

中华人民共和国  
环境保护部污染物排放总量控制司大气处

中华人民共和国  
氮氧化物总量控制项目

大气氮氧化物控制技术指南 (3)  
—燃煤火力发电、工业锅炉—

2016年2月

日本国际协力机构 (JICA)

株式会社 数理计划  
公益财团法人 国际环境技术转移中心 (ICETT)

CNO
CN
16-01



# 大气氮氧化物控制技术指南

## — 燃煤火力发电 —

中华人民共和国环境保护部

独立行政法人国际协力机构



## 前言

本《氮氧化物控制技术指南》是中国环境保护部与株式会社数理计划和公益财团法人国际环境技术转移中心实施的独立行政法人国际协力机构的技术合作项目“中华人民共和国大气氮氧化物总量控制项目”的内容之一，由株式会社数理计划和公益财团法人国际环境技术转移中心与中国环境保护部一起共同编制。

在 2011 年开始的十二五规划中，中国政府将氮氧化物列入了控制对象，各行各业开始高度重视氮氧化物减排技术，制定了排放标准，并针对污染源采取了控制措施。经过中央和地方政府正确的现场指导以及企业自身的努力，十二五规划制定的减排目标有望基本达成，但希望进一步改善大气环境的呼声依然很高，在 2016 年开始的十三五规划中，中国政府依然会将氮氧化物作为控制对象。

本指南的对象行业燃煤火力发电行业中新建企业从 2012 年 1 月开始、现有企业从 2014 年 7 月开始执行火电厂大气污染物排放标准（GB13223-2011）规定的 NO<sub>x</sub> 排放标准。目前，国内企业正在引进技术、改进设备等，为实现达标做各种努力。

在上述项目中，中方负责编写中国国内 NO<sub>x</sub> 减排的改善情况和需求，研究 JICA 专家介绍的控制方法在中国国内应用的可行性；日方负责根据中方提供的信息、案例分析及专家座谈会上中方专家的介绍等，提出适合中国的减排措施等。本指南旨在将本项目的活动结果进行汇编，通过本指南为地方政府和企业制定 NO<sub>x</sub> 控制措施提供参考。

本指南重点介绍了日本的 NO<sub>x</sub> 控制技术，以及日本现行的 NO<sub>x</sub> 控制的相关政策、企业的运行管理方法和监测分析方法等。

本指南在编写时得到了有关部门和人员的大力协助，在开展案例分析活动中得到了湖南省湘潭市有关部门和企业的积极协助和配合，在此深表谢意。我们衷心地希望本指南能够为中国的地方政府和处于生产一线的企业等提供参考。

2015 年 10 月

中华人民共和国环境保护部  
独立行政法人国际协力机构



# 目录

1	日本燃煤火力发电厂概要	1
1.1.	燃煤火力发电厂技术的发展状况	1
1.1.1.	背景	1
1.1.2.	燃煤发电的变迁	1
1.2.	针对燃煤火力发电厂的行政措施及适用法规等	2
1.3.	火电厂锅炉蒸气条件的变迁	5
1.4.	自备电厂锅炉的状况	6
2	环保措施的变迁、标准等	8
2.1.	制定措施的经过	8
2.2.	发电锅炉相关的主要标准等	8
2.2.1.	制定经过	8
2.2.2.	环境基本法	9
2.2.3.	环境标准	9
2.2.4.	控制标准	10
2.2.5.	SO <sub>x</sub> 排放标准 (通过 K 值进行量和总量的控制)	10
2.2.6.	NO <sub>x</sub> 排放标准	11
2.2.7.	烟尘排放标准	13
2.2.8.	世界各国大气污染物的限值	14
2.3.	环境影响评价	14
2.4.	节能	15
2.4.1.	节能效果及基准制度	15
2.4.2.	烟气温度、标准空气比	15
2.4.3.	其他节能措施	16
2.5.	燃煤火力发电厂的主要环保措施	16
2.6.	室素酸化物测定基准	17
2.6.1.	分析方法	17
2.6.2.	监测管理	18
2.6.3.	日常监测	19
2.7.	大气污染防治的管理机构等	20
2.7.1.	公害防治管理员制度及机构等	20
2.7.2.	公害防治管理员的工作	21
2.8.	关于采取对策引进设备的补贴制度	21
2.8.1.	防止公害事业团的补贴	21
2.8.2.	对中小企业的融资	24
2.8.3.	日本开发银行的融资	25
2.8.4.	税收方面的措施	25
2.9.	技术普及与技术开发活动	25
3	燃煤火力发电厂和氮氧化物的特性	28
3.1.	燃煤火力发电的特性	28
3.1.1.	锅炉类型	28
3.1.2.	蒸气条件	35
3.1.3.	设备结构	35

3.1.4.	近些年开始运行的公共燃煤电厂锅炉	36
3.1.5.	火力发电方式	37
3.2.	煤燃料的特性、种类等	37
3.2.1.	燃煤的燃料特性	37
3.2.2.	煤炭等级	38
3.3.	燃烧方式	39
3.4.	氮氧化物 (NO <sub>x</sub> )	40
3.4.1.	氮氧化物生成的基本原理及环境影响	40
3.4.2.	氮氧化物减排技术的基本原理	43
3.4.3.	氮氧化物 (NO、NO <sub>2</sub> ) 对环境的影响等	43
4	工业锅炉的氮氧化物减排技术	45
4.1.	燃烧室的氮氧化物生成控制技术	45
4.1.1.	生成控制技术	45
4.1.2.	各种低 NO <sub>x</sub> 燃烧技术	45
4.1.3.	炉排燃烧	51
4.1.4.	流化床燃烧	52
4.1.5.	改善运行条件	53
4.2.	烟气脱硝技术	54
4.2.1.	烟气脱硝设备须具备的条件	54
4.2.2.	烟气脱硝设备	54
5	其他环保措施及技术	61
6	燃煤发电锅炉的控制	62
7	运行管理	64
7.1.	削减氮氧化物的运行管理	64
7.2.	锅炉、汽轮机的主任技术员制度 (BT 主任技术员)	64
8	燃煤火力发电行业的氮氧化物控制措施总结	65
9	日本的氮氧化物控制措施应用事例	68
10	最适合的大气氮氧化物控制技术以及中国的氮氧化物控制技术方	70

# 1 日本燃煤火力发电厂概要

## 1.1. 燃煤火力发电厂技术的发展状况

### 1.1.1. 背景

以燃煤为燃料的发电方式有两种：煤炭在锅炉中直接燃烧将热能转换成蒸气，用蒸汽轮机发电的气力发电方式和将燃烧气体直接导入燃气轮机发电后，将其废热的热能转换成蒸气进行发电的复合发电方式。在此，我们只围绕直接燃烧煤炭的蒸汽锅炉，介绍日本的氮氧化物减排措施。

日本燃煤发电的历史从明治时期的藏前浅草火力开始，当时只是一座小型发电厂。之后经历了以水力发电为主的时期、煤荒期、1930年代的电力管制期、1941-1945年的二战期等，燃煤发电一直处于供电量和技术发展的低迷时期。

1954年-1957年，日本迎来了工业发展时期，电力需求量急剧增加，史称神武景气时代。一直到1970年代，随着家用电器的普及，生活用电量增加以及经济高速增长期用电量的急剧增加，电源结构从“水主火辅”变成了“火主水辅”，火力发电从以前的补给电源开始成为综合性经济电源。

燃煤发电从1970年代到现在，一直受石油危机、公害源、核能发电和太阳能发电等新能源应用带来的电源多样化的影响，但直到现在，燃煤发电作为稳定电源，在公共用电和自备电中占有重要的地位。日本是一个煤炭资源贫乏的国家，虽然不得不依靠进口，但世界煤炭资源丰富，与石油相比市场成本稳定，并且，从发电技术上来讲，燃煤的燃烧、发电的安全性和可靠性都很高，不受天气等因素的影响，是一种可靠性高的电力。我们相信，燃煤发电今后在公共用电和自备电中仍然占据主要地位。

### 1.1.2. 燃煤发电的变迁

日本2013年度不同电源的发电量中，燃煤占30%，LNG居第二位。福岛核电站发生事故以前，直到2009年底，核能发电占16.2%，但核电站因安全问题停运后，LNG和燃煤发电的比率增加。根据2011年度的发电设备容量统计，总发电输出功率54.6亿kW中，燃煤发电占31.5%，是最大电源。（出处：电力事业联合会统计）

此外，作为支撑燃煤发电技术发展的基础，日本在1950-1970年代的造船业以及工业锅炉制造业等重工业产业储备了大量的制造技术、材料生产技术和人材，并且，日本的火电设备生产厂家还积极从当时拥有先进火电技术的CombustionEngineering（USA）、Sulzer Brothers（瑞士）、Siemens（德国）、Babcock&Wilcox（UK、USA）和Foster Wheeler（USA）等进口技术，终于在1980年代超过了其他先进国家，其在经营方面的努力得到了国际的认可。现在，高效燃煤发电设备已经发展成为一个日本强有力的出口产业。

## 1.2. 针对燃煤火力发电厂的行政措施及适用法规等

用于公用发电和自备电的锅炉由于其公共性和社会影响性很大，因此，对设备机能的可靠性和稳定性要求很高。鉴于上述情况，日本政府制定了单独的电气事业法，规定了发电企业应具备的企业经营理念及设备具体部位的结构、规范等。针对发电企业规定的电气事业法内容如下：

- 电气事业运营的公平合理性
- 电气使用者利益的保护
- 电气事业的健全发展
- 电气设施的施工、维护及使用规定
- 公共安全及环境保护

值得注意的是，作为法律理念，这一法律重视的不是电力企业的利益，而是使用者的利益保护和环保措施。

火电厂从建厂时的选址到运行后的业务开展，从区域、设施、运行、维护、运营等所需的稳定电源到区域环境保护，影响范围非常大。因此，从对环境的影响到锅炉等设备的设计制造、检修、安全保护，日本制定了很多相关法规和标准。这些法规和标准不仅适用于燃煤发电，还适用于除核能发电外的所有发电。表 1-1 为日本燃煤发电锅炉的管辖部门划分及主要适用法规，图 1-1 为公共发电和自备电的电力设施划分。图 1-2 为系统划分详细图。

表 1-1 日本燃煤发电锅炉的管辖部门划分及主要适用法规

项目	适用法规等
企业划分	公共火力发电      一般电力企业 独立发电企业 特定发电企业
	自备火力发电      自备电厂
管辖部门	经济产业省外局资源能源厅
适用法规等	电气事业法 发电用火力设备的技术标准 安全规定 自备电厂设施安全管理规定 日本工业规格（JIS）、电气规格（JEC）等
环境相关法规	工厂选址法（绿化措施等） 环境影响评价法 环境基本法 大气污染防治法 水质污浊防治法

	噪音・振动控制法 恶臭防治法 废弃物的处理及清理相关法律 二恶英类治理特别措施法 土壤污染治理法 完善特定工厂公害防治组织的相关法律 推进防止全球气候变暖措施的相关法律
--	--

这些法规中，与燃煤火力发电厂有密切关系的法规是建厂前实施的环境影响评价法和设计规划时作为标准的技术标准。发电用火力设备的技术标准是根据法律，从确保公共安全、稳定供电的观点出发制定的发电设施的设计、施工、维护管理的标准及设施的审查、检查标准。自 1953 年制定《发电锅炉技术标准》以来，随着蒸气条件的高温高压化、耐高温腐蚀、高强度、耐水蒸气氧化材料等的开发，政府相关部门颁布的法律迄今为止已修改了数十次。

氮氧化物（NO<sub>x</sub>）相关法规仅与锅炉有关的，就涉及到煤燃料、燃烧、锅炉结构、大气污染防治相关法规等。合理的运营管理也涉及到环境计量、节能相关、土壤污染、污水处理、选址的相关法等。

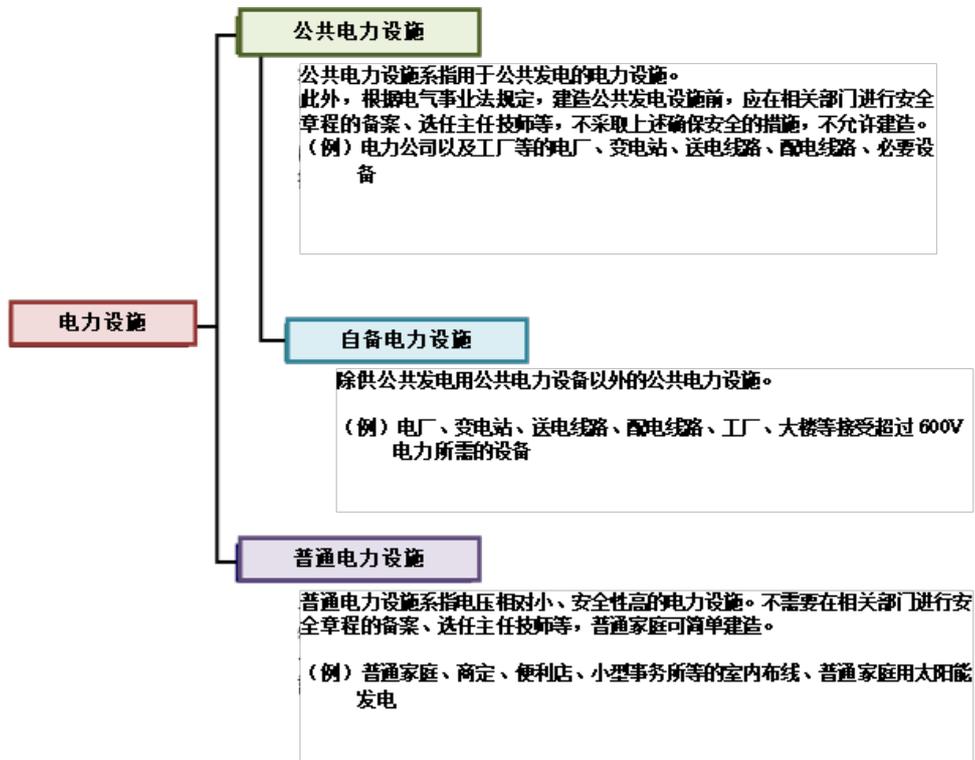


图 1-1 电力设施（发电设施）的划分  
(出处：经济产业省)

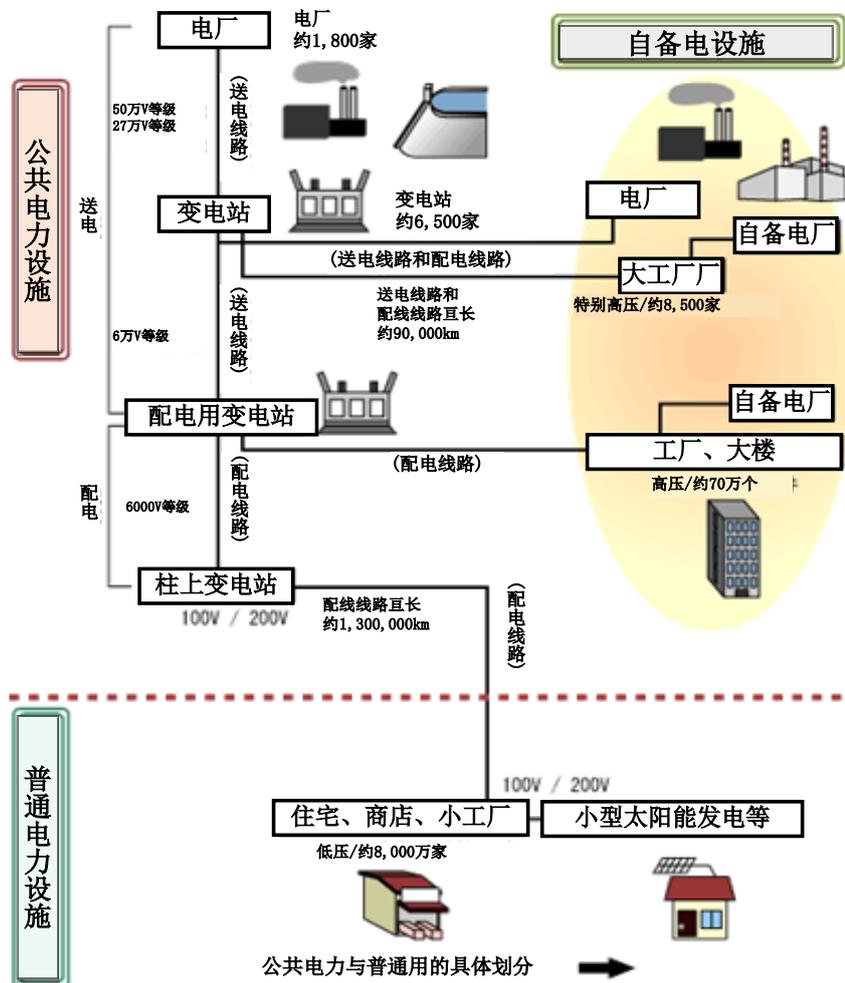


图 1-2 电力设施的系统划分详细图

(出处: 经济产业省)

### 1.3. 火电厂锅炉蒸气条件的变迁

公共电厂发电锅炉和自备电厂发电锅炉的蒸汽条件和规模相差很大。公共电厂 1974 年安装的锅炉输出规格为功率 27MW、蒸气压力 4.4MPa、蒸气温度 457℃。随着火电技术的迅速发展, 1960 年安装的锅炉亚临界压力和蒸气条件为 16.6MPa、566/538℃, 1974 年安装了 100MW 超临界压力机组。此后, 以输出功率 350-500MW 为界, 超过该输出功率的一般采用超临界压力机组。

1989 年 31MPa、566/566/566℃ 的超超临界压力锅炉开始运行, 蒸气条件最高可达 600/600℃。

现在，日本正在研发更高效的新一代超超临界 USC 蒸汽为 700℃ 的更高效锅炉。图 1-3 为公共电厂火力锅炉容量的变迁，图 1-4 为锅炉蒸气规格的变迁。

自备电锅炉的蒸气条件在大输出功率发电锅炉中采取与公共发电锅炉相同的规格。特别是随着近来对电力企业限制的放松以及市场对电力的迫切需求，高效率的高温高压锅炉已成为今后发展的趋势。自备电厂中许多主要为工厂提供用电的中小型自备电厂引进了热电联产发电机组，考虑到背压的条件、经济性及效率等，各电厂都会进行最佳匹配测试。

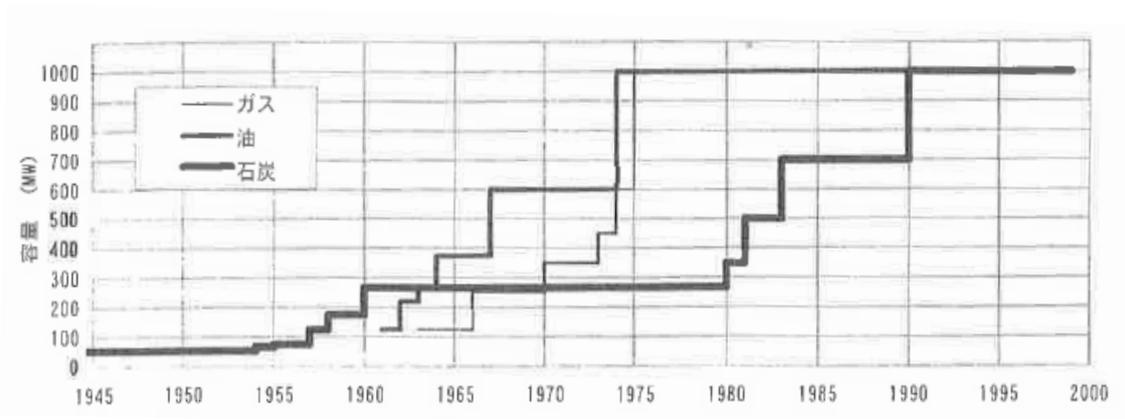
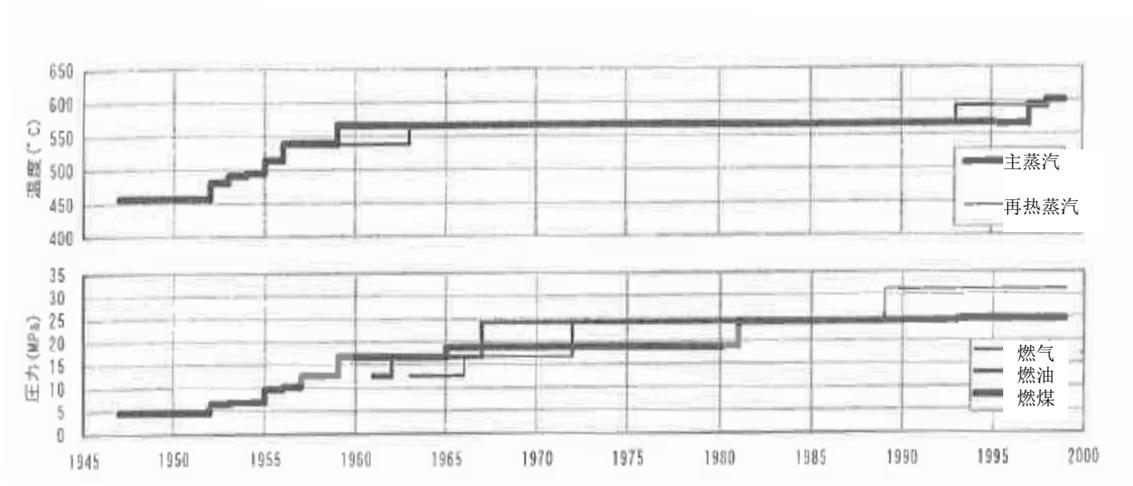


图 1-3 公共电力火力锅炉容量的变迁

(出处：火力核能发电技术协会)

图 1-4 锅炉蒸气规格的变迁



(出处：火力核能发电技术协会)

#### 1.4. 自备电厂锅炉的状况

自备电厂锅炉与各行业固有的工艺有密切关系，不光用来发电，有许多像前面讲过的电

热联产那样，成了工艺的一部分。现在，除特定行业外，小型电厂已经不再使用燃煤发电锅炉自备电，而是采用燃气、重油、生物质等作为发电锅炉的燃料。燃煤发电锅炉目前仅在蒸汽、电力等消耗率大的造纸、纸浆、水泥、钢铁等行业使用。这些行业是电力、蒸汽的消耗大户，选择燃煤发电锅炉是考虑到煤燃料的经济性以及可与污泥、生物质、废气等副产品混烧的优势。但是，可再生能源发电固定价格收购制度(FIT)实施后，以副产品、废弃物燃料和生物质燃料的复合燃料型电力公司为主的电厂建设和运行剧增，也有许多企业计划将燃煤作为辅助燃料。1998年独立发电者(IPP)制度的实施，促进了发电规模大型化的发展，出现了单机容量为700MW级的发电机组，同时也呈现出以副产品、生物质等为燃料的燃料的多样化，燃煤发电比例为17%左右。自备电厂发电比例为全国发电电力的13%左右，自备电消电率高的行业为化学、造纸、纸浆和钢铁行业，占25-35%，水泥行业占7-10%。造纸、纸浆和钢铁行业的企业规模较大。表1-2为主要燃煤自备电厂的信息：

表 1-2 主要燃煤自备电厂的信息

企业名	运行开始时间	设备容量万 kW	混烧燃料
神钢 神户 #1	2002	66.5	
神钢 神户 #2	2004	66.5	
新日铁 室兰 #5	2001	10	煤气、重油
新日铁 釜石 #1	2000	14.9	重油
新日铁 鹿岛 #1	2007	47.5	
新日铁 广畑	1999	13.3	
新日铁 户畑 #3	1999	13.7	煤气
新日铁 大分 #9	1999	30	煤气
日本造纸 钏路	2004	8	
Sanix Energy	2003	7.4	废塑料
Summit Onahama	2004	5	重油
丝鱼川发电	2001	14.9	
宇部兴产 宇部 #1	2004	19.5	
土佐发电 土佐 #1	2005	15	
住友大阪水泥高知 1	2005	6.5	
Sigma Power 有明三池	1975	17.5	重油
Sigma Power 有明三川	1983	4.8	

(出处：电气事业便览 2012 等)

## 2 环保措施的变迁、标准等

### 2.1. 制定措施的经过

燃煤发电从电力公司创业以来一直是主力发电形态，但火主水辅期间大力发展燃煤、石油火电，造成了公害的污染普遍排放增加，到了 1960 年代，电厂选址越来越困难。但随着低公害技术的开发，烟尘、硫氧化物（SO<sub>x</sub>）、氮氧化物（NO<sub>x</sub>）等的产生已经可以控制，并且由于脱石油的时代发展趋势以及煤炭的经济性，燃煤发电再次成为重要的电源。如图 2-1 所示，日本火电厂的环境负荷(SO<sub>x</sub>/NO<sub>x</sub>)与美国、法国、德国相比非常低。特别是日本具有雄厚实力的关西电力，NO<sub>x</sub> 排放量为 0.109 g/kWh（2012 年度），仅为德国 2010 年度排放量的 12%左右。

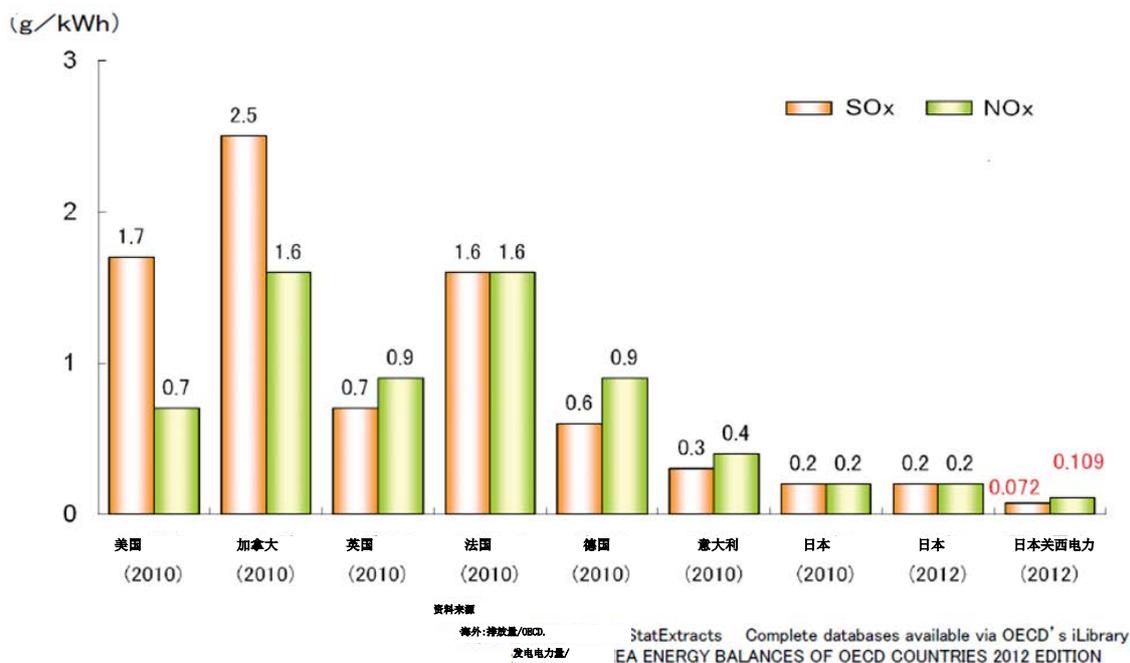


图 2-1 各国的火电厂的环境负荷(SO<sub>x</sub>NO<sub>x</sub>)

### 2.2. 发电锅炉相关的主要标准等

#### 2.2.1. 制定经过

发电锅炉排放的主要公害物质有从烟囱排放的烟尘、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、有害物质等与燃烧有关的“煤烟”、燃料装卸、处理飞灰/燃烧灰时扬起的“粉尘”、臭气以及从污水连续排放设备和烟气处理设备中排放的污水等。

公害问题作为社会问题凸显，日本于 1967 年制定了《公害防治基本法》、1972 年制定了《自然环境保护法》。根据上述法律，日本采取了发电锅炉方面的大气污染防治及水质污浊防

治等环境行政措施，在公害防治及自然环境保护方面发挥了重要作用。但是，随着工业的迅速发展，环境问题也发生也巨大变化，现在的环境问题主要集中在 CO<sub>2</sub> 排放等造成的全球气候变暖、氟利昂排放造成的臭氧层破坏、SO<sub>x</sub> 等酸性气体排放造成的酸雨等全球性环境保护、大城市圈 NO<sub>x</sub> 排放造成的大气污染以及日益增加的废弃物等造成的生活环境问题。除 1980 年代的传统工业公害之外，废弃物焚烧处理设施排放的二恶英类有害物质以及机动车尾气、制冷剂氟利昂类等与日常生活密切相关的活动造成的污染源也在不断增大。

### 2.2.2. 环境基本法

仅凭传统的控制方法已无法应对这些新的环境问题。1993 年，日本制定了公害对策基本法，制定并实施了环境基本法。基本法由三章四十六条构成，规定了环境保护的基本理念，明确了国家、地方政府、企事业单位和国民的责任和义务。基本理念有以下三点：

- ① 享受并继承环境资源；
- ② 构建环境负荷影响少的可持续发展社会；
- ③ 通过国际协调积极推进全球环境保护。

根据环境基本法，日本政府还制定了环境基本规划，制定了环境标准，并分别制定并实施了大气污染防治、水质污浊防治、噪音振动限制、臭气防治的相关法律法规，并且要求地方政府也要根据国家的基本方针，结合本地区的环境情况，采取相应的治理措施。

为了防治火炉发电方面的大气污染，日本于 1962 年制定的《关于限制煤烟排放等问题的法规》。这一法规实际上是之后限制排放法律体系的开始。法律体系中明确规定了公害的对象范围、公害污染源排放企业的责任（PPP: Polluter pays Principle）、行政部门的责任和义务等，实行 SO<sub>x</sub>、烟尘及其他粉尘浓度排放限制制度。

1968 年日本开始实行 SO<sub>x</sub> 的 K 值限制、1974 年开始实行 SO<sub>x</sub> 总量控制制度，1977 年，NO<sub>x</sub> 被纳入有害物质范围，并从 1981 年开始在东京、横滨、川崎、大阪等制定区域实行总量控制制度。

1997 年，二恶英被指定为有害大气污染物的，并且，同年还制定了环境影响评价法，要求火力发电厂等建厂时必须通过环评。对于影响大气环境的 NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 及 SPM 等参数，要求必须实施掌握现状、预测影响、定量评估及事后调查等。

### 2.2.3. 环境标准

大气污染物的控制方面，针对环境基本法第 16 条第 1 款规定的与大气污染有关的环境条件，以保护人的健康为原则设定了标准浓度。表 2-1 为日本的大气污染环境标准。这些标准均为在可以在正确掌握大气污染情况的地方，按照规定的监测方法监测时的参照标准。

表 2-1 大气污染环境标准

物质	环境条件
二氧化硫	小时值的日均值为 0.04ppm 以下, 且小时值为 0.1ppm 以下
一氧化碳	小时值的日均值为 10ppm 以下, 且小时值的 8 小时平均值为 20ppm 以下
悬浮颗粒物	小时值的日均值为 0.10mg/m <sup>3</sup> 以下, 且小时值为 0.20mg/m <sup>3</sup> 以下
光化学氧化剂	小时值为 0.06ppm 以下
二氧化氮	小时值的日均值在 0.04ppm-0.06ppm 范围内或低于此范围
苯	年平均值为 0.003mg/m <sup>3</sup> 以下
三氯乙烯	年平均值为 0.2mg/m <sup>3</sup> 以下
四氯乙烯	年平均值为 0.2mg/m <sup>3</sup> 以下
二氯甲烷	年平均值为 0.15mg/m <sup>3</sup> 以下

#### 2.2.4. 控制标准

日本的煤烟采取多方面的控制标准, 有排放标准控制、总量控制及燃料使用标准等。

##### ① 排放标准

排放标准有国家统一制定的一般排放标准、适用于多种污染物同时存在及煤烟排放设施集中区域的特别排放标准、以及地方政府在国家排放标准基础上制定的加严标准三种。

##### ② 总量控制

对于工厂企业集中、仅凭一般排放标准难以全部环境达标的区域, 针对特定工厂排放的 SO<sub>x</sub> 及 NO<sub>x</sub> 等烟尘制定总量控制标准。

截至 2014 年, 针对 24 个区域采取了 SO<sub>x</sub> 总量控制, 针对 3 个区域采取了 NO<sub>x</sub> 总量控制。

##### ③ 燃料使用标准

燃料使用标准有以下两种:

- 根据季节使用燃料的措施;
- 指定区域使用燃料的措施

由于通过采取上述措施可以控制各区域的全年污染程度, 因此, 这是一种地方长官(市长、镇长等)可以通过劝告、命令的方式要求排污企业使用优质燃料、减少燃料使用量的制度。

#### 2.2.5. SO<sub>x</sub> 排放标准 (通过 K 值进行量和总量的控制)

很多国家的 SO<sub>x</sub> 排放标准为烟气浓度标准。日本最初也是的, 排放标准也是以烟气浓度为标准的, 但是, 环境并没能达标。因此, 1968 年日本开始采用 K 值控制方法。此外, 对于工厂企业集中、仅凭各设备的 K 值排放控制环境无法达标的区域, 由国家指定区域, 由当地都道府县知事主持计算整个区域的允许排放总量, 指定总量削减计划。

## 2.2.6. NO<sub>x</sub> 排放标准

由于各种设施的燃烧条件等不同，NO<sub>x</sub> 产生特性也不一样。因此，煤烟产生设备的 NO<sub>x</sub> 排放标准按设备的类型和规模分别加以规定。从 1973 年第一次制定标准以来，1975 年、1977 年、1979 年先后四次强化并扩大了标准范围。

1978 年修订为表 2-1 所示的环境标准，并规定“日均值超过 0.06ppm 的区域原则上应在 7 年内达到 0.06ppm 的标准”。1981 年，NO<sub>x</sub> 被指定为总量控制对象物质，东京都特别区等 3 个区域被指定为 NO<sub>x</sub> 总量控制物质区域，逐步采取 NO<sub>x</sub> 减排措施。

NO<sub>x</sub> 产生于燃料燃烧时，要达到环境标准只有减少烟气排放量和降低浓度两种方法。即：通过改善燃烧方法控制 NO<sub>x</sub> 生成，或去除烟气中的 NO<sub>x</sub>。

### 2.2.6.1. NO<sub>x</sub> 排放标准（浓度控制标准）

如表 2-2 所示，锅炉的允许排放浓度根据锅炉设备使用的燃料、锅炉型号、烟气量加以规定。特别是燃煤锅炉，考虑到 NO<sub>x</sub> 生成机制，排放控制标准分别按燃烧方式规定。由于每种燃料的空气比都不同，因此，作为标准的 O<sub>2</sub> 浓度也分别按燃料类型规定。

表 2-2 发电锅炉相关的日本 NO<sub>x</sub> 排放控制标准概要

煤烟产生设备	规模 最大额定输出功率 (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> N/h)	残余 O <sub>2</sub> 浓度 (%Vol)	排放标准 (ppm) *
燃气专烧锅炉	>50	5	60
	4-50		100
	1-4		130
	<0.5-1		150
劣质煤锅炉 (炉顶燃烧器)	>70	6	200
	4-70		250
	<0.5-4		350
劣质煤专烧锅炉 (炉顶燃烧器) >30 万 m <sup>3</sup> N/h	>70	6	200
	30-70		250
劣质煤锅炉 火炉分隔墙型、 火炉热释放率 >14 万 k cal/m <sup>3</sup> h	>70 50-70	6	200 250
劣质煤锅炉 上述以外	>70	6	200
	30-70		250
劣质煤专烧锅炉	>70		200

上述以外	40-70 >0.5-40	6	250 350									
燃煤专烧锅炉 层燃方式 自然循环型 >14 万 kcal/m <sup>3</sup> h	>20-25 万 m <sup>3</sup> /h	6	250									
燃煤锅炉 接线型倾斜式燃烧器	>100 万 m <sup>3</sup> N/h	6	200									
燃煤锅炉 流化床燃烧	>4 万 m <sup>3</sup> N/h	6	350									
固体燃烧锅炉 抛煤机炉排燃烧	4-20	6	320									
固体燃烧锅炉 流化床燃烧	<40	<0.5-4	250									
固体燃烧锅炉 上述以外	>70 4-70 -4	6	200 250 350									
液体燃烧锅炉	>50 1-50 -1	4	130 150 280									
固体燃烧小型锅炉 受热面积<10m <sup>2</sup>		6	350									
废弃物焚烧炉 悬挂转、连续炉		12	250									
废弃物焚烧炉 连续炉上述以外		12	250									
<p>*NO<sub>x</sub> 是 NO、N<sub>2</sub>O、NO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等的混合物。燃烧过程中产生的 NO<sub>x</sub> 大部分为 NO，NO<sub>2</sub> 的产生量虽因燃烧条件等不同所烧会有些波动，但也只占几个百分点。NO<sub>2</sub> 的产生率虽然很低，但具有很强的毒性，因此，环境标准中对 NO<sub>2</sub> 浓度做了规定。并且，JIS 的 NO<sub>x</sub> 浓度检测法也要求按照 NO<sub>2</sub> 标准进行检测。</p> <p>实际上，NO/NO<sub>2</sub> 比因燃料、设备类型的不同也不一样。日本以燃煤为燃料的 NO<sub>2</sub> 换算的 NO<sub>x</sub> 排放系数如下：</p> <table border="0"> <tr> <td>发电锅炉</td> <td>70</td> <td>kg/108kcal</td> </tr> <tr> <td>水泥烧成炉</td> <td>140</td> <td></td> </tr> <tr> <td>焦炉</td> <td>20</td> <td></td> </tr> </table> <p>(资料来源：1997 环境厅大气保全局大气规制课)</p>				发电锅炉	70	kg/108kcal	水泥烧成炉	140		焦炉	20	
发电锅炉	70	kg/108kcal										
水泥烧成炉	140											
焦炉	20											

如果硬要将 ppm 换算成 mg/m<sup>3</sup>，假设烟气组分 100%为 NO<sub>2</sub>时，

$$100\text{mg/m}^3 \quad \approx \quad 200\text{ppm}$$

(实际上，设备产生的 NO 占 95%以上，因此，100mg/m<sup>3</sup>约为 140ppm)

### 2.2.6.2. NO<sub>x</sub> 总量控制

对于 NO<sub>x</sub> 排放源集中、无法确保环境达标的区域实行总量控制。总量控制规划由知事在听取相关的市长、镇长、村长、审议会及其他合议制机构的意见后制定。NO<sub>x</sub> 允许排放量的计算例如下：

- ① 根据原燃料使用量的增加，使单位平均允许排放量减少的算法（原料使用量方法）。

$$Q = a \cdot W^b$$

Q: NO<sub>x</sub> 允许排放量 (m<sup>3</sup>N/h)

W: 特定工厂等所有煤烟产生设备的原燃料使用量 (重油换算 kl/h)

a: 都府县知事为达成减排目标量规定的常数

b: 0.08-1.0, 为督道府县知事规定的常数

- ② 在考虑烟气排放量、地域分布情况等因素的前提下，计算特定工厂安装的所有 NO<sub>x</sub> 排放设备的允许排放量

$$Q = k \{ \Sigma(C \cdot V) \}^L$$

Q: NO<sub>x</sub> 允许排放量 (m<sup>3</sup>N/h)

C: 设备系数 (知事按设备类型规定)

V: 各设备的烟气排放量 (m<sup>3</sup>N/h)

k: 知事为达成减排目标量规定的削减常数

L: 知事在考虑排放特性的前提下，在 0.8-1.0 的范围内规定的常数

### 2.2.7. 烟尘排放标准

烟气中含有的“灰尘”和“煤渣灰”等固体颗粒物称为“烟尘”，用这一定义与煤粉碎等时产生的固体颗粒“粉尘”区别开来。烟尘中含有无机物、有机物及各种金属类物质，是造成烟尘沉降等环境恶化的原因，因此，环境标准中规定了排放标准，对其加以控制。表 2-3 为典型锅炉类型的烟尘排放标准。收集的烟尘法律要求必须作为工业废弃物正确处理，适用废弃物处理法。

表 2-3 典型锅炉类型的烟尘排放标准

设备名	规模 (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> N/h)	一般排放标准 (g/m <sup>3</sup> N)	O <sub>2</sub> 浓度 (%vol)
燃气专烧锅炉	4 - >20	0.05	5

	<4	0.1	
重油专烧锅炉及 气体液体混用锅炉	>20	0.05	4
	4 - 20	0.15	
	1 - 4	0.25	
	<1	0.30	
黑液燃烧锅炉	>20	0.15	—
	4 - 20	0.25	
	<4	0.30	
燃煤锅炉	>20	0.10	6
	4 - 20	0.20	
	<4	0.30	

### 2.2.8. 世界各国大气污染物的限值

表 2-4 为世界各国燃煤发电的 SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub> 及烟尘的排放限值，仅供参考：

表 2-4 世界各国燃煤发电的 SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub> 及烟尘的排放限值

项目	日本	美国	德国
SO <sub>x</sub>	K 值控制 50-100ppm*	脱硫率 >90% Max. ≙ 500ppm	脱硫率 >85% Max. ≙ 150ppm
NO <sub>x</sub>	200ppm	375 ppm	100ppm
烟尘	100mg/m <sup>3</sup> N (50mg/m <sup>3</sup> N)*	35mg/m <sup>3</sup> N	50mg/m <sup>3</sup> N

\* 地方政府例

## 2.3. 环境影响评价

建电厂时，如果要改变土地的形状、新建设施，则企业应该在建厂前，就建设发电厂对环境的影响自行进行合理的调查、预测和评价，并根据评价结果采取环境保护措施。1977 年日本政府内阁会议决定建立电厂建设项目环境影响评价制度，并于 1997 年实现了环境影响评价制度的法制化。在对电气事业法的部分内容进行修订后，从 1999 年开始全面实施环境影响评价法。环境影响评价法规定应根据规模大小分别判断是否需要环境影响评价，并要求建厂时应尽早公开企业信息，听取居民、专家和地方政府等的意见。对象企业中，第一类企业必须进行环评，同等规模企业中需要确定进行何种程度环评的企业属第二类企业。

第一类企业 火电厂 15 万 kW 以上

第二类企业 具有一定规模以上的企业（地区条例中规定）

环评内容分为环境现状调查和环境影响预测、评价两个部分。

环境现状调查：环境基本法中规定的所有环境

自然环境 大气环境：电厂选址点的气象、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、PM 等

水环境：水质、底泥、水流等

土壤环境：地形、地质、土壤质量等

生物多样性等生物系统

环境负荷物质：废弃物、CO<sub>2</sub> 排放量等

环境影响预测、评价的主要项目：

烟气的扩散、温排水的扩散、噪音的扩散、景观等

采用数值模拟和模型实验进行环境度、扩散浓度和周边景观的预测。

## 2.4. 节能

### 2.4.1. 节能效果及基准制度

节能不仅能获得经济效益，削减能耗和排放烟气量，还有望削减 CO<sub>2</sub>（GHG）及大气污染物的排放总量。

日本资源能源厅从 2008 年开始根据节能法设立了基准指标制度。这一制度将电力等 6 个行业 10 个领域作为指定行业，与其他企业对比后判断其节能措施的优劣，落后的则督促其改善节能措施，提高节能效果。基准的设定高于企业平均值+标准偏差，旨在督促企业积极主动采取节能措施。报告数据显示，2013 年度 11 家电力企业基准达成率为 18.2%，应达水平在 100.3%以上，上一年度平均值为 98.9%，标准偏差为 28.4%。

火力发电锅炉、工业锅炉燃料燃烧合理化的烟气温度等管理标准如下。

### 2.4.2. 烟气温度、标准空气比

日本经济产业省发布的适用电气事业法的锅炉管理标准见下表。表 2-5 为标准烟气温度，表 2-6 为目标烟气温度。另外还有前面表 4-1 的标准的空气比。

表 2-5 标准烟气温度

燃料种类	固体燃料 煤粉	固体燃料 流化床	液体燃料	气体燃料	高炉煤气 副产煤气
标准烟气温度（℃）	150	—	145	110	200

（出处：通产省公示第 388 号 1993）

表 2-6 目标烟气温度

燃料种类	固体燃料 煤粉	固体燃料 流化床	液体燃料	气体燃料	高炉煤气 副产煤气
目标烟气温度（℃）	140	—	135	110	190

（出处：通产省公示第 388 号 1993）

上表中的目标烟气温度为定期检修后锅炉通风设备入口空气温度在 20℃以下、负荷率为 100%的条件下燃烧时，管理出口烟气温度或废热回收机烟气处理设备的出口烟气温度，燃煤等固定燃料在固定床燃烧时的目标值没有设定。

### 2.4.3. 其他节能措施

火电厂其他的节能合理化对象如下：

- ①加热、冷却、传热的合理化：给水系统、热交换器等
- ②防止辐射、传导等造成的热损热：隔热标准等
- ③废热回收利用：烟气、废热
- ④热的动力变换等：热电联产
- ⑤防止电气损失：变压器效率、改善功率因数、受变电
- ⑥改变电气的动力等：电动机的空转、需要系数、台数控制

## 2.5. 燃煤火力发电厂的主要环保措施

燃煤火力发电厂的环保措施大致分为地球环境保护措施和保护地区环境措施两大类。保护地球环境的措施之一就是控制与 21 世纪面临的全球气候变暖这一最大课题相关的 CO<sub>2</sub> 排放。现在采取的措施有提高发电效率、扩大非化石燃料的使用等控制排放源、减少耗电量及负荷均一化。

地区环保措施如图 2-2 所示，需多方面采取措施：

<b>大气污染防治措施</b>	SOx: 燃料的低S化、烟气脱硫设备 NOx: 低N燃料、改善燃烧方法、烟气脱硝设备 烟尘: 优质燃料、高性能除尘设备 煤尘飞散: 室内储煤、洒水设备
<b>水质保全措施</b>	污水: 污水处理设备 温排水: 深层取水、表层水注排水、热回收 漏油: 拦油栅、输油臂
<b>废弃物措施</b>	燃煤灰渣: 填埋处理、资源化 脱硫石膏: 有效利用
<b>噪音、振动防治措施</b>	低噪音设备、隔音壁、设备的合理安置
<b>与周边环境的和谐措施</b>	绿化: 栽种花草植物 景观: 设备安装、形状、色彩的搭配

图 2-2 燃煤火力发电厂的主要地区环保措施

## 2.6. 窒素酸化物測定基準

对于各设备排放的含有大气污染物质的烟气，日本在《大气污染防治法》中，根据各设备的烟气量和是否采取总量控制等，规定了监测分析的频率。

### 2.6.1. 分析方法

日本认可的烟气中的 NO<sub>x</sub> 分析方法有 JIS 规定的化学分析法（JIS K0104）和连续分析法（JIS B 7982）。表 2-7 为 NO<sub>x</sub> 化学分析法的类型及概要，表 2-8 为连续分析法的自动测定设备种类及测定范围等。

表 2-7 NO<sub>x</sub> 化学分析法的类型及概要

分析法的类型	定量范围	vol ppm (mg/m <sup>3</sup> )	对象成分气体
Zn-NEDA 法	真空烧瓶法	1-50(2-100)	NO + NO <sub>2</sub>
	圆筒法	5-250(10-510)	
NEDA 法	真空烧瓶法	3-500(5-1000)	NO + NO <sub>2</sub>

	圆筒法	7-1200(13-2500)	
离子色谱法	真空烧瓶法	4-1400(8-2800)	NO + NO <sub>2</sub>
	圆筒法	20-7000(40-145000)	
PDS 法	真空烧瓶法	10-300(20-620)	NO + NO <sub>2</sub>
	圆筒法	12-4200(24-8400)	
萨尔茨曼分光光度法	5-200(10-400)		NO <sub>2</sub>

表 2-8 连续分析法的自动计测器的种类和测定范围等

测量仪器的种类	测定范围 vol ppm	测定对象物质	适用条件
化学发光法	0-10 0-2000	NO NO <sub>x</sub> * <sup>1</sup>	适用于可忽视同时存在的 CO <sub>2</sub> 的影响时或可消除其影响时
红外线吸收法	0-19 0-2000	NO NO <sub>x</sub> * <sup>1</sup>	适用于可忽视同时存在的 CO <sub>2</sub> 、SO <sub>2</sub> 、水分、炭化氢的影响时或可消除其影响时
紫外线吸收法	0-50 0-2000	NO NO <sub>2</sub> NO <sub>x</sub> * <sup>2</sup>	适用于可忽视同时存在的 SO <sub>2</sub> 、炭化氢的影响时或可消除其影响时

\*<sup>1</sup> 先将 NO<sub>2</sub> 转换成 NO 后再测定

\*<sup>2</sup> NO 和 NO<sub>2</sub> 各测定值的和量

### 2.6.2. 监测管理

大气污染相关的环境监测因各种各样的变动因素（例如：采样、监测设备、试剂、称重、计算等）会产生误差。即使这些变动因素保持固定不变，也会因为监测人员的不同而产生差异，平均值也会发生变化。日本有计量法和环境计量师制度，对于监测设备建立了 ISO9000（质量管理体系），设备的设计、生产、购买、销售等各个环节都应用了认证管理制度。表 2-9 为监测、分析精度评估和管理例。环境计量师是一种国家资格，主要从事大气、水质等的环境计量证明和计量管理等工作。环境计量师要求具备环境、计量相关法规、化学知识、化学分析、浓度计量、计量管理技术等知识。

表 2-9 监测、分析精度的评估及管理

管理项目	管理内容
测定、分析设备的评估与维护管理	设备的校准、检测限、线性、重复性等的评估、读数装置的维护管理
分析法的证实	检测、定量限度、空白、不确定性的确定
标准作业程序	日常的设备、分析法的评估

SOPs:Standard operating Procedure	试剂的测定、技能培训、检修维护手册
数据评估与管理	灵敏度波动、空白的评估 结果、条件等的记录、管理表等的使用及结果报告
外部精度管理	培训会、共同实验的参加及主办 交叉检验的实施 标准物质、试剂的使用、结果的报告披露

### 2.6.3. 日常监测

日本有很多区域对烟气排放达一定量以上的工业锅炉，就其污染物排放情况及是否正常运行实施日常、连续的在线监测，对于小输出功率的自备发电锅炉，要求监测项目有 NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、CO、N<sub>2</sub>O 等。图 2-3 为这类工厂应用的烟道烟气自动分析仪。这一设备是根据 JIS《烟气自动检测仪》中规定的监测原理开发的分析设备，采用非分散红外线分析法、磁压式氧分析仪等方法，用途广泛，是中国计量法审定 No.2006-C118 仪器（NO<sub>x</sub> 监测范围：100-5000ppm、其他还监测 SO<sub>x</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>）。图 2-4 同样用非分散红外线分析仪最多可同时连续测量包括烟气中 NO<sub>x</sub> 等在内的 5 种成分（NO<sub>x</sub> 监测范围：100-5000ppm，2 个有效距离）



图 2-3 烟道烟气自动分析仪（非分散红外线吸收法）  
(出处：堀場制作所)



图 2-4 红外线烟气分析仪（非分散红外线吸收法）  
(出处：富士电机系统)

## 2.7. 大气污染防治的管理机构等

### 2.7.1. 公害防治管理员制度及机构等

法定的公害防治管理员制度是对日本大气环境改善做出巨大贡献的制度。像工业锅炉那样的工业锅炉煤烟排放达一定量以上的工厂、特定工厂必须设立选任具有法定资格的管理员或公害防治机构，并在都道府县知事处备案。

#### 【对象行业】

- 制造业（包括物品的化工业）
- 电力
- 供气
- 供热

机构体系由应成为特定工厂公害防治措施负责人的“公害防治总负责人”和分管公害防治措施技术的“公害防治管理员”组成。公害防治管理员是具有资质的人员，根据烟气量及排放有害物质的种类可选任不同等级资质的人员。

### 2.7.2. 公害防治管理员的工作

锅炉方面的公害防治管理员管理的大气污染技术工作如下：

- 检查使用的燃料
- 检修煤烟产生设备(锅炉)
- 操作、检修及修理煤烟处理设备及其配套设备
- 监测煤烟量或煤烟浓度并记录监测结果
- 检修、修理监测设备
- 发生事故时采取应急措施
- 降低煤烟量或煤烟浓度、制限设备使用及其他必要措置

作为 NO<sub>x</sub> 排放设备公害防治管理员完成工作的必要条件，要求其应具有要求学历和工作年限外，还应具备以下基础知识：

- 公害概论：大气污染的现状、大气污染的产生机理、大气污染的影响等相关知识
- 大气污染相关法规
- 燃烧、煤烟防治技术：燃料、燃烧计算、防治技术、NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub> 去除技术
- 煤烟的扩散：扩散现象、扩散理论、
- 除尘/集尘技术
- 监测技术：燃料试验法、燃烧管理测量、NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub> 监测分析、烟尘监测、设备管理

## 2.8. 关于采取对策引进设备的补贴制度

1967 年制定的《公害对策基本法》第 24 条规定，“对于企业投资建设防止公害的设施，国家或者地方公共团体必须努力采取必要的金融、税收以及其他措施给予支持”。而且还规定“在构建前述的措施时，要特别考虑到中小企业”。根据这样的基本思路，为了促进污染发生源的企业采取防止公害措施，日本实施了补贴、公共金融、税制优惠措施、工厂搬迁及指导措施、技术指导提供信息、企业内部组织建设以及人才培养等各种措施。在这之后，有政府背景的机关进行了统合重组，机关团体的名称、事业内容频繁地发生了变动，但是在这里，按照当时的名称，我们介绍一下日本的产业公害对策非常活跃的 20 世纪 60 年代以后开展的主要工作。

### 2.8.1. 防止公害事业团的补贴

防止公害事业团是为落实政府对公害问题的补贴政策而在 1965 年成立的专业机构。1992 年法律修改后，防止公害事业团更名为“环境事业团”，2004 年又改名为“环境保护机构”，事业内容也进行了重新调整评估。同时，成立当初是属于通商产业省的下属单位，环境厅成立之后，转为由环境厅管辖。防止公害事业团实施的主要补贴项目如下。

### 2.8.1.1. 建设转让项目

对于建设防止公害设施技术、资金方面比较困难的企业及公共团体，事业团直接建设设施，完工后转让的项目。运营方式是：建设费用由政府提供低息贷款，转让后由委托方的企业及公共团体来偿还贷款给事业团。偿还期设施是 20 年以内，机械设备是 15 年以内，是低息贷款。具体的事业项目如下。

#### ① 共同防止公害设施

在同行业的工厂比较集中的地区，相比每个工厂和企业单独建设处理设施，共同建设一个设施的话有可能降低成本。出于这样的考虑，才会实施这种共同防止公害设施的建设转让项目。与大气有关的，比如煤烟处理设施、粉尘防止设施等，也成为建设转让项目的对象。

#### ② 集体建设建筑物

随着城市化的发展和产业结构的变化，难以确保空间来建设防止公害的设施，会造成邻近地区公害已经是不可避免的。因为这些理由，因此为多家企业集体搬迁，准备搬迁土地、平整土地、建设厂房以及建设防止公害设施、然后进行转让的项目。这个项目中也有可能包括在搬迁后的地点建设共同防止公害设施。

#### ③ 缓冲绿地

为了防止从工业地带排放的煤烟和粉尘等造成公害问题，非常有效的做法是在工业区和居民区之间种植缓冲绿地，将两个区隔开。大规模的建设绿地需要大量的费用，事业团代替地方公共团体来建设绿化地带，然后再转让给地方公共团体。

#### ④ 大气污染对策绿地

树木能吸收污染物质，具有净化大气的功能。利用树木的这个优点，为了缓和大气污染开展绿地建设项目。这个项目不仅包括在工厂周边建设绿地，还包含在城市区域内建设大规模的绿地项目。

图 2-5 显示建设转让项目成果的推移。

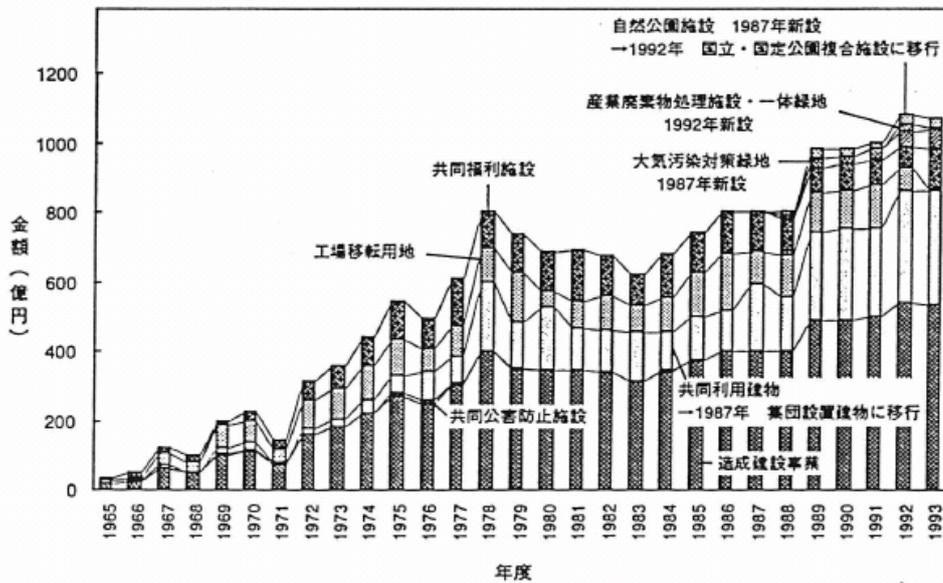


图 2-5 建设转让项目成果的推移

(出处:《环境事业团的概要和事例》, 环境事业团, 1994)

### 2.8.1.2. 融资项目

对企业及公共团体发放低息贷款, 来促进大家开展防止公害的活动。偿还事业团贷款, 除了一部分项目外, 一般设施在 20 年以内, 机械设备在 15 年以内。可以融资的设施和项目如下。

#### ① 防止产业公害设施

单独或者复数的工厂建设共同利用的防止公害设施, 对其所需费用发放贷款。防止公害设施里面包括煤烟处理设施和粉尘防止设施等防止大气污染的设施。

#### ② 控制特定氟利昂排放设施

为了防止对臭氧层的破坏, 对于企业建设控制特定氟利昂及卤排放的设施或者再生利用设施发放贷款。

图 2-6 所示实际融资金额的推移。

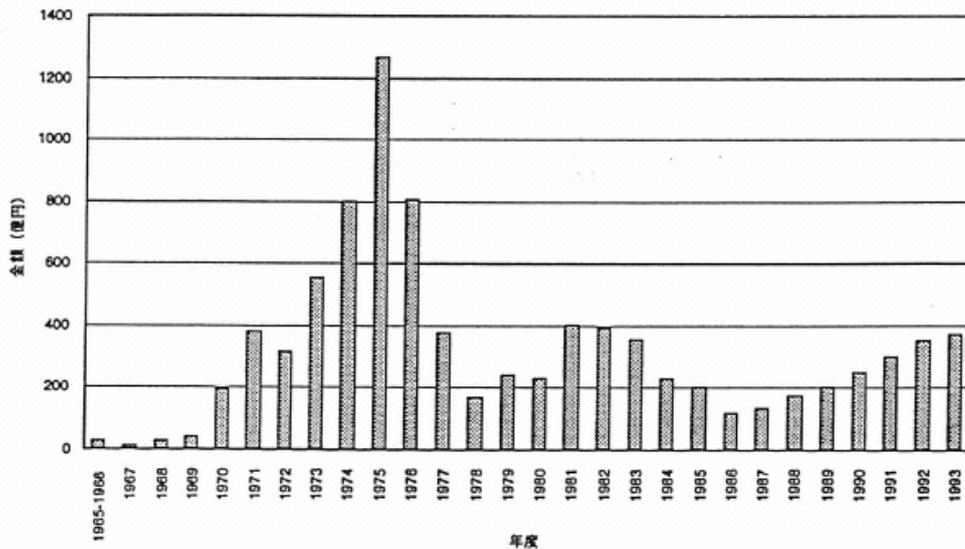


图 2-6 融资金额的推移

(出处:《环境事业团的概要和事例》, 环境事业团, 1994)

## 2.8.2. 对中小企业的融资

### 2.8.2.1. 中小企业金融公库

是对中小企业者发放贷款的由政府全额出资的金融机关。为了促进中小企业的增长和发展, 向中小企业发放一般金融机关不愿意发放的设备资金和长期周转资金。1965年开始, 为建设防止产业公害的设施以及实施防止公害的工厂搬迁等所需资金, 发放特别利息的贷款。防止大气污染方面, 如集尘除尘装置以及改善燃烧设施、测量分析装置等也是融资的对象。

### 2.8.2.2. 国民金融公库

国民金融公库是政府全额出资的金融机构, 目的在于向很难得到银行及其他一般金融机关的资金融资的国民大众提供必要的项目资金。从1970年开始, 为建设防止产业公害设施发放特别贷款。贷款发放的对象企业及设施, 与中小企业金融公库的情况大体相同。

### 2.8.2.3. 中小企业事业团

依据《中小企业事业团法》作为综合性地实施中小企业对策的机构, 由原来的中小企业振兴事业团和原来的中小企业共济事业团合并而成立了中小企业事业团。针对防止产业公害的相关项目, 实施资金补贴。

- 共同防止公害项目
- 防止公害设施共同利用项目
- 工厂等集群化项目(建设工业园等)
- 工厂共同化项目(共用工厂的建设)
- 共同设施项目

#### 2.8.2.4. 中小企业设备近代化资金

依据《中小企业近代化资金等助成法》规定，以为中小企业设备近代化做出贡献为目的，在各都道府县的窗口为个别的中小企业发放贷款。对象包括：通商产业大臣指定的行业种类的企业、及通产局长批准都道府县知事(省长)指定的地方产业振兴行业的企业为对象，对防止公害设施发放贷款。

#### 2.8.3. 日本开发银行的融资

日本开发银行是为了提供长期的设备资金，促进经济的重建以及产业开发，为一般金融机构开展的金融业务进行互补、或者奖励而成立的银行。自 1960 年开始发放防止产业公害贷款，针对再生资源设施和节能设施等范围广泛的环境对策，实施贷款和贴息、债务担保等业务。

#### 2.8.4. 税收方面的措施

作为针对防止公害对策的税收方面的优惠措施，国家税收以及地方税收各采取了一些措施。

##### 【国家税收】

- 防止公害相关特定设备等的特别折旧
- 使用年限的特例
- 特定资产的以旧换新时的征税特例

##### 【地方税收】

- 固定资产税的非课税措施
- 固定资产税的征税标准的特例
- 特别土地保有税的非课税
- 企业税的特例

### 2.9. 技术普及与技术开发活动

在日本围绕工业锅炉开展的技术普及和环保活动中，民间团体和学会在各种制度的贯彻普及及技术研发发挥了巨大作用。行政部门依靠民间团体和研发机构提供信息，与之进行协商，以求制定合理的标准和措施的做法获得了一致好评。特别是在制定大气污染防治措施时，民间团体和学会在 NEDO 等特殊法人、产业界、行政部门及学会相关的信息活动以及先进基础技术的研发中起到了带头作用。设备生产厂家及锅炉用户所属的锅炉、环境领域的各行业团体不仅参与会员培训、人才培养以及业界可共享的基本技术开发方法，而且还参与调查、信息活动乃至对国家建言献策。特别是在提高日本的锅炉、脱硝设备等设备行业技术方面，生产厂家所作出的贡献得到了一致认可。此外，通过开展活动共享行业信息对锅炉制造技术

及大气污染治理技术的相互启发和搞活市场也作出了巨大贡献。工业锅炉相关的主要团体及其活动见表 2-10 工业锅炉相关的主要团体及其活动。

表 2-10 工业锅炉相关的主要团体及其活动

区分	名称	活动	会员数
学会	(一社)日本机械学会	机械工学 原动机、材料、热力学等的研究	法人 714 个人 30612
	(公社)大气环境学会	大气环境的研究	
	(一社)日本能源学会	能源研究 燃料、燃烧、工艺学	法人 241 个人 1444
	日本燃烧器研究会	燃烧技术、节能研究	法人 53
	(公社)化学工学会	能源、环境、资源等的研究	法人 282
行业协会	(一社)日本产业机械工业会(JSIMM)	锅炉制造、环境技术相关活动	法人 190
	(一社)日本锅炉协会(JBA)	工业锅炉相关活动 技术普及、质量、检查、人材培养	个人 7800
	(公财)日本小型贯流锅炉协会	小型贯流锅炉相关活动	
	(一社)锅炉维修安装协会	锅炉安装公司的行业活动	法人 392
	(一财)节能中心(ECCJ)	节能诊断、研修、信息 国际合作项目	法人 2339
	(一财)燃煤能源中心(J·COAL)	燃煤利用技术的开发、调查、普及 国际合作项目	法人 115
	(独行)新能源产业技术综合开发机构(NEDO)	高性能锅炉的开发、洁净煤技术的开发	—
	(一社)产业环境管理协会(JEMAI)	环境监测、环境管理、公害防治 管理员考试、讲座、国际合作项目	法人 51
	(一社)日本环境测定分析协会	环境计量师、分析公司的各项活动	法人 32
	(公社)日本环境技术协会(JETA)	大气/水监测技术的体系化、监测 设备的改良、国际合作等	法人 34
(公财)北九州国际技术合作协会 KITA 环境合作中心	环境产业的国际合作、培训项目 清洁生产	福冈县下 属相关机	

			构
	(公财)国际环境技术转移中心 (ICETT)	环保相关的技术转移、指导、调查、普及、研究	中部地区 相关机构

### 3 燃煤火力发电厂和氮氧化物的特性

#### 3.1. 燃煤火力发电的特性

##### 3.1.1. 锅炉类型

公共电力企业使用的燃煤发电锅炉基本上都是贯流水管锅炉。自备电厂燃煤发电锅炉根据蒸汽规格、规模和用途，分别使用自然循环式、强制循环式或贯流式管理等。锅炉一般分为辐射传热（燃烧室）和接触传热两大部分，由过热器、再热器、省煤器等锅炉压力部分、空气预热器烟气处理设备和辅机等构成。

除部分废热回收发电锅炉外，几乎所有的发电蒸气都是以过热蒸气的形式被送入汽轮机。因此，炉压升高，高压下汽水密度差下降，自然循环推动力下降，需要采用强制流动。大输出功率发电锅炉几乎都是亚临界压力锅炉，由气泡形成膜态沸腾等，因此使用强制贯流方式。

电厂一般采取的负荷波动的方式来应对夏季用电高峰，为了吸收这一负荷波动，公共火电厂最近采用了将定压灌流改为变压贯流来应对中间负荷的方法。

强制循环和贯流变压等方式在合理、稳定分配火炉壁管内的水量方法、维持控制管壁温度的方法以及传热管材料等方面都需要高度的设计技术和专有技术，这些技术多为锅炉生产厂家的专利技术。图 4.1、图 4.2 为自然循环锅炉和强制循环辐射锅炉的水、蒸气的流程概念图：

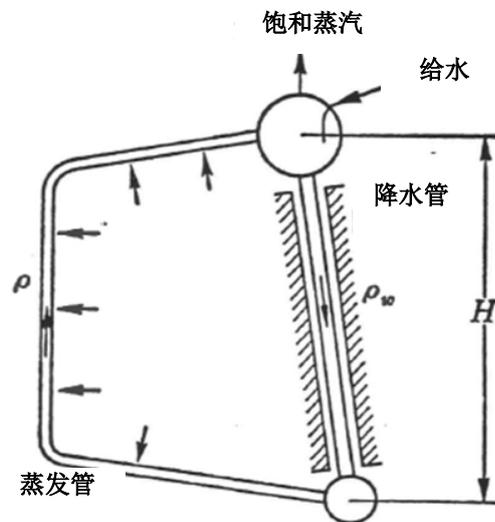


图 3-1 自然循环锅炉水循环模式图

(出处：筑波大学 锅炉的概要)

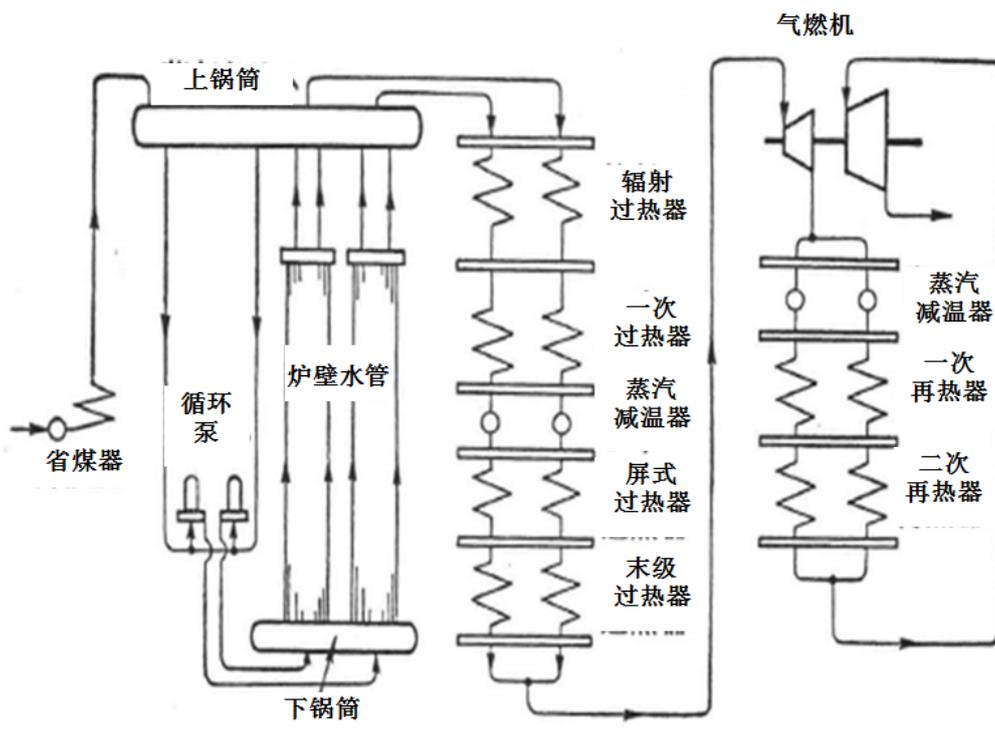


图 3-2 强制循环辐射形锅炉的水、蒸气系统例  
 (出处: 筑波大学 锅炉的概要)

图 3-3、图 3-4 为自备电厂煤粉锅炉应用最多的典型自然循环辐型锅炉和强制循环锅炉的结构。

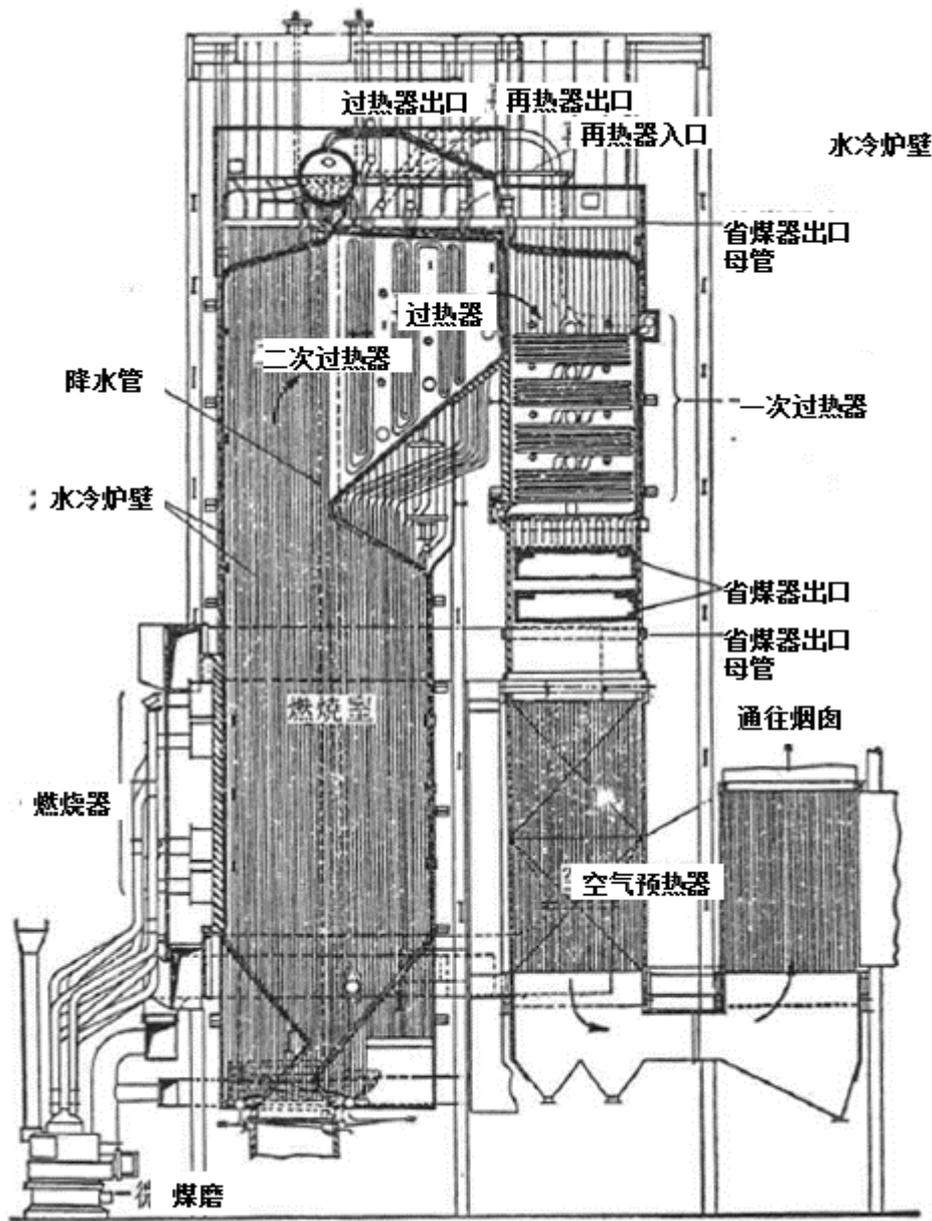


图 3-3 自然循环辐射锅炉  
(出处: 筑波大学锅炉的概要)

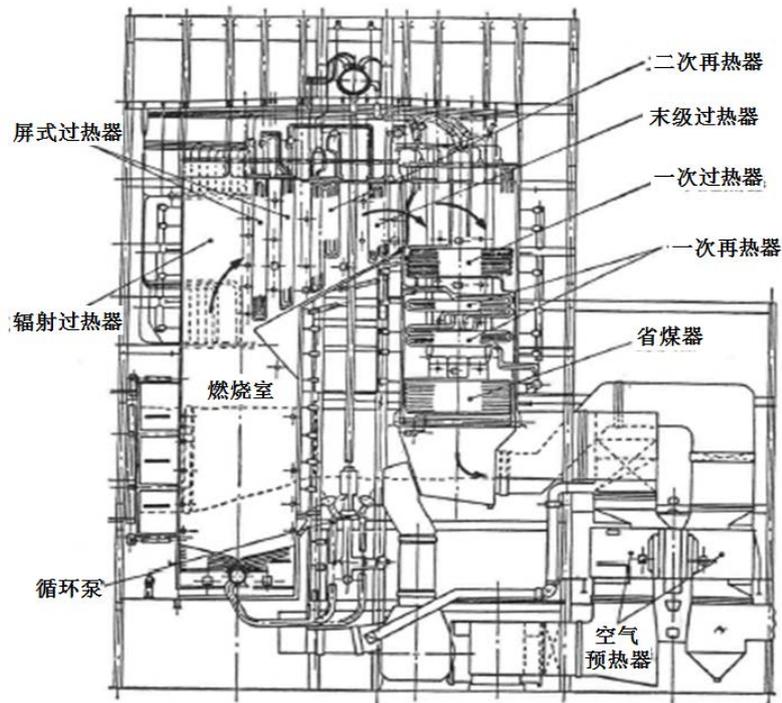


图 3-4 强制循环锅炉的结构

(出处: 筑波大、锅炉的概要)

图 3-5 为日本最初的超临界压力 500MW 煤粉锅炉 (电源开发松岛), 图 3-6 为再热蒸气温度 593℃ 为 700MW 煤粉锅炉 (中部电力碧南 3 号)、图 3-7 为蒸气温度、再热蒸气温度均为 600℃ (1998 年)、1000MW 600℃/600℃ 的东北电力原町 2 号机, 图 3-8 为锅炉出口 NO<sub>x</sub> 排放浓度 < 175ppm 的 700MW 电厂, 图 3-9 为 NO<sub>x</sub> 排放浓度 < 150ppm 的 1050MW、25MPa、600℃/610℃ 电源开发橘湾火电厂的锅炉。图 3-10 为自备电厂用褐煤、生物质混烧循环流化床锅炉, 图 3-11 为燃煤木质废材循环流化床锅炉的设备系统。流化床锅炉主要作为自备电厂燃煤发电广泛使用, 具体请参照 2014 年 7 月 30 日提交的报告 (附件 1)。

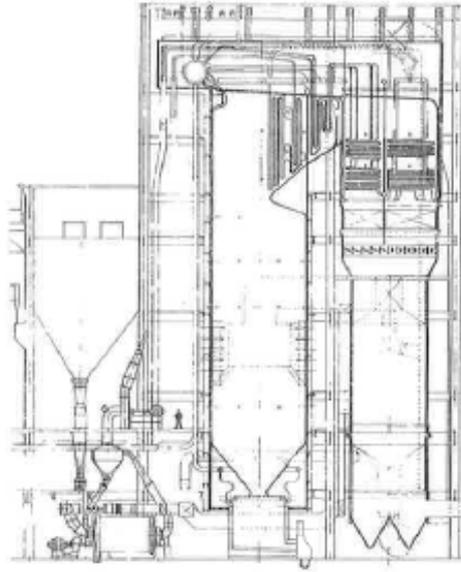


图 3-5 电源开发 松岛 1 号锅炉

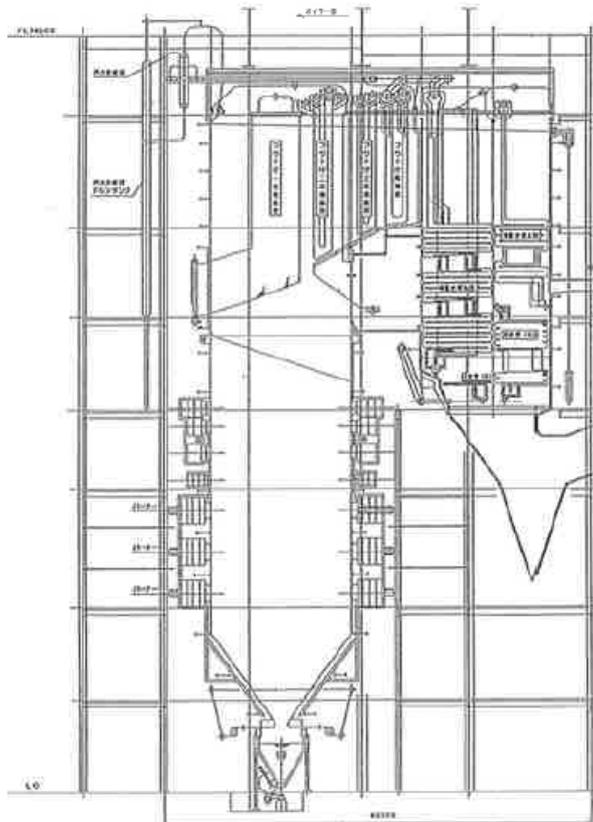


图 3-6 中部电力碧南 3 号锅炉

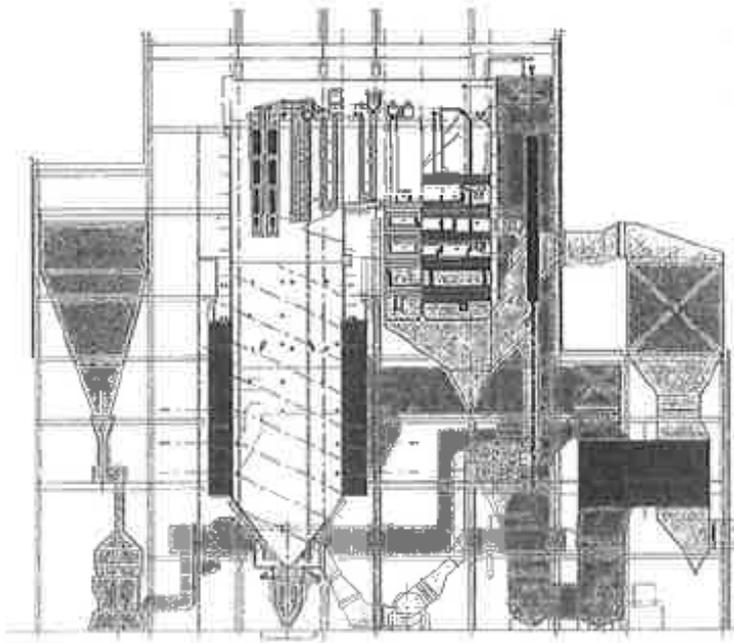


图 3-7 东北电力原町 2 号锅炉

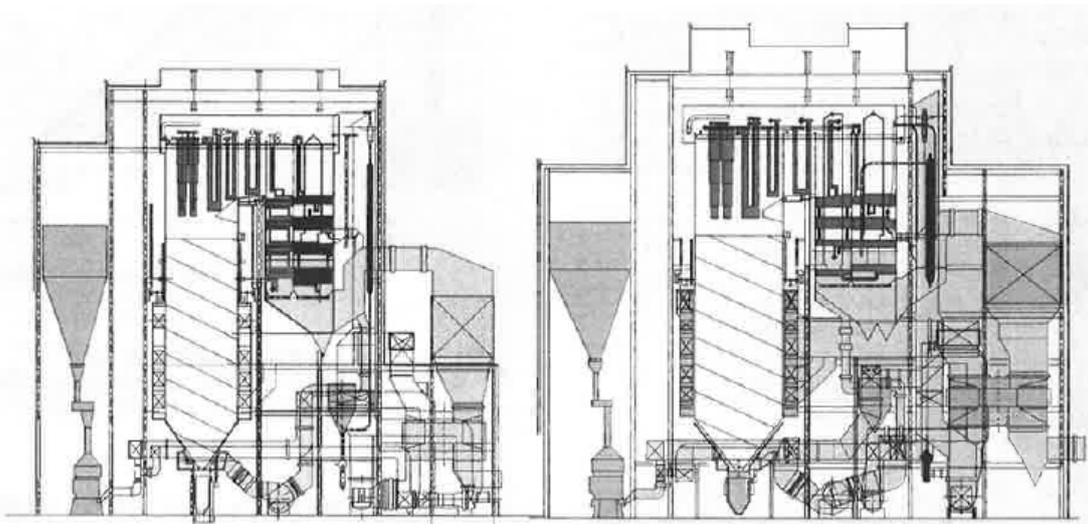


图 3-8 四国电力橘湾电厂锅炉（左图）

图 3-9 电源开发橘湾火电厂 2 号（右图）

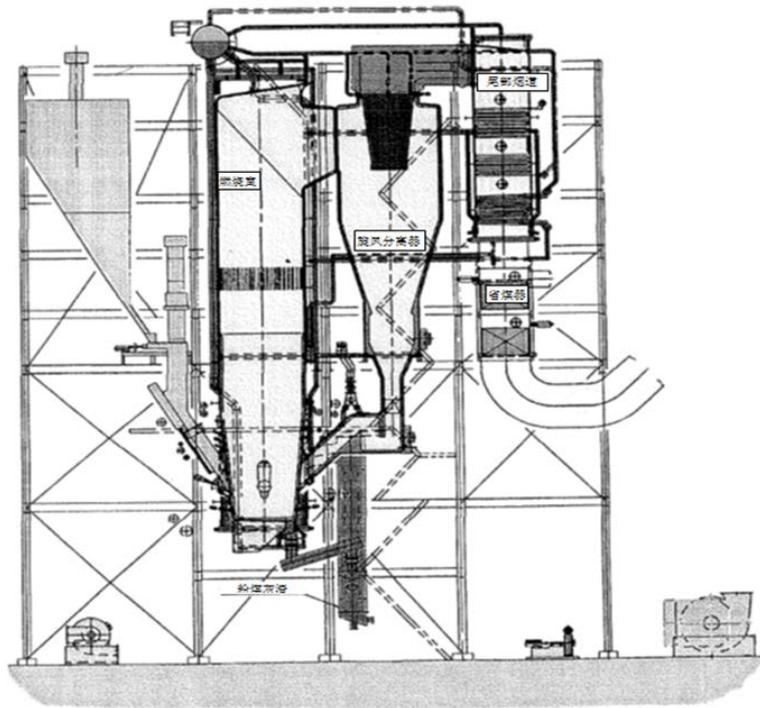


图 3-10 褐煤+生物质混烧循环流化床锅炉

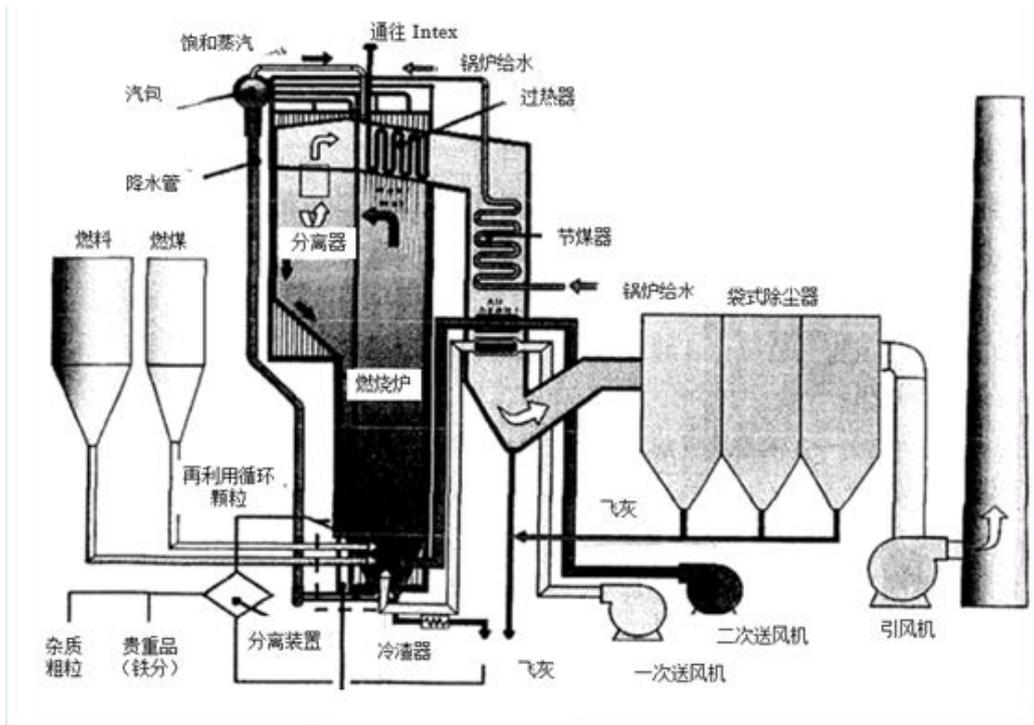


图 3-11 循环流化床锅炉设备系统

(出处: JSIM)

### 3.1.2. 蒸气条件

小中型自备电厂火力锅炉多采用锅筒自然循环或强制循环、亚临界压力为 (sub.SC)、3-6MPa 等级的低压锅炉，而包括售电企业在内的公共电力企业多采用定压贯流或变压贯流、超临界 (SC) >22.4MPa、<566℃、超超临界 (USC) >566℃的锅炉。(参照表 4.1)

### 3.1.3. 设备结构

图 4.12 为燃煤发电的一般设备结构，图 4.13 为增压流化床燃烧复合发电设备结构。

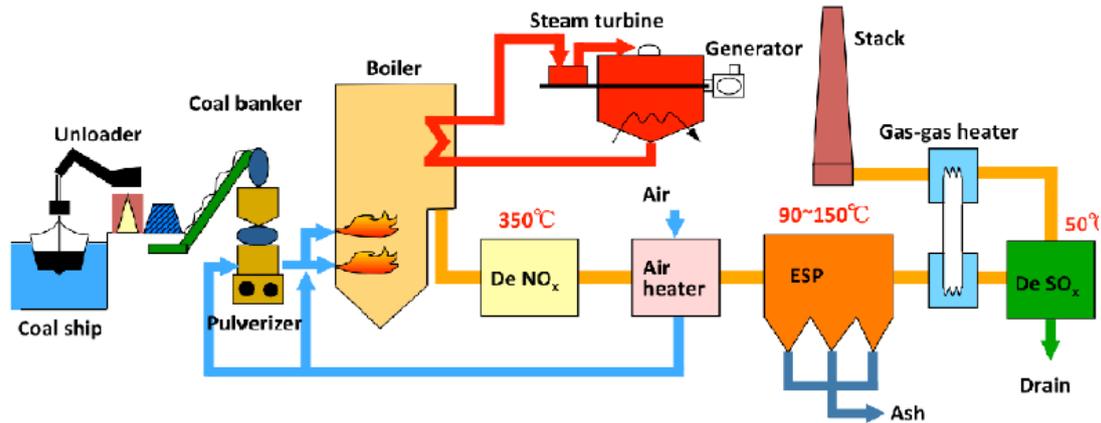


图 3-12 燃煤发电一般设备结构  
(出处: 渡边火力发电煤燃烧技术)

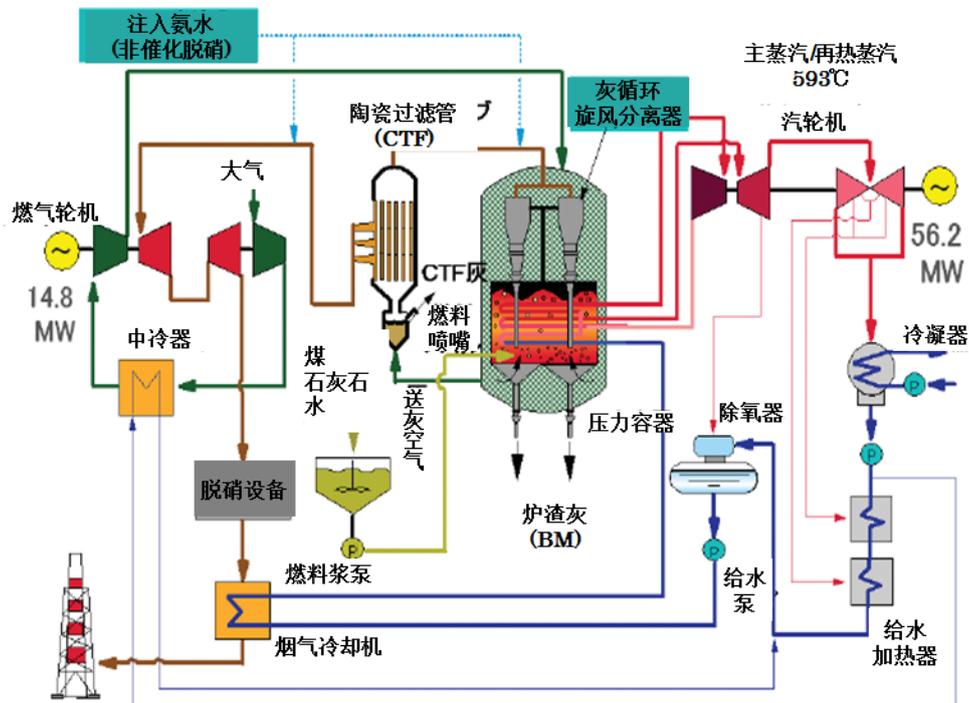


图 3-13 增压流化床燃烧复合发电设备结构  
(出处: CCUJ)

### 3.1.4. 近些年开始运行的公共燃煤电厂锅炉

表 4.1 为日本国内 1990 年-1999 年开始运行的公共燃煤电厂锅炉。这些锅炉运行全部都达到所在地区大气环境等标准。

表 3-1 1990 年-1999 年开始运行的公共燃煤电厂锅炉

电厂名	类型	燃料	容量 (t/h)	蒸气规格 *	生产厂家
电源开发松浦 I	贯流变压	燃煤 重油	3170	24.1 / 538/566	Bubcock-Hitachi
北陆电力敦贺	贯流变压	燃煤	1520	24.1 / 566/566	三菱重工
中部电力碧南 I	贯流变压	燃煤 重油	2300	24.1 / 538/566	三菱重工
酒田共同火力	强制循环	燃煤 重油	1145	16.6 / 566/538	三菱重工
中部电力碧南 II	贯流变压	燃煤	2300	24.1 / 538/566	三菱重工
中部电力碧南 III	贯流变压	燃煤	2250	24.1 / 538/566	IHI
东北电力能代	贯流变压	燃煤	1920	24.5 / 538/566	Bubcock-Hitachi
冲绳电力具志川 I	自然循环	燃煤	520	16.6 / 566/538	川崎重工
相马共同火力 I	贯流变压	燃煤	3080	24.1 / 538/566	Bubcock-Hitachi
电源开发若松	PFBC 贯流	燃煤 轻油	146.57	10.1/2.6 593/593	IHI
北陆电力七尾 I	贯流变压	燃煤	1510	24.1/566/593	Bubcock-Hitachi
冲绳电力具志川 II	自然循环	燃煤	520	16.6 / 566/538	Bubcock-Hitachi
九州电力苓北	贯流变压	燃煤 重油	2300	24.1 / 566/566	IHI
相马共同火力 II	贯流变压	燃煤 重油	3080	24.1 / 538/566	三菱重工
电源开发松浦	贯流变压	燃煤	2950	24.1 593/593	Bubcock-Hitachi
东北电力原町 I	贯流变压	燃煤 重油	2970	24.5 / 566/593	三菱重工
北海道电力苦东	PFBC 强制循环	燃煤	195	16.6 566/538	三菱重工
中国电力三隅	贯流变压	燃煤	2900	24.5 / 600/600	三菱重工
东北电力原町 II	贯流变压	燃煤	2890	24.5 / 600/600	Bubcock-Hitachi
北陆电力七尾 II	贯流变压	燃煤	2120	24.1 / 593/593	IHI

(\* ) 蒸气规格 压力 MPa /温度℃ (出处: 火力核能发电)

### 3.1.5. 火力发电方式

火力发电多采用煤炭直接燃烧发电方式，技术成熟，可靠性高。并且，还可与其他燃料混烧，适用性强。日本为了实现未来高效发电和提高发电的环保性，开始应用 LNG 燃气轮机联合循环发电和整体煤气化联合循环发电。表 3-2 为媒体直接燃烧发电与其他发电方式的比较。

表 3-2 火力发电方式的比较

发电方式	媒体直接燃烧	LNG 燃气轮机联合循环	整体煤气化联合循环 IGCC
燃料	煤粉等	LNG	煤粉
设备结构	锅炉 烟气脱硝脱硫设备 除尘器 蒸汽轮机发电机	空气压缩机 燃气轮机发电机 废热回收锅炉 蒸汽轮机发电机 烟气脱硝设备	气化炉 焦回收装置 气体净化器 燃气轮机发电机 升压器 废热回收锅炉 蒸汽轮机发电机
效率	高(40-43%)	高(44-60%)	高(42%)
实际应用等	多	多	少

## 3.2. 煤燃料的特性、种类等

### 3.2.1. 燃煤的燃料特性

燃煤与其他重油、燃气等化石燃料相比，不同的生成条件显现出多样的物理性和化学性，因此，煤种不同，其燃烧过程（着火、燃烧性）以及燃烧后的烟气组分也不同。燃煤锅炉的燃料特性涉及到一般的合同条件、对锅炉的合理评估等，根据下列工业分析、元素分析、灰分组分析值等来确定：

- 总水分：燃煤到货时保有的水分含量（固有水分+表面附着湿分）
- 粒径越小湿分越大。
- 灰分：燃烧残渣，无机矿物质含量的标准。
- 挥发分/固定碳：燃料的有效成分，一般来说“固定碳/挥发分=燃料比”，作为表示燃烧性的指标。固定碳是因 C、挥发分是因化合水分、挥发性成分、热分化生成的挥发分等。挥发分高的煤易着火、火焰长、易燃烧。固定碳多的煤相反形成炽烈燃烧，燃烧速度慢，燃烧方式受到制约。

- 总硫份、总氮份：是烟气中的大气污染物——SO<sub>x</sub>·NO<sub>x</sub> 的生成源。硫份有有机硫、黄铁矿硫、硫酸盐硫等。无机硫可通过选煤去除硫份。
- 发热量：燃料评估中最重要的值。总发热量中由于含有水分、氢形成的水蒸气凝结潜热，一般根据实际利用的低位发热量（真发热量）来评估。
- 灰的溶解性：燃烧过程中灰在炉内或燃烧器中软化、溶解，生成熟料、炉渣的性状。灰的组分不同，软化温度、溶解温度、溶流温度也各异。一般 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等酸性成分多时熔点高，煤粉燃烧时建议溶解温度>1300℃。流化床燃烧时，由于燃烧温度低，不存在问题。
- 污垢热阻：煤灰凝结附着在过热器或再热器上的现象，燃煤中 Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、Cl、CaO 等含量多时，硫份也会形成低熔点的硫酸络盐，促进污垢的产生。
- 粉碎性：煤粉燃烧时重要的特性，根据 ASTM 规格的 HGI (Hard-grove Grindability Index) 进行评估。建议煤粉燃烧>45。
- 磨损性：飞灰造成的受热面磨损等是粉碎机磨损的原因，需注意燃煤中的石英、方石英、多铝红柱石、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等矿物质。
- 粒径：最大粒径、粉碎率等影响燃烧性。粒径大小影响燃烧器的喷雾特性、炉排燃烧和流化床燃烧时的燃烧速度。
- 粘结性（结块性）：指燃煤加热后膨胀，形成块状物质的性质，根据煤的粘结指数判断。粘结指数高的燃煤，可导致燃烧器喷嘴的粘结堵塞和未燃煤粉增加。炉排燃烧时，可形成燃烧障碍。

### 3.2.2. 煤炭等级

表 3-3 为 ASTM 根据燃煤的发热量、固定碳、挥发分、结块性，按碳化的进化顺序进行的分类：

表 3-3 煤炭等级 (ASTM)

Class	Group	固定碳 % (*)	挥发分 % (*)	发热量 Mcal/kg <sup>(+)</sup>	结块性
I 无烟煤	高无烟煤	98≤	≤/2	—	无
	无烟煤	92≤/ <98	2 </ ≤8	—	无
	半无烟煤	86≤/ <92	8 </ ≤14	—	无
II 烟煤	低挥发分烟煤	78≤/ <86	14 </ ≤22	—	有
	中挥发分烟煤	69≤/ <78	22 </ ≤31	—	有
	A 高挥发分烟煤	<69	31 <	7.78≤	有
	B 高挥发分烟煤	—	—	7.22≤/ <7.78	有
	C 高挥发分烟煤	—	—	6.39≤/ <7.22	有

				$5.83 \leq / < 6.39$	有
III 亚烟煤	A 亚烟煤	—		$5.83 \leq / < 6.39$	无
	B 亚烟煤	—		$5.28 \leq / < 5.83$	无
	C 亚烟煤	—		$4.61 \leq / < 5.28$	无
IV 褐煤	A 褐煤	—		$3.5 \leq / < 4.61$	无
	B 褐煤	—		$< 3.5$	无

(\*: 干煤/无矿物质基      (+: 恒湿煤/无矿物质基)

### 3.3. 燃烧方式

燃煤发电锅炉的燃烧方式分类煤粉燃烧、炉排燃烧（块煤、粉煤）、流化床燃烧（块煤、粉煤）三种。其中，炉排燃烧适用于小输出功率自备电厂发电，流化床燃烧的鼓泡沸腾式适用于劣质煤、生物质等混烧的小输出功率自备电厂发电。

循环流化床燃烧和增压流化床燃烧适合于中大输出功率发电。表 3-4 为燃煤发电锅炉燃烧方式的特点：

表 3-4 燃煤发电锅炉燃烧方式的特点

燃烧方式	特点
煤粉燃烧（燃烧器）	用粉碎机将煤粉碎，将煤粉和助燃空气一起喷入炉内，使其悬浮燃烧的方式。燃烧过程分为挥发分燃烧和焦炭燃烧两部分，炉内喷雾方向和形式有很多种，适用于所有大小型的锅炉。 煤粉燃烧的控制 NO <sub>x</sub> 技术已经很成熟，商用业绩很多。
炉排燃烧	燃煤等固体燃料在固定床及移动床上进行燃烧的方式，适用于小型燃煤发电锅炉。从床下供给助燃空气，在火床上面进行燃烧。 对燃煤的燃料比和粒径有限制。 NO <sub>x</sub> 控制技术方面限制较多，削减量有一定的限度。
流化床燃烧	鼓泡流化床：在流化燃烧室内与流化催化剂一起依靠高压空气是料层沸腾燃烧方式。 循环流化床：料层在燃烧室与床料高速上升燃烧，在尾部除尘器将未燃物回收再循环至燃烧室完成燃烧的方式。 增压流化床：将流化床放在压力容器内，用燃气轮机进行燃气发电、用蒸汽轮机进行蒸汽发电的联合发电系统。 无论哪种形式，NO <sub>x</sub> 的生成量少，仅炉内脱硫也可排放达标。

### 3.4. 氮氧化物 (NO<sub>x</sub>)

#### 3.4.1. 氮氧化物生成的基本原理及环境影响

NO<sub>x</sub> 根据其结合状态有 N<sub>2</sub>O、NO、NO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 等多种存在方式，工业锅炉燃料（固体、液体、气体）燃烧产生的主要有 NO 和 NO<sub>2</sub>。通常将这两种的化合物统称 NO<sub>x</sub>。

大气污染物多种多样。燃烧生成的大气污染物中，去除燃料中的硫份，即可防止 SO<sub>x</sub> 的生成。但是，NO<sub>x</sub> 的生成过程不同，即使去除燃料中的氮份，空气中的氮也会生成 NO<sub>x</sub>，因此，在采取 NO<sub>x</sub> 减排措施时，需考虑燃烧器和燃烧条件等多方面因素。

锅炉的燃烧气体中绝大多数为 NO，按容积比计算的话，NO<sub>x</sub> 占了 90-95%vol.。除此之外，烟气中还有 N<sub>2</sub>O、N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 等物质，但含量都非常低。

经确认，NO 排入空气中后被空气中的 O<sub>2</sub> 或 O<sub>3</sub> 氧化，使 NO/NO<sub>2</sub> 处于平衡状态。

根据起源，燃烧产生的 NO<sub>x</sub> 分为以下两种类型：

- ① Thermal NO<sub>x</sub>: 热反应引起的、空气中的 N<sub>2</sub> 分子在高温状态下氧化生成的物质。
- ② Fuel NO<sub>x</sub>: 燃料中所含的各种氮化合物引起的、在燃烧时生成的物质。
- ③

##### 3.4.1.1. Fuel NO<sub>x</sub> 的生成及变化

燃料中如果含有氮化合物 (Fuel N)，那么在燃烧过程中氮化合物会转换成 NO。这种 NO 被称为 Fuel NO，它与因空气中的 N<sub>2</sub> 形成的 NO(Thermal-NO)的生成过程不同。燃料的种类和产地不同，燃料中的氮含量也不一样，通常在表 3-5 所示的范围内：

表 3-5 燃料中的氮含有率

燃料种类	氮含有率 (重量%)
原油 (中东产)	0.09 - 0.22
C 重油	0.1 - 0.4
A 重油	0.05 - 0.1
轻油	0.02 - 0.03
煤油	0.0001 - 0.0005
油焦	1.12 - 2.59
燃煤	0.2 - 3.4
LPG、城市燃气	—
LNG	0.1
树皮	0.5
生物质 (木材、蔗渣、稻壳)	0.05-0.1
城市废弃物	0.4-0.6

出处: *Formation Mechanisms & Controls of Pollution in Combustion System, JSME 等*

图 3-14 为在煤燃烧的热分解过程中挥发分 NO 的生成及 Char-NO 的生成变化。

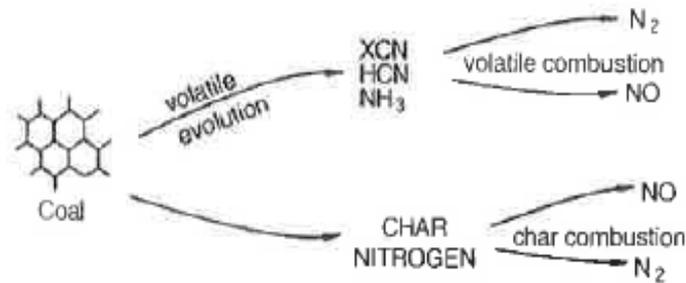


图 3-14 燃煤中氮份在燃烧过程中的变化

石油类中所含的氮氧化物有吡啶(Pyridine,  $C_5H_5N$ )、喹啉(Quinoline,  $C_9H_7N$ )等碱性物质及吡咯(Pyrrole,  $C_4H_5N$ )、吲哚(Indole,  $C_8H_7N$ )、咔唑(Carbazole,  $C_{12}H_9N$ )等非碱性物质的环状化合物。燃煤类燃料所含的氮化合物的结构虽不完全明确,但应该是杂环结合或链结合。这些结合很松散,在燃烧过程中容易释放出  $N$ 、 $NH_i$  ( $i=1,2$ ) 等化学物种,在温度较低的情况下也可以转换成  $NO$ 。

假设  $C_mH_{2n}$  类燃料的含氮量为 1%wt., 这 1%的氮份全部转换成  $NO$  时,在当量比 1 的理论干基助燃空气中  $NO_x$  为 1,500ppm·mol ( $O_2=0\%$ 换算)。燃煤及重质油燃烧时,应生成等量的 Fuel  $NO_x$ 。

气体燃料中虽然也含有氮份,但其形态几乎全部是  $N_2$ , 发生的变化与空气中的  $N$  相同。

影响 Fuel  $NO_x$  生成特性的主要因素有当量比、火焰温度、压力、燃料种类、氮化合物(fuel-N)的种类和浓度等。在锅炉的实际燃烧过程中,并非所有的氮份都转换成  $NO_x$ 。重油的转换率在氮份为 0.1-0.2%时为 60-40%。固体燃料生成的  $NO_x$  有挥发成分生成的 Volatile- $NO_x$  和焦炭中的  $N$  生成的 Char- $NO_x$ 。Volatile- $NO_x$  的  $NO_x$  转换率比 Char- $NO_x$  大。图 6.2 为 Fuel- $NO_x$  的生成、消灭过程。该图可大致分为三个部分:①Fuel-N 的挥发化过程(Volatile N 的生成)、②Volatile N 与  $O_2$  结合变成  $NO_x$ 、③Volatile N 生成的  $NO_x$  的还原过程。即: Fuel  $NO_x$  生成  $HCN \cdot NH_3$ , 其氮化合物生成  $NO_x$  时产生的氧化反应与生成的  $NO_x$  通过含氮化合物被还原转换成  $N_2$  的还原反应同时发生。图 6.3 为燃料中氮份与 Fuel  $NO_x$  的关系。

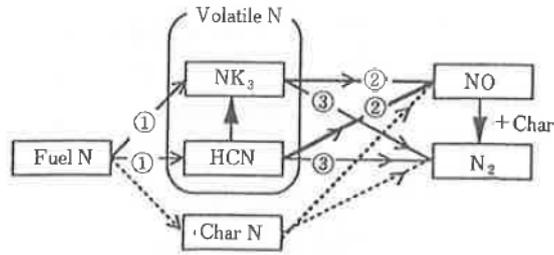


图 3-15 Fuel NO 的生成、消灭模式图  
(出处: 产业燃烧技术、ECCJ)

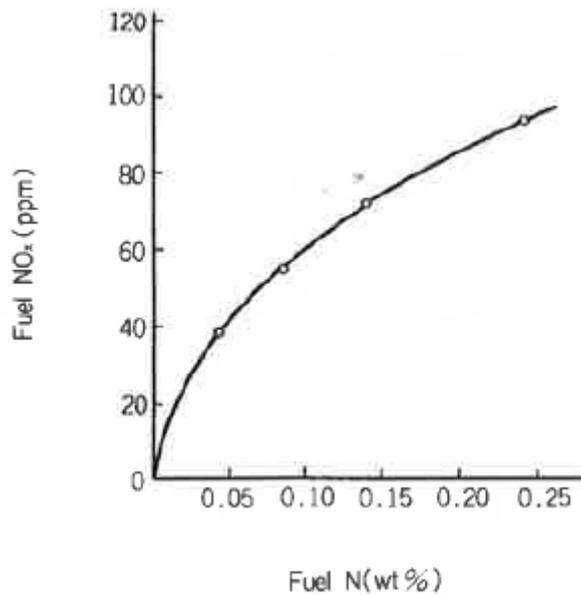
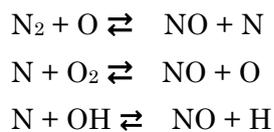


图 3-16 燃料中氮份与 Fuel NO<sub>x</sub> 的关系

(出处: 加藤、Low NO<sub>x</sub> Combustion Technology in Boiler, 纸 pa 技协志 No.45-5、1991)

### 3.4.1.2. 3 Thermal NO<sub>x</sub> 的生成

从生成特点上来看, Thermal-NO<sub>x</sub> 分为 Zeldovich-NO<sub>x</sub> 和 Prompt-NO<sub>x</sub>。Zeldovich-NO<sub>x</sub> 是在火焰尾部的高温燃烧气体中生成, 相对于空气过剩及燃料过剩的情况, O 原子应处于平衡状态, 可用下列 Zeldovich 机制说明:



燃烧温度越高、O<sub>2</sub> 浓度越高、在高温中滞留时间越长, Zeldovich-NO 生成量越多。根据这一原理, Zeldovich-NO 的控制方法有稀薄预混烧法、烟气再循环法、浓淡燃烧法、水喷射

/蒸汽喷射法、缓慢混合法、二级燃烧法等。

在燃烧反应强的火焰部位及其附近，出现一种用 Zeldovich 机制无法解释的 NO 快速生成的现象，称之为 Prompt-NO。这一现象是碳化氢燃料特有的现象，CO 和 H<sub>2</sub> 没有出现这种现象。Prompt-NO 的生成多出现在燃料过剩时，这是由于在燃烧过程中生成了 HCN 及 NH 等燃烧中间生成物。煤粉燃烧时，在挥发分燃烧区，颗粒周围的扩散火焰区生成的 Prompt-NO 约有几十 ppm，这在极低 NO<sub>x</sub> 的煤粉燃烧中不能忽视，但 Prompt-NO 的生成绝对量不多，通常 Zeldovich-NO 占绝大多数，采取减排措施时也应该以 Zeldovich-NO 为目标。

### 3.4.2. 氮氧化物减排技术的基本原理

工业锅炉 NO<sub>x</sub> 减排的基本技术分为以下两大类：

1、根据 NO<sub>x</sub> 的生成原理，以控制 NO<sub>x</sub> 生成为目的的技术：

- ① 降低燃料中的氮份；
- ② 低空气比燃烧（低 O<sub>2</sub> 浓度）；
- ③ 降低火焰温度；
- ④ 缩短气体滞留时间。

2、以降低去除烟气中 NO<sub>x</sub> 浓度为目的的技术：

- ① 将 NO<sub>x</sub> 还原成 N<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O；
- ② 使用活性炭选择去除 NO<sub>x</sub>。

发电锅炉实际应用的各项技术在 4 中论述。

### 3.4.3. 氮氧化物（NO、NO<sub>2</sub>）对环境的影响等

NO<sub>x</sub> 是燃烧产生的物质 NO 和 NO<sub>2</sub> 的总称。

锅炉等一般燃烧设备排放的燃烧气体中，90-95%vol 为 NO。有数据显示，NO 的毒性比 NO<sub>2</sub> 低，但作为 NO<sub>x</sub> 对环境的影响如下：

① 对人体的影响

NO<sub>2</sub> 对粘膜有刺激，引发支气管炎和肺水肿等；NO 对人体的生理机能有影响。暴露在 NO<sub>2</sub> 中会引起感染抵抗力的减弱，动物实验数据表明，NO<sub>2</sub> 浓度超过 0.5ppm 时，对呼吸器官感染的抵抗力会下降。

② 酸雨

NO<sub>x</sub> 和 SO<sub>x</sub> 都是造成酸性物质沉降的原因，是导致森林生态系统和水环境恶化的原因。

③ 化学烟雾的生成

NO<sub>x</sub> 和不饱和碳化氢经强紫外线照射后发生光化学反应，二次生成臭氧、PAN 等氧化力很强的物质。一般光化学氧化剂（O<sub>x</sub>）的 90% 以上为臭氧，人在臭氧浓度为 0.15-0.25ppm 的环境中呆 2 个小时，即会出现呼气管刺激症状（咳嗽、胸痛等）及肺功能减弱的情况。

④ 对全球气候变暖的影响

IPCC 报告中详细记述了  $\text{NO}_x$  对全球气候变暖的影响，指出会造成疟疾、黄热病等传染病的增加等，对健康带来影响。并且，还会造成异常气候、海平面上升、生态平衡破坏、对食品生产造成很大影响。 $\text{N}_2\text{O}$  是人为的温室效应气体，在平流层变成  $\text{NO}$ ，破坏臭氧层。

【 $\text{N}_2\text{O}$  对温室效应的贡献度】

据 IPCC 报告（1995 年）统计，在锅炉、机动车等人为排放的温室效应气体对全球气候变暖的直接贡献度中， $\text{N}_2\text{O}$  继  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  之后排在第三位。尽管大气中  $\text{N}_2\text{O}$  的浓度低，但全球变暖系数值很大，贡献度高，为 5.7%。表 3-6 所示为主要温室效应气体全球变暖系数值及浓度。

表 3-6 主要温室效应气体全球变暖系数值及浓度

	$\text{CO}_2$ (ppmv)	$\text{CH}_4$ (ppbv)	$\text{N}_2\text{O}$ (ppbv)
全球变暖系数	1	21	310
1994 年的浓度	358	1720	312
1900 年以前	280	700	275

全球变暖系数： $\text{CO}_2=1$  时 100 年影响的效果

出处：IPCC-环境厅资料（1995）

## 4 工业锅炉的氮氧化物减排技术

### 4.1. 燃烧室的氮氧化物生成控制技术

#### 4.1.1. 生成控制技术

从  $\text{NO}_x$  的生成原理来看，需要控制燃烧室生成的  $\text{NO}_x$ 。特别是工业锅炉，由于受操作和经济性的制约，削减燃烧室  $\text{NO}_x$  生成的问题备受重视。 $\text{NO}_x$  的生成原因与适用控制技术的关系与燃烧方式无关，如图 4-1 所示，大致分为燃料改善及改善燃烧技术两大类：

##### 【燃料改善】

- a. 使用有机氮化合物含有率低的燃料

##### 【燃烧改善】

- a. 降低燃烧区的  $\text{O}_2$  浓度（降低  $\text{O}_2$  浓度）
- b. 缩短在高温区燃烧气体的滞留时间（缩短气体滞留时间）
- c. 降低燃烧温度，特别是要消除局部高温区（降低火焰温度）

用上述方法之一或组合的方式可减少  $\text{NO}_x$  的生成。

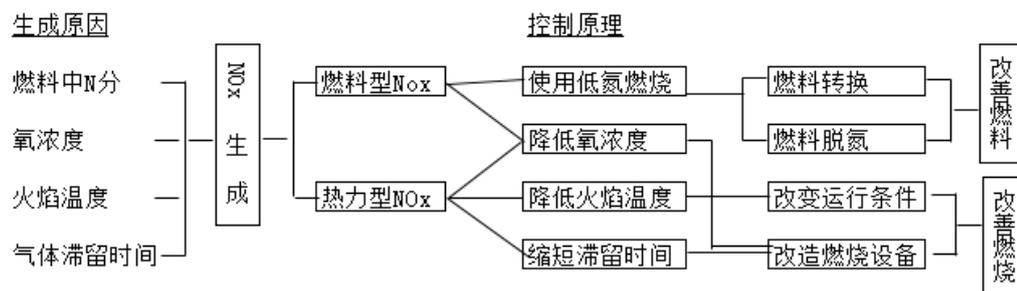


图 4-1  $\text{NO}_x$  生成控制技术

#### 4.1.2. 各种低 $\text{NO}_x$ 燃烧技术

实际的  $\text{NO}_x$  生成控制法改造燃烧技术时，公共发电的锅炉采用煤粉燃烧（燃烧器燃烧）、流化床燃烧方式；自备电发电小型输出功率的锅炉采用移动床炉排燃烧或鼓泡流化床燃烧方式，大中输出功率的锅炉采用循环流化床或增压流化床燃烧方式。所有煤炭燃烧通用的  $\text{NO}_x$  生成控制技术有以下及种方法：

- ① 降低过剩空气率：日本现在的燃煤发电都已采取节能措施，不可能再希望通过调整空气比来削减  $\text{NO}_x$ 。表 4-1 为电气事业法适用的自备电厂煤粉发电锅炉的标准空气比/目标空气比。

发电锅炉的管理标准比一般工业锅炉严格。

表 4-1 标准/目标空气比

负荷率 %	标准空气比	目标空气比
75-100	1.15-1.3	1.15-1.25
(参考)50-100	1.3-1.45	1.2-1.3

参考为一般工业锅炉的适用值。

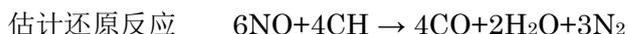
(出处: 节能法附表 1-A,B)

- ② 降低助燃空气温度: 一般燃料燃烧使用的空气温度为 250-350°C 左右, 通过降低这一温度来削减 NO<sub>x</sub> 的方法
- ③ 二级燃烧: 将燃料燃烧使用的空气分成两级供给的方法, 图 4-2 为二级燃烧的概念图。
- ④ 烟气再循环: 将部分燃烧烟气混入助燃空气中, 降低助燃空气的 O<sub>2</sub> 浓度, 降低火焰温度, 从而控制 NO<sub>x</sub> 生成的方法。循环量最多为 20-30%。
- ⑤ 低 NO<sub>x</sub> 燃烧器的适用及改造: 根据燃烧器的结构控制 NO<sub>x</sub> 生成的方法  
使低 NO<sub>x</sub> 燃烧器具备控制 NO<sub>x</sub> 生成效果的机能有以下三个方法。实际应用的燃烧器类型很多, 一般具备其中之一或组合机能:
  - i 放缓燃烧与空气的扩散混合速度 (降低火焰温度效果)
  - ii 促进燃烧的不均匀化 (火焰分布粗密化)
  - iii 促进火焰的热辐射 (缩短高温燃烧气体的滞留时间)

下面介绍几个低 NO<sub>x</sub> 型煤粉燃烧器的典型例子:

a. 二级燃烧法 (燃烧器燃烧)

将燃烧分成两级或两级以上, 分段进行燃烧的方法。有将助燃空气分为多级和将燃料分为多级的两种方式。空气二级法是在第一级中降低空气比, 进行燃料过剩燃烧, 在第二级中将剩余的助燃空气送入进行燃料稀薄燃烧的方式。在第一级中, 由于控制了峰值燃烧温度, 可控制 Thermal NO<sub>x</sub> 的生成; 由于空气比低, 在燃料过剩燃烧条件下, 可控制 Fuel NO<sub>x</sub> 的生成。但这种方式容易造成不完全燃烧或不稳定燃烧, 因此, 需要注意烟尘及 CO 的产生。这种方式一般适用于大输出功率的锅炉。图 4-3 为燃料二级喷入燃烧的原理, 这一方法是在第一级燃料稀薄燃烧完的位置喷入二次燃料。第一级生成的 NO 被 CmHn 基还原, 又经三次风被燃烧去除。图 4-4 和图 4-5 为两家企业不同类型的二级燃烧-旋流组合型低 NO<sub>x</sub> 燃烧器 (煤粉用)



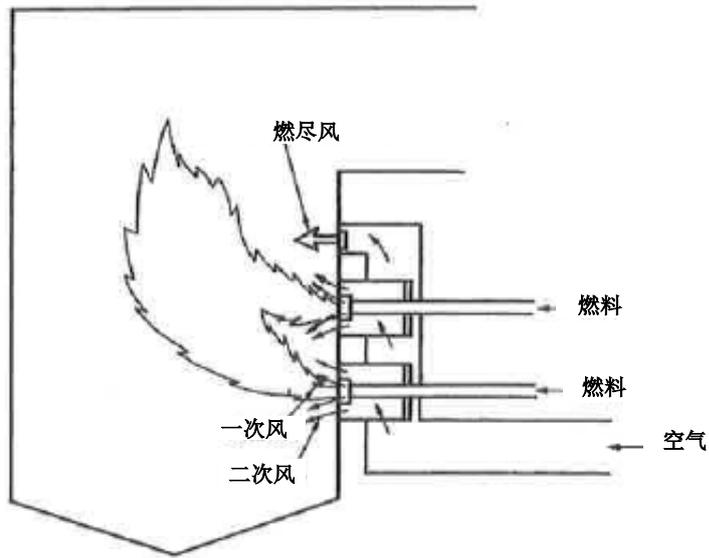


图 4-2 二级燃烧法概念图  
(出处: 火力核能发电, No.691, Vol165, 2014)

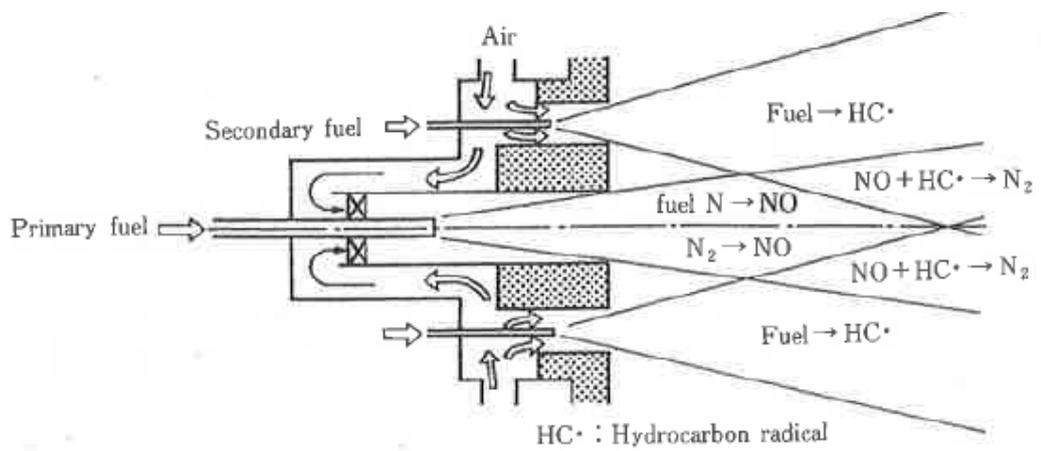


图 4-3 燃料二级喷入法原理  
(出处: 产业燃烧技术, ECCJ)

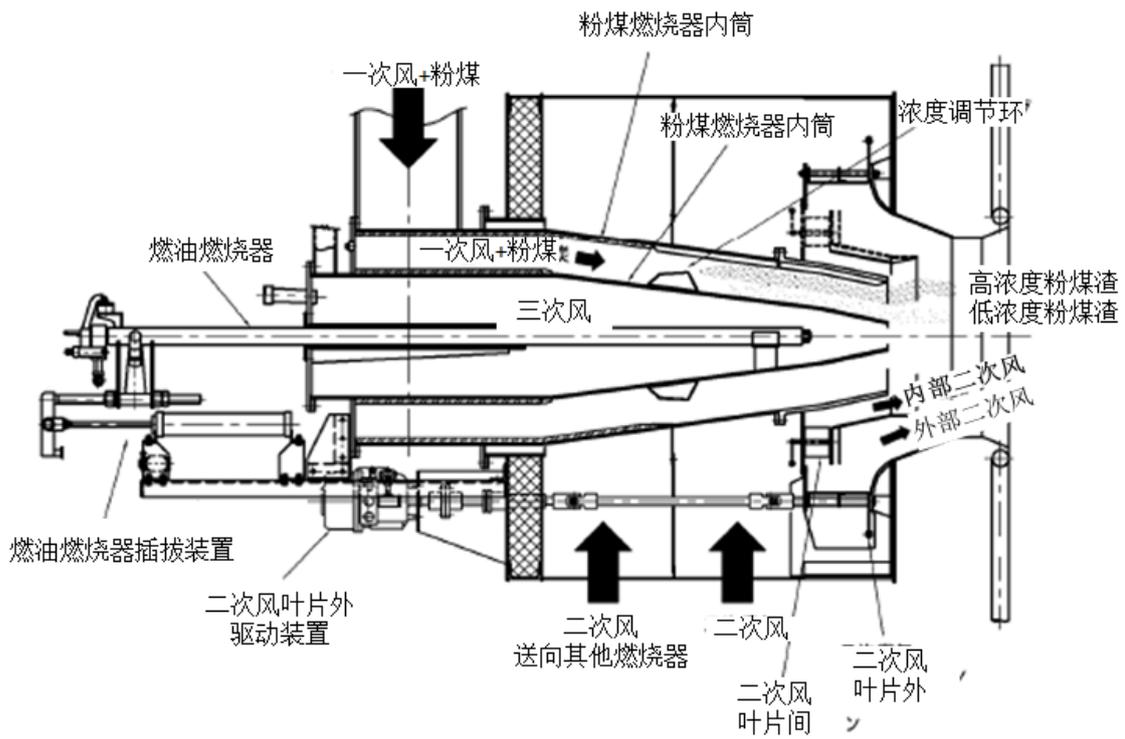


图 4-4 二级燃烧低 NO<sub>x</sub> 燃烧器（煤粉用）  
(出处: IHI)

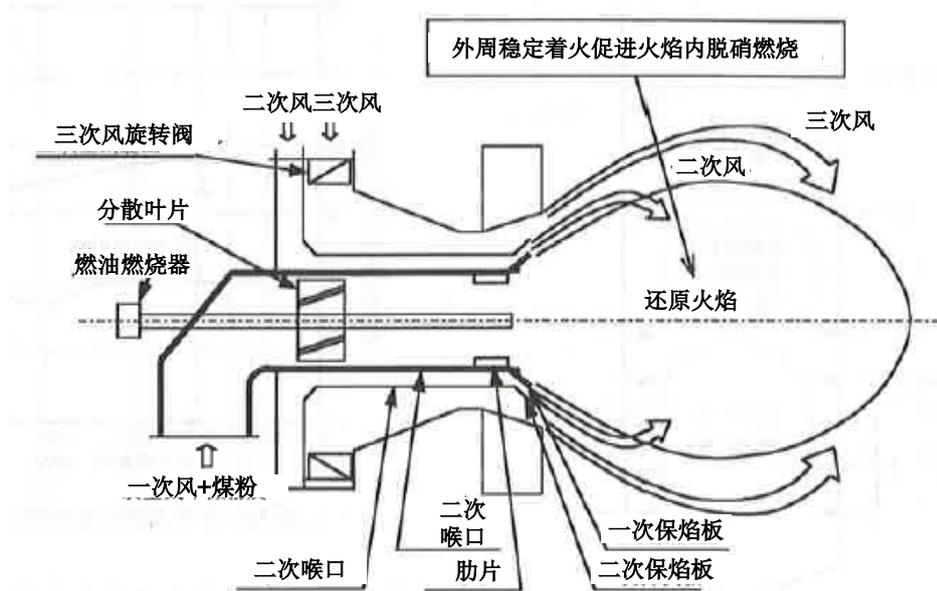


图 4-5 低 NO<sub>x</sub> 煤粉燃烧器  
(出处: 环境省资料、川崎工厂)

**b. 烟气再循环 EGR: Exhaust Gas Recirculation (燃烧器燃烧)**

将部分燃烧烟气再循环与助燃空气混合，降低火焰温度和  $O_2$  分压，从而控制  $NO_x$  生成的方法。燃料不同，烟气的  $O_2$  浓度也不一样。以燃油为燃料时，烟气的  $O_2$  浓度为 3-5%vol，燃烧器部位的混合助燃空气的  $O_2\%$  比只用空气时（21%vol）降低，具有削减  $NO_x$  的效果。但对于削减 Fuel  $NO_x$  基本无效。图 4-6 为烟气再循环法的概念图。

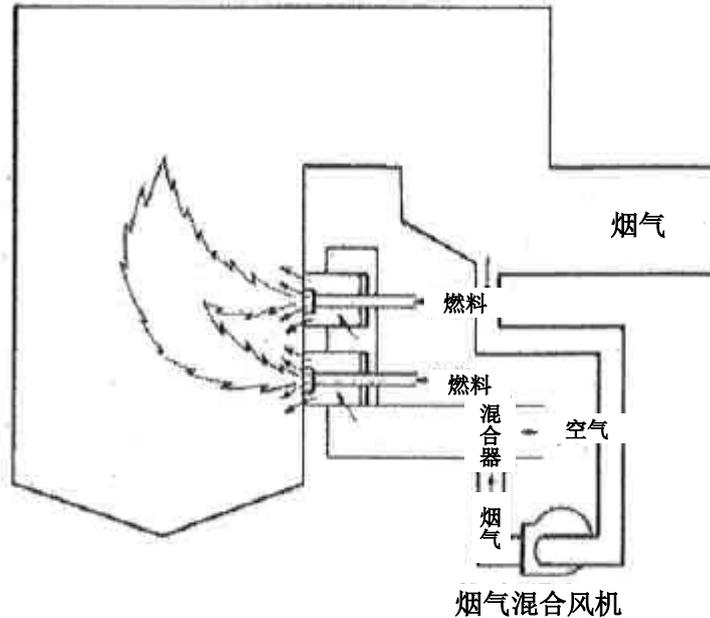


图 4-6 烟气再循环法的概念图

(出处: 火力核能发电, No.691, Vol165, 2014)

**c. 浓淡燃烧 (燃烧器燃烧)**

将燃料过剩燃烧器和燃料稀薄燃烧器交替或合理排列在装有数个燃烧器的锅炉上，在燃烧室内燃烧的方式，可降低整体的燃烧温度。助燃空气量和燃料总量不变，用于大输出功率锅炉。也有改变 1 个燃烧器喷嘴直径，使火焰有浓有淡进行浓淡燃烧的方法。图 4-7 为浓淡燃烧+二级燃烧组合型低  $NO_x$  燃烧器。

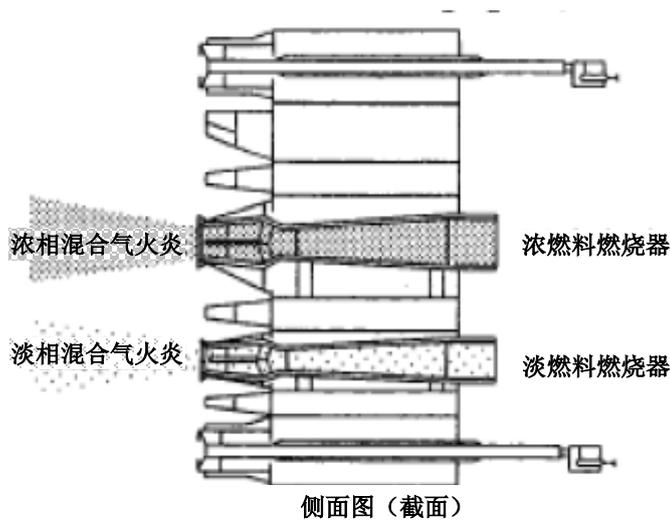


图 4-7 浓淡燃烧+二级燃烧组合型低 NO<sub>x</sub> 燃烧器 (煤粉用)  
(出处: 三菱重工)

#### d. 低 NO<sub>x</sub> 燃烧器

根据燃烧器的结构, 控制 NO<sub>x</sub> 产生基本上有以下三种方法:

- 放缓燃烧与空气的扩散混合速度;
- 促进燃烧的不均匀化;
- 促进火焰的热辐射。

为了实现上述效果, 国际上开发了以下多种类型的低 NO<sub>x</sub> 燃烧器:

- ① 快速燃烧型: 促进燃料和空气的混合, 通过散热降低燃烧温度, 缩短在高温区的滞留时间, 从而减少 Thermal NO<sub>x</sub> 的生成。(图 4-8)
- ② 缓慢燃烧型: 通过降低助燃空气及燃料的喷出流速, 扩大燃烧区, 降低火焰温度及 O<sub>2</sub> 浓度, 从而减少 Thermal NO<sub>x</sub> 的生成。
- ③ 分割火焰型: 将火焰分割成多个独立火焰, 降低火焰温度, 缩短在高温区的滞留时间, 从而减少 Thermal NO<sub>x</sub> 的生成。
- ④ 阶段燃烧型: 将助燃空气及燃料分成多个级, 分阶段供给。第一级供给低过剩空气进行低过剩空气燃烧, 第二级以后供给充分的空气进行完全燃烧。通过降低燃烧温度、均一化以及第一级的低过量空气燃烧, 即可控制 ThermalNO<sub>x</sub> 的生成, 又可控制 Fuel NO 的生成。

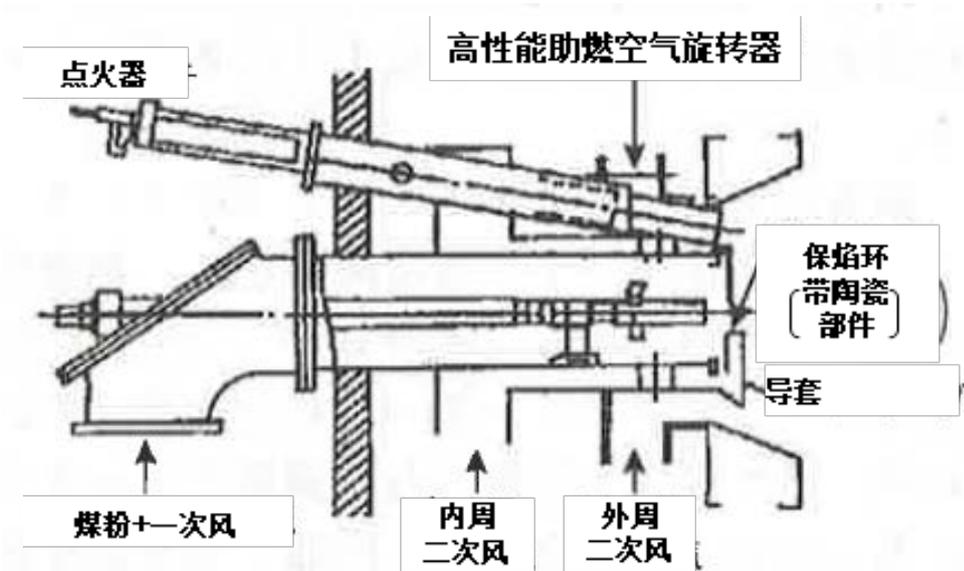


图 4-8 煤粉 NR 燃烧器  
(出处: 环境省资料、日立)

#### e. 炉内脱硝法

燃烧室内生成的  $\text{NO}_x$  在燃烧室内通过碳化氢还原。还原条件为：碳化氢的分解温度必须在  $900^\circ\text{C}$  以上、必须有  $\text{O}_2$  存在、还原用碳化氢量必须比存在的  $\text{O}_2$  的化学当量多、气氛温度必须高于未燃煤粉的反应温度、必须送入充足的助燃空气使未燃煤粉完全燃烧等。图 7.9 为炉内脱硝概念图：

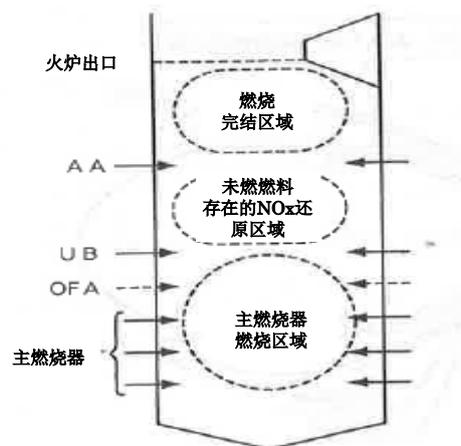


图 4-9 炉内脱硝概念图

#### 4.1.3. 炉排燃烧

前面也提到过，炉排燃烧主要是固定碳进行表面燃烧产生的  $\text{CO}$  与大部分的挥发分在炉

的空间部位进行气体燃烧。NO<sub>x</sub> 生成特性在形式上虽有差异，但一般与煤粉燃烧相似，具有以下特性：

- 燃料中的氮份越多，NO<sub>x</sub> 生成量越大；
- 燃料比越高，燃煤的 NO<sub>x</sub> 生成量越大。

此外，灰分越多，燃煤的 NO<sub>x</sub> 生成量也相对增多。燃煤中氮份与 O<sub>2</sub> 浓度的关系例如图 4-10 所示。炉排燃烧时，空气比越大，O<sub>2</sub> 浓度越高；此外，氮份越增多，NO<sub>x</sub> 浓度有直线增高的趋势。

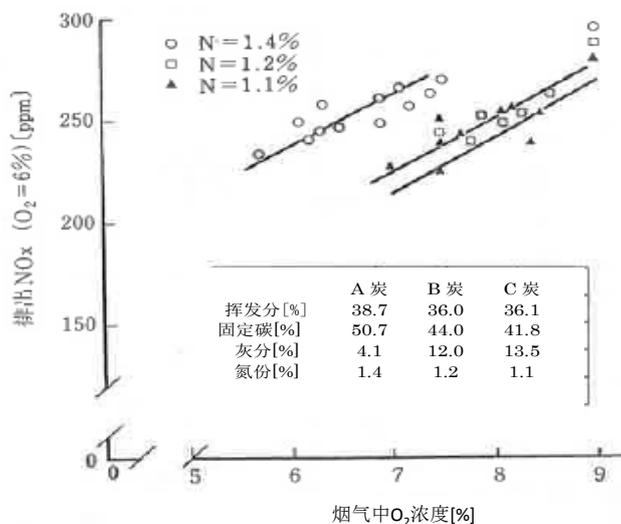
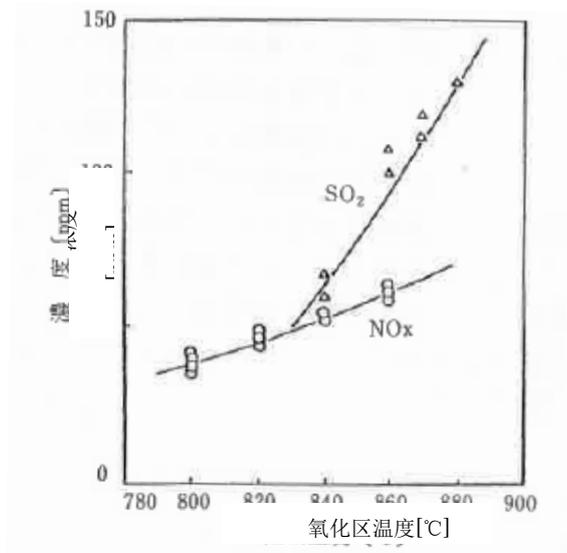


图 4-10 燃煤中氮份/O<sub>2</sub> 浓度的关系例

(出处：产业燃烧技术, JFRC, p171)

#### 4.1.4. 流化床燃烧

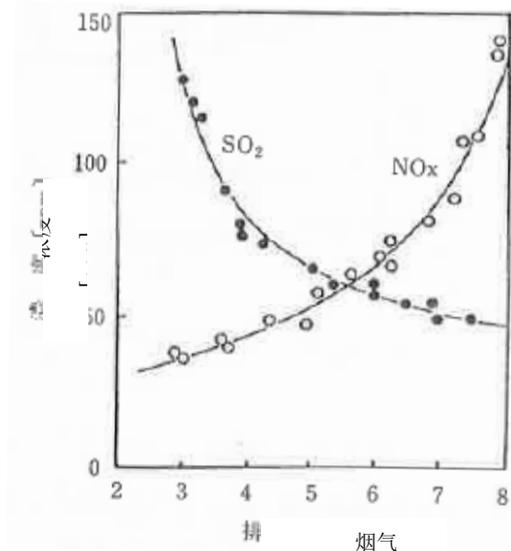
流化床温度与 NO<sub>x</sub> 生成量呈正相关关系。工业锅炉的燃烧温度一般在 900℃ 以下，Thermal NO<sub>x</sub> 的生成量很少，多为因燃料中的氮份生成的 Fuel NO<sub>x</sub>。据报告统计，比起燃煤中的 N 含量，N 的结合状态在 NO<sub>x</sub> 生成中起主要作用。炉内加石灰石进行炉内脱硫时，由于石灰石会增加 NO<sub>x</sub> 的生成量，因此，将燃烧气体中的飞灰进行再循环以减少石灰石的使用量对控制炉内 NO<sub>x</sub> 的生成非常重要。图 4-11 为燃煤循环流化床燃烧的燃烧温度与 NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub> 的关系。图 4-12 为同一炉出口的 O<sub>2</sub> 浓度与 NO<sub>x</sub>/SO<sub>2</sub> 的关系。循环流化床燃烧时，将炉底部和炉中央部分为二级，送风进行二级燃烧，以控制 NO<sub>x</sub> 的生成。但温度在 830℃ 以下时石灰石无法进行煅烧，因此脱硫率降低。



(Ca/S 比=3, 不加 CaO 时的 SO<sub>2</sub> 为 500ppm)

图 4-11 燃烧温度与 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 的关系

(出处: 产业燃烧技术, JFRC, p170)



(Ca/S 比=不加 3, CaO 时的 SO<sub>2</sub> 为 500ppm)

图 4-12 O<sub>2</sub> 浓度与 SO、NO<sub>x</sub> 的关系

(出处: 产业燃烧技术, JFRC, p171)

#### 4.1.5. 改善运行条件

改变目前的空气比、燃烧室负荷及空气预热温度的运行条件是实现低 NO<sub>x</sub> 化的一种方法。

##### a. 低空气比燃烧

空气比变化引起的温度变化以及 O<sub>2</sub> 浓度变化是空气比影响 NO<sub>x</sub> 生成的因素。Fuel

NO<sub>x</sub> 的增加与空气比成正比，而 Thermal NO<sub>x</sub> 具有凸形状的特性。通常锅炉运行时，空气比与凸形状的最大值相比，偏向低空气比一侧，因此，减少 NO<sub>x</sub> 生成应采用低空气比燃烧。燃烧性随着空气比的降低有减弱的趋势，需注意 CO 及烟尘的产生。

#### b. 降低燃烧室热负荷

燃烧室热负荷的差异与火焰、燃烧室烟气温度及炉内滞留时间等有关，与燃料与空气的混合情况及火焰放热情况的变化也有关系，对 NO<sub>x</sub> 的生成有很大影响。

目前有通过提高燃烧室热负荷来实现工业锅炉的小型化及高效化的趋势，但提高程度应控制在 NO<sub>x</sub> 减排适用范围内。

#### c. 降低空气预热温度

助燃空气温度与 Thermal NO<sub>x</sub> 的增加有直接关系。预热温度降低，火焰温度及燃烧室的气氛温度下降，NO<sub>x</sub> 的生成量减少。降低空气预热温度时，需将锅炉效率、烟尘增加量及 NO<sub>x</sub> 低减率进行对比。平衡通风锅炉燃烧室为负压，引入的空气不仅成为过剩空气，还有可能造成无法合理控制燃烧，因此，需严格管理防止这种情况的发生。

## 4.2. 烟气脱硝技术

### 4.2.1. 烟气脱硝设备须具备的条件

工业锅炉的烟气脱硝设备必须具备以下条件：

- 脱硝率高；
- 可长时间稳定运行；
- 具备对负荷波动的随动性；
- 成本效益好；
- 不产生二次公害。

### 4.2.2. 烟气脱硝设备

图 4-13 为燃煤发电烟气脱硝设备的典型工艺结构，图 4-14 为高烟尘的烟气脱硝措施系统例。根据烟尘浓度选择将除尘设备安装在头部或是尾部。

工业锅炉应用的烟气脱硝设备的脱硝方法及原理如表 4-2 所示：

表 4-2 烟气脱硝设备的脱硝方法及原理

方法	原理
选择性催化还原法 (SCR)	用 NH <sub>3</sub> 作还原剂，催化时选择性还原去除 NO <sub>x</sub> 。干法，适用于烟气量多的处理。 反应式 $4NO + 4NH_3 + O_2 \rightarrow 4N_2 + 6H_2O$ $NO + NO_2 + 2NH_3 \rightarrow 2N_2 + 3H_2O$

非催化还原法 (SNCR)	在高温区非催化条件下喷 $\text{NH}_3$ , 还原去除 $\text{NO}_x$ 。 $4\text{NO} + 4\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ (脱硝反应) $4\text{NH}_3 + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ (药剂燃烧反应)
活性炭吸附法	使用活性炭, 在喷 $\text{NH}_3$ 选择性去除 $\text{NO}_x$ 的同时, 吸附去除 $\text{SO}_x$ 。

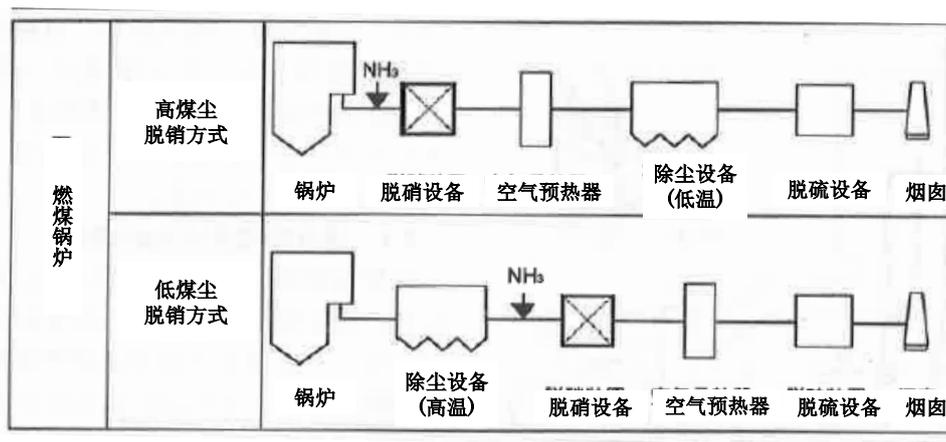


图 4-13 烟气脱硝设备典型的工艺结构

(出处: 火力核能发电技术协会)

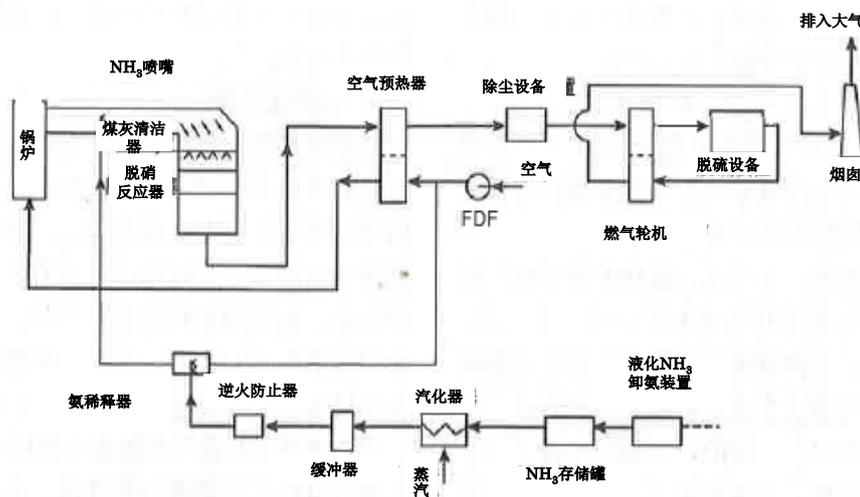


图 4-14 高烟尘烟气脱硝措施的系统例

(出处: 火力核能发电技术协会)

① 选择性催化还原法(SCR)

一种通过催化剂进行的  $\text{NO}$  与  $\text{NH}_3$  的等摩尔反应, 烟气温度在  $350\text{-}400^\circ\text{C}$  时优先反

应。锅炉燃烧气体设定在这一温度带时，可达到 80%以上的脱硝效果。催化剂的形状有粒状、板状、格子状、圆筒状等，为了预防煤燃料的堵塞，多采用板状和格子状的催化剂。脱硝催化剂会因烟气中的烟尘、SO<sub>x</sub> 和碱金属而老化，因此需注意与除尘设备之间的安装位置以及烟气温度的。这一脱硝法是日本开发并向国外输出的技术，在国外得到了普遍的应用。设备工艺简单，易运行，故障率低，不产生废水和副生成物，操作简单，可简单地与烟气源协调。并且，几乎没有可移动部分，故障例很少。管理的重点为催化剂性能的管理，主要会出现安逃逸引起的空气预热器及尾部部分设备的关闭、脱硝设备入口处灰尘堆积和喷氨部位的故障。此外，燃煤未燃灰的细小颗粒是造成催化剂堵塞的原因。

脱硝催化剂具有气体性状，随着时间的推移性能降低，通常采用部分更换或添加新催化剂的方式恢复其性能。使用寿命受燃料种类、老化成分（Na, K, Ca 等）的情况、强度、比表面积、细孔容积等影响。一般寿命为：燃煤<燃油<燃气。此外，恢复催化剂性能的再生方法也被广泛使用。

表 4-3 工业用燃煤锅炉安装 SCR 设备条件的标准例

	例 I	例 II	例 III
压力损失	0.5-2 kPa	-100 mmWC	-100mmWC
燃气温度	≒ 350-400 °C	300-550 °C	180-550°C
脱硝率	<80 % - 90 %	-95 %	-95%
反应塔压损	<60 mmWC		

表 4-4 所示为各类烟气催化剂性能老化的主要原因，图 4-15 为燃煤选择性催化还原脱硝系统的典型设备结构，图 4-16 为烟气烟道脱硝工艺安装例，图 4-17、图 4-18 为各种形状的脱硝催化剂，图 4-19 为燃煤锅炉的选择性催化还原法脱硝例：

表 4-4 各类烟气催化剂性能老化的主要原因

烟气种类	废弃物	燃气	燃油	燃煤
热老化	○	◎	○	○
化学降解(催化剂中毒)	◎		◎	
物理老化(烟尘)				◎

◎主要老化原因      ○老化原因

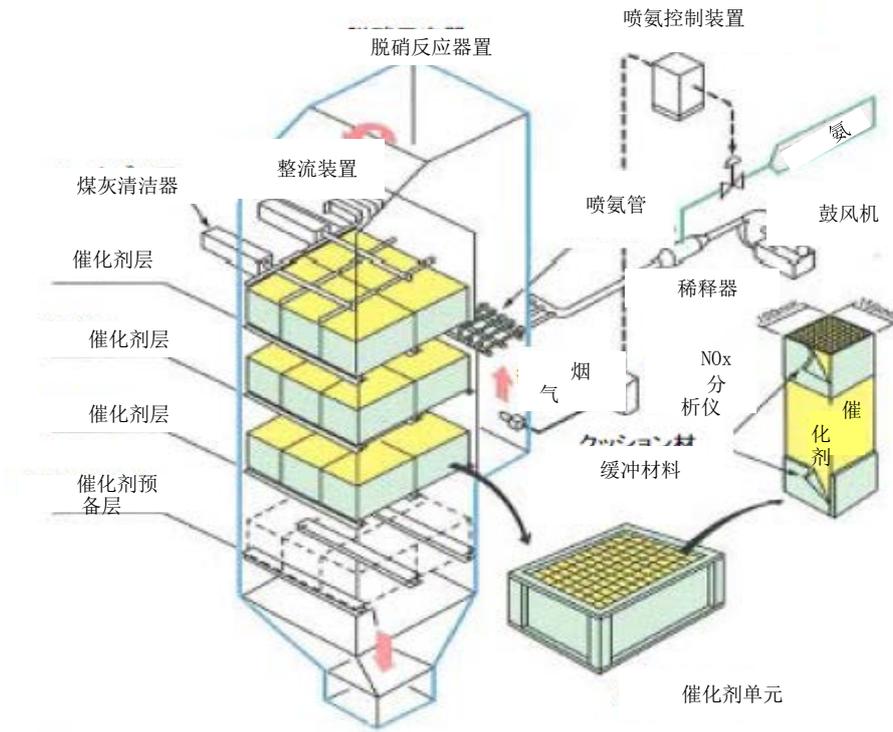


图 4-15 燃煤选择性催化还原法脱硝系统  
(出处: 川崎重工)

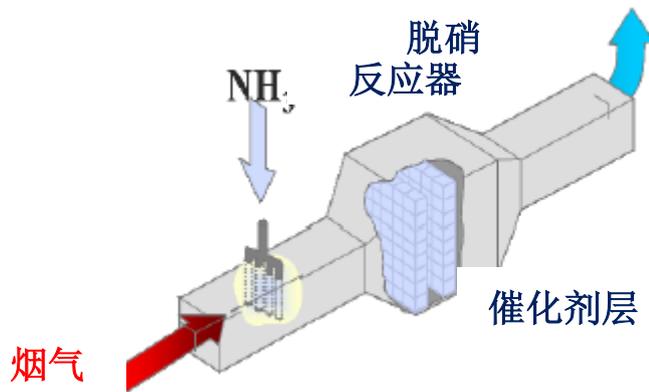


图 4-16 选择性催化还原法 (SCR) 脱硝工艺  
(出处: IHI)

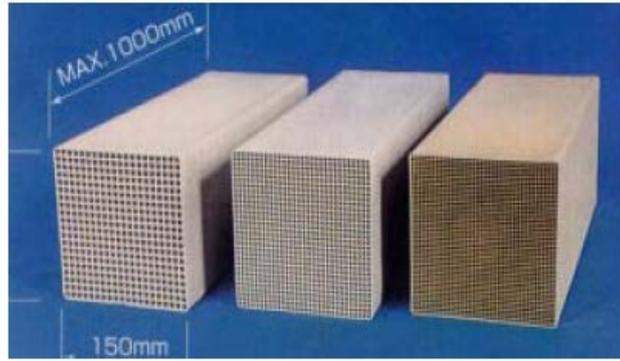


图 4-17 蜂窝状脱硝催化剂  
(出处: IHI)

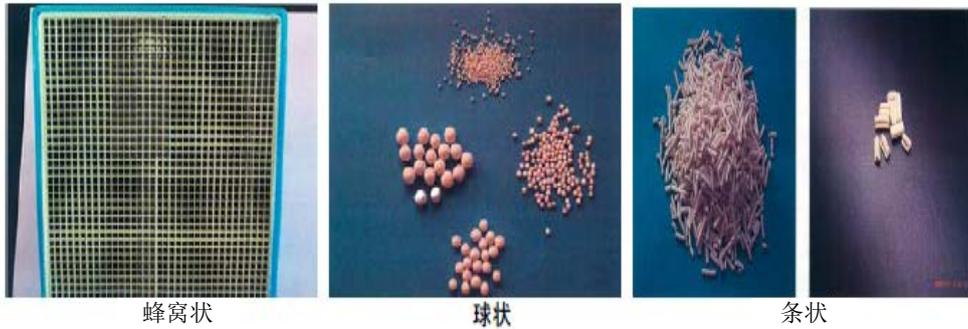


图 4-18 各种形状的脱硝催化剂例  
(出处: 堺化学)

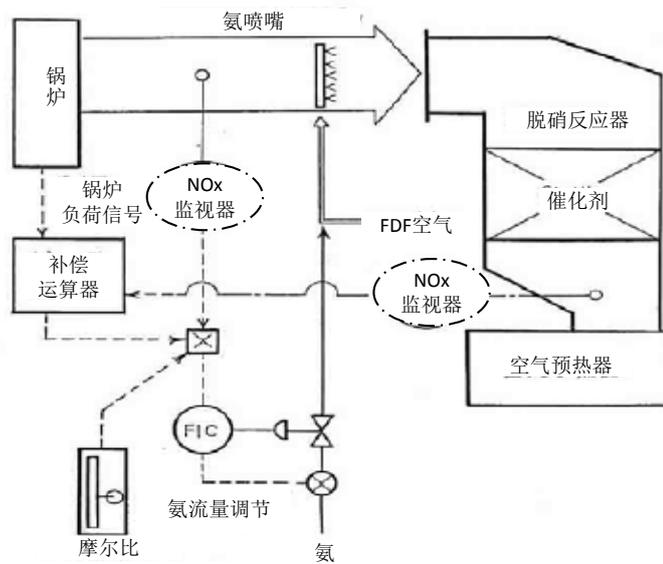


图 4-19 燃煤锅炉选择性催化还原法脱硝控制例  
(出处: 火力原子力发电志 1984)

## ② 非催化还原法 (SNCR)

向燃烧气体的高温区 (800-1050℃) 喷吹  $\text{NH}_3$  或  $(\text{NH}_2)\text{CO}$  等还原剂, 将  $\text{NO}_x$  还原成  $\text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 。反应所需的滞留时间为 0.1sec 以上, 可能的话最好在 0.4sec 以上, 脱硝率为 40-50% 左右, 需针对负荷波动和烟气温度的变化采取措施。随着还原剂喷量的增加,  $\text{NO}_x$  去除性能也会提高, 但未参与反应的氨会发生氨逃逸。此外, 还与烟气中的  $\text{SO}_2$  等发生反应形成硫酸铵, 产生白烟。图 4-20 为喷吹还原剂 ( $\text{NH}_3$ ) 的要领例。

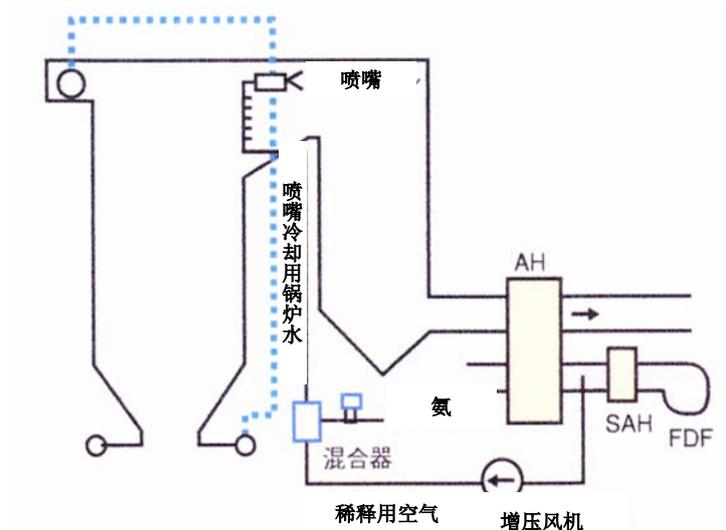


图 4-20 喷吹还原剂 ( $\text{NH}_3$ ) 的要领例

## ③ 活性炭吸附法

向冷却至 180-200℃ 左右的烟气中喷吹  $\text{NH}_3$ , 与活性炭等的炭催化剂接触后,  $\text{NO}_x$  被  $\text{NH}_3$  还原分解成  $\text{N}_2$ , 不但可以脱硝, 还可以脱硫、去除二恶英等污染物。这种脱硝法有在金属精炼用废热锅炉和废弃物焚烧用废热锅炉的应用实例。此方法的脱硝率为 40-80%, 吸附能力下降的活性炭可通过再生工艺循环再生利用。图 4-21 为活性炭吸附法烟气脱硝系统的工艺流程例。

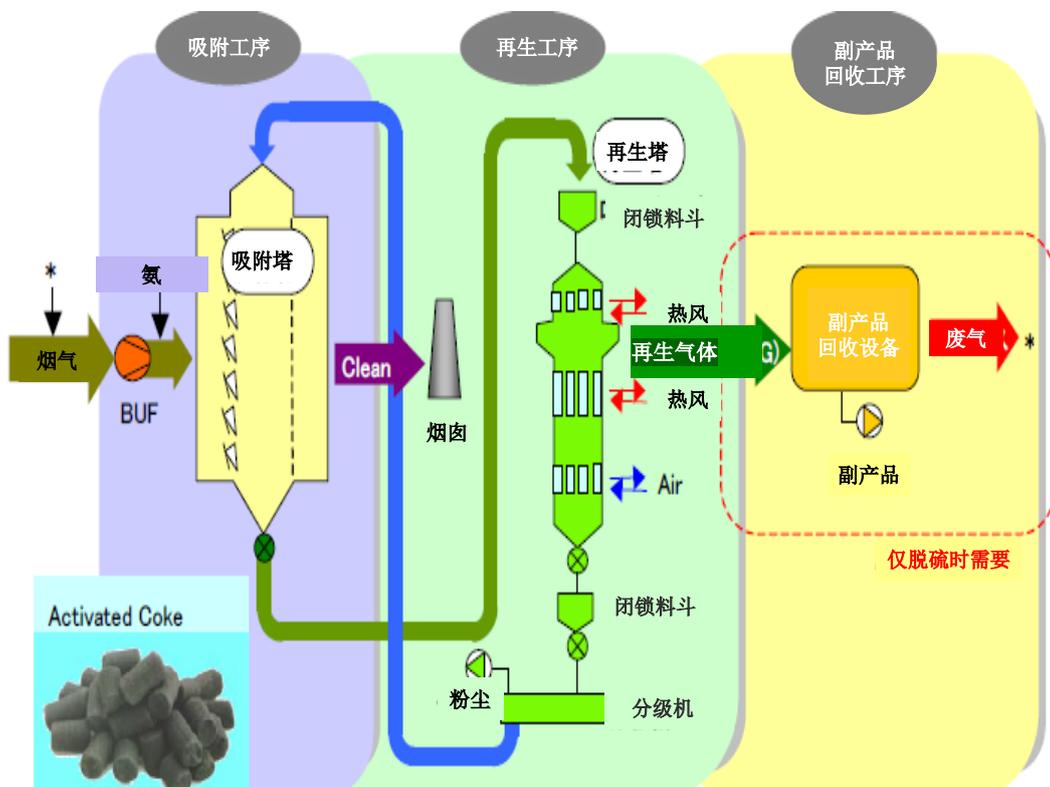


图 4-21 活性炭吸附法烟气脱硝系统  
(出处: J-Power En Tech)

## 5 其他环保措施及技术

在大气污染领域，发电锅炉为污染源的环境污染除 NO<sub>x</sub> 外，还产生“烟尘”“SO<sub>x</sub>”“二恶英类”等污染物。此外，水质污染源中，排污水、洗烟废水都是 SS 或 pH 限制对象。送风机、空气压缩机、泵类等产生的振动、噪音以及燃料等散发出的臭气也是应治理的对象。表 5-1 为典型环保治理对象领域及治理技术的概要。

表 5-1 典型环保治理对象领域及治理技术的概要

对象领域	污染物质等	污染源	治理技术
大气污染	烟尘	燃烧烟气	各种吸尘器
	粉尘	灰、燃煤、木粉等燃料	各种吸尘器、封闭堆场
	SO <sub>x</sub>	含 S 燃料的燃烧	燃料转换、脱硫设备
	HCL	燃料的燃烧（烟气、废弃物等）	吸附处理装置
	Hg	煤燃烧等	吸附处理装置
	二噁英类	废弃物等的燃烧、废气	吸附处理装置、燃烧改善
	重金属类	废弃物等的燃烧	吸附处理装置
水质污浊	高 pH/低 pH	各种废水、洗烟废水、冷却水	中和处理
	高 SS、溶盐	燃料堆场废水、灰处理、排烟废水	絮凝沉淀处理等
	重金属类 浊度	废弃物等的灰处理、洗烟废水 化学洗涤	絮凝沉淀处理等
振动噪音	标准值以下	回转机械、破碎机等	防振装置、基础、防音措施
臭气	H <sub>2</sub> S、NH <sub>3</sub> 等	有机性燃料（腐败性、高水分）漏 气	吸附防臭、抽吸燃烧等
废弃物	煤灰 脱硫石膏 废油 PCB 废弃物	燃烧灰 烟气脱硫 润滑油等 变压器绝缘油等	几乎全部再资源化  (PCB 属于特殊废弃物，根据管理法处理)

燃煤火力发电厂产生的工业废弃物中最多的的是燃煤灰。燃煤中含有 10-20%的灰分，100 万 kW 级的燃煤火力发电厂约产生 20-30t/yr 的燃煤灰。

2001 年实施的资源有效利用促进法中将电力企业产生的燃煤灰确定为指定副产物，促进了燃煤灰的再资源化。2005 年以后，燃煤灰的资源化率高达 96%左右，主要有效用于水泥、土木建筑和农林水产等诸多行业。

## 6 燃煤发电锅炉的控制

---

现在，燃煤发电已普遍采用了数字控制，实现了对细微之处的控制。这种合理化自动控制不仅可提高负荷变化率，降低最低负荷，缩短启动/停止时间等，还可加速维护保养速度。并且监控系统性能显著，CRT操作站的HCI(Human Computer Interface)实现了智能化监控，根据监控情况进行包括运行支援、设备维护保养支援在内的综合控制管理已非常普及。其中，通过控制中心对大气污染相关参数进行监控、以及锅炉机能的运行支援、最佳控制、多煤种适应控制、监控工作等都是电力企业最重要的工作。

图 9.1 为公共火电厂综合运行监控系统概念图，图 9.2 为日本的控制系统开发公司的火电厂锅炉控制系统例。NO<sub>x</sub> 相关的主要控制有以下技术：

➤ 公共火力发电的控制

- 锅炉自动控制
- 燃烧器自动控制
- 运行监控技术
- 操作自动化
- 监控技术
- 计算处理技术
- 发电机组计算机 中央处理终端设备

➤ 自备电火力发电的控制

自备电火力发电的控制与公共火力发电不同，不仅适用于锅炉控制，也适用于工厂工艺供汽、多炉连锁控制、工厂受变电、配电系统的供电、厂内所有公用设施。因此，企业采取分散化控制、电气—仪器设备—计算机的综合化以及与通用网络连接的控制方式，以 DCS (Distributed Control System) 为主体，对电气、仪器设备、信息数据进行控制。

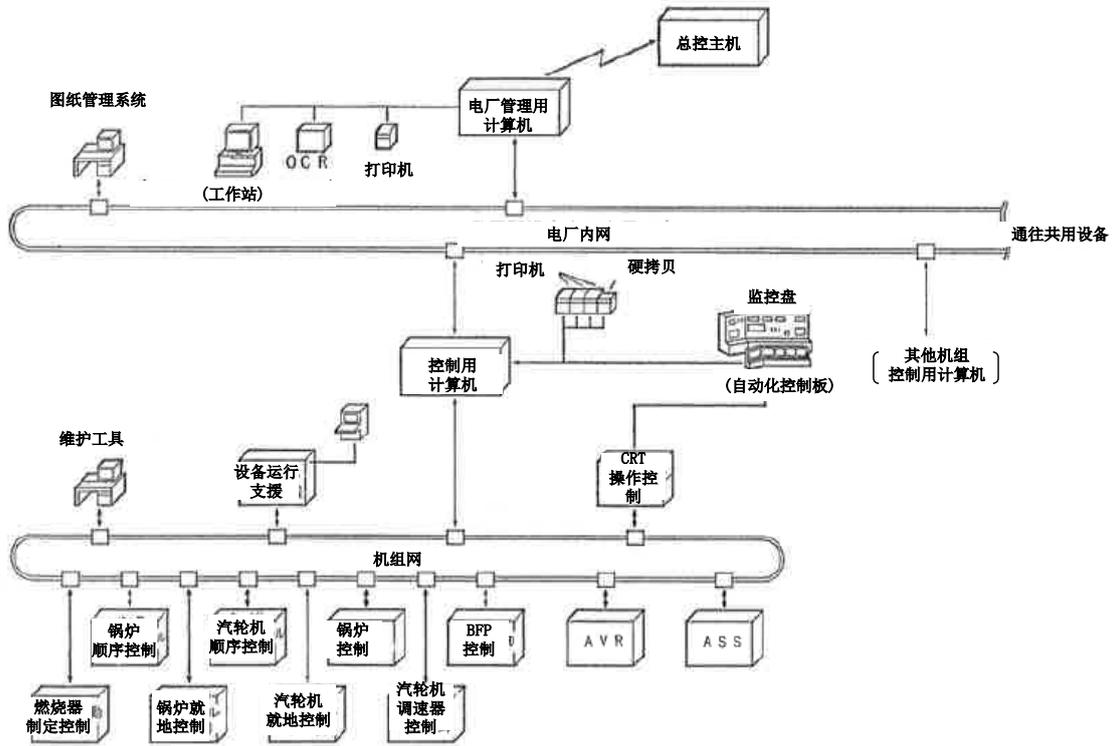


图 6-1 公共火电厂综合运行监控系统概念图  
(出处: 火力核能发电技术协会)

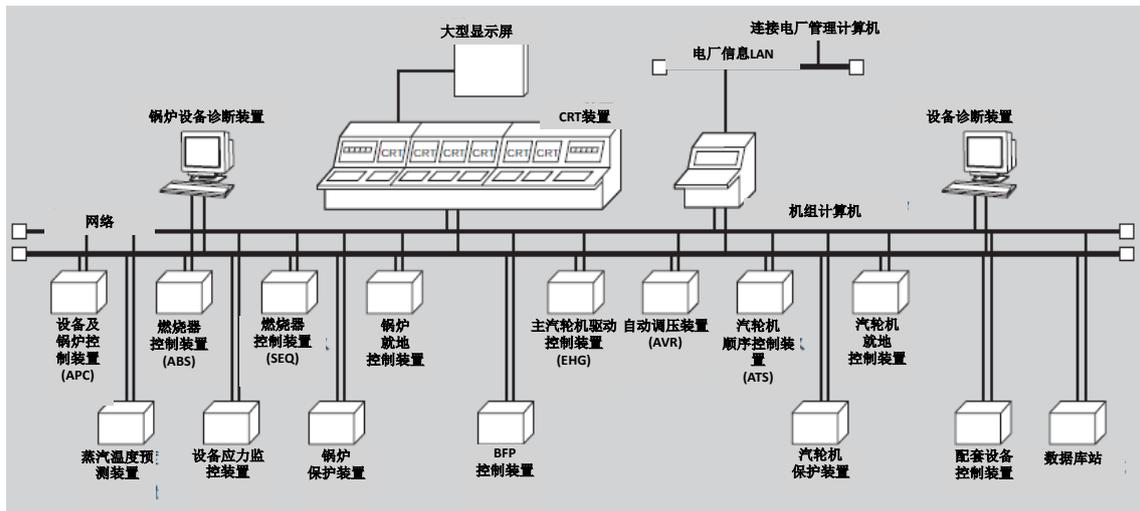


图 6-2 火电厂锅炉控制系统例  
(出处: 富士电机、富士时报 vol170, No. 7, 1997)

## 7 运行管理

### 7.1. 削减氮氧化物的运行管理

燃煤火力发电厂削减NO<sub>x</sub>的运行管理分为控制NO<sub>x</sub>生成的燃烧管理和去除NO<sub>x</sub>烟气脱硝两种。燃烧管理燃烧方式和控制机理虽然不同，采取的管理方法也各异，但都是根据前面叙述的NO<sub>x</sub>生成原理，将低NO<sub>x</sub>化的机能维持在符合计划条件状态下的管理。脱硝设备的运行及维护管理要点如表 7-1 所示：

表 7-1 脱硝设备的运行及维护管理要点

项目	管理要点
与锅炉自动燃烧控制的协调机能（Control Center）	燃料品质评估、燃烧特性、负荷变动、烟气温度SO <sub>x</sub> /NO <sub>x</sub> /O <sub>2</sub> 浓度、烟尘浓度等
烟气温度	省煤器、空气预热器、与脱硫设备及除尘设备的关系
脱硝设备	催化剂性能、反应器的异常、喷氨机能、
整个烟气系统	烟气流化压损、烟道等的灰堆积、温度分布、SO <sub>x</sub> 浓度
各装置的机械性故障等	泄露、监测仪器指示值、堵塞

### 7.2. 锅炉、汽轮机的主任技术员制度（BT 主任技术员）

为了妥善、合理地管理电厂的运行和设备维护保养，根据日本电气事业法，企业必须任命具有专业知识的技术业务负责人员担任 BT 主任技术员。BT 主任技术员根据电气事业法，负责电厂的锅炉、汽轮机等火力发电设备的安装工程、维护保养及使用方面的安全监督等工作。BT 主任技术员的资格分为一类和二类，电气事业法要求企业必须根据自己设备的规模大小挑选任命。

## 8 燃煤火力发电行业的氮氧化物控制措施总结

迄今为止介绍的减排方法汇总如下表：

表 8-1 政策方面的措施

政策·制度等	制定·实行年	概要	备考	效果
制定电气事业法	1965～现在	公用事业发相关规定	电气设施相关技术指南等 设定专任 BT 主任技术员	绝对性效果
限制排放法律体系化	1962	制定有害物质	整理现有基本法等法律	大
指定环境标准	1971～1978	环境中浓度标准	排放标准的基准	大
排放浓度标准	1973～1979	第一次制定～第四次制定	包括处罚规定	大
制定和实行总量控制	1981	4个城市	特区地方政府为对象	大
公害防治管理员制度	1970～	一定规模以上企业的监理责任	国家资格	非常大
公害对策基本法 (大气污染防治法)	1967～1968 (省略旧法律)	公共金融、税制优惠措施 对中小企业的特别措施 制定各种标准和监测规定	大气污染分钟相关规定 融资制度、金融公库、中小企业事业团金融措施的制度化、 国家税收·地方收税的非课税措施	非常大
公害防止事业团	1965	发放低息贷款，来促进大家开展防止公害的活动	实施贷款和贴息、债务担保 利用过的企业较多	非常大
主要团体的活动	1967～现在	研究开发、指导等	参考指南 2-9	活跃
环境计量师制度	1952～1992	由保有国家资格的专家监测	必须化	相关效果大

(计量法)			提高数据的正确度	提高可靠性
热管理法 (旧热管理规则)	1951~现在	一定规模上热管理的必须化	必须化	非常大
节能法	1979~现在	能源使用合理化	设定目标值—必须化	非常大
电器技术规定	1999	烟气脱硝设备指针	JEAC3604 等	必要遵守

表 8-2 技术反面的措施

方式	措施 适用技术等	技术·装置	效果 方法 经济性等	日本的经验
控制产生 Fuel NOx	使用低氮煤	燃料采购 改善质量	削减效果大、增高燃料费、特定煤种	少
	燃料脱氮	提高燃料品质	削减效果大、经济性不高、作为工业燃料公积 较难	无
控制产生 Thermal NOx	低空氧比燃烧 (低 O <sub>2</sub> )	烟气再循环	有一定效果 (必要研究锅炉类型)、增高动力 费用、 可并用燃烧器、规模 运行负荷影响效果	较多
	低 NOx 燃烧器	二级燃烧 浓淡燃烧等 多种	特殊性由厂商以及木炭种,罐子燃烧室不同, 引进技术时必要研究。必要注意专利有效期限 价格由该设备规模不同	较多
	炉内脱硝	CmHn 剂 还原	燃烧温度方面制约、消失未燃烧物、由锅炉构 造有制约燃	少
	炉排燃烧	低 O <sub>2</sub> 燃烧	加强标准→ 将来很难开展	较少
	流化床燃烧	BFB CFB PFB	保证较高控制效果、动力费用与设备费用较高 BFC 为工业自备电厂发电	较多 PFB 只有 4 件实例

烟气脱硝	SCR 法	催化剂+喷入 NH <sub>3</sub>	因烟气中的烟尘、SO <sub>x</sub> 和碱金属而老化、比 SNCR 经济性低	大规模锅炉经验较多
	SNCR 法	非催化+喷入 NH <sub>3</sub>	合适工业锅炉、一定要注意漏氨	较多
	AC 吸着法	活性炭+喷入 NH <sub>3</sub>	超低排放脱硝、维护费用较高	无
削减燃料消耗量	节能 提高热效率	控制燃烧、高效率仪器 受热面适当化 贯彻管理	NO <sub>x</sub> 减少量比例燃煤消费量 必要热管理 运行员资格制度、加强报告体系等	作为脱硝初步措施， 日本企业看做非常重要

## 9 日本的氮氧化物控制措施应用事例

(地点: S 制纸 (株) 实施年份: 1984 年)

改造后的炉型等	炉型	强制循环贯流式
	额定蒸发量	55,000 kg/hr
	蒸汽常用压力	3.4 MPaG
	蒸汽温度	485 °C
	蒸汽的用途	自备热电联产(造纸厂)
	燃料	烟煤 / 低位发热量 23.4kJ/kg / 燃料比 2.4 N 分 1.3-1.6
	燃烧方式	循环流化床燃烧
NO <sub>x</sub> 排放浓度 (O <sub>2</sub> =6%)	新装焚烧工业废弃物余热回收锅炉(旧锅炉)时	≈ 300 ppm
	改造后目标值(新装 CFBC)	< 250 ppm
减排措施实施顺序	<b>采用 CFBC 前应确认的项目</b> ↓ 项目: 燃煤性状波动、负荷应答性、连续运行时间、维修保养费用	
	<b>采取减排措施前应综合研究的事项</b> ① 可否进行脱水污泥的混烧处理: 絮凝剂的变更、脱水率的提高等 ② 保证燃煤的粒径分布: 前处理破碎机的性能、设定采购燃煤条件的变化 ↓ ③ 炉内脱硫率: 确认生产厂家的业绩值 <b>采用的 NO<sub>x</sub> 生成控制技术</b> ① 循环硫化床燃烧方式 ② 负荷率 Turn Down 65~90%时 NO <sub>x</sub> 排放浓度 保证在 200ppm 以下(专烧燃煤时) ③ 额定输出时热效率 >90%LHV 连续运行 >2000hr (②、③在订购时要求厂家保证做到)	
采用技术的费用	<b>试验实证费(包括混烧)</b> 燃煤分析费 1种9个 100,000 试验运行费 500,000 (燃料、动力、药剂、临时设施等) 增设、改善污泥相关设备费 约 40,000,000	<b>计 46,000,000 日元</b>
	<b>引进设备费</b> 设备费(包括燃煤前处理、灰处理) 1,800,000,000 污泥处理相关费 250,000,000	<b>计 2,090,000,000 日元</b>

	配套工程分（土建等）	40,000,000
	本费用为 1984 年时的费用，不包含动力、灰处理费用。	
效果	应用后的结果 负荷率 65%~90% → NO <sub>x</sub> 浓度 220~240 ppm 污泥混烧时 负荷率 85% → NO <sub>x</sub> 浓度 240~250ppm	
改造时的注意事项	①可否污泥混烧 ②实施炉内脱硫（炉内投入脱硫剂） ③监督管理燃煤粒径 ④在高热效率稳定输出下的连续运行	
评估	初期设定的各目标性能值基本上都已达到。	

## 10 最适合的大气氮氧化物控制技术以及中国的氮氧化物控制技术 技术方案

---

《国家环境保护“十二五”规划》要求到 2015 年全国氮氧化物排放总量下降 10%。为落实氮氧化物减排目标，国务院发布了《节能减排“十二五”规划》，分别针对电力、水泥、钢铁等重点行业氮氧化物的排放提出了明确的控制目标及治理措施要求。

要求新建燃煤机组要同步建设脱硝设施。加快燃煤机组低氮燃烧技术改造和烟气脱硝设施的建设，对单机容量 30 万千瓦以上（含）的燃煤机组、东部地区和其它地区的省会城市单机容量 20 万千瓦及以上的现役燃煤机组，均要实行脱硝改造，综合脱硝效率达到 75% 以上。到 2015 年，火电行业 NO<sub>x</sub> 排放量要求控制在 750 万吨，新增削减能力 305 万吨。

2012 年我国电力行业氮氧化物排放量为 1018.7 万吨，呈现出明显的下降趋势，较 2011 年下降了 8%。对全国氮氧化物排放总量的减排贡献巨大。

为积极响应国家对燃煤机组提出的氮氧化物减排要求，近几年我国电力行业脱硝机组装机容量的占比显著升高。2012 年，纳入重点调查统计范围的火电厂共 3127 家。其中，独立火电厂 1824 家，拥有 4625 台机组，共有脱硝设施 438 套；自备电厂 1303 家，拥有 2517 台机组，其中 71 台有脱硝设施。目前我国火电行业的脱硝技术已经相对成熟，但是脱硝装置的运行水平及企业监管能力还有待提高，需要借鉴日本的成功经验。（数据来源：2012 年环境统计年报）

# 大气氮氧化物控制技术指南

## — 工业锅炉 —

中华人民共和国环境保护部

独立行政法人国际协力机构



## 前言

本《氮氧化物控制技术指南》是中国环境保护部与株式会社数理计划和公益财团法人国际环境技术转移中心实施的独立行政法人国际协力机构的技术合作项目“中华人民共和国大气氮氧化物总量控制项目”的内容之一，由株式会社数理计划和公益财团法人国际环境技术转移中心与中国环境保护部一起共同编制。

在 2011 年开始的十二五规划中，中国政府将氮氧化物列入了控制对象，各行各业开始高度重视氮氧化物减排技术，制定了排放标准，并针对污染源采取了控制措施。经过中央和地方政府正确的现场指导以及企业自身的努力，十二五规划制定的减排目标有望基本达成，但希望进一步改善大气环境的呼声依然很高，在 2016 年开始的十三五规划中，中国政府依然会将氮氧化物作为控制对象。

本指南的对象行业工业锅炉行业中新建企业从 2014 年 7 月开始、现有企业从 2015 年 10 月开始执行锅炉大气污染物排放标准（GB13271-2014）规定的 NO<sub>x</sub> 排放标准。目前，国内企业正在引进技术、改进设备等，为实现达标做各种努力。

在上述项目中，中方负责编写中国国内 NO<sub>x</sub> 减排的改善情况和需求，研究 JICA 专家介绍的控制方法在中国国内应用的可行性；日方负责根据中方提供的信息、案例分析及专家座谈会上中方专家的介绍等，提出适合中国的减排措施等。本指南旨在将本项目的活动结果进行汇编，通过本指南为地方政府和企业制定 NO<sub>x</sub> 控制措施提供参考。

本指南重点介绍了日本的 NO<sub>x</sub> 控制技术，对日本现行的 NO<sub>x</sub> 控制的相关政策、企业的运行管理方法和监测分析方法等，同时还加入了中国需要的相关内容。

本指南在编写时得到了有关部门和人员的大力协助，在开展案例分析活动中得到了湖南省湘潭市有关部门和企业的积极协助和配合，在此深表谢意。我们衷心地希望本指南能够为中国的地方政府和处于生产一线的企业等提供参考。

2015 年 10 月

中华人民共和国环境保护部  
独立行政法人国际协力机构



## 目录

1	日本工业锅炉的概要	1
1.1.	工业锅炉的发展情况	1
1.2.	锅炉的定义	3
1.3.	工业锅炉的定位	3
1.4.	工业锅炉安装数量	4
2	日本工业锅炉的相关环保规定与政策	6
2.1.	环境标准	7
2.2.	控制标准	7
2.3.	SO <sub>x</sub> 排放标准（通过 K 值进行量和总量的控制）	8
2.4.	NO <sub>x</sub> 排放标准	10
2.5.	烟尘排放标准	13
2.6.	监测标准	13
2.6.1.	分析方法	13
2.6.2.	监测管理	14
2.6.3.	日常监测	15
2.7.	公害防治管理员制度	15
2.8.	补贴制度	16
2.8.1.	防止公害事业团的补贴	17
2.8.2.	对中小企业的融资	19
2.8.3.	日本开发银行的融资	20
2.8.4.	税收方面的措施	20
2.9.	技术普及与技术开发活动	20
3	工业锅炉的氮氧化物减排技术	22
3.1.	工业锅炉构造	22
3.1.1.	锅炉类型	22
3.1.2.	燃料	30
3.1.3.	燃烧技术	35
3.2.	氮氧化物（NO <sub>x</sub> ）	45
3.2.1.	氮氧化物生成的基本原理及环境影响	45
3.2.2.	氮氧化物减排技术的基本原理	48
3.2.3.	氮氧化物（NO、NO <sub>2</sub> ）对环境的影响等	48
3.3.	工业锅炉的氮氧化物减排技术	49
3.3.1.	燃烧室的氮氧化物生成控制技术	49
3.3.2.	烟气脱硝技术	57
3.4.	节能	62
3.5.	锅炉的燃烧控制与运行管理	66
3.5.1.	控制的目 的等	66
3.5.2.	燃烧控制	66
3.5.3.	运行管理	67
3.6.	工业锅炉氮氧化物控制措施总结	70
4	工业锅炉氮氧化物防治案例分析	72

4.1. 中国国内的应用事例 .....	72
4.1.1. 概要 .....	72
4.1.2. 研究应改善的部分及评估 .....	73
4.2. 日本的应用事例 .....	75
4.2.1. 事例 I .....	75
4.2.2. 事例 II .....	76

# 1 日本工业锅炉的概要

## 1.1. 工业锅炉的发展情况

在产业活动中，工业锅炉作为动力和加热源是支撑企业活动的原动机。工业锅炉与医院、楼房等设施使用的制冷供暖锅炉对人们的生活带来了很大影响。1705年，英国的汤玛斯·纽科门（Thomas Newcomen）发明了常压蒸汽机，之后经詹姆斯·瓦特（James Watt）等改良，推动了欧洲产业革命的发展。据资料记载，日本的筑丰煤田在1875年、高岛煤矿在1890年引进了锅炉。1870-1880年，日本进入锅炉国产化时期，三菱重工、川崎重工、大阪铁工所（现在的日立造船）以及火车制造等企业开始生产船舶用锅炉。1900年代初，高尾铁工所（1908年）、平川铁工所（1912年）、飒波铁工所（1912年）成立，开始生产卧式单炉胆锅炉（Cornish boiler）、双炉胆锅炉（Lancashire boiler）、机车锅炉（locomotive boiler）、炉筒烟管式锅炉（flue and smoke tube boiler）及水管锅炉（Water tube boilers）等。1900年-1940年是日本产业的黎明期，产业迅速发展，工业锅炉在煤矿、制丝、纺织、造纸、发电、棉织、丝织、制糖、面粉、啤酒等所有使用热能的行业都得到了广泛应用。1950年以后，日本迎来了工业高度增长期，市场对高温高压、大功率且安全高品质的锅炉需求越来越迫切。在这一背景下，日本的锅炉生产企业开始引进欧美的先进技术，具体见表 1-1。

随着先进锅炉的普及，日本相继颁布了《工业标准化法》（1949年）、《陆用钢制蒸汽锅炉结构 JIS B8201》（1954年）、《锅炉及压力安全规则》（1959年）、《烟尘排放限制法》（1959年）、《热管理法》（1951年）、各种大气污染限制法规以及《工厂能源使用合理化法》（1979年）等，完善了工业锅炉的监理、限制标准的法令和标准，为提高日本的锅炉制造技术和锅炉相关的配套技术及维护管理水平做出了巨大贡献。从现代国际相关规范制定的发展变化来看，对日本影响最大的是 ISO-TC11 国际标准化审议（1997年）、美国修订《ASME 锅炉及压力容器规范》（1998版）以及欧盟发布《压力设备指令（PED）》等。

表 1-1 1950 年代技术引进代表例

锅炉生产厂家	引进技术
三菱重工(株)	Combustion Engineering(USA) Sulzer Brothers(瑞士)
Bubcock-Hitachi(株)	Babcock & Wilcoxs (UK. USA)
石川岛播磨重工业(株)	Foster Wheeler (USA) Sulzer Brothers(瑞士)
横山工业(株)*	Siemens(德国)
川崎重工业(株)	La Mont(德国)
汽车制造(株)*	Siemens(德国)

(株)Takuma	Sulzer Brothers (瑞士) Clayton (USA)
-----------	---------------------------------------

\*现在的川崎重工业(株)

日本工业锅炉的蒸汽等负荷形态及燃料情况随着时代的变迁变化很大，主要是顺应了市场需求和燃料市场的变化。用于加热、烘干、加湿、蒸馏、动力源、制冷供热等的蒸汽和温水以汽—水、汽—空气、汽—固体、汽—液体等热交换或直接送气的形式得到了广泛利用。但是，蒸汽和温水的性质规格多样，现在使用的燃料也多种多样。蒸汽规格的变迁从低压饱和蒸汽变为高温高压化和大型化；燃料则从以煤炭为主流逐步变为重油、轻油、天然气和生物质燃气。进入构建循环型社会的时代后，生活废弃物和工业废弃物作为有机可燃物也成为了珍贵的燃料。

随着燃料种类的变化，1980年代，日本从以燃煤为燃料的炉排燃烧（Stoker firing）、煤粉燃烧（Pulverized firing）和以燃油/燃气为燃料的燃烧器燃烧（Burner firing）发展成为以低热值、高水分的生物质和废弃物为燃料的时代，流化床燃烧（Fluidized Bed firing）得到了广泛普及。水循环方面也从规模和蒸汽规格方面发展成为自然循环式、强制循环式和贯流式等。

截至1950年代，日本的大气污染防治也仅仅是在烟囱上安装简易旋风分离机，以减少烟尘的排放。进入1960年代，随着制造业的迅速发展，锅炉数量和煤烟排放量增加，日本全国各地发生公害污染，迫使日本开始加强控制公害措施，制定烟尘、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>和污水等的排放浓度标准，安装除尘器和烟气脱硫脱硝设备。

热管理方面，由于国内能源资源匮乏，日本于1979年制定了《节能法》和《热管理法》，严格实施燃烧、热损等的改善以及工厂等热效率的节能管理，这对锅炉结构及运行管理的革新产生了巨大影响。

21世纪要求工业锅炉具有高效性和经济性，采取IT化控制和无人化运行操作，并能够控制温室气体排放，高性能、环保型锅炉得到了普及。

## 1.2. 锅炉的定义

一般利用燃料燃烧后所产生的热加热/蒸发炉内的水等热媒介，产生规定的压力、温度的蒸汽、热水等的装置。从广义上来讲，也包括通过传导、辐射、对流等热交换，将媒介（水、气体、传热油等）中所带的其他设备产生、排放的热能及电能进行热回收，产生蒸汽及温水的装置。适用国家法规的工业锅炉是指，产生超过大气压的蒸汽，并将蒸汽供给其他地方的装置及其附带的过热器及节煤器。温水锅炉是指，用火、燃气及其他高温气体等媒介或电热将带有压力的水或热媒加热后供给其他地方的装置。锅炉的定义不仅是制定锅炉的设计、制作、安装等规则及标准，也是在防治大气污染、水质污浊、噪音、振动等各种公害行政措施中对锅炉机能、形态及适用法规的解释，非常重要。

## 1.3. 工业锅炉的定位

在日本，作为原动机的锅炉，其应用行业及热媒介（蒸汽、温水、传热油）等的用途不同，管辖部门和适用法规也不同。

用于发电企业及自备电的发电锅炉，由于其公用性及社会影响性较大，要求设备的机能须具有高度的可靠性及稳定性。因此，使用法规及管辖部门与工业锅炉及制冷供暖等生活锅炉不同，结构设计、材料、操作资质、检修规定及维护管理等也有各自的规定。表 1-2 为日本锅炉的行政管辖划分。

由于工业锅炉及生活锅炉与发电锅炉在压力、蒸汽温度等规格以及维护管理技术方面要求的水准不同，划分其管辖部门是为了有效地采取行政措施。

表 1-2 日本锅炉的管辖部门划分

划分	发电锅炉	工业锅炉
用途	公共用 一般电力企业 独立发电企业 特定发电企业	工业用 作为一般不附加发电的制造业的热源和动力
	自备电：自用 (剩余电力可售电给电网)	商业用：制冷供暖、厨房、医院等的热源
适用规格等	电气事业法、技术标准 安全检查规定等	劳动安全卫生法 锅炉及压力容器安全规则
管辖部门	经济产业省	厚生劳动省

根据锅炉及压力容器安全规则的规定，日本按受热面规模及蒸汽压力对工业锅炉进行了分类，对安装、定期检修及操作使用做了明确规定，具体见表 1-3。例如，超过规定受热面积及最高使用压力的锅炉必须由持有“锅炉技师资格证”、“锅炉操作技能培训结

业证”以及“锅炉操作特训结业证”的人员操作使用及进行安全监督。

保有水量少、受热面积在 3 m<sup>2</sup> 以下的小型贯流锅炉等由持有“锅炉操作技能培训结业证”的人员操作。

表 1-3 法规对工业锅炉的分类（适用法规：劳动安全卫生法）

锅炉的类型	受热面积 (m <sup>2</sup> )	备注
锅炉	>3.0	除简易锅炉以外的锅炉
小型锅炉	1.0-3.0	<0.1MPaG 时汽包内径及长度有限制
小型锅炉	0.5-1.0	<0.1MPaG
简易锅炉	<0.5	<0.1-0.3MPaG
温水锅炉	>14	温水锅炉
	8-14	小型锅炉

此外，锅炉在法规上的划分类型分别适用大气污染、水质污浊、噪音振动等各种公害标准值及操作使用等方面的行政规定。

#### 1.4. 工业锅炉安装数量

进入 2000 年代后，工业锅炉发生了巨大变化，从厚重长大型的多耗能型产业形态向先进的高科技产业转变，能源消耗结构也发生了变化。很多企业废弃大型锅炉转而采用多个小型锅炉合设的形式，使用燃料也更加多样化。

劳动安全卫生法登记的安装锅炉数在 1978 年度达到了峰值，之后大幅减少，进入本世纪后，2000-2009 年减少了 32%。2013 年度锅炉受热面积小于 40 m<sup>2</sup> 的锅炉占 66.7%，锅炉类型如表 1-4 所示，炉筒烟管锅炉、小型贯流锅炉及温水锅炉占 72%。日本工业锅炉的特点从使用燃料可以看出，为了达到城市圈严格的 NO<sub>x</sub> 排放标准，改用燃气锅炉；为了控制温室气体排放，促进再生能源的普及利用，改善能源的国内自给率等，普遍采用将废弃物及生物质等有机可燃物作为燃料的锅炉。从表 1-5 所示的 2011 年度锅炉安装数量可以看出，燃油燃料锅炉站 71.7%。表 1-6 为 2013 年度按使用燃料统计的工业锅炉安装数量。

表 1-4 各种类型的工业锅炉安装数量

(截至 2012 年 12 月)

锅炉类型	安装数	构成比 (%)
水管 自然循环式	3,145	11.1
强制循环式	198	0.7
贯流式	4,312	15.3

圆筒锅炉（炉筒烟管）	10,170	36.0
组合式铸铁锅炉	3,148	11.1
温水锅炉	6,072	21.5
其他	28,250	100

注：厚生劳动省管辖锅炉的安装数。不包括小型锅炉，包括商业用锅炉。

出处：JBA 锅炉年鉴（2013）

表 1-5 工业锅炉的规模

（截至 2013 年度）

受热面积（m <sup>2</sup> ）	<40	40-<100	100-<200	200-<500	500-
安装数	18,833	5,192	2,103	1,403	719
%	66.7	18.4	7.4	5	2.5

出处：JBA 锅炉年鉴（2013）

表 1-6 按使用燃料统计的工业

（截至 2011 年度）

使用燃料	安装数	构成比（%）
燃油	26,776	71.7
燃煤	186	0.5
燃气	6,440	17.3
其他（废弃物、副产品）	3,926	10.5
合计	37,325	100

出处：锅炉年鉴（2012）

## 2 日本工业锅炉的相关环保规定与政策

---

工业锅炉排放的有害物质包括烟囱排放的煤尘、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、有害物质等与燃烧有关的烟尘、燃料装卸及处理飞灰、燃烧灰时带起的粉尘、臭气、连续炉水排污以及烟气处理设备排放的污水等。

公害问题作为社会问题凸显，日本于 1967 年制定了《公害防治基本法》、1972 年制定了《自然环境保护法》。根据上述法律，日本采取了工业锅炉方面的大气污染防治及水质污浊防治等环境行政措施，在公害防治及自然环境保护方面发挥了重要作用。但是，随着工业的迅速发展，环境问题也发生也巨大变化，现在的环境问题主要集中在 CO<sub>2</sub> 排放等造成的全球气候变暖、氟利昂排放造成的臭氧层破坏、SO<sub>x</sub> 等酸性气体排放造成的酸雨等全球性环境保护、大城市圈 NO<sub>x</sub> 排放造成的大气污染以及日益增加的废弃物等造成的生活环境问题。除 1980 年代的传统工业公害的外，废弃物焚烧处理设施排放的二恶英类有害物质以及机动车尾气、制冷剂氟利昂类等与日常生活密切相关的活动造成的污染源也在不断增大。

仅凭传统的控制方法已无法应对这些新的环境问题。1993 年，日本制定了公害对策基本法，制定并实施了环境基本法。基本法由三章四十六条构成，基本理念有以下三点：

- ① 享受并继承环境资源；
- ② 构建环境负荷影响少的可持续发展社会；
- ③ 通过国际协调积极推进全球环境保护。

此外，还明确了为达成这一理念国家、地方政府、企事业单位及国民的责任和义务。根据环境基本法，日本政府还分别制定并实施了大气污染防治、水质污浊防治、噪音振动限制、臭气防治的相关法律法规。

1962 年制定的《关于限制煤烟排放等问题的法规》实际上是之后限制排放法律体系的开始。法律体系中明确规定了公害的对象范围、公害污染源排放企业的责任 (PPP: Polluter pays Principle)、行政部门的责任和义务等，实行 SO<sub>x</sub>、烟尘及其他粉尘浓度排放限制制度。

1968 年日本开始实行 SO<sub>x</sub> 的 K 值控制、1974 年开始实行 SO<sub>x</sub> 总量控制制度。1977 年，NO<sub>x</sub> 被纳入有害物质范围，并从 1981 年开始在东京、横滨、川崎、大阪等制定区域实行总量控制制度。

1997 年，二恶英被指定为有害大气污染物质的，并且，同年还制定了环境影响评价法，要求火力发电厂等建厂时必须通过环评。对于影响大气环境的 NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 及悬浮颗粒物 (SPM) 等参数，要求必须实施掌握现状、预测影响、定量评估及事后调查等。

## 2.1. 环境标准

大气污染物的控制方面，针对环境基本法第 16 条第 1 款规定的与大气污染有关的环境条件，以保护人的健康为原则设定了标准浓度。表 2-1 为日本的大气污染环境标准。这些标准均为在可以在正确掌握大气污染情况的地方，按照规定的监测方法监测时的参照标准。

表 2-1 大气污染环境标准

物质	环境条件
二氧化硫	小时值的日均值为 0.04ppm 以下，且小时值为 0.1ppm 以下
一氧化碳	小时值的日均值为 10ppm 以下，且小时值的 8 小时平均值为 20ppm 以下
悬浮颗粒物	小时值的日均值为 0.10mg/m <sup>3</sup> 以下，且小时值为 0.20mg/m <sup>3</sup> 以下
光化学氧化剂	小时值为 0.06ppm 以下
二氧化氮	小时值的日均值在 0.04ppm- 0.06ppm 范围内或低于此范围
苯	年平均值为 0.003mg/m <sup>3</sup> 以下
三氯乙烯	年平均值为 0.2mg/m <sup>3</sup> 以下
四氯乙烯	年平均值为 0.2mg/m <sup>3</sup> 以下
二氯甲烷	年平均值为 0.15mg/m <sup>3</sup> 以下

## 2.2. 控制标准

日本的煤烟采取多方面的控制标准，有排放标准控制、总量控制及燃料使用标准等。

### ① 排放标准

排放标准有国家统一制定的一般排放标准、适用于多种污染物同时存在及煤烟排放设施集中区域的特别排放标准、以及地方政府在国家排放标准基础上制定的加严标准三种。

### ② 总量控制

对于工厂企业集中、仅凭一般排放标准难以全部环境达标的区域，针对特定工厂排放的 SO<sub>x</sub> 及 NO<sub>x</sub> 等烟尘制定总量控制标准。

截至 2014 年，针对 24 个区域采取了 SO<sub>x</sub> 总量控制，针对 3 个区域采取了 NO<sub>x</sub> 总量控制。

### ③ 燃料使用标准

燃料使用标准有以下两种：

- i. 根据季节使用燃料的措施；
- ii. 指定区域使用燃料的措施

由于通过采取上述措施可以控制各区域的全年污染程度，因此，这是一种地方长官(市

长、镇长等) 可以通过劝告、命令的方式要求排污企业使用优质燃料、减少燃料使用量的制度。

### 2.3. SO<sub>x</sub> 排放标准 (通过 K 值进行量和总量的控制)

很多国家的 SO<sub>x</sub> 排放标准为烟气浓度标准。日本最初也是的排放标准也是以烟气浓度为标准的, 但是, 环境并没能达标。因此, 1968 年日本开始采用 K 值控制方法。此外, 对于工厂企业集中、仅凭各设备的 K 值排放控制环境无法达标的区域, 由国家指定区域, 由当地都道府县知事主持计算整个区域的允许排放总量, 指定总量削减计划。

#### a. K 值排放控制

按划分的区域 (K 值), 将下列公式计算的允许排放量作为标准:

$$q = K \times 10^{-3} H_e^2$$

q: SO<sub>x</sub> 的允许排放量 (m<sup>3</sup>N/h)

K: 各区域的常数 (3 < K < 17.5)

SO<sub>x</sub> 排放烟囱多的区域 K 值小, 标准严。

H<sub>e</sub>: 有效烟囱高度 (m): 烟囱实际高度+烟上升高度(参照图 2-1)

H<sub>e</sub>: H<sub>0</sub>+0.65 (H<sub>m</sub>+H<sub>t</sub>)

$$H_m = 0.795 \sqrt{Q \cdot V} / 1 + 2.58/V$$

$$H_t = 2.01 \times 10^{-3} \cdot Q \cdot (T - 288) \cdot (2.30 \log J + 1/J - 1)$$

$$J = 1 / \sqrt{Q \cdot V} \times [1460 - 296 \times V / T - 288] + 1$$

H<sub>0</sub>: 排放口的实际高度 (m) (参照图 2-1)

Q: 15°C 时的烟气排放量 (m<sup>3</sup>/sec)

V: 排放速度 (m/sec)

T: 排放温度 (K)

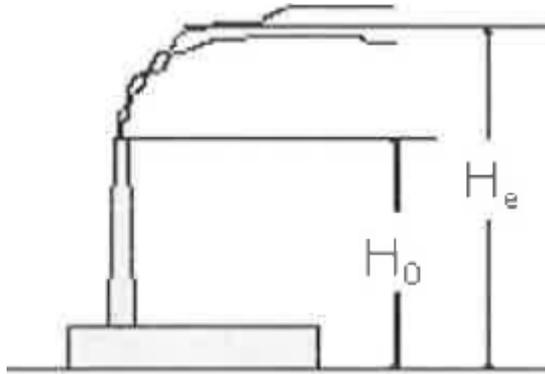


图 2-1 烟囱高度  $H_e/H_0$

**b. 总量控制标准的基本公式**

SO<sub>x</sub> 总量控制的计算方法有以下两个基本方法：

- ① 根据原燃料使用量的增加，使单位平均允许排放量排放量减少的算法（原料料使用量方法）。

$$Q = a \cdot W^b$$

Q: SO<sub>x</sub> 允许排放量 (m<sup>3</sup>N/h)

W: 特定工厂等所有煤烟产生设备的原燃料使用量 (重油换算 kl/h)

a: 督道府县知事为达成减排目标量规定的常数

b: 0.08-1.0, 为督道府县知事规定的常数

- ② 聚合的最大地表浓度在指定区域的所有指定工厂为固定浓度的算法（最大聚合地表浓度计算方法）

$$Q = C_m / C_{m0} \cdot Q_0$$

Q: SO<sub>x</sub> 允许排放量 (m<sup>3</sup>N/h)

Q<sub>0</sub>: 指定工厂安装设备的 SO<sub>x</sub> 排放总量 (m<sup>3</sup>N/h)

C<sub>m</sub>: 最大地表浓度 (知事为达成减排目标规定的值 vol %)

C<sub>m0</sub>: Q<sub>0</sub> 相关的最大聚合地表浓度 (vol %)

表 2-2 为日本福冈县的工业锅炉 SO<sub>x</sub> K 值控制例：

表 2-2 SO<sub>x</sub> K 值控制例（福冈县）

区域	K 值
北九州市（新建）	1.75
大牟田市（新建）	2.35
福冈市	8.76
久留米市	13
其他区域	17.5

## 2.4. NO<sub>x</sub> 排放标准

由于各种设施的燃烧条件等不同，NO<sub>x</sub> 产生特性也不一样。因此，煤烟产生设备的 NO<sub>x</sub> 排放标准按设备的类型和规模分别加以规定。从 1973 年第一次制定标准以来，1975 年、1977 年、1979 年先后四次强化并扩大了标准范围。

1978 年修订为表 2-1 所示的环境标准，并规定“日均值超过 0.06ppm 的区域原则上应在 7 年内达到 0.06ppm 的标准”。1981 年，NO<sub>x</sub> 被指定为总量控制对象物质，东京都特别区等 3 个区域被指定为 NO<sub>x</sub> 总量控制物质区域，逐步采取 NO<sub>x</sub> 减排措施。

NO<sub>x</sub> 产生于燃料燃烧时，要达到环境标准只有减少烟气排放量和降低浓度两种方法。即：通过改善燃烧方法控制 NO<sub>x</sub> 生成，或去除烟气中的 NO<sub>x</sub>。

### ① NO<sub>x</sub> 排放标准（浓度控制标准）

如表 2-3 NO<sub>x</sub> 排放控制标准所示，锅炉的允许排放浓度根据锅炉设备使用的燃料、锅炉型号、烟气量加以规定。特别是燃煤锅炉，考虑到 NO<sub>x</sub> 生成机制，排放控制标准分别按燃烧方式规定。由于每种燃料的空气比都不同，因此，作为标准的 O<sub>2</sub> 浓度也分别按燃料类型规定。

表 2-3 工业锅炉的日本 NO<sub>x</sub> 排放控制标准概要

煤烟产生设备	规模 最大额定烟气量 (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> N/h)	残余 O <sub>2</sub> 浓度 (%Vol)	排放标准 (ppm) *
燃气专烧锅炉	>50	5	60
	4 -50		100
	1 - 4		130
	<0.5 -1		150
劣质煤锅炉 (炉顶燃烧器)	>70	6	200
	4-70		250

	<0.5-4		350
劣质煤专烧锅炉 (炉顶燃烧器) >30 万 m <sup>3</sup> N/h	>70 30-70	6	200 250
劣质煤专烧锅炉 火炉分隔墙型、 火炉热释放率 >14 万 kcal/m <sup>3</sup> h	>70 50-70	6	200 250
劣质煤锅炉 上述以外	>70 30-70	6	200 250
劣质煤专烧锅炉 上述以外	>70 40-70 >0.5-40	6	200 250 350
燃煤专烧锅炉 层燃方式 自然循环型 >14 万 kcal/m <sup>3</sup> h	>20-25 万 m <sup>3</sup> /h	6	250
燃煤锅炉 接线型倾斜式燃烧器	>100 万 m <sup>3</sup> N/h	6	200
燃煤锅炉 流化床燃烧	>4 万 m <sup>3</sup> N/h	6	350
固体燃烧锅炉 抛煤机炉排燃烧	4-20	6	320
固体燃烧锅炉 流化床燃烧	<40	<0.5-4	250
固体燃烧锅炉 上述以外	>70 4-70 -4	6	200 250 350
液体燃烧锅炉	>50 1-50 -1	4	130 150 280
固体燃烧小型锅炉 受热面积<10m <sup>2</sup>		6	350
废弃物焚烧炉 悬挂转、连续炉		12	250
废弃物焚烧炉		12	250

连续炉 上述以外												
<p>*NO<sub>x</sub> 是 NO、N<sub>2</sub>O、NO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等的混合物。燃烧过程中产生的 NO<sub>x</sub> 大部分为 NO，NO<sub>2</sub> 的产生量虽因燃烧条件等不同所烧会有些波动，但也只占几个百分点。NO<sub>2</sub> 的产生率虽然很低，但具有很强的毒性，因此，环境标准中对 NO<sub>2</sub> 浓度做了规定。并且，JIS 的 NO<sub>x</sub> 浓度检测法也要求按照 NO<sub>2</sub> 标准进行检测。</p> <p>实际上，NO/NO<sub>2</sub> 比因燃料、设备类型的不同也不一样。日本以燃煤为燃料的 NO<sub>2</sub> 换算的 NO<sub>x</sub> 排放系数如下：</p> <table> <tr> <td>发电锅炉</td> <td>70</td> <td>kg/108kcal</td> </tr> <tr> <td>水泥烧成炉</td> <td>140</td> <td></td> </tr> <tr> <td>焦炉</td> <td>20</td> <td></td> </tr> </table> <p>（资料来源：1997 环境厅大气保全局大气规制课）</p> <p>如果硬要将 ppm 换算成 mg/m<sup>3</sup>，假设烟气组分 100%为 NO<sub>2</sub>时，</p> $100\text{mg/m}^3 \quad \approx \quad 200\text{ppm}$ <p>（实际上，设备产生的 NO 占 95%以上，因此，100mg/m<sup>3</sup> 约为 140ppm）</p>				发电锅炉	70	kg/108kcal	水泥烧成炉	140		焦炉	20	
发电锅炉	70	kg/108kcal										
水泥烧成炉	140											
焦炉	20											

## ② NO<sub>x</sub> 总量控制

对于 NO<sub>x</sub> 排放源集中、无法确保环境达标的区域实行总量控制。总量控制规划由知事在听取相关的市长、镇长、村长、审议会及其他合议制机构的意见后制定。NO<sub>x</sub> 允许排放量的计算例如下：

### a. 根据原燃料使用量的增加，使单位平均允许排放量排放量减少的算法（原料使用量方法）。

$$Q = a \cdot W^b$$

Q: NO<sub>x</sub> 允许排放量 (m<sup>3</sup>N/h)

W: 特定工厂等所有煤烟产生设备的原燃料使用量 (重油换算 kl/h)

a: 都府县知事为达成减排目标量规定的常数

b: 0.08- 1.0, 为督道府县知事规定的常数

### b. 在考虑烟气排放量、地域分布情况等因素的前提下，计算特定工厂安装的所有 NO<sub>x</sub> 排放设备的允许排放量

$$Q = k \{ \Sigma(C \cdot V) \}^L$$

Q: NO<sub>x</sub> 允许排放量 (m<sup>3</sup>N/h)

C: 设备系数 (知事按设备类型规定)

V: 各设备的烟气排放量 (m<sup>3</sup>N/h)

k: 知事为达成减排目标量规定的削减常数

L: 知事在考虑排放特性的前提下，在 0.8-1.0 的范围内规定的常数

## 2.5. 烟尘排放标准

烟气中含有的“灰尘”和“煤渣灰”等固体颗粒物称为“烟尘”，用这一定义与煤粉碎等时产生的固体颗粒“粉尘”区别开来。烟尘中含有无机物、有机物及各种金属类物质，是造成烟尘沉降等环境恶化的原因，因此，环境标准中规定了排放标准，对其加以控制。表 2-4 为典型锅炉类型的烟尘排放标准。收集的烟尘法律要求必须作为工业废弃物正确处理，适用废弃物处理法。

表 2-4 典型锅炉类型的烟尘排放标准

设备名	规模 烟气量 (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> N/h)	一般排放标准 (g/m <sup>3</sup> N)	O <sub>2</sub> 浓度 (%vol)
燃气专烧锅炉	4 · >20	0.05	5
	<4	0.1	
重油专烧锅炉及 气体液体混用锅炉	>20	0.05	4
	4 · 20	0.15	
	1 · 4	0.25	
	<1	0.30	
	小型锅炉	0.30	
黑液燃烧锅炉	>20	0.15	—
	4 · 20	0.25	
	<4	0.30	
燃煤锅炉	>20	0.10	6
	4 · 20	0.20	
	<4	0.30	

## 2.6. 监测标准

对于各设备排放的含有大气污染物质的烟气，日本在《大气污染防治法》中，根据各设备的烟气量和是否采取总量控制等，规定了监测分析的频率。

### 2.6.1. 分析方法

日本认可的烟气中的 NO<sub>x</sub> 分析方法有 JIS 规定的化学分析法 (JIS K0104) 和连续分析法 (JIS B 7982)。表 2-5 为 NO<sub>x</sub> 化学分析法的类型及概要，表 2-6 为连续分析法的自动测定设备种类及测定范围等。

表 2-5 NO<sub>x</sub> 化学分析法的类型及概要

分析法的类型	定量范围	vol ppm (mg/m <sup>3</sup> )	对象成分气体
Zn-NEDA 法	真空烧瓶法	1-50(2-100)	NO + NO <sub>2</sub>
	圆筒法	5-250(10-510)	
NEDA 法	真空烧瓶法	3-500(5-1000)	NO + NO <sub>2</sub>
	圆筒法	7-1200(13-2500)	
离子色谱法	真空烧瓶法	4-1400(8-2800)	NO + NO <sub>2</sub>
	圆筒法	20-7000(40-145000)	
PDS 法	真空烧瓶法	10-300(20-620)	NO + NO <sub>2</sub>
	圆筒法	12-4200(24-8400)	
萨尔茨曼分光光度法		5-200(10-400)	NO <sub>2</sub>

表 2-6 连续分析法的自动计测器的种类和测定范围等

测量仪器的种类	测定范围 vol ppm	测定对象物质	适用条件
化学发光法	0-10 0-2000	NO NO <sub>x</sub> * <sup>1</sup>	适用于可忽视同时存在的 CO <sub>2</sub> 的影响时或可消除其影响时
红外线吸收法	0-19 0-2000	NO NO <sub>x</sub> * <sup>1</sup>	适用于可忽视同时存在的 CO <sub>2</sub> 、SO <sub>2</sub> 、水分、炭化氢的影响时或可消除其影响时
紫外线吸收法	0-50 0-2000	NO NO <sub>2</sub> NO <sub>x</sub> * <sup>2</sup>	适用于可忽视同时存在的 SO <sub>2</sub> 、炭化氢的影响时或可消除其影响时

\*<sup>1</sup> 先将 NO<sub>2</sub> 转换成 NO 后再测定

\*<sup>2</sup> NO 和 NO<sub>2</sub> 各测定值的和量

## 2.6.2. 监测管理

大气污染相关的环境监测因各种各样的变动因素（例如：采样、监测设备、试剂、称重、计算等）会产生误差。即使这些变动因素保持固定不变，也会因为监测人员不同而产生差异，平均值也会发生变化。日本有计量法和环境计量师制度，对于监测设备建立了 ISO9000（质量管理体系），设备的设计、生产、购买、销售等各个环节都应用了认证管理制度。表 2-7 为监测、分析精度评估和管理例。环境计量师是一种国家资格，主要从事大气、水质等的环境计量证明和计量管理等工作。环境计量师要求具备环境、计量相关法规、化学知识、化学分析、浓度计量、计量管理技术等知识。

表 2-7 监测、分析精度的评估及管理

管理项目	管理内容
测定、分析设备的评估与维护管理	设备的校准、检测限、线性、重复性等的评估、读数装置的维护管理
分析法的证实	检测、定量限度、空白、不确定性的确定
标准作业程序 SOPs:Standard operating Procedure	日常的设备、分析法的评估 试剂的测定、技能培训、检修维护手册
数据评估与管理	灵敏度波动、空白的评估 结果、条件等的记录、管理表等的使用及结果报告
外部精度管理	培训会、共同实验的参加及主办 交叉检验的实施 标准物质、试剂的使用、结果的报告披露

### 2.6.3. 日常监测

日本有很多区域对烟气排放达一定量以上的工业锅炉，就其污染物排放情况及是否正常运行实施日常、连续的在线监测，要求监测项目有 NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、CO、N<sub>2</sub>O 等。图 2-2 为烟道烟气自动分析仪的实例。

(NO<sub>x</sub> 监测范围：100-5000ppm、其他还监测 SO<sub>x</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>)



图 2-2 烟道烟气自动分析仪（非分散红外线吸收法）中国计量法审定№.2006-C118

(出处：堀厂制作所)

## 2.7. 公害防治管理员制度

法定的公害防治管理员制度是对日本大气环境改善做出巨大贡献的制度。像工业锅炉那

样的工业锅炉煤烟排放达一定量以上的工厂、特定工厂必须设立选任具有法定资格的管理员或公害防治机构，并在都道府县知事处备案。

#### 【对象行业】

- 制造业（包括物品的化工业）
- 电力
- 供气
- 供热

机构体系由应成为特定工厂公害防治措施负责人的“公害防治总负责人”和分管公害防治措施技术的“公害防治管理员”组成。公害防治管理员是具有资质的人员，根据烟气量及排放有害物质的种类可选任不同等级资质的人员。

锅炉方面的公害防治管理员管理的大气污染技术工作如下：

- 检查使用的燃料
- 检修煤烟产生设备(锅炉)
- 操作、检修及修理煤烟处理设备及其配套设备
- 监测煤烟量或煤烟浓度并记录监测结果
- 检修、修理监测设备
- 发生事故时采取应急措施
- 降低煤烟量或煤烟浓度、制限设备使用及其他必要措置

作为 NO<sub>x</sub> 排放设备公害防治管理员完成工作的必要条件，要求其应具有要求学历和工作年限外，还应具备以下基础知识：

- 公害概论：大气污染的现状、大气污染的产生机理、大气污染的影响等相关知识
- 大气污染相关法规
- 燃烧、煤烟防治技术：燃料、燃烧计算、防治技术、NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub> 去除技术
- 煤烟的扩散：扩散现象、扩散理论、
- 除尘/集尘技术
- 监测技术：燃料试验法、燃烧管理测量、NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub> 监测分析、烟尘监测、设备管理

## 2.8. 补贴制度

1967 年制定的《公害对策基本法》第 24 条规定，“对于企业投资建设防止公害的设施，国家或者地方公共团体必须努力采取必要的金融、税收以及其他措施给予支持”。而且还规定“在构建前述的措施时，要特别考虑到中小企业”。根据这样的基本思路，为了促进污染发生源的企业采取防止公害措施，日本实施了补贴、公共金融、税制优惠措施、工厂搬迁及指导措施、技术指导提供信息、企业内部组织建设以及人才培养等各种措施。在这之后，有政府背

景的机关进行了统合重组，机关团体的名称、事业内容频繁地发生了变动，但是在这里，按照当时的名称，我们介绍一下日本的产业公害对策非常活跃的 20 世纪 60 年代以后开展的主要工作。

### 2.8.1. 防止公害事业团的补贴

防止公害事业团是为落实政府对公害问题的补贴政策而在 1965 年成立的专业机构。1992 年法律修改后，防止公害事业团更名为“环境事业团”，2004 年又改名为“环境保护机构”，事业内容也进行了重新调整评估。同时，成立当初是属于通商产业省的下属单位，环境厅成立之后，转为由环境厅管辖。防止公害事业团实施的主要补贴项目如下。

#### 2.8.1.1. 建设转让项目

对于建设防止公害设施技术、资金方面比较困难的企业及公共团体，事业团直接建设设施，完工后转让的项目。运营方式是：建设费用由政府提供低息贷款，转让后由委托方的企业及公共团体来偿还贷款给事业团。偿还期设施是 20 年以内，机械设备是 15 年以内，是低息贷款。具体的事业项目如下。

##### ① 共同防止公害设施

在同行业的工厂比较集中的地区，相比每个工厂和企业单独建设处理设施，共同建设一个设施的话有可能降低成本。出于这样的考虑，才会实施这种共同防止公害设施的建设转让项目。与大气有关的，比如煤烟处理设施、粉尘防止设施等，也成为建设转让项目的对象。

##### ② 集体建设建筑物

随着城市化的发展和产业结构的变化，难以确保空间来建设防止公害的设施，会造成邻近地区公害已经是不可避免的。因为这些理由，因此为多家企业集体搬迁，准备搬迁土地、平整土地、建设厂房以及建设防止公害设施、然后进行转让的项目。这个项目中也有可能包括在搬迁后的地点建设共同防止公害设施。

##### ③ 缓冲绿地

为了防止从工业地带排放的煤烟和粉尘等造成公害问题，非常有效的做法是在工业区和居民区之间种植缓冲绿地，将两个区隔开。大规模的建设绿地需要大量的费用，事业团代替地方公共团体来建设绿化地带，然后再转让给地方公共团体。

##### ④ 大气污染对策绿地

树木能吸收污染物质，具有净化大气的功能。利用树木的这个优点，为了缓和大气污染开展绿地建设项目。这个项目不仅包括在工厂周边建设绿地，还包含在城市区域内建设大规模的绿地项目。

图 2-3 显示建设转让项目成果的推移。

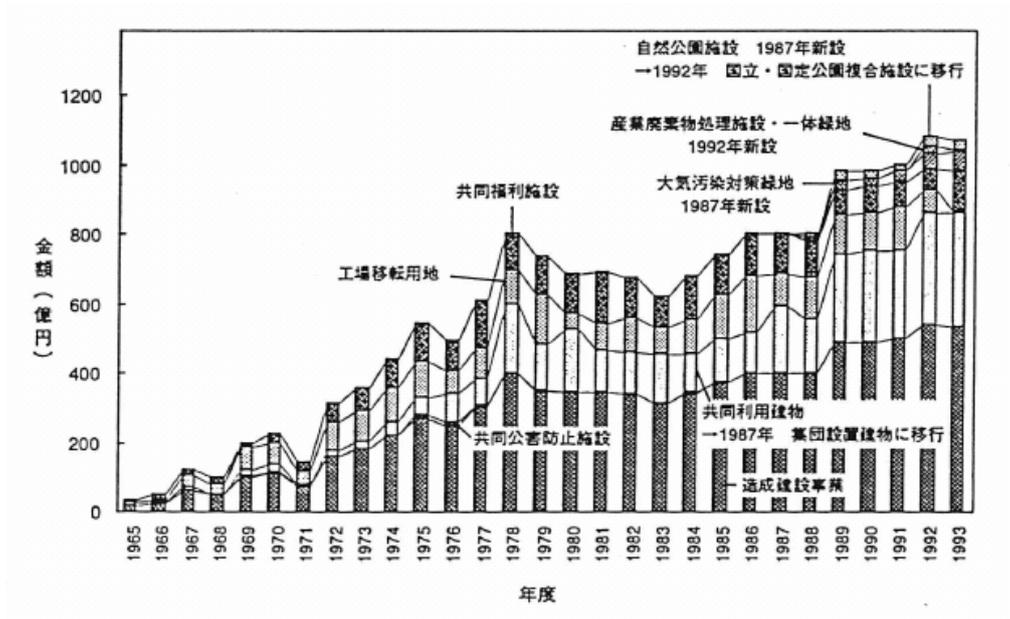


图 2-3 建设转让项目成果的推移

(出典:《环境事业团的概要和事例》，环境事业团，1994)

### 2.8.1.2. 融资项目

对企业及公共团体发放低息贷款，来促进大家开展防止公害的活动。偿还事业团贷款，除了一部分项目外，一般设施在 20 年以内，机械设备在 15 年以内。可以融资的设施和项目如下。

#### ① 防止产业公害设施

单独或者复数的工厂建设共同利用的防止公害设施，对其所需费用发放贷款。防止公害设施里面包括煤烟处理设施和粉尘防止设施等防止大气污染的设施。

#### ② 控制特定氟利昂排放设施

为了防止对臭氧层的破坏，对于企业建设控制特定氟利昂及卤排放的设施或者再生利用设施发放贷款。

图 2-4 所示实际融资金额的推移。

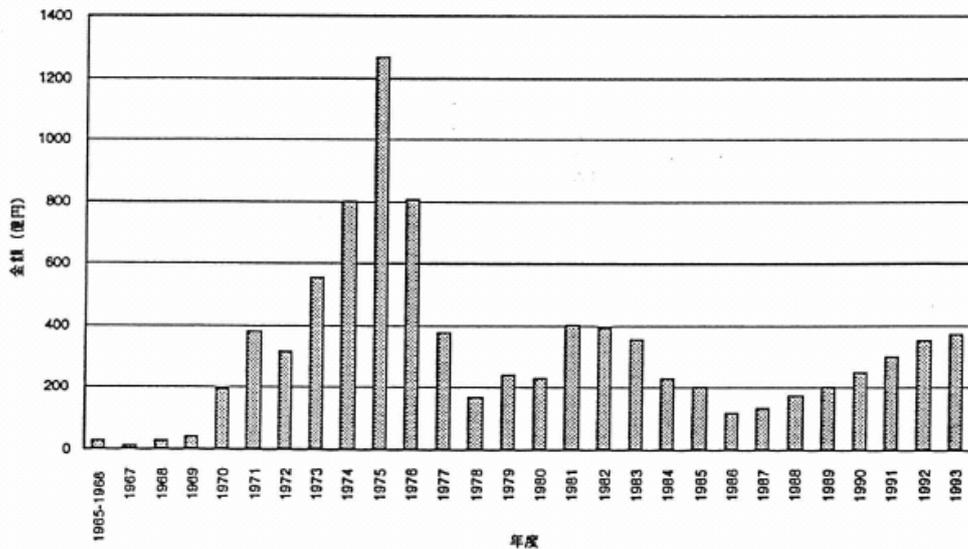


图 2-4 融资金额的推移

(出典:《环境事业团的概要和事例》, 环境事业团, 1994)

## 2.8.2. 对中小企业的融资

### 2.8.2.1. 中小企业金融公库

是对中小企业者发放贷款的由政府全额出资的金融机关。为了促进中小企业的增长和发展, 向中小企业发放一般金融机关不愿意发放的设备资金和长期周转资金。1965年开始, 为建设防止产业公害的设施以及实施防止公害的工厂搬迁等所需资金, 发放特别利息的贷款。防止大气污染方面, 如集尘除尘装置以及改善燃烧设施、测量分析装置等也是融资的对象。

### 2.8.2.2. 国民金融公库

国民金融公库是政府全额出资的金融机构, 目的在于向很难得到银行及其他一般金融机构的资金融资的国民大众提供必要的项目资金。从1970年开始, 为建设防止产业公害设施发放特别贷款。贷款发放的对象企业及设施, 与中小企业金融公库的情况大体相同。

### 2.8.2.3. 中小企业事业团

依据《中小企业事业团法》作为综合性地实施中小企业对策的机构, 由原来的中小企业振兴事业团和原来的中小企业共济事业团合并而成立了中小企业事业团。针对防止产业公害的相关项目, 实施资金补贴。

- 共同防止公害项目
- 防止公害设施共同利用项目
- 工厂等集群化项目(建设工业园等)
- 工厂共同化项目(共用工厂的建设)

- 共同设施项目

#### 2.8.2.4. 中小企业设备近代化资金

依据《中小企业近代化资金等助成法》规定，以为中小企业设备近代化做出贡献为目的，在各都道府县的窗口为个别的中小企业发放贷款。对象包括：通商产业大臣指定的行业种类的企业、及通产局长批准都道府县知事(省长)指定的地方产业振兴行业的企业为对象，对防止公害设施发放贷款。

#### 2.8.3. 日本开发银行的融资

日本开发银行是为了提供长期的设备资金，促进经济的重建以及产业开发，为一般金融机关开展的金融业务进行互补、或者奖励而成立的银行。自 1960 年开始发放防止产业公害贷款，针对再生资源设施和节能设施等范围广泛的环境对策，实施贷款和贴息、债务担保等业务。

#### 2.8.4. 税收方面的措施

作为针对防止公害对策的税收方面的优惠措施，国家税收以及地方税收各采取了一些措施。

##### 【国家税收】

- 防止公害相关特定设备等的特别折旧
- 使用年限的特例
- 特定资产的以旧换新时的征税特例

##### 【地方税收】

- 固定资产税的非课税措施
- 固定资产税的征税标准的特例
- 特别土地保有税的非课税
- 企业税的特例

#### 2.9. 技术普及与技术开发活动

在日本围绕工业锅炉开展的技术普及和环保活动中，民间团体和学会在各种制度的贯彻普及及技术研发发挥了巨大作用。行政部门依靠民间团体和研发机构提供信息，与之进行协商，以求制定合理的标准和措施的做法获得了一致好评。特别是在制定大气污染防治措施时，民间团体和学会在 NEDO 等特殊法人、产业界、行政部门及学会相关的信息活动以及先进基础技术的研发中起到了带头作用。设备生产厂家及锅炉用户所属的锅炉、环境领域的各行业团体不仅参与会员培训、人才培养以及业界可共享的基本技术开发方法，而且还参与调查、信息活动乃至对国家建言献策。特别是在提高日本的锅炉、脱硝设备等设备行业技术方面，生产厂家所作出的贡献得到了一致认可。此外，通过开展活动共享行业信息对锅炉制造技术

及大气污染治理技术的相互启发和搞活市场也作出了巨大贡献。工业锅炉相关的主要团体及其活动见表 2-8 工业锅炉相关的主要团体及其活动。

表 2-8 工业锅炉相关的主要团体及其活动

区分	名称	活动	会员数
学会	(一社) 日本机械学会	机械工学 原动机、材料、热力学等的研究	法人 714 个人 30612
	(公社) 大气环境学会	大气环境的研究	
	(一社) 日本能源学会	能源研究 燃料、燃烧、工艺学	法人 241 个人 1444
	日本燃烧器研究会	燃烧技术、节能研究	法人 53
	(公社) 化学工学会	能源、环境、资源等的研究	法人 282
行业协会	(一社) 日本产业机械工业会(JSIMM)	锅炉制造、环境技术相关活动	法人 190
	(一社) 日本锅炉协会(JBA)	工业锅炉相关活动 技术普及、质量、检查、人材培养	个人 7800
	(公财) 日本小型贯流锅炉协会	小型贯流锅炉相关活动	
	(一社) 锅炉维修安装协会	锅炉安装公司的行业活动	法人 392
	(一财) 节能中心(ECCJ)	节能诊断、研修、信息 国际合作项目	法人 2339
	(一财) 燃煤能源中心(J·COAL)	燃煤利用技术的开发、调查、普及 国际合作项目	法人 115
	(独行) 新能源产业技术综合开发机构(NEDO)	高性能锅炉的开发、洁净煤技术的开发	—
	(一社) 产业环境管理协会(JEMAI)	环境监测、环境管理、公害防治 管理员考试、讲座、国际合作项目	法人 51
	(一社) 日本环境测定分析协会	环境计量师、分析公司的各项活动	法人 32
	(公社) 日本环境技术协会(JETA)	大气/水监测技术的体系化、监测 设备的改良、国际合作等	法人 34
	(公财) 北九州国际技术合作协会 KITA 环境合作中心	环境产业的国际合作、培训项目 清洁生产	福冈县下属 相关机构
(公财) 国际环境技术转移中心 (ICETT)	环保相关的技术转移、指导、调 查、普及、研究	中部地区相 关机构	

### 3 工业锅炉的氮氧化物减排技术

#### 3.1. 工业锅炉构造

##### 3.1.1. 锅炉类型

工业锅炉类型一般按照受热面结构与水循环方式、燃烧方式或热交换方式等进行分类。各类工业锅炉均有与其相匹配的需热设备、输出功率、蒸汽条件及经济性，要求必须与需热设备的条件相匹配。表 3-1 所示为工业锅炉的分类型及特征。日本国内目前普及的工业锅炉类型从小容量多炉合设的趋势来看，蒸发量为 500kg/h-10t/h 的炉筒烟管式（自然循环）及小型贯流水管锅炉较多。

从使用燃料来看，燃油、燃气燃料占主流，除自备电用外，目前供暖及工厂蒸汽用锅炉都已不使用燃煤锅炉。1990 年以后，以可燃性废弃物和生物质为替代燃料的锅炉得到了广泛普及。这些锅炉的燃烧方式大多为窑炉燃烧、炉排燃烧及流化床燃烧。热分解气化燃烧作为工业锅炉使用的很少，而城市垃圾气化炉、工业废弃物气化炉作为废热锅炉应用的较多。

图 3-1 所示为炉筒烟管锅炉的外观及原理概念。图 3-2 为多管式小型贯流锅炉，图 3-3 为小型贯流锅炉（低 NO<sub>x</sub> 型）。有几十个生产厂家以中小规模、多管安装、控制低压蒸汽的方式满足市场对这些类型的锅炉的需求。图 3-4 为燃油燃气专烧/混烧锅炉双包式自然循环水管锅炉，图 3-5、图 3-6 为专烧燃煤—逆推排炉燃烧型自然循环锅炉及煤粉水管锅炉的截面结构图。

图 3-7、图 3-8 分别为鼓泡循环流化床锅炉及循环流化床锅炉，图 3-9 为最近快速普及的、以粉碎的可燃性废弃物、木屑、农业废弃物等为燃料的燃煤与生物质混烧循环流化床锅炉。图 3-10 为双锅筒废热锅炉的截面结构图。废热锅炉没有标准结构，根据热回收对象气体及设备设计受热面结构。没有安装回热系统的，由于无法进行燃烧，锅炉自身没有除尘、脱硫及脱硝。

表 3-1 工业锅炉的分类型及特征

大分类	类型	特征、结构等
水管锅炉	炉胆锅炉	以大容积锅炉汽包为主体，与受热面积相比锅炉量多，使用低压。 有双炉胆式、卧式单炉胆式、炉筒式及炉筒烟管式等
	水管锅炉	以水管为主要受热面，可自由计划燃烧室容积和接触受热面，适合大、中输出功率和高压规格，负荷响应性好。 横水管式、立式水管式、倾斜水管式及辐射式等
水循环方式	自然循环式	依靠水与水蒸气的密度差，在上汽包和上汽包、集箱之间自然循环的方式 适合小-中输出功率的锅炉
	强制循环式	利用水泵强制进行水循环。二相流。
	贯流式	受热由长管构成，从管的一端给水，将水加热、蒸发、过热

		后从另一端提供蒸汽的方式，相不变，有单管式和多管式。有小型贯流、高压锅炉用贯流锅炉、基本型的本生锅炉及苏尔寿锅炉等
燃烧方式	燃烧器燃烧	液体、气体燃料及煤粉用燃烧器，在炉内与助燃空气共同喷雾使火焰着火燃烧。
	炉排燃烧	固体燃料在固定床、移动床上进行燃烧的方式。从床下供给助燃空气，在燃料上面着火燃烧。
	流化床燃烧	鼓泡流化床：在流化燃烧室内与床料一起依靠高压空气是料层沸腾燃烧。 循环流化床：料层在燃烧室与床料高速上升燃烧，在尾部除尘器将未燃物回收再循环。
发生热媒体	蒸汽	饱和蒸汽：压力下蒸汽温度的蒸汽 过热蒸汽：超过饱和温度的过度加热蒸汽
	温水	高温水、中温水、低温水
	传热油	低压力
特殊	废热锅炉	将钢铁、有色金属、水泥烧成炉、玻璃等行业的工业炉的烟气、焚烧炉及化学反应设备排放的废热、GT 及 GE 等的废热通过热交换回收，使水变成蒸汽或温水的锅炉
	铸铁锅炉	铸铁炉片前后排列组合的锅炉。 用于供暖、供热水。
	电热锅炉	以电热为热源的锅炉，作为启动、辅助用锅炉

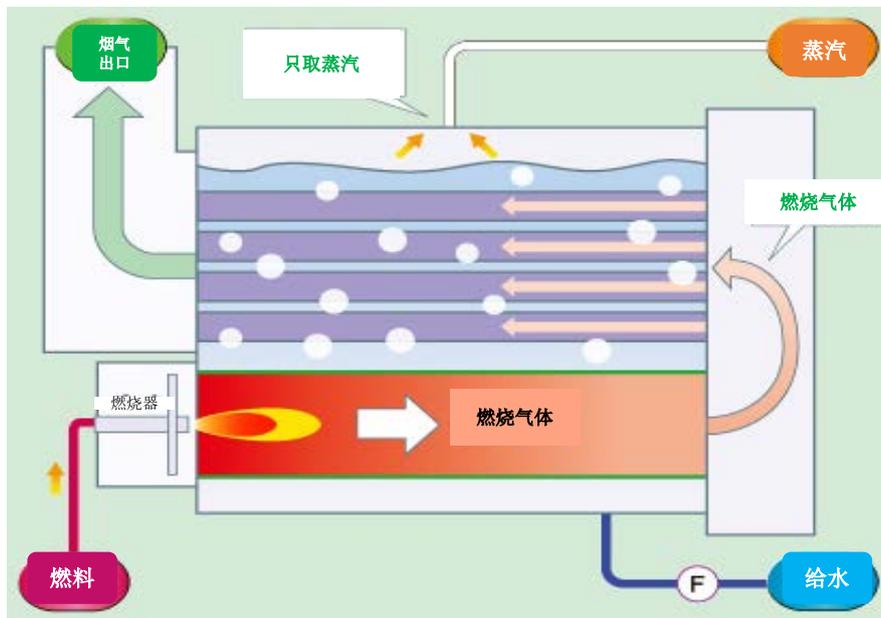


图 3-1 炉筒烟管锅炉的外观及原理概念

(出处: 川重冷热工业产品目录)

参考: 《日本典型的炉筒烟管锅炉生产厂家》

出处: 锅炉年鉴等

川重冷热工业、HIRAKAWA、日本 THERMOENER、IHI PACKAGED BOILER 等

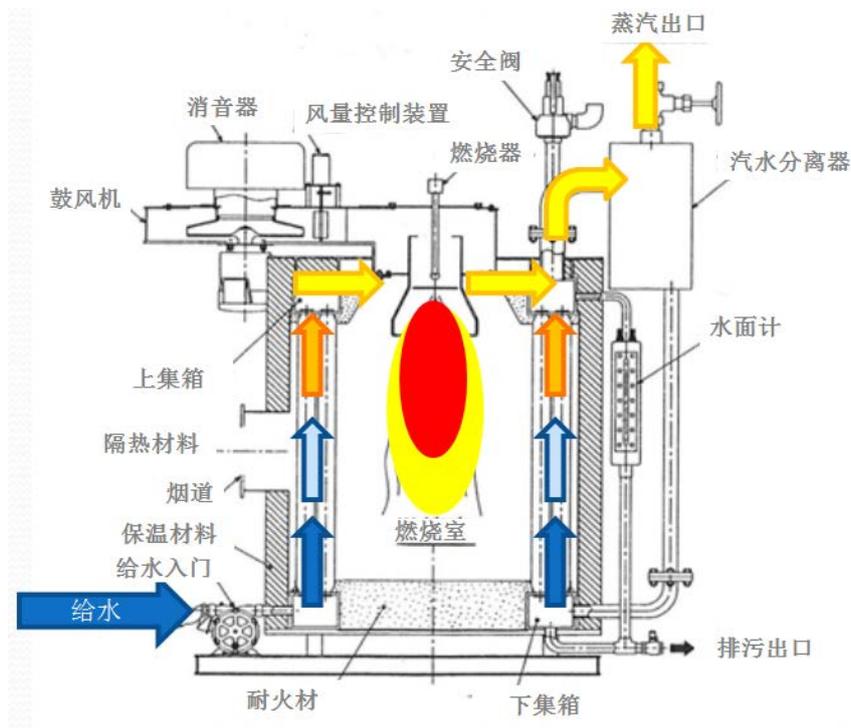
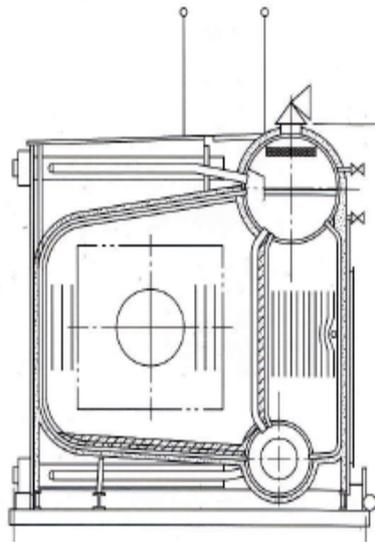


图 3-2 多管式小型贯流锅炉  
(出处: 三浦)



图 3-3 小型贯流锅炉 (低 NO<sub>x</sub> 型) 油燃料 1.5-2.5 t/h  
(出处: 三浦工业产品目录)

参考:《日本典型的炉筒烟管锅炉生产厂家》 出处: 锅炉年鉴等  
三浦工业、前田铁工所、SAMSON、日本 THERMOENER、HIRAKAWA 等



燃烧室截面结构

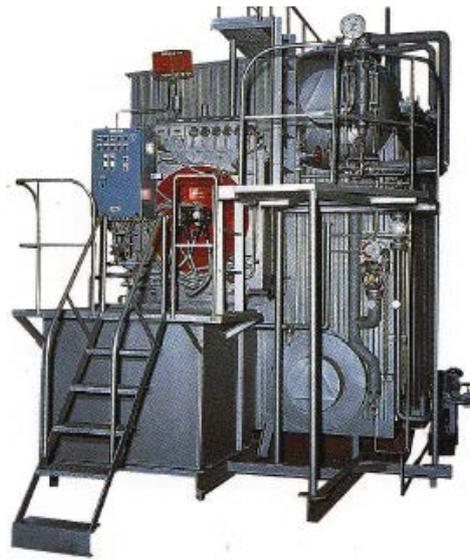


图 3-4 燃油燃气专烧/混烧双锅筒自然循环锅炉

(出处: *TAKUMA NPO* 产品目录)

参考:《日本典型的双锅筒自然循环锅炉生产厂家》出处: 锅炉年鉴等  
川重冷热工业、IHI PACKAGED BOILER、BHIC、TAKUMA、三菱重工等

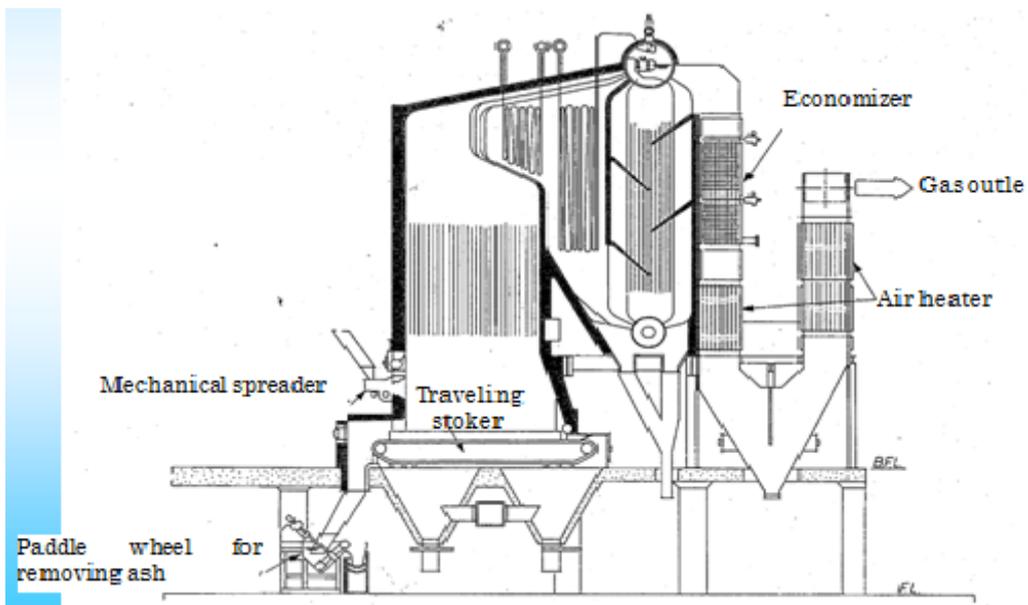


图 3-5 专烧燃煤—逆推排炉燃烧型自然循环锅炉

(出处: TAKUMA 产品目录)

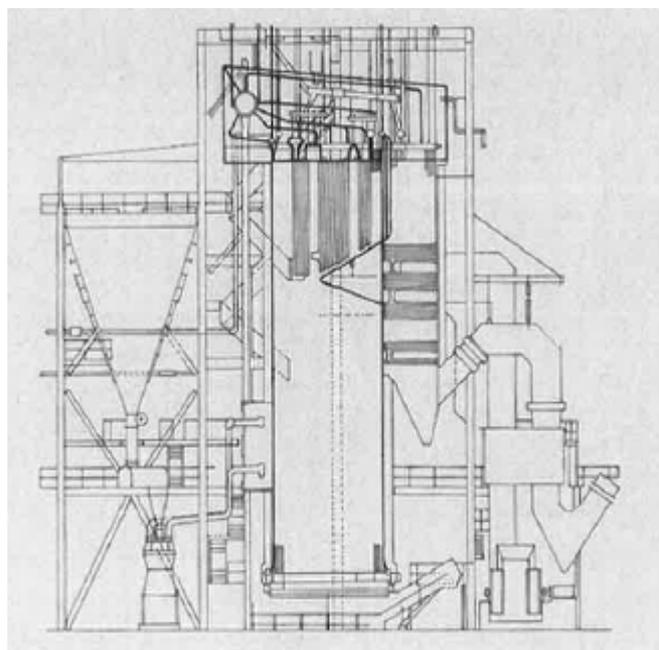


图 3-6 煤粉水管锅炉

(出处: BHIC)

参考:《日本典型的煤粉水管锅炉生产厂家》 出处: 锅炉年鉴等

BHIC、三菱重工、IHI、川崎重工业、TAKUMA 等

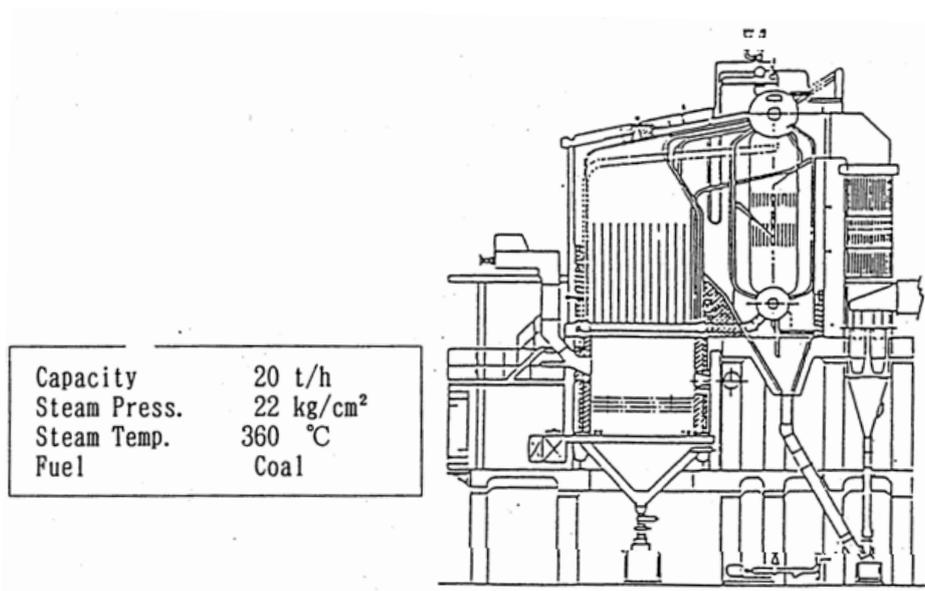


图 3-7 鼓泡 (Bubbling) 流化床燃烧自然循环水管式锅炉  
(出处: TAKUMA)

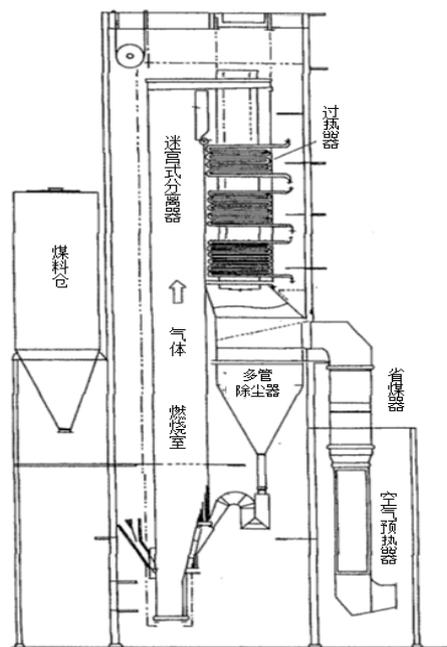


图 3-8 燃煤循环流化床锅炉 (出处: NKK)

参考:《日本典型的流化床锅炉生产厂家》 出处: 锅炉年鉴等  
JFE ENGINEERING、IHI、BHIC、TAKUMA、SHI、三菱重工等

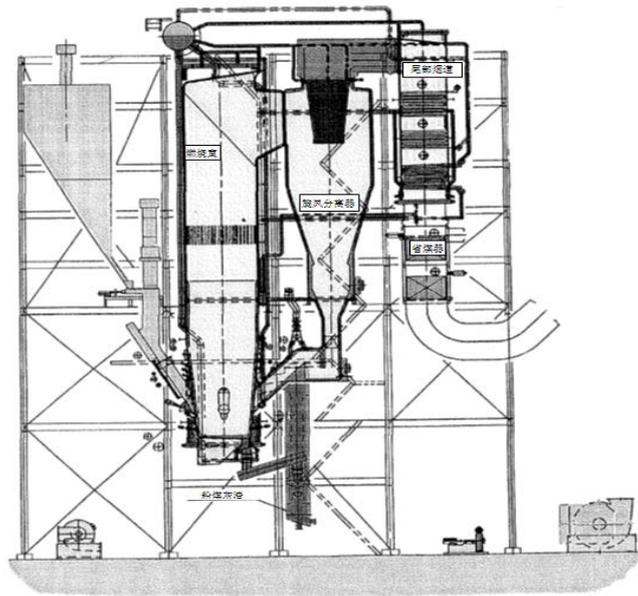


图 3-9 燃煤与生物质混烧循环流化床锅炉  
(出处: TAKUMA)

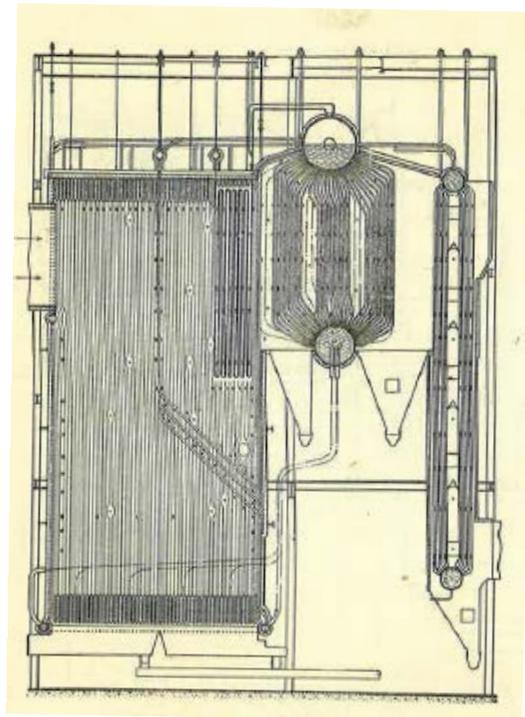


图 3-10 双锅筒废热锅炉  
(出处: BHIC 锅炉便览)

参考:《日本典型的废热环锅炉生产厂家》 出处: 锅炉年鉴等  
三菱重工、川崎重工业等

### 3.1.2. 燃料

#### 3.1.2.1. 燃料特性

工业锅炉使用的主要燃料见表 3-2。可使用燃料多种多样,具体根据锅炉规模、燃烧方式、蒸汽用途、运行条件及经济性评估等来确定。目前,在推进节能、实施可再生能源交易制度、促进废弃物的再利用等社会形势下,在工业界,不仅矿物燃料,只要是含有可燃物及热容量的气体、液体和固体等具有能源价值的介质都得到利用。工业锅炉的燃料主要从装卸性(保存、运输等)、燃烧性、发热量、灰分、环保性及安全性等方面进行评估。燃料的形态大致分为固体燃料、气体燃料及液体燃料三大类,其各自特性及评估如表 3-3 所示。

控制 NO<sub>x</sub> 生成的效果受燃烧室使用的燃料质量影响很大,燃料品质的选择与日常合理管理非常重要。

表 3-2 工业锅炉使用的主要燃料

燃料类型	种类	低位发热量
固体燃料	燃煤:无烟煤、烟煤、褐煤等 块煤、煤粉、沉淀煤、煤矸石等	4,000-8,000 kcal/kg
	生物质:木屑、纸屑、纤维屑、稻壳、 稻草麦秸、枝桠材、蔗渣、椰壳、 有机污泥、动植物残渣等	1,500-3,500 kcal/kg
	废弃物:生活类、可燃性工业废弃物 给水污泥、生活污水污泥	1,500-3,500 kcal/kg
	油焦	8,400 kcal/kg
	RDF、RPF、碳化物	3,000-4,000 kcal/kg
液体燃料	重油,轻油、煤油	9,700-10,400 kcal/L
	废油	<2,000 kcal/L
	FOP(Fuel Oil Product)	9,640-10,400 kcal/kg
	COM (Coal Oil Mixture)	8,200 kcal/kg (C/O=50:50)
	CWM(Coal Water Mixture)	— (根据混合比决定)
	黑液(造纸)	3,140 kcal/kg
气体燃料	LNG	13,000 kcal/kg
	LDG(转炉煤气)	2,200 kcal/m <sup>3</sup> N
	COG(焦炉煤气)	4,500 kcal/m <sup>3</sup> N
	城市煤气 13A(东京都)	10,760 kcal/m <sup>3</sup> N
	废弃物溶解气	3,000- kcal/m <sup>3</sup> N
	生物气	3,000-6,000 kcal/m <sup>3</sup> N

出处:火原协会讲座、东燃气资料等

表 3-3 工业锅炉燃料的特性及评估

	燃煤（固体类）	石油类（液体类）	气体类
装卸性	需要上煤机、输送机、煤堆场、烘干、粉碎等占地面积大的基础设施，需要进行混煤、调整、预防发热氧化等管理，动力费高。哈氏可磨性系数（HGI）是其粉末化的基准。	用管道和罐车输送，方便，油罐储存，需采取安全措施（明火爆炸） 按危险物处置	LNG 沸点低，液体密度低，易管理。需采取安全措施。 LPG 需注意保管温度以及废气中的腐蚀性杂质
燃烧性	煤质不同，着火性、粘结性、破碎性、磨损性、灰的软化溶解等不同	需注意燃烧器的喷雾性能，但比固体燃料好。	是用燃烧器可以得到良好的燃烧。
灰处理	需要处理未燃灰、焚烧灰渣及飞灰等	只处理飞灰	没有灰，无需处理
环保性	需要采取去除烟尘、SO <sub>x</sub> 、NO <sub>x</sub> 、Hg 等的措施	须采取去除烟尘、SO <sub>x</sub> 及 NO <sub>x</sub> 的措施	清洁燃料，不含有害成分（废气除外）
NO <sub>x</sub> 措施	需要应用低 NO <sub>x</sub> 燃烧器，采取脱硝措施	与燃煤相比容易控制 NO <sub>x</sub> 生成	不需要或采用低 NO <sub>x</sub> 燃烧法

### 3.1.2.2. 发热量

实际使用时的发热量根据所含的水分、C、H、O 的组分值及灰分而定。燃料中的水分在锅炉燃烧时以水蒸气的状态存在。由于水蒸气的蒸发热无法利用，这种发热量成为低位发热量（Lower heating value 或 Net heating value），与加上水分蒸发热的高位发热量（Higher heating value 或 Gross calorific value）区分使用。燃煤由于其化学结构不明确，其发热量根据分析值用近似实验公式计算：

$$H.H.V=L.H.V + 6(9H+W)$$

$$L.H.V=81C + 290 (H-O/8) + 25S - 6W$$

H.H.V: 高位发热量 (kcal/kg)

L.H.V: 低位发热量 (kcal/kg)

C: 炭 (%) H: 氢 (%) S: 硫黄 (%) W: 水分 (%)

### 3.1.2.3. 灰分

燃料中的灰分是 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MgO、NaO、K<sub>2</sub>O 等无机质或不燃性物质。燃料不同，灰分质的特征也各异。因此，在是否适合燃烧条件方面需注意以下几点：

- ① 掌握燃烧温度与灰分变化中的软化点、熔融点及流动点，防止妨碍燃烧现象的发生；
- ② 由于灰中含有碱金属的低熔点化合物，因此会在受热面上沉积积聚。一般在含碱量

<0.5 时，很少出现结焦结渣现象；

灰含碱率=碱性成分 wt / 酸性成分 wt

③ 接触受热面飞灰积聚会造成堵塞，应注意布管方式，或安装吹灰设备。

#### 3.1.2.4. 燃料比（固定碳/挥发分）

燃料比对燃煤等固体燃料的燃烧性（燃烧速度、着火性、火焰稳定性等）影响很大，是选择燃烧方式的重要特性，因此，炉排燃烧使用的燃料受到一定的限制。燃煤是碳化深度的指标，碳化深度值越大，燃料比也越大。

#### 3.1.2.5. 粘结性及结块性

指燃煤加热后膨胀，形成块状物质的性质，根据煤的粘结指数判断。粘结指数高的燃煤，可导致煤粉燃烧器喷嘴的粘结堵塞和未燃煤粉增加。炉排燃烧时，可导致火床局部燃烧和漏气燃烧，成为生成 NO<sub>x</sub> 的原因。

#### 3.1.2.6. 着火性

油燃料的着火性有蒸发燃烧和扩散燃烧两种，均为火焰燃烧，有固定的可燃范围。着火性的影响因素有油的种类、形状（粘度、蒸发速度等）、喷雾方式、喷雾粒径、空气比、O<sub>2</sub> 浓度、油温、喷雾压力等。此外，选择的设备机能不当，也是引起振动燃烧及脉动燃烧的原因。

气体燃料的燃料流速、空气比如果不超出燃气特性的合理范围，即可稳定着火。燃气的组分、燃烧器的型号以及湍流扩散火焰、预混合火焰不同，着火的状态也不一样。

燃料比是判定燃煤着火性的因素。固定碳越多，着火性越差。煤粉燃烧由于有未燃损失的影响，燃料比多为 3 以下。此外，燃煤的着火性判定指数可以用下列公式计算：

$$\text{着火性指数} = \frac{HV-81C}{VM+W}$$

其中，**HV**: 原煤发热量(kcal/kg)

**C**: 固定碳 (%)

**VM**: 挥发分 (%)

**W**: 湿分 (%)

着火性判定指数是水分含量多的燃煤着火难易度的判定标准。指数在 35 以下时，需要改善着火性。

烟煤、生物质等有机性固体物燃料的燃烧方式不是燃烧器燃烧时，由于炉排形式及发热量不同着火性也不一样，其着火性指标以燃料比为基准。后述表 2.9 介绍的案例等是选定可适用炉排方式的典型适用燃煤条件。炉排燃烧着火性的好坏对稳定火床的持续以及燃烧区的稳定都有影响。

### 3.1.2.7. 助燃空气量及燃烧气体量

燃料完全燃烧后，所需的空气量、燃烧气体量可根据燃料的元素构成通过计算正确算出。燃烧组分与助燃空气量、燃烧气体量的关系如图 3-11 所示，在实际的锅炉中，不是按燃烧所需的理论空气量 ( $L_0$ )，而是按过剩空气量燃烧，实际的助燃空气量 ( $A$ ) 及燃烧气体量 ( $G_v$ ) 的过剩空气会增加。

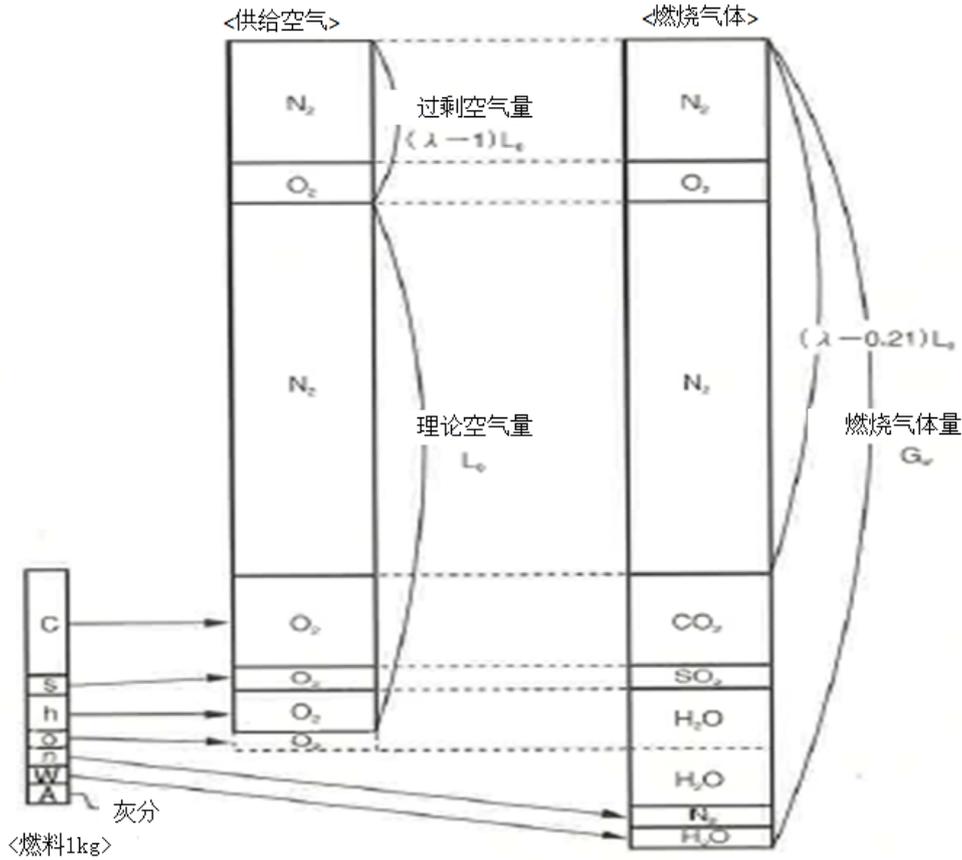


图 3-11 燃烧组分与助燃空气量、燃烧气体量的关系

#### ① 固体、液体燃料

实际助燃空气量  $A = mL_0$

$$L_0 = 8.89C + 26.7(H + O/8) + 33.3S \quad (\text{Nm}^3/\text{kg fuel})$$

实际燃烧气体量  $G_v = (m-1)L_0 + G_0$

$$G_0 = (1-0.21)L_0 + 1.867C + 11.2H + 0.7S + 1.2244W + 0.8N \quad (\text{Nm}^3/\text{kg fuel})$$

其中，C, H, O, S, N, W 为燃料 1kg 中的 kg 含量，m 为空气比。

② 气体燃料

实际助燃空气量  $A=mL_0$

$$L_0=1/0.21(H_2+0.5CO+2CH_4+3.5C_2H_6+3C_2H_4+\dots - O_2) \quad (Nm^3/Nm^3)$$

实际燃烧气体量  $G_v$

$$G_v=(m-0.21)L_0+CO_2+CO+H_2+3CH_4+5C_2H_6+\dots +N_2 \quad (Nm^3/Nm^3)$$

其中,  $CO, CO_2, CH_4$ : 气体燃料  $1 Nm^3$  中的其他容积 ( $Nm^3/Nm^3$ )

$m$ : 过剩空气系数

### 3.1.2.8. 燃煤等固体燃料

一般工业锅炉使用的固体燃料有燃煤、木材、蔗渣等生物质燃料、脱水污泥、稻壳等可燃废弃物。其中影响  $NO_x$  生成的因素为燃料比及 N 份等。木材、燃煤的典型性状如表 3-4 所示。

表 3-4 固体燃料的典型性状

种类 成分		木材	燃煤		
			褐煤	烟煤	无烟煤
高位发热量	kcal/kg	1,800-3,500	4,800-6,950	6,000-8,400	6,500-8,400
工业分析	水分 %wt	30-60	5-15	1-5	27-35
	灰分 %wt	1-5	2-25	2-20	1-5
	挥发分 %wt	75-80	30-50	20-45	2-20
	固定碳 %wt	20-25	30-40	45-80	5-15
燃料比	—	≒0.2	<1	1.0-4.0	4.5-17
元素分析	C %wt	49-51	60-75	65-85	80-90
	H %wt	5-6	4-5	4-6	2-5
	N %wt	0.2-1.0	1.0-1.5	1.0-1.5	1.0-1.5
	T.S %wt	微量	0.5-2.0	0.5-2.0	0.5-2.0
	O %wt	42-45	15-30	5-15	1-5

(出处: 日本锅炉协会 技士 TEXT 等制作)

### 3.1.3. 燃烧技术

本节将使用介绍固体、液体、气体燃料的燃烧技术。

#### 3.1.3.1. 燃烧特性

燃烧是一种燃料因空气或  $O_2$  氧化后产生光或火焰的现象，固体燃料（燃煤等）、液体燃料（重油、轻油等）、气体燃料（LNG、LPG、生物气等）等种类不同，其燃烧机理也不一样。燃烧在燃烧工学上的定义如下：“氧化时产生的热导致温度上升，最终产生的热辐射线波长及强度肉眼可以感知的现象”。

##### ① 燃料油的燃烧机理与 $NO_x$ 生成

燃料油的燃烧分为蒸发燃烧和分解燃烧，是一种火焰燃烧。燃烧反应是一种化学反应，具有蒸发——燃烧的过程。燃料油是一种复杂的多种  $C_mH_n$  的混合物，由于其分解温度比着火或燃烧温度低，因此，在燃烧之前开始分解成  $C_m$  和可燃性气体，并与  $O_2$  结合燃烧。 $C_m$  表面燃烧后成为  $CO_2$ ，可燃性气体( $C_mH_n$ )氧化后经扩散燃烧生成  $CO_2+H_2O$ 。上述燃烧反应产生的热进一步进行热分解，分解燃烧和表面燃烧相互混合或同时发生，使燃烧持续进行。影响燃烧的因素有油种性状（粘度、发热量等）、喷雾方式（油压等）、喷雾粒径、过剩空气系数、 $O_2$  浓度、助燃空气温度、油/空气的搅拌混合、燃烧器配置等。

油燃烧是依靠燃烧器旁边喷雾油滴的不断蒸发、着火持续的，因此产生的  $NO_x$  是氮化合物氧化产生的 Fuel  $NO_x$ ，并且，由于同时形成高温火焰，产生 Thermal  $NO_x$  的比例也很高。

##### ② 气体燃烧的机理与 $NO_x$ 生成

气体燃烧有扩散燃烧和预混合燃烧两种。扩散燃烧时氧化速度依靠扩散在湍流区燃烧，具有火焰稳定、控制性强等特点。但在控制  $NO_x$  生成方面，需对火焰形状、停留时间及燃烧温度进行严格控制。预混合燃烧可实现高负荷燃烧及完全燃烧，但由于是高温燃烧，需注意控制 Thermal  $NO_x$  的生成。

除煤气、工业炉废气、生物气等外，LNG 及 LPG 等燃料中几乎不含氮化合物，因此，生成的  $NO_x$  几乎全是 Thermal  $NO_x$ 。

##### ③ 燃煤等固体燃料的燃烧机理及 $NO_x$ 生成

燃煤等固体燃料的燃烧方式不同，燃烧机理也各异。煤粉燃烧时，送入炉内的一次风与煤粉因周围的火焰及周围的高温辐射热而受热，开始着火燃烧，形成由挥发分控制的一次燃烧区。

燃煤颗粒挥发出的  $CH_4$ 、 $H_2$ 、 $CO$  等与周围扩散过来的一次风中的  $O_2$  混合，形成火焰。二次燃烧区主要是焦炭燃烧，从一次燃烧区流入的未燃气体与焦炭通过与二次风的扩散混合进行燃烧。影响燃烧的因素有着火性、燃煤的熔损性（燃烧速度、粒径、燃料比等）、 $O_2$  浓度及炉内温度等。

炉排燃烧是周围的空气或  $O_2$  扩散到燃煤表面，在表面进行燃烧反应。熔点低的成分通过熔融气化等进行蒸发燃烧或分解燃烧。

含有大量有机氮的煤燃料，其  $NO_x$  生成特性具有复杂的反应形态。煤粉燃烧时，一

次燃烧及二次燃烧中均含有 Thermal NO<sub>x</sub> (Zeldvich 机理)、Prompt NO<sub>x</sub> 及 Fuel NO<sub>x</sub>。炉排燃烧的火床高温时或厚层燃烧中接触时间变长时，生成的几乎全是 Thermal NO<sub>x</sub>。

### 3.1.3.2. 空气比

燃烧所需的理论空气量与实际所需的空气量之比称为空气比 (Air ratio) 或过剩空气系数 (Excess air ratio)，其倒数成为当量比 (Equivalent ratio)。空气比是与锅炉燃烧起源的所有动态特性 (效率、气体组分、燃烧温度、气体量及燃烧控制等) 相关的重要特性。

空气比  $m = \text{实际的空气量 } A / \text{理论空气量 } L_0$

当量比  $\varphi = 1/m$

如表 3-5 所示，日本从节能的观点出发，根据燃烧方式及使用燃料，对各种蒸发量的锅炉都从法律上制定了管理标准，并制定了更加严格的目标值 (表 3-6)。

表 3-5 劳动安全卫生法施行令 一般锅炉空气比的管理标准

类型 蒸发量 t/h	负荷率 %	固体燃料* 固定床燃烧	固体燃料 流化床燃烧	液体燃料	气体燃料
>30	50-100	1.3-1.45	1.2-1.45	1.1-1.25	1.1-1.2
10-30	50-100	1.3-1.45	1.2-1.45	1.15-1.3	1.15-1.3
5-10	50-100	—	—	1.2-1.3	1.2-1.3
<5	50-100	—	—	1.2-1.3	1.2-1.3
小型贯流锅炉	100	—	—	1.3-1.45	1.25-1.4

注：\*以煤粉为燃料、蒸发量>10t/h 时，为 1.2-1.3。

表 3-6 劳动安全卫生法施行令 一般锅炉空气比的目标值

类型 蒸发量 t/h	负荷率 %	固体燃料* 固定床燃烧	固体燃料 流化床燃烧	液体燃料	气体燃料
>30	50-100	1.2-1.3	1.2-1.25	1.05-1.15	1.05-1.15
10-30	50-100	1.2-1.3	1.2-1.25	1.15-1.25	1.15-1.25
5-10	50-100	—	—	1.15-1.3	1.15-1.25
<5	50-100	—	—	1.15-1.3	1.15-1.25
小型贯流锅炉	100	—	—	1.25-1.4	1.2-1.35

注：\*以煤粉为燃料、蒸发量>10t/h 时，为 1.2-1.25。黑液燃烧为 1.2-1.3

采用固定床燃烧法在指定的负荷率范围内稳定燃烧，合理控制未燃损失及燃烧很难达到固体燃料的目标值，因此，需要采用高性能的燃烧机。

### 3.1.3.3. 燃烧气体温度

NO<sub>x</sub> 生成位置与火焰及燃烧室的温度有密切关系。燃烧气体的低温化是控制 NO<sub>x</sub> 生成的主要方法，但也受燃烧气氛及锅炉燃烧室热吸收率的制约。因此，需要在研究负荷波动、火焰形状、燃烧室受热面结构、燃烧室热负荷、输出功率及脱硝的经济性等的基础上确定采取何种方法。

由于燃烧气体温度因燃烧室气氛温度及燃烧条件不同变化很大，因此，计算很难计算燃烧气体温度。但是，可以用下列公式计算出假定燃烧气体周围完全隔热状态下的“隔热理论火焰温度”，作为制定措施时的参考：

$$T_g = LHV / (G_v \times C_{pg})$$

T<sub>g</sub>: 理论火焰温度 (°C)

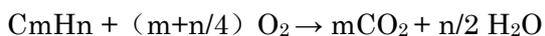
LHV: 燃料的低位发热量 (kJ/kg 或 kJ/m<sup>3</sup>N)

G<sub>v</sub>: 燃烧烟气量 (m<sup>3</sup>N/kg 或 m<sup>3</sup>N/m<sup>3</sup>)

C<sub>pg</sub>: 烟气的平均比热 (kJ/m<sup>3</sup>N · K)

(省略燃烧前空气及燃料的显热)

用本公式进行计算的条件为: 温度为在下列完全燃烧中不发生热分解反应的 2000°C 以下。



### 3.1.3.4. 燃烧方式

由于工业锅炉使用的燃料多种多样，锅炉规模大小不一，且广泛用于多种领域，因此燃烧方式呈多样化。通常液体燃料和气体燃烧的燃烧方式为燃烧器燃烧；燃煤、生物质等固体燃料的燃烧形式多种多样，有炉排燃烧、流化床燃烧、燃烧炉燃烧等；煤粉、木屑之类的木粉、稻壳等也为燃烧器燃烧。

表 3-7 为典型燃烧方式的维护费用及特性的比较，表 3-8 为对专烧燃煤工业锅炉的适用性

表 3-7 典型燃烧方式的维护费用及特性的比较

燃烧方式	设备规模 (t/h)	维护费	空气率	燃烧率	控制性
链式炉排燃烧	1-10	1	1	1	1
抛煤机炉排燃烧	10-300	2	2	2	2
煤粉燃烧	30-300	4	4	4	4
BFC(鼓泡流化床)	10-50	3	4	4	3
CFBC(循环流化床)	30-250	4	4	4	4
燃烧器燃烧 (燃油)	无限制	3	5	5	5
燃烧器燃烧 (燃气)	无限制	2	5	5	5

指标比较: 劣 1<2<3<4<5 优

表 3-8 专烧燃煤时对工业锅炉的适用性

燃烧方式	抛煤机炉排	煤粉	BFC	CFBC
煤质适用性	低燃料比<2.5	适用范围广	可适用劣质煤	可适用劣质煤
燃烧效率	82-88	90-92	87-90	87-90
负荷调节比	1/5	1/2	1/5	1/3
负荷响应性	3 %/min	5 %/min	3 %/min	3 %/min
实际业绩	小型锅炉中多用	大型锅炉中多用	小中型锅炉中多用	大中型锅炉中多用
维护、损耗等	炉排烧损 熟料对策	粉磨机的磨损	内插管的磨损 腐蚀、流动阻滞	火炉内壁面磨损

### 3.1.3.5. 燃烧机及燃料的特征

#### ① 燃烧器燃烧（液体、气体）

##### a. 气体燃烧

与重油燃烧相比，气体燃烧具有以下特征：

通过低压喷射与空气扩散混合燃烧，由于没有燃油燃烧时的喷雾蒸发过程，火焰为短火焰。反应速度及火焰温度受与空气的混合条件左右。由于组分的 C/H 比小，燃烧过程中没有灰尘产生。（不发光焰）

即使是低空气比，燃烧也很稳定，可取得较大负荷调节比，燃烧速度快，可燃范围大。

着火失败的话有爆炸的危险。

##### b. 燃油燃烧

为了保持燃油一定水平的流动性，燃油燃烧采取以下两种方式：加温后油压喷雾方式及加温后利用蒸汽/空气喷雾辅助装置（atomizing assist）形成的扩散效果的方式。与气体燃料不同的是，燃油燃烧经过蒸发的过程后与助燃空气进行扩散燃烧。由于实现完全燃烧需要一定的时间，因此，在控制 NO<sub>x</sub> 生成时需要在喷雾粒径、扩散效果及空气的混合方法等方面采取措施。

##### c. 煤粉燃烧

由于煤粉燃烧的燃烧温度在 1,500℃左右，空气中的 N<sub>2</sub> 发生 Zeldovich 反应产生的 NO<sub>x</sub> 很少。这是因为 N<sub>2</sub> 分解成 N 原子这一反应的活性能量很大，有 315 kJ/mol。因此，生成的 NO<sub>x</sub> 应该是 N<sub>2</sub> 与 CmHn、O<sub>2</sub> 发生扩散火焰反应产生的快速温度型 NO<sub>x</sub>(PromptNO<sub>x</sub>)。燃煤中的氮份产生的 HCN、CN、NH<sub>i</sub> 等经过与 Prompt NO<sub>x</sub> 相同的生成过程，生成 Fuel NO<sub>x</sub>。

#### ② 炉排（Stoker）燃烧

炉排燃烧作为挥发分多的燃煤、木屑、树皮、蔗渣等生物质以及有机性可燃废弃物等

的固体燃料的燃烧方式很早以前就开始使用了。从 1980 年代开始,由于燃煤采购的原因,日本国内运行的炉排燃烧锅炉数量很少,中国及东南亚各国多使用挥发分多的褐煤、烟煤及生物质燃料。

图 3-12、图 3-13 所示为炉排燃烧的燃烧形态及空气、火床的机理。除火下加煤式外,燃料在炉排上铺成一定的厚度,空气从炉排下方送入。燃烧从下往上进行,形成灰层、火床及燃料层(烘干、加热)。炉排有固定火床式(水平形/倾斜形)、顺推炉排及逆推炉排三种,向火床的给料方法也有按固定料层厚度输送的切断推出的方式及通过风力抛煤机或旋转抛煤机向火床抛洒燃料的方式等。

燃烧效率为固定火床式<顺推炉排<逆推炉排。炉算的间距、形状及空气阻力等不同,粉状染料(煤粉、木屑等)筛选、悬浮燃烧率或飞灰会有所增加。如图 3-14、图 3-15 顺推炉排燃烧概念图所示,顺推火床的着火区、燃烧区火床横向呈一条线。由于没有燃烧层的混合,容易发生局部燃烧或漏气燃烧,会造成 NO<sub>x</sub> 生成量增加。采取逆向抛煤方式时,整个火床都成为燃烧区,需要控制燃煤的粒径及料层厚度。

逆推炉排燃烧适用的煤种如表 3-9 所示。超过该值也可以燃烧,但会出现燃烧率、稳定性及负荷响应性降低、NO<sub>x</sub> 生成量增加以及灰渣等问题,容易发生漏气燃烧、局部燃烧,火床上也容易发生这种现象。如果发生局部高温燃烧, Thermal-NO<sub>x</sub> 的生成量则会增加。此外,与煤粉燃烧相比,由于气流燃烧所占的比例小,火床燃烧占绝大多数,因此,在低空气等低 NO<sub>x</sub> 燃烧的控制性方面受到制约。

目前,在使用的烟煤锅炉中多为最大蒸发量为 20t/h 左右的顺推炉排锅炉及输出功率为 30t/h 的中小型逆推炉排锅炉。

表 3-9 逆推炉排燃烧适用燃煤的条件

煤种	烟煤、褐煤、次煤
燃煤粒径	<25mm 但 < 2mm → 30%以内
湿分(附着水分)	< 10 %
高位发热量	>4,000 kcal/kg
灰分	< 35 %
挥发分	>20 %
燃料比	< 2.5
粘结指数(粘结性)	< 2.5
灰的软化点	<1150 °C

在劣质煤及有机性固体燃料(生物质、脱水污泥、可燃性废弃物等)的燃烧中,倾斜阶梯式炉排燃烧非常普及。

这一炉排燃烧经历烘干→燃烧→后期燃烧的过程,燃烧缓慢,适合将含水量多、发热量低、灰分含量高的材料作为锅炉燃料使用时采用。由于这种燃烧方式燃烧温度低,如能

控制不出现漏气燃烧的情况，那么 Thermal NO<sub>x</sub> 的生成量会很少。

图 3-16 为焚烧可燃性废弃物用阶梯式炉排燃烧机结构的一个示例。用于专烧脱水有机污泥、农业废弃物、废弃物等以及与燃煤等混烧的炉排形状及燃烧方式多种多样，非常普及。

### ③ 流化床燃烧

流化床燃烧是一种依靠从层底送入的空气将岩砂、石灰石等与燃烧没有直接关系的颗粒的高温粉体层似沸腾状流化形成流化床后，向形成的流化床中投入直径为几毫米-几十毫米的燃料使其燃烧的方式。作为固体燃烧用锅炉，根据燃烧流态颗粒及烟气流速划分的鼓泡流化床和循环流化床非常普及。

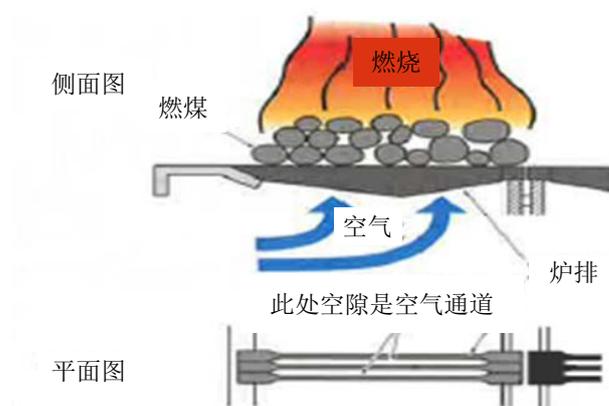


图 3-12 炉排燃烧的燃烧形态

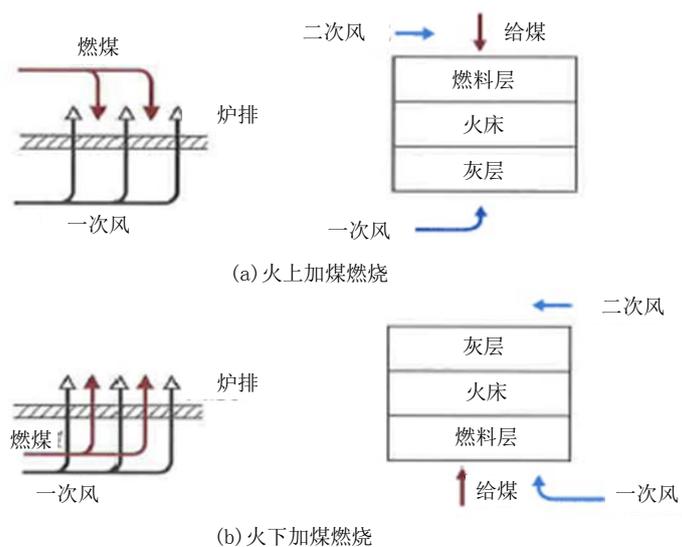


图 3-13 炉排燃烧的空气、火床机理

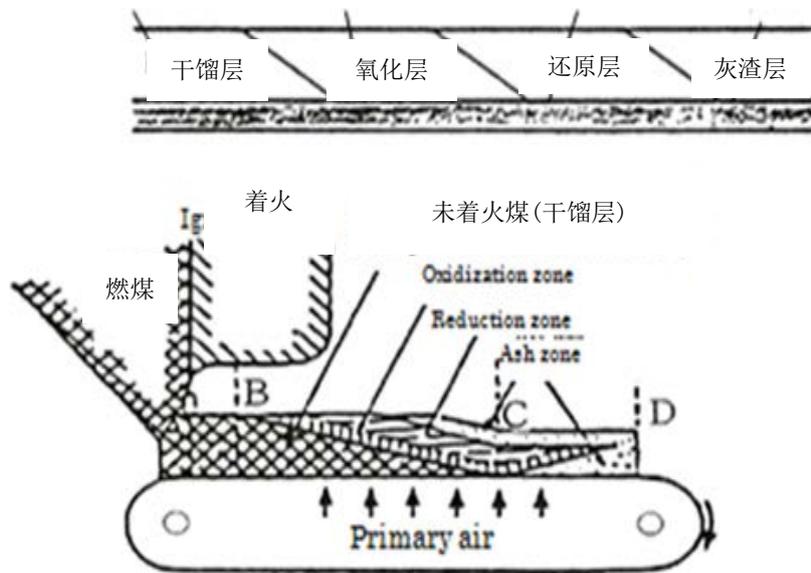


图 3-14 顺推炉排燃烧概念图

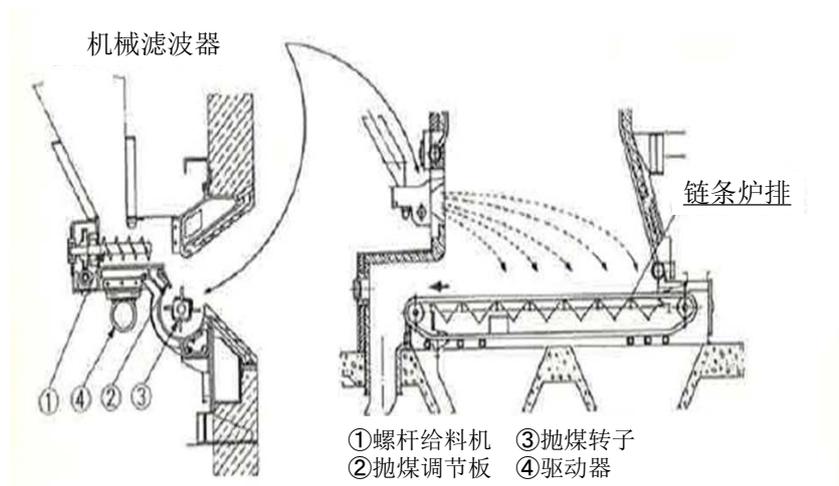


图 3-15 逆推炉排燃烧概念图

#### a. 鼓泡流化床燃烧 (BFBC: Bubbling Fluidized Bed Combustion)

烟气流速缓慢，颗粒在燃料颗粒低于最小流化速度的区域保持静止状态，在高于最小流化速度、空塔速度比较缓慢区域的区域颗粒床内出现鼓泡，随着鼓泡的上升颗粒运动变得活跃，整体呈沸腾状态，但燃料颗粒并未随之沸腾而是留在床内继续燃烧。通常由于流化床内装有蒸发管，可将层内温度控制在  $700-900^{\circ}\text{C}$ ，因此，即使像低熔点燃煤及污泥之类的低热值燃料也可以燃烧，不会发生妨碍溶解的情况。图 3-17 为鼓泡流化床燃烧的流化概念图。

**b. 循环流化床燃烧(CFC: Circulating Fluidized Bed Combustion)**

烟气流速快，为 4-8m/sec，颗粒循环时间（滞留时间）长，在整个燃烧室中不断进行燃烧反应。烟气流速增大，超过燃料颗粒流态化的终端速度后，燃料颗粒与烟气的混合变得更加活跃，部分未燃烬的燃料颗粒随着烟气飞散到设备外。这些飞散的燃料颗粒被尾部的旋风集尘器等装置捕集后再次被送回燃烧室。这样，燃料通过流化和捕集装置被循环，继续燃烧。流化床的循环分为两种方式，一种是旋风集尘器之类的捕集装置安装在燃烧室外的外循环方式，一种是在燃烧室内部循环的内循环方式。图 3-18 为外循环流化床锅炉的基本概念图，图 3-19 为内部循环流化床锅炉的概念图。有关循环流化床燃烧锅炉的具体介绍，请参照 2014 年 7 月 30 日提交的报告（附件 1）。

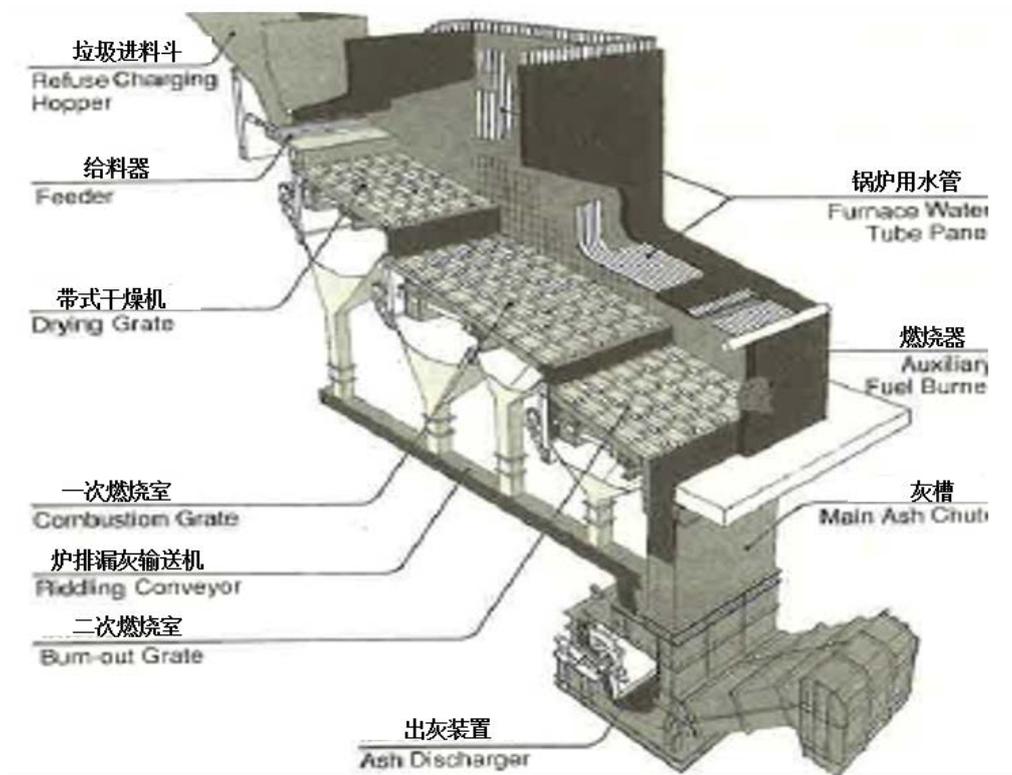


图 3-16 可燃性废弃物燃烧用阶梯式炉排燃烧机

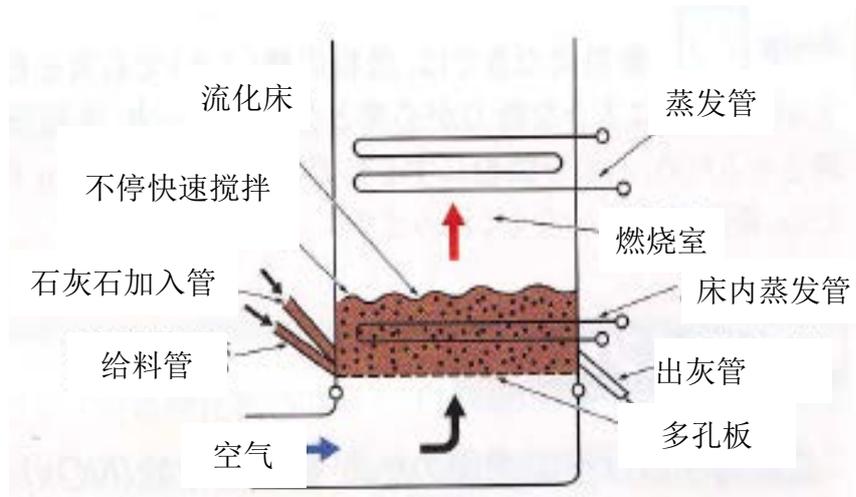


图 3-17 鼓泡流化床燃烧流化概念图

(出处 JBA 资料)

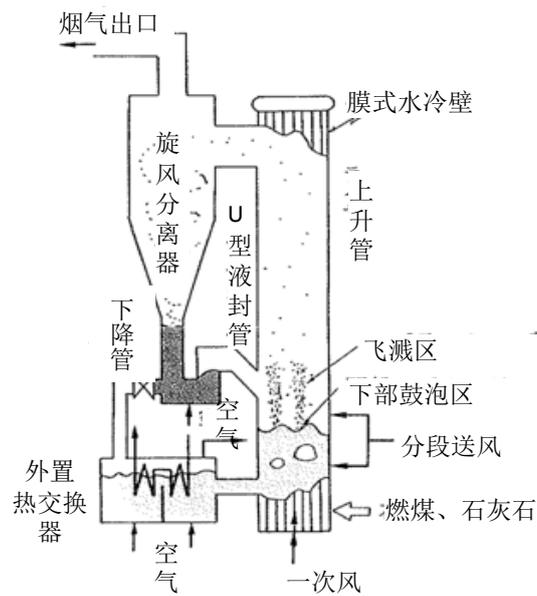


图 3-18 外循环流化床锅炉基本概念图

(出处: 火力原子力发电技术协会)



		炉	
钢铁行业	废热发电 联合循环	强制循环、废热锅炉	高炉煤气 (GT 烟气)、焦炉煤气、加热炉烟气
食品行业	热电联产 热供给	FBC、炉筒烟管、小型贯流、温水、自然循环、贯流锅炉	轻质油、燃气、污泥
制冷供热	蒸汽/温水热交换	铸铁锅炉、温水锅炉、	燃气、轻质油、RDF、废木材
木材加工业	热电联产	FBC、炉排式、自然循环	生物质 (废木材)、可燃性工业废弃物
粗糖厂	热电联产	炉排式、FBC、自然循环、	蔗渣、生物气
工业园区	热电联产 多缶设置方式	CFBC、FBC、炉排式、小型贯流、炉筒烟管、	燃气、可燃性工业废弃物、轻质油
其他低压饱和蒸汽需求行业	单缶或多缶设置方式	小型贯流、炉筒烟管、废热回收、	燃气、轻质油

备注: CFBC: 循环流化床燃烧、FBC: 鼓泡流化床燃烧 PC: 煤粉燃烧器燃烧  
其余的全部是燃烧器燃烧

## 3.2. 氮氧化物 (NO<sub>x</sub>)

### 3.2.1. 氮氧化物生成的基本原理及环境影响

NO<sub>x</sub> 根据其结合状态有 N<sub>2</sub>O、NO、NO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 等多种存在方式, 工业锅炉燃料 (固体、液体、气体) 燃烧产生的主要有 NO 和 NO<sub>2</sub>。通常将这两种的化合物统称 NO<sub>x</sub>。

大气污染物多种多样。燃烧生成的大气污染物中, 去除燃料中的硫份, 即可防止 SO<sub>x</sub> 的生成。但是, NO<sub>x</sub> 的生成过程不同, 即使去除燃料中的氮份, 空气中的氮也会生成 NO<sub>x</sub>, 因此, 在采取 NO<sub>x</sub> 减排措施时, 需考虑燃烧器和燃烧条件等多方面因素。

锅炉的燃烧气体中绝大多数为 NO, 按容积比计算的话, NO<sub>x</sub> 占了 90-95%vol.。除此之外, 烟气中还有 N<sub>2</sub>O、N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 等物质, 但含量都非常低。

经确认, NO 排入空气中后被空气中的 O<sub>2</sub> 或 O<sub>3</sub> 氧化, 使 NO/NO<sub>2</sub> 处于平衡状态。

根据起源, 燃烧产生的 NO<sub>x</sub> 分为以下两种类型:

- ① Thermal NO<sub>x</sub>: 热反应引起的、空气中的 N<sub>2</sub> 分子在高温状态下氧化生成的物质。
- ② Fuel NO<sub>x</sub>: 燃料中所含的各种氮化合物引起的、在燃烧时生成的物质。

#### 3.2.1.1. Fuel NO<sub>x</sub> 的生成及变化

燃料中如果含有氮化合物 (Fuel N), 那么在燃烧过程中氮化合物会转换成 NO。这种 NO 被称为 Fuel NO, 它与因空气中的 N<sub>2</sub> 形成的 NO(Thermal-NO)的生成过程不同。燃料的种类和产地不同, 燃料中的氮含量也不一样, 通常在表 3-11 所示的范围内:

表 3-11 燃料中的氮含有率

燃料种类	氮含有率 (重量%)
原油 (中东产)	0.09 - 0.22
C 重油	0.1 - 0.4
A 重油	0.05 - 0.1
轻油	0.02 - 0.03
煤油	0.0001- 0.0005
油焦	1.12 - 2.59
燃煤	0.2 - 3.4
LPG、城市燃气	—
LNG	0.1
树皮	0.5
生物质 (木材、蔗渣、稻壳)	0.05-0.1
城市废弃物	0.4-0.6

出处: *Formation Mechanisms & Controls of Pollution in Combustion System*, JSME 等

图 3-20 为在煤燃烧的热分解过程中挥发分 NO 的生成及 Char-NO 的生成变化。

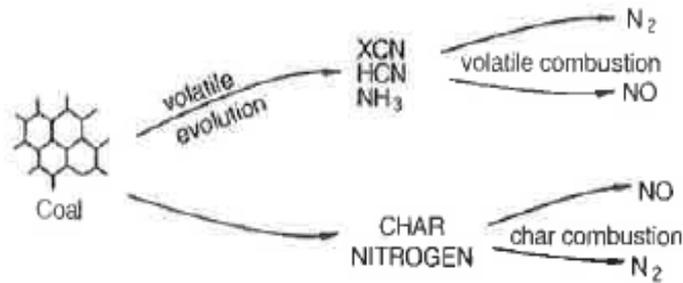


图 3-20 燃煤中氮份在燃烧过程中的变化

石油类中所含的氮氧化物有吡啶(Pyridine,  $C_5H_5N$ )、喹啉(Quinoline,  $C_9H_7N$ )等碱性物质及吡咯(Pyrrole,  $C_4H_5N$ )、吲哚 (Indole,  $C_8H_7N$ )、咔唑(Carbazole,  $C_{12}H_9N$ )等非碱性物质的环状化合物。燃煤类燃料所含的氮化合物的结构虽不完全明确,但应该是杂环结合或链结合。这些结合很松散,在燃烧过程中容易释放出  $N$ 、 $NH_i$  ( $i=1,2$ ) 等化学物种,在温度较低的情况下也可以转换成  $NO$ 。

假设  $C_mH_{2n}$  类燃料的含氮量为 1 %wt., 这 1%的氮份全部转换成  $NO$  时,在当量比 1

的理论干基助燃空气中 NO<sub>x</sub> 为 1,500ppm·mol (O<sub>2</sub>=0%换算)。燃煤及重质油燃烧时, 应生成等量的 Fuel NO<sub>x</sub>。

气体燃料中虽然也含有氮份, 但其形态几乎全部是 N<sub>2</sub>, 发生的变化与空气中的 N 相同。

影响 Fuel NO<sub>x</sub> 生成特性的主要因素有当量比、火焰温度、压力、燃料种类、氮化合物 (fuel-N) 的种类和浓度等。在锅炉的实际燃烧过程中, 并非所有的氮份都转换成 NO<sub>x</sub>。重油的转换率在氮份为 0.1-0.2% 时为 60-40%。固体燃料生成的 NO<sub>x</sub> 有挥发成分生成的 volatile-NO<sub>x</sub> 和焦炭中的 N 生成的 Char-NO<sub>x</sub>。Volatile-NO<sub>x</sub> 的 NO<sub>x</sub> 转换率比 Char-NO<sub>x</sub> 大。图 3-21 为燃料中氮份与 Fuel NO<sub>x</sub> 的关系。

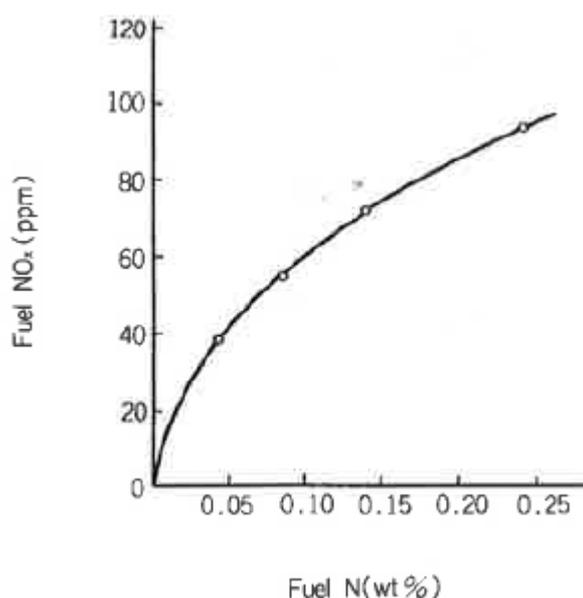
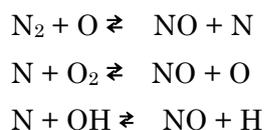


图 3-21 燃料中氮份与 Fuel NO<sub>x</sub> 的关系

(出处: 加藤、*Low NO<sub>x</sub> Combustion Technology in Boiler*, 纸 pa 技协  
志 No.45-5, 1991)

### 3.2.1.2. Thermal NO<sub>x</sub> 的生成

从生成特点上来看, Thermal-NO<sub>x</sub> 分为 Zeldovich-NO<sub>x</sub> 和 Prompt-NO<sub>x</sub>。Zeldovich-NO<sub>x</sub> 是在火焰尾部的高温燃烧气体中生成, 相对于空气过剩及燃料过剩的情况, O 原子应处于平衡状态, 可用下列 Zeldovich 机制说明:



燃烧温度越高、O<sub>2</sub> 浓度越高、在高温中滞留时间越长, Zeldovich-NO 生成量越多。根据

这一原理，Zeldovich-NO 的控制方法有稀薄预混烧法、烟气再循环法、浓淡燃烧法、水喷射/蒸汽喷射法、缓慢混合法、二级燃烧法等。

在燃烧反应强的的火焰部位及其附近，出现一种用 Zeldovich 机制无法解释的 NO 快速生成的现象，称之为 Prompt-NO。这一现象是碳化氢燃料特有的现象，CO 和 H<sub>2</sub> 没有出现这种现象。Prompt-NO 的生成多出现在燃料过剩时，这是由于在燃烧过程中生成了 HCN 及 NH 等燃烧中间生成物。煤粉燃烧时，在挥发分燃烧区，颗粒周围的扩散火焰区生成的 Prompt-NO 约有几十 ppm，这在极低 NO<sub>x</sub> 的煤粉燃烧中不能忽视，但 Prompt-NO 的生成绝对量不多，通常 Zeldovich-NO 占绝大多数，采取减排措施时也应该以 Zeldovich-NO 为目标。

### 3.2.2. 氮氧化物减排技术的基本原理

工业锅炉 NO<sub>x</sub> 减排的基本技术分为以下两大类：

1、根据 NO<sub>x</sub> 的生成原理，以控制 NO<sub>x</sub> 生成为目的的技术：

- ① 降低燃料中的氮份；
- ② 低空气比燃烧（低 O<sub>2</sub> 浓度）；
- ③ 降低火焰温度；
- ④ 缩短气体滞留时间。

2、以降低去除烟气中 NO<sub>x</sub> 浓度为目的的技术：

- ① 将 NO<sub>x</sub> 还原成 N<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O；
- ② 使用活性炭选择去除 NO<sub>x</sub>。

工业锅炉实际应用的各项技术在 3.3 中论述。

### 3.2.3. 氮氧化物（NO、NO<sub>2</sub>）对环境的影响等

NO<sub>x</sub> 是燃烧产生的物质 NO 和 NO<sub>2</sub> 的总称。

锅炉等一般燃烧设备排放的燃烧气体中，90-95%vol 为 NO。有数据显示，NO 的毒性比 NO<sub>2</sub> 低，但作为 NO<sub>x</sub> 对环境的影响如下：

① 对人体的影响

NO<sub>2</sub> 对粘膜有刺激，引发支气管炎和肺水肿等；NO 对人体的生理机能有影响。暴露在 NO<sub>2</sub> 中会引起感染抵抗力的减弱，动物实验数据表明，NO<sub>2</sub> 浓度超过 0.5ppm 时，对呼吸器官感染的抵抗力会下降。

② 酸雨

NO<sub>x</sub> 和 SO<sub>x</sub> 都是造成酸性物质沉降的原因，是导致森林生态系统和水环境恶化的原因。

③ 化学烟雾的生成

NO<sub>x</sub> 和不饱和碳化氢经强紫外线照射后发生光化学反应，二次生成臭氧、PAN 等氧

化力很强的物质。一般光化学氧化剂（Ox）的 90%以上为臭氧，人在臭氧浓度为 0.15-0.25ppm 的环境中呆 2 个小时，即会出现呼气管刺激症状（咳嗽、胸痛等）及肺功能减弱的情况。

#### ④ 对全球气候变暖的影响

IPCC 报告中详细记述了 NO<sub>x</sub> 对全球气候变暖的影响，指出会造成疟疾、黄热病等传染病的增加等，对健康带来影响。并且，还会造成异常气候、海平面上升、生态平衡破坏、对食品生产造成很大影响。N<sub>2</sub>O 是人为的温室效应气体，在平流层变成 NO，破坏臭氧层。

#### 【N<sub>2</sub>O 对温室效应的贡献度】

据 IPCC 报告（1995 年）统计，在锅炉、机动车等人为排放的温室效应气体对全球气候变暖的直接贡献度中，N<sub>2</sub>O 继 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 之后排在第三位。尽管大气中 N<sub>2</sub>O 的浓度低，但全球变暖系数值很大，贡献度高，为 5.7%。表 3-12 所示为主要温室效应气体全球变暖系数值及浓度。

表 3-12 主要温室效应气体全球变暖系数值及浓度

	CO <sub>2</sub> (ppmv)	CH <sub>4</sub> (ppbv)	N <sub>2</sub> O(ppbv)
全球变暖系数	1	21	310
1994 年的浓度	358	1720	312
1900 年以前	280	700	275

全球变暖系数：CO<sub>2</sub>=1 时 100 年影响的效果

出处：IPCC-环境厅资料（1995）

### 3.3. 工业锅炉的氮氧化物减排技术

#### 3.3.1. 燃烧室的氮氧化物生成控制技术

##### 3.3.1.1. 生成控制技术

从 NO<sub>x</sub> 的生成原理来看，需要控制燃烧室生成的 NO<sub>x</sub>。特别是工业锅炉，由于受操作和经济性的制约，削减燃烧室 NO<sub>x</sub> 生成的问题备受重视。NO<sub>x</sub> 的生成原因与适用控制技术的关系与燃烧方式无关，如图 3-22 所示，大致分为燃料改善及改善燃烧技术两大类：

#### 【燃料改善】

- a. 使用有机氮化合物含有率低的燃料

#### 【燃烧改善】

- a. 降低燃烧区的 O<sub>2</sub> 浓度（降低 O<sub>2</sub> 浓度）
- b. 缩短在高温区燃烧气体的滞留时间（缩短气体滞留时间）
- c. 降低燃烧温度，特别是要消除局部高温区（降低火焰温度）

用上述方法之一或组合的方式可减少 NO<sub>x</sub> 的生成。

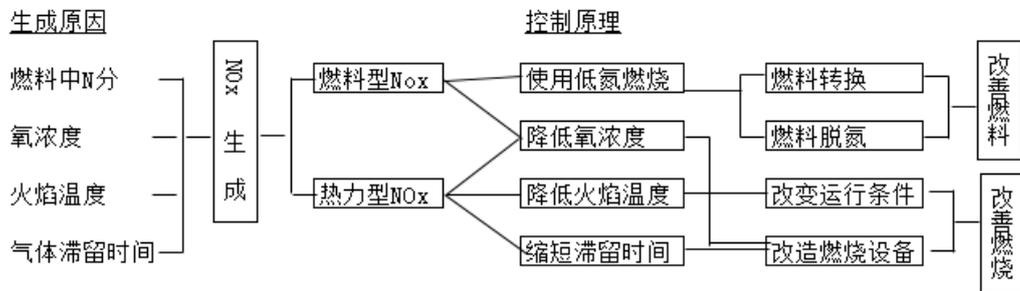


图 3-22 NO<sub>x</sub> 生成控制技术

### 3.3.1.2. 各种低 NO<sub>x</sub> 燃烧技术

#### a. 二级燃烧法（燃烧器燃烧）

将燃烧分成两级或两级以上，分段进行燃烧的方法。有将助燃空气分为多级和将燃料分为多级的两种方式。空气二级法是在第一级中降低空气比，进行燃料过剩燃烧，在第二级中将剩余的助燃空气送入进行燃料稀薄燃烧的方式。在第一级中，由于控制了峰值燃烧温度，可控制 Thermal NO<sub>x</sub> 的生成；由于空气比低，在燃料过剩燃烧条件下，可控制 Fuel NO<sub>x</sub> 的生成。但这种方式容易造成不完全燃烧或不稳定燃烧，因此，需要注意烟尘及 CO 的产生。这种方式一般适用于大输出功率的锅炉。图 3-23 为二级燃烧低 NO<sub>x</sub> 燃烧器（燃油、燃气用），图 3-24 为二级燃烧低 NO<sub>x</sub> 燃烧器（煤粉用）：

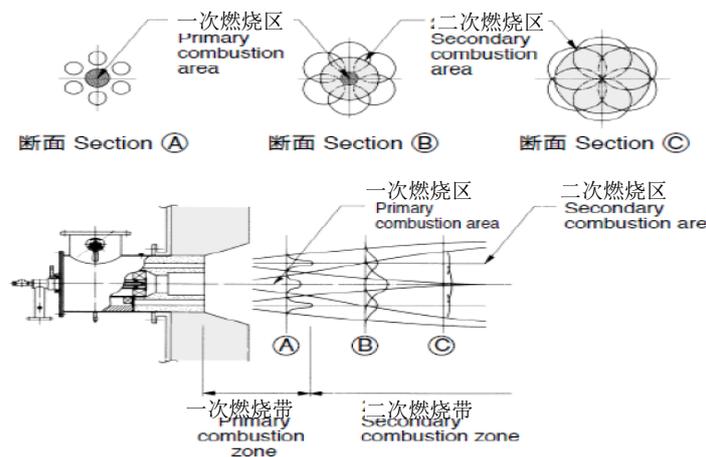


图 3-23 二级燃烧低 NO<sub>x</sub> 燃烧器（燃油、燃气用）

(出处：中外炉工业)

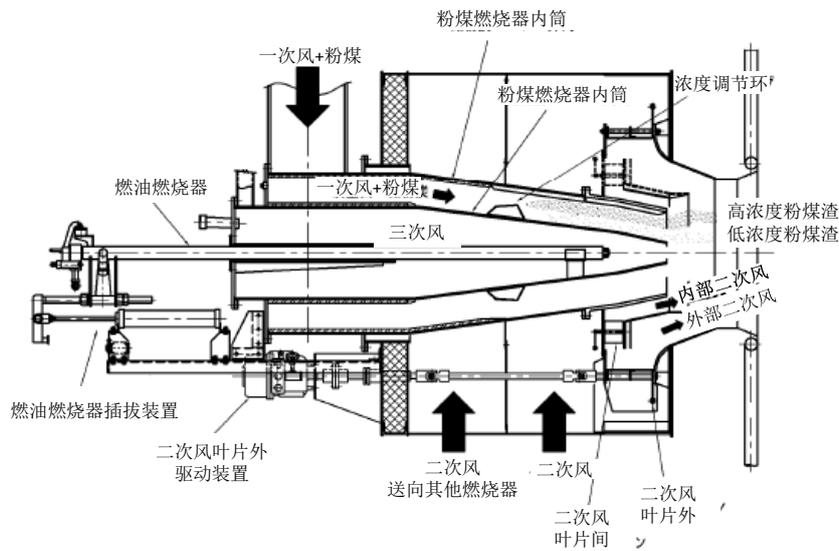


图 3-24 二级燃烧低 NO<sub>x</sub> 燃烧器（煤粉用）  
(出处: IHD)

**b. 烟气再循环 EGR: Exhaust Gas Recirculation (燃烧器燃烧)**

将部分燃烧烟气再循环与助燃空气混合，降低火焰温度和 O<sub>2</sub> 分压，从而控制 NO<sub>x</sub> 生成的方法。燃料不同，烟气的 O<sub>2</sub> 浓度也不一样。以燃油为燃料时，烟气的 O<sub>2</sub> 浓度为 3-5%vol，燃烧器部位的混合助燃空气的 O<sub>2</sub>% 比只用空气时（21%vol）降低，具有削减 NO<sub>x</sub> 的效果。但对于削减 Fuel NO<sub>x</sub> 基本无效。

**c. 浓淡燃烧（燃烧器燃烧）**

将燃料过剩燃烧器和燃料稀薄燃烧器交替或合理排列在装有数个燃烧器的锅炉上，在燃烧室内燃烧的方式，可降低整体的燃烧温度。助燃空气量和燃料总量不变，用于大输出功率锅炉。也有改变 1 个燃烧器喷嘴直径，使火焰有浓有淡进行浓淡燃烧的方法。图 3-25 为浓淡燃烧+二级燃烧组合型低 NO<sub>x</sub> 燃烧器，图 3-26 为浓淡燃烧器的外形及原理图。

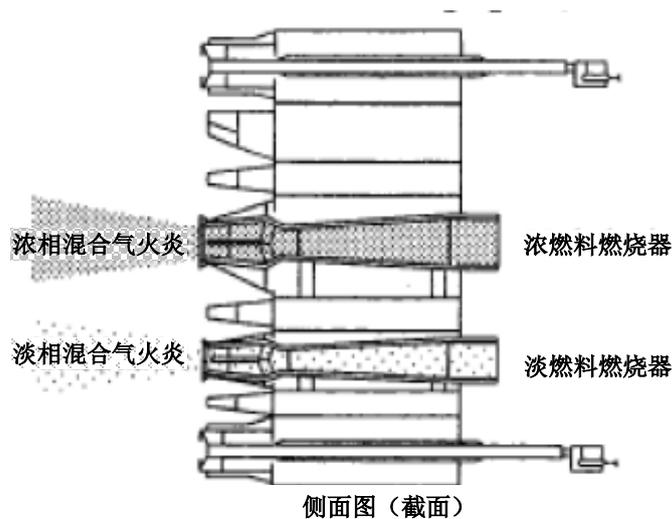


图 3-25 浓淡燃烧+二级燃烧组合型低 NO<sub>x</sub> 燃烧器 (煤粉用)

(出处: 三菱重工)



**【原理】**

将火焰分割为空气过剩带和燃料过剩带，使一级燃烧区燃料过剩，二级燃烧区空气过剩，进行浓淡燃烧，从而降低NO<sub>x</sub>的生成。

示意图



图 3-26 浓淡燃烧器的外形及原理图 (燃气、燃油用)

(出处: Volcano)

**d. 蒸汽/水喷射**

向火焰中喷射蒸气或水，降低火焰温度，减少燃烧烟气中烟尘的产生，从而获得低过剩空气燃烧的效果。这一方法对 Fuel NO<sub>x</sub> 产生量较多的重质油没有效果。

#### e. 低 NO<sub>x</sub> 燃烧器

根据燃烧器的结构，控制 NO<sub>x</sub> 产生基本上有以下三种方法：

- 放缓燃烧与空气的扩散混合速度；
- 促进燃烧的不均匀化；
- 促进火焰的热辐射。

为了实现上述效果，国际上开发了以下多种类型的低 NO<sub>x</sub> 燃烧器：

- ① 快速燃烧型：促进燃料和空气的混合，通过散热降低燃烧温度，缩短在高温区的停留时间，从而减少 Thermal NO<sub>x</sub> 的生成。
- ② 缓慢燃烧型：通过降低助燃空气及燃料的喷出流速，扩大燃烧区，降低火焰温度及 O<sub>2</sub> 浓度，从而减少 Thermal NO<sub>x</sub> 的生成。
- ③ 分割火焰型：将火焰分割成多个独立火焰，降低火焰温度，缩短在高温区的停留时间，从而减少 Thermal NO<sub>x</sub> 的生成。
- ④ 自身再循环型：利用空气及燃料的流动（运动量）将部分燃烧气体循环至燃烧区，通过降低燃烧温度和燃料气化，利用还原性气体对 NO<sub>x</sub> 的分解作用减少 Thermal NO<sub>x</sub> 的生成。图 3-27 为安装在输出功率在 6 GJ/h 以下的炉筒烟管锅炉及小型贯流锅炉上、将高温燃烧烟气抽回燃烧器头部与燃料混合区的低 NO<sub>x</sub> 燃油/燃气燃烧器，NO<sub>x</sub> 生成浓度为煤油 < 50ppm、13A 燃气 < 40ppm。
- ⑤ 阶段燃烧型：将助燃空气及燃料分成多个级，分阶段供给。第一级供给低过剩空气进行低过剩空气燃烧，第二级以后供给充分的空气进行完全燃烧。通过降低燃烧温度、均一化以及第一级的低过量空气燃烧，即可控制 ThermalNO<sub>x</sub> 的生成，又可控制 Fuel NO 的生成。

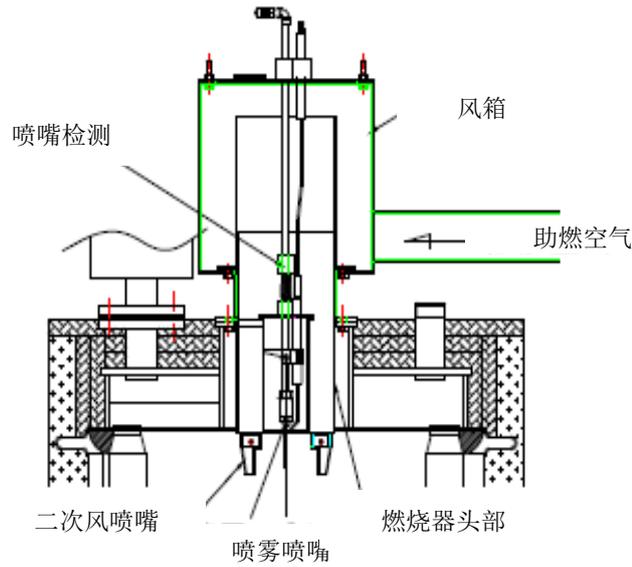


图 3-27 分割+燃烧气体内部再循环型低 NO<sub>x</sub> 燃烧器（燃油、燃气）

（出处：Olympia）

### 3.3.1.3. 炉排燃烧

前面也提到过，炉排燃烧主要是固定碳进行表面燃烧产生的 CO 与大部分的挥发分在炉的空间部位进行气体燃烧。NO<sub>x</sub> 生成特性在形式上虽有差异，但一般与煤粉燃烧相似，具有以下特性：

- 燃料中的氮份越多，NO<sub>x</sub> 生成量越大；
- 燃料比越高，燃煤的 NO<sub>x</sub> 生成量越大。

此外，灰分越多，燃煤的 NO<sub>x</sub> 生成量也相对增多。燃煤中氮份与 O<sub>2</sub> 浓度的关系例如

图 3-28 所示。炉排燃烧时，空气比越大，O<sub>2</sub> 浓度越高；此外，氮份越增多，NO<sub>x</sub> 浓度有直线增高的趋势。

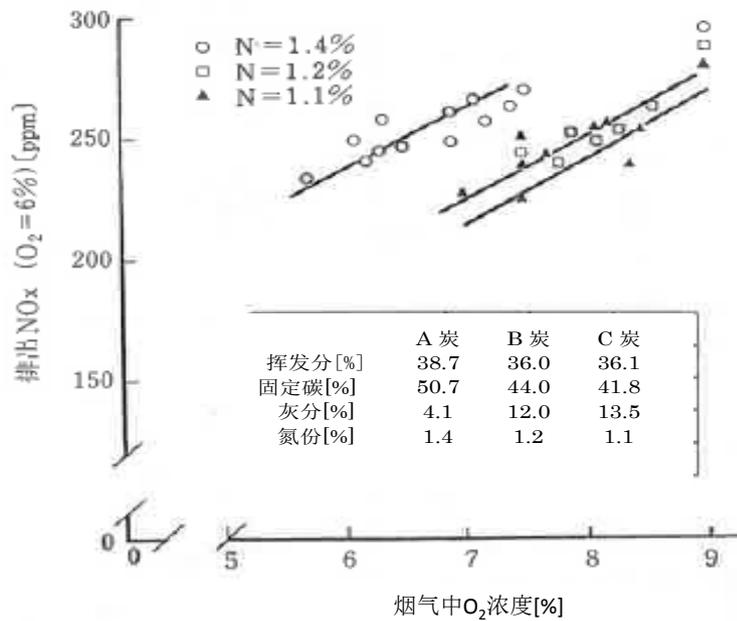
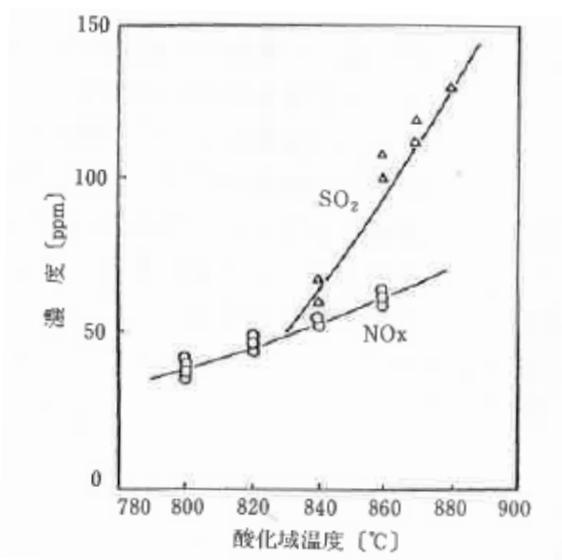


图 3-28 燃煤中氮份/O<sub>2</sub> 浓度的关系例

(出处: 产业燃烧技术, JFRC, p171)

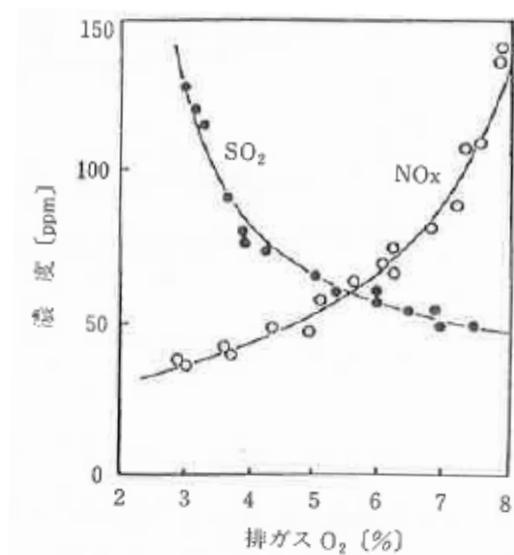
#### 3.3.1.4. 流化床燃烧

流化床温度与 NO<sub>x</sub> 生成量呈正相关关系。工业锅炉的燃烧温度一般在 900℃以下，Thermal NO<sub>x</sub> 的生成量很少，多为因燃料中的氮份生成的 Fuel NO<sub>x</sub>。据报告统计，比起燃煤中的 N 含量，N 的结合状态在 NO<sub>x</sub> 生成中起主要作用。炉内加石灰石进行炉内脱硫时，由于石灰石会增加 NO<sub>x</sub> 的生成量，因此，将燃烧气体中的飞灰进行再循环以减少石灰石的使用量对控制炉内 NO<sub>x</sub> 的生成非常重要。图 3-29 为燃煤循环流化床燃烧的燃烧温度与 NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub> 的关系。图 3-30 为同一炉出口的 O<sub>2</sub> 浓度与 NO<sub>x</sub>/SO<sub>2</sub> 的关系。循环流化床燃烧时，将炉底部和炉中央部分为二级，送风进行二级燃烧，以控制 NO<sub>x</sub> 的生成。但温度在 830℃以下时石灰石无法进行煅烧，因此脱硫率降低。



(Ca/S 比=3, 不加 CaO 时的 SO<sub>2</sub> 为 500ppm)  
 图 3-29 燃烧温度与 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 的关系

(出处: 产业燃烧技术, JFRC, p170)



(Ca/S 比=不加 3, CaO 时的 SO<sub>2</sub> 为 500ppm)  
 图 3-30 O<sub>2</sub> 浓度与 SO、NO<sub>x</sub> 的关系

(出处: 产业燃烧技术, JFRC, p171)

### 3.3.1.5. 改善运行条件

改变目前的空气比、燃烧室负荷及空气预热温度的运行条件是实现低 NO<sub>x</sub> 化的一种方法。

#### a. 低空气比燃烧

空气比变化引起的温度变化以及 O<sub>2</sub> 浓度变化是空气比影响 NO<sub>x</sub> 生成的因素。Fuel NO<sub>x</sub> 的增加与空气比成正比，而 Thermal NO<sub>x</sub> 具有凸形状的特性。通常锅炉运行时，空气比与凸形状的最大值相比，偏向低空气比一侧，因此，减少 NO<sub>x</sub> 生成应采用低空气比燃烧。燃烧性随着空气比的降低有减弱的趋势，需注意 CO 及烟尘的产生。

#### b. 降低燃烧室热负荷

燃烧室热负荷的差异与火焰、燃烧室烟气温度及炉内滞留时间等有关，与燃料与空气的混合情况及火焰放热情况的变化也有关系，对 NO<sub>x</sub> 的生成有很大影响。

目前有通过提高燃烧室热负荷来实现工业锅炉的小型化及高效化的趋势，但提高程度应控制在 NO<sub>x</sub> 减排适用范围内。

#### c. 降低空气预热温度

助燃空气温度与 Thermal NO<sub>x</sub> 的增加有直接关系。预热温度降低，火焰温度及燃烧室的气氛温度下降，NO<sub>x</sub> 的生成量减少。降低空气预热温度时，需将锅炉效率、烟尘增加量及 NO<sub>x</sub> 低减率进行对比。平衡通风锅炉燃烧室为负压，引入的空气不仅成为过剩空气，还有可能造成无法合理控制燃烧，因此，需严格管理防止这种情况的发生。

### 3.3.1.6. 中国顺推炉排燃煤锅炉燃烧方面的 NO<sub>x</sub> 减排措施

中国现有的工业用燃煤锅炉基本上都是顺推炉排锅炉。削减这类锅炉排放的 NO<sub>x</sub> 是有效改善大气环境的一个行之有效的措施。为了从燃烧方面和安装烟气脱硝辅助设备方面探讨综合、合理的 NO<sub>x</sub> 减排措施，2012 年度，中日两国合作在武汉市实施了案例研究，研究结果将在 4.1 中具体说明。

## 3.3.2. 烟气脱硝技术

### 3.3.2.1. 烟气脱硝设备须具备的条件

工业锅炉的烟气脱硝设备必须具备以下条件：

- 脱硝率高；
- 可长时间稳定运行；
- 具备对负荷波动的随动性；
- 成本效益好；
- 不产生二次公害。

### 3.3.2.2. 烟气脱硝设备

工业锅炉应用的烟气脱硝设备的脱硝方法及原理如表 3-13 所示：

表 3-13 烟气脱硝设备的脱硝方法及原理

方法	原理
选择性催化还原法 (SCR)	用 NH <sub>3</sub> 作还原剂，催化时选择性还原去除 NO <sub>x</sub> 。干法，适合用于烟气量多的处理。 反应式 $4NO + 4NH_3 + O_2 \rightarrow 4N_2 + 6H_2O$ $NO + NO_2 + 2NH_3 \rightarrow 2N_2 + 3H_2O$
非催化还原法 (SNCR)	在高温区非催化条件下喷 NH <sub>3</sub> ，还原去除 NO <sub>x</sub> 。 $4NO + 4NH_3 + O_2 \rightarrow 4N_2 + 6H_2O$ (脱硝反应) $4NH_3 + 3O_2 \rightarrow 2N_2 + 6H_2O$ (药剂燃烧反应)
活性炭吸附法	使用活性炭，在喷 NH <sub>3</sub> 选择性去除 NO <sub>x</sub> 的同时，吸附去除 SO <sub>x</sub> 。

#### ① 选择性催化还原法(SCR)

一种通过催化剂进行的 NO 与 NH<sub>3</sub> 的等摩尔反应，烟气温度在 350-400℃时优先反应。锅炉燃烧气体设定在这一温度带时，可达到 80%以上的脱硝效果。催化剂的形状有粒状、板状、格子状、圆筒状等，为了预防煤燃料的堵塞，多采用板状和格子状的催化剂。脱硝催化剂会因烟气中的烟尘、SO<sub>x</sub> 和碱金属而老化，因此需注意与除尘设备之间的安装位置以及烟气温度。这一脱硝法是日本开发并向国外输出的技术，在国外得到了普遍的应用。设备工艺简单，易运行，故障率低，不产生废水和副生成物，操作简单，可简单地与烟气源协调。并且，几乎没有可移动部分，故障例很少。管理的重点为催化剂性能的管理，主要会出现安逃逸引起的空气预热器及尾部部分设备的关闭、脱硝设备入口处灰尘堆积和喷氨部位的故障。此外，燃煤未燃灰的细小颗粒是造成催化剂堵塞的原因。

脱硝催化剂具有气体性状，随着时间的推移性能降低，通常采用部分更换或添加新催化剂的方式恢复其性能。使用寿命受燃料种类、老化成分 (Na, K, Ca 等) 的情况、强度、比表面积、细孔容积等影响。一般寿命为：燃煤<燃油<燃气。此外，恢复催化剂性能的再生方法也被广泛使用。

表 3-14 工业用燃煤锅炉安装 SCR 设备条件的标准例

	例 I	例 II	例 III
压力损失	0.5-2 kPa	-100 mmWC	-100mmWC
燃气温度	≒ 350-400 °C	300-550 °C	180-550°C
脱硝率	<80 % - 90 %	-95 %	-95%
反应塔压损	<60 mmWC		

表 3-15 所示为各类烟气催化剂性能老化的主要原因，图 3-31 为燃煤选择性催化还原脱硝系统的典型设备结构，图 3-32 为烟气烟道脱硝工艺安装例，图 3-33、图 3-34 为各种形状的脱硝催化剂，图 3-35 为燃煤锅炉的选择性催化还原法脱硝例：

表 3-15 各类烟气催化剂性能老化的主要原因

烟气种类	废弃物	燃气	燃油	燃煤
热老化	○	◎	○	○
化学降解(催化剂中毒)	◎		◎	
物理老化(烟尘)				◎

◎主要老化原因      ○老化原因

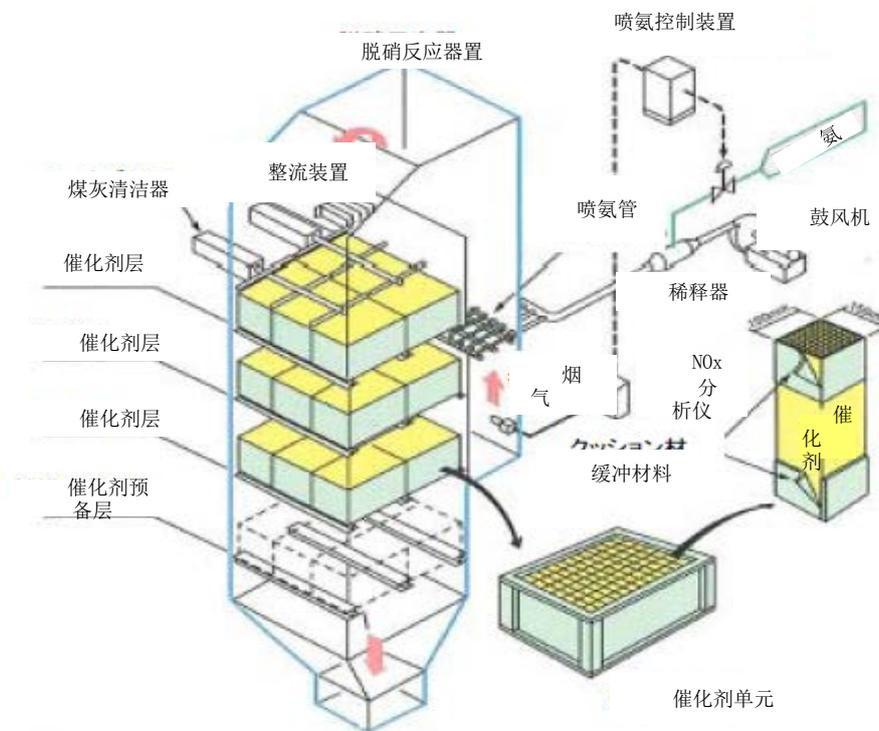


图 3-31 燃煤选择性催化还原法脱硝系统

(出处: 川崎重工)

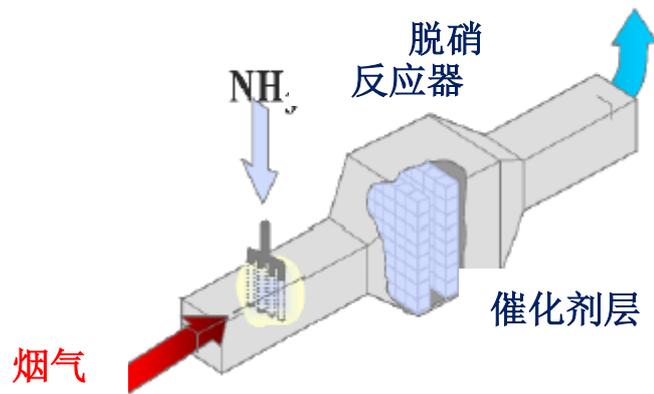


图 3-32 选择性催化还原法 (SCR) 脱硝工艺  
(出处: IHI)

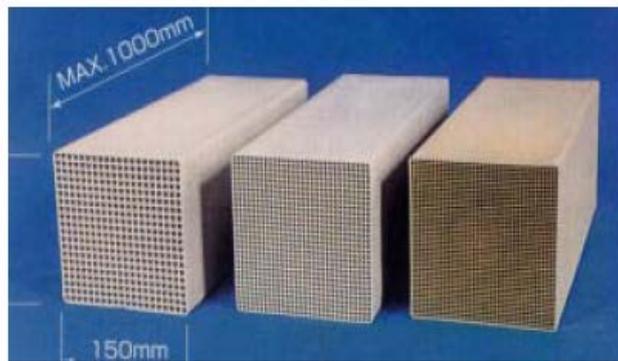


图 3-33 蜂窝状脱硝催化剂  
(出处: IHI)

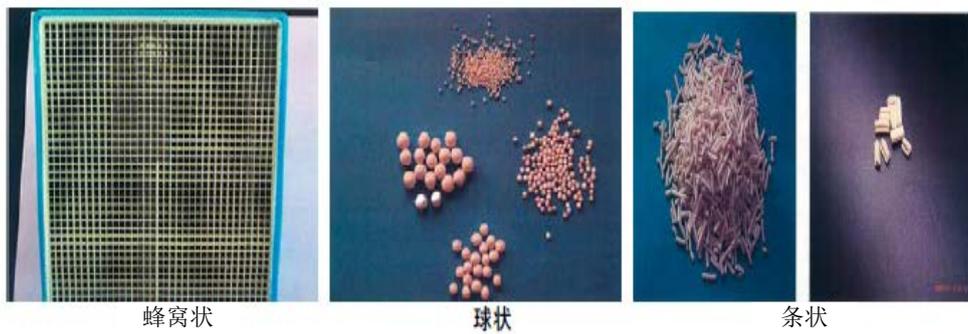


图 3-34 各种形状的脱硝催化剂例  
(出处: 堺化学)

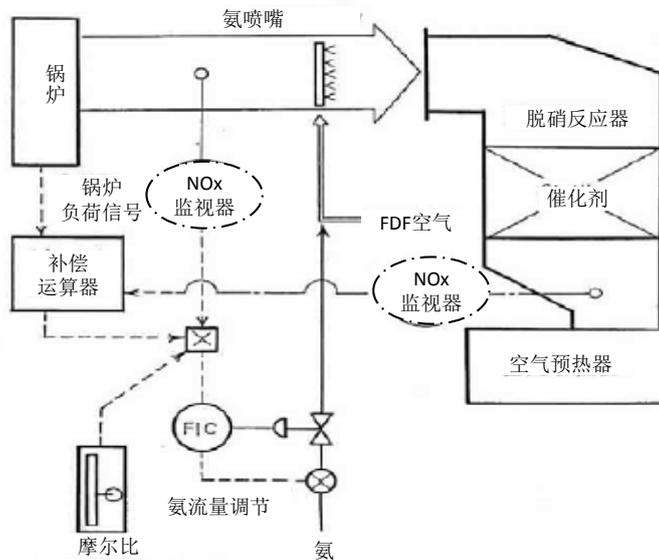


图 3-35 燃煤锅炉选择性催化还原法脱硝控制例  
(出处: 火力原子力发电志 1984)

② 非催化还原法 (SNCR)

向燃烧气体的高温区 (800-1050°C) 喷吹  $\text{NH}_3$  或  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  等还原剂, 将  $\text{NO}_x$  还原成  $\text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 。反应所需的滞留时间为 0.1sec 以上, 可能的话最好在 0.4sec 以上, 脱硝率为 40-50% 左右, 需针对负荷波动和烟气温度的变化采取措施。随着还原剂喷量的增加,  $\text{NO}_x$  去除性能也会提高, 但未参与反应的氨会发生氨逃逸。此外, 还与烟气中的  $\text{SO}_2$  等发生反应形成硫酸铵, 产生白烟。图 3-36 为喷吹还原剂 ( $\text{NH}_3$ ) 的要领例。

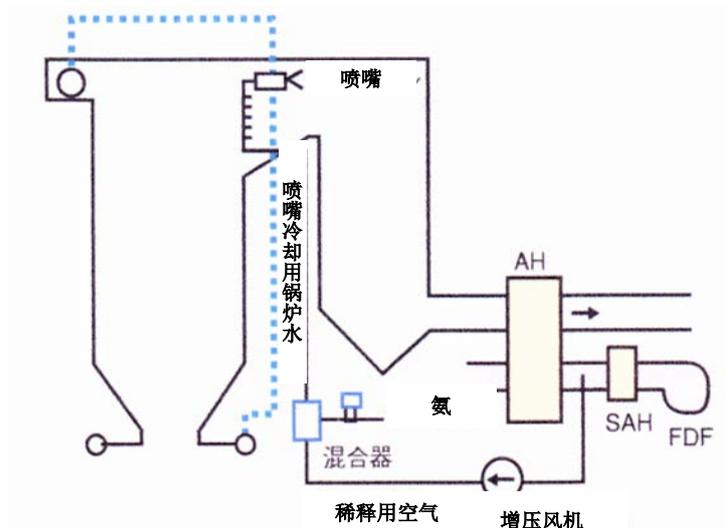


图 3-36 喷吹还原剂 ( $\text{NH}_3$ ) 的要领例

### ③ 活性炭吸附法

向冷却至 180-200℃左右的烟气中喷吹  $\text{NH}_3$ ，与活性炭等的炭催化剂接触后， $\text{NO}_x$  被  $\text{NH}_3$  还原分解成  $\text{N}_2$ ，不但可以脱硝，还可以脱硫、去除二恶英等污染物。这种脱硝法有在金属精炼用废热锅炉和废弃物焚烧用废热锅炉的应用实例。此方法的脱硝率为 40-80%，吸附能力下降的活性炭可通过再生工艺循环再生利用。图 3-37 为活性炭吸附法烟气脱硝系统的工艺流程例。

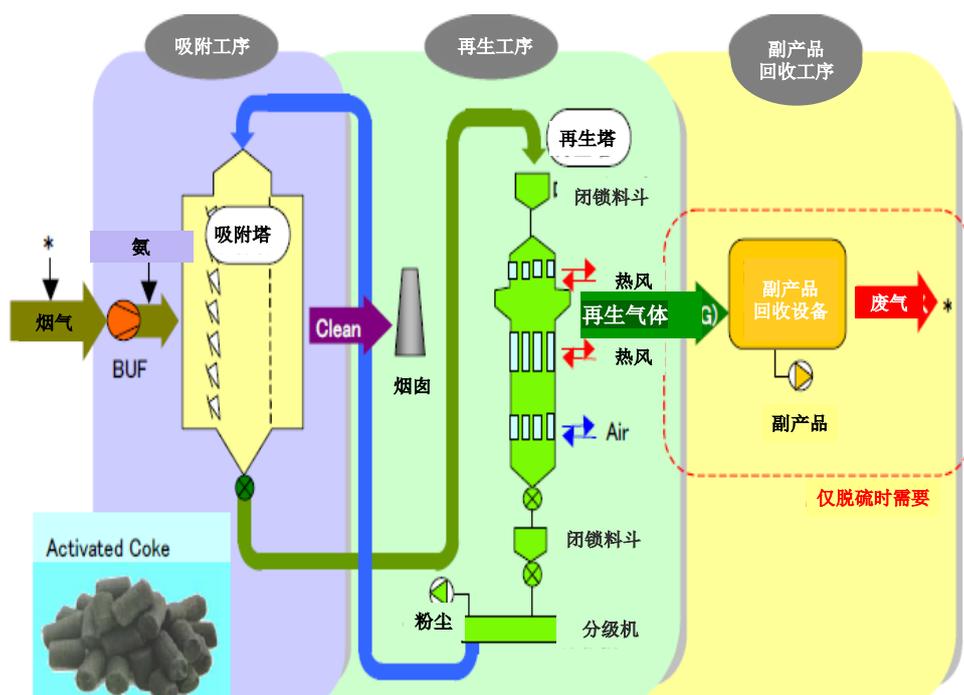


图 3-37 活性炭吸附法烟气脱硝系统

(出处: J-Power En Tech)

## 3.4. 节能

通过节能削减燃料消耗量不仅可以削减能源成本，获得经济效益，在环保方面还可以减轻燃烧引起的所有公害，并且，还可以削减温室效应气体  $\text{CO}_2/\text{N}_2\text{O}$  及  $\text{NO}_x$  和  $\text{SO}_x$  的排放量。

从理论上讲，如果能够将目前 80% 的锅炉热效率提高至 90% 的话，燃料消耗量将相应减少，烟气量、 $\text{CO}_2$  量、 $\text{NO}_x$  量也将减少 10%。这种能够获得协同效应的措施，是日本工业锅炉节能的重要措施。

工业锅炉节能措施有针对热损方面的措施和输出/输出综合能源效率的措施，涉及很多方面。以燃煤为例，能源损失如下：

#### a. 热损

- 烟气热损失（拥有显热）
- 不完全燃烧气体造成的损失（CO、未燃煤粉）
- 炉渣中的未燃煤粉造成的损失（灰、飞灰）
- 锅炉外壁的散热损失
- 排水、漏出等造成的热损
- 其他（停炉时的余热等）

#### b. 综合能源效率方面损失

- 电机损失（效率、机械损失等）
- 风机损失（效率、机械损失等）
- 泵损失（效率、机械损失等）
- 破碎机效率（效率、空转损）
- 输送机效率（效率）
- 其他

降低空气比、提供燃烧效率、减少热损、改善控制机能等从设备的结构、机能方面的改善涉及到燃料管理、运行管理及运用。表 3-16 为工业锅炉节能措施的内容。在这些措施中，低空气比、热损、降低烟气温度、燃烧管理、负荷平均化、控制辅机转数等措施的节能效果非常显著。例如，空气比 1.5、烟气温度 250℃、A 重油燃烧锅炉的烟气热损失为 13%，将其空气比改善到 1.2 后，烟气热损降到 10.5%。如果将烟气排风动力减少的部分也考虑进去的话，可以取得很好的效果。此外，不同工业锅炉规模、不同燃料空气比的标准值及目标值见表 3-5、表 3-6

以下是烟气温度高时采取的对策，仅供参考：

- ① 维修、调整燃烧器等
- ② 清扫受热面
- ③ 检修、维护气体通路
- ④ 回收烟气热
  - 空气预热:与二相流体的温度无关，可进行热回收
  - 给水加热:NO<sub>x</sub> 不会增加
  - 废热锅炉的安装:也可将多个锅炉的烟气集中回收

采取上述措施时的注意事项：

- ① 烟气酸露点的下限:结露（腐蚀的发生）
- ② 低温（冬）下水蒸气的凝结成水滴产生白烟
- ③ 烟囱通风减少（排风力下降）

表 3-16 工业锅炉的节能措施

对象	措施	改善内容、范围等
燃料管理	燃料多样化	固体：燃煤、生物质、油焦 液体：重油、轻油、废油、煤油 气体：LNG、城市燃气、生物气 副产品：工业废弃物
	燃料装卸管理	运输、接收、卸货、储存、计量、购买
	品质管理	残炭、粘土、水分、S、N、灰分、土泥
	提高燃料品质	混合、助燃材料、浆液、提高品质
燃烧	掌握燃烧设备的特性、性能	负荷调节比、空气比、火焰长度、环境值
	掌握工艺方面负荷条件	负荷范围（蒸汽品质—压力、温度、纯度） 控制精度（响应性、允许变动幅度） 运行方法
	保持计划性能	调整运行、机能 调整燃烧（点火、着火、供给、喷嘴）
	性能向上 低空气比 减少未燃损失 减少不完全燃烧损失	改善燃烧器（微粉化、空气混合、负荷调节比） 燃料转换（转换为轻质油、气体燃料） 改善控制（强化监控机能、改善控制精度） 减少烟气量（低空气比）
设备保安全管理	防止散热	蒸汽系统、排水系统（管、阀、集流管、回水弯管） 助燃空气系统（泄露、送入低温空气） 燃烧气体系统（锅炉本体、管道部分） 燃料系统（燃料箱、配管、运送） 保温材料（材质老化、厚度不够、高温部裸露）
	防止排出（泄露）	蒸汽管、阀、法兰盘、回水弯管
	结皮	燃烧气体方面（灰尘、氧化膜、灰的附着等） 水方面（硬度成分、硅质垢） 蒸汽方面（固体垢）
运用管理	锅炉方面	负荷率的合理化（小型化、设备改造） 负荷波动的平均化（安装蓄热器等） 负荷配分（多炉合设-台数控制） 运行压力、温度的合理化 设备维护的合理化
	蒸汽消耗方面	使用方法的改善、调峰 排水回收率的改善

	水方面	给水处理（水质变动、处理法、运行方法） 排污(量、率、连续/間歇) 锅炉水、排水
废热回收	烟气热回收	省煤器的設置 空气预热器的設置 给水预热/空气预热
	改善锅炉水排污	安装排污水热回收器
	提高排水回收率	安装排水热回收器
	防止散热	保温、隔热施工
测量、控制	测量仪器	安全仪器（保持性能、充实装备） 管理仪器（提高精度、充实装备） 控制仪器（保持机能、提高性能）
	控制	调节器、测序仪、安全装置
	监控	报警、信号等
	信息管理	记录、预防、预测
辅机动力	超大设备的合理化	风机、泵
	运行方法	连续或间歇运行 DSS 单机、多机运行 季节变动、时间段
	改善部分负荷特性	改善性能 控制转数
	锅炉余压的有效利用	回收动力 小型发电

【参考】 烟气热量损失的计算方法

提高锅炉的热效率减少烟气热量损失非常重要。烟气热量损失可根据烟气温度监测值计算出来。

烟气损失热量  $Q_{gl}$  的计算公式：

$$Q_{gl} = G_v \times C_p (T_g - T_a)$$

其中

$G_v$ : 湿基燃烧气体量 ( $m^3N/kg$  或  $m^3N/m^3N$ )

$C_p$ :  $T_g - T_a$  之间的平均定压比热 ( $kJ/m^3N \cdot K$ )

$T_g$ : 烟气温度 ( $^{\circ}C$ )

$T_a$ : 标准温度 (大气温度) ( $^{\circ}C$ )

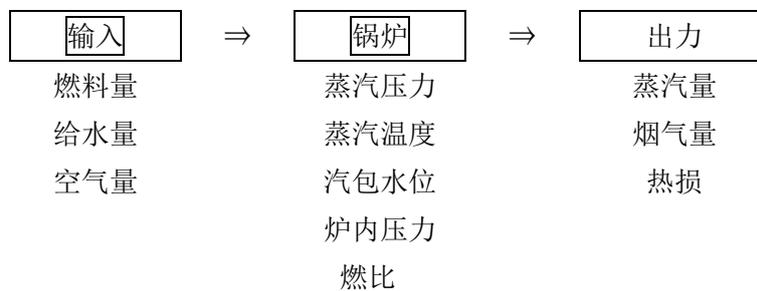
### 3.5. 锅炉的燃烧控制与运行管理

#### 3.5.1. 控制的目等

治理大气污染需从源头有效控制污染物的排放。只有正确掌握锅炉的运行数据、烟气排放量、NO<sub>x</sub> 浓度等，才能切实有效地进行控制。安装设备的企业如果没有掌握上述参数的话，就无法确定合适的大气污染物达标条件，采取正确的改善措施。同样，制定标准的政府部门也应根据可靠的科学依据执行标准，进行处罚，实施政令。要控制锅炉燃烧生成 NO<sub>x</sub>，稳定燃烧及将锅炉的各项机能控制在符合计划值的状态是不可缺少的条件。即：必须快速、准确地根据运行数据掌握锅炉及大气污染的特性，进行有效的运行管理。以前是凭经验确定合理、安全的平均管理值，依靠熟练司炉人员的经验和知识进行控制操作，现在已广泛利用 IT 技术进行自动控制，并对锅炉运行时的动态燃烧特性进行监测，可以随时合理调整控制值。与 NO<sub>x</sub> 生成相关的燃烧控制及运行管理的概要如下：

#### 3.5.2. 燃烧控制

工业锅炉的控制是将锅炉输出输入的能量和物质随动控制为平衡或控制值。锅炉输出输入物质的关系如下所示，加入的只是燃料、给水和空气，输出的是蒸汽、烟气、灰、未燃物以及锅炉散逸出的热损。与输出量有关的主要控制项目为燃烧量的控制。几乎所有的工业锅炉都装有自动燃烧控制（ACC: Autmatic Combustion Control）。与 NO<sub>x</sub> 排放有关的燃烧温度和 O<sub>2</sub> 浓度等是补充控制。与基本锅炉控制有关的输出—输入的动态要素如此：



实际的控制量和操作量的关系如表 3-17 所示，要素很少。很多热电联产锅炉等中增加了直接或间接与锅炉控制量有关的动态特性—电气系统和热需求量的操作量，控制要素有所增加。

表 3-17 控制量和操作量的关系

控制对象	被操作量或控制量
蒸汽压力	燃料量、空气量
蒸汽温度	减温器的注水量、传热量
锅炉水位	给水量
炉内压力	烟气量、空气量、挡板开度
空燃比	燃料量、空气量
NO <sub>x</sub> 浓度	喷氨量、燃烧温度等

### a. 反馈控制

为了将蒸汽压力、水位、蒸汽温度等调至需保持的固定值（控制量），在测定实际的控制量后返回调节器，与目标值进行比较，控制操作量，使实际控制量与目标值保持一致的方法，适用于以下系统运行。图 3-38 所示为反馈控制的概念。反馈控制的运行有以下几种：

- On Off 运行：控制量（例：蒸汽压力）达到上限值时 Off，控制量下降到指定值时 On。On-Off 期间，需合理设定运行间隙。
- High Low Off 运行：控制操作量 High、Low 或 Off 的任何一个状态。
- 比例运行（P）：与偏差大小成正比来增减操作量的运行。
- 积分运行（I）：以与控制偏差量成正比的速度来增减操作量的运行。
- 微分运行（D）：与偏差变化的速度成正比来增减操作量的运行。
- 

### b. 序列控制

按照事先规定的顺序，在确认满足规定条件的同时，推进各控制阶段的控制方法。为满足条件时，控制中止（联锁）。需手动等方式解除该条件，回复正常操作。

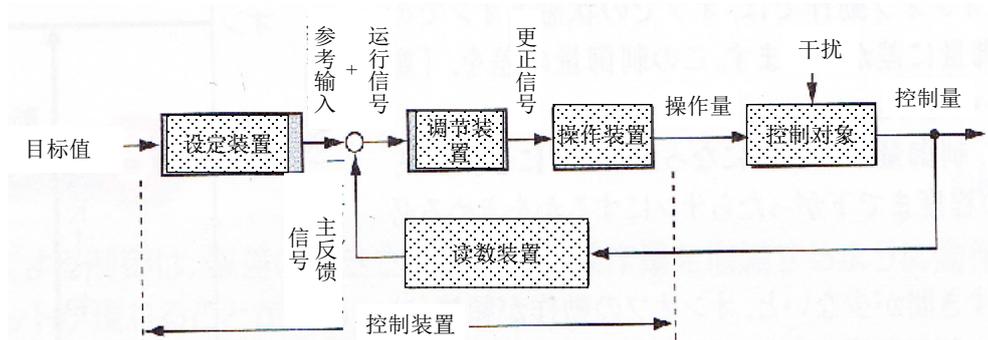


图 3-38 反馈控制概念

### 3.5.3. 运行管理

大出力功率的锅炉引进最新的运行管理系统不仅提高了 NO<sub>x</sub> 减排效果，而且还提高了锅炉效率。表 3-18 为煤燃烧中锅炉燃烧的管理、运行支援系统概要。

表 3-18 煤燃烧中锅炉燃烧的管理、运行支援系统概要

管理项目	内容
性能合理化	对 Excess O <sub>2</sub> 、OFA 量、粒度、NH <sub>3</sub> 量等的控制进行操作支援（改变偏压设定等），以便能够在 NO <sub>x</sub> 控制标准以内，将烟气损失、未燃煤粉、厂用电量、耗 NH <sub>3</sub> 量降低到最少（合理化）

燃烧监控及合理化	用综合火焰监控设备记忆各煤种最适合的火焰模式（针对NO <sub>x</sub> 、未燃煤粉、稳定燃烧等），当大大偏离标准模式时，引导修正风箱模式等。
受热面生垢监控、启动吹灰装置	在显示各部位受热面的生垢情况的同时，显示大大偏离标准值时，以及蒸汽温度控制操作量的空间低于标准值时，根据各种燃料的特性，自动启动吹灰装置。
煤磨性能监控等及合理化	监控煤磨负荷率、差压、电流、振动等，确认这些参数在限值以内。接近限值时，发出煤磨切换、停止、检修的指令。
辅机合理化运行	将辅机的运行空间与性能的合理化关联起来进行操作引导。

对于中国及东南亚各国使用的、以块煤和煤粉为燃料的中小输出功率锅炉，炉排燃烧方式的燃烧管理项目有以下几点：

#### a. 燃烧管理

管理燃烧的项目有烟气分析（O<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub>）、温度（空气、燃烧气体）、流量（空气、燃烧气体）、通风压力（空气、烟气各部位）及烟气的煤烟浓度等。

燃煤锅炉的燃烧管理项目与 NO<sub>x</sub> 生成的关系

烟气分析——空气比的合理化

温 度——燃烧温度的合理化、再循环空气温度的监控

流 量——空气量、再循环空气量合理值的监控

通风压力——炉排通风压力的合理化

蒸汽输出——在负荷调节比值制限内运行的监控

#### b. 燃料管理

煤燃料的粒度分布、氮份、硫份、燃料比、发热量、灰分、水分等对燃烧性及 NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub> 的生成量有很大影响。应定期测定，确保其在限值内。

#### c. 脱硝设备的锅炉及配套设备的管理要点

在实际的锅炉运行中，要求脱硝设备保持可正常运行管理的状态。表 3-19 为普通脱硝设备的锅炉及配套设备的管理要点。

表 3-19 脱硝设备的锅炉及配套设备的管理要点

位置	管理、检修要点
脱硝反应器	1. 保温板脱落 2. 漏气 3. 烟气差压
NH <sub>3</sub> 注入装置	1. 阀门和挡板的开合状态

	<ol style="list-style-type: none"> <li>2. 氨气隔离阀及控制阀的工作状态</li> <li>3. 阀门压盖漏气</li> <li>4. 开启时漏气</li> <li>5. 喷氨软管的漏气、老化</li> <li>6. 仪表指示 <ul style="list-style-type: none"> <li>• NH<sub>3</sub> 压力及温度</li> <li>• 稀释空气压力</li> <li>• NH<sub>3</sub> 液浓度</li> </ul> </li> </ol>
吹灰装置	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 运行电机等的温度、振动、异常噪音</li> <li>2. 减速器的运行、漏油等</li> <li>3. 头部压盖、法兰盘漏油</li> <li>4. 吹灰主管的旋转、插入运行状态</li> </ol>

### 3.6. 工业锅炉氮氧化物控制措施总结

迄今为止介绍的减排方法汇总如下表。

表 3-20 政策方面的措施

政策·制度等	制定·实行年	概要	备考	效果
限制排放法律体系化	1962	制定有害物质	整理现有基本法等法律	大
指定环境标准	1971~1978	环境中浓度标准	排放标准的基准	大
排放浓度标准	1973~1979	第一次制定~第四次制定	包括处罚规定	大
制定和实行总量控制	1981	4个城市	特区地方政府为对象	大
公害防治管理员制度	1970~	一定规模以上企业的监理责任	国家资格	非常大
公害对策基本法 (大气污染防治法)	1967~1968 (省略旧法律)	公共金融、税制优惠措施 对中小企业的特别措施 制定各种标准和监测规定	大气污染分钟相关规定 融资制度、金融公库、中小企业事业团金融措施的制度化、 国家税收·地方收税的非课税措施	非常大
防止公害事业团	1965	发放低息贷款，来促进大家开展防止公害的活动	实施贷款和贴息、债务担保 利用过的企业较多	非常大
主要团体的活动	1967~现在	研究开发、指导等	参考指南 2-8	活跃
环境计量师制度 (计量法)	1952~1992	由保有国家资格的专家监测	必须化 提高数据的正确度	相关效果大 提高可靠性
热管理法 (旧热管理规则)	1951~现在	一定规模上热管理的必须化	必须化	非常大
节能法	1979~现在	能源使用合理化	设定目标值—必须化	非常大

表 3-21 技术方面的措施

方式	措施 适用技术等	技术·装置	效果 方法 经济性等	日本的经验
控制产生 Fuel NOx	使用低氮煤	燃料采购 改善质量	削减效果大、增高燃料费、特定煤种	少
	燃料脱氮	提高燃料品质	削减效果大、经济性不高、作为工业燃料公积较难	无
控制产生 Thermal NOx	低空氧比燃烧 (低 O <sub>2</sub> )	烟气再循环	有一定效果 (必要研究锅炉类型)、增高动力费用、可并用燃烧器、规模 运行负荷影响效果	较多
	低 NO <sub>x</sub> 燃烧器	二级燃烧 浓淡燃烧等 多种	特殊性由厂商以及木炭种,罐子燃烧室不同, 引进技术时必要研究。必要注意专利有效期限价格由该设备规模不同	较多
	炉排燃烧	低 O <sub>2</sub> 燃烧	加强标准→ 将来很难开展	较少
	流化床燃烧	BFB CFB	保证较高控制效果、动力费用与设备费用较高	较多
烟气脱硝	SCR 法	催化剂+喷入 NH <sub>3</sub>	因烟气中的烟尘、SO <sub>x</sub> 和碱金属而老化、比 SNCR 经济性低	大规模锅炉经验较多
	SNCR 法	非催化+喷入 NH <sub>3</sub>	合适工业锅炉、必要注意漏氨、设备费用较低	较多
	AC 吸着法	活性炭+喷入 NH <sub>3</sub>	超低排放脱硝、维护费用较高	无
削减燃料消耗量	节能 提高热效率	控制燃烧、高效率仪器 受热面适当化 贯彻管理	NO <sub>x</sub> 减少量比例燃煤消费量 必要热管理 运行员资格制度、加强报告体系等	作为脱硝初步措施, 日本企业看做非常重要

## 4 工业锅炉氮氧化物防治案例分析

### 4.1. 中国国内的应用事例

#### 4.1.1. 概要

下面介绍一个日本环境省 2012 年度实施的《基于日本示范环境治理技术的国际推广开展的普及环保技术的调查项目》中的一个案例。该项目在武汉市的配合下，以 NO<sub>x</sub> 减排措施的研究为目的，实施了顺推炉排燃烧锅炉方面的 NO<sub>x</sub> 减排对策案例研究。

案例研究的对象锅炉是工业领域作为热源用（低压·饱和蒸汽）的锅炉。A 锅炉和 B 锅炉为中国国内燃煤工业锅炉的运行条件及管理情况等具有代表性的条件，表 4-1 为案例研究锅炉的主要规格。

表 4-1 案例研究锅炉的主要规格

对象锅炉	A	B
锅炉形式等	自然循环 水管式 平衡通风式	自然循环 水管式 平衡通风式
煤种	烟煤、块煤/粉煤	烟煤、块煤/粉煤
粒径	3-5mm max. 5mm	平均 20mm
组分	(2 种专烧)	
使用燃煤	A 煤* B 煤	
水分(%)	5.72 1.96	15.35
灰分(%)	0.82 30.11	17.29-19.61
挥发分(%)	27.36	33.38-30.41
固定碳(%)	55.48	54.68-55.29
氮份(%)	无测定值 0.22	无测定值
高位发热量(Mcal/kg)	5.93	5.178-5.049
燃烧方式	顺推链条炉排	顺推链条炉排
蒸汽规格 额定蒸发量 (t/h)	15	25
蒸汽压力 (MPa)	Max/Nor. 1.0 / 0.85	Max/Nor. 1.6 / 1.35
蒸汽温度 °C	饱和	饱和
给水温度 °C	Nor. 30	105
NO <sub>x</sub> 排放浓度 (mg/m <sup>3</sup> N)	224 (O <sub>2</sub> =12.9 %vol.)	150 (O <sub>2</sub> =8.2 %vol.)
计划热效率 (%)	不明	78
烟气脱硫设备	有 湿法	有 湿法

\* 可看出分析值中有失配的地方。

## 4.1.2. 研究应改善的部分及评估

### 4.1.2.1. 削减 Fuel NO<sub>x</sub>

关于使用燃煤中的 N 含量，进货方在进货时没有进行煤质管理，使用时仅参考了供货商提供的抽样分析值和预测性状。只是设想如果  $N < 0.1-0.2\%db$ ，则生成的 NO<sub>x</sub> 中 Fuel NO<sub>x</sub> 所占的比例应该很小。但是，在没有进行可靠的质量管理的情况下，无法对煤质转换等改善进行评估。

### 4.1.2.2. Thermal NO<sub>x</sub> 的生成控制及燃烧改善

顺推炉排燃烧是一种难以对 NO<sub>x</sub> 排放进行控制的燃烧方式。燃烧原理在 3.1.3.5 中已叙述过，燃烧过程在移动火床上按顺序形成了一个纵向的烘干—加热—干馏—氧化—还原连续燃烧过程。“低空气比燃烧 - 低 O<sub>2</sub> 燃烧”、“降低火焰温度”及“缩短烟气滞留时间”是从一般燃烧方面控制 Thermal NO<sub>x</sub> 生成的措施，对这些措施的改善评估如下：

#### ① 低空气比燃烧 - 低 O<sub>2</sub> 燃烧

进行低 O<sub>2</sub> 燃烧可采取烟气循环和减少从炉排下送入的一次风量的方法。为了合理保持顺推煤层的稳定燃烧，需保持横向的着火区，还需保持燃烧区纵向固定的宽度。要确保这种厚度的煤层所需的通风，通风损失应均匀。但是，由于调整烘干区、燃烧区、后期燃烧区合适的风压和空气分配非常困难，不参与燃烧的空气增加，因此，向火床的送风量的空气比至少应在 1.4-1.5 左右。此外，燃烧室中未燃煤粉的燃烧还需要二次送风，要达到能够有效控制 NO<sub>x</sub> 生成的低空气比燃烧条件则会造成燃烧机能下降，因此，采用这种方法控制 NO<sub>x</sub> 的生成非常困难。

烟气再循环法在小型火床方式燃烧锅炉上由于受火床燃烧结构的制约过多，控制效果并不理想。制约条件之一为炉排下方风箱的隔断以及无法严格控制风压及火床上的燃烧。此外还有负荷的随动性。如果像 A 锅炉那样进行低负荷运行，则由于火床负荷的关系会造成不稳定燃烧。二次送风从锅炉的结构来看，水管受热面的改造非常困难。如果像 B 锅炉那样输出功率接近额定蒸发量，则增加再循环烟气量后，从火床厚度等燃烧机理上来看，未燃煤粉会增加，热效率降低。

#### ② 降低火焰温度

这一燃烧方式的火焰形状为长的、上升火焰，在燃烧室内的火焰充满程度不高。用于未燃煤粉燃烧送入的二次风到达距离与炉宽相比，风压也只有 30mmWC 左右，不会有很好的搅拌效果。因此，为了降低火焰温度，需限制燃烧室热负荷的降低幅度。对于高负荷运行以及计划高热负荷运行的锅炉，向炉内喷蒸汽、喷水可以降低燃烧温度，但为了防止蒸发量减少，需在烟气低温部位加大热回收受热面。

#### ③ 缩短烟气滞留时间

根据与 NO<sub>x</sub> 生成有关的燃烧机理，在燃烧器燃烧上采取的缩短烟气滞留时间的措施。但由于在顺送炉排燃烧时无法对火床进行管理、对火焰整体进行控制，因此，很

难实施这一措施。

#### 4.1.2.3. 现有同类型锅炉氮氧化物减排措施的评估等

案例研究认为，根据燃烧机理采取的 NO<sub>x</sub> 减排措施限制很多，希望制定合理的限值。这是国内同类型的现有锅炉 NO<sub>x</sub> 减排共同存在的问题，其减排措施评估如下：

##### ① 提高热效率

提高热效率可以降低燃料消耗量→减少烟气量→削减 NO<sub>x</sub> 排放总量。

已安装省煤器、空气预热器的，只能对负荷的平均化和改善燃烧方面采取措施，但 NO<sub>x</sub> 减排效果只有百分之几，作用不大。

##### ② 安装烟气脱硝设备

像 A、B 锅炉之类的情况可以考虑采用选择性非催化还原法，但没有向烟道喷入脱硝剂（NH<sub>3</sub> 等）后可取得满意脱硝效果的烟气温度区域，向 150~200℃ 区域喷入脱硝剂无法取得满意的脱硝效果。此外，很多锅炉也没有足够的能够进行脱硝反应的烟道空间。工业锅炉脱硝剂的成本高，对企业造成很大的经济负担，这一因素也应考虑进去。

##### ③ 转换改造成煤粉燃烧

从燃烧室构造来看，需对设置燃烧器所需的水管构造进行大幅度改造。最大的问题是：正常火焰所需的燃烧室容积不够；由于是小型锅炉，粉碎燃煤导致动力费用增加、装卸燃料变得复杂，不合理。

##### ④ 应用流化床燃烧锅炉

流化床燃烧可以实现低空气比和低温燃烧，可有效控制 NO<sub>x</sub> 的生成。并且，根据燃烧机理，还可同时炉内脱硫，是一种环保型锅炉。根据经济性方面的案例研究，一般锅炉蒸发量为 5~30t/h 的小型锅炉推荐应用沸腾流化床式，30t/h 以上的推荐应用循环流化床式。

#### 4.1.2.4. 节能措施的评估

项目专家在案例研究中，以提高工业锅炉 NO<sub>x</sub> 减排效果为目的，对现有锅炉进行了节能诊断，希望能够为中国在今后的工业锅炉节能措施的程序和评估法方面提供参考。

##### ① 负荷分析

通过“运行日志分析”和“负荷分析”定量掌握目前锅炉的效率及蒸汽使用负荷波动。

##### ② 改善锅炉运行效率的

“低蒸发量负荷”“频繁停启”运行的锅炉效率会降低。针对这一问题，可以根据蒸汽使用量，多台合设小型锅炉，结合蒸汽负荷的变动情况，自动合理控制锅炉的运行，保证所需数量的锅炉一直保持高效运行的状态。

表 4-2 为案例研究中将现有燃煤锅炉和多炉合设新建小型燃气贯流锅炉 NO<sub>x</sub> 减排量评估对比实例。根据当时实际运行情况计算的结果表明，经煤改气和多炉合设后，一年可削减 NO<sub>x</sub>

6,964 kg, 效果非常好。

表 4-2 工业锅炉的节能诊断例

对象锅炉	燃煤锅炉	小型燃气贯流锅炉
额定蒸发量(t/h)×基数	15×2	2×4
平均蒸发量 (kg/h)	3,082	
平均运行效率 (%)	59.6	91.7
能源使用量 (MJ/yr)	108,836	70,737
烟气 NO <sub>x</sub> 浓度 (g/m <sup>3</sup> N)	123	68
NO <sub>x</sub> 排放量 (kg/yr)	8,684	1,720

(出处: 环境省 氮氧化物减排治理技术应用指南、2012)

## 4.2. 日本的应用事例

### 4.2.1. 事例 I

(地点: T0 制纸(株) 实施年份: 1986 年)

炉型等	炉型	自然循环双汽包
	额定蒸发量	12,000 kg/hr
	蒸汽常用压力	1.4 MPaG
	蒸汽温度	197 °C 饱和
	蒸汽的用途	造纸工序加热用
	燃料	烟煤 / 低位发热量 22.3 kJ/kg / 燃料比 2.1-2.4 N 分 1.3%bd.
	燃烧方式	顺推炉排
NO <sub>x</sub> 排放浓度 (O <sub>2</sub> =6%)	改造前	380~450ppm
	改造后目标值	<250ppm
减排措施实施 顺序	<p><b>额定负荷运行确认排放浓度</b></p> <p>↓ 确认项目: 燃煤性状分析、空气温度、空气比、负荷变化、燃烧室热负荷</p> <p><b>为实施减排措施而进行的实证试验</b></p> <p>①低 N 燃煤试验 → 削减率 L=30~50ppm/0.1%N bd</p> <p>↓ ②燃煤粒径分布变化对 NO<sub>x</sub> 浓度影响的试验</p> <p>&lt;50mm - 90%pass → &lt;30mm - 90%pass ∙ ∙ L=25~35ppm</p>	

	<p>③低过量空气燃烧试验 (低 O<sub>2</sub> 燃烧)</p> <p>O<sub>2</sub> 11.0→8.5.%vol L=80~90ppm</p> <p><b>采取的控制 NO<sub>x</sub> 生成技术</b></p> <p>①燃煤粒径分布的细化及整粒 通过控制床上局部燃烧减少 NO<sub>x</sub> 的生产</p> <p>②烟气再循环 向二次风中输送烟气进行烟气再循环 (再循环比 Max 25%vol)</p> <p>③喷 NH<sub>3</sub> 液 高负荷的情况下 NO<sub>x</sub> 排放超标时, 向烟气中喷 NH<sub>3</sub> 液。</p>
改善费用	<p><b>试验实证费</b> <span style="float:right">计 2,643,000 日元</span></p> <p>燃煤分析费 3种9个样本 <span style="float:right">243,000</span></p> <p>试验运行费 <span style="float:right">900,000</span> (燃料、动力、劳务费及临时装置等)</p> <p>烟气监测费 7 Run <span style="float:right">1,500,000</span></p>
	<p><b>改善设备费</b> <span style="float:right">计 13,800,000 日元</span></p> <p>改造工程费(烟道、燃煤破碎装置、电气装置) <span style="float:right">8,500,000</span></p> <p>循环通风机、电动机、操作盘 <span style="float:right">1,800,000</span></p> <p>喷氨装置 1 套 <span style="float:right">3,500,000</span></p>
	上述费用为 1986 年时的费用, 不包括公司内部劳务费。
	效果
	<p>采取措施后的结果</p> <p>负荷率 85%~70% → 浓度 220~230 ppm</p> <p>负荷率 95%~90% → 浓度 240~250 ppm (未使用 NH<sub>3</sub>)</p>
改造时的注意事项	<p>①应采用烟气再循环比改造成与 NO<sub>x</sub> 生成浓度联动的控制方式。</p> <p>②应注意采取低负荷时循环烟气的腐蚀 (S 分)</p> <p>③需根据燃烧机的机型, 从防止漏气和局部燃烧方面对燃煤粒径进行严格管理。(安装 TV 在线监控, 用来监视火床的情况)</p>
对措施的评估	<p>通过烟气再循环实现了低氧燃烧和火床的均压稳定, 达到了标准值。</p> <p>几乎没有采取喷氨脱硝。</p>

#### 4.2.2. 事例 II

(地点: N 食品加工(株) 实施年份: 1988 年)

炉型等	炉型	强制循环
	额定蒸发量	40,000 kg/hr
	蒸汽常用压力	3.4 MPaG
	蒸汽温度	425 °C
	蒸汽的用途	自备热电联产（食品厂）
	燃料	烟煤 / 低位发热量 21.7kJ/kg / 燃料比 2.2 N分 1.8% bd
	燃烧方式	循环流化床燃烧（CFBC）
NOx 排放浓度 (O <sub>2</sub> =6%)	为 Stoker 燃烧锅炉 时	>400 ppm
	CFBC 后目标值	<150ppm
减排措施实施 顺序	<p style="text-align: center;"><b>未对现有锅炉进行改造，研究采用新锅炉</b></p> <p style="text-align: center;">确认项目： 研究采用 CFBC 替代 Stoker 燃烧锅炉的技术 ↓ (投资费用、转换方法、Dust/SOx 等大气污染措施的综合评估等)</p> <p style="text-align: center;"><b>采取减排措施需研究的事项</b></p> <p style="text-align: center;">①是否需要换煤种（粒径分布、夹杂物、灰软化点等） ②选择多种国内外燃煤，委托多家公司进行锅炉计划 (在考虑 NOx 减排技术的同时，根据日本的燃料状况，主要将重点放在使用多种燃煤、负荷应答性、连续运行业绩、业绩和设备费用方面) ③计划规格（须达成 NOx 目标排放浓度的规格设定） ↓ 保证负荷率 额定输出的 60~100% 连续运行时间 &gt;1,800 hr 维护保养费用 初期机械设备投资费用的 &lt;2% yr</p> <p style="text-align: center;"><b>作为控制 NOx 生成措施采用的锅炉及手法</b></p> <p style="text-align: center;">① 循环流化床锅炉（强制循环） ② 燃煤的前处理：采用粗破碎机和分级装置 ③ 采用炉内脱硫方式</p>	
采用设备和手法所需的费用 (不含拆除现有锅炉的费用)	应用设备的费用	<b>计 1,494,000,000 日元</b>
	CFBC 锅炉（部分辅机移用）	1,260,000,000
	然煤前处理设备 1套	180,000,000
	炉内脱硫设备辅机 1套	48,000,000
	其他采用前的调查费及在厂家实验炉的试烧费	約 6,000,000
	本费用为 1988 年时的费用，不含工程建设费。	

效果	应用后的结果 负荷率 60%~90% → 150~160 ppm 负荷率 100% → <175ppm
应用时的注意事项	① 应彻底进行燃煤品质管理（去除砂土和不燃物）； ② 由于是高效锅炉，应注意烟气温度低造成除尘效率降低的情况； ③ 对燃煤粒径进行彻底管理； ④ 应注意连续运行时炉内滞留物质的清除方法。
对采取措施的评估	从综合经济效益来看，设备投资部分与采用劣质煤、提高效率等部分基本相抵； NOx 排放大幅减少。

## 日本的循环流化床燃烧锅炉



## 一 目 次

缩略语表 .....	1
1. 序 .....	2
2. 流化床锅炉的原理 .....	2
3. 循环流化床锅炉的特征 .....	5
4. 循环流化床锅炉的结构等 .....	6
5. 循环流化床锅炉的大气污染防治技术 .....	11
6. 大气污染控制政策 .....	12
7. 日本循环流化床锅炉大气污染物方面的实绩值 .....	13
8. 循环流化床锅炉的使用及设备管理 .....	14
9. 日本循环流化床锅炉的市场状况 .....	16
10. 结束语 .....	18



缩略语表

缩略语	中文/英文
CFB	循环流化床 Circulating Fluidized Bed
CFBC	循环流化床燃烧 Circulating Fluidized Bed Combustion
BFB	鼓泡流化床 Bubbling Fluidized Bed
BFBC	鼓泡流化床燃烧 Bubbling Fluidized Bed Combustion
RKC	回转炉床燃烧 Rotary Kiln Combustion
	链条炉燃烧 Stoker Combustion
	床料 Bed Material
RPS	可再生能源比例标准, 可再生能源配额制 Renewables Portfolio Standard
	白云石 Dolostone, Dolomite
RDF	废弃物衍生燃料 Refuse Derived Fuel
RPF	废纸废塑料固形燃料 Refuse Paper & Plastics Fuel
PKS	棕榈壳 Palm Kernel Shell
	本书中指未燃尽碳 Char

## 1. 序

流化床广泛运用于烘干、化学反应、燃烧等方面，是使用固体颗粒的代表性气固系统。1910年Phillips & Bulteel申请的基本专利是现在循环流化床的原型。1922年出现了煤气化(Winkler)、1944年出现了粉煤流化床锅炉(Hemminger USA)等专利。1973年石油危机后，工业先进国开始开发燃煤、废弃物的新燃烧技术以及气化技术等锅炉燃烧方式，到了20世纪90年代，先后开发出比当时的粉煤燃烧、链条炉燃烧更先进的、具有炉内脱硫、脱硝等特点的技术。1979年，Ahlstrom公司率先实现了循环流化床锅炉的工业化。通过颗粒流态化实现良好的气固接触及传热特性的方法很多，其中，鼓泡流化床方式(Bubbling Fluidized Bed)、及从湍流流化床开始进一步提高烟气流速，达到高速流化床状态，在上升管(Riser)、旋风分离器(Cyclone)及下降管(Down Comer)之间循环的循环流化床方式(Circulating Fluidized Bed)得到了实际应用。在实现其商业化方面，由于要求大量固定燃料的稳定燃烧以及减少SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>等大气污染物排放，日本经过了反复试运行和实践，才达到现在的状况。

日本从20世纪70年代后期开始推进流化床燃烧技术的实际应用开发，主要目的在于处理低位发热量的污水污泥、造纸污泥等工业废弃物以及生活废弃物，实现劣质煤的燃料化。1975年日本科学技术厅项目《流化床燃烧技术开发调查》的启动，标志着日本从政府层面开始推进这一技术的开发，之后，常压鼓泡流化床锅炉的开发又被指定为1976年度煤炭工业审议会重点项目。日本在引进欧美技术的同时，不断进行国内自主研发，迎来了鼓泡流化床、循环流化床的研发期。从鼓泡流化床应用于一般工业锅炉开始，到了20世纪80年代，循环流化床锅炉蒸发量已经达到了34~300 t/h。进入21世纪后，为了控制全球变暖，日本的电厂开始以木质生物质及有机污泥等再生能源代替燃煤作为燃料，循环流化床燃烧作为低公害燃烧方式得到了广泛应用。

## 2. 流化床锅炉的原理

煤、废弃物等固形燃料的直接燃烧技术，通过烟气流速、燃料颗粒形状，实现了链条炉燃烧(Stoker Combustion)、流化床燃烧(Fluidized Combustion)、粉煤燃烧(Pulverized Combustion)、回转炉床燃烧(Rotary Kiln Combustion)等的实用化。

根据燃烧流态颗粒及烟气流速，流化床大致分为鼓泡流化床及循环流化床两种。根据流化床这一结构特点，流化床燃烧锅炉分为鼓泡流化床锅炉及循环流化床锅炉。

### 1) 鼓泡流化床锅炉

烟气流速缓慢，颗粒在燃料颗粒低于最小流化速度的区域保持静止状态，在高于最小流化速度、空塔速度比较缓慢区域的区域颗粒床内出现鼓泡，随着鼓泡的上升颗粒运动变得活跃，整体呈沸腾状态，但燃料颗粒并未随之沸腾而是留在床内。这一状态称为鼓泡流化床，但除锅炉外，这一技术也应用于废弃物焚烧炉。

### 2) 循环流化床锅炉

烟气流速提高，超过燃料颗粒流态化的终端速度后，燃料颗粒与烟气的混合变得更加活跃，燃料颗粒随着烟气飞散到设备外。采用将该飞散的燃料颗粒通过旋风分离器等装置分离、修补，再次送回燃烧室，实现循环燃烧的方式的锅炉称为循环流化床锅炉。

图1所示为外部循环流化床锅炉的基本概念图：

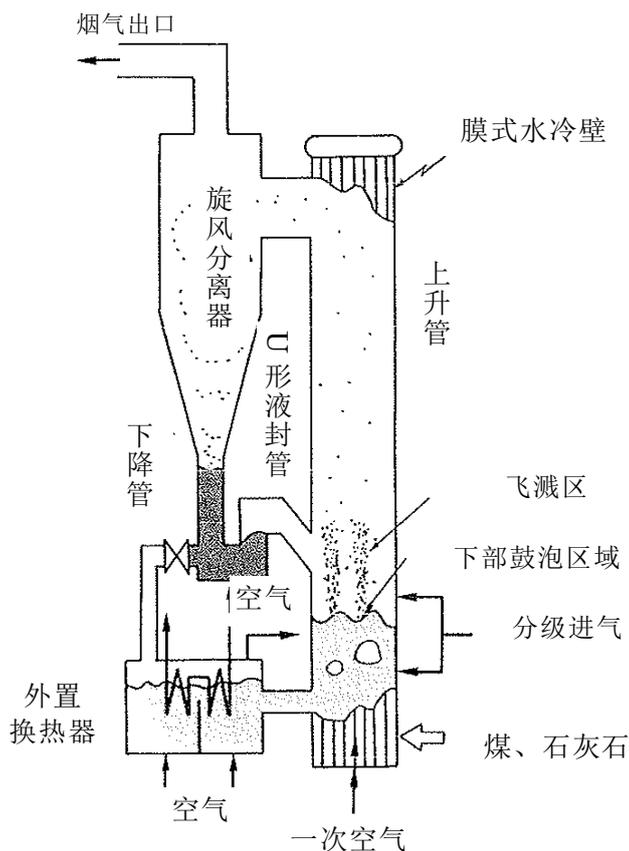


图 1 外部循环流化床锅炉的基本概念图

(来源：火力核发电技术协会)

如表 1 所示，采用直接燃烧法的固体燃料锅炉的流化床燃烧分为在大气压状态下进行炉内燃烧的常压流化床锅炉和在加压状态下进行炉内燃烧的加压流化床锅炉两种。这两种锅炉还分为鼓泡流化床燃烧 (BFBC) 及循环流化床燃烧 (CFBC) 两种燃烧方式。

常压流化床锅炉用于供应蒸汽或温水，加压流化床锅炉则是将蒸汽用于发电，加压烟气在净化后经汽轮机用作发电。由于加压烟气的净化技术及其经济性等尚未开发，日本的加压循环流化床锅炉目前只有几台，用于验证开发技术，没有商用的实例。

表 1 流化床锅炉的形式

炉内压	燃烧方法	类型
常压	鼓泡流化床燃烧 (BFBC)	多级堆叠式
		Lunch 型
	循环流化床燃烧 (CFBC)	有外置换热器
		无外置换热器
加压	鼓泡流化床燃烧 (BFBC)	增压式
		涡轮增压式

	循环流化床燃烧 (CFBC)	增压式
		涡轮增压式

表 2 为燃煤锅炉燃烧方式的比较。由于流化床燃烧是在超过最小流态化速度的区域内，将沙子、石灰石等床料沸腾，使其接触混合，因此可以脱硫脱硝。而链条炉燃烧中烟气流/燃煤颗粒接触缓慢，无法进行炉内脱硫脱硝。

表 2 燃煤锅炉燃烧方式的比较

燃烧方式	Stoker	BFBC	CFBC	Pulverized
燃煤粒径 mm	块煤 0.8~50	粗粒煤 5~25	细粒煤 0.1~10	粉煤<0.1
烟气流速 m/s	0.8~1.5	1~2	4~8	10~15
床料	无	粗粒	细粒	无
脱硫法	烟气处理	炉内脱硫（石灰石）	炉内脱硫（石灰石）	烟气处理
脱硝法	烟气处理	炉内脱硝	炉内脱硝	烟气处理

如表 2 所示，循环流化床锅炉烟气流速快，以 4~8m/s 的速度运行，以便使炉内气流中 100~200 个床料悬浮，大于流态颗粒的终端速度。这样一来，烟气与燃料颗粒的混合越来越活跃，在炉内循环的同时，颗粒随着烟气飞散到设备外，需要用旋风分离器捕集，循环后再次燃烧。换热器有的安装在外部，有的安装在内部。内置时需要注意炉床负荷。图 2 所示为固体燃烧法与火炉烟气流速的关系。

$$\begin{aligned}
 U_0 < U_{mf} & \quad \text{——固定床} \\
 U_{mf} < U_0 < U_t & \quad \text{——BFBC} \\
 U_0 > U_t & \quad \text{——CFBC}
 \end{aligned}$$

$U_{mf}$  : 开始流化速度

$U_0$ : 流体速度=空塔速度（总空气量/火炉水平截面面积）

$U_t$ : 终端速度

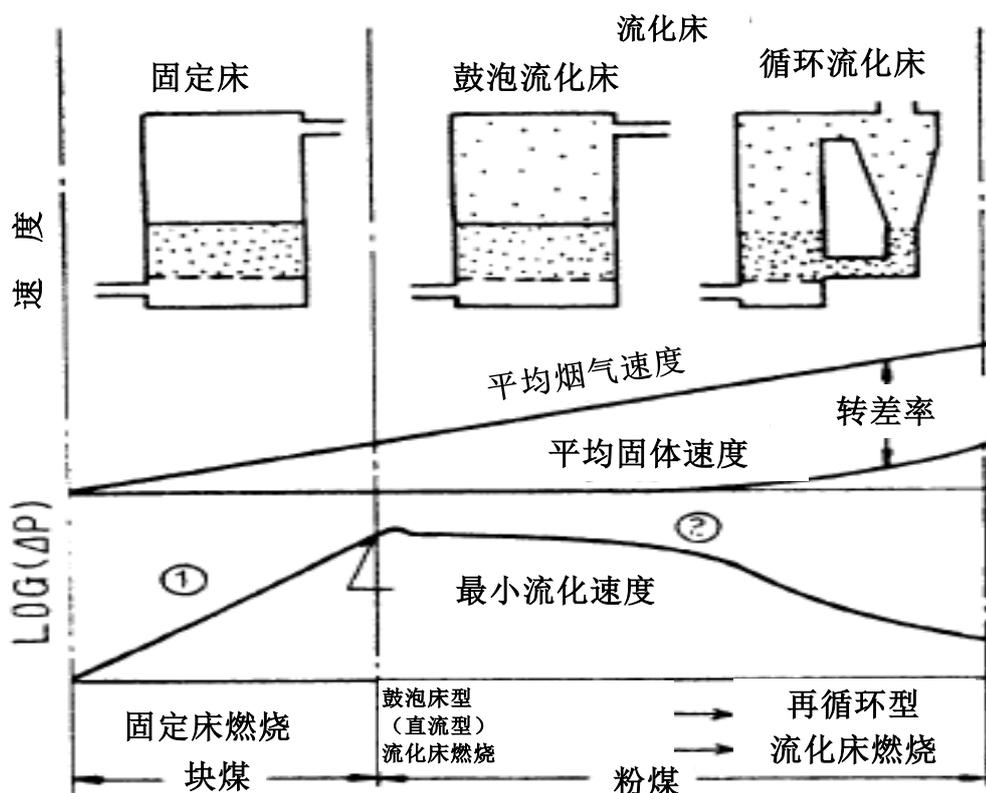


图 2 燃烧烟气流体速度与流化床燃烧形式的关系

(来源：火力核发电技术协会)

### 3. 循环流化床锅炉的特征

流化床燃烧的特征如下，1)~6)为BFBC与CFBC的共同特征，7)与8)为CFBC的特征：

- 1) **可燃烧多种煤**：可燃烧高灰分、高湿度的劣质煤（褐煤）、无烟煤及烟煤等多种煤。
- 2) **燃料适用性强**：可将低位发热量的脱水有机污泥、生物质（木材、棕榈壳）、生活废弃物、甘蔗渣、RDF(废弃物固形燃料)、RPF(废纸废塑料固形燃料)、废轮胎等作为燃料，对燃料特性变化的追从性高。
- 3) **多种燃料混烧**：由于加热、干燥、挥发等燃烧过程是流动的，因此，燃烧反应时间长，燃烧特性稍有不同的燃料也可混烧。
- 4) **高效燃烧减少未燃尽损失**：可分级送风，并通过接触搅拌，提高床内传热率，与粉煤燃烧及链条炉燃烧相比，燃烧温度低（850~950℃），可降低完全燃烧的未燃尽碳粒。
- 5) **低过量空气燃烧**：高速流态化使燃料颗粒与燃烧空气之间的相对速度差较大，可得到良好的固气反应，可降低过量空气系数。
- 6) **炉内脱硫脱硝**：床料的接触混合可实现炉内脱硫脱硝，因此，无需另外安装烟气脱硫脱硝装置，使设备结构简单化，节省了设备费用及安装空间。脱硫方面，可在炉内添加石灰石进行干法脱硫。此外，低温燃烧可减少 Thermal NO<sub>x</sub> 的生成。
- 7) **对负荷波动的追从性**：由于燃烧室与外置换热器分离，与BFBC相比，对负荷波动具有良好的追从性。此外，部分负荷特性也很好。

- 8) **高通用性**：在内部循环流化床锅炉中，多需要中小功率的锅炉，也有许多用于焚烧生活废弃物发电的业绩。因其燃烧效率与燃油锅炉相当，很少产生二噁英类物质，公害性低，受到了广泛好评。此外，还可专烧和混烧多种煤、废轮胎、污泥等可燃性废弃物。

表 3 为鼓泡流化床燃烧（BFBC）与循环流化床燃烧（CFBC）的比较：

表 3 BFBC 与 CFBC 的比较

特性	BFBC	CFBC
燃料的运动 (fuel motion)	流化、沙床内运动	流态化、 循环火炉与旋风分离器
燃烧区域	沙床内部及表面	与火炉高度相等的全区域
燃烧制御性	与 CFBC 相比较迟钝	敏感
低过量空气燃烧	可	可
运行性	白天启停 (DSS) 可连续运行	适合连续运行
燃料	燃料适用性强 需前处理 (削成碎片)	可适应多种燃料 与 BFBC 相比，需要充分粉碎
环境负荷 低 SO <sub>x</sub> 燃烧 低 NO <sub>x</sub> 燃烧	可高效炉内脱硫，但性能没有 CFBC 好 无法同时炉内脱硫	高效炉内脱硫 可同时炉内脱硫
适用功率	小~中功率	中~大功率

#### 4. 循环流化床锅炉的结构等

##### 1) 锅炉的结构

如图 3—图 5 外部循环循及图 6 内部循环所示，环流化床锅炉的基本结构由火炉（上升管）、旋风分离器及未燃尽碳的循环管（下降管等）构成，传热面由火炉壁面、旋风分离器的膜式水冷壁及后面的对流传热面（过热器、再热器等）组成。水循环法有单体自然循环式和强制滞留循环式等，在日本有各种各样的实绩。日本的技术有在 20 世纪 80 年代从欧美的 Steinmuller, Altom(kvaener Envio Power)、B&W(Power GEN)、Foster Wheeler、Lurgi 等引进技术后经日本锅炉生产厂家改良开发的技术系统及日本自主开发的技术系统。这些技术在国内外都取得了专利，目前在日本国内和国外均有应用。

图 7 所示为典型的循环流化床锅炉的设备系统：

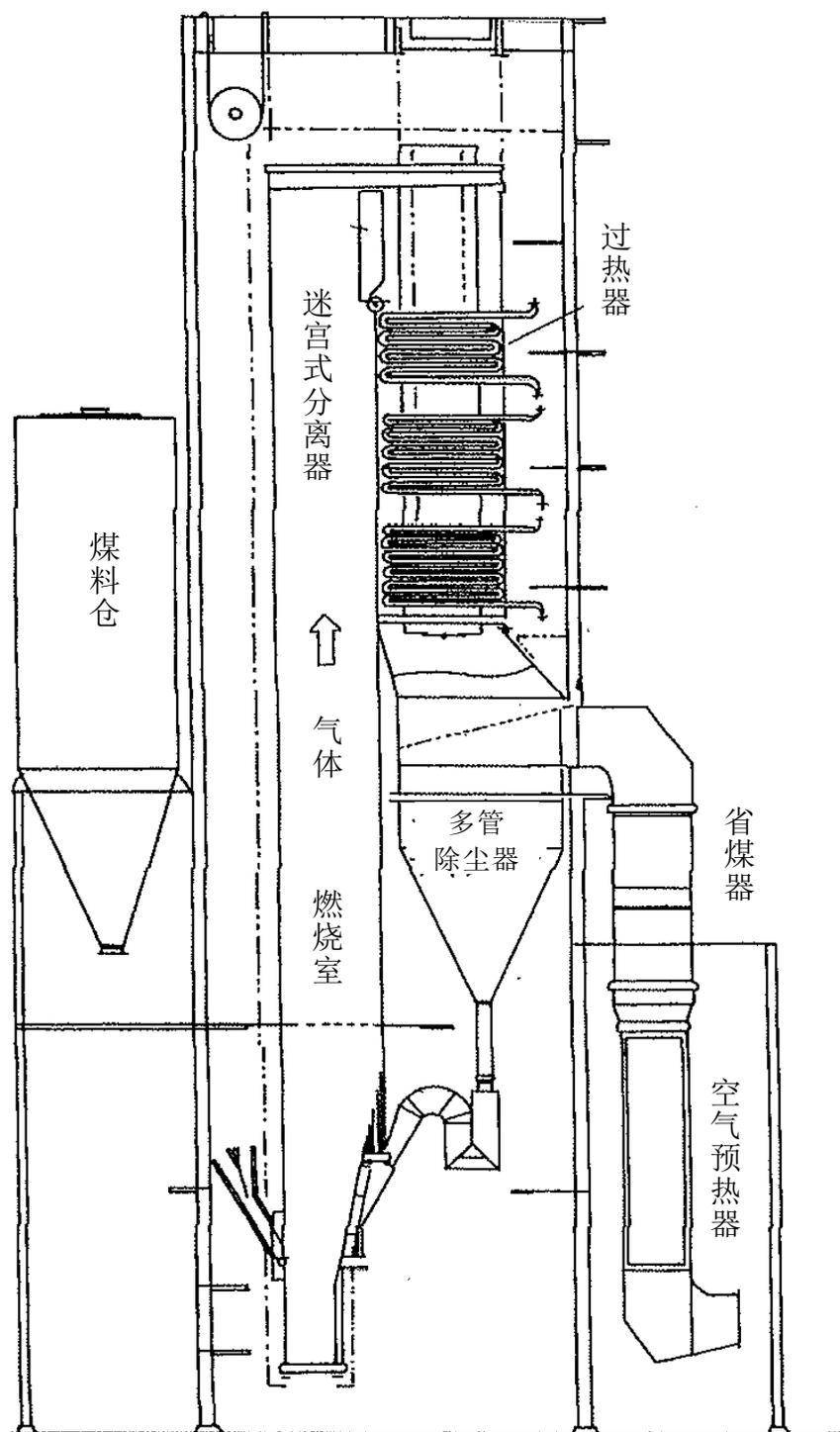


图 3 外部循环流化床锅炉的基本结构事例 (1)

(来源: NKK)

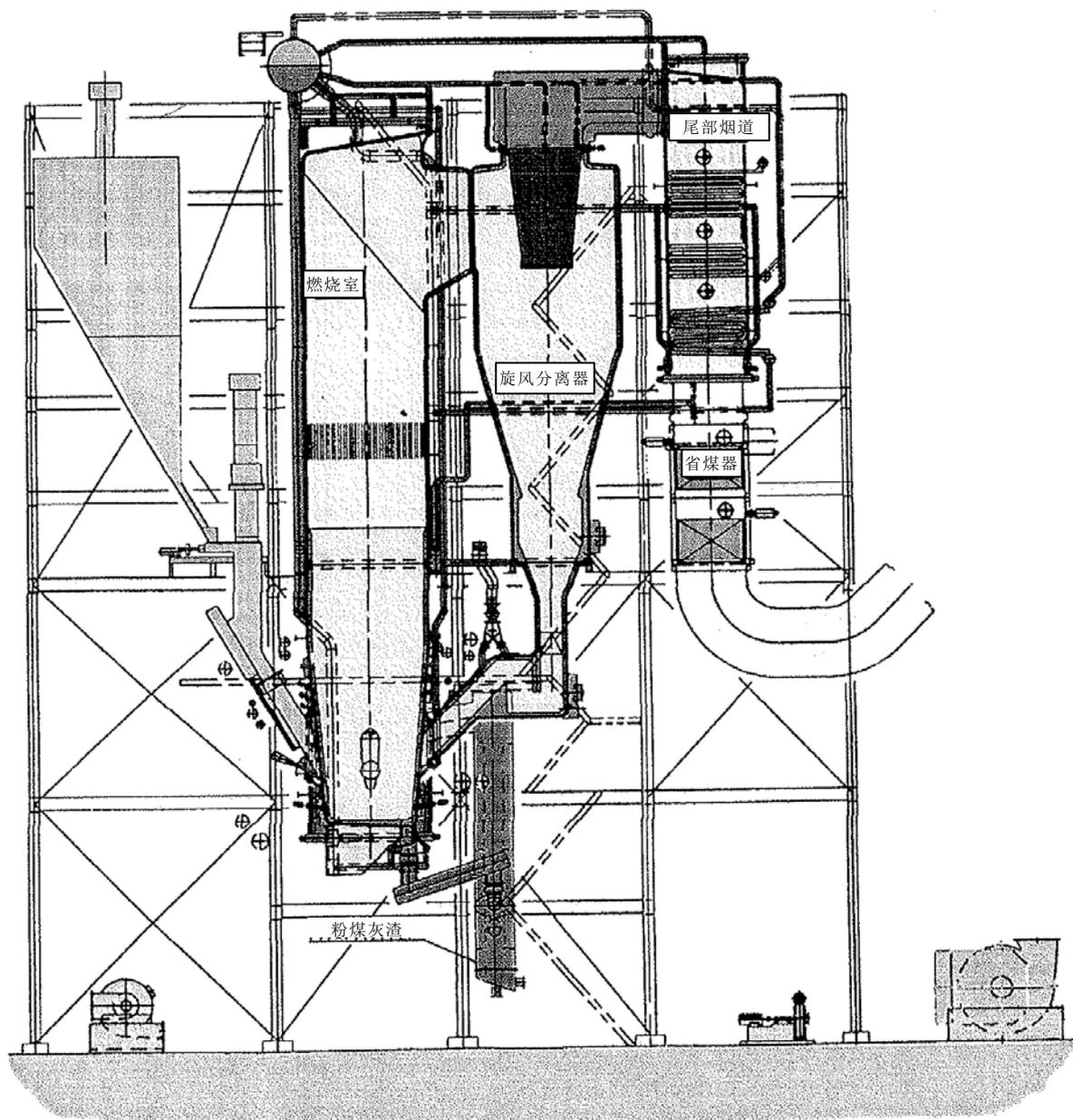


图 4 外部循环流化床锅炉的基本结构事例 (2)

(来源: 田熊)

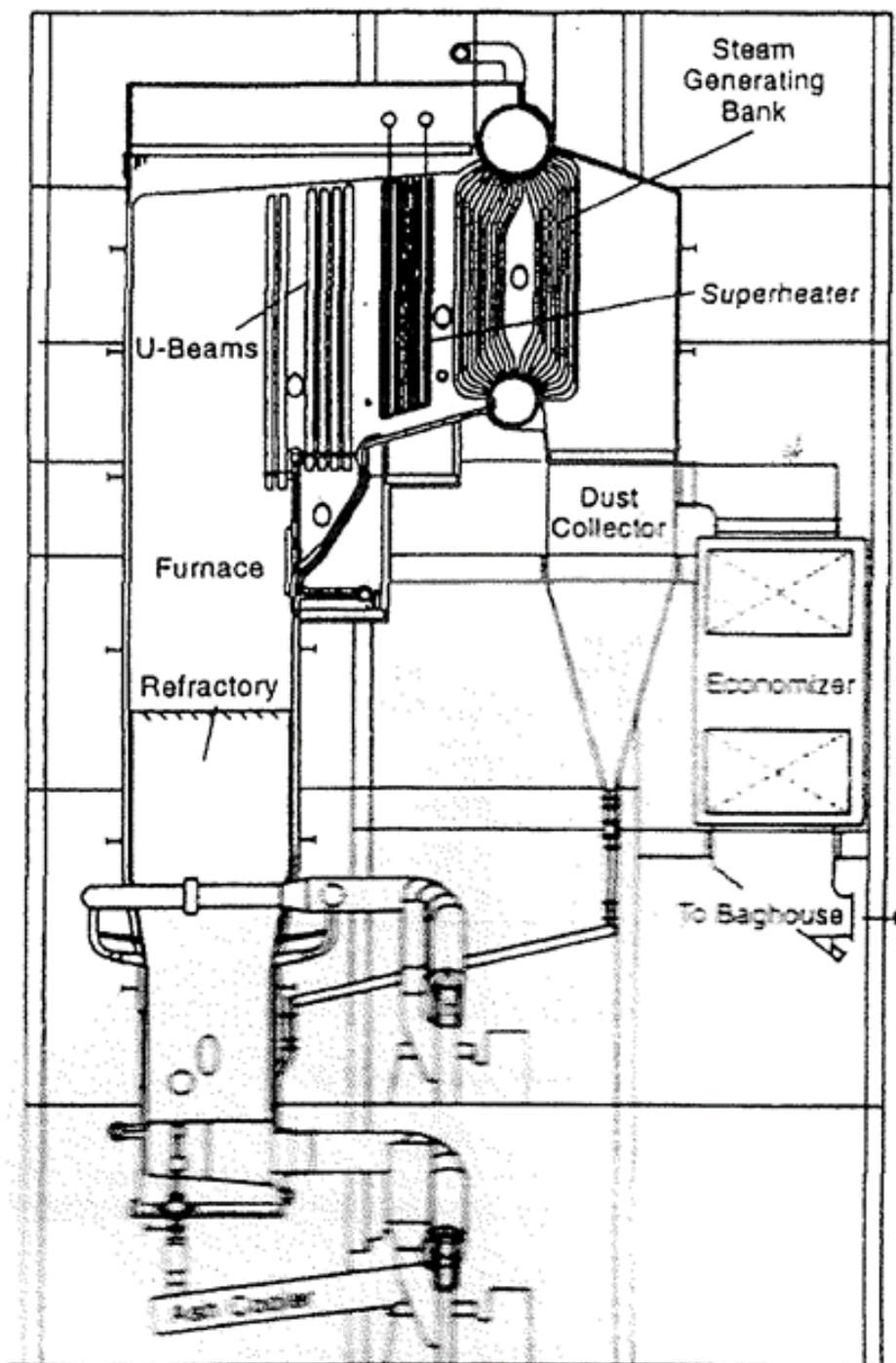


图 5 外部循环流化床锅炉的基本结构事例 (3)

(来源: Babhitachi)

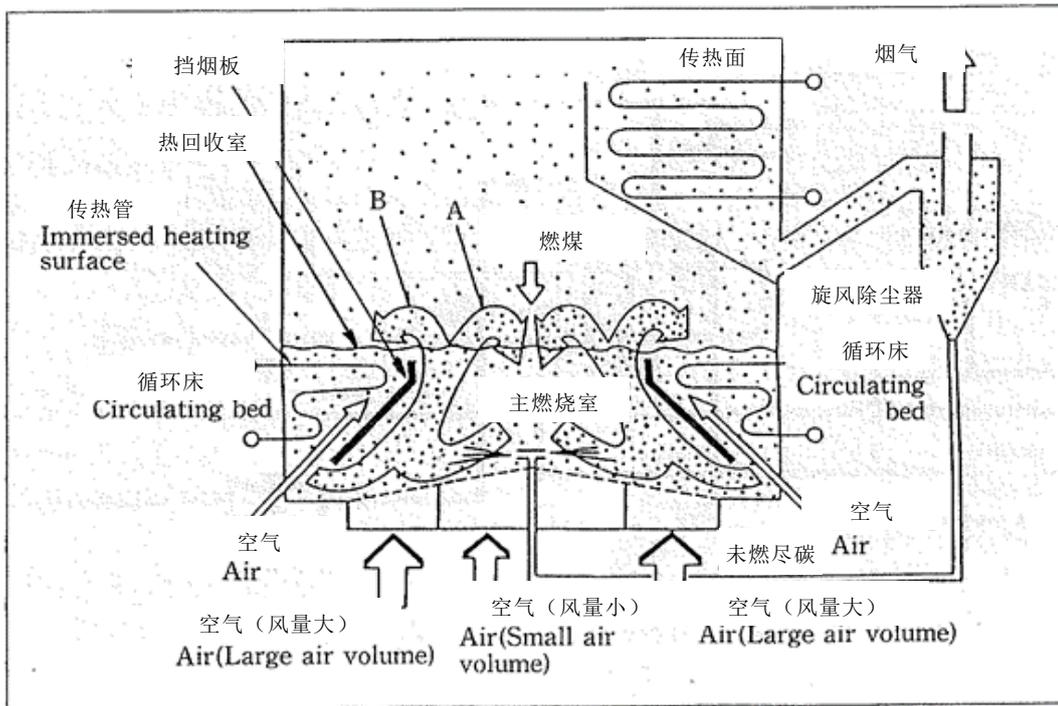


图 6 内部循环流化床锅炉的工作概念  
(来源: CCUJ)

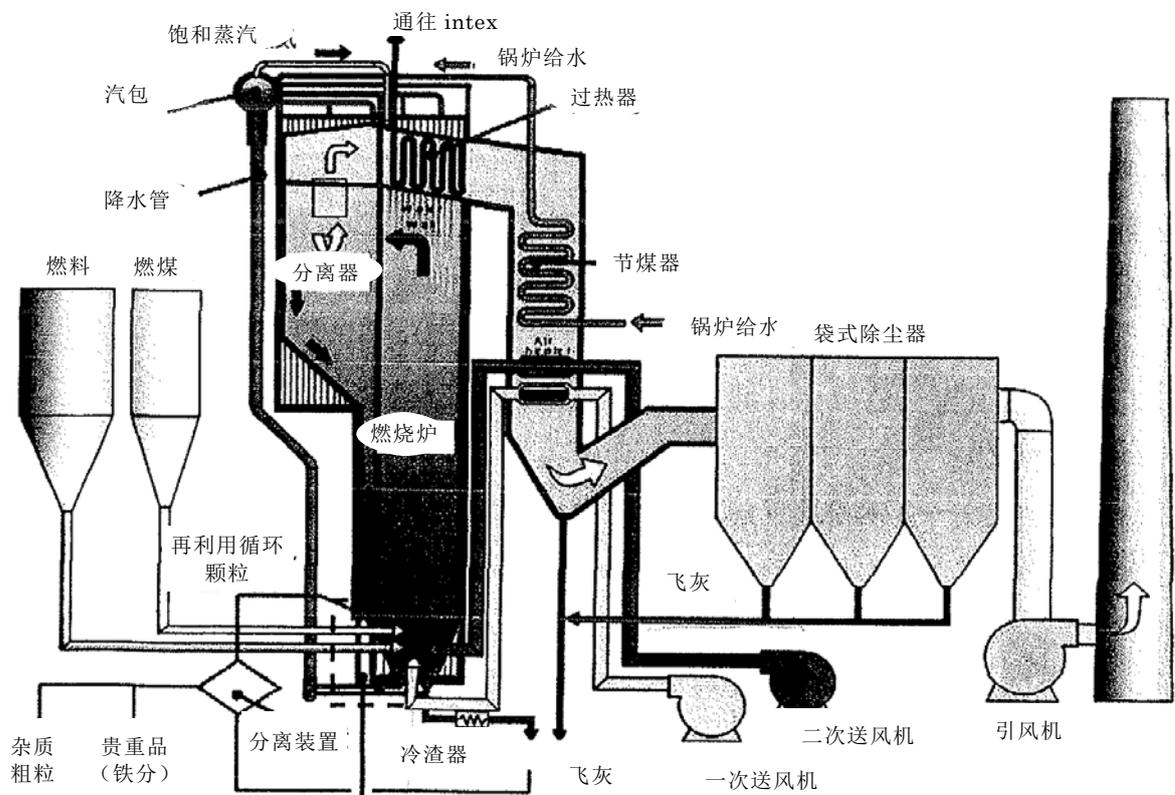


图 7 循环流化床锅炉设备系统的事例 (来源: JSIM SHI)

## 2) 蒸气规格

循环流化床锅炉的火炉放射传热面及对流传热面的基本排列结构与粉煤燃烧及重油燃烧的锅炉结构相似，没有燃烧器燃烧时的光焰燃烧火焰，只是火炉烟气温度的及烟气流速较低。因此，蒸气规格在欧美多为超超临界区域，而日本引进的多为蒸气压力、蒸气温度、蒸气纯度均为适合 5~300MW 小中发电功率的、10MPa、540℃ 的高温高压规格。

## 3) 辅机

基本的辅机结构与燃烧粉煤等的固体燃料锅炉相同，脱硫剂为干法、简易脱硝，但热旋风分离器需要与上升管大小相同的空间，飞灰系统会略微复杂。

# 5 循环流化床锅炉的大气污染防治技术

流化床燃烧锅炉因其减少环境负荷而获得好评。与其他的粉煤燃烧及链条炉燃烧相比，流化床燃烧锅炉燃烧效率高，从燃烧结构上来看，成为大气环境负荷的烟气量、CO<sub>2</sub>、煤尘、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、HCL 等排放量少，对环境造成的影响小，控制措施也简单易行，并且，还可使用在其他燃烧领域已实证效果的技术。

## 1) 烟气量、CO<sub>2</sub>量

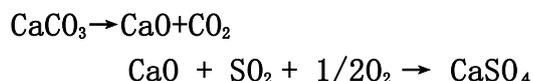
与粉煤燃烧等直接火焰燃烧相比，流化床燃烧一般过量空气系数较低，在 1.3 以下，并且，锅炉热效率方面要求的性能很高，设定为 90~92%<sub>at LHV</sub> 以上。因此，烟气量少，总 CO<sub>2</sub> 排放量减少。

## 2) 煤尘排放浓度、除尘技术

在流化床燃烧中，CO、H<sub>2</sub> 等未燃尽气体及未燃尽碳在火炉内溶化室燃烧。循环流化床的空塔烟气流速度快，与固定床燃烧相比，对流时间也相对较短，旋风分离器中难免留有未燃尽碳。此外，灰分进到烟气中，需要用除尘器去除。虽然受负荷波动等引起的烟气量波动的影响，但一般除尘器入口的含尘浓度比粉煤燃烧锅炉少。除尘方法是安装电除尘器或过滤除尘器。安装时应考虑安装位置的空间以及烟气温度的等条件，以便能够达到排放标准。两种除尘方法都为干法处理，不需要进行污水处理。

## 3) SO<sub>x</sub> 排放浓度、脱硝技术

在流化床燃烧中，向流化床内添加石灰石 CaCO<sub>3</sub> 或白云石 CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 作为脱硫剂的方法，可在燃烧的同时进行脱硫。石灰在煅烧后生成 CaO，产生以下脱硫反应：



循环流化床燃烧因颗粒循环保证了较长的反应时间，因此，Ca/S 克分子比小。从上述的脱硫反应可以看出，Ca/S 克分子比、过量空气系数、脱硫剂的循环等是管理方面的重要指标，各种锅炉的管理指标都不同，因此，需要试烧验证。

## 4) NO<sub>x</sub> 排放浓度

循环流化床锅炉的 NO<sub>x</sub> 排放浓度受过量空气系数、炉床负荷、流化温度、Ca/S 克分子比、燃烧性状等条件及上升管高度、燃料供给方法等的影响，随着过量空气系数的增加，NO<sub>x</sub> 排放浓度也将增加，但与粉煤燃烧等相比，燃烧温度低，在 850~950℃ 的温度下燃烧，使 Thermal NO<sub>x</sub> 的产生得到了控制。因此，在流化床燃烧中产生的 NO<sub>x</sub> 中 Fuel NO<sub>x</sub> 占大半，需要采取减

排措施时，降低燃料中的 N 分即可取得很好的效果。

但是，在日本国内，由于总量控制的制约等，有时要求达到更低的排放浓度。这时，会采取由流化床底部的还原燃烧及溶化室的氧化燃烧构成的二级燃烧、上升管内 NO 受 CO、NH<sub>3</sub>、H<sub>2</sub> 等还原性烟气及未燃尽碳的影响还原分解的还原区域的烟气再循环以及喷氨等措施。但是，由于受温度条件及过量空气系数的制约，应用时应进行试运行验证。

## 6. 大气污染控制政策

### 1) 控制体系

在日本，关于锅炉排放的煤烟，在根据环境基本法的基本理念制定的环境标准以及成为大气保护行政管理基础的《大气污染防治法》中，对于排放标准、排放限制、燃料使用规则、煤烟监测义务、报告以及处罚等均加以规定，安装锅炉企业有义务遵守这些规定。

循环流化床锅炉相关的大气污染防治法管控对象物质如表 4 所示：

表 4 相关的大气污染防治法限制对象物质

管控物质		物质示例	产生形态	管控标准	管控措施
煤烟	硫氧化物	SO <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	物质的燃烧	排放标准 (量控制、K 值控制、总量控制)	改善命令 直接处罚
	煤尘	煤烟灰等	物质的燃烧	排放标准 (浓度控制、不同设施 & 不同规模)	同上
	有害物质	NO <sub>x</sub> Cd、HCl	物质的燃烧、 分解等	排放标准(浓度控制、 不同设施&不同物质 总量控制(NO <sub>x</sub> ))	同上
粉尘	一般粉尘	煤粉	粉碎、粉碎、筛 选等	结构、使用、管理标准	符合标准命令

排放标准中有国家针对每种产生污染物的设备统一制定的一般排放标准、针对环境负荷大的地区新装设施制定的、用以代替一般排放标准的特别排放标准以及针对仅凭上述排放标准无法完全防治大气污染的地区，有都道府县针对煤尘及有害物质制定的加严标准。

针对 SO<sub>x</sub>，日本分别规定了各地区的排放标准，有的地方政府还制定了各地区的总量控制标准。NO<sub>x</sub> 与 SO<sub>x</sub> 相同，对于达标困难的地区，以各企业的设施为对象制定了总量控制标准。

另外，还在城市圈及指定地区根据季节制定了不同的使用燃料标准，规定可个季节使用燃料中的硫分上限。

### 2) 循环流化床锅炉相关的煤烟排放标准

日本的煤烟产生设施按照锅炉、焚烧炉等设备的不同类型，根据燃烧方式、燃料种类、规模(烟气量)制定一般排放标准值。

以日本的《大气污染防治法》中规定的燃煤、固体燃料(RDF、RPF、石油焦炭、木屑等)

废弃物为燃料的循环流化床锅炉的煤烟一般排放标准如表 5~表 6 所示。表 5 为煤尘的排放标准，表 6 为 NO<sub>x</sub> 的排放标准：

表 5 煤尘的排放浓度

设施名	烟气量 (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> N/h)	一般排放标准 (g/m <sup>3</sup> N)	特别排放标准 (g/m <sup>3</sup> N)	O <sub>2</sub> 浓度 (%Vol)
燃煤锅炉	20 以上	0.10	0.05	6
	4~20	0.20	0.10	
	4 以下	0.30	0.15	
其他燃烧固体燃料锅炉	4 以上	0.30	0.15	6
	4 以下	0.30	0.20	
焚烧废弃物锅炉(连续)	4 以上	0.15	0.08	12
	4 以下	0.50	0.15	

表 6 NO<sub>x</sub> の排放标准

设施名	烟气量 (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> N/h)	排放标准值 (ppm)	O <sub>2</sub> 浓度 (%Vol)
燃煤锅炉 (流化床燃烧)	1~4	350	6
	4~20	250	
燃烧固体燃料锅炉	20~50	250	
	50~70	250	
	70 以上	200	
焚烧废弃物锅炉(连续)	4 以上	250	12

注：与流化床燃烧的适用划分不清楚（与燃气、油的混烧，没有规定规模等）时，其标准通过行政指导确定。

## 7. 日本循环流化床锅炉大气污染物方面的实绩值

日本国内具有代表性的企业目前正在运行的循环流化床锅炉的大气环境监测值如表 7 所示。可以看出，所有的锅炉中，煤尘、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub> 的排放浓度远远低于该地区的排放标准。

由于包括流化床燃烧在内的发电锅炉烟气排放量多，对地区环境的影响大，因此，除锅炉性能好外，在企业公害防治负责人的统一指挥下严格执行燃料、燃烧管理以及设施的监管及监测制度等，对控制污染物的排放控制取得了很好的效果。

循环流化床锅炉对合理处理工业废弃物及生活废弃物发挥了巨大作用。从循环流化床锅炉在遵守《废弃物处理法》规定的二噁英类物质排放控制指南等的情况下能够正常运行的实际情况可以看出，循环流化床燃烧技术具有优秀的环境特性。

表 7 日本具有代表性的循环流化床锅炉环境监测值

企业	燃料	煤尘 (mg/m <sup>3</sup> N)	SO <sub>x</sub> (ppm)	NO <sub>x</sub> (ppm)
住友大阪水泥(株)	燃煤·木屑	<20	<100	<120
(株)SANIX	RPF	<40	<50	<200
王子 MATERIA(株)	RPF·煤	<30	<50	<150
日本制纸(株)	煤	<50	<100	<100
大牟田市 RECYCLE 设施	RDF	<20	<3 *	< 65

(\* 总量控制地区 单位: m<sup>3</sup>/h)

## 8. 循环流化床锅炉的使用及设备管理

### 1) 控制性

日本国内应用的发电循环流化床锅炉，输出规模不同其负荷变化特性也不一样。在 10~100MW 要求的高中间负荷段，追从性的变化率可轻松达到 5%/min。主蒸气压力及主蒸气温度也是如此。日本根据《发电事业法》严格检查、确认发电设施的控制性，性能未得到验证的，无法取得运行许可证。

基本控制系统与粉煤燃烧、油燃烧及气体燃烧相同，以主蒸气压力、主蒸气流量、SH 温度、炉内床压、火炉温度、SH/RH 管壁温度等动态特性为基础，控制燃料供给量、空气量、烟风量及 SH 注水量。锅炉的基本传热特性由全可燃颗粒循环速率、床内烟气速度以及空燃比决定。其他还有近年来采取的送风机、给水泵、空气压缩机等的变频控制等节能措施。

### 2) 锅炉热效率

热效率是理论上根据锅炉结构面中与传热面积及燃烧相关的烟气显热损失及未燃尽损失算出的因数。日本的循环流化床锅炉应用事例中，除以处理废弃物为主要目的的外，多为发电用中型输出功率锅炉，锅炉热效率在 92%<sub>atLHV</sub> 以上，设计和实际业绩均达到了高效。

### 3) 运行障碍及对策

根据以往的经验，在流化床燃烧中遇到的运行障碍有以下 7 种。发电企业因障碍即使是短时间停运，从公共利益的角度来看也会引起停止送配电事故，引起次生受害乃至三级受害，因此，连续稳定运行并维持固定的输出功率是发电企业的必备条件。停止送配电事故也会造成企业巨大损失，因此，必须建立一套包括锅炉的定期检修在内的预防保护体制。

#### ① 无法流化的异物（岩石、金属类等）堆积到火炉内底部

对策：在燃料前处理时，剔除无法流化的杂质、不燃物，按燃料粒径进行分粒。安装炉外卸出装置，定期清理底部堆积物。

#### ② 蒸气过热管群的腐蚀及积灰

对策：在因烟气温度高，易出现 HCL 等高温腐蚀的过热管群部位以及易积灰的部位安装除灰装置，使用耐酸钢管。

### ③ 高停吹比造成峰值性突变负荷

由于会造成强烈控制流化床内的燃烧条件（汽轮机送气条件）的状态，因此，不希望出现这种状态。

对策：采取稳定电力系统的措施，减缓蒸气量的波动。

### ④ 旋风分离器内壁积灰等

旋风分离器是循环流化床燃烧中分离燃烧烟气与流化料的重要装置，因此，必须对其采取措施，防止循环流化床出现运行障碍。附着物是燃烧生成物，因其不断堆积变厚，会降低分离效率，或引起脱落闭塞事故。

图 8 所示为旋风分离器上的附着物事例。

对策：需要在外表壁的保温及内部吹灰装置上下功夫。所用燃煤需考虑煤种的影响，对粒径加以管理。

### ⑤ 连通管的堵塞及换热器内烟气通过面的堵塞

对策：安装在堵塞时可使用的旁路，安装定期除锈装置，避免循环停止。

### ⑥ 烟气连通管的磨损及腐蚀

多因灰的高磨损性及废弃物燃烧时的酸性腐蚀造成。

对策：采用堵塞时可拆卸的结构，安装临时旁路管。

### ⑦ 传热面的磨损

流化床锅炉的流化料变成传热体，因此，火炉传热面多出现磨损。

对策：对传热管进行表面喷镀，内衬耐火材料。

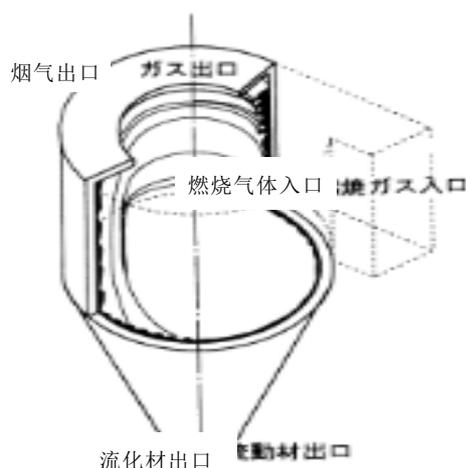


图 8 旋风分离器附着物事例

（来源：日本制纸 锅炉年次大会资料）

#### 4) 设备管理

在日本，法律规定必须根据循环流化床锅炉的用途，指定具有法定资格的操作技术人员，不仅负责锅炉的运行，还应负责预防保护、安全管理及热管理等工作。此外，进行烟气相关的大气污染管理及废弃物处理时，也必须指定各方面具有法定资格的管理人员，不仅是发电用锅炉及供电用锅炉，所有相关工作都必须在这些具有法定资格的管理人的监管下合理运行。日本的电力质量的可靠性及节能活动处于世界最高水平，这与这些人辛勤的付出分不开的。

### 9. 日本循环流化床锅炉的市场状况

日本的一次能源中，燃煤的比例高，依靠进口印度尼西亚煤、澳大利亚煤等的体制从 20 世纪 70 年代即已形成。因此，日本一直在不断开发、应用像流化床燃烧这样燃烧方面可完全应对劣质煤及煤质波动的燃烧系统。20 世纪 90 年代初，根据废弃物焚烧设施二噁英对策及《建设回收利用法》，日本制定了 RDF、RPF 等回收燃料的替代对策，并根据 RPS 法《电力企业系能源等利用特别措施法》，开始进行生物质发电，这样，对流化床燃烧技术的需求不断增大。因此，20 世纪 80 年代~21 世纪初，日本国内重工业生产厂家不断进行自主研发，并与欧美进行技术合作，20 世纪 90 年代，针对缫丝业及废弃物处理的商用流化床锅炉的使用量急剧增加。

表 8 所示为作为 NEDO（独立行政法人 新能源产业技术综合开发机构）国际燃煤利用对策项目《Clean Coal Technology 实证普及项目》中国际援助项目的一部分，作为循环流化床锅炉的普及用示范锅炉，在中国、菲律宾、印度尼西亚及泰国等应用的锅炉。

表 8 NEDO 国际燃煤利用对策项目（CCT）交付的循环流化床锅炉

收货方	国名	项目年度	燃料
房山服装集团公司	中国北京市	1993~1994	燃煤
淄博矿务局岭子煤矿	中国·山东省	1994~1995	燃煤
枣庄矿务局紫里煤矿	中国·山东省	1995~1996	燃煤
Calaca 燃煤发电	菲律宾·八打雁	1995~1997	燃煤
Indorama Chemical	泰国·Saraburi	1997~1998	褐煤·玉米芯
Kertas·Basuki·Rachmat	印尼· Banjuwangi	1997	燃煤
东风汽车有限公司	中国·湖北省	2002~2004	燃煤

（来源：NEDO CCT 资料）

表 9 所示为日本具有代表性锅炉生产厂家在国内的部分出货业绩，蒸发量为 10~300 t/h 的锅炉得到了广泛普及。从表中可以看出，造纸、水泥、食品、钢铁、化学、电力批发销售、木材加工、废弃物处理等许多行业都引进了循环流化床锅炉，没有行业限制，取得了广泛的业绩。特别是在运行条件和可信度方面要求高的行业需求较多。希望通过应用循环流化床锅炉，使用廉价的劣质燃料以期获得经济利润的企业、以及要求能够处理污泥、有机残渣等含水量高、燃烧性差的副产品及能够连续运行的企业，不受行业、企业的限制，都应用了循环流化床锅炉。特别是日本自主研发的内部循环流化床燃烧法，可以将废轮胎等废弃物作为燃料，与同型号的气化炉一起在国内外销售了 200 多台，取得了骄人的业绩。

1995年以后,日本的大型锅炉生产厂家向海外市场进行的技术出口和成套设备出口主要以大气环保性锅炉及高性能锅炉为主,在亚洲及西欧市场,中功率 IPP 用燃煤火力发电、生物质发电以及废弃物发电领域的业绩突出。

表 9 日本循环流化床锅炉的主要实绩

No.	用户	地点	蒸发量 (t/h)	燃料	生产厂家
1	(株)Kuraray	仓敷	70	燃煤	三井造船(株)
2	出光兴产(株)	千葉	300	燃煤	三井造船(株)
3	(株)神戸制钢	山口	34	燃煤	Pyro Power (株)
4	新日铁住金(株)	兵庫	250	燃煤	Pyro Power (株)
5	Omikenshi(株)	兵庫	35	燃煤	Pyro Power (株)
6	(株)神戸制钢	神戸	150	燃煤	Pyro Power (株)
7	(株)神戸制钢	加古川	225	燃煤	Pyro Power (株)
8	Oji Materia(株)	大分	200	RPF、燃煤	三菱重工业(株)
9	日本制纸(株)	勇拂	260	燃煤	三菱重工业(株)
10	王子制纸(株)	春日井	140	木屑、废轮胎、 RPF	三菱重工业(株)
11	中国木材(株)	日向	13	木質生物质	(株)田熊
12	NEDO (IRC)	泰国	30	褐煤、 生物质	(株)田熊
13	住友大阪水泥(株)	栃木	105	木屑、燃煤、 废轮胎	(株)荏原制作所
14	Showa Shell Sekiyu K. K	川崎	49MW	PKS、木屑	JFE Engineering(株)
15	(株)Sanix	苫小牧	180×2	废塑料	JFE Engineering(株)
16	神之池生物质发电 所	神栖	106	木屑、树皮	(株)荏原製作所
17	Daicel Corporation	大竹	300	燃煤、废轮胎	住友重机工业(株)
18	住友共同電力(株)	新居浜	180	燃煤	住友重机工业(株)
19	住友大阪水泥(株)	高知	237	燃煤、软木、木 屑	住友重机工业(株)
20	岩国 Wood Power(株)	岩国	45MW	木屑	JFE Engineering(株)
21	大牟田市 RECYCLE 施設	大牟田	86.9	RDF	川崎重工业(株)
22	太平洋水泥(株)	丝魚川	475	燃煤、软木	住友重机械工业(株)

## 10. 结束语

日本的循环流化床锅炉技术在锅炉机能及低公害方面处于世界最高水平。与欧洲锅炉市场几家公司垄断的情况不同，日本具有代表性的流化床锅炉生产厂家有数十家，处于竞争状态。这种竞争促进了多方面新燃料市场开发活动，技术发展显著。运行开始后经历的各种事故障碍作为经验教训，促进了新技术的开发，设备维护及支援工作成为一种新的商业模式。

控制全球变暖以及延长化石燃料的使用时间等地球环境问题是人类在本世纪共同面临的、亟待解决的问题，循环流化床锅炉在发电以及将利用废弃物能源等能源措施方面有其自身的优势，具有很好的发展前景。