

# 農業残渣の燃料利用の飛躍的普及のための半炭化技術の開発

北海道大学大学院工学研究院環境創生工学専攻  
教授 石井一英、助教 佐藤昌宏、特任助教 落合 知

## 1. 研究背景と目的

温室効果ガス排出量削減のために再生可能エネルギーによる発電は順調に進んでいるが、熱の再生エネルギー化が進まない。特に北海道をはじめとする北日本地域では、冬期暖房のための化石燃料の再生可能エネルギーへの代替を強く推進する必要がある。農業地域では、稲わら、トウモロコシ茎などの農業残渣（農作物非食用部）は全国で年間 448 万トン発生しており、鋤込みを除く利用率は未だ 32%と低い（農林水産省食料産業局データ）。またダイオキシン類発生が理由で野焼きが禁止されて以降、主流である鋤込みは、有機成分を農地に還元するという重要な役割がある反面、土壌内で分解することにより、メタンガスや亜酸化窒素の温室効果ガス発生の原因ともなる（例えば、(財)日本農業研究所調べなど）。このような背景から温室効果ガス排出量削減と東日本大震災での反省を活かし、農業残渣の地域燃料利用の検討が各地で行われ始めた。しかし実際には、図 1-1 に示すように、①収集・輸送・保管コスト（低密度で存在、秋に集中発生）、②乾燥工程（高い含水率）や③破碎工程（破碎性悪い）でのエネルギー消費、④燃料品質（発熱量低い）の 4 つの課題が存在するため、収集から燃料利用までのサプライチェーンの構築や普及が困難である。



図 1-1 稲わらなどバイオマス燃料普及の課題と半炭化による課題解決の可能性

そこで研究者らは、日本で始めて稲わらペレットの事業化を実施した北海道南幌町を対象に、稲わらペレットの製造試験、稲わらペレットの燃料性状や燃焼試験、木質

と稲わら混合ペレットの製造と燃焼試験、サプライチェーン全体のコスト解析などの研究を行ってきた。その中で、先にも示した①から④の4つの課題を解決することが重要であることを明らかにしてきた。そして、4つの課題を同時に解決しうる半炭化技術に着目した。

本研究で対象とする半炭化は、通常の600℃程度の炭化プロセスとは異なり、200℃～300℃でほどほどに炭化する技術であり、脱水ができ、理想的にはほとんどの炭素が残り、重量が半減してエネルギー密度が増加する。かつ、破碎性や疎水性が高まることから、かさ密度が減少し、吸水性も小さくなるので、輸送・保管に有利となる。世界的には、欧米諸国間で流通している木質ペレットの長距離輸送を効率化するための半炭化技術は今、大きな注目を集めている一方、農業残渣の半炭化の研究はまだ始まったばかりである。そして研究開発上の将来目指すべきポイントは、半炭化にエネルギーが必要であることから、廃熱を利用する、低い半炭化温度の設定など省エネ型の半炭化技術の確立である。その初期段階の本研究では、多様な農業残渣を対象とした半炭化実験を行い、以下のa)～d)を明らかにし、全体エネルギーバランスを考慮した上で、農業残渣ごとの最適な半炭化条件を明らかにする。

- a) 半炭化条件（温度、時間）と半炭化物の性状の関係
- b) 半炭化物の保管時の含水率等性状の変化
- c) 半炭化物から製造したペレット（半炭化ペレット）燃料特性
- d) 半炭化ペレットの燃焼特性と灰およびクリンカ生成特性

## 2. 様々な農業残渣の半炭化特性に関する研究

### 2.1 対象とする農業残渣

本実験において使用する対象農業残渣とその特徴を表2-1に示す。各農業残渣の入手にあたり、北海道南幌町さんにご協力いただいた。

表2-1 対象の農業残渣とその特徴

農業残渣	発生季節	特徴	南幌町の作付け面積(ha)
稲わら	秋	・既に運用されている	2,222
籾殻	秋	・灰分が高い ・初期粒径が5～10mm	
とうもろこし (葉)	夏	・含水率が高い	44
とうもろこし (根本)	夏	・含水率が極めて高い ・乾燥しにくい	
スイカ(茎)	夏	・乾燥すると非常に固い	6



## 2. 2 実験方法

### 2. 2. 1 半炭化の方法

半炭化リアクターの形状と寸法を図 2-1 に示す。リアクターの深さ 20cm の位置に網を張り、その上に農業残渣を 50~100g 入れ、ふた・栓をしっかりとしめる。ボンベを用いチューブを通して窒素をリアクター内に注入し、排ガスは水を通し外に排出される。リアクターを乾燥器「FS-605」(ADVANTEC 製) に入れ、窒素を流入させながら乾燥器を加熱、リアクター内を処理温度まで昇温させたのち一定時間処理温度を維持し、その後室温にて冷却した。

半炭化の後、重量を量り、半炭化物を破砕機で破砕し、3mm メッシュが通るまで破砕した。

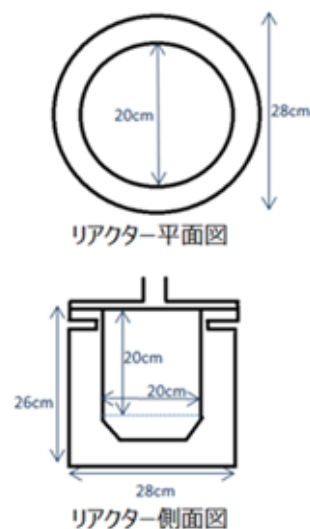


図 2-1 半炭化リアクター

### 2. 2. 2 半炭化の温度条件

半炭化の温度条件は 190℃、220℃、250℃、280℃とした。時間は 0 分、60 分とした。ただし、温度は半炭化時のリアクター内の最大到達温度であり、時間はその温度での継続時間である。なお、対象農業残渣のうち、とうもろこしの葉と根本は試料不足のため時間条件 0 分の半炭化実験は行うことができなかった。また、半炭化時のリアクター内の温度変化を図 2-2 に示す。所定の温度には約 3 時間を要する。

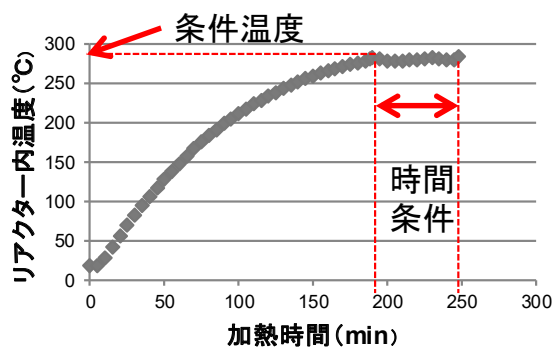


図 2-2 リアクター内の温度変化  
(280℃60 分の場合)

### 2. 2. 3 分析項目

#### (1) 含水率

JIS Z 7302-3<sup>1)</sup> に準拠し、蒸発皿の質量とそれに試料を約 1g 入れたときの質量を 1mg の桁まで測定する。それをあらかじめ 105±2℃に調整した乾燥装置内で 1 時間乾燥させ、デシケーター内で 10 分程度放熱させたのち蒸発皿と半炭化物の質量を 1mg の桁まで測定し、乾燥前後の重量差より含水率を求めた。なお、試料 1 条件につき 3 回の測定を行った。

## (2) 灰分

JIS Z 7302-4<sup>2)</sup>に準拠し、絶乾試料約 1 g をあらかじめ恒量にしてあるるつぼに 0.1 mg の桁まではかりとった。室温状態の電子炉の均熱帯にるつぼを挿入し、るつぼにふたをした。電子炉に通電し約 60 分かけて 500℃まで昇温し、その後 30 分かけて 815℃まで昇温して、815±10℃で 1 時間保持した。灰化が終了したらるつぼを取り出し、室温の金属板の上で約 10 分間、次にデシケータ内で 10～15 分間放冷した。放冷後、デシケータから取り出してただちに質量を 0.1 mg の桁まではかり、灰の質量を求め、灰化前後の重量差より灰分を求めた。なお、測定は 1 条件につき 3 回とし、絶乾試料重量に対する絶乾灰分重量の割合を灰分(%)とした。

## (3) 半炭化による損失重量

半炭化前と半炭化後の稲わらの重量を測定し、半炭化による重量変化を測定した。

## (4) 高位発熱量

JIS M 8814<sup>3)</sup>に準拠し、自動ポンプ熱量計 (IKA 製 C7000) を用いて半炭化物の高位発熱量を測定した。1 回の発熱量測定で、約 0.5g の粉末状の半炭化物を秤量して供試し、試料 1 条件につき 4 回の測定を行った。

## (5) 水素含有量及び低位発熱量

全自動元素分析装置 (elementar 製 varioELIII) を用いて、半炭化物中の水素の含有率を定量した。測定は試料 1 条件につき 4 回行った。そして、水素含有率と含水率と高位発熱量を用いて(1)式より低位発熱量を算出した。

$$\text{LHV} = \text{HHV} - r \times (\text{U} + 9 \times \text{H}) \quad (1)$$

LHV: 低位発熱量 (kJ)、HHV: 高位発熱量 (kJ)、r: 蒸発潜熱 (2.5kJ)、U: 含水率 (%)、H: 水素含有率 (%)

## (6) 熱量残存率

乾燥稲わらの低位発熱量に対する各半炭化物の低位発熱量の割合を熱量残存率として算出した。

## (7) 粒径分布

稲わらの破砕の程度を知るために粒径を測定した。方法は、メッシュの大きさがそれぞれ 5.6 mm、2.0 mm、1.0 mm、0.5 mm、0.25 mm、0.125 mm、0.075 mm の試験用ふるいの質量をはかり、メッシュが細かいふるいが下になるように重ねた。半炭

化物約 20 g を最上段のふるいに入れ、ふるいにふたをした後、手で 5 分ほど振った。各ふるいとふるいに残っている半炭化物の質量を量り、半炭化物が残っていないふるいは取り除き、ふるいを重ね再び 5 分ほど振った。各ふるいとふるいに残っている半炭化物の質量を量り、質量が変わらなかったものを取り除いた。全てのふるいと半炭化物の質量が同じになるまで同じ動作を繰り返し、粒径分布を求めた。

## 2. 3 実験結果と考察

### 2. 3. 1 三成分

図 2-3 に稲わらを対象とした場合の三成分の分析結果を示す。なお、半炭化の際に失われた水分及び揮発分の量も合わせて 100%として示している。半炭化の温度が上昇する、さらに半炭化時間が増加するほど、揮発分が揮発して減少していることがわかる。植物の主要構成成分であるヘミセルロースとセルロースの熱分解が始まる温度はそれぞれ 180℃、240℃と言われているため、本実験では主にこの二成分が熱分解していると考えられる。

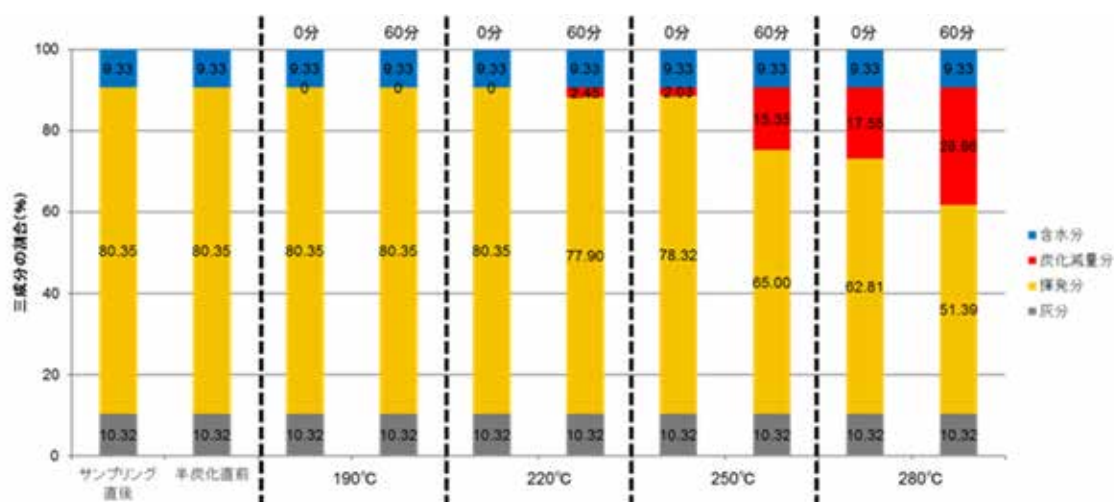


図 2-3 稲わらの半炭化物の三成分分析結果

同様に、籾殻、とうもろこし（葉）、スイカ（茎）の結果を図 2-4～図 2-6 に示す。籾殻は、稲わらと比べて灰分が多いが、半炭化による揮発分の減少傾向は同程度であった。とうもろこし（葉）は原料の水分量が多いのが特徴であり、半炭化することによる水分蒸発と揮発分の減少が燃料の質向上につながると考えられる。スイカ（茎）についても、半炭化上昇及び時間の増加とともに、揮発分の減少が見られた。

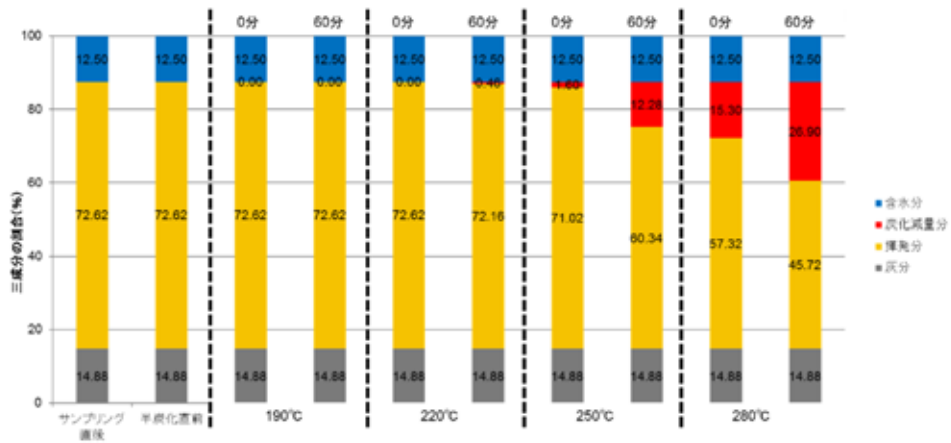


図 2-4 粃殻の半炭化物の三成分分析結果

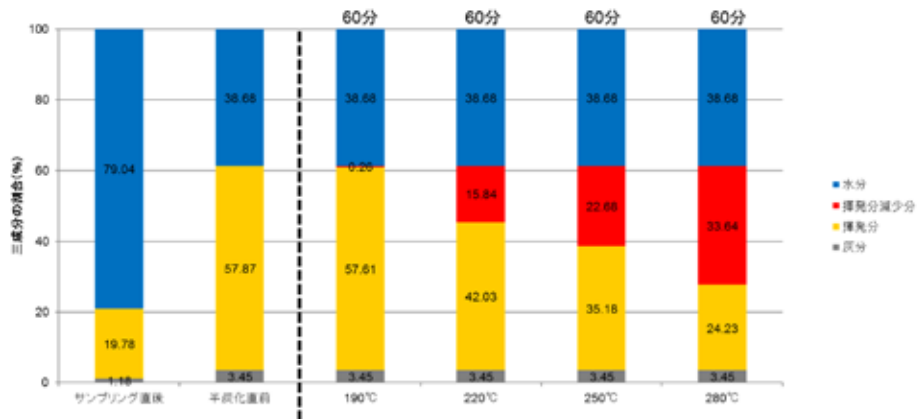


図 2-5 とうもろこし（葉）の半炭化物の三成分分析結果

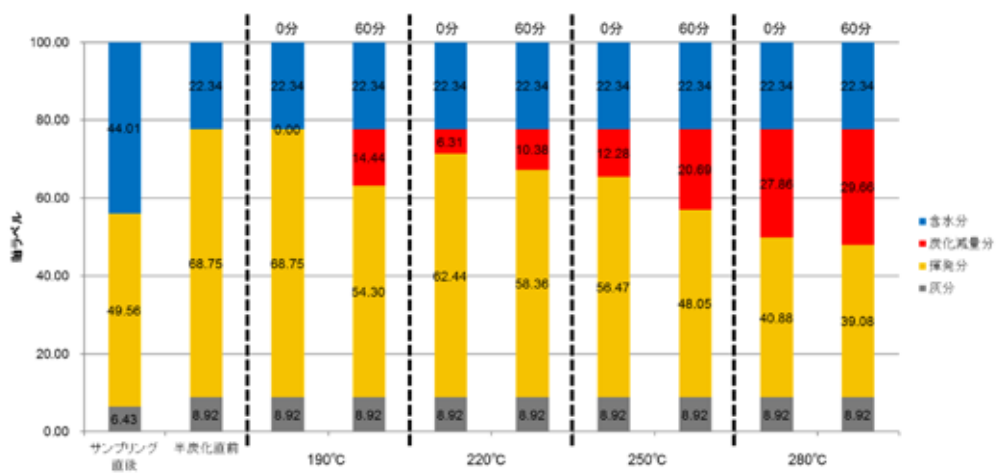


図 2-6 スイカ（茎）の半炭化物の三成分分析結果



### 2. 3. 2 低位発熱量と灰分

図 2-7 に低位発熱量と灰分の分析結果を示す。半炭化を行うことにより、エネルギー成分である揮発分が減少してしまうが、それ以上に重量の減少分が大きいいため、いずれのサンプルも、乾燥状態よりも半炭化したほうが、さらに半炭化温度を上昇させたほうが低位発熱量は増加する。一方、灰分の相対的割合も増加することがわかる。

燃焼を前提としたバイオマス燃料品質の観点から、低位発熱量が大きく灰分が少ないほうが品質の高い燃料であると言える。そのような観点から、とうもろこし（葉、根本）>稲わら>スイカ>籾殻の順で燃料品質が高いといえる。また、半炭化の効果の評価としては、乾燥状態と 280℃での半炭化の低位発熱量の差が大きいほど、半炭化の効果が大きいと考えられる。その観点からは、とうもろこし（葉、根本）>稲わら>スイカ（茎）>籾殻となる。

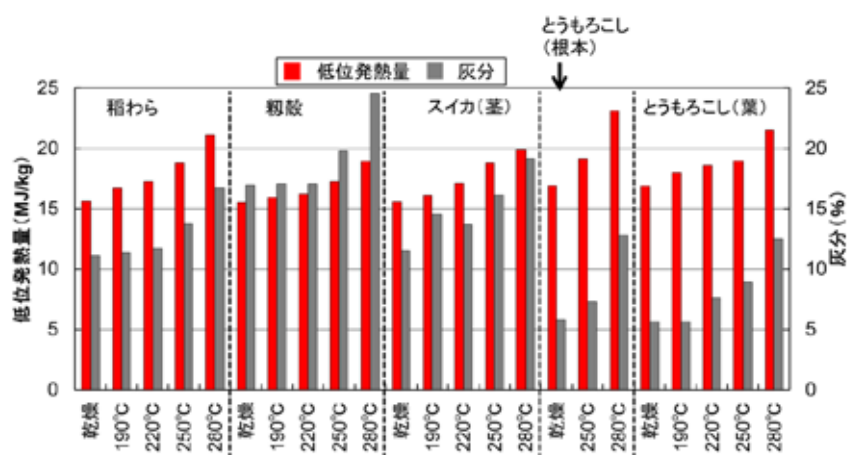


図 2-7 低位発熱量と灰分

### 2. 3. 3 熱量残存率

一方、半炭化にはエネルギーが必要であり、さらにサンプル中の熱量もトータルとして減少する。図 2-8 には、熱量残存率を示す。これより、とうもろこしの葉や根本については、他のサンプルと比較して半炭化後の熱量残存率が小さいことがわかる。相対的には、稲わらの熱量残存率が比較的高いことがわかる。

以上より、熱量残存率を考慮すると、稲わらは 220℃、籾殻は 250℃、とうもろこし（葉）は 190℃、とうもろこし（根本）は 250℃、そしてスイカ（茎）は 220℃で半炭化するのが適しているといえる。

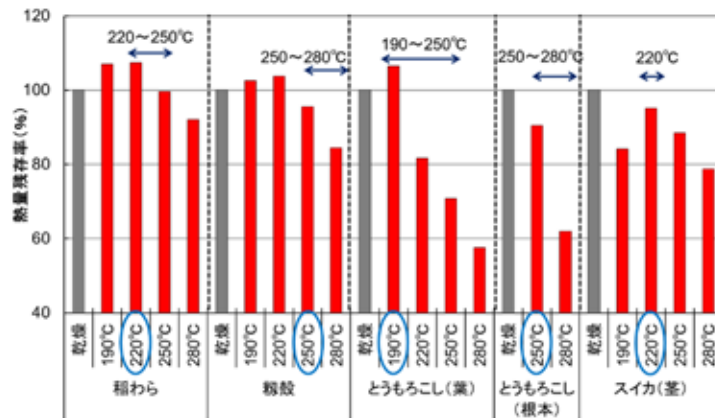


図 2-8 熱量残存率と半炭化に適した温度範囲

### 2. 3. 4 粒径分布測定による破碎性の比較

次に図 2-9 に、破碎後の粒径分布を示す。50%通過質量百分率であるメディアン径で比較すると、乾燥状態、190°Cでの半炭化物に比べて、220°C及び 250°Cでのメディアン径の減少が大きく、破碎性が向上していることがわかる。一方、280°Cの場合は、250°Cとそれほど大きく変わらないことがわかった。

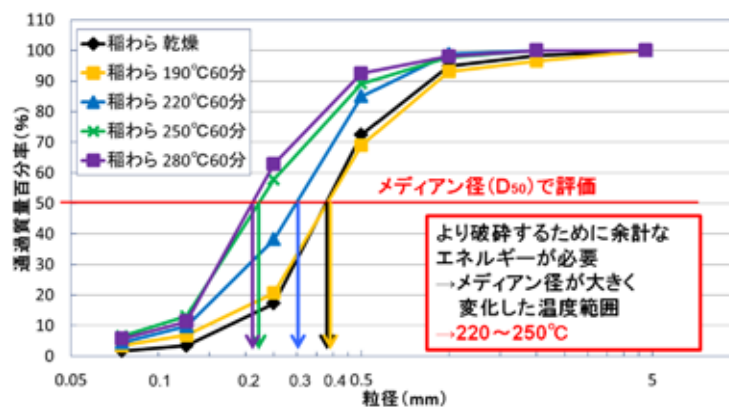


図 2-9 稲わらの半炭化物の破碎後の粒径分布

### 2. 3. 5 まとめ

稲わら、籾殻、とうもろこしの葉と根本、スイカの茎を対象に半炭化を行ったところ、

- ①発熱量と灰分の観点から、とうもろこしの葉と根本、稲わらは燃料利用可能性が高いが、籾殻やスイカの茎は灰分が高く燃料利用可能性は低い。
- ②揮発分の減少と破碎性の向上には関係性がある。
- ③熱量残存率及び破碎性を考慮して、各農業残渣における最適な半炭化条件を示すことができた。



### 3. 稲わらペレットの分散型熱利用に向けた半炭化の効果とボイラ燃焼特性

#### 3.1 半炭化とペレット化の順序の影響に関するレビュー (TP ペレットと PT ペレット)

半炭化とペレット化を組み合わせる燃料を製造するにあたって、半炭化とペレット化の順序を考慮する必要がある。当研究では、半炭化してからペレット化したペレットを TP (Torrefaction - Pelletization) ペレット、ペレット化してから半炭化したペレットを PT (Pelletization - Torrefaction) ペレットと呼ぶこととする。

Linoj Kumar ら<sup>5)</sup>は表 3-1 のように TP ペレットと PT ペレットのサプライチェーン上における利点と欠点をまとめた。

表 3-1 TP ペレットと PT ペレットのサプライチェーン上における利点と欠点<sup>5)</sup>

	利点	欠点
TP	<ul style="list-style-type: none"> <li>半炭化バイオマスの破砕にかかるエネルギーが小さくなる</li> <li>ペレットの密度が高く、通常の木質ペレットに匹敵する</li> <li>ペレットの耐久性が高く、通常の木質ペレットに匹敵する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>かさ密度が小さいため、必要とされるリアクター容積が大きくなり、導入コストが高くなる</li> <li>同じ製造ラインでホワイトペレットと半炭化ペレットの両方を製造することが難しい</li> <li>半炭化バイオマスの高い摩耗性はペレタイザーのダイの寿命を低下させる</li> </ul>
PT	<ul style="list-style-type: none"> <li>木質ペレットはかさ密度が大きいため必要とされるリアクターの容積が小さく、リアクターでの処理量が 3~4 倍増加する。結果として資本コストが低下する</li> <li>既往のペレット製造施設に簡単に統合でき、粉砕やペレット化装置に半炭化バイオマスが入ってこないため汚れず、装置の寿命にも影響しない</li> <li>疎水性で、全乾のペレットが最終生成物として得られる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>密度や耐久性が通常のペレットに比べ劣る</li> <li>リアクターによっては、半炭化中にペレットを損傷・崩壊させる可能性がある</li> <li>半炭化ペレットの輸送や取り扱い中に微粉の生成やペレットの損失の可能性がある</li> </ul>

### 3. 2 稲わらの半炭化効果の検討

#### 3. 2. 1 原料

試験材料として、稲わらを用いた。稲わらは北海道南幌町で2017年11月に収集されたものである。また、ペレット製造時に混合するおがくずは、主にカツラ・セン・ホホなどの北海道産広葉樹のおがくずである。これらの試料は収集後、研究室で20-25℃程度の室温で保管した。

#### 3. 2. 2 実験方法

##### (1) ペレット製造条件

本研究では稲わらと稲わらペレットではかさ密度や取り扱い性に違いがあるため、稲わらの半炭化と稲わらペレットの半炭化の両方を検討した。また、半炭化の温度、木質との混合、半炭化とペレット化の順序による利点・欠点を検討するために、

- ・半炭化を行っていない稲わらから作成したペレット：稲わらペレット①
- ・200℃で半炭化した稲わらから作成したペレット：TP200℃100%
- ・200℃で半炭化した稲わらと木くずを同量ずつ混合して作成したペレット  
：TP200℃50%
- ・250℃で半炭化した稲わらから作成したペレット：TP250℃100%
- ・250℃で半炭化した稲わらと木くずを同量ずつ混合して作成したペレット  
：TP250℃50%
- ・稲わらペレットを200℃で半炭化させたペレット  
(スクリー式炭化炉：PT スクリュー、回転式炭化炉：PT 回転)
- ・稲わらペレット：稲わらペレット②

を作成した。図3-1に上記のペレット製造条件を図にしたものを示す。

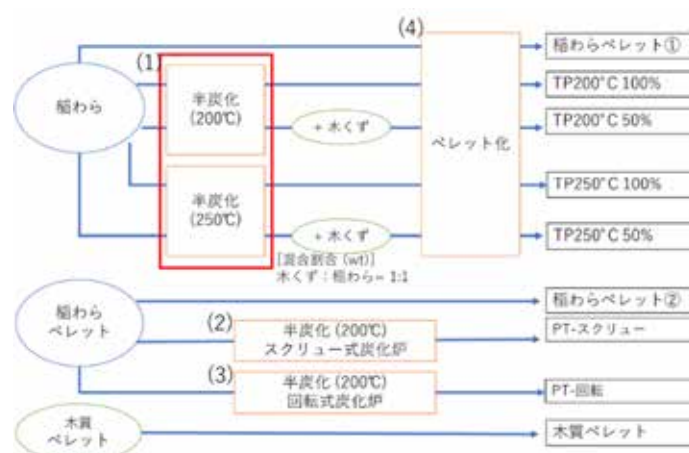


図3-1 ペレットの製造条件

## (2) 半炭化・ペレット化手法

### 1) 稲わらの半炭化

ステンレス製のリアクターと乾燥機を用いて半炭化を行った。リアクターの寸法は高さ 450 mm、幅 550 mm、奥行 470 mm であり、リアクターの上部には窒素を流入させるためのチューブを差し込むための穴とリアクター内のガスを排出するためにチューブを差し込む穴とリアクター内の温度を測るために熱電対を差し込む穴が開いている。図 3-2 にリアクターの設計図を示す。

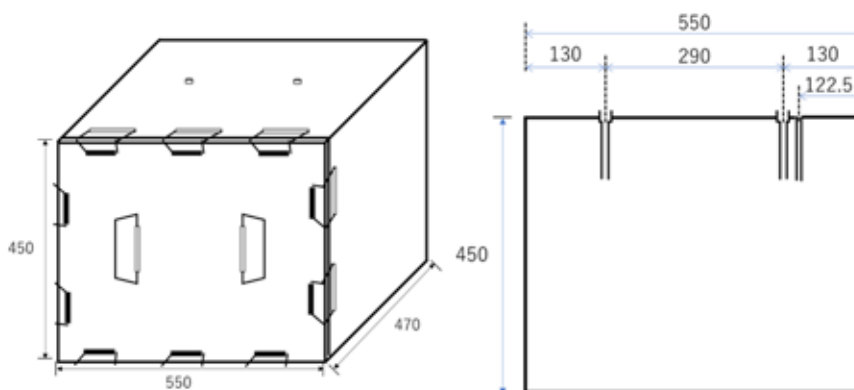


図 3-2 リアクター (左: 全体図 右: 断面)

リアクターに稲わらを入れ、密閉した。窒素ポンプを用いチューブを通して窒素をリアクター内に注入し、排ガスはポンプ、吸収瓶 (水) を通し屋外に排出される。リアクターを乾燥器 (ADVANTEC 製 FS-605) に入れ、窒素を流入させながら乾燥器を加熱し、

リアクター内を処理温度まで昇温させたのち一定時間、処理温度を維持し、その後室温にて放熱した。リアクター内の温度は熱電対を差し込み測定した。

半炭化の温度と時間の条件は、(処理温度/半炭化時間) 200°C/1 時間と 250°C/1 時間の 2 条件とする。また、半炭化時のリアクター内の温度変化を図 3-3 に示す。乾燥器の起動後、1°C 程度/分で昇温し、約 3 時間で 200°C に達する。

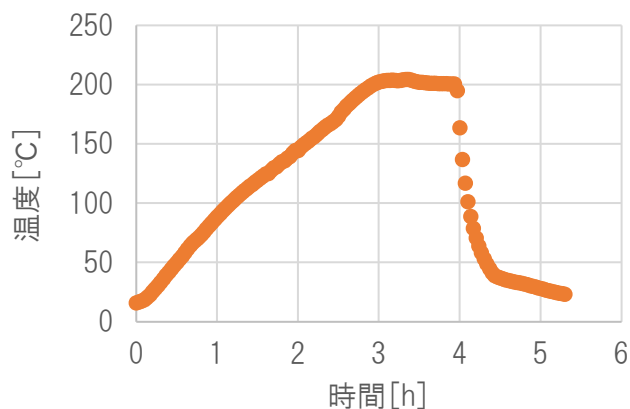


図 3-3 半炭化時のリアクター内の温度変化

## 2) スクリュー式炭化炉を用いた稲わらペレットの半炭化

ペレットに成形した稲わらは取扱いが高いため、北海道立総合研究機構林産試験場（所在地：北海道旭川市）所有のスクリュー式の炉を用いて半炭化を行った。図 3-4 に使用したスクリュー炉の写真を示す。投入部から入れられたペレットはスクリューによって移動し、排出される。スクリュー炉には電熱線が巻かれていて、温度測定用の熱電対が刺さっている箇所が 4 か所ある。



図 3-4 スクリュー炉

スクリュー炉の操作盤で 4 か所それぞれ設定温度を入力し、運転時は熱電対で常時温度を測定し、設定温度に達していない場合は自動で電熱線が加熱され、スクリュー炉内部の温度が設定温度に維持される仕組みになっている。

本実験では、200℃での半炭化時間を 1 時間に極力近づけるためにスクリューの回転速度をできるだけ遅く設定し、ホッパーから投入された原料（ペレット）が 45 分程度で排出される設定とした。

## 3) 回転炉を用いた稲わらペレットの半炭化

ペレットに成形した稲わらの半炭化は北海道立総合研究機構林産試験場（所在地：北海道旭川市）所有の回転式の炭化炉でも行った。回転式炭化炉のリアクターに 3kg 程度の稲わらペレットを入れ、ボルトを使い、蓋をしっかりと閉めた。リアクターを図 3-5 のように炭化炉にセットし、炭化炉の蓋を閉めた。回転炉のヒーターの電源を入れると、リアクター内部の温度を熱電対で測りながら、設定したプログラムにより炭化炉は 1 時間かけて 200℃まで升温し、200℃で 1 時間保持した。その間炭化炉のリアクターは一定速度で回転し続けていた。そのあと、リアクターを取り出し、自然放熱した。



図 3-5 リアクターをセットした回転式炭化炉

#### 4) ペレット化

地方独立行政法人北海道立総合研究機構林産試験場にて成形作業を行った。まず、おがくずと混合して製造するペレットに関しては重量比でバイオマス試料とおがくずを混合した。その後、水分が約15%になるように加水し、十分に手作業で攪拌した。これを図 3-6 に示すフラットダイ式成形機に投入し、5 mm のメッシュのふるいにかけて、直径 6 mm 長さ 3 cm 程度のペレットを成形した。



図 3-6 フラットダイ式ペレット成形機

#### (3) 測定項目

2 章で示した含水率、灰分、揮発分、発熱量、粒径分布に加えて以下の項目について分析を行った。

##### 1) 固定炭素

固定炭素は、JIS M 8812<sup>6)</sup>に準拠し求めた。

##### 2) 元素分析 (炭素、窒素、水素、硫黄、酸素)

JIS M 8819<sup>7)</sup>に準拠し、全自動元素分析装置 (elementar 製 vario EL cube) を用いて、炭素・窒素・水素・硫黄の含有率(%)を定量した。測定は試料 1 条件につき 4 回行った。また、試料中の酸素は水分、灰分、炭素、窒素、水素、硫黄を差し引いた残りとした。

##### 3) 原料及び半炭化試料のかさ密度

未処理の稲わらと 200℃で半炭化した稲わらのかさ密度は、粗かさ密度と密かさ密度の 2 種類を測定した。どちらの測定の場合も、まず使用する容器の質量を 10 g の桁まで測定した。

粗かさ密度の測定は、まずステンレス容器 (容積 10.38 L) の中に試料を入れ、ときどき容器を揺することで均しながら試料を充填していく。容器がいっぱいになるまで試料を充填したら、蓋で試料を押しつぶすことがないよう容器の容量を超えた試料を取り除いたうえで蓋をし、容器と試料の質量を 10 g の桁まで測定した。

密かさ密度の測定は、まずステンレス容器 (容積 10.38 L) の中に試料を圧密しながら充填した。容器がいっぱいになるまで試料を充填したら、蓋で容器の容量を超え

た試料を押しつぶしながら蓋をし、容器と試料の質量を 10 g の桁まで測定した。

なお、かさ密度は 1 試料につき 5 回測定し、その平均値と標準誤差を使用した。

#### 4) 平衡含水率

JIS B 7920<sup>8)</sup>や北野らの研究<sup>9)</sup>を参考に測定を行った。少量の蒸留水を含んでいる固相の塩化カリウムの結晶（シャーベット状の塩化カリウム）が入った磁器製の蒸発皿をデシケータの中に入れ密封した。塩に余分な水を入れず、シャーベット状にするのは相対湿度が上がりすぎないようにするためである。

デシケータを恒温器内に入れ、恒温器内の温度を 30℃に保った。試料約 1 g を 107±2℃で 1 時間乾燥させ、デシケータに移し、冷却した。冷却後直ちに質量を 0.1 mg まではかり、その後、デシケータの中に入れ 72 時間の間、温度 30℃、相対湿度 84% の環境下で静置した。静置後直ちに質量を 0.1 mg まではかった。そして(2)式により平衡含水率 EMC を算出した。

$$EMC = \frac{m_1 - m_2}{m_0} \times 100 \quad (2)$$

EMC：試料中の平衡含水率 [質量分率(%)]

$m_1$ ：静置後の容器と試料の質量(g)

$m_2$ ：静置前の容器と試料の質量(g)

$m_0$ ：試料のはかりとり量(g)

#### 5) ペレットのかさ密度

日本木質ペレット協会の木質ペレット品質規格<sup>10)</sup>をもとにした。JIS Z 7702-9 に準拠し、空の測定容器のみの質量と、容器に水を満たした時の質量を、いずれも 1 g の桁まではかり、水 1 g = 1 cm<sup>3</sup>として容器の容積 (V) を求める。次に測定容器を良く乾燥した後、試料を測定容器の縁からあふれる状態まで入れ、約 15 cm の高さから厚さ 1.5 cm の木製板上に 3 回自然落下させる。測定容器に減量分を追加して、試料がすりきり状態になるまで操作を繰り返す。試料の表面が平らになるように整え、試料で満たされた測定容器の質量を 1 g の桁まではかる。

#### 6) ペレットの機械的耐久性

日本木質ペレット協会の木質ペレット品質規格<sup>10)</sup>をもとにした。機械的衝撃力に対する木質ペレットの耐粉化性能を求める方法で、木質ペレットに関する欧州規格 EN 15210-1 に準拠して規格化したものである。

測定器具である耐久性試験器の構造と仕様を図 3-7 に示す。回転箱は、表面は平滑なスチール、アルミニウムあるいはアクリル樹脂製で、リベットやねじ釘などの突出部はできるだけ小さく角を丸く仕上げ、また微粉が漏れないように隙間のない構造と



する。寸法は 300 (縦) × 300 (横) × 125 (幅) mm で、内部には緩衝翼 (230 × 50 mm) を対角線方向に強固に取り付ける。試料の投入扉を側面に一箇所設ける。回転箱を 50 rpm の速度で回転するため、300 × 300 mm の壁の中心位置に、壁に直角に回転軸を取り付ける。

微粉を十分に除去した試料 500 ±10 g を採り、その質量を 0.1 g の桁まで測定した。

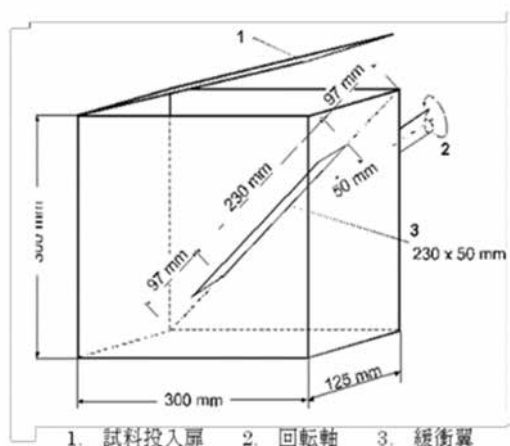


図 3-7 耐久性試験器の回転箱の構造と仕様

試料を回転箱内に定量的に移し、ふたを閉めて 50 ± 2 rpm の回転速度で正確に 500 回転した。終了後回転箱から試料を取り出し、円孔径 3.15 mm の板ふるいにかけて、ふるいに残った試料の質量を 0.1 g の桁まで測定し、ふるい上重量の割合が機械的耐久性となる。

### 3. 2. 3 実験結果

表 3-2 に原料となる稲わらや木くずの測定結果、表 3-3 にペレットの測定結果、図 3-8 に分析した稲わら、木くず、ペレットの写真を示す。

表 3-2 原料となる稲わらや木くずの測定結果

	単位	稲わら			木くず
		未処理	200°C	250°C	
揮発分	%	67.1	71.9	68.9	78.8
工業分析 (気乾ベース)					
固定炭素分	%	13.8	17.2	18.4	13.3
水分	%	10.2	1.4	2.0	7.7
灰分	%	8.9	9.5	10.8	0.2
工業分析 (無水ベース)					
揮発分	%	74.8	72.9	70.3	85.4
固定炭素分	%	15.4	17.3	18.5	14.4
灰分	%	9.9	9.8	11.2	0.2
元素分析 (無水ベース)					
C	%	41.19	43.14	46.24	48.12
O	%	42.56	40.65	36.28	45.31
H	%	5.73	5.56	5.43	6.25
N	%	0.56	0.75	0.77	0.07
S	%	0.08	0.06	0.06	0.00
発熱量					
高位発熱量	MJ/kg	16.31	17.06	17.50	19.19
低位発熱量	MJ/kg	15.01	15.80	16.27	17.78
かさ密度					
粗かさ密度	kg/m <sup>3</sup>	54.6	53.9	—	—
密かさ密度	kg/m <sup>3</sup>	92.7	90.5	—	—
エネルギー密度					
粗かさ密度	GJ/m <sup>3</sup>	0.82	0.85	—	—
密かさ密度	GJ/m <sup>3</sup>	1.39	1.43	—	—
平衡含水率	%	11.37	10.77	9.04	—
粒径分布					
< 2.0mm	%	100.0	100.0	99.5	—
< 1.0mm	%	92.5	98.0	98.9	—
< 0.5mm	%	59.1	77.7	84.7	—
< 0.25mm	%	20.8	37.6	45.3	—
< 0.125mm	%	5.7	9.1	10.5	—
< 0.075mm	%	2.5	3.0	2.6	—

表 3-3 ペレットの測定結果

	未処理稲わらペレット		TPペレット			木質ペレット		未処理稲わらペレット		PTペレット	
	RSP①		TP200°C100%	TP250°C100%	TP200°C50%	TP250°C50%	WP	RSP②	PT200°C100%	Batch	
揮発分	%	65.52	65.68	66.02	71.00	70.49	77.71	64.89	67.06	68.63	
工業分析 (気乾ベース)	%	15.67	15.93	16.80	14.74	15.87	14.64	14.62	16.64	19.54	
水分	%	9.63	9.61	7.44	9.14	8.94	7.24	8.36	3.63	2.51	
灰分	%	9.16	8.78	9.74	5.12	4.70	0.41	12.13	12.66	14.40	
工業分析 (無水ベース)	%	72.5	72.66	71.33	78.14	77.41	83.78	70.81	69.59	66.91	
固定炭素分	%	17.36	17.62	18.15	16.22	17.43	15.78	15.95	17.27	19.05	
灰分	%	10.14	9.72	10.52	5.64	5.16	0.44	13.24	13.14	14.04	
C	%	41.19	43.14	46.24	45.63	47.18	48.12	40.88	41.09	42.88	
O	%	42.30	40.77	36.99	42.98	40.80	45.31	39.30	39.39	36.83	
H	%	5.73	5.56	5.43	5.91	5.84	6.25	5.73	5.56	5.37	
N	%	0.56	0.75	0.77	0.41	0.42	0.07	0.72	0.73	0.81	
S	%	0.08	0.06	0.06	0.03	0.03	0.00	0.13	0.09	0.07	
発熱量	MJ/kg	16.31	17.06	17.50	18.12	18.35	19.19	16.93	17.09	17.47	
高位発熱量	MJ/kg	14.80	15.56	16.09	16.56	16.80	17.60	15.42	15.74	16.19	
低位発熱量	MJ/kg	525.67	642.05	716.50	661.40	716.78	656.40	499.7	491.20	489.89	
かさ密度	kg/m³	7.78	9.99	11.53	10.95	12.04	11.55	7.71	7.73	7.93	
エネルギー密度	MJ/m³	12.42	11.57	10.97	11.25	11.44	11.01	12.87	11.70	10.21	
平衡含水率	%	86.14	95.86	92.42	94.29	97.55	94.94	86.17	87.00	86.11	
機械的耐久性											



図 3-8 稲わら、木くず、ペレットの写真

### 3. 2. 4 考察

#### (1) ペレットの保管・輸送効率

##### 1) かさ密度

図 3-9 にペレットのかさ密度を示す。未処理の稲わらペレットは  $500 \text{ kg/m}^3$  程度であったが、TP ペレットは  $640\sim 720 \text{ kg/m}^3$  と未処理のもの  $1.3\sim 1.4$  倍まで増加し、木質ペレット並みになった。一方、PT ペレットは未処理の稲わらペレットのかさ密度とほとんど変わらなかった。

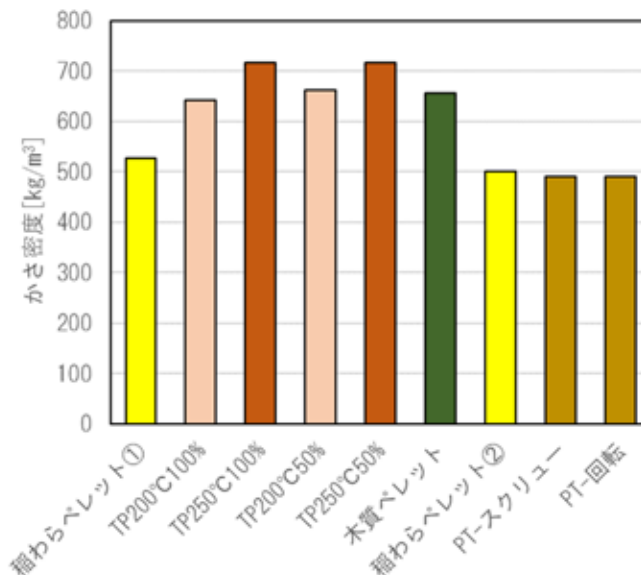


図 3-9 ペレットのかさ密度

#### (2) 低位発熱量・エネルギー密度

図 3-10 にペレットの低位発熱量を示す。未処理の稲わらペレットの低位発熱量は  $15 \text{ MJ/kg}$  程度の発熱量であったが、稲わらの半炭化によって、 $5\sim 9\%$ 程度発熱量が増加した。また、木質ペレットの発熱量は  $17.6 \text{ MJ/kg}$  であり、未処理の稲わらや半炭化した稲わらよりも発熱量が大きく高かったため、木質と半炭化稲わらを混合したペレットは半炭化稲わらだけから製造したペレットと比べて、発熱量は向上した。

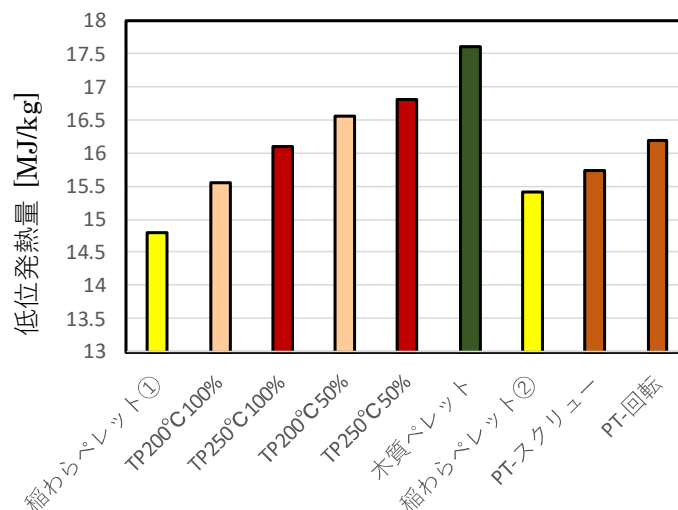


図 3-10 ペレットの発熱量

未処理の稲わらペレットと PT ペレットを比較すると、未処理の稲わらペレット、

スクリー炉で半炭化した稲わら、回転炉で半炭化した稲わらの順で発熱量が大きくなった。回転炉での半炭化もスクリー炉での半炭化と同様に 200℃で行ったが、発熱量の違いから回転炉での半炭化の方が実際の温度は高かったと考えられ、半炭化後のペレットの色の濃さからも同様のことが考えられる。

図 3-11 にペレットのかさ密度と低位発熱量から求めたペレットのエネルギー密度を示す。未処理の稲わらペレットのエネルギー密度は 7.7 GJ/m<sup>3</sup>程度であったが、TP ペレットは発熱量もかさ密度も増加しているため 1.3~1.5 倍程度まで増加した。PT ペレットは未処理のものとは比べて発熱量は増加している一方、かさ密度は減少したためエネルギー密度はほとんど変化しなかった。

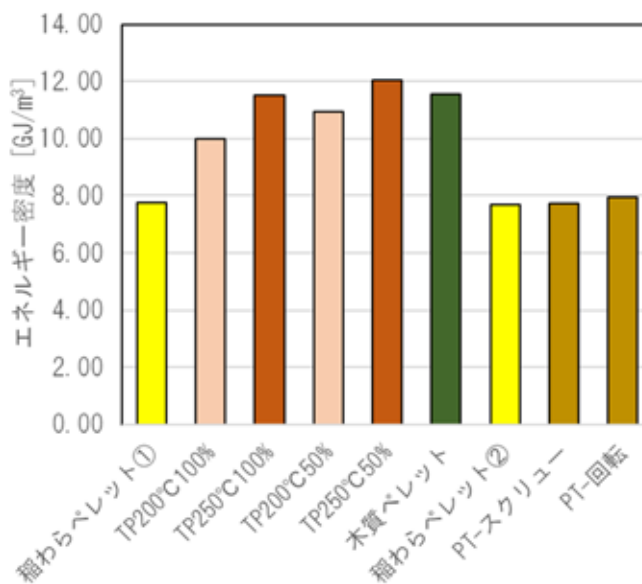


図 3-11 ペレットのエネルギー密度

### (3) 機械的耐久性とかさ密度の関係

図 3-12 は各ペレットの機械的耐久性を示したものである。この図より、未処理の稲わらペレットの場合、86%ほどであったが、TP ペレットは 92~97%程度まで上昇した。

図 3-13 はペレットのかさ密度と機械的耐久性の関係を示したものである。この図より、かさ密度が低いほど機械的耐久性が低く、かさ密度が高いほど機械的耐久性が高い関係がみられた。前述のとおり、TP ペレットのかさ密度が高いのは、原料の破碎性に起因するものであるため、TP ペレットは原料の破碎性が高

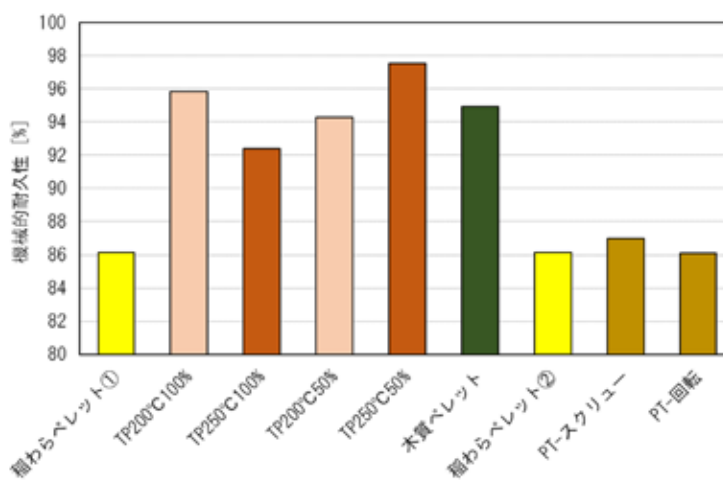


図 3-12 ペレットの機械的耐久性

いために密にペレットが成形され、かさ密度と機械的耐久性が高くなったと考えられる。

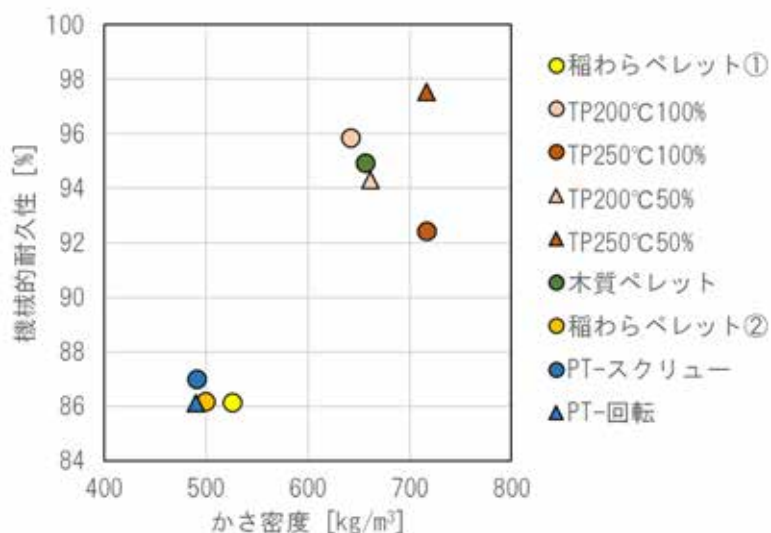


図 3-13 かさ密度と機械的耐久性の関係

### 3. 2. 5 半炭化による効果についてまとめ

稲わらから作成したペレット燃料としてのサプライチェーン上における半炭化や半炭化とペレット化の順序、木質との混合についての利点と欠点をまとめると表 3-4 のようになる。

半炭化によって、発熱量が増え、含水率や硫黄含有率が減るため、燃料としての質が向上するが、半炭化にエネルギーやコストがかかることが欠点であり、いかにして半炭化にかかるエネルギーやコストを削減するかが課題である。

TP ペレットは、未処理の稲わらペレットと比べてエネルギー密度が大幅に向上するため、保管輸送効率はかなり向上するが、稲わらはかさ密度が低く、取扱い性も悪いいため、半炭化の効率が悪い。そのため、TP ペレットの製造では、稲わらをいかにして効率よく半炭化するかが課題となる。

PT ペレットは半炭化の効率はいいが、エネルギー密度や機械的耐久性は TP ペレットよりも劣ってしまう。そのため、PT ペレットは未処理の稲わらペレットに対して発熱量を上げるために効率よく行うことができる処理という位置づけになるであろう。

また、木質との混合により発熱量や揮発分が増加し、灰分や窒素や硫黄の含有率が低下するため燃料としての質が向上するが、混合自体が手間になるほか、収集経路が稲わらと木質の 2 種類となるためコストがかかる恐れがある。



表 3-4 半炭化や TP ペレット、PT ペレット、木質との混合の利点と欠点

	利点	欠点
TP ペレット	<ul style="list-style-type: none"> <li>原料の破碎性が向上するため、かさ密度が増加し、保管輸送効率が向上する</li> <li>かさ密度と発熱量が増加するため、エネルギー密度が大きく増加し、保管輸送効率が向上する</li> <li>機械的耐久性が増加し、輸送時のペレットの破損が少なくなる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>稲わら自体のかさ密度が低く、取扱い性も悪いため、半炭化時の効率が悪い</li> </ul>
PT ペレット	<ul style="list-style-type: none"> <li>ペレットを半炭化するため、半炭化の効率が良い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>かさ密度やエネルギー密度が TP ペレットと比べ低い</li> </ul>
木質との混合	<ul style="list-style-type: none"> <li>未処理の稲わらや半炭化した稲わらに比べて発熱量が高いため、混合により発熱量が増加する</li> <li>揮発分が増加し、灰分が低下するため、燃料としての質が向上する</li> <li>窒素や硫黄の含有率が極めて低いため、それらの元素の含有率の低下につながり、装置の腐食の防止や環境保全につながる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>混合することが手間になる</li> <li>収集経路が増えるため、コストがかかる恐れがある</li> </ul>

#### 4. 小型バイオマスバーナーを用いた燃焼試験

##### 4. 1 燃焼試験方法

###### 4. 1. 1 燃焼機器の概要

燃焼試験は北海道帯広市に所在する株式会社武田鉄工所協力の下、バイオマス燃焼用温風式熱供給装置（小型ペレットバーナーユニット TKD-SBU02）を用いて行った。小型バイオマスバーナーと熱交換器の外観を図 4-1、小型バイオマスバーナーの炉内を図 4-2 に示し、また、バイオマス燃料用温風式熱供給装置の仕様を表 4-1 に示す。

武田鉄工所のバイオマス燃焼用温風式熱供給装置は、全長 3.2m、高さ 2.2m、幅 0.8m と従来の燃焼機に比べ 3 分の 1 程度に小型化されており、ビニールハウスの保温や施設の暖房などに利用できる。一般的に稲わらやもみ殻といった農業残渣は燃焼すると、灰や灰分

が固まってできるクリンカが多く発生し、機械の送風口を塞いでしまうため、燃料として適していない。しかし、炉内が回転することにより灰やクリンカが炉内に付着せずに自動で炉外に排出することが可能である。また、木質燃料に比べ発熱量が少なく、着火後の立ち上がり不安定といった課題には炉の回転速度を制御し、送風機で炉内に旋回流を作り出すことで安定した燃焼が可能になっている。同機は、北海道内の中小企業などが開発した優れた新

技術や新製品に送られる「2018 年度北海道新技術・新製品開発賞」のものづくり部門において大賞を受賞しており、十勝管内の農業施設や中標津きのこ栽培培養棟、北海道大学の試験農場などに導入されている<sup>12-14)</sup>。



図 4-1 小型バイオマスバーナーと熱交換器の外観



図 4-2 小型バイオマスバーナーの炉内

表 4-1 バイオマス燃料用温風式熱供給装置 仕様<sup>14)</sup>

形式	TKD-SBU02	
対応燃料	木質ペレット、農業残渣ペレット、籾殻燃料 廃菌床ペレット、小麦くず、豆類くず	
熱出力 (使用燃料により異なります)	1~6万kcal/hr 42~251MJ/hr 12~70kW	
炉内温度	800~900°C	
効率	70~80%	
燃料消費量	2.5~15kg/hr (LHV4000kcal/kg)	
点火方式	電気ヒーター	
風量	50Hz	66m <sup>3</sup> /min
	60Hz	76m <sup>3</sup> /min
電気使用	単相100V 50/60Hz	
消費電力	50Hz	定格：17A 点火時：28A
	60Hz	定格：21A 点火時：31A
外形寸法	全長	3.2m
	全幅	0.8m
	全高	2.2m
ユニット重量	約700kg	
周辺機器	ペレットタンク、燃料移送装置	
主な構造・機能	回転炉方式 ロータリーバルブ式燃料供給装置 灰出し機構・炉内自動灰出し（オプション） 設定温度によるON/OFF	

#### 4. 1. 2 ペレットと供給速度

試験で用いるペレット試料は以下の3種類とした。

- ① 半炭化稲わら・木質混合ペレット
- ② 半炭化稲わらペレット
- ③ 稲わらペレット

バーナーへのペレットの重量当たりの供給量は、燃料供給装置を連続運転させ、1分間にどのくらい供給するか1サンプルにつき5回測定し、平均をとった。その結果、①半炭化稲わら・木質混合ペレットは 949 g/min、②半炭化稲わらペレットは 709 g/min、③稲わらペレットは 706 g/min となり、②と③はほとんど変わらなかったが、かさ密度が大きい①はほかに比べ供給量が 1.35 倍になった。

定常運転中、燃料の供給装置は 3 秒の運転と x 秒の停止を繰り返す。表 4-2 に x に当たる運転のインターバルとその時の 1 時間当たりの供給熱量を示す。

表 4-2 ペレットの供給インターバルと供給熱量

	インターバル [s]	供給熱量 [kcal/hr]
① 半炭化稲わら・木質混合ペレット	4.7	87600
② 半炭化稲わらペレット	2.4	88600
③ 稲わらペレット	1.7	99100

## 4. 2 測定項目と測定方法

### 4. 2. 1 ペレットの供給量

ペレットを保管している袋や容器ごとペレットの重量 (1 g 単位) から、ペレットの投入後にペレットが保管されていた袋や容器の重量を差し引くことで、ペレットの供給量を算出した。

### 4. 2. 2 炉内温度、バーナー出口温度、排気温度、熱交換器入り口/出口温度

それぞれの温度を、熱電対を用い測定し、1 秒ごとにデータロガーで記録した。熱交換器出口は 2 か所あるため、それぞれ測定した。図 4-3 に測定箇所の概要を示す。

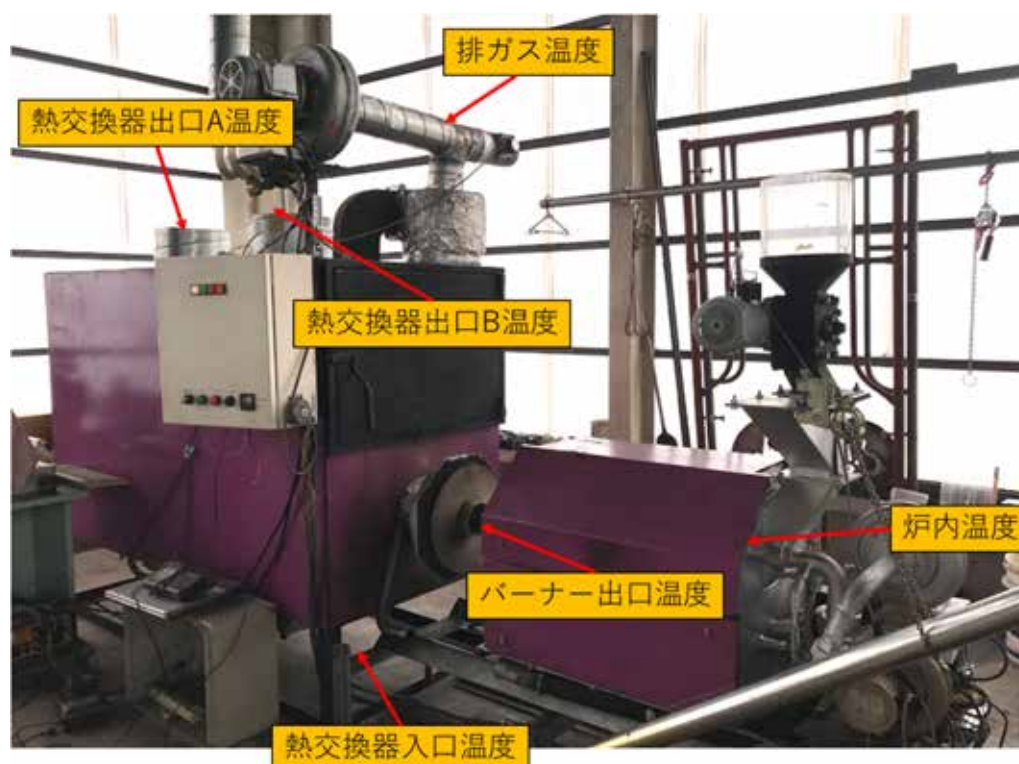


図 4-3 温度の測定箇所

#### 4. 2. 3 熱交換器出口・排気口の流速と温度

風速温度計（株式会社カスタム製 Model CW-50）を用いて、熱交換器出口と排気口の流速と温度を測定した。熱交換器出口の流速と温度は定常運転時に半径 15cm の円形の出口の中心と中心から 10cm の部分でそれぞれ測定した。また、排気口の流速と温度はボイラの停止動作中に半径 6.2cm の円形の中心部で測定した。

#### 4. 2. 4 灰・クリンカの発生量

炉内から排出される灰が炉外で燃焼しないようにするために加えた水の入ったベール缶の重量を量り、炉内から灰処理装置を通して排出される灰をベール缶に回収し、回収後のベール缶の重量を量ることで灰の発生量を求めた。また、クリンカの発生量は運転終了後、炉内の温度が十分に下がってから、炉内に残っていたクリンカを手で取り出し、重量を量った。

#### 4. 2. 5 クリンカの強度と化学組成

株式会社イマダ製デジタルフォースゲージ ZTA-200N を用いて灰が完全に崩れるまでの強度の最大値を測定した。測定は各ペレットにつき 8 回測定し、平均と標準偏差を求めた。HORIBA 製蛍光 X 線元素分析装置 MESA-500 を用いて測定した。電圧、電流は自動に設定し、真空状態で測定した。

### 4. 3 結果と考察

#### 4. 3. 1 ペレット燃焼量

表 4-3 に 1 時間当たりのペレット燃焼量(重量及び体積)と未処理稲わらペレットに対する燃焼量の割合を示す。

半炭化や木質との混合によって発熱量が高くなるため、重量当たりの燃焼量は未処理の稲わらペレットと比べて TP ペレットは 78%、PT ペレットは 85%と 15~20%以上ペレットの使用が少なくなった。また、TP ペレットはかさ密度が向上するため、体積当たりの TP ペレットの燃焼量は未処理のペレットと比較して 40%以上削減された。ペレットの体積当たりの燃焼量を減らすことができれば、使用場所での保管スペースが少なく済み、また、燃料を貯めておく燃料ホッパーへの供給頻度も減らすことができる。

表 4-3 ペレット燃焼量と未処理稲わらペレットに対する燃焼量の割合

	ペレット燃焼量 [kg/hr]	未処理ペレットに対する 燃焼量の割合 [wt%]	ペレット燃焼量 [L/hr]	未処理ペレットに対する 燃焼量の割合 [vl%]
① TP200°C50%	22.25	78.2	33.7	59.1
② PTペレット	24.20	85.0	49.3	86.5
③ 稲わらペレット	28.46	100.0	57.0	100.0

### 4. 3. 2 定常運転時の炉内温度

図 4-4 に定常運転時(運転開始 1 時間後から 3 時間後まで)の炉内温度の変化を示す。TP ペレットは 800~850℃あたり、PT ペレットは 750~800℃あたりで定常となった。未処理の稲わらペレットはエネルギーの量が大きかったにもかかわらず、700~750℃とほかのペレットに比べ、低い炉内温度となった。これは未処理の稲わらはチャー燃焼がほとんどなく、揮発分の燃焼が主であるためであると考えられる。また、炉内の温度の変化が激しい理由は、燃料の供給と炉内の回転のタイミングによるものであると考えられる。

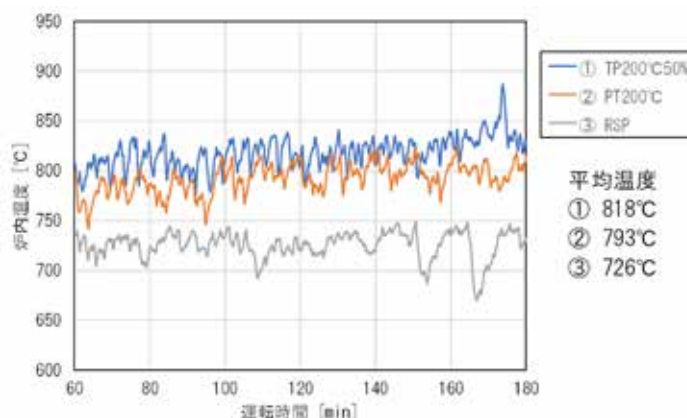


図 4-4 定常運転時(運転開始 1 時間後から 3 時間後まで)の炉内温度の変化

図 4-5 に定常運転時(運転開始 1 時間後から 3 時間後まで)のバーナー出口温度の変化を示す。どのペレットにおいても 850~900℃あたりを推移したが、PT ペレットは少し温度が低かった。炉内温度とバーナー出口温度を比較したときに未処理の稲わらペレットは 170℃ほど上昇した一方、TP ペレットと PT ペレットは 70℃程度の上昇にとどまった。未処理の稲わらペレットは揮発分の燃焼が主であるため、温度上昇が他よりも大きかったと考えられる。また、TP ペレットにおいて 175 分あたりに温度が急落しているのは、炉内温度が 900℃を超え、安全装置が作動し、燃料の供給が止まったことが理由である。

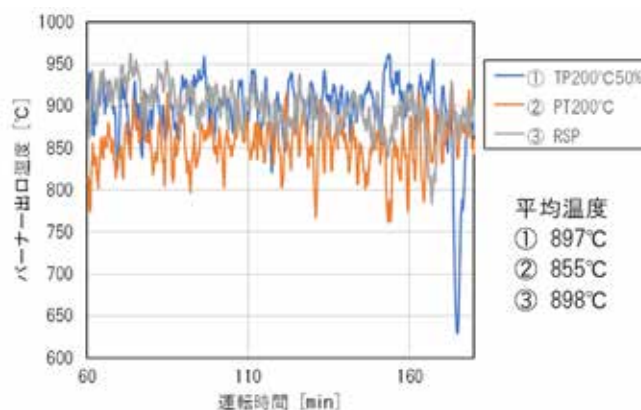


図 4-5 定常運転時(運転開始 1 時間後から 3 時間後まで)のバーナー出口温度の変化

図 4-6 に定常運転時(運転開始 1 時間後から 3 時間後まで)の排ガス温度の変化を示す。



TP ペレットと未処理の稲わらペレットの場合は 190~200℃で定常となり、PT ペレットの場合は 180~190℃で定常となった。バーナー出口温度も PT ペレットだけ低かったため、排ガス温度も低くなったと考えられる。

定常運転時において排ガス温度が 200℃近いことから、燃焼で生じる排ガスを利用した半炭化を行える可能性がある。燃焼排ガスのように酸素が含まれている環境下での半炭化は酸化半炭化 (Oxidative Torrefaction) と呼ばれており、ここ数年研究が行われている。酸化半炭化が実際に燃焼排ガスで行うことができれば、通常半炭化でキャリアガスとして使う窒素ガスの必要がなくなり、窒素ガスの分離や加熱にかかるエネルギーやコストが削減できる。

図 4-7 に定常運転時 (運転開始 1 時間後から 3 時間後まで) の熱交換器入口温度と出口温度の差の変化を示す。熱交換器での温度上昇が特に大きかったのは投入した熱量の大きかった未処理の稲わらペレットで、TP ペレットと PT ペレットの間では大きな差がなかった。

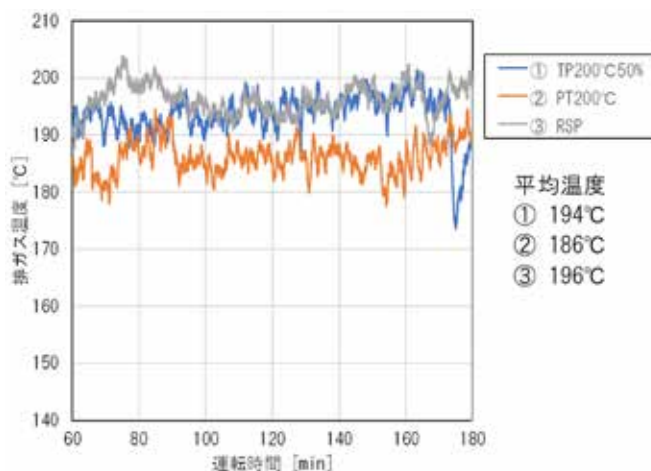


図 4-6 定常運転時(運転開始 1 時間後から 3 時間後まで)の排ガス温度の変化

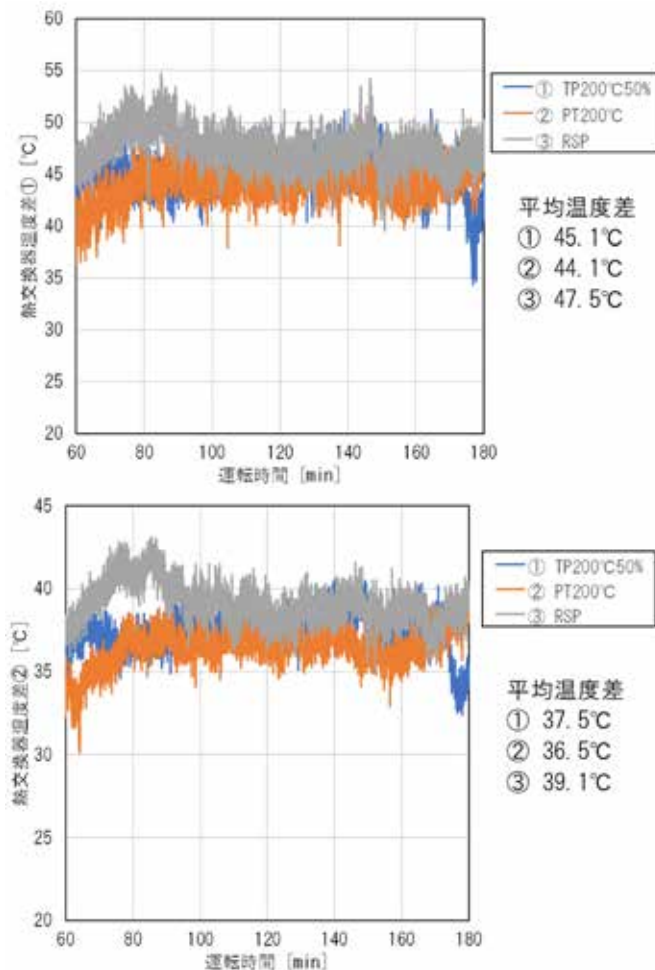


図 4-7 定常運転時(運転開始 1 時間後から 3 時間後まで)の熱交換器入口温度と出口温度の差の変化

### 4. 3. 3 クリンカ生成

図 4-8 に燃焼試験終了後の炉内の写真、図 4-9 に燃焼試験後に炉内に残っていたクリンカの写真を示す。どのペレットにおいても多少の灰と大小いくつかのクリンカが炉内に残っていた。TP ペレットの場合は炉内に残ったクリンカは合計 104g であり、クリンカの数は一歩少なかったが、最大で 8×15cm のクリンカが残っていた。PT ペレットでは、炉内に残ったクリンカは合計 113g で、一番大きいクリンカは 10×8cm 程度の大きさであり、大小 10 個程度のクリンカが炉内に残った。未処理の稲わらペレットの場合はペレットの投入量が一番多かったため、炉内に残ったクリンカの合計重量は 123g と一番量が多かった。3 時間にわたる燃焼後もさほど灰やクリンカが残っていないことから 3 時間以上の燃焼も可能であると考えられる。



図 4-8 炉内の温度が下がりきった後の炉内の様子



図 4-9 燃焼試験後に炉内に残っていたクリンカ

表 4-4 に燃焼試験で生じた灰やクリンカの主な成分と塩基度を示す。塩基度は灰の成分割合[wt%]から以下の式を用いて算出した<sup>15)</sup>。

$$\text{塩基度} = (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2) \quad (3)$$

灰やクリンカの主な成分は  $\text{SiO}_2$  や  $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Mn}_2\text{O}_3$  であり、これらの成分が全体の 95%以上を占め、特に  $\text{SiO}_2$  は灰の 60~70%、クリンカの 76%程度を占めた。また、TP ペレットの灰の塩基度はほかの灰よりも高く 0.6 となった。これは木くずを混ぜたことによって  $\text{SiO}_2$  の割合が減り、 $\text{K}_2\text{O}$  や  $\text{CaO}$  の割合が増えたからであると考えられる。PT ペレットの灰と未処理稲わらペレットの灰の塩基度は 0.35 程度であった。クリンカの塩基度はどのペレットにおいても 0.25 前後となった。

表 4-4 灰やクリンカの主な成分と塩基度

wt%	① TP200°C50%		② PT-スクリュー		③ 未処理稲わらペレット	
	灰	クリンカ	灰	クリンカ	灰	クリンカ
$\text{SiO}_2$	60.21	77.025	67.155	75.435	70.01	76.27
$\text{K}_2\text{O}$	23.765	10.338	18.696	13.613	16.612	13.506
$\text{CaO}$	9.659	6.929	5.155	4.178	5.389	4.118
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	2.706	1.95	1.86	1.746	1.726	1.349
$\text{Mn}_2\text{O}_3$	2.687	1.87	3.327	2.419	3.753	2.502
その他	0.972	1.889	3.807	2.608	2.511	2.452
塩基度	0.600	0.249	0.383	0.259	0.339	0.249

灰の成分のうち、ナトリウムとカリウムは灰の融点を下げることが知られている<sup>16)</sup>。図 4-10 はシリカ( $\text{SiO}_2$ )を含むアルカリ酸化物  $\text{Na}_2\text{O}$  と  $\text{K}_2\text{O}$  の二元状態図であり、この図では 3 つの穀物のわら(稲わら: R、高アルカリ性麦わら: W、低アルカリ性麦わら: Y)についての正規化組成物の位置も示されている。また、文字に続く数字は処理を表しており、0 は未処理、5 は実験室で水浸出したもの、6 は雨で洗浄したものである。この図より  $\text{SiO}_2$  が 80%程度するとき  $\text{K}_2\text{O}$  の融点は 800°Cを下回っている。クリンカの化学組成

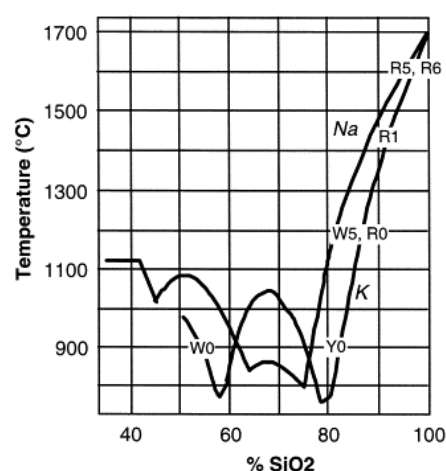


図 4-10 シリカを含むアルカリ酸化物  $\text{Na}_2\text{O}$  と  $\text{K}_2\text{O}$  の二元状態図<sup>16)</sup>

はどのペレットでも  $\text{SiO}_2$  が 76%前後と  $\text{K}_2\text{O}$  の融点が低い域であるため、 $\text{K}_2\text{O}$  が融けてクリンカになったと考えられる。

#### 4. 3. 4 エネルギー収支

各測定ポイントの温度データおよび流量等を用いて、定常運転時のエネルギー収支を図 4-11 に示す。

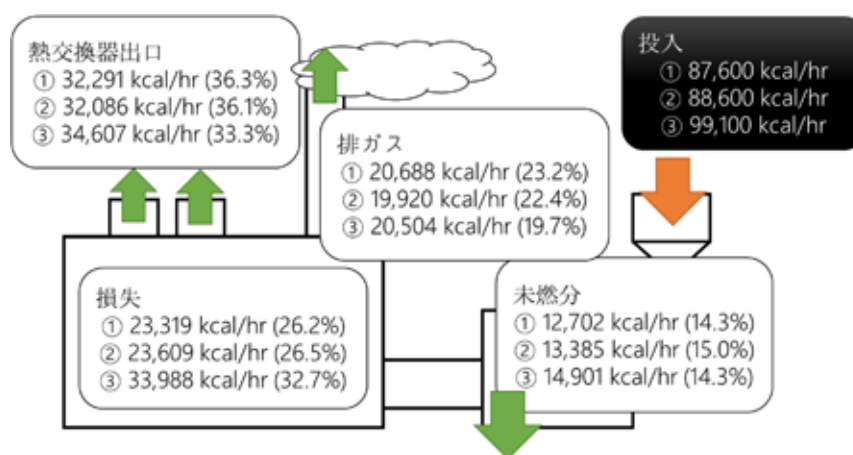


図 4-11 定常運転時におけるエネルギー収支

投入エネルギーを 100%としたとき、熱交換器出口の出力が 35%程度、排ガスからの損失が 20%程度、未燃分としての損失が 15%程度、その他損失が 30%程度となった。熱交換器の出力が投入エネルギーの 35%程度となったが、今回の試験において炉の回転を比較的高頻度に設定したため、より遅くすることで未燃分としての損失や炉内から排出された灰が有している熱からの熱損失を抑えることができ、より熱交換効率を向上させることができると考えられる。一方で、炉の回転の頻度を落とすことで、炉内でクリンカが成長してしまう恐れがあるため、それを考慮し、回転頻度を設定する必要がある。

#### 4. 3. 5 物質収支

次に図 4-12 に定常運転時における揮発分や灰分、未燃分などの物質収支を示す。

燃焼で揮発・蒸発したペレットの揮発分や水分の割合は PT ペレットと未処理の稲わらペレットで約 75%を占めた。一方、木くずが混合されている TP ペレットは他より多く 83%であった。

炉内から排出された灰は PT ペレットと未処理の稲わらペレットで 21%程度であり、灰分が少ない木くずを混合した TP ペレットでは 16%程度であった。炉内から排出された灰に含まれていた未燃分はどの燃料でも投入量の 10%を超える程度であった。

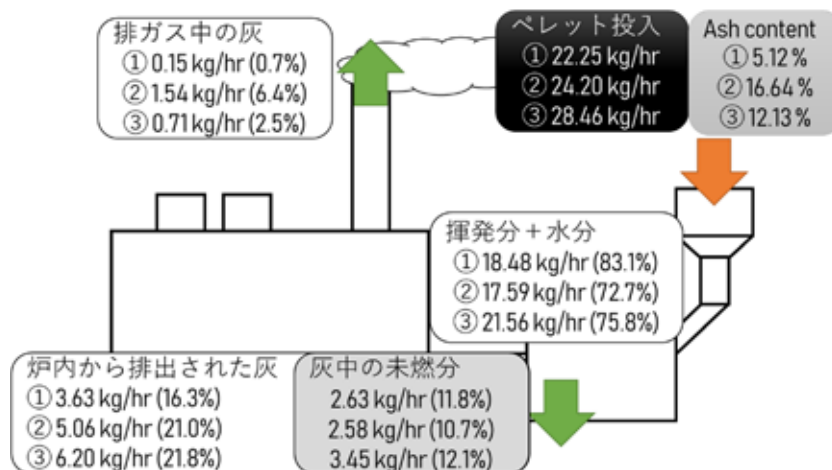


図 4-12 定常運転時における物質収支

ペレット投入量とペレットの灰分の積から理論灰発生量が算出でき、その値から炉内から排出された灰の量を差し引いた値を排ガスから排出されたと想定される灰とした。排ガスから排出された灰は TP ペレットの場合が 1 番少なくペレット投入量に対して 1%を下回った。これは、TP ペレットは機械的耐久性が高いため、ペレットの輸送や取扱い時に破損し、粉化した割合が少ないからであると考えられる。

#### 4. 3. 6 燃焼試験のまとめ

株式会社武田鉄工所のバイオマス燃焼用温風式熱供給装置での燃焼試験の結果、灰分の多い稲わらペレットの 3 時間の燃焼は可能であった。

投入されるペレットの発熱量を 9 万~10 万 kcal/hr 程度に調整したとき、必要なペレットの重量は未処理のペレットと比べ、TP ペレットや PT ペレットは 8 割程度に抑えられ、また、TP ペレットの必要となる体積は未処理のペレットと比べ 6 割以下まで抑えることができた。同じ熱量を取り出すのに必要なペレットの体積が減ることで、使用場所での保管スペースが少なく済み、また、燃料を貯めておく燃料ホッパーへの供給頻度も減らすことができる。

燃焼試験後に炉内にはどの条件においても多少の灰と大小いくつかのクリンカしか残っていなかったため、3 時間以上の運転も可能であると思われる。クリンカの化学組成はいずれのペレットの燃焼時でも SiO<sub>2</sub> が 80%弱であり、K<sub>2</sub>O の融点が下がる組成であった。そのため、炉内の温度が K<sub>2</sub>O の融点を下回る 800℃以下になるように運転することで大きなクリンカの生成を防ぐことができるとと思われる。

また、定常運転時のエネルギー収支を計算したとき、投入エネルギーを 100%とすると、どのペレットにおいても、熱交換器出口の出力が 35%程度、排ガスからの損失が 20%程度、未燃分としての損失が 15%程度、その他損失が 30%程度となった。



また、定常運転時に排ガスに含まれていたと考えられる灰の量は TP ペレットが 1 番少なく、これは、TP ペレットは機械的耐久性が高いため、運搬時や取り扱い時に粉化した割合が少なかったためであると考えられる。

## 5. 本研究の結論

本研究では、多様な農業残渣を対象とした半炭化実験及び実規模ボイラーでの燃焼試験を行って、以下の結論を得た。

### a) 半炭化条件（温度、時間）と半炭化物の性状の関係

- ・発熱量と灰分の観点から、とうもろこしの葉と根本、稲わらは燃料利用可能性が高いが、籾殻やスイカの茎は灰分が高く燃料利用可能性は低い。
- ・揮発分の減少と破碎性の向上には関係性がある。
- ・熱量残存率及び破碎性を考慮して、各農業残渣における最適な半炭化条件を示すことができた。

### b) 半炭化物の保管時の含水率等性状の変化

- ・OH 基が減り疎水性に近づくため、平衡含水率が減少し、保管がしやすく、また燃料としての質の向上につながる。

### c) 半炭化物から製造したペレット（半炭化ペレット）燃料特性

- ・稲わらを半炭化することで、稲わらペレットの従来のサプライチェーン上の課題であった発熱量、保管・輸送効率の点で、木質ペレットと同等にまで改善可能であることを示した。今後、半炭化に必要なコストも含めた全体コストの削減効果を検討する必要がある。

### d) 半炭化ペレットの燃焼特性と灰およびクリンカ生成特性

- ・分散型熱利用を想定したボイラーでの燃焼試験の結果、クリンカ問題は発生せず 3 時間の連続・安定燃焼が可能であることを示した。
- ・特に、半炭化した稲わらと未処理の木質の混合ペレット(TP)は、同様のボイラー出力を得るために必要となるペレットの削減が可能であり、保管スペースの削減、燃料ホッパーへの供給頻度の低下につながる。さらに排ガス中の粉じんの削減やさらなるボイラー出力の向上が期待されることを示した。

## 参考文献

- 1) 廃棄物固形化燃料-第 3 部：水分試験方法（2017 年 1 月 26 日閲覧）

<http://kikakurui.com/z7/Z7302-3-1999-01.html>



- 2) 廃棄物固形化燃料-第4部：灰分試験方法（2017年1月26日閲覧）  
<http://kikakurui.com/z7/Z7302-4-2009-01.html>
- 3) 石炭類及びコークス類 ボンプ熱量計による総発熱量の測定方法及び真発熱量の計算方法（2017年1月26日閲覧）  
<http://kikakurui.com/m/M8814-2003-01.html>
- 4) 熱重量・示差熱 TG-DTA（2017年1月26日閲覧）  
<http://www.rigaku.com/ja/technique/d01>
- 5) Kumar, L., Koukoulas, A. A., Mani, S. & Satyavolu, J.: Integrating Torrefaction in the Wood Pellet Industry: A Critical Review, *Energy & Fuels*, 31(1), pp.37–54 (2017)
- 6) 日本工業規格 JIS M 8812 石炭類及びコークス類—工業分析方法—(2004).
- 7) 日本工業規格 JIS M 8819 石炭類及びコークス類—機器分析装置による元素分析方法 (1997).
- 8) 日本工業規格 JIS B 7920 湿度計-試験方法, (2000) Available at:  
<http://kikakurui.com/b7/B7920-2000-01.html>.
- 9) 北野寛, 高橋千晴 & 稲松照子: 塩類の飽和水溶液による湿度定点の実現方法, 計測自動制御学会論文集, 23(12), pp.1246-1252 (1987)
- 10) 一般社団法人日本木質ペレット協会 改訂版【木質ペレット品質規格】(平成 28年11月15日発効) <http://w-pellet.org/hinshitsu-2/>
- 11) 熱重量・示差熱 TG-DTA, Rigaku Available at:  
<https://www.rigaku.com/ja/technique/d01>. (Accessed: 28th January 2019)
- 12) 小縣大輝: 経産省「はばたく中小企業 300社」 武田鉄工所(帯広)が選出 2018年4月25日, 十勝朝日新聞 2018年4月25日 pp.3
- 13) 長谷川正人: かちまいエコノミー 十勝の技術に高評価, 十勝朝日新聞 2018年10月14日 pp.3
- 14) 株式会社武田鉄工所: バイオマス燃焼用温風式熱供給装置小型バイオマスバーナーユニット TKD-SBU02, Available at: <https://recycbarner.jimdofree.com/>.
- 15) Slagging and Fouling Indices, Available at:  
<http://www.coaltech.com.au/LinkedDocuments/Slagging & Fouling.pdf>. (Accessed: 28th January 2019)
- 16) Jenkins, B. M., Baxter, L. L., Miles, T. R. & Miles, T. R.: Combustion properties of biomass, *Fuel Processing Technology*, 54(1-3), pp.17-46 (1998)

## 謝辞

本研究は、公益財団法人 JFE21 世紀財団の研究助成によるものである。関係各位に感謝申し上げます。