

# 間接加熱式乾燥機における乾燥蒸気の有効利用 ～アンモニアストリッピングによる排水処理～

Use of Exhaust Steam of Indirect Drying Machines ~Effluent Treatment after Ammonia Stripping~

木越雅美\* 山口和也\* 大野淳平\*

Masami Kigoshi, Kazuya Yamaguchi, Junpei Ono

間接加熱式乾燥機の排ガスは、乾燥によって発生する水蒸気で構成されるため、約100℃において潜熱回収が可能である。この排ガスは通常熱利用されずに捨てられる場合が多いが、実際は乾燥機周辺設備でさらに熱利用できるケースも多く存在する。本報ではその一例として、メタン発酵消化液の処理を想定し、汚泥の乾燥および、その蒸気を用いたアンモニア排水処理の負荷低減について検討した。ラボスケールおよびパイロットスケールでストリッピング試験を行い、汚泥濃度4%の消化液を脱水+乾燥する場合において、アンモニア濃度を約80%低減することが可能で、これに伴い現行の排水処理における薬品使用量・槽容量ともに最大で1/5に低減できることが示された。

Exhaust gases of indirect drying machines have much steam that can be used as latent heat of about 100°C. Though wasted in many cases, the steam can be used as thermal energy in peripheral equipment of drying machines. Here, we studied about ammonia treatment in methane fermentation digestion liquid with exhaust steam. We experimented with ammonia stripping on a laboratory-scale and pilot-scale, then we found that we could reduce ammonia concentration by 80%, if we dewatered and dried the digestion liquid that had a sludge density of 4%. There is a possibility that this approach could reduce the amount of water treatment chemicals and the size of reactor by 80%.

## 1. はじめに

近年、化石燃料の枯渇に対する危機意識や、地球温暖化対策の必要性が急速に高まっており、産業分野においては、エネルギー管理の強化、省エネルギーに関する技術革新、設備の導入などによるさらなる省エネルギー化が必要とされている。

脱水+乾燥プロセスは、産業界の幅広い分野で必要不可欠な基盤技術である。間接加熱式乾燥機は、乾燥時に発生する水蒸気のみを排ガスとして排出するため、排ガス量が最小限、かつ100℃付近において潜熱回収が可能である。この排ガスは通常熱利用されずに捨てられる場合が多いが、実際は乾燥機周辺設備でさらに熱利用できるケースも多く存在する。例として、メタン発酵消化液脱水汚泥の乾燥排ガスを用いた脱水ろ液の脱アンモニア処理、焼酎粕の乾燥に伴う蒸留廃液の脱エタノール処理、脱水前原料の予熱による脱水効率の向上<sup>1)</sup>などが挙げられる。

一方、メタン発酵消化液の脱アンモニア処理は、通常、硝化・脱窒といった生物処理が行われている<sup>2)</sup>。このとき、pH調整や水素供与体としてメタノールおよび種々の薬品が使用され、その薬品代がコストデメリットとなるが、生物処理の前段で乾燥排ガスによる脱アンモニアの処理が可能となれば、硝化・脱窒における薬品使用量および槽容量などの低減が期待できる。

そこで本報では、アンモニア含有排水の処理として、アンモニアストリッピング技術について紹介するとともに

に、模擬廃液および実液、ラボスケールおよびパイロットスケールでの運転結果の一例、生物処理と比較した場合の薬品削減量の概算について報告する。

## 2. ストリッピング原理

アンモニアストリッピングは液相から気相へのアンモニアの放散現象であり、その理論はヘンリーの法則および二重境膜説に基づく。

前者は気体の気液平衡に関するものであり、一定温度において、液相に溶ける成分ガスの濃度すなわち溶解度は、気相中の成分ガスの分圧に比例するというものである。ヘンリー定数は、温度が高いほど増加する傾向にあるため、それに伴い溶解度は減少する。したがって、温度が高いほど、ストリッピングの効果は得やすくなる。

$$p=Ex$$

$p$  : 気相分圧 (atm)

$E$  : ヘンリー定数 (atm・m<sup>3</sup>/kg-mol)

$x$  : 液相での成分濃度 (kg-mol/m<sup>3</sup>)

また、アンモニアは水中において次式で示す平衡を保っており、pHが高いほど平衡が右側に移動する。いまヘンリーの法則が成立するのは、NH<sub>3</sub>に対してであり、pHが高いほどストリッピングに有利となる。



\* 技術開発本部 プロセス技術開発部

一方、二重境膜説は相界面における物質移動について定めたものである。ストリッピングにおける物質移動の推進力となるのは液相においては平衡濃度との濃度差、気相においては平衡分圧との分圧差で示される。この差が大きいほど、物質移動がしやすくなり、ストリッピングがされやすくなる。また、物質移動は気液の界面で起こるため、いかにこの気液界面を大きく取れるか、すなわち接触面を大きく取れるかがストリッピング能力を上げるポイントとなる。

### 3. 基礎実験

#### 3.1 実験方法

##### 3.1.1 使用廃液

本実験では、入手簡易性などの面より、模擬廃液と実液の2種類を用いて検討を行った。模擬廃液は、28%アンモニア水を希釈して濃度1,000mg/Lに調製したものを使用した。また実液は、豚糞・生ごみ混合メタン発酵施設で発生した消化液の脱水ろ液(アンモニア濃度約

1,200mg/L)を使用した。実液の性状について表1に示す。

##### 3.1.2 実験条件および装置

実験装置を図1に示す。ストリッピングは気液接触の効率向上がアンモニア除去率向上のポイントとなるため、多段処理を基本とする。よって本実験の装置内部には多孔板による仕切を設け、仕切の数や位置を調節できる構造にした。蒸気は装置下部より吹込み、上部より排出した。アンモニア排水は上部から下部へ通水し、蒸気と向流接触となるようにした。槽内の貯留量は、静置時の水位が250mm(約0.35L)となるように設定した。

実験条件について表2に示す。気液比は100を基準とし、気液比400の条件まで検討を行った。蒸気流量は、出口における流量を示しているが、装置内に入った蒸気は、液温上昇や放熱の影響で一部凝縮するため、入口における流量より5~20%程度低くなっていた。

##### 3.1.3 分析方法

採取した試料は、定性ろ紙2号でろ過した後、ネスラー法によりアンモニア濃度を測定した。

表1 消化液(実液)性状(脱水前)

項目	
水分 (%)	97.4
pH	8.0
BOD (mg/L)	3,208
COD (mg/L)	7,405
SS (mg/L)	21,522
T - N (mg/L)	2,139
T - P (mg/L)	747

表2 実験条件

	気液比 100	気液比 200	気液比 300	気液比 400
液流量 (L/min)	0.2	0.2	0.2	0.2
出口蒸気流量 (L/min)	20	45	56	77
液流速 (m/sec)	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025
出口蒸気流速 (m/sec)	0.2440	0.5481	0.6818	0.9442
実際の気液比	100	224	278	385
水位 (mm)	250	250	250	250
滞留時間 (min)	1.70	1.70	1.70	1.70

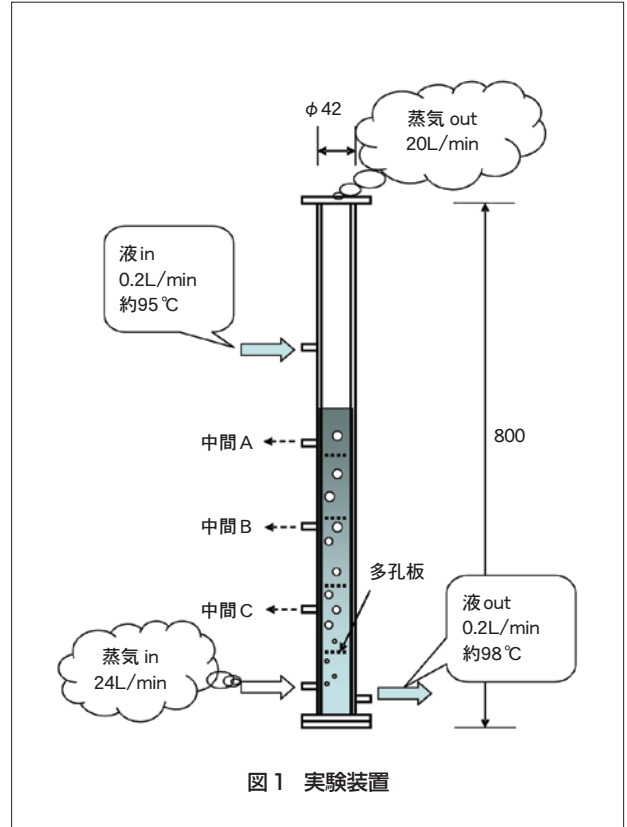


図1 実験装置

### 3.2 実験結果

#### 3.2.1 仕切と除去率の関係

装置内部に取付ける多孔板の条件(数および開孔率)を変化させてストリッピングを行い、アンモニア除去率について比較した。

結果を図2に示す。仕切数を増やし、開孔率を小さくするほど除去率が上昇する傾向が見られ、仕切4段・開孔率33%の条件におけるアンモニア除去率が60.8%だったのに対し、仕切10段・開孔率14%の条件における除去率は80.0%となった。ただし、仕切7段・開孔率14%の条件でも仕切10段とほぼ同等の除去率が得られていることから、仕切7段以上・開孔率14%以下にすることで、押し流れに十分近い流れ場を形成でき、ほぼ理想的な多段処理が行えたと考えられる。以後は、仕切10段・開孔率14%を標準条件として実験を行った。

#### 3.2.2 気液比と除去率の関係

蒸気量を変化させることで、気液比とアンモニア除去率の違いについて検討した。

結果を表3に示す。気液比100の条件では除去率が80.0%であったのに対し、気液比200の条件では除去率

が91.9%となり、気液比を高くするほど除去率が向上する傾向が見られた。ただし、気液比300や気液比400における除去率は約95%となり、気液比約300以上における除去率はほぼ一定となることが予想される。

#### 3.2.3 模擬廃液と実液との除去率比較

これまでの実験は全て模擬廃液を使用していたのに対し、ここでは、実液を用いて同条件でストリッピングを行った際のアンモニア除去率について比較した。

実験結果を表4に示す。気液比100、気液比200の両条件において、消化液のアンモニア除去率はアンモニア水と比べて10～14%程度低くなる傾向が見られた。

ストリッピングは、温度とpHが高いほどアンモニアが気体側へ移行しやすい(遊離率が高い)傾向がある。入口における模擬廃液は95℃、pH約9.5であるのに対して、消化液はpH約7.5であり、このときの模擬廃液の遊離率は99%、消化液の遊離率は50%となる。ただし、消化液を加温すると、溶解していた炭酸ガスが次第に抜けていき、pHは約9.5まで上昇する。よって、初期のpHの差が除去率低下の原因であったと考えられる。

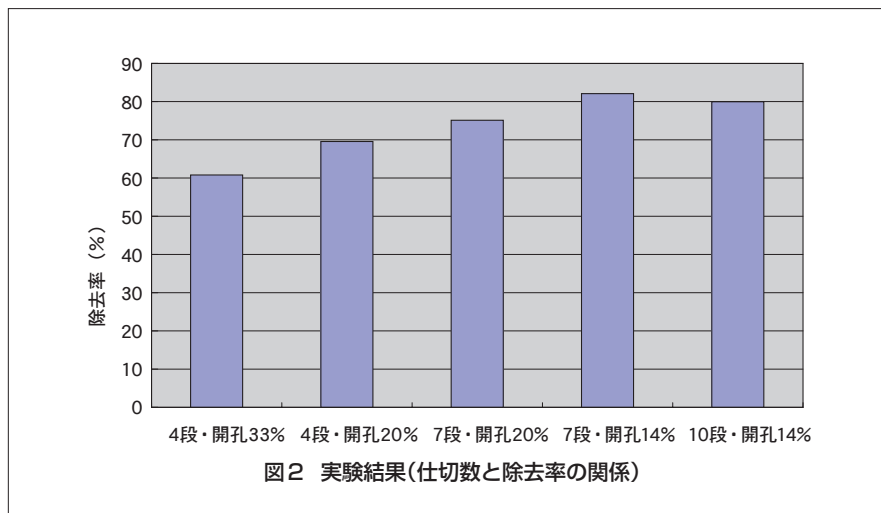


表3 実験結果(気液比と除去率の関係)

	気液比 100		気液比 200		気液比 300		気液比 400	
	NH <sub>3</sub> 濃度 (mg/L)	除去率 (%)	NH <sub>3</sub> 濃度 (mg/L)	除去率 (%)	NH <sub>3</sub> 濃度 (mg/L)	除去率 (%)	NH <sub>3</sub> 濃度 (mg/L)	除去率 (%)
入口	1,098	0.0	1,050	0.0	1,025	0.0	990	0.0
中間 - A	890	18.9	880	16.2	875	14.6	810	18.2
中間 - B	665	39.4	530	49.5	465	54.6	405	59.1
中間 - C	490	55.4	275	73.8	180	82.4	135	86.4
出口	220	80.0	85	91.9	50	95.1	40	96.0

4. パイロット実験

4.1 実験方法

4.1.1 使用廃液

基礎実験と同様の模擬廃液および実液を使用した。

4.1.2 実験装置

ストリッピング装置としては塔内に充填材をつめ、液とガスを向流に流して気液接触させる充填塔形式が広く知られているが、スケーリングによる性能の低下、閉塞などの問題がある。また、液中にガスを吹込む蒸留塔や気泡塔では圧損が大きく、ブロウの動力が大きくなる欠点があった。そこで、本実験においては図3に示すような横型攪拌式のストリッピング装置を製作した。

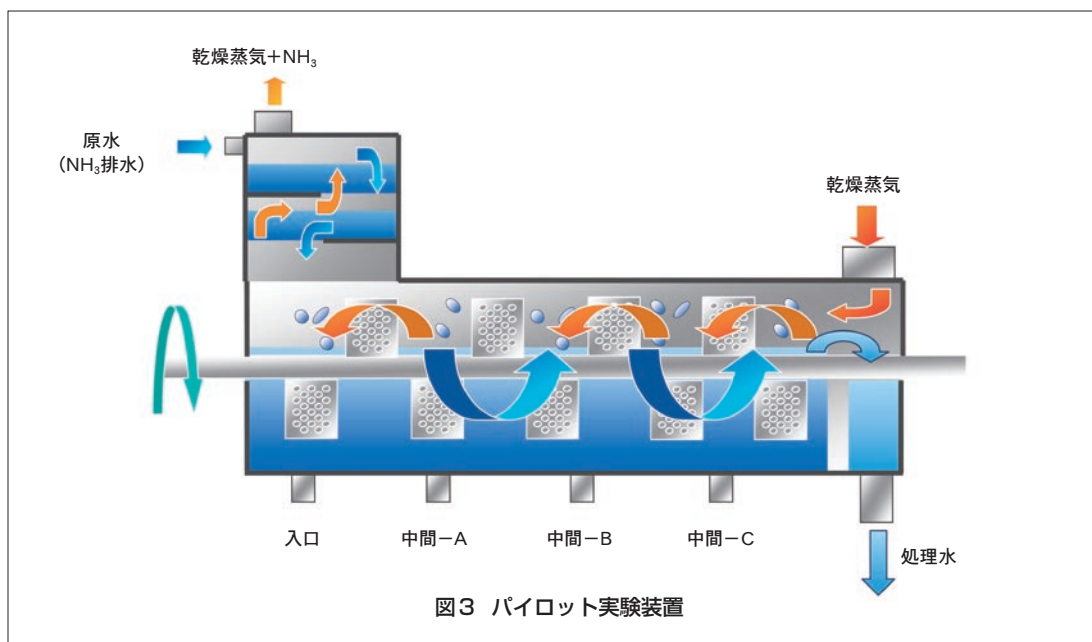
処理槽寸法：φ300×2,200L(L/D=7.3)

回転数：343rpm

装置左側から導入されたアンモニア廃液は、攪拌羽根によって微細な液滴となって気中へと分散され、右側の出口へ進んでいく。一方、脱水汚泥の乾燥によって得られた蒸気は装置右側から導入され、気中へ分散したアンモニア廃液と向流に接触させている。二重境界膜説より、ストリッピング効果を高めるには、物質移動の推進力を高く取り、また気液接触界面を大きく取ることが重要である。そのためには、アンモニア廃液の装置内での混合を極力小さくした押し出し流れに近い状態をつくること、微細な液滴を数多く気中へ分散させる必要がある。本装置は攪拌羽根や堰について種々の検討を行うことにより、装置の最適化を図っている。

表4 実験結果(模擬廃液と実液の除去率比較)

	気液比 100				気液比 200			
	NH <sub>3</sub> 水		消化液		NH <sub>3</sub> 水		消化液	
	NH <sub>3</sub> 濃度 (mg/L)	除去率 (%)	NH <sub>3</sub> 濃度 (mg/L)	除去率 (%)	NH <sub>3</sub> 濃度 (mg/L)	除去率 (%)	NH <sub>3</sub> 濃度 (mg/L)	除去率 (%)
入口	1,098	0.0	1,190	0.0	1,050	0.0	1,280	0.0
中間-A	890	18.9	980	17.6	825	21.4	1,045	18.4
中間-B	665	39.4	755	36.6	530	49.5	750	41.4
中間-C	490	55.4	520	56.3	275	73.8	520	59.4
出口	220	80.0	405	66.0	85	91.9	235	81.6



### 4.1.3 実験条件

気液比は、消化液重量・汚泥濃度・脱水汚泥含水率・乾燥汚泥含水率を設定することで求められる。いま、消化液の重量を1,500kg、汚泥濃度を4%、脱水汚泥の含水率を75%、乾燥汚泥の含水率を5%と仮定すると、脱水ろ液・乾燥蒸気の量が決まり、この場合の気液比は239となる(図4参照)。また、脱水汚泥含水率を65%とした場合の気液比は約135となる。今回の実験は都合上気液比200・気液比135の条件で行った。

運転方法としては、ストリッピング装置への脱水ろ液の通水量は1,200kg/hで一定とし、気液比が200、135となるように、蒸気量をコントロールして実験を行った。

ける除去率は、消化液がアンモニア水に比べて10%程度低い傾向にあった。同条件における基礎実験の結果と比較してもほぼ同程度の除去率が得られており、パイロット機の運転は基礎実験結果をよく反映していると言える。

本実験で設定した気液比は最大で230だが、前述の通り、汚泥濃度・脱水汚泥の数値が変わると気液比も変化する。実際のメタン発酵消化液の汚泥濃度は6%程度のケースが多く、その場合の気液比は約400程度となり、さらなる除去率向上が期待できる。基礎実験の結果と照らし合わせると、汚泥濃度6%の消化液を脱水・乾燥・ストリッピングした場合、アンモニア除去率約90%と予想される。

### 4.2 実験結果

実験結果を表5に示す。アンモニア水と消化液の除去率を比較すると、基礎実験結果と同様、同じ気液比にお

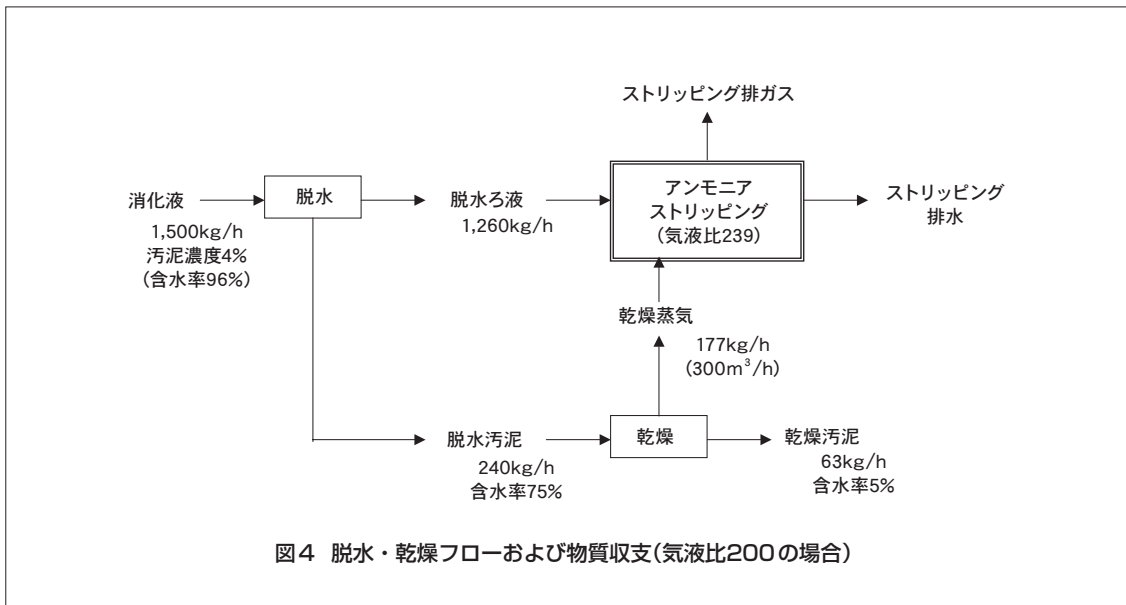


図4 脱水・乾燥フローおよび物質収支(気液比200の場合)

表5 実験結果

	アンモニア水				消化液				
	気液比 130		気液比 230		気液比 135		気液比 200		
	NH <sub>3</sub> 濃度 (mg/L)	除去率 (%)	NH <sub>3</sub> 濃度 (mg/L)	除去率 (%)	NH <sub>3</sub> 濃度 (mg/L)	除去率 (%)	NH <sub>3</sub> 濃度 (mg/L)	除去率 (%)	
入口	1,025	0.0	1,025	0.0	入口	1,310	0.0	1,370	0.0
入口後	795	22.4	460	55.1	入口後	1,150	12.2	1,100	19.7
中間前	610	40.5	290	71.7	中間前	1,040	20.6	845	38.3
中間後	430	58.0	160	84.4	中間後	760	42.0	600	56.2
出口前	250	75.6	80	92.2	出口前	490	62.6	375	72.6
出口	185	82.0	70	93.2	出口	385	70.6	255	81.4

### 5. 実機におけるメリット

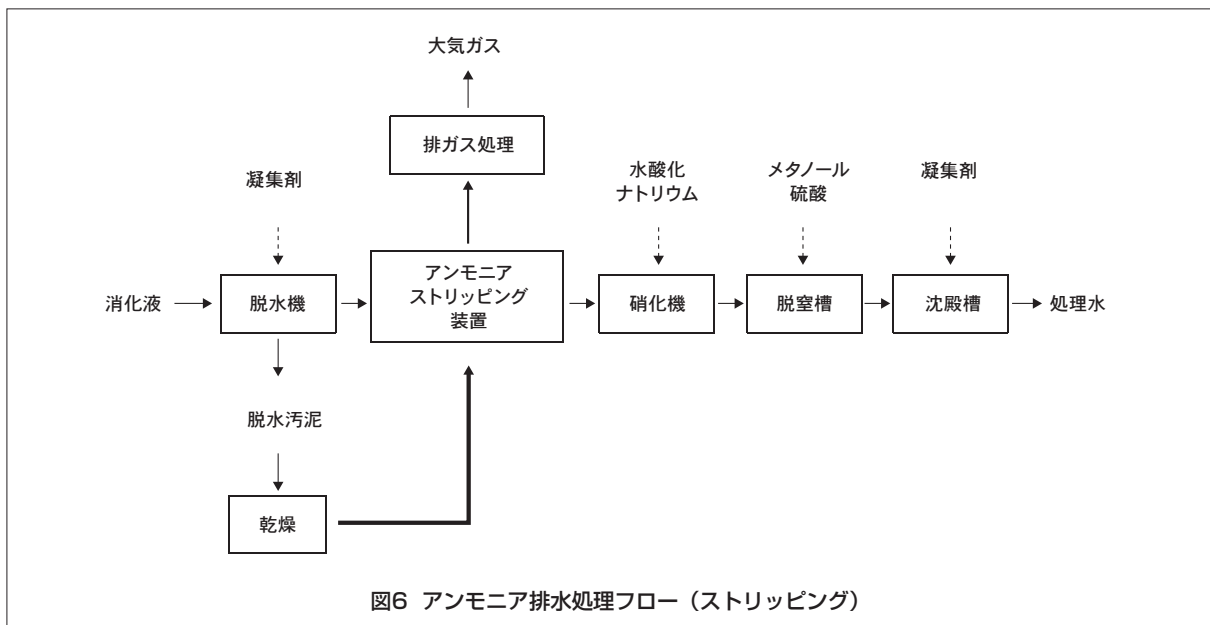
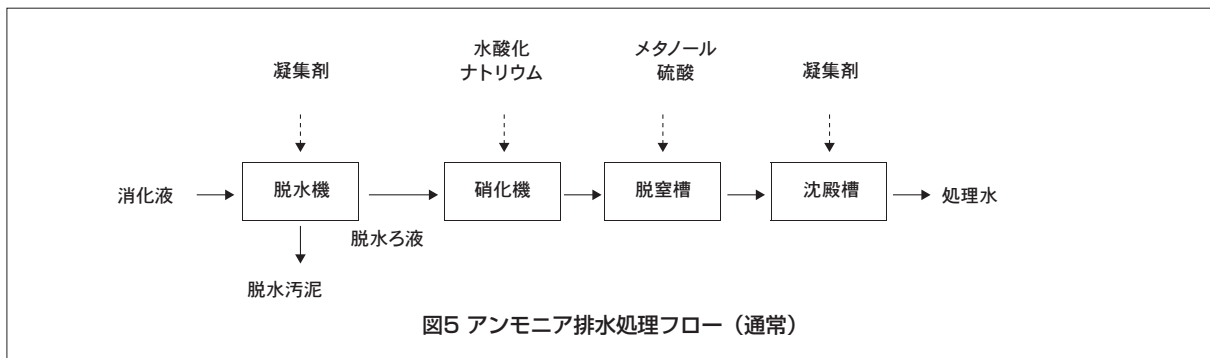
メタン発酵の消化液は、無処理のまま液肥として利用されることがあるが、利用先が確保されない場合は通常図5に示すフローにて処理がなされる。消化液の脱水によって発生した脱水ろ液はアンモニア濃度が高く、硝化、脱窒によって規制値以下になるよう排水処理を行わなければならない。生物処理におけるアンモニアの分解速度は非常に遅いため、アンモニア濃度によって設備の大きさが支配されるケースがほとんどである。また、アンモニア負荷に応じて、水酸化ナトリウム・硫酸などのpH調整剤や、脱窒における水素供与体としてのメタノールなどの薬剤使用量が決まるため、アンモニアストリッピングによる排水負荷の低減は設備コストならびにランニングコストの低減に非常に有効である。

本実験では、図6のようなフローにてストリッピングを行った結果、アンモニア濃度を80%低減することが可能となった。したがって、薬剤使用量は単純に1/5、実際には汚泥量の低減も可能なため、それ以上の効果が期待される。硝化、脱窒槽の大きさはBOD負荷が問題にならない場合、1/5程度にすることが可能であり、BOD負荷を考慮する必要がある場合についても通常よりコンパクトにすることが可能である。

### 6. まとめ

本実験により得られた結果を以下に整理する。

- ①基礎実験装置で用いた縦型のストリッピングにおいては、多孔板多段処理が基本とされており、仕切数・開孔率と除去率の関係について検討した。その結果、仕切板の条件として7段以上・開孔率14%以下の条件であれば、液進行方向の混合が抑えられ、ストリッピング効果を高くできる。
- ②希釈アンモニア水とメタン発酵消化液の脱水ろ液の2種類を用いてストリッピングを行った。その結果、ラボスケール・パイロットスケール共に、気液比が高くなるほど除去率の向上が見られ、同じ気液比で比較した場合、消化液の除去率はアンモニア水より10%程度低くなる傾向が見られた。ただし、今回のモデルケースである気液比200における消化液の除去率は80%を達成しており、脱水前の汚泥濃度が高くなると、それに伴って気液比もさらに高く設定できるため、さらなる除去率の向上が予想される。
- ③以上の結果をもとに、現行のアンモニア排水処理方法である生物処理の前段にストリッピングを設けた場合のコストメリットについては、薬剤使用量を1/5、また処理槽の容量を1/5に削減できることが示された。



**参考文献**

- 1) 根津秀一ら：冬期のスラッジ加温による脱水効率の向上、第47回全国水道研究発表会要旨集 pp.264-pp.265 (1996)
- 2) 下水・廃水・汚泥処理ガイドブック第1版(編集・下水・廃水・汚泥処理ガイドブック編集委員会、発行・環境技術研究会)、pp.765-pp.766

**執筆者**

**木越雅美**

Masami Kigoshi

2006年入社

環境関連機器の開発に従事



**山口和也**

Kazuya Yamaguchi

1997年入社

環境関連機器の開発に従事



**大野淳平**

Junpei Ono

2005年入社

産業機械の開発に従事

