

國際核能發電趨勢與成本分析 2022/03/31 修訂

袁正達¹、廖偉辰²、柴蕙質³

我國擬將「溫室氣體減量及管理法」草案修正成「氣候變遷因應法」，並將2050年淨零排放目標入法，在全球面臨淨零排放目標下，核能發電的角色亦再次受到關注，本文彙整近年國際使用核能發電的趨勢及成本、並說明日本經產省對福島核災事故成本的最新估算結果，以供相關單位參考。

一、國際使用核電趨勢

目前全球使用核能發電的國家有32個，美國是發電量最高的國家，2020年占全球的30.8%；法國極度依賴核能發電，2011年全國核電占比高達約80%，最近幾年雖有下降，但至2020年仍有約67%，而在發電量方面原本法國一直是全球第二高，但在2020年已被中國超越，中國2020年發電量占球全13.6%，僅次於美國。此外，近十年全球用電量逐年上升，年均成長率約為2.1%，而核能發電量並無明顯增長，約介於2,470TWh至2,800TWh，年均成長率約為0.2%，占全球發電量約10%，全球核能發電量及占比如下圖。

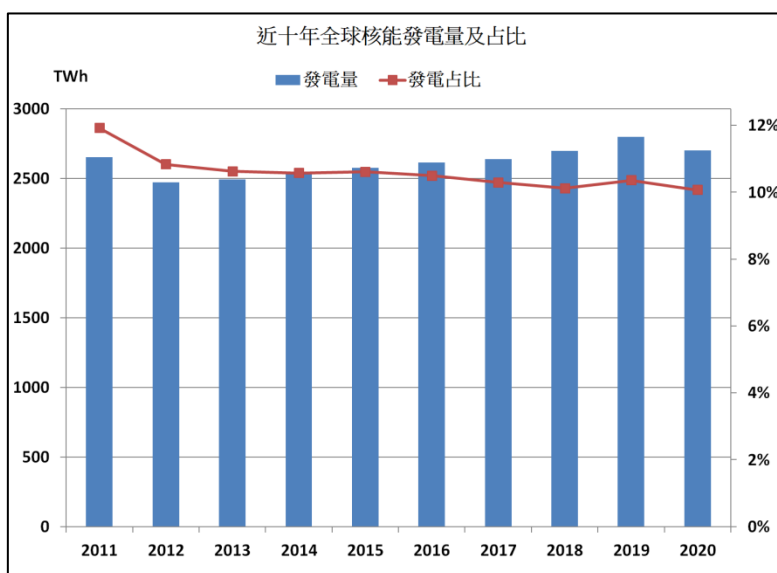


圖1. 近10年全球核能發電占比

¹作者為核能研究所綜計組研策室副工程師

²作者為核能研究所綜計組研策室副工程師

³作者為核能研究所綜計組研策室副工程師

2011年發生福島核災，除了中國核電使用有明顯逐年增加之外，許多國家政府或民眾對核電的使用態度較趨於保守，而德國、比利時與台灣已經有非核的時程規畫。日本在2011年福島核災後許多反應爐停止運轉，雖然日本經產省(Ministry of Economy, Trade and Industry, METI) 7月公布最新戰略能源計畫(Strategic Energy Plan)中提到，到2030年實現20%至22%的核電目標，但根據2021年日本廣播協會NHK的一項調查，85%的日本民眾仍然對可能發生的核事故感到擔憂。即使最近面臨能源價格飆漲，德國政府2022年非核計畫仍未改變，將停止所有機組運作，德國決定放棄核電主要是安全上的考量，而德國政界及人民大部分都支持這項決定。比利時從2022年10月開始，將會啟動廢除核電廠的任務，到2025年完成停用核電，並爭取在2045年前，完成拆除核電廠以及處理核燃料工作。我國核一廠已經於2018年除役，核二廠一號機因燃料池貯存容量不足已於2021年7月1日停止運轉，2021年12月28日起進入除役階段。我國對核電的依賴度逐年降低，目前政府朝著2025年達成非核的目標邁進。

二、核能發電均化成本

國際能源署(IEA)會定期更新各國各類發電均化成本數據，有關發電均化成本之計算，是在特定折現率下考慮投資成本、翻新及除役成本、燃料及廢料成本、運維成本，根據IEA(2020)報告，主要使用核電國家在不同折現率下之發電均化成本如下表1，以匯率1美元兌換28台幣計算，結果顯示7%折現率下美國新建核電廠均化成本為1.99台幣/度，日本與韓國分別為2.43台幣/度及1.49台幣/度，其餘如下表1所列。

表 1. 核電發電均化成本(台幣/度)

國家/折現率	3%	7%	10%
法國	1.27	1.99	2.71
日本	1.71	2.43	3.14
韓國	1.1	1.49	1.88
美國	1.23	1.99	2.76
中國	1.4	1.85	2.3
印度	1.35	1.85	2.35

資料來源：Projected Costs of Generating Electricity, IEA (2020)

註 1: 匯率 1 美元兌換 28 台幣計算

另外，IEA(2021)亦推估核電與再生能源2020年至2050年發電均化成本及相較於2020年下降率預測（如下圖2）；此分析之核電與各種再生能源成本為美國、歐盟、中國、印度等國之平均，折現率為7%，由於歐盟2020年核電均化成本較高，約為4.2台幣/度，因此導致整體平均值2.77台幣/度較上表1中各國成本高，而太陽能與離岸風電的平均發電成本分別為1.26台幣/度與2.91台幣/度，明顯低於我國，是因為相對國際而言，我國再生能源發展期程較短，導致目前成本仍偏高。下圖2結果顯示，核電成本下降幅度小，但再生能源尤其是離岸風電成本下降明顯，至2050年下降率相較於2020年達66%，屆時成本約為核電的4成，此外太陽光電至2050年成本也僅約為核能的2成。

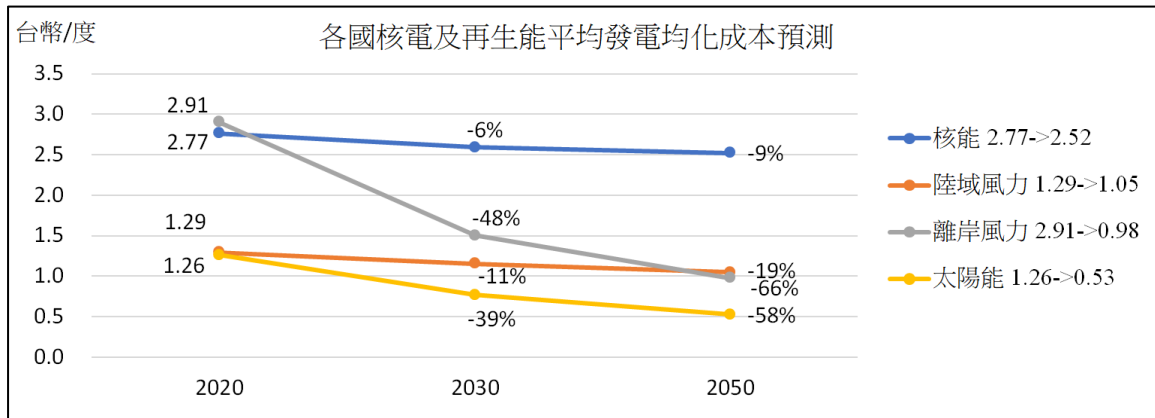


圖 2. 進10年全球核能發電占比

資料來源: Net Zero by 2050 -A Roadmap for the Global Energy Sector, IEA (2021)

註:匯率以 1 美元兌換 28 元新台幣計算。

根據World Nuclear Industry Status Report (2021)，日本經產省在福島事故後，考慮除役及提升安全風險等級之下，核能發電成本(含建廠成本，折現率3%)至少為3.02 台幣/度，將可能比屋頂型太陽光電及燃氣發電昂貴，在此情況下，核能發電將不再是最便宜的發電技術。此外，Japan Center for Economic Research (JCER) 亦指出，在考慮核能事故風險下，假設核電廠建造成本將從 USD 3,390/kW 增加到 USD 6,770/kW，漲幅近一倍，核能發電成本(含核後端除役成本)約為3.78台幣/度，相關比較可參考下圖3。

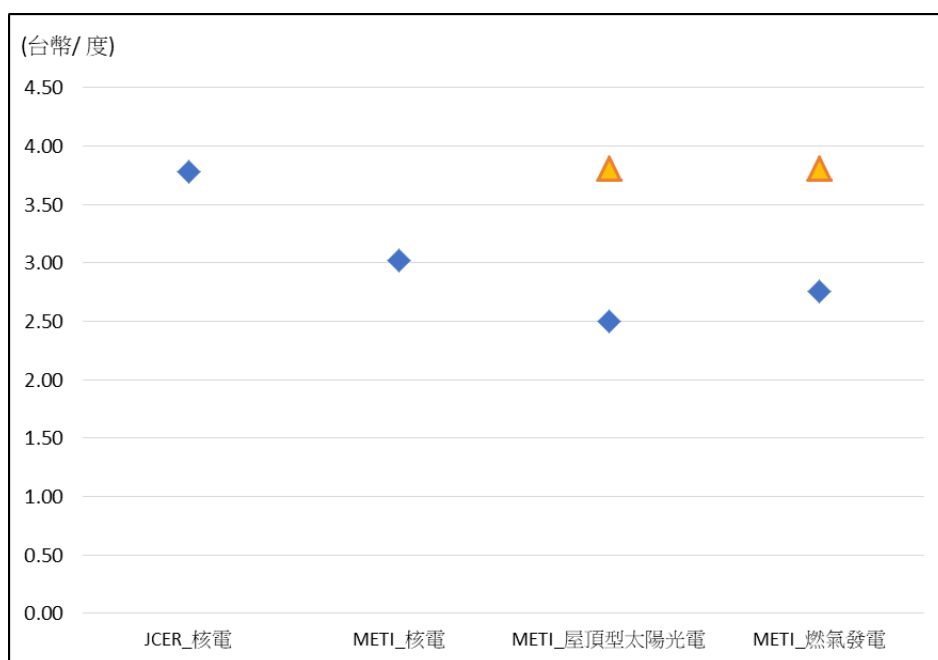


圖3. 各單位發電成本

註 1:匯率分別以 1 美元兌換 106 日圓；1 美元兌換 28 元新台幣計算。

註 2:三角形圖示表示估計值的上限。根據 METI 估算，屋頂型太陽光電成本介於 2.5~3.81 台幣/度，燃氣發電成本介於 2.76~3.81 台幣/度。

三、事故成本

日本經歷311事件後，事故風險所對應的成本費用，主要反映在追加的安全對策與及事故損害賠償等二項費用。在追加的安全對策方面，主要分為強化與新設對策兩種概念，除了耐震裕度、防海嘯、電源可靠度與設備性能的強化提升之外，新設對策包含防止飛機意圖衝撞、抑制放射性物質擴散、防止格納容器(圍阻體)破損、爐心損傷及對自然災害如火山、森林火災等項目納入考慮。此外，在2015年成本工作小組會議召開時，已有15座核電廠(24台機組)向原子力規制委員會申請更改裝置許可來符合新的評估標準。目前則有

16座核電廠(27台機組)正在申請，每家公司都在構建額外的安全措施。根據2021年成本工作小組針對各電力公司採取的額外安全措施的最新估計，每座核電廠約增加2,000億日元的費用，其中資本成本為1,369億日元，相關追加的安全對策可參考圖4。

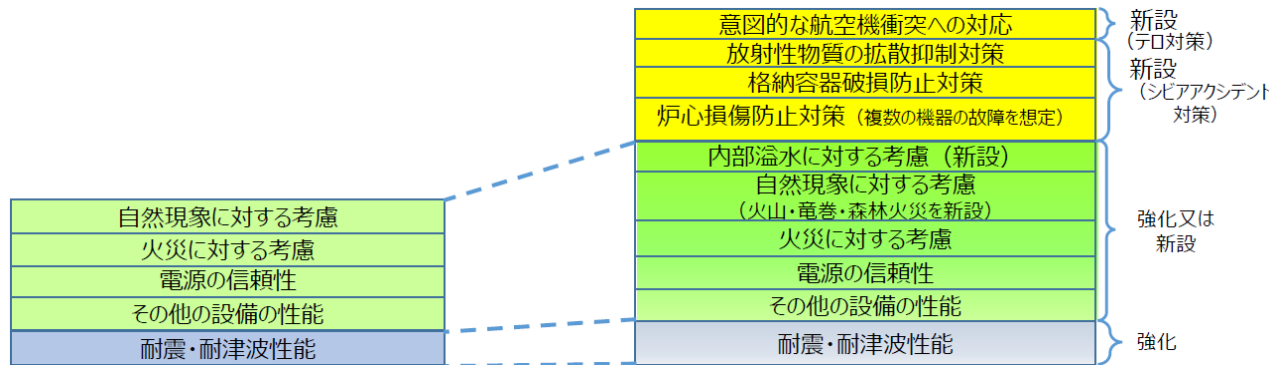


圖4. 防止重大事故和恐怖襲擊發生的設計標準與對策

資料來源: 基本政策分科会に対する発電コスト等の検証に関する報告, METI (2021)

另外，在事故損害賠償方面，2016年「東京電力改革・1F(福島核一廠)問題委員會」估計福島核災的損害賠償費用高達23.8兆日圓，而根據2017年5月與2021年4月「東京電力改革・1F(福島核一廠)問題委員會」的最新認定，參考福島核災的事故損害金額，並以4座模型廠作為基準⁴，再按發電量、人口、地域性等進行調整，以計算核電廠發生事故的相關成本，估算損害賠償費用為15.7兆日圓，其中事故廢爐費用為2.7兆，損害賠償費用為7.4兆日圓、除汙及中間貯藏分別為2.4兆日圓與0.9兆日圓。值得注意的是該報告估算15.7兆日圓的事故成本為下限值，未來仍有可能增加。相關費用可參考圖5。

⁴根據基本政策分科会に対する発電コスト等の検証に関する報告(METI, 2021)第8頁，以4座核電廠數據的平均值，將典型的發電設施虛擬化為模型廠「モデルプラント」以估算發電成本，此方法在OECD、英國和美國也採用，是國際公認的方法。

	事故廃炉費用	損害賠償費用	除染・中間貯蔵費用		その他
東京電力改革・1F問題委員会に提示された見直し（2016年12月9日参考資料より）	廃炉・汚染水対策の制度整備に必要な資金規模 8.0兆円 補正① 2.7兆円	賠償 7.9兆円 補正② 7.4兆円	除染（汚染廃棄物処理含む） 4.0兆円 補正② 2.4兆円	中間貯蔵（建設・管理運営等） 1.6兆円 補正② 0.9兆円	※平成23年度～令和元年度は決算額を用い、令和2年度は予算額を計上。 ※2015年コストWG同様、賠償及び除染費用や、次の事故が発生した場合に不要な費用を除く。
その他、前回までの試算において計上していた費用	補正①：廃炉費用については出力に依存しないと仮定し、福島第一1～4号機の追加廃炉費用を汚染レベルの高い1～3号機の3基分で割って補正 補正②：一過性の費用については出力とは関係なく計上し、毎年の費用についてはモデルプラントと福島第一の1号機から3号機までの出力の比（120万/202.8万）で補正 補正③：モデルプラントを前提として試算				発電施設の減損、核燃料の損失 補正③ 0.14兆円 行政費用補正③ 2.1兆円 ※
	合計 23.8兆円				
	補正後 合計 15.7兆円				
現時点で推計不能な費用、現時点で明らかに含まれていない費用	（廃炉関係） ○テアリ取出し以降に生じる廃棄物処分費用		（除染関係） ○最終処分関係費用		

圖5. 損害費用估算

資料來源：基本政策分科会に対する発電コスト等の検証に関する報告，METI (2021)

四、結語

在COP26 氣候峰會上，風力發電、太陽光電毫無疑問已是2050年全球達到淨零排放的主角；此外，國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)署長Rafael Mariano Grossi 於會議上提出核能發電可提供穩定的能源，協助部署更多的風力與太陽能發電，對解決氣候變遷問題做出貢獻，在達成淨零排放路徑中，應占有一席之地。然而，若考慮事故成本，日本經產省在福島事故後，考慮除役及提升安全風險等級之下，核能發電成本至少為3.02 台幣/度，將可能比屋頂型太陽光電及燃氣發電昂貴，核能發電將不再是最便宜的發電技術。而Japan Center for Economic Research (JCER)亦指出，在考慮核能事故風險下，假設核電廠建造成本將增加近一倍，核能發電成本為3.78台幣/度。因此，世界各國如何在能源安全、風險與成本之間取得平衡，均須考慮自身條件而有不同選擇。

參考文獻

1. Projected Costs of Generating Electricity, IEA (2020)
2. Net Zero by 2050 -A Roadmap for the Global Energy Sector, IEA (2021)
3. World Nuclear Industry Status Report (2021)
4. 基本政策分科会に対する発電コスト等の検証に関する報告，METI (2021)