



# 第十届超超临界机组技术交流2016年会



**叶勇健**

华东电力设计院机务部副总工程师，教授级高级工程师，长期从事火力发电厂设计，主持参加多个高参数、大容量1000MW、600MW超超临界电厂设计。主要研究方向：烟气净化、电厂节能、热机设备、热力系统、厂房布置等。

**燃煤电厂在不采用CCS条件下能满足二氧化碳的排放标准**

2017年2月28日-3月2日 中国·济南

主办单位：中国动力工程学会

协办单位：华能山东发电有限公司

承办单位：中国电力科技网

# 不采用CCS的燃煤电厂能够达到 到美国CO<sub>2</sub>排放标准

华东电力设计院

2017年2月



# 第1节

## 问题的背景



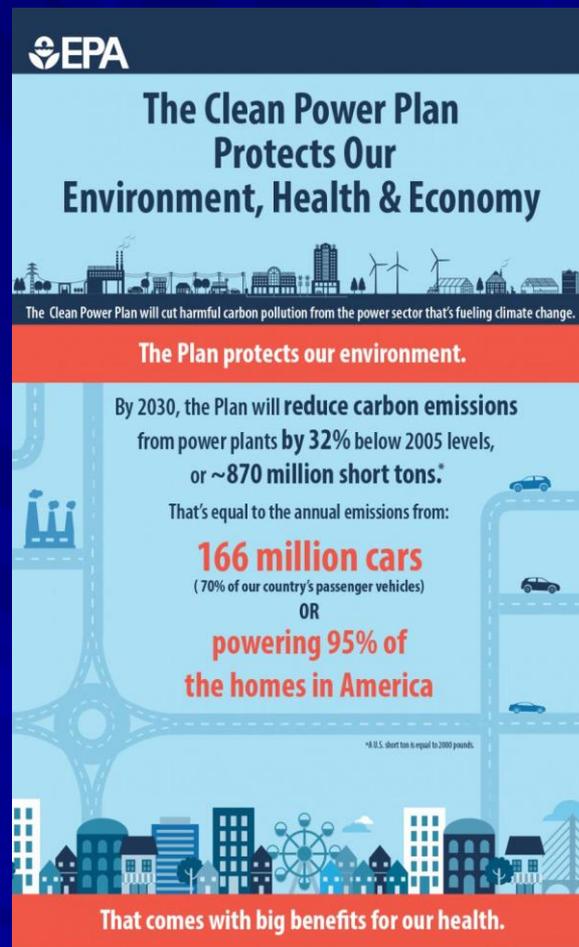
华东电力设计院

CPECC ECEPDI EAST CHINA ELECTRIC POWER DESIGN INSTITUTE



# 1 美国清洁电力计划 CPP

- 2015年8月3日，美国奥巴马政府签署了美国清洁电力计划（下称CPP， Clean Power Plan）。CPP旨在减少发电厂的碳排放，以应对气候变化。
- CPP首次提出了美国全国的各类火力发电厂的二氧化碳排放上限，并要求美国各州按照自身的情况因地制宜的设立（通常是更严格的）减排目标和减排方案。



华东电力设计院

CPECC ECEPDI EAST CHINA ELECTRIC POWER DESIGN INSTITUTE

# 1 美国清洁电力计划 CPP

美国CPP规定的运行火电厂二氧化碳年均排放限值 kg/MWh (lbs/MWh)

	过渡期 (2022-2029年)	最终期 (2029年后)
燃煤机组	696 (1534)	592 (1305)
燃天然气机组	337 (832)	350 (771)



# 1 美国清洁电力计划 CPP

美国《新建、改建、重建固定排放源的温室气体排放标准：发电机组》 kg/MWh (lbs/MWh)

		排放限值 (以机组发电量为基准)
燃煤机组	新建	635 (1400)
	改建、重建	816 (1800) 热输入量>2000MMBTU/h (2.11GJ/h)
		907 (2000) 热输入量≤2000MMBTU/h (2.11GJ/h)
燃天然气机组	新建、重建	带基本负荷: 453 (1000) (发电量) 或 467 (1030) (供电量)
		不带基本负荷: 54 (120)
		多种燃料机组: 54~73 (120~160)



# 1 美国清洁电力计划 CPP

美国佛罗里达州规定的二氧化碳排放限值  
kg/MWh (lbs/MWh)

	过渡期			最终期
	2022—2024	2025—2027	2028—2029	2029以后
年平均值	498 (1097)	456 (1006)	430 (949)	417 (919)
过渡期平均值	465 (1026)			—

加利福尼亚州、缅因州和华盛顿州的排放与佛类似，均为500kg/MWh (1100 lbs/MWh)，以机组供电量为基准。



华东电力设计院

EPECC ECEPDI EAST CHINA ELECTRIC POWER DESIGN INSTITUTE

# 1 美国清洁电力计划 CPP

美国环保署（EPA）提出如下三条技术路线

- 提高现有燃煤电厂的热效率；
- 关闭燃煤电厂转向二氧化碳排放强度低的燃天然气电厂；
- 对于燃煤电厂排放的部分烟气进行二氧化碳捕捉、运输和储存（CCS）。其中对于燃煤机组，美国环保署建议以设置部分烟气的CCS系统作为主要的应对技术手段。



华东电力设计院

EPECC ECEPDI EAST CHINA ELECTRIC POWER DESIGN INSTITUTE

## 2 CCS应用的短板

成本：用于2X660MW的煤粉锅炉的不同处理容量的CCS系统的成本和能耗的估算

CCS处理烟气容量	二氧化碳捕捉系统投资	二氧化碳捕捉能耗降低发电出力比例	二氧化碳输送能耗降低发电出力比例
5%	2亿	1.42%	0.7%
25%	10亿	7.1%	3.6%
50%	16亿	12.7%	6.4%
100%	28亿	22.6%	11.3%

另外，发电厂捕捉的二氧化碳用于民用的市场容量非常有效，二氧化碳的地质储存条件比较苛刻。二氧化碳管道运输对安全性要求非常高。



# 3 结论

大规模地通过CCS降低发电厂的碳排放  
在性价比和外部条件上不现实，需要另  
辟蹊径采取其它手段。

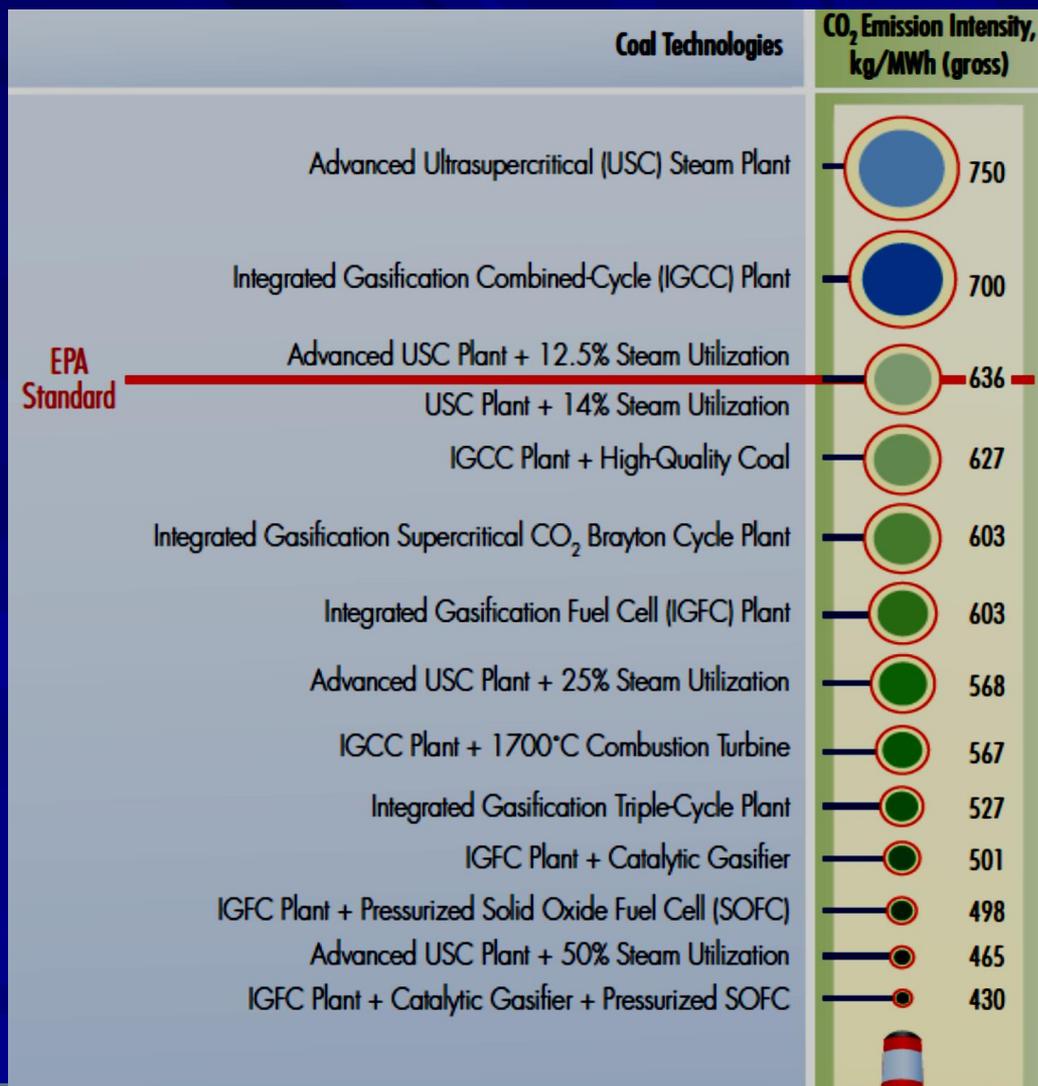
美国电力科学研究院（EPRI）于2015年  
发表了一份名为《燃煤电厂能否不采用  
CCS而达到CO<sub>2</sub>排放限值？》的白皮书。  
该报告的结论是，不采用CCS而单纯提高  
机组热效率是无法达到美国635kg/MWh  
的二氧化碳排放限值



# 3

# 结论

美国电力科学研究院 (EPRI) 提出的技术路线：除了采用供热手段外，其它技术方案都与煤气化技术相关，如 IGCC，煤气化加超临界二氧化碳循环，煤气化加燃料电池等





# 第2节

## 二氧化碳排放强度计算



华东电力设计院

CPECC ECEPDI EAST CHINA ELECTRIC POWER DESIGN INSTITUTE



# 4 燃煤电厂二氧化碳排放量的计算

$$E=b \times k_c \times OF \times 44 \div 12$$

式中：

E——每度电的二氧化碳排放强度 单位：kg/MWh

b——每度电的标煤耗 单位：kg/MWh

$k_c$ ——标煤的二氧化碳排放系数 单位：kg/kg

OF——碳的氧化率



# 4 燃煤电厂二氧化碳排放量的计算

## 各国研究机构标煤二氧化碳排放系数

	标煤二氧化碳排放系数 kg/kg
中国工程院	0.68
国家发展改革委能源研究所	0.67
美国能源部	0.702
日本能源经济研究所	0.756
亚洲开发银行	0.726
全球环境基金会 (GEF)	0.748



# 4 燃煤电厂二氧化碳排放量的计算

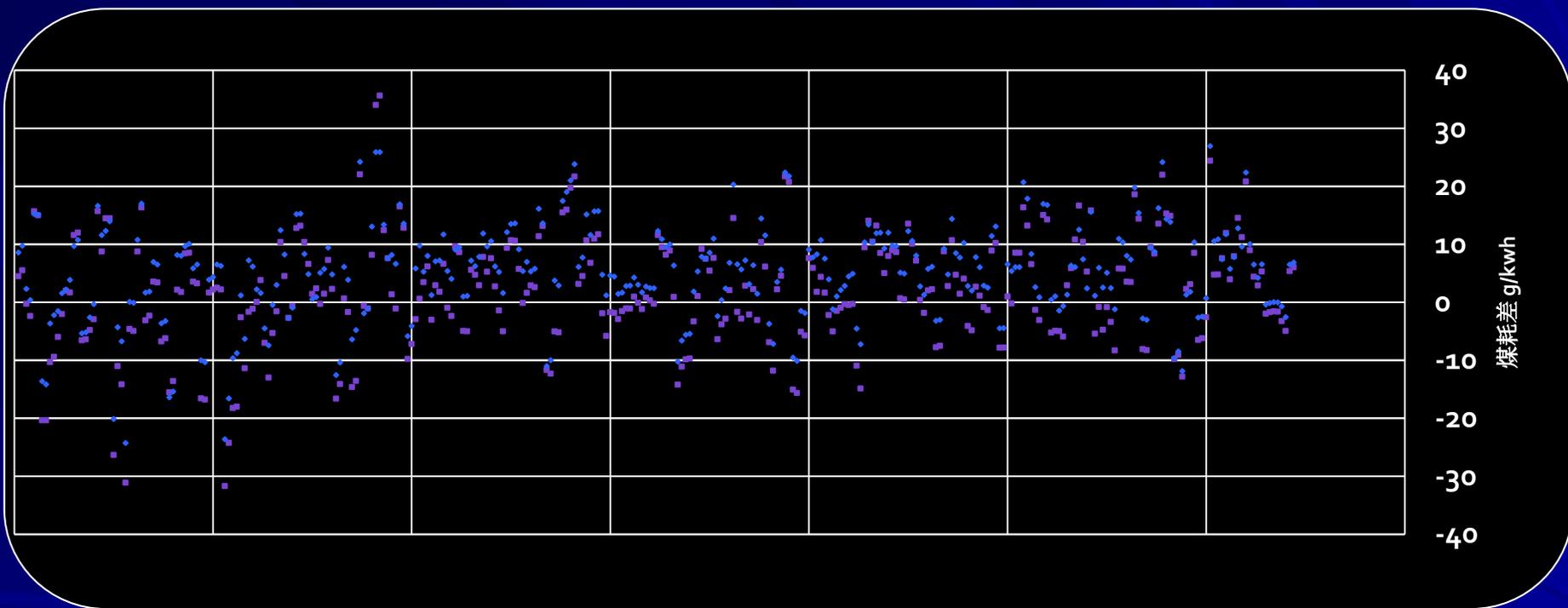
各煤种的标煤二氧化碳排放系数  
(低位发热量)

煤种	含碳量 Car	标煤CO <sub>2</sub> 排放系数 kg/kg
准格尔煤	57.53%	0.763
平朔精煤	66.04%	0.745
平朔混煤	58.91%	0.754
大同优混1号	65.58%	0.768
大同优混2号	55.62%	0.760
神华煤	68.36%	0.787
平二煤	60.68%	0.772
平三煤	61.40%	0.771
伊泰煤	56.26%	0.774
安太堡煤	70.80%	0.758
活鸡兔煤	59.47%	0.786
补连塔煤	66.10%	0.788
上湾煤	65.19%	0.795
石炭煤	54.47%	0.767
保德煤	60.91%	0.748
曙光煤	49.13%	0.763
辛置煤	51.30%	0.761
东滩煤	55.68%	0.766
平顶山煤	50.91%	0.767
平均值	59.70%	<b>0.768</b>



# 5 设计煤耗和运行煤耗偏差

322台500MW~1000MW机组运行煤耗和设计煤耗差值

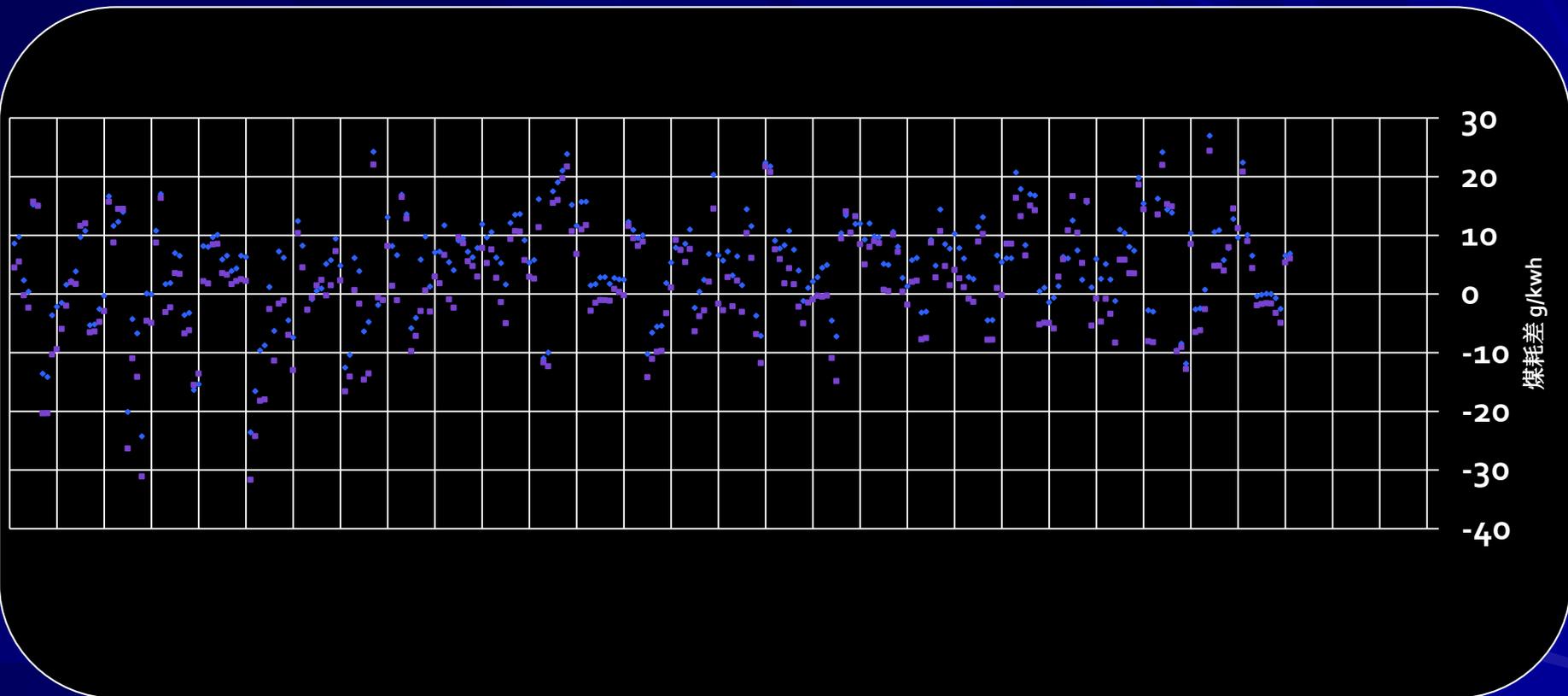


华东电力设计院

CPECC ECEPDI EAST CHINA ELECTRIC POWER DESIGN INSTITUTE

# 5 设计煤耗和运行煤耗偏差

271台600MW等级机组运行煤耗和设计煤耗差值



华东电力设计院

CPECC ECEPDI EAST CHINA ELECTRIC POWER DESIGN INSTITUTE

# 5 设计煤耗和运行煤耗偏差

统计了我国322台500MW~1000MW机组的设计发（供）电煤耗和2012年的平均运行发（供）电煤耗及平均负荷率，这些机组设计亚临界参数到超超临界参数，是我国目前的主力机组。根据统计，这些机组的平均负荷率**73.31%**，平均年运行发电煤耗高于平均设计发电煤耗**4.97kg/MWh**，平均年运行供电煤耗高于平均设计供电煤耗**1.82kg/MWh**。

为计算保守起见，剔除运行煤耗低于设计煤耗的机组后，机组的平均负荷率**72.99%**，平均年运行发电煤耗高于平均设计发电煤耗**10.11kg/MWh**，平均年运行供电煤耗高于平均设计供电煤耗**8.09kg/MWh**。

可以预测，我国新建高效燃煤机组在年平均负荷率70%左右的运行煤耗将高于设计值**5~8kg/MWh**。



## 6 达到美国排放限值的煤耗值

可以推算出达到美国关于新建燃煤机组二氧化碳排放限值的年平均运行发电煤耗约 $230\text{kg/MWh}$ ，设计发电煤耗约 $225\text{kg/MWh}$ (按二氧化碳转换系数 $0.768$ )。这显然是低于目前热效率最高的超超临界机组的煤耗。





# 第3节

## 达到美国碳排放限值的 技术策略



华东电力设计院

CPECC ECEPDI EAST CHINA ELECTRIC POWER DESIGN INSTITUTE



# 7 提高超超临界机组设计效率

- 通过采用**二次再热技术**可以提高系统效率约两个百分点，这已在国电泰州电厂二期工程所实践证明。
- **降低系统的不可逆损失**主要针对锅炉和汽轮机，比如提高燃烧效率减少飞灰含碳量，减少汽轮机轴封蒸汽损失，提高汽轮机级效率，降低管道系统阻力，特别是四大管道和汽轮机抽汽系统管道阻力，以及降低系统中的阀门节流损失，其中主汽轮机和小汽轮机各汽缸进汽门的节流损失值得关注。另外，应关注加热器换热过程中的不可逆火用损失，合理设置冷热端参数。



# 7 提高超超临界机组设计效率

- **利用烟气余热**目前国内以及有很多应用。烟气余热利用的主要方式包括：（1）利用烟气余热加热凝结水——低温省煤器方案；（2）利用烟气余热加热进入锅炉的空气，即二次风和（或）一次风——烟气余热二元利用方案；（3）低温烟气置换出高温烟气热量加热给水和凝结水——烟气余热梯级利用方案；（4）利用烟气余热加热湿法脱硫后的低温烟气；（5）利用烟气余热加热暖通系统。
- 充分降低汽轮机冷端，通过增加排汽面积和冷却水流量，以及利用冷却水余热等技术也可进一步提高机组热经济性。



# 7 提高超超临界机组设计效率

- 国内开发了初参数为35MPa/610°C /630°C /630°C超超临界二次再热燃煤1000MW发电机组，在系统设计上充分运用了上述提效技术，实现了发电煤耗达245.35kg/MWh，发电效率达到50.13%（低位发热量）。
- 采用该技术的发电二氧化碳排放达到了677kg/MWh（按碳转换系数0.768计）或591 kg/MWh（按发改委能源研究所的碳转换系数0.67计）。如按70%负荷平均发电煤耗比设计值高5kg/MWh计，则按两种碳转换系数计算，年平均碳排放强度为691kg/MWh和603kg/MWh



# 7 提高超超临界机组设计效率

- 即使按照保守的碳转换系数，在这项技术的基础上通过提升蒸汽参数采用40MPa/700°C /720°C /720°C的先进超超临界（AUSC）二次再热机组，也能达到美国排放标准。

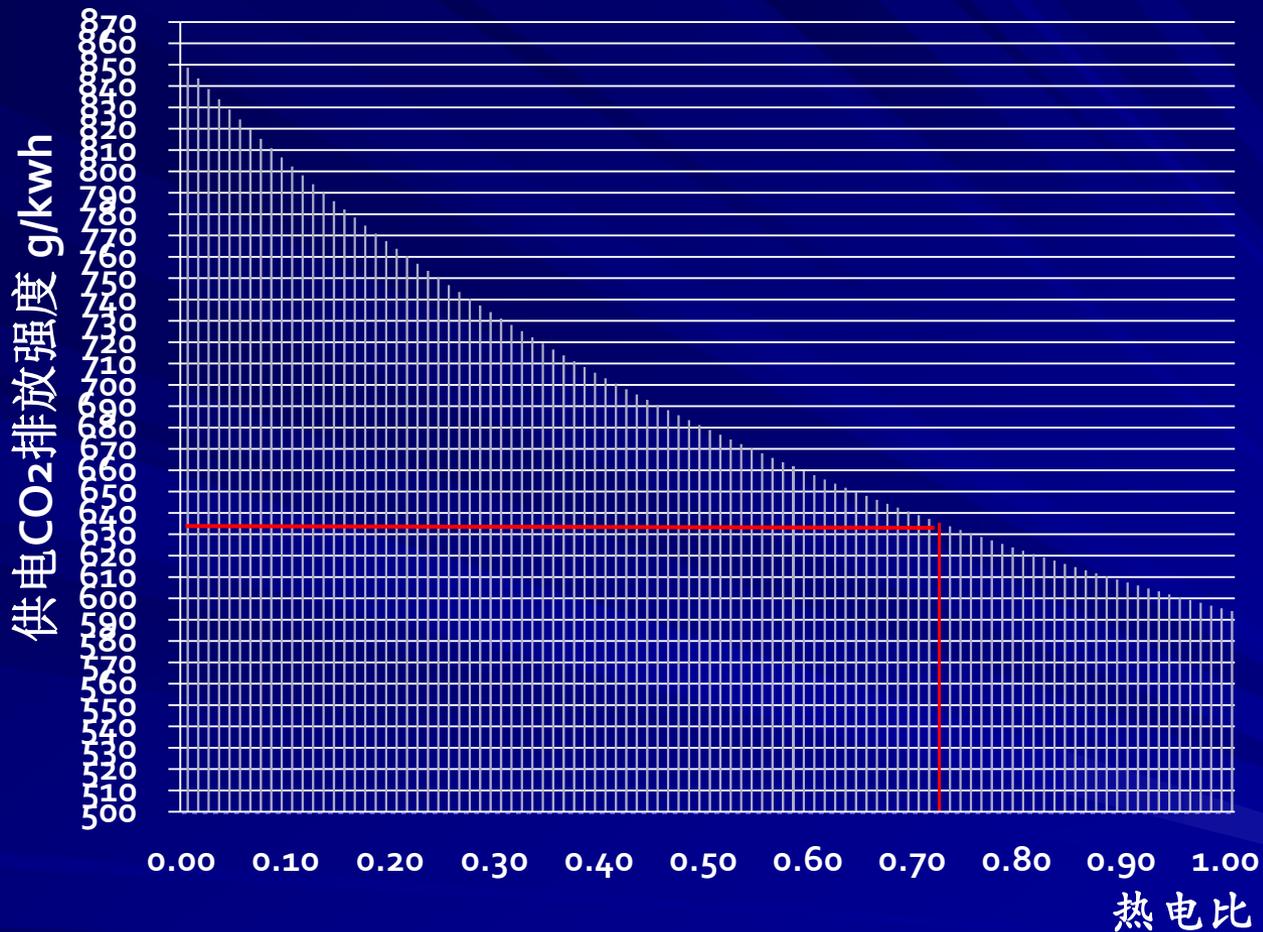


## 8 采用供热技术

- 燃煤集中供热对机组发供电二氧化碳排放强度的削减效果较为显著。
- 下图分别为机组纯凝工况下发电效率为40%、45%、50%三种情况下，热电比从0~100%的发电二氧化碳排放强度。由图可见，随着热电比的提高，碳减排的效果非常显著。若达到635g/wkh的美国排放标准，三种效率的机组分别达到热电比为0.72、0.40和0.15。



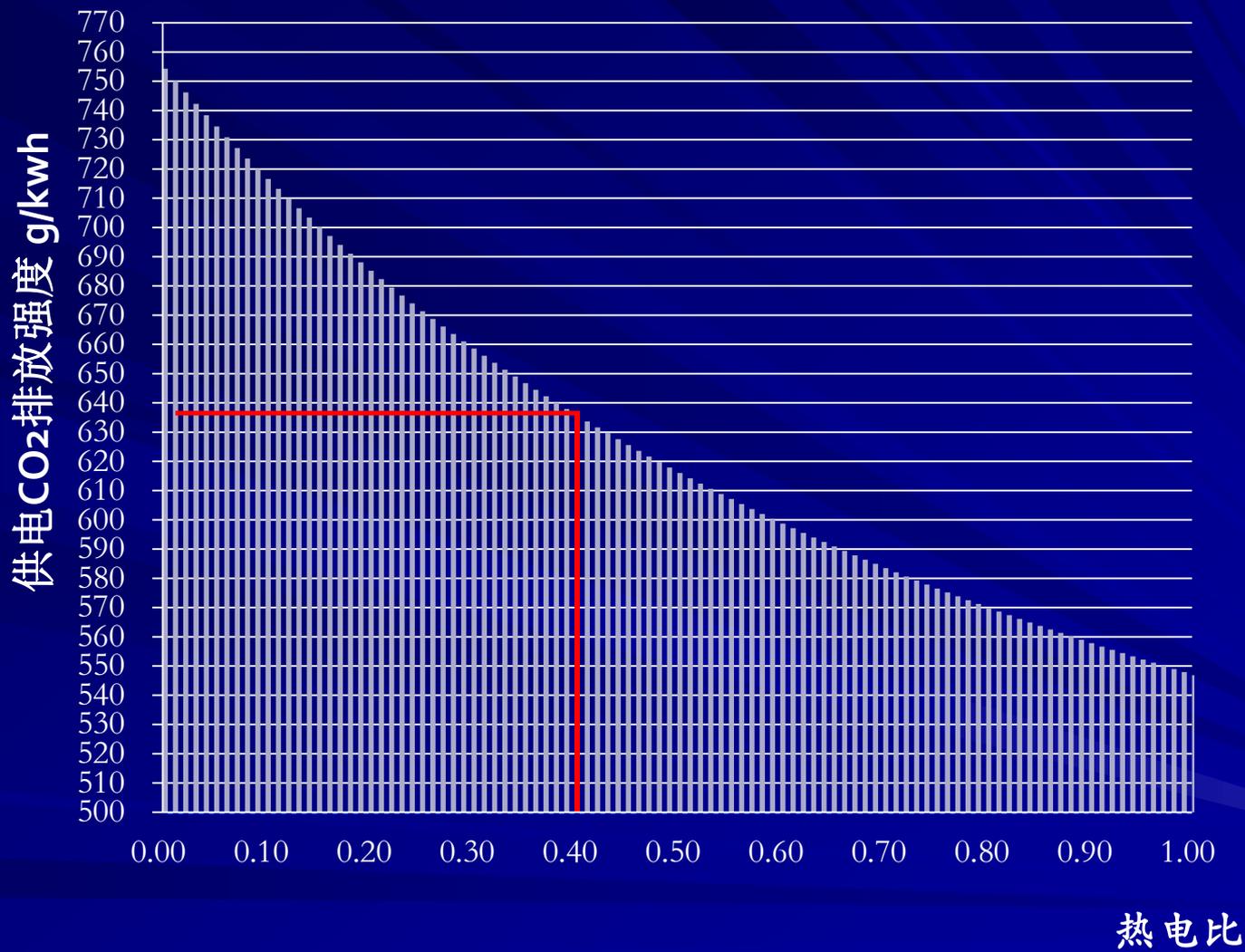
# 8 采用供热技术



华东电力设计院

EPECC ECEPDI EAST CHINA ELECTRIC POWER DESIGN INSTITUTE

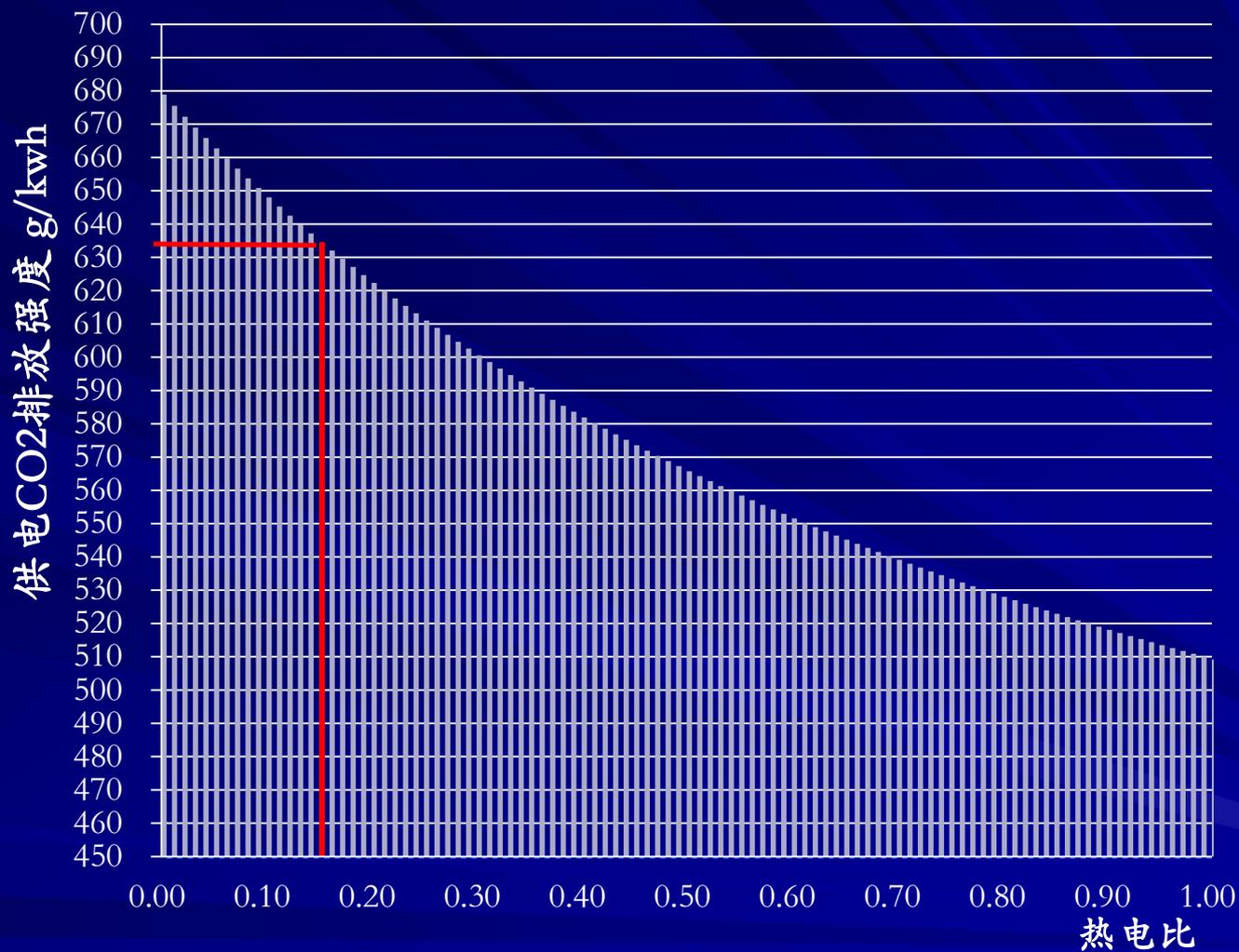
# 8 采用供热技术



华东电力设计院

EPECC ECEPDI EAST CHINA ELECTRIC POWER DESIGN INSTITUTE

# 8 采用供热技术



华东电力设计院

EPECC ECEPDI EAST CHINA ELECTRIC POWER DESIGN INSTITUTE

# 9 生物质混烧

- 生物质燃烧是将其吸收固化的CO<sub>2</sub>重新释放到大气中，因此生物质被广泛认为是一种CO<sub>2</sub>零排放的可再生能源。
- 生物质成型燃料是以秸秆为原料，经工艺加工，最后制成成型颗粒燃料，具有热值高、燃烧充分的特点，是一种洁净低碳的可再生能源，作为锅炉燃料，它的燃烧时间长，强化燃烧炉膛温度高。
- 生物质预混、预磨，混烧有一个可以达到的最大锅炉负荷，这取决于磨的限制和锅炉效率。实验结果表明5~10% (重量百分比)的生物质掺烧比对煤的燃烧影响是可以忽略的。



## 9 生物质混烧

- 欧洲生物质混烧电厂的经验表明，大部分情况下，生物质在混烧条件下可以达到输入热量10%。国内的研究表明当为300MW 燃煤机组时，生物质混烧比例应控制在10%以内；当为600MW 燃煤机组时，生物质混烧比例应控制在5~8%。
- 如果采用将生物质成型颗粒燃料直接送入独立的生物质磨煤机研磨后设置生物质储料仓，进入独立的生物质燃烧器燃烧的混烧技术路线，虽然投资增加，但是能够达到的混烧比例较高。



## 9 生物质混烧

- 假定生物质混烧比例达到15%，则机组设计发电煤耗可以放宽的到265kg/MWh，即目前大多数一次再热超超临界机组都能达到美国CO<sub>2</sub>排放限值。
- 就碳排放而言，采用生物质混烧的投入比采用更高参数的二次再热机组，更新更高效率的主机设备和进行系统改造，乃至部分烟气进行CO<sub>2</sub>捕捉都有很强的竞争力，对于目前我国大量运行的超超临界机组的降碳技术改造具有好得多的性价比。





# 第4节

## 小节



华东电力设计院

CPECC ECEPDI EAST CHINA ELECTRIC POWER DESIGN INSTITUTE



# 10 小节

- 燃煤机组要达到美国CPP规定的年平均发电二氧化碳排放强度635kg/MWh的限值，并不是没有可能而只能走CCS一条道路。
- 当前的技术水平下采用供热或生物质燃料混烧是两个可行且经济的策略，当然无论是供热还是生物质都需要合适的外部条件。



# 10 小节

- 采用二次再热技术，并通过多种手段进一步提高超超临界机组的热效率，在现有技术水平上按发改委能源研究所的碳转换系数技术已经能达到635kg/MWh的限值，而先进超超临界（AUSC）技术即700℃蒸汽参数的机组能实现按更保守计算方法得出的限值。而AUSC技术与IGCC等煤气化技术相比，性价比的竞争力上具有一定的优势。



谢谢!

Thank You



华东电力设计院

CPECC ECEPDI EAST CHINA ELECTRIC POWER DESIGN INSTITUTE

