

## 消化槽の改築に伴う消化ガス発生量の推測と有効利用案の事例

オリジナル設計(株) 西日本施設部 ○尾平純一、寺田憲治

汚泥処理施設の改築において、消化槽の運転方法の変更に伴う消化ガスの発生量に関して検討を行った。また、消化ガスを焼却炉や温水ヒータにて場内利用すると共に、さらに有効利用が可能なガス量が発生するか検討を行った。焼却炉と温水ヒータでの消化ガスの利用状況にもよるが、全体計画では温水ヒータの使用状況に関わらず、有効利用可能なガスが得られると推測された。

*Keyword* : 下水汚泥、消化、バイオガス化、ガス精製、ガス発電

### 1. はじめに

本施設は、1940 年頃に供用開始し、約 80 年が経過する施設であり、これまでも再構築に取り組んできたが、濃縮槽や消化槽など汚泥処理施設や設備の老朽化が顕著となったこと、消化槽への受け入れ量が増加することから施設の建て替えおよび設備の更新が必要となった。

また、汚泥消化設備の更新にあたっては、消化ガスの場内利用量を増加させバイオガスの利用率を向上させること、焼却炉などから発生する熱エネルギーを活用することを考慮した更新設計を行うこととなった。

### 2. 消化ガス発生量の検討にあたり

消化ガスの発生量を検討するにあたり、実績データを活用することが有効的であるが、表 2.1. に示すように消化槽の運転条件が大きく変化することから、そのまま活用することが難しい。このため、汚泥量や固形物量な

表 2.1. 消化槽の運転条件の変化

|       | 既 設              | 更新後              |
|-------|------------------|------------------|
| 投入汚泥量 | 100              | 250              |
| 攪拌方法  | ガス攪拌             | 機械攪拌             |
| 消化温度  | 中温消化<br>(30～37℃) | 高温消化<br>(50～55℃) |

どの基礎データは実績値を活用するとともに、下水道統計を利用した類似稼働施設の運転実績を参考とした。また、「下水道施設計画・設計指針と解説後編－2009 年版－」（以下、設計指針後編）の数値との相違を確認しながら設計条件の設定を行った。

### 3. 消化ガス発生量検討

本施設の消化槽は、これまで中温消化で運転されてきたが、消化日数が短く消化槽の容量が半分程度に小さくなること、焼却炉などからの熱エネルギーを活用できることから高温消化へ変更する。このため、消化温度の変更に伴う消化ガス発生量の検討を行った。

3. 1. 汚泥消化設備を導入する処理場の消化ガス発生量

下水道統計より全国の汚泥消化設備を導入している処理場の過去 5 ヶ年の投入有機物量 (VS) 当たりの消化ガス発生量を整理した。

図 3. 1. の消化日数と投入有機物量当たりの消化ガス発生量では、消化日数 20 日から 50 日に集中しているが、日数の長短による消化ガス発生量の推移は見られず、設計指針後編 359 頁に示されている  $500 \sim 600 \text{ Nm}^3/\text{t-VS}$  付近に集中していることが確認された。

図 3. 2. の消化温度と投入有機物量当たりの消化ガス発生量では、消化温度の上昇による連続性は見られないが、全国でも採用の多い中温帯に固まっていることが確認された。なお、中温帯、高温帯で明確な消化ガス発生量の変化は見られず、前述同様  $500 \sim 600 \text{ Nm}^3/\text{t-VS}$  付近に集中していることが確認された。

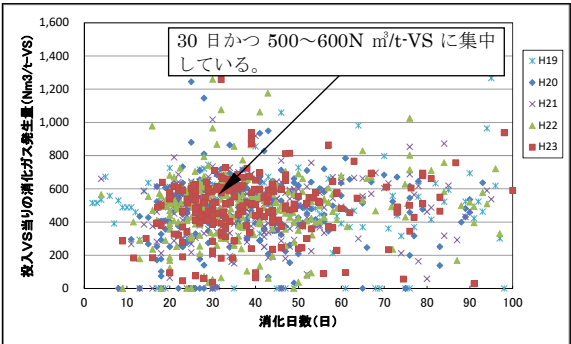


図 3. 1. 消化日数と投入有機物量当たりの消化ガス量の相関図

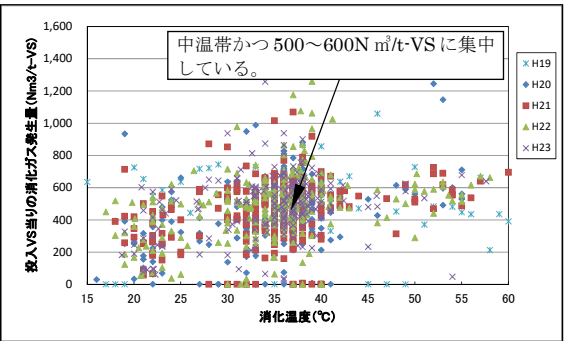


図 3. 2. 消化温度と投入有機物量当たりの消化ガス量の相関図

3. 2. 本施設の投入有機物量当たりの消化ガス発生量

本施設の投入有機物量当たりの消化ガス発生量を、消化槽投入汚泥の固形物量と消化ガス発生量の実績値をもとに算出したところ、表 3. 1. に示すようにほぼ  $600 \text{ Nm}^3/\text{t-VS}$  を上回り、8 月には  $700 \text{ Nm}^3/\text{t-VS}$  を超える実績値が確認された。

表 3. 1. 投入有機物量当たりの消化ガス発生量

| 2013年 | 消化槽投入汚泥<br>固形物量 | 消化ガス<br>発生量 | 投入VS当たり<br>のガス発生量 |
|-------|-----------------|-------------|-------------------|
|       | t/日             | Nm³/日       | Nm³/t-VS          |
| 4月    | 15.6            | 8,210       | 667               |
| 5月    | 16.4            | 8,380       | 613               |
| 6月    | 14.4            | 7,660       | 641               |
| 7月    | 13.7            | 7,520       | 662               |
| 8月    | 12.3            | 7,300       | 702               |
| 9月    | 18.8            | 6,900       | 520               |
| 10月   | 15.7            | 7,550       | 608               |

3. 3. 投入有機物量当たりの消化ガス発生量の設定

更新前の本施設の消化ガス発生量の実績では、ほとんどの月で  $600 \text{ Nm}^3/\text{t-VS}$  を越え、8 月には  $700 \text{ Nm}^3/\text{t-VS}$  を越える値も確認された。今後  $600 \sim 700 \text{ Nm}^3/\text{t-VS}$  を推移すると想定されることから、更新後の投入有機物量当たりの消化ガス発生量を  $700 \text{ Nm}^3/\text{t-VS}$  とした。

4. 有効利用可能な消化ガス量の推測

本施設の消化ガスは、消化槽を加温するための蒸気ボイラーの燃料や焼却炉の補助燃料

として有効利用され、今後も同様に場内利用を主体に消化ガスの有効利用が計画されている。全体計画および事業計画時では、消化槽への投入汚泥量が現状よりも多くなるため、これまでの運転実績より燃費を想定して使用熱量を算出し、有効利用可能な消化ガスおよび熱量の推測を行った。なお、消化ガス化のもとになる投入汚泥中の有機物含有率についても整理を行った。

#### 4.1. 投入汚泥中有機物含有率の設定

本施設の過去 7 ヶ年の投入汚泥中有機物含有率（強熱減量）を表 4.1. に示す。

2011 年以前は、80%を下回る数値が多かったが、それ以降は 80%を上回る数値を確認することができた。本施設は、合流式であるものの、有機物の割合の平均値は、設計指針後編 327 頁に記載されている分流式に近い状況であることが確認された（合流式 74.8%、分流式 79.0%）。

外国人観光客の増加、食の欧米化などを踏まえると今後もこのような状況が続くと想定されることから、本施設の投入汚泥中有機物含有率を 80%とした。

表 4.1. 消化槽投入汚泥中の有機物含有率

|       | 消化槽投入汚泥           |      |                  |
|-------|-------------------|------|------------------|
|       | 汚泥量               | 固形物量 | 有機物含有率<br>(強熱減量) |
|       | m <sup>3</sup> /日 | t/日  | %                |
| 2007年 | 805               | 17.7 | 80.4             |
| 2008年 | 790               | 16.7 | 78.4             |
| 2009年 | 860               | 18.9 | 75.2             |
| 2010年 | 710               | 17.7 | 73.0             |
| 2011年 | 890               | 16.0 | 79.7             |
| 2012年 | 826               | 17.7 | 80.0             |
| 2013年 | 738               | 14.5 | 82.5             |

#### 4.2. 消化ガス利用状況

本施設の過去 6 ヶ年の消化ガスの発生量や使用状況、全体計画と事業計画時の消化ガスの発生量・熱量などを表 4.2. にまとめた。

焼却炉や蒸気ボイラーの消化ガス使用量の実績は、使用熱量に換算し、整理を行った。

消化ガスを使用する焼却炉は、2009 年までが 1 炉、2010 年以降は 2 炉稼働しており、焼却炉の稼働数増加に合わせて都市ガスの使用量が増加したことが確認できる。また、2013 年はガスブースターの増設工事により 2 炉の焼却炉で消化ガスを使用することが可能となったことから、消化ガスの使用量が増加し、都市ガスの使用量が減少したことが確認された。

全体計画及び事業計画では、消化槽の加温は蒸気ボイラーから温水ヒータへ変更される計画である。

表 4. 2. 消化ガス利用状況

| 年度               | 焼却炉     |         | 蒸気ボイラー | 温水ヒータ   | 使用<br>熱量<br>合計 | 消化ガス   |         |      |      |
|------------------|---------|---------|--------|---------|----------------|--------|---------|------|------|
|                  | 消化ガス    | 都市ガス    |        |         |                | 発生量    | 熱量      |      |      |
|                  | 使用熱量    |         |        |         |                |        |         | 使用熱量 | 使用熱量 |
|                  | Mj/d    |         |        |         |                |        |         | Mj/d | Mj/d |
| 2008年            | 52,269  | 88,875  | 62,139 | —       | 203,283        | 8,260  | 173,460 |      |      |
| 2009年            | 55,209  | 96,525  | 69,510 | —       | 221,244        | 9,550  | 200,550 |      |      |
| 2010年            | 58,275  | 205,605 | 58,758 | —       | 322,638        | 7,280  | 152,880 |      |      |
| 2011年            | 58,002  | 180,045 | 73,899 | —       | 311,946        | 7,950  | 166,950 |      |      |
| 2012年            | 51,366  | 244,125 | 67,326 | —       | 362,817        | 7,572  | 159,005 |      |      |
| 2013年            | 84,000  | 132,043 | 61,719 | —       | 277,762        | 7,810  | 164,010 |      |      |
| 平均               | 59,854  | 157,870 | 65,559 | —       | 283,282        | 8,070  | 169,476 |      |      |
| 全体計画<br>(平成37年度) | 444,711 |         | —      | 413,343 | 858,054        | 41,395 | 869,295 |      |      |
| 事業計画<br>(平成30年度) | 421,213 |         | —      | 215,279 | 636,492        | 21,784 | 457,464 |      |      |

## 4. 3. 有効利用可能な消化ガス量の推測

消化ガスは、図 4. 1. に示すようにバイオ天然ガス化装置（メタン濃度を約 60% から 98% 以上まで精製する設備）で精製され、焼却炉や温水ヒータへ供給される計画である。ここでは、焼却炉や温水ヒータで使用しきれなかった精製ガスを有効利用可能なガス量とする。

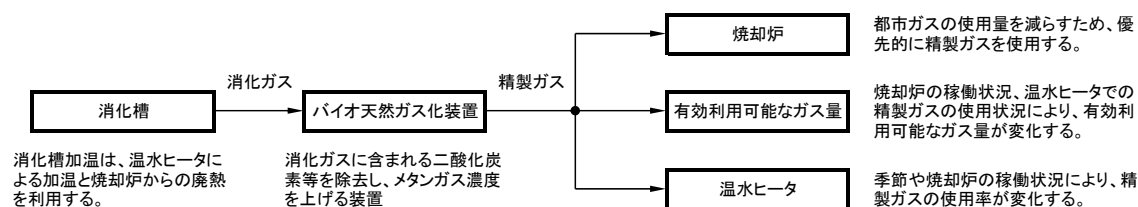


図 4. 1. 消化ガスの利用先

消化槽の加温には、温水ヒータによる加温のほかに焼却炉の廃熱を利用することが計画されている。焼却炉の稼働状況により供給される廃熱が変化するとともに、季節により温水ヒータでの精製ガスの使用量も変化する。このため、焼却炉の稼働状況を固定し、温水ヒータでの精製ガスの使用率を 4 ケース想定し、有効利用可能な消化ガス量を表 4. 3. に整理した。

事業計画時に温水ヒータが必要とする消化ガスを 100% 供給した場合、有効利用可能な消化ガス量が発生しないと推測される。ただし、温水ヒータによる精製ガスの使用量が減ると有効利用可能な消化ガス量が発生することが推測された。なお、全体計画時に、温水ヒータへ消化ガスを 50% 供給する場合で 10,817N m<sup>3</sup>/日の有効利用可能な消化ガス量が発生すると推測される。

表 4. 3. 温水ヒータの使用状況と有効利用可能な消化ガス量

| 投入VS<br>当たりの<br>ガス<br>発生量 | 計画              | 焼却炉      |                    | 温水ヒータ   |         |         |      |                    |                    |                    |                    | 消化ガス               |                    | 有効利用可能な<br>消化ガス量(精製) |                    |                    |                    |
|---------------------------|-----------------|----------|--------------------|---------|---------|---------|------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                           |                 | 使用<br>熱量 | 消化<br>ガス<br>使用量    | 使用熱量    |         |         |      | 消化ガス<br>使用量        |                    |                    |                    | 発生量                | 精製量                |                      |                    |                    |                    |
|                           |                 | MJ/d     | Nm <sup>3</sup> /d | MJ/d    | MJ/d    | MJ/d    | MJ/d | Nm <sup>3</sup> /d | Nm <sup>3</sup> /d | Nm <sup>3</sup> /d | Nm <sup>3</sup> /d | Nm <sup>3</sup> /d | Nm <sup>3</sup> /d | Nm <sup>3</sup> /d   | Nm <sup>3</sup> /d | Nm <sup>3</sup> /d | Nm <sup>3</sup> /d |
| Nm <sup>3</sup> /t-VS     |                 |          |                    |         |         |         |      |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                      |                    |                    |                    |
| —                         |                 | —        | —                  | 100%    | 50%     | 25%     | 0%   | 100%               | 50%                | 25%                | 0%                 | —                  | —                  | 100%                 | 50%                | 25%                | 0%                 |
| 700                       | 全体計画<br>(H37年度) | 444,711  | 11,479             | 413,343 | 206,672 | 103,336 | 0    | 10,670             | 5,335              | 2,667              | 0                  | 41,395             | 27,631             | 5,482                | 10,817             | 13,485             | 16,152             |
|                           | 事業計画<br>(H30年度) | 421,213  | 10,873             | 215,279 | 107,640 | 53,820  | 0    | 5,557              | 2,779              | 1,389              | 0                  | 21,784             | 14,541             | -1,889               | 889                | 2,279              | 3,668              |

温水ヒータによる精製ガスの利用率が低いと有効利用可能なガスが増える。

## 5. 消化ガス発電

近年、地球温暖化防止や循環型社会が叫ばれる中、下水処理過程で発生する下水汚泥もバイオマス資源として位置づけられている。下水汚泥を嫌気消化して得られる消化ガスを発電として有効利用することにより、二酸化炭素排出の削減に繋がる。

### 5. 1. 消化ガス発電の導入検討

本市における消化ガス（余剰分）の取り扱いとしては以下が考えられた。

- ・ 消化ガス発電設備の導入
- ・ 焼却炉以外での場内利用（場内のガス管へ接続）
- ・ 余剰ガス燃焼装置の導入

精製された消化ガスは温水ヒータに使用されるため、その使用量が減った場合にのみ有効利用可能な消化ガスが発生する。余剰分となる消化ガスは供給量が不安定であることから、焼却炉以外での場内利用（場内のガス管への接続）は、運用後問題が発生する可能性が高い。また、余剰ガス燃焼装置においては消化ガスを有効利用せず燃焼処分するだけである。

本市では地球温暖化防止の観点から、先行して太陽光発電を導入している経緯もあり、余剰分となる消化ガスを有効利用するため、消化ガス発電設備を導入する計画として検討を進めることとなった。

### 5. 2. 消化ガス発電による有効利用方法

本施設の運用状況を考慮した場合、発電した電力の主な利用方法としては以下が考えられた。

- ・ 場内負荷設備に接続し消費する方法
- ・ 固定価格買取制度を利用して売却する方法
- ・ 消化ガスを民間事業者売却する方法（必要な受変電や発電設備の整備などについても民間事業者が行う）

先でも述べたように、余剰分となる消化ガスは供給量が不安定であることから、固定価格買取制度や民間事業者に売却する方法では、リスクが大きく経済効果も期待できないことが予測された。

一方、“場内負荷設備に接続し消費する方法”は、対象とする設備や負荷を予め決めておき、既存設備に接続することで、発電電力を最も有効に利用することができる。また、発電量が少ない場合には、商用電力を使用できるため、施設運用上影響がないことから、発電した電力は場内利用することが有利であると判断された。

なお、表4.3.より季節変動や焼却炉の廃熱回収を考慮し、事業計画時、温水ヒータに有効利用する消化ガス量を25%とすると、

$$2,279 \text{ Nm}^3/\text{d} \div 24\text{h} = 95.0 \div 100 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

その場合の消化ガス量（余剰分）は約100 Nm<sup>3</sup>/hと見込まれ、発電機1台あたりのガス使用量が約13 Nm<sup>3</sup>/台であることから、7台の発電機が設置できると想定された。

### 5.3. 廃熱回収利用

本施設は、高温消化を採用することから、消化槽内の温度は50～55℃となる。焼却炉等で廃熱回収し得られた温水は、消化槽内の温度を高温に保つため、熱交換器にて消化汚泥を加温するのに用いられる。

消化ガス発電設備からも廃熱回収することが可能であり、上記温水の一部を供給することが可能である。以下に発電機1台当りの廃熱回収についての参考仕様を示す。

表5.1. 消化ガス発電機1台当りの廃熱回収仕様

|      |           |            |
|------|-----------|------------|
| 廃熱回収 | 廃熱回収量     | 40kW(MJ/h) |
|      | 温水取り出し温度  | 最大85℃      |
|      | 温水流量(標準値) | 116L/min   |

上記に示すとおり、消化ガス発電機1台当りの廃熱回収に伴う温水は、高温消化に用いても問題はない温度である。また、発電機の設置台数を増やすことができれば、温水の供給量も多くなり、総合的なエネルギー効率を向上できる可能性がある。

### 6. 施設稼働後の運転状況確認

本施設は既設消化槽の改築更新を終えたばかりであることから、今後運転状況を確認し、設計時の数値の検証を行う予定である。