

近畿大学

バイオコークス研究所報告

2024 第22号



近畿大学バイオコークス研究所



バイオコークス事業化推進プロジェクト

近畿大学バイオコークス研究所報告

第22号 (2024)

目 次

「技術報告」

鉄の溶解プロセスにおける杉とコーヒー滓混合バイオコークスの加炭効果	
..... 富田 義弘、森本 亨	1

「解説記事」

アーク炉向けの固体バイオ燃料利用の現状と展開	
..... 井田 民男	7

「活動報告」	13
--------	----

鑄鉄の溶解プロセスにおける杉とコーヒー滓混合バイオコークスの加炭効果

富田 義弘^{※1}、森 本 亨^{※2}

(※¹ 近畿大学バイオコークス研究所、※² ホソカワミクロン株式会社)

【緒 言】

鑄鉄の製造を行う過程で加炭材が使用されている。加炭材の種類には電極黒鉛やコークスなどがあり、我が国は他国からの輸入にほぼ依存している¹⁾。なかでも、加炭材は化石資源に由来するため、消費量削減が課題となっている。バイオマスは天然由来の資源であるのでカーボンニュートラルの概念により、特に廃棄物系バイオマスの有効活用することによりゴミを減らすことにもつながる。昨今、コンビニエンスストアでもコーヒーを豆から淹れているため大量のコーヒー滓が廃棄されており、有効活用が模索されている。現状では、再生紙にするなどのアップストリームに関する取り組みなどが行われているが、少数であり廃棄することが多い。

著者らは、これまでの実験結果で木質系バイオマスをバイオコークス（以下、BIC と略す）化することで、加炭材の代替として可能性があることを示唆している^{2) -4)}。しかし木質系バイオマスは収集する際に多くの費用がかかり、チップ化を行うことでバイオマス発電などに利用されていることから、木質バイオマスの入手には制限がある。そこで、木質系バイオマスの代替として廃棄物系バイオマスを原料にした BIC を作製できれば、木質材料の使用量を減らし、廃棄されるバイオマスの有効活用になると考えられる。また、化石資源の代替ならびに木質の代替として使用することで、エネルギーの安全供給、環境安全、経済効果の 3 点を同時に解決でき、環境に配慮した鑄鉄製造を行えると考えた⁵⁾。

本研究では、鑄鉄製造時の加炭材料として BIC の利用を考え、高周波誘導溶解炉にて銑鉄レス鑄造を行った。BIC には杉とコーヒー滓の混合 BIC を使用し加炭量、機械的性質への影響を調べることによってコーヒー

滓の加炭材としての代替効果について調査を行った。

【実験方法】

1. 杉とコーヒー滓の物性値評価

コーヒーは焙煎度、淹れ方などによって味わいに変化することから、コーヒー滓の成分にも影響があると考えた。そこでコーヒーインストラクターである小島和也氏監修の元、焙煎度、豆の粗さ、抽出方法の 3 つの条件で最も酸味と苦味が強いコーヒー豆と最も酸味と苦味が弱いコーヒー豆を作製し、それぞれのコーヒー滓の成分を調査した。

コーヒー豆の粉碎度を 1mm 以下、焙煎度を深煎り、抽出方法をエスプレッソの酸味や苦味が最も強い条件と、コーヒー豆の粉碎度が粗め（1.5 ～ 2mm）、焙煎度を浅煎り、抽出方法アメリカンの酸味や苦味の最も弱い条件の 2 種類のコーヒー滓の成分分析を行った。Table 1 にコーヒー豆の概要を示す。また、焙煎には半熱風式の焙煎機を用いた。作製したコーヒー豆からコーヒーを抽出し、抽出後のコーヒー滓を、水分、灰分：JIS M 8812、C、H、N：JIS M 8813 に基づいて物性値を測定した。なお、比較材として杉と生豆についても測定を行った。測定した結果を Table 2 に示す。

Table 1 Specifications of green beans.

Beans	San Marino fully ripened on a tree
Country of origin	Brazil
Production area	Mogiana, Cerrado, Sur de Minas, etc.
Varieties	Katsuai, Moonbord, etc.
Production altitude	600m-1000m
Purification M ethod	Natural, Sun Dried
Harvest time	June-October
Cupping	Passion.fruit.sweet.

Table 2 Chemical composition and physical properties. (mass%)

	Moisture	Ash	C	H	N	Total calorific value (Kcal/kg)
Cedar	8.26	3.09	49.9	6.21	< 0.1	4395
Green beans	7.44	3.09	49.6	6.87	2.42	5140
Light Roast, American	9.22	1.66	53.4	7.04	2.38	5640
Deep roast, Espresso	7.73	2.45	53.7	6.99	2.59	5630

生豆と杉を比較した結果では炭素量はほぼ同値といえる。また、焙煎度、豆の粗さ、抽出方法の違いによるコーヒー滓の炭素量への影響もなかった。焙煎したものと比較すると焙煎した方が約 4 mass% 高い値となった。総発熱量は生豆と杉を比較すると 745 kcal/kg 低く、焙煎したものと比較すると焙煎した方が約 500 kcal/kg 高い値となった。焙煎することで揮発成分が放出され、炭素量の割合が増え、これに伴い総発熱量も高くなっている。また、杉は幹部分のみを利用しており豆と比べると N 量は低い。

以上の結果より、焙煎度、豆の粗さ、抽出方法の違いによる炭素量に差は生じないことから、浅煎りのアメリカンとして抽出した後のコーヒー滓を用いて、加炭効果を調査することとした。

2. 杉とコーヒー滓混合バイオコークスの特性評価

本研究では杉とコーヒー滓の混合 BIC を加炭材として鑄鉄製造に用いることを目的としているため、原料となる杉、コーヒー滓共にカッターミルで 1mm 以下に粉碎し、含水率を 9 mass% に調湿し、ピーカー内に入れたバイオマスを手動攪拌器を用い 30 sec. 攪拌混合したものを BIC 化した。なお、杉は和歌山県産とし、杉の幹 100mass% として利用した。BIC の製造条件は電気炉内の $\phi 48\text{mm}$ シリンダー内にバイオマスを充填し、22MPa に加圧しながら 453K に昇温後、900sec. 間保持とし、その後、自然冷却を行い取り出す方法とした。使用する BIC の種類として杉にコーヒー滓 10mass%、コーヒー滓 20mass%、コーヒー滓 30mass% を混合した BIC の 3 種類とした。混合した BIC の見かけ密度は杉 100mass% で 1.38g/cm^3 、コーヒー滓 10mass% 代替で 1.38g/cm^3 、コーヒー滓 20mass% 代替で 1.34g/cm^3 、コーヒー滓 30mass% 代替で 1.33g/cm^3 となり、コーヒー滓を混合することで見かけ密度は小さくなった。Table 2 の杉とコーヒー滓の物性値より、杉混合 BIC の炭素量を計算した結果、コーヒー滓 10mass%BIC の炭素量は 50.12mass%、コーヒー滓 20mass%BIC の炭素量は 50.34mass%、コーヒー滓 30mass%BIC の炭素量は

50.56mass% となった。

次に、混合 BIC の強度特性評価を行うために、圧縮試験により比較を行った。この結果、杉にコーヒー滓を 10mass% 混合すると 10MPa 高い強度となった。また、混合割合を高くすると強度が低下する傾向が見られた。コーヒー豆には約 15mass% の油脂が含まれており、コーヒー滓に残留した油分が原因であると考えられる。コーヒー滓を 10mass% 混合することで油分により密着性が向上し強度は上昇するが、コーヒー滓の割合が多くなると油分過多により密着性が低下し圧縮強度が低下していく。しかし、石炭コークスの圧縮強度は約 20MPa であることから、コークス代替としては十分な強度を有していることがわかる。以上の結果をまとめたものを Table 3 に示す。

以上の結果より、杉にコーヒー滓を混合させても、かさ密度は 1.3g/cm^3 以上を保つことができ、炭素量も大きな違いはないことから、杉 100mass%BIC と同等として鑄造に用いることが可能であると考えられる。

3. 高周波誘導溶解炉を用いた鑄造実験方法

我が国における高周波誘導溶解炉を用いた鑄鉄の鑄造では、銑鉄を用いることが多いが、銑鉄は高価であるため、本実験では銑鉄を用いることなく、鋼くず、Fe-Si 合金、Fe-S 合金、BIC のみで溶解を行う銑鉄レス鑄造を行った。鋼くずを BIC で加炭することで鑄造に適した炭素量に加炭させることを目的とし、製造した鑄鉄中の炭素量を測定することで加炭効果を測定した。

杉とコーヒー滓の混合 BIC からの加炭効果を確認するために黒鉛るつぼ（日本ルツボ株式会社製 #15）内に $\phi 48\text{mm}$ 、重量 100g の BIC を 1kg、Fe-Si 合金 80g、Fe-S 合金 13g を入れ、BIC の浮上を防ぐため、鋼くず（S45C ポンチくず） $\phi 20\text{mm}$ 、重量 5kg を上部にセットした。高周波誘導溶解炉（富士電波工業株式会社 30kW、3kHz）内に黒鉛るつぼをセットし昇温、1773K に到達後 600sec. 保持し、Fe-Si 合金 80g で接種後、分析用鑄型に鑄込み、化学組成の計測を行った。化学組成の分析には AMETEK 製の発光分光分析装置

Table 3 Blended ratio of coffee grounds to cedar. (mass%)

	Blended ratio of coffee grounds			
	0	10	20	30
Bulk density (g/cm^3)	1.38	1.38	1.34	1.33
Carbon ratio (mass%)	49.9	50.12	50.34	50.56
Compressive strength (MPa)	88.6	98.2	78.7	72.1

Table 4 Chemical composition of melting materials for casting. (mass%)

	C	Si	Mn	P	S
Steel scrap	0.44	0.23	0.76	0.016	0.01
Fe-Si alloy	–	75	–	–	–
Fe-S alloy	–	–	–	–	28.65

(SPECTROLAB M12) を用いた。用いた鋼くず、Fe-Si 合金、Fe-S 合金の化学組成を Table 4 に示す。また、高周波誘導溶解炉内に設置した黒鉛るつば内のイメージ図を Fig. 1 に示す。

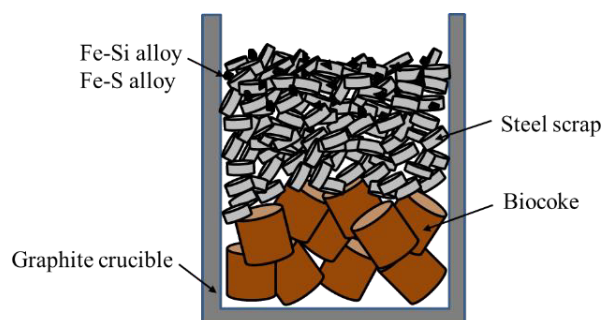


Fig. 1 Schematic of the arrangement of materials in a graphite crucible.

【実験結果および考察】

炭素量の分析結果を Fig. 2 に示す。コーヒー滓の割合

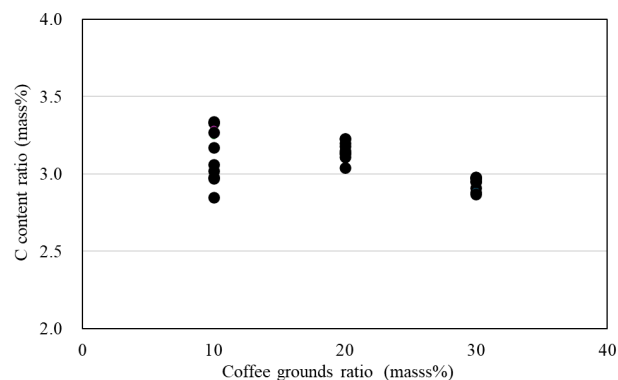


Fig. 2 Relationship between the coffee grounds ratio and the carbon content ratio in cast iron.

が多くなるとわずかではあるが加炭効果が小さくなる。平均値で見るとコーヒー滓 10mass%BIC の炭素含有量は 3.13mass% 標準偏差 0.16、コーヒー滓 20mass%BIC の炭素含有量は 3.16mass% 標準偏差 0.05、コーヒー滓 30mass%BIC の炭素含有量は 2.93mass% 標準偏差 0.04 である。コーヒー滓 10mass% の条件ではばらつきが大きいが、平均値としては同等といえる。このことから杉にコーヒー滓を混合しても加炭効果への影響は小さいと言える。

そこで、経過時間ごとの加炭効果を明らかにするために溶解開始後 1.2ks から 0.3ks 毎に溶湯を採取し、炭素含有量の分析を行った。この結果と近似曲線を Fig. 3 に示す。また、それぞれの平均値と標準偏差を Table 5 に示す。

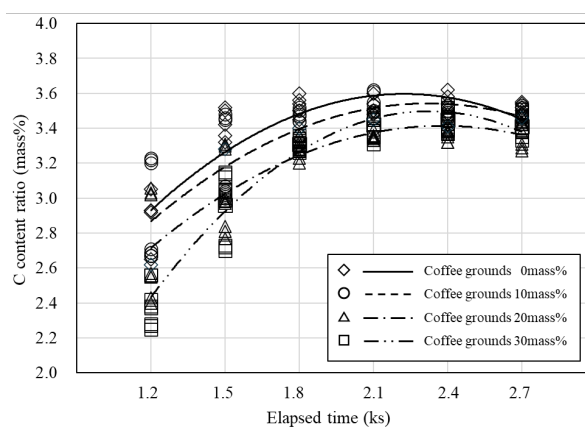


Fig. 3 Transition of carbon content ratio in the melt with elapsed time.

Table 5 Average and standard deviation of carbon content ratio in cast iron.

	Elapsed time (ks)		1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7
Blende ratio of coffee grounds	0	Average	2.85	3.40	3.51	3.51	3.52	3.51
	10		2.86	3.17	3.43	3.51	3.50	3.49
	20		2.70	3.03	3.29	3.35	3.37	3.39
	30		2.41	2.96	3.31	3.42	3.45	3.41
	0	Standard deviation	0.16	0.09	0.07	0.05	0.07	0.03
	10		0.25	0.21	0.07	0.07	0.02	0.03
	20		0.27	0.20	0.05	0.02	0.03	0.08
	30		0.12	0.18	0.03	0.06	0.06	0.06

どの条件においても溶解開始から 1.2ks で加炭効果が見られる。また、1.5ks までは鋼くずの溶け方にばらつきが生じたため炭素量のばらつきも大きくなっている。平均値で見ると杉に次いでコーヒー滓 10mass% BIC が一番高い値となった。また、溶解開始から 2.1ks 経過すると、すべての条件で加炭効果は小さくなり、やがて飽和状態となっている。これは溶湯と接触した BIC が揮発成分を放出し炭化、炭化した BIC が分解し溶湯に吸炭され、BIC が炉内から焼失したためであると考えられる。かさ密度が低く圧縮強度が低いコーヒー滓 20mass% 以上では炉内での分解、崩壊が早くなり固定炭素量が低下したためであると考えられる。しかし、低下量はわずかであり 2.7ks 経過した時点では、杉との差は 0.3mass% 以内であり、どの条件においても加炭効果は同等であるといえる。

次に、機械的性質を調べるために、前述と同じ条件で溶解を行い、溶解時間 2.1ks 経過後の溶湯を砂型に鋳造

し、JIS Z2241 8B 号試験片に加工後、引張強さとブリネル硬さを測定した。また、鑄鉄は黒鉛の形状を調査するため引張試験後の破断部近傍の組織観察を行った。

溶解実験はそれぞれの条件で 3 回ずつ行い、化学組成を調査した結果を Table 6 に示す。炭素量の標準偏差は杉 100mass%BIC で 0.02、コーヒー滓 10mass%BIC で 0.03、コーヒー滓 20mass%BIC で 0.02、コーヒー滓 30mass%BIC で 0.03 であった。そこで、平均値に一番近い結果となった試料を用いて機械的性質を比較した。

分析結果より、杉 100mass%BIC を用いた条件が一番高い加炭効果を示した。そして、コーヒー滓 20mass%BIC を用いた条件がばらつきが小さく、平均すると高い値となった。また、鑄鉄の主要 5 元素である C、Si、Mn、P、S の値を見ると、炭素量以外への影響は小さく、加炭効果だけが現れており、他の元素への影響はなかった。

試験片を作製し、引張試験、ブリネル硬さ試験を行った。この結果を Table 7、Fig. 4 に示す。また、光学顕

Table 6 Chemical composition of cast iron. (mass%)

Blended ratio of coffee grounds to cedar	C	Si	Mn	P	S
0	3.48	2.46	0.68	0.02	0.06
10	3.21	2.42	0.67	0.02	0.06
20	3.37	2.66	0.68	0.02	0.06
30	3.26	2.55	0.69	0.02	0.06

Table 7 Carbon content ratio, Tensile strength, and Brinell hardness due to different coffee grounds content ratios.

	Blended ratio of coffee grounds to cedar (mass%)			
	0	10	20	30
C content ratio (mass%)	3.48	3.21	3.37	3.26
Tensile strength (MPa)	133	246	135	194
Brinell hardness (HB)	145	196	155	171

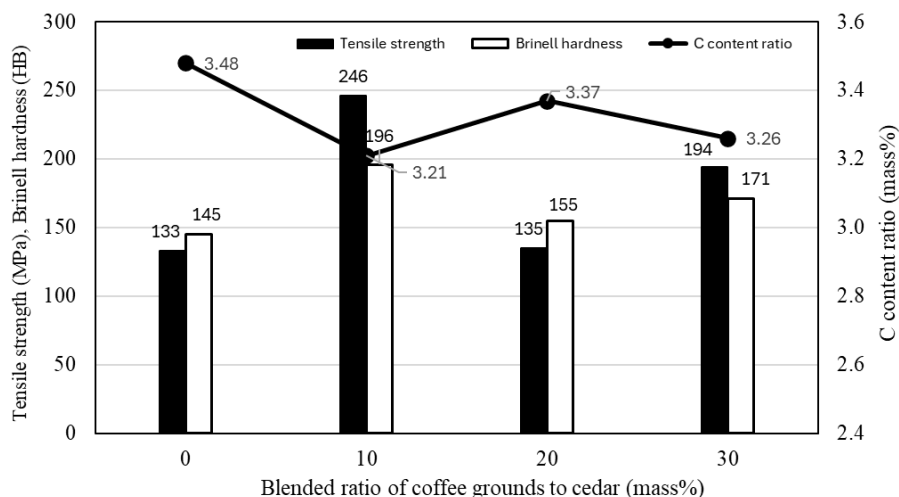


Fig. 4 Carbon content ratio, Tensile strength, and Brinell hardness due to different coffee grounds content ratios.

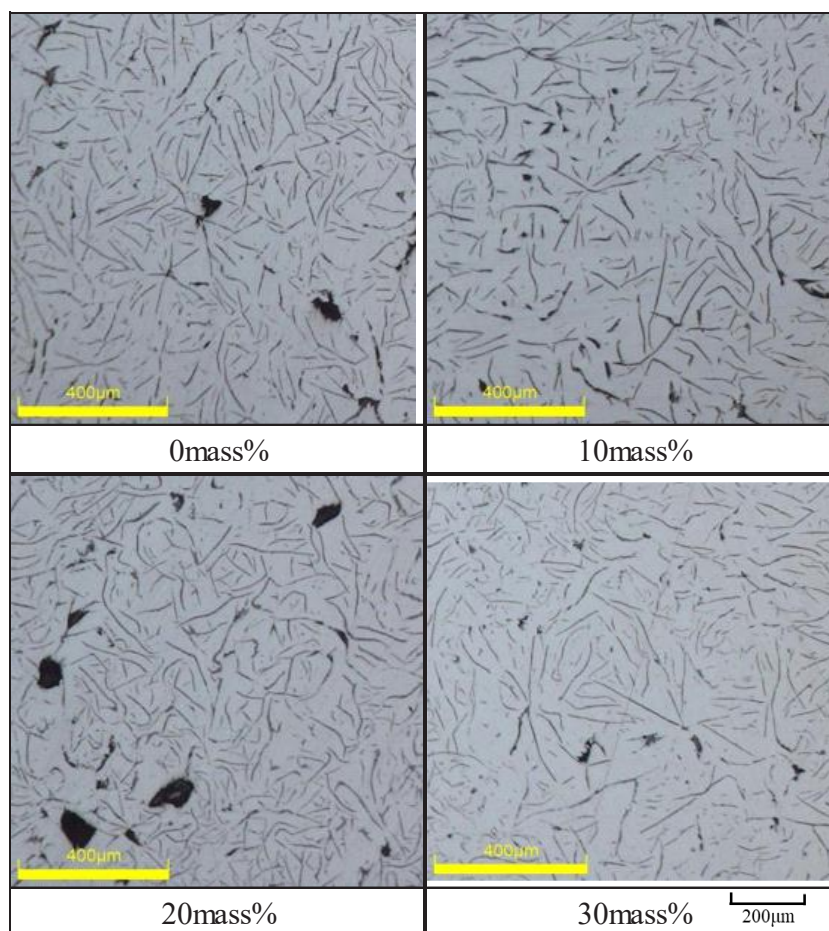


Fig. 5 Microscopic observation results of cast iron

微鏡による組織観察を行った結果を Fig. 5 に示す。なお、組織観察を行う上で腐食処理は行わず、黒鉛形状のみを調査した。

炭素量が高くなると引張強さや硬さが低くなり、炭素量が低くなると引張強さや硬さが高くなる。一般的に炭素量が多くなると黒鉛の晶出する量が増えるとともに大きく成長（粗大化）する。鑄鉄の強度は黒鉛形状の影響を大きく受けるため、粗大化すると強度は著しく低下する。Fig. 5 の組織中の黒色の部分が黒鉛であり、炭素量の多い条件では丸い粗大化した黒鉛も現れている。黒鉛の面積率は杉 100mass% で 19%、コーヒー滓 10mass% で 24%、20mass% で 17%、30mass% で 21% である。杉 100mass%BIC を用いた場合とコーヒー滓を混合させた条件を比較すると、黒鉛面積はコーヒー滓 20mass% で高くなっており、炭素量が高いことから粗大化した黒鉛が現れていると考えられる。粗大化した黒鉛を除くと黒鉛の太さや長さは同等であり、コーヒー滓混合による黒鉛形状への影響は小さいと考えられる。

以上のことから、杉をコーヒー滓に一部代替した BIC

を用いた鑄造では、すべての条件で加炭効果が現れるが、他の元素への影響は小さく、加炭効果を調整すれば機械的性質への影響もないといえる。

以上の結果および考察により、杉にコーヒー滓を混合させても加炭効果を得ることができた。また、杉 100mass% の BIC の結果と同等の加炭効果を得ることができ、機械的性質や黒鉛組織への影響も及ぼさないことがわかった。杉とコーヒー滓混合 BIC は加炭材として鑄造可能であることから、杉の代替材料としてコーヒー滓は有効であり、杉の使用量を減少させることが可能となるだけでなく、食品廃棄物も削減できることから、従来の鑄造よりも安価で地球環境にも考慮した鑄造が可能となり、環境に配慮した鑄鉄製造を行えると言える。

【結 言】

本研究では、杉とコーヒー滓を混合したバイオコークスを作製し、銑鉄レス鑄造を行い、5kg の鋼くずに 1kg の BIC を加炭材の代替材料として用いた結果から次の

ことを示した。

1. 杉 100mass%BIC を用いた鑄造による加炭量とコーヒー滓を混合した BIC の加炭量を比較した結果、ほぼ同等であり、コーヒー滓を混合した BIC を用いた鑄造の方が加炭効果は 0.1 ~ 0.2mass% 小さくなる。
2. 高周波誘導溶解炉において溶解開始後、コーヒー滓を混合した割合により加炭傾向の違いは現れるが、溶解開始から 2.7ks で同等となる。
3. 杉をコーヒー滓 30mass% まで代替しても鑄鉄の機械的性質、組織には影響を与えない。

【謝 辞】

近畿大学バイオコークス研究所所員の皆様には、多くのご教示を頂き、研究成果を纏めることができましたこと、感謝の意を表します。また、コーヒー豆の剪定、焙

煎、抽出などご協力いただきました自家焙煎工房カフェ littleisland 代表の小島和也氏に厚く御礼申し上げます。

【参考文献】

- 1) 一般炭の輸入数量：財務省防衛統計（2023），6.
- 2) Y.Tomita: “Effects of repetitive production on the mechanical characteristic and chemical structure of green tea bio-coke”, Journal of Japan Foundry Engineering Society, 85（2013）,15-20.
- 3) Y.Tomita, Y.Obana and T.Ida: “Verifications of the Carburizing Material Substitution Effect of Biocoke in High Frequency Induction Fusion Melting”, Journal of Smart Processing, 3（2014）, 289-294.
- 4) Y.Tomita, K.Shimada and T.Ida: “Carburizing Effect of Cast Iron in High-Frequency Induction Electric Furnace Melting by Bio-Coke”, Journal of Japan Foundry Engineering Society, 95（2023）, 9-15.
- 5) バイオマス・ニッポン総合戦略推進会議：バイオマス活用推進基本計画（農林水産省）（2010），11-12.

アーク炉向けの固体バイオ燃料利用の現状と展望

井 田 民 男

(近畿大学バイオコークス研究所)

【緒 言】

令和2年内閣府発出の2050年カーボンニュートラルに向けたグリーン成長戦略に関する論点では、「我が国は、2050年までに、温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、すなわち2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」との方針に沿って、成長戦略の柱に経済と環境の好循環を掲げ、グリーン社会の実現に最大限注力すべきではないかとの議論がなされた。その基礎資料によると、2015年の国連気候変動枠組み条約締約国会議（パリ協定＝COP21）、で採択された気候変動問題に関する国際的な枠組みで目標を完全に達成するためには、どのような道筋をたどることになるかが分析された。そのシナリオでは、世界全体でその目標を2050年に達成するためには、CO₂排出削減量が年間35億トンのバイオマス利用が必要であることが提示された^{1) 2)}。

それを受け、経済産業省から令和3年に「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略の策定」が発出された。策定では、エネルギー関連産業、輸送・製造関連産業及び家庭・オフィス関連産業を14の分野にカテゴリーされ、それぞれに方針が打ち出された。特に、カーボンリサイクル・マテリアル産業では、「ゼロカーボン・スチール」の実現に向けた技術開発・実証が大テーマとして掲げられ、水素還元製鉄に関する3つの具体的な技術開発が掲げられた。

- ① 鉄鉱石の還元に必要な炉内熱補償技術
- ② 石炭使用量の減少に伴う通気確保技術
- ③ 還元鉄の溶解に不可欠な電炉の高度化・不純物除去技術、等を確立

である³⁾。

なかでも、「ゼロカーボン・スチール」を実現するには、鉄鉱石の還元の脱炭化と同時に、還元鉄の溶解においてアーク炉で脱炭素化することが強く求められる。特に、専門分野以外から見ると、アーク炉という名称から投入する電力をアークに変換し、そのプラズマエネルギーのみを熱に転換し、溶解している炉であると、認識

されているらしいがある。従来、アーク炉の技術開発の取り組みは、炉内の均質溶解であったり、短時間溶解であったり、その他、高効率溶解を目指した技術開発であったため、酸素ガス、燃焼性ガス、粉コークス、塊（石炭）コークス、廃プラスチックなどを炉内に投入している。「ゼロカーボン・スチール」事業を完遂するには、これらの投入エネルギーも脱炭素化する必然性が技術開発の方向性として新しく生まれる。

世界の粗鋼生産量は、2023年約18億8820万トンではほぼ横ばい状態が続いており、我が国は、約8700万トンと停滞気味の統計データとなっている⁴⁾。

ここでは、鉄鋼分野でのグリーンエネルギーイノベーション（GX）事業の礎を築くための1つの方向性として、アーク炉の脱炭化があり、その取り組みが加速的に進んでいる。ここでは、アーク炉向けのバイオマス資源を活用した固体バイオ燃料利用の現状と展望を述べる。

【アーク炉業界における現状と展開】

我が国のアーク炉業界は、国内約40か所の製鋼工場が操業している。近年、特に大規模製鋼において高炉からの高効率かつ省エネルギー化が可能な電炉化への転換が進んでいる。電炉には、加熱方式から誘導加熱と電気抵抗加熱の2つに分類される。電力の方式として、直流型、交流型に分けられ、排熱を利用し省エネルギー化を向上した予熱型や出鋼方式の違いなどから、シャフト式スクラップ予熱装置付アーク炉（MSP-DC炉、SSP-DC炉）、コンスチールシステム、電炉・直流炉（DC炉）、電炉・炉底出鋼方式（偏芯炉底出鋼・EBT）、電炉・ツインシェル炉（1電源2炉）など様々な炉型が開発されている。背景には、アーク炉が経済的（エコノミー）な優位性に長けているので、技術開発が進められた経緯があるが、環境的（エコロジー）ではない、側面を持っている。アーク炉を用いた「ゼロカーボン・スチール」の実現には、環境的ではない側面をカーボンニュートラルな再生可能エネルギーに置き換えることによって、経済的かつ環境的な炉に生まれ変わる大きな可能性を秘めて

いる。

カーボンニュートラルな再生可能エネルギーへの転換のための市場規模を石炭コークス消費量から俯瞰する。アーク炉操業の製鋼工場においては、供給規模が異なるためそれぞれ電炉能力が異なり、石炭コークスの消費量が異なる。我が国の電炉による年間の鉄鋼生産量は、約30百万トン／年で、一般的には、電炉能力が1ヒート約60分で50トン～300トン／ヒートで溶解操業されている。石炭コークス消費量は、塊（石炭）コークス：約15万トンを酸化還元・補助燃焼用として1ヒートに平均5キロ／トンが投入され、(CDQ)粉（石炭）コークス：約30万トンを溶鋼中カーボン調整・スラグフォーミング形成用として1ヒート平均10キロ／トンが用いられている。上述のように、この市場に高炉からの電炉化が重なり、さらに大きな市場になる一方、膨大な石炭コークスとスクラップを消費する業界となることが推測される⁵⁾。

「ゼロカーボン・スチール」の実現における将来の成長性としては、大きな期待が加速的に押し寄せている感がある。特に、着目されている点は、高炉からの電炉化により、CO₂排出量が約1/4に激減するところである。さらに、現状での電炉比率20%から欧米並みの50%まで電炉比率まで高くなり、カーボンニュートラルかつ再生可能エネルギーへの転換が同時に進むことによって、再生可能エネルギー市場やカーボンクレジット市場などの拡大が見込まれる。

この将来展望において、塊（石炭）コークスおよび(CDQ)粉（石炭）コークスを固体バイオ燃料に置き換えることができる固体バイオ燃料技術開発こそが最大の焦点となることは言うまでもない。

【固体バイオ燃料利用の現状と展開】

アーク炉向けの固体バイオ燃料において、COの生成が重要な効果を持つことが分かつつある。Fig. 1に標準的なバイオマス構成による発熱量とその割合及び成分配分率を示す。バイオマスは、生合成により生化学的にはセルロース、ヘミセルロース、リグニンと灰成分等により構成される。この構成を熱分解特性の観点から見ると、固定炭素成分（Fixed carbon）と高温揮発成分（High temperature V.M.）、低温揮発成分（Low temperature V. M.）と灰成分（Ash）に分けられる。バイオマス種別によって、この配分率は異なるので、平均的な成分割合を想定し、各発熱量を図に示している。

低温揮発成分は、計測できないので、差分として推算している。また、この低温揮発成分は、フルフラールなどの吸熱成分が含まれるので、比較的低い発熱量になる。よって、固体バイオ燃料からの主なCO生成源としては、固定炭素と高温揮発成分になる。

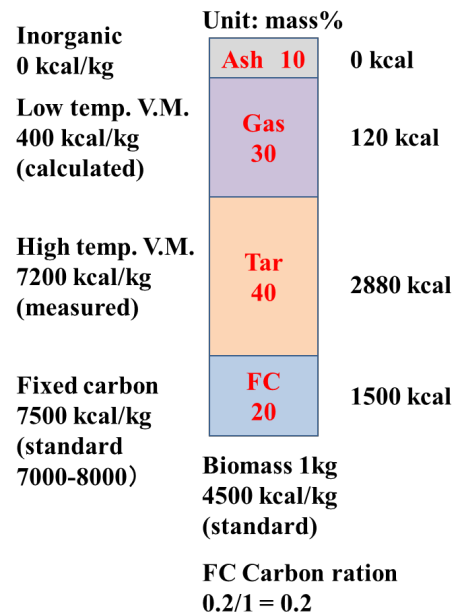


Fig. 1 Standard biomass in thermal characteristics.

一方、操業現場の経験値として、低密度の固体バイオ燃料である薪、ペレットやブリケットでは、溶解に必要な約60～90分間に早期に灰化していることが確認され、効果が見られない報告を受けている。すなわち、固体バイオ燃料として、揮発速度が早いと、炉底部においてCO燃焼領域が形成できないために石炭コークス代替燃料として適用できない理由となっている。

この比率を高めるには、トレファクション処理があるが、加熱温度200～380℃のトレファクション処理を施すと、気孔率が高くなり、CO生成速度が早くなり、炉内での効果が低下することが類推されている。この点においては、最適なガス化速度を求める必要があるが、現状での石炭コークスと同溶解時間を達成する必要がある。よって、アーク炉向け固体バイオ燃料には、緩慢燃焼あるいは緩慢ガス化しながら約60～90分の溶解時間、炉内で滞留することができることがターゲットになる。

トレファクション（半炭化）は、バイオマスの改質等を目的に行われる低温の熱処理である。半炭化の英語名称としては、半炭化技術（乾式半炭化）の考案者である佐野・本庄はsemi-carbonizationを使用していたが、現在では造語であるtorrefactionが主流となっている。半炭化は、処理雰囲気条件により乾式半炭化（DT：Dry

torrefaction) と水熱半炭化 (WT: Wet torrefaction) に分類できる。前者の DT 処理は、200~300℃ の不活性ガス雰囲気で行われる熱分解処理である。後者の WT 処理は、180~260℃ の熱媒体中 (圧縮水、飽和水等) で熱処理であり、熱分解以外に加水分解や灰分浸出といった反応も生じる場合がある。半炭化は低温熱処理であるため、高温熱処理である炭化と比べてエネルギー収率を高く保持できることから、バイオマスの前処理・製造に係る二酸化炭素排出を低減しつつ、バイオマス資源の改質 (発熱量の向上、疎水性の付与等) が可能となる⁶⁾。

トレファクション処理について、その原理を Fig.2 に示す。重量収率 70mass% (低温揮発成分 20mass% + 高温揮発成分 10mass% 損失) を 200~380℃ で加熱処理した変化を想定し推算値を示している。それぞれの熱エネルギーおよび配分率の変化は、図に示す数値となる。特に、熱エネルギーは、約 17.5% 向上し、固定炭素率も約 43% 向上する。トレファクション処理は、原料からの変化を考えると熱エネルギー損失技術であるが、単位重量に換算すると熱エネルギー向上技術となる改質技術に位置付けられる。アーク炉向けの固体バイオ燃料として考えると、固定炭素率 + 高温揮発成分率が

19% 向上し、単位重量当たりの CO 発生量は、増加する。しかしながら、トレファクション温度が高くなるに従い、固定炭素率 + 高温揮発成分率が向上する反面、気孔率が高くなり、揮発速度が上昇し、燃焼及び揮発化時間が短くなるので、溶解時の滞留時間が短くなり、効果が薄れることになる。

森山らは、乾式半炭化燃料 (DTB) のエネルギー特性の推定モデルについて検討を行っている。推定モデルの構築により、DTB 燃料を使用するボイラ側からの要求に見合うエネルギー特性を有する DTB 燃料の製造条件を逆推定・制御し得ることとなる。DT 処理では、半炭化温度・時間のわずかな変化によりエネルギー特性は大きく変化する可能性がある。これは、半炭化温度領域では半炭化条件のわずかな差異が熱分解反応の進行に大きく影響するためである。澤井らは、熱天秤を用いた半炭化等温熱分解実験 (DT 温度 = 230、250、270、290、310℃) の結果から、スギ、シイノキ、稲ワラに対する半炭化 two-step 反応モデルを構築し、DTB のエネルギー特性を 5% の高い推定精度で予測し得ることを示した。澤井らは、バイオマスの樹種によらず汎用的に DTB のエネルギー特性を推定する方法を検討している。バイオマスを構成する主要 3 高分子であるセルロース、

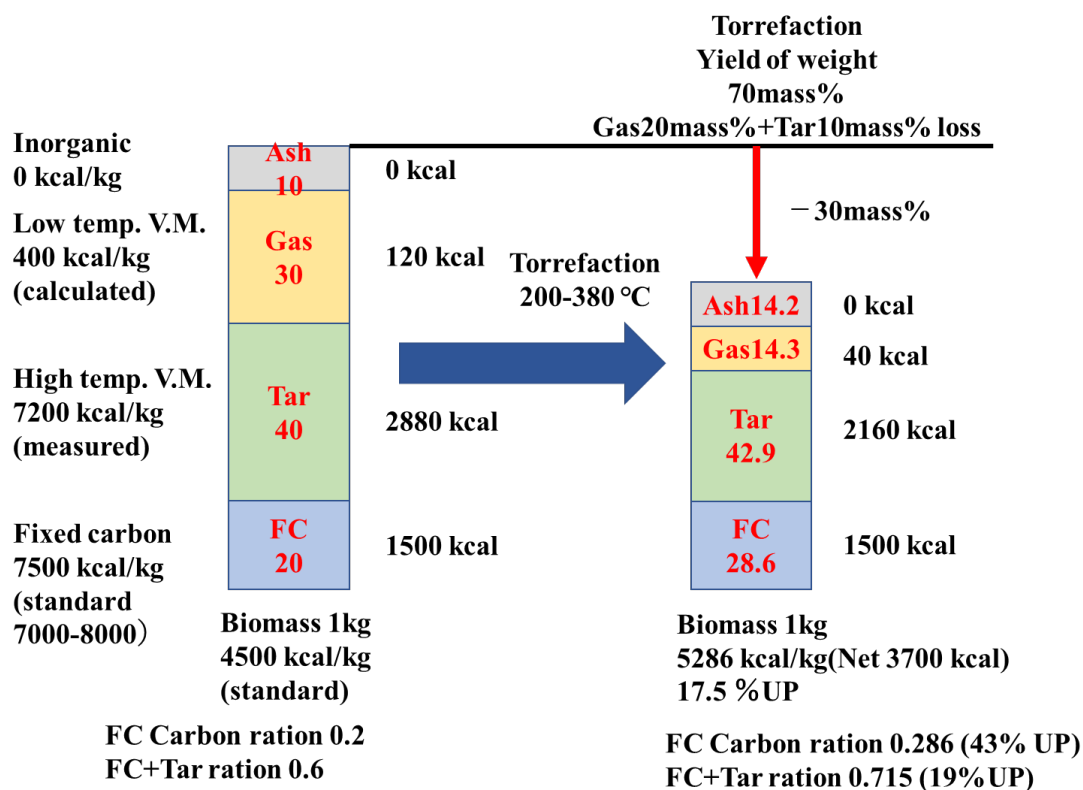


Fig. 2 Torrefaction concept of biomass in thermal characteristics.

キシラン、リグニン試薬の熱天秤による昇温熱分解実験（105℃から950℃まで）を行い、反応速度解析からDT処理時のVM生成反応モデルを同定し、これにHHV実験相関式を組み合わせることで、DT処理を行った主要3高分子のHHV推定モデルを構築した。主要3高分子のHHV推定モデルと実バイオマスにおける主要3高分子・灰分の質量分率の情報から、主要3高分子が独立に熱分解する仮定の下、実バイオマス（スギ、稲ワラ）におけるDTBのHHVを汎用的に推定し得ることを示した⁷⁻⁸⁾。

アーク炉向け固体バイオ燃料としては、この相反する特性を相殺するトレファクション処理を施した高密度（低気孔率）かつ固定炭素率+高温度揮発成分率が高い特性を有した性質が求められることになる。既に、塊（チャージ）コークスを100%置換できることが実証されており、(CDQ)粉コークスの代替としてのトレファクション・ペレットの適用可能性を検証する必要があるが、加炭性も求められており、高温でのチャー燃焼の持続性が開発のポイントとなる。

【実アーク炉での燃焼試験結果】

Fig. 3に製鋼用アーク炉の断面を示す。まず、スクラップヤードにてスクラップをスクラップバスケットに装入し、これをアーク炉まで運び炉蓋を開き、スクラップをアーク炉本体に装入し、スクラップ溶解を行う。溶解エネルギーとして電気、燃料（LNG、灯油等）、炭材（炭粉や塊コークス）を用いる。従来、製鋼用アーク炉では、原料のスクラップを溶解する工程で高温の排ガスが発生するため、後流での排ガス熱の有効利用が模索されてきた。排ガス熱の有効利用に対応しているのがスク

ラップ予熱型アーク炉である。スクラップ予熱型アーク炉では、図のように、アーク炉直上にスクラップ予熱槽があり、原料のスクラップをアーク炉からの排ガスを用いて予熱し、予熱されたスクラップを溶解することで溶解エネルギー削減を図る方式である。ここでは、この予熱型アーク炉において石炭コークス代替としてバイオコークスを活用した実証試験を行い、CO₂削減効果を検証した。バイオコークスをアーク炉内に直接に投入することでスクラップ溶解の熱源になることが期待され、直接に石炭コークス置換分のCO₂削減が図れる。また、石炭コークスでは実現できなかったスクラップをバイオコークスからの発熱で効率よく溶解に寄与することが分かっている。このことは、スクラップに着熱されなかった発生熱量が排ガス温度を上昇させ、予熱槽に流れ込むことでスクラップの受熱効率を向上するダブルでのエネルギー効率向上によることが考察される⁹⁾。

シャフト式スクラップ予熱装置付アーク炉における高密度かつ高強度を有する固体バイオ燃料（バイオコークス）による石炭コークスの全量代替燃焼試験結果を示す。（協力：ヤマトスチール株式会社、住友商事マシネックス株式会社）

- ・電力や酸素、ガスに大きな増減がないことを検証
- ・出鋼温度は高く熱源として効果があることを検証
- ・廃プラスチックも熱源として使用しているが、塊（石炭）コークスの使用の時よりも少ない量で溶解可能であることを検証が得られ、固体バイオ燃料による石炭コークス代替が可能であることが検証された。従来の石炭コークスのみの溶解工程では、炉内で石炭コークスが表面反応やガス化反応により、CO生成しても、OHラジカルが周辺に存在しないので、燃焼へは寄与せず、有効に熱利用されていなかったと類推できる。

【展 望】

地球温暖化に起因する気候変動問題は、国際社会が一体となって喫緊に取り組むべき重要な課題であることは言うまでもない。2050年到達目標である「ゼロカーボン・スチール」への挑戦が本格化している。また、既に始まっているであろう化石資源争奪時代への突入を鑑みると、バイオマス資源の多様な活用方法、特に複合化し、国内資源を活かすために少量資源ですら活用できる技術開発を準備する必要がある。一方では、少バイオ資源国家である我が国が安定してバイオマス資源を確保す

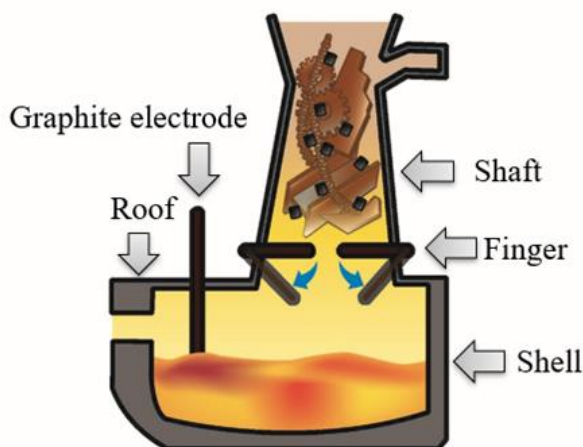


Fig. 3 Pre-heat type arc furnace construct image.

るためには、東南アジアとの有効な関係を築く必要があり、多バイオ資源国家との共存共栄の道を探し求める必要性がある。

さらに、アーク炉の高度化を達成しないことには、完全な「ゼロカーボン・スチール」の実現はありえない。現在、固体バイオ燃料へのほぼ100%代替燃料化が進んでいる塊コークスにおいては、さらなる最適な固体バイオ燃料の創出により、投入電力の低下が期待できるところである。直近においては、粉(CDQ)コークスの固体バイオ燃料代替が急がれるところである。鉄の還元に必要な酸素は、風力エネルギーなどのグリーン電力による水の電気分解などで調達することは技術的に可能かと考える。最大の課題は、黒鉛電極のグリーン化である。2024年度「NEDO先導研究プログラム／新技術先導研究プログラム」において、「人造黒鉛における化石由来原料依存からの脱却に資する革新的製造技術の開発」が公募された。焦点は、バイオマス炭素からニードルコークス代替素材の創成に掛かっており、低級炭素を如何に高級炭素へと転換できるかが、ハードルとなる¹⁰⁾。

最後に、アーク炉のみならず高炉、キュボラ、精練炉などの石炭／石炭コークスの高度な利用に適用可能な固体バイオ燃料の開発が個々に求められることになる。しかし、これからの選択肢としては、石炭／石炭コークスの性状に合わせた炉への適用ではなく、お互いに歩み寄った固体バイオ燃料の開発も含めた溶解炉開発も進むべき道と考える。合わせて、固体バイオ燃焼の高効率化を図るためには、高温環境での超緩慢燃焼と炭化進行に伴う収縮機能による加炭性、還元性を確保するため高機能化が必要になる。

【謝 辞】

長年、バイオコークス技術開発に伴走頂いている株式会社ナニワ炉機研究所殿に謝意を申し上げます。特に、1963年鑄鉄溶解設備専門メーカーとして起業され、鑄造業界発展のためバイオコークス事業に多大なるご理解とご支援を頂きました故・村田悦夫会長（令和6年8月ご逝去）に深謝すると共にご冥福をお祈りします。

【参考文献】

- 1) <https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/seicho/seichosen-ryakukaigi/dai2/siryoul.pdf> (2024.9) (In Japanese)
- 2) <https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/seicho/seichosen-ryakukaigi/dai2/siryoul2.pdf> (2024.9) (In Japanese)
- 3) <https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005-3.pdf> (2024.9) (In Japanese)
- 4) <https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUC-263140W4A120C2000000/> (2024.9) (In Japanese)
- 5) <https://coal.jogmec.go.jp/content/300379416.pdf> (2024.9) (In Japanese)
- 6) T. SAWAI, T. IDA, S. MIZUNO, N. KANADA: "Biomass Torrefaction Reforming Technology and Its Prospect", Netsu Sokutei, 51-2 (2024), 70-77. (In Japanese)
- 7) Fumiya MORIYAMA, Satoru MIZUNO, Nami TAGAMI-KANADA, Toru SAWAI: "Evaluation of energy properties of torrefied biomass for a given pyrolysis condition by isothermal pyrolysis kinetics", Mechanical Engineering Journal, 8-3 (2021), 21-00069
- 8) T. SAWAI, K. YOKOTA, N. TAGAMI-KANADA: "Generalized heating value estimation of torrefied woody biomass based on pyrolysis kinetics of primary constituent polymers", Journal of Thermal Science and Technology, 17-3 (2022), 22-00114
- 9) N. Oki: "Tackling to the Carbon-Neutral Society by Innovative Solid Biofuel with Arc Furnace", Smart Processing Society for Materials, Environment & Energy, 12-1 (2023), 18-22. (In Japanese)
- 10) <https://www.nedo.go.jp/content/100970433.pdf> (2024.9) (In Japanese)

活動報告

【学術論文】

- 1) Nami TAGAMI-KANADA, Satoru MIZUNO, Supitchaya CHERDKEATTIKUL, Tamio IDA, Estimation of maximum Bio-coke compressive strength based on chemical composition, Mechanical Engineering Journal, Vol.8 Issue1, pages 20-00391 (2021)
- 2) Vidya Cundasari Koesoemadinata, Kenki Chou, N. Baharin, W. J. Yahya, M. A. Yuzir, F. N. M. Akhir, K. Iwamoto, S. Hata, S. Aid, N. Othman, T. Ida, Yasukazu Murakami, Hirofumi Hara, The effectiveness of biological pretreatment of oil palm empty fruit bunch on its conversion into Bio-Coke, Bioresource Technology Reports, Vol.15, BITEB-D-21-00147R3, 100765, (P.7) (2021)
- 3) Nami Tagami-Kanada, Koji Yoshikuni, Satoru Mizuno, Toru Sawai, Manabu Fuchihata, Tamio Ida, Combustion characteristics of densified solid biofuel with different aspect ratios, Renewable Energy, Volume 197, pp.1174-1182 (2022).
- 4) 富田義弘, 島田寛大, 井田民男, バイオコークスによる高周波誘導電気炉溶解における鑄鉄の加炭効果, 鑄造工学 Vol. 95 (1), pp.9-15 (2023).
- 5) Nur Syahirah Kamal Baharin; Supitchaya Cherdkeattikul; Nami Kanada; Hirofumi Hara; Satoru Mizuno; Toru Sawai; Manabu Fuchihata; Tamio Ida, Impact and effectiveness of Bio-Coke conversion from biomass waste as alternative source of coal in Southeast Asia, Journal of Material Cycles and Waste Management, 25, pp.17-36 (2023).
- 6) Nur Syahirah Kamal Baharin, Hirofumi Hara, Tamio Ida, Potential of Japanese cedar's Bio-Coke as a sustainable solid fuel to replace coal coke, Biomass Conversion and Biorefinery, DOI:10.1007/s13399-023-04286-7 (2023).
- 7) Supitchaya Cherdkeattikul, Yusuke Morisawa Nami Tagami-Kanada, Tamio Ida, FTIR and chemometric study of densified solid biofuel produced under subcritical water conditions and its compressive

strength affected by lignocellulose substances, Fuel, Volume 342, 127835 (P.9) (2023).

- 8) Nami Tagami-Kanada, Chinatsu Kondo, Tsuneyoshi Matsuoka, Yuji Nakamura, Tamio Ida, Combustion characteristics of biocoke with added Al powder in oxygen-enriched atmosphere, Fuel, Volume 350, 15, 128788 (P.10) (2023).

【活動状況】

委託研究契約：2021 年度 13 件 2022 年度 10 件
2023 年度 10 件 計 33 件
技術指導契約：2021 年度 0 件 2022 年度 2 件
2023 年度 2 件 計 4 件
KLC 技術相談：2021 年度 9 件 2022 年度 25 件
2023 年度 12 件 計 46 件

【今後の展望・活動】

《製鋼用アーク炉向けバイオ粉コークスの開発》

新技術先導研究プログラムの技術シーズに係る情報提供依頼 (RFI) に基づく

製鋼用アーク炉向けバイオ粉コークスの開発を推進する。現状バイオコークスは、製鋼用アーク炉で補助燃料として投入される粉コークス (CDQ) と塊コークスの内、塊コークスを全量置換できる実績を有する。鉄鋼 GX 事業におけるアーク炉の役割は今後増し、鉄鋼 GX 事業において粉コークスを置換できるバイオ粉コークスの開発研究を推進。

《エネルギー資源争奪を回避できる研究とはなにか》

(公財) 国際高等研究所 2023 年度研究プロジェクト申請書に基づく

化石資源に代わる新しいエネルギー基盤への変革が人口増加、食糧自給などの地球規模での課題に地理的に時間的に技術的に本当に応えられるかどうか焦点となる。科学者は、地上の太陽と称される核融合エネルギー、究極の再生可能エネルギーとなる人工光合成によるバイオマス資源の創生など剛毅な精神で挑戦しているが、エネルギー争奪を回避するために必要な研究とは何かを問い、人類が自然と共生し、生き延びることができ

るのか？できないのか？の答えに向かって、目指すべき着地点を導くことを研究所の指針とし、活動。

【国際共同研究】

泰日工業大学；共同研究：バイオコークスに関するSPC 設立への協力、タイ天然資源環境省傘下のタイ温室効果ガス管理機構 (TGO) との協議にて JCM クレジットに関する交渉

南洋工科大学；共同研究、JFE エンジニアリングとの協働により、シンガポール政府 NEA: National Environment Agency からの大型委託事業を下に共同研究

マレーシア日本国際工科院；共同研究

ケンタッキー大学；共同研究

インドネシア大学；共同研究

【ISO/TC 238 Solid Bio-fuels】

日本産業標準調査会 (JISC) の承認を受け、2024 年 1 月より、ISO/TC 238 (Solid Biofuels and Pyrogenic Biocarbon: 固体バイオ燃料およびバイオカーボンに係る国内審議団体の設立に中心的に貢献。国内審議の専門委員として活動。2025 年度日本国開催誘致に活動に積極的に関与。

【その他活動事項】

【解説記事】

- 1) 淵端学, 井田民男, スケールモデルの適用範囲に関する一考察, 日本実験力学学会誌, Vol.20, No.4, pp.243-247 (2021)

- 2) 井田民男, 多原料バイオコークスの特性と CO₂ 削減誘導型産業炉への適用, 太陽エネルギー学会誌, Vol.47, No.2, pp.18-25 (2021)
- 3) 井田民男, バイオコークスによるカーボンニュートラル社会実現への現状と展望, 月刊「型技術」Vol.37, No.1, pp.18-21 (2022)
- 4) 村田博敏, 井田民男, カーボンニュートラル社会を実現するグリーン・キャスティングへのガイドパス, 素形材, Vol.63, No.8, pp.26-31 (2022)
- 5) 井田民男, 汚泥バイオコークスの成型特性と燃焼・貯蔵性, 再生と利用 (日本下水道協会誌), Vol.46, No.170, pp.6-11 (2022)
- 6) 井田民男, 次世代固体バイオエネルギー; バイオコークスの溶解炉での燃焼挙動とカーボンニュートラル社会を実現するための固体バイオ燃料開発動向, 日本燃焼学会, 第 64 巻 209 号, pp.1-8 (2022)
- 7) 井田民男, 富田義弘, 水野 諭, 金田奈実, カーボンニュートラル社会を実現するための固体バイオ燃料: バイオコークスの研究開発動向, スマートプロセス学会誌, Vol. 12 (1), pp.5-12 (2023)

【特 許】

特許番号 7555067 号：特願 2020-160689
「固体バイオ燃料の製造方法」

* 学術論文、活動状況、その他活動事項については、3 年間の実績を記す。

近畿大学バイオコース研究所報告

第22号 2024

令和7年2月1日印刷

令和7年2月1日発行

発行者 近畿大学バイオコース研究所



近畿大学
KINDAI UNIVERSITY