

「The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World」之核電成本研析

袁正達、葛復光

核能研究所能源經濟及策略研究中心

2019/07/26

一、核能發電的發展機會

根據 MIT 發布的報告「The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World」(2018)報告指出，為了支撐世界經濟持續成長與人口增長，同時必須大量地降低溫室氣體排放，以因應氣候變遷所帶來的嚴峻挑戰，核能是目前可提供最大比例零碳發電的電力技術，並同時具潔淨、穩定發電的特性。在其它發電技術不斷進步，成本逐年下降的情況下，目前核電無法蓬勃發展的最根本問題仍是成本，此外則是民眾關注嚴重事故(如福島核災)的後果。本報告沒有涉及放射性廢棄物(用過核燃料)處置或核子擴散風險。雖然這些問題普遍認為是擴大核能利用的障礙，但尋找廢棄物處置的解決方案和管理核子擴散風險在政治層面均遠遠超過技術的挑戰。因此，整份報告的重點之一在於提出具可行性的方式來建造具價格競爭力的核電廠，以降低發電成本。該報告主要以核電在減碳過程中所扮演的角色出發，透過不同情境來模擬發電成本、核電裝置容量與減碳成本之間的關係，並分別從核電、燃煤及燃氣的發電均化成本進行比較、

核電成本的組成、等面向來進行說明，最後並彙整可以有效降低核電廠建置成本的建議。

二、核電可有效降低減碳成本，但建置成本變動大

目前全世界面臨的問題是必須大量地降低溫室氣體排放，同時滿足全世界數十億人對電力的需求與支持經濟的成長。因此，在 2050 年要有效地降低溫室氣體排放所需要的電力配比將與目前的電力結構有所不同。目前雖有多項低碳或零碳的電力技術組合可供選擇，核能發電做為可調度的低碳電力對於減碳具有潛在貢獻，因此核能發電在電力部門普遍被認為是可以達到深度減碳不可或缺的電力選項，若缺乏該選項將導致深度減碳成本的大幅提升。該報告針對美國(新英格蘭)與中國(天津、北京、唐山)等區域，模擬 Nuclear-None、Nuclear-Nominal Cost 與 Nuclear-Low Cost 等三種情境下的平均發電成本與核能的裝置容量變化如圖 1 所示。在深度減碳下($1\text{g-CO}_2/\text{KWh}_e$)，美國新英格蘭區域在 Nuclear-None 情境下，平均發電成本約 210 USD/MWh_e ，而 Nuclear-Nominal Cost 與 Nuclear-Low Cost 情境下，該成本分別為 100 USD/MWh_e 與 120 USD/MWh_e 。此差距在中國更加明顯。另外，也可觀察到核能的裝置容量也隨著減碳目標愈嚴格而逐步提升，都顯示降低核能發電成本對於平均發電成本下降與達到減碳目標存在顯著的效益。

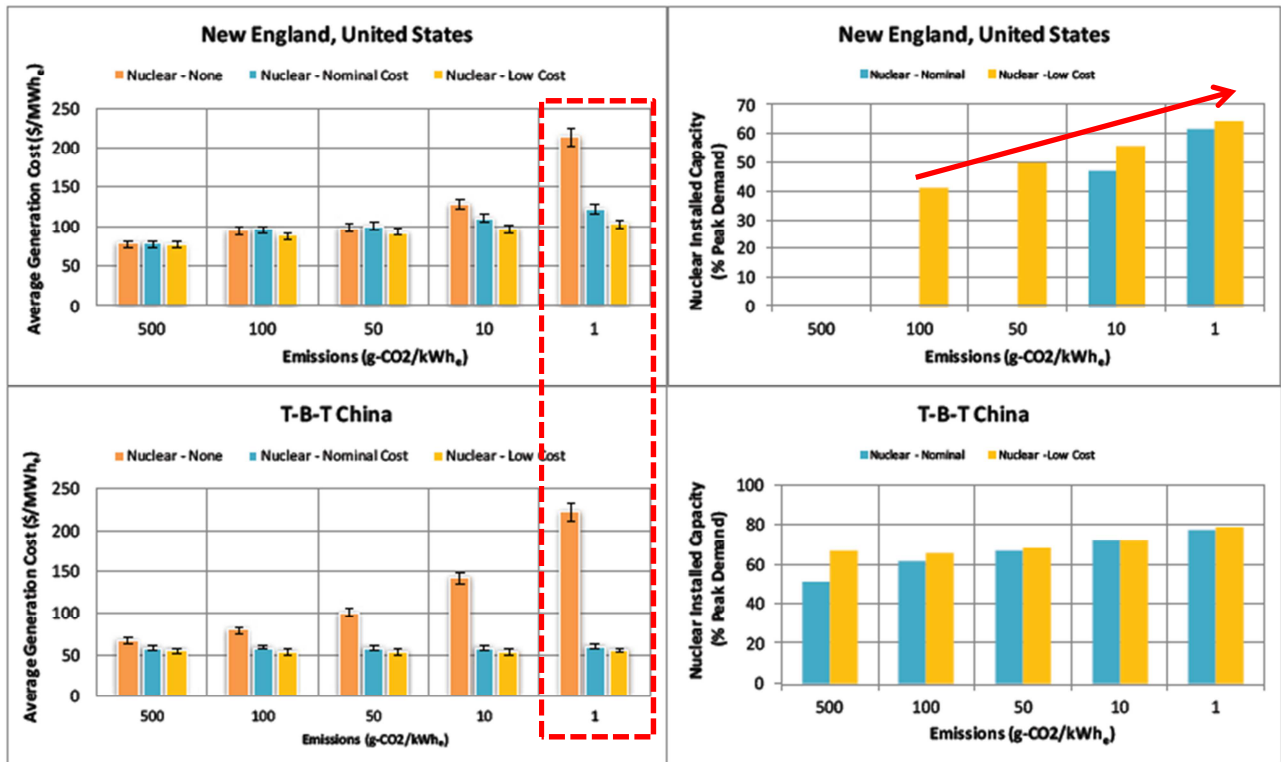


圖 1. 不同減碳目標下，發電成本與核能裝置容量變化

雖然核電具有減碳效益，但核電廠的建置成本確具有非常大的變動性。圖 2 顯示過去與近期核電廠建置成本之比較，近期興建的電廠以南韓與中國的成本最低，其中阿聯核電廠也是由南韓所建造，反觀歐美國家的電廠設計如美國 AP100 與英國、法國、芬蘭的 EPR，建置成本明顯較高，主要原因是過去 30 幾年來歐洲及美國在核電廠建造上產生斷層，南韓與中國反而累積豐富的核電廠建置經驗所導致。

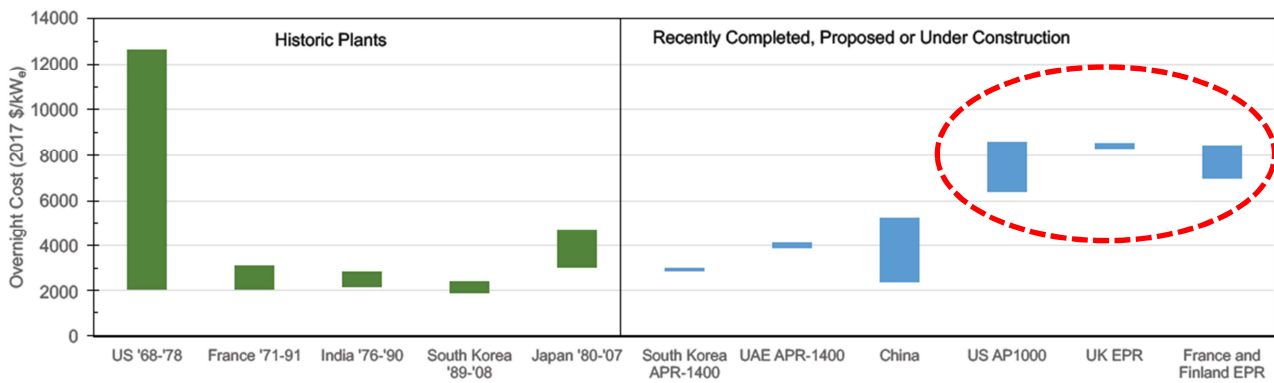


圖 2. 歷史與近期輕水式核電廠建置成本比較

三、核能發電與燃氣、燃煤發電之成本比較

該報告將燃氣與燃煤發電成本以 OECD 國家的輕水式核電成本為基準予以標準化，數值大(小)於 1 則表示成本高(低)於核能發電，並針對燃氣、燃煤發電成本與核能發電的成本進行比較；在不考慮碳稅下，美國與法國的燃氣發電均化成本明顯比核能發電具有競爭優勢，而亞洲國家因天然氣成本較高，與核能發電的成本差距不若歐美國家來的明顯；在燃煤發電與核能電的比較方面，除南韓的燃煤發電成本比核能高之外，其他國家的燃煤與核能發電的成本相近。

另外，若考慮碳稅為每噸 30 美元的情形下，在日本、南韓與中國等亞洲國家的成本將提高許多，例如南韓的燃氣發電均化成本相對核能為 1.78-2.93 倍，該比例在日本與中國分別為 1.05-1.58 與 0.97-1.95，因亞洲國家進口天然氣成本較高，因此核電的成本優勢將更為明顯。相同地，燃煤發電若考慮碳稅，成本優勢將不復存在。因此，考慮碳價之下，燃氣與燃煤發電都比核電來得貴。

表 1. 高、低天然氣價格下，燃氣、燃煤與核能發電之均化成本(標準化)

	Natural Gas		Coal		Nuclear
	LCOE	LCOE with Carbon Cost ^a	LCOE	LCOE with Carbon Cost	LWR
US	0.67	0.85	0.88	1.21	1.0
South Korea	1.54-2.69	1.78-2.93	1.40	1.99	1.0
Japan	0.92-1.46	1.05-1.58	0.94	1.23	1.0
China	0.74-1.72	0.97-1.95	1.03	1.63	1.0
France	0.58-1.05	0.71-1.18	-	-	1.0

^a Assumed carbon cost is \$30/tonne of CO₂

四、核能電廠之成本組成

根據 Black & Veatch (2012)，核電廠的總成本大致可分成 Nuclear Island Equipment、Turbine – Gen. Equipment、Yard, Cooling, and Installation、Engineering, Procurement, and Construction Cost 及 Owner's Cost 等五大類。透過表 2 各項成本占比可以發現，反應爐與電力轉換系統等設備占總成本的 17%-28%，其它非設備(Non-equipment)的成本約占 75%，因此，欲使核電廠建置成本下降的重點不在於 NSSS 的設計與特定反應爐技術的改進，而在於(1)改善整廠建造或交付至現場以及(2)縮短建造期間，以降低利息成本。

表 2. 不同 LWR 之成本組成

	Cost Breakdown (% of total cost)				
	Generic AP1000	Historic U.S. LWR Median Case	Historic U.S. LWR Best Case	South Korean APR1400	EPR
Nuclear Island Equipment	12.6	9.9	16.5	21.9	18.0
Turbine – Gen. Equipment	4.9	7.0	11.9	5.6	6.3
Yard, Cooling, and Installation	47.5	46.3	49.3	45.5	49.7
Engineering, Procurement, and Construction Cost	15.9	17.6	7.7	20.0	15.3
Owner's Cost	19.1	19.2	14.6	7.0	10.7

五、小結

核能發電在電力部門已普遍被認為是可以達到深度減碳的重要選項，其中的重點在於如何有效地降低成本，並提出實務上能夠有效降低核電廠建置成本的主要建議：

1. 採用已驗證的計畫(proven project)及建廠管理做法，以增加新核電廠施工及完工的成功機率。例如(a)完成更多比例的施工前詳細設計；(b)使用經過驗證的供應鍊和熟練的勞動力；(c)設計的早期階段就將製造商和建造商納入設計團隊。
2. 從主要是繁瑣、高度依賴現場的建廠轉移到更多標準化工廠的系列化生產。。
3. 事實上如將其它被忽略的隱藏成本如空氣汙染、二氧化碳排放等也考量進來，將使得核電相對傳統化石能源更具成本競爭力。

MIT 的整份報告從核電在減碳過程中所扮演的角色出發，並提出可行的方式來降低核電成本，然而，除如何有效降低核電成本及跟其他發電技術間的成本競爭之外，實際上核能發電的角色仍存在不少爭議，例如嚴重核能災害對民衆的影響(如福島核災)、核廢料的最終處置等議題，而各國在面對這些爭議上也抱持不同的看法跟考量，相關國際發展趨勢仍值得我國持續觀察以做為借鏡。

參考文獻

1. Black & Veatch. 2012. Cost and Performance Data for Power Technologies. National Renewable Energy Laboratory.
2. 「The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World」 (2018), MIT
<http://energy.mit.edu/research/future-nuclear-energy-carbon-constrained-world/>