

# 行政院及所屬各機關出國報告

(出國類別：開會)

## 出席第 41 屆世界核能協會(WNA)年會

服務機關：台灣電力公司 燃料處

姓名職稱：任致遠 (806531) 核能工程監 (核燃料組組長)

姓名職稱：張志豪 (117426) 核能工程師

派赴國家：英國

出國期間：105 年 9 月 11 日至 105 年 9 月 18 日

報告日期：105 年 11 月 8 日

# 目 錄

圖目錄 .....	ii
表目錄 .....	iv
壹、 出國緣起與任務 .....	1
貳、 行程紀要 .....	2
參、 工作內容 .....	5
一、 全球核能趨勢 .....	7
二、 和諧的能源發展計畫(Harmony Program).....	15
三、 亞洲核電國家的積極佈局 .....	20
四、 核燃料原料鈾市場 .....	26
五、 核燃料濃縮服務市場 .....	33
肆、 感想與心得 .....	37
附件資料 .....	40
參考資料 .....	40

## 圖目錄

圖 1. WNA 年會高階企業領袖座談.....	4
圖 2. WNA 的和諧能源發展計畫.....	6
圖 3. 全球核能機組統計資料.....	7
圖 4. 全球核能工業 2015 年績效指標.....	9
圖 5. 全球各年各區域核能發電量.....	9
圖 6. 核能機組裝置容量預測.....	14
圖 7. 全球發電結構 IEA WEO2014.....	15
圖 8. 各種發電方式的溫室氣體排放比較.....	16
圖 9. IEA 2DS 情境下，預估未來全球發電結構.....	16
圖 10. WNA Harmony 核能發展規劃.....	18
圖 11. WNA 核能機組新建速率目標規劃.....	18
圖 12. 平均新建核能機組工期統計.....	19
圖 13. CNNC 的核能事業版圖.....	21
圖 14. 中國大陸首部華龍一號在福清核能基地的建造.....	21
圖 15. CNNC 的核燃料元件生產.....	22
圖 16. CNNC 的核燃料工業園區投資計畫.....	22
圖 17. 南韓核能裝置容量及發電占比.....	23
圖 18. 南韓各種發電方式的碳排放比較.....	24

圖 19. 南韓核能機組新建計畫未來預估數量及裝置容量 .....	24
圖 20. SWAKOP 所生產鈾料主要供應 CGN 的核能機組分佈 .....	26
圖 21. 湖山鈾礦名目開採產能與 U3O8 產量 .....	27
圖 22. 湖山鈾礦開採及生產計畫歷程表 .....	27
圖 23. 過去 70 年內鈾料供應與市場價格趨勢關係 .....	28
圖 24. 現階段與 1990 年代的鈾料供需情況比較 .....	29
圖 25. Paladin 成本最佳化 .....	30
圖 26. Paladin 的 Langer Heinrich 礦區表現 .....	30
圖 27. UxC 對於全球鈾料需求 2016 年與 2011 年的比較 .....	31
圖 28. Cameco 部份現有礦區決定減產 .....	32
圖 29. Cameco 將專注於非傳統核電國家的銷售市場 .....	32
圖 30. LEU 庫存與石油庫存的成本比較 .....	33
圖 31. URENCO 的濃縮廠及裝置容量 .....	34
圖 32. URENCO 過去 3 年的營運表現及財務情形 .....	35
圖 33. 濃縮服務長約市場的歷年價格 .....	35

## 表目錄

表 1. 新建核能機組一覽表 (2015 年) .....	10
表 2. 除役核能機組一覽表 (2015 年) .....	10
表 3. 各情境下全球核能機組數量及裝置容量 (預估 2035 年) .....	14
表 4. 全球各區域發電方式占比 (2014 年) .....	19
表 5. 全球各區域核能機組建廠規劃時程 (2016 年) .....	19

## 壹、 出國緣起與任務

世界核能協會(WNA, World Nuclear Association)於今(2016)年9月14日至16日，循往例在該協會總部英國倫敦召開第41屆年會，同時，會前於9月12日至14日召集各工作小組會議(Working Group Meeting)。與會者分屬各國政府原子能機構、核能法規管制單位、電力公司、核能公司、核燃料供應商、核能顧問公司等等，會中除進行各國核工業發展、核能展望，核燃料循環市場供需狀況與未來趨勢發展預測，核能法令與執照申請規範等議題探討，並邀請專家學者進行座談，針對目前核能發展分享其見解。

本公司除身為該協會會員，有義務出席該會議參與協會事務討論外，並肩負起我國核能機組所需填換核燃料安全供應之重責，為能適時、適質、適量採購質高價廉之核燃料，透過每次與會，積極與其他會員保持交流互動與情報聯繫，蒐集並瞭解最新之第一手市場資訊及其他電力公司之發展與供應商之動態。

日本福島事故2011年發生後，至今已屆滿逾5年，在此一階段，日本核能機組的重啟將做為全球核能工業的指標，雖然日本政府相當積極地支持，但面臨地方政府與民眾的反對與抗爭，核能復甦之路仍有好長一段路要走；另一方面，全力發展核能工業的中國大陸，從核能機組的設計及研發、反應器組件的生產等重工業的發展與配合、新建機組的自主建造、核燃料循環各階段的供應與生產，甚至是海外輸出核能機組與核燃料，顯示出未來核能發展的趨勢、成敗興衰，亞洲將成為全球核工業界關注的亮點。

同時，目前本公司正辦理核三廠所需填換核燃料之製造服務採購，透過與核燃料專業顧問公司之意見交換與資訊蒐集，期能藉此取得更符合本公司機組特性、需求的市場參考價格，以作為採購之依據。

## 貳、行程紀要

時間	工作內容
9/11 (日)	往程：台北—英國倫敦
9/12 (一)	世界核能協會工作小組會議
9/13 (二)	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Fuel Report Working Group and Sup-groups</li> <li>➤ Security of the International Fuel Cycle Working Group</li> </ul>
9/14 (三) 09:00~12:30	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Transport Working Group</li> <li>➤ Fuel cycle Plenary Session</li> </ul>
9/14 (三) 16:00~18:15 18:15~21:00	世界核能協會年會 Registration Exhibition Launch Welcome Reception
9/15 (四) 09:00~09:30 09:30~11:30 11:30~12:00	世界核能協會年會 Opening Addresses Feature Presentations: <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ The Nuclear Energy Future-Promise and Challenges</li> <li>➤ Brief Introduction of CNNC and its Nuclear Power &amp; Nuclear Fuel Supply</li> <li>➤ Nuclear Industry's Response to Energy Environment Changes-Korea's Experience</li> <li>➤ Canada's Nuclear Industry and Sustainable Energy</li> </ul> New Build Hot Seat Interview <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ John Barrett, Horizon Nuclear Association</li> <li>➤ Phumzile Tshelane, South African Nuclear Energy Corporation</li> </ul>

<p>14:00~15:15</p> <p>15:15~16:15</p> <p>16:15~17:15</p>	<p>Uranium Mining:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Swakop Uranium-Uranium mining at Husab</li> <li>➤ Energy Fuels-Global Uranium Supply Risks</li> <li>➤ Paladin Energy-Adapting to the downturn in uranium</li> <li>➤ Cameco-Desperate Times Call For...</li> </ul> <p>New Build Hot Seat Interview</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Alexander Lokshin, Rosatom State Atomic Energy Corporation</li> <li>➤ Tom Samson, NuGeneration</li> </ul> <p>Uranium Enrichment:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Centrus Energy-Enriched Uranium as a Strategic Resource</li> <li>➤ Urenco-Enriching the future</li> <li>➤ UxC- Paradigm Shift Russia's New Approach to Enrichment</li> </ul>
<p>9/16 (五)</p> <p>09:00~10:00</p> <p>10:00~10:15</p> <p>10:15~10:35</p> <p>11:00~12:15</p> <p>12:15~12:30</p>	<p>世界核能協會年會</p> <p>Feature Presentations:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Nuclear Power in Brazil and Latin America</li> <li>➤ Frédéric Lelièvre, AREVA NP</li> <li>➤ Ali Akbar Salehi, Atomic Energy Organization of Iran</li> </ul> <p>New Build Hot Sear Interview</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Mingguang Zheng, State Nuclear Power Technology Corporation (China)</li> </ul> <p>Feature Presentations:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Vincent de Rivaz CBE, EDF Energy</li> </ul> <p>Regulation and Licensing: Moderator: Peter Prozesky, World Association of Nuclear Operators</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Regulation and Licensing-Next Steps</li> <li>➤ Licensing SMRs</li> <li>➤ Design Basis</li> <li>➤ Harmonisation of Nuclear Regulation and Licensing</li> </ul> <p>New Build Hot Sear Interview</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ José Emeterio Gutiérrez, Westinghouse</li> </ul>

<p>14:00~14:15</p> <p>14:15~15:45 15:45~16:00</p> <p>18:45~23:30</p>	<p>New Build Hot Sear Interview</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Attila Aszódi, Budapest University of Technology and Economics Institute of Nuclear Techniques</li> </ul> <p>High Level Panel</p> <p>Closing Address</p> <p>Gala Dinner and Dance</p>
<p>9/17 (六)</p> <p>9/18 (日)</p>	<p>返程：英國倫敦—台北</p>



圖 1. WNA 年會高階企業領袖座談

## 參、工作內容

世界核能協會(World Nuclear Association, WNA)為全球核能工業界中，最重要且非營利的民間國際組織，其目的在推廣全世界核能的和平用途使用，強化核工業營運發展及促進會員間商業交流，主要關注核能發電及核燃料循環各階段，包含原料鈾(礦產)、轉化與濃縮服務、燃料製造與使用，核物料運輸及用過核燃料最終安全處置等。其所舉辦之會議為全球核能工業最重要的論壇及會議，亦為各會員相互交換經驗及取得資訊之管道，目前會員公司共 173 個，分別來自於全球 35 個國家，會員遍及主要反應器供應商、核能工程、建造與研發機構、放射性廢棄物管理等領域，並可提供核物料運輸、法律、核子保險、經銷代理及貿易、工業分析與財務融資等各領域之跨國服務。所屬電力公司之發電量占全球核能發電之 90% 以上；核燃料方面，會員公司所生產之原料鈾、轉化、濃縮及燃料製造服務，將近包括全世界之所有產量，對於核能工業，尤其是核燃料循環之影響極為深遠。

2016 年召開的第 41 屆年會，與往例相同在 WNA 總部英國倫敦舉行，吸引全球來自 33 個國家的 200 多個公司，超過 600 位各核能工業的專家及企業領袖代表與會，同時也有許多非核能業界，但體認核能對於確保全球永續能源發展及環境保護之重要地位的專家學者參加。

因應 2015 年 12 月召開第 21 屆聯合國氣候變遷高峰會(COP21)所議定之巴黎協議，WNA 提出了所謂和諧的能源發展計畫(Harmony Program)，考慮到要想達成降低全球暖化問題的目標，必須部署多樣性的低碳能源技術(low-carbon technologies)且和諧共存，如再生能源、化石燃料的碳捕獲及封存等，尤其核能更是不可獲缺，以確保可靠、低廉及潔淨的能源供應，並在人類社會發展與自然環境保護之間，尋找最佳的平衡點。目標是在 2050 年前新增 1000 GWe 的核能機組裝置容量，並使核能發電占比達全球總發電量的 25%。

此外，隨著中國大陸核能事業各方面的積極興起，連帶著南韓的核電工業及哈薩克的鈾礦計畫，亞洲地區國家的動向，在全球核能工業中愈發

重要，尤其是日本核能機組在福島事件後，除符合更嚴謹的新核能安全規範要求外，通過地方政府的檢視及民眾的反對聲浪，是否能夠陸續順利重啟，更將成為核能發展趨勢的指標之一。

茲將本次 WNA 年會所探討之議題，就各項較具參考價值之主題彙整並區分，各項重點內容摘要如下：

- 一、全球核能發展趨勢
- 二、和諧的能源發展計畫(Harmony Program)
- 三、亞洲核電國家的積極佈局
- 四、核燃料原料鈾市場
- 五、核燃料濃縮服務市場

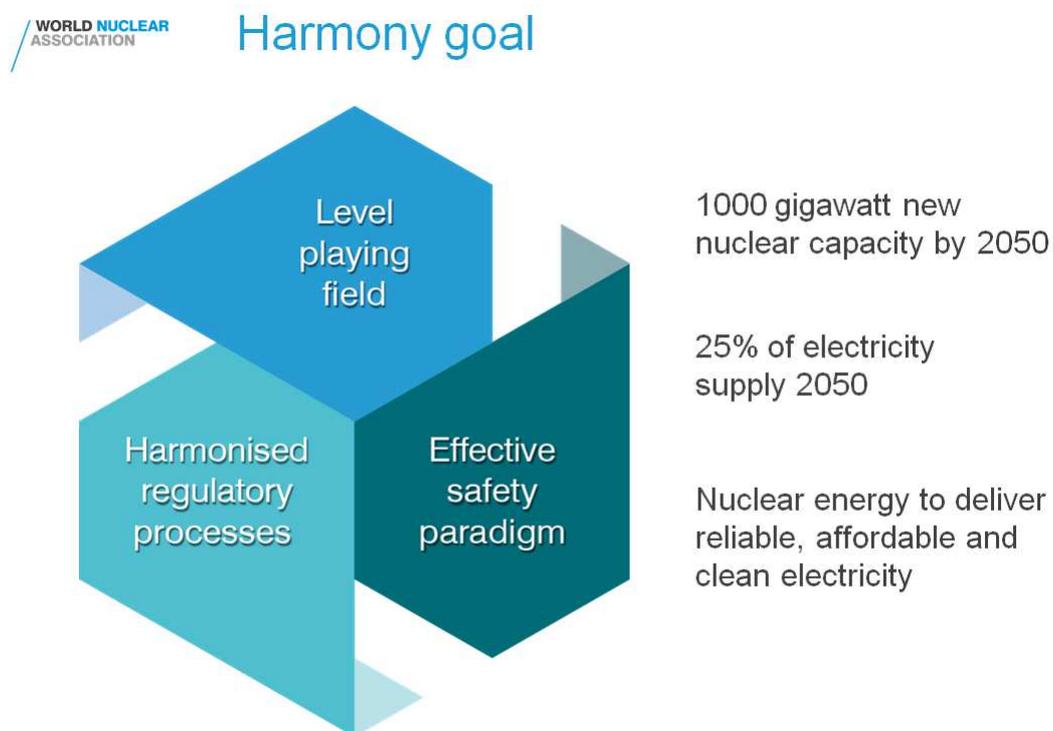


圖 2. WNA 的和諧能源發展計畫

## 一、全球核能趨勢

根據國際原子能總署 IAEA (International Atomic Energy Agency)的 PRIS (Power Reactor Information System)資料顯示，截至 2016 年 8 月，全球 31 個核電國家共有 449 部核能機組可供運轉使用，總裝置容量達 390,000 MWe，所提供可靠、穩定且低碳排放的基載電力，佔全球發電量約 11%。

同時共有 60 部核能機組分別於 14 國興建，並有 18 個國家正考慮新建核能機組，超過 160 部機組新建計畫在規劃中。目前全球超過 60% 的人口居住在核能供應國家，預計在 2030 年將提升至 70%（約由目前的 43 億至未來的 61 億），儘管德國等少數國家已經決定全面廢除核能使用，但核能技術的推展仍持續進行當中。

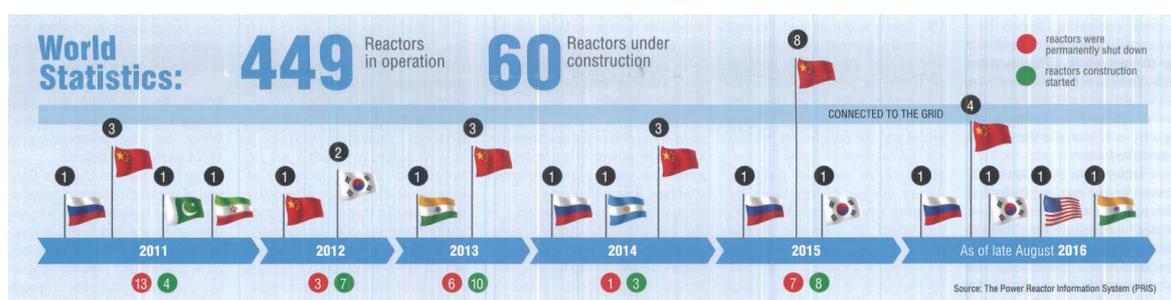


圖 3. 全球核能機組統計資料

現今核工業界經過整合及發展後，共有 11 個可提供完整的核燃料循環技術與服務的大型企業，這些供應商分別是：

- AREVA（法國）、
- Candu Energy（加拿大）、
- 中國核工業集團（簡稱中核集團）（中國大陸）  
(CNNC, China National Nuclear Corporation)、
- 中國廣核集團（簡稱中廣核）（中國大陸）  
(CGN, China General Nuclear Power Group)、
- 國家電力投資集團（簡稱國電投）（中國大陸）  
(SPI, China's State Power Investment Corporation)、

- GE-Hitachi (美國) 、
- Korea Electric Power Corporation (韓國) 、
- Mitsubishi Heavy Industries (日本) 、
- Nuclear Power Corporation of India (印度) 、
- Rosatom State Nuclear Energy Corporation (俄羅斯) 、
- Toshiba/Westinghouse (日本/美國)

此外，全球核燃料供應鏈(supply chain)中，通過美國機械工程師學會(American Society of Mechanical Engineers, ASME)對核能級認證(N-type certificate)的公司共有 340 家，相互競爭的壓力同時促進了製造組裝的在地化、企業合資及跨國合作，尤其是中國大陸、韓國等經由技術移轉而發展其本土化之核燃料製造供應能力，已可完全自主生產並輸出至其他國家，各主要供應商如 AREVA、GE 及 Westinghouse 也藉由組織重組或釋出股權吸引注資等國際整合策略，強化了其跨國經營及供應能力。

在核能事業全球化發展之下，依照 WNA 2016 的 The World Nuclear Supply Chain-Outlook 2035 報告中的參考情境(reference scenario)預估，新建機組對於核能工業供應鏈的產值，包含核能設備與零組件等的需求，在 2025 年將有可能達到每年約 240 億至 300 億美金。

#### (一) 2015 年的核能績效指標：

WNA 2016 年的世界核能機組績效報告指出，2015 年的核能績效是破紀錄的一年，全球核能機組平均容量因數（扣除日本的影響後）為 81.7%，2015 年發電量為 2441 TWh（24410 億度電），約佔全球發電量 10%。

2015 年共有 10 部新建核能機組併入電網發電，平均建廠工期為 73 個月，裝置容量合計為 9499 MWe；另有 3 部機組進行功率提升共 376 MWe，總計 2015 年新增核能機組發電裝置容量為 9875 MWe。



Nuclear industry performance indicators, 2015

**81.7%**

Global average capacity factor (excluding Japan)

**2441 TWh**

Electricity generated in 2015

**10**

New reactors brought online

**9875 MWe**

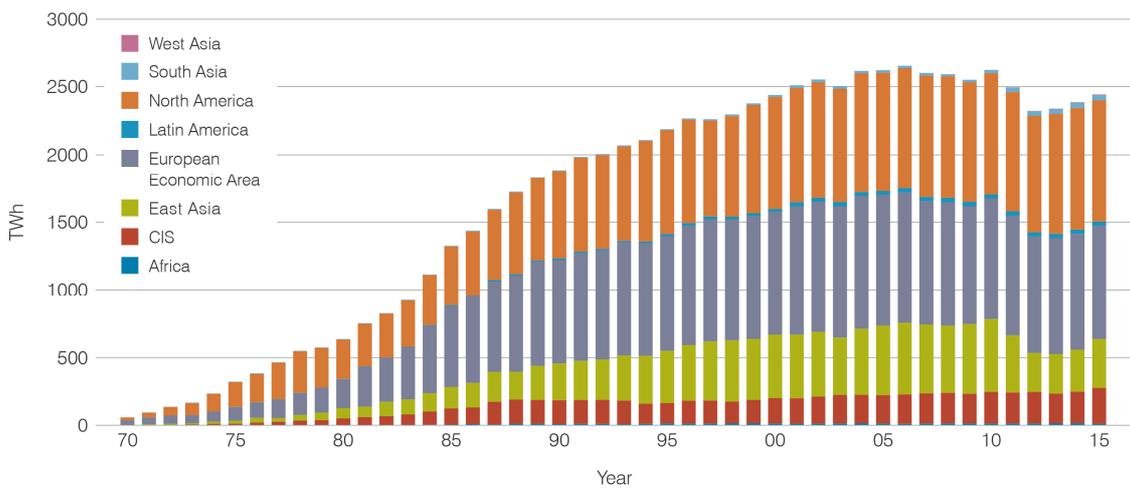
Net increase in generating capacity

**73 months**

Average construction period for new reactors starting in 2015

圖 4. 全球核能工業 2015 年績效指標

Nuclear Electricity Production



Source: IAEA PRIS

圖 5. 全球各年各區域核能發電量

新建核能機組中，以中國大陸為首分別是方家山 2 號機 (Fangjiashan #2)、福清 2 號機(Fuqing #2)、紅沿河 3 號機(Hongyanhe #3)、寧德 3 號機(Ningde #3)、陽江 2 號及 3 號機(Yangjiang #2 & #3)、昌江 1 號機(Changjiang #1)及防城港 1 號機(Fangchenggang #1) 等 8 部，加上南韓 Shin Wolsong #2 及俄羅斯 Beloyarsk #4 各 1 部。

表 1. 新建核能機組一覽表 (2015 年)

Reactor	Capacity (MWe)	Start of construction	Grid connection	Type of reactor
<b>China</b>				
Fangjiashan 2	1,020	Jul 2009	Jan 2015	PWR
Fuqing 2	1,020	Jun 2009	Aug 2015	PWR
Hongyanhe 3	1,020	Jan 2009	Mar 2015	PWR
Ningde 3	1,020	Jan 2010	Mar 2015	PWR
Yangjiang 2	1,020	Jun 2009	Mar 2015	PWR
Yangjiang 3	1,020	Nov 2010	Oct 2015	PWR
Changjiang 1	610	Apr 2010	Nov 2015	PWR
Fangchenggang 1	1,020	Jul 2010	Oct 2015	PWR
<b>Korea Republic</b>				
Shin Wolsong 2	960	Sept 2008	Feb 2015	PWR
<b>Russia</b>				
Beloyarsk 4	789	Jul 2006	Dec 2015	FBR

Source: World Nuclear Association

除役的部分，則有 7 部核能機組在 2015 年永久停機(shut down permanently)，分別是德國的 Grafenrheinfeld 及英國的 Wylfa #1，各自因政治因素及經濟因素，不再繼續運轉，以及日本的 Genkai #1、Mihama #1 & #2、Shimane #1、Tsuruga #1 等 5 部，在福島事件後即已停機，至 2015 年方正式宣布除役的機組。

表 2. 除役核能機組一覽表 (2015 年)

Reactor	Capacity (MWe)	Electricity generated (TWh)	Date of closure	Type of reactor
<b>Germany</b>				
Grafenrheinfeld	1,345	333.0	Jun 2015	PWR
<b>Japan</b>				
Genkai 1	529	127.7	Mar 2015	PWR
Mihama 1	320	60.1	Mar 2015	PWR
Mihama 2	470	101.6	Mar 2015	PWR
Shimane 1	439	101.9	Mar 2015	BWR
Tsuruga 1	341	80.1	Mar 2015	BWR
<b>UK</b>				
Wylfa 1	490	123.2	Dec 2015	GCR
Total	3934			

Source: World Nuclear Association

## (二) 全球核能工業亮點：

全球核工業界在歷經福島事件的衝擊，頹靡之後幾經整合的結果，已經開始慢慢復甦，儘管速度緩慢，但亞洲地區核能機組的新建數量，尤其是中國大陸，是過去 20 年來未曾有過的巔峰。

隨著日本核能機組的重啟，以及新技術的研究與發展（如小型核能機組 SMRs, Small Modular Reactors）、數個大型核能新建合作計畫的推動，及西方國家民眾對於核能的正面態度轉變，為核工業的發展帶來一線曙光。

1. 北美地區：由於北美地區頁岩氣(shale gas)礦床持續地發現及開採，降低了對於燃煤的使用及對於進口能源的依賴，影響了電力市場的價格，同時造成了美國核能電廠的衝擊，此外負面政策及市場機制的影響，使得部份核能機組因為經濟考量而被迫提前除役。然而，美國聯邦政府為降低二氧化碳排放，而推出的潔淨能源計畫(Clean Power Plan 2015)，承諾了提供足夠基金作為優先發展 SMRs 為未來能源規劃使用。

此外，加拿大的 Ontario 省政府與 Bruce Power 電廠，於 2015 年達成 Bruce #3~#8 等 6 部機延役 30 至 35 年不等的協議，並於 2016 年正式生效。

2. 南美地區：阿根廷的第 3 部核能機組 Atucha #2，於 2015 年 2 月全功率運轉發電，使其核電占比達到 10%，除其自行設計僅 25MWe 的 CAREM 整合式小規模原型(prototype)機組，於 2014 年開始建造外，阿根廷核電公司與中核集團於 2015 年簽訂於阿根廷興建第 4 及第 5 部機組的合作協議，第 5 部機組規劃將採用中國大陸自主設計的華龍一號(Hualong One)。

另一個南美洲的核電國家，巴西，第 3 部核能機組 Angra #3 停建後復工，目前由 AREVA 負責建造，此外，巴西核電公司亦與中核集團簽訂合作備忘錄，積極尋求新建機組的可能。

3. 歐洲：福島事件後決定全面廢核的德國，將如期在 2022 年達成目標，然而由於再生能源的補貼制度，使得來自德國與其鄰近國家大量的風能與太陽能，造成歐洲電力現貨市場價格的影響，核能機組被迫進行負載追隨(load-following)，在風能及太陽能發電尖峰時必須停機，無法正常運轉，營運更加困難。新建機組的狀況在歐洲可說是命運乖舛，建造中的 4 部機組，斯洛伐克的 Mochovce #3 & #4 (1987 年開始建造、1993 年停工、2009 年復建)、芬蘭的 Olkiluoto #3 (2005 年開始建造) 及法國的 Flamanville #3 (2007 年開始建造)，至今仍無法商轉；儘管如此，芬蘭的 Hanhikivi #1 及英國的 Hinkley Point C 正在積極推展中，此外，保加利亞、捷克、匈牙利、波蘭及羅馬尼亞都有意新建核能機組。  
以核能發電為主力的法國，共有 58 部核能機組，新的能源政策「邁向綠色成長的能源轉型法」通過後，承諾將在 2025 年前，逐漸將目前 75% 的核能發電占比調降為 50%。  
同樣為核能技術輸出國的俄羅斯，除了 VVER V-320 設計的壓水式反應器 Rostov #3 及 BN-800 機型的快中子反應器 Beloyarsk #4，分別於 2015 年商轉與併網外；俄羅斯也積極出口反應器，預計在中國、匈牙利、印度及土耳其興建，其含燃料供應、再回收處理及訓練課程的整合式配套包裝，吸引了像是約旦、奈及利亞與越南等新興核電國家，及哈薩克與南非等國的興趣。
4. 亞洲：在政府的全力支持下，中國大陸的核能計畫持續而有規模地推動中，2015 年除了併入電網的 8 部核能機組外，更開始了福清 5 號及 6 號機(Fuqing #5 & #6)、紅沿河 5 號及 6 號機(Hongyanhe #5 & #6)的新建計畫；根據中國大陸國務院發佈的「能源發展戰略行動計畫(2014-2020 年)」及「國民經濟和社會發展第十三個五年(2016-2020 年)規劃綱要(簡稱十三五規劃綱要)」，為了改善空氣品質及降低溫室氣體排放，將減少對燃煤使用的依賴，改採用潔淨能源，目標在 2020 年核能

機組裝置容量達到 58 GWe，並有 30 GWe 正在興建中，新核能機組規劃除了在大陸東部沿海進行外，更同時考慮內陸建造的可行性。值得一提的是，首部採用 Westinghouse 公司 AP-1000 機組型式設計的三門 1 號機(Sanmen #1)，及首部採用 AREVA 公司 EPR 機組型式設計的台山 1 號機(Taishan #1)，預計將陸續在 2016 下半年及 2017 上半年完工；而中國大陸自主設計的華龍一號，採用在福清 5 號及 6 號機的新建計畫，最快也將在 2019 及 2020 年底開始營運。

日本核能機組重啟的情況，目前通過日本原子力規制委員會(Nuclear Regulation Authority, NRA)安全審查共 5 部機，分別是關西電力的高濱 3 號及 4 號機(Takahama #3 & #4)、九州電力的川內 1 號及 2 號機(Sendai #1 & #2)、四國電力的伊方 3 號機(Ikata #3)，除高濱 2 部機組重啟後，因民眾及地方政府反對，而做出假處分判決被迫停機外，其他 3 部機組已正常運轉，但要想達到日本能源政策在 2030 年再生能源占比達 22%~24%、核能占比達 20%~22%，除了日本政府的推動以外，還必須要先獲得地方政府及民眾的支持。

韓國水力與核能電力公司於 2015 年底開始運轉首部 APR-1400 反應器，此機型設計也使用在韓國與阿聯酋合作，共 4 部核能機組的 Barakah 新建計畫中，目前已全數動工建造，預計將在 2020 年全部完成。

5. 非洲：南非政府在 2015 年底批准裝置容量 9600 MWe 的核能機組新建計畫；而埃及的 El Dabaa 核能機組新建計畫，已經與俄羅斯達成協議，將由 Rosatom 負責建造。
6. 大洋洲：儘管澳洲是全球最大的原料鈾供應國之一，但自 1970 年代以來，從來沒有考慮過核能計畫，惟 2016 年 5 月核燃料循環皇家委員會(Nuclear Fuel Cycle Royal Commission)考量可行性及可發展性後，初步評估建議可以考慮在南澳大利亞興建核廢料貯存場，接收各國的放射性廢棄物，以增加收益。

(三) 未來核能發展趨勢預測：

WNA 於 The World Nuclear Supply Chain-Outlook 2035 報告，就可負擔性(affordability)、可利用性(availability)、可取得性(accessibility)及可接受性(acceptability)等 4 個面向，考慮能源政策與經濟趨勢的相互影響，做出未來核能發展反映在核能機組裝置容量的參考情境(Reference)及高案(Upper)、低案(Lower)評估。

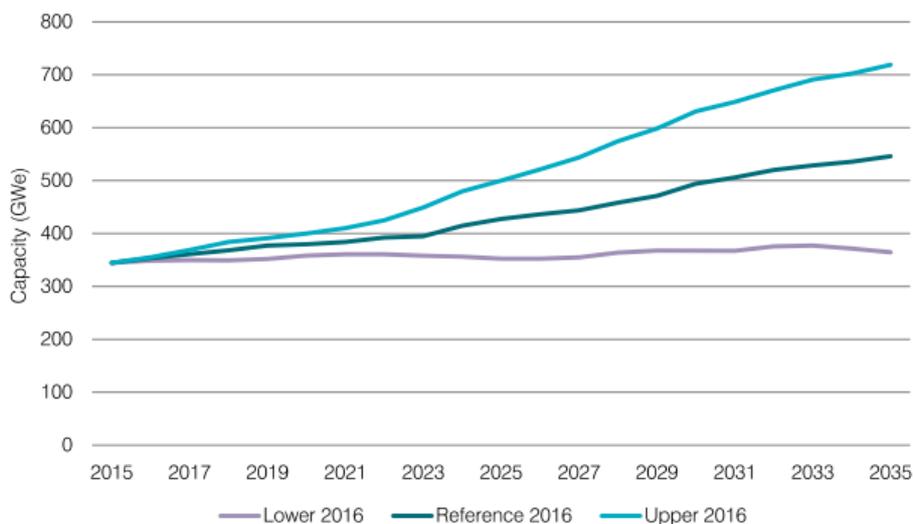


圖 6. 核能機組裝置容量預測

參考情境中，預估至 2025 年全球核能機組數量將有 462 部、2035 年則有 547 部，裝置容量年成長率約 2.3%；至於高案及低案，2035 年機組數量各預估為 720 部及 362 部，裝置容量年成長率則各約為 3.75% 及 0.3%。

表 3. 各情境下全球核能機組數量及裝置容量（預估 2035 年）

Region	Lower case		Reference case		Upper case	
	GWe	Reactors	GWe	Reactors	GWe	Reactors
North America	82.8	79	114.3	111	122.2	119
Latin America	3.4	4	10.7	11	16.8	17
European Economic Area <sup>45</sup>	62.8	56	93.6	87	139.9	134
Commonwealth of Ind.States	39.7	39	53.2	54	62.7	63
East Asia	147.7	143	217.2	211	281.9	274
West Asia	10.8	9	25.5	23	33.2	30
South Asia	14.1	29	22.8	41	45.6	67
Southeast Asia & Pacific	1.2	1	4.3	4	8.4	8
Africa	1.9	2	4.9	5	8.2	8
<b>World</b>	<b>364.4</b>	<b>362</b>	<b>546.5</b>	<b>547</b>	<b>718.9</b>	<b>720</b>
of which, OECD area	185.7	172	271.9	257	344.9	321

Source: World Nuclear Association, 2016, Nuclear Capacity Scenario Update

## 二、和諧的能源發展計畫(Harmony Program)

由於 2015 年在巴黎舉行的第 21 屆聯合國氣候變化綱要公約(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)下的締約國大會(Conference of Parties, COP)，簡稱 COP21，針對造成全球暖化的氣候變遷議題，達成巴黎協議(Paris Agreement)，將全球平均氣溫上升幅度控制在與工業革命前相比的 2°C 以內，並積極以 1.5°C 為努力目標；對應到國際能源總署(IEA, International Energy Agency)，為了使全球溫升限制在 2°C 以內的水平，大氣中二氧化碳濃度必須控制在 450 ppm 以內，稱為 450 情境(450 scenario)，這意味著必須減少對化石燃料的依賴，而需採用環保、經濟且可靠的低碳能源。

### (一) 能源結構的改變

根據 IEA 世界能源展望 World Energy Outlook 2014 (WEO2014)，報告分析，目前電力來源主要還是由化石燃料供應，同時伴隨著大量溫室氣體的排放，然而隨著開發中及未開發國家對於電力的需求日趨增加，要想達成前述減緩全球暖化效應的目標，必須從能源結構開始改變，發展低碳能源技術，採用再生能源、減少化石燃料使用，並輔以碳捕獲及碳封存技術，管控二氧化碳排放。

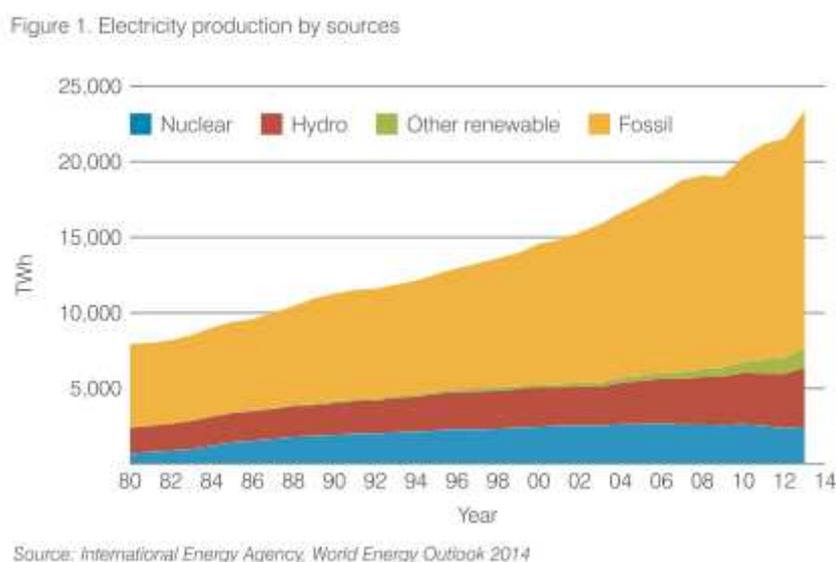


圖 7. 全球發電結構 IEA WEO2014

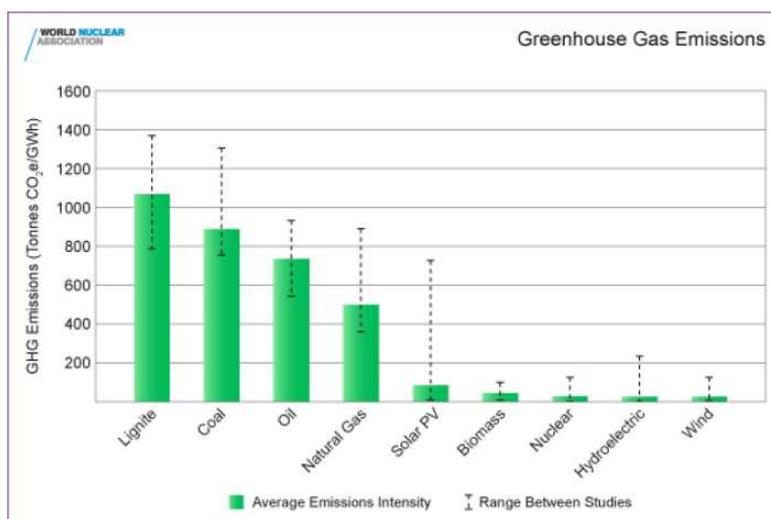


圖 8. 各種發電方式的溫室氣體排放比較

然而，在兼顧能源的可靠性及經濟性下，核能發電是無法被忽略的潔淨能源。在 IEA 的評估下，要想控制全球溫升在 2°C 以內，其 2 Degree Scenario (2DS 情境) 認為核能發電在 2050 年的發電量，必須增加至 7000 TWh (70000 億度電)，約為當時全球電力供應占比的 17%；WNA 則提出不同觀點，在考慮再生能源及低碳技術未必能即時補足的前提下，其 Harmony 計畫認為應該將核能發電占比目標設定更高一些，在 2050 年達到 25%，即必須再增加 1000 GWe 的新建核能機組裝置容量。

Figure 2. International Energy Agency 2°C Scenario for electricity generation

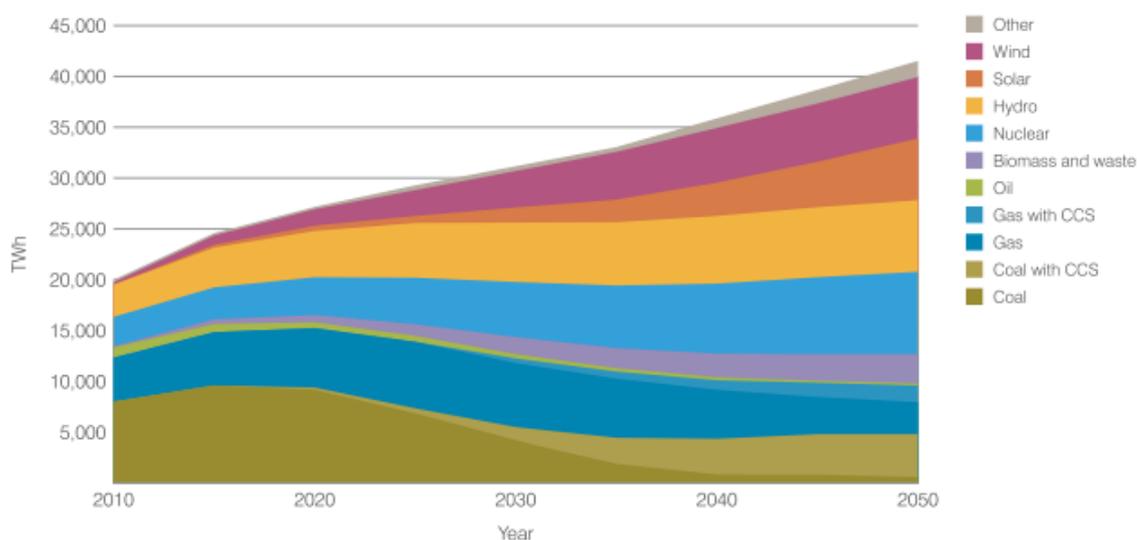


圖 9. IEA 2DS 情境下，預估未來全球發電結構

## (二) WNA 的和諧計畫(Harmony Program)

WNA 的 Harmony 計畫提出更積極的核能發展藍圖，前提是政府與公眾的支持，以及管制機構基於核能安全建立標準化規範等，核能工業在此共同合作下方能順利推展，其架構之關鍵如下：

### ➤ Level playing field：公平的競爭機制

目前電力價格由於天然氣價格低廉及再生能源補貼，使得市場大亂，能源政策未能與環保政策同調，在考慮化石燃料外部成本、碳排放及碳稅等問題，應參考美國環保署(EPA, Environmental Protection Agency)的潔淨能源計畫(Clean Power Plan)，針對所有低碳技術建立公平機制，不僅評估環保的效益，同時考慮到發電可靠度及輸電成本，利用長期電力價格指標(long-term price signals)及容量支付(capacity payments)，以確保在自由化電力市場中的穩定供應安全；

### ➤ Harmonised regulatory processes：和諧的管制程序

提高標準化(standardisation)機制，使全球核能機組設計規範及管制標準互相達成協調，以加速核能機組設計及建廠的執照申請，同時確保核能安全管制規範有效率(efficiently)且有效能(effectively)地運作，並能促進核能業界的國際貿易及推動核能機組設計的創新變革；

### ➤ Effective safety paradigm：核能安全的模範

以公眾利益的角度出發，確保發電安全才是最有利的，比較各種發電方式的危害致死率，儘管考慮核子事故的影響，核能仍然是相對安全的，然而確保全球核能安全，加強核能技術發展及妥善進行運轉管理，仍舊是核工業界的首要工作。

要想達到 2050 年全球核能發電占比達 25%的目標，同時考慮新建機組規劃及現有機組除役時程，核能機組裝置容量必須至少增加 1000 GWe；

## Nuclear energy should deliver more: Harmony goal is 1000 GW

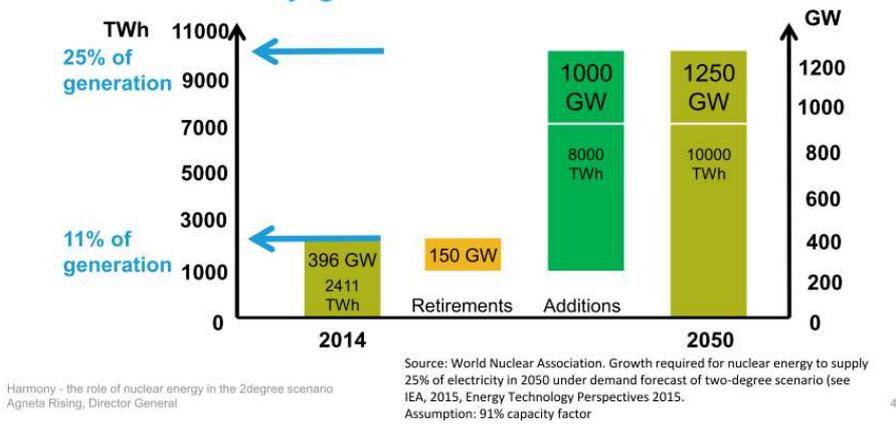


圖 10. WNA Harmony 核能發展規劃

依照 WNA 新建核能機組規劃，2016 至 2020 年間，每年加入 10 GWe (共 50 GWe)、2021 至 2025 年間，每年加入 25 GWe (共 125 GWe)、2026 至 2050 年間，每年加入 33 GWe (共 825 GWe)，合計在 35 年內，能夠增加 1000 GWe。

Figure 3. Nuclear grid connection rates required to meet the Harmony target of 1000 GW of new build by 2050

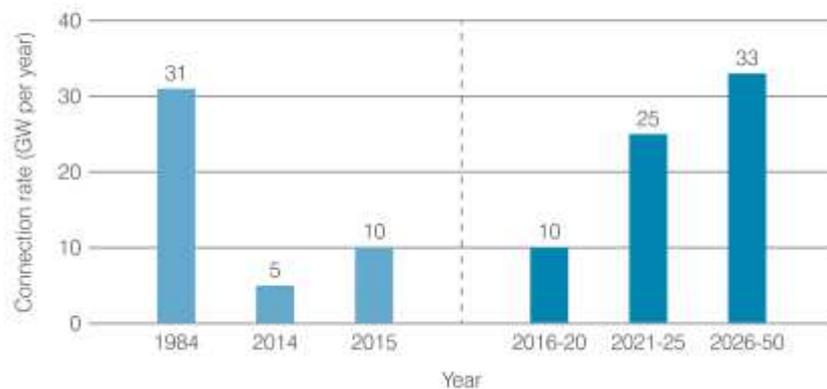
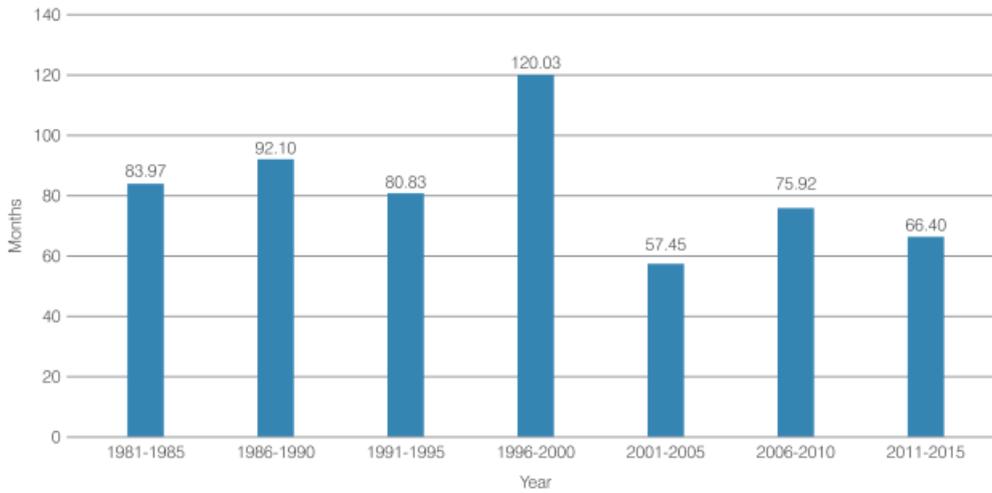


圖 11. WNA 核能機組新建速率目標規劃

依照 1980 年代曾經核能興起的建設規模，只要有政策的支持，搭配資金的投入，這樣的規劃並非不可能，尤其隨著新建核能機組技術的進步，平均建廠工期壓縮在 5 至 6 年內，對於核能發電占比較低的亞洲、非洲及拉丁美洲等地，能夠快速發展有效率且具經濟效益的發電方式是有相當誘因的。

Figure 11. Median construction times for reactors since 1981



Source: IAEA PRIS

圖 12. 平均新建核能機組工期統計

表 4. 全球各區域發電方式占比（2014 年）

Table 1.1: Electricity generation by fuel type and region in 2014, %

Region	Thermal	Hydro	Nuclear	Renewable	Total
North America	64	14	19	3	100
Latin America <sup>7</sup>	48	49	2	1	100
Western Europe <sup>8</sup>	47	18	25	10	100
Eastern Europe <sup>9</sup>	64	17	18	1	100
East Asia	74	18	5	3	100
Middle East & South Asia	86	10	2	2	100
Southeast Asia & Pacific	86	9	0	5	100
Africa	80	17	2	1	100
<b>World</b>	<b>67</b>	<b>18</b>	<b>11</b>	<b>4</b>	<b>100</b>

Source: IAEA, 2015, *Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the period up to 2050*, Table 9.

表 5. 全球各區域核能機組建廠規劃時程（2016 年）

Table 1.2: Nuclear power reactors by region, number of reactors and capacity (as of 1 July 2016)

Region	Operable		Under construction		Planned	
	Reactors	GWe	Reactors	GWe	Reactors	GWe
North America	119	113.4	4	4.5	8	8.7
Latin America	7	5.0	2	1.3	2	1.9
European Economic Area <sup>14</sup>	133	122.8	4	4.1	19	22.0
CIS <sup>15</sup>	51	39.5	10	8.8	30	27.7
East Asia	107	98.0	28	32.2	59	67.7
West Asia <sup>16</sup>	1	0.9	4	5.4	8	8.3
South Asia	24	6.0	9	5.6	27	25.2
Southeast Asia & Pacific	0	0	0	0	5	4.8
Africa	2	1.8	0	0	2	2.4
<b>World</b>	<b>444</b>	<b>387.4</b>	<b>61</b>	<b>61.9</b>	<b>160</b>	<b>168.7</b>
of which, OECD <sup>17</sup>	318	297.9	13	15.2	44	55.1

Source: World Nuclear Association Reactor Database and analysis.

### 三、 亞洲核電國家的積極佈局

民用核能發電自 1970 年代發展以來，一直以美國、獨立國協及歐洲國家等為首，核能工業技術也都主要來自這些國家，然而隨著時代演進，早期的核能機組開始面臨除役，儘管有新建計畫或機組進行設備改善、安全評估後延役，增加數目也僅與能除役打平，預估歐美國家未來幾年的核能機組裝置容量並無太大變化。

反觀亞洲國家，尤其中國大陸與韓國，藉著政府的支持，積極發展核能工業，從核能機組設計、建廠技術、反應器組件等重工業的搭配，核燃料前端循環的各階段配合與供應，亞洲核電國家對於核能工業的影響力指日可待；本次 WNA 年會中國大陸、日本、哈薩克、韓國等公司的大規模參與，更像是為核能工業的蕭條注入了一劑強心針，特別是開場的接待會與年會首日的午餐，分別由韓國水電與核電公司 (KHNP) 及中廣核集團 (CGNPC) 贊助，而由中核集團 (CNNC) 贊助款待與會者的歡送晚宴上，吸引全場注目的川劇變臉與舞獅表演，彷彿宣告著中國大陸即將讓全世界刮目相看。

亞洲核電各國的積極與熱情，從多位來自亞洲國家的主講者，發表其所屬公司未來發展趨勢的簡報內容當中，可見一斑。

#### (一) 中國大陸

代表中核集團 (CNNC) 的首席經濟師 (Chief Economics Officer) Huang Mingang (黃敏剛)，描述 CNNC 是一個驚人而龐大的核能公司，於 1955 年由政府支持成立，目前其下屬的子公司與研究機構超過 100 個、員工超過 10 萬名，業務遍及研發、建造及運轉核能機組，核燃料循環及相關技術應用，是中國大陸主要的核能電廠投資者及經營者，並且能夠供應自主設計的核能電廠及核燃料。

CNNC 從自行研發開始，其後引進法國、美國及俄羅斯的核電技術，藉由技術移轉加以改良並創新設計，其目標明確，就是能夠

成為全球核能機組及核燃料的供應商，目前與中廣核集團共同研發的華龍一號(Hualong One, HPR1000)，屬於中國大陸完全自主化設計，首部機組將使用在中國大陸福建省福清核能基地的福清 5 號、福清 6 號新建機組計畫中，於 2015 年開始建造，並已經與巴基斯坦簽訂輸出協議。



圖 13. CNNC 的核能事業版圖



圖 14. 中國大陸首部華龍一號在福清核能基地的建造

核燃料前端循環方面，現有的大西北戈壁的 404 轉化廠、甘肅蘭州及陝西漢中的濃縮廠，四川宜賓與內蒙包頭的燃料元件製造廠外，可生產中國大陸國內各種核能機組所需核燃料元件。

### Nuclear Fuel Manufactured by CNNC



圖 15. CNNC 的核燃料元件生產

此外，CNNC 同時計劃投資 800 億人民幣（約 120 億美金），計劃在位於河北省及廣東省打造兩個匯集轉化、濃縮及製造廠的新興核燃料工業園區。

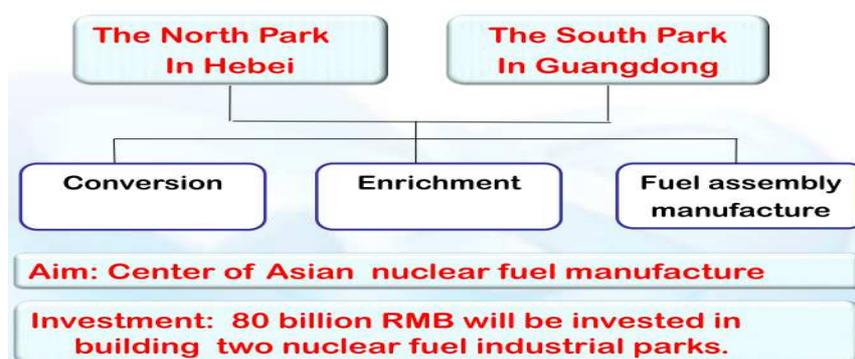


圖 16. CNNC 的核燃料工業園區投資計畫

據報導，中國大陸目前有 32 部核能機組運轉中、22 部建造中，更多核能機組正在規劃階段，官方預測在 2020 年之前核能機組的裝置容量將達到目前的 2 倍，相當於約 58 GWe，中國大陸可說是目前世界上核電進展最快的國家。

## (二) 韓國

代表韓國水電與核電公司(KHNP)的副總及全球策略辦公室首長 Baek Sik Noh，描述南韓高達 95.7%的能源仰賴海外進口，由於其高耗能、高排放的工業結構，對於能源政策與佈局上必須考慮到 3E1S，也就是能源可靠性 Energy Security、經濟性 Economy、環境保護 Environment 及安全性 Safety，這也是核能發電在韓國被重視及作為主要佈局的原因。

目前南韓共有 24 部核能機組(21716 MWe)，裝置容量占比為 22.1%、發電量占比為 31.2%，並有 6 部機組(8460 MWe)在建、4 部機組(5720 MWe)規劃中。

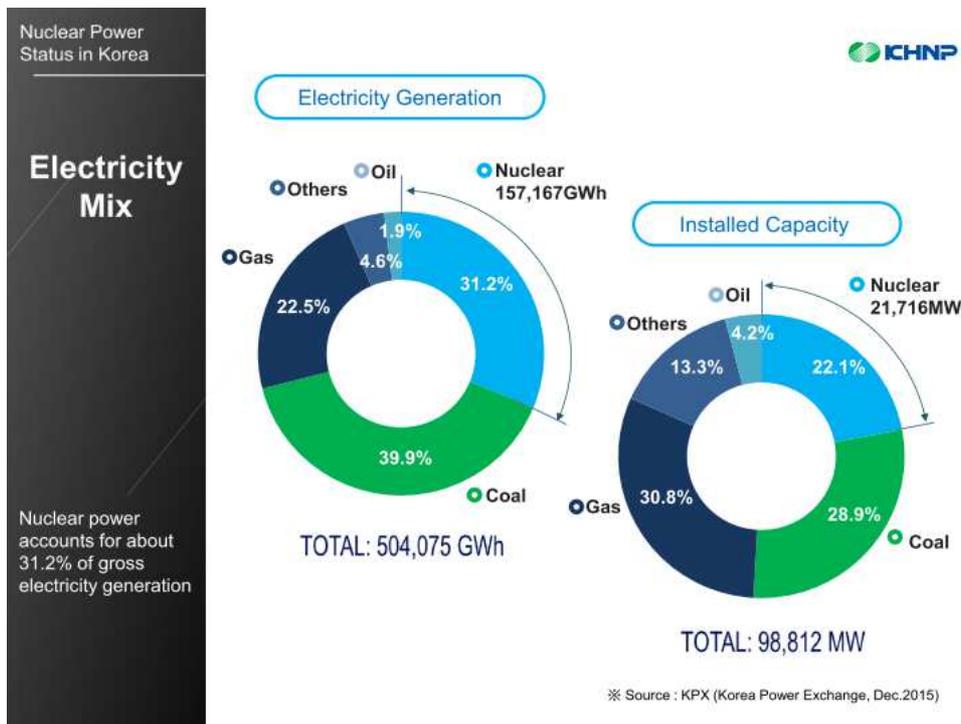


圖 17. 南韓核能裝置容量及發電占比

無庸置疑地，核能發電是南韓最便宜且最可靠的發電方式，也是可達到在地化(localization)發展的準自產能源，同時為了想達成巴黎協議降低二氧化碳排放的目標，核能也是不可獲缺的穩定基載電力來源，若缺少低碳排放的核能發電，南韓將至少增加 22%的二氧化碳排放。但依目前南韓能源佈局對 2030 年的二氧化碳排放預估約 851 百萬噸，需降至 536 百萬噸，仍有 37%的努力空間。

Energy Environment

**Environment**

Without nuclear power, CO<sub>2</sub> emission will increase by 22% in Korea

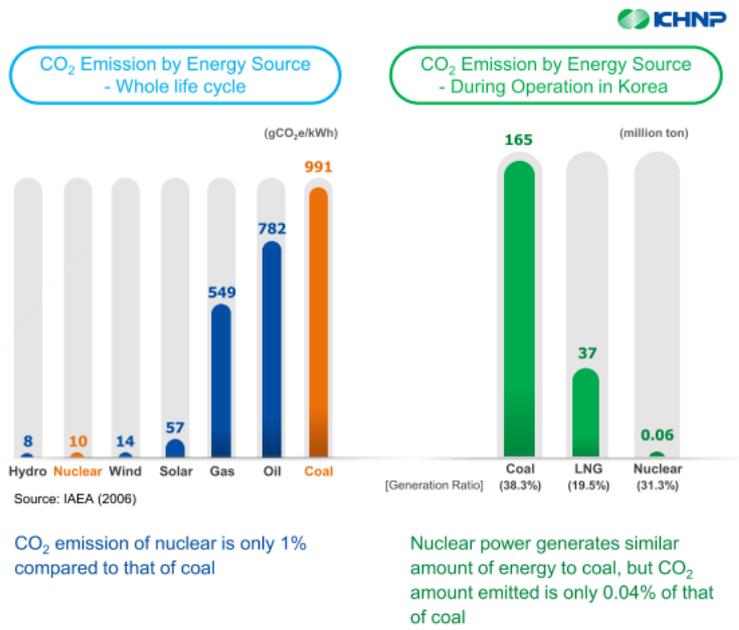


圖 18. 南韓各種發電方式的碳排放比較

也因此，南韓的能源政策在新的氣候規範下，仍將維持核能發電為主要的電力來源，新建機組計畫預計在 2029 年前核能機組數將增加至 35 部、裝置容量將達到 38229 MWe，預估能源占比約為當時的 28.2%。

Status of Nuclear Power in Korea

**Energy Plan of Nuclear Industry**

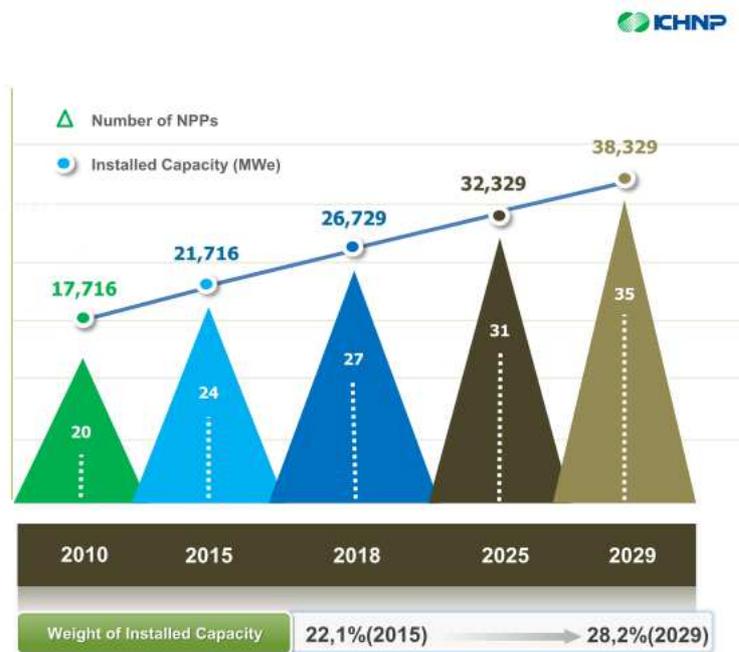


圖 19. 南韓核能機組新建計畫未來預估數量及裝置容量

南韓的核電工業結構完整，KHNP 與同樣身為韓國電力公司 (KEPCO) 所屬子公司的 KEPCO E&C (負責電力工程與建設)、KNF (負責核燃料供應)、KPS (負責電廠營運) 等企業相互合作，同時在 KAERI (韓國原子能研究機構)、KORAD (放射性廢棄物管理機構) 等許多核能工業相關組織及供應商的支援及配合下，組成了高效率的核能工業集團。甚至拿到阿拉伯聯合大公國 4 部核能機組新建計畫合約，採用南韓引進西屋公司技術後自主設計的 APR-1400 機組，說明了其核能技術的在地化發展及機組與燃料國際化出口的能力。

除了設計及建造核能電廠、組裝核燃料，供應國內及海外客戶使用，KHNP 同樣注重用過核燃料的後端循環營運，規劃在 2028 年以前完成中期貯存場及最終處置場的選址及評估，並分別於 2035 年及 2052 年完成中期貯存場及最終處置場建設。在首重核能安全的前提下，確保供應穩定及品質，然而履行社會責任與提高公眾接受度才是人民願意接受核能的關鍵。

### (三) 哈薩克

代表哈薩克原子能公司 Kazatomprom (KAP) 的執行長(CEO) Askar Zhumagaliyev，描述 KAP 目前是全球最大的鈾礦生產者，以目前的生產速度其鈾礦蘊藏量至少可維持 60 至 70 年，但因應目前市場價格的頹勢，KAP 或許選擇減少開採量” leave some of the uranium assets in the ground” 更為合適。

KAP 也提出建言，認為核工業界應該針對核能安全議題與一般民眾有更好的溝通，所有不理性的反對聲音，45% 來自於對核子武器的恐懼、另外 45% 則來自於對於輻射安全的擔憂，增進核能安全的溝通及避免輻射外洩產生，將是核工業界的當務之急。

#### 四、核燃料原料鈾市場

##### (一) 中廣核鈾業斯科公司

中廣核鈾業斯科公司 SWAKOP Uranium 的執行長 Zheng KePing (鄭克平)，說明了中廣核集團(CGN)在納米比亞湖山礦區(Husab, Namibia)投資計畫的進展。

SWAKOP 是中廣核集團與納米比亞國礦公司共同出資成立，為中廣核鈾業發展公司所屬子公司，開始生產後將主要供應 CGN 所營運的核能機組使用，分別是 18 部運轉中(裝置容量約 19300 MWe) 及 10 部建造中(裝置容量約 12436 MWe) 的核能機組。

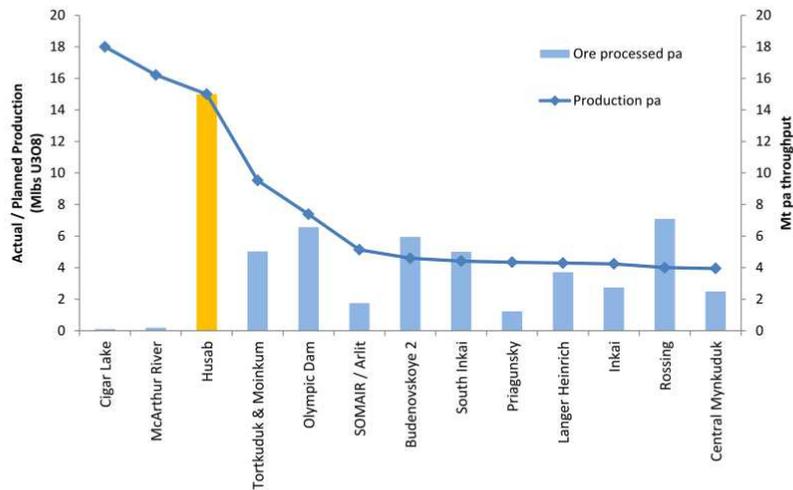
#### CGN – Swakop Uranium’s majority shareholder and key customer



圖 20. SWAKOP 所生產鈾料主要供應 CGN 的核能機組分佈

目前納米比亞為僅次於哈薩克、加拿大、澳洲、尼日及俄羅斯的全球第六大鈾礦生產國，而湖山礦區據 WNA 資料可確認蘊藏量(measured & indicated)為 13.77 萬噸鈾，為全球第三大鈾礦，該鈾礦開採及生產計畫，每年名目產量開採 1500 萬噸礦石、生產 1500 萬磅 U3O8，正式投產後並將逐年提升開採產能達 5000 萬噸，將有助於納米比亞躋身為全球前三大鈾礦生產國。

## The world's largest uranium mine



Sources: Company research, Wise uranium, WNA data for production. Cigar lake shown as 2017 planned output. Husab assumes 15Mlbs pa production and 15Mt pa throughput capacity; output will vary with grade

圖 21. 湖山鈾礦名目開採產能與 U3O8 產量

湖山鈾礦在短短 10 年內已經足具規模，據報導，自 2014 年 3 月起，湖山 2 座露天礦場(open pit)已開採超過 14000 萬噸礦石，開採深度將達 400 米，2016 年 7 月主要碎裂機具到位後，將可順利生產 U3O8，預計將在 2016 年底開始投入生產營運。

## Husab timeline – discovery to production in less than a decade

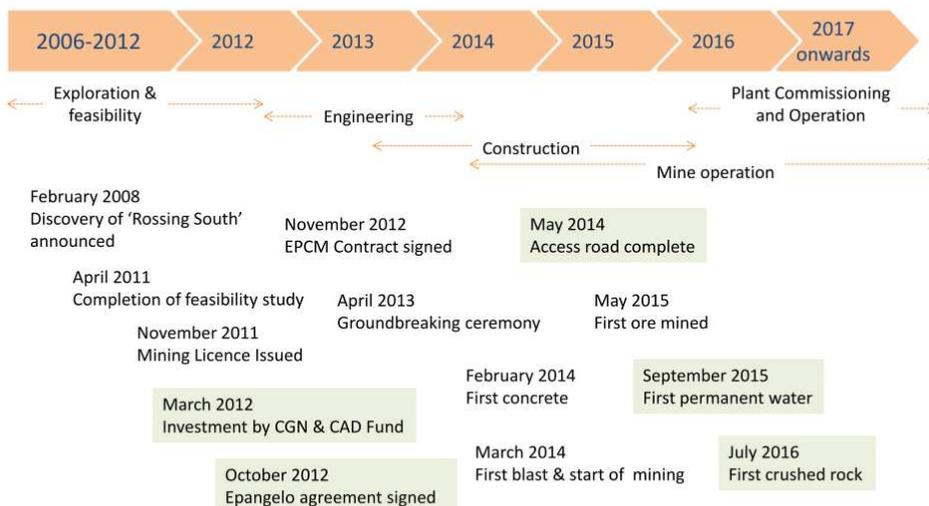


圖 22. 湖山鈾礦開採及生產計畫歷程表

## (二) Energy Fuels 公司

Energy Fuels (EF)公司營運長 Mark Chalmers 則提出了全球鈾料供應危機的警訊，強調了目前的鈾料市場，就好比” boom-and-bust cycle” 經濟繁榮後勢必蕭條的交替循環，並將反映在鈾礦生產與價格的互動關係上。在過去的 70 年內就有過 3 次這樣的循環。

### Prices Matter

Eventually Supply Responded to Prices – With a Lag

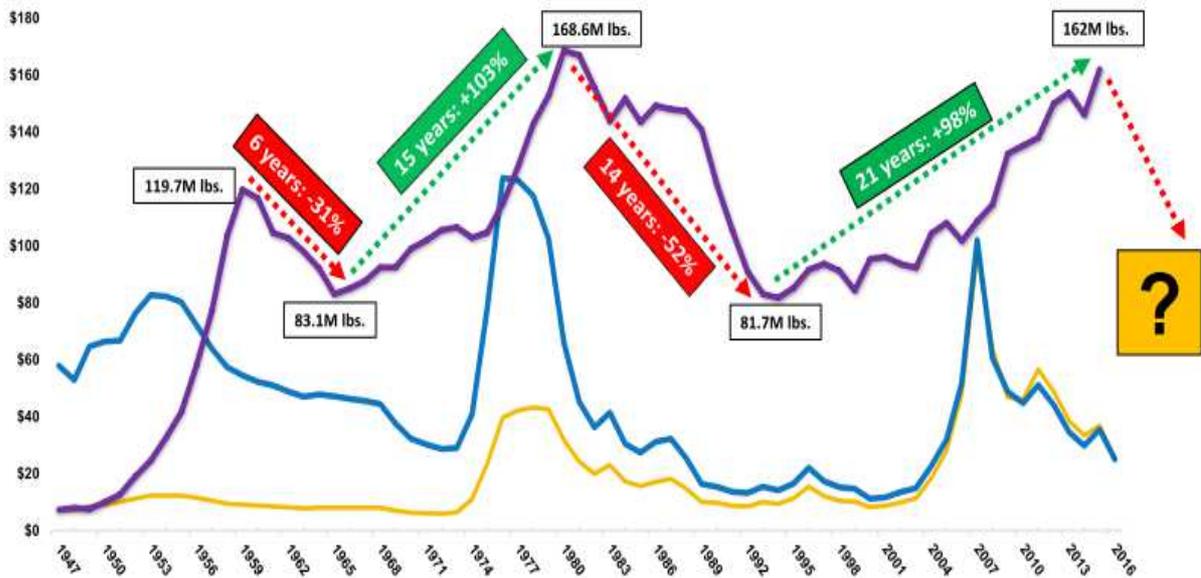


圖 23. 過去 70 年內鈾料供應與市場價格趨勢關係

鈾料供應將因市場價格攀升而增加，供過於求後，因互相競價消滅而降低產量，其中最顯著的例子，自 1988 年開始分為 3 個階段，第一階段是 1988 年到 2004 年，稱為昏迷年(Coma Years)，原料鈾價格長達 17 年低於每磅 US\$30、第二階段是 2004 年到 2013 年，被稱為核能復甦年(The Renaissance Years)，短暫的 9 年期間，價格超過每磅 US\$30，第三階段自 2013 年開始至今，可以說是另一次昏迷，或者說是風雨前的寧靜(Calm Before the Storm)。

可預測地，隨著目前原料鈾市場價格的低迷，未來鈾料產量將再次減少，但相較於第一階段，現階段的鈾料庫存低於 1990 年代，但需求可能將以更快速度成長增加中。

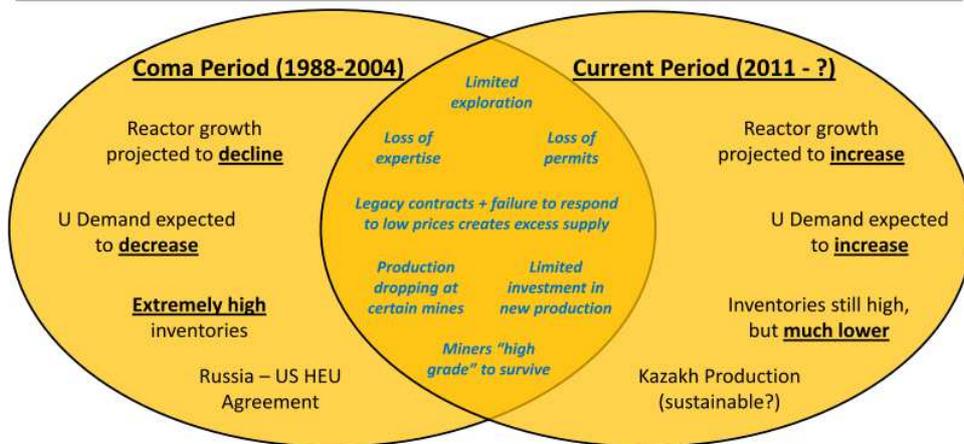


圖 24. 現階段與 1990 年代的鈾料供需情況比較

EF 認為，大多數現存鈾料供應商在現今蕭條的價格，已無法繼續支撐下去，至少 7 成 5 的礦區進行減產，不景氣的條件下，甚至許多礦區的長約在 2017 至 2018 年供應結束後，將被迫面臨關閉，即使有新礦的探勘與發現，亦無法立即補足生產量，未來的鈾料供應將產生危機，在哈薩克礦區因經營策略減產而無法救援之下，市場價格至少將漲回至每磅 US\$50 以上，才有可能支應目前及未來的鈾礦開採進行，然而這僅僅是單純供需與價格的觀察，尚未考慮政治因素、商業利益、礦區環境及開採技術等各種條件的影響，過去的經驗顯示，即便是鈾料市場來到相對高的價格，仍有許多新礦區不願意立即投入生產。這是鈾料供應的危機，而且恐怕馬上就要發生。

### (三) Paladin Energy 公司

Paladin Energy 公司的執行長 Alexander Molyneux 描述了該公司在納米比亞的 Langer Heinrich 礦區的發展近況，有關目前原料鈾低價環境下，其成本降低及最佳化的營運作法。試劑成本的最佳化，引進重碳酸鹽(bicarbonate)回收系統，使 2012 年每磅 US\$13.04 的

成本，在 2016 年 Q4 前降低至每磅 US\$6.33。同時，製程成本最佳化的結果，成本自 2012 年的每磅 US\$19.12，在 2016 年 Q4 前降低到 US\$9.84。也因為這樣的成本最佳化，使得 Paladin 能夠在目前低鈾料價格的環境之下，持續維持第一線(Tier One)，即排名前 25% 強的長約供應商。

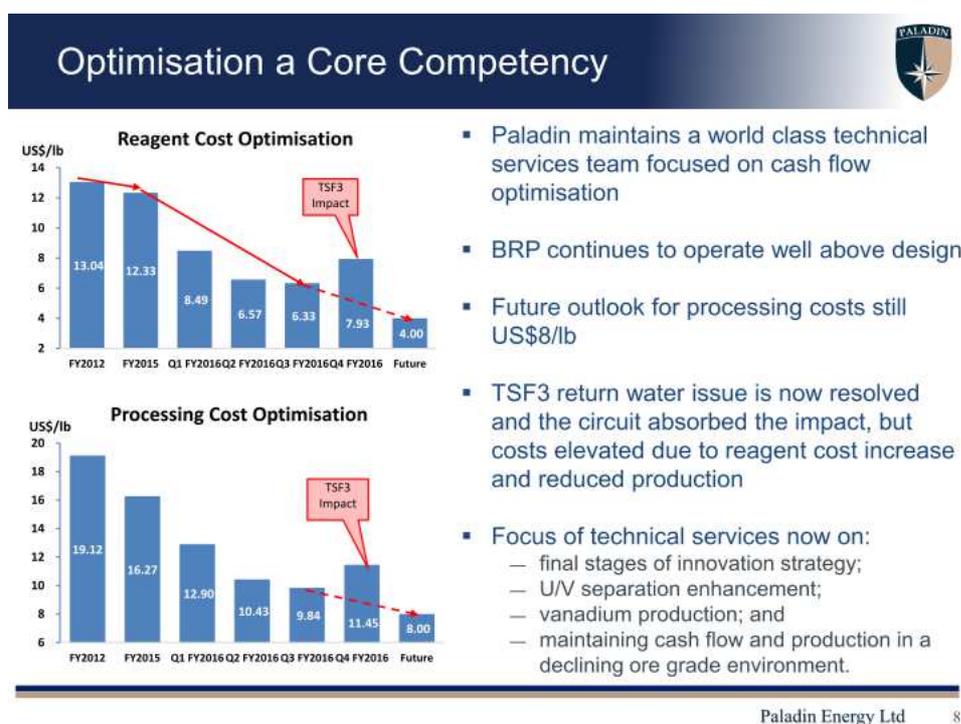


圖 25. Paladin 成本最佳化



圖 26. Paladin 的 Langer Heinrich 礦區表現

#### (四) Cameco 公司

Cameco 公司的行銷副總(VP, Marketing) Tim Gabruch 為鈾料市場座談做出總結，他提醒與會者，由於日本重啟的時程未如預期，核能管制規範的限制增加，以及發電成本的經濟性考量（美國有許多機組因此陸續除役）等因素，2016 年對於鈾料需求的預測與 2011 年相比，不增反減。

2011 年時，UxC 預估 2016 年將有 201 百萬磅的 U3O8 需求，至 2025 年則成長為 240 百萬磅；實際上 UxC 統計，在 2016 年僅有 165 百萬磅的 U3O8 需求，而預測至 2025 年，也下修到需求量为 203 百萬磅。



圖 27. UxC 對於全球鈾料需求 2016 年與 2011 年的比較

目前市場上繼續維持過剩的鈾料產能，若非長約的穩定供應，將會不利於鈾礦商，且對未來的供應安全造成危機，供過於求的問題將使價格更無彈性與競爭力。為此，Cameco 公司在 2016 年 4 月時決定減產，痛苦但毅然決然地，將 Rabbit Lake、Crow Butte、Smith Ranch-Highland 等礦區的產能縮減，將焦點維持在第一線的 McArthur River、Cigar Lake、Inkai 等礦區，以確保長期的生產力。

## ► Difficult Decisions Required

Focus on Tier One assets



圖 28. Cameco 部份現有礦區決定減產

從生產觀點來看，目前中短期鈾料市場價格更加劇烈波動，未來 Cameco 需要保留彈性以因應這樣不利主要生產商的環境。面對全球鈾料需求的變化，應該將注意力放在快速成長的非傳統核電國家（如中國大陸、印度、阿聯等）的市場上，Cameco 身為全球最大核燃料整合性供應商，未來將更謹慎地規劃其銷售及生產上。

## ► Changing Face of Demand

Growing attention on high growth non-traditional markets; focus on those markets that are most value accretive



圖 29. Cameco 將專注於非傳統核電國家的銷售市場

## 五、核燃料濃縮服務市場

### (一) Centrus Energy 公司

Centrus Energy 公司的總裁兼執行長 Dan Poneman 提出了各國政府應該建立策略性低濃縮鈾庫存(Strategic Low Enriched Uranium Reserves)作法的可能性，此目的是為了因應鈾料供應可能斷絕的突發事件，雖然極不可能但一旦發生恐影響極鉅，即黑天鵝效應(black swans)。

如同各國政府正在進行的石油、醫藥、糧食等關鍵重要物資策略性庫存一般，LEU 庫存能夠確保能源供應、降低濃縮生產壓力，同時維持濃縮裝置容量，庫存鈾料可以採用製成核燃料、轉化廠或製造廠的鈾料帳戶，或是實體的濃縮鈾庫存。而庫存量可以比照國際能源署對於石油的 90 天安全庫存，約為年進口量的 25%。

舉例來說，美國每年約進口 1360 噸 LEU，則其 25% 的 340 噸 LEU（相當於 17 個反應器填換批次所需），估計美國政府約需投入 3.5 億美金的鈾料資產，每年需要 2 百萬美金營運；相較於石油庫存需額外花費 70 億美金建造貯存槽，210 億美金的石油資產成本，及每年 2 億美金的營運費用，LEU 庫存僅需要一個倉庫即可輕易達成。

#### Storing LEU vs. Storing Oil

	Cost	Footprint
<b>Strategic Petroleum Reserve</b> (25% annual imports)	\$7 billion to build \$21 billion to fill \$200 million/yr to operate	60 underground caverns 2000 feet deep 4,000,000,000 ft <sup>3</sup>
<b>Strategic LEU Reserve</b> (25% annual imports)	\$350 million to fill \$2 million/yr to operate	Fits inside here: 

圖 30. LEU 庫存與石油庫存的成本比較

## (二) URENCO 公司

URENCO 公司的執行長 Thomas Haerberle 描述了 URENCO 目前的近況及未來的發展，標註該公司是目前核工業界中唯一獨立且跨國組成的公司，至今已成功營運 45 年，目前濃縮服務的名目裝置容量為 1900 萬濃縮功(SWU)，4 個濃縮廠中 3 個位處歐洲（荷蘭的 Almelo 廠、德國的 Gronau 廠、英國的 Capenhurst 廠）、1 個設在美國（新墨西哥州的 Eunice 廠）。

### URENCO's Geographic Diversity



#### Global Supply



Almelo, The Netherlands  
Current capacity: 5.4 million SWU/year



Gronau, Germany  
Current capacity: 4.1 million SWU/year



Capenhurst, UK  
Current capacity: 4.9 million SWU/year



Eunice, New Mexico  
Current capacity: 4.6 million SWU/year



圖 31. URENCO 的濃縮廠及裝置容量

儘管濃縮市場價格走低，URENCO 在 2015 年的表現仍然穩定成長，全球 19 個國家中擁有 50 個客戶，其產能 51% 供應北美洲地區、40% 供應歐洲地區，其餘地區則為 9%。

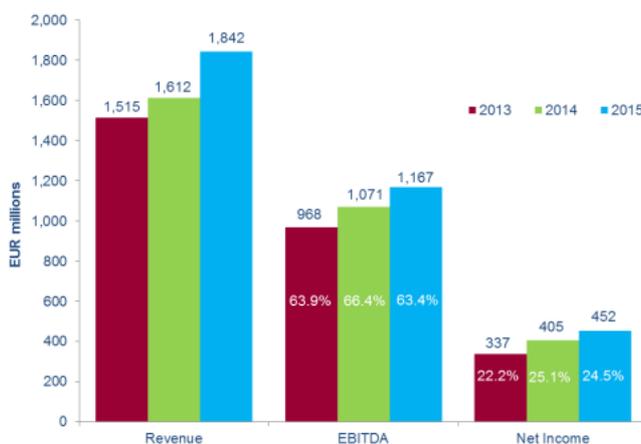
但 URENCO 同時提到，目前核燃料市場中低迷的濃縮服務價格，無法使投資獲利致資金不願意注入，更不用談再投資及擴充產能，如果想要使供應商長期且穩定供應，必須要維持在最低限的價格。

URENCO 需要努力的目標則為最佳化其營運策略及資產配置，發揮濃縮技術的最大彈性，以供應客戶並削減濃縮庫存，同時維持並新建與客戶的合作關係，以強化在核工業的相互地位。

## URENCO's Financial Performance



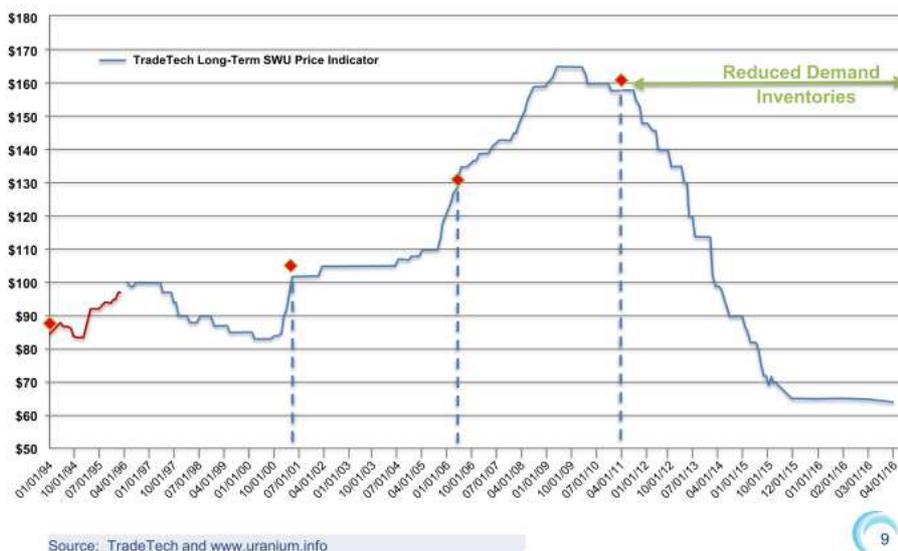
URENCO achieved a strong operational and financial performance in 2015



5

圖 32. URENCO 過去 3 年的營運表現及財務情形

## Enrichment Price History



9

圖 33. 濃縮服務長約市場的歷年價格

### (三) UxC 顧問公司

UxC 顧問公司的資深策略副總(Sr. VP Policy) Anna Bryndza 闡釋了一個有關俄羅斯濃縮事業策略將有整體模式轉變(paradigm shift)的觀點。

長期以來核工業界對於俄羅斯濃縮服務的看法，由於某些歷史背景、非傳統合約架構（如下腳再濃縮或 HEU 下混等）、缺乏居中協調的組織，以及貿易限制等因素，其濃縮服務的供應非受市場力量所影響，且不與市場趨勢有所反應，通常被界定為”special case”，UxC 並以”Ux RU SWU Price”來區分不同的價格趨勢。

然而，許多過去俄羅斯背後無法與市場互應的理由目前已經消失，其貿易關係正在常規化，並且 Rosatom 所屬的 TVEL 燃料公司開始進行了俄羅斯轉化及濃縮廠的整合與強化；同時，與 AREVA/URENCO 簽訂約 380 萬 SWU 的下腳再濃縮服務合約，及 500 萬 SWU 的 HEU 下混合約終已告結，這表示俄羅斯的濃縮服務與全球市場建立了連結，俄羅斯的濃縮服務供應將為市場帶來衝擊。

俄羅斯利用了兩個重要的步驟以處理剩餘供應，為了處理當前的供應過剩，將整個 Angarsk 濃縮廠用來處理鈾礦，將礦場的下腳(tails)再濃縮(re-enrich)後進行貯存；長期的策略則是，預期俄羅斯將降低總體的濃縮服務裝置容量，因此逐步淘汰其年久的離心機組(centrifuges)。

這些策略上的改變，將使俄羅斯核工業界必須更注意市場變化，過往的觀念必須拋棄，雖然這些模式上的轉變多數還未被注意，然而事實上俄羅斯濃縮廠這些轉變，已經對全球鈾料、轉化服務及濃縮服務市場造成影響，我們必須認識到一個相當劇烈的核工業經營模式與市場趨勢的轉變正在俄羅斯發生中。

#### 肆、感想與心得

- 一、全球核能截至 2016 年 8 月，共有 31 個核電國家，計 449 部核能機組可供運轉使用，總裝置容量達 390,000 MWe，所提供電力佔全球發電量約 11%，同時有 60 部機組建造中，超過 160 部機組規劃中。

WNA 就可負擔性、可利用性、可取得性及可接受性等面向，考慮能源政策與經濟趨勢對於核能發展的相互影響，進行核能機組裝置容量的參考情境及高、低案預測，其裝置容量年成長率分別為 2.3% 及 3.75%、0.3%；參考情境中，預估全球至 2025 年將有 462 部、2035 年則為 547 部核能機組。

- 二、2015 年核能機組營運績效，平均容量因數（扣除日本的影響後）為 81.7%，年發電量 2441 TWh（24410 億度電）。2015 年共有 10 部新建核能機組併入電網發電，裝置容量合計為 9499 MWe，平均建廠工期為 73 個月，並有 7 部核能機組除役。

值得注意的是，10 部新建機組中有 8 部為中國大陸所有，同時間還有 20 餘部在建；而 7 部除役機組中有 5 部屬於日本，在福島事件後即已停機，至 2015 年正式宣佈除役。

- 三、因應 2015 年 12 月在巴黎舉行的第 21 屆聯合國氣候變化綱要公約締約國大會(21th Conference of Parties, COP21)，為了達成巴黎協議(Paris Agreement)之要求，WNA 提出所謂和諧的能源發展計畫(Harmony Program)，目標是在 2050 年前新增 1000 GWe 的核能機組裝置容量，並使核能發電占比達全球總發電量的 25%，以確保可靠、低廉及潔淨的能源供應。

WNA 的核能發展藍圖，建構在公平的競爭機制、和諧的管制程序及核能安全的規範上，預期 2016 至 2020 年間，每年加入 10 GWe、2021 至 2025 年間，每年 25 GWe、2026 至 2050 年間，每年加入 33 GWe。

四、核能工業在幾經整合及發展後，能夠提供完整的核燃料循環技術與服務的供應商，共有 11 個大型企業：法國的 AREVA、加拿大的 Candu Energy、中國大陸的中核集團(CNNC)、中廣核(CGN)、國電投(SPI)、美國的 GE-Hitachi (GEH)、韓國的 Korea Electric Power Corporation (KEPCO)、日本的 Mitsubishi Heavy Industries (MHI)、印度的 Nuclear Power Corporation of India Ltd (NPCIL)、俄羅斯的 Rosatom 及由日本 Toshiba 主要持股的美國 Westinghouse。

很明顯地，中國大陸、韓國、印度及日本的興起，顛覆了原來核能技術完全掌控在西方國家的局面，在政府的全力支持下，中國大陸及韓國積極發展核能工業；中國大陸目前有 36 部核能機組運轉中、20 部建造中，預計在 2020 年之前核能機組裝置容量達 58 GWe；南韓目前有 24 部核能機組、6 部建造中，預計在 2029 年前增加至 35 部，裝置容量達 38 GWe。

五、相較於能夠自主生產核燃料的中核集團，同樣身為中國大陸核能機組主要營運者的中廣核集團，在發展鈾礦開採事業上也不遑多讓，其在西非納米比亞所投資的湖山鈾礦，2016 年底即將投產，每年 1500 萬磅 U3O8 的產能，將主要提供中國大陸核能機組使用。

而鈾料市場方面，Energy Fuels 公司提出了警告，認為持續的低價將無法支撐礦區的生產，供應長約結束後將紛紛面臨關廠，然而隨著新建機組計畫帶來鈾料需求的增加，未來 7 至 10 年內勢必產生供應缺口；Paladin 及 Cameco 公司在營運策略上或有不同，但一致認同現有的市場環境並非正常，不論是降低生產成本或是減產以增加未來的供應彈性，都是放眼未來，尋求穩定經營的最佳作法。

濃縮服務市場方面，Centrus Energy 公司提出了建立策略性 LEU 庫存的建議，以因應可能發生的缺料危機；URENCO 公司則以 2015 年的穩定成長，在持續走低的市場環境下，展現其穩定供應及營運策略的最佳化；UxC 點出了俄羅斯核工業的改革及變化，勢必對未來市場造成衝擊，值得注意觀察。

六、 本次 WNA 年會期間，與各方核工業界代表多有交流，更能夠瞭解全球核能發展趨勢，雖然日本核能機組重啟不如預期，但由於電力需求的持續提高，而同時又因應必須克服的氣候變遷議題，各國應努力達成的減碳目標，核能發展與復甦雖緩慢，但將逐步的回穩。特別是大量興建核能機組的中國大陸，積極地參與國際會議，將為核工業界帶來更多的商機，需求刺激供給，核能技術的國際交流，無形中也象徵了投資獲利的可能性，人口密度高但仍電力供應還未能完全普及的亞洲地區，例如印度、東南亞及中國大陸等，肯定是未來 10 年內，全球核工業界的關注目標。

另外在與日本核燃料供應商代表，交換兩國核能機組營運過程面臨到的困境時，深感中央及地方政府支持的重要性，與民眾的良性溝通及宣導，更是能夠獲得社會公眾認同的關鍵；在本公司核能營運此刻面臨到許多不理性的反對聲浪及打壓，仍然有許多努力的空間。

七、 儘管我國的核能政策是在 2025 年全面走向非核家園，也就是說本公司核能機組逐漸面臨除役，但在所有機組全數除役前，仍然有製成核燃料交貨執行，以及前端物料最佳化調度與合約彈性執行策略等，必須要與市場接軌及與供應商或其他電力公司保持密切往來；除役之後，若有剩餘核物料的處理，包含無法使用的製成燃料及預先建置的鈾料庫存，都需要妥善安排並尋求管道進行銷售或轉讓，WNA 核能國際事務的參與，將有助於瞭解核工業界發展動向及市場資訊更新，並協助做出正確決策，以獲取本公司最大利益。

註：本組於此次前往英國倫敦開會前，即已完成 ERI 2016 年報導有關核能現況與展望之整理，以及中國大陸有關核能發展資訊，包含反應器技術的演進及核能機組新建規劃，詳如附件資料，擬併此出國報告陳閱，惟部份資料涉及廠家智慧財產權，故附件不隨電子檔上傳出國報告資訊網。

## 附件資料

1. 資料整理：核能現況與展望 ERI 2016 年報導
2. 資料整理：中國大陸核能發展情況

## 參考資料

1. WNA 年會講演者簡報資料
2. WNA 資料：The World Nuclear Supply Chain-Outlook 2035 (2016 Edition)
3. WNA 資料：World Nuclear Performance Report 2016
4. WNA 資料：Post Event Report 2016
5. WNA 網頁 <http://www.world-nuclear.org/>
6. IAEA 核能機組資料庫 <https://www.iaea.org/pris/>
7. WNN 報導”Achieving 1000 GWe of new capacity by 2050”
8. Nuclear Review 特別報導 2016 年 9 月
9. Nucleonics Week 報導 Vol.57/No.37/2016.9.15
10. TradeTech 週報 2016.9.16
11. UxC Weekly 週報 2016.9.19
12. ERI 顧問公司 2016 Nuclear Fuel Cycle Supply and Price Report 年度報告