バイオ固体燃料における標準化の現状と動向

Current State and Trends on International Standardization of Solid Biofuel

澤 井 徹*・井 田 民 男**
Toru SAWAI and Tamio IDA

Key Words: Solid Biofuel, International Standardization, Pellets, Briquettes, Biocoal

1. 緒 言

バイオマス資源はその大部分が森林バイオマスに代表される固体資源であり、バイオ固体燃料としての利活用が注目されている。Lamers ら¹⁾によれば、バイオ固体燃料の世界貿易量は2000年から2010年の間に、56 PJ から300 PJ へと増大し、とりわけペレット燃料が貿易量の拡大をけん引している。最新の報告（バイオマス白書2014）²⁾では、ペレットの国際貿易量は2011年で150 PJ（820万トン）に到達していることが示されており、これは木質ペレットの世界生産量2200万トンの37%を占めている。バイオ固体燃料が世界的に広く利用されると同時に、世界市場で流通するようになるにつれて、バイオ固体燃料の国際標準化が求められるようになってきた。この要望を受けて、2014年に、ISO 17225 Solid biofuels - Fuel specifications and classes - (バイオ固体燃料 燃料の仕様と等級)³⁾が発行されたところである。

本解説ではバイオ固体燃料の国際標準化の現状、産業分野・電力分野において二酸化炭素排出削減策として導入が期待されている石炭代替バイオ固体燃料の動向について概観する。

2. 国際標準化の現状

2.1 ISO 17225 シリーズ概要

2014年に発行されたISO 17225 シリーズは現段階では以下に示す7つのpartで構成されている。part 1の一般的要件以降、part 2とpart 6でペレットが、part 3とpart 7でブリケットが、part 4で木質チップが、part 5で薪が取り扱われている。今後の貿易量が大きくなると予測される熱処理圧密燃料はpart 8に組み込まれており、2016年2月時点では草案策定中の状況である。

－ Part 1: General requirements (一般的要件)

- － Part 2: Graded wood pellets (等級別木質ペレット)
- － Part 3: Graded wood briquettes (等級別木質ブリケット)
- － Part 4: Graded wood chips (等級別木質チップ)
- － Part 5: Graded firewood (等級別薪)
- － Part 6: Graded non-woody pellets (等級別非木質ペレット)
- － Part 7: Graded non-woody briquettes (等級別非木質ブリケット)
- － Part 8: Graded thermally and densified biomass fuels (等級別熱処理・圧密化バイオマス燃料)

part 1の一般的要件では、バイオ固体燃料の仕様として、a) 原資源、b) 主要な貿易形態と燃料特性を示すことが規定されている。

主要なバイオ固体燃料の原資源をTable 1に示す。原資源としては、木質、草本、フルーツ、水生バイオマスの4

Table 1 Classification of origin and sources of solid biofuels.

木質 バイオマス	高木 (tree)、低木 (bush, shrub) 由来のバイオマス
草本 バイオマス	非木質の茎を有し、成長する季節の最後に枯れる植物由来のバイオマス。穀物および穀物の副産物である穀草を含む
フルーツ バイオマス	フルーツあるいは種子を有するフルーツ植物の一部に由来するバイオマス ・ berries: 漿果《核のない果肉の柔らかな食用小果実》 ・ stone/kernel fruit: 核果《ウメ・モモなど堅い核のある果物》 ・ nuts and acorns: 殻斗果《どんぐり等の殻斗のある果実》
水生 バイオマス	水生植物に由来するバイオマス
混合と混在	混合 (blends) は意図的なバイオ燃料への混合、混在 (mixture) は意図しない混入

* 近畿大学 理工学部 (〒 577-8502 大阪府東大阪市小若江 3-4-1)

Faculty of Science and Engineering, Kindai University (3-4-1 Kowakae, Higashiosaka, Osaka, 577-8502 Japan)

** 近畿大学 バイオコックス研究所 (〒 577-8502 大阪府東大阪市小若江 3-4-1)

Research Institute of Biocoal, Kindai University (3-4-1 Kowakae, Higashiosaka, Osaka, 577-8502 Japan)

種と、これらの混合物が5番目に加えられている。

バイオ固体燃料の貿易形態は、21通りに区分され、ISO 17225中の表にまとめられている。燃料形状とサイズは、燃料輸送時の重要な特性となると同時にその燃焼特性やハンドリング性能にも影響することから、貿易形態ごとにその主要サイズ・製造方法が示されている。また、各貿易形態の燃料仕様は、明記すべき規範特性 (normative properties) と任意表示の参考特性 (informative properties) に分けて、個別に表の形式で項目が規定されている。

なお、part 1の序文において、バイオマスはエネルギー資源であると同時に、建材、家具、紙製品のためのマテリアル資源でもあり、カスケード的利用が大前提である旨を示していることは重要といえる。

2.2 ペレットとブリケット

成形されたバイオ固体燃料は、そのエネルギー密度が高く、輸送および使用時のハンドリング性の向上が期待できることから、世界貿易量が今後も拡大していくと見込まれる。貿易形態における成形バイオ固体燃料としては、現段階でペレットとブリケットがある。両者の形状における仕様の違いとして、ペレットは直径が25 mm以下、ブリケットは25 mmより大であると規定している。本節では、ペレットとブリケットの仕様について概観する。

1) 木質ペレット (ISO 17225-2)

part 2では、木質バイオマスを原資源とするペレットの等級化とその仕様が規定されている。木質ペレットは、民生用 (住宅用・業務用) に加えて産業用のエネルギー発生装置で使用されることを想定して、等級化がなされている。使用対象となる燃焼機器としては、ペレットストーブ、ペレットバーナー、ペレットボイラーが示されている。

民生用 (住宅用・業務用) の等級別木質ペレットは、A1、A2、B級ペレットの3通りに区分されている。いずれの等級も、形状の仕様は共通で、直径Dが6または8 mm、長さLが3.15 ~ 40 mmの円柱形と規定されている。L/Dの上限が6程度に抑えられているのは、ペレット供給装置での閉塞回避のためである。これら3つの等級における主要な差異は、原資源とこれに伴う灰分率であり、A1、A2、B級に対する灰分率の上限値は0.7 %、1.2 %、2.0 %と規定されている。

産業用の等級別木質ペレットは、I1、I2、I3級ペレットの3通りに区分されている。民生用との違いは、形状、灰分率、機械的耐久性、粉化度、N分、S分、Cl分、微量重金属含有量である。一般的に、産業用ペレットの燃焼機器は、制御システムや排ガス浄化システムを有している。このため、民生用途の木質ペレットの仕様に比べて産業用途では幾分緩い基準となっている。さらに、産業用では微粉にして使用することがあるため、粒子径分布が仕様に加えられている。一例として、I1級では、1.0 mm未満が全体の

60 %、2.0 mm未満が全体の95 %、3.15 mm未満が全体の99 %以下であることが仕様に与えられている。

なお、いずれの等級においても、灰融解温度が参考特性 (informative properties) に挙げられ、その値を記述すべきであると明記されている。

2) 非木質ペレット (ISO 17225-6)

part 6では、非木質バイオマス (草本、フルーツ、水生) を原資源とするペレットの等級化とその仕様が規定されている。木質ペレットと同様に、民生用 (住宅用・業務用) に加えて産業用のエネルギー発生装置で使用されることを想定して、等級化されている。使用対象となる燃焼機器としては、ペレットバーナー、ペレットボイラー、ペレットバーナーを組み込んだ燃焼システムが示されている。非木質ペレットでは、以下に示す高灰分率の理由により、ペレットストーブでの使用を想定していない。

非木質ペレットの場合、その取り扱い時における注意点が序文に述べられており、これが木質ペレットとは大きく異なる点である。以下に主な注意事項を示す。

- ・非木質ペレットは、灰分、塩素、窒素、硫黄、主要な重金属元素の含有率が高いため、非木質ペレットのために設計あるいは調整された機器での使用を推奨する。
- ・一般的に非木質バイオマスは高灰分で木質系バイオマスと比べて低融点の灰を形成し、ボイラー内でのスラッシングや腐食を誘発する。

等級は非木質系バイオマスの原資源に対してA、B級の2通りに区分されている。これに加えて、特定の原資源に対する等級として、イネ藁、ミスカンサス (ススキ)、リードカナリーグラスで製造されるペレットの仕様が個別に規定されている。木質ペレットの仕様と比べると、灰分率はかなり高くA級、B級でその上限値が6 %、10 %となっている。また、燃料は円柱形ではあるがそのサイズは任意であり、直径Dは6 ~ 25 mm、長さLは3.15 ~ 40 mm (D = 6 mm ~ 10 mmの場合)、3.15 ~ 50 mm (D = 12 mm ~ 25 mmの場合) と規定されている。

3) 木質ブリケット (ISO 17225-3)

part 3では、木質バイオマスを原資源とするブリケットの等級化とその仕様が規定されている。木質ブリケットは、基本的に民生用 (住宅用・業務用) での使用を想定して等級化がなされており、産業用のバイオ固体燃料として位置づけはない。使用対象となる燃焼機器としては、ストーブ、暖炉、調理機器、ルームヒーター、サウナストーブ、ボイラーシステムが示されている。

等級別木質ブリケットは、A1、A2、B級の3通りに区分されている。民生用 (住宅用・業務用) の等級別木質ペレットと比較すると、ブリケットでは灰分率が若干高く、これに伴い発熱量も10 %程度低くなっているが、化学組成および重金属含有量の仕様はほぼ同じである。大きく異

なるのは、形状と成形性評価に関する仕様である。ブリケットは、その形状が軸対称な円柱形とは限らず、直方体も含めて種々の形状が示されている。成形性評価の仕様は、見かけ密度 (particle density) のみであり、木質ペレットの仕様に組み込まれている嵩密度 (bulk density)、機械的耐久性 (Mechanical durability)、粉化度 (Fines) は含まれていない。ブリケットでは、その形状と見かけ密度が多様であり、これらが燃焼特性に大きく影響すると考えられる。ISO の注意事項においても、ブリケットの燃焼挙動を特徴付ける燃焼時間が形状と見かけ密度によって変化することが指摘されている。燃焼挙動に関しては、ブリケットの比表面積も大きく関与すると考えられ、各等級の仕様に比表面積が参考特性 (informative properties) として挙げられている。明記すべきとの記述はあるものの、明確な基準値は示されていない。今後はブリケットの用途に対応した比表面積の仕様策定を検討することが必要になると考えられる。

4) 非木質ブリケット (ISO 17225-7)

part 7 では、非木質バイオマスを原資源とするブリケットの等級化とその仕様が規定されている。非木質ブリケットの用途は木質ブリケットと同様に、基本的には民生用 (住宅用・業務用) を対象としている。

非木質ペレットと同様、非木質ブリケットにおいても、灰分、塩素、窒素、硫黄、主要な重金属元素の含有率が高いことによる取り扱い時の注意点が序文に述べられている。

等級別非木質ブリケットは、A、B 級の 2 通りに区分されている。その仕様は、形状や成形性評価項目を除いて非木質ペレットと同じ仕様となっている。ただし、ここでも、比表面積が参考特性 (informative properties) として挙げられている。

2.3 熱処理圧密バイオ固体燃料

熱処理バイオ固体燃料の一つにトレファクションペレットがある。トレファクションは、半炭化とも呼ばれ、バイオマス改質方法の一つとして、本庄、佐野ら^{4),5)}により 1998 年に提唱されたものである。200-300 °C の中程度の温度域での熱分解である半炭化は、500 °C 以上の炭化温度に比べて熱分解温度が低いいため、これまでは “semi-carbonization” あるいは “mild pyrolysis” とも呼ばれていたが、現在では “torrefaction” が主流となっている。半炭化の主な特長を以下に示す。なお、詳細な半炭化の原理については佐野・本庄による解説⁶⁾を、最新のレビューとしては、Steltら⁷⁾、Chenら⁸⁾による報告を参照されたい。

木質バイオマスは熱分解温度上昇に伴い、その色が、薄茶色、茶色、こげ茶色、黒色へと変化する。黒色化は熱分解によって C-C 結合が 1 重結合から 2 重結合に変化することによるものである。1958 年発刊の木材工業ハンドブックによれば⁹⁾、熱分解温度に対して炭化物の名称が個別に与

Fig.1 HHV and energy yield of torrefied biomass.
[文献 10) より転載]

えられており、280 °C：赤色炭、320 °C：褐色炭、340 °C：黒色炭、432 °C：揮黒炭と呼ばれている。これより、古くから半炭化状態の炭の存在が知られていたことがわかる。

Fig.1 に、スギの熱分解によって得られた残炭物の高位発熱量 Q_H [MJ/kg] とエネルギー収率 Y_E を示す¹⁰⁾。 Y_E は残炭物の質量収率 Y_M と全乾状態の高位発熱量 Q_{H0} を用いて式 (1) で与えられる。熱分解温度 T_p の増加と共に、 Q_H が増大し改質が行われている。一方、 Y_E は徐々に減少するが、 $T_p = 250 - 300$ °C の半炭化温度域では、 $Y_E = 0.8$ 程度の高い状態で $Q_H = 28$ MJ/kg に改質されていることがわかる。すなわち、半炭化改質は、エネルギー収率を高く保った状態での発熱量改質である点に最大の特長を有する。

$$Y_E = \frac{Y_M Q_H}{Q_{H0}} \quad (1)$$

エネルギー特性の改質に加えて、ハンドリング性の向上に結びつく他の優れた特性も付与することができる。その一つは、粉碎動力の低減である¹¹⁾⁻¹³⁾。木質バイオマスを均質な材料として利用するためには粉碎処理が不可欠となる。ハンマーミルを用いた場合の粉碎所要動力を粉碎試料の熱分解温度に対して検討した結果¹³⁾、木質領域で 1-5 MJ/kg であった粉碎エネルギーが $T_p = 250 - 300$ °C の半炭化領域で約 1/10 まで減少することが明らかになった。これは熱分解により木材の繊維構造が崩壊したためである。このため、乾燥および半炭化処理後に粉碎工程を配置することで、プロセス全行程のエネルギー消費を低減できる可能性があることが示唆されている¹³⁾。

前述のように、熱処理バイオ固体燃料についての標準化は、part 8 で検討されているところである。仕様の詳細は未定であるが、part 1 から part 7 に示されたバイオ固体燃料とは異なり、熱処理の進行度 (熱分解の進行度) を示す仕様として固定炭素分と揮発分が規範特性 (normative properties)

に組み込まれることが part 1 で述べられている。

3. 石炭代替バイオ固体燃料の動向

IEA World Energy Outlook 2013¹⁴⁾ によれば、2011 年における全世界の石炭消費量は 3773 Mtoe であり、これは、世界の 1 次エネルギー供給の 29 %、化石資源由来二酸化炭素排出量の 45 % に相当する。

温室効果ガス削減のためには、民生分野におけるバイオ固体燃料の導入に加えて、産業分野および発電分野で使用されている石炭あるいは石炭コークスをバイオ固体燃料で代替することがきわめて重要となる。また、「脱石炭」の動きが世界各地で広まっている。その一例として 2015 年 11 月に OECD が加盟国の石炭火力輸出に対する融資制限を加えたことなどが挙げられ¹⁵⁾、バイオ固体燃料の導入促進の期待が高まっている。

現在の主な石炭用途とバイオ固体燃料による代替案は、以下の通りである。

- ・石炭火力発電所における石炭・バイオマス混焼発電
- ・製鉄・鋳物・溶融炉等での石炭コークスを代替するバイオ固体燃料の導入

なお、上記の分野では、バイオ固体燃料以外の再生可能エネルギー（太陽、風力、バイオ気体・液体燃料）による代替は容易ではなく、適切なバイオ固体燃料の導入と仕様の策定が火急の課題であるといえる。

3.1 石炭火力発電所におけるバイオマス混焼燃料

石炭火力発電所におけるバイオマスの混焼利用では、既に木質ペレットの利用実績があり、ISO 17225-2 において産業用ペレットの等級が定められている。さらに今後、混焼率向上を目的にトレファクションペレット導入の可能性が高く、これまで多くの検討¹⁶⁾⁻¹⁸⁾が行われている。ISO 17225-8 の発行によりトレファクションペレットの等級と仕様が確定すれば、混焼利用による発電分野の二酸化炭素削減が期待できる。

3.2 製鉄・鋳物・溶融炉等での石炭コークス代替燃料

製鉄・鋳物・溶融炉等で使用されている石炭コークスを代替するバイオ固体燃料（以下、バイオコークス）としては、これまで 2 つのタイプが検討されてきている。1 つは炭化熱処理を施した揮発分の少ないバイオ固体燃料であり¹⁹⁾⁻²²⁾、バイオチャー、バイオコークス、バイオマスコークスと呼ばれている。他の一つは近畿大学の井田の考案によるバイオコークス（以下、BIC）²³⁾であり、非熱処理バイオマスあるいは半炭化熱処理バイオマスを使用した成形燃料となっている。BIC は、炭化熱処理燃料に比べて、質量収率が高いことに加え、二酸化炭素削減効果も高くなる可能性があることが示されている²⁴⁾。

バイオコークスの仕様策定に対しては、少なくとも以下の点を満足することが要求される。

- ・燃焼熱による高温雰囲気形成が可能であること
- ・還元材として利用できること
- ・通気性・通液性の確保が可能であること
- ・製品に及ぼす影響が少ないこと

上記要求事項を満足しない場合にはキュボラ、高炉、溶融炉が操業停止になる可能性もあり、バイオコークスの品質評価が求められる。すなわち、バイオコークスを製造するメーカー、バイオコークスの販売者および使用者、加えてバイオコークスで生産された鋳物や鋼材等を使用するユーザー等に対しても品質保証ができなければならない。このため、バイオコークスは、単なる熱源としての燃料ではなく、バイオコークスで生産された製品（鋳物や鋼材等）に対する品質保証も求められる性格の燃料といえる。

しかしながら、バイオコークスの仕様に関する検討はこれまで行われてきていないのが現状である。熱処理バイオコークスは、現在検討されている ISO 17225-8 の範疇に組み込まれると思われるが、先ほど示した製品（鋳物や鋼材等）に対する品質保証までを具体的な仕様で規定できているかについては、ISO 17225-8 の発行を待って、今後検討していく必要がある。また、非熱処理バイオコークス (BIC) については、形状特性（直径 25 mm 以上）からブリケット燃料の一種として取り扱うことができる。しかし、現在の ISO 17225-3 または ISO 17225-7 で規定されているブリケットの仕様は民生用途を対象としており、バイオコークスに求められている要件をすべて満足するとは言い難い点がある。具体的には、2.2 節でも述べたように、ブリケットの成形性評価が見かけ密度のみで行われている点である。高温雰囲気での圧縮強度や燃焼特性といった特殊環境下に置かれた成形燃料の特性は、見かけ密度のみで評価することは容易ではないと推測される、

これらの点を踏まえて、バイオコークスの仕様を策定し、石炭コークスを代替する燃料を開発・普及させていくことが、今後の取り組むべき課題であると考えている。

4. まとめ

本解説では、バイオ固体燃料の国際標準化の現状、産業分野、電力分野での二酸化炭素排出削減策として期待されている石炭・石炭コークスを代替するバイオ固体燃料の動向について概観した。

世界における「脱石炭」の動きに加えて、2015 年パリで開催された COP21 の二酸化炭素削減目標を達成するためにも、石炭・石炭コークス代替のバイオ固体燃料の導入が求められている。木質ペレットおよび次世代のトレファクションペレットは国際標準化の流れに乗り、今後の展開が予測されている。一方、バイオコークスは開発途上の燃料であり、その仕様について検討を進めていく必要がある。バイオコークスの導入促進、標準化の策定が、バイオ固体燃料分野における今後の取り組むべき重要な課題の一つに

なっていると言える。

謝 辞

本研究の一部は、平成 27 年度近畿大学 21 世紀研究開発奨励金の支援により行われた。ここに付記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Lamers P, Junginger M, Hamelinck C and Faaij: A Developments in international solid biofuel trade—An analysis of volumes, policies, and market factors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **16**-5 (2012) 176-3199.
- 2) NPO 法人バイオマス産業社会ネットワーク、バイオマス白書 2014 (2014)、<http://www.npobin.net/hakusho/2014/>.
- 3) ISO 17225 (2014) Solid biofuels –Fuel specifications and classes.
- 4) 本庄孝子：未利用バイオマスの資源化：BCDF への道、燃料および燃焼、**65** (1998) 490-497.
- 5) 本庄孝子、佐野寛：新燃料・BCDF バイオマス資源化、第 31 回化学工学会大会講演論文集 (1998) T301.
- 6) 佐野寛、本庄孝子：バイオマスの半炭化の原理と効用、高温学会誌、**37**-2 (2011) 43-49.
- 7) M.J.C van der Stelt et al., Biomass upgrading by tor-refaction for the production of biofuels: A review, *Biomass and Bioenergy*, **35** (2011) 3748-3762.
- 8) W-H. Chen, J.Peng and X. T. Bi: A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **44** (2015) 847-866.
- 9) 農林省林業試験場、木材工業ハンドブック、丸善 (1958).
- 10) 澤井徹、梶本武志、赤阪素史、加治増夫、井田民男、瀧端学、本庄孝子、佐野寛：杉小径木の圧縮半炭化燃料の圧縮強度・発熱量特性、高温学会誌、**33**-1 (2007) 31-37.
- 11) A. Morita, T. Ida, T. Sawai, K. Namba and M. Fuchihata: Comminution and combustion properties of mixture of semi-carbonized woody biomass and coal, *J. JSEM*, **9** (2009) 36-41.
- 12) V. Repellin, A. Govin, M. Rolland and R. Guyonnet: Energy requirement for fine grinding of torrefied wood, *Biomass and Bioenergy*, **34** (2010) 923-930.
- 13) 西健治、澤井徹、他 4 名：木質系粉碎物燃料の前処理工程（粉碎、乾燥、半炭化改質）および輸送におけるエネルギー消費量の低減、高温学会誌、**37**-2 (2011) 63-70.
- 14) IEA (2013) IEA World Energy Outlook 2013.
- 15) 日経産業新聞 2015 年 12 月 1 日
- 16) N. Ooiwa: Evaluation of a new biomassfuel aimed at the improvement in mixed combustion rate, Chubu electric power news on development of technology, **148** (2013) 11-12.
- 17) L. J. R. Nunes, J. C. O. Matias and J. P. S. Catalão: A review on torrefied biomass pellets as a sustainable alternative to coal in power generation, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **40** (2014) 153-160.
- 18) D. Agar, J. Gil, D. Sanchez, I. Echeverria and M. Wihersaari: Torrefied versus conventional pellet production – A comparative study on energy and emission balance based on pilot-plant data and EU sustainability criteria, *Applied Energy*, **138** (2015) 621-630.
- 19) T. Yoshida, S. Q. Turn, R. S. Yost, Jr M. J. Antal: Banagrass vs Eucalyptus wood as feedstocks for metallurgical biocarbon production. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **47** (2008) 9882–9888.
- 20) Jung Su-Hwa, Oh Seung-Jin, Choi Gyung-Goo and Kim Joo-Sik: Production and characterization of microporous activated carbons and metallurgical bio-coke from waste shell biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **109** (2014) 123-131.
- 21) A. Adrados, I. De Marco, A. Lopez-Uribebarrenechea, J. Solar and B. Caballero: Avoiding tar formation in biocoke production from waste biomass. *Biomass and Bioenergy*, **74** (2015) 172-179.
- 22) 柏原友、西本薫、田中宏和、梶山博久、石田吉浩、長田守弘：シャフト炉式ガス化溶融炉におけるバイオマスコークスの実機適用～CO₂フリー化の達成～新日鉄エンジニアリング技報、**3** (2012) 13-18.
- 23) T. Ida, A. Nakanishi, Osaka TLO, Patent Number 4088933: Bio-coke, “BIC” (2006),
- 24) T. Sawai, I. Katayama, T. Ida, and T. Kajimoto: Estimation of Energy Density and Energy Yield of Torrefied Biomass with Colorimetric Values, *Proc of International Conference on Power Engineering-15 (ICOPE-15)* (2015).