Original Paper

Relationship between Feedstock Price and Break-Even Point of Woody Biomass Power Generation under FIT Program

Takashi YANAGIDA, Takahiro YOSHIDA, Hirofumi KUBOYAMA, and Masaki JINKAWA

(Received August 19, 2014)

再生可能エネルギー固定価格買取制度を利用した木質バイオマス発電事業における
原料調達価格と損益分岐点の関係

柳田高志, 吉田貴紘, 久保山裕史, 陣川雅樹

In July 2012, the Government of Japan introduced the “Feed-in Tariff (FIT) Program for Renewable Energy Use”. Currently, quite a few woody biomass power plants are under construction in various regions to take advantage of the FIT program. Unutilized forest biomass is expected to use for the fuel in the biomass power generation. However the supply cost, including cutting and transportation costs, of unutilized forest biomass is varied from the geological condition. Decision of the target supply cost depends on the transaction price of biomass at the power plant. The purpose of this study is to provide an information of feedstock cost on brake-even point of the biomass power generation. Electricity production cost of biomass power generation is estimated by establishment of cost estimation model. The feedstock cost on break-even point of biomass power generation in the scale range of 500 - 20,000 kW is estimated. These values may help the decision of the target supply cost of the biomass in the forest sector.

2012年7月に再生可能エネルギー固定価格買取制度が施行され、各地に木質バイオマス発電所の計画が相次いでおり、今後、燃料となる間伐材や林地残材の利用促進が期待されている。しかしながら、間伐材や林地残材の搬出は地域差や条件により費用が大きく異なるため、発電所の原料受入価格の目安を基に供給費用の目標値を設定し、搬出の可否を判断するのが望ましい。そこで、本研究では、森林における間伐材や林地残材等の未利用木質バイオマスの供給コストの目標値設定に資する情報を提供することを目的とする。まず、500 kW ~ 20,000 kW 規模のバイオマス発電を対象に、内閣官房国家戦略室コスト等検証委員会の発電コスト試算シートをベースにしたモデルを作成し、バイオマス発電に関するデータを組み込み、発電コスト等の試算検討を行った。その上で、発電規模、原料含水率を変数としたときの発電事業の損益分岐点にある原料コストを整理した。森林の未利用バイオマスの供給コストに関する限界の指標の一つを提示できたと考える。

Key Words

Forest biomass, Power generation, FIT, Supply cost, Break-even point

1. はじめに

国内では2012年7月に再生可能エネルギー固定価格買取制度(Feed-In Tariff, FIT)が施行して2年が経過した。そのFITにおける買取価格¹⁾は、木質系バイオマスを4種類に分類しており(Table 1)、その中でも特に間伐材等の未利用木材については32円/kWh(税別)と設定され、価格優遇策がとられている。これによって、現在供給コストの問題を抱えている間伐材や林地残材の利用促進が期待されている。

事実、日本各地に木質バイオマス発電所の計画が相次いでおり、資源エネルギー庁の公表資料¹⁾によると、2014年3月までに認定された木質バイオマス発電(「一般廃棄物、その他のバイオマス」は除く)は全国で60件(計126万kW)に上る。稼働中の発電所¹⁾は、「間伐材等由来の木質バイオマス」および「一般木質バイオマス」に分類される発電所は5件あり、福島県5,700kW、栃木県265kW、長野県1,500kW、大分県5,700kW、高知県29,500kWである。これら以外

Forest and Forestry Products Research Institute
1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan

独立行政法人森林総合研究所
〒305-8687 茨城県つくば市松の里1

Table 1 Electricity price in feed-in tariff for woody biomass

Classification	Price[JPY/kWh]
Unutilized forest biomass (ex. Thinned wood, forest residue)	32
General wood (ex. saw mill residue, PKS)	24
Demolition wood	13
Waste (ex. pruned branch)	17

の現在までに稼働している発電所は岩手県 5,700 kW²⁾ が挙げられ、以上の稼働している発電所の合計出力は 5 万 kW 以下と少ない。このように、現状として、未利用バイオマスを活用する発電所の稼働状況はまだわずか^{3) 4)}ではあるが、2015 年末までに多数のバイオマス発電が新たに稼働することが予想されている。計画中の木質バイオマス発電は、約 4 割が 5,000 ~ 10,000 kW 規模で、その多くが未利用木材を燃料とすることを想定している³⁾。このような状況下で、建設計画が集中している地域では、原料の調達範囲の競合などから原料の安定供給とその価格安定性が不安視されており、どのように既存のチップ消費者および新設発電所間で原料面の共存を図っていくかが課題となっている⁴⁾。一方、未利用バイオマスの供給側は、これまで採算が合わずに搬出できなかった間伐材や林地残材の受け皿ができたことで、搬出の準備を始めており、木材破砕機やチップ製造機を購入し供給体制を整えつつある⁵⁾。ただし、発電サイトでの原料受入価格に上限があるのも事実であり、未利用バイオマスの搬出からチップ製造に掛ける費用がこの価格を下回ることが前提となることから、ある程度の目標値を設定して供給体制を整えることが望ましい。しかしながら、このバイオマス原料の価格には注意が必要である。未利用バイオマスを原料とした木質バイオマス発電のサプライチェーンにおける取引単位は異なっており (Fig. 1)、特に、木質チップの取引では同じ質量のバイオマスでも含水率の違いにより価格が異なる。なぜなら、生材由来の木質チップは水を多く含んでいるので、乾燥の度合いによって単位重量当たりの発熱量が大きく異なるからである。このように発電サイトへの供給段階において熱量的に不安定な品質の木質バイオマスの規格の統一化は図られておらず、発電事業者が個別に対応しているのが現状であり、バイオマスの供給側にとっても価格がわかり

にくいものになっている。そのため、原料供給側から搬出コストの目安に関する要望が挙げられている。その一例⁶⁾を挙げると、「木質バイオマス発電所の収益と収支の概算金額が把握できる早見表や、チップや原木の受入価格を逆算試算できるマニュアル等の整備」等がある。これまで、バイオマス発電に関する研究は数多く報告^{7) ~ 14)}されているが、木質バイオマス発電の損益分岐点にある原料価格について整理した報告はされていない。損益分岐点にある原料価格は、原木の調達コストの目安を算定する指標となり得ると考えられる。これらの問題を解決するためには、上述のように、未利用木質バイオマスの含水率と発電コストの関係についての整理が不可欠である。そこで、本研究では、森林における未利用木質バイオマスの搬出量と供給コストの目標値設定に資するための、原料含水率を考慮した基礎情報を提供することを目的として、木質バイオマスの価格と発電コストについて検討する。まず、500 kW ~ 20,000 kW 規模のバイオマス発電事業において原料含水率の違いを考慮した原料消費量を整理し、それを基に原料価格を固定したときの発電規模の違いを考慮した発電コスト試算を行う。また、原料価格を変動させ、事業の収入と支出が均衡して利益のない状態の点、すなわち損益分岐点を明らかにすることは極めて重要である。なぜなら、原料価格の上昇に伴い、損益分岐点から支出増加側の領域に移行した場合、発電事業が困難になるからである。そこで、本研究では、発電事業の損益分岐点にある原料価格を明らかにすることを目的とする。

2. 未利用木質バイオマスを用いた木質バイオマス発電システム

本研究で検討する発電システムの境界領域は、燃料としての木質チップの受け入れから系統への電力供給までとする (Fig. 2)。木質チップの原料は未利用木質バイオマスとして間伐材と林地残材を想定する。発電は、木質チップをボイラーに供給し、蒸気を発生させ、その蒸気でタービンを回転させ、発電する方式を想定する。ここで生産される発電量を総発電量 (E_{gross}) とし、この発電出力の大きさを発電規模と定義する。この総発電量から所内率分 (E_{auxi}) を差し引いたものを正味発電量 (E_{net}) とし、この E_{net} 全量を系統に供給し売電する。木質チップに含まれる灰はボイラーから回収され廃棄処理される。実際の発電では、FIT 上で買取価格

Fig. 1 The difference of trading unit on the supply chain of biomass power generation

Fig. 2 System flow diagram of biomass power generation using unutilized forest biomass

の異なる原料を組み合わせる燃料とするケースもある²⁾。他方、発電のシステムも排熱を有効に利用する熱電併給が事業性の観点から重要であるといわれている¹⁵⁾。このように、異なる燃料の組合せやシステムも想定されるが、それらについては今後の課題とし、本研究では、未利用木質バイオマスを用いて電気のみを生産するシステムについて検討する。

3. プロセスの基本データ

3.1 燃料（木質チップ）の組成

実際のバイオマス発電は、樹種や部位の異なる原料が使用されると考えられ、それらの化学組成は異なる。しかしながら、熱化学変換である燃焼においては、元素組成や発熱量が重要であり、それらは比較的均一である。ここでは、木質バイオマスの高位発熱量を 18 MJ/kg、灰分率を 1.0% と仮定した。ただし、燃料に含まれる水分に大きく影響される低位発熱量は発電コストに対して影響力の高い要因となるので、ここではベースケースとしての値を設定し、4.3 節の感度分析でばらつきの影響について検証する。ベースケースの値は、燃料に含まれる含水率（湿潤基準 Wet basis: W.B., 以下、

含水率は W.B. とする）を 40% と設定し、高位発熱量から式 (1)¹⁶⁾ を用いて低位発熱量に変換した。

$$\text{LHV} = \text{HHV} \cdot (1 - \text{MC}/100) - 2.443 \cdot (9 \cdot \text{HC}/100 \cdot (1 - \text{MC}/100) + \text{MC}/100) \quad (1)$$

ここで、LHV, HHV, MC, HC は、それぞれ燃料の低位発熱量 [MJ/kg], 高位発熱量 [MJ/kg], 含水率 [%] および水素含有率 [%] である。水素含有率は 6% と仮定した。

3.2 発電効率、所内率

木質バイオマス発電において、発電効率は発電規模と強い相関がある。本研究では、木質バイオマス発電に関するヒアリングおよび文献^{17) 18)} からデータを収集し (Table 2, Fig. 3)、発電規模と発電端効率（以下、発電効率とする）の相関関係式 (2) を導出した。

$$\eta = 5.762 \ln(PS) - 26.65 \quad R^2 = 0.93 \quad (2)$$

ここで、 η , PS はそれぞれ発電効率および発電規模である。発電効率 η は投入したバイオマスのエネルギー量に対して得られた電気のエネルギー量の割合で、この式中での単位は % である。発電規模 PS の単位は kW である。

Table 2 Data list of woody biomass power generation plant

Power plant (location)	Plant scale; kW	Power generation efficiency; %	Auxiliary power ratio ; kW/kW	Construction year
A (Fukushima)	11,500	27		2006
B (Ibaraki)	4,900	22.47		2005
C (Niigata)	50,000	35		2005
D (Toyama)	990	12.1		2007
E (Gifu)	600	11.2		2003
F (Hiroshima)	2,000	12.5		1985
G (Yamaguchi)	10,000	29	0.12	2006
H (Oita)	12,000	27	0.15	2006
I (Fukushima)	5,700	26	0.13	2012
J (Nagano)	1,300	16	0.15	2005
K: manufacture's data	3,550	20	0.18	
L: manufacture's data	6,250	25	0.12	
N: manufacture's data	20,000	28.7	0.10

Fig. 3 Power generation efficiency of biomass power plant

Fig. 5 Construction cost of biomass power plant

Fig. 4 The auxiliary power ratio of biomass power plant

Fig. 6 Utility cost of biomass power plant

所内率についても、ヒアリングおよび文献値^{17) 18)}から発電規模と所内率の関係を整理 (Table 2, Fig. 4) し、相関式 (3) を導出した。

$$AP = 0.1505 \exp(-1.841 \cdot 10^{-5} \cdot PS) \quad R^2 = 0.31 \quad (3)$$

ここでの、 AP 、 PS はそれぞれ所内率および発電規模である。は所内率 AP は発電した電力のうち発電所内の設備で消費される電力量の割合で、この式中での単位は%である。発電規模 PS の単位は kW である。

4. コストの試算方法と前提条件

国内のバイオマス発電プラントの規模は 500 ~ 50,000 kW と様々であり、そのうち 5,000 ~ 10,000 kW の規模が約 4 割を占める³⁾。最大規模の 75,000 kW になると、燃料は未利用木質バイオマスの他に海外からのパーム椰子殻 (Palm kernel Shell : PKS) や石炭を混合する方式になる¹⁹⁾。未利用木質バイオマスのみを燃料とする発電プラントは、燃料供給量が制限要因となり、発電出力 20,000 kW 以上の大規模発電は見当たらない。本研究では、未利用木質バイオマス専焼発電について検討する目的から、発電規模を 500 ~ 20,000 kW の範囲に設定した。発電プラントの建設費については、ヒアリングおよび文献値^{17) 18)}から発電規模と建設費の関係を整理 (Fig. 5) し、相関式 (4) を導出した。

$$PC = 0.0835 \cdot (PS)^{0.6763} \quad R^2 = 0.89 \quad (4)$$

ここでの、 PC 、 PS はそれぞれプラント建設費および発電規模である。プラント建設費 PC の単位は億円、規模 PS の単

位は kW である。

発電に使用する薬品や水道等に関する費用をユーティリティ費とし、ヒアリングから得られたデータ (Fig. 6) を整理し、推算式 (5) を導出した。

$$I = 3,823 \cdot (PS) + 10,281,107 \quad R^2 = 0.75 \quad (5)$$

ここでの I 、 PS はそれぞれユーティリティ費および発電規模である。ユーティリティ費 I は年間あたりの費用で単位は円/年である。発電規模の単位は kW である。

発電コストは、発電事業に関わる総費用を発電電力量で除して求めた。発電コストの試算式を式 (6) に示す。

$$\begin{aligned} \text{EPC [JPY/kWh]} \\ = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i + B_i + C_i + D_i + E_i + F_i + G_i + H_i + I_i + J_i)}{\sum_{i=1}^n K_i} \end{aligned} \quad (6)$$

ここでの EPC 、 A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 、 G 、 H 、 I 、 J 、および K は、それぞれ発電コスト、燃料費、減価償却費、固定資産税、人件費、保守・点検費、保険費、一般管理費、灰処理費、ユーティリティ費、利子返済費および発電量である。

本研究における発電コストの試算は、内閣官房国家戦略室コスト等検証委員会の発電コスト試算シート²⁰⁾をベースに、上記の式 (1-5) の組み込み、ならびに、一般管理費、保険費、灰処理費、ユーティリティ費、借入金利子返済費の項目を追加する方法で行った。各項目の試算方法ならびに設定条件を Table 3 に示す。発電事業のプロジェクト期間は、FIT での買取期間を想定し、20 年間とした。なお、式 (6) における

Table 3 Cost component of electricity production cost

	Cost component	Factor and setting conditions
EPC	Electricity production cost	$\sum_{i=1}^n (A_i + B_i + C_i + D_i + E_i + F_i + G_i + H_i + I_i + J_i) / \sum_{i=1}^n K_i$
A_i	Feedstock cost [JPY/year]	$A = FC \cdot FP$
B_i	Depreciation cost [JPY/year]	$B = (PC / DP)$
C_i	Fixed property tax cost for plant [JPY/year] (Amounts are rounded down to the nearest 100 JPY)	$C = RV \cdot FT / 100$
D_i	Labor cost [JPY/year]	$D = OP \cdot LF$
E_i	Maintenance cost [JPY/year]	$E = PC \cdot 0.03$
F_i	Insurance cost [JPY/year]	$F = PC \cdot 0.004$
G_i	General administrative cost [JPY/year]	$G = D \cdot 0.25$
H_i	Ash disposal cost [JPY/year]	$H = AG \cdot AF$
I_i	Utility cost [JPY/year]	$I = 3,823 \cdot (PS) + 10,281,107$ eq.(5), Fig. 6
J_i	Repayment of debt [JPY/year]	$J = ((PC - (PC / RP) \cdot (n-1)) \cdot (r/100))$
K_i	Electricity production amount [JPY/year]	$J = PS \cdot (1 - AP/100) \cdot OH$
n_p	Project period [years]	20 years as purchase period on FIT program
PS	Plant scale (generating-end output) [kW]	Range from 500 to 20,000 kW
PC	Plant construction cost [x 10 ⁸ JPY]	$PC = 0.0835 \cdot (PS)0.6763$ eq.(4), Fig. 5
DP	Depreciation period [years]	15 years
RP	Repayment period	15 years repayment with principal equal method
r	Interest [%]	3
η	Power generation efficiency (generating-end output, LHV basis) [%]	$\eta = 5.762 \ln(PS) - 26.65$ eq.(2), Fig. 3
AP	Auxiliary power ratio [%]	$AP = 0.1505 \exp(-1.841 \cdot 10^{-5} \cdot PS)$ eq.(3), Fig. 4
$Enet$	Net electricity generation [%]	$Enet = PS \cdot (1 - AP)$
OH	Annual operating hours [hours/year]	$330 [\text{days/year}] \cdot 24 [\text{hours/day}] = 7,920$
LHV	LHV of feedstock [MJ/kg]	$LHV = HHV \cdot (1 - MC/100) - 2.443 \cdot (9 \cdot HC/100 \cdot (1 - MC/100) + MC/100)$
HHV	HHV of feedstock [MJ/kg]	18
MC	Moisture content of feedstock [%, wet basis]	Range from 20 to 50
HC	Hydrogen content of feedstock [%, dry basis]	6
AC	Ash content of feedstock [%, dry basis]	1
FC	Feedstock consumption [tons/year]	$FC = (PS \cdot OH \cdot 3.6 [\text{MJ/kWh}]) / (\eta / 100) / LHV / 1,000$
FP	Feedstock price [JPY/ton]	12,000 (as base case)
UT	Statutory useful time [years]	15 years
FT	Fixed property tax rate [%]	1.4
RV	Ratable value [JPY] (Amounts are rounded down to the nearest 1,000 JPY)	Previous year's $RV \cdot (1 - DR)$ (*Only first year of the project: $PC \cdot (1 - DR/2)$)
DR	Depreciation rate	0.142 as UT is 15 years
OP	Number of operators [person] ²¹⁾	Range from 200 to 1,000 kW: $OP_{200-1,000 \text{ kW}} = 0.005Enet$ Range from 1,000 to 10,000 kW: $OP_{1,000-10,000 \text{ kW}} = 0.000778Enet + 4.222$ Range from 10,000 to 20,000 kW: $OP_{10,000-20,000 \text{ kW}} = 12$
LF	Labor fee [JPY/person/year]	5,000,000
AG	Ash generation amount [tons/year]	$AG = FC \cdot (1 - (MC/100)) \cdot (AC/100)$
AF	Ash disposal fee [JPY/ton]	20,000

発電電力量は Fig. 2 における正味発電量 ($Enet$) である。プラントの建設費は全額借り入れると仮定し、補助金はなしとした。この建設費は、法定耐用年数で減価償却すると仮定し、その費用を減価償却費とした。借入返済に係わる利息分を金利返済費として計上した。人件費は、運転要員数とその単価の積で算出しているが、運転要員数は報告書²¹⁾で提案されている算出式を用いて試算した。運転要員以外の人件費は、一般管理費に組み込むこととした。木質バイオマスの燃

焼に伴い発生する灰の処理費用として、20,000 円 / t を想定した。

5. 結果と考察

5.1 バイオマス発電に必要な木質バイオマス量

木質バイオマス発電の燃料必要量を Table 3 の FC の式を用いて試算した。結果を Fig. 7 に示す。たとえば、5,000 kW 規模の場合、含水率 40% の木質バイオマスを燃料とすると、

Fig. 7 Annual biomass consumption at biomass power plant

年間に必要なバイオマスは約 7.0 万 t-wet と推計される。森林の原木丸太消費量は、実際の発電所で用いられるバイオマスの樹種や産地の違い、含水率による誤差があるため精確な推計は難しいが、全乾重量と全乾密度（スギ 0.40 g/cm³ を用いた²²⁾）から原木丸太の材積を試算すると、約 10.5 万 m³ となる。この消費量は県単位の素材生産量に匹敵する量である。平成 24 年木材需給報告書²³⁾によると、新潟県、石川県、福井県、愛知県、佐賀県、長崎県の素材生産量がそれぞれ約 9～13 万 m³ であることから、バイオマス発電が地域の林業に与える影響の大きさが実感できる。FIT は 20 年間の買取保証であるため、バイオマス発電プラントの設置にあたっては 20 年以上にわたって原料を安定供給する持続性を担保しなければならない。そのため、バイオマス発電が過密な地域では原料の使用量を減らす工夫も重要である。Fig. 7 より、原料の含水率の違いは、原木の消費量に大きく影響する。たとえば、含水率 50% の原料を 30% まで乾燥させてからボイラーで燃焼させることで、森林の原木消費は約 1 割削減できる。バイオマスの低コスト乾燥化技術はそのための重要な鍵となるであろう。

5.2 発電コスト

木質バイオマス発電の原料としての未利用バイオマスは、間伐材や林地残材などの種類があり、山林の地形や搬出システムの違いにより搬出コストが様々である。ここではその作業コストの一例を示す。Kamimura ら²⁴⁾ は、間伐材のチップ化におけるプロセスコストとして、作業道までの木寄せ、搬出、チップ加工をそれぞれ 4,286, 3,660, 3,532 円 /

t-wet としている。これらに輸送費を上乗せすると、間伐材を伐採して発電サイトまで輸送したときの木質チップの価格、すなわち発電サイトにおける原料コストは、少なく見積もっても約 12,000 円 /t-wet と推定される。これは、調達価格等算定委員会の報告書³⁾の価格と同水準になっている。そこで、原料価格を 12,000 円 /t-wet、および、その前後として、それぞれ 10,000 円 /t-wet と 14,000 円 /t-wet とした場合の発電コストを試算した。なお、ここでの原料含水率は 40% と仮定した。Fig. 8 に試算結果を示す。発電コストは発電規模が大きくなるにつれ低減され、いわゆる規模の経済が顕著に現れている。本検討の未利用木質バイオマスの電力買取価格は 32 円 /kWh なので、発電コストがこの価格を下回る場合に採算がとれることになる。バイオマス発電は発電規模 5,000 kW 以上でないと採算がとれないといわれており²⁵⁾、本検討では発電コストの項目を増やして試算しているために、その追加分が増加しているが、同水準の結果が得られた。小規模な発電は、発電コストが売電コストを上回ってしまい、たとえば、500 kW 規模の発電コストは、売電価格 32 円 /kWh の 2.4～3.1 倍となった。小規模で事業をおこなうには、格安で燃料が入手出来るルートを確保することや、熱利用等の副次的な収入源が必要と思われる。

発電コストの内訳について、それぞれの項目が占める割合を Table 4 に示す。原料費は発電コストの約 6 割以上を占めており、最も大きな要因である。原料費は原料調達価格と原料消費量の積で構成されているので、これらに関わる要因を見直すことで経済性の向上に効果がある。原料調達価格の削減ならびに発電効率の改善は事業性の向上に大きく寄与することが示唆された。久保山¹⁵⁾は、原料調達の低コスト化方策として、林業連携型の林地残材供給、全木集材の拡大、土場におけるチップ化、チップトラックやチップトラクターによる高効率チップ生産、の 4 点を提案している。こうした方策を進めることで、林地残材を 7,000 [円 /t-wet] 程度で供給できるとしている。このように、高性能林業機械の導入と収集運搬体系のシステム改善により、地域全体における生産体制の効率化を進めることが重要であると考えられる。また、原料の累積生産量が n 倍に増加すれば単位あたりの生産費用が n^a 倍 ($-1 < a < 0$) になる学習効果が現れるといわれている。Junginger²⁶⁾ ²⁷⁾ は学習曲線²⁸⁾を用いた木質燃料サプライチェーンの分析を行っており、この中でスウェーデンにおける 1975 年から 2003 年の木質チップ等の価格の調査をおこない、累積生産量が 2 倍になるごとに、価格が 0.85 倍になることを報告している。あくまでも、原料調達の価格は、需要と供給のバランスにより大きく影響されるので、必ずしも原料の累積生産量が増えたからといって市場の価格が下がるとはいえないが、累積生産量の増加による原料の伐採・搬出・チップ化作業の効率化は図られると考えられる。他方、エネルギー効率の改善も重要である。生産するエネルギーが発電のみの場合は、発電効率と言い換えてもよいが、式 (2) より試算される 500 kW の発電効率は 9.2% であり、バイオマス燃料のもつ発熱量のうち 9.2% しか電気に変換され

Fig. 8 Electricity production cost (Note: a) Moisture content of feedstock as 40%)

Table 4 proportion of the breakdown of electricity generation costs

	Minimum [%]	Maximum [%]
Feedstock (Fuel) cost	64.0	76.6
Depreciation cost	8.5	12.6
Fixed property tax	0.9	1.3
Labor cost	1.6	5.7
Maintenance cost	5.0	7.4
Insurance cost	0.7	1.0
General administrative cost	0.4	1.4
Ash disposal cost	0.6	0.8
Utility cost	2.2	4.6
Repayment for interest on borrowing	2.3	3.4

ず、残りの9割以上は熱として捨てられることを意味している。FIT先進国のドイツでは、木質バイオマス発電は熱電併給（CHP）が前提となっているので、発電により併産される排熱も利用され、エネルギーの総合効率が高いエネルギーシステムが普及している。さらに、ドイツでは、水蒸気の代わりに、水よりも低沸点で沸騰するフロン等を用いてタービンを回すORC（Organic Rankine Cycle）発電方式が普及しており、この方式だと発電出力が500 kW程度でも発電効率は15%以上と高い¹⁵⁾。国内の木質バイオマス発電も、今後は、排熱の需要を確保し、熱電併給システムを導入したバイオマスエネルギーの高度利用に向けた取り組みが重要である。

さて、発電コストの内訳で燃料費に次いで大きな項目は、設備の減価償却費、修繕費、人件費、ユーティリティ費と

なる。減価償却費は発電規模が大きくなれば、発電コスト当たりの費用は小さくなる。たとえば、5,000 kWのプラントの減価償却費は3.9円/kWhであり、20,000 kWのそれは2.4円/kWhである。ただし、規模が大きくなるにつれて電力生産単位当たりの設備費用や修繕費は低減する一方で、バイオマス燃料の必要量は増加（Fig. 7）し、それに伴って集荷圏が拡大するため輸送コストがかさむので電力生産単位当たりの原料費は増加する。同様に、大規模になると持続的に燃料を確保するためのリスクが増加する。バイオマス発電の建設にあたっては、地域の資源量調査を十分に行った上で、設備費用の規模効果と燃料調達における輸送コストのバランスを踏まえてプラントの最適規模を決定することが重要である。

灰の処理費用の試算にあたっては、バイオマス中の灰分率1% -dry wt, 灰の処理単価20,000円/tと仮定しているが、発電コストに占める灰の処理費用は1%以下となり、相対的に小さいことが明らかとなった。また、灰は用途開拓ができれば無償で引き取られる可能性もある。

5.3 感度分析

本節では、5.2節での結果を踏まえて、その信頼性についての分析を行う。Table 5には、それぞれの要因が変化した場合の発電コストへの影響（要因別感度分析）について検討した結果を示す。各要因の変動幅は、基本ケースの値の±20%をした。ただし、稼働日数のみ±5%とした。基本ケースとは、4.3節Fig. 8の発電コストの試算に用いた前提条件である。原料の含水率と発電効率の変動に対する発電コス

Table 5 Change of cost with varying input data

	Variation	Change of cost / base cost ^{b)}
Moisture content of feedstock	80 - 120 % ^{a)}	0.89 - 1.16
Power generation efficiency	80 - 120 %	0.87 - 1.19
Auxiliary power ratio	80 - 120 %	0.97 - 1.04
Annual operation days	95 - 105 %	0.98 - 1.02
Construction cost	80 - 120 %	0.95 - 1.05
Labor cost	80 - 120 %	0.99 - 1.01
Utility cost	80 - 120 %	0.99 - 1.01

Note: a) 100% is equal to no variation. b) Base cost is the electricity production cost as shown Fig. 8.

トへの影響は大きく、原料含水率が40%から48%になった場合には発電コストは16%増加することが明らかとなった。また、発電効率が前提条件(式(2))で試算されるよりも20%低下した場合には、発電コストが19%増加することがわかった。それ以外の要因については、相対的に小さく、変動の影響は少ないといえる。

5.4 損益分岐点における燃料価格と発電規模の関係

原料価格を変化させ、各発電規模における事業収支を試算した。その結果の一例を Fig. 9 に示す。この図の縦軸は経営収支を発電量で除した値で kWh あたりの収入と支出のバランスを表している。この縦軸が 0.0 円 / kWh の点は、利益も損失も出ない点で損益分岐点という。この点に対応する横軸の接点は原料の支払額限界点を示している。原料価格がこの点を超えると、経営収支は赤字となる。支払額限界点の求め方は、図中の関係式の切片を傾きで除した値となる。この場合は、13,730 円 / 生・トンと試算される。このようにして、発電規模と原料含水率を変化させ、損益分岐点上にある原料価格を算出した。Fig. 10 には、各発電規模における損益分岐点上の原料価格を燃料含水率の違いごとにプロットしたグラフを示す。伐採時の間伐材や、林地残材の含水率はスギの場合 55 ~ 60% といわれているので、発電所での燃焼段階ではその含水率が低下し、最大でも 50% 程度から十分に乾燥された 30 ~ 40% の木質チップが原料(燃料)として使用されるので、ここでは原料含水率を 50% から 20% までの範囲について試算した。任意の発電規模と原料含水率における縦軸交点をみることで、損益分岐点上の原料価格を確認することができる。たとえば、発電規模 5,000 kW、原料含水率 30% の場合には、損益分岐点上の原料価格は約 12,500 円 / t-wet となる。ただし、ここに示す原料価格は、損益分岐点上のものなので、発電所側の利益を考慮すると実際の原料価格はこの値以下になること、さらに、この試算には 4.3 節のばらつきがあることに注意されたい。供給側は森林からの木質バイオマスの搬出・チップ化コストの目標値を、最低でも損益分岐点上の燃料調達価格以下に設定する必要がある。木質バイオマス発電の持続的な運営と林業の活性化のために、FIT を上手く活用しバイオマスの供給側、

Fig. 9 Relationship between the balance of income and expenditure and feedstock supply price

Fig. 10 Relationship between feedstock supply price on the break-even point and plant scale of the biomass power generation under FIT program

需要側が連携して双方に経済的な利益が生まれるポイントを見いだしていくことが重要である。

6. おわりに

本研究は、未利用木質バイオマスを燃料とした発電事業において、原料供給コストの目標設定に資する情報を提供することを目的とし、発電コストと原料価格に関する関係性を明らかにした。まず、木質バイオマス発電のコスト試算モデルを作成し、500 kW ~ 20,000 kW 規模の発電事業に関する検討を行った。発電コストに占める各要素の割合を定量的に示し、原料コストが6割以上であることを明らかにした。さらに、コスト試算に関する精度について感度分析を実施し、その結果を踏まえた上で、各発電規模における事業の損益分岐点にある原料価格を明らかにした。森林の未利用バイオマスの供給コストに関する限界の指標の一つを提示できたと考える。バイオマス発電の基本は、総合効率の高い熱電併給システムを地域に分散させることであると考えられるので、今後は熱の利用に関する議論が必要であると考えられる。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、森林総合研究所の多くの関係者に大変有意義なご意見を頂いた。また、本研究は、森林総合研究所運営交付金プロジェクト（D1P06 木質バイオマスエネルギー事業支援システムの開発）の一環として行われた。ここに記して謝意を表する。

文 献：References

- Agency for natural resources and Energy, Ministry of Economy, Trade and Industry, http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/kakaku.html (Last access: 2014.6.23) : 経済産業省資源エネルギー庁, http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/kakaku.html (Last access: 2014.6.23)
- Ando, N., *Norin Kinyuu*, **67**(1), 2-16(2004) : 安藤範親, 農林金融, **67**(1), 2-16 (2004)
- Committee of the price estimation, Ministry of Economy, Trade and Industry, http://www.meti.go.jp/committee/chotatsu_kakaku/pdf/report_003_01_00.pdf (Last access: 2014.6.23) : 調達価格等算定委員会, 経済産業省, http://www.meti.go.jp/committee/chotatsu_kakaku/pdf/report_003_01_00.pdf (Last access: 2014.6.23)
- E-Contecture The May issue 2014, NIPPO CO., LTD., p.16 (2014) : イー・コンテクチャー 2014 年 5 月号, 日報ビジネス株式会社, p.16 (2014)
- Mokuzai Kenzai Weekly (magazine for Building Materials) No. 1978, Japan forest products journal co., ltd., (2014):木材建材ウイクリー No.1978, 日刊木材新聞社, (2014)
- Forestry agency, Ministry of agriculture, Forestry and Fisheries, http://www.rinya.maff.go.jp/j/riyou/biomass/hatudenriyou_guideline.html (Last access: 2014.6.23) : 林野庁, http://www.rinya.maff.go.jp/j/riyou/biomass/hatudenriyou_guideline.html
- Mokuzai Kenzai Weekly (magazine for Building Materials) No. 1971, Japan forest products journal co., ltd., (2014):木材建材ウイクリー No.1971, 日刊木材新聞社, (2014)
- Dornburg, V.; Faaij, A. P. C., *Biomass Bioenerg.*, **21**, 91-108 (2001)
- Hara, T.; Shinguu, H.; Katada, M.; Yoshikawa, K.; Min, T.; Namioka, T.; Matsubara, H., *J. Jpn. Inst. Energy*, **83**, 815-820 (2004) : 原勉, 新宮宏昭, 片田正弘, 吉川邦夫, ミンテジン, 波岡知昭, 松原弘直, 日エネ誌, **83**, 815-820 (2004)
- Kubo, K.; Nakata, T., *J. Jpn. Inst. Energy*, **83**, 1013-1020 (2004) : 久保一雄, 中田俊彦, 日エネ誌, **83**, 1013-1020 (2004)
- Caputo, A. C.; Palumbo, M.; Pelagagge, P. M.; Scacchia, F., *Biomass Bioenerg.*, **28**, 35-51 (2005)
- Kurihara, S.; Uto, R.; Aoki, Y., *J. Jpn. Inst. Energy*, **88**, 310-325 (2009) : 栗原史郎, 宇都隆一, 青木頼幸, 日エネ誌, **88**, 310-325 (2009)
- Kamimura, K.; Kuboyama, H.; Yamamoto, K., *J. Jpn. Inst. Energy*, **88**, 877-883 (2009) : 上村佳奈, 久保山裕史, 山本幸一, 日エネ誌, **88**, 877-883 (2009)
- Taniguchi, M.; Tanaka, H.; Ito, Y.; Nishiyama, A.; Sasauchi, K., *J. Jpn. Inst. Energy*, **88**, 906-911 (2009) : 谷口美希, 田中秀直, 伊藤嘉文, 西山明雄, 笹内謙一, 日エネ誌, **88**, 906-911 (2009)
- Kuboyama, H., in Outlook study on the forest, forestry and forest industry: Data, theory and simulation, Forestry and forest Products Research Institute, Ed., Japan Forestry Investigation Committee, pp. 73-95 (2012) : 久保山裕史, 改訂 森林・林業・木材産業の将来予測—データ・理論・シミュレーション—, 森林総合研究所編, 日本林業調査会, pp. 73-95 (2012)
- Matsumura, Y., in Biomass Handbook, led, The Japan Institute of Energy, Ed., Ohm-sha, p. 362 (2002) : 松村幸彦, バイオマスハンドブック (第1版), 日本エネルギー学会編, オーム社, p. 362 (2002)
- Kojima, A.; Takahama, H.; Ashizawa, M., CRIEPI Research Rep. No. M07002, <http://criepi.denken.or.jp/jp/kenkikaku/report/detail/M07002.html> (Last access: 2014.06.23) : 小島明弘, 高濱均, 芦澤正美, 電力中央研究所 研究報告 M07002, <http://criepi.denken.or.jp/jp/kenkikaku/report/detail/M07002.html> (Last access: 2014.06.23)
- Kamikawa, K., Mokuzai Jouhou (Nov. 2013) 270, 1-5 (2013) : 上河潔, 木材情報 (2013 年 11 月号), 270, 1-5 (2013)
- Sumitomo Corporation, <http://www.sumitomocorp.co.jp/news/detail/id=27923> (Last access: 2014.08.08) : 住友商事, <http://www.sumitomocorp.co.jp/news/detail/id=27923> (Last access: 2014.08.08)
- National policy unit, Cabinet secretary, http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/policy09/archive02_shisan_sheet.html (Last access: 2014.6.23) : 内閣官房国家戦略室コスト等検証委員会, http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/policy09/archive02_shisan_sheet.html (Last access: 2014.6.23)
- The Japan Institute of Energy Ed, Report of fundamental research on promotion of new energy introduction- Utilization and promotion of biomass energy conversion technology, p. 210 (2002) : 日本エネルギー学会編, 平成 13 年度 新エネルギー等導入促進基礎調査 (バイオマスエネルギーの利用・普及政策に関する調査), p. 210 (2002)
- Forestry and forest Products Research Institute, Ed., Wood Industry Handbook, 4ed, Maruzen, p. 113 (2004) : 森林総合研究所監修, 木材工業ハンドブック改訂4版, 丸

- 善, p. 113 (2004)
- 23) Wood supply and demand report, http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/mokuzai_zyukyu/ (Last access: 2014.8.8): 平成 25 年木材需給報告書, http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/mokuzai_zyukyu/ (Last access: 2014. 8.8)
- 24) Kamimura, K.; Kuboyama, H.; Yamamoto, K., *Biomass Bioenerg.*, **36**, 107-115 (2012)
- 25) Woody Biomass Power Generation Exploratory Committee, <http://www.pref.niigata.lg.jp/rinsei/1356765077247.html> (Last access: 2014.07.01): 木質バイオマス発電等検討委員会, <http://www.pref.niigata.lg.jp/rinsei/1356765077247.html> (Last access: 2014.07.01)
- 26) Junginger, H. M., Doctoral Thesis of Utrecht University 2005, <http://dspace.library.uu.nl/handle/1874/7123> (Last access: 2014.6.23)
- 27) Björheden, R., *Biomass Bioenerg.*, **30**, 289-295 (2006)
- 28) Asano, K., CRIEPI Research Rep. No. Y09020, <http://criepi.denken.or.jp/jp/kenkikaku/report/detail/Y09020.html> (Last access: 2014.06.23): 朝野賢司, 電力中央研究所 研究報告 Y09020, <http://criepi.denken.or.jp/jp/kenkikaku/report/detail/Y09020.html> (Last access: 2014.06.23)
-