

第16回北海道地域エネルギー・温暖化対策推進会議

高密度・高硬度の新固体バイオ燃料；バイオコークスによる道内カーボンニュートラルに向けた取り組み - 長期備蓄型固体バイオ燃料の開発 -

近畿大学バイオコークス研究所 所長/教授 井田 民男

1. はじめに

1948年世界の石炭究極埋蔵量は、約65,000億トンが埋蔵していた。[1]1950年後半には、石油、天然ガスへエネルギー基盤がシフトし、各国で石炭産業の衰退が生じた。1995年世界の石炭生産量約12.1億トン/年から1975年約17.7億トン/年に増加し、年率約0.25億トンで増加している。現在、世界の石炭究極埋蔵量は、約28,000億トンで年間生産量が約67億トンを消費しており、1975年から2010年までの年率で約1.4億トンの増加傾向にある。究極埋蔵量も73年間で約57%減少している。[2]

さらに、2010年段階で可採埋蔵量は8609億トンと推定されており、単純計算すると約128.5年で枯渇し、年率1.4億トンを加味すると約73年で枯渇することとなる。世界の人口増加を如何にして抑え込むか、特にアフリカ、中国、インドでの人口増加に注視しなければならない。[3]

2021年経済産業省が進めるグリーンイノベーション基金事業による2030年に向けた業種別のCO₂排出量では、国内排出量約11億トン（2019年推計）のうち、主な石炭からのCO₂排気量は、発電等が39.1%でこのうち1/3が石炭火力により約13%、鉄鋼分野において石炭コークス等で約12%が排気されているので全体の約25%に相当する。[4]

一方、鉄鋼分野では、鉄鉱石の埋蔵量は、約1500~2000億トンで世界の総生産量約16億トンから計算すると、約100年で枯渇することになるが、市場には地金やスクラップ等が存在しているので、徐々に劣化はするものの鉄資源リサイクル利用は、これからの新規燃料開発によりキュポラ、電気炉等による溶解により維持できる可能性がある。

ここでは、2007年NEDO マッチングファンド事業「 castingコークス代替となる高硬度固形バイオ燃料の量産開発と実証」の採択を受け、北海道恵庭に位置する近畿大学バイオコークス研究所（当時；資源再生研究所）でキックオフし、2008年低炭素社会に向けた技術シーズ発掘・社会システム実証モデル事業（経済産業省委託事業）「北海道発・草本資源を利活用した次世代ゼロ・エミ燃料による低炭素社会への実証モデル」、2010年地域イノベーション創出研究開発事業（経済産業省・北海道経済産業局委託事業）「道内未利用バイオによる高効率ソフト・バイオコークスの研究開発」等の支援を受け、北海道を拠点とした新規固体バイオ燃料（バイオコークス）開発とカーボンニュートラルな社会形成に向けた普及活動の成果と現状を紹介する。

2. 高密度・高硬度な新固体バイオ燃料開発の背景

先ず鉄鋼・ casting等で利用されている石炭コークスを基軸に考えると石炭をコークス炉で16~24時間900°Cで乾留して焼成して製造される冶金コークス（製鉄用）、さらに約24時間追加乾留して製造される castingコークス（ casting用）に大別される。その他、ブリーズと呼ばれる粒塊の小さな石炭コークスも補助的に利用される。業界ごと、機関ごとに評価手法は異なるが、冷間および高温での圧縮強度（CSR手法など）が炉内の通気性や加炭性を確保する上で重要な因子となる。特に、石炭コークスの冷間での圧縮強度は、一軸の圧縮強度試験から冶金コークスで約10MPa、 castingコークスで約20MPaの性能が発現する。[5][6]

溶解炉の歴史は約1300年前に遡る。出雲地方最古の「出雲国風土記」に、奥出雲地方で作られる鉄は硬く、農機具に適しているとの記載がある。“たたら製法”である。[7] その当時は、木炭を燃料にしていたが、石炭コークスによる高度な溶解炉は、約100年前に今の原型ができたとされている。しかし、今でもブラジルでは、鉄鉱石からユウカリ木炭で木炭高炉を稼働させ、世界に銑鉄を供給している。

一方、電気炉（アーク炉、高周波/低周波誘導炉など）は、歴史が浅く、1966年に原子力電力が商業ベースで稼働し、キュポラから電気炉へと移行したので、既に電気炉では石炭コークスによる操業で始めているため、固体バイオ燃料の適用可能性が不明確な状況である。

さらに、電力分野では、高度な微粉炭燃焼や石炭ガス化技術開発が求められ、同時に石炭灰の有効活用の開発も循環型社会形成には必要不可欠である。

このような石炭/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、固体バイオ燃料の性状に合わせた炉開発も進むべき道と考える。

3. 高密度・高硬度な新規固体バイオ燃料開発の指針

バイオマス資源は、それ自体はほとんどのバイオマスが高含水率であるため、熱エネルギー価値が低く、セルロースを骨格としているので高強度なポリマー性物質である。活用すべきは、分子量1万を超えるリグニンがポイントと考える。このリグニンには、縮合可能な活性ポイントが存在している。さらに、木質系から草本系、農業系残渣、汚泥系などのすべてのバイオマス資源を対象にするには、基本的に前処理工程が重要になる。

近畿大学で開発された固体化手法を規範としながら新固体バイオ燃料像について論じる。

バイオマスの前処理として、数%から数十%に初期含水率を調湿し、数ミリまで粉碎することによって、原料性状として統一化する。統一化された原料を反応シリンダーに充填し、平均180°C-20MPaの亜臨界水状態で加熱し、冷却後取り出す。各種原料による直接撮影結果を図1に示す。



図1 各種原料による高密度・高硬度な固体バイオ燃料；バイオコークス

見かけ比重は、1.35を超えており、冷間圧縮強度は100MPaを超える。目視では、黒色化する。冷間強度は鋳物用石炭コークスの約5倍以上である。この手法は、バイオマス資源を前処理し、粒子状に作り替え、再度固体化を行う、骨格再構成技術であり、全てのバイオマス資源を対象とすることができる。

4. 高炉への適用における開発指針

平成20年度経済産業省委託調査「3Rシステム化可能性調査事業—鉄鋼業における植物由来廃棄物を原料としたバイオコークスの活用法と循環システム構築に係る調査—で詳細な調査が実施された。

この調査で判明した最大の課題は、資源量である。高炉での冶金コークス消費量は、1高炉で日量約4000トンであり、30%代替するだけでも、年間、日量1200トンの固体バイオ燃料が365日必要になる。全高炉での年間消費量が約2500万トンとすると、我が国の森林でのバイオマス生産量約38万トン/年から試算すると、約0.18日分しか供給できない試算となる。

調査は、高炉での冶金コークス消費に関する実態にも言及している。冶金コークスは、メインの高炉部で約70%を転炉への移動時に約30%を消費していることが分かった。メインの高炉部分での冶金コークスの役目は、還元性、加炭性、通気性、熱源と多岐に亘るが、転炉への移動時には、主に保温性と酸化防止であり、1500°C溶湯上での燃焼保持時間が求められる。

一方、ブラジルでの木炭高炉では、今でもユウカリ木炭が使用されており、この木炭代替としての固体バイオ燃料開発も鉄鉄市場安定供給の観点から重要なポイントとなる。

5. キュボラへの適用における開発指針

キュボラでの石炭コークス利用は、主に熱源と加炭性としての役目が期待される。もちろん、シャフト型であるため炉内の通気性を確保しつつ、約 1500°Cの溶解ゾーンへの降下が必要である。キュボラは、層状に被加熱材と石炭コークスが積層しているため、炉内を降下するに従い温度が上昇し、予備加熱され溶解ゾーンへと突入する。炉の規模によって異なるが、通常 25 トン/時で溶解する炉では、トップチャージから溶解ゾーンまで 70 分程度とされており、段階的に大気温度から 1500°Cまでの炉内経路を下降しながら、炭化物として存在できる性能が求められるところである。近畿大学で開発された固体バイオ燃料による実炉燃焼試験では、10~30%ほどの鋳物用石炭コークス代替が可能であることを実証している。

(協力；豊田自動織機、栗本鐵工所、ナニワ炉機研究所)

6. 一般廃棄物溶融炉への適用における開発指針

一般廃棄物の燃焼処理問題は、最終処分場の逼迫にある。平成 31 年度環境省環境再生・資源循環局委託「CO₂ 排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業」(多原料バイオコークスによる一般廃棄物処理施設及び鋳物製造業での CO₂ 排出量削減の長期実証)にて詳細に研究、調査、報告がなされている。

この溶融炉では、主に冶金コークスが使用されており、溶融熱源としての役目が期待されている。炉内には、可燃性廃棄物が積層されており、そのトップから冶金コークス、石灰がチャージされ、炉底には冶金コークスによる高温ベッドが形成され、燃焼灰が溶融化しスラグとして流出する。

実炉(80 トン/日)での燃焼試験では、約 36.5%の代替率に成功し、最高値 50%を超える代替も可能であることが検証された。現在、シンガポール政府支援の下、100%固体バイオ燃料による装置開発が進められ、汚泥を原料とした固体バイオ燃料の開発にも取り組んでいる。

これらの結果から高密度の固体バイオ燃料は、積層された一般廃棄物の中を密度差から選択的に炉内を降下し、高温ベッド上部に到達するものと推測される。ほぼ、全量のまま高温ベッドに到達するので、主に揮発分による CO 火炎とチャー燃焼が熱源となり灰溶融に寄与する。特筆すべきは、冶金コークスでの総供給熱量の約 70%の冶金コークス+固体バイオ燃料(バイオコークス)で溶融できている点である。

(協力；石炭フロンティア機構、南洋工科大学、JFE エンジニアリング)

7. 電気炉への適用における開発指針

電気炉の CO₂ 削減を目的とした環境に適応した炉開発は、著しい。通常、高炉、キュボラ等でもオープン型が標準であり、特にアーク炉において固定概念を払ったクローズ型が注目を浴びている。アーク炉では、大電力により溶解するので、大幅な電力原単位の低減が求められていた。さらに、アーク炉でもバケットコークスからの加炭性と熱源が求められている。このクローズ型アーク炉では、固体バイオ燃料のエネルギーを全量利用できる可能性があり、緩慢燃焼を進化させることが求められる。[8]

8. 長期備蓄への適用における開発指針

1970 年代のオイルショックに始まるエネルギー備蓄の最大の課題は、保管場所である。我が国は地理的な制約から、自然を利用した備蓄がほぼできない状況であることと、石油に限定されているところにある。特に、再生可能エネルギーのほとんどが発電なのでエネルギー備蓄が難しい。バイオマスは、炭素が固定化されているとはいえ、素材のままだと湿ったり、腐ったりするのでエネルギー備蓄には向いていないきらいがある。

さらに、石炭の保管では、自然発火による事故が後を絶たず、その管理・制御が負担となっている。残された巨大空間として廃炭鉱を活用し、100~200 年間保管し、質が変化しない固体バイオ燃料の性状には、さらに防水性に優れ、自然発火性がなく、積層しても型崩れしない特性が求められる。言うまでもなく、保管後の固体バイオ燃料が鉄鋼用、電力用に適用可能な性能を保持しておく必要がある。

9. 新固体バイオ燃料；バイオコークスに適応した新規溶解炉の開発指針

固体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硬化化機能が必要になる。このような新規固体バイオ燃料の開発の下、高温ベッド高さが低く、溶解部と供給部が分離され、揮発ガス燃焼を熱源として、チャーを有効に活用できる高速かつ高温新型溶解炉の開発が望まれる。

10. 道内でのカーボンニュートラルに向けた取り組み

10.1 道内資源

食料自給率 200%を誇る北海道ではあるが、バイオコークス化に適した未利用あるいは廃棄バイオマス資源の調査の現状を紹介する。大規模な未利用資源としては、食品ロスやそば殻、フスマが挙げられる。さらに、汚泥系バイオマスとして馬糞が候補として挙げられる。

先ずバイオコークス化技術は、複数のバイオマス資源が混在しても固形化可能である点が魅力である。詳細においては、環境省・平成 27～31 年度 CO₂ 排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業「多原料バイオコークスによる一般廃棄物処理施設での CO₂ 排出量 25%削減の長期実証」を参照されたい。国内の大きな課題は、通年でのバイオマス資源の安定確保である。特に、秋収穫のもみ殻は、未利用の魅力的な資源ではあるが安定確保が難しい。この点において環境省事業では、多原料資源からのバイオコークス化と燃焼試験を実施した。

食品ロスにおいて我が国は、ムーンショット 5 で「2050 年までに、未利用の生物機能等のフル活用により、地球規模でムリ・ムダのない持続的な食料供給産業を創出」を目指している。食糧から生まれるバイオマス資源は、食品廃棄物資源と汚泥資源等である。食品資源には、可食と非可食資源に区分される。食品廃棄物資源は、可食部のロスと非可食部の総量である。また、汚泥排泄物は、人体が健全なエネルギー転換装置であって、栄養素から取り出したエネルギーにより、生命・運動を維持し、取り出せないエネルギーを自然に返し、循環を維持する仕組みから生産される資源である。いずれも、バイオコークス化は可能であるが、乾燥エネルギー（高含水率）が大きなネックとなる。現状での乾燥技術は、残念ながら大きく立ち遅れていると言っても過言ではない。真空乾燥、気流乾燥、加熱乾燥、遠心乾燥など連続操業可能で低コストを実現する技術開発が見落とされているきらいがある。

このような乾燥技術の停滞は一旦置いて、太陽熱や余剰熱あるいは未利用（廃）熱を利用することにより、低コスト化を図り、バイオコークス化できれば十分に化石資源との競合のステージに立てる可能性を有している。特に、汚泥資源は特異な性状を持っており、石炭コークスに匹敵する熱間強度を有している。

そば殻とフスマは、道内の未利用最大バイオマス資源であると考えている。そば殻は、国際的な競争市場流通において、以前のそば殻付きから剥き身での流通を余儀なくされており、そば殻が道内に残渣する。

この状況を打破するため幌加内町では、北海道庁エネルギー地産地消事業化モデル支援事業費（新エネ有効活用モデル）の支援を受け、そば殻をバイオコークス化する FS が実施されている。幌加内町は、全国 1 位のそば作付面積、収量のそばの産地であり、そばを剥き身で販売するために、剥き身工場では「そば殻」「そば残渣」など大量に発生する廃棄物をバイオコークス化することにより、ゼロエミッション化を推進し、循環型社会形成への取り組みを加速している。

また、小麦製粉から発生するフスマも魅力的な資源である。国内最大の小麦生産を誇る北海道は、そのフスマにおいても大量に調達可能な資源と期待する。

さらに、鹿追町環境保全センターバイオガスプラントでは、家畜ふん尿をバイオマス資源としたメタン発酵を実施しているが、馬糞は対象外となっている。馬糞をバイオコークス化し、蓄積場からのメタン発生抑制やボイラー熱源として利用できれば化石資源の消費抑制と CO₂ 削減が同時に可能となり、地方の抱える大きな課題を克服することができる。既に、汚泥バイオコークスは、JFE エンジニアリング、南洋工科大学と共にシンガポール政府の委託を受け、高温ガス化溶解炉への適用試験を実施しており、良好な結果を得ている。課題は、乾燥エネルギーであるが、近畿大学と石光商事が取り組むサステナブルなコーヒー滓バイオコークスの循環システムを組み入れれば、熱エネルギー収支が成立する可能性を有している。

10.2 道内での CO₂ 削減

大規模には、溶解炉での適用が考えられる。道内にある高炉、アーク炉、高温ガス化溶解炉、アルミ溶解炉などが対象となる。最大の CO₂ 削減は、高炉での削減ではあるが、国内最大の食料自給を誇る北海道でもこのエネルギー消費量を確保することは簡単ではないが挑戦に値する。（調査中）

中規模には、ボイラー利用がある。本件、守秘義務があり詳細は解説できないが、道内のバイオマス資源をバイオコークス化、燃焼試験を実施。化石資源削減による CO₂ 削減効果の実証を済ませている。この実証試験により、地産地消と共にゼロエミッションへの取り組みから再生可能エネルギーへ導入に向けたカーボンニュートラルな社会への実装が加速するものと期待している。（実証済）

小規模には、8AGARAGE COFFEE（ヤエイ ガレージ コーヒー；小樽市）では、店舗で廃棄される焙煎時のコーヒーチャフ、コーヒー抽出滓、ハンドピックしたコーヒー生豆と焙煎豆などを原料とするバイオコークスを店内で燃焼し、SDGs の一環としてゼロエミッションの取組を進めている。このショップで

は、これらの原料によるバイオコークスを店内で燃焼し、暖を取りながら焼きマシュマロを楽しむことができる。(実証済)

また、一般社団法人 Pine Grace (代表理事; 酪農学園大学・横田博名誉教授) から依頼を受けた北海道に自生する針葉樹 (アカエゾマツ) からエキス (精油; 抗菌性を利用して家畜の皮膚病に活用) を抽出した残渣によるバイオコークス化に成功しており、道内産業のゼロエミッション化を支援し、推進しており今後の発展が期待できる。(調査中)

さらに、家庭用暖炉には、燃焼時間が長く、夜分に起きて燃料追加することが少なく重宝している声が届いている。(ヒアリング済)

11. カーボンニュートラル社会への展望

現状でのバイオコークス性能では、キュポラ溶解炉において 30%程度は石炭コークス利用分野で代替可能な燃料として活用可能と考えている。大きな課題は、石炭コークスで作られるベッドと呼ばれる燃焼の床である。一方では、安価な原子力電力を基に台頭した電気溶解炉での溶解メカニズムが異なるところである。アーク炉でも誘導加熱炉 (IH 方式など) でもベッドが存在しない。間接的に外部から加熱し溶解を行うのであるが、熱源が補填あるいは不足するので、内部に熱源を置くことはあるものの、炉内に高温の溶解ゾーンを作る必要がない。

このような歴史を振り返ると、次世代バイオコークスの開発による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硬度化機能が必要になる。このような新規固体バイオ燃料の開発の下、高温ベッド高さが低く、溶解部と供給部が分離され、揮発ガス燃焼を熱源として、チャーを有効に活用できる高速かつ高温新型溶解炉の開発が喫緊に望まれる。

中でも燃焼工学的な観点からは、高温 CO 燃焼 (1300°C以上) の制御がバイオマス燃焼の高効率、溶解炉への適用に必要不可欠であることが分かってきた。

最後に、エネルギー枯渇を乗り切るためには、バイオ炭素備蓄型再生可能エネルギー社会の実現が必要不可欠である。世界の安定かつ平和を実現するためエネルギーを安定的に確保し、経済成長と環境保全の S+3E を進めるのは、至難の業である。その礎を産官学が連携して、やがて訪れるエネルギー危機を乗り越えることを期待してやまない。

参考文献

1. 松澤勲, 地学雑誌 57 1 : 16-26 (1948).
2. 矢田俊文, 地学雑誌 91 6 : 77-83(1982).
3. <http://www.jcoal.or.jp/publication/s1-2.pdf> (2021).
4. 経済産業省: グリーンイノベーション基金事業の今後の進め方について(2021).
5. 下田泉, 深田喜代志, 炭素 TANSO 235 : 316-324(2008).
6. 井筒和一郎, 燃料協会誌 58 631 : 976-984(1979).
7. <http://www.tetsunorekishimura.or.jp> (2021).
8. JFE 技報 3 : 67(2004).
9. 牧野敦, 日本燃焼学会誌 55 172 : 94-109(2013).