

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1）
—セメント分野—

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 (セメント)

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セメント産業では、セメント工業大気汚染物排出基準（GB4915-2013）により、NO_x 排出基準が改定され、新規事業場では2014年3月、既設事業場では2015年7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	日本のセメント製造業の概要.....	1
1.1	セメント製造業の変遷.....	1
1.1.1	概要.....	1
1.1.2	セメント製造企業.....	2
1.2	セメントの種類.....	3
1.3	セメント生産.....	4
1.4	エネルギー消費.....	6
1.4.1	エネルギー消費の実態.....	6
1.4.2	エネルギー消費率とCO ₂ 排出量削減.....	9
1.4.3	排熱回収発電の導入.....	9
2	日本のセメント製造業における環境保全に係る規制及び政策.....	11
2.1	セメント製造業が排出する大気汚染物質の法的規制対象物とその定義.....	11
2.2	窒素酸化物抑制管理施策.....	12
2.2.1	排出基準.....	12
2.2.2	総量規制の導入.....	13
2.3	セメント製造業における省エネルギー施策.....	15
2.3.1	焼成方式の転換.....	15
2.3.2	排熱回収発電の導入.....	16
2.3.3	熱管理の徹底.....	16
2.4	日本におけるセメント製造業と廃棄物処理.....	17
2.4.1	概説.....	17
2.4.2	エコセメント.....	20
2.4.3	塩素濃度の制限.....	22
2.4.4	廃棄物処理と適正な維持管理基準.....	22
2.5	窒素酸化物の測定方法.....	23
2.5.1	常時監視体制と計測の必要性.....	23
2.5.2	ガス流量・ガス温度の測定.....	25
2.5.3	試料採取方式.....	27
2.5.4	窒素酸化物測定方法.....	28
2.6	管理者制度.....	30
2.7	公的機関等における窒素酸化物削減対策の技術開発・助成等.....	32
2.8	セメント業界の対応.....	32
3	セメント製造業における窒素酸化物の排出削減対策技術.....	33
3.1	セメント製造概要.....	33

3.1.1	セメントの定義・性状・種類等	33
3.1.2	セメント原料	33
3.1.3	セメント製造工程	34
3.2	窒素酸化物 (NO _x)	37
3.2.1	基本原理	37
3.2.2	窒素酸化物と他の大気汚染物質の生成との関連	40
3.3	窒素酸化物削減技術の基本原理	40
3.4	燃焼場における窒素酸化物生成抑制技術	42
3.4.1	燃料の低窒素化	42
3.4.2	低 NO _x バーナの装備	42
3.4.3	低酸素燃焼法	45
3.4.4	排ガス再循環法	46
3.5	排煙脱硝技術	46
3.5.1	選択接触触媒還元法	46
3.5.2	無触媒脱硝法	47
3.6	焼成プロセスの改善—火炉熱負荷の低減	47
4	窒素酸化物発生施設の運転管理	50
4.1	監視システム	50
4.2	総合的省エネルギー管理	53
5	セメント産業における窒素酸化物抑制対策まとめ	55
6	世界におけるセメント製造業の窒素酸化物排出抑制技術導入状況	57
7	日本における対策導入事例	59

1 日本のセメント製造業の概要

1.1 セメント製造業の変遷

1.1.1 概要

日本におけるセメントの利用は、1975年に英国、仏国から8tの輸入が確認されている。日本国内における製造は1875年5月19日に大蔵省セメント製造所（深川撰綿製造所）において開始されている。焼窯は堅窯2基（堅窯、高さ14.5m、直径最上部1.2mφ、中央部3.6mφ）によるものであった。その後、山口藩の製造会社(1881年)、川南セメント工場(1882年)、東洋組(1882年)の工場が建設された。1883年度の国内生産量は1,500tに達し、国内需要の約40%を賄う産業に発展している。1883年~1891年代は、政府の殖産興業政策年代であり、セメント産業は官民資本による代表的な産業となり、1891年には輸出産業まで成長している。当時の生産様式は、堅炉（徳久利窯）によるもので、原料は、石灰、粘土質として川泥を用い、燃料としてコークス、無煙炭を使用した。堅窯能力は、13t/回・窯炉の数窯により、月産70~145t程度であった。

1894年~1914年代は、建設用材としてセメントの優れた堅牢性が実証され需要の伸張があり、堅窯生産方式の爛熟期を迎えている。現代の主流窯炉である回転炉（Kiln）は、1903年に浅野セメント東京工場、1913年に小野田セメント第二工場に導入されている。堅窯方式は1920年前に近代的製造ラインから撤退した。回転炉方式は堅窯方式に比べて、連続運転、一貫製造工程、生産規模の増大等の有利な特徴が認知されたことが普及の要因である。

更に1916~1917年頃から、クリンカ冷却、電気集塵機の装備（浅野セメント東京深川工場）、1920年排熱回収発電の設置（小野田セメント）が行われ、省エネルギーや環境対策が実施されている。1929年~1939年にかけて、セメント業界は経営面や技術面で著しい変容を経ており、レポールキルン(Lepol Kiln)の導入、生産品種の多様化、事業所当たり生産規模の増大(3,000~5,000t/日から10,000t/日)が見られる。第二次世界大戦後、設備の荒廃や石炭等の供給統制等のためセメント産業は低迷期に至るが、1951年度にはクリンカ生産量680万tの戦前の水準に回復している。以後1965年まで発展期を迎え、生産技術面では、各社でロングキルン(1954年徳山セメント)レポールキルン、改良焼成法、シャフトキルン等々が導入され、生コンクリートの普及や、使用燃料も石炭から重油へと漸次転換が見られた。1973年には、国内経済の好景気を背景に建設ブームを迎え、セメント年間生産高は7,729万tに達し、アメリカを凌ぎロシアに次ぐ世界第2位を記録した。

1970年代から1985年代にかけて、製造法では、SP法(Suspension Pre-heater System)、Lepol法、NCB法は漸次各種のNSP法(New Suspension Pre-heater System)に転換され、仮焼炉の設置、排熱回収発電によるエネルギー回収、環境保全面では、粉じん、煤じん、SO_x、NO_xなどの大気汚染物質の排出抑制対策が図られ現在に至っている。特に日本のセメント製造業における製造工程の改善は著しく、1963年からのSP化(第一セメント川崎工場)、1971年からはNSP化(三菱セメント東谷工場)が始まり、SP法の脱硫装置的效果により、SO_x

排出量規制は解消された。同時に NSP の導入により、セメント産業は NOx 排出濃度が下がり排煙脱硝装置の装備を必要としない産業となった。1990 年代に入り、新たな対策として地球温暖化抑制を目的とする CO₂ 排出抑制や環境調和型企業を指向する気運も関わり、地域環境保全の推進が求められることとなり、低公害燃料への転換、省エネルギー対策としての熱効率の向上、原料工程や仕上工程における破碎動力の削減などの取り組みを経験している。

さらに、日本のセメント製造業が世界に誇れる技術面として、NSP 方式による高エネルギー効率化の達成と共に、廃棄物の原料化・燃料化を図りエコセメント等に再資源化されていることが挙げられる。廃棄物の利用は、生活系廃棄物及び産業廃棄物の固形・液状廃棄物の適正処分の方策としての評価だけでなく、現在セメント産業の重要なビジネスの一つまで成長しており、経営面での利得と地域環境保全推進の相乗効果を生むことで高く評価されている。

1.1.2 セメント製造企業

日本のセメント産業の歴史は、前述 1875 年最初のセメント製造が開始して以来今日までが構造改善と企業再編の歴史と言われるように、その時代の市場や経営資本の移転等の情勢を反映し、生産技術や企業体制を変化させてきている。2013 年 4 月現在、企業数 17 社・30 工場、10 販売ブランドがあり、クリンカ生産能力は 54,951 千 t/年である。

最近の日本のセメント産業は、表 1-1 に示すような経緯で現在に至っている。このような経営主体の変化は生産技術の改善、生産数量の増減、販売数量の制約、過剰設備の廃棄、共同販売会社の設立等の経緯に強く影響を及ぼしている。

表 1-1 最近の日本のセメント企業の変遷

年代	会社・企業グループ等
1984	5 つの共同販売会社設立 ・中央セメント ・不二セメント ・大日本セメント ・アンデスセメント ・ユニオンセメント
1990	統合 三菱マテリアル (三菱鉱業セメント + 三菱金属)
1991	解散 (中央セメント、ユニオンセメント) 合併 (三菱マテリアル + 東北開発)
1994	解散 (大日本セメント、アンデスセメント、不二セメント) 合併 秩父小野田セメント (小野田セメント + 秩父セメント) 合併 住友大阪セメント (住友セメント + 大阪セメント)
1998	販売会社設立・合併 宇部三菱セメント (宇部興産+三菱マテリアル) 合併 太平洋セメント (秩父小野田セメント + 日本セメント)
2003	合併 ディー・シー (第一セメント + 中央商事)
2004	撤退 三井鉱山

	資本提携 麻生ファージュセメント (麻生セメント+ 仏ラファージュ)
2010	秩父太平洋セメント 生産停止
2012	親会社合併による変更 日鉄セメント→日鉄住金セメント 新日鉄高炉セメント →日鉄住金高炉セメント
2013	資本提携先減資措置 麻生ファージュセメント → 麻生セメント

(出典 : JCA 2013)

現在の製造方式では全て乾式が占めており、そのほとんどがNSP方式である。湿式は1985年時に1基のみ稼働しており、659,000tが生産されていたが1980年代で既に廃棄された。2000~2012年時点における製造能力及びキルン保有基数を表1-2に示す。

表 1-2 様式別製造能力及びキルン保有基数

製造様式			2000年	2012年
乾式	NSP	基数	55	44
		生産能力 (t)	77,108,000	47,111,000
	SP	基数	10	9
		生産能力 (t)	10,115,000	7,650,000
湿式	W	基数	0	0
		生産能力 (t)	0	0

1.2 セメントの種類

日本で生産・消費されているセメントは、品質の改善、性能安全性の向上、生産効率の向上や生産者・消費者が安心して品質が保証された製品を取り扱う目的で、表1-3に示すように混合材、成分、強度等で分類規格化された日本工業規格（JIS）が制定されている。

表 1-3 セメントの分類（JIS）

セメントの種類		混合材（質量%）	少量混合成分（質量%）
ポルトランドセメント JIS R 5210-2009	普通 / 早強 / 超早強	—	<5%
	中庸強/低熱/耐硫酸塩		
高炉セメント JIS R 5211-2009	A / B / C	5~30 / 30~60 / 60~70	クリンカ、石膏及び少量混合成分の含量に対し質量

			で <5%
シリカセメント JIS R5212-2009	A / B / C	5~10 / 10~20 / 20~30	
フライアッシュ セメント JIS R 5213-2009	A / B / C	5~10 / 10 ~ 20 / 20~30	
エコセメント JIS R 5214-2009	普通 速硬		<5%

1.3 セメント生産

セメント製造業における生産は需要市場の動向を強く受け、設備能力を超えて生産されるケース、逆に負荷の低い生産を余儀なくされるケースはしばしば見られ、生産量の変動は窒素酸化物排出量に関係する操業条件、とりわけ燃焼条件に大きく影響する。

日本のセメント生産量は、1996年度の99,267,000tをピークに、以降公共事業の抑制や住宅建設数の減少、リーマンショックによる世界的景気後退に伴う民間建設工事の減少等の影響から2011年度57,576,000tになるまで減少した。殊に内需量は1990年度86,286,000tの最高時から2010~2011年度までに半減している。

2011年度セメント種類別生産動向では、ポルトランドセメント76.5%、混合セメント23.2%、輸出用クリンカ・その他0.3%で、2000年代に入りこの構成比は現在までほぼ一定で推移している。図1-1は日本のセメント生産量・需要・輸出入の推移である。

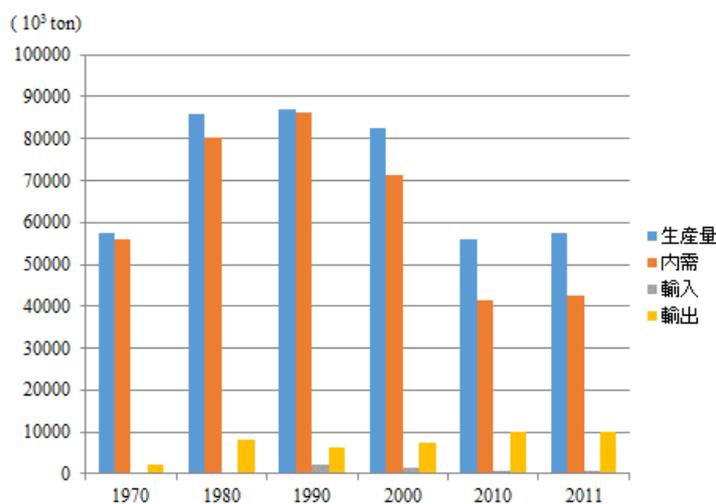


図 1-1 日本のセメント生産量・需要・輸出入の推移

(出典 : JCA、Cement Handbook 2012)

一方、世界のセメント生産量の変遷をみると第二次世界大戦後、世界経済の発展に合わせ急速に生産量が増加した。1945~1973年間の増加量は伸び率10%/年、20Mt/年を続け約11倍に増加し、その後2004年頃まで4.1~4.8%/年の伸びを記録している。(OECD、Round table on sustainable development, Can Transnational Sectoral Agreement help reduce G.H.G Emission)

2005年ごろまでは、Lafarge(仏)、Holcim(スイス)、Heidelberg Cement(独) Buzzi Unicem(伊)など欧州の大規模生産企業がトップ10社を占めていたが、その後中国の生産量が飛躍的に伸び、2011年度現在中国の生産量は世界の約1/2を占めている。需要先は原料の調達が各地で容易なこと、製品輸送費が高いことから、国内・地域内取引が中心で輸出量は全生産量の5%程度である。

製造方式みると、乾式キルンは1980年代で切替が終わった日本、大半が乾式の韓国に比べて、ロシア、東欧などでは、石灰石の湿分が高いため、依然湿式、半乾式なども使用されている。中国では堅炉数も多い。

世界のセメント生産量は、2009年度3,080,871千tで、このうち中国が世界生産量の1/2以上を占めており、需要量においても同様である。図1-2に世界主要国のセメント生産量の推移を、表1-4に世界主要国のセメント企業数と製造能力を、表1-5に世界主要国のセメント需給を示す。

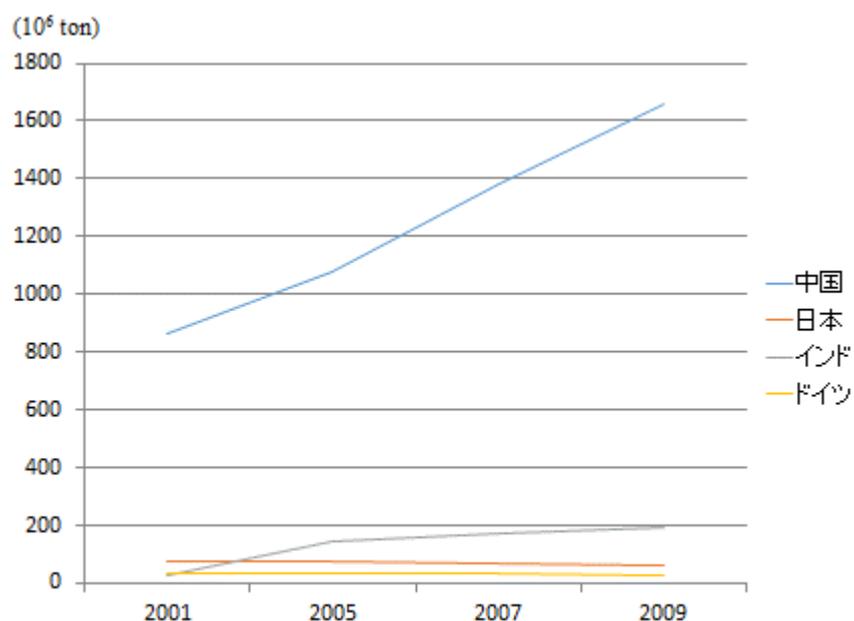


図 1-2 世界主要国のセメント生産量の推移

(出典：JCA、Cement Handbook 2012)

表 1-4 世界主要国のセメント企業数と製造能力 (2009 fyr)

国名	企業数	一環工場	Kiln 能力 (10 ³ ton)
中国	N.A	N.A	(1,657,125)
日本	18	32	63,441
インド	47	142	322,610
韓国	8	11	61,476
アメリカ	28	97	98,700
ロシア	19	40	73,600
イタリア	28	88	60,000
ドイツ	22	36	33,600
スペイン	(17)	50	55,000

() 内は推定、中国はセメント生産高を示す。

出典 : JCA、Cement Handbook 2012

表 1-5 世界主要国のセメント需給 (2009 fyr)

(単位 : 10³ ton)

国名	生産量	消費量	輸入量	輸出量
中国	1,657,125	1,622,216	820	15,611
日本	59,567	44,308	802	10,720
インド	190,020	185,072	2,035	5,670
韓国	52,212	48,473	831	4,572
アメリカ	63,956	70,530	6,767	1,007
ロシア	45,753	44,042	1,453	2,805
イタリア	36,317	36,086	3,237	1,955
ドイツ	30,441	25,384	1,186	7,015
スペイン	30,860	28,913	2,848	2,838

(出典 : CEMBUREAU, 各国セメント協会)

1.4 エネルギー消費

1.4.1 エネルギー消費の実態

セメント産業は典型的なエネルギー多消費産業であり、生産コストに占めるエネルギー

費の割合が高い。セメント製造工程における熱収支の区分は表 1-6 に示すが、燃料の燃焼熱を利用した入熱量は、エネルギー消費の約 70%を、高温が必要となるセメント焼成工程で消費している。NSP 方式では、SP やクリンカクーラ (AQC) から放出される排ガス熱を回収し発電している。

日本セメント協会統計によると、2008~2011 年度エネルギーの平均原単位は、3,439 MJ/t-cement である。この値は 1990 年比-4.4%である。1996 年 12 月にセメント業界は「日本経団連環境自主行動計画目標」に参画し、省エネルギー目標値として掲げたセメント製造用エネルギー原単位 (セメント製造用+自家発電用+購入電力) において、1990 年/2008~2012 年比 - 3.8%を達成している。この原単位は欧米・韓国に比較して、30~70%低い値である。なお、廃棄物を使用しない原単位は、2,500MJ/t-cement である。

このような成果は、1990 年代に高効率焼成方式である、SP、NSP 方式に 100%転換され、かつ、世界に例をみない徹底的な熱管理による合理化や排熱回収の実施、原石破碎工程や石炭ミルの効率改善が図られた結果である。図 1-3 にセメント製造用エネルギー原単位の推移、図 1-4 セメント製造用熱・電力エネルギー原単位の推移を示す。

表 1-6 セメント製造工程における熱収支の区分

有効に利用される熱量 ←燃料燃焼熱 + 原料空気顕熱	損失される熱量 ←大気放出 + 冷却放散
<ul style="list-style-type: none"> ➤ クリンカ焼成用 ➤ 原料乾燥用 ➤ 石炭乾燥用 ➤ 排熱発電回収熱 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 排ガス熱量 (煙突放出) ➤ クリンカの持去り熱量 ➤ その他 (設備からの放熱等)

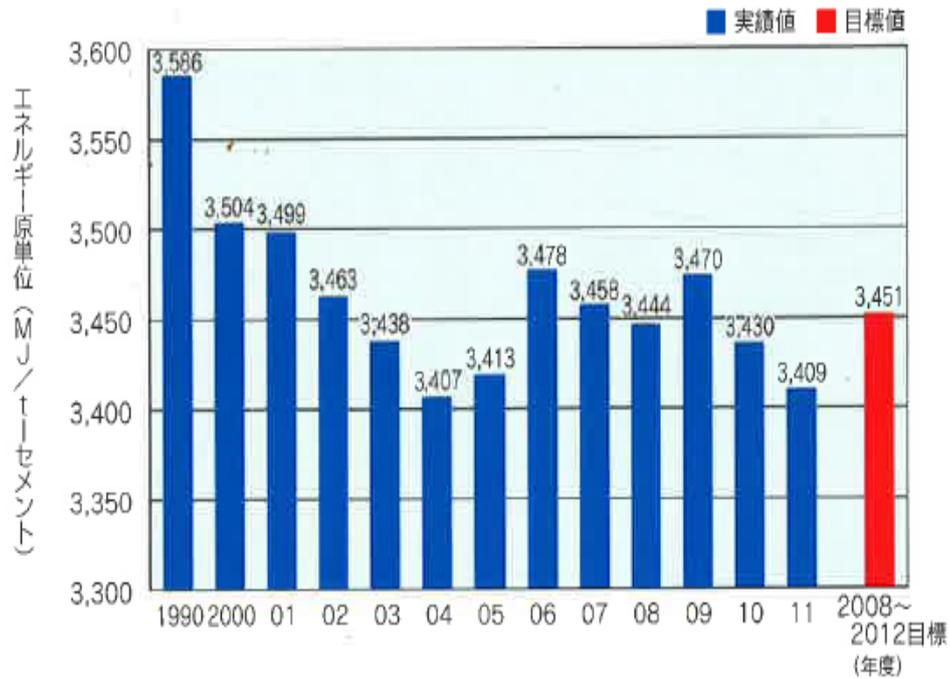


図 1-3 セメント製造用エネルギー原単位の推移

(出典：JCA, Cement Industry 2012)

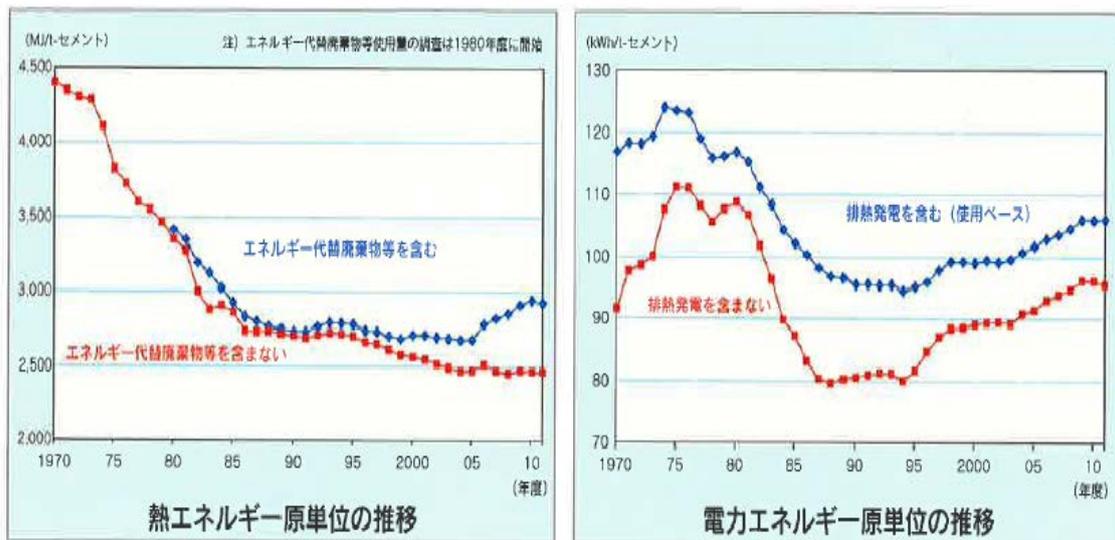


図 1-4 セメント製造用熱・電力エネルギー原単位の推移

(出典：JCA, Cement Industry 2012)

1.4.2 エネルギー消費率と CO₂ 排出量削減

温暖化ガスである CO₂ 排出量の削減は地球温暖化抑制の命題である。セメント製造はエネルギー多消費産業であり、石炭等の化石燃料由来の CO₂ とともに、その約 2 倍に相当する CO₂ が石灰石の熱分解で発生する。省エネルギーを含む削減方策としては次の対策が講じられてきた。

- ① 原材料の採掘、工場までの輸送方法の改善：工場立地近接化、ベルトコンベア方式
- ② 原料工程における粉砕ミルの高効率化（省電力）
- ③ 燃料消費量の削減：SP、NSP の導入、熱効率の改善
- ④ クリンカの石灰石原単位の削減：鉄鋼スラグ等の使用、クリンカ比率の低減
- ⑤ 混合セメントの利用拡大：フライアッシュ、スラグ、石灰石粉等の利用
- ⑥ 廃棄物の利用

世界の主要セメント企業で結成されたセメント部会（CSI：WBCSD）の統計では、セメント 1t 当たりの総 CO₂ 排出量は 1990~2010 年間で 14% 減少している。世界的なエネルギー効率化は、2010 年 3,400 MJ/t - cement で日本の実績に比べ 30% 以上高く、温暖化ガス削減の面でも省エネの余地がある。

日本のセメント製造業におけるエネルギー対策による CO₂ 削減効果は、世界最高水準にある。図 1-5 に示すように、2011 年度 CO₂ 排出量は 1990 年度に比較して、エネルギー起源 37% の削減、プロセス起源で約 40% が削減された。

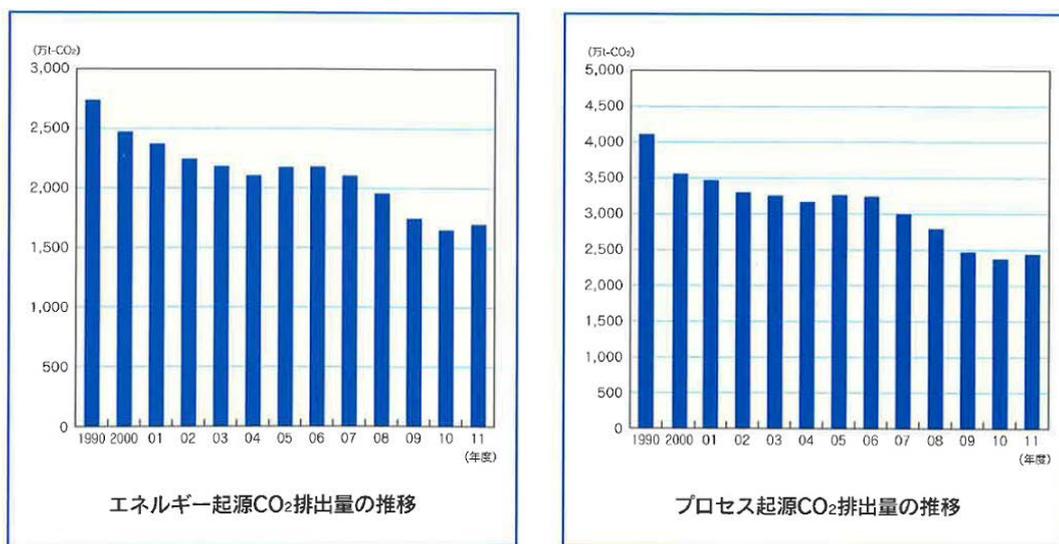


図 1-5 CO₂ 排出量の推移

(出所：JCA, Cement Industry 2012)

1.4.3 排熱回収発電の導入

セメント焼成工程における、SP 方式、NSP 方式における Pre-heater の排ガス温度は、

300~400℃となり、その熱を排熱蒸気ボイラで回収し蒸気復水型発電を行う。クリンカクーラからの排気も 250~350℃あり同じように排熱回収して発電に供している。一般に排熱回収電力は工場内電力需要の 25~30%に相当し、出力面でも安定した質の高い電力として購入電力費の削減に寄与している。

表 1-7 日本の排熱発電設備に関する概要

(2010 年度 JCA 統計)

普及率	60%
エネルギー削減量	発電量 約 20~30kWh/t -clinker
初期設備投資額	約 20 億円/系列 (9MW 級)

2 日本のセメント製造業における環境保全に係る規制及び政策

セメント製造工程は、製造業のうちでも規模が大きく、原料工程、焼成工程、仕上工程にわたり、煤煙、粉じんが発生する箇所が多い。

- 粉じん発生源：原料の粉砕工程、石炭の微粉砕工程、製品の仕上工程及びそれらの搬送工程
- 煤煙発生源：焼成工程及び冷却工程における燃焼（硫黄酸化物・窒素酸化物・煤じんなど）

日本では産業復興が始まった 1950 年代から健全な産業発展と公衆衛生面から、自治体で公害防止条例を制定して対策を開始した。しかし、高度成長が始まった 1955 年ごろから京浜地区、阪神地区、北九州等の工業団地において、大気・水質の産業公害が激増し深刻な社会問題となった。特に大気汚染源である SO_x や煙害による、四日市喘息などの呼吸器疾患が各地で深刻となった。セメント製造業は排ガス量も多く、地域の大气汚染に係わる煤煙・粉じんの公害発生源業種として、対策の対象とされた。

2.1 セメント製造業が排出する大気汚染物質の法的規制対象物とその定義

日本のセメント産業において以下の物質が法的規制の対象とされている。

- 煤じん：燃料の燃焼及び有機性原料の燃焼・熱分解により生成される。成分は未燃物質、灰分等である。
- 硫黄酸化物(SO_x)：燃料の燃料及び原料の熱分解により生成される。SO₂、SO₃ など。SP、NSP 方式では排煙中の SO_x は殆ど排出されていない。SP、NSP 方式では、石灰石の粉末状原料をプレヒーター最上段から投入し、キルン排ガスと浮遊状態で接触させる。この接触により、CaCO₃→CaO + CO₂ の脱炭酸反応により、排ガス中の SO₂ のほとんどが原料に吸収される脱硫効果が生じるため、キルン・集塵機を介して工程内で循環系を形成している。ただし、燃料中に多量の S 分を含有する場合、石灰と結合してキルン炉内等石膏を生成して運転阻害を発生する。
- 窒素酸化物(NO_x)：燃料中の N 分の燃焼及び O₂ 相が存在する高温雰囲気中で N 分が酸化され生成され、NO、NO₂ など生成する。生成原理等は 3.2 を参照のこと。
- 粉じん (Dust)：主に原料前処理工程及び石炭ハンドリング（粗砕・乾燥・粉砕）、仕上工程（製品粉砕・包装・出荷）から発生する。集塵法はバッグフィルター、電気集塵機が採用されている。集塵箇所により、ダストの組成や温度が異なり、ダストの見掛け電気抵抗値も異なるため調湿や調温を行う必要がある。
(例：200℃煤煙ガス中のダスト見掛け電気抵抗値は水分 20%と水分 7%では 10¹¹~10¹³ ω-cm と変化する。)

クリンカークーラの集塵はマルチサイクロン+電気集塵が採用されている。排ガス温度 250~350℃で電気抵抗値 10⁵~10¹⁰ ω-cm にあり良好な集塵が可能である。

➤ その他（重金属類・ダイオキシン類・フロン化合物など）：原料（廃棄物）及び燃料起源とする有害物質。キルン内部では原料がダイオキシン類の熱分解温度以上で高温焼成されるため、ダイオキシン類は煤煙として排出されない。

表 2-1 に窒素酸化物に関わる主な規制等の主な推移を示す。

表 2-1 窒素酸化物に関わる主な規制等の推移

年	地域	制度制定等	内容
1949	東京都	公害防止条例	
1950	大阪府		
1951	神奈川県		
1962	全国	煤煙排出規制法	施設の届出制、濃度規制
1963	東京・川崎・大阪・北九州	煤煙規制第一次指定区域	
1967	全国	公害対策基本法	国家行政
1968	全国	大気汚染防止法	国家行政
1972~1997	全国	大気汚染防止法の順次改正	国家行政
1972	川崎市	公害防止条例	NOx 総量規制の導入
1973	全国	環境基準	NO ₂ 環境基準設定
1974	四日市市	総量規制	NOx 総量規制施行 (試行猶予)
1978	全国	環境基準	NOx 環境基準改定

2.2 窒素酸化物抑制管理施策

2.2.1 排出基準

窒素酸化物は硫黄酸化物と共に人の環境に悪影響を及ぼすばかりではなく、日本国内では排出規制前の 1970 年夏に発生した「光オキシダント被害」の原因物質の一つとして特定され、1973 年環境庁は当時の国際水準としては数倍厳しい 1 時間値の 24 時間平均値 0.02 ppm 以下の環境基準を設定して排出削減を図った。しかし、産業界の排出施設の実態から、急速にこの基準値を達成することは不可能な状況があり、1978 年 7 月に 1 時間値の 24 時間平均値 0.04~0.06ppm のゾーン内、又はそれ以下に改定された。日本の大気汚染規制行政の特徴である産業活動の実態、地域環境（Back ground）、観測機器市場の需給状況、管理技術者の養成や資格制度の普及等に配慮した猶予期間を設けた施政が執られた。窒素酸化物対策では規制措置（監督・指導・命令・罰則執行等）が段階的に施行されてきている。

日本のセメント製造業に関わる窒素酸化物の環境基準を表 2-2 に、排出基準の経緯を表 2-3 に示す。

表 2-2 窒素酸化物の環境基準値

(1978 年制定)

汚染物質	二酸化窒素 (NO ₂)
環境上の条件	1hr 値の 1 日平均値が 0.04ppm から 0.06ppm までのゾーン内又はそれ以下
測定方法	ザルツマン試薬を用いる吸光光度法

表 2-3 窒素酸化物の排出基準値 (ppm*) の経緯

方式	排ガス量 (万 m ³ /h)	~ 1973.8	1973.8 ~1975.12	1975.12 ~1977.6	1977.6 ~1979.8	1979.8 ~	On (%)
湿式	>10	—	—	250	250	250	10
	<10	—	—	—	350	350	
その他	>10	480	480	250	250	250	10
	<10	480	480	480	350	350	

備考：多くの地方自治体ではこの基準値に上乘した基準値を設定している。

* 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・施設種別ごと異なり、日本の場合、NO₂ 換算の NO_x 排出係数は石炭燃料のケースで以下のようにになっている。

発電用ボイラ	70	kg/10 ⁸ kcal
セメント焼成炉	140	
コークス炉	20	

(出所：1997 環境庁大気保全局大気規制課)

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。)

2.2.2 総量規制の導入

地域の排出許容総量（地域環境容量）を求め、それに応じて各排出事業者の排出口について規制を行うものである。基準は表 2-2 に示す環境基準値を目安に、特定地域内の環境

容量により上乘した年平均値を目標として設定して施行されている地域が多い。総量規制の個々の設定量は、一定地域内で窒素酸化物排出施設の操業状態を含む周辺地域の影響などの科学的な検証に基づいて設定されるべきものである。

1974年法改正時点ではSOxと同様の総量規制の必要性が議論されたが、NOx測定法や工場・自動車など発生源の多様性、燃焼過程における複雑な生成メカニズム、大気中におけるNO→NO₂変化等々、汚染予測手法や規制手法がSOxに比較して複雑で不確定あることから、規制を必要とする地域内における比較的定量的な負荷が把握されやすいボイラ、工業炉、焼却炉などの固定排出源からの排出総量や、自動車に代表される移動排出源の排出総量等の科学的・定量的な確認を得るために長期間にわたるモニタリング調査を実施した。

NOx総量規制の導入はSOxに比べ遅れて、1981年になり3地区（東京特別区等、横浜市等、大阪市等）に導入された。これらの地区では「総量削減計画」が策定され固定排出源からの排出量等は、1985年には1975年度の排出総量の6割以下に削減された。

現在では、日本のセメント工場の多くが総量規制の対象地域である都市圏に位置しており、地方自治体の策定した削減指導を受けてきたが、東京都等の特定地域を除き、殆どのセメント製造業において、目標値を達成している。東京都下等に存在していた規制値を達成出来ない事業所は事業活動を既に閉鎖している。総量規制の目標値達成率の算定は次式の通り。

$$\text{削減率 (\%)} = 100 - \left[\frac{\text{目標年度負荷量} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{\text{基準年度負荷量} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)} \right] \times 100$$

NOx総量規制が布かれている地域における規制対象施設からのNOx排出量は次のような規制基準が適用される。

【規制対象】

定格原燃料使用量の合計が規定数量以上の工場（例：東京都特定地域 重油燃料>1kl/h）

【許容NOx排出量】

➤ 既設施設の場合

$$Q = 0.51 \left\{ \sum (C \cdot V) \right\}^{0.95}$$

➤ 新・増設施設の場合

$$Q = 0.51 \left\{ \sum (C \cdot V) + \sum (C_i \cdot V_i) \right\}^{0.95}$$

茲で Q：排出が許容されるNOx量 (m³N/h)

C, C_i：施設係数 セメントキルン焼成炉の場合 C=9.0 C_i=6.3

V：基準日前に設置された施設毎に定格能力運転による乾き排出ガス量

(万 m³N/h O₂=0%)

Vi： 基準日以後に新・増設された施設毎に定格能力運転による乾き排出ガス量

(万 m³N/h O₂=0%)

2.3 セメント製造業における省エネルギー施策

2.3.1 焼成方式の転換

セメント製造の省エネルギー対策は、熱分野と電力（動力）分野が主な対象である。熱分野ではエネルギー消費の最も多い焼成技術の改良に着目され、生産能力の増強、燃料コストの削減を目的に始められた。初めに比較的小口径の労働集約型の乾式キルンから省人型の湿式ロングキルンや燃料効率のよい半乾式のレポールキルン（Lepol kiln）が採用された。1963年に西ドイツで開発されたSP方式が第一セメント川崎工場に導入され、燃料消費量が大幅に低減できた。

1971年には、SPキルン方式のPre-heater部に仮焼炉を設けた日本独自の開発によるNSPキルンが三菱セメント東谷工場で運転開始されて、低NO_x化と省エネルギー双方を可能とした世界最先端技術を確立した。NSP方式による焼成用所用熱量は、L方式に比べ約30%、湿式（W）方式の1/2に削減でき、生産コストの削減や排ガス量の削減に大きな効果が得られた。本方式は現在の焼成技術におけるBAT(Best Available Technology)として世界各国に普及している。

このほかの熱分野の省エネルギー対策では、排熱回収発電と原料や石炭の乾燥工程の改善が挙げられる。これらの熱源はキルン排熱の回収熱で行われる。またSP排熱とクリンカクーラ排熱の高温域ガスは排熱発電として熱回収している。発電方式は典型的なランキンサイクルによる低圧蒸気-復水発電方式が導入され、工場で消費する電力の30%程度を自家発電している。低温排熱や設備からの放射回収熱は、乾燥用熱源として利用されている。現在、日本のセメント製造工程の熱管理は業界自主行動計画の一環として徹底的に実施されており、熱効率は世界最高水準にある。

電気分野では、セメント製造工程で消費する電力の約70%を占める原料、石炭、クリンカ粉砕に要する電力が省エネルギーの対象である。1970年代から現在まで講じられてきた省エネルギーの主な対策は次の通り、

- ① 原料粉砕機の高効率型の導入（例：縦型ローラーミル、粉砕乾燥同時処理など）
- ② クリンカ粉砕機の高効率機種種の導入（例：予備粉砕、ロールプレスなど）
- ③ 重量物搬送施設のベルトコンベア等低電力型の導入
- ④ 大容量回転機器の回転数制御の装備（VVVF制御など）
- ⑤ 配電システムの力率改善・変圧器の高効率化（コンデンサーの設置などによる無効電力の削減）

日本のセメント業界における最近の省エネルギー対策の設備投資額の推移を表 2-4 に示

す。

表 2-4 セメント業界における省エネルギー対策等の設備投資額の推移

(単位：百万円)

項目	2006 年度	2007 年度	2008 年度	2009 年度
省エネルギー設備の普及促進	1,086	1,059	7,350	1,744
エネルギー代替廃棄物等の使用拡大	7,103	3,759	7,150	1,938
その他の廃棄物等の使用拡大	5,687	2,664	634	2,321
混合セメントの生産比率拡大	238	462	308	8
合計	14,115	7,944	15,442	6,011

セメント製造工程は、日量生産規模が大きく、且つ、連続運転、設備型産業で、熱電多消費型工程であることから、1990～2000 年代にかけて実施された熱・電エネルギーに関する省エネルギー対策の効果は、生産コストの大幅な削減につながった。電気消費量削減の事例のみでも約 100 kWh/Clinker の削減効果を達成し、日量生産 5,000 t-Clinker 規模で設備投資償却 1～1.5 年で回収されている。表 2-5 に省エネルギー技術の普及率・削減効果を示す。

表 2-5 省エネルギー技術の普及率・削減効果

設備	普及 (%)	エネルギー削減原単位 (1 基あたり)	投資費用 (億円)
排熱発電	60	3.5～4.0 kWh/t-Clinker	20 (設備 1 式)
Slag Mill (縦型)	73	40 kWh/t-Clinker	5 (補機・工事含)
Roller Mill (予備粉砕)	46	10～20% / 仕上工程	5～10 / 粉砕 100t/h
Air Beeem Cooler	50	0.5～1.5 kWh/t-clinker	1.5～3 / 基
原料 Mill (堅型)	46	30% / 原料工程	15 / 調合原料 200t/h

(出典：経産省、T-22 省エネ・省資源技術報告書より作成)

2.3.2 排熱回収発電の導入

1.4.3 で先述したように SP・AQC からの排熱回収発電は、セメント製造工程における総合熱効率の向上に大きな比率を占めており、発電出力は外部からの購入電力量低減による生産コストの低減効果はもとより、公共電力系統に及ぼす系統電源の安定性、CO₂削減等々その影響は大きい。

2.3.3 熱管理の徹底

工場におけるエネルギー消費原単位の低減は、セメント業に限らず、製造コストの低減、燃料資源の節約、CO₂や窒素酸化物等の大気汚染物質の排出削減等産業界全体に波及する方

策である。

日本では「エネルギーの使用の合理化に関する法律」により、燃料の燃焼の合理化、排熱回収、加熱・伝熱等の合理化、電気の抵抗等の損失防止等の判断管理基準が制定されている。

セメント製造業では、表 2-6 に示すセメント製造施設に関して合理化の基準が示されている。実際は企業でこの基準値より高い管理目標を自主的に定めて管理されている。また、熱管理手法として利用される熱勘定方式も日本工業規格（JIS R 0303-2004）で制定されており、Kiln、Cooler、Pre heater などの熱収支の検討や EMS 評価に使用されている。

表 2-6 施設のエネルギー合理化基準

区分	設備	判断基準等
燃焼	セメント焼成炉	基準空気比(連続) 気体燃料 1.3 液体燃料 1.3 微粉炭燃料 1.3
加熱・伝熱・冷却	乾燥装置、冷却装置、	適切な管理 計測・記録・点検等
放射・伝導による 熱損失防止	高温施設	基準炉壁温度（側壁）（但し Kiln 外壁は除外） >1300℃ 120 ℃ <900℃ 80 ℃
排熱回収	Kiln、Cooler	排ガス温度 基準排熱回収率 <500 25%
電気の損失防止	受変電・配電	配電電圧の適正化 変圧器の適正需要率 >50% 力率改善 >90%
電気の合理化	回転機械等	回転数制御、台数制御、始動電力の低減、 高効率形式の採用

2.4 日本におけるセメント製造業と廃棄物処理

2.4.1 概説

高炉スラグ、石炭灰は表 2-7 に示すように、セメントの主成分である CaO、SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ などで構成されており、セメント原料として使用することが可能である。有機汚泥、廃タイヤ、廃油、廃プラスチック類、木屑、ASR（解体自動車廃材）等の可燃性有機系廃棄物は、燃料の一部としても利用可能である。

Kiln や仮焼炉における燃焼温度は、1400～1500℃（仮焼炉≒900～1000℃）であり、有機性廃棄物は完全に熱分解され無害化、減量化される。灰分はセメント原料と同質のためリサイクルされる。ダイオキシン類やフロン類等は高温燃焼により完全分解され排出されな

い。未燃分を含有する燃え殻は原料としてクリンカ内に取り込まれるため二次廃棄物が発生しない。焼却灰や煤じんは、水洗・篩・破碎処理等の前処理を行い、廃棄物中に含有する、Pb、Cr等の重金属類やCl、P等の成分を除去している。また、Cl系低融点固形物がKilnにおいて発生する運転阻害を防止するために後述するCl成分の系外への引抜システムを設けるケースもある。

日本のセメント製造業は、多くの業種から排出される廃棄物を原料や燃料として活用し、エコタウン構築に代表されるIndustrial Clusteringを形成しており、循環型社会形成施策の代表的な物流を形成している。2011年度のセメント1t当たりの廃棄物処理量は471kgに達している。

廃棄物の適正処理の評価以外の点でも、有機物のメタン化（温暖化ガス）の削減、埋め立て処分場の延命化、廃棄物の広域的再資源化処理体制、廃棄物処理費の削減等の面で地域環境保全に貢献している。なお日本では、廃棄物の煤じんや焼却灰は廃棄物処理法に準拠して無害化・減容化・安定化処理が義務化されている。

表 2-7 セメント原料と廃棄物の組成例

原料		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃
Portland Cement		62~65	20~25	3~5	3~4	2~3
Eco Cement		59~63	15~19	7~9	4~5	3~4
セメント 原料	石灰石	47~55				
	粘土		45~78	10~26	3~9	
	珪石		77~96			
	鉄原料				40~90	
	石膏	28~41				37~59
廃棄物	焼却主灰	18.7	31.9	14.1	5.7	0.7
	燃え殻	17.1	37.6	17	8.2	0.6

(出典：大住、エコセメントの話、日本规划協会、2003)

図 2-1 にセメント 1ton 当たり廃棄物・副産物使用量、図 2-2 にセメント製造に使用されている主な廃棄物・副産物量の推移、表 2-8 にセメント製造業における廃棄物処理量（2010年度）を示す。

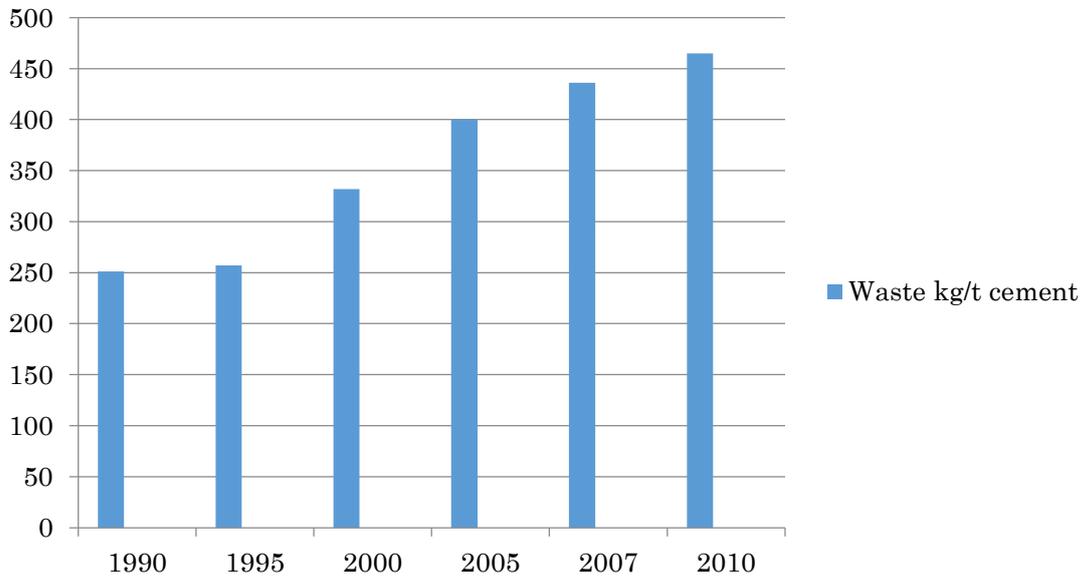


図 2-1 セメント 1ton 当たり廃棄物・副産物使用量

(出典 : JCA:Cement Handbook 2012)

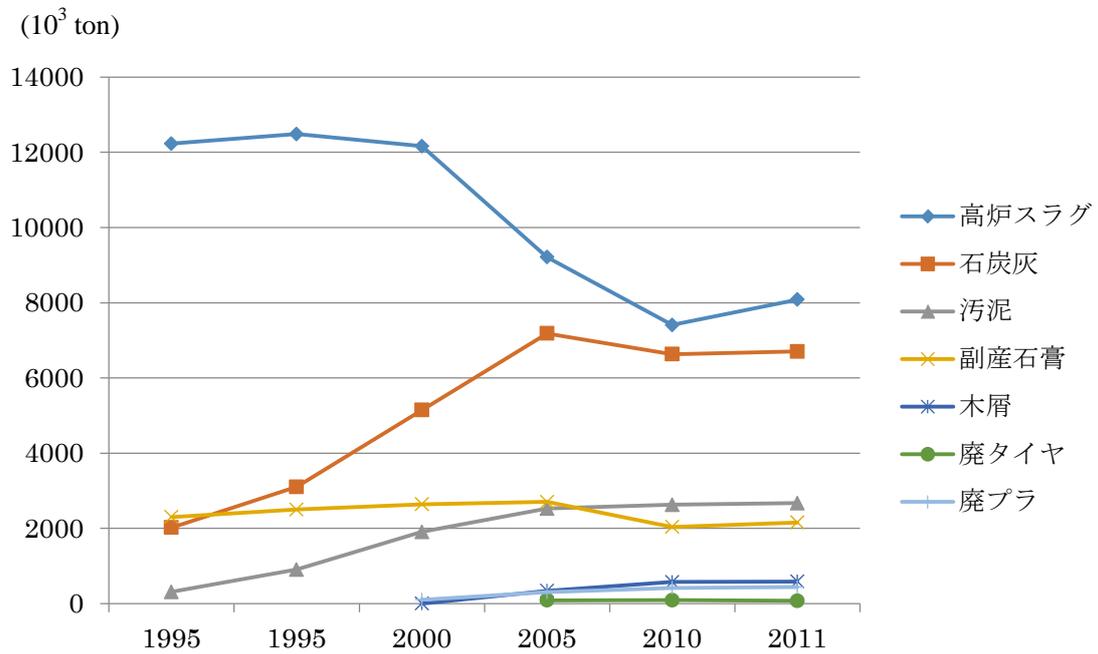


図 2-2 セメント製造に使用されている主な廃棄物・副産物量の推移

(出典 : JCA:Cement Handbook 2012)

表 2-8 セメント製造業における廃棄物処理量 (2010fyr)

廃棄物の種類	セメント焼成の利用先	処理量 (10 ³ t/yr)
高炉スラグ	原料	7,345
石炭灰	原料・混合材	6,443
汚泥	原料	2,514
副産石膏	原料	1,914
廃プラスチック類	燃料	413
木屑	燃料	564
廃タイヤ	燃料・原料	87

(出典：JCA)

2.4.2 エコセメント

日本の1年間の廃棄物排出量は、生活系廃棄物（法定品目：一般廃棄物）が約4500万t（2012年度）、汚泥や高炉スラグのような産業活動により排出される産業廃棄物（法定品目：産業廃棄物）が約3.86億tに達している。廃棄物処理法のもとに、一般廃棄物は75%が焼却処理、産業廃棄物は77%焼却等中間処理されている。セメント業で受け入れ資源化されている廃棄物量は排出総量の約6%強に相当する2,700万t（2011年度）である。廃棄物品目別でセメントの利用率は、高炉スラグ32%（2010年度鉄鋼スラグ協会）、石炭灰53%（2010年度日本フライアッシュ協会） 廃タイヤ10%（2010年度日本自動車タイヤ協会）であり、セメント製造業は循環型社会形成に大きく貢献している。エコセメントは、廃棄物処理利用の目的で世界最初に日本で開発され事業化された。都市ごみ焼却灰を対象に資源化する目的で、2001年4月市原エコセメントが稼働開始して。その後、東京都多摩地区等で事業化されている。エコセメントは日本工業規格 JIS B 5214 で規格化され、商品として確立している。表 2-9 にエコセメントの品質規格を示す。

図 2-3～図 2-4 はエコセメント製造工程事例及び工程における廃棄物投入事例である。

表 2-9 エコセメントの品質規格

(*Na₂Oeq%=Na₂O+0.658K₂O)

品質/種類		普通エコセメント	速硬エコセメント
比表面積	cm ² /g	>2500	>3300
凝固	始発 h-m	>1-00	-
	終結 h-m	<10-00	>3300
圧縮強さ	1d	-	15.0
	3d	>12.5	>22.5
	7d	>22.5	>25

	28d	> 42.5	> 32.5
安定性	パット法 ルシヤテリエ法	良 < 10 mm	良 < 10mm
MgO	%	< 5.0	< 5.0
SO ₃	%	< 4.5	< 10.0
強熱減量	%	< 3.0	< 3.0
全アルカリ *	%	< 0.75	< 0.75
塩化物イオン	% JIS R 5202	< 0.1	0.5-1.5

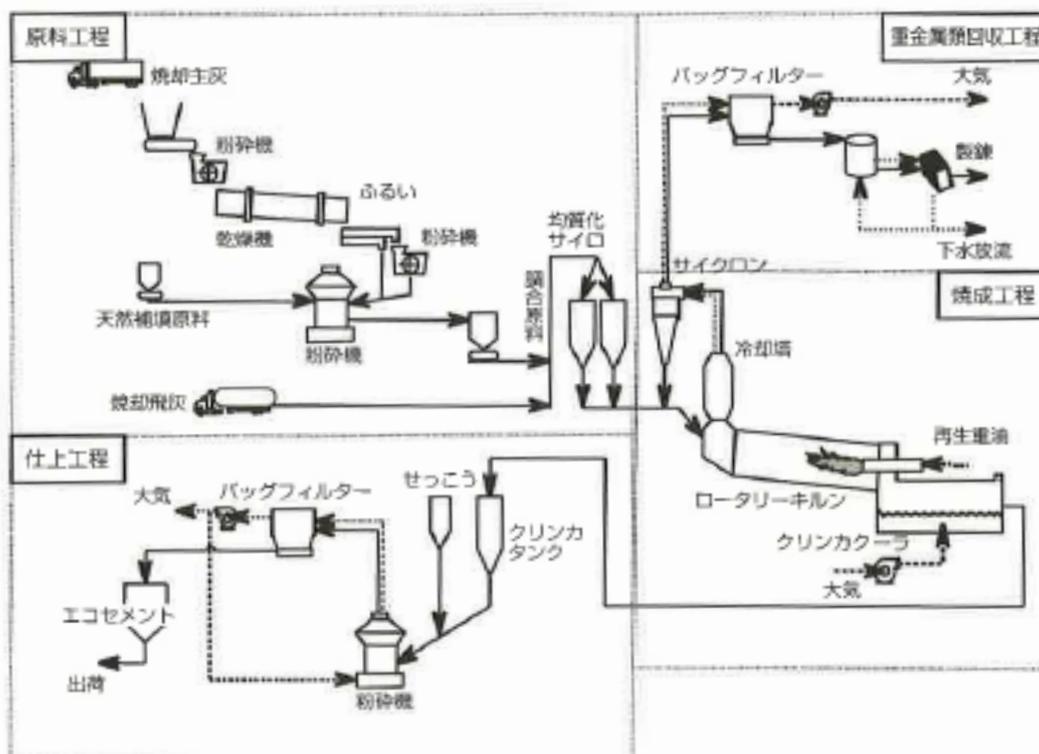


図 2-3 エコセメント製造工程

(出典：大住、エコセメントの話、日本規格協会、2003)

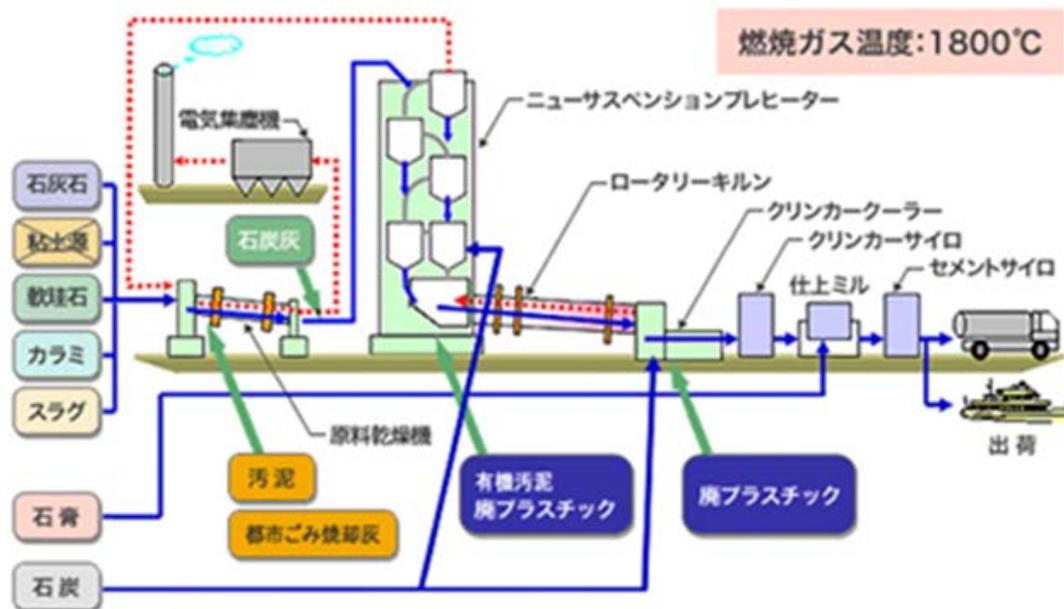


図 2-4 工程における廃棄物投入箇所の事

(出典：T 社資料)

2.4.3 塩素濃度の制限

セメント生産プロセスでは、キルン焼成で発生する塩素濃度が高い場合、運転に障害となる。

廃棄物の原料化における処理では、ガス抽出等の塩素除去システムの対策が必要である。クリンカ焼成工程において、塩素濃度が 50ppm を越えるとプレヒーターを構成するサイクロンの閉鎖が生じる。また、セメント中の塩素濃度が日本工業規格で定める許容値 350ppm を越えると品質への栄養が生じる。日本の各社は、製造段階における最適な条件について、製造ライン毎に原料や廃棄物の調整とシステムの構成等を実証し、把握している。

2.4.4 廃棄物処理と適正な維持管理基準

日本の廃棄物処理法は、焼却・熱分解等の処理を行う場合、表 2-10 に示す施行規則第 4 条 5 等に基づく維持管理に関する基準を遵守しなければならない。

表 2-10 廃棄物を焼却・熱分解処理する場合の主な維持管理基準

項目	技術基準等
廃棄物の焼却炉投入	定量供給、供給装置の密閉構造
燃焼温度等	>800°C、ガス滞留時間 >2sec、850~900°Cで完全燃焼
燃焼残渣	熱灼減量 <10%
排ガス	①温度の連続測定

	②集塵機入口温度 <200℃以下 ③煙突出口 CO 濃度の連続測定・記録
廃油などの燃料化	消防法による引火、防爆、貯蔵等の構造規則に準拠すること

2.5 窒素酸化物の測定方法

2.5.1 常時監視体制と計測の必要性

日本のセメント工場では、大気汚染防止・安全監視のために、製造工程におけるガス成分を連続して分析、測定している。大気汚染防止法に定める排出ガス量 4 万 Nm³ 以上の特定工場は常時濃度測定を行わなければならない。総量規制地域以外は、常時監視の義務はないが、大部分のセメント工場は一般の産業施設と比較して排ガス量も多いため、地域住民と環境保全に関わる協定や合意形成の上で操業されており、大部分の工場は常時監視を行ない運転監理や品質管理に供している。

総量規制基準は 1 時間あたりに排出される窒素酸化物量についての許容限度であることを基本とするものであるため、この 1 時間値を適切に把握し得るように測定するよう法定されている。

窒素酸化物のモニタリングを的確に行うには測定箇所に対応した検討が必要である。試料採取点の決定、計測器の選択や設置、維持管理、精度管理が必要である。なかでも計器の維持管理は、測定値の精度に著しく影響するため維持管理を徹底することが求められる。

図 2-5 に製造工程におけるガス成分の連続分析、測定事例を、また、ガス測定の測定箇所と目的を表 2-11 に示す。表 2-12 に日本のセメント業における大気汚染物質の測定頻度基準を示す。

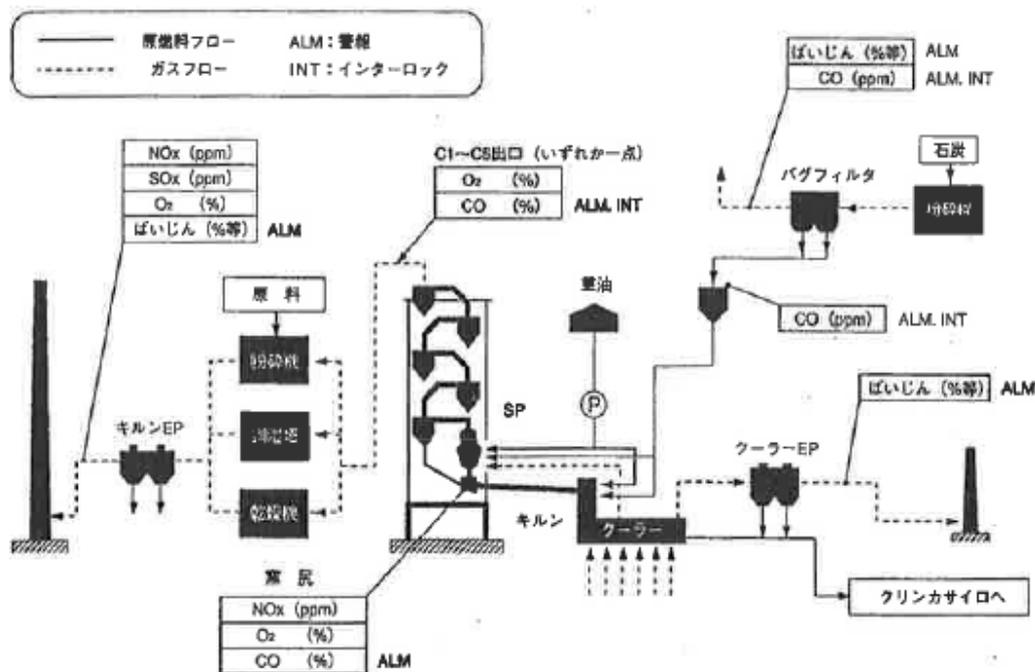


図 2-5 製造工程におけるガス成分の連続分析、測定箇所

出典：KITA, 開発途上国の大気汚染防止に係る固定排出源対策マニュアル (1999)

表 2-11 ガス測定箇所と目的

項目	測定箇所	目的・内容
NOx	SP 集塵機出口 (煙突)	法令規定要件、連続監視、記録、保管が義務づけされている。(O ₂ =10%換算値表示)
	Kiln 出口	Fuel NOx / Thermal NOx の発生状況の確認、Kiln 内の燃焼状況監視のためのパラメータとして活用、焼成条件の運転指標にも利用する
SOx	SP 集塵機出口 (煙突)	法令規定要件、連続監視、記録、保管が義務づけされている。(O ₂ =10%換算値表示) SP、NSP Kiln の場合、SP 部が脱硫装置として機能するため、10ppm 以下で問題とならない濃度となる。
O ₂	SP 集塵機出口 (煙突)	法令規定要件、NOx、SOx の O ₂ =10%換算値を算出するために連続監視、記録、保管が義務づけられている。SP 以降のリーク管理にも利用する。
	SP 出口	全体の燃焼管理、リーク管理用として利用
	Kiln 出口	Kiln の燃焼管理
	SP 出口	全体の燃焼管理用、器内爆発防止のための警報・Inter-lock

CO	Kiln 出口	機能値
	石炭ミル BF 出口	自然発火防止検知用
	微風炭 Silo 内	微粉炭着火検知用
煤じん	SP 集塵機出口 (煙突)	集塵機機能の常時監視用 (濾布破損、EP 機能等)
	クーラー集塵機出口	
	石炭ミル BF 出口	

表 2-12 セメント工場の大気汚染物質の測定頻度

測定項目	煤煙発生施設の規模	測定頻度
煤じん	排ガス量 >40,000 Nm ³	1 回/2 月 以上
	排ガス量 <40,000 Nm ³	2 回/年 以上
SOx	SOx >10 Nm ³ (特定工場設置)	常時
	SOx <10 Nm ³	1 回/2 月 以上
NOx	排ガス量 >40,000 Nm ³ (特定工場設置)	常時
	排ガス量 >40,000 Nm ³	2 回/年 以上
	排ガス量 <40,000 Nm ³	1 回/年 以上

2.5.2 ガス流量・ガス温度の測定

燃焼管理や NOx 濃度管理を行う上で、ガス濃度と共にガス量、ガス温度、O₂ 濃度の測定が必要である。

2.5.2.1 ガス温度測定

セメント焼成工程の NOx に関連するガス温度域は 200~1600℃ と Range が広いため検出素子の使用範囲と接触型/非接触型の選定に注意が必要である。一般には表 2-13 に示す温度計を使用する。

焼成工程内のガスは測温素子部にダスト等が固着し易く、付着による感度誤差が生じるため日常的なクリーニングが欠かせない。

表 2-13 ガス温度計の種類と使用温度

方式	種類	使用範囲 °C
接触方式	電気抵抗温度計	- 180 ~500
	熱電温度計 B/K/E/J/T	- 180 ~1700
非接触方式	輻射温度計	100~2000
	光温度計	900~2000

2.5.2.2 ガス量測定

セメント焼成工程のガスは高温且つ微粒子を多く含み、ガス量路も大きいため、ピトー管によるガス速度水頭又は絞り機構による方法が取られている。その他、熱線式、電磁式などがある。

① ピトー管（規格：JIS B 8330）

ガス流路中の全圧と静圧との差（動圧）を計測して次式から流速を求める。動圧の測定には単管傾斜圧力計等が使用される。

$$V=C \sqrt{2Pd/\rho}$$

$$V=C \sqrt{2gh/\gamma}$$

ここで V： ガス流速 m/s

C： ピトー管係数

Pd： ピトー管による動圧測定値 Pa

ρ ： ダクト内におけるガス密度 kg/m³

h： ピトー管による動圧測定値

γ ：ダクト内におけるガスの単位体積当たりの重量 kgf/m³

g： 重力の加速度 9.81 m/s²

② 絞り機構による方法（規格：JIS Z 8762）

真直なガス流路にオリフィスを挿入して流れを絞り、その前後の圧力差から流量を求める。

$$Q=C \varepsilon F \sqrt{2P/\rho}$$

ここで Q： 流量 m³/s

ρ ： ガス密度 kg/m³

F： オリフィスの穴の断面積 m²

P： オリフィス前後の圧力差 Pa

セメント焼成排ガスは、高温でダスト濃度が高いので、耐温、汚れに留意する必要がある。

2.5.2.3 排ガス中の O₂ 濃度の測定

O₂は大気汚染物質ではないが、NO_x 排出の際、空気で薄めて基準値を超えない違法行為を防止するためや、排出系統へ外気の吸引による希釈がある場合を考慮する必要がある。そのため、NO_x 濃度を規制する場合には施設の種類により定めた O₂ 濃度に換算して測定濃度を示す方法が用いられている。

換算は次式による

窒素酸化物の量 (NO_x) の計算式

$$\text{NO}_x = \frac{(21 - \text{O}_n)}{(21 - \text{O}_s)} \times C_s$$

- ここで
- NO_x : NO_x の換算濃度
 - O_n : 施設で定められた標準 O₂ 濃度 (%)
 - O_s : 排出ガス中 O₂ 濃度 (%)
 - C_s : 窒素酸化物の実測濃度 {標準状態換算}

なお日本のセメント焼成炉に適用される窒素酸化物濃度の標準 O₂ 濃度は表 2.6.4 の通り

表 2-14 標準 O₂ 濃度

(大気汚染防止法令別表第 1 の 9)

発生施設	最大定格排出ガス量 10 ⁴ m ³ N/h	標準 O ₂ 濃度 %vol.
セメント焼成炉 (乾式)	10 以上 (湿)	10
	10 未満 (湿)	10

O₂ 濃度を自動的に連続測定する自動計測は日本工業規格 JIS B 7983 で磁気式、電気化学式が規定されている。

- 磁気式 : 磁気風方式、磁気力方式
- 電気化学式 : ジルコニア方式、電極式

2.5.3 試料採取方式

排ガスの試料採取方法は、日本工業規格 JIS K 0095 に規定されている。試料ガス採取部は、自動測定の干渉影響成分の除去 {例 : 水分} や、ダスト、ミスト成分の除去に使用される。採取点の選定は濃度が均一でガス流速が安定しており、流速が最も速い点を選ぶ。

煙道の屈曲部や断面形状が急激に変化する部分では、ガスが乱流となっており濃度は均一化されている。一般には煙道断面の中央部から採取する。

留意すべき点として、採取管台はガス流に直角に設け、連続測定の場合、露点の生成による硫黄酸化腐食やダスト固着対策を講じる。図 2-6 は NO_x 自動計測器の構成事例を示す。

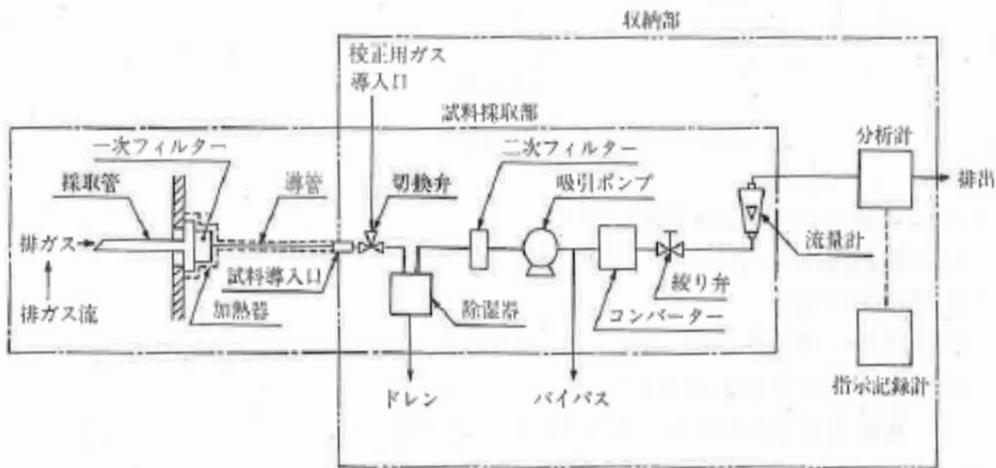


図 2-6 NO_x 自動計測器の構成事例

2.5.4 窒素酸化物測定方法

2.5.4.1 NO₂分析法—ザルツマン吸光光度法

NO₂分析法として O₃ 化学発光法と共に環境基準の測定法として指定されている。試料中ガス中の NO₂ を吸収発色液に通して発色させ、吸光度 (545 nm) を測定する。定量範囲は 2~200ppm (10~400mg/m³)、多量の NO が共存する場合は影響を受ける。図 2-7 にザルツマン法による試料ガス採取装置の例を示す。

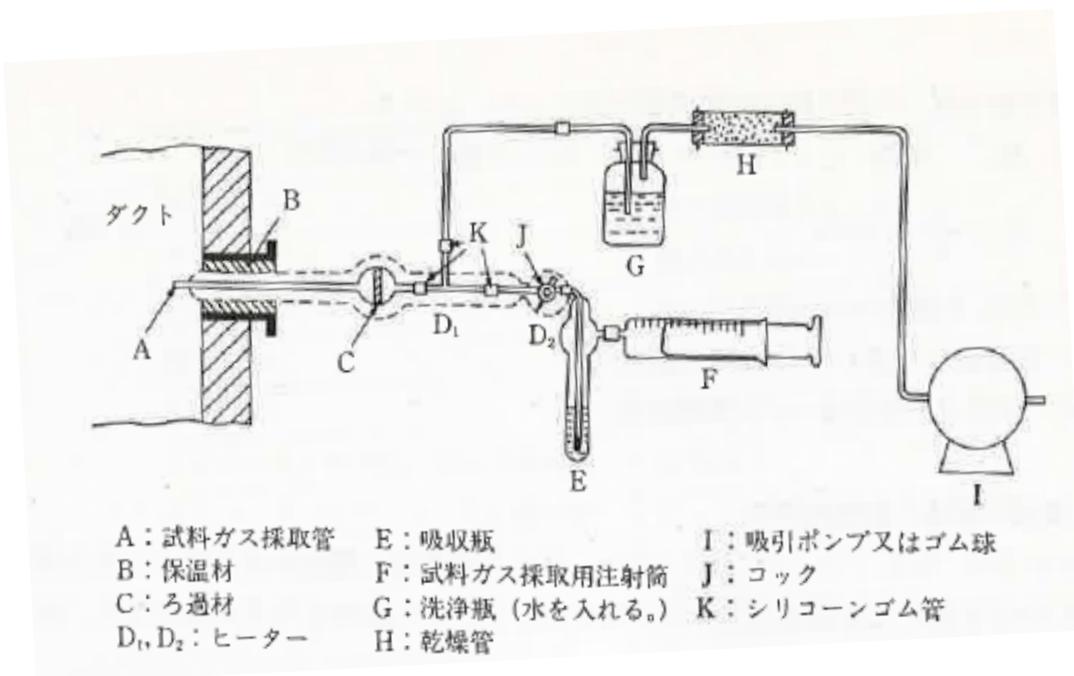


図 2-7 ザルツマン法による試料ガス採取装置の例

(出典: JEMAI, 公害防止の技術と法規 3 版, 1998)

2.5.4.2 連続測定法

日本における窒素酸化物の連続測定方式として、日本工業規格 JIS B 7982 が規定されている。計測方式の種類と適用条件を表 2-15 に示す。日本では自動連続測定計測法として化学発光方式、赤外線吸収方式が主流となっている。

表 2-15 計測方式の種類と適用条件

計測方式の種類	適用条件	測定範囲 ppm	対象物質
化学発光方式	共存する CO ₂ の影響を無視できる場合又は影響を除去できる場合に適用する	0~20 0~2000	NO NO _x (NO ₂ は NO に還元)
赤外線吸収方式	共存する CO ₂ 、SO ₂ 、水分、HmCn の影響を無視できる場合又は影響を除去できる場合に適用する	0~20 0~2000	NO NO _x (NO ₂ は NO に還元)
紫外線吸収方式	共存する SO ₂ 、HmCn の影響を無視出来る場合又は影響を除去出来る場合に適用する	0~50 0~2000	分散形 NO NO ₂ NO _x 非分散形 NO ₂ NO _x
低電位電解方式	SO ₂ の影響を受けるのでアルカリ溶液等で除去する	0~100 0~2000	NO ₂ NO _x (NO ₂ は NO に還元)

① 化学発光方式

NO と O₃ との反応による NO₂ の生成過程において生じる化学発光のうち、590~875 nm 付近における近赤外線領域を利用し、その発光強度から試料ガス中に含まれる NO に還元し測定する。次式のように NO が NO₂ になるとき、その一部が (≒10%) は励起状態にあり、これが基底状態に移るとき過剰のエネルギーを光として放出する。この光を光電子増幅管で電流に変換して NO 濃度を求める方法である。



この計測法の特徴は、0~数%の濃度にわたって、直線関係が存在しているため、低濃度から高濃度まで任意の Range に電氣的切換えが可能である。検出感度が高い、干渉成分の影響が比較的少ない、応答時間が速い、などの特徴がある。

図 2-8 に化学発光方式の構成を示す。この方式で測定できるのは NO であり、NO₂ の測定には NO にコンバータで還元して NO_x として NO の差を測定して求める。水分は化学発光反応による発光を減光する干渉成分である。試料ガスの除湿、調湿処理が必要とする。

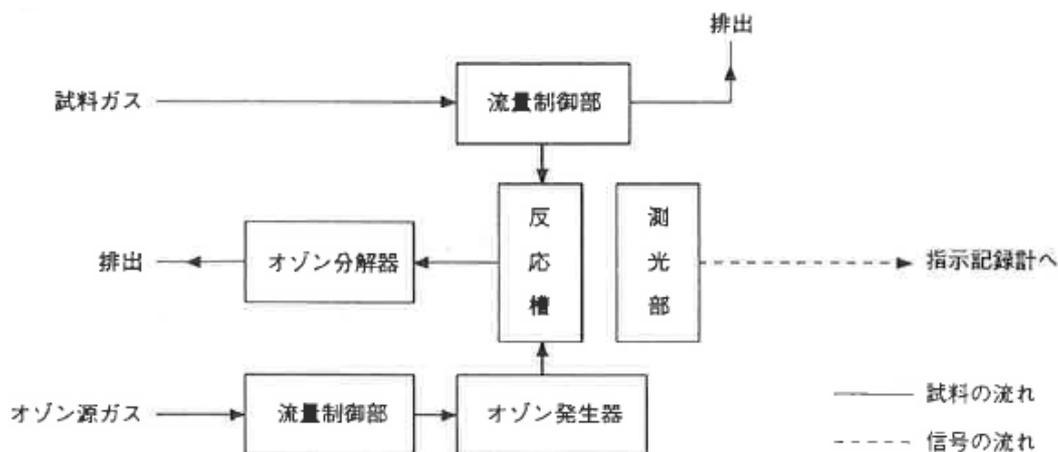


図 2-8 化学発光方式の構成

(出典：JEMAI, 公害防止の技術と法規 3 版、1998)

② 非分散形赤外線吸収方式

NO の赤外線領域 5.3 μm 付近における吸収量を測定し、試料ガス中の NO の濃度を連続的に測定する。窒素酸化物については、試料ガスをコンバータに通し NO₂ を NO に還元して測定する。保守管理が容易な方式である。

③ 紫外線吸収方式

NO/NO₂ の紫外線領域における吸収量の変化を測定し連続的に濃度測定できる。SO₂、CO、HC、O₃ の影響を受ける。

2.5.4.3 NO₂分析法—ザルツマン吸光光度法

NO₂分析法として O₃化学発光法と共に環境基準の測定法として指定されている。

試料中ガス中の NO₂を吸収発色液に通して発色させ、吸光度 (545nm) を測定する。定量範囲は 2~200ppm (10~400 mg/m³)、多量の NO が共存する場合は影響を受ける。

2.6 管理者制度

セメント製造工程における大気汚染防止の対象は、焼成に伴う NO_x、SO_x、煤じんや原料処理工程や製品化工程からの粉じんがある。セメント製造業に限らず一定量以上の燃焼ガス等を排出する工場（法的には特定工場と称する）では、公害防止管理者や公害防止統括者の選任、大気汚染防止に関わる管理が義務化されている。公害防止管理者は国家資格者であり、一定の技術素養と管理能力が認定された者である。表 2-16 に大気汚染施設の区分と公害防止管理者、表 2-17 にセメント製造工程における公害防止管理対象を示す。

1971年に資格制度が発足して以来、これらの管理者が日本の大気公害の発生抑制や大気汚染防止施設の機能維持や維持管理に果たした役割は大きい。なお、東京都などの地方行政区においても、国家資格に準じる公害防止管理者制度を設け、管理者は、施設の監視、測定、緊急時の措置、施設の維持管理等を管理監督している。

環境マネジメントシステム（EMS）も大気汚染等の防止や管理に寄与しており、セメント業においては、ISO14000やこれに準じたECO ACTION-21制度が利用されており、PCDA（Plan Do Check Act）を基本手法とした環境管理が普及している。

表 2-16 大気汚染関係施設の区分と公害防止管理者

施設の区分	公害防止管理者の種類	資格者の種類
法に規定する有害物質を発生する煤煙発生装置で排出ガス量が 40,000 m ³ /h 以上	大気関係第1種公害防止管理者	大気関係第1種有資格者
法に規定する有害物質を発生する煤煙発生装置で排出ガス量が 40,000 m ³ /h 以上	大気関係第2種公害防止管理者	大気関係第1種有資格者 又は 大気関係第2種有資格者
硫黄酸化物及び煤じんのみを発生する煤煙発生施設で排出ガス量が 40,000 m ³ /h 以上の工場	大気関係第3種公害防止管理者	大気関係第1種有資格者 又は 大気関係第3種有資格者
一般粉じん発生施設	一般粉じん関係公害防止管理者	大気関係第1~4種有資格者 又は 一般粉じん関係有資格者

表 2-17 セメント製造工程における公害防止管理対象

汚染分野	発生施設	汚染物質
大気	キルン（焼成炉）	煤じん、SO _x 、NO _x 、HCl、F
	クリンカクーラー	煤じん、SO _x 、NO _x
水質汚濁	ボイラ、冷水塔	pH COD SS
粉じん	粉砕機 微粉炭粉砕機、集塵機 搬送施設 製品袋詰	粉じん
振動・騒音	送風機、空気圧縮機、粉砕機、 微粉炭粉砕機、ポンプ	振動、騒音

2.7 公的機関等における窒素酸化物削減対策の技術開発・助成等

日本は 1960~1970 年代にかけて、産業活動の高度成長期を迎え、同時進行で甚大な大気汚染や水質汚濁に亘る公害を経験した。大気汚染の元凶である煤じん・SOx・NOx 排出量削減対策は、1970 年代の日本において行政及び事業者双方が取り組むべき最大の課題であった。

1970 年代には、NOx に関わる法規制の整備、公害防止事業団等に代表する公的助成や支援金融制度の構築、国家的公害防止管理者制度の導入などの諸制度の整備がほぼ確立された。同時に削減対策に要する装置技術や計測機器の研究開発が、国家や公的機関、地方自治体研究機関、大学等で実行された。実際の防止機器やプラント製作を担った民間の装置機器メーカーにおいても、基本特許の欧米からの輸入や自社開発を行い、NSP をはじめ脱硝触媒、低 NOx バーナなどを開発した。その結果、世界的な技術成果をあげ、国内実証と合わせ 1990 年代以降には輸出産業として成長して、高効率、高機能を誇る日本特有の環境技術を生む契機となった。また、これらの開発・製作・実証を支える環境装置基盤技術である耐食、耐火、材料、加工技術等を支える基盤インフラの役割を果たした中小企業の貢献は高く評価されている。

2.8 セメント業界の対応

セメント製造業は、鉄鋼業や製紙業と同様に、事業経営面で設備投下資本が大きい設備型産業である。しかし、償却費、金利などの固定費の削減努力より、製品コストの変動費に当たるエネルギー費や用材費の削減は、経営上寄与度が大きく、合理化の有力な手段である。セメント各社は、1971 年から生産プロセスの積極的な合理化に取り組み、MFC、SF、RSP、KSV、DD など各種の NSP 方式を開発し設備導入した。（日本では湿式焼成炉は 1997 年で廃炉された）

これらの製造工程の合理化は、NOx、SOx 等の大気汚染防止対策面に対する削減効果が大きく、NOx 排出削減で見ると、仮焼炉の設置によるキルン窯炉内における熱負荷減少により、Thermal NOx の生成が減少し、排ガス脱硝処理を行わなくとも規制値達成が可能な状況に 1970 年代末に到達している。実際の NOx 排出濃度の測定値事例を表 2-18 に示す。

表 2-18 日本のセメント製造企業の排ガス測定値

事業所(県)	煤じん (mg/m ³ N)	Dxn 類 (TEQ-ng/m ³ N)	NOx (ppm)	測定年月
O ₂ %	O ₂ =10% vol.	O ₂ =12% vol.	O ₂ =10% vol.	
U 社-U (山口)	11	N.D *	190	2013.7
U 社-I# 1 (山口)	10	N.D *	157	2013.6

* N.D : not detected

3 セメント製造業における窒素酸化物の排出削減対策技術

3.1 セメント製造概要

3.1.1 セメントの定義・性状・種類等

セメントは結合材料を意味しているが、一般的な定義は「石灰を主成分とする土木・建築用の無機質材料で、水と反応して固まる性質をもつもの」であり、製造方法からみると「主に石灰質材料と粘土質材料を適当な割合で混合し、粉末状にしたものを焼成すると、クリンカが生成する。このクリンカに石膏等を混ぜて粉砕したもの」である。

セメントは水和反応により凝固-硬化する水和生成物を特徴とする建材である。クリンカを構成する主な化合物は「エーライト」「ビーライト」「アルミネート相」「フェライト相」と呼ばれる4種類である。(表 3-1) なお、セメント業界においては、CaO を C、SiO₂ を S、Al₂O₃ を A、Fe₂O₃ を F とし、独特の略記号で表現している。

表 3-1 クリンカ構成物質

クリンカの構成物質		化学組成	備考
珪酸カルシウム	エーライト	3CaO・SiO ₂ (C ₃ S)	微量の Al、Na、K、Ti、 Fe、Mg 等含む
	ビーライト	2CaO・SiO ₂ (C ₂ S)	
間隙相	アルミネート相	3CaO・Al ₂ O ₃ (C ₃ A)	少量の SiO ₂ 、Mg、Na、 K 等含む
	フェライト相	4CaO・Al ₂ O ₃ ・Fe ₂ O ₃ (C ₄ AF)	

なお、仕上工程でクリンカと混合される石膏は、水和反応速度を適度に制御する効果がある。

日本で生産されているセメントの種類は、一般にポルトランドセメントと混合セメントに二分され、JIS でポルトランドセメント 6 種類、混合セメント 3 種類が規定されている。

3.1.2 セメント原料

代表的なセメントであるポルトランドセメントは、CaO、SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、SO₃ を主成分とする。原料はこれらの化学成分を含む天然資源や副産物が用いられ、一般的に石灰質原料、粘土質原料、珪酸質原料、鉄原料とセメント粉砕の際、添加する石膏が原料とされる。セメントの中間製品であるクリンカの焼成反応は 1,250~1,600℃で起こるため、原料は反応性に富むことが求められる。

➤ 石灰質原料

石灰質原料は石灰石が最もよく使用される。欧州では泥灰岩 (Marl)、粘土質石灰岩、天然セメント岩、貝殻等が使用されている。石灰石の構成鉱物は方解石 (Calcite-CaCO₃) であり、850℃以上で CaCO₃→CaO+CO₂ に分解して反応性に富む生石灰 (CaO) となる。

➤ 粘土質原料

粘土は SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 を含み、特に Al_2O_3 , Fe_2O_3 を多く含むものが使用される。高炉スラグ、フライアッシュなども代替原料として利用されている。粘板岩、頁岩 (Shale) などの風化したものは最良である。

➤ 珪酸質原料

軟珪石、珪石、珪質粘板岩など SiO_2 が 80~90% 程度の粉砕性に優れたものが使用される。

➤ その他

鉄原料：焼結反応促進成分、製錬廃滓など、

MgO : C_3S の構成成分、高炉スラグ、蛇紋岩など、

➤ 石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

セメントの凝固時間を調整するために使用される。化学工場からの副産石膏や天然石膏が使用されている。化学石膏では硬化不良や強度発現不良の原因となる燐酸や有機酸、無機物の混入を避けなければならない。

3.1.3 セメント製造工程

セメント製造工程は、原料の採掘、運搬、貯蔵後、原料工程、焼成工程、仕上工程に大別される。石灰石は、採掘後一般に一次破砕、二次破砕され適正な粒径にされ工場に搬入される。

➤ 原料工程

石灰石、粘土、珪石、鉄原料、その他の原料を所定の化学組成となるように調合する。通常、蛍光 X 線分析やコンピュータ制御により正確な調合を図る。焼成工程の排ガスを利用した乾燥や原料ミル (原料粉砕機) で細粉砕して調合原料を生産し、Air Blending Silo を経て Kiln に搬送する。廃棄物や副産物も原料として利用されているが乾燥機やサイロの前で混入されている。調合原料はセメントの大部分を占めるクリンカの主成分である CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 が一定の割合となるように原料調整するものである。図 3-1 にセメントの一般組成を示す。廃棄物等はこれらの成分で構成されているため原料として有効に活用出来る。

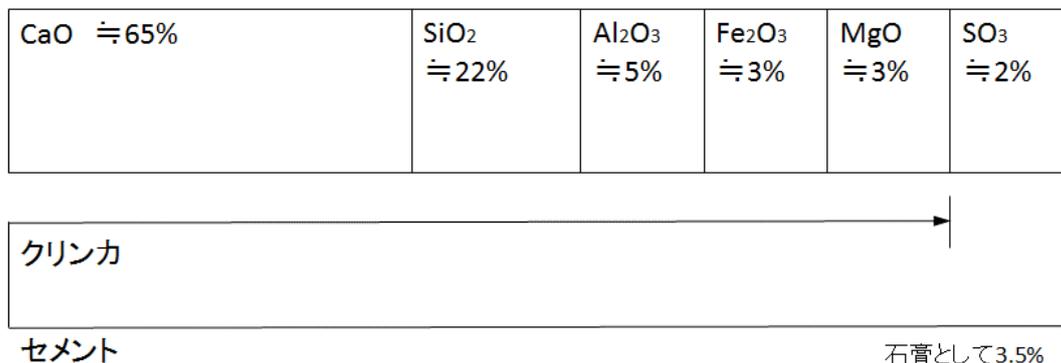


図 3-1 セメントの組成

➤ 焼成工程

原料工程で得られた調合原料を高温焼成しクリンカを生成する工程である。焼成工程は、回転窯 (Kiln) のほか、SP、仮焼炉、クリンカクーラ、燃焼装置、排ガス熱回収装置 (排熱回収ボイラ+蒸気タービン発電設備)、集塵機等から構成される。

クリンカは回転窯 (Rotary Kiln) で焼成する。セメント Kiln には、乾式・湿式があり、乾式では、Shaft Kiln、Short Kiln、Long Kiln、流動床、湿式では Short Kiln、Long Kiln などがある。乾式ショートキルンには、Lepol Kiln や SP や、NSP があるが、日本では NSP 方式と SP 方式しか現在使用されていない。

日本のセメント工場では、焼成効率を向上させるため、調合原料を直接、キルンに投入せず予熱乾燥するプレヒータ (Pre-heater) を通過させて Kiln 内に投入する方法を採用している。プレヒータは仮焼炉の有無で二つの方式がある。仮焼炉は、CaCO₃ を主成分とする石灰石が脱炭酸反応により CO₂ を分離させ、CaO を生成、Kiln において 1400℃以上で焼成される。

【仮焼炉無：SP 方式】

原料粉末を Kiln 投入前に Kiln 排ガス中に浮遊させて熱交換を行う方法で、1950 年 Humboldt 社の開発により、独国 Klockner- Hutte Bremen AG. に 1 号機が建設された。以降、大型化への展開、熱消費率が優れていたことから、Polysius 社、F.L.Smidth 社、Krupp 社、Wedag 社などを通じ世界に広く普及した。

【仮焼炉付：NSP 方式】

1971 年に日本で SP Kiln 方式の改良型として開発された焼成方式である。

SP 方式の予熱機能を向上させるために、SP 最下段に仮焼炉 (Calciner) を設け、更に加熱させ、CaCO₃ → CaO の分解を仮焼炉でほぼ終える効果を得る。このため仮焼炉/Kiln における熱消費率は 10/90～60/40 となり Kiln の熱負荷が下がることと、燃料原単位が小さいこと、仮焼炉出口ガス温度が 850～900℃と比較的低温で燃焼させるため

Thermal-NOx 生成量が抑制され、SP 方式に比較して焼成工程における NOx 排出量を低く抑えられる。このため公害規制に厳しい日本では 1970~1980 年代に急速に普及した。

クリンカクーラは、クリンカの品質に影響するクリンカの急速冷却や乾燥熱源等に利用される高温空気の発生工程で重要な工程である。形式は Shaft Cooler、Rotary Cooler、遊星 Cooler、Grate Cooler などがある。日本では殆ど熱交換効率に優れ、冷空気接触が可能な Grate Cooler が使用され、さらに優れた熱効率等の機能を有する改良型 CFG、IKN 等が採用されている。

➤ 仕上工程

焼成されたクリンカを粉砕して粉末状のセメント商品に加工する工程である。セメントの硬化速度を調節する目的で石膏や、混合セメント生産では高炉スラグ、フライアッシュなどの混合材を加えて加工する。焼成工程で生産されたクリンカに石膏を加え、仕上げミル（セメント粉砕機）で粉砕してセメントを生産する。

仕上げミルにおける粉砕効率を上げるため、一般的には仕上げミルで粉砕されたものは、Separator（分級機）で粗粉と微粉に分級され、微粉が最終製品であるポルトランドセメントとなる。混合セメントの場合は混合機でポルトランドセメントと混合材を混ぜて製造される。

セメント製造工場における代表的な NSP 方式の製造工程を図 3-2 に示す。

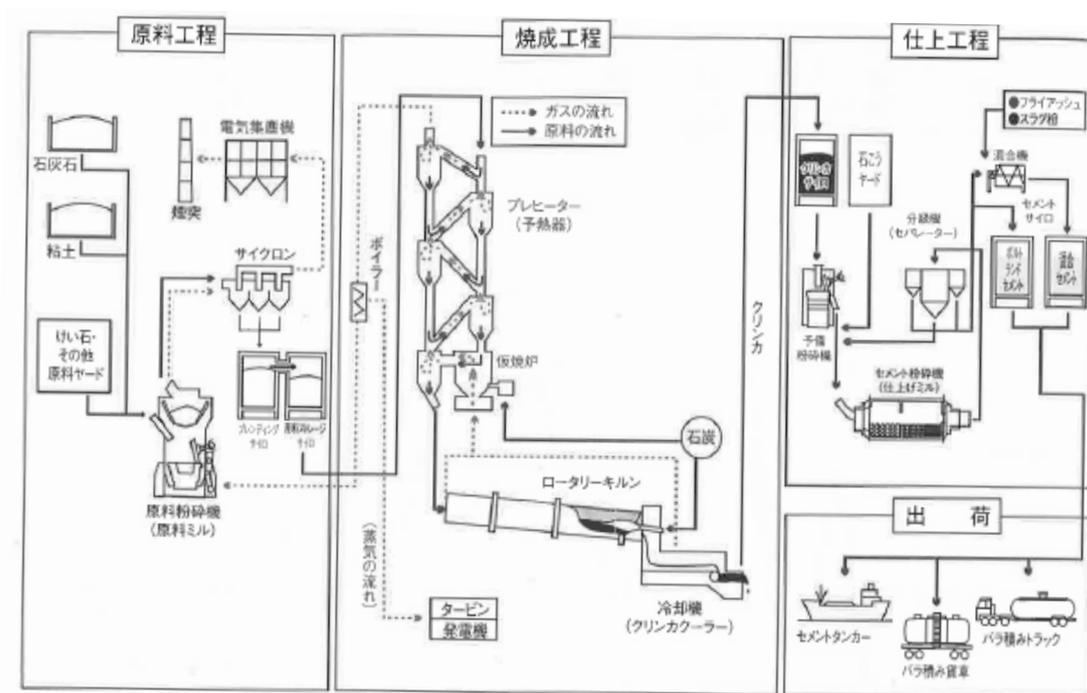


図 3-2 セメント製造工程 (NSP 方式)

3.2 窒素酸化物 (NOx)

3.2.1 基本原理

窒素酸化物はNとOの化合物である。結合状態によって数種類の存在が知られているが、燃料の燃焼によって生成するものは、NO、NO₂で、一般にこの双方を窒素酸化物NO_xと称している。一般にボイラや内燃機関の燃焼から発生する場合にはNOが多く、NO_xの90~95vol.を占めており、微量にN₂O、N₂O₄、N₂O₅などを含む。NOは大気中に放散されると大気中のO₂やO₃により酸化されて、一般環境大気測定ではNO/NO₂比でほぼ1程度になり平衡状態になることが計測されている。

生成起源ではFuel NO_xとThermal NO_xの2種に区分される。

- ① Fuel NO_x：燃料中に含まれる各種窒素化合物から燃焼に際して生成される
- ② Thermal NO_x：空気中の窒素分子が高温状態で酸化されて生成される

3.2.1.1 Fuel NOx

石油系燃料には、Pyridine (C₅H₇N)、Quinoline (C₉H₇N)、Indole (C₈H₇N)、Amides 類(R-C-NR₁R₂)及びその誘導体の形でN分が含有されている。(日本の場合 0.1~0.3%)

石炭に含まれる窒素化合物も石油と類似したものと考えられているが、含有率は無水ベースで0.7~2.5%と高い。廃棄物系ポリウレタン、ユリア、メラミン樹脂等にもN分が含まれる。

気体燃料にも HCN や NH₃ として N 分を含むものがあるが N₂ の形で存在するものは Fuel NO_x に関係しない。

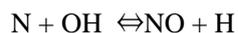
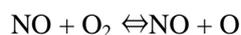
燃料中の N 分 1% が全て NO_x に変化したとすると、乾きガス中の NO_x 濃度は重油で 1,550ppm、(O₂=0%) 石炭で約 2,000ppm (O₂=0%) となるが、実際には全ての N が NO_x に変化するわけではない。石炭由来の Fuel NO_x の場合、揮発分から派生する Volatile NO_x と Char 中の N から発生する Char NO_x に分かれる。生成機構から乾留温度や当量比等の影響を受けるが気体・液体燃料では、Volatile NO の変換率は高い。

3.2.1.2 Thermal NO_x

生成の特徴から Zeldovich NO_x と Prompt NO_x に分けられる。

【Zeldovich NO_x】

火炎後流の高温燃焼ガス中で生成されるものもので、空気過剰、燃料過剰の場合に対して O 原子が平衡にあると考え次の機構で生成する。



Zeldovich NO_x は、

- ・ 燃焼温度が高い程、
- ・ O₂ 濃度が高い程、
- ・ 空気比が大きい程、
- ・ 高温の滞留時間が長い程 増加する。

【Prompt NO_x】

燃焼反応が盛んな火炎部やその近傍では Zeldovich 機構では説明できない急速な NO 生成現象があり、これを PromptNO と称している。この現象は C_mH_n 系燃料特有のものであり、CO や H₂ 燃焼のときには見られない。燃料過剰のときの多く、燃焼中間生成物として発生する HCN や NH などが原因とされている。生成絶対量は多くない。

図 3-3 に NO_x 濃度と燃焼ガス滞留時間・ガス温度・空気比の関係、図 3-4 に理論燃焼温度における滞留時間と NO_x 生成量の関係を示す。

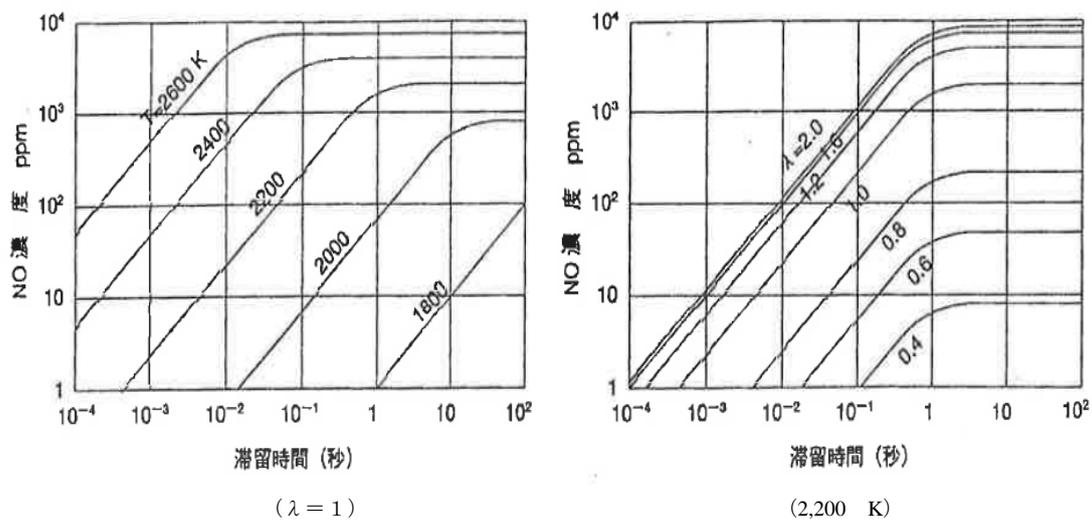


図 3-3 NOx 濃度と燃焼ガス滞留時間・ガス温度・空気比の関係

(出典：公害防止機器設備機械事典)

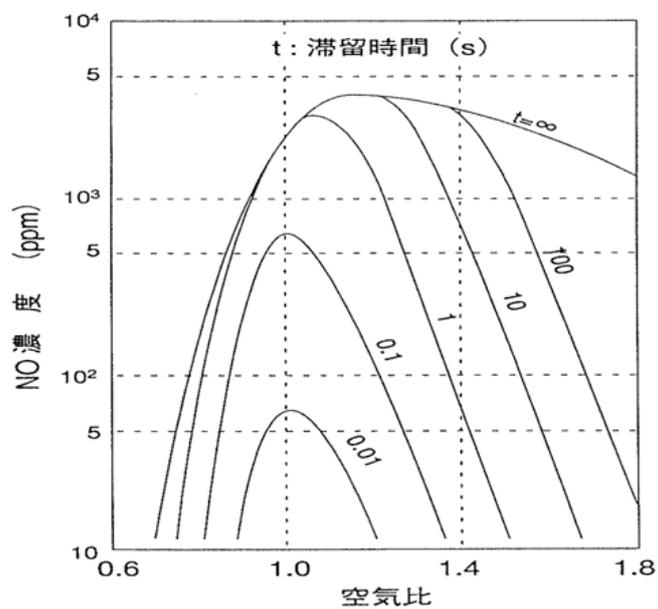


図 3-4 理論燃焼温度における滞留時間と NOx 生成量

(出典：低 NOx 燃焼に関する調査報告書 JSIM)

3.2.2 窒素酸化物と他の大気汚染物質の生成との関連

排ガス中の SO_3 は余剰 NH_3 と反応して、 NH_4HSO_4 が生成してガス温度の変化により析出して閉塞する現象が発生する。セメント焼成から回避出来ない Ca 濃度の影響も留意すべき点である。

窒素酸化物生成には関係ないが、濃度測定法により表 3-2 に示す共存ガスが測定濃度に影響するため考慮する必要がある。

表 3-2 共存ガスの影響

NOx 濃度分析法	影響ガス成分	影響
化学発光法	CO_2	クエンチング現象
紫外線吸収法	SO_2 (NO)	吸収スペクトル重複
低電位電解法	SO_2	電位妨害

3.3 窒素酸化物削減技術の基本原則

窒素酸化物の生成は、先述したように燃焼場で発生して、燃焼ガス温度と O_2 濃度の影響を強く受ける。セメント焼成工程は製造方式に拘わらず、クリンカ焼成のため、高温で長時間の加熱を必要とするため、適用可能な NOx 生成抑制法がボイラや工業用加熱炉に比べ制約される。従って、焼成工程での一定濃度の発生を許容し、排煙脱硝で除去する方法に依存せざるを得ないプロセスである。このため、各国の窒素産物の規制値は他の製造業に比較して比較的高い値に設定されてケースが多い。

生成量削減として基本的には生成機構からの削減対策と焼成工程における仮焼処理方式が取られる。生成後の排煙中の脱硝は脱硝剤による方法が取られている。日本では NSP 方式の導入により、規制濃度以下で操業可能で、排煙脱硝は緊急時対策として装備はされているが、実際に使用されている事例は少ない。

セメント製造業における窒素酸化物排出制御法として実用化されている技術は次の通り。

① 燃焼場における生成抑制技術

【Fuel NOx の生成抑制】

- 燃料中の N 分低減
- 初期燃焼域での O_2 濃度の低減

【Thermal NOx の生成抑制】

- 燃焼温度の低下
- 燃焼域での O_2 濃度の低減
- 高温域でのガス滞留時間の短縮

表 3-3 燃焼場における窒素酸化物生成低減技術の基本的特性

低減対策	Thermal NO _x			Fuel NO _x	
	燃焼温度の低下	燃焼域での O ₂ 濃度の低減	滞留時間の短縮	燃料中の N 分の低減	初期燃焼時域での O ₂ 濃度の低減
燃料の軽質化		△		◎	
低空気比燃焼	○	◎	○		◎
混合特性の変更	○	◎	○		□
低 NO _x バーナー	○	△	◎		■
予混合燃焼	○		◎		■
段階的燃焼	○	◎	○		○
排ガス再循環	◎		○		

◎ 大きい効果が期待出来る ○ 効果がある △ 間接的な効果

■ 逆の効果が生じる □ 対策により効果が異なる恐れあり

備考: Kiln や仮焼炉で採用が困難な火炉熱負荷の低減や水・蒸気噴霧、炉内脱硝等は省略

表 3-3 は、燃焼場における窒素酸化物生成低減技術の基本的特性である。実際の燃焼機的设计には数種の低減技術を組み合わせた方法が取られることが多い。燃焼場における NO_x 低減のポイントは火炎域における還元領域の形成に極言される。図 3-5 はバーナー火炎における NO_x 生成・還元概念の説明図である。

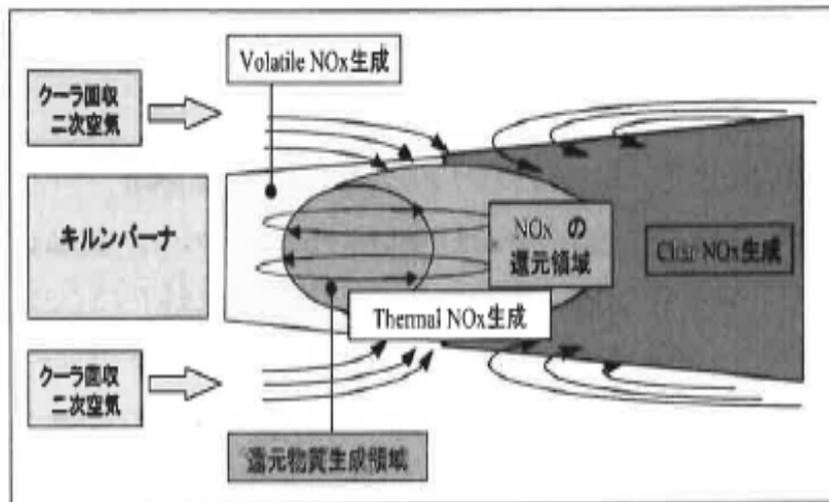


図 3-5 セメントキルンバーナー火炎における NO_x 生成・還元概念

(出典: ICETT、低 NO_x バーナーの開発)

- ② 排煙脱硝技術
 - 乾式選択接触還元法 (SCR: Selective Catalytic Reduction)
 - 乾式無触媒選択還元法 (SNCR: Selective Non Catalytic Reduction)
 - 乾式同時脱硫脱硝法
- ③ 焼成プロセスの改善—火炉熱負荷の低減
 - 仮焼炉 (NSP 方式) : 仮焼炉による分散燃焼、石灰石熱分解・原料予熱効果により、キルン内熱負荷の減少による生成抑制
- ④ 運転管理面
 - 仮焼炉・キルン・排煙脱硝の運転と窒素酸化物に関するパラメータの適正制御及び管理

3.4 燃焼場における窒素酸化物生成抑制技術

3.4.1 燃料の低窒素化

燃料種と NO_x 生成量の関係は、一般に固体燃料>液体燃料>ガス燃料の順に少なくなる。ガス燃焼の場合、燃料中に窒素化合物がほとんどなく、Fuel NO_x の発生はほとんどない。さらに、Thermal NO_x に対しても燃料がガス体であるため空気や再循環ガスとの良好な混合が得られやすく、燃焼が均一で局所的な高温部が少ないために、固体・液体燃料に比べて NO_x の生成が少ない。

液体・固体燃料は、燃料中に窒素化合物を含み、白熱炭燃焼などの局所的な高温部が発生するため、NO_x 発生量が多い。総量規制の緊急指示や、生産状況、原料条件、廃棄物の処理などが原因で一次的に排出濃度の低下が必要な場合の措置として、良質燃料との混焼 (Dual Firing) や LNG 専焼方式などは有力な方策である。仮焼炉の燃料消費量が多い場合や低 O₂ 燃焼が行われている場合は Fuel NO_x の占める量は少ないため燃焼の効果は少ない。

3.4.2 低 NO_x バーナの装備

燃焼由来の Thermal NO_x の抑制は、「燃焼温度の低下」「燃焼域での O₂ 濃度の低減」「高温域での滞留時間の短縮」が基本条件である。燃焼機は低 O₂ 燃焼を含めて、火炎形状、噴霧特性、燃焼反応の挙動等がこの条件を具備する機構で設計されている。火炎形状等は火炉構造、燃料特性に大きく影響するため、日本のセメント各社では自社の炉において燃焼機メーカーと試行実証して導入する事例が多い。

低 NO_x バーナはバーナ本体において生成抑制機能を有する形式で、多様な構造のものが開発され利用されている。基本的な機能は、火炎温度の低下と希薄 O₂ 濃度燃焼、HC 吹込による NO 還元効果等により、NO_x 生成を抑制するものである。NO_x 生成に大きな影響を持つ燃焼場における燃料と空気の混合を良好にして燃焼の完結を速めて、ガスの高温域の滞留時間を短くする混合促進型や、火炎に濃淡をつけ分割燃焼させる方式や、空気流を 2

次まで分割して還元雰囲気を作る方式等のバーナが利用されている。

代表的な低 NO_x バーナとして次の形式がある。

- ① 急速燃焼型 (混合促進型)
- ② 二段燃焼型
- ③ 自己循環型
- ④ 濃淡燃焼型
- ⑤ 排ガス循環・濃淡燃焼組合理
- ⑥ 排ガス循環・二段燃焼組合理

各型式の低 NO_x バーナの原理や構造を図 3-6~図 3-11 に示す。

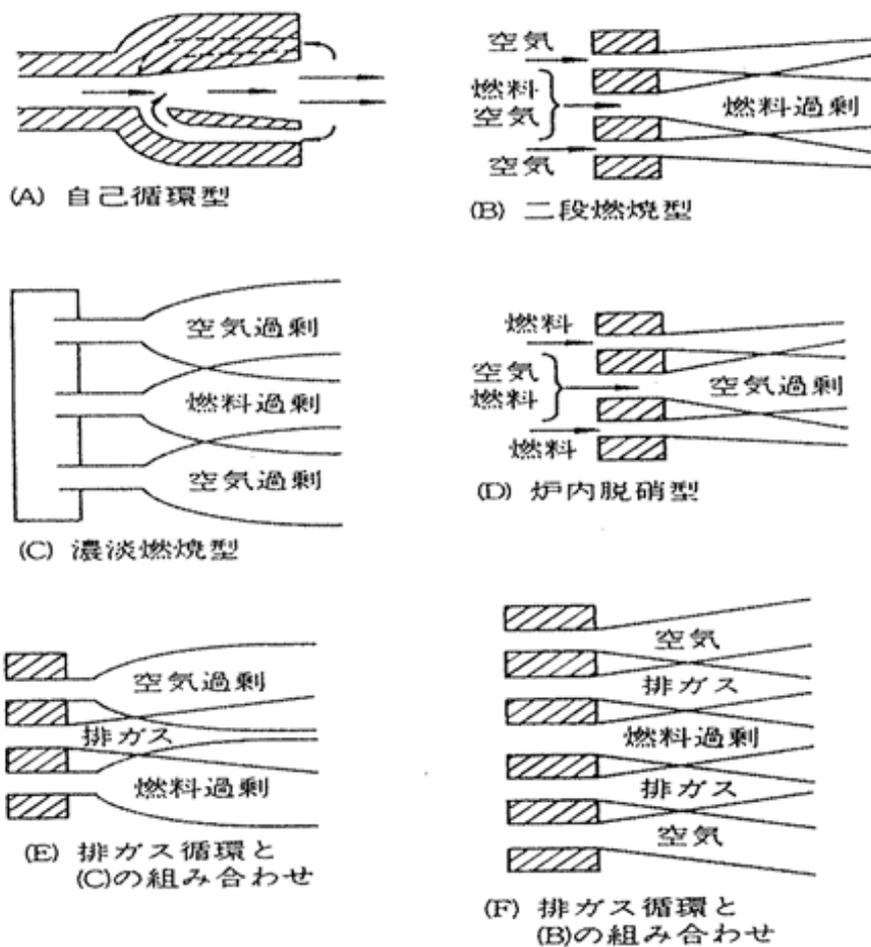


図 3-6 各型式の低 NO_x バーナの原理構造

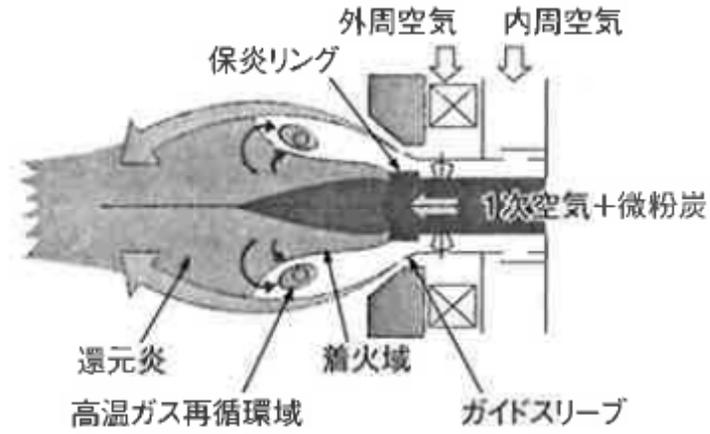


図 3-7 二次空気旋回流型微粉炭バーナ (日立NRバーナ)

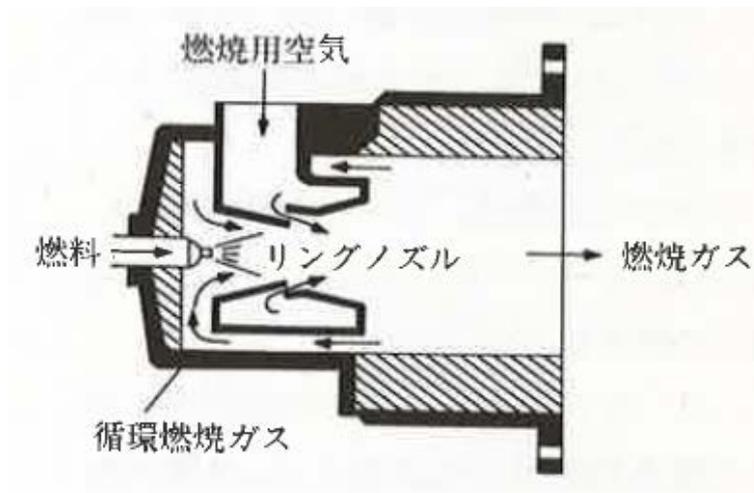


図 3-8 自己再循環型バーナ (重油・ガス)

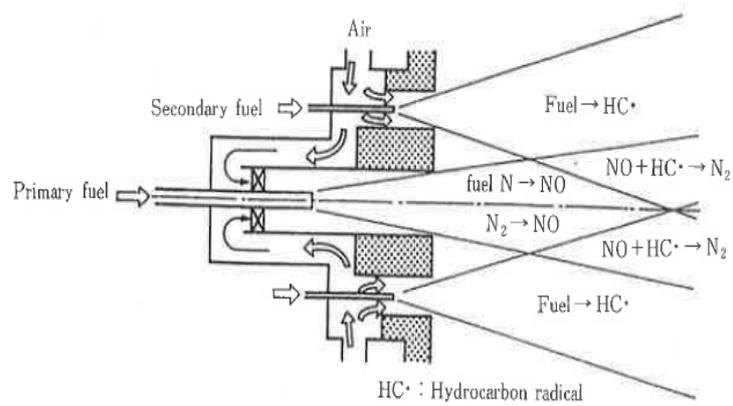


図 3-9 燃料二段吹込型バーナの原理

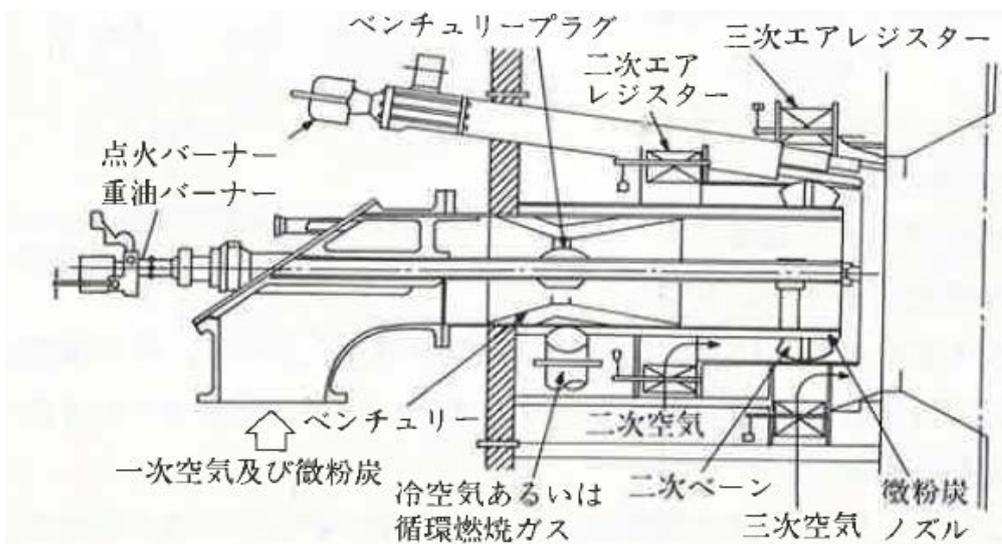


図 3-10 微粉炭用段階的燃焼低 NO_x バーナ

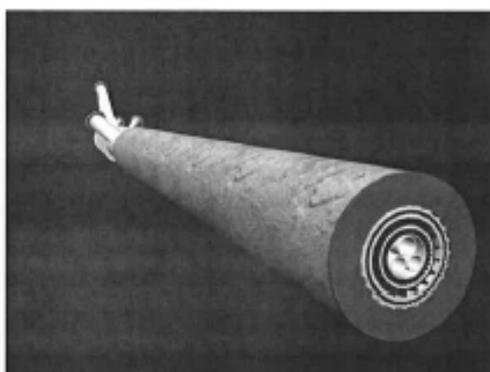


図 3-11 多機能キルンバーナ (多種燃料燃焼用)

(出典 : NEDO Report 2012)

3.4.3 低酸素燃焼法

総空気比と NO_x 生成量の関係は正の関係にあり、特に初期燃焼領域における一次空気は生成量に大きな影響がある。本手法は過剰空気を少なくし、可能な限り理論空気量に近い空気比で燃焼を行い窒素酸化物の生成を抑制する方法である。更に省エネルギー効果も生まれる。空気比を低くすると燃焼領域での O₂ 濃度が減少し、火炎温度も低くなるので両者の相乗効果で生成が抑制される。

微粉炭燃焼の場合、低減効果大きい。この方法は低空気比で燃焼させるため、燃焼効率の低下や CO の増加、未燃分の増加を防ぐような監視、制御に注意が必要である。燃料の種類で NO_x 生成量のピーク特性が異なるので、特性を良く把握しておく必要がある。(空気比と NO_x 生成特性は図 3-3 を参照のこと)

3.4.4 排ガス再循環法

セメント焼成工程の適用ではダストや温度等の制約や循環割合などについて、長期の実証が必要である。排ガスの一部を再度循環させて燃焼用空気に混合させ、火炎温度を低下させる作用と、 O_2 分圧を低下させて生成を抑制させる。火炎の安定性等試験で確認すべき課題が多い。

3.5 排煙脱硝技術

3.5.1 選択接触触媒還元法

アンモニア (NH_3) を排ガス中に吹込み、触媒に NH_3 と NO_x (NO 、 NO_2) を選択的に反応させ水 (H_2O) と N_2 に分解する方法である。



触媒層において O_2 が共存しても NO_x と NH_3 の反応が選択的に進行するので、無触媒脱硝法に比べて、還元剤の消費量が少ない。 NH_3 消費量はほぼ理論当量比に近く、50~70%の高い脱硝率が得られるが、欠点として次の点がある。

- 触媒の活性寿命がある。
- ダストなどによる目詰まりが発生する。(集塵機の後流側設置：温度の制約があり)
- ガス流動圧損があること。(触媒のガス通過形状による)
- ガス中の成分の触媒表面への付着等による触媒活性の劣化が生じる。
- 脱硝反応部の設置場所を必要とする。

触媒の形状には、図 3-12 に示すように、板状、ハニカム、格子状等が使用されている。

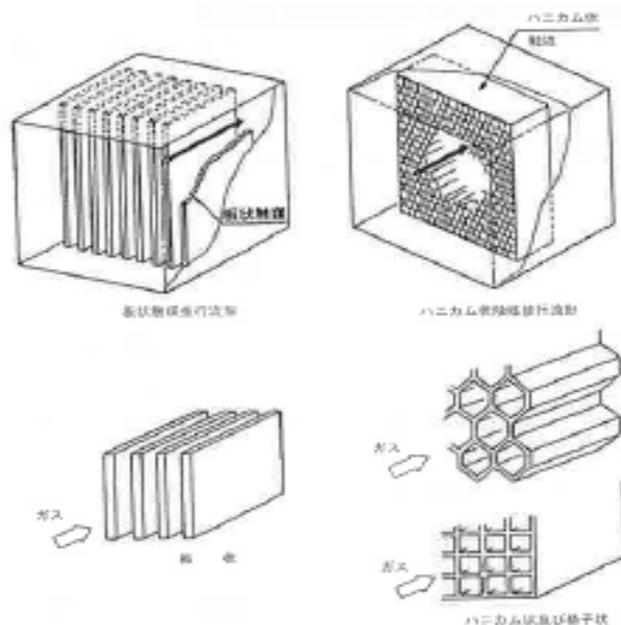
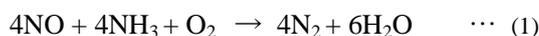


図 3-12 脱硝触媒の形状事例

3.5.2 無触媒脱硝法

排ガス中に NH₃ や (NH₂)₂CO 等の還元剤を吹込み、生成 NO_x をダクト内で還元する方法である。

NH₃ と NO の反応は次の通り。



通常は NO が主体であるため、(1)の反応が O₂ 共存下でも進行し、NO と NH₃ の理論当量は 1.0 であるが、NO₂ も存在するので(2)の反応も生じる。実際の反応では NH₃ 量は理論当量以上が必要である。多すぎると未反応 NH₃ の流出や排ガス中の HCl と反応して、白煙や臭気の発生となる。無触媒脱硝法の特徴は次の通り

- 特別の反応装置が不要で簡単である。
- ガスの流動圧損、閉鎖などの恐れがない。
- 既設プラントに容易に装備できる。

技術的検討事項は下記のとおり

- ガス温度変化により脱硝率が変動し易く、実証を必要とする。
- 当量以上の NH₃ を過剰添加した場合、リークや塩化アンモニウムが生成、脱硝率が低下する。
- ある程度の接触時間を必要とする。(>0.4sec)
- 噴霧特性、ガス温度、ノズル形状等が脱硝率に影響するため、実証確認が必要である。

3.6 焼成プロセスの改善—火炉熱負荷の低減

セメントの焼成工程は、調合原料を SP へ投入後、次のような反応で進行する。

- ① 乾燥：水分の蒸発（主に SP で乾燥） <100℃
- ② 予熱：粘土分が分解、脱水する 100~750℃
- ③ 仮焼：石灰石 (CaCO₃) が分解、脱炭酸する。CaO・CO₂ に分解される。750℃~
- ④ 焼成：一部が溶解して C₃S、C₂S を生成、塊状に溶解し、クリンカが生成される。1000℃~
- ⑤ 冷却：融液が結晶化して、アルミネート相、フェライト相を生成 1300~1450℃

SP 方式では原料中の 40~50%、NSP 方式では 80~90% が Kiln に入る前に分解、脱炭酸される。仮焼炉を設けた NSP 方式では CaCO₃ の分解を Kiln より分離しているため、Kiln の熱負荷が低減され、火炉内で生成される窒素酸化物が減少する。また仮焼炉の仮焼温度は 800~1000℃程度で低いため窒素酸化物の生成が少なく、総合的に焼成工程における燃焼起源の Thermal NO_x 排出が減少することになる。

SP 方式では単に予熱効果のみであるのに対し、NSP 方式では石灰石の分解まで終了する

ため、Kiln のクリンカ生成能力の増加も図られる。窒素酸化物生成抑制効果からみた仮焼炉 NSP 方式の効用は次の通り

- a. 他の方式に比較して燃料消費量が少なく、間接的に窒素酸化物の排出削減となる。
- b. 仮焼炉の燃焼温度が低いので窒素酸化物の生成が抑制される。
- c. 低品位の燃料が使用可能（例：可燃性廃棄物、廃油、低質油など）
- d. 燃焼ガスのバイパスが容易である。
- e. 多様な燃料が、ボイラ、キルン、工業炉と同様に噴霧燃焼可能である。
- f. キルンの焼成ゾーンの熱負荷の低減、安定運転機能の向上が図れる。耐火物の耐用度も延び保守費の削減ができる。

日本や欧州におけるセメント製造社やプラントメーカーで多数の方式が開発されており、商用プラントとして導入されている。図 3-13 に各種の NSP 方式と仮焼炉の構造を示す。

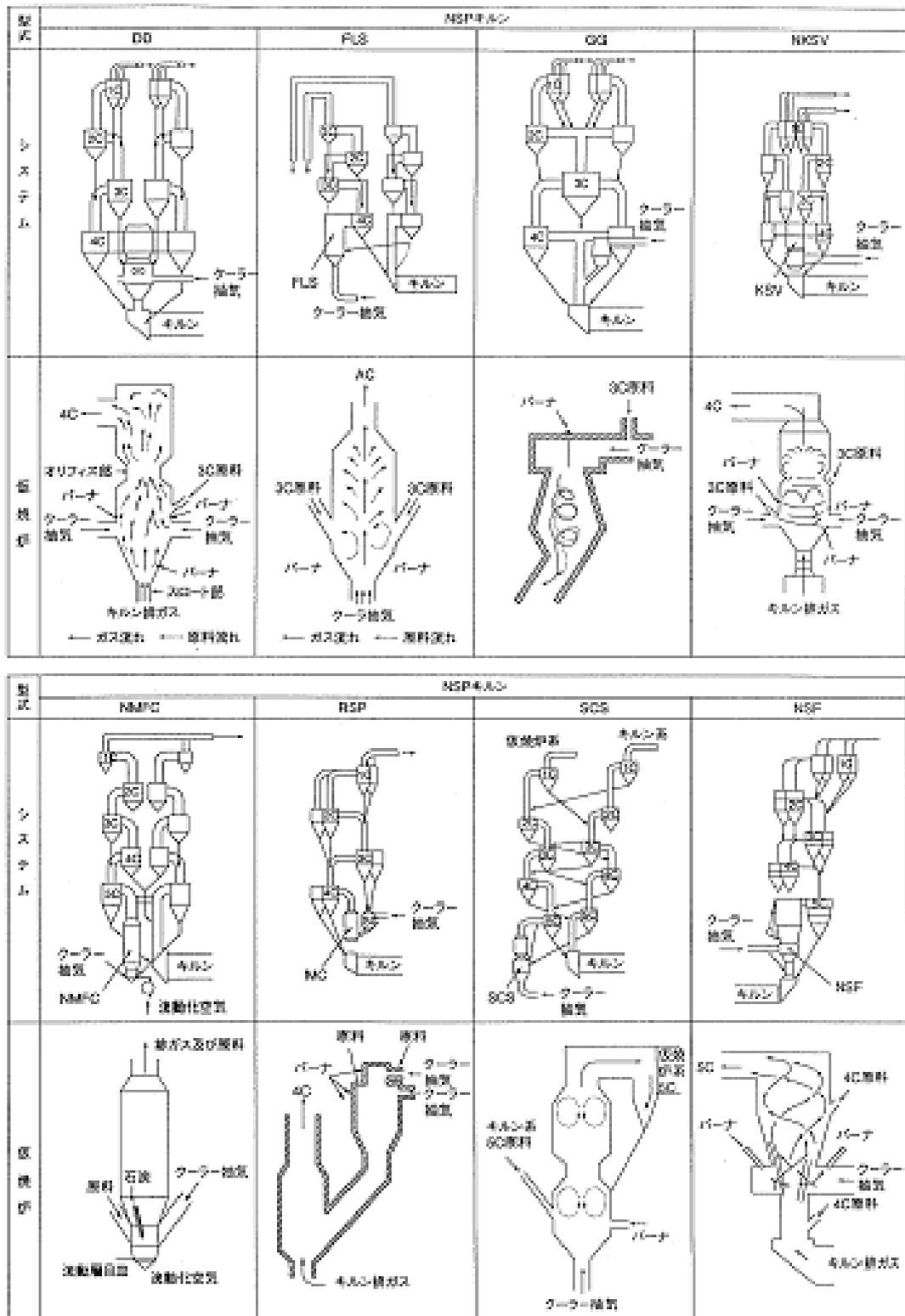


図 3-13 各種の NSP 方式と仮焼炉の構造

4 窒素酸化物発生施設の運転管理

4.1 監視システム

セメント製造工程における大気汚染物質は、窒素酸化物のほかに、煤じん、粉じん、硫酸化物、リークアンモニア、フッ化物などがあり、これらの生成物は製造工程の各所から生成排出される。そのため、各生産工程から種々のデータを収集し、総合集中監視し、管理する方法が取られている。すなわち、中央操作室でコンピュータを介在して、総合的なデータ収集、解析、評価を行い、CRT ディスプレイ装置をマンマシンインターフェースとして、運転員に常時、情報を提供し管理している。異常データが発生した場合の迅速な対応、適切な運転操作を図るため、警報設定値の設定も重要である。この警報により、焼成工程における燃焼の制御、原料供給量の調整、ガス温度等の運転状況の修正措置を講じている。図 4-1 はセメント工場における総合集中監視システムの事例である。

窒素酸化物の排出防止管理として、焼成工程におけるキルンや仮焼炉及びクリンカクーラからの排ガスを連続記録、監視している。更に NO_x の酸素濃度 10% 換算値を求め、瞬時値、1 時間平均値及び 24 時間平均値を連続記録し、排出基準及び総量規制値を常に満足する排出量となるよう運転管理を行っている。同時にこれらの測定値を、大気汚染監視テレメータシステムを構成して、無線・専用電話回線で市町村の監視部署に報告している。テレメータ監視システムは送信される観測データを監視し、規制値を超越する場合や当該地域が高濃度になった場合には排出量削減等の要請措置を講じている。このシステムは行政機構と産業界の大気環境の情報共有化の効果も得られている。図 2.7.2 に自治体のテレメータ監視システムの事例を、図 2.7.3 に工場内のテレメータ監視システムの事例を示す。

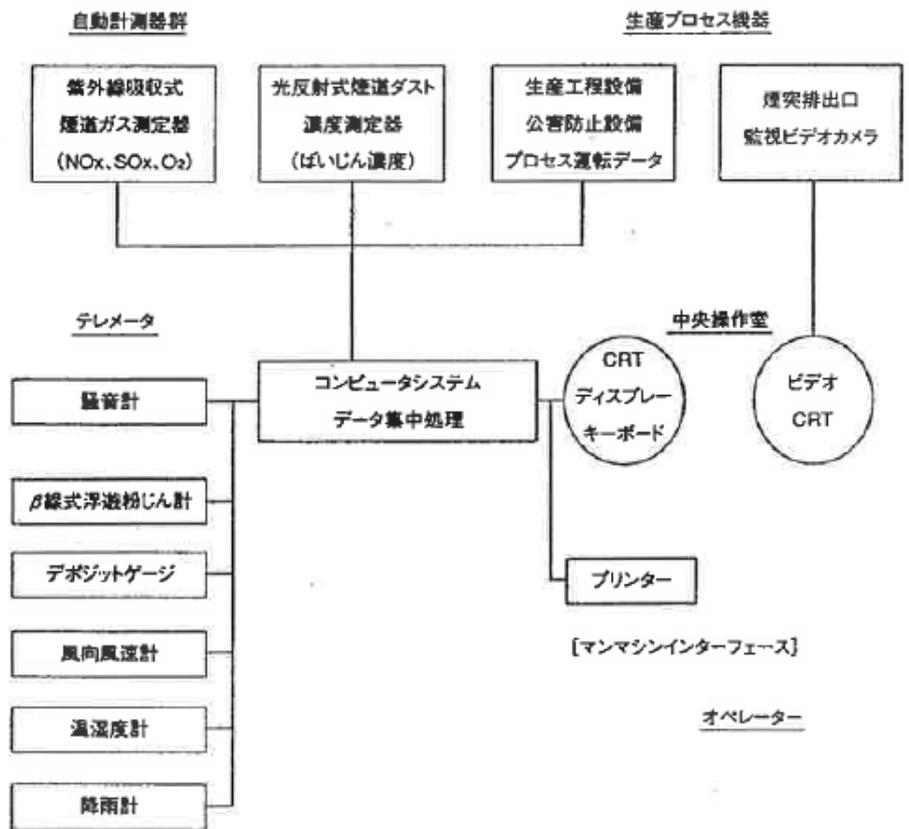


図 4-1 セメント工場における総合集中監視システムの事例

出典：KITA, 開発途上国の大気汚染防止に係る固定排出源対策マニュアル (1999)

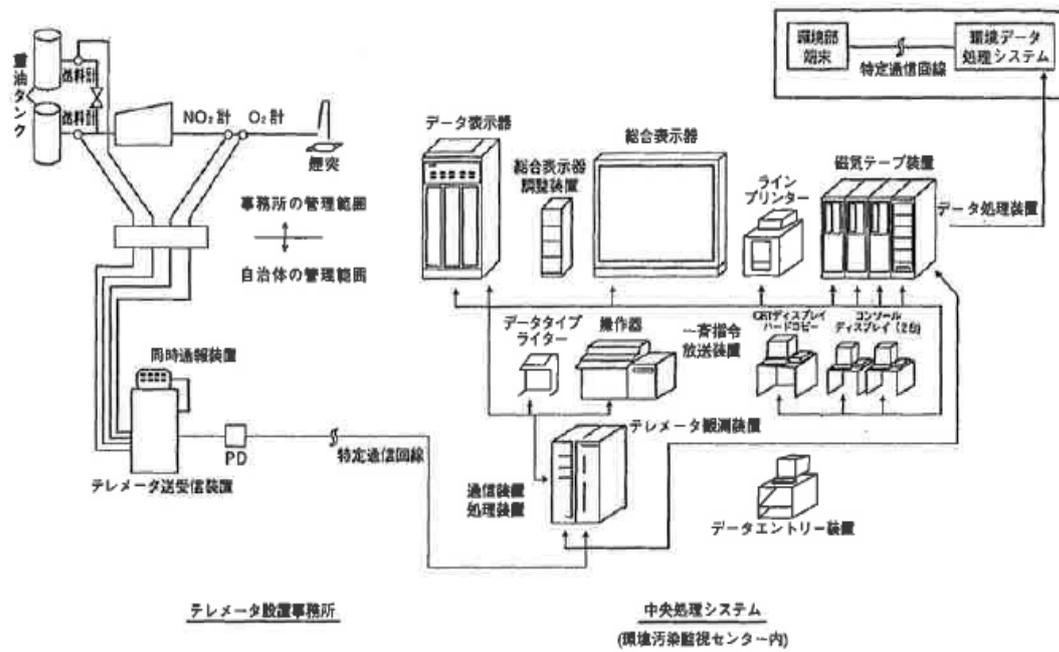


図 4-2 自治体のテレメータ監視システムの事例

出典：環境省、NOx 排出削減対策技術の導入に関わる G/L (2013)

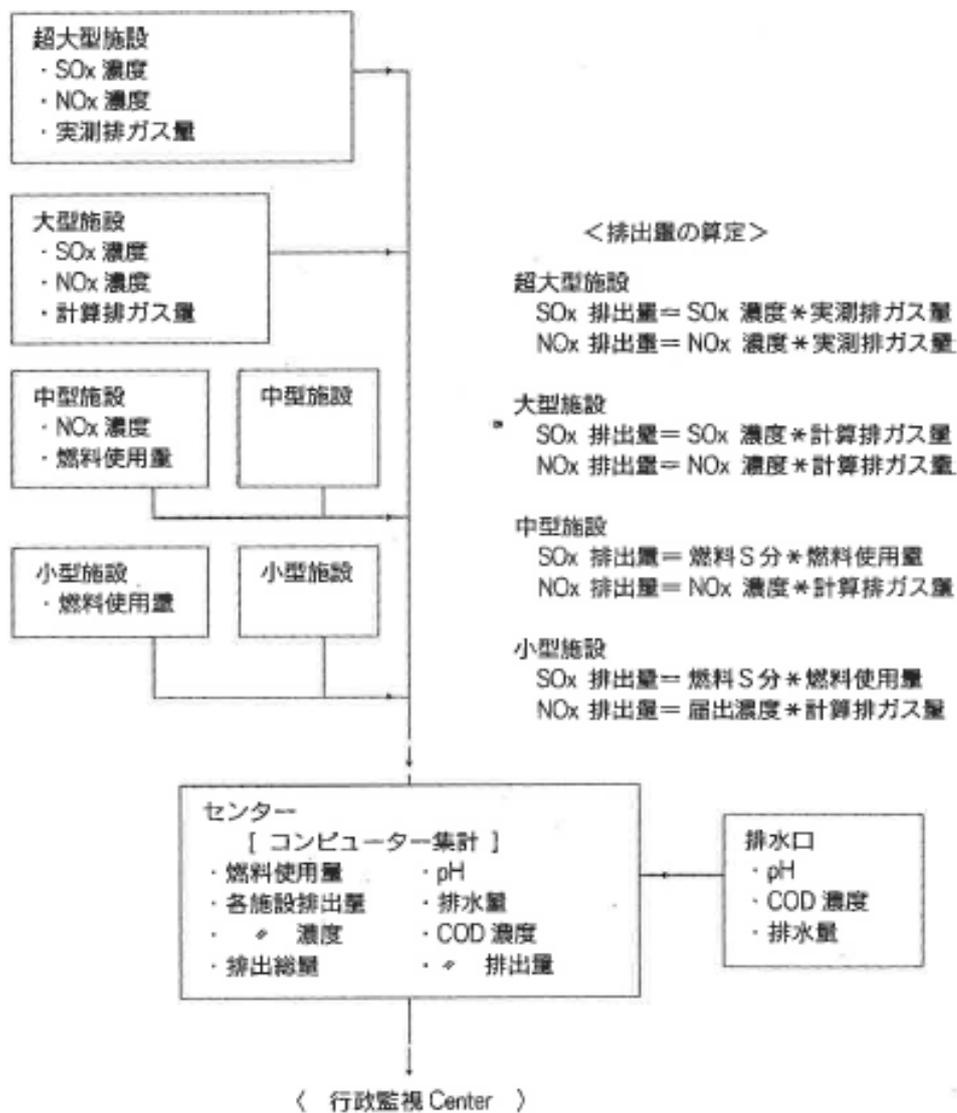


図 4-3 工場内のテレメータ監視システムの事例

出典：環境省、NOx 排出削減対策技術の導入に関わる G/L (2013)

4.2 総合的省エネルギー管理

セメント産業におけるエネルギー管理は、環境管理と共に事業性に関わる重要な管理業務である。省エネルギー効果は、経済性の向上のほかに CO₂ 排出削減や廃棄物再資源化の社会的効果が大きい。

日常管理の対策として

- ① 燃料消費量の削減
- ② クリンカの石灰石原単位の削減：鉄鋼滓等の利用

③ 混合セメントの利用の利用拡大：Fly-ash、石灰石粉の利用

なおセメント製造の一定期間の目標管理指標として、総合エネルギー原単位が利用されている。

総合エネルギー原単位 (Et)

$$Et = \frac{F1 + Ep + F12 - Es}{SP}$$

ここで

F1：燃料

Ep：購入電力

F12：自家発電燃料

Es：その他電力

Sp：セメント全生産量

IEA は 2007 年にセメント産業に関するエネルギー管理指標として表 4-1 に示す項目を挙げている。

表 4-1 セメント産業に関するエネルギー管理指標

指標	単位
① Clinker Ratio per t-Cement クリンカ比率	%
② Energy intensity of clinker クリンカ t 当たりエネルギー原単位	GJ/t clinker
③ Alternative fuel use for clinker production クリンカ生産の代替燃料割合	%
④ Electricity intensity of cement セメント t 当たりの電力原単位	kW/t-cement
⑤ Total energy intensity of cement セメント t 当たりのエネルギー原単位	GJ/t-cement
⑥ Total primary energy intensity セメントの総合一次エネルギー原単位	GJ/t-cement
⑦ Energy related CO ₂ emissions per t-cement セメント t 当たりのエネルギー由来 CO ₂ 排出	t-CO ₂ /t-cement
⑧ Energy & process CO ₂ emissions per t-cement セメント t 当たりのエネルギー由来及びプロセス由来 CO ₂ 排出	t-CO ₂ /t-cement

(出所：IEA, tracking industrial Energy Efficiency & CO₂ Emissions, 2007)

5 セメント産業における窒素酸化物抑制対策まとめ

これまでに紹介した窒素酸化物抑制手法について、纏めたものを下表に示す。

表 5-1 政策面における対策

政策・制度等	制定・施行年	概要	備考	効果
排出規制の法体系化	1962	有害物質の指定	基本法等の整備	大
環境基準の制定	1971～1978	環境上の濃度基準	排出基準の目安	規制基準
排出濃度基準	1973～1979	第一次規制 ～ 第四次規制	罰則規定含む	大
総量規制の制定・施行	1981	4都市で施行	特別地方自治体対象	大
公害防止管理者制度	1970～	一定規模以上の監理義務	国家資格	極めて大きい
公害対策基本法 (大気汚染防止法等)	1949(都条例) 1967～1968 (旧法省略)	整備に係わる金融・税制措置 中小企業特別措置 各種基準・測定法の規定	大気汚染防止全般 融資制度、金融公庫、中小企業事業団等の金融措置 の制度化、国税・地方税の非課税等特別措置	極めて大きい
公害防止事業団	1965	産業公害防止目的の融資等	融資、利子補給、債務保証、利用企業多	極めて大きい
諸機関の活動	1960～現在	研究開発、指導等	ガイドライン 2.8 を参照	活発
環境計量士制度 (計量法)	1952～1992	国家資格者に依る測定	義務化	側面効果大 信頼性向上
熱管理法 (旧熱管理規則)	1951～現在	特定規模以上の熱管理全般の 義務化	管理の義務化 報告義務	極めて大きい
省エネルギー法	1979～現在	エネルギー使用の合理化	達成目標値の設定—義務化、排熱回収など	極めて大きい
JIS	2004	エネルギー合理化基準	空気比などの基準	大
廃棄物処理法(旧—新)	197～現在	廃棄物の適正処分	鉍滓、灰、可燃性廃棄物のリサイクル、維持管理規定	大

JIS B5214	2002	エコセメントの規定	品質の規定	大
-----------	------	-----------	-------	---

表 5-2 技術面における対策

方式	対策・適用技術等	技術・装置	利得・方法・経済性等	日本における実績
焼成工程	NSP 方式	仮焼炉方式	低減効果大	100% 導入済み
生成抑制 Fuel NOx	低 N 分石炭の使用	購入条件の改善	低減効果大、燃料費の増加、炭種の特定	少ない
	石炭の脱 N	改質	低減効果大、経済性なし、産業用燃料として供給に難	無
生成抑制 Thermal NOx	低空気比燃焼 (低 O ₂)	排ガス再循環など	一定の効果あり (缶型式の検討必要)、動力費の増加、燃焼機などと併用可、規模・操業度により効果大	実績多数
	低 NOx バーナ	二段燃焼・濃淡燃焼等々 多様	メーカーや炭種、缶燃焼室により特性が異なるため導入には実証が必要、特許有効期限に留意、価格は規模等による	実績多数
排煙脱硝	SCR 法	触媒+NH ₃ 吹込み	ダスト濃度、アルカリなどによる劣化、SNCR より経済性劣る	大規模缶で実証経験あり
	SNCR 法	無触媒+NH ₃ 吹込み	容易に設置可能、吹込み条件などで実証が必要	実績多数
燃料消費量低減	省エネルギー 熱効率向上	燃焼制御、高効率機器 放散熱等の回収 管理の徹底	低減 NOx 量は石炭燃料消費量に比例して削減 熱管理の義務化 (空気比など) 排熱回収、断熱施工 運転員の資格制度、報告の義務化など	第一段の対策として日本では最も効果ある重要対策と見做す

6 世界におけるセメント製造業の窒素酸化物排出抑制技術導入状況

European Commission JRC Reference Report(Industrial Emission Directive 2013)の NO_x 削減最適技術 (BAT) では、表 6-1 に示す窒素酸化物排出抑制技術を紹介している。なお、Pre-heating /Pre-calcining process における NO_x 排出達成レベルは 200~450mg/m³ である。

表 6-2 は EU で導入されている脱硝技術の実績を示す。

表 6-1 欧州における NO_x 排出削減最適技術 (BAT)

Technique	Applicability
	Applicable to all types of kilns used for cement manufacturing. The degree of applicability can be limited by product quality requirement & potential impacts on process stability
Low NO _x burners	Applicable to all rotary kilns, in the main kiln as well as in the pre-calciner
Mid-kiln firing	Generally applicable to long rotary kilns
Addition of mineralisers to improve the burnability of the raw meal (mineralized clinker)	Generally applicable to rotary kilns subject to final product quality requirement
Stage combustion also in combination with a precalciner & the use of optimized fuel mix	In general, can only be applied in kilns equipped with a precalciner, Substantial plant Modifications are necessary in cyclone preheater systems without a precalciner
SNCR	In principle, applicable to rotary kilns. The Injection zones vary with the type of kiln process.
SCR	Applicability is subject to appropriate catalyst & process development in the cement industry

表 6-2 EU で導入されている脱硝技術

Country	Flame cooling	Mineralised clinker	Staged combustion	SNCR	SCR
Belgium	2			2	
Germany			7	33	1
Denmark		2		1	
Spain		4	2	8	
France	2		7	18	
Italy	2		7	16	1
U.K			1	9	
Austria	3		2	8	

Switzerland	2	1	1	4
-------------	---	---	---	---

(出典 CEMBUREAU, 2006)

セメント焼成工程における窒素酸化物の排出抑制に最も効果がある NSP 方式は、1971 年に日本で開発されて以来、世界各国に普及している。世界では、まだ、焼成工程で窒素酸化物対策が困難な SP 方式等が稼働されているが、日本では 1997 年の旧 SP 方式は全て NSP 方式に転換又は廃棄されている。図 6-1 に各国における SP 方式・NSP 方式の普及率を示す。表 6-3 に各国における NSP 方式の導入事例を示す。

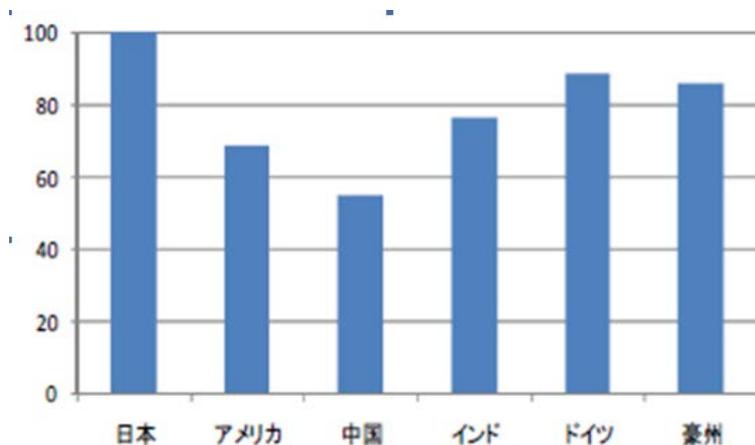


図 6-1 SP 方式・NSP 方式の普及率

(出典 : JCA, 2004~2007 年度統計)

表 6-3 NSP 方式導入事例

Country	Company	Plant	Capacity (t/d)
Indonesia	PT Semen Andalas	Ihongsa	4,000
Iraq	M.O.I&I	Badoosh	3,200
Jordan	Jordan Cement		3,200
USSR	V/OI licensintorg	Moldvia	5,000
Thailand	Siam Cement	Ta Luang	4,000
USA	Kaiser Cement Corp	Permanenta	4,500
India	Narmada	Jamanenta	3,000
P.R.China	Sinoma Cement	Xiangtan	5,000

7 日本における対策導入事例

(場所：A セメント 株式会社 実施年：1984 年)

型式等	焼成形式 NSP 定格 Clinker 焼成能力 3,000 t-Clinker/day Kiln サイズ 3.5 i.mφ×55 mL 燃料 瀝青炭／低位発熱量 21kJ/kg／燃料比 2.4 N 1.2%bd 焼成方式 PC バーナ																		
NO _x 排出濃度 (O ₂ =10%)	改造前 340～370ppm 改造後目標値 <220ppm																		
低減対策手順	<p>定格負荷運転による排出濃度の確認</p> <p>↓ 確認項目：石炭性状分析、空気温度、空気比、負荷変動 KILN 炉内温度、AQC 工程の熱風の流動特性（温度・風量等）</p> <p>低減対策のための実証試験確認</p> <p>①低 N 分石炭燃焼試験 → 削減率 L=70～90ppm/0.1%N .bd ②AQC 熱風の SP&仮焼炉への返送量の変化による NO_x 濃度への影響試験</p> <p>↓ 仮焼炉燃焼用空気返送比 10%～15% vol → L=40～50ppm Kiln 炉燃焼用空気返送比 5%vol → L=30～50ppm ③ Kiln 内燃焼温度の影響 -50℃ → L=30～40ppm</p> <p>採用した NO_x 生成抑制技術</p> <p>① 低 N 分石炭との混焼（NO_x 排出濃度と連関制御法の適用） ② AQC 熱風の返送量の増加 → Max 25% vol ③ 低 NO_x バーナの採用（Kiln 用） ④ 燃焼用空気の低温化による燃焼温度の低下(AQC 返送比制御) ⑤ 高負荷時において NO_x 基準値を超える場合、排ガス中への NH₃ 液吹込</p>																		
改善費用	<table border="0"> <tr> <td>試験実証費</td> <td style="text-align: right;">計 8,000,000 円</td> </tr> <tr> <td>石炭分析費 3品 15点</td> <td style="text-align: right;">3,000,000</td> </tr> <tr> <td>試験運転費(燃料・動力・薬品費・仮設など)</td> <td style="text-align: right;">1,000,000</td> </tr> <tr> <td>ガス計測費 3Run</td> <td style="text-align: right;">4,000,000</td> </tr> <tr> <td>改善設備費</td> <td style="text-align: right;">計 66,000,000 円</td> </tr> <tr> <td>改造工事費(熱風道・W.Box・電気計装)</td> <td style="text-align: right;">22,000,000</td> </tr> <tr> <td>循環通風機・電動機・操作</td> <td style="text-align: right;">7,000,000</td> </tr> <tr> <td>バーナ及び補機</td> <td style="text-align: right;">20,000,000</td> </tr> <tr> <td>NH₃ 吹込み装置 1式</td> <td style="text-align: right;">17,000,000</td> </tr> </table> <p>本費用は 1984 年時におけるもので社内労務費は不含</p>	試験実証費	計 8,000,000 円	石炭分析費 3品 15点	3,000,000	試験運転費(燃料・動力・薬品費・仮設など)	1,000,000	ガス計測費 3Run	4,000,000	改善設備費	計 66,000,000 円	改造工事費(熱風道・W.Box・電気計装)	22,000,000	循環通風機・電動機・操作	7,000,000	バーナ及び補機	20,000,000	NH ₃ 吹込み装置 1式	17,000,000
試験実証費	計 8,000,000 円																		
石炭分析費 3品 15点	3,000,000																		
試験運転費(燃料・動力・薬品費・仮設など)	1,000,000																		
ガス計測費 3Run	4,000,000																		
改善設備費	計 66,000,000 円																		
改造工事費(熱風道・W.Box・電気計装)	22,000,000																		
循環通風機・電動機・操作	7,000,000																		
バーナ及び補機	20,000,000																		
NH ₃ 吹込み装置 1式	17,000,000																		

効果	対策後結果 負荷率 95%~90% → 200~230ppm (NH ₃ 未使用)
導入時の留意点	①各排ガス再循環比は NO _x 生成濃度に連動した制御とする。 ②NH ₃ 吹込みの要否に遅れが生じないように、連関する制御対象因子を以って自動制御する。(地域非常時対策&濃度超対策対応)
対策の評価	非常時対策用 NH ₃ 脱硝はほとんど使用しない状態、 削減効果あり