

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（2）  
—钢铁（烧结机、焦炉）—

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

## — 钢铁烧结机 —

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。

本指南的对象行业钢铁烧结行业中新建企业从 2012 年 10 月开始、现有企业从 2015 年 1 月开始执行钢铁烧结、球团工业大气污染物排放标准（GB28662-2012）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介绍的中国各行业存在的问题以及信息等，介绍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，同时分析了日本现行的相关政策、企业的运行管理方法和监测分析方法等内容。

本指南在编写时得到了有关部门和人员的大力协助，在开展案例分的过程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	日本钢铁行业的生产现状	1
1.1.	生产规模	1
1.2.	生产工艺	2
1.2.1.	技术变迁	2
1.2.2.	新技术	2
1.3.	氮氧化物排放情况	4
1.4.	能耗情况	4
2	日本现行钢铁行业氮氧化物控制管理政策	6
2.1.	污染防治措施	6
2.2.	法规政策	10
2.3.	技术基础研究	11
2.4.	排放标准	11
2.5.	节能要求	13
3	氮氧化物产生工序及防治技术	15
3.1.	烧结工序分析	17
3.2.	烧结机的运行管理	18
3.2.1.	控制指标	18
3.2.2.	控制工序	19
3.3.	氮氧化物排放与控制情况	22
4	氮氧化物控制技术分析	26
4.1.	不同装置的控制措施及效果	26
4.2.	节能措施	28
4.3.	氮氧化物控制技术原理	32
4.3.1.	烟气脱硝	32
4.3.2.	烟气循环系统	33
4.3.3.	使用低氮焦炭	34
4.3.4.	防漏风措施	34
4.3.5.	活性炭吸附	35
4.3.6.	二氧化硫、氮氧化物协同处置	36
4.3.7.	Exhaust Gas Treatment through Low-Temperature Plasma	37
4.3.8.	Top Pressure Recovery Turbine	38
4.3.9.	Sinter Plant Heat Recovery	39
4.3.10.	Multi-silt Burner in Ignition Furnace	40
4.4.	氮氧化物控制技术经济性	41
4.4.1.	烟气循环	41
4.4.2.	选择性催化还原法(SCR)	42
4.4.3.	活性炭干法排烟脱硫脱硝装置	43
5	中国烧结机氮氧化物控制技术应用案例	45
5.1.	太原钢铁有限公司	45
5.1.1.	绪言	45
5.1.2.	活性炭移动层式脱硫脱硝技术	46
5.1.3.	干法脱硫脱硝装置	47

5.1.4.	小结.....	51
5.2.	湖南华菱湘潭钢铁有限公司.....	52
5.2.1.	概要.....	52
5.2.2.	NO <sub>x</sub> 排放路线图.....	53
5.2.3.	控制措施.....	54
6	建议.....	56



# 1 日本钢铁行业的生产现状

## 1.1. 生产规模

如图 1-1 所示，日本的粗钢产量在 1975 年之前一直处于上升状态，但之后一直徘徊于 1 亿吨左右。2002 年以后，世界粗钢产量从 2002 年的 9.04 亿吨下降至 2010 年的 14.31 亿吨，2012 年略有增加，为 15.48 亿吨；日本的产量 2002 年为 1.07 亿吨，2010 年为 1.09 亿吨，2012 年 1.07 亿吨，基本没有变化。今后估计也是在 1 亿吨左右。但是，中国在 2002 年为 1.82 亿吨，2010 年为 6.28 亿吨，2012 年为 7.17 亿吨，增幅很大。

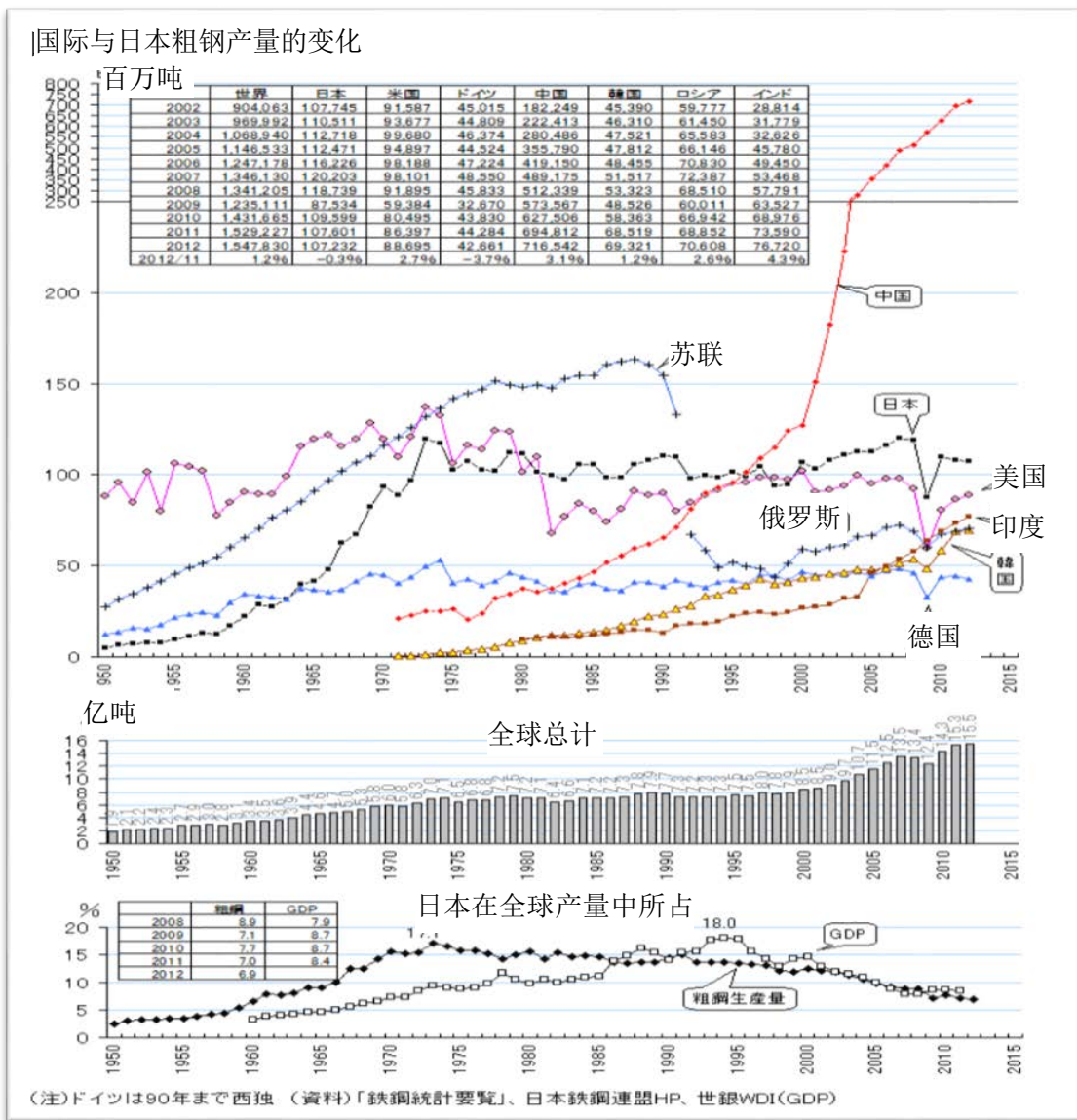


图 1-1 国际与日本的粗钢产量变化

## 1.2. 生产工艺

### 1.2.1. 技术变迁

图 1-2 所示为日本的生产技术变迁，主要项目如下：<sup>1 2</sup>

- ① 铁矿石 特矿石品种的变迁
- ② 原料的前处理： 烧结、球团设备、原料品质改善
- ③ 高炉运行、设备： 强化矿石整粒、使用自熔性烧结矿、高炉的大型化、运行的效率化（确立超高压运行）
- ④ 技术标准化： 确立复合送风、提高炉料分布技术要求、提高运行管理系统要求
- ⑤ 改善焦炭质量： 提高溃裂强度、降低灰分、削减强粘结煤的使用量
- ⑥ 环保、节能、省力化： 烟气脱硫、脱硝、TRT、CDQ、余热回收、零排放对策、废塑料原料化

### 1.2.2. 新技术

将下列技术投入实际应用，或研究开发（仅为主要部分）：

- ① SCOPE21（Super Coke Oven for Productivity & Environmental Enhancement toward the 21<sup>st</sup> Century）<sup>3</sup>：革新性焦炭炉 = 新一代焦炭制造技术  
→新日铁大分第 5 焦炭炉实机 1 号机 2008 年 5 月开始运行
- ② COURSE（CO<sub>2</sub> Ultimate Reduction in Steelmaking Process by Innovative Technology for Cool Earth 50）<sup>4</sup>：以削减钢铁工序 CO<sub>2</sub> 为目的而进行的长期性项目。  
日本政府从 2008 年开始推行 Cool Earth 项目。

<sup>1</sup> 高松信彦、栗原喜一郎、斋藤元治、加来久典：制铁技术开发的进程及今后的展望 新日铁技报、第 391 号（2011）

<sup>2</sup> 影近博：钢铁技术开发的进步与今后的开展 NKK 技报 No.179（2002.11）

<sup>3</sup> 经济产业省：煤炭高度转换焦炭制造技术开发项目（SCOPE21）的跟踪评估（2011 年）

<sup>4</sup> 日本钢铁联盟：web site

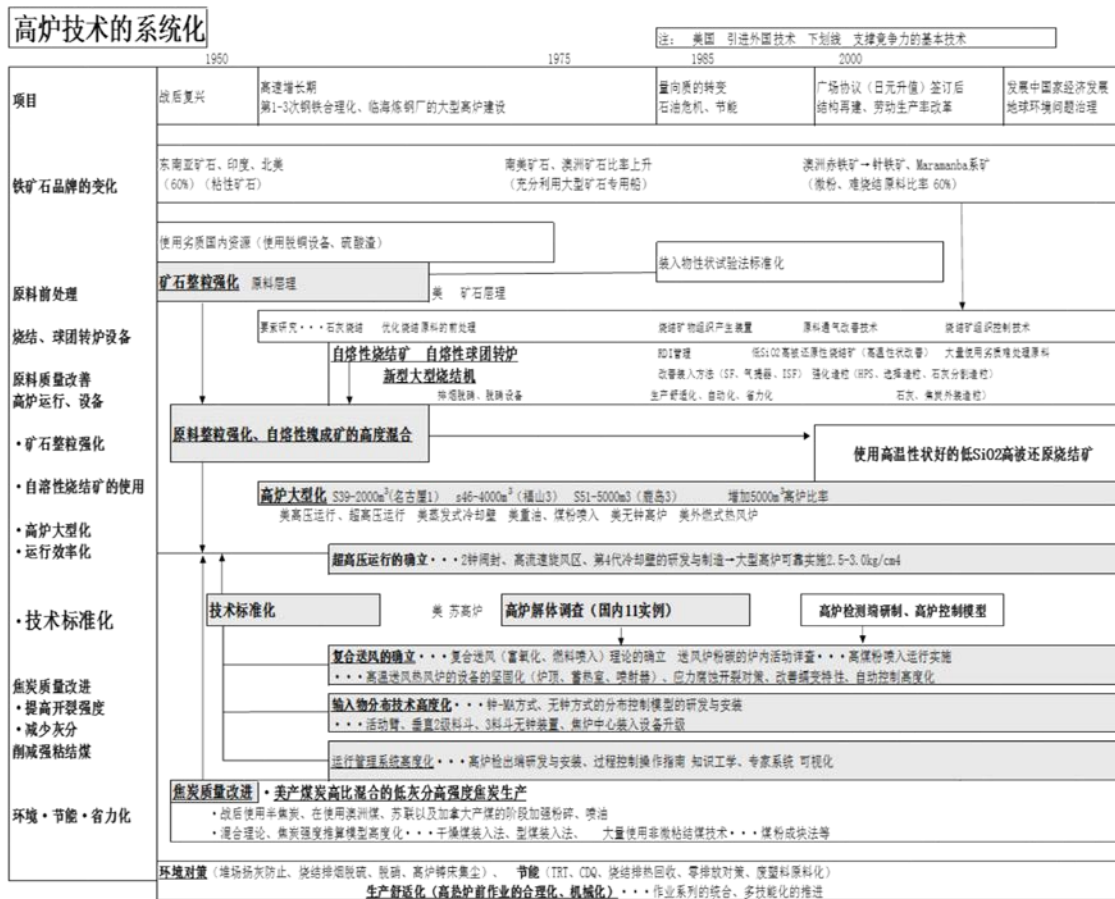


图 1-2 钢铁行业生产技术的变迁

(出典：彼岛秀雄：高炉技术的系统化、国立博物馆技术的系统化调查 第15集 2010年3月)

### 1.3. 氮氧化物排放情况

钢厂的 NO<sub>x</sub> 主要污染源与 SO<sub>x</sub> 相同，有烧结机、焦炭炉和加热炉。日本主要采取了开发低氮燃烧器、改善燃烧条件、开发安装烟气脱氮脱硝设备等措施，钢铁行业的 NO<sub>x</sub> 排放量不断减少，取得了很好的效果（图 1-3）。1994 年以后，日本钢铁联盟停止汇总日本钢铁行业 NO<sub>x</sub> 排放量的数据，之后的数据将按 1993 年的水准推算。

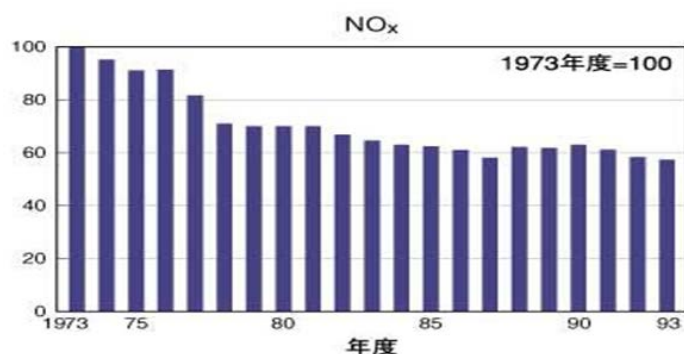


图 1-3 钢铁行业 NO<sub>x</sub> 排放量变化

(出处: 日本钢铁联盟)

### 1.4. 能耗情况

2007 年能耗强度（粗钢平均每吨的能耗）与 1990 年相比降低了 10.6%。

效果显著的主要节能措施如下<sup>5</sup>：

- (1) 第一阶段（-1980 年左右）：改善运行
  - ① 高炉的燃料比降低
  - ② 加热炉的燃料降低
- (2) 第二阶段（1980 年左右-1995 年左右）：改善、应用设备，
  - ① TRT（高炉炉顶煤气余压发电）
  - ② 烧结主排·冷却余热回收锅炉
  - ③ CDQ（焦炭炉干法冷却设备）
  - ④ 转炉余热锅炉
  - ⑤ 其他余热回
  - ⑥ 连续铸造设备
  - ⑦ 连续烧钝设备
- (3) 第三阶段（1995 年左右-）：削减 CO<sub>2</sub>、资源回收利用

<sup>5</sup> 饭野吉嗣等：钢铁厂在环境保护方面所做的努力 JFE 技报、No.6（2004 年 12 月）

① 高炉燃气轮机联合循环(GTCC)

② 废弃物回收利用技术（以废塑料为原料-喷入高炉、用于焦炭炉）、粉尘回收

JFE 在这方面取得了突出的成果。如图 1-4 所示，能耗强度以上世纪 70 年代初为基准，到 2003 年度大约削减了 33%。

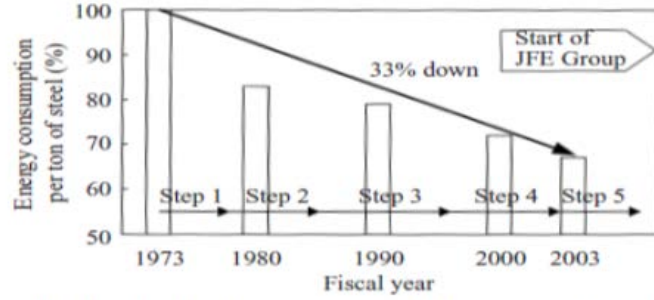


Fig. 1 Trend of energy consumption per ton of steel (FY1973 = 100%)

图 1-4 能耗强度变化

## 2 日本现行钢铁行业氮氧化物控制管理政策

### 2.1. 污染防治措施

在 2000 年之后的全球化形势下，随着世界级钢铁行业的结构调整以及钢铁企业的整合，2001 年诞生了 Arcelor、2003 年诞生了 JFESteal、2004 年诞生了 Mittal、2006 年诞生了 Arcelor-Mital、2012 年诞生了新日铁住金等钢铁巨头企业，钢铁企业的竞争日趋白热化。<sup>6 7</sup>

钢铁企业在提高生产率、降低成本、治理环境污染的同时，不断推进烧结机烟气中氮氧化物（以下简称“NOx”）的减排工作。

所有钢铁企业都希望通过设备的大型化和效率化来提高生产率、降低成本。特别是高炉，1995 年神户钢铁厂开始将加古川第 1 高炉（5400 m<sup>3</sup>）等扩建为炉容积为 5000 m<sup>3</sup>以上的超大型高炉（表 2-1），并通过应用省力化设备、实现设备的自动化和合理化以及改善运行状况等方式提高生产率（表 2-2），实现低还原剂运行（图 2-1）。通过上述一系列的努力，神户钢铁厂的劳动生产率在 10 年中约翻了一番，达到约 1600t/人/年，烧结机也实现了集约化和大型化。

表 2-1 5000m<sup>3</sup>以上高炉建设变化

开炉时间	高炉名
1995	神户制钢所加古川第 1 高炉 (5400 m <sup>3</sup> )
1998	JFE 钢铁千叶第 6 高炉 (5153 m <sup>3</sup> )
2002	JFE 钢铁仓敷第 4 高炉 (5005 m <sup>3</sup> )
2003	新日本制铁君津第 4 高炉 (5555 m <sup>3</sup> )
2004	新日本制铁大分第 2 高炉 (5775 m <sup>3</sup> )
	JFE 钢铁京滨第 1 高炉 (5000 m <sup>3</sup> )
	住友金属工业鹿岛第 1 高炉 (5370 m <sup>3</sup> )
2006	JFE 钢铁福山第 4 高炉 (5000 m <sup>3</sup> )
2007	新日本制铁名古屋第 1 高炉 (5443 m <sup>3</sup> )
	住友金属工业鹿岛第 3 高炉 (5370 m <sup>3</sup> )
2009	新日本制铁大分第 1 高炉 (5775 m <sup>3</sup> )

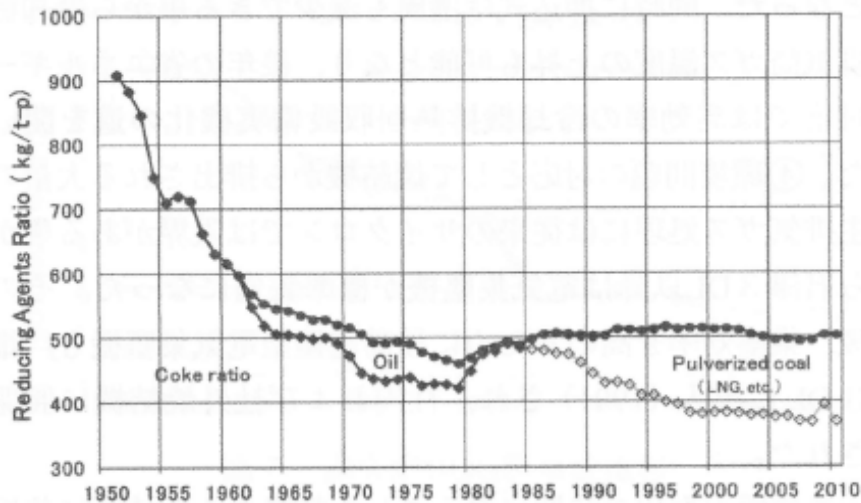
（出处：彼岛秀雄：高炉技技术的系统化、国立博物馆技术的系统化调查 第 15 集 2010 年 3 月）

<sup>6</sup> 高松信彦、栗原喜一郎、斋藤元治、加来久典： 制铁技术开发的进程及今后的展望 新日铁技报、第 391 号 79 (2011), 82-83 页

<sup>7</sup> 饭野吉嗣、相马冬树、桥本邦俊： 钢铁厂在环境方面的努力、JFE 技报、No.6 (2004 年 12 月)

表 2-2 高炉业绩的变化

	1990 年	2003 年
高炉运行台数 (炉内容积 m <sup>3</sup> )	37 台 (122,997)	29 台 (114,017)
平均内容积 (m <sup>3</sup> )	3323	3931
年产铁量 (t/年)	80,144,653	82,089,710
平均产铁比 (t/m <sup>3</sup> · d)	1.99	2.04
平均燃料比 (kg/t)	505	506 (kg/t)
平均焦炭比 (kg/t)	446	381
平均补贴燃料费 (kg/t)	59 (煤粉 51kg/t)	125 (煤粉 125kg/t)
炉渣比 (kg/t)	312	287
烧结矿比 (%) / 球团比 (%)	77.0/8.0	73.1/5.3



(出处: 彼岛秀雄: 高炉技技术的系统化、国立博物馆技术的系统化调查 第 15 集 2010 年 3 月)

图 2-1 日本的燃料比例变化

(出处: *The State of the Art Clean Technologies (SCOT) for Steelmaking Handbook (2nd Edition), December 2010*)

表 2-3 全国烧结机业绩比较图

项目	1990 年	2002 年
烧结机运转台数 (台)	33	25
烧结机有效面积 (m <sup>2</sup> )	9,017	8,541
产量 (千 t/年)	106,442	106,496
日产量 (t/d)	9,407	11,671
生产效率 (t/h/m <sup>2</sup> )	1.41	1.46
收益率 (%)	90	88.9

(出处: 彼岛秀雄: 高炉技技术的系统化、国立博物馆技术的系统化调查 第 15 集 2010 年 3 月)

在环境污染治理方面,为实现节约资源和资源的再利用,日本在粉尘、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、CO<sub>2</sub> 减排及二噁英等有害物质的治理措施方面和建设循环型社会方面进行了不懈的努力。在粉尘治理方面,随着电除尘器、布袋除尘器得到普及,以及 SO<sub>x</sub> 治理方面 1973 年川崎制铁千叶第 4 烧结机安装使用脱硫装置以来,上世纪 70 年代-2000 年期间,几乎所有的钢铁厂都安装使用了脱硫装置,SO<sub>x</sub> 污染排放情况得到了很大的改善(表 2-4)。图 2-2 所示 JFE 的实例中,SO<sub>x</sub> 与 1973 年相比大约减少了 1/9。

表 2-4 烧结机烟气脱硫装置安装情况

工厂	启运年	脱硫方式	处理能力	备注
川铁千叶 4DL	1973	湿法石灰石膏法	12 万 Nm <sup>3</sup> /h	
新日铁户畑	1974	电石渣-石膏法	20 万 Nm <sup>3</sup> /h	
川铁水岛 4DL	1974	湿法石灰石膏法	75 万 Nm <sup>3</sup> /h	
住友和歌山 5DL	1975	Moretana 法石灰石膏法	37 万 Nm <sup>3</sup> /h	
川铁水岛 3DL	1975	湿法石灰石膏法	90 万 Nm <sup>3</sup> /h	
川铁千叶 3DL	1975	湿法石灰石膏法	32 万 Nm <sup>3</sup> /h	(停运)
住金鹿岛 1DL	1975	Moretana 法石灰石膏法	88 万 Nm <sup>3</sup> /h	
住金鹿岛 2DL	1976	Moretana 法石灰石膏法	200 万 Nm <sup>3</sup> /h	
神钢尼崎	1976	CAL 法	35 万 Nm <sup>3</sup> /h	(停运)
神钢神户	1976	CAL 法	35 万 Nm <sup>3</sup> /h	(停运)
中山制钢	1976	CAL 法	37.5 万 Nm <sup>3</sup> /h	
川铁千叶 4DL 增强	1976	湿法石灰石膏法	65 万 Nm <sup>3</sup> /h	
NKK 福山 3DL	1976	氨硫酸铵法	76 万 Nm <sup>3</sup> /h	(停运)



新日铁若松	1976	电石渣-石膏法	180 万 Nm <sup>3</sup> /h	(停运)
NKK 京滨 1DL	1976	氨硫酸铵法	156 万 Nm <sup>3</sup> /h	
新日铁堺	1979	电石渣-石膏法	50 万 Nm <sup>3</sup> /h	(停运)
中山制钢 (改造)	1983	氢氧化镁法	37.5 万 Nm <sup>3</sup> /h	
住金小仓 3DL	1985	氢氧化镁法	40 万 Nm <sup>3</sup> /h	
新日铁户畑 (改造)	1987	氢氧化镁法	42 万 Nm <sup>3</sup> /h	
新日铁名古屋 3DL	1987	活性炭	90 万 Nm <sup>3</sup> /h	
川铁水岛 4DL (改造)	1996	氢氧化镁法	75 万 Nm <sup>3</sup> /h	
川铁水岛 3DL (改造)	1996	氢氧化镁法	90 万 Nm <sup>3</sup> /h	
同上名古屋 1/2DL	1999	活性炭	130 万 Nm <sup>3</sup> /h	

(出处: 一般社团法人日本钢铁协会 《钢铁便览》)

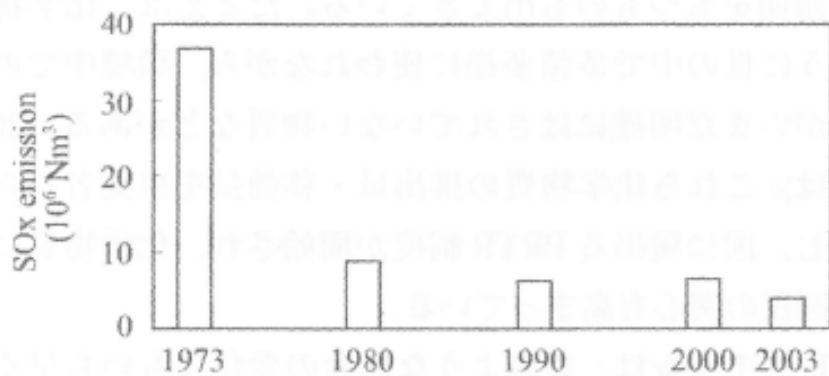


图 2-2 SOx 削减变化

(出处: 铃木富雄: 钢铁厂的燃烧技术 铁与钢 第 76 (1990) 第 6 号)

在 NO<sub>x</sub> 治理方面, 1973 年日本制定了现行的氮氧化物相关的环境标准, 规定“日平均值应在 0.04-0.06ppm 以下”, 为了达到这一标准, 钢铁联盟设立了“钢铁行业 NO<sub>x</sub> 防治技术开发总部”, 并于 1974 年设立了“NO<sub>x</sub> 研究协会”, 在之后的 5 年内总投资 23 亿多日元不断研究开发新技术, 最终达到了技术开发总部和研究协会成立时所定的目标。1980 年 3 月底上述机构解散, 但其成果作为实用技术在各钢铁企业得到了广泛地运用。图 2-3 所示 JFE 的实例中与 1973 年相比 NO<sub>x</sub> 降到了 1/2 以下。<sup>8</sup>

<sup>8</sup> 彼岛秀雄:高炉技术的系统化、国立博物馆技术的系统化调查 第 15 集 2010 年 3 月

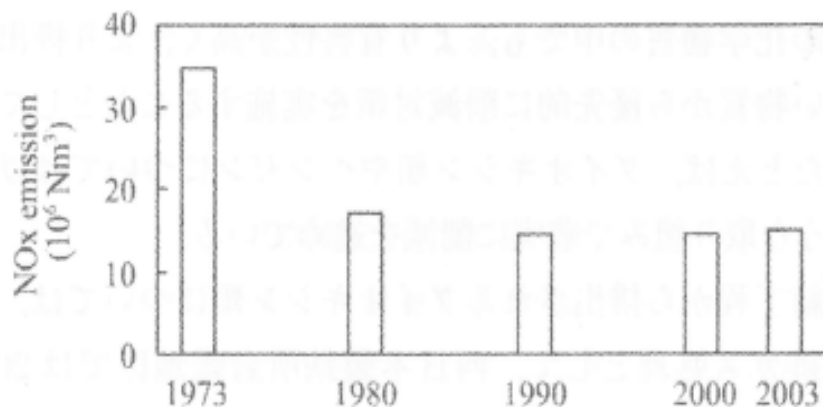


图 2-3 NO<sub>x</sub> 削减变化

(出处: 饭野吉嗣、相马冬树、桥本邦俊: 钢铁厂在环境方面的努力、*JFE 技报*, No.6 (2004 年 12 月))

## 2.2. 法规政策

如表 2-5 所示, 日本在防止公害的环境政策措施 (法规制) 的变迁中, 制定了各种钢铁行业 NO<sub>x</sub> 控制法律法规。主要法规如下:

1970 年: 制定《公害基本法》

1974 年: 制定《NO<sub>x</sub> 环境标准》

1976 年: 《工厂等 SO<sub>x</sub> 总量控制》(1973 年制定)

1978 年: 修订《NO<sub>2</sub> 环境标准 (现行的日平均 0.04-0.06ppm 标准)》

1982 年: 《工厂等 NO<sub>x</sub> 总量控制》(1981 制定)

表 2-5 大气污染相关年表 (主要法规)

年	东京都	国家
1949	制定工厂公害防止条例	
1955	制定煤烟防止条例	
1962		制定煤烟排放限制等的法律
1968	东京都与东京电力签订公害防止协定 成立东京都公害研究所	制定大气污染防治法
1969	制定公害防止条例	制定二氧化硫 (SO <sub>2</sub> ) 的环境标准
1970	修订公害防止条例 (强化限制)	
1971	实行重油的燃料限制 (限制硫磺含量)	

1972		制定悬浮颗粒物 (SPM) 的环境标准
1973		制定二氧化氮 (NO <sub>2</sub> )与光化学氧化剂 (O <sub>x</sub> ) 的环境标准
1974	强化重油的燃料限制 (限制硫磺含量)	
1976	实行工厂等 SO <sub>x</sub> 总量控制	
1978		修订二氧化氮 (NO <sub>2</sub> )的环境标准
1982	实行工厂等 NO <sub>x</sub> 总量控制	
1992		制定机动车 NO <sub>x</sub> 法
1993		制定环境基本法
1999	开展《NO 柴油车行动计划》	
2000	制定环境确保条例 (全面修订公害防止条例)	
2001	设立机动车公害监视员 (机动车 G-man) 强化电厂 NO <sub>x</sub> 控制、小型焚烧炉控制 (禁止使用)	
2003	开始限制柴油车	
2006	查有车限制 (强化排放标准)	
2007		制定机动车 NO <sub>x</sub> 、PM 法 (修订机动车 NO <sub>x</sub> 法)
2009		制定细微颗粒物 (PM <sub>2.5</sub> )的环境标准

### 2.3. 技术基础研究

1973 年以后, 日本钢铁联盟与政府、研究机构和相关行业联合, 于同年成立了“钢铁行业 NO<sub>x</sub> 防治技术技术开发总部”, 并根据该总部的基本方针成立了“(财) 钢铁设备氮氧化物防治技术开发基金 (NO<sub>x</sub> 基金) 和”钢铁行业氮氧化物防治技术研究组合 (NO<sub>x</sub> 组合), 作为技术开发机构。NO<sub>x</sub> 组合扶持大学、研究机构进行研究, 共同开展“烧结烟气脱硝技术”的研究。由此, 钢铁行业在 NO<sub>x</sub> 防治技术开发方面所做的努力可见一斑。1980 年“NO<sub>x</sub> 基金”改组为“钢铁行业环境保护技术开发基金”, 将研究扶持的范围扩大至大气、水质、废弃物等整个环境领域。

### 2.4. 排放标准

日本现行的钢铁行业相关设备的 NO<sub>x</sub> 排放标准如表 2-6 所示:

表 2-6 钢铁设备的 NO<sub>x</sub> 排放标准值(日本)

	设备类型	规模	新设标准值	
			On (%)	NO (ppm) *
锅炉	燃气锅炉	4 万 m <sup>3</sup> N 以上	5	60-100
		4 万 m <sup>3</sup> N 以下	5	130-150
	重油锅炉	20 万 m <sup>3</sup> N 以上	4	130-150
	气体液体混烧锅炉	4-20 万 m <sup>3</sup> N	4	150
		1-4 万 m <sup>3</sup> N	4	150
		1 万 m <sup>3</sup> N 以下	4 (注)	180
	燃煤锅炉	20 万 m <sup>3</sup> N 以上	6	200-250
		4-20 万 m <sup>3</sup> N	6	250-320
		4 万 m <sup>3</sup> N 以下	6	250-320
燃气发生炉	燃气发生炉		7	150
加热炉	加热炉		7	150
焙烧炉、烧结炉、分解炉	焙烧炉	4 万 m <sup>3</sup> N 以上		220
		4 万 m <sup>3</sup> N 以下		220
	锰铁烧结炉			220
	其他烧结炉			220
	分解炉	4 万 m <sup>3</sup> N 以上		220
		4 万 m <sup>3</sup> N 以下		
熔矿炉、转炉、平炉	熔矿炉中的高炉			100
	其他熔矿炉			100
	转炉			
	平炉	4 万 m <sup>3</sup> N 以上		
		4 万 m <sup>3</sup> N 以下		
金属溶解炉	金属溶解炉	4 万 m <sup>3</sup> N 以上		180
		4 万 m <sup>3</sup> N 以下		180
金属加热炉	金属加热炉	4 万 m <sup>3</sup> N 以上	11(注)	100-180
		4 万 m <sup>3</sup> N 以下	11(注)	150-180
焦炭炉	焦炭炉		7	170
空白栏没有规定				

(注) 该规定暂定适用 On=Os, 不进行氧含量校正。

\*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。

实际上，NO/NO<sub>2</sub> 比因燃料、设备类型的不同也不一样。

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)

## 2.5. 节能要求

上世纪 70 年代，经历了石油危机后，日本各钢铁企业开始积极开展节能工作。之后，又响应国家和“日本经济团体联合会”的号召，于 1996 年 12 月制定了“钢铁行业环保自主行动计划”，开展了防止全球变暖的节能活动，设定了“与 1990 年相比，到 2010 年将钢铁生产工序的能耗削减 10%”的目标。图 2-4 所示为截至 2007 年的业绩变化。与 1990 年相比，2007 年的能耗强度改善了 10.6%。图 2-5 所示为日本的“钢铁行业节能及环境累计投资金额变化”，可以看出，日本钢铁企业积极投资节能设备，并取得了巨大成果。

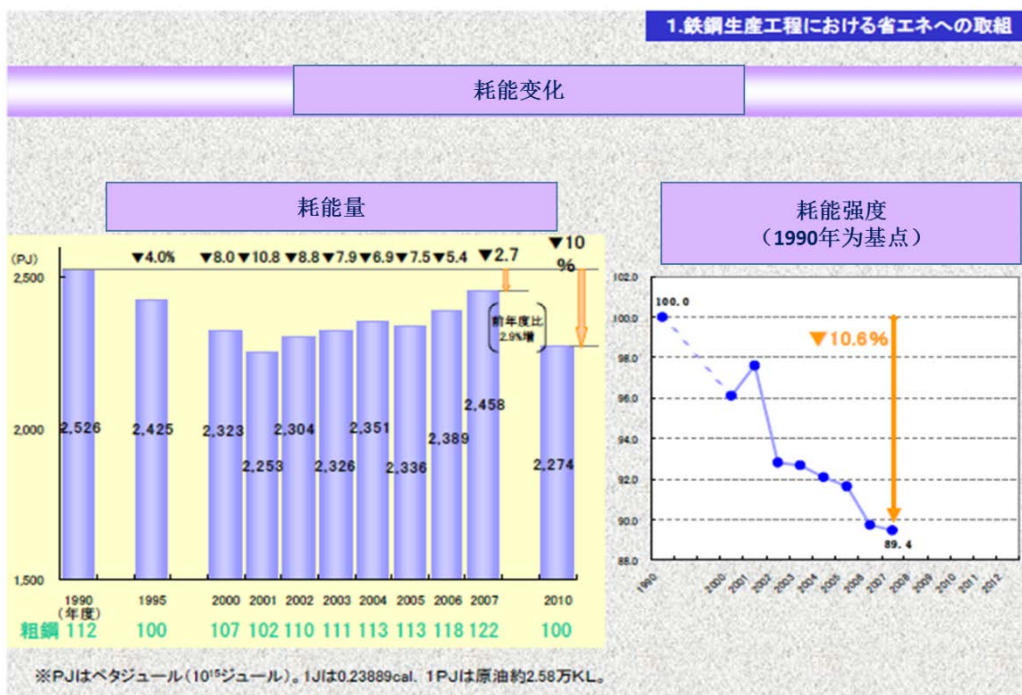


图 2-4 钢铁生产工序的能耗变化

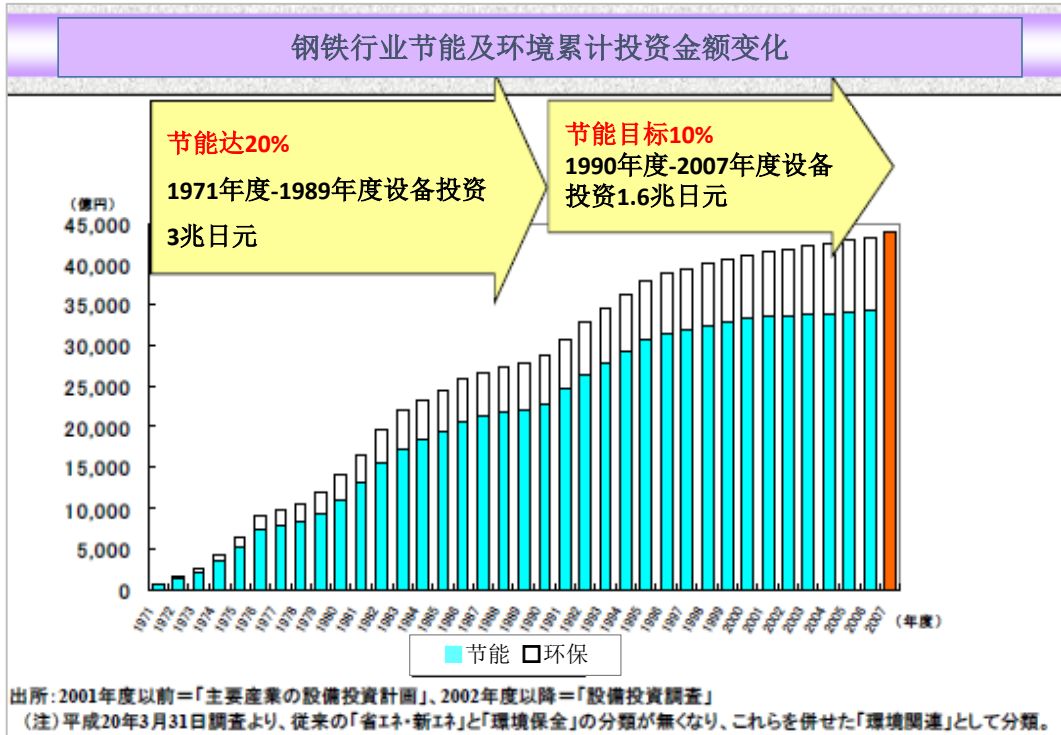


图 2-5 钢铁行业节能及环境累计投资金额变化

(出处: 日本钢铁联盟: 钢铁行业在防止全球变暖方面的努力 自主行动计划进度报告 2008年10月)

### 3 氮氧化物产生工序及防治技术

钢铁厂以高炉为中心，由焦炉、烧结机、转炉、电炉、造块、分块、轧钢工序构成，拥有一条龙工序。（图 3-1）

这些设备及工序需要铁矿石、煤、水等大量的资源、燃料及电力等能源。对大气造成污染的 NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub> 和煤尘主要从这些设备和工序排出。

如表 3-1 所示，钢铁的各生产工序会产生粉尘、烟尘、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub> 等污染物质，一般采用图 3-1 钢铁行业的环境对策所示的对策。

表 3-1 钢铁产生粉尘、烟尘、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub> 等污染物质的工序

工序	粉尘、烟尘产生的环节	产生 NO <sub>x</sub>	产生 SO <sub>x</sub>
装卸原料	下料斗		
原料调车场	堆放场、堆料、轮式装载机		
原料处理	破碎机、输送机、输送机连接部料斗		
焦炭炉	煤粉碎机、混煤机、原料槽、煤塔、送煤车、拦焦机、消火塔、截煤机、筛煤机	有	有
烧结炉	主烟气、冷却烟气、输送机、料斗、破碎筛煤机	有	有
高炉	储矿槽、铸床、铸床、高炉烟气	有	有
热风炉	烟气	有	有
转炉	炉口、炉周围（炉周系）（熔铁炉、熔矿炉）、转炉烟气	有	有
均热炉	烟气	有	根据燃料情况
加热炉	烟气	有	根据燃料情况
锅炉	烟气	有	根据燃料情况

（注）：根据《钢铁界》1974 年 7 月号编制

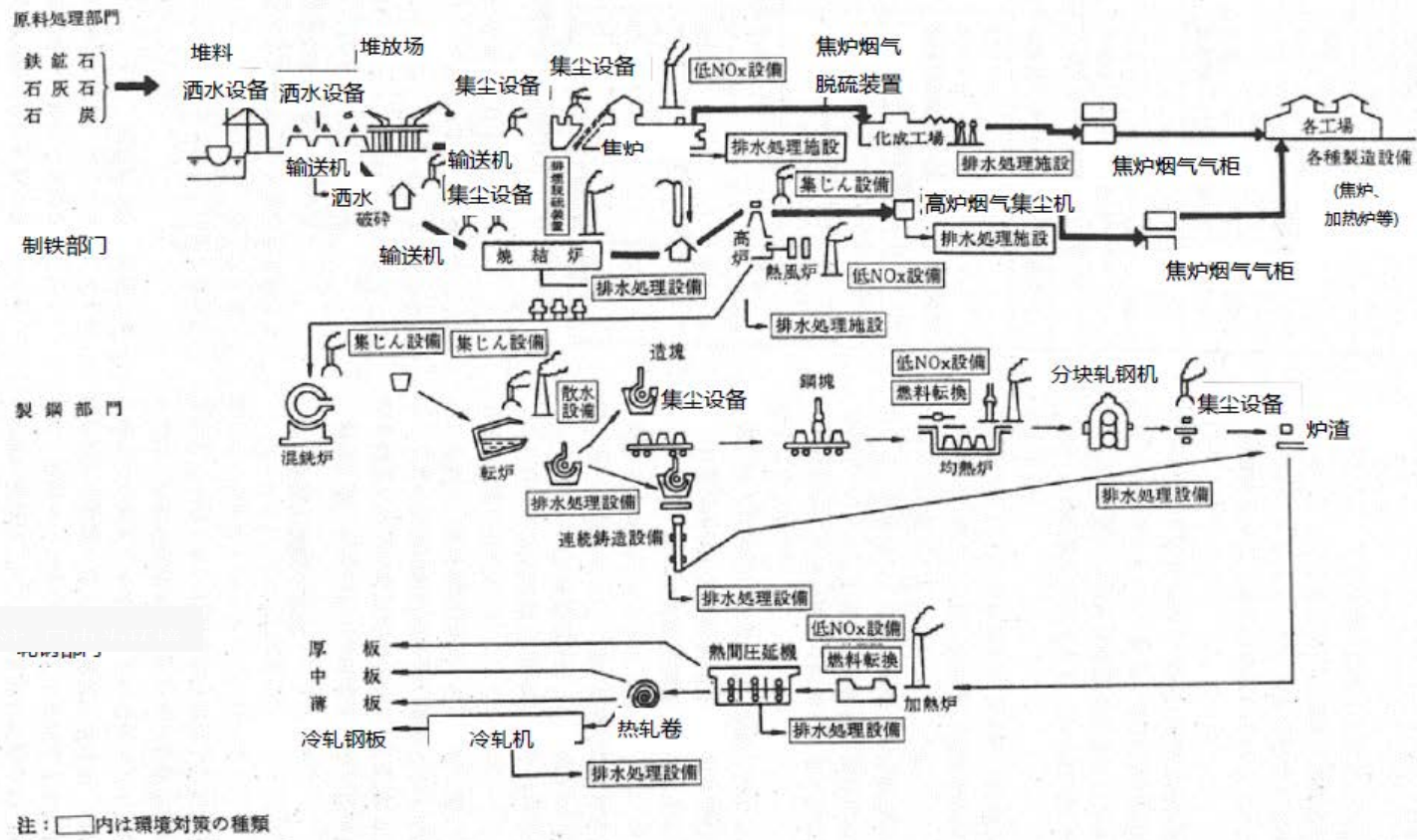


图 3-1 钢铁行业的环境对策

(出处:《钢铁界》 1984年7月号)



### 3.1. 烧结工序分析

针对 SO<sub>x</sub> 和煤尘，企业已经采取措施，控制其排放； NO<sub>x</sub> 方面，采取行之有效的措施减少排放的要求也越来越迫切。

钢铁厂 NO<sub>x</sub> 污染源主要是烧结机、焦炉、加热炉及锅炉。特别是烧结机，NO<sub>x</sub> 的排放量占整体的 20 - 40%，成为 NO<sub>x</sub> 的主要排放源。

烧结机是制造高炉原料烧结矿的设备。由于烧结矿的品质影响到高炉的运行及生产率，因此，企业一直在努力改善烧结矿品质。此外，随着高炉的大型化，适合批量生产的德怀特-劳埃德（DL）型烧结机已成为主流，在加宽烧结机台车的同时，加长烧结机的长度，从而扩大烧结面积，实现了烧结机的大型化（图 3-2）。

DL 型烧结机由原料槽、1 次搅拌、2 次搅拌、混合原料缓冲料斗、铺底料斗、点火炉、车台、风箱、主排风管、集尘器（ESP）、烧结风机（主排风机）、烟囱、1 次破碎、2 次破碎及冷烧结矿条筛组成。

铁矿石、焦炭、石灰石作为原料通过 1 次搅拌、2 次搅拌后混合。在这一过程中加水制粒（制成 1 - 8mm 左右的原料颗粒，称为“疑似粒子”）。制粒原料通过给矿部的缓冲料斗装入烧结机的台车（装有车轮，数米长的车轮连在一起，沿轨道向排矿部的 1 次破碎机侧水平移动），构成原料层。从原料层的上部向下部抽入空气，原料层的上面被点火炉燃烧器点燃，原料中混合的焦炭依次从上往下下移燃烧。这一过程促进了原料矿石的烧结反应及熔融反应，生成气孔率高的烧结矿。生成的烧结矿在排矿部的一次破碎机中破碎，赤热的焦炭经冷却机冷却后二次破碎，冷烧结矿条筛筛分后，粒径在 5mm 以下（标记为“-5mm”）的细小颗粒作为返矿送回原料槽再次使用。粒度调整（+5mm）后的烧结矿作为高炉原料投入高炉。此外，部分烧结矿经铺底料斗装入台车底部的炉篦面。

从烧结机上面抽入的空气与原料燃烧反应，从下部的风箱通过集尘器、主排风机经烟囱排入大气中。烧结烟气中包含粉尘、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、二噁英类（DXN）大气污染物（表 3-2）。平均每吨烧结矿排放 1500 - 2500Nm<sup>3</sup> 以上的烟气，烟气排放量很大。

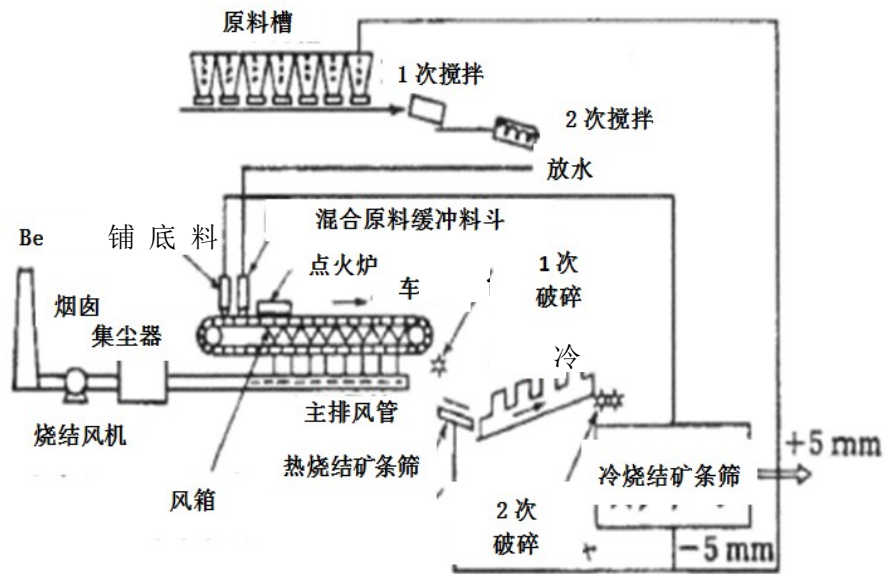


图 3-2 DL 式烧结机系统图

(出处: 一般财团法人日本铁钢协会《钢铁便览》)

烧结烟气中包含粉尘、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、二噁英类 (DXN) 大气污染物 (表 3-2)。平均每吨烧结矿排放 1500 - 2500Nm<sup>3</sup> 以上的烟气, 烟气排放量很大。

表 3-2 烧结烟气中的有害物质

有害成分	排放浓度
Dust	0.5 - 3g/Nm <sup>3</sup>
SO <sub>x</sub>	400 - 1000mg/Nm <sup>3</sup>
NO <sub>x</sub>	300 - 700mg/Nm <sup>3</sup>
DXN 類	0.5 - 5ngI-TEQ/Nm <sup>3</sup>

(出处: Best Available Techniques Reference Document on the Production of Iron and Steel, December 2001)

## 3.2. 烧结机的运行管理

### 3.2.1. 控制指标

主要管理项目有以下 3 项:

#### (1) 产品质量

管理项目及管理水平由于原料、设备、高炉运行条件的原因并非是一定的, 表 3-3 仅为

一例。

(2) 燃料消耗率

正在设法改善点火炉的燃烧技术，开发一种可在点火炉的表面层点火均匀、稳定、且可实际应用的燃烧器。

(3) 生产率

原料混合的事前处理、给料方法、烧结床的抽风量、烧结床的移动速度、燃料消耗率的最小化均为重要项目。

表 3-3 烧结矿产品质量管理目标

烧结矿产品质量管理项目	目标水平
落下强度	+10mm% 83~90%以上
转鼓强度	+10mm% 60~70%以上
还原粉化指数	-3mm% 35~45%以上
碱度偏差	CaO/SiO <sub>2</sub> 的 日内 $\delta \leq 0.05 \sim 0.1$
产品粒度 (-5mm)	-5mm% 5%以下
产品中 FeO(%) 被还原性 (学振法)	5~9% 还原率 60~65%以上

(出处: 一般财团法人日本铁钢协会《钢铁便览》)

### 3.2.2. 控制工序

按照工序列举以下 4 项。这些是运行管理所需的项目，受到监管。表 3-4 所示为烧结机运行数据的一个例子：

(1) 原料混合预处理

主要管理项目为混合原料的烧结床的通气性、烧结后的强度、粒度及减少产品成分偏差。表 3-5 所示为原料的混合比例的一个例子。

表 3-4 烧结运行数据例

		项目	业绩值例			项目	业绩值例			
机体	台车宽	W	[m]	4.0	烧结混合	矿石混合率	O	[%]	59.4	
	有效机长	L	m	80.0		烧结粉混合率	[R2]	"	5.3	
	有效面积	W×L	[m <sup>2</sup> ]	320.0		石灰石混合率	[LS]	"	10.3	
主排风机	抽风压	△P	[-mmH <sub>2</sub> O]	1 600		返矿混合率	[R2]	"	21.3	
	抽风量	V	[Nm <sup>3</sup> /min]	16 000		焦粉率	C	"	3.7	
	烟气温度	T	°C	120		计	"	"	100.0	
生产结构式	生产量[日产]	Pr	[t/d]	11 040		原料/产品性质	混合原料平均粒径	DM	[mm]	2.4
	生产率	PM	[t/h]	437.3			水分	Moist	[%]	6.0
	给料层厚度	h	[mm]	450.0			产品平均粒径	D <sub>s</sub>	[mm]	18.6
	台车速度	u	[m/min]	4.00			粉率	-5mm	[%]	4.5
	给料密度	d	[t/m <sup>3</sup> ]	1.80	转鼓强度		TI	[+10mm%]	63.0	
	烧结块成品率	η <sub>1</sub>	[%]	89.7	落下强度		SI	"	85.2	
	产品/烧结块	η <sub>2</sub>	"	69.4	低温还原粉化率		RDI	[-3mm%]	33.8	
运行率	r	"	95.0	化学成分	T. Fe		[%]	56.6		
成品率	烧结成品率	β	"	90.0			FeO	"	8.77	
	钢包成品率	π	"	70.1			SiO <sub>2</sub>	"	5.58	
	产品成品率	α	"	76.1			Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	"	1.95	
消耗率	新原料消耗率	OR	[kg/t-sinter]	1 111.0			CaO	"	10.17	
	焦粉消耗率	k	"	55.0			MgO	"	1.21	
	点火气体消耗率	i	Nm <sup>2</sup> /t-sinter	9.0			TiO <sub>2</sub>	"	0.29	
	铺底料消耗率	b	[kg/t-sinter]	126.0			CaO/SiO <sub>2</sub>	"	1.82	
	返矿消耗率	r1	"	315.0			[CaO+MgO]/SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	"	1.51	
	烧结粉消耗率	r2'	"	79.0						

(出处: 一般财团法人日本铁钢协会《钢铁便览》)

表 3-5 原料混合例

		A	B
新原料	巴西	29	20
	澳大利亚	27	32
	果阿	8	5
	南非	6	9
	规模	3	2
	砂铁	0	4
	高炉粉尘	1	1
	其他	12	14
	石灰石粉	14	13
	计	100	100
返矿		28	32
焦炭		5.1	4.7

(出处: 一般财团法人日本铁钢协会《钢铁便览》)

(2) 给料、点火、烧成

为了防止往台车给料时产生粒度偏析, 应检查原料是否装入台车, 表面层的是否点火均匀、稳定, 炉头有无异常的裂缝、收缩, 排矿部有无燃烧不均、未燃尽的情况等。

### (3) 冷却、产品粒度调整

排矿部排出的烧结块（在台车上烧成后的固体物）中含有大块烧结块，经过一次搅拌、冷却、二次搅拌破碎后，用 CS 分筛调整粒度。

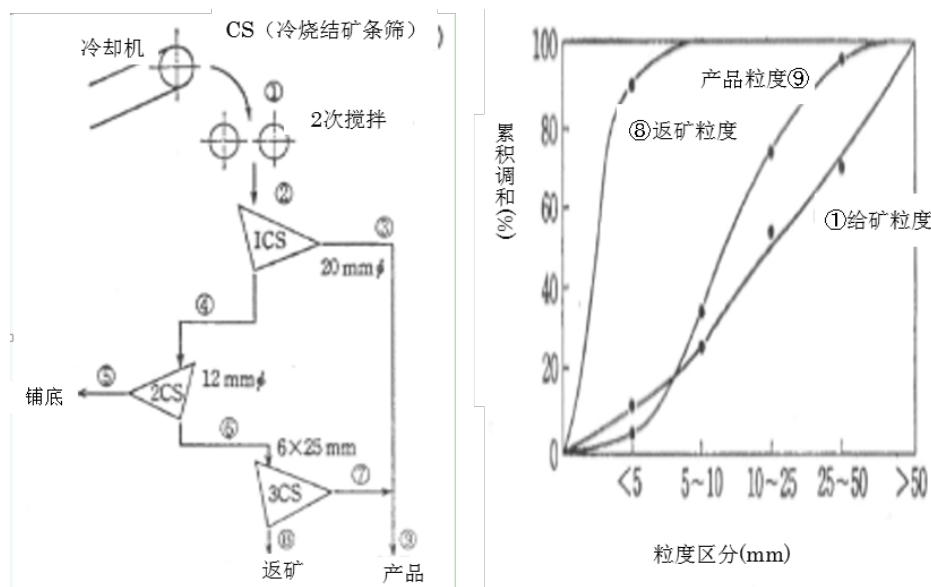


图 3-3 产品筛分流程及粒度一例

(出处: 一般财团法人日本铁钢协会《钢铁便览》)

### (4) 烟气处理

主排风机风箱抽入的烟气经高效 ESP (电除尘器) 去除粉尘、经安装在主排风机后部的脱硫装置去除 80~90% 以上的 SO<sub>x</sub> 后从烟囱排出 (烟气脱硝装置中 SCR 和干法脱硫脱硝装置, 国际上有数十例安装运行的例子)。

### (5) 综合自动管理

在上述 4 款的基础上,对整个工序依靠自动运行系统, 有效进行运行管理。图 3-4 为自动运行系统的一个例子。

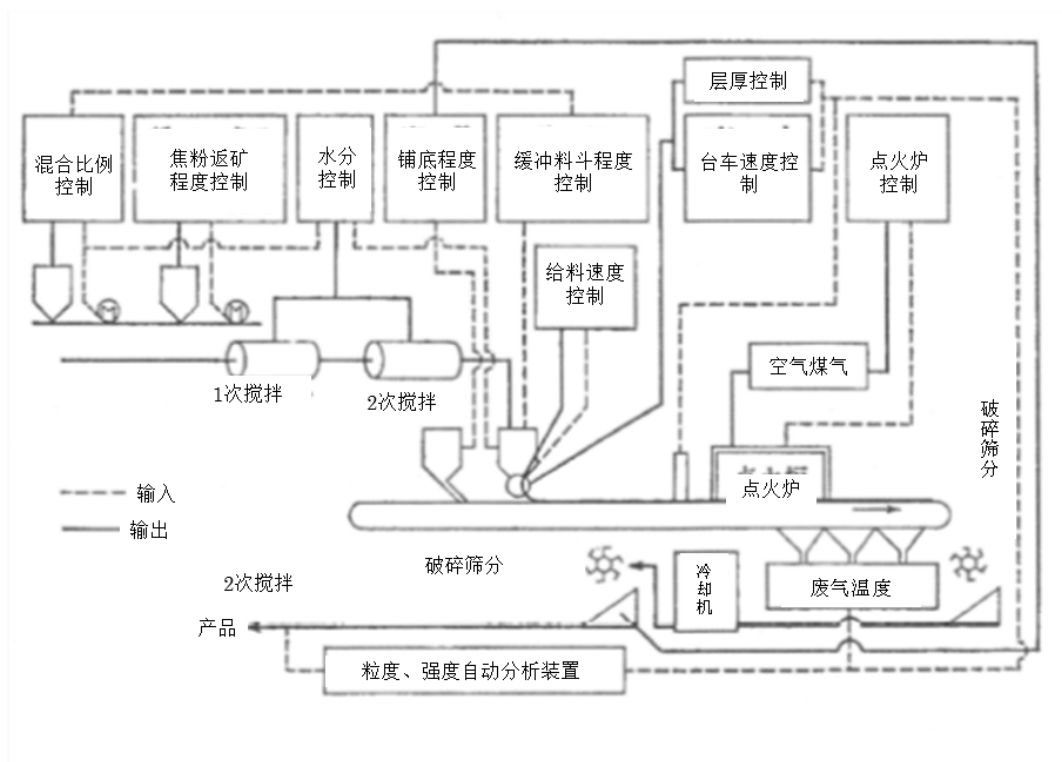


图 3-4 综合运行系统例

(出处：一般财团法人日本铁钢协会《钢铁便览》)

### 3.3. 氮氧化物排放与控制情况

烧结工序中产生的氮氧化物（NO<sub>x</sub>）有 NO 和 NO<sub>2</sub>，其中 95% 以上为 NO，排放到大气中之后逐渐氧化转化成 NO<sub>2</sub>。

NO 的产生分为空气中的氮与氧在高温下燃烧反应后产生的 Thermal NO<sub>x</sub> 和原料中的有机氮氧化物产生的 Fuel NO<sub>x</sub>。试验及理论模拟试验证明，烧结过程中的 NO<sub>x</sub> 主要是 Fuel NO<sub>x</sub><sup>9 10</sup>。

烧结给料层经过干燥、燃烧、熔融、烧结工序生成烧结矿（图 3-5 图 3-6）。这一过程中 NO<sub>x</sub> 产生于烧结氧化区域（氧化带），在还原区域（还原带）减少。

烧结过程中产生的 Fuel NO<sub>x</sub> 是由焦炭中所含的氮以及原料铁矿石中的氮造成的，但焦炭中所含的氮是产生 Fuel NO<sub>x</sub> 的主要原因。焦炭中的氮分解成 N、NH、NH<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub>、CN、HCN，在氧化带中与氧气反应，根据  $N+1/2O \rightarrow NO$  生成 NO<sub>x</sub>。但是，从降温工序开始在火

<sup>9</sup>高松信彦、栗原喜一郎、斋藤元治、加来久典：制铁技术开发的进程及今后的展望 新日铁技报、第 391 号（2011）79，82-83 页

<sup>10</sup>饭野吉嗣、相马冬树、桥本邦俊：钢铁厂在环境方面的努力、JFE 技报、No. 6（2004 年 12 月）

焰内的氧分压较低的还原带，由于再结合反应的  $N+N \rightarrow N_2$ 、 $NH+NH \rightarrow H_2+N_2$  等抑制了  $NO_x$  生成。(图 3-5)。

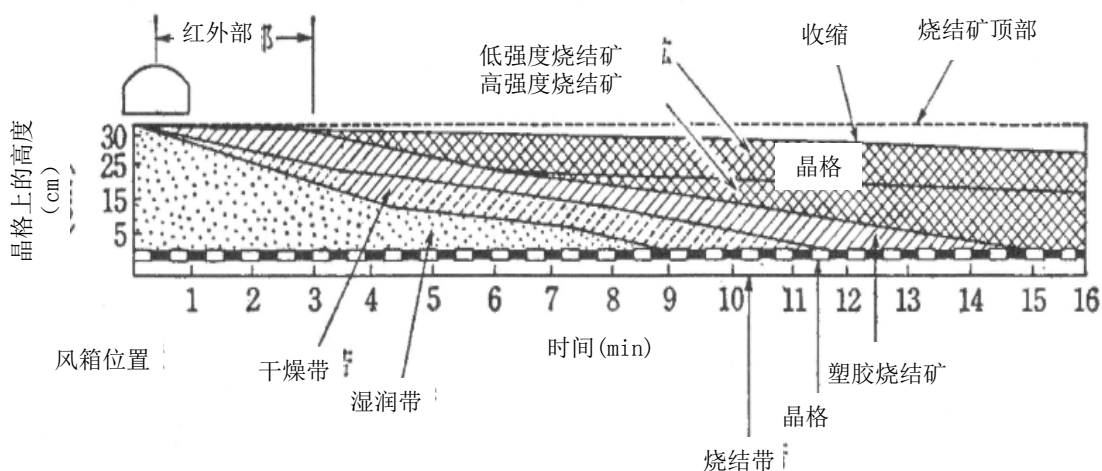


图 3-5 烧结进行情况

(出处：一般财团法人日本铁钢协会《钢铁便览》)

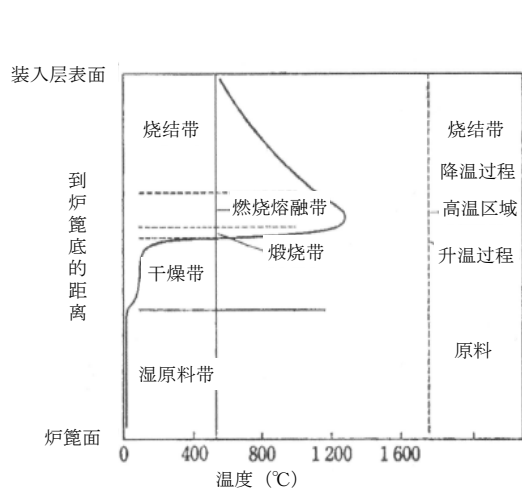


图 3-6 给料层的代表温度曲线

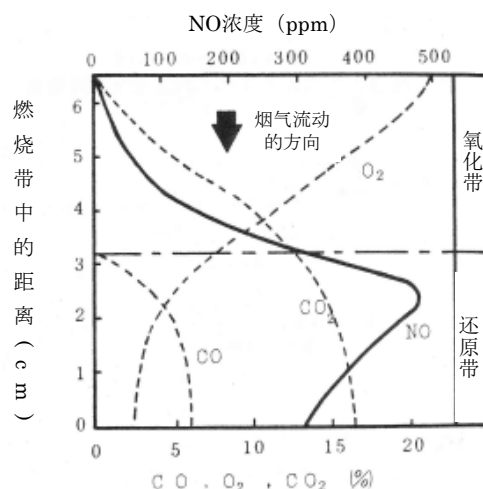


图 3-7 烧结燃烧带的烟气分布(焦炭 4%)

(出处：一般财团法人日本铁钢协会《钢铁便览》)

(出处：铁与钢 '77 - S52)

编制烧结机烧结过程的  $NO_x$  排放图(给料部至排矿部风箱的  $NO_x$  浓度数据资料)，评估  $NO_x$  的产生情况是制定  $NO_x$  控制措施的重要信息。

在烧结机的前端长 1/4 处的风箱处出现峰值，之后逐步降低。此外， $SO_x$  在烟气温度的在

中央处高温出现峰值，之后逐步减低（图 3-8）。H<sub>2</sub>O、O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、CO 呈现出图 3-9 所示的数据。

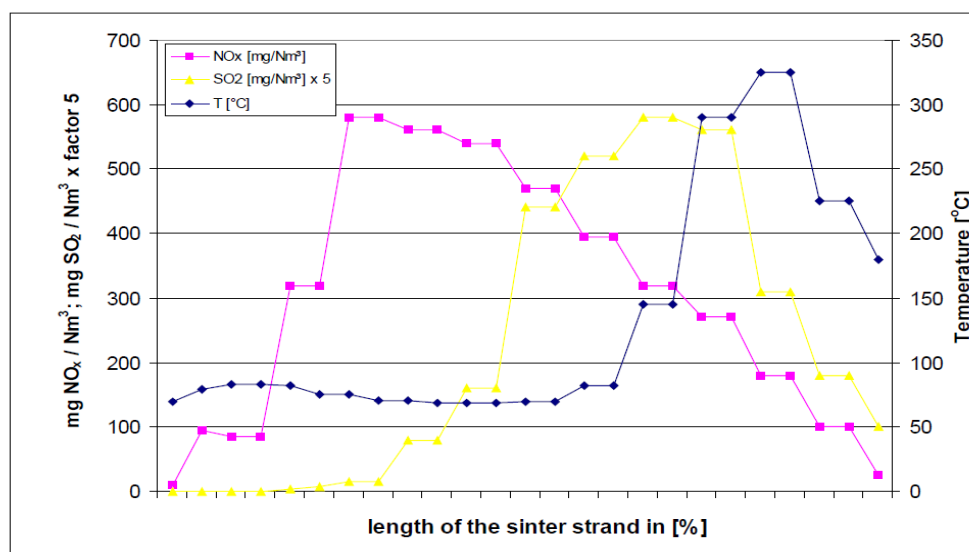


Figure 4.8: Typical emission profile of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> in the waste gas (individual wind-boxes) and the temperature curve along the sinter strand - based on [Neuschütz, 1996]

图 3-8 烧结机的烟气、温度数据资料

(出处: *Best Available Techniques Reference Document on the Production of Iron and Steel* December 2013)

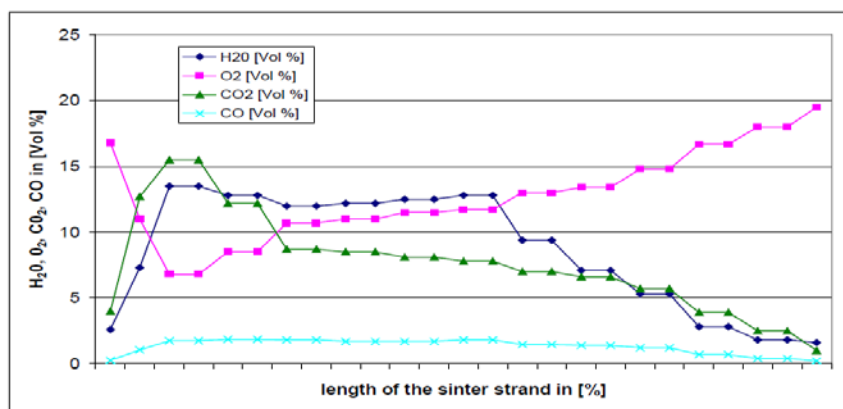


Figure 4.5 : Typical emission profile of CO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O in the waste gas (single windboxes) along the sinter strand - based on [Neuschütz, 1996]

图 3-9 烧结机的烟气数据资料

(出处: *Best Available Techniques Reference Document on the Production of Iron and Steel* December 2013)

要削减 NO<sub>x</sub>，首先需要确立其削减流程。确立流程时，评估投入成本及削减效果，预测目标的达成情况很重要。

具体地，首先需要调查、掌握目前烧结机烟气的 NO<sub>x</sub> 排放量，然后设定应达到的 NO<sub>x</sub> 排放目标值。根据调查结果，分析、评估产生 NO<sub>x</sub> 主要原因，研究、评估并采取有效控制措施。



可采取上述的措施，从成本低、行之有效的措施开始，逐步采取措施，直至达成目标值（图 3-10）。

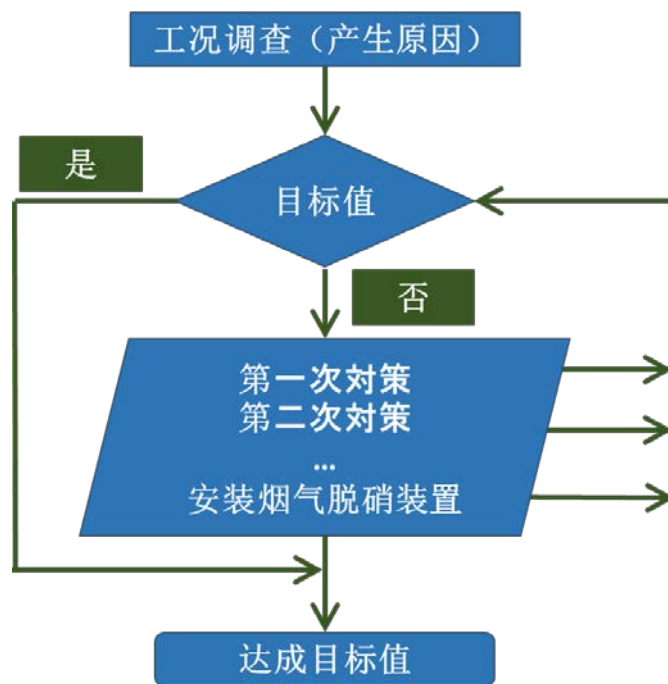


图 3-10 削减 NO<sub>x</sub> 的流程

## 4 氮氧化物控制技术分析

钢铁行业的 NO<sub>x</sub> 控制技术如图 4-1 所示，分为控制 NO<sub>x</sub> 产生的控制技术和产生后的烟气脱硝技术两大类。钢铁企业根据设备产生 NO<sub>x</sub> 的机制运用这些技术，采取适当的措施。

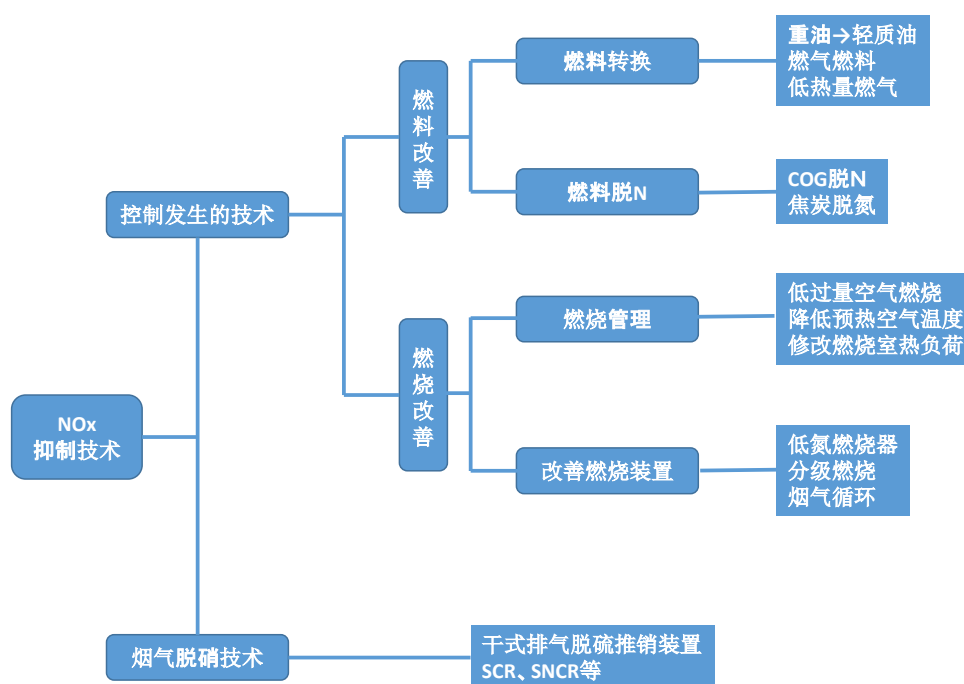


图 4-1 钢铁行业 NO<sub>x</sub> 控制技

### 4.1. 不同装置的控制措施及效果

钢铁厂主要的 NO<sub>x</sub> 排放源是烧结机、焦炭炉、加热炉和锅炉。特别是烧结机，NO<sub>x</sub> 排放量占总排放量的 20-40%。因此，对烧结机采取的 NO<sub>x</sub> 对策对钢铁厂全厂的 NO<sub>x</sub> 控制贡献最大。

针对每个设备采取的 NO<sub>x</sub> 控制对策及其效果见表 4-1。掌握钢铁厂的现状，据此切实采

取表 4-1 所列的对策非常重要。<sup>11 12 13</sup>

此外，在上述方法的基础上，再结合下列节能节省资源措施，NO<sub>x</sub> 削减效果会更好，主要措施如下：

- 排热回收系统
- 烟气循环系统
- 改善设备：防漏风措施

表 4-1 钢铁行业主要产生 NO<sub>x</sub> 设备的控制对策及效果

设备名	主要产生机制	控制对策	效果	备注
烧 结 机 <sup>14</sup>	F-NO <sub>x</sub>	使用低氮焦炭	含氮量低，产生量也随之降低	需确保使用低氮粘结煤
		添 加 生 石 灰 <sup>15 16 17</sup>	有效	用生石灰抑制 NO <sub>x</sub> 的产生
		改善点火列管燃烧 器 <sup>18</sup>		节能效果：事例 COG 率 1976 年约 7m <sup>3</sup> N/t→1988 年 约 1.7m <sup>3</sup> N/t
		烟气循环 <sup>19 20</sup>	25~40%削减	节能效果：循环烟气 流量 25~50%
		干法烟气脱硫脱硝 装置	脱 硝 性 能： 一级处理约 40% 二级处理约 80%	1999 年开始实际应 用同时去除粉尘、 NO <sub>x</sub> 、SO <sub>x</sub> 、二噁 英及其他有害物质

<sup>11</sup> Commission implementing decision of 28.Feb.2012; establishing the best available techniques(BAT)conclusions under Directive 2010/75/EU of the European Parliament and Council on industrial emission for iron and steel Production , Official Journal of the European Union. 8.3.2012

<sup>12</sup> Section V.D.2, Sinter Plant in the Iron industry DRAFT22/04/04; Guidelines on the Best Available Techniques (BAT) for Sinter Plants in the Iron Industry, coordinated by Mr. Patric Finlay (Canada)

<sup>13</sup> European Commission, 2012; Guidance document on control techniques for emission of sulfur, NO<sub>x</sub>, VOCs, dust (including PM10 , PM2.5 and black carbon) from stationary sources

<sup>14</sup> Commission implementing decision of 28.Feb.2012; establishing the best available techniques(BAT)conclusions under Directive 2010/75/EU of the European Parliament and Council on industrial emission for iron and steel Production , Official Journal of the European Union. 8.3.2012

<sup>15</sup> 菅原等：铁与钢 62 (11)、S420 (1976)

<sup>16</sup> 肥田等：铁与钢 63 (4)、S53 (1977)

<sup>17</sup> NO<sub>x</sub> reduction in the sintering process: Yan-guang Chen, Zhan-cheng Guo,Zhi Wang, and Gen-sheng Feng International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials Vol.16, No.2, April 2009, Page143

<sup>18</sup> 高松信彦、栗原喜一郎、斋藤元治、加来久典：制铁技术开发的进程及今后的展望 新日铁技报、第 391 号 (2011)

<sup>19</sup> 一般社团法人日本钢铁协会 《钢铁便览》

<sup>20</sup> Application of Modified Coke to NO<sub>x</sub> Reduction with Recycling Flue Gas during Iron Ore Sintering Process: Yan-guang CHEN, Zhan-cheng GUO& Zhi WANG , ISIJ International ,Vol.48 (2008) ,No.11,page.1517-1523

		选择性催化脱硝装置 (SCR) <sup>21</sup>	脱硝性能: 80-90%	上世纪 70 年代开始实际应用
焦炭炉	T-NO <sub>x</sub>	使用低 N 煤	有效	
		改善燃烧装置		
		低氮燃烧器	有效	
		分级燃烧	有效	
		烟气循环	有效	
加热炉	Thermal-NO <sub>x</sub>	低氮燃烧器	有效	
		再生烧嘴	NO <sub>x</sub> 约 30ppm	蓄热式超低氮燃烧、燃料消耗量约削减 25%
均热炉	Thermal-NO <sub>x</sub>	低氮燃烧器 <sup>22</sup>	NO <sub>x</sub> 120ppm 以下	
		再生烧嘴		

【注】成本分析属于厂家保密信息，无法获取信息。因此，表 4-1 部分不做成本分析。

## 4.2. 节能措施

随着高炉容积的大型化，烧结机也实行了大型化。主要是在加宽烧结机台车的同时，加长烧结机的长度，从而扩大烧结面积，增强了其实用性。1971 年新日铁君津 3 台改造为 500 m<sup>2</sup> (5m×100m) 烧结面积的烧结机开始运行，之后烧结机的大型化得到了广泛普及。大型烧结机中融入了当时最尖端的技术：

- ① 安装高负压鼓风机 (-19.6kPa)，以应对超过 500mm 的高层厚度运行；
- ② 设两条生产线，实现成品系统运行率的稳定化，以提高烧结机的运行率<sup>23</sup>；
- ③ 排热回收系统 (图 4-2) 和烟气循环系统 (图 4-3)

并且，由于烧结机是继高炉之后的第二高耗能设备，如图 4-4 所示，消耗热量的 26% 左右作为烧结矿的显热、23% 作为主要烟气显热被排放出去。针对这种情况，③ 作为节能措施应用了排热回收系统和烟气循环系统。

<sup>21</sup> Summary report: Research on Technical Pollution Prevention Option for Iron Sintering, The Canadian of Ministers of the Environment(CCME), Nov.27, 2003, page7

<sup>22</sup> 中川二彦：低氮蓄热式燃烧器系统的开发，传热研究 1998 年 7 月,34-39 页

<sup>23</sup> 高松信彦、栗原喜一郎、斋藤元治、加来久典：制铁技术开发的进程及今后的展望 新日铁技报、第 391 号 (2011)，79,82,83 页

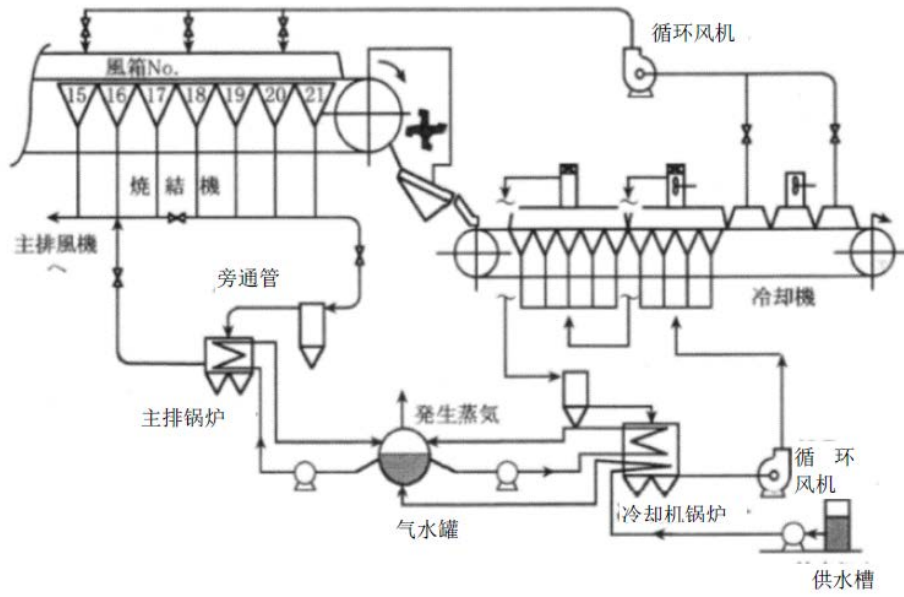


图 4-2 烧结烟气显热回收设备流程例

(出处：一般社団法人日本钢铁协会 《钢铁便览》)

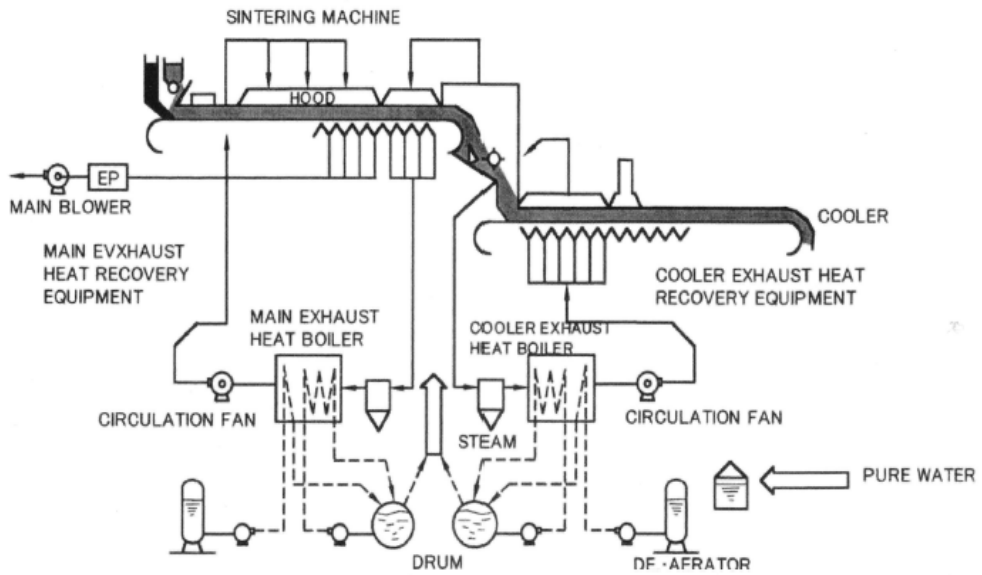


图 4-3 烟气循环系统例

(出处：一般社団法人日本钢铁协会 《钢铁便览》)

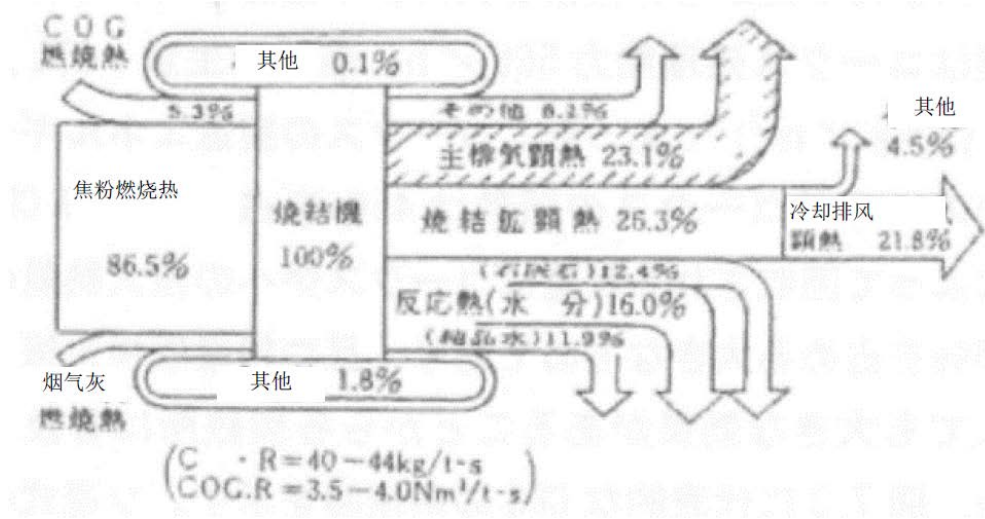


图 4-4 烧结工序的热平衡

(彼岛秀雄:高炉技技术的系统化、国立博物馆技术的系统化调查 第 15 集 2010 年 3 月)

为了实现继高炉之后的第二高耗能设备--烧结机的节能，降低生产成本，日本推行了通过提高点火炉的效率来削减 COG 率（焦炭炉烟气排放率）的方法。通过改善点火炉的燃烧器，使点火炉的 COG 率从 1976 年的平均每吨烧结矿的 7m<sup>3</sup>N 提高到 1-2m<sup>3</sup>N，提高了效率（图 4-5）。点火燃烧器有缝式燃烧器、表面燃烧器、列管燃烧器等，企业根据自己的实际情况选用不同类型的燃烧器(图 4-6)。新日铁广田的一台烧结机 1988 年的 COG 率达到了 0.48 m<sup>3</sup>N/t，创造了当时最低纪录。<sup>24</sup>

主排风机的耗电量占企业耗电量的一大半，企业通过改善鼓风机高效三维叶片、应用与风量变化相匹配的旋转圈数控制系统等,降低了用电量。

<sup>24</sup> 高松信彦、栗原喜一郎、斋藤元治、加来久典：制铁技术开发的进程及今后的展望 新日铁技报、第 391 号 (2011)

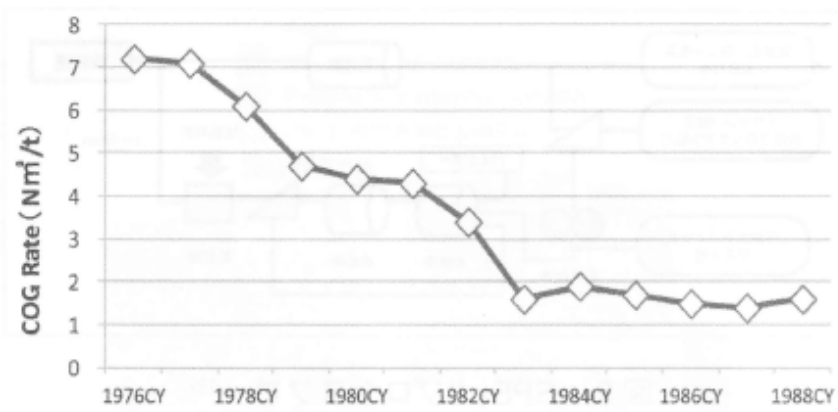


图 4-5 点火炉 COG 率变化例

(出处: 高松信彦、栗原喜一郎、斋藤元治、加来久典: 制铁技术开发的  
进程及今后展望 新日铁技报、第 391 号 (2011))

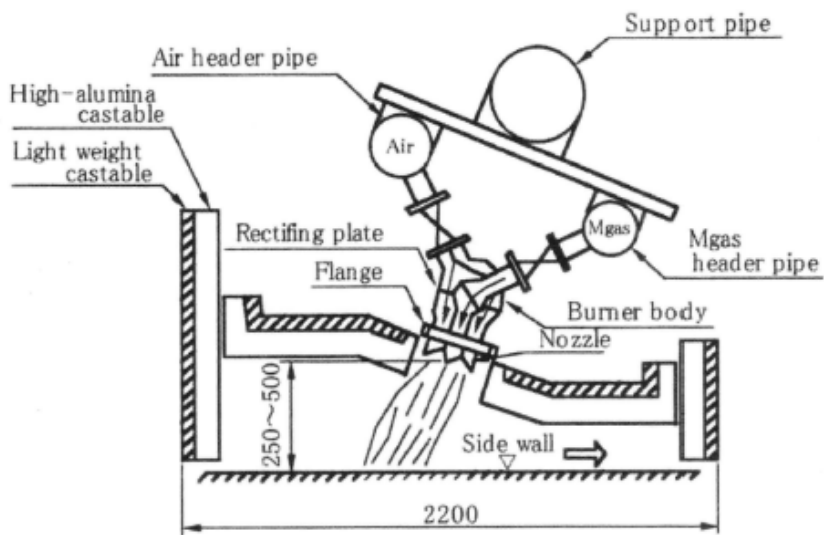


图 4-6 点火炉列管燃烧器例

(出处: 一般社团法人日本钢铁协会 《钢铁便览》)

### 4.3. 氮氧化物控制技术原理

#### 4.3.1. 烟气脱硝

1974年川崎制铁千叶钢铁厂第4烧结炉、1979年NKK（日本钢管）京滨钢铁厂第1烧结炉开始应用选择性催化还原法（SCR）。（图4-7）<sup>25 26</sup>。

此外，1987年新日铁名古屋第三钢铁厂的第1、第2、第3烧结机引进了活性炭干法脱硫脱硝设备。<sup>27</sup>这两种方式目前在日本国内的各钢铁厂仍在实机运行（表4-2）。

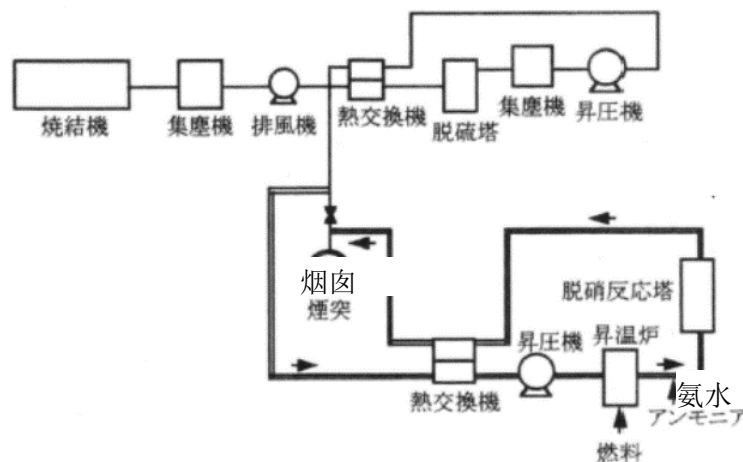


图 4-7 NKK 选择性催化还原法（NKK 京滨）

\*SCR 国外实施例

China Steel Taiwan. 烧结 No3&4 1977年, No1 1999年→NO<sub>x</sub> 去除率 80%以上  
在 EU 和 USA 没有实施（截至 2010）

表 4-2 钢铁厂烧结机脱硝装置

#### 选择性催化脱硝装置（SCR）

钢铁厂名称	成套设备名	去除对象物	启运年
川崎制铁千叶制铁所	No.4 烧结机	NO <sub>x</sub>	1974
NKK 京滨制铁所	No.4 烧结机	NO <sub>x</sub>	1979

#### 活性炭干法排烟脱硫脱硝装置

钢铁厂名称	成套设备名	去除对象物	启运年
新日铁制铁（株）名古屋制铁所	No.1&2 烧结机	SO <sub>x</sub> 、NO <sub>x</sub> 、DUST	1999

<sup>25</sup> 饭野吉嗣、相马冬树、桥本邦俊：钢铁厂在环境方面的努力、JFE 技报、No.6 （2004年12月）

<sup>26</sup> 彼岛秀雄：高炉技技术的系统化、国立博物馆技术的系统化调查 第15集 2010年3月

<sup>27</sup> 住友重机械工业株式会社：住友的干法脱硫脱硝装置（技术手册）



新日铁制铁（株）大分制铁所	No.1 烧结机	SO <sub>x</sub> 、NO <sub>x</sub> 、DUST、DXNS	2003
PCSCO 浦项制铁所	No.3 烧结机	SO <sub>x</sub> 、NO <sub>x</sub> 、DUST、DXNS	2004
々	No.4 烧结机	SO <sub>x</sub> 、NO <sub>x</sub> 、DUST、DXNS	2004
新日铁制铁（株）君津制铁所	No.3 烧结机	SO <sub>x</sub> 、NO <sub>x</sub> 、DUST	2004
（株）神户制钢所加古川制铁所	烧结机	SO <sub>x</sub> 、NO <sub>x</sub> 、DUST、DXNS	2009
山西太原不锈钢有限公司	No.2 烧结机	SO <sub>x</sub> 、NO <sub>x</sub> 、DUST、DXNS	2010
々	No.3 烧结机	SO <sub>x</sub> 、NO <sub>x</sub> 、DUST、DXNS	2010

注) 根据在日本国内文献检索获得的信息编制。

\*干法排烟脱硫脱硝设备国外实施例

Blue Scope Steel Port kembla Steel Works No3 Sinter Plant Australia

在 EU 和 USA 没有实施 (截至 2010 年)

(出处: 住友重机械工业株式会社: 住友的干法脱硫脱硝装置 (技术手册),

*Guidance document on control techniques for emission of sulfur, NO<sub>x</sub>, VOCs, dust(including PM10,PM2.5 and black carbon) from stationary sources)*

#### 4.3.2. 烟气循环系统

作为能够提高热回收效率、节能率以及降低粉尘、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub> 排放的环境对策技术, 日本开发了烟气循环技术, 并得到了广泛地应用。

- ① 在烧结机头上完全循环烧结块的冷却烟气的方法;
- ② 循环部分主烟道烟气的方法;
- ③ 烧结机排矿部的烟气与烧结机前部烟气混合循环的方法

表 4-3 为烟气循环实施的一个例子。循环烟气流量比例为 23%, 主烟气流量减少了 23-30%, 排热回收量增加了 30%, SO<sub>x</sub> 排放量减少了 3-10%, 电除尘器 (EP) 入口处的粉尘浓度减少了 30%, 并且, NO<sub>x</sub> 排放量也减少了 3-10%。据报告, 烧结矿的品质 (TI、RDI) 和生产率没有变化, 被评价为环境对策方面行之有效的对策。

表 4-3 排烟循环系统实施成果例

项目	实施成果
循环烟流量比率	23%
主排烟流量	减少 20-30%
排热回收量	增加 30%
SO <sub>x</sub> 排放量	减少 3-10%
NO <sub>x</sub> 排放量	减少 3-10%

E.P.入口处的粉尘浓度	减少 30%
烧结矿品质 (T.I., R.D.I.)	无变化
生产率	无变化

(出处: 一般社团法人日本钢铁协会 《钢铁便览》)

\*国外实施例(其他例请参照 4. 5. 1)

Voestalpine, Linz, Austria NO<sub>5</sub> 烧结设备

循环气体流量比 约 40%

SO<sub>x</sub> 排放量 减少 25-30% NO<sub>x</sub> 排放量 减少 25-30%

(出处: Guidance document on control techniques for emission of sulfur , NO<sub>x</sub>, VOCs, dust(including PM10,PM2.5 and black carbon) from stationary sources)

#### 4.3.3. 使用低氮焦炭

经研究证实, 燃烧过程中产生的几乎所有的 NO<sub>x</sub> 都是因焦炭中的氮形成的燃料型氮氧化物 (Fuel NO<sub>x</sub>), 热力型氮氧化物 (Thermal NO<sub>x</sub>) 的贡献极少。<sup>28</sup> 因此, 选用低氮焦炭作燃料控制烧结过程中产生的 NO<sub>x</sub> 的方法效果很好。

\*国外实施例

在世界上各烧结炉设备室实施<sup>29</sup>

#### 4.3.4. 防漏风措施

具有节能效果的措施可以间接减少用电量。在烧结机的台车及侧壁等部位采取防漏风措施, 可减少烟气排放量和燃料的使用量, 从而间接减少 NO<sub>x</sub> 的排放量

##### 【掌握漏风量】

- 确认漏风位置: 台车周围、防尘挡板、电除尘器、主排风机、烟道
- 台车周围:
- 侧壁连接部、台车缝隙、气封部、封口部
- 主要漏风部位一般在台车与台车的烧结机滑动部位 (挡板处)。台车的料层空洞与密封装置处发生漏风, 这部分约占总漏风量的 80%。

##### 【放漏风措施】

插入圆筒形圆筒型填充料、用密封橡胶填塞缝隙、胶性金属接触方式等。

<sup>28</sup> 经济产业省: 煤炭高度转换焦炭制造技术开发项目 (SCOPE21) 的跟踪评估 (2011 年)

<sup>29</sup> Guidance document on control techniques for emission of sulfur , NO<sub>x</sub>, VOCs, dust(including PM10,PM2.5 and black carbon) from stationary sources

### 4.3.5. 活性炭吸附

#### ■技术概要

是通过生成于粒状的活性焦炭 (Activated Coke: 以下简称“AC”) 的作用, 来去除废气中的  $\text{SO}_x$ 、 $\text{NO}_x$ 、二恶英、粉尘和汞等污染物质的装置, 本系统是由 AC 移动层去除污染物质的吸附工序和使吸附能力下降的 AC 再生的再生工序构成, AC 在两个工序之间作循环使用。在进行脱硫时, 对于 AC 再生所产生的高浓度  $\text{SO}_2$  气体, 可通过副产物回收工序以硫酸和石膏等加以回收

#### ■特点

- (1) 除脱硝外, 还能去除脱硫和脱二恶英等多种污染物质。
- (2) 由于废气温度基本上不下降, 因此, 不需要再加热。
- (3) 在去除  $\text{SO}_3$  时, 无需耐腐蚀性材料和烟道衬里。
- (4) 与选择接触还原法 (SCR 法) 不同, 无需对催化剂进行寿命管理。
- (5) 能应对难以确保用水或排水困难的状况。
- (6) 对适用现有设备时, 改造工程较少、容易施工。
- (7) 基本上不产生废弃物。

#### ■运转管理

- (1) 需要补充用的 AC 及氨。
- (2) 由于经分级机分离的粉尘主成分为 AC 粉, 因此, 可用于锅炉等燃料。
- (3) 由热风炉产生再生用热风。燃料为焦炭炉气体 (COG)·轻油等。

#### ■特性

- 处理气体温度:  $180^\circ\text{C}$  以下 (根据废气中的氧气浓度)
- 脱硝效率: 40 - 80%
- 脱硫率: 99%以上 (入口浓度 1000ppm 以下)
- 脱 DXN: 0.1ng-TEQ 以下 (入口 5ng-TEQ/ $\text{m}^3\text{N}$  以下)
- 脱塵: 20-30mg/ $\text{m}^3\text{N}$  以下 (入口 100mg/ $\text{m}^3\text{N}$  以下)

#### ■维护管理

由于吸附塔和再生塔没有可动部装置, 其他部分也由通通设备构成, 因此, 无需特殊的维护管理。

#### ■实际交付使用业绩

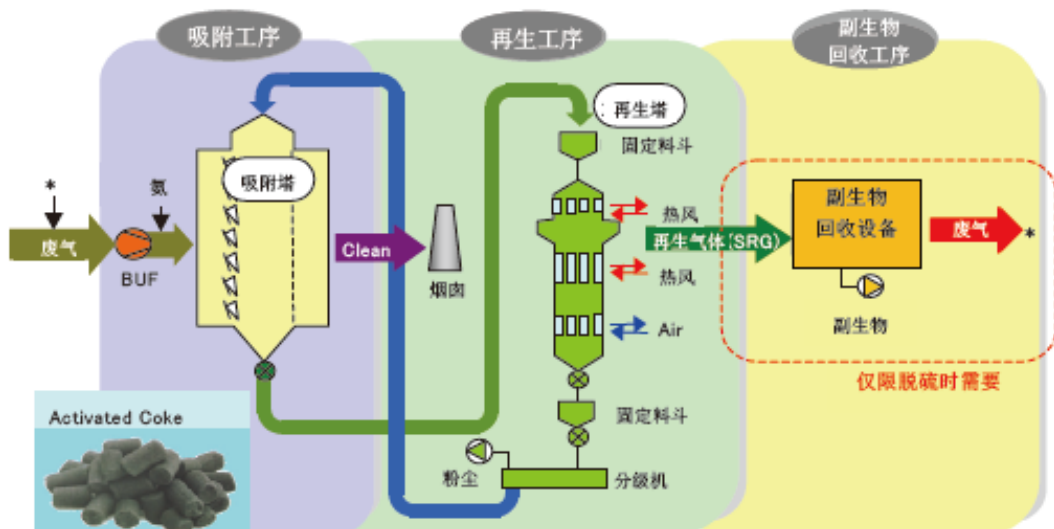
【日本】: 煤炭火力发电站 (- 600MW)·重油火力发电站·炼铁厂烧结炉 (- 110 万  $\text{Nm}^3/\text{h}$ )·清扫工厂·水泥工厂

【德国】: 煤炭火力发电站

【美国】: 煤炭火力发电站的实证试验设施

#### ■联系地址

J-Power EnTech 株式会社

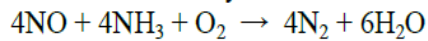


#### 4.3.6. 二氧化硫、氮氧化物协同处置

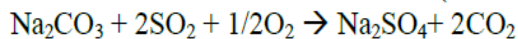
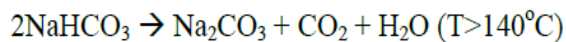
##### Description:

SO<sub>x</sub> and dioxins contained in the sinter flue gas are removed in this process by adding sodium bicarbonate and Lignite.

NO<sub>x</sub> is removed by the selective catalytic reduction reaction at around 200~450°C:



For SO<sub>x</sub> removal the reactions are:



Lignite Injection produces dioxin < 0.2 ng-TEQ/Nm<sup>3</sup>.

##### Energy/Environment/Cost/Other Benefits:

- High SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub> removal efficiency

##### Block Diagram or Photo:

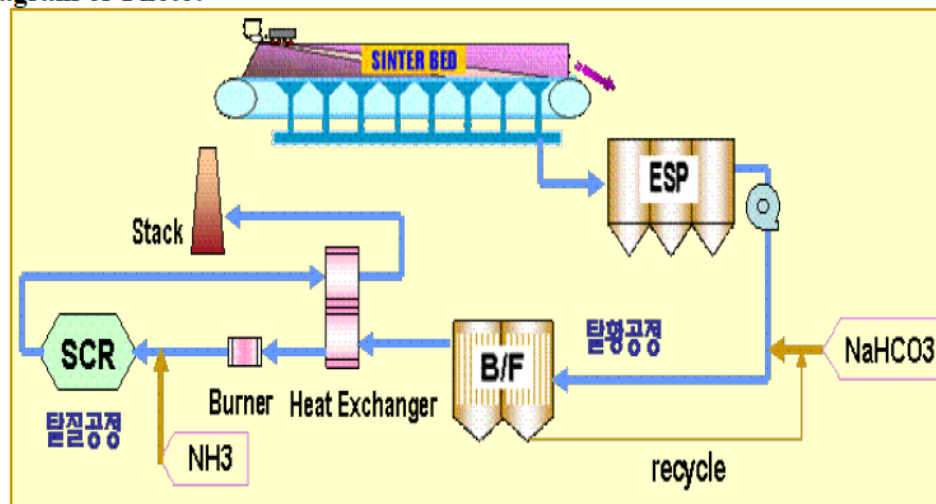


Figure 1.5: NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> removal using selective catalytic reduction

**Commercial Status:** Emerging

##### Contact information:

Mr. Youngdo Jang  
Department of Environment & Energy, POSCO  
Phone: +82-54-220-5773

##### Installation information:

Full-scale facility is being installed in Kwangyang Works; 4 units expected to be completed June 2007.

### 4.3.7. Exhaust Gas Treatment through Low-Temperature Plasma

#### Exhaust Gas Treatment through Low-Temperature Plasma

**Description:**

Active radicals of low-temperature plasma remove SOx, NOx and HCl simultaneously. Dioxin also decreased with the addition of Lignite to the process. Reliability and stability have been proven (over five years of operation). Core technology includes full-scale magnetic pulse compressor, stabilizing pulse width and rising time, proper reactor capacity design, and energy saving technology through additives.

**Energy/Environment/Cost/Other Benefits:**

- Low cost with high pollutants removal efficiency
- Compact - less space required than other technologies
- A commercial scale plant installed at an incinerator in Kwang Works showed a substantial reduction of SOx(>70%), NOx(>95%) and HCl(>99%)
- Dioxin also decreased to less than 0.2 ng-TEQ/Nm3

**Block Diagram or Photo:**

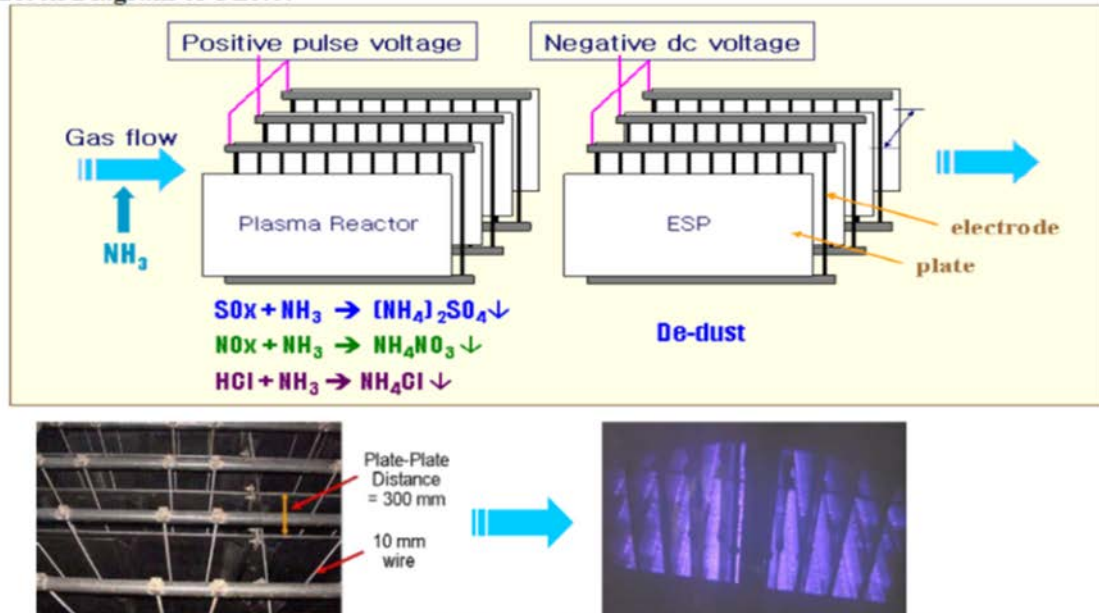


Figure 1.6: NOx and SOx removal using low-temperature plasma

**Commercial Status:** Emerging

**Contact information:**

Mr. Youngdo Jang, Department of Environment & Energy, POSCO  
T +82-54-220-5773  
yджang@posco.co.kr

**Installation information:**

Installation of commercial scale plant in 2000 at Kwanyang Works  
POSCO plans to adopt above technology at Sinter plant in Pohang Works in about 2010



### 4.3.8. Top Pressure Recovery Turbine

#### Top Pressure Recovery Turbine

##### Description:

Top Pressure Recovery Turbine (TRT) is a power generation system, which converts the physical energy of high-pressure blast furnace top gas into electricity by using an expansion turbine. Although the pressure difference is low, the large gas volumes make the recovery economically feasible. The key technology of TRT is to secure the stable and high-efficiency operation of the expansion turbine in dusty blast gas conditions, without harming the blast furnace operation.

##### Energy/Environment/Cost/Other Benefits:

- Generates electric power of approximately 40-60 kWh/t pig iron
- Japanese Integrated Steel Works:
  - Generates more than 8% of electricity consumed in Japanese ironworks (about 3.33 TWh)
- Excellent operational reliability, abrasion resistant
- Suitable for larger furnaces and higher temperature gases compared to Bag filter systems
- Wet TRT System (US):
  - Typical investments of about \$20/t power recovery of 30 kWh/t hot metal<sup>18</sup>
  - No combustion of BF gas
- Dry TRT System, e.g., Venturi Scrubber- Electrostatic Space Clear Super (VS-ESCS):
  - Lower water consumption compared with wet type
  - Raises turbine inlet temperature, increasing power recovery by about 25-30%<sup>19</sup>
  - More expensive than wet type, \$28/t hot metal<sup>2</sup>. NEDO from Japan gives 1.8 years for the payback period of VS-ESCS (including the construction costs)<sup>20</sup>

##### Block Diagram or Photo:

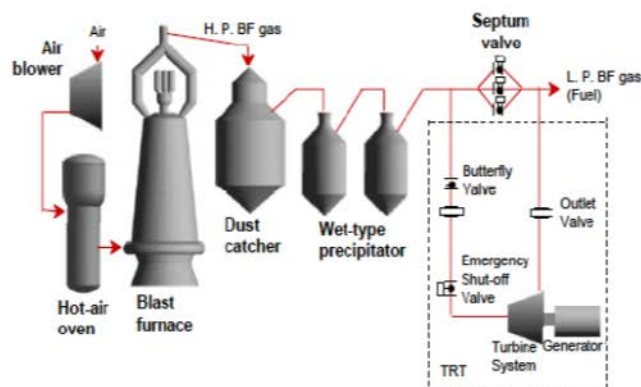


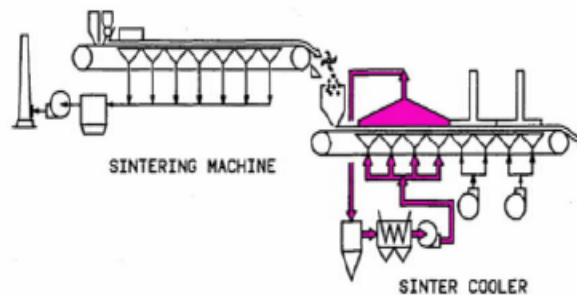
Figure 3.1: Flow diagram of TRT system (wet type)

#### 4.3.9. Sinter Plant Heat Recovery

##### Energy/Environment/Cost/Other Benefits:

- Retrofitted system at Hoogovens in the Netherlands:
  - Fuel savings in steam and coke achieved
  - NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> and particulate emissions reduced
  - Capital costs of approximately \$3/t sinter<sup>1</sup>
- Wakayama Sintering Plant trial operation in Japan:
  - 110-130 kg/t of sinter recovered in steam
  - 3-4% reduction in coke
  - 3-10% reduction in SO<sub>x</sub>
  - 3-8% reduction in NO<sub>x</sub>
  - About 30% reduction in dust
  - Increased productivity, yield, and cold strength
- Taiyuan Steel in Japan:
  - Recovered exhaust heat equaled 15 t/h (or 12,000 KL/year crude oil)
  - SO<sub>2</sub> reduced
- NEDO reports the energy saving of 4700 GJ/year for a 100 Mton-sinter/year plant (47 kJ/tonn sinter)<sup>3</sup>

##### Block Diagram or Photo:



*Figure 1.1: Sinter plant heat recovery from sinter cooler<sup>1</sup>*

**Commercial Status:** Mature

**Contact information:** Sumitomo Metal Industries, Ltd. <http://www.sumitomometals.co.jp>

#### 4.3.10. Multi-slit Burner in Ignition Furnace

##### Multi-slit Burner in Ignition Furnace

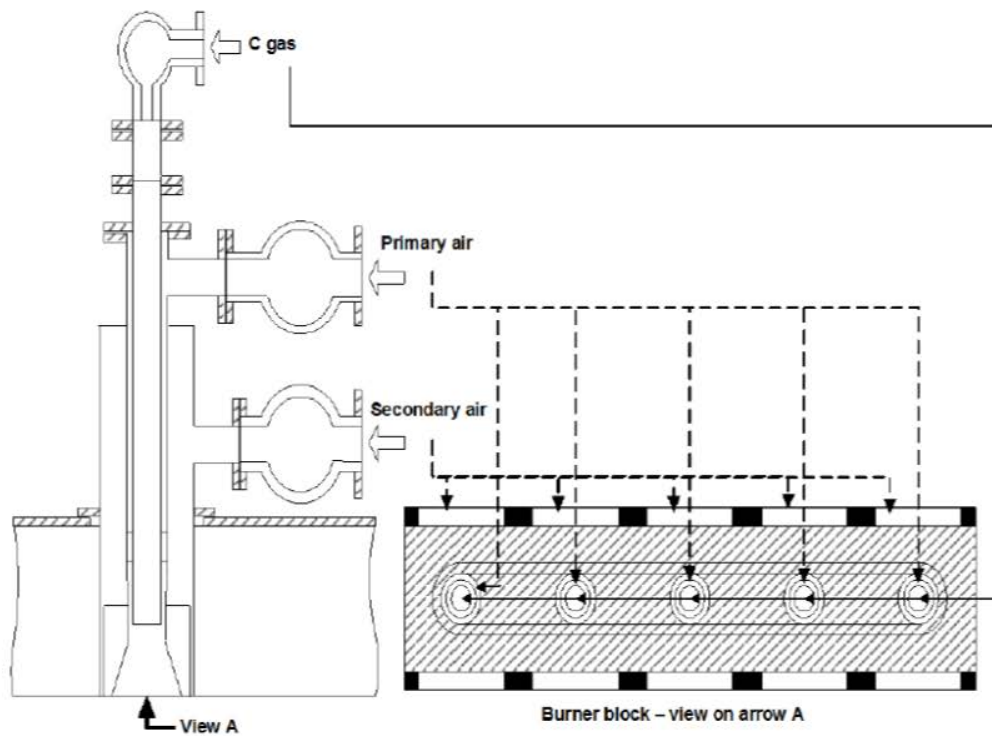
**Description:**

Multi-slit burners produce one wide, large stable flame, which eliminates “no flame” areas and supplies minimum heat input for ignition, therefore saving energy.

**Energy/Environment/Cost/Other Benefits:**

- Total heat input for ignition was reduced by approximately 30% compared with conventional burner in Wakayama Steel Works of Sumitomo Metals in Japan

**Block Diagram or Photo:**



*Figure 1.9: Outline of multi-slit burner*

**Commercial Status:** Mature

**Contact information:**

Sumitomo Metal Industries, Ltd.  
<http://www.sumitomometals.co.jp>

JP Steel Plantech Co.  
<http://www.steelplantech.co.jp>

**Installation information:**

The burners have been installed in Sumitomo Metals in Japan and many steel works in China and other countries



#### 4.4. 氮氧化物控制技术经济性

实机应用并在运行的烧结机烟气处理烟气循环、SCR、干法烟气脱硫脱硝（RAC: Regenerative Activated Carbon)d 的经济性及具体事例如下<sup>30</sup>:

这些技术均根据 NO<sub>x</sub> 削减水平的要求装机应用。

##### 4.4.1. 烟气循环

再循环部分烟气（25-50%），可减少 NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、粉尘(Dust)、二噁英等的排放，同时因烟气排放量的减少还可实现节能。具有代表性的事例如下：

- ① 【事例-1】 Corus, Ijmuiden, Netherlands, 1994 年  
EOS (Emission optimized sintering) process

烧结机产量	4.2×10 <sup>6</sup> t/y
烟气量	1.2×10 <sup>6</sup> Nm <sup>3</sup> /h (3 台烧结机)
循环烟气量	40-50%
NO <sub>x</sub> 削减率	30-45% (入口: 570-630mg/Nm <sup>3</sup> 出口: 310-410 mg/Nm <sup>3</sup> )
初期设备成本	EUR17×10 <sup>6</sup>
削减运行成本	EUR2.5×10 <sup>6</sup> /y (主要由于焦粉的削减: : 6kg/t-烧结矿×EUR100/t-焦粉)
维护保养成本	无数据

(成本换算为 1996 年的 EUR)

- ② 【事例-2】 Huttenwerke Krupp Mannesmann,Duisburg,Germany 2001 年  
LEEP (Low Emission and Energy optimised sintering) process

烧结机面积	420m <sup>2</sup>
烟气量	无数据
循环烟气量	约 50%
NO <sub>x</sub> 削减率	25-50%
初期设备成本	EUR14×10 <sup>6</sup>
运行成本削减	焦粉削减 5-7kg/t-烧结矿
维护保养成本	无数据

(成本换算为 1996 年的 EUR)

<sup>30</sup> Guidance document on control techniques for emission of sulfur , NO<sub>x</sub>, VOCs, dust(including PM10,PM2.5 and black carbon) from stationary sources

③ 【事例-3】 Voestalpine Stahl Linz, Austria 2005 年  
EPOSINT (Environmental Process Optimised Sintering) process

烧结机面积	250m <sup>2</sup>
烟气量	无数据
循环烟气量	25-28%
NO <sub>x</sub> 削减率	25-30%
初期设备成本	EUR15×10 <sup>6</sup>
运行成本的削减	焦粉削减 2-5kg/t·烧结矿
维护保养成本	无数据

\*估算例: Arcelor Mital, Ghent, Belgium

烧结机面积: 175m<sup>2</sup> 初期设备成本: EUR14×10<sup>6</sup>

" : 498m<sup>2</sup> 初期设备成本: EUR27.3×10<sup>6</sup>

④ 【事例-4】 新日铁户畑 NO.3 烧结机 1992 年  
将烟气分成 4 份, 一部分采取循环方式 (SO<sub>x</sub> 部分脱硫)

烧结机面积	480m <sup>2</sup>
烟气量	925,000Nm <sup>3</sup>
循环烟气量	28%
NO <sub>x</sub> 削减率	3%
SO <sub>x</sub> 削减率	63%
初期设备成本	EUR8-10×10 <sup>6</sup> (换算为 1997 年的 EUR)
运行成本的削减	焦粉削减 6%
维护保养成本	无数据

国际上实机运行情况: 除上述钢铁厂以外, 还有欧美的钢铁厂。

注) 烟气量: 循环烧结机排放的部分烟气, 其余的排放到大气中。

#### 4.4.2. 选择性催化还原法 (SCR)

烧结矿生产量为 4×10<sup>6</sup> t/y、烟气量为 1×10<sup>6</sup> Nm<sup>3</sup>/h、开工时间为 8640h/y 时, 初期设备成本为 EUR25-45×10<sup>6</sup>、运行成本为 EUR1.5-2.0/t·烧结矿 (\*\*).

事例如下: (成本换算为 1996 年的 EUR)

① 【事例-1】 川崎制铁千叶制铁所 1975 年引进设备

烧结矿生产量	7,000t/day
--------	------------

烟气量	620,000-750,000Nm <sup>3</sup> /h
NO <sub>x</sub> 除去率	90%以上(入口: 450mg/Nm <sup>3</sup> 出口: 37 mg/Nm <sup>3</sup> )
温度	400-480°C
初期设备成本	EUR27.3×10 <sup>6</sup> (1975 年)
运行成本	EUR0.40/t-烧结矿(1992 年) (EUR1,000,000/y)
维护保养成本	EUR0.08/t-烧结矿(1992 年) (EUR200,000/y)

② 【事例-2】日本钢管京浜制铁所 1979 年引进设备

烧结矿生产量	12,000t/day
烟气量	1.2-1.3×10 <sup>6</sup> Nm <sup>3</sup> /h
NO <sub>x</sub> 除去率	70-75% (入口: 410mg/Nm <sup>3</sup> 出口: 100-120 mg/Nm <sup>3</sup> )
温度	340°C
初期设备成本	EUR50×10 <sup>6</sup> (1979 年)
运行成本	EUR0.75/t-烧结矿 (1992 年)
维护保养成本	EUR0.57/t-烧结矿 (1992 年) (EUR 900,000/y)

\*其他实机应用例: China Steel, Taiwan No3 (烟气量约 850,000Nm<sup>3</sup>/h),  
NO.4 烧结机 (烟气量约 1164,000Nm<sup>3</sup>/h) 1997 年、  
NO.1 烧结机 (烟气量约 464,000Nm<sup>3</sup>/h) 1999 年  
NO.1-4 的 NO<sub>x</sub> 除去率: 约 80%

\*截至 2010 年, 除上述事例外, 没有实机应用的钢铁厂。

#### 4.4.3. 活性炭干法排烟脱硫脱硝装置

干法烟气脱硫脱硝设备的成本如下:

脱硫设备规模	烧结面积 500-600m <sup>2</sup>
初期设备成本	约 EUR60 百万
运行成本	EUR1/t-烧结矿
维护保养成本	EUR0.17/t-烧结矿(EUR 750,000/年)

初期成本与运行成本例

Table 3.26: Cost estimation of an activated coal system

Abatement efficiency required	deSO <sub>x</sub> : 95 % deNO <sub>x</sub> : 40 %	deSO <sub>x</sub> : 95 % deNO <sub>x</sub> : 80 %
<b>Initial cost:</b>	110 <sup>(1)</sup>	136.1
• main facility	60.8	86.2
• initial filling of activated char coal	8.8	16.2
• by-product facility (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	8.5	8.5
• other (piping, WWTP, electricity and instruments, civil facility, engineering)	21.9	25.2
<b>Running cost (8476 h/yr):</b>	100	166.8
• activated char coal	57.7	115.4
• electrical power	29.8	35.3
• NH <sub>3</sub> (for deNO <sub>x</sub> )	10.4	14.0
• other (COG, utilities, steam, NaOH)	13.6	13.6
• H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (on the market) <sup>(2)</sup>	-11.5	-11.5
<sup>(1)</sup> Total cost of dry system is 100 % (this value is referenced to the 110 % shown Table 3.26 of Section 3.3.2.7.2). <sup>(2)</sup> Sulphuric acid produced. NB: Gas flow rate: 1.5 million Nm <sup>3</sup> /h; gas temperature: 120 °C; SO <sub>2</sub> input: 373 mg/Nm <sup>3</sup> ; NO <sub>x</sub> input: 454 mg/Nm <sup>3</sup> . Source: [ 268, SHI 2006 ].		

\*国际实机运行情况:

- BlueScope Steel, Port Kembla Works, Australia, sinter machine No 3, to treat 1552000 Nm<sup>3</sup>/h of waste gas for dust and PCDD/F (start-up June 2003)
- Nippon Steel Corporation, Oita Works, Japan, sinter plant No 1, to treat 1300000 Nm<sup>3</sup>/h of waste gas for SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, dust and PCDD/F (start-up 2003)
- POSCO, Pohang Steelworks, Korea, sinter machines Nos 3 and 4, to treat 1350000Nm<sup>3</sup>/h of waste gas for SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> dust and PCDD/F (start-up November 2004)
- Nippon Steel Corporation, Kimitsu Steelworks, Japan, sinter plant No 3, to treat 1700000 Nm<sup>3</sup>/h of waste gas for SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> and dust (start-up 2004)
- Kobe Steel Corporation, Kakogawa Steelworks, Japan, sinter plant No 1, to treat 1500000 Nm<sup>3</sup>/h of waste gas for SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> dust and PCDD/F (at planning stage in 2007).

## 5 中国烧结机氮氧化物控制技术应用案例

### 5.1. 太原钢铁有限公司

#### 5.1.1. 绪言

大容量燃烧烟气的脱硝技术通常采用 Ti-V 系的金属催化剂(SCR 催化剂)进行还原反应。但是为了发挥 SCR 催化剂的效果,需要 300℃以上的高温。火力发电厂的工业锅炉空气加热器上流的气体温度高达 300-400℃,是 SCR 催化剂的性能充分发挥的最佳温度区域。另外,生产钢铁厂高炉原料烧结矿的烧结机在进行烟气处理时,其烟气温度低于锅炉,通常在 100-150℃左右,因此,在烧结机烟气使用 SCR 催化剂时,需要对烟气进行升温,这样就会加大成本。近年来,作为 SCR 脱硝技术的换代技术,活性炭脱硝技术受到业界关注。活性炭法不仅能脱硝,还能脱硫、脱二噁英、除尘,并能去除汞等挥发性重金属。由于本方法在低温下也能发挥作用,在日本多用于烧结机烟气处理。中国的太原钢铁有限公司,在烧结机的烟气处理上首次引进了活性炭法,2010 年 8 月开始正式运行。照片 1 为该公司引进的干法脱硫脱硝装置全景。该公司几乎在同一时间又引进了一套同样的装置,目前两套设备运行顺利。本文对太原钢铁有限公司引进的干法脱硫脱硝装置(住友重机械工业株式会社)做一简要介绍。另外,对近年来受到业界关注的半干法脱硫法中附加 SCR 脱硝法的一体化系统及活性炭法的维护管理费用做一比较分析。



照片 1 干法脱硫脱硝装置全景

### 5.1.2. 活性炭移动层式脱硫脱硝技术

主要设备构成如图 5-1 所示。由去除有害物质的吸附塔、使活性炭再生的脱离塔、以及使活性炭循环使用的一体化系统构成。在现有烧结机上加装本设备时，通常需要在主鼓风机（MB）的下流一侧安装升压通风机（BUF）、在 BUF 的下流一侧安装脱硫脱硝设备。另外，还需加装一套副产品回收设备，从活性炭再生时脱离出的硫氧化物中回收石膏或硫酸等有用物质。

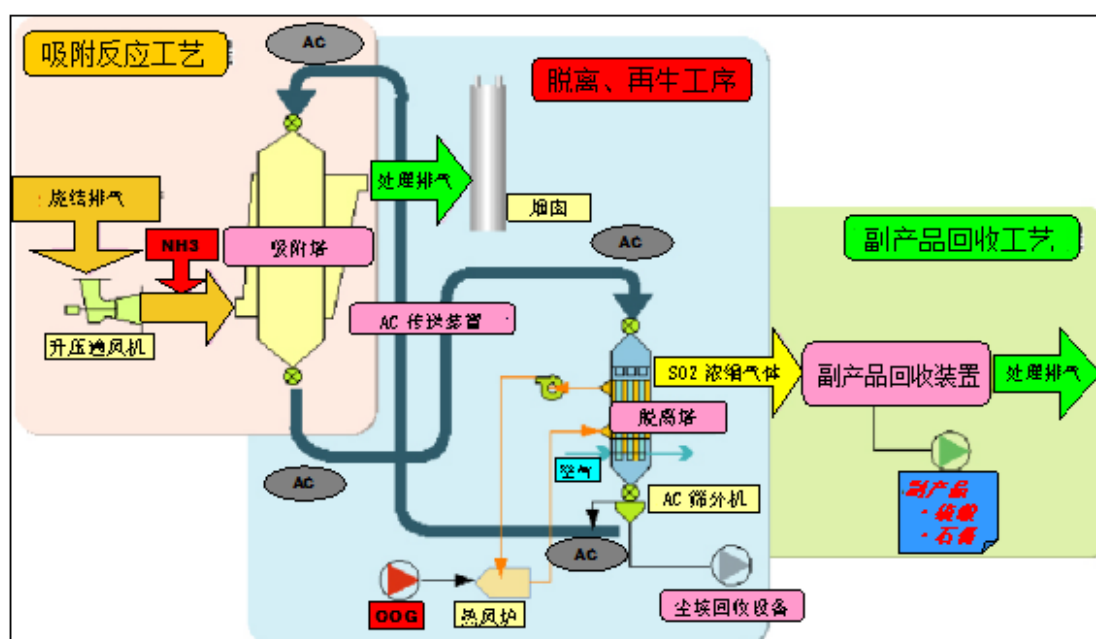


图 5-1 活性炭干法脱硫脱硝工艺示意图

本工艺所使用的活性炭如照片 2 所示。平均直径 9mm，长度 10-15mm，呈圆柱形。选用活性炭时最重要的指标是 SO<sub>2</sub> 的吸附能力、燃点及强度。



照片 2 活性炭

### 5.1.3. 干法脱硫脱硝装置

#### 5.1.3.1. 主体设备

此处的主体设备是指吸附塔、脱离塔及活性炭循环的一体化系统。首先必须确定吸附塔的能力，即活性炭的有效容量。确定有效容量的必需条件是表 5-1 所示的吸附塔入口的烟气条件、各种有害物质的消除要求及所使用的活性炭的性能。以这些条件为参数，才能确定吸附塔的能力及活性炭循环量。其次是要根据活性炭的循环量来确定一体化系统的运送能力，然后再考虑好用脱离塔活性炭再生所需的传热面积、再生后活性炭冷却所需的传热面积，就可以确定脱离塔的大小尺寸。至此主要设备的规格即已确定好，再依次确定附属设备的规格即可。

表 5-1 吸附塔入口烟气条件

项目	单位	吸附塔入口烟气条件			
		最大值	平均值	设计值	备注
烟气流量	m <sup>3</sup> N-wet/h	1,444,000	1,369,000	1,444,000	BUF Inlet
烟气压力	kPa		5.0	5.0	BUF Outlet
烟气温度	°C	138	135	138	BUF Inlet
煤尘	mg/m <sup>3</sup> N-dry	100	90	100	
O <sub>2</sub>	%-dry	14.4	14.3	14.4	
CO <sub>2</sub>	%-dry	6*		6*	
CO	%-dry		0.6	0.6	
N <sub>2</sub>	%-dry		Balance	Balance	
H <sub>2</sub> O	%	13	12	12	
SO <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup> N-dry	815	639	815	
SO <sub>3</sub>	mg/m <sup>3</sup> N-dry		微量	微量	
NO <sub>x</sub>	mg/m <sup>3</sup> N-dry	317	260	317	
HCl	mg/m <sup>3</sup> N-dry		40*	40*	
HF	mg/m <sup>3</sup> N-dry		2.5*	2.5*	
PCDD/F	ng-TEQ/m <sup>3</sup> N-dry		1.5*	1.5*	
Hg	µg/m <sup>3</sup> N-dry		微量	微量	

### 5.1.3.2. 硫酸回收设备

上述工艺中作为副产品回收的有石膏或硫酸，太原钢铁有限公司选定了硫酸。普通期（春季、夏季、秋季）的硫酸产品纯度为 98%，冬季由于要考虑防止冻结，所以将硫酸产品纯度定为 92.5%。日本国内以回收石膏者居多。

### 5.1.3.3. 脱硫脱硝性能的时间性变化及保证性能

活性炭在烟气开始后脱硫性能及脱硝性能逐渐上升，此现象称为在线激活。图 5-2 所示为 NH<sub>3</sub> 注入开始后脱硝性能随时间的变化情况。脱硫率已超过了承诺的保证性能 95%。脱硝率从图上可看出，呈逐渐上升趋势，NH<sub>3</sub> 注入开始后约 3 周时间即达保证值 33%。一个月后的 2010 年 12 月 6 日-10 日，平均脱硫率达到 97%，平均脱硝率达到 42%。

表 5-2 所示为保证性能与实测值。各项性能数据为烟气开始约 4 个月后的实测结果。所有项目皆超过了承诺的保证性能，证明活性炭移动层法用于处理含有多种有害物质的烟气是有效的。另外，所回收的硫酸作为工业用硫酸，其质量得到保障，已在该公司炼钢厂内有效使用。

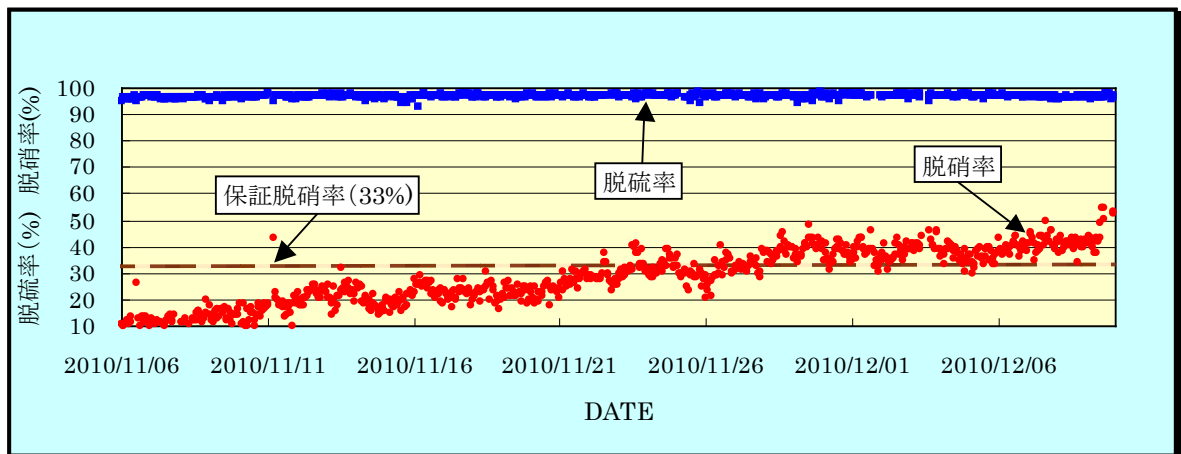


图 5-2 NH<sub>3</sub> 注入开始后脱硫脱硝的经时变化

表 5-2 保证性能与性能实测结果

保证项目			保证值	实测值	判定
SO <sub>2</sub> (脱硫)	烟囱入口浓度	mg/m <sup>3</sup> N-dry	≤41	7.5	合格
	脱硫率	%	≥95	98	合格
NO <sub>x</sub> (脱硝)	烟囱入口浓度	mg/m <sup>3</sup> N-dry	≤213	101	合格
	脱硝率	%	≥33	50	合格
煤尘	烟囱入口浓度	mg/m <sup>3</sup> N-dry	≤20	17.1	合格
PCDD/F	烟囱入口浓度	ng-TEQ/m <sup>3</sup> N-dry	≤0.2	0.15	合格



NH <sub>3</sub> Slip	烟囱入口浓度	ppm-dry	≤39.5	0.3	合格
回收硫酸	纯度等级	%	≥98 一等品	一等品	合格

#### 5.1.3.4. 维护管理费用

以单位时间平均使用量推算出的维护管理费用如表 5-3 所示。其中，活性炭粉可以作为燃料再利用，硫酸可在炼钢厂内使用。因此，一年的维护管理费用为 4,880 万元，换算成每 ton 烧结矿约为 9.38 元/t-s。另外，硫酸采用了冬季 92.5%纯度的价格，在其他季节可生产出 98%纯度的硫酸，因此可以进一步降低维护管理费用。

表 5-3 维护管理费用测算结果

项目		消耗量		费用	
		每小时平均	每天	万元/天	万元/年
1	活性炭	- 0.358 t/h	6.9 t/d	4.179	1,463
2	生活用水	1.20 t/h	28.8 t/d	0.109	3.83
3	工业用水	2.0 t/h	48.0 t/d	0.0182	6.34
4	循环水	250 t/h	6,000 t/d	0.186	65.1
5	压缩空气	220 m <sup>3</sup> N/h	5,280 m <sup>3</sup> N/d	0.0422	14.8
6	氮	1,100 m <sup>3</sup> N/h	26,400 m <sup>3</sup> N/d	0.924	323
7	蒸汽	4.0 t/h	96.0 t/d	0.576	202
8	电力	4,449 kWh	106,786 kWh	5.34	1,869
9	COG	15.06 GJ/h	361 GJ/d	1.815	635
10	活性炭粉	产 0.299 t/h	7.16 t/d	-0.0716	-25.1
11	液体 NH <sub>3</sub>	0.092 t/h	2.22 t/d	0.710	249
12	硫酸		22.0 t/d	-1.32	-462
13	人工			0.411	144
11	维修			1.123	393
合计				13.9	4,880

#### 5.1.3.5. 与其他方式的比较

近年来，中国多采用半干法脱硫法替代湿法脱硫法。另外，新增的烧结机的 NO<sub>x</sub> 排放限制会日趋严格。我们对对半干法脱硫法+SCR 脱硝法与活性炭法的成本作了比较分析。

结果表明，如果是单纯脱硫，则初期投资及维护管理费用皆为半干法脱硫法更低。若为半干法脱硫法+SCR 脱硝法，则情况有所变化。图 5-3 所示为两者工艺的比较。

两者用于烧结面积 600m<sup>2</sup> 的烧结机烟气时的维护管理费用比较如表 5-4 所示。活性炭法按太

原钢铁有限公司的实际运行数据计算，半干法采用日方专家对中国市场调查结果的数据。另外，本比较中按脱硝率 40% 的事例进行计算。

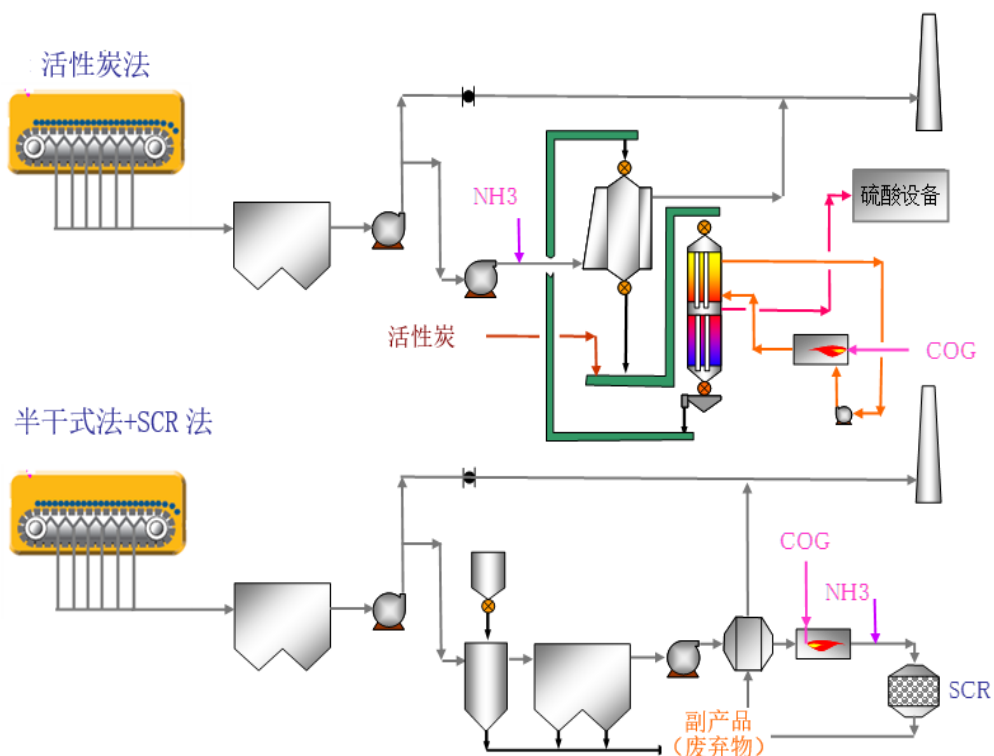


图 5-3 活性炭法与半干法的脱硝工艺比较

表 5-4 维护管理费用比较

项目	半干法+SCR法		活性炭法	
	详细	费用 万元/年	详细	费用 万元/年
脱硫剂	石灰	350	活性炭	1,743
NH <sub>3</sub>		676		700
COG		5,640		659
N <sub>2</sub>		445		458
工业用水		60		18
纯水		—		20
压缩空气		24		24
蒸氣		6		323
电力		2,822		2,612
催化剂交换		1,980		—
滤布交换		600		—
副产品	石膏等	142	硫酸	-678
			活性炭粉	-362
人工	12人	180	12人	180
减排效益		-465		-465
合计		12,461		5,233

电力消耗方面，由于需要与烟气流量相适应的排风机，不会有大的出入。若要细究，则在 SCR 催化剂层的压降方面，半干法的电力消耗会高一些。若除去电力消耗，则活性炭法在维护管理费用方面活性炭的补充费用占一大半。半干法的 COG 费用占维护管理费的 50%。活性炭法中，作为活性炭再生用的热源，使用少量 COG，而半干法中为了有效脱硝，必须对全部气体流量进行加热处理。

换算成 CO<sub>2</sub> 排放量，活性炭法为 7,000 吨/年，半干法为 60,000 吨/年，从地球温室效应的角度来说，这一点是不利的。

其次，半干法还有催化剂功能退化所需的催化剂交换费用、袋式除尘器的滤布交换费用。而在活性炭法，在副产品及活性炭粉的有效利用上可以创造收益。综合考虑以上比较，活性炭法的每年维护管理费用约为半干法的 40% 左右。

以上仅为维护管理费用的分析，本来应当对包括初期投资的寿命周期成本（LCC: Life Cycle Cost）进行比较分析。为此，笔者根据中国制造的设备对初期投资费用进行了比较，结果表明，半干法+SCR 法的初期投资费用更低。

根据以上结果进一步做 LCC 分析，结果如图 5-4 所示。图中计划了第一年度的初期投资费用，并构想出了次年度开始历年的维护管理费用累计金额的变化情况。从图中可以看出，2 年半后，半干法+SCR 法的累计费用高于活性炭法。以寿命周期 20 年计算，累计费用相差 13 亿元。

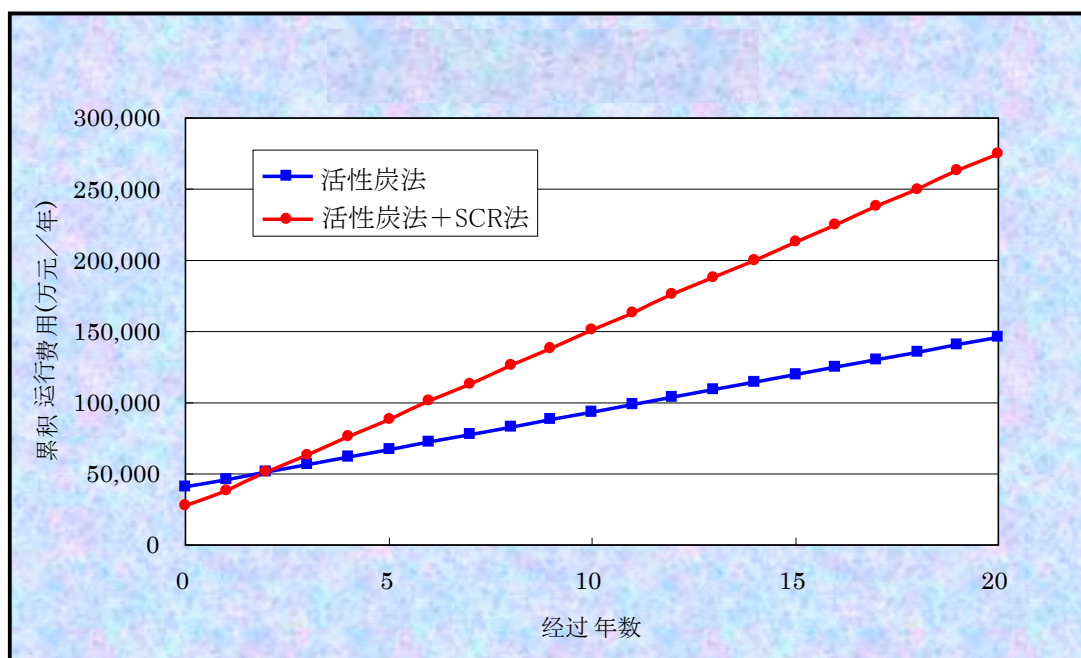


图 5-4 累计运行成本比较

#### 5.1.4. 小结

本设备于 2008 年 8 月初由太原钢铁有限公司向住友重机械工业株式会社订购并安装，于

2010年8月31日开始正式运行。吸附塔及脱离塔的设计由住友重机械工业株式会社承担，其他设计及安装工程由太原钢铁有限公司承担。运行开始后一直很顺利。

以上对半干法+SCR法的运行成本进行了比较，可供选定方式时参考。

## 5.2. 湖南华菱湘潭钢铁有限公司

### 5.2.1. 概要

在JICA与环保部的合作项目《大气氮氧化物总量控制项目》的活动中，得到了湖南省湘潭市环保局和湖南华菱湘潭钢铁有限公司的大力配合，项目组以控制烧结机的NO<sub>x</sub>为目的开展了案例研究。

表 5-5 对象烧结机概要

烧结机	制造厂家：沈阳重型机械厂
	烧结机机型：DS-360
	料床尺寸（宽×长）：4.5m×90m 台车数：147 料层厚度：750mm
	烧结矿（t/h）：最高(计划) 500 常用 480
	点火炉用燃料种类/煤种：混合煤气
	燃烧器的类型：双斜带式节能点火器 数量：27个
	燃料消耗量(kg/h) 计划值：6000 运行值：4800
主风机规格	排风量（Nm <sup>3</sup> /h）：2×18000m <sup>3</sup> /min 静压（Pa）：17000 动力（kW）：2×6500
运行情况 烟气数据	一般运行时间：24h/day×344day/y 连续 检修：日常维护
	烟气量（m <sup>3</sup> /h 或 Nm <sup>3</sup> /h）：一般运行时 - 1000000
	烟气温度（℃）：120-150
	除尘方式：电除尘
	烟气脱硫：1#烟道 湿法脱硫 脱硫塔出口浓度（mg/nm <sup>3</sup> ）：<200 2#烟道：无 排放出口浓度（mg/nm <sup>3</sup> ）：200 - 500
NO <sub>x</sub> 减排设备	安装情况：无
	类型：无
	效率：无
NO <sub>x</sub> 监测方法	监测位置：排放出口、湿法脱硫设备入口
	监测方法：红外线方式
	监测设备：烟气在线监测系统
	检测频率：连续监测

运行管理	投入粉矿石量 (t/d)： 12000      石灰粉量 (t/d)： 790 焦炭粉量 (t/d)： 480 造粒径 (mm)： > 3
节能措施	已采取措施： 采用厚层原料烧结的方法降低固体燃料的消耗量

案例研究按照表 5-6 的流程进行。

表 5-6 案例研究活动内容

制作 NO <sub>x</sub> 排放路线图	烟气监测	监测位置：各风箱、电除尘器出口、烟道 测定项目：NO <sub>x</sub> 、SO <sub>2</sub> 、O <sub>2</sub> 、CO、CO <sub>2</sub> 、静动压、水分 使用器材：烟气分析仪 (HORIBA 制造 便携式烟气分析仪 PG350)、皮托管、压差仪等
	制作、分析排放路线图	对认为异常的部分再次监测
商讨措施	设定目标值	根据排放标准，设定目标值
	商讨减排措施	除商讨了通过烟气循环削减 NO <sub>x</sub> 和 SO <sub>x</sub> 的措施外，还对漏风、余热回收等节能措施采用模拟计算等方式进行了商讨。

### 5.2.2. NO<sub>x</sub> 排放路线图

将监测的项目数据进行可视化处理做成图表对于掌握各项污染物的变化动向，商讨控制措施非常重要。

从制作的 NO<sub>x</sub> 排放图（图 5-5）中我们可以看出：

- NO<sub>x</sub> 的产生量在烧结机前半段达到峰值，之后慢慢下降；
- SO<sub>x</sub> 的产生量与烟气温度一同在中间以后的部位开始增加，在烧结机后半部达到峰值，之后下降。

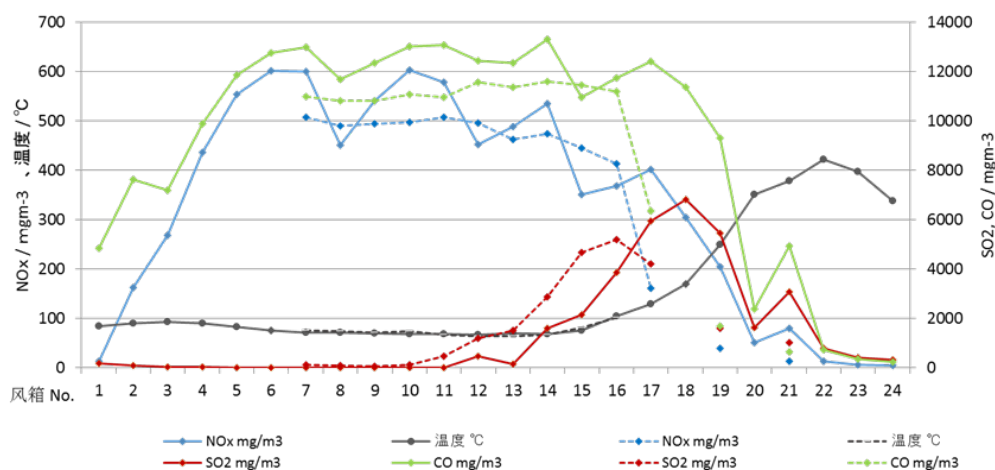


图 5-5 根据监测结果制作的 NO<sub>x</sub> 排放路线图

### 5.2.3. 控制措施

#### 【烟气循环】

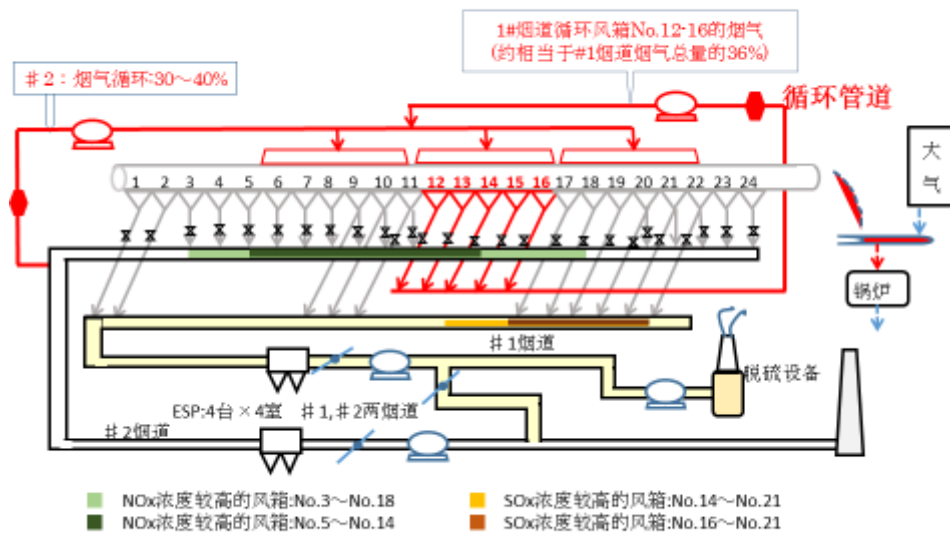
对象企业希望能够找到一个同时可以削减 NO<sub>x</sub> 和 SO<sub>2</sub> 的措施。根据这一要求，JICA 专家提出了可最大限度地利用现有减排设备的、通过烟气循环实现减排措施。

根据制作的 NO<sub>x</sub> 排放路线图以及各风箱的烟气量数据，JICA 专家针对循环烟气时从哪些风箱中抽出烟气、送入哪些风箱进行了模拟试验，以便确定最佳风箱重组方案。

模拟试验的部分内容见图 5-6 图 5-2。

通过循环 NO<sub>x</sub> 浓度较高的 12 - 16 号风箱的烟气以及 2 号烟道烟气总量的 30 - 40%，有望削减烧结机排放的 NO<sub>x</sub> 总量的 15%。

此外，再加上通过调整抽送空气量等烧结机的操作，效果会更好。但是，改变运行条件有可能影响产品质量，需要边改变运行条件边试验。



2

图 5-6 烟气循环改造施工例

**【漏风对策】**

在与企业生产负责人交流时得知，与日本的案例相比，湘钢的烧结机台车漏风率远远高于日本企业。减低漏风率不仅可以降低烧结机烟气风机的输出功率，实现节能，还可增加烧结矿生成的有效风量，提高生产力。针对湘钢的具体情况，JICA 专家建议湘钢从确定漏风处入手降低漏风率。

## 6 建议

有关 NO<sub>x</sub> 控制的技术及方法主要有以下几点：首先需要设定将烧结机的 NO<sub>x</sub> 排放量控制在多少以内。设定时须参考一般法律规定的大气排放浓度、条例规定的大气排放浓度以及自主管理要求的大气排放浓度。

设定大气排放浓度后，与目前的大气排放浓度进行比较，目前的排放浓度超标时，必须采取减排措施。具体的减排措施有原料管理、运行管理、烟气管理和节能管理几个方面。日本和欧美实施的烧结机主要 NO<sub>x</sub> 减排措施的特征如表 6-1 所示。首先需要进行合理的原料管理和运行管理，在此基础上正确评估烟气管理的措施和效果，采取措施达成 NO<sub>x</sub> 排放浓度的设定目标。

在烟气管理的 NO<sub>x</sub> 减排技术中，相对处于中级的减排技术是“烟气循环”，处于高级的是“选择性催化脱硝设备(SCR)”，在高一级的是联合处理有害物质的“干法烟气脱硫脱硝设备”。随着处理级别的提高，设备成本、运行成本也将增大。

在采取减排措施时，应考虑维持和提高生产率、成本和维护保养等问题，根据生产现场的情况，采取切合实际的减排措施。

表 6-1 烧结机的主要 NO<sub>x</sub> 控制措施及效果

主要生成机理	管理分类	减排技术	效果	成本	备注
Fuel-NO <sub>x</sub>	原料管理	使用低 N 焦炭	N 含量降低, NO <sub>x</sub> 产生量也将减少	确保低 N 焦炭的费用	需确保低 N 炼焦煤
		添加石灰石	提高生产率、控制 NO <sub>x</sub> 生成	添加石灰石的费用	用石灰石控制 NO <sub>x</sub> 生成
	运行管理	减小漏风率	通过节能减少 NO <sub>x</sub> 排放	台车密封措施费用	减少了烟气量, 从而节省了主排风机的动力
		安装点火线型燃烧器	提高生产率, 从而减少 NO <sub>x</sub> 排放	线型燃烧器安装费	料层上面均层点火, 从而提高生产率
	烟气管理	烟气循环	削减 NO <sub>x</sub> 20~50%	烟气循环烟道改造费: 不太高	循环烧结烟气量的 25~50% 通过烟气循环减少 NO <sub>x</sub> 排放 安装外罩时, 应注意不妨碍维修保养作业。
		选择性催化脱	脱硝性能:	较高	1970 年代已投入使用



		硝设备 (SCR)	80~90%		
		干法烟气脱硫 脱硝设备	脱硝性能: 一级处理约 40% 二级处理约 80%	高	1999 年开始投入使用 同时去除粉尘、NO <sub>x</sub> 、SO <sub>x</sub> 、 二噁英等有害物质



# 大气氮氧化物控制技术指南

## — 钢铁焦炉 —

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《大气氮氧化物总量控制技术指南》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受独立行政法人国际协力机构的委托实施的技术合作项目“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。

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，分析提出可能适合中国的减排措施等。本指南旨在将本项目的活动成果进行汇编，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	日本的钢铁焦炉.....	1
2	焦炉发展概况.....	2
2.1.	发展历程.....	2
2.2.	新一代焦炉的开发.....	3
3	焦炉大气污染物的排放标准.....	6
4	焦炉概要.....	9
4.1.	炼铁行业的焦炭.....	9
4.1.1.	概要.....	9
4.1.2.	焦炭在高炉中的作用.....	9
4.1.3.	管理指标.....	9
4.1.4.	焦炭组分.....	9
4.1.5.	焦炭品质.....	10
4.1.6.	焦炭品质的试验方法.....	10
4.2.	焦炭的制造.....	11
4.3.	焦炉结构.....	13
4.4.	焦炉附带装置.....	15
5	工业锅炉的氮氧化物防治技术.....	17
5.1.	焦炉煤气的提纯及净化.....	17
5.1.1.	目的.....	17
5.1.2.	脱硫处理.....	18
5.1.3.	氨回收.....	18
5.2.	烟气脱硝技术.....	18
5.3.	通过燃烧管理及热平衡提高热效率.....	19
6	EU 的氮氧化物和硫氧化物减排措施.....	20





# 1 日本的钢铁焦炉

---

炼铁的主要原料为铁矿石、焦炭和石灰石。焦炉用块煤和石灰粉生产焦炭，在钢铁生产工艺中属于前工序。焦炭在铁矿石冶炼成铁的过程中起到在高炉中高温加热溶化铁矿石，把铁从铁矿石里还原出来的作用。焦炉除了生产钢铁行业冶金用的焦炭外，还生产水煤气等气焦化焦、碳化氢油等化学原料。本报告主要以高炉炼焦炉为对象进行论述。

对于与本 JICA 项目相关的大气氮氧化物总量控制措施方面，日本钢铁行业的高炉、焦炉等采用烟气的热利用以及煤气净化处理等技术。但这些技术并不限于焦炉单机，而是从经济性及效率性的观点出发，采取对高炉及其他厂内窑炉等钢铁生产设备整体集约或循环混合，作为燃料使用，或进行余热利用。

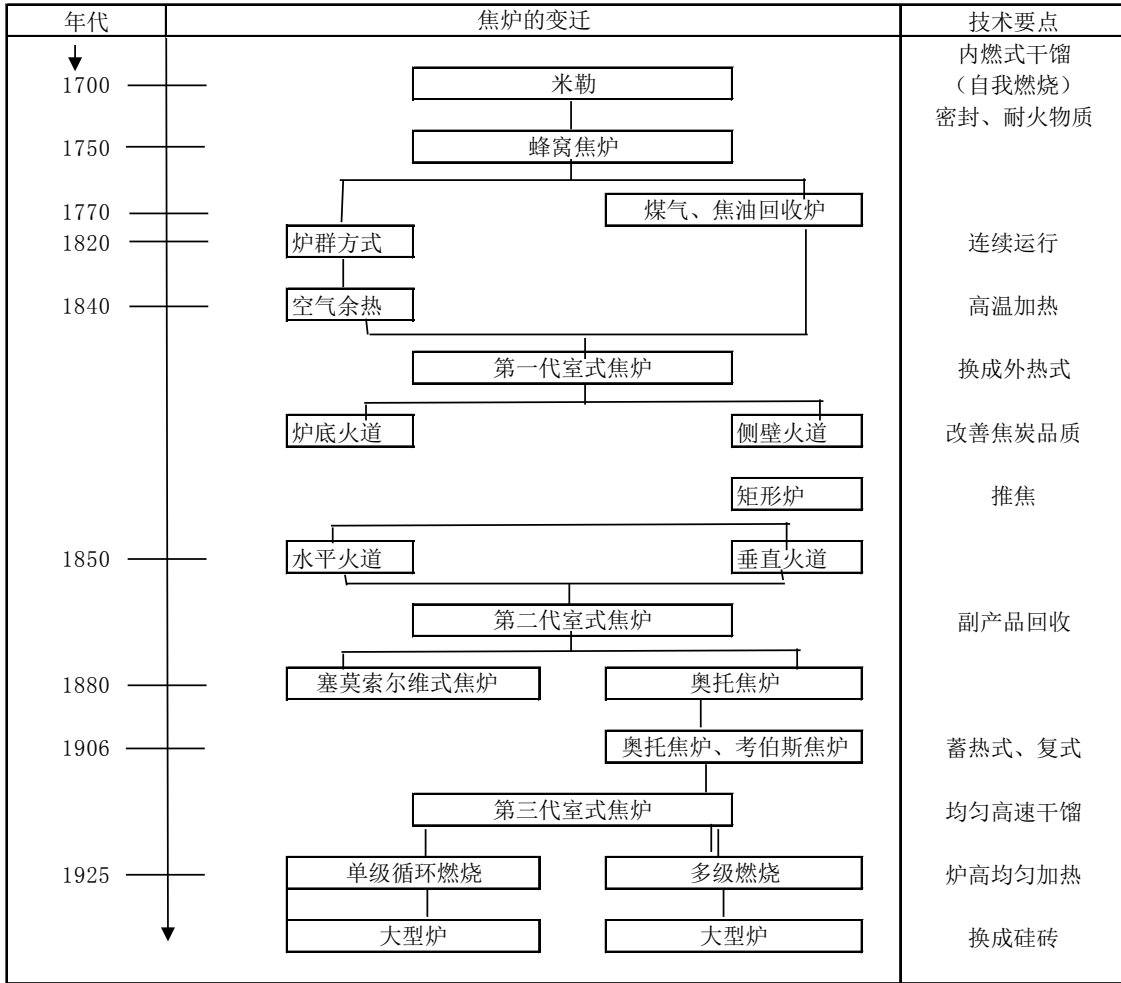
日本的钢铁行业在国际铁矿产品市场上处于节能、钢材产品成本等方面的激烈竞争中，拥有在这些方面占有重要地位的焦炉相关的许多优秀专利技术。但是，由于市场竞争的关系，这些专利信息没有公开。因此，本报告仅限于对日本高炉焦炉的概要介绍。有关各钢厂可应用的焦炉设备结构、能源系统、包括氮氧化物在内的大气环境污染对策以及运行技术等详细信息，建议从商业的角度，通过企业的渠道商讨专利使用及技术转移的事宜。

## 2 焦炉发展概况

### 2.1. 发展历程

在 1735 年英国人吉尔比(Gilbe)发明了一种得到焦炭的方法之前,焦炭的生产采用的是一种称为米勒 (Miler) 的成堆干馏法 (土法炼焦)。出于通风的考虑,高炉用焦煤要求采用块状焦炭。但是,土法炼焦煤炭成品率低,焦炭品质差,1760 年代开始逐渐被内燃干馏式蜂窝焦炉取代。到了 1850 年代,出现了第一代间接加热的室式焦炉,改为机械化装煤和推焦,大大提高了焦炭的生产量。1880 年代,回收焦炉煤气、焦油等副产品的第二代室式焦炉得到了普及,1900 年代出现了奥托式焦炉(Otto coke oven)、考伯斯式焦炉(Koppers coke oven)、斯蒂尔式焦炉(Carl-Still coke oven),至今仍在使用。此外,1911 年还发明了以高炉煤气之类的低热值煤气为燃料的复式焦炉,从 1990 年代开始开发超大型干馏焦炉(EU)以及生产率高、功能强大的新一代焦炭制造技术(SCORP21,日本),表 2-1 为焦炉技术的变迁:

表 2-1 焦炉技术的变迁



(出处: 东北大院国际文化研论 重野等, 1994)

## 2.2. 新一代焦炉的开发

日本的焦炉技术进入二十一世纪后迎来了设备更新时期, 钢铁行业需要进行大幅度的技术革新。1970 年代, 处于告诉经济增长期的日本集中修建了许多设施, 到了 2000 年, 炉龄超过了 30 年, 设施在快速老化, 需要解决提高生产率(节能化、劣质煤种的利用)及 CO<sub>2</sub> 减排等环境问题。鉴于这一情况, 1994~2003 年日本政府和民间联合进行了新一代焦炭制造技术的开发(SCOPE21: Super Coke Oven for Productivity & Environmental enhancement toward the 21<sup>st</sup> century)。

这一技术研发是经济产业省支持, 由(财)煤炭利用综合中心(CCUJ)、钢铁联盟(5 家钢厂, 5 家相关公司)共同研发, 通过了 Pilot Plant 试验、实机试验等, 取得了预期的成果, 获得了多项专利。该项技术研发在国内外申请了煤前处理工艺、干馏炉、出焦、焦炭改性等 65 项专利, 已获得 24 项专利。项目结束后, 又申请了 27 项专利, 技术开发水平之高获得了

一致认可。

表 2-2 为 SCOPE21 的开发目标等概要，图 2-1 为新一代焦炉工艺概要。开始研发是，一般焦炉烟气中的 NO<sub>x</sub> 浓度为 250~350 ppm，日本将开发目标值设定为 170 ppm 以下，根据实证炉的报告，新燃烧器的开发以及通过控制 heat spot，烟气中的 NO<sub>x</sub> 浓度下降到 100ppm 以下，NO<sub>x</sub> 达到了 75ppm(炉温 1250℃时，O<sub>2</sub> =7 %vol)(吉田等 ISIJ vol.90-9,2004) 除此之外，还实现了无扬尘装煤和低温出焦，炉盖处的漏煤气问题也得到了解决。

表 2-2 SCOPE21 (煤高度转换焦炭制造技术的开发) \*) 概要

项目	开发目标	内容
开发目标	①煤资源的有效利用 ②环保及节能 ③高生产率	增加非粘结煤的使用比例 20%→50% 节能效果 20% (间接实现 CO <sub>2</sub> 减排) 削减 NO <sub>x</sub> 30%，实现无烟、无冒烟 生产率提高 3 倍，降低设备费用
开发成果	①日微粘结煤使用比例 ②节能 ③削减 NO <sub>x</sub> ④生产率	达到 50% 达到 20% 实现削减 30% 增加 2.4 倍
其他效果	①实机设备方面的设备费 ②制造费 ③安装空间	削减 16% 削减 18% (Full cost base) 减少 ≒ 1/2

\*) 正式名称 (新一代焦炉开发的俗称)

(出处: 第 14 次煤利用技术评估小委员会 METI 2005)

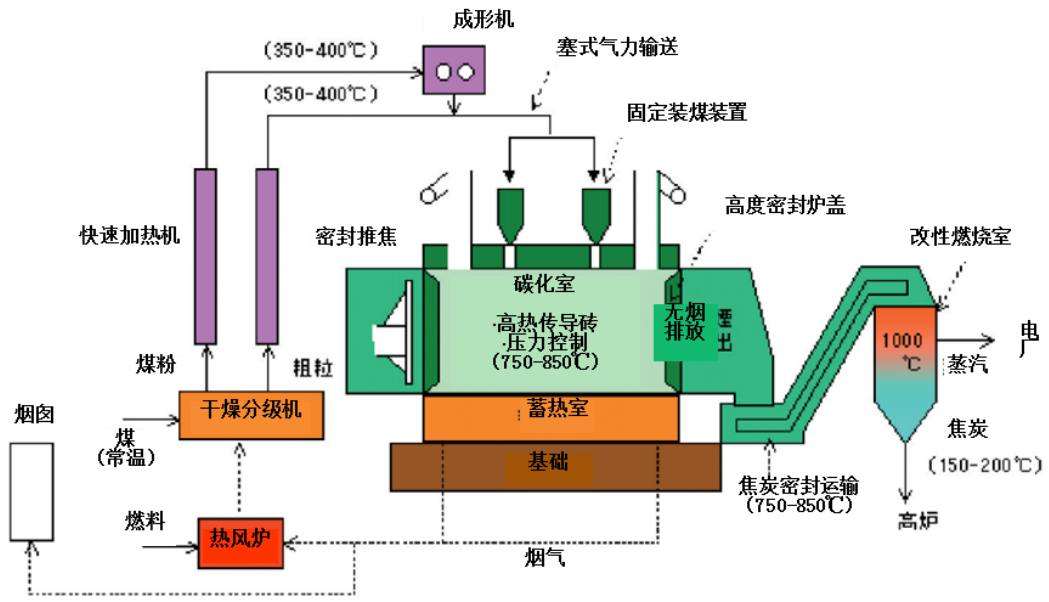


图 2-1 SCOPE21:新一代焦炉工艺的概要  
 (出处: C.C.T in Japan, J-coal)

### 3 焦炉大气污染物的排放标准

日本焦炉的大气污染物排放标准与工业锅炉一样，都需根据大气污染防治法中的污染物（煤烟、粉尘和恶臭等）排放标准和限值标准制定防治措施。除表 3-4 的粉尘是根据产生粉尘设备的结构、使用管理标准进行治理外，其他与工业锅炉等相同，规定了 SO<sub>x</sub>（K 值标准、总量控制标准）、NO<sub>x</sub>（浓度标准、总量控制标准）以及煤尘（浓度标准）的排放标准。恶臭物质的控制标准则根据恶臭在厂界内的浓度加以规定。日本的钢铁行业中，钢厂的大气污染物排放源多，排放量也大，一般都适用总量控制标准。

在污染严重的区域，对新建设施采取煤尘排放加严标准。日本焦炉相关的大气污染物排放标准如下，表 3-1 为 NO<sub>x</sub> 排放标准，表 3-2 为煤尘排放标准，表 3-3 为焦炉相关的一般粉尘产生设备。针对粉尘，日本并未制定排放标准，而是指定对象设备，根据其构造及使用管理制定了标准：

表 3-1 NO<sub>x</sub> 排放标准

设备	型式	烟气量(万 m <sup>3</sup> N/h)	On (%)	排放标准值(ppm)
焦炉	奥托型	10 以上	7	170
		10 以下		
	其他型式	10 以上	7	170
		10 以下		

表 3-2 煤尘的排放标准值

(On=7 %vol)

设备	一般排放标准 (mg/m <sup>3</sup> N)	特别排放标准 (mg/m <sup>3</sup> N)
焦炉	0.15	0.10

表 3-3 焦炉相关的一般粉尘产生设备

设备的种类	规模
焦炉	原料处理能力 50 t/日以上
带式输送机及斗式输送机 (密封式的除外)	带宽 75 cm 以上、或斗的内容积 0.03 m <sup>3</sup> 以上
破碎机及磨碎机(湿法的及密封式的除外)	原动机额定输出功率 75 kW 以上
振动筛 (湿法的及密封式的除外)	原动机额定输出功率 15 kW 以上

表 3-4 一般粉尘产生设备的结构及使用管理标准

设备种类	标准
焦炉	(1)装煤作业：必须安装无烟装煤设备，或在装煤车上安装吸尘罩及除尘器，或安装与上述设备具有同等以上效果的的设备； (2)出焦作业：必须在推焦车上安装吸尘罩，或安装处理该吸尘罩吸附的粉尘的除尘器，或安装与上述设备具有同等以上效果的的设备； (3)熄焦作业：熄焦塔必须安装栅板、除尘器或与上述设备具有同等以上效果的的设备。
矿物堆场	(1)必须放在粉尘不易飞散的建筑物内。 —其他省略—
带式输送机及斗式输送机	(4)必须安装除尘罩 —其他省略—
破碎机及磨碎机	(1) 必须安装在粉尘不易飞散的建筑物内。 —其他省略—
振动筛	(2)必须安装吸尘罩和除尘器。 —其他省略—

此外，针对焦炉的煤尘等污染源，还需防止焦炉运行时煤气泄漏。美国在 CAA1990(Clean Air Act Amendments) 中规定了煤气泄漏限值，具体见表 3-5：

表 3-5 焦炉煤气泄漏限值 (CAA、USA、1990)

部位·运行	MACT	LAER
炉门(漏率)	5 %	3 %
装煤孔盖(漏率)	1 %	1 %
上升管(漏率)	5 %	4 %
装煤冒烟时间	16sec/装入	16sec/装入

MACT : Maximum Achievable Control Technology

LAER : Lowest Achievable Emission Rate

对于产生恶臭的焦炉的泄漏煤气等物质，《恶臭防治法》对 22 种物质以限制标准的方式规定了其允许限度。表 3-6 为其中 3 种物质的限制标准。每种物质的限值浓度根据与排放口高度相对应的恶臭物质的流量以及根据排放口高度规定的扩散计算算出：

表 3-6 恶臭物质在境内的限制标准

(单位: ppm)

物质名称	A 区域	B 区域	C 区域
氨	1	1	2
硫化氢	0.02	0.02	0.06
甲苯	10	10	30

A: B、C 以外的区域      B: 农业新兴区域      C: 工业、工业专用区域



## 4 焦炉概要

### 4.1. 炼铁行业的焦炭

#### 4.1.1. 概要

上文已经讲过，炼铁行业的焦炭用于高炉，生成煤气成为焦炉煤气（COG：Coke Oven Gas），与厂内产生的高炉煤气（BFG 或 B 煤气：Blast Furnace Gas）及烧结烟气（Sintering Gas）等一起作为发电等的燃料使用。其他副产品有含有萘的焦油以及还有三元醇、混合二甲苯和苯物质的轻油物质等化学产品。

#### 4.1.2. 焦炭在高炉中的作用

为了在高炉中提取铁矿石中的铁，需要还原氧化铁，煤炭生成的焦炭就是还原剂。生产 1 吨生铁，用铁矿石 260kg，需要焦炭 430kg。

焦炭在高炉中的作用有以下四点：

- ①能量源：提供氧化铁还原反应所需的热量（补偿吸热反应、提高反应速度）
- ②还原煤气（CO）源
- ③溶化铁时所需的炭
- ④确保通气及液体渗透性

#### 4.1.3. 管理指标

高炉用焦炭必须具备高强度、粒状为 25~75mm、多孔、具有良好的反应性等条件。生成焦炭的特性管理指标有以下几点：

- ①焦炭强度（Drum Index）：用转鼓指数（D.I）表示，将 10 kg 大于 50mm 粒度的焦炭装入转鼓（内径 1.5m，鼓长 1.5m），以 15 rpm 的转速转 10min 后，用 15mm 的振动筛分筛，振动筛上剩下的重量%成为强度 84%，用  $D.I=84$  或  $DI_{15}^{84}$  表示。JIS 2151 中使用 15mm 指数。
- ②焦炭的反应性（Reactivity of Coke）
- ③基质强度（Micro Strength）：日本一般采用 H.E.Brayden 等发明的、测量 1mm 焦炭粒与钢球碰撞后产生的焦炭粒度变化求得的强度。
- ④气孔率（Porosity of Coke）····· JIS K2151

$$\text{气孔率}(\%) = (1 - \text{表观比重} / \text{真比重}) \times 100$$

#### 4.1.4. 焦炭组分

煤粉	90 %
灰分	≒ 10 %
挥发分/水分	<1 %

#### 4.1.5. 焦炭品质

焦炉干馏生成的焦炭为 1050℃ 以上的赤热焦炭，熄焦将温度降至 200℃ 左右成为产品。湿法熄焦和干法熄焦的焦炭品质不同，具体见表 4-1：

表 4-1 焦炭的品质

项目	湿法熄焦	干法熄焦
水分(%)	2~5	0.1~0.3
灰分(%)	11.35	11.39
挥发分(%)	0.50	0.41
平均粒度(mm)	65	55
焦粉率(破碎后) (-15mm%)	10	13
气孔率(%)	49	48
DI <sub>15</sub> <sup>20</sup> (%)	83.5	85.5
DI <sub>15</sub> <sup>50</sup> (%)	12.9	17.9
小型反应后强度(%)	50	52

(出处: CCUJ、制铁技术 CCT 资料)

#### 4.1.6. 焦炭品质的试验方法

日本对焦炭品质的试验方法规定如下：

##### ① 煤试验法

水分：日本工业标准 JIS M8803,8811,8812 总水分、湿分、固有水分

工业分析：日本工业标准 JIS M8812

成焦性试验：日本工业标准 JIS M8801 等

焦渣特性、膨胀计测定法、罗加指数测定方法、粘结指数测定法等

##### ② 焦炭试验法：部分日本工业标准 JIS K2151

转鼓强度试验法

落下强度试验法

比重及气孔率测量法

显微强度法（测量焦炭气孔壁的结构强度）

反应性

##### ③ 焦炭采样法：日本工业标准 JIS M8811

## 4.2. 焦炭的制造

焦炉在生铁生产工序中的地位如图 4-1 及图 4-2 的焦炭制造工艺例所示，是用原料煤生产高炉用原料的工序。焦炉结构的概念图如图 4-3 所示，燃烧室和碳化室呈三明治状数百个前后交替排列。原料煤从碳化室上部的装煤孔装入，关闭孔盖。在耐火砖隔开的燃烧室中燃烧高炉煤气等加热装入的煤至 1100~1350℃，于空气隔绝 12~20hr 进行干馏。在这一过程中，原料煤中的固定炭素等在碳化室下部溶解固化变成赤热状的焦炭。挥发分蒸发分解后通过碳化室上部的管道被回收。推焦机将干馏后的赤热焦炭水平方向推出后，立即在干法熄焦设备 (CDQ :Coke Dry Quenching) 中用氮气进行熄焦冷却。由于氮气的温度在 800℃以上，显热量大，进行热回收后用于生产发电蒸汽等或在焦炉中循环利用。此外，生成的焦炉煤气因加热助燃空气被冷却，煤焦油、苯、氨、焦炉煤气等按各自的沸点被分离成化学制品、燃料等。

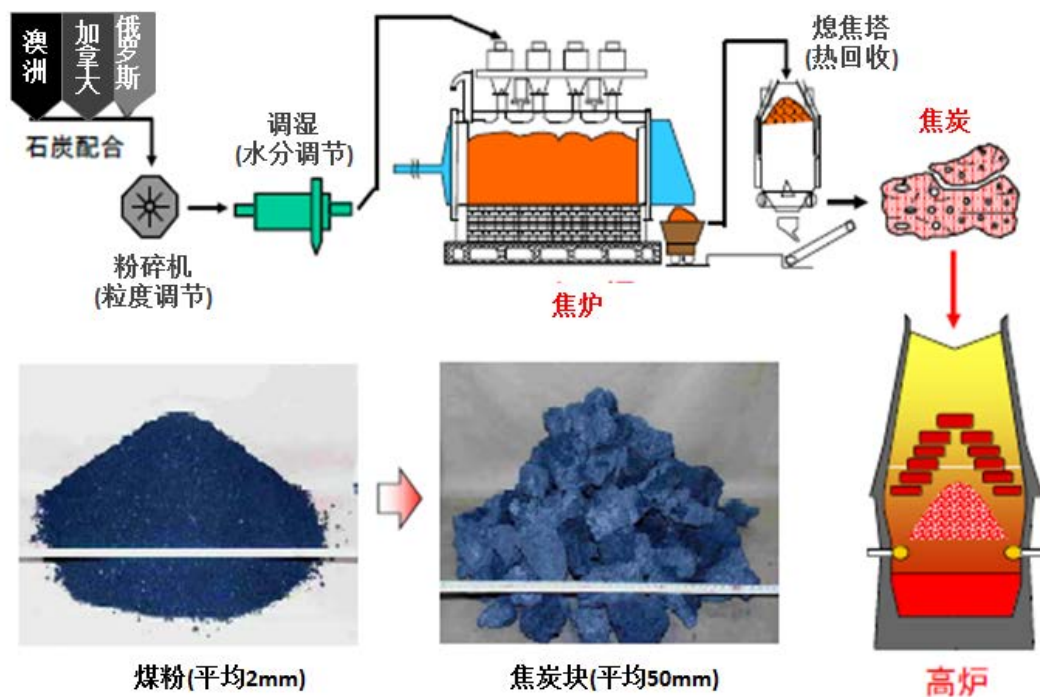


图 4-1 生铁生产工艺中焦炉的地位  
(出处: 2012 年度煤基础讲座 制铁技术、2013)

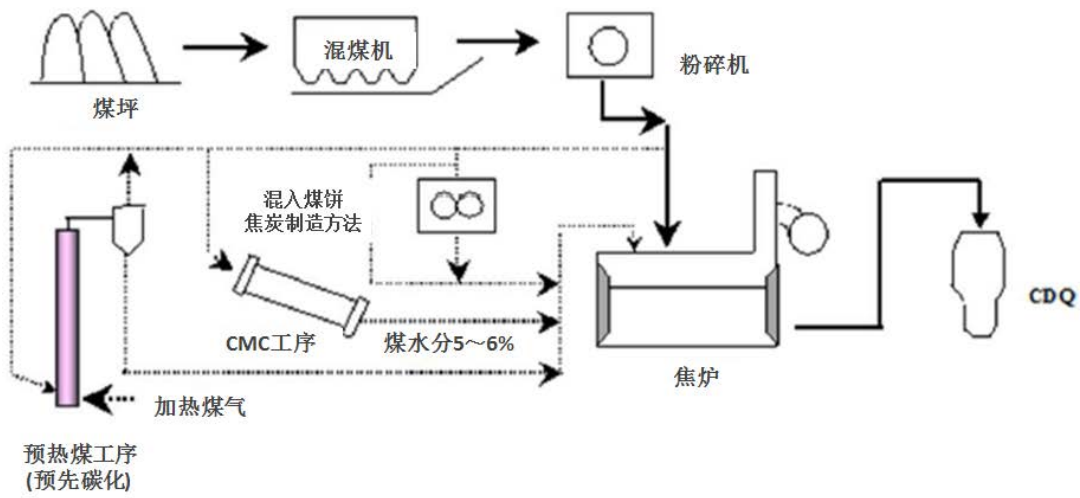


图 4-2 焦炭制造工艺例  
 (出处: 九大讲义资料 碳素材在铁精炼方面的应用 2013)

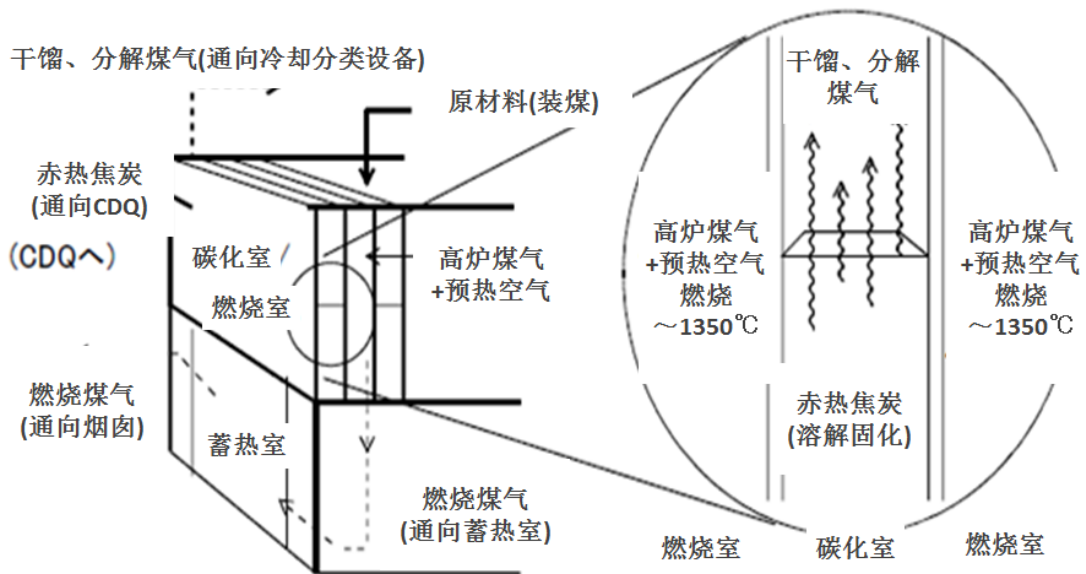


图 4-3 焦炉的概念结构 (以B煤气为热源的事例)  
 (出处: (德) 经济产业研究所 补论 3、戒能 2012)

### 4.3. 焦炉结构

现在的焦炉的代表炉体结构为下部为蓄热室，上部燃烧室和碳化室交替排列。燃烧煤气和空气在蓄热室和燃烧室预热燃烧，再次在蓄热室回收后排放。焦炉有只以焦炉煤气(COG)作为燃料的单式炉和既可使用高炉煤气(BFG)又可使用焦炉煤气复式炉两种。

从焦炉的结构上来看，其燃料及空气的供给方式、烟气循环、蓄热室的排列、燃烧室的结构等各具有不同的特征。典型的焦炉各部位结构如图 4-4 所示：

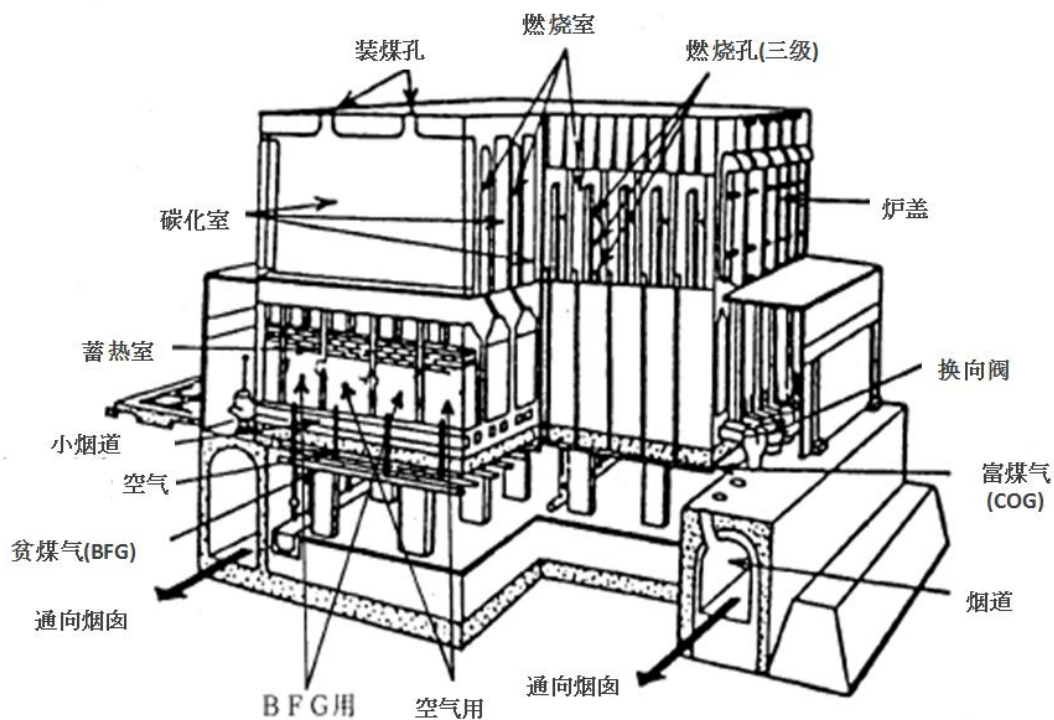


图 4-4 典型的焦炉部位结构

(出处：东北大院国际文化研论 重野等 1994)

图 4-5 所示的考伯斯式 (Koppers) 焦炉通过烟气循环的方式加长火焰，在燃烧室的上部安装辅助火道装置以调整炉顶的温度。

图 4-6 所示的奥托时 (Otto) 焦炉是日本的改良型焦炉。在碳化室的下部设有贫煤气 (高炉煤气) 和空气用的两个蓄热室，燃烧器根据燃料不同进行了细化。

日本钢厂还有以下从欧美技术引进的和自己改良的等多种型式的焦炉：

- 斯蒂尔式 (Carl Still) 焦炉
- 新日铁 M 式焦炉
- 新日铁 S 式焦炉
- 威尔普特式 (Wilputte) 焦炉

➤ DKH 炉

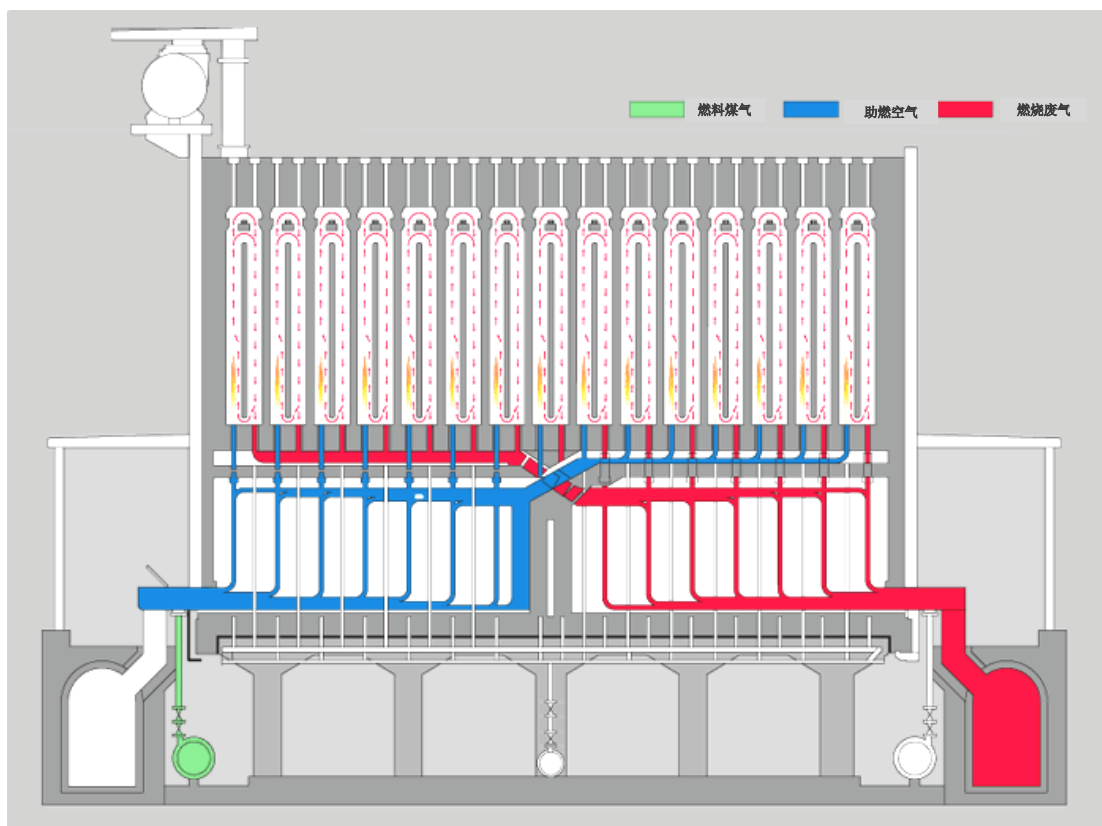


图 4-5 考伯斯式焦炉的结构  
(出处: 焦炭史料馆 H.P)

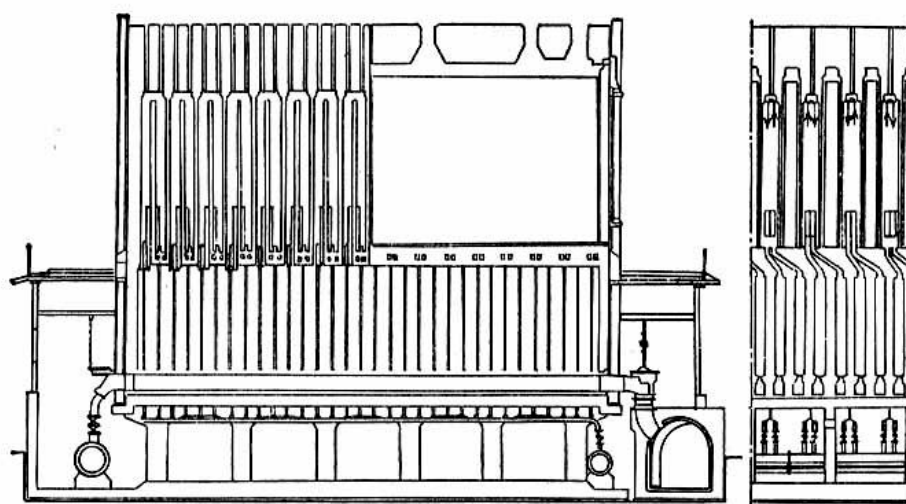


图 4-6 奥托式焦炉结构  
(出处: 燃料协会 燃料便览,1974)

#### 4.4. 焦炉附带装置

如图 4-2 所示，焦炉带有对原料煤进行前处理用的燃煤粉碎机、混煤机、调湿机（装入调湿煤 CMC：Coal Moisture Control）以及后处理用的熄焦设备（CDQ）、热回收锅炉、除尘器、烟气净化设备（脱硫、脱  $\text{NH}_3$ 、轻油回收）等设备。图 4-7 为干法熄焦设备，图 4-8 为 CDQ 设备能源回收系统例。CDQ 在节能方面效果显著，在日本的 NEDO 示范项目中取得了很好的成果，获得了很高评价，在中国，承德、杭州等钢厂均有应用。

此外，还有装煤机、推焦机、煤气提纯工艺的第一阶段冷却工序副产品焦油的回收装置（参照图 4-9）。另外，还有现在必不可少的合理控制多数炉群的自动控制设备等（加热控制、燃烧控制等）特别是控制设备方面，日本的各个企业都拥有自主开发的许多专利（例：公告 No.WO2014030438A1 等）

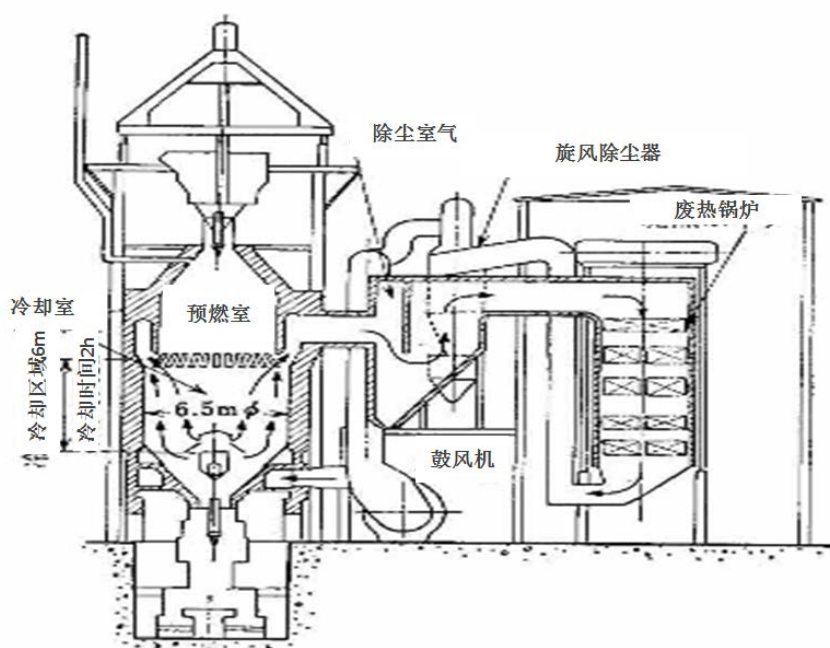


图 4-7 干法熄焦设备

（出处：钢铁便览）



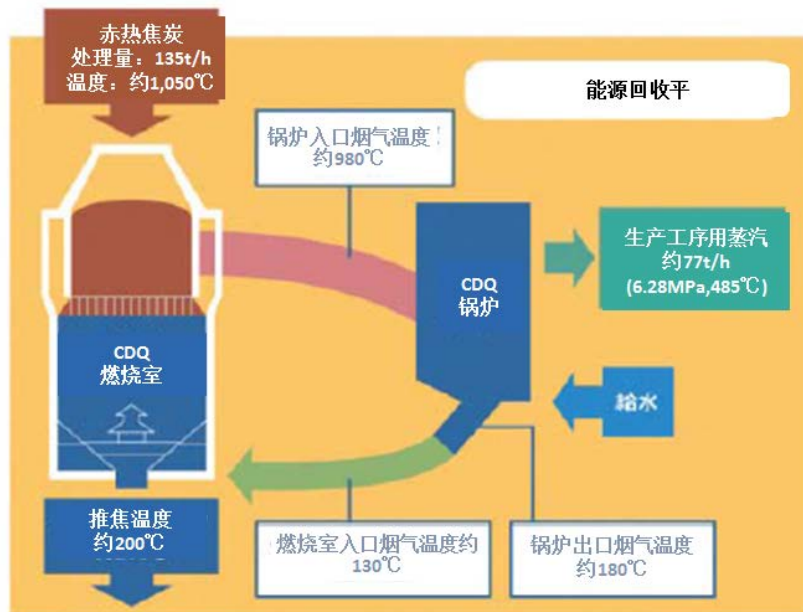


图 4-8 CDQ 设备能源回收系统  
(出处: CCUJ 制铁技术 CDQ 技术)

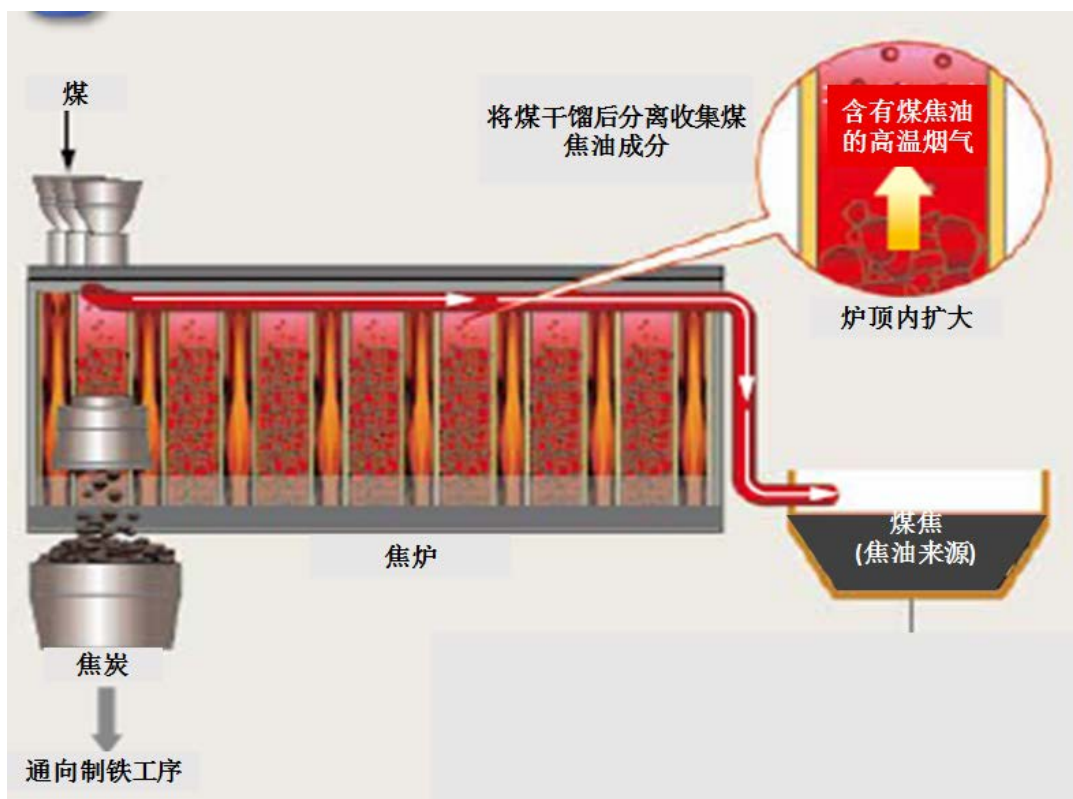


图 4-9 焦油回收系统概念图  
(出处: 煤焦油蒸馏 制品化技术 化学的世界 vol.52)



## 5 工业锅炉的氮氧化物防治技术

### 5.1. 焦炉煤气的提纯及净化

#### 5.1.1. 目的

焦炉煤气 (COG) 一部分直接作为焦炉燃料使用, 其他的作为高炉燃料及厂内制钢、轧钢厂的燃料使用。此外, 用作城市煤气及化学原料等时, 需经过冷却、脱硫、脱氨、轻油回收等提纯。COG 提纯工艺的典型例如图 5-1 所示。

制铁厂和炉型不同虽然会有些差异, 但总的来说, 焦炉煤气燃料化一般  $H_2/O_2$  vol. 比高, 具有很高的燃料价值。表 5-1 所示为粗焦炉煤气的组分例。煤气产生量为  $300\sim 400m^3/t\text{-coal}$ , 煤气的低位发热量为  $4,780\sim 5,000\text{ kcal}/m^3$ 。此外, 据报告, 该事例中与  $NO_x$  生成浓度相关的 HCN 浓度为  $150\sim 200\text{ ppm}$ , NO 低于基准值  $170\text{ ppm}$ 。

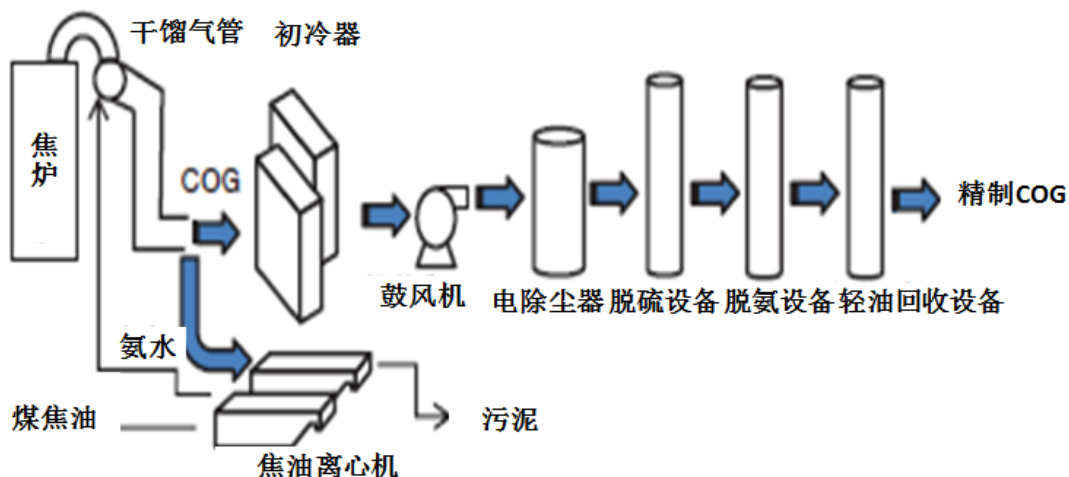


图 5-1 COG 提纯工艺例

(出处: S 公司产品介绍 2011)

表 5-1 粗焦炉煤气组分例

例	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> (%)	CO (%)	CH <sub>4</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)	N <sub>2</sub> (%)
1	2.4	0.2	4.3	7.4	30.8	50.6	4.3
2	2.4	0.1	5.0	5.9	30.1	52.5	2.0
3	2.5	0.8	6.6	6.5	41.2	35.6	6.8
4	2.2	0.6	3.6	7.2	37.0	45.9	3.5
5	2.7	0.2	4.9	7.4	32.3	45.9	6.6

(出处: 日立评论 vol.44.3,1962, 有机合成化学 vol.18.7,1960, 氢能源系统 Vol.35-1 2010 等)

### 5.1.2. 脱硫处理

焦炉煤气中含有硫化氢 ( $\text{H}_2\text{S}$ )  $4\sim 7 \text{ g/m}^3\text{N}$ ，作为燃料使用时，因其能生成腐蚀性气体  $\text{SO}_x$ ，需要进行脱硫处理。脱硫方法有干法和湿法两种，由于烟气量大，企业多采用湿法脱硫，这样，酸性物质的硫化氢与氨或磷酸钠等碱性吸收液接触脱硫的塔克哈克斯 (Takahax process)和 Fumaks process 脱硫技术得到了普及。(专利例:特开 2009-114233、特开昭 61-255993、特开昭 63-86793、特开 2011-93987 等)

### 5.1.3. 氨回收

焦炉煤气中含有  $6\sim 10 \text{ g/m}^3\text{N}$  的氨，一般采用 Phosam 法、Carl Still 法和 Koppers 法等进行氨回收。Phosam 法是美国开发的将煤气中含有的氨用  $\text{H}_2(\text{NH}_4)\text{PO}_4$  溶液吸收后通过水蒸气蒸馏回收液体氨的方法。Phosam 法的回收工艺见图 7-2。回收的氨可以在厂内的电厂做个做烟气脱硝剂使用。

此外，COG 作为燃料使用时，虽然需进行脱硫、脱磷等净化处理，但在进行其他物质的湿法处理和吸收处理时，产生  $\text{NO}_x$  的氢氰酸因加水分解和聚合反应变成蚁酸，间接削减了  $\text{NO}_x$  的生成。

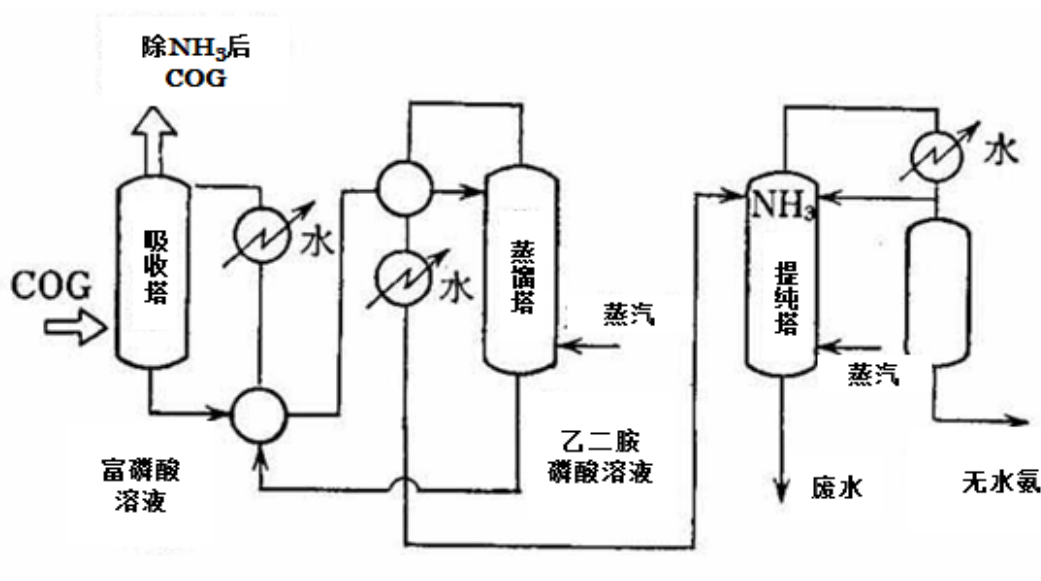


图 5-2  $\text{NH}_3$  回收工艺

(出处: 钢铁便览)

## 5.2. 烟气脱硝技术

从上面的介绍我们可以知道，日本的制铁用焦炉没有直接将焦炉煤气 (COG) 排放进大气中的，而是与高炉煤气等厂内其他设施产生的烟气混合后作为燃料梯级利用，在钢厂最终排放点汇集后进行脱硝处理。特别是由于钢厂设施的显热值大，热回收利用系统的热回收率、

高效的系统设计是否合适，对节能成本的影响很大，企业需充分研究。

焦炉煤气中含有大量的 HCN 和 NH<sub>3</sub>，燃烧时容易产生 NO<sub>x</sub>。减少 COG 燃烧面 NO<sub>x</sub> 生成的方法与工业锅炉和工业窑炉相同，有燃烧烟气的再循环法（减低火焰温度）和部分燃烧法（低 O<sub>2</sub> 浓度）等。（例：特开 No.昭 61-133286，特开平 No.平 1-306494 等）

余热回收锅炉后的烟气脱硝与工业锅炉和工业窑炉等一样，适用干法非催化还原法脱硝（SNCR）和选择性催化还原法脱硝（SCR）。焦炉烟气脱硝时，由于烟气中含有大量的 SO<sub>3</sub>，能够降低脱硝性能，因此在脱硫处理、适用烟气温度及选择催化剂时需充分注意。日本的钢铁企业拥有与此相关的许多专利（例：公开 No.特开 2010-240521 等）

对于加热用燃烧气体，在燃烧方式方面采取碳化室温度分布均匀化、合理安装燃烧器以及循环燃烧烟气，增长燃烧火焰等措施，减少了燃烧阶段 NO<sub>x</sub> 的生成。烟气脱硝的方法与上述相同，采取 SNCR 法。

### 5.3. 通过燃烧管理及热平衡提高热效率

焦炭制造工序总耗能中的大约 90%作为焦炭的干馏热量消耗。干馏热量相关的成本与原料煤成本对炼焦成本影响非常大，因此，降低干馏热量消耗即可大幅降低炼焦成本。

日本在热管理方面，规定必须定期核算能源/物质的投入/产出平衡，并将结果报告有关行政部门。为了能够进行定期核算，企业采用自动燃烧管理系统对整个焦炉进行计量监控，开发了对炉组进行监控的同时，对每个炉分别进行监控的方法。根据装煤水分、装煤量、各炉的燃料温度、产生煤气温度、赤热焦炭温度、烟气分析等的监测信息确定净结焦时间，进行以炉组为单位的投入热量调整和每座炉的燃料气体分配调整，固定每座炉的净结焦时间。通过上述措施，在热平衡方面，与 1970 年代相比，现在干馏热量大幅减少。图 10-1 为焦炉的热平衡及物料平衡的估算例：

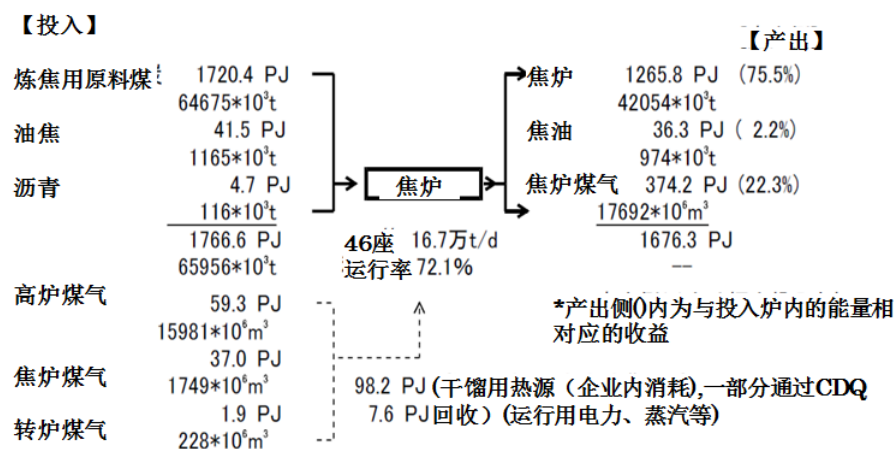


图 5-3 焦炉的热平衡及物料平衡的估算例  
(出处：(德) 经济产业研究所 戒能等 2012)

## 6 EU 的氮氧化物和硫氧化物减排措施

---

EU 各国采取的焦炉相关的 NO<sub>x</sub> 及 SO<sub>x</sub> 减排最佳可行技术 (BAT: Best Available Technology) 非常有效 (Commission Implementing Decision of 28 Feb. 2012、notified under document C(2012) 903 E.U)。BAT No.49 中公布了以下焦炉煤烟 (Emission) 减排技术:

- ① 焦炉运行时, 必须防止燃烧室及碳化室的煤气泄漏;
- ② 必须维修现有焦炉, 防止燃烧室及碳化室的煤气泄漏;
- ③ 新建锅炉时, 必须应用由热导率高的薄型耐火砖及耐火材料构成的、具有新型蓄热功能的低 NO<sub>x</sub> 型焦炉。

COG 脱硫方法方面, 推荐下列 2 种方法为 BAT:

- ① 吸收法脱硫
- ② 湿式氧化法脱硫