

## 農作物残渣の燃料化と燃焼に関する研究

上出 光志, 山越 幸康, 藤澤 拓己, 北口 敏弘\*

### Study on Thermal Recycle of Biomass of Agricultural Residues

Mitsushi KAMIDE, Yukiyasu YAMAKOSHI  
Takumi FUJISAWA, Toshihiro KITAGUCHI

#### 抄 録

エネルギー資源の多様化, 地域エネルギーの開発のためには, 未利用の農作物残渣など低品位バイオマスのサーマルリサイクルが重要である。しかし, 農作物残渣の燃料化は十分に試みられておらず, その燃料特性も明らかにされていない。本研究では, 道内農作物残渣燃料の成型性と燃焼性を調べ, その燃料に適応した燃焼機を開発した。クリンカーが発生しても燃焼を継続できる出力300kWの燃焼バーナを開発し, 農作物残渣ペレットは燃料として全く問題なく利用できることが明らかになった。

**キーワード** : 農作物残渣, 低品位バイオマス, クリンカー, 燃焼機, ペレット

#### Abstract

For a diversification of energy resource and a development of regional energy, thermal recycle of the low quality biomass as unutilized agricultural residues is important. Nevertheless, the briquetting of a solid fuel from agricultural residues is not done fully in Japan, and the fuel characteristics are not clear. In this study, the briquetability and the fuel characteristic of them were made clear, and the biomass burner was developed which fitted these fuel. As a result, the developed middle scale biomass burner of output power 300kW can be continued burning even if clinker breeds and it was proved that the agricultural residue pellet could utilize as fuel without problems at all.

**KEY-WORDS** : agricultural residues, biomass fuel, low quality biomass, clinker, burner, hot water supply system

#### 1. はじめに

道内のエネルギーを取り巻く環境は電力の固定価格買取制度 (FIT) の施行以降変化しつつあり, 風力, 太陽光, 木質バイオマス, バイオガスなどの再生可能エネルギーの導入量は年々増大している。一方, 将来にわたる国内のエネルギーの安定供給のために, エネルギー源の多様化等が模索されている。道内でも, 森林資源, 農水産業残渣, 廃棄物などを活用した地域エネルギーの地産地消の取組が増加しており, 経済活性化, 新産業創出などを目的とした地域エネルギービジョン実現について, 道総研に対して自治体からの支援要望が増えてきている。

このような背景の中で, 本研究では, 森林資源に乏しい農業地域で排出される未利用残渣の燃料利用に着目した。具体的には, 芽室町で農作物残渣及びプラスチック系農産廃棄物の混合ペレット燃料を製造するとともに, その燃料特性を把握した。さらにこれらペレット燃料の基礎的な燃焼試験により農作物残渣ペレットの燃焼特性を明らかにし, 燃焼機・ボイラ及び熱供給システムを開発した。

また, 自治体が主導する地域エネルギー開発では, 地域特性を活かした燃料開発が試みられているが, その政策実現には, 地域特性・実情に適合した社会実装のための技術開発が重要である。このため, 地元機関との連携強化を図りながら実施した事業化支援例についても報告する。

\* 道総研本部, \* Hokkaido Research Organization Center Department

事業名: 受託研究

課題名: 農作物残渣等を燃料とする農業ハウス用自動燃焼ボイラーの開発

農業用廃プラスチックの再利用に関する研究

農作物残渣を生産現場で利用するためのペレット化技術の開発

## 2. 道内農作物残渣ペレットの製造

### 2.1 道内農作物残渣ペレットの基礎特性

#### 2.1.1 各種試験の概要

各種農作物残渣は、排出時に高高くエネルギー密度が低い  
ため燃料として使用するためには、ペレット化し、エネルギー  
密度を増加させることが必要である。農作物残渣のペレット  
化及び燃料利用に必要な次の条件(①~④)を調べるため、  
農作物残渣の性状分析(工業分析、発熱量など)、ペレット  
製造試験及び燃焼試験を行った。

- ①連続成型を可能とする原料の水分値、ペレタイザーの温度。
- ②ペレット化に必要なエネルギーの推計(乾燥、粉碎、成型  
のための消費電力)。
- ③ペレットの密度、強度など。
- ④ペレットストーブを用いた燃焼実験でのクリンカー(灰分  
が高温で熔融し固化した物質)発生状況、排ガス、燃焼温  
度など。

農作物残渣として、北海道大学研究農場で栽培されている  
道内主要作物の残渣、訓子府町、新ひだか町、平取町、南幌  
町で排出されている地域性の強い作物の残渣(各地の主要農  
作物の残渣)を用いた。

すべての原料は乾燥後5mm目のスクリーンを通過するサ  
イズに粉碎後、フラットダイ型(穴径6mm)のペレタイザー  
で成型し、木質ペレットストーブで燃焼試験を行った。

#### 2.1.2 道内農作物残渣の性状

表1に、道内農作物残渣の工業分析値(ドライベース)と  
総発熱量を示す。桑の枝とそば殻は木質バイオマス(引用値)  
と近い値であった。他の農作物残渣はいずれも灰分が高く、  
それに対応して発熱量が低いことが共通の特徴であった。

図1に、農作物残渣中の灰分を示す。土砂成分であるケイ  
素、肥料成分であるカリウム、カルシウムなどが含まれてい  
る。これらは圃場からの回収時に混入した土砂に由来する成  
分と推定される。この結果は、高品質な燃料を得るためには  
農作物残渣を粉碎後、篩などを用いて土砂除去が必要である  
ことを示唆している。

#### 2.1.3 ペレットの製造試験

ペレットの製造には、適正な温度と水分が重要である。前  
項の原料を用いてペレットを製造した結果、ほとんどの原料  
で水分を10%程度に調製することにより、ペレットが比較的  
容易に製造可能であることがわかった。図2に、トマト茎葉  
を原料としてペレットを成型した時のフラットダイの温度変  
化を示す。フラットダイの温度上昇に伴い、ペレットの製造  
は安定し、30~40℃で連続的に生産することができた。他の

農作物残渣についても、ほぼ同様な傾向が得られた。

表1 道内農作物残渣の工業分析値

	工業分析結果(DB%)			高発熱量 MJ/kg
	灰分	揮発分	固定炭素分	
木質(引用値)	0.3	82.7	17.0	20.1
ミニトマト茎葉(新ひだか)	14.7	70.2	15.1	14.3
玉ねぎ鬼皮(訓子府)	27.5	63.3	9.2	13.1
豆殻(訓子府)	5.4	77.2	17.4	16.7
そば殻(訓子府)	2.0	77.4	20.6	19.1
稲わら(南幌)	11.6	65.0	23.4	16.5
トマト茎葉(平取)	15.8	70.0	14.2	14.4
稲わら(北大)	11.1	74.3	14.6	16.2
豆殻(北大)	16.6	71.2	12.2	16.4
トマト茎葉(北大)	15.8	68.5	15.7	14.4
桑の枝(北大)	2.0	81.2	16.8	17.8
アスパラ茎葉(北大)	5.4	75.4	19.2	18.6
アスパラ根(北大)	23.6	61.2	15.2	15.7
デントコーン茎葉(北大)	7.7	69.9	22.4	17.4
スイートコーン茎葉(北大)	8.9	72.8	18.3	17.0
えん麦わら(北大)	6.9	72.8	20.3	18.5
てん菜茎葉(北大)	17.9	69.7	12.4	15.2

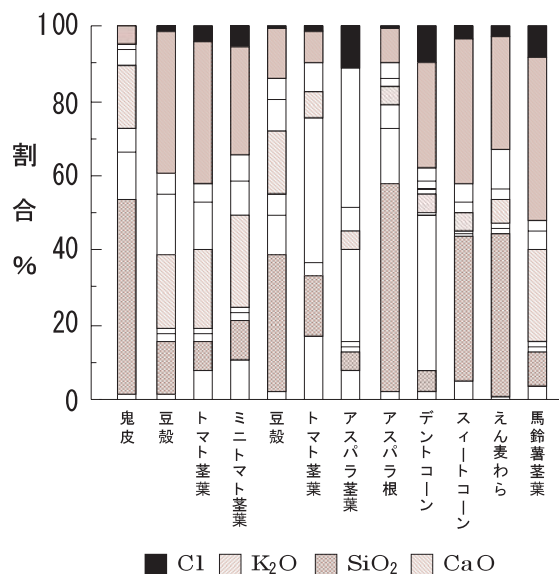


図1 道内農作物残渣中の無機成分

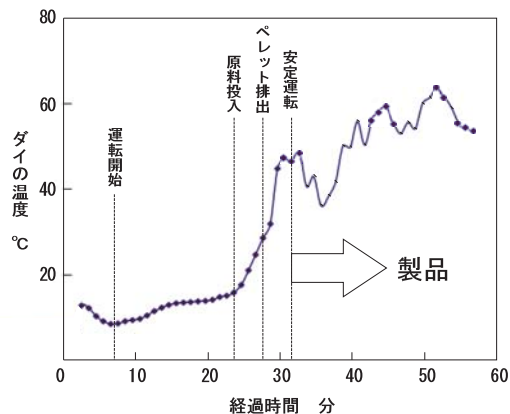


図2 成型時のフラットダイの温度変化

図3に、原料とペレットの密度測定から求めた圧縮率、圧壊強度を示す。鬼皮は圧縮率が17と最も高く、エネルギー密度が高くなることからわかる。一方、ペレットの直径方向の圧壊強度では、木質ペレットと比較し、鬼皮、豆殻（北大）、えん麦わらは低い値になった。ペレット1kgの製造に要した消費電力量推定値は、乾燥53Wh(原料水分40%を10%まで乾燥)、粉碎185Wh、成型544Whであり、成型に要した電力が総計の70%以上を占有した。農作物残渣の場合、圃場での天日乾燥も可能なため乾燥・粉碎に係る消費電力の削減は可能である。今回の試験生産では、ペレット生産に要するエネルギーは生産されたペレットの全エネルギーの15%（最大）であり、製造された燃料のエネルギー量と製造に要したエネルギーの比（EPR：Energy Profit Ratioエネルギー収支比）は6.7と比較的高い値となった。

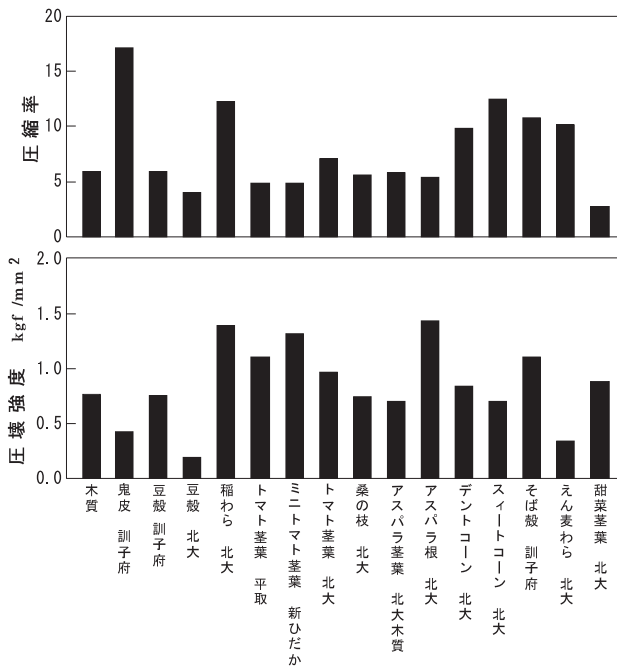


図3 ペレット製造時の圧縮率及び圧壊強度

### 2.1.4 ペレット燃料の基礎燃焼試験

ペレットストーブによる基礎的な燃焼実験では、ほとんどの燃料でクリンカーが発生し、燃焼継続が困難であった。このため、クリンカー障害を排除できる機構を持つ燃焼装置の開発が必要であることがわかった。

### 2.2 農作物残渣ペレットの実証試験規模での製造

農作物残渣バイオマスは、土砂混入などのため灰分が高く、発熱量が低い低品位なバイオマス燃料である<sup>1),2)</sup>。農業残渣の中には、プラスチック系残渣もある。ポリ塩化ビニル系廃プラ（農ビ）は塩素が高濃度に含有するため燃料利用は困難であるのに対し、ポリエチレンなどの廃プラ（農ポリ）は発熱量も高く燃料として利用できる可能性がある。

農ポリに属する長いも育成ネットは、使用後に長いもの茎葉が巻きつき、処理が難しい農業残渣<sup>3),4),5)</sup>として知られている。

農作物残渣バイオマスペレットは、発熱量が低い低品位燃料であるが、農ポリの混合により、着火性の改善、発熱量の向上が見込まれ、高品質な燃料に改質することが可能と考えられる。2.3節及び2.4節では、芽室町をモデル地域として、小豆殻、使用済み長いも育成ネット（以下廃ネットと記述）の燃料化に関する実証的な検討を行った。

### 2.3 農ポリ混合燃料の成型

めむろシニアワークセンターで約20tの農ポリ混合燃料を製造した。表2に、原料性状として水分、灰分、低発熱量を示す。これらはロット毎の分析値であり、収集の仕方、圃場での乾燥度合い、ネットに付着した長いも茎葉の腐熟状況によって大きく変化した。

表2 原料性状

	水分 %	灰分 %	低発熱量 MJ/kg
トドマツ	5.1~12.5	0.08~0.7	16.1~17.5
廃ネット	—	8.8~20.5	36.8~42.3
小豆殻	9.4~16.1	8.1~15.4	12.3~14.9

表3に、木質バイオマスに廃ネットを配合し製造したペレットの物性値を示す。原料はすべて10mmスクリーン通過条件で粉碎し、原料水分を10~20%に調整後、廃ネットを所定の割合混合し、ペレット製造した。なお、単位密度はペレット単体の密度を意味し、機械的耐久性とはペレットの壊れにくさをいい、一定量の機械的衝撃を与えた後に壊れなかった重量の割合である。

表3 廃ネット混合がペレット物性に及ぼす影響

廃ネット混合割合	0%	10%	20%
単位密度 g/cm <sup>3</sup>	1.15	1.14	0.93
かさ密度 kg/L	0.53	0.52	0.42
機械的耐久性 %	95.5	82.2	71.1

廃ネット20%配合では、機械的耐久性は25%低下するが長距離輸送しない限りペレットが崩壊することはないと推測される。一方、単位密度、嵩密度はともに20%程度低下しており、それらに伴いエネルギー密度も低下するため、設備容量（貯蔵タンク、供給装置、燃焼炉）が大型化し、設備費コストが増大する。このため、廃ネットの適正配合量は最大で10%であることがわかった。

実用上では、芽室町の廃ネット年間排出量、ペレット生産規模(1000t/年)から廃ネット5%配合が適正值と判断される。表4に、廃ネット5%配合ペレットの物性値を示す。

表4 廃ネット5%配合ペレットの物性値

	小豆殻	廃ネット	小豆殻+ネット5%	トドマツ+ネット5%
かさ密度 kg/L	0.6	0.4	0.64	0.63
機械的耐久性 %	95.2	88.5	98.2	95.7
発熱量 MJ/kg	14.5	46.34	18.4	19.44

トドマツ、小豆殻等の原料は単体でペレット化しても発熱量に変化はなく、表2の発熱量に等しいものと仮定し、小豆殻のみの燃料と廃ネットを配合した燃料を比較すると、廃ネット混合により発熱量は13%程度向上し、加えて着火性の改善も期待される。

#### 2.4 原料から土砂除去の方法

土砂が混入した農作物残渣等から製造された燃料ではペレット製造機械の摩耗や燃焼時のクリンカーの大量発生などの課題が顕在化している。それが低品位なバイオマスの利活用を妨げている大きな要因である。バイオマスを燃料利用する場合、各工程に大きな経費をかけることは難しいため、簡易で大きな効果を得ることのできる土砂の除去方法を検討した。

##### 2.4.1 廃ネットからの土砂除去

廃ネットに付着している土砂は、茎葉が腐熟したものが主体でネットの撚り目全体に付着している。このため、一旦ネットを粉砕し、篩分けの方法が容易で低コストである。燃料製造の操作段階での廃ネットの灰分は10%程度まで低下していることから、工場の生産ラインに篩分け工程またはスクリーンコンベアによる振動輸送ラインが設備されていれば十分であることが分かった。

##### 2.4.2 農作物残渣からの土砂除去方法

農作物残渣に土砂が付着する原因は、残渣の収集方法、天候、風、栽培方法など様々なことが考えられる。小豆殻では、付着する土砂量は8~30%と大きく変動した。土砂を完全に除去した小豆殻本来の灰分値(2.8%)と比較し、3~5倍の土砂が付着していることがわかった。この土砂量に応じた対応は不可能なため、廃ネットと同様に、篩分け処理を試みた。表5に、原料の粒度10mmスクリーンを通過した農作物残渣粉砕物を目開き1mmのスクリーンで土砂除去した原料の灰分値を示す。すべての農作物残渣の灰分値が約50%減少し、十分な土砂の除去効果が得られた。

表5 篩分けによる農作物残渣からの土砂除去効果

	灰分値 %	
	処理前	処理後
小豆殻	8.1~15.4	4.8~7.7
小豆殻+廃ネット(5%)	8.8~20.5	3.9~7.4
枝、葉、草	21.4	12.2
剪定枝	3.4	1.7

※篩分け後の原料歩留まりはすべて90%程度

以上の結果から、篩分けするだけで土砂を十分に除去できることが確認できた。水洗等の処理により土砂を除去し、クリンカー障害の軽減は可能ではあるが、これ以上の原料コストの増加は事業性の低下に繋がるため、残存土砂のクリンカー対策には、燃焼機の機能性向上で対処することにした。

### 3. 燃焼ボイラ及び熱供給システムの開発

農作物残渣(低品位なバイオマス)ペレット燃料を効率的に燃焼できるボイラを開発した。この種のペレット燃料は木質ペレット燃料と比較し、灰分が多く燃焼性が悪い、発熱量が低い、クリンカーが発生し燃焼を阻害するなど多くの欠点がある。このため、日本国内では出力500kW以下の中小ボイラを用いて農作物残渣を効率的に燃焼し、熱回収できるボイラは皆無である。この規模のボイラでもストーカ式燃焼機による燃焼は可能であるが、燃焼室が大型化し、クリンカーの発生を抑制できないため、効率的な燃焼状態は得られない。ここでは、燃焼機を燃焼バーナ、ボイラを燃焼バーナと熱交換器の複合体に分けて表記することにした。

#### 3.1 燃焼ボイラの設計のコンセプト

農作物残渣燃料は、多くの欠点を持つ極めて低品位なバイオマス燃料ためであるため、固体燃料の中でも特に扱いづらい。このため、燃料としての能力を最大限引き出すことのできる燃焼機構を開発しなければならない。本研究では、ボイラの開発にあたり、下記の項目に開発重点を置いた。

- ・クリンカー障害の防止機能を付帯すること。
- ・85%以上の高い熱効率を有すること。
- ・広範囲な性状の燃料に対応できること。
- ・既存重油ボイラと連携運転できること。
- ・全自動運転できること。
- ・IoT(Internet of Things)活用による集中管理が可能なこと。

#### 3.2 燃焼ボイラの詳細機能

図4に、本研究で開発した低品位バイオマス用燃焼バーナ(炉内径600mm、全長1,600mmの円筒形)を示す。燃焼バーナには一次燃焼用空気(一次空気ファン)、二次燃焼用空気(二次空気ファンと冷却空気ファン)の3基の送風ファンが設置されており、燃焼炉内に旋回流を作るように空気が送入される。バーナ炉内の燃料層を攪拌する耐熱ステンレス鋳鋼製のシャフト、レーキ(パドル)からなる攪拌装置には冷却用空気が送り込まれシャフト、パドル外縁部から吹き出し、攪拌装置全体を冷却するとともに、冷却後は二次空気として利用される。なお、本燃焼バーナの熱出力は300kWである。



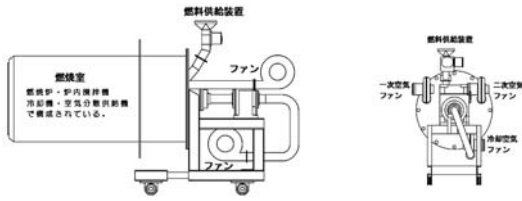


図4 低品位バイオマス用燃焼バーナ

### 3.2.1 燃焼炉内部の攪拌

バイオマスに付着した土砂などは、カリウムなどのアルカリ金属によって溶融点が約700℃まで低下する。溶融したクリンカーは燃料を包み込む、空気孔を塞ぐ、冷却時に炉壁などに固着し、燃焼にとっては大きな障害をもたらす。

図5は、固定床におけるクリンカーの形成過程を示したものである。

燃焼初期にはロストル上で灰が溶融し、一次空気が流通した部分に穴が開いたドーナツ状のクリンカーが形成される(図5a)。さらに燃焼が進行すると空気の流通が困難になり、ペレットの形状を保った大きなクリンカー(図5b)に成長し、燃焼灰の排出が困難となって燃焼が継続できなくなる。これらを防止するため、燃焼時には燃焼層を攪拌してクリンカーの成長を阻害(分割)し、冷却時には溶融したクリンカーが強固に固化する前に排出することが必要である。

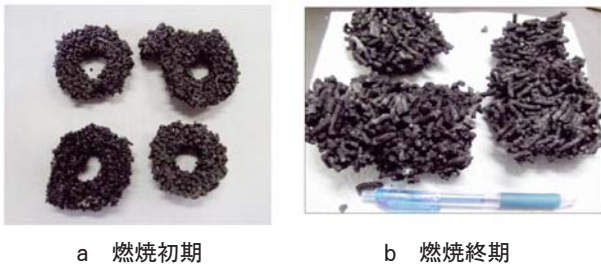


図5 クリンカーの形成(固定床)

本研究では、900℃~1300℃の任意の燃焼温度で、「灰分が多い燃料の効率的な燃焼」、「クリンカーの粘度を低下させ、攪拌動力の省力化、灰の容易な排出」を実現することが可能な燃焼バーナを開発した(図6)。

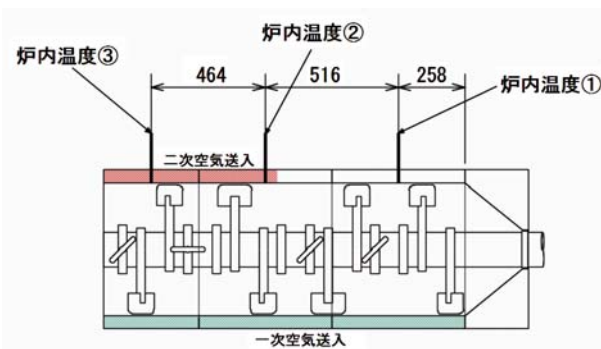


図6 バーナの内部構造と空気の送入方法

バーナには、15個のパドルが取り付けられたレーキが装備されている。このレーキの回転によりクリンカーが破碎され、成長が阻害される。また、燃焼時にレーキの高温腐食を防止するためには、シャフト本体、パドル数カ所から冷却用空気を噴出させている。この方式により冷却空気が燃料層へ拡散され、燃焼が十分に促進される。さらに、バーナ内部の温度は3カ所の熱電対で測定され、温度分布を所定の設定値に保つために、レーキに付属しているパドルで燃料の搬送、滞留、逆送を繰り返し、炉内の燃料層厚さの調整、燃料の滞留時間の調整を行い、燃焼残渣の発生を少なくしている。例を挙げると、灰分の多い燃料は炉内中心部の温度が高くなるように設定し、灰分の少ない燃料は温度分布が一定となるように設定している。

図7に、燃焼層の攪拌によるクリンカーの破碎効果を示す。攪拌速度が速いほどクリンカーの破碎度が増し排出し易くなるが、炉内で燃料の滞留時間が短くなるため、攪拌速度を安易に増すと、燃焼完了前に排出されることがある。今回開発したバーナでは、クリンカーの破碎と燃料の滞留時間を制御し、効果的な燃焼が可能となるように設計した。

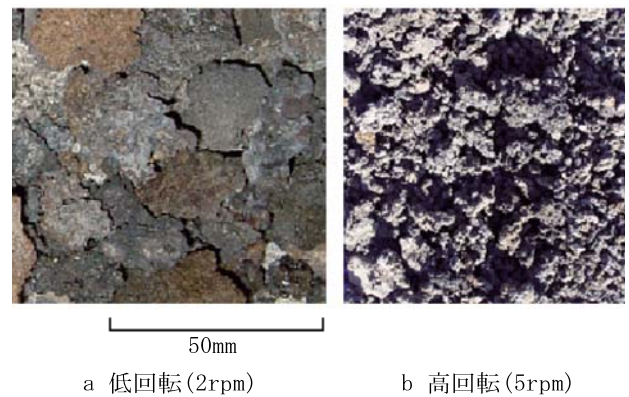


図7 クリンカーの破碎効果

### 3.2.2 熱効率の向上

今回開発したバーナでは、炉内下部から一次空気のみを送入し、上部から二次空気が送入される機構を採用することで燃焼ボイラの熱損失が極力少ない、高い熱効率を得られる制御システムとした(図6参照)。ボイラからの熱損失は未燃残渣の発生(未燃損失)によるもの、ボイラ本体からの放熱、排ガス損失などが考えられ、この中でも未燃損失や燃排ガス損失は熱効率に大きな影響を与える。本燃焼バーナでは、燃焼層内部を攪拌することで未燃損失は1%以下となった。また、送入空気に旋回を与え、空気と可燃性ガスを効率的に混合し、炉内滞留時間を長くすることによって、燃焼効率の向上と燃焼バーナ内で燃焼を完了する設定とした。さらに、基本的な燃焼制御は酸素濃度を基準に空気比を1.5程度で維持する燃焼制御を行い、燃焼に必要な過剰な空気量を極め

で少なく調整した。このため、排ガスが持ち去る熱は少なく炉内温度が高温となり、燃焼層攪拌効果と併せて燃渣損失は大きく減少し、高い熱効率が得られている。

### 3.2.3 広範囲な性状のバイオマス燃料に対応

通常の燃焼機では、燃料種に応じた燃焼機の調整をあらかじめ行うが、本燃焼バーナでは、燃焼温度と酸素濃度を基準に燃焼を制御(燃料供給量, 空気送风量など)するため、どのような性状の燃料でもほぼ一律の方法で燃焼が可能であり、900~1,300℃で燃焼温度を任意に設定できた。高温燃焼の利点は、生成する一酸化炭素量が少なくなり、それに伴い煤煙生成量が少なくなることである。燃焼炉内に燃料が供給された時、燃焼性の悪い燃料では炉内全体の温度は一時的に低下するが、高温であればスムーズな燃焼に移行可能である。

### 3.2.4 そのほかの機能

本ボイラシステムは全自動運転を基本としており、着火・燃焼・消火のためのパラメータはあらかじめプログラミングされているため、使用者は通常運転開始・停止のボタンを押すだけで操作が完了し、ボイラのメンテナンスは熱交換器の清掃のみである。ボイラシステムのシーケンス制御は着火、定常燃焼、停止(消火)と施設への熱供給に大別される。

着火工程は、燃料の性状に大きく影響され、木質燃料のように着火性、燃焼性ともに良好な燃料はスムーズに定常燃焼へ移行できるが、灰分が多く、着火性・燃焼性の悪い燃料の場合、火種を十分に大きく作り徐々に定常燃焼へ移行させる必要がある。水分が多い燃料も同様の手順で着火する必要がある。このような燃料では15段階程度のステップで徐々に火種を大きくする操作を行っている。

定常燃焼に移行後は、温水温度、炉内温度の監視のもと、設定した最適燃焼状態(空気比1.5, 酸素濃度7%)を維持しながら燃焼が継続され、この方法により燃料性状に影響されことなく良好な燃焼を維持することができる。

消火動作は温水温度が設定値(80~85℃)に達したときに始まり燃料供給の停止、燃焼灰の排出で構成され、煙道温度、炉内温度、炉内圧力を監視し、すべてが設定値を下回ったときに停止する。

再着火は、揮発分の爆発的な着火を防止するため、燃焼炉の温度、炉内圧力、煙道温度を参照しながら自動的に判断する。

## 3.3 ボイラの燃焼試験

ボイラの燃焼試験は芽室町の国民宿舎(新嵐山荘)で実施した。燃料は、街路樹、小豆殻、小豆殻に長いも育成ネットを5%配合したペレットを使用した。表6に、これら燃料の性状を示す。本節の燃焼試験では、ボイラの許容燃料範囲を模索するため、表5の燃料の中で、より低品位の燃料である

篩分け処理前の燃料を使用した。

表6 燃料性状(試験製造ペレット)

	水分 %	低発熱量 MJ/kg	灰分 %
小豆殻	12.6	12.3~14.9	8.1~15.4
小豆殻+ネット	14.7	13.1~14.5	8.8~20.5
街路樹	8.3	16.1~17.9	0.08~0.73
木質ペレット(参考値)	~10	16.5~	~0.5

これらの燃料による燃焼試験の結果を図8に示す。燃焼炉内の温度履歴が示すように、着火後およそ3時間で定常燃焼に移行することが確認された。燃焼初期の炉奥(図6の炉内温度①)、炉中央(同②)、炉出口(同③)温度については、炉奥は着火地点であるためいち早く温度が上昇し、炉中央、炉出口の順に温度が上昇する。炉出口では可燃物はほとんど存在しておらず温度は低くなるはずであるが炉中央の発生熱により温度が上昇している。燃焼が定常状態に制御されている場合には炉中央の温度が高く、炉奥、炉出口の温度はともに低くなる。このように3.2.1項で説明したようにボイラは最適燃焼状態に制御されているのがわかる。

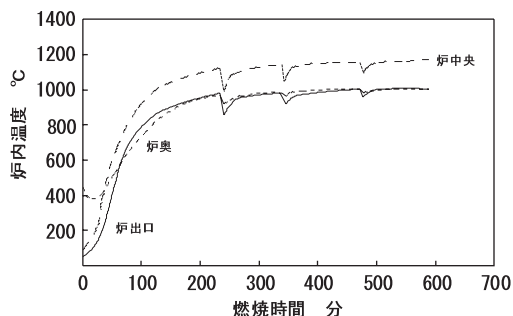


図8 燃焼炉内の温度履歴

表7に、排ガス組成の一例を示す。一酸化炭素濃度は50ppm以下と極めて低い値を示し、他の成分についてもすべて大気汚染防止法の基準値以内であった。熱供給装置でのダイオキシンの規制値はないものの、今回開発した燃焼炉のサイズでは小型焼却炉の排出基準値(5.0 ng-TEQ/m<sup>3</sup>N以下)を超えないように運転することが求められている。今回、小豆殻を燃料とした場合のダイオキシン排出量は0.14 ng-TEQ/m<sup>3</sup>Nと極めて低い値であった。

表7 排ガス組成

	基準値	測定値
一酸化炭素	なし	50ppm以下
窒素酸化物	350ppm	103~134ppm
硫酸酸化物	0.864m <sup>3</sup> N/h	0.0072m <sup>3</sup> N/h
ダイオキシン	5.0ng-TEQ/m <sup>3</sup> N	0.14ng-TEQ/m <sup>3</sup> N

※酸素濃度12%換算値、空気比1.5

表8に、ボイラ性能指標の一つである熱効率を示す。ボイラの熱効率は灰分含有量に影響されることなく85%以上の高値を示した。また、排出される灰分にはクリンカーの存在は認められるが、未燃分はほとんど含まれないことから、ほぼ完全に燃料が燃焼したことを示している。

表8 ボイラの熱効率

	炉内温度℃ (炉中央)	熱効率%
小豆殻	900~1000	85.0
小豆殻+ネット	950~1050	84.9
街路樹	1050~1150	90.8

バイオマスを燃焼した後に生じる燃焼灰は産業廃棄物として処理しなければならない。燃焼灰1kgあたりの処理料金は25円程度であるため、10%灰分の燃料を1t燃焼したときには2,500円程度の灰処理料金が必要となる。この処理料金を軽減するため、燃焼灰の有効利用方法を検討した。表9に、小豆殻燃焼灰から溶出した重金属類の分析値を示す。燃焼灰からの、カドミウム、セレン、鉛、ヒ素の溶出は検出されなかった。

表9 燃焼灰の溶出試験結果

	溶出量基準値 mg/L	燃焼1	燃焼2
カドミウム	0.01	ND	ND
セレン	0.01	ND	ND
鉛	0.01	ND	ND
ヒ素	0.01	ND	ND

その他の有害物質として六価クロムがあるが、その濃度は76ppmという高濃度となった。このボイラの燃焼関連部品にはステンレス鋼を使用している。この部品は1,000℃以上の酸化雰囲気での長時間暴露による高温酸化腐食のため攪拌レーキのパドル部分がやせており、部品から脱落した材料が混入し、六価クロム濃度が増大している可能性が高い。図9に、六価クロムを含む燃焼灰を土砂で希釈し三価に還元処理した結果を示す。10%希釈では六価クロム濃度は約30日で肥料取締法基準値(1.5ppm)以下になった。

一方、部品材料の検討では、高温酸化腐食に耐性の高い材料での燃焼実験を行っている。その結果、燃焼灰中の六価クロム濃度は20ppmとなり大きな効果が得られた。以上の結果から、燃焼灰の利用方法として融雪促進剤としての応用が期待される。

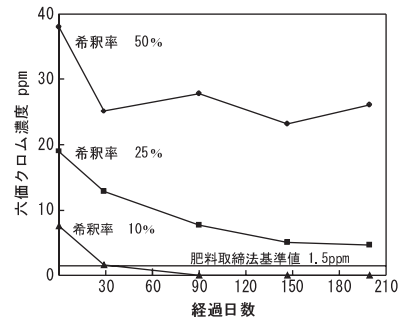


図9 六価クロムの還元処理結果

### 3.4 熱供給システムの開発及び実証試験

芽室町の国民宿舎において、熱供給システムの開発、ボイラ運転制御プログラムの開発、ボイラ構成部品の寿命判定を行った。図10に、本研究で開発したボイラ給湯システム概要図を示す。本システムは国民宿舎の給湯・暖房システムへ接続され、既存の重油ボイラは本バイオマスボイラのバックアップ熱源として稼働するようにプログラミングした。システム全体の保有水量は約25tで、貯湯タンクを通して既存のラインに熱を供給する方式であり、この保有水が急激な熱需要に対応するバッファとして機能を果たしている。また、バイオマスボイラの運転範囲は宿泊施設への供給温水温度が60℃であるが、実際には温水70℃でボイラの運転開始、85℃で運転停止を繰り返している。

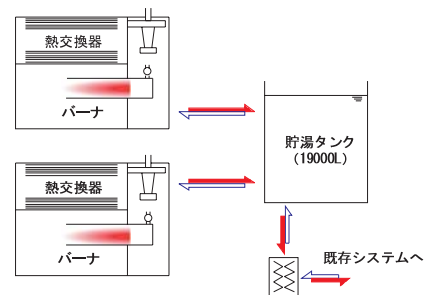


図10 バイオマスボイラ給湯システム

これまでの実証試験では、朝の起床時、風呂の清掃時、炊事場の作業開始時、昼食時間帯(スキー客の出入りが激しい)の熱消費量が多く、夜間は比較的熱需要が低いことがわかった。通常はバイオマスボイラ2台で運用しているが、熱量が不足する状態(貯湯槽温水温度が65~70℃)になると自動的に重油ボイラが稼働し、貯湯槽から施設への熱移動が遮断され、バイオマスボイラは貯湯槽の加温に専念する。貯湯槽温度が設定値に達したら重油ボイラが停止し、貯湯槽から施設への熱供給を開始する。このボイラ運転システムは実証試験を通して、制御プログラムの誤動作対策、燃焼制御の高度化、ボイラ部品の改良、ボイラの遠隔集中管理(IoT化)に取り組んでいる。(図11はボイラとその燃焼状態)。





図11 開発したボイラと燃焼状態

#### 4. まとめ

道内農作物残渣の燃料化と燃焼技術を検討した結果、ペレット製造、燃焼バーナ、社会実装に関して、次の知見が得られた。

##### 4.1 ペレット製造

農作物残渣はいずれの原料でも水分値が約10%で良好な成型性を示し、ペレット化することができた。また、製造したペレットは地域内の輸送にも耐える強度を持つことがわかった。付着土砂の除去については篩分けで50%以上軽減できる方法を見出した。農作物残渣に廃ネットを混合し、ペレットを製造する際には、その混合量は10%が限度であり、それ以上の混合では成型性が悪くなりエネルギー密度が著しく低下することが明らかになった。

##### 4.2 燃焼バーナ

燃焼バーナ開発では、灰分量が0～30%程度までのバイオマス燃料を効率的に燃焼することが達成でき、クリンカーの発生に対しても、破碎しながら排出する機構を設備し、全く問題なく燃焼を継続できた。熱効率はいずれの燃料でも85～90%であった。この燃焼バーナを採用した加温システムは、始動・停止の2つのボタンで運転可能な全自動である。また、将来の普及を見越して、IoTを活用したweb上での一括集中管理方式のプログラム開発を進めている。

##### 4.3 社会実装に向けた取り組み<sup>6)-7)</sup>

芽室町を舞台にした、農作物残渣など低品位なバイオマス資源を基軸とした地域循環型社会構築に向けて、燃料の将来的な需給、事業性を考慮した仕組み作りを行い、平成32年度には事業の開始が見込まれている。

さらに、地域活性化のため外部からの技術導入を極力避け、十勝地域既存の技術の活用と開発力の向上を目指し、“十勝発信の技術(all十勝)”を掲げて地場産業として定着を図り、地域の新規産業の起業、地域の活性化を図っている。

#### 謝辞

本研究を進めるにあたり、多大なる御指導・御助言・御協力を賜りました、北海道大学工学研究院の山形定助教、北海道大学北方生物圏フィールド科学センターの荒木肇教授、(株)武田鉄工所・(株)NERCの職員の皆様、林産試験場、十勝農業試験場、環境科学研究センターの皆様に、また、ペレット製造、燃焼バーナ開発、実証試験のフィールドを提供していただいた芽室町役場、めむろシニアワークセンター、JAめむろには、衷心より御礼申し上げます。最後に、本研究を強く支持してくださいました(株)NERC代表取締役(故人)竹腰和夫氏のご冥福をお祈り申し上げます。

#### 引用文献

- 1) 上出光志ほか、『農作物残渣等を燃料とする農業ハウス用自動燃焼ボイラーの開発』、JST地域ニーズ即応研究報告書、2010
- 2) 山形定ほか、『農作物残渣を生産現場で利用するためのペレット化技術の開発』、ノーステック報告書、2008
- 3) 芽室町、『芽室町地域新エネルギービジョン』報告書、2008
- 4) 芽室町、『芽室町の公共施設を活用したバイオマス資源の町内循環推進事業』報告書、2010
- 5) 芽室町、『地域に賦存する畑作関連バイオマス由来のペレットボイラーの開発』報告書、2010
- 6) 上出光志ほか、『農業用廃プラスチックの再利用に関する研究』、循環税報告書、2014
- 7) 上出光志ほか、『農業用廃プラスチックの地域内資源循環システムの社会実装に係る研究』、循環税中間報告書、2016