

第二届火电厂锅炉、汽机新技术与节能改造研讨会



龙辉 中国电力工程顾问集团公司工程技术中心副主任，教授级高级工程师，国家700。C超超临界创新联盟技术委员会、中国电机工程学会火力发电专业委员会、机械工业环境保护机械标准化技术委员会大气净化设备分技术委员会委员，工信部大气净化装备委员会副主任委员。主要从事火力发电新技术及环保工艺发展方向研究。近年在国家级电力期刊上发表有关火电新技术发展及环保工艺方面研究论文30余篇。

演讲题目：燃煤机组节能设计新技术研究介绍



燃煤机组 节能设计新技术研究介绍

2015. 3. 25

一、前言

二、燃煤锅炉烟气余热梯度利用技术

三、锅炉烟风道低阻设计技术

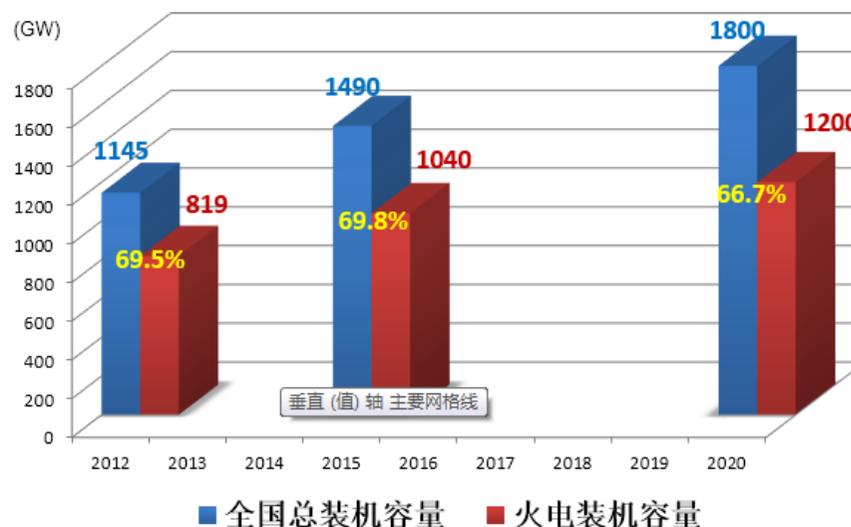
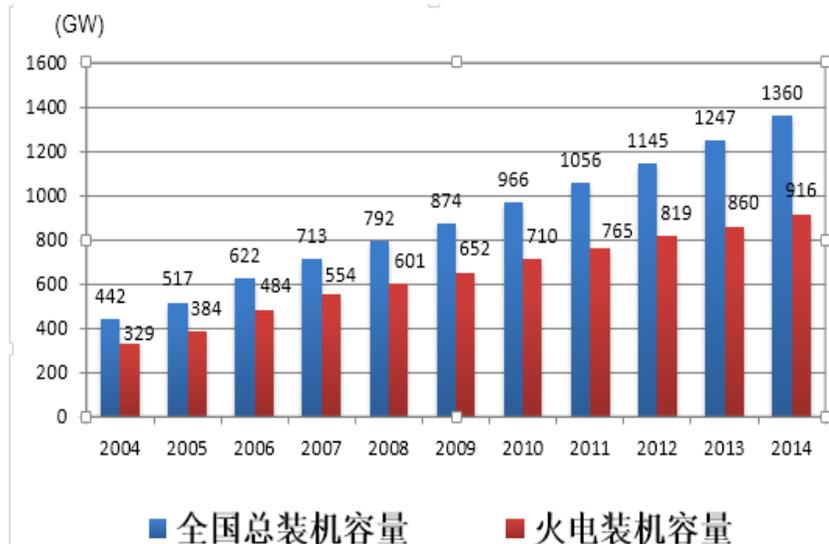
四、满足“超低排放”要求的烟气治理系统节能技术

五、结语

一、前言

装机容量及预测

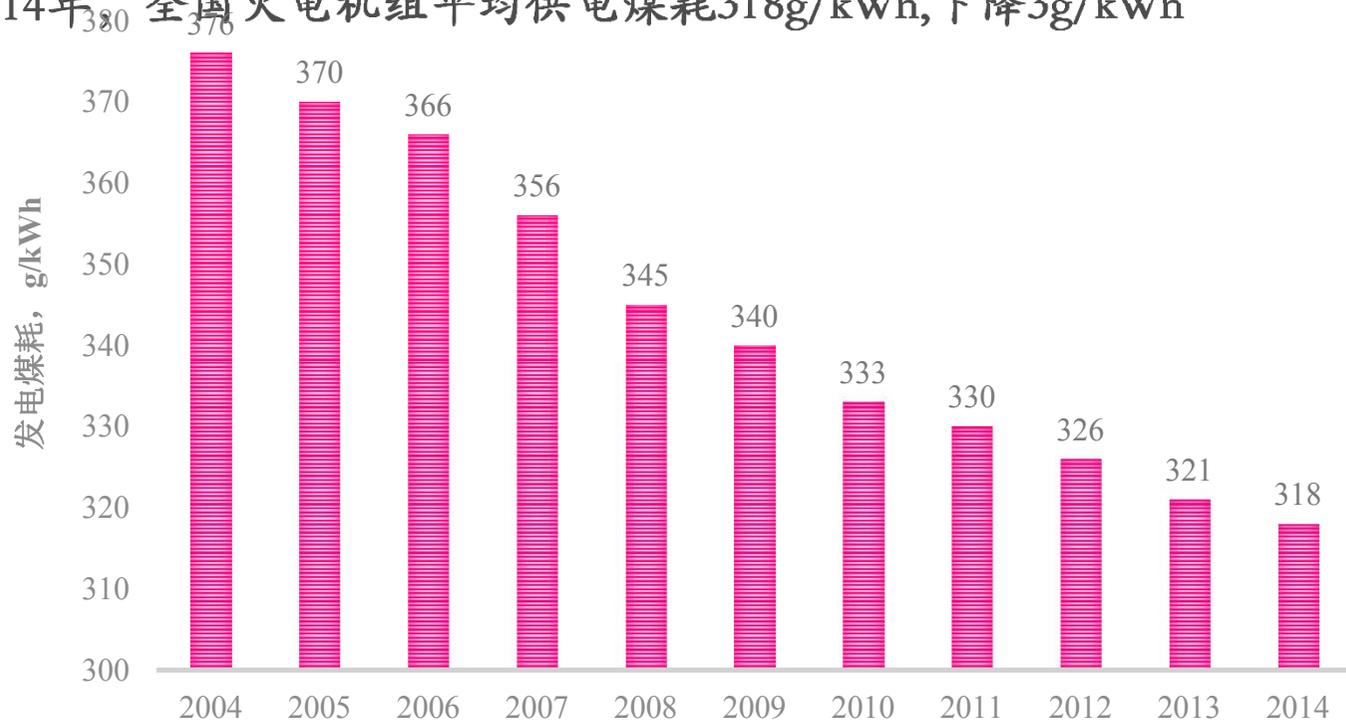
- 我国一次能源结构和经济发展特征决定了电力工业在相当长的时间内以燃煤发电为主，清洁、高效的先进燃煤发电技术具有举足轻重的地位
- 我国总装机容量居世界第一，截止2014年底，全国发电设备容量136019万千瓦，其中火电装机容量91569万千瓦



一、前言

燃煤发电煤耗下降

- 随着大型电力设备制造水平、设计技术集成的提高以及以大代小政策的落实，大型火电机组可靠性和效率显著提高
- 2014年，全国火电机组平均供电煤耗318g/kWh，下降3g/kWh



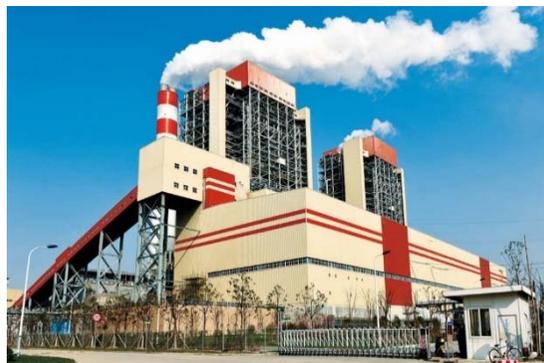
一、前言

第一代超超临界燃煤发电技术

- 我国一次能源结构决定一定时期内仍将以燃煤发电为基本原则，进一步优化火电结构，发展更高效、高参数超超临界燃煤机组降低发电煤耗，提高能源利用效率
- 第一代600℃等级超超临界发电技术以华能玉环电厂、外高桥电厂为代表，采用一次中间再热设计，分别完成了超超临界机组国产化和创造世界上运行供电煤耗最低的能耗水平，减少温室气体和其它污染物排放



华能玉环电厂4×1000MW机组



上海外高桥电厂三期工程2×1000MW机组



一、前言

第二代超超临界燃煤发电技术--二次再热技术

- 美国、日本、丹麦、德国先后开展二次再热项目
- 中国进行了二次再热机组建设，机组容量超越国外
- 两次再热机组的效率可在目前超超临界机组的基础上提高3%。
- **技术创新点：**
 - 机组容量：600MW 1000MW
 - 主机压力为31MPa，兼顾安全性、经济性
 - 主蒸汽温度采用600℃，再热蒸汽温度采用610℃~620℃，充分利用现有材料的耐高温潜力

一、前言

超超临界燃煤发电二次再热技术

- 热力系统优化
- 锅炉关键技术
- 适应二次再热锅炉的计算程序控制温度偏差
- 合理选择受热面的材料、水冷壁材料
- 再热蒸汽温度的调节，再热蒸汽出口汽温的保证
- 汽机关键技术
- 承受更高压力等级的高压缸模块设计
- 大通流的二次再热中压汽缸模块设计
- 五缸四排汽单轴汽轮发电机组的轴系稳定



一、前言

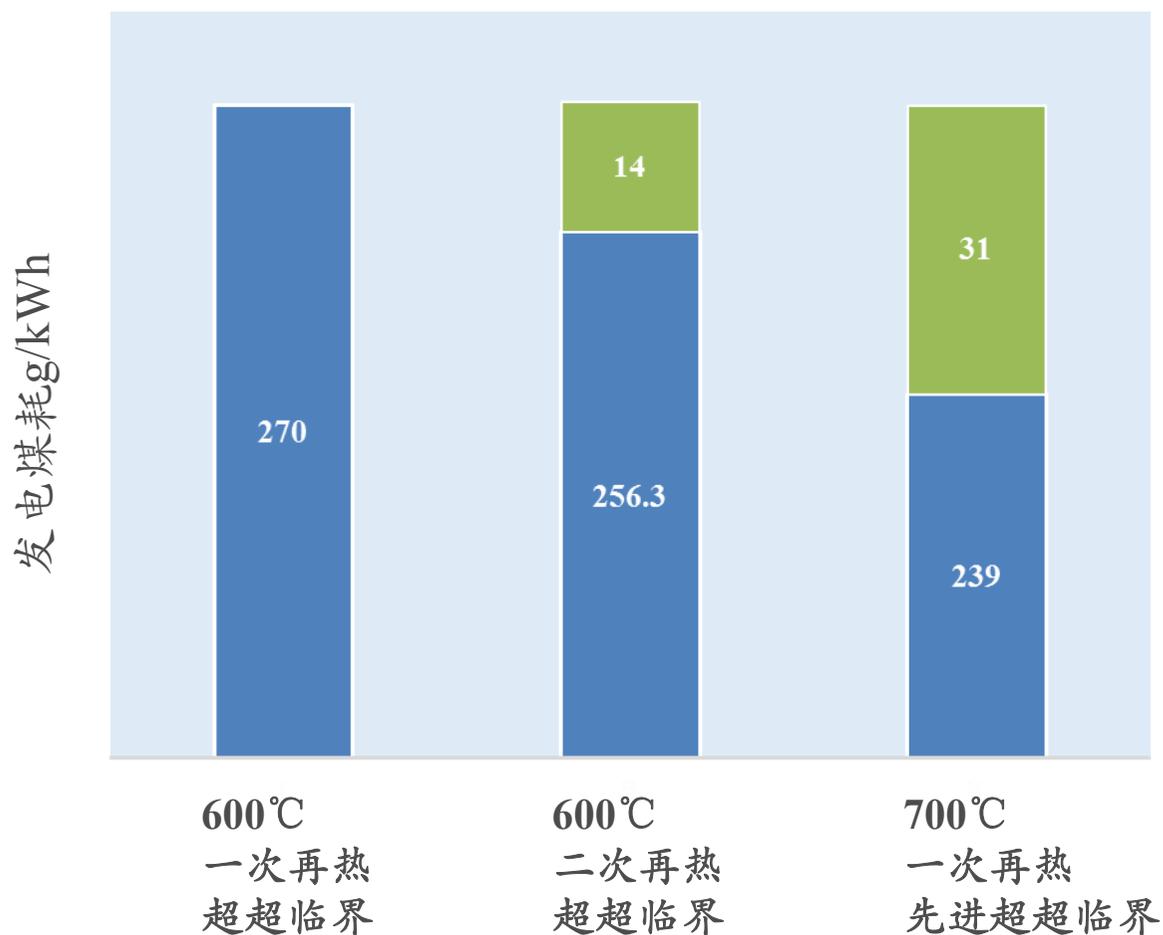
二次再热节能效果

项 目	一次再热超超临界 2×1000MW	二次再热超超临界 2×1000MW
蒸汽参数	25MPa 600/600℃	31.0MPa 600/610/610℃
汽机热耗率 (kJ/kW-h)	7350(平均)	7040
锅炉效率(%)	94	94.65
管道效率(%)	99	99
发电效率(%)	45.58	47.92
发电煤耗 (g/kW-h)	270	256.3
年耗标准煤(吨)	297×10^4	281.9×10^4
年节约标准煤(吨)	基准	151000



一、前言

各技术发电煤耗的比较



一、前言

1000MW超超临界机组设计供电煤耗对标情况

外三1000MW	万州1000MW	泰二1000MW
一次再热	一次再热	二次再热
283.3	271.1	267.1

一、前言

国内已开展的系统优化设计主要包括：

- 1、提高机组参数；
- 2、降低汽轮机背压；
- 3、燃烟煤机组采用高效磨煤机配动态分离器；
- 4、烟气余热回收；
- 5、采用凝泵、风机等采用变频装置,等等。

一、前言

在设计发电煤耗和供电煤耗不断降低情况下，再降低煤耗已经很难，必须突破传统的系统设计，才能实现大的飞跃，我们开展的主要技术研究：

- 1) 燃煤锅炉烟气余热梯度利用技术；
- 2) 锅炉烟风道的低阻设计技术；
- 3) 满足“超低排放”要求的烟气治理系统节能技术。

二、燃煤锅炉烟气余热梯度利用技术

二、燃煤锅炉烟气余热梯度利用技术

典型的烟气余热利用方案

目前我国常用的烟气余热利用方案大多为在除尘器前或除尘器后设置烟气余热换热器，利用烟气余热加热凝结水或热网水，排挤部分汽轮机的回热抽汽。在汽轮机进汽量不变的情况下，被排挤的抽汽可在汽轮机内继续膨胀做功，提高了汽轮机功率，进而提高机组的热效率。如华能北京高碑店项目和外高桥三期项目等。

二、燃煤锅炉烟气余热梯度利用技术

改进的烟气余热利用方案

根据不同的建设条件，也有一些新建电厂或电厂改造项目拟采用除尘器前、后均设置烟气余热利用的方案。可以在烟气余热利用的同时，改善除尘器的工作状态。改进型的烟气余热利用方案，可以加热凝结水，也可以后一级采用热媒（水）加热器加热冷风，提高空气预热器入口风温方案，替换更高品质的蒸汽，进一步提高机组热效率，

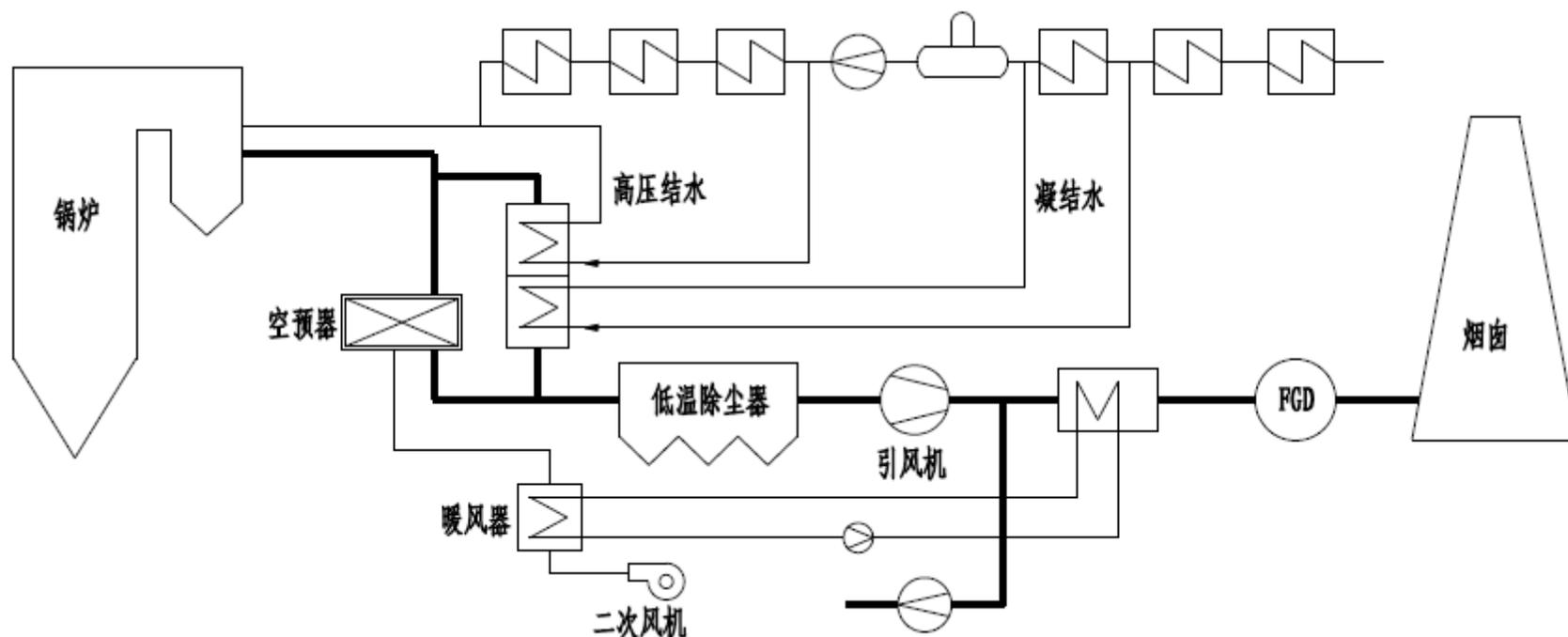
二、燃煤锅炉烟气余热梯度利用技术

我们现在重点研究燃煤锅炉的高效烟气余热梯度利用。高效烟气余热梯级利用方案为20-30%的烟气不经过空预器，进入旁路省煤器，形成以下热力系统工作条件：

- 1、加热高压给水；
- 2、加热凝结水；
- 3、该部分烟气与空预器出口烟气汇合，通过除尘器进入热媒（水）烟气—空气换热器，加热进入空预器的冷风。

二、燃煤锅炉烟气余热梯度利用技术

烟气余热梯度利用系统流程图如下：



与常规烟气余热利用方案相比，采用烟气余热梯度利用方案的节能效果高出较多，供电煤耗可降低5~6g/kW.h。

二、燃煤锅炉烟气余热梯度利用技术

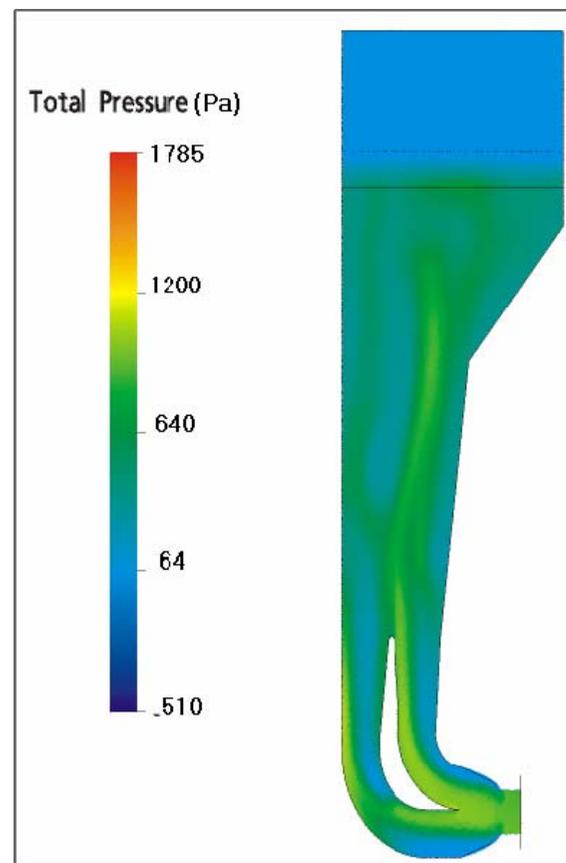
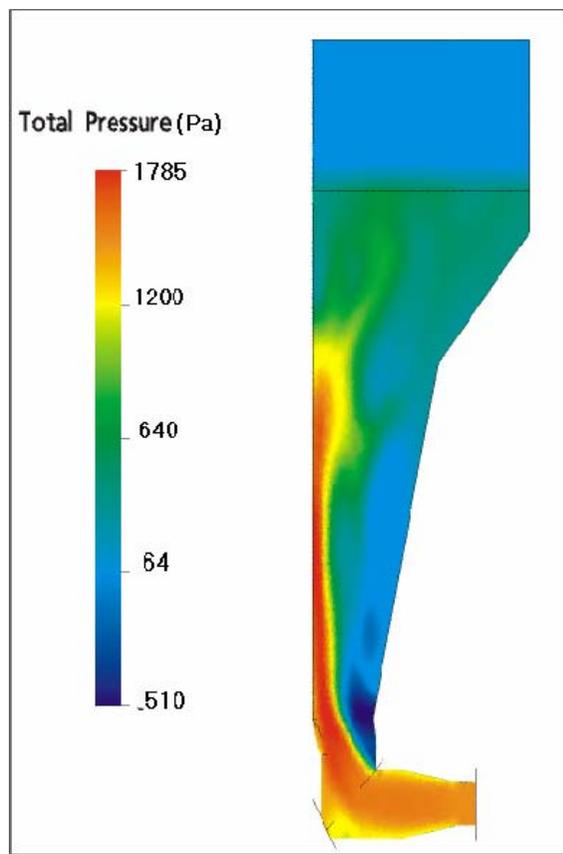
采用烟气余热梯度利用技术的大型超超临界燃煤机组，由于利用高温烟气加热高压给水，进一步减少高品位的抽汽返回汽轮机做功，从而提高机组的整体效率，由于节能效果显著，与现有的超超临界机组相比，可定义为第三代超超临界燃煤机组发电设计技术。

三、锅炉烟风道低阻设计技术

三、锅炉烟风道低阻设计技术

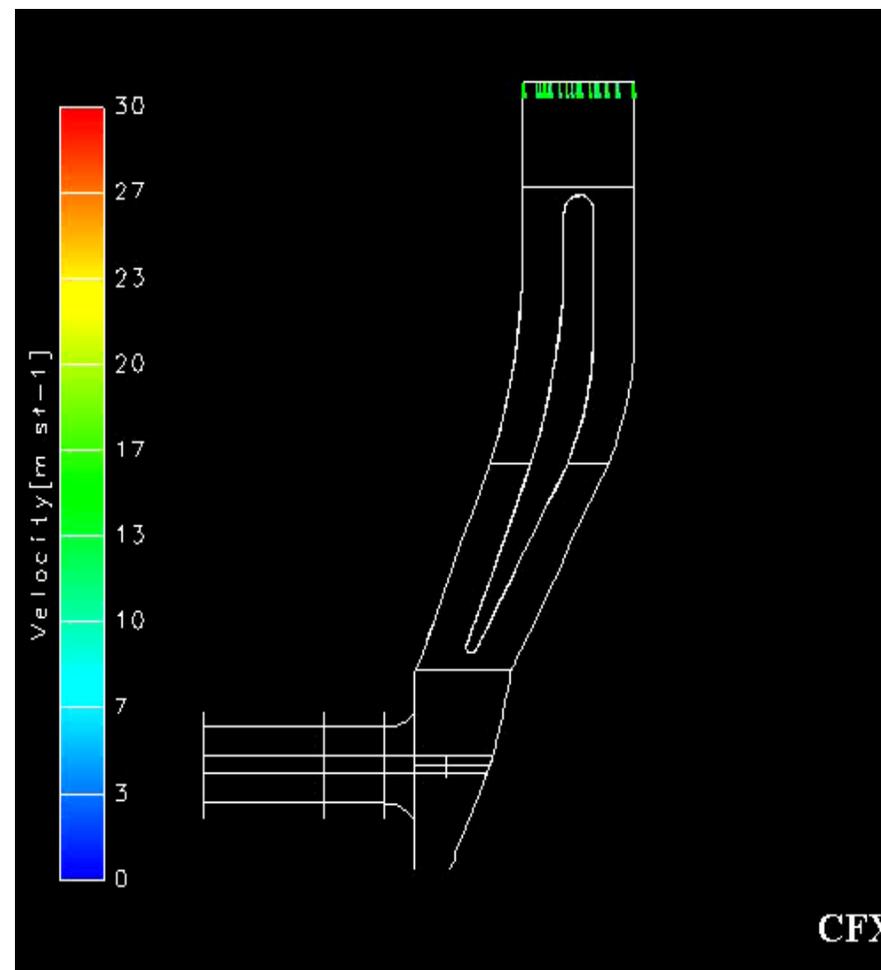
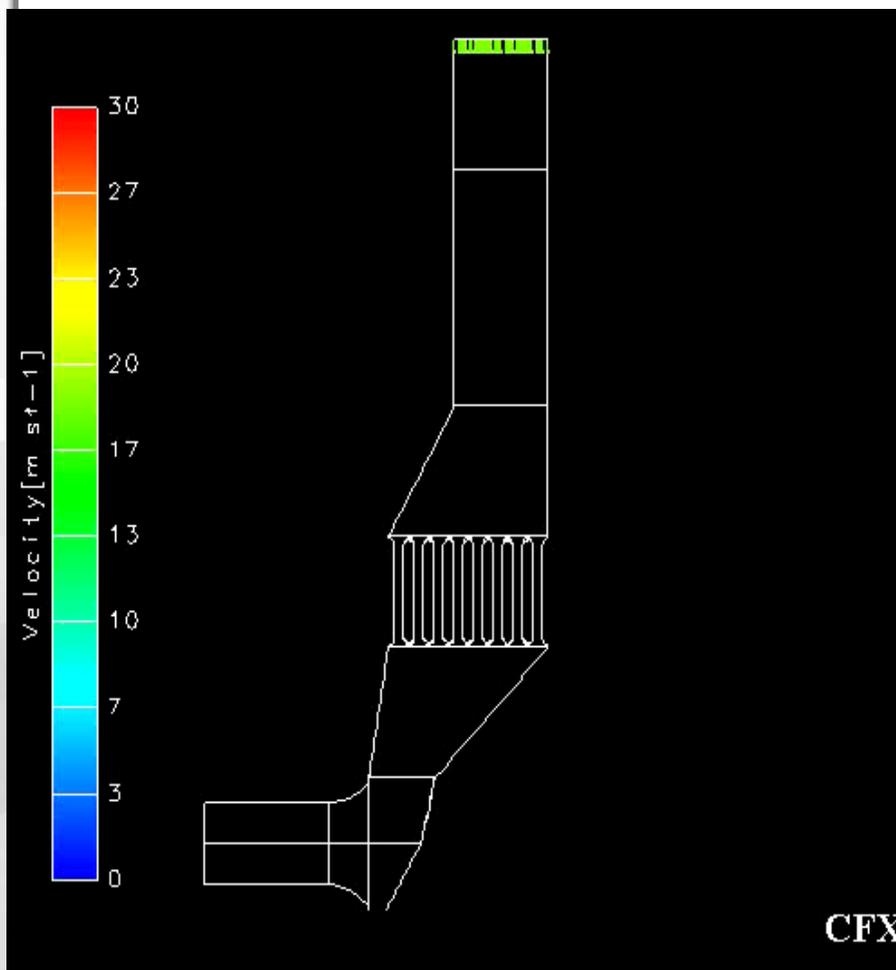
传统的烟风道设计按照前苏联标准、美国标准进行计算，现代计算机运算水平的提高，利用数学模拟进行烟风道流场计算可大幅度降低整个烟风系统阻力。每套送风机、一次风机、引风机系统均可在目前设计条件下降低阻力，从而使送风机、引风机、一次风机轴功率能耗降低，全厂厂用电率降低。

三、锅炉烟风道低阻设计技术



降低747Pa

三、锅炉烟风道低阻设计技术



送风机入口风道阻力降低237Pa

三、锅炉烟风系统节能设计技术研究

1×1000MW采用低阻烟风道降低的压力损失和预期节约的功率

系统	预期降低的压力损失	预期节约的功率
一次风系统	1kPa	400kW
二次风系统（包括到燃烧器风箱风道、风门、消音器）	1.2kPa	700kW
烟气系统（包括SCR、空气预热器、除尘器入口、出口，引风机入口烟道、消音器、风门、FGD、烟囱入口）	1.5kPa	1800kW
每台机组预期降低情况	3.73kPa	2900kW

三、锅炉烟风道低阻设计技术

除了节能，根据经验，应用空气声学专利创新，能减少噪声30~50dBA，相当于减少一台消音器。

附加带来的其它效益

- 均衡气流分配同样改善锅炉燃烧过程，提高脱硫、电除尘等污染防治设备的性能。
- 气流紊乱如果出现在烟囱进口将引起CEMS出现问题，低阻烟道能减少紊流流过烟囱进口，确保可靠的测量度。



四、满足“超低排放”要求 的烟气治理系统节能技术

四、满足“超低排放”要求的烟气治理系统节能技术

目前燃煤火电机组烟气治理“超低排放”主要
技术路线：

- 1、低 NO_x 燃烧器+SCR+ESP或FF+WFGD
- 2、低 NO_x 燃烧器+SCR+ESP或FF+WFGD+WESP

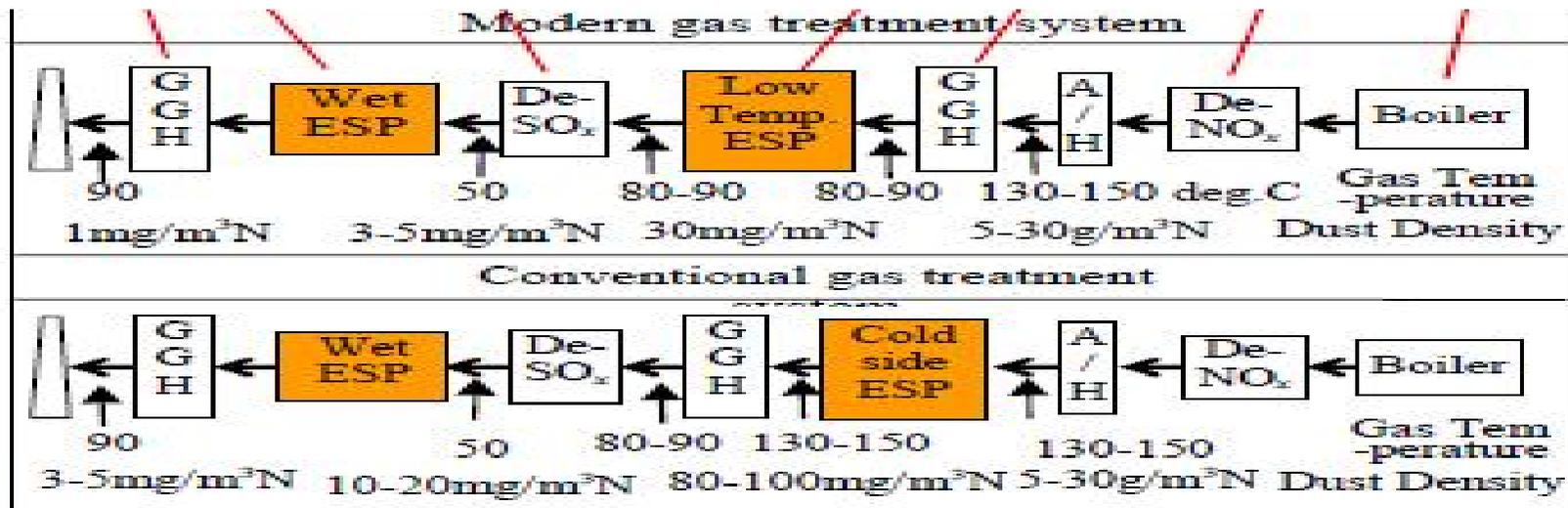
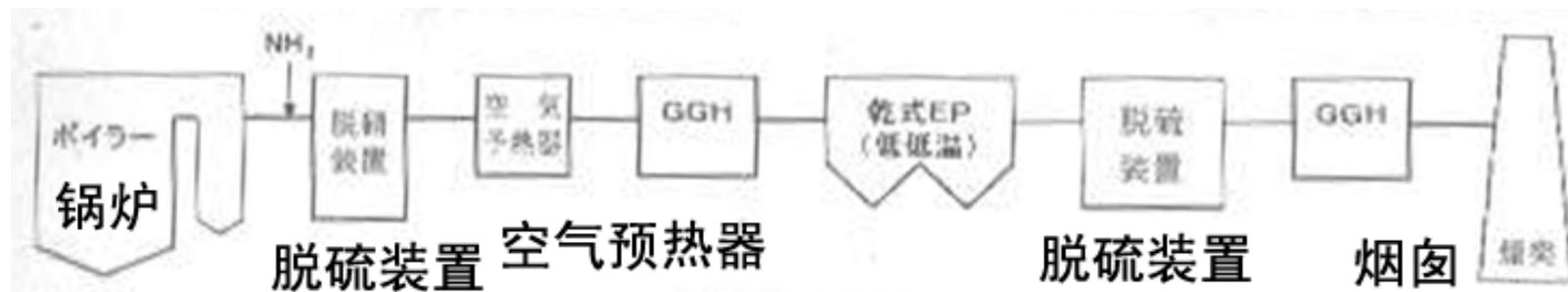
四、满足“超低排放”要求的烟气治理系统节能技术

1、除尘采用低低温电除尘器

低低温电除尘器技术从电除尘器及湿法烟气脱硫工艺的单一除尘和脱硫工艺路线演变而来。1997年日本三菱率先在大型燃煤火电机组中开始推广应用基于MGGH使电除尘器（ESP）在90℃左右运行的低低温电除尘工艺。鉴于该项技术的优点非常明显，此后得到了迅速的发展，据不完全统计，配套机组容量累计已超15000MW，典型的企业有三菱、石川岛播磨、日立等。

四、满足“超低排放”要求的烟气治理系统节能技术

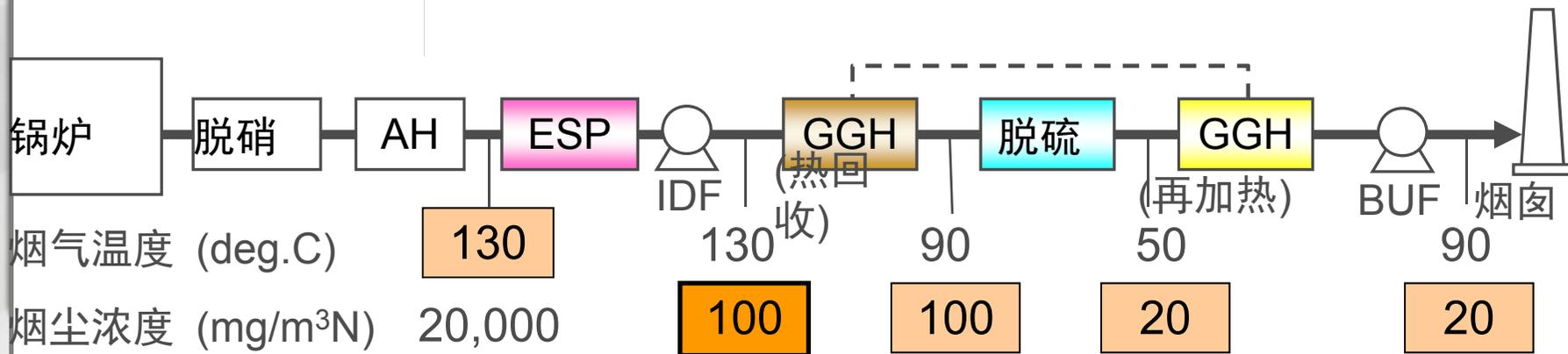
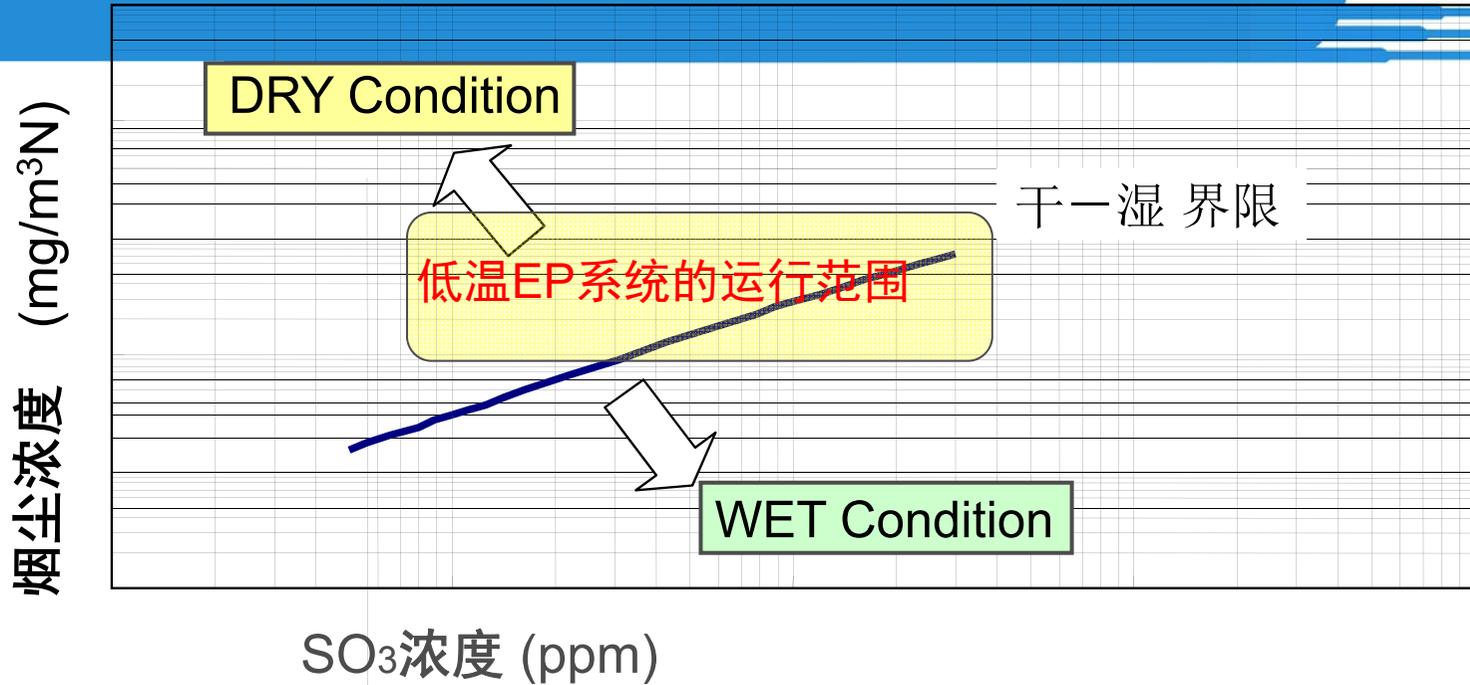
在日本目前运行的除尘方式：



四、满足“超低排放”要求的烟气治理系统节能技术

低低温电除尘器与电厂热力系统及脱硫系统结合，具有综合节能、节水、环保的效果，并能满足燃中、低灰分煤条件下国家环保排放标准的粉尘的控制要求，该工艺具有无泄漏、没有温度及干、湿烟气的反复变换、不易堵塞的特点。

四、满足“超低排放”要求的烟气治理系统节能技术



四、满足“超低排放”要求的烟气治理系统节能技术

节能效果明显

对1台1000MW机组低低温电除尘系统的节能效果计算分析，烟气温度降低30°C，可回收热量 1.64×10^8 kJ/h，节约湿式脱硫系统水耗量70t/h，同时，烟气温度降低后，实际烟气量大大减少，这不仅可以降低下游设备规格，而且可使风机（IDF）的电耗约减小10%，脱硫用电率由原来的1.3%减小到1.0%。

四、满足“超低排放”要求的烟气治理系统节能技术

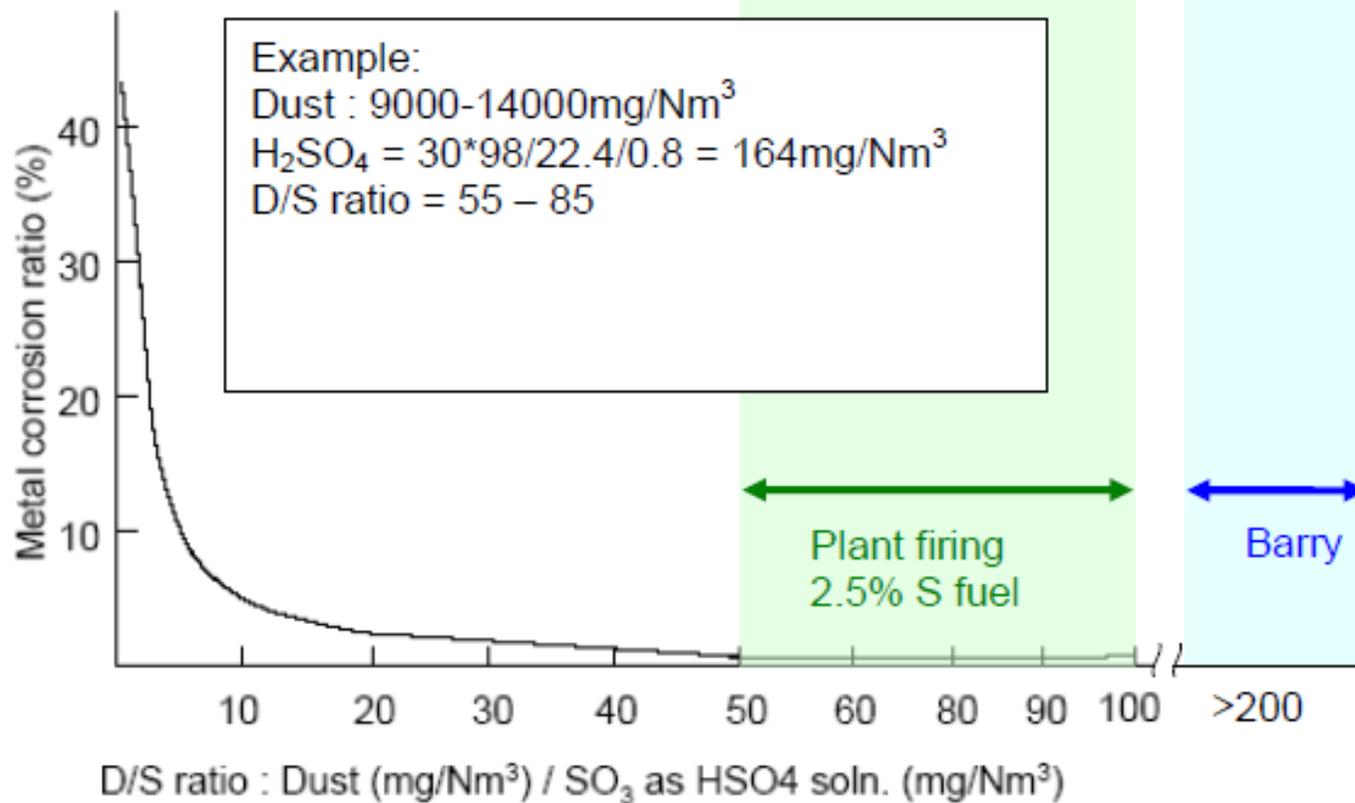
低低温电除尘器应用于高硫煤的应用上还在进行研究。

美国也有研究显示含硫量高于1%的燃煤对系统的可靠性具有不确定性。美国应用的低低温电除尘器中，有电除尘器入口SO₃气体浓度18ppm的报道。在日本石川岛的业绩中，低温换热器处最高的SO₂入口浓度大约对应的煤种含硫量为1.17%，这从另一个角度的实践表明低低温电除尘器在含硫量低于这个数值的燃煤是可行的。

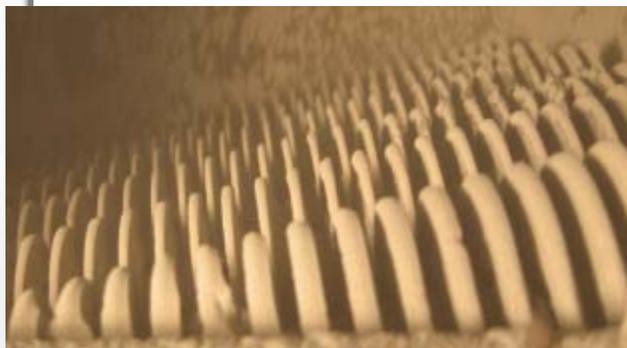
四、满足“超低排放”要求的烟气治理系统节能基本

由于日本各电厂的燃煤稳定，一般不会改变燃煤种类，因此其酸露点较稳定。由于燃煤含硫率越高，烟气中的 SO_3 浓度越高，其对应的酸露点就越高，发生腐蚀的风险增加。低低温电除尘器对高硫煤的腐蚀情况还有待进一步研究。

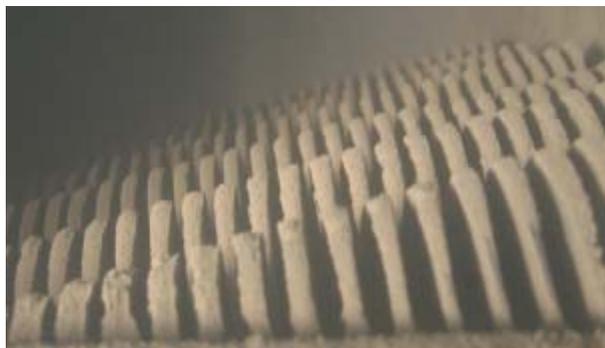
四、满足“超低排放”要求的烟气治理系统节能技术



四、满足“超低排放”要求的烟气治理系统节能技术



a) $\text{SO}_3=43\text{mg}/\text{m}^3\text{N}$
(12ppm)



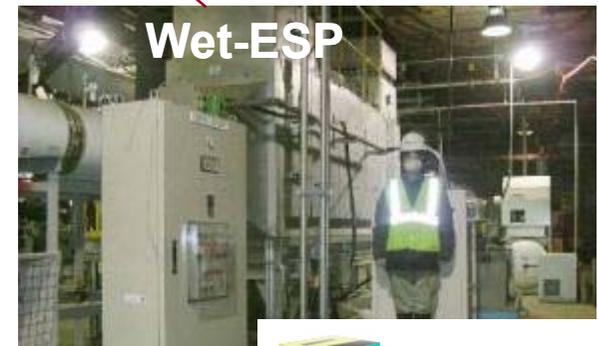
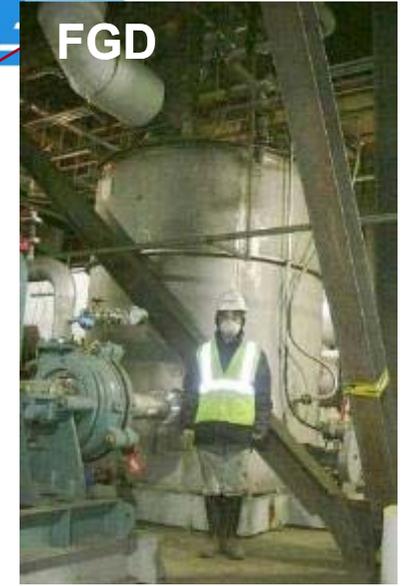
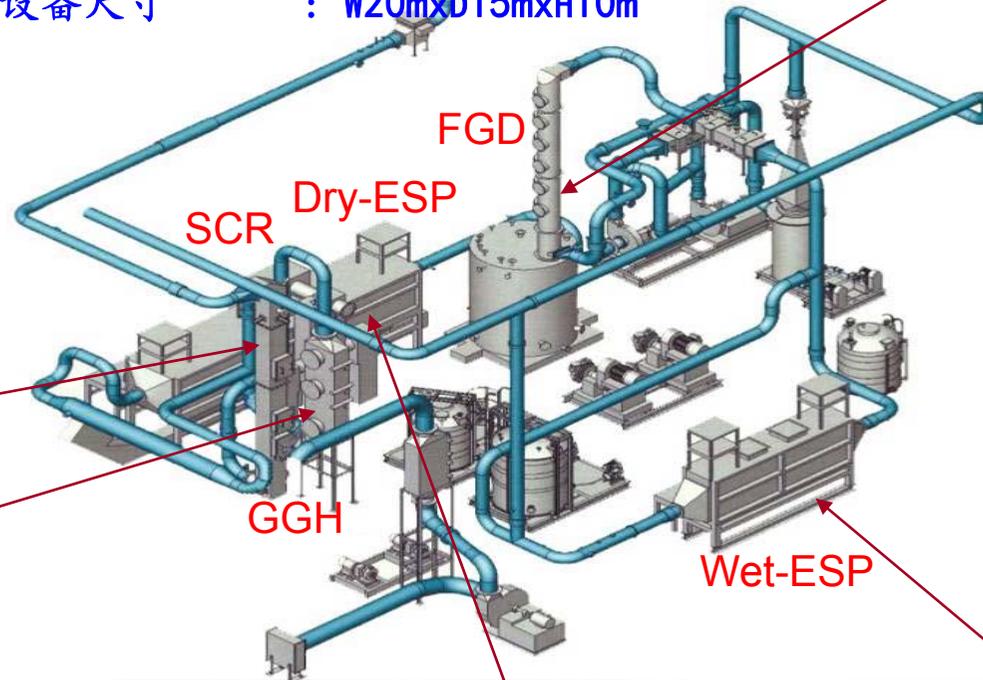
b) $\text{SO}_3= 143\text{mg}/\text{m}^3\text{N}$
(40ppm)



c) $\text{SO}_3= 321\text{mg}/\text{m}^3\text{N}$
(90ppm)

· 随着排烟中 SO_3 浓度的增加，换热管上堆积的灰量也会增加。

烟气流量 : 2000m³N/h-wet (1MW)
煤 : Gateway (S: 2.93%, SO₂: 2100ppm)
脱SO₂ : 99%
设备尺寸 : W20mxD15mxH10m



四、满足“超低排放”要求的烟气治理系统节能技术

在国内应用情况

1) 大唐宁德电厂4#炉低低温电除尘器改造项目

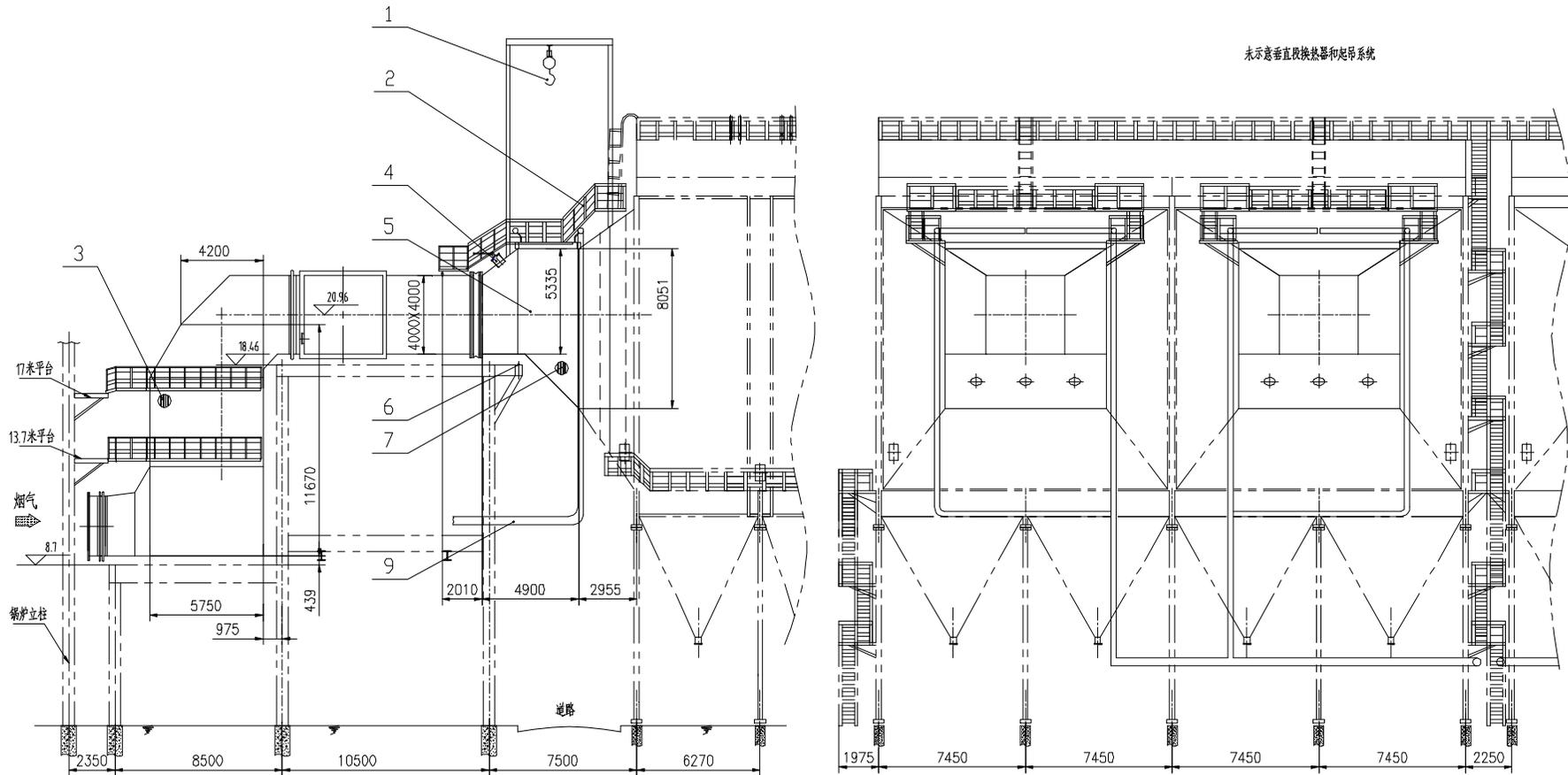
在除尘器的进口喇叭处和前置的垂直烟道处分别各设置一级烟气余热利用节能装置，换热介质通过换热管路串联连接，采用汽机冷凝水与热烟气通过烟气余热利用节能装置进行热交换，使得除尘器的运行温度由按 150°C 下降到 95°C 左右。垂直段换热装置将烟温按 150°C 降至 115°C 设计计算，水平段换热装置将烟温按 115°C 降至 95°C 计算。

四、满足“超低排放”要求的烟气治理系统节能技术

该套装置实现并达到如下目的：

- (1) 降低电除尘入口烟气温度，进而降低粉尘比电阻，发挥低低温除尘作用，使机组烟囱粉尘排放达到国家新标准；
- (2) 回收锅炉烟气余热，加热凝结水，降低机组供电煤耗，提高经济性；
- (3) 减少脱硫系统的工艺水耗，促进保证脱硫效率，降低烟囱雨，同时延长喷雾器等脱硫设备零件的使用寿命；
- (4) 去除 SO_3 ，防止电除尘器及下游设备 SO_3 低温腐蚀。

四、满足“超低排放”要求的烟气治理系统节能技术



四、满足“超低排放”要求的烟气治理系统节能技术



四、锅炉烟气治理系统节能技术研究

- 在烟温为 150°C 工况下，经换热装置后的降温幅度平均达到 50°C 以上，烟气粉尘比电阻下降明显。
- 除尘器性能测试表明：在增设换热装置后，粉尘排放从约 $60\text{mg}/\text{Nm}^3$ 下降到 $20\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，除尘效率有效提高。
- SO_3 脱除测试表明：在增设换热装置后， SO_3 脱除率达到73.78%。
- 热力系统试验表明：在600MW负荷时，汽机的热耗下降 $52\text{kJ}/\text{kWh}$ 以上；在450MW负荷时，汽机的热耗下降 $69\text{kJ}/\text{kWh}$ 以上。

四、满足“超低排放”要求的烟气治理系统节能技术

2) 华能榆社电厂2×330MW机组烟气系统改造工程

采用以低低温电除尘技术为核心的烟气协同治理技术路线，系统中不设置WESP，原电除尘器改造前出口烟尘浓度约 $100\text{mg}/\text{m}^3$ ，实际燃用含硫量约2%左右的高硫煤，采用低低温电除尘技术，将烟气温度降至 90°C 左右，同时将第1、2电场工频电源改造为高频电源。2014年8月上旬投入运行，经测试，电除尘器出口烟尘浓度为 $18\text{mg}/\text{m}^3$ ，经湿法脱硫系统后，烟尘排放浓度为 $8\text{mg}/\text{m}^3$ 。

四、满足“超低排放”要求的烟气治理系统节能技术

3) 华能长兴电厂2×660MW机组新建工程

采用以低低温电除尘技术为核心的烟气协同治理技术路线，系统中不设置WESP，每台炉配套2台双室五电场静电除尘器，设计烟气温度为90℃，电除尘器出口烟尘浓度设计值为15mg/m³，要求经湿法脱硫系统后，烟尘排放浓度≤5mg/m³；已于2014年11月底投入使用，经初步测试，电除尘器出口烟尘浓度值为10mg/m³，经湿法脱硫后，出口烟尘排放为3.5~4mg/m³。

五、结论

五、结论

1、燃煤机组节能设计新技术

1) 烟气梯度余热回收技术

可实现降低供电煤耗5~6g/kWh, 机组效率可提高1%以上, 是目前除提高机组参数外提高效率最高的节能技术。

2) 锅炉烟风道低阻设计技术

利用目前国内强大的计算机计算手段完成数值模拟, 完成低阻烟风道设计, 应用于工程实践, 最终可降低电厂厂用电率降低0.2%左右。

五、结论

采用上述2种设计技术,可使发电煤耗下降6~7g/kWh,我们完全可以认为在现有的材料水平条件下,是实现600°C超超临界机组升级换代的技术。

五、结论

2、实现节能技术与环保技术的发展有机结合

随着我国火电厂污染物排放控制标准的不断提高，特别是满足三部委提出“超低排放”高标准要求，使环保设施的投入和能耗在不断增加，要寻找环保与节能的平衡点，需要不断加大对节能与环保新技术的研究，才能努力实现节能和环保技术的有机结合，我们在继续加大低低温高效烟气处理系统在适用范围的深入研究，使该技术在中国进一步发展并得到应用。

谢谢!