

水與能源

劉廣定

水和能源是現代生活的必需，更是永續發展之必要資源。一般人常不注意，水和能源還有相互依存的唇齒關係。因為除風力之外，生產能源的主要方式如水力、火力與核能發電，都需要用水。近年來廣受重視的生質燃料（biofuel），尤須消耗很多的水——包括了灌溉、生產肥料與農藥、以及處理所造成汙染等。全世界能源發電約 8% 是用來抽取、處理和輸送水給農業、工業、公共和個人用戶。

水能交織

國際能源總署（International Energy Agency, IEA）2012 年發表的「世界能源展望 2012」（World Energy Outlook 2012）中首次探討了水與能源的關係。於第 17 章綜合討論需水量（即取水量 withdrawal）不同的能源，及估算水力發電外產生各種能源的需水量。故知 2010 年約有 5830 億立方公尺（噸）或 583 bcm（十億立方公尺）淡水用於產生能源，佔世界總需水量的 15%；又預估改進產能方式之後，2035 年產生能源之需水量將上升 20% 至 691 bcm，而耗水量（consumption）將從 66 bcm 增為 122 bcm，多了 85%！參閱圖一（不計需水量很小的風力發電）。但若沿用 2010 年產能方式，2035 年產能需水量將高達 790 bcm。

因此，今（2014）年 3 月 22 日「世界水日」（請參閱本刊第 45 卷第 7 期，第 553~554 頁）

的主題即是「水與能源」，強調「水能交織」（water-energy nexus）觀念之重要。其討論的目標有六：

1. 加強認識水和能源之間的相互關係；
2. 政策對話聚焦於涉及「水能交織」的廣泛問題上；
3. 經過案例研究，向能源部門和水資源領域決策者證明，以整合的方式探討與解決「水能交織」問題，能獲得更大的經濟和社會影響；
4. 確認政策制定和能力建設之問題，能使聯合國的部門，特別是「水組織」（UN-Water）和「能源組織」（UN-Energy），得以提供顯著之貢獻；
5. 確定「水能交織」之關鍵性利益相關者，並促使他們在進一步發展中之積極參與；
6. 促成有關「水能交織」課題在 2015 年後繼續討論；

許多相關的國際與民間組織也都在此前後發布了或簡或詳的相關資訊。現擇幾項介紹於後。

聯合國水組織

聯合國水組織（UN-Water）除出版《世界水發展報告 2014：水與能》（World Water Development Report 2014: Water and Energy）外並由聯合國大學（UNU）及聯合國工業發

展組織 (UNIDO) 代表，在世界水日發表「水與能」的報告。說明能源和水的關聯錯綜複雜，其中強調：

產生能量需要水 (Water for energy)

——水是發展能源基礎設施的關鍵，並且是整個能源基礎設施和資源開發過程的根本。從獲取原料，淨化，洗滌和處理原料，到核能與火力發電廠的冷卻液，以及種植生質燃料作物，推動渦輪機 (包括水力發電) 等都需要用水。

水之運作需要能量 (Energy for water)

——水基礎設施唯有依靠能量才能運作，才能表現其整體功能價值。海水淡化、地下水開採、淡水之淨化與輸送、廢水與汗水之收集和處理，終端使用者之利用 (包括農業灌溉) 等都需要用能量。

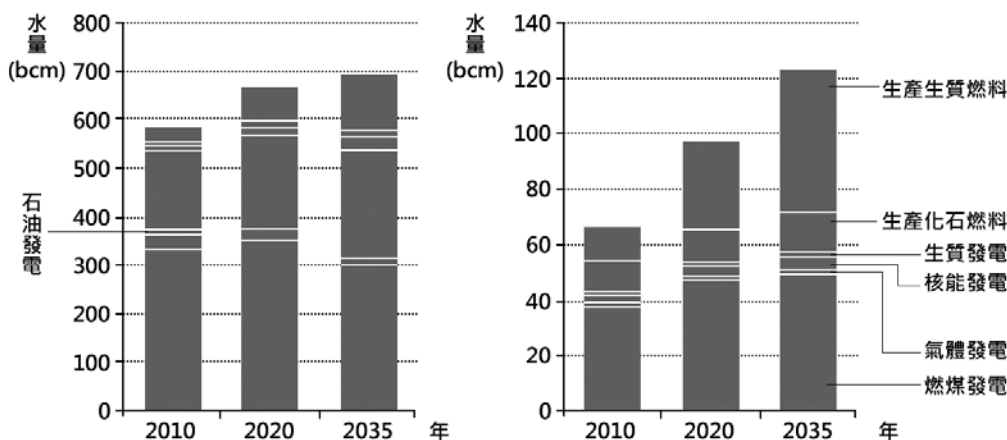
並提出一些數據和估計如下：

- 人類無經常穩定的電力或無電力可用。
- 未來 25 年的趨勢是世界各地區，主要是在非經合組織 (non-OECD) 國家，能源和電力消費增加。
- 到 2035 年，能源消耗將增加 35%，這將增加產生能源的用水量 85% (參考圖一)。

- 自 1990 年代起，水力發電一直保持穩定供應約 20% 以內的世界電力。
- 一般而言，抽取地表水比抽取地下水少用 30% 能量。然可以預期，因地下水位下降而抽取所耗能會愈來愈高。全球分生產生質燃料灌溉用水估計為 44 bcm，佔所有灌溉用水 2%。在當前的生產條件下，平均需要大約 2500 公升 (L) 的水 (約 820 L 為灌溉用) 產生 1L 液體生質燃料，約等於生產平均每人每天食物所需之水量。

在《水與能》報告中還有許多重要資訊，例如：

1. 面臨滿足日益增長之需求的挑戰——全球的需水量到 2050 年預計將平均增加約 55%，主要是製造業 (40%)，熱發電 (14%) 和一般民眾使用 (13%) 增長的需求很大。這樣一來，淡水供應將愈加緊張，全球 40% 以上人口將生活在嚴重缺水的地區。
2. 全球電力生產不同來源之百分比 (2011)



圖一：全世界能源需水量 (左) 與耗水量 (右)。(數據來源：World Energy Outlook 2012)

生產能源的方式有很多，包含化石燃料、生質燃料、燃煤發電、核能發電、氣體發電、生質發電等，都需要用到水來產生能源，同時也會耗費水資源。

2010 年全世界約有 583 bcm (十億立方公尺) 的淡水用於生產能源，預估在改進產能方式後，2035 年用來產能的需水量會上升 20%，而耗水量會從原本的 66 bcm 增多 85% !

年統計) 如圖二。

3. 藉熱能發電之電廠 (thermoelectric power plant) 負擔全球電力生產約 80%，其冷卻所需之淡水，在歐洲佔總取水量的 43% 而在美國接近 50%。
4. 目前農業用水約佔全球總能耗的 70%。食品之生產和供應約佔三分之一。從農業栽培到生產生質燃料的需水量遠大於產生化石燃料。

為喚起世人注意，水組織列出五項重點訊息 (key messages)：

1. 水需要能量，能量需要水；
2. 淡水供應有限，但需求量不斷增加；
3. 節約能源即是節約用水；
4. 「最底層的十億人」(The Bottom Billion) 迫切需要獲得水和衛生設施，以及電力；
5. 改善供水和能源效率是必須的政策。

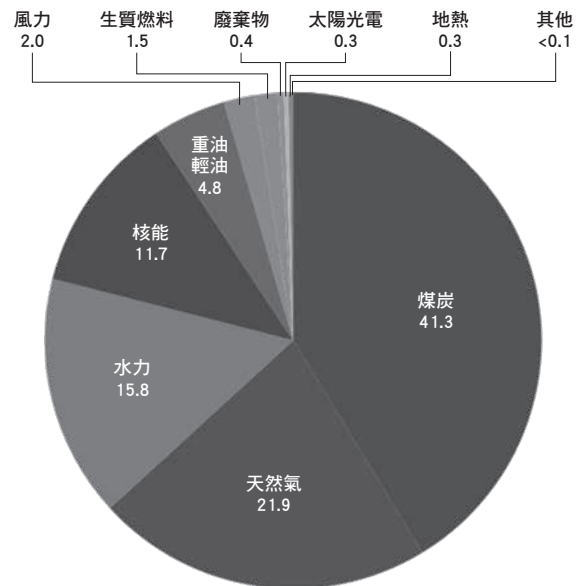
《最底層的十億人》 (The Bottom Billion)

保羅·高力 (Paul Collier) 於 2007 年所著書名，指阿富汗等 58 個開發中國家，超過十億的居民。

美國能源部

今年六月美國的能源部 (DOE) 出版了《水能交織：挑戰與機會》(The Water-Energy Nexus: Challenges and Opportunities) 一本新報告。說明設計了水與能源關係為架構，以整合的挑戰和機遇空間，為能源部及其合作夥伴未來的行動和努力奠定了基礎。為應對氣

圖二：全球電力來源分布 (單位：%)



候變遷，人口增長，技術進展及政策變化等造成之挑戰，特別強調能源部長期以來所建立「研究，發展，示範，部署」(RDD&D) 的整合模式。

這報告又確定了六項準則——「戰略支柱」(Strategic Pillar)，作為協調整合研發之基礎：

1. 優化淡水使用效率於能源生產、發電、及各種終端利用系統；
2. 優化能源效率於水資源管理、處理、分配及各種終端利用系統；
3. 增強能源和供水系統的可靠性與復原能力；
4. 增加非傳統水源安全生產與有效使用；
5. 推行有關水質，生態系統和地震影響等之義務性能源業務；
6. 開發水和能源系統的生產之間的協同效應。

美國環保署

美國環保署（EPA）曾鼓吹加強「水與能源效率」，估計：

- 全國每年用電量的3~4%（大約560億千瓦，約值40億美元）乃用於供應飲用水和污水處理服務；
- 如果供水和污水處理事業可以減少使用10%的能源，每年將節省約4億美元；
- 供水和廢水處理行業是城市區域典型的最大能源消費者，常佔總耗能的30~40%；
- 如果1%美國家庭裝置高能效產品與節水設備，每年可節省用電約1億度，並減少排放8萬噸的溫室氣體。

因此，呼籲重視使用能源之效率，以及節約用水——等於節約用能。

古瑞斯交流基金會

古瑞斯交流基金會（Grace Communications Foundation）是1997年在美國紐約市成立的非營利性民間團體，關注對象為基於能源、水與食物之永續發展，以及所產生的環境和健康問題。2014年發布了幾項數據，提醒大家注意：

- 美國藉熱能發電之電廠，其冷卻用水佔總取水量的49%；
- 配備直流冷卻系統電廠消耗了90%的取水量，餘為使用閉合循環冷卻系統者所消耗；
- 每天需取用10~20億加侖（gal, 1 gal = 3.8 L）的水煉製8億加侖的石油產品；
- 從玉米製造1加侖乙醇需要3.5~6加侖

水，但從原油製造1加侖汽油只需1~2.5加侖水；

- 愛荷華州的每個乙醇工廠每年約使用4億加侖水，大致相當1萬人口市鎮每年的用水量。

因而呼籲：少開車、共乘車（carpooling）和使用公共交通工具，盡可能避免消耗化石燃料及生質燃料，也省了用水。同樣重要的是在家裡也須節省能源，改用節能電器和燈泡，不用時關閉電器，以及使用節水器具。聚少成多，集腋成裘。每個人的一些小努力，所省下能源和水之總量是可觀的。

耗水的熱能發電

除藉水力和風力發電之電廠外，以熱能發電之電廠乃利用「燃料」產生的能量，將水加熱使其變成蒸汽，再推動渦輪機與發電機來發電。然後以水冷卻蒸汽並釋放多餘的熱能，在這冷卻過程中會用到大量的水。

冷卻蒸汽較普遍的方式有二：只用一次的貫流式冷卻（once-through cooling）和循環使用的濕式冷卻（wet cooling）。另有「乾冷式」（dry cooling），則較少採用。由於冷卻設計的方式不同，因蒸發的耗損有差別。一般而言，濕冷式耗損的水比貫流式為多。依據2012年一篇刊於 *Environmental Research Letters* 的統計美國發電廠資料報告，選列一些產生每1000度電平均所需用和消耗水量的數據於圖三。

據臺電報導：民國102年，燃煤的火力發電在臺灣所有發電中約佔40%，天然氣的火力發電約佔30%，累計發電量約1192億度。以使用兩種火力燃料和冷卻方式可約略估計

貫流冷卻

每 1000 度電 (MWh)	需水量 (gal)	耗水量 (gal)
核能發電	25000-60000	140-400
火力發電 (煤)	20000-50000	400-317
火力發電 (天然氣)	7500-20000	20-100

濕式冷卻

每 1000 度電 (MWh)	需水量 (gal)	耗水量 (gal)
核能發電	800-2600	600-800
火力發電 (煤)	500-1200	480-1100
火力發電 (天然氣)	150-283	130-300

圖三：發電廠冷卻蒸汽需水量及耗水量舉隅。

出每發一度電耗損約 2 公升水，而知一年內火力發電消耗了約 2384 億公升的水。核能發電在臺灣所有發電中約佔 20% 左右，累計發電量約 400.79 億度，以每發一度電消耗 1.5 公升水來估算，去年核能發電則消耗了約 600 億公升的水。總共消耗水資源約 3000 億公升，相當於 12 萬座奧林匹克標準游泳池的水量！

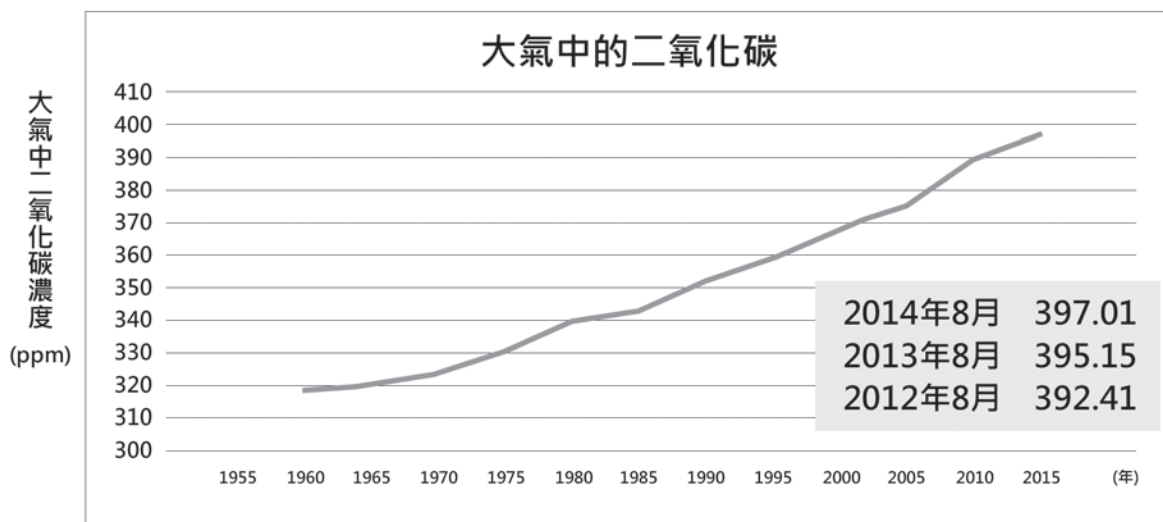
不同種發電廠在一小時內產生 100 萬瓦電力，所需水的消耗量。100 萬瓦的能量可以在每小時供應約 1000 戶住宅生活用電。

圖四



(數據來源：National Renewable Energy Laboratory)

圖五



餘論

上節只述及熱能發電之電廠冷卻蒸汽的耗水量。若加上清洗火力發電產生的二氧化碳，及獲取產能原料如煤（可以參考大陸的中國環境科學出版社 2012 年 8 月出版的《噬水之煤》一書）、石油、生質乙醇，甚至於製造轉換太陽能的材料，都需要耗用更多的水。圖四是據美國人統計 1000 個家庭每小時用電，因發電方式不同所消耗水量（加侖）所畫。

當前全球二氧化碳排放量持續攀高。2013 年 5 月 10 日一度高達 400 ppm，今年八月之平均值已升到 397.01 ppm（圖五）。8 月 31 日至 9 月 6 日一週平均值為 396.28 ppm，一年前為 393.94 ppm，而十年前（2004）為 373.94 ppm，可見增加之快。實際上，國際能源總署 2013 年 11 月發表之「世界能源展望 2013」（WEO-2013）已指出：全球溫室氣體排放之三分之二來自能源產業，2035 年，與能源相關的 CO₂ 排放將上升 20%，以致世界平均氣溫上升 3.6°C，遠高於期待的 2°C。因

而呼籲：必須改進產能方式，節約用能，減緩二氧化碳排放量增加的速率。

依交通部之統計，民國 102 年，臺灣民眾使用之交通工具，「機車」占 47.7%，「自用小客車」23.7%，公共運輸僅占 15.2%。行駛 1 公里平均所需之汽油，從石油的抽取、精煉和輸送約需耗費 1.8 公升的水！所以少開車、共乘車或搭乘公共運輸確能減少使用燃料油，減低二氧化碳排放量，也等於少耗費寶貴的水資源。

再者，為配合全球人口增加而必需之糧食增產，將使農業及食品工業之需水量及耗水量隨之不斷增加，卻也遭受發展生質燃料增加用水造成的壓迫（參考圖一）。故知：節能、節水，以及加速相關的科學和技術之 RDD&D 實是追求永續發展之道。

劉廣定

臺灣大學化學系名譽教授