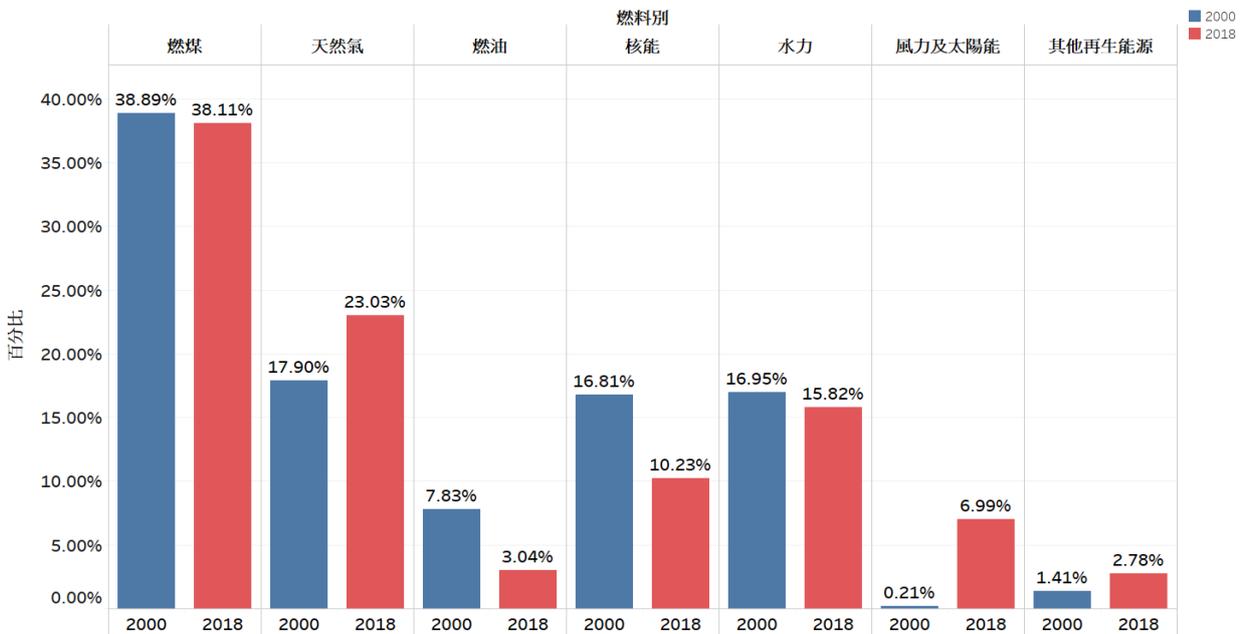


我國發電設備發電效率探討

台灣綜合研究院高級助理研究員 劉澤懷

一、前言

根據國際能源總署(International Energy Agency, IEA) 在 2020 年的「世界能源展望報告(World Energy Outlook 2019)」中指出，從 2000 年至 2018 年間，隨著中國、印度、及其他發展中國家經濟快速成長，全球電力需求增加近 75%；而發電結構中，2018 年相較於 2000 年，核能發電占比下降約 7%，再生能源上升至 26%，其中風力發電及太陽能發電成長約 7% 左右，石化燃料(燃煤、燃油、天然氣)中燃煤及燃油占比皆下降，唯有天然氣約上升約 5%，總體仍然維持 65% 的占比，詳如圖 1 所示。而再生能源方面，水力發電占比仍為最高。



資料來源: IEA, “World Energy Outlook 2019”, 2019。

圖 1.全球電力發電結構變化(2000 至 2018 年)

由圖 1 中之趨勢可得知，目前全球正處於能源轉型階段，以成長幅度來看，化石燃料漸漸以天然氣為主要燃料及風力與太陽能的使用，與我國在 2025 年能源轉型目標一致，因應國際二氧化碳排放減量趨勢及民眾意識，除燃料使用改變外，因我國近幾年仍以火力發電為主，高發電效率有助於減少燃料使用及降低碳排放等好處。有鑑於此，本研究就現階段我國火力發電設備發電效率概況、國內、外發電效率比較分析及未來發電設備相關最新發展趨勢進行分析。

二、我國火力發電設備之發電效率概況

隨著對環境永續的追求，能源轉型目的為在 2025 年達到天然氣發電占比 50%、燃煤發電 30% 及再生能源發電 20%，理論上以天然氣發電之電廠在空污排放量之表現都優於燃煤電廠，其主要的空氣污染物為氮氧化物；另，在溫室氣體排放方面，根據美國 Energy Information Administration (EIA) 表示，在相同單位下 (million Btu)，煤炭的二氧化碳排放量多於天然氣約 20%，因此考量環境永續上，天然氣比煤碳占有一定的優勢。但，現階段火力發電燃料使用中，發電成本最低為煤、天然氣次之、油最高，根據台電公布各種發電方式之發電成本中，燃氣每度電的發電成本大約是燃煤的 1.5 倍，加上考慮到燃料存量天數為穩定供電的因素之一，燃煤的儲存方式、天數及存量比天然氣更具優勢，故考量到上述因素，發電效率的提升就顯得重要，發電效率的高低直接影響燃料用量、成本及碳排放量，代表相同發電量，發電效率高者理論上會減少燃料用量，進而減少發電成本及碳排放。

火力發電設備發電原理是將燃料加熱燃燒，將貯藏的化學能轉換為熱能，熱能通過汽輪機轉為機械能，最後帶動發電機旋轉，將機械能轉變為電能。而依據台灣電力公司表示，電廠發電效率通常以熱耗率或熱效率表示，熱耗率係指每輸出一度電實際所需之熱量及熱效率係指火力電廠每發一度電所消耗熱量與所需投入燃料熱量之比值。式(1)及式(2)為熱耗率及熱效率計算公式，如下：

$$\text{淨熱耗率} \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{kWh}} \right) = \frac{\text{廠發電耗用燃料熱量(Kcal)}}{\left(\frac{\text{廠總發電量} - \text{廠內用電}}{860} \right) (\text{kWh})} \quad (1)$$

$$\text{淨熱效率}(\%) = \frac{860 \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{kWh}} \right)}{\text{淨熱耗率} \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{kWh}} \right)} \times 100 \quad (2)$$

其中式(2)中，860 (Kcal/kWh) 為每度電相當之熱量之理論值，而燃料消耗率(燃耗率)係指每輸出一度電所耗之燃料量，計算公式為年度熱耗率除以燃料熱值，如式(3)，依據 台電統計年報，係採固定燃料熱值計算，提供各年度或各機組燃耗率比較時的共同基準，否則比較上不具意義，如煤熱值以 6,000 kcal/kg 及天然氣熱值以 8,998 kcal/m³ 計算燃耗率。

$$\text{燃耗率} = \frac{\text{淨熱耗率}}{\text{燃料熱值}} \quad (3)$$

另一方面，行政院環保署國家溫室氣體登錄平台提供各年度固定污染源之溫室氣體總排放量，現階段溫室氣體總排放量數據環保署更新至 107 年，本文計算每度電溫室氣體排放量係用溫室氣體總排放量除以淨發電量，如式(4)。

$$\text{每度電溫室氣體排放量} \left(\frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{kWh}} \right) = \frac{\text{溫室氣體排放量}(\text{tonCO}_2\text{e}) * 1000 \left(\frac{\text{kg}}{\text{ton}} \right)}{\text{淨發電量}(\text{kWh})} \quad (4)$$

統整式(1)至式(4)，並配合環保署目前更新至 107 年溫室氣體排放量之數據，本研究以 107 年台電統計年報及各民營電廠之 107 年度年報為計算淨熱耗率、淨熱效率、燃耗率及每度電溫室氣體排放量之數據依據，國營及民營電廠之計算結果詳如表 1 至表 4。

表 1 107 年台電火力汽力廠機組發電及碳排放情形

電廠	淨發電量 (度)	淨熱耗率 (Kcal/kWh)	淨熱 效率 (%)	煤用量 (氣乾基) (公噸)	溫室氣體 排放量 (公噸 CO ₂ e)	燃耗率 (kg/kWh)	每度電溫室氣體 排放量 (kgCO ₂ e/kWh)
林口	11,591,942,127	2,156	39.89	3,735,423	9,549,446	0.3593	0.823
大林	8,281,951,115	2,172	39.60	2,715,859	10,111,290 ^{*1}	0.3619	0.705 ^{*2}
興達	13,778,817,400	2,395	35.91	5,091,223	19,066,805 ^{*1}	0.3992	0.694 ^{*2}
台中	37,248,097,200	2,393	35.94	14,470,154	34,203,261	0.3988	0.918

資料來源：台電107年統計年報，行政院環保署國家溫室氣體登錄平台，本研究整理。

*1 大林與興達電廠，此兩發電廠內含有天然氣機組，因環保署國家溫室氣體登錄平台僅提供溫室氣體總排放量，故大林及興達電廠之溫室氣體排放量為燃料種類煤及天然氣之加總。

*2 如上述附註 1，大林與興達電廠之每度電溫室氣體排放量是依據淨總發電量(燃煤機組+天然氣機組)計算，大林總淨發電量 14,332,942,515 kWh(8,281,951,115+6,050,991,400)及興達總淨發電量 27,459,046,753 kWh(13,778,817,400+13,680,229,353)，故不包含在比較每度電溫室氣體排放量計算結果內。

表 2 107 年台電火力複(單)循環廠機組發電及碳排放情形

電廠	淨發電量 (度)	淨熱耗率 (Kcal/kWh)	淨熱 效率 (%)	天然氣用量 (m ³)	溫室氣體 排放量 (公噸 CO ₂ e)	燃耗率 (m ³ /kWh)	溫室氣體 每度電排放量 (kgCO ₂ e/kWh)
通霄	15,008,430,000	1,795	47.92	2,761,159,787	5,750,998	0.1994	0.383
大林	6,050,991,400	2,515	34.19	1,539,090,257	10,111,290*1	0.279	0.705*2
興達	13,680,229,353	1,991	43.19	2,763,861,207	19,066,805*1	0.2212	0.694*2
南部	7,808,789,520	1,948	44.15	1,546,434,363	3,222,881	0.2164	0.412
大潭	28,355,999,423	1,826	47.09	5,472,477,820	10,966,256	0.2029	0.387

資料來源：台電107年統計年報，行政院環保署國家溫室氣體登錄平台，本研究整理。

表 3 107 年民營火力汽力廠機組發電及碳排放情形

電廠	淨發電量 (度)	淨熱耗率 (Kcal/kWh)	淨熱 效率 (%)	煤用量 (濕基) (公噸)	溫室氣體 排放量 (公噸 CO ₂ e)	燃耗率 (kg/kWh)	溫室氣體 每度電排放量 (kgCO ₂ e/kWh)
和平	8,598,079,689	2,384	36.07	3,337,138	7,799,547	0.397	0.907
麥寮	11,094,827,825	2,368	36.31	4,300,276	9,754,873	0.394	0.879

資料來源：107年度和平及麥寮電廠年報，本研究整理。

表 4 107 年民營火力複(單)循環廠機組發電及碳排放情形

電廠	淨發電量 (度)	淨熱耗率 (Kcal/kWh)	淨熱 效率 (%)	天然氣 用量 (m ³)	溫室氣體 排放量 (公噸 CO ₂ e)	燃耗率 (m ³ /kWh)	溫室氣體 每度電排放量 (kgCO ₂ e/kWh)
長生	3,975,963,230	1,802	47.74	738,421,891	1,529,993	0.2002	0.384
新桃	2,385,268,000	1,855	46.37	449,271,679	942,891	0.2061	0.395
國光	1,907,734,611	1,811	47.48	349,019,002	734,756	0.2013	0.385
嘉惠	2,237,785,600	1,813	47.43	412,329,167	859,921	0.2015	0.385
森霸	3,918,769,416	1,844	46.64	734,380,611	1,533,440	0.2049	0.391
星能	2,101,568,000	1,811	47.48	386,951,200	811,219	0.2013	0.386
星元	2,660,090,905	1,795	47.92	484,972,410	999,796	0.1995	0.376

資料來源：107年度各民營電廠年報，本研究整理。

由表 1 至表 4 可證明，當效率越高，燃耗率及每度電溫室氣體排放量均會越低。統計結果顯示，我國燃煤電廠平均淨效率約為 37%、平均每輸出一度電耗煤量約為 0.385 kg 及溫室氣體排放量約為 0.882 kgCO₂e，相較於我國天然氣電廠，平均淨效率約為 46%，每度電耗氣量及溫室氣體排放量約分別為 0.2111 m³ 及 0.388 kgCO₂e，其中大林及興達電廠不包括在平均每度電溫室氣

體排放量內，原因詳如註二。因此，以我國能源轉型政策對未來固定污染源溫室氣體排及空氣污染物排放將有明顯改善，另，在能源轉型過渡期，為確保供電穩定，燃煤發電暫不可或缺的，故燃煤機組之發電效率提升機組就效率扮演重要的角色，以求最小化空氣污染及二氧化碳之排放量/濃度。

三、國內、外發電效率比較分析

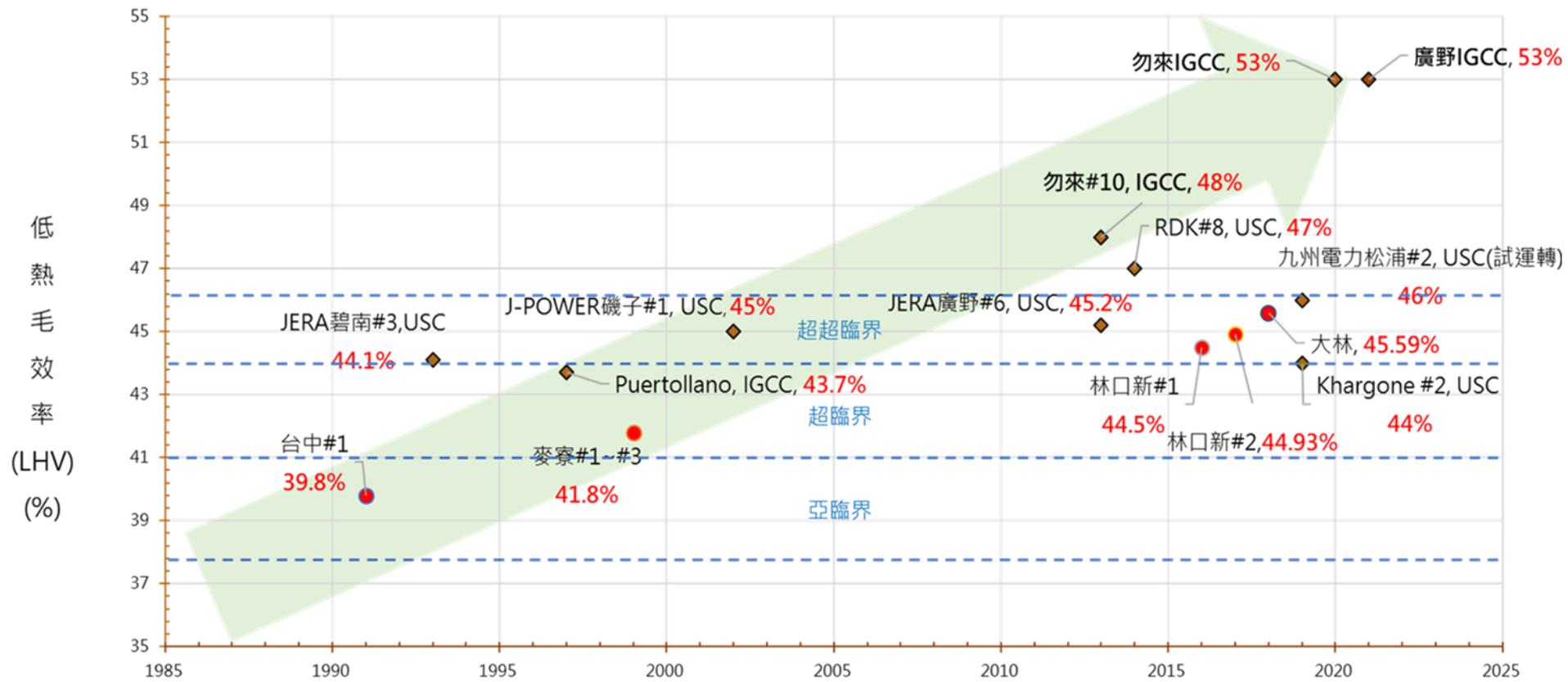
全球除能源天然資源豐富之國家(如：瑞典、葡萄牙等國之慣常水力發電占比可達 50%)外，多數國家仍以化石燃料及核能為主要發電結構，本研究綜整比較國、內外火力(燃煤及燃氣)發電廠(如：日本、印度、美國、英國、德國)之機組設備類型、發電效率，茲分述如下：

(一) 燃煤機組

日本燃煤機組在世界具有指標性，從 1993 年商轉的 JERA 碧南#3 為日本第一台超超臨界機組，毛熱效率約 44.1%(LHV)，至 2013 年商轉的 JERA 廣野#6 之毛熱效率約 45.2%(LHV)，世隔 6 年，九州電力松浦#2 目前正試運轉，預估之毛熱效率達到 46%(LHV)；除國外 IGCC 機組外，我國燃煤機組與國外機組設備規格演進的比較方面，如圖 2 所示，從 80 年商轉的台中火力機組(亞臨界)之毛熱效率約 39.8% (LHV)，而 88 年商轉麥寮火力機組(超臨界)之毛熱效率約 41.8% (LHV)，至 107 年商轉的大林#1(超超臨界)之毛熱效率約 45.59% (LHV)。因此，近 30 餘年來我國燃煤機組毛熱效率提升約 5.8%，已與世界先進燃煤機組發電效率相當。

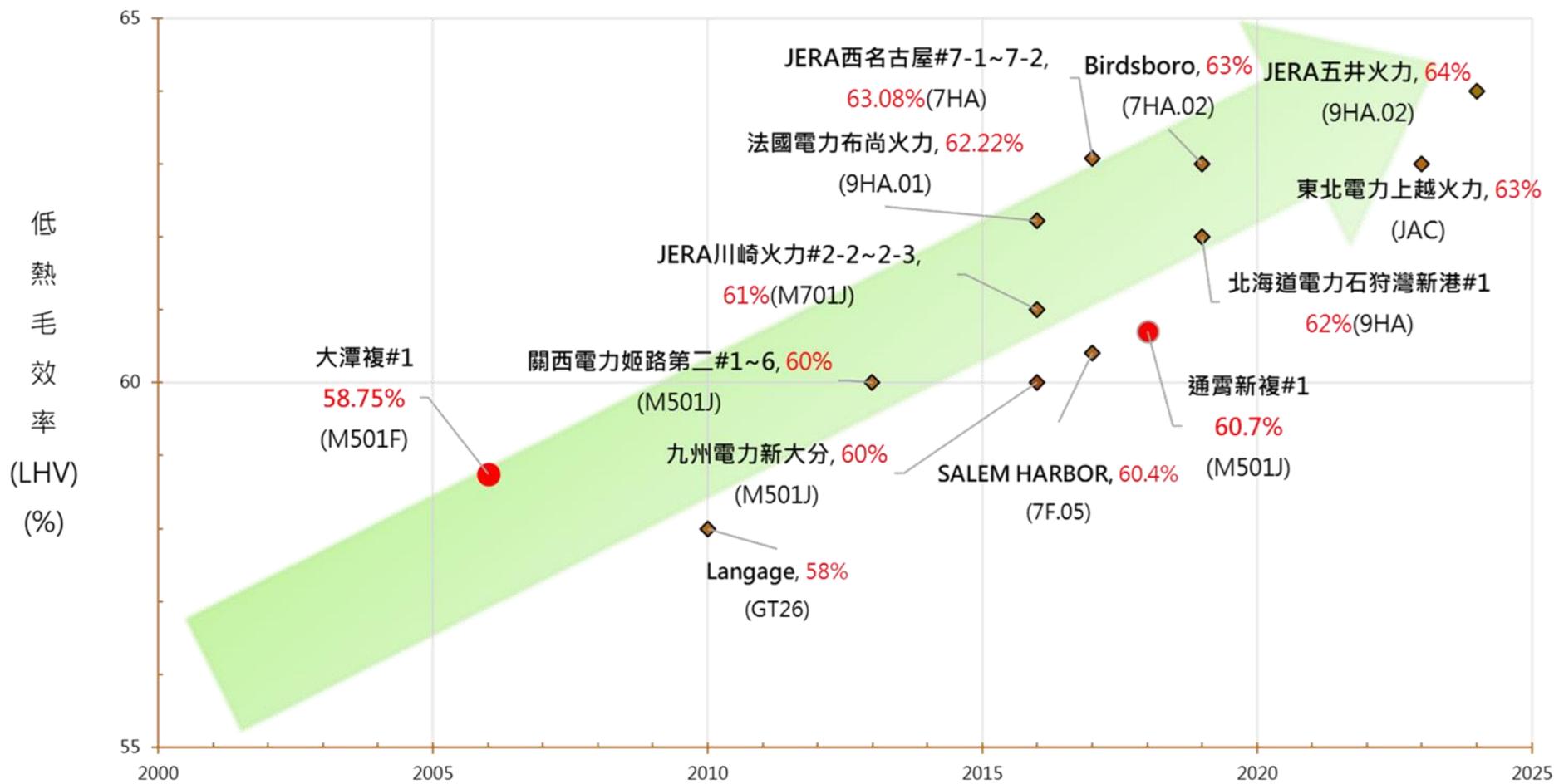
(二) 燃氣複循環機組

我國燃氣複循環機組從 69 年商轉的通霄複#1 之毛熱效率約 39.2% (LHV)，而 90 年商轉的長生民營複循環機組之毛熱率已達 52.4% (LHV)，近來 107 年商轉的通霄新複#1 之毛熱效率高達 60.7% (LHV)；因此，近 40 年來我國複循環機組毛熱效率已提升 21.5%，相較於日本之複循環機組毛發電效率，我國正逐步趕上日本，達世界先進燃氣機組發電效率水準。以台電既有火力電廠為例，通霄電廠於 2018 年 2 月所更新的燃氣複循環機組#1 為日本 MHPS 公司生產的最新 M501J 型，而 2019 年及 2020 年將陸續新增同型燃氣複循環機組，各項設備配置規劃(含氣渦輪機)及運轉參數皆趕上目前最新技術，並在相同燃氣機組(M501J)比較下，以我國通霄新複#1 燃氣機組毛熱效率最高，詳見圖 3 所示。



資料來源：台電公司提供，本研究整理繪製

圖 2 我國燃煤發電廠機組與國外機組效率比較



資料來源：台電公司提供，本研究整理繪製

圖 3 我國燃氣複循環發電廠機組與國外機組效率比較

四、未來發電設備相關最新發展趨勢

對於國際上環保意識抬頭及對二氧化碳議題高度重視，國際上對於未來發展著重在低碳燃料及再生能源相關發電設備之發展，如天然氣及太陽能。但，由於天然氣存量問題及再生能源供電穩定性等問題，且國內處於能源轉型階段，短期內燃煤電廠的存在是必要的，因此提升既有燃煤電廠效率，以穩定基載電力的供應及最大化降低既有之火力電廠空污排放。

國際上許多國家現今火力發電主要以天然氣為主，以美國為例，除已商轉天然氣複循環機組，建設中之機組都使用最新設備，如 Jackson Generation 預計在 2022 年完成，使用三菱(MHPS)最新氣渦輪機(501JAC)，單機效率可高達 44%，除了發電效率，氣渦輪機之升降載率及啟動時間相對重要，以因應當需要電力緊急調度時，具有足夠彈性配合，本研究彙整 GE、MHPS 及西門子(Siemens)現階段最新氣渦輪機之資訊，詳如表 5。

表 5 GE、MHPS 及 Siemens 之單循環氣渦輪機資訊

	GE		MHPS		Siemens	
型號	9HA.02	7HA.03	M701JAC	M501JAC	SGT5-9000HL	SGT6-9000HL
頻率	50Hz	60Hz	50Hz	60Hz	50Hz	60Hz
額定功率	571MW	430MW	448MW	425MW	593MW	405MW
壓縮機級數	14	14	15	15	12	12
壓縮比	23	23	23	23	24	24
效率(LHV)	43.9%	43.2%	44.0%	44.0%	42.8%	42.6%
低熱值熱耗率 (kJ/kWh)	8,201	8,332	8,182	8,182	8,411	8,451
排氣溫度	636°C	-	663°C	649°C	670°C	670°C
升降載速率	70MW/min	75MW/min	53MW/min	42MW/min	85MW/min	85MW/min
啟動時間	<30min	<30min	<30min	<30min	<30min	<30min

資料來源: GE、MHPS、Siemens 官方網站，本研究整理。

IEA 於「2017 年能源技術展望報告」中即針對燃煤發電機組的淨效率做以下定義效率，淨熱效率在 38~39%(LHV)以下之燃煤發電機組屬次臨界、39~43%(LHV)為超臨界、43~45%(LHV)可歸為超超臨界，淨效率大於 45%(LHV)則為先進超超臨界發電，且機組效率提升有助於 CO₂ 排放強度的下降，其趨勢約為提升機組效率 1%則可以降低 CO₂ 排放強度 2.5%，這也是各製造商致力於提升機組效率主因之一。

先進超超臨界機組(A-USC)(主蒸氣溫度 700~760°C/壓力約為 5,000psi) 效率範圍設計值為 45%~50%，為未來燃煤機組重要研發項目之一，美國在過去 10 年裡，在降低汽輪機低壓端熱損失方面也取得了顯著的進步，提高了整體發電機組的效率和可靠性，美國電力研究所和美國能源部門將繼續下一階段的先進 USC 組件測試；日本處於開發證實高溫耐熱材料開發與二段再熱系統等檢討之要素技術階段，並以國家計畫等級進行研發。

煤炭氣化複合發電(IGCC)技術較傳統燃煤技術多一道氣化手續，電廠設備較多，建廠成本也較傳統燃煤電廠高。因 IGCC 煤質範圍具彈性與便宜、污染排放低且發電效率高(40%~43%)，但因建設與運轉成本因素，故國際上實際商轉案例並不多，現今實際商轉的 IGCC 發電廠為中國天津的綠色煤電計畫建造的 IGCC 電廠，韓國於 2016 年商轉的 Taean 電廠以及日本於 2007 年商轉的 Nakoso 電廠計畫，惟以日本發展進度較為領先，其國家與電業共同建設之 25 萬瓩級實驗電廠，並已開始商轉。並以此為基礎，於將來亦期待發展將燃料電池整合於複循環發電之「煤炭氣化燃料電池複合發電(IGFC)」，以達熱效率的提高目標。

五、結論

配合我國能源轉型政策，114 年達天然氣 50%、燃煤 30%及再生能源 20%之配比目標，落實「增氣減煤」之原則，近幾年來燃煤發電逐漸減少，反之，天然氣及再生能源之發電量逐漸升高，我國燃煤及燃氣複循環發電設備從規劃、建置到商業運轉，均需 5 至 10 年不等

之時間；過去以來能源局已善盡監督電業採購世界先進機組設備，而電業亦依招標規範建置發電效率較高且污染防制最佳之發電機組。

除購買世界最先進之機組設備，對於既有之火力電廠，我國以提升機組熱效率，減少廠內用電、節約非生產性用電為主軸，檢討出多項重點改善案，如機組元件之改善。此外，我國已應用人工智慧之技術於火力發電廠，如建立煤的履歷系統、燃燒校調等，將發電效率平滑化及極大化。未來應持續追蹤國際最新發電技術及設備發展，及持續應用 AI 技術應用於節能、儲能、電網等，以提升效能。

參考資料來源：

1. 台灣電力公司企劃處，“107 年統計年報”，台灣電力公司，2017。
2. 行政院環境保護署國家溫室氣體登錄平台，
https://ghgregistry.epa.gov.tw/ghg_rwd/Main/Index
3. “Energy Technology Perspectives 2017.” Energy Technology Perspectives, 2017.
4. Gas Power Systems & Gas Power Generation: GE Power. (n.d.). Retrieved July 28, 2020, from <https://www.ge.com/power/gas>
5. Gas turbines. (n.d.). Retrieved July 28, 2020, from <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/power-generation/gas-turbines.html>
6. Mitsubishi Hitachi Power Systems, L. (n.d.). Gas Turbines: Products: MITSUBISHIHITACHI POWER SYSTEMS, LTD. Retrieved July 28, 2020, from <https://www.mhps.com/products/gasturbines/>
7. “World Energy Outlook 2019.” World Energy Outlook, 2019.