

IEA 和 NEA 發布發電成本估計報告

—提出 2020 年發電技術均化成本和評估方法改善

林華偉

工業技術研究院 綠能與環境研究所

摘要

國際能源總署(IEA)和經濟合作暨發展組織(OECD)核能總署(Nuclear Energy Agency, NEA)評估 2020 年各種發電技術的均化成本。燃氣、燃煤、太陽光電、陸域風力、大型水力和汽電共生的建廠成本較低，分別落在 700-3,000 美元/kW 之間。當折現率 3%，均化成本較低的技術是核能、陸域風力和燃煤，分別是 51、69 和 76 美元/千度(中位數)。當折現率 10%，均化成本較低的技術是燃煤、燃氣複循環機組(CCGT)、陸域風力和核能，分別是 97、106、108 和 113 美元/千度(中位數)。敏感度分析顯示，燃氣 CCGT 均化成本對燃料成本變動最為敏感，燃煤均化成本對各項參數的敏感程度較平均。折現率和建廠成本變動對核能電廠均化成本的衝擊相當大。容量因數、營運年數變動對太陽光電和風力發電均化成本的影響較大。因應市場開放和再生能源增加趨勢，IEA 和 NEA 提出容量額度、容量均化成本、彈性指標和價值因素四個方向，以改善均化成本方法。

關鍵字：發電均化成本、發電技術、IEA、NEA

一、前言

IEA 和 NEA 發表第八版發電成本估計報告(Projected Costs of Generating Electricity 2015 edition, EGC 2015)。NEA 於 1981 年首次發表發電成本估計報告，評估燃煤和核能的均化成本。1989 年 IEA 加入 NEA 共同發表第三版報告，納入了再生能源和燃氣發電技術。

2015 年報告提供全球 181 座發電廠資料，發電技術涵蓋化石燃料、核能、再生能源、生質能和汽電共生。該報告是電力政策和能源模型研究者、電業主管機關和發電業者的重要參考。

均化成本分析方法的目的是比較各種發電技術生命週期的單位發電成本，評估可以補償發電技術成本的費率。

二、分析方法和重要參數設定

(一)均化成本分析方法

均化成本是發電廠投資案達到損益平衡的電力費率(electricity tariff)。損益平衡是指各期收益折現值加總相當於各期成本折現值加總，該收益不僅支付變動成本，也結清債務和股東權益(debt and equity)，達到投資者要求的報酬率(rates of return)。發電均化成本的方程式如下：

$$\begin{aligned} \text{均化成本} &= \text{電力費率} \\ &= \frac{\sum[(\text{建造成本}_t + \text{維運成本}_t + \text{燃料成本}_t + \text{排碳成本}_t + \text{除役成本}_t) \times (1 + \text{折現率})^{-t}]}{\sum \text{年發電量}(1 + \text{折現率})^{-t}} \end{aligned}$$

均化成本分析方法以損益平衡的電力費率來代表單位發電成本，上式能夠成立是基於兩個假設：

- 發電廠投資案各期收益和成本的實質折現率是穩定不變的；
- 躉售的電力費率(electricity tariff)是穩定不變的。

均化成本分析方法的優點是簡單、透明，可以做跨國跨發電技術的比較，以及它連結財務分析廣為人知的淨折現值觀念。很多國家的電力市場仍受管制，再生能源發電比重低，均化成本分析方法至今仍適用。

(二)重要參數設定

EGC 2015 原則上採用各國發電廠提供資料來計算均化成本。均化成本分析方法是比較各種發電技術做為基載的成本，為了有一致比

較基礎，降低各國發電廠在某些參數之差異的影響，例如折現率、施工期、營運年數、容量因數、燃料價格和碳價格，以及除役成本和殘值等，這些參數有設定值，說明如下：

1. 折現率

計算發電均化成本的實質折現率有三種設定：3%、7%和 10%。此處折現率是投資資金的社會成本，假設電力費率是穩定不變，未考量政治、經濟和電力市場變化的風險。

2. 施工和營運年數

非水力再生能源的施工期 1 年，燃氣發電廠是 2 年，燃煤發電廠 4 年，核能發電廠是 7 年。

風力和太陽能發電廠營運 25 年，燃氣發電廠是 30 年，燃煤發電廠和地熱電廠是 40 年，核能發電廠 60 年，水力電廠營運達 80 年。

3. 容量因數

在基載情況下，CCGTs、燃煤和核能電廠的容量因數設定 85%。實務上，CCGTs 通常是中載或尖載。再生能源發電設備的容量因數因地而易，使用各國資料。

4. 燃料價格和碳價格

硬煤(hard coal)和天然氣平均進口價格來自 IEA 首席經濟學家辦公室，與 IEA 世界能源展望(WEO)報告之假設一致。燃料的平均熱值與價格的關係是基於 OECD 能源統計和能源平衡資料。紐西蘭、中國大陸和南非採用國家設定值。

- 硬煤： 101 美元/公噸
- 天然氣(OECD Europe)： 11.1 美元/MMBtu
- 天然氣(OECD Asia)： 14.4 美元/MMBtu
- 天然氣(United States)： 5.5 美元/MMBtu

褐煤(brown coal)熱值和價格，大部分國家採用國家設定值，褐煤熱值內定值 25 GJ/公噸。

各國碳價格採用一致數據 30 美元/公噸 CO₂。

5. 除役成本和廢棄物管理成本

所有發電技術的除役成本和廢棄物管理成本發生在發電廠結束營運後的十年期間。除役成本設定是：

- 化石燃料發電廠的設備和材料殘值假設等於拆除和場地恢復成本，因此淨除役成本為 0。
- 太陽能 and 風力發電到達運轉年限是更換新的發電設備，廢棄物價值估計是初始投資成本的 20%。
- 核能除役成本是隔夜成本的 15%。其他技術除役成本是隔夜成本的 5%。

三、各種發電技術的均化成本

(一) 建廠成本

IEA 和 NEA 蒐集全球 181 座發電廠的設置容量、投資成本、容量因數、電力轉換效率、燃料和操作維護變動成本、除役成本等資料，發電技術涵蓋燃氣、燃煤、核能、陸上和離岸風力、太陽熱能和光能、水力、地熱、生質能和汽電共生。這些發電廠的特徵摘要如表 1。

從發電容量中位數來看，容量較大的技術是核能、燃煤、燃氣和離岸風力。大部分再生能源發電技術的容量較小，全球僅少數大型水力電廠有大發電容量。

比較各種發電技術的隔夜成本(不考慮建造期間資金利息的建廠成本)，以中位數來看，每單位發電容量建廠成本最高是聚光型太陽熱能電廠 6,072 美元/kW，最低是開式循環燃氣電廠(OCGT)699 美元/kW。

每單位發電容量建廠成本較高的技術有生質能、核能、離岸風力、小型水力、地熱和聚光型太陽熱，分別落在 4,000-6,000 美元/kW；每單位發電容量建廠成本較低的技術有燃氣、燃煤、太陽光電、陸域風力、大型水力和汽電共生，分別落在 700-3,000 美元/kW。

表 1、各種發電技術容量和建廠成本的摘要

技術	電廠數量	淨容量(MW)				隔夜成本(美元/kW)			
		最小值	平均值	中位數	最大值	最小值	平均值	中位數	最大值
燃氣-CCGT	13	350	551	475	900	627	1,021	1,014	1,289
燃氣-OCGT	4	50	274	240	565	500	708	699	933
燃煤	14	605	1,131	772	4,693	813	2,080	2,264	3,067
核能	11	535	1,434	1,300	3,300	1,807	4,249	4,896	6,215
太陽光電-住宅	12	0.003	0.007	0.005	0.02	1,867	2,379	2,297	3,366
太陽光電-商業	14	0.05	0.34	0.22	1	728	1,583	1,696	1,977
太陽光電-大型	12	1	19.3	2.5	200	937	1,555	1,436	2,563
聚光型太陽熱	4	50	135	146	200	3,571	5,964	6,072	8,142
陸域風力	21	2	38	20	200	1,200	1,911	1,804	2,999
離岸風力	12	2	275	223	833	3,703	4,985	4,998	5,933
水力-小型	12	0.4	3.1	2	10	1,369	5,127	5,281	9,400
水力-大型	16	11	1,093	50	13,050	598	3,492	2,493	8,687
地熱	6	6.8	62	27	250	1,493	4,898	5,823	6,625
生質能	11	0.2	154	10	900	587	4,447	4,060	8,667
汽電共生	19	0.2	5.3	1.1	62	926	4,526	2,926	15,988

備註：CCGT(combined cycle gas turbine)、OCGT(open cycle gas turbine)

資料來源：IEA and NEA 2015, Projected Costs of Generating Electricity 2015

(二)各種技術均化成本的分布

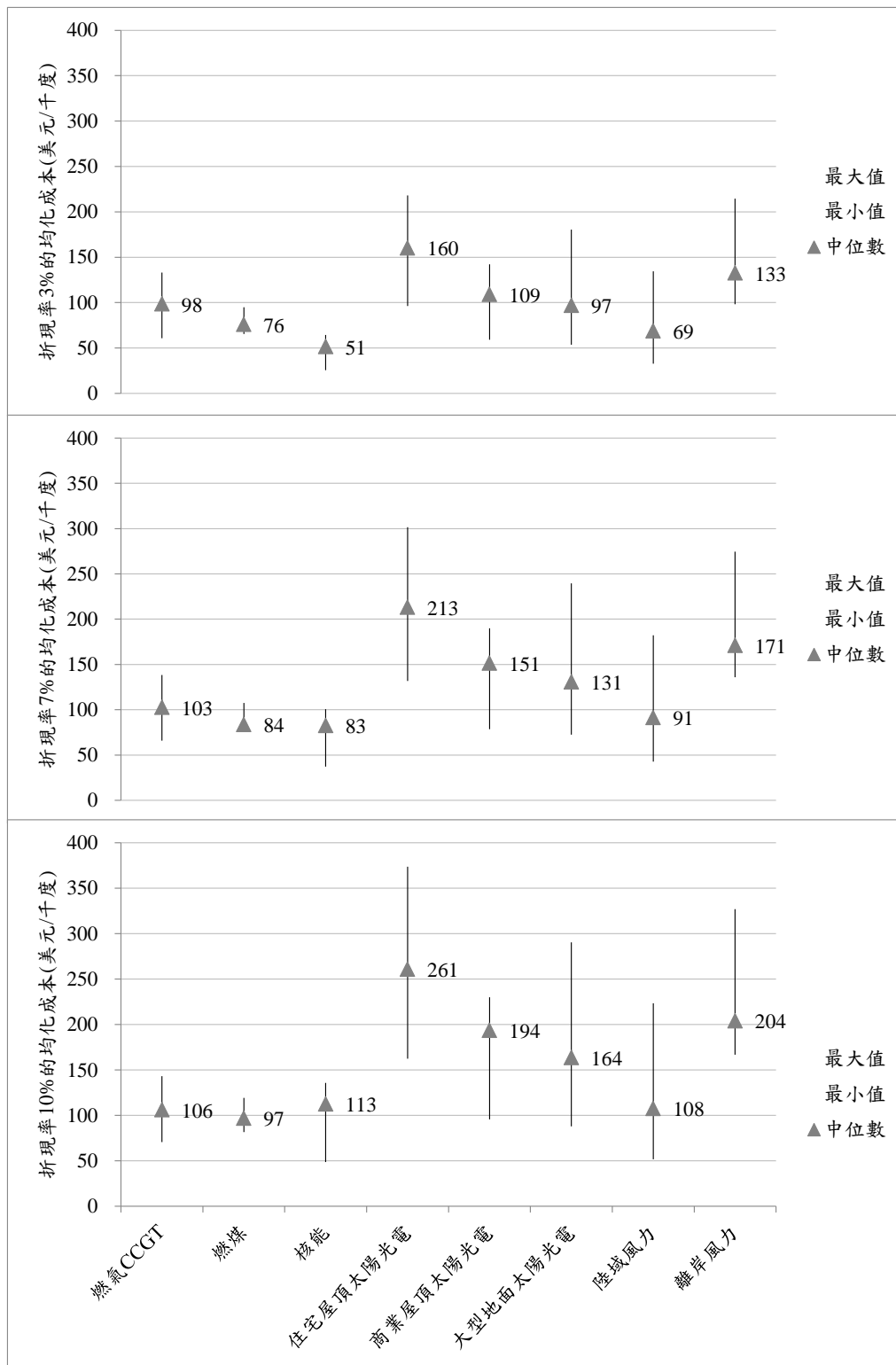
IEA 和 NEA 以發電廠資料估計發電均化成本。圖 1 是特定折現率下，主要發電技術之均化成本的最大值和最小值區間和中位數。

當折現率 3%，均化成本較低的技術是核能、陸域風力和燃煤，中位數分別是 51、69 和 76 美元/千度，陸域風力最大與最小值差距大，最大值達 135 美元/千度。燃氣 CCGT、大型地面和商業屋頂太陽光電的中位數接近 100 美元/千度。離岸風力和住宅屋頂太陽光電均化成本較高，中位數分別是 133 和 160 美元/千度。

隨著折現率增加，各項技術均化成本中位數上升，最大與最小值差距也擴大。不過各項發電技術均化成本的相對位置有了變化。

當折現率 10%，均化成本最低的技術是燃煤 97 美元/千度，其次依序是燃氣 CCGT、陸域風力和核能，這 4 項技術均化成本差距不大。

太陽光電和離岸風力的均化成本高出許多，中位數在 164 美元/千度以上。



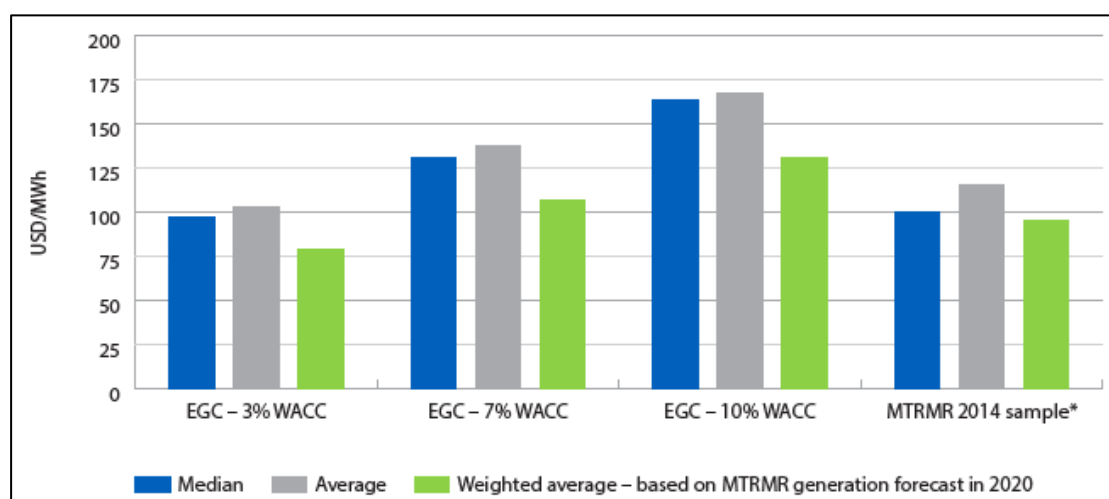
資料來源：IEA and NEA 2015, Projected Costs of Generating Electricity 2015，本研究整理(2015/11)

圖 1、各項技術發電均化成本的最大與最小值和中位數

(三)發展中再生能源適合用加權平均均化成本

太陽光電和風力發電的均化成本差距很大，原因是這些技術正在加速應用和演進，製造成本快速下降，各地的安裝成本也不同。例如各國裝置太陽光電的許可、檢查和併網、勞工成本和貸款條件，以及發電時數有很大差異。

若要比較快速發展的再生能源的均化成本，採用加權平均值比中位數或簡單平均值較為適當。圖 2 列出 IEA EGC 2015 和 2014 年再生能源市場報告(The Medium-term Renewable Energy Market Report, MTRMR 2014)蒐集的大型太陽光電均化成本的中位數、簡單平均值和加權平均值。



備註：MTRMR 根據各地市場的資金成本估計均化成本，EGC 採用三種折現率 3%、7% 和 10%。
資料來源：IEA and NEA 2015, Projected Costs of Generating Electricity 2015

圖 2、2020 年大型太陽光電廠的均化成本估計

以未來各國市場規模調整的大型太陽光電廠均化成本加權平均值，顯然低於中位數和平均值。EGC 2015 以折現率 3% 計算的加權平均均化成本將近 80 美元/千度，以折現率 10% 計算是 130 美元/千度。MTRMR 2014 計算的加權平均均化成本大約是 95 美元/千度。

經過市場規模調整的加權平均值，更能反映太陽光電市場從歐洲轉向中國大陸、日本和美國趨勢下的均化成本變遷。

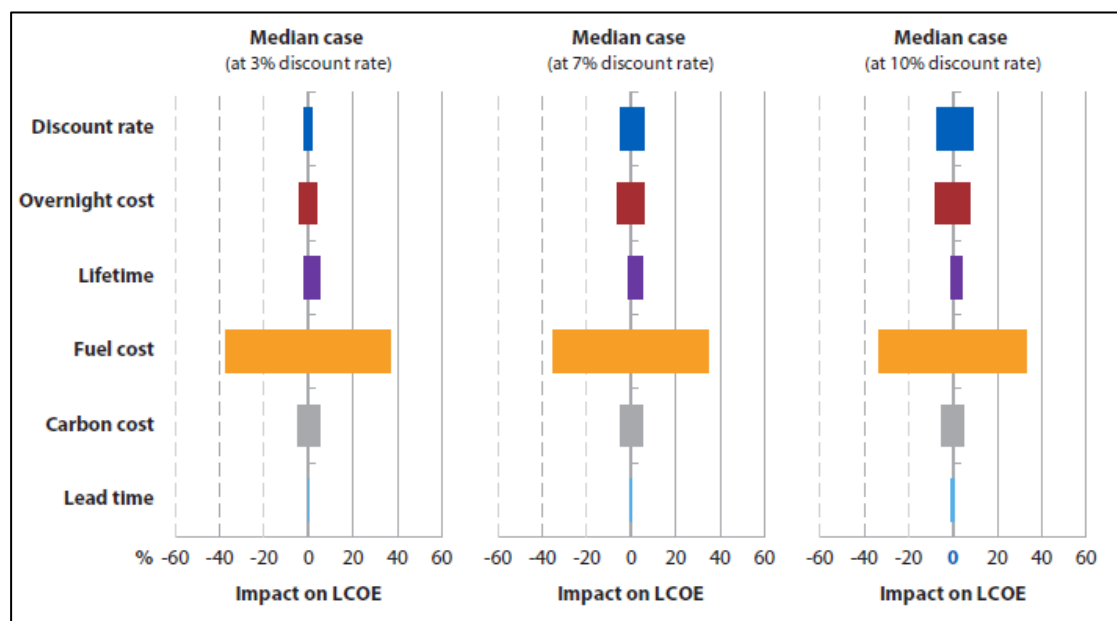
四、敏感度分析

敏感度分析是找出哪些參數對均化成本有較大影響，分析這些重要參數增減對均化成本的影響方向和程度。EGC 2015 分析的參數有折現率、容量因數、隔夜成本、營運年數、燃料成本、碳價格和施工年數。

(一)燃氣 CCGT 發電均化成本的敏感度分析

根據 EGC 2015 調查的燃氣 CCGT 資料，以各項數據之中位數計算一個假想發電廠的均化成本，這個 Median case 有折現率 3%、7% 和 10% 三種情況。接著折現率、隔夜成本、運轉年數等六個參數各自增減 50%，均化成本變化比率以六個橫條表示，形成以下龍捲風圖 (tornado charts)。

燃料成本對燃氣 CCGT 發電均化成本的影響程度最大，請見圖 3。折現率 3% 時，燃料成本增加或減少 50%，均化成本相對應增加或減少約 36%。當折現率提高，均化成本對燃料成本的敏度度稍微降低。其他五個參數增減 50%，對均化成本的影響都小於 10%。



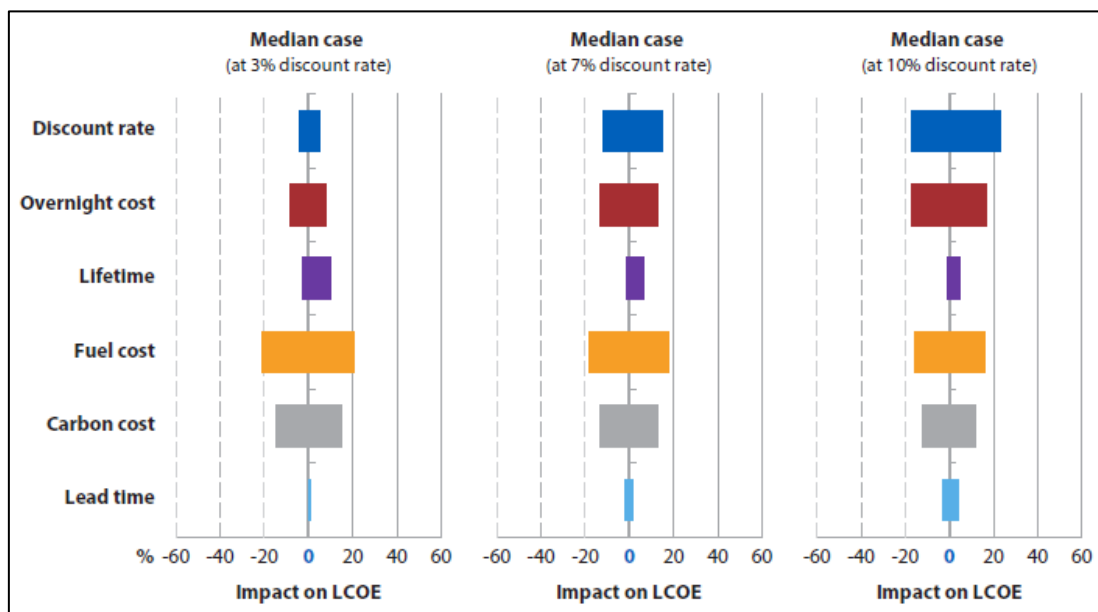
資料來源：IEA and NEA 2015, Projected Costs of Generating Electricity 2015

圖 3、重要參數對燃氣 CCGT 發電均化成本的影響

折現率、隔夜成本、碳價格和施工年數增減與均化成本變化方向相同。營運年數增減與均化成本變化方向是相反的，而且減少營運年數對均化成本的影響大於延長營運年數的影響。這是因為發電廠壽命長，提前除役少收的營收折現值大於延役多收營收的折現值。

(二) 燃煤發電均化成本的敏感度分析

圖 4 顯示，各項參數對燃煤發電均化成本的影響程度較平均，尤其在高折現率情況。主要原因是：1)相對於天然氣，煤炭單位熱值的價格便宜，但是碳排放較高；2)燃煤電廠單位容量建廠成本較高，而且營運年數較長，因此折現率或建廠成本改變，對均化成本的衝擊較大。



資料來源：IEA and NEA 2015, Projected Costs of Generating Electricity 2015

圖 4、重要參數對燃煤發電均化成本的影響

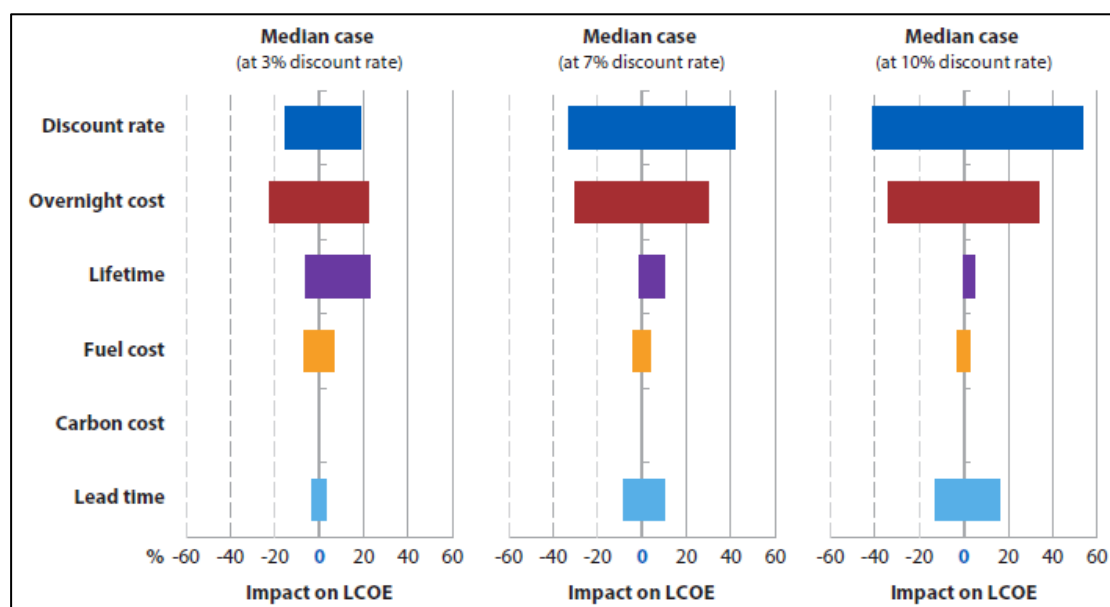
(三) 核能發電均化成本的敏感度分析

折現率和建廠成本對核能發電均化成本的衝擊相當大，尤其在高折現率情況，折現率增加一半將造成均化成本上升五成以上，建廠成本增加一半也對均化成本有超過三成以上衝擊，請見圖 5。這是因為

核能電廠與燃煤電廠有相同特徵，單位容量建廠成本較高，而且營運年數長。

由於核電廠營運年數比燃煤電廠更長，延役壽齡一半帶來的收益較高，尤其是折現率越低，延役增加營收的折現值會更高。這反映當折現率降低，營運年數對均化成本的衝擊明顯變大。

核電廠的另一特徵是建造期間較長(EGC 2015 設為 7 年)，施工期延長一半將造成各期營收的折現值更低，躉售價格(即均化成本)要提高才能損益平衡。

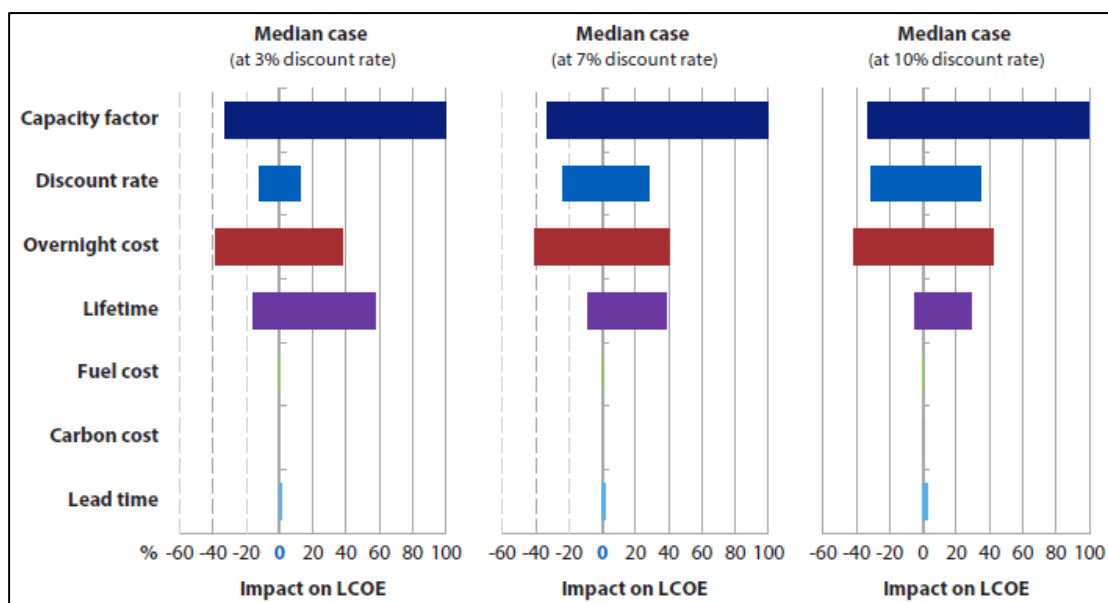


資料來源：IEA and NEA 2015, Projected Costs of Generating Electricity 2015

圖 5、重要參數對核能發電均化成本的影響

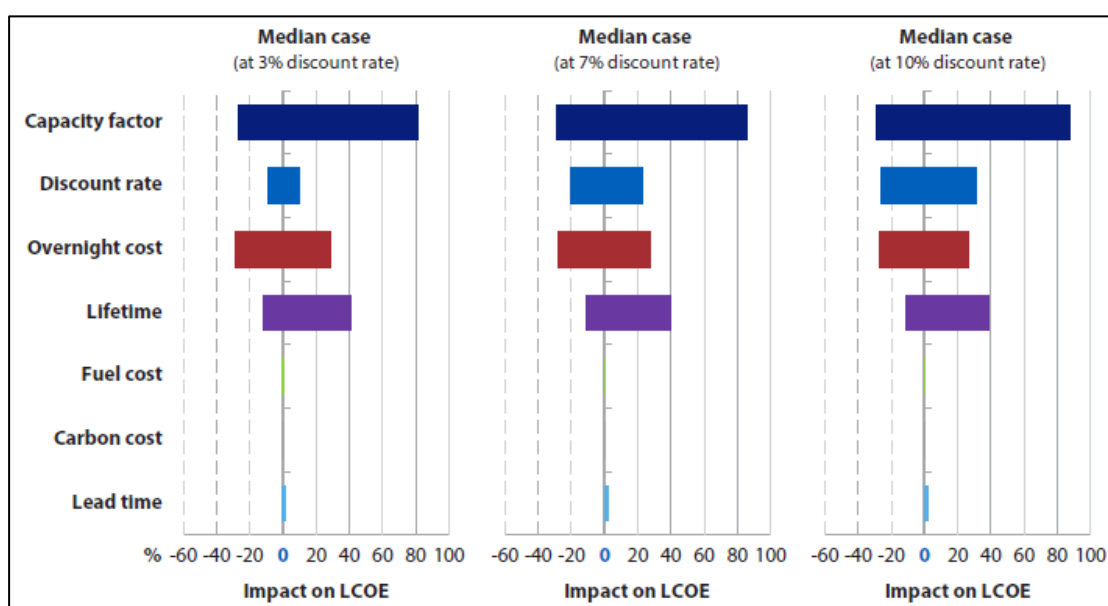
(四)商業屋頂太陽光電和陸域風力發電均化成本的敏感度分析

各地太陽光和風力發電容量因數差異大，有必要將容量因數納入再生能源發電均化成本的敏感度分析。此外，住宅、商業屋頂和大型地面太陽光電均化成本的敏感度分析結果類似，EGC 2015 只呈現商業屋頂型的分析結果，請見圖 6 和圖 7。



資料來源：IEA and NEA 2015, Projected Costs of Generating Electricity 2015

圖 6、重要參數對商業屋頂太陽光電均化成本的影響



資料來源：IEA and NEA 2015, Projected Costs of Generating Electricity 2015

圖 7、重要參數對陸域風力發電均化成本的影響

在太陽光電和風力發電，容量因數變化對均化成本的衝擊是巨大的，兩者呈現反向關係。商業屋頂太陽光發電容量因數減少一半，均化成本增加一倍以上；若容量因數增加一半，均化成本只降低三成。

這顯示容量因數增減對均化成本的衝擊是不對稱的。

太陽光電和風力發電的另一項特徵是營運年數對均化成本的衝擊程度高於傳統的火力電廠和核能電廠。這是因為太陽光電和風力發電建置時間短，壽齡也短於傳統發電廠，若營運年數增加或減少，營收增減的折現值相對較高。

五、均化成本方法的檢討

均化成本分析方法的假設是電業受管制和經營低風險。民間投資發電廠面臨政府規範、執照取得、投入成本和電價變動等風險，電業投資的折現率會反映投資風險。此外，大量導入發電特性有時間和空間變化的再生能源，也會影響其他發電技術的配置和電網平衡。當前電業投資和電源規劃的考量已超出均化成本方法的分析範疇，為此 EGC 2015 提出以下檢討。

(一)反映風險的資金成本

1. EGC 2015 認為債評良好國家的國營公用事業，評估投資的實質折現率是 3%。環境穩定和低風險下，民間投資評估的實質折現率是 7%。當風險更高，實質折現率是 10%。
2. EGC 2015 以問卷調查各國發電業的資金成本，平均大約是 7%。投資資金來自銀行貸款和發行股份，貸款成本在 3.8%-6%，發行股份成本在 6% (如德國住宅 PV)到 15% (如荷蘭再生能源)之間。EGC 2015 認為調查結果符合其折現率的設定。
3. EGC 2015 提出政府改善電業投資條件的做法：1)政策穩定和透明，例如溫室氣體目標；2)降低資金成本，如政府提供融資保證。

(二)系統成本

1. 大規模應用再生能源，均化成本方法只比較各種技術發電成本顯得不足。系統影響(system effects)考慮到不同發電技術和電力系統基礎設施的互動，捕捉每種發電技術導入對整個系統的衝擊。
2. 系統影響區分三類：1) 模式成本(profile costs) 是再生能源發電有自我相關特性¹，其他發電技術必須配合快速升降載因而提高發電成本。2) 平衡成本是(balancing costs)再生能源不確定性(如預測錯誤)導致其他發電廠變更排程更頻繁、更接近實時，也需要更多備用容量。3) 電網影響(grid effects)是系統為了容納多變再生能源，必須增加輸配設備，改為不同的電網結構。
3. 文獻上量化分析再生能源之經濟衝擊有兩種方法：1) 系統價值法(system value approach) 比較再生能源帶來的系統價值淨效益²是否大於再生能源均化成本。2) 系統成本法(system cost approach)是電力系統導入目標技術或標竿發電技術，兩種技術對電力系統的淨效益之差異定義為目標技術的系統成本。因此目標技術均化成本加上系統成本是該技術考量系統影響的均化成本，可以做技術比較。

(三)EGC 2015 提出均化成本方法的改善

1. 容量額度(capacity credit)：衡量新設每單位發電裝置容量對於系統裕度(System Adequacy)的影響。系統裕度指電力系統能夠滿足尖峰用電需求的能力。
2. 容量均化成本(the cost of new entry or levelised cost of capacity)：因應多變再生能源進入開放電力市場，必須提

¹ 自我相關特性例如一座太陽光電站開始大量發電，同時其他太陽光電站也大量發電。當大規模導入這類技術，可能有再生能源發電量大量驟升驟降的情形。

² 系統價值的淨效益是電力系統在再生能源導入前後的系統成本差異。

供備用容量的單位成本。

3. 彈性指標(flexibility metric)：衡量某技術能夠彈性供應發電容量或降低負載需求的能力，包含儲能和需量反應等技術。
4. 價值因素(value factor)：量化再生能源電力隨著其發電占比變化的市場價值。文獻上，再生能源電力的當前價值可以從市場價格來衡量，但是未來價值需要複雜計量方法或系統模型。

六、結論

EGC 2015 沿用均化成本分析方法，評估 2020 年各種技術的發電成本。這次與過去版本的最大不同是，折現率設定從 5% 和 10% 改為 3%、7% 和 10%，核電廠營運年數從 40 年增加到 60 年。

建廠成本方面，各種發電技術之隔夜成本的中位數顯示，生質能、核能、離岸風力、小型水力、地熱和聚光型太陽熱的每單位發電容量建廠成本較高，分別落在 4,000-6,000 美元/kW 區間。燃氣、燃煤、太陽光電、陸域風力、大型水力和汽電共生的每單位發電容量建廠成本較低，分別落在 700-3,000 美元/kW 區間。

均化成本方面，較低的技術是核能、陸域風力和燃煤，中位數分別是 51、69 和 76 美元/千度(折現率 3%)。當折現率 10%，均化成本較低的技術是燃煤、燃氣 CCGT、陸域風力和核能，中位數分別是 97、106、108 和 113 美元/千度。

敏感度分析顯示，燃料成本變動對燃氣 CCGT 均化成本的影響程度最大。燃煤均化成本對各項參數的敏感程度較平均。核能電廠建廠成本高、營運年數長，折現率和建廠成本變動對均化成本的衝擊相當大。在太陽光電和風力發電，容量因數、營運年數變動對均化成本的衝擊很大。

隨著電力市場走向開放競爭，再生能源發電容量增加，均化成本

分析方法顯得力有未逮。例如均化成本方法是計算長期平均成本，開放市場的躉售電價是反映發電邊際成本。均化成本不考量電業投資的市場風險，也未考量再生能源發電特性衝擊電力系統的成本。為此 EGC 2015 提出容量額度、容量均化成本、彈性指標和價值因素四個方向，以改善均化成本方法。

參考文獻

1. IEA and NEA 2015, Projected Costs of Generating Electricity 2015 edition, 2015/9.

https://www.iea.org/bookshop/711-Projected_Costs_of_Generating_Electricity