

尿素分解装置を用いた無触媒脱硝システム

SNCR deNOx Process by Urea Decomposing System

杉田大智*・井藤宗親*

1. はじめに

各種燃料焚ボイラや廃棄物焼却炉から発生する窒素酸化物 (NOx) の除去方法として、触媒脱硝法と無触媒脱硝法があるが、触媒脱硝法は熱エネルギー消費が大きいため、近年では CO₂ 削減の観点から発電量を向上させることを目的に、無触媒脱硝法を採用する施設が増加している。

無触媒脱硝法は、炉内に脱硝剤 (尿素、アンモニア等) を直接噴霧する方式であり、脱硝剤としては一般的に尿素が使用されてきた。しかし、近年は厳しい排出基準を満足するため、尿素よりも高い脱硝効率を得られるアンモニアを使用するケースが増加している。一方、アンモニアは尿素に比べ高価であり、かつ取扱いに注意を要する物質であるため、アンモニアを貯留・供給する設備を設置する際は漏洩対策設備も併せて設置する必要があり、設備が増加するというデメリットがあった。

そこで当社は、触媒を用いて、安全・安価な尿素から脱硝効率の高いアンモニアガス (以下：尿素分解ガス) を生成する尿素分解装置を開発した。本書では、システム概要、実証試験、実用機の性能、本システム採用による発電効率の向上および CO₂ 削減効果について報告する。

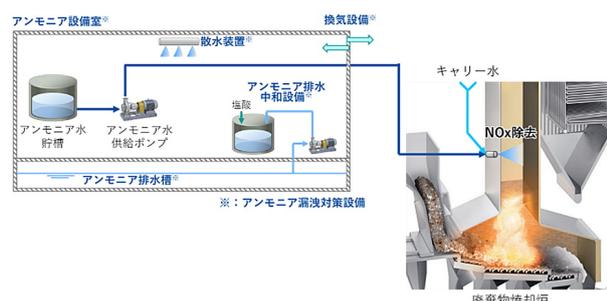


図1 アンモニア噴霧方式のシステムフロー図

2. システムの概要

2.1 従来の無触媒脱硝システム

無触媒脱硝システムは、廃棄物焼却炉で発生する窒素酸化物 (NOx) の低減方法として、一般的に知られている技術のひとつであり、脱硝剤 (尿素やアンモニア) を炉内に吹き込み、NOx を低減する技術である。

脱硝剤に尿素を用いる尿素水噴霧方式は、安全で安価な尿素水を使用し、構成機器が少なくシンプルなシステムとなるため、従来から一般的に使用されてきた。尿素水噴霧方式は、ポンプにより尿素水を供給し、炉内に直接噴霧することで NOx を除去するが、直接アンモニアを噴霧した場合に比べると脱硝効率が低くなる。

一方で、脱硝剤にアンモニアを用いるアンモニア噴霧方式は、尿素水噴霧方式よりも脱硝性能が高いため、近年の厳しい NOx 排出規制を満足するよう採用されるケースが増加している。アンモニア噴霧方式のシステムフロー図を図1に示す。

アンモニア噴霧方式は、アンモニア水を炉内に直接噴霧することで NOx を除去する。しかし、アンモニアは尿素に比べ高価であり、かつ劇物に指定され、取扱いに注意を要する物質である。このため、アンモニアの貯留・供給設備を設置する際は漏洩対策設備も併せて設置する必要がある。このように、アンモニア噴霧方式は、アンモニアによる高い脱硝性能を得られるというメリットがある反面、尿素に比べると薬品単価が高く、またアンモニア漏洩対策設備が必要となるなどのデメリットがあった。

以上のように、従来システムは使用する脱硝剤に応じてデメリットがあったため、尿素やアンモニア

* (株)タクマ 環境技術1部

のメリットをあわせもった、尿素からアンモニアガスを生成する尿素分解装置を開発した。

2.2 尿素分解装置を用いた無触媒脱硝システム

尿素分解装置は、触媒を用いて尿素からアンモニアガスを生成するものであり、本装置を用いた無触媒脱硝システムは、このアンモニアガスを脱硝剤として炉内へ噴霧することにより、廃棄物焼却炉から発生するNO_xを除去するシステムである。

尿素的加水分解反応は下記の2式で表される。



尿素 イソシアン酸 アンモニア



イソシアン酸 水 二酸化炭素 アンモニア

①および②式の尿素分解反応が完全に進行すれば、尿素 1mol からアンモニア 2mol が生成する。炉内に直接尿素を噴霧した場合、②式の反応速度が遅く炉内で尿素分解反応が十分進行しないため、アンモニアを直接炉内に吹き込むよりも脱硝効率が低くなる。

図2に尿素分解装置における尿素からアンモニアへの加水分解機構を示す。尿素分解装置は、装置内の気相で①式の反応を進行させた後、触媒を用いて所定の温度のもとで②式の反応を促進させ、尿素をアンモニアに完全分解する。

図3に尿素分解装置を用いた無触媒脱硝システムのシステムフロー図を示す。キャリア空気は、キャ

リア空気加熱ヒータで加熱された後、触媒を充填した尿素分解反応器に供給される。尿素水は、尿素水供給ポンプにより反応器内に供給され、触媒によりアンモニアへ分解される。生成したアンモニアは、脱硝剤としてキャリア空気とともに炉内へ吹き込まれる。なお、キャリア空気を加熱するのは、反応器に供給された尿素水を気化し、触媒温度を約 250℃ とすることで、アンモニアへの高い分解率を維持するためである。

以上のように、尿素を焼却炉で使用する直前にアンモニアへ転換することで、従来システムのデメリットを克服した最適なシステムを構築できる。

表1に従来システムと尿素分解装置を用いた新システムの特徴を示す。新システムは尿素を用いるため、薬品単価が安く、漏洩対策が不要、安全性も高く、かつアンモニアガスを炉内に噴霧できるため高い脱硝性能が得られるシステムとなる。

3. 実証試験

3.1 基本性能試験

実施における実証試験に先立ち、基本性能の確認試験¹⁾を行った。この試験では実機スケールの試験装置を製作し、尿素からアンモニアへの転換率(以下、アンモニア転換率)と触媒温度や触媒SV(空間速度)の関係性を調査した。

図4に尿素水供給量 16kg/h、触媒の空間速度 3,000h⁻¹、線速度 0.3m/s のときの触媒温度とアンモ



図2 尿素分解装置における尿素的加水分解反応

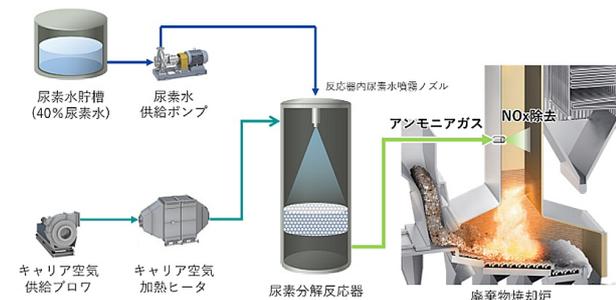


図3 尿素分解装置を用いた無触媒脱硝システムのシステムフロー図

表1 従来システムと新システムの特徴

項目	従来システム		新システム
	尿素水噴霧方式	アンモニア噴霧方式	尿素分解装置
薬品単価	○安い	△高い	○安い
設備	○漏洩対策なし	△漏洩対策なし	○シンプル
安全性	○安全	△取扱注意	○安全
脱硝性能	△低い	○高い	○高い

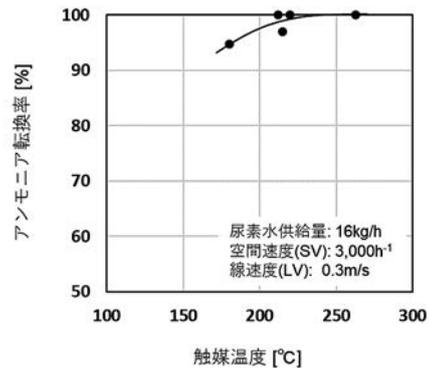


図4 触媒温度とアンモニア転換率

ニア転換率の関係を示す。触媒温度が180℃程度の場合、アンモニア転換率は95%以下であったが、200℃を超えると95%以上となり、250℃以上ではほぼ100%であった。また、図5に尿素水供給量16kg/h、触媒温度220℃、線速度0.3m/sのときの空間速度とアンモニア転換率の関係を示す。空間速度が6,000h⁻¹以下ではアンモニア転換率はほぼ100%であったが、空間速度が増加するにつれて転換率は下がり、空間速度が12,000h⁻¹では転換率は97%であった。

3.2 実施設における無触媒脱硝試験

基本性能が確認できたため、実施設（ストーカ式270t/日/炉）において、約4ヶ月間の無触媒脱硝試験²⁾を行った。

図6に既設の尿素水噴霧方式と本システムのNO_x除去性能を、噴霧点のガス温度別に示す。例えば当量比0.8のとき、既設の尿素水噴霧方式では除去率30%程度であったのに対し、本システムのNO_x除去率は約40%程度と高いNO_x除去率を確認した。また、NO_x除去率30%の条件で、同じ燃焼室ガス温度（850～900℃）で比較すると、尿素水噴霧方式に対し、本システムの方が尿素水使用量を

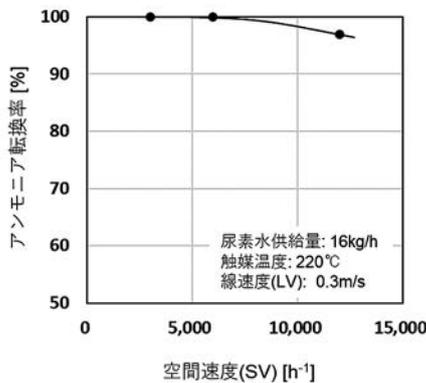


図5 空間速度とアンモニア転換率

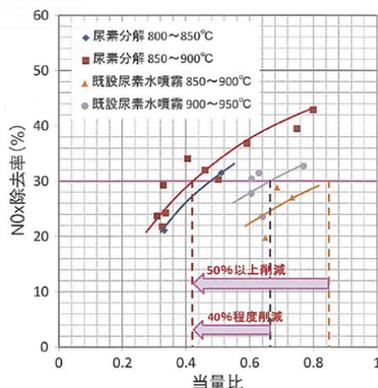


図6 NO_x除去性能（無触媒脱硝試験）

を50%以上削減できた。また、尿素水噴霧方式の反応効率が高い燃焼室ガス温度（900～950℃）と比較しても40%程度削減できた。

4. 実施設における性能

本システムの初号機を一般廃棄物処理施設である太田市外三町広域清掃組合クリーンプラザ（2021年竣工）に納入した。また、この施設には本システム以外にも高効率発電に資する様々な最新技術が採用されている。本項では、本システムの性能³⁾に加え、本施設の発電効率の向上効果やCO₂削減効果について試算した。

4.1 実施設の概要

表2に本システムを納入した実施設の概要を、図7にフローシートを示す。

本施設には165t/日のごみ処理能力を有する焼却炉が2系列設置され、合計330t/日のごみ処理能力を有する施設となっている。焼却炉はストーカ式焼却炉が採用されており、ごみは給じん装置によって焼却炉へ供給され、焼却処理される。焼却炉の空気過剰率は1.25でボトムアッシュの熱灼減量は3%以下となるよう完全燃焼させている。熱回収設備としてボイラおよびエコノマイザが設置され、ごみの燃焼で発生した燃焼排ガスから熱を回収する。ボイラは圧力5.0MPa、温度430℃の蒸気を発生させ、出

表2 実施設の概要

ごみ処理能力	165ton/日×2系列
焼却設備	ストーカ式焼却炉 空気過剰率: 1.25 ボトムアッシュ熱灼減量: 3%以下
熱回収設備	ボイラ, エコノマイザ 蒸気圧力: 5MPa 蒸気温度: 430℃
余熱利用設備	蒸気タービン 発電出力: 9,700kW 発電効率: 26.2%
排ガス処理設備	無触媒脱硝設備（尿素分解装置） 排ガス再循環システム ろ過式集じん器

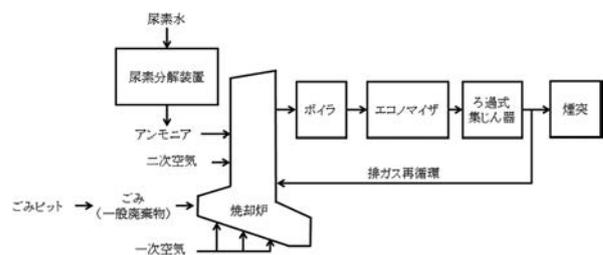


図7 実施設のフローシート

力 9,700kW の蒸気タービンで発電し、発電効率は 26.2%にて設計されている。蒸気タービンで発電した電力は事業所内の他施設やごみ発電施設の各設備で使用し、余った電力は売電している。排ガス処理として、NO_x 除去には排ガス再循環、低空気比燃焼、尿素分解装置による無触媒脱硝システムが採用され、HCl、SO_x、ダイオキシン類、水銀はろ過式集じん器による乾式除去設備が採用されている。

本施設に適用している尿素分解装置を用いた無触媒脱硝システムも、図 3 に示す試験装置と同様の設備構成で設置した。実機においては、ごみの燃焼に伴い発生する NO_x は常に変動する。このため尿素水の供給量は、施設の煙突で測定している NO_x 濃度が所定の濃度となるよう制御するフィードバック制御を導入した。また、尿素水が増減しても触媒温度が所定の温度となるよう、空気温度を制御した。

本施設に納入した尿素分解反応器（以下、反応器と記す）の外観を図 8 に、尿素分解装置の運転条件を表 3 に示す。

4.2 尿素の分解性能

基本性能の確認試験では、表 3 に示す運転条件において、尿素からアンモニアへの転換率がおおよそ



図 8 尿素分解反応器の外観

表 3 尿素分解装置（実用機）の運転条件

項目	単位	数値
尿素供給量	L/h	30(max.)
触媒温度	°C	250
空間速度	h ⁻¹	6,000
空気供給量	m ³ N/h	250

100%となることを確認している（図 4, 5）が、本施設でもアンモニアへの転換率を調査した。尿素のアンモニアへの転換率は、①②式より反応器出口の CO₂ 濃度を測定することで確認できるため、実用機においては反応器出口における CO₂ 濃度から、アンモニア転換率を算出した。

表 4 に尿素分解装置におけるアンモニア転換率の測定結果を示す。100% 反応すると仮定した理論 CO₂ 濃度 0.33% に対し、0.32% の CO₂ 濃度が計測された。①式が 100%、②式が 97% 進行したと仮定すると、全体では 98% と、ほぼ 100% アンモニアへ転換していることを確認した。

4.3 NO_x 除去性能

実機において本システムの NO_x 除去性能を確認した結果を図 9 に示す。図中には他施設のアンモニア噴霧式無触媒脱硝システムにおける NO_x 除去性能を併せて示す。

発生 NO_x 濃度 50 ~ 60ppm、尿素分解ガスの噴霧温度 850 ~ 900°C において、本施設の無触媒脱硝システムにおける NO_x 除去性能は、アンモニア当量比 0.6 で除去率 40% 程度であり、図 6 に示す無触媒脱硝試験の NO_x 除去性能と同等であることを確認した。

4.4 発電効率向上および CO₂ 削減効果

本施設に導入した無触媒脱硝システムは、触媒脱

表 4 尿素分解装置（実用機）におけるアンモニア転換率

項目	単位	数値
触媒温度	°C	250
尿素水供給量	L/h	4.7
理論 CO ₂ 濃度 (100% 反応すると仮定した場合)	-	0.33
測定 CO ₂ 濃度	-	0.33
アンモニア転換率	%	98

表中の数値は測定期間における1時間平均値を示す。

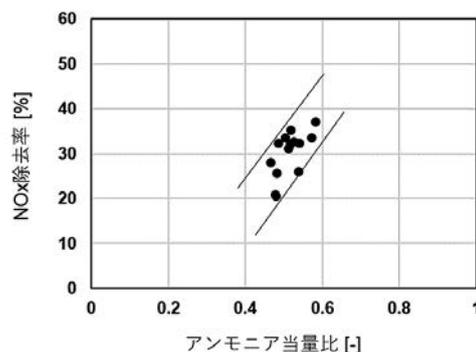


図 9 NO_x 除去性能（実用機）

硝システムと比べ、エネルギー消費が少なく、発電効率やCO₂排出削減の点で有利となる。また、本施設は無触媒脱硝システム以外でも複数の発電効率向上策（低空気比燃焼、ボイラ蒸気の高圧化、低温エコノマイザの採用、蒸気タービン排気蒸気の低圧化）が採用されており、これらの技術についても、発電効率やCO₂削減効果を試算した。CO₂削減効果については、年間発電量の増加分に当該地域の電力会社が公表しているCO₂の排出係数(0.452kg-CO₂/Wh)⁴⁾から求めた。また、年間ごみ量(86,379t/年)やごみ質(9,700kJ/kg)、発電量など、試算に用いる数値は設計値を使用した。

表5に発電量および発電効率の試算結果を示す。今回の試算では、触媒脱硝システムは脱硝触媒をろ過式集じん器の下流に配置し、排ガスを160℃から190℃まで蒸気を熱源に昇温する想定とした。表5より本施設で、触媒脱硝システムに変え無触媒脱硝システムを採用したことにより、発電量は260kW、発電効率は0.7ポイント増加していることを確認した。

また、本施設の低空気比、ボイラ蒸気条件、低温エコノマイザ、タービン排気蒸気の低圧化もそれぞれ試算し、それぞれ0.4, 1.8, 0.1, 0.7ポイントの発電効率が向上する結果となり、無触媒脱硝システムの採用効果と合わせると、合計で3.6ポイントの発電効率が向上し、発電効率は26.2%となることを確認した。

次に、それぞれの技術によるCO₂削減効果について試算した結果を表6に示す。本施設で、触媒脱硝システムに変え無触媒脱硝システムを採用したことにより、CO₂は715t-CO₂/年削減でき、従来技術

を採用している施設と比較して、CO₂は3.1%削減していることを確認した。また、低空気比運転などの他技術の効果もあわせると、従来施設と比較して、合計で3,712t-CO₂/年、16.2%のCO₂を削減していることを確認した。

5. まとめ

近年、厳しいNO_x排出基準を求められるなかで、当社は触媒を用いて、安全・安価な尿素から脱硝効率の高いアンモニアガスを生成する尿素分解装置を開発し、一般廃棄物処理施設に導入した。基本性能の確認試験では、触媒温度は250℃以上、空間速度は6000h⁻¹以下でアンモニア転換率がほぼ100%とできることが分かった。実施設においても、尿素分解反応器に供給された尿素は、ほぼ100%のアンモニア転換していることを確認し、また無触媒脱硝システムのNO_x除去性能が、無触媒脱硝試験と同等であることを確認した。さらに本無触媒脱硝システムの発電効率やCO₂削減効果について試算した。その結果、触媒脱硝システムに変え無触媒脱硝システムとすることで発電効率は0.7ポイント増加し、他の発電効率向上策を合わせると、3.6ポイント増加していることを確認した。またCO₂削減効果は無触媒脱硝システムを採用することで3.1%削減し、他技術の効果もあわせると16.2%削減していることを確認した。

謝辞

本書の作成にあたり、太田市外三町広域清掃組合殿をはじめ、関係各位に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 倉田昌明, 藤川宗治, 藤平弘樹, 前田典生, 尿素分装置を用いた無触媒脱硝試験, タクマ技報, **23** (1), 72-78 (2015).
- 2) 倉田昌明, 藤平弘樹, 前田典生, 尿素分装置を用いた無触媒脱硝試験 (その2), タクマ技報, **24** (1), 35-41 (2016).
- 3) 杉田大智, 工藤隆行, 尿素分解装置を用いた無触媒脱硝システムの実機導入報告, タクマ技報, **29** (2), 44-48 (2021).
- 4) 東京電力エネジーパートナー (株), 2021年度のCO₂排出係数について (accessed Mar.31 2023), https://www.tepco.co.jp/ep/notice/news/2022/1663624_8910.html

表5 発電量および発電効率の試算結果

項目	従来技術	本施設	発電量増加分	発電効率増加分
脱硝システム	触媒脱硝	無触媒脱硝	260kW	0.7pt
空気比	1.5	1.25	160kW	0.4pt
ボイラ蒸気条件	4MPa 400℃	5MPa 430℃	650kW	1.8pt
エコノマイザ出口ガス温度	200℃	167℃	20kW	0.1pt
蒸気タービン排気圧	14kPa(abs.)	10kPa(abs.)	260kW	0.7pt
発電出力	8,350kW	9,700kW	1350kW	-
発電効率	22.5%	26.2%	-	+3.6pt (total)

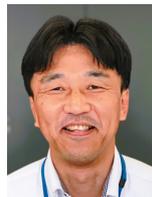
表6 各技術のCO₂削減効果の試算結果

項目	従来技術	本施設	CO ₂ 削減量	CO ₂ 削減率
脱硝システム	触媒脱硝	無触媒脱硝	715t-CO ₂ /year	3.1%
空気比	1.5	1.25	440t-CO ₂ /year	1.9%
ボイラ蒸気条件	4MPa 400℃	5MPa 430℃	1,787t-CO ₂ /year	7.8%
エコノマイザ出口ガス温度	200℃	167℃	55t-CO ₂ /year	0.2%
蒸気タービン排気圧	14kPa(abs.)	10kPa(abs.)	715t-CO ₂ /year	3.1%
合計	22,962t-CO ₂ /年	26,674t-CO ₂ /年	3,712t-CO ₂ /年	16.2%

著者略歴



杉田大智（すぎた だいち）
2017年に株式会社タクマ入社。入社以来水処理に関わる業務に携わる。
2020年より現職。一般廃棄物処理に関わる業務に従事。



井藤宗親（いとう むねちか）
1997年に株式会社タクマ入社。入社以来開発業務に携わる。
2016年より現職。一般廃棄物処理に関わる業務に従事。