



京能集团2016年环保改造技术交流会



龙 辉

环保部火电环境保护中心专家委员会委员，中国电力工程顾问集团有限公司副总工程师，教授级高级工程师。国家注册环保工程师、注册机械工程师，工信部大气净化装备委员会副主任委员，国家700℃超超临界燃煤发电技术创新联盟技术委员会委员，中国电机工程学会火力发电专业委员会委员，电力行业联合循环发电标准化技术委员会委员，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。长期从事火力发电厂热机、环保新技术研究工作。近年来在国家级电力期刊上发表有关新技术发展及环保工艺方面的研究论文30篇以上。

国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

国外燃煤电厂污染物减排情况、 技术路线及减排趋势

2016. 3. 17

内 容



国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势



超低排放技术路线选择如何提前考虑汞等重金属、SO₃、PM2.5的脱除技术

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

美国、德国

已有烟气治理技术效率和可用率的不断提高；
多污染物进行高标准排放控制的综合能力。

日本

新型烟气治理工艺技术应用。

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

1、美国

美国燃煤机组烟气处理技术发展随着环保法规的不断严格，其发展经历了3个阶段：

第1阶段——1990年之前；

1990年前，美国的环保排放控制标准比较低，如：
SO₂排放控制标准在1480mg/Nm³，各种烟气处理技术应用
研究和发展阶段。

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

第2阶段：1990年始~2007年底前；

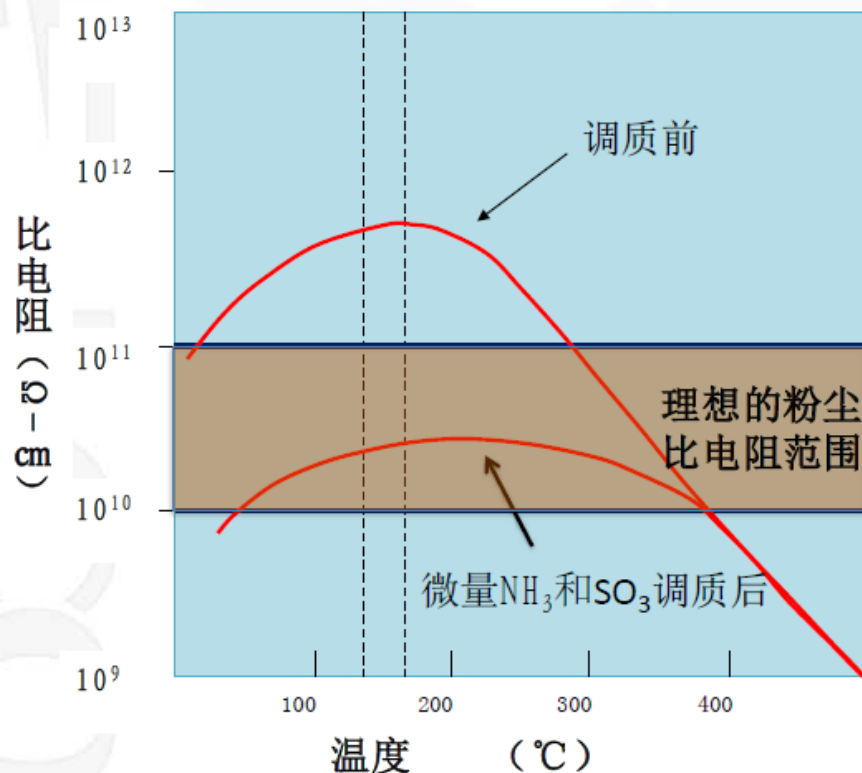
1990年美国环保总署提出了《清洁大气法修正案》，《清洁大气法修正案》的颁布实施，针对燃煤机组粉尘、 NO_x 及 SO_2 排放提出了较严格的控制要求，各种烟气处理技术在燃煤机组得到工程应用及大发展，工程中应用比较主要性的烟气治理工艺如下：

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

(1) 电除尘器调质除尘工艺

烟气调质系统添加一定量的添加剂，保证进入电除尘器之前与烟气实现最佳混合效果。提高烟尘荷电能力，使粉尘的表面物理特性满足电除尘器的要求，以达到提高除尘效率的目的。

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势



左图是双重烟气调质前后粉尘比电阻的对比曲线图。相对于调质前的比电阻，微量的 NH_3 和 SO_3 调质后粉尘的比电阻下降约两个数量级，至电除尘器除尘的理想比电阻范围内。

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

(2) 布袋除尘器除尘工艺

利用高效布袋除尘器直接保证较低出口粉尘浓度保证除尘效率99.9%以上，目前在美国大约有36%的燃煤机组采用了布袋除尘器，其主要在配半干法烟气脱硫工艺及多污染物联合脱除时使用。

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

美国堪萨斯州Council Bluffs 4号790MW机组布袋除尘器



一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

(3) 旋转喷雾干燥法烟气脱硫工艺

在美国350MW到935MW机组均有运行业绩，2006年投运多套790MW超临界机组利用该工艺的烟气脱硫装置，在美国电站脱硫项目中，80%采用石灰石—石膏湿脱硫工艺，其余20%份额中采用半干法烟气脱硫工艺。

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

美国790MW机组旋转喷雾半干法烟气脱硫装置



一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

(4) 湿式石灰石-石膏法烟气脱硫工艺

对燃中、高硫煤机组，采用湿式石灰石-石膏法烟气脱硫工艺。早期的湿法烟气工艺采用吸收塔串塔技术，后随着烟气脱硫技术与脱硫效率的提高，主要采用单塔技术，其主要代表作为托盘塔技术。

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

(5) 活性炭烟气脱汞工艺

在火电厂烟气脱汞技术发展方面,美国走在世界的前列,对煤中重金属进行分析,对其中一部分电厂采用活性炭脱汞工艺。美国已有169个机组完成烟气脱汞工程应用。

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

- 美国堪萨斯州Council Bluffs 4号790MW机组活性炭烟气脱汞工艺投射点



一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

- 活性炭脱汞工艺储罐



一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

第3阶段：2008年始；

开始执行《美国清洁空气法修正案》二期工程，比1990年颁布的《美国清洁空气法修正案》对污染物的控制力度更大，要求更严，即高效烟气治理技术发展阶段。其中对脱硫装置的要求如下：新上燃煤机组当采用石灰石—石膏湿法烟气脱硫工艺时，脱硫效率达到98%~99%，脱硫装置可用率达到99%；

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

当采用烟气循环流化床脱硫工艺或旋转喷雾干燥法烟气脱硫工艺时，脱硫效率达到95%以上，脱硫装置可用率达到99%。

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

在烟气综合治理工艺示范装置设计方面：美国执行PPII计划（火电厂改进计划），美国能源部在国内AES Greenidge4号机组(104MW机组)安装了一套组合技术环保型示范装置。

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

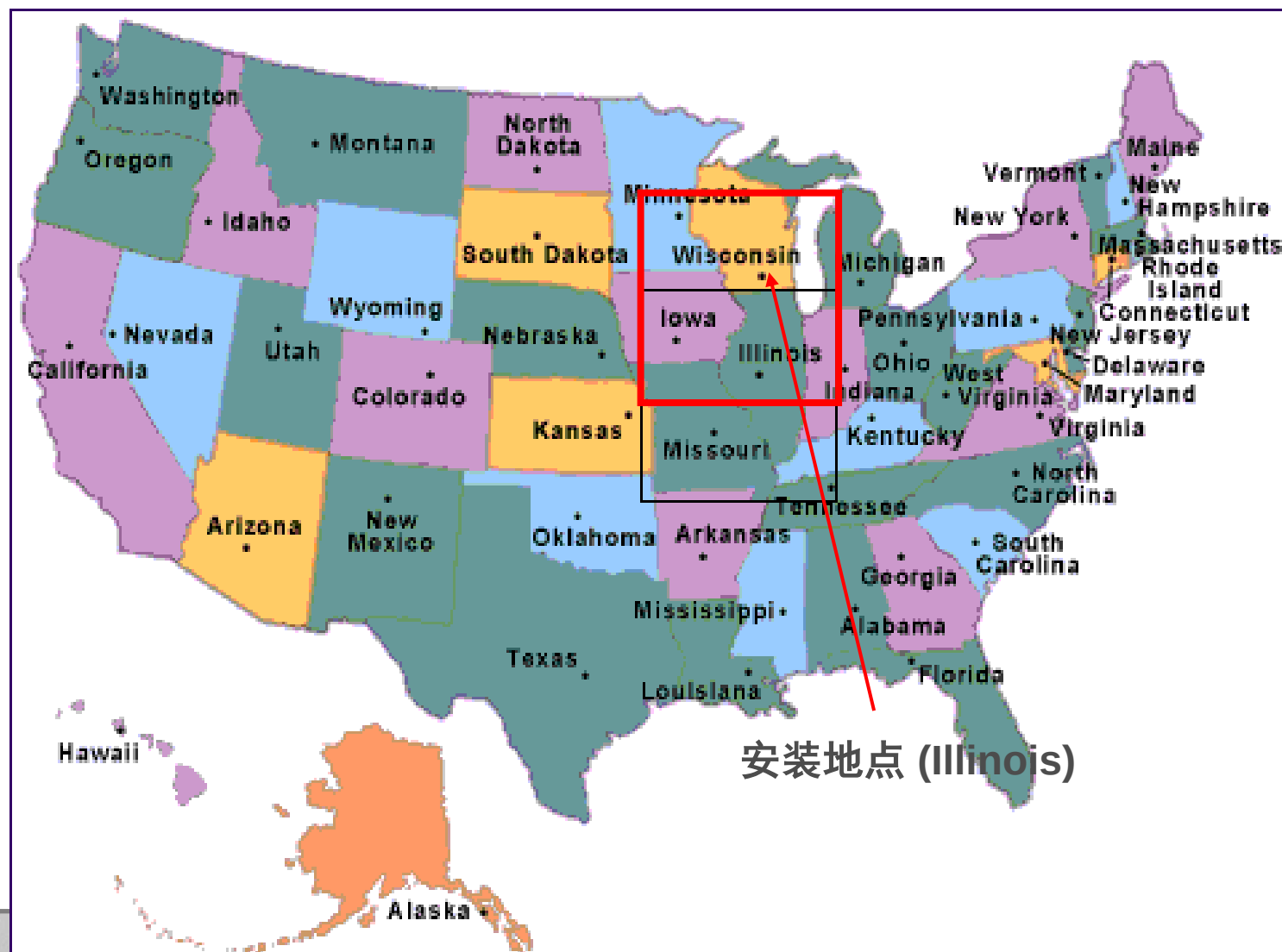
主要工艺路线为：低 NO_x 燃烧器+SNCR+SCR+CFB-FGD（烟气循环流化床脱 SO_2 、 SO_3 工艺）+脱汞（活性炭脱汞工艺）+布袋除尘器示范装置， SO_2 脱除率 $>95\%$ ， SO_3 $>95\%$ ，脱汞率 $>90\%$ ， NO_x 排放为 $150\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。该项目2008年投运。试验成功后，将应用到国内近500个老燃煤机组，机组容量在 50MW~600MW之间，这是美国在烟气综合治理方面一个重要的尝试。

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

美国燃煤机组低低温电除尘器研究工作

2009年我们与日本三菱公司谈判，探讨低低温电除尘器在中国应用可行性，三菱公司提出当时要与美国开展合作，在燃煤机组完成低低温电除尘器项目，其后美国公司也确实开展了一些研究和试验。

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势



一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

U.S. Illinois Power Plant (400MW)



现场测试设备

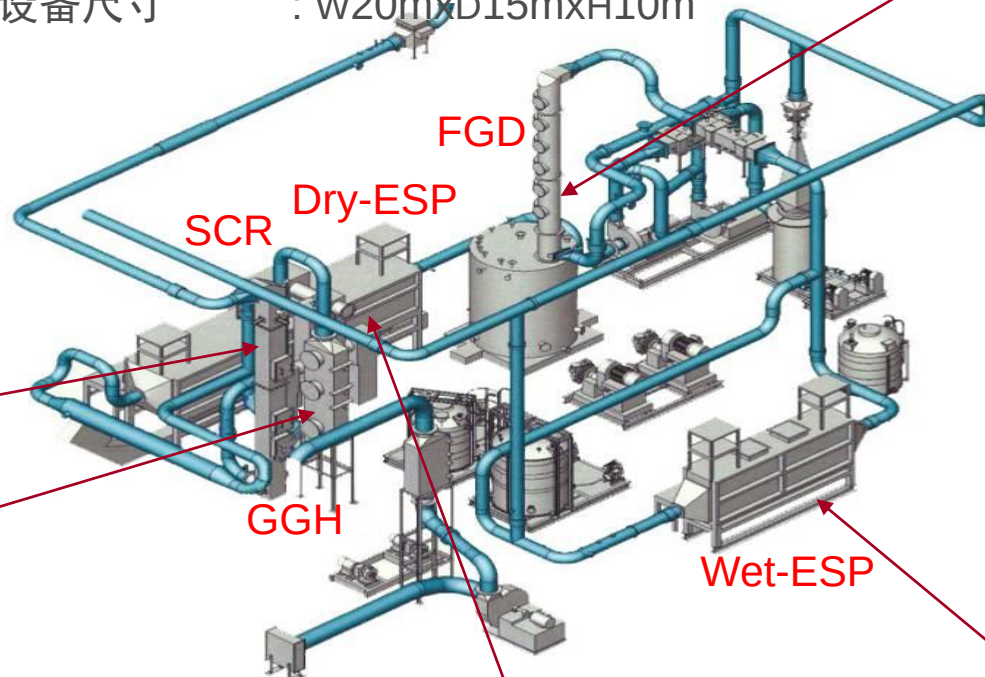
烟气流量 : 2000m³N/h-wet(1MW)
煤 : Gateway(S: 2.93%, SO₂: 2100ppm)
脱SO₂ : 99%
设备尺寸 : W20mxD15mXH10m



SCR



GGH(G/C)



FGD

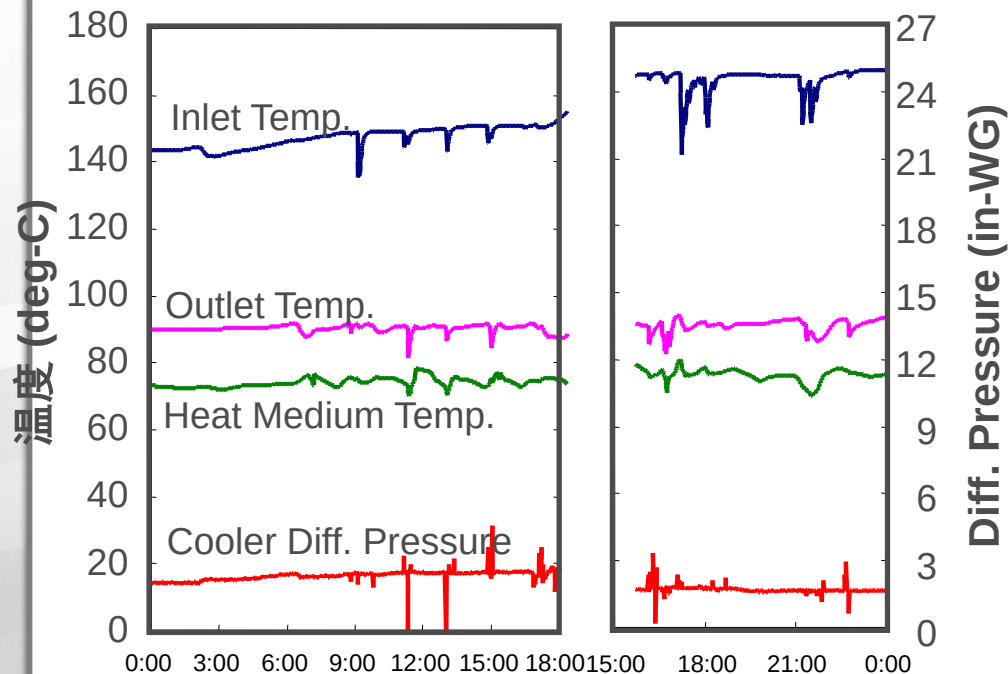


Dry-ESP



Wet-ESP

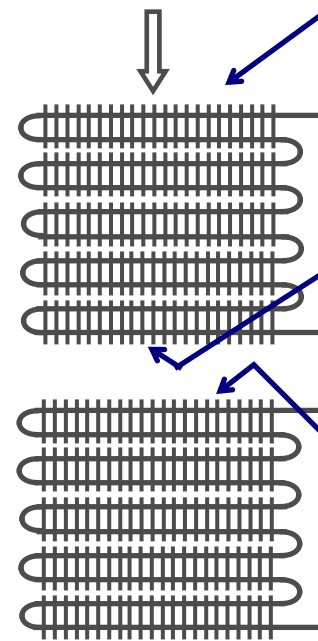
GGH的可靠性试验 (烟气冷却)



初装

运行后

Flue Gas Flow



1st Section (Top)



1st Section (Bottom)



2nd Section (Top)



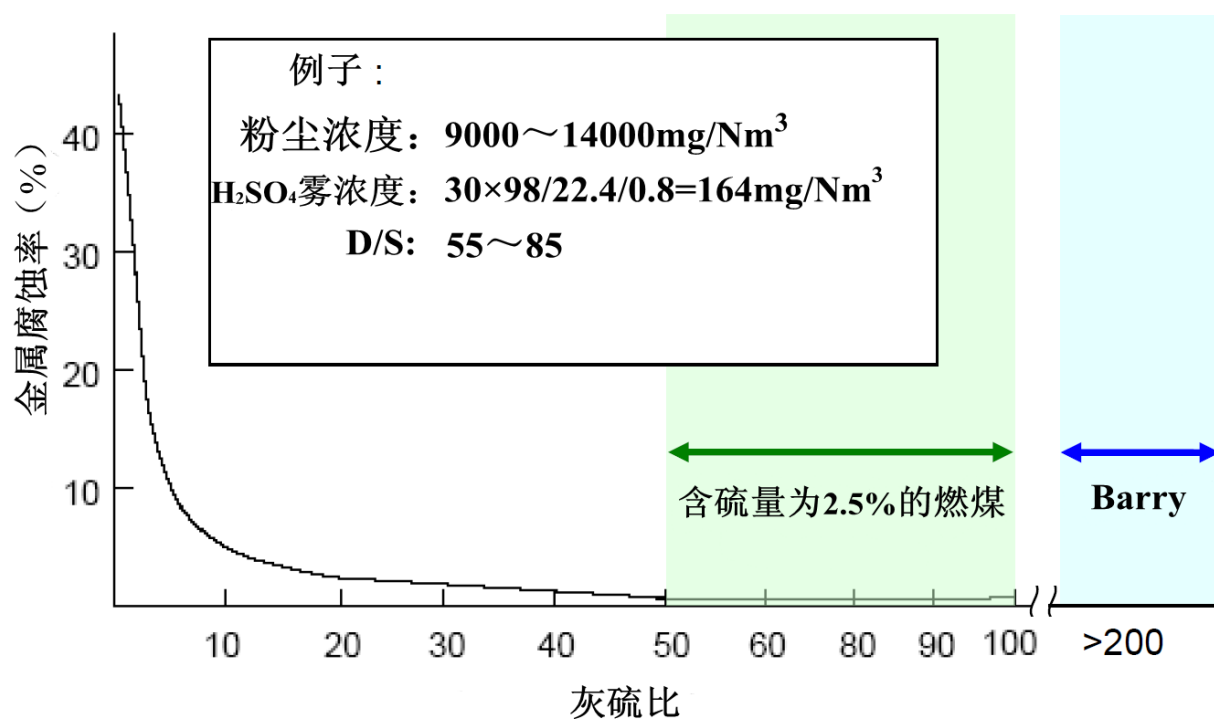
2nd Section (Bottom)

运行后照片

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

美国南方电力公司通过PM浓度/ H_2SO_4 雾浓度来评价腐蚀程度，当低低温电除尘器采用含硫量为2.5%的燃煤时，灰硫比在50~100可避免腐蚀，当采用含硫量更高的燃煤时，为避免腐蚀，灰硫比应大于200。

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势



美国某项目评价腐蚀方法

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

湿式电除尘器在美国燃煤机组发展

美国在2006年废除了PM10要求, 专门对PM2.5提出控制要求。此后在燃煤机组建了8台左右湿式电除尘器。

采取的除尘工艺路线主要是: 布袋除尘器(电除尘器)+湿法烟气脱硫装置+湿式电除尘器

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

火电厂	装机容量 (MW)	设计煤种	烟气处理技术
Elm Road	2 x 670	匹兹堡 #8	FF/WFGD/ WESP
Prairie States	2 x 880	南伊利诺伊烟煤	FF/WFGD/WESP
Trimble County	820	烟煤与次烟煤混合	ESP/FF/WFGD/WESP
CWLP-Dallman	200	烟煤与次烟煤混合	FF/WFGD/WESP
Spurlock 电厂	1号机: 340, 2号机: 550		ESP/WFGD/WESP

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

美国燃煤机组安装湿式电除尘器目的

(1) 满足美国环保排放法规的要求。

美国2011年5月颁布的新的污染物控制标准，对燃煤机组颗粒物排放浓度控制要求折成我们用的单位为 $12.3\text{mg}/\text{m}^3$ ，因此首先应满足该要求。

(2) 满足控制PM2.5、硫酸雾及脱汞要求。

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

- 美国对80个电厂的测试结果表明：

静电除尘系统的汞脱除率可达至36%

布袋除尘系统的汞脱除率高达90%

颗粒物控制设备	平均脱汞率/%		
	烟煤	次烟煤	褐煤
静电除尘器	36 (0—63)	9 (0—18)	1 (0—2)
布袋除尘器	90 (84—93)	72 (53—87)	无测试数据

在布袋除尘器内，烟气与滤料表面形成的滤饼层充分接触，滤饼层如同一个固定床反应器，可以促进汞的异相氧化和吸附；

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

1) 美国Trimble County 电厂2号机组湿式电除尘 器的应用



美国Trimble County 电厂
— 820 MW
水平喷淋板式湿式电除尘
器

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

2) 美国 Spurlock 电厂烟气治理技术路线: 采用低 NO_x 燃烧器+SCR+电除尘器+湿法烟气脱硫+湿式电除尘器工艺

位置: Maysville, KY

容量: 1号机: 340 MW, 2号机: 550 MW

投运时间: 2008/2009

燃煤硫分: 4.2%

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势



一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

3) Elm Road 1、2号机 技术路线：采用 低 NO_x 燃烧器+SCR+布袋除尘器+湿法烟气脱硫+湿式电除尘器工艺

Location Oak Creek, WI

机组容量：2 x 670 MW

投运时间：2009/2010

燃煤硫分：2.6%

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

2、德国

德国目前燃煤机组采用的主要环保工艺

欧盟已经把环境保护大气排放的有害物质控制列入欧盟法律，而在德国有更加严格的环保法律——联邦环境污染防治法（BImSchG），2004年7月20日联邦环境污染防治法第13实施条例（修正）完成并开始执行。第13实施条例对新机组的粉尘、CO、NO_x、SO₂、SO₃的排放控制要求如下。

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

根据德国联邦环境污染防治法，对300MW以上机组有关粉尘、 NO_x 和 SO_2 排放控制浓度要求分别为20mg/Nm³、200mg/Nm³和200mg/Nm³（ SO_2+SO_3 ），这一要求中不仅对粉尘、 SO_2 、 NO_x 排放提出了严格要求，对 SO_3 排放也同时提出了要求。2016年1月1日将执行最新的欧盟环境法规。

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

在FGD可靠性方面：德国标准要求机组每年不带FGD运行在100~120小时内，可以分几次运行，但FGD一次只能停72小时。

针对法规要求，德国目前在目前燃煤机组采用的主要代表工艺如下：

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

(1) 高效电除尘器

大容量燃煤机组主要采用的是高效电除尘器。为保证高效电除尘器+烟气脱硫工艺后烟尘颗粒浓度 $<20\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，采取的主要对策：

增大比集尘面积、对电除尘器电源和控制部分优化、烟气流场改进。

据介绍，实际高效电除尘器本身除尘效率就可达到99.9%以上，除尘器出口浓度可控制在 $20\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以下。

FISIA BABCOCK
ENVIRONMENT GmbH

Coal / Ash Analysis
for ESP
820 MW Klingenberg

08.02.2008

Coal Analysis	Dim.	No. of World Coal																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Lower cal. value	kJ/kg	25,10	25,12	25,20	25,10	24,90	22,61	22,69	22,88	22,61	26,85	27,20	27,16	26,80	20,93	20,93	29,92	29,32
Carbon	%	64,10	63,75	64,70	65,40	64,50	59,30	57,40	59,70	55,70	67,50	70,05	68,50	69,35	55,00	54,20	76,20	73,20
Hydrogen	%	3,90	4,20	4,05	3,40	3,70	3,60	4,33	3,40	4,20	4,30	3,70	4,45	3,20	3,10	3,00	4,20	4,60
Ash	%	12,50	12,00	14,00	13,50	10,00	10,20	15,00	17,00	21,00	12,95	9,99	9,26	14,50	20,93	25,50	6,84	6,87
Hydrogen	%	3,90	4,20	4,05	3,40	3,70	3,60	4,33	3,40	4,20	4,30	3,70	4,45	3,20	3,10	3,00	4,20	4,60
Sulfur	%	0,70	0,30	0,50	0,57	0,76	0,29	1,00	0,29	0,70	0,10	0,53	0,96	0,95	0,91	0,90	0,77	0,20
Nitrogen	%	1,50	1,65	1,40	1,60	1,40	1,22	1,05	1,10	2,16	1,27	1,24	1,38	1,48	1,37	1,00	1,37	1,34
Oxygen	%	7,30	8,10	6,85	7,77	8,14	10,40	10,22	8,51	6,24	6,05	7,07	7,73	3,02	9,69	6,32	5,41	5,75
Others	%	6,10	5,80	4,45	4,36	7,80	11,39	6,67	6,60	5,80	3,53	3,72	3,27	4,30	5,90	6,08	1,01	3,44

Ash Analysis	Dim.	No. of Ash from the a.m. coal																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Silicon, SiO ₂	%	55,00	59,58	71,80	44,40	58,30	53,38	32,41	62,18	56,70	59,39	44,54	64,61	49,00	49,3	50,00	43,62	46,22
Alumina, Al ₂ O ₃	%	24,00	25,44	21,30	32,50	18,20	18,59	17,44	25,00	19,45	29,41	33,58	17,53	23,10	26,00	25,00	20,32	22,69
Iron, Fe ₂ O ₃	%	5,50	6,60	2,10	3,20	11,60	5,32	6,33	4,70	8,17	4,80	4,26	6,38	13,10	3,50	8,00	7,20	18,05
Calcium, CaO	%	4,50	1,76	0,75	10,00	2,80	9,84	11,65	2,20	3,28	0,70	4,96	2,14	6,00	10,50	4,00	10,71	4,19
Magnesium MgO	%	1,50	0,98	0,54	2,00	2,10	2,60	12,35	1,40	1,90	0,68	2,10	2,38	1,40	2,70	3,00	3,72	0,95
Sodium Na ₂ O	%	0,60	0,33	0,26	0,20	1,00	1,00	0,70	0,40	1,42	0,27	0,62	0,52	0,73	0,14	1,00	2,45	0,40
Potassium, K ₂ O	%	1,20	1,67	0,84	0,60	1,80	1,85	0,50	0,80	3,28	1,76	0,48	1,83	1,22	0,49	3,00	1,50	1,65
Titanium, TiO ₂	%	1,10	0,97	1,01	1,90	0,70	0,79	1,08	1,00	0,76	1,64	1,85	0,85	1,13	1,27	1,20	1,05	0,96
Sulfur SO ₃	%	2,00	0,64	0,34	3,50	2,60	4,96	14,97	2,30	3,75	0,32	5,03	2,37	2,75	3,36	3,00	8,54	3,58
Phosphorus P ₂ O ₅	%	0,80	0,76	0,19	1,70	0,30	0,52	0,03	0,02	0,16	1,00	0,63	0,48	1,39	1,60	0,60	0,89	0,48



Druckgröße: 100mm

ESP Klingenberg

erwarteter Reingasstaubgehalt beim Rußblasen

51 g/Nm³ tr. Rohgasstaubgehalt

T = 135 °C

O₂ = 6 %

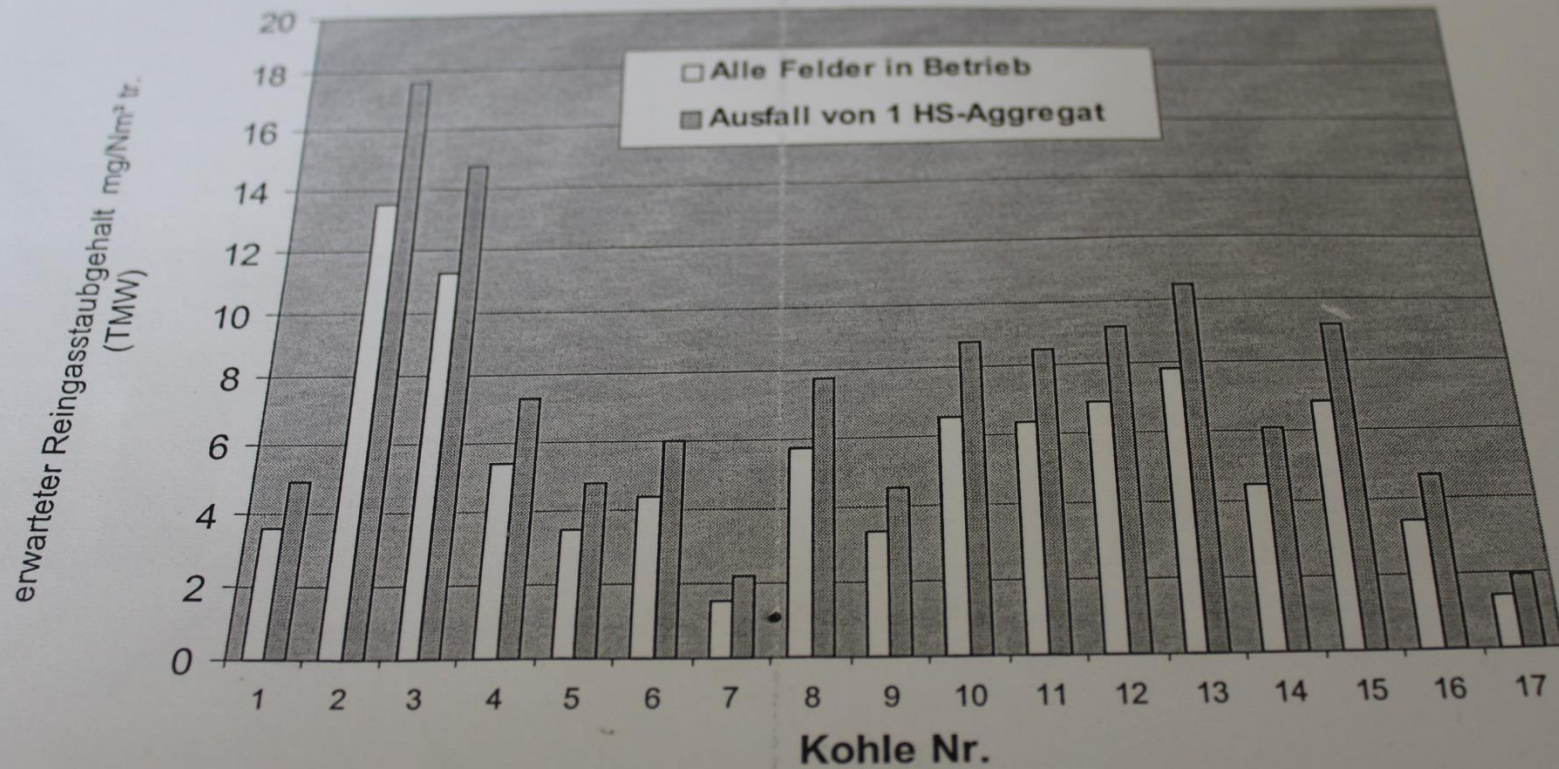
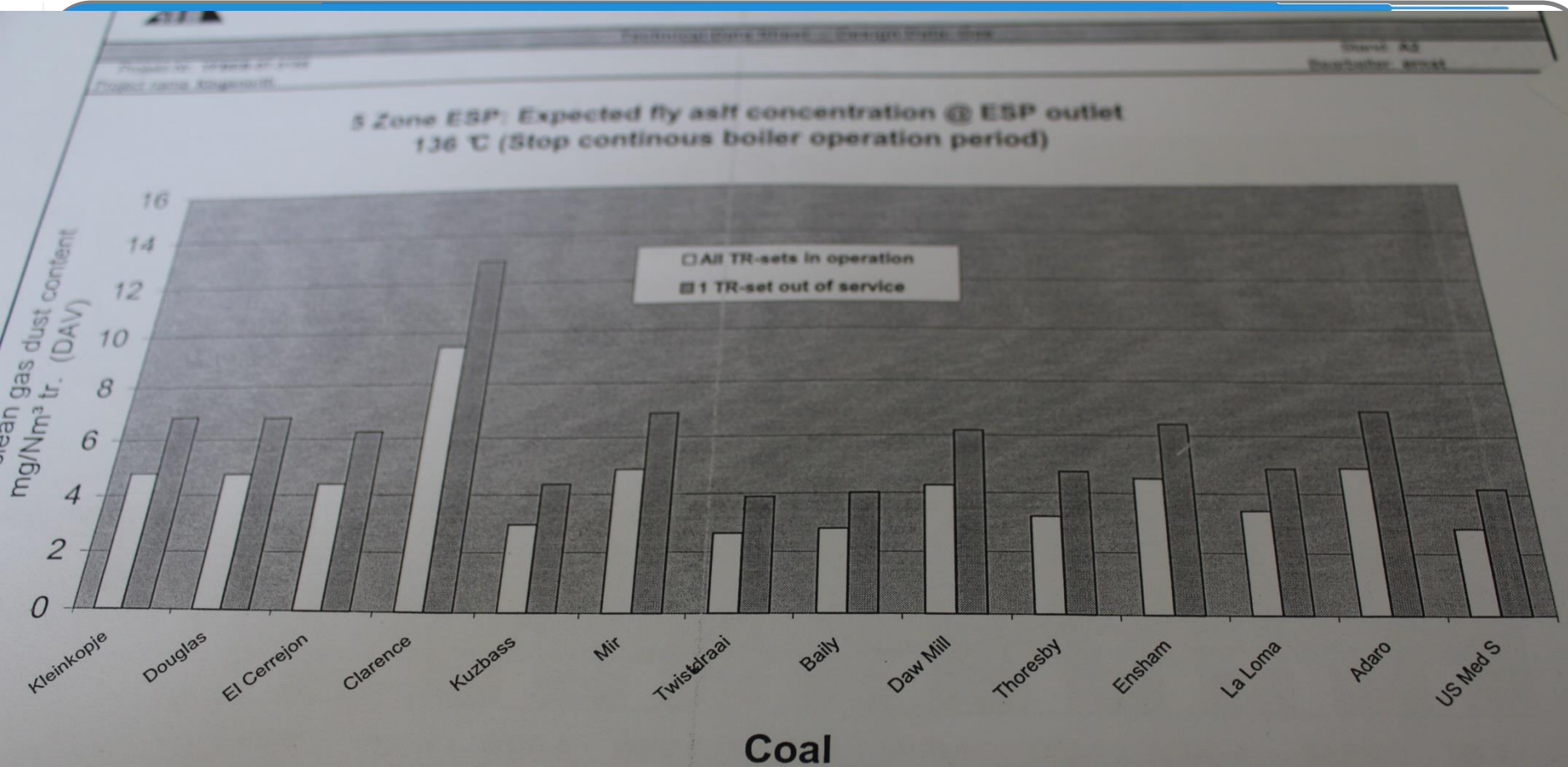
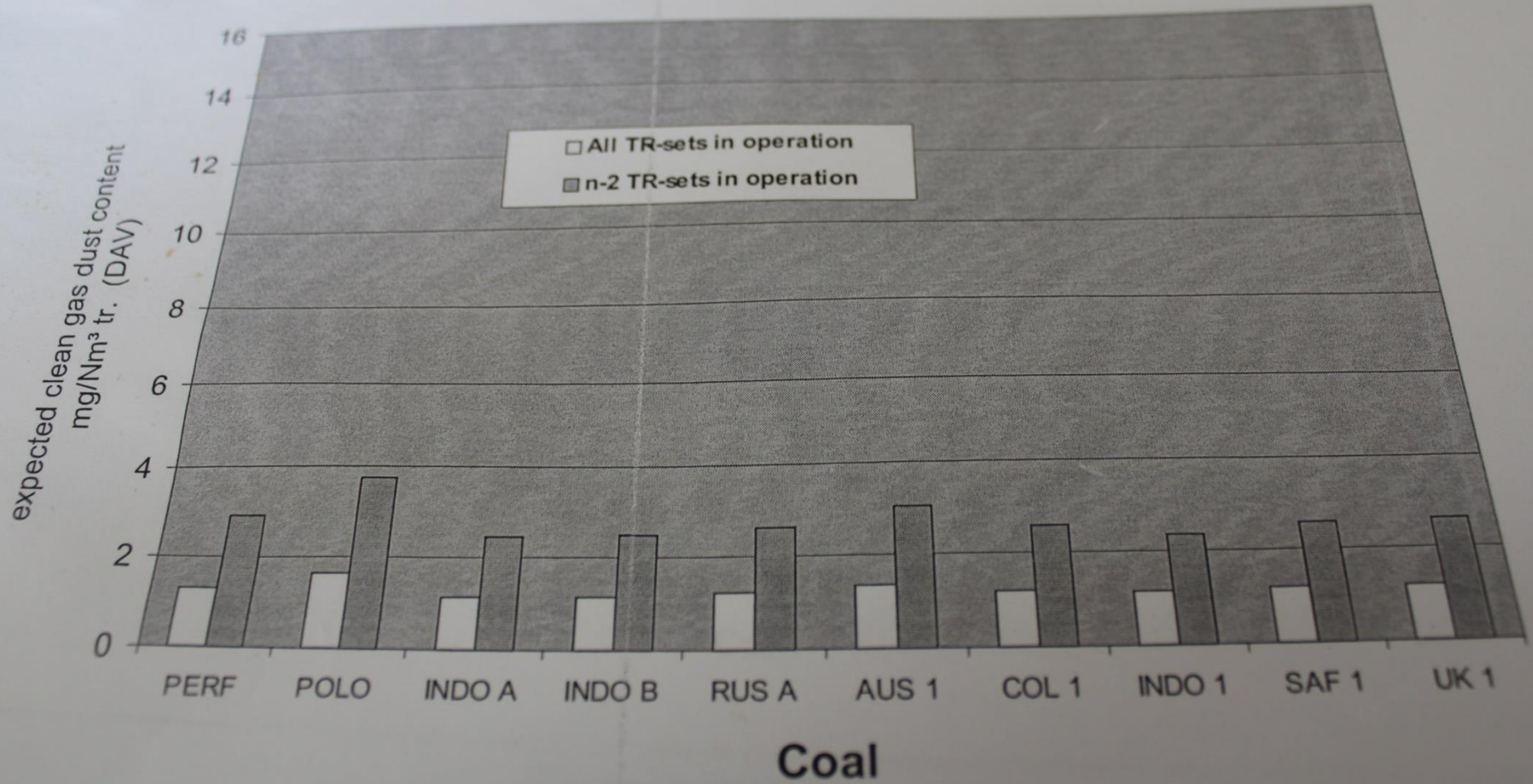


Diagramm 3



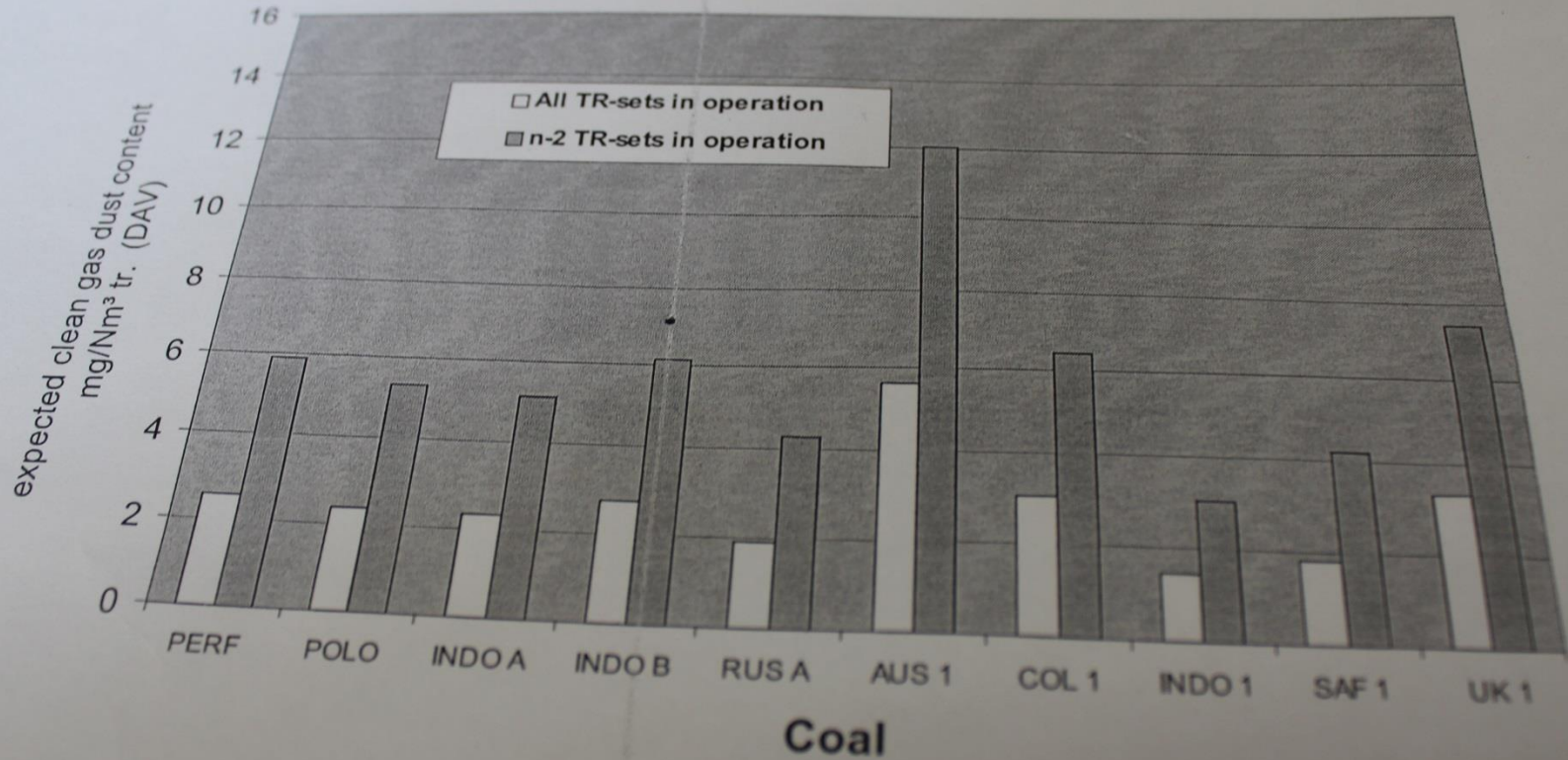
Project: Electroblast/Blasque 800 MW

Expected clean gas dust content daily average value @ B.R. 120 °C



Project: Electrabel/Blaich 800 Mwot

Expected clean gas dust content
daily average value @ E.R. 140 °C



一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势



一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

(2) 布袋除尘器除尘工艺。

(3) 湿法烟气脱硫工艺、烟气循环硫化床脱硫工艺、旋转喷雾干燥法烟气脱硫工艺。

但主要采取的是：高效电除尘器+湿法烟气脱硫工艺路线。

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

德国公司在著名的黑泵电厂(2×800MW机组)、Boxberg电厂(2×800MW机组)和Niederaussem电厂(1×1027MW机组)设计过程中对环保方面的设计十分严格,环保型电厂技术主要向高效环保方面发展,采用低NO_x燃烧器+SCR烟气脱硝+高效电除尘器+湿法烟气脱硫+烟塔合一技术,以黑泵电厂为例,二十世纪90年代建成,后随国内SO₂排放控制法规的变化,02年对脱硫系统进行改造,保证满足法规的要求。

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

3、日本

在2000年前大容量机组主要采用常规静电除尘设备，2000年后随着燃煤机组环保治理措施技术的迅速发展和对环保的高度重视，在2002年就把脱硫、脱硝、除尘的三个规范合并成一个规范，“这样便于非常系统地开展多污染物的协同减排”。这就是《排烟处理设备指南》（JEAG 3603-2002），2012年进行了第2次修订，变成JEAG 3603-2012。

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

《排烟处理设备指南》（JEAG 3603-2007）解读：

1、明确了适用范围

适合发电用锅炉以及发电用燃气轮机的排烟处理系统。在排烟处理系统带有脱硝，脱硫，除尘设备时适用。对我们同时还需要考虑未来的脱汞。

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

2、脱硝、除尘器、脱硫装置作为排烟处理系统的组成部分要考虑优化组合及选定的方法。

3、选定系统构成的思路

在确定排烟处理系统的构成时，要考虑锅炉设备等的烟气特性及设计条件等，以构成系统内各装置相互的协调及高可靠性。

按我们的提法：炉后大系统协同控制

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

4、锅炉设备等烟气特性和必要的环保装置；

在锅炉设备等烟气特性方面，根据使用燃料的不同，必须设置环境对策装置以及要对应环境规制值。

按我们的提法：一炉一策

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

5、系统构成的选定和注意事项

就系统的构成而言，希望在取得各系统协调的同时，能充分发挥每一个系统的特点，构成一个可靠性高的系统。

此外，在进行系统设计时，希望确保作为整个排烟处理设备的性能。

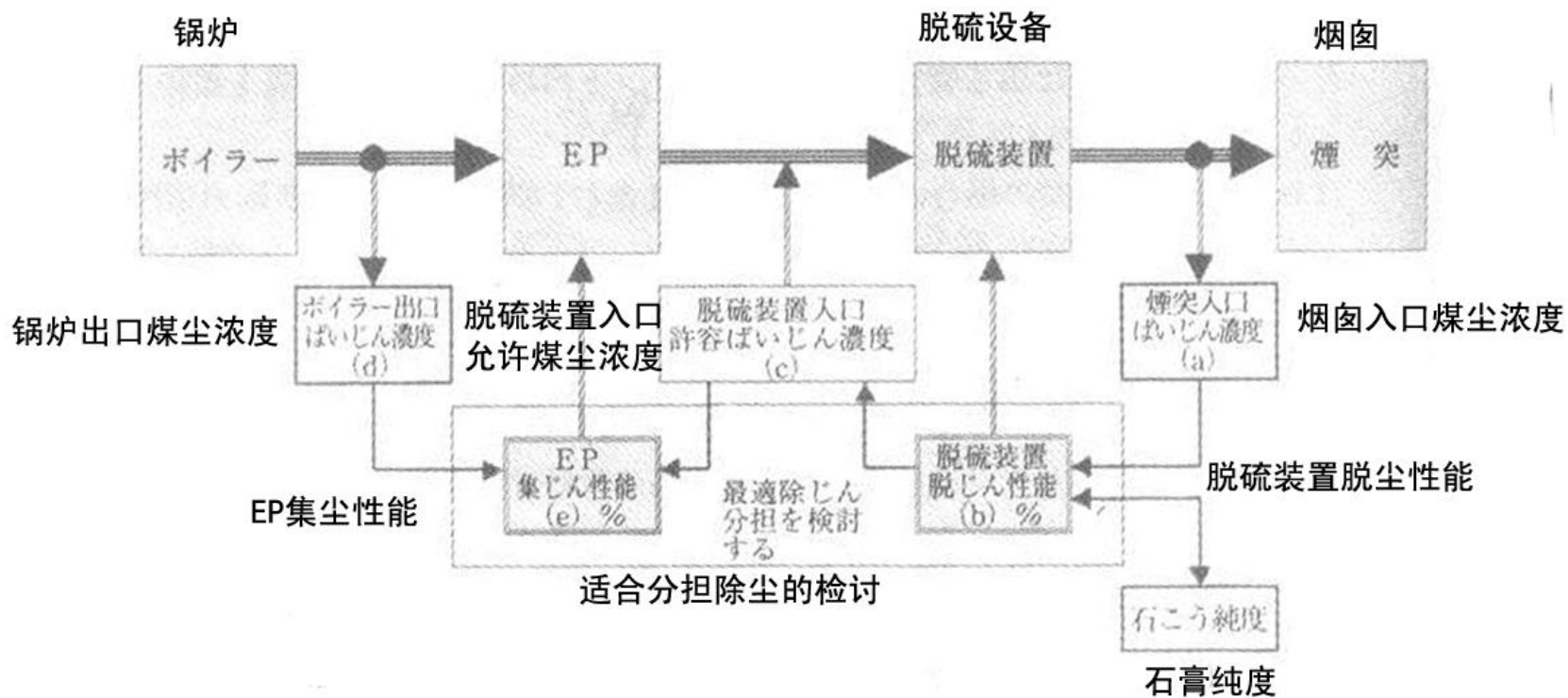
- (1) 在配置排烟处理各系统时，是否把烟气温度考虑进去了
- (2) 是否有防止 SO_3 的腐蚀及防止堵塞的对策
- (3) 各系统除尘的分工问题

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

6、技术路线选定的思路

过去烟尘浓度控制要严格按照低低温EP方式+湿式EP方式进行，由于系统的简化，系统的构成大多采用低低温EP方式。

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势



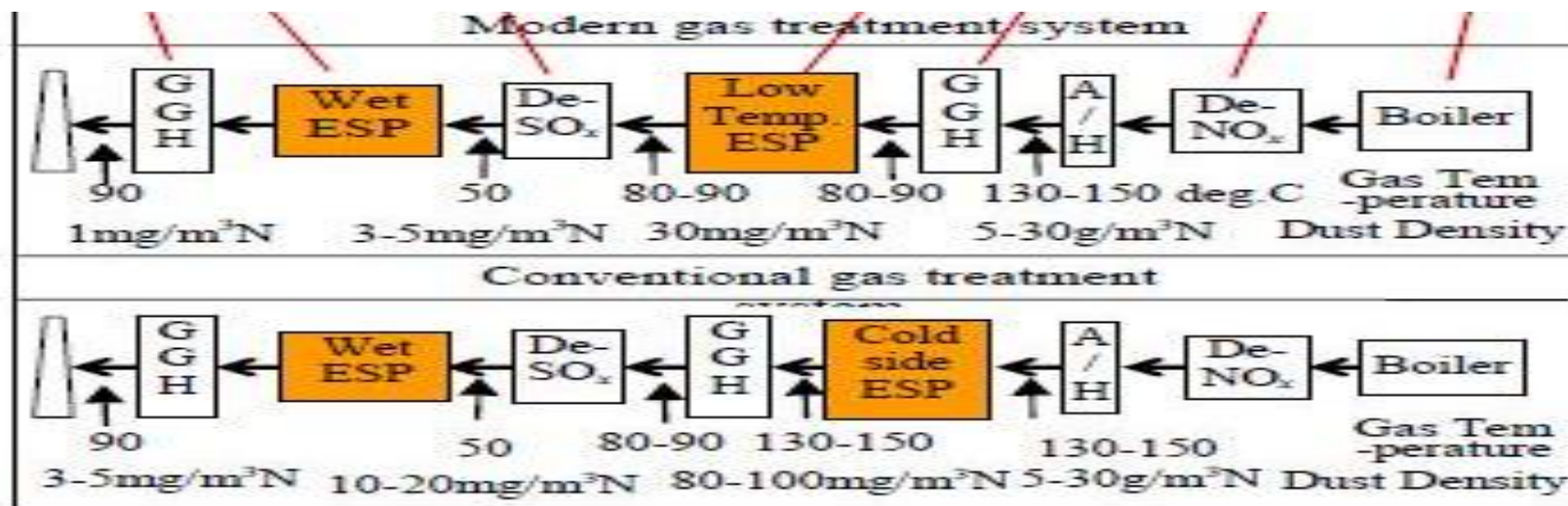
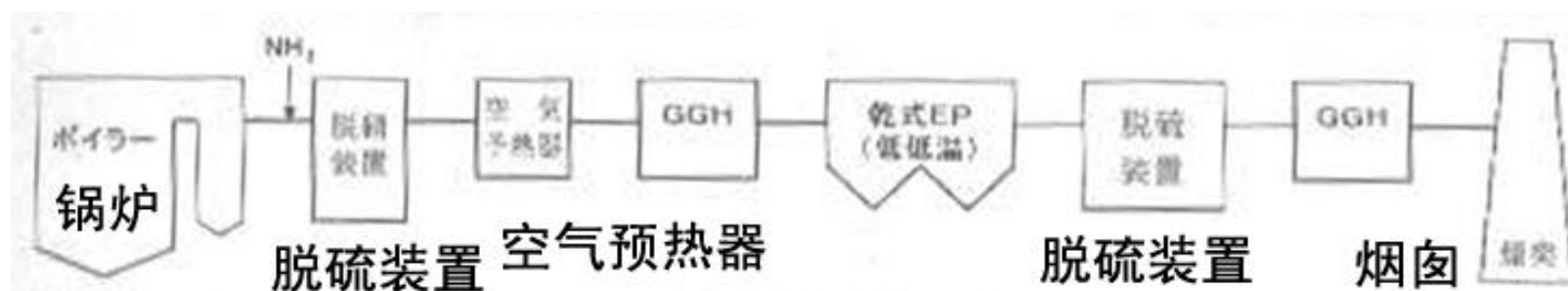
一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

就系统的除尘而言虽然是由电除尘器和脱硫装置分担，但电除尘器掌握有主导权。

- (1) 脱硫装置的除尘性能。
- (2) 要求脱硫装置入口允许排尘浓度 (=电除尘器出口粉尘浓度) (必须考虑石膏的纯度)。
- (3) 锅炉出口粉尘浓度和脱硫装置入口允许浓度要求根据电除尘器除尘性能。

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

在日本目前运行的除尘方式：



一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

(1) 低低温电除尘器技术路线

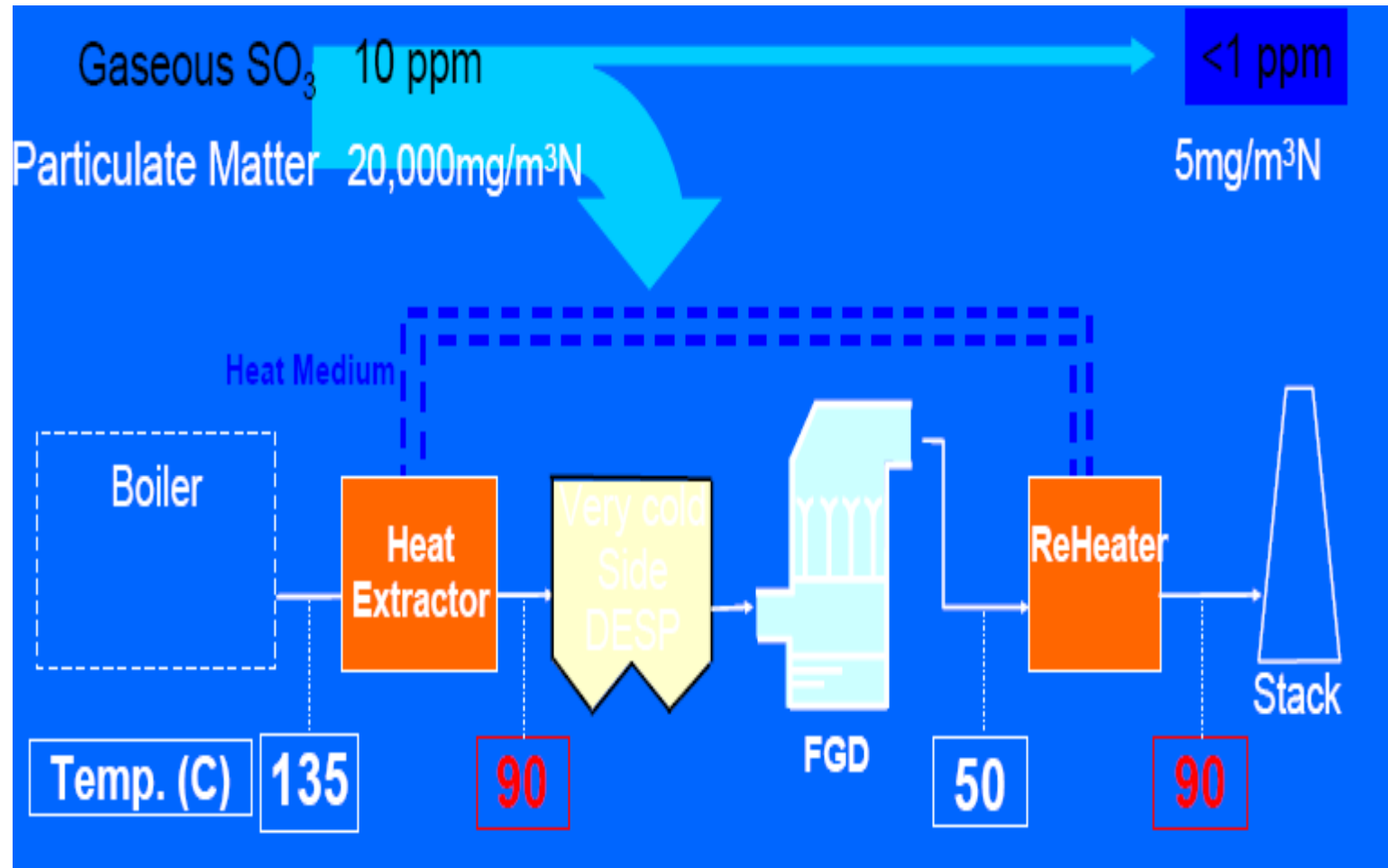
(2) 低低温电除尘器 (+移动极板) +湿式电除尘器技术路线

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

低低温电除尘器

为适应日本环保排放控制标准的不断提高并解决SO₃引起的酸腐蚀问题，日本三菱公司上世纪90年代开始研究将MGGH移至空气预热器后、除尘器前布置的新型低低温高效烟气处理技术。

低低温电除尘器工艺流程图



低低温高效烟气处理技术工艺特点

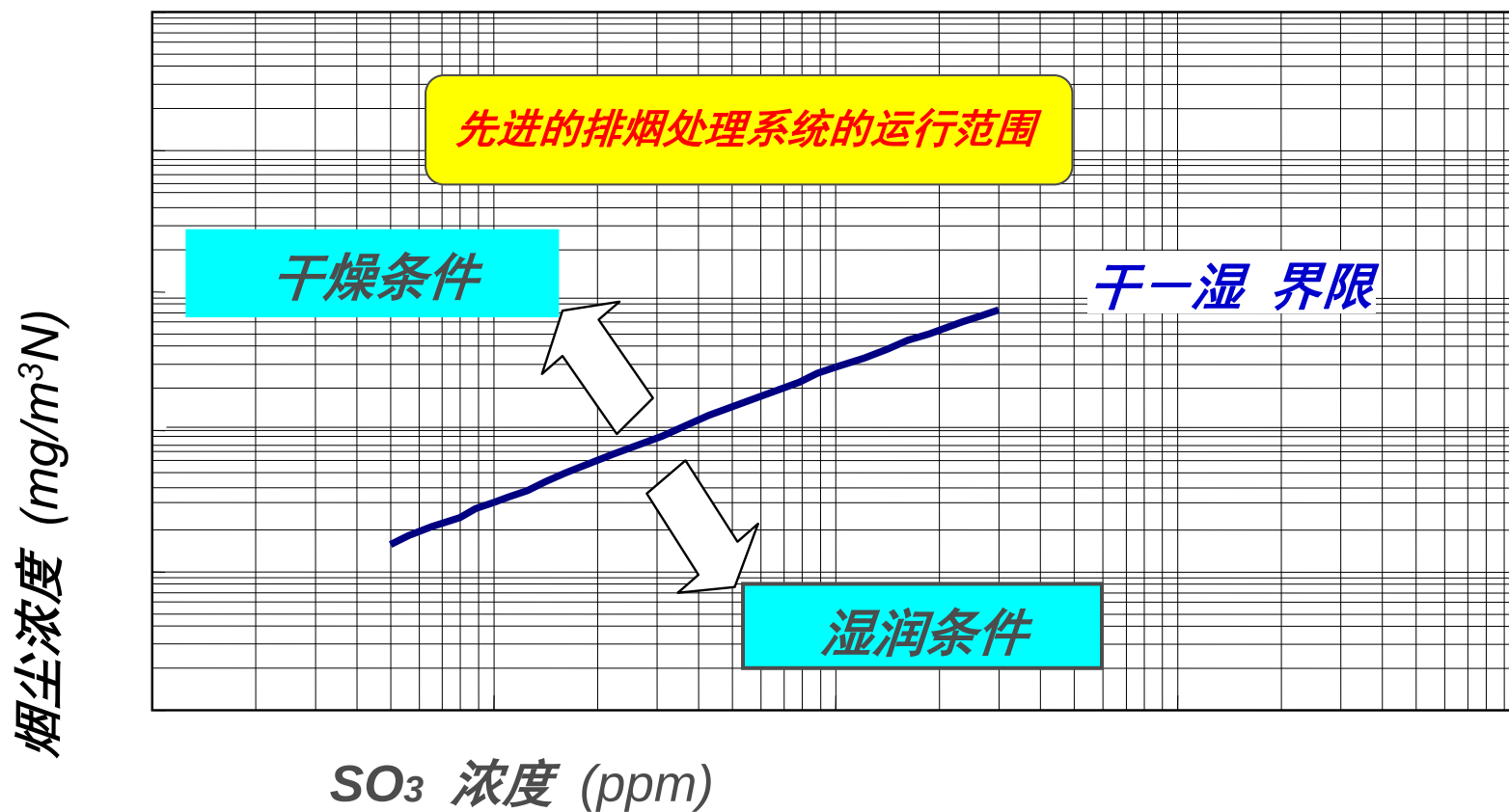
节能效果明显。

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℃，可回收热量 1.64×10^8 kJ/h，减少湿式脱硫系统水耗，同时，烟气温度降低后，实际烟气流大大减少，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1.2%减小到1.0%。

低低温高效烟气处理技术工艺特点

可去除绝大部分SO₃。

在该系统的除尘装置中，烟温已降到露点以下，而烟气含尘质量浓度很高，一般为15000~25000mg/m³左右，平均粒度仅有20~30 μm，因而总表面积很大，为硫酸雾的凝结附着提供了良好的条件。



D/S : Dust (烟尘浓度) / SO_3

低低温高效烟气处理技术工艺特点

通常情况下，灰硫比（D/S）大于100，烟气中的 SO_3 去除率可达到95%以上， SO_3 质量浓度将低于 $3.72\text{mg}/\text{m}^3$ 。另外，FGD入口烟气含尘量的降低还有利于石膏质量的提高。对煤种适应性强，能提高高效烟气处理技术的除尘性能；改善湿烟囱工作环境。

解决了湿法脱硫工艺中 SO_3 腐蚀的难题，有良好的经济效益。

低低温高效烟气处理技术工艺特点

除尘效率高。

比电阻下降。低低温电除尘器将烟气温度降低到酸露点以下，由于烟气温度的降低，特别是由于SO₃的冷凝，可大幅度降低粉尘的比电阻，消除反电晕现象，从而提高除尘效率。这种模式下可以省略湿式ESP。通过湿法脱硫装置保证出口烟尘浓度小于10mg/Nm³排放。

低低温高效烟气处理技术工艺特点

击穿电压上升。

排烟温度降低，使电场击穿电压上升，除尘效率提高。排烟温度每降低 10°C ，电场击穿电压上升约3%。

可以实现最优化的系统布置。

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

工程应用情况

三菱公司在1997年开始研究将低低温高效烟气处理技术应用，并已成功应用于9台机组。

日本石川岛公司工程应用有4台机组。

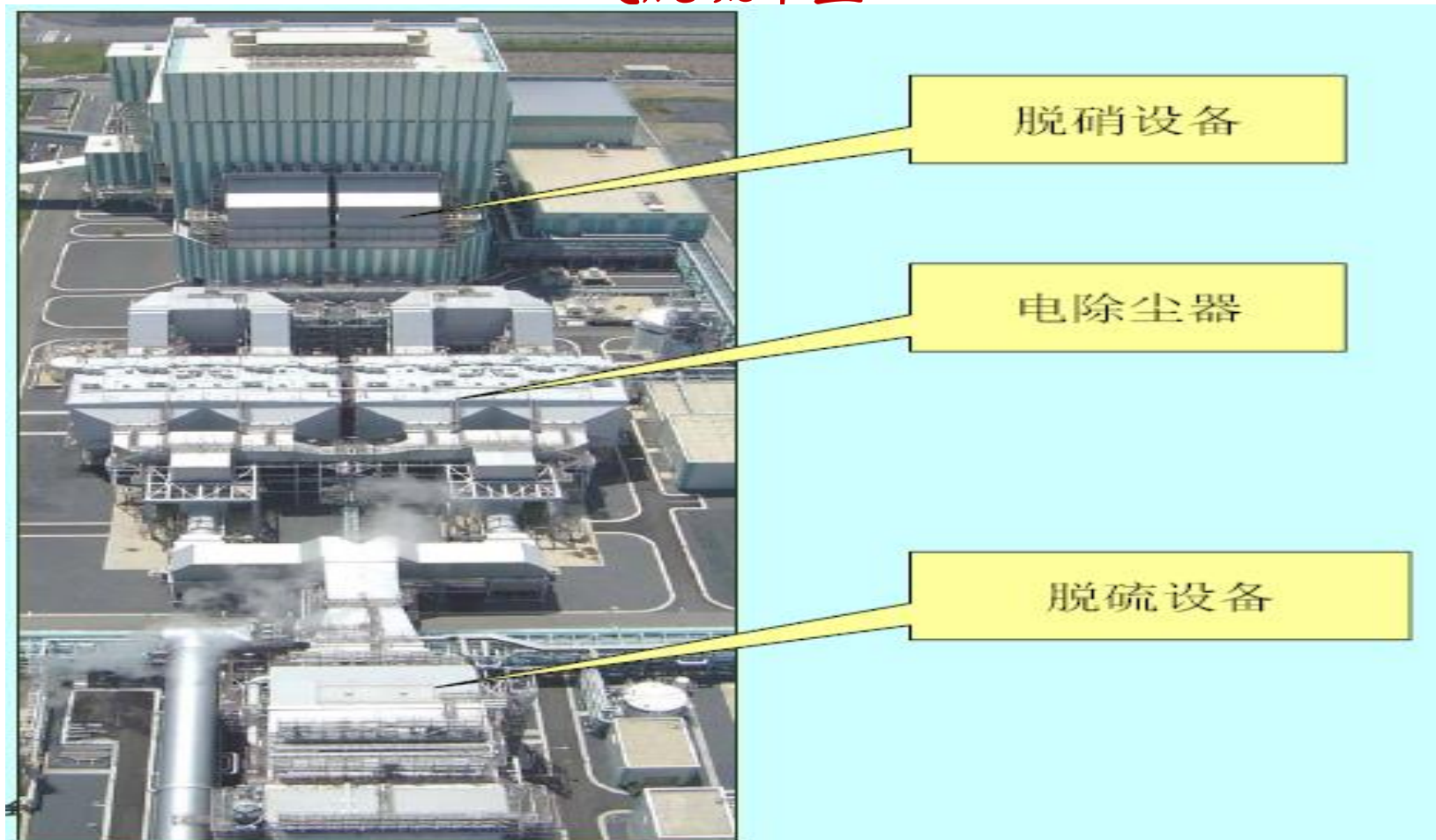
日本日立公司在碧南2台1000MW燃煤机组有工程应用业绩。

目前投运业绩超过20个电厂，机组容量累计超15000MW

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

Hitachinaka 电厂 1000MW 机组

日本燃煤机组典型的 SCR+GGH+低低温电除尘器+湿法烟气脱硫布置



一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

橘湾电厂保证值和考核试验结果
(1×1050MW机组)

项目	设计值	测试结果
FGD入口烟气流量(湿态/干态) / ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	2851000/2642900	2882000/2660100
烟气温度/ $^{\circ}\text{C}$	90	96
SO_x 质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2445	1070
H_2O 的体积分数/%	7.3	7.7
粉尘质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	24.0	3.7
FGD出口烟气流量	2964000/2650100	3043000/2667300
烟气温度/ $^{\circ}\text{C}$	>90	106
SO_x 质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	<129.0	34.3
H_2O 的体积分数/%	10.6	12.3
粉尘质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{m}_3$)	<5	1

日本典型电厂低低温电除尘器应用情况

电厂名称	东京电力公司广野 电厂5#机组	常陆那珂电厂1# 机组	橘湾火力发电站 2#机组	碧南电厂4#、 5#机组
制造厂家	三菱重工	石川岛播磨	日本电源开发	日本日立
机组大小	600MW	1000MW	1050MW	1000MW
烟气温度	~90℃	92℃	设计：90℃ 实测：96℃	设计： 80℃~90℃
低低温ESP出口 烟尘浓度	设计值：30mg/m ³ 实测16.4mg/m ³	实测：30mg/m ³ (入口：15g/m ³)	设计值：24mg/m ³ 实测：3.7mg/m ³	实测： <30mg/m ³
WFGD出口烟尘 浓度	设计值：5mg/m ³ 实测值：3.4mg/m ³	实测值： <8.0mg/m ³	实测值： 1.0mg/m ³	实测： 3.0~5.0mg/m ³
WFGD除尘效率	实测值：79.27%	实测值：73.33%	实测值：72.97%	实测： 83.33%~90%
投运时间	2004年7月	2003年	2000年12月	2001年、2002年
备注	配备离线振打	采用混煤	/	采用移动电极， 脱硫后配备WESP

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

——移动极板电除尘器

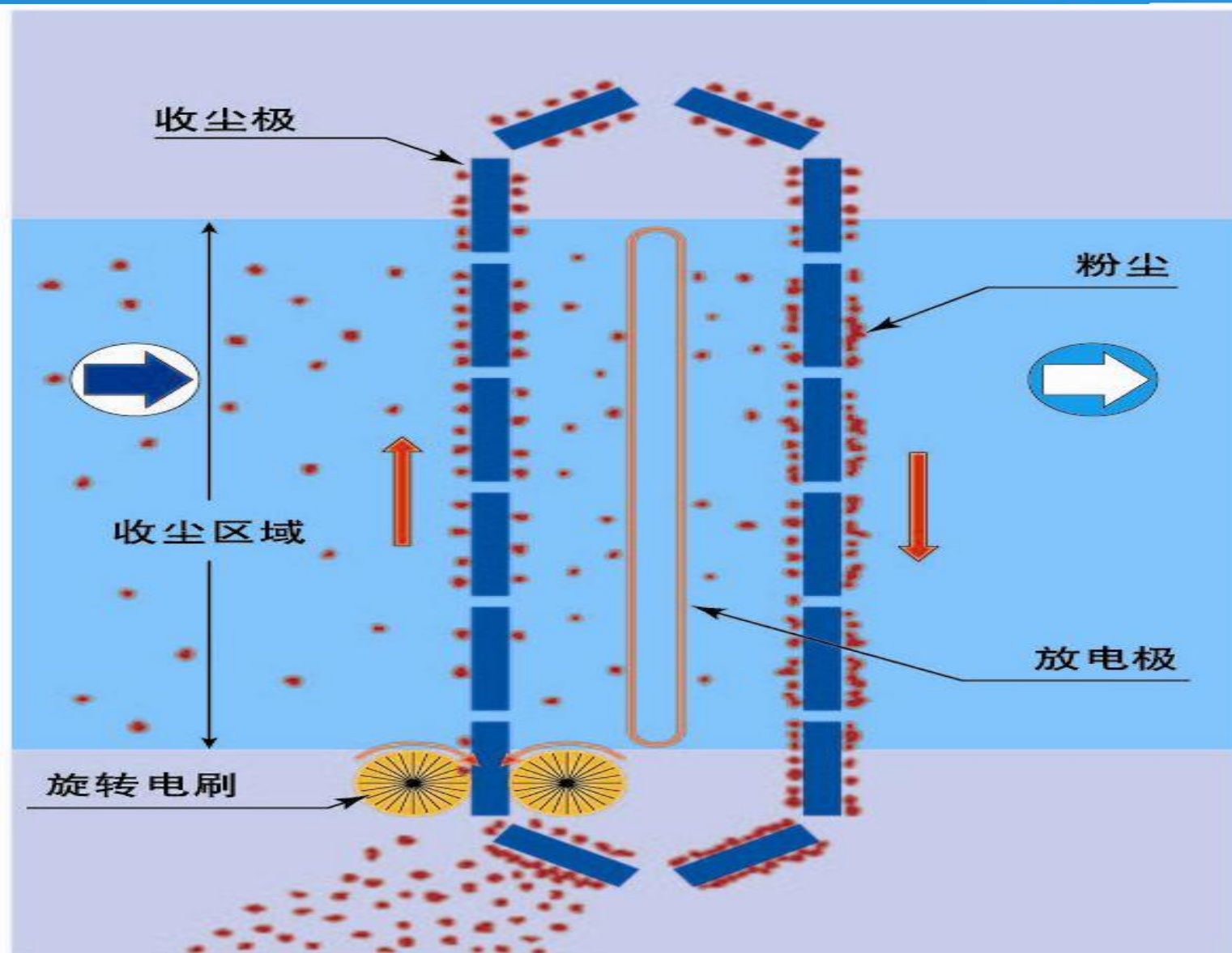
移动极板系统，能够利用旋转刷和移动的收尘极板去除捕集的粉尘，从而防止电晕，移动极板系统能有效地收集高电阻率的粉尘。该系统较之传统的固定电极系统更为紧凑，用电量也更小。

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

收尘极板通过顶部驱动轮的旋转，以极慢的速度进行上下移动，带电粉尘在集尘区域内被收集。

附着在极板上的粉尘在非集尘区域内，被夹住收尘极板的两把旋转电刷刮落。旋转电刷按照与收尘极板移动方向相反的方向旋转，防止粉尘的飞散，同时将粉尘刮落到料斗中。

一、国外燃煤机组烟气治理技术发展及工艺路线选择

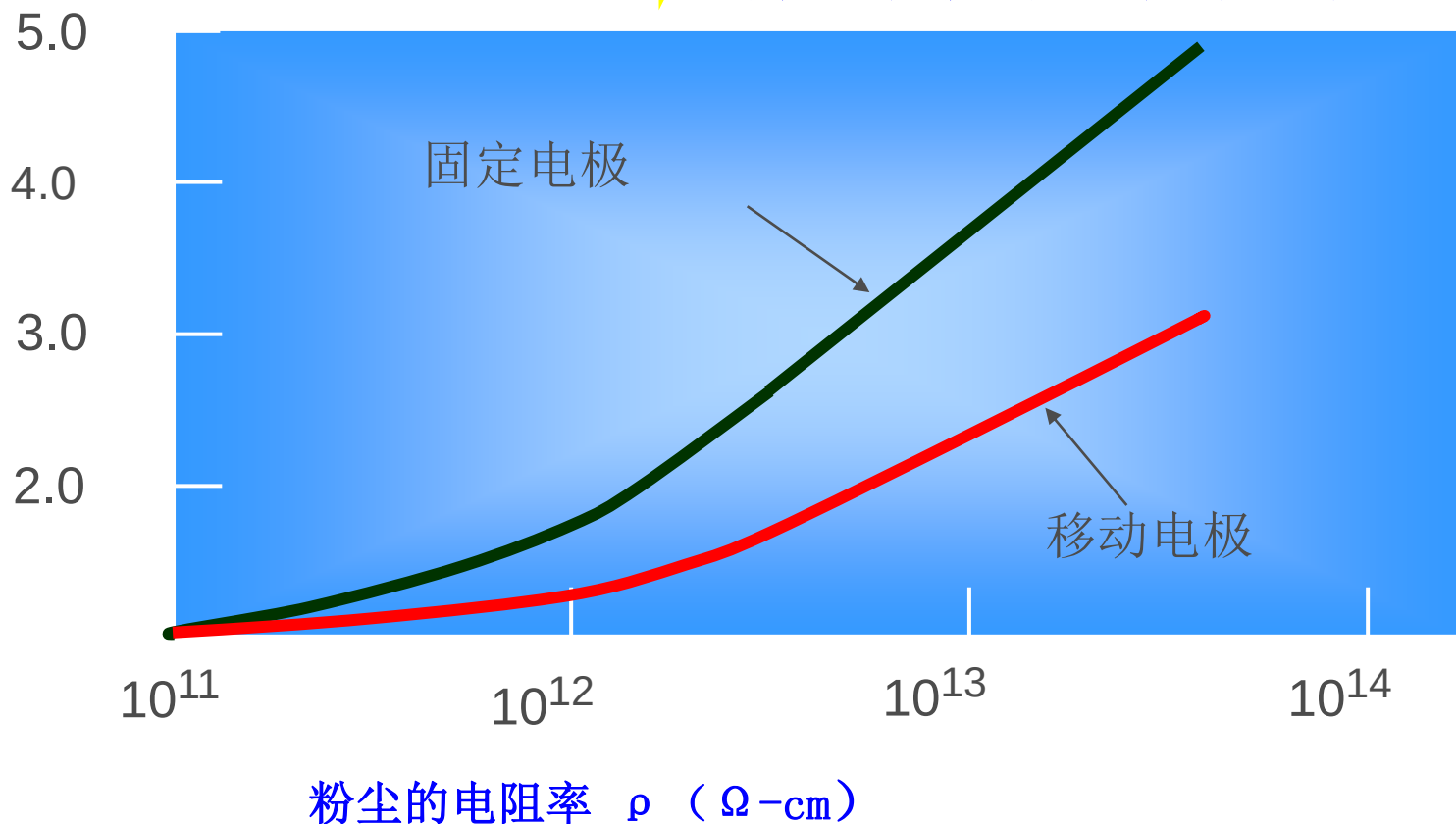


一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势



高比电阻粉尘反电晕形成区域

电除尘器收尘面积指数



一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

相马共同火力发电（株）敬启/新地1号
(1994年, 1000MW机组)



一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

日本超低排放控制技术路线发展历程及湿式电除尘技术发展：

(1) 低 NO_x 燃烧器+SCR+ESP+WFGD+WESP（碧南1、2、3号3台700MW机组，91年、92年93年投运）+烟气再热器；

(2) 低 NO_x 燃烧器+SCR+热回收器+低低温电除尘器（1997年~2009年）+WFGD+烟气再热器；

(3) 低 NO_x 燃烧器+SCR+热回收器+低低温电除尘器+移动极板+WFGD+WESP（碧南4、5号2台1000MW机组，2009年、2010年投运）+烟气再热器。

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势



一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

碧南1、2、3号3台700MW机组污染物控制

电厂	碧南1号机组		碧南2号机组		碧南3号机组	
控制污染物	粉尘	SO ₃	粉尘	SO ₃	粉尘	SO ₃
湿式电除尘器入口	25.3	1	26	1	26.5	1
湿式电除尘器出口	5	0.1	5	0.1	5	0.1
除尘效率	80.2%	90%	80.8%	90%	81.1%	90%

对于燃煤电厂，主要作为烟气复合污染物控制的精处理技术装备。

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

碧南 4、5 号机组2×1000MW机组湿式电除尘器

处理气体量 (wet) 3,116,500 Nm³/h

烟气温度 50℃

进口粉尘浓度 ≤5.0 mg/Nm³

出口粉尘浓度 ≤2.0 mg/Nm³

除尘率 60%

一、国外燃煤电厂污染物减排情况、技术路线及减排趋势

1~3号机配套WESP为三菱重工产品，电场数为2个，4~5号机配套WESP为日立公司产品，电场数为1个。投产至今运行情况良好，烟尘排放浓度长期保持在 $2\text{mg}/\text{m}^3 \sim 5\text{mg}/\text{m}^3$ 水平，在煤质较好情况最低达到 $1\text{mg}/\text{m}^3$ 。

二、超低排放技术路线选择如何提前考虑汞等重金属、SO₃、PM2.5的脱除技术

二、超低排放技术路线选择如何提前考虑汞等重金属、SO₃、PM2.5的脱除技术

1、烟气治理技术未来发展预测

在国内大规模推进燃煤电厂烟气脱硫、脱硝、除尘超低排放、近零排放的同时，我们应注意到燃煤电厂面临烟气治理更多的技术研究与工程应用课题，如：烟气脱汞、脱SO₃、PM2.5等问题。

二、超低排放技术路线选择如何提前考虑汞等重金属、SO₃、PM2.5的脱除技术

1) 关于烟气脱汞

环保部对我国燃煤电厂汞污染控制已经提出了明确要求：

一是要**摸清底数**，建立我国典型燃煤机组排放清单的计算模型，开展燃煤电厂大气汞排放在线监测试点工作，准确掌握燃煤电厂大气汞排放第一手数据。

二是进行**脱汞技术示范**。结合烟气脱硫、脱硝、除尘工作，开展同时脱汞的多污染物协同控制示范工程，并进行系统的技术、经济和环境效益评估。

三是要通过试点示范，提出燃煤电厂大气汞污染控制**技术政策**和**经济政策**的建议。

四是要将**燃煤电厂大气汞污染防治工作**纳入各集团公司的“十二五”规划，落实项目和资金安排，制定有针对性的措施。

二、超低排放技术路线选择如何提前考虑汞等重金属、SO₃、PM_{2.5}的脱除技术

在这个背景下，六大电力集团已经开展燃煤机组烟气脱汞测量项目的相关工作，全国16个电厂作为示范电厂。

发电集团

电厂

华能

福州电厂

高碑店热电厂

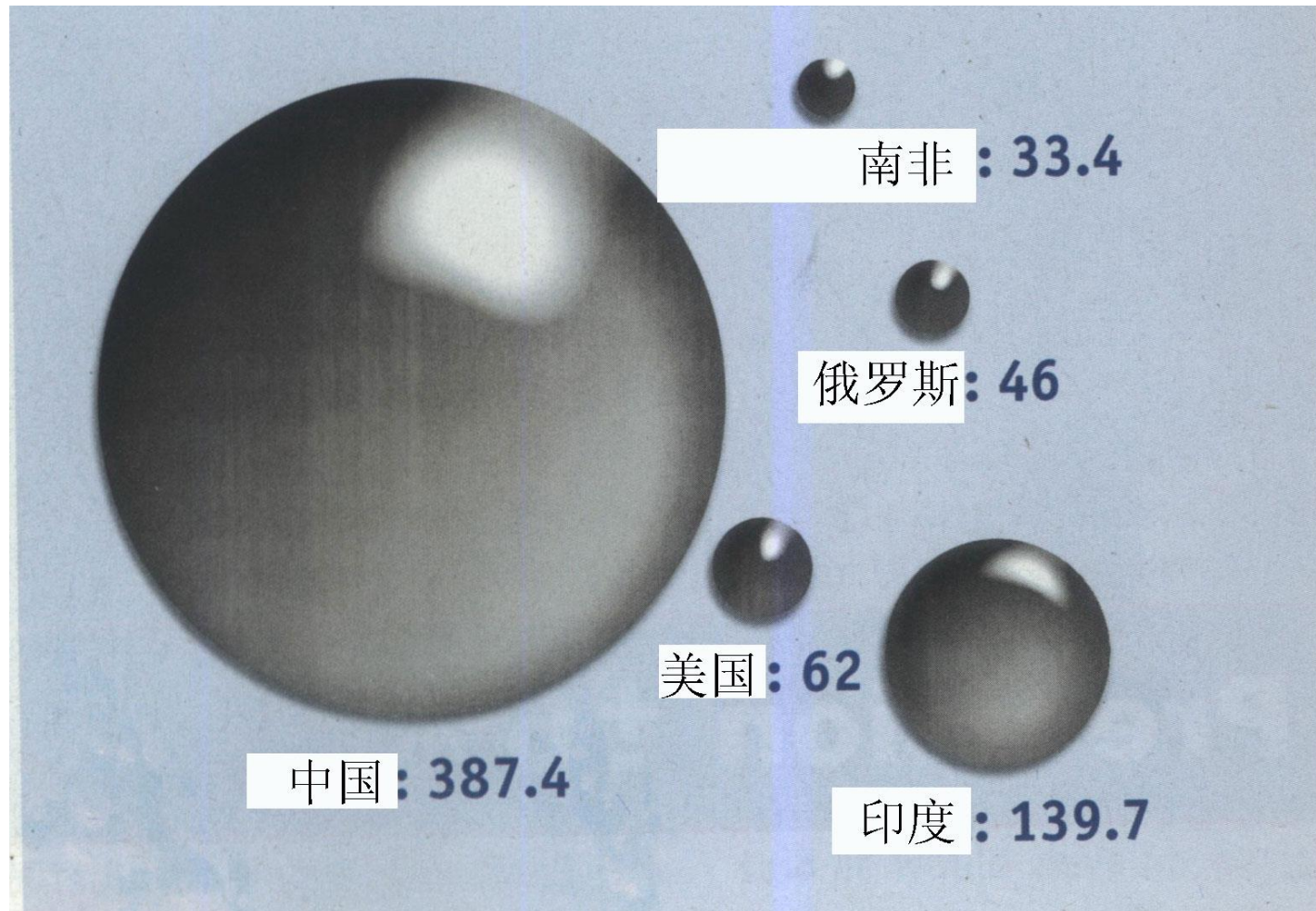
榆社电厂



天



二、超低排放技术路线选择如何提前考虑汞等重金属、SO₃、PM2.5的脱除技术



联合国环境规划署 (UNEP) 的估计, 2005年

二、超低排放技术路线选择如何提前考虑汞等重金属、SO₃、PM2.5的脱除技术

煤中汞含量及煤质的影响—中国煤中的汞

研究者从15个主要采煤省采集了176个煤炭样品，并从20个电厂采集了炉前煤，分析结果：

省份	平均值	最小值	最大值
山西	0.15	0.03	0.63
内蒙古	0.18	0.01	1.53
陕西	0.25	0.01	1.13
四川	0.34	0.21	0.54
重庆	0.41	0.16	0.78
贵州	0.21	0.01	2.25
云南	0.08	0.02	0.26
辽宁	0.10	0.04	0.16
黑龙江	0.03	0.01	0.05
山东	0.16	0.05	0.39
河南	0.13	0.05	0.26
江苏	0.18	0.11	0.30
安徽	0.20	0.08	0.41
河北	0.17	0.04	0.45
新疆	0.02	0.01	0.06
甘肃	0.18	0.04	0.33

二、超低排放技术路线选择如何提前考虑汞等重金属、SO₃、PM2.5的脱除技术

根据电厂的测量结果：

烟煤燃烧产生的烟气中，汞以氧化态为主；

次烟煤燃烧产生的烟气中，氧化态与元素态汞的比例大约相当；

而褐煤燃烧产生的烟气中，汞以元素态为主，这与褐煤卤素含量偏低以及飞灰组成的差异有关。因此，控制褐煤燃烧产生的汞污染的难度最为艰巨。

二、超低排放技术路线选择如何提前考虑汞等重金属、SO₃、PM2.5的脱除技术

吸附剂喷射技术所使用的吸附剂分为三类：

未处理的吸附剂，例如活性炭；

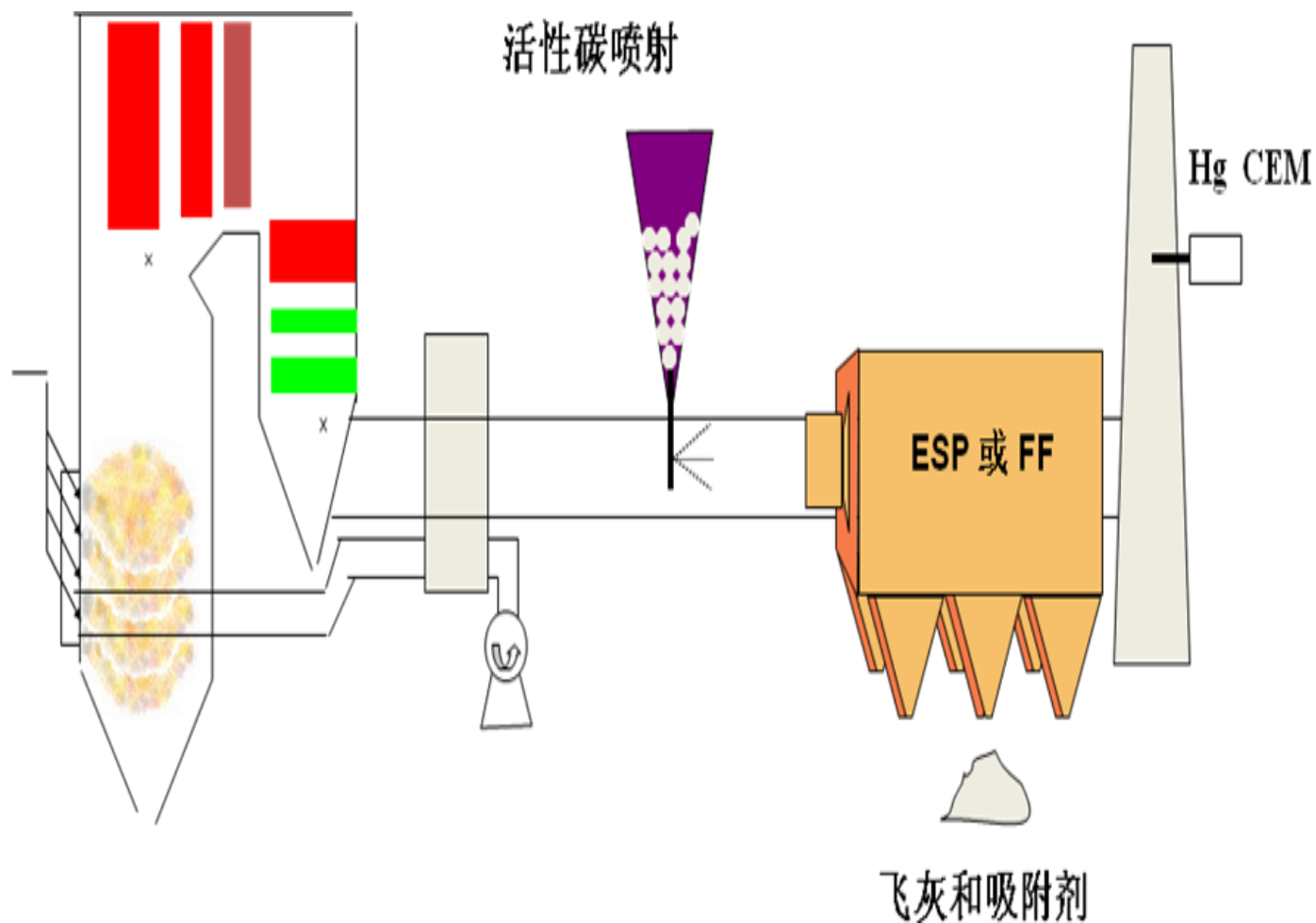
特殊处理的吸附剂，如溴化活性炭；

自产生的吸附剂，如未燃尽碳和飞灰。

目前在美国，一些ACI设备已投入运营。有些电厂使用的是未处理的活性炭；有些电厂为减少活性炭用量，提高脱汞效率，使用的是特殊处理的活性炭。

新研制的活性炭对汞的吸附能力不断提高。

二、超低排放技术路线选择如何提前考虑汞等重金属、SO₃、PM_{2.5}的脱除技术



二、超低排放技术路线选择如何提前考虑汞等重金属、SO₃、PM2.5的脱除技术

• 汞控制方法的经济性和可行性比较

措施	投资费用	运行费用	说明
洗煤	中等	中等	一般去除效率可达30%。
混煤	很低	很低	次烟煤和烟煤混合，可能影响锅炉性能。
煤添加剂	很低	中等	会增加烟气的腐蚀性。
除尘装置	低	低	一般去除效率小于30%~80%。
脱硫装置	很低	低	需要控制汞的再释放。
脱硝装置	中等	中等	可能需要更换催化剂种类。
活性炭喷射	低	高	飞灰的商业利用价值受到限制。
TOXECON	很高	高	保证飞灰的商业利用价值。

二、超低排放技术路线选择如何提前考虑汞等重金属、SO₃、PM2.5的脱除技术

2、关于燃煤电厂脱除SO₃和PM2.5

我国燃煤的巨大差异使我们更加清醒的认识到烟气治理技术发展的复杂性，我国的云南、贵州、四川、湖南、广西等地燃煤硫分较高，SO₃和PM2.5排放较为严重，将会有更严的标准要求。我们可以借鉴美国一些经验，提出我们的技术路线。

二、超低排放技术路线选择如何提前考虑汞等重金属、SO₃、PM2.5的脱除技术

1) 美国Trimble County 电厂2号机组湿式电除尘器的应用 (2011年投运)

该电厂是美国燃高硫煤最环保的电厂之一。

2号机技术路线：低NO_x燃烧器+SCR

(NO_x综合脱除率>90%) + 喷射Ca(OH)₂

系统 (脱除SO₃)
+ESP+活性炭脱汞装
置+FF+WFGD (SO₂脱
除率>98%) +WESP



美国Trimble County 电厂

- 820 MW

水平喷淋板式湿式电除尘器

二、超低排放技术路线选择如何提前考虑汞等重金属、SO₃、PM2.5的脱除技术

2) 美国 Spurlock 电厂 1 号机和 2 号机技术路线: 采用低NO_x燃烧器+SCR+电除尘器+湿法脱硫+湿式电除尘器工艺

位置: Maysville, KY

容量: 1 号机: 340 MW, 2 号机: 550 MW

投运时间: 2008/2009

燃煤硫分: 4.2%

二、超低排放技术路线选择如何提前考虑汞等重金属、SO₃、PM2.5的脱除技术

3) Elm Road 1、2号机 技术路线：采用 低NO_x燃烧器+SCR+布袋除尘器+湿法烟气脱硫+湿式电除尘器工艺

Location Oak Creek, WI

机组容量：2 x 670 MW

投运时间：2009/2010

燃煤硫分：2.6%

湿式电除尘器脱除达总量94%的PM2.5、SO₃。

二、超低排放技术路线选择如何提前考虑汞等重金属、SO₃、PM_{2.5}的脱除技术

美国电厂使用湿式电除尘器的效果

表x 烟囱排放结果（单位：lb/MMBtu）

	站点A	站点B	站点C	站点D
FPM*	0.0019	0.0007	0.007	0.006
TPM**	0.013	0.005	0.020	0.011
H ₂ SO ₄	0.0047	0.0004	0.0001	0.0033
Hg	6.4E-7	4.9E-7	6.7E-7	3.9E-7

*可滤过性颗粒

**总颗粒物（可滤过性颗粒和可压缩颗粒）

二、超低排放技术路线选择如何提前考虑汞等重金属、SO₃、PM_{2.5}的脱除技术



WFGD /
HFWESP
Systems
for PM +
SO₃
Control

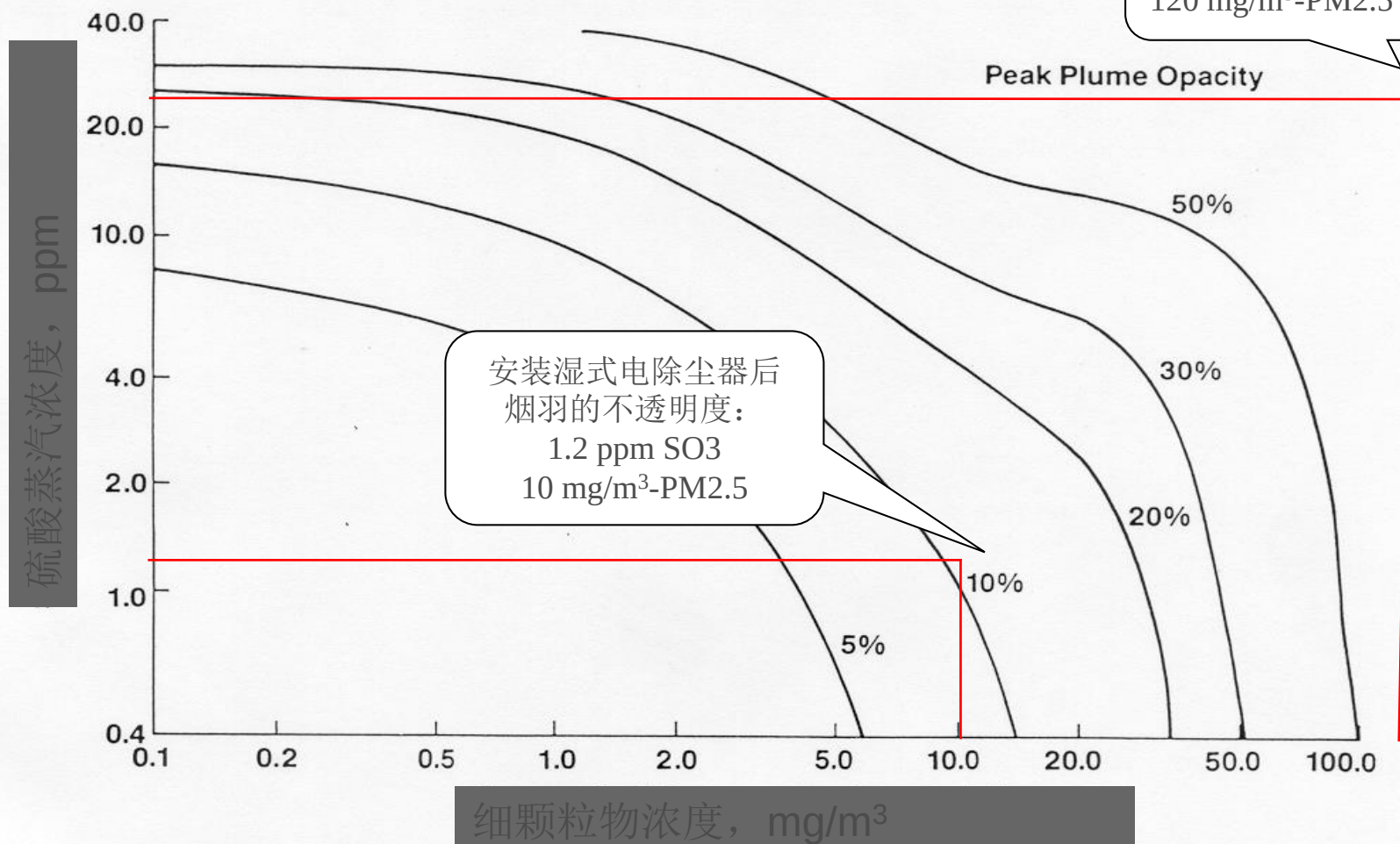
二、超低排放技术路线选择如何提前考虑汞等重金属、SO₃、PM_{2.5}的脱除技术



左边烟囱安装有湿式电除尘器
右边烟囱无湿式电除尘器

湿式除尘器安装后烟羽的可预计不透明度

目前的不透明度：
25ppm -SO₃
120 mg/m³-PM2.5



二、超低排放技术路线选择如何提前考虑汞等重金属、SO₃、PM_{2.5}的脱除技术

2、燃煤电厂烟气治理技术路线的几点思考

1) 美国湿式电除尘器的应用主要针对新上机组，燃中、高煤电厂。

自从2006年提出PM_{2.5}控制要求后，提出了除脱除传统的粉尘、NO_x、SO₂外，主要脱除PM_{2.5}、SO₃及汞的要求，进而提出了：低NO_x燃烧器+SCR+脱汞+高效ESP+WFGD+WESP的技术路线。

二、超低排放技术路线选择如何提前考虑汞等重金属、SO₃、PM_{2.5}的脱除技术

2) 日本烟气治理超低排放控制技术路线发展历程及湿式电除尘技术的应用

a. 低NO_x燃烧器+SCR+ESP+WFGD+WESP（碧南1、2、3号3台700MW机组，91年、92年93年投运）+烟气再热器；

b. 低NO_x燃烧器+SCR+热回收器+低低温电除尘器（1997年~2009年）+WFGD+烟气再热器；

c. 低NO_x燃烧器+SCR+热回收器+低低温电除尘器+移动极板+WFGD+WESP（碧南4、5号2台1000MW机组，2009年、2010年投运）+烟气再热器。

我国嘉华电厂1000MW机组通过多种污染物高效协同脱除及超低排放环保岛成套技术的研究，第三方权威监测结果表明，烟尘、SO₂、SO₃、NO_x、Hg排放浓度分别为0.425 mg/m³、5mg/Nm³、7.87 mg/m³、23.13 mg/m³、1.31 μg/m³。

谢谢!