木質系バイオマス混焼の利用可能性

学生員 牧野 陽祐* 正員 加藤 丈佳*
正員 鈴置 保雄*

Potential of Co-firing of Woody Biomass in Coal Fired Power Plant

Yosuke Makino*, Student Member, Takeyoshi Kato*, Member, Yasuo Suzuoki*, Member

Taking the distributing woody biomass supply into account, this paper assesses the potential of a co-firing of woody biomass in utility's coal power plant from the both energy-saving and economical view points. Sawmill wastes, trimming wastes from fruit farms and streets, and thinning residues from forests in Aichi Prefecture are taken into account. Even though transportation energy is required, almost all of woody biomass can be more efficiently used in co-firing with coal than in a small-scale fuel cell system with gasification as a distributed utilization. When the capital cost of fuel cell system with 25% of total efficiency, including preprocess, gasification and power generation, is higher than 170×10^3 yen/kW, almost all of thinning residues can be more economically used in co-firing. The cost of woody biomass used in co-firing is also compared with the transaction cost of renewable power in the current RPS scheme. The result suggests the co-firing of woody biomass in coal fired power plant can be feasible measure for effective utilization of woody biomass.

キーワード：木質系バイオマス，石炭火力，混焼，燃料電池

Keywords: woody biomass, coal fired power plant, co-firing, fuel cell

1. はじめに

木質系バイオマスはエネルギー密度が低く，しかも排出地点が分散しているため，そのエネルギー利用においては輸送エネルギーや輸送費用が大きいことが問題とされている。そのため，排出地点ごとでガス化して燃料電池における発電に利用するなどの小規模・分散システムにおける利用が有効とされている。しかし，石炭火力における混焼や将来的にはガス化複合発電などの大規模・集中的なシステムは，小規模システムと比較して本質的にエネルギー効率が低く，周辺の木質系バイオマスの分布によっては経済的にも有効な利用方法となる可能性がある。したがって，木質系バイオマスの最適な利用方法については，地域の木質系バイオマス賦存量の分布に基づき，輸送エネルギーや輸送費用を考慮して統計的に評価する必要がある。

本論文では，木質系バイオマスの大規模・集中的な利用方法として既設の石炭火力における混焼に着目し，地域ごとの賦存量を考慮して，その省エネ性及び経済性を評価した。まず，愛知県を対象として市町村別に製材所廃材，果樹剪

定枝，街路樹剪定枝および間伐残材の賦存量調査を行った。次に，省エネ性の評価として，混焼による一次エネルギー削減量が，輸送および乾燥に必要な合計エネルギーよりも大きくなる木質系バイオマスの利用可能量，さらにガス化＋燃料電池における小規模・分散的な利用よりも効率的となる木質系バイオマスの利用可能量を算定した。また，経済性について，賦存量は多いが最も高コストと考えられる間伐残材を対象として，ガス化＋燃料電池の設備費や，現在のRPS法における新エネルギー等の発電電力の取引価格を指標とした評価を行った。その際，森林の持つ多面的機能の発揮という外部効果を考慮した。以上の検討を通じて，石炭火力における木質系バイオマス混焼の利用可能性について，省エネ性及び経済性の観点から統計的に評価した。

2. 愛知県の木質系バイオマス賦存量

愛知県内の87市町村を対象として，文献調査を中心として，以下のように各種木質系バイオマスの賦存量を算定した。また，市販の地図ソフトを用いて各市町村から石炭火力までの輸送経路を決定した。

2・1 製材所廃材の算定方法 2002年における県の国産および外材の素材入荷量⁽¹⁾に基づき，比例換算によって各製材所の素材入荷量を算定した。本来ならば，製材所の規模を反映させるべきであるが，製材所規模についての

* 名古屋大学大学院工学研究科
〒464-8603 名古屋市千種区不老町
Graduate School of Engineering, Nagoya University
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603

データが得られなかったため、本論文では1製材所あたりの規模は同じと想定して算定している。なお、各市町村における製材所の総数は電話帳から確認した。次に、製材所からの各種木質残廃材の発生量およびその利用方法に関するアンケート調査結果⁽²⁾に基づき、燃料および焼・棄却されるかさ体積としての廃材排出量 (m^3/yr) を算定した。さらに、素材別のかさ比重⁽³⁾を考慮して重量換算の排出量 (t/yr) を算定した。製材所廃材の含水率を 80% (乾量基準) と想定して低位発熱量原単位を $8,574 \text{ kJ/kg}$ とし、発熱量換算の製材所廃材の排出量を算定した。

2・2 果樹剪定枝の算定方法 2001 年における各市町村の果樹種ごとの栽培面積⁽⁴⁾と、果樹剪定枝の排出量原単位に関するアンケート調査結果⁽⁵⁾に基づき、市町村ごとの果樹剪定枝の排出量 (t/yr) を算定した。また、果樹剪定枝の含水率を 100% (乾量基準) と想定して低位発熱量原単位を $7,465 \text{ kJ/kg}$ とし、発熱量換算の排出量を算定した。

2・3 街路樹剪定枝の算定方法 街路樹剪定枝については、全国 16 都市の街路樹本数⁽⁶⁾に基づき排出量を算定した。まず、街路樹の本数が得られた都市について、人口との相関関数を定式化した結果、人口 1 万人あたりの高木本数は 465 本となり、この値を用いて各市町村の街路樹本数を算定した。次に、1999 年度における横浜市の街路樹剪定枝の排出量に基づき、横浜市の街路樹本数に対する比例換算によって検討対象地域の各市町村からの街路樹剪定枝の排出量 (t/yr) を算定した。また、街路樹剪定枝の含水率を 100% (乾量基準) と想定して低位発熱量原単位を $7,465 \text{ kJ/kg}$ とし、発熱量換算の街路樹剪定枝を算定した。

2・4 間伐残材の算定方法

2・4・1 現状の発生量 平成 14 年度の愛知県の間伐実績⁽⁷⁾によると、間伐実施面積は約 $2,840 \text{ ha}$ であり、間伐材の素材換算量は約 $60,600 \text{ m}^3$ である。また、間伐材のうち利用されているものは約 $24,800 \text{ m}^3$ である。間伐材のうち素材として利用可能な部分の割合を 60%⁽⁸⁾とすると、間伐材発生量は約 $101,000 \text{ m}^3$ となる。未利用分を全て間伐残材とすると、間伐残材発生量は約 $76,200 \text{ m}^3$ となり、間伐残材発生率は 75.5% となる。

2・4・2 森林管理による潜在的発生量 現状で間伐が行われていない森林も含め、愛知県内の全ての人工林針葉樹 (スギ、ヒノキ) について間伐が行われた場合の間伐残材賦存量を算定した。愛知県では他県と比べて高齢級の森林の割合が高く、森林管理が必要な森林は高齢級の森林において多く存在していると考えられる。このような森林で森林管理をする場合に 1 ha あたりで発生する間伐残材の量は、低年齢級 (スギでは 4~7 年齢級、ヒノキでは 4~8 年齢級) の森林に対して行われる通常の間伐で発生する量とは大きく異なることが考えられる。そこで高齢級間伐と通常の間伐とを区別して間伐残材賦存量を算出した。その際、愛知県の森林計画書⁽⁹⁾に基づき、低年齢級の森林では 10 年周期で、高齢級の森林では 20 年周期で、20% の木が間伐されると想定した。

愛知県林業統計書における樹種別年齢級の森林蓄積を用いて、年間の間伐材発生量 (m^3/yr) を算出し、さらに、スギ及びヒノキの材比重をそれぞれ $853 \text{ kg}/\text{m}^3$ 及び $923 \text{ kg}/\text{m}^3$ ⁽¹⁰⁾として、重量換算の間伐材発生量 (t/yr) を算定した。次に、年間の間伐材発生量に間伐残材発生率を乗じ年間の間伐残材賦存量を算定した。なお、森林管理が行われ間伐材の発生量が増加した場合でも間伐残材の発生率は現状と同じとし、現状での値 (75.5%) を用いた。上記の計算を市町村別に行い、市町村別の間伐残材の賦存量を算定した。

また、間伐残材の含水率を 100% (乾量基準) と想定して低位発熱量原単位を $7,465 \text{ kJ/kg}$ とし、現状および森林管理による潜在的な間伐残材について、発熱量換算の排出量を算定した。

2・5 賦存量の算定結果 上述の方法により、各種木質系バイオマスの排出量を算定した。表 1 に木質系バイオマス賦存量の重量換算と発熱量換算を示す。回収が容易な製材所廃材、果樹剪定枝および街路樹剪定枝の排出量は少ない。一方、間伐残材は、現状でも $68 \text{ kt}/\text{yr}$ と他の木質系バイオマスと比較して排出量が多い。さらに、森林管理によって現在は間伐が行われていない森林からの潜在的発生量も含めると賦存量は $218 \text{ kt}/\text{yr}$ となり、現状の発生量の 3.2 倍に増加する。

製材所廃材、果樹剪定枝および街路樹剪定枝の発熱量換算の賦存量の合計は $222 \text{ TJ}/\text{yr}$ であり、この値は平成 13 年度の碧南火力 5 号機 $1,000 \text{ MW}$ の石炭消費量 (約 $50,000 \text{ TJ}/\text{yr}$) の 0.44% にすぎない。しかし、賦存量が大きな間伐残材を含めると、全木質系バイオマスの発熱量は約 $1,850 \text{ TJ}/\text{yr}$ となり、 $1,000 \text{ MW}$ の石炭消費量の 3.69% に相当する。石炭火力において混焼可能なバイオマスの比率はエネルギー換算で数%程度と考えられており⁽¹¹⁾、愛知県における木質系バイオマスの賦存量は、大規模な石炭火力における混焼としては適量と考えられる。

次に、これらの木質系バイオマスの混焼によって得られる電力を算出した。混焼率が低いため、発電効率 (発電端 40%⁽¹¹⁾) は変化せず、また、木質系バイオマスの破碎等の前処理を含めた所内動力も石炭のみの場合 (5.5%⁽¹²⁾) と同じと想定すると、全木質系バイオマスを利用した場合の発電量

表 1 木質系バイオマスの賦存量

Table 1. Potential supply of woody biomass.

	weight (t/yr)	energy (TJ/yr)
sawmill wastes	4,889	42
trimming wastes from fruit farms	20,883	156
trimming wastes from streets	3,180	24
Sub total	28,952	222
thinning residues (current)	67,972	507
thinning residues (potential)	150,024	1,120
thinning residues (total)	217,996	1,627
TOTAL	246,948	1,849

図1 石炭火力までの輸送距離と木質系バイオマスの累積発熱量との関係

Fig. 1. Relation between transportation distance to coal fired power plant and cumulative amount of woody biomass.

は約 194 GWh/yr となる。この値は、RPS 法による中部電力の平成 16 年度の新エネルギー導入義務量（約 390 GWh）の約 50%に相当する。

各市町村における各木質系バイオマスの排出量と石炭火力までの輸送経路の距離との関係を図 1 に示す。同図 (a) に示す製材廃材および剪定枝の場合、片道の輸送距離が 80 km 以内の市町村からの排出量が多い。一方、同図 (b) に示す間伐残材の場合、輸送距離が 50～100 km の市町村の間伐残材賦存量が多い。

3. 省エネ性評価

3.1 輸送エネルギーの算定方法 木質系バイオマスを石炭火力において混焼する場合、エネルギー的に損失とならないためには、少なくとも輸送エネルギーと乾燥エネルギーの合計値よりも、発電による石炭分の一次エネルギー削減量の方が大きい必要がある。そこで本論文では、以下のように、石炭火力までの木質系バイオマス輸送エネルギーおよび乾燥エネルギーを算定した。

市町村単位で集計したバイオマス n の排出量 B_n (m^3/yr または t/yr) に対し、トラック 1 台あたりの輸送可能量を F_n ($\text{m}^3/\text{台}$ または $\text{t}/\text{台}$) とすると、輸送に必要なトラック延べ台数は B_n/F_n となる。次に、トラックの燃費 G を 3 km/L 、

軽油の発熱量 Q を 38.2 MJ/L として、市町村 A から石炭火力までの輸送経路 L_A (km) を用いると、トラックの往復に必要な輸送エネルギー T_A (MJ/yr) は次式のように表される。

$$T_{An} = \left(\frac{B_n}{F_n} \right) \times \left(\frac{L_A}{G} \times 2 \right) \times Q \dots \dots \dots (1)$$

なお、バイオマス排出地点は各市町村内で分散しているが、多くの市町村に関して、市町村内の輸送距離よりも市町村から碧南火力までの輸送距離の方が長いと考えられる。そこで本研究では、市町村内の輸送距離については、それぞれの排出地点からの距離を個別に算定するのではなく、各市町村の市役所・町村役場をその代表地点として平均的な輸送距離を用いている。

製材所廃材の輸送については 4t トラックを想定し、上述のように発生量を見かけ体積で算出していることから、標準的な荷台面積を考慮して、 $F_n = 8 \text{ m}^3/\text{台}$ と想定した。果樹・街路樹剪定枝については、剪定枝粉碎処理車による輸送を想定し、 $F_n = 1.6 \text{ t}/\text{台}$ と想定した。間伐残材については、枝葉を結束してからトラックに積み込むという輸送方法の実測値⁽¹⁰⁾に基づき、単位容積あたりの重量を $0.437 \text{ t}/\text{m}^3$ とし、 $F_n = 3.5 \text{ t}/\text{台}$ と想定した。

3.2 乾燥用エネルギーの算定方法 木質系バイオマスは含水率 25% (乾量基準) まで乾燥された後に利用されると想定した。水の蒸発熱を $2,512 \text{ kJ/kg}$ (600 kcal/kg)、ボイラの燃焼効率 η_B を 80% と想定し、含水率 $M\%$ (乾量基準) のバイオマスを 25% まで乾燥するために必要なエネルギー量 D_M (kJ/kg, m.c. basis) を次式によって算出した。

$$D_M = \frac{M - 25}{100 + M} \times \frac{2,512}{\eta_B} \dots \dots \dots (2)$$

3.3 混焼に利用可能なバイオマス量 混焼時の発電効率 η_C を 37.8% (発電端効率 40%, 所内動力 5.5%) と想定し、利用時における含水率 25% (乾量基準) の木質系バイオマスの量を B'_n 、発熱量を Q_{25} として、混焼による一次エネルギー削減量 E_1 (MJ/yr) を次式によって算出した。

$$E_1 = B'_n \times Q_{25} - (T_{An} + B_n \times D_M) \dots \dots \dots (3)$$

愛知県内の 87 市町村の各木質系バイオマスについて E_1 を算出した。その結果、全ての木質系バイオマスについて E_1 は正となった。すなわち、輸送エネルギーや乾燥エネルギーを考慮しても、愛知県内で排出される全ての木質系バイオマスは、エネルギー的に損失とならずに石炭火力において混焼可能であると考えられる。

3.4 ガス化 + 燃料電池との比較 木質系バイオマスを市町村単位で分散的にエネルギー利用する技術としてガス化 + 燃料電池システムを想定し、一次エネルギー削減量に関して、石炭火力における混焼との比較を行った。一般に、ガス化効率は 70～75%⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾、燃料電池による発電効率は 45～55% 程度である。さらに、木質系バイオマスの破碎のための動力や、市町村内での木質系バイオマスの輸送

を考慮して、燃料電池の発電効率 η_{FC} は 25～35%と想定した。なお、燃料電池の排熱は、木質系バイオマスの乾燥用に利用されることも考えられるが、本論文では、ガス化に必要な熱として利用されると想定した。

ガス化 + 燃料電池による一次エネルギー削減量と上述の E_1 とを比較し、石炭火力において混焼の方がエネルギー的に有利となる木質系バイオマスの割合を算定した。その結果、 $\eta_{FC} = 33\%$ 以下の場合、全ての木質系バイオマスに関して、石炭火力における混焼の方が効率的であった。 η_{FC} が 34%を超えると、混焼の方が効率的となる木質系バイオマスの割合は減少し、 $\eta_{FC} = 35\%$ の場合には、全木質系バイオマスの約 20%が混焼に利用するよりもガス化 + 燃料電池において利用した方が効率的となった。

なお、ガス化 + 燃料電池システムは、小規模でも高効率な発電システムであることが特徴であるため、本研究では、規模によらず発電効率は一定と考え、各市町村に 1ヶ所ずつ導入されるものと想定している。この場合、ガス化 + 燃料電池の発電効率を 25%とすると、各市町村の発電規模は 0.2～2.3 MW となる。したがって、発電規模が数 kW にも満たないような市町村に関しては、より長距離の木質系バイオマスの輸送が必要であり、輸送エネルギーや輸送コストの増加のために、石炭火力における混焼への利用の優位性がさらに増すものと考えられる。

4. 間伐残材の経済的価値

4.1 間伐残材価格の算定方法 木質系バイオマスのうち、最も賦存量の大きい間伐残材に関して、石炭火力における混焼において経済的に利用可能な賦存量を算定した。間伐残材を利用するために必要な費用として、伐採・搬出費用と石炭火力までの輸送費用を考慮した。伐採・搬出費用は全てエネルギー利用のための間伐残材で負担されると考えた。ただし、間伐材のうち 24.5%は、製材・加工材や丸太材等、エネルギー以外の目的で利用されて利益が得られることを考慮して⁽⁷⁾、その利益分を伐採・搬出費用と輸送費用から差し引くことにより、石炭火力において利用する際の間伐残材の価格を算出した。

4.2 伐採・搬出費 愛知県林野庁の提供資料により、伐採・搬出費用は 247,000 円/ha と見積もられている。1ha の間伐によって発生する間伐残材は 31.1 t/ha であるため、間伐残材を 1t 発生させるのに必要な費用は 7,950 円/t となる。

4.3 輸送費 輸送の際に必要な燃料費と人件費とを合わせて輸送費とする。輸送は 4t トラックによって行われるものとし、トラックの燃費 G を 3 km/L、軽油の価格 C_1 を 86 円/L と想定した。上述のように、トラック 1 台あたりの輸送可能量 F_n を 3.5 t/台と想定しており、各市町村 A から石炭火力までの片道輸送距離 L_A (km) を用いて、間伐残材 1t あたりの燃料費 C_{t-f} を次式のように算定した。

$$C_{t-f} = \frac{C_1}{G} \times \frac{1}{F_n} \times 2L_A \cdots \cdots \cdots (4)$$

次に、トラックドライバーの時間給 H_p を 1,250 円/h(日給としては 10,000 円/日)、トラックの平均速度 S_{av} を 30 km/h と想定し、人件費 C_{t-l} を次式によって算出した。

$$C_{t-l} = \frac{H_p}{S_{av}} \times \frac{1}{F_n} \times 2L_A \cdots \cdots \cdots (5)$$

以上から、片道輸送距離 L_A (km) あたりの輸送費 ($C_{t-f} + C_{t-l}$) は、 $40.2L_A$ (円/t) となる。

4.4 エネルギー以外の利用による利益 間伐材の径を 9～11 cm と想定し、原木価格をスギが 10,000 円/t、ヒノキが 17,000 円/t⁽¹⁵⁾ とする。森林管理によるスギおよびヒノキの間伐材発生比はそれぞれ 55%および 45%であり、間伐材の平均原木価格は 13,200 円/t となる。間伐残材の発生率が 75.5%であることを用いて、間伐残材 1t あたりの利益分を求めると 4,280 円/t となる。

4.5 間伐残材価格の算定結果 上述の算定方法に基づき、石炭火力で発電用燃料として利用する際の間伐残材価格 C_{tr} を算定した。その結果、愛知県全体での間伐残材の平均価格は 6,730 円/t となった。この値は単位エネルギーあたりでは 901 円/GJ に相当する。原料炭の輸入価格が 180 円/GJ⁽¹⁶⁾ 程度であることを考えると、燃料としての間伐残材価格は非常に高いと言える。

5. 外部効果を含めた経済的価値

間伐残材のエネルギー利用の外部効果として、森林管理による森林の多面的機能の発揮が考えられる。森林の多面的機能には表層崩壊防止効果、水源涵養効果、生物種保全効果などがあるが、これらの効果の多くは森林管理による効果額を定量化することは容易ではない。本論文では、検討の第一段階として、定量化しやすい表層崩壊防止効果のみをとりあげた。表層崩壊防止効果の経済的価値は、森林管理によって減少する年間の表層崩壊面積を算定し、これに伴う山腹工事費用の減少分とした。

まず、対象地域において 1 年間に新たに崩壊する面積の割合を算定した。年度別の全国の崩壊面積の推移⁽¹⁷⁾ によると、1 年間に発生する崩壊面積の平均値は 17,334 ha であった。この値は平成 15 年度の全国の森林面積 2,514.6 万 ha の 0.0689%に相当する。

次に、林野庁が昭和 34 年に行った崩壊地調査の結果を参考にして⁽¹⁸⁾、森林管理による崩壊面積の差を算定した。この調査によると、主伐の際、択伐方式による伐採が行われている森林での崩壊面積は 0.98%、未着手の森林では 1.66%、平均では 1.18%となっている。択伐の場合と未着手の場合の崩壊面積割合の比率は、森林管理がされる場合とされない場合の崩壊の起こりやすさの比率を表していると考え、この比率の差によって森林管理の有無による表層崩壊防止効果が表されたとした。ただし、上述の値は、調査時までの累積の崩壊面積であることと、崩壊が起こっている森林を選択して調査されている可能性が高いため、それぞれの崩壊面積割合の絶対値が通常よりも大きくなっていることが考えられる。そこで、前述の 1 年間に新規に崩壊する面

積の割合 0.0689%を基準にして、後述の崩壊面積の割合は森林管理の有無による比率のみを用いた。

以上の想定に基づき、森林管理がされる場合とされない場合の一年間に発生する崩壊面積の差を求めた。全森林面積に対する1年間で発生する崩壊面積の割合は、森林管理がされる場合が 0.0572% ($= 0.0689 \times 0.98/1.18$)、森林管理がされない場合が 0.0970% ($= 0.0689 \times 1.66/1.18$) となり、その差は 0.0398% である。山腹工事費用は崩壊面積 1 ha あたり 8,690 万円/ha⁽¹⁹⁾ とすると、森林管理の有無による森林 1 ha あたりの年間工事費用の差は 34,500 円/ha となる。1 ha の間伐によって発生する間伐残材は 31.1 t/ha であるので、間伐残材を 1 t 収集することによる表層崩壊防止効果の経済的価値は 1,110 円/t となる。

また、この値を上述の間伐残材価格から差し引くことにより、森林管理による外部効果を考慮した間伐残材の価格 C_{tr} は、愛知県全体の平均で 5,620 円/t (753 円/GJ) となった。すなわち、森林管理による表層崩壊防止効果を考慮することによって、エネルギー源としての間伐残材の価格 C_{tr} を 16% 安く見積もることができる。

今後、表層崩壊防止効果以外の外部効果に関しても経済的価値を算出し、評価に含める予定である。

6. 間伐残材を利用した混焼の経済性評価

6.1 間伐残材の発電コスト 石炭火力において利用する際の間伐残材の価格 C_{tr} (円/GJ) と、木質系バイオマスの破碎等の前処理を含む混焼システムの追加的な設備費 C_C とから、木質系バイオマスを混焼に利用する場合の発電コストを算定した。上述のように、混焼を行っても石炭火力の発電効率は低下せず、 $\eta_C = 37.8\%$ とした。また、 $C_C = 20,000$ 円/kW⁽²⁰⁾、耐用年数 $Y = 20$ 年、負荷率 $LF = 80\%$ と想定し、次式によって間伐残材を用いた場合の発電コスト C_E (円/kWh) を算出した。

$$C_E = \frac{C_C}{Y \times 8,760 \times LF} + \frac{C_{tr}}{\eta_C} \times \frac{3,600}{10^6} \dots\dots\dots (6)$$

森林管理による外部効果を含める場合と含めない場合の発電コストと間伐残材賦存量との関係を図 2 に示す。外部効果を含めない場合、発電コストは 5.62 ~ 12.2 円/kWh となり、愛知県全体での平均値は 8.73 円/kWh となった。これに対し、外部効果を含めて評価することによって、発電コストは 4.20 ~ 10.8 円/kWh、平均値は 7.31 円/kWh となり、間伐残材を利用した発電コストを 1.42 円/kWh 低く見積もれることがわかった。

6.2 ガス化 + 燃料電池との比較 間伐残材をガス化 + 燃料電池に利用する場合の発電コストについては、将来技術であるガス化 + 燃料電池の設備費 C_{FC} によって大きく異なる。そこで、 C_{FC} を 1 ~ 30 万円/kW と変化させ、石炭火力における混焼の方が発電コストが安くなる間伐残材の割合を算定した。ただし、ガス化 + 燃料電池の設備費 C_{FC} には木質系バイオマスを破碎する費用も含むものと想定した。なお、ガス化 + 燃料電池に利用する場合の間伐残材の

図 2 石炭火力における木質系バイオマス混焼の発電コスト

Fig. 2. Electricity generation cost of biomass co-firing in coal fired power plant.

図 3 ガス化 + 燃料電池の設備費に対する混焼とガス化 + 燃料電池との経済性の変化

Fig. 3. Economy of co-firing with coal as a function of facility cost of FC system with gasifier.

価格は、上述の C_{tr} から市町村ごとに輸送費用を差し引いた値を用いた。また、ガス化 + 燃料電池の電池寿命を 4 万時間⁽²¹⁾、ガス化プロセスを含む発電効率を 25 ~ 35% と想定し、(6) 式と同様にして発電コストを算出した。

ガス化 + 燃料電池の設備費に対して、混焼に利用した方が有益となる間伐残材の割合を図 3 に示す。ガス化 + 燃料電池の発電効率が 25% の場合、設備費が 17 万円/kW 程度以上であれば、愛知県で発生する間伐残材のほぼ全てが混焼に利用した方が経済的にも有利となることがわかった。また、将来的にガス化 + 燃料電池の発電効率が 35% 程度になっても、設備費が 23 万円/kW 以上であれば混焼に利用した方が経済的となった。

6.3 他の新エネルギー発電との比較 RPS 対策としての間伐残材による混焼を想定し、上述の混焼の発電コストの算定結果と RPS 施行下での新エネルギー等の発電電力取引価格⁽²²⁾ との比較を行った。結果を図 4 に示す。同図より廃棄物発電等の現状で行われているバイオマス発電や水力発電の取引価格の大部分は混焼の発電コストと競合し

図4 混焼の発電コストとRPSにおける新エネルギー発電電力取引価格との比較

Fig. 4. Comparison between electricity generation cost of co-firing and transaction cost in RPS scheme.

ている。しかし、PVの取引価格に対して、混焼の方が発電コストが安くなる間伐残材の割合は100%である。また、風力発電との比較でも、発電コストは混焼の方が安くなる可能性が高いと考えられる。取引価格の安い廃棄物発電や水力発電の発電電力だけでは、新エネルギー導入義務量を賄えないと考えられるので、PVや風力発電の代替として、新エネルギー導入義務量の約50%を賄うことができる混焼は、RPS対策として経済的にも有効であると考えられる。

7. おわりに

本論文では、地域の木質系バイオマスの賦存量を算定し、石炭火力における混焼によるエネルギー利用の省エネ性および経済性を評価した。主な知見は以下のとおりである。

(1) 愛知県内の木質系バイオマスの賦存量は年間1,850TJであり、全てを混焼に利用する場合、194GWhの発電量となる。この値は、検討地域の電力会社におけるRPS法下での新エネルギー導入義務量の約50%に相当する。

(2) 愛知県内で発生する木質系バイオマスのほぼ100%について、輸送エネルギーを考慮しても、ガス化+燃料電池に利用するよりも石炭火力における混焼に利用した方が省エネ性の点で有利である。

(3) 表層崩壊防止効果という外部効果を考慮すると、エネルギー源としての間伐残材価格は約16%安く見積もられる。

(4) ガス化+燃料電池の発電効率が25%の場合、設備コストが17万円/kW程度以上であれば、愛知県内で発生する全ての間伐残材について、輸送費用を考慮しても発電コストは石炭火力における混焼の方が安い。

(5) 愛知県内の大部分の間伐残材に関してはRPS法施行下における新エネルギー等の発電電力取引価格に対して経済的に有利である。

今後は、森林管理による副次的な効果として表層崩壊防止以外の効果も定量化し、木質系バイオマスの最適エネルギー利用について検討を行う必要があると考える。また、

RPS法施行下における新エネルギー等の発電電力取引価格の分布を調査し、RPS対策としてのバイオマス混焼の利用可能性を検討する予定である。

(平成17年2月22日受付、平成17年6月6日再受付)

文 献

- (1) 農林水産省 Web site: <http://www.maff.go.jp/toukei/sokuhou/data/seizai2002/seizai2002.pdf>
- (2) 伊神裕司・村田光司:「製材工場における木質残材の発生と利用」, 森林総合研究所報告, Vol.2, No.2, pp.111-114 (2003)
- (3) 辻直幸・藤井栄治・安藤努・山吉栄作・船岡正光:「植物資源の活用循環系を創造するための三重県をモデル地域とした検証」, 三重県工業技術総合研究所研究報告, No.24 (2000)
- (4) 農林水産省 Web site: <http://www.tdb.maff.go.jp/toukei/a02smenu2?TokID=D003&TokKbn=B&TokID1=D003B2001-010>
- (5) T. Sano and S. Miura: "A Study on the Use Possibility of Woody Biomass Energy According to an Area", Proc. of 22th JSER, pp.329-334 (2003) (in Japanese)
- (6) 佐野貴司・三浦秀一:「木質バイオマスエネルギーの地域別利用可能性に関する研究」, 第22回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集, pp.329-334 (2003)
- (7) 京都市 Web site: http://www.city.kyoto.jp/kensetu/ryokusei/keikaku/keikaku_frame_7_1.html
- (8) 愛知県農林水産部林務課:平成14年度愛知県林業統計書, p.52 (2003)
- (9) 本多淳裕:バイオマスエネルギー, 省エネルギーセンター (1986)
- (10) 愛知県農林水産部林務課:尾張西三河森林計画変更計画書 (2003)
- (11) 林野庁:平成12年度バイオマス資源の利用手法に関する調査報告書 (2001)
- (12) 新エネルギー・産業技術総合開発機構:バイオマスエネルギー高効率転換技術開発 石炭・木質バイオマス混焼技術の研究開発 (2003)
- (13) 経済産業省資源エネルギー庁電力・ガス事業部:電力需給の概要, p.221 (2002)
- (14) K. Dowaki and S. Mori: "An operating evaluation concerning the biomass gasification cogeneration system", Proc. of 21th JSER, pp.277-282 (2002) (in Japanese)
- (15) 堂脇清志・森俊介:「バイオマスガス化コージェネレーションシステムの運転評価」, 第21回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集, pp.277-282 (2002)
- (16) 電力中央研究所:木質系バイオマス発電技術の動向と実用化に向けた研究課題, 電力中央研究所報告 (2003)
- (17) 岐阜県 Web site: <http://www.pref.gifu.jp/s11548/tyutu/6.htm>
- (18) 省エネルギーセンター:エネルギー・経済統計要覧 (2003)
- (19) 日本治山治水協会:治山事業60年史, 中央公論事業出版 (1973)
- (20) 水利科学研究所:森林経営と保全に関する基礎調査報告書, pp.172-174 (1971)
- (21) 三菱総合研究所:地球環境人間生活にかかわる農業及び森林の多面的な機能の評価に関する調査研究報告書 (2001)
- (22) Office of Utility Technologies, Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. DOE and EPRI: Renewable Energy Technology Characterizations, p.2-42 (1997)
- (23) 溶融炭酸塩型燃料電池発電システム技術研究組合 Web site: <http://www1.ttcn.ne.jp/~MCFC/content5.html>
- (24) RPS法 Web site: <http://www.rps.go.jp>

牧野陽祐 (学生員) 1981年12月6日生。2004年3月名古屋大学工学部電気電子工学科卒業。同年4月名古屋大学大学院工学研究科電子情報システム専攻電気工学分野博士課程前期課程に進学。現在に至る。木質系バイオマスに関する研究に従事。エネルギー・資源学会会員。

加 藤 丈 佳（正員）1996 年 3 月名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程修了。同年 4 月名古屋大学理工科学総合研究センター助手，現在に至る。2002 年国際応用システム分析研究所研究員。工学博士。超伝導システム，エネルギーシステムに関する研究に従事。エネルギー・資源学会会員。

鈴 置 保 雄（正員）1978 年 3 月名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程修了。同年 4 月名古屋大学工学部助手，同講師，同助教授を経て，1995 年 4 月同大学理工科学総合研究センター教授，2003 年 4 月同大学大学院工学研究科教授，現在に至る。工学博士。主として，電気電子材料，エネルギーシステムに関する研究に従事。IEEE，応用物理学会，高分子学会，エネルギー・資源学会会員。