

#### 4.1.4 窒素酸化物の発生抑制と排煙脱硝

燃料を高温で燃焼すれば一酸化窒素が発生し、大気中に放散されると二酸化窒素に変わり、酸性雨や光化学オキシダントの原因になります。本稿では、運転条件の変更や燃焼装置の部分的な改造で一酸化窒素の発生を抑制する方法と、燃焼装置の下流で一酸化窒素を窒素ガスと水蒸気に分解する排煙脱硝装置について概説します。排煙脱硝装置は、発電所が総処理能力の8割を占めています。

### 1. 窒素酸化物の発生抑制方法

燃料の燃焼にともなって発生する窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）には二種類があります。一つは燃料に含まれている窒素が燃焼過程で空気中の酸素と結合し、窒素酸化物になるフューエル NO<sub>x</sub> です。もう一つは燃焼用の空気に含まれている窒素と酸素が高温状態で反応し、窒素酸化物になるサーマル NO<sub>x</sub> です。フューエル NO<sub>x</sub> の発生を抑制するには、当然のことですが、なるべく窒素含有率の少ない燃料を使用するのが有効です。石油系燃料の場合は、原油に含まれている窒素化合物が、精製の過程で沸点の高い燃料に濃縮します。原油の窒素含有率は概ね 0.1%～0.3%ですが、灯油は 0.05%以下、軽油は 0.1%～0.15%、重油だと 0.3%～0.5%になります。石油燃料は窒素分と硫黄分に関連性があり、一般的に硫黄分の多い燃料には窒素分も多いと考えてよいでしょう。石炭に含まれている窒素分は石油系燃料よりも多く、0.7%～2.2%です。ガス燃料にも窒素分が含まれていますが、大部分は化合物ではなく窒素ガスの状態です。このため空気中の窒素と同じ扱いでよく、フューエル NO<sub>x</sub> に該当しません。このように石炭より石油、石油も重油より軽油、軽油よりも灯油の方

が好ましく、LNG はさらに好ましい燃料です。燃料に含まれている窒素は概ね 5%から 30%が NO<sub>x</sub> になりますが、この変換割合にはボイラーや燃焼炉の酸素濃度と温度条件が大きく影響します。燃料に起因する NO<sub>x</sub> の寄与率は、最大で NO<sub>x</sub> 発生量の 75%程度に達することがあります。このため、排出規制が厳しい地域の発生源は燃料の選択に注意する必要があります。

一方、燃焼用の空気に含まれている窒素が酸化物になるサーマル NO<sub>x</sub> は、発生機構から下記の 3 種類の対策で発生を抑制できることがわかっています。

- (1) 燃焼領域での酸素濃度を希薄にする。
- (2) 高温領域の燃焼ガス滞留時間を短くする。
- (3) 燃焼温度を低くする。とくに局所的な高温領域を作らない。

これらの方策は運転条件の変更と、燃焼装置の改善で具体化できるので、表 1 に示す対策が実際に採用されています。

### 2. 運転条件の変更による方法

#### 2.1 低空気比運転

低空気比運転は、可能な限り過剰空気量を少なくし、燃焼領域の酸素濃度を希薄にして NO<sub>x</sub> の発生を抑制する方法です。酸素濃度が薄いとバーナーの火炎温度も低くなるので、両者が相乗効果を発揮します。過剰空気比が小さいほどエネルギー効率が高くなり、省エネルギー効果も得られます。しかし空気量が過少になると不完全燃焼になり、未燃焼の炭素、つまり「すす」が発生しやすく

なります。しがって炉内に酸素濃度計を設置し、  
コンピューターと連動させて適切に空気量を調整  
する自動制御システムが広く採用されています。

## 2.2 燃焼室負荷の低減

燃焼室負荷の低減は、燃焼量を設計値より少な

表 1. サーマル NO<sub>x</sub> の排出抑制方法 (出典: 公害防止の技術と法規 2020 (産業環境管理協会))

抑制方式名	適用検討対象設備	サーマル NO <sub>x</sub>			フューエル NO <sub>x</sub>			対策実施の難易度	考慮しておかなければならない障害				備考		
		抑制理由			抑制効果	抑制理由	抑制効果		熱効率の低下	出力の低下	装置の大形化	ばいじん等の増加			
		火炎温度の低下	酸素濃度の低下	高温域滞留時間の短縮	果の程度	酸素濃度の低下	果の程度								
運転条件の変更による方法	低空気比燃焼	全施設	◎	◎		○	○	○				◇			
	燃焼室熱負荷低減	全施設	◎		○			△	○		◇	◇新			
	空気予熱温度低下	大形施設	◎		○			△	△	◇	◇				
燃焼装置の改造による方法	二段燃焼	大形施設	◎	◎		◎	○	◎	×				◇	負荷変動の大きい施設では不適。 空気予熱器等の低温伝熱面を持ったものでは熱効率の低下はない。	
	濃淡燃焼	バーナー2本以上の施設	◎	◎		○	○	○	△				◇		
	排ガス再循環	大形施設	◎		○	◎		△	×	◇	◇				
	水蒸気又は水吹き込み	全施設	◎		○			△	△	◇					
	炉内脱硝	大形施設	◎	◎		◎	○	◎	×				◇		
	低NO <sub>x</sub> バーナー	混合促進形	全施設	◎		◎		○	△						原理が他のNO <sub>x</sub> 抑制と同じものは効果が低下する。
		分割火炎形	全施設	◎		◎		○	△						
		自己再循環形	全施設	◎		○		○	△						
段階的燃焼組み込み形		全施設	◎	◎		○	○	◎	△				◇		
改善燃料	エマルジョン燃料	中・小形施設	◎					△	△	◇					

(注) 抑制理由

- ◎ 特に関係のあるもの
- 関係のあるもの

抑制効果の程度

- ◎ 大きいもの
- ある程度効果のあるもの
- △ あまり効果のないもの

対策実施の難易度

- 現状の装置のまま可能なもの
- △ 若干の改造が必要なもの
- × 大幅な装置の改造を要するもの

考慮しておかなければならない障害

- ◇ 特に関係のあるもの
- 既 既設に適用した場合
- 新 新設に適用した場合

くして炉内と火炎の温度を下げ、NO<sub>x</sub> の発生を抑制する方法です。しかし出力が低下するので、稼働率に余裕がないと採用が困難です。

### 2.3 空気予熱温度の低下

空気予熱温度の低下は、燃焼温度を低下させるので NO<sub>x</sub> の発生を抑制する効果があります。一方、予熱温度の低下はエネルギー効率を低下させる影響があります。

## 3. 燃焼装置の改善による方法

運転条件の変更による NO<sub>x</sub> の排出抑制は、費用が安いですが採用が困難な場合も少なくありません。一方、燃焼装置の改善による方法は、費用がかかりますが NO<sub>x</sub> の排出を確実に抑制できます。

### 3.1 二段燃焼

二段燃焼は図 1 に示すように、燃焼用空気を第 1 段階で理論空気量の 60%~80%を吹き込み、第

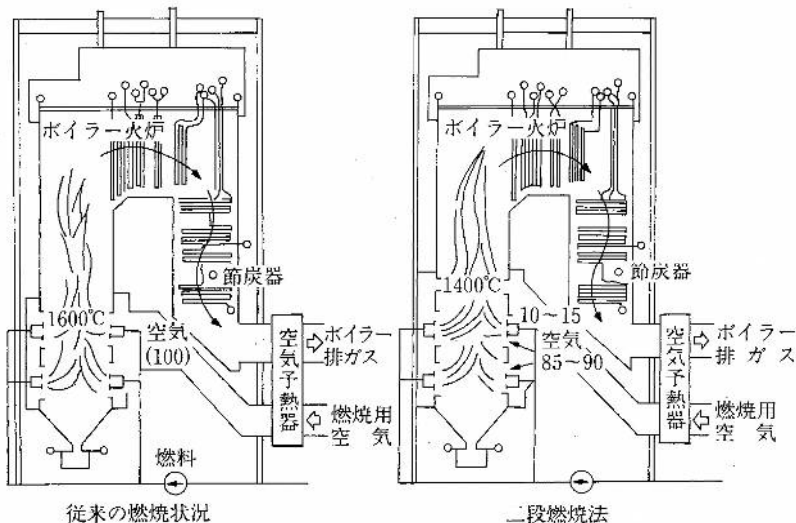


図 1. 二段燃焼方式の原理  
(出典：公害防止の技術と法規 2020 (産業環境管理協会))

2 段階で不足する空気を供給する燃焼方法です。目的は急激な燃焼による火炎温度の上昇を抑制し、同時に酸素不足にして NO<sub>x</sub> の発生を抑制することにあります。一段目の空気量は、ガス燃料なら 55%から 65%程度まで減らせますが、重油の場合は「すす」が発生するので、80%程度以下にはできません。この方法はサーマル NO<sub>x</sub> だけでなく、低酸素にすることでフューエル NO<sub>x</sub> の生成抑制にも寄与します。サーマル NO<sub>x</sub> の 30%から 50%、フューエル NO<sub>x</sub> の 50%程度まで低減できるとする報告があります。他方、二段燃焼は不完全燃焼を起こすので一酸化炭素が発生し、煤塵も発生しやすい点に注意が必要です。

### 3.2 排ガス再循環

排ガス再循環は図 2 に示すように、燃焼排ガスの一部を燃焼用空気に混入し、燃焼温度を低下させることによって NO<sub>x</sub> の生成を抑制します。酸素濃度が希薄になることも NO<sub>x</sub> の生成抑制に寄与します。この方法はサーマル NO<sub>x</sub> の発生抑制

には有効ですが、フューエル NO<sub>x</sub> の抑制にはあまり効果がありません。循環させる排ガスの割合は、燃焼室の構造と安定燃焼の点から制約を受けますが、15%~20%程度の範囲です。この方法を既設の燃焼設備に採用すると、伝熱特性や温度分布の変化で多少の燃焼効率低下が予想されます。装置としては新たな送風機の導入と、排ガス再循環のダクト設置工事が必要です。

### 3.3 低 NO<sub>x</sub> バーナー

低 NO<sub>x</sub> バーナーは、酸素濃度

表 2. 低 NO<sub>x</sub> バーナーの種類と特性

種類	特性
急速 燃焼 型	燃料と空気の直角に近い衝突で急速に混合し、円錐形の薄い火炎を形成させて、燃焼ガスの高温部滞留時間を短縮。
緩慢 燃焼 型	バーナー角度の拡大、燃焼空気の旋回、流速低下、燃料流速の低下で、火炎表面積を拡大させ火炎温度を低下。
火炎 分割 型	バーナーに溝をつけて火炎を分割し、火炎温度を低下させる。火炎の層が薄く、燃焼ガスの高温部滞留時間が短縮。
自己 再循 環型	空気と燃料の噴霧によって生じるガスの流れを利用し、燃焼ガスの一部をバーナー内部で強制的に循環。酸素濃度が希薄になり NO <sub>x</sub> の発生が抑制される。構造の異なる 2 種類がある。
段階 燃焼 型	バーナー内部に二段燃焼の原理を組込み、一段目で酸素濃度の薄い燃焼状態を作り NO <sub>x</sub> の発生を抑制。微粉炭燃焼用低 NO <sub>x</sub> バーナーは、段階燃焼組込み型。

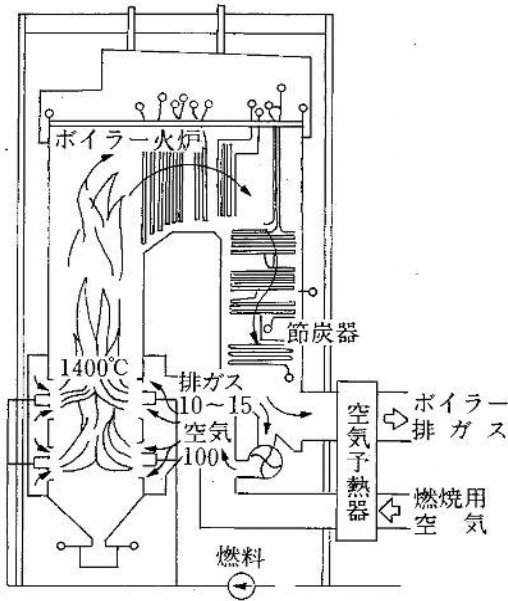


図 2. 排ガス再循環ボイラー  
(出典：公害防止の技術と法規 2020)

の低減、火炎最高温度の低下、高温領域でのガス滞留時間の短縮など、NO<sub>x</sub> の発生抑制に有効な方法をバーナーの構造で具体化したものです。各メーカーが多様な工夫を凝らし、市場に提供しています。実用化されている低 NO<sub>x</sub> バーナーを機能的に区分すると表 2 になります。

#### 4. 低 NO<sub>x</sub> 燃焼技術の適用形態

低 NO<sub>x</sub> 燃焼技術は海外の技術開発も含めて大幅に進歩し、あらゆる燃料のボイラーだけでなく、金属加熱炉や石油加熱炉にも広く普及しています。したがって排煙から窒素酸化物を除去する排煙脱硝装置は、大型の燃焼設備以外はほとんど不要といつてよいでしょう。現在、大型ボイラーでは二段燃焼、排ガス再循環、低 NO<sub>x</sub> バーナーを単独、あるいは組合せて使用しています。小型ボイラーでは、主として自己再循環型や火炎分割型の低 NO<sub>x</sub> バーナーが採

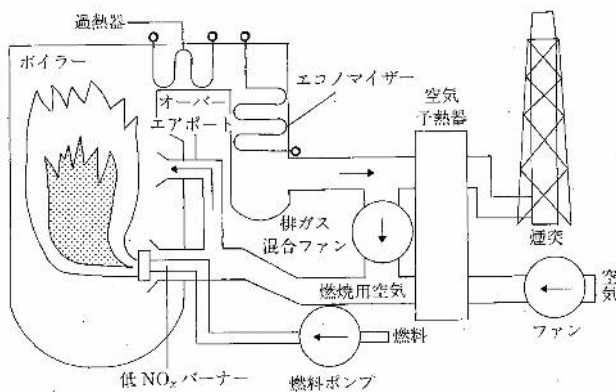


図 3. 二段燃焼、排ガス再循環、低 NO<sub>x</sub> バーナーの組合せ  
(出典：公害防止の技術と法規 2020)

用されています。二段燃焼、排ガス再循環、低 NO<sub>x</sub> バーナーの組合せ事例を図 3 に示します。

## 5. 排煙脱硝

窒素酸化物は、燃焼装置の構造や適切な運転条件の選択で、かなりの程度まで発生を抑制することができます。しかし発電ボイラーのような大規模な発生源は、発生の抑制だけで排出基準を達成することが困難です。このため、ボイラーの下流で発生した窒素酸化物を無害化する排煙脱硝装置が必要になります。

排煙脱硝装置は 1970 年代から建設が始まりましたが、排煙脱硝装置より遅れて増加しています。1960 年代は硫黄酸化物による環境汚染が激しかったので、排煙脱硝装置の建設が先行したのです。その後、1980 年代に窒素酸化物の排出規制が段階的に強化されたので、1990 年代に設置基数が増加しました。これまでに設置されてきた排煙脱硝装置は約 1700 基で、業種としては電力、鉄鋼、化学、機械、それに清掃工場も設置しています。ただし清掃工場の設置は、脱硝装置というより排ガス洗浄装置と違ってよいでしょう。一方、処理能力では電力、つまり火力発電所の設置が最も多く、総処理能力の約 85% を占めています。

### 5.1 排煙脱硝プロセスの種類

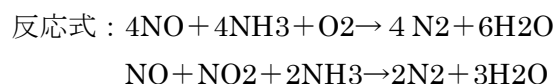
排煙脱硝装置は、排ガスにアンモニアを加えて窒素酸化物を窒素と水蒸気に分解します。分解に触媒を使用するアンモニア接触還元法と、触媒を使用しない無触媒還元法があります。アンモニア接触還元法には、窒素酸化物だけを還元する選択接触還元法と、窒素酸化物以外の成分も還元する非選択接触還元法があります。このほかには

採用事例が多くありませんが、アルカリ吸収法や活性炭吸着法もあります。選択接触還元法は総処理能力の約 86% に達しており、現状では圧倒的な比率を占めています。非選択接触還元法は総処理能力の 7% に過ぎません。非選択触媒が選択触媒より先に開発されたので、1970 年代はほとんどが非選択接触還元法でしたが、時期が後になるほど効率のよい選択接触還元法が多くなったのです。

無触媒還元法も効率のよい触媒が開発される前に採用されていたので、今日では処理能力で 2% 程度を占めるに過ぎません。アルカリ洗浄法は小規模な排出源のガス洗浄と同じで、必ずしも排煙脱硝装置とはいえません。活性炭吸着法は脱硫と脱硝を兼ねた装置で、石炭火力発電所が採用していますが、採用例としては多くありません。このように現在では選択接触還元法が主流になっており、ボイラー、ガスタービン、ディーゼルエンジン、プロセス加熱炉や金属加熱炉などに広く採用されています。したがって以降は、選択接触還元法について述べます。

### 5.2 選択接触還元法のプロセスと触媒

図 4 に選択接触還元法のプロセスを示します。ボイラー排ガスは、温度が 400℃ 以下に下がった状態でアンモニアを噴霧され、脱硝触媒が充填された反応器に入ります。反応器では、排ガス中の一酸化窒素が窒素ガスと水蒸気に分解されます。反応式は下記です。なお、燃焼ガスに含まれている窒素酸化物の 90% 以上は一酸化窒素で、大気環境に排出されると空気中の酸素と結合して二酸化窒素に変わります。



反応器を出た燃焼ガスは空気予熱器で熱を奪われ、集塵機を経て環境に排出されます。石炭や重油ボイラーの排ガスのように、排ガス中に硫黄酸化物が含まれている場合は集塵機の下流に排煙脱硫装置を設置します。選択接触還元法で使われる触媒は、圧力損失を小さくするために図5のようにハニカム型（格子状）、またはプレート型（板状）に成形して設置します。触媒は酸化チタンを担体とし、酸化バナジウムを活性金属とする構成が採用されています。広い温度領域で高活性を示しますが、排ガス中に硫酸カリウム、硫酸ナトリウムなどのアルカリ金属塩が含まれていると活性が低下します。このため、水洗などによる定期的な除去が必要になります。触媒の寿命は石炭燃焼ボイラーで5～6年、石油燃料ボイラーで8～10年です。

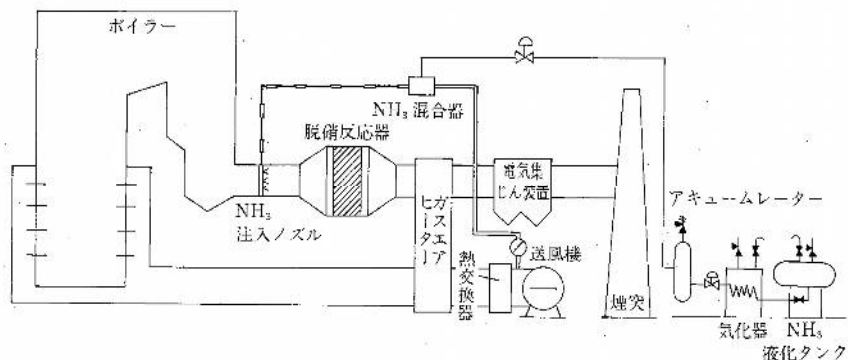
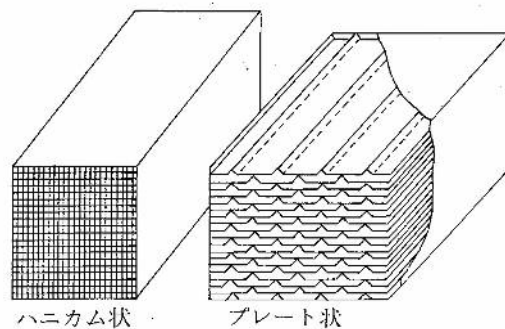


図4. 選択接触還元法のプロセス  
(出典：公害防止の技術と法規 2020 (産業環境管理協会))



(注) ハニカム状は通常 150 mm × 150 mm で長さは 500 ~ 1000 mm, プレート状の寸法は様々である。

図5 排煙脱硝触媒

(出典：公害防止の技術と法規 2020)

## 6. 窒素酸化物排出抑制対策の性能

これまで述べてきた各種の窒素酸化物対策の性能は、石炭燃焼ボイラーの場合、何も対策を講じなければ 500 ppm～800ppm の窒素酸化物濃度になりますが、低 NO<sub>x</sub> バーナーや二段燃焼を採用すれば 150 ppm～200ppm に低減できます。さらに選択接触還元法の排煙脱硝装置を採用すれば、40 ppm～80ppm にまで低減できます。同様に石油燃焼の場合は燃焼炉の対策で 40 ppm～100ppm にまで低減でき、排煙脱硝で 15～40ppm まで低減できます。窒素酸化物対策の費用は、低 NO<sub>x</sub> バ

ーナーと二段燃焼は比較的安く、排ガス再循環はダクト工事で送風機が必要なので少し高くなります。排煙脱硝装置は、排出抑制策に比べて圧倒的に大きな費用が必要になります。このような性能と費用の関係から、小規模な燃焼装置はほとんどが低 NO<sub>x</sub> バーナーで対処しています。中規模になると、二段燃焼や排ガス再循環の組合せで対処し、排煙脱硝装置は規模の大きい燃焼装置で採用されています。(おわり)

参考：公害防止の技術と法規 (産業環境管理協会)