量非常驚人，達該國總淡水用量之 7%，故自 NEWater 運轉以來，即將供應晶圓廠超純水水源作為首要用途。以位於 Pasir Ris Wafer Fab Park 的 Systems on Silicon Manufacturing (SSMC) 為例，SSMC 是皇家飛利浦電子公司 (Royal Philips Electronics)、我國台積電公司 (Taiwan Semiconductor Manufacturing Company, TSMC)、以及新加坡經濟發展局 (Economic Development Board of Singapore) 所共同投資成立之八吋晶圓廠，於 1998 年成立，自 2000 年開始運轉，月產量約為三萬片。

SSMC 目前年用水量達 120 萬噸 (約 3,300 CMD)，主要用作製程清洗與冷卻水，其用水來源採 NEWater (供水導電度約為 50 S/cm)，再導入廠內超純水程序，包括多層濾料過濾器 (MMF, multi-media filter)、活性炭濾床 (ACF, activated carbon filter)、紫外線殺菌、逆滲透膜 (RO)、離子交換樹脂等程序，以進一步去除鹽類濃度，將  $\text{Na}^+$ 、 $\text{F}^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SiO}_4^{4-}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等降至 ppt 等級，而真空除氣系統 (vacuum degasifier) 可去除水中溶解之  $\text{O}_2$  與  $\text{CO}_2$  至 5 ppb 以下。SSMC 在引進 NEWater 之前曾作過一系列可行性研究，包括模廠測試，以驗證其水質是否會對製程與產品品質造成影響，結果發現並無任何問題。廠方指出，自來水

之 SDI 一般在 5 以上，NEWater 約在 1~2 之間，對於 RO 之負擔非常小；比較主要的問題為 NEWater 之 LSI 為負值，為避免造成管線腐蝕，SSMC 及其它廠商要求 NEWater 在配水進入科學園區前，先以碳酸氫鈉將 pH 值調高至 8，以調整 LSI 至 0 附近。

目前 SSMC 每日約使用 2,500 CMD 的 NEWater，大幅降低廠內自來水之使用量，經評估發現，使用 NEWater 作為超純水水源後，該廠化學藥劑之用量明顯下降，離子交換樹脂再生時間也從數天提高至半個月，約可降低 20% 以上的純水設備操作成本；另外 SSMC 亦在評估使用薄膜除氣系統 (membrane degasifier)，以求降低現有真空系統之能源需求與占地。

在 SSMC 廠內，使用過之純水如水質在可接受範圍，將有部份導回純水回收設備，其它則與超純水系統產生濃縮液混合，經過初步過濾後，轉作廠內其它次級用途，包括廠區清洗、廢氣洗滌塔 (scrubber)、沖廁等；總體而言，製程所產生的廢水在經過廠內廢水處理後，約有半數以上導回廠內回收使用。

目前每兩週的定期水質檢驗中，而在 NEWater 儲水槽供水閥門處亦配有線上流量計、導電度計、以及線上 TOC 量測儀偵測器等設備，一旦超過閥值 (TOC 高於 1,000 ppb，導電度高於 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )，將發出警報，同步聯結到廠務人員之手機，通知至現場處理。

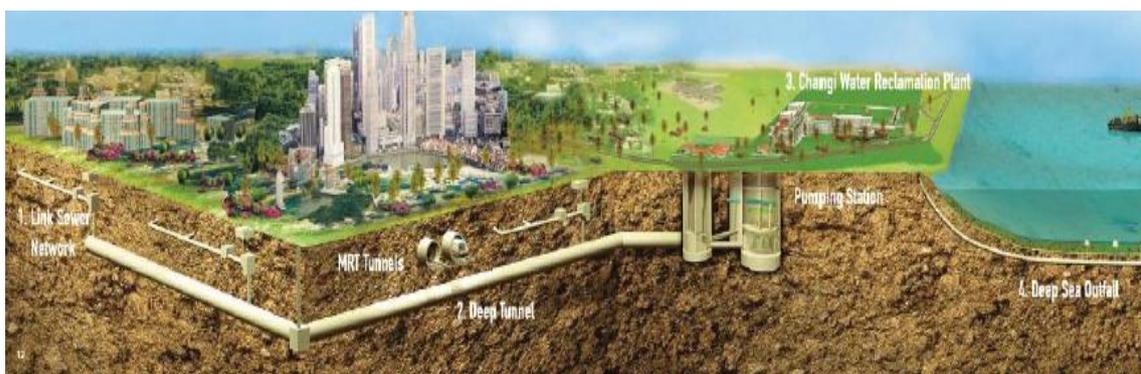
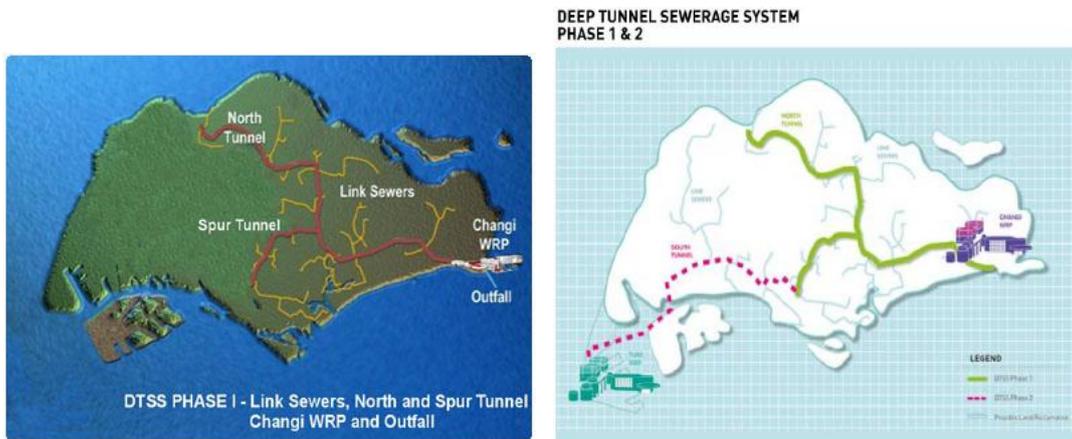
### 3.7 深層隧道下水系統 (DTSS)

新加坡既有的六座污水處理廠已運轉甚久，效能有待提升，而且個別均需廣大用地，包括廠址本身以及週遭的緩衝用地，對於國土面積有限的新加坡是一大負擔，故 PUB 自 1997 年起興建所謂深層隧道下水系統 (DTSS, Deep tunnel sewerage system，或稱「深隧道陰溝系統」)，總經費超過新加坡幣二十億元。

DTSS 包括了兩個在島國交錯的大型深隧道、兩個中央水供回收廠、深海排水口及一個污水管網。建構兩條橫亙新加坡島的污水管，最大深度達 50 公尺，管徑範圍為 3 公尺至 6 公尺，將全國污水引至兩個新污水處理廠：最東端的樟宜水再生廠 (Changi East water reclamation plant) 與最西端的裕廊島水再生廠 (Jurong Island water reclamation plant)，此二污水廠將逐漸取代現有六座污水處理廠，負責新加坡所有污水處理，其位置將遠離住宅區與商業區，對民眾生活與占地降到最小，而放流水將由深海排放管 (outfall) 排入海底 (30 公尺深)；另可釋放出現有污水廠與幫浦站之占地，轉作其它用途。其中樟宜廠已於 2009 年完工並開始營運。

兩個深層隧道直徑最大達 6 米，埋設的深度離地面 20 米至 50 米。有關當局也將建造一個較小的污水管網以把現有的污水管道與深隧道連接起來。污水將從

現有的污水管通過污水連管流向深層隧道。隧道將把污水導入建於兩座大型廠。經過水供回收廠處理的廢水通過深海排水口排入新加坡海峽。有了 DTSS，分佈島國四周的現有水供回收廠及水泵站都將逐步被淘汰。這將使目前被這些設施所占的 290 公頃土地得以改為住宅用途或其他發展。



- 收集所有用過的水，以供再利用。
- 深層隧道污水系統長達48公里，輸送到樟宜污水處理廠(2009.6正式啟用)，進行回收、處理和再利用。是當今全球規模最大、最具創新性的污水處理工程之一。





圖 3.7-1 DTSS 示意圖

DTSS 包括兩階段工程，第一階段包括北部隧道 (North Tunnel)、幫浦站、樟宜水再生廠、以及處理後放流水海放管 (Phase I 工程)；北部隧道包括 47 公里長之管路以及 38 個豎井通道 (access shafts)；樟宜水再生廠初期處理量為 800,000 CMD，未來將擴建至 240 萬 CMD，逐步取代現有 Kim Chuan 與 Bedok 等東部既有污水處理廠之功能。

目前已完成之第一期工程包括：建設從克蘭芝到樟宜的 48 公里隧道，一個位於樟宜、產能為 80 萬 m<sup>3</sup>/d、並具有一個 5 公里長的深海排水口的水供回收廠，以及一些 50 公里長的污水連管。在第一期工程中，位於樟宜的北段隧道、進水泵站以及深海排水口系統已於 2005 年底竣工並啟用。原有的其中三家水供回收廠的污水已導入北段隧道，繞道柔佛海峽排入新加坡海峽。樟宜廠啟用後，現有污水將逐漸導入北段隧道以輸送到處理廠處理。

第二階段工程 (Phase II) 包括南部隧道、裕廊島水再生廠與海放管、以及樟宜水再生廠之擴建，將於 2015 年啟動；預計在 2045 年前現有污水處理廠都將退役，而樟宜與裕廊島兩污水廠將可因應未來一百年內的處理需求。

既有的污水處理廠並不會立刻退役，故 NEWater 廠將不受 DTSS 影響，將繼續運作，直至現有污水處理廠之功能均被取代為止；屆時因現有模組均為可移動式，可考慮移至新再生水廠繼續運作，或另於當地建立大型 NEWater 廠，但這些構想目前都還在規劃中。PUB 人員亦表示，隨著 DTSS 之推動，目前之污水收集管將同步更新，而中水道管線亦會同時進行鋪設，長期而言全島將可使用回收水 (Bedok 目前於現場僅留有放流水再生設施，即新生水廠，污水處理功能已併入樟宜廠)。

PUB 的 DTSS 於 2008 年獲得由國際水協會頒發的東亞和太平洋區「專案創新獎」中的「最佳規劃獎」。深層隧道下水系統整個概念是很創新的，例如拆除原來用來把污水抽到污水處理廠的水泵，讓污水依靠重力從深隧道流向污水處理廠。不但不需要擔心水泵出現故障而引起污水溢出，而且原來的水泵所占的土地也能騰出來給別的建築。同時，為了節省空間，污水處理廠也被建成樓房，而不像以前那樣的平房建築。

樟宜水再生廠之程序主要為初級處理、生物處理（主要以除氮為主，而未考慮除磷）、污泥厭氧消化槽、以及污泥固液分離與乾燥設備。樟宜水再生廠之海放管為兩條 5.2 公里長的幹管，管徑為 3 公尺，陸上部份為 300 公尺，海底則有 4.9 公里，延伸 30 公尺深，海放管壁外有石層保護，至少可耐受 20 噸船錨之撞擊；放流管末端則有許多散流口 (diffuser)，以利放流水的擴散與稀釋。

經樟宜水供回收廠處理的污水將被輸送到深海排水口並通過一系列擴散器稀釋及分散到海水裏。樟宜深海排水口由兩個各長 5 公里的水管組成。第三個較短的水管將鋪設至離海岸不遠處，作未來擴建用。深海排水口的陸地部分將由三個各長 3 米的混凝土/鋼管組成。這長約 300 米的陸地水管將埋在深溝裏。在大海部分的水管長約 4900 米，將鋪設在水下深溝裏，在岩石床上以優質岩石覆蓋。此外，也將放置大型護面石以保護水管免受錨的損壞及確保水管不被海浪、風暴潮等移位。水管的最後一個部分將是一個擴散區，擁有一系列從水管延伸至海床上方的擴散器。這些水頭都有混凝土水頭保護，以免受船錨損壞。它們的深度達海面以下 30 米。當整個系統的建設完成後，現有的水供回收廠及泵站將逐步被取代。



圖 3.7-2 樟宜水處理回收廠處理流程圖



圖 3.7-3 樟宜水處理回收廠海放管、海放管散流口與散流口保護套頭施工過程

(摘自 PUB)

新加坡在下水道建設上為雨污分離。目前新加坡有約 3400 公里的污水道系統輸送家庭用戶及商業大廈的污水至水供回收廠，為確保污水管耐用、安全且不會漏水，以免污水滲入排水溝、溝渠及水道，污染了將流往蓄水池的雨水，在 1996 年展開的 10 年計畫中，有 790 公里的舊污水管道被列入翻新項目。至今已有超過 90% 的翻新工作已完成。

在污水下水道技術方面，新加坡採取了不開挖科技，無需挖掘路面就能更換舊的污水管，該方法是在現有的水管內裝置聚酯內襯以形成一個新的內水管。使用不開挖方法整修舊污水管大大減少了更換污水管所需的時間。由於大部分的工程都在地底下進行，因此也不會對交通或附近的居民造成太大的干擾。在新加坡採用的眾多不開挖方法當中，最廣為應用的是原位內搪管道法（Cured-In-Place Pipe lining method，或稱 CIPP 法）。該科技利用水壓將一充滿樹脂（一種帶黏性、膠狀物質）的軟管通過人孔推入污水管道。當軟管完全襯在原有污水管道的內壁時，將用於推軟管的水加熱至能使樹脂固化的溫度，於是在原有的污水管道裏就形成了新的管道。一般來說，CIPP 法只需三天就能整修 100 米長的污水管，而傳統的開挖方法可能需要三個星期或更長的時間。因此，該方法成本效益很高，能節省約 40% 的更換成本。

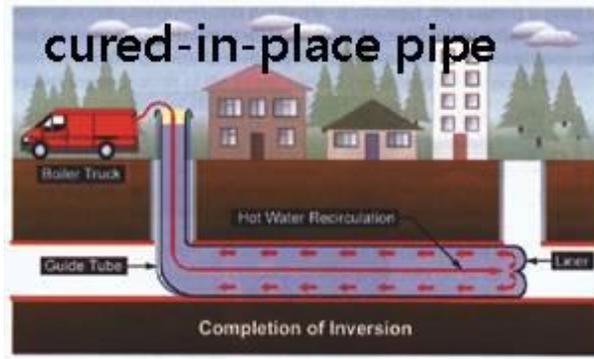


圖 3.7-4 CIPP 示意圖

### 3.8 各項管理措施

除前述之「四大水龍頭」開源措施之外，為能更好地管理和充分利用有限的水供資源，PUB 採取了多項措施，歸納可分為下述五項：

#### 一、高水價政策

較之於台灣，新加坡水價高出許多。居民用水（家庭用水）每月用水量 40 噸以下者每噸 1.17 元，惟需加收 30% 耗水稅，亦即實際總水價為 1.52 元；40 噸以上者，每噸 1.4 新加坡幣，耗水稅為 45%，即總水價為 2.03 元，此外，隨水費徵收排污費，每噸 0.3 元。非居民用水（工商用水）每噸 1.17 元，加計 30% 耗水稅，實際總水價為 1.52 元，惟排污費為 0.6 元。另船務用水為每噸 1.92 元，加計 30% 耗水稅，實際總水價為 2.5 元，但不收取排污費。

另值得一提的是，新加坡其他民生費用同樣高於台灣，其每度電價約 0.14 新加坡幣，每立方公尺瓦斯 0.12 新加坡幣。

在高水價政策下，PUB 有穩定合理的收益，財務穩定，經營狀況良好，無需編列財政補助；如要建設較大的工程，PUB 還可憑藉自身雄厚的經濟實力和良好的信譽向銀行貸款，使得 PUB 各項建設均可順利推動。

#### 二、漏水控制

新加坡一直致力於維持低的水流失量（Unaccounted-For-Water，或稱 non-revenue water，NRW，無計費水量），亦即因漏水、流量計誤差及其他因素所造成生產水量及有記錄用水量之間的差。PUB 執行所謂「3R」：Repair（修繕）、Review（檢視）、Reduce（減量）。在 1990 年代初期，新加坡的 NRW 量約為 10%，至 2004 年 NRW 已減至 5%。

在漏水控制計畫下，PUB 推廣使用優質的水管及配件、水管更新、密集的漏水探測及縮短配水系統漏水的維修時間。水管更新計畫包括在 1984 年至 1993

年之間更換 181 公里的陳舊、無襯底的鑄鐵幹管及 6 萬 8400 條鍍鋅鐵連接管。在 10 年內（1985—95），這些努力成功地使水管漏水的數量從 1 萬 8085 起減至 4543 起。公用事業局繼續在 1999 年實行一項 5 年計畫，於 2004 年更換所有超過 50 年、長約 280 公里的舊管路。

為了更全面而準確地找出漏水位置，新加坡購買金屬探傷器、地音探測器、電子漏水探測器，以及漏水聲音相關器等。新加坡進行了近 620 項日間監測及 280 項夜間漏水監測，在一年內完成了整個漏水系統的檢測。自 2001 年初，新加坡引進了聽漏儀，它能夠在不需繁雜檢測步驟下確認疑似漏水區。

所有來自自來水廠的水供及用戶用水都 100% 地經測量和記錄。為了確保用戶龐大用水量的記錄能準確無誤，新加坡不惜代價投資在諸如複合水錶之類的電子測量設備。這項全面的記錄系統幫助新加坡向用戶準確地收費並減少了水流失量。需要大量用水的地方包括：新幹管、連接管及給水池的啟用及灌注，維護配水系統時的清洗及沖刷，以及救火。為了避免這些用途所帶來的不適當計量，即水流失量，新加坡實施了按月報告制度，以確保水的正確用途。

此外，為控制配水管線漏水量，全國的輸水鍍鋅管改成球磨鑄鐵管、不銹鋼管和銅管等品質較佳的管線、定期汰換主要管線、主動偵測漏水點、以及立即處理民眾反應問題。PUB-One 人員定期依流量資料調查可能發生漏水區域，使用聽音棒與音壓感測器等設備，以找出漏水點，依此作為更換管線之依據，控制單位長度管線之裂縫數（每公里不超過三個）。

為能提高流量量測精確率，目前自來水廠與加壓站一律使用電子式流量計，而並透過定期之流量計測試校正服務，包括使用複合流量計（compound flowmeter），降低用戶水表之誤差，並定期予以更換。

### 三、宣導節水

另一個應對水供需求不斷增長的方法是節約用水，從而提高水的利用率，儘量縮小水資源的供需差距，做到用水自給自足。新加坡採用了幾種措施鼓勵國民節約用水。其中包括在水龍頭裝置水流調節器以控制水流，以及推廣使用低容量的抽水馬桶水箱。政府也鼓勵商業及工業用戶有效用水以達到節水目的。在各方面的努力下，新加坡的人均用水量已從 2003 年的 165L/d 降至 2005 年的 160L/d。水龍頭等用水器具全部更換成節水型器具。

推廣節水設施，包括推動使用每次 4.5 升的省水馬桶（一般 9L/次），水龍頭安裝省水片以降低流量（已由一般 8 L/min 降低至 6 L/min，未來希望可降至 2L/min）；這還包括各類的教育宣導，以及嚴厲禁止非法接水行為。新加坡進行全民節水教育，把節水作為人人遵守的社會公德，甚至列入小學教科書的公共課程，使節水意識深入人心。

他們從培養公眾節水意識入手，使新加坡人自覺養成節約用水的習慣。如 2003 年開館的新生水展覽館，就是作為一個對民眾進行節水教育的場所而存在的，目前已有 50 多萬人次到此參觀。而前述之高水價和水費累進制亦鼓勵公眾節約用水。據統計，目前新加坡人每天的人均用水量已從 1990 年代之 165 升降為 157 升，降幅接近 5%，這一成績受到世界的肯定。

未來新加坡將持續推行二段式馬桶，同時亦有配套設施鼓勵購買省水型洗衣機。

#### 四、禁止高耗水產業設置

新加坡考慮供水量有限，在兼顧經濟發展之情況下，仍依法禁止建設高耗水和造成水污染的企業。嚴格管理，用水新戶要向 PUB 提出用水申請，審查批准後方可取水。對月超用水量 500 立方米的用戶和家庭用水計量異常戶，PUB 都要進行審查，並提出改進措施；而目前高耗水之晶圓製造業，亦大量使用 NEWater，而非天然水源。

除此之外，由於立法及執法嚴格，新加坡非法用水的案例很少。違法者將面對新加坡幣 5 萬元的罰款或長達 3 年的監禁。

#### 五、鼓勵民間參與

新加坡的水資源在質與量、供求管理、公共與私人機構參與、效率與公平考量、國家戰略利益與經濟利益以及在增加國內水供產量及以來外來水源方面，都成功地取得了平衡。長期以來，水資源一直被新加坡政府視為永久性的戰略資源，為了減少國家淡水的進口依賴程度，政府通過科研開發等多種途徑積極尋找新的水源。經過 40 多年的努力，新加坡現已形成淡水進口、雨水儲蓄和新生水三大水源供應管道。

雖然新加坡的水供應仍然依賴外國，但新加坡的水務業卻已成為當地迅速興起的行業之一，在國際上享有盛譽。不久前，新加坡環境部、經濟發展局及公用事業局發表的聯合公告指出，隨著本地大規模水務工程，如新生水、深層隧道下水系統及濱海堤壩等工程的逐步落實，新加坡不僅已經成功地把缺水的劣勢轉變為優勢，而且還帶動了本地水務業的蓬勃發展。

今天，新加坡已從水資源的嚴重短缺國，逐漸成為水資源能夠自給自足的國家，在解決自身水資源問題的同時，新加坡已成為掌握世界先進水務技術的國家，並進而成為水資源管理先進國和水務技術輸出國。當地水務業市場上，有 50 多家國際和本地公司，實里達新生水廠建設時首次採用了本地公司研發的膜（該廠所使用的低壓膜是本地公司凱發 Hyflux 研發）。此舉將鼓勵更多本地水務業者為水處理及迴圈過程繼續研發及生產高品質的產品及解決方案。新加坡國內的 8 家水務公司紛紛走出國門，在中國、印度、中東等地拓展商機；優越的地

理位置將吸引更多水務業者以此為基地，開拓亞洲水務市場、進行水務新科技的實驗專案。新加坡正在向國際「水務中樞」的目標大步邁進。新加坡評估目前其在全球水務市場的占有率為 1%，希望在 2015 年前，新加坡的占有率能上升到 5%。環境和水務產業已被新加坡作為下一步的三個重點產業之一發展。

新加坡在充分利用水資源方面所做的另一個努力是呼籲全國人民為水管理盡一份力，因為管理水資源不僅是政府及水務公司的責任，用戶也扮演著一個很重要的角色。新加坡稱之為「3P 方法」，即社會大眾（people）、公共領域（public）及私營機構（private sector）。政府正積極探討讓私營機構扮演提供公共服務的角色。這是一個結合私人界專才為水務業提供更富競爭力服務的最佳時機。其中一個倡議是採用國營－私營夥伴（Public Private Partnership）的形式，這個形式能為私營機構提供發揮其所長的機會。

新 3P 方法的要點是與夥伴合作在新加坡發展一個繁榮的水務業。2004 年 12 月，3 個新的水務團體成立了，包括「水供科技、培訓及網路中心」、「新加坡水協會」及「水供聯絡網小組」；「水供科技、培訓及網路中心」的成立是為了協助新加坡發展成為一個水務業的科技、培訓及網聯業者的中心，集合了「新加坡水協會」及「水供聯絡網小組」的力量，該中心希望能在管理、關注及享用水資源方面為合作夥伴們建立一個強有力的紐帶。

## 六、鼓勵水相關科技之研發

PUB 於 2007 年成立國家科研基金，下設環境與水科技發展委員會（Environment and Water Technology Development Council），迄今投入 4.8 億新加坡幣，支持近 100 項科研項目。PUB 鼓勵研發，鼓勵企業、學校、研究機構提出構想，第一階段由專家審批，第二階段進行示範（demonstration），第三階段進行實廠測試（field test），如有疑慮，任何一個時間點都可以停止。相關之「call-for-proposal」從 2007 年開始，每年經費約 3,000 萬元新加坡幣，2012 年上半年即已接到 25 件；PUB 的策略為先鼓勵技術發展，再提供驗證（verification），雖新加坡目前並無環保技術驗證（ETV）這樣的機制，因為先進國家如美國已經有此制度（如加州之 DHS certificate），希望廠商擁有其他國家之 ETV，PUB 再自己作模廠測試，確認其效能即可。小型企業或新創公司之後可以作現場測試，增加其業績（reference），達扶植產業效果。近期 PUB 即提出技術需求，亦即如何讓每噸海淡水耗電量從 3.5~4.0 kWh，降至 1.5 kWh，目前在眾多提案中，獲選者為西門子公司，而 PUB 即撥款 400 萬元新加坡幣予以支持，同時要請各水廠提供支持，協助測試，未來若成功，廠商擁有知識產權，而 PUB 擁有使用權。

除此之外，新加坡也大力發展為水行業卓越科研中心聚集地點，鼓勵國內外企業於新加坡設置研發中心或總部。以下為兩則重要案例：

1. 2009 年新加坡政府透過政府和企業合資方式，爭取到美國奇異公司

(GE) 在新加坡投資 1 億美元，和新加坡國立大學 (NUS) 合作，設立「NUS-GE 新加坡水科技中心」。美國奇異公司預測，全球對乾淨水源的需求，2030 年時將比現在成長兩倍。因此奇異公司計畫接下來兩年，將在全球投資 15 億美元，推動研發活動，包括在新加坡設立水科技中心。奇異水資源亞太區總經理凱西迪 (Kevin Cassidy) 表示，澳洲經濟雖然發達，但水資源卻非常有限，因此不得不求助替代方案，如海水淡化、水再循環利用等。中國和印度也因為工業發展，加上人口成長，急需開拓水資源。因此，奇異公司和新加坡國立大學將透過新加坡水科技中心，以高效益的水處理技術，滿足亞太及全球市場對乾淨水源急速成長的需求。總投資額達 1.5 億美元的新加坡水科技中心預計下週開幕；新加坡政府最多將投入 7000 萬美元。奇異公司預估，目前全球的水處理市場總值約 400 億美元，20 年內估計將成長兩倍。

2. 2012 年，國際工程諮詢公司邁進集團 (Meinhardt Group) 與南洋理工大學及其南洋商學院合作設立水培訓中心，致力把新加坡發展成水行業的卓越科研中心，三方日前在新加坡國際水周 (Singapore International Water Week) 的展覽會場，簽署了合作備忘錄，稱為“邁進水培訓中心” (Meinhardt Water Training Centre)，中心將通過實際的培訓和實習，以及製造跟公共部門和私人企業客戶分享構想與最佳行業做法的聯繫平臺，協助培養水行業的專長。課程將包括為業者、中層管理和高管量身定做短期課程，讓他們在環境、水源和廢水處理的領域方面增長知識，以及加強技術、商業和管理技巧。課程也將著重在環境工程的最新科技和發展，並將跟實地經驗相結合，包括探訪本地和外國的水廠，以獲取關於世界級設施的第一手經驗。邁進集團的多元工程專長和監督專案交付週期 (project delivery cycle) 的國際經驗，將協助傳授更加全面的知識給客戶，讓他們擁有結合水和廢水處理的必要能力，以進行永續與長遠的基礎設施規劃。

## 第四章 結論與建議

### 4.1 結論

參加本次新加坡國際水周與展覽後，獲致下述心得：

1. 本次論壇結合都市規劃與水務管理兩項議題，都市的水岸景觀營造與河川水質整治，可改善居住環境，同時將水岸從作為行政區域分隔線之角色，成功融入都市居民的生活與動線，透過「水岸縫合」理念提高都市整體價值，紐約市之經驗足以借鏡；而穩定水資源供應，提高節水率，可穩定生產與有助形成產業聚落，提高產業價值，降低對自然資源與國外倚賴，是為國家發展上的關鍵策略，新加坡積極構建「四個國家水龍頭」的理念因此頗受各國重視。
2. 不論地小人稠如新加坡、雨多但地勢陡峭難儲水如日本、台灣，或是地大物博如美、中、澳等，各國均面臨傳統水源受各種因素開發不易，以及水源供應穩定度受氣候變遷的影響；提高水再利用率，尤其是都市污水處理廠放流水之大規模再生利用，以及十萬噸級之大規模海淡廠設置，可降低對傳統水資源之倚賴，是為國際趨勢。
3. 新加坡設置濱海堤壩之河口堰，在台灣或因各種限制不易實施，惟新加坡為提高此類平地水資源之水質以及可利用率，在都市規劃以及控管逕流廢水污染所作之種種努力，仍足以為我國借鏡。
4. 新加坡數十年來為確保水源自主供應，大力發展再生水與海淡水等公共工程的種種努力，不論採何種興辦模式（PUB 自辦或是採 DBOO 等），均提供國內外各類水務廠商之舞台，也提供國內相關設備產業之實績驗證機會，公私部門互蒙其利。新加坡經驗顯示，發展再生水與海淡水為一種知識密集產業，對於設備使用、水質管理、系統整合等各種技術的累積，足以帶動國內水利產業、水處理設備等環保產業，以及水務管理相關服務業起飛，在政府有效整合與宣傳下，更可輸出海外。
5. 水再生議題目前已經從「水資源回收」，進一步到「水中能資源回收」，包括磷酸鹽、重金屬、微生物資源、能源等；未來國內污廢水處理廠區規劃設置時，應視水質狀況，進一步將水資源回收、固體廢棄物資源回收、能源回收等，納入廠區設計規劃中。
6. 各類水處理新技術的開發除可使水回收能耗與用藥再降低，並可達到前述「水中能資源回收」之目標，惟從氮氮厭氧氧化（ANAMMOX）之發展過

程，顯然需藉由各類創新育成機制，使得相關技術可以在發展初期獲得舞台與實證機會，而後才能逐步放大規模。是故 PUB 在水務方面之研發策略足以為我國參考，包括：

- 每年針對特定技術議題（產水節能、水質安全），公開向學界與業界徵求研發計畫，獲得解決後再與業界共同應用。
  - 對具潛力技術，與業界合作投資設置大規模模廠驗證之（包括正向滲透 FO、ANAMMOX 等）。
  - 鼓勵業界於新加坡成立研發中心，優化技術力量，積極向國際引入高階技術人才（如 Hyflux、Memstar、GE Water 等均循此模式設立研發中心）。
7. 新加坡擅長國際宣傳與包裝，使各國高度重視各項成果，其各種措施值得我國借鏡，包括：
- 國際化：挾新加坡英語環境之優勢，與國際密切接軌；善用國內外專家顧問團（Expert panel），強化國際宣傳效果。
  - 新聞化：行銷內容精緻、即時且具國際化，使各方樂於引用；透過媒體正面宣傳，深化國內認同，全民支持使施政更具動力。
  - 廣角化：結合多項議題，包括國家安全、產業發展、民眾福祉、國際關注等，使宣傳具加乘效果；而新加坡民間力量旺盛，相輔相乘，公民合作使利基更大。

## 4.2 建議

我國與新加坡環境所去甚遠，新加坡採取各項策略雖足以借鏡，在我國實行時仍需考量既有行政面與環境面調整之，在此有下述各項建議：

1. 新加坡之國際宣傳措施足以為我國借鏡，惟新加坡擁有我國在語言或是環境所沒有之優勢。對於國外人脈之培養實有必要長期耕耘，並有持續宣傳機會，方能使國外正視我國成就。衡諸一般國際研討會之狀況，一般與會者約有 25% 為外國人，而外國與會者中又有一半來自於飛機時程四小時之內的國家。建議可針對目前各項專案所曾經邀約國外專家及其所在單位予以建檔，作為既有國際合作網絡之重要據點，因其對我國狀況已有一定程度了解，未來可持續而有系統地提供這些專家我國最新水利工程與水務產業發展資訊（以英文電子報型式）；對於我國諸項較大規模之工程成就，可結合數項特定議題，配合大型國際研討會在台舉辦契機，邀請來台，並促動有關人員參與盛會。
2. 長期以來對於河川水資源之利用主要著重於「水量」，而隨時代演進，社會對於水質與水岸環境之要求有增無減，而水岸環境之改善又進一步帶動都市

土地價值之提升，故我國主要城市均盡力推動水岸景觀營造。未來的流域計畫除前述水量之管理外，在既有點源污染之控管外，強化控管來自不特定區域之非點源污染（如逕流廢水、坡地土石沖刷、農業廢水等），是為各國所面臨之挑戰，未來有必要進一步將「污染總量管制」納入前述流域計畫中，整合考慮水量與水質，提升都市整體價值，係在環資部架構下之重要議題。

3. 我國目前極力推動放流水再生利用以因應快速成長之工業需求，雖仍面臨水價未合理化、法制面未完備，以及各單位間待協調等議題；目前使用端對於「用水保險」之意識已逐漸抬頭，惟法制面與單位協調問題仍未解決，建議未來透過「再生水資源發展條例」草案，逐步解決單位協調方面之問題，包括管線設置等跨區域建設過程所需政府協助事項。惟水再生產業不同於傳統水資源開發，初期政府可採示範案方式，提高社會對於此一模式之接受度，並發掘相關行政配套問題，但在台灣若主要供應特定工業，無涉社會大眾，長期而言相關管理機制可回歸商業契約，政府僅提供管線設置以及設廠用地等最必要之協助。
4. 新加坡與我國均有水務方面之科技研發專案，惟作法上主要差異為：
  - 新加坡之議題開展選定與其發展之特定工程高度相關。
  - 研發成果若具可行性，其落實亦較快速；可行技術在短時間內需從小型模廠 大型模廠 實廠化，以 NEWater 之發展經驗來看，其進程約在 5 ~ 10 年內，所謂模廠最大產水量可達 10,000 CMD。
  - 新加坡 PUB 可提供適當試驗廠區，後續實用化進程主要透過 PUB 取得使用權，再落實至 PUB 所有之廠區，加以推廣，而後引發民間企業之興趣。

我國各項科技專案所獲成果，在現有大型公共工程採購環境下，未必能獲得選用（因尚不成熟、實績偏少、耗材特殊而非泛用廠商可提供、僅能由少數廠商提供系統性服務等諸多因素），未來有必要針對上述問題逐步解決，包括由政府以科技專案投資特定示範點，引入民間資金，並資助足夠經費設置一定規模之模廠，作為實績，方有助於水務產業之進步。