

美國加快電廠除役的啟示

—因需以燃煤發電補足電力，加速核電廠除役將導致碳排放量增加

蕭國鑫、吳坤益

工業技術研究院 綠能與環境研究所

摘要

美國頁岩氣大量生產後，導致天然氣價大幅降低，同時亦減低了燃氣發電的成本；加以近年來美國的電力需求成長緩慢，部分地區發電過剩；且美國政府規定未來發電廠亦須符合 MATS 標準及其他環保法規要求，在成本效益、環保與安全考量下，燃煤或核電廠遂成為優先考慮除役的對象，並逐漸為燃氣與再生能源發電所取代。而加速燃煤或核電廠除役將提高燃氣與再生能源發電占比，但是大量使用天然氣會使得氣價上漲而造成物價上揚，如加速燃煤與核電廠除役，預估 2040 年時天然氣價將比參考情境高出 11%，並帶動電價上漲。而在單獨加速燃煤電廠除役，預估 2040 年時的發電產業 CO₂ 排放量將減少 14%~20%；但是單獨加速核能電廠除役時，由於燃煤發電需要補足核能電廠除役所減少的電力，2030 年以後將會導致 CO₂ 的排放量比參考情境來的高。

目前我國若加速燃煤或核能電廠除役，將會因為電力不足而增加燃氣發電量。但是增加燃氣發電之天然氣儲存槽及興建新的燃氣電廠需要 10~12 年時間，且我國的 LNG 進口價為美國本土天然氣價的 3~5 倍，所以加速燃煤或核電廠除役，短期內除了有缺電隱憂外，亦將造成電價上漲。

一、前言

燃煤及核能發電為目前相對便宜與穩定的基載電源，2010 年約合占美國電力生產的 64.4%[2]。但是燃煤發電有大量溫室氣體排放的缺點，且美國未來亦需遵守汞和有毒氣體標準(Mercury and Air Toxics Standards, MATS)，以及其他環保法規要求，例如美國環保署於今(2014)年 6 月 2 日依據潔淨空氣法 (Clean Air Act) 授權提出「潔淨電力計畫」(Clean Power Plan)，藉由一系列針對各州電力碳排放係數的規範，促成 2030 年時電力部門的二氧化碳(CO₂)排放量，需較 2005 年減少 30%(如華盛頓州被要求減排 72%，北達科達州只需減少 11%)[8]，所以在 2016 年前舊有電廠必須選擇除役或進行翻新改善。而核能發電的整體營運除了電廠興建成本偏高外，尚有操作安全、用過核燃料儲存與除役後廠區的復原等問題；所以在考量環保及安全的措施情況下，此兩者的發電成本均有增加趨勢[2]。反之，美國頁岩氣大量開採後，天然氣的成本大幅降低，相對亦減低了燃氣發電成本；加上近年來美國境內的電力需求成長緩慢，且部分地區發電過剩，而發電成本較高的發電廠在無法損益兩平情況下，遂成為優先考慮除役的對象；如 2011 年與 2012 年，美國的核能與燃煤發電合占電力生產比例已下降到 61.5%及 56.4%。因此，本文將對這些發電廠如果除役，對未來電力市場的影響性進行探討。

二、美國的核能、燃煤與燃氣發電情形

如表 1 所示，1990 年美國的年總發電量為 3.04 兆瓩小時，其中核能年發電量約占總發電量 19.1% (0.58 兆瓩小時)；2000~2010 年核能年發電量大致維持在 0.75~0.81 兆瓩小時之間(約占年總電力生產 19~20%)，但自 2010 年以後，核能年發電量已有逐年下降趨勢[2]。而依據 IEA 資料，2012 年美國的核能發電主要來自境內 104 座核能發電廠所發的電力[6]；到 2014 年 3 月時，已有 4 部核能機組除役，

即美國境內若未包括興建中的核電廠，目前仍運作中的核電廠有 100 部核能機組[7]。

表 1、1990 年~2012 年美國的發電燃料占比[1]

(單位:T KWh)

種類 年代	石油液體 和其他	燃煤	核能	再生能源	燃氣	合 計
1990	0.14	1.59	0.58	0.36	0.37	3.04
1991	0.13	1.59	0.61	0.36	0.38	3.07
1992	0.11	1.62	0.62	0.33	0.40	3.08
1993	0.13	1.69	0.61	0.36	0.41	3.20
1994	0.12	1.69	0.64	0.34	0.46	3.25
1995	0.09	1.71	0.67	0.38	0.50	3.35
1996	0.10	1.80	0.67	0.42	0.46	3.44
1997	0.11	1.85	0.63	0.43	0.48	3.49
1998	0.14	1.87	0.67	0.40	0.53	3.62
1999	0.13	1.88	0.73	0.40	0.56	3.69
2000	0.12	1.97	0.75	0.36	0.60	3.80
2001	0.14	1.90	0.77	0.29	0.64	3.74
2002	0.11	1.93	0.78	0.34	0.69	3.86
2003	0.14	1.97	0.76	0.36	0.65	3.88
2004	0.14	1.98	0.79	0.35	0.71	3.97
2005	0.14	2.01	0.78	0.36	0.76	4.06
2006	0.08	1.99	0.79	0.39	0.82	4.06
2007	0.08	2.02	0.81	0.35	0.90	4.16
2008	0.06	1.99	0.81	0.38	0.88	4.12
2009	0.06	1.76	0.80	0.42	0.92	3.95
2010	0.06	1.85	0.81	0.43	0.99	4.13
2011	0.05	1.73	0.79	0.51	1.01	4.10
2012	0.04	1.52	0.77	0.50	1.23	4.05

燃氣與核能發電尚未大量使用前，燃煤發電為美國主要的電力來源，如 1990 年燃煤發電 1.59 兆瓩小時，占當年發電量 52.1%，燃氣發電只占 12.2%；2010 年美國開始大量生產頁岩氣(shale gas)，並提供燃氣發電使用後，燃煤發電占比在 2011 年及 2012 年時已逐漸下降為 42.2%及 37.4%，而燃氣發電占比則提升為 24.6%及 30.4%[2]。

由於美國天然氣價格下降、電力需求增長減緩，以及燃煤及核能發電需面臨環保與核安問題，所以此兩種發電機組已考慮進行除役。

例如 2012 年底，燃煤發電總裝機容量為 310 GW，但在 AEO2014 參考案例中，推估 2020 年美國境內約有 50GW(16%)的燃煤機組除役，雖然到 2034 年時燃煤機組發電仍占最大比例，但是之後就會被燃氣發電所取代[1]。另 2012 年及 2013 年美國核電運營商宣布，2015 年前有五部核子反應爐將會除役，而目前已除役者，包括聖奧諾弗雷 2 號和 3 號(San Onofre 2 and 3)反應爐、奇瓦(Kewaunee)反應爐及水晶河(Crystal River) (合計裝置容量約 4.2GW)，以及擬於 2014 年底除役之佛蒙特州揚基(Vermont Yankee)反應爐[4]。此外，奧伊斯特河(Oyster Creek)核電廠也因為單位盈利能力下降隱憂，預計於 2019 年停止營運[5]。為了評估超出參考情境下發電廠除役的可能影響，於是 AEO2014 中乃利用 NEMS 模型，針對加速燃煤或核能電廠、豐富的石油與天然氣資源、及一般的參考情境等進行模擬。

三、美國未來的發電情形

(一)NEMS模型推估

美國能源部能源資訊局(EIA)依據每年最新之能源生產潛能、能源發展趨勢及能源價格預測等對美國能源體系產生影響的重要因素資料，推估至2040年美國能源供需發展趨勢，作為政府與各界能源供需之參考依據[2]。而推估模型以國家能源建模系統(The National Energy Modeling System; NEMS)作為工具；此模型屬大型、多區域、技術資料豐富之能源經濟模型，為結合各部門能源需求預測模組、總體經濟行為模組及能源市場模組，在經濟面及資源限制條件下，求解能源供給組合。

NEMS模型之情境組合，為假設在既有(2013年10月底)的法規與標準均不變的情況下，參考情境提供了可以討論與檢視能源生產、消費、技術及發展趨勢的未來發展之基礎，其中2014年的模擬情境數共有30個[2]；同時也透過不同的情境檢視美國經濟與能源體系中，關於市場發展、技術及政策的不確定性。例如模擬燃氣發電的趨勢中，

考慮到未來天然氣價格相對低廉，對於新建燃氣電廠已具有相當的誘因，所以部分地區的燃氣電廠會逐漸取代原先之燃煤或是核能電廠；且到2035年的燃氣發電量會超越燃煤發電，在發電種類中占最大比例。另由於能源政策的引導，在規劃期程的前10年，再生能源發電的成長速度較快；而在2020年以前，美國的電力需求在既有的裝置量下仍可以滿足，所以燃煤電廠在一定的操作容量因數下，發電量仍可維持最大占比的37.4% (表2)[2]。

表2、NEMS模型之參考情境組合推估美國各類別發電比例[1]

年 份	燃油與其他	燃 煤	核 能	再生能源	燃 氣
1990	4.5%	52.5%	19.0%	11.8%	12.3%
2000	3.3%	51.7%	19.8%	9.4%	15.8%
2010	1.4%	44.8%	19.6%	10.4%	23.9%
2012	1.0%	37.4%	19.0%	12.2%	30.4%
2015	1.1%	39.2%	18.5%	14.2%	27.0%
2020	1.0%	37.4%	17.7%	15.2%	28.8%
2025	0.9%	36.5%	16.9%	15.4%	30.3%
2030	0.9%	35.1%	16.2%	15.5%	32.2%
2035	0.8%	33.6%	15.7%	15.7%	34.1%
2040	0.8%	32.1%	15.5%	16.3%	35.2%

(二) NEMS模型推估結果

AEO2014案例旨在探討對於推估天然氣價格和電力需求替代假設的影響，或是計算CO₂排放量，以減少溫室氣體排放，並作為未來可能的政策參考。而在考量美國整體能源和經濟的系統中，NEMS模型情境利用了多種組合，本文主要討論下列四種組合情境：

- (1) 加速燃煤電廠除役
- (2) 加速燃煤與核能電廠除役
- (3) 具有豐富的油與天然氣資源
- (4) 參考情境等進行模擬。

圖1為NEMS模型推估上述四種情境中，燃煤電廠於2012年至2040年除役的累積裝置容量，顯示到2040年單獨加速燃煤電廠除役的裝置容量可達110 GW(比參考情境51 GW約多出1.17倍)；在同時加速

燃煤與核電廠除役的情境下，2030年以前與單獨加速燃煤電廠除役接近，之後燃煤電廠除役趨於平緩，主要是部分燃煤電廠需要彌補核能電廠除役後的電力[1]。

美國核能管理委員會(NRC)已經批准境內 70% 以上的核能電廠再延長 20 年許可[2]；而 AEO2014 情境模擬為假定已許可的電廠均可延期退役，並繼續運轉到 60 年(除非退役計畫已經明確報導)，且假設目前興建中的核電廠建置完成後(裝置容量 5.5GW)，沒有再建新的核電廠。在模擬加速燃煤與核電廠除役的情況下，到 2040 年約有 42GW 核電裝置容量除役(圖 2)。其中在 2029 年以前，並沒有明顯地降低核電裝置容量(大部分核電廠延役到 60 年)；2029 年以後加速核電廠除役與同時加速燃煤電廠除役的裝置容量將大為提升，到 2040 年時已達到 42GW[1]。

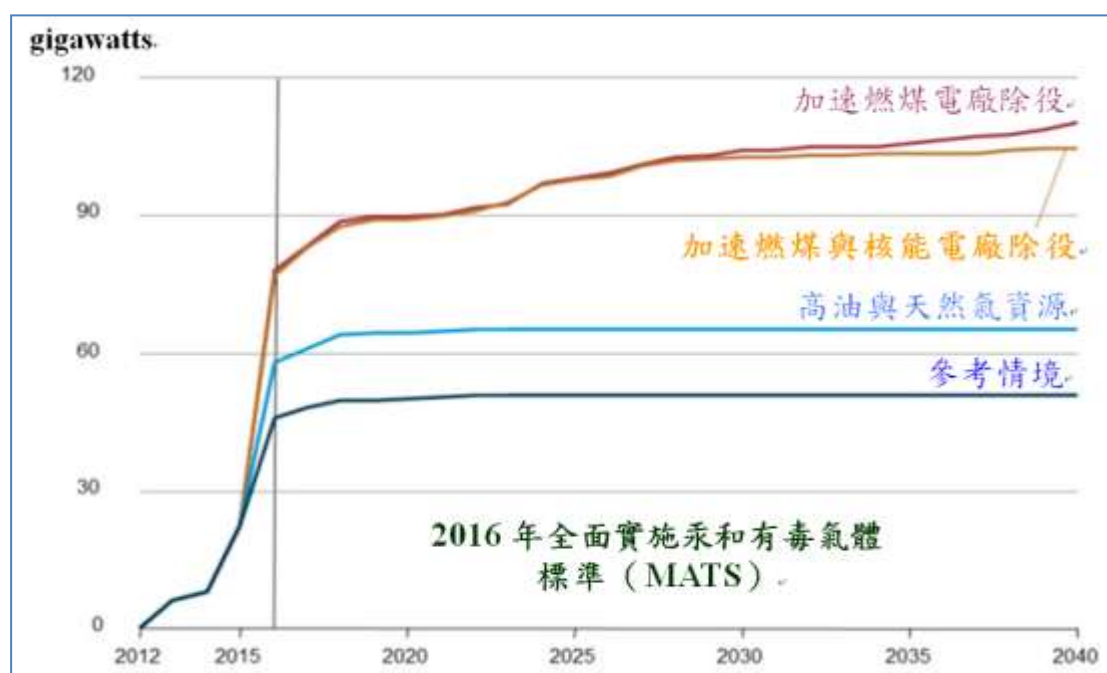


圖 1、NEMS 模型推估四種情境中燃煤電廠於 2012 年至 2040 年除役累積裝置容量 [1]

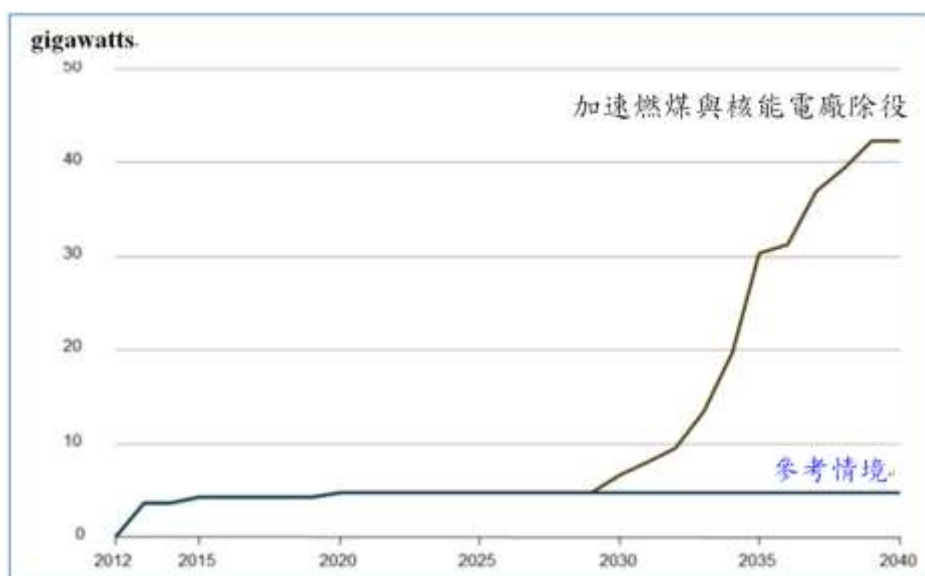


圖 2、NEMS 模型推估 2012 年~2040 年加速燃煤與核能電廠除役情境下，核電裝置累積除役容量 [1]

為了取代已除役的燃煤與核電廠供電量，NEMS 模型參考案例中亦模擬推估增加裝置容量(包括電力行業、汽電共生及最終使用部門的能力)；其中新裝置容量組合幾乎為燃氣與再生能源發電(圖 3)。例如在加速燃煤或核電廠除役的推估情境下，燃氣與再生能源發電增加的裝置容量將超過 290GW 與 90GW[1]。

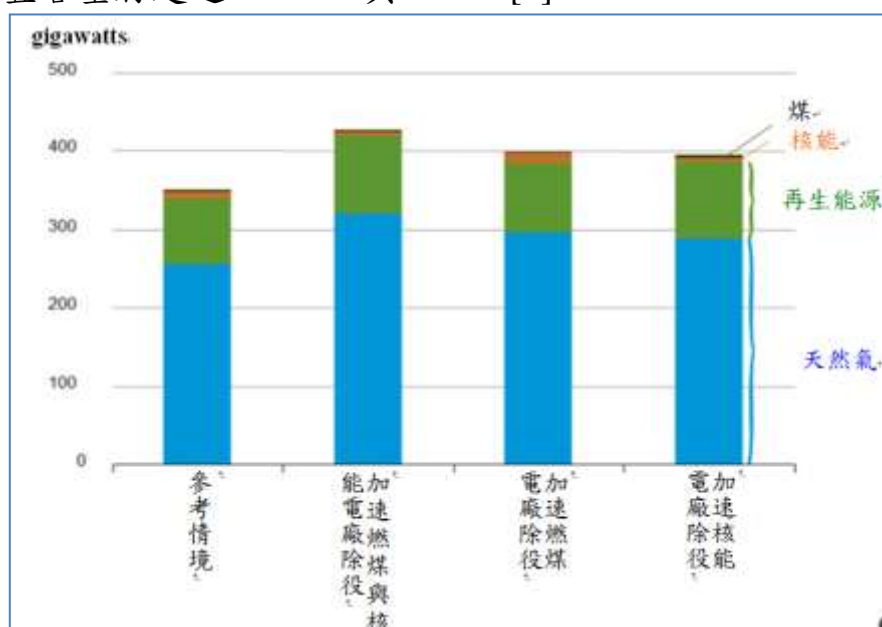


圖 3、NEMS 模型推估四種情境之燃煤與核能電廠於 2012 年至 2040 年除役後新增加的燃氣與再生能源裝置容量 [1]

NEMS 模型依據四種不同情境，推估 2040 年各類型的發電量如圖 4 所示，顯示單獨加速燃煤電廠除役後，燃煤電廠在 2040 年總減少的裝置容量最多；但在單獨加速核能電廠除役的情況下，AEO2014 模型預測 2040 年燃煤電廠裝置容量比參考情境微幅增加 1%。另外在同時加速核能發電及燃煤發電情況下，2040 年的核能發電會比參考情境低 40%；但在單獨加速燃煤發電情況下，核能發電裝置容量將比參考情境增加約 2% [1]。

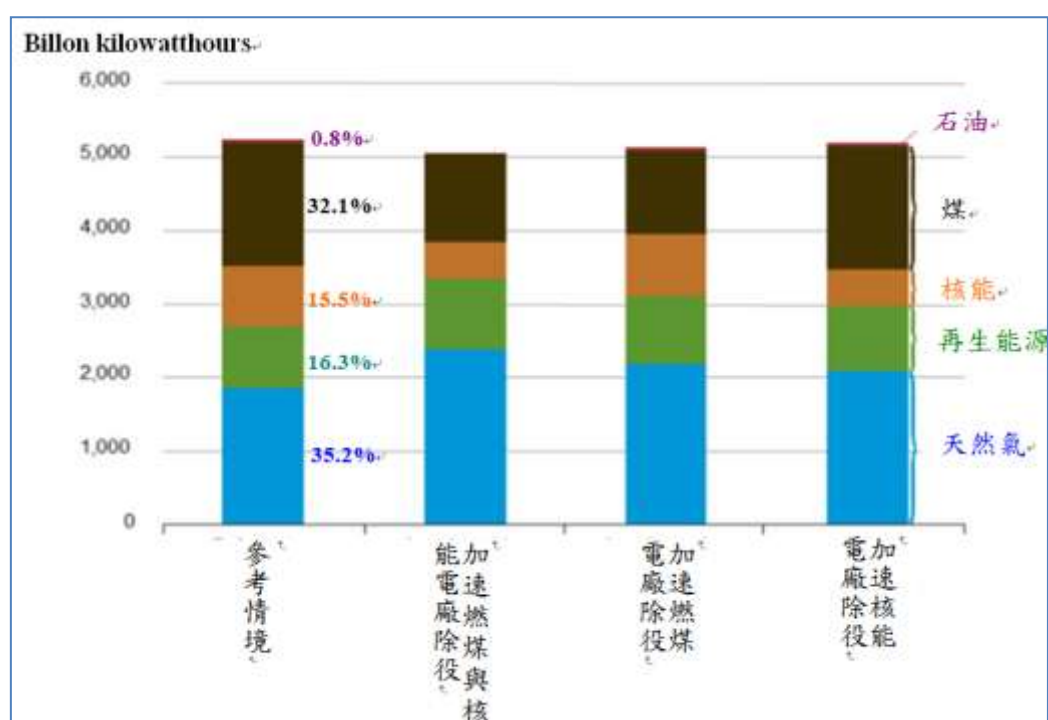


圖 4、NEMS 模型四種不同情境推估 2040 年美國各類型的發電量[1]

對於不確定分析，在既有燃煤與核能電廠部分除役後，因為供電量出現缺口，導致燃氣電廠可能加速成長。如在加速燃煤電廠除役的情境假設中，因為煤炭價格與燃煤電廠運維成本均高於參考情境，導致更多的燃煤電廠除役。在此情境下，2019 年時的燃氣電廠已可超越燃煤電廠，而到 2040 年時，燃氣電廠發電量占比可達 43%；在同時加速燃煤與核能電廠除役的情境模擬中，燃氣電廠的占比會高達 47%。另外由於儲能技術或其他相關技術發展的障礙，再生能源無法完全取代燃煤和核能電廠除役所留下來基載電力的缺口，所以燃氣電廠裝置量在這兩情境中增加 32% 與 50% [2]。

燃煤與燃氣發電為電力產業 CO₂ 排放的主要來源(約占全美 CO₂ 排放量 39%[8])，而核電與再生能源在發電過程中近於不排放。其中燃煤電廠發每千度電(Megawatthour)所排放的 CO₂ 超過燃氣複循環電廠的兩倍[1]。因為燃煤廠造成高的 CO₂ 排放量，而加速燃煤廠除役能顯著地減排 CO₂，所以 AEO2014 模型預估在此情境下，2040 年時燃煤電廠的 CO₂ 排放將低於參考情境約 20%(圖 5)；而在同時加速燃煤與核能機組除役的情況下，雖然部分核能發電改為燃氣發電，但 CO₂ 排放量仍比參考情境低 14%。但是在單獨加速核電廠除役的情境下，燃煤電廠會因為需要補足加速核電廠除役所缺的電力，所以 CO₂ 的排放將會高於參考情境[1]。

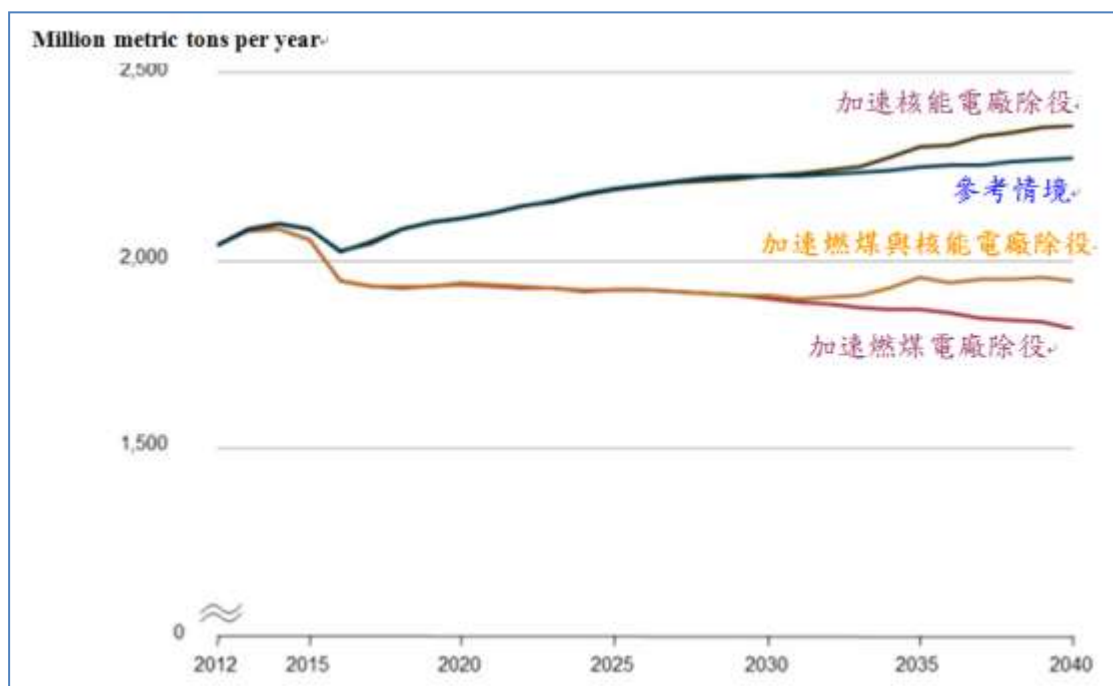


圖 5、NEMS 模型四種不同情境推估 2012 年至 2040 年美國發電廠 CO₂ 排放量[1]

四、導致電廠除役因素

由於經濟上的考量，發電業者通常會考慮如果預期發電成本超過收入時，該電廠是否進行除役。其中導致燃煤電廠電力行業收入下降的主因為經營成本增加，例如較大型資本項目的發電成本，包括安裝煙氣脫硫(Flue Gas Desulfurization, FGD)設備、營運成本增加或燃料成本上升等。另外 2012 年和 2013 年燃煤電廠傳輸到電力部門的平均價格雖然下降，但在 2007 至 2011 年間，燃煤電廠營運成本每年上升超過 4% [1]；所以整體的營運成本仍然比相對低廉氣價的燃氣電廠較不具競爭力。

而依據 AEO2014 之情境模擬，假設煤礦生產力下降後會造成煤價提升，且煤礦的運輸成本增加，將導致 2040 年燃煤價格上升 68% 以上；另外，隨著燃煤電廠年齡增加，為確保能有效運作，所以需要更新零件和進行工廠設備升級，也會造成較高的營運(O&M)成本；例如 2012 年至 2040 年間，燃煤電廠每年以 3% 的 O&M 成本增加，未來若再加上燃料價格的上漲，將會造成燃煤電廠加速除役。而相較於燃煤電廠，較低的天然氣價格提升了天然氣複循環(Natural Gas Combined-cycle, NGCC)發電廠的競爭力；如自 2008 年起，美國天然氣價開始下降後，較低的價格促使 NGCC 的發電成本更低，導致現有燃煤電廠的收入減少，進而驅使較不具競爭力的燃煤電廠加速除役。

燃煤發電為目前電力產業排放 CO₂ 主要來源，依圖 5 所示，當加速減少燃煤發電後，預估 2040 年時的發電產業 CO₂ 排放將會減少 14%~20% [1]。且未來也需要符合美國 MATS 所訂的標準及其他環保法規要求；如在 AEO2014 報告中說明，2016 年以後，所有燃煤電廠發電系統必須在纖維濾網上配備淨氣器(scrubber)或乾燥吸附劑噴射(dry sorbent injection, DSI)才能再繼續經營(2012 年底美國燃煤發電機裝置有 64% 符合此要求，其餘的業者仍在考慮是否加裝或除役)；另外如潔淨電力計畫即規範 2030 年時，電力部門的 CO₂ 排放需較

2005 年減少 30%，在這些相關環保法規的規範下，亦促成不具經濟效益的燃煤電廠加快除役。

核能電廠有相對較高的興建費用、營運安全風險、用過核燃料儲存，以及環境保護與景觀回復等課題(燃料成本相對較低)，均為核電廠重要的成本與後端營運支出。而 AEO2014 針對加速核電廠除役的情境模擬，是假設美國境內已被允許延 20 年許可的核電廠均可繼續運轉到 60 年。依據 AEO2014 資料顯示，2008~2012 年間，美國核電廠 O&M 成本每年平均約增加 4%[3]；假設到 2040 年以前，核電廠 O&M 成本每年以 3% 成長，且核電廠在運轉 60 年後，因為老舊因素而除役(AEO2014 參考案例中，2012 年至 2019 年推估除役的核電廠裝置容量達 6GW，其中四座反應爐已於 2013 年除役，而新增 5.5GW 核電廠裝置容量為目前正在興建中的核電廠，並假設未來沒有再籌建新的核電廠)。另外在 AEO2014 的市場趨勢中，亦曾討論即使有天然氣價格低廉的誘因（提高石油和天然氣產量），但在核電占比低的情況下，延遲其他電廠退役許可的可能性仍會增加。

五、天然氣與電力零售價格

加速燃煤和核能電廠除役會導致天然氣使用量增加，進而帶動氣價上漲；依據 AEO2014 預估，2040 年預估此情境的天然氣價比參考情境高出 11%(圖 6)[1]。另外因為加速除役情況不同，所以未來的電力零售價格亦會有所差異，而天然氣價格為影響電力零售價格的重要因子，所以預估 2040 年時，加速燃煤與核能電廠除役的假設案例中，零售電價比參考案例電價高出 12%(圖 7 與表 3)[1]。

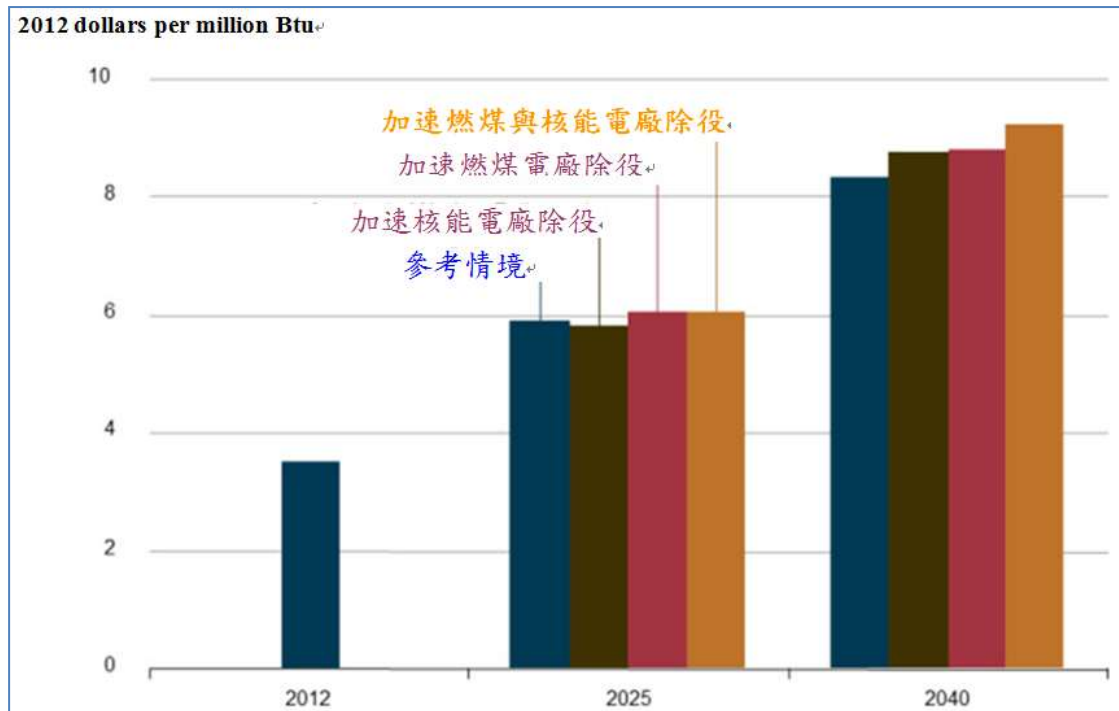


圖 6、NEMS 模型四種不同情境推估 2025 及 2040 年美國天然氣價格
[1]

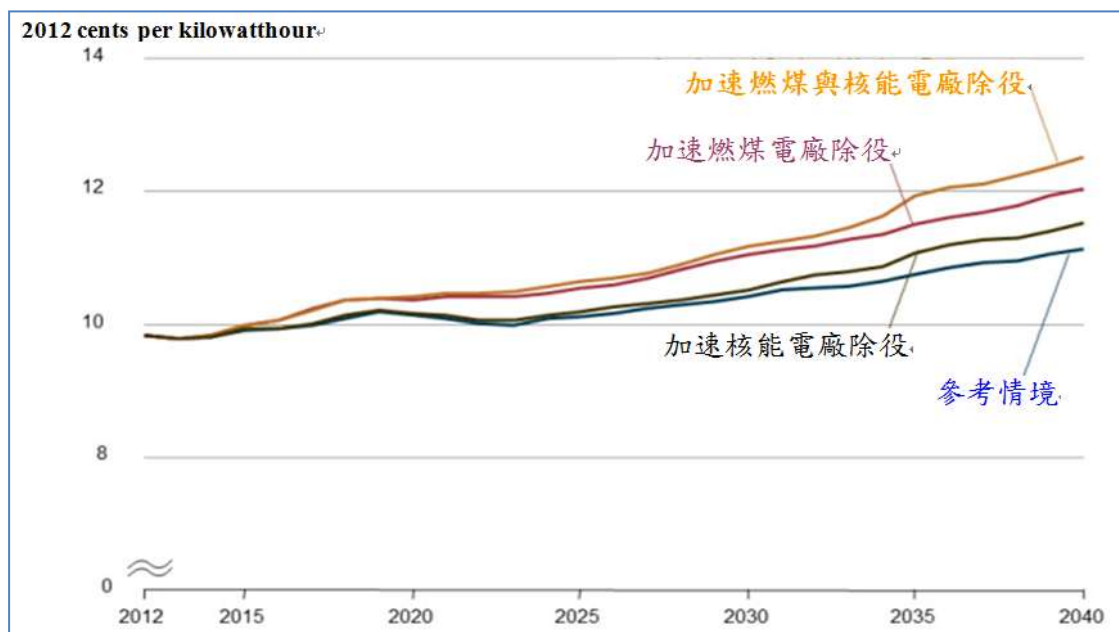


圖 7、NEMS 模型四種不同情境推估 2012 年~2040 年之電力零售價格
[1]

美國環保署亦說明，2030 年整體 CO₂ 排放量比 2005 年減少 30% 的新規定草案實施後，美國電價將會上漲；雖然此行動最多可能只會幫助全球 CO₂ 排放量減少 1~2%，但是到 2030 年時，整個國家因為減排改進民眾健康及全球暖化現象而獲取的淨利益，推估可以達到 480 億~820 億美元[8]。

表 3、NEMS 模型四種不同情境之 2012 年、2025 年及 2040 年電力行業平均交貨天然氣價格、零售電價及 CO₂ 排放量[1]

歷史與未來模擬案例	電力行業平均交貨 天然氣價格 (美元/MBtu, 2012)	零售電價 (美分/度, 2012)	電力行業的二氧 化碳排放量 (百萬噸)
2012	3.44	9.8	2,039
2025			
參考情境	5.75	10.1	2,194
加快燃煤電廠除役	5.91	10.5	1,925
加快核電廠除役	5.69	10.2	2,188
加快燃煤及核電廠除役	5.92	10.6	1,923
2040			
參考情境	8.16	11.1	2,271
加快燃煤電廠除役	8.60	12.0	1,821
加快核電廠除役	8.57	11.5	2,356
加快燃煤及核電廠除役	9.03	12.5	1,946
歷史資料來源:美國 EIA, 2013 年 9 能源回顧月, DOE/EIA-0035(2013/09)。 未來預測: AEO2014 國家能源建模系統, REF2014.D102413A, HCLONUC.D012314A, HCCSTOM.D012314A 和 LOWNUC14.D012314B。			

六、結論與建議

1. 美國頁岩氣大量生產後，導致天然氣價大幅降低，相對減低了燃氣發電成本，加以近年來美國的電力需求成長緩慢，導致部分地區發電過剩；另為符合美國政府所訂的 MATS 標準及其他環保法規要求，以及依據美國潔淨電力計畫，2030 年時電力部門的 CO₂ 排放需較 2005 年減少 30%，在這些相關環保法規的規範下，促成不具經濟效益的燃煤電廠加快除役。核能電廠則因為有高風險的營運安全疑慮、用過核燃料儲存，以及環境保護與景觀回復等問

題，所以也是加速除役的考慮對象。

2. NEMS 模型推估 2040 年時，單獨加速燃煤電廠除役的裝置容量可達 110GW(比參考情境 51GW 約多出 1.17 倍)，單獨加速核電廠除役的核電裝置容量約有 42GW，其中在 2029 年以前，並沒有明顯地降低核電裝置容量(大部分核電廠延役到 60 年)，2029 年以後，加速核電廠除役的裝置容量將大為提升。
3. 燃煤和核電廠加速除役會提高天然氣與再生能源發電占比；但是大量使用天然氣，會使得氣價上漲而造成物價上揚(如加速燃煤與核電廠除役，2040 年時預估天然氣價比參考情境高出 11%)，並帶動電價上漲。而再生能源發電(太陽能 and 風力發電)的技術改善能提高能源轉換效率，降低發電成本(包含建置與維修保養成本)，未來將成為再生能源輸出國(資金及技術)並提高國家經濟競爭力。
4. 當加速燃煤電廠除役後，預估 2040 年發電產業 CO₂ 排放將會減少 14%~20%。但是單獨加速核能電廠除役時，由於燃煤發電需要補足核能電廠除役所減少的電力，2030 年以後將會導致 CO₂ 的排放量比參考情境來的高。
5. 我國因天然資源缺少，主要仍以燃煤發電為主，若加速燃煤或核能電廠除役，將會因為電力不足而增加燃氣發電量，但是我國興建燃氣電廠與增加天然氣儲存槽需要約 10~12 年的時間，且我國進口的 LNG 的價格為美國本土天然氣價的 3~5 倍，因此，加速燃煤或核能電廠除役除了有缺電隱憂外，亦將造成電價上漲。另在我國的能源結構中，因為地理環境條件因素，再生能源占比短期內不容易大幅提高，因此宜冷靜客觀思考，我國未來能源發展之困境。
6. 依現有政策，核四發電廠能否運轉將由全國人民藉由公投來決定；但是在未雨綢繆的同時，國人也可以藉由節約能源之推行，或藉由產業轉型，以實際達到節能減碳的效益。

參考文獻

- [1] EIA Annual Energy Outlook 2014_Implications of accelerated power plant retirements, http://www.eia.gov/forecasts/aeo/power_plant.cfm, 4/28/2014
- [2] EIA Annual Energy Outlook 2014_ with projections to 2040.
- [3] Electric Utility Cost Group (EUCG), via Nuclear Energy Institute, "Annual briefing for the financial community" (February 13, 2014), <http://www.nei.org/Issues-Policy/Economics/Financial-Analyst-Briefings/Nuclear-Energy-in-2014-Status-and-Outlook>.
- [4] Entergy, "Entergy to close, decommission Vermont Yankee" (Press Release, August 27, 2013; accessed March 25, 2014), http://www.entergy.com/newsroom/newsrelease.aspx?NR_ID=2769.
- [5] Exelon Corporation, "Exelon to retire Oyster Creek generating station in 2019" (Press Release, December 8, 2010; accessed March 25, 2014), http://www.exeloncorp.com/newsroom/pr_20101208_Nuclear_OysterCreekRetirement.aspx.
- [6] IEA STATISTICS_Electricity Information, 2012.
- [7] IEA STATISTICS_Electricity Information, 2013.
- [8] Barack Obama's move to reduce carbon pollution from US power plants by 30%, The Economic Times, ET Bureau Jun 10, 2014.