

# 新規バイオマス燃料導入に向けた調査・分析メニュー

田内 希<sup>\*1</sup> 宮下 和大<sup>\*1</sup>  
 Tauchi Nozomi Miyashita Kazuhiro

近年地球温暖化対策としてバイオマスエネルギーの利用が広く普及してきている。一方で、バイオマスは種類によって性状が大きく異なり、その中にはボイラトラブル誘発因子のアルカリ成分を多く含むものも存在することがわかっている。そこでバイオマス燃料の燃料性状や設備への影響（焼結性、付着性等）を予測し、設計や運転・メンテナンスに反映させることが求められている。本稿では、バイオマス発電ボイラを安定して運用していくために重要となるバイオマス燃料の調査・分析メニューの一例を紹介する。

キーワード：バイオマス、膠着度、灰組成、燃焼性、溶解性、灰障害、アグロメレーション、灰付着、腐食

## 1. はじめに

バイオマスエネルギーは持続可能なエネルギー資源として関心が高まり、石炭火力からバイオマス火力発電への置き換えが進められている。一方、バイオマス燃料は松、杉、竹など木質系のものから、椰子殻、鶏糞などの農業系廃棄物、建築廃材に至るまで多岐にわたり、その種類によって性状が大きく異なる。そのため従来の石炭火力ボイラの発電方式（直接燃焼方式）から、バブリング流動床方式や循環流動層方式に発展することで燃

焼効率の向上を図っている<sup>(1)</sup>（図1）。しかしこのような性状の違いや発電方式の転換により、アグロメレーション（※1）<sup>(2)</sup>や伝熱管への灰付着や腐食等<sup>(3)</sup>の新たなトラブルが発生している。これらのトラブルを防ぐためには、事前にバイオマスを調査し、選定する必要がある。本稿では、バイオマス燃料および燃焼灰に対して、重要である調査・分析メニュー（表1）について説明する。

※1：流動媒体となる珪砂と反応し塊状の固着物を生成し、最終的に流動不良を起こす。

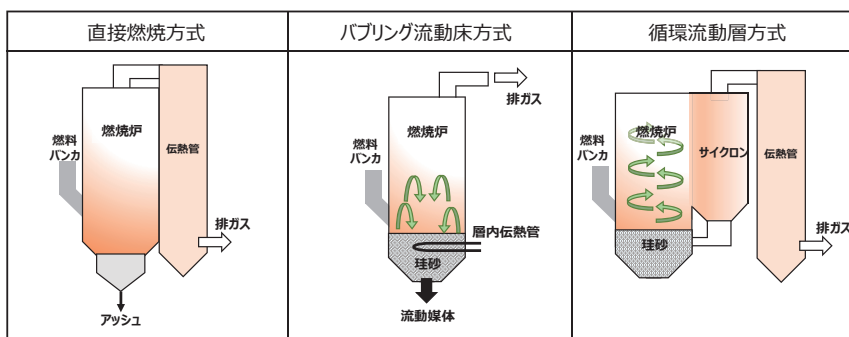


図1 主なバイオマス発電方式

\*1：研究開発センター 研究開発グループ

表1 バイオマス燃料の調査・分析メニュー例一覧

	調査項目	評価項目	詳細	分析手法
燃料	バイオマスの燃料適性	寸法計測		寸法測定
		水分量	操作性、粉碎時の付着性の把握	全水分測定
		基礎性状	燃焼効率の把握	工業分析
		熱量	完全燃焼時の熱量を把握	発熱量測定
		燃焼傾向	着火温度、燃え切り温度の把握	TG-DTA測定
	燃料の燃焼性	燃料組成		元素分析
		粉碎性	粉碎後の粒径予測	構成粒子径測定
			ポイラミル粉碎後の粒径実測	粉体燃料の粒子径測定
	輸送性	耐衝撃性	ペレットの硬さで評価	機械的耐久試験
	保管性	かさ密度	単位体積当たりの重量を評価	かさ密度測定
自然発火性		貯蔵時の自然発火のリスク評価	ワイヤーバスケット試験	
灰	アグロメレーション (アグロメ)	灰の焼結性	アグロメ発生予測	膠着度
		アグロメの断面観察/元素分析	アグロメ発生過程の推測	SEM-EDS分析
		流動砂の粒度	流動性の予測	粒径測定
	伝熱管閉塞	灰組成	アルカリ成分の含有量を調査	組成分析
		灰融点測定	温度変化に伴う形状変化観察	溶融特性試験
		灰溶融予測	溶融挙動を計算	シミュレーション
		凝集性	付着温度の推測	膠着度
		添加剤評価	灰の付着温度の変化を測定	膠着度
	伝熱管腐食	灰組成	腐食因子の含有量を調査	組成分析
		高温腐食	試験体の腐食量を評価	灰塗布試験

## 2. バイオマス燃料に関する調査・分析メニュー

### 2.1 バイオマスの燃料適性調査項目

#### (1) 寸法計測

バイオマス燃料の大きさは、搬送性や燃焼速度に関係し、推奨されている規格サイズの燃料を選別することで、サイズの不均一による搬送時のトラブル回避や燃焼効率の向上につながる<sup>(4)</sup>。「寸法計測」ではその大きさや形状を測定し、そのバラつきなどを評価する。

#### (2) 水分量

燃料の取扱いやすさや、粉碎時の付着性を把握するための手法として、「全水分測定」がある。燃料を一定粒度以下まで粉碎し、これを既定の温度で重量変化がなくなるまで乾燥させ、その重量変化分を計測する。

#### (3) 基礎性状

バイオマス燃料の水分・灰分・揮発分・固定炭素の存在比率でその燃料の燃焼品質が把握できる。各項目が示す性状を表2に示す。この4項目の分析をまとめて「工業分析」と呼ぶ。

表2 工業分析項目が示す燃料性状

水分	水分量が少ないほど着火性が良く、発熱量が大きい
灰分	灰分が少ないほど発熱量が大きく、廃棄物が少ない
揮発分	可燃成分であり、多いほど燃焼効率が良い
固定炭素	可燃成分であるが難燃性のため、少ないほど燃焼性が良く、未燃分が残りにくい

#### (4) 熱量

「発熱量測定」により、燃料がもつ完全燃焼した際の熱量を把握する。

#### (5) 燃焼傾向

燃焼傾向とは、「発火温度(火種がなくとも自然

発火する温度)」や「燃え切り温度」のことを指す。これらを簡便に測定する方法として「TG-DTA 測定」がある(図2)。TG-DTA 測定とは、温度変化時の試料の重量変化(TG)と、試料と基準物質の温度差を測定する示差熱測定(DTA)を同時に計測する手法である。すなわち、重量が段階的に減少する様相から試料の水分量、灰分量を求め、示差熱の値から着火点、燃え切り温度、さらには分解、酸化、耐熱性などの物性評価が可能である。

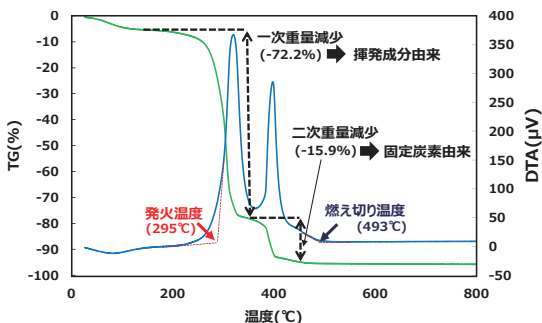


図2 TG-DTA 測定による燃焼挙動計測例

## 2.2 燃焼性調査項目

### (1) 燃料組成

燃料の品質規格に適合しているかどうかの判定をする。着目する元素は主成分のC・H・N・Sおよび微量元素のF・Cl・B・Se・Hg・As等である。

### (2) 粉碎性

バイオマスペレットは粉碎された木くずを加工して作られるが、構成粒子径が大きい(粗い)と燃焼効率が悪く、構成粒子径が小さい(細かい)と燃焼効率は良いことが知られている。「構成粒子径測定」では、加工する際のペレットの元になる木くずがどのくらい微粉碎されていたかを測定する。手順を図3に、構成粒子径の粒径比較を図4に示す。

実際にバイオマスペレットがボイラミルにて規定サイズ以下まで粉碎されているか確認する方法として「燃料管における粉体燃料の分析試験」がある。この試験は、IHI 社内規格<sup>(5)</sup>に則り、燃料バンクから燃焼炉の間の燃料管内部風速を計測しながら、この風速と同じ流速でノズルから内部空気を吸引して木粉や微粉炭の粒子を捕捉し、粉体燃料試料の流量・粒子径データを得るものである。

この試験は、微粉炭焼きボイラを木粉焼きボイラとして流用する際にミルの性能評価にも利用する。

## 2.3 燃料の輸送性調査項目

### (1) 耐衝撃性

バイオマスペレットが小さな力で崩れるとサイロへの安定供給に支障をきたす。当社では、実際

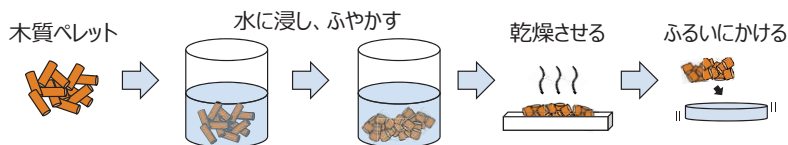


図3 構成粒子径測定の手順例



図4 構成粒子径の粒径比較

にペレットが受ける力の形態を想定し、「機械的耐久試験」でペレットの強度を把握している。これは、回転衝撃力に対するバイオマスペレットの耐粉化性能を求めるもので(図5)<sup>(6)</sup>、一定量の機械的衝撃を与えた後に壊れなかった部分の質量割合を求めることで、ペレットをサイロに投入する際や、コンベア搬送する場面などでの「崩れにくさ」を評価する基礎データになる<sup>(7)</sup>。

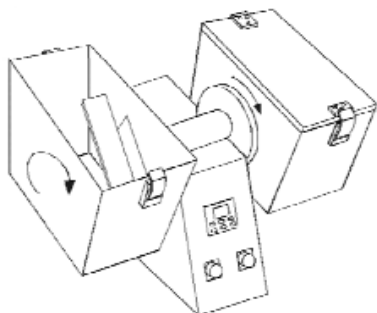


図5 耐久性試験器の例(ツイン回転箱)

## 2.4 燃料の保管性調査項目

### (1) かさ密度

貯蔵スペースの算出には「かさ密度」が用いられる。かさ密度は、単位容積あたりの重量を算出する基礎データである。バイオマスは石炭・石油などに比べ、かさ密度が小さいことから貯蔵時に3~6倍もの容積を必要とする。

### (2) 自然発火性

自然発火とは「物質が空气中で、発火温度よりはるかに低い温度で自然に発熱し、その熱が長時間蓄熱されて発火点に達し、遂に燃焼に至る現象」である<sup>(8)</sup>。バイオマスペレットの自然発火を防ぐ貯蔵方法を検討するために、自然発火性の傾向を把握することは重要である。貯蔵時の状態を模擬的に再現し(図6)、その状態での蓄熱・放熱バランスから、自然発熱性を評価する試験として「ワイヤーバスケット試験」がある。一定粒度に調整したバイオマスをワイヤーで作ったバスケット

に充填し、乾燥機内に静置した状態で、継続的に温度変化とガス成分情報を計測することで自然発火性の傾向を把握する。

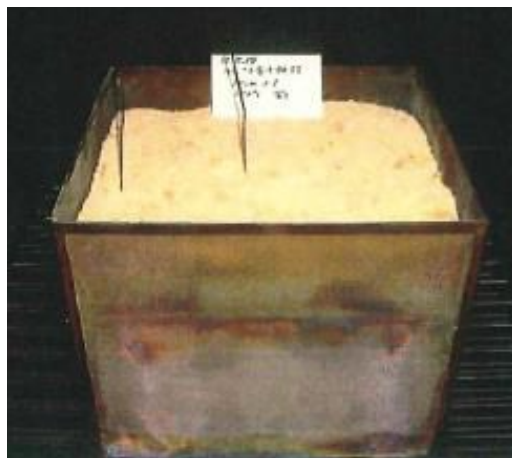


図6 ワイヤーバスケットの充填状況

## 3. バイオマス灰に関する調査・分析メニュー

燃焼後に生じる灰がボイラトラブルを引き起こすことが知られている。そのため、燃料としての特性のほか燃焼灰についても検査・分析が必要である。

### 3.1 アグロメーションに関する予防と対策

バイオマス発電によく用いられる循環流動層ボイラでは多量の珪砂( $\text{SiO}_2$ )が流動媒体として使われている。これらの珪砂とバイオマス燃料が燃焼炉内にて高温下に置かれることでアグロメーション(以下、アグロメ)と呼ばれる焼結体を形成することがわかっている(図7)。アグロメが増えるほど、珪砂は流動が困難になり最終的には流動不良が起きる。そのため、アグロメに対する事前対策や発生した際の原因調査は重要である。

#### (1) 灰の焼結性

当社ではアグロメの生成具合を、焼結体の硬さの指標である「膠着度」を用いて評価している



図7 実際に生成したアグロメレーション

(図8)<sup>(9)</sup>。灰と珪砂の混合試料で膠着度を求めれば、灰と珪砂の焼結体形成の可能性がわかり、アグロメの起きやすさを予測できる<sup>(10)</sup>。膠着度は焼結体の崩れやすさの目安であり、1.0に近いほど

焼結体が崩れず、炉内トラブルが発生しやすいと推定する(式(1))。

$$\text{膠着度} = \frac{\text{試験後の重量}}{\text{試験前の重量}} \quad (1)$$

(2) アグロメの断面観察 / 元素分析

アグロメ生成の原因究明手段の一つとして、実際に生成したアグロメの表面や断面の観察や元素の定性/定量分析を実施している。断面の元素分布マッピングで元素ごとの偏析状態が把握でき、原因物質の推定に役立つ。図9はアグロメ断面の元素マッピングの一例である。マッピング像では、色により各画像内の存在割合を示している。以下画像においては、Si(珪砂主成分のシリコン)の周りにK(カリウム)やCa(カルシウム)が囲うように同一箇所が付着しており、K-Si-Ca化合物の形成によるアグロメの発生が読み取れる。

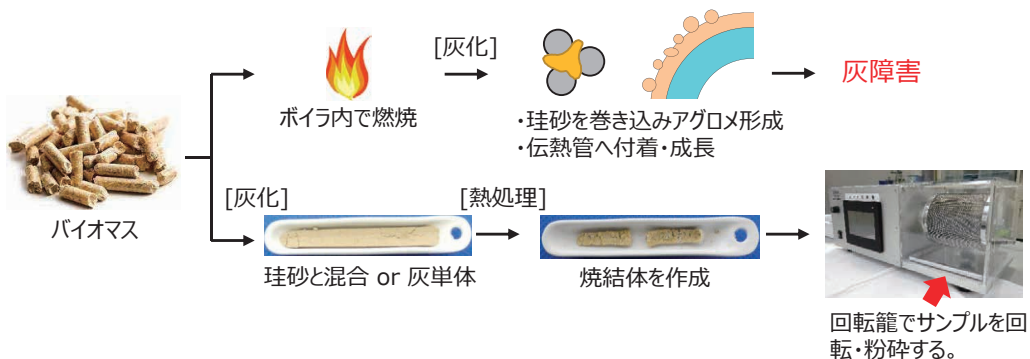


図8 膠着度の概念図

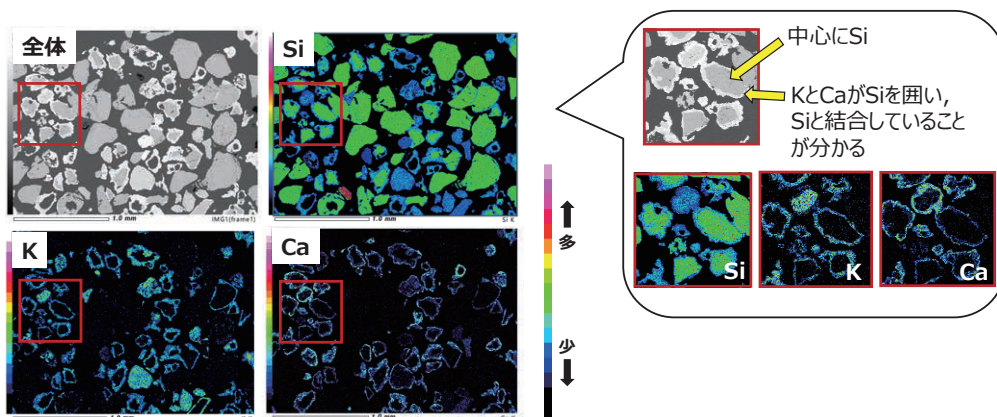


図9 アグロメ断面の元素マッピング

### 3.2 伝熱管閉塞に関する調査

バイオマス燃料の灰はアルカリ成分(K, Na)を多く含む。アルカリ成分は灰の融点を下げることが知られており、低融点灰の伝熱管への付着による伝熱阻害を発生させることがある。そのため、灰組成や凝集具合からこの現象を事前に調査・評価することが重要である。

#### (1) 灰組成

灰組成は、試料にX線を照射したときに発生する蛍光X線(XRF)を元に、含有する元素の分析結果から灰の化学組成を求める。バイオマス燃料である EFB(Empty Fruits Bunch：パーム椰子房繊維)とコーヒ<sup>かす</sup>ー滓の測定結果の一例を表3<sup>(11)</sup>に示す。成分、特にアルカリ成分の含有率割合により灰の溶融温度および灰障害の発生が予測できる。

表3 バイオマス燃料の元素分析結果の一例

試料	EFB	コーヒ <sup>かす</sup> ー滓
SiO <sub>2</sub>	25.3	9.12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.34	8.87
TiO <sub>2</sub>	0.05	0.84
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.54	5.49
CaO	3.13	24.8
MgO	4.62	6.3
Na <sub>2</sub> O	1.04	2.43
K <sub>2</sub> O	47.4	7.4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3.17	7.8
MnO	-	-
SO <sub>3</sub>	1.44	7.8
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-
Li <sub>2</sub> O	-	-
CuO	-	-
Cl	15.2	-
F	-	-

EFBはアルカリ成分が多くコーヒ<sup>かす</sup>ー滓より融点が低いことが予想される。

#### (2) 灰融点測定

当社では、灰障害抑制や操業管理をする上で、バイオマス灰の溶融特性を実測する手法として、DIN51730(溶融性試験方法)規格に則り、高温加熱顕微鏡を用いてバイオマス灰の温度による形状変化測定を採用している(表4、図10)。これは高温加熱顕微鏡にて温度変化に伴う灰を円柱状に成型したテストピースの形状変化により、溶融性や収縮・膨張等の変化も記録できる(図11)<sup>(12)</sup>。

#### (3) 灰溶融予測

灰の溶融挙動・溶融形態を予測には、熱力学平衡計算ソフトウェア「FactSage」を用いた<sup>(13)</sup>シミュレーション手法をとることもできる<sup>(14)</sup>。本ソフト

表4 溶融特性試験条件

規格	DIN51730(溶融性試験方法)に準拠
測定温度	常温~1500℃
測定雰囲気	酸化性(空気雰囲気)、還元性



図10 ライツ高温顕微鏡外観

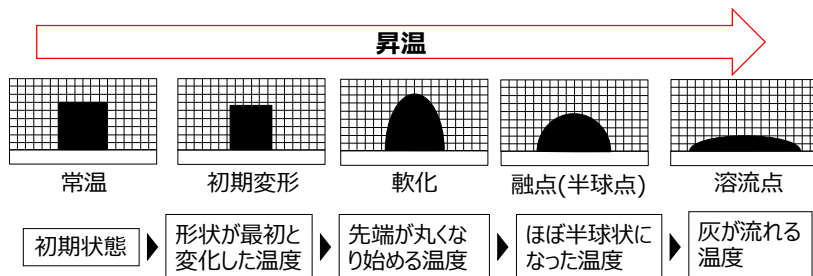


図11 溶融性指標

ウェアでは、灰組成やさまざまな温度、雰囲気、圧力条件を入力することで、灰溶融挙動を計算することができる。図12に灰の溶融挙動を計算した例を示す。運転温度での溶融灰、すなわちスラグの割合を見ることで伝熱管への付着や閉塞を予測できる。

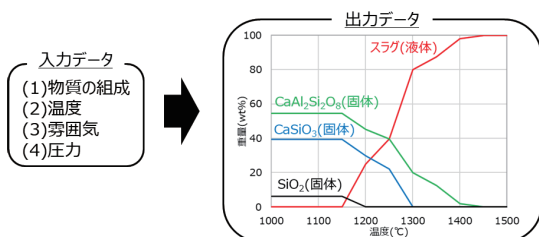


図12 灰溶融シミュレーションの手順

#### (4) 凝集性評価 / 添加剤評価

(1)～(3)で灰の融点が高いことがわかったとしても、固着物の硬さが低く、崩れやすければ閉塞にはつながりにくい。また灰付着抑制を目的とした添加剤は、凝集灰をもろく崩れやすくする傾向がある。そのため、凝集灰の硬さや崩れやすさに関しては、3.1節(1)に示した「膠着度」を求めることで評価できる<sup>(11)</sup>。

### 3.3 伝熱管腐食に関する調査項目

バイオマスボイラでは、灰に含まれるアルカリ成分や腐食性ガス(硫黄、塩素)の影響により、伝熱管が腐食し、定期的なメンテナンスが余儀なくされている<sup>(3)</sup>。そのため、事前に燃料の腐食特性を把握することで腐食トラブル低減等につながる。

#### (1) 灰組成

3.2節(1)と同様の方法でバイオマス灰の組成を調べることで、灰に含まれる腐食因子含有量を求めることができる。特に腐食トラブルの直接的な原因である塩素濃度に着目することが多い。

#### (2) 高温腐食

バイオマス発電ボイラ内は、高温(500～1000℃)かつ、腐食性ガスによる腐食が発生しやすい環境である。実際のボイラ環境を模擬した高温腐食試験により、バイオマス燃料の腐食性やボイラ部材の耐腐食性も評価できる。試験装置概要と試験実施可能条件を図13、表5<sup>(15)</sup>に示す。当社では、試験片に灰を塗布し、高温環境下でガスを流す灰塗布試験を実施している(図14)<sup>(16)</sup>。これは表面状態や重量減少から腐食を評価する。

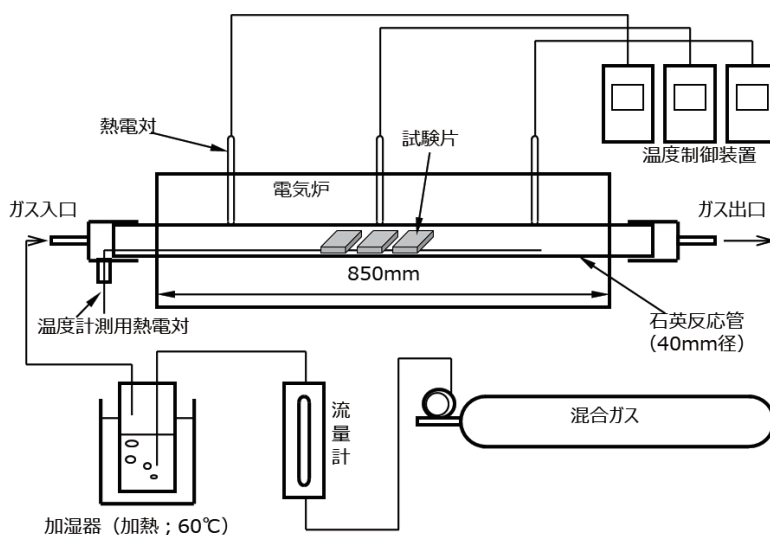


図13 高温腐食試験装置概要

表5 実施可能な腐食試験条件

温度	室温~1000℃
供給可能なガス	塩化水素*1、硫化水素*1、二酸化硫黄、アンモニア、水素*1、ヘリウム、窒素、酸素、アルゴン、二酸化炭素、一酸化炭素など
反応管材質	石英、ガラス、SUS、アルミナなど
反応管内径	4~75mm
分析可能なガス	供給可能なガスに加え、一酸化窒素などの空気中では不安定な物質やガス状有機物
圧力	常圧

\*1：ガス濃度は応相談

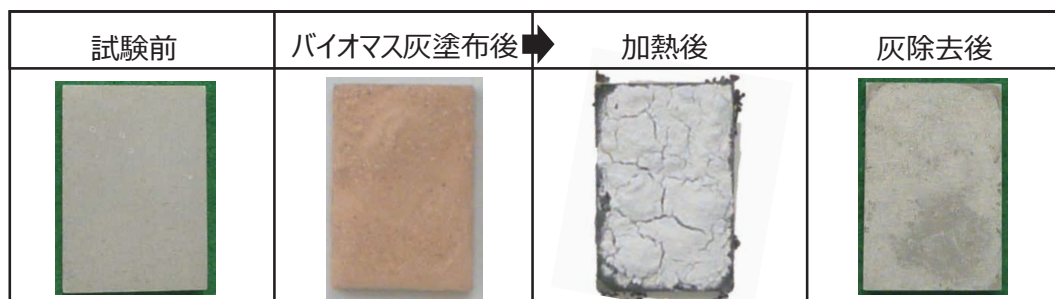


図14 灰塗布試験前後の外観状況（700℃で1時間）

#### 4. まとめ

本稿ではバイオマス燃料を「燃料」と「灰」の二つの状態に分類し、それらの各種調査・分析メニューを紹介した。「燃料」分析からはバイオマス燃料としての燃料適性が把握できる。一方でボイラトラブルは「灰」性状に由来することが多い。今後利用されるバイオマスは更なる多様化が見込まれることから、これら両面でバイオマス燃料を調査・分析することが安定したボイラ運用やボイラトラブル抑制につながる。そこで本稿がバイオマス燃料の最適な調査・分析に役立ていただければ幸いである。

#### 参考文献

- (1) 小島、高濱、芦澤：国内バイオマス燃焼発電システムの現状調査・分析、2007
- (2) K. O. Davidsson, L. -E. Åmand, B. -M. Steenari,

A. -L. Elled, D. Eskilsson, B. Leckner : Countermeasures against alkali related problems during combustion of biomass in circulating fluidized bed boilers, Chem. Eng. Sci., Vol.63, 2008, pp.5314-5329

- (3) 佐藤直樹、奥原洋人、和田知歌子、松永康夫、大野恵美：バイオマス専焼ボイラの付着灰影響の解明と対策、IHI 技報、Vol.61、No.2、2021、pp.29-41
- (4) 燃料用木質チップの品質規格：木質バイオマスエネルギー利用推進協議会、2016
- (5) S. Matsunari, K. Watanabe, E. Ohno, M. Echizenya : Sampling method for woody biomass particles conveyed by air in the fuel pipe of a pulverized coal firing boiler, Mech. Eng. J. 7, 2020, pp.1-10
- (6) 木質ペレット品質規格：一般社団法人日本木質ペレット協会、2017



- (7) 長島陽一、永瀬成世、高野卓：バイオマス燃料分析サービス、IIC REVIEW、Vol.65、2021/04、pp.35-37
- (8) 大橋、笹内、水野、井田、淵端：保管時の安全確保にかかるバイオコークスの発熱特性、スマートプロセス学会誌、5巻、3号、2016、pp.198-206
- (9) 田内希、宮下和大、茂田潤一：バイオマス中アルカリ成分が流動層ボイラに及ぼす影響、IIC REVIEW、Vol.68、2022/10、pp.19-26
- (10) 知恵、茂田：膠着度によるバイオマス燃料の灰障害予測評価、火力原子力発電、Vol.73、No.5、2022、pp.403-407
- (11) 茂田潤一、知恵賢二郎、高野卓：バイオマス専焼時の灰障害予測評価、IIC REVIEW、Vol.66、2021/10、pp.26-31
- (12) 茂田潤一、知恵賢二郎：高温加熱顕微鏡による石炭灰の溶融温度測定技術、IIC REVIEW、Vol.49、2013/04、pp.46-55
- (13) 株式会社計算力学研究センターホームページ：<https://www.rccm.co.jp/product/thermodynamics/factsage/>
- (14) 内村大道、宮下和大：灰障害予測に対するシミュレーションの適用、IIC REVIEW、Vol.68、2022/10、pp.13-18
- (15) 江部郁仁、則定和志：ガスを用いた触媒試験および腐食試験の紹介、IIC REVIEW、Vol.65、2021/04、pp.38-40
- (16) 茂田潤一、梶ヶ谷一郎：燃焼灰の高温腐食試験法と腐食性評価の紹介、IIC REVIEW、Vol.34、2005/10、pp.32-38



研究開発センター  
研究開発グループ

田内 希

TEL. 045-791-3522  
FAX. 045-791-3547



研究開発センター  
研究開発グループ

宮下 和大

TEL. 045-791-3522  
FAX. 045-791-3547