

カーボンニュートラル社会へ向けた木質バイオマス燃料の役割と国際標準化対応

Role of woody biomass fuel and compliance with international standardization towards carbon-neutral society

吉田貴紘*

1. 緒言

バイオマスは再生可能エネルギーの中で唯一の炭素資源であり、その再生は太陽エネルギーで営まれる。昨年に政府は2050年にカーボンニュートラルを目指すと発表したが、その実現に向けてバイオマス資源は化石資源に替わる有力な炭素資源として挙げられよう。そして木質バイオマスは食料利用と競合しにくい上、我が国では国土面積の多くを森林が占めることから、主要なバイオマス資源であるといえる。また木材は古くから建築用材、紙、薪炭などとして、有用な生物材料と燃料として活用されてきた。木質バイオマス燃料は国内では発電用途などに需要が増加する一方、海外ではそれに加えて国際標準化が着実に進められている。

本稿では、木質バイオマスの資源量、生物材料としての利用、燃料の高性能化、燃料の国際標準化の4点から、カーボンニュートラル社会へ向けた木質バイオマス燃料の役割を述べる。

2. 木質バイオマス資源と燃料利用量の現状

森林は世界の陸地面積の31%を占め、その総蓄積量は5,570億 m^3 で炭素蓄積量（地上部と地下部の合計）は293Gtに達する⁽¹⁾。この蓄積量は炭素換算で我が国が消費する原油（2019年で約1.7億kL）の約2,400年分に相当する。また森林は地球温暖化緩和のほか、木材等物質生産、水源涵養、土砂災害防止、生物多様性保存、文化・レクリエーションなど多面的な機能を有しており、持続可能な開発目標（SDGs）の達成に向けてその役割はますます大きくなっている。

我が国の森林は国土面積の67%を占め、そのうち人工林の半数が50年生を超えて本格的な利用期を迎えている⁽²⁾。木材自給率は1955年から2000年初頭にかけて国産材供給減少と木材輸入増加等により低下を続けたが、人工林資源の充実、海外の輸出規制、技術革新などを背景にその後は増加に転じ、2018年では36.6%と過去最低だった2002年（18.8%）の約2倍まで回復した。図1に2018年における木材需給構成を示す。特に需要増加が著しいのは燃料用材で、これは発電用の増加などを背景に需要量（902万 m^3 ）は前年比16%増であった。燃料用材は国産材率が69.3%を占めることから、現時点では木材需要と自給率向上に貢献している⁽²⁾。また世界では木質燃料生産量は19億 m^3 （2019年）で木材総生産量の49%を占める⁽³⁾。その用途は発展途上国を中心に調理用の薪炭用が高いが、今後は先進国を中心に発電用などの産業用が増えると考えられる。産業用途用の木質燃料の一つに木質ペレットがあり、2019年の世界生産量は4628万t（民生用途や他の圧縮燃料も含む）で2012年に

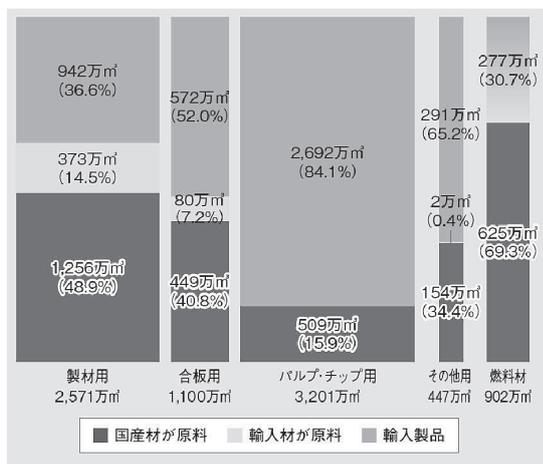


図1 2018年における木材需給の構成⁽²⁾

* 国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所

比べてほぼ倍増して、その半分は国際取引されている⁽³⁾。図2に我が国における木質ペレット等の国内生産量、輸入量の推移を示す⁽⁴⁾。過去5年間をみると国内生産量がほぼ横ばいなのに対して輸入量は約17倍に急増した。この理由に発電用に安価で大量調達可能な海外産ペレットの需要が増えたものと考えられ、海外産燃料のPKS（ヤシ殻）の輸入も大幅に増加している。

3. 生物材料の木質バイオマスを長く上手に使う

樹木は大気中のCO₂を葉から吸収し、光合成でつくられたグルコースを木材に変えて肥大成長する。木材は全乾質量の約半分を炭素で占めることから、樹木は木材の形で炭素を貯蔵するといえる。従って木材を建築用材、家具などにマテリアル利用することは大気中のCO₂を固定することに繋がる。

木材は金属やコンクリート材料に比べて①軽い、②省エネルギー加工、③比強度が大きい、④調湿作用がある、⑤熱、電気を伝えにくい、⑥腐りやすい、⑦燃えやすいなどの特徴がある⁽⁵⁻⁹⁾。

①軽い：木材実質（細胞壁）の密度は約1.5 g/cm³であるが、実際の木材は中空で、空隙の割合が大きいほど小さくなる。そのため木材の見かけ密度は国産材で大体0.3~0.9 g/cm³の範囲にあり、金属材料（例えばコンクリート2.1、アルミニウム2.7、ステンレス鋼7.9）に比べて小さく、木材は比較的軽い材料といえる。

②省エネルギー加工：木材は切削、乾燥で資材に利用できるが、乾燥温度は100℃前後である。いっぽう鉄の製銑やセメントのキルン製造では1,000℃以上の高温を要する。そのため木材製品製造における炭素排出源単位はセメント、ガラス、銅板、アルミ

ニウムに比べて数分の1~数十分の1と低い。また木造建築物を解体後に発生する解体材はチップ等に切削してボード、製紙原料、燃料に再利用できる。

③比強度が大きい：強度は一般に単位面積あたりで示されるが、これを質量あたりの比強度に換算すると木材は引張り強度では鋼鉄の約4倍、圧縮強度ではコンクリートの約6倍になる。また木材を化学解繊して得られるセルロースナノファイバーは、鋼鉄の5分の1の軽さでステンレス鋼の6倍の強度を有するが、比強度換算では約30倍になる。

④調湿作用：木材の含水率は周囲温湿度に応じて平衡状態を保っていく（平衡含水率）。木材は湿度が高い場合は吸湿して低い場合は放湿する。平衡含水率は放湿で到達した場合と吸湿で到達した場合とは異なり、前者の場合で高くなることが知られている。

⑤熱、電気を伝えにくい：木材は多孔質で空気の占める領域が大きいため、熱伝導率がコンクリートの1/5、アルミニウムの1/800、鉄の1/200以下である。また乾燥木材は高い電気抵抗と低い誘電率を示す優れた絶縁体である。木材は含水率の増加に伴って電気抵抗が低下し誘電率が増加することから、この原理を利用して木材含水率計が市販されている。

⑥腐りやすい：木材の腐朽は原因生物となる木材腐朽菌が木材に付着することで起こる。さらにシロアリ食害によって腐朽が進行する。また紫外線で木材の表面が変色や浸食を受けることが知られている。

⑦燃えやすい：木材は260℃付近から熱分解が急激に進行して着火しやすくなり400~500℃で自然発火する。この性質から燃料に利用できるが、建築材料には火災の点で不利にみえるかもしれない。しかし近年は工法や材料開発が進んで不利な点が解消されつつある。木材は断面が大きい場合、燃焼しても内部まで達しないため、耐力低下は他材料に比べて緩やかである。

最近ではCLT（Cross Laminated Timber、直交集成板）などの新たな木質材料の技術開発や法制度の支援等から、木材を中高層建築物へ利用する動きが増えつつある。さらに木材は極地条件でも使用に耐えうるとして南極昭和基地の構造材料などに採用されてきたほか、最近では民間企業が大学と共同で木造人工衛星の打ち上げ計画を発表している⁽¹⁰⁾。

日本学術会議は「ポスト石油時代において持続・循環型社会を形成するには、まずはCO₂の固定によって生まれる生物資源をカスケード的に利用する物質生産（と一部エネルギー供給）体系を構築する必要がある」として、カスケード利用の重要性を提

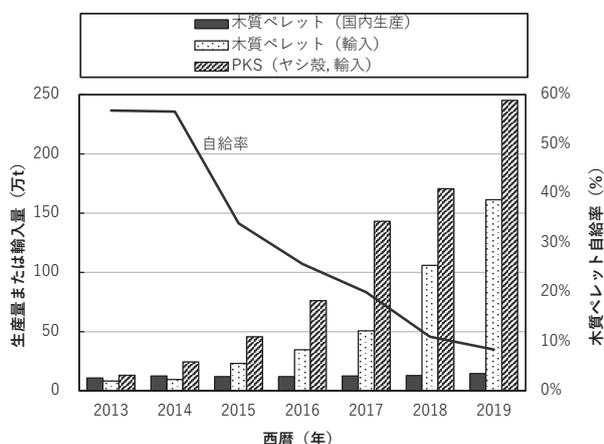


図2 木質ペレットの国内生産量、輸入量、PKS輸入量の推移⁽⁴⁾

言している⁽¹¹⁾。カスケードとは多段の滝を意味し、バイオマスのカスケード利用はマテリアル、エネルギーの順に段階的に利用しながら、そのポテンシャルを最大限引き出して効率的に利用することを指す。欧州委員会はカスケード利用を、木材を製品加工後に最低1回以上マテリアルまたはエネルギー目的に使用されると定義して、単段カスケードと多段カスケードに分類している^(12,13)。

図3に木質バイオマスのカスケード利用の流れを示す^(14,15)。図中(1)は用途としての空間的広がりを示し、森林で伐採された木材は丸太から製材、合板、チップなどになり、集成材、木質ボード、パルプなどのマテリアルに利用される。製造工場では製品と残材(副産物)に分かれ、製品は建築物、家具、紙などの用途に使われる。加工残材は木質製品原料や敷料、燃料、木炭などに利用される。燃料は工場内で直接燃焼等されて熱や電力としてエネルギー変換される。図中(2)は耐用面としての時間的な広がり示し、マテリアルからエネルギーまでの流れを時間軸、ポテンシャルまたは構成単位(エレメント)の軸で示している。森林から運び出された樹木は、まず丸太から製材、集成材、合板等に加工され、それらが建築、家具分野に利用される。利用後はこれらを小片化してボード類(パーティクルボードなど)やパルプ、紙等になる。そして後述するバイオリファイナリー工程によって、熱分解やガス化やで有用な化学原料や製品に変換し、最終的には燃料としてエネルギー利用される。また、段階を重ねるにつれて木材構成単位(エレメント)が小さくなり、かつ量的ポテンシャルも下がっていく。ただし付加価値等の質的な面では、バイオリファイナリー技術の確立次第では広がる可能性がある。エレメントが小さくなるにつれ、製品のライフサイクルも短くなると考えられるが、図の横軸はそこまで表現し切れ

ていない。いずれにせよバイオマスはカスケード利用で長期利用が可能となり、マテリアル利用の間は炭素固定されているともいえるため、CO₂の放出抑制になる。またマテリアルに利用できなくなったエレメントは、最終的に燃料としてCO₂と水、少量の灰として大気や地表に放出される。灰はもともと樹木が土壌から吸収した無機元素を由来とするので、灰を林地に戻せば、完全に近い元素・物質循環ともいえる。一方でマテリアル中の共存物質(被覆材、接着剤等)の分離・処理技術などの課題もあるが、最近では灰を接着剤の増量剤に利用する技術が開発される⁽¹⁶⁾など進展がみられる。カスケード利用は生物材料である木材を長く上手に使う手段として、持続的資源利用と温暖化抑制からも有効な手段と考えられる一方で、資源の利用効率を考慮した研究が少なく⁽¹⁷⁾、社会実装する上で評価研究の進展が待たれるところである。

4. 木質バイオマス燃料の高性能化技術

(1) 木材燃料の均一化処理

木材は高位発熱量が全乾質量基準で大体20-21 MJ/kgを示して樹種による大きな違いはない。ところが前出のように木材は樹種による密度の違いから、図4に示すように体積基準での発熱量(エネルギー密度)は大きく異なる⁽¹⁸⁾。例えばスギとコナラでは2倍異なっており、薪の火持ちが両者によって異なるのはこのことによる。さらにチップであれば周囲に空隙を含むために、エネルギー密度はいっそう低くなる。燃料の輸送、貯蔵、供給の際はエネルギー密度を十分考慮しなければならない。

エネルギー密度を向上する手段に圧密処理があり、この処理で木材中の空隙を最小化させることで樹種によるばらつきも小さくなる。本処理で得られる燃料の代表的なものがペレットやブリケットで、

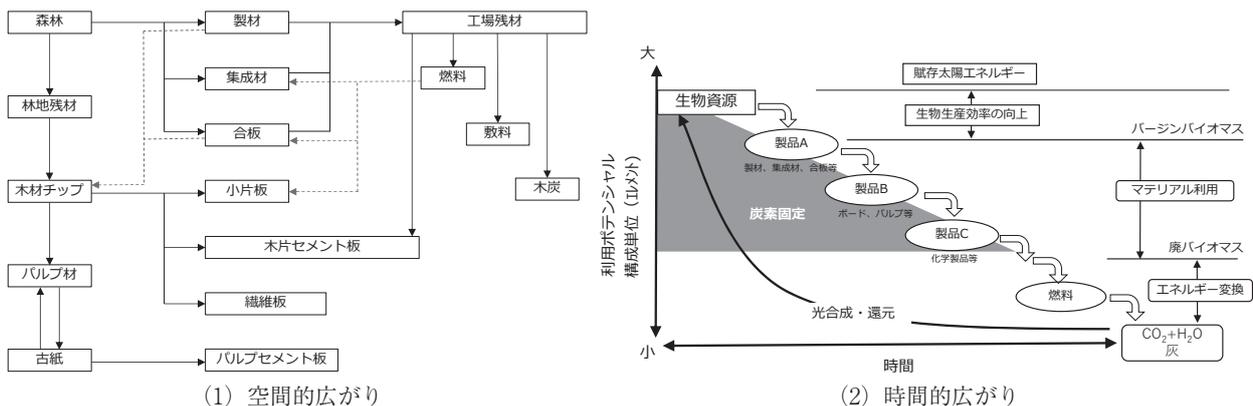


図3 バイオマスのカスケード利用の流れ^(14,15)

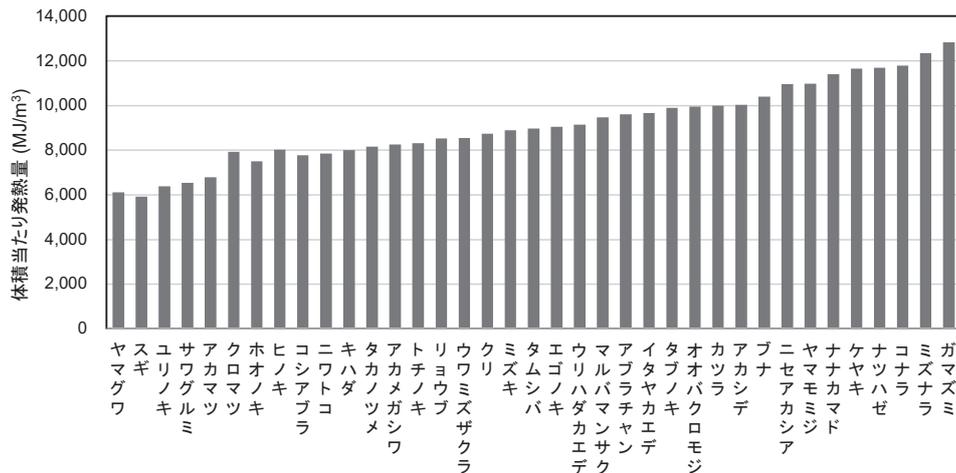


図4 木材の体積あたり発熱量⁽¹⁸⁾

燃料の見かけ密度は 1.2 g/cm³ 前後で木材の真密度に近づき、ばら積み時の密度（かさ密度）もペレットで 600~700 kg/m³ と同じ含水率の木材チップと比べて 2~4 倍高くなる。ペレット、ブリケットは加工には一手間を要するが、エネルギー密度の高さと均一性の点から利便性に優れるといえる。

木質燃料は密度、含水率のほか、部位、形状の違い、異物（土砂）混入など、燃焼性状は大きくばらつく。産業分野ではこうした性状の違いにも対応出来る燃焼器が存在するが、木材の熱分解、燃焼過程では CO₂ の他に様々な無機、有機化合物が生じて、エミッション低減対策の付帯装置を必要とする。一方、同じく生物を起源とする石油やガスは、精製工程で燃料性状がほぼ均一化されるため、家庭用の燃焼機器でも高度な制御を可能する。よって木質燃料を家庭等の小規模用途に導入を進めるには、できるだけ性状を均一にすることで、小型装置での制御高度化や低エミッション化の点で重要と考えられる。

(2) トレファクション（半炭化）による高性能化

木質ペレットは前出のように比較的均質でエネルギー密度に優れる点を述べたが、エネルギー密度が石炭に比べてまだ低く、さらに吸湿や吸水でその形状が崩壊する欠点を有する。バイオマスを改質する方法として古くから熱処理が行われており、木材の材料用途においては数多くの検討例がある⁽¹⁹⁾。燃料用途においても木炭に代表される炭化処理で発熱量等を向上できることが知られているが、近年、熱分解近傍温度（250~300℃程度）での低温熱処理（半炭化）と圧密化（ペレット化）の組み合わせがエネルギー密度を最大化してバイオマス燃料を高性能化できる技術として注目されている。従来の炭化は見かけの発熱量の増加と引き替えに

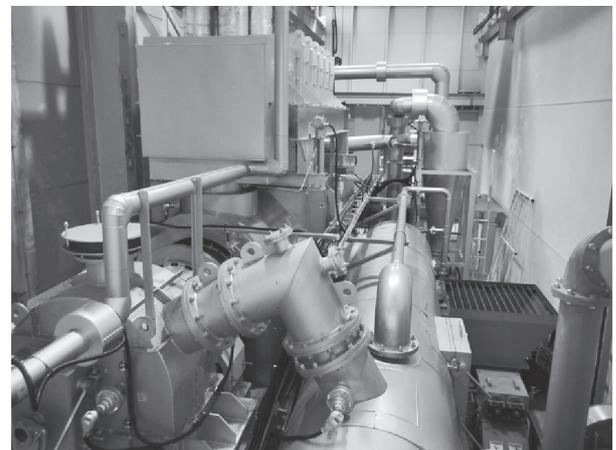


図5 半炭化燃料実証プラント⁽²¹⁾

70%程度質量減少するために木炭に残るエネルギーは 30%程度にすぎない。ところが半炭化では温度が低いため発熱量の増加が少ないが、質量減少は 20~30%前後と低いため半炭化物に残るエネルギーは 90%近くに達する。半炭化物はエネルギー収率が高いことに加えて添加物なしでペレット状に圧密化ができる。半炭化はトレファクション（torrefaction, 焙煎）とも呼ばれ、その燃料化技術は 2000 年代に入ってから半炭化と圧密化の組み合わせによる研究が進展した。製法は原料を熱処理と成型を別々に行う方法と、それらを同時に行う方法などがある。

半炭化ペレット燃料の実用化開発は国内外で行われており、例えば筆者らはラボ試験の成果をもとに民間企業 2 社と共同で半炭化燃料製造実証機を開発して燃料の製造・利用試験を実施した⁽²⁰⁾。図5に実証プラントの概要を示す⁽²¹⁾。製法は木材チップを外熱式ロータリーキルンで半炭化後にペレット燃料化する方法を採用した。半炭化炉にロータリーキ

ルン式を採用することで林地残材のような多様な形状に対応できるとともに、生チップを乾燥処理なしにそのまま供せるようにした。ペレット製造機（ペレタイザ）はリングダイ方式の商用モデルを採用した。平成 27～28 年度に実証プラントの連続運転を行い、生のスギ木部チップから連続的に半炭化することに成功したほか、温度制御や操作方法などの改良で地域事業者が運転可能な程度まで機器の完成度を高めた。この結果をもとに小規模用途の商用機を設計して、その規模は原料消費能力約 1 t-wet/h、燃料生産能力約 2,500 t/年とした。半炭化ペレット燃料を地域で熱利用することを念頭に、試作した燃料を市販ペレットストーブ、農業用ハウス加温用ペレット温風機で燃焼試験を行い、半炭化ペレット燃料は着火時間が早く着火時の煙が少ないこと、ペレット温風機での起動停止が早いことなどの成果を得た⁽²⁰⁾。

また半炭化は耐水性、耐久性（耐朽性）、寸法安定性の付与などの効果があり、マテリアル用途では外装材などの市販品がある。特に薬剤処理なしで耐久性効果が得られることは大きなポイントともいえる。筆者らは奈良県森林技術センターらと共同で耐久性に優れた半炭化処理木質チップ舗装材を開発した⁽²²⁾。従来の木質チップ舗装材は腐朽による劣化で耐用年数が短い欠点があったが、半炭化処理舗装材は、チップの耐久性が向上するため、さらに長期の使用が可能である。導入先には公園や遊歩道を想定しているが、都市公園は面積が増加傾向にある一方で維持管理が課題となっている。半炭化処理した木質チップ舗装材の導入で、管理者側にはメンテナンスの軽減がある一方、利用者側には木質舗装ならではの快適性（蓄熱しにくい、クッション性に優れる）などを享受できるなどの二重のメリットがある。

ただし、半炭化は熱処理設備の導入を必要とするため、追加コストが発生して従来の木質ペレットよりは高くなるを得ない。大規模な発電用途の試算例ではあるが、輸送、利用でコスト低減することから、総コストは半炭化燃料で優れるとの報告がある⁽²³⁾。半炭化処理製品を利便性の高い均一燃料や長寿命材料として捉えれば、最終利用までを含めることで半炭化処理にメリットの可能性があると考えられる。

5. バイオマス燃料の国際標準化の重要性

品質規格は標準化の中核をなすものであり、その

規格の導入で、品質・性能・安全性・互換性の確保、利便性の向上、試験・評価方法の統一が実現し、技術革新、低コスト化、燃焼時の低エミッション化などを加速化できる。その結果、規格は産業の発展だけでなく、地球温暖化抑制、持続可能社会の実現にも貢献できると考えられる。

バイオマスの燃料の国際規格は主に ISO 第 238 専門委員会（ISO/TC238 Solid Biofuels（固体バイオ燃料））が審議している。TC238 はスウェーデンを幹事国に 46 カ国から構成される（表 1）。欧州各国は早くから規格作成に着手して 2010 年に欧州統一規格（EN 規格）を発行した。さらに 2007 年に ISO/TC238 が組織されて、2014 年から ISO 規格が順次発行された。表 2 に ISO 固体バイオ燃料関連規格の一覧を示す。発行数は 44 で（2021 年 2 月現在）、このうち中核をなす ISO 17225 にはペレット、チップ、薪、熱処理（トレファクション）燃料などの品質要求事項が示されている。このほかに新たに 14 の規格が審議中であり、別の専門委員会である TC296（竹と藤）は 2020 年に燃料用竹炭規格を発行したほか、TC300（固形化廃棄物由来燃料）は廃棄物系バイオマス燃料規格を議論している。このようにバイオマス燃料規格の国際標準化が進められている。

日本ではバイオマス燃料規格は全て業界自主規格であって国家規格が存在しない。また同じ燃料でも自主規格が複数存在する場合もある。WTO の TBT 協定（貿易の技術的障害に関する協定）では各国規制等で用いられる強制規格や任意規格の国際規格への整合化を定めている。ところが国内規格は必ずしも国際規格に整合しておらず、日本は木質バイオマス燃料の国際標準化にガラパゴス的状况に置かれているといえる。このことはビジネス上で不必要な障害になる恐れがある。日本の国際規格への参画状況をみると、日本はオブザーバー地位（O メンバー）であるため策定や改訂に直接参画できないほか、投票で賛成票に含まれないなどの制約を受けている。そこで積極的参加地位（P メンバー）への変更を目指して筆者や近畿大学井田教授らが発起人となって 2019 年に任意団体「固体バイオ燃料国際規格化研究会」を設立して、同年 5 月に TC238 議長を招いて記念シンポジウムを開催した⁽²⁴⁾。その後当研究会は TC238 の投票案件に所轄団体へ積極的に意見を発出してきた。その結果、2020 年 2 月に農水省バイオマス循環資源課に TC238 国内審議委員会が設置され、官民の利害関係者が参加して日本

表1 ISO/TC238 参加国一覧 (2021年2月現在)

Pメンバー (積極的参加, 25カ国)	Oメンバー (オブザーバー, 21カ国)
オーストリア, ハンガリー, 南アフリカ, ベルギー, アイルランド, スペイン, カナダ, イタリア, スウェーデン (幹事国), 中国, カザフスタン, スイス, 韓国, デンマーク, マレーシア, イギリス, フィンランド, オランダ, ノルウェー, ドイツ, アメリカ, フランス, ポーランド, インド, チリ	アルゼンチン, エジプト, モンゴル, アルメニア, エストニア, ニュージーランド, クロアチア, タイ, パルバドス, イラン, ルーマニア, ブルガリア, イスラエル, セルビア, コロンビア, モルドバ, スロバキア, <u>日本</u> , フィリピン, スリランカ, チェコ

表2 ISO 固体バイオ燃料関連規格一覧 (2021年2月現在)

ISO 番号 ^{*1}	発行年	名称
14780	2017	試料の調製
14780 AMD	2019	試料の調製 - 追補
16559	2014	用語, 定義及び説明
16948	2015	炭素, 水素及び窒素の全含有量の測定
16967	2015	主成分の測定 - Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na 及び Ti
16968	2015	微量元素の測定
16993	2016	一つの基準から他の基準への分析結果の変換
16994	2016	硫黄及び塩素の総含有量の測定
16995	2015	水溶性塩化物, ナトリウム及びカリウム含有量
TS 16996	2015	蛍光 X 線による元素組成の測定
17225-1	2014	燃料の仕様及び分類 - 第1部: 一般要求事項
17225-2	2014	燃料の仕様及び分類 - 第2部: 等級別木質ペレット
17225-3	2014	燃料の仕様及び分類 - 第3部: 等級別木質ブリケット
17225-4	2014	燃料の仕様及び分類 - 第4部: 等級別木質チップ
17225-5	2014	燃料の仕様及び分類 - 第5部: 等級別薪
17225-6	2014	燃料の仕様及び分類 - 第6部: 等級別非木質ペレット
17225-7	2014	燃料の仕様及び分類 - 第7部: 等級別非木質ブリケット
TS 17225-8	2016	燃料の仕様及び分類 - 第8部: 等級別熱処理圧縮バイオ燃料
TS 17225-9	2020	燃料の仕様及び分類 - 第9部: 等級別産業用破砕チップ及び切削チップ
17827-1	2016	非圧縮燃料の粒度分布の測定 - 第1部: 3.15 mm 以上の開口をもつふるいによる振動スクリーン法
17827-2	2016	非圧縮燃料の粒度分布の測定 - 第2部: 3.15 mm 以下の開口をもつふるいによる振動スクリーン法
17828	2015	かさ密度の測定
17829	2015	ペレットの長さ及び直径の測定
17830	2016	粉末化ペレットの粒度分布
17831-1	2015	ペレット及びブリケットの機械的耐久性の測定 - 第1部: ペレット
17831-2	2015	ペレット及びブリケットの機械的耐久性の測定 - 第2部: ブリケット
18122	2015	灰分の測定
18123	2015	揮発分の測定
18125	2017	発熱量の測定
18134-1	2015	含水率の測定 - 全乾法 - 第1部: 全水分 - 基準法
18134-2	2017	含水率の測定 - 全乾法 - 第2部: 全水分 - 簡易法
18134-3	2015	含水率の測定 - 全乾法 - 第3部: 一般分析用試料の水分
18135	2017	サンプリング
18846	2016	ペレットの試料内の微粒子含有量の測定
18847	2016	ペレット及びブリケットの粒子密度の測定
19743	2017	3.15 mm 超の重異物
20023	2018	固体バイオ燃料ペレットの安全性 - 住宅及びその他小規模用途における木質ペレットの安全な取扱及び保管
20024	2020	業務及び産業用途における固体バイオ燃料ペレットの安全な取り扱い及び保管
TS 20048-1	2020	発生ガス及び酸素減少特性の測定方法 - 第1部: 実験室における発生ガス及び酸素減少量測定
20049-1	2021	成形バイオ燃料の自己発熱性の測定 - 第1部: 等温式発熱量計法
TS 20049-2	2021	成形バイオ燃料の自己発熱性の測定 - 第2部: かご式加熱試験法
21404	2020	灰の溶融挙動の測定
21626-2 ^{*2}	2020	竹炭 - 第2部: 燃料用
21945	2020	小規模利用における簡易サンプリング方法
TR 23437	2020	かさ積みしたバイオ燃料のブリッジ (架橋化, 閉塞) 挙動の評価

*1 AMD: 追補 TS: 技術仕様書, TR: 技術報告書 *2 ISO TC296 (竹と藤) が審議, 発行

の意見を述べる場が出来た。しかし地位はまだOメンバーのままである。Pメンバーに移行するには民間の利害関係者が主体的に委員会を運営することが求められる。国や研究者は政策的、科学的立場で横から支援するのが本来の役割と言えよう。当研究会は近い将来のPメンバー移行を目指して引き続き活動している。

6. おわりに

太陽エネルギーの恵みで得られる木質バイオマスは、再生可能な生物材料かつ有機炭素資源であり、カーボンニュートラル社会実現に向けて本命的な役割を担うといえよう。ただ木質バイオマスはその成長は時間を要することから、持続可能な利用の点からは、マテリアルからエネルギーにカスケード利用するのが望ましい姿と考えられる。また、その発熱量が化石燃料に比べて低く、性状が不均一なことから、ペレット化や半炭化処理などによって均一化と高性能化を図ることで、制御の高度化を図られよう。そして燃料の標準化はその均質化、機器の安定運転と低コスト化、低エミッション化、さらには地球温暖化抑制やSDGs実現に繋がる。我が国が燃料標準化からこれ以上ISOLate（取り残される）されないよう、利害関係者の積極的参画と連携が望まれる。

こうした取り組みなどから、日本が世界のバイオマスビジネスやカーボンニュートラル社会に先導的に貢献することも不可能ではないと考えられる。

謝辞

本内容の一部は林野庁木質バイオマス加工・利用システム開発事業「林地残材等のトレファクション燃料化による高効率利用技術の確立」（共同実施者：株式会社アクトリー、三洋貿易株式会社）、および農林水産省 農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業（27014C）「半炭化処理による高性能木質舗装材の製造技術開発」（共同実施者：奈良県森林技術センター、東北工業大学、ニチレキ株式会社、有限会社地域資源活用研究所）によって行われた。

参考文献

- 1) FAO, Global Forest Resources Assessment 2020 – Key findings, Rome (2020)
- 2) 林野庁, 令和元年度森林・林業白書, p54, p161, p164 ほか (2021)
- 3) FAO, FAOstat, Forestry Production and Trade, <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO> (2021年2月15日確認)
- 4) 林野庁, 令和元年における木質粒状燃料（木質ペレット）の生産動向について（2020） ほか
- 5) 山下晃功編, 技術研究選書 木材の性質と加工, 開隆堂（1993）
- 6) 公益社団法人日本木材加工技術協会, 令和2年度木材乾燥講習会テキスト（2020）
- 7) 阿部賢太郎, 植物由来の高強度ナノファイバー「セルロースナノファイバー」の製造, 生存圏研究, 第13号 p.43-50（2017）
- 8) 公益社団法人日本木材保存協会, 木材保存学入門改訂3版（2012）
- 9) 木造建築は地震や火災に弱いのでは？, 日本木材情報センターホームページ, <http://www.jawic.or.jp/riyohou/mnl.php?idx=6> (2021年2月15日確認)
- 10) 住友林業, 3年後に人工木造衛星を宇宙へ, 日刊木材新聞2020年12月24日付け, 1（2020）
- 11) 日本学術会議, 生物資源とポスト石油時代の産業科学—生物生産を基盤とする持続・循環型社会の形成を目指して—（2000）<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/17youshi/1777.html>（2021年2月15日確認）
- 12) European Commission, Cascades. Study on the Optimized Cascading Use of Wood, Brussels（2016）
- 13) N. Thonemann, M. Schumann, Environmental impacts of wood-based products under consideration of cascade utilization: A systematic literature review, J. Cleaner Production, 172, 4181-4188（2018）
- 14) 有馬孝禮, 木材利用と地球環境—循環型資源としての木材のカスケード利用①—, 山林, 2018.10, 12-16,（2018）
- 15) 有馬孝禮, 木材利用と地球環境—循環型資源としての木材のカスケード利用②—, 山林, 2018.11, 10-17（2018）
- 16) 丸玉産業, バイオマスボイラー灰の再利用技術確立, 日刊木材新聞2021年1月29日号, 1（2021）
- 17) 佐賀清崇, 福村一成, 富田正彦, バイオマス系廃棄物のカスケード利用の有効性と最高水準のバイオマス生産量について, 農村計画論文集, 第6集, 115-120（2004）
- 18) 武田宏, 木質バイオマス利用のための燃料特性

- 試験, 新潟県森林研究所研究報告, 50, 63-70 (2009)
- 19) Esteves, B. M.: Wood Modification by Heat Treatment: A Review, BioResources, 4-1 (2009), 370-404.
- 20) 吉田貴紘, 次世代炭焼き「トレファクション(半炭化)」による木質バイオマスの地産地消, 山林, 2017. 6, 20-17 (2017)
- 21) 国立研究開発法人森林研究・整備機構, 環境報告書 2020, p6 (2020)
- 22) 吉田貴紘, 半炭化処理による高性能木質舗装材の製造・利用技術開発, 木材工業, 73 (9), 346-351 (2018)
- 23) IEA Bioenergy Task 32, Status overview of torrefaction technologies A review of the commercialization status of biomass torrefaction, IEA Bioenergy (2015).
- 24) 固体バイオ燃料国際規格化研究会ホームページ <https://solidbiofuelsforum.wixsite.com/sbfj> (2021年2月15日確認)

著者略歴



吉田 貴紘 (ヨシダ タカヒロ)

2000年東北大学大学院修了。NEDO, 産総研特別研究員を経て2003年森林総合研究所入所。2017年より現職。2018年に日本エネルギー学会進歩賞(学術部門)受賞。2019年ドイツバイオマス研究センター客員研究員。主に木質ペレット等の高性能化と木質チップの乾燥技術開発を担当。博士(工学)。