

從美國全球核能夥伴計畫(GNEP)看核能發展遠景

作者：謝得志

核能曾經是一個美好的夢，一公克的鈾-235 分裂即能產生 1 MWD 之能量，亦即提供點亮一萬個 100 瓦的燈泡一天之所需能量；相對的，煤則需要十萬倍以上的重量才能產生同樣的能量。所以 1960 年代，發電業界對核能發電趨之若鶩，一度以為核能會是最便宜的能源。但隨著安全之顧慮，核廢之隱憂，反核聲音逐漸擴大，終至美夢轉為惡夢，發電業避之唯恐不及。但是風水輪流轉，如今面對全球暖化、石油耗竭等嚴重議題，核能再度成為解決方案的選項之一。核能發展歷經大起大落之教訓，對發展遠景之整體思維已更加嚴謹和周全。本文將說明美國全球核能夥伴計畫(Global Nuclear Energy Partnership, GNEP)之現況，從而探討美國對核能發展遠景之看法，以做為極為缺乏自主能源的台灣對核能發展取捨之參考。

1. 美國全球核能夥伴計畫(GNEP)緣起

2006 年 2 月美國能源部推出全球核能夥伴計畫(Global Nuclear Energy Partnership, GNEP)，是自 1976 年美國宣布用過核燃料不進行再處理而逕行最終處置之政策後歷經 30 年核能工業的冬天後，改弦更張，重新提倡用過核燃料再處理之創舉。GNEP 延伸自 AFCI (Advanced Fuel Cycle Initiative)計畫，而 AFCI 之前身為始於 1999 年之 Accelerator Transmutation of Waste (ATW) 計畫，所以 GNEP 並非突然起意。2006 年核能復甦逐漸明朗，之前，核能研發雖似停滯，其實美國仍一直針對其難題，探索解決之道。此難題不外核廢、核武、核安、核原料及核經濟之考慮。

ACFI 之目的即在開發解決這些難題的相關技術，ACFI 目標有四：

- (1) 開發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，並使美國在本世紀不需再興建另一座最終處置場。
- (2) 開發更能避免核武擴散之核燃料技術，以減少鈾及濃縮鈾等可用於核武之原料存量。
- (3) 將用過核燃料由核廢負擔轉為資源，使鈾能成為永續能源。
- (4) 使核燃料具有商業競爭力，且非常安全。

當然以上目標並非一蹴可幾，過渡的策略是考慮由目前美國所實施核燃料只用一次即當廢料處理之方式，轉變為下列作法：

- (1) 有限再循環：鈾再循環利用一次，這是目前法國的作法，只需熱中子反應器。
- (2) 多次再循環：鈾再循環利用多次，此時需要少數快中子反應器。
- (3) 永續再循環：此時全用快中子反應器，不管是天然鈾、乏鈾或超鈾元素都

可做為燃料，充份利用。要達到永續再循環之最終目標，有許多技術待開發，AFCI 之時程規劃，預定 2025 年建新型商用再處理廠，2040 年建商用快中子反應器。

GNEP 延續原有的技術研發，繼續開發可消耗超鈾元素的進步型快中子核反應器；開發適於開發中國家使用的小型且抗核武擴散的核反應器；開發先進的用過核燃料再循環技術，此技術不需分離鈾，且可降低民間鈾的存量，並簡化後端的廢料處理。GNEP 除了開發技術外，積極進一步尋求國際合作，試圖建立全球核能應用之新架構，尤其是國際核燃料供應架構，希望此架構可讓有心發展核能的國家有可靠且價格合理的核燃料供應，而不需建立鈾濃縮、再處理等敏感的核燃料製造技術。GNEP 亦積極於將所建立的技術經由示範廠的試驗，擴大到可商業化的規模。

2. GNEP 之技術思維

理想的核能發電，必須核電廠本身絕對安全，且絕對不可因擴展核能發電應用而助長核武擴散。所以核能發電之技術和核武製造之技術差別越大越好，簡言之，核能發電最好不要鈾濃縮與鈾分離。另外發展核能發電，後端之核廢料也要妥善處理，不可遺害萬年，最好短期內其放射性即衰減至可接受的程度。相關之考慮，詳述如下。

2.1 核能之和平與軍事用途

核能是使用原子核的能量，基本上有兩種方式：一是核分裂，另一是核融合。核分裂時一個原子核分成數個較輕的原子核，同時釋放出能量；核融合時數個較輕的原子核結合成一個較重原子核，亦能釋放出能量。核融合是還在開發中之技術，而核分裂則已大量商業使用。本文之核能是指藉由核分裂所獲得的能量。並非所有的原子核都會有核分裂反應，常用到的只有鈾、鈾和鈾，其中鈾是最普遍的。

核能是重要的能源，但是很不幸的核能之應用最先是用於軍事用途，亦即原子彈。原子彈有兩種：鈾彈和鈾彈。鈾原子彈並非直接用天然鈾製造的，天然鈾中含有各種鈾的同位素，如鈾-238 鈾-235 等，其中大部分是鈾-238，但鈾原子彈需要的是鈾-235，鈾-235 只佔天然鈾之 0.71%，要製造鈾原子彈先要將鈾中之鈾-235 濃度提高，此程序即是所謂的濃縮(enrichment)。所以製造鈾原子彈，興建濃縮廠是先決條件。不幸的是，現有之輕水式熱中子核能電廠所用的核燃料也要用濃縮鈾，只是濃縮程度不同；鈾原子彈要 90%以上，而核能電廠所用的核燃料是 5%以下。所以興建濃縮廠可以是為了核能發電，也可能是為了發展核武，這也是伊朗興建濃縮廠雖號稱是為了和平應用，卻引起高度關切的原因。

至於鈾，並不存在於天然界，鈾主要是鈾在核反應器中經過中子活化之產物，將在核反應器用過之核燃料經由化學分離，即可提煉鈾。早期為了製造鈾原子彈，開發之鈾萃取化學程序，稱為 PUREX(Plutonium and Uranium Recovery by

Extraction)，一直延用至今，類似程序亦用於核能電廠用過核燃料之再處理。因此用過核燃料再處理廠可以是為了核能發電，也可能轉為發展核武。所以為了避免核武擴散，1976 年卡特總統宣布美國不做用過核燃料再處理。

核能之和平與軍事用途，其所需技術既可能通用，無怪乎核能復興隨之而來的是核武擴散疑慮。為了消除此疑慮，GNEP 之研發方向是要區隔核能發電之技術和核武製造之技術，重新建立新的核能發電技術架構，在此架構中不要鈾濃縮與鈾分離。此架構中，核能電廠是以快中子核能電廠為主軸，此類電廠之鈾不需濃縮；而用過核燃料再處理目前考慮的是 UREX+ 程序，可能是 UREX+1 或 UREX+2、3、4 等不同的同位素分離程序，實際的作法仍未確定，但基本原則是不需將鈾分離即可再循環使用。

2.2 核廢料的處理

除了上述核武擴散疑慮，核能發電民眾反對之理由主要來自於電廠之運轉安全與核廢料的處理之疑慮。電廠之運轉安全以蘇聯之韋諾堡事件與美國三哩島事件最讓人觸目驚心，所幸經由設計之改良與管制措施之加強，運轉安全已有大幅改善，近年來運轉實績良好，無嚴重事故。但是核廢料則仍是全球待解的問題，尤其是用過核燃料的處置，至今全世界仍無一正式啓用的用過核燃料最終處置場，以至於反核人士常諷刺核能電廠有如沒有廁所的豪宅。

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。半衰期較長之同位素主要來自錒系元素 (actinide)，大多是鈾於核反應器中經中子活化之產物，其中鈾和鈾的同位素稱為主要錒系元素 (major actinides)，其他次要錒系元素 (minor actinides) 為 neptunium, americium, curium, berkelium, californium, einsteinium, and fermium 等。在用過燃料中之錒系元素半衰期在 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錒系元素去除，核廢儲存將較容易。

錒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，錒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，有利於消耗錒系元素，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。

2.3 鈾的充份利用

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，預估全球若生活水平與美國相當，則需有八倍的能源供應。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。何為用過核燃料？現有之輕水式核能電廠之核燃料主要採用濃縮度 3-5% 之二氧化鈾燃料棒，在發電的過程中，鈾燃料棒中的鈾-235 不斷消耗，以至於濃縮度不斷降低，終至於太低而必需更換，此時之用過核燃料仍含有大量的鈾，鈾-235 之濃度也仍高於天然鈾，另含有可分裂的鈾元素。美國目前一年用電約 450 gigawatt-years。暫存之用過燃料含有 50000 噸鈾，一噸的鈾可產生約 1 gigawatt-year 之電力，所以若完全使用，使用暫存之用過燃料含有的鈾，即夠美國 100 年的電力需求，若加上美國因鈾濃縮產生之乏鈾 470000 噸，則還可再用 1000 年。所以 1976 年卡特總統為了避免核武擴散，宣佈放棄用過核燃料再處理技術開發，用過核燃料將直接掩埋，亦即採一次使用之開燃料週期模式，從能源充分利用的角度來看，並不是好的決策。GNEP 即在檢討此項政策，改弦更張，走向永續再利用同時避免核武擴散的方向。

3. GNEP 計畫現況

但是經過三十年核能低潮，美國在核能技術，尤其燃料再處理上，已落後法國、日本等國。眼看核能即將復甦，美國似乎急於用 GNEP 計畫奪回核能技術之龍頭寶座。

GNEP 於 2006 年 2 月提出後，美國能源部大力推動，於 2007 年 5 月於華盛頓 DC 召開部長級會議，並有中國、法國、蘇俄、日本等國參加及簽署協議，2007 年 9 月於維也納再度召開部長級會議，共有 35 國參加。其中 16 國簽署協議，其後意大利也有意參加，至此簽署 GNEP Statement of Principle 之國家已達 17 國，在國際上似乎是一片看好。

然而在美國國會，GNEP 之預算一直都不順利。2007 年美國能源部以 AFCI 名義提出 \$250 million 預算，參眾議院協商結果撥給 \$167.5 million。2008 年預算美國能源部仍以 AFCI 名義提出 \$395 million，眾議院通過撥款 \$120 million，參議院同意給 \$243 million，最終協商結果是獲得 \$179 million，遠低於行政部門原先規劃之 \$395 million。就在國會預算審查期間，9 月底，美國國家科學院(National Academy of Sciences)建議布希政府停止 GNEP 計畫，建議先落實相關技術研發，先推動如 AFCI 之較小規模研發計畫，主要的理由是美國國家科學院認為技術尚未成熟，太急於商業化，其技術及財務風險都太高，不見得理想。

2007 年 11 月 14 日美國參議院能源及自然資源委員會舉辦 GNEP 之聽證會，主要是聽取各界對 GNEP 計畫之看法，做為預算審核之參考。國會關心 GNEP 所需經費太龐大、期程太長、所要解決的問題太雜。

聽證會的主席為民主黨的 Jeff Bingaman，擁核之共和黨參議員 Pete Domenici 亦與會，並一度暫代主席，二位均來自新墨西哥州。在會中陳述意見者有六位，分別

爲：能源部助理部長 Dennis Spurgeon、國會預算辦公室主任 Peter Orszag、洛杉磯拉摩斯國家實驗室副所長 Dr. Wallace、麻省理工學院 Dr. Neil Todreas、Belfer Center 之 Dr. Matthew Bunn 以及 Boston Consulting Group 之 Pattabi Seshadri。在聽證會中能源部助理部長強調 GNEP 之重要性與急迫性；美國總統即將改選，政治上之考量也可能也是能源部急於讓 GNEP 成爲長期政策的原因，以期未來能穩定發展；國會預算辦公室從用過燃料管理的角度比較各種方案之經費，再處理比不再處理約高 25% 經費，唯國會預算辦公室也強調此種比較僅做參考，因爲假設之因素太多；洛杉磯拉摩斯國家實驗室說明現有研發能量，表示美國有能力開發相關技術；麻省理工學院對現有技術水準提出看法，認爲很多仍只是實驗室實驗結果，規模放大不宜躁進；Belfer Center 從核武擴散的角度看問題；Boston Consulting Group 又從用過燃料管理的角度比較其經費。

基本上，GNEP 所闡述的理想，大家原則上都支持，主要的爭議如下：

- (1) 在建立的國際核燃料供應架構的構想中，將全球國家分成兩類：核燃料供應國與核燃料接受國。基本上核燃料接受國是不准開發敏感技術的，以避免核武擴散。許多野心勃勃的國家，是否甘於永遠屈居爲核燃料接受國，是有待考驗的。
- (2) 能源部急於推動此計畫，因此提出鉅額預算，準備短期內及興建商業級的廠房，反對者認爲沒有需要這麼急，而且相關技術還未經過逐步驗證，不應從實驗室的實驗直接跳升到興建大廠，其失敗的風險太高。反對者還認爲目前較急的應該是推動新蓋核能電廠，以及完成最終處置場 Yucca mountain 的興建計畫。GNEP 想興建之主要設施爲：
 - (a) 整合燃料處理中心(Consolidated Fuel treatment Center) 用於現有輕水式核能電廠以及未來快中子反應器(burner)燃料再處理。
 - (b) 進步型燃耗式快中子反應器(Prototype Advanced Burner Reactor)原型廠：展示鈾系元素之轉化及快中子反應器技術。燃耗式快中子反應器與滋生式快中子反應器之差別在於不加包覆(blanket)，以免產出太多鈾及次要鈾系元素。
 - (c) 進步型燃料循環設施(Advanced Fuel Cycle Facility)：用於製造及再處理進步型燃耗式快中子反應器(ABR)所用之新型轉化核燃料(Transmutation fuel，內含鈾、鈾，還有次要鈾系元素)。
- (3) 反對者還認爲循環使用之再處理燃料週期模式太貴，沒有經濟價值，不可能商業化。此點在能源價格不斷提升後，結論應會不同。
- (4) 反對者認爲 GNEP 所開發之再處理技術雖然不分離鈾，但有心人藉此技術練功，將來可輕易轉化成分離鈾的技術，無助於抑止核武擴散。此點仍需藉助於核子保防與監督。

4.結語

1939 年確定核分裂可釋放大量能量，1945 年原子彈即於日本廣島引爆，1954 年美國興建核能潛艇，同年蘇聯興建核能電廠，1958 年美國也興建第一座核能電廠。因為核能之軍事用途，加上正值第二次世界大戰，大國莫不傾全力開發，短短 15 年，核分裂由發現而至商業應用，進展神速。但是由於核能發電技術延伸自軍事應用，其技術並非針對和平應用的最佳設計，使得後續發展蒙上陰影。

GNEP 試圖從和平應用的角度，最佳化其設計。GNEP 勾勒未來全球核能發展的遠景，積極尋求全球共識，依 GNEP 之構想對提供永續能源會有莫大的貢獻，目前已有 17 個國家認同此計畫之理念，並簽署其計畫之原則聲明(statement of principle)。此理念強調發展核能以解決能源問題之時，能兼顧鈾資源之充份利用、降低核武擴散之機率、同時解決核廢料的問題。

核能是一場未完成的夢，理論上所有目前的難題，技術上都可能解決，唯從理論到實際需經過一系列的工程驗證，新的架構幾乎從核反應器、核燃料製造、用過核燃料再處理、核廢料處理與處置、核子保防都需建立新的技術，所需經費、人力非常龐大，只有美國這樣的超級強權的強力帶領才有可能圓夢。

GNEP 雖然目前在美國國會預算爭取上仍有困難，但是即使更改計畫名稱，其實質的內涵將不斷往前推進，對全球會有深遠影響。其所探討之永續能源和核廢問題也都是台灣的頭痛問題，台灣雖因不被美國視為國家而未能參與簽署，但 GNEP 可能影響台灣未來之能源選擇、用過核燃料以及核廢料之處理與處置，所以對其發展宜密切注意。

參考資料：

- (1) Advanced Fuel Cycle initiative (ACFI) Comparison Report, FY 2005, DOE/NE
- (2) United States Senate, Committee on Energy and Natural Resources, November 14, 2007 GNEP public hearing
- (3) Idaho Smizdat : Nuke Notes, December 18,2007