

中華人民共和国

環境保護部汚染物質排出総量規制司大気処

中華人民共和国

大気中の窒素酸化物総量抑制プロジェクト

NOx 抑制に係る技術ガイドライン（その2）
—鉄鋼分野（コークス炉、焼結炉）—

平成28年2月

独立行政法人

国際協力機構（JICA）

株式会社 数理計画

公益財団法人 国際環境技術移転センター（ICETT）

中国事
JR
16-01

NO_x 抑制に係る技術ガイドライン (鉄鋼焼結炉)

中華人民共和国環境保護部

独立行政法人国際協力機構

はじめに

この「NO_x 抑制に係る技術ガイドライン」は、独立行政法人国際協力機構の技術協力プロジェクトとして株式会社数理計画及び公益財団法人国際環境技術移転センターが実施した「中華人民共和国大気中の窒素酸化物総量抑制プロジェクト」において、中国環境保護部と協働で取り纏めたものです。

中国では、2011年から始まった第12次五カ年計画において窒素酸化物が新たに排出総量規制の対象に加えられたことにより、窒素酸化物削減対策について急速に関心が高まり、各産業業界において排出基準が定められ、排出源での抑制対策が進められています。第12次五カ年計画において定められた削減目標は、中央及び地方政府の適正な現場指導や企業自身の努力により達成されることが見込まれていますが、更なる大気環境改善への期待は依然として大きく、2016年より開始される第13次五カ年計画においても引き続き窒素酸化物が規制対象となる予定です。

本ガイドラインの対象分野である鉄鋼焼結分野では、鉄鋼焼結工業大気汚染物質排出基準（GB28662-2012）により、NO_x 排出基準が改定され、新規事業上では2012年10月、既設事業場では2015年1月より施行が開始されており、国内各地の企業において、基準達成のための技術導入、設備改善等が進められています。

上述のプロジェクトでは、中国国内の改善状況やニーズ、JICA 専門家が紹介する対策手法に対する中国国内における導入可能性の検討に関連する活動を中国側が担当しました。中国側が提供した情報に加え、ケーススタディや専門家会合で得られた課題や情報などを元に、中国で適用可能な対策手法についての紹介に関連する活動を日本側が担当し、本ガイドラインでは地方政府や企業が NO_x 抑制対策に取り組む際の参考となるよう活動結果を取り纏めたものが本ガイドラインとなっています。

本ガイドラインは日本における NO_x 抑制技術を中心に紹介しています。日本で施行されている窒素酸化物規制に関する政策、企業における運転管理や測定分析手法についても紹介しています。

このガイドラインが中国の地方政府や企業などの皆様の一助となることを期待するとともに、ガイドラインの作成にあたり協力いただいた関係者の皆様、ケーススタディ活動に積極的にご協力いただいた湖南省湘潭市の皆様に心より御礼申し上げます。

2015年10月

中華人民共和国環境保護部
独立行政法人国際協力機構

目次

1	日本の鉄鋼業の生産概要	1
1.1	生産量	1
1.2	生産工程	2
1.2.1	技術の変遷	2
1.2.2	新たな技術	2
1.3	日本の鉄鋼業における窒素酸化物排出状況	4
1.4	エネルギーの消費分析	4
2	日本の鉄鋼業における環境保全に係る規制及び政策	6
2.1	大気汚染対策に関する変遷	6
2.2	環境政策の経過	10
2.3	窒素酸化物抑制への取り組み	11
2.4	排出基準	12
2.5	省エネルギーに関する政策要求	13
3	大気中の窒素酸化物排出工程及び技術特徴	15
3.1	焼結工程	17
3.2	焼結機の操業管理	18
3.2.1	管理目標	18
3.2.2	操業管理	19
3.3	焼結工程における窒素酸化物生成と抑制	22
4	大気中の窒素酸化物制御技術及び適用範囲	26
4.1	各設備の窒素酸化物抑制対策と効果	26
4.2	省エネルギー対策について	28
4.3	焼結機の窒素酸化物発生抑制・低減対策	32
4.3.1	焼結機の排ガス脱硝設備	32
4.3.2	焼結機排ガス循環システムによる窒素酸化物低減効果	33
4.3.3	低窒素コークス使用による窒素酸化物低減対策	34
4.3.4	焼結機の漏風防止対策による間接的 NOx 低減	35
4.3.5	Activated Coke Method	36
4.3.6	SOx & NOx reduction using SCR	37
4.3.7	Exhasut Gas Treatment through Low-Temperature Plasma	38
4.3.8	Top Pressure Recovery Turbine	39
4.3.9	Sinter Plant Heat Recovery	40
4.3.10	Multi-silt Burner in Ignition Furnace	41
4.4	窒素酸化物抑制技術の経済性 NOx 抑制技術の経済性	42

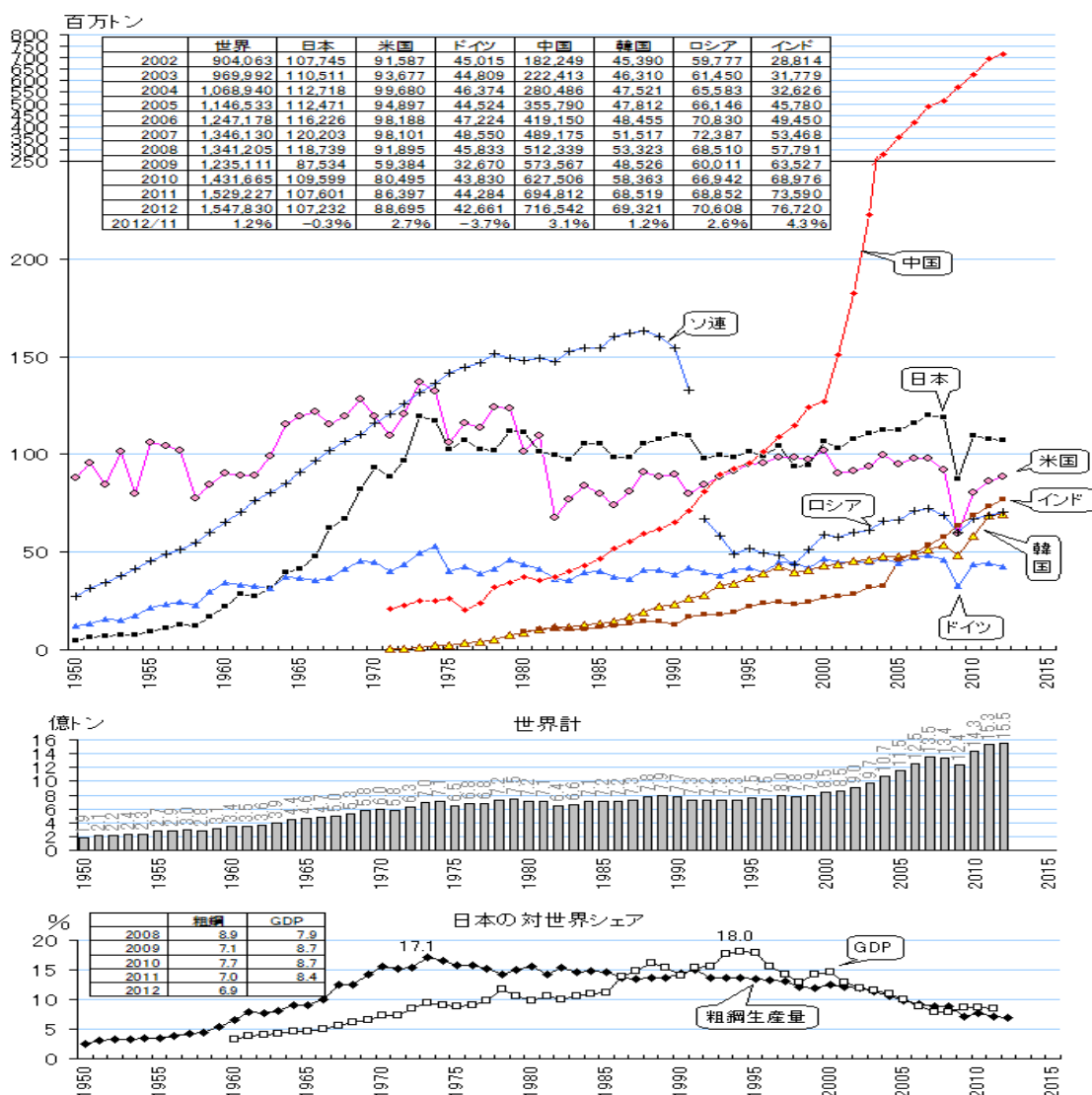
4.4.1	排ガス循環	42
4.4.2	選択的接触還元法(SCR)	43
4.4.3	乾式排煙脱硫脱硝装置(RCA)	44
5	中国における焼結機排ガスの窒素酸化物抑制技術の導入事例	46
5.1	太原鋼鉄有限公司	46
5.1.1	緒言	46
5.1.2	活性炭移動層による脱硫脱硝技術について	47
5.1.3	乾式脱硫脱硝装置設計の概要	48
5.1.4	結語	53
5.2	湖南華菱湘潭鋼鉄有限公司	53
5.2.1	概要	53
5.2.2	NOx 排出マップ作成	55
5.2.3	対策の検討	55
6	中国の窒素酸化物抑制技術の焼結機への導入について	57

1 日本の鉄鋼業の生産概要

1.1 生産量

図 1-1 に示す通り、日本の粗鋼生産量は 1975 年までは増加傾向にあったが、その後は年約 1 億 t 前後で推移している。2002 年以降では、世界の粗鋼生産量が 2002 年 9.04 億 t から 2010 年度 14.31 億 t、2012 年 15.48 億 t へと増加しているが、日本の生産量は 2002 年 1.07 億 t、2010 年 1.09 億 t、2012 年 1.07 億 t と横這い状況で推移しており、今後も約 1 億 t で推移すると予想されている。他方、中国は 2002 年に 1.82 億 t、2010 年に 6.28 億 t、2012 年は 7.17 億 t へと大幅に増加している。

世界と日本の粗鋼生産量の長期推移



(注)ドイツは90年まで西独 (資料)「鉄鋼統計要覧」、日本鉄鋼連盟HP、世銀WDI(GDP)

図 1-1 世界と日本の粗鋼生産量の推移

1.2 生産工程

1.2.1 技術の変遷

図 1-2 に日本の生産技術の変遷を示す。主な項目は次の通りである。^{1 2}

- ① 鉄鉱石銘柄の変遷
- ② 原料の事前処理：焼結・ペレット設備、原料品質改善
- ③ 高炉操業、設備：鉄石整粒強化、自溶鉄性塊成鉄使用、高炉大型化、操業の効率化（超高压操業の確立）
- ④ 技術の標準化：複合送風の確立、装入物分布技術の高度化、操業管理システムの高度化
- ⑤ コークスの品質改善：潰裂強度の向上、灰分の低減、強粘結炭の削減
- ⑥ 環境・省エネルギー・省力化：排煙脱硫、脱硝、TRT、CDQ、排熱回収、ゼロエミッション対策、廃プラスチック原料化

1.2.2 新たな技術

主に次のような技術が実用化、あるいは開発への取り組みが検討されている。

- ① SCOPE21 (Super Coke Oven for Productivity & Environmental Enhancement toward the 21st Century)³：革新的コークス炉=次世代コークス製造技術
→新日鉄大分第5コークス炉に実機1号機 2008年5月稼働
- ② COURSE (CO₂ Ultimate Reduction in Steelmaking Process by Innovative Technology for Cool Earth 50)⁴：鉄鋼プロセスのCO₂削減を目的とした長期的プロジェクト。日本政府が推進しているクールアースプロジェクトとして2008年より推進している。：

¹ [鉄鋼便覧] 一般社団法人日本鉄鋼協会

² 影近博 (2002.11) . 鉄鋼技術開発の進歩と今後の展開 NKK 技報, No.179

³ 経済産業省 (2011 年) . 石炭高度転換コークス製造技術開発プロジェクト (SCOPE21) の追跡評価

⁴ 日本鉄鋼連盟ウェブサイト

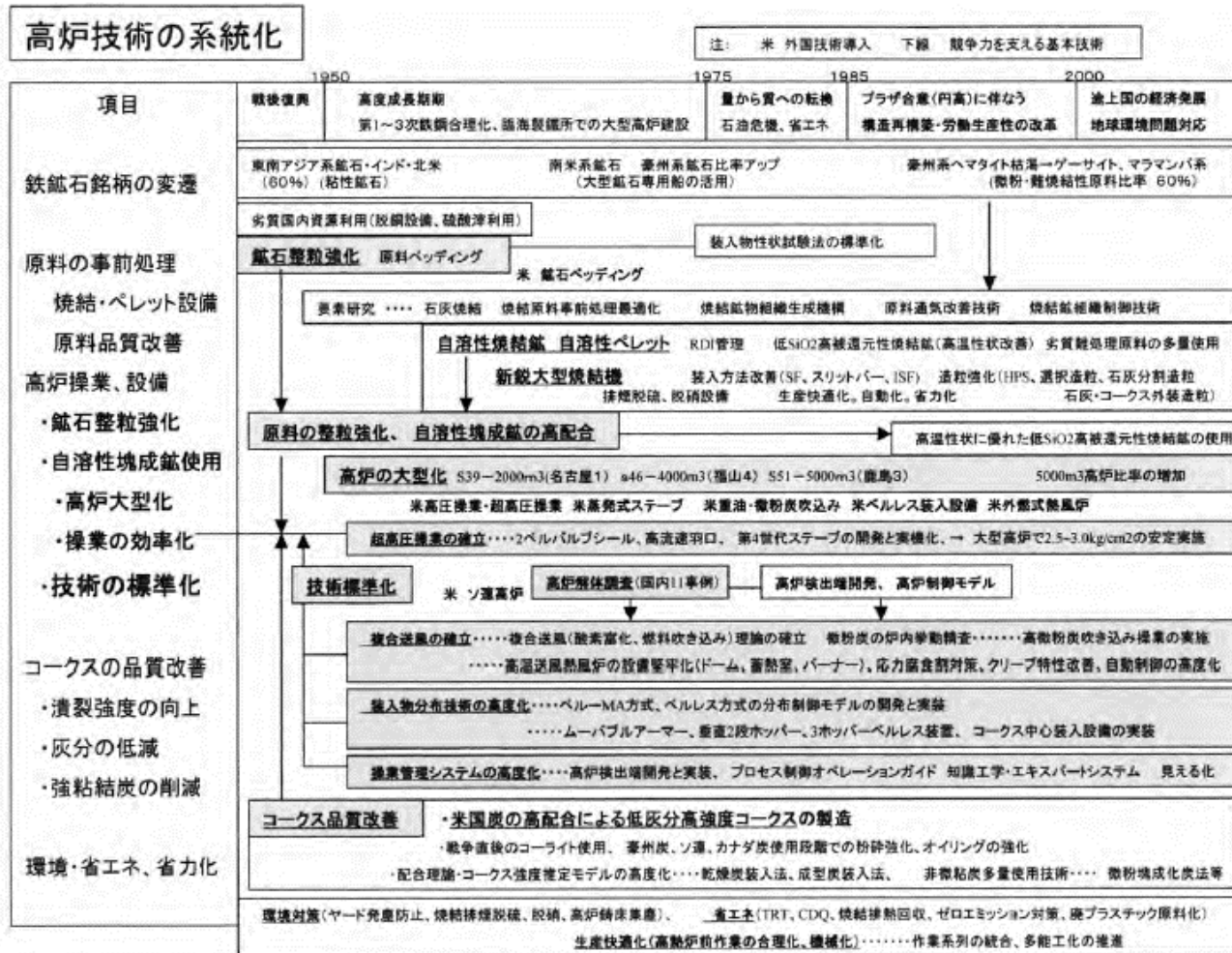


図 1-2 鉄鋼業生産技術の変遷

(出典：彼島秀雄 (2010.3). 高炉技術の系統化 国立博物館技術の系統化調査, 第15集)

1.3 日本の鉄鋼業における窒素酸化物排出状況

製鉄所における NOx の主な発生源は、SOx と同様に焼結機、コークス炉、加熱炉であり、日本において窒素酸化物が発生しにくいバーナの開発や燃焼条件の改善、排ガスから窒素酸化物を取り除く脱硝設備の開発・設置などの対策を実施されてきた。これらの結果、図 1-3 に示されるように日本の鉄鋼業における NOx 排出量は減少している。なお、1994 年以降日本鉄鋼連盟による日本の鉄鋼業の NOx 排出量の集計は取りやめているが、その後も 1993 年のレベルで推移していると推測される。

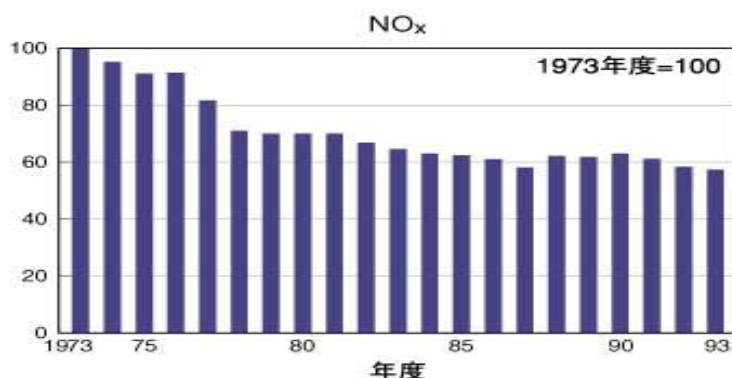


図 1-3 鉄鋼業の NOx 排出量の推移 (出典:日本鉄鋼連盟)

1.4 エネルギーの消費分析

エネルギー原単位 (粗鋼 1t 当たりのエネルギーエネルギー消費量) は 1990 年比で 2007 年度までに 10.6%減少している。

効果的な主な省エネルギー対策として以下が挙げられる。⁵

(1) 第一段階 (~1980 年頃) : 操業改善

- ① 高炉の還元剤比低減
- ② 加熱炉の燃料低減

(2) 第二段階 (1980 年頃~1995 年頃) : 設備改善・導入

- ① TRT (高炉炉頂圧発電)
- ② 焼結主排・クーラー排熱回収ボイラー
- ③ CDQ (コークス炉乾式消火設備)
- ④ 転炉排熱ボイラー
- ⑤ その他の排熱回収
- ⑥ 連続鋳造設備
- ⑦ 連続焼鈍設備

(3) 第三段階 (1995 年頃~) : CO2 削減、資源リサイクル

⁵ 飯野吉嗣他(2004.12). 製鉄所における環境への取り組み JFE 技報, No.6

- ① 高炉ガス焚ガスタービン・コンバインドサイクル発電 (GTCC)
- ② 廃棄物リサイクル技術(廃プラスチックの原料化—高炉吹き込み、コークス炉への利用)
- ③ ダストリサイクル

これらに積極的に取り組んだ JFE の例では、図 1-4 に示すように、エネルギー原単位は 1970 年代初めを基準にすると 2003 年度までに約 33%削減している。

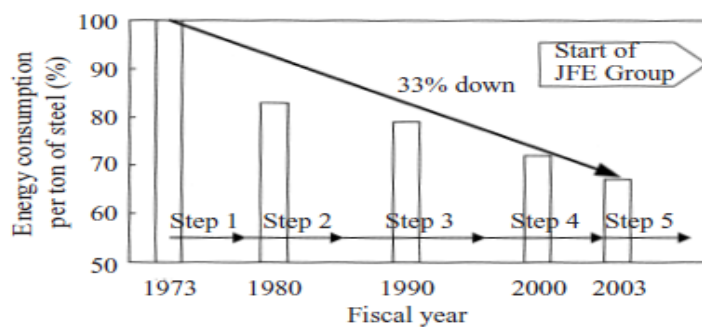


Fig. 1 Trend of energy consumption per ton of steel (FY1973 = 100%)

図 1-4 エネルギー原単位の変化

2 日本の鉄鋼業における環境保全に係る規制及び政策

2.1 大気汚染対策に関する変遷

2000年代以降のグローバル化の下で、世界レベルで鉄鋼業の再編成が進み、2001年 Arcelor、2003年 JFE スチール、2004年 Mittal、2006年 Arcelor-Mittal、2012年新日鉄住金などに示されるように、鉄鋼メーカーの統合により巨大鉄鋼メーカーが誕生している。各製鉄メーカーは益々厳しい競争に晒されている。^{6 7}

製鉄所における焼結機排ガスの窒素酸化物（以下 NOx と記す）の低減は、製鉄所の生産性の向上、コスト低減、環境汚染防除の取り組みの中で進められてきた。

生産性の向上、コストの低減については製鉄所全体で、設備の大型化、効率化が図られてきた。特に高炉については、1995年神戸製鋼所加古川第1高炉（5400m²）をはじめとして、炉容積5000m²以上の超大型高炉への拡大改修が進められた（表 2-1）。さらに省力化設備の導入、設備の自動化や合理化、操業改善に取り組み、生産性の向上（表 2-2）、低還元材を用いた操業が図られてきた（図 2-1）。これらにより労働生産性はここ10年の間で約2倍となり、約1600t/人/年へと大幅に改善されている。¹ 焼結機においても同様に集約化、大型化が図られた（表 2-3）。

表 2-1 5,000 m² 以上の高炉建設の推移

火入れ時期	高炉名	
1995	神戸製鋼所加古川第1高炉	(5400m ²)
1998	JFE スチール千葉第6高炉	(5153m ²)
2002	JFE スチール倉敷第4高炉	(5005m ²)
2003	新日本製鉄君津第4高炉	(5555m ²)
2004	新日本製鉄大分第2高炉	(5775m ²)
	JFE スチール京浜第1高炉	(5000m ²)
	住友金属工業鹿島第1高炉	(5370m ²)
2006	JFE スチール福山第4高炉	(5000m ²)
2007	新日本製鉄名古屋第1高炉	(5,443m ²)
	住友金属工業鹿島第3高炉	(5,370m ²)
2009	新日本製鉄大分第1高炉	(5,775m ²)

(出典：彼島秀雄 (2010.3). 高炉技術の系統化 国立博物館技術の系統化調査, 第15集)

⁶ 高松信彦、栗原喜一郎、斎藤元治、加来久典(2011). 製鉄技術開発の歩みと今後の展望 新日鉄技報, 第391号 79,p82,p83

⁷ 飯野吉嗣、相馬冬樹、橋本邦俊 (2004.12). 製鉄所における環境への取り組み JFE 技報, No.6

表 2-2 高炉操業成績の推移

	1990 年	2003 年
高炉稼働基数 (炉内容積 m ³)	37 基 (122,997)	29 基 (114,017)
平均内容積 (m ³)	3,323	3,931
年間出銑量 (t/年)	80,144,653	82,089,710
平均出銑比 (t/m ³ ・d)	1.99	2.04
平均還元材比 (kg/t)	5.05	5.06 (kg/t)
平均コークス比 (kg/t)	446	381
平均補助燃料費 (kg/t)	59 (微粉炭 51kg/t)	125 (微粉炭 125kg/t)
スラグ原単位 (kg/t)	312	287
焼結鉄比 (%) /ペレット比 (%)	77.0/8.0	73.1/5.3

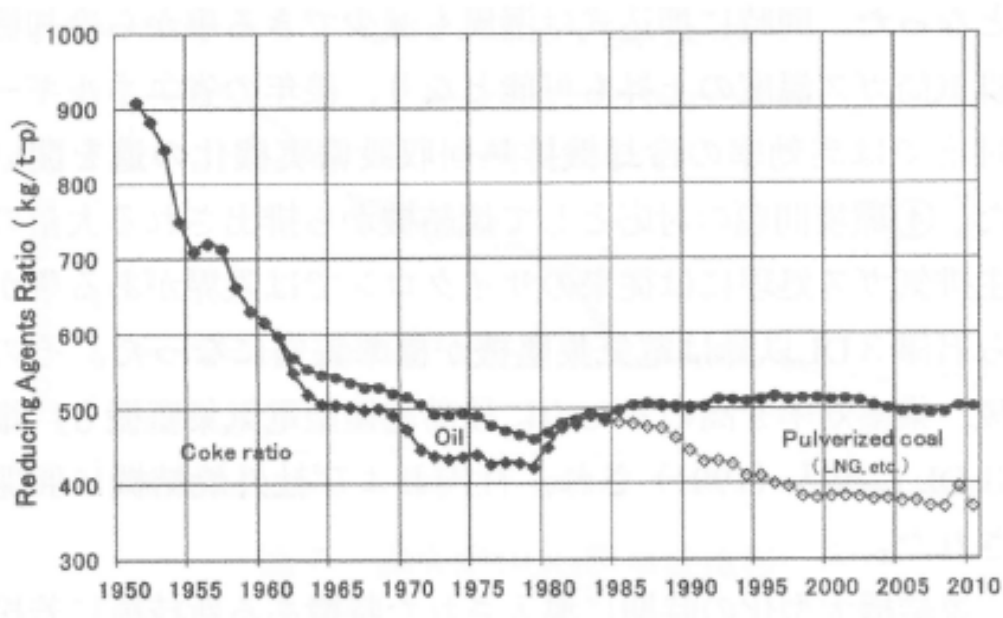


図 2-1 日本の還元材比推移

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

表 2-3 全国焼結機の操業実績比較

項目	1990 年	2002 年
焼結機稼働基数 (基)	33	25
焼結機有効面積 (m ²)	9,017	8,541

生産量	(千 t/年)	106,442	106,496
1日当り生産量	(t/d)	9,407	11,671
生産率	(t/h/m ²)	1.41	1.46
歩留	(%)	90	88.9

(出典：彼島秀雄 (2010.3). 高炉技術の系統化 国立博物館技術の系統化調査,

第15集)

環境汚染防止については粉じん対策、SO_x 対策、NO_x 対策、CO₂ 削減対策、ダイオキシンなど有害物質対策、循環型社会への取り組みとして省資源、資源再利用への取り組みが進んできた。粉じん対策は、電気集塵機やバクフィルターの設置普及により、SO_x 対策は1973年川崎製鉄千葉第4焼結機において脱硫装置が稼働開始以来、1970年代から2000年間でほとんどの製鉄所に脱硫装置が導入設置されたことにより大幅な改善が図られた(表 2-4)。

図 2-2 の JFE の例では SO_x は 1973 年比で約 1/9 に減少している。

表 2-4 焼結機排煙脱硫装置の設置状況

事業所	稼動開始年	脱硫方式	処理能力	備考
川鉄千葉4DL	1973	湿式石灰石膏法	12万Nm ³ /h	
新日鐵戸畑	1974	スラグ・石膏法	20万Nm ³ /h	
川鉄水島4DL	1974	湿式石灰石膏法	75万Nm ³ /h	
住金和歌山5DL	1975	モレタナ式石灰石膏法	37万Nm ³ /h	
川鉄水島3DL	1975	湿式石灰石膏法	90万Nm ³ /h	
川鉄千葉3DL	1975	湿式石灰石膏法	32万Nm ³ /h	(停止)
住金鹿島1DL	1975	モレタナ式石灰石膏法	88万Nm ³ /h	
住金鹿島2DL	1976	モレタナ式石灰石膏法	200万Nm ³ /h	
神鋼尼崎	1976	CAL 法	35万Nm ³ /h	(停止)
神鋼神戸	1976	CAL 法	35万Nm ³ /h	(停止)
中山製鋼	1976	CAL 法	37.5万Nm ³ /h	
川鉄千葉4DL増強	1976	湿式石灰石膏法	65万Nm ³ /h	
NKK福山3DL	1976	アンモニア硫安法	76万Nm ³ /h	(停止)
新日鐵若松	1976	スラグ・石膏法	180万Nm ³ /h	(停止)
NKK京浜1DL	1976	アンモニア硫安法	156万Nm ³ /h	
新日鐵堺	1979	スラグ・石膏法	50万Nm ³ /h	(停止)
中山製鋼(改造)	1983	水酸化マグネシウム法	37.5万Nm ³ /h	
住金小倉3DL	1985	水酸化マグネシウム法	40万Nm ³ /h	
新日鐵戸畑(改造)	1987	水酸化マグネシウム法	42万Nm ³ /h	
新日鐵名古屋3DL	1987	活性炭	90万Nm ³ /h	
川鉄水島4DL(改造)	1996	水酸化マグネシウム法	75万Nm ³ /h	
川鉄水島3DL(改造)	1996	水酸化マグネシウム法	90万Nm ³ /h	
同上名古屋1/2DL	1999	活性炭	130万Nm ³ /h	

(出典：[鉄鋼便覧] 一般社団法人日本鉄鋼協会)

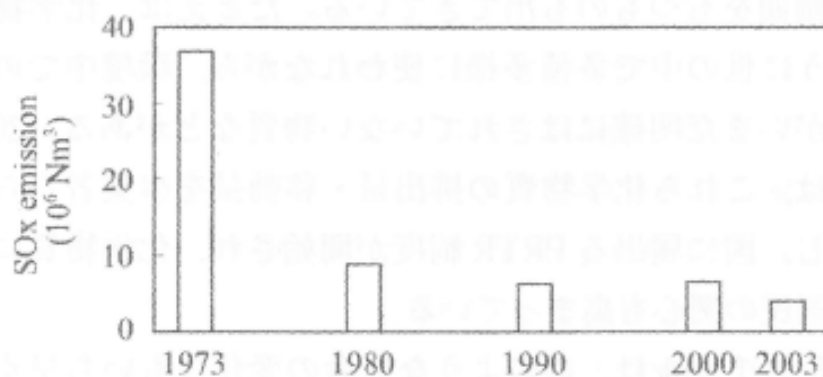


図 2-2 SOx 低減推移

(出典：鈴木富雄(1990). 製鉄所における燃焼技術 鉄と鋼, 76 第 6 号)

NOx 対策は 1973 年に現行の窒素酸化物の環境基準として「1 日平均値 0.04~0.06ppm 以下」が制定された。それに対応するため、鉄鋼連盟に『鉄鋼業 NOx 防除技術開発本部』が設置され、また 1974 年には『NOx 研究組合』を設立され、以降 5 年間で総額 23 億円超を投じて研究開発を継続実施した。『NOx 研究組合』は目的が達成されたことから、1980 年 3 月末に解散し、その成果が各製鉄所で実用技術として適用されている。⁸ 図 2-3 の JFE の例では、NOx 発生量は 1973 年比で 2003 年までに 1/2 以下に減少している。

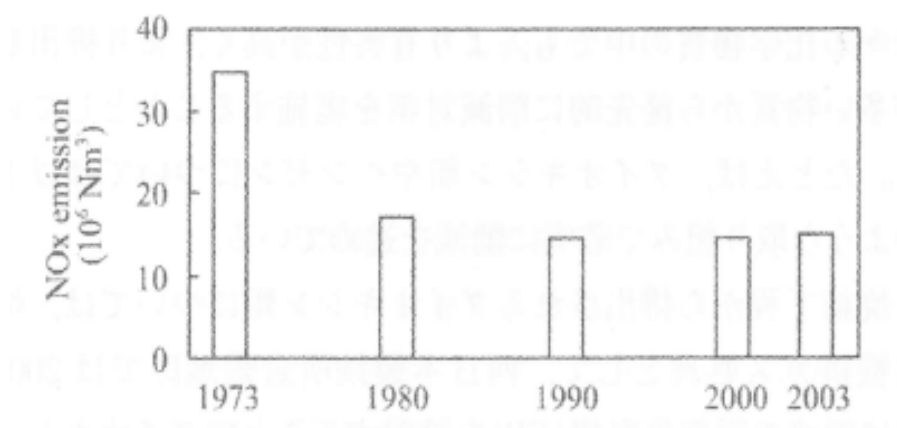


図 2-3 NOx 低減推移

(出典：飯野吉嗣、相馬冬樹、橋本邦俊 (2004.12). 製鉄所における環境への取り組み
JFE 技報, No.6)

2.2 環境政策の経過

表 2-5 に示されるように公害防止の環境政策対応(法規制)の経過の中で、鉄鋼業の NOx 抑制政策が実施されてきた。主なものは、次の通り。

- 1970 年: 「公害基本法」制定
- 1974 年: 「NOx 環境基準」制定
- 1976 年: 「工場等の SOx 総量規制」実施、(1973 年制定)
- 1978 年: 「NO₂ の環境基準 (現行の 1 日平均 0.04~0.06ppm) 」へ改定
- 1982 年: 「工場等の NOx の総量規制」実施 (1981 制定)

表 2-5 大気汚染関係年表 (主なもの)

年	東京都	国
1949	工場公害防止条例制定	
1955	ばい煙防止条例制定	

⁸ 彼島秀雄 (2010.3). 高炉技術の系統化 国立博物館技術の系統化調査, 第 15 集

1962		ばい煙の排出の規制等に関する法律制度
1968	東京都と東京電力とで公害防止協定締結 東京都郊外研究所設置	大気汚染防止法制定
1969	公害防止条例制定	二酸化硫黄(SO ₂)の環境基準制定
1970	公害防止条例改正(規制の強化)	
1971	重油の燃料規制施行(硫黄含有率規制)	
1972		浮遊粒子状物質(SPM)の環境基準制定
1973		二酸化窒素(NO ₂)と光化学オキシダント(Ox)の環境基準制定
1974	重油の燃料規制(硫黄含有率規制)強化	
1976	工場等の SOx の総量規制実施	
1978		二酸化窒素(NO ₂)の環境基準改定
1982	工場等の NOx の総量規制実施	
1992		自動車 NOx 法制定
1993		環境基本法制定
1999	『ディーゼル車 NO 作戦展開』展開	
2000	環境確保条例制定(公害防止条例を全面改正)	
2001	自動車公害監視員(自動車 G メン)設置 発電所の NOx 規制強化、小型焼却炉規制(使用禁止)	
2003	ディーゼル規制開始	
2006	ディーゼル車規制(排出基準強化)	
2007		自動車 NOx・PM 法制定(自動車 NOx 法改正)
2009		微小粒子状物質(PM2.5)の環境基準制定

2.3 窒素酸化物抑制への取り組み

鉄鋼連盟は 1973 年以降、官、学、関連業界と協力連携し、同年に日本鉄鋼連盟に『鉄鋼業 NOx 防除技術開発本部』を設置した。また、同本部の基本方針に基づき技術開発実施機関として『(財)鉄鋼設備窒素酸化物防除技術開発基金(NOx 基金)』、および『鉄鋼業窒素酸化物防除技術研究組合(NOx)組合』を設立した。本組合は大学、研究機関へ研究の助成を行い、“焼結排ガスの脱硝技術”について共同研究を実施した。これに見られるように業界として積極的に NOx 防除技術に取り組んだ。『NOx 基金』は 1980 年に『鉄鋼業環境保全技術開発基金』に改組して、環境問題全般(大気、水質、廃棄物など)へ研究補助を拡大し助成

している。

2.4 排出基準

日本で施行されている鉄鋼業関連の設備に関する NOx 排出基準は表 2-6 のとおりである。

表 2-6 鉄鋼設備の NOx 排出基準値(日本)

	施設種類	規模	新設基準値		
			On (%)	NOx (ppm) *	
ボイラー	ガス専焼ボイラー	4 万 m ³ N 以上	5	60~100	
		4 万 m ³ N 未満	5	130~150	
	重油専焼及び	20 万 m ³ N 以上	4	130~150	
	ガス液体混焼ボイラー	4~20 万 m ³ N	4	150	
		1~4 万 m ³ N	4	150	
		1 万 m ³ N 未満	4	180	
	石炭燃焼ボイラー	20 万 m ³ N 以上	6	200~250	
		4~20 万 m ³ N	6	250~320	
		4 万 m ³ N 未満	6	250~320	
ガス発生炉	ガス発生炉		7	150	
及び加熱炉	加熱炉		7	150	
焙焼炉、焼結炉、か焼炉	焙焼炉	4 万 m ³ N 以上		220	
		4 万 m ³ N 未満		220	
	フェロマンガン製造用焼結炉			220	
	その他の焼結炉			220	
	か焼炉	4 万 m ³ N 以上			220
		4 万 m ³ N 未満			
溶鋳炉、転炉、平炉	溶鋳炉のうち高炉			100	
		その他の溶鋳炉		100	
	転炉				
	平炉	4 万 m ³ N 以上			
		4 万 m ³ N 未満			
金属溶解炉	金属溶解炉	4 万 m ³ N 以上		180	
		4 万 m ³ N 未満		180	

金属加熱炉	金属加熱炉	4万 m ³ N 以上	11(注)	100~180
		4万 m ³ N 未満	11(注)	150~180
コークス炉	コークス炉		7	170
空白欄は規定なし				
<p>(注) この規定の適用については当分の間、On=Os とし、酸素濃度補正を行わない。 *NO_x は NO、N₂O、NO₂、N₂O₃ などがあるが、燃焼に伴って発生する NO_x は大部分が NO であり、NO₂ は数%程度発生するが、その発生率は燃焼条件等により変化する。 NO₂ の発生率は低いものの、毒性が強いため環境基準では NO₂ 濃度で定められている。また JIS の NO_x 濃度測定法も NO₂ 基準で検量するよう規定している。 実際は NO/NO₂ 比は燃料・施設種別ごと異なる。 茲であえて ppm→mg/m³ 換算目安のため排ガス組成が 100%NO₂ と仮定すれば 100mg/m³ → ≒ 200ppm となる。 (実際の施設では NO が 95%以上を占めるため 100mg/m³→140ppm となる。)</p>				

2.5 省エネルギーに関する政策要求

1970 年代のオイルショックを契機として、各鉄鋼会社は省エネルギーに積極的に取り組みを開始した。その後、地球温暖化防止の省エネルギー活動として、国、及び「日本経済団体連合会」の呼びかけに応じて、1996 年 12 月「鉄鋼業の環境保全に関する自主行動計画」を策定した。“鉄鋼生産工程のエネルギー消費量を 2010 年に 1990 年比 10%削減”を目標に設定し取り組みを実施している。図 2-4 に 2007 年までの実績推移を示している。エネルギー原単位は 1990 年度比 2007 年度で 10.6%改善している。

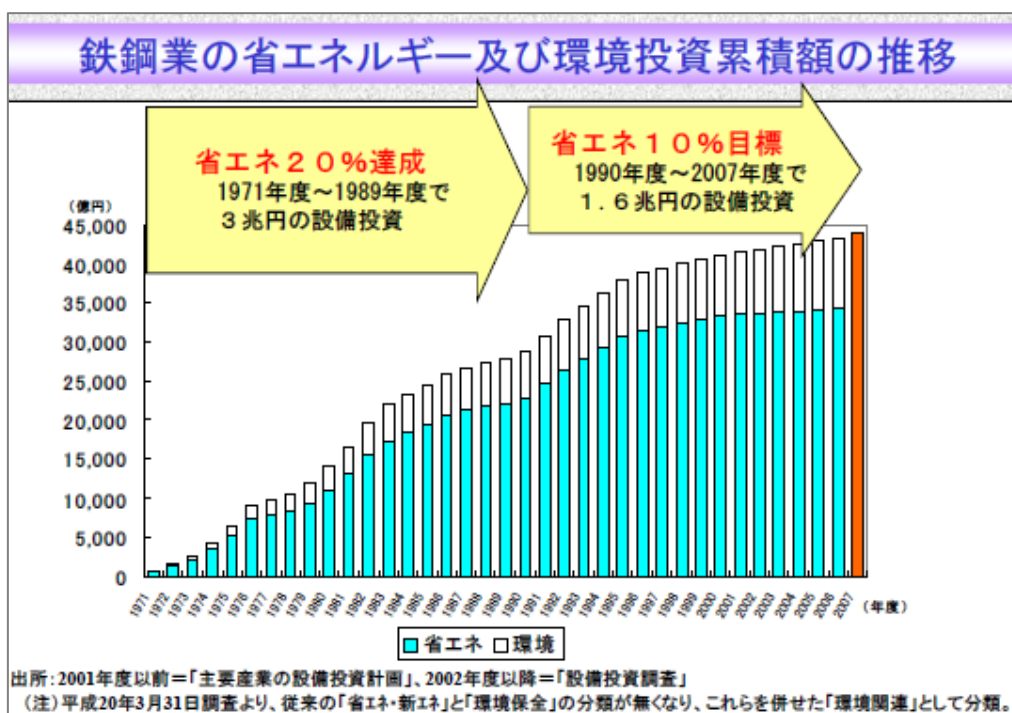


図 2-5 に日本の「鉄鋼業の省エネルギー及び環境投資累積額の推移」を示している。積極的な省エネルギーへの設備投資が行われ、成果に繋がったことが示されている。

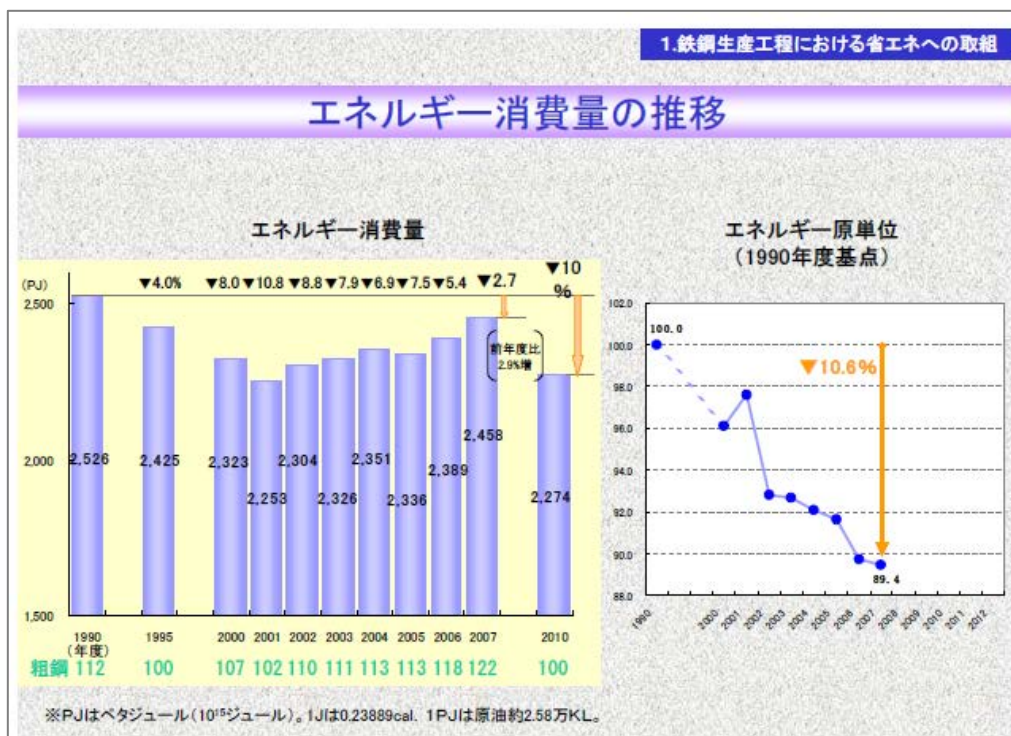


図 2-4 鉄鋼生産工程のエネルギー消費量の推移

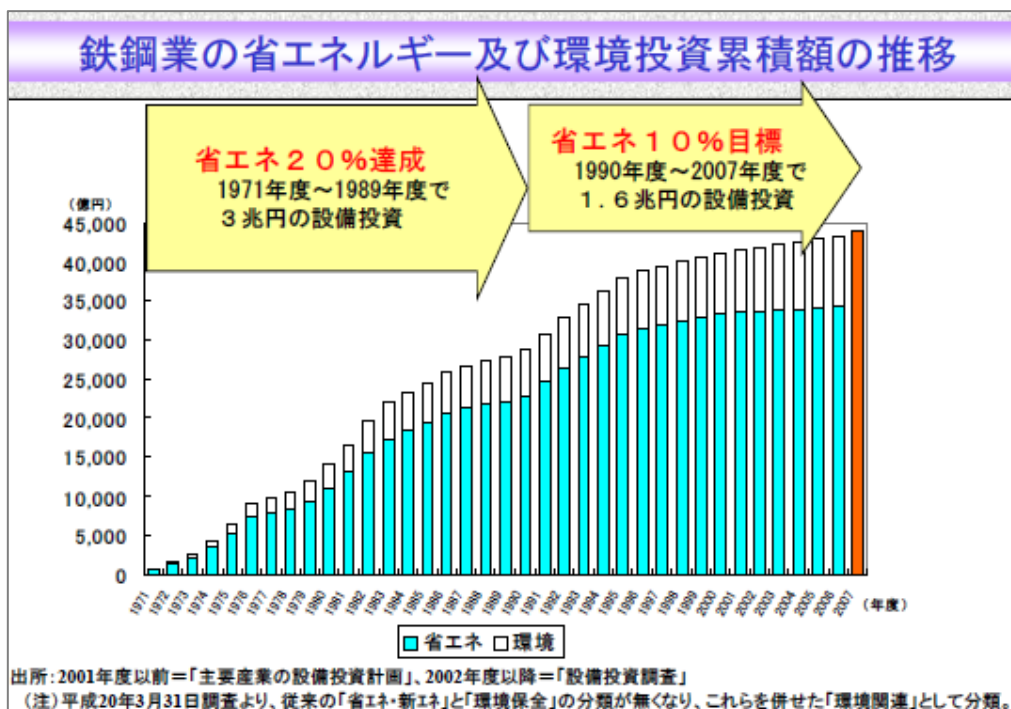


図 2-5 日本の鉄鋼業の省エネ及び環境投資累積額の推移

(出典：日本鉄鋼連盟 (2008). 鉄鋼業の地球温暖化対策への取組み 自主行動計画進捗状況報告)

3 大気中の窒素酸化物排出工程及び技術特徴

一貫工程を有する製鉄所は、高炉を核として、コークス炉、焼結機、転炉、電気炉、造塊、分塊、圧延工程で構成され(図 3-1)、これらの設備、工程で鉄鉱石、石炭、水など多量の資源と燃料、電力などのエネルギーを必要としている。大気汚染の原因となる NO_x、SO_x、煤塵は主としてこれらの設備、工程から排出される。

表 3-1 に示すように各製造プロセスから粉じん・煤じん・NO_x・SO_x の汚染物質が発生する。それに対する対策は図 3-1 に示されるような対策が講ぜられるのが望ましい。

表 3-1 鉄鋼業における粉じん・煤じん・NO_x・SO_x 発生工程

工程	粉じん・煤じん発生箇所	NO _x 発生	SO _x 発生
原料荷揚	アンローダーホッパー		
原料ヤード	堆積場、スタッカー、ホイールローダ		
原料処理	クラッシャー、コンベア、コンベア乗継部ホッパー		
コークス炉	石炭粉砕機、混炭機、原料槽、石炭塔、送炭車、ガイド車、消火塔、コークカッター、スクリーン	有り	有り
焼結炉	主排気、クーラー排気、コンベア、ホッパー、クラッシャースクリーン	有り	有り
高炉	貯鉱槽、鋳床、高炉ガス	有り	有り
熱風炉	排気ガス	有り	有り
転炉	炉口、炉周系 (溶銑鍋、溶鋳鍋)、転炉ガス	有り	有り
均熱炉	排気ガス	有り	燃料による
加熱炉 ボイラー	排気ガス 排気ガス	有り 有り	燃料による 燃料による

(注)「鉄鋼界」1974年7月号に基づき作成

第3図 鉄鋼業における環境対策

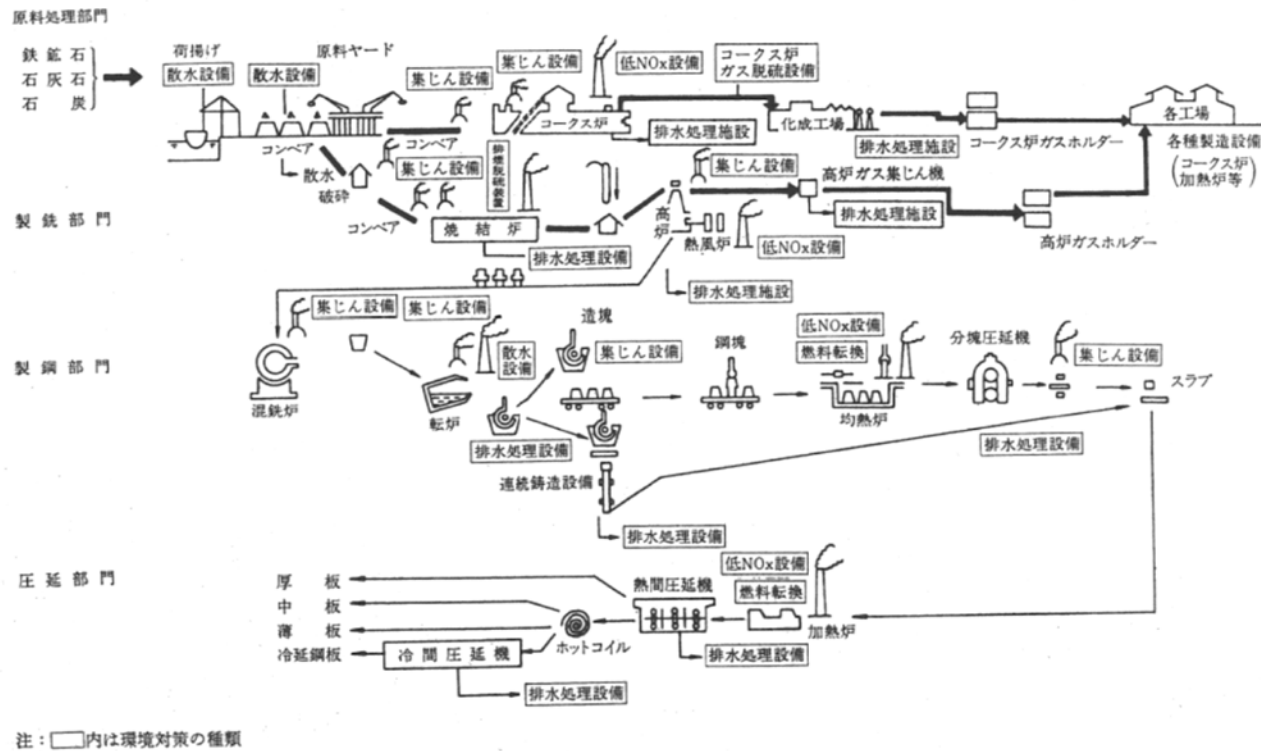


図 3-1 鉄鋼業の環境対策 (出典:「鉄鋼界」昭和59年7月号)

3.1 焼結工程

SO_x、煤塵については、対策が講じられ、排出抑制が進展しているが、他方で NO_x 対策についてはさらに効果的な対策で抑制することが強く求められている。

製鉄所における主要 NO_x 発生源は焼結機、コークス炉、加熱炉、ボイラーであるが、取り分け焼結機が全体の 20~40%を排出しており、焼結機が主要な NO_x 排出源となっている。

焼結機は高炉投入原料である焼結鉱の製造設備である。焼結鉱の品質は高炉の操業、生産性に影響を及ぼすため、品質改善が図られてきた。また高炉の大型化に伴い、焼結機も大量生産に適したドワイトロイド (DL) 式が主流となり、逐次、パレット幅の拡大と機長の延長による焼結面積の拡大による大型化が図られてきた (図 3-2)。

設備として、原料槽、1次、2次ミキサー、配合原料サージホッパー、床敷ホッパー、点火炉、パレット、ウインドボックス(風箱)、主排風管、集塵機 (ESP)、シタリングファン (主排風機)、煙突、1次、2次クラッシャー、コールドスクリーンにより構成されている。

原料としての鉄鉱石、コークス、石灰石が1次、2次ミキサーで混合される。この過程で水分を添加し、造粒される。造粒された1~8mm程度の原料粒子は疑似粒子と呼ばれる。造粒原料は給鉱部の配合原料サージポッパーより焼結機のパレットへ装入され、原料層を構成している。パレットには車輪が取り付けられ、数メートルの長さの車両が連結されており、レール上を排鉱部の1次クラッシャー側へ水平移動している。原料層の上部より下部に空気を吸引し、点火炉バーナにより原料層の上面が着火され、原料中に混合されたコークスが順次上面より下面へ燃焼していく。この過程で、原料鉄石の焼結反応、熔融反応が促進され、気孔率の高い焼結鉱が生成される。生成された焼結鉱は排鉱部の1次クラッシャーで破碎される。赤熱コークスはクーラーで冷却された後、2次クラッシャーで破碎され、コールドスクリーンで篩にかけられ、粒径5mm以下(-5mmと記す)の細粒は返鉱として原料槽へ供給され再利用される。粒度調整(+5mm)された焼結鉱は高炉原料として高炉に投入される。尚、一部は床敷ポッパーより、パレット底部のグレート面に装入される。

焼結機上面より吸引された空気は原料と燃焼反応後、下部のウインドボックスより集塵機、主排風機を介して煙突より大気中へ排出される。焼結排ガス中には、大気汚染物質の煤塵、SO_x、NO_x、ダイオキシン類(Dioxins)が含まれている (表 3-2)。

焼結鉱の生産により焼結鉱1トン当たり1,500~2500Nm³以上と大量の排ガスを排出する。

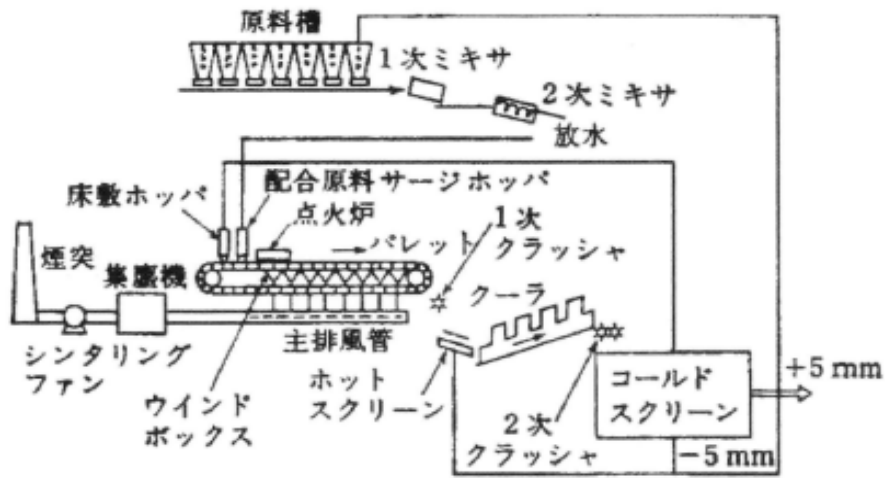


図 3-2 DL 式焼結機系統図

(出典：一般社団法人日本鉄鋼協会「鉄鋼便覧」)

表 3-2 焼結排ガス中有害物質

有害成分	排出濃度
Dust	0.5~3g/Nm ³
SOx	400~1,000mg/Nm ³
NOx	300~700mg/Nm ³
DXN 類	0.5~5ngI-TEQ/Nm ³

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

3.2 焼結機の操業管理

3.2.1 管理目標

主要な管理項目は次の3項目である。

(1) 製品品質

管理項目、目標水準は原料、設備、高炉操業の条件により必ず一定していないが、一例を表 3-3 に示す。

(2) 燃料原単位

点火炉の燃焼技術の改善が図られている。点火炉の表面層での均一着火と安定が可能となるバーナが開発実用化されている。

(3) 生産性

原料配合事前処理、装入方法、焼結ベッドの吸引風量、焼結ベッドの移動速度、燃料原

単位の最小化が重要な項目である。

表 3-3 焼結鉄製品品質管理目標

焼結鉄製品品質管理項目	目標水準
落下強度(シャッタ強度)	+10 mm% 83~90%以上
回転強度(タンブラ強度)	+10 mm% 60~70%以上
還元粉化指数 (RDI)	-3 mm% 35~45%以下
塩基度のバラツキ	CaO/SiO ₂ の 日内 $\sigma \leq 0.05 \sim 0.1$
製品粒度 (-5 mm)	-5 mm% 5%以下
製品中 FeO [%]	5~9%
被還元性 (学振法)	還元率 60~65%以上

(出典：一般社団法人日本鉄鋼協会「鉄鋼便覧」)

3.2.2 操業管理

工程に従って次の 4 項目が挙げられる。これらの操業管理に必要な項目が監視、管理されている。表 3-4 に焼結機操業データの一例を示す。

(1) 原料混合予備処理

配合原料の焼結ベッドの通気性、焼結後の強度、粒度、製品成分のバラツキの減少が主な管理項目である。原料の配合割合の一例を表 3-5 に示す。

表 3-4 焼結操業データ例

項 目		実績値の例		項 目		実績値の例	
本体	パレット幅 W	[m]	4.0	シ ン タ ミ ッ ク ス	鉄石配合率 O	[%]	59.4
	有効機長 L	m	80.0		焼結粉配合率 (R_2)	"	5.3
	有効面積 $W \times L$	[m ²]	320.0		石灰石配合率 (LS)	"	10.3
主 併 風 機	吸引風圧 ΔP	[-mmH ₂ O]	1,600		返鉄配合率 (R_2)	"	21.3
	吸引風量 V	[Nm ³ /min]	16,000		粉コークス率 C	"	3.7
	排気温度 T	℃	120		計	"	100.00
	生産量(日産) Pr	[t/d]	11,040		配合原料平均粒径 DM	[mm]	2.4
生 産 構 造 次	生産比 PM	[t/h]	437.3		水分 $Moist$	[%]	6.0
	挿入層圧 h	[mm]	450.0		製品平均粒径 D_s	[mm]	18.6
	パレットスピード u	[m/min]	4.00		粉率 -5mm	[%]	4.5
	挿入密度 d	[t/m ³]	1.80	回転強度 TI	[+10mm%]	63.0	
	シンタケーキ歩留り η_1	[%]	89.7	落下強度 SI	"	85.2	
	製品/シンタケーキ η_2	"	69.4	低温還元粉化率 RDI	[-3mm%]	33.8	
	稼働率 r	"	95.0	原 料 ・ 製 品 性 状	化学成分 $T.Fe$	[%]	56.6
歩 留 り	焼結歩留り β	"	90.0		FeO	"	8.77
	鍋歩留り π	"	70.1		SiO ₂	"	5.58
	製品歩留り α	"	76.1		Al ₂ O ₃	"	1.95
原 単 位	新原料原単位 OR	[kg/t-sinter]	1,111.0		CaO	"	10.17
	粉コークス原単位 k	"	55.0		MgO	"	1.21
	点火ガス原単位 i	Nm ³ /t-sinter	9.0		TiO ₂	"	0.29
	床敷鉄原単位 b	[kg/t-sinter]	126.0		CaO/SiO ₂	"	1.82
	返鉄原単位 r_1	"	315.0		[CaO+MgO]/SiO ₂ +Al ₂ O ₃	"	1.51
	焼結粉原単位 r_2'	"	79.0				

(出典：一般社団法人日本鉄鋼協会「鉄鋼便覧」)

表 3-5 原料配合例

		A	B
新 原 料	ブラジル	29	20
	オーストラリア	27	32
	ゴア	8	5
	南アメリカ	6	9
	スケール	3	2
	砂鉄	0	4
	高炉ダスト	1	1
	その他	12	14
	石灰石粉	14	13
	計	100	100
返 鉦		28	32
コークス		5.1	4.7

(出典：一般社団法人日本鉄鋼協会「鉄鋼便覧」)

(2) 装入、点火、焼成

パレットへの装入時の粒度偏析が生じないようにパレットへ装入されているか。点火は層上面に均一に着火し、安定しているか、ベッドに異常なクラック、収縮は見られないか、排鉦部でのむら焼き、焼残りはないかなどが管理されている。

(3) 冷却、製品粒度調整

排鉦部から排出されるシンターケーキ（パレット上で焼成された後の固形分）は大塊が含まれており、1次クラッシャー、クーラー、2次クラッシャーにより破碎され、コールドスクリーンにより篩にかけられ、粒度が調整される。(図 3-3)

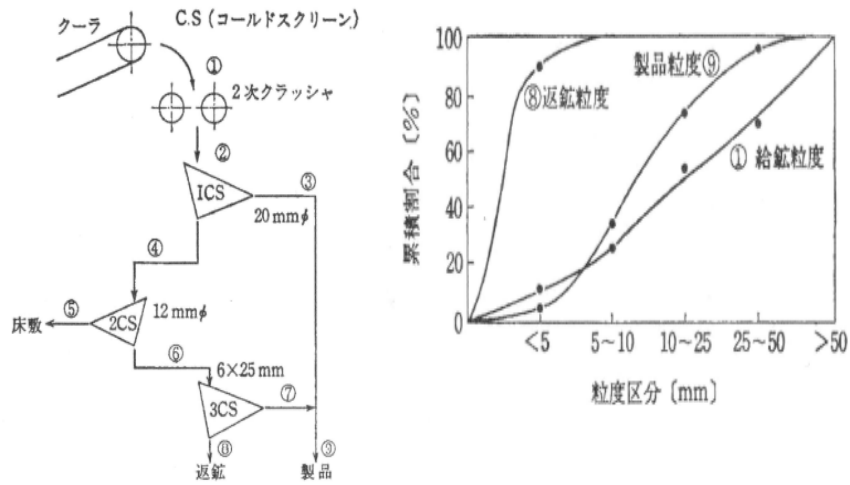


図 3-3 製品ふるい分けフローと粒度の一例

(出典：一般社団法人日本鉄鋼協会「鉄鋼便覧」)

(4) 排ガス処理

主排風機でウインドボックスより吸引された排ガスは、高効率電気集塵機で粉塵が除塵され、主排風機の後段に設置される脱硫装置で SO_x が 80~90% 以上除去され、煙突より大気中へ放出される。(排ガス脱硝装置は SCR と乾式脱硫脱硝装置が世界で数十例設置され稼働している。

(5) 総合的自動運転管理

上記の4項目に加え、工程全体を対象とした自動運転システムで効率的に運転管理を行っている。自動運転システムの一例を図 3-4 に示す

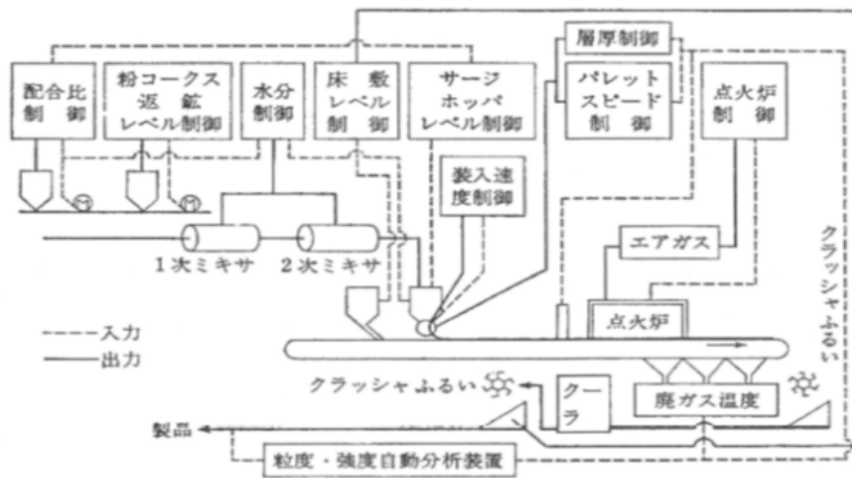


図 3-4 総合自動運転システム例

(出典：一般社団法人日本鉄鋼協会「鉄鋼便覧」)

3.3 焼結工程における窒素酸化物生成と抑制

焼結工程で発生する窒素化合物 (NO_x) は NO、NO₂ であり、NO が 95%以上と大部分を占めている。大気中に放出されると徐々に酸化されて NO₂ に転化する。

NO の発生は、空気中の窒素と酸素が高温で燃焼反応し発生する Thermal NO_x と燃料、原料中の有機窒素化合物が起源となる Fuel NO_x に大別される。焼結過程における NO_x は実験、理論シミュレーションにより、Fuel NO_x が支配的であることが確認されている^{9 10}。

焼結装入層の進行状況は乾燥、燃焼、熔融、焼結の過程を経て焼結鉱が生成される(図 3-5、図 3-6)。この間での NO_x は焼結酸化ゾーン(酸化帯)で生成し、還元ゾーン(還元帯)で減少する。

焼結過程の Fuel NO_x 発生起源はコークス含有窒素と原料鉄鉱石中の窒素であるが、コークス窒素が支配的である。コークス中の窒素は N、NH、NH₂、NH₃、CN、HCN に分解し、酸化帯で酸素と反応し、 $N+1/2O \rightarrow NO$ により NO_x を生成する。(図 3-5、図 3-6)

しかし降温過程から火炎内の酸素分圧が低い還元帯では、再結合反応の $N+N \rightarrow N_2$ 、 $NH+NH \rightarrow H_2+N_2$ などにより生成が抑制される(図 3-5)。

⁹ 高松信彦、栗原喜一郎、斎藤元治、加来久典 (2011) 製鉄技術開発の歩みと今後の展望 新日鉄技報、第 391 号 79、P82~83

¹⁰ 飯野吉嗣、相馬冬樹、橋本邦俊 (2004 年 12 月) . 製鉄所における環境への取り組み JFE 技報, No.6

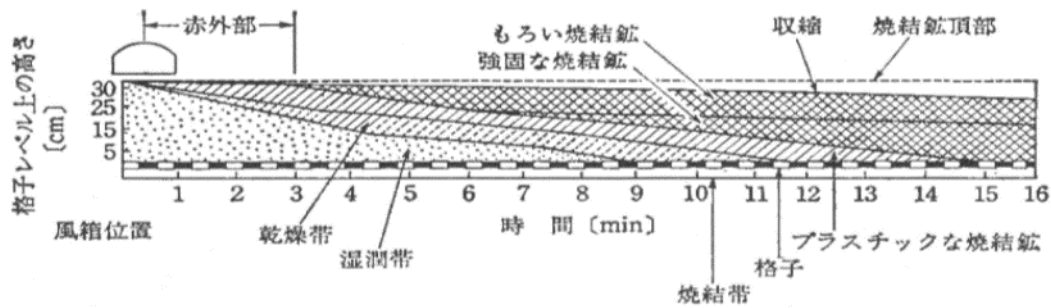


図 3-5 焼結進行状況

(出典：一般社団法人日本鉄鋼協会「鉄鋼便覧」)

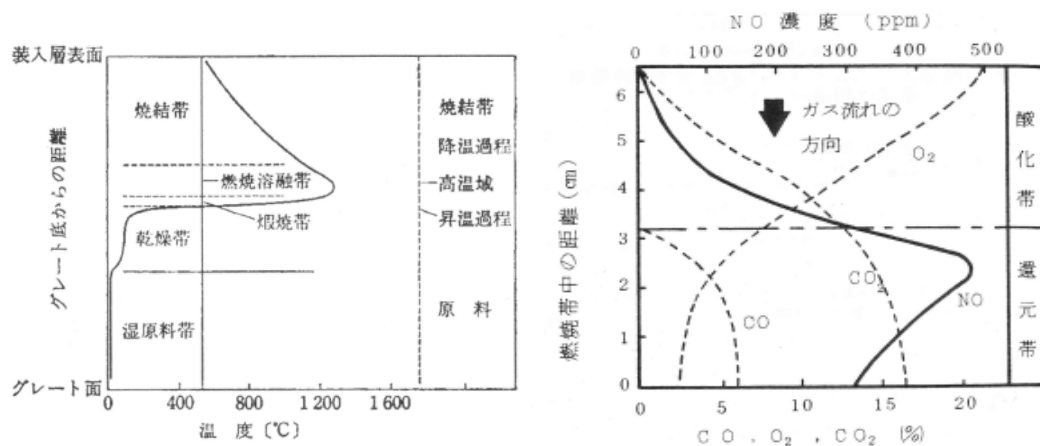


図 3-6 装入層の代表的な温度曲線

図 3-7 焼結燃焼帯のガス分布 (コークス 4%)

(出典：一般社団法人日本鉄鋼協会「鉄鋼便覧」) (出典：鉄と鋼 '77 - S52)

焼結機の焼結過程の NOx 排出マップ (原料装入部から排鉱部に至るウインドボックスの NOx 濃度プロファイル) を作成し、発生状況を把握することは抑制対策を検討する上で重要な情報となる。

NOx の発生量は焼結機長 (焼結機の長さ) の前段 1/4 当たりのウインドボックスでピークとなり、その後漸減していく。他方、SOx は排ガス温度が高温になる中央当たり以降からピークを経て漸減する (図 3-8)。H₂O、O₂、CO₂、CO は図 3-9 のようなプロファイルを示す。

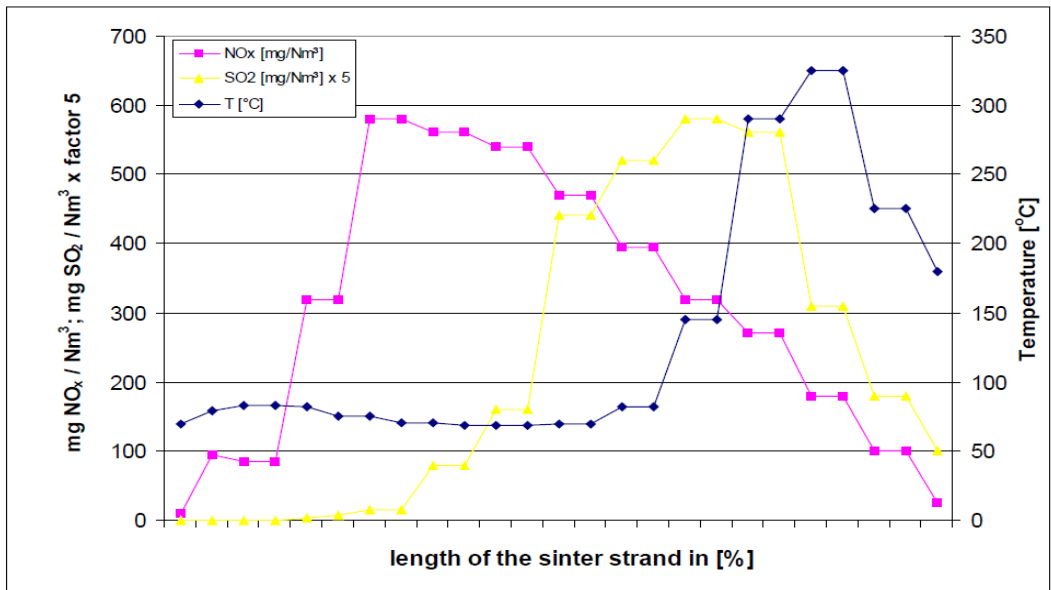


Figure 4.8: Typical emission profile of SO₂ and NO_x in the waste gas (individual wind-boxes) and the temperature curve along the sinter strand - based on [Neuschütz, 1996]

図 3-8 焼結機のガス、温度プロファイル

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

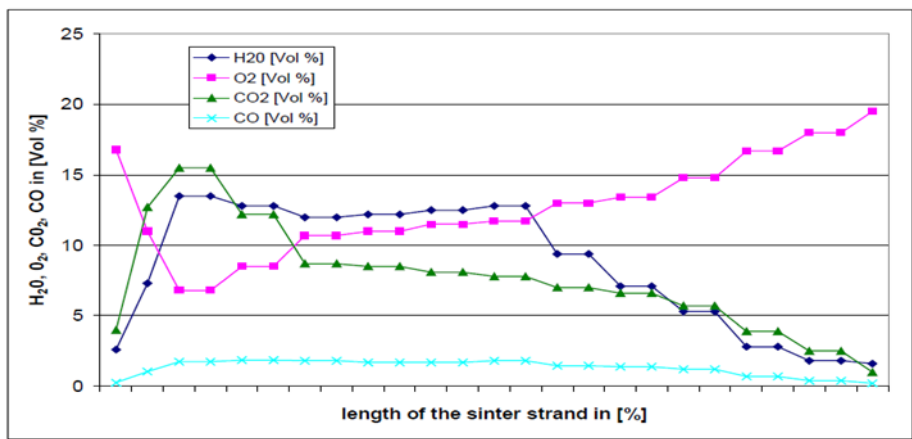


Figure 4.5 : Typical emission profile of CO₂, CO, O₂ and H₂O in the waste gas (single windboxes) along the sinter strand - based on [Neuschütz, 1996]

図 3-9 焼結機のガスプロファイル

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

NOx 削減対策を講じるにあたり、最初に NOx 低減化の手順を確立することが求められる。手順確立においては投入コストと NOx 低減効果を評価し、目標の達成を図ることが重要である。

具体的には最初に現状での焼結機の排ガス NOx 排出量を調査・把握し、次に達成すべき NOx 排出目標値を設定する。調査の結果より発生要因を分析、評価し、その要因に効果的な対策を実施する。目標値達成まで前述の対策より、低コストで効果のある対策を順次行い、目標を達成する(図 3-10)。

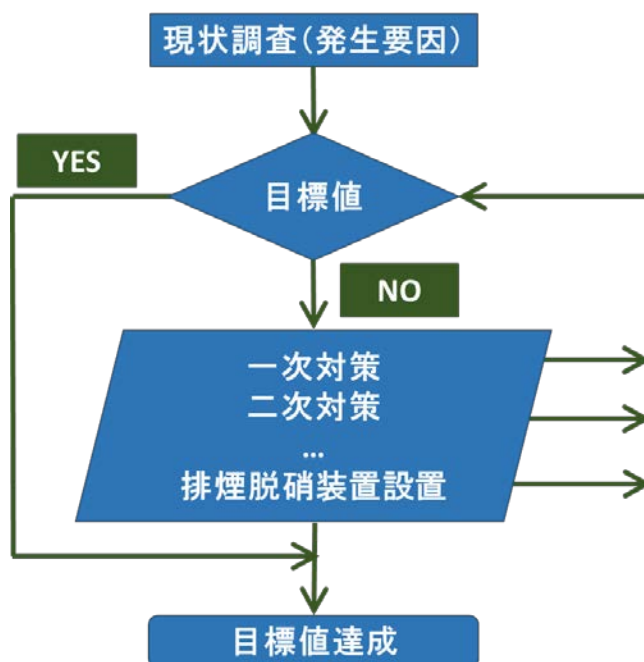


図 3-10 NOx 低減化フロー

4 大気中の窒素酸化物制御技術及び適用範囲

鉄鋼業における NOx 抑制技術は図 4-1 に示されるように発生そのものを抑制する抑制発生技術と、発生後の排煙脱硝技術に大別される。これらの技術を用い、NOx が発生する設備の発生メカニズムに応じて適切に対策を講じることが求められる。

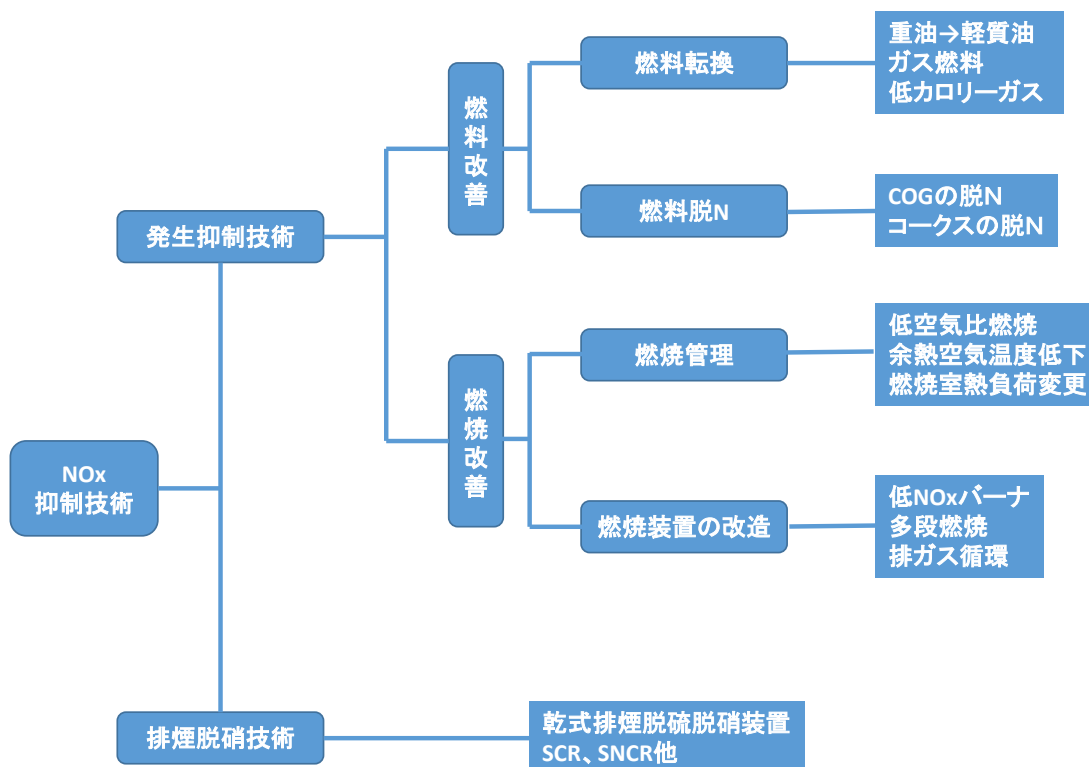


図 4-1 鉄鋼業の NOx 抑制技術

4.1 各設備の窒素酸化物抑制対策と効果

製鉄工程における主な NOx の発生源は焼結機、コークス炉、加熱炉、ボイラーである。取り分け焼結機が全体の 20~40%を排出しているため、焼結機への NOx 抑制対策が製鉄所全体の NOx 抑制に大きく寄与する。

各設備の主な NOx 抑制対策と効果を表 4-1 に示す。

製鉄所における現状を把握し、それを踏まえて、表 4-1 に示されるような対策を的確に講じることが大切である。^{11 12 13}

¹¹ 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

¹² 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)

¹³ European Commission, 2012; Guidance document on control techniques for emission of sulfur, NOx, VOCs, dust (including PM10 , PM2.5 and black carbon) from stationary sources

さらに、上述の低減対策に付随して、省エネルギー、省資源対策についても NOx 低減効果が期待される。主な対策は次のとおり。

- 排熱回収システム
- 排ガス循環システム
- 設備の改善（漏風防止対策など）

表 4-1 鉄鋼業の主な NOx 発生設対策と効果

設備名	主発生メカニズム	抑制対策	効果	備考
焼結機 ¹⁴	Fuel-NOx	低窒素コークスの使用	N 含有比率低下に比して低下	低窒素粘結炭の確保が必要
		石灰石の添加 ^{15 16 17}	効果あり	石灰石による NOx 発生抑制
		点火ラインバーナの改善 ¹⁸		
		排ガス循環 ^{19 20}	25~40%削減	省エネ効果：循環排ガス 循環ガス量 25~50%
		乾式排煙脱硫脱硝装置	脱硝性能： 一段処理約 40% 二段処理約 80%	1999 年より実用化 ダスト、NOx、SOx、 ダイオキシン他有 害物質同時除去
		選択触媒脱硝装置 (SCR) ²¹	脱硝性能： 80~90%	1970 年代実用化
コークス炉	Thermal-NOx	低 N 石炭の使用	効果あり	
		燃焼装置の改善 低 NOx バーナ	効果あり	

¹⁴ 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

¹⁵ 菅原ほか(1976). 鉄と鋼, 62(11), S420

¹⁶ 肥田ほか (1977). 鉄と鋼, 63(4), S53

¹⁷ Yan-guang Chen, Zhan-cheng Guo,Zhi Wang, and Gen-sheng Feng(April 2009). NOx reduction in the sintering process International Journal of Minerals, Metallurgy and Material,sol.16 No.2, 143

¹⁸ 高松信彦、栗原喜一郎、斎藤元治、加来久典： 制鉄技術开发的进程及今后的展望 新日铁技报、第 391 号 (2011)

¹⁹ [鉄鋼便覧] 一般社団法人日本鉄鋼協会

²⁰ Yan-guang CHEN, Zhan-cheng GUO& Zhi WANG(2008). Application of Modified Coke to NOx Reduction with Recycling Flue Gas during Iron Ore Sintering Process ISIJ International ,Vol.48 No.11, 1517—1523

²¹ Sumarry report: Reserch on Technical Pollution Prevention Option for Iron Sintering, The Canadian of Ministers of the Environment(CCME), N0v.27, 2003, page7

		多段燃焼 排ガス循環	効果あり 効果あり	
加熱炉	Thermal NOx	低 NOx バーナ リジェネバーナ	効果あり NOx 約 30ppm	蓄熱式で超低 NOx 燃焼 燃料消費量約 25% 削減
均熱炉	Thermal NOx	低 NOx バーナ ²² リジェネバーナ	NOx120 ppm 以 下	

注記:コストについては情報入手不可能のため記載できない。

【注記事項】コスト分析はメーカーマターであり、情報の入手は不可能である。従って、コスト分析は不可能のため、表 4-1 にコスト分析は記述していない。

4.2 省エネルギー対策について

高炉容積の大型化に対応して、焼結機も大型化した。主にパレット幅拡大と機長延長を組み合わせ、焼結面積の拡大が実用化された。1971 年に新日鉄君津 3 焼結機の焼結面積 500m² (5m×100m) が稼働し、その後大型化が広く普及していった。同大型焼結機には当時の最新鋭技術が織り込まれていった。当時導入されたのは次のとおり。

- ① 500mm 超の高層厚操業に対応した高負圧ブロワ (-19.6kPa) の設置
- ② 焼結機の稼働率向上に欠かせない成品系統稼働率安定化の為に系統 2 系列化²³
- ③ 省エネ対策として排熱回収システム (図 4-2)、排ガス循環システム (図 4-3)

焼結機は高炉に次ぐエネルギーの多消費設備である。図 4-4 に示されように消費熱量の約 26% が焼結鉬の顕熱として、23% が主排ガス顕熱として排出されている。これに対し、③が導入された。

²² 中川二彦 (1998.7). 低 NOx 蓄熱式バーナシステムの開発 伝熱研究, 34-39

²³ 高松信彦、栗原喜一郎、斎藤元治、加来久典(2011). 製鉄技術開発の歩みと今後の展望 新日鉄技報,第 391 号 79,82,83

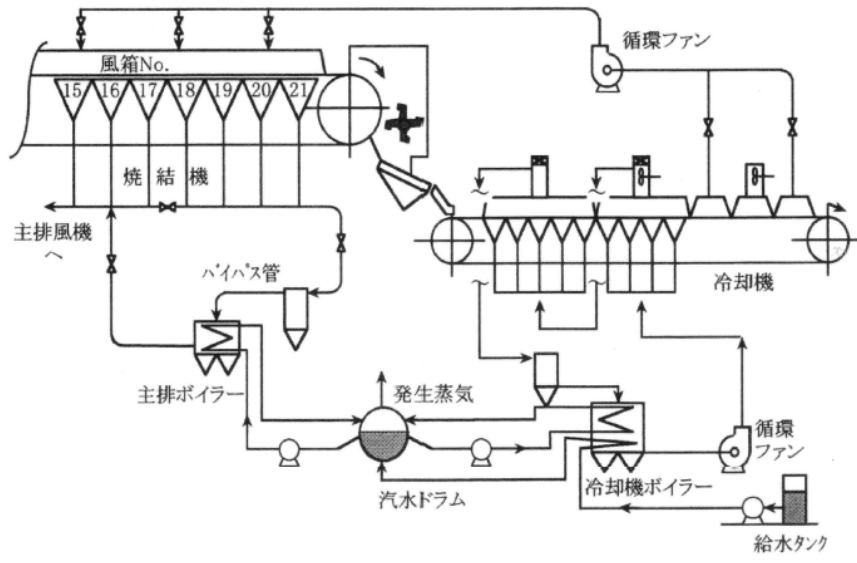


図 4-2 焼結排ガス顕熱回収設備フロー例

(出典：[鉄鋼便覧] 一般社団法人日本鉄鋼協会)

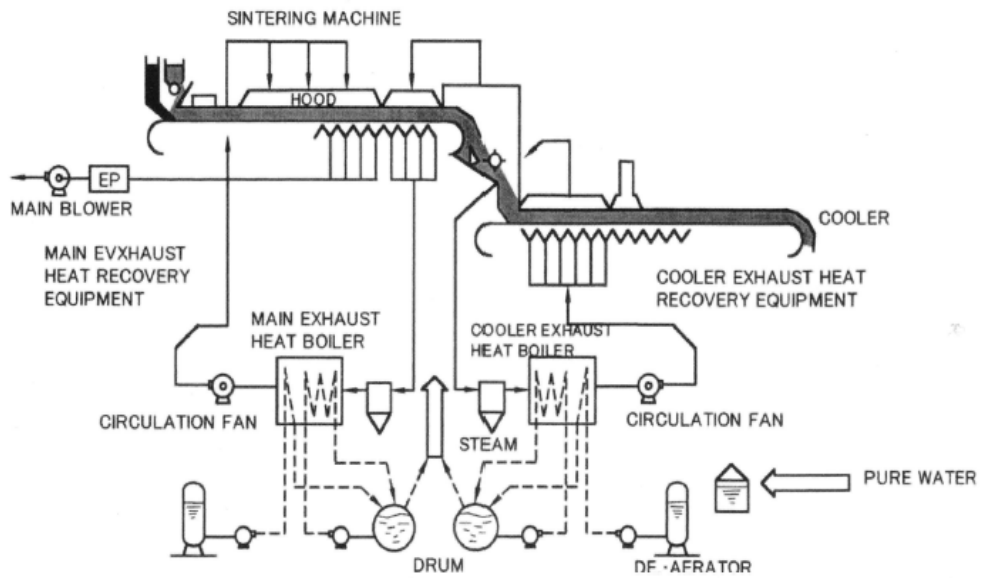


図 4-3 排ガス循環システム例

(出典：[鉄鋼便覧] 一般社団法人日本鉄鋼協会)

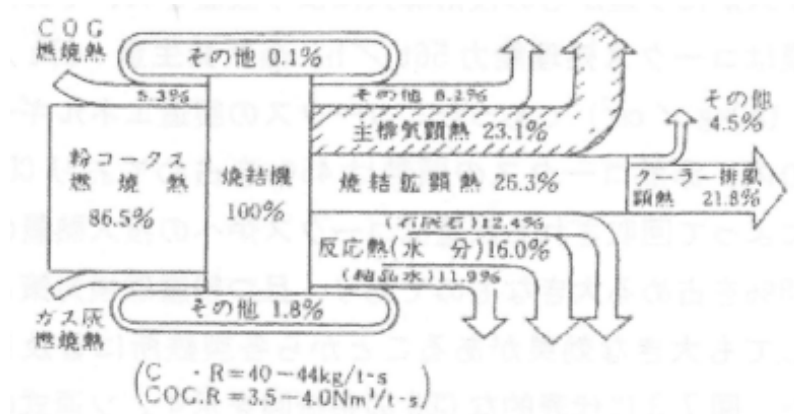


図 4-4 焼結プロセスの熱バランス

(出典：彼島秀雄 (2010.3). 高炉技術の系統化 国立博物館技術の系統化調査, 第15集)

高炉に次ぐエネルギー多消費の焼結機の省エネ・省コスト削減対策として進められたのは、点火炉の効率化によるコークス炉ガス(COG)原単位削減であった。点火炉バーナの改善により、点火炉 COG 原単位が焼結鉱 1 トン当たり 1976 年の $7\text{m}^3\text{N}$ から $1\sim 2\text{m}^3\text{N}$ へと大幅に改善した (図 4-5)。点火バーナ形式はスリットバーナ、面バーナ、ラインバーナ等各社特徴のある方式が導入されている (図 4-6)。新日鉄広畑 1 焼結機では 1988 年に COG 原単位 $0.48\text{m}^3\text{N}/\text{t}$ と非常に低い値を達成している。²⁴

また、電力原単位の低減については、電力消費の大半を占める主排風機ブロワーの高効率三次元翼への改善、風量変化に適応した回転数制御を導入し、電力原単位の低減を図っている。

²⁴ 高松信彦、栗原喜一郎、斎藤元治、加来久典(2011). 製鉄技術開発の歩みと今後の展望 新日鉄技報, 第 391 号 79,82,83

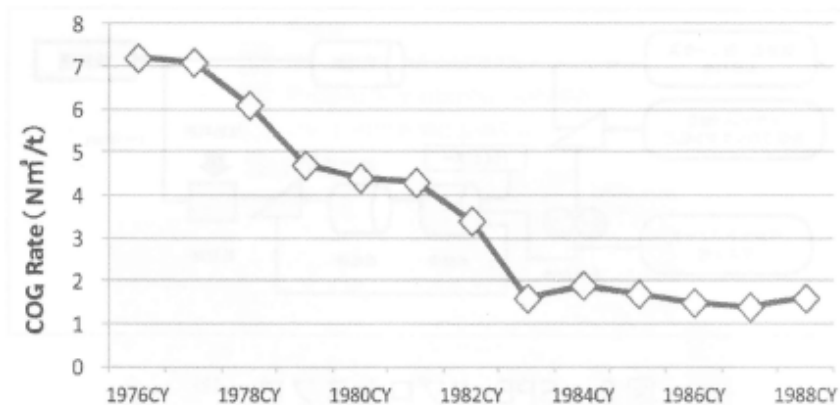


図 4-5 点火炉 COG 原単位推移例

(出典：高松信彦、栗原喜一郎、斎藤元治、加来久典(2011). 製鉄技術開発の歩みと今後の展望 新日鉄技報, 第391号 79,82,83)

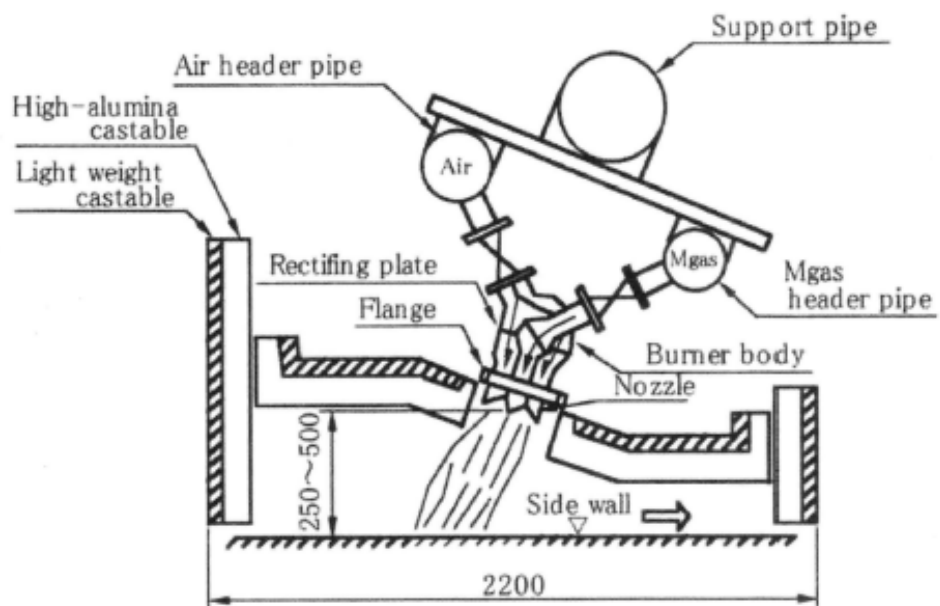


図 4-6 点火炉ラインバーナー

(出典：[鉄鋼便覧] 一般社団法人日本鉄鋼協会)

4.3 焼結機の窒素酸化物発生抑制・低減対策

4.3.1 焼結機の排ガス脱硝設備

1974年に川崎製鉄千葉製鉄所第4焼結機、1979年にNKK（日本鋼管）京浜製鉄所第1焼結機に選択的接触還元法（SCR）が実機導入され、稼働が開始した（図4-7）。^{25 26}

また、1987年に活性炭式乾式脱硫脱硝設備が新日鉄名古屋3製鉄所第1、第2焼結機に導入された。²⁷ これらの二つの方式が国内各製鉄所で実機として稼働している（表4-2）。

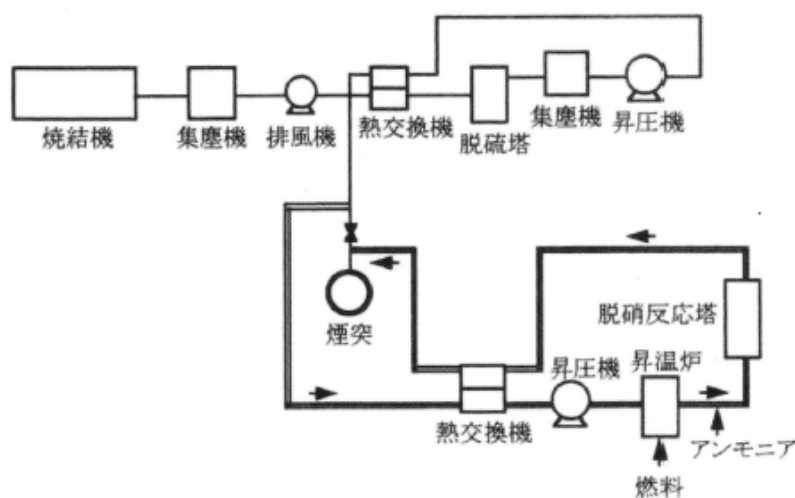


図 4-7 NKK 選択的接触触媒還元法（NKK 京浜）

*SCR 海外の実施例

China Steel Taiwan. 焼結 No3&4 1977年, No1 1999年 → NO_x 除去効率 80%以上
EU、USA では実施例なし（2010時点）

(出典 : Guidance document on control techniques for emission of sulfur , NO_x, VOCs, dust
(including PM₁₀, PM_{2.5} and black carbon) from stationary sources

²⁵ 飯野吉嗣、相馬冬樹、橋本邦俊 (2004.12). 製鉄所における環境への取り組み JFE 技報, No.6

²⁶ 彼島秀雄 (2010.3). 高炉技術の系統化 国立博物館技術の系統化調査, 第15集

²⁷ 住友の乾式脱硫脱硝装置, 住友重機械工業株式会社(技術パンフレット)

表 4-2 製鉄所焼結機脱硝装置

選択触媒脱硝装置(SCR)

製鉄所名	プラント名	除去対象物質	運転開始年
川崎製鉄千葉製鉄所	No.4 焼結機	NOx	1974
NNK 京浜製鉄所	No.1 焼結機	NOx	1979

活性炭式乾式排煙脱硫脱硝装置

製鉄所名	プラント名	除去対象物質	運転開始年
新日本製鉄(株)名古屋製鉄所	No.4 焼結機	SOx、NOx、DUST	1999
新日本製鉄(株)大分製鉄所	No.1 焼結機	SOx、NOx、DUST、DXN's	2003
POSCO 浦項製鉄所	No.3 焼結機	SOx、NOx、DUST、DXN's	2004
"	No.4 焼結機	SOx、NOx、DUST、DXN's	2004
新日本製鉄(株)君津製鉄所	No.3 焼結機	SOx、NOx、DUST	2004
(株)神戸製鋼所加古川製鉄所	焼結機	SOx、NOx、DUST、DXN's	2009
山西太源不銹鋼股份公司	No.2 焼結機	SOx、NOx、DUST、DXN's	2010
"	No.3 焼結機	SOx、NOx、DUST、DXN's	2010

注)文献調査により調査した日本国内の入手可能な情報より作成

* 乾式排煙脱硫脱硝装置海外実施例

Blue Scope Steel Port kembla Steel Works No3 Sinter Plant Australia

EU、USA 実施なし (2010 年時点)

(出典：住友の乾式脱硫脱硝装置, 住友重機械工業株式会社(技術パンフレット)、

Guidance document on control techniques for emission of sulfur, NOx, VOCs,

dust(including PM10,PM2.5 and black carbon) from stationary sources)

4.3.2 焼結機排ガス循環システムによる窒素酸化物低減効果

排ガス循環技術は熱回収の高効率化と省エネルギーの向上と粉じん、SOx、及び NOx の排出を低減できる環境対策技術として開発、実用化が進められ、下記の手法が実用化されている。

- ① 焼結ケーキの冷却排ガスを焼結機ベッド上に完全循環する方法
- ② 主要排ガスの一部を循環する方法
- ③ 焼結機排鉞側の排ガスと焼結機前部排ガスとを混合して循環する方法

排ガス循環実施の一例を表 4-3 に示す。循環ガス流量比率 23%で、主排ガス流量は 20~30%減少し、排熱回収量 30%増加、SOx 排出量 3~10%減少、EP (電気集塵機) 入

ロダスト（粉じん）濃度 30%減少し、加えて NOx 排出量も 3~10%減少している。

環境対策技術による焼結鉱品質（TI、RDI）、生産性は変化なしと報告されており、省エネ、環境対策として有効な対策であると評価されている。

表 4-3 排ガス循環システム実施の成果一例

項目	操業結果
循環ガス流量比率	23%
主排ガス流量	20-30% 減少
排熱回収量	30% 増加
SOx 排出量	3-10% 減少
NOx 排出量	3-10% 減少
E.P. 入口でのダスト濃度	30% 減少
焼結鉱品質 (T.I., R.D.I.)	変化なし
生産性	変化なし

(出典：[鉄鋼便覧] 一般社団法人日本鉄鋼協会)

*海外の実施例（他例は 4.5.1 を参照）

Voestalpine, Linz, Austria No.5 焼結プラント

循環ガス流量比率 約 40%

SOx 排出量 25~30%減少 NOx 排出量 25~30%減少

(出典：Guidance document on control techniques for emission of sulfur, NOx, VOCs, dust(including PM10,PM2.5 and black carbon) from stationary sources)

4.3.3 低窒素コークス使用による窒素酸化物低減対策

焼結過程において発生する NOx のほとんどは、コークス中の窒素に起因する Fuel NOx であり、Thermal NOx の寄与は極めて少ないことが確認されている。²⁸ 従って、焼結過程において発生する NOx を抑制する方法としては、低窒素コークスを使用する方法が効果的である。

*海外の実施例

世界の各焼結プラントで実施されている。²⁹

²⁸ 経済産業省（2011年）. 石炭高度転換コークス製造技術開発プロジェクト（SCOPE21）の追跡評価

²⁹ Guidance document on control techniques for emission of sulfur, NOx, VOCs, dust(including PM10,PM2.5 and black carbon) from stationary sources

4.3.4 焼結機の漏風防止対策による間接的 NO_x 低減

省エネルギー効果のある対策は間接的に、電力使用量の低減につながっている。焼結機のパレットやサイドウォールなどの設備面を中心に漏風防止対策を講じることにより、排ガス量の減少、燃料の低減が図られ、間接的に NO_x の低減が可能となる。

【漏風量の把握】

- 漏風位置の確認：パレット周り、ダストダンパー、電気集塵機、主排風機、ガスダクト
- パレット周り：サイドウォール継部、パレットの間隙、エアシール部、デッドシール部
- 漏風量の測定：熱線風速計及び酸素濃度計
- 主な漏風箇所は一般的にパレット台車(Pallet Truck)とパレット台車の焼結機摺動部(Dead Plate)である。パレット台車では原料層の空洞(Rat Hall)と Air Seal Bar 部で漏風が発生し、この部分で漏風量全体の約 80%を占めている。

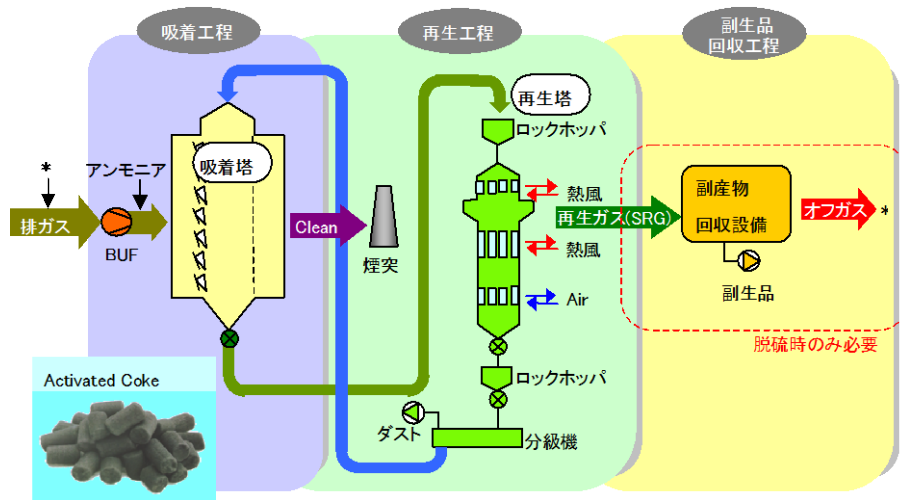
【対策手法】

パッキンの挿入、シールによる閉塞、ゴムメタルタッチなど

4.3.5 Activated Coke Method

■技術概要

排ガス中の SO_x、NO_x、ダイオキシン、ダスト及び水銀等の汚染物質を、粒状に成型された活性コークス（Activated Coke：以下 AC）の働きにより除去する装置であり、ACの移動層で汚染物質を除去する吸着工程、吸着能力が低下した AC を再生する再生工程にて構成され、ACは両工程間で循環使用される。脱硫を行う場合、ACの再生により発生する高濃度 SO₂ ガスは、副産品回収工程にて、硫酸や石膏などで回収することが可能である。



■特長

- (1) 脱硝他、脱硫・脱ダイオキシンなど複数汚染物質を除去できる。
- (2) 排ガスの温度降下はほとんどないため再加熱が不要である。
- (3) SO₃除去で、耐腐食性材料や煙道ライニングが不要である。
- (4) 選択接触還元法（SCR法）と異なり、触媒の寿命管理が不要である。
- (5) 用水の確保が困難あるいは排水が困難な状況に対応できる。
- (6) 既設への適用の場合、改造が少なく容易である。
- (7) 廃棄物がほとんど発生しない。

■運転管理

- (1) 補給用の AC 及びアンモニアが必要である。
- (2) 分級機で分離したダストの主成分は AC 粉のため、ボイラ等の燃料に使用することが可能である。
- (3) 再生用熱風は熱風炉にて発生する。燃料はコークス炉ガス（COG）・軽油等である。

■特性

- 処理ガス温度：180℃以下（排ガス中の酸素濃度による）
- 脱硝効率：40～80%
- 脱硫率：99%以上（入口濃度 1000ppm 以下）
- 脱 DXN：0.1ng-TEQ 以下（入口 5ng-TEQ/m³N 以下）
- 脱塵：20-30mg/m³N 以下（入口 100mg/m³N 以下）

■保守管理

吸着塔・再生塔には可動部がなく、その他も汎用機器で構成されるため、特殊な保守管理が不要である。

■納入実績

【日本】石炭火力発電所（～600MW）・重油火力発電所・清掃工場・セメント工場

【ドイツ】石炭火力発電所

【米国】石炭火力発電所における実証試験設

■連絡先

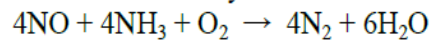
ジェイパワーエンテック株式会社

4.3.6 SO_x & NO_x reduction using SCR

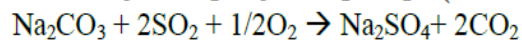
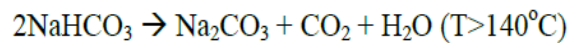
Description:

SO_x and dioxins contained in the sinter flue gas are removed in this process by adding sodium bicarbonate and Lignite.

NO_x is removed by the selective catalytic reduction reaction at around 200~450°C:



For SO_x removal the reactions are:



Lignite Injection produces dioxin < 0.2 ng-TEQ/Nm³.

Energy/Environment/ ~ost/Other Benefits:

- High SO_x and NO_x removal efficiency

Block Diagram or Photo:

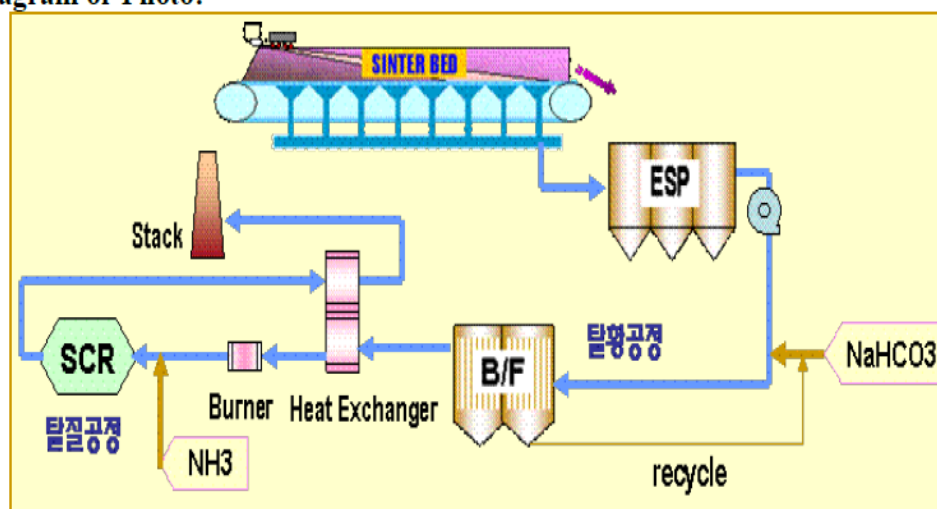


Figure 1.5: NO_x and SO_x removal using selective catalytic reduction

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 SO_x, NO_x 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 SO_x(>70%), NO_x(>95%) and HCl(>99%)
- Dioxin also decreased to less than 0.2 ng-TEQ/Nm³

Block Diagram or Photo:

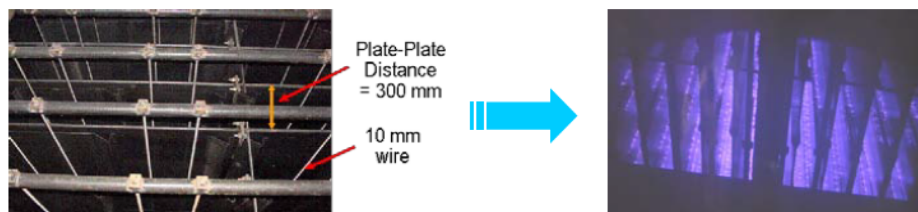
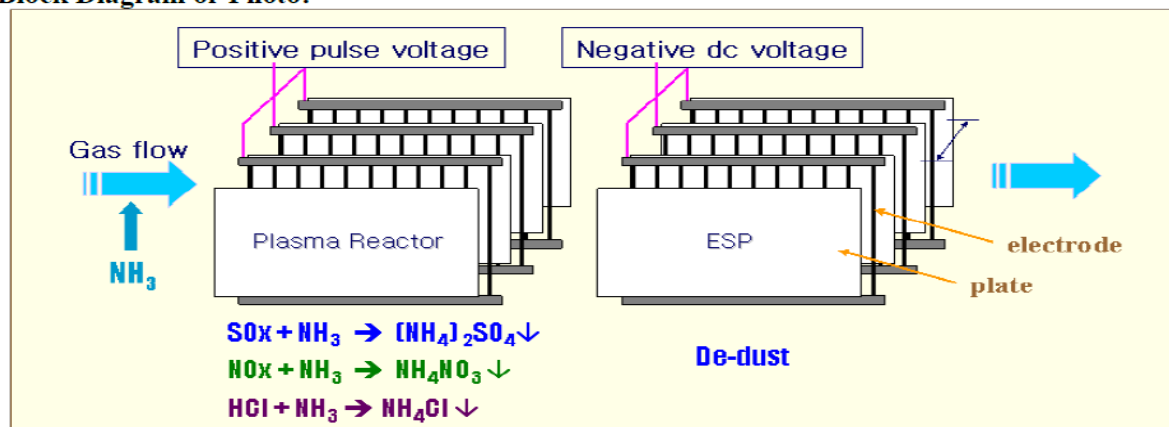


Figure 1.6: NO_x and SO_x removal using low-temperature plasma

Commercial Status: Existing

Contact information:

Mr. Youngdo Jang, Department of Environment & Energy, POSCO
T +82-54-220-5773
ydjang@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 metal¹⁸
 - 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%¹⁹
 - More expensive than wet type, \$28/t hot metal². NEDO from Japan gives 1.8 years for the payback period of VS-ESCS (including the construction costs)²⁰

Block Diagram or Photo:

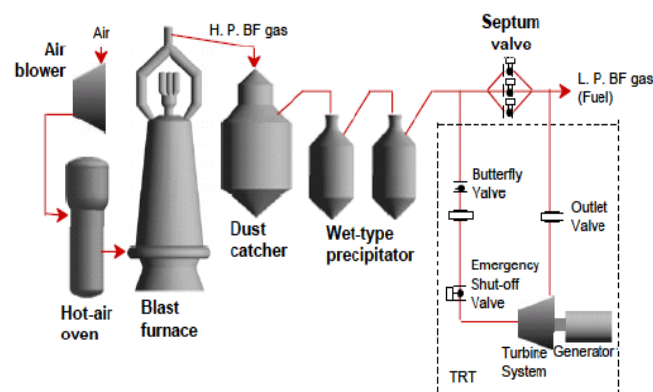


Figure 3.1: Flow diagram of TRT system (wet type)

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_x, SO_x and particulate emissions reduced
 - Capital costs of approximately \$3/t sinter¹
- 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_x
 - 3-8% reduction in NO_x
 - 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)
 - SO₂ reduced
- NEDO reports the energy saving of 4700 GJ/year for a 100 Mton-sinter/year plant (47 kJ/tonn sinter)³

Block Diagram or Photo:

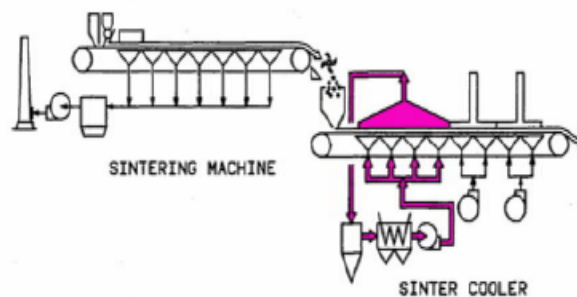


Figure 1.1: Sinter plant heat recovery from sinter cooler¹

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:

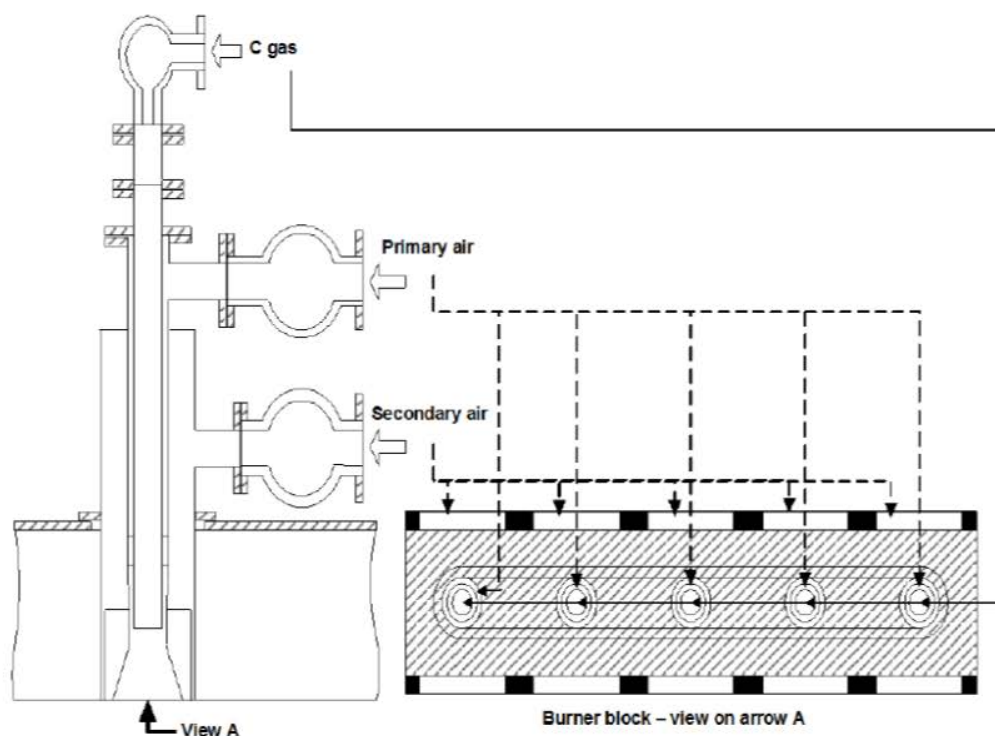


Figure 1.9: Outline of multi-slit burner

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 窒素酸化物抑制技術の経済性 NOx 抑制技術の経済性

焼結機の排ガス処理として実機に導入され、稼働している排ガス循環、SCR、乾式排煙脱硝脱硝(RAC: Regenerative Activated Carbon)についての経済性と具体的事例は次の通りである。³⁰

これらの技術は要求される NOx 削減のレベルに応じて実機への導入が選択されている。

4.4.1 排ガス循環

排ガスの一部(25~50%)を再循環し、NOx、SOx、粉じん(Dust)、ダイオキシン他の汚染物質の大气放出を抑制する。同時に大气放出の排気ガス量の減量により、省エネが可能である。

代表的事例は次の通りである。

- ① 『事例-1』 Corus, IJmuiden, Netherlands, 1994 年
EOS (Emission optimized sintering) process

焼結機生産量	4.2×10 ⁶ t/y
排ガス量	1.2×10 ⁶ Nm ³ /h (焼結機 3 基分)
循環ガス量	40~50%
NOx 削減率	30~45% (入口:570~630mg/Nm ³ 出口:310~410 mg/Nm ³)
初期設備コスト	EUR17×10 ⁶
ランニングコストの削減	EUR2.5×10 ⁶ /y (主要因として粉末コークスの削減:6kg/t-焼結鉍×EUR100/t-粉末コークス)
メンテナンスコスト	データなし

(コストは 1996 年の EUR に換算)

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

焼結機面積	420m ²
排ガス量	データなし
循環ガス量	約 50%
NOx 削減率	25~50%
初期設備コスト	EUR14×10 ⁶

³⁰ Guidance document on control techniques for emission of sulfur, NOx, VOCs, dust(including PM10,PM2.5 and black carbon) from stationary sources

ランニングコストの削減	粉末コークスの削減 5~7kg/t-焼結鉍
メンテナンスコスト	データなし

(コストは 1996 年の EUR に換算)

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

焼結機面積	250m ²
排ガス量	データなし
循環ガス量	25~28%
NOx 削減率	25~30%
初期設備コスト	EUR15×10 ⁶
ランニングコストの削減	粉末コークスの削減 2~5kg/t-焼結鉍
メンテナンスコスト	データなし

*試算例:ArcelorMital,Ghent,Belgium

焼結機面積:175m² 初期設備コスト : EUR14×10⁶
 // :498m² 初期設備コスト : EUR27.3×10⁶

- ④ 『事例-4』 新日鉄戸畑 No3 焼結機 1992 年
排気ガスを 4 分割にして一部循環方式 (SOx 部分脱硫)

焼結機面積	480m ²
排ガス量	925,000Nm ³
循環ガス量	28%
NOx 削減率	3%
SOx 削減率	63%
初期設備コスト	EUR8~10×10 ⁶ (EUR 1997 換算)
ランニングコストの削減	粉末コークスの削減 6%
メンテナンスコスト	データなし

世界における実機稼働状況:上記以外に欧米にあり

注) 排ガス:焼結機からの排出ガス量を指す。その一部が循環され、残りが大気放出される。

4.4.2 選択的接触還元法(SCR)

焼結鉍生産量が 4×10⁶ t/y、排ガス量 1×10⁶ Nm³/h、稼働時間 8,640h/y の場合、初期設備コストは EUR25~45×10⁶、ランニングコスト EUR1.5~2.0/t-焼結鉍である。

事例は次の通りである。(コストは 1996 年の EUR に換算)

① 『事例-1』 川崎製鉄千葉製鉄所 1975 年設備導入

焼結鉄生産量	7000t/day
排ガス量	620,000~750,000Nm ³ /h
NO _x 除去率	90%以上 (入口:450mg/Nm ³ 出口:37 mg/Nm ³)
温度	400~480°C
初期設備コスト	EUR27.3×10 ⁶ (1975 年)
ランニングコストの削減	EUR0.40/t-焼結鉄 (1992 年) (EUR1,000,000/y)
メンテナンスコスト	EUR0.08/t-焼結鉄 (1992 年) (EUR200,000/y)

② 『事例-2』 日本鋼管京浜製鉄所 1979 年設備導入

焼結鉄生産量	12,000t/day
排ガス量	1.2~1.3×10 ⁶ Nm ³ /h
NO _x 除去率	70~75%(入口:410mg/Nm ³ 出口:100~120 mg/Nm ³)
温度	340°C
初期設備コスト	EUR50×10 ⁶ (1979 年)
ランニングコストの削減	EUR0.75/t-焼結鉄 (1992 年)
メンテナンスコスト	EUR0.57/t-焼結鉄 (1992 年) (EUR900,000/y)

*その他の実機導入例:China Steel,Taiwan No3 (排ガス量約 850,000Nm³/h) ,
 No4 焼結機 (排ガス量約 1164,000Nm³/h) 1997 年、
 No1 焼結機 (排ガス量約 464,000Nm³/h) 1999 年
 No1~4 の NO_x 除去率:約 80%
 *2010 年時点では上記以外の実機導入はなし。

4.4.3 乾式排煙脱硫脱硝装置(RCA)

乾式排煙脱硫脱硝装置のコストは次の通りである。

脱硫設備規模(焼結面積)	500~600 m ²
初期設備コスト	約 EUR60 百万
ランニングコスト	EUR1/t-焼結鉄
メンテナンスコスト	EUR0.17/t-焼結鉄(EUR 750,000/年)

初期コストとランニングコストの一例

Table 3.26: Cost estimation of an activated coal system

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

* 世界における実機稼働状況

- BlueScope Steel, Port Kembla Works, Australia, sinter machine No 3, to treat 1552000 Nm³/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 Nm³/h of waste gas for SO_x, NO_x, dust and PCDD/F (start-up 2003)
- POSCO, Pohang Steelworks, Korea, sinter machines Nos 3 and 4, to treat 1350000Nm³/h of waste gas for SO_x, NO_x dust and PCDD/F (start-up November 2004)
- Nippon Steel Corporation, Kimitsu Steelworks, Japan, sinter plant No 3, to treat 1700000 Nm³/h of waste gas for SO_x, NO_x and dust (start-up 2004)
- Kobe Steel Corporation, Kakogawa Steelworks, Japan, sinter plant No 1, to treat 1500000 Nm³/h of waste gas for SO_x, NO_x dust and PCDD/F (at planning stage in 2007).

5 中国における焼結機排ガスの窒素酸化物抑制技術の導入事例

5.1 太原鋼鉄有限公司

5.1.1 緒言

大容量の燃焼排ガスの脱硝技術は、Ti-V 系の金属触媒（SCR 触媒）による還元反応を利用した技術が一般的である。しかし、SCR 触媒の効果を発揮するためには、300℃以上の高温が要求される。火力発電所における事業用ボイラーでは、エアヒータの上流側のガス温度が 300~400℃あり、SCR 触媒の効果が最も発揮できる温度領域になる。一方、製鉄所で高炉の原料となる焼結鉱を製造する焼結機の排ガスを処理する場合、排ガス温度がボイラーに比べ低く、通常、100~150℃程度である。したがって、焼結機排ガスに SCR 触媒を適用する場合、排ガスを昇温する必要があり、そのエネルギーコストが膨大になることが知られている。

近年、SCR 脱硝技術に代わる脱硝技術として注目されているのが、活性炭による脱硝技術である。活性炭法は、脱硝のみならず、脱硫、脱ダイオキシン、除塵、さらには、水銀等の揮発性重金属の除去にも適用できる。本方法は、低温でのその機能が発揮されるため、日本においては、とりわけ焼結機排ガス処理用として適用されてきた。中国では太原鋼鉄有限公司が焼結排ガス用処理設備として、初めて活性炭法を導入し、2010年8月に商用運転が開始された。写真 1 に同会社が導入した乾式脱硫脱硝装置の全景を示す。同社では、ほぼ並行してもう 1 基を導入しており、いずれも順調に稼働している。

本稿では、太原鋼鉄有限公司が導入した乾式脱硫脱硝装置（住友重機械工業株式会社製）の概要を紹介する。さらには、近年注目されている半乾式脱硫法に SCR 脱硝法を付加したコンバインドシステムと活性炭法の維持管理費との比較についても併せて報告する。



写真 1 乾式脱硫脱硝装置全景

5.1.2 活性炭移動層による脱硫脱硝技術について

主要機器構成を図 5-1 に示す。有害物質を除去するための吸着塔、活性炭を再生するための脱離塔、及び活性炭を循環させるためのコンベアシステムから構成されている。既設焼結機に本設備を据付する場合は、メインブロア (MB) の下流側に昇圧通風機 (BUF) を設置し、BUF の下流側に脱硫脱硝設備を設置するのが一般的である。さらに、活性炭再生時に脱離する硫酸化物を石膏或いは硫酸等の有価物として回収する副産品回収設備を設けている。

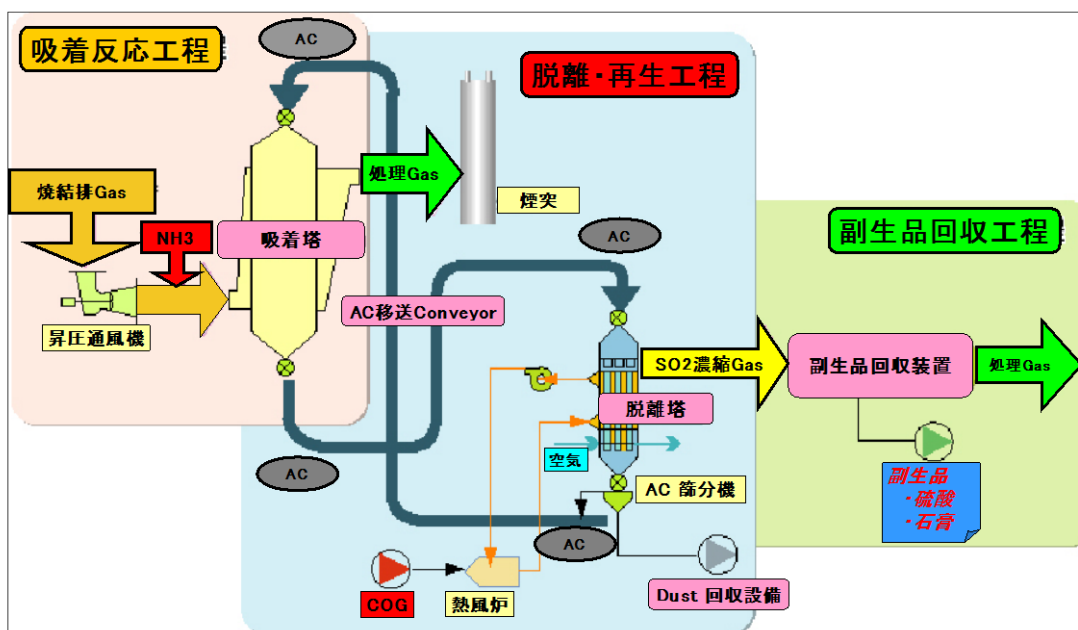


図 5-1 活性炭式乾式脱硫脱硝プロセスの概要

本プロセスで使用している一般的な活性炭の概観を写真 2 に示す。平均径が 9mm で、長さが 10~15mm の円柱状である。活性炭選定に当たっての重要な項目は、SO₂ の吸着能力、発火点および強度である。



写真 2 活性炭

5.1.3 乾式脱硫脱硝装置設計の概要

5.1.3.1 本体設備

ここで言う本体設備とは、吸着塔、脱離塔および活性炭を循環するコンベアシステムである。まずは吸着塔の容量、即ち、活性炭の有効容量を決める必要がある。有効容量決定に必要な項目は、表 5-1 に示した吸着塔入り口排ガス条件、各有害物質の要求除去性能および使用活性炭の特性である。これらをパラメータとして吸着塔容量および活性炭循環量が決定される。次に決定された活性炭循環量からコンベアシステムの搬送能力を決定する。さらには、脱離塔の活性炭の再生に要する伝熱面積、再生後の活性炭の冷却に要する伝熱面積を決定すれば、脱離塔のサイズが決まる。これで主要設備の仕様が決定されるため、これを基に付帯設備の仕様を順次決定していく。

表 5-1 吸着塔入口排ガス条件

項目	単位	吸着塔入口排ガス条件			
		最大値	平均値	設計値	注記
排ガス流量	m ³ N-wet/h	1,444,000	1,369,000	1,444,000	BUF Inlet
排ガス圧力	kPa		5.0	5.0	BUF Outlet
排ガス温度	°C	138	135	138	BUF Inlet
煤じん	mg/m ³ N-dry	100	90	100	
O ₂	%-dry	14.4	14.3	14.4	
CO ₂	%-dry	6*		6*	
CO	%-dry		0.6	0.6	
N ₂	%-dry		Balance	Balance	
H ₂ O	%	13	12	12	
SO ₂	mg/m ³ N-dry	815	639	815	
SO ₃	mg/m ³ N-dry		微量	微量	
NO _x	mg/m ³ N-dry	317	260	317	
HCl	mg/m ³ N-dry		40*	40*	
HF	mg/m ³ N-dry		2.5*	2.5*	
PCDD/F	ng-TEQ/m ³ N-dry		1.5*	1.5*	
Hg	μg/m ³ N-dry		微量	微量	

5.1.3.2 硫酸回収設備

前項のプロセス概要で、副産品として石膏或いは硫酸を挙げたが、太原鋼鉄有限公司は

硫酸を選定した。通常期（春季、夏季及び秋季）の製品硫酸純度は 98%である。但し、冬季は、凍結防止の観点から 92.5%純度の硫酸を製造することになっている。なお、日本国内では、これまで石膏として回収するケースの方が多い。

5.1.3.3 脱硫脱硝性能の経時変化と保証性能

活性炭は通ガス開始後、徐々に脱硫性能及び脱硝性能が向上してくる。これをオンライン賦活と称している。図 5-2 は、NH₃ 注入開始後の脱硝性能の経時変化を示している。脱硫率は、既に保証性能の 95%を超えていることが分かる。脱硝率は徐々に向上し、NH₃ 注入開始後、約 3 週間で保証値の 33%に達した。ちなみに一ヶ月経過後の 2010 年 12 月 6 日～10 日における平均脱硫率は 97%、平均脱硝率は 42%であった。

保証性能と実測値を表 5-2 に示す。各性能は、通ガス開始後、約 4 ヶ月経過後に実施した性能確認試験結果である。全ての項目において保証性能を上回り、活性炭移動層法が多様な有害物質を含む排 Gas 処理に適用できることが証明された。また、回収された硫酸は、工業用硫酸として十分な品質を有しており、同公司製鉄所内で有効に利用されている。

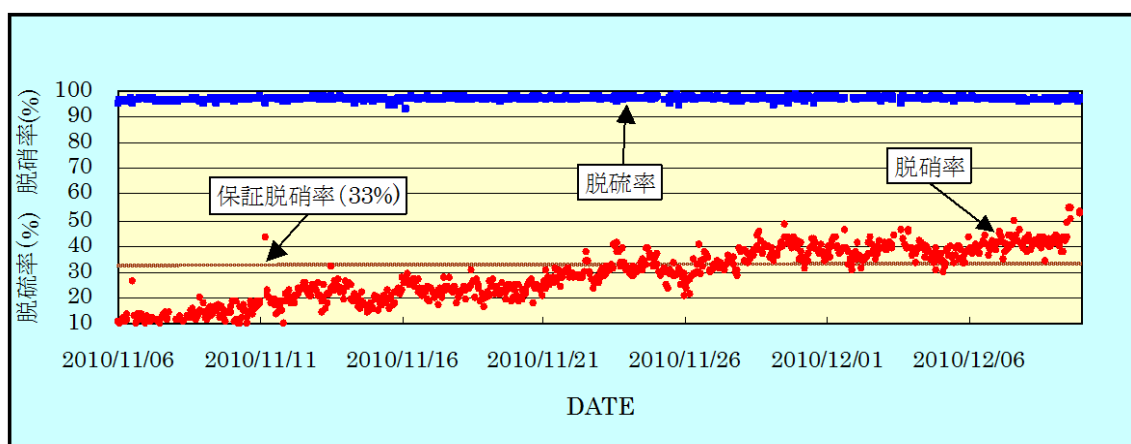


図 5-2 NH₃ 注入開始後の脱硫脱硝性能の経時変化

表 5-2 保証性能と性能測定試験結果

保証項目		保証値	実測値	判定	
SO ₂ (脱硫)	煙突入口濃度	mg/m ³ N-dry	≤41	7.5	合格
	脱硫率	%	≥95	98	合格
NO _x (脱硝)	煙突入口濃度	mg/m ³ N-dry	≤213	101	合格
	脱硝率	%	≥33	50	合格
煤じん	煙突入口濃度	mg/m ³ N-dry	≤20	17.1	合格
PCDD/F	煙突入口濃度	ng-TEQ/m ³ N-dry	≤0.2	0.15	合格
NH ₃ Slip	煙突入口濃度	ppm-dry	≤39.5	0.3	合格

回収硫酸	純度 等級	%	≥98 一等品	一等品	合格
------	----------	---	------------	-----	----

5.1.3.4 維持管理費用

時間平均使用量を基準として求めた維持管理費用を表 5-3 に示す。この内、活性炭粉は燃料として再利用、硫酸は製鉄所内で使用している。したがって、年間の維持管理費用は 4,880 万元となり、焼結鉱トン当たりで換算すると、9.38 元/t-s となる。なお、硫酸は、冬季における純度 92.5%の Cost を採用した。他の季節においては 98%硫酸を製造できたため、更なる維持管理費用低減に繋がる。

表 5-3 維持管理費用試算結果

項目		消費量		費用	
		時間平均	日間	万元/日	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	工業用水	2.0 t/h	48.0 t/d	0.0182	6.34
4	循環水	250 t/h	6,000 t/d	0.186	65.1
5	圧縮空気	220 m ³ N/h	5,280 m ³ N/d	0.0422	14.8
6	窒素	1,100 m ³ N/h	26,400 m ³ N/d	0.924	323
7	蒸気	4.0 t/h	96.0 t/d	0.576	202
8	電力	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	産 0.299 t/h	7.16 t/d	-0.0716	-25.1
11	液体 NH ₃	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	補修			1.123	393
合計				13.9	4,880

5.1.3.5 他方式との比較

近年、中国では、湿式脱硫法に替わり半乾式脱硫法の採用が多く見受けられるようになってきた。また、新設の焼結機の NOx 排出規制も強化されて行くことが想定される。半乾式脱硫法+SCR 脱硝法と活性炭法のコスト比較を試みた結果を示す。

その結果、脱硫のみであれば初期投資及び維持管理費用とも半乾式脱硫法が優位である

が、半乾式脱硫法+SCR 脱硝法となると、様相が変わってくる。両者のプロセスの比較を図 5-3 に示す。

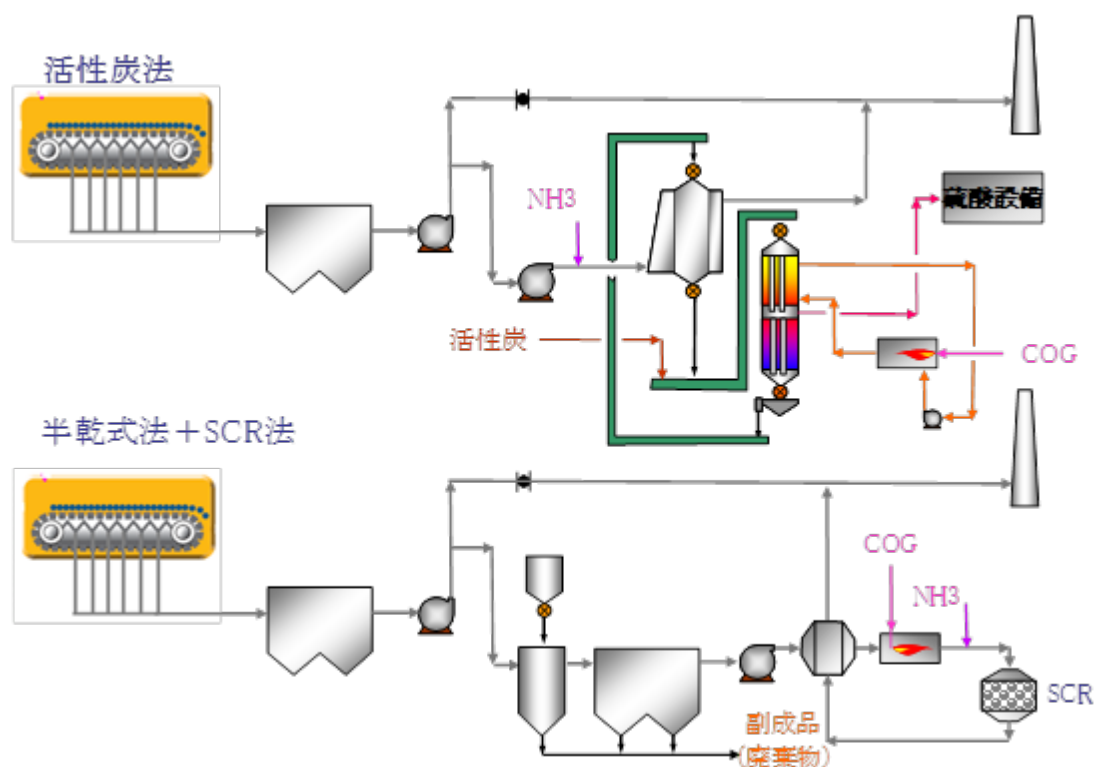


図 5-3 活性炭法と半乾式法の脱硝プロセスの比較

両者を焼結面積 600m^2 の焼結機排ガスに適用した場合の、維持管理費用の比較を表 5-4 に示す。活性炭法は、太原鋼鉄有限公司での実績をベースにしている。半乾式法は、日本側専門家が中国での市場価格を調査した結果に基づいた。なお、本比較は脱硝率 40% を達成可能なケースについて試算した。

表 5-4 維持管理費用の比較

項目	半乾式+SCR 法		活性炭法	
	詳細	費用 万元/年	詳細	費用 万元/年
脱硫剤	石灰	350	活性炭	1,743
NH ₃		676		700
COG		5,640		659
N ₂		445		458

工業用水		60		18
純水		—		20
圧縮空気		24		24
蒸気		6		323
電力		2,822		2,612
触媒交換		1,980		—
ろ布交換		600		—
副産物	石膏他	142	硫酸	-678
			活性炭粉	-362
人工	12人	180	12人	180
減排収益		-465		-465
合計		12,461		5,233

電力に関しては、排ガス流量に応じた排風機が必要となるため大差は生じない。強いて言えば、SCR 触媒層の圧損分のみ、半乾式の方が電力費が高くなると言える。電力費を除くと、活性炭法では当然のことながら補給活性炭費が維持管理費の内の大半を占める。一方、半乾式ではコークス炉ガス(COG)費が全維持管理費の 50%を占めることが判明した。活性炭法は、活性炭の再生用の熱源として少量の COG を使用するのに対し、半乾式では、脱硝を効率的に行わせるため、全ガス流量を加熱する必要がある。

排出される CO₂ 量に置き換えると、活性炭法の 7,000t/年に対し、半乾式法では、60,000t/年となり、地球温暖化の観点から見ても、好ましいとは言えない。

また半乾式法では、触媒劣化に伴う交換費用、バグフィルターのろ布交換費用が発生する。一方、活性炭法では、副産品の硫酸及び活性炭粉は有効利用するので収益と捉えた。以上の検討結果を踏まえると、活性炭法の年間維持管理費は、半乾式法の約 40%程度に納まることが分かった。

以上の比較評価はあくまでも維持管理費の評価であり、本来は初期投資を含めた生涯コスト (LCC : Life Cycle Cost) で比較しなければならない。そこで、中国製作をベースとした初期投資額を検討した。その結果、半乾式法+SCR 法がより少ない初期投資額で導入できることが分かった。

これらの結果を基に LCC の比較を実施した結果を図 5-4 に示す。図は、初年度に初期投資額をプロットし、その翌年から維持管理費の累積額をプロットしたものである。図から分かる通り、2年後には、半乾式法+SCR 法が活性炭法の累積コストを上回ることが判明した。ライフサイクルを 20年間とすると、累積コスト差は 13 億円となる。

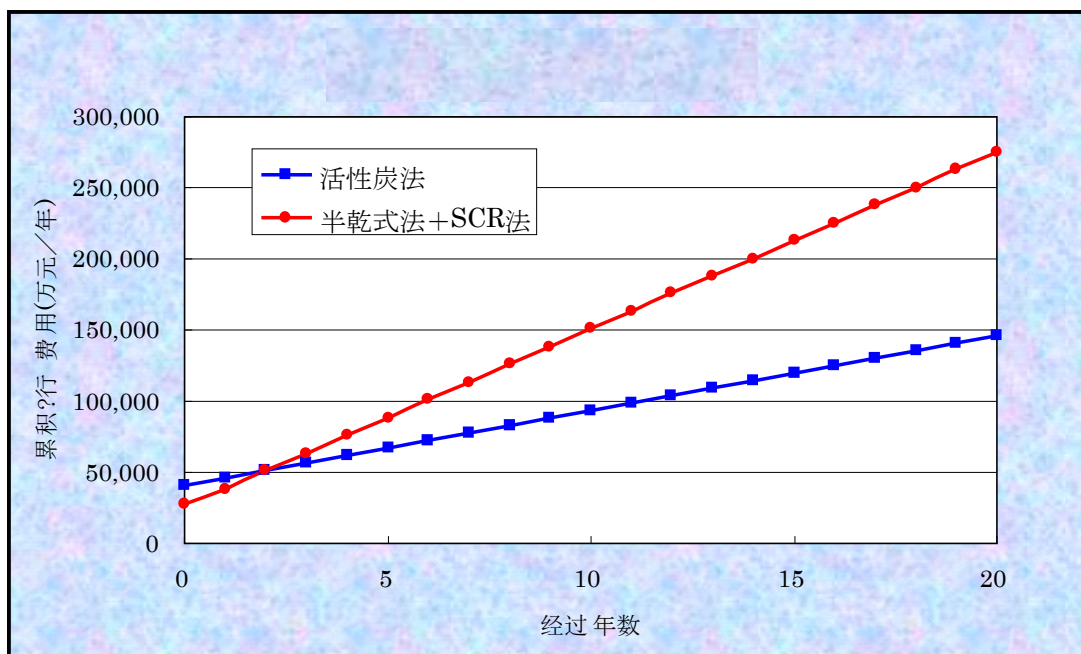


図 5-4 維持管理費の累積額比較

5.1.4 結語

本設備は 2008 年 8 月初頭に太原鋼鉄有限公司が住友重機械工業株式会社に発注し、建設したもので、2010 年 8 月 31 日に営業運転を開始した。吸着塔及び脱離塔の設計を住友重機械工業株式会社が担当し、その他設計、建設工事は太原鋼鉄有限公司が担当した。営業運転開始後も順調に稼働していることを報告しておく。

半乾式法+SCR 法とのコスト比較についても一例を示したが、方式選定に当たって、参考になれば幸いである。

5.2 湖南華菱湘潭鋼鉄有限公司

5.2.1 概要

JICA 技術協力プロジェクト「大気中の窒素酸化物総量抑制プロジェクト」の活動において、湖南省湘潭市及び湖南華菱湘潭鋼鉄有限公司の協力のもと、焼結炉の窒素酸化物抑制を目的としたケーススタディを実施した。

対象とした焼結炉は表 5-5 のとおり。

表 5-5 対象焼結炉概要

焼結機	製造メーカー：瀋陽重型機械廠
	焼結機形式：DS-360

	炉床サイズ (タテ×ヨコ) : 4.5m×90m ベッド層厚:750mm
	焼結鉍 (t/h) : 最高(計画) 500 常用 480
	点火炉燃料の種類/炭種: 混合石炭ガス
	燃焼バーナの方式: ダブル斜めイグナイタ 本数: 27 本
	燃料消費量(kg/h) 計画値: 6000 運転値: 4800
主排風機仕様	排风量 (Nm ³ /h) : 18000m ³ /min 静圧(Pa):17000 動力 (kW) : 6500
運転状況 排ガスデータ	通常の運転時間 : 24h/day ×344day/y 連続 保守点検:日常メンテナンス:
	排ガス量 (m ³ /h 又は Nm ³ /h) : 通常運転時 800000
	排ガス温度 (°C) : 120-150
	集塵方法 : 電気集塵
	排煙脱硫 : #1 ライン湿式脱硫 脱硫塔出口濃度:<200 (mg/nm ³) : #2 ライン:なし 排出出口濃度:200~500 (mg/nm ³) :
NOx 削減対策設備	設置状況 : なし
	種類 : なし
	効率 : なし
NOx の測定方法	測定場所: 排出出口、湿式脱硫装置入口
	測定方法 : 赤外線方式
	測定機器 : 排ガスオンライン測定システム
	測定頻度 : 連続測定
運転管理	投入粉鉍石量 (t/d) : 12000 石灰粉量 (t/d) : 790 コークス粉量 (t/d) : 480 造粒径 (mm) : > 3
省エネ対策	実施済対策 : 厚層原料焼結による固体燃料消費の低減

ケーススタディは表 5-6 示すフローにて実施した。

表 5-6 ケーススタディ活動内容

NOx 排出マップ作成	排ガス測定	測定箇所 : 各ウインドボックス、電気集塵機出口、煙道 測定項目 : NOx、SO ₂ 、O ₂ 、CO、CO ₂ 、静動圧、水分 使用機器 : 排ガス分析計
-------------	-------	--

		(HORIBA 製 ポータブル ガス分析計 PG350)、ピト ー管、差圧計 等
	排出マップの作成・分析	異常値と思われる箇所については再測 定
対策の検討	目標値の設定	排出基準値を基に、目標値を設定
	抑制対策の検討	排ガス循環による NOx、SOx 対策のほか、漏風対策や熱回収などの省エネ対策についてシミュレーションを交えながら検討

5.2.2 NOx 排出マップ作成

上述 3.5 に記載のとおり、各測定項目について、変動傾向を分析するためにグラフ化したものは汚染物質の排出状況を視覚的に捉え、抑制対策を検討する上で非常に重要である。

作成された排出マップ(図 5-5)からは次の点が分かった。

- NOx の発生量は焼結機長前半でピークとなり、徐々に低下していく。
- SOx の発生量は排ガス温度と共に中央以降で増加し、焼結機長後半でピークに達し、その後低下する。

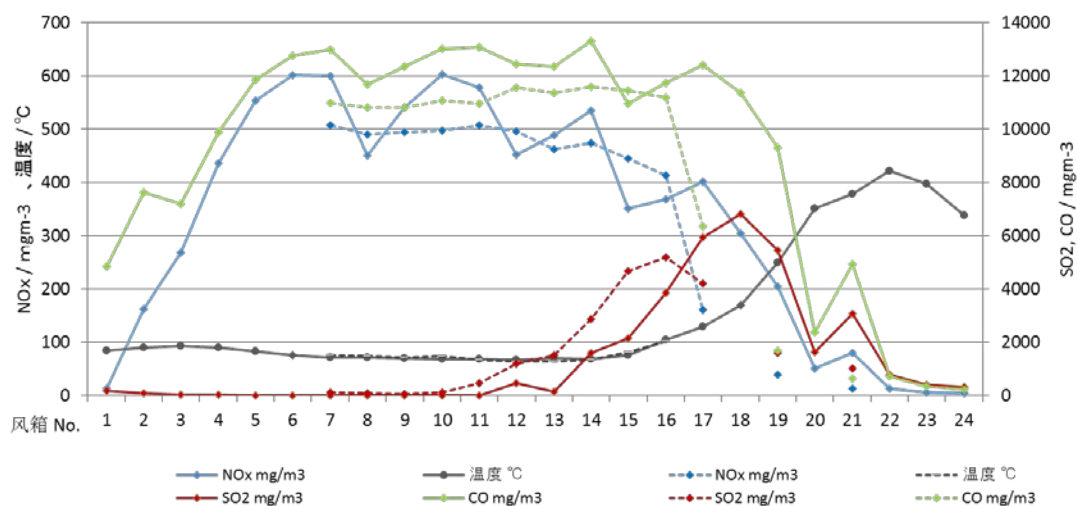


図 5-5 測定結果に基づき作成した NOx 排出マップ

5.2.3 対策の検討

【排ガス循環】

対象企業の希望により、NOx 抑制対策と SO₂ 抑制対策が同時に実返可能な対策案について、既存の汚染物質抑制設備を最大限に利用できる排ガス循環による抑制対策について検

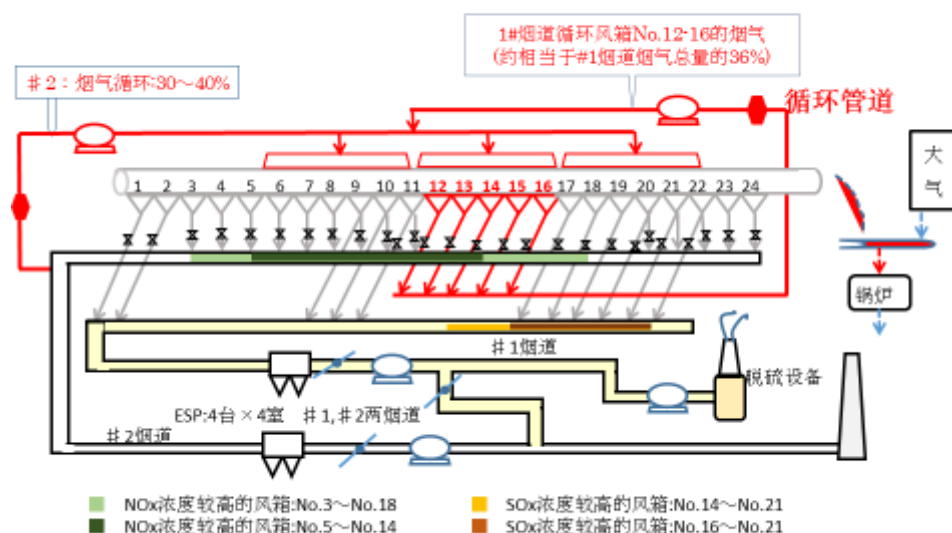
討を行った。

測定に基づき作成された NOx 排出マップ及び各ウインドボックスにおけるガス流量データに基づき、目標値を達成できるよう循環ガスの抜き出し箇所、循環ガスの戻し先の選定についてシミュレーションを実施した。

シミュレーションの一部を図 5-6 に示す。

NOx 濃度が比較的高い風箱番号 12~16 の排ガス循環と 2 号煙道の排ガス総量 30~40% により、全体の NOx の 15% 低減が予測される。

また、これに加え、吸引空気量の調整など、焼結機の運転操作により、全体の排ガス量の低減を加えることで、更なる低減効果が得られると予測している。しかし、運転条件の変更については生産物の品質に影響を与えるため、条件を変えながらの試験が必要となる



2

図 5-6 排ガス循環のための施工例

【漏風対策】

日本の事例との比較により、焼結機パレットから漏風量が多いことが判明した。漏風対策防止により、焼結機排ガスブロワの出力低減による省エネルギーが可能であること、更には焼結鉱生成の有効風量増加により生産量が向上することから、漏風箇所を特定するよう提案した。

6 中国の窒素酸化物抑制技術の焼結機への導入について

まとめとして、主要なポイントを述べる。まず、焼結機から大気放出される窒素酸化物(NOx)の排出量をいくら以下に抑制するかを設定する必要がある。設定については、一般的に法的要求大気排出濃度、条例の要求大気排出濃度、及び自主的管理大気排出濃度の要求レベルを考慮しなければならない。これらにより求められる大気排出濃度を設定する。大気排出濃度が設定されれば、現状の大気排出濃度と比べて、現状の大気排出濃度が設定された大気排出濃度を超えている場合には、排出抑制対策が講じられなければならない。

具体的な抑制対策は原料管理、操業管理、排ガス管理、省エネ管理の側面がある。日本及び欧米で実施されている焼結機的主要なNOx抑制対策の特徴は表6-1の通りである。まず、原料管理、操業管理を適切に管理し、その上で排ガス管理の対策と効果を的確に評価し、対策を講じて設定目標以下のNOx排出濃度を達成するのが望ましい。なお、排ガス管理のNOx抑制対策技術は、比較的中位レベル処理の『排ガス循環』、高度レベル処理の『選択触媒脱硝装置(SCR)』、さらに高度な有害物質同時処理の『乾式排煙脱硫脱硝装置』と位置付けられる、処理レベルの高度化とともに設備コスト、ランニングコストは高くなる傾向にある。抑制対策を講じる際には、生産性の維持・向上、コスト、メンテナンスを考慮して各現場に合った適切な対策を講じることが最も重要である。

表 6-1 主な焼結機のNOx抑制対策と効果

主発生メカニズム	管理区分	抑制対策	効果	コスト	備考
Fuel-NOx	原料管理	低窒素コークスの使用	N含有比率低下に比してNOx発生低下	低窒素コークス確保の費用	低窒素粘結炭の確保が必要
		石灰石の添加	生産性向上、及びNOx抑制効果	石灰石添加費用	石灰石によるNOx発生抑制
	操業管理	漏風の低減化	省エネによるNOx抑制効果	パレット台車のシール対策費	排ガス量の低減による主排風機の動力低減
		点火ラインバーナの改造	生産性向上によるNOx抑制効果	ラインバーナ設置費	原料層上面の均一着火による生産性向上
	排ガス管理	排ガス循環	NOx20~50%削減	排ガス循環ラインへの改造費	焼結排ガス量の25~50%を循環

				あまり高くない	排ガス循環による NOx 放出抑制 フード取り付けに よるメンテ時の作 業性が低下しない よう配慮必要
		選択触媒脱硝 装置(SCR)	脱硝性能： 80~90%	やや高い	1970年代実用化
		乾式排煙脱硫 脱硝装置	脱硝性能： 一段処理約 40% 二段処理約 80%	高い	1999年より実用化 ダスト、NOx、SOx、 ダイオキシン他有 害物質同時除去

NO_x 抑制に係る技術ガイドライン (鉄鋼コークス炉)

中華人民共和国環境保護部

独立行政法人国際協力機構

はじめに

この「NOx 抑制に係る技術ガイドライン」は、独立行政法人国際協力機構の技術協力プロジェクトとして株式会社数理計画及び公益財団法人国際環境技術移転センターが実施した「中華人民共和国大気中の窒素酸化物総量抑制プロジェクト」において、中国環境保護部と協働で取り纏めたものです。

中国では、2011年から始まった第12次五カ年計画において窒素酸化物が新たに排出総量規制の対象に加えられたことにより、窒素酸化物削減対策について急速に関心が高まり、各産業業界において排出基準が定められ、排出源での抑制対策が進められています。第12次五カ年計画において定められた削減目標は、中央及び地方政府の適正な現場指導や企業自身の努力により概ね達成されることが見込まれていますが、更なる大気環境改善への期待は依然として大きく、2016年より開始される第13次五カ年計画においても引き続き窒素酸化物が規制対象となる予定です。

上述のプロジェクトでは、中国国内の改善状況やニーズ、JICA 専門家が紹介する対策手法に対する中国国内における導入可能性の検討に関連する活動を中国側が担当しました。中国側が提供した情報に加え、ケーススタディや専門家会合で得られた課題や情報などを元に、中国で適用可能な対策手法についての紹介に関連する活動を日本側が担当し、本ガイドラインでは地方政府や企業がNOx 抑制対策に取り組む際の参考となるよう活動結果を取り纏めています。

このガイドラインが中国の地方政府や生産現場である企業などの皆様の一助となることを期待するとともに、ガイドラインの作成にあたり協力いただいた関係者の皆様、ケーススタディ活動に積極的にご協力いただいた湖南省湘潭市の皆様に心より御礼申し上げます。

2015年10月

中華人民共和国環境保護部
独立行政法人国際協力機構

目次

1	日本における鉄鋼コークス炉	1
2	コークス炉の変遷	2
2.1	変遷	2
2.2	次世代コークス炉の開発	4
3	日本におけるコークス炉の大気汚染物質排出基準値	6
4	コークス炉	9
4.1	鉄鋼業におけるコークス	9
4.1.1	概要	9
4.1.2	高炉におけるコークスの役割	9
4.1.3	管理指標	9
4.1.4	平均的組成	10
4.1.5	品質	10
4.1.6	品質試験法	10
4.2	コークスの製造	11
4.3	コークス炉の構造	12
4.4	コークス炉付帯装置	15
5	鉄鋼コークス炉における窒素酸化物の排出削減対策技術	17
5.1	コークス炉ガスの精製・浄化	17
5.1.1	目的	17
5.1.2	脱硫処理	18
5.1.3	アンモニア回収	18
5.2	最終排出ガスの窒素酸化物対策	18
5.3	燃焼管理と熱精算による熱効率の向上	19
6	EUにおける窒素酸化物及び硫黄酸化物の低減対策について	20

1 日本における鉄鋼コークス炉

製鉄に要する主な原料は、鉄鉱石、コークス、石灰石である、塊石炭や粉石炭からコークスを生産するコークス炉は、鉄鋼生産工程では前工程に属する。コークスは高炉において鉄鉱石を高温加熱・溶解により還元し、銑鉄を製造するものである。コークス炉は、製鉄業における冶金用コークスのほか、水性ガス等ガス化コークス、炭化水素油など化学原料を生産することを目的とするものがある。本報では製鉄業における高炉コークス炉を対象とする。

なお、本 JICA プロジェクトの目的である大気中の窒素酸化物総量抑制対策については、日本の鉄鋼業では高炉・コークス炉等における排ガスの熱利用やガス化浄化処理などが行われている。しかし、それらはコークス炉単機に限定した利用・処理プロセスをとらず、経済性や効率的な観点より、高炉や所内の他の窯炉等を含める鉄鋼生産施設全体で集約される、若しくは循環・混合され、燃料化や熱利用化が図られている。

また日本の鉄鋼業は鉄鉱製品の国際市場において、省エネルギーや鋼材品コスト等の分野で、熾烈な競争環境に晒されている背景があり、その分野で大きな影響をもつコークス炉は多数の優れた技術特許を有しているが、これらに抵触する関係から情報の開示が行われていない。従って本報は、日本の高炉コークス炉の概要を紹介するに留める。従って、個々の製鉄所において導入可能なコークス炉に関する施設構成やエネルギーシステム、窒素酸化物を含む大気環境汚染対策、操業技術等の詳しい情報は、ビジネスレベルベースで個々の企業間ルートで特許使用権や技術移転の収集を奨める。

2 コークス炉の変遷

2.1 変遷

鉄鋼業において高炉でコークスを用いる手法が開発された 1735 年当時、コークス製造法はマイラーと称される野焼き法であった。しかし、高炉内の空隙を確保し、通風を促すため、コークスが塊状物であるよう要求されることや、石炭歩留まりが低くコークス品質が悪いことから、1760 年代には密閉耐火物窯で内燃式乾留型のビーハイブ炉に転換された。1850 年代になり、第一世代の室炉コークス炉である間接加熱方式の炉が出現し、石炭装入やコークス押出機械化などの改善が行われ、大量生産化が進んだ。1880 年代では、第二世代室炉コークス炉として、発生ガスやタールなどを回収する副産物回収コークス炉が普及している。第三世代室炉コークス炉は 1900 年代に入りオットー、コッパース、カールスチル炉が台頭して、現在に至っている。なお、1911 年には高炉ガスのような低カロリーガスを燃料とする複式炉等が開発されている。1990 年代では超大型乾留炉の開発 (EU) や高生産性、高機能の次世代型コークス製造技術開発 (SCORP21, 日本) が着手されている。表 2-1 にコークス炉技術の変遷を示す。

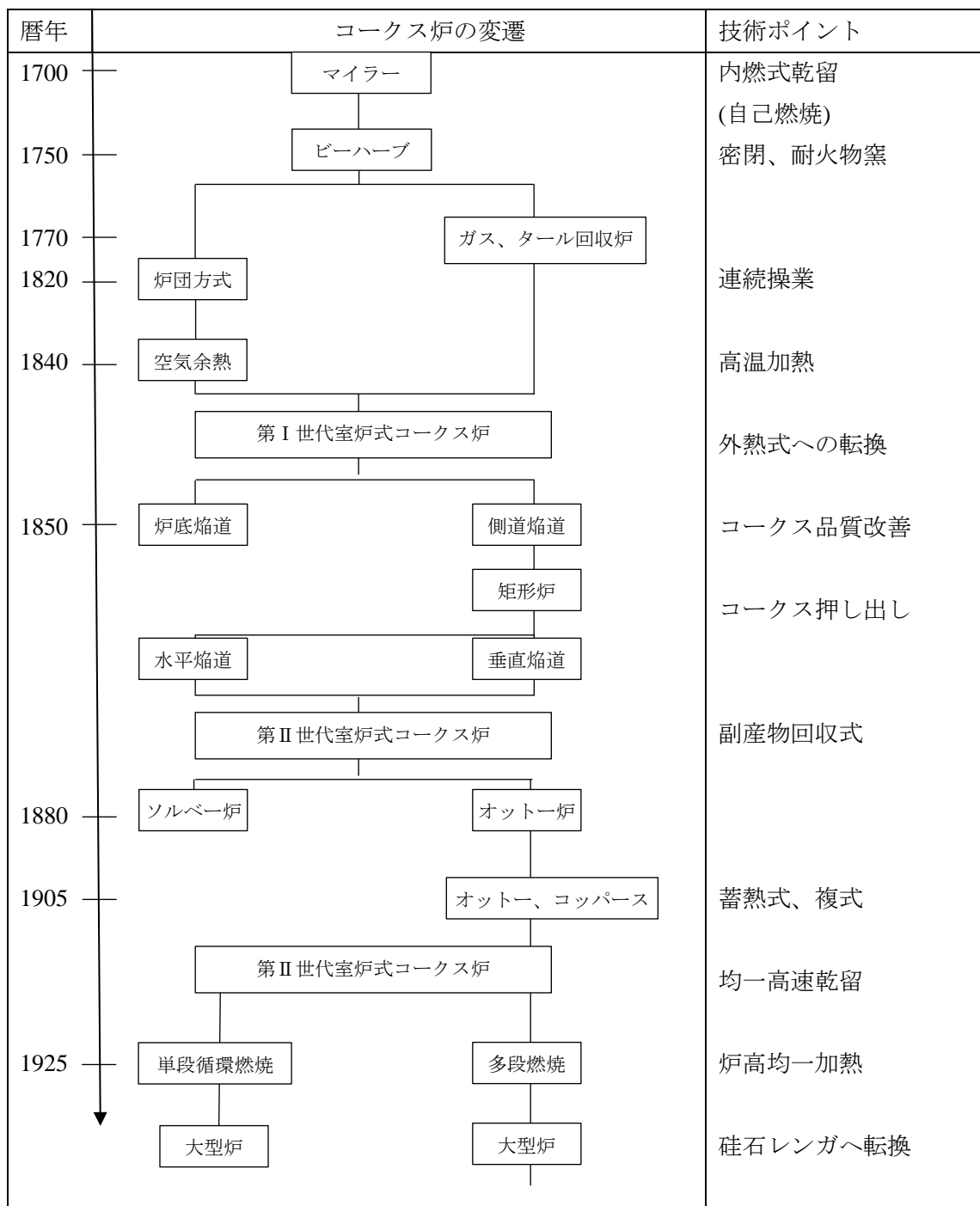


表 2-1 コークス炉技術の変遷

(出典：重野ら、1994 東北大学院国際文化研論)

2.2 次世代コークス炉の開発

日本のコークス炉技術は、2000年代に入り設備更新時期を迎えていたため、鉄鋼業界として大幅な技術革新を図る必要があった。それらの背景として、1970年代の高度経済成長期に集中的に建造された施設が多く、2000年時点で炉令が30年を超え、老朽化が進んでいたこと、生産性の向上（省エネルギー化・低品位炭種の利用）、CO₂削減等環境課題への対応などを図る必要があった。そこで、官民共同の国家プロジェクトとして、次世代コークス製造技術の開発（SCOPE21: Super Coke Oven for Productivity & Environmental enhancement toward the 21st century）が1994~2003年間にわたり推進された。

SCOPE21の開発は、経済産業省の補助の下、(財)石炭利用総合センター（CCUJ）、鉄鋼連盟（鉄鋼5社、関係会社5社）が参加した共同研究開発体制で、Pilot Plant試験、実機試験等が実施され、所定の成果を得て、多数の特許を取得している。本開発による国内外の特許出願数は、石炭事前処理工程、乾留炉、窯出し、コークス改質等で65件、この内24件が登録された。プロジェクト終了後においても27件が出願されており技術開発水準の高さが認められる。

表2-2にSCOPE21の開発目標等の概要を示す。また、図2-1に次世代コークス炉プロセスの概要を示す。NO_x低減成果でみると、開発着手当時の一般の炉排ガス中のNO_x濃度は250~350ppmであったが、開発目標値は170ppm以下に設定されている。結果的に実証炉の報告事例では、新燃焼バーナの開発や、ヒートスポットを抑制して、排ガス中のNO_x濃度を100ppm以下に低減することが可能と確認されている。また、NO_x濃度75ppm（at炉温1250℃、O₂=7%vol）が達成された報告も見られる。（吉田ら、ISIJ、vol.90-9,2004）

その他の炉機能改善成果として、無発塵装入や中低温窯出しが可能なこと、炉蓋からのガス漏れの解消が報告されている。

表 2-2 SCOPE21（石炭高度転換コークス製造技術の開発）の概要^{*}

項目	開発目標	内容
開発目標	①石炭資源の有効利用 ②環境及び省エネルギー ③高生産性	非粘結炭の使用割合の増加：20%→50% 省エネルギー効果：20%（CO ₂ 削減に寄与） NO _x 30%低減、無煙、無発煙の達成 生産性3倍増加、設備費低減
開発成果	①日微粘結炭使用割合 ②省エネルギー ③NO _x 低減 ④生産性	50% 達成 20% 達成 30% 低減達成 2.4倍 増加
その他の効果	①実機設備上の設備費 ②製造費 ③設置スペース	16% 削減 18% 削減（Full cost base） ≒1/2に削減

(出典：第14回石炭利用技術評価小委員会より、METI、2005)

*) 正式名称 (次世代コークス炉の開発は俗称)

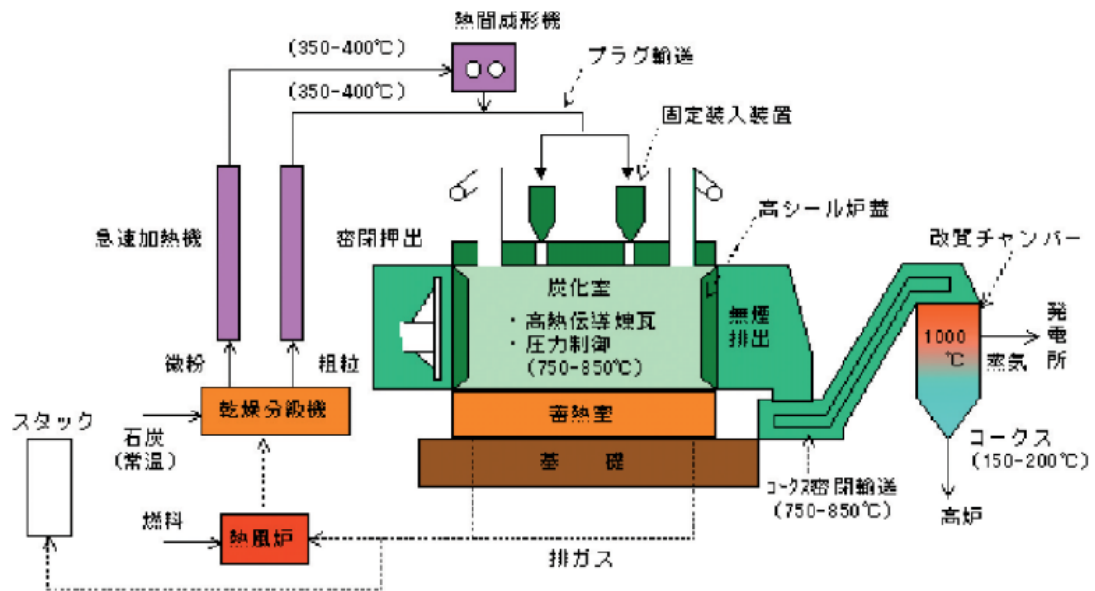


図 2-1 SCOPE21：次世代コークス炉プロセスの概要

(出典：C.C.T in Japan, J-coal)

3 日本におけるコークス炉の大気汚染物質排出基準値

コークス炉を対象とする日本の大気汚染に関する排出基準値は、ボイラや工業炉と同様に大気汚染防止法に準じて、汚染物質(煤塵、粉塵、悪臭等)の排出基準が定められており、これらの規制に準拠した対策が必要である。基準の様式については、表 3-4 に示す粉塵発生施設の構造・使用管理基準に定められる粉塵を除き、その他汚染物質についてボイラ等と同様に SO_x(K 値規制、総量規制)、NO_x(濃度規制、総量規制)、煤塵(濃度規制)の排出基準値が規定されている。悪臭物質の規制基準は事業所敷地境界線における濃度により規制されている。なお、日本の鉄鋼産業では、各事業所における大気汚染物質の排出源が多く、各々の排出量も多いため、大部分の事業所にて総量規制が適用されている。

煤塵については、汚染度が深刻な地域において、新設される発生施設に対して一般排出基準より厳しい特別排出基準が適用される制度がある。日本におけるコークス炉に関わる大気汚染物質の排出基準値として、表 3-1 に NO_x 排出基準、表 3-2 に煤塵の排出基準値、表 3-3 にコークス炉に関わる一般粉塵発生施設をそれぞれ示す。粉塵の場合、基準値規制ではなく、対象施設の指定と表 3-4 に示す構造、使用管理基準により規制がなされている。

表 3-1 NO_x 排出基準

施設	型 式	排出ガス量(万 m ³ N/h)	On (%)	排出基準値(ppm)
コークス炉	オットー型	10 以上 10 未満	7	170
	その他の型式	10 以上 10 未満	7	170

表 3-2 煤塵の排出基準値

(On=7 % vol)

施設	一般排出基準 (mg/m ³ N)	特別排出基準 (mg/m ³ N)
コークス炉	0.15	0.10

表 3-3 コークス炉に関わる一般粉塵発生施設

施設の種類	規模
コークス炉	原料処理能力 50 t/日以上
ベルトコンベア及びバケットコンベア (密閉式のものを除く)	ベルト幅 75 cm 以上、又はバケットの内容積が 0.03 m ³ 以上
破碎機及び摩砕機 (湿式のもの及び密閉式のものを除く)	原動機の定格出力 75 kW 以上

篩 (湿式のもの及び密閉式のを除く)	原動機の定格出力 15 kW 以上
-----------------------	-------------------

表 3-4 一般粉塵発生施設の構造・使用管理基準

施設の種類	基準
コークス炉	(1)装炭作業は、無煙装炭装置とするか、装炭車にフード及び集塵機を設置するか、又はこれらと同等以上の効果を有する装置を設置して行うこと。 (2)窯出し作業は、ガイド車にフードを設置し、又は当該フードから粉塵を処理する集塵機を設置するか、又はこれと同等以上の効果を有する装置を設置して行うこと。 (3)消火作業は、消化塔にハードル、フィルター又はこれと同等以上の効果を有する装置を設置して行うこと。
鉱物の堆積場	(1)粉塵が飛散しにくい構造の建築物内に設置されていること —その他省略—
ベルトコンベア及びバケットコンベア	(4)粉塵カバーで覆われていること —その他省略—
破碎機及び摩砕機	(1)粉塵が飛散しにくい構造の建築物内に設置されていること —その他省略—
篩	(2)フード及び集塵機が設置されていること。 —その他省略—

その他、コークス炉の大気汚染環境の煤塵等に関わる発生源では、炉の作業時のガス漏れ防止がある。米国ではCAA1990（Clean Air Act Amendments）で表 3-5 に示すようなガス漏れ規制値を規定している。

表 3-5 コークス炉のガス漏れ規制値（CAA、USA、1990）

部位・操業	MACT	LAER
ドア（リーク率）	5 %	3 %
装入蓋（リーク率）	1 %	1 %
上昇管（リーク率）	5 %	4 %
装入発煙時間	16sec/装入	16sec/装入

MACT : Maximum Achievable Control Technology

LAER : Lowest Achievable Emission Rate

コークス炉等のリークガスが発生源となる悪臭物質に関しては、悪臭防止法により 22 物質について規制基準で許容限度が定められている。表 3-6 に 3 物質の規制基準を示す。いずれの物質も境界線濃度は、悪臭物質の流量、排出口高から規定する拡散計算により求める。

表 3-6 悪臭物質の敷地境界線における規制基

(単位 : ppm)

物質名	A 地域	B 地域	C 地域
アンモニア	1	1	2
硫化水素	0.02	0.02	0.06
トルエン	10	10	30

A:B、C 以外の地区、B:農業新興地域、C:工業、工業専用地域

4 コークス炉

4.1 鉄鋼業におけるコークス

4.1.1 概要

製鉄業のコークスは先述した高炉用に利用される。また、生成ガスはコークス炉ガス (COG :Coke Oven Gas) と称され、所内で発生する高炉ガス (BFG 又は B ガス :Blast Furnace Gas) や焼結炉排ガス (Sintering Gas) 等と共に発電用等の燃料として利用されている。その他の副産品として、ナフタリン等を含有するタールやトリオール、キシロール、ベンゾール質を含む軽油物質がある。これらの成分質は化学製品として利用されている。

4.1.2 高炉におけるコークスの役割

高炉において、鉄鉱石に含まれる鉄分を取り出すため、酸化鉄を還元する必要がある、石炭から生成されるコークスが還元剤として使用される。銑鉄 1t を生産するために、鉄鉱石 260 kg に対し、コークスを約 430kg を必要とする。

高炉におけるコークスの役割は次の 4 点にある。

- ① エネルギー源：酸化鉄の還元反応に必要な熱供給（吸熱反応の補償と反応速度の上昇）
- ② 還元ガス (CO) 源
- ③ 溶鉄への加炭材
- ④ 通気及び通液性の確保

4.1.3 管理指標

高炉用コークスが具備すべき条件として、高強度、粒径 25～75mm、多孔質で反応性に優れていることが求められる。また、生成コークスの特性の管理指標として次の点が使用されている。

- ① コークス強度 (Drum Index) :

ドラム指数 (D.I) で表示される。50mm 以上の粒度のコークス 1kg をドラム (内径 1.5m、胴長 1.5m) に入れ、15 rpm で 10 分間回転後、15mm 篩上に残った重量%

を強度 84% と称して $D.I=84$ 又は DI_{15}^{150} で表す。日本工業規格 JIS K 2151 で

は 15mm 指数が用いられている。

- ② コークス反応性 (Reactivity of Coke)
- ③ 基質強度 (Micro Strength) :

日本では通常 H.E.Blaiden らが考案した 1mm コークス粒と鋼球との衝突によるコークスの粒度変化を測定して求める。

④ 気孔率 (Porosity of Coke) :

日本工業規格 JIS K2151 により次のように求めることとしている。

$$\text{気孔率 (\%)} = (1 - \text{見かけ密度} / \text{真密度}) \times 100$$

4.1.4 平均的組成

炭素分	90 %
灰分	≒ 10 %
揮発分・水分	<1 %

4.1.5 品質

コークス炉で石炭から乾留生成されたコークスは 1050℃以上の赤熱状であり、これを消火設備で消火し、約 200℃程度に冷却して製品化される。コークス品質は、湿式消火法と乾式消火法で異なるが、各々の一般的事例を表 4-1 に表す。

表 4-1 コークスの品質

項目	湿式消火法	乾式消火法
水分(%)	2~5	0.1~0.3
灰分(%)	11.35	11.39
揮発分(%)	0.50	0.41
平均粒度(mm)	65	55
粉率(カット後) (-15mm%)	10	13
気孔率(%)	49	48
DI ₁₅ ³⁰ (%)	83.5	85.5
DI ₁₅ ¹⁵⁰ (%)	12.9	17.9
小型反応後強度(%)	50	52

(出典 : CCUJ、製鉄技術 CCT 資料)

4.1.6 品質試験法

日本のコークス品質試験法は次の通り規定されている。

① 石炭試験法

水分 : 日本工業規格 JIS M8803、8811、8812 (全水分、湿分、固有水分)

工業分析 : 日本工業規格 JIS M8812

コークス化性試験 : 日本工業規格 JIS M8801 など

ボタン法、デイレメータ法、ログ法、粘結力指数測定法など

コークス試験法：一部日本工業規格 JIS K2151、回転強度試験法、落下強度試験法
比重及び気孔率測定法、マイクロストレングス法（コークス気孔壁の構造強度測定）、反応性

② コークスのサンプリング法：日本工業規格 JIS M8811

4.2 コークスの製造

銑鉄生産工程におけるコークス炉の位置付けは、図 4-1 や図 4-2 のコークス製造系統の事例に示す通り、先述原料炭から高炉用原料を生産するための工程である。

コークス炉はほぼ共通して概念的に図 4-3 に示すような構造をしており、燃焼室と炭化室は交互にサンドイッチ状に数百枚が横置配列されている。原料炭は、炭化室上部の穴から落下装入され蓋を閉めて密閉される。(装炭工程) 装入された原料炭は、耐火煉瓦を隔てた両側の燃焼室で高炉ガスなどを燃焼させた熱により約 1100~1350℃に加熱され、12~20 時間空気を遮断して乾留される。この過程で原料炭中の固定炭素分などは、炭化室下部で融着固化して赤熱状態のコークスとなる。揮発分は蒸発・分解し、炭化室上部の配管より回収される。乾留が終わった赤熱コークスは、押出機により水平方向に取り出され、直ちにコークス乾式消火設備 (CDQ :Coke Dry Quenching) において、窒素ガスにより消火冷却される。窒素ガスは 800℃以上になるため、顕熱量が大きく、熱回収し発電用蒸気等に利用される、或いは、コークス炉で循環利用される。また生成ガスは、燃焼用空気の加熱で冷却され、コールタール・ベンゼン・アンモニア・コークスガスなどが沸点別に分離され化成成品、燃料等に利用される。

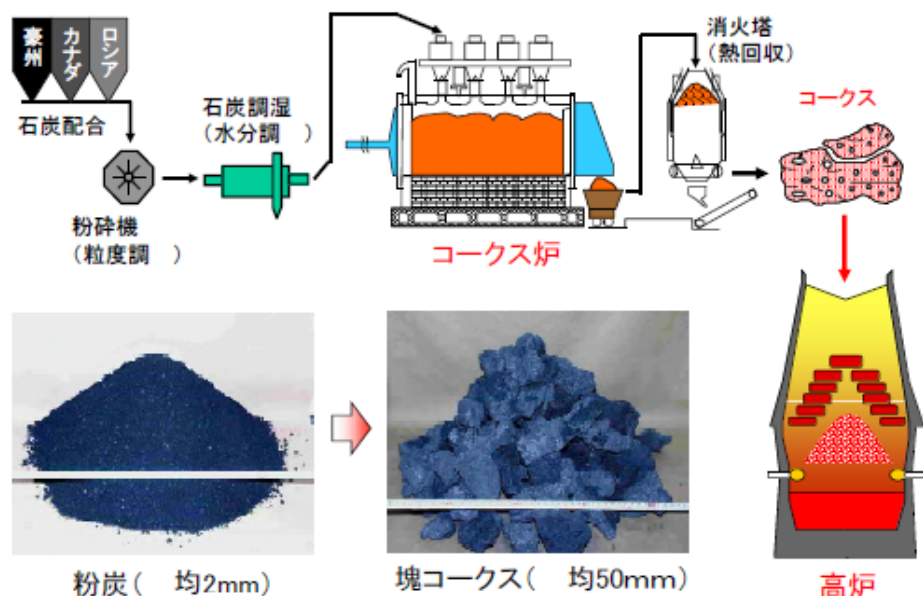


図 4-1 銑鉄生産工程におけるコークス炉の位置づけ
(出典：2012 年度石炭基礎講座、製鉄技術、2013)

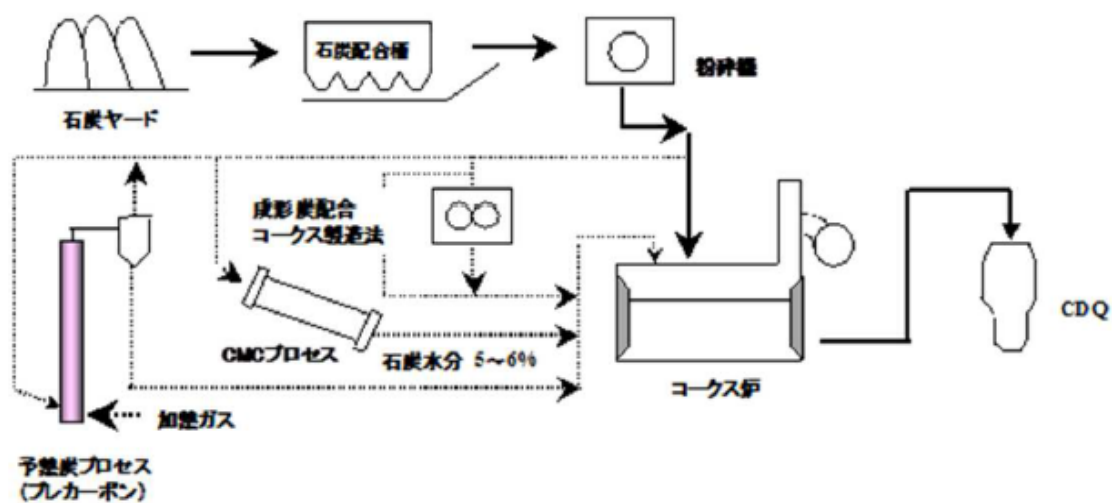


図 4-2 コークス製造の製造系統の事例

(出典：尹,2013. 炭素材の鉄精錬への応用 九大講義資料)

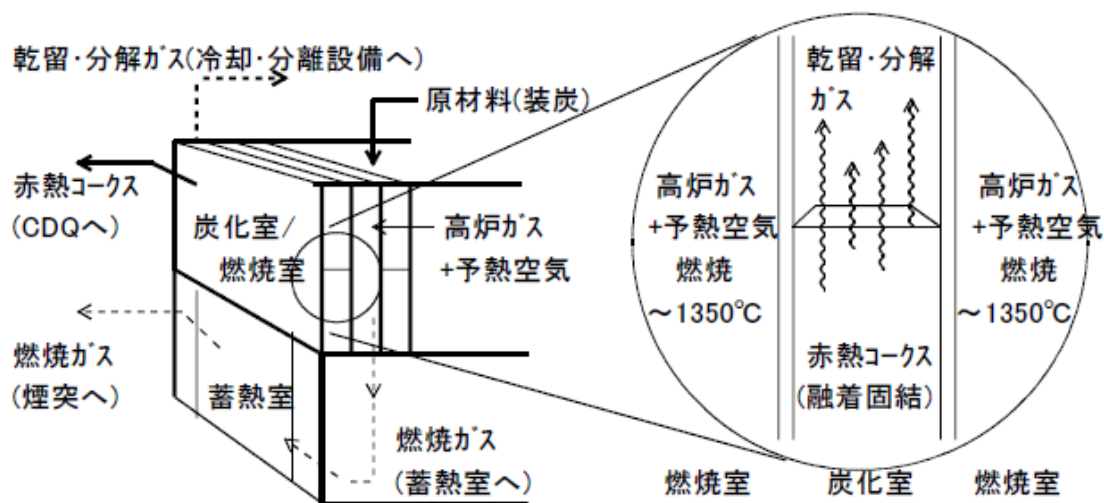


図 4-3 コークス炉の概念構造 (高炉ガスを熱源とする事例)

(出典：戒能、2012. 補論独3 経済産業研究所)

4.3 コークス炉の構造

現在のコークス炉の典型的な炉体構造は、炉体の下部に蓄熱室があり、その上部に燃烧室と炭化室とが交互に配列されたものである。燃料ガスおよび空気は蓄熱室で予熱され、燃烧室で燃烧後、再び蓄熱室で熱回収されて、排出される。コークス炉にはコークス炉ガ

ス (COG) のみを燃料とする単式炉と、高炉ガス (BFG)、コークス炉ガスのいずれも使用できる複式炉がある。

各種の炉の構造面では、燃料・空気の供給方法、ガス循環、蓄熱室の配列、燃焼室の構造などで特徴がある。代表的なコークス炉の各部位の構成を図 4-4 に示す。

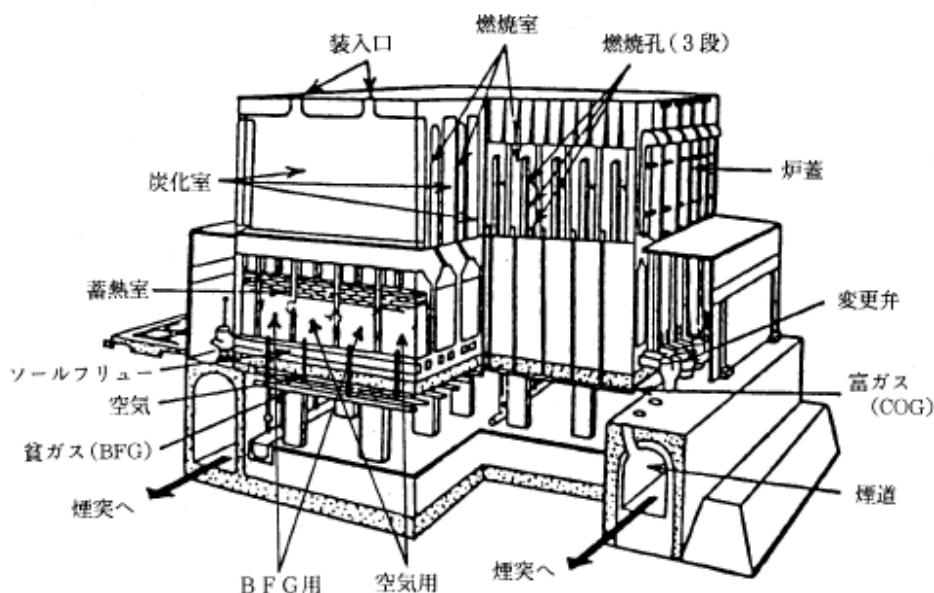


図 4-4 代表的なコークス炉の部位構成

(出典：重野ら,1994. 東北大院国際文化研論)

図 4-5 に示すコッパース式 (Koppers) コークス炉は、排ガス循環方式による長炭化や、燃焼室上部に補助炎道機構を設けて炉頂部温度調整を図っているなどの特徴がある。

図 4-6 に示すオットー式 (Otto) コークス炉は、本来のオットー式コークス炉を日本において改良した型式のものである。炭化室の下に貧ガス(高炉ガス)用、空気用の二つの蓄熱室を設けて、燃料毎に細分化されたバーナを有するのが特徴である。

日本の製鉄所におけるその他の炉方式では、欧米からの技術導入技術や自社における改良型炉で次のような多数の方式炉が設置されている。

- カールスチル (Carl Still) 式
- 新日鉄 M 式
- 新日鉄 S 式
- ウイルプット (Wilputte) 式
- DKH 炉

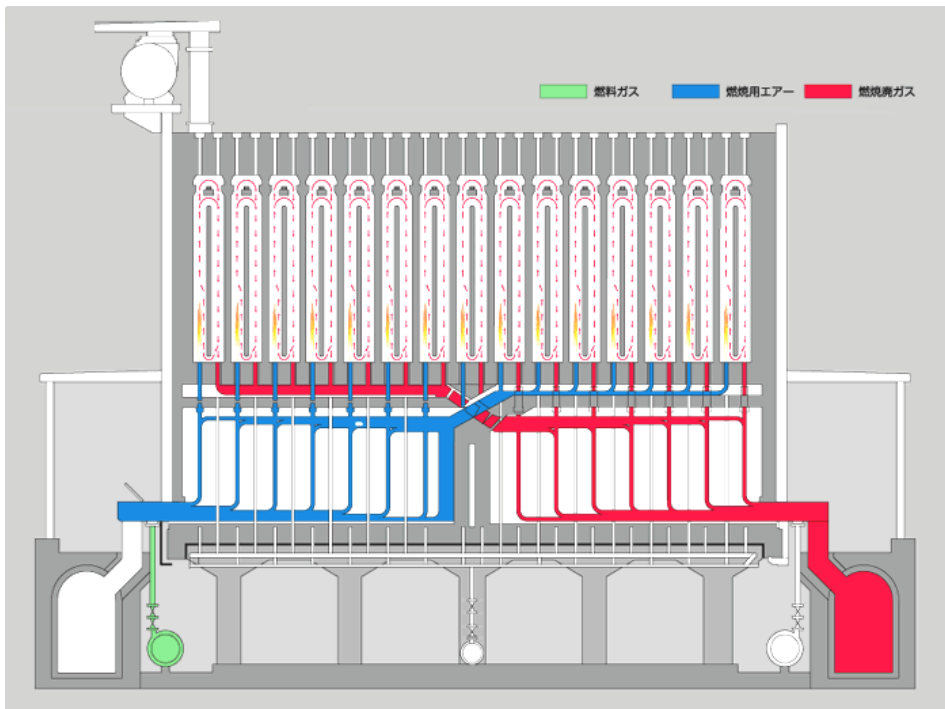


図 4-5 コッパース式コークス炉の構造

(出典：コークス史料館HP)

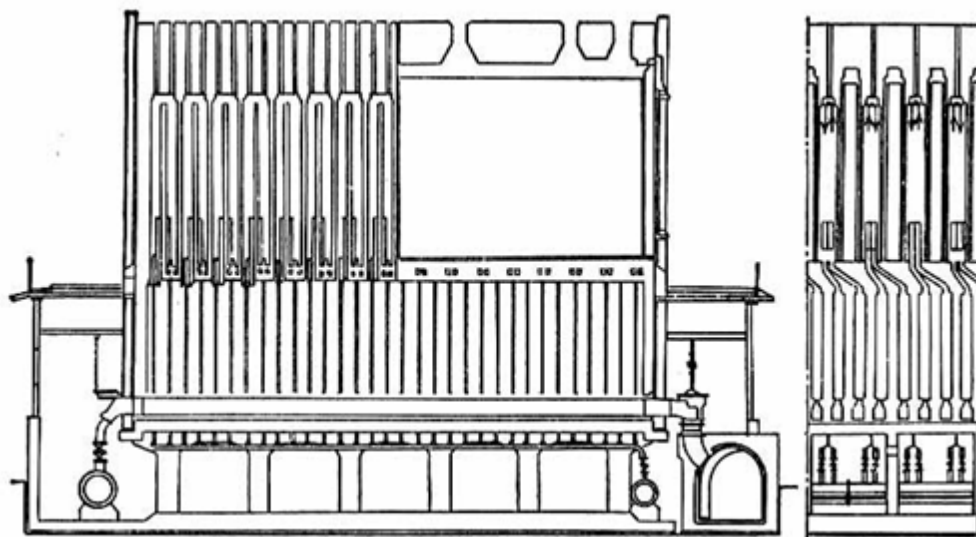


図 4-6 オットー式コークス炉構造

(出典：燃料協会、燃料便覧、1974)

4.4 コークス炉付帯装置

コークス炉には原料炭の前処理として、図 4-2 に示すように石炭粉砕機、配合装置、調湿装置（調湿炭装入 CMC : Coal Moisture Control）等が付設される。後処理では消火設備および熱回収ボイラ、集塵機、ガス清浄化装置（脱硫、脱 NH₃、軽油回収）などが付設される。図 4-7 に乾式消火装置（CDQ）、図 4-8 に CDQ 装置エネルギー回収の系統の事例を示す。なお、CDQ は省エネルギー効果が大きく、日本では NEDO モデル事業における成果が評価され、中国の承德、杭州等の製鉄所に導入実績がある。

その他、付帯補機として、原料炭装入装置や押出機、ガス精製工程の第一段階の冷却工程で副生物として生成されるタールの回収装置（図 4-9 参照）がある。また、これらの他に現在では不可欠な装備として、多数の炉団の温度を適切に制御する自動制御機器（加熱制御、燃焼制御等）などがある。特に制御機器に関して、日本の各企業では独自に開発した多くの特許を保有している。（例：公告 No.WO2014030438A1 など）

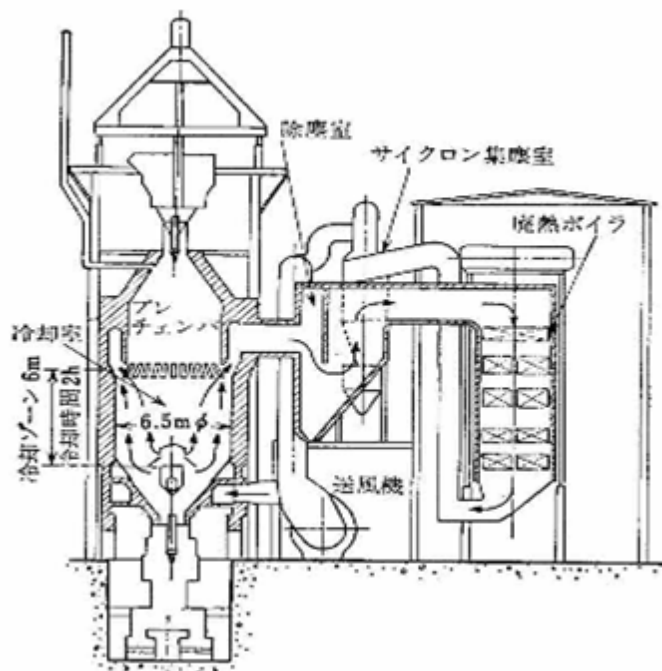


図 4-7 乾式消火装置

(出典：鉄鋼便覧)

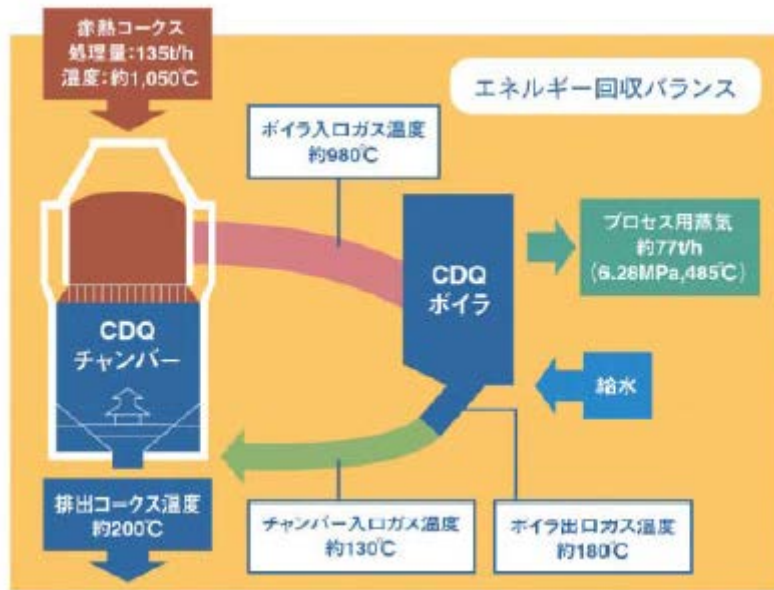


図 4-8 CDQ 装置エネルギー回収の系統

(出典：CCUJ、製鉄技術 CDQ 技術)

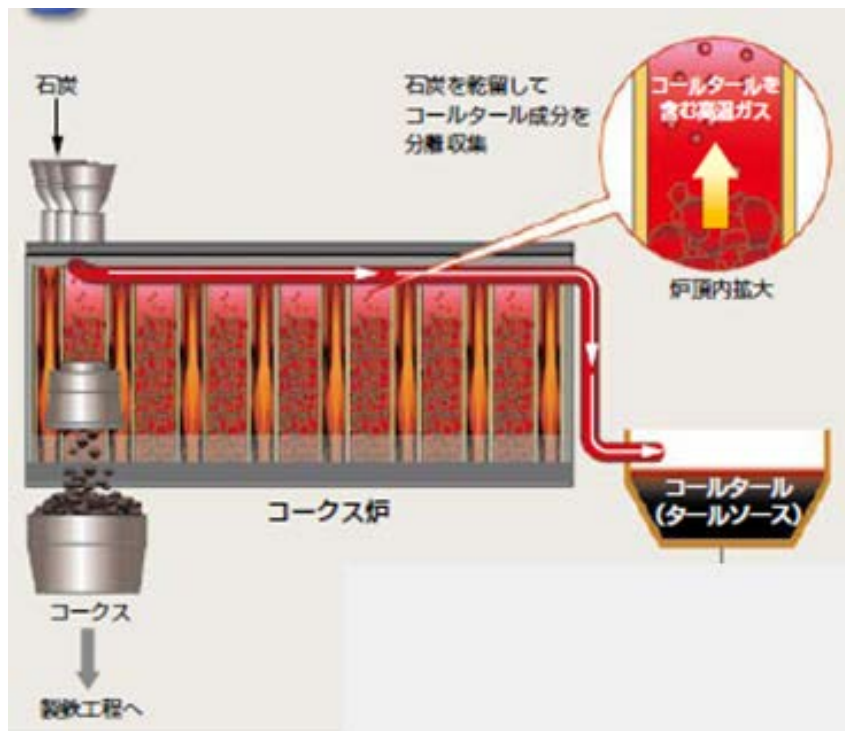


図 4-9 タール回収系統の概念図

(出典：コールタール蒸留・製品化技術 化学の世界 vol.52)

5 鉄鋼コークス炉における窒素酸化物の排出削減対策技術

5.1 コークス炉ガスの精製・浄化

5.1.1 目的

コークス炉ガス (COG)の一部は直接コークス炉用燃料として用いられるが、その他に高炉用や所内の製綱・圧延部門等の燃料としても使用されている。また、都市ガスや化学原料等に利用される場合には、冷却・脱硫・脱アンモニア・軽油回収等の精製工程を経た後で利用される。COG 精製プロセスの代表的事例を図 5-1 に示す。

製鉄所や炉型式によって一定ではないが、コークス炉ガスは一般的に H_2/O_2 vol. 比が高く、燃料価値が高い。表 5-1 に粗コークス炉ガスの組成の事例を示す。ガス発生量は石炭 1 トン当たり $300\sim 400m^3$ 、ガスの低位発熱量は $4,780\sim 5,000 kcal/m^3$ にある。

なお、この事例では NO_x の生成濃度に関する HCN 濃度は $150\sim 200 ppm$ 、NO 濃度は基準値 $170ppm$ 以下の計測値が報告されている。

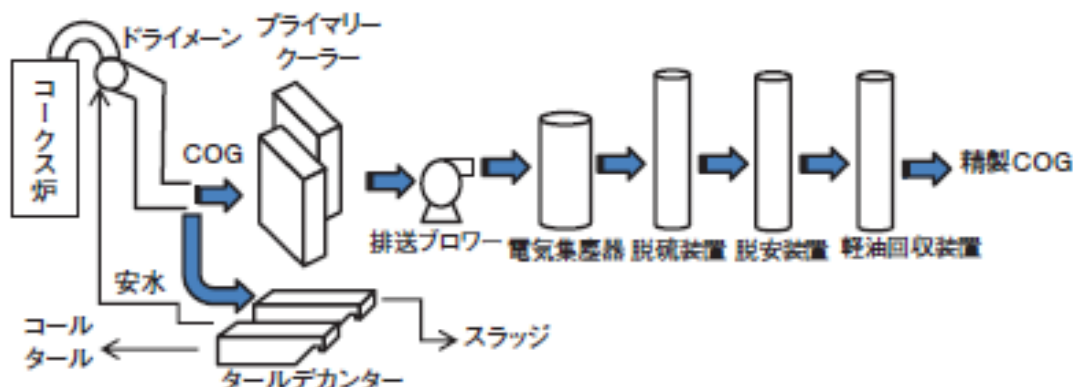


図 5-1 COG 精製プロセスの事例

(出典：S 社製品紹介、2011)

表 5-1 粗コークス炉ガス組成の事例

事例	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	C _n H _m (%)	CO (%)	CH ₄ (%)	H ₂ (%)	N ₂ (%)
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

(出典：日立評論 vol.44.3,1962, 有機合成化学 vol.18.7,1960,

水素エネルギーシステム Vol.35-1 2010 など)

5.1.2 脱硫処理

コークス炉ガスは硫化水素(H_2S)を $4\text{--}7\text{g/m}^3\text{N}$ 含有しており、燃料として使用する場合には腐食原因及び SO_x の発生源となるため、脱硫処理を行う必要がある。脱硫方式には乾式と湿式があるが、ガス量が大きいため湿式の脱硫方式が多く普及しており、酸性物質である硫化水素をアンモニア又はリン酸ソーダ等のアルカリ性吸収液に接触させて除去する Takahax 式や Fumaks 式技術が確立されている。(特許例:特開 2009-114233、特開昭 61-255993、特開昭 63-86793、特開 2011-93987 など)

5.1.3 アンモニア回収

コークス炉ガス中に $6\text{--}10\text{g/m}^3\text{N}$ 含有するアンモニア除去処理には、Phosam 法や Carl Still 法、Koppers 法などが採用されている。Phosam 法は米国で開発された方式で、ガス中のアンモニア分を $H_2(NH_4)PO_4$ 溶液で吸収除去した後、水蒸気蒸留により液体アンモニアとして回収する方式である。Phosam 法の回収工程を図 5-2 に示す。尚、回収されたアンモニアは所内の発電所等で排煙脱硝剤として利用されている。

これらの他、COG を燃料として利用する際には脱硫や脱燐等の浄化をするが、 NO_x 生成源となるシアン化水素についても、その他物質の湿式処理や吸収処理中に加水分解・重合反応によってギ酸等に変化するため、 NO_x 低減に繋がる。

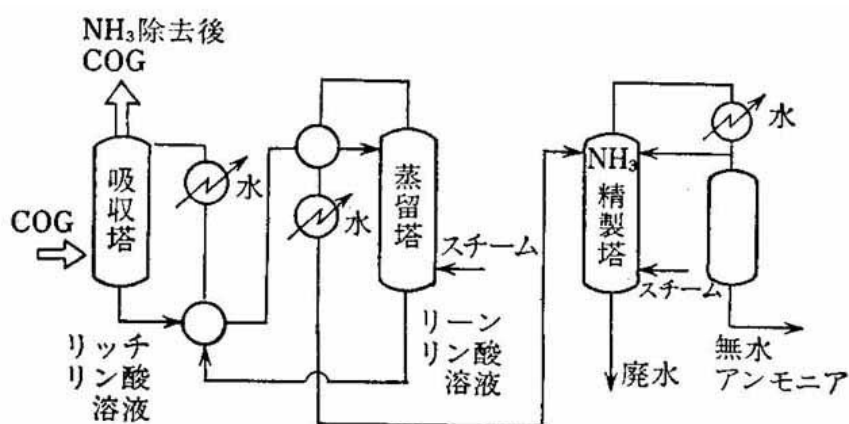


図 5-2 NH_3 回収工程

(出典：鉄鋼便覧)

5.2 最終排出ガスの窒素酸化物対策

日本の製鉄用コークス炉は、前述のようにコークス炉ガス(COG)を直接大気放出する事例はなく、高炉ガス等所内の他施設の排ガスと混合して、熱カスケード的に燃料などに利用されている。また、製鉄所の最終排出点で集合した形で脱硝処理がされる。特に製鉄所内における施設は顕熱値が大きく、熱回収利用システムにおける熱回収率や効率的な系統設計は省エネルギーコストへの影響が大きいため、所内全体で十分な検討が求められる。

コークス炉ガスは、ガス中に HCN や NH₃ を多量に含むため、燃焼時には NO_x が発生し易い。これらの NO_x 生成低減法は、ボイラや工業窯炉と同様の手法が取られ、燃焼排ガスの再循環法（火炎温度の低下）、部分燃焼法（低 O₂ 濃度）等がある。（例：特許開 No.昭 61-133286, 特許開平 No.平 1-306494 など）

廃熱回収ボイラ後の排ガスの脱硝法は、工業用ボイラや工業窯炉等と同様に乾式無触媒還元法脱硝（SNCR）や選択触媒還元法脱硝（SCR）が適用されている。これらの排ガスには SO₃ が多く含まれているため、脱硝性能の低下が発生する。このため、脱硫処理や適用ガス温度、触媒選定に留意する必要がある。日本の鉄鋼企業はこれらの対策に関連する多くの技術特許を所有している。（例：公開 No.特開 2010-240521 など）

加熱用燃焼ガスにおける NO_x 対策は、炭化室の温度分布の均一化やバーナの配置の工夫、燃焼排ガスの循環による長炭化を図る等、燃焼段階で NO_x 生成を抑制するような対策が講じられている。排ガスの脱硝手法に関しては前述同様に SNCR が採用される。

5.3 燃焼管理と熱精算による熱効率の向上

コークスの製造工程で消費する全エネルギーの約 90%は、コークスの乾留熱量として消費される。乾留熱量に関連するコストは原料炭コストと共に製造コストの大きな影響をおよぼすため、乾留熱量提言による大幅な製造コスト低減が見込まれる。

日本では熱管理上、定期的にエネルギー・物質について投入/産出の収支を精算及び管理し、関係行政機関に報告する義務がある。その為に要する計量監視や自動燃焼管理システムが全コークス炉に採用されており、炉団と共に窯毎制御する方法も開発されている。装入炭水分、装入炭量測定、各窯の燃料温度、発生ガス温度、赤熱コークス温度、排ガス分析などの測定値情報を元に火落ちを判定して、炉団単位の投入熱量調整と窯毎の燃料ガス分配調整し、窯毎の火落ち時間を一定に制御する。この効果により熱精算面で、乾留熱量は 1970 年代より現在では大幅な低減が見られる。参考に図 5-3 にコークス炉の熱収支・物質収支の試算事例を示す。

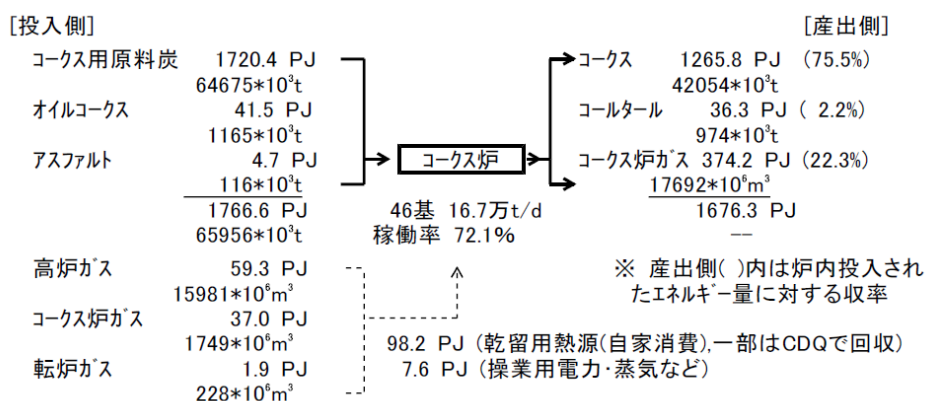


図 5-3 コークス炉の熱収支・物質収支の試算事例

(出典：戒能ら 2012 . (独) 経済産業研究所)

6 EUにおける窒素酸化物及び硫黄酸化物の低減対策について

EU 諸国ではコークス炉の NO_x 及び SO_x の低減対策に関する利用可能な最適技術(BAT : Best Available Technology)が発効されている。(Commission Implementing Decision of 28 Feb. 2012、notified under document C(2012) 903 E.U) BAT No.49 ではコークス炉の煤煙排出削減策として次の技術の実施が告示されている。

- ① 炉の操業において、燃焼室及び炭化室からのガス漏洩を防止すること
- ② 既設炉においては、燃焼室及び炭化室からの漏出を防止するため補修すること
- ③ 新設炉においては、熱伝導率の優れた薄い煉瓦や耐化材で構成する新しい蓄熱機能を有する低 NO_x 形を導入すること

COG の脱硫方式に対する BAT として次の 2 方式が推奨されている。

- ① 吸収方式による脱硫
- ② 湿式酸化法による脱硫