

日本産業機械工業会会長賞

「尿素分解装置を用いた無触媒脱硝システム」

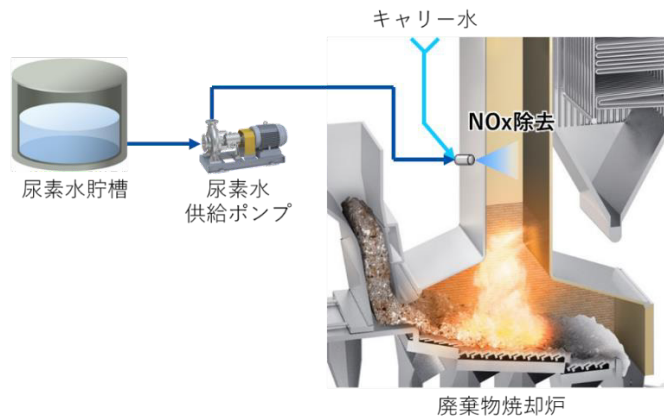
株式会社タクマ

1. 装置の詳細説明

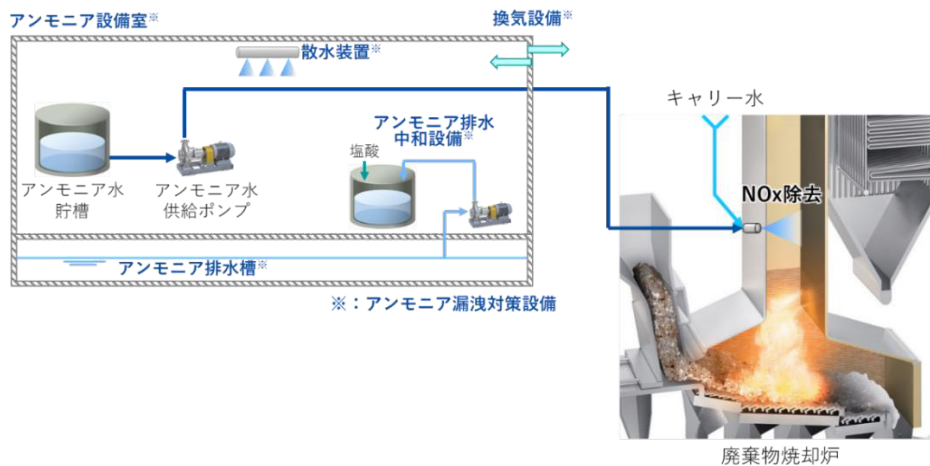
(1) 従来の無触媒脱硝システムの概要

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。

従来から採用されている無触媒脱硝システムである尿素水噴霧方式のフローを図表 1 に、アンモニア噴霧方式のフローを図表 2 に示す。



図表 1 従来の無触媒脱硝システム（尿素水噴霧方式）のフロー



図表 2 従来の無触媒脱硝システム（アンモニア噴霧方式）のフロー

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で、従来から一般的に使用されてきた。本方式は、尿素水供給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NO_xを除去するが、アンモニアを直接噴霧した場合に比べると低い脱硝効率となる。

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NO_x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。本方式は、アンモニア水供給ポンプによりアンモニア水を供給し、炉内に直接噴霧することでNO_x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り、設備費が増加する。

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ることができるというメリットがある反面、アンモニア漏洩対策設備が必要で設備費用が高価であること、および薬品単価が尿素に比べると高価であるというデメリットがあった。

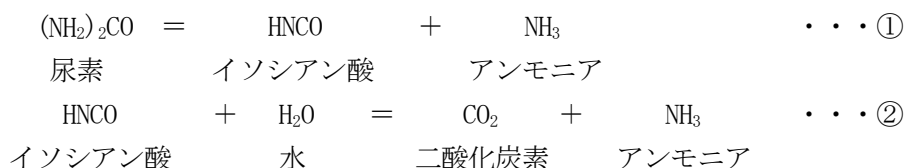
以上のように従来システムは使用する脱硝剤（尿素、アンモニア）に応じてメリット、デメリットがあったが、これらデメリットを克服し、尿素やアンモニアそれぞれのメリットを活かした、尿素からアンモニアガスを生成する尿素分解装置を開発した。本装置によって、安全性が高く低コストであるという尿素のメリットと、脱硝性能が高いというアンモニアのメリットをあわせもった画期的なシステムを実現した。

(2) 尿素分解装置を用いた無触媒脱硝システム

1) 装置概要

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。



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。

図表3に尿素分解装置における尿素からアンモニアガスへの加水分解機構を示す。尿素分解装置は、装置内の気層で①式の反応を進行させた後、尿素分解触媒を用いて所定の温度のもとで②式の反応を促進するため、尿素はアンモニアに完全に分解する。



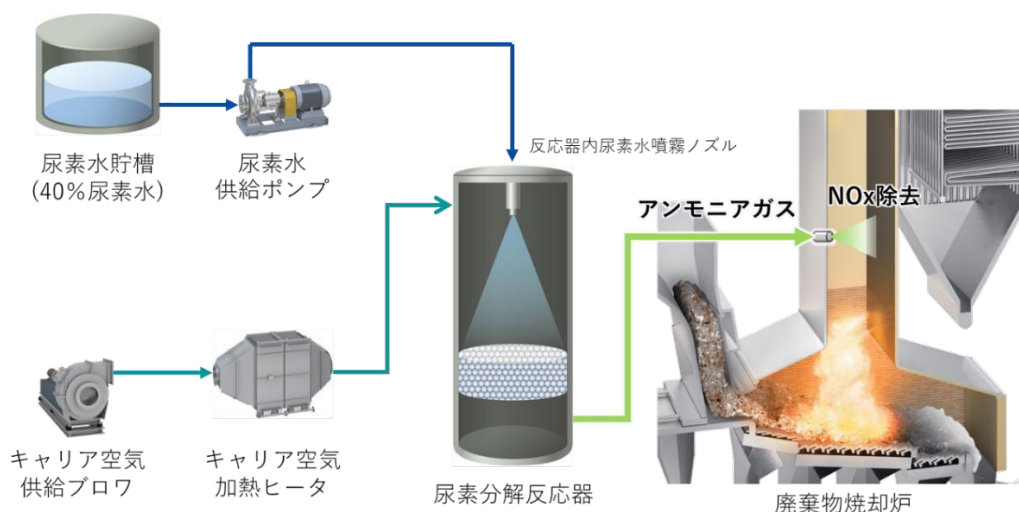
図表 3 尿素分解装置における尿素からアンモニアへの加水分解反応

図表 4 に尿素分解装置を用いた無触媒脱硝システムのフローを、図表 5 に尿素分解反応器（以下、反応器と記す）の外観を示す。

本装置は、キャリア空気供給ブロワと、キャリア空気加熱ヒータ、尿素水貯槽、尿素水供給ポンプ、反応器内尿素水噴霧ノズル、および尿素分解触媒を充填した反応器から構成される。

キャリア空気は、ヒータで加熱された後、尿素分解触媒(粒状)を充填した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、尿素分解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理由は、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、尿素からアンモニアへの高い分解率を発揮するためである。

触媒温度が約 200℃以下に低下するとシアヌル酸(C₃H₃N₃O₃)が触媒表面に析出し、尿素の分解反応を阻害する。そのため、本装置は尿素分解触媒にシアヌル酸が析出してきた際に、触媒温度を上昇させ、シアヌル酸を分解することで触媒の再生を行う「再生工程」を備えている。性能劣化の兆候が見られた際に炉内にアンモニアを供給しながら触媒を再生することによって性能を維持し、尿素分解装置の長期安定運転を可能とした。



図表 4 尿素分解装置を用いた無触媒脱硝システムのフロー



図表 5 尿素分解反応器外観 (約 2m×2m)

図表 6 に従来システムと尿素分解装置を用いた本システムの特徴をまとめる。従来システムである尿素水噴霧方式は、尿素を用いるため、薬品単価、設備費用が安価であり、安全性も高いが、脱硝性能はアンモニアより低かった。もう一つの従来システムであるアンモニア噴霧方式は、アンモニアを用いるため、薬品単価が高価であり、アンモニア漏洩対策設備が必要となるため設備費用も高価で、かつアンモニアの取り扱いに注意が必要となるが、脱硝性能は尿素よりも高い。これらの従来システムに対し、本システムは、尿素分解装置により、尿素を用いるため薬品単価、設備費用は安価であり、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。

	【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	○安価	△高価		○安価
設備費用	○安価	△高価		○安価
安全性	○安全	△取扱注意		○安全
脱硝性能	△低い	○高い		○高い

図表 6 従来の無触媒脱硝システムと尿素分解装置を用いた無触媒脱硝システムの特徴

2. 開発経緯

(1) 開発経緯

1) 開発の趣旨

従来の無触媒脱硝システムは、尿素水噴霧方式とアンモニア噴霧方式が用いられている。一般的に脱硝剤としては尿素が使用されてきたが、近年は厳しい NOx 排出規制を満足するため、尿素より脱硝効率が高いアンモニアを使用するケースが増加している。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り、設備費が増加していた。

そこで当社は、触媒を用いて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。本装置を無触媒脱硝システムに用いることで、安全性が高く低コストであるという尿素のメリットと脱硝性能が高いというアンモニアのメリットをあわせもった画期的なシステムを実現した。

2) 開発の目標

- ①尿素をアンモニアに完全に分解する。
- ②長期安定運転ができるよう触媒が劣化しても性能を回復する機能を持つ。

3) 開発の経緯 (性能に関する具体的な内容は「5. 性能」の項で示す。)

- 2014 年～
 - ①基本性能試験：アンモニア転換率ほぼ 100%の尿素分解装置の開発。
 - ②実施設における無触媒脱硝試験 (脱硝性能試験)：
 - アンモニア噴霧方式と同等の高い NOx 除去性能の確認。
 - 触媒におけるシアヌル酸分解除去及び繰り返し再生機能の確認。
- 2015 年～
 - ③実施設における無触媒脱硝試験 (長期間安定運転)：
 - 尿素分解と触媒再生が同時に可能な装置として改善。
- 2021 年 第 1 号機納入

①基本性能試験 (2014 年)

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)の関係等を調査し、アンモニア転換率をほぼ 100%にできる尿素分解装置を開発した。

②実施設における無触媒脱硝試験 (脱硝性能試験、2014 年)

①で製作した試験装置を実施設(ストーカ式 200t/日/炉)に設置して約 10 日間の無触媒脱硝試験を行った。既設の尿素水噴霧方式に比べ、本システムの方が尿素水の使用量を削減できることを確認し、アンモニア噴霧方式と同等の高い NOx 除去性能が得られることを確認した。

また同時に、約 10 日間の連続運転試験においては尿素分解性能を維持していることを確認したが、試験的に触媒温度を低下させてシアヌル酸を析出させた状態で触媒の再生を行い、シアヌル酸の分解除去と初期性能への復帰および繰り返し再生が可能であることをあわせて確認した。

ただし、本試験の再生工程は、触媒の再生と尿素の分解を同時に実施できるものとしていなかったため、触媒の再生中は尿素からアンモニアを生成できないという装置の連続運転性に課題が残った。また、試験期間が短く、長期安定運転の確認が十分にできなかった。

③実施設における無触媒脱硝試験（長期間安定運転、2015年）

②とは別の実施設（ストーカ式 270t/日/炉）において、①で製作した試験装置を設置して約4ヶ月間の無触媒脱硝試験を行った。この施設においても既設の尿素水噴霧方式に比べ、本システムのほうが尿素水の使用量を削減できることを確認し、アンモニア噴霧方式と同等の高いNOx除去性能が得られることを確認した。

再生工程については、装置を尿素の分解と触媒の再生を同時に行えるよう改善した結果、再生中も尿素からアンモニアを生成できるようになり、炉内の脱硝効率も落ちることなく運転できることを確認した。さらに、試験終了後の触媒表面にシアヌル酸の析出はなく、触媒が長期にわたって尿素分解性能を維持できることを確認した。

④実機導入（2021年）

最新の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、施設規模：ストーカ式 165t/日/炉×2炉）に本システムの1号機（2系列）を納入した。本施設の無触媒脱硝システムにおけるNOx除去性能は、アンモニア当量比0.4～0.6でNOx除去率20～40%であり、他施設のアンモニア噴霧方式と同等のNOx除去性能であることを確認した。また、竣工後約6ヶ月の長期運転において、尿素分解性能を維持し、安定運転できることを確認している。

（2）共同開発

無し

（3）技術導入

無し

3. 独創性

本システムを実現するにあたって、重要な技術的ポイントは以下のとおりである。

（1）尿素からアンモニアへの転換率の最大化

アンモニア転換率を100%としなければ、薬品使用量の増加を招き、また転換しなかった尿素や中間生成物のシアヌル酸が触媒に析出して触媒活性を低下させるため、100%の転換率とする必要があった。

そのために重要なポイントは、触媒温度と触媒量（空間速度）を適切に見極めることであった。

そこで「2. 開発経緯」①基本性能試験（2014年）の試験装置において、触媒温度および触媒量を変えた運転を実施し、アンモニア転換率を100%とできる条件を把握した。この結果をもとに、実施設における脱硝試験および実機においては、適正な触媒量で装置を設計し、かつ適

正な触媒温度で運転することで、尿素からアンモニアへの転換率を 100%となることを確認した。

(2) 連続運転性

一般廃棄物処理施設は地域の公衆衛生を担う施設であり、容易に停止することができない。特に無触媒脱硝システムはNOxの公害防止基準値を遵守するために必要不可欠なシステムであるため、システムを構成する装置は長期間にわたって連続的に運転できるものとする必要があった。

そのために重要なポイントは、長期間にわたって性能を維持し、万が一性能が低下した際には運転を継続しながらも性能復帰できる機能を備えることであった。

そこで、長期間にわたって性能を維持するため、尿素水の供給量の変動しても触媒温度を所定の温度に維持し、触媒へのシアヌル酸の析出を抑制する温度制御を構築した。また、万が一シアヌル酸が触媒に析出し触媒活性が低下しても、触媒温度を上昇させることでシアヌル酸を分解し、触媒活性を再生する機能を装備した。

特にこの再生を行う機能については、試験当初の「2. 開発経緯」②実施設における無触媒脱硝試験（脱硝性能試験、2014年）では、再生中はアンモニアを生成できないという課題があったが、同③実施設における無触媒脱硝試験（長期間安定運転、2015年）では、設備容量を見直し、再生中でも尿素からアンモニアを生成できるシステムを構築することで、連続運転性能を確保した。

4. 特許の有無

次のとおり、4件の特許を取得済み。

特許番号：第 6381124 号 / 尿素加水分解装置

特許番号：第 5885811 号 / 尿素加水分解装置及びその制御方法

特許番号：第 5859101 号 / 尿素加水分解装置及び尿素加水分解装置の触媒再生方法

特許番号：第 6504613 号 / 尿素加水分解装置

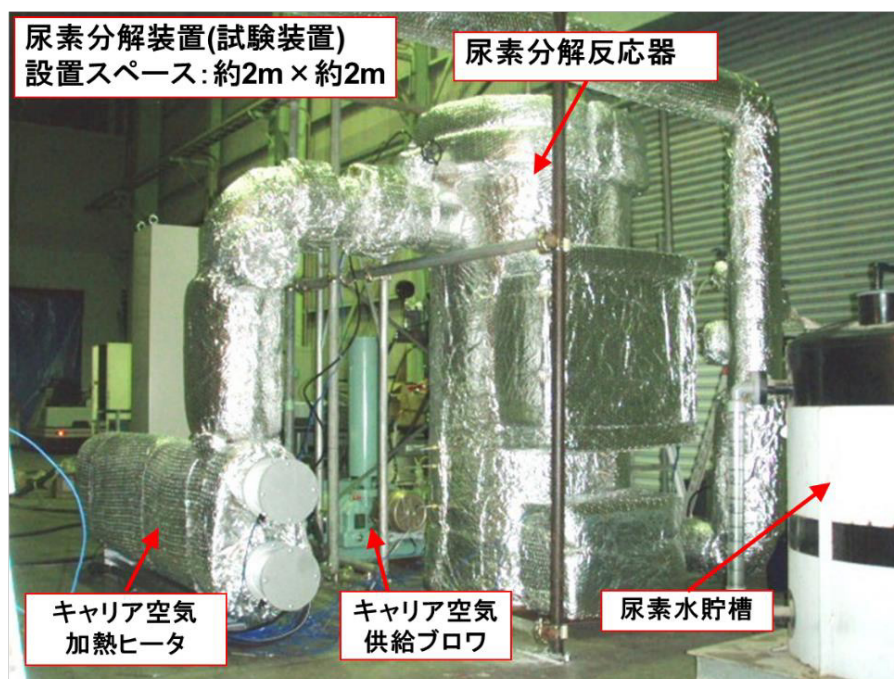
5. 性能

(1) アンモニア転換率

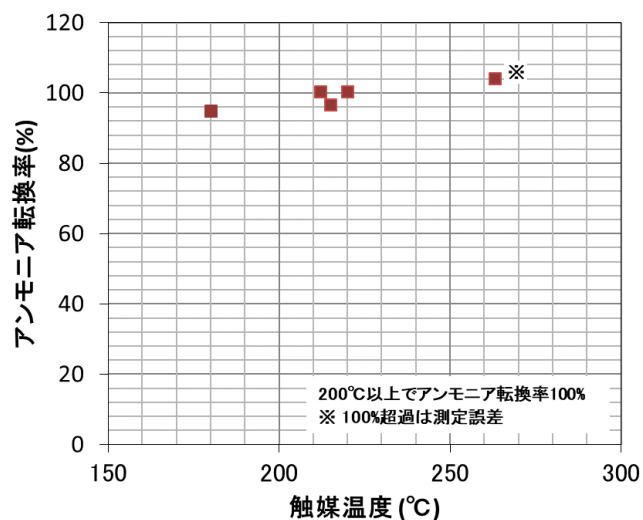
①基本性能試験 (2014年)

実機スケールの試験装置を図表7に示す。この装置を用いて調査したアンモニア転換率と触媒温度の関係を図表8に示す。

図表8に示すとおり、触媒温度が約200℃以上の条件でほぼ100%のアンモニア転換率が得られることを確認した。



図表7 尿素分解装置外観 (試験装置)



図表8 触媒温度とアンモニア転換率

(2) NO_x 除去性能

②実施設における無触媒脱硝試験（脱硝性能試験、2014年）

①で製作した試験装置を実施設(ストーカ式 200t/日/炉)に設置し、無触媒脱硝試験を行った結果を図表9に示す。本試験では、尿素水供給量比とNO_x除去率の関係から、既設の尿素水噴霧方式と本システムのNO_x除去性能を比較した。尿素水供給量比とは、尿素水噴霧時(ブランク)に30%のNO_x除去率が得られる尿素水供給量を1.0とした値である。

本試験においては、同じNO_x除去率30%となる尿素水供給量比は約0.5であったことから、尿素水噴霧方式に比べて尿素水使用量を50%程度削減できた。

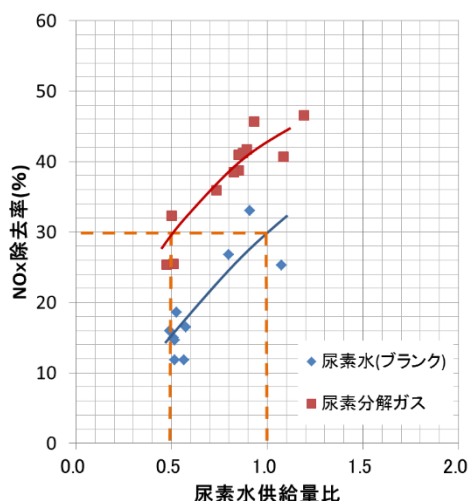
また、アンモニア噴霧方式では、尿素供給量比1.0のときNO_x除去率が45%程度となることがわかっている。本試験でも尿素供給量比1.0のときNO_x除去率が40~45%程度であり、アンモニア噴霧方式と同等の高いNO_x除去性能が得られることを確認した。

③実施設における無触媒脱硝試験（長期間安定運転、2015年）

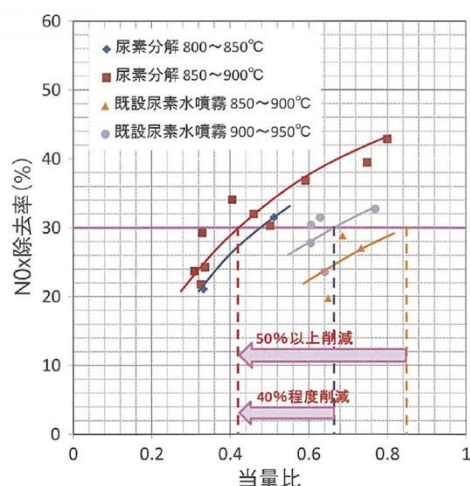
①で製作した試験装置を、②とは別の実施設(ストーカ式 270t/日/炉)に設置し、無触媒脱硝試験を行った結果を図表10に示す。本試験では、脱硝剤の当量比とNO_x除去率の関係から、既設の尿素水噴霧方式と本システムのNO_x除去性能を比較した。また、噴霧点の燃焼室ガス温度別にNO_x除去性能を確認した。

図表10より、例えば当量比0.8のとき本システムのNO_x除去率は約40%が得られたが、これはアンモニア噴霧方式の除去率とほぼ同程度であり、本システムで高いNO_x除去率を実現できることを確認した。

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。



図表9 NO_x除去性能(無触媒脱硝試験STEP2)



図表10 NO_x除去性能(無触媒脱硝試験STEP3)

④実機導入（2021年）

最新の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、施設規模：ストーカ式 165t/日/炉×2 炉)に尿素分解装置を用いた無触媒脱硝システムの1号機を納入し、実機において本システムのNOx除去性能を確認した結果を図表11に示す。図中には他施設のアムモニア噴霧式無触媒脱硝システムにおけるNOx除去性能を併せて示す。

発生NOx濃度50～60ppm、尿素分解ガスの噴霧温度850～900℃において、本施設の無触媒脱硝システムにおけるNOx除去性能は、アンモニア当量比0.4～0.6でNOx除去率20～40%であり、他施設のアムモニア噴霧式無触媒脱硝システムにおけるNOx除去性能と同等であることを確認した。

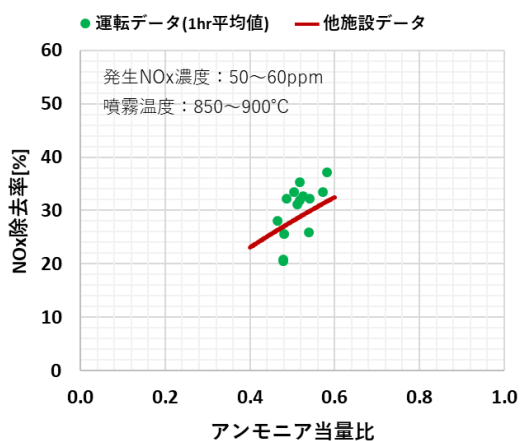
(3) 再生工程による尿素分解性能維持

②実施設における無触媒脱硝試験（脱硝性能試験、2014年）

③実施設における無触媒脱硝試験（長期間安定運転、2015年）

連続運転試験において通常運転では触媒が劣化しないことを確認したが、試験的に触媒表面温度を低下させて白色固形物を析出させ、強制的に触媒の活性を低下させた後に触媒再生試験を実施した。尿素分解触媒の再生は、反応器への尿素水の供給を停止した後に反応器内部を昇温し、触媒表面に析出したシアヌル酸を分解除去することにより行った。

触媒表面には白色固形物(シアヌル酸)が付着していたが、このシアヌル酸を30分程度の昇温による触媒再生運転で分解除去できることを確認した。また、触媒再生運転により触媒の活性が初期性能まで復帰し、繰り返し再生が可能なことも併せて確認した。



図表11 NOx除去性能（実機）

④実機導入 (2021年)

約6ヶ月の運転期間において触媒性能は維持していたが、尿素分解触媒の再生が正常に機能するか確認するため、尿素分解触媒の再生を行った。図表12に尿素分解装置の再生工程前後におけるトレンドデータの一部を示す。尿素水は触媒中心に向けて噴霧しているが、運転にともないシアマル酸が触媒表面に析出すると、触媒表面の中央部と外周部に温度差が生じる。この温度差を触媒表面温度差とし、熱電対で検出した。

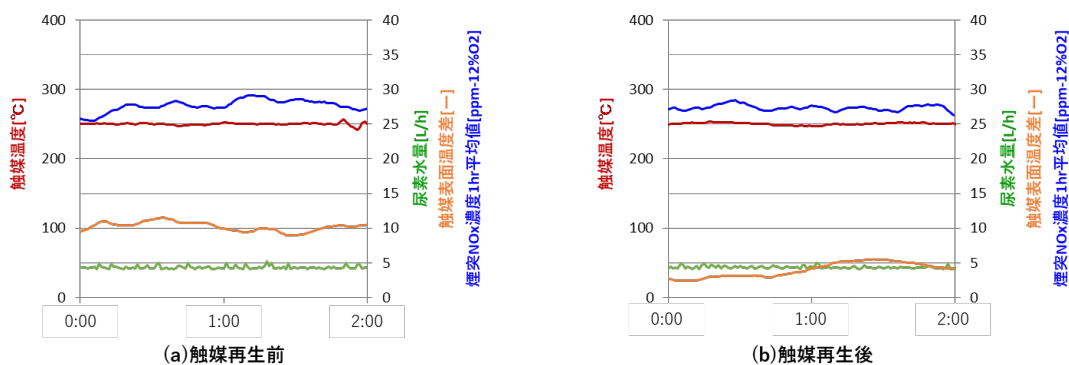
触媒再生前の触媒表面温度差の平均値を10とすると、触媒再生後の触媒表面温度差は約4となった。触媒再生前後で煙突NO_x濃度や尿素水量はほとんど変わっていないことから、触媒表面温度差は再生工程によって少なくなったと考えられる。

再生工程で反応器内温度を上昇させることにより、触媒表面温度差が少なくなったことから、再生工程によって、触媒表面に析出したシアマル酸を分解できていると考えられ、本工程が正常に機能していることを確認した。また、触媒再生中も反応器への尿素水の供給は継続したが、煙突NO_x濃度は大きく上昇することなく、安定して炉内の脱硝ができた。

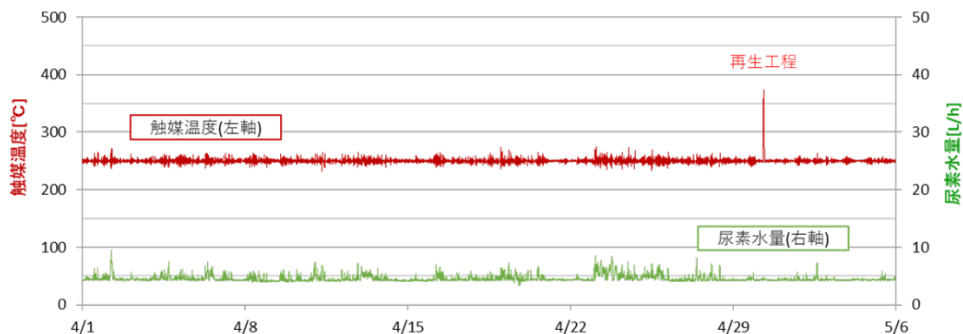
(4) 長期安定運転

④実機導入 (2021年)

図表13に尿素分解装置の約1か月の連続運転における触媒温度および尿素水量のトレンドデータの一部を示す。触媒温度は制御設定温度250℃とした。発生NO_x濃度の変動に伴い、反応器に供給される尿素水量が変動するが、触媒温度は250℃±20℃の範囲で安定している。図表13に示した期間以降も順調に運転し、4/1から6か月以上が経過しても安定運転を継続しており、尿素分解装置を長期間安定して運転できることを確認した。



図表12 再生工程前後のトレンドデータ(例)



図表13 尿素分解装置のトレンドデータ(例)

(5) 従来方式との比較

耐久性・安全性、運転・操作性、維持管理等の性能について、従来方式と新方式との比較表を図表 14 に示す。

図表 14 性能比較表

項目	【従来方式】 アンモニア噴霧による 無触媒脱硝システム	【新方式】 尿素分解装置を用いた 無触媒脱硝システム
耐久性	同等 (装置上、耐久性は高い)	同等 (装置上、耐久性は高い)
安全性	アンモニアは劇物に指定され、取扱いに注意を要する。 また、アンモニア漏洩対策設備の設置が必要。	安全な尿素を使用するため、取扱いは容易。 また、アンモニア漏洩対策設備の設置が不要
運転・操作性	同等 (NOx 濃度に応じて、アンモニア供給ポンプの周波数を自動制御)	同等 (NOx 濃度に応じて、尿素水供給ポンプの周波数を自動制御)
維持管理性	無触媒脱硝システムの維持管理だけでなく、アンモニア漏洩対策設備のメンテナンスが必要	無触媒脱硝システムの維持管理のみ
届出	必要 (アンモニアの使用に対し、消防署や労働基準監督署へ届出が必要)	不要

6. 経済性

尿素分解装置を用いた無触媒脱硝システム(新方式)について、経済性を試算した結果を図表15および図表16に示す。

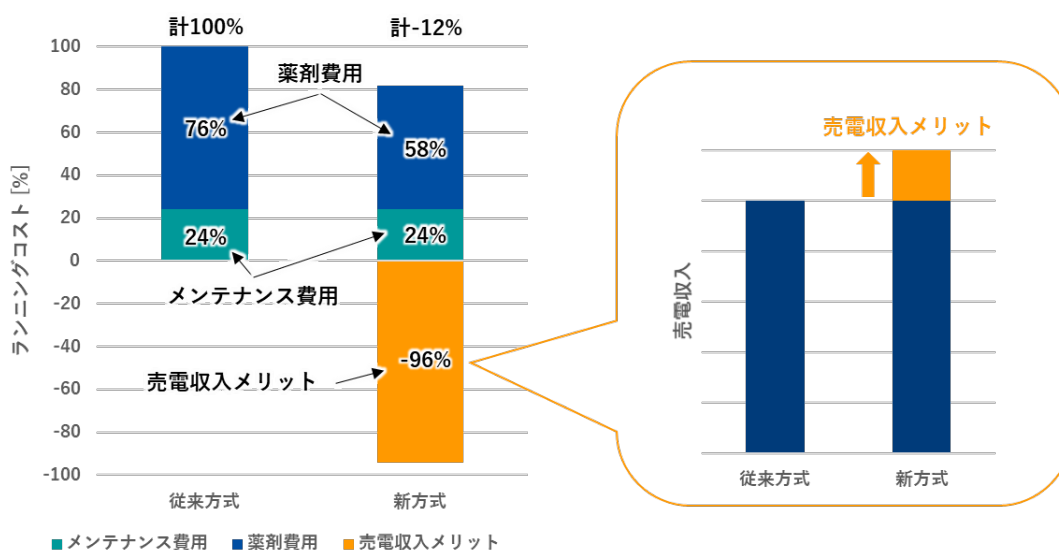
本試算における施設規模は100t/日/炉×2炉のストーカ式焼却炉を想定し、NOx除去率は33%程度(発生NOx濃度60ppmに対して煙突NOx濃度40ppm)とした。試算対象は、近年の厳しいNOx排出規制にも対応できるアンモニア水噴霧方式(従来方式)と新方式を比較した。また比較を容易にするため、イニシャルコストは従来方式を100%として、またランニングコストは、従来方式のランニングコストの合計を100%とした。

(1) イニシャルコスト(従来方式を100%とした)

新方式は尿素分解装置の設備費用が増加するが、アンモニア漏洩対策設備費用が不要になるため、従来方式と比較して設備費用は32%安価となる。

図表15 経済性試算

項目	従来方式	新方式
イニシャルコスト		
設備費用	100%	68%
ランニングコスト		
薬剤費用	76%	58%
メンテナンス費用	24%	24%
売電収入メリット*	—	-94%
合計	100%	-12%



図表16 ランニングコスト試算

(2) ランニングコスト(従来方式のランニングコスト合計を100%とした)

薬剤費用は、新方式はアンモニア水よりも安い尿素水を使用するため、従来方式と比較して薬剤費用が24%程度削減できる。

メンテナンス費用は、従来方式はアンモニア漏洩対策設備のメンテナンスが必要となるが、新方式では尿素分解装置のブロワやヒータのメンテナンスが必要となるため、従来方式と同程度となる。

次に売電収入メリットに関しては、従来方式では炉内へアンモニア水を噴霧するため、キャリア水が必要となるが、新方式ではこのキャリア水が不要となりボイラ蒸発量が増加するため、発電量が増加する。一方で、新方式は尿素分解装置のブロワやヒータにより消費電力は増加するが、発電量が増加する効果が大きく、結果として売電収入は大幅に増加する。この売電収入メリットをランニングコストとして評価すると、薬剤費用やメンテナンス費用を上回り、ランニングコストがマイナス(収益側)に転ずることとなり、大幅な売電収入メリットが得られることが分かる。

このように尿素分解装置を用いた無触媒脱硝システムは、従来のアンモニア水噴霧方式よりイニシャルコストを大幅に削減し、ランニングコストを上回る大幅な売電収入メリットが得られるため、経済性においても非常に優れたシステムであると言える。

7. 将来性

本システムは、一般廃棄物焼却施設を中心として3件の受注実績(内1件が納入済み、2件は設計中)を有している。尿素分解装置は無触媒脱硝法だけでなく、触媒脱硝法にも適応可能であり、厳しいNOx排出規制に対応しつつ高効率発電に寄与できる点を訴求することにより、今後新規の一般廃棄物焼却施設において採用拡大が期待される。

加えて、本システムは、既存施設でも容易に導入が可能であり、さらには一般廃棄物焼却施設に限らずアンモニアを使用している産業廃棄物焼却施設や、ボイラ・発電施設に対しても導入可能であるため、より一層の普及が見込まれる。