

英國核電廠除役考量與費用推估

蕭國鑫

工業技術研究院 綠能與環境研究所

摘要

英國核電廠除役優先考慮因素為安全及環境問題，並兼顧實質權益關係者的參與及鼓勵社區提供永久儲存場址的遴選，且政府亦提供這些受衝擊社區社會經濟支援；其中安全問題除了核電廠的拆除、環境整復及避免輻射污染外，對於放射性廢棄物處理與減量，特別是規劃未來的深地層處置永久儲存地點為重點方向。另英國 NDA 針對現有核電設備除役後，所需的拆除作業及最終處置場所費用與維護，包括投資新發電設備、再生能源補助與電力進口等因子，若包含直接之發電經濟效益損失及間接之就業與社會經濟救助等，統計將花費 1,216 億美元，包括核電廠停止商轉的經濟損失 240 億美元及除役和整治費用 976 億美元，且未來除役的整體費用仍有可能變動。

未來我國亦須面臨核電廠除役問題，而用過核燃料之深地層永久儲存場的場址尋覓為關鍵所在；如英國藉由本地居民主動參與遴選用過核燃料永久處置場址的做法可以借鏡，而另覓境外地點或參考瑞典之用過核燃料永久處置場設在核電廠內之深層地質中之做法亦可加以考慮(需考慮深層地質穩定度及地震等災害)。另依據台電 2011 年資料，核一、二、三廠不延役，拆廠費用約 622 億元，加上核廢料後端處理成本，預估總成本約需 3,353 億元；至 2010 年，我國核能發電量每度提列 0.17 元充作核能後端營運基金已累積約達 2,089 億元。但是未來若要明確遴選出較佳的用過核燃料永久儲存場地地點，不論是境外或是如瑞典之永久處置場設在核電廠內之深層地質中之做法，均應進行除役費用的審慎評估。

關鍵字：核能發電、用過核燃料、除役

一、前言

核能發電具有減碳與穩定提供電力的效能，但是對於發電後用過核燃料的儲存與廠區復原等措施，在沒有具體的解決方案之前，未來將是個重大的困擾問題。而核能設施除役不是單純的拆除工程而已，拆遷時的困難度與複雜性，拆遷後對於廠址的復原與環保、用過核燃料的長久保存與安全考量，均不亞於原設施新建工程；其所需要的經費，依據除役的考量因素，如財政、技術及社會環境與經濟層面之問題，均隨著永久安全儲存問題而有很大的不同。

2006 年 3 月，英國核能設施除役局(Nuclear Decommissioning Authority, NDA)曾對英國國內 20 座核電廠的除役及整治工作進行整治綜合計畫；而除役計畫的重要原則是將安全、保安與環境考量列為最優先考量，並以高度危險物

質減量為主要重點。其策略方案中明訂幾項做法，包括「實質權益關係者的參與」，以及對除役與整治工作受衝擊社區提供「社會經濟的支援」。經過評估後，宣布整個整治工作將花費 700 億英鎊(包括核電廠停止商轉的經濟損失、除役和整治費用)，而除役工作的整體費用估算值仍有可能變動[9]。未來我國亦須面臨核電廠的除役問題，因此，英國對於核電廠除役的考量因素與經費評估，可提供我國未來核電廠除役時的參考。

二、英國的總發電量與核能發電

如表 1 所示[11]，1973 年英國總發電量為 2,820 億瓩小時(282.0 TWh)，其中核能年發電量占總發電量 9.93% (280 億瓩小時)；之後的核能年發電量持續增加(如圖 1)，2005 年核能年發電量達到 816 億瓩小時(占年總電力生產 3,984 億瓩小時的 20.48%)；2010 年核能年發電量下降為 621 億瓩小時(占年總電力生產 3,812 億瓩小時的 16.29%)；其中目前的核能發電主要來自英國境內的 19 座核能發電廠。

表 1、1973 年~2010 年英國的電力生產和消費統計[11] (單位:TWh)

種類	1973	1980	1990	2000	2005	2008	2009	2010 e
核能發電	28.0	37.0	65.7	85.1	81.6	52.5	69.1	62.1
水力發電	4.6	5.1	7.2	7.8	7.9	9.3	8.9	6.7
太陽光電	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
風能發電	0.0	0.0	0.0	0.9	2.9	7.1	9.3	10.0
燃煤發電	174.6	207.9	206.4 e	122.3	136.3	126.8	106.0	109.8
石油	72.2	33.1	34.7e	8.4	5.3	5.7	4.4	3.4
天然氣	2.7	2.1	5.0 e	148.1	152.6	176.2	165.5	175.5
生質燃料&廢棄物			0.7	4.5	11.7	11.1	12.4	13.7
總計	282.0	285.3	319.7	377.1	398.4	388.7	375.7	381.2
電廠自用	19.2	19.0	19.6	16.3	17.9	16.3	16.5	
抽蓄耗能	0.9	1.5	2.6	3.5	3.7	5.4	4.8	4.2
進口	0.2	0.0	12.0	14.3	11.2	12.3	6.6	7.1
出口	0.1	0.0	0.0	0.1	2.8	1.3	3.7	4.5
傳輸消耗	19.6	21.5	25.0	31.1	27.9	27.9	26.7	
能源產業耗能	9.4	9.0	10.0	10.9	8.5	8.3	8.1	
最終消費	233.1	234.3	274.4	329.4	348.7	341.9	322.4	

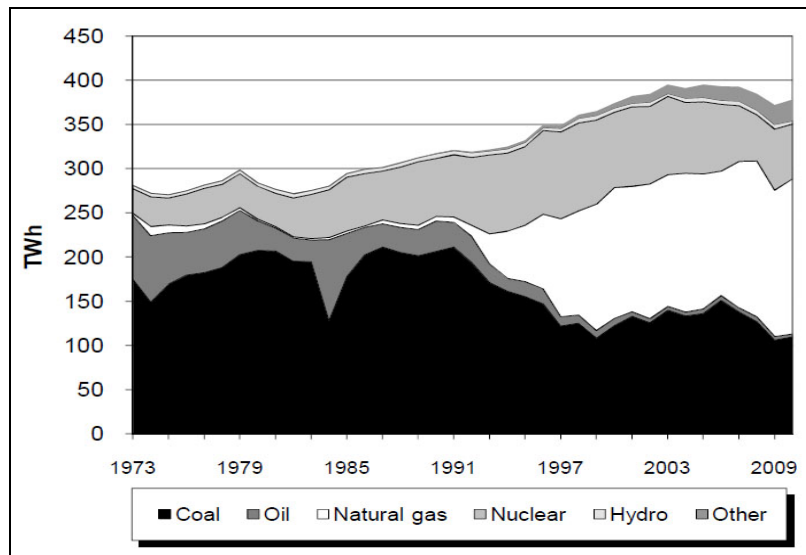


圖 1、1973~2010 年英國的電力發電情形[11]

鑒於 2008 年英國的核能發電量只占當年度發電總量的 13.51%，且從 1995 年以後就沒有再建設新的核電廠，推估 2020 年之前又有至少四分之一的核電廠須要除役，而北海石油存量亦逐漸減少；為了有穩定的電力提供及避免能源短缺，以確保未來的經濟發展，並能有效減排，以緩和全球暖化問題；因此，2009 年英國政府宣布，規劃未來將在十個城市籌建新的核能電廠，並預計此波的核電廠最快可於 2018 年投入運作；推估到 2025 年時，核能發電的比例能增加至 25%；且隨着核能發電比例的提高，可望更快達到「2050 年將二氧化碳排放量減少八成」的目標[12]。

2011 年 3 月日本發生福島核子事件後，英國政府即重新檢視核能政策，並審慎檢查各核能廠的安全措施；經過評估確定目前的核電廠運轉安全無虞，於是重新宣示新建核電廠政策並沒有改變。另英國能源部長於同年 7 月的「新建核電廠 2011 年」會議中，亦提到「必須以事實、科學證據和強勢獨立的管制機關，來維持民眾的信心。」；而且英國必須以新核電廠邁向未來，否則國力無法更繁盛。如果英國廢核，將會轉嫁成本給電力使用者，在 2050 年前達 1,050 億美元。為了要使英國成為全球最具有吸引力的核能和低碳能源投資市場，因此，明確宣示沒有核能的話，英國將會變得「更黑暗且更不景氣」；但是在發展核能時，亦會積極處理放射性廢棄物及用過核燃料的問題[6]。

三、英國核能廠除役考量與費用推估

2010 年 7 月，英國已經有 26 個機組(總功率 3,301 MWe)的核子反應爐停止運轉發電，若包含目前運轉中的 19 座核能機組及規劃中新建的核電廠，未來均需面對除役的問題；因此，英國政府乃透過 NDA 機構，針對核能廠未來的除役工作進行評估。其中除役的優先考慮因素為安全及環保問題，包含放射性廢棄物處理與永久儲存，並將高度危險物質減量列為主要重點；至於核能廠的拆除與復原工作，依據現有的技術已可以順利解決。

3.1 放射性廢棄物處理

英國核電廠的用過核燃料，目前暫存在核電廠核廢料池的臨時儲存系統中；未來核電廠的核燃料從反應爐移出後，具高放射性、高溫的用過核燃料會暫時貯存在水池中，等待其冷卻及放射性快速下降(德國第一座核廢料最終處理場計畫從 2030 年開始使用，此之前亦在核電廠原廠址興建核廢料暫時處理場，進行暫時核廢料的儲存處置)。另 NDA 亦規劃用過核燃料可再做處理，將可再利用的鈾 235 和鈾取出，剩餘物質再當作高放射性廢棄物處置[14]。其中用過核燃料在水池中放置數年後，會移至乾式貯存設施做中期貯存；而乾式貯存設施，是將用過核燃料放在水泥護箱內的焊接金屬密封鋼筒中。這種技術在全球廣泛使用，例如美國就有 55 處的乾式貯存設施正在運作中。

NDA 規劃之放射性廢棄物處置，是以地質處置場作為中高放射性廢棄物儲存場所，時程包括 4 年的地質研究、10 年的地表分析和 15 年的地下研究、設施興建和啟動。另亦參考鄰國選址興建經驗，如依據瑞士設址之整個流程需 31 年、法國 32 年、芬蘭 37 年；因此，乃重新規劃設定 2040 年為深層核廢料處置場的運轉年。

由於深地層處置(deep underground repositories)代表高強度放射性廢棄物或用過核燃料最終處理最安全、最永續的選項，所以歐盟執行委員會(European Commission, EC)於 2011 年亦公佈放射性廢棄物深地層處置計畫，依據用過核燃料與放射性廢棄物處理指示 (Proposal for a Council Directive on the Management of Spent Fuel and Radioactive Waste, SEC(2010) 1289/1290)，將提供歐盟各會員國規劃安全貯存放射性廢棄物與用過核燃料計畫時的參考依據。目前尚未強制各會員國採用深地層處置，因為每個地區的地質狀況差異甚大；因此各會員國應該根據場址的特殊狀況確定處置深度，每處場址都必須依其特殊情況加以評估。另該指示也允許多國共用一個處置場，但不得將放射性廢棄物出口至歐盟以外的地區進行最終處置；同時各國亦應該立法，以堅持政府在制定相關計畫時，必須告知並徵詢民眾的意見[7]。

3.2 實質權益關係者的參與

用過核燃料最終處置場的設置與選址非常不容易，特別是高放射物質在長時間集中儲存的不確定性頗高；因此，只要是被動的被選定為最終處置場的地區，必定會遭遇到居民的抗爭；且處置場附近以後若是發生地震、海嘯等天災，最終處置場也會被迫再度遷移。因此，NDA 乃規劃提出社區自願參與的構想，並由英國政府邀請對於處置場設址有興趣的社區表示意見；其中並參考瑞典之用過核廢料永久處置場的評估做法，藉由居民的主動參與遴選核廢料永久處置場地點，如透過瑞典核燃料與廢料處理公司(Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company)於 2002~2009 年的評估結果，宣布瑞典用過核燃料永久處置場將設在 Forsmark 電廠內，並成為全球第二座高強度放射性廢棄物確定處置場址(世界第一座處置場設在芬蘭 Olkiluoto 核電廠內，第二座處置場原為美

國 Yucca Mt.，因歐巴馬政府決策廢止。)。而依據規劃，瑞典此處置場位於地下 500 公尺深處的堅硬黏土層中，將於 2013 年先建地下實驗室，並從 2015 年開始興建處置場，預計在 2023 年營運；而處置場設計至少可將高強度放射性廢棄物與人類生活圈隔絕 100,000 年，直到其放射強度降至與天然鈾礦背景輻射強度相等為止；另外瑞典亦提供 2.4 億美元回饋金予廢料處置場周邊社區，以協助地方發展[15]。

由於 NDA 所提出之核廢料最終處置場設置以深地層處置為主，所以依據多個社區回應及初期的分析結果，大多不符合地質處置場條件；目前僅剩阿列達爾及寇普蘭社區持續參與選址，不過還是有權利隨時可選擇退出。

3.3 社會經濟支援

當核電廠拆除並除役後，除了需要將拆遷物質掩埋，並依規劃用途進行土地整復外，亦需要密集監測與追蹤廠區及周圍地區的輻射劑量；另外亦須視財政預算，提供當地居民的健康保險，並進行長期的追蹤檢查，且需要對於核電廠周圍居民提供合理化的社區回饋等措施，務必在核電廠除役後，沒有(或減至最低)社會民眾抗爭的後遺症發生。

3.4 除役費用推估

核電廠的除役費用，主要依據核電廠的特性、使用年限與產生核廢料的體積，並兼顧除役後的土地整復及考量社會成本等因素加以估算；根據美國的統計，若未考量最終處置場所未來的永久安定性，平均每一座反應爐的除役費用粗估約為 100 億台幣[2]。若核電廠完工營運至完成除役時間越久，則除役成本將再增加；而且高階核廢料被儲存到一個「視為安全」的地方，在這段時間內，評估為穩定狀態或是在可控制的範圍內，是絕對重要且必須的，否則只要評估錯誤或稍為管理不慎，輻射外洩的事件就有可能發生；即使如美國雅卡山 (Yucca Mountain) 的計畫被執行，也難保證輻射永遠不會外洩[3]。另依據江祥輝所述[4]，國際上一座 1 百萬瓩的大型核能電廠，除役的成本約為 45 億至 90 億新台幣，如果加上用過核燃料與低階放射性廢料的最終處置費用，費用約為 215 億至 280 億新台幣；且關鍵在於放射性廢料（機組、建築廢料）及用過的核燃料是否有最終處置廠或中期貯存場可存放。

依據 NDA 針對英國核電廠的除役費用進行統計，考量因素除了核電廠除役後，需要拆除現有核電設備及最終處置場所的費用與維護、因應核電除役之新發電設備投資、再生能源的補助發展(如同樣功率的風力發電廠產量較核電廠將近少了四倍)、電力進口等之外；尚包括與核電相關之直接與間接就業人口損失、核電廠周圍住戶與土地之社會經濟救助等。經過評估後，統計整個整治工作將花費 700 億英鎊(約為 1216 億美元；原來為 560 億英鎊)，包括核電廠停止商轉的經濟損失 140 億英鎊(240 億美元)及除役和整治費用 560 億英鎊(970 億美元)；而除役工作的整體費用估算值仍有可能變動[9]。

四、我國核能除役準備

未來我國亦須面臨核電廠除役問題，台電公司亦著力在核電廠除役之準備工作；而優先考量因素亦為安全及環保問題，在核電廠除役時，除了確保人員安全、土地整復與環境復原外，同時亦兼顧到用過核燃料的處理與減量問題，目前並繼續尋覓與評估用過核燃料永久儲存場的最佳場址。

4.1 放射性廢棄物處理

我國核電廠運轉過程產生的核廢料，包含低放射性與高放射性廢棄物兩種；對於低放射性廢棄物的貯存和處置，是將廢棄物埋藏於地下，藉著多重防護措施，安全地隔離放射性廢棄物於人類生活環境之外。如1982年起，即將低放射性廢棄物運至蘭嶼貯存場，1996年5月以後的蘭嶼貯存場已貯滿；目前核能廠產生的低放射性核廢料，均經過壓縮減量，並放入防腐蝕專用桶子中，分貯存在各核能廠核廢料倉庫中。

高放射性核廢料在最終處置尚未被認可之前，國際上的作法仍是將用過核燃料暫存在核能設施之內；台電亦參照歐、美、日等核能國家的處理方式，並依照我國法規的規定，將具放射性之用過核燃料採取「水池冷卻、乾式貯存、最終處置」等三種方式進行儲放。目前用過核燃料係貯存於各廠燃料池中，藉由封閉式冷卻水的循環作用，將用過核燃料冷卻降溫，並以水作為屏蔽，以達到對輻射的阻隔作用；待其冷卻後再改用乾式貯存法，置放於充填「氬」惰性氣體的不鏽鋼筒中，並以混凝土護箱作為輻射屏蔽加以保存，以提供預計存放40~60年用過核燃料的中期處置場所，最後再轉移到最終處置地點。

用過核燃料的最終處置，國際上都一致採用深層地質處置，使用「多重障蔽」的概念，利用深層地質岩層的隔離阻絕特性，配合必要的工程手段，將用過核子廢料，深埋在地下三百至一千公尺處的適當岩層中，形成層層保護[1]。台電公司也亦於2004年提報「用過核子廢料最終處置計畫書」，並且獲得原能會核備；目前仍積極推動最佳選址、勘查與評估中。

由於用過核燃料尚未放置在最終處置場之前，內含之高放射性核廢料約只占其成分的3%，其餘的97%是可以經過再處理予以回收的鈾與鈾；台電公司曾經考量用過核燃料經過回收再處理，以提供繼續使用，經評估費用仍然太高；故策略上是於核能電廠內先行中期貯存用過核燃料，以保留將來再處理之彈性，同時積極進行用過核燃料最終處置場技術發展。而為確保放射性廢棄物暫時貯存設施周邊的環境保護與人員健康，台電公司也承諾會持續執行安全管制，及環境輻射監測，並且會落實定期檢查，以確保安全無虞，為民眾的安全以及環境的永續把關。

4.2 除役費用推估

依照行政院已發布的「核能電廠除役管理方針」，核能電廠必須在預定永久停止運轉前三年，提出除役計畫及環境影響評估報告，核電廠的除役最遲應於永久停機 25 年後拆除完成(前期作業 5 年、反應器解聯及除污 2 年、安全貯存期 3 年、除污及拆除作業 5 年、廠區復原工作 1 年)，再根據美國核子管理委員會 (Nuclear Regulatory Commission, NRC) 依據表 2 定義之立即拆除方式進行除役[10]，並將廠區土地復原作為其他開發利用。

表 2、美國核子管理委員會定義的三種除役方式[10]

拆除方式	說明
「立即拆除」 (immediate dismantlement)	核能電廠永久停爐後短時間內(通常兩年內)，將電廠及廠址中的放射性物質或已遭受污染的物件除污與拆除，並將廠內的用過核燃料移出至儲存場，且解除管制(regulatory control)，使得該土地很快提供做別的用途。
「延後拆除」 (deferred dismantling)	核電廠終止營運後沒有立即拆除，而是將機組先封閉(enclosure)或安全貯存一段時間(如約 40 到 60 年的時間)，使得廠內使用過核燃料等放射物質自然衰變，較無放射危害之後，再進行除污與拆除。
「固封除役」 (entombment)	使用過的核燃料與核廢料移出廠外後，將剩餘之放射性物質或物體封存在原先強固耐久的結構體中，直到放射性衰變到可以使該處無限制使用的地步(1986 年車諾核災後，蘇聯即採用此種方式來封閉核電廠)。

依 OECD/NEA 研究[13]，核能電廠平均除役成本如表 3 所示(各國國情均有差異，所以每一種的成本結構變動極大，故僅提供參考)。通常沸水式核能電廠的除役成本稍高於壓水式核能電廠，而氣冷式則高出前兩者許多。圖 2 為 OECD/NEA 針對核能廠除役後，各主要項目占總除役成本的百分比，其中並以「廢棄物管理」一項之成本變動範圍最大，主要原因係受有無處置場之影響。

表 3、核能電廠平均除役成本[13]

反應器型式	成本 (美元/kWe) (2001 年幣值)	我國核能廠反應器類型
PWR(壓水式)	320	核三(951 千瓩*2)
PHWR(重水式)	360	
BWR(沸水式)	420	核一(636 千瓩*2)、核二(985 千瓩*2)、核四(1,350 千瓩*2)
GCR(氣冷式)	>2,500	

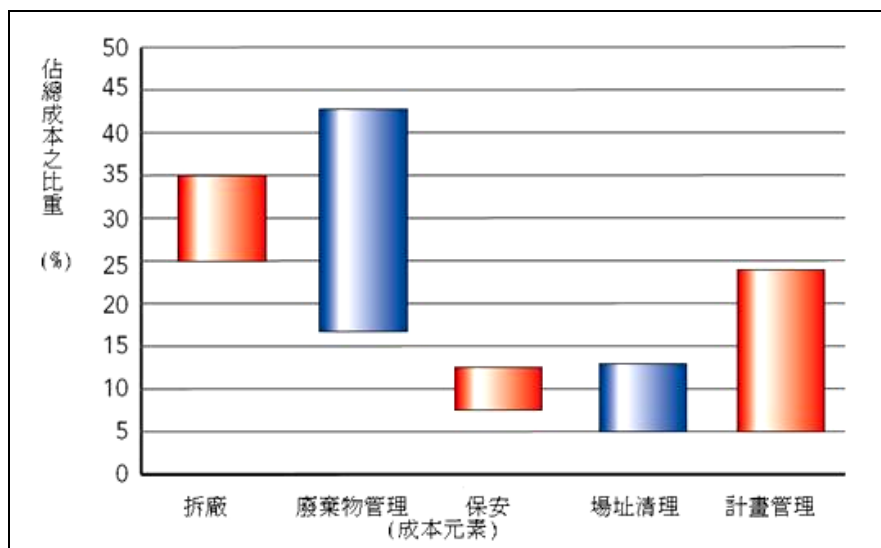


圖 2、核能廠除役各主要項目占總除役成本百分比[13]

目前我國核電發電量，每度提列 0.17 元充作核能後端營運基金(累積到 2010 年約 2,089 億元)。而用過核燃料及廢料之輸貯及處置費用占基金的百分之六十，拆廠及拆廠廢料之最終處置占百分之三十[8]。另依據台電 2011 年的資料，未來如果核一、二、三廠不延役，拆廠費用約 622 億元、再加上核廢料後端處理成本，預估總成本約需 3,353 億元[5]。

五、結論與建議

1. 英國核電廠的除役工作，以安全及環境問題為優先考慮因素，並兼顧實質權益關係者的參與及鼓勵社區提供永久儲存場址的遴選；而英國政府亦提供這些受衝擊社區社會經濟支援(編列回饋金給予廢料處置場周邊社區，以協助地方發展)。其中安全問題除了核電廠的拆除、環境整復及避免輻射污染外，對於放射性廢棄物處理與減量，特別是規劃未來的深地層處置永久儲存地點將列為重點。
2. 英國 NDA 針對拆除現有核電設備及籌建最終處置場所的費用與維護、核電除役後投資新發電設備、再生能源補助與電力進口等因子，若包含發電之直接經濟損失及間接就業人口損失、核電廠周圍住戶與土地之社會經濟救助等，統計將花費 1,216 億美元(原 973 億美元)，包括核電廠停止商轉的經濟損失 240 億美元及除役和整治費用 976 億美元；且未來除役的整體費用仍有可能變動。
3. 未來我國亦須面臨核電廠除役問題，而評估核電廠的拆除與復原工作，依據現有的技術，已可以順利解決安全、環保及土地整復等問題；但是用過核燃料的深地層永久儲存場的場址尋覓應是關鍵所在。目前除了可以考慮評估境外地點、或是由本地居民主動參與遴選核廢料永久處置場地地點外，亦可參考瑞典用過核廢料永久處置場設在核電廠內深層地質中之做法(需評估深層地質是否問穩定與考慮地震等相關災害因素)，進行核廢料永久處置場的評估。

- 4.我國核能發電量每度提列 0.17 元充作核能後端營運基金(累積到 2010 年約達 2,089 億元)；依據台電 2011 年資料，如果核一、二、三廠不延役，拆廠費用約 622 億元，加上核廢料後端處理成本，預估總成本約需 3,353 億元，上述的資料中並未提及永久儲存場設置與評估方法；未來若要明確遴選出較佳的使用過核燃料永久儲存場地點，不論是境外地區或是參考瑞典之用過核廢料永久處置場設在核電廠內之深層地質中之做法，均應再進行費用的審慎評估。
- 5.英國為了有穩定的電力提供及避免能源短缺，以確保未來的經濟發展及保持國力，並能有效減排以緩和全球暖化問題，故以核能安全為第一考量下，利用科學證據和強勢獨立的管制機關運作來維持民眾的信心。未來我國亦會面臨同樣的電力問題，特別是 99.4%的能源依賴進口，在國內的自主能源嚴重缺乏，替代能源發展尚未成熟之前，以風力、太陽能、水力發電或能源依賴進口的火力發電等，要滿足民生與工商業的用電需求，仍然有相當高的不穩定性；而核能發電為目前較為經濟、穩定且潔淨的重要電力來源之一，在加強檢視核能廠安全及確保安全無虞後情況下運轉，則核能發電正好可以彌補國內未來的電力可能不足的問題。

參考文獻

- [1] 李丹妮，核廢料乾式貯存_安全無虞，新台灣新聞週刊，2006。
- [2] 核電廠除役成本知多少，苦勞報導，2011/04/29。
- [3] 世界核能工業現況報告，2010/20/11。
- [4] 核能電廠除役拆廠，2000 年核四全紀錄，核四計畫再評估會議第六次委員會議。
- [5] 3 座核電廠若除役成本 3353 億元，蘋果即時，2011/03/29。
- [6] 英國我將以核能再起，WNN News, 2011/07/25。
- [7] 放射性廢棄物深地層處置計畫，WNN News, 2010/11/03。
- [8] 核電廠提前除役政策分年電價影響，國政分析，2003
- [9] Cleanup of Old British Nuclear Sites to Cost Billions, www.nda.gov.uk , 2006/03/31.
- [10] Decommissioning strategies for facilities using radioactive material. IAEA. Safety Reports Series No. 50, Vienna, 2007
- [11] IEA Electricity Information, 2011.
- [12] http://the-sun.on.cc/cnt/china_world/20091111/00425_001.html.
- [13] OECD/Nuclear Energy Agency. Decommissioning Nuclear Power Plants: Policies, Strategies and Costs. Paris. 2003.
- [14] WNN News 2011/07/25, 2011/07/05, 2011/06/30.
- [15] World Nuclear News Weekly 3 - 9 June, 2009.