

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

N<sub>0</sub>x 抑制に係る技術ガイドライン（その3）  
—石炭火力発電所、工業用ボイラー—

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<sub>x</sub> 抑制に係る技術ガイドライン (石炭火力発電)

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<sub>x</sub> 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石炭火力発電産業では、火力発電所大気汚染物排出基準（GB13223-2011）により、NO<sub>x</sub> 排出基準が改定され、新規事業場では 2012 年 1 月、既設事業場では 2014 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<sub>x</sub> 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<sub>x</sub> 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     | 日本における石炭火力発電所の概要.....         | 1  |
| 1.1   | 石炭火力発電所の技術的发展状況.....          | 1  |
| 1.1.1 | 背景.....                       | 1  |
| 1.1.2 | 石炭火力の変遷.....                  | 1  |
| 1.2   | 石炭火力発電所に対する行政機構と適用法規等.....    | 2  |
| 1.3   | 火力発電所のボイラの蒸気条件の変遷.....        | 5  |
| 1.4   | 自家発電用ボイラの状況.....              | 7  |
| 2     | 環境保全対策の経緯・規制等.....            | 9  |
| 2.1   | 対策の経緯.....                    | 9  |
| 2.2   | 発電用ボイラに係わる主な規制等.....          | 9  |
| 2.2.1 | 経緯.....                       | 9  |
| 2.2.2 | 環境基本法.....                    | 10 |
| 2.2.3 | 環境基準.....                     | 10 |
| 2.2.4 | 規制・基準.....                    | 11 |
| 2.2.5 | SOx 排出基準（K 値による量規制・総量規制）..... | 12 |
| 2.2.6 | NOx 排出基準.....                 | 12 |
| 2.2.7 | 煤じんの排出基準.....                 | 15 |
| 2.2.8 | 各国の大気汚染物質の規制値.....            | 15 |
| 2.3   | 環境影響評価.....                   | 16 |
| 2.4   | 省エネルギー.....                   | 16 |
| 2.4.1 | 省エネルギー効果・ベンチマーク制度.....        | 16 |
| 2.4.2 | 排ガス温度・基準空気比.....              | 17 |
| 2.4.3 | その他の省エネルギー対策.....             | 17 |
| 2.5   | 石炭火力発電所の主な環境保全対策.....         | 18 |
| 2.6   | 窒素酸化物測定基準.....                | 18 |
| 2.6.1 | 分析方法.....                     | 19 |
| 2.6.2 | 測定管理.....                     | 19 |
| 2.6.3 | 日常のモニタリング.....                | 20 |
| 2.7   | 大気汚染防止に関する管理組織等.....          | 22 |
| 2.7.1 | 公害防止管理者制度・組織等.....            | 22 |
| 2.7.2 | 公害防止管理者の業務.....               | 22 |
| 2.8   | 対策装置の導入に係る助成の枠組み.....         | 23 |
| 2.8.1 | 公害防止事業団による助成.....             | 23 |

|       |                                          |    |
|-------|------------------------------------------|----|
| 2.8.2 | 中小企業に対する融資 .....                         | 25 |
| 2.8.3 | 日本開発銀行による融資 .....                        | 26 |
| 2.8.4 | 税制上の措置 .....                             | 26 |
| 2.9   | 技術普及・技術開発活動について .....                    | 26 |
| 3     | 石炭火力発電所における窒素酸化物の排出削減対策技術 .....          | 28 |
| 3.1   | 石炭火力発電の特性 .....                          | 28 |
| 3.1.1 | ボイラ形式 .....                              | 28 |
| 3.1.2 | 蒸気条件 .....                               | 35 |
| 3.1.3 | 機器構成 .....                               | 35 |
| 3.1.4 | 最近運開した事業用石炭焚き火力発電所 .....                 | 36 |
| 3.1.5 | 火力発電方式 .....                             | 37 |
| 3.2   | 石炭燃料の特性、種類等 .....                        | 38 |
| 3.2.1 | 石炭の燃料特性 .....                            | 38 |
| 3.2.2 | コールランク .....                             | 39 |
| 3.3   | 燃焼方式 .....                               | 40 |
| 3.4   | 窒素酸化物 (NO <sub>x</sub> ) .....           | 41 |
| 3.4.1 | 窒素酸化物生成の基本原則、環境影響 .....                  | 41 |
| 3.4.2 | 窒素酸化物削減技術の基本原則 .....                     | 44 |
| 3.4.3 | 窒素酸化物 (NO、NO <sub>2</sub> ) の環境影響等 ..... | 44 |
| 4     | 石炭火力発電用ボイラにおける窒素酸化物の排出削減対策技術 .....       | 46 |
| 4.1   | 燃焼場における窒素酸化物生成抑制技術 .....                 | 46 |
| 4.1.1 | 生成抑制技術 .....                             | 46 |
| 4.1.2 | 各種の低 NO <sub>x</sub> 燃焼技術 .....          | 46 |
| 4.1.3 | ストーカ 燃焼 .....                            | 53 |
| 4.1.4 | 流動層燃焼 .....                              | 54 |
| 4.1.5 | 運転条件の改善 .....                            | 56 |
| 4.2   | 排煙脱硝技術 .....                             | 57 |
| 4.2.1 | 排煙脱硝装置の付加条件 .....                        | 57 |
| 4.2.2 | 排煙脱硝装置 .....                             | 57 |
| 5     | その他の環境保全対象と対策技術 .....                    | 65 |
| 6     | 石炭火力発電用ボイラの制御 .....                      | 66 |
| 7     | 運転管理 .....                               | 68 |
| 7.1   | 窒素酸化物低減に係わる運転管理 .....                    | 68 |
| 7.2   | ボイラ・タービン主任技術者制度 (BT 主任技術者) .....         | 68 |
| 8     | 石炭火力発電産業における窒素酸化物抑制対策まとめ .....           | 69 |
| 9     | 日本における対策導入事例 .....                       | 72 |

- 10 大気中窒素酸化物抑制に最適な技術及び中国における窒素酸化物抑制技術案  
74



# 1 日本における石炭火力発電所の概要

## 1.1 石炭火力発電所の技術的发展状況

### 1.1.1 背景

石炭を燃料とする発電方式には、石炭をボイラで直接燃焼して熱エネルギーを蒸気に伝えて蒸気タービン発電機で発電する汽力発電方式と、燃焼ガスを直接、ガスタービンに導入して発電した後、その排熱を蒸気に伝えて発電する複合発電方式がある。茲では、石炭直接燃焼による蒸気ボイラに限定した窒素酸化物の排出削減に着目した日本の削減対策について報じる。

日本における石炭火力発電の歴史は、小規模電気事業であった明治期の蔵前浅草火力に始まり、その後水力主流時代を経て、石炭需給逼迫期、1930年代の電力事業の統制期、1941～1945年の大戦期などで石炭火力にとっての調達量及び技術分野での低迷時代があった。

1954年～1957年の神武景気と称された産業発展期を迎え、電力需要は飛躍的に増加をした。その後1970年代にかけて、家電機器の普及による民生用消費電力消費の増加、高度経済成長期における電力需要の急激な増加により「水主火従」から「火主水従」を迎え、従来の火力発電の補給用電源とする運用から、電源の総合的な経済的運用が開始された。

石炭火力は1970年から現在にかけて、石油危機や公害発生源、原子力発電や太陽光などの新エネルギーの導入などの電源多様化等の影響を受けてきているが、現在でも石炭火力は、安定電源として、事業用及び自家発電用として重要な位置を占めている。

石炭は日本にとって、国内に生産炭鉱がなく海外炭に依存せざるを得ない燃料である。しかし、世界に広く賦存する資源であることや、石油に比べ市場コストが安定していることなどが挙げられる。また発電技術面でみても、燃焼・発電ともに安全性や信頼性が高く、天候等の影響を受けない信頼度の高い電力である。従って今後も石炭火力は、事業用、自家発電用として主要な位置を占めることが確約できる。

### 1.1.2 石炭火力の変遷

日本の2013年度における電源別電力量で石炭が占める割合は約30%で、LNGに次ぐ位置にある。福島原子力発電所事故発生以前の2009年末では16.2%程度で推移していたが、原子力発電所が安全対策のため停止した後でLNGや石炭火力の比率が高くなっている。なお2011年度の発電設備容量統計では、総発電出力54.6億kWのうち石炭火力は31.5%で最も大きい電源である。(出典：電力事業連合会統計)

一方、石炭火力発電の技術伸展を支える基盤として、1950～1970年代における造船業や工業用ボイラ製造業等の重工業産業における製造技術や材料生産技術、人材が蓄積されていたことが挙げられる。同時に日本の火力プラントメーカーは、積極的に当時先進火力技

術を有していた、Combustion Engineering (USA)、Sulzer Brothers(スイス)、Siemens (ドイツ)、Babcock & Wilcox(UK、USA)、Foster Wheeler(USA)などから技術輸入を図り、1980 年では先進国を凌ぐ水準に到達した経営努力は高く評価できる。現在では高効率石炭火力プラントは日本の有力な輸出産業に成長している。

## 1.2 石炭火力発電所に対する行政機構と適用法規等

発電事業や自家発電に供される発電用ボイラは、公益性や社会的影響度が大きいため、施設の機能に高度な信頼性や安定性が求められる。そのため、独立する電気事業法を制定して、発電事業者が具備すべき事業運営理念から、施設の細部にわたる構造や基準に及ぶ規則が規定されている。発電事業者に対し電気事業法で定められている内容は次の通り、

- 電気事業の運営の適正かつ合理性
- 電気使用者の利益の保護
- 電気事業の健全な発達を図る
- 電気工作物の工事、維持及び運用の規制
- 公共の安全と環境保全を図る

注目すべき点は法理念として、電気供給側の利益ではなく、電気使用者の利益の保護と環境保全対策が重視されていることとである。

火力発電所は設置に伴う立地条件から運開後の事業展開まで、地域、施設、運転、保守運営に至る電源質の安定、地域環境保全に及ぶ広範な分野に影響するプラントである。従って環境影響からボイラ等の施設設計製作、検査、保安に至る関係法規は多数に及ぶ。これらに係わる法規や基準は、石炭燃料に限らず原子力基本法に基づく原子力発電分野を除く全ての発電事業に適用される。表 1-1 に日本の石炭火力発電ボイラの所掌行政機関及び主な適用法規等を示す。図 1.1 は事業用発電と自家発電との電気工作物の区分を示す。図 1.2 は系統区分の詳細図である。

表 1-1 日本の石炭火力発電施設の所掌行政機関及び主な適用法規

| 項目    | 適用法規等                                           |
|-------|-------------------------------------------------|
| 事業者区分 | 事業用火力発電      一般電気事業<br>卸電気事業者<br>特定電気事業者        |
|       | 自家用火力発電      自家発電事業者                            |
| 所掌機関  | 経済産業省外局 資源エネルギー庁                                |
| 適用法規等 | 電気事業法<br>発電用火力設備の技術基準<br>保安規定<br>自家用電気工作物保安管理規定 |

|        |                                                                                                                                                                               |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|        | 日本工業規格（JIS）、電気規格（JEC）等                                                                                                                                                        |
| 環境関連法規 | 工場立地法（緑化対策等）<br>環境影響評価法<br>環境基本法<br>大気汚染防止法<br>水質汚濁防止法<br>騒音・振動規制法<br>悪臭防止法<br>廃棄物の処理及び清掃に関する法律<br>Dioxins 類対策特別措置法<br>土壌汚染対策法<br>特定工場における公害防止組織の整備に関する法律<br>地球温暖化対策の推進に関する法律 |

これらの法規で、石炭火力発電所に大きく係わる法規は、建設前に実施する環境影響評価法や設計計画に基準とする技術基準である。発電用火力設備の技術基準は法に基づいて、公共の安全確保、電気の安定供給の観点から、発電に関わる施設の設計、工事、維持管理に関する基準として、さらにこれらの施設に関わる審査、検査の基準として定められている。

1953 年「発電ボイラ技術基準」として作成以来、蒸気条件の高温高压化、耐高温腐食・高強度・耐水蒸気酸化材料等の開発に伴い、省令として数十回の改正が行われ現在に至っている。

窒素酸化物（NOx）に関わる法規はボイラに関してだけでも、石炭燃料、燃焼、ボイラ構造、大気汚染防止関係法規等に関係する。適正な運営管理には、環境計量や省エネルギー関係、土壌汚染、排水処理、立地関係法等も関与する。

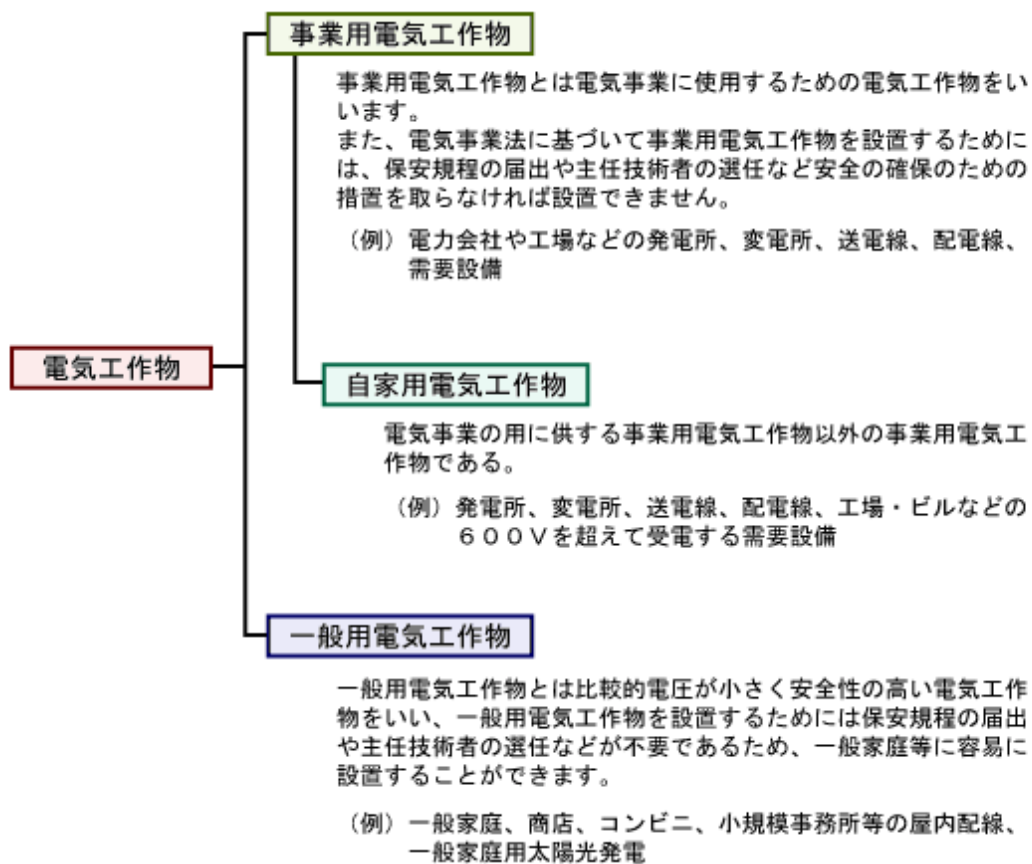


図 1-1 電気工作物（発電施設）の区分

(出典：経済産業省)

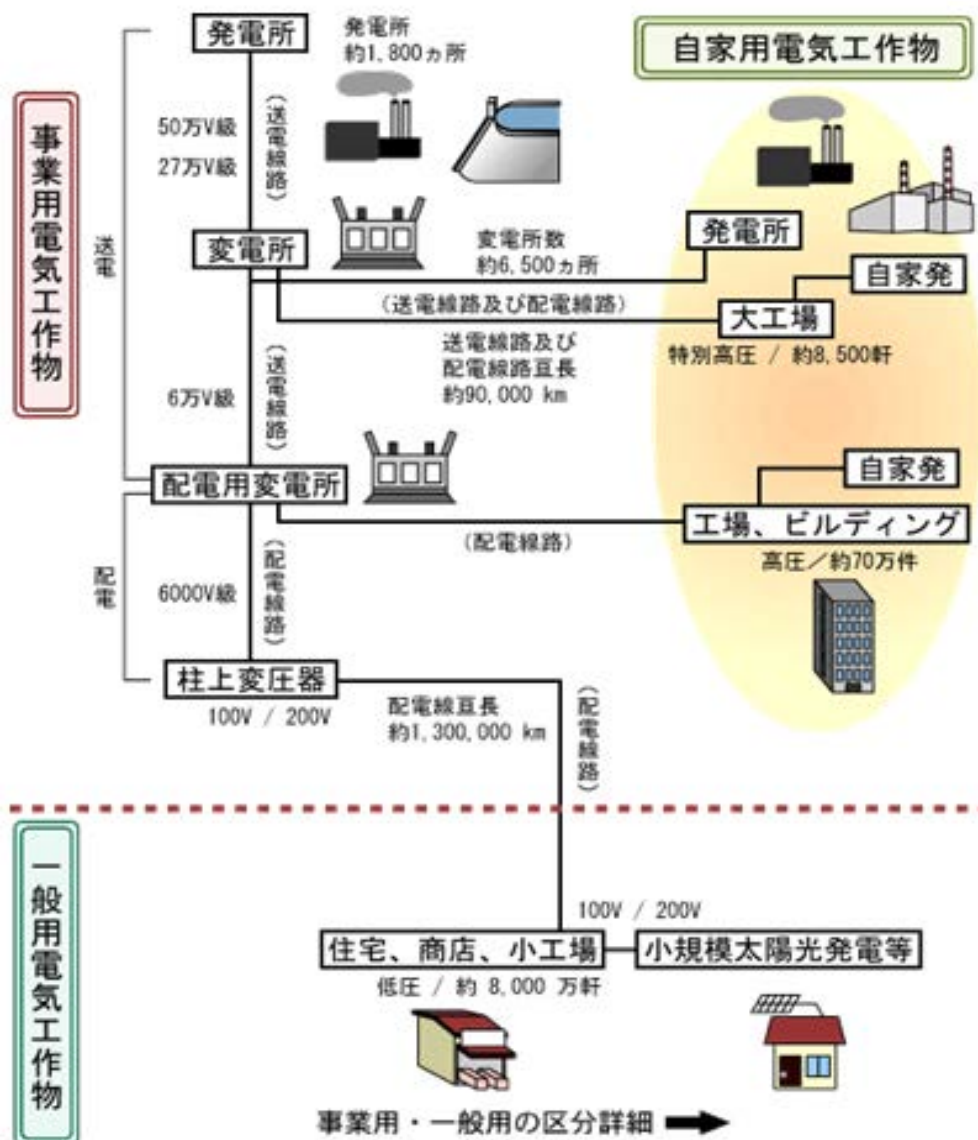


図 1-2 電気工作物の系統区分の詳細図

(出典：経済産業省)

### 1.3 火力発電所のボイラの蒸気条件の変遷

公益発電事業用途と自家発電事業用では、蒸気条件や規模に大きな差がある。発電事業用に 1947 年に建設されたボイラの仕様は、出力 27MW、蒸気圧力 4.4MPa、蒸気温度 457℃であったが、火力技術は急速に進歩して、1960 年には、亜臨界、蒸気条件 16.6MPa、566/538℃、1974 年には、超臨界圧 100MW が建設されている。その後出力 350～500MW を境にそれ以上は、超臨界圧 UNIT が採用されるのが一般的となった。

1989 年には 31MPa、566/566/566℃の超々臨界圧ボイラが運開し更に 600/600℃まで運開している。

現在では、更に高効率を実現するために次世代超々臨界 USC 蒸気温度 700℃級について開発が進められている。図 1-3 に事業用火力ボイラの容量の変遷を、図 1-4 にボイラの蒸気仕様の変遷を示す。

自家発電用ボイラの蒸気条件は、大出力発電ボイラにおいては、事業用ボイラと同様な仕様が採用されている。特に昨今の電気事業の規制緩和や電力需給のひっ迫により、高効率が求められるため高温高圧となる傾向にある。自家発電における工場用電源需要を主とする中小規模の自家発電は、熱併給発電の導入比率が高く、蒸気仕様は背圧の条件など勘案して、経済性や効率等を重視して各々の事業所で最適受験が決定されている

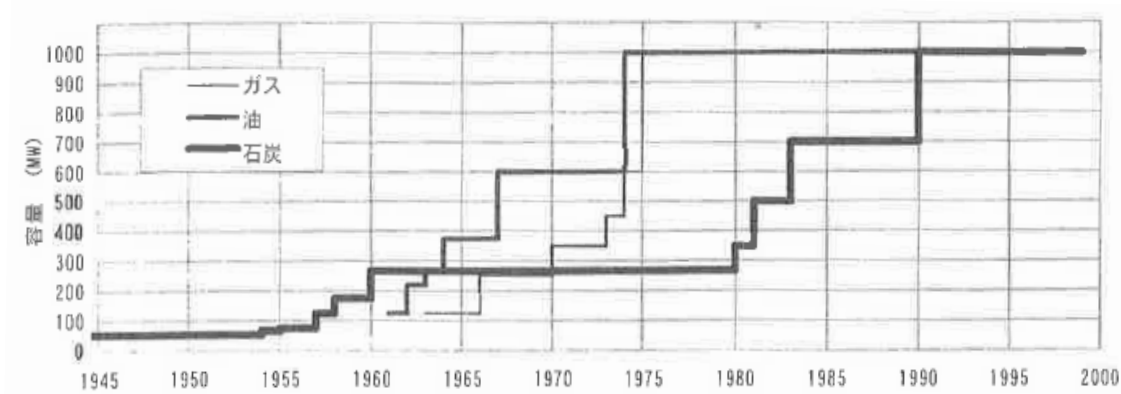


図 1-3 事業用火力ボイラの容量の変遷

(出典：火力原子力発電技術協会)

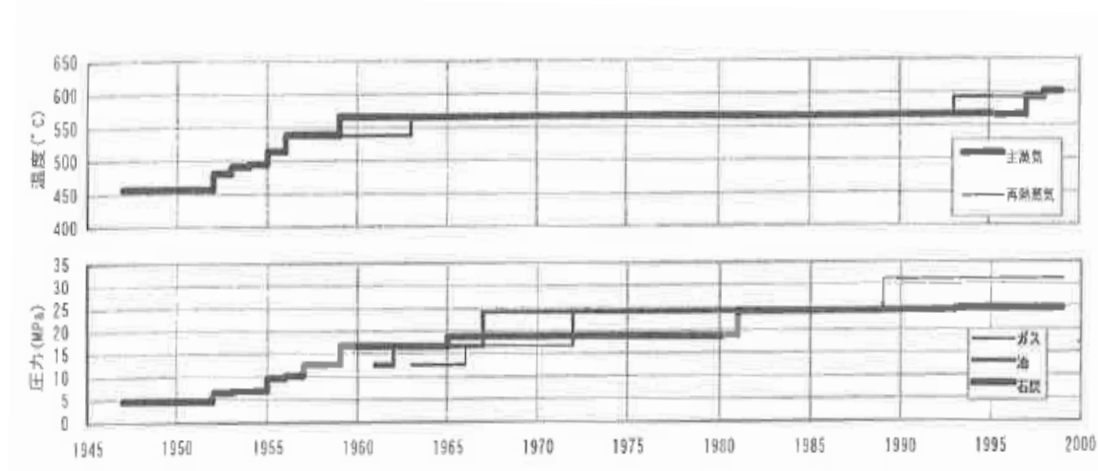


図 1-4 ボイラの蒸気仕様の変遷

(出典：火力原子力発電技術協会)

## 1.4 自家発電用ボイラの状況

自家発電用ボイラは、各産業固有のプロセスと密接な関係があり、発電を行うだけでなく、先述した熱併給発電のように、そのプロセスの一部となっているものが多い。現在、石炭自家発電ボイラは、特定産業を除き小規模な発電所から燃料転換が行われるにつれ、ガス・重油・バイオマス等に転換されている。現在では、蒸気・電力などのエネルギー多消費産業である紙・パルプ業、セメント業、鉄鋼業等のみで使用されている。これらの産業は電力・蒸気消費量が多く、石炭燃料の経済性や可燃性副生物である汚泥やバイオマス、オフガスとの混焼が可能である点が利用されている理由である。しかし、再生エネルギー買取り制度（FIT）の施行以降、副生・廃棄物燃料やバイオマスを利用した複合燃料型売電事業を主とする発電所の建設や運開が急増しており、石炭を補助燃料として計画されたものが多い。1998年に施行されたIPP(電力卸供給事業者)制度の発足で単機容量700MW級の発電規模も出現している。使用燃料も副産物やバイオマスなど多様であり、石炭火力比率は17%程度である。全国発電電力に対する自家発電比率は13%程度で推移している。産業分野における業種別で自家発電消費電力の比率が高いのは、化学、紙・パルプ業、鉄鋼業で25～35%を占め、セメント業では7～10%である。紙・パルプ業や鉄鋼業は1社当たりの規模は大きい。表1-2に主な石炭焼き自家発電所の要目を示す。

表 1-2 主な石炭焼き自家発電所の要目

| 企業名          | 運開年  | 設備容量万 kW | 混焼燃料    |
|--------------|------|----------|---------|
| 神鋼 神戸 #1     | 2002 | 66.5     |         |
| 神鋼 神戸 #2     | 2004 | 66.5     |         |
| 新日鉄 室蘭 #5    | 2001 | 10       | 石炭ガス・重油 |
| 新日鉄 釜石 #1    | 2000 | 14.9     | 重油      |
| 新日鉄 鹿島 #1    | 2007 | 47.5     |         |
| 新日鉄 広畑       | 1999 | 13.3     |         |
| 新日鉄 戸畑 #3    | 1999 | 13.7     | 石炭ガス    |
| 新日鉄 大分 #9    | 1999 | 30       | 石炭ガス    |
| 日本製紙 釧路      | 2004 | 8        |         |
| サニックスエナジー    | 2003 | 7.4      | 廃プラスチック |
| サミット小名浜      | 2004 | 5        | 重油      |
| 糸魚川発電        | 2001 | 14.9     |         |
| 宇部興産 宇部 #1   | 2004 | 19.5     |         |
| 土佐発電 土佐 #1   | 2005 | 15       |         |
| 住友大阪セメント高知 1 | 2005 | 6.5      |         |

|             |      |      |    |
|-------------|------|------|----|
| シグマパワー有明・三池 | 1975 | 17.5 | 重油 |
| シグマパワー有明・三川 | 1983 | 4.8  |    |

(出典：電気事業便覧2012 ほか)

## 2 環境保全対策の経緯・規制等

### 2.1 対策の経緯

石炭火力発電は、電気事業の創業期から主力の発電形態であったが、火主水従期における石炭・石油火力の建設の増加により、公害の原因物質の排出が多く見られたため 1960 年代では発電所立地が困難となった。しかし低公害技術の開発により、煤じん、硫黄酸化物（SO<sub>x</sub>）、窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）等の発生を抑制可能となり、脱石油の時代趨勢や経済性もあり石炭火力は重要な電源となっている。

図 2-1 に示すように日本の火力発電所における環境負荷(SO<sub>x</sub>/NO<sub>x</sub>)は米国や、フランス、ドイツに比較して格段に低い。特に日本の有力な事業用電力である関西電力の NO<sub>x</sub> 排出量は 0.109 g/kWh（2012 年度）と低くドイツの 2010 年度の排出量の約 12%である。

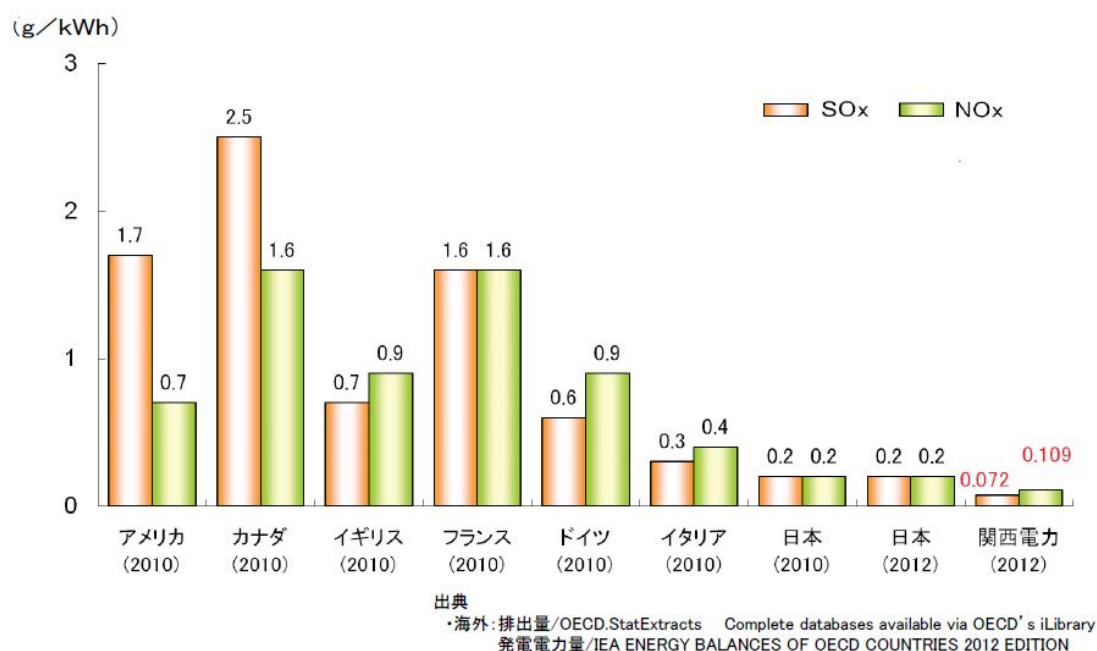


図 2-1 各国の火力発電所の環境負荷(SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>)

### 2.2 発電用ボイラに係わる主な規制等

#### 2.2.1 経緯

発電用ボイラから排出される主な公害物質は、燃焼に係わる「煤煙」として、煙突から大気放出する煤じん、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、有害物質と、燃料ハンドリングや飛灰・燃焼灰の処理に付随する「粉じん」、臭気、連続ブロー水や排煙処理装置から排出される汚濁排水などが対象となる。

発電用ボイラに係わる大気汚染防止、水質汚濁防止等の環境行政は、公害問題が社会問題として出現しだした 1967 年に制定された公害防止基本法、1972 年に制定された自然環境

保全法を基にして施行され、公害防止や自然環境保全に重要な役割を果たした。しかし、その後の産業伸張に伴う排ガスや排水環境の量・質の変容は著しく、更に今日では、環境改善対象として、CO<sub>2</sub>等による地球温暖化、フロン放出によるオゾン層の破壊、SO<sub>x</sub>などの酸性ガスによる酸性雨等の地球規模の環境保全や、大都市圏におけるNO<sub>x</sub>による大気汚染、大量生産大量廃棄の社会現象に由来する増加する廃棄物等の生活環境問題が中心になってきた。1980年代までの従来型の産業公害に加えて、廃棄物焼却処理施設からのダイオキシン類や自動車排ガス、冷媒フロン、廃家電類などの日常生活に密着した活動に起因する汚染源が増大している。

### 2.2.2 環境基本法

日本ではこれらの新たな環境問題に対処するために従来型の規制的手法のみでは十分ではなかったため、1993年に公害対策基本法に変わり、環境基本法が制定施行された。基本法は全3章46条からなり、環境の保全について、基本的理念を定め、併せて国や地方公共団体、事業者、国民の責務を明らかにして環境保全に関する施策の基本事項を定めている。

基本理念の概要は次の通りである。

- ① 環境の恵沢の享受と継承
- ② 環境への負荷の少ない持続的発展が可能な社会の構築
- ③ 国際的協調による地球環境保全の積極的推進

この環境基本法の下で、国は環境基本計画を定め、環境基準の制定や個別の大気汚染防止、水質汚濁防止、土壌汚染、騒音・振動規制、臭気防止などが施行令、施行規則として制定されている。これらの国の基本方針に準じて、地方公共団体も地域環境に応じた施策を講じることが求められている。

火力発電に係わる大気汚染防止については、1962年に制定された「煤煙の排出の規制等に関する法律」が、その後の排出規制の法体系の事実上の始まりである。法体系の中で、公害の対象範囲、公害発生源者の責任（PPP：Polluter pays Principle）、行政の責務等が明確に示され、SO<sub>x</sub>と煤じん、その他の粉じんの濃度規制が導入された。

1968年にSO<sub>x</sub>のK値規制、1974年SO<sub>x</sub>総量規制が導入された。NO<sub>x</sub>は1977年に有害物質に加えられ、1981年に東京、横浜、川崎、大阪等の指定地域に総量規制が導入されている。

1997年にはダイオキシン類が有害大気汚染物質の指定物質に規定され、また環境影響評価法が制定されて、環境アセスメントが火力発電所等の建設に義務化された。大気環境では、NO<sub>2</sub>やSO<sub>2</sub>、SPMなどの項目について、現況把握、影響予測、定量的評価、事後調査などの実施が定められている。

### 2.2.3 環境基準

日本の大気汚染物質の規制は、環境基本法第16条第1項に規定する大気汚染に係わる環

境上の条件につき、人の健康を保護する上で維持されることが望ましい基準濃度を基に設定されている。表 2-1 に大気汚染に係わる環境基準を示す。これらの環境基準は、大気汚染の状況を的確に把握することができると認められる場所において、各々定められた測定方法によるものとされている。

表 2-1 大気汚染に係わる環境基準

| 物質         | 環境上の条件                                                                             |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 二酸化硫黄      | 1hr 値の 1 日平均値が 0.04ppm 以下であり、かつ、1hr 値が 0.1ppm 以下であること                              |
| 一酸化炭素      | 1hr 値の 1 日平均値が 10ppm 以下であり、かつ、1hr 値の 8 時間平均値が 20ppm 以下であること                        |
| 浮遊粒子物質     | 1hr 値の 1 日平均値が 0.10mg/m <sup>3</sup> 以下であり、かつ、1hr 値が 0.20mg/m <sup>3</sup> 以下であること |
| 光化学オキシダント  | 1hr 値が 0.06ppm 以下であること                                                             |
| 二酸化窒素      | 1hr 値の 1 日平均値が 0.04ppm 以下から、0.06ppm までのゾーン内又はそれ以下であること                             |
| ベンゼン       | 1 年平均値が 0.003mg/m <sup>3</sup> 以下であること                                             |
| トリクロロエチレン  | 1 年平均値が 0.2mg/m <sup>3</sup> 以下であること                                               |
| テトラクロロエチレン | 1 年平均値が 0.2mg/m <sup>3</sup> 以下であること                                               |
| ジクロロメタン    | 1 年平均値が 0.15mg/m <sup>3</sup> 以下であること                                              |

#### 2.2.4 規制・基準

日本の煤煙の規制基準は、多面的な規制を実施しており、排出基準規制、総量規制基準、燃料使用基準等がある。

##### ① 排出基準

排出基準は国が一元的に定める一般排出基準と、汚染が複合する地区や煤煙発生施設の密度が高い地区に適用される特別排出基準、地方自治体が国の排出基準に上乗せ基準を制定する 3 方法の排出基準がある。

##### ② 総量規制

工場や事業所が集合している地域で、一般排出基準のみでは環境基準の確保が困難な地域にあっては、特定工場で排出する SO<sub>x</sub> や NO<sub>x</sub> などの指定煤じんについて総量規制基準を定めている。

2014 年現在、SO<sub>x</sub> については 24 地域、NO<sub>x</sub> については 3 地域が規制されている。

##### ③ 燃焼使用基準

燃料使用基準としては、次の 2 種類がある。

➤ 季節による燃料の使用に関する措置

➤ 指定地域における燃料の使用に関する措置

この措置により、地域ごとに年間を通じ汚染度合に対応するため、良質の燃料の使用、燃料使用量の削減を地方自治体の長（市長、町長など）が勧告、命令出来る制度である。

## 2.2.5 SOx 排出基準（K 値による量規制・総量規制）

諸外国では SOx の排出基準は排ガスの濃度基準であるが、日本でも当初の排出基準は濃度であったが環境基準が達成できなかったため、1968 年に K 値規制が導入された。また工場・事業所が集積しており、施設毎の K 値排出規制のみによっては環境基準の達成が困難と考えられる一定地域を国が指定し、当該都道府県知事は、地域全体での排出許容総量を算出し、総量削減計画を作成する。

## 2.2.6 NOx 排出基準

煤煙発生施設に対する NOx の排出基準は施設毎に燃焼条件等が異なり、NOx の発生特性が異なることから、施設の種類、規模毎に定められている。1973 年に第一次規制が設定されて以来、1975 年第二次規制、1977 年第三次規制、1979 年第 4 次規制が行われ強化拡充が行われてきた。

1978 年に表 2-1 に示す環境基準に改定されるとともに、「1 日平均値が 0.06ppm を超える地域にあっては、原則として 7 年以内に 0.06ppm が達成されるように努める」ものとされた。これに伴い 1981 年総量規制対象物質として指定され、東京都特別区地域など 3 地区が指定されて暫時削減対策が講じられている。

NOx は燃焼に伴って発生するもので、環境基準の達成対策は、排出ガスの量と濃度の低減しか方法がない。すなわち、燃焼方法の改善により発生を抑制するか、排煙中の NOx を除去するかのと二通りの方法しかない。

### 2.2.6.1 NOx 排出基準（濃度規制）

表 2-2 の NOx 排出規制基準に示すように、ボイラ施設の使用燃料、ボイラ型式、排ガス量に応じて許容排出濃度が定められている。特に石炭燃料燃焼ボイラは、NOx 生成機構を考慮して燃焼方式別に規定されている。空気比も燃料毎に異なるため基準とする O<sub>2</sub> 濃度も燃料種類別に規定している。

表 2-2 発電用ボイラに係わる日本の NOx の排出規制基準の概要

| 煤煙発生施設  | 規模                                        | 残存 O <sub>2</sub> 濃度<br>(% Vol) | 排出基準<br>(ppm) * |
|---------|-------------------------------------------|---------------------------------|-----------------|
|         | 最大定格 (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> N/h) |                                 |                 |
| ガス専焼ボイラ | >50                                       | 5                               | 60              |
|         | 4 ~ 50                                    |                                 | 100             |
|         | 1 ~ 4                                     |                                 | 130             |
|         | <0.5 ~ 1                                  |                                 | 150             |

|                                                               |                            |         |     |
|---------------------------------------------------------------|----------------------------|---------|-----|
| 低品位炭燃焼ボイラ<br>(天井バーナ)                                          | >70                        |         | 200 |
|                                                               | 4~70                       | 6       | 250 |
|                                                               | <0.5~4                     |         | 350 |
| 低品位炭専焼ボイラ<br>(天井バーナ)<br>>30 万 m <sup>3</sup> N/h              | >70                        | 6       | 200 |
|                                                               | 30~70                      |         | 250 |
| 低品位炭専焼ボイラ<br>火炉分割壁型、<br>火炉熱発生率<br>>14 万 kcal/m <sup>3</sup> h | >70                        | 6       | 200 |
|                                                               | 50~70                      |         | 250 |
| 低品位炭専焼ボイラ<br>上記以外                                             | >70                        |         | 200 |
|                                                               | 30~70                      | 6       | 250 |
| 低品位炭燃焼ボイラ<br>上記以外                                             | >70                        |         | 200 |
|                                                               | 40~70                      | 6       | 250 |
|                                                               | >0.5~40                    |         | 350 |
| 石炭専焼ボイラ<br>全面燃焼方式<br>自然循環型<br>>14 万 kcal/m <sup>3</sup> h     | >20~25 万 m <sup>3</sup> /h | 6       | 250 |
| 石炭燃焼ボイラ<br>接線型チルチングバーナ                                        | >100 万 m <sup>3</sup> N/h  | 6       | 200 |
| 石炭燃焼ボイラ<br>流動層燃焼                                              | >4 万 m <sup>3</sup> N/h    | 6       | 350 |
| 固体燃焼ボイラ<br>散布式ストーカ                                            | 4~20                       | 6       | 320 |
| 固体燃焼ボイラ<br>流動層燃焼                                              | <40                        | <0.5~ 4 | 250 |
| 固体燃焼ボイラ<br>上記以外                                               | >70                        |         | 200 |
|                                                               | 4~70                       | 6       | 250 |
|                                                               | ~ 4                        |         | 350 |
| 液体燃焼ボイラ                                                       | >50                        |         | 130 |
|                                                               | 1~50                       | 4       | 150 |
|                                                               | ~ 1                        |         | 280 |
| 固体燃焼小型ボイラ<br>伝熱面積<10m <sup>2</sup>                            |                            | 6       | 350 |
| 廃棄物焼却炉                                                        |                            | 12      | 250 |

|          |  |    |     |
|----------|--|----|-----|
| 浮遊回転、連続炉 |  |    |     |
| 廃棄物焼却炉   |  | 12 | 250 |
| 連続炉 上記以外 |  |    |     |

\*NO<sub>x</sub> は NO、N<sub>2</sub>O、NO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O<sub>3</sub> などがあるが、燃焼に伴って発生する NO<sub>x</sub> は大部分が NO であり、NO<sub>2</sub> 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。

NO<sub>2</sub> の発生率は低いものの、毒性が強いため環境基準では NO<sub>2</sub> 濃度で定められている。また JIS の NO<sub>x</sub> 濃度測定法も NO<sub>2</sub> 基準で検量するよう規定している。

実際は NO/NO<sub>2</sub> 比は燃料・施設種別ごと異なり、日本の場合、NO<sub>2</sub> 換算の NO<sub>x</sub> 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 <sup>8</sup> 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/m<sup>3</sup> 換算目安のため排ガス組成が 100%NO<sub>2</sub> と仮定すれば

100mg/m<sup>3</sup> → ≒ 200ppm となる。

(実際の施設では NO が 95%以上を占めるため 100mg/m<sup>3</sup>→140ppm となる。)

#### 2.2.6.2 NO<sub>x</sub> 総量規制

NO<sub>x</sub> 排出源が集合している地域で、環境基準の確保が困難であると認められる地域では、総量規制が施行されている。総量規制計画は、知事が関係する市町村長や審議会、その他の合議制機関の意見を聴き制定されている。

排出 NO<sub>x</sub> 許容量の算定事例は以下の通り

- ① 使用する原燃料が増大するに応じて、1 単位当たりの排出の許容量が低減するようになる算定法。(原燃料使用量方式)

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

**Q:** 排出 NO<sub>x</sub> 許容量 (m<sup>3</sup>N/h)

**W:** 特定工場等における全煤煙発生施設の使用原燃料の量 (重油換算 KL/h)

**a:** 削減目標量が達成されるように都道府県知事が定める定数

**b:** 0.08~1.0 で都道府県知事が定める定数

- ② 特定工場に設置されている全ての NO<sub>x</sub> 排出施設について排出ガス量、地域の分布状況等を勘案して算定する方法

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

**Q:** 排出 NO<sub>x</sub> 許容量 (m<sup>3</sup>N/h)

**C:** 施設係数 (施設の種類ごとに知事が定める)

V: 施設毎の排出ガス量 (m<sup>3</sup>N/h)

k: 削減目標量が達成されるように知事が定める削減定数

L: 0.8 以上 1.0 未満の範囲で排出分布、排出特性を勘案して知事が定める定数

### 2.2.7 煤じんの排出基準

燃焼排ガス中に「煤」や「燃え滓」である固形粒子物質を「煤じん」と称して、石炭粉砕等で生じる固形粒子である「粉じん」と区別されている。煤じんは無機物質、有機物質、各種金属類を含み降下煤じん等の環境劣化の原因となるため、環境基準において排出基準が定められ規制されている。表 2-3 に代表的なボイラ型式の煤じんの排出基準を示す。なお、集塵された煤じんは廃棄物処理法に準拠した産業廃棄物として取り扱われ適正処理が義務化されている。

表 2-3 代表的なボイラ型式の煤じんの排出基準

| 施設名                     | 規 模<br>(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> N/h) | 一般排出基準<br>(g/m <sup>3</sup> N) | O <sub>2</sub> 濃度<br>(%vol) |
|-------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| ガス専焼ボイラ                 | 4 ~ >20<br><4                               | 0.05<br>0.1                    | 5                           |
| 重油専焼ボイラ 及び<br>ガス液体混焼ボイラ | >20<br>4 ~ 20<br>1 ~ 4<br><1                | 0.05<br>0.15<br>0.25<br>0.30   | 4                           |
| 黒液燃焼ボイラ                 | >20<br>4 ~ 20<br><4                         | 0.15<br>0.25<br>0.30           | —                           |
| 石炭燃焼ボイラ                 | >20<br>4 ~ 20<br><4                         | 0.10<br>0.20<br>0.30           | 6                           |

### 2.2.8 各国の大気汚染物質の規制値

参考までに各国の石炭火力における SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、煤じんの排出規制値を表 2-4 に示す。

表 2-4 各国の石炭火力における SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、煤じんの排出規制値

| 項目              | 日本                      | 米国                         | ドイツ                        |
|-----------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|
| SO <sub>x</sub> | K 値規制<br>50~100 ppm*    | 脱硫率 >90%<br>Max. ≒ 500 ppm | 脱硫率 >85%<br>Max. ≒ 150 ppm |
| NO <sub>x</sub> | 200ppm                  | 375 ppm                    | 100 ppm                    |
| 煤じん             | 100 mg/m <sup>3</sup> N | 35 mg/m <sup>3</sup> N     | 50 mg/m <sup>3</sup> N     |

|  |                           |  |  |
|--|---------------------------|--|--|
|  | (50 mg/m <sup>3</sup> N)* |  |  |
|--|---------------------------|--|--|

\* 地方自治体の事例

## 2.3 環境影響評価

発電所の建設には、土地の形状の変更、工作物の新設等を行う事業者が、実施に当たり予めその発電事業に係わる環境への影響について、自ら適正に調査、予測又は評価を行い、その結果に基づき環境保全に配慮するものである。1977 年政府は閣議決定で発電所建設に際して環境評価の施行の制度を図った。1997 年に環境影響評価制度の法制化を図り、電気事業法の一部改正を経て、1999 年から環境影響評価法の全面施行がされている。環境影響評価は規模により可否を個別に判断するよう規定している。建設には早い段階から事業者の情報が公開され、住民、専門家、地方自治体等の意見を聞く手続きが導入されている。対象となる事業のうち、第一種事業は必ず環境評価の手続きを行わなければならない。またそれに準ずる規模等を有する事業のうち環境影響の程度の判定を行う必要のある事業が第二種事業と定めている。

第一種事業 火力発電所 15 万 kW 以上

第二種事業 一定規模以上のもの（地域条例で制定する）

評価項目は、環境の現況調査と環境影響の予測・評価に分けられる。

➤ 現況調査項目：環境基本法で扱う環境全般

自然環境 大気環境：発電所立地点の気象、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、浮遊物質など

水環境：水質、底質、水流など

土壌環境：地形、地質、土壌質など

生物多様性等生体系

環境負荷物質：廃棄物、CO<sub>2</sub> 排出量等

➤ 環境影響予測・評価の主な項目

排煙の拡散、温排水の拡散、騒音の拡散、景観など

予測手法は数値シミュレーションや模型実験を用い、環境濃度、拡散濃度、周辺景観の予測を行う。

## 2.4 省エネルギー

### 2.4.1 省エネルギー効果・ベンチマーク制度

省エネルギー効果は経済効果だけでなく、燃料消費量や排ガス量の絶対的削減となり、CO<sub>2</sub>（GHG）や大気汚染物質の排出総量の削減が可能となる。

2008 年から資源エネルギー庁は、省エネルギー法に基づきベンチマーク指標制度を設定した。この制度は、電力供給業ほか 6 業種 10 分野を指定業種として、省エネルギーの取組が他社と比較して進んでいるか遅れているかを明確にして、遅れている企業には更なる努

力を促す仕組みである。ベンチマークは事業者の平均値に標準偏差を加えた水準より高い水準を設定して事業者の自主的な努力を促している。なお 2013 年度の電力事業者 11 社の達成率は 18.2%、目指すべき水準は 100.3%以上、前年度平均値 98.9%、標準偏差 28.4%が報告されている。

火力用・工業用ボイラは、燃料の燃焼の合理化として、排ガス温度等の管理基準が示されている。

#### 2.4.2 排ガス温度・基準空気比

電気事業法の適用を受けるボイラには、表 2-5 基準排ガス温度、表 2-6 目標排ガス温度及び表 4-1 基準の空気比が経済産業省告示で提示されている。

表 2-5 基準排ガス温度

| 燃料種類         | 固体燃料<br>微粉炭 | 固体燃料<br>流動床 | 液体燃料 | 気体燃料 | 高炉ガス<br>副生ガス |
|--------------|-------------|-------------|------|------|--------------|
| 基準排ガス温度 (°C) | 150         | —           | 145  | 110  | 200          |

(出典：通産省公示第 388 号 1993)

表 2-6 目標排ガス温度

| 燃料種類         | 固体燃料<br>微粉炭 | 固体燃料<br>流動床 | 液体燃料 | 気体燃料 | 高炉ガス<br>副生ガス |
|--------------|-------------|-------------|------|------|--------------|
| 目標排ガス温度 (°C) | 140         | —           | 135  | 110  | 190          |

(出典：通産省公示第 388 号 1993)

この表で掲げる目標排ガス温度は、定期検査後、ボイラ通風装置入口の空気温度 20°C 以下の負荷率 100%で燃焼を行う時、ボイラ出口ガス温度又は排熱回収・排煙処理装置の出口ガス温度である。石炭等の固定燃料における固定床燃焼の場合は、目標値を設定していない。

#### 2.4.3 その他の省エネルギー対策

その他の火力発電所に係る省エネルギー合理化対象として次の項目が挙げられている。

- ①加熱、冷却、伝熱の合理化：給水系統、熱交換器等
- ②放射、伝導等による熱損失の防止：断熱基準等
- ③排熱回収利用：排ガス、排熱

- ④熱の動力変換等：併給発電
- ⑤電気損失の防止：変圧器効率、力率改善、受変電
- ⑥電気の動力変換等：電動機の空転、需要率、台数制御

## 2.5 石炭火力発電所の主な環境保全対策

石炭火力発電所の環境保全対策は、地球環境に係わる対応と地域環境保全に係わる対応に大別される。

地球環境では、21 世紀の最大課題である温暖化抑制に関わる CO<sub>2</sub> 排出抑制がある。発電効率の向上や、非化石燃料の利用拡大等の排出源側の対策と、電力消費側の省エネルギーと負荷平準化が施策として取り組まれている。

地域環境保全対策としては図 2-2 に示すような多岐に及ぶ対策が必要とされている。

|                   |                                                                                                                  |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>大気汚染対策</b>     | SO <sub>x</sub> ……燃料の低S化、排煙脱硫装置<br>NO <sub>x</sub> ……低N燃料、燃焼方法改善、排煙脱硝装置<br>煤じん ……良質燃料、高性能集塵装置<br>炭じん飛散…屋内貯炭、散水装置 |
| <b>水質保全対策</b>     | 排水 ……排水処理装置<br>温排水 ……深層取水、表層水注放水、熱回収<br>漏油 ……オイルフェンス、ローディングアーム                                                   |
| <b>廃棄物対策</b>      | 石炭灰…埋立処分、資源化<br>脱硫石膏…有効利用                                                                                        |
| <b>騒音・振動防止対策</b>  | 低騒音機器、防音壁、機器の適正設置                                                                                                |
| <b>周辺環境との調和対策</b> | 緑化…植栽<br>景観 ……設備配置、形状、色彩の工夫                                                                                      |

図 2-2 石炭火力発電所の主要な地域環境対策

## 2.6 窒素酸化物測定基準

各施設より排出される大気汚染物質を含む排ガスについては、大気汚染防止法において各施設の排出ガス量や総量規制の有無に基づき、測定分析の頻度が定められている。

### 2.6.1 分析方法

日本で認められている排ガス中の NO<sub>x</sub> 分析方法は、JIS で規定されている化学分析法 (JIS K0104) と連続分析法(JIS B 7982)が使用されている。表 2-7 に NO<sub>x</sub> の化学分析法の種類と概要を、表 2-8 に連続分析法の自動計測器の種類と測定範囲等を示す。

表 2-7 NO<sub>x</sub> の化学分析方法の種類と概要

| 分析方法の種類     | 定量範囲 vol      | ppm (mg/m <sup>3</sup> ) | 対象成分ガス               |
|-------------|---------------|--------------------------|----------------------|
| Zn-NEDA 法   | 真空フラスコ法       | 1~50(2~100)              | NO + NO <sub>2</sub> |
|             | 注射筒法          | 5~250(10~510)            |                      |
| NEDA 法      | 真空フラスコ法       | 3~500(5~1000)            | NO + NO <sub>2</sub> |
|             | 注射筒法          | 7~1200(13~2500)          |                      |
| イオンクロマトグラフ法 | 真空フラスコ法       | 4~1400(8~2800)           | NO + NO <sub>2</sub> |
|             | 注射筒法          | 20~7000(40~145000)       |                      |
| PDS 法       | 真空フラスコ法       | 10~300(20~620)           | NO + NO <sub>2</sub> |
|             | 注射筒法          | 12~4200(24~8400)         |                      |
| ザルツマン吸光光度法  | 5~200(10~400) |                          | NO <sub>2</sub>      |

表 2-8 連続分析法の自動計測器の種類と測定範囲等

| 計測器の種類  | 測定範囲 vol ppm   | 測定対象物質                                                  | 適用条件                                                                        |
|---------|----------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 化学発光方式  | 0~10<br>0~2000 | NO<br>NO <sub>x</sub> * <sup>1</sup>                    | 共存する CO <sub>2</sub> 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                           |
| 赤外線吸収方式 | 0~19<br>0~2000 | NO<br>NO <sub>x</sub> * <sup>1</sup>                    | 共存する CO <sub>2</sub> 、SO <sub>2</sub> 、水分、炭化水素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。 |
| 紫外線吸収方式 | 0~50<br>0~2000 | NO<br>NO <sub>2</sub><br>NO <sub>x</sub> * <sup>2</sup> | 共存する SO <sub>2</sub> 、炭化水素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。                     |

\*<sup>1</sup> あらかじめ NO<sub>2</sub> を NO に変換して測定

\*<sup>2</sup> NO と NO<sub>2</sub> のそれぞれの測定値の合量

### 2.6.2 測定管理

大気汚染に関する環境測定の作業には、種々の変動要因（例：サンプリング・測定装置・

試薬・秤量・計算など）があり、誤差が生じる。またこれらの変動要因が一定に保たれている場合でも計測者が変わると誤差や平均値が変わる。日本では計量法や環境計量士制度があり、機材等に関しても ISO9000（品質管理）が設けられており、設計・製造・購入・販売等あらゆる分野で認証管理が導入されている。

測定・分析精度の評価・管理業務の事例を表 2-9 に示す。

なお、日本の環境計量士制度は、国家資格として大気・水質等の環境計量証明や計量管理等を行っている。環境計量士に求められる知識は、環境や計量関係法規、化学知識や化学分析、濃度計量、計量管理技術等である。

表 2-9 測定・分析精度の評価と管理業務

| 管理項目業務                                       | 管理内容                                               |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 測定・分析機器の評価と維持管理                              | 機器の校正、検出限界、直線性、併行精度等の評価、検出部の保守管理                   |
| 分析法の validation                              | 検出・定量限界、ブランク、不確かさの確定                               |
| 標準作業手順書<br>SOPs:Standard operating Procedure | 日常的な機器・分析法の評価<br>試料の測定。技能訓練、点検保守マニュアル              |
| データの評価と管理                                    | 感度変動、ブランクの評価<br>結果・条件等の記録、管理表等の利用と結果報告             |
| 外部精度管理                                       | 研修会・共同実験の参加や主催<br>クロスチェックの実施<br>標準物質や試料の使用、結果の報告開示 |

### 2.6.3 日常のモニタリング

日本では一定ガス量以上のボイラを対象に大気汚染上、適正に運転されている状況を、日常、連続モニタリングを実施している地域が多い。小出力規模の自家発電における望ましいモニタリング項目としては、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、CO、N<sub>2</sub>O などが対象である。そのような工場で導入されている煙道排ガス自動分析装置を図 2-3 に示す。本装置は JIS「排ガス中自動計測器」に規定された測定原理に基づく分析装置で、非分散型赤外線分析法、磁気圧力式酸素計で広範囲の用途に採用されている、中国計量法検定 No.2006-C118 品である。（NO<sub>x</sub> 測定範囲 100～5000ppm、他に SO<sub>x</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 計測）

図 2-4 は同様に非分散型赤外線分析計で排ガス中に含む NO<sub>x</sub> ほかに最大 5 成分が同時連続測定できる。（NO<sub>x</sub> 測定範囲 0-50～5000ppm 2 レンジ）



図 2-3 煙道排ガス自動分析装置（非分散型赤外線吸収式）

（出典：堀場製作所）



図 2-4 赤外線ガス分析装置（非分散型赤外線吸収式）

（出典：富士電機システムズ）

## 2.7 大気汚染防止に関する管理組織等

### 2.7.1 公害防止管理者制度・組織等

日本の大気環境改善に大きな貢献した制度として、法定の公害防止管理者制度が挙げられる。

工業用ボイラのような一定量以上の煤煙を排出する工場は、特定工場として法定資格管理者の選任や公害防止のための組織を構成し都道府県知事に届けなければならない。

#### 【対象業種】

- 製造業（物品の化工業を含む）
- 電気供給業
- ガス供給業
- 熱供給業

組織の体系は、特定工場の公害防止対策の責任者となるべき「公害防止統括者」、公害防止対策の技術的事項を分掌する「公害防止管理者」で構成される。なお、公害防止管理者は有資格者で、排ガス量や排出有害物質種類により選任できる資格の種類が規定されている。

### 2.7.2 公害防止管理者の業務

ボイラにおいて選任された公害防止管理者が管理する大気汚染技術業務は次の通りである。

- 使用する燃料の検査
- 煤煙発生施設(ボイラ)の点検
- 煤煙処理施設及びこれに付属する施設の操作、点検及び補修
- 煤煙量又は煤煙濃度の測定の実施及びその結果の記録
- 測定機器の点検及び補修
- 事故時における応急措置の実施
- 煤煙量又は煤煙濃度の減少、施設の使用制限その他の必要な措置

NO<sub>x</sub> 排出に関わる施設の公害防止管理者は業務を遂行するに必要な条件として、学歴や経験年数と共に、基礎知識として次の項目の取得が求められている。

- 公害概論：大気汚染の現状、大気汚染の発生機構、大気汚染の影響等に関する知識
- 大気汚染関係法規
- 燃焼・煤煙防止技術：燃料、燃焼計算、防止技術、NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub> 除去技術
- 煤煙の拡散：拡散現象、拡散理論、
- 除塵・集塵技術
- 測定技術：燃料試験法、燃焼管理計測、NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub> 測定分析、煤塵の測定、機器の管理

## 2.8 対策装置の導入に係る助成の枠組み

1967年に制定された公害対策基本法の第24条では、「国又は地方公共団体は、事業者が行う公害防止のための施設の整備について、必要な金融上および税制上の措置その他の措置を講ずるように努めなければならない」とされ、また、「前項の措置を講ずるにあたっては、中小企業者に対する特別の配慮がなされなければならない」と規定された。このような基本的な考え方に沿って、日本では汚染発生源である事業者の公害対策を促すための施策として、補助金、公的金融、税制優遇措置、工場立地の移転・誘導措置、技術指導・情報提供、企業内部の組織・人材の育成のための措置などが実施されてきた。その後、政府系機関では統合整理が進み機関・団体の名称、事業内容は頻繁に変更されているものが多いが、ここでは、日本の産業公害対策が活発化してきた1960年代以降の主要な取組を、当時の名称で述べていくこととする。

### 2.8.1 公害防止事業団による助成

公害事業団は、1965年に設立された政府の公害問題に対する助成施策実施のための専門機関である。1992年の法律改正により環境事業団に、さらに2004年には環境保全機構に名称変更され、事業内容も見直されてきた。また、発足当時の監督権限は通商産業省に置かれていたが、環境庁の発足に伴い環境庁へ移管されている。公害防止事業団が実施してきた主な助成事業は次のとおりである。

#### 2.8.1.1 建設譲渡事業

技術・資金面で公害防止施設の設置が困難であるような事業体及び公共団体に対して事業団が直接に施設の建設を行い、完成後に譲渡する事業をいう。建設費用は低金利である政府からの借入金が用いられ、譲渡後は注文主である事業体及び公共団体が事業団へ返済する仕組みになっていた。返済期間は施設に対しては20年以内、機械装置に対しては15年以内であり、低い金利が設定されていた。具体的な事業は以下のとおりであった。

##### (1) 共同公害防止施設

同業の類似した工場が集中している地域では、各々の工場や事業体が単独で処理施設を整備するよりも、共同で施設を設置した方がよりコスト安になる可能性が高い。この点に着目して共同公害防止施設の建設譲渡事業が行なわれた。大気関連ではばい煙処理施設、粉じん防止施設等が対象となった。

##### (2) 集団設置建物

都市化の進展や産業構造の変化等により、公害防止施設設置のための空間確保が困難である、近隣公害の発生が避けられない等の理由により、複数の企業が集団で移転するための用地の取得・造成、工場建物施設や公害防止施設の建設及び施設の譲渡を行なうものである。この事業には移転先での共同公害防止施設の設置が含まれる場合もある。

##### (3) 緩衝緑地帯

工業地帯から排出されるばい煙や粉じん等による公害を防止するためには、工業地帯と居住地帯の間を遮断するグリーンベルトが有効である。大規模な緑地の造成には多額の費用を要することから、地方公共団体に代わって事業団がグリーンベルトの建設譲渡を行なうものである。

#### (4) 大気汚染対策緑地

樹木は汚染物質を吸収して、大気を浄化する機能を有している。この長所を利用して大気汚染を緩和する緑地帯を建設する事業である。この事業には工場の周辺における緑地帯整備に加えて、都市域内にまとまった緑地を建設する事業も含まれている。

図 2-5 は建設譲渡事業の実績の推移を示したものである。

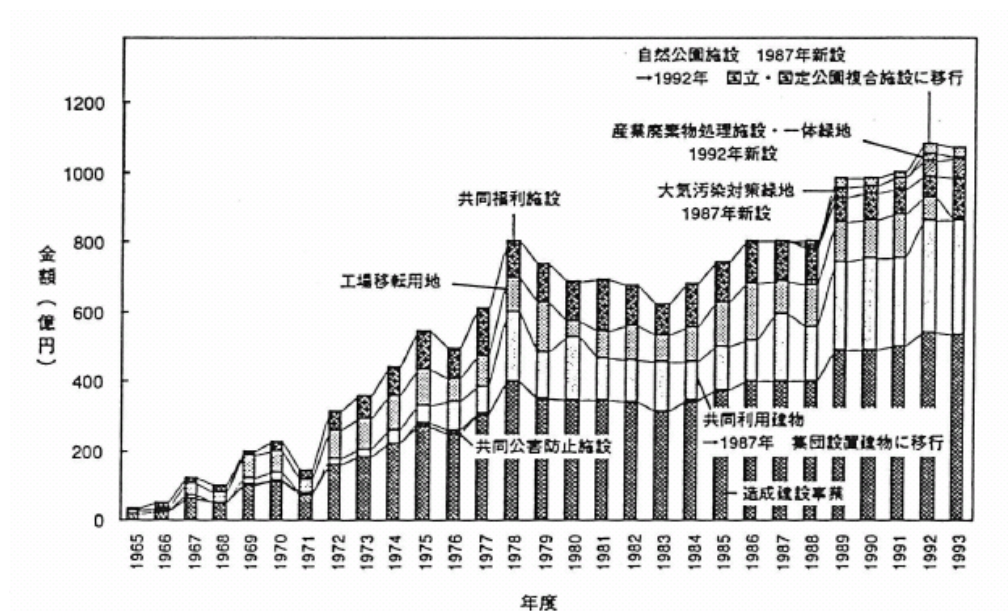


図 2-5 建設譲渡事業の実績の推移

出典：環境事業団の概要と事例、環境事業団、1994

#### 2.8.1.2 融資事業

事業体及び公共団体に対して低金利での融資を行い、公害防止活動を促進させるものである。事業団への返済期間は一部事業を除いて、施設に対しては 20 年以内、機械装置に対しては 15 年以内であった。融資が利用できる施設や事業は以下の通りであった。

##### (1) 産業公害防止施設

単独もしくは複数の工場が共同で利用する公害防止施設を設置するための費用を融資するものである。公害防止施設には、ばい煙処理施設や粉じん防止施設等の大気汚染防止施設が含まれていた。

## (2) 特定フロン排出抑制施設

オゾン層破壊防止のために、特定のフロン及びハロンの排出抑制施設又は再生利用施設を設置する事業体に対して融資を行なうものである。

図 2-6 に融資実績額の推移を示す。

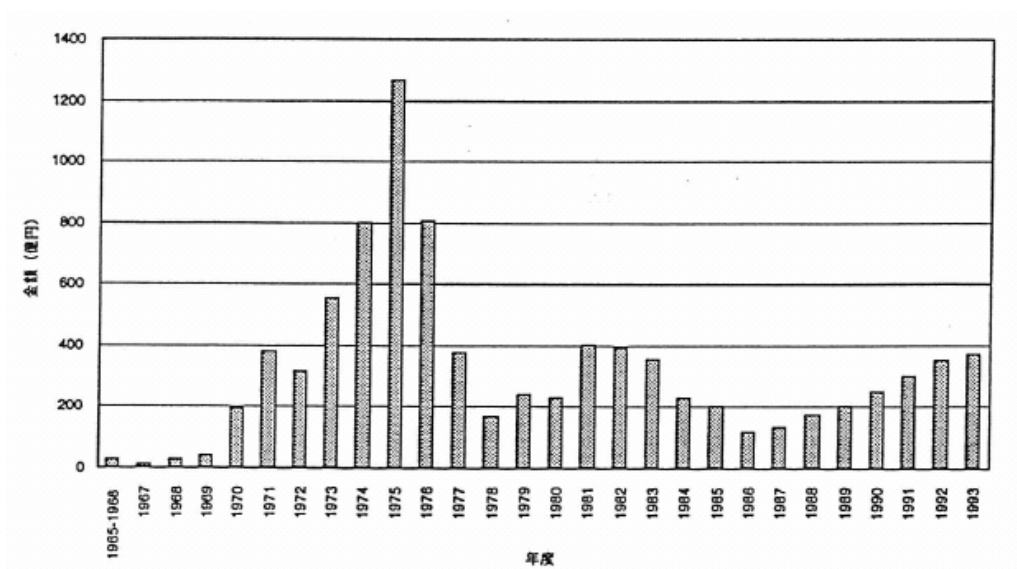


図 2-6 融資実績額の推移

出典：環境事業団の概要と事例、環境事業団、1994

## 2.8.2 中小企業に対する融資

### 2.8.2.1 中小企業金融公庫

中小企業の成長・発展を促進するため、一般の金融機関から融資を受けにくい設備資金や長期運転資金を中小企業者に融資することを目的として設立された全額政府出資の金融機関である。1965 年より、産業公害防止施設の整備や公害防止のための工場移転等の実施に必要な資金の特別金利による貸付を行なっていた。大気汚染防止関係では、集じん・除じん装置や燃焼改善施設、測定分析装置等が融資対象となっていた。

### 2.8.2.2 国民金融公庫

銀行その他一般金融機関からの資金の融資を受けることが困難な国民大衆に対して、必要な事業資金の供給を行なうことを目的として設立された全額政府出資の金融機関である。1970 年より産業公害防止施設の設置に対する特別貸付を実施した。対象となる企業及び施設は、中小企業金融公庫の場合とほぼ同じである。

### 2.8.2.3 中小企業事業団

「中小企業事業団法」に基づいて中小企業施策を総合的に実施する機関として、旧中小企業振興事業団と旧中小企業共済事業団とを統合して設立された。産業公害防止に関連する以下の事業に対して資金助成を実施していた。

- 共同公害防止事業
- 公害防止施設共同利用事業
- 工場等集団化事業（工業団地等の建設）
- 工場共同化事業（共同工場の建設）
- 共同施設事業

#### 2.8.2.4 中小企業設備近代化資金

「中小企業近代化資金等助成法」に基づき、中小企業の設備の近代化の促進に寄与することを目的として、都道府県が窓口となって個別中小企業に対して貸付を行なうものである。通商産業大臣が指定する業種に属する企業及び通産局長の承認を得て都道府県知事が指定した地方産業振興業種に属する企業を対象に、公害防止施設に対する貸付を実施していた。

#### 2.8.3 日本開発銀行による融資

長期設備資金の供給を行なうことにより、経済の再建及び産業の開発を促進するため、一般の金融機関が行なう金融などを補完し、又は奨励することを目的として設立された。1960 年より産業公害防止に対する融資を開始し、再生資源施設や省エネルギー施設等の幅広い範囲に及ぶ環境対策に対する融資や利子補給、債務保証等の事業を実施していた。

#### 2.8.4 税制上の措置

公害防止対策に対する税制面での優遇措置として、国税、地方税についてそれぞれ以下のような措置がとられていた。

##### 【国税】

- 公害防止関連特定設備等の特別償却
- 耐用年数の特例
- 特定の資産の買換えの場合の課税の特例

##### 【地方税】

- 固定資産税の非課税措置
- 固定資産税の課税標準の特例
- 特別土地保有税の非課税
- 事業所税の特例

### 2.9 技術普及・技術開発活動について

日本の工業用ボイラを取り巻く技術普及や環境保全において、諸制度の徹底や普及活動、技術開発分野における、民間団体や学会の果たしてきた役割は極めて大きい。行政機関が講じる規制や施策立案に際し情報提供の協力や協議を通じて、最適化を図ってきた経緯は高く評価される。殊に大気汚染対策には NEDO に代表される特殊法人等、産業界・行政機構・学会に連関する情報活動や先進的な基礎技術の研究開発において先導的役割を担って

きた。

施設メーカーやボイラ設置者が所属するボイラ、環境分野の各業界団体では、会員の研修・人材開発から、業界が共有出来る基本技術の開発はもとより、調査・情報活動、更には国家施策の提言にまで関わってきた。殊に日本のボイラや脱硝装置のような装置産業の技術向上に果たしたメーカーの活動は高く評価出来る。業界活動による情報の共有化も、ボイラ製造技術や大気汚染対策技術において相互啓発や市場の活性化に大きく寄与してきた。

工業用ボイラに係わる主な諸団体とその活動を表 2-10 に示す。

表 2-10 工業用ボイラに係わる諸団体と活動内容

| 区分 | 名称                              | 活動                                     | 会員数                |
|----|---------------------------------|----------------------------------------|--------------------|
| 学会 | (一社) 日本機械学会                     | 機械工学全般<br>原動機、材料、熱力学等の研究               | 法人 714<br>個人 30612 |
|    | (公社) 大気環境学会                     | 大気環境の研究                                |                    |
|    | (一社) 日本エネルギー学会                  | エネルギー全般の研究<br>燃料、燃焼、プロセス工学             | 法人 241<br>個人 1444  |
|    | 日本バーナ研究会                        | 燃焼技術、省エネルギー研究                          | 法人 53              |
|    | (公社) 化学工学会                      | エネルギー・環境・資源等の研究                        | 法人 282             |
| 業会 | (一社) 日本産業機械工業会<br>JSIMM         | ボイラ製造、環境技術全般に係わる活動                     | 法人 190             |
|    | (一社) 日本ボイラ協会<br>JBA             | 工業用ボイラ全般にわたる活動<br>技術普及、品質、検査、人材育成      | 個人 7800            |
|    | (公財) 日本小型貫流ボイラ協会                | 小型貫流ボイラに係わる活動                          |                    |
|    | (一社) ボイラ整備据付協会                  | ボイラの据付業者の業界活動                          | 法人 392             |
|    | (一財) 省エネルギーセンター<br>ECCJ         | 省エネルギー診断、研修・情報<br>国際協力事業               | 法人 2339            |
|    | (一財) 石炭エネルギーセンター<br>J・COAL      | 石炭利用技術の開発・調査・普及<br>国際協力事業              | 法人 115             |
|    | (独行) 新エネルギー・産業技術総合<br>開発機構 NEDO | 高性能ボイラの開発<br>Clean Coal Technology の開発 | —                  |
|    | (一社) 産業環境管理協会<br>JEMAI          | 環境計測、環境管理、公害防止管理者<br>試験、講習、国際協力事業      | 法人 51              |
|    | (一社) 日本環境測定分析協会                 | 環境計量士、分析事業者の諸活動                        | 法人 32              |
|    | (公社) 日本環境技術協会<br>JETA           | 大気・水の測定技術の体系化、測定機<br>器の改良、国際協力等        | 法人 34              |
|    | (公財) 北九州国際技術協力協会                | 環境産業の国際協力、研修事業                         | 福岡県下関係             |

|  |                           |                             |              |
|--|---------------------------|-----------------------------|--------------|
|  | KITA 環境協力センター             | クリーナープロダクション                | 機関           |
|  | (公財)国際環境技術移転センター<br>ICETT | 環境保全に関する技術移転、指導、調査、普及活動、研究、 | 中部地区関係<br>機関 |

### 3 石炭火力発電所における窒素酸化物の排出削減対策技術

#### 3.1 石炭火力発電の特性

##### 3.1.1 ボイラ形式

石炭火力発電用ボイラで使用されている形式は、事業用ではほとんどが貫流式水管ボイラである。自家用石炭火力発電用ボイラは、蒸気仕様や規模、用途により自然循環式、強制循環式、貫流式などが、使用されている。ボイラの部位の一般的な構成は、放射伝熱部（燃焼室）と接触伝熱部に二分され、過熱器、再熱器、節炭器等のボイラ圧力部位と空気予熱器や排ガス処理装置、補機類から構成されている。

発電用蒸気は、一部の排熱回収発電ボイラを除き、ほとんどが過熱蒸気でタービン送気される。このため、事業用火力ボイラは高圧化されており、高圧下では罐水の比重差が無くなり、自然循環力が無くなる為、強制循環される。また大出力事業用は、ほとんどが亜臨界圧であり、気泡による膜沸騰などが生じる為、強制貫流式が適用される。

事業用火力発電所の最近の傾向は、夏季ピーク電力需要に対応する負荷変動を吸収するために、定圧貫流から変圧貫流に変え中間負荷に対応する方法が採用されている。

強制循環式や貫流変圧式などの方式では、火炉壁管内の最適かつ安定的な水量配分や管壁温度の維持、制御法、伝熱管材料などに、高度の設計技術的や know-how を必要とする。これらの技術はボイラ製造者の特許としての取扱が多い。代表的な自然循環ボイラ、強制循環放射式の水・蒸気のフロー概念図を図 3-1~図 3-2 に示す。

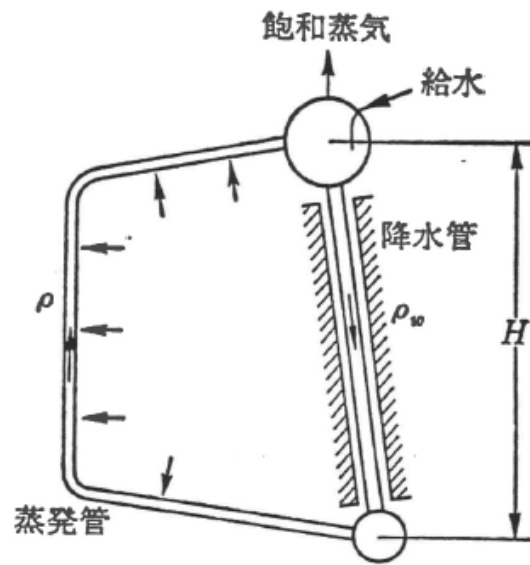


図 3-1 自然循環ボイラの水循環模式図

(出典：筑波大、ボイラの概要)

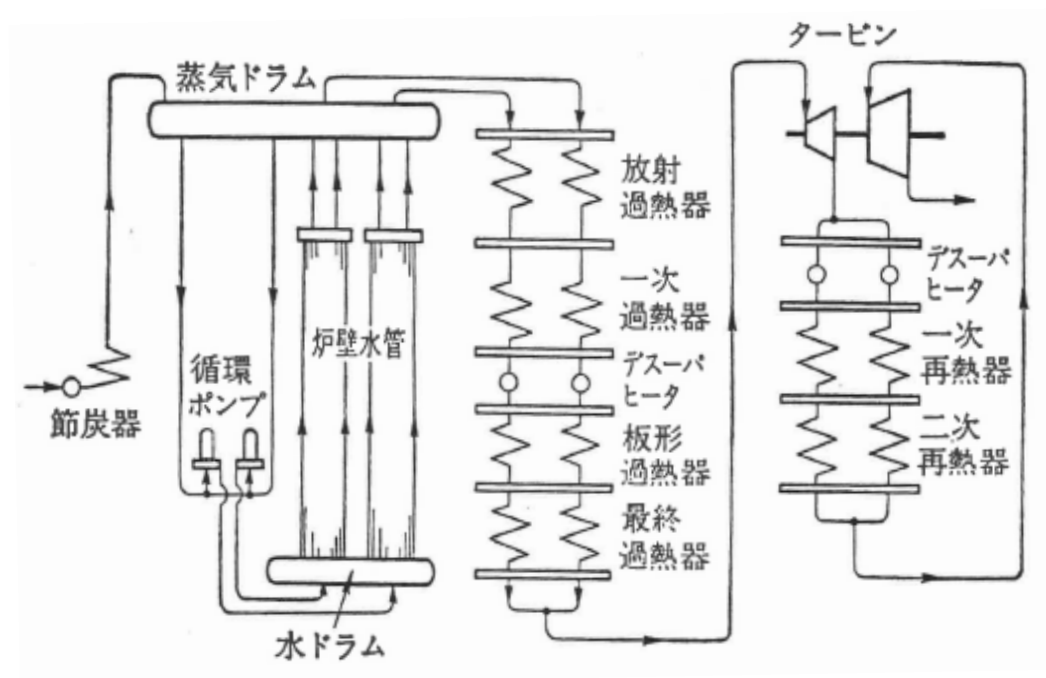


図 3-2 強制循環放射形ボイラの水・蒸気系統例

(出典：筑波大、ボイラの概要)

自家発電用微粉炭焚きボイラとして、実績の多い代表的な自然循環放射型ボイラと強制循環型ボイラの構造を図 3-3~図 3-4 に示す。

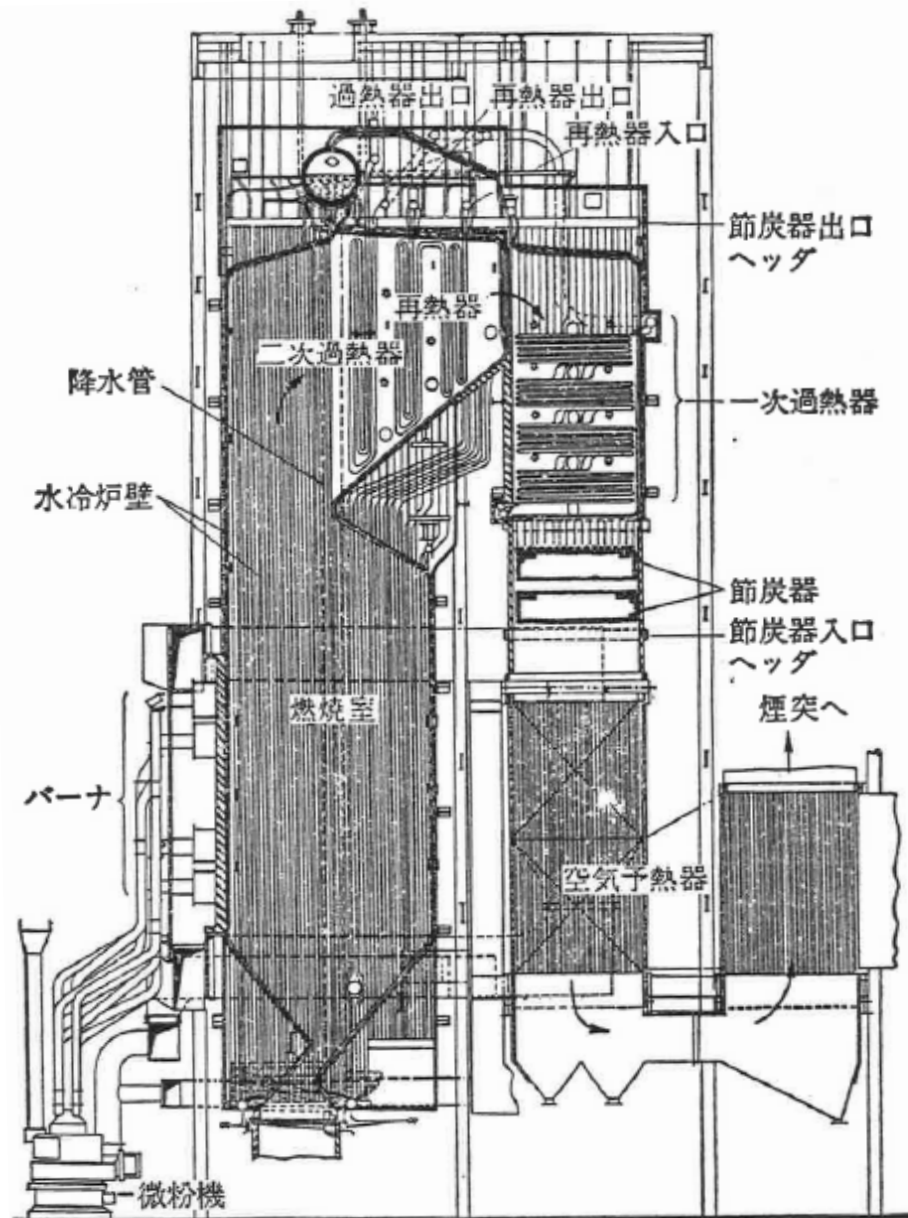


図 3-3 自然循環放射型ボイラ

(出典：筑波大、ボイラの概要)

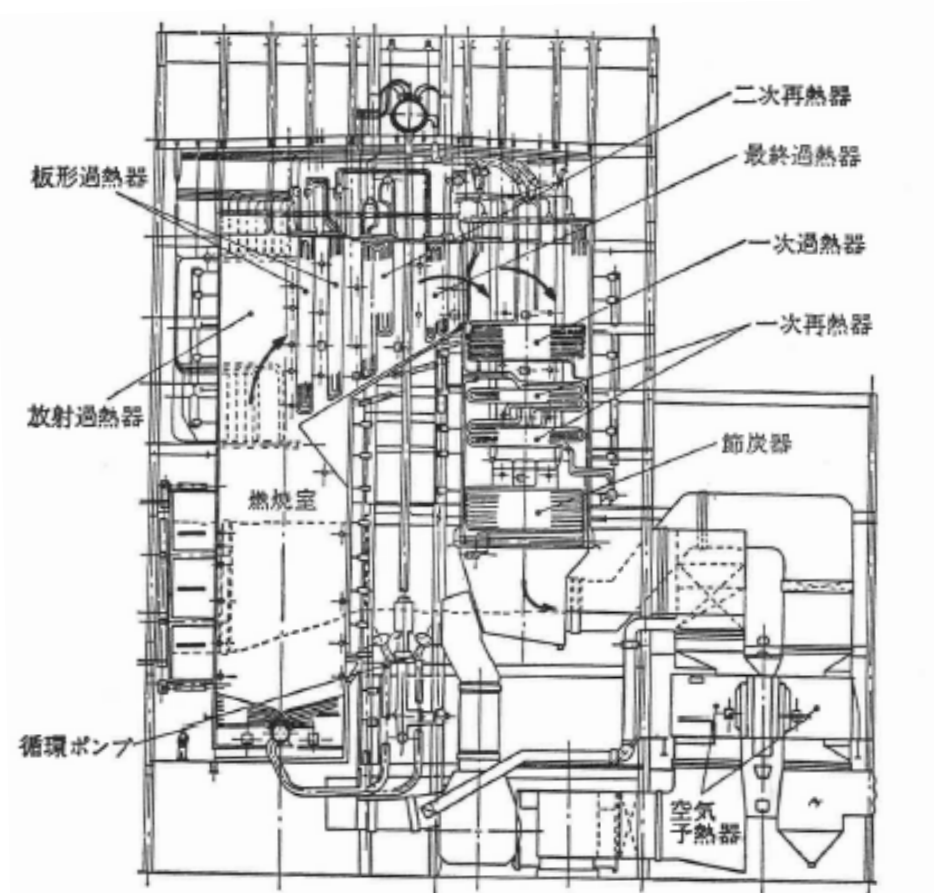


図 3-4 強制循環形ボイラの構造

(出典：筑波大、ボイラの概要)

図 3-5 は日本最初の超臨界圧 500MW 微粉炭焚きボイラである（電源開発松島）。図 3-6 に再熱蒸気温度 593℃となった 700MW 微粉炭焚きボイラ（中部電力碧南 3 号）、図 3-7 は蒸気温度、再熱蒸気温度が共に 600℃になった(1998 年) 1000MW、600℃/600℃の東北電力原町 2 号機、図 3-8 は、ボイラ出口 NOx 排出濃度<175ppm を達成した 700MW、発電所、図 3-9 は同様に<150ppm を達成した 1050MW、25MPa、600℃/610℃ 電源開発橘湾火力発電所のボイラを示す。図 3-10 は自家用発電用褐炭・バイオマス混焼循環流動層ボイラ、図 3-11 は石炭・木質廃材焚き循環流動層ボイラの設備系統を示す。なお流動層ボイラは主に自家用石炭火力として多く普及しているが、詳細については 2014 年 7 月 30 日付け報告書(添付資料 1)を参照のこと。

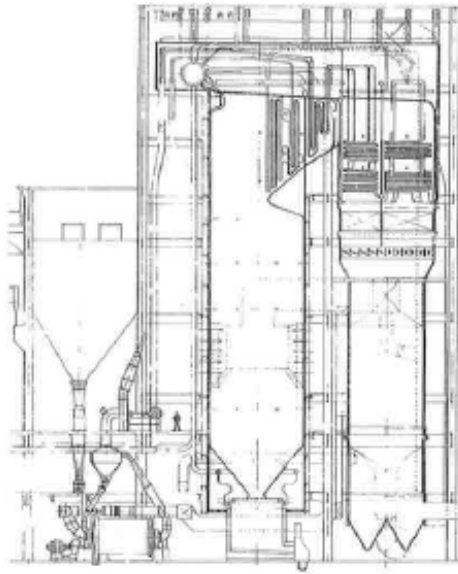


図 3-5 電源開発 松島 1 号ボイラ

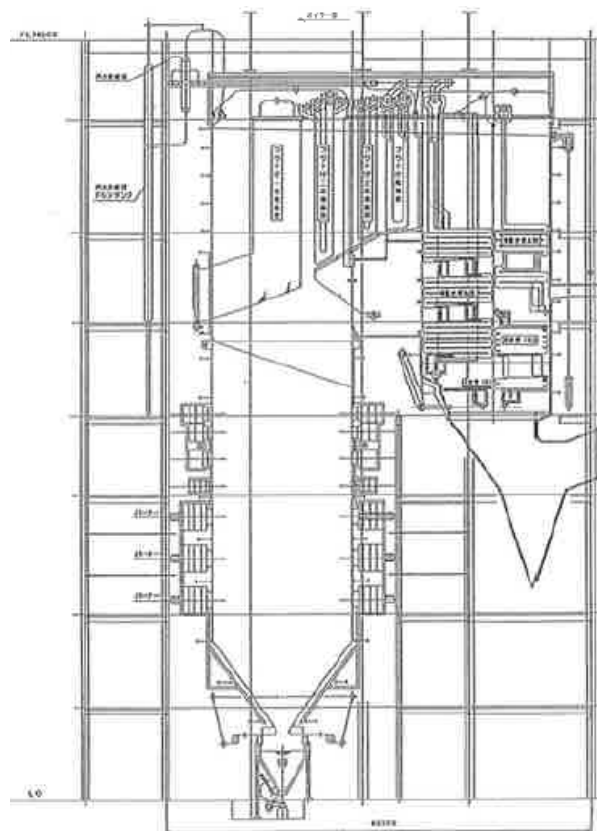


図 3-6 中部電力碧南 3 号ボイラ

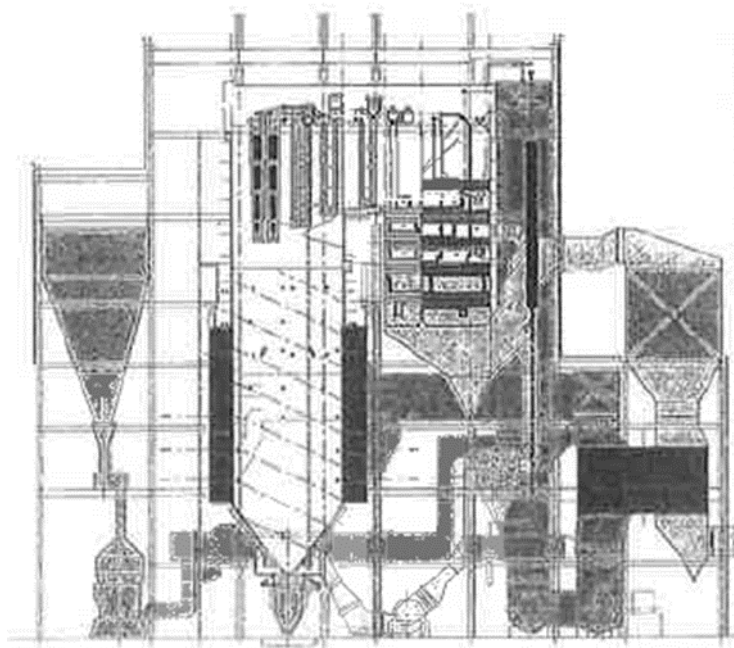


図 3-7 東北電力原町 2 号ボイラ

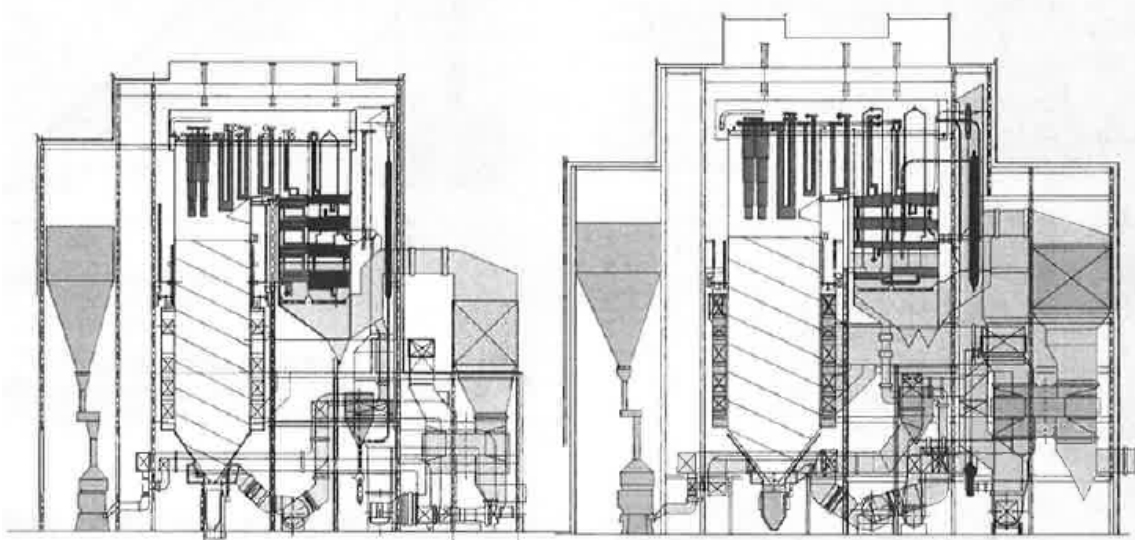


図 3-8 四国電力橘湾発電所ボイラ（左）

図 3-9 電源開発橘湾火力発電所 2 号(右)

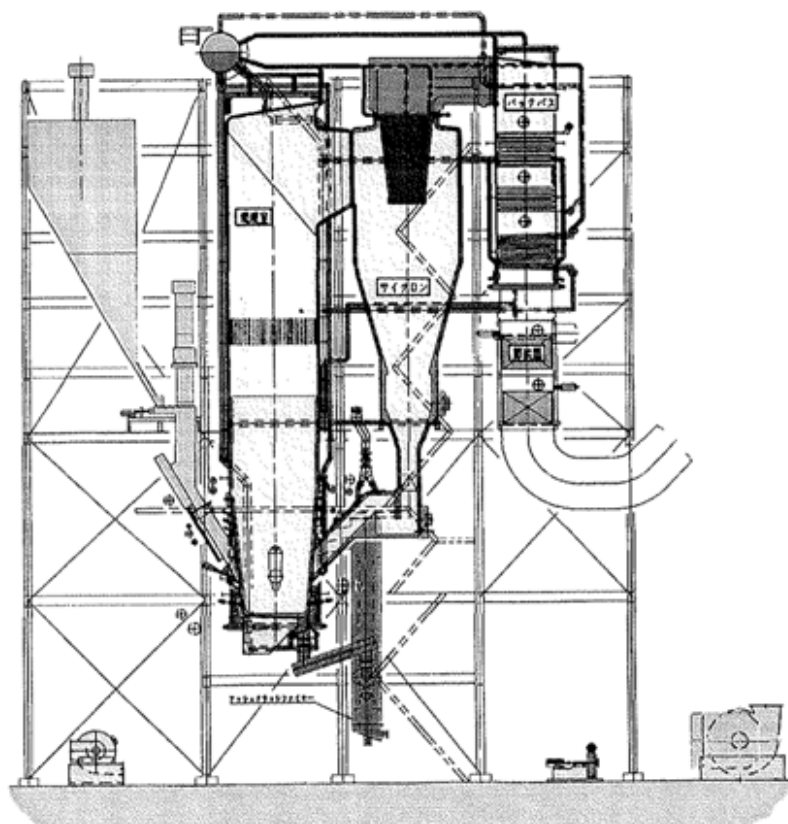


図 3-10 褐炭+バイオマス混焼循環流動層ボイラ

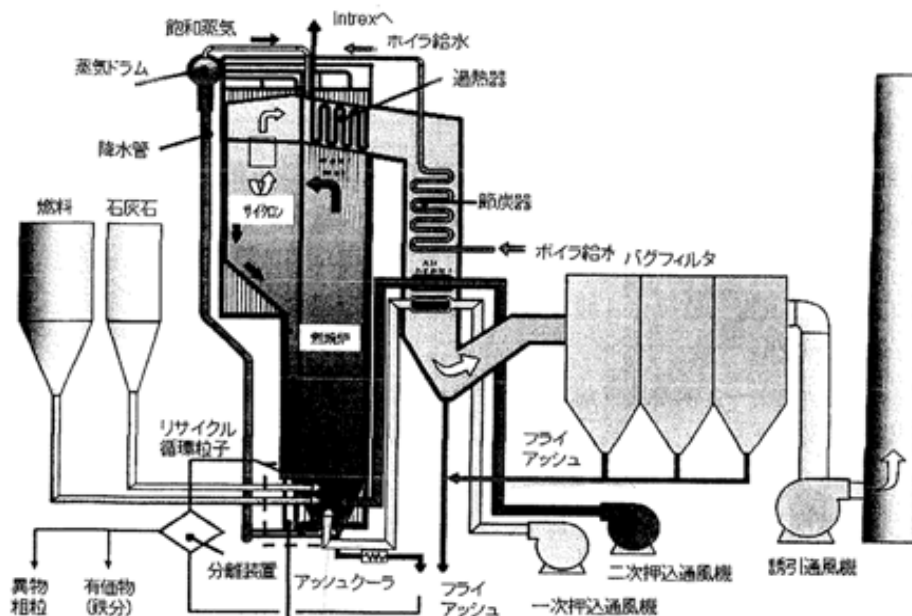


図 3-11 循環流動層ボイラ設備系統

(出典：JSIM)

### 3.1.2 蒸気条件

小中規模の自家発電火力ボイラは、ドラム型自然循環型ボイラや強制循環型ボイラの亜臨界（sub.SC）や3~6MPa級の低圧仕様が多い。売電事業等を含む事業用火力では、定圧貫流や変圧貫流ボイラで超臨界（SC）>22.4MPa、<566℃、超々臨界（USC）>566℃が多く採用されている。（表 3-1 参照）

### 3.1.3 機器構成

図 3-12 に石炭火力発電の一般的な設備構成を、図 3-13 に加圧流動層燃焼複合発電の設備構成を示す。

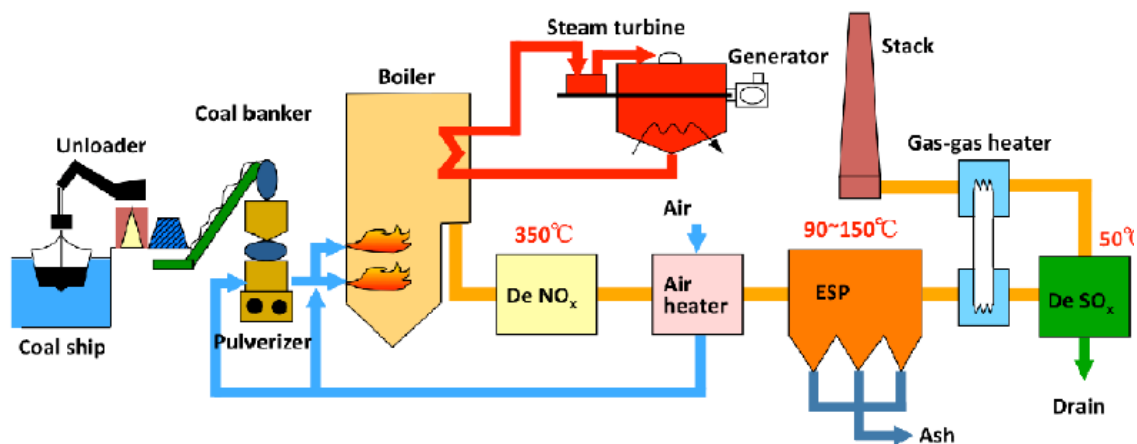


図 3-12 石炭火力発電の一般的な設備構成

(出典：渡辺、火力発電石炭燃焼技術)

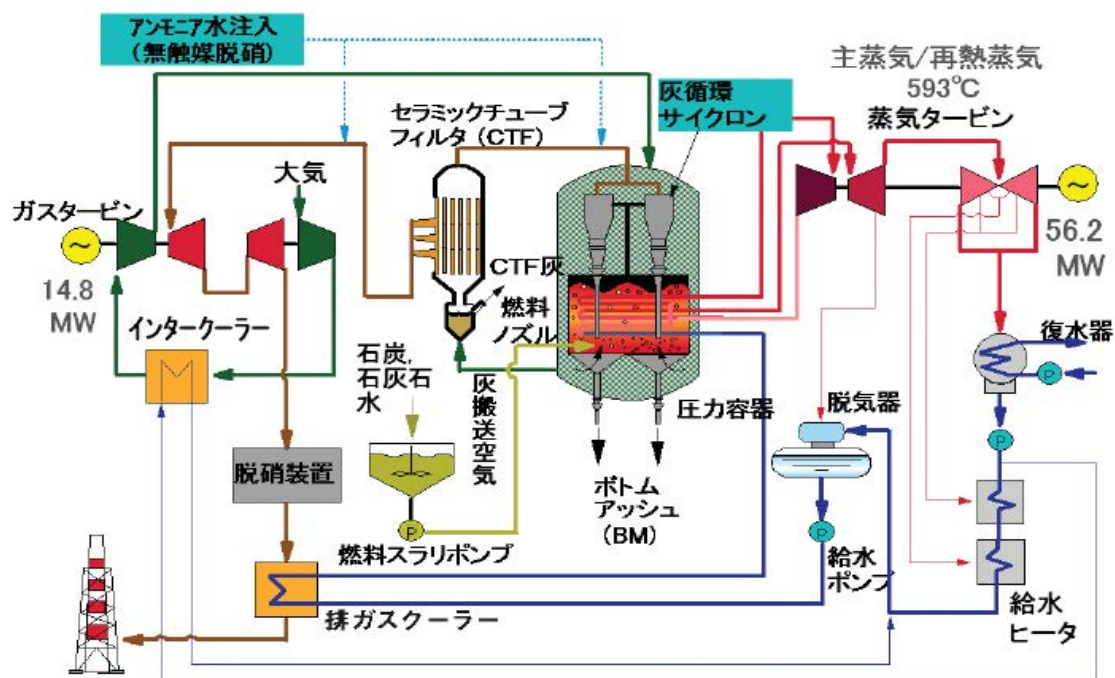


図 3-13 加圧流動層燃焼複合発電の設備構成

(出典：CCUJ)

### 3.1.4 最近運開した事業用石炭焚き火力発電所

表 3-1 に日本国内の 1990 年～1999 年に運開した事業用石炭焚き火力ボイラを示す。全て設置地域の大気環境等の規制値を遵守して運転されている。

表 3-1 1990 年～1999 年に運開した石炭焼き事業用火力ボイラ

| 発電所名     | 型式           | 燃料    | 容量(t/h) | 蒸気仕様 *              | 製造者  |
|----------|--------------|-------|---------|---------------------|------|
| 電源開発松浦Ⅰ  | 貫流変圧         | 石炭・重油 | 3170    | 24.1 / 538/566      | バブ日立 |
| 北陸電力 敦賀  | 貫流変圧         | 石炭    | 1520    | 24.1 / 566/566      | 三菱重工 |
| 中部電力碧南Ⅰ  | 貫流変圧         | 石炭 重油 | 2300    | 24.1 / 538/566      | 三菱重工 |
| 酒田共同 火力  | 強制循環         | 石炭 重油 | 1145    | 16.6 / 566/538      | 三菱重工 |
| 中部電力碧南Ⅱ  | 貫流変圧         | 石炭    | 2300    | 24.1 / 538/566      | 三菱重工 |
| 中部電力碧南Ⅲ  | 貫流変圧         | 石炭    | 2250    | 24.1 / 538/566      | IHI  |
| 東北電力能代   | 貫流変圧         | 石炭    | 1920    | 24.5 / 538/566      | バブ日立 |
| 沖縄電力具志川Ⅰ | 自然循環         | 石炭    | 520     | 16.6 / 566/538      | 川崎重工 |
| 相馬共同火力Ⅰ  | 貫流変圧         | 石炭    | 3080    | 24.1 / 538/566      | バブ日立 |
| 電源開発若松   | PFBC<br>貫流   | 石炭 軽油 | 146.57  | 10.1/2.6<br>593/593 | IHI  |
| 北陸電力 七尾Ⅰ | 貫流変圧         | 石炭    | 1510    | 24.1/ 566/593       | バブ日立 |
| 沖縄電力具志川Ⅱ | 自然循環         | 石炭    | 520     | 16.6 / 566/538      | バブ日立 |
| 九州電力 苓北  | 貫流変圧         | 石炭 重油 | 2300    | 24.1 / 566/566      | IHI  |
| 相馬共同火力Ⅱ  | 貫流変圧         | 石炭 重油 | 3080    | 24.1 / 538/566      | 三菱重工 |
| 電源開発松浦   | 貫流変圧         | 石炭    | 2950    | 24.1 593/593        | バブ日立 |
| 東北電力原町Ⅰ  | 貫流変圧         | 石炭 重油 | 2970    | 24.5 / 566/593      | 三菱重工 |
| 北海道電力 苫東 | PFBC<br>強制循環 | 石炭    | 195     | 16.6<br>566/538     | 三菱重工 |
| 中国電力三隅   | 貫流変圧         | 石炭    | 2900    | 24.5 / 600/600      | 三菱重工 |
| 東北電力原町Ⅱ  | 貫流変圧         | 石炭    | 2890    | 24.5 / 600/600      | バブ日立 |
| 北陸電力七尾Ⅱ  | 貫流変圧         | 石炭    | 2120    | 24.1 / 593/593      | IHI  |

(\*) 蒸気仕様 圧力 MPa / 温度℃

(出典：火力原子力発電)

### 3.1.5 火力発電方式

石炭直接燃焼発電方式は多数の実績があり、熟成技術で信頼性が高い。他の燃料との混焼も可能で運用性が広い方式である。日本では将来の高効率発電や環境保全性の向上を図るため、LNG コンバインド発電や石炭ガス化発電の導入が見られる。表 3-2 は石炭直接燃焼発電と他の発電方式の比較である。

表 3-2 火力発電方式の比較

| 発電方式 | 石炭直接燃焼                              | LNG コンバインド                                           | 石炭ガス化 IGCC                                                            |
|------|-------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 燃料   | 微粉炭ほか                               | LNG                                                  | 微粉炭                                                                   |
| 機器構成 | ボイラ<br>排煙脱硝脱硫装置<br>集塵機<br>蒸気タービン発電機 | 空気圧縮機<br>ガスタービン発電機<br>排熱回収ボイラ<br>蒸気タービン発電機<br>排煙脱硝装置 | ガス化炉<br>チャー回収装置<br>ガス精製装置<br>ガスタービン発電機<br>昇圧機<br>排熱回収ボイラ<br>蒸気タービン発電機 |
| 効率   | 高い (40～43%)                         | 高い(44～60%)                                           | 高い(42%)                                                               |
| 実績等  | 多数                                  | 多数                                                   | 少数                                                                    |

## 3.2 石炭燃料の特性、種類等

### 3.2.1 石炭の燃料特性

石炭は他の重油・ガスなどの化石燃料に比べ生成条件の違いにより、多様な物理的・化学的性質を示すため、炭種によって、その燃焼過程（着火・燃焼性）および燃焼後の排ガス組成は異なっている。石炭ボイラにおいて、通常の契約条件や、ボイラへの適正評価等に係わる燃料特性は、工業分析や元素分析、灰分の組成の分析値等が次の項目で行われている。

- 全水分：到着ベースで石炭が保有している水分量（固有水分+表面付着湿分）  
湿分は粒径が細かい程多い傾向を示す。
- 灰分：燃焼残渣となり無機鉱物含有量の目安となる。
- 揮発分/固定炭素：燃料としての有効成分で「固定炭素/揮発分＝燃料比」と称され、燃焼性を示す指標とされている。固定炭素は C に、揮発分は化合水分、揮発性成分、熱分化による生成揮発分等である。高揮発分炭は着火が容易で、長炎で燃焼し易く、固定炭素が多い炭は逆に熾燃焼となるため燃焼速度が遅く燃焼方式が制約される。
- 全 S、N 分：排ガス中の大気汚染物質である SO<sub>x</sub>・NO<sub>x</sub> 生成源となる。S 分は、有機 S、黄鉄鉱 S、硫酸塩 S などがあるが、無機 S は選炭である程度、除去が可能である。
- 発熱量：燃料としての評価で最も重要な値である。総発熱量は水分、H による水蒸気の凝縮潜熱を含んでいるため、実際利用される低位発熱量（真発熱量）で評価される。
- 灰の溶融性：燃焼過程で炉内や燃焼機において、灰分が軟化・溶融してクリンカ-

やスラギング生成に起因する性状である。灰の組成により、軟化温度・熔融温度・溶流温度が異なる。一般に  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  等の酸性成分が多い場合、融点が高い。微粉炭燃焼では熔融温度  $>1300^\circ\text{C}$  が望ましい。流動層燃焼では燃焼温度が低く問題とならない。

- ファーリング性：石炭灰が過熱器や再熱器に石炭灰が凝縮付着する現象であるが、石炭中に  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Cl}$ 、 $\text{CaO}$  などが多量に含まれている場合は S 分も低融点の硫酸錯塩を形成してファーリングの発生を助長する。
- 粉砕性：微粉炭燃焼では重要な特性で ASTM 規格に基づく HGI (Hard-grove Grindability Index) で評価している。微粉炭燃焼では  $>45$  が望ましい。
- 摩耗性：飛灰による伝熱面の摩耗や粉砕機の摩耗の原因となるもので、石炭中の石英、クリストバライト、ムライト、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等の鉱物質に留意する必要がある。
- 粒径：最大粒径、微粉率などが燃焼性に影響する。バーナの噴霧特性やストーカ燃焼、流動層燃焼における燃焼速度に影響する。
- 粘結性(集塊性)：石炭の粘着性は石炭が加熱された時に膨張して Cake 状に塊る性質を言い、ボタン指数で評価する。ボタン指数が高い石炭は、バーナノズルへの付着や閉鎖、未燃分の増加、火床燃焼では燃焼障害が生じる。

### 3.2.2 コールランク

ASTM 基準では、石炭の発熱量、固定炭素・揮発分・集塊性を基準にして石炭化の進化した順にランク化して表 3-3 のように分類している。

表 3-3 Coal Rank (ASTM)

| Class    | Group     | 固定炭素<br>% (*     | 揮発分<br>% (*      | 発熱量<br>Mcal/kg (+                            | 集塊性    |
|----------|-----------|------------------|------------------|----------------------------------------------|--------|
| I 無煙炭    | 高無煙炭      | $98 \leq$        | $\leq 2$         | —                                            | 無      |
|          | 無煙炭       | $92 \leq / < 98$ | $2 < / \leq 8$   | —                                            | 無      |
|          | 半無煙炭      | $86 \leq / < 92$ | $8 < / \leq 14$  | —                                            | 無      |
| II 瀝青炭   | 低揮発分瀝青炭   | $78 \leq / < 86$ | $14 < / \leq 22$ | —                                            | 有      |
|          | 中揮発分瀝青炭   | $69 \leq / < 78$ | $22 < / \leq 31$ | —                                            | 有      |
|          | A 高揮発分瀝青炭 | $< 69$           | $31 <$           | $7.78 \leq$                                  | 有      |
|          | B 高揮発分瀝青炭 | —                |                  | $7.22 \leq / < 7.78$                         | 有      |
|          | C 高揮発分瀝青炭 | —                |                  | $6.39 \leq / < 7.22$<br>$5.83 \leq / < 6.39$ | 有<br>有 |
| III 亞瀝青炭 | A 亞瀝青炭    | —                |                  | $5.83 \leq / < 6.39$                         | 無      |
|          | B 亞瀝青炭    | —                |                  | $5.28 \leq / < 5.83$                         | 無      |

|       |        |   |  |                      |   |
|-------|--------|---|--|----------------------|---|
|       | C 亜瀝青炭 | — |  | $4.61 \leq / < 5.28$ | 無 |
| IV 褐炭 | A 褐炭   | — |  | $3.5 \leq / < 4.61$  | 無 |
|       | B 褐炭   | — |  | $< 3.5$              | 無 |

(※ 乾炭/無鉱物ベース      (+ 恒湿炭/無鉱物ベース

### 3.3 燃焼方式

石炭火力用ボイラの燃焼方式は、微粉炭燃焼、ストーカ燃焼（塊炭・粉炭）、流動層燃焼（塊炭・粉炭）に三分される。この内ストーカ燃焼は小出力自家発電用に、流動層燃焼の気泡沸騰型は低品位炭やバイオマス等の混焼の小出力自家発電用に適用されている。

循環流動層燃焼や加圧流動層燃焼は中大出力発電用に適用されている。表 3-4 に石炭火力の燃焼方式の特徴を示す。

表 3-4 石炭火力ボイラの燃焼方式の特徴

| 燃焼方式       | 特徴                                                                                                                                                                                                                       |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 微粉炭燃焼（バーナ） | 石炭を粉砕機で微粉化し、微粉炭として燃焼用空気と炉内に噴霧し浮遊燃焼させる方式、燃焼過程は揮発分、Char 領域がある。炉内噴霧方向や型式にいろいろな方式がある。<br>全ての規模に採用されている。<br>NO <sub>x</sub> 生成抑制技術は開発済、商用実績多数あり                                                                               |
| ストーカ燃焼     | 石炭等固形燃料用、固定床や移動床の上で燃焼する方式、小規模な石炭火力発電用に適用されている。燃焼用空気は火層下から供給され燃焼は火層上部で炎燃焼する<br>石炭の燃料比や粒径に制約がある。<br>NO <sub>x</sub> 生成抑制技術には制約があり、削減値に限界がある。                                                                               |
| 流動層燃焼      | 気泡流動層：流動燃焼室内で流動媒体と共に高圧空気で気泡状に沸騰させて燃焼する<br>循環流動層：燃焼室で高速で流動媒体と上昇燃焼させ、未燃分は後流捕集部で回収し燃焼室に戻し循環させて燃焼を完結させる。<br>加圧流動層：流動層を圧力容器内に収納して、燃焼ガスをガスタービンで発電し、発生した蒸気は蒸気タービン発電する複合発電システムとして利用。<br>何れの型式も NO <sub>x</sub> 生成は少なく炉内脱硫も可能である。 |

### 3.4 窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>)

#### 3.4.1 窒素酸化物生成の基本原理、環境影響

NO<sub>x</sub> には結合状態により数種類の存在が知られており、N<sub>2</sub>O、NO、NO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> などがあるが、工業用ボイラに関わる燃料（固体・液体・気体）の燃焼による燃焼生成物として重要なのは、NO と NO<sub>2</sub> である。一般に両方の化合物の和を総称して NO<sub>x</sub> と称している。

様々な大気汚染物質のうち、燃焼に伴い生成する大気汚染物のうち、SO<sub>x</sub> は燃料中の S 分を除去することでその生成を防げるが、NO<sub>x</sub> は生成過程が異なり、燃料中の N 分を除去しても、空気中の窒素に起因して生じるため、生成低減対策は燃焼機や燃焼条件など多面に及ぶ。

ボイラにおける燃焼ガスではNOが圧倒的に多く、容積比でNO<sub>x</sub> の90~95%vol.を占める。排ガス中には他に N<sub>2</sub>O、N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> などもあるが微量である。

NO は大気中に排出されると大気中の O<sub>2</sub> や O<sub>3</sub> などにより酸化され、NO や NO<sub>2</sub> は平衡状態になることが確認されている。

燃焼により発生する NO<sub>x</sub> は、その起源により次の 2 種類に区分される。

- ①Thermal -NO<sub>x</sub>：熱的反応に起因、空気中の N<sub>2</sub> 分子が高温状態で酸化された生成するもの
- ②Fuel -NO<sub>x</sub>：燃料中に含む各種窒素化合物を起源として燃焼に際して生成されるもの

##### 3.4.1.1 Fuel -NO<sub>x</sub> の生成と挙動

燃料中に窒素化合物（Fuel N）が含まれていると、それが燃焼過程で NO に変換される。このような NO は Fuel -NO と称され、空気中の N<sub>2</sub> が起源となる NO(Thermal-NO)と生成過程が異なる。燃料中の窒素含有量は燃料の種類や産地により異なるが、一般的に表 3-5 に示す範囲にある。

表 3-5 燃料中の窒素含有率

| 燃料の種類    | 窒素含有率（重量%）    |
|----------|---------------|
| 原油（中東系）  | 0.09 ~0.22    |
| C 重油     | 0.1~0.4       |
| A 重油     | 0.050.1       |
| 軽油       | 0.02 ~0.03    |
| 灯油       | 0.0001~0.0005 |
| オイルコークス  | 1.12 ~ 2.59   |
| 石炭       | 0.2 ~3.4      |
| LPG・都市ガス | —             |
| LNG      | 0.1           |

|                      |          |
|----------------------|----------|
| 樹皮                   | 0.5      |
| バイオマス（木材・バガス・<br>籾殻） | 0.05~0.1 |
| 都市廃棄物                | 0.4~0.6  |

出典：Formation Mechanisms & Controls of Pollution in Combustion System, JSME ほか

石炭燃焼の熱分解過程における揮発分 NO の生成と Char NO 生成挙動について図 3-14 に示す。

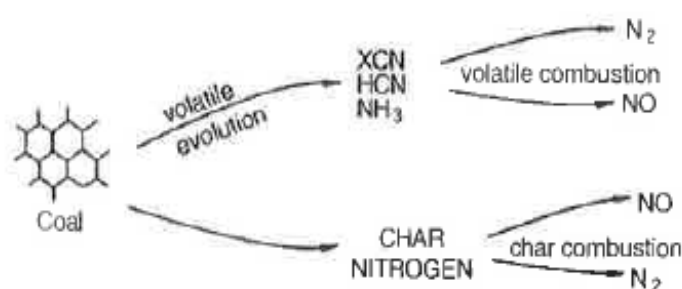


図 3-14 石炭中の N 分の燃焼過程における挙動

石油系に含まれる窒素化合物は、ピリジン(Pyridine,  $C_5H_5N$ )、キノリン(Quinoline,  $C_9H_7N$ )等の塩基性物質やピロール(Pyrrole,  $C_4H_5N$ )、インドール (Indole,  $C_8H_7N$ )、カルバゾール(Carbazole,  $C_{12}H_9N$ )等の非塩基性物質の環化合物がある。石炭系燃料に含まれる窒素化合物の構造は明確ではないが、複素環結合又は鎖状結合と考えられている。これらの結合は弱いので燃焼過程で  $N$ ,  $NH_i$  ( $i=1,2$ ) 等の化学種を放出しやすく、比較的低温でも NO に変換される。

仮に、 $C_mH_2n$  形燃料に 1%wt. の N 分が含まれている場合、これが全て NO に変換されると当量比 1 の理論乾き燃焼ガスにおいて 1,500ppm-mol ( $O_2=0\%$ 換算) となる。石炭や重質油の燃焼では相当量の Fuel-NOx が生成されることが予想される。

ガス燃料にも窒素分が含まれるものもあるが、その形態はほとんどが  $N_2$  であり、空気中の窒素と同じ挙動を示す。

Fuel-NOx の生成特性に影響する主要因子は、当量比、火炎温度、圧力、燃料種、窒素化合物 (fuel-N) の種類と濃度などである。実際のボイラにおける燃焼過程では、全ての N 分が NOx に変換するわけではない。重油の場合の転換率は N 分 0.1~0.2% で 60~40% である。また、固体燃料の場合、揮発成分から発生する Volatile-NOx と Char 中の N から発生する Char-NOx がある。Volatile-NOx の NOx 転換率は Char-NOx より大きい。Fuel-NOx の生成・消滅過程は、図 5.2 のような過程が報告されている。図中①Fuel-N の揮発化過程 (Volatile N

の生成)、②O<sub>2</sub>による Volatile N から NO<sub>x</sub> への転換、③Volatile N による生成 NO<sub>x</sub> の還元過程に大別できる。すなわち、Fuel NO<sub>x</sub> から HCN・NH<sub>3</sub> が生成し、その窒素化合物から NO<sub>x</sub> になる酸化反応と、生成した NO<sub>x</sub> が含窒素化合物により還元され N<sub>2</sub> へ転換する還元反応が並列に競合して起こる。図 5.3 に燃料中の N 分と Fuel NO<sub>x</sub> の関係を示す。

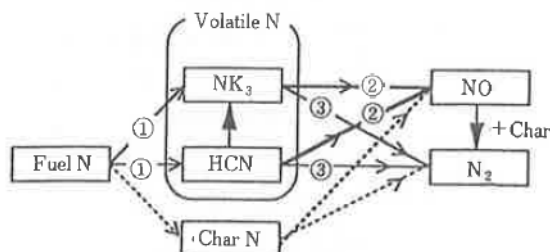


図 3-15 Fuel NO の生成・消滅の模式図

(出典：産業燃焼技術、ECCJ)

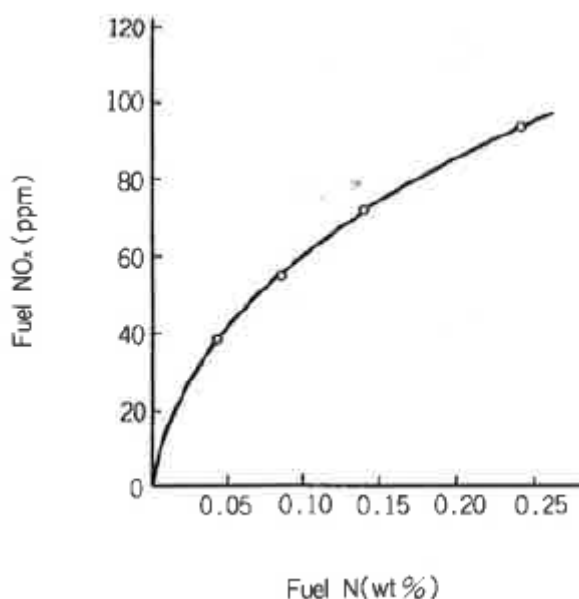
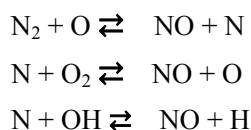


図 3-16 燃料中の N 分と Fuel NO<sub>x</sub> の関係

(出典：加藤、Low NO<sub>x</sub> Combustion Technology in Boiler, 紙パ技協誌 No.45-5、1991)

#### 3.4.1.2 Thermal -NO<sub>x</sub> の生成

Thermal -NO<sub>x</sub> は生成の特徴から Zeldovich-NO<sub>x</sub> と Prompt-NO<sub>x</sub> に分けられる。Zeldovich-NO<sub>x</sub> は火炎後流の高温燃焼ガス中で生成されるものであり、空気過剰並びに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 Zeldovich 機構で説明できる。



Zeldovich-NO は燃焼温度が高い程、 $O_2$  濃度が高い程、また高温での滞留時間が長いほど増加する。

この原理に基づいた各種の抑制法が希薄予混合燃焼、排ガス再循環、濃淡燃焼、水・水蒸気噴射、緩慢混合、二段燃焼などである。

燃焼反応が盛んな火炎部やその近傍では拡大 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 Prompt-NO と呼ぶ。この現象は炭化水素燃料特有のものであり、CO や  $H_2$  のときには見られない。生成は燃料過剰のときに多く、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。微粉炭燃焼では、揮発分燃焼域で粒子まわりの拡散火炎ゾーンにおける生成が数十 ppm 程度生成されるため、極低 NOx 微粉炭燃焼では無視できない。しかし、Prompt-NOx の生成絶対量は多くなく、一般には Zeldovich-NO が支配的で低減対策もその方向で取られている。

#### 3.4.2 窒素酸化物削減技術の基本原則

工業用ボイラの NOx 排出削減の基本的技術は、次の二つに分かれる。

NOx 生成原理から、生成抑制を目的とする技術

- ① 燃料中の N 分低減化
- ② 低空気比燃焼（低  $O_2$  濃度）
- ③ 火炎温度の低下
- ④ ガス滞留時間の短縮

排ガス中の NOx 濃度の削減除去を目的とする技術

- ① NOx を  $N_2$  と  $H_2O$  に還元する
- ② 活性炭を用いて NOx を選択除去する

発電用ボイラで実際利用されている各技術は後述 4 で説明する。

#### 3.4.3 窒素酸化物（NO、NO<sub>2</sub>）の環境影響等

NOx は燃焼によって発生するものは、NO と NO<sub>2</sub> であり、NOx はこの総称である。

ボイラなどの一般燃焼装置から排出される燃焼ガスでは、NO/NOx 比は 90~95%vol が NO である。NO の毒性は NO<sub>2</sub> より低いという報告があるが NOx としての環境影響は次の通り

- ① 人体に対する影響

NO<sub>2</sub> は粘膜の刺激、気管支炎、肺水腫などの原因、NO は生理機能への影響がある。

NO<sub>2</sub> 暴露の影響は感染抵抗性の減弱を引き起こし、動物実験では、0.5ppm 以上で呼吸器感染に対する抵抗力の低下が確認されている。

## ② 酸性雨

NO<sub>x</sub> は SO<sub>x</sub> とともに、酸性物質降下物質の原因となり、森林生態系や水環境の劣化の原因とされている。

## ③ 化学系スモッグの生成

NO<sub>x</sub> と不飽和の炭化水素に、強力な紫外線が照射されると光化学反応が起こり、オゾン、PAN などの酸化力の強い物質が二次的に生成される。一般に光オキシダント (O<sub>x</sub>) の 90%以上はオゾンである。0.15~0.25ppm - 2hr の気道刺激症状（せき、胸部不快感など）と肺機能低下が現れる。

## ④ 地球温暖化への影響

温暖化の環境への影響については IPCC 報告書に詳しいが、マラリアや黄熱病などの媒介性伝染病の増加等の健康に対する影響、異常気象、海面上昇、植物種等の自然環境、食料生産への影響などが指摘されている。N<sub>2</sub>O は人為的な温室効果ガスとされており、また、成層圏で NO に変わり、オゾン層の破壊を起こす。

### ➤ N<sub>2</sub>O の温室効果寄与度

IPCC の発表（1995 年）では、ボイラや自動車などから人為的に排出された温室効果ガスによる地球温暖化への直接寄与度において、N<sub>2</sub>O は CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> に次ぎ、濃度が低いにもかかわらず、温暖化係数が大きいため、寄与度 5.7%と高い。表 3-6 に主要温室効果ガスの温暖化係数と濃度を示す。

表 3-6 主要温室効果ガスの温暖化係数と濃度

|           | CO <sub>2</sub> (ppmv) | CH <sub>4</sub> (ppbv) | N <sub>2</sub> O(ppbv) |
|-----------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 温暖化係数*    | 1                      | 21                     | 310                    |
| 1994 年の濃度 | 358                    | 1720                   | 312                    |
| 1900 年以前  | 280                    | 700                    | 275                    |

\* 温暖化係数： CO<sub>2</sub>= 1 とした 100 年間及ぼす効果

出典：IPCC-環境庁資料（1995）

## 4 石炭火力発電用ボイラにおける窒素酸化物の排出削減対策技術

### 4.1 燃焼場における窒素酸化物生成抑制技術

#### 4.1.1 生成抑制技術

NO<sub>x</sub> の生成原理から、燃焼場における発生を抑制する必要がある。特に工業用ボイラは取扱や経済性に制約されるため、燃焼場での生成量削減が重視される。生成要因と適用抑制技術の関係は燃焼方式に関わらず、図 4-1 に示すように大別すれば燃料改善、燃焼改善による技術に分けられる。

##### 【燃料改善】

- a. 有機窒素化合物の含有率の低い燃料を使用すること。

##### 【燃焼改善】

- a. 燃焼域での O<sub>2</sub> 濃度を低くすること。(O<sub>2</sub> 濃度の低下)
- b. 高温域での燃焼ガスの滞留時間を短くすること。(ガス滞留時間の短縮)
- c. 燃焼温度を低くする。特に局所的高温域をなくすこと。(火炎温度の低下)

これらの何れかの方法または組み合わせを応用することで NO<sub>x</sub> の生成を低減することが出来る。

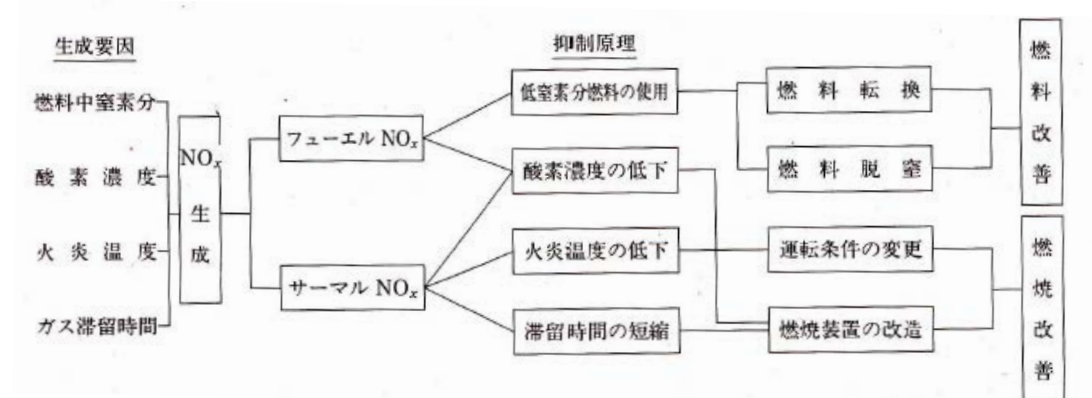


図 4-1 NO<sub>x</sub> 生成抑制技術

#### 4.1.2 各種の低 NO<sub>x</sub> 燃焼技術

実際の NO<sub>x</sub> 生成抑制法における燃焼改善技術としては次のような方法が採用されている。事業火力では微粉炭燃焼（バーナ燃焼）、流動層燃焼が、自家発電では、小型出力に移動床ストーカ燃焼や気泡流動層燃焼、中大出力に循環流動層や加圧流動層燃焼が利用されている。全ての石炭燃焼に共通する NO<sub>x</sub> 生成抑制技術として次の方法が適用されている。

- ① 過剰空気率の低下：日本の現状の石炭火力では既に省エネルギー方策が実施されており、空気比調整による NO<sub>x</sub> 低減は望めない状況にある。表 6.1 は電気

事業法適用の自家発電石炭火力の微粉炭焚きボイラの基準空気比/目標空気比である。

発電用ボイラには一般工業用ボイラより厳しい管理基準が定められている。

表 4-1 基準/目標空気比

| 負荷率 %      | 基準空気比    | 目標空気比     |
|------------|----------|-----------|
| 75～100     | 1.15～1.3 | 1.15～1.25 |
| (参考)50～100 | 1.3～1.45 | 1.2～1.3   |

参考は一般工業用ボイラの適用値

(出典：省エネルギー法別表 1-A,B)

- ② 燃焼用空気温度の低下：一般に燃料用空気温度は 250～350℃程度で運用されているがこの温度を下げる方法
- ③ 二段燃焼：燃料用空気を二段に分けて供給する方法、図 4-2 は二段燃焼の概念図である。
- ④ 排ガス再循環：燃焼排ガスの一部を燃焼用空気に混入して、燃焼用空気の O<sub>2</sub> 濃度を下げ、燃焼温度を下げる方法。循環量は 20～30%が限界である。
- ⑤ 低 NO<sub>x</sub> バーナの適用・改善：バーナ構造により NO<sub>x</sub> 生成を抑制する方法  
低 NO<sub>x</sub> バーナの NO<sub>x</sub> 生成抑制効果上、具備すべき機能として次の基本的な三方法がある。実際採用されているバーナはこれらの単独機能又は組み合わせた機能で多くの型式のバーナが開発されている。
  - i 燃焼と空気の拡散混合を緩慢にする。(火炎温度の低下効果)
  - ii 燃焼を不均一化を促進する。(火炎分布の粗密化)
  - iii 火炎の熱放射を促進する。(高温燃焼ガスの滞留時間の短縮)
 現在実用されている低 NO<sub>x</sub> 型微粉炭バーナの代表事例を紹介する。

#### a. 二段燃焼法(バーナ燃焼)

燃焼を二段に、あるいはそれ以上に分けて供給するもので、燃焼空気を多段にする方式と、燃料を多段にする方式がある。空気二段法では一段目で空気比を絞り燃料過剰燃焼を行い、二段目で残りの燃焼用空気を新たに吹込み燃料希薄燃焼する方式である。一段目では、ピークの燃焼温度が抑えられるため、Thermal -NO<sub>x</sub> が抑制され、空気比が低いため燃料過剰燃焼条件下で Fuel -NO<sub>x</sub> が抑制できる。しかし、不完全燃焼や不安定燃焼が生じやすく、煤塵や CO の発生に注意する必要がある。一般には大出力ボイラに適する。図 4-3 に燃料二段吹込燃焼の原理を示すが、この方法では一段目燃料希薄燃焼が完了した位置に二次燃料が吹き込まれる。一段目で生成した NO は、CmHn ラジカルによって還元され、更に三次空気によって燃焼除去される。図 4-4 及び図 4-5 に 2 社の異なる型式の二段燃焼-旋回流

組合形低 NO<sub>x</sub> バーナ（微粉炭用）を示す。

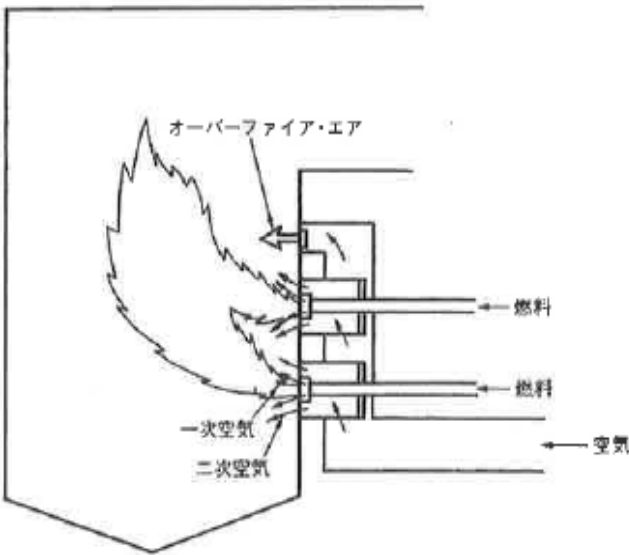
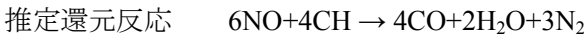
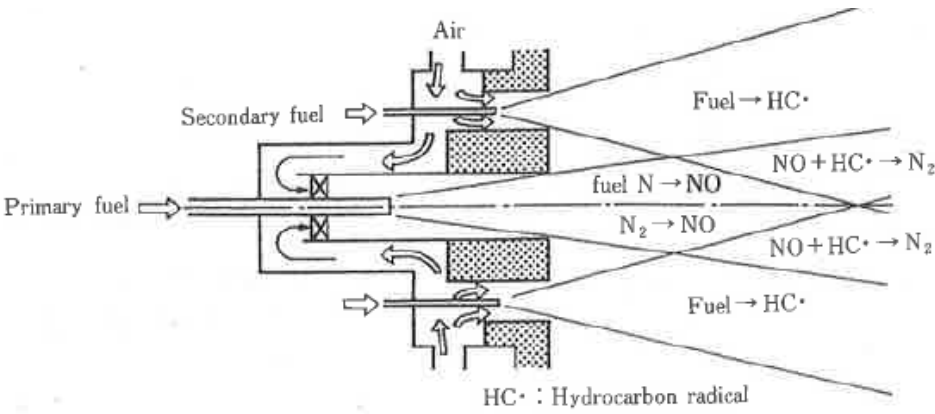


図 4-2 二段燃焼法の概念図



(出典：火力原子力発電、No.691, Vol65、2014)

図 4-3 燃料二段吹込法の原理

(出典：産業燃焼技術、ECCJ)

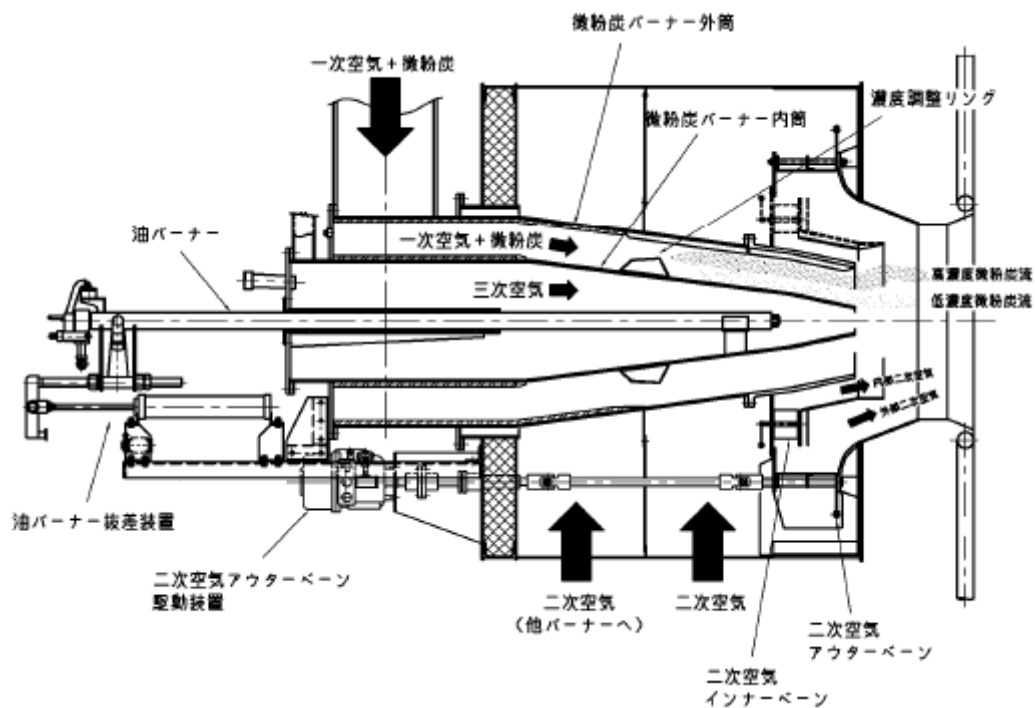


図 4-4 二段燃焼低 NO<sub>x</sub> バーナ（微粉炭用）

(出典：IHI)

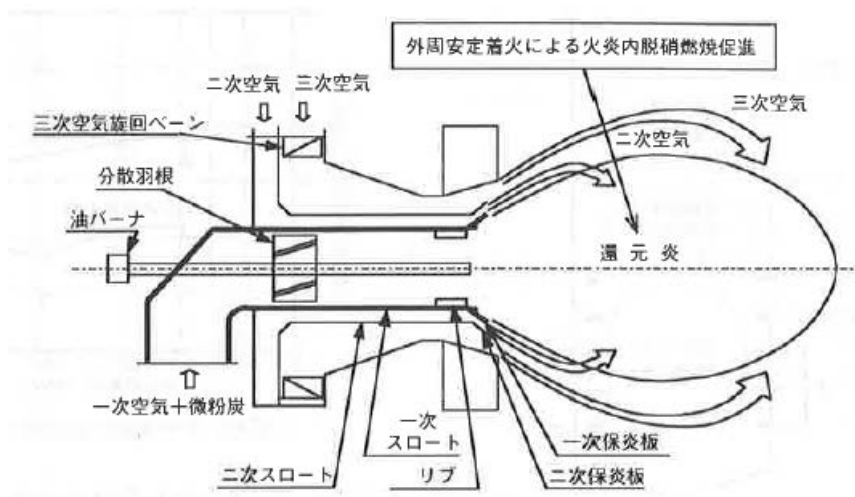


図 4-5 低 NO<sub>x</sub> 微粉炭バーナ

(出典：環境省資料、川崎プラント)

**b. 排ガス再循環(EGR : Exhaust Gas Recirculation) (バーナ燃焼)**

燃焼排ガスの一部を再循環して燃焼用空気に混合させ、火炎温度を低下させる作用と  $O_2$  分圧を低下させる両作用により  $NO_x$  の生成を抑制する方法である。排ガスの  $O_2$  濃度は燃料によって異なるが油燃料では約 3~5%vol であるため、バーナ部での混合燃焼用空気の  $O_2$  %は空気のみの場合 (21%vol) より下がり  $NO_x$  低減効果がある。Fuel- $NO_x$  の低減には殆ど効果はない。図 4-6 は排ガス再循環法の概念図である。

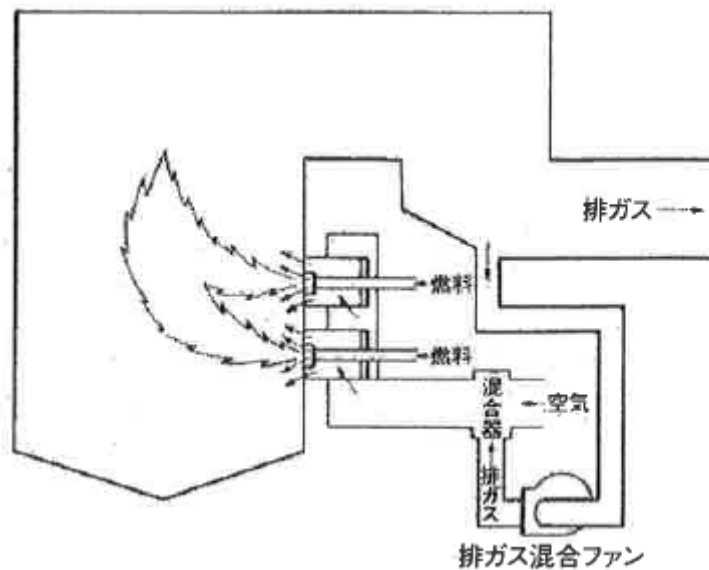


図 4-6 排ガス再循環法の概念図

(出典 : 火力原子力発電、No.691, Vol65、2014)

**c. 濃淡燃焼(バーナ燃焼)**

複数本のバーナを装備しているボイラにおいて、燃料過剰バーナと燃料希薄バーナを交互もしくは適当に配列させて燃焼室内で燃焼させる方式で、全体の燃焼温度が下げる効果がある。燃焼用空気量・燃料の総量は変わらない。大出力のボイラで採用される。1 個のバーナノズル自身で噴射ノズル径を変えて火炎に濃淡を付けて燃焼させる方法もある。図 4-7 に濃淡燃焼+二段燃焼組合型低  $NO_x$  バーナを示す。

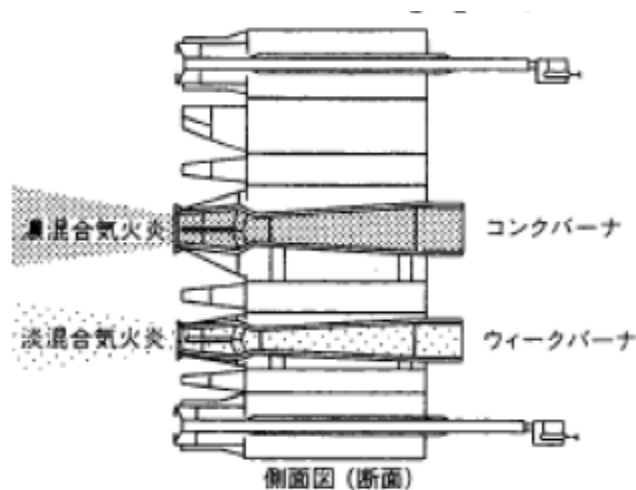


図 4-7 濃淡燃焼+二段燃焼組合理型低 NO<sub>x</sub> バーナ（微粉炭用）

（出典：三菱重工業）

#### d. 低 NO<sub>x</sub> バーナ

バーナ構造による NO<sub>x</sub> 抑制には基本的な次の三つの方法がある。

- 燃焼と空気の拡散混合を緩慢にする
- 燃焼の不均一化を促進する
- 火炎の熱放射を促進する

これらの効果を得るために次のような多くの型式の低 NO<sub>x</sub> バーナが開発されている。

- ① 急速燃焼型：燃料と空気の混合を促進させ放熱による燃焼温度の低下と高温での滞留時間の短縮により Thermal -NO<sub>x</sub> を低減させるもの(図 4-8 参照)
- ② 緩慢燃焼型：燃焼用空気及び燃料噴出流速の低下により燃焼域を拡大させ、火炎温度の低下及び O<sub>2</sub> 濃度の低下により NO<sub>x</sub> 生成の抑制をはかるもの
- ③ 火炎分割型：火炎を複数の独立したものに分割し、火炎温度の低下と滞留時間の短縮により Thermal -NO<sub>x</sub> を抑制するもの
- ④ 段階的燃焼型：燃焼用空気や燃料を多段に分けて段階的に供給するもので、一段目では低過剰空気で、二段目以降では十分な空気を供給して完全燃焼させる。燃焼温度の低下、均一化、一段目の低過剰空気燃焼により、Thermal/Fuel -NO<sub>x</sub> の両方が抑制できる。

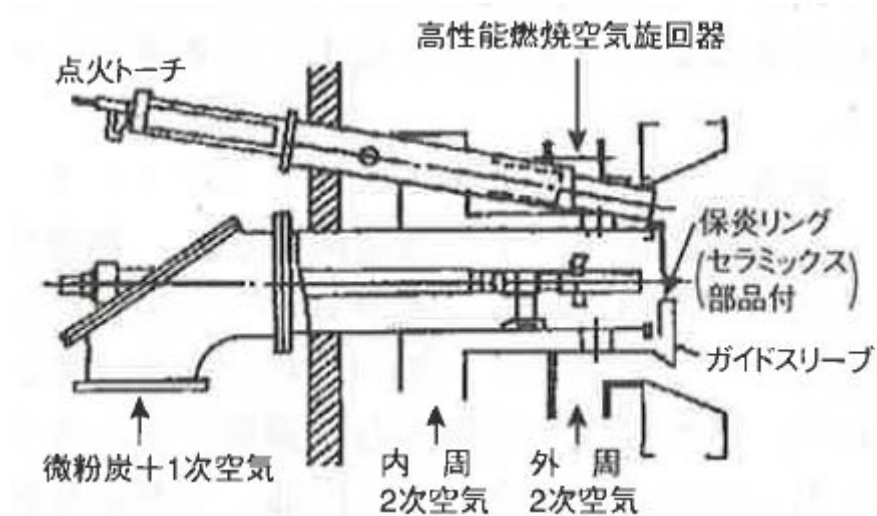


図 4-8 微粉炭 NR バーナ

(出典：環境省資料、日立)

#### e. 炉内脱硝法

燃焼室内で生成した  $\text{NO}_x$  を、燃焼室内で炭化水素により還元するものがある。

還元する条件として、炭化水素の分解温度の  $900^\circ\text{C}$  以上であること、 $\text{O}_2$  が存在すること、還元用炭化水素量が存在する  $\text{O}_2$  の化学当量より多いことである。雰囲気温度が未燃分の反応温度以上であること。未燃分を完全に消去するのに十分な燃焼用空気が供給されることなどである。 図 4-9 は炉内脱硝概念図である。

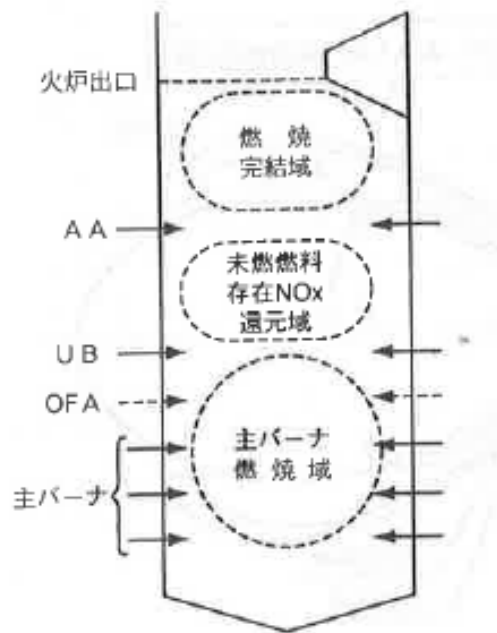


図 4-9 炉内脱硝概念図

#### 4.1.3 ストーカ 燃焼

ストーカ燃焼では先述したように主に固定炭素が表面燃焼を行い、その燃焼で発生するCOと大部分の揮発分は炉の空間部でガス燃焼を行う。NO<sub>x</sub>生成特性は形式の差異はあるが、一般的に微粉炭燃焼に近い次のような特性がある。

- 燃料中のN分が多いとNO<sub>x</sub>生成量が多い。
- 燃料比が高い石炭はNO<sub>x</sub>生成量が多い。

また、灰分が多い石炭は相対的にNO<sub>x</sub>生成が多い。石炭中のN分とO<sub>2</sub>濃度の関係例を図4-10に示す。ストーカ燃焼では、空気比が大きくなりO<sub>2</sub>濃度が増加するほど、またN分が増加するほど直線的にNO<sub>x</sub>濃度は増加の傾向を示す。

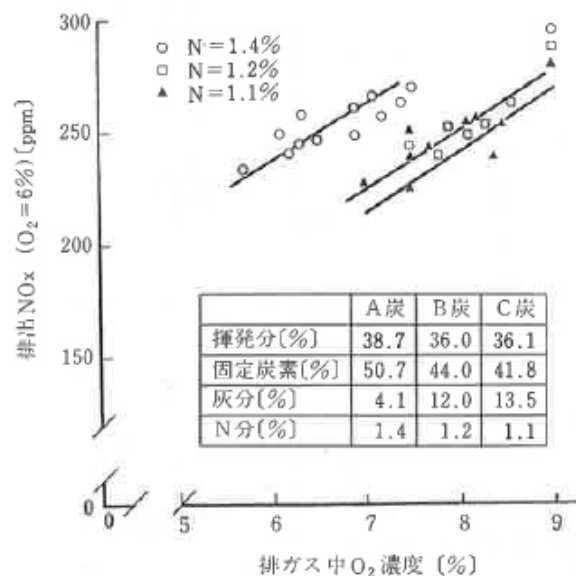


図 4-10 石炭中の N 分/O<sub>2</sub> 濃度の関係例

(出典：産業燃焼技術, JFRC, p171)

#### 4.1.4 流動層燃焼

流動層温度と NO<sub>x</sub> 生成量は正の相関がある。工業用ボイラでは通常燃焼温度は 900℃以下であり、Thermal -NO<sub>x</sub> の生成は少なく、燃料中の N 分に起因する Fuel -NO<sub>x</sub> が占める。石炭では石炭中の N 分量より N の結合状態の影響が支配的という報告がある。なお、炉内脱硫を行うため石灰石を炉内に投入する場合、NO<sub>x</sub> の生成量を増加させるため、燃焼ガス中の飛灰を再循環して石灰石の使用量を低減することが重要である。

図 4-11 に石炭燃料の循環流動層燃焼における燃焼温度と NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub> の事例を示す。図 4-12 は同じく炉出口の O<sub>2</sub> 濃度と NO<sub>x</sub>/SO<sub>2</sub> の関係を示す。循環流動層燃焼では、炉底部、炉中央部と二段に分けて空気を挿入する二段燃焼により、抑制効果が図れる。脱硫効果は温度が 830℃以下では石灰石の仮焼が進行しないため脱硫率は低下する。

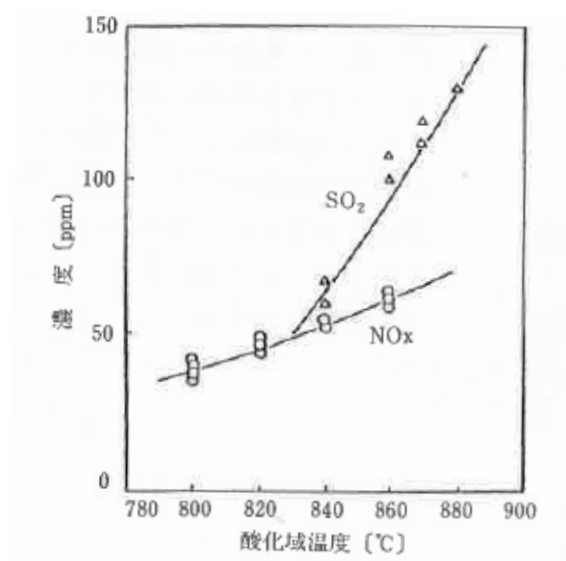


図 4-11 燃焼温度と  $\text{SO}_2 \cdot \text{NO}_x$  の関係  
(出典：産業燃焼技術,JFRC, p170)

( $\text{Ca/S}$  比=3,  $\text{CaO}$  を加えない場合の  $\text{SO}_2$  は 500ppm)

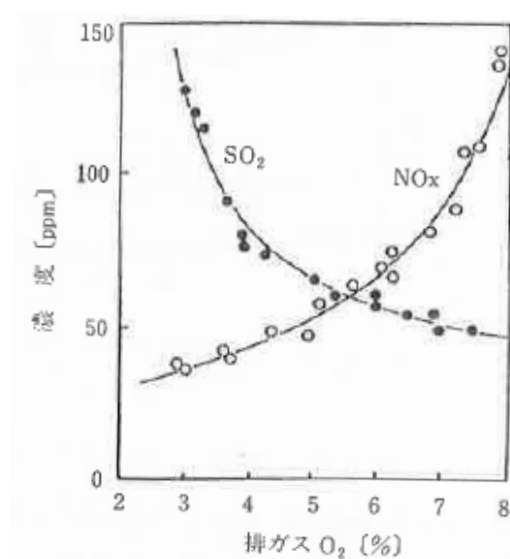


図 4-12  $\text{O}_2$  濃度と  $\text{SO} \cdot \text{NO}_x$  の関係 (出典：産業燃焼技術,JFRC, p171)

( $\text{Ca/S}$  比=3,  $\text{CaO}$  を加えない場合の  $\text{SO}_2$  は 500ppm)

#### 4.1.4.1 運転条件の改善

低  $\text{NO}_x$  化の改善技術として現状の空気比や燃焼室負荷、空気予熱温度の運転条件を変える方法がある。

#### a. 低空気比燃焼

空気比の NO<sub>x</sub> に及ぼす影響としては、空気比の変化に伴う温度変化と、O<sub>2</sub> 濃度変化が因子として作用する。Fuel -NO<sub>x</sub> は空気比に比例して増加するが、Thermal -NO<sub>x</sub> は凸形の特性をもつ。通常のボイラの運転では、空気比はこの最大値よりも低空気比側にあり、その為、NO<sub>x</sub> 低減には低空気比燃焼が採用される。空気比低下に伴い燃焼性が劣化する傾向から CO や煤塵の発生に注意が必要である。

#### b. 燃焼室熱負荷の低減

燃焼室熱負荷が NO<sub>x</sub> に与える影響は、負荷の差異により、火炎及び燃焼室ガス温度と炉内滞留時間等が関連しており、燃料と空気の混合状況や火炎からの放熱状況が変化することにも関係する。

工業用ボイラの小型化、高効率化を図るため燃焼室熱負荷を高く設定される傾向にあるが NO<sub>x</sub> 対策の適用範囲は制約される。

#### c. 空気予熱温度の低下

燃焼用空気温度は Thermal -NO<sub>x</sub> の増加につながる。予熱温度を低下すれば火炎温度及び燃焼場の雰囲気温度が低下し NO<sub>x</sub> は減少する。ボイラ効率や煤塵増加と NO<sub>x</sub> 低減率を比較検討する必要がある。平衡通風方式のボイラでは、燃焼室が負圧のため、吸引する空気は過剰空気となるだけでなく適正な燃焼制御が不可になるため管理し防止する必要がある。

### **4.1.5 運転条件の改善**

低 NO<sub>x</sub> 化の改善技術として現状の空気比や燃焼室負荷、空気予熱温度の運転条件を変える方法がある。

#### a. 低空気比燃焼

空気比の NO<sub>x</sub> に及ぼす影響としては空気比の変化に伴う温度変化と、O<sub>2</sub> 濃度変化が因子として作用する。Fuel NO<sub>x</sub> は空気比に比例して増加するが Thermal NO<sub>x</sub> は凸形の特性をもつ。通常のボイラの運転では、空気比はこの最大値よりも低空気比側にあり、その為、NO<sub>x</sub> 低減には低空気比燃焼が採用される。空気比低下に伴い燃焼性が劣化する傾向となるため CO や煤じんの発生に注意が必要である。

#### b. 燃焼室熱負荷の低減

燃焼室熱負荷が NO<sub>x</sub> に与える影響は、負荷の差異により、火炎及び燃焼室ガス温度と炉内滞留時間戸が関連し、燃料と空気の混合状況や火炎からの放熱状況が変化することにも

関係する。

工業用ボイラの小型化、高効率化を図るため燃焼室熱負荷が高く設定される傾向にあるが NOx 対策の適用範囲は制約される。

#### c. 空気予熱温度の低下

燃焼用空気温度は Thermal NOx の増加につながる。予熱温度を低下すれば火炎温度及び燃焼場の雰囲気温度が低下し NOx は減少する。ボイラ効率や煤じん増加と NOx 低減率を比較検討する必要がある。平衡通風方式のボイラでは、燃焼室が負圧のため、吸引する空気は過剰空気となるだけでなく適正な燃焼制御が不可になるため管理し防止する必要がある。

## 4.2 排煙脱硝技術

### 4.2.1 排煙脱硝装置の付加条件

工業用ボイラの排煙脱硝装置は下記の条件を付加しなければならない。

- 脱硝率が高いこと
- 長時間にわたり安定した運転が可能であること
- 負荷変動に対する追従性を有すること
- 経済性に優れていること
- 二次公害を発生しないこと

### 4.2.2 排煙脱硝装置

石炭火力の排ガス処理における排煙脱硝設備の代表的なプロセス構成を図 4-13 に、図 4-14 に高煤じんの排煙脱硝措置の系統例を示す。煤じん濃度により集塵装置の前後設置が選択されている。

石炭火力用ボイラで導入されている排煙脱硝装置の方式と原理を表 4-2 に示す。

表 4-2 排煙脱硝装置の方式と原理

| 方式               | 原理                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 選択接触還元法<br>(SCR) | 還元剤として NH <sub>3</sub> を用い、触媒上で NO <sub>x</sub> を選択的に還元除去する。<br>乾式、排ガス量が多い処理に適する。<br>反応式 $4\text{NO} + 4\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$<br>$\text{NO} + \text{NO}_2 + 2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$ |
| 無触媒還元法<br>(SNCR) | 高温度域、無触媒条件下で NH <sub>3</sub> を注入して NO <sub>x</sub> を還元除去する。<br>$4\text{NO} + 4\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ (脱硝反応)<br>$4\text{NH}_3 + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ (薬剤燃焼反応)                       |
| 活性炭吸着法           | 活性炭を用い、NH <sub>3</sub> を注入して NO <sub>x</sub> を選択除去すると同時に SO <sub>x</sub> を吸着除去する。                                                                                                                                                                                         |

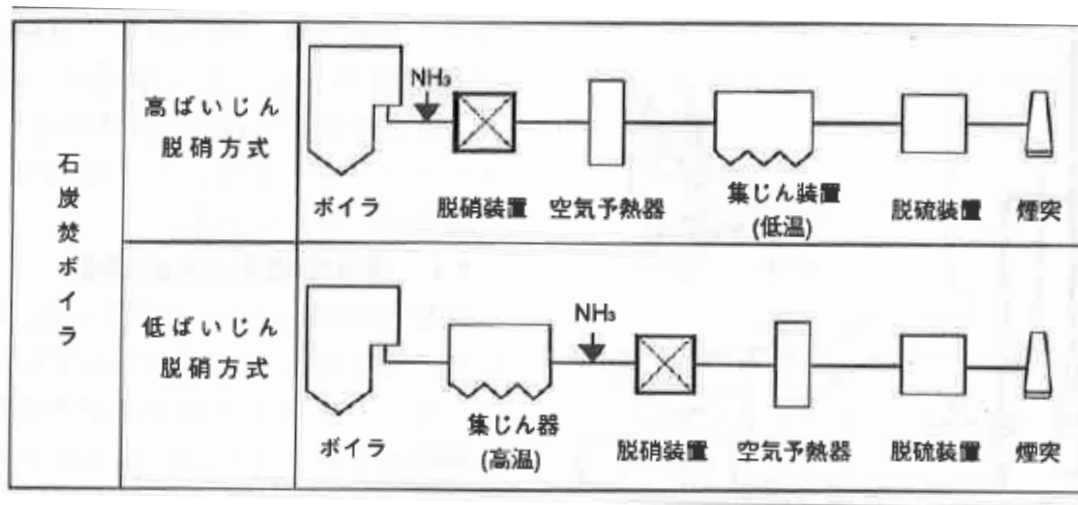


図 4-13 排煙脱硝設備の代表的なプロセス構成

(出典：火力原子力発電技術協会)

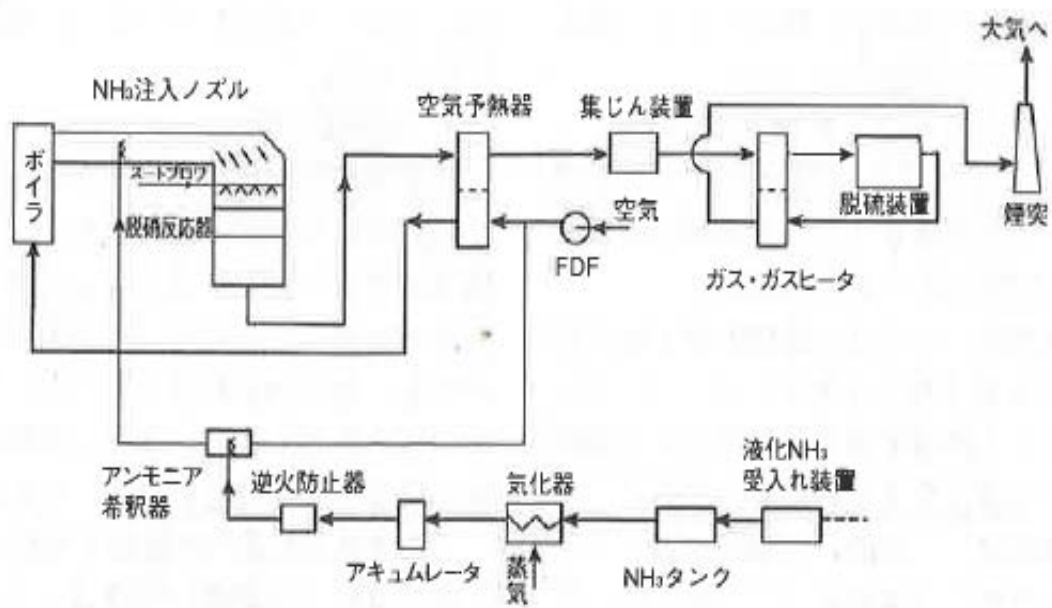


図 4-14 高煤じんの排煙脱硝措置の系統例

(出典：火力原子力発電技術協会)

① 選択接触還元法(SCR)

反応は触媒を介した NO と NH<sub>3</sub> との等モルで反応であり、ガス温度が 350~400℃付近で優先的に進行する。ボイラ燃焼ガスのこの温度域に設置されて、80%を超える脱硝効果が可能である。触媒の形状は、粒状、板状、格子状、円筒状等があるが、石炭燃料では目詰まりを防止するため、板状、格子状の触媒が多く使用されている。脱硝触媒は、ガス中のダスト、SO<sub>x</sub>、アルカリ金属により劣化する。集塵装置との設置個所やガス温度に留意する必要がある。本方式は日本で開発され海外に技術輸出されており普及率が高い。プロセスが簡単で、運転が容易であり、トラブルの少ない装置である。廃水や副生成物がなく、運転操作が単純なためガス発生源と容易に協調できる特徴を有する。可動部分がほとんどないため、故障例は少ない。主な管理は、触媒の性能管理となる。主な現象として、リークアンモニアによる空気予熱器や後流機器の一部閉鎖、脱硝装置入口部の灰の堆積、アンモニア注入部の故障がある。石炭未燃灰の微粒子は触媒の目詰まりの原因となる。

脱硝触媒はガス性状により経年劣化等により性能が低下する。一般に一部の触媒の取替や積み増しで性能回復を図る。耐用期間は、燃料種や劣化成分（Na、K、Ca 等）状況、強度、比表面積、細孔容積等により異なる。一般的に寿命は石炭焚き<油焚き<ガス焚き順に長い。また触媒の性能を回復する再生方法も普及している。

表 4-3 工業用微粉炭焚きボイラの SCR 設置条件の目安事例

|       | 事例Ⅰ         | 事例Ⅱ       | 事例Ⅲ      |
|-------|-------------|-----------|----------|
| 圧力損失  | 0.5~2 kPa   | ~100 mmWC | ~100mmWC |
| ガス温度  | ≒ 350~400 ℃ | 300~550 ℃ | 180~550℃ |
| 脱硝率   | <80 %- 90 % | ~95 %     | ~95%     |
| 反応塔圧損 | <60 mmWC    |           |          |

表 4-4 に排ガスの種類別触媒性能劣化の要因を示す。石炭焚き選択接触還元脱硝システムの代表的な設備構成を図 4-15 に、排ガス煙道における脱硝プロセスの設置例を図 4-16 に、各形状の脱硝触媒を図 4-17、図 4-18 に示す。図 4-19 は石炭焚きボイラの選択接触還元法脱硝制御事例である。

表 4-4 排ガスの種類別触媒性能劣化の要因

| 排ガス種類       | 廃棄物 | ガス | 油 | 石炭 |
|-------------|-----|----|---|----|
| 熱的劣化        | ○   | ◎  | ○ | ○  |
| 化学的劣化（触媒被毒） | ◎   |    | ◎ |    |
| 物理的劣化（ダスト）  |     |    |   | ◎  |

◎主要劣化要因 ○劣化要因

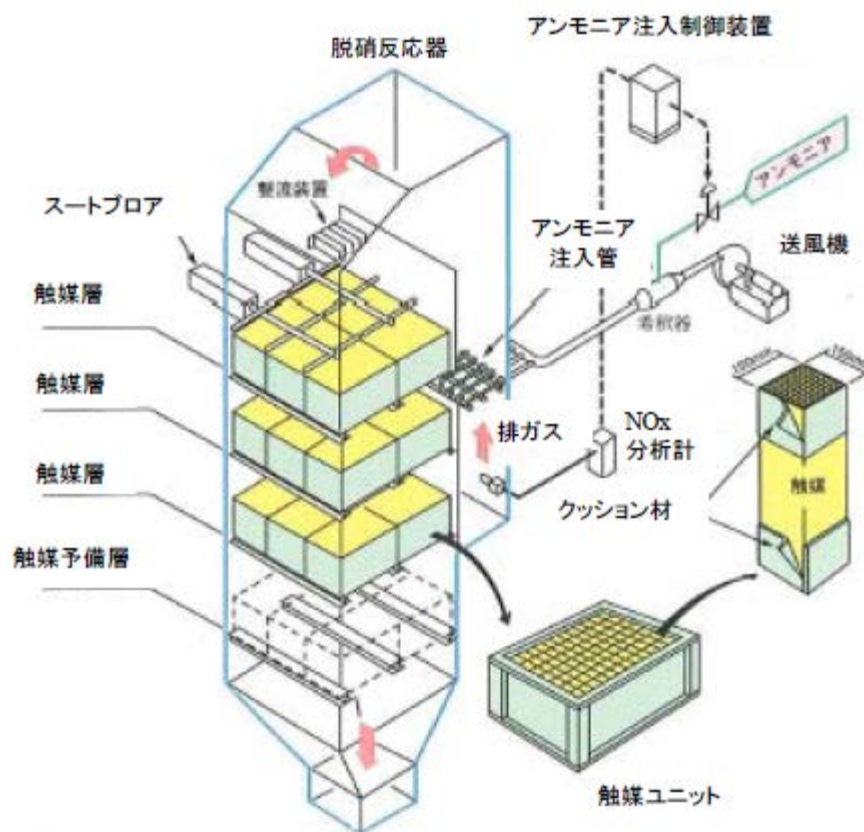


図 4-15 石炭焼き選択接触還元法脱硝システム

(出典：川崎重工業)

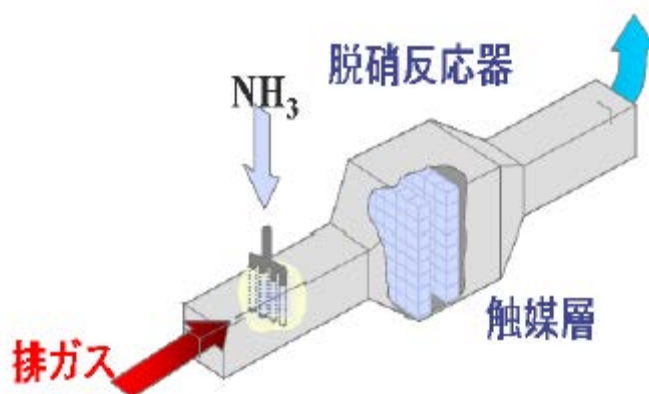


図 4-16 選択接触還元法（SCR）脱硝プロセス

(出典：IHI)

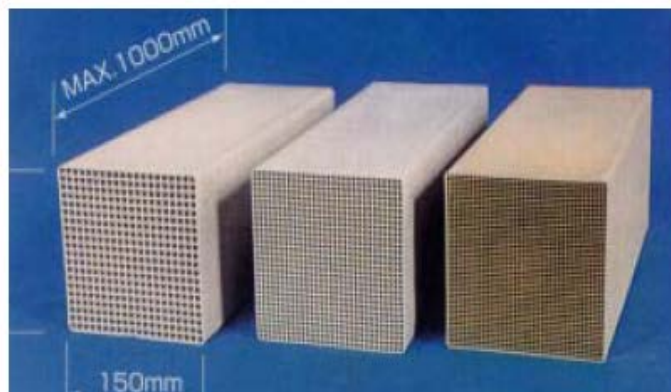


図 4-17 ハニカム形脱硝触媒

(出典：IHI)



図 4-18 各種形状の脱硝触媒の事例

(出典：堺化学)

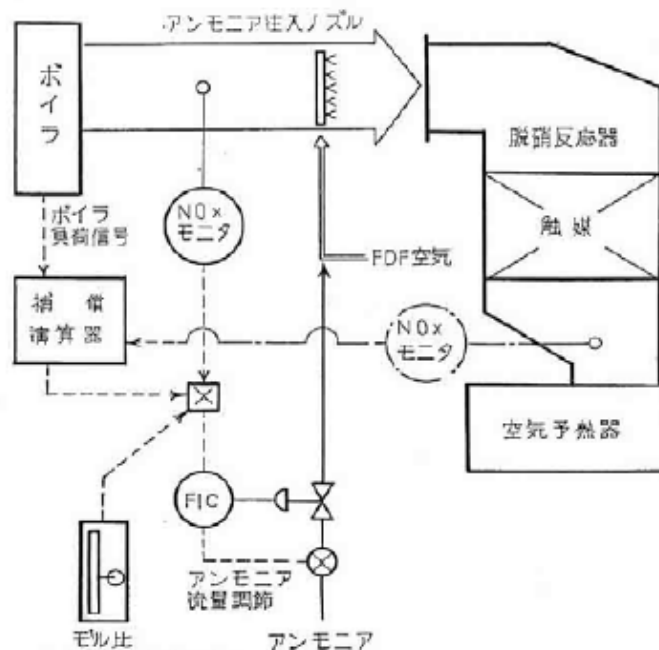


図 4-19 石炭焚きボイラの選択接触還元法脱硝制御事例

(出典：火力原子力発電誌1984)

## ② 無触媒還元法 (SNCR)

燃焼ガス中の高温域 (800~1050℃) に  $\text{NH}_3$  や  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  などの還元剤を噴霧して還元させ  $\text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$  にする。反応に要する滞留時間は 0.1sec 以上、可能なら 0.4sec 以上が好ましい。脱硝率は 40~50%程度である。負荷変動やガス温度の変化への対応策が必要である。還元剤の噴霧量増加により、除去性能は向上するが未反応分がリークアンモニアとして放出する。また、ガス中の  $\text{SO}_2$  等と反応して硫酸アンモニウムを生成し白煙発生が生じる。図 4-20 は 還元剤 ( $\text{NH}_3$ ) 吹込み要領の事例である。

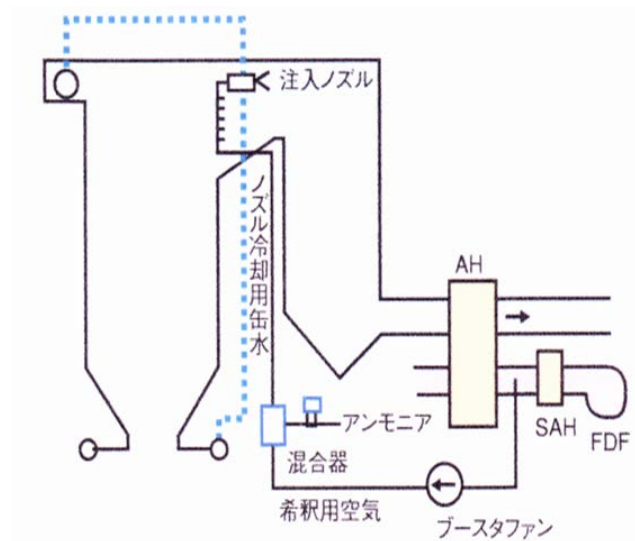


図 4-20 還元剤 (NH<sub>3</sub>) 吹込み要領事例

### ③ 活性炭吸着法

180~200℃前後に冷却した排ガス中に NH<sub>3</sub> を注入し、活性炭等の炭素系触媒を接触させると NO<sub>x</sub> は NH<sub>3</sub> により還元され N<sub>2</sub> に分解される。脱硝のほか脱硫、ダイオキシン等の汚染物質も除去できる。金属精錬用排熱回収ボイラや廃棄物焼却用排熱ボイラに導入事例がある。脱硝効率は 40~80%、吸着能力が低下した活性炭は再生工程で循環して再生利用される。

図 4-21 に活性炭吸着法排煙脱硝システムのフロー事例を示す。

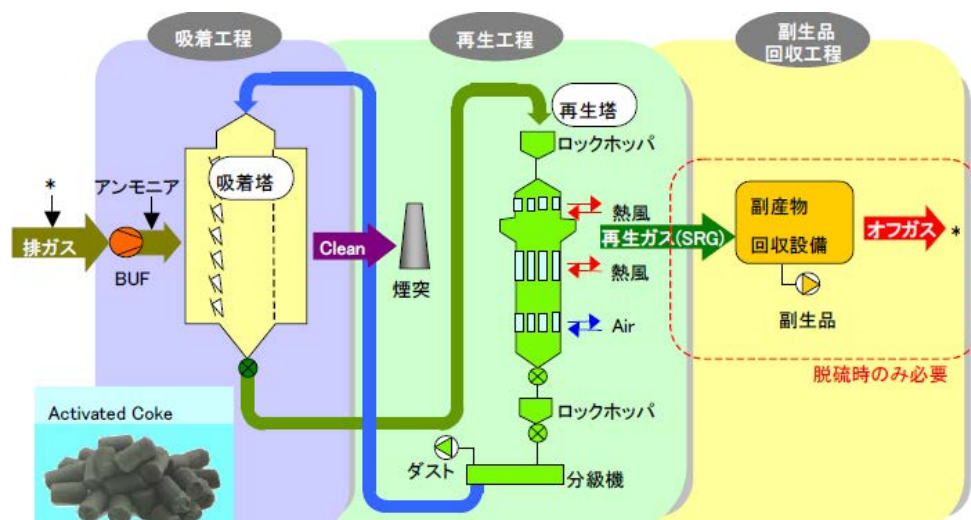


図 4-21 活性炭吸着法排煙脱硝システム

(出典 : J-Power En Tech)

「参考」

石炭燃焼ボイラで生成・排出される NO<sub>x</sub> 等燃焼生物の一般的濃度

| 燃焼生成物                     | 微粉炭燃焼   |      | 流動層燃焼             |      | ストーカ燃焼            |
|---------------------------|---------|------|-------------------|------|-------------------|
|                           | 発電用     | 工業用  | BFC               | CFBC |                   |
| NO <sub>x</sub> (ppm)     | ~60     | ~200 | ~300              | ~150 | ~300              |
| N <sub>2</sub> O (ppm)    | ~5      | ~5   | ~50               | ~150 | ~20               |
| SO <sub>x</sub> (ppm)     | ~50     | ~50  | ~100              |      | ~300              |
| CO (ppm)                  | ~50     | ~150 | ~150              |      | ~300              |
| 煤じん (mg/m <sup>3</sup> N) | ~50     |      | ~5                |      | ~50               |
| 捕集灰の未燃分(%wt)              | ~5      | ~15  | ~10               |      | ~45               |
| 排煙処理                      | 排煙脱硫脱硝付 |      | ESP or Bag Filter |      | ESP or Bag Filter |

## 5 その他の環境保全対象と対策技術

発電用ボイラが発生源となる環境汚染には、大気汚染分野において、NO<sub>x</sub> 以外に環境基準に抵触する「煤じん」「SO<sub>x</sub>」「ダイオキシン類」等がある。また水質汚濁源では、ブロー水や洗煙排水が SS や pH 規制の対象となる。送風機、空気圧縮機、ポンプ類等で発生する振動・騒音や燃料等から拡散する臭気も環境汚染の防止対策を講じる必要がある。

表 7.1 は代表的な環境保全対策の対象分野と対策技術の概要である。

表 5-1 代表的な環境保全対象分野と対策技術の概要

| 対象分野 | 汚染物質等                               | 発生源                             | 防止対策技術                                         |
|------|-------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------|
| 大気汚染 | 煤じん                                 | 燃焼排ガス                           | 各種集塵機                                          |
|      | 粉じん                                 | 灰、石炭・木粉などの燃料                    | 各種集塵機、ヤードの密閉                                   |
|      | SO <sub>x</sub>                     | 含 S 燃料の燃焼                       | 燃料転換、脱硫装置                                      |
|      | HCl                                 | 燃料の燃焼（ガス・廃棄物など）                 | 吸着処理装置                                         |
|      | Hg                                  | 石炭燃焼等                           | 吸着処理装置                                         |
|      | ダイオキシン類                             | 廃棄物等の燃焼、オフガス                    | 吸着処理装置、燃焼改善                                    |
|      | 重金属類                                | 廃棄物等の燃焼、                        | 吸着処理装置                                         |
| 水質汚濁 | 高 pH/低 pH                           | 各種ブロー、洗煙排水、冷却水                  | 中和処理                                           |
|      | 高 SS・溶解塩                            | 燃料ヤード排水、灰処理<br>排煙排水             | 凝集沈殿処理など                                       |
|      | 重金属類<br>濁質                          | 廃棄物等の灰処理・洗煙排水<br>化学洗浄           | 凝集沈殿処理など                                       |
| 振動騒音 | 基準値以下                               | 回転機械、破砕機など                      | 防振動装置、基礎、防音対策                                  |
| 臭気   | H <sub>2</sub> S、NH <sub>3</sub> など | 有機性燃料（腐敗性、高水分）<br>ガスリーク         | 吸着防臭、吸引燃焼など                                    |
| 廃棄物  | 石炭灰<br>脱硫石膏<br>廃油<br>PCB 廃棄物        | 燃焼灰<br>排煙脱硫<br>潤滑油等<br>変圧器絶縁油など | ほとんどが再資源化<br><br>(PCB は特別管理廃棄物で<br>措置法に準拠した処理) |

石炭火力発電所で発生する産業廃棄物で最も多いのは石炭灰である。石炭には、10~20% の灰分が含まれており、100 万 kW 級の石炭火力発電所から約 20~30t/yr の灰が発生する。

2001 年に施行された資源有効利用促進法において、電気事業から発生する石炭灰は、指定副産物に指定されており、再資源化が促進され、2005 年以降資源化率 96%前後の高い水準で推移している。主な有効利用先は、セメント分野、土木建設分野、農林・水産分野と多方面にわたっている。

## 6 石炭火力発電用ボイラの制御

現在の石炭火力発電で採用されている自動制御方式はデジタル制御が急速に普及しており、細かな制御が可能となった。最適自動制御方式の出現により、負荷変化率向上、最低負荷の引き下げ、起動・停止時間の短縮等の改善が図られている。同時に監視の集中化、保守の迅速化が加速されている。計測制御システムの性能は著しく、CRT オペレーション化による HCI(Human Computer Interface)のインテリジェン化が図られ、運転支援、保全支援を含む統合的な制御管理が一般的となっている。その中でコントロールセンターにおける大気汚染に係わる制御・監視は、発電事業の最重要事項として取り扱われており、ボイラ機能における運転支援や最適制御、多炭種適応制御、監視業務等は、発電事業の最重要事項である。

図 8.1 に事業用火力発電所の総合運転監視制御システムの概念図を、図 8.2 に日本の制御システムメーカーの火力発電所のボイラ制御システム事例を紹介する。なお、主な NO<sub>x</sub> に係わる制御系として次のような制御がある。

### ➤ 事業用火力の制御

- ・ ボイラ自動制御
- ・ バーナ自動制御
- ・ 運転監視技術
- ・ 操作自動化
- ・ 監視技術
- ・ 計算処理技術
- ・ ユニット計算機 中央演算処理・端末装置

### ➤ 自家用火力

自家発電火力の制御は事業用と異なり、発電用だけでなく工場プロセス蒸気の供給、複数罐の連系制御、工場受変電、配電系統への電力供給、工場内 Utility 全般に適用される。このことから制御の分散化、電気-計装-計算機統合化、汎用ネットワークとの接続等が導入されている。DCS (Distributed Control System) が主体的に電気、計装制御、情報制御に適用されている。

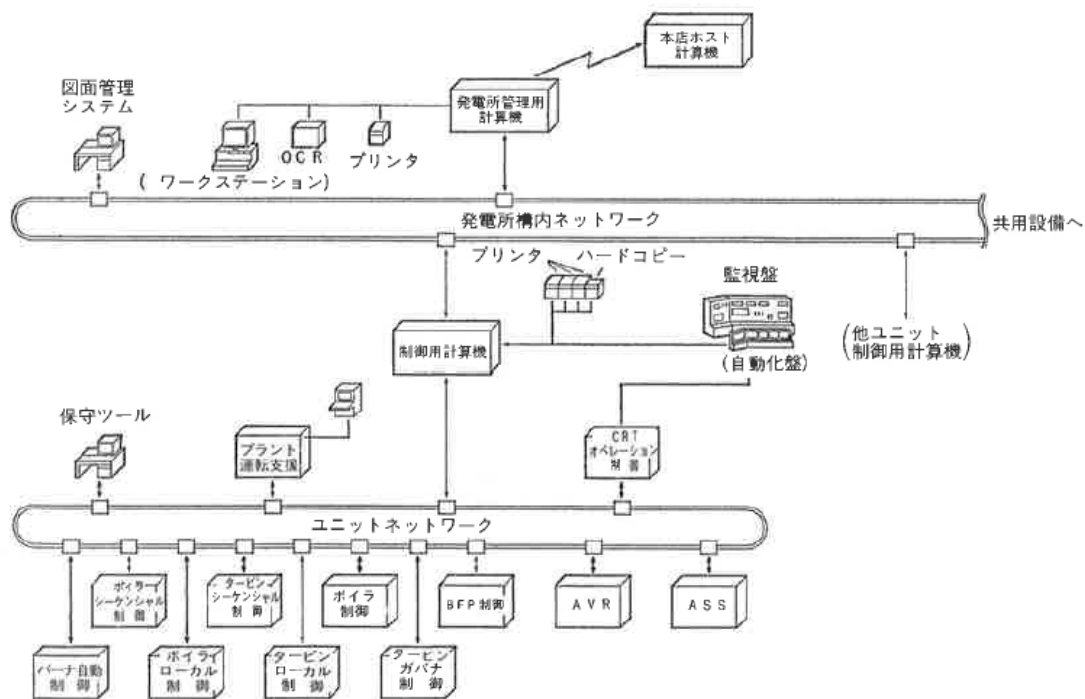


図 6-1 事業用火力発電所の総合運転監視制御システムの概念図

(出典：火力原子力発電技術協会)

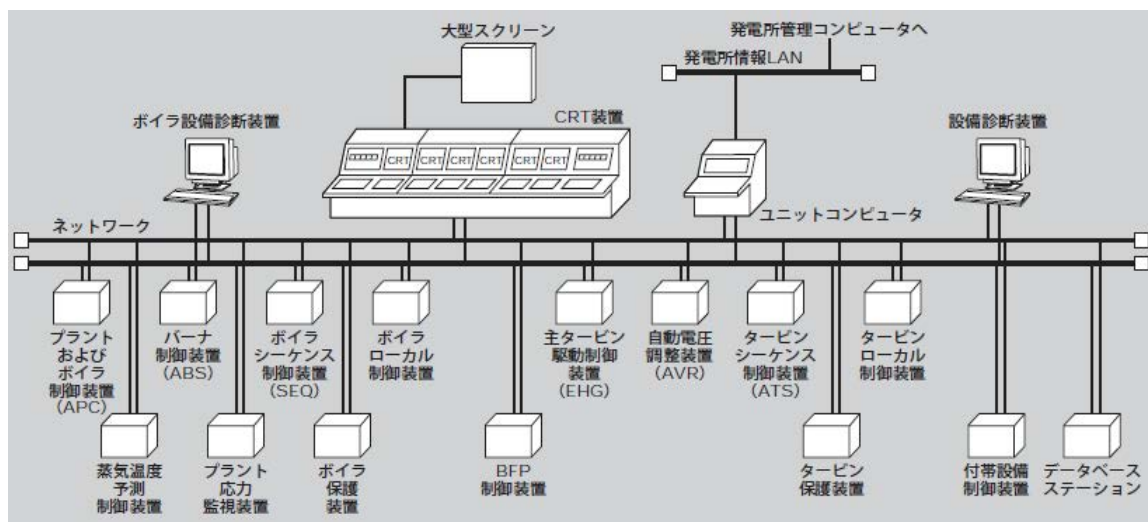


図 6-2 火力発電所のボイラ制御システム事例

(出典：富士電機、富士時報 vol70, No.7, 1997)

## 7 運転管理

### 7.1 窒素酸化物低減に係わる運転管理

石炭火力発電所における NOx 低減に係わる運転管理は、生成抑制に係わる燃焼管理と NOx 除去に係わる排煙脱硝に二分される。燃焼管理は、燃焼方式や制御機構でその管理手法は異なるが、先述した生成原理に添った低 NOx 化の機能を計画条件値通り維持することを管理することである。脱硝装置の運転及び保守管理は、表 7-1 のような点がある。

表 7-1 脱硝装置の運転・維持管理の要点

| 項目                              | 管理点の例                                                      |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------|
| ボイラ自動燃焼制御との協調機能（Control Center） | 燃料質の把握、燃焼特性、負荷変動、ガス温度<br>SOx/NOx/O <sub>2</sub> 濃度、煤じん濃度など |
| 排ガス温度                           | 節炭器、空気予熱器、脱硫装置・集塵機との関係                                     |
| 脱硝装置                            | 触媒性能、反応器の異常、NH <sub>3</sub> 注入機能、                          |
| 排煙系統全般                          | ガス流動圧損、煙道等の灰堆積、温度分布、SOx 濃度                                 |
| 各装置の機械的故障等                      | 漏洩、計器指示値、閉塞、                                               |

### 7.2 ボイラ・タービン主任技術者制度（BT 主任技術者）

火力発電所における運転や維持等を適正かつ合理的に管理運営するため、日本の電気事業法では、専門的な知識を有する技術業務責任者として BT 主任技術者を専任し従事しなければならない。BT 主任技術者は、電気事業法に基づき、発電所のボイラ・タービン等の火力設備の工事、維持及び運用に関する保安監督等にあたる。第一種、第二種の資格があり施設規模等により選任が義務化されている。

## 8 石炭火力発電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 8-1 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             |
|-----------------------|---------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------|
| 電気事業法の制定              | 1965～現在             | 発電事業に係わる全般の規定                            | 工作物の全ての技術指針等<br>BT 主任技術者の専任など                                  | 絶対的効果          |
| 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<br>(大気汚染防止法等) | 1967～1968<br>(旧法省略) | 整備に係わる金融・税制措置<br>中小企業特別措置<br>各種基準・測定法の規定 | 大気汚染防止全般<br>融資制度、金融公庫、中小企業事業団等の金融<br>措置の制度化<br>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                | ～現在                 | 研究開発、指導等                                 | ガイドライン 2.9 参照                                                  | 活発             |
| 環境計量士制度<br>(計量法)      | 1952～1992           | 国家資格者に依る測定                               | 義務化                                                            | 側面効果大<br>信頼性向上 |
| 熱管理法                  | 1951～現在             | 特定規模以上の熱管理全般の                            | 義務化                                                            | 極めて大きい         |

|          |         |             |             |        |
|----------|---------|-------------|-------------|--------|
| (旧熱管理規則) |         | 義務化         |             |        |
| 省エネルギー法  | 1979～現在 | エネルギー使用の合理化 | 目標値設定—義務化   | 極めて大きい |
| 電気技術規定   | 1999    | 排煙脱硝設備指針    | JEAC3604 など | 準拠義務   |

表 8-2 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             |
|---------------------|---------------------------|-------------------------|------------------------------------------------------|----------------------|
| 生成抑制<br>Fuel NOx    | 低 N 分石炭の使用                | 調達条件改善                  | 低減効果大、燃料費の増加、炭種の特定                                   | 実績多数                 |
|                     | 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<br>Thermal NOx | 低空気比燃焼（低 O <sub>2</sub> ） | 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                 |
|                     | 炉内脱硝                      | CmHn 剤 還元               | 燃焼温度制約、未燃分消去、炉構造の制約                                  | 実績少し                 |
|                     | ストーカ燃焼                    | 低 O <sub>2</sub> 燃焼     | 基準強化→将来性に難 小規模缶用                                     | 実績極少数                |
|                     | 流動層燃焼                     | BFB・CFB<br>PFB          | 高い抑制効果を保証、動力費・設備費が大<br>BFC は産業用自家発電、                 | 実績多数<br>PFB は 4 事例のみ |
| 排煙脱硝                | SCR 法                     | 触媒+NH <sub>3</sub> 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                       | 大規模缶で実績多数あり          |
|                     | SNCR 法                    | 無触媒+NH <sub>3</sub> 又は尿 | 産業用缶向き、リーク NH <sub>3</sub> に留意                       | 小規模産業用実績多            |

|         |                 |                                    |                                                         |                               |
|---------|-----------------|------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------|
|         |                 | 素吹込み                               |                                                         | 数                             |
|         | AC 吸着法          | 活性炭+NH <sub>3</sub> 吹込み            | 極低濃度脱硝用、費用大                                             | 実績少ない                         |
| 燃料消費量低減 | 省エネルギー<br>熱効率向上 | 燃焼制御、高効率機<br>器<br>伝熱面の適切化<br>管理の徹底 | 低減 NOx 量は石炭燃料消費量に比例して削減<br>熱管理の義務化<br>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<br>日本では最も需要と<br>見做す |

## 9 日本における対策導入事例

(場所：S 製紙 (株) 実施年：1984 年)

|                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                            |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 改造後ボイラ<br>型式等                                | ボイラ形式                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 強制循環貫流式                                    |
|                                              | 定格蒸発量                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 55,000 kg/hr                               |
|                                              | 蒸気常用圧力                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 3.4 MPaG                                   |
|                                              | 蒸気温度                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 485 °C                                     |
|                                              | 蒸気の用途                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 自家用熱併給発電(製紙工場)                             |
|                                              | 燃料                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 瀝青炭／低位発熱量 23.4kJ/kg／燃料比 2.4<br>N 分 1.3-1.6 |
|                                              | 燃焼方式                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 循環流動層燃焼                                    |
| NO <sub>x</sub> 排出濃度<br>(O <sub>2</sub> =6%) | 産廃焼却排熱回収ボイラ(旧ボイラ)新設時                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | ≒ 300 ppm                                  |
|                                              | 改造後目標値 (CFBC 新設)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | < 250 ppm                                  |
| 低減手順                                         | <div>CFBC による適正の確認</div> <p>↓ 項目：石炭性状変動 負荷応答性、連続稼働時間、保守費</p> <div>低減対策のための総合的検討事項</div> <p>①脱水汚泥の混焼処理の可否：凝集剤の変更、脱水率の向上など</p> <p>②石炭の粒径分布の保証：前処理破碎機の性能、購入炭条件設定<br/>変化</p> <p>↓ ③炉内脱硫率：メーカーの実績値の確認</p> <div>採用した NO<sub>x</sub> 生成抑制技術</div> <p>①循環流動層燃焼方式</p> <p>②負荷率 Turn Down 65～90%時 NO<sub>x</sub> 排出濃度 200ppm 保証<br/>(石炭専焼時)</p> <p>③定格出力時熱効率 &gt;90%LHV 連続運転&gt;2000hr<br/>(②、③についてはこれらが保証されるようメーカーに発注した)</p> |                                            |
| 導入費用                                         | 試験実証費 (混焼含む) <b>計 46,000,000 円</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                            |
|                                              | 石炭分析費 1 品 9 点                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 100,000                                    |
|                                              | 試験運転費(燃料・動力・薬剤・仮設など)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 500,000                                    |
|                                              | 汚泥関係設備増設・改善費                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 約 40,000,000                               |
|                                              | 導入設備費 <b>計 2,090,000,000 円</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                            |
|                                              | 設備費(石炭前処理・灰処理含む)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 1,800,000,000                              |
|                                              | 汚泥処理関係費                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 250,000,000                                |

|         |                                                                                                        |            |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|         | 付帯工事費（土建等）                                                                                             | 40,000,000 |
|         | 本費用は 1984 年時におけるもので動力・灰処理費は含まない。                                                                       |            |
| 効果      | 導入後結果<br>負荷率 65%～90%   →  NOx 濃度 220～240 ppm<br>汚泥混焼時   負荷率 85%                   →  NOx 濃度 240～250ppm |            |
| 導入時の留意点 | ①汚泥混焼の可否<br>②炉内脱硫の実施（脱硫剤の炉内投入）<br>③石炭粒径の監理<br>④安定した高熱効率の出力での連続運転                                       |            |
| 評価      | 初期設定の目標諸性能値を概ねクリアできた。                                                                                  |            |

## 10 大気中窒素酸化物抑制に最適な技術及び中国における窒素

### 酸化物抑制技術案

「国家環境保護『十二五』計画」では、2015 年まで全国の NO<sub>x</sub> 排出総量が 10% 下がることが要求されている。NO<sub>x</sub> 排出削減目標を着実に実行するために、国務院は「省エネ排出削減『十二五』計画」を公布し、それぞれ電力、セメント、鉄鋼等の重点業界の NO<sub>x</sub> 排出に対して明確な抑制目標及び対策措置に関する要求を出した。

新規石炭火力発電ユニットについて、同時に脱硝装置の設置も要求されている。石炭火力発電ユニットの低 NO<sub>x</sub> 燃焼技術改造及び排ガス脱硝施設の建設を推進し、シングルユニットの容量が 30 万 kW 以上（含む）の石炭火力発電ユニット、東部地域及びその他の地域の省都のシングルユニットの容量が 20 万 kW 及びそれ以上の現役石炭火力発電ユニットに対して、すべて脱硝改造を行い、総合脱硝効率が 75% 以上達し、2015 年末まで火力発電業の NO<sub>x</sub> 排出量が 750 万トンに抑え、新增削減能力が 305 万トンに達することが要求されている。

2012 年の中国における電力業の NO<sub>x</sub> 排出量は 1082.35 万トンであり、減少で推移していることが明らかとなった、2010 年と比べて 1.5% 低減し、NO<sub>x</sub> 排出削減の実現に寄与した唯一の発生源となり、中国全国の NO<sub>x</sub> 総排出量の抑制に大きく寄与した。

石炭火力発電ユニットに対する国の NO<sub>x</sub> 排出削減要求に積極的に応えるため、ここ数年、中国の電力業の脱硝ユニット設置容量の占める割合が著しく上昇している。2012 年に重点調査統計範囲に収められた火力発電所は 3127 社ある。そのうち、独立発電事業者は 1824 社あり、ユニットを 4625 基、脱硝装置を 438 セット保有している。電力自家発電所は 1303 社で、ユニットを 2517 基保有しており、そのうち、71 基に脱硝装置が設置されている。現在、中国の火力発電業の脱硝技術が相対的に成熟しているが、脱硝装置の運転レベル及び企業の監督管理能力を更に高める必要があり、日本の成功経験を参考にする必要がある。（データ出典：2012 年環境統計年報）

# NO<sub>x</sub> 抑制に係る技術ガイドライン (工業用ボイラ)

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<sub>x</sub> 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工業用ボイラ分野では、ボイラにおける大気汚染物排出基準（GB13271-2014）により、NO<sub>x</sub> 排出基準が改定され、新規事業場では 2014 年 7 月、既設事業場では 2015 年 10 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<sub>x</sub> 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<sub>x</sub> 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     | 日本の工業用ボイラの概要                         | 1  |
| 1.1   | 工業用ボイラの技術的發展状況                       | 1  |
| 1.2   | ボイラの定義                               | 2  |
| 1.3   | 工業用ボイラの位置づけ                          | 3  |
| 1.4   | 工業用ボイラの設置基数                          | 4  |
| 2     | 日本の工業用ボイラにおける環境保全に係る規制及び政策           | 6  |
| 2.1   | 環境基準                                 | 7  |
| 2.2   | 規制基準                                 | 7  |
| 2.3   | SO <sub>x</sub> 排出基準（K 値による量規制・総量規制） | 8  |
| 2.4   | NO <sub>x</sub> 排出基準                 | 10 |
| 2.5   | 煤塵の排出基準                              | 13 |
| 2.6   | 排ガス中の NO <sub>x</sub> 測定基準           | 13 |
| 2.6.1 | 分析方法                                 | 13 |
| 2.6.2 | 測定管理                                 | 14 |
| 2.6.3 | 日常のモニタリング                            | 15 |
| 2.7   | 公害防止管理者制度                            | 16 |
| 2.8   | 対策装置の導入に係る助成の枠組み                     | 17 |
| 2.8.1 | 公害防止事業団による助成                         | 17 |
| 2.8.2 | 中小企業に対する融資                           | 20 |
| 2.8.3 | 日本開発銀行による融資                          | 21 |
| 2.8.4 | 税制上の措置                               | 21 |
| 2.9   | 技術普及・技術開発活動について                      | 21 |
| 3     | 工業用ボイラにおける窒素酸化物の排出削減対策技術             | 23 |
| 3.1   | 工業用ボイラの構造                            | 23 |
| 3.1.1 | ボイラ形式                                | 23 |
| 3.1.2 | 燃料                                   | 32 |
| 3.1.3 | 燃焼技術                                 | 37 |
| 3.2   | 窒素酸化物 (NO <sub>x</sub> )             | 49 |
| 3.2.1 | 窒素酸化物生成の基本原則、環境影響                    | 49 |
| 3.2.2 | 窒素酸化物削減技術の基本原則                       | 53 |
| 3.2.3 | 窒素酸化物 (NO、NO <sub>2</sub> ) の環境影響等   | 53 |
| 3.3   | 工業用ボイラにおける窒素酸化物の排出削減対策技術             | 54 |
| 3.3.1 | 燃焼場における窒素酸化物生成抑制技術                   | 54 |

|       |                               |    |
|-------|-------------------------------|----|
| 3.3.2 | 排煙脱硝技術 .....                  | 62 |
| 3.4   | 省エネルギー .....                  | 68 |
| 3.5   | ボイラの燃焼制御と運転管理 .....           | 71 |
| 3.5.1 | 制御の目的等 .....                  | 71 |
| 3.5.2 | 燃焼制御 .....                    | 72 |
| 3.5.3 | 運転管理 .....                    | 73 |
| 3.6   | 工業用ボイラにおける窒素酸化物抑制対策のまとめ ..... | 76 |
| 4     | 工業用ボイラにおける窒素酸化物抑制事例 .....     | 78 |
| 4.1   | 中国における導入事例 .....              | 78 |
| 4.1.1 | 概要 .....                      | 78 |
| 4.1.2 | 改善の検討分野と評価 .....              | 79 |
| 4.2   | 日本における事例 .....                | 81 |
| 4.2.1 | 事例Ⅰ .....                     | 81 |
| 4.2.2 | 事例Ⅱ .....                     | 83 |

# 1 日本の工業用ボイラの概要

## 1.1 工業用ボイラの技術的发展状況

産業活動において工業用ボイラは、動力・加熱源として事業活動の基幹となる原動機である。病院やビル等建築物の生活環境で使用される冷暖房用ボイラとともに、国民生活への影響度は大きい。ボイラは 1705 年イギリスの Thomas Newcomen が単胴大気圧蒸気機関を発明以来、James Watt などの改良を得て、欧州における産業革命の推進力となった。日本では 1875 年に筑豊炭田に、1890 年に高島炭鉱の揚水用に導入された記録がある。国産ボイラは 1870~1880 年代にかけて、現三菱重工業、現川崎重工業、大阪鉄工所（現日立造船）、汽車製造等で船舶用気缶の製造が始まり、1900 年代初頭、高尾鉄工所（1908）、平川鉄工所（1912）、颯波鉄工所（1912）が創業され、コルニシュボイラ、ランカシャボイラ、機関車ボイラ、炉筒煙管式ボイラ、水管ボイラなどが製造されている。産業黎明期に当たる 1900 年前後から 1940 年にかけて、殖産振興著しく、工業用ボイラは、炭鉱、製糸、紡績、製紙、発電、綿絹織物、製糖、製粉、ビール製造業等、熱を利用するあらゆる産業で導入されている。近代 1950 年代に入り、産業界の高度成長期を迎え、蒸気需要の高温高压化、出力の増大、品質・安全の確保等の市場の高度技術罐の需要を背景に、先進欧米技術の導入が進められた。1950 年代に技術導入された主なメーカーを表 1-1 に示す。

このような普及とともに、工業用ボイラの監理・規制を対象とする法令や規格も整備され、ボイラ製造技術やボイラを取り巻く様々な関連技術の向上、維持管理に大きく寄与している。主なものとして工業標準化法（1949）、陸用鋼製蒸気ボイラ構造 JIS B8201（1954）、ボイラー及び圧力容器安全規則（1959）、煤煙排出規制法公布（1959）、熱管理法（1951）、大気汚染規制諸法規、工場におけるエネルギーの使用の合理化に関する法（1979）等が挙げられる。なお日本に大きな影響を及ぼした、近代の国際的な関連規格制定の動勢をみると、ISO- TC11 会議「国際規格統一化審議」（1997）、USA：ASME 規格動力用ボイラ Sec-1 及び圧力容器 Sec-VIII div. 安全率の改定（1998）、EU 規格 EN Pressure equipment Directive 施行などがあった。

表 1-1 1950 年代における技術導入代表事例

| ボイラメーカー                | 技術導入先                                               |
|------------------------|-----------------------------------------------------|
| 三菱重工業(株)               | Combustion Engineering(USA)<br>Sulzer Brothers(スイス) |
| バブcock 日立(株)           | Babcock & Wilcoxs (UK, USA)                         |
| 石川島播磨重工業(株)            | Foster Wheeler (USA)<br>Sulzer Brothers(スイス)        |
| 横山工業(株) <sup>(*)</sup> | Siemens(独)                                          |

|             |                                        |
|-------------|----------------------------------------|
| 川崎重工業(株)    | La Mont(独)                             |
| 汽車製造(株) (*) | Siemens(独)                             |
| (株)タクマ      | Sulzer Brothers (スイス)<br>Clayton (USA) |

(\*) 現川崎重工業(株)

日本の工業用ボイラは、蒸気等の負荷形態や燃料事情が年代により大きく変化し、その需要や燃料市場に対応した発展を経ていることが特徴である。蒸気や温水の需要は、加熱、乾燥、加湿、蒸留、動力源、冷暖房などの用途に、汽－水、汽－空気、汽－固体、汽－液などの熱交換や直接送気で広く利用されている。しかし、蒸気や温水の性質仕様は広く、現在では使用燃料も多様である。蒸気仕様面における変遷は、漸次、低圧飽和蒸気から高温高压化、大型化を辿り、燃料面では、石炭主流から重質油時代を経て軽質油に、更に天然ガスやバイオガスに変遷した。また、循環型社会形成時代を迎え、生活系廃棄物や産業廃棄物も有機系可燃物として貴重な燃料として利用されている。このような燃料の変化に伴い燃焼方式も、石炭燃料時代の火格子燃焼 (Stoker firing) や微粉燃焼 (Pulverized firing)、油・ガス燃料のバーナ燃焼 (Burner firing) を経て、低発熱量、高水分質のバイオマスや廃棄物の燃料化が進んだ 1980 年代には、流動層燃焼 (Fluidized Bed firing) が普及した。水循環面でも規模や蒸気仕様により、自然循環式・強制循環式・貫流式などの変遷が見られる。

大気汚染対策は 1950 年代までは、煤塵対策用に煙突に簡易なサイクロン分離器を設ける程度で排煙されていたが 1960 年代に入り、製造業等の急速な進展に伴い、缶数や煤煙量の増加により、日本全国が公害時代を経て、後述する公害規制が強化されることとなり、煤塵、SOx、NOx、排水等の排出濃度基準が制定されて、集塵機、排煙脱硫脱硝装置が付設されることとなった。

一方、熱管理面でも国内エネルギー資源の乏しい国情から 1979 年に省エネルギー法や熱管理法が制定され、燃焼面、熱損失等の改善、熱効率の工場等の省エネルギーのための管理が励行されることとなり、ボイラの構造や運転管理に大きな影響を与えた。

21 世紀の工業用ボイラは、制御の IT 化や運転取扱いの無人化や地球温暖化抑制への取り組みから高効率や経済性が要求される時代にあり、高性能、環境調和型の各種のボイラが普及している。

## 1.2 ボイラの定義

一般に燃料を燃焼し、発生した熱を受け、缶内部の水等の熱媒体を加熱/蒸発させて所定の圧力、温度の蒸気、温水など発生する装置である。広義には、他の施設で発生排出される熱を有する媒体 (水・ガス・熱媒油など) や電気エネルギーから伝導・放射・対流などの熱交換より、熱回収して蒸気や温水とする装置も含む。また国の定める法規に準拠すべき工業用とは、大気圧を超える蒸気を発生させて、これを他に供給する装置並びにこれに

付設された過熱器、及び節炭器と定義されている。温水ボイラは、火気、燃焼ガス、その他の高温ガス等の媒体又は電気熱により、圧力を有する水又は熱媒を加熱して、これを他に供給する装置と定義されている。なお、ボイラの定義は、ボイラ的设计・製造・設置等に係わる規則や基準の制定だけでなく、大気汚染や水質汚濁、騒音・振動等の公害諸規制の行政措置においても、ボイラ機能や形態、法規の適用解釈で重要である。

### 1.3 工業用ボイラの位置づけ

日本においては、原動機であるボイラは、使用される業種や熱媒体（蒸気・温水・熱媒油）などの用途により管轄官庁や適用法規が異なる。

発電事業や自家発電に供される発電用ボイラは、公益性や社会的影響度が大きく、施設の機能に高度な信頼性や安定性が求められるため、産業用や冷暖房用などの民生用途のボイラとは適用法規や所掌行政機関が異なる。また、構造設計、材料、取り扱い資格、検査規定、整備管理等も定められた各々の規則に準拠する。表 1-2 に日本のボイラの行政所掌区分を示す。

工業用や民生用ボイラと、発電用ボイラの行政所掌を区分する目的は、圧力・蒸気温度等の仕様面や保安全管理技術において、各々要求される水準が異なるため、効果的な行政措置を執ることを目的としている。

表 1-2 日本のボイラの行政所掌区分

| 区分     | 発電用ボイラ                              | 工業用ボイラ                             |
|--------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 用途     | 事業用<br>一般電気事業者<br>卸電気事業者<br>特定電気事業者 | 工業用<br>一般に発電を付加しない<br>製造業等の熱源用、動力用 |
|        | 自家発電用：自家消費電力用<br>(余剰電力は売電可能)        | 業務用：冷暖房用、厨房用、病院等の熱源                |
| 適用規格等  | 電気事業法、技術基準<br>保安検査規定等               | 労働安全衛生法<br>ボイラ及び圧力容器安全規則           |
| 所掌行政機関 | 経済産業省                               | 厚生労働省                              |

工業用ボイラは、ボイラ及び圧力容器安全規則により、伝熱面規模や蒸気圧力によって、表 1-3 に示す法規上で分類されており、設置、定期検査、取扱が規制されている。例えば、一定以上の伝熱面積・最高使用圧力の取扱・保安監督は、「ボイラ技士免許資格者」、「ボイラ取扱技能講習終了者」、「ボイラ取扱業務特別教育修了者」が行うことになっている。保有水量が少ない伝熱面積  $3\text{m}^2$  以下の小規模な小型貫流ボイラ等は技能講習終了者で取扱える。

表 1-3 工業用ボイラの法規上の分類（適用法規：労働安全衛生法）

| ボイラの種類 | 伝熱面積 (m <sup>2</sup> ) | 備考                     |
|--------|------------------------|------------------------|
| ボイラ    | >3.0                   | 簡易ボイラ以外のもの             |
| 小規模ボイラ | 1.0~3.0                | <0.1MPaG では胴内径や胴長に制限あり |
| 小型ボイラ  | 0.5~1.0                | <0.1MPaG               |
| 簡易ボイラ  | <0.5                   | <0.1~0.3MPaG           |
| 温水ボイラ  | >14                    | 温水ボイラ                  |
|        | 8~14                   | 小規模ボイラ                 |

尚、ボイラの法規上の分類は、大気汚染や水質汚濁、騒音振動等の公害諸基準値や取扱等の行政措置において、区分毎に適用されている。

#### 1.4 工業用ボイラの設置基数

工業用ボイラは、2000 年代に入り、重厚長大型のエネルギー多消費型の産業形態から、先端的高テク産業へ変容が著しく、エネルギー消費構造が変化した。そのため、大型罐を廃止して小型罐による多罐設置の普及や、使用される燃料も多様化している。

労働安全衛生法に準じて登録されているボイラ設置数は、1978 年度をピークに大きく減少しており、2000~2009 年間に 32%減少した。2013 年度では、伝熱面積 40m<sup>2</sup> 未満のボイラが 66.7%を占める状況になり、且つ、ボイラ形式も表 1-4 に示すように炉筒煙管・小型貫流式・温水ボイラが 72%を占めている。日本の工業用ボイラの特徴は、使用燃料区分から分析かるように、都市圏の厳しい NOx 規制によるガス燃料焚きへの転換や、温暖化抑制のための再生型エネルギーの普及促進政策、エネルギー源の国内自給率の改善要求などが動機となり、廃棄物やバイオマス等の有機性可燃物の代替化に供すボイラの普及が著しいことである。表 1-5 に示す 2011 年度設置基数からみると、油燃料缶が 71.7%を占めている。表 1-6 は 2013 年度の使用燃料別の工業用ボイラ設置数である。

表 1-4 工業用ボイラの形式別設置数

(2012 年 12 月現在)

| ボイラ型式        | 設置数    | 構成比 (%) |
|--------------|--------|---------|
| 水管 自然循環式     | 3,145  | 11.1    |
| 強制循環式        | 198    | 0.7     |
| 貫流式          | 4,312  | 15.3    |
| 丸ボイラ (炉筒・煙管) | 10,170 | 36.0    |
| 鑄鉄組合式        | 3,148  | 11.1    |
| 温水ボイラ        | 6,072  | 21.5    |
| その他          | 28,250 | 100     |

出典：JBA ボイラ年鑑 (2013)

注：厚生労働省所掌ボイラの設置数を示す。小型ボイラは不含、業務用ボイラは含む

表 1-5 工業用ボイラの規模

(2013 年度現在)

| 伝熱面積 (m <sup>2</sup> ) | <40    | 40~<100 | 100~<200 | 200~<500 | 500~ |
|------------------------|--------|---------|----------|----------|------|
| 設置数                    | 18,833 | 5,192   | 2,103    | 1,403    | 719  |
| %                      | 66.7   | 18.4    | 7.4      | 5        | 2.5  |

出典：JBA ボイラ年鑑 (2013)

表 1-6 使用燃料別 工業用ボイラ設置数

(2011 年度現在)

| 使用燃料          | 設置数    | 構成比 (%) |
|---------------|--------|---------|
| 油             | 26,776 | 71.7    |
| 石 炭           | 186    | 0.5     |
| ガ ス           | 6,440  | 17.3    |
| その他 (廃棄物・副生物) | 3,926  | 10.5    |
| 計             | 37,325 | 100     |

出典：ボイラ年鑑 (2012)

## 2 日本の工業用ボイラにおける環境保全に係る規制及び政策

---

工業用ボイラから排出される公害物質は、燃焼に係わる煤煙として、煙突から大気放出される煤塵、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、有害物質と、燃料ハンドリングや飛灰・燃焼灰の処理に付随する粉塵、臭気、連続ブロー水や排煙処理装置から排出される排水などが対象となる。

工業用ボイラに関する大気汚染防止、水質汚濁防止等の環境行政は、公害問題が社会問題として出現し始めた 1967 年に制定された公害防止基本法、1972 年に制定された自然環境保全法を基にして行われ、公害防止や自然環境保全に重要な役割を果たした。しかし、その後の産業伸張による変容は著しく、今日の環境問題は CO<sub>2</sub> 等による地球温暖化、フロン放出によるオゾン層の破壊、SO<sub>x</sub> などの酸性ガスによる酸性雨等の地球的規模の環境保全や、大都市圏における NO<sub>x</sub> による大気汚染、増加する廃棄物等の生活環境問題が中心になってきた。1980 年代までの従来型の産業公害に加えて、廃棄物焼却処理施設からのダイオキシン類や自動車排ガス、冷媒フロン類など日常生活に密着した活動に起因する汚染源が増大している。

日本ではこれらの新たな環境問題に対処するために従来型の規制的手法のみでは十分ではなく、1993 年に公害対策基本法に変わり、環境基本法を制定施行された。基本法は 3 章 46 条からなり、基本的理念として、次の 3 点を定めている。

- ① 環境の恵沢の享受と継承
- ② 環境への負荷の少ない持続的発展が可能な社会の構築
- ③ 国際的協調による地球環境保全の積極的推進

また、この理念達成に向けた、国、自治体、事業者、国民の責務を明示している。この環境基本法の下で、個別の大気汚染防止、水質汚濁防止、騒音・振動規制、臭気防止などが、施行令、施行規則として制定されている。

1962 年に制定された「煤煙の排出の規制等に関する法律」は、その後の排出規制の法体系の事実上の始まりである。法体系の中で、公害の対象範囲、公害発生源者の責任(PPP:Polluter pays Principle)、行政の責務等が明確に示され、SO<sub>x</sub> と煤塵、その他の粉塵の濃度規制が導入された。

SO<sub>x</sub> については、1968 年に K 値規制が、1974 年に SO<sub>x</sub> 総量規制が導入された。

NO<sub>x</sub> は 1977 年に有害物質として定められ、1981 年に東京、横浜、川崎、大阪等の指定地域に総量規制が導入されている。

1997 年にはダイオキシン類が有害大気汚染物質の指定物質に規定され、また環境影響評価法が制定されて、環境アセスメントが火力発電所等の建設に義務化された。大気環境では、NO<sub>2</sub> や SO<sub>2</sub>、浮遊粒子物質 (SPM) などの項目について、現況把握、影響予測、定量的評価、事後調査などの実施が定められている。

## 2.1 環境基準

日本の大気汚染物質の規制は、環境基本法第 16 条第 1 項に規定する大気汚染に係わる環境上の条件につき、人の健康を保護する上で維持されることが望ましい基準濃度を基に設定されている。表 2-1 に大気汚染に係わる環境基準を示す。これらの環境基準は、大気汚染の状況を的確に把握することができると認められる場所において、各々定められた測定方法により測定分析されるものとされている。

表 2-1 大気汚染に係わる環境基準

| 物質         | 環境上の条件                                                                             |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 二酸化硫黄      | 1hr 値の 1 日平均値が 0.04ppm 以下であり、かつ、1hr 値が 0.1ppm 以下であること                              |
| 一酸化炭素      | 1hr 値の 1 日平均値が 10ppm 以下であり、かつ、1hr 値の<br>8 時間平均値が 20ppm 以下であること                     |
| 浮遊粒子物質     | 1hr 値の 1 日平均値が 0.10mg/m <sup>3</sup> 以下であり、かつ、1hr 値が 0.20mg/m <sup>3</sup> 以下であること |
| 光化学オキシダント  | 1hr 値が 0.06ppm 以下であること                                                             |
| 二酸化窒素      | 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であること                               |
| ベンゼン       | 1 年平均値が 0.003mg/m <sup>3</sup> 以下であること                                             |
| トリクロロエチレン  | 1 年平均値が 0.2mg/m <sup>3</sup> 以下であること                                               |
| テトラクロロエチレン | 1 年平均値が 0.2mg/m <sup>3</sup> 以下であること                                               |
| ジクロロメタン    | 1 年平均値が 0.15mg/m <sup>3</sup> 以下であること                                              |

## 2.2 規制基準

日本の煤煙の規制基準は、多面的な規制を実施しており、排出基準規制、総量規制基準、燃料使用基準等がある。

### (1) 排出基準

排出基準は国が一元的に定める一般排出基準と、煤煙発生施設の密度が高い地区に適用される特別排出基準、地方自治体が国の排出基準に上乗せ基準を制定する 3 方法の排出基準がある。

### (2) 総量規制

工場や事業所が集合している地域で、一般排出基準のみでは環境基準の確保が困難な地域にあっては、特定工場で排出する SO<sub>x</sub> や NO<sub>x</sub> などの指定煤塵について総量規制基準を定めている。2014 年現在、SO<sub>x</sub> については 24 地域、NO<sub>x</sub> については 3 地域が規制されている。

### (3) 燃料使用基準

燃料使用基準としては、次の2種類がある。

- ① 季節による燃料の使用に関する措置
- ② 指定地域における燃料の使用に関する措置

この措置により、地域毎に年間を通した汚染度合に対応するため、良質の燃料の使用、燃料使用量の削減を地方自治体の長（市長、町長など）が勧告、命令出来る制度である。

## 2.3 SO<sub>x</sub> 排出基準（K 値による量規制・総量規制）

諸外国では SO<sub>x</sub> の排出基準は排ガスの濃度基準であるが、日本でも当初の排出基準は濃度に準じたものであった。しかし、環境基準が達成できなかったため、1968 年に K 値規制が導入された。また工場・事業所が集積しており、施設毎の K 値排出規制のみによっては環境基準の達成が困難と考えられる一定地域を国が指定し、当該都道府県知事は、地域全体での排出許容総量を算出し、総量削減計画を作成する。

### ① K 値排出規制

地区の区分（K 値）ごとに次式で定める許容排出量を基準とする。

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

**q:** SO<sub>x</sub> の許容排出量      m<sup>3</sup>N/h

**K:** 地域別に定める常数（3 < K < 17.5）

SO<sub>x</sub> 排出煙突が多くある地域は K 値が小さく厳しい規制となっている。

**H<sub>e</sub>:** 有効煙突高さ      (m) ・ ・ 煙突実高+煙上昇高 (図 2-1 参照)

$$H_e = H_0 + 0.65 (H_m + H_t)$$

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

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

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

**H<sub>0</sub>:** 排出口の実高さ      (m) (図 2-1 参照)

**Q:** 15℃における排出ガス量      (m<sup>3</sup>/sec)

**V:** 排出速度      (m/sec)

**T:** 排出温度      (K)

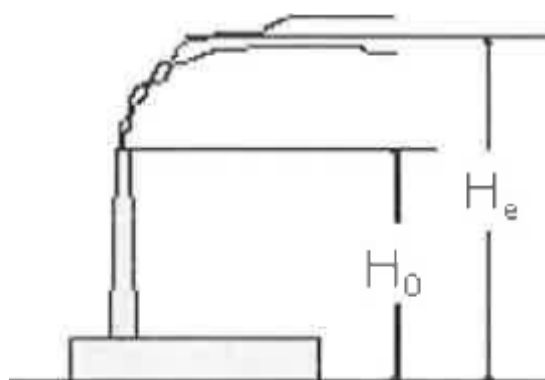


図 2-1 煙突高さ  $H_e/H_o$

## ② 総量規制基準の基本式

SOx の総量規制における算定法として基本式事例の 2 方式は次の通り

a. 使用する原燃料が増大するに応じて、1 単位当たりの排出の許容量が低減するようになる算定法。(原燃料使用量方式)

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

Q: 排出 SOx 許容量 ( $\text{m}^3\text{N/h}$ )

W: 特定工場等における全煤煙発生施設の使用原燃料の量 (重油換算  $\text{kl/h}$ )

a: 削減目標量が達成されるように都道府県知事が定める定数

b: 0.08~1.0 で都道府県知事が定める定数

b. 重合した最大地上濃度が指定地域における全ての指定工場において一定となる算定法 (最大重合地上濃度算定方式)

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

Q: 排出 SOx 許容量 ( $\text{m}^3\text{N/h}$ )

$Q_0$ : 指定工場に設置されている全 SOx 排出量 ( $\text{m}^3\text{N/h}$ )

$C_m$ : 最大地上濃度 (削減目標達成のため知事が定める値 vol %)

$C_{m0}$ :  $Q_0$  に係る最大重合地上濃度 (vol %)

表 2-2 に日本の工業用ボイラに係わる SOx の K 値規制の福岡県の事例を示す。

表 2-2 SOx の K 値規制の事例 (福岡県)

| 地域       | K 値  |
|----------|------|
| 北九州市「新設」 | 1.75 |
| 大牟田市「新設」 | 2.35 |
| 福岡市      | 8.76 |
| 久留米市     | 13   |

## 2.4 NOx 排出基準

煤煙発生施設に対する NOx の排出基準は施設毎に燃焼条件等が異なり、NOx の発生特性が異なることから、施設の種類、規模毎に定められている。1973 年に第一次規制が設定されて以来、1975 年第二次規制、1977 年第三次規制、1979 年第 4 次規制が行われ強化拡充が行われてきた。

1978 年に表 2-1 に示す環境基準に改定されるとともに、「1 日平均値が 0.06ppm を超える地域にあっては、原則として 7 年以内に 0.06ppm が達成されるように努める」ものとされた。これに伴い 1981 年に総量規制対象物質として指定され、東京都特別区地域など 3 地区が指定されて暫時削減対策が講じられている。

NOx は燃焼に伴って発生するもので、環境基準の達成対策は、排出ガスの量と濃度の低減しか方法がない。すなわち、燃焼方法の改善により発生を抑制するか、排煙中の NOx を除去するかの二通りの方法しかない。

### (1) NOx 排出基準（濃度規制）

表 2-3 の NOx 排出規制基準に示すように、ボイラ施設の使用燃料、ボイラ型式、排ガス量に応じて許容排出濃度が定められている。特に石炭燃料燃焼ボイラは、NOx 生成機構を考慮して燃焼方式別に規定されている。空気比も燃料毎に異なるため、基準とする O<sub>2</sub> 濃度も燃料種類別に規定している。

表 2-3 工業用ボイラに係わる日本の NOx の排出規制基準の概要

| 煤煙発生施設                                           | 規模<br>最大定格排ガス量<br>(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> N/h) | 残存 O <sub>2</sub> 濃度<br>(% Vol) | 排出基準<br>(ppm) * |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------|
| ガス専焼ボイラ                                          | >50                                                    | 5                               | 60              |
|                                                  | 4~50                                                   |                                 | 100             |
|                                                  | 1~4                                                    |                                 | 130             |
|                                                  | <0.5~1                                                 |                                 | 150             |
| 低品位炭燃焼ボイラ<br>(天井バーナ)                             | >70                                                    | 6                               | 200             |
|                                                  | 4~70                                                   |                                 | 250             |
|                                                  | <0.5~4                                                 |                                 | 350             |
| 低品位炭専焼ボイラ<br>(天井バーナ)<br>>30 万 m <sup>3</sup> N/h | >70                                                    | 6                               | 200             |
|                                                  | 30~70                                                  |                                 | 250             |
| 低品位炭専焼ボイラ                                        | >70                                                    |                                 | 200             |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                            |        |                   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|--------|-------------------|
| 火炉分割壁型、<br>火炉熱発生率<br>>14 万 kcal/m <sup>3</sup> h                                                                                                                                                                                                                                                                         | 50~70                      | 6      | 250               |
| 低品位炭専焼ボイラ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | >70                        |        | 200               |
| 上記以外                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 30~70                      | 6      | 250               |
| 低品位炭燃焼ボイラ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | >70                        |        | 200               |
| 上記以外                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 40~70                      | 6      | 250               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | >0.5~40                    |        | 350               |
| 石炭専焼ボイラ<br>全面燃焼方式<br>自然循環型<br>>14 万 kcal/m <sup>3</sup> h                                                                                                                                                                                                                                                                | >20~25 万 m <sup>3</sup> /h | 6      | 250               |
| 石炭燃焼ボイラ<br>接線型チルチングバーナ                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | >100 万 m <sup>3</sup> N/h  | 6      | 200               |
| 石炭燃焼ボイラ<br>流動層燃焼                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | >4 万 m <sup>3</sup> N/h    | 6      | 350               |
| 固体燃焼ボイラ<br>散布式ストーカ                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 4~20                       | 6      | 320               |
| 固体燃焼ボイラ<br>流動層燃焼                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <40                        | <0.5~4 | 250               |
| 固体燃焼ボイラ<br>上記以外                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | >70<br>4~70<br>~4          | 6      | 200<br>250<br>350 |
| 液体燃焼ボイラ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | >50<br>1~50<br>~1          | 4      | 130<br>150<br>280 |
| 固体燃焼小型ボイラ<br>伝熱面積<10m <sup>2</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                            | 6      | 350               |
| 廃棄物焼却炉<br>浮遊回転、連続炉                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                            | 12     | 250               |
| 廃棄物焼却炉<br>連続炉 上記以外                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                            | 12     | 250               |
| <p>*NO<sub>x</sub> は NO、N<sub>2</sub>O、NO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O<sub>3</sub> などがあるが、燃焼に伴って発生する NO<sub>x</sub> は大部分が NO であり、NO<sub>2</sub> 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。</p> <p>NO<sub>2</sub> の発生率は低いものの、毒性が強いため環境基準では NO<sub>2</sub> 濃度で定められている。また JIS の NO<sub>x</sub> 濃度測定法も NO<sub>2</sub> 基準で検量するよう規定している。</p> |                            |        |                   |

実際は NO/NO<sub>2</sub> 比は燃料・施設種別ごと異なり、日本の場合、NO<sub>2</sub> 換算の NOx 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 <sup>8</sup> 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/m<sup>3</sup> 換算目安のため排ガス組成が 100%NO<sub>2</sub> と仮定すれば

$$100\text{mg/m}^3 \rightarrow \div 200\text{ppm} \text{ となる。}$$

(実際の施設では NO が 95%以上を占めるため 100mg/m<sup>3</sup>→140ppm となる。)

## (2) NOx 総量規制

NOx 排出源が集合している地域で、環境基準の確保が困難であると認められる地域では、総量規制が施行されている。総量規制計画は、知事が関係する市町村長や審議会、その他の合議制機関の意見を聴いた上で制定されている。排出 NOx 許容量の算定事例は以下の通り。

- ① 使用する原燃料が増大するに応じて、1 単位当たりの排出の許容量が低減するようになる算定法。(原燃料使用量方式)

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

**Q:** 排出 NOx 許容量 (m<sup>3</sup>N/h)

**W:** 特定工場等における全煤煙発生施設の使用原燃料の量 (重油換算 kL/h)

**a:** 削減目標量が達成されるように都道府県知事が定める定数

**b:** 0.08~1.0 で都道府県知事が定める定数

- ② 特定工場に設置されている全ての NOx 排出施設について排出ガス量、地域の分布状況等を勘案して算定する方法

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

**Q:** 排出 NOx 許容量 (m<sup>3</sup>N/h)

**C:** 施設係数 (施設の種類ごとに知事が定める)

**V:** 施設毎の排出ガス量 (m<sup>3</sup>N/h)

**k:** 削減目標量が達成されるように知事が定める削減定数

**L:** 0.8 以上 1.0 未満の範囲で排出分布、排出特性を勘案して知事が定める定数

## 2.5 煤塵の排出基準

燃焼排ガス中に「煤」や「燃え滓」である固形粒子物質を「煤塵」と称して、石炭粉砕等で生じる固形粒子である「粉塵」と区別されている。煤塵は無機物質、有機物質、各種金属類を含み降下煤塵等の環境劣化の原因となるため、環境基準において排出基準が定められ規制されている。表 2-4 に代表的なボイラ型式の煤塵の排出基準を示す。なお、集塵された煤塵は廃棄物処理法に準拠した産業廃棄物として取り扱われ、適正処理が義務化されている。

表 2-4 代表的なボイラ型式の煤塵の排出基準

| 施設名                    | 規模<br>排出ガス量<br>( $10^4 \text{m}^3 \text{N/h}$ ) | 一般排出基準<br>( $\text{g/m}^3 \text{N}$ ) | O <sub>2</sub> 濃度<br>(%vol) |
|------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| ガス専焼ボイラ                | 4 <<br><4                                       | 0.05<br>0.1                           | 5                           |
| 重油専焼ボイラ及び<br>ガス液体混焼ボイラ | >20<br>4 ~ 20<br>1 ~ 4<br><1<br>小型ボイラ           | 0.05<br>0.15<br>0.25<br>0.30<br>0.30  | 4                           |
| 黒液燃焼ボイラ                | >20<br>4 ~ 20<br><4                             | 0.15<br>0.25<br>0.30                  | —                           |
| 石炭燃焼ボイラ                | >20<br>4 ~ 20<br><4                             | 0.10<br>0.20<br>0.30                  | 6                           |

## 2.6 排ガス中の NOx 測定基準

各施設より排出される大気汚染物質を含む排ガスについては、大気汚染防止法において各施設の排出ガス量や総量規制の有無に基づき、測定分析の頻度が定められている。

### 2.6.1 分析方法

日本で認められている排ガス中の NOx 分析方法は、JIS で規定されている化学分析法 (JIS K0104) と連続分析法 (JIS B 7982) が使用されている。表 2-5 に NOx の化学分析法の種類と概要を、表 2-6 に連続分析法の自動計測器の種類と測定範囲等を示す。

表 2-5 NO<sub>x</sub> の化学分析方法の種類と概要

| 分析方法の種類     | 定量範囲          | vol ppm (mg/m <sup>3</sup> ) | 対象成分ガス               |
|-------------|---------------|------------------------------|----------------------|
| Zn-NEDA 法   | 真空フラスコ法       | 1~50(2~100)                  | NO + NO <sub>2</sub> |
|             | 注射筒法          | 5~250(10~510)                |                      |
| NEDA 法      | 真空フラスコ法       | 3~500(5~1000)                | NO + NO <sub>2</sub> |
|             | 注射筒法          | 7~1200(13~2500)              |                      |
| イオンクロマトグラフ法 | 真空フラスコ法       | 4~1400(8~2800)               | NO + NO <sub>2</sub> |
|             | 注射筒法          | 20~7000(40~145000)           |                      |
| PDS 法       | 真空フラスコ法       | 10~300(20~620)               | NO + NO <sub>2</sub> |
|             | 注射筒法          | 12~4200(24~8400)             |                      |
| ザルツマン吸光光度法  | 5~200(10~400) |                              | NO <sub>2</sub>      |

表 2-6 連続分析法の自動計測器の種類と測定範囲等

| 計測器の種類  | 測定範囲 vol ppm   | 測定対象物質                                                  | 適用条件                                                                        |
|---------|----------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 化学発光方式  | 0~10<br>0~2000 | NO<br>NO <sub>x</sub> * <sup>1</sup>                    | 共存する CO <sub>2</sub> 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                           |
| 赤外線吸収方式 | 0~19<br>0~2000 | NO<br>NO <sub>x</sub> * <sup>1</sup>                    | 共存する CO <sub>2</sub> 、SO <sub>2</sub> 、水分、炭化水素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。 |
| 紫外線吸収方式 | 0~50<br>0~2000 | NO<br>NO <sub>2</sub><br>NO <sub>x</sub> * <sup>2</sup> | 共存する SO <sub>2</sub> 、炭化水素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。                     |

\*<sup>1</sup> あらかじめ NO<sub>2</sub> を NO に変換して測定

\*<sup>2</sup> NO と NO<sub>2</sub> のそれぞれの測定値の合量

## 2.6.2 測定管理

大気汚染に関する環境測定の作業には、種々の変動要因（例：サンプリング・測定装置・試薬・秤量・計算など）があり、誤差が生じる。またこれらの変動要因が一定に保たれている場合でも計測者が変わると誤差や平均値が変わる。日本では計量法や環境計量士制度があり、機材等に関しても ISO9000（品質管理）が設けられており、設計・製造・購入・販売等あらゆる分野で認証管理が導入されている。

測定・分析精度の評価・管理業務の事例を表 2-7 に示す。

なお、日本の環境計量士制度は、国家資格として大気・水質等の環境計量証明や計量管理

等を行っている。環境計量士に求められる知識は、環境や計量関係法規、化学知識や化学分析、濃度計量、計量管理技術等である。

表 2-7 測定・分析精度の評価と管理業務

| 管理項目業務                                       | 管理内容                                               |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 測定・分析機器の評価と維持管理                              | 機器の校正、検出限界、直線性、併行精度等の評価、検出部の保守管理                   |
| 分析法の validation                              | 検出・定量限界、ブランク、不確かさの確定                               |
| 標準作業手順書<br>SOPs:Standard operating Procedure | 日常的な機器・分析法の評価<br>試料の測定。技能訓練、点検保守マニュアル              |
| データの評価と管理                                    | 感度変動、ブランクの評価<br>結果・条件等の記録、管理表等の利用と結果報告             |
| 外部精度管理                                       | 研修会・共同実験の参加や主催<br>クロスチェックの実施<br>標準物質や試料の使用、結果の報告開示 |

### 2.6.3 日常のモニタリング

日本では一定ガス量以上の工業用ボイラを対象に大気汚染上、適正に運転されている状況を、日常、連続モニタリングを実施している地域が多い。望ましいモニタリング項目としては、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、CO、N<sub>2</sub>O などである。図 2-2 に煙道排ガス自動分析装置の事例を示す。



(NO<sub>x</sub> 測定範囲 100~5000ppm、他に SO<sub>x</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 計測)

図 2-2 煙道排ガス自動分析装置（非分散型赤外線吸収式）中国計量法検定№.2006-C118

(出典：堀場製作所)

## 2.7 公害防止管理者制度

日本の大気環境改善に大きな貢献した制度として、法定の公害防止管理者制度が挙げられる。

工業用ボイラのような一定量以上の煤煙を排出する工場は、特定工場として法定資格管理者の選任や公害防止のための組織を構成し都道府県知事に届けなければならない。

### 【対象業種】

- 製造業（物品の化工業を含む）
- 電気供給業
- ガス供給業
- 熱供給業

組織の体系は、特定工場の公害防止対策の責任者となるべき「公害防止統括者」、公害防止対策の技術的事項を分掌する「公害防止管理者」で構成される。なお、公害防止管理者は有資格者で、排ガス量や排出有害物質種類により選任できる資格の種類が規定されている。

ボイラにおいて選任された公害防止管理者が管理する大気汚染技術業務は次の通りである。

- 使用する燃料の検査
- 煤煙発生施設(ボイラ)の点検
- 煤煙処理施設及びこれに付属する施設の操作、点検及び補修
- 煤煙量又は煤煙濃度の測定の実施及びその結果の記録
- 測定機器の点検及び補修
- 事故時における応急措置の実施
- 煤煙量又は煤煙濃度の減少、施設の使用制限その他の必要な措置

NO<sub>x</sub> 排出に関わる施設の公害防止管理者は業務を遂行するに必要な条件として、学歴や経験年数と共に、基礎知識として次の項目の取得が求められている。

- 公害概論：大気汚染の現状、大気汚染の発生機構、大気汚染の影響等に関する知識
- 大気汚染関係法規
- 燃焼・煤煙防止技術：燃料、燃焼計算、防止技術、NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub> 除去技術
- 煤煙の拡散：拡散現象、拡散理論、
- 除塵・集塵技術
- 測定技術：燃料試験法、燃焼管理計測、NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub> 測定分析、煤塵の測定、機器の管理

## 2.8 対策装置の導入に係る助成の枠組み

1967 年に制定された公害対策基本法の第 24 条では、「国又は地方公共団体は、事業者が行う公害防止のための施設の整備について、必要な金融上および税制上の措置その他の措置を講ずるように努めなければならない」とされ、また、「前項の措置を講ずるにあたっては、中小企業者に対する特別の配慮がなされなければならない」と規定された。このような基本的な考え方に沿って、日本では汚染発生源である事業者の公害対策を促すための施策として、補助金、公的金融、税制優遇措置、工場立地の移転・誘導措置、技術指導・情報提供、企業内部の組織・人材の育成のための措置などが実施されてきた。その後、政府系機関では統合整理が進み機関・団体の名称、事業内容は頻繁に変更されているものが多いが、ここでは、日本の産業公害対策が活発化してきた 1960 年代以降の主要な取組を、当時の名称で述べていくこととする。

### 2.8.1 公害防止事業団による助成

公害事業団は、1965 年に設立された政府の公害問題に対する助成施策実施のための専門機関である。1992 年の法律改正により環境事業団に、さらに 2004 年には環境保全機構に名称変更され、事業内容も見直されてきた。また、発足当時の監督権限は通商産業省に置か

れていたが、環境庁の発足に伴い環境庁へ移管されている。公害防止事業団が実施してきた主な助成事業は次のとおりである。

#### 2.8.1.1 建設譲渡事業

技術・資金面で公害防止施設の設置が困難であるような事業体及び公共団体に対して事業団が直接に施設の建設を行い、完成後に譲渡する事業をいう。建設費用は低金利である政府からの借入金が用いられ、譲渡後は注文主である事業体及び公共団体が事業団へ返済する仕組みになっていた。返済期間は施設に対しては 20 年以内、機械装置に対しては 15 年以内であり、低い金利が設定されていた。具体的な事業は以下のとおりであった。

##### (1) 共同公害防止施設

同業の類似した工場が集中している地域では、各々の工場や事業体が単独で処理施設を整備するよりも、共同で施設を設置した方がよりコスト安になる可能性が高い。この点に着目して共同公害防止施設の建設譲渡事業が行なわれた。大気関連ではばい煙処理施設、粉じん防止施設等が対象となった。

##### (2) 集団設置建物

都市化の進展や産業構造の変化等により、公害防止施設設置のための空間確保が困難である、近隣公害の発生が避けられない等の理由により、複数の企業が集団で移転するための用地の取得・造成、工場建物施設や公害防止施設の建設及び施設の譲渡を行なうものである。この事業には移転先での共同公害防止施設の設置が含まれる場合もある。

##### (3) 緩衝緑地帯

工業地帯から排出されるばい煙や粉じん等による公害を防止するためには、工業地帯と居住地帯の間を遮断するグリーンベルトが有効である。大規模な緑地の造成には多額の費用を要することから、地方公共団体に代わって事業団がグリーンベルトの建設譲渡を行なうものである。

##### (4) 大気汚染対策緑地

樹木は汚染物質を吸収して、大気を浄化する機能を有している。この長所を利用して大気汚染を緩和する緑地帯を建設する事業である。この事業には工場の周辺における緑地帯整備に加えて、都市域内にまとまった緑地を建設する事業も含まれている。

図 2-3 は建設譲渡事業の実績の推移を示したものである。

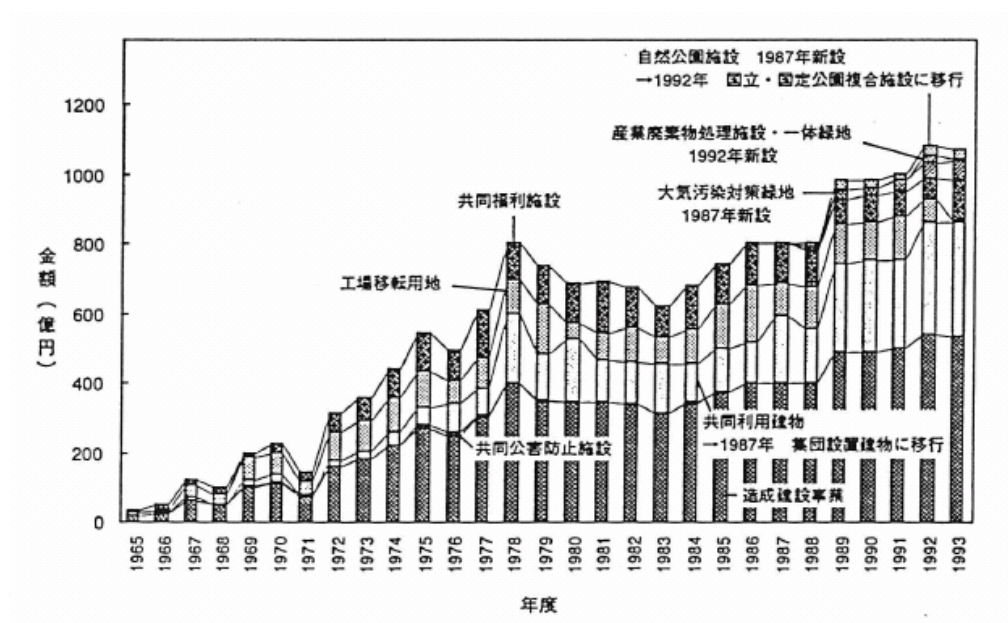


図 2-3 建設譲渡事業の実績の推移

出典：環境事業団の概要と事例、環境事業団、1994

### 2.8.1.2 融資事業

事業体及び公共団体に対して低金利での融資を行い、公害防止活動を促進させるものである。事業団への返済期間は一部事業を除いて、施設に対しては 20 年以内、機械装置に対しては 15 年以内であった。融資が利用できる施設や事業は以下の通りであった。

#### (1) 産業公害防止施設

単独もしくは複数の工場が共同で利用する公害防止施設を設置するための費用を融資するものである。公害防止施設には、ばい煙処理施設や粉じん防止施設等の大気汚染防止施設が含まれていた。

#### (2) 特定フロン排出抑制施設

オゾン層破壊防止のために、特定のフロン及びハロンの排出抑制施設又は再生利用施設を設置する事業体に対して融資を行なうものである。

図 2-4 に融資実績額の推移を示す。

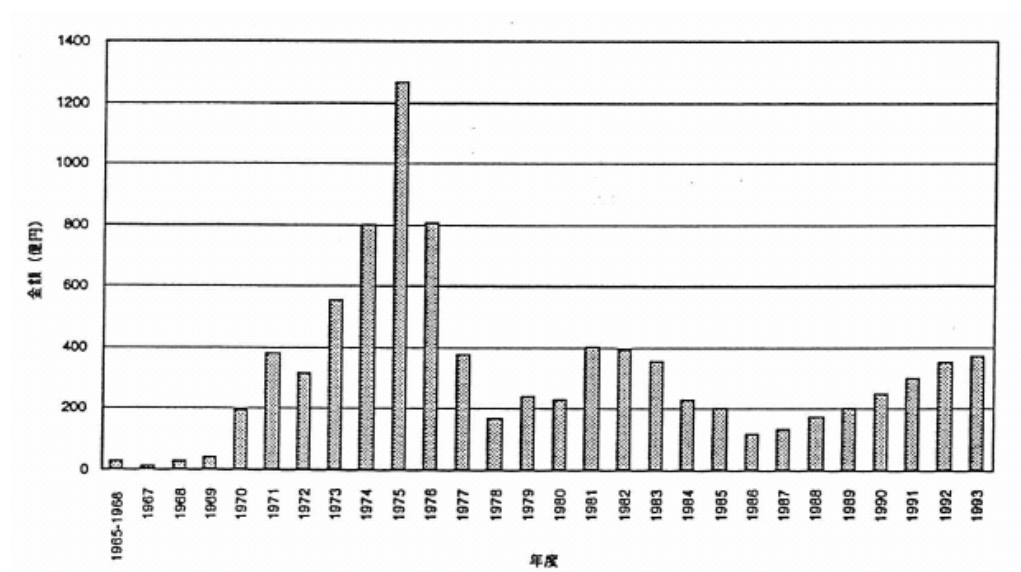


図 2-4 融資実績額の推移

出典：環境事業団の概要と事例、環境事業団、1994

## 2.8.2 中小企業に対する融資

### 2.8.2.1 中小企業金融公庫

中小企業の成長・発展を促進するため、一般の金融機関から融資を受けにくい設備資金や長期運転資金を中小企業者に融資することを目的として設立された全額政府出資の金融機関である。1965 年より、産業公害防止施設の整備や公害防止のための工場移転等の実施に必要な資金の特別金利による貸付を行なっていた。大気汚染防止関係では、集じん・除じん装置や燃焼改善施設、測定分析装置等が融資対象となっていた。

### 2.8.2.2 国民金融公庫

銀行その他一般金融機関からの資金の融資を受けることが困難な国民大衆に対して、必要な事業資金の供給を行なうことを目的として設立された全額政府出資の金融機関である。1970 年より産業公害防止施設の設置に対する特別貸付を実施した。対象となる企業及び施設は、中小企業金融公庫の場合とほぼ同じである。

### 2.8.2.3 中小企業事業団

「中小企業事業団法」に基づいて中小企業施策を総合的に実施する機関として、旧中小企業振興事業団と旧中小企業共済事業団とを統合して設立された。産業公害防止に関連する以下の事業に対して資金助成を実施していた。

- 共同公害防止事業
- 公害防止施設共同利用事業
- 工場等集団化事業（工業団地等の建設）
- 工場共同化事業（共同工場の建設）
- 共同施設事業

#### 2.8.2.4 中小企業設備近代化資金

「中小企業近代化資金等助成法」に基づき、中小企業の設備の近代化の促進に寄与することを目的として、都道府県が窓口となって個別中小企業に対して貸付を行なうものである。通商産業大臣が指定する業種に属する企業及び通産局長の承認を得て都道府県知事が指定した地方産業振興業種に属する企業を対象に、公害防止施設に対する貸付を実施していた。

#### 2.8.3 日本開発銀行による融資

長期設備資金の供給を行なうことにより、経済の再建及び産業の開発を促進するため、一般の金融機関が行なう金融などを補完し、又は奨励することを目的として設立された。1960 年より産業公害防止に対する融資を開始し、再生資源施設や省エネルギー施設等の幅広い範囲に及ぶ環境対策に対する融資や利子補給、債務保証等の事業を実施していた。

#### 2.8.4 税制上の措置

公害防止対策に対する税制面での優遇措置として、国税、地方税についてそれぞれ以下のような措置がとられていた。

##### 【国税】

- 公害防止関連特定設備等の特別償却
- 耐用年数の特例
- 特定の資産の買換えの場合の課税の特例

##### 【地方税】

- 固定資産税の非課税措置
- 固定資産税の課税標準の特例
- 特別土地保有税の非課税
- 事業所税の特例

### 2.9 技術普及・技術開発活動について

日本の工業用ボイラを取り巻く技術普及や環境保全において、諸制度の徹底や普及活動、技術開発分野における、民間団体や学会の果たしてきた役割は極めて大きい。行政機関が講じる規制や施策立案に際し情報提供の協力や協議を通じて、最適化を図ってきた経緯は高く評価される。殊に大気汚染対策には NEDO に代表される特殊法人等、産業界・行政機構・学会に連関する情報活動や先進的な基礎技術の研究開発において先導的役割を担ってきた。

施設メーカーやボイラ設置者が所属するボイラ、環境分野の各業界団体では、会員の研修・人材開発から、業界が共有出来る基本技術の開発はもとより、調査・情報活動、更には国家施策の提言にまで関わってきた。殊に日本のボイラや脱硝装置のような装置産業の技術向上に果たしたメーカーの活動は高く評価出来る。業界活動による情報の共有化も、

ボイラ製造技術や大気汚染対策技術において相互啓発や市場の活性化に大きく寄与してきた。

工業用ボイラに係わる主な諸団体とその活動を表 2-8 に示す。

表 2-8 工業用ボイラに係わる諸団体と活動内容

| 区分 | 名称                               | 活動                                     | 会員数                |
|----|----------------------------------|----------------------------------------|--------------------|
| 学会 | (一社) 日本機械学会                      | 機械工学全般<br>原動機、材料、熱力学等の研究               | 法人 714<br>個人 30612 |
|    | (公社) 大気環境学会                      | 大気環境の研究                                |                    |
|    | (一社) 日本エネルギー学会                   | エネルギー全般の研究<br>燃料、燃焼、プロセス工学             | 法人 241<br>個人 1444  |
|    | 日本バーナ研究会                         | 燃焼技術、省エネルギー研究                          | 法人 53              |
|    | (公社)化学工学会                        | エネルギー・環境・資源等の研究                        | 法人 282             |
| 業会 | (一社) 日本産業機械工業会<br>JSIMM          | ボイラ製造、環境技術全般に係わる活動                     | 法人 190             |
|    | (一社) 日本ボイラ協会<br>JBA              | 工業用ボイラ全般にわたる活動<br>技術普及、品質、検査、人材育成      | 個人 7800            |
|    | (公財) 日本小型貫流ボイラ協会                 | 小型貫流ボイラに係わる活動                          |                    |
|    | (一社) ボイラ整備据付協会                   | ボイラの据付業者の業界活動                          | 法人 392             |
|    | (一財) 省エネルギーセンター<br>ECCJ          | 省エネルギー診断、研修・情報<br>国際協力事業               | 法人 2339            |
|    | (一財) 石炭エネルギーセンター<br>J・COAL       | 石炭利用技術の開発・調査・普及<br>国際協力事業              | 法人 115             |
|    | (独行) 新エネルギー・産業技術<br>総合開発機構 NEDO  | 高性能ボイラの開発<br>Clean Coal Technology の開発 | —                  |
|    | (一社)産業環境管理協会<br>JEMAI            | 環境計測、環境管理、公害防止管<br>理者試験、講習、国際協力事業      | 法人 51              |
|    | (一社)日本環境測定分析協会                   | 環境計量士、分析事業者の諸活動                        | 法人 32              |
|    | (公社)日本環境技術協会<br>JETA             | 大気・水の測定技術の体系化、測<br>定機器の改良、国際協力等        | 法人 34              |
|    | (公財)北九州国際技術協力協会<br>KITA 環境協力センター | 環境産業の国際協力、研修事業<br>クリーナープロダクション         | 福岡県下関<br>係機関       |
|    | (公財)国際環境技術移転センター<br>ICETT        | 環境保全に関する技術移転、指導、<br>調査、普及活動、研究、        | 中部地区関<br>係機関       |

### 3 工業用ボイラにおける窒素酸化物の排出削減対策技術

#### 3.1 工業用ボイラの構造

##### 3.1.1 ボイラ形式

工業用ボイラの形式分類は、一般に伝熱面構造と水循環法、燃焼方式や熱交換法等で分類される。各々に適合する熱需要設備、出力規模、蒸気条件、経済性があり、熱需要側の条件に合致することが求められる。表 3-1 に工業用ボイラの形式区分と特徴を示す。日本国内で現在普及している工業用ボイラの形式は、小容量多缶設置を推進する傾向があることから、蒸発量 500kg/h~10t/h 級の炉筒煙管型（自然循環）や小型貫流水管ボイラが多く見られる。

燃料区分では、油・ガス燃料が主流を占め、石炭は自家発電用を除き、現在では暖房や工場蒸気の用途では稼働缶はない。代わって、1990 年代以降、代替エネルギー源として、可燃性廃棄物やバイオマスを燃料とするボイラの導入が著しい。これらの燃焼方式は、大部分がキルン燃焼や火格子燃焼、流動層燃焼である。なお、熱分解ガス化燃焼は、工業用ボイラとしての用途では少ないが、都市ごみのガス化炉や産業廃棄物ガス化炉で排熱ボイラとしての導入形態が多い。

図 3-1 に炉筒煙管ボイラの外観と原理概念を示す。図 3-2 は多管式小型貫流ボイラ、図 3-3 は小型貫流ボイラ(低 NO<sub>x</sub> 型)を示す。これらの形式のボイラは、小中規模かつ低圧蒸気の需要を多管設置・制御する方式で、メーカー数十社で市場需要に応じている。

図 3-4 はオイル・ガス専焼/混焼二胴形自然循環水管ボイラ図 3-5、図 3-6 は石炭専焼-逆送移動火格子燃焼式自然循環ボイラ、微粉炭焚き水管ボイラの断面構造を示す。

図 3-7、図 3-8 に気泡型及び循環型の流動層ボイラを、図 3-9 は、近年普及が著しい細片化した可燃性廃棄物や木屑・農産廃等を燃料とする石炭・バイオマス混焼循環流動層ボイラを示す。図 3-10 は二胴形排熱回収ボイラの断面構造の事例を示す。排熱回収ボイラは、熱回収する対象ガスや施設により、伝熱面構造が設計されるため標準的な構造はない。また、追焚システムを装備しない場合、燃焼が行われないため、ボイラ自体で集塵・脱硫・脱硝を行われていない。

表 3-1 工業用ボイラの形式区分と特徴

| 大区分   | 形式    | 特徴・構造等                                                                   |
|-------|-------|--------------------------------------------------------------------------|
| 水管ボイラ | 丸ボイラ  | 容積の大きいボイラ胴を主体とするもの、伝熱面積に比べ保有水が多く、低圧で利用される。<br>ランカシャ型、コルニッシュ型、炉筒型、炉筒煙管型など |
|       | 水管ボイラ | 水管を主要伝熱面とするもの、燃焼室容積や接触                                                   |

|       |         |                                                                                                                |
|-------|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|       |         | 伝熱面を自由に計画でき、中大出力、高圧仕様に適す、負荷応答性に優れる。<br>横水管型、立水管型、傾斜水管型、放射型など                                                   |
| 水循環方式 | 自然循環式   | 気水密度差により上部気水胴と下部水胴・管寄の<br>間で自然循環する方式<br>小~中出力に適する                                                              |
|       | 強制循環式   | 水循環をポンプで強制的に行うもの。二相流                                                                                           |
|       | 貫流式     | 伝熱部を長い管で構成し、管の一端から給水を順<br>次、加熱、蒸発、過熱し他端から蒸気として取出<br>す方式、相変化なし、単管・多管方式がある。小<br>型貫流、高圧ボイラ用、基本型としてベンソン、<br>スルザー型等 |
| 燃焼方式  | バーナ燃焼   | 液体・ガス燃料や微粉炭の燃焼用、炉内に燃焼空<br>気と共に噴霧し火炎燃焼させる                                                                       |
|       | 火格子燃焼   | 固形燃料用、固定床や移動床の上で燃焼する方<br>式、燃焼空気は火層下から供給、燃焼は燃料上部<br>で火炎燃焼する。                                                    |
|       | 流動層燃焼   | 気泡流動層：流動燃焼室内で流動媒体と共に高圧<br>空気で気泡状に沸騰させて燃焼する<br>循環流動層：燃焼室で高速で流動媒体と上昇燃焼<br>させ後流捕集部で未燃物を回収し再循環する                   |
| 発生熱媒体 | 蒸気      | 飽和蒸気：圧力における蒸気温度の蒸気<br>過熱蒸気：飽和温度以上に過熱された蒸気                                                                      |
|       | 温水      | 高温水・中温水・低温水                                                                                                    |
|       | 熱媒油     | 低圧力                                                                                                            |
| 特殊    | 排熱回収ボイラ | 鉄鋼業・非鉄業、セメント焼成炉、ガラスなどの<br>工業炉の排ガスや、焼却炉や化学反応設備からの<br>排熱、GT、GE などの排熱を熱交換で回収、蒸気<br>や温水とするボイラ                      |
|       | 鋳鉄ボイラ   | 鋳鉄製セクションを前後に並べて組合せたもの<br>暖房用、給湯用に利用されている                                                                       |
|       | 電気ボイラ   | 電気熱を熱源とするボイラ、起動用、補助用                                                                                           |

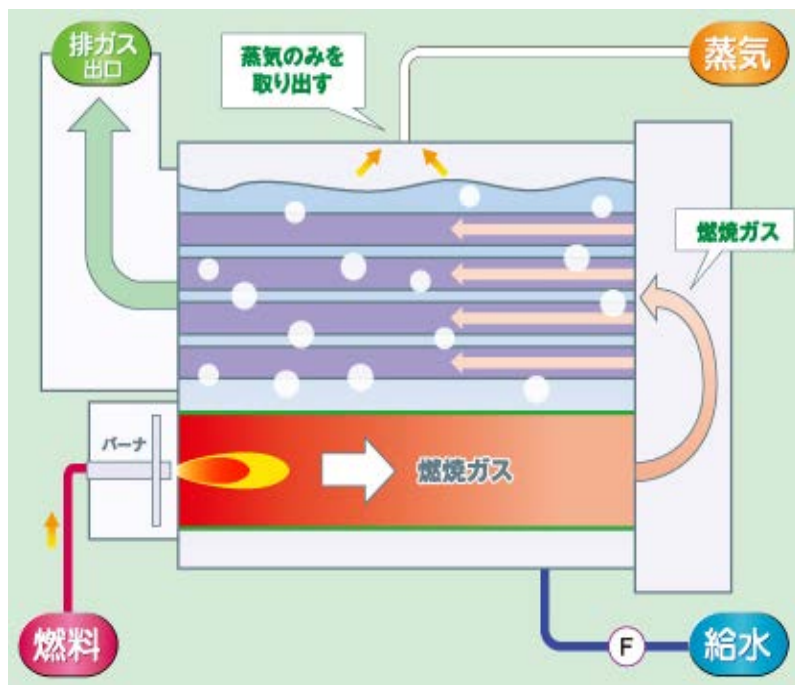


図 3-1 炉筒煙管ボイラの外観と原理概念

(出典：川重冷熱工業カタログ)

参考情報「日本の代表的な炉筒煙管ボイラメーカー」 出典：ボイラ年鑑等

川重冷熱工業、ヒラカワ、日本サーモエナジー、IHI 汎用ボイラなど

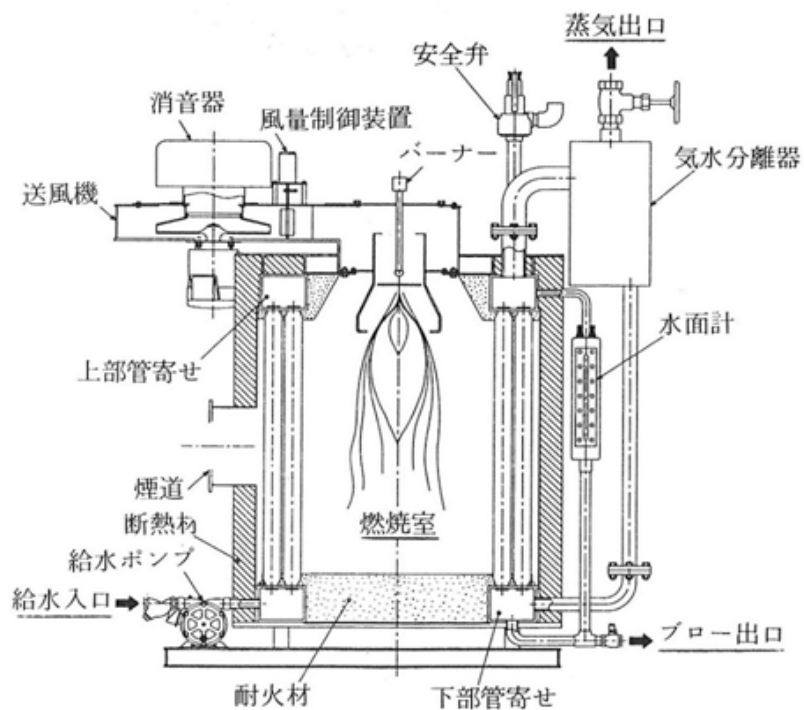
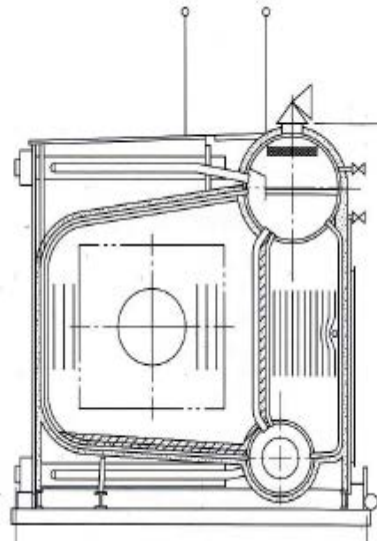


図 3-2 多管式小型貫流ボイラ  
(出典：三浦工業)



図 3-3 小型貫流ボイラ（低 NOx 型）油燃料 1.5~2.5 t/h  
(出典：三浦工業カタログ)

参考情報「日本の代表的な小型貫流ボイラメーカー」 出典：ボイラ年鑑等  
三浦工業、前田鉄工所、サムソン、日本サーモエナー、ヒラカワなど



「燃焼室断面構造」

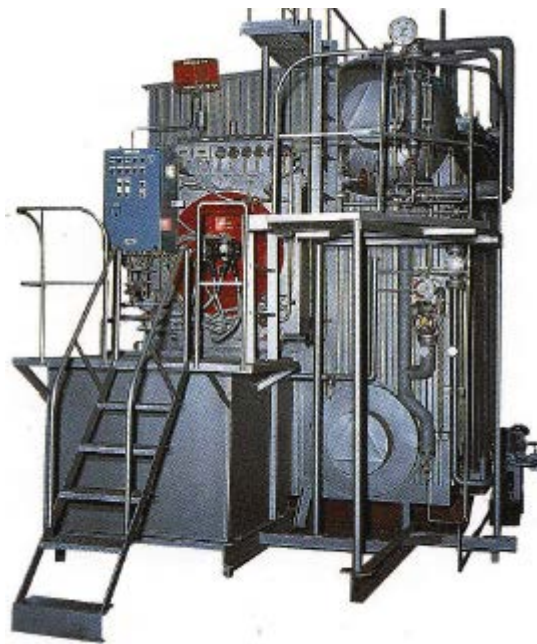


図 3-4 オイル・ガス専焼/混焼二胴形自然循環ボイラ

(出典：タクマ NPO カタログ)

参考情報「日本の代表的な二胴形自然循環ボイラメーカー」 出典：ボイラ年鑑等  
川重冷熱工業、IHI 汎用ボイラ、パブ日立工業、タクマ、三菱重工業など

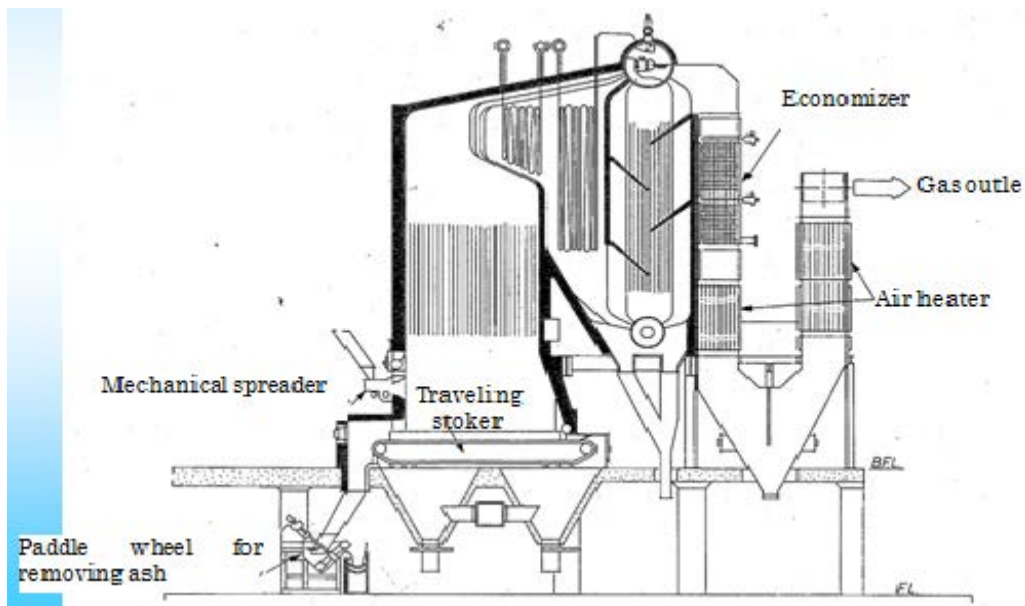


図 3-5 石炭専焼一逆送移動床火格子燃焼式自然循環ボイラ

(出典：タクマ カタログ)

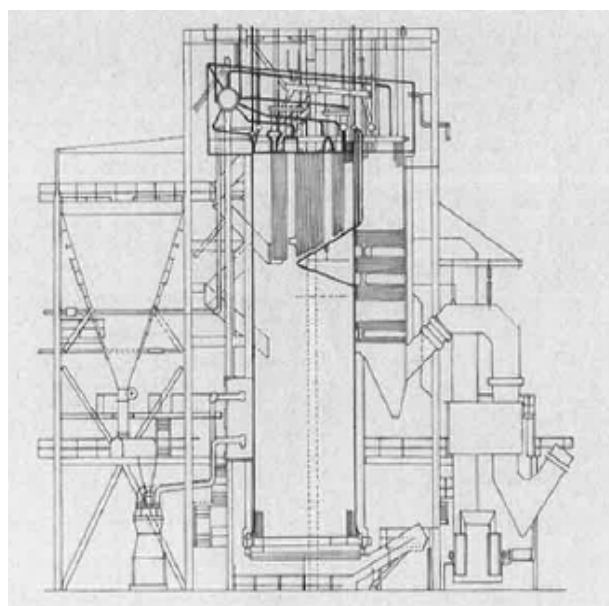


図 3-6 微粉炭焚き水管ボイラ

(出典：バブ日立工業)

参考情報「日本の代表的な微粉炭焚き水管ボイラメーカー」

出典：ボイラ年鑑等 バブ日立工業、三菱重工業、IHI、川崎重工業、タクマなど

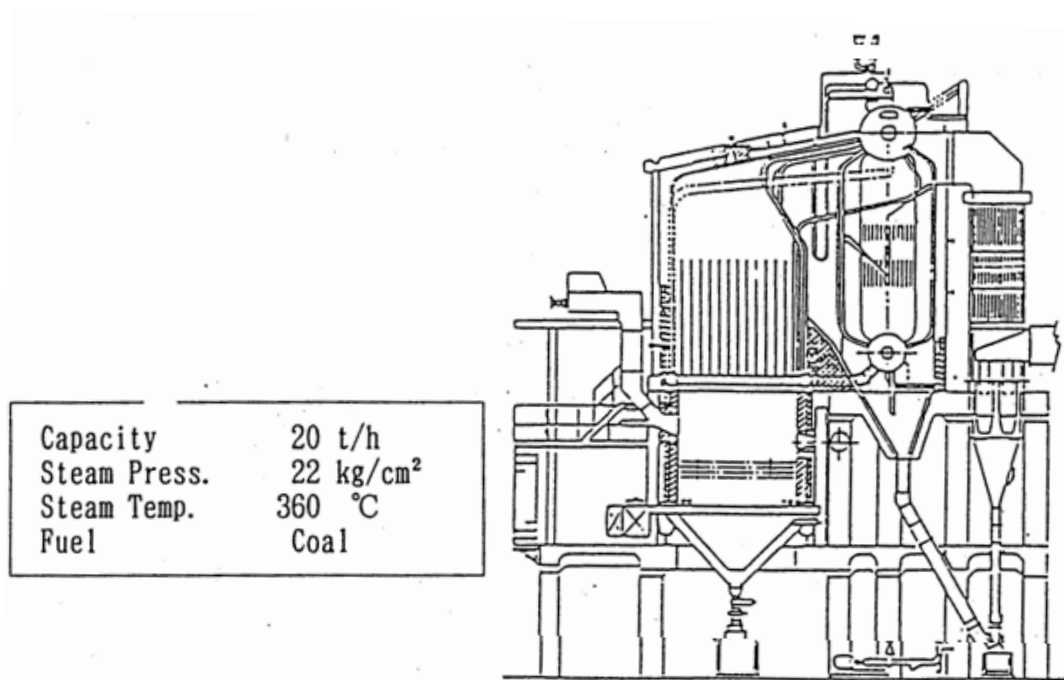


図 3-7 気泡（バブリング）形流動層燃焼自然循環水管式ボイラ

(出典：タクマ)

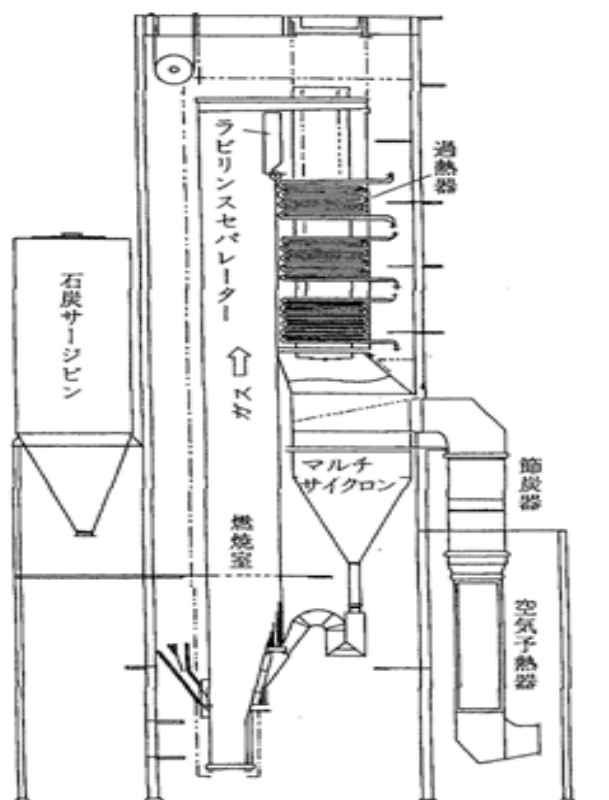


図 3-8 石炭焚循環流動層ボイラ  
(出典：NKK)

参考情報「日本の代表的な流動層ボイラメーカー」 出典：ボイラ年鑑等

JFE エンジ、IHI、パブ日立工業、タクマ、SHI、三菱重工業など

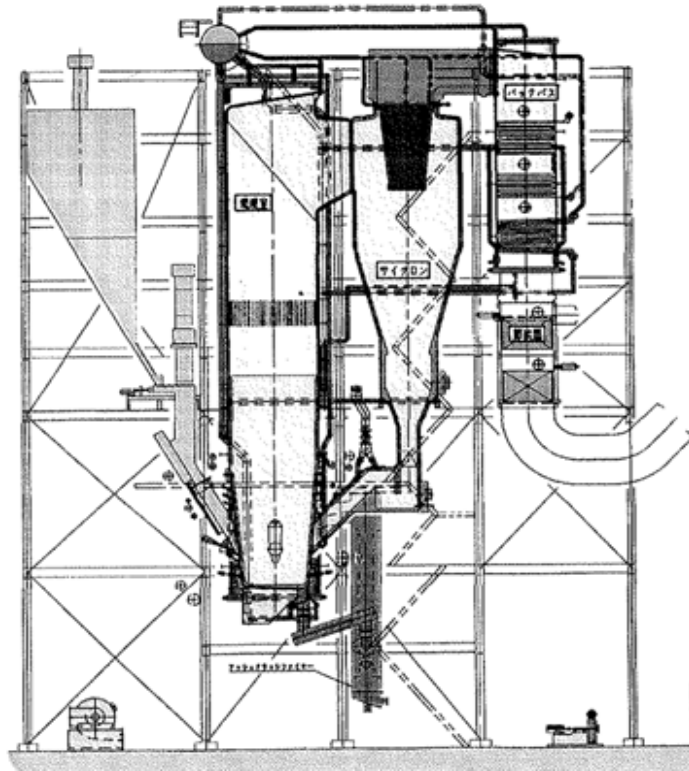


図 3-9 石炭・バイオマス混焼循環流動層ボイラ

(出典：タクマ)

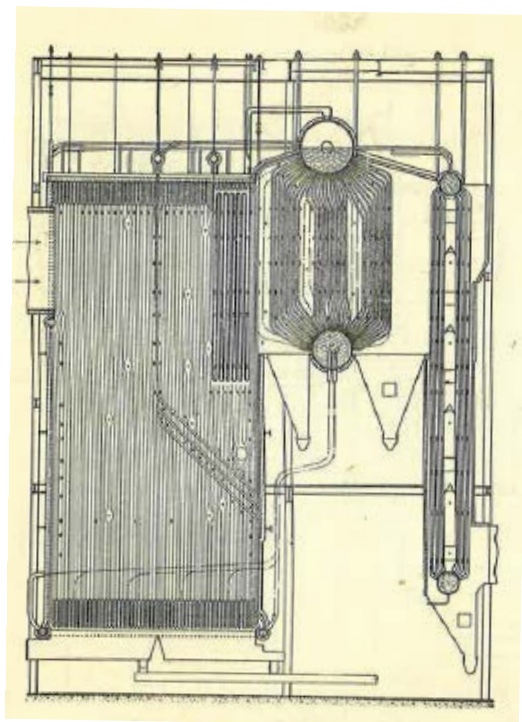


図 3-10 二胴型排熱回収ボイラ（出典：バブ日立・ボイラ便覧）

参考情報「日本の代表的な排熱回収ボイラメーカー」 出典：ボイラ年鑑等

三菱重工業、川崎重工業ほか多数あり

### 3.1.2 燃料

#### 3.1.2.1 燃料特性

工業用ボイラで使用されている燃料の主なものを表 3-2 に示す。使用されている燃料は、ボイラ規模、燃焼方式、蒸気の使用用途、運転条件、経済性評価等により多様である。現在、産業界では省エネルギーの推進、再生エネルギー買い取り制度の施行、廃棄物のリサイクル推進等の社会情勢を受けて、鉱質系燃料に限らず、可燃物や熱容量を有するガス・液体・固体など、エネルギー的価値媒体であれば全て利用されている状況にある。工業用ボイラの燃料質はハンドリング性（保管貯蔵・運搬など）、燃焼性、発熱量、灰分、環境保全、安全性等から評価を行う。燃料の形態から、固体燃料、気体燃料、液体燃料に大別され、各々の特性と評価を表 3-3 に示す。

NO<sub>x</sub> の生成抑制に関わる燃焼場における燃料質の影響は大きく、燃料品質選定や日常の管理は適切に実行されることが肝要である。

表 3-2 工業用ボイラで使用されている主な燃料

| 燃料種別 | 種類                                                   | 低位発熱量                             |
|------|------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| 固形燃料 | 石炭：無煙炭・瀝青炭・褐炭等<br>塊炭、粉炭、沈粉炭、ボタ等                      | 4,000～8,000 kcal/kg               |
|      | バイオマス：木屑、紙屑、繊維屑、粃殻、<br>藁、剪定枝、バガス、椰子殻、有機汚泥、<br>動植物残渣等 | 1,500～3,500 kcal/kg               |
|      | 廃棄物：生活系、可燃性産業廃棄物<br>下水汚泥、排水汚泥                        | 1,500～3,500 kcal/kg               |
|      | オイルコークス                                              | 8,400 kcal/kg                     |
|      | RDF、RPF、炭化物                                          | 3,000～4,000 kcal/kg               |
| 液体燃料 | 重油・軽油・灯油                                             | 9,700～10,400 kcal/L               |
|      | 廃油                                                   | < 2,000 kcal/L                    |
|      | FOP(Fuel Oil Product)                                | 9,640～10,400 kcal/kg              |
|      | COM (Coal Oil Mixture)                               | 8,200 kcal/kg (C/O=50:50)         |
|      | CWM(Coal Water Mixture)                              | —<br>(配合比で決定)                     |
|      | 黒液 (製紙)                                              | 3,140 kcal/kg                     |
| ガス燃料 | LNG                                                  | 13,000 kcal/kg                    |
|      | LDG (転炉ガス)                                           | 2,200 kcal/m <sup>3</sup> N       |
|      | COG (コークス炉ガス)                                        | 4,500 kcal/m <sup>3</sup> N       |
|      | 都市ガス 13A (東京都)                                       | 10,760 kcal/m <sup>3</sup> N      |
|      | 廃棄物溶融ガス                                              | 3,000～kcal/m <sup>3</sup> N       |
|      | バイオガス                                                | 3,000～6,000 kcal/m <sup>3</sup> N |

出典：火原協会講座、東ガス資料ほか

表 3-3 工業用ボイラ燃料の特性と評価

|             | 石炭（固体系）                                                                        | 石油系（液体系）                                                  | ガス系                                                                                 |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| ハンドリン<br>グ性 | 揚炭機、コンベア、貯炭<br>場、乾燥、粉碎などの広<br>大なインフラが必要、混<br>炭、調整、発熱酸化防止<br>等の管理が必要、動力費<br>が多い | 配管やローリ輸送で簡<br>便、<br>タンク貯蔵、安全対策<br>(引火爆発)が必要<br>危険物取扱に準拠する | LNG は沸点が低く、液<br>密度が低く取扱易い。引<br>火爆発対策が必要<br>LPG は保管温度に、オ<br>フガス系は腐食性不純<br>物に留意する必要があ |

|                    |                                                   |                                              |                            |
|--------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------|
|                    | 破碎性（HGI）は微粒化の目安となる                                |                                              | る                          |
| 燃焼性                | 炭質により、着火性、粘結性、破碎性、摩耗性、灰軟化熔融など異なる                  | バーナの噴霧特性に留意する必要があるが固形燃料より優れる                 | バーナで良好な燃焼が可能               |
| 灰処理                | 未燃灰、焼却灰滓、飛灰などの処理が必要                               | 飛灰処理のみ                                       | 灰分がなく処理不要                  |
| 環境保全性              | 煤塵、SO <sub>x</sub> 、NO <sub>x</sub> 、Hg 等の除去対策が必要 | 煤塵、SO <sub>x</sub> 、NO <sub>x</sub> の除去対策が必要 | 有害成分がないクリーン燃料（オフガスを除く）     |
| NO <sub>x</sub> 対策 | 低 NO <sub>x</sub> 型燃焼機・脱硝対策が必要                    | 石炭より対策が容易                                    | 不要または低 NO <sub>x</sub> 燃焼法 |

### 3.1.2.2 発熱量

実際使用時の発熱量は、水分や C・H・O の組成値や灰分により決まる。燃料中の水分は、ボイラにおける燃焼において、水蒸気の状態で存在する。水蒸気の蒸発熱は利用できないため、この様な発熱量を低位発熱量（Lower heating value 又は Net heating value）と呼び、水分の蒸発熱を加算した高位発熱量（Higher heating value または、Gross calorific value）と分けて使われている。石炭の場合、化学的構造が明確でないため分析値から近似実験式で算出されている。

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

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

H.H.V : 高位発熱量 (kcal/kg)

L.H.V : 低位発熱量 (kcal/kg)

C : 炭素 (%)    H : 水素 (%)    S : 硫黄 (%)    W : 水分 (%)

### 3.1.2.3 灰分

燃料中の灰分は、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MgO、NaO、K<sub>2</sub>O 等の無機質又は不燃性物質である。燃料により様々な灰分質に特徴があるため、燃焼条件への適合性に次の点に留意する必要がある。

- ① 燃焼温度と灰分の挙動における、軟化点、溶融点、流動点を把握して、燃焼阻害が発生しないこと。
- ② 灰中にはアルカリ金属の低融点化合物を含んでいるため伝熱面への付着・蓄積が発生する。一般にアルカリ率が<0.5 の場合は Slagging 等の現象は少ない。

$$\text{灰アルカリ率} = \text{塩基性成分 wt} / \text{酸性成分 wt}$$

③ 接触伝熱面に飛灰が堆積して閉塞しない管配列や煤落装置を設ける。

#### 3.1.2.4 燃料比（固定炭素／揮発分）

燃料比は、石炭などの固形燃料において、燃焼性（燃焼速度・着火性・保炎性など）に大きく作用する。燃焼方式の選定に重要な特性で、ストーカ燃焼では使用燃料が限定される。

石炭は炭化度の指標になり炭化度が進めば燃料比は大きい。

#### 3.1.2.5 粘着性及び集塊性

石炭の場合、石炭が加熱されたときに膨張してケーキ状になる性質を言い、ボタン指数で判断している。ボタン指数が高い石炭は、微粉炭のバーナノズルへの粘着閉塞や未燃分増加となる。ストーカ燃焼では火層での局所燃焼や吹抜燃焼を起こし、NO<sub>x</sub> 生成の原因になる。

#### 3.1.2.6 着火性

油燃料の着火性は、蒸発燃焼と拡散燃焼とあるが炎燃焼であり、一定の可燃範囲がある。着火性は、油種・性状（粘度・蒸発速度など）、噴霧方式、噴霧粒径、空気比、O<sub>2</sub> 濃度、油温、噴霧圧力等が影響因子である。不適な機器機能が選定された場合、振動燃焼や脈動燃焼の誘因となることもある。

ガス燃料は燃料流速、空気比がガスの特性の適正範囲を外れなければ安定した着火ができる。ガス組成やバーナ形式により乱流拡散火炎や予混合火炎によって状態は異なる。

石炭の着火性は燃料比が判定に用いられている。固定炭素が多い程、着火性は劣る。微粉炭燃焼では未燃損失に影響するため、燃料比が 3 以下を目安にする場合が多い。また石炭の着火性判定指数として次式が用いられている。

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

茲で HV：原炭発熱量(kcal/kg)

C: 固定炭素 (%)

VM: 揮発分 (%)

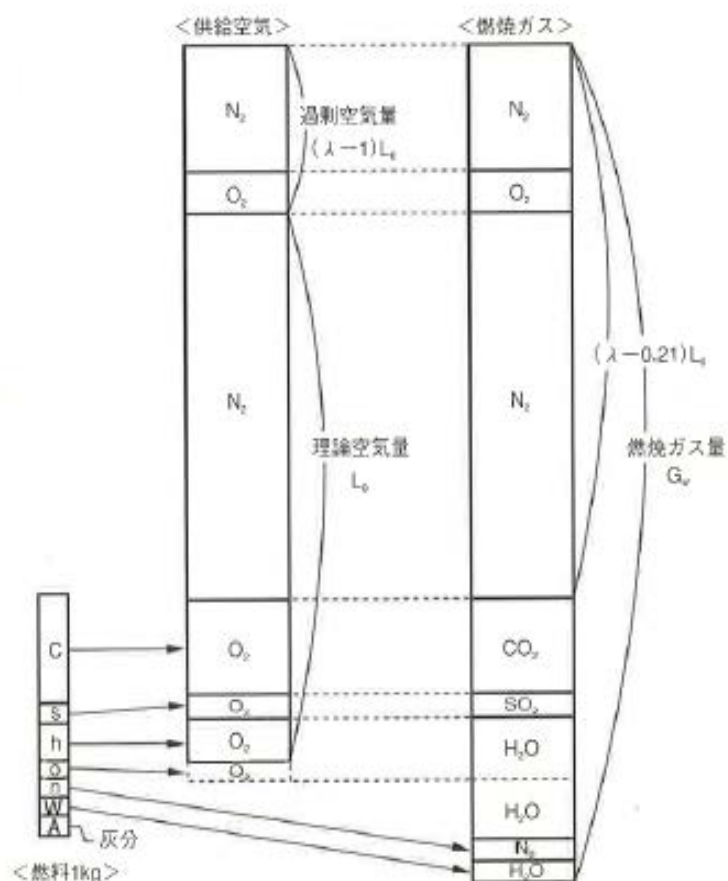
W: 湿分 (%)

着火性判定指数は、水分が多い石炭の着火の難易度の判定基準となる。指数が 35 以下の場合には着火性改善が必要である。

瀝青炭やバイオマス等の有機性固形物燃料の着火性は、燃焼方式がバーナ燃焼でない場合、ストーカ形式や発熱量により異なるため、指標として燃料比が目安とされる。後述する表 3-9 の事例等は適用可能なストーカ方式選定の代表的なものである。ストーカ燃焼の着火性の良否は、安定した火層の継続や燃焼ゾーンの安定に影響する。

#### 3.1.2.7 燃焼空気量・燃焼ガス量

燃料が完全燃焼した場合、必要とする空気量、燃焼ガス量は、燃料の元素組成から計算により正確に求めることができる。燃焼組成と燃焼空気量・燃焼ガス量の関係は図 3-11 に示すように実際のボイラでは、各々、燃焼に必要な理論空気量 ( $L_0$ ) より過剰空気で燃焼さ



れており、実際の燃焼空気量 (A)、燃焼ガス量 ( $G_v$ ) は過剰空気分が増える。

図 3-11 燃料組成と燃焼空気量・燃焼ガス量の関係

#### ① 固体・液体燃料

実際燃焼空気量  $A = mL_0$

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

実際燃焼ガス量  $G_v = (m - 1)L_0 + G_0$

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

ここで C、H、O、S、N、W は 燃料 1kg 中の kg 含有量、 $m$  は空気比を指す。

## ② ガス燃料

実際燃焼空気量  $A = mL_0$

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

実際燃焼ガス量  $G_v$

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

ここで  $CO$ 、 $CO_2$ 、 $CH_4$ 、等は気体燃料  $1 Nm^3$  中のガス容積 ( $Nm^3/Nm^3$ )、 $m$  は空気過剰率を指す。

### 3.1.2.8 石炭等の固形燃料

一般に工業用ボイラで使用されている固形燃料は、石炭とバイオマス系燃料である木材やバガス、可燃廃棄物である脱水汚泥、籾殻などがある。この中で  $NO_x$  生成への影響因子では、燃料比、N 分等である。木材、石炭の代表的な性状を表 3-4 に示す。

表 3-4 代表的な固形燃料の性状

| 種類<br>成分      |          | 木材          | 石炭          |             |             |
|---------------|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|               |          |             | 褐炭          | 瀝青炭         | 無煙炭         |
| 高位発熱量 kcal/kg |          | 1,800~3,500 | 4,800~6,950 | 6,000~8,400 | 6,500~8,400 |
| 工業分析          | 水分 %wt   | 30~60       | 5~15        | 1~5         | 27~35       |
|               | 灰分 %wt   | 1~5         | 2~25        | 2~20        | 1~5         |
|               | 揮発分 %wt  | 75~80       | 30~50       | 20~45       | 2~20        |
|               | 固定炭素 %wt | 20~25       | 30~40       | 45~80       | 5~15        |
| 燃料比           | —        | ≒0.2        | <1          | 1.0~4.0     | 4.5~17      |
| 元素分析          | C %wt    | 49~51       | 60~75       | 65~85       | 80~90       |
|               | H %wt    | 5~6         | 4~5         | 4~6         | 2~5         |
|               | N %wt    | 0.2~1.0     | 1.0~1.5     | 1.0~1.5     | 1.0~1.5     |
|               | T.S %wt  | 微量          | 0.5~2.0     | 0.5~2.0     | 0.5~2.0     |
|               | O %wt    | 42~45       | 15~30       | 5~15        | 1~5         |

(出典：日本ボイラ協会 技士テキスト等より作成)

### 3.1.3 燃焼技術

本項では固形・液体・ガス体燃料に使用されている燃焼技術について紹介する。

### 3.1.3.1 燃焼特性について

燃焼は、空気又は  $O_2$  によって燃料が酸化されて光や炎を生じる現象で、固形燃料（石炭など）・液体燃料（重油・軽油など）・気体燃料（LNG・LPG・バイオガスなど）などの種類によってその燃焼機構は異なる。燃焼工学上の燃焼の定義は「酸化に伴う発熱によって温度が上昇し、その結果として発生する熱輻射線の波長及び強さが肉眼に感ずるに至っているもの」とされている。

#### ① 燃料油の燃焼機構と $NO_x$ 生成

蒸発燃焼と分解燃焼があり炎燃焼である。燃焼反応は一種の化学反応で蒸発－燃焼の過程を取る。燃料油は複雑な多数の可燃性ガス( $C_mH_n$ )の混合物で、その分解温度が着火又は燃焼温度より低いいため燃焼する前に熱分解して  $C_m$  と可燃性ガスとなり、 $O_2$  と結合し燃焼する。 $C_m$  は表面燃焼して  $CO_2$  となり、 $C_mH_n$  は酸化して拡散燃焼により  $CO_2+H_2O$  になる。この燃焼反応により生じた熱でさらに熱分解を起こし分解燃焼と表面燃焼が交互、あるいは同時に起こることにより燃焼が連続的に進行する。燃焼に影響する因子は、油種性状（粘度・発熱量など）、噴霧方式（油圧など）・噴霧粒径・空気過剰率・ $O_2$  濃度、燃焼用空気温度、油/空気の攪拌、バーナ配置などである。

油燃焼の  $NO_x$  生成は、バーナ近傍の噴霧油滴の蒸発・着火により燃焼が継続されているため N 化合物の酸化による Fuel - $NO_x$  の生成と共に高温の火炎を形成するため Thermal - $NO_x$  の生成も割合も高くなる。

#### ② ガス燃焼機構と $NO_x$ 生成

拡散燃焼と予混合燃焼がある。拡散燃焼では酸化速度が拡散により乱流域で燃焼される。炎の安定性、制御性など優れた特性があるが、 $NO_x$  生成面から、火炎形状、滞留時間、燃焼温度の工夫を必要とする。予混合燃焼は高負荷燃焼や完全燃焼が可能であるが高温燃焼となり Thermal - $NO_x$  の生成に留意する必要がある。

石炭ガス、工業炉のオフガス、バイオガス等を除き、LNG や LPG は燃料中に窒素化合物が殆ど含まれないため、生成する  $NO_x$  は殆どが Thermal - $NO_x$  である。

#### ③ 石炭等固形燃料の燃焼機構と $NO_x$ 生成

燃焼方式により燃焼機構は異なる。微粉炭燃焼では火炉内に吹き込まれた一次空気と微粉炭は周囲の火炎、周囲の高温輻射熱を受け着火燃焼を始め、揮発分支配の一次燃焼域を形成する。

石炭粒子から揮発した  $CH_4 \cdot H_2 \cdot CO$  などが周囲から拡散してくる一次空気中の  $O_2$  と混合し、火炎を形成する。二次燃焼域は主に Char の燃焼であり、一次燃焼域から流込む未燃ガスと Char が二次空気との拡散混合により燃焼する。燃焼に影響する因子は、着火性、炭の燃切性（燃焼速度・粒子径・燃料比など）、 $O_2$  濃度、炉内温度などである。

ストーカ燃焼は、石炭表面に周囲の空気又は  $O_2$  が拡散して、表面で燃焼反応が行われる。融点の低い成分は熔融気化などで蒸発燃焼や分解燃焼する。

$NO_x$  生成は、有機窒素分を多量に含む石炭燃料の  $NO_x$  生成特性は複雑な反応形態を

している。

微粉炭燃焼では、一次燃焼、二次燃焼とも Thermal -NO<sub>x</sub> (Zeldvich 機構) と Prompt NO<sub>x</sub> 及び Fuel -NO<sub>x</sub> が含まれる。ストーカ燃焼の場合は火層が高温の場合や厚焚きで接触時間が長くなる場合、Thermal -NO<sub>x</sub> が支配的となる。

### 3.1.3.2 空気比

燃焼に必要な理論空気量と実際必要とする空気量の比を空気比 (Air ratio) 又は空気過剰率 (Excess air ratio)、またこの逆数を当量比 (Equivalent ratio) と称している。ボイラの燃焼起源の全ての動的特性 (効率・ガス組成・燃焼温度・ガス量・燃焼制御など) に関わる重要な特性である。

空気比  $m = \text{実際の空気量 } A / \text{理論空気量 } L_0$

当量比  $\phi = 1/m$

日本では省エネルギーの視点から、蒸発量毎に燃焼方式・使用燃料により、表 3-5 に示す管理基準が法定されている。また更に厳しい表 3-6 に示す目標値も設定されている。

表 3-5 労働安全衛生法施行令 一般ボイラの空気比の管理基準

| 区分<br>蒸発量 t/h | 負荷率<br>% | 固体燃料 <sup>(*)</sup><br>固定床燃焼 | 固体燃料<br>流動層燃焼 | 液体燃料     | 気体燃料     |
|---------------|----------|------------------------------|---------------|----------|----------|
| >30           | 50~100   | 1.3~1.45                     | 1.2~1.45      | 1.1~1.25 | 1.1~1.2  |
| 10~30         | 50~100   | 1.3~1.45                     | 1.2~1.45      | 1.15~1.3 | 1.15~1.3 |
| 5~10          | 50~100   | —                            | —             | 1.2~1.3  | 1.2~1.3  |
| <5            | 50~100   | —                            | —             | 1.2~1.3  | 1.2~1.3  |
| 小型貫流ボイラ       | 100      | —                            | —             | 1.3~1.45 | 1.25~1.4 |

注(\*) : 固形燃料微粉炭焚きの場合、蒸発量>10t/h にあつては 1.2~1.3 とする。

表 3-6 労働安全衛生法施行令 一般ボイラの空気比の目標値

| 区分<br>蒸発量 t/h | 負荷率<br>% | 固体燃料 <sup>(*)</sup><br>固定床燃焼 | 固体燃料<br>流動層燃焼 | 液体燃料      | 気体燃料      |
|---------------|----------|------------------------------|---------------|-----------|-----------|
| >30           | 50~100   | 1.2~1.3                      | 1.2~1.25      | 1.05~1.15 | 1.05~1.15 |
| 10~30         | 50~100   | 1.2~1.3                      | 1.2~1.25      | 1.15~1.25 | 1.15~1.25 |
| 5~10          | 50~100   | —                            | —             | 1.15~1.3  | 1.15~1.25 |
| <5            | 50~100   | —                            | —             | 1.15~1.3  | 1.15~1.25 |

|             |     |   |   |          |          |
|-------------|-----|---|---|----------|----------|
| 小型貫流ボ<br>イラ | 100 | — | — | 1.25~1.4 | 1.2~1.35 |
|-------------|-----|---|---|----------|----------|

注(\*：固形燃料微粉炭焚きの場合、蒸発量>10t/h にあつては 1.2~1.25 とする

黒液燃焼 1.2~1.3

固形燃料に求められる目標値は、固定床燃焼法では指定する負荷率の範囲内で、安定燃焼、未燃損失、燃焼制御を適正に行い達成するには、厳しい値で高機能燃焼機の採用が必然的に求められる条件である。

### 3.1.3.3 燃焼ガス温度

NO<sub>x</sub> 生成場は火炎中と燃焼室の温度に相關することが確認されている。燃焼ガスの低温化は NO<sub>x</sub> 生成抑制対策の主要な方策であるが、燃焼雰囲気やボイラの燃焼室における熱吸収率の制約もあり、負荷変動、火炎形状、燃焼室伝熱面構造、燃焼室熱負荷、出力規模、脱硝の経済性等を検討して決定する。

燃焼ガス温度は、燃焼室雰囲気温度や燃焼条件によって、大幅に変わる為、燃焼ガス温度の計算は容易ではないが、燃焼ガス周囲が完全に断熱された状態を仮定した「断熱理論火炎温度」を次式で計算して求め、対策の参考とされている。

$$T_g = \text{LHV} / (\text{Gv} \times \text{Cpg})$$

T<sub>g</sub>: 理論火炎温度 (°C)

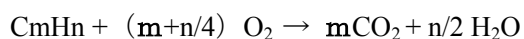
LHV: 燃料の低位発熱量 (kJ/kg 又は kJ/m<sup>3</sup>N)

Gv: 燃焼排ガス量 (m<sup>3</sup>N/kg 又は m<sup>3</sup>N/m<sup>3</sup>)

Cpg: 排ガスの平均比熱 (kJ/m<sup>3</sup>N・K)

(燃焼前の空気・燃料の顕熱は省く)

本式による算定は下記で示す完全燃焼で熱解離反応が発生しない 2000°C以下の条件である。



### 3.1.3.4 燃焼方式

工業用ボイラで使用されている燃焼方式は、使用する燃料が多様なことと、ボイラ規模や用途が多岐にわたる関係で多くの方式が普及している。一般に液体燃料やガス燃料ではバーナ燃焼、石炭やバイオマス等の固形燃料では多様な形式があり、ストーカ燃焼、流動層燃焼、Kiln 燃焼などが使用されている。微粉炭や Saw Dust のような木粉、穀殻などはバーナ燃焼もされている。

表 3-7 は代表的な燃焼方式の維持費や特性の比較である。表 3-8 に石炭を専焼とする工業用ボイラに対する適用性について示す。

表 3-7 代表的な燃焼方式の維持費等の特性比較

| 燃焼方式          | 設備規模 (t/h) | 維持費 | 空気率 | 燃焼率 | 制御性 |
|---------------|------------|-----|-----|-----|-----|
| 鎖床ストーカ        | 1~10       | 1   | 1   | 1   | 1   |
| Spreader ストーカ | 10~300     | 2   | 2   | 2   | 2   |
| 微粉炭燃焼         | 30~300     | 4   | 4   | 4   | 4   |
| BFC(気泡流動層)    | 10~50      | 3   | 4   | 4   | 3   |
| CFBC(循環流動層)   | 30~250     | 4   | 4   | 4   | 4   |
| バーナ燃焼 (油)     | 制約なし       | 3   | 5   | 5   | 5   |
| バーナ燃焼 (ガス)    | 制約なし       | 2   | 5   | 5   | 5   |

指標比較： 劣 1<2<3<4<5 優

表 3-8 石炭専焼の場合の工業用ボイラへの適用性

| 燃焼方式      | Spreader<br>ストーカ | 微粉炭     | BFC                | CFBC         |
|-----------|------------------|---------|--------------------|--------------|
| 炭質の適用性    | 低燃料比<br><2.5     | 広い      | 低品位炭可能             | 低品位炭可能       |
| 燃焼効率      | 82~88            | 90~92   | 87~90              | 87~90        |
| Turn-Down | 1/5              | 1/2     | 1/5                | 1/3          |
| 負荷応答性     | 3 %/min          | 5 %/min | 3 %/min            | 3 %/min      |
| 実績缶数      | 小型缶に多数           | 大型缶に多数  | 小中型缶に多い            | 中大型缶に多い      |
| 保守・損耗など   | 火格子の焼損<br>クリンカ対策 | 微粉碎機の摩耗 | 内挿入管の摩耗<br>腐食、流動不遜 | 火炉内壁面の摩<br>耗 |

### 3.1.3.5 燃焼機と燃料の特徴

#### ① バーナ燃焼 (液体・ガス)

##### a. ガス燃焼

ガス燃焼は重油燃焼に比べて次のような特徴がある。

低圧噴射で空気と拡散混合燃焼し、油燃焼のような噴霧蒸発過程がないため短炎である。反応速度、火炎温度は空気との混合条件に支配される。

成分の C/H 比が小さいため燃焼過程で煤の生成が無い。(不輝炎)

低空気比でも燃焼が安定し、Turn Down 比が大きくとれる。燃焼速度が速く、可燃範囲が広い。

着火失敗があると爆発の危険がある。

##### b. 油燃焼

油の一定以上の流動性を保つため加温して、油圧噴霧方式や蒸気/空気等の

atomizing-assist による拡散効果を利用した方式がある。ガス燃料と異なるのは、蒸発の過程をとり燃焼用空気と拡散燃焼を行うことにある。この点、完全燃焼に一定の時間があり、NO<sub>x</sub> 生成抑制法において、噴霧粒径、拡散効果、空気の混合法等に工夫がなされる。

### c. 微粉炭燃焼

微粉炭燃焼は燃焼温度が 1,500℃程度であるため、空気中の N<sub>2</sub> を根源とする Zeldovich 反応機構による NO<sub>x</sub> の寄与は少ない。これは N<sub>2</sub> を N 原子に分解する反応の活性エネルギーが 315 kJ/mol と大きいためである。その為、C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>、O<sub>2</sub> との拡散火炎反応によって生じる Prompt NO<sub>x</sub> 反応機構と考えられている。Fuel -NO<sub>x</sub> は石炭中の N 分から生じた HCN、CN、NH<sub>i</sub> などが Prompt NO<sub>x</sub> と同様の生成過程で NO<sub>x</sub> を生成すると考えられている。

### ② 火格子（ストーカ）燃焼

ストーカ燃焼は揮発分の多い石炭や、木屑・バーク・バガス等のバイオマス、有機性可燃廃棄物などの固形燃料の燃焼方式として古くから利用されている。日本国内の稼働罐は、1980 年代から石炭調達事情から少数になったが、中国や ASEAN 諸国では、揮発分の多い褐炭や瀝青炭、バイオマス燃料に多数使用されている。

図 3-13 にストーカ燃焼の燃焼形態と空気・火層のメカニズムを示す。

燃料は下込め式を除き、ストーカ上に一定厚さに散布又は送出され、空気はストーカ下部から送気される。燃焼の進行又は火層の形成は、下から上に灰層、火層、燃料層（乾燥・加熱）となる。ストーカは固定火床式（水平形/傾斜形）、順送移動火床式、逆送移動火床式があり、火床への燃料の供給方法にも、一定層厚で送り出す Cut-Gate 押出式、空気又は回転式散布機で火床に散布する Spreader 式などがある。

燃焼効率、固定火床式<順送移動火床式<逆送移動火床式の順に高い。格子間の間隔や形状、空気抵抗などにより、粉状の燃料（粉炭、Saw Dust など）の Riddling が増加することや、浮遊燃焼率が増え飛灰の増加がある。

図 3-14、図 3-15 の順送移動火床式ストーカ燃焼の概念図に示すように、順送火床の場合は、着火ゾーン、燃焼ゾーンが火床横方向に一線状となり、燃焼層の混合が無いため、局所燃焼や吹抜け燃焼が発生し易く、NO<sub>x</sub> 生成面からみると好ましくない。逆送散布方式では、火層全面が燃焼ゾーンとなるが、炭粒径や火層厚の制御が必要である。

逆送移動火床式燃焼の場合の適用できる炭種を表 3-9 に示す。この値を超える場合も燃焼可能であるが、燃焼率の低下、安定性や負荷応答性、NO<sub>x</sub> 生成、灰障害等の支障が出る。一般に NO<sub>x</sub> の生成面では、吹抜燃焼や局所燃焼が発生し易く、火層でそのような現象が発生し易い。局部高温燃焼が発生すれば Thermal -NO<sub>x</sub> の発生が増加する。

また、微粉炭燃焼に比較して、気流燃焼の占める割合が少なく、火層燃焼が支配的のため低空気など低 NO<sub>x</sub> 燃焼を行うための制御性に制約がある。

現在、瀝青炭用で使用されているボイラ規模では順送移動火床式で最大蒸発量 20t/h 程度、逆送移動火床式で 30t/h の中小出力工業用ボイラが多い。

表 3-9 逆送移動火床式ストーカ燃焼の適用炭の条件

| 炭種         | 瀝青炭、褐炭、亜炭            |
|------------|----------------------|
| 石炭粒径       | <2mm 但し <2mm → 30%以内 |
| 湿分（付着水分）   | < 10 %               |
| 高位発熱量      | >4,000 kcal/kg       |
| 灰分         | < 35 %               |
| 揮発分        | >20 %                |
| 燃料比        | < 2.5                |
| ボタン指数(粘結性) | < 2.5                |
| 灰の軟化点      | <1150 °C             |

低品位炭や有機性固形燃料（バイオマス、脱水汚泥、可燃性廃棄物など）の燃焼では、傾斜階段式ストーカが普及している。

乾燥→燃焼→後燃焼と緩慢な燃焼を行い、水分含有が多く低質な発熱量や灰分の多い材をボイラ燃料として利用する場合に適する方式である。吹抜燃焼が発生しないよう制御されていれば、低燃焼温度のため Thermal -NO<sub>x</sub> の生成は少ない。

図 3-16 は可燃性廃棄物燃焼用階段式ストーカ燃焼機の構造の一例を示す。

脱水有機汚泥や農産廃材、廃棄物等の専焼や石炭等との混焼用には、多様な Grate 形状や燃焼方式が普及している。

### ③ 流動層燃焼

流動層燃焼は、珪砂や石灰石のような燃焼に直接関与しない粒子の高温粉体層を底部から吹き込む空気で沸騰に似た様相の流動層とした後、この中に直径が数 10mm 以下の燃料を投入して燃焼させる方式である。ボイラでは、燃焼流動粒子とガス流速により、気泡流動層と循環流動層が固形燃焼用として普及している。

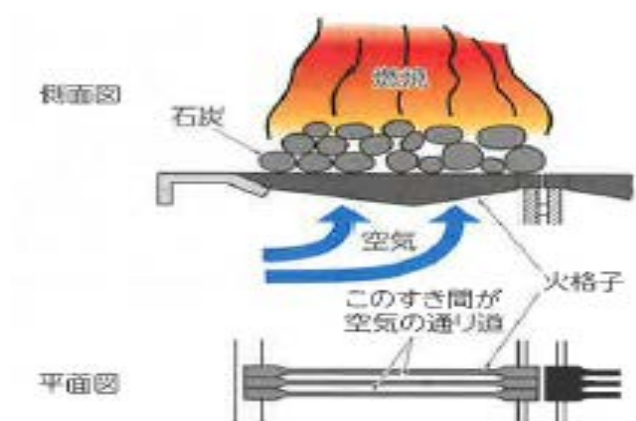


図 3-12 ストーカー 燃焼の燃焼形態

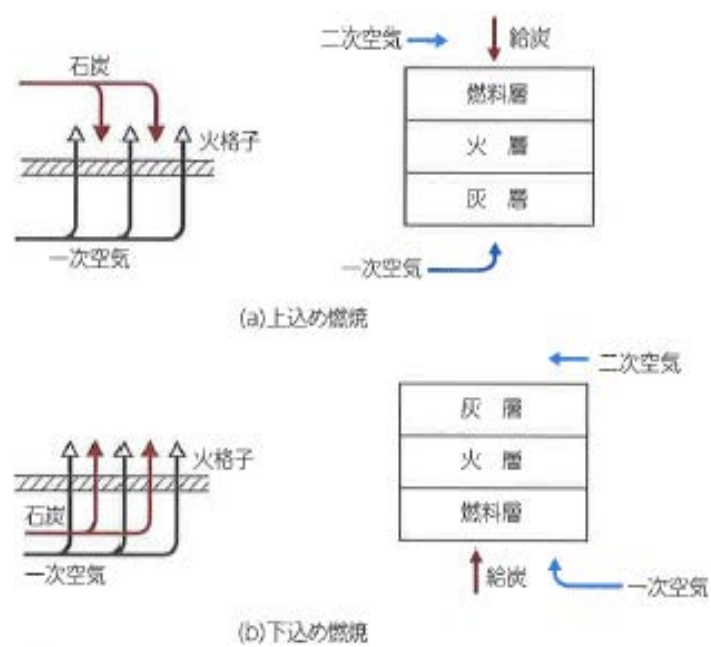


図 3-13 ストーカー燃焼の空気・火層メカニズム

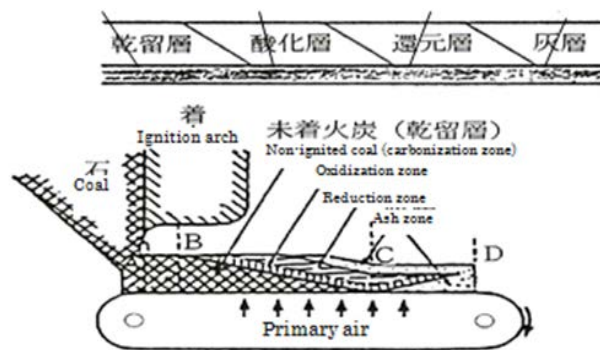


図 3-14 順送移動火床式ストーカ燃焼の概念図

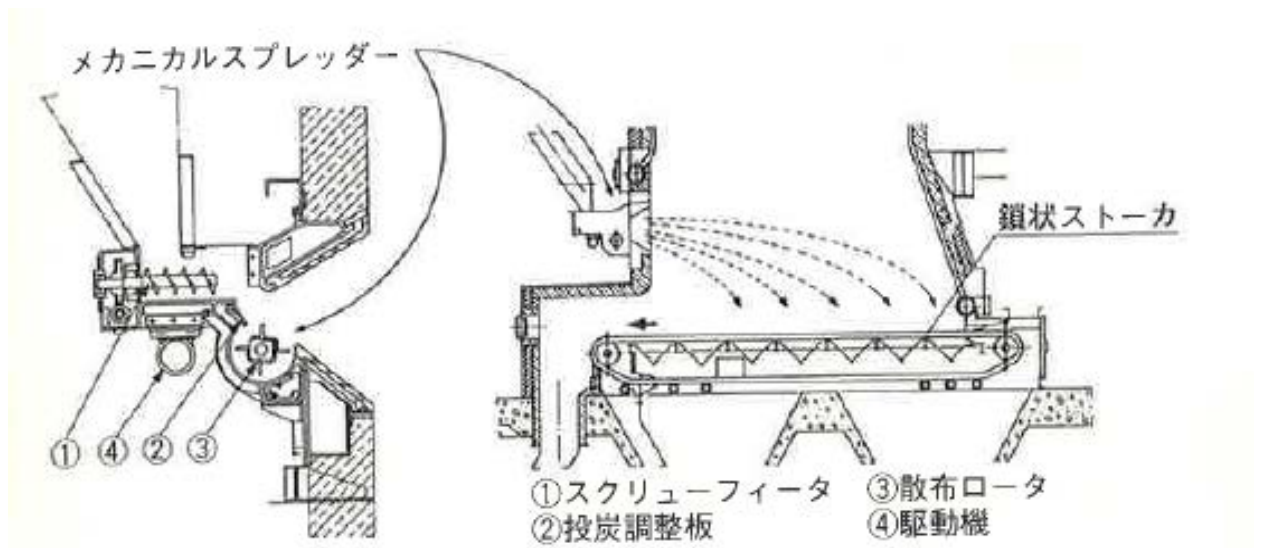


図 3-15 逆送移動火床式ストーカ燃焼の概念図

#### a. 気泡流動層燃焼 (BFBC: Bubbling Fluidized Bed Combustion)

ガスの流速が遅く、燃料粒子の最小流動化速度以下の領域では、粒子が静止状態を保つが、最小流動化速度以上の空塔速度が比較的遅い領域では粒子層内に気泡が出現し、気泡の上昇につれて粒子が活発に流動運動し、全体として沸騰状態になる。

燃料粒子はガスに同伴されことなく層内に留まり燃焼を継続する。一般に流動層内に蒸発管を配し層内温度を  $700\sim 900^{\circ}\text{C}$  に制御できるため、低融点の石炭や汚泥のような貧位燃料でも熔融障害が生じず燃焼可能である。図 3-17 気泡流動層燃焼の流動概念図である。

#### b. 循環流動層燃焼(CFC: Circulating Fluidized Bed Combustion)

ガス流速が  $4\sim 8\text{m/sec}$  と速く粒子循環時間（滞留時間）が長く、燃焼室全域で燃焼反応が進行する。ガスの流速が増して、燃料粒子流動化の終端速度以上になれば、燃料粒

子とガスの混合はより活発となり、一部の燃焼が完了していない燃料粒子はガスに同伴して燃焼室外に飛散する。この飛散した粒子は後流に設けたサイクロン等で補集され、再度燃焼室に戻される。

このように燃料を流動部と補集部で循環させて燃焼を継続させる。なお、サイクロンのような補集部を燃焼室と別置にした外部循環方式と、燃焼室内で循環する内部循環方式がある。

図 3-18 は外部循環流動層ボイラの基本的概念図、図 3-19 は内部循環流動層ボイラの概念図である。なお循環流動層燃焼ボイラについての詳細は 2014 年 7 月 30 日付け報告書(添付資料 1)を参照のこと。

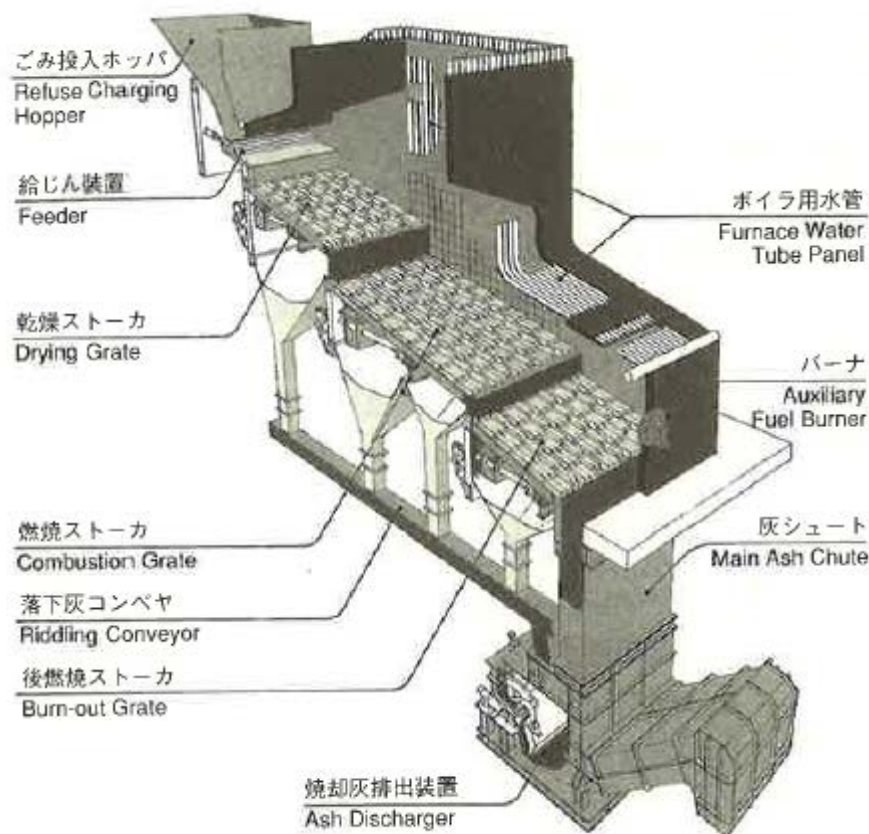


図 3-16 可燃性廃棄物燃焼用階段式ストーカ燃焼機

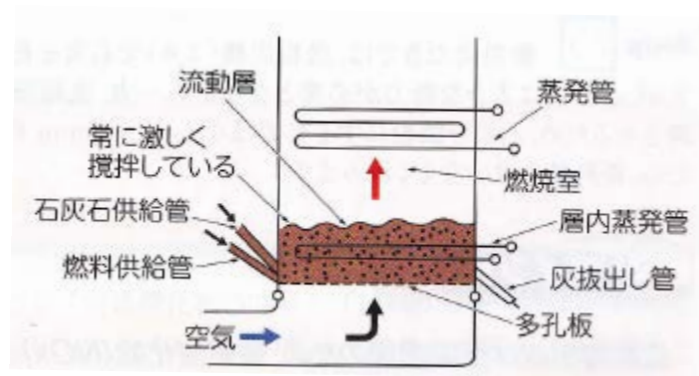


図 3-17 気泡流動層燃焼の流動概念図

(出典 JBA 資料)

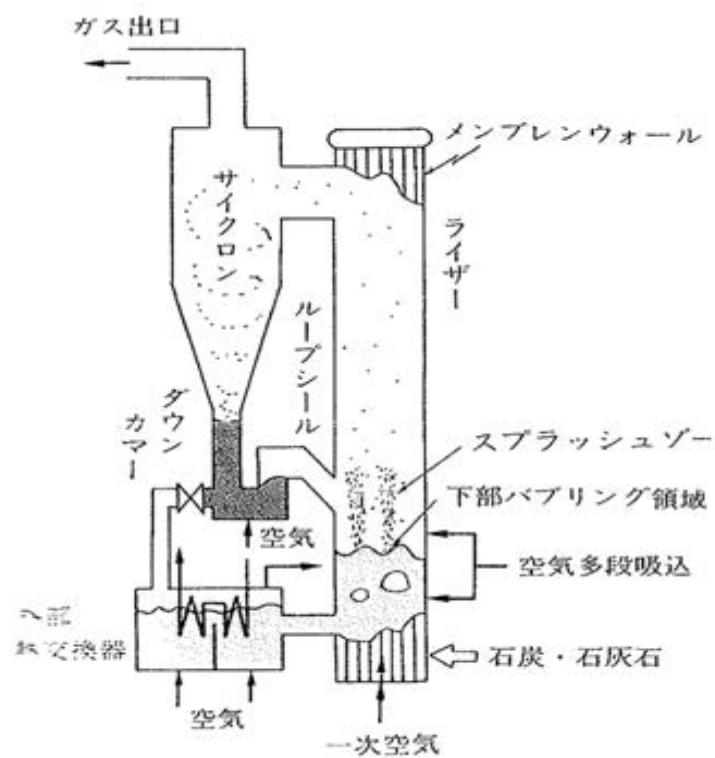


図 3-18 外部循環流動層ボイラの基本的概念図

(出典：火力原子力発電技術協会)

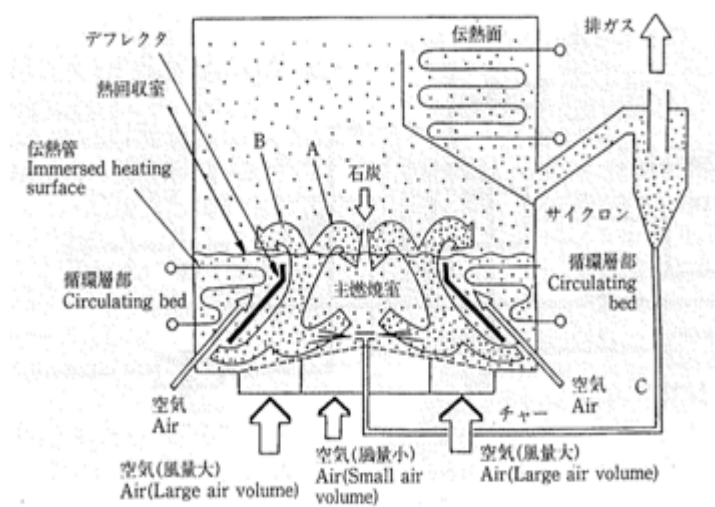


図 3-19 内部循環流動層ボイラ

(出典：荏原)

### 3.1.3.6 導入業種等による特徴

日本で使用されているボイラは、行政監督所掌上、発電用と工業用に二分されていることを 1.3 で述べた。また工業用ボイラには冷暖房用ボイラや小型ボイラも含む。法的範囲を別にして本報では、発電事業を目的とするボイラと民生需要（冷暖房等）や産業活動で使用するボイラを広義に工業用ボイラと見做した場合、表 3-10 に示すように、製紙業や食品業など低温域の熱需要が大きい業種では、熱併給発電 (Co-Generation) が導入されており、セメント製造業や鉄鋼・非鉄・ガラス製造業などの排熱回収では発電主体の排熱回収ボイラが導入されている。

現在、熱のカスケード的利用による熱効率の向上が殆どの事業所で採用されており、低圧飽和蒸気を加熱源とする場合でも、一次側を高圧高温蒸気で排熱発電方式を導入するケースが多い。

表 3-10 業種別ボイラ形式等の導入事例

| 業種      | 導入システム | ボイラ形式                         | 使用燃料                        |
|---------|--------|-------------------------------|-----------------------------|
| 製紙業     | 熱併給発電  | CFBC、FBC、ストーカ式自然循環ボイラ、黒液回収ボイラ | 石炭、汚泥、産廃、オイル<br>コークス、RDF、黒液 |
| セメント製造業 | 排熱回収発電 | 水管、強制循環、<br>排熱回収ボイラ、PC 燃焼ボイ   | AQC & SP 排ガス<br>石炭、RDF、脱水汚泥 |

|                |                 |                                 |                             |
|----------------|-----------------|---------------------------------|-----------------------------|
|                |                 | ラ                               |                             |
| ガラス製造業         | 排熱回収発電          | 水管、強制循環、排熱回収ボイラ                 | 溶炉排ガス                       |
| 鉄鋼業            | 排熱回収発電<br>コンバイン | 強制循環、排熱回収ボイラ                    | 高炉ガス（GT 排ガス）、コークス炉ガス、加熱炉排ガス |
| 食品製造業          | 熱併給発電<br>熱供給    | FBC、炉筒煙管、小型貫流、温水、<br>自然循環、貫流ボイラ | 軽質油、ガス、汚泥                   |
| 冷暖房            | 蒸気/温水熱交換        | 鋳鉄ボイラ、温水ボイラ、                    | ガス、軽質油、RDF、廃木材              |
| 木材加工業          | 熱併給発電           | FBC、ストーカ式、自然循環                  | バイオマス（廃木材）、可燃産廃             |
| 原糖工場           | 熱併給発電           | ストーカ式、FBC、自然循環、                 | バガス、バイオガス                   |
| 工業団地           | 熱併給発電<br>多缶設置方式 | CFBC、FBC、ストーカ式、小型貫流、炉筒煙管、       | ガス、可燃産廃、軽質油                 |
| その他低圧飽和蒸気の需要産業 | 単缶又は多缶設置方式      | 小型貫流、炉筒煙管、排熱回収、                 | ガス、軽質油                      |

備考：CFBC：循環流動層燃焼、FBC：バブリング流動層燃焼 PC：微粉炭バーナ燃焼、  
その他は全てバーナ燃焼

## 3.2 窒素酸化物 (NOx)

### 3.2.1 窒素酸化物生成の基本原則、環境影響

NOx には結合状態により数種類の存在が知られており、N<sub>2</sub>O、NO、NO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> などがあるが、工業用ボイラに関わる燃料（固体・液体・気体）の燃焼による燃焼生成物として重要なのは、NO と NO<sub>2</sub> である。一般に両方の化合物の和を総称して NOx と称している。

様々な大気汚染物質のうち、燃焼に伴い生成する大気汚染物のうち、SOx は燃料中の S 分を除去することでその生成を防げるが、NOx は生成過程が異なり、燃料中の N 分を除去しても、空気中の窒素に起因して生じるため、生成低減対策は燃焼機や燃焼条件など多面に及ぶ。

ボイラにおける燃焼ガスでは NO が圧倒的に多く、容積比で NOx の 90~95%vol. を占める。排ガス中には他に N<sub>2</sub>O、N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> などもあるが微量である。

NOは大気中に排出されると大気中のO<sub>2</sub>やO<sub>3</sub>などにより酸化され、NOやNO<sub>2</sub>は平衡状態になることが確認されている。

燃焼により発生するNO<sub>x</sub>は、その起源により次の2種類に区分される。

- ①Thermal -NO<sub>x</sub>：熱的反応に起因、空気中のN<sub>2</sub>分子が高温状態で酸化された生成するもの
- ②Fuel -NO<sub>x</sub>：燃料中に含む各種窒素化合物を起源として燃焼に際して生成されるもの

### 3.2.1.1 Fuel -NO<sub>x</sub>の生成と挙動

燃料中に窒素化合物（Fuel N）が含まれていると、それが燃焼過程でNOに変換される。このようなNOはFuel -NOと称され、空気中のN<sub>2</sub>が起源となるNO(Thermal-NO)と生成過程が異なる。燃料中の窒素含有量は燃料の種類や産地により異なるが、一般的に表 3-11に示す範囲にある。

表 3-11 燃料中の窒素含有率

| 燃料の種類                | 窒素含有率（重量%）    |
|----------------------|---------------|
| 原油（中東系）              | 0.09 ~0.22    |
| C 重油                 | 0.1~0.4       |
| A 重油                 | 0.050.1       |
| 軽油                   | 0.02 ~0.03    |
| 灯油                   | 0.0001~0.0005 |
| オイルコークス              | 1.12 ~ 2.59   |
| 石炭                   | 0.2 ~3.4      |
| LPG・都市ガス             | —             |
| LNG                  | 0.1           |
| 樹皮                   | 0.5           |
| バイオマス（木材・バガス・<br>籾殻） | 0.05~0.1      |
| 都市廃棄物                | 0.4~0.6       |

出典：Formation Mechanisms & Controls of Pollution in Combustion System, JSME ほか

石炭燃焼の熱分解過程における揮発分NOの生成とChar NO生成挙動について図 3-20に示す。

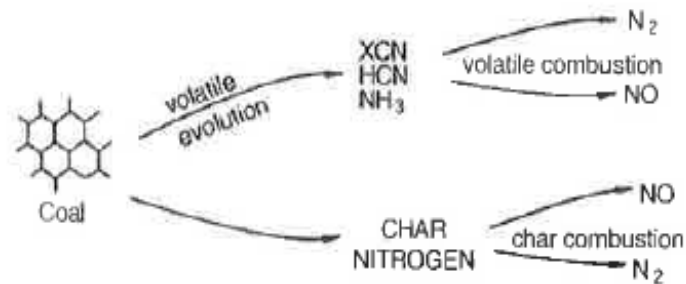


図 3-20 石炭中の N 分の燃焼過程における挙動

石油系に含まれる窒素化合物は、ピリジン(Pyridine,  $C_5H_5N$ )、キノリン(Quinoline,  $C_9H_7N$ )等の塩基性物質やピロール(Pyrrole,  $C_4H_5N$ )、インドール (Indole,  $C_8H_7N$ )、カルバゾール (Carbazole,  $C_{12}H_9N$ )等の非塩基性物質の環化合物がある。石炭系燃料に含まれる窒素化合物の構造は明確ではないが、複素環結合又は鎖状結合と考えられている。これらの結合は弱いので燃焼過程で  $N$ ,  $NH_i$  ( $i=1,2$ ) 等の化学種を放出しやすく、比較的低温でも  $NO$  に変換される。

仮に、 $C_mH_{2n}$  形燃料に 1%wt. の  $N$  分が含有している場合、これが全て  $NO$  に変換されると当量比 1 の理論乾き燃焼ガスにおいて 1,500ppm-mol ( $O_2=0\%$ 換算) となる。石炭や重質油の燃焼では相当量の Fuel- $NO_x$  が生成されることが予想される。

ガス燃料にも窒素分が含まれるものもあるが、その形態はほとんどが  $N_2$  であり、空気中の窒素と同じ挙動を示す。

Fuel- $NO_x$  の生成特性に影響する主要因子は、当量比、火炎温度、圧力、燃料種、窒素化合物 (Fuel-N) の種類と濃度などである。実際のボイラにおける燃焼過程では、全ての  $N$  分が  $NO_x$  に変換するわけではない。重油の場合の転換率は  $N$  分 0.1~0.2%で 60~40%である。また、固体燃料の場合、揮発成分から発生する volatile- $NO_x$  と Char 中の  $N$  から発生する Char- $NO_x$  がある。Volatile- $NO_x$  の  $NO_x$  転換率は Char- $NO_x$  より大きい。図 3-21 に燃料中の  $N$  分と Fuel- $NO_x$  の関係を示す。

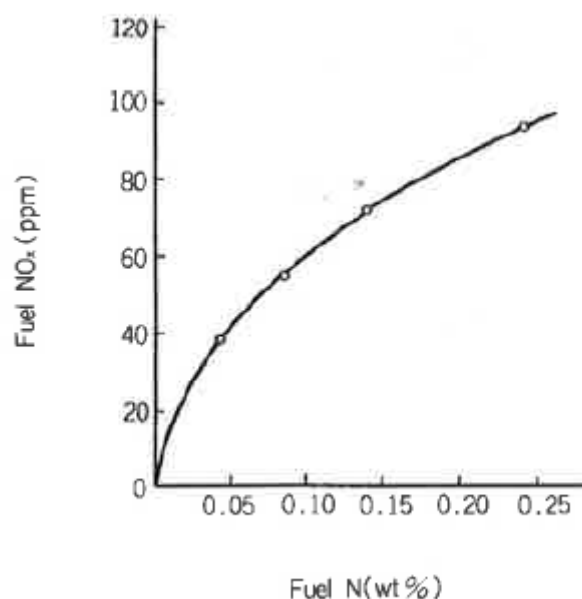
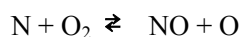
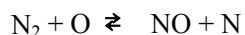


図 3-21 燃料中の N 分と Fuel -NO<sub>x</sub> の関係

(出典：加藤、*Low NO<sub>x</sub> Combustion Technology in Boiler*, 紙パ技協誌 No.45-5、1991)

### 3.2.1.2 Thermal -NO<sub>x</sub> の生成

Thermal -NO<sub>x</sub> は生成の特徴から Zeldovich-NO<sub>x</sub> と Prompt-NO<sub>x</sub> に分けられる。Zeldovich-NO<sub>x</sub> は火炎後流の高温燃焼ガス中で生成されるものであり、空気過剰並びに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 Zeldovich 機構で説明できる。



Zeldovich-NO は燃焼温度が高い程、O<sub>2</sub> 濃度が高い程、また高温での滞留時間が長いほど増加する。

この原理に基づいた各種の抑制法が希薄予混合燃焼、排ガス再循環、濃淡燃焼、水・水蒸気噴射、緩慢混合、二段燃焼などである。

燃焼反応が盛んな火炎部やその近傍では拡大 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 Prompt-NO と呼ぶ。この現象は炭化水素燃料特有のものであり、CO や H<sub>2</sub> のときには見られない。生成は燃料過剰のときに多く、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。微粉炭燃焼では、揮発分燃焼域で粒子まわりの拡散火炎ゾーンにおける生成が数十 ppm 程度生成されるため、極低 NO<sub>x</sub> 微粉炭燃焼では無視できない。しかし、Prompt-NO<sub>x</sub> の生成絶対量は多くなく、一般には Zeldovich-NO が

支配的で低減対策もその方向で取られている。

### 3.2.2 窒素酸化物削減技術の基本原則

工業用ボイラの NO<sub>x</sub> 排出削減の基本的技術は、次の二つに分かれる。

NO<sub>x</sub> 生成原理から、生成抑制を目的とする技術

- ① 燃料中の N 分低減化
- ② 低空気比燃焼（低 O<sub>2</sub> 濃度）
- ③ 火炎温度の低下
- ④ ガス滞留時間の短縮

排ガス中の NO<sub>x</sub> 濃度の削減除去を目的とする技術

- ① NO<sub>x</sub> を N<sub>2</sub> と H<sub>2</sub>O に還元する
- ② 活性炭を用いて NO<sub>x</sub> を選択除去する

工業用ボイラで実際利用されている各技術は後述 3.3 で説明する。

### 3.2.3 窒素酸化物（NO、NO<sub>2</sub>）の環境影響等

NO<sub>x</sub> は燃焼によって発生するものは、NO と NO<sub>2</sub> であり、NO<sub>x</sub> はこの総称である。

ボイラなどの一般燃焼装置から排出される燃焼ガスでは、NO/NO<sub>x</sub> 比は 90~95%vol が NO である。NO の毒性は NO<sub>2</sub> より低いという報告があるが NO<sub>x</sub> としての環境影響は次の通り

#### ① 人体に対する影響

NO<sub>2</sub> は粘膜の刺激、気管支炎、肺水腫などの原因、NO は生理機能への影響がある。

NO<sub>2</sub> 暴露の影響は感染抵抗性の減弱を引き起こし、動物実験では、0.5ppm 以上で呼吸器感染に対する抵抗力の低下が確認されている。

#### ② 酸性雨

NO<sub>x</sub> は SO<sub>x</sub> とともに、酸性物質降下物質の原因となり、森林生態系や水環境の劣化の原因とされている。

#### ③ 化学系スモッグの生成

NO<sub>x</sub> と不飽和の炭化水素に、強力な紫外線が照射されると光化学反応が起こり、オゾン、PAN などの酸化力の強い物質が二次的に生成される。一般に光オキシダント（Ox）の 90%以上はオゾンである。0.15~0.25ppm - 2hr の気道刺激症状（せき、胸部不快感など）と肺機能低下が現れる。

#### ④ 地球温暖化への影響

温暖化の環境への影響については IPCC 報告書に詳しいが、マラリアや黄熱病などの媒介性伝染病の増加等の健康に対する影響、異常気象、海面上昇、植物種等の自

然環境、食料生産への影響などが指摘されている。N<sub>2</sub>O は人為的な温室効果ガスとされており、また、成層圏で NO に変わり、オゾン層の破壊を起こす。

➤ N<sub>2</sub>O の温室効果寄与度

IPCC の発表（1995 年）では、ボイラや自動車などから人為的に排出された温室効果ガスによる地球温暖化への直接寄与度において、N<sub>2</sub>O は CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> に次ぎ、濃度が低いにもかかわらず、温暖化係数が大きいため、寄与度 5.7% と高い。

表 3-12 に主要温室効果ガスの温暖化係数と濃度を示す。

表 3-12 主要温室効果ガスの温暖化係数と濃度

|           | CO <sub>2</sub> (ppmv) | CH <sub>4</sub> (ppbv) | N <sub>2</sub> O(ppbv) |
|-----------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 温暖化係数*    | 1                      | 21                     | 310                    |
| 1994 年の濃度 | 358                    | 1720                   | 312                    |
| 1900 年以前  | 280                    | 700                    | 275                    |

\* 温暖化係数： CO<sub>2</sub> = 1 とした 100 年間及ぼす効果

出典：IPCC-環境庁資料（1995）

### 3.3 工業用ボイラにおける窒素酸化物の排出削減対策技術

#### 3.3.1 燃焼場における窒素酸化物生成抑制技術

##### 3.3.1.1 生成抑制技術

NO<sub>x</sub> の生成原理から、燃焼場における発生を抑制する必要がある。特に工業用ボイラは取扱や経済性に制約されるため、燃焼場での生成量削減が重視される。生成要因と適用抑制技術の関係は燃焼方式に関わらず、図 3-22 に示すように大別すれば燃料改善、燃焼改善による技術に分けられる。

【燃料改善】

- a. 有機窒素化合物の含有率の低い燃料を使用すること。

【燃焼改善】

- a. 燃焼域での O<sub>2</sub> 濃度を低くすること。（O<sub>2</sub> 濃度の低下）
- b. 高温域での燃焼ガスの滞留時間を短くすること。（ガス滞留時間の短縮）
- c. 燃焼温度を低くする。特に局所的高温域をなくすこと。（火炎温度の低下）

これらの何れかの方法または組み合わせを応用することで NO<sub>x</sub> の生成を低減することが出来る。

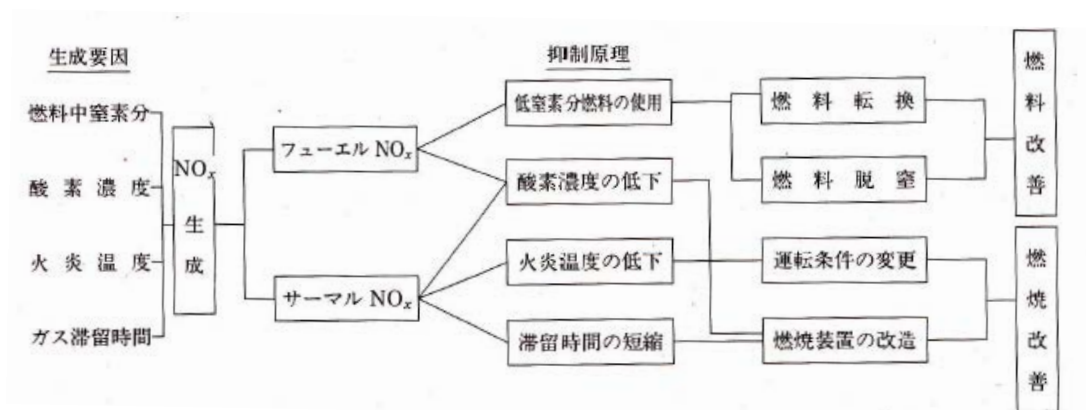


図 3-22 NOx 生成抑制技術

### 3.3.1.2 各種の低 NOx 燃焼技術

#### a. 二段燃焼法(バーナ燃焼)

燃焼を二段に、あるいはそれ以上に分けて供給するもので、燃焼空気を多段にする方式と、燃料を多段にする方式がある。空気二段法では一段目で空気比を絞り燃料過剰燃焼を行い、二段目で残りの燃焼用空気を新たに吹込み燃料希薄燃焼する方式である。一段目では、ピークの燃焼温度が抑えられるため、Thermal -NOx が抑制され、空気比が低いため燃料過剰燃焼条件下で Fuel -NOx が抑制できる。しかし、不完全燃焼や不安定燃焼が生じやすく、煤塵や CO の発生に注意する必要がある。一般には大出力ボイラに適する。図 3-23 に二段燃焼低 NOx バーナ（油・ガス用）、図 3-24 に二段燃焼低 NOx バーナ（微粉炭用）を示す。

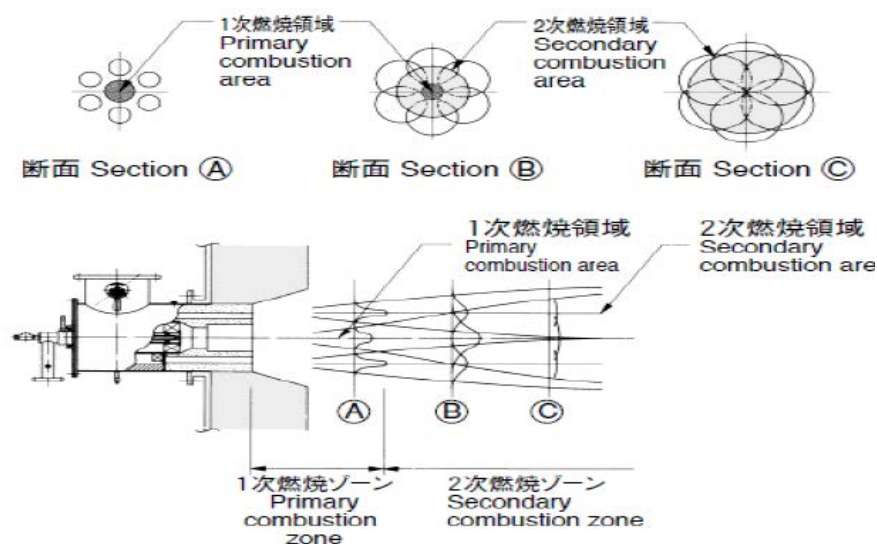


図 3-23 二段燃焼低 NOx バーナ（油・ガス用）

(出典：中外炉工業)

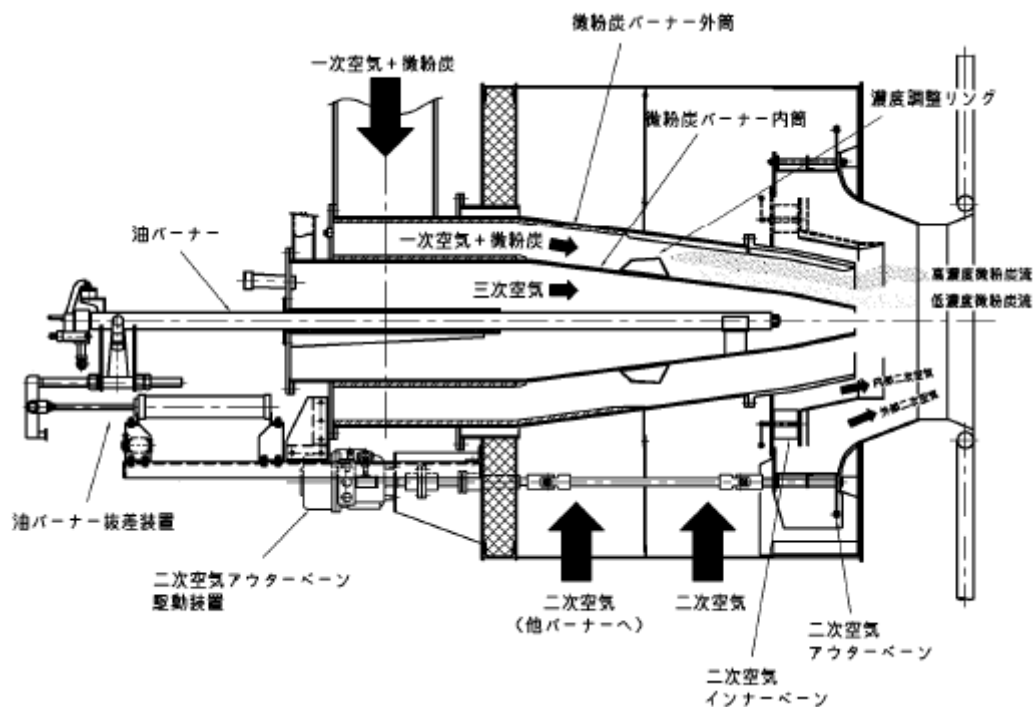


図 3-24 二段燃焼低 NOx バーナ（微粉炭用）

(出典：IHI)

#### b. 排ガス再循環(EGR：Exhaust Gas Recirculation) (バーナ燃焼)

燃焼排ガスの一部を再循環し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<sub>2</sub> 分圧を低下させる両作用により NO<sub>x</sub> の生成を抑制する方法である。排ガスの O<sub>2</sub> 濃度は燃料によって異なるが油燃料では約 3~5%vol であるため、バーナ部での混合燃焼用空気の O<sub>2</sub>%は空気のみの場合(21%vol)より下がり NO<sub>x</sub> 低減効果がある。Fuel-NO<sub>x</sub> の低減には殆ど効果はない。

#### c. 濃淡燃焼(バーナ燃焼)

複数本のバーナを装備しているボイラにおいて、燃料過剰バーナと燃料希薄バーナを交互もしくは適当に配列させて燃焼室内で燃焼させる方式で、全体の燃焼温度が下げる効果がある。燃焼用空気量・燃料の総量は変わらない。大出力のボイラで採用される。1 個のバーナノズル自身で噴射ノズル径を変えて火炎に濃淡を付けて燃焼させる方法もある。図 3-25 に濃淡燃焼+二段燃焼組合型低 NO<sub>x</sub> バーナを示す。図 3-26 に濃淡燃焼バーナの外形と原理図を示す。

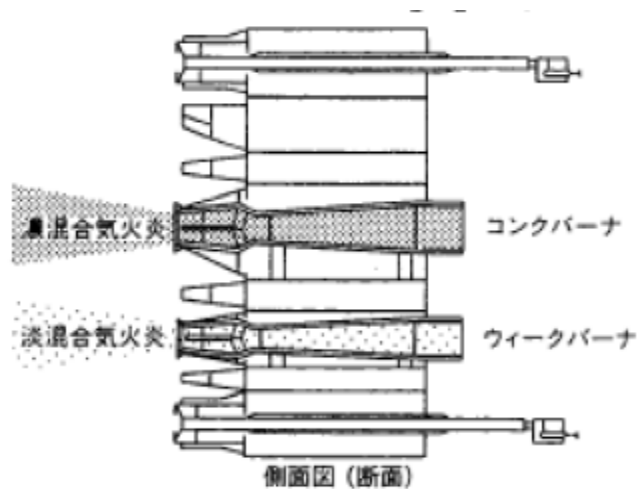


図 3-25 濃淡燃焼+二段燃焼組合理型低 NO<sub>x</sub> バーナ（微粉炭用）

（出典：三菱重工業）



【原理】

火炎を空気過剰ゾーンと燃料過剰ゾーンに分割して一次側を燃料過剰、二次側を空気過剰にすることで濃炎燃焼ができ、低 NO<sub>x</sub> を実現しています。

イメージ

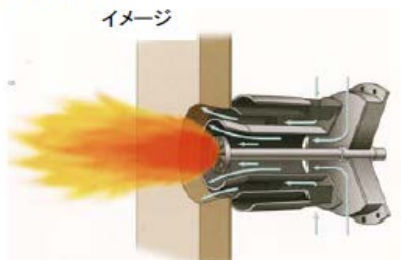


図 3-26 濃淡燃焼バーナの外形と原理図（ガス・油用）

（出典：ボルカノ）

d. 水蒸気又は水吹込み

火炎中に水蒸気又は水を噴射し、火炎温度が低下し燃焼排ガス中の煤塵発生を減少さ

せる結果、低過剰空気燃焼の効果が得られる。Fuel -NO<sub>x</sub> が高い重質油では効果は少ない。

#### e. 低 NO<sub>x</sub> バーナ

バーナ構造による NO<sub>x</sub> 抑制には基本的な次の三つの方法がある。

- 燃焼と空気の拡散混合を緩慢にする
- 燃焼の不均一化を促進する
- 火炎の熱放射を促進する

これらの効果を得るために次のような多くの型式の低 NO<sub>x</sub> バーナが開発されている。

- ① 急速燃焼型：燃料と空気の混合を促進させ放熱による燃焼温度の低下と高温での滞留時間の短縮により Thermal -NO<sub>x</sub> を低減させるもの
- ② 緩慢燃焼型：燃焼用空気及び燃料噴出流速の低下により燃焼域を拡大させ、火炎温度の低下及び O<sub>2</sub> 濃度の低下により NO<sub>x</sub> 生成の抑制をはかるもの
- ③ 火炎分割型：火炎を複数の独立したものに分割し、火炎温度の低下と滞留時間の短縮により Thermal -NO<sub>x</sub> を抑制するもの
- ④ 自己再循環型：空気及び燃料の流れ（運動量）を利用して、燃焼ガスの一部を燃焼領域へ循環させるもので、燃焼温度の低下と燃料ガス化によって発生する還元性ガス NO<sub>x</sub> 分解作用を利用するものである。出力 6 GJ/h 以下の炉筒煙管型や小型貫流型の小規模ボイラの油・ガス用に装備されている、高温の燃焼排ガスをバーナ先端の燃料との混合域に戻す方式の低 NO<sub>x</sub> バーナを図 3-27 に示す。NO<sub>x</sub> 生成濃度は、灯油 <50ppm、13A ガス <40ppm である。
- ⑤ 段階的燃焼型：燃焼用空気や燃料を多段に分けて段階的に供給するもので、一段目では低過剰空気、二段目以降では十分な空気を供給して完全燃焼させる。燃焼温度の低下、均一化、一段目の低過剰空気燃焼により、Thermal/Fuel -NO<sub>x</sub> の両方が抑制できる。

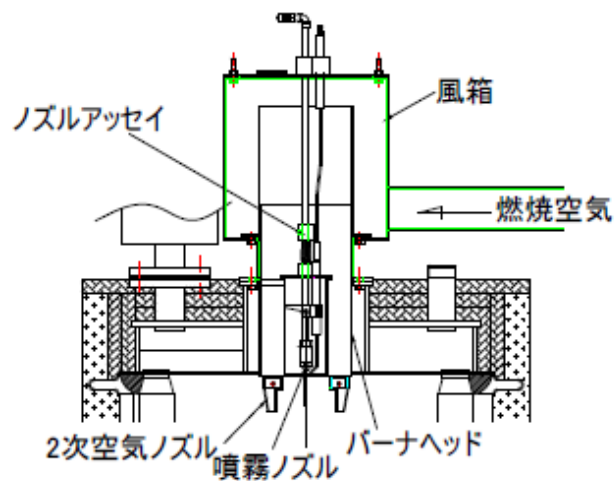


図 3-27 分割＋燃焼ガス内部再循環型低 NO<sub>x</sub> バーナ（油・ガス）

（出典：オリンピア）

### 3.3.1.3 ストーカ 燃焼

ストーカ燃焼では先述したように主に固定炭素が表面燃焼を行い、その燃焼で発生する CO と大部分の揮発分は炉の空間部でガス燃焼を行う。NO<sub>x</sub> 生成特性は形式の差異はあるが、一般的に微粉炭燃焼に近い次のような特性がある。

- 燃料中の N 分が多いと NO<sub>x</sub> 生成量が多い。
- 燃料比が高い石炭は NO<sub>x</sub> 生成量が多い。

また、灰分が多い石炭は相対的に NO<sub>x</sub> 生成が多い。石炭中の N 分と O<sub>2</sub> 濃度の関係例を図 3-28 に示す。ストーカ 燃焼では、空気比が大きくなり O<sub>2</sub> 濃度が増加するほど、また N 分が増加するほど直線的に NO<sub>x</sub> 濃度は増加の傾向を示す。

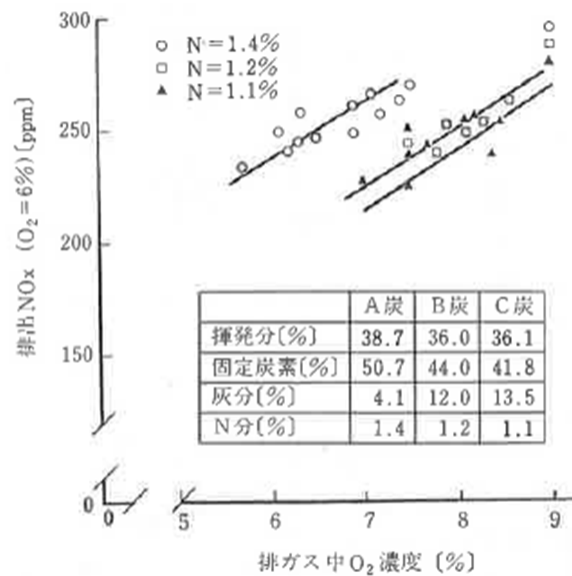


図 3-28 石炭中の N 分/O<sub>2</sub> 濃度の関係例

(出典：産業燃焼技術, JFRC, p171)

#### 3.3.1.4 流動層燃焼

流動層温度と NO<sub>x</sub> 生成量は正の相関がある。工業用ボイラでは通常燃焼温度は 900℃以下であり、Thermal -NO<sub>x</sub> の生成は少なく、燃料中の N 分に起因する Fuel -NO<sub>x</sub> が占める。石炭では石炭中の N 分量より N の結合状態の影響が支配的という報告がある。なお、炉内脱硫を行うため石灰石を炉内に投入する場合、NO<sub>x</sub> の生成量を増加させるため、燃焼ガス中の飛灰を再循環して石灰石の使用量を低減することが重要である。

図 3-29 に石炭燃料の循環流動層燃焼における燃焼温度と NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub> の事例を示す。図 3-30 は同じく炉出口の O<sub>2</sub> 濃度と NO<sub>x</sub>/SO<sub>2</sub> の関係を示す。循環流動層燃焼では、炉底部、炉中央部と二段に分けて空気を挿入する二段燃焼により、抑制効果が図れる。脱硫効果は温度が 830℃以下では石灰石の仮焼が進行しないため脱硫率は低下する。

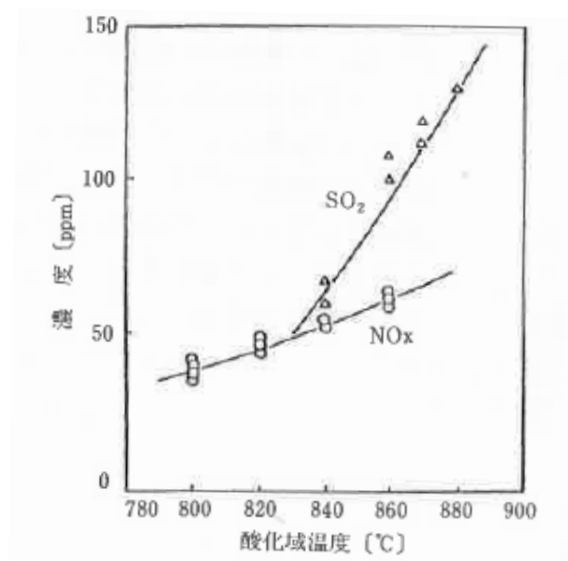


図 3-29 燃焼温度と  $\text{SO}_2 \cdot \text{NO}_x$  の関係  
(出典：産業燃焼技術,JFRC, p170)

( $\text{Ca/S}$  比=3,  $\text{CaO}$  を加えない場合の  $\text{SO}_2$  は 500ppm)

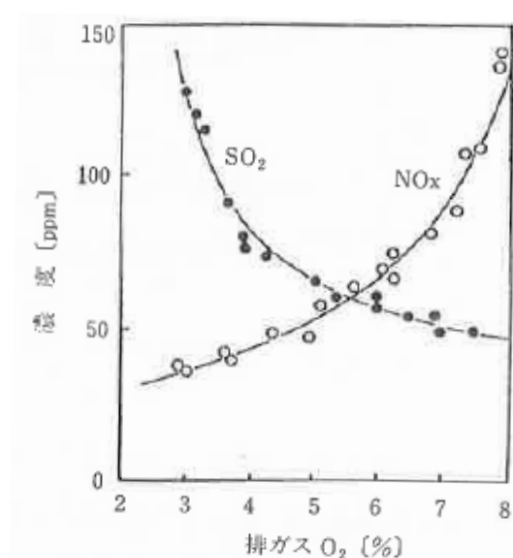


図 3-30  $\text{O}_2$  濃度と  $\text{SO} \cdot \text{NO}_x$  の関係 (出典：産業燃焼技術,JFRC, p171)

( $\text{Ca/S}$  比=3,  $\text{CaO}$  を加えない場合の  $\text{SO}_2$  は 500ppm)

### 3.3.1.5 運転条件の改善

低  $\text{NO}_x$  化の改善技術として現状の空気比や燃焼室負荷、空気予熱温度の運転条件を変える方法がある。

#### a. 低空気比燃焼

空気比の NO<sub>x</sub> に及ぼす影響としては、空気比の変化に伴う温度変化と、O<sub>2</sub> 濃度変化が因子として作用する。Fuel -NO<sub>x</sub> は空気比に比例して増加するが、Thermal -NO<sub>x</sub> は凸形の特性をもつ。通常のボイラの運転では、空気比はこの最大値よりも低空気比側にあり、その為、NO<sub>x</sub> 低減には低空気比燃焼が採用される。空気比低下に伴い燃焼性が劣化する傾向から CO や煤塵の発生に注意が必要である。

#### b. 燃焼室熱負荷の低減

燃焼室熱負荷が NO<sub>x</sub> に与える影響は、負荷の差異により、火炎及び燃焼室ガス温度と炉内滞留時間等が関連しており、燃料と空気の混合状況や火炎からの放熱状況が変化することにも関係する。

工業用ボイラの小型化、高効率化を図るため燃焼室熱負荷を高く設定される傾向にあるが NO<sub>x</sub> 対策の適用範囲は制約される。

#### c. 空気予熱温度の低下

燃焼用空気温度は Thermal -NO<sub>x</sub> の増加につながる。予熱温度を低下すれば火炎温度及び燃焼場の雰囲気温度が低下し NO<sub>x</sub> は減少する。ボイラ効率や煤塵増加と NO<sub>x</sub> 低減率を比較検討する必要がある。平衡通風方式のボイラでは、燃焼室が負圧のため、吸引する空気は過剰空気となるだけでなく適正な燃焼制御が不可になるため管理し防止する必要がある。

### **3.3.1.6 中国における石炭焚き順送移動火床式ストーカ燃焼ボイラの燃焼面における NO<sub>x</sub> 低減方策**

中国における工業用石炭焚き既設罐では、順送移動火床式ストーカ燃焼ボイラが多数を占めている。これらの罐から排出されている NO<sub>x</sub> 量削減は、大気環境の改善に大きな効果が期待できる方策である。

燃焼面や排煙脱硝付設など総合的且つ合理的な対策を探る目的で、2012 年度に日中協働で武漢市において実施したケーススタディの検討結果を 4.1 に詳報する。

## **3.3.2 排煙脱硝技術**

### **3.3.2.1 排煙脱硝装置の付加条件**

工業用ボイラの排煙脱硝装置は下記の条件を付加しなければならない。

- 脱硝率が高いこと
- 長時間にわたり安定した運転が可能であること
- 負荷変動に対する追従性を有すること

- 経済性に優れていること
- 二次公害を発生しないこと

### 3.3.2.2 排煙脱硝装置

工業用ボイラで導入されている排煙脱硝装置の方式と原理を表 3-13 に示す。

表 3-13 排煙脱硝装置の方式と原理

| 方式               | 原理                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 選択接触還元法<br>(SCR) | 還元剤として NH <sub>3</sub> を用い、触媒上で NO <sub>x</sub> を選択的に還元除去する。<br>乾式、排ガス量が多い処理に適する。<br>反応式 $4\text{NO} + 4\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$<br>$\text{NO} + \text{NO}_2 + 2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$ |
| 無触媒還元法<br>(SNCR) | 高温度域、無触媒条件下で NH <sub>3</sub> を注入して NO <sub>x</sub> を還元除去する。<br>$4\text{NO} + 4\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ (脱硝反応)<br>$4\text{NH}_3 + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ (薬剤燃焼反応)                       |
| 活性炭吸着法           | 活性炭を用い、NH <sub>3</sub> を注入して NO <sub>x</sub> を選択除去すると同時に SO <sub>x</sub> を吸着除去する。                                                                                                                                                                                         |

#### ① 選択接触還元法(SCR)

反応は触媒を介した NO と NH<sub>3</sub> との等モルで反応であり、ガス温度が 350~400℃付近で優先的に進行する。ボイラ燃焼ガスのこの温度域に設置されて、80%を超える脱硝効果が可能である。触媒の形状は、粒状、板状、格子状、円筒状等があるが、石炭燃料では目詰まりを防止するため、板状、格子状の触媒が多く使用されている。脱硝触媒は、ガス中のダスト、SO<sub>x</sub>、アルカリ金属により劣化する。集塵装置との設置個所やガス温度に留意する必要がある。本方式は日本で開発され海外に技術輸出されており普及率が高い。プロセスが簡単で、運転が容易であり、トラブルの少ない装置である。廃水や副生成物がなく、運転操作が単純なためガス発生源と容易に協調できる特徴を有する。可動部分がほとんどないため、故障例は少ない。主な管理は、触媒の性能管理となる。主な現象として、リークアンモニアによる空気予熱器や後流機器の一部閉鎖、脱硝装置入口部の灰の堆積、アンモニア注入部の故障がある。石炭未燃灰の微粒子は触媒の目詰まりの原因となる。

脱硝触媒はガス性状により経年劣化等により性能が低下する。一般に一部の触媒の取替や積み増しで性能回復を図る。耐用期間は、燃料種や劣化成分 (Na、K、Ca 等) 状況、強度、比表面積、細孔容積等により異なる。一般的に寿命は石炭焚き<油焚き<ガス焚き順に長い。また触媒の性能を回復する再生方法も普及している。

表 3-14 工業用微粉炭焚きボイラの SCR 設置条件の目安事例

|       | 事例Ⅰ         | 事例Ⅱ       | 事例Ⅲ      |
|-------|-------------|-----------|----------|
| 圧力損失  | 0.5~2 kPa   | ~100 mmWC | ~100mmWC |
| ガス温度  | ≒ 350~400 ℃ | 300~550 ℃ | 180~550℃ |
| 脱硝率   | <80 %-90 %  | ~95 %     | ~95%     |
| 反応塔圧損 | <60 mmWC    |           |          |

表 3-15 に排ガスの種類別触媒性能劣化の要因を示す。石炭焚き選択接触還元脱硝システムの代表的な設備構成を図 3-31 に、排ガス煙道における脱硝プロセスの設置例を図 3-32 に、各形状の脱硝触媒を

図 3-33、図 3-34 に示す。図 3-35 は石炭焚きボイラの選択接触還元法脱硝制御事例である。

表 3-15 排ガスの種類別触媒性能劣化の要因

| 排ガス種類       | 廃棄物 | ガス | 油 | 石炭 |
|-------------|-----|----|---|----|
| 熱的劣化        | ○   | ◎  | ○ | ○  |
| 化学的劣化（触媒被毒） | ◎   |    | ◎ |    |
| 物理的劣化（ダスト）  |     |    |   | ◎  |

◎主要劣化要因 ○劣化要因

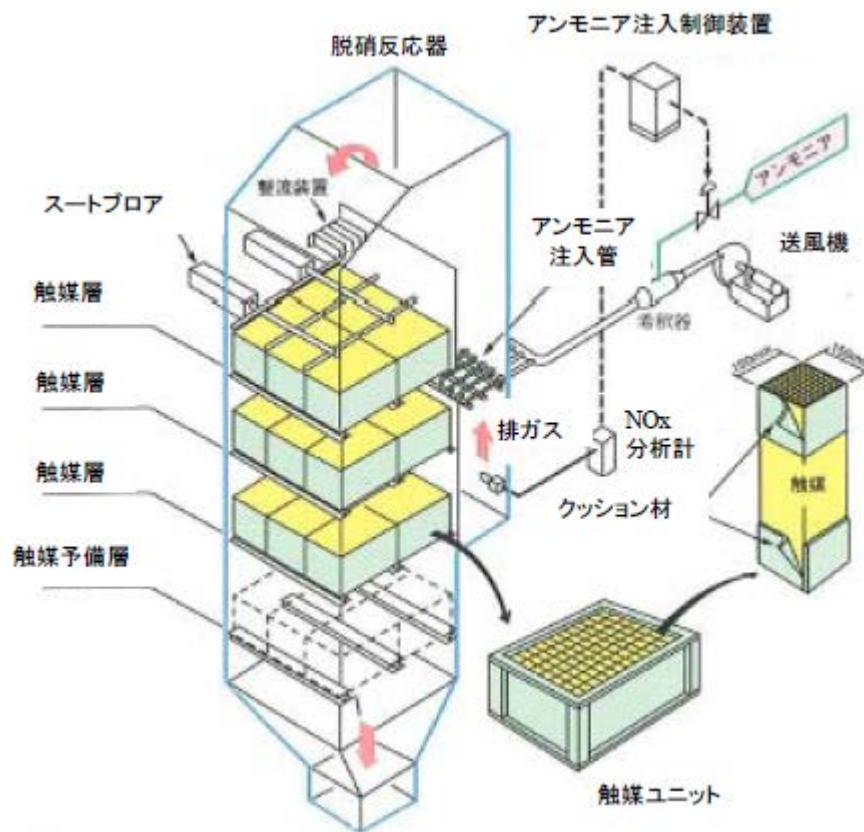


図 3-31 石炭焼き選択接触還元法脱硝システム

(出典：川崎重工業)

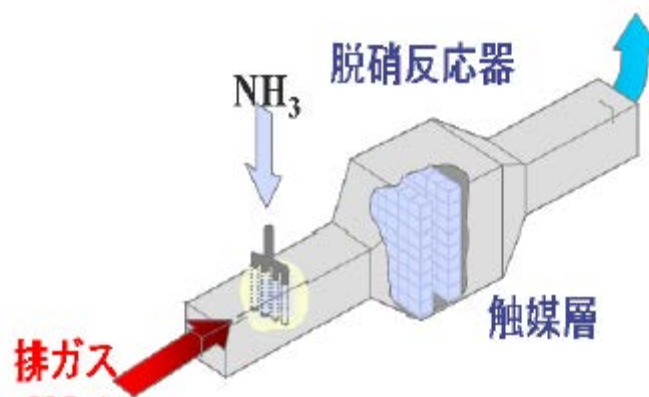


図 3-32 選択接触還元法（SCR）脱硝プロセス

(出典：IHI)

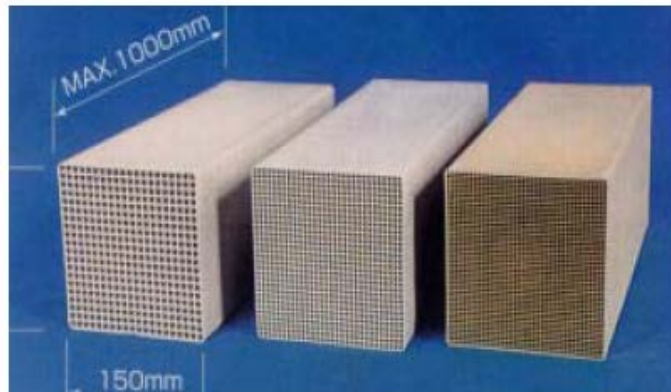


図 3-33 ハニカム形脱硝触媒  
(出典：IHI)



図 3-34 各種形状の脱硝触媒の事例  
(出典：堺化学)

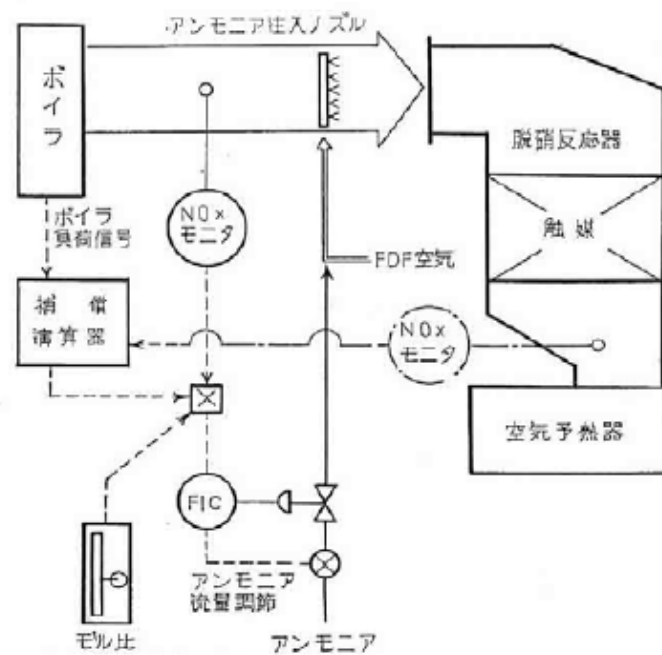


図 3-35 石炭焚きボイラの選択接触還元法脱硝制御事例  
(出典：火力原子力発電誌1984)

## ② 無触媒還元法 (SNCR)

燃焼ガス中の高温域 (800~1050℃) に  $\text{NH}_3$  や  $(\text{NH}_2)\text{CO}$  などの還元剤を噴霧して還元させ  $\text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$  にする。反応に要する滞留時間は 0.1sec 以上、可能なら 0.4sec 以上が好ましい。脱硝率は 40~50%程度である。負荷変動やガス温度の変化への対応策が必要である。還元剤の噴霧量増加により、除去性能は向上するが未反応分がリークアンモニアとして放出する。また、ガス中の  $\text{SO}_2$  等と反応して硫酸アンモニウムを生成し白煙発生が生じる。図 3-36 は 還元剤 ( $\text{NH}_3$ ) 吹込み要領の事例である。

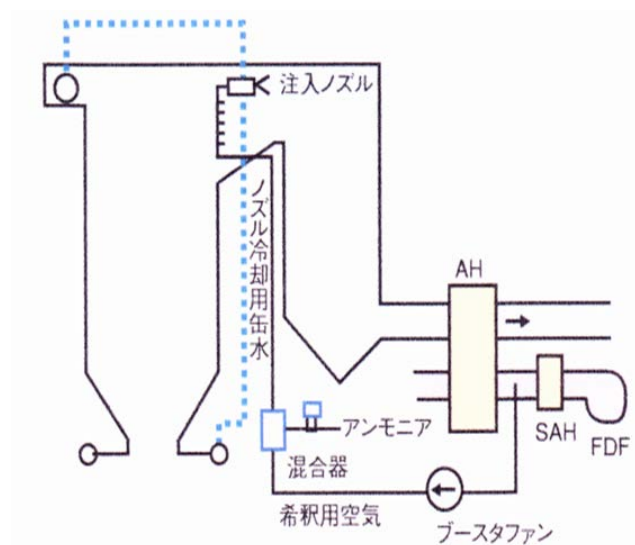


図 3-36 還元剤 ( $\text{NH}_3$ ) 吹込み要領事例

## ③ 活性炭吸着法

180~200℃前後に冷却した排ガス中に  $\text{NH}_3$  を注入し、活性炭等の炭素系触媒を接触させると  $\text{NO}_x$  は  $\text{NH}_3$  により還元され  $\text{N}_2$  に分解される。脱硝のほか脱硫、ダイオキシン等の汚染物質も除去できる。金属精錬用排熱回収ボイラや廃棄物焼却用排熱ボイラに導入事例がある。脱硝効率は 40~80%、吸着能力が低下した活性炭は再生工程で循環して再生利用される。

図 3-37 に活性炭吸着法排煙脱硝システムのフロー事例を示す。

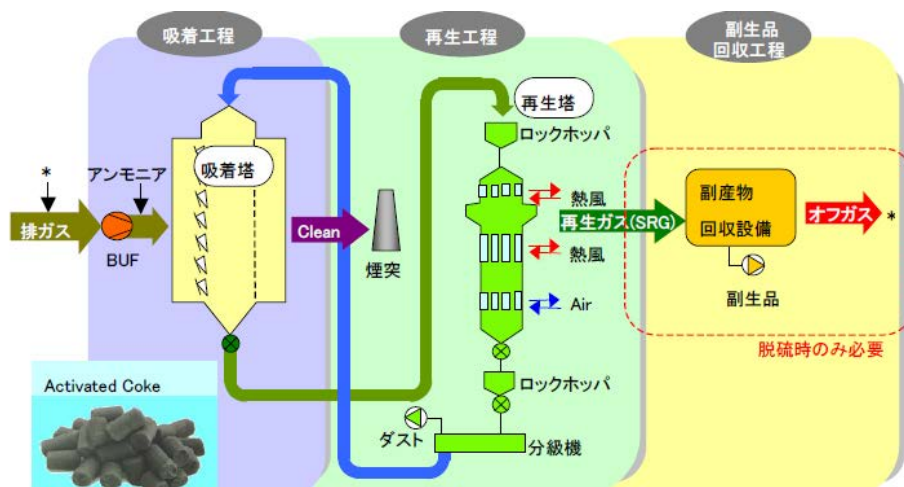


図 3-37 活性炭吸着法排煙脱硝システム  
(出典 : J-Power En Tech)

### 3.4 省エネルギー

省エネルギーにより、燃料消費量を削減することは、エネルギーコストの削減による経済的効果を得られるだけでなく、環境面における、燃焼により発生する全ての公害を軽減できる。温室効果ガス  $\text{CO}_2/\text{N}_2\text{O}$  の排出量の削減や  $\text{NO}_x$  や  $\text{SO}_x$  の排出量も減少できる。

現状のボイラ熱効率を 80% から 90% の向上した場合、理論的には、燃料消費量の減量に比例して、排ガス量、 $\text{CO}_2$  量、 $\text{NO}_x$  量も 10% 減少することになる。このような相乗効果が得られることから、日本では工業用ボイラの省エネルギー対策は重要な施策となっている。

工業用ボイラに関わる省エネルギー方策は熱損失と入/出力の総合エネルギー効率があり多岐にわたる。石炭焚きボイラを例にすると損失は以下のものがある。

#### a. 熱損失

- 排ガス熱による損失（保有顕熱）
- 不完全燃焼ガスによる損失（ $\text{CO}$ 、未燃分）
- 燃え殻中の未燃分による損失（灰、飛灰）
- ボイラ周壁からの放熱損失
- ドレン、漏出等による熱損失
- その他（停止時の残熱等）

#### b. 総合エネルギー効率上の損失

- 電動機損失（効率、機械的損失等）
- 送風機損失（効率、機械的損失等）
- ポンプ損失（効率、機械的損失等）

- 破碎機効率（効率、アイドリング損）
- 搬送機効率（効率）
- その他

省エネの対象範囲は空気比の低減、燃焼効率の向上、放熱損失の改善、制御機能改善等の構造・機能面から、燃料管理、運転管理や運用面にまで及ぶ。

表 3-16 は工業用ボイラにおける省エネルギー方策の内容である。この方策の中でも、低空気比、放熱損失、排ガス温度の低減、燃焼管理、負荷平準化、補機の回転数制御などは、特に大きい省エネルギー効果が期待される対策である。

例えば、空気比 1.5、排ガス温度 250℃、A 重油燃焼ボイラにおいて、排ガス熱損失は 13% であるが、この空気比を 1.2 に改善した場合、排ガス熱損失は 10.5% になる。排ガスの排風動力の減少分も考慮すると大きな効果が得られる。

尚、工業用ボイラの規模別、燃料別の空気比の基準値や目標値は先述の表 3-5、表 3-6 で示した通り。

参考までに排ガス温度が高い時に講じる対策は下記の通り。

- ① バーナ等の燃焼機の整備・調整
- ② 伝熱面の清掃
- ③ ガス流路の点検保全
- ④ 排ガスの熱回収
  - 空気予熱：二相流体の温度に関係なく熱回収が可能
  - 給水加熱：NO<sub>x</sub> の上昇がない
  - 廃熱ボイラの設置：多数缶の排ガスを集合して回収も可能である。

上記対策を講じる場合の留意点

- ① 排ガスの酸露点の下限→結露（腐食の発生）
- ② 低気温（冬）水蒸気の水滴化により白煙の発生
- ③ 煙突のドラフトが低下する（排風力低下）

表 3-16 工業用ボイラにおける省エネルギー方策

| 対象   | 対策         | 改善内容・分野等                                                              |
|------|------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 燃料管理 | 燃料の多様化     | 固体：石炭・バイオマス・オイルコークス<br>液体：重油・軽油・廃油・灯油<br>ガス：LNG・都市ガス・バイオガス<br>副生物：産廃物 |
|      | 燃料ハンドリング管理 | 搬送・受入・払出・貯蔵・計量・購入                                                     |
|      | 品質管理       | 残炭・粘土・水分・S・N・灰分・土泥                                                    |

|                |                                     |                                                                                                          |
|----------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                | 燃料の改質                               | ブレンド・助燃材・エマルジョン・改質                                                                                       |
| 燃 焼            | 燃焼装置の特性・性能の把握                       | Turn-Down・空気比・火炎長さ・環境値                                                                                   |
|                | プロセス側負荷要件の把握                        | 負荷範囲（蒸気品質—圧力・温度・純度）<br>制御精度（応答性・許容変動幅）<br>運転方法                                                           |
|                | 計画性能維持                              | 作動・機能調整<br>燃焼調整（点火・着火・供給・ノズル）                                                                            |
|                | 性能向上<br>低空気比<br>未燃損失低減<br>不完全燃焼損失低減 | バーナ改善（微粒化・空気混合・Turn-Down）<br>燃料転換（軽質油、気体燃料へ転換）<br>制御改善（監視機能強化・制御精度の改善）<br>排ガス量の低減（低空気比）                  |
| 設 備 保 全<br>管 理 | 放熱防止                                | 蒸気系・ドレン系（管・弁・管寄・トラップ）<br>燃焼用空気系（漏出・低温空気吸込）<br>燃焼ガス系（ボイラ本体・ダクト部）<br>燃料系（タンク・配管・搬送）<br>保温材（材質劣化・厚不足・高温部露出） |
|                | 放出防止（漏洩）                            | 蒸気管・弁・フランジ・トラップ                                                                                          |
|                | スケーリング                              | 燃焼ガス側（煤・酸化被膜・灰の付着等）<br>水側（硬度成分、シリカ質のスケール）<br>蒸気側（固形成分のスケール）                                              |
| 運 用 管 理        | ボイラ-側                               | 負荷率の適正化（小型化・設備改造）<br>負荷変動の平準化（蓄熱器の設置など）<br>負荷配分（多缶設置-台数制御）<br>運転圧力・温度の適正化<br>設備保全の適正化                    |
|                | 蒸気消費側                               | 使用方法の改善・ピークカット<br>ドレン回収率の改善                                                                              |
|                | 水 側                                 | 給水処理（水質変動・処理法・運転方法）<br>ブロー {量・率・連続/間歇}<br>ボイラ水・排水                                                        |
| 排熱回収           | 排ガス熱回収                              | 節炭器の設置<br>空気予熱器の設置<br>給水予熱/空気予熱                                                                          |
|                | ボイラ水ブロー改善                           | ブロー水熱回収器の設置                                                                                              |

|       |            |                                                       |
|-------|------------|-------------------------------------------------------|
|       | ドレン回収率向上   | ドレン熱回収器の設置                                            |
|       | 放熱防止       | 保温・断熱施工                                               |
| 計測・制御 | 計器         | 保安計器（性能維持・装備充実）<br>管理計器（精度向上・装備充実）<br>制御計器（機能維持・性能向上） |
|       | 制御         | 調節器・シーケンサ・安全装置                                        |
|       | 監視         | 警報・信号等                                                |
|       | 情報管理       | 記録・予防・予知                                              |
| 補機動力  | 過大機器の適正化   | 送風機、ポンプ                                               |
|       | 運転方法       | 常時又は一時的運転 DSS<br>単機・複数基運転<br>季節変動、時間帯                 |
|       | 部分負荷特性改善   | 性能改善<br>回転数制御                                         |
|       | ボイラ余圧の有効利用 | 動力回収<br>小型発電                                          |

＊参考：排ガス損失熱量の算定法

ボイラの熱効率の向上には排ガス損失熱の影響が大である。ガス温度測定値から算定できる。

排ガス損失熱  $Q_{gl}$  の算定式

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

ここで

$G_v$ : 湿り燃焼ガス量 ( $m^3N/kg$  又は  $m^3N/m^3N$ )

$C_p$ :  $T_g \sim T_a$  間の平均定圧比熱 ( $kJ/m^3N \cdot K$ )

$T_g$ : 排ガス温度 ( $^{\circ}C$ )

$T_a$ : 基準温度 (大気温度) ( $^{\circ}C$ )

## 3.5 ボイラの燃焼制御と運転管理

### 3.5.1 制御の目的等

大気汚染の防止のためには、発生源からの汚染物質の抑制を効果的に行う必要がある。実効性を確保するためには、ボイラ運転状況値、ガス排出量、 $NO_x$  濃度等を正確に把握する必要がある。施設の設置者はこれらの計量値を把握することなく、大気汚染規制値への適合条件や改善対策を講じることは出来ない。同様に規制当局においても、信頼ある工学的根拠なしに規制の施行や罰則・命令等の行政執行は出来ない。

ボイラ燃焼で生成する  $NO_x$  生成抑制には、安定燃焼やボイラ諸機能が計画値に適った状

態に制御されることが不可欠な条件となる。即ち、運転状況値から速やか且つ正確にボイラや大気汚染に関わる特性を把握して効率的な運転管理が実行されることである。適正な燃焼制御と運転管理は、かつては、合理的で安全と思われる平均的な管理値を定めて、熟練運転員の経験や知識に依存して制御操作されていたが、現在では IT 技術を適用した自動制御が一般的で、ボイラ運転中における動的な燃焼特性を測定して、適正な制御値を管理できる手法が導入されている。ここでは NOx 生成に関わる燃焼制御と運転管理の概要について述べる。

### 3.5.2 燃焼制御

工業用ボイラの制御は、ボイラに出入するエネルギーと物質を平衡又は制御値に追従制御することである。ボイラに入出する物質の関係は次に示すように、入力としては燃料系・給水系・空気系のみで、出力は蒸気・排ガス・灰や未燃物、ボイラ施設から放散される放散熱などの熱損失である。出力量に係わる主制御となるのは燃焼量制御である。殆どの工業用ボイラは、自動燃焼制御（ACC : Automatic Combustion Control）が装備されている。NOx 排出に連関する要素の制御である燃焼温度や O<sub>2</sub> 濃度等は補完的な制御となる。基本的なボイラ制御に関わる入力－出力の動的要素は次の通り

|     |   |       |   |      |
|-----|---|-------|---|------|
| 入力  | ⇒ | ボイラ   | ⇒ | 出力   |
| 燃料量 |   | 蒸気圧力  |   | 蒸気量  |
| 給水量 |   | 蒸気温度  |   | 排ガス量 |
| 空気量 |   | ドラム水位 |   | 熱損失  |
|     |   | 炉内圧力  |   |      |
|     |   | 空燃比   |   |      |

実際の制御量と操作量の関係は、表 3-17 に示す通り要素数は少ない。熱併給発電用ボイラ等では、直接又は間接的にボイラ制御量に関係する動特性である電気系統や熱需要量の操作量も組み込まれる事例が多いため、制御要素は増える。

表 3-17 制御量と操作量の関係

| 制御対象   | 被操作量や制御量        |
|--------|-----------------|
| 蒸気圧力   | 燃料量、空気量         |
| 蒸気温度   | 過熱低減器の注水量、伝熱量   |
| ボイラ水位  | 給水量             |
| 炉内圧力   | 排ガス量、空気量、ダンパー開度 |
| 空燃比    | 燃料量、空気量         |
| NOx 濃度 | 脱硝剤吹込量、燃焼温度等    |

#### a. フィードバック制御

蒸気圧力、水位、蒸気温度などを一定に保持する必要がある値（制御量）に調整するために、実際の制御量を測定して調節器に戻し目標値と比較し、それが一致するように操作量を制御する方法で次のようなシステム動作が適用されている。フィードバック制御の概念を図 3-38 に示す。フィードバック制御の動作には次のような動作がある。

- On Off 動作：制御量（例：蒸気圧力）が上限値の状態を Off、制御量が指定値に下がった状態を On とする。On-Off の間に動作隙間が適切な設定が必要である。
- High Low Off 動作：操作量が高い状態・低い状態・Off の状態のいずれかを取り、制御する。
- 比例動作（P）：偏差の大きさに比例して操作量を増減するよう動作するもの。
- 積分動作（I）：制御偏差量に比例した速度で操作量を増減するよう動作するもの
- 微分動作（D）：偏差が変化する速度に比例して操作量を増減するよう動作するもの

#### b. シーケンス制御

予め定められた順序で、定められた条件を満足していることを確認しながら制御の各段階を進めていく制御法で、条件が満足していない場合制御は中止される。（インターロック）

この条件を手動等で解除して正常な操作に復帰する必要がある。

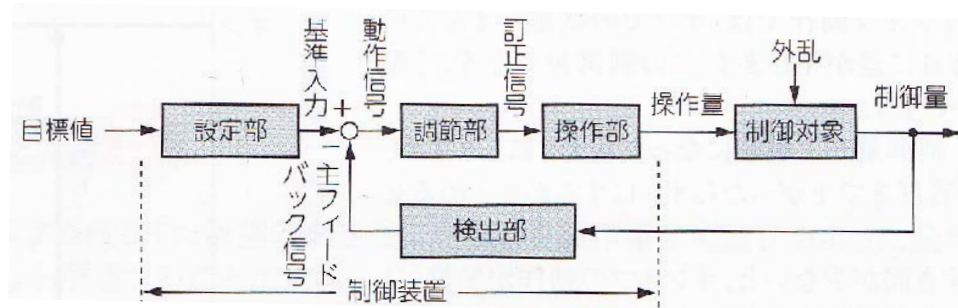


図 3-38 フィードバック制御の概念

### 3.5.3 運転管理

大出力のボイラでは NOx 低減効果だけでなく、効率面からも最新の運転管理システムの導入が行われている。表 3-18 に石炭燃焼におけるボイラ燃焼管理・運転支援システムの概要を示す。

表 3-18 微粉炭燃焼におけるボイラ燃焼管理・運転支援システムの概要

| 管理項目  | 内容                                            |
|-------|-----------------------------------------------|
| 性能最適化 | NOx が制限範囲で排ガス損失・未燃分・所内動力・NH <sub>3</sub> 消費量が |

|              |                                                                                                      |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|              | 最小になるよう（最適化）Excess O <sub>2</sub> ・OFA 量・粒度・NH <sub>3</sub> 量などの制御に対する操作支援（バイヤス設定変更など）を行う            |
| 燃焼監視と最適化     | 石炭に応じた最適火炎パターン（NO <sub>x</sub> ・未燃分・安定燃焼等に対して）を総合火炎監視装置により記憶し、基準パターンからのずれが大きい場合には風箱ダンパー等の修正操作をガイドする。 |
| 伝熱面汚れ監視・煤落作動 | 各部伝熱面の汚れ状態を表示するとともに、基準値から大幅にずれた場合、蒸気温度制御操作量の余裕が基準値を下回った場合、煤落装置を作動させる。個々の燃料特性に応じて自動的に作動させる。           |
| ミル性能監視等と最適化  | ミル負荷率・差圧・電流・振動等について状態を監視し、これらが制限値以内であることを確認しながら運転する。制限値に接近している場合、ミル切替・停止・保守の指令を出す。                   |
| 補機最適化運転      | 補機の運転裕度と性能最適化との関連を付けながら操作ガイドを行う。                                                                     |

中国や ASEAN 諸国において使用されている塊炭・粉炭を燃料とする中小出力石炭ボイラのストーカ燃焼方式における燃焼管理項目としては次の点が挙げられる。

#### a. 燃焼管理

燃焼を管理する項目には、ガス分析（O<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub>）温度（空気、燃焼ガス）、流量（空気、燃焼ガス）、通風圧力（空気、ガスの各部位）、排ガス煤煙濃度等である。

石炭燃焼ボイラにおける燃焼管理項目と NO<sub>x</sub> 生成との関係

ガス分析：空気比の最適化

温度：燃焼温度の最適化、再循環空気温度の監視

流量：空気量、再循環空気量の適正值の監視

通風圧力：火格子の通風圧力の最適化

蒸気出力：Turn - Down 値の制限内運転の監視

#### b. 燃料管理

石炭燃料は、粒度分布、N 分、S 分、燃料比、発熱量、灰分、水分等が燃焼性や NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub> 生成量に大きく影響する項目である。定期的な測定を行い、規制値内にあるよう管理する。

#### c. 脱硝装置におけるボイラ及び付属機器の管理点

実際のボイラ稼働状況において、脱硝機構が正常に作動し管理できる状況に維持することが求められる。表 3-19 に日常の一般的な脱硝装置におけるボイラ及び付属機器の管理点を示す。

表 3-19 脱硝装置におけるボイラ及び付属機器の管理点

| 機器                   | 管理点、点検点                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 脱硝反応器部               | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 保温板の脱落</li> <li>2. ガス漏れ</li> <li>3. ガス差圧</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                      |
| NH <sub>3</sub> 注入装置 | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 弁及びダンパーの開閉状態</li> <li>2. NH<sub>3</sub> ガス注入遮断弁及び制御弁の作動状態</li> <li>3. 弁のグラント漏れ</li> <li>4. 作動空気漏れ</li> <li>5. 注入フレキシブルチューブの漏れ、劣化</li> <li>6. 計器の指示 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ NH<sub>3</sub> 圧力及び温度</li> <li>・ 希釈空気圧力</li> <li>・ NH<sub>3</sub> 液濃度</li> </ul> </li> </ol> |
| 煤吹装置                 | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 作動モータ等の温度・振動・異音</li> <li>2. 減速機の作動・油漏れなど</li> <li>3. ヘッド部のグラント、フランジの油漏れ</li> <li>4. 煤吹主管の回転、挿入作動の状態</li> </ol>                                                                                                                                                                           |

### 3.6 工業用ボイラにおける窒素酸化物抑制対策のまとめ

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 3-20 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                                  | 現行の基本法等の整備                                                     | 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                                                        | 大              |
| 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～               | 一定規模以上の事業体の監理義務                          | 国家資格                                                           | 極めて大きい         |
| 公害対策基本法<br>(大気汚染防止法等) | 1967～1968<br>(旧法省略) | 整備に係わる金融・税制措置<br>中小企業特別措置<br>各種基準・測定法の規定 | 大気汚染防止に係わる全般を規定<br>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         |
| 諸団体の活動                | 1967～現在             | 研究開発、指導等                                 | ガイドライン表 2-8 参照                                                 | 活発             |
| 環境計量士制度<br>(計量法)      | 1952～1992           | 国家資格者に依る測定                               | 義務化<br>Data の確度向上                                              | 側面効果大<br>信頼性向上 |
| 熱管理法<br>(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                         | 義務化                                                            | 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                              | 目標値設定—義務化                                                      | 極めて大きい         |

表 3-21 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                  |
|---------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------|
| 生成抑制<br>Fuel NOx    | 低 N 分石炭の使用                 | 燃料の調達 質改善                      | 低減効果大、燃料費の増加、炭種の特選                                       | 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<br>Thermal NOx | 低空気比燃焼 (低 O <sub>2</sub> ) | 排ガス再循環                         | 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<br>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                      |
|                     | ストーカ燃焼                     | 低 O <sub>2</sub> 燃焼            | 基準強化 → 将来性に難                                             | 実績少数                      |
|                     | 流動層燃焼                      | BFB・CFB                        | 高い抑制効果を保証、動力費・設備費が大                                      | 実績多数                      |
| 排煙脱硝                | SCR 法                      | 触媒+NH <sub>3</sub> 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                           | 大規模缶で実績あり                 |
|                     | SNCR 法                     | 無触媒+NH <sub>3</sub> 吹込み        | 産業用缶向き、リーク NH <sub>3</sub> に留意、設備費安い                     | 実績多数                      |
|                     | AC 吸着法                     | 活性炭+NH <sub>3</sub> 吹込み        | 極低濃度脱硝用、維持費用大                                            | 実績無                       |
| 燃料消費量低減             | 省エネルギー<br>熱効率向上            | 燃焼制御、高効率機器<br>伝熱面の適切化<br>管理の徹底 | 低減 NOx 量は 石炭燃料消費量に比例して削減<br>熱管理の義務化<br>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<br>最も需要と見做す |

## 4 工業用ボイラにおける窒素酸化物抑制事例

### 4.1 中国における導入事例

#### 4.1.1 概要

2012 年度に日本環境省にて実施した「日本モデル環境対策技術等の国際展開に基づく環境技術普及のための調査業務」にて、武漢市の協力の下に NO<sub>x</sub> 排出削減対策の検討を目的として実施した石炭焚き順送移床ストーカ燃焼ボイラの燃焼面における NO<sub>x</sub> 低減方策に関するケーススタディについて述べる。

ケーススタディの対象罐は製造業の熱源用用途（低圧-飽和蒸気）に利用されている罐である。中国国内の石炭用工業用ボイラの稼働条件や管理状況等において代表する条件と考えられる A、B 罐である。表 4-1 はケーススタディボイラの要目仕様である。

表 4-1 ケーススタディボイラの要目仕様

| 対象罐                                        | A                                | B                               |
|--------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| ボイラ形式等                                     | 自然循環 水管式<br>平衡通風式                | 自然循環 水管式<br>平衡通風式               |
| 炭種                                         | 瀝青炭、塊炭/粉炭                        | 瀝青炭、塊炭/粉炭                       |
| 粒径                                         | 3~5mm max. 5mm                   | 平均 20mm                         |
| 組成                                         | (2 種専焼)                          |                                 |
| 使用石炭                                       | A 炭* B 炭                         |                                 |
| 水分(%)                                      | 5.72 1.96                        | 15.35                           |
| 灰分(%)                                      | 10.82 30.11                      | 17.29~19.61                     |
| 揮発分(%)                                     | 27.36                            | 33.38~30.41                     |
| 固定炭素(%)                                    | 55.48                            | 54.68~55.29                     |
| N 分(%)                                     | 測定値なし 0.22                       | 測定値なし                           |
| 高位発熱量(Mcal/kg)                             | 5.93                             | 5.178~5.049                     |
| 燃焼方式                                       | 順送鎖床火格子                          | 順送鎖床火格子                         |
| 蒸気仕様                                       |                                  |                                 |
| 定格蒸発量 (t/h)                                | 15                               | 25                              |
| 蒸気圧力 (MPa)                                 | Max/Nor. 1.0 / 0.85              | Max/Nor. 1.6 / 1.35             |
| 蒸気温度 ℃                                     | 飽和                               | 飽和                              |
| 給水温度 ℃                                     | Nor. 30                          | 105                             |
| NO <sub>x</sub> 排出濃度 (mg/m <sup>3</sup> N) | 224 (O <sub>2</sub> =12.9 %vol.) | 150 (O <sub>2</sub> =8.2 %vol.) |
| 計画熱効率 (%)                                  | 不明                               | 78                              |
| 排煙脱硫装置                                     | 付設 湿式                            | 付設 湿式                           |

\* 分析値には不整合の点が見られる。

## 4.1.2 改善の検討分野と評価

### 4.1.2.1 Fuel-NOx の削減

使用石炭における含有 N 分について受入管理が行われておらず供給業者が提示した Spot 的な分析値や予想性状で運用されている。N<0.1~0.2 % db であれば生成 NOx 中に占める Fuel-NOx は少ないと想定されが、信頼出来る品質管理が行われていない状況では炭質転換などの改善の評価はできない。

### 4.1.2.2 Thermal -NOx の生成抑制と燃焼改善

順送鎖床火格子燃焼は、Thermal -NOx の生成抑制に対する燃焼制御が基本的に困難な方式である。3.1.3.5 で燃焼原理を先述したが、燃焼過程は移動火床上を、順に乾燥－加熱－乾留－酸化－還元の手方向の一連する燃焼過程を形成している。

Thermal -NOx 生成抑制燃焼の方策である「低空気比燃焼 - 低 O<sub>2</sub>燃焼」「火炎温度の低下」「ガス滞留時間の短縮」について改善を検討した評価は次の通り

#### ① 低空気比燃焼 - 低 O<sub>2</sub> 燃焼

低 O<sub>2</sub> 燃焼を行う方式は、排ガス循環法と火格子下から吹き込む一次空気量の削減が考えられる。順送する石炭層では、適正な安定燃焼を維持するために、着火ゾーンは横手方向に一定に保持し、且つ、燃焼ゾーンも長手方向に一定の幅で保持する必要がある。また、炭層厚さに対する必要な通気性の確保のために均等な通気損失を必要とするため、乾燥ゾーン・燃焼ゾーン・後燃焼ゾーンにあった適切な風圧や空気配分の調整が、困難であるために、燃焼に供しない空気が増え、火層への送気量として空気比 1.4~1.5 程度が最低限度必要とする。燃焼室中の未燃分燃焼用に必要な二次空気量も合わせて、NOx 生成抑制効果を得るような低空気比燃焼の条件は燃焼機能が低下するため難しい。

排ガス再循環法の採用は、小型火床方式の燃焼罐では、火床燃焼構造での制約が多く適用効果が低い。制約される条件の一つは、火格子下の風箱の仕切り、風圧力の制御、火床上の燃焼制御が厳格に出来ない点である。他の点では負荷追従性である。A 罐のような低負荷運転では、火床負荷の関係で燃焼不安が生じる。二次空気の吹込みも炉構造から水管伝熱面の改造が困難である。一方 B 罐のような定格蒸発量に近い出力の場合、再循環ガス量を増やすと火層厚などの燃焼機構上、未燃分の増加が生じて熱効率が低下する。

#### ② 火炎温度の低下

本燃焼形式の火炎形状は、長炎で上昇炎となり、燃焼室内での火炎充満度は高くない。

未燃分の燃焼用として吹込む二次空気の到達距離も炉巾の広さに比して、風圧 30mmWC 程度で十分な攪拌効果を期待できない。このため火炎温度の低下を図るには、燃焼室熱負荷の低減に限定される。高負荷で運転されるケースや高熱負荷で計画されているボイラでは、炉内に蒸気吹込みや水噴霧を行い燃焼温度が下げられるが、蒸発量の低下を防ぐためには、排ガス低温部において熱回収伝熱面を追加する必要がある。

### ③ ガス滞留時間の短縮

NO<sub>x</sub> 生成に関係する燃焼機構の上で、バーナ燃焼で措置されるガス滞留時間の短縮化は順送ストーク燃焼においては、火層の管理や火炎の全体的な制御が不可であるため対策が困難である。

#### 4.1.2.3 既設同型罐に対する窒素酸化物排出削減対策の評価等

本ケーススタディ結果は、燃焼機構からの NO<sub>x</sub> 排出削減対策は制約が多く、規制値等の適切な措置が望まれる。国内の同型式の既設罐における NO<sub>x</sub> 排出削減に共通するもので、対策等に対して次のような評価となる。

##### ① 熱効率の向上

熱効率の向上効果は、燃料消費量の削減→排ガス量の削減→NO<sub>x</sub> 排出総量の削減に繋がる。

方法としては、節炭器、空気予熱器を装備している場合は、負荷平準化や燃焼改善のみが改善策であるが NO<sub>x</sub> 低減効果は数%に留まりメリットが少ない。

##### ② 排煙脱硝装置の設置

A、B 罐のようなケースでは、無触媒脱硝法が考えられるが、脱硝剤（NH<sub>3</sub> など）を煙道に吹込み十分な脱硝効果が得られるガス温度域がない。150~200℃域への吹込みでは、十分な脱硝効果が得られない。また脱硝反応を得るために十分な煙道スペースもない事例が多い。

工業用ボイラでは脱硝剤の経済的負担も大きく産業界への影響も検討されるべきである。

##### ③ 微粉炭燃焼への転換改造

燃焼室の構造面でバーナ設置に要する水管構造の大幅な改造を必要とする。最大の課題は、正常な火炎が必要とする燃焼室容積が不足することと、小規模のため、微粉炭化に要する粉碎動力費増やハンドリングの複雑化があり合理化に反する。

##### ④ 流動層燃焼ボイラの導入

流動層燃焼は、低温燃焼、低空気比が可能であるため、NO<sub>x</sub> 生成抑制効果があり、且つ燃焼機構から炉内脱硫も併せて可能な環境保全形罐である。一般的に、経済性からケーススタディ 罐級の蒸発量 5~30t/h の小型罐には沸騰型流動層方式を、30t/h 以上には循環流動層方式の導入を推奨する。

#### 4.1.2.4 省エネルギー対策の評価

既設缶に対し、省エネルギー対策の可能性について検討を行った。ここに記載する結果は、同型のものに限らず適応が可能となる。今後の工業用ボイラにおける省エネルギー対策の手順や評価法として参考とされたい。

##### ① 負荷分析

現状のボイラ効率や蒸気の使用負荷変動の定量的な把握を「運転日誌分析」や「負荷分析」で行う。

## ② ボイラ運転効率の改善

「低蒸発量負荷」「頻繁なボイラ起動停止」で運転されているボイラは効率低下する。この改善法として、蒸気使用量に合わせて、小型ボイラを複数台設置して、蒸気負荷の変動に合わせて必要な台数のボイラを常に効率の良い領域で運転するように自動最適制御する方法がある。

ケーススタディ事例では、既設石炭焚きと新設ガス焚き小型貫流ボイラを複数基設置の場合を比較した NOx 排出削減量評価の事例を表 4-2 に示す。実際の現状運転状況を基にした試算結果では、ガス燃料転換と複数基設置による効率改善効果として、年間 NOx 6,964 kg が削減可能となる。

表 4-2 工業用ボイラの省エネルギー診断事例

| 対象ボイラ              | 石炭焚きボイラ | ガス焚き<br>小型貫流ボイラ |
|--------------------|---------|-----------------|
| 定格蒸発量(t/h)×基数      | 15×2    | 2×4             |
| 平均蒸発量 (kg/h)       | 3,082   |                 |
| 平均運転効率 (%)         | 59.6    | 91.7            |
| エネルギー使用量 (MJ/yr)   | 108,836 | 70,737          |
| 排ガス NOx 濃度 (g/m³N) | 123     | 68              |
| NOx 排出量 (kg/yr)    | 8,684   | 1,720           |

(出典：環境省、窒素酸化物排出削減対策技術の導入に関わるガイドライン、2012)

## 4.2 日本における事例

### 4.2.1 事例 I

(場所：TO 製紙㈱ 実施年：1986 年)

|        |        |                                                 |
|--------|--------|-------------------------------------------------|
| ボイラ型式等 | ボイラ形式  | 自然循環 2 気水胴                                      |
|        | 定格蒸発量  | 12,000 kg/hr                                    |
|        | 蒸気常用圧力 | 1.4 MPaG                                        |
|        | 蒸気温度   | 197 °C 飽和                                       |
|        | 蒸気の用途  | 抄紙工程加熱用                                         |
|        | 燃料     | 瀝青炭／低位発熱量 22.3 kJ/kg／燃料比 2.1-2.4<br>N 分 1.3%bd. |

|                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |            |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                                  | 燃焼方式                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 順送移動ストーカー  |
| NOx 排出濃度<br>(O <sub>2</sub> =6%) | 改造前                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 380～450ppm |
|                                  | 改造後目標値                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | <250ppm    |
| 低減対策手順                           | <div>定格負荷運転による排出濃度の確認</div> <p>↓ 確認項目： 使用石炭の性状分析 空気温度 空気比 負荷変動 燃焼室熱負荷</p> <div>低減対策のための実証試験</div> <p>①低 N 分石炭燃焼試験 → 削減率 L=30～50ppm/0.1%N bd</p> <p>↓ ②石炭の粒径分布の変化の NOx 濃度への影響試験</p> <p>&lt;50mm - 90%pass → &lt;30mm - 90%pass ∴ L=25～35ppm</p> <p>③低空気比燃焼試験(低 O<sub>2</sub> 燃焼)</p> <p>O<sub>2</sub> 11.0→8.5.%vol L=80～90ppm</p> <div>採用した NOx 生成抑制技術</div> <p>①石炭の粒径分布の微細化及び整粒</p> <p>火床上の局部燃焼の抑制による NOx 低減</p> <p>②排ガス再循環</p> <p>二次空気への排ガス再循環 (再循環比 Max 25%vol)</p> <p>③NH<sub>3</sub> 液吹込</p> <p>高負荷時において NOx 排出基準値を超える場合、排ガス中への NH<sub>3</sub> 液吹込</p> |            |
| 改善費用                             | <b>試験実証費</b> <span style="float:right"><b>計 2,643,000 円</b></span>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |            |
|                                  | 石炭分析費 3 品 9 点                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 243,000    |
|                                  | 試験運転費(燃料・動力・労務費・仮設など)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 900,000    |
|                                  | ガス計測費 7 Run                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 1,500,000  |
|                                  | <b>改善設備費</b> <span style="float:right"><b>計 13,800,000 円</b></span>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |            |
|                                  | 改造工事費(煙道・石炭破碎機構・電気計装)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 8,500,000  |
|                                  | 循環通風機・電動機・操作盤                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 1,800,000  |
|                                  | NH <sub>3</sub> 吹込み装置 1 式                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 3,500,000  |
|                                  | 本費用は 1986 年当時におけるもので、社内労務費は含まない。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |            |
| 効果                               | 対策後結果<br>負荷率 85%～70% → 濃度 220～230 ppm<br>負荷率 95%～90% → 濃度 240～250 ppm (NH <sub>3</sub> 未使用)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |            |
| 改造時の留意点                          | ①排ガス再循環比は NOx 生成濃度に連動した制御に改造する。<br>②低負荷の場合の循環ガスによる腐食対策に留意すること。(S 分)<br>③石炭粒径は燃焼機の型式に応じて、吹抜けや局部燃焼の防止面から十分                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |            |

|       |                                                                            |
|-------|----------------------------------------------------------------------------|
|       | な管理を必要とする（火床面監視用 TV モニタリングの設置）                                             |
| 対策の評価 | 排ガス再循環による低酸素燃焼と火層の均圧安定化で基準値を達成できた。<br>NH <sub>3</sub> に依る排煙脱硝はほとんど使用しなかった。 |

#### 4.2.2 事例Ⅱ

（場所：N 食品加工㈱ 実施年：1988 年）

|                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                            |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| ボイラ型式等                                       | ボイラ形式                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 強制循環                                       |
|                                              | 定格蒸発量                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 40,000 kg/hr                               |
|                                              | 蒸気常用圧力                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 3.4 MPaG                                   |
|                                              | 蒸気温度                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 425 °C                                     |
|                                              | 蒸気の用途                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 自家用熱併給発電(食品工場)                             |
|                                              | 燃料                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 瀝青炭／低位発熱量 21.7kJ/kg／燃料比 2.2<br>N 分 1.8% bd |
|                                              | 燃焼方式                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 循環流動層燃焼（CFBC）                              |
| NO <sub>x</sub> 排出濃度<br>（O <sub>2</sub> =6%） | Stoker 燃焼ボイラ時                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | >400 ppm                                   |
|                                              | CFBC 後目標値                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | <150ppm                                    |
| 低減対策手順                                       | <div>既存缶における改造対策が無く、新缶導入の検討</div> <p>確認項目： Stoker 燃焼型式缶から CFBC 導入の技術検討<br/>↓ （投資費用、切換方法、Dust/SO<sub>x</sub> など大気汚染対策の総合評価など）</p> <div>低減対策のための検討事項</div> <p>① 炭種の切換えの要否（粒径分布、夾雑物、灰軟化点など）<br/>② 数種の国内外炭を選定して、メーカー 数社にボイラ計画依頼<br/>（選定基準は NO<sub>x</sub> 対策技術とともに、日本の燃料事情から幅広い炭種への適用、負荷応答性、連続運転実績、実績、設備費に重点を置く）<br/>③ 計画仕様（目標 NO<sub>x</sub> 濃度を達成するための仕様設定）<br/>↓ 保証負荷率 定格出力の 60～100%<br/>連続運転時間 &gt;1,800 hr<br/>保守費用 初期機械設備投資費用の &lt;2% yr</p> |                                            |

|                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
|                       | <div>NOx 生成抑制対策として導入したボイラ及び手法</div> <div>           ① 循環流動層ボイラ（強制循環）<br/>           ② 石炭の前処理：粗破碎機及び分級装置の導入<br/>           ③ 炉内脱硫方式の導入         </div>                                                                                                                                                                                                         |  |
| 導入に伴う費用<br>(既設缶撤去は不含) | <b>導入設備費</b><br><div> <div>CFBC ボイラ（一部補機は転用）</div> <div>1,260,000,000</div> </div> <div> <div>石炭前処理施設 1 式</div> <div>180,000,000</div> </div> <div> <div>炉内脱硫施設補機 1 式</div> <div>48,000,000</div> </div> <div> <div>その他の導入検討費用（海外調査&amp;試焚等）</div> <div>約 6,000,000</div> </div> <div> <b>計 1,494,000,000 円</b> </div> <p>本費用は 1988 年時におけるもので土建工事費は含まない。</p> |  |
| 効果                    | <b>導入後結果</b><br><div>           負荷率 60%～90% → 150～160 ppm<br/>           負荷率 100% → &lt;175ppm         </div>                                                                                                                                                                                                                                                |  |
| 導入時の留意点               | ① 石炭品質の管理を徹底すること（土砂・不燃物の除去）<br>② 高効率であるため低負荷時、排ガス温度が低くなるため、電気固有抵抗値や露点形成による集塵機能への影響の試験検討<br>③ 石炭粒径の管理徹底<br>④ 連続稼働の実施となる炉内滞留物のクリーニング方法                                                                                                                                                                                                                         |  |
| 対策の評価                 | 総合経済評価は設備投資分は低質炭購入・効率向上等でほぼ同相殺される。<br>NOx 低減効果大。                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |  |

## 日本における循環流動層燃焼ボイラについて



## 内容

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 用語 .....                              | 1  |
| 1. 序 .....                            | 2  |
| 2. 流動層ボイラの原理 .....                    | 2  |
| 3. 循環流動層ボイラの特徴 .....                  | 5  |
| 4. 循環流動層ボイラの構造等 .....                 | 6  |
| 5. 循環流動層ボイラの大気汚染対策技術 .....            | 10 |
| 6. 大気環境保全に関わる規制等 .....                | 11 |
| 7. 日本の循環流動層ボイラにおける大気汚染物質に関する実績値 ..... | 13 |
| 8. 循環流動層ボイラの取扱、設備保全管理 .....           | 14 |
| 9. 日本の循環流動層ボイラの市場の実態 .....            | 16 |
| 10. 結語 .....                          | 18 |



## 用語

|                                                     |                |
|-----------------------------------------------------|----------------|
| <b>CFB</b><br>Circulating Fluidized Bed             | 循環流動層          |
| <b>CFBC</b><br>Circulating Fluidized Bed Combustion | 循環流動層燃焼        |
| <b>BFB</b><br>Bubbling Fluidized Bed                | 気泡流動層          |
| <b>BFBC</b><br>Bubbling Fluidized Bed Combustion    | 気泡流動層燃焼        |
| <b>RKC</b><br>Rotary Kiln Combustion                | 回転炉床燃焼         |
| <b>Stoker Combustion</b>                            | ストーカ燃焼         |
| <b>Bed Material</b>                                 | 流動層媒体          |
| <b>RPS</b><br>Renewables Portfolio Standard         | 新エネルギー利用特別措置法  |
| <b>Dolostone, Dolomite</b>                          | ドロマイト（苦灰石、白雲石） |
| <b>RDF</b><br>Refuse Derived Fuel                   | 固形化燃料          |
| <b>RPF</b><br>Refuse Paper & Plastics Fuel          | 紙質・廃プラ系固形燃料    |
| <b>PKS</b><br>Palm Kernel Shell                     | オイルパーム核殻       |
| <b>Char</b>                                         | 本書では未燃炭素粒子     |

## 1. 序

流動層は固体粒子を扱う代表的な気固系システムとして、乾燥、化学反応、燃焼等多様な用途に利用されている。流動層の原型となる基本的な特許は 1910 年に Phillips & Bulteel より提出されており現在の循環流動層の原型である。1922 年には石炭ガス化 (Winkler)、1944 年微粉炭用流動層ボイラ (Hemminger USA) などの特許が出されている。1973 年石油危機後、工業先進国でボイラ用燃焼方式として、石炭や廃棄物の新しい燃焼技術やガス化技術の開発が進められ、以後 1990 年代まで、既存の微粉炭燃焼や Stoker 燃焼に優る炉内脱硫、脱硝などの特徴から活発な開発が続けられてきた。循環流動層ボイラは 1979 年 Ahlstrom 社で初めて工業化されている。粒子を流動化させ良好な気固接触や伝熱特性を実現させる方式には、多くの方式が開発されているが、大別して気泡流動層方式 (Bubbling Fluidized Bed) と乱流流動層から更にガス流速を増加させて高速流動層の状態にして、ライザー (Riser)、サイクロン (Cyclone)、ダウンカマー (Down Comer) の間で循環する循環流動層方式 (Circulating Fluidized Bed) が実用化されている。商用化には大量の固形燃料を安定的に燃焼させるためと、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub> 等の大気汚染物質排出抑制が求められたため、幾多の試行や実践を経て現在に至っている。

日本における流動層燃焼技術は、1970 年後半から主として低発熱量の下水汚泥や製紙汚泥などの産業廃棄物や、生活系廃棄物の焼却処理、低品位炭の燃料化を目的とした実用化開発が進められていた。国としての技術開発への取組は 1975 年度科学技術庁事業「流動層燃焼技術開発調査」に始まり、1976 年度石炭工業審議会 重点課題の指定を受けて常圧気泡流動層型ボイラの開発が進められ、欧米技術の導入と国内独自開発と相まって、気泡流動層・循環流動層の開発期を呈した。気泡流動層の一般産業用ボイラ向けの導入から始まり、循環流動層ボイラは 1980 年代に入り蒸発量 34~300 t/h 級が導入されている。2000 年代に入り地球温暖化抑制のため、石炭に代替して再生エネルギー資源と見做される木質系バイオマスや有機汚泥を燃料とする発電所で、循環流動層燃焼は低公害型燃焼方式として多数導入されている。

## 2. 流動層ボイラの原理

石炭や廃棄物のような固形燃料の直接燃焼技術は、ガス流速や燃料の粒子形状により、ストーカー燃焼 (Stoker Combustion)、流動層燃焼 (Fluidized Combustion)、微粉炭燃焼 (Pulverized Combustion)、回転炉床燃焼 (Rotary Kiln Combustion) 等が実用化されている。

流動層燃焼を行うものとして、燃焼流動粒子とガス流速により気泡流動層と循環流動層に大別される流動層の仕組みを利用した気泡流動層ボイラ及び循環流動層ボイラがある。

### 1) 気泡流動層ボイラ

ガスの流速が遅く、燃料粒子の最小流動化速度以下の領域では粒子が静止状態を保ち、最小流動化速度以上の空塔速度が比較的遅い領域では粒子層内に気泡が出現し、気泡の上昇につれて粒子が活発に運動し、全体として沸騰状態にあるが、燃料粒子は同伴されることなく層内に留まる。この状態を気泡流動層と称するが、ボイラのほかに廃棄物焼却炉にも利用されている。

## 2) 循環流動層ボイラ

ガスの流速が増して、燃料粒子流動化の終端速度以上となれば、燃料粒子とガスの混合はより活発となり、燃料粒子がガスに同伴して系外に飛散する。この飛散した燃料粒子をサイクロン等の補修装置を設けて、燃焼ガスから分離・補修して再度燃焼室へ戻し、循環燃焼させる方式を採用するボイラを循環流動層ボイラと称する。

図 1 に外部循環流動層ボイラの基本的概念図を示す。

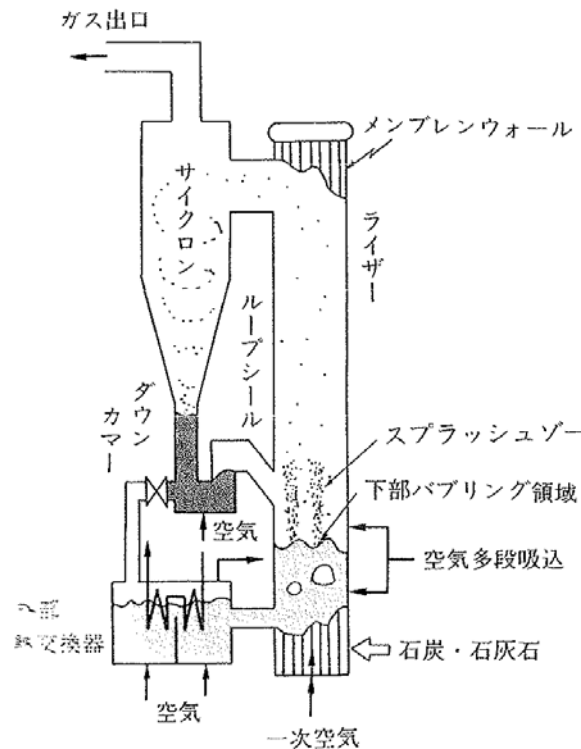


図 1 外部循環流動層ボイラの基本的概念図

(出所：火力原子力発電技術協会)

直接燃焼方式による固体燃料用ボイラにおける流動層燃焼には、表 1 に示す炉内を大気圧状態で燃焼させる常圧流動層ボイラと、炉内を加圧状態で燃焼させる加圧流動層ボイラに二分される。更に各々気泡流動層燃焼（BFBC）と循環流動層燃焼（CFBC）方式がある。常圧流動層ボイラは蒸気又は温水需要に、加圧流動層ボイラは蒸気を発電用に、加圧ガスはガス清浄後にガスタービンを通じて発電用に利用されている。日本における加圧循環流動層ボイラは、加圧されたガスの清浄化技術や経済性などが未開発のため、開発目的の実証缶が数基存在するのみで商用事例はない。

表 1 流動層ボイラの形式

| 炉内圧 | 燃焼方式              | 型 式       |
|-----|-------------------|-----------|
| 常圧  | 気泡流動層燃焼<br>(BFBC) | 多段スタック型   |
|     |                   | ランチ型      |
|     | 循環流動層燃焼<br>(CFBC) | 外部熱交換器有方式 |
|     |                   | 外部熱交換器無方式 |
| 加圧  | 気泡流動層燃焼<br>(BFBC) | スーパチャージ方式 |
|     |                   | ターボチャージ方式 |
|     | 環流動層燃<br>(CFBC)   | スーパチャージ方式 |
|     |                   | ターボチャージ方式 |

表 2 に石炭燃焼ボイラの燃焼方式の比較を示す。流動層燃焼は、最小流動化速度以上の領域で砂や、石灰石等の層媒体（Bed Material）を沸騰状態にして接触混合されるので脱硫脱硝が可能となる。ストーカ燃焼では緩慢なガス流/石炭粒子の接触で炉内除去は不可能である。

表 2 石炭燃焼ボイラの燃焼方式の比較

| 燃焼方式     | Stoker    | BFBC      | CFBC       | Pulverized |
|----------|-----------|-----------|------------|------------|
| 石炭粒径 mm  | 塊炭 0.8~50 | 粗粒炭 5~25  | 細粒炭 0.1~10 | 微粉炭<0.1    |
| ガス流速 m/s | 0.8~1.5   | 1~2       | 4~8        | 10~15      |
| 流動媒体     | なし        | 粗粒        | 細粒         | なし         |
| 脱硫法      | 排ガス処理     | 炉内脱硫（石灰石） | 炉内脱硫（石灰石）  | 排ガス処理      |
| 脱硝法      | 排ガス処理     | 炉内脱硝      | 炉内脱硝       | 排ガス処理      |

循環層流動層ボイラは、表 2 に示すようにガス流速は 4~8m/s と速く、炉内ガス気流中には 100~200  $\mu$  m の媒体が浮遊し流動粒子の終端速度以上になるよう運転される。ガスと燃料粒子の混合は活発となり、炉内での内部循環とともに、粒子はガスに同伴して系外に飛散するため、捕集サイクロンで捕集し循環して燃焼させる。熱交換器を外部に設ける場合と内部に設ける場合があるが内部設置では炉床負荷に留意する必要がある。図 2 は固体燃焼方式と火炉ガス流速の関係を示す。

流動化状態を表す燃焼ガス流体速度と流動層燃焼形式の関係は以下のとおり。

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

$U_{mf}$ ：流動開始速度

$U_0$ ：流体速度＝空塔速度（全空気量/火炉水平断面積）

$U_t$ ：終末速度

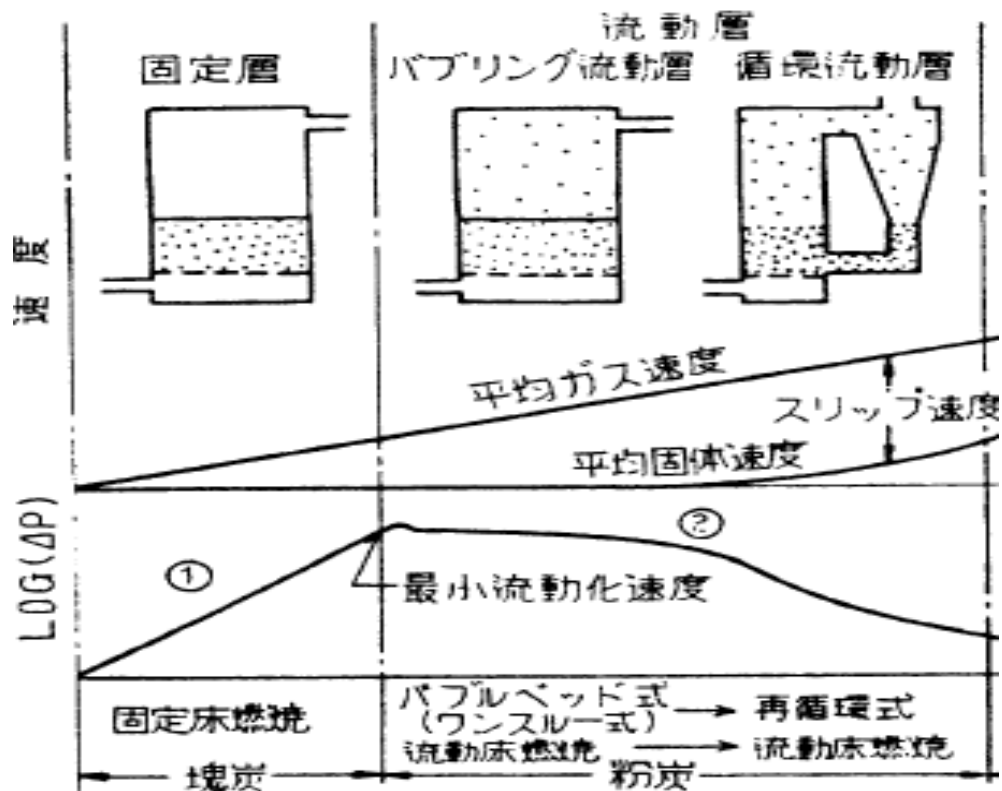


図 2 燃焼ガス流体速度と流動層燃焼形式の関係

(出所：火力原子力発電技術協会)

### 3. 循環流動層ボイラの特徴

流動層燃焼の特徴として次の点が挙げられる。1)~6)は BFBC、CFBC に共通する特徴、7)及び 8)は CFBC の特徴としている。

- 1) 多様な石炭の燃焼：高灰分、高湿分の低品位炭（褐炭）、無煙炭、瀝青炭などの広範な石炭の燃焼が可能である。
- 2) 柔軟な燃料適用性：低発熱量の脱水有機汚泥やバイオマス（木材、オイルパーム核殻）、生活系廃棄物、バガス、RDF(廃棄物固形燃料)、RPF(紙質・廃プラ系固形燃料)、廃タイヤなどの燃料化が可能であり、燃料特性の変化に対する追従性が高い。
- 3) 多種燃料の混焼：加熱・乾燥・揮発等の燃焼過程が流動的であるため、燃焼反応時間が長く、多少の燃焼特性が異なる燃料でも混焼が可能である。
- 4) 高効率燃焼による未燃損失の低減：多段空気吹込みが可能であること、さらに接触攪拌により層内の熱伝導率が高く、微粉炭燃焼やストーカ燃焼と比較して燃焼温度が低く(850～950℃)、完全燃焼による未燃分の低減が可能である。
- 5) 低空気比燃焼：高速流動化のため、燃料粒子と燃焼空気間の相対速度差が大きい。良好な固気反応を得られることができ、過剰空気率の低減化が可能である。
- 6) 炉内での脱硫脱硝：層媒体の接触混合による炉内での脱硫脱硝が可能であるため、排煙

脱硫脱硝装置を別置する必要がなく、機器構成が簡素化され、設備費の低減や設置スペースが省ける。脱硫については火炉内に石灰石を供給し乾式脱硫が可能である。また、低温燃焼により Thermal NO<sub>x</sub> の生成が抑制可能である。

- 7) 負荷変動に対する追従性：燃焼室と外部熱交換器が分離されるため、BFBC に比べて負荷変動に対する優れた追従性がある。また、部分負荷特性も良好である。
- 8) 高い汎用性：内部循環流動層ボイラでは、中小出力缶の需要が多く、生活系廃棄物の焼却発電にも多数の実績がある。オイル燃焼缶に相当する燃焼効率やダイオキシン類発生が少ない低公害性が評価されている。また多品種の石炭や廃タイヤ、汚泥などの可燃性廃棄物の専焼・混焼に適用可能である。

表 3 に気泡流動層燃焼（BFBC）と循環流動層燃焼（CFBC）の比較を示す。

表 3 BFBC と CFBC の比較

| 特性                                                | BFBC                                        | CFBC                           |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------|
| 燃料の運動                                             | 流動化、砂層内を運動                                  | 流動化、<br>火炉とサイクロンを循環            |
| 燃焼域                                               | 砂層内部と表面                                     | 火炉高さ全域                         |
| 燃焼制御性                                             | CFBC より鈍感                                   | 敏感                             |
| 低空気比燃焼                                            | 可能                                          | 可能                             |
| 稼働性                                               | 日間起動停止(DSS)、<br>連続稼働可能                      | 連続稼働に適している                     |
| 燃料                                                | 多種燃料への適応性大<br>前処理(チップ化)が必要                  | 多種燃料への適応性大<br>BFBC より十分な粒粉化が必要 |
| 環境負荷 低 SO <sub>x</sub> 燃焼<br>低 NO <sub>x</sub> 燃焼 | 高効率の炉内脱硫が可能だが、性能が CFBC よりは劣る<br>炉内脱硫との両立は困難 | 高効率炉内脱硫<br>炉内脱硫との両立可能          |
| 適用出力規模                                            | 小～中規模                                       | 中～大規模                          |

#### 4. 循環流動層ボイラの構造等

##### 1) ボイラの構成

循環流動層ボイラの基本的構造は、外部循環型（図 3～図 5）及び内部循環型（図 6）に示すように、火炉（ライザー）、サイクロン、Char の循環管（ダウンカマーなど）で構成され、伝熱面は火炉壁面、サイクロン部のメンブレン構造壁及び後置される対流伝熱面（過熱器、再熱器など）で構成されている。水循環方式は、単胴自然循環、強制貫流型など多様な実績が見られる。日本の技術は 1980 年代に欧米の Steinmuller、Altom(kvaener Envio Power)、B&W(Power GEN)、Foster Wheeler、Lurgi 等から技術導入し日本のボイラメーカーで改良開発された技術系統と日本独自開発技術の系統がある。いずれも開発部位は国内外特許を取得

して、現在では国内外に納入されている。

図 7 に代表的な循環流動層ボイラの設備系統を示す。

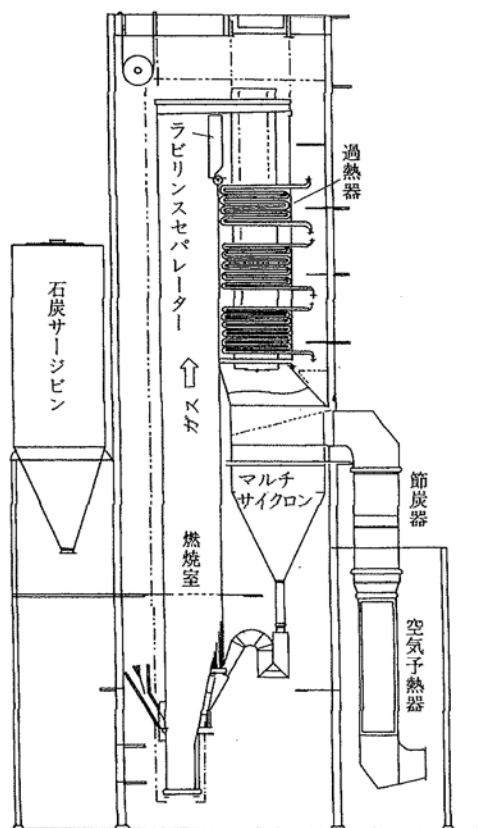


図 3 外部循環流動層ボイラの基本構造事例 (1)

(出所：NKK)

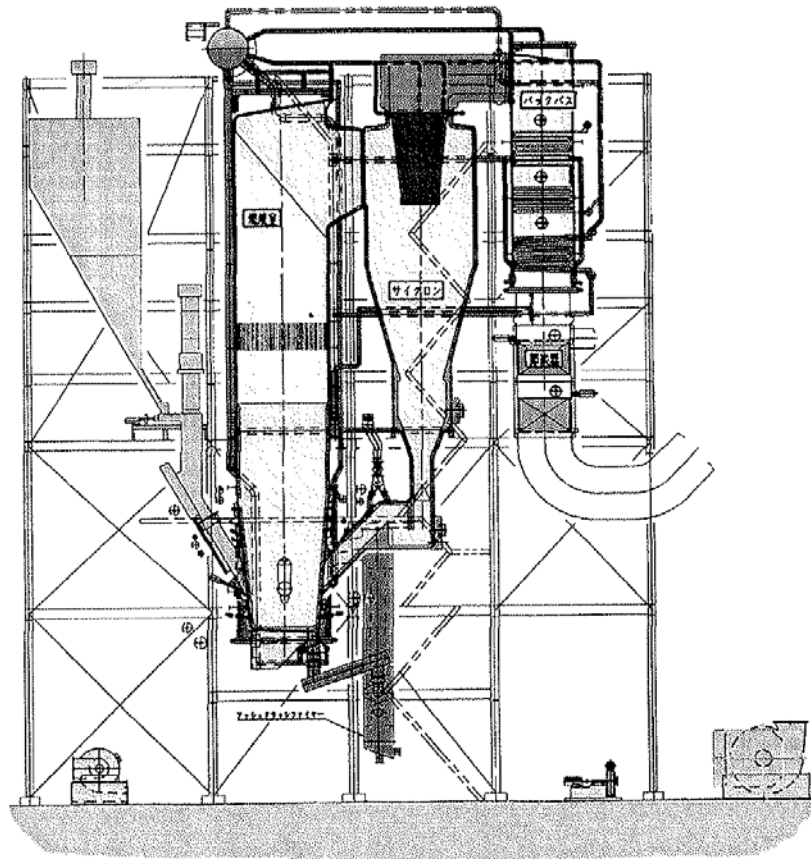


図 4 外部循環流動層ボイラの基本構造事例 (2)

(出所：タクマ)

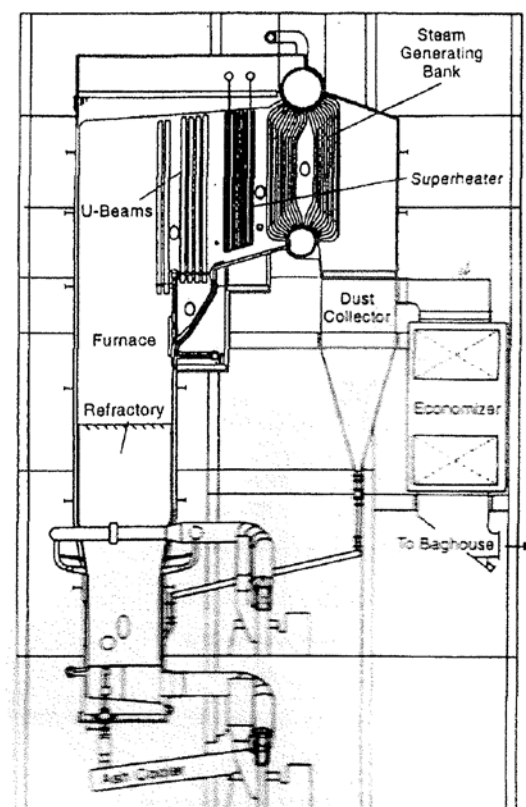


図 5 外部循環流動層ボイラの基本構造事例 (3)

(出所：バブ日立)

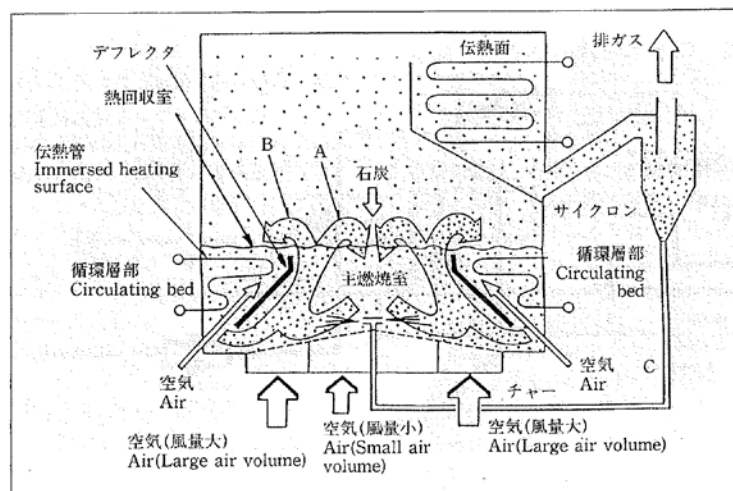


図 6 内部循環流動層ボイラの作動概念

(出所：CCUJ)

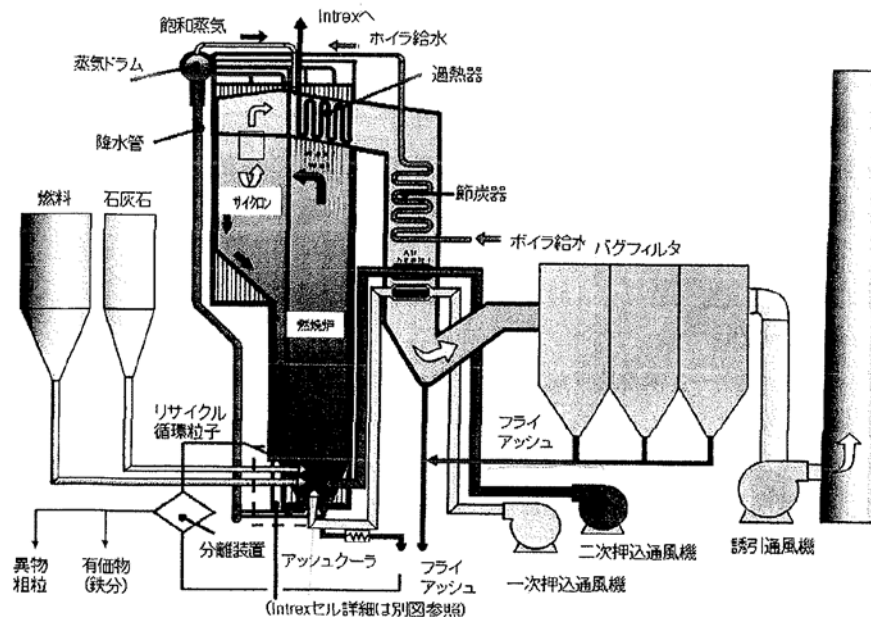


図 7 循環流動層ボイラの設備系統の事例

(出所：JSIM SHI)

## 2) 蒸気仕様

循環流動層ボイラにおける、火炉の放射伝熱面や対流伝熱面の基本的な配列構造は、微粉炭燃焼や重油燃焼のボイラ構造と類似している。バーナ燃焼のような輝炎燃焼火炎はなく、火炉ガス温度、ガス流速が低いのみである。従って、蒸気仕様は、欧米では超々臨界域が多くみられるが、日本の導入実績では、蒸気圧力、蒸気温度、蒸気純度とも 5~300MW 級小中発電出力用に適する 10MPa 級、540℃級の高温高压仕様が多い。

## 3) 補機

基本的な補機構成は、微粉炭燃焼等の固体燃料ボイラと同じである。脱硫剤が乾式、脱硝系統が簡略であるが、ホットサイクロン部がライザー部と同等程度のスペースを必要とすることや飛灰系統がやや複雑になる。

# 5. 循環流動層ボイラの大気汚染対策技術

環境負荷低減型ボイラとして評価されている流動層燃焼ボイラは、他の微粉炭燃焼やストーカ燃焼に比べると燃焼効率が高く、燃焼機構上、大気環境負荷となる排ガス量、CO<sub>2</sub> 排出量、煤塵、SO<sub>x</sub> 排出濃度、NO<sub>x</sub> 排出濃度、HCL 排出濃度等の排出量が少なく汚染影響度が低いいため、対策も簡素且つ容易である。さらに対策技術が他の燃焼分野で実証確立されたものが充当できるメリットも大きい。

## 1) 排ガス量・CO<sub>2</sub> 量

流動層燃焼は微粉炭燃焼等の直接火炎燃焼に比べて、一般的に空気比が 1.3 以下と低く、且つボイラ熱効率も高性能を求めるため 90~92%at LHV 以上と高く設定されている。それ故排ガス量は少なく、総 CO<sub>2</sub> 排出量は低減される。

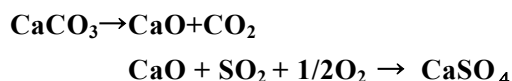
## 2) 煤塵排出濃度・集塵技術

流動層燃焼では火炉内フリーボードで CO、H<sub>2</sub> などの未燃ガスや Char が燃焼する。循環流動層は空塔ガス速度が速く、固定層燃焼に比べ対流時間も短いためサイクロン部に未燃分が同伴することは避けられない。また灰分は排ガス中に移行するため、集塵機で捕集集塵される。負荷変動等に起因するガス量の変動による影響を受けるが、一般的に集塵機入口の含塵濃度は微粉炭燃焼ボイラより少ない。集塵方法は設置が可能なスペースの位置やガス温度などの条件を考慮し、排出基準を満たすよう電気集塵機又はろ過集塵機が装備される。

いずれも乾式処理であり排水処理は不要である。

## 3) SO<sub>x</sub> 排出濃度・脱硝技術

流動層燃焼は脱硫剤として石灰石 CaCO<sub>3</sub> 又はドロマイト CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> を流動層内に添加する手法で燃焼と同時に脱硫することが可能である。石灰は仮焼されて CaO になり、以下のような脱硫反応が起こる。



循環流動層燃焼は、粒子の循環により長い反応時間が確保されるため Ca/S モル比は小さい。上述の脱硫反応から、Ca/S モル比、空気比、脱硫剤の循環等が管理面において重要な指標であることが解るが、各々のボイラで管理指標は異なるため、試焚検証することが必要である。

## 4) NO<sub>x</sub> 排出濃度

循環流動層ボイラにおける NO<sub>x</sub> 排出濃度は、空気比、炉床負荷、流動温度、Ca/S モル比、燃焼性状等の条件やライザー高さ、燃料供給法などの影響を受け、空気比の増加とともに NO<sub>x</sub> 排出濃度が増加するが、微粉炭燃焼等に比べて燃焼温度が低く、850~950℃で燃焼を行うため、Thermal NO<sub>x</sub> の発生が抑えられる。それ故、流動層燃焼で発生する NO<sub>x</sub> の大半を Fuel NO<sub>x</sub> が占めており、削減対策を要する場合には燃料中の N 分の低減が効果的である。

しかし、日本国内では総量排出量規制の制約等で更に低い排出濃度の実現を求められる場合がある。その場合は流動層底部における還元燃焼及びフリーボード部における酸化燃焼による二段燃焼法やライザー内において NO が CO、NH<sub>3</sub>、H<sub>2</sub> 等の還元性ガスや Char の影響を受けて還元分解される還元ゾーンへの排ガス再循環、NH<sub>3</sub> 注入法などの対策が講じられるが、温度条件や空気比の制約があるため、導入に際し試行検証が実施されている。

# 6. 大気環境保全に関わる規制等

## 1) 規制の体系

日本においてはボイラから排出される煤煙は、環境基本法の基本理念に基づく環境基準や

大気保全行政の基幹をなす「大気汚染防止法」において、排出基準、排出制限、燃料使用規制、煤煙測定義務、報告、罰則等が規定されており、ボイラ設置者はこの規定を遵守する義務がある。

循環流動層ボイラに関わる大気汚染防止法規制対象物質を表 4 に示す。

表 4 循環流動層ボイラに関わる大気汚染防止法規制対象物質

| 規制物質 |       | 物質の例示                              | 発生形態          | 規制基準                                        | 規制措置       |
|------|-------|------------------------------------|---------------|---------------------------------------------|------------|
| 煤煙   | 硫黄酸化物 | SO <sub>2</sub><br>SO <sub>3</sub> | 物の燃焼          | 排出基準<br>(K 値規制、総量規制)                        | 改善命令<br>直罰 |
|      | 煤塵    | 煤など                                | 物の燃焼          | 排出基準<br>(濃度規制、施設&規模毎)                       | 同上         |
|      | 有害物質  | NO <sub>x</sub><br>Cd、HCl          | 物の燃焼・<br>分解など | 排出基準(濃度規制、施設&物質毎)<br>総量規制(NO <sub>x</sub> ) | 同上         |
| 粉塵   | 一般粉塵  | 石炭粉                                | 粉碎、選別など       | 構造・使用・管理基準                                  | 基準適合命令     |

排出基準には国で発生施設毎に一元的に規定する一般排出基準、環境負荷の大きい地域の新設施設に一般排出基準にかえて適用される特別排出基準、さらに前述の排出基準では大気汚染防止が不十分な地域において、煤塵と有害物質では都道府県が条例によって定める上乘せ基準がある。

SO<sub>x</sub> については地域区分毎に排出基準が規定されているが、地域により地方自治体が総量規制基準を定めている場合がある。さらに NO<sub>x</sub> についても SO<sub>x</sub> と同様に環境基準の達成が困難な地域では、各事業所の施設を対象として総量規制基準が定められている。

その他、都市圏や指定地域において、季節によって燃料中の硫黄分に上限を設ける使用燃料基準も制定されている。

## 2) 循環流動層ボイラに係わる煤煙排出基準

日本の煤煙発生施設は、ボイラ、焼却炉など施設種別毎に、燃焼方式、燃料種、規模（排ガス量）に応じて一般排出基準値が定められている。

日本の大気汚染防止法が定める石炭、固体燃料（RDF、RPF、石油コークス、木屑など）、廃棄物などを燃料とする循環流動層ボイラから排出される煤煙に関する一般排出基準について表 5 及び表 6 に示す。尚、表 5 に煤塵の排出基準値を、表 6 に NO<sub>x</sub> の排出基準値を示す。

表 5 煤塵の排出濃度

| 施設名           | 排ガス量<br>(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> N/h) | 一般排出基準<br>(g/m <sup>3</sup> N) | 特別排出基準<br>(g/m <sup>3</sup> N) | O <sub>2</sub> 濃度<br>(%Vol) |
|---------------|----------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| 石炭燃焼ボイラ       | 20 以上                                        | 0.10                           | 0.05                           | 6                           |
|               | 4~20                                         | 0.20                           | 0.10                           |                             |
|               | 4 未満                                         | 0.30                           | 0.15                           |                             |
| その他の固体燃料燃焼ボイラ | 4 以上                                         | 0.30                           | 0.15                           |                             |
|               | 4 未満                                         | 0.30                           | 0.20                           |                             |
| 廃棄物焼却ボイラ (連続) | 4 以上                                         | 0.15                           | 0.08                           | 12                          |
|               | 4 未満                                         | 0.50                           | 0.15                           |                             |

表 6 NO<sub>x</sub> の排出基準

| 施設名                | 排ガス量<br>(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> N/h) | 排出基準値<br>(ppm) | O <sub>2</sub> 濃度<br>(%Vol) |
|--------------------|----------------------------------------------|----------------|-----------------------------|
| 石炭燃焼ボイラ<br>(流動層燃焼) | 1~4                                          | 350            | 6                           |
|                    | 4~20                                         | 250            |                             |
| 固体燃料燃焼ボイラ          | 20~50                                        | 250            |                             |
|                    | 50~70                                        | 250            |                             |
|                    | 70 以上                                        | 200            |                             |
| 廃棄物焼却炉 (連続)        | 4 以上                                         | 250            | 12                          |

備考：流動層燃焼との適用区分が不明な場合、(ガス、油との混焼、規模規定が無い等) の場合の基準は行政指導により確定する

## 7. 日本の循環流動層ボイラにおける大気汚染物質に関する実績値

日本国内における代表的な事業所で現在稼働中の循環流動層ボイラについて、大気環境計測値を表 7 に示す。全てのボイラにおいて煤塵、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub> の排出濃度が当該地域における排出基準を大きく下回る結果となっている。

発電事業用ボイラは流動層燃焼に限らず排出ガス量が多く、地域環境への影響が大きいため、ボイラ機能の優秀性と共に、事業所における公害防止統括者の指揮統括の下で実施される燃料・燃焼管理や施設の保全監理、測定義務の励行等が実効に寄与していると想定できる。

また産業廃棄物や生活系廃棄物の適正処理としての役割が大きい循環流動層ボイラに関しても、廃棄物処理法の定めるダイオキシン類排出抑制に係わるガイドラインなどの遵守と合わせて問題なく運用されている実態から、循環層流動層燃焼技術の環境特性の優れている点が理解できる。

表 7 日本の代表的な循環流動層ボイラにおける環境計測値

| 企業          | 燃料    | 煤塵 (mg/m <sup>3</sup> N) | SO <sub>x</sub> (ppm) | NO <sub>x</sub> (ppm) |
|-------------|-------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 住友大阪セメント(株) | 石炭・木屑 | < 20                     | < 100                 | < 120                 |
| (株)サニックス    | RPF   | < 40                     | < 50                  | < 200                 |

|             |        |      |       |       |
|-------------|--------|------|-------|-------|
| 王子マテリア(株)   | RPF・石炭 | < 30 | < 50  | < 150 |
| 日本製紙(株)     | 石炭     | < 50 | < 100 | < 100 |
| 大牟田市リサイクル施設 | RDF    | < 20 | < 3 * | < 65  |

(\* 総量規制地域 単位：m<sup>3</sup>/h)

## 8. 循環流動層ボイラの取扱、設備保全管理

### 1) 制御性

日本国内に導入されている発電用循環流動層ボイラについて、負荷変化特性は出力規模により異なるが、10～100MW 級で要求される高中間負荷帯においては変化率 5%/min の追従性は問題なく達成されている。主蒸気圧力、主蒸気温度に関しても同様である。日本では発電事業法に基づき、制御性に対する厳しい検査確認が実施されており、性能が検証されない場合は事業運用の許可が得られない。

基本制御系は微粉炭燃焼・油燃焼・ガス燃焼と同じで、主蒸気圧力、主蒸気流量、SH 温度、炉内圧、火炉温度、SH/RH 管壁温度等の動的特性を基に、燃料供給量、空気量、給水量、排ガス風量、SH 注水量等を制御している。ボイラの基本的な伝熱特性は全可燃粒子循環量、層内ガス速度および空燃比で決定する。そのほか、昨今の省エネルギー対策として、送風機、給水ポンプ、空気圧縮機などに VVVF 制御が導入されている。

### 2) ボイラ熱効率

熱効率は、原理的にボイラ構造面における伝熱面積と燃焼に関わる排ガス顕熱損失、未燃損失に起因する因子である。日本の循環流動層ボイラにおける導入事例では、廃棄物処理を主目的とするものを除き、発電事業用の中規模出力ボイラが多くを占めていることから、ボイラ熱効率は 92%atLHV 以上と計画・実績とも高効率を達成している。

### 3) 運転障害と対策

これまでの経験より、流動層燃焼で発生する運転障害には次の①～⑦が挙げられる。発電事業では障害による停止は、公益性からたとえ短時間であっても送配電停止事故に繋がり、二次被害や更には三次被害が発生するため、連続安定稼働且つ一定の出力維持が必要条件となる。送配電停止事故は事業収益に莫大な損失を与えることから、ボイラの定期検査・修理を含む予防保全体制の確立が必須となっている。

#### ① 流動不可な異物（岩石、金属類など）の火炉内底部への堆積

対策：燃料の前処理において流動不可な夾雑物、不燃物の選別除去や燃料粒子径の整粒を行う。また底部滞留物の定期的な炉外取出機構を設ける。

#### ② 蒸気過熱管群の腐食や灰付着

対策：ガス温度が高く、HCL など高温腐食が発生し易い過熱管群部位やスラグの付着し易い構造部には煤落装置や耐酸鋼管を使用する。

#### ③ 高いターンダウン比に起因する尖頭的な突変負荷の発生

流動層内の燃焼条件（タービン送気条件）を激しく制御する状態となるため、好ま

しくない。

対策：電力系統の安定化対策や蒸気量負荷の緩慢な変動を図る。

④ サイクロン内壁の灰等の付着

サイクロンは循環流動層燃焼において燃焼ガスと流動材の分離を行う主要な機能部であるため、循環流動層の運転障害対策として回避出来ない。付着物は燃焼生成物であり成長するため、厚くなると分離効率の低下や脱落閉塞事故に繋がる。

図 8 にサイクロン部の付着物の事例を示す。

対策：外表壁の保温や内部の煤落装置に工夫が必要である。石炭の場合炭種の影響や粒径の管理が必要である。

⑤ 連通管の閉鎖や熱交換器内のガス通過面の閉鎖

対策：閉鎖した場合に使用できるバイパスや定期的なスケール払出装置を設けて循環停止を回避する。

⑥ ガス連通管部の摩耗や腐食

灰の高摩耗性や廃棄物燃焼の場合の酸性腐食が原因となる場合が多い。

対策：閉鎖の場合に容易に取外可能な構造の採用や仮のバイパス管を設ける。

⑦ 伝熱面の摩耗

流動材が熱媒体となる流動層ボイラの性格上、火炉伝熱面の摩耗が発生する場合が多い。

対策：伝熱管の溶射被覆や、耐火材ライニング施工を行う。

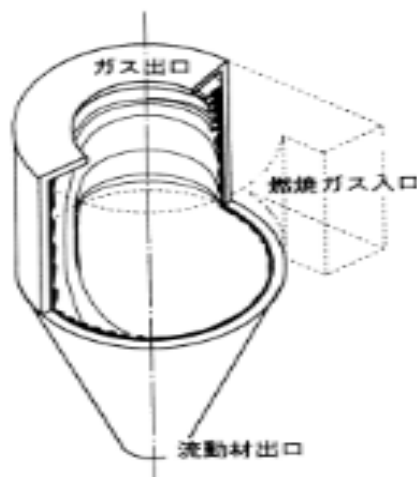


図 8 サイクロン部の付着物の事例

(出所： 日本製紙 ボイラ年次大会資料)

#### 4) 設備管理

日本では循環流動層ボイラの用途により、所定の法定取扱技術者の専任が義務化されており、運転取扱だけでなく、予防保全や安全管、熱管理等の業務に従事する。また、排ガスに関わる大気汚染管理や廃棄物処理事業を行う場合もそれぞれに法定資格管理者が専任するよう定められており、発電用や熱供給用に限らず、これらの法定資格管理者の統括監督のもと適正な運用が実行されている。日本の電力質の信頼性と省エネルギー活動は国際的に最高水準にあるが、これらの人的なバックアップが背景にある結果である。

### 9. 日本の循環流動層ボイラの市場の実態

日本の一次エネルギー源における石炭の比率は高く、インドネシア炭、オーストラリア炭などの輸入炭に依存する体制は 1970 年代から定着している。このため、燃焼面において必然的に低品位炭や炭質の変動に強靱に対応できる流動層燃焼のような燃焼システムの開発と導入が行われてきた。併せて、1990 年代初頭における廃棄物焼却施設におけるダイオキシン類対策、3R を基調とする循環型社会形成を図ることを目的とした建設リサイクル法に準拠した RDF、RPF に代表されるリサイクル燃料への代替、RPS 法「電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法」によるバイオマス発電事業の展開等に代表される日本国内の環境問題への対応策として、流動層燃焼はその利点から高い需要があり、1980 年～2000 年代にかけて、国内重工業メーカーは自社技術の開発や欧米からの技術提携に取り組み、1990 年代には製紙業や廃棄物処理業向け商用缶の納入が活発化した。

表 8 に NEDO(独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構)の国際石炭利用対策事業「Clean Coal Technology 実証普及事業」の国際支援事業の一環で、循環流動層ボイラの普及用モデル缶として、中国、比国、インドネシア、タイ等に納入されているボイラを示す。

表 8 NEDO 国際石炭利用対策事業 (CCT) 納入の循環流動層ボイラ

| 納入先            | 国名               | 建設事業年度    | 燃料      |
|----------------|------------------|-----------|---------|
| 房山服装集团公司       | 中国・北京市           | 1993～1994 | 石炭      |
| 淄博鋁務局嶺子炭鋁      | 中国・山東省           | 1994～1995 | 石炭      |
| 棗莊鋁務局紫里炭鋁      | 中国・山東省           | 1995～1996 | 石炭      |
| カラカ石炭火力        | 比国・バタンガス         | 1995～1997 | 石炭      |
| インドラマケミカル      | タイ・サラブリ          | 1997～1998 | 褐炭・コンコブ |
| ケルタス・バスキ・ライハット | インドネシア<br>バニユアング | 1997      | 石炭      |
| 東風汽車有限公司       | 中国・湖北省           | 2002～2004 | 石炭      |

(出所：NEDO CCT 資料)

表 9 に日本の代表的ボイラメーカーの国内における納入実績の一部を示す。ボイラ規模は蒸発量基準で 10～300t/h と広く普及している。循環流動層ボイラの導入先業種も、製紙業、セメント業、食品、鉄鋼、化学、電力卸売業、木材加工業、廃棄物処理業等と多様に亘り、業種に限定されず広範な実績を示しており、特に稼働条件に高い信頼性を求められる業種からの需要

が高い。循環流動層ボイラ導入の経済的メリットが期待出来る安価な低品位燃料が調達可能な企業や、汚泥や勇氣残渣などの高温分で燃焼性に劣る副生物の処理や連続運転が求められる場合においては、業種・企業を問わず導入されているのが特徴である。特に日本で独自に開発された内部循環流動層燃焼は、廃タイヤ等の廃棄物の燃料化に多くの実績があり、同型式のガス化熔融炉とともに国内外で 200 基以上の実績を誇る。

日本を代表する大手ボイラメーカーの海外市場への技術輸出やプラント輸出についても、1995 年代以降に大気環境保全型、高性能ボイラを中心に活発に行われており、アジア、西欧諸国における中出力 IPP 用石炭火力、バイオマス発電および廃棄物発電分野への実績が多い。

表 9 日本における循環流動層ボイラの主な実績

| No. | ユーザー            | 場所  | 蒸発量(t/h) | 燃料              | メーカー                |
|-----|-----------------|-----|----------|-----------------|---------------------|
| 1   | (株)クラレ          | 倉敷  | 70       | 石炭              | 三井造船(株)             |
| 2   | 出光興産(株)         | 千葉  | 300      | 石炭              | 三井造船(株)             |
| 3   | (株)神戸製鋼         | 山口  | 34       | 石炭              | 神鋼パイロパワー(株)         |
| 4   | 新日鐵住金(株)        | 兵庫  | 250      | 石炭              | 神鋼パイロパワー(株)         |
| 5   | オーミケンシ(株)       | 兵庫  | 35       | 石炭              | 神鋼パイロパワー(株)         |
| 6   | (株)神戸製鋼         | 神戸  | 150      | 石炭              | 神鋼パイロパワー(株)         |
| 7   | (株)神戸製鋼         | 加古川 | 225      | 石炭              | 神鋼パイロパワー(株)         |
| 8   | 王子マテリアル(株)      | 大分  | 200      | RPF、石炭          | 三菱重工業(株)            |
| 9   | 日本製紙(株)         | 勇払  | 260      | 石炭              | 三菱重工業(株)            |
| 10  | 王子製紙(株)         | 春日井 | 140      | 木屑、廃タイヤ、<br>RPF | 三菱重工業(株)            |
| 11  | 中国木材(株)         | 日向  | 13       | 木質バイオマス         | (株)タクマ              |
| 12  | NEDO (IRC)      | タイ  | 30       | 褐炭、<br>バイオマス    | (株)タクマ              |
| 13  | 住友大阪セメント<br>(株) | 栃木  | 105      | 木屑、石炭、<br>廃タイヤ  | (株)荏原製作所            |
| 14  | 昭和シェル石油(株)      | 川崎  | 49MW     | PKS、木屑          | JFE エンジニアリン<br>グ(株) |
| 15  | (株)サニックス        | 苫小牧 | 180×2    | 廃プラスチック         | JFE エンジニアリン<br>グ(株) |
| 16  | 神之池バイオ発電<br>所   | 神栖  | 106      | 木屑、樹皮           | (株)荏原製作所            |
| 17  | (株)ダイセル         | 大竹  | 300      | 石炭、廃タイヤ         | 住友重機工業(株)           |
| 18  | 住友共同電力(株)       | 新居浜 | 180      | 石炭              | 住友重機工業(株)           |
| 19  | 住友大阪セメント<br>(株) | 高知  | 237      | 石炭、コークス、<br>木屑  | 住友重機工業(株)           |
| 20  | 岩国ウッドパワー<br>(株) | 岩国  | 45MW     | 木屑              | JFE エンジニアリン<br>グ(株) |

|    |             |     |      |          |            |
|----|-------------|-----|------|----------|------------|
| 21 | 大牟田市リサイクル施設 | 大牟田 | 86.9 | RDF      | 川崎重工業(株)   |
| 22 | 太平洋セメント(株)  | 糸魚川 | 475  | 石炭、Corks | 住友重機械工業(株) |

## 10. 結語

日本における循環流動層ボイラ技術は、ボイラ機能や低公害性において国際的の最高水準にある。欧州ボイラ市場における数社による寡占状況とは異なり、日本の代表的流動層ボイラメーカーとして数十社が存在し競合している状況にある。この競合の副次効果として、多面的かつ新燃料の市場開発活動が活発であり、技術伸張も著しい。運転開始後に経験する様々な事故障害は新技術開発の糧として活用し、設備保全業務や支援は新たなビジネスモデルとなっている。

今世紀の地球環境課題として、温暖化抑制、化石燃料の延命が世界人類共通の Solution Item である中、発電事業や廃棄物エネルギー利用などのエネルギー施策に資する循環流動層ボイラの将来への期待は大きい。