

2012 年輻射與核電知識深耕暨日本參訪心得

曉明女中 楊郁柔

311 東日本大地震，震碎了許多人的家園，也震醒了全世界對核能發電安全的關注。

3 月 11 日周五下午，日本東北發生該國史上最強的 9 級地震，上萬的寶貴生命被奪走，還有更多人雖然幸運保住了性命，卻失去了他們的家園，直到現在，都還在極為困厄的環境中生活著。在此，我要先對這次災難中所有遭逢不幸的人們表達最深的同情和關懷。

由於震災影響，位於福島的核電廠也遭受重大衝擊，損害情形究竟有多嚴重，以及輻射外洩會造成多大程度的後遺症，直到現在恐怕還無法做出明確的研判。而其他各項硬體建設及人民生計受到的損失，現在也無法精準的估算。唯一確定的是，災後重建的工作，應該還有好一段路要走。

而這次的核電廠災難，也讓核能安全與運用的問題，再次在全球引發激烈的討論。核電能源的運用，一直是個爭議性的議題。從早年美國的三哩島事件到後來的車諾比電廠核災，讓人們意識到核能運用的風險，核能發電的發展因此曾經受到相當程度的限制。但是在全球暖化日益嚴重的趨勢之下，核能被視為最不會製造溫室氣體的乾淨能源，再加上核能安全的技術比起早年有長足的進步，核能發電又再次成為發展的重點。

福島第一核電廠事故是肇因於 2011 年 3 月 11 日在日本宮城縣東方外海發生的規模矩震級 9.0 地震與緊接著引起的海嘯，而在福島第一核電廠造成的一系列設備損毀、爐心熔毀、輻射釋放等災害事件。

日本福島第一核電廠六座反應爐機組沸水式反應器(Boiling water reactor)的定額發電量，總計約 470 萬瓩。311 強震後，1 至 3 號反應爐機組立即自動停機，而 4 至 6 號反應爐機組則因在進行定期維修保養等而未開機運轉。地震造成反應爐機組喪失外部供應的電源，而原本可啟動的 13 台緊急用柴油發電機卻遭海嘯淹沒，因此陷於完全斷電的情況。冷卻系統停擺無法冷卻反應爐機組內的高溫燃料棒，雖然 2、3 號機組的緊急用爐心冷卻系統(ECCS, Emergency Core Cooling System)的反應爐爐心隔離冷卻系統(RCIC, Reactor Core Isolation Cooling System)的幫浦曾啟動，但整體的緊急用爐心冷卻系統(ECCS)可說失效。而東電惟恐反應爐損壞要求自衛隊供給淡水，遲遲不灌注海水，反應爐容器(reactor vessel)內的水溫上升蒸發，結果使燃燒棒部分露出水面上。由於包裹燃料棒之護套是鋳合金材質，鋳在高溫下接觸到氧氣(從水蒸氣中產生氧氣)就會反應而產生出氫氣，反應爐容器(reactor vessel)內的氣壓就大幅升高。為了不損壞反應爐機組而使鋼材反應爐容器(steel containment vessel)直接排放一部分的氣體進行洩壓作業，導致排放出的氫氣在廠房內爆炸，隔日 1 號機組外圍

廠房 (Secondary containment) 即被炸破，當晚 8 時才由首相下令灌注海水。14 日 3 號機組之外圍廠房 (Secondary containment) 也被炸破，造成工人和自衛隊士兵共 11 名受傷，1 名工人遭受輻射曝露。而後 15 日 2 號機組的壓力抑制槽 (suppression pool) 發生爆炸，反應爐內冷卻水蒸發成蒸氣經釋放閥 (release valve) 被引到壓力抑制槽 (suppression pool) 內，以降低反應爐壓力及溫度。此壓力抑制槽 (suppression pool) 或其他管線破損等造成 1 至 3 號機組廠房和渦輪機房 (turbine building) 的地板還有廠房外的電線管路通道佈滿了高能量輻射積水，其中 2 號機組由於壓力抑制槽 (suppression pool)，甚至反應爐容器 (containment vessel) 也可能破損，積水輻射最嚴重。積水也經由廠區的排水口流進海裏、污染了海水。

為了持續冷卻反應爐，廠區內的過濾水貯存槽接到滅火系統管線並灌水進反應爐容器 (reactor vessel) 內，而過濾水和消防用水都用盡後，開始灌注海水，而直到美海軍自外海提供純水後，才能穩定的灌注淡水進爐心，冷卻燃料棒。雖然東電的盡力搶修，但至 4 月 14 日為止核電廠現地狀況為：5、6 號機組已接通電源，恢復電力的使用將使用過核燃料儲存槽 (spent fuel pool) 之溫度降至平時溫度。1 至 4 號機組持續灌淡水到使用過核燃料儲存槽 (spent fuel pool)，尤其是 4 號機組儲存槽放置的是保養中暫存的反應爐燃料棒。1 至 3 號機組則是持續灌注淡水進反應爐容器 (reactor vessel) 內，冷卻燃料棒，以避免反應爐及使用過核燃料儲存槽內溫度過高或水面過低而釋出輻射或產生危險。1 號至 4 號機組所有的中央控制室監測反應爐及使用過核燃料儲存槽的表面溫度壓力功能已恢復，可隨時進行調整注水量。但連接外部輸電線到 1 至 4 號機組廠房以進行之自動冷卻反應爐及使用過核燃料儲存槽之作業，由於廠房和房外的管線通道 (trench) 地板積滿了高輻射水的原因，目前仍在進行清除高輻射積水作業，無法進行自動冷卻及進一步的作業。

東北關東地區近海發生地震及海嘯後，當日經濟產業省原子力安全暨保安院即成立「原子力災害對策總部」掌握並協調廠區搶修狀況、監控鄰近地區海域污染情形並依據「原子力災害對策特別措置法」、「原子爐等管制法」等法發佈避難等各項命令。雖然福島核事故至當時 (約一個月) 輻射累積被估只有車諾比核災的十分之一，達六十三萬兆貝克 (Bq)，不會直接影響人體健康。不過事故一個月後仍未完全停止釋出放射性物質。車諾比核災時只有一個反應爐出問題，只持續兩周，但福島核電廠事故至今仍有四個反應爐處於危險狀況中。而且核污染範圍較大，洩漏出來的放射性物質，污染海洋、泥土、空氣，食物、水和農作物等。

經歷這樣引發全球騷動並為之驚恐的事件，引發了我想更進一步了解核能發電的好奇心。於是今年我已先參加了清大在核三廠及南展館舉辦的研習課程。不同於一般網路上的片面且零碎的資訊，經過教授的整合分析，讓我對於台灣的核能發電已有了初步的認識。核能發電占台灣總發電比的 17%。核能發電是利用鈾-235 分裂反應所產生的能量，將水加熱使其變成蒸汽，再推動汽輪機與發電機來發電。台灣主要有 4 部沸水式反應器及 2 部壓水

式反應器來進行核能發電。壓水式核反應器的分裂反應原理、燃料棒設計、緩和劑功能、壓力槽與圍阻體之作用等都與沸水式核反應器類似；兩者間最大的差別是壓水式反應器在水加熱成蒸汽的過程中採用了兩套迴路，在壓水式反應器中的「主迴路」裏冷水經過爐心加熱後只增加溫度但不變成蒸汽，熱水送至「蒸汽產生器」中把熱量傳給「次迴路」的水後變成冷水再送回爐心；而次迴路的水則會被加熱成蒸汽去推動汽輪機，用過的蒸汽再經海水冷卻後重複使用，這種設計可以確保汽輪機使用的蒸汽絕無核分裂反應所產生的放射性物質，但因系統較為複雜，故運轉與維護也較沸水式反應器辛苦。此外，壓水式反應器的控制棒設在壓力槽上端，由上向下抽插，比起沸水式反應器由下往上的設計在運作與保養上較為方便。除了學到核能發電的原理，我還很有榮幸能實地到核三廠參觀。這可能是我第一次也是我唯一一次能親眼看見核電廠的整個運作流程，我真的很珍惜這次機會。我覺得核能發電真的很不簡單，因為那麼多設備在運轉時，我都還搞不太清楚各機器的功能。多虧有工作人員的解說，也才讓我知道壓水式反應器的特別。當我一看到核電廠的控制室時，不禁佩服起在裡頭工作的員工們。大大小小的按鈕、密密麻麻的資料，每天還有例行的檢查工作，不僅要了解每一個按鈕的作用，還要了解每一部機器的運作流程，全部都只為了核能發電並使核能安全有所保障。

教授在演講中還有提到，未來 50 年人類面臨的十大議題，第一項就是「能源」。化石燃料的耗竭是 21 世紀人類文明最大的危機，石油是飛機、輪船及汽車引擎所用的燃料來源，沒有了石油所有交通工具將停擺，石化工業也沒有了原料，人類文明將大幅倒退。目前大部分家庭都以天然氣或液化石油氣作為煮飯燒菜的燃料，若將有限的天然氣用來發電實在可惜，根據估計，全球的原油存量將在 39 年後枯竭殆盡，天然氣是 60 年，煤礦也只有 200 年。然而，實際的消耗速度可能會更快，或許原油與天然氣在未來廿到卅年內就達到產值的高峰，接著開始往下降。也就是說，新世紀還過不到一半的時候，如果未能發展出新的取代能源，能源供需不足的差距將會開始巨幅拉大，能源危機也就要降臨了。煤礦並無法解決我們的能源問題，因為煤礦的燃燒對於人體健康以及生態系統都會造成嚴重的損害，而且會使全球暖化的趨勢更為惡化。目前供應全球的能源有將近八成仰賴化石資源，但基於人類的濫用與誤用，這些資源非常可能在數十年內便相繼用盡，唯一能支持人類文明發展的便只有「電能」。電能產生的能量來源大致上可分為火力、太陽能、水力、風力、地熱、潮汐及核能。我和幾個同學曾列表分析並比較各能源在台灣發展的優劣及要面對的困難。目前台灣主要依賴火力發電，但它不是再生能源且會造成溫室效應加劇，再加上氮氧化物及硫化物的影響，可能使下酸雨的機會增加。化石燃料經燃燒後產生的灰燼一旦經風的運送，便可能汙染生物原有的棲息環境並影響植被，甚至汙染人類的飲食而導致疾病。太陽能的發電功率最低，且太陽能板製作的時候需要大量的水及許多含有毒性的物質，對環境造成的影響不容小覷。而台灣的水力發電已差不多達到飽和，因台灣具有經濟價值的河川不多，且多已開發完成，很難再找

到適合地點且建築成本高還會破壞生態環境。台灣也不適合增加風力發電的比例，因台灣的風場不穩定，且夏季用電量大但風力不足，而冬季風力強卻發電過多，不符合經濟效益。且風力發電機必須設置在場地大還靠近海邊的區域，這樣風力發電機間才不會互相干擾，還能不被障礙物阻擋而能第一時間接觸到風。而風力發電機在運轉時會產生極大的噪音汙染，影響居民生活品質，不只如此，機組在運轉時很有可能會打到鳥類，要考量的因素真的不少。地熱能無法在台灣發展因為台灣的地熱含酸性物質，這樣很可能會腐蝕機器。潮汐能具有很大的發展潛力，不過它的建築成本高、技術複雜，還有庫區淤積、設備腐蝕等問題，無法滿足我們現在急需發展能源的需求。相較來說，核能是最具經濟成本效益的低碳能源，因核能發電功率是所有能源中最高的，且燃料成本低、體積小、運儲方便，也不會造成空氣汙染。核能的優勢則在國防上能抵抗海上封鎖，安全儲量時間最長，由於可維持一年半以上運轉可稱半自產能源，同時核能的使用可減少進口石油及可降低二氧化碳排放量，故核能與其他能源相較最能滿足台灣需求。天然鈾的出產國，例如加拿大與澳洲，多是政治穩定的國家，不若石油產地集中在中東等政治不穩定的地區，國際政治風險低。雖然核能目前還有核廢料及熱汙染的問題，但若不使用核能的話，一旦能源危機再度發生，或是國際上決定管制二氧化碳的排放量，亦或是國際能源供需失衡時，這些對經濟發展所帶來的衝擊及國內能源供應的穩定性都會造成不小的影響。由於核能是有願景的高科技，不像化石燃料用一點少一點，亦不像風力及太陽能發電無法作重大突破，為了追求更經濟更安全的核能，反應器一直在改良進步中。由於核能科技的進展日新月異，故核能是追隨時代腳步的能源。核能發電可透過科技改良，徹底解決人類能源需求，是具有發展願景的能源。

經過了311大地震所造成的福島第一核電廠事故後，我看到了大家對於核能發電的恐懼，包括我也被媒體的渲染力影響我對核能的看法。我不想只看到片面的狀況，因為每件事都有不同的面向，每件事都有優缺點，對於現狀，我們只能採取對大家最有益的方法。所以我參加了核能研習營，也到很多論壇上看各方的意見，在對核能及現今能源的發展趨勢有了初步的認識後，還不足以滿足我的好奇心。可想而知，我又興致勃勃的跑去參加了輻射與核能知識訪日交流團。唯有親自了解，才能看到最直接的面貌，那才是最真實的了解。也可以透過交流，讓我知道他們的想法，才不會讓認知侷限在框架內。

首先拜訪的是六所村，它隸屬青森縣，位於日本本州最東北端的下北半島。人口只有萬人左右的小村落卻擁有：日本核子燃料公司(JNFL)、財團法人環境科學技術研究所、國際核融合研究設施、風力發電站、石油儲備基地及先端分子生物科學研究所。

1984年，「六所村核循環基地」的構想浮上檯面。這是政府為青森縣及六所村端上的大餅，是結合「用畢核燃料再處理工廠」、「鈾濃縮工廠」、「低階核廢料處置場」三項核能設施的「核燃料循環基地」。

核燃料循環係指開採鈾礦、濃縮、轉換、再處理、處置等一連串工程。天然鈾礦內僅含有約 0.7% 具核分裂性的鈾 235 元素，必須將其濃縮至約 4% 方能供核電廠使用。鈾濃縮技術能製造核彈，這也是西方國家對三不五時拿鈾濃縮出來秀的北韓或伊朗戒慎恐懼的原因，也或許是鄰近美軍基地的六所村被允許設置鈾濃縮工廠的理由。

核燃料用畢之後成為高階核廢料，燃料棒內會產生一種不存在於自然界，名為鈾的化學物質。鈾的危險性雖然比鈾更高，但也能經由核分裂過程散發巨大能量。從用畢核燃料內抽取鈾的過程即稱為核燃料再處理。再處理因為技術性及危險性太高，抽取出來的鈾又無法妥善利用。因此全世界僅有英法兩國擁有具商業處理能力的再處理工廠。且英國的 Sellafield 再處理工廠已在電力事業自由化後，陷入財政困難而倒閉。經過再處理工程提煉出來的鈾雖然能做發電利用，但卻極度危險。世界各國曾經研發過使用鈾發電的「高速增殖爐」，皆紛紛宣告失敗。除了日本以外，西方國家幾乎都已中止了鈾的研究計畫。無路可去、又可做成核彈的鈾，目前不是在各國受到嚴密保存，否則就是拿來製造 MOX 鈾鈾混合核燃料，於一般原子爐使用。

我們參觀了展示館，解說員以模型與圖片介紹燃料循環的每一環節，也介紹了再處理工程的流程（儲存→溶解→分離→精製→脫硝→製品儲藏）。我們還到了高放射性廢棄物儲存廠。我們很幸運的看到剛經英、法處理好的高放射性廢棄物。這些已被處理為玻璃固化體，表面是不鏽鋼材質。在輸送中用傳熱金屬板與空氣自然對流而冷卻，解說員還提到運送的目的地最主要是吸收輻射熱及保護這些玻璃固化體。低放射性廢棄物掩埋處置場是我們參訪的重點，其設計容量為 60 萬立方公尺，掩埋場一分為二：1 號掩埋場是掩埋經處理後的液體放射性廢棄物，而 2 號掩埋場是掩埋固體放射性廢棄物。教授還提到日本引進台灣的高效率核廢料固化技術。放射性廢棄物如同有害事業廢棄物一般，須要經過安定化處理，使它具備足夠的物理與化學安定性，以確保搬運、貯存與最終處置的安全。由於大眾對放射性的疑慮，放射性廢棄物的產生者對廢棄物的安全管理，都十分謹慎地進行，除了確保安全外，也希望廢棄物愈少愈好。因此，在選擇安定化處理技術時，通常要能兼顧安全性及達成減容的效果。

將放射性廢液與固化材料混合，形成穩定的固化體，是各核能國家為達成放射性廢液安定化的普遍作法，選擇的固化材料主要有水泥、柏油或高分子聚合物等。這些方法，因為要添加多量的固化材料，造成廢棄物的固化體比原先放射性廢棄物的體積增加許多。因此，我國核能研究所自 1990 年即著手研發壓水式反應器廢液高效率固化技術，1998 年核三廠採用該固化技術後，將其每年產生的固化廢棄物由往年 400—500 桶，1999 年驟然降為 34 桶，2002 年更降至 17 桶，使核三廠成為全世界核廢料減量最績優的電廠。該項固化技術除獲得美、日、

法等十多個國家的專利外，並曾經技術授權日本日立公司，預備為敦賀核能電廠新建的三、四號機組所使用。

繼壓水式反應器固化技術研發成功後，核能研究所也開發成功沸水式反應器廢液高效率固化技術，核二廠於 2006 年開始使用該技術，當年即將其固化廢棄物年產量降為原來的 1/3。目前核一廠正評估採用該技術，未來完成後若採行，預估國內三座核能電廠每年產生的低放射性固化廢棄物可能降至 250 桶以下左右，屆時我國放射性廢棄物的減廢量成效，將在國際間居遙遙領先的地位。核能研究所的研究人員，使許多放射性廢棄物消失不見了，真可謂是「核廢減量的魔法師」。

接著，我們拜訪了女川核電廠。311 地震發生時，坐落在牡鹿半島上、東北電力公司的女川核電廠 3 部反應爐正在運轉。芮氏 9 級的地震，導致女川電廠有感地震約為 6 級。14 時 46 分地震發生時，3 部反應爐立刻全部自動停機。1 號機（54 萬 4,000 瓩），3 號機（82 萬 5,000 瓩）地震發生時均正常運轉發電中，自動停機後，反應爐也正常進行冷卻降溫，1 號機於 2 月 12 日 0 點 12 分，2 號機於 12 日 1 時 17 分均降溫至 100°C 以下，即「冷溫停止狀態」。而 2 號機（82 萬 5,000 瓩）則是在地震發生前 46 分，即 11 日 14 時 0 分，控制棒才一根一根抽出，開始進行臨界運轉，地震後立刻停止臨界運轉，此時反應爐尚處在「冷溫停止狀態」，所以一旦停止運轉不必做降溫的操作。

地震後的女川核電廠，由於地震太大導致外部電源的 5 組饋線中有 4 組斷電，其他 1 組可正常供電。有了 1 組饋線的供電已足夠供給核電廠所有操作所需的電力，3 月 17 日至 26 日間，其他 4 組饋線的供電也陸續恢復正常。海嘯不只破壞生活環境，福島電廠釋出的放射性物質對環境造成很大的傷害。由於女川電廠基地的海拔比海嘯的高度更高，所以沒有被海嘯侵襲，此為不幸中的大幸。這一次的海嘯對福島和女川核廠的影響作比較的話，東北電力公司在女川電廠建築之初，即考慮到西元 869 年的「貞觀海嘯」、1611 年的「慶長三陸地震海嘯」、1896 年的「明治三陸地震海嘯」以及 1933 年「昭和三陸地震海嘯」等歷史紀錄，做了詳細而深入的調查，綜合判斷後決定女川電廠建築在海拔 14.8 公尺的基地上。

福島核一廠最大的事故是強烈海嘯的侵襲，女川電廠也是自芮氏 9 級大地震發生後 43 分鐘，即 15 點 29 分受到 13 公尺高的大海嘯侵襲。由於女川電廠座落在 14.8 公尺的地盤上，雖然因大地震地盤全部下沉約 1 公尺，但也有 13.8 公尺高，因此未被巨大海嘯吞沒，而逃過一劫。但是，港灣的設施、冷卻水的取水設備等則被海嘯破壞。核電廠的港灣地震前高於海面 3.8 公尺，地震後下陷至 2.5 公尺，在港灣設置供 1 號機使用的重油槽（容量 96 萬公升），由於海嘯來臨時重油槽被浮在海水面上，海嘯退回後重油槽因而傾倒，重油槽周圍設置的防油堤已被沖毀看不到蹤跡。海嘯來臨時重油槽存放有 60 萬公升重油，倒壞時有 30 萬公升流失掉，港灣內已設置圍欄防止重油擴散，將海水污染至最小。

在面對自然災害時，福島核一廠並沒有做到最好的變應，大海嘯來襲的預防措施不夠，這和美國三哩島事故與蘇聯車諾比爾事故不同，核電廠本來就應採取正確且快速的防範措施。同樣遭受海嘯侵襲的女川電廠，仍能保護好廠內設施而不致於造成這麼大的損害，便能證明電廠設計的良好及保護的妥當，這是建造核電廠本來就要有的作法。

海嘯因地震而引起，過去發生的地震和海嘯的大小，以及地震和海嘯分別的影響，其災害也有所差異。因此，在考慮採取各種不同程度的緊急對策時，應考慮世界各國遭受地震和海嘯的經驗，以最嚴重影響事件作為核電廠的基礎設計、安全基準，依這種經驗擬定十二萬分的安全對策是最重要的課題。

由此教訓，日本處在世界上地震、海嘯、洪水等眾多災害的地區，未來核電廠的設計要確立更高標準的安全基準。女川電廠的基地比 13 公尺的海嘯更高，建廠時的慎重考慮的確是未雨綢繆的遠見。在十幾公尺高的岩盤上建廠，雖然在抽取冷卻用海水時會大量消耗電能，是一項負面的因素，東北電力公司經過多方面考量下，作出先知一般的決定，真是明智之舉，也獲得了各界高度的評價。

在行程的最後，我們來到了福島高校與當地學生進行交流。他們先用投影片的方式告訴我們福島的現況。經過了這次大地震，福島損失了約新台幣 2'853'100'000 元，且平均每個人每小時接受約 0.82 微西弗的輻射劑量。他們沉痛的表示，他們每天都在忍受其他人對於福島居民投出的異樣眼光，害怕吸收太多輻射，也害怕接觸他們。地震過後，只有 12.3% 的建築殘骸經處理後還能做為蓋房子的材料，但這些仍不足以興建房子，現在只能依賴外資的資金幫助。他們的農產品也賣不出去，每個人都對輻射感到人心惶惶，在經濟上更造成了衝擊。我聽了都覺得很感慨，可是也無能為力，好想幫他們做點什麼。在討論的時候，福島高校同學提到日本將在 2030 年停核，將來可能不只提高了電價，對於日本的工業、經濟等都會造成不小的衝擊，他們擔心有可能影響到自己未來的就業機會。對於這次福島核災，也有日本同學覺得是人為疏失，因為領袖做了錯誤的決定，沒有辦法處理好核災事故，導致災情擴大，所以應該多注意人的對應，而不只是一味的反核。講到台灣的低放射性核廢料處置場時，台灣(台東)同學說，應用平等的方式對待台東人，他們不是討厭核廢料，是討厭官員的高姿態，我想只要是人都不喜歡有被丟棄的感覺，應該用同理心和當地人民溝通。不要把現金直接交給地方官員，應該直接經營地方的公共設施，例如：日本就直接在地方設立圖書館、建學校等，用真誠來感動人民，用行動來溝通。

一般大眾對於核能的認知大多來自於電視和網路，不過極多資料是片面不完全的，民眾大多是被動接受資訊。有人可能只聽過一方的說詞，而對核能產生相當大的偏見及誤會。政府應針對這方面做檢討。平時，政府就應委託學術團體多舉辦研習營傳播正確的觀念，或是

提供獎學金鼓勵人們多往這方面發展，亦或是可多舉辦知識問答之類的比賽，讓人們主動探討這方面的資訊。

我們還是要知道，全世界在兼顧經濟發展、能源安全與環境保護前提下，各國得提供民眾便宜、充足、穩定且潔淨的能源，而現階段橫互在各國面前的挑戰，是改善能源使用污染、提高能源使用安全及削減溫室氣體排放（來自煤炭、石油及天然氣之使用），尤其溫室氣體排放引發的全球溫暖化問題，更是人類能源使用的最大挑戰。為了因應此人類生存危機，確保人類生存的福祉，全球在一九九〇年提出管制溫室氣體的國際公約，一九九七年提出目標更明確的京都議定書。而關於核能，則從來沒有國際公約要求進行管制。

事實上，各國在面臨拯救人類福祉的污染與溫室氣體管制的現實問題挑戰下，更在國際公約的壓力下，減少火力發電使用勢在必行，因為面對溫室氣體減量的挑戰，不排放溫室氣體的核能，將肩負越來越重的責任。

世界的客觀情勢在變，由於全球化以及中國與印度之興起，能源需求大增。但石油數十年內即將耗盡，各種能源價格飛漲，鈾也不例外；加上燃燒化石燃料，排放二氧化碳所造成之全球暖化，氣候變遷之災難，非碳能源，再度受到重視。在能源缺乏的時代，一次使用之燃料週期模式，顯得浪費，漸漸無法被接受，改採用過核燃料再處理之永續循環利用模式，已成共識。核燃料若只用一次即當廢料處理，則只用到鈾能量理論值之1%，從能源利用的角度來看，無異暴殄天物。其實用過核燃料是否為廢料一直有爭議，就像垃圾和資源有時不易分野，端視能否化腐朽為神奇，將廢物再利用。核能發電仍須注重核能安全的確保，車諾比事故源自老舊設計及安全管理失當，但諷刺的是此事故亦促成國際核能安全體系之建立，包括世界核能運轉協會(WANO)及IAEA均藉國際間評估及傳遞經驗回饋資訊建立了核能安全網絡。

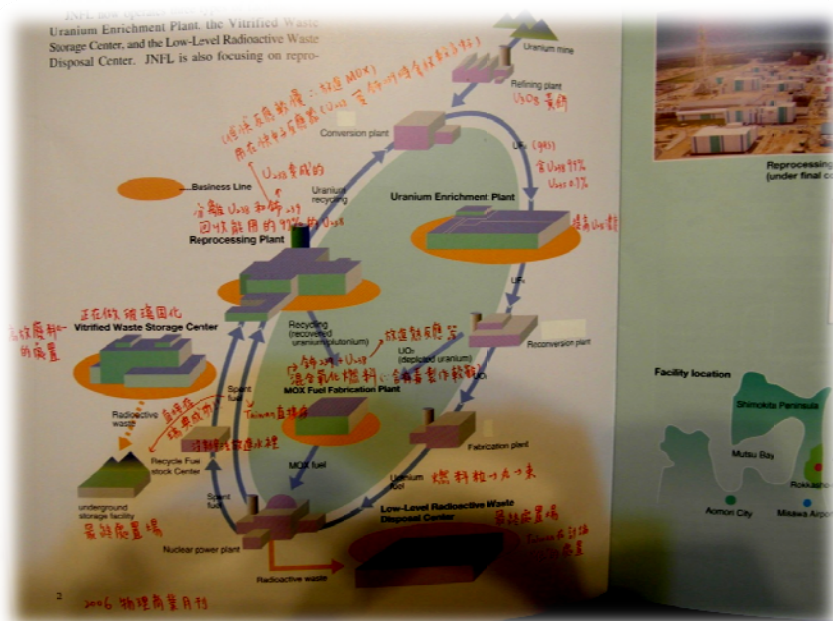
未來核能應朝向用過核燃料處理及高放射性廢棄物之更有效率處理技術，以減少長期環境負荷。如果技術更好的話，希望能將用過核燃料由核廢負擔轉為資源，使鈾能成為永續能源，並使核燃料具有商業競爭力，且非常安全。用過核燃料的處置主要的難題是半衰期過長，有些長達萬年以上，以至於很難證明其長期安全性。在用過燃料中之鈾系元素半衰期在300年至2萬年間，是用過核燃料半衰期過長之主要原因，所以若能將用過燃料之鈾系元素去除，核廢儲存將較容易。鈾系元素的特性是只要與能量夠高之中子結合都能分裂產生能量，而且中子能量越高，鈾系元素與中子結合後分裂與活化的比例就越高，所以提高中子能量，用快中子反應器，有利於消耗鈾系元素，解決核廢料半衰期過長的難題。其他半衰期較長之分裂產物也考慮將之分離後加以轉化。民眾對於放射性廢棄物的處理仍有疑慮，為了確保核能發電的正當性，核能工業須以科技解決用過核燃料及高階放射性廢棄物的處理。除了開發技術外，應積極進一步尋求國際合作，並試圖建立全球核能應用之新架構。

贊成使用核能和反對使用核能的人士，當然各自擁有不同的立場。贊成使用核能的人士主張，現今的核能技術已經發展到高度的水平，我們需要做的是淘汰老舊規格的核能電廠，但是不該完全的反對使用核能。例如美國在三哩島事件之後，就因為對核能使用過度的擔憂，完全停止核電廠的興建，取而代之的，卻是上百座的火力發電廠。從事後來看，長期下來火力發電廠運作所產生的溫室氣體，恐怕與全球暖化程度加劇有絕對的關聯。就環境的角度來看，當初的決策似乎是錯誤的。

事實上前述的情形也點出我們面臨的困境。全球有越來越多的人從貧困生活中脫離，用電的需求量也持續的大幅提升，對應地球暖化的嚴重性，讓人們夾在其中左右為難，而在目前的技術和能力之下，核能似乎是解決此一問題最務實的作法。

但是反對核能運用的人士則強調，核能一旦失控的風險是人類難以承受的。用電需求增加和全球暖化是不爭的事實，一夕之間就要完全廢核當然也是不切實際的訴求，但至少我們應該停止新建核電廠，同時將心力和資源完全投注在其他安全性、環保性更高的替代能源上，例如太陽能 and 風力發電。例如葡萄牙全國已經有將近一半的供電來源來自風力和太陽能發電，就是一個讓人振奮的消息。或者另一方面來看，如何有效的降低人們的用電量，可能才是解決問題的真正癥結所在。

相信接觸到雙方訴求的人，基本上能夠認同兩邊的立論都有其道理，也會同意這真的是非常難以判斷對錯或是優劣的議題。我們能夠做的，相信就是儘可能在兼顧務實、環境和人類安全之間，找出一個均衡點，但是這個均衡點的界線該如何拿捏，恐怕還有賴人們集體的智慧來尋找答案。



這是在六所村辛苦記的筆記（六所村核電廠運作流程圖）~