原動力場超超臨界鍋爐發展

中華民國仲裁人 / 宋郁德

關鍵字：淨煤發電技術、超超臨界鍋爐、超臨界鍋爐

摘要

以投資效益而言，提升主蒸汽壓力雖可略增機組效率，但鍋爐及汽機的設計壓力亦需相對提高，將大幅增加投資成本及日後維護費用，抵銷機組所提高之效率。對於主蒸汽及再熱蒸汽溫度的提升，則僅需變更部分爐管及汽機相關材料，略增初期成本，相對機組效率提升之效益較為顯著，且由於再熱蒸汽之壓力較主蒸汽壓力為低，故以提升再熱蒸汽溫度為最優先。

長期以來節能減碳需求越趨強烈，迫使未來電力走向先進的淨煤發電技術，歐盟已規劃超過30年，應用全新的材料科技成果，鍋爐出口蒸汽壓力及溫度高達350 bar及700°C。而新型態大型動力廠燃煤超超臨界機組鍋爐發展趨勢，在本文中概述。

一、前言

依工程熱力學原理，介質參數提高必然使熱效率提高，主要是因為改善熱力循環所致。從各項研究可知，就周際瑜先生在台電公司出國研習報告「超臨界鍋爐及其附屬設備運轉技術」提及：一般壓力是180～360 bar、溫度538～618°C的範圍內，壓力每提高10 bar，機組的熱效率上升0.18～0.29%；主蒸汽溫度或再熱蒸汽溫度每提高22°C，機組的熱效率上升1～1.25%（如圖1）；因此在同樣條件下（均為一次再熱），主蒸汽壓力從25 MPa升至30.0 MPa，機組熱效率只提0.75%，只有單純將溫度從566°C提高至600°C時熱效率提高的一半（如圖2）；故欲改善機組熱效率提升蒸汽溫度比提升蒸汽壓力顯著有效，平均而言蒸汽溫度每提升22°C，可獲得1.25%的熱效率之改善。

長期以來節能減碳需求越趨強烈，迫使未來電力走向先進的淨煤發電技術，歐盟已規劃超過30年，「The Advanced Pulverized 700°C PF Power Plant project」，設計蒸汽條件由傳統540°C/250 bar大幅提高至700°C/350 bar超超臨界燃煤發電機組，將可大幅減少耗

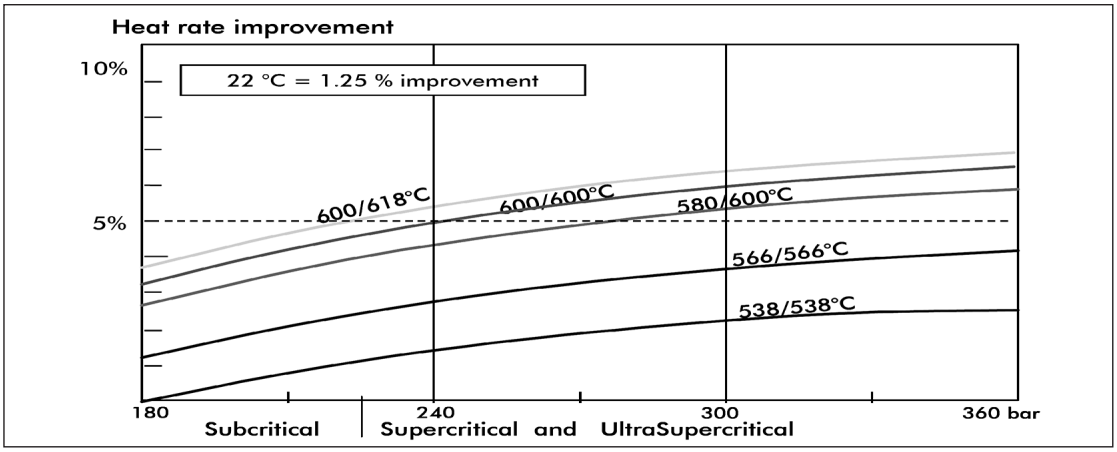

圖 1　Heat Rate Improvement Vs Steam Conditions（Single Reheat）[1]

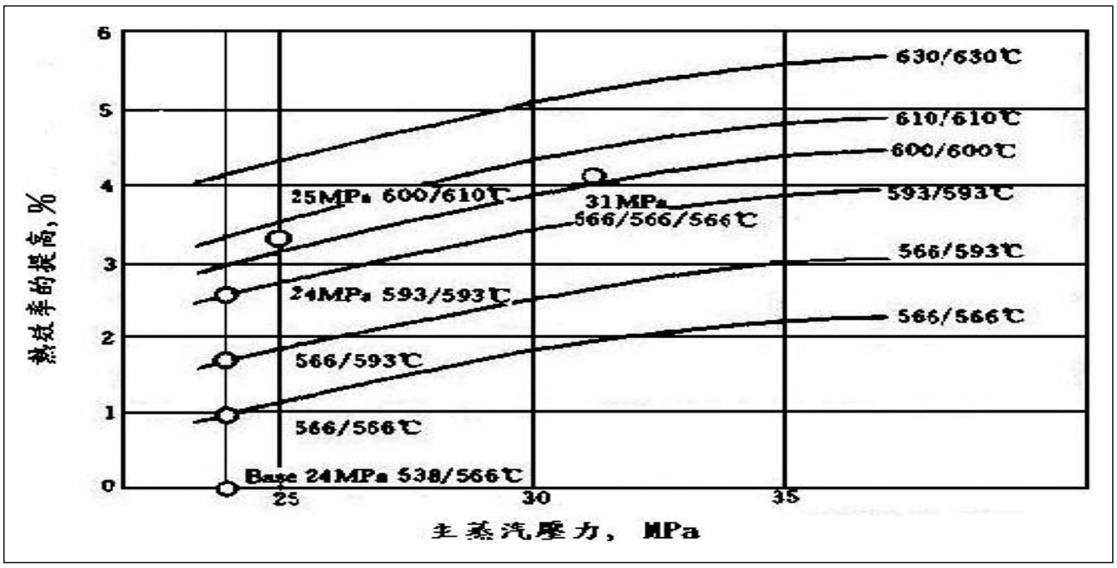

圖 2　蒸汽參數對照效率的影響 [1]

煤量及污染排放量。計畫商轉世界首座淨廠效率高達50%，發電量為500 MWe燃煤超臨界機組，應用全新的材料科技成果，鍋爐出口蒸汽壓力及溫度高達350 bar及700°C。由於是架構在已成熟的商業化燃煤發電技術之上，相較於現有傳統燃煤機組，將可減少相同燃料之耗煤量及CO_2排放量達30%以上，對於使用化石燃料的傳統發電機組的設計有重大的影響，將是未來主要的商業化淨煤技術之一。

由於目前燃料價格（石油及煤碳）飆漲，興建高效率的超臨界機組為目前臺灣電力開發之要務，主要理由為高燃料價格、相對地需提高機組的效率，以降低運轉成本。由於超臨界機組採用高效率之空氣污染防治設備使得空氣污染排放量降低。而新型態燃煤超臨界機組鍋爐發展趨勢，在本文中概述。

二、鍋爐及其輔機設備

鍋爐及其輔機設備係以高溫燃燒氣將水加熱成為蒸汽，為汽力電廠之蒸汽主要來源，除供給汽輪機旋轉所需動力外，還可做各種不同用途，例如供輔助熱交換器作傳熱交換、或被引用於其他試俥、清潔、維修等用途。火力發電用之鍋爐不斷改進，例如溫度、壓力與熱效率的提升、材質改良、各種輔機附屬配件之裝設等。

電廠的鍋爐型式如下：

（一）以構造分

1. 圓筒式鍋爐：以大型之鼓筒為其主體，僅適合於小型低壓力使用。

2. 水管式鍋爐：由許多小口徑水管與其匯集在一起的集管箱（Header）和汽水鼓等三個主體構成。水管外側受火燄之輻射熱照射及接觸燃氣，水在管內流動，被加熱成飽和狀態之汽水混合物再流回到汽鼓，在汽鼓內進行汽水分離，分離出來之飽和蒸氣再送至過熱器加熱，成為過熱蒸氣來推動汽輪機做功。在水管式鍋爐中使用最多的當屬輻射鍋爐。

3. 廢熱回收鍋爐HRSG（Heat Recycle Steam Generator）

利用排放廢熱加熱於鍋爐時另引入燃料燃燒稱助燃式（Supplement Type），而純使用排放的廢熱於鍋爐內不再有燃燒稱為非燃式（Unfired Type）熱回收鍋爐HRSG（圖3），可分為臥式自然循環廢熱鍋爐與立式強制循環廢熱鍋爐兩種，為當今複循環機組所採用。此鍋爐亦因氣渦輪機排氣溫度之不同，加上經濟因素，比如建廠成本、燃料成本、維護費用及需求負載容量與品質而定，一般分為三種型式：

(1) 單壓式（Single Pressure HRSG）：只產生一段壓力的飽和蒸氣。
(2) 雙壓非再熱式（Dual Pressure Non-Reheat HRSG）：有蒸發器產生高及低壓段蒸氣。
(3) 三壓再熱式（Triple Pressure Reheat HRSG）：有過熱器產生過熱蒸汽，有高、中、低壓三段蒸氣。

需求的負載蒸發容量越高，愈須多段壓力，以提高熱能利用率，而須付出更多建置成本與操作運轉維修成本。

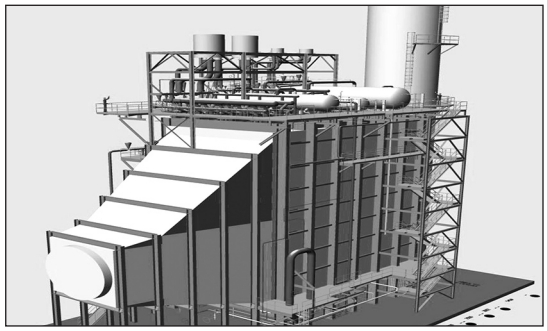

圖 3　熱回收鍋爐 HRSG [2]

（二）依循環方式分

1. 自然循環：鍋爐爐水的循環力量，係由降水管中之飽和水與水牆管中之汽水混合物，兩者間之比重（密度）差而產生。

2. 強制循環：隨鍋爐壓力變高，飽和水與飽和蒸汽密度差變小，自然循環力變差時，由爐水循環泵克服系統阻力，將定量之爐水輸送到水牆管中，水流率及壓力可藉由泵浦來控制達適當條件於汽鼓中做汽水分離，可節省管料，傳熱也較佳。

3. 貫流式鍋爐：鍋爐採用超臨界壓力，由飼水泵送入鍋爐之爐水，在管中加熱、蒸發、過熱，貫流式鍋爐沒有需要再加以循環，飼水進入爐管受熱後，變成超臨界態蒸汽離開，不用汽鼓，全由管組成。若在次臨界壓力下，則須一分離器以去除蒸汽中之液態水。

4. 貫流加上強迫循環：其設備構造與強迫循環鍋爐類似，附設一泵浦，在低載或起動時，可強迫爐水循環。

（三）鍋爐材質

鍋爐由多樣管徑及不同的管厚，且長度千呎以上的鋼管組成。大多數鍋爐水牆管多採用低碳鋼，使用無縫鋼管及電阻熔接管，運轉時對流溫度約260～371°C，中碳鋼在510°C燃氣下運轉，過熱器爐管必須能抗溫達593°C以上，所以採用Cr Mo Ni合金鋼是必須的，一般用耐熱合金鋼，此管外徑大都為2吋或2.5吋之圓筒型光管，其位於溫度比較高區域者，管子吊架與管子間的鞍型間隔片支撐，也是需要考量高溫。現代的鍋爐均採用沃斯田鐵結構為多，以便能在極高溫度下運轉。對於鍋爐的建造，使用不同等級的金屬結構，遵照美國機械工程師學會（ASME）所提POWER BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE之設計規格。對管材的選擇應視材料的抗氧性、最大容許應力以及經濟性而定。

（四）鍋爐本體結構

鍋爐本體結構：吸收燃燒熱，使爐管內的水生成為蒸氣的部份。詳圖4貫流式鍋爐本體與附屬輔機設備組合圖所示。

1. 燃燒室（或稱爐膛Furnace）為使燃料燃燒生熱之空間。爐膛受熱面積與產生的蒸發量有關；高度能使水牆管內的爐水達到循環作用，避免爐管過熱；裝有爐溫探測器及吹灰器，不能碰撞；保溫耐火磚要能承受運轉溫度，空間吸熱均勻；不可有燃氣漏出或吸入。

2. 汽鼓（Drum）：分離汽和水之裝置，貫流式水管鍋爐則無此設備。飼水經由飼水管補充至汽鼓中，以供給鍋爐之蒸發水量；飼藥管填加藥品以減少鍋垢、污泥及腐蝕之發生；連續沖放管用以調節水位及控制爐水品質；氣水分離器會產生迴旋作用，使汽水混合物之汽和水分離；分離出的水經旋渦消除器至降水管；飽和蒸汽取樣管抽取爐水及蒸汽供分析水質。

3. 過熱器（Superheater）：將鍋爐本體所生

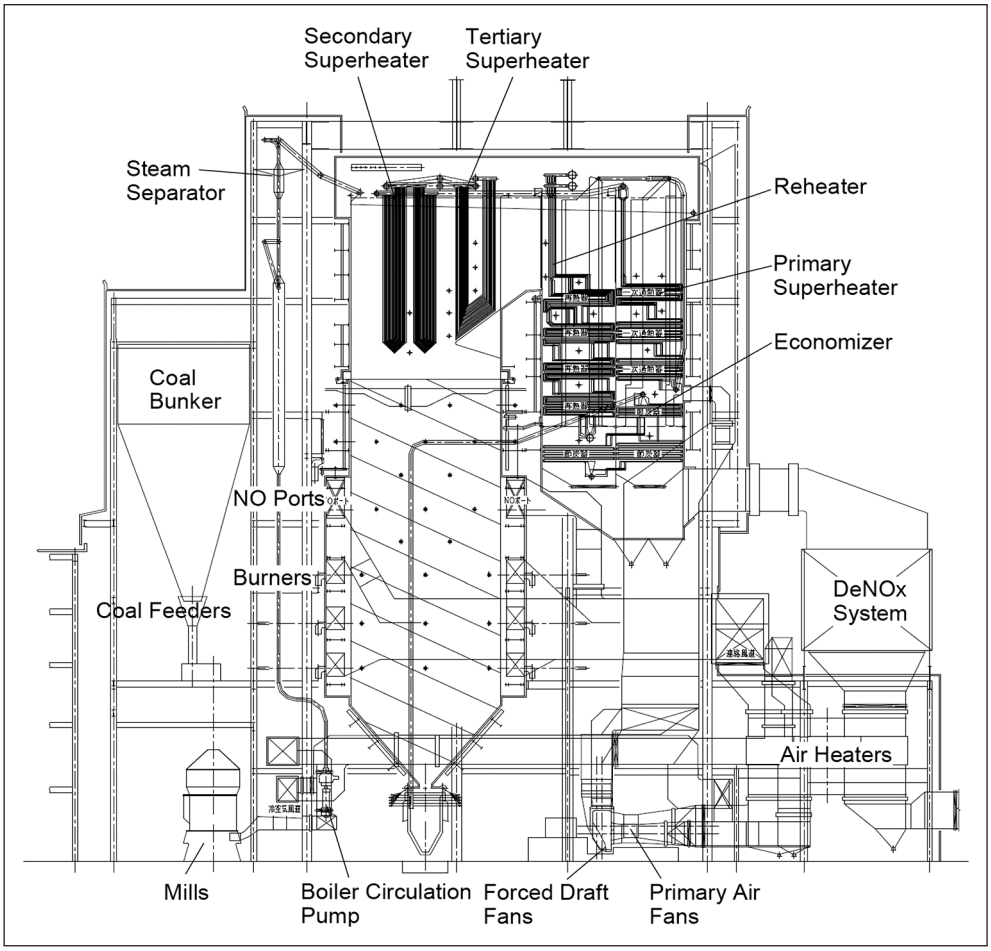

圖 4　貫流式鍋爐本體與附屬輔機設備組合圖 [2]

成的飽和蒸汽進一步加熱至飽和溫度以上的過熱蒸汽，以免濕蒸氣中之液滴對汽輪機之葉片造成腐蝕，同時為控制蒸汽溫度在542°C左右，為免水管無法承受高溫，有減溫器，以自動調節噴水流量來控制溫度。

4. 再熱器（Reheater）：將經高壓段汽輪機作功後之蒸汽，再導回鍋爐吸收煙氣熱量，提高蒸汽溫度供低壓段氣輪機使用做功。設計上再熱器必須有足夠蒸汽質量流率保持壓力，即管中壓降不大於5%。

5. 節熱器（省煤器Economizer）：利用燃燒煙氣餘熱將進入鍋爐之給水預熱的裝置。飼水溫度升高，氧從水中排出，會腐蝕管子內壁，但如飼水溫度過低，管外部水份凝結，造成管外腐蝕，降低熱傳導，要使用清洗設備去除沉積物，所以除要利用飼水除氧方式去除溶解氧外，一般在飼水系統

可利用抽氣加熱，提高飼水溫度。

三、超臨界鍋爐整體比較

優點：	缺點：
1. 蒸氣壓力高、機組效率高。 2. 鍋爐效率高發電成本降低。 3. 無汽水鼓裝置，設計與建廠較簡單。 4. 產生蒸汽的時間短。	1. 設備剛性要大，管壁厚度增加，建廠費用高。 2. 水處理設備要求高，有雜質危害問題。 3. 鍋爐管材耐壓力耐高溫要求高，採用 Ni Cr Mo 高合金鋼。 4. 飼水流量的控制及自動燃燒控制要更精巧。

煤炭的蘊藏量超過百年以上，在可以預知的未來，仍然是發電過程所不可或缺的主要燃料之一。然而燃煤發電具有低效率、高污染的缺點，CO_2、NOx、SOx的大量排放，是主要的污染排放問題。因此，燃煤發電之淨煤技術的發展，一直朝向降低CO_2的排放為目標，現階段以「提昇機組效率以減少CO_2排放」及未來的「CO_2的捕集與封存（CCS）」等兩大方面來努力。就提昇機組效率方面來說，提高蒸汽溫度及壓力的超臨界或超超臨界機組的研發與製造，可以減少煤炭的使用，以降低污染物的排放，是目前主要商業化的節能減碳技術應用。

90s年代以來環境保護意識急劇升高，由於煤炭是產生CO_2主要的來源，放棄燃煤發電的聲浪持續高漲，因此歐洲電力集團及製造廠商於1994著手建立跨國的研發計畫，稱為「The Advanced Pulverized 700°C PF Power Plant project」，設計蒸汽條件由傳統540°C/250 bar大幅提高至700°C/350 bar超超臨界燃煤發電機組，將可大幅減少耗煤量及污染排放量。以表1為例，比較不同燃煤機組

表 1　不同蒸汽條件燃煤電廠的比較表

A. 現行德國燃煤電廠平均值
B. 電廠條件（鍋爐溫度 / 過熱氣溫度 / 蒸氣壓力）（540°C/560°C/25 MPa）
C. 電廠條件（700°C/720°C/35 MPa, cooling tower, single reheat）
D. 電廠條件（700°C/720°C/35 MPa,sea water cooling, double reheat）

	A	B	C	D
Power Plant Net Efficiency（%）	37.0	43.8	50.2	51.9
Spec. CO_2-Emission（g/kWh）	930	785	685	663
Spec. Fuel Consumption（g /kWh）	332	280	245	237
Reduction of CO_2-Emission（%）	--	15.5	26.3	28.7

效率對耗煤量及CO_2排放量，以硬煤（Hard Coal）熱值為燃料基準，Basis A是現行德國燃煤電廠平均值，Basis B是傳統超臨界機組，Basis C、D是最近新建2015年將商轉的機組，廠效率由37%提升至50%以上，相同的發電量及煤質基準條件，CO_2及煤炭將減量大約30%的成效，由此可見效率提昇對節能減碳的重要性。最大的挑戰在於高溫材料的研發與驗證，以及鍋爐與汽機的硬體設計，以期發展出最先進的高溫材料應用於傳統的燃煤發電機組。然而，對於未來的CO_2捕集與封存技術，由於技術層次較高，現階段僅止研發階段。

計畫的執行者已完成：尋找高溫材料供應商，尋找製造加工廠商，可測試高溫材料製造品質，高溫元件電廠運轉實測。選定德國Scholven電廠F機組的鍋爐，於700°C蒸汽溫度條件，實地安裝測試不同高溫材料在鍋爐的使用情況，測試區域分別是蒸發器（Evaporator）、過熱器（Superheater）、安全

表 2　Scholven 電廠測試 700°C 條件之區域及材料

測試區域 / 測試條件	測試材料
蒸發器爐管及集管	
進口溫度：53°C 出口溫度：42°C 壓力：155 bar	進口集管：13CrMo44 出口集管：P92 爐管：T24、HCM12、Alloy 617
過熱器爐管及集管	
進口溫度：34°C 出口溫度：89°C 壓力：152 bar	進口集管：P92 出口集管：Alloy 617 爐管：Alloy 714、TP310N、Alloy 740、Alloy 617

閥（Safety Valve）、汽機關斷閥（Turbine Stop Valve），測試材料如表2為所列。

該計畫是建造700°C超超臨界電廠稱為FSDP（Full-Scale Demonstration Plant），將於2010年招標，目前德國最大電力公司E.ON積極規劃總經費超過10億歐元的700°C超超臨界電廠，稱為Project 50 Plus。但是FSDP的主要經費決定於第7期歐盟科研架構計畫（FP7）的政治立場，以及是否將CO_2捕集與FSDP組合而定，這是FSDP電廠是否建造不可確定的因素之一。分3個階段完成FSDP建廠計畫，其中2008年以前完成容量及廠址的決定，2010年以前完成發包合約的簽訂，2014年完成建造及機組起動（start-up）。電廠初步規範如下：

Site：Wilhehnshaven, Germany
Fuel：Hard Coal（25 MJ/kg（5,971 kcal/kg））
Fuel Consumption：140 ton/h
Output：508 MW
Net efficiency：> 50%
Main steam：705°C/365 bar
Reheat steam：720°C/73 bar
Feed water：330°C
CO_2 emission：670 g CO_2/kWh

淨效率50%以上的超高效率機組並非單純以提高蒸汽條件來達成的，仍須有其它項目的改善設計來配合，如飼水溫度的提高、汽機效率提升、廢熱的回收、廠用電的減少、真空度的改善等等項目的匹配。以600°C/250 bar之淨效率46%為基礎，各項目的改善對效率的增加程度如下表3所示，唯有各方面的配合改善，50%的目標才能達到。然而700°C計畫是否成功與高溫材料的發展息息相關，因此以下將介紹高溫材料於鍋爐的應用情形：

表 3　各項目的改善對效率的影響表

	主蒸汽溫度	再熱蒸汽溫度	飼水溫度	汽機效率（%）	廢熱回收（%）	鍋爐效率（%）	輔機用電（%）	真空度（kPa）
600°C /250 bar	600°C	600°C	270°C	91/94/87	-	95.0	7.0	4.0
700°C /350 bar	700°C	720°C	330°C	93/95/90	-	95.5	6.5	3.5
效率增加（%）	+3	+1.8	+0.6	+0.35	+0.6	+0.26	+.2	+0.2
累積效率（%）	49	50.8	51.4	51.75	52.35	52.61	52.87	53.07

四、鍋爐高溫材料發展

（一）鍋爐爐管溫度的分布

超臨界或超超臨界鍋爐各區域壓力組件的承受溫度並非單一數值，隨著機組負載的變化，鍋爐各區域爐管、集管及蒸汽管路的溫度均會變化，下表4為四種蒸汽條件下超臨界及超超臨界鍋爐於40%及100%負載時，各區爐管的蒸汽溫度/蒸汽壓力的變化情形，其中603°C/300 bar及703°C/358 bar為超超臨界機組，其餘為超臨界機組。下表粗黑體字表示100%負載的爐管蒸汽溫度值，蒸汽條件由540°C/200 bar至703°C/358 bar，省煤器溫度變化由290°C增加至380°C，水牆（爐鼻）溫度由375°C增加至490°C，水牆（爐頂）溫度由385°C增加至520°C，水牆出口溫度自400°C增加至540°C，過熱器出口溫度由540°C增加至703°C。由此顯示當蒸汽條件為703°C/358 bar時，各區域爐管的溫度均較傳統設計條件高出許多，因此傳統的高溫材料應用於過熱器區域，於此只能應用703°C電廠之水牆管或更低溫的省煤器管，而大量的高溫新材料將應用於過熱器爐管、集管或蒸汽管路。以下介紹高溫材料及傳統超臨界或700°C電廠鍋爐各區域材料的考量及應用情形：

（二）鍋爐高溫材料的應用

材料應用於超臨界或超超臨界鍋爐，主要是考量溫度的因素，以耐溫等級由低至高依序為肥粒鐵系低合金鋼（ferritic steel）、麻田散鐵系低合金鋼（martensitic steel）、沃斯田鐵系不鏽鋼（austenitic steel）、鎳基超合金（Ni-based super alloy）等四大類的材料，應用於鍋爐為嘴管、過/再熱器爐管、集管、管路、高壓閥、安全閥等壓力組件（pressure parts）。此四類材料於不同蒸汽條件之超臨界鍋爐的佔比如表5所示，而合金含量越高，則價格成本亦高，如鎳基超合金的成本高於肥粒鐵系低合金鋼的10倍以上，因此使用溫度越高，材料的成本越高。此外，研究結果顯示肥粒鉄系低合金鋼的應用溫度無法超越620°C，稱為肥粒鐵障礙（ferritic barrier）。肥粒鐵系與麻田散鐵系低合金鋼主要是以2% Cr、9% Cr、12% Cr為主的低合金鋼，沃斯田鐵系不鏽鋼是以22-25% Cr的合金添加為主要應用的材料。

表6為不同鍋爐區域的材質選用考量因素。以水牆管區域材質的選用為例，考慮超臨界鍋爐水牆管的溫度並非恆定值，金屬溫度隨著受熱長度增加而昇高，造成較次臨界機組更嚴苛的環境。對於水牆管常用的材料，如銲接性佳的T11（1Cr-lMo）爐管，則有潛變強度不足的缺點。雖然T22（2Cr-2Mo）、T91（9Cr-1Mo）材料足以因應此環

表 4　四種蒸汽條件之鍋爐爐管 / 集管溫度值（單位：°C）

負載 100%（40%）	省煤器出口	水牆（爐鼻）	水牆（爐頂）	水牆管出口	過熱器出口
540°C 200bar	290（270）	375（305）	385（305）	400（330）	540（540）
544°C 261bar	330（290）	420（325）	440（360）	450（380）	544（544）
603°C 300bar	340（305）	440（375）	470（415）	490（455）	603（603）
703°C 358bar	380（335）	490（395）	520（445）	540（475）	703（703）

表 5　不同蒸汽條件鍋爐使用材料的佔比

蒸汽條件（蒸氣壓力 / 鍋爐溫度 / 過熱氣溫度）	使用材料佔比
250 bar/540°C/560°C	Ferritic + Martensitic：100%
280 bar/600°C/620°C	Ferritic + Martensitic：80% Austenitic：20%
360 bar/700°C/720°C	Ferritic + Martensitic：60% Austenitic：24% Ni-based：16%

表 6　不同的鍋爐區域的材質選用考量因素

鍋爐區域	選用材質主要的考量因素
水牆管	銲接性、腐蝕、潛變、疲勞
過 / 再熱器管	潛變、腐蝕、疲勞
集管	疲勞、潛變
蒸汽管路	疲勞、潛變

境，然而卻有銲接性不佳、須施以銲後熱處理等缺點。因此，T-23（HCM2S）材料是T-22鋼材的改良，在原有的2.25 Cr鋼材添加1.6W、V、Nb等元素，並降低碳含量，其潛變強度介於T22與T91的高經濟性鋼材，銲接性優於T22及T91，適合應用於超臨界或超超臨界鍋爐水牆管的一種常用材料。

鍋爐的高溫高壓蒸汽管路、集管、過熱器及再熱器等爐管，必須以材料的潛變強度為主要的考量。此外，對於厚件的集管及蒸汽管路，熱疲勞也是重要的考量因素之一。相較於沃斯田鐵系列的鋼材，肥粒鐵及麻田散鐵系列的母材具有較低的熱膨脹係數，及較高的熱傳導係數，因此適合應用於集管及蒸汽管路。許多早期的超超臨界的機組，因蒸汽管路及集管選用不鏽鋼材質，往往造成材料熱疲勞的破壞。如前所述，肥粒鐵或麻田散鐵系列的低合金鋼應用溫度620°C以下具有較佳的機械性質。

對於蒸汽溫度700°C的嚴苛環境，耐溫能力較高的不鏽鋼無法使用於集管及蒸汽管路的條件下，以及對於傳統超臨界或超超臨界鍋爐使用的肥粒鐵系低合金鋼又有肥粒鐵障礙的限制，因此該計畫設計製造鎳基超合金做為鍋爐出口集管、過/再熱蒸汽出口管路、末段過/再熱器局部管排、安全閥、高壓閥的用途。下表7為符合700°C超超臨界鍋爐可行的高溫材料，包含肥粒鐵系等四類的高溫材料，但並不侷限於此，新材料仍持續的研發。

表 7　符合 700°C 超超臨界鍋爐的高溫材料

鍋爐區域 / 基材材質	Ferritic + Martensitiv	Austenitic	Ni-Based Alloy
水牆管	T23 T24 T92 T122	–	Alloy 617（Mod.）
過 / 再熱器管	–	Super 304H Alloy 174 Sanicro 25 HR6W	Alloy 617（Mod.） Alloy 740 Alloy 263
集管及蒸汽管路	–	HR6W	Alloy 617（Mod.） Alloy 263

五、結語

歐盟27個會員國達成協議，2020年前縮減溫室氣體排放20%，確保風力、太陽能等乾淨能源佔總能源20%。此舉勢必將汰換許多高污染、低效率的現有燃煤機組。為因應未來的改變，歐盟700°C超超臨界燃煤發電計畫更應加速進行，以符合未來新的減量要求。結合高溫材料的研發應用與整廠先進的設計概念，規劃出超高效率商業等級的燃煤發電機組，雖然最後的電廠建造及運轉仍有賴更多經費的投入而有其不確定因素，但此結果是成果豐碩並證明具體可行。相對於其它研發或試驗中的CO_2減量技術而言，其規模多為先導等級（pilot scale）而非商業等級（commercial scale）的機組，均有其商業應用的限制。而700°C電廠的技術是直接架構在既有成熟的商業化發電技術之上，若計畫成功將對應用數百年的傳統化石燃料發電技術，有極為深遠的影響，將徹底改變此類傳統技術擺脫高污染、低效率的缺點，以全新的面貌兼顧環保需求及節能減碳的優點。因此，面對節能減碳的全球化趨勢，掌握最先進之淨煤發電技術的演變及高溫材料的應用情形，有助於未來燃煤機組的規劃與執行。

參考文獻

1. 周際瑜，超臨界鍋爐及其附屬設備運轉技術，台電公司 98 年出國研習報告（未出版）。
2. 宋郁德，火力發電廠發電供電設備組態介紹，電機技師雙月刊，100 年 2 月，P.17-P.20。