

行政院及所屬各機關出國報告

(出國類別：開會)

出席第 38 屆世界核能協會(WNA)年會

服務機關：台灣電力公司

出國人職稱：燃料處副處長

姓名：任曾平 (808547)

出國地區：英國

出國期間：102 年 9 月 9 日至 102 年 9 月 15 日

報告日期：102 年 10 月 16 日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：出席第 38 屆世界核能協會(WNA)年會

頁數 67 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司/陳德隆/23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

任曾平/台灣電力公司/燃料處/副處長/23666722

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他：開會

出國期間：102 年 9 月 9 日至 102 年 9 月 15 日 出國地區：英國

報告日期：102 年 10 月 16 日

分類號/目

關鍵詞：核能、原料鈾、核燃料、倫敦、WNA

內容摘要：(二百至三百字)

- 一、 WNA 高、中及低案的年成長率分別為 4.2%、3%及 0%。至 2020 年，預期在中案下，全球核能裝置容量可達 574GWe。WNA 認為主要差異來自日本及中國。日本停機之機組嚴重影響短期內之裝置容量預測，且 WNA 預期近期 1-2 年重新啟動運轉之機組將不會太多，且因福島事故，許多國家紛紛暫停新核能機組計畫，或是不允許機組延役，故 WNA 調降整體全球裝置容量預測。另一方面，中國及印度並未因福島事件停下興建核能機組之腳步，且速度非常快，加上其他開發中國家，如阿拉伯聯合大公國、土耳其及沙烏地阿拉伯等，故長期來看，核能裝置容量還是會快速成長。
- 二、 原料鈾市場部分，WNA 表示以預測之中案為例，至 2020 年原料鈾需求量約達 7.8 萬噸鈾(約 203 萬磅 U3O8)，2030 年則增加至約 9.7 萬噸鈾(253 萬磅 U3O8)。依據目前現存及未來的核能機組裝置容量及原料鈾生產量，預計在 2023 年前供需均屬平衡的狀態。但在 2023 年後，由於現有鈾礦已開採完畢以及新鈾礦開發計畫的較預期中減少，將需要新的供應量投入市場。大致說來，福島事件後，需求預測持續下修，致近期原料鈾市場供過於求。
- 三、 轉化服務部份，以預測之中案為例，至 2020 年轉化服務需求量約達 7.5 萬噸鈾，2030 年則增加至約 9.5 萬噸鈾。於 2017 年以前，轉化服務供需大致平衡，而由於次級供應減少及需求量增加之情形下，自 2017 年後期，轉化服務將出現缺口。此缺口將可能成為轉化廠提高其產能之誘因。如未來需求增加，將刺激轉化商提高運轉產能。
- 四、 濃縮服務部份，以 WNA 預測之中案為例，至 2020 年濃縮服務需求量約達 6 千萬 SWU，2030 年則增加至約 7.7 千萬 SWU。短期而言，濃縮市場之供應(包含現有及興建中濃縮廠以及現貨供應)遠高於需求，濃縮服務之需求預期於 2013 年-2030 年因亞洲及中東國家之需求而提升。雖然傳統氣體擴散式設備關廠，現有濃縮設備之擴充、新產能之加入以及俄國之轉變，將使濃縮服務產業供應無虞。
- 五、 西方世界現有之製造服務已高於需求量約 40%，即便以高案預測未來之需求，至 2020 年仍供應無虞。另燃料製造廠之建廠及投入產線速度較興建核能機組來的快，因此尚不急於興建新的燃料製造廠。此外，增加製造服務產能耗時較核能機組裝置容量之前置期短，可隨時依需求調整。

報告內容

目 錄

| | |
|----------------|----|
| 壹、出國緣起與任務..... | 1 |
| 貳、出國行程..... | 2 |
| 參、工作內容..... | 4 |
| 肆、結論與建議..... | 43 |

壹、出國緣起與任務

- 一、世界核能協會(WNA)第 38 屆年會於今(2013)年 9 月 11~13 日在協會總部英國倫敦召開，並在 9 月 10~11 日召開各工作小組會議 (Working Group Meeting)。會中除討論各國核能展望、核燃料前端市場供需及未來市場預測外，亦探討核能溝通議題。本公司出席是項會議，除參與討論協會會務，積極維持與其他會員之互動，並透過與其他會員交流之機會，蒐集與瞭解最新之第一手市場資訊外，目前正積極辦理 2016 年起開始供應之濃縮服務採購案，惟日本福島事故後，面對全球舊濃縮廠陸續關閉，而新濃縮廠之興建又充滿變數，更加上國內在核一二三廠之是否除役或延役，以及核四廠續建或不續建之爭議下仍存有各種可能之變化。藉由參與此次會議之便，可與各廠家面對面交換意見，以為擬訂濃縮服務標案採購計畫之參考。

貳、出國行程

| 時間 | 工作行程 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 9/9(一) | 往程：台北—倫敦 |
| 9/10(二) | 世界核能協會工作小組會議 |
| 9/11(三) | 世界核能協會年會 |
| 9/13(四) 09:00 09:30 11:00 14:00 15:50 | 世界核能協會年會-Welcome Leaders Panel WNA Fuel Cycle Report <ul style="list-style-type: none"> • Presentation of the WNA Fuel Market Report • New Market Fundamentals After Fukushima The Nuclear Fuel Cycle <ul style="list-style-type: none"> • Fuel Cycle Management, a Utility Perspective • Sustainable Fuel Cycle Solutions • BWR Fuel Reliability • Nuclear Operation and Radioactive Waste Management • CANDU Fuel Cycles: From Concept to Commercial Operation Public Acceptance and Communication <ul style="list-style-type: none"> • Real Lessons Learned from Fukushima, Crucial Sharing Among the Nuclear Literacy Project • Communicating Effectively with the |

| 時間 | 工作行程 |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | <p>Public in a Radiation Emergency</p> <ul style="list-style-type: none"> • Crucial Lessons from Fukushima for the Global Nuclear Industry - Key to Communication: be Preventive, Proactive and Professional • How Governments Can Avoid Protests: Kudankulam Case Study |
| <p>9/13(五)9:00</p> <p>10:50</p> <p>13:30</p> | <p>Energy and Nuclear Power Panel</p> <p>Education and Training</p> <ul style="list-style-type: none"> • Influence of WNU on my Career • How to Develop the Safety Culture of Human Resources Dealing with Nuclear Energy • HR Challenges at Rosatom • Creating the Skills Supply Chain for a Nuclear New Build <p>The Nuclear Supply Chain in particular quality assurance and localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> • Value Chain Creation and Localization • Localisation of the Supply Chain: Joint Ventures between French Small and Medium Companies and Partners in the World to Deliver World Class Services and Equipment • NSQ 100 Nuclear Quality Standard Association Qualification • Indian Experience in Supply Chain Management & Localisation • Quality Assurance and Localisation |
| <p>9/14(六)-9/15(日)</p> | <p>返程：倫敦-台北</p> |

參、工作內容

世界核能協會(World Nuclear Association, WNA)為全世界核燃料循環最重要的民間國際業界組織，其所舉辦之會議為核能工業最重要的論壇及會議，亦為各會員國相互交換經驗及取得資訊之管道，目前會員公司 170 餘個，遍佈 30 餘國，會員所屬電力公司之發電量占全球核能發電之 95%，而會員公司所生產之原料鈾、轉化、濃縮服務將近全世界之所有產量，對於核燃料循環工業之影響極為深遠。

世界核能協會第 38 屆年會於今(2013)年 9 月 11 日至 9 月 13 日在協會總部倫敦召開，本次會議計超過 600 位專業人士參加，會議規模龐大，吸引大量關心核能發展人士參與，顯見核能仍為大眾所關心議題。

職除了參加本次年會外，並趁會議空檔，就本公司即將辦理 2016 年起開始供應之濃縮服務長約採購，與各廠家面對面協商及交換意見，茲分別將 WNA 會議提供之各項資訊，較具參考價值之主題及內容摘要如下：

- 一、全球核能裝置容量之現況與展望
- 二、全球核燃料市場(包括原料鈾、轉化服務、濃縮服務及製造服務)之供需分析
- 三、日本核能發電之現況與展望
- 四、中國大陸之核能發展現況
- 五、美國核能發電之現況與展望
- 六、法國電力集團(EDF)核燃料營運之現況與展望

一、全球核能裝置容量之現況與展望

WNA 2013 年核燃料市場報告指出，影響核能機組裝置容量的主要因素有二：目前營運中之核能機組是否能繼續運轉，以及新核能機組興建之可能性。大致說來，影響上述裝置容量的多寡，皆與各國之能源政策相關，分述如下：

(一) 影響裝置容量之因素

1. 運轉中之核能機組運轉壽命:

對現有運轉中之核能機組來說，最直接影響裝置容量之因素為核能機組是否延役。核能機組一般之運轉年限為 40 年，若可延役，則核燃料需求勢必將增加，惟仍須視各國政府之核能政策及態度。現階段因福島事件之影響，許多國家暫緩國內核能機組延役申請之審查，甚至發佈核能機組皆不延役之命令。現有運轉中之核能機組壽命大概至 2030 年左右。

圖一 現有運轉中核能機組之壽命

2. 新建核能機組

(1) 開發其他能源之技術

因開採能源技術越來越進步，非傳統天然氣 (unconventional gas) 如頁岩氣 (shale gas) 之開採成本低廉，經濟性高且較一般石化能源乾淨，目前在一些國家已被大量使用；另外，再生能源發電亦因科技進步更有發展，皆會影響新核電計畫之發展，影響未來全球核電裝置容量。

(2) 供應安全

許多缺少天然資源之國家，為了確保能源及電力供應無虞，將考慮提升核電之佔比。

(3) 環境議題

各國之能源政策大都以減少溫室氣體排放為目標，並朝向再生能源發展，故將會影響核電在其中之地位。

(4) 電力市場結構

各國對於電業民營化及自由化將影響現有供電體系及未來新電廠之建置。

(5) 反核勢力

各國核能之發展將受國內民眾對核能之看法而有很大之影響。

(二) 2013 至 2030 年全球核能裝置容量預測

WNA 進行全球裝置容量預測時，進行了核能經濟、大眾接受度、氣候變遷及輿論之影響，以及電力市場結構等假設，茲就中、高及低案分述如下：

1. 假設

(1) 中案

- A.核電業經濟性相對好轉。
- B.全球暖化將持續，核能之低發電成本已納入考量。
- C.各國政府了解到成本及減碳目標無法同時兼顧(石化能源成本過高，而再生能源無法達成京都議定書下之減碳目標)，故核能將會是極佳選擇。
- D.電業結構陸續重組及自由化將持續。
- F.福島事故僅影響一些國家，而大部分的國家仍維持先前之核電計畫。
- G.大眾對核電計畫反對程度開始減少。

(2) 高案

- A.核電業經濟性極佳，石化能源成本大幅增加。
- B.各國政府宣導零碳運動，須儘量減少使用石化能源。
- C.電業結構重組及自由化刺激投資，須達成國家和國際能源及環境政策目標。
- D.大眾對核能安全之信任度增加。

(3) 低案

- A.天然氣價低及核電廠建廠成本過高，使投資新核能機組較不具經濟性。
- B.即使認知全球溫室效應之嚴重性，各國政府仍不願積極推動核能。
- C.一些主要國家電業結構重組主要投資計畫仍待決定。
- D.福島事件對核電業影響甚鉅。
- E.大眾對核電之顧慮日益增加，核能機組提早除役且停止新建機組計畫。
- F.一些國家將現有核能機組除役並暫停新機組興建。

2. 全球核能裝置容量預測預測

(1) 全球核能裝置容量預測

高、中及低案的年成長率分別為 4.2%、3%及 0%。圖二顯示 2015 年起將開始出現差異，至 2020 年，預期在中案下，全球核能裝置容量可達 574GWe。

圖二 全球核能裝置容量預測-各案

(2) 各區域及各國裝置容量預測

以各區域來看，圖三顯示自 2011 年起，東亞成長最快也最多，南亞亦會增加，而西歐及中歐稍微減少，其他區域如美洲則持平。

圖三 各區域裝置容量預測-中案

(3) 影響裝置容量預測之國家

2013 年之高案及中案皆較 2011 年預測來的低，低案則持平(圖四)。WNA 認為主要差異來自日本及中國。日本停機之機組嚴重影響短期內之裝置容量預測，且 WNA 預期近期 1-2 年重新啟動運轉之機組將不會太多，且因福島事故，許多國家紛紛暫停新核能機組計畫，或是不允許機組延役，故 WNA 調降整體全球裝置容量預測。另一方面，中國及印度並未因福島事件停下興建核能機組之腳步，且速度非常快，加上其他開發中國家，如阿拉伯聯合大公國、土耳其及沙烏地阿拉伯等，故長期來看，核能裝置容量還是會快速成長。

圖四 2011 年及 2013 年全球裝置容量預測比較-各案

由 WNA 預測之裝置容量預測中案，預期至 2030 年核能機組增加最多之國家為中國(增加 108 部)、印度(增加 21 部)、日本(增加 31 部)、南韓(增加 11 部)、俄羅斯(增加 12 部)及阿拉伯聯合大公國(增加 6 部)。

表一 中案下全球各國至 2030 年核能機組數量及裝置容量預測

二、全球核燃料市場需求

(一) 影響核燃料市場需求之因素

核燃料需求除受上述裝置容量影響之外，影響核燃料需求的

另外一大因素為核電廠營運及燃料相關因素包括：核能機組運轉之容量因素(Capacity/Load Factor)、週期長度、燃料濃縮度、燃料設計及燃耗(Burn-up)等。

另外，各個電力公司與採購相關之策略、庫存政策、合約執行、是否有使用再處理之燃料等，亦會決定該電力公司之核燃料需求。惟 WNA 認為，這些因素僅影響短期內之核燃料需求，長期預測核燃料需求仍應以核能裝置容量為主，因其最能實際代表未來之核燃料需求。

值得一提的是濃縮下腳之重要性，WNA 認為濃縮下腳之選擇亦是影響核燃料需求之因素之一，以經濟因素來看，考量原料鈾及濃縮功之相對價格決定出最佳之下腳以取得最便宜之濃縮價格。目前大部份之最佳下腳約落於 0.25% 以下，WNA 於 2013 年之核燃料市場報告中指出最佳下腳為 0.24% (2003~2004 年為 0.3~0.35%)。

(二) 原料鈾市場

影響原料鈾供需平衡的因素眾多，並相互影響，主要幾項因素如下：

| 影響供應之原因 | 影響需求之原因 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none">● HEU-LEU 計畫● 美國減少庫存政策及出售渠庫存之影響● 耗乏鈾、用過核燃料及 HEU 再處理之政策● 合適之價格● 充足的資源 | <ul style="list-style-type: none">● 濃縮下腳之選擇● 週期長度及濃縮度● 燃料設計及處理● 燃耗之增加● 庫存之建立● 鈾料成為期貨商品 |

1. 需求

WNA 表示以預測之中案為例，至 2020 年原料鈾需求量約達 7.8 萬噸鈾(約 203 萬磅 U3O8)，2030 年則增加至約 9.7 萬噸鈾(253 萬磅 U3O8)，且從 2020 年起各案開始出現較大之差異。

圖四 至 2030 年全球之鈾需求預測

2. 初級供應

(1) 全球原料鈾礦區資源量

依「經濟合作暨發展組織核能署」(OECD NEA)與「國際原子能署」(IAEA)出版之紅皮書(Red Book)預測之結果：

- A. 鈾資源量之預測逐年上升
- B. 鈾礦整體資源開採成本逐年提高
- C. 多數資源集中於澳洲、哈薩克、俄國以及加拿大等四國。

圖五 IAEA 全球鈾資源量

(2) 原料鈾之供應歷史

原料鈾供應史大致可分為四階段(圖六):

- 1945-1960 年代(軍事時代):此階段核能發電伴隨核武競賽而成長。1950 年代，為滿足軍事需求而需大量之 HEU 及鈾，至 1960 年代後鈾料需求急遽下降。
- 1960 年代晚期-1980 年代(民用核能擴張時代):1960 年代晚期，原料鈾產量為因應民用核子反應器之需求而大量增加。新礦區投產迅速，且自北美、日本及歐洲國家之簽訂大量之長約訂單。
- 1980 年代中期-2002 年(庫存過剩時代):1980 年代後期，各國核能計畫紛紛暫停。電力公司為執行已簽訂原定核能計畫所需之原料鈾契約，而開始有大量鈾料庫存，導致許多礦廠減產或關閉。
- 2003-2007 年(核能急遽發展時代):為因應迅速發展之核能發電，在有限之供應及市場急需額外之供應的情形下，原料鈾價格高漲，至 2007 年原料鈾價格方趨於平緩。

圖六 西方世界歷年原料鈾之產量及需求量

(3) 近年來之世界原料鈾產量

近年來鈾礦之生產及需求深受福島事件所影響。福島事件前，鈾礦生產商積極擴產或準備擴產以因應預期的需求；惟福島事件後，全球核能計畫不確定性大增，使需求下降而礦區相關之開發計畫也因此延宕。前景不明之全球核能計畫，對初起步的礦商(廠)影響更甚，許多礦商(廠)因財務考量而延遲或停止計畫中之開礦計畫。

雖然市場情形持續惡化，2011 年仍有少數地區開礦，如：

- Honeymoon (Australia)
- Langer Heinrich Stage 3 (Namibia)
- Novokonstantinovkoe (Ukraine)
- Willow Creek (US)

而全球原料鈾總產量於 2011 年至 2012 年鈾礦產量提升之主要原因為哈薩克擴張渠 ISR 生產之區域，而哈薩克也成為全球鈾礦生產量最大之國家(於 2011-2012 年增加產量約 2,000 公噸鈾)。

表二 2010-2012 年各國原料鈾之生產量及佔比

表三 2012 年鈾礦各種開採方式之產量與佔比

(4) 不同階段鈾礦發展之預測

鈾礦為高風險投資，不僅須承擔財務、技術、地理位置及礦區本身之風險外，亦需承擔政治、環境之風險及社會責任。加上鈾料生產與需求高度相依，故在未來市場需求尚

未明朗之前，生產商大都不願貿然投入生產。

為便於預測未來原料鈾生產量，以下大致將礦區分成五大類：

- (一)Current capacity-已生產且於近程規劃上將繼續生產之礦區。
- (二)Mine under development-已有確定之開發計畫且已進行開發之礦區。
- (三)Planned mines-已完成可行性評估且亦完成特定階段之相關法規申請的礦區。此類礦區已進一步完成財務及開發上之規劃。
- (四)Prospective mines-已完成部分可行性評估且已著手相關法規程序之礦區。一般而言，若市場狀態未明，此類礦區將不會生產。
- (五)Supply Pipeline-是為了滿足未來需求而存在之供應，包含：新發現之礦體、已取消或延期之採礦計畫、現有生產礦區未預期之延役或現有生產礦區額外發現之礦藏，以及不可預期之次級供應。

表四 可滿足未來鈾需求待生產之礦區

WNA 將 Current capacity、Mine under development、Planned mines 及 Prospective mines 四類礦區做高中低案之分析。於中案之假設中，Current capacity 之礦區將生產其名目產能之 90%，且 Mine under development 之礦區亦將生產其名目產能之 90%，惟此礦區之計畫將延遲 2 年；

Planned mines 則被假設將會延遲 6 年才會開始生產且年產量為其 80% 之名目量；而 Prospective mines 則被假設將會延遲 8 年才會開始生產且年產量為其 70% 之名目量。

表五 各類礦區於各案下延遲開採之年限

2013-2030 年原料鈾產量之預測，Current capacity 之礦區產量相較於 2011 年減少約 2,000 公噸鈾，而 Planned mines 及 Prospective mines 兩類礦區產量之預測與 2011 年相比減少約 15,000 公噸鈾許多開礦計畫漸轉為 Supply Pipeline，也因此取消或延宕（如：Olympic Dam，Trekopje）。

圖七 2013 年與 2011 年 WNA 報告鈾礦產能之比較

3. 次級供應

- (1) 美國能源部(DOE)投入市場的物料為次級供應來源之一，其中包括 UF6 nat，TVA, ENW 及 DOE 三方協議下之耗乏鈾再濃縮，其數量於 2015 年約可至 3,000 公噸轉化鈾(以下同)，2021 年後降至約 200 公噸鈾。惟 WNA 認為如市場需求量增加(高案)的情況下，DOE 有可能於 2018 年再投入耗乏鈾，其數量於 2019 年可達約 2,400 公噸鈾。

圖八 DOE 供應之鈾料數量

(2) WNA 認為目前俄國的次級供應量來源包括 ERU (Enriched Reprocessed Uranium, 即濃縮再處理鈾)、高濃縮功所節省之饋料及耗乏鈾再濃縮等，其供應量約每年 5,000 公噸鈾，惟 WNA 認為俄國是否會針對市場供需狀況投入額外次級供應量仍是未知。

圖九 俄羅斯供應之濃縮再處理鈾料數量

- (3) 根據 WNA 報告，預估 2013 年以前市場上仍有約 5,000 噸鈾的未滿足需求，其中約 2,500 公噸鈾係由俄國次級供應量提供之，且此狀況約延續至 2030 年。
- (4) WNA 預估 2012-2018 年間，來自西方國家濃縮商因高濃縮功所節省之饋料、ERU 及 MOX 量約小於 5,000 噸鈾，並將在 2020-2030 年間突破 5,000 噸鈾。
- (5) 全球次級供應量來源包括俄國 HEU/LEU 計畫、ERU&MOX、美國 DOE 投入耗乏鈾再濃縮、西方國家濃縮商之多餘饋料、俄國濃縮商之多餘饋料及耗乏鈾再濃縮等，WNA 預估 2013 年次級供應量約可至 20,000 噸鈾，2020 年降至約 14,000 噸鈾。俄國 HEU/LEU 計畫預計於 2014 年結束，且預估 2026 年後 DOE 之物料將退出市場。

(6) WNA 預估低案的狀況下，俄國將不需於市場內投入每年 2,500 噸鈾額外供應量，其供應量將由目前次級供應量提供。另高案的狀況下，除俄國須投入每年 2,500 噸額外供應量外，美國 DOE 亦投入每年約 2,000 噸鈾。

(7) 根據 2013 年 WNA 報告，2013 年 WNA 次級供應量參考案較 2011 年報告增加約 3,000 噸鈾，渠供應量係來自於西方國家濃縮商之多餘饋料及美國 DOE 投入市場之浩乏鈾，且 2018 年後次級供應量較 2011 年報告之預估量減少約 2,000 噸鈾，其原因係 ERU/MOX 之減少量。

4. 供需分析

相較於 2011 年，原料鈾預測需求量已下滑。其中本預測最大的不確定性來自於全球核能發電之發展對於未來新礦區的影響，依據目前現存及未來的核能機組裝置容量及原料鈾生產量，預計在 2023 年前供需均屬平衡的狀態。但在 2023 年後，由於現有鈾礦已開採完畢以及新鈾礦開發計畫的較預期中減少，將需要新的供應量投入市場。大致說來，福島事件後，需求預測持續下修，致近期原料鈾市場供過於求。但值得注意的是一旦需求出現，電力公司將會調高渠庫存，相對地，生產商亦會調高庫存以因應未來之需求。

(三) 轉化服務市場

1. 需求

以預測之中案為例，至 2020 年轉化服務需求量約達 7.5 萬噸鈾，2030 年則增加至約 9.5 萬噸鈾，且從 2020 年起各案

開始出現較大之差異。

2. 初級供應

(1)轉化商現況

A. Cameco

2012 年-5 年換照(license renewal)之申請獲 CNSC (Canadian Nuclear Safety Commission)審核通過；與 KazAtomProm 簽署 UO₃ 精煉廠合作協議(MOA)。2013 年-持續進行 port hope 廠之現代化與環保計畫。

B. ConverDyn

福島事故後因法規要求進行之設備更新已按時程完成，並已恢復正常運轉，該公司已投入超過 1 億美元將設備升級，以提升效率。

C. Areva

Comurhex II 之興建工作主要在 Malvesi 廠，惟後續擴產計畫已取消。2013 年末將進行氟化氫(HF)之填換。

D. Rosatom

強化自澳洲、加拿大與美國進口鈾料之法律架構，於 2012 年自澳洲進口第 1 批鈾料。將於 SGChE 轉化廠整合所有轉化作業

E. Springfields

2016 年以後並無銷售合約。

(2)世界轉化廠裝置容量

註：

(a)名目產能之使用率係根據公開資訊所做之假設，可能依不同情況而增加。

(b)Comurhex II 完工後，名目產能可增至 15,000 tU/year，惟無後續擴

產計畫。

(c)假設中國之轉化產能足以滿足其國內濃縮廠扣除 underfeeding 後

之饋料需求。

(d)由於名目產能不明，故假設名目產能與產能使用率相同。

(e)巴西預期未來將興建新廠而增加產能。

(f)Springfields 之合約量為 5,000 tU/year。

(g)Springfields 2016 年以後無合約。

每年實際產出量可能依情況變化而有所不同。

3. 次級供應

WNA 預估轉化市場之次級供應量約與原料鈾市場相同。

4. 供需分析

轉化服務中案之假設為：

- 除 Springfields Fuels Limited 之外，西方世界之轉化廠將生產其名目產能之 70%。
- Springfields Fuels Limited 至 2015 年每年產能為 5,000tU UF₆，而 2016 年 1 月-3 月產能為 1,250tU UF₆，之後因 toll agreement 終止而停產。
- 俄羅斯、中國與巴西以滿足國內之需求為主。

由下圖可知於 2017 年以前，轉化服務供需大致平衡，而由於次級供應減少及需求量增加之情形下，自 2017 年後期，轉化服務將出現缺口。此缺口將可能成為轉化廠提高其產能之誘因。如未來需求狀況增加將刺激轉化商提高運轉產能，

惟長期來看，仍需要有新產能之加入。

(四) 濃縮服務市場

1. 需求

基於濃縮鈾須經由饋料經濃縮服務而成，WNA 認為濃縮服務與原料鈾之需求有基本關聯性，而影響濃縮鈾之濃縮度因素包括容量因素、燃耗及周期長度，在這些因素下濃縮度增加即會增加饋料及濃縮服務數量，另濃縮下腳不同，也會改變饋料及濃縮服務間之數量關係。下腳如變動 0.2%，則約略影響 20% 之饋料和濃縮服務數量。

以預測之中案為例，至 2020 年濃縮服務需求量約達 6 千萬 SWU，2030 年則增加至約 7.7 千萬 SWU。

2. 初級供應

濃縮商現況

A. AREVA

GB II 北廠 2013 年 3 月商轉後，目前產能約 4.3 百萬 SWU，並繼續依計畫時程提升產能。EREF 因財務問題，興建時程未定，最早須至約 2018 年才會開始興建。

B. URENCO

因福島事故減少之需求，調整擴產計畫：取消 Almelo 廠 0.6 百萬 SWU 與 Capenhurst 廠 0.4 百萬 SWU 的擴產計畫；放慢 LES 第 3 階段擴產計畫的

速度，預計 2022 年(原定 2015 年)達到目標產能 5.7 百萬 SWU，第 4 階段擴產則暫停。因市場生產過剩而計畫以"SWU"換"鈾"，10%~15%之產能將用做 underfeeding(即低濃縮下腳)與下腳再濃縮而換得鈾料。

C. USEC

Paducah 濃縮廠已於 2013 年 5 月停止運轉，2014 年將繼續進行庫存管理與完成客戶交貨之事宜。ACP RD&D 計畫已完成 120 個離心機之設備建置與安裝工作，以進行商轉模組之驗證。系統整合測試工作已完成，USEC 預計將於第 4 季進行模組介接之運轉測試工作。整個計畫依預算按時程進行中，預計將於 12 月完成所有之計畫目標工作。

D. CNNC

因群眾抗議而取消原訂於廣東省興建之鶴山核能工業園區計畫(包括轉化廠、濃縮廠與製造廠)。

E. Rosatom

俄羅斯最後一批由 HEU 轉成之 LEU 預計於 2013 年 11 月運出。TENEX 與 NAC KazAtomProm 簽署物料帳戶系統協議，以確定自哈薩克天然鈾實體交運至俄羅斯轉化廠，以及後續製程之轉帳交貨方式。

F. GLE

第 2 階段之測試迴路繼續運轉中，以驗證經濟性與技術上商轉之可行性，做為興建第 1 組商業模組決策之依據。2013 年 8 月 14 日向 DOE 申請於 Paducah 濃縮廠回收下腳之計畫。將評估市場供需狀況以決定是否興建濃縮廠。

G. 現有與新建濃縮廠分布圖

(1) 與 2011 年市場報告相比之重大變化

A.後福島世代，全球濃縮需求減少約 10%。

B.新濃縮廠商轉時程延後(ACP、EREF、GLE)。

C.現有濃縮廠擴產計畫之不確定性增加

(a)GB II 北廠

(b)俄羅斯 ECP、UEIP 與 SCC 廠現代化計畫。

(c)中國 SUEC、LUEC 與鶴山本土技術之擴產計畫。

(d)UUSA 之 LES 廠。

D.因 SWU 供應持續超過需求，西方世界濃縮商利用過剩產能進行 underfeeding。

(2) 主要濃縮商產能預測

3. 次級供應

WNA 認為濃縮市場之次級供應來源包括俄國 HEU/LEU 計畫、ERU&MOX(包括美國核武等級鈾降低濃度為 MOX 燃料)以及美國 DOE 投入市場之耗乏鈾再濃縮功，其中 2014 年後 HEU/LEU 計畫將終止。2012 年數量約為 9.5 百萬 SWU，2014 年後降至 3 百萬 SWU，預估 2026 年後可達至 4.5 百萬 SWU。

4. 供需分析

短期而言，濃縮市場之供應(包含現有及興建中濃縮廠以

及現貨供應)遠高於需求，對於過剩的濃縮供應，建議如下：

1. 基於目前機組皆為離心式機組，目前興建中之新濃縮產能可視需要減少。
2. 原用以供應俄羅斯核武用途之高濃縮鈾(HEU)混拌/稀釋的濃縮產能可移轉到 underfeeding(即增加濃縮功，以減少饋料)使用。
3. 西方濃縮商也可降低濃縮下腳，可減少轉化鈾的需求，並消耗多餘的濃縮產能。

濃縮服務之需求預期於 2013 年-2030 年因亞洲及中東國家之需求而提升。濃縮技術也於此時期自氣體擴散式和離心分離式轉變為全離心分離式時代，未來雷射分離式亦有可能加入供應濃縮服務之行列。俄國之濃縮工業亦處於轉變時期，該國濃縮產能原專注於下腳再濃縮，近期將轉變為專注於供應濃縮服務。

雖然傳統氣體擴散式設備關廠，現有濃縮設備之擴充、新產能之加入以及俄國之轉變，將使濃縮服務產業供應無虞。

(五) 製造服務市場

1. 需求

LWR 燃料製造需求係以全球核能機組裝置容量估算，在 2013 年約為 6,500 噸濃縮鈾(單位為 tHM, tonnes of heavy

metal)，需求量在參考中案(reference case)及高案(upper case)下，約在 2016-2017 年間達到 7,000 噸及 7,500 噸、在 2020-2021 年間達到 8,000 噸及 9,000 噸，並在 2029-2030 年間分別預估達到將近 10,000 噸及 12,000 噸，低案(lower case)需求量則於 2017-2018 年左右達到最高點約 7,000 噸，需求量隨機組除役下跌至 2029-2030 年左右之 6,000 噸。

2013 年報告對於未來燃料製造服務需求預估仍考慮逐步成長，惟相較於 2011 年對於參考中案及高案之需求成長趨勢有大幅抑低的現象，應為考慮日本福島事件後，全球對新建核能機組抱持觀望的態度。然而，對於新建機組來說，雖然初始核心(first core)平均濃縮度僅 2.8% 左右，但由於新建機組裝填使用量大，全爐心燃料相當於一般填換批次的 3 倍數量，故初始核心燃料的加入將造成需求量尖峰，以 2020 年加入之初始核心燃料來看，參考中案約增加 750 噸之需求量。

2. 供應

(1) 輕水式反應器(LWR)燃料

全球 LWR 燃料製造供應產能，總計分別為轉化量(六氟化鈾轉化為二氧化鈾)13,708 噸、燃料丸產量 14,418 噸及燃料棒/燃料元件產量 12,772 噸鈾。

其中，主要製造服務供應來自於美國及西歐，全球三大核燃料製造廠家 AREVA、GNF 及 Westinghouse 均分別於美國及西歐設廠生產核燃料，轉化容量與製造產量大致相符。AREVA 於美國 Richland 廠製造產量為 1,200 噸、法國 Romans 廠為 1,400 噸、德國 Lingen

廠為 650 噸；GNF 於美國 Wilmington 廠製造產量為 1,000 噸、投資西班牙 ENUSA 公司的 Juzbado 廠為 500 噸、於日本 Kurihama 廠為 750 噸，後兩者無轉化產能；Westinghouse 於美國 Columbia 廠製造產量為 1,500 噸、於瑞典 Vasteras 廠為 600 噸。

次要供應為哈薩克、日本、巴西、印度、南韓及中國等，其中，哈薩克雖無製造產能，但供應 2,000 噸轉化產能，可補足次要製造供應廠轉化產能不足的缺口；另俄羅斯及英國分別由 TVEL 及 Westinghouse 生產 RBMK 及 AGR 反應器燃料，產量分別為 2,100 噸及 860 噸。

(2)重水式反應器(PHWR)燃料

PHWR 採用天然鈾作為反應器燃料，無轉化、濃縮等加工過程，全球製造產量為 4,320 噸，其中以 Cameco 位於加拿大的 Port Hope 廠及 GE 位於加拿大的 Peterborough 廠為最主要製造廠家，產量分別為 1,200 噸及 1,500 噸。

另阿根廷、中國、印度、南韓、巴基斯坦及羅馬尼亞均有部份產能。

(3)鈾鈾混合(MOX)燃料

MOX 燃料係採用再處理後的鈾，以二氧化鈾的型態與二氧化鈾進行混合後製成燃料再利用。目前燃料丸產量與製造產量一致，其中以 AREVA NC 於法國 Marcoule 廠的 195 噸為最大，印度及日本亦分別有部份產能，另日本與美國各有 130 噸及 100 噸的產量分別預計於 2016 及 2018 年加入營運。

3. 供需分析

核燃料製造仍屬高科技；燃料設計要求零破損，設計者主要係自材料上去改進。西方世界現有之製造服務已高於需求量約 40%，即便以高案預測未來之需求，至 2020 年仍供應無虞。另燃料製造廠之建廠及投入產線速度較興建核能機組來的快，因此尚不急於興建新的燃料製造廠。此外，增加製造服務產能耗時較核能機組裝置容量之前置期短，可隨時依需求調整。

(六) 結論

1. 全球核能機組的裝置容量已較 2011 年之預估量減少，但仍會持續增加。預估至 2030 年，全球核能機組裝置容量將可達 574GW，原料鈾需求量預估成長至 97,000 噸。
2. 鈾料市場日增的不確定性已導致新礦區開採計畫的取消或延遲，預估目前現有和預期產量加上次級供應量在 2024 年時將不足所需。
3. 轉化市場預估至 2017 年後需增加產能利用率以供應需求。
4. 濃縮市場為消耗現有多餘產能，調低下腳濃縮度之情形將增加。
5. 製造市場的產能預期將可充分供應需求量。
6. 2030 年以後，第四代反應器將改變未來之鈾料需求，惟在 2050 年以前，此改變將不顯著。

三、日本核能發電之現況與營運

(一) 核能現況與核電廠申請運轉進度：

福島事件之後，日本全國原有 52 座可運轉之機組，在今(2013)年 9 月以前，僅剩 2 部機組在運轉中(詳下圖)，分別為 Ohi 3 及 Ohi 4，而 Ohi 3 號機已於 9 月 2 日、Ohi 4 號機已於 9 月 15 日分別停機進行檢修，未來須通過新規範之安全分析後再行啟動，故目前全日本是屬於零核電狀態。

Ohi 3 及 Ohi 4 是在新法規制定之前，於 2012 年 4 月 19 日即提交給日本核能管制局(NRA)進行審核，於 7 月 3 日由 NRA 核定該 2 部機組因確保不會有立即性的重大問題產生，而成為福島事件後唯二獲准重新啟動的機組。

NRA 已於 2013 年 6 月 19 日正式公布新的核能法規，並於 7 月 8 日起開始規定須依照新規範來申請運轉執照，和過去不同的是，新的法規和法律緊密結合，不再像過去一樣「由電力業者以自願的方式來推動」。核能管制局局長 Shinichi Tanaka 表示，日本已經進入另一個里程碑，這是全世界最高安全標準的法規。

目前已有 12 座 PWR 機組及 2 座 BWR 機組提出重啟申請(已提出申請的機組有 Ohi 3 及 4; Takahama 3 及 4; Genkai 3 及 4; Sendai 1 及 2; Tomari 1、2 及 3; Ikata 3; Kashiwazaki Kariwa 6 及 7)。NRA 表示，在提出申請之後，至少需要 6 個月對重啟申請進行審核，依據 WNN 報導預期最早在 2013 年 12 月可完成第一個機組審核。

(二) 日本核能機組重啟之預期

WNA 認為日本核能機組未來是否能順利通過新的核能法規

重新啟動運轉，須考量下列因素：

- 核能機組壽命
- 裝置容量大小
- 核能機組型式
- 核能機組廠址

WNA 大幅調降 2013 年對於日本機組之預測，因福島事件之後，日本核電業不確定性大增，故調降裝置容量預測。並預測自 2014 年起至 2016 年將陸續有機組重新啟動運轉，最樂觀之狀態可能會有接近 40 部機組重啟，最不樂觀的狀況則可能僅剩 20 至 25 部左右。

(三) 核電重啟之規範

福島事件後，對福島同等級之地震與海嘯威脅即時處理進行研究，先對緊急安全措施與重大事故處理的強化，強化項目包含：緊急電源供應、反應器冷卻系統、用過燃料池冷卻系統、避免氫爆與移除 heavy debris 的方式，Ohi 3 與 4 號機即係以此規範進行重啟執照申請。

在 NRA 新通過的核能安全法規下，和過去所不一樣的是，這次的法規具有法律的強制性。德國核能專家 Michael Maqua 分析新法規可分為兩大部分，第一部份為審查既有核電廠的安全，特別是著重在對抗外部威脅，例如地震和海嘯的能力。第二部分則延續深層防禦的概念，要求增加處理嚴重事故的設備，包括防止氫氣爆炸，以及萬一發生爐心熔毀事故時，過濾及排放反應器廠房內特定放射性物質的設備等。從新核能安全法規規範可看出，對預期外事件具有多重的因應方

式，不因事故發生的機率小而避開一旦事故發生後的控制與處理。目前停止運轉的核電廠，則必須通過新法規的檢驗後才能夠恢復運轉。

(四) 日本核工業的長期展望

下圖為日本目前至 2050 年之間核能裝置容量預測圖，在福島事件發生之前約為 48,900 MW，到今年已降至 44,490 MW，後續亦因反應器年限陸續屆滿且暫無新機組可銜接，核能裝置容量將逐年下降；虛線部分是考量機組延役至 60 年的計畫可進行且開始有新機組的興建活動，總裝置容量仍有下滑趨勢，惟估計約可維持保有約 35,000 MW 的機組可運轉。延役議題以美國為例，截至目前，美國 104 部機組已有 73 部完成延役為 60 年之審核。

核燃料循環產業是日本能夠穩定提供核燃料作為運轉核子反應器之用的重要產業。在青森縣六所村(Rokkasho Village)相關的核燃料循環措施，包含：核燃料再處理廠(測試中)、MOX 燃料製造廠(測試中)、剩餘產物玻璃固化中心、低放射性產物中心、鈾濃縮廠。依據 WNN 於 5 月 30 日的報導，六所村的玻璃固化廠的測試完成，代表日本已建立完整的核燃料後端處理體系，惟 JNFL 尚須向 NRA 提出使用執照申請，儘管在未來核能發展尚未明朗化，現行日本的核廢料處理政策仍以發展再處理為主。

(五) 結論

目前日本的核能工業強調以多重的方式強化核電廠之安全性，成為世界最高標準，並且持續要求能達到高於法規規範之標準，並積極向各國學習，以避免第二次福島事件之發生。

對於重新啟動機組的標準，首先需滿足新版核能安全規定，且日本已意識到核能的延後啟動或持續不使用核能對社會之影響。因此，即使在核電尚未重啟之前，也要對電廠的延役工作、取代老舊電廠及維持核燃料循環工作進行準備。

四、中國大陸之核能發展現況

(一) 中國大陸之核能方針政策-在確保安全的基礎上，積極發展核能

在中國大陸，核能被列為國家戰略性新興產業，不僅作為一種乾淨且高效率的能源解決方案，並作為科技創新與經濟成長的動力，包括：改善能源結構、確保能源供應、因應氣候變化、加速科技創新、推動產業升級、提升經濟增長等六大目標。

中國大陸核能發展的規劃目標為新建機組須滿足第三代安全標準且多採用 AP1000 壓水式反應器(Advanced Passive 1000 PWR, AP1000)為主。如表 1 所示，截至 2013 年 6 月，中國大陸運轉中之機組共有 17 部，興建中的機組有 30 部；預計於 2020 年時，共有 58GW 商轉，另有 30GW 的機組持續興建中。

表 中國大陸已商轉與建設中核能機組數量統計

| 名稱 | 機型 | 商轉機組 | 興建中機組 |
|--------|---------|--------------------------|---------|
| 大亞灣、嶺澳 | M310 | 6x1000MW | |
| 寧德 | CPR1000 | 1×1000 | 3×1000 |
| 紅沿河 | CPR1000 | 1×1000 (2013/6/27 商轉) | 5×1000 |
| 陽江 | CPR1000 | | 4×1000 |
| 台山 | EPR | | 2×1700 |
| 防城港 | CPR1000 | | 2×1000 |
| 秦山 I | CNP300 | 1×300MWe | |
| 秦山 II | CNP650 | 4×650MWe | |
| 秦山 III | CANDU | 2×700MWe | |
| 方家山 | CPR1000 | | 2×1000 |
| 福清 | M310+ | | 4×1000 |
| 三門、海陽 | AP1000 | | 4×1250 |
| 田灣 | VVER | 2×1100MWe | 2×1000* |
| 石島灣 | HTR | | 2×200 |
| 總和 | | 17 部 | 30 部 |

目前，中國大陸核能已經進入第三代核電產業化發展階段，同時持續研究新一代的反應器，如：已經完成的測試用快中子反應爐、正在建設中的高溫氣冷堆反應器(High Temperature Gas-cooled Reactor, HTGR)、研發小型模組化反應爐(Small Modular Reactor, SMR)及熔岩式反應器。

(二) 中國大陸核能技術之發展目標-AP1000 壓水式反應器

中國大陸之國家核電技術公司 (State Nuclear Power Technology Co, SNPTC) 與西屋公司合作，將世界首批的 AP1000 機組於中國付諸興建，包含浙江三門 2 部機組與山東海陽 2 部機組，其中三門 1 號機與海陽 1 號機預計於 2014 年 12 月併聯，三門核電站的 AP1000 機組亦是世界首座動工之同型機組。

具備被動型安全系統的第三代壓水式反應器，以西屋公司的 AP1000 為代表，若發生事故時可由上層的儲水槽，使用重力引水，結合自然對流原理，讓蒸發的水氣冷卻流回反應器繼續冷卻燃料所產生的熱，此為被動型安全系統之設計原則。

AP1000 的被動型安全系統，主要是由兩個被動式安全系統組成：被動式爐心冷卻系統 (Passive Core Cooling System, PXS) 及被動式圍阻體冷卻系統 (Passive Containment Cooling System, PCS)。主要功能具備：

1. 餘熱移除：利用自然對流將餘熱移除至圍阻體外。
2. 被動式安全注入：利用自然對流及重力引水對爐心冷卻系統提供補給。
3. 圍阻體冷卻：在爐體的外側以空氣自然對流及蒸發水分來冷卻。
4. 輻射外洩移除：利用自然對流及蒸汽冷凝來移除。

(三) 中國大陸核能發展模式-自主化與國際合作相結合

中國大陸的核能自主化是一個期待在合作中創造雙贏的體系。為了落實核電技術自主化政策，中國大陸與美國簽署了《中華人民共和國和美利堅合眾國政府關於在中國合作建設先進壓水堆核電項目及相關技術轉讓的諒解備忘錄》，大陸方面並指定 SNPTC 接受美方技術轉移，代表此後中國所興建的新機組，可能都會採用 AP1000 機組。在中國的計畫之中，興建 AP1000 的目標是在消化、吸收、全面掌握 AP1000 技術的基礎上，透過再創新開發功率更大的先進被動型壓水式反應器之核電技術，在此原則上設計出 CAP1400，與 AP1000 相比，CAP1400 在主系統、安全性能、數位保護系統及放射性廢料處理系統進一步的提升安全性、可靠度及經濟性。

中國核能發展自主化之做法循序漸進，依序為：(1)國外為主，中方全面參與，建成自主化依託項目等 4 部 AP1000 機組，成為沿海廠址之標準設計；(2)中方為主，國外提供支援，形成 AP1000 標準設計，具備在沿海與內陸皆可興建 AP1000 機組的能力；(3)完成 AP1000 之重要技術全面自主創新，興建 CAP1400 及進行規模化建設，開始興建 CAP1700 的先期準備工作，中國 CAP1400 計畫將於 2014 年開工，預計可於 2018 年有首部機組完成併聯。

此外，SNPTC 也與韓國、義大利、西班牙、德國等國企業在 CAP1400 的建設中亦有合作項目，並且在開發新型反應器、建立全球供應鏈、開發國際市場及進行國際投資等項目上進行合作，提升相關了企業之競爭性。

國家核電技術公司與合作夥伴關係圖

(四) 結論

中國大陸是世界上少有擁有各類產業齊全、產業鏈完整的核工業體系的國家，中國大陸目前建造中的機組約佔了世界的40%，而其核能發電約只佔了總發電量的2%，以中國大陸高碳排放量的背景來說，核能發電為其增加談判籌碼的一項選擇。此外，中國大陸以結合國際合作投資加以學習建立自主化之核能機組，未來，中國大陸除了是全球最大的核電市場，亦將成為全球核電技術創新的重要基地。

五、美國核能發電之現況與展望

(一) 美國電力工業面臨之問題

過去數年受美國經濟衰退、低價天然氣與電力市場不振之影響，電力需求尚未回復至 2007 年金融危機發生前之水準。2012 年美國天然氣價大量下滑至低於 \$2/MMBtu，而由於在許多電力市場上，價格係由燃氣機組所主導，故電價亦隨之下跌。去(2012) 年大部份區域之電價現貨價格達到 10 年來的新低點。這已威脅到許多發電廠之生存經濟條件，當然亦包括部份之核電廠。然而，就某些範圍而言，未來數年可能停機之裝置容量可能取決於聯邦政府與各地區是否能夠正視真正威脅係來自於存在於美國電力市場檯面下之問題，而工業界則必須努力使政府正視這些問題。

1. 能源組合未分散風險

各種發電燃料與技術皆有某種程度之風險，故煤、核能、天然氣、再生能源與高發電效益之能源分散組合，一向為美國電力工業之核心強項。各種比例之組合皆可做為對價格波動與供應中斷之避險。目前在美國的電力工業中，卻存在未分散的風險。自 1995 年以來，美國境內新增之裝置容量大約有 75% 為燃氣機組(大約 35 萬 MW)，而可提供連續運轉且價格穩定之燃煤與核能機組僅約佔 6%，且此趨勢似乎持續發展中。

除此之外，大部份的化石燃料機組將於未來 5 至 7 年停機，部份因低價天然氣，大部份則因低碳排放環保之要求。如此一來，將形成對天然氣的過度依賴。

2. 過度依賴天然氣

對天然氣過度依賴將導致：

(1) 價格波動風險

去年天然氣之低價情形已不再持續。今(2013)年迄今為止，發電機組所用之平均天然氣交貨價已高於 2012 年上半年之平均價，而今(2013)年上半年大部份交易中心之天然氣現貨價格亦比去年同期增加約 50%，在東北地區更增加約 100%。

(2) 供應中斷

在電力以外之工業，天然氣之需求亦持續增加，預計至 2020 年，來自電力、工業界與液化石油氣之出口需求將增加 20% 至 30%。雖然美國天然氣資源量大，但問題是基礎建設是否能適時適地滿足需求之成長。

美國數個主要市場對於過度依賴天然氣之情形已發出嚴重之警告。如美國新英格蘭區之電力供應中，來自於天然氣部份超出 50%，造成在 2013 年 1 月至 2 月間，面臨天然氣現貨價格劇烈增加至 \$30/MMBtu 時，被迫調整其電價至 \$250/MWhr~\$260/MWhr (高於此區電力市場一般價格 \$40/MWhr 甚多)，進而威脅其供電之可靠度。除新英格蘭區之外，佛羅里達州依靠天然氣提供電力來源已增加至 70%，在 Crystal River 核能機組停機(除役)後將達更高；在紐約，來自燃氣機組之電力供應亦已由 29%(2000 年)增加至 44%(2012 年)。

(二) 美國核能電廠停機(除役)之原因探討

至今(2013)年為止，將停機(除役)之 4 部與明年之第 5 部，其中有 3 部機組之原因是單獨且特殊的。Crystal River 係因維修成本之高度不確定性所造成；San Onofre 2 號及 3 號機則為管制機構審查之不確定性所導致。另 2 部運轉績效非常卓著之 Kewaunee 與 Vermont Yankee 機組則受經濟因素被迫停機(除役)。

未來還有多少部核能機組會永久停機取決於幾項難以預測之因素，包括所處區域之能源與電力價格、天然氣價格、經濟與電力需求之成長以及政治，或許更重要的是政府是否認真面對上述電力市場面臨之問題。

(三) 美國核能發電之價值

雖然美國核能發電短期內有所挑戰，但長期來看前景依然可期，且核能發電之價值仍如同以往之穩固。這些價值來自於可提供連續、安全且穩定之大量電力。此外，核能亦提供低碳能源之價值，在碳總量管制與交易系統(cap-and-trade system)中，核能降低了其他碳排放機組為達標準所須負擔之比例。核能機組對電網而言係屬穩定之電源，特別是不會像燃氣機組必須承擔價格波動之風險而提供電價之穩定性。可靠有彈性的電力市場所必須具備的條件之一，燃料與技術分散，核能發電亦屬其一。最終，核能提供許多高薪的就業機會與地方稅收之來源。雖然這些價值確實皆存在，但這些大都是未被正視之核能價值，而讓所有人體認到這些價值則是核工界的職責。

六、法國電力集團(EDF)核燃料循環營運之現況與展望

法國電力集團(Electricite De France, 以下簡稱 EDF), 成立於 1946 年, 為法國負責發輸配電之國有企業, 身為全球電業之領導者, 經營項目包含發電(核能、火力及再生能源等)、輸配電網、電力銷售及貿易等。

EDF 跨國集團立基於歐洲, 於美洲、亞洲、非洲等各先進國家成立分公司, 並與各國電力公司建立長期合夥關係, 簽訂合作協議, 供應全球 3,770 萬個客戶、全球員工共 156,168 人、營業額達 650.3 億歐元, 全球機組發電裝置容量達 134.6 百萬瓩(核能占 55.6%、化石燃料占 17.6%、天然氣占 8%、水力占 15.9%, 其他再生能源則占 2.9%), 實際總發電量則達每年 6,282 億度電(核能占 79.6%、化石燃料占 8.2%、天然氣占 4.8%、水力占 5.9%, 其他再生能源則占 1.5%), 約有 87% 發電量屬於低碳能源。(註: GWe 相當於百萬瓩、TWh 相當於 10 億度電)

EDF 進行核燃料循環營運及放射性廢棄物管理的目的, 在於有效並穩定利用核能進行發電。EDF 集團對於核燃料的需求量, 每年約為 1 萬噸原料鈾及 7 百萬分離功(SWU)(約相當於全球市場之 15% 需求量或歐洲市場之 60% 需求量)。

英國目前共有 16 部核能機組, 供應全英國約 18% 之電力, 除了 1 部 Magnox 機組將於 2014 年除役, 剩餘 14 部 AGR 及 1 部 PWR 機組均由 EDF 集團之 EDF Energy 公司負責營運。

法國則共有 58 部核能機組由 EDF 營運, 均屬 PWR 機組, 其中 34 部 900 MWe、20 部 1300 MWe 及 4 部 1450 MWe 分散法國境內 20 個廠址, 供應全法國超過 75% 之電力。

核燃料在工業使用上, 面臨到三項挑戰, 分別是: 燃料供應安全

與市場競爭性、爐心安全與燃料表現，以及核燃料循環與放射性廢棄物管理。

(一) 燃料供應安全與市場競爭性

EDF 在過往 30 年以來，針對核燃料循環前端的原料鈾(raw uranium)、轉化服務 (conversion services) 及濃縮服務 (enrichment services) 階段，採用下列 5 種手段以達成最關鍵的供應安全：

1. 投資及供應來源之多元化；
2. 天然鈾及再處理鈾料的策略性庫存；
3. 利用再循環減少約 15% 的天然鈾年需求量；
4. 對供應商的風險評估、資格認可及監督；
5. 掌控運輸、包裝容器及儲存等物流後勤管理。

例如：採法國與英國合作的方式，以集團的層級進行濃縮鈾採購。此外，自行採購硼酸及氫氧化鋰供 PWR 機組使用。

(二) 爐心安全與燃料績效

製造服務 (fabrication services) 階段，攸關燃料績效及爐心安全，EDF 採用 4 個策略進行採購：

1. 透過各供應商製造廠地理位置及燃料設計的多元化，確保法國核能電廠的填換燃料供應安全；
2. 進行供應商製造品質認證及燃料製程監督；
3. 利用燃料專業技術作為經驗回饋；
4. 所屬法國及英國 EPR 電廠共同採購所需之燃料製造服務。

EDF 並對其所屬法國及英國 EPR 電廠的燃料，透過燃料在爐心的營運經驗相互參考，採以燃料共用設計 (common design)；其在法國的電廠可共用燃料束安全庫存，並建立有自主爐心營運能力：

1. 新燃料檢查工具；
2. 燃料維修技術支援；
3. 專業燃料填換及爐心燃料挪移工程師團隊

(三) 核燃料循環與放射性廢棄物管理

核燃料循環中，除了前端採購、爐心營運外，還有無法避免談到有關後端的用過燃料(spent fuel)管理及放射性廢棄物管理的部分。

針對用過燃料的管理，EDF 已具備用過燃料再處理(reprocessing)及後續鈾/鈾(Pu/U)混合燃料再循環利用(recycling)技術有 30 年的經驗；同時，針對用過燃料中期貯存(interim storage)技術，用過燃料池(spent fuel pool)或乾式貯存桶(dry storage cask)，EDF 亦已進行了 30 年的研究與發展，採用乾貯桶採購成本平均分攤、設置區域性之乾貯設施、建立專業乾貯技術團隊及統一各電廠乾貯桶採購契約等策略。目前 EDF 在英國，有兩個可暫存 100 年的中期貯存場建置計畫正在進行中，分別是 Sizewell B (PWR 廠址內)的乾式貯存場，及 Hinkley Point C (2 個 EPR 計畫的預定廠址內)的濕式貯存場。

另對於放射性廢棄物管理，EDF 針對以下幾點提出說明：

1. 法規要求的透明化。對於放射性廢棄物的管理及需求，法國訂有相關法令 (French 2006 Planning Act, National Plan for the Management of Radioactive Waste and Materials)，有助於 EDF 符合法規要求的透明化；
2. 工業級(industrial-scale)的放射性廢棄物管理技術。EDF

發展了工業級技術，運用在其法國機組運轉維護(O&M, Operation and Maintenances)下，以及除役計畫 (decommissioning program)所產生的放射性廢棄物管理；

3. 廢棄物處理(treatment)；
4. 廢棄物處置(disposal)；
5. 財務方面觀點。

肆、結論與建議

- 一、WNA 高、中及低案的年成長率分別為 4.2%、3%及 0%。至 2020 年，預期在中案下，全球核能裝置容量可達 574GWe。2013 年之高案及中案皆較 2011 年預測來的低，低案則持平。WNA 認為主要差異來自日本及中國。日本停機之機組嚴重影響短期內之裝置容量預測，且 WNA 預期近期 1-2 年重新啟動運轉之機組將不會太多，且因福島事故，許多國家紛紛暫停新核能機組計畫，或是不允許機組延役，故 WNA 調降整體全球裝置容量預測。另一方面，中國及印度並未因福島事件停下興建核能機組之腳步，且速度非常快，加上其他開發中國家，如阿拉伯聯合大公國、土耳其及沙烏地阿拉伯等，故長期來看，核能裝置容量還是會快速成長。由 WNA 預測之裝置容量預測中案，預期至 2030 年核能機組增加最多之國家為中國(增加 108 部)、印度(增加 21 部)、日本(增加 31 部)、南韓(增加 11 部)、俄羅斯(增加 12 部)及阿拉伯聯合大公國(增加 6 部)。
- 二、原料鈾市場部分，WNA 表示以預測之中案為例，至 2020 年原料鈾需求量約達 7.8 萬噸鈾(約 203 萬磅 U3O8)，2030 年則增加至約 9.7 萬噸鈾(253 萬磅 U3O8)，且從 2020 年起各案開始出現較大之差異。而全球原料鈾總產量於 2011 年至 2012 年鈾礦產量提升之主要原因為哈薩克擴張渠 ISR 生產之區域，而哈薩克也成為全球鈾礦生產量最大之國家(於 2011-2012 年增加產量約 2 ktU)。相較於 2011 年，原料鈾預測需求量已下滑。其中本預測最大的不確定性來自於全球核能發電之發展對於未來新礦區的影響，依據目前現存及未來

的核能機組裝置容量及原料鈾生產量，預計在 2023 年前供需均屬平衡的狀態。但在 2023 年後，由於現有鈾礦已開採完畢以及新鈾礦開發計畫的較預期中減少，將需要新的供應量投入市場。大致說來，福島事件後，需求預測持續下修，致近期原料鈾市場供過於求。但值得注意的是一旦需求出現，電力公司將會調高渠庫存，相對地，生產商亦會調高庫存以因應未來之需求。

三、轉化服務部份，以預測之中案為例，至 2020 年轉化服務需求量約達 7.5 萬噸鈾，2030 年則增加至約 9.5 萬噸鈾。於 2017 年以前，轉化服務供需大致平衡，而由於次級供應減少及需求量增加之情形下，自 2017 年後期，轉化服務將出現缺口。此缺口將可能成為轉化廠提高其產能之誘因。如未來需求增加，將刺激轉化商提高運轉產能，惟長期來看，仍需要有新產能之加入。

四、濃縮服務部份，以 WNA 預測之中案為例，至 2020 年濃縮服務需求量約達 6 千萬 SWU，2030 年則增加至約 7.7 千萬 SWU。短期而言，濃縮市場之供應(包含現有及興建中濃縮廠以及現貨供應)遠高於需求，濃縮服務之需求預期於 2013 年-2030 年因亞洲及中東國家之需求而提升。濃縮技術也於此時期自氣體擴散式和離心分離式轉變為全離心分離式時代，未來雷射分離式亦有可能加入供應濃縮服務之行列。俄國之濃縮工業亦處於轉變時期，該國濃縮產能原專注於下腳再濃縮，近期將轉變為專注於供應濃縮服務。雖然傳統氣體擴散式設備關廠，現有濃縮設備之擴充、新產能之加入以及俄國之轉變，將使濃縮服務產業供應無虞。

五、製造服務部份，LWR 燃料製造需求係以全球核能機組裝置容量估算，在 2013 年約為 6,500 噸濃縮鈾（單位為 tHM，tonnes of heavy metal），需求量在參考中案(reference case)及高案(upper case)下，約在 2016-2017 年間達到 7,000 噸及 7,500 噸、在 2020-2021 年間達到 8,000 噸及 9,000 噸，並在 2029-2030 年間分別預估達到將近 10,000 噸及 12,000 噸，低案(lower case)需求量則於 2017-2018 年左右達到最高點約 7,000 噸，需求量隨機組除役下跌至 2029-2030 年左右之 6,000 噸。西方世界現有之製造服務已高於需求量約 40%，即便以高案預測未來之需求，至 2020 年仍供應無虞。另燃料製造廠之建廠及投入產線速度較興建核能機組來的快，因此尚不急於興建新的燃料製造廠。此外，增加製造服務產能耗時較核能機組裝置容量之前置期短，可隨時依需求調整。

六、WNA 大幅調降 2013 年對於日本機組之預測，因福島事件之後，日本核電業不確定性大增，故調降裝置容量預測。並預測自 2014 年起至 2016 年將陸續有機組重新啟動運轉，最樂觀之狀態可能會有接近 40 部機組重啟，最不樂觀的狀況則可能僅剩 20 至 25 部左右。目前日本的核能工業強調以多重的方式強化核電廠之安全性，成為世界最高標準，並且持續要求能達到高於法規規範之標準，並積極向各國學習，以避免第二次福島事件之發生。對於重新啟動機組的標準，首先需滿足新版核能安全規定，且日本已意識到核能的延後啟動或持續不使用核能對社會之影響。因此，即使在核電尚未重啟之前，也要對電廠的延役工作、取代老舊電廠及維持核燃料循環工作進行準備。

七、在中國大陸，核能被列為國家戰略性新興產業，不僅作為一種乾淨且高效率的能源解決方案，並作為科技創新與經濟成長的動力，包括：改善能源結構、確保能源供應、因應氣候變化、加速科技創新、推動產業升級、提升經濟增長等六大目標。中國大陸核能發展的規劃目標為新建機組須滿足第三代安全標準且多採用 AP1000 壓水式反應器 (Advanced Passive 1000 PWR, AP1000) 為主。截至 2013 年 6 月，中國大陸運轉中之機組共有 17 部，興建中的機組有 30 部；預計於 2020 年時，共有 58GW 商轉，另有 30GW 的機組持續興建中。中國大陸目前建造中的機組約佔了世界的 40%，而其核能發電約只佔了總發電量的 2%，以中國大陸高碳排放量的背景來說，核能發電為其增加談判籌碼的一項選擇。此外，中國大陸以結合國際合作投資加以學習建立自主化之核能機組，未來，中國大陸除了是全球最大的核電市場，亦將成為全球核電技術創新的重要基地。

八、過去數年受美國經濟衰退、低價天然氣與電力市場不振之影響，電力需求尚未回復至 2007 年金融危機發生前之水準。2012 年美國天然氣價大量下滑至低於 \$2/MMBtu，而由於在許多電力市場上，價格係由燃氣機組所主導，故電價亦隨之下跌。去(2012)年大部份區域之電價現貨價格達到 10 年來的新低點。這已威脅到許多發電廠之生存經濟條件，當然亦包括部份之核電廠。然而，就某些範圍而言，未來數年可能停機之裝置容量可能取決於聯邦政府與各地區是否能夠正視真正威脅係來自於存在於美國電力市場檯面下之問題，而工業界則必須努力使政府正視能源組合未分散風險、過度依賴天然氣、價格波動風險、供應中斷等問題。美國數個主要市場對於過度依賴天然氣之情形已發出嚴重之警告。如美國新英

格蘭區之電力供應中，來自於天然氣部份超出 50%，造成在 2013 年 1 月至 2 月間，面臨天然氣現貨價格劇烈增加至 \$30/MMBtu 時，被迫調整其電價至 \$250/MWhr~\$260/MWhr (高於此區電力市場一般價格 \$40/MWhr 甚多)，進而威脅其供電之可靠度。除新英格蘭區之外，佛羅里達州依靠天然氣提供電力來源已增加至 70%，在 Crystal River 核能機組停機(除役)後將達更高；在紐約，來自燃氣機組之電力供應亦已由 29%(2000 年)增加至 44%(2012 年)。

九、職除了參加本次年會外，並趁會議空檔與各濃縮服務廠家就本公司即將辦理 2016 年起開始交貨之濃縮服務招標案交換意見，這些濃縮廠家包括美國之 USEC 公司、法國之 AREVA 公司、英國之 URENCO 公司與德國之 NUKEM 公司。職與渠等就長約標案之合約期間、供應內容及價格機制等交換意見，亦就另一為期三年之中短期合約標案之供應數量、價格機制及擔保方式等，廣泛交換意見，渠等均表示將會積極參與投標。