

# 木質バイオマス発電設備におけるタール燃焼装置の開発

今田 雄司・北野 裕樹

YUJI konta, YUUKI kitano

日工株式会社

## 概要

昨年(2021年)11月に開催されたCOP26では、世界197カ国に及ぶ締約国より温室効果ガス排出量の削減に関する野心的な目標が報告されている。先進国の一員である我が国は、英国や米国などと競うようにして2050年の温室効果ガス排出量実質ゼロを目指すことを目標に掲げており、これを達成するためにもカーボンニュートラルに向けた新しい技術の開発が急務とされる。中でも、バイオマス発電は、2011年のFIT制度施行にともない拡大推移して来ているものの、燃料となる木質バイオマス燃料の調達などの制約により、その設置場所が限定的となり普及の足枷となっている。そこで、国は、同燃料の調達の制約が少ない2,000kW未満の小型バイオマス発電の電力買取価格を割増にして普及に拍車を掛けている。ただし、小型バイオマス発電所で副産物として大量に生成する木質タール、木酢液、洗浄水などを処分することが同発電事業の生産性を低下させCO<sub>2</sub>削減に逆行する新たな課題を残している。

本稿では、木質タールの自立燃焼をはかることにより外部から電力や化石燃料などのエネルギーを供給すること無く、しかも、カーボンニュートラルでこれらの副産物を無害化処理することを目的に開発を進めたタール燃焼装置についてその詳細を報告する。

## 1. 緒言

2021年の11月にCOP26 (Conference of the Party: 国連気候変動枠組条約第26回締約国会議) が英国のグラスゴーで開催され、世界197カ国に及ぶ締約国の取組が発表されている。我が国では、岸田総理が2030年までを「勝負の10年」と位置づけ温室効果ガスの削減目標や今後の支援など、脱炭素社会へ向けた取り組みを表明している。そして、COP26としては、パリ協定で示された世界全体の平均気温上昇を今世紀末までに2.0℃未満に抑えることを目標とし、可能な限り1.5℃未満に抑えるように努力していくことが再確認された。このことから、これらを実現するための脱炭素へ向けた新しい技術開発のスピードは、今後加速していくものと考えられる。

このような国際情勢の中、我が国では、2021年10月に「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」を策定し、その中で脱炭素社会の実現を目指すことの宣言と、2030年までのCO<sub>2</sub>の削減量を46%と提示し、2050年にはカーボンニュートラルの実現を掲げている。

これらを実現する新しいエネルギー利用技術として、風力、地熱、水力、太陽、バイオマス発電がある。特に、バイオマス発電は季節変動や昼夜問わずして安定操業が可能な

発電技術である。

そして、この発電設備は、カーボンニュートラルの燃料としてバイオマス(木材チップ等)を用いて、電力を生産している。これにより生産された電力は、再生可能エネルギーの固定買取制度(以下、FIT制度)として取り扱われ、FIT制度の下、プレミアム価格で売電することにより、本事業の収益性を改善するとともに、山林の未利用材を使用することで森林の再生とカーボンニュートラルを実現できるバイオマス発電の普及に拍車を掛けようとするものである。

これらのバイオマス発電設備には、一般的に採用されるガス化方式として、アップドラフト方式とダウンドラフト方式が多く採用されている。アップドラフト方式は、ガス化剤の流れが材料投入と向流で流れる方式である。この方式は酸素濃度制御、乾留温度制御、生成ガス量の制御に優れているが、木質タールの生成量が多くなるため、そのままの状態ではガスエンジンへ木質ガスを導入すると内燃機関内部で故障が発生する。

そのため、湿式スクラバーにより木質ガスを洗浄し、そのまま洗浄液はタール分離層で分離され、上水は加熱軽質タール、沈殿したものは重質タールの燃料に分離される。

これらの木質ガス以外の副産物は直接発電に利用する

ことができないため産業廃棄物として取り扱う必要がある。従来は、産業廃棄物の減容化を図って処分費用を削減するために化石燃料を燃やして水分を蒸発させている。これらのことはバイオマス発電所の生産性を低下させることだけでなく、CO<sub>2</sub>削減という大義に沿わない側面も含んでいる。これらのことを鑑みて、可燃性の木質タールと水を主成分とする木酢液や洗浄液を同電設備内で無害化するためのタール燃焼装置を新たに開発するに至った。

本稿では、弊社バイオマスバーナリの技術を基盤とし、タールの自立燃焼により外部から電力や化石燃料の新たなエネルギーを供給することなく、しかも、副産物である木酢液や洗浄液を無害化処理することを目的として開発したタール燃焼装置についてその詳細を報告する。

## 2. タール燃焼装置

バイオマス発電設備フローを図2-1に示す。図よりガス化炉で木質チップを熱分解すると、可燃性ガス(以下、生成ガス)が発生する。この生成ガスはタール成分や木粉などの不純物を含むことから、これらを除去するために湿式スクラバーで洗浄してガスエンジンへ燃料として供給される。一方の洗浄水は、前述のタール成分をはじめとする副産物を多く含んでいることから、タール分離槽で静置され、比重差により酢酸を含有した上水液<sup>2-3)</sup>の軽質タールと沈殿した重質タールとに分離される。

従来のガス化発電システムでは、ガスエンジンで燃料として利用することができないこれらの副産物を産業廃棄物として処分する必要があった。これらのことを鑑みて、今回新たに開発したタール燃焼装置は、余剰となる木質ガス、副産物

である木質タール、木酢液、洗浄水を化石燃料による助燃を行わずして、自立燃焼による無害化処理を可能としている。そして、同タール燃焼装置は、木質タール燃焼用の予熱空気バーナ2基と、余剰ガス及び副産物の無害化処理の反応器となるタール燃焼炉で構成している。

2基の予熱空気バーナは、重質タールの燃焼を専用とする重質タールバーナと軽質タールの燃焼を専用とする加熱軽質タールバーナに区別される。まず、タール分離槽で比重分離し沈殿した重質タールは、タール燃焼装置の主燃料として重質タールバーナへ供給される。一方の上澄み液は、タール燃焼装置で発生する燃焼廃熱を利用して加熱器で蒸発減容化され、濃縮された残留液を加熱軽質タールと称して加熱軽質タールバーナへ燃料として供給している。この加熱軽質タールは、燃料としての燃焼性を向上させるために低位発熱量で21,100kJ/kg以上になるまで加熱濃縮している。他方の蒸発したタール成分を含む水蒸気(以下、フラッシュ蒸気と記述)は、タール燃焼炉に還元して余剰となった木質ガスと共に850℃で酸化分解し無害化される。さらに、熱バランスの変動により炉内温度が850℃を超えないように、清水を炉内に噴霧して熱バランスを保っている。加えて、エネルギーの有効利用の観点より、タール燃焼装置から排出される850℃の排ガスから熱交換器を介してフラッシュ蒸気の加熱と燃焼空気の予熱を行っている。

なお、年に1度程度の極めて稀な頻度ではあるが、発電設備の運用開始や停止時において、ガスエンジンで燃料として使用することができない低質な木質ガスが生成されるため、洗浄を行わず直接燃焼炉へ導入して無害化処理を行っている。

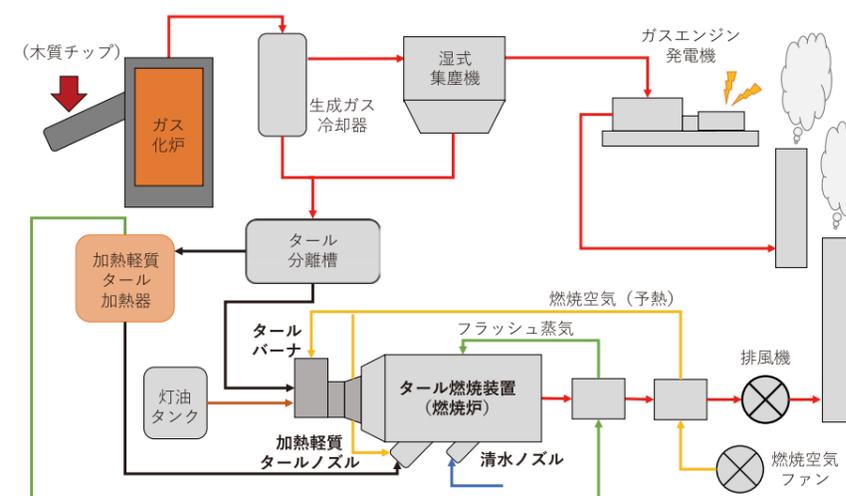


図2-1. 木質バイオマス発電設備フロー

## 2.1 タール燃烧炉

写真2-1に示すタール燃烧炉は、発電設備から発生する臭気を含むフラッシュ蒸気や余剰となる木質ガスなどの可燃性ガスを安全に酸化分解して無害化することができる装置である。

同タール燃烧炉は、実際のバイオマス発電設備から発生する重質タール、加熱軽質タルのサンプルより元素分析と発熱量を測定し、フラッシュ蒸気はメーカーからの分析データを使用して設計を行った。同タール燃烧炉の大きさは、炉内における熱負荷を $12.6 \times 10^5 \text{kJ/m}^3\text{h}$  ( $350 \text{kW/m}^3$ ) 以下に抑えるように設計している。燃烧室の基本構造は次項で触れるシミュレーションを用いて熱風とフラッシュ蒸気の混合状態を各種評価し、燃烧炉の形状と詳細な大きさや重質タールノズル、加熱軽質タールノズル、清水ノズルの位置を決定している。

そして、同燃烧炉は、導入したフラッシュ蒸気や余剰となる木質ガスを無害化するのに必要となる2秒以上の滞留時間を確保できる内部容積に設計している。さらに、安全と省エネルギーの観点から、同燃烧炉の鉄皮温度が $100^\circ\text{C}$ 以下になるように、耐火材の全層厚を $300\text{mm}$ とし、断熱性に優れた耐火材を外側に耐火性に優れたものを内側に施工する2層施工としている。次に図2-2にタール燃烧炉の全体図を示す。図より、加熱軽質タールノズルと清水ノズルは、処理ガスの流れに沿うように炉体に斜め後方から炉の中心部に向けて挿入している。なお、タール燃烧装置の検討に用いた各種条件設定値とタルの物性値を表2-1と表2-2に、設計した燃烧炉の仕様を表2-3に示す。

また、同発電所より発生する常温の重質タールは動粘度が高く、バーナノズルでの霧化が難しい燃料であるため、動粘度を下げて霧化を改善するために加温が必要となる。このことから、重質タールと加熱軽質タール共にタンクでの貯蔵温度を $80^\circ\text{C}$ としている。一方、重質タルの加熱温度が $50^\circ\text{C}$ を下回ると動粘度が $50\text{cSt}$ よりも高く流動性が悪くなり、配管内で閉塞することを確認している。そして、配管内の残留圧力にもよるが、重質タルが水溶性を示すことから加熱温度を高めすぎると水分が無くなり、タルが配管内で固着してメンテナンスが極めて困難になる。したがって、タール燃烧炉を運用する上で、重質タルや加熱軽質タルの燃料温度を $50^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$ の範囲で管理することが最も重要である。



写真2-1. タール燃烧炉

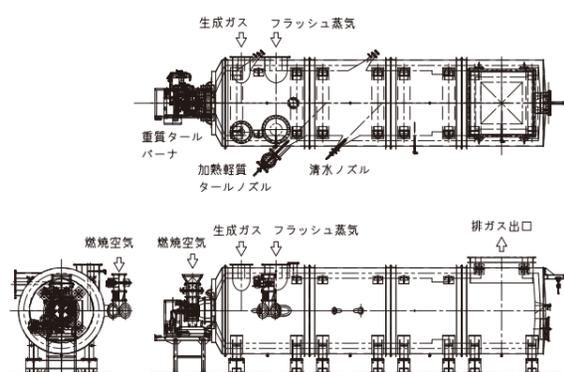


図2-2. タール燃烧炉全体図

表2-1. 熱収支の入力条件

項目	条件値
フラッシュ蒸気導入量	2,337kg/h
フラッシュ蒸気温度	$480^\circ\text{C}$
重質、加熱軽質タール燃焼量	$250\text{kg/h}$ (MAX)
出口排ガス温度	$850^\circ\text{C}$
燃烧空気予熱温度	$300^\circ\text{C}$
燃烧空気比	1.20
排ガス酸素濃度	4.0%(w.b.)

表2-2. タール物性値

種類	重質タール	加熱軽質タール
高位発熱量	35,301 kJ/kg	29,459 kJ/kg
低位発熱量	25,819 kJ/kg	21,100 kJ/kg
密度	1.10 kg/L	1.08 kg/L
水分	8.8 wt%	18.9 wt%

表2-3. 熱収支より設計した燃烧炉寸法

項目	寸法[mm]
燃烧炉外径φ	2,480
燃烧炉全長L	9,620
炉内有効長L'	6,500
鋼材板厚t	6
耐火材施工厚t	150
断熱材施工厚t	150

## 2.2 流体シミュレーション

同燃烧炉は臭気成分を含んだフラッシュ蒸気や生成ガスを炉内円筒断面の接線方向から導入することにより回転させ、炉の中心部分で水平に高速燃焼するバーナ火炎が、周囲で回転しているこれらの可燃性ガスをエジェクション効果により巻き込んで混合燃焼することを基本コンセプトとしている。そして、この効果を確認するために、流体シミュレーションソフト「STAR-CCM」(シーメンス社製)を使用して燃焼ガスの流れ方向と温度分布のシミュレーション解析を行っている。

さらに、詳細な炉内構造の検討を行うために、図2-3に示すタール燃烧炉の3Dモデルを用いてシミュレーション解析を行った。図より、炉内部の流れや温度分布に局所的な偏りが生じないように、炉内に図2-4に示す絞り部を設けることにより、ガスの流速を高めて攪拌を促進させている。同タール燃烧炉においては、この絞り部の位置とその内径との関係が燃烧炉の性能を大きく左右するために、同シミュレーションを駆使して、これらの関係性の最適化をはかっている。なお、シミュレーションに使用した計算条件を表2-4に示す。

つぎに図2-5に本シミュレーションの結果を示す。図より、断面Aは、重質タルの燃焼ガスに加熱軽質タールノズル(バーナ)から噴霧した加熱軽質タルの燃焼状況を表している。断面Bは、炉内温度の上昇を抑制する清水の噴霧状況を表している。断面Cは、タール燃烧炉出口における混合ガスの状態を表している。

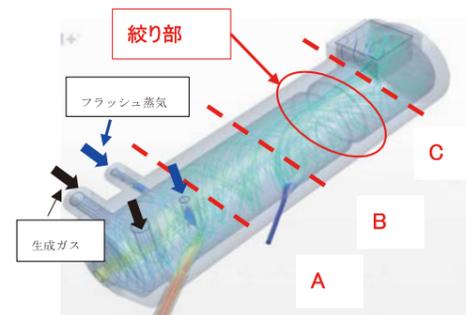


図2-3. 燃烧炉3Dモデル

まず、断面Aに着目すると、タール燃烧炉の右側から炉の中心部分に向かって加熱軽質タルが噴霧されている。そして、生成ガスとフラッシュ蒸気とが接線方向から導入されることにより、炉内に旋回流が発生し加熱軽質タルの燃焼火炎が旋回方向に流されている様子が確認できる。そして、この燃焼火炎が旋回流と混合しながら炉の中心部に向かって均熱化がはかられつつあることがわかる。そして、ガス体は、温度が低いほど密度が高く、遠心力により炉内外周部を中心に流れ、炉内壁面の温度が低下する傾向になっている。つぎに、断面Bに着目すると、清水を噴霧しているノズルの先端近傍で炉内温度が急激に低下するも、加熱軽質タルの燃焼火炎と同様に旋回流よりも中心部に向かって均熱化がはかられていく様子かわかる。最後に断面Cに着目すると、断面Aと断面Bでは旋回流を主体とする混合機構が働いていたことに対して、断面Cでは、絞り効果による縦渦を主体とする混合機構が働いている。このことによりタール燃烧炉出口においては炉の中心部から外周に至って均熱化が進み均等な温度分布になっていることが確認できる。

なお、燃烧炉内の絞りは圧力損失が増大し、設備全体の風量バランスに影響を与えることが想定されるため、絞り部の有効断面積が78%になるように設計している。以上のことから、本シミュレーション結果を用いて、加熱軽質タールノズルの設置位置及び炉内の絞り断面積の最適化をはかることが可能となった。

表2-4. 流体シミュレーション計算条件

項目	条件値
重質タール燃焼量	112.5 kg/h
加熱軽質タール燃焼量	137.5 kg/h
フラッシュ蒸気導入量	1,600 kg/h
冷却水噴霧量	420 L/h

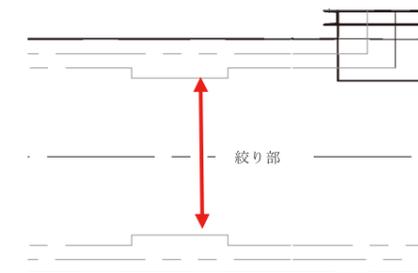
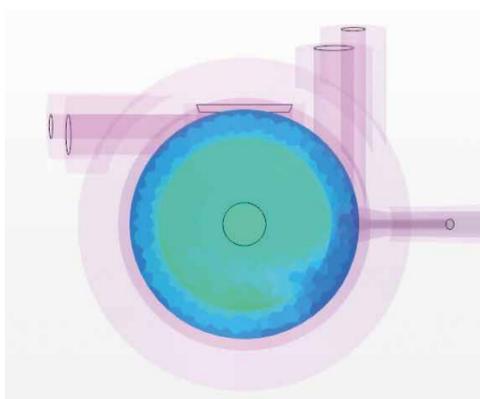
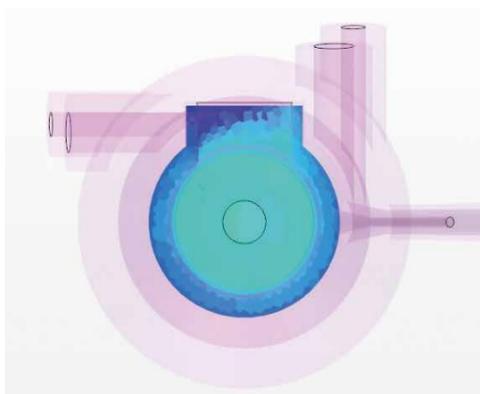


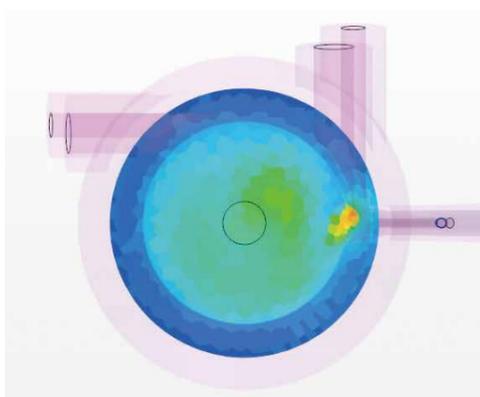
図2-4. 燃烧炉絞り部



B断面:水ノズル噴霧



C断面:燃焼炉出口



A断面:加熱軽質タールノズル燃焼

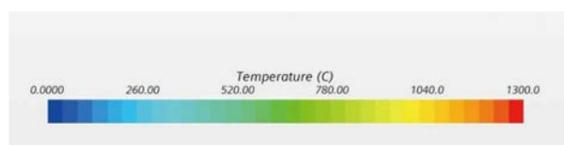


図2-5. シミュレーションの断面温度分布

### 2.3 重質タールバーナ

写真2-2に示す重質タールバーナは、図2-6の重質タールバーナ構造図に示すように、バーナ本体の内部に灯油噴霧用ノズルと重質タール噴霧用ノズルを並列に搭載しており、両者共に圧縮空気を噴霧媒体とする2流体ノズルを採用している。さらに、同タール燃焼炉の廃熱を燃焼空気の予熱に有効利用すると共に、従来のメタリック製のミックスチャンバーに代えて蓄熱容量が大きい耐火キヤスタブル製とすることにより保炎効果を高めている。

同発電設備は、年1回の定期点検時に完全停止状態から起動するが、その時のみ最初の4時間は灯油を使用する。そして、炉内が規定の温度に上昇すると重質タールの噴霧を開始し、灯油と重質タールとの混焼燃焼での運用となる。この時は、灯油の燃焼量のみで炉内の温度制御を行っている。そして、燃焼炉出口が設定温度800℃~850℃まで昇温し、灯油の燃焼量調量弁開度が一定時間低開度で維持されると灯油の噴霧を停止して重質タールのみの専焼に切り替わる。さらに、燃焼炉が昇温してから一定時間経過後に、加熱軽質タールバーナの運転が開始され、燃焼炉内部の重質タールバーナの火炎に向けて加熱軽質タールが噴射され、重質タールと加熱軽質タールの混焼が開始される。

本バーナにおける燃焼量制御は、設備内で発生する重質タールと加熱軽質タールとを燃料としてタール燃焼炉で全量消費する必要があるため、これらのタール発生量とのバランスを勘案して任意に設定できるようにしている。灯油使用時には排ガス温度制御、重質タール専焼の場合にはタール燃焼量を任意で設定する流量制御を行い、重質タール専焼のみで炉内温度が850℃以上の温度になるように流量を設定している。そして、炉内温度が850℃を超える場合には、清水を噴霧して炉内温度が850℃になるように温度制御を行っている。なお、運用中にタール燃焼炉出口の温度が低下したときには、灯油による補助燃焼で再度昇温を行っている。

これらのタール燃料は、前述したように水溶性で不安定な性状を示すため、温度が一定であっても動粘度が常に変動しており、調量弁が同じ開度であっても流量が変化することになる。このことから、燃焼空気量の調整は実際の燃料の流量値より計算して燃焼に必要な空気量を調整している。さらに、燃焼空気ダクトには風量計を設置し、タッチパネル上で空気比を入力することで、燃料の実流量に対しての空気比制御を可能にしている。図2-7に燃焼量が一定のまま空気比の設定値を変更した時の運転中の各トレンドを示す。

図2-8に、加熱軽質タールの燃焼量を変更したときの空気比制御の各トレンドを示す。図より青線で示す燃焼量が設定値となる様に流量制御していることと、緑線でしめす風量も

同時に空気比制御している。これより、不安定な性状の燃料であっても流量に対して燃焼空気量を自動調整し、空気不足にならないように運用できるシステムを構築している。



写真2-2. 重質タールバーナ

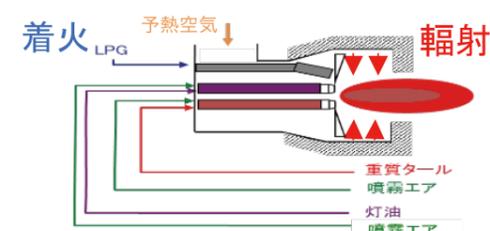


図2-6. 重質タールバーナ構造図

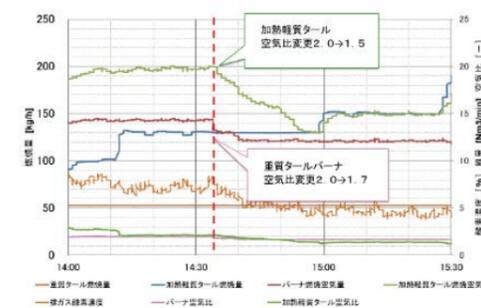


図2-7. 燃焼量が一定の空気比制御

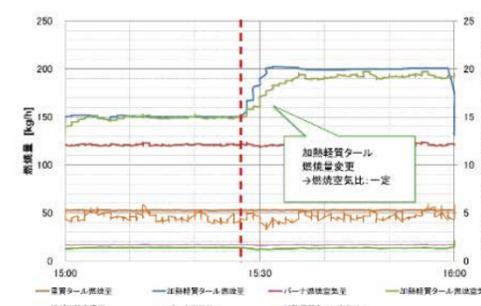


図2-8. 燃焼量, 空気比の同時制御

### 2.4 加熱軽質タールバーナ

写真2-3に示す加熱軽質タールバーナは、重質タールバーナと同様に圧縮空気を噴霧媒体とする2流体ノズルを使用し、炉内で燃焼している重質タールの火炎に加熱軽質タールを噴霧して燃焼させるバーナである。そして、本バーナは、図2-9に示す構造をしており、噴霧した加熱軽質タールは燃焼炉内で燃焼している重質タールの火炎とキヤスタブルからの輻射熱をうけることにより燃焼を安定させている。ところで、加熱軽質タールの噴霧ノズルは、写真2-4に示すような二重構造とし、内側を加熱した80℃の加熱軽質タールが、外側を常温の噴霧用圧縮空気が流れる構造としている。従来のタール燃焼ノズルを使用すると、噴霧用圧縮空気により加熱軽質タールが冷やされてすぐに固着してしまう現象が起きている。



写真2-3. 加熱軽質タールノズル



写真2-4. 加熱軽質タールノズル(従来品)

そこで、加熱軽質タールノズルの改善案として、写真2-5に示すように液体燃料が流れる経路と噴霧エアが流れる経路とを分離して、加熱軽質タールが冷却されない特殊ノズルに変更している。また、加熱軽質タールを使用していないときにノズル先端のタール残渣が高温な炉内の輻射熱を受けて固着し詰まりが発生した経緯があるため、ノズル全長を短くし、図2-9に示すように予熱空気でノズル先端部を冷却できる構造に変更している。そして、このノズルは、動粘度が高い液体や、異物が混入している液体、液体温度が低下すると固着するような今回の加熱軽質タールなどの燃料を噴霧するときには極めて詰まり難い構造になっている。なお、本加熱軽質タールバーナは、季節変化による木質燃料の含水量が増減し、加熱軽質タールの生成量が大きく変動しても、連続で安定して燃焼することができるバーナが求められる。

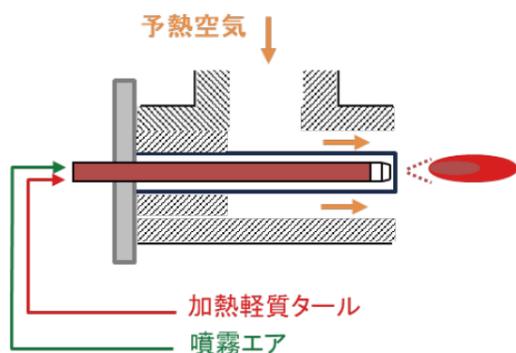


図2-9. 加熱軽質タールノズル構造図



写真2-5. 加熱軽質タールノズル(特殊品)

### 3. タール燃焼装置の運転

ここでは、発電設備の定格出力運転中におけるタール燃焼装置の2つの事例であるRUN1、RUN2とを比較する。その時の比較運転データとしてRUN1を図3-1に、RUN2を図3-2に示す。タール燃焼装置の運用は、年間を通じての加熱軽質タールと重質タールの発生量を日々管理し、それぞれのバーナの出力バランスを任意に変更して管理している。しかしながら、季節変動や運転状況により加熱軽質タールは大量に発生する場合があります、表3-1に示すように低位発熱量が基準値(低位発熱量21,100kJ/kg)に到達しない状況で噴霧する運転の頻度が高くなることは否めない。

図3-1より、RUN1の運転では、重質タール燃焼量が85kg/h、加熱軽質タール燃焼量が200kg/hで運用している。この時、炉内温度を制御する清水噴霧量は0L/hで燃焼炉内温度を800℃以上で運用している。この運用に対して、図3-2に示すRUN2の運転では、重質タール燃焼量が50kg/h、加熱軽質タール燃焼量が300kg/hで、炉内温度が850℃となる様に清水噴霧量を200~300L/hの範囲で噴霧し制御しているのがわかる。RUN1よりもRUN2の方が加熱軽質タール中の水分量が少ないことから、このときの加熱軽質タールの濃縮度合いに差があり、低位発熱量も大きく異なっている状況での運用である。

以上のように、本タール燃焼装置は、重質タールや加熱軽質タールの物性値が大きく変動しても臨機応変に対処可能な機器や制御方式で構成している。そして、加熱軽質タールを安定して炉内で噴霧させることで、無害化に必要となる炉内温度を継続的に維持することが可能である。さらに、本タール燃焼装置に搭載しているバーナには、燃料の燃焼量からフィードバックを行い必要となる燃焼空気量を自動調整する制御システムを導入している。このことから、空気比を任意に設定するのみで燃焼空気量を精度良く調整でき、しかも、燃料の物性値が変化することによって燃焼量が大きく変動しても燃焼空気量の調整を自動で行うことができる。

加えて、これらの自動制御システムは、排気煙道の酸素濃度が基準値の4%前後に収まるように中央操作室で監視しながら燃焼空気比の設定を変更することが随時できることから、急激にマテリアルバランスが変化して酸素不足に至った時でも瞬時に対応することが可能である。

表3-1. 加熱軽質タール物性値

運転データ	日時	燃焼量	水分率	低位発熱量
RUN 1	2018/04/12 21:50	200 kg/h	74.0 wt%	8,371 kJ/kg
RUN 2	2018/12/12 16:00	300 kg/h	54.4 wt%	12,138 kJ/kg

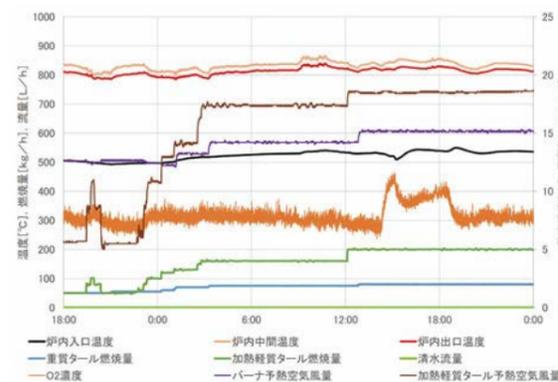


図3-1. 運転データRUN1

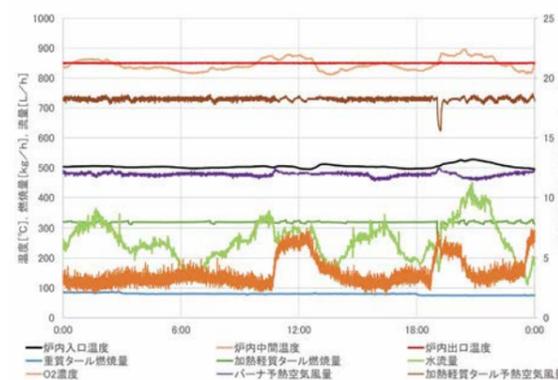


図3-2. 運転データRUN2

### 4 まとめ

日工で開発した本タール燃焼装置により、木質バイオマス発電設備内で発生する重質タールと加熱軽質タールを化石燃料の代替燃料として有効利用することを可能にした。これまで、バイオマス発電ではタールを成分とする副産物が多く発生することで、これらの廃棄処理費用の問題やタールを含む蒸気からの臭気問題などが運用上の問題となり、従来の最大出力能力を下げた運用することもあったが、本開発したタール燃焼装置を用いることで、これらの問題が解決し、定格出力を維持しつつ年間を通しての安定した運用が可能になった。

そして、本装置を設計する上でキーポイントとなるのは、

- ・フラッシュ蒸気の導入位置
- ・加熱軽質タール特殊ノズル
- ・加熱軽質タールの燃焼する基準熱量
- ・生成ガスの自立燃焼する条件

以上の4点である。本開発においてシミュレーションソフトで

燃焼炉内のノズル導入位置と形状を最適化することができたため、タール燃焼装置の排ガス無害化処理性能を発揮し、現在も問題なく稼働している。

本装置で開発したバーナは、弊社のバイオマスバーナの技術を基盤に予熱空気使用、燃焼空気量の自動制御を導入したバーナである。これらの技術は、今後もバイオマス発電設備内のバーナやアスファルトプラント用のバーナとしても幅広く製品展開できると考えている。

### References

1. 前田道路(株) 傳田喜八郎/日工(株)今田雄司:アスファルトプラント用ガス・バイオマス燃料混焼バーナの開発, 日本工業出版, 建設機械2017年1月号, 技術資料, p.10 (2017).
2. 社団法人 日本エネルギー学会:バイオマスハンドブック 第2版, オーム社, (2009).
3. 社団法人 化学工学会, 日本エネルギー学会:バイオマスプロセスハンドブック, オーム社, (2012).
4. 化学工学会編:化学工学便覧 第7版, 丸善出版, (2012).

### 筆者紹介



KONTA Yuji  
今田 雄司  
2002年入社  
開発部 開発1課



KITANO Yuuki  
北野 裕樹  
2015年入社  
開発部 開発1課