

## 核能發電 3Q:生命週期碳排放、外部成本與除役成本概析

張志瑋、陳中舜、葛復光

核能研究所-能源經濟及策略研究中心

2013/09

近來由於核四公投議題的持續發酵，有關核能對於環境影響的討論又再次展開。本文蒐集了近期聯合國組織的相關數據，可提供各界作為研究之參考。

在核能電廠 CO<sub>2</sub> 排放方面，一般常以生命週期評估(LCA, Life Cycle Assessment)的溫室氣體碳排放量作為參考，其包含燃料生產、電廠興建運轉、後端處理與除役等各階段。而最常被環保團體分別引用的為 Storm van Leeuwen (2005)[1]與 Sovacool (2008) [2]等兩篇報告。在 Sovacool 文章中，共彙整國際上 103 篇關於核能生命週期的溫室氣體排放量研究，並篩選出 19 篇可信度較高的研究，進行統計分析後顯示：核電的生命週期排放量平均值為 66 g-CO<sub>2</sub>eq/kWh，與其他再生能源相較，碳排放量偏高，其中核燃料精煉時的 CO<sub>2</sub> 排放佔總量的 38%。

但將 Sovacool 的數據與 IPCC AR4(2007)[3]報告相比(如表 3-5-1 所示)，該數據則有高估的傾向。就以 2011 年 IPCC 可再生能源與減緩氣候變遷特別報告為例 [4]，在考慮各種能源生命週期之不確定性後，若取中位數(50th percentile)來看，核能發電生命週期 CO<sub>2</sub> 排放量為 16 g-CO<sub>2</sub>eq/kWh，約為燃煤電廠的 1.6%、天然氣的 3.4%、太陽能發電的 47%，該結果亦與聯合國環境規劃署(UNEP)的引述亦

類似[5]。另於 2012 年 OECD 核能署(Nuclear Energy Agency, NEA)曾針對相關核能-低碳能源的議題進行專題研究[6]，並彙整了 20 份包含國際組織、政府機構與大學公開報告的 LCA 結果，文中特別指出由於 Sovacool 文章中許多重要的假設皆引述於 Storm van Leeuwen 的數據，而 Storm van Leeuwen 採用了低品味鈾原礦與較高的土木建築耗能估算，故造成 Sovacool 報告中 LCA 計算結果較其他類似報告為高的主因。總體來看，各類發電技術的生命週期 CO<sub>2</sub> 排放量由少至多排列為：水力發電<海洋能發電<風力發電<核能<生質燃料<太陽能發電<地熱發電<天然氣<燃油<燃煤。

除了二氧化碳排放外，不同發電技術對環境尚有諸多的外部性影響(External Effect)，若將其價格化統稱為「外部成本」(External Cost)。歐洲的 Cost Assessment for Sustainable Energy System (CASES)[7] 計畫，即是從 1990 年代開始有系統地評估歐洲各類發電技術之外部成本，其結果經 Nuclear Energy Agency(NEA)整理後，如表 3-5-2[8]所示。尤其值得注意的是，太陽光電由於製程中會產生大量的 NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub> 及溫室氣體排放，導致外部成本偏高。另外，若是以燃燒稻草獲取生質能亦會產生大量的廢氣且單位體積熱質含量低，而栽種生質作物需要大量土地，亦會造成土地利用、生物多樣性等問題。綜合上述結果可知，核能發電在生命週期碳排放量與外部成本的表現，約略介於風力與太陽光電之間。

另一方面社會各界亦很關心核電廠除役的成本問題。根據 UNEP (2012) 針對核設施除役進行專題研究中指出[9]，現階段核設施除役程序是複雜且耗時的。

以英國首座完成除役的核電廠為例，電廠於 1981 年就已關閉，直到 2011 年才完成除役。2006 年時歐盟委員會亦發佈了關於核設施除役、用過核燃料及放射性廢棄物的財政管理建議和指導方針；而針對核設施除役的成本與反應器的類型、尺寸、位置...等，OECD/NEA 目前業已設計完成對除役成本的估算方法。根據實際經驗，在美國核反應器除役的平均花費約 5 億美元，約是初始投資成本的 10%-15%。而英國核設施除役的政府撥款從 1970 年 200 萬英鎊增長至 1990 年 95 億英鎊再到 2011 年 537 億英鎊，顯示出個別核電廠除役的成本仍有高度不確定性。但於 UNEP 報告中亦指出：(1) 隨著除役處理經驗的豐富，這種不確定性情況和花費都會減少。(2) 新式核電廠的設計若一開始就考慮了安全高效除役、安全運轉、事故防範及其對公眾健康和環境破壞等議題，亦可降低除役時的不確定性及花費。

而除了目前各界所關注的發電成本外，生命週期碳排放量、外部成本及除役成本，皆應為考量能源結構及能源規劃時的重要參考數據。根據國際能源署(IEA)及聯合國政府間氣候變遷小組(IPCC)的建議，唯有維持多元務實的能源政策，才能有效地解決能源供給與減緩氣候變遷。事實上能源與生物一樣，”多樣化”是維持永續發展的最根本條件，讓各類能源技術在既有基礎上公平競爭，彼此亦能截長補短、相輔相成，這才是確保國家可永續發展的良方。

表 3-5-1：各類低碳能源生命週期碳排放量比較

生命週期碳排放 g-CO <sub>2</sub> eq/kWh	臺灣環境 保護聯盟	Sovacool (2008)	IPCC AR4 (2007)	WEISSER (2008)	IPCC (2011)	NEA (2012)
核能	112.47~165.22 (van Leeuwen, 2005)	66	3~40	4~24 (15 組樣本)	16	29
天然氣	385	446	400~約 500 (NGCC)	400~840 (16 組樣本)	469	499
生質燃料	62	11~41	----	36~100 (8 組樣本)	18	45
風力	11~37	9~10	6.9~25	8~36 (15 組樣本)	12	26
太陽光電	---	32	12.5~104	42~76 (13 組樣本)	22(CSP) 46(PV)	85

資料來源：IPCC, NEA, Sovacool(2008), Weisser(2008)

表 3-5-2：歐洲各項發電設施外部成本 (EUR/MWh in EU27)

外部成本	核能	燃煤 IGCC	Lignite IGCC	燃氣 CCGT	水力 發電 (水庫)	風力 發電 (陸域)	風力 發電 (離岸)	太陽 光電 (PV)	生質能 (稻草)	生質能 (木材)
人類健康 影響	1.55	8.35	3.84	4.24	0.57	0.75	0.72	6.58	15.55	4.64
生物多樣 性損失	0.09	0.79	0.32	0.52	0.02	0.04	0.03	0.34	2.94	0.49
植被(N <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> )	0.02	0.15	0.04	0.12	0.01	0.01	0.01	0.07	0.1	0.13
材質 SO <sub>2</sub> & NO <sub>x</sub>	0.03	0.11	0.03	0.07	0.01	0.01	0.01	0.09	0.12	0.07
放射性	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
氣候變遷	0.43	17.56	19.57	8.97	0.16	0.21	0.17	1.81	1.46	1.2
總和	2.14	26.96	23.8	13.93	0.76	1.03	0.94	8.88	20.17	6.54

資料來源：NEA(2012)



## 參考文獻

1. van Leeuwen, Storm, J.W. and P. Smith, 2005, Nuclear Power-The Energy Balance, 2013/06, [www.stormsmith.nl](http://www.stormsmith.nl).
2. Sovacool, Benjamin K., 2008, Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey, *Energy Policy*, 36, 2950–2963.
3. IPCC, 2007, IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007.
4. IPCC, 2011, Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation.
5. UNEP, 2011, Towards a GREEN economy.
6. OECD/NEA, 2012, The Role of Nuclear Energy in a Low-carbon Energy Future.
7. CASES, selected online statistical databases, 2013/06, [http://www.feem-project.net/cases/links\\_databases.php](http://www.feem-project.net/cases/links_databases.php)
8. OECD/NEA, 2012, Nuclear Energy and Renewables: System Effects in Low-carbon Electricity Systems.
9. UNEP, 2012, UNEP YEAR BOOK 2012-Emerging Issues in Our Global Environment.
10. Weisser, D., IAEA, 2008, A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies.