

Study on Self-heating Behavior of Carbonized Woody Biomass during Storage

Masami ASHIZAWA^{*1‡}Maromu OTAKA^{*1}Tetsuya SHOJI^{*1}Akimasa YAMAGUCHI^{*1}Hiromi YAMAMOTO^{*2}

貯蔵時における木質バイオマス炭化物の 自己発熱挙動に関する研究

芦澤 正美^{*1‡}大高 円^{*1}庄司 哲也^{*1}山口 哲正^{*1}山本 博巳^{*2}

Abstract

The purpose of this study is to evaluate the self-heating for the carbonized woody biomass, and to provide the essential information on storage management to contribute to the realization of co-firing at pulverized coal power station. In this study, the authors conducted two kinds of experiments for self-heating characteristics. (1) As a result of the isothermal self-heating experiment, the amount of heat generation was higher than that of bituminous coal and lower than that of subbituminous coal. It was found that there was little change in the self-heating property for consolidation of the samples. (2) As a result of the adiabatic experiment simulating storage in a silo, the temperature rising rate of carbonized woody biomass was about 1.2 to 2 times higher than that of bituminous coal, but about half that of subbituminous coal. The storage time of carbonized woody biomass can be referred/grasped from that of bituminous coal and subbituminous coal in the actual operation of the power plant. Since the rate of temperature rise due to self-heating tends to increase as the amount of fixed carbon increases, fixed carbon is an important control index when relatively evaluating self-heating.

Keywords: Self-heating, Carbonization, Woody Biomass, Storage
キーワード：自己発熱，炭化，木質バイオマス，貯蔵

1. はじめに

微粉炭火力発電所では、国際的な低炭素化ニーズに応えていくため、カーボンニュートラルな木質バイオマスを利用した混焼発電を行っている。しかし、木質バイオマスは石炭に比べ、かさ密度が低く繊維質であることから、その混焼率は、概ね3%程度（熱量基準）に留まっているケースが多い¹⁾。木質バイオマスの混焼率を高めるためには、燃料搬送ラインや粉砕機の改造が必要となる。これに対し、木質バイオマスを炭化処理することで、石炭と同等の燃料性状に近づけられる²⁾ことや、粉砕性などのハンドリング性を改善できる³⁻⁵⁾ことなどが報告⁶⁻⁸⁾されているほか、既設発電所の粉砕機等を改造せずに混焼率を大幅に高められるとの報告⁹⁾もある。木質バイオマス炭化物の混焼

は、CO₂排出量の削減に繋がる有効な手段といえる。しかし、石炭火力発電所での実運用に供するためには、貯蔵時の自己発熱性の評価や、安全な貯蔵を行うための管理指標の構築等が必要である。

ペレット化された木質バイオマスの自己発熱性の評価には、等温熱量測定法等が有効であるとされ、測定方法などが標準化されている¹⁰⁾。この方法は、運用実績のある石炭の値との比較から、安全に貯蔵できる日数の目安を得るなど、運用管理を決める際の基礎情報として用いることができる。また、貯蔵中の木質バイオマスの自己発熱には、(1) 生細胞呼吸(Living cell respiration)、(2) 生物学的分解(Biological degradation)、(3) 熱化学的酸化反応(Thermochemical oxidative reactions)の3つのメカニズムとステップがあるとされている¹¹⁾。熱化学的酸化反応は、生物学的分解を経て約65°C以上で生じ、その後、約105°C以上で自然

*1 Energy Transformation Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry, 2-6-1 Nagasaka, Yokosuka-shi, Kanagawa 240-0196, Japan

‡e-mail: ashizawa@criepi.denken.or.jp

*2 Grid Innovation Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry

Received: September 21 2021, Accepted: November 4 2021

*1 電力中央研究所 エネルギー変換システム研究本部 (〒240-0196 神奈川県横浜須賀市長坂 2-6-1)

‡e-mail: ashizawa@criepi.denken.or.jp

*2 電力中央研究所 グリッドイノベーション研究本部

(原稿受付：2021年9月21日、受理日：2021年11月4日)

発火に至ると報告¹²⁾されており、自然発火に至るまでにはある程度の時間を要する。このため、自然発火に至るまでの時間は、ひとつの重要な管理指標となる。Ceballos^ら¹³⁾は、針葉樹の樹皮やおがくずの半炭化（トレファクション）試料を対象に、自己発熱性を評価し、固定炭素の増加に伴い発熱性が高まる傾向を明らかにしている。しかし、炭化处理により自己発熱性が高まったとしても、前述の通り、自然発火に至るまでの貯蔵時間を適切に管理できれば、実運用に供することができる。日本の微粉炭火力では、コスト削減と燃料種拡大の観点から、安価な亜瀝青炭の利用拡大も進んでいる。亜瀝青炭は瀝青炭に比べ自己発熱性が高いため、貯蔵時における温度や酸化反応に伴い発生するCO濃度の計測・管理を徹底するとともに、適切な貯蔵時間を管理することで運用している。この亜瀝青炭と木質バイオマス炭化物との自己発熱性、ならびにCO濃度や発熱に至るまでの時間や温度変化量を相対的に比較できれば、発電所での運用の参考となる。

本研究の目的は、代表的な木質バイオマス炭化物を対象に、炭化物そのものの自己発熱量を測定するとともに、サイロを想定した貯蔵時の自己発熱実験を行い、発電所で利用実績のある瀝青炭や亜瀝青炭と、木質バイオマス炭化物のCO濃度や貯蔵時間等の比較から、微粉炭火力での実運用に資する相対的な管理条件を示すことである。

2. 実験

2.1 供試燃料

実験には、賦存量が多く今後の利活用が期待される木質バイオマスとして林地残材を選定した。林地残材、その炭化物2種類、石炭の代表性状をTable 1に示す。なお、林地残材は海外産の針葉樹であり、国内の製材工場から入手した。林地残材の炭化物は、固定炭素の影響を把握するため、2種類（固定炭素が約35%（CFR-1）と約30%（CFR-2））を製造した。また、Table 1には、微粉炭火力発電所で利用実績のある豪州産の瀝青炭 BC とインドネシア産の亜瀝青炭 SBC を比較の対象として選定し、これらの燃料性状についても示した。

林地残材の炭化物は、Fig. 1に示す炭化設備^{14,15)}を用いて製造した。炭化条件としては、炭化温度（ロータリーキルンの内筒メタル温度を軸方向に4カ所計測しており、その平均温度を炭化温度とした）でCFR-1が平均370°C、CFR-2が平均340°C、炭化機内筒の回転数は3 rpm、原料供給量は100~150 kg/h、炭化時間は約40分とし、得られた炭化物は概ね50~80 kg/hの範囲であった。発熱性評価の実験に用いるまでは、窒素封入したドラム缶にて保管し、炭化物の酸化を抑制した。

Table 1 Typical properties of feedstocks

Fuel	FR	CFR-1	CFR-2	BC	SBC
	Forest Residue	Carbonized Forest Residue		Bituminous Coal	Subbituminous Coal
Country of origin	North America	North America	North America	Australia	Indonesia
Moisture(*1) (wt%)	29.2	<0.1	<0.1	5.2	27.8
Proximate Analysis(*1) (wt% dry basis)					
Ash	2.9	6.90	3.55	12.5	3.2
Volatile Matter	83.2	57.90	66.35	35.1	52.5
Fixed Carbon	13.9	35.20	30.10	52.4	44.3
Fuel Ratio (ash-free basis)					
	0.17	0.61	0.46	1.49	0.84
Ultimate Analysis (wt% dry ash-free basis)					
C	48.8	61.20	59.00	73.8	70.2
H (*2)	6.39	5.19	5.68	4.95	5.23
N	0.36	0.55	0.46	1.82	1.04
O (*3)	41.50	26.10	31.30	6.5	20.3
S	0.02	0.02	0.02	0.49	0.13
Calorific Value(*4)					
HHV	20.63	24.75	23.96	28.75	27.87
LHV	19.18	23.58	22.68	28.64	26.69
(MJ/kg dry basis)					

*1 : According to JIS M 8812, *2 : JIS M 8819, *3 : JIS M 8813, *4 : JIS M 8814

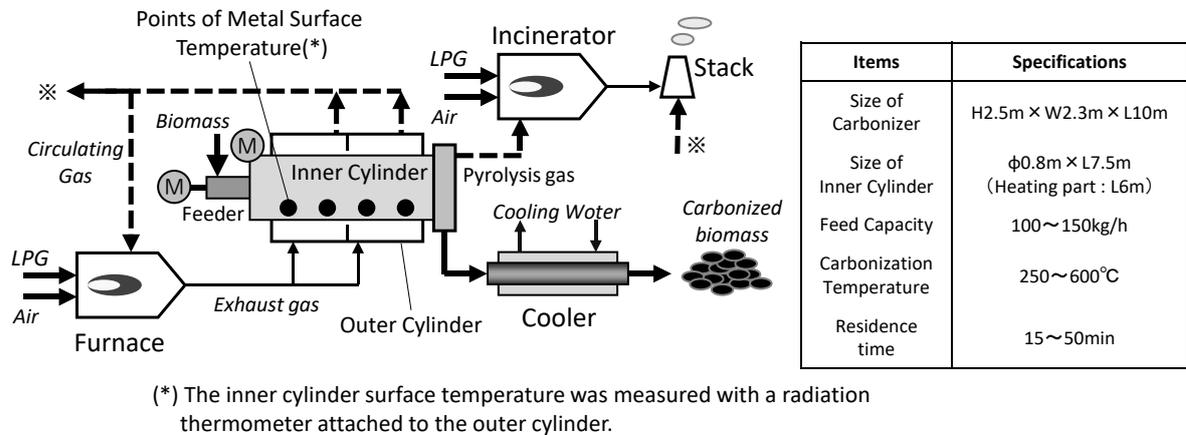


Fig. 1 Outline of carbonizing test facility

2.2 実験方法の選定

木質バイオマス炭化物の自己発熱性を評価するにあたり、これまで100年以上にわたって基礎的かつ実用的な研究が行われてきている石炭の自己発熱性に関する研究を参考にした。石炭における評価方法を纏めると、Table 2に示す様々な方法が存在する。評価にあたっては、各評価方法の特徴、得られるデータの意味合いを理解した上で、目的に合致した評価方法を選定する必要がある²⁴⁾。本研究では、試料自身の発熱性の評価に熱量測定法 (Calorimetric Method) を用い、また、貯蔵時の発熱性の評価には、サイロでの貯蔵を想定し、これを再現可能な断熱法 (Adiabatic Method) を採用することとした。各々の実験装置および方法を次に示す。

2.3 実験装置と方法

2.3.1 等温発熱性実験 (熱量測定法)

試料自身の自己発熱性の評価には、熱量測定法のひとつである、等温発熱測定装置 (TA Instruments 社製の TAM Air™ Calorimeter) を用いた。実験装置の概要を Fig. 2 に示す。実験は容量 20 mL の密閉型ガラス容器に 2 g の試料を充填し、室温から昇温を開始、80°C で保持し、その際の発熱量を計測した。測定時間は概ね 168 時間 (7 日間) とした。なお、供試した試料は、林地残材の炭化物 (圧密なし) と、これらを C. F. Nielsen 社の Briquetting Machine BP3200 でブリケット化した試料 (圧密あり)、比較のための瀝青炭 BC および亜瀝青炭 SBC の合計 4 試料とした。なお、林地残材の炭化物は、圧密ありと圧密なしの試料ともに、空気中での発熱を極力抑えるため、窒素雰囲気グローブボックス内で珈琲用の手動ミルで粉碎し、石炭についてはローラミル (宇部興産機械(株)の堅型ローラミル UM2.6S) で粉碎した⁹⁾ (以降、一旦圧密した炭化物については、試料名の後ろに「*」を付し CFR-1* とし、圧密なしの試料名と区別する)。

2.3.2 貯蔵時の自己発熱性評価実験 (断熱法)

貯蔵時の自己発熱性の評価には、サイロ貯蔵を模擬する

ため断熱法を採用し、独自に設計・製作した貯蔵安全性評価装置¹²⁾を用いて実験を行った。実験設備の概要を Fig. 3 に示す。サイロを模擬した容器は 2 基あり、1 基の容量は約 400 L である。容器は、ステンレス製のチャンパー 5 段を積み重ねた構造で、各チャンパー用のヒータ 5 段、各チャンパーの中間位置には温度計測部を設けており、5 カ所の試料温度、4 カ所の壁面温度 (内外含めて 8 カ所) を計測できる。温度計測には T 型熱電対を使用した。なお、発電所では、温度変化に加え酸化反応を速やかに検出可能な CO 濃度計測も行っており、本実験でも計測対象とした。実験手順の模式図を Fig. 4 に示す。その概要は次の通りである。①容器内に試料を充填し、②容器下部から窒素 3~5 L/分を供給し、不活性雰囲気とする。続いて、③窒素供給を維持したまま、5 段のヒータで所定温度まで加熱を開始する。昇温時には、壁面温度と壁側の試料温度の偏差が 10°C 以内に収まるよう制御した。④所定温度に到達した際には、壁面の断熱状態を模擬するため、壁面温度と壁面側の試料温度の差がほぼゼロとなるよう制御、⑤温度安定後、窒素から空気 1.5 L/分に切替、⑥3~5 日間、温度分布変化や発生する CO ガス濃度を計測、⑦計測終了後、ヒータを切り、空気から窒素ガスへ切替、冷却を行う。本実験における所定温度は、熱化学的発熱反応が生じる温度¹²⁾を考慮し、60°C を選定した。なお、実験は試料準備から計測完了まで 1 試料につき約 1 ヶ月を要するため、計測対象を絞り、瀝青炭 BC、亜瀝青炭 SBC および林地残材の炭化物 CFR-1 を選定した。なお、固定炭素の異なる CFR-2 については、温度変化のみに着目した実験を行った。充填試料は、石炭が到着ベース (as received basis) の 50 mm アンダー (目開き 50 mm の篩を通過した試料)、林地残材の炭化物は、前述の C. F. Nielsen 社の Briquetting Machine BP3200 で圧縮成形した、直径約 40 mm、長さ 20~40 mm のブリケットを用いた (以降、ブリケット化した炭化物については、試料名の後ろに「B」を付し CFR-1B, CFR-2B とし、圧密なしの試料名と区別する)。

Table 2 Typical evaluation methods for self-heating and spontaneous ignition

Method	Overview	Temp. Range※	Index	Ref.
Adiabatic Method	The reactor filled with the sample is kept at a constant temperature in an N ₂ atmosphere, and after the temperature stabilizes, air or oxygen is supplied to the reactor. The temperature of the supply gas is controlled so as to follow the temperature of the sample. SIT (Spontaneous Ignition Tester) method, R70 (Mean Temperature Rise Rate from 40°C to 70°C) method, MAB (Moist Adiabatic Benchmark) method SHT (Self Heating Temperature) method, etc.	SIT: 110°C~ R70, MAB: 40~70°C	SIT: Time to reach the specified temperature, etc. R70, MAB: Heating rate between 40 and 70°C	SIT: 16, 17) R70: 17, 18) MAB:17, 19) SHT: 20)
CPT Method	A reactor filled with a sample is installed in a constant temperature bath and air is introduced. By raising the temperature of the constant temperature bath from room temperature at a constant rate, the sample temperature is delayed and the temperature rises, and the temperature at which the constant temperature bath and the sample temperature are equal is called the Crossing Point Temperature (CPT). The smaller the CPT value, the higher the spontaneous combustibility.	110~220°C	CPT	CPT: 17, 21)
Ignition Point Measurement	After suspending the basket made of wire mesh filled with the sample in the constant temperature bath, the constant temperature bath temperature is maintained at a constant temperature. Measure whether the sample can be ignited or the critical atmospheric temperature at which the sample ignites.	80°C, 140°C	Critical ignition temperature	Wire Basket: 17, 22)
Calorimetric Method	DSC: A constant amount of heat is applied to the sample, and the endothermic and exothermic reactions of the sample are measured. C80: In a closed container, measure the minute calorific value while suppressing the evaporation of moisture. Measured from ordinary temperature to 300°C at a heating rate of 0.1°C/min. TAM: The sample is held at a constant temperature, and the amount of heat absorbed and the amount of heat generated by the sample are measured.	DSC: Discretionally C80: Ordinary Temp.~300°C TAM: Ordinary Temp.~150°C	Heat quantity based on endothermic and exothermic reaction	
Oxygen Consumption Measurement	The BOD Oxi Top method, which measures the oxygen absorption rate, was applied to coal. A method of measuring oxygen consumption by utilizing the phenomenon that CO ₂ is generated by the reaction of coal and oxygen.	10, 20, 30, 40°C	Amount of oxygen consumption	23)

※ Experiments may be conducted outside the temperature range shown in this table.



Temperature Range : 5 - 90°C
Stability : ±0.02°C



Volume : 20 mL
Material : Glass

(a) Device

(b) Ampoule (Sample bottle)

Fig. 2 TAM Air™ Calorimeter

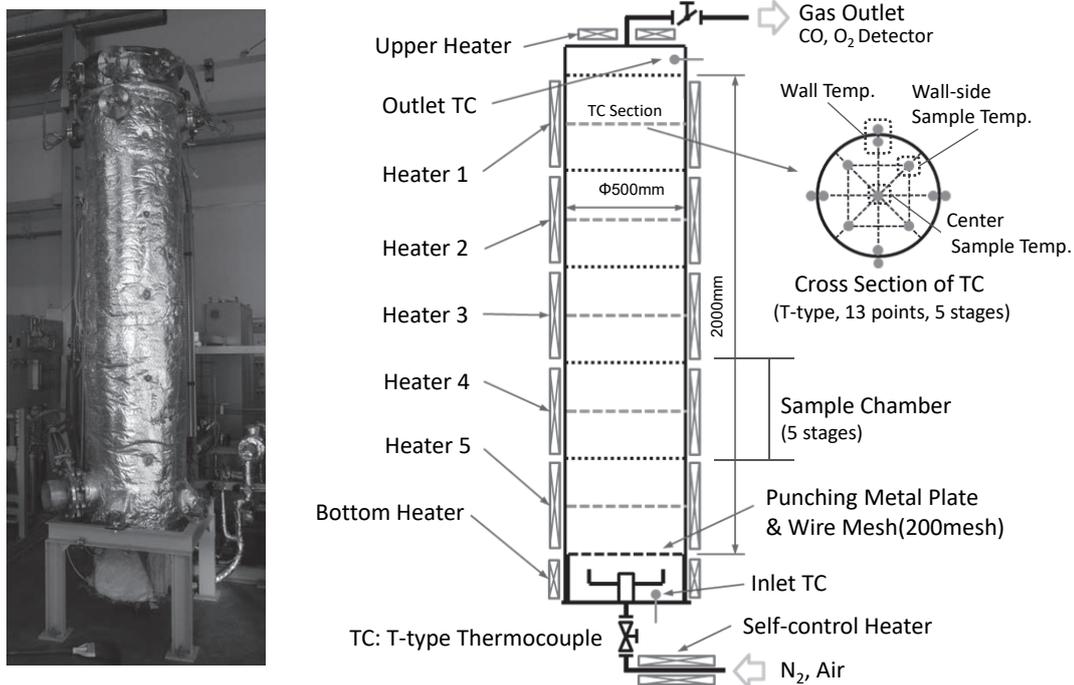


Fig. 3 Outline of storage safety evaluation facility

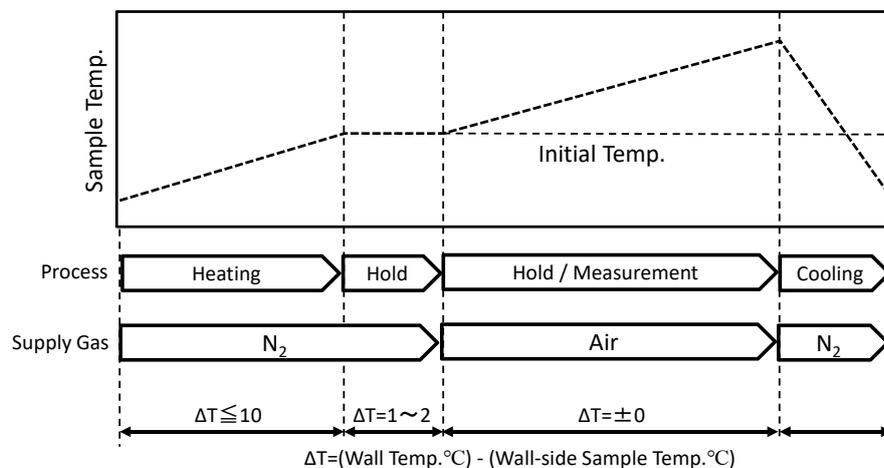


Fig. 4 Procedure of adiabatic storage test

3. 結果と考察

3.1 熱量測定法による発熱特性

等温発熱測定装置を用いて、林地残材の炭化物および石炭の自己発熱量を測定した。その結果を Fig. 5 に示す。林地残材の炭化物 CFR-1 は、概ね 75 kJ/kg の発熱量であった。この値は、瀝青炭 BC の 67 kJ/kg よりは高いものの、亜瀝青炭 SBC の 80 kJ/kg より低く、林地残材炭化物の自己発熱性は瀝青炭と亜瀝青炭の間であった。また、林地残材炭化物の圧密なし CFR-1 と圧密あり CFR-1*を比較すると、発熱量にほとんど変化は見られなかった。このため、燃料の輸送と貯蔵のハンドリング性の観点からブリケッ

ト化しても自己発熱性に影響を与えない可能性が高い。一方、粒径分布の分析結果 Fig. 6 に着目すると、林地残材炭化物の 200 mesh パス率（対象物の微粉碎において、200 mesh の粉碎物(粒子径 75 μm 以下に相当)の重量割合)は、圧密なしの CFR-1 で約 42%、圧密ありの CFR-1*で約 30%程度であり、Briquetting Machine による圧密を一旦行うことで、粒径が若干粗い状態となっていることがわかる。熱化学的酸化反応速度は、一般的に粒径が大きいほど遅くなるものと考えられることから、粒径が大きい CFR-1*、CFR-1、SBC、BC の順で発熱量を小さめに評価している可能性がある。仮に CFR-1*の粒径分布が CFR-1 とほぼ同一であった場合、CFR-1*の発熱量は計測値より大きい可能性が

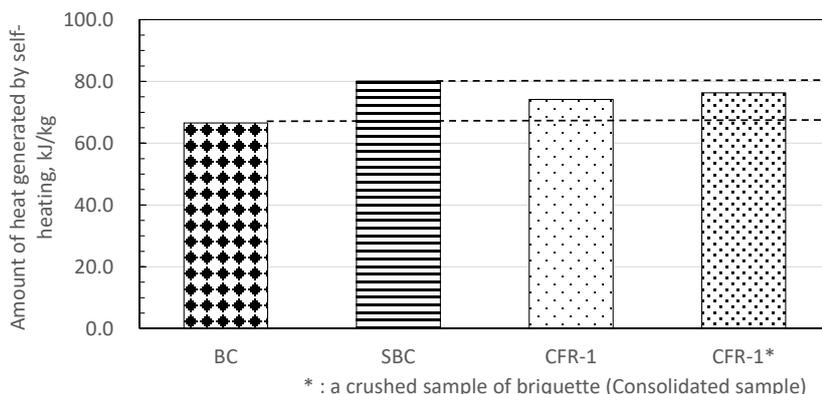


Fig. 5 Amount of heat generated in an isothermal state (Measurement results by TAM Air)

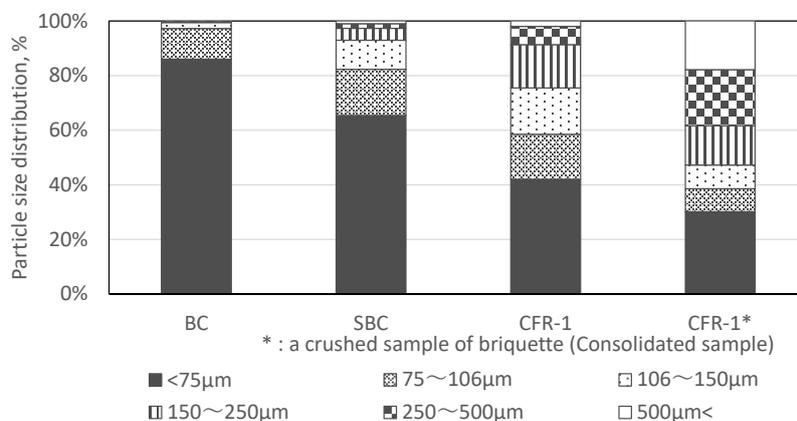


Fig. 6 Particle size distribution of samples

ある。そこで、実用時を想定した試料（ブリケット化した炭化物）を用いて、実際の貯蔵に近い状態の自己発熱性を評価するため、瀝青炭 BC、亜瀝青炭 SBC およびブリケット化した林地残材炭化物 CFR-1B、CFR-2B について、断熱法による発熱特性の評価実験を次に行った。

3.2 断熱法によるサイロ貯蔵想定時の発熱特性

貯蔵安全性評価装置を用いて、瀝青炭 BC、亜瀝青炭 SBC、ならびに林地残材炭化物 CFR-1B の発熱特性を計測した結果を Fig. 7～9 に示す。試料温度は外部影響の最も少ない容器 3 段目（高さ方向中央）の試料中央温度を用いて整理した。いずれの試料も、窒素から空気への供給ガス切替後の時間経過に伴い、温度上昇ならびに CO の発生が確認され、熱化学的酸化反応が生じたものと推定できる。瀝青炭 BC は、供給ガス切替から 3 日間で約 4.7°C 上昇し、CO 濃度は約 200 ppm へ上昇した。亜瀝青炭 SBC は、3 日間で約 18.3°C 上昇し、4 日目で 80°C に到達したため、ここで試験を終了とした。ガス切替直後に CO 濃度は急上昇し、試験終了直前には 900～1000 ppm に達した。林地残材炭化物 CFR-1B は、3 日間で約 9.8°C 上昇し、CO 濃度は 400～500 ppm まで上昇、最大 600 ppm に到達した。3 日間の温

度上昇は、亜瀝青炭 SBC が最も大きく、次に林地残材炭化物 CFR-1B、瀝青炭 BC の順であった。この順序は、先の等温発熱測定の結果と一致する。このことから、自己発熱性の相対比較において、断熱法と比べて簡便に計測できる等温発熱測定法も有効と考えられる。一方、同一の経過時間における CO 濃度についても、亜瀝青炭 SBC、林地残材炭化物 CFR-1B、瀝青炭 BC の順で高濃度の値が検出され、この順序で酸化反応の進みが早いものと推定される。

供給ガス切替のタイミングをゼロ時間に、その際の温度をゼロ°Cとした場合の各試料の温度変化を、固定炭素が異なる CFR-2B の実験結果もあわせて Fig. 10 に示す。瀝青炭 BC の温度変化は、ガス切替後 6 時間程度で約 4°C 上昇するものの、その後は殆ど温度上昇がみられなかった。一方、亜瀝青炭 SBC の場合、ガス切替直後には若干擾乱が生じたが、その後はリニアに上昇する傾向にあった。林地残材炭化物の場合は、CFR-1B、CFR-2B とともに、ガス切替直後の急上昇はみられず、時間経過とともに緩やかに温度上昇する傾向にあり、前半の 40 時間程度までは瀝青炭 BC よりも温度上昇は低い、48～60 時間後には瀝青炭 BC と逆転し高くなった。

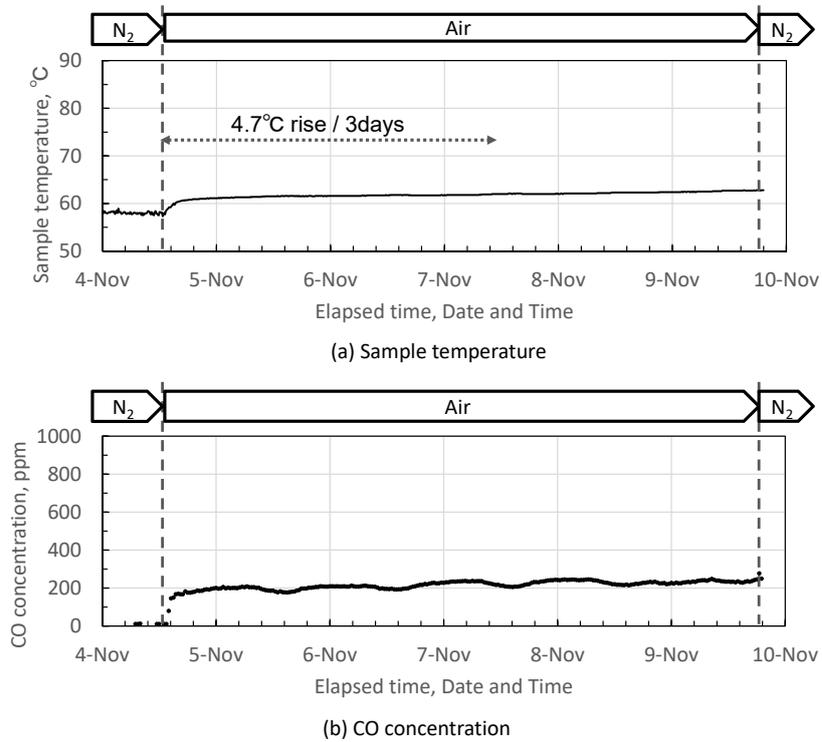


Fig. 7 Results of storage test for BC

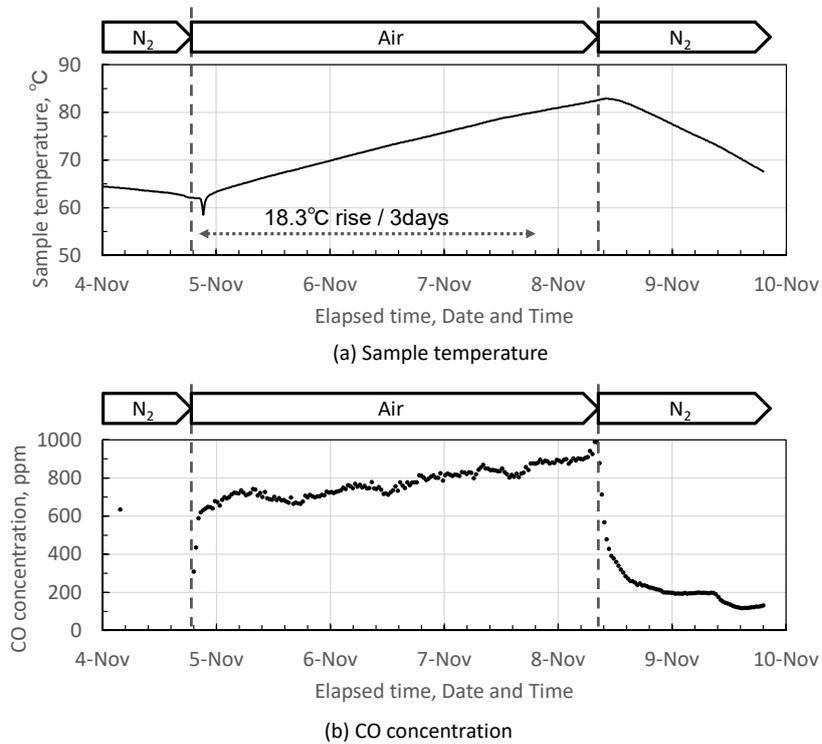


Fig. 8 Results of storage test for SBC

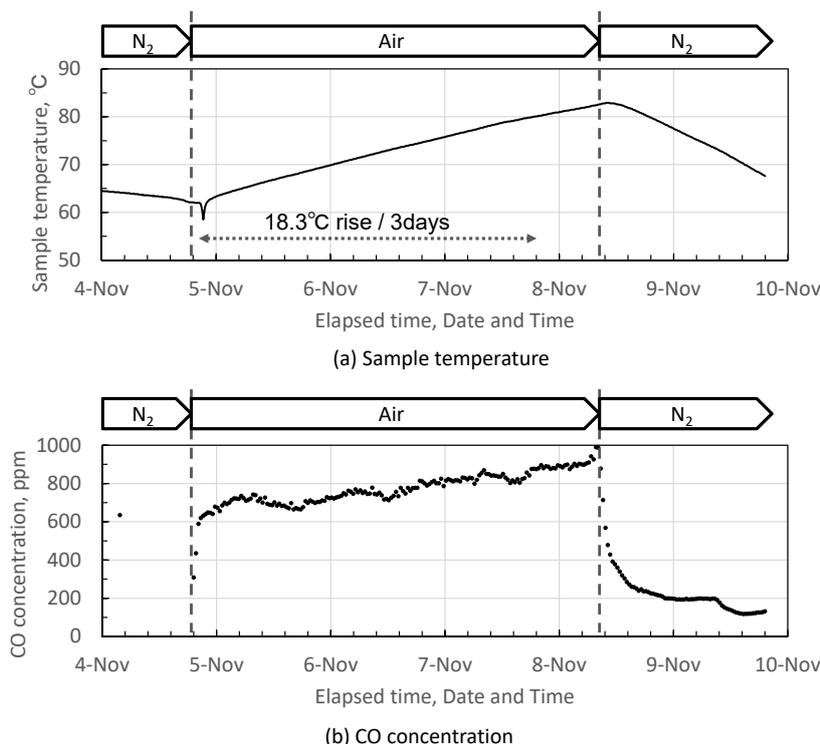


Fig. 9 Results of storage test for CFR-1B

供給ガス切替時の温度と 3 日後の温度の差から求めた温度上昇速度 (°C/day) を固定炭素で整理した結果を Fig. 11 に示す。ただし、瀝青炭 BC の値は参考値として示した。理由は、低温で酸素と反応しやすい官能基 (-COOH, =O 等) が、亜瀝青炭に比べて少なく²⁵⁾、固定炭素のみでは比較できないこと、ガス切替から 6 時間経過までの温度上昇 (Fig. 10 参照) が大きく、0~3 日目までの範囲で見るとリニアな傾向ではないためである。Fig. 11 において固定炭素の異なる林地残材 CFR-1B (固定炭素: 約 35%) と CFR-2B (固定炭素: 約 30%) を比較すると、既往の研究結果¹³⁾と同様に、固定炭素の高い CFR-1B の方が自己発熱による温度上昇速度は早い。また、いずれの炭化物も、瀝青炭 BC よりはやいものの、亜瀝青炭 SBC よりはやい。仮に温度上昇速度が一定で、 $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ の温度上昇を許容すると仮定した場合、実験を開始した 60°C に至ってから、林地残材炭化物 CFR-1B は約 6 日間、CFR-2B は約 10 日間、亜瀝青炭は約 3.5 日間以内にサイロから払い出して利用する必要があるものと考えられる。

以上の結果から、林地残材等の木質バイオマス炭化物をサイロで貯蔵する際には、既に運用実績のある亜瀝青炭の貯蔵時間や CO 濃度と同様に管理すれば、安全サイドでの運用が可能である。また、固定炭素の増加に伴い、自己発熱速度が早まる傾向がみられることから、固定炭素は自己発熱性を相対的に評価する際のひとつの重要な管理指標になるものと考えられる。したがって、微粉炭火力発電所

においては、固定炭素に着目しサイロ貯蔵時の温度や CO 濃度計測値などのデータ蓄積を図ることで、木質バイオマス炭化物の安全な貯蔵管理指針の構築に役立つものと考えられる。

4. まとめ

研究実績の豊富な石炭の自己発熱性評価方法を参考に、林地残材炭化物の自然発火に至る前の自己発熱性について、等温発熱性実験ならびにサイロを想定した貯蔵時の自己発熱性の評価実験を行った。また、微粉炭火力発電所で利用実績のある瀝青炭と亜瀝青炭の結果と比較し、相対的な評価を行うことで、バイオマス炭化物の貯蔵時の管理条件の検討を行い、主に以下の結果を得た。

- (1) 等温発熱性実験の結果、林地残材炭化物 CFR-1 の自己発熱量は、瀝青炭 BC より高いが、亜瀝青炭 SBC よりも低く、両者の中間であった。また、林地残材炭化物の圧密あり (CFR-1*) と圧密なし (CFR-1) の自己発熱量には差異がみられなかったことから、ブリケット化しても、自己発熱性に影響を与えない可能性が高い。ただし、圧密ありの試料は粒径が粗い状態で評価しており、自己発熱性を小さめに評価している可能性がある。
- (2) サイロを想定した貯蔵時の自己発熱性の評価実験の結果、林地残材炭化物の温度上昇速度は、瀝青炭より

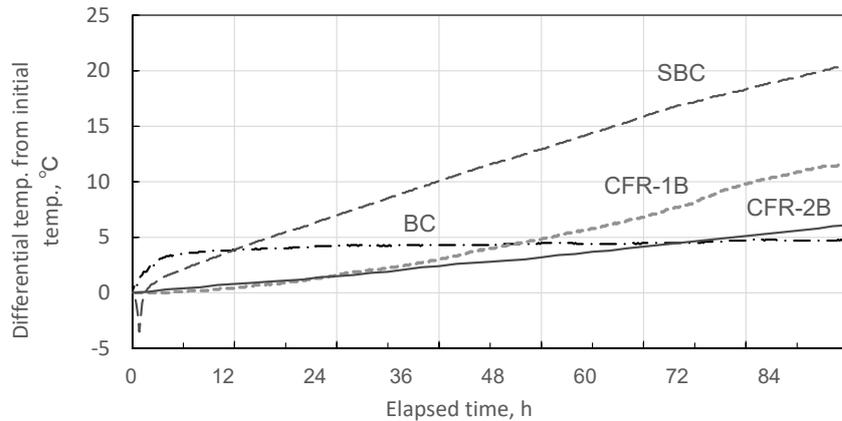
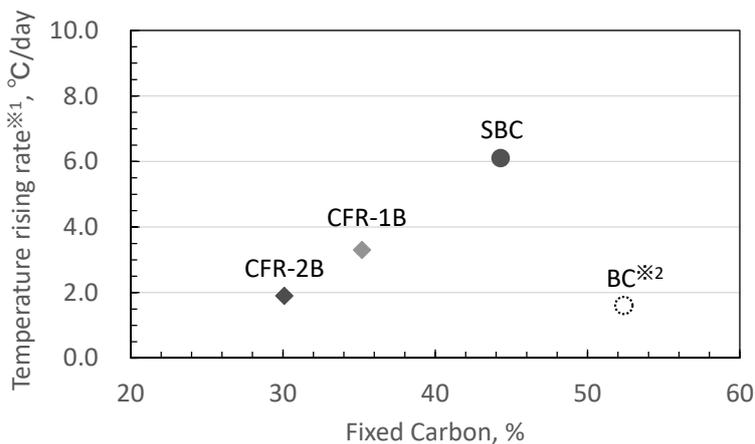


Fig. 10 Differential temperature from initial temperature and elapsed time



※1: Temp. rising rate was calculated from the difference between temp. immediately after switching to air and temp. after 3 days.
 ※2: Plot BC is for reference only, as the temp. rise of BC also includes the non-linear region (0-6 hours) shown in Fig. 10.

Fig. 11 Temperature rising rate and fixed carbon

も約 1.2~2 倍高いが、亜瀝青炭の約半分程度であった。温度上昇速度の順序は、(1) の等温発熱性実験の結果と一致したことから、自己発熱性の相対比較において、等温発熱測定法も有効と考えられる。林地残材炭化物の温度上昇速度は、固定炭素の値が高いほど早まる傾向であった。一方、同一の経過時間における CO 濃度についても、亜瀝青炭、林地残材炭化物、瀝青炭の順で高濃度の値が検出され、温度上昇速度の順序と同一であった。

- (3) 木質バイオマス炭化物を微粉炭火力発電所で利用する際には、既に利用実績のある亜瀝青炭の貯蔵時間と CO 濃度を運用管理のひとつの目安とすることで、安全サイドに運用できる。また、固定炭素は、炭化物の

自己発熱性を相対的に評価する際の重要な管理指標のひとつとなる。

以上の成果は、カーボンニュートラルな木質バイオマス炭化物の利用促進に寄与するものと考えられ、微粉炭火力発電所の低炭素化に貢献するものと期待される。

謝辞

本成果は、環境省委託事業「CO₂排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業」として実施した 2013 年度および 2014 年度「石炭火力における混焼率 30%を実現する木質バイオマスの改質プロセスの実用化開発」、ならびに 2015 年度~2017 年度「バイオ改質炭普及拡大に向けたエネルギー

ギー自立型製造プロセスの構築並びに微粉炭ボイラでの100%専焼技術の開発の一環として得られたものであり、委託元の環境省、主実施者の三菱重工業環境・化学エンジニアリング株式会社、共同実施者の国立研究開発法人産業技術総合研究所の関係各位に謝意を表す。また、本成果のとりまとめに当たり、国立大学法人 東京農工大学大学院 工学研究院 秋澤 淳教授に研究指導を受けた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- Mitsui & Co., Global Strategic Studies Institute Monthly Report, 資料ダウンロード (accessed May 3 2021), https://www.mitsui.com/mgssi/en/report/detail/_icsFiles/afiedfile/2018/01/12/170703m_unokikuchi_e.pdf
- J. Xue, T. Chellappa, S. Ceylan, J. L. Goldfarb, Enhancing biomass + coal Co-firing scenarios via biomass torrefaction and carbonization: Case study of avocado pit biomass and Illinois No. 6 coal, *Renewable Energy*, **122**, 152-162(2018).
- B. Arias, C. Pevida, J. Feroso, M.G. Plaza, F. Rubiera, J.J. Pis, Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass, *Fuel Processing Technology*, **89**(2), 169-175(2008).
- M. Phanphanich, S. Mani, Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass, *Bioresource Technology*, **102**(2), 1246-1253(2011).
- M.J.C. van der Stelt, H. Gerhauser, J.H.A. Kiel, K.J. Ptasinski, Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review, *Biomass and Bioenergy*, **35**(9), 3748-3762(2011).
- C. Ndibe, J. Maier, G. Scheffknecht, Combustion, cofiring and emissions characteristics of torrefied biomass in a drop tube reactor, *Biomass and Bioenergy*, **79**, 105-115(2015).
- C-W. Huang, Y-H. Li, K-L. Xiao, J. Lasek, Cofiring characteristics of coal blended with torrefied Miscanthus biochar optimized with three Taguchi indexes, *Energy*, **172**, 566-579(2019).
- T. Yoshida, Production and Evaluation Method of Heat-Treated Biomass Pellet Fuels, *Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics*, **19**(3), 175-181(2019).
- M. Ashizawa, M. Otaka, T. Shoji, H. Yamamoto, Carbonization characteristics of woody biomass, grindability and combustibility for carbonized woody biomass, *Journal of Japan Solar Energy Society*, **47**(5), 1-8(2021).
- International Standard ISO 20049-1, Solid biofuels - Determination of self-heating of pelletized biofuels - Part1: Isothermal calorimetry, 2020.
- S. Krigstin, S. Wetzel, A review of mechanisms responsible for changes to stored woody biomass fuels, *Fuel*, **175**, 75-86(2016).
- M. Kimoto, M. Ashizawa, Research for spontaneous ignition of woody pellet in storage – Mechanism of spontaneous ignition and demonstration method in large scale storage -, *CRIEPI Report M08022*(2009).
- D. C. C. Ceballos, K. Hawboldt, R. Helleur, Effect of production conditions on self-heating propensity of torrefied sawmill residues, *Fuel*, **160**, 227-237(2015).
- Y. Endo, M. Otaka, Development of energy self-sustained production process of Bio Upgraded Coal™ (BUC) with high co-firing rate in Pulverized Coal boilers. In Proceedings of the 9th i-CIPEC, Kyoto, Japan, 20–23 September 2016.
- T. Shoji, K. Sakuragi, M. Taki, M. Otaka, Evaluation of Effects of Operating Condition to Properties of Carbonized Fuel by using 4t/d Carbonization Facility, *CRIEPI Report M14012*, 5-9(2015).
- M. Uchida, T. Tsutsumi, K. Uebo, S. Nomura, K. Saito, Development of Method to evaluate the Characteristics of Coal Oxidation and Heat Generation, *日本製鉄技法*, 第 413 号, pp.151-156(2019).
- M. Matsumoto, Study on the measurement method of spontaneous heating applied for the stored coal management, The 55th Conference of Coal Science, **55**(2-6), 2018., 資料ダウンロード (accessed August 29 2021) : https://www.jstage.jst.go.jp/article/jiesekitanronbun/55/0/55_58/_pdf/-char/ja
- B. Beamish, M. A Barakat, J. D.St George, Adiabatic testing procedures for determining the self-heating propensity of coal and sample ageing effects, *Thermochimica Acta*, **362**(1-2), pp. 79-87(2000).
- B. Beamish, R. Beamish, Benchmarking moist coal adiabatic oven testing, 10th Underground Coal Operators Conference, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, pp. 264-268(2010)., 資料ダウンロード (accessed August 29 2021): <https://ro.uow.edu.au/coal/324/>
- X. Wang, Y. Luo, Study on correlation of quantified coal rank with self-heating temperature, *Mining Engineering*, **67**(11), pp. 54-60(2015).
- J. Li, Z. Li, Y. Yang, X. Zhang, D. Yan, L. Liu, Inhibitive effects of antioxidants on coal spontaneous combustion, *Energy and Fuels*, **31**(12), pp. 14180-14190(2017).
- Y. S. Nugroho, A. C. Mcintosh, B. M. Gibbs, Low-temperature oxidation of single and blended coals, *Fuel*, **79**(15), pp. 1951-1961(2000).
- M. Uchida, Y. Tobu, M. Nishifuji, K. Uebo, S. Nomura, K. Saito, J. Ozaki, T. Takarada, Study on low temperature oxidation of coal using batch type reactor, The 55th Conference of Coal Science, **55**(2-1), 2018., 資料ダウンロード (accessed August 29 2021): https://www.jstage.jst.go.jp/article/jiesekitanronbun/55/0/55_48/_pdf/-char/ja
- 古積博, 岩田雄策, 桃田道彦, 再生資源燃料等の危険性評価に関する研究報告書, 消防研技術資料, 第 79 号(2007).
- 崔原榮, 大森大助, 伊藤隆政, 高橋克巳, 田中昭洋, 低品位炭(亜瀝青炭)の貯蔵および運搬技術—サイロ貯炭の昇温試験とその昇温挙動の数値解析—, *IHI 技報*, **56**(4), pp. 38-45(2016).