

# 高温ガス化直接溶融炉におけるコークスゼロ操業と バイオマス炭多様化に向けた実証

## Demonstration of Zero-Coke Operation and Biomass Charcoal Performance Verification in High-Temperature Gasifying and Direct Melting Furnace

奥山 契一 OKUYAMA Keiichi JFE エンジニアリング 環境本部 開発センター  
渡辺 純也 WATANABE Junya JFE エンジニアリング 環境本部 エンジニアリングセンター装置設計部 流動・ガス化設計室  
グループリーダー  
川畑 秀駿 KAWABATA Hidetoshi JFE エンジニアリング 技術本部 総合研究所

### 要旨

シンガポールの高温ガス化直接溶融炉実証設備で、灰溶融燃料として使用されている石炭由来のコークスを、バイオマス炭により代替する試験を実施した。コークスはバイオマス炭によって 100% 代替でき、消費重量も同程度となった。東南アジアの市販品から選定した 4 種類のバイオマス炭の消費重量を比較し、バイオマス炭に求められる性状として、見掛密度、揮発分、一個あたり重量を規定した。2 種類のバイオマス炭を混合使用すると、消費重量は平均値ではなく高性能なバイオマス炭に近い値に低減された。これらより、実機におけるカーボンニュートラルを目指したコークスゼロ操業およびバイオマス炭の多様化に向け、大きく前進した。

### Abstract:

High temperature gasifying and direct melting furnace uses coal-derived coke as auxiliary fuel to melt ash. The performance of biomass charcoal as a substitute for coke was studied using the demonstration facility in Singapore. Results show that biomass charcoal can be fully substituted for coal-derived coke at comparable consumption rates. A maximum charcoal consumption ratio of 1.5 was obtained through the evaluation of four different types of biomass charcoal from suppliers across Southeast Asia. As suitable biomass charcoal, the following minimum requirements were found: apparent density above 0.94 g/cm<sup>3</sup> (dry basis), volatile matter content below 7%wt. (dry basis) and weight per piece above 90 g (dry basis). In addition, when two types of charcoal are mixed, total consumption rate is not the mean value between the two types of charcoal, but decreased towards the value of the higher performance charcoal. Above results represent an encouraging step towards zero-coke operation aimed at carbon neutrality, as well as the diversification of suitable biomass charcoal in order to secure its stable sourcing at commercial stage.

## 1. はじめに

カーボンニュートラルを実現するための取り組みが世界各国で進められている。脱炭素化のためには化石燃料、特に石炭系燃料の削減や、再生可能エネルギーへの代替が求められる。

JFE 高温ガス化直接溶融炉は、廃棄物をガス化するとともにコークスを使用し灰分を溶融させるため、一般廃棄物をはじめ、産業廃棄物、焼却灰、掘り起こしごみ、アスベストなど多様な廃棄物を処理でき、2003 年の初号機竣工以降、国内外で 13 プラントの納入実績がある<sup>1-3)</sup>。このプロセスは製鉄プロセスにおける高炉技術をベースとしているため、石炭誘導品であるコークス（以下、コークス）の使用を前提

としていることから、バイオマス燃料によりコークスの代替を進める実機試験が進められてきた<sup>4-7)</sup>。コークスよりも原木の入手が容易な地域では、高炉において木炭が製鉄原料として用いられることから<sup>8)</sup>、バイオマス燃料によるコークスの完全代替は非現実的な着想ではない。ただし、地域ごとに安価な燃料を選定して適用することで、環境性と経済性を両立させることは重要である。

シンガポールは最終処分場が逼迫し廃棄物焼却灰の再資源化が喫緊の課題となっており、また廃棄物処理の高度化にも積極的である。当社はシンガポール南洋理工大学と次世代の廃棄物処理技術に関する共同研究契約を締結し、同大学から受注した高温ガス化直接溶融炉実証設備（Waste-to-Energy Research Facility: 以下、WTERF）を 2019 年に竣工した。シンガポールではカーボンニュートラルに向けた政府

2022 年 3 月 18 日受付

方針によりコークスの商用輸入は許可されず、コークスをバイオマス燃料によって完全代替することが求められており、この共同研究の中で WTERF による検証を進めてきた。

本稿では、シンガポールでの実証試験により得られた知見の中から、バイオマスを炭化した燃料（以下、バイオマス炭）によるコークスの代替について述べる。地理的な理由でバイオマス燃料の入手が容易な同国で、日本で蓄積してきたコークス代替技術を発展させ、バイオマス炭によりコークスを完全代替するコークスゼロ操業を検証した。さらに、商用化時に課題となるバイオマス炭入手量の確保に向け、複数種の製品の単独および混合使用時の消費量を確認し多様化を進めたので、これらの成果を報告する。

## 2. 高温ガス化直接溶融炉の概要

図1にJFE高温ガス化直接溶融炉の炉内断面図を示す。炉下部の主羽口から酸素富化空気、炉中段の副羽口から空気が吹き込まれ、炉頂から廃棄物、コークス、石灰石が投入される。溶融炉内に堆積した廃棄物層の最上部では水分の蒸発が、その直下で可燃分の熱分解が進行する。廃棄物の固定炭素と灰分は、投入されたコークス、石灰石とともに溶融炉内を予熱されながら下降する。この間に固定炭素は炉下部から上昇してくるO<sub>2</sub>および高温のCO<sub>2</sub>により、燃焼およびガス化される。灰分はコークス、石灰石と共に炉下部に到達する。

ここで、廃棄物が短時間で消失するのに対し、コークスは長時間をかけて消費されるため、残留したコークスは炉底に堆積し充填層が形成される。コークス充填層では、主羽口から供給された酸素富化空気によりコークスが燃焼し、その燃焼熱で灰分が溶融される。このとき、石灰石は灰分の融点を下げ、生成した溶融スラグの粘性を低下させて流

動性を向上させるはたらきをする。溶融スラグはコークス充填層を流下し、出滓口から連続的に排出される。

主羽口および副羽口から吹き込まれる酸素の総量は、投入された廃棄物を完全燃焼させる量に対し大幅に少ないため、COやH<sub>2</sub>を含む可燃ガスが生成する。廃棄物層で発生した可燃ガスは、溶融炉後段の二次燃焼室で完全燃焼される。燃焼ガスは、ボイラーで熱回収され、排ガス処理系へ送られる。

## 3. バイオマス炭の概要

### 3.1 バイオマス炭の選定

コークスを完全代替するためのバイオマス炭には、コークスに近い性状が求められる。炭化がよく進み、高密度で大きなサイズのものが好ましい。バイオマス炭の一種である木屑成型品炭化物は、製材所から排出される鋸屑を六角柱状や四角柱状に押出成型した後、高温で炭化した市販品であり、高価な備長炭の代用品として広く用いられている。「オガ炭」や「Saw dust charcoal」とも呼称されるこの製品は、性能と経済性を両立させ得るため、高温ガス化直接溶融炉で標準的なコークス代替品として使用できるが、製造会社により品質はさまざまである。高温ガス化溶融炉で使用するバイオマス炭として、マレーシアおよびベトナムで入手可能な市販品の中から、高品質な4種類を選定した。それらの外観を写真1に示す。バイオマス炭Aはマレーシア製、バイオマス炭B、CおよびDはベトナム製であり、バイオマス炭Dはバイオマス炭Cの改良品である。

良質の木屑成型品炭化物は長い棒状のまま製品となるが、使用設備でのホップ等におけるブリッジを避けるため、特別に80mm程度の長さに折った仕様を指定した。

### 3.2 バイオマス炭性状の比較

コークスと比較した各バイオマス炭の性状を表1に示す。いずれのバイオマス炭もコークスと同様に80乾wt%以上が固定炭素で構成されていた。また、一般に原料バイオマスに含まれる灰分は石炭より少ないため、製品であるバイオマス炭の灰分はコークスよりも低い値になっていた。

バイオマス炭の形状は消費速度に影響する。コークスや

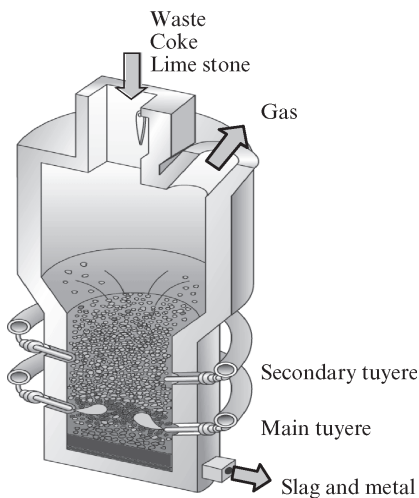


図1 高温ガス化直接溶融炉

Fig. 1 Schematic configuration of high temperature gasifying and direct melting furnace

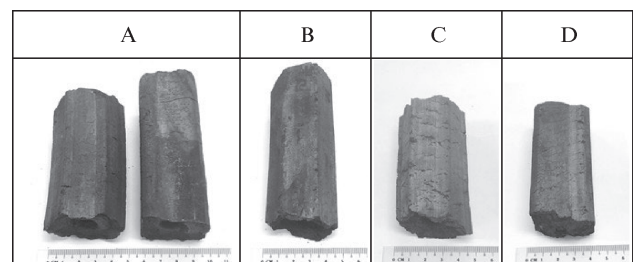


写真1 バイオマス炭の外観

Photo 1 Biomass charcoals

表 1 バイオマス炭の性状  
Table 1 Properties of biomass charcoals

Type		Saw dust charcoal					Coke
Biomass charcoal name		A		B	C	D	
Size	(mm)	φ48×L80	□39×L80	φ43×L80	φ44×L80	□37×L80	40～80
Weight*	(g-dry/piece)	103	99	91	85	100	40～400
Proximate analysis	Moisture	(wt%-dry)	6.7	8.5	8.6	9.5	1～6
	Ash	(wt%-dry)	2.3	4.2	5.5	6.4	10～13
	Volatile matter	(wt%-dry)	3.6	4.3	6.9	6.1	0.3～2
	Fixed carbon	(wt%-dry)	94.1	91.5	87.6	87.5	85～89
Lower calorific value	(MJ/kg)	30.3	28.9	28.1	26.5	27～30	
Apparent density (dry basis)	(g/cm <sup>3</sup> )	0.94	1.00	0.94	1.02	1.0～1.2	

\* Weight of saw dust charcoal is converted to 80 mm in length

バイオマス炭の炉底部での燃焼は表面反応であるため、個々の粒が大きく比表面積が小さくなるほど消費速度が減少する。個々の粒の大きさは簡易的に一個あたり重量で把握できる。表 1 には長さ 80 mm に揃えた際の重量を示した。

揮発分および見掛密度は、バイオマス炭の炉内での強度と消費速度に影響するため重要である。表 1 に示した見掛密度は、JIS K 2151 に準じ乾燥重量と水の排除体積から算出した。高温ガス化直接溶融炉の炉下部でなるべく少ない投入量で良好な充填層を形成するためには、高強度かつ低反応速度で炉内に長時間存在できるバイオマス炭が望ましい。揮発分が多いと高温下で急速に脱離して気孔率が増加するため、強度が低下し、かつ反応速度が増加する。揮発分が低かつ見掛密度が高いものは、使用時の高温下でも強度を保ち、反応速度すなわち消費速度は抑制される。

バイオマス炭 A は、他と比べてやや大きく、一個あたり重量は六角柱で 103 乾 g、四角柱で 99 乾 g であった。また、揮発分 5 乾 wt% 未満、見掛密度 0.9 乾 g/cm<sup>3</sup> 以上の品質を持っていた。

バイオマス炭 B はバイオマス炭 A よりも径がやや小さく一個あたり重量は 91 乾 g であり、バイオマス炭 A よりわずかに高い揮発分と、有意に高い見掛密度を有していた。見掛密度 1.00 g/cm<sup>3</sup> はコークスに近い値である。

バイオマス炭 C は、バイオマス炭 A より径がやや小さく、バイオマス炭 B よりも径はわずかに大きい。見掛密度が低いいため一個あたり重量は最も低く 85 乾 g であった。揮発分はバイオマス炭 A およびバイオマス炭 B よりもやや高い値となり、見掛密度はバイオマス炭 A と同程度であった。

バイオマス炭 D はバイオマス炭 C の改良品である。揮発分はバイオマス炭 C からわずかに減少する程度であったが、一個あたり重量はバイオマス炭 A と同等の 100 乾 g に増加し、製品の見掛密度はバイオマス炭 B の 1.00 乾 g/cm<sup>3</sup> を超える値にまで向上していた。

## 4. コークスゼロ操業に向けた実証試験

### 4.1 試験方法

選定したバイオマス炭を使用する一連の試験を、**写真 2** に示す高温ガス化直接溶融炉実証設備（処理量 11.5 t/日×1 炉）で実施した。

#### 4.1.1 バイオマス炭を用いたコークスの全量置換

バイオマス炭 A を使用しコークスを置換する試験を実施した。実証設備では、最初にコークスを用いた安定運転条件を確定させた後、バイオマス炭 A を投入しつつ、スラグ温度が基準値を下回らないようにコークスを削減していった。コークスの全量置換を達成した後は、1 ヶ月間の連続運転で安定操業を確認した。さらに、バイオマス炭の使用量を削減し、標準となる運転条件を確定した。

#### 4.1.2 各種バイオマス炭原単位の確認

つぎに、他のバイオマス炭との比較試験を実施した。バイオマス炭 B およびバイオマス炭 C は各 20 t、バイオマス炭 D は 10 t 使用した。実証設備では、供給するバイオマス炭の種類をいちどきに切り替えた後、良好な灰溶融状態が



写真 2 高温ガス化直接溶融炉実証設備

Photo 2 High temperature gasifying and direct melting furnace demonstration facility

継続されスラグ温度が基準値を下回らないようバイオマス炭の供給量を調整して、燃料使用量を確認した。

### 4.1.3 バイオマス炭の混合使用

実証設備には、コークス用とバイオマス炭用の2つの供給装置がある。コークス全量置換を達成した後はコークスを供給しないため、2種類のバイオマス燃料の供給が可能となる。商用機では性能の異なるバイオマス炭の混合使用が想定されるため、その影響を検証した。後述するように、性能差の大きいバイオマス炭Bとバイオマス炭Cの2種を混合率を変更して供給し、燃料使用量の変化を確認した。

## 4.2 試験結果

本試験の燃料使用量は、各燃料の原単位をコークス操業時の原単位で除した燃料使用率（燃料原単位指数） $R_f$  (wt%) で評価した。

$$R_f = F/C_0 \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $C_0$ はコークスのみによる操業におけるコークス原単位 (kg/t-ごみ)、 $F$ は本試験中の各燃料原単位 (kg/t-ごみ)を示す。

### 4.2.1 バイオマス炭を用いたコークスの全量置換

コークスを用いた安定運転条件から、バイオマス炭Aを投入してコークスを置換し、最後に標準運転条件を確定し

た一連の試験につき、燃料使用率の経時変化を図2に、スラグ温度の経時変化を図3に示す。

バイオマス炭Aは、図2(1)に示すとおり約1ヶ月間かけて徐々に増加させた。コークスはこれに対応して徐々に減少させ、最終的に全量置換を実現した。バイオマス炭Aの使用率は136wt%に達したが、図3(1)に示すとおりスラグ温度は置換過程でわずかながら増加し続けており、不測の事態に備え熱量をやや過剰に与えた条件設定であったといえる。

つぎに、このコークス全量置換を達成した条件を継続し、1ヶ月間の連続試験を行った。図2(2)に示すこの間の燃料使用率および図3(2)に示すスラグ温度の経時変化より、バイオマス炭Aのみを使用した条件でも、安定した長期運転が可能であることが示された。この間、炉の運転は極めて良好な状態が維持され、連続運転が可能であった。また、連続試験中に短期的にバイオマス炭投入量を減じる試みを行い、削減可能であることを確認している。

連続試験終了後に改めてバイオマス炭Aの投入量を削減した。図2(3-1)に燃料使用率の経時変化を示す。到達した83wt%付近では、ごみや燃料の供給が乱れるとスラグの連続排出が頻繁に停止する状態だったので、これを削減限界とした。このときのスラグ温度が図3(3-1)であり、バイオマス炭削減に伴う温度の低下が見られた。つぎに、図2(3-2)に示すとおり、出率が安定する99wt%付近の燃料使

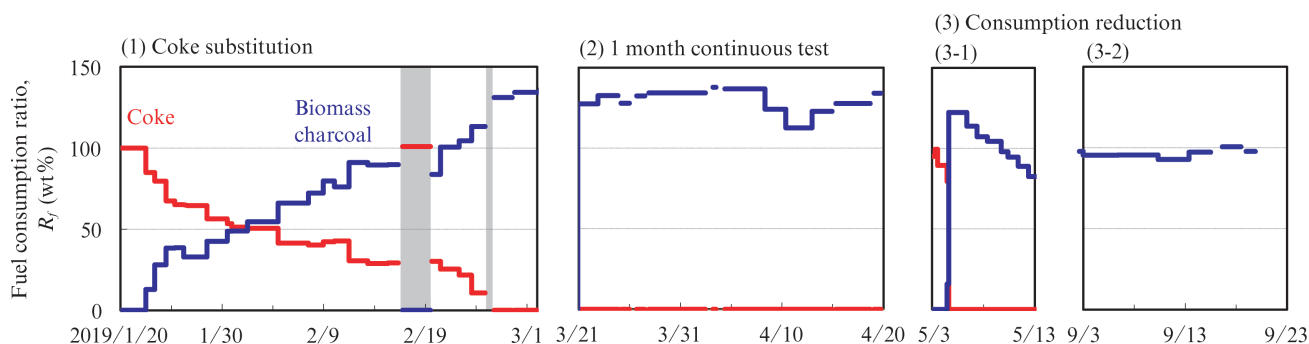


図2 バイオマス炭Aによるコークス全量置換における燃料使用率の経時変

Fig. 2 Time-dependent change of fuel consumption ratio in full coke substitution of biomass charcoal A

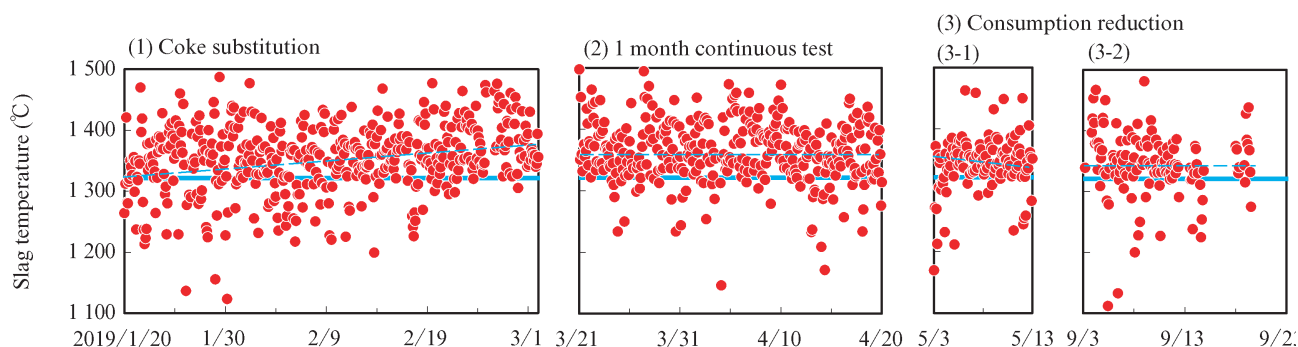


図3 バイオマス炭Aによるコークス全量置換におけるスラグ温度の経時変化

Fig. 3 Time-dependent change of slag temperature in full coke substitution of biomass charcoal A

用率でバイオマス炭 A の供給を続け、2 週間の安定運転が可能であることを確認した。図 3 (3-2) に示すスラグ温度はコークスのみによる運転と同程度であった。これより、バイオマス炭 A を使用することにより、コークスと同程度の投入量 99 wt% でコークスと同様の安定運転が可能であることを実証した。

以上より、コークスと同程度の投入重量で、バイオマス炭を用いてコークスを全量置換するコークスゼロ操業を達成した。現在、シンガポールの実証設備ではコークスを用意せず、バイオマス炭を使用して通常運転を行っている。

#### 4.2.2 各種バイオマス炭原単位と重要因子の確認

前項のコークス全量置換試験で到達した最終条件を標準条件として、実証設備における様々な試験を開始した。表 1 に示した 4 種類のバイオマス炭をそれぞれ単独に使用し、スラグ温度が同等になるよう調整した際の燃料使用率を図 4 に示す。バイオマス炭の種類により燃料使用率は大きく変化した。

バイオマス炭 A の燃料使用率は 99 wt% であり、前項で述べたようにコークスと同程度であった。バイオマス炭 B では 84 wt% となり、バイオマス炭 A より燃料使用率を 15% 低減できることがわかった。バイオマス炭 B がバイオマス炭 A より優れているのは見掛密度が高い点であり、見掛密度を増加させると燃料使用率は効果的に削減できることが示された。

バイオマス炭 C の燃料使用率は 125 wt% となり、バイオマス炭 A より 26% 増加した。この燃料使用率はバイオマス炭 B の 1.5 倍に相当する。バイオマス炭 C はバイオマス炭 A と比較し一個あたり重量が少なく、バイオマス炭 B より見掛密度が低い。これらの要因が総合的に寄与してバイオマス炭 C の燃料使用率を悪化させたものと考えられる。なお、バイオマス炭 C の揮発分は表 1 に示したように 6.9 乾 wt% であり、バイオマス炭 A の 3.6 乾 wt% と比較してやや高い。揮発分はなるべく低減することが望ましいが、つぎに述べるバイオマス炭 D が揮発分 6.1 乾 wt% で良好な燃

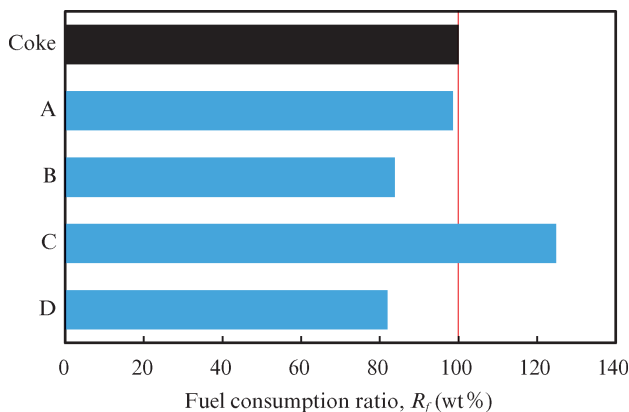


図 4 バイオマス炭の燃料使用率

Fig. 4 Fuel consumption ratio of biomass charcoals

料使用率を示したことから、このわずかな揮発分の差が燃料使用率の悪化に決定的な影響を与えたとは考えにくい。

バイオマス炭 C の燃料使用率を改善する根本的な手段は製品の見掛密度を上げることであり、結果として一個あたり重量も増加する。バイオマス炭 C の改良品であるバイオマス炭 D の見掛密度は、バイオマス炭 B の 1.00 乾  $\text{g}/\text{cm}^3$  を超える 1.02 乾  $\text{g}/\text{cm}^3$ 、一個あたり重量はバイオマス炭 A と同等の 100 乾 g である。試験の結果、バイオマス炭 D の燃料使用率は 82 wt% まで低減された。これはバイオマス炭 C の 34% 減に相当し、バイオマス炭 D はバイオマス炭 B と同等の燃料使用率であった。

一連の燃料原単位確認試験から、高温ガス化直接溶融炉で使用するバイオマス炭の見掛密度は 0.94 乾  $\text{g}/\text{cm}^3$  以上、好ましくは 1.0 乾  $\text{g}/\text{cm}^3$  以上であること、揮発分は実績値として 7 乾 wt% 以下、また一個あたり重量は 90 g 以上であることが求められる。なお、バイオマス炭の形状は、径に対し 2 倍程度の長さであることが望ましい。一個あたり重量を増加させるために径の 2 倍より長くしても、比表面積を縮小する効果は小さくほとんど消費重量に影響しないと推定でき、またホッパ等におけるブリッジを増加させることから好ましくない。

#### 4.2.3 バイオマス炭の混合使用

バイオマス炭 B とバイオマス炭 C では、燃料使用率に 1.5 倍の差があった。これら 2 種類の混合率を変更して高温ガス化直接溶融炉に供給し、合計した燃料使用率を検証した。この結果を図 5 に示す。

燃料使用率は各々の燃料使用率の単純な平均値にはならず、高性能側のバイオマス炭の性能に大きく影響を受け、高性能側に近い値になることがわかった。高性能なバイオマス炭 B の一部を低性能なバイオマス炭 C で置き換えると、半分程度まで置換しても燃料使用率の増加はわずかであっ

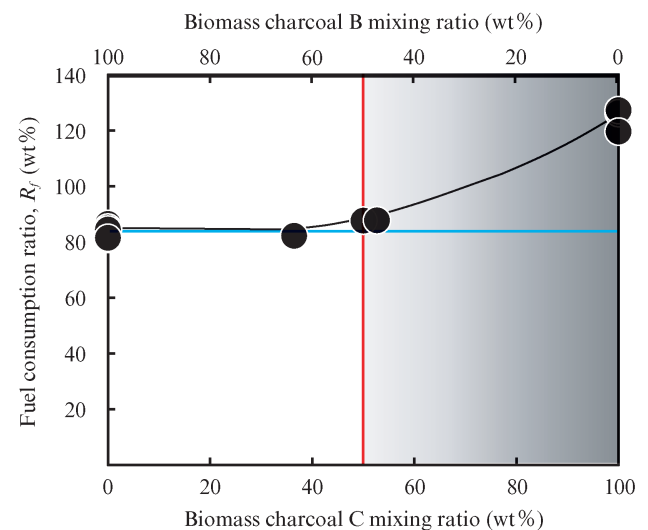


図 5 バイオマス炭混合使用時の燃料使用率

Fig. 5 Fuel consumption ratio of mixed biomass charcoals

た。バイオマス炭 B およびバイオマス炭 C の燃料使用率はそれぞれ 84 wt%, 125 wt% であり、これらを 50 wt% ずつ混合した場合、単純な平均値は 105 wt% と算出されるが、実測値は 88 wt% であった。これは、混合使用により 16 wt% のバイオマス炭を削減できたことに相当する。

バイオマス炭は灰分を溶融させるための熱源と、灰溶融領域を形成し、かつ生成した溶融スラグを良好に流下させるベッド材としての働きを合わせ持つ。このうち熱源としての機能は、熱量を維持しさえすれば低性能なバイオマス炭でも代替できると推定している。性能の異なる 2 種類のバイオマス炭を混合使用する場合に、高性能なバイオマス炭にベッド材としての機能を維持できる量が残される範囲では熱量を一定に保っての置換が可能であり、2 種類のバイオマス炭の発熱量がほぼ同じであれば、投入する重量をほぼ一定に保っての置換が可能であると考えられる。

## 5. バイオマス炭の確保

以上から、高温ガス化直接溶融炉において選定すべきバイオマス炭の性状と、使用可能なバイオマス炭の総量を確保するための道筋が示された。

まず、使用可能なバイオマス炭に求められる性状を明らかにしたことで、以降のバイオマス炭の選定が容易になった。

つぎに、図 4 に示すようにバイオマス炭の性状により燃料使用率は変化し、さらに図 5 に示すようにこれらを混合使用する場合の燃料使用率は単純な平均値よりも改善されることから、性状の異なるバイオマス炭を組み合わせることでより総使用量の削減が可能であることが判明した。すなわち、製造工場における製品の改良や、利用時の混合使用によって置換効率を向上させ、商用施設でのバイオマス炭必要量を減少させれば、バイオマス炭の確保に資することになる。バイオマス炭の効率向上はバイオマス炭確保量の拡大と同じ意味を持つ。

## 6. おわりに

カーボンニュートラルに向け JFE 高温ガス化直接溶融炉に石炭系燃料の不使用が求められる中、シンガポールの高温度ガス化溶融炉実証設備でコークスをバイオマス炭によって完全代替する検証を進めてきた。バイオマス炭としてマレーシアおよびベトナムで製造された 4 種類の製品を選定し、それらを用いて試験した結果を以下に述べる。

- (1) コークスはバイオマス炭によって全量置換でき、バイオマス炭のみによる安定した長期運転が可能であった。バイオマス炭はコークスと同程度の消費重量に削減できた。
- (2) 4 種類のバイオマス炭につき、廃棄物 1t あたりの消費

重量を指数化した燃料使用率で比較した。燃料使用率の差異は最大で 1.5 倍であった。

- (3) 高温ガス化直接溶融炉で使用するバイオマス炭に求められる性状は、見掛密度 0.94 乾 g/cm<sup>3</sup> 以上、好ましくは 1.0 乾 g/cm<sup>3</sup> 以上、揮発分 7 乾 wt% 以下、長さが径の 2 倍程度となる形状において一個あたり重量 90 乾 g 以上であることが確定できた。
- (4) 2 種類のバイオマス炭を混合使用すると、消費重量は 2 種類の単純な平均値ではなく、高性能側のバイオマス炭の値に近づいた。混合使用によりバイオマス炭総量の削減が可能であることを示した。

以上より、商用機におけるカーボンニュートラルを目指したコークスゼロ操業に向け大きく前進できた。すでに実証設備ではコークスの代わりにバイオマス炭を用いることが通常運転として定着している。さらに、バイオマス炭の多様化に向け、複数種の製品の単独および混合使用における消費重量の検証を進めたことで、バイオマス炭確保の道筋も示された。最適な利用方法が確立されている安価なコークスを商用的に代替するために、今後も実機におけるバイオマス燃料の更なる適用拡大やコストダウンを推進していく所存である。

## 謝辞

今回の一連の試験にあたり、共同研究のパートナーシップの中で多大な協力をいただいた南洋理工大学の Nanyang Environment & Water Research Institute (NEWRI) および Residues, Resource and Reclamation Centre (R3C) に感謝いたします。

### 参考文献

- 1) 松平恒夫, 須藤雅弘, 山川裕一. JFE 高温ガス化直接溶融炉の実機操業結果. JFE 技報. 2004, no. 3, p. 14-19.
- 2) 稲田武彦, 松平恒夫, 石関幸二. 高温ガス化直接溶融炉による高効率 RDF 発電. JFE 技報. 2004, no. 6, p. 49-53.
- 3) 明石哲夫, 多田光宏, 内山武. 高温ガス化直接溶融炉による飛散性アスベスト廃棄物の溶融無害化処理. JFE 技報. 2010, no. 25, p. 7-10.
- 4) 内山武, 奥山契一, 秋山肇. 高温ガス化直接溶融炉におけるコークス使用量削減. JFE 技報. 2013, no. 32, p. 67-73.
- 5) 奥山契一, 秋山肇, 内山武, 田中一嘉, 村田博敏, 井田民男. 高温ガス化直接溶融炉におけるバイオコークスによるコークス使用量削減. 伝熱. 2014, vol. 53, no. 224, p. 38-42.
- 6) 角間崎純一, 橋本敬一郎, 内山武, 奥山契一, 堀内聡. 多原料バイオコークス (BIC) による一般廃棄物処理施設での CO<sub>2</sub> 排出量 25% 削減の長期実証. 廃棄物資源循環学会誌. 2017, vol. 28, no. 1, p. 53-62.
- 7) 角間崎純一, 川畑秀駿, 太田慧, 井田民男. 多原料バイオコークスによる一般廃棄物処理施設及び産業用キュボラでの利用実証. Journal of the Japan Institute of Energy. 2019, vol. 98, no. 12, p. 340-346.
- 8) 谷口良一, 芹沢保文. ブラジルの木炭製鉄. 鉄と鋼. 1982, no. 15, p. 2086-2094.



奥山 契一



渡辺 純也



川畑 秀駿