

燃煤發電效率提升技術發展與減碳潛力評估

台綜院研一所 王俊凱

摘要

依 IEA(2015)世界能源展望新政策情境預估，至 2035 年全球發電結構中，仍有 31.2%來自燃煤發電，持續在供電結構上扮演不可或缺的角色，但其會造成大量的污染物排放及溫室氣體排放，並導致氣候變遷等負面影響，嚴重衝擊全球的生態環境。因此，世界先進國家致力於發展高效低排放(High-efficiency, low emissions, HELE)燃煤發電技術，以提高燃煤機組效率，減少煤碳使用及污染物排放。

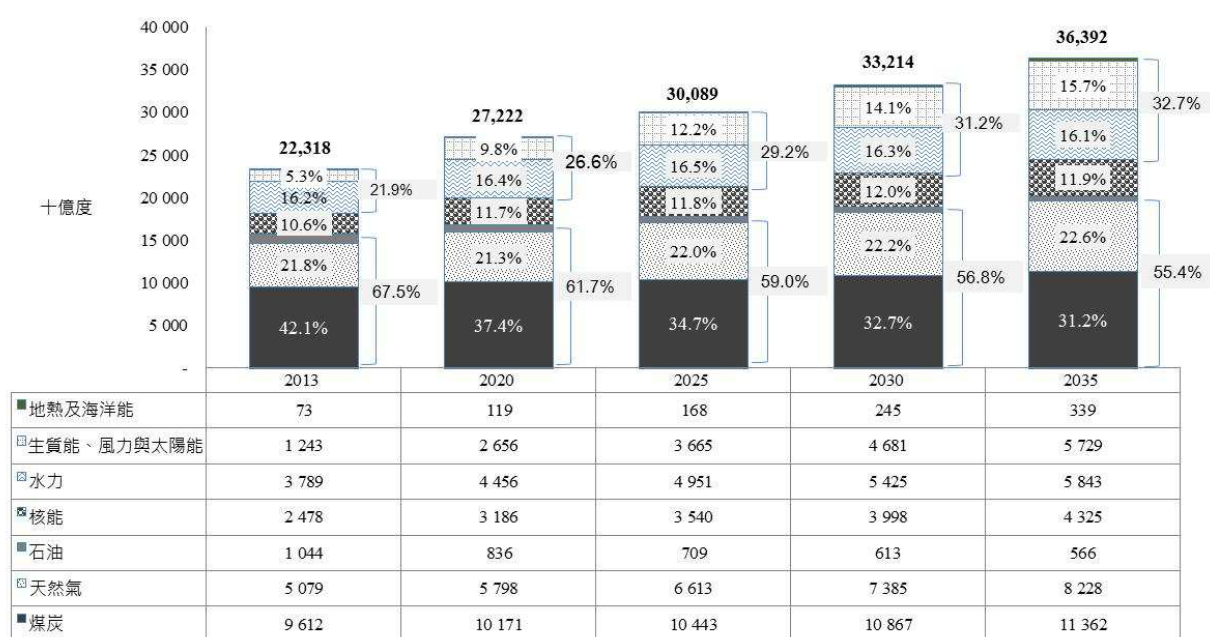
世界各國積極發展提升發電效率技術，在設計階段包括先進超超臨界技術(Advanced Ultra Super Critical, A-USC)技術、高低位分軸配置二次再熱技術，可提高粉煤發電熱效率至 48%以上。在既有機組效率改善上，中國大陸公布 2020 年平均淨耗煤率應低於 310 克標準煤/度(相當於 39.6%HHV-net)目標，另在新設超超臨界機組效率改善上，中國大陸上海外高橋第三發電廠效率改善案例獲美國電力雜誌評選的 2015 年頂級電廠(TOP PLANT)之一，可做為我國燃煤電廠效率改善之參考。

有鑑於此，本文評估燃煤電廠效率提升之減量潛力，發現各方案減量效果最小為 C1 方案 8.2 百萬噸至最大 C4 方案 16.4 百萬噸，顯示燃煤部門效率改善之減量潛力十分龐大。因此，建議我國應推動引入中國大陸最新發電技術及現有電廠效率改善技術之效益與風險評估，以作為推動能源部門溫室氣體減量之參考依據。

關鍵字： 高效低排放技術(High-efficiency, low emissions Technologies)、先進超超臨界技術(Advanced Ultra Super Critical, A-USC)；電廠效率(Power Efficiency)；平均淨耗煤率(Average Coal Consumption Per KWH)

壹、前言

電力為現代人生活的必需品，在使用時非常方便、安全，且不會造成污染，而煤炭因成本低廉且供應穩定等優勢，持續在供電結構上扮演不可或缺的角色，依 IEA(2015)世界能源展望新政策情境預估，至 2035 年全球發電結構中，仍有 31.2%來自燃煤發電(如圖 1 所示)。但燃煤發電會造成大量的污染物排放及溫室氣體排放，並導致氣候變遷等負面影響，嚴重衝擊全球的生態環境。因此，世界先進國家致力於發展高效低排放(High-efficiency, low emissions, HELE)燃煤發電技術，以使用更有效率燃煤機組減少煤碳使用，並搭配二氧化碳捕捉及封存技術(Carbon and Capture Storage,CCS)進一步降低二氧化碳排放，以提高燃煤發電效益。有鑑於此，本文即就燃煤發電原理及高效低排放(HELE)燃煤發電技術中燃煤技術進展及減量潛力進行探討，並分析中國大陸最新燃煤機組耗煤量標準，以提供我國未來繼續使用燃煤發電、提高燃煤發電效率之參酌。



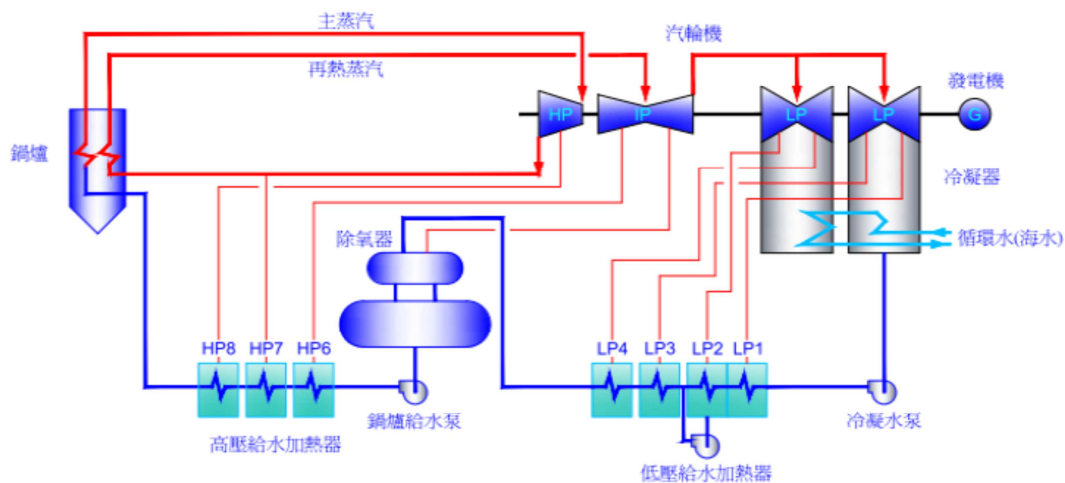
資料來源：IEA (2015), World Energy Outlook 2015，新政策情境(New Policy Scenario, NPS) 評估結果。

圖 1、全球各類能源發電量結構預測

貳、燃煤發電原理¹

大型燃煤慣常火力電廠採用再熱再生朗肯循環(Reheat Regenerative Rankine Cycle)，以粉煤為燃料，用預熱空氣吹進鍋爐內燃燒，所產生的熱能將水加熱成成高壓高溫蒸汽，進入汽輪機的高壓段(HP)膨脹做功後，回到鍋爐再加熱，然後送至中壓段(IP)、低壓段(LP)推動汽輪機葉輪旋轉直接帶動發電機發電。

蒸汽進入汽輪機做功後，部分蒸汽由汽輪機不同壓力段抽出，提供各級給水加熱器加熱鍋爐飼水，其餘大部分蒸汽則排入冷凝器，經海水冷卻為冷凝水，冷凝水經由冷凝水泵加壓，通過各級低壓飼水加熱器，以汽機抽出的蒸汽加熱後送至除氧器(Deaerator)進行脫氧處理，再由鍋爐飼水泵加壓，送經各級高壓飼水加熱器，最後回到鍋爐，形成一熱循環(如圖 2 所示)。



資料來源：鄭高禎(2012)。

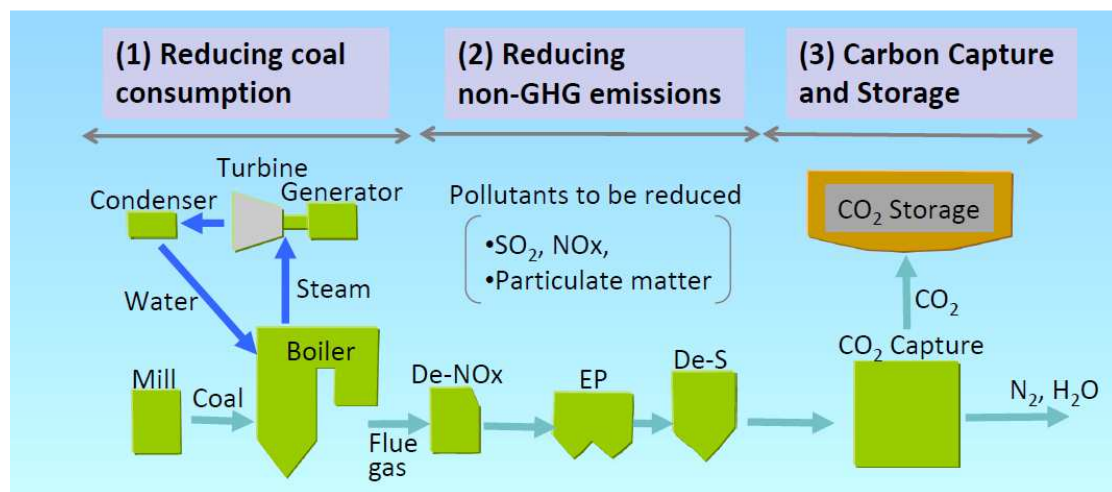
圖 2、燃煤火力熱循環圖

¹發電原理引用鄭高禎(2012)，台電慣常火力發電工程發展，水利土木科技資訊-56 期。

參、燃煤電廠效率提升技術發展

依據 IEA(2012)能源科技展望指出，全球的老舊燃煤機組平均效率僅有 33%，採用高效率、低排放(High-efficiency low emissions, HELE)的淨煤發電技術，是今後朝向低碳目標的必經之路。高效率、低排放(HELE)分為三個技術方向，首先，提高燃煤機組發電效率，減少煤炭使用量；其次，更有效率的去除空氣污染物；另外，搭配 CCS 技術降低每度電的 CO₂ 排放量至 100 克以下，如圖 3 所示。

高效率、低排放(HELE)技術中，以提高燃煤機組發電效率為世界各國主要發展方向，中國大陸更訂定燃煤機組效率標準，要求全國新建燃煤電廠平均淨耗煤率低於 300 克標準煤/度(相當於 40.9%HHV-net)，至 2020 年，現役燃煤發電機組平均淨耗煤率低於 310 克標準煤/度(相當於 39.6%HHV-net)。此一標準遠低於台電公司 105 年度化石燃料成本預估之燃煤燃耗率為 432 克/度(約相當於 370 克標準煤/度)，顯示我國燃煤火力機組仍有提升效率之空間。基此，本文就燃煤電廠在設計階段及營運階段效率提升技術發展進行探討，以做為我國燃煤火力電廠提高效率之參考。



資料來源：John Topper(2012)。

圖 3、高效率、低排放(HELE)淨煤發電技術系統圖

一、設計階段提高效率技術

依據馮偉忠(2015)指出受限於熱力學理論，使用朗肯循環(Rankine Cycle)的慣常火力電廠基本系統極其相似，其基本設計、

系統設置和設備型態等難有突破性的變化，通常機組主要設計參數確定，機組效率也就基本確定。因此，在設計階段提升效率的方式有：

- 提高蒸汽參數(溫度、壓力)：利用高於水的臨界點的蒸汽溫度和壓力，即在高於22.1MPa的壓力下運行，是最有效的提高效率的辦法，超超臨界機組(通常的定義是指壓力大於22.1MPa，溫度超過600°C的機組)已經商業化，在超超臨界機組的蒸氣參數範圍下，主蒸氣壓力每提高1 MPa，機組的熱效率可提升0.13 ~ 0.15 %；主蒸氣溫度每提高10°C的，機組的熱效率可提升0.25 ~ 0.30 %；再熱蒸氣溫度每提高攝氏10度，熱效率可提升0.15 ~ 0.20 %。

然最高蒸汽參數受到耐熱合金材料技術限制，這些材料製成的高溫元件需在最高溫度下運轉20-40年。目前最高蒸汽參數為溫度600°C/620°C、壓力30MPa等級；而700°C條件所需耐熱金屬材料尚在研究中，預計10年內尚無法商業化。

- 降低汽輪機排汽參數：受汽輪機排汽面積、排汽濕度、末級葉片長度及自然條件等的限制。依IEA(2014)報告指出冷凝壓力從6.5kPa降至3.0kPa，可提高熱效率1.5%，以丹麥Nordjylland 電廠3號機組為例，利用10°C冷卻水溫，背壓大幅降至2.3 kPa。
- 增加再熱次數：目前普遍設計為一次再熱，而二次再熱技術雖能提高效率，但因系統較一次再熱複雜，投資金額高，成本效益比頗受爭議。
- 提高鍋爐效率：目前部分煙煤鍋爐的設計效率已達95% ~ 95.2%，但受到煤種、煤含硫量的限制。主要通過降低過剩空氣係數及降低排煙溫度等措施提升效率。依IEA(2014)報告指出過剩空氣係數從25%降為15%，可提高熱效率0.3%，透過熱回收設施每降低排煙出口溫度10°C，可提高熱效率0.3%。
- 提高汽輪機效率：近年來，汽輪機的葉片研究並無顯著進展，缸效率的提高趨於穩定。
- 增加汽輪機抽汽級數及提高給水溫度：受汽輪機抽汽口的設置

及鍋爐水冷壁材料等的限制。

- 管道系統優化：通過適當增大管徑、減少彎頭、儘量採用彎管和斜三通等低阻力連接件等措施，降低主蒸汽、再熱、給水等管道阻力。可提高機組熱效率提高0.1%~0.2%。

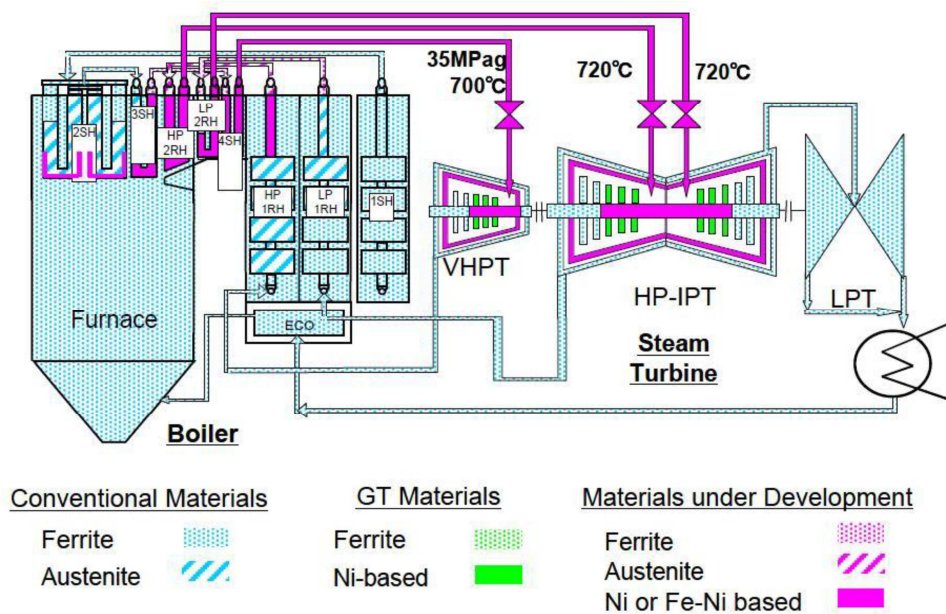
基於上述方式與限制，目前主要技術發展方向為持續提高蒸汽參數(溫度、壓力)的先進超超臨界煤粉燃燒技術(Advanced Ultra Super Critical, A-USC)、調整現有技術應用方式的高低位分軸配置二次再熱技術，以及改變熱循環方式以突破效率限制的氣化複循環發電(Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC)發電技術，茲分述如下。

1.先進超超臨界煤粉燃燒技術(A-USC)

A-USC 機組為超超臨界(USC)機組的進一步發展機型，只是運行的溫度和壓力更高。目前技術研發著力於提升主蒸汽溫度 700°C~760°C 高溫 and 30MPa~35MPa 高壓的蒸汽條件，可將燃煤發電淨效率提升至 46%(HHV-net)²，如圖所示。

但為電廠設備的元件必須採用耐高溫高壓條件的超級合金(鎳基非鐵材料)(如圖 4 所示，紫色部分金屬)，材料成本遠遠高於 SC 和 USC 電廠所用的鋼質材料，由美國、歐盟、日本及中國大陸研發中為 A-USC 機組商業化面臨的主要挑戰。2014 年初，阿爾斯通公司(Alstom)宣佈，開發中的超級合金完成 760°C、17,000 小時的運轉實驗，2015 年底，中國大陸設置運轉首座 700°C 關鍵部件驗證試驗平臺，在超級合金開發上取得里程碑式的進展，未來將由實驗室研究邁向工程示範應用，然短期內尚難以實現商業化。

²在間信之(2015)，我國清潔煤技術研究今後的發展，國立研究開發法人新能源・產業技術綜合開發機構



資料來源：Fukuda M(2010)

圖 4、A-USC 機組系統設計圖

2. 高低位分軸配置二次再熱技術

大型發電廠所用的汽輪機，其配置設計可分為單軸串聯式及雙軸並聯式：(鄭高禎,2012)

單軸串聯式：高、中壓汽輪機轉軸、低壓汽輪機轉軸與發電機轉軸串聯成一單軸；

雙軸並聯式：高、中壓汽輪機轉軸與一發電機轉軸串聯，而低壓汽輪機轉軸與另一發電機轉軸串聯，兩者並聯成雙軸。

其主要考量為低壓汽輪機末級葉輪尺寸的技術發展，以及單一發電機容量之限制，越大的機組有較多採雙軸設計的實例。近年來，由於技術不斷提昇，葉片和轉子材料的改進，更長葉片的開發，單軸式機組已提升至 100 萬瓩等級。

考量高溫蒸汽管道是燃煤電廠透過提高蒸氣參數及兩次再熱提升機組效率的關鍵課題。中國大陸發展出“高低位分軸配置二次再熱技術”，即在現有的蒸汽參數條件下，利用高低位雙軸佈置兩次再熱，並改變傳統的高(中)壓缸軸系佈置方式，改為配置於靠近鍋爐的聯箱處，而(中)低壓缸軸系仍按常規佈置，如圖 5 所示。

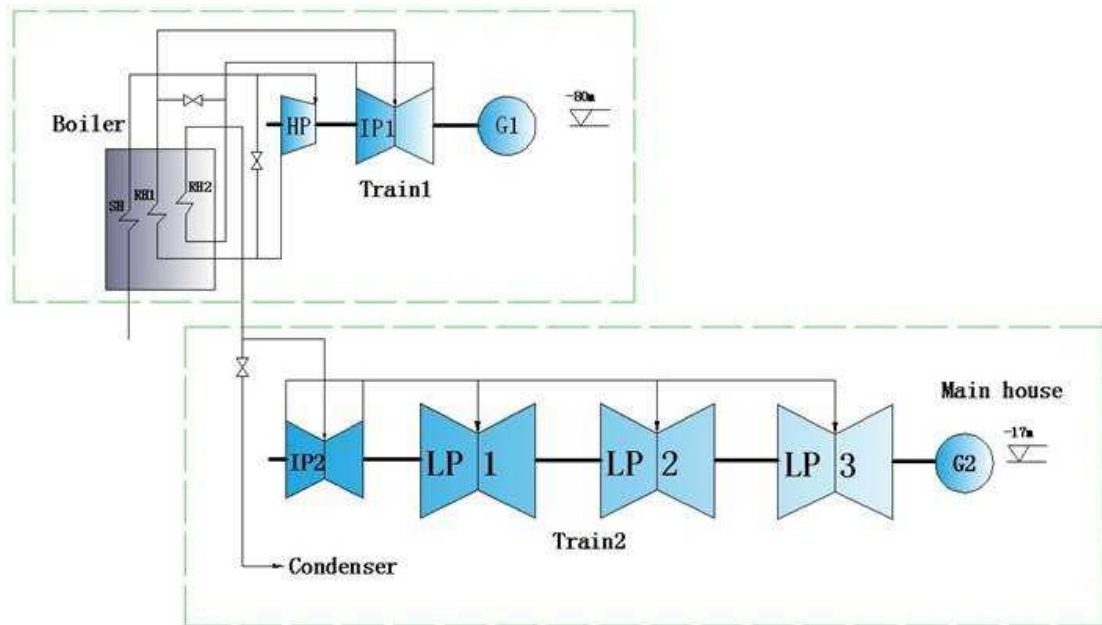


圖5、高低位分軸配置二次再熱超超臨界機組示意圖

這種設計方式主要優勢為相較常規超超臨界機組減少接近85%的高溫高壓蒸汽管道長度，不但減少蒸汽經過這些管道產生的壓力和散熱損失，同時也避免增加第二次再熱蒸汽管道所帶來的蒸汽阻力和散熱損失，充分發揮二次再熱技術效率優勢。根據西門子公司(SIEMENS)所做的熱平衡計算結果，在採用600℃等級蒸汽參數及二次再熱條件下，本技術熱耗率相較單軸一次再熱超超臨界機組可下降5%。此外，由於本技術節省絕大部分高單價高溫高壓蒸汽管道費用，即使增加二次再熱設備費用，其機組單位造價仍與一次再熱超超臨界機組相當。

為驗證此一技術構想，中國大陸推動一項251工程技術方案，建設一部135萬瓩高低位雙軸二次再熱超超臨界發電機組，預計2018年落成，預估機組供電煤碳耗用降低至251克標準煤/度(相當於熱效率48.92% HHV-net)，已達A-USC預估效率標準。一旦251工程技術商轉達到預設效率目標，將可大幅提高未來燃煤電廠效率。

3. 氣化複循環發電(IGCC)發電技術：

由於煤炭氣化技術，可以先去除污染物再使用煤碳，開啟全球煤炭環保高效利用的新方向，氣化產生的合成氣被廣泛用

於化工生產和氣化複循環發電系統(IGCC)。

IGCC 主要是由空氣分離、氣化、淨化等製程和複循環機組所組成的發電技術，由於 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。還處於技術示範階段的 IGCC 系統造價和運行費用偏高，成為影響 IGCC 發展的障礙之一。

但因 IGCC 燃料便宜且彈性、汙染排放低且發電效率高，其長期運轉效率仍較傳統燃煤電廠及天然氣電廠佳。目前已經商業化示範運轉的 IGCC 電廠發電效率約在 40% 上下，如日本勿來(Nakoso)電廠 IGCC 示範項目，在氣渦輪機中熱煤氣溫度為 1200℃ 的情況下，運營效率可達到 40.5%。若能將溫度提高到 1500℃，效率能達到 46%。另 Katherine and Ahmed(2016)提出一種新型 IGCC 結合燃料電池(Integrated Gasification Fuel Cell, IGFC)構想，發電效率預估可提升至 55%~60%。然 IGCC 在國內仍處以研究發展階段，尚未商業化，未來我國仍以超超臨界煤粉煤發電技術為主。

二、營運階段效率提升技術

燃煤發電廠的運轉年限可達 40 年，透過整修鍋爐部件、升級汽輪機、可以提高整體效率，減少單位發電量的排放，而通過升級和改造來提高現有機組性能的潛力評估，通常需要對燃燒過程、蒸汽迴圈、以及電廠的主要配套設施等主要功能進行詳細核查。而且相較於新電廠可採行的措施，現役電廠可採取的效率提升措施存在很多限制條件，如電廠整體的佈置方式，增加設備所需的空間等都是重要限制因素。

另外，中國大陸環境保護部、國家發改委、國家能源局 2015 年底提出「全面實施燃煤電廠超低排放和節能改造工作方案」，列出多項節能改造技術，本文整理出其中 16 種，列於表 1，其中，以改造亞臨界汽輪機通流部分效果最好，預計可降低平均淨耗煤率 10~20g 標準煤/度，甚至 IEA(2014)報告指出於亞臨界汽輪機更換為超超亞臨界汽輪機，在技術上亦為可行。

表1、現役機組節能改造技術

序號	技術名稱	技術原理及特點	節能減排效果	成熟程度及適用範圍
1	汽輪機通流部分改造	採用全三維技術優化設計亞臨界汽輪機通流部分，採用新型高效葉片和新型汽封技術改造汽輪機，節能提效效果明顯。	預計可降低平均淨耗煤率 10~20g/度。	技術成熟。
2	汽輪機間隙調整及汽封改造	部分汽輪機普遍存在高壓缸效率隨執行時間增加不斷下降的問題，主要原因是汽輪機通流部分不完善、汽封間隙大、汽輪機內缸接合面漏汽嚴重、存在級間漏汽和蒸汽短路現象。通過汽輪機本體技術改造，提高運行缸效率。	預計可降低平均淨耗煤率 2~4g/度。	技術成熟。 適用於 30~60 萬瓩各類型機組。
3	鍋爐排煙餘熱回收利用	合適位置通過加裝煙氣冷卻器，回收部分熱量，用來加熱凝結水、鍋爐送風或城市熱網低溫回水，從而達到節能提效、節水效果。	採用低壓省煤器技術，若排煙溫度降低 30℃，機組平均淨耗煤率可降低 1.8g/度，脫硫系統耗水量減少 70%。	技術成熟。 適用於排煙溫度比設計值偏高 20℃以上的機組。
4	鍋爐本體受熱面及風機改造	透過鍋爐改造，可降低排煙溫度和風機電耗。具體措施包括：一次風機、引風機、增壓風機葉輪改造或變頻改造；鍋爐受熱面或省煤器改造。	預計可降低煤耗 1.0~2.0g/度。	技術成熟。 適用於亞臨界機組。
5	鍋爐運行優化調整	透過鍋爐燃燒及制粉系統優化試驗，減少實際燃用煤種與設計煤種差異影響。	預計可降低平均淨耗煤率 0.5~1.5g/度。	技術成熟。
6	電除塵器改造及運行優化	根據典型煤種，選取不同負荷，結合吹灰情況等，在保證煙塵排放濃度達標的情況下，試驗確定最佳的供電控制方式(除塵器耗電率最小)及相應的控制參數。通過電除塵器節電改造及運行優化調整，節電效果明顯。	預計可降低平均淨耗煤率約 2~3g/度。	技術成熟。 適用於現役 30 萬瓩亞臨界機組、60 萬瓩亞臨界機組和超臨界機組。
7	熱力及疏水系統改進	改進熱力及疏水系統，可簡化熱力系統，減少閥門數量，治理閥門洩漏，取得良好節能提效效果。	預計可降低平均淨耗煤率 2~3g/度。	技術成熟。 適用於各級容量機組。
8	汽輪機閥門管理優化	通過對汽輪機不同順序開啟規律下配汽不平衡汽流力的計算，以及機組軸承承載情況的綜	預計可降低平均淨耗煤率 2~3g/度。	技術成熟 適用於 20 萬瓩以上機組。

序號	技術名稱	技術原理及特點	節能減排效果	成熟程度及適用範圍
		合分析，採用閥門開啟順序重組及優化技術，解決機組在投入順序閥運行時的瓦溫升高、振動異常問題，使機組能順利投入順序閥運行，從而提高機組的運行效率。		
9	汽輪機冷端系統改進及運行優化	汽輪機冷端性能差，表現為機組真空低。通過採取技術改造措施，提高機組運行真空，可取得很好的節能提效效果。	預計可降低平均淨耗煤率 0.5~1.0g/度。	技術成熟。 適用於 30 萬瓩亞臨界機組、60 萬瓩亞臨界機組和超臨界機組。
10	高壓除氧器乏汽回收	將高壓除氧器排氧閥排出的乏汽通過表面式換熱器提高化學除鹽水溫度，溫度升高後的化學除鹽水補入凝汽器，可以降低過冷度，一定程度提高熱效率。	預計可降低平均淨耗煤率約 0.5~1g/度	技術成熟。 適用於 10~30 萬瓩機組
11	取較深海水作為電廠冷卻水	直流供水系統取、排水口的位置和型式應考慮水源特點、利於吸取冷水、溫排水對環境的影響、泥沙沖淤和工程施工等因素。有條件時，宜取較深處水溫較低的水。但取水水深和取排水口佈置受航道、碼頭等因素影響較大。	採用直流供水系統時，迴圈水溫每降低 1℃，平均淨耗煤率降低約 1g/度。	技術成熟。 適於沿海電廠。
12	脫硫系統運行優化	具體措施包括：1)吸收系統(漿液迴圈泵、pH 值運行優化、氧化風量、吸收塔液位、石灰石粒徑等)運行優化；2)煙氣系統運行優化；3)公用系統(制漿、脫水等)運行優化；4)採用脫硫添加劑。可提高脫硫效率、減少系統故障、降低系統能耗和運行成本、提高對煤種硫份的適應性。	預計可降低平均淨耗煤率約 0.5g/度。	技術成熟。 適用於 30 萬瓩亞臨界機組、60 萬瓩亞臨界機組和超臨界機組。
13	凝結水泵變頻改造	高壓凝結水泵電機採用變頻裝置，在機組調峰運行可降低節流損失，達到提效節能效果。	預計可降低平均淨耗煤率約 0.5g/度。	技術成熟。 在大量 30~60 萬瓩機組上得到推廣應用。
14	空氣預熱器密封改造	回轉式空氣預熱器通常存在密封不良、低溫腐蝕、積灰堵塞等問題，造成漏風率與煙風阻力增	預計可降低平均淨耗煤率 0.2~0.5g/度。	技術成熟。 各級容量機組。

序號	技術名稱	技術原理及特點	節能減排效果	成熟程度及適用範圍
		大，風機耗電增加。可採用先進的密封技術進行改造，使空氣預熱器漏風率控制在 6% 以內。		
15	電除塵器高頻電源改造	將電除塵器工頻電源改造為高頻電源。由於高頻電源在純直流供電方式時，電壓波動小，電量電壓高，電量電流大，從而增加了電量功率。同時，在煙塵帶有足夠電荷的前提下，大幅度減小了電除塵器電場供電能耗，達到了提效節能的目的是。	可降低電除塵器電耗。	技術成熟。適用於 30~100 萬瓩機組。
16	加強管道和閥門保溫	管道及閥門保溫技術直接影響電廠能效，降低保溫外表面溫度設計值有利於降低蒸汽損耗。但會對保溫材料厚度、管道佈置、支吊架結構產生影響。	暫無降低平均淨耗煤率估算值。	技術成熟。適於各級容量機組。

資料來源：本文整理自 2015 年「全面實施燃煤電廠超低排放和節能改造工作方案」。

此外，新建造的超超臨界機組效率亦有改進之空間，依據美國電力雜誌評選的 2015 年頂級電廠(TOP PLANT)名單，中國大陸上海外高橋第三發電廠(以下簡稱外三電廠)由美國工程機械師協會(ASME)推薦入選。依據資料顯示，外三電廠中國大陸首批建造的 1,000MW 超超臨界機組，兩台機組於 2005 年 7 月開工，分別於 2008 年 3 月和 6 月商轉，在容量因數 0.74 情形下，機組淨效率達 42.73%(HHV-net)。隨後，該電廠進一步研發並實裝各項節能減排新技術，2011 年機組淨效率進一步躍升為 44.5%(HHV-net)。另據外三電廠最新數據顯示，2015 年 1-5 月煤耗為 273g 標準煤/kWh；二氧化硫的平均排放濃度 14.95mg/Nm³，平均脫硫效率達 98% 以上；煙氣排放濃度實測數已低於 1mg/Nm³ 氮氧化物排放量僅為 15.9mg/Nm³。

依據馮偉忠(2015)報告指出，外三電廠從設備和系統中尋求降低各類相關損失的可能，最終達到提升機組整體效率的目的，所採用的鍋爐、汽輪機提高能效技術如下。

- 排煙損失及回收技術

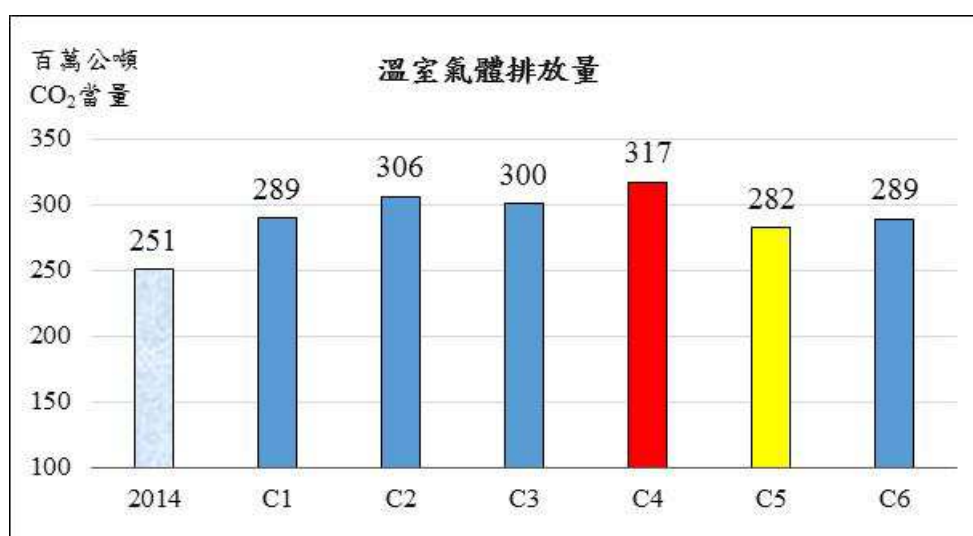
- 空氣預熱器密封技術
- 鍋爐的節能啟動系列技術
 - 不啟動給水泵、靜壓狀態下的鍋爐上水及不點火的熱態水沖洗
 - 直流鍋爐蒸汽加暖開機和穩燃技術。
- 主蒸汽參數及運行調節方式的優化
- 給水泵及系統的優化和節能
- 廣義回熱理論及系列技術
- 彈性回熱技術
- 固體顆粒侵蝕防治系列技術

外三電廠針對燃煤低負載運行下的輔機效率進行改善，主因為傳統燃煤發電組通常作為基載，低負載運行概率低，輔機的低負載節能需求並不高。然而，中國大陸煤發電佔總裝置容量比例超過 70%，發電負載勢必會調整，低負載時的定速輔機均處於低效運轉情況，因此，大型輔機若能進行變速和變頻運轉，其效率將大為改善。

肆、燃煤電廠效率提升減碳潛力評估

我國為因應國際溫室氣體減量趨勢，於 2015 年 7 月 1 日公布施行「溫室氣體減量及管理法」，並於溫管法第四條第一項明確規範國家溫室氣體長期減量目標為 2050 年溫室氣體排放量降為 2005 年排放量的 50 % 以下。另依據經濟部能源局 2015 年公布之「我國燃料燃燒二氧化碳排放統計」，我國 2014 年燃料燃燒總排放量 251 百萬噸，其中，能源部門佔為 166 百萬噸，約佔 66%，另依台電公司統計，台電公司燃煤發電排放 57 百萬噸，顯見未來能源部門減量壓力十分沉重。

有鑑於此，本文即以「能源開發政策評估說明書」(下稱說明書)之中需求資料，嘗試評估燃煤電廠效率提升之減量潛力。依據說明書評估結果 2035 年溫室氣體排放量介於 282~306 百萬噸之間，詳見圖 6，中需求各方案 2035 年燃煤發電量如表 2 所示。



資料來源：能源開發政策評估說明書(草案)。

圖 6、2035 年我國溫室氣體排放量

表2、說明書中各需求方案2035年燃煤發電量

發電技術	C1 方案			C3 方案			C5 方案		
	裝置容量 (MW)	發電量 (百萬度)	容量 因數	裝置容量 (MW)	發電量 (百萬度)	容量 因數	裝置容量 (MW)	發電量 (百萬度)	容量 因數
既有機組	5,897	25,293	0.49	5,897	43,707	0.85	5,897	44,982	0.87
新設機組	6,180	50,348	0.93	10,553	85,973	0.93	5,703	46,463	0.93
發電技術	C2 方案			C4 方案			C6 方案		
	裝置容量 (MW)	發電量 (百萬度)	容量 因數	裝置容量	發電量	容量 因數	裝置容量	發電量	容量 因數
既有機組	5,897	31,367	0.61	5,897	43,990	0.85	5,897	45,908	0.89
新設機組	7,926	64,573	0.93	13,001	105,918	0.93	5,703	46,463	0.93

資料來源：能源開發政策評估說明書(草案)。

本文進行部分假設以評估燃煤電廠效率提升之減量潛力，茲將假設條件臚列如下，並將各電廠相關效率值推估彙整於表3：

- 既有機組平均淨耗煤率：假設表2之既有機組平均淨耗煤率與現況相近，並考量20年間機組除役，故以台電公司103年統計年報之台中電廠2014年平均淨熱耗率2,384仟卡/度(約相當於340.6克標準煤/度)作為既有機組平均淨耗煤率假設值。
- 新設機組平均淨耗煤率：另考量未來新設燃煤機組均為林口、大林超超臨界同級或以上機組，故以林口、大林平均淨耗煤率作為新設機組平均淨耗煤率假設值。
- 提升效率目標：既有機組平均淨耗煤達到310克標準煤/度(中國大陸2020年目標值)，新設機組平均淨耗煤達到251克標準煤/度(2018年商轉之示範電廠設計值)

表3、新設機組及既有機組熱效率推估

項目	新設機組			既有機組	
	說明書		效率目標	說明書	效率目標
計畫	林口更新	大林更新	251 專案	台中電廠	中國大陸
型式	超超臨界 一次再熱	超超臨界 一次再熱	超超臨界 二次再熱		
單機容量	800MW	800MW	600MW +800 MW		
蒸氣條件(壓力(Mpa)/ 溫度(°C)/再熱蒸氣/ 二次再熱(°C))	24.5/600 /600	25.0/600 /600	30.0/600 /610/620		
機組淨效率 (HHV-net)	40.28%	41.21%	48.92%	36.05%	39.61%
機組淨熱耗率 kJ/度 (HHV)	8,938	8,735	7,359	9,985	9,089
平均淨耗煤率 公克標準煤/度	305	298	251	341	310
供電二氧化碳排放 公斤/度	0.793	0.775	0.653	0.885	0.806

註：1.中國大陸每千克標準煤熱值為 29,271 千焦耳(7,000 千卡)，台電公司計算煤熱值則以(6,000 千卡)計算。

2.採 1 公斤標準煤排放 2.6 公斤 CO₂ 估算碳排放量。

茲將中需求各方案 2035 年燃煤發電二氧化碳過程彙整於表 4，依據估算結果，燃煤發電效率改善將可帶來大幅減量效果，各方案減量效果最小為 C1 方案 8.2 百萬噸至最大 C4 方案 16.4 百萬噸。

表4、說明書中各需求方案2035年燃煤發電二氧化碳估算

發電技術	C1 方案			C3 方案			C5 方案		
	發電量 (百萬度)	每度電二氧 化碳排放 (公斤/度)	二氧化碳 排放量 (百萬噸)	發電量 (百萬度)	每度電二氧 化碳排放 (公斤/度)	二氧化碳 排放量 (百萬噸)	發電量 (百萬度)	每度電二氧 化碳排放 (公斤/度)	二氧化碳 排放量 (百萬噸)
既有機組	25,293	0.885	22.4	43,707	0.885	38.7	44,982	0.885	39.8
效率目標	25,293	0.806	20.4	43,707	0.806	35.2	44,982	0.806	36.3
新設機組	50,348	0.775	39.0	85,973	0.775	66.6	46,463	0.775	36.0
效率目標	50,348	0.653	32.9	85,973	0.653	56.1	46,463	0.653	30.3
效率改善			8.2			14.0			9.3
發電技術	C2 方案			C4 方案			C6 方案		
	發電量 (百萬度)	每度電二氧 化碳排放 (公斤/度)	二氧化碳 排放量 (百萬噸)	發電量 (百萬度)	每度電二氧 化碳排放 (公斤/度)	二氧化碳 排放量 (百萬噸)	發電量 (百萬度)	每度電二氧 化碳排放 (公斤/度)	二氧化碳 排放量 (百萬噸)
既有機組	31,367	0.885	27.8	43,990	0.885	39.0	45,908	0.885	40.7
效率目標	31,367	0.806	25.3	43,990	0.806	35.5	45,908	0.806	37.0
新設機組	64,573	0.775	50.0	105,918	0.775	82.1	46,463	0.775	36.0
效率目標	64,573	0.653	42.1	105,918	0.653	69.1	46,463	0.653	30.3
效率改善			10.4			16.4			9.3

資料來源：本文估算。

伍、對我國之啟示

一、中國大陸積極治理煤碳使用帶來的環境衝擊，其所公布之超高標準之電廠效率值及空氣污染標準，將有可能成為地方政府推動環保效率標準之參考，我國應持續關注其後續發展。

二、中國大陸這一波燃煤電廠效率改善技術研發浪潮，已獲得豐碩成果，其中，外三電廠案例已獲美國電力雜誌、美國工程機械師協會(ASME)認可，顯示其效率改善技術確實具有獨到之處。且燃煤部門效率改善之減量潛力龐大，我國應推動引入中國大陸最新發電技術及現有電廠效率改善技術之效益與風險評估，以作為推動能源部門溫室氣體減量之參考依據。

參考文獻

1. 台電公司(2015)，103年統計年報。
2. 台灣綜合研究院(2014)，(IGCC,CCS)及我國引進技術之可行性分析。
3. 在間信之(2015)，我國清潔煤技術研究今後的發展，國立研究開發法人新能源・產業技術綜合開發機構。
4. 美國電力雜誌，
<http://www.powermag.com/shanghai-waigaoqiao-no-3-shanghai-china/>，2016年4月查詢。
5. 馮偉忠(2015)，挑戰現有煤電技術的效率極限，基石2015年第1期。
6. 經濟部能源局(2015)，我國燃料燃燒二氧化碳排放統計。
7. 鄭高禎(2012)，台電慣常火力發電工程發展，水利土木科技資訊-56期。
8. Materials in Japanese double-reheat A-USC design (Fukuda M, 9th Liege Conference: Materials for Advanced Power Engineering, 2010)
9. Fukuda M(2010), 9th Liege Conference: Materials for Advanced Power Engineering.
10. IEA (2015), World Energy Outlook 2015
11. IEA(2012)，技術路線圖-高效低排放燃煤發電
12. IEA(2012)，能源科技展望。
13. IEA(2014)，通過升級燃煤電廠實現減排。
14. John Topper(2012), FUTURE COAL DEMAND: ROADMAP FOR COAL-FIRED POWER PLANT EFFICIENCY AND INTERACTION WITH CCS.
15. Katherine M. Ong, and Ahmed F. Ghoniem(2016), Modeling of indirect carbon fuel cell systems with steam and dry gasification, Journal of Power Sources.