

美國能源部核能總署核能發展策略報告

2013 年 5 月 8 日

美國能源部核能總署(Office of Nuclear Energy, Department of Energy, DOE/NE)於 2013 年 4 月 10 日公布了下個會計年度的預算計畫¹，請求國會同意 2014 年總經費 7 億 3 仟 5 佰萬美元之預算金額，並說明這些經費將用以支持美國政府之各項核能計畫，以聯邦政府力量來引導核能科技之研發工作，包括電力供應、核能安全、廢料儲存及管理、以及核子保安科技等，用以協助達成能源安全、防止核子擴散、及因應氣候變遷之需求。上述預算計劃公布不久後，DOE/NE 主管官員在核能助理部長 Peter Lyons 之帶領下，於 4 月 22 日赴美國核能管制委員會(Nuclear Regulatory Commission, NRC)與五位委員舉行開放式之公眾會議(如圖 1)，討論兩個聯邦機構之間的合作關係，也說明了未來 DOE/NE 主導核能科技研發的重點，以下就針對 2014 年 DOE/NE 預算計劃及與核管會公眾會議內容，整理研判美國核能發展策略之重點。



圖 1:美國能源部核能總署與核管會舉行公眾會議

(資料來源: 美國核管會網站)

歐巴馬總統對核能的承諾

在核能總署 2014 年的預算書中首先引用美國總統歐巴馬於 2012 年 3 月在韓國首爾舉行之第二屆核安保高峰會(Nuclear Security Summit, NSS)中之談話：「當石油價格節節高昇及全球氣候逐漸暖化的情況下，核能只會變得更為重要，這也是為什麼美國又再度啟動核能工業，以做為發展所有可能能源全盤策略之一環」。



圖 2:美國歐巴馬總統在核安保高峰會演說

(資料來源: 美國能源部網站¹)

在前述的預算計畫中也提到，美國能源部的使命(Mission)在於透過轉化科技方案來迎接能源、環境、及核能之挑戰，以確保美國的安全(security)及繁榮。圖 3 為核能總署 2014 年度預算，相較 2012 年而言，整體上減少了約 14%，除小型模組化反應器計畫、愛得荷國家實驗室保防及保安計畫外，多半呈現減少的現象，其中大學補助部分完全被刪除，可以說是近年美國減支措施(Sequestration)下的受害者。

	(Dollars in Thousands)	
	FY 2012 Current	FY 2014 Request
Integrated University Program	5,000	0
SMR Licensing Technical Support	67,000	70,000
Reactor Concepts RD&D	110,652	72,500
Fuel Cycle R&D	180,993	165,100
Nuclear Energy Enabling Technologies	71,307	62,300
Radiological Facilities Management	69,510	5,000
International Nuclear Energy Cooperation	2,983	2,500
Idaho Facilities Management	154,097	181,560
Idaho Safeguards and Security ^a	93,350	94,000
Program Direction	91,000	87,500
Adjustments	7,924 ^b	-5,000 ^c
Total, Nuclear Energy	853,816	735,460

圖 3:美國能源部核能總署 2014 年預算

(資料來源: 美國能源部網站 ¹⁾)

高放射性用過核燃料處置策略

能源部核能助理部長 Peter Lyons 在面對核管會委員會時，提出 2013 年 1 月份出版之用過核燃料及高階核廢棄物管理及處置之策略 ²，其中對於各界關心能源部因應藍帶委員會(Blue Ribbon Commission)對美國核能未來之建議，特別是用過核燃料之管理與處置部分，他提出三個關鍵的要素：系統設計、共識之廠址選擇、及組織與預算 ³。目前能源部打算以 10 年 56 億美元來規劃並與各界討論用過核子燃料暫存先導廠址、設計、申請執照、建造、使用等，然後再推進至大規模的聯合式中期貯存廠址及最終地質處理場(Geological Repository)之計畫。在時程的規劃方面，先導性中期貯存場預定為 2022 年開始運轉，大型聯合式暫存場為 2025 年啟用，最終地質式之處理場則期望在 2048 年能夠接接收用過核子燃料(如圖 4)。

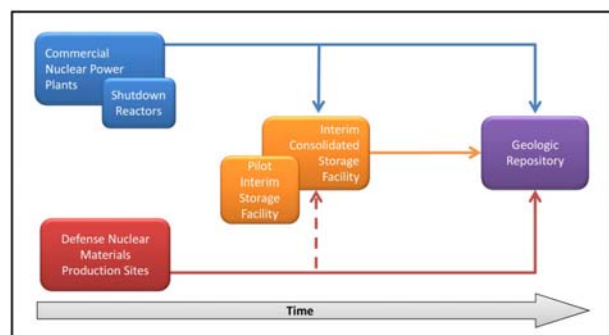


圖 4:美國用過核子燃料管理及處置規劃

(資料來源: 美國能源部 ²⁾)

日本福島事故之研究

核能總署副助理部長 Dr. John Kelly 報告有關日本福島事故後，能源部所屬美國聖迪亞(Sandia)、愛德荷(Idaho)、橡樹嶺(Oak Ridge)等國家實驗室，與美國核管會、電力研究所(EPRI)、日本原子力基盤機構(JNES)、東京電力公司(TEPCO)等單位共同合作，利用已開發之嚴重核子事故程式 MELCOR 來模擬重建事故的過程。Dr. Kelly 在其簡報中提及 2012 年 8 月份已發表了一份有關研究報告⁴，其中引用圖 5 的範例，來說明研究人員利用程式模擬福島 1 號機爐內的壓力變化，已與在福島電廠現場所取得的數據有相近的結果。

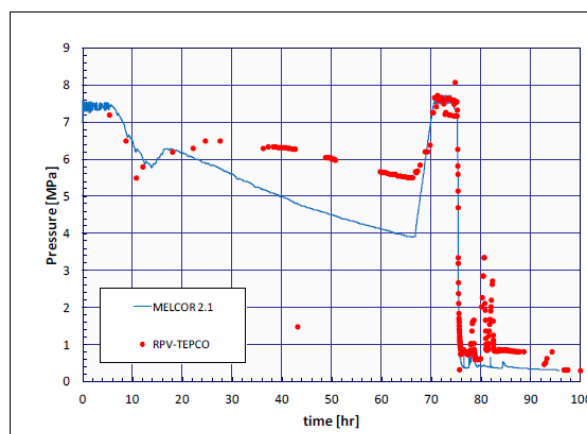


圖 5:福島電廠 1 號機壓力變化圖

(資料來源: 美國能源部 SNL 國家實驗室⁴)

Dr. Kelly 進一步提到國際間也正由經濟合作暨開發組織核能署 (OECD/NEA)⁵，進行有關福島事故的研究，並將各國所開發不同之計算程式，如：MELCOR、MAAP、SAMPSON、SOCRAT、ASTEC 等，進行相互比對的工作，此計畫之目的在於經由實際的數據來校驗 (benchmark) 各程式，並由模擬的結果，提供日本未來做為移除反應爐內燃料的指引。美國聖迪亞國家實驗室(SNL)則將在後續的研究中，支援有

關不準度的量化工作。Dr. Kelly 此番談話，正好呼應核能總署 Lyons 助理部長有關能源部與核管會間經常共同研究，但在研究成果方面，則可以根據兩個聯邦機構的特性做不同的應用，前者用於管制，後者則做為科技知識之精進，請參考示意圖如圖 6。

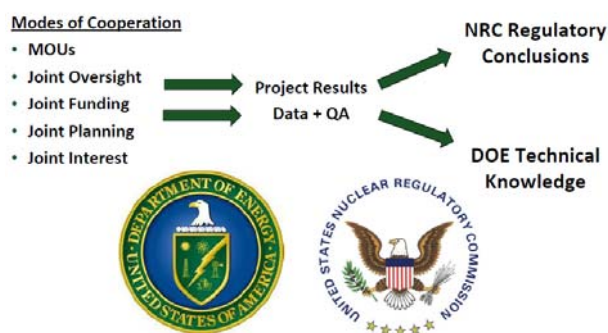


圖 6: 美國核管會與能源部合作研究開發關係

(資料來源: 美國能源部⁶)

新型核反應器之開發

在新型核反應器的發展方面，小型模組化反應器(Small Modular Reactor, SMR)是能源部發展的重點⁷，除已於2012年11月選擇B&W(Babcock and Wilcox)公司之mPower小型模組化反應器(SMR)，做為第一階段經費援助的對象，接著於2013年3月份能源部又再度宣布徵求第二階段經費援助及合作對象，美國政府將以4億5千萬美元發展2個SMR的計畫，包括創新之工程(First-of-a-kind Engineering)、設計認證、及申照作業，民間業者則將相對出資另一半的經費，期望mPower型SMR反應器在2023年達到商業運轉，後續的SMR商業運轉的目標則訂為2025年。

至於新一代(或稱第四代)反應器之研發工作，核能總署 Kelly 副助理部長表示將繼續推動安全、經濟、抗核子擴散之創新科技⁸，重點支持的計畫包括：進步型小型模組化反應器(advSMR)、進步型反應器概念、及下一代核能電廠(Next Generation Nuclear Plant, NGNP)，其中在 NGNP 的執照審查架構方面，能源部與核管會於2005年起即有備忘錄(MOU)之合作，而選定的目標為高溫氣冷式反應器(High-Temperature Gas Reactor, HTGR)，圖7為HTGR之示意圖。至於在第四代反應器國際合作計畫(Generation IV, or GEN-IV)的工作方面，由 Kelly 的簡報中可以得知美國參與在非常高溫式氣冷式反應器(Very High-Temperature Gas-cooled Reactor, VHTR)以及鈉冷式快中子反應器(Sodium-cooled Fast Reactor, SFR)之計算，同時也以觀察員的身份參與鉛冷式快中子反應器(Lead-cooled Fast Reactor, LFR)及熔鹽式反應器(Molten Salt Reactor, MSR)。



圖 7: HTGR 示意圖

(資料來源：美國能源部⁸)

輕水式反應器延續運轉計畫

核能總署輕水式反應器技術處處長 Rebecca Smith-Kevern 向美國核管會委員會的簡報中⁹，提出了能源部輕水式反應器延續運轉計畫(Light Water Reactor Sustainability, LWRS)，此計畫主要在於提供現有核能機組 60 年運轉執照期限後，能夠再延續運轉之科學基礎，以確保長期可靠性、生產性、核能安全性及能源安全性。她指出現有美國核能電廠供全國約 20%之電力，而且是無碳能源中最大的貢獻者，美國未來預測將來電力的需求仍以 1%的速度成長，如果現有電廠在運轉 60 年後(最初 40 年執照加上已延役 20 年)不再運轉，即使未來增加了新電廠的容量，核能比例將開始下降。能源部評估若把現有電廠 60 年執照期限再度延長，與增加新的核能電廠對電力需求斷層之風險來說，前者顯然是較為樂觀。若用新增電廠來全部取代舊機組，將增加難以估計的成本，若考慮改採化石燃料電廠，則又將顯著地提供溫室氣體的排放。

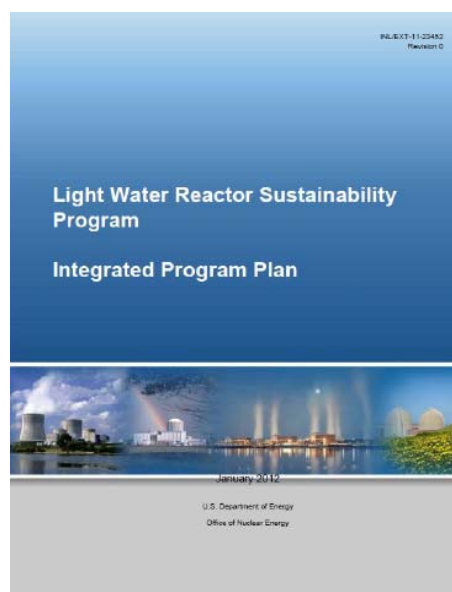


圖 8: 輕水式反應器延續運轉計畫
(資料來源: 美國能源部⁹)

為了確保現有機組能夠在 60 年執照期限，延續運轉至 80 年，能源部所屬愛得荷國家實驗室(Idaho National Laboratory, INL)被委以技術整合及研究發展的任務，其研究的重點主要包括：材料老化及劣化評估、進步型輕水式核子燃料研究、進步型資訊控制科技、風險告知安全餘裕特性分析、及效率提升計畫。在 2014 年的預算中，LWRS 希望爭取 2 仟 1 佰萬美元的經費來支援各項研究工作。此外，能源部簡報中也提及 2008 年及 2011 年由能源部與核管會共同辦理的「反應器老化管理國際論壇」中，各方專家已交換與 LWRS 相關之經驗、最佳實施策略、及新興的知識等，未來仍將繼續透過公眾會議等方式討論老化管理議題與研究成果。

進步型核燃料循環之研發

核能總署副助理部長 Dr. John Herczeg 在其簡報中¹⁰，強調有關用過核子燃料之研究發展工作，他指出雖然能源決策者認為核能是未來能源不可缺少的一環，但是目前持續累積在各廠址的用過核燃料及高放射性廢棄物，確實也造成潛在核子擴散的隱憂。日本福島事故的啟示，使美國也體認到須再次強調及面對此一挑戰，以符合能源、環境、及經濟安全的目標，能源部核能總署也因此建立了核燃料循環科技計畫(Fuel Cycle Technologies, FCT)。FCT 計畫又可再細分成以下五個工作重點：

1. 燃料循環選項：發展系統化、透明、目標流程之過濾方法，用以評估燃料循環提案之各種可能性，以確認出可能的解決方式。
2. 進步型核燃料：研發意外可容式及防擴散式之核燃料，以支援現有反應器及下一代反應器之延續運轉。
3. 分離技術：研發創新的技術，以回收用過核子燃料中之鈾及其他元素，同時仍兼顧反擴散、降低損失、及減少廢料。此項研發子項亦包含最終地質貯存之適用廢料形式。
4. 用過核子燃料處置：建立有關用過核子燃料及高放射性廢棄物長期性中期貯存、運輸、及最終處置之科學基礎及技術。
5. 特殊材質之保護：本項科技研究在於核子物料之控制及可計數性，能夠確保核子材料之保安及保防工作而不被錯用。

Dr. John Herczeg 在向核管會委員的簡報時，核管會主席 Dr. Allison Macfarlane 特別提醒核燃料後端處理的重要性，並認為國際間在未來要把核能做為其國家能源政策的一部分時，也同時需兼顧到日後用過核燃料的處理(置)問題，故對於在場掌握美國未來核能政策的能源部官員來說，這是一個很好的提示，特別是目前最熱門的小型模組化反應器(SMR)的開發，Allison 就強調一定要做好後端用過核燃料處理的規劃，這也將是日後審查 SMR 的要項。事實上她在 2013 年核管資訊大會中，就曾向與會各國專家闡述了相同概念，美國應從本身做起。

另外在核燃料循環選項的內容方面(參看圖 9)，Herczeg 副助理部長提出再收回(recycle)的概念，相較於美國傳統上用過核燃料中期及最終處置的規劃，目前已走向利用創新的分離(separation)技術來改進現有之單向式之燃料循環，但也強調要儘可能降低再處理(reprocessing)、減少廢料產生量、及降低擴散風險。而能源部依藍帶委員會的建議，朝向聯合式之中期貯存是目前最重要的策略。

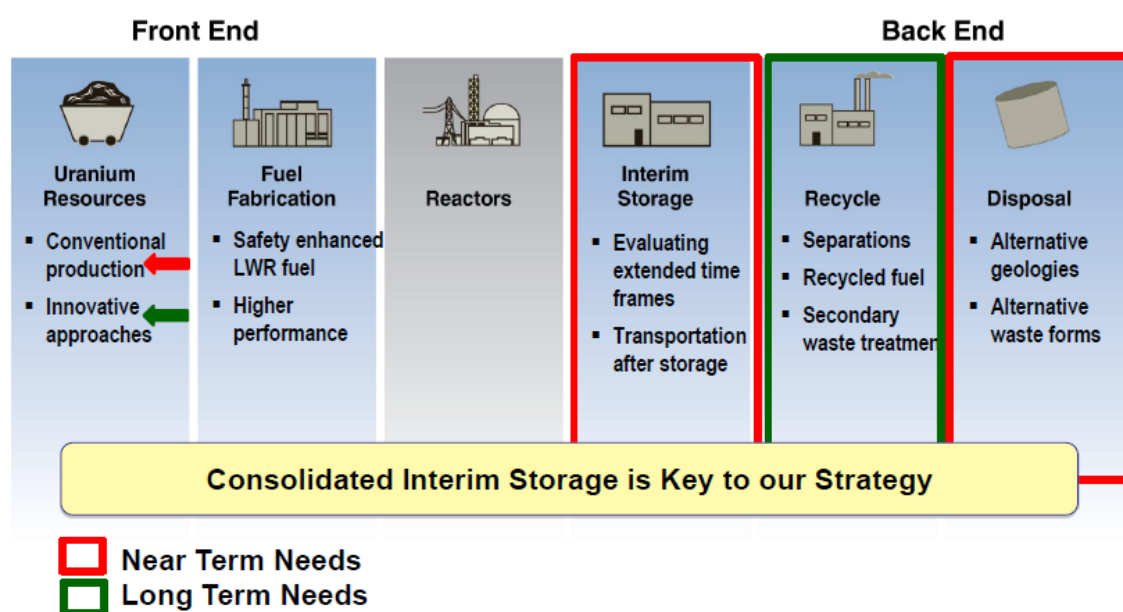


圖 9: 短期及長期核燃料循環示意圖

(資料來源: 美國能源部¹⁰)

能源部研究設施之再投資

核能總署代理副助理部長 Tracey Bishop 強調許多先進的研究計畫，必須經由實驗之比對及認證¹¹，例如聖迪亞國家實驗室(SNL)之暫態測試設施，將用來支援意外相容核燃料之研發工作，預計在 2018 年前需完成本設施以協助未來 10 年的燃料開發計畫。Bishop 又舉例說明愛得荷國家實驗室(INL)之照射後檢查能力，將用來研究次原子位階之照射過之材料特性。此外，能源部 2014 年會計預算亦顯示，INL 設施之管理即編列了 1 億 8 千萬美元的費用，用來計畫、取得、運轉、維護、處理位於 INL 內之設施及資源。

綜合心得

綜合以上美國能源部核能總署 2014 年會計年度的預算計畫，及該署官員與美國核能管制委員會五位委員舉行面對面公眾會議之討論內容，整理如下列各項心得：

1. 從核能總署的年度計畫預算書即可看出美國核能相關的策略方向，與其能源政策是習習相關的，在現任歐巴馬總統「以上皆是」之多重能源政策的引導下，核能開發包括：新型反應器之投資興建、現有反應器之延續利用、進步型核燃料循環及技術、用過核燃料之中期貯存及最終處置等，都在未來能重點工作範圍中。而 2012 年由藍帶委員會所公布美國未來核能藍圖，特別是用過核燃料之貯存與處置，不僅是明年的預算，能源部已納入其中長程的計畫加以落實，此種由預算面反映政策面的做法，頗值得我國參考。當然若以目前最新的時程規劃，最終處置場到延到 2048 年才有可能開始啟用，在此方面美國似有以時間換取空間的考量。
2. 日本福島事故發生後，具有核能發電的各國無不採取各種可能的措施，來提升核能電廠之安全性教育。其中運用計算機程式來模擬事故發生的過程，除了重建事故的原因及推測演變的序列，亦可以提供運轉人員操作改進的參考，對於福島現場之後續處理，亦有相當的助益。能源部的重點工作也包含了這個全球矚目的事故模擬研究。我國透過與美國核管會間之合作計畫，由核能研究所長期參與嚴重核子事故之計畫，在福島事故後也進行了各種事故情境的模擬，甚至也用以驗證台電公司所發展之斷然處置措施，未來應持續參與核管會的合作計畫，以便能進一步與各國專家交換研究的心得。
3. 美國對於新型反應器的研究開發方面，一向是居於世界領導地位，目前除了 4 座大型機組已有西屋公司 AP-1000 型壓水式反應器興建中，另有 EPR、ESBWR、APWR 等型式機組在核管會審查。小型模

組化的概念，從設計、審查、建造、應用，目前也以相當積極的時程來推進，能源部希望能在 2023 年便達到商業運轉，時程的壓力不輕。另外美國也繼續投入在第四代反應器之技術及核燃料的研究工作中，與世界各國共同合作。我國核能在政策雖然已決定採用「確保核安與穩健減核」，但仍應在學術的領域中儘可能參與國際活動，以保持對核能新科技的瞭解，其中新概念核能安全技術，將來亦可能運用於我國的電廠中。

4. 美國能源決策者雖然預見新的核能電廠之加入營運，但在電力成長、溫室氣體排放、及新電廠容量加入速度緩慢等因素的考量，已於數年前即已開始探討延續現有核能電廠運轉年限至 80 年的可能性，當然這必須要有嚴謹的老化管理機制，才能確保下一代的人在安全無虞的條件下繼續使用核能。美國這種儘量利用現有電廠的做法，或可供我國能源決策單位一個思考的參考。
5. 能源部核能助理部長 Dr. Peter Lyons 先前擔任美國核管會委員，而核管會 William Magwood 委員則曾擔任能源部核能助理部長的職位，在公眾會議中兩人的角色雖然互換，但對於美國核能政策中有關之研究項目，皆表示雙方可以共同合作，此亦說明科技是中性的，合作過程中並不會因為管制者與政策推動的角色而衝突，主要差異是在研究成果的應用方面，管制者是從安全管制的角度切入，而政策推動者則以開發運用為主。我國因為核能人力資源有限，往往也會有研究開發(球員)與管制(裁判)的矛盾情結，美國兩個聯邦機構間之競合關係提供了一個好的範例。
6. 美國聖迪亞、愛得荷等國家實驗室扮演支援能源部研發工作的重要角色，而我國透過台美民用核能合作的機制，也與這兩個實驗室建立了聯繫的管道，未來將進一步針對核能科技應用、資訊交換及人員交流等方面，加強雙方的合作關係。

參考資料

1. Peter Lyons, FY 2014 Budget Request, Office of Nuclear Energy, U.S. Department of Energy, April 10, 2013.
2. Department of Energy, "Strategy for the Management and Disposal of spent Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste", January, 2013.
3. Peter Lyons, "Strategy for the Management and Disposal of Used Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste", Office of Nuclear Energy, U.S. Department of Energy, April 22, 2013.
4. Sandia National Laboratories, "Fukushima Daiichi Accident Study (Status as of April 2012)", August, 2012.
5. John Kelly, "Severe Accident Analysis Research Based on Fukushima", Office of Nuclear Energy, U.S. Department of Energy, April 22, 2013.
6. Peter Lyons, "Cooperation between the U.S. Nuclear Regulatory Commission and the U.S. Department of Energy", April 22, 2013.
7. Rebecca Smith-Kevern, "Small Modular Reactors", Office of Nuclear Energy, U.S. Department of Energy, April 22, 2013.
8. John Kelly, "Advanced Reactors", Office of Nuclear Energy, U.S. Department of Energy, April 22, 2013.
9. Rebecca Smith-Kevern, "Light Water Sustainability", Office of Nuclear Energy, U.S. Department of Energy, April 22, 2013.
10. John Herczeg, "Advanced Fuel Cycle and Long-Term Storage of Spent Fuel Research and Development", Office of Nuclear Energy, U.S. Department of Energy, April 22, 2013.
11. Tracey Bishop, "Resumption of Transient Testing and Advanced Post Irradiation Examination Capabilities", Office of Nuclear Energy, U.S. Department of Energy, April 22, 2013.