



Title	未利用材を利用した日本における木質ペレット製造のエネルギー収支分析
Author(s)	土屋, 陽子; 唐沢, 邦彦; 佐藤, 寿樹; 辻, 宣行
Citation	木材学会誌, 56(6), 427-436 https://doi.org/10.2488/jwrs.56.427
Issue Date	2010
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/45004
Type	article (author version)
File Information	MG56-6_427-436.pdf



[Instructions for use](#)

未利用材を利用した日本における木質ペレット製造のエネルギー収支分析*1

土屋陽子*2、唐沢邦彦*3、佐藤寿樹*4、辻宣行*4

Energy consumption at procurement of wood pellets in Japan

Yooko Tsuchiya, Kunihiko Karasawa, Toshiki Satoh, Tsuji Nobuyuki

木質ペレット製造のエネルギー収支分析

*1本研究の一部は第29回エネルギー・資源学会研究発表会(2010年6月,大阪)において発表した。

*2 電力中央研究所 Central Research Institute of Electric Power Industry, Abiko 270-1194, Japan

*3 株式会社セレス CERES, Inc., Maebashi 371-0241, Japan

*4 北海道大学サステイナビリティ学教育研究センター Hokkaido University Center for Sustainability Science, Sapporo 060-0809, Japan

Domestic unused material wood possesses significant potential as an alternative feedstock to substitute fossil fuel for combustion fuel production. However, fuel conversion from the unused wood is not so advanced due to economic reasons. In this paper, energy consumption of wood pellet procurement was evaluated. The case analysis of three wood pellet factories (CERES, Inc., Hokkaido Date-shi, and Asyoro-cho) and a wood chip factory (CERES, Inc.) was carried out. The percentage of energy content of pellet procurement to output is about 20%, which is a remarkably high percentage compared with overseas pellet procurement. Energy consumption at procurement included manufacturing and operating energy of tree felling and transport, pellet manufacture and pellet distribution, and output energy is given in the calorific value of the supplied pellet. It was found that the ratio of electric power, which affects the operation of the pellet factory, was highest in input energy. In comparison with chip manufacturing, the energy consumption ratio of pellet procurement was slightly lower. For increased energy efficiency, it is necessary to improve domestic wood fuel procurement fundamentally.

Keywords: bio-fuel, wood pellet, gross energy analysis, energy consumption,

未利用バイオマスを利用した木質ペレット製造について、エネルギー収支分析を行った。国内の3つのペレット工場を対象に、木材の伐採、輸送、ペレット製造、ペレット流通を評価範囲として、各工程における設備製造のエネルギーと運転エネルギーから、システム全体のエネルギー消費量を算出した。その結果、製造したペレットの発熱量（出力エネルギー）はペレット製造に係るエネルギー（入力エネルギー）を上回り、エネルギー収支はプラスであることが示された。しかし、出力エネルギーに占める入力エネルギーの割合は16～26%に達し、海外のペレット製造に比べて高い比率であることが明らかになった。入力エネルギーの詳細分析から、木材の調達手段や破碎方法、また乾燥用ボイラー燃料の選択等により、エネルギー消費量は大幅に低減する可能性があると考えられた。しかし、国産ペレットが燃料として競争力を持つためには相当な改善が必要であり、今後、林業の活性化を含めたシステム全体の最適化を図っていく必要がある。

1. 緒言

持続可能な循環型社会の実現に向け、再生可能なバイオマスエネルギーへの期待が高まっている。中でも木質バイオマスは、エネルギー賦存量および利用可能量において十分な量が見込めると考えられることから、民生用ストーブやボイラー、発電用燃料として、実用可能性が高いと言える。国土の7割を森林が占める我が国において、森林資源は豊富に存在する。しかし林業の衰退に伴い木材の伐採、集積、さらに運搬には莫大なコストがかかるため、国内における木質バイオマスの利用はあまり進んでいない。国の施策としても国産のバイオ燃料の利用促進を強力に推し進めているが、林地残材はほとんど利用されていないのが実情である¹⁾。

2003年に施行されたRPS制度に基づき、バイオマス等、新エネルギーの利用が電気事業者にも義務付けられ、電力各社においても、バイオマス混焼発電や太陽光、風力発電等、様々な取り組みでCO₂削減を果たしている。中でも、CO₂排出量の多い石炭火力へのバイオマス混焼は、今後ますます重要性が増すと考えられる。石炭に近い発熱量を維持し、なおかつ、持続的に供給可能なバイオマス燃料の確保は喫緊の課題であると言える。こうした背景から、本研究では、石炭火力への混焼が可能なバイオ燃料として木質ペレットを対象に、エネルギー収支の観点から燃料としての質を評価した。

エネルギーの入出力を評価する手法として、エネルギー収支分析がある^{2,3)}。新たなエネルギーを得るために、どれだけのエネルギー投入が必要かを見積もるもので、エネルギーの価値を評価する上で役立つ。新たなエネルギーを得るために、それを上回るエネルギー投入が必要となる技術開発は、適当な手段とは言えない。また、エネルギーを評価する上では、直接的なエネルギー投入だけでなく、間接的なエネルギー投入も考慮し、そのシステムが社会に対して真にエネルギーを供給しているかを正しく判断する必要がある。よって、入力エネルギーの算出に当たっては、燃料の採掘や輸送、設備の建設、運転、補修など、エネルギーを取り出すために必要な全ての項目を可能な限り考慮する必要がある。

以上の点を踏まえ、木質ペレット製造に伴う入力エネルギーとして、木材の伐採、輸送、ペレット製造、流通を考慮し、各工程で消費されるエネルギー量を算出した。国内の3つの事例を対象にエネルギー収支を評価することで、国内のペレット製造のエネルギー消費を概観するとともに、改善すべき課題の抽出を図った。

2. 方法

分析対象として、国内の自治体等が運営する3つのペレット工場を抽出した。概要をTable 1に記した。生産能力は、国内の自治体等が運営するペレット工場としては平均的な規模である。ペレット原料となる木材の調達手段として、事例1および2では山林からの伐倒を伴い、一方、事例3では木材集積場で発生する残材を利用している。なお、事例1では松食い虫の被害を受けたアカマツの有効利用を目的とするもので、立ち枯れアカマツを原料としている。

事例1を例に、ペレット工場の構成をFig.1に示す。ペレット工場は、主に、木材破碎(①~⑦)、乾燥(⑧~⑫)、ペレット成型(⑬~⑰)から成る。最初に木材を破碎する一次破碎の段階(②)で、事例1では電気を動力とする破碎機を使用しているが、事例2および3では、軽油あるいは重油を燃料とする移動式破碎機を使用している。また、ペレットを製造する上で木材の乾燥は非常に重要な工程であるが、乾燥用ボイラーの燃料に、事例1では端材を、事例2では不良品ペレット、事例3では灯油をそれぞれ利用している。

国内の木質バイオマスの利用では、木材の伐採、集積に係るコストが高いことがしばしば問題となる。また、製品となるペレットの輸送工程もエネルギー消費に影響を与える重要な要因となる。よって計算の範囲は、木材の伐採からペレットの流通までとした(Fig.2)。設備、器具の燃料消費量等、計算に使用した数値は、主に事業者からの聞き取りによるもので、実測値あるいは経験値に基づく。なお、植林等、森林整備に関わる項目については考慮しなかった。また、使用する設備、器具の補修および廃棄に費やすエネルギーについても計上していない。エネルギー量の計算に使用したエネルギー原単位の値を、Table 2に

纏めて記した⁴⁾。

3. 結果

各事例について、事業者への聞き取りに基づき、実際の稼働状況に即した計算条件から、木材伐採 ($E_{\text{木材伐採}}$)、木材輸送 ($E_{\text{木材輸送}}$)、ペレット製造 ($E_{\text{ペレット製造}}$)、ボイラー燃料供給 ($E_{\text{ボイラー燃料}}$)、ペレット流通 ($E_{\text{流通}}$) の各工程について、次の通りエネルギーを算出した。

3.1 事例1のエネルギー収支

3.1.1 木材伐採 ($E_{\text{木材伐採}}$)

木材の伐採は、チェーンソーを使って人力で行い、切り出した木材は、ミニ油圧ショベルを使って輸送用トラックに積載した。

計算条件

- ・チェーンソー使用台数；2台
- ・チェーンソー重量(鉄鋼とみなす)；4.4 kg
- ・チェーンソー燃料；ガソリン
- ・チェーンソー償却年数；20年
- ・ミニ油圧ショベル使用台数；2台
- ・ミニ油圧ショベル重量(乗用車で代用)；2.5 t
- ・ミニ油圧ショベル燃料；軽油
- ・ミニ油圧ショベル償却年数；11年(乗用車の平均使用年数⁵⁾で代用)

チェーンソーの燃料タンク容量は0.42 Lで、1回の燃料投入で平均3本の伐採が可能である。木材の年間処理量は2000本程度であり、さらに、伐採した木材の細断のため、1本あたり10回程度の切断を要する。従って、チェーンソー1台当たりの年間ガソリン使用量は1400 Lとなる。さらに、チェーンの摩耗防止に潤滑油が必要であり、年間700 Lを要する。また、ペレットはマツの幹材部分を利用した全木ペレットであり、枝葉部分を切

り除く必要がある。丸太の年間処理量が 960 t 程度であるのに対し、枝葉の処理量は 320 t であることから、枝葉の切除に必要な燃料エネルギーを丸太の 1/3 とした。

チェーンソー製造のエネルギー

$$=4.4 \text{ kg} \times 25.7 \text{ MJ/kg} \times 1/20 \times 2$$

$$=11.3 \text{ MJ/y}$$

チェーンソー運転のエネルギー

$$=(1400 \text{ L} \times 35.2 \text{ MJ/L} + 700 \text{ L} \times 41.0 \text{ MJ/L}) \times 2 \times 4/3$$

$$=208 \text{ GJ/y}$$

一方、ミニ油圧ショベルについては、一度の燃料供給（軽油 25 L）で 2 トン車 10 台分の積載が可能である。年間の木材処理量から、1 台当たりの燃料使用量は 800 L となる。

これより、ミニ油圧ショベル 2 台の年間の製造及び運転エネルギーは次の通りとなる。

ミニ油圧ショベルの製造エネルギー

$$=2.5 \text{ t} \times 115 \text{ GJ/t} \times 1/11 \times 2$$

$$=52.3 \text{ GJ/y}$$

ミニ油圧ショベルの運転エネルギー

$$=800 \text{ L} \times 38.5 \text{ MJ/L} \times 2$$

$$=61.5 \text{ GJ/y}$$

以上の結果から、木材の伐採に係る入力エネルギーは次式となる。

$E_{\text{木材伐採}}$

=チェーンソー製造のエネルギー+チェーンソー運転のエネルギー+ミニ油圧ショベル製造のエネルギー+ミニ油圧ショベル運転のエネルギー

$$=0.0113+208+52.3+61.5$$

$$=322 \text{ GJ/y}$$

3.1.2 木材輸送 ($E_{\text{木材輸送}}$)

木材伐採地は、ペレット工場から半径 1km 圏内に位置する。伐採地からペレット工場までの木材の輸送は 2 トントラックで行い、1 度に輸送できる丸太重量は 2 t である。ここで、年間の木材処理量 960 t をペレット生産量と仮定した。

計算条件

- ・ 2 トントラック台数 ; 1 台
- ・ 2 トントラック重量 ; 2.3 t
- ・ 2 トントラック燃料 ; 軽油
- ・ 2 トントラック燃費 ; 4.6 km/L
- ・ 2 トントラック償却年数 ; 11 年
- ・ 積載量 ; 2 t

トラック製造のエネルギー

=トラック重量×トラックのエネルギー原単位(自動車で代用)/償却年数

=2.3 t×115 GJ/t×1/11=24.1 GJ/y

トラック運転のエネルギー

=年間木材処理量/1 回の運搬量×距離/燃費×軽油のエネルギー原単位

=960 t/y /2 t×2 km/4.6 km×38.5 MJ/L

=8.04 GJ/y

$E_{\text{木材輸送}}=24.1+8.04=32.1 \text{ GJ/y}$

3.1.3 ペレット製造 ($E_{\text{ペレット製造}}$)

計算条件

- ・ 消費電力 (月) ; 19,517 kWh
- ・ 設備償却年数 ; 20 年 (補修に要するエネルギーは考慮しない)
- ・ 設備重量 (全て鉄鋼とみなす) ; 56.9 t
- ・ 貯木場重量 (コンクリート基礎) ; 414 t

設備製造のエネルギー

= {設備重量(鉄鋼で代用) × 鉄鋼のエネルギー原単位 + コンクリート基礎重量 × コンクリートのエネルギー原単位} / 償却年数

= (56.9 t × 25.7 MJ/kg + 414 t × 0.879 MJ/kg) / 20

= 91.3 GJ/y

運転のエネルギー

= 消費電力(月) × 月/年 × 電気のエネルギー原単位

= 19517 kWh × 12 × 9.42 MJ/kWh

= 2206 GJ/y

$E_{\text{ペレット製造}}$

= 設備製造のエネルギー + 運転のエネルギー

= 91.3 GJ/y + 2206 GJ/y = 2300 GJ/y

3.1.4 ボイラー燃料供給 ($E_{\text{ボイラー燃料}}$)

枝葉は、本来であれば端材として林地に放置される部分であるが、本件では乾燥用ボイラー燃料として利用している。枝葉の切り落としに係るエネルギーは木材伐採工程で計上しているため、ここでは林地からペレット工場までの輸送エネルギーを考慮した。ボイラーへの枝葉供給量は 167 kg/h なので、年間 320 t を消費する。工場への輸送は 2 トントラックを使用し、一度の積載量は 500 kg である。

計算条件

- ・ 年間枝葉供給量 ; 320 t
- ・ 2 トントラック使用台数 ; 1 台
- ・ 積載量 500 kg

その他の条件は前節までと同様。

トラック製造のエネルギー

$$=2.3 \text{ t} \times 115 \text{ GJ/t} \times 1/11$$

$$=24.1 \text{ Gcal/y}$$

トラック運転のエネルギー

$$=320 \text{ t/y} / 0.5 \text{ t} \times 2 \text{ km} / 4.6 \text{ km} \times 38.5 \text{ MJ/L}$$

$$=10.7 \text{ GJ/y}$$

$$E_{\text{ボイラー燃料}} = 24.1 + 10.7 = 34.8 \text{ Gcal/y}$$

3.1.5 ペレット流通 ($E_{\text{流通}}$)

市場へのペレット輸送距離は往復 50 km 圏内であり、4 トントラック 1 台を使用して行った。

計算条件

- ・ 4 トントラック台数 ; 1 台
- ・ 4 トントラック重量 ; 3.9 t
- ・ 4 トントラック燃料 ; 軽油
- ・ 4 トントラック燃費 ; 4.6 km/L
- ・ 4 トントラック償却年数 ; 11 年
- ・ 積載量 ; 2.75 t

トラック製造のエネルギー

$$=3.9 \text{ t} \times 115 \text{ GJ/t} \times 1/11$$

$$=40.8 \text{ GJ/y}$$

トラック運転のエネルギー

$$=960 \text{ t/y} / 2.75 \text{ t} \times 50 \text{ km} / 4.6 \text{ km/L} \times 38.5 \text{ MJ/L}$$

$$=146 \text{ GJ/y}$$

$$E_{\text{ペレット輸送}} = 40.8 + 146 = 187 \text{ GJ/y}$$

3.1.6 出力エネルギー

一方、出力エネルギーは、ペレットの発熱量（高位）18.8 MJ/kg から、次の通り求められる。

E 出力エネルギー

=年間ペレット生産能力×発熱量(高位)

=960 ton/y×18.8 MJ/kg

=18100 GJ/y

3.2 事例 2 のエネルギー収支

前節と同様に、事例 2 についてエネルギー収支を求めた。使用した数値は、事例 1 と同様に、事業者からの聞き取りによるもので、実測値あるいは経験値に基づく。計算根拠となる条件を以下に記す。また、各工程におけるエネルギーの計算結果を Table 3 に纏めて記した。尚、計算の詳細については巻末に Appendix として付記した。

計算条件

- ・ペレット製造能力；2000 ton/年
- ・ペレット発熱量；18.4 MJ/kg
- ・チェーンソー使用台数；2 台
- ・油圧ショベル使用台数；2 台
- ・木材輸送トラック；10 トントラック 2 台使用。輸送密度は 50%。燃料は軽油。年間軽油消費量は 9560L。輸送距離は片道 30 km。
- ・一次破砕機；重量 19.9 ton。償却年数 5 年。燃料は軽油。年間軽油消費量は 8580 L。
- ・ペレット製造プラント；装置総重量 54 ton。償却年数 20 年。年間消費電力は 571000 kWh。
- ・その他構内搬送重機類；総重量 19.4 ton。年間軽油消費量は 20652L。
- ・ペレット流通；輸送距離は往復 100 km 程度。4 トントラック 1 台使用。年間軽油消費量は 7900L。

3.3 事例 3 のエネルギー収支

同様に、事例 3 の計算条件を以下に記す。計算結果については、Table 3 の通りである。

計算条件

- ・ペレット製造能力；650 ton/年
- ・ペレット発熱量；18.7 MJ/kg
- ・木材輸送トラック；10 トントラック 1 台使用。燃料は軽油。年間軽油消費量は 5019 L。
- ・ヤード内前処理；チェーンソー/重量 5 kg。償却年数 20 年。年間ガソリン消費量 296 L。
薪割り機/重量 1 ton。償却年数 10 年。動力は電力であり、ペレット製造の消費電力に含まれる。バックホウ/重量 14.5 ton。償却年数 10 年。燃料は重油。タイヤショベル/重量 6.7 ton。償却年数 10 年。燃料は重油。バックホウとタイヤショベルを併せ年間重油消費量は 1727 L。
- ・一次破砕機；重量 2.1 ton。償却年数 10 年。燃料は重油。年間重油消費量 2955 L。
- ・ペレット製造プラント；装置総重量 47.3 ton。償却年数 20 年。年間消費電力 135000 kWh。
ボイラー灯油消費量 14910 L。
- ・その他構内搬送重機類；フォークリフト/重量 930 kg。償却年数 10 年。年間ガソリン消費量 160 L。タイヤショベル/重量 2780 kg。償却年数 10 年。重油消費量 1142 L。
- ・ペレット流通；輸送距離は往復 100 km 程度。4 トントラック一台使用。年間軽油消費量は 2570L。

その他の条件は前節に同じ。

4. 考察

3 事例のエネルギー収支を纏めて Fig.3 に示した。いずれの事例においても、出力エネルギーであるペレット発熱量が入力エネルギーを上回り、エネルギー収支はプラスであることが示された。

入力エネルギーの内訳について、木材調達では間伐材を利用した事例 2 で入力エネルギー

一が高い値を示した。間伐材は資源として有効に利用されるべきであるが、本事例のようにペレット製造のために山林から切り出した場合、多くのエネルギー消費を招いてしまう。製材需要があり、健全な森林経営がなされている場合には、間伐材は山に放置されることなく、土場等へ搬出される。この段階でペレット原料の調達が可能になれば、エネルギー消費は大幅に低減されると考えられる。このことは、土場残材を利用した事例 3 との比較からも明らかである。尚、事例 1 では、松食い虫の被害を受けた立ち枯れアカマツを有効利用する目的から、ペレット工場はアカマツ林に隣接して立地している。従って、木材の伐採、集積および輸送に係るエネルギーは大幅に低減されている事例と言える。

入力エネルギー内訳で大きな比率を占めるのはペレット製造工程のエネルギーである。よって、この部分のエネルギーをさらに詳しく分析した。生産規模が近く、構成機器が異なる事例 1 と 3 を対象に、ペレット製造エネルギーの内訳を Fig.4 に示した。いずれの事例においても、ペレット製造工程に占める設備製造のエネルギー比率は低く、運転に係るエネルギーが圧倒的に高いことがわかる。その内訳をみると、事例 1 では一次破碎が全運転エネルギーの半分程度を占めている。事例 1 では一次破碎に電力駆動の破碎機を使用しているが、重油を燃料とする移動式破碎機を利用した事例 3 に比べ、著しくエネルギー消費が高いことが窺える。一方、ボイラー燃料に関わるエネルギー消費は低く抑えられている。事例 1 ではボイラー燃料に端材を利用している。ペレットは木材の丸太部分を利用して作られるため、本来、枝葉は不要部分として林地に放置される。事例 1 では、この枝葉を回収してボイラー燃料としている。一方、事例 3 では灯油ボイラーを使用している。年間の灯油消費量は 15,000 L であり、年間 560 GJ のエネルギーが消費されている。さらに、不良品のペレットをボイラー燃料に戻し入れている事例 2 では、年間 1300 GJ のエネルギーが消費されている計算になる。端材をボイラー燃料に利用することで、消費エネルギーの低減が図られる。

1 トン当たりのペレット製造に係る消費エネルギーについて見てきたが、他の化石燃料

と比較する場合、燃料としての質が異なるため、単位生産量当たりの消費エネルギーは意味をなさない。ボイラー燃料等、燃焼燃料として利用する場合には、発熱量が問題となる。そこで、単位発熱量当たりのペレット製造エネルギーを Table 4 に示した。表中、チップに関するエネルギーについては、Fig.1 に示す事例 1 において、一次破碎（①、②）と出荷のための袋詰め工程（⑱、⑲）のみを考慮し、試算した結果である。尚、発熱量や嵩密度については、一次破碎後に得られるチップを分析し、出力エネルギーや輸送エネルギーの算出に用いた。参考までに、海外の評価事例を Table 5 に示した^{6,7)}。デンマークにおけるペレット製造を試算したもので、木材の調達、ペレット製造、ペレット流通を評価範囲としている。表から、国内のペレット製造は、海外のペレット製造に比べ、多くの製造エネルギーが投入されているかことが覗える。同じくデンマークの試算例で、化石燃料について評価した結果を Table 5 に併せて示した。海外の事例においては、木質ペレットは化石燃料に比べてエネルギー収支の面から優位であることが理解できる。一方、国内のペレット製造について言えば、エネルギー収支分析からは、化石燃料に対するペレットあるいはチップ燃料の優位性は見られない。国産ペレットが燃料として競争力を持つためには、相当の改善が必要であると言える。

5. 結論

エネルギー収支分析の結果、出力エネルギーとなるペレット発熱量はペレット製造に係る投入エネルギーを大きく上回り、エネルギー収支がプラスになることから、木質ペレットの燃料としてのポテンシャルは高いと判断された。しかし、海外の事例に比べ、ペレット製造に投入されるエネルギーは非常に高く、改善が必要であることが明らかになった。改善項目として、木材の調達手段やペレット工場の構成、また輸送燃料の低減が挙げられる。ペレット原料となる木材には間伐材や製材屑を利用すべきであるが、製材業等、基幹となる産業が機能していなければ、ペレット原料の調達は非常にエネルギーを消費するものとなる。また、本報のエネルギー収支分析から、木材の破碎方法やボイラー燃料を見直

すことで、エネルギー消費量が低減できることが示された。木材の一次破碎には電力ではなく、灯油や重油を燃料とする破碎機を利用することが、エネルギー消費を抑える上で非常に効果的である。ボイラー燃料には、端材等の未利用資源を積極的に活用すべきである。さらに、輸送にかかる燃料消費も入力エネルギーを増加させる大きな要因となる。木材調達地とペレット工場、さらにペレット消費地を考慮した立地条件の選定についても十分に考慮すべきである。

本報では、地産地消を目的とする比較的小規模な事例を対象としたが、消費エネルギーの低減に向けた課題は、国内の大規模プラントにも通じる。よりエネルギー消費の低いシステムを構築することで、国産ペレット燃料の国際的な競争力が増し、未利用材の利用が進むものと考えられる。

文献

1) Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries:

http://www.maff.go.jp/j/biomass/b_energy/pdf/kakudai01.pdf. Accessed April 7, 2010 (2007).

2) 山田英司, 松井一秋, 芦田譲, 小川紀一郎: エネルギー基本戦略に関する調査報告書, (財) エネルギー総合工学研究所, 17-22 (2005).

3) 内山洋司, 山本博巳: 電中研研究報告 Y90015, 1991.

4) 本藤裕樹: 電中研研究報告 Y95013, 1996.

5) (財) 自動車検査登録情報協会: http://www.airia.or.jp/number/pdf/03_32.pdf. Accessed April 7, 2010 (2009).

6) Hansen, M. T., Jein, A. R., Hayes, S., Bateman, P.: “English Handbook for Wood Pellet Combustion”, National Energy Foucation, Intelligent Energy Europe, 2009 pp72-73.

7) MILJØ & ENERGI MINISTERIET:

http://193.88.185.141/Graphics/Publikationer/Forsyning/Drivhusgasemission_juni_2001.pdf. Accessed March 4, 2010(2001).

Table 1. Outline of pellet plant

	Production capacity	Procurement	Transportation distance of wood	Crushing power or fuel	Boiler fuel
Case 1	960 ton/y	Standing decayed tree	1 km	Electric power	Minor
Case 2	2000 ton/y	Thinning material	30 km	Diesel	Defective pellet
Case 3	650 ton/y	Surplus wood in yard	40 km	Heavy oil	Kerosene

Table 2. Energy requirement factors⁴⁾

Item	Specific energy consumption (Unit)		Type
Electricity	9.42	(MJ/kWh)	Manufacturing
Steel	25.7	(MJ/kg)	Manufacturing
Concrete	0.879	(MJ/kg)	Manufacturing
Gasoline	35.2	(MJ/L)	Calorific value
Diesel	38.5	(MJ/L)	Calorific value
Kerosene	37.3	(MJ/L)	Calorific value
Lubricant	41.0	(MJ/L)	Calorific value
Truck (Car)	115	(GJ/ton)	Manufacturing

Table 3. Energy consumption for each process

	Tree felling	Wood transport	Pellet manufacture	Boiler fuel	Pellet distribution	Total of input energy	Output energy
Case 1	0.34	0.033	2.4	0.036	0.19	3.0	18.8
Case 2	0.66	0.44	3.4	(0.65)	0.17	4.7	18.4
Case 3	0.21	0.42	2.3	0.86	0.21	4.0	18.7

Unit:GJ/ton

Table 4. Energy consumption at domestic pellets procurement

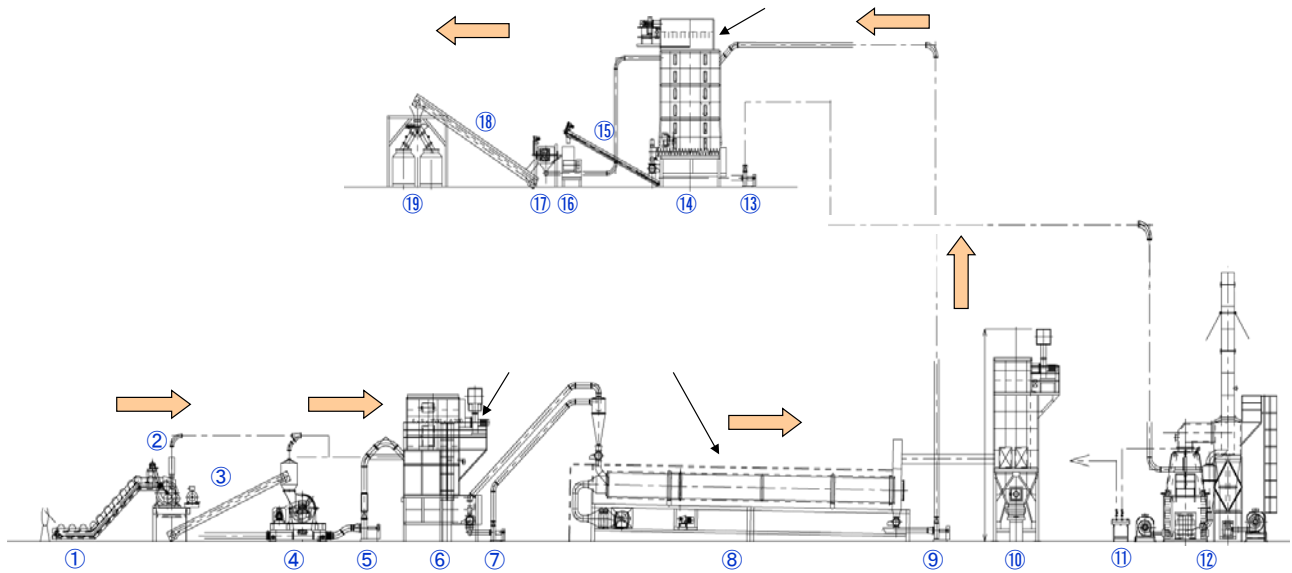
Energy consumption at procurement				
		MJ/ton	MJ/GJ	% of energy content
Case 1	Pellets	2990	159	15.9
	Chips	2180	179	17.9
Case 2	Pellets	4630	252	25.2
Case 3	Pellets	4040	216	21.6

The table shows that the example used 2990 MJ for obtaining 1 ton of pellets of case 1.

In order to compare standards with individual fuels different calorific value, so that spent 159 MJ for obtaining 1 GJ Pellets. Or that the energy used for the procurement of pellets represents 15.9% of the calorific value.

Table 5. Total energy consumption at procurement of different fuels^{6,7)}

Energy consumption at procurement			
	MJ/ton	MJ/GJ	% of energy content
Natural gas	2840	58	5.8
Oil	4617	114	11.4
Coal	1764	67	6.7
Wood pellets	626	36	3.6
Wood chips	308	33	3.3



No.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
Devise	Chain conveyer	First ripper	Belt conveyer	Hammer mill	Crushing blower	Dust extractor	Blower	Rotary drier	Crushing blower	Dust extractor
Weight(t)	2.5	6.5	0.3	3.5	0.6	5.0	0.4	7.5	0.6	4.0
No.	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱		
Devise	Fan	Boiler	Blower	Blower	Screw conveyer	Pelletizer	Sifter	Chain conveyer	Packing machine	
Weight(t)	0.4	13	0.5	7.0	0.4	2.0	1.0	0.7	1.0	

Fig.1. Composition of pellet plant (Case 1)

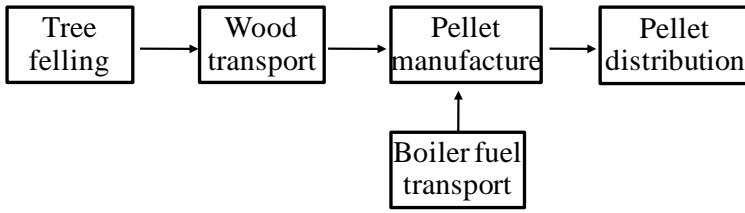


Fig.2. Boundary condition

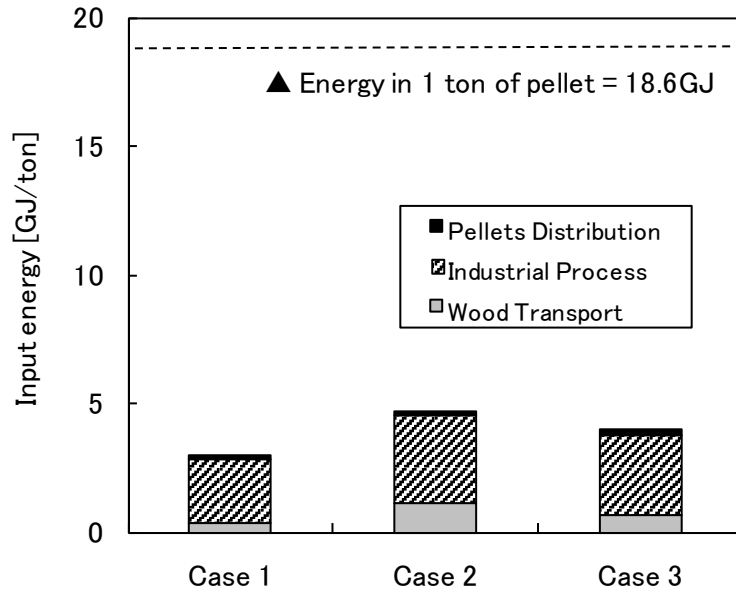
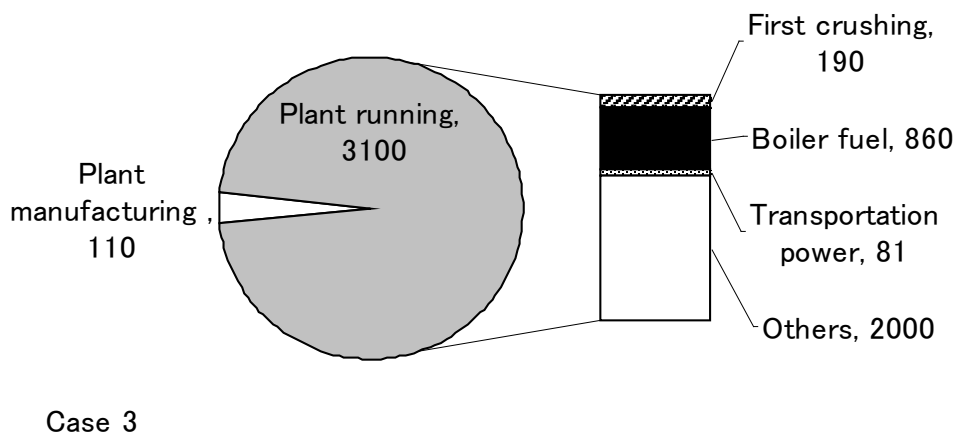
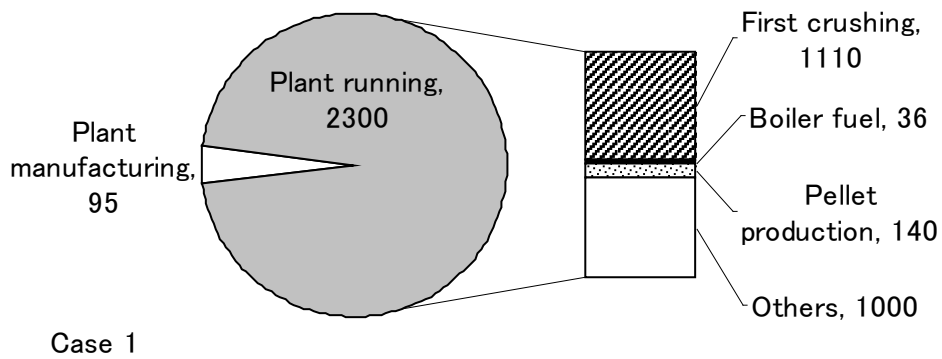


Fig.3. Comparison of energy consumption



Unit; MJ/ton

Fig.4. Content of pellet manufacturing energy

Appendix Inventory sheet

Process	Calculating formula	Amount of energy(GJ/ton)
Case 1		
Output energy Pellet production;960 ton/year, Calorific value; 18.8 MJ/kg	$960 \text{ ton/year} \times 18.8 \text{ MJ/kg} = 18100 \text{ GJ/year}$	18.8
Input energy	$E_a + E_b + E_c + E_d + E_e$	$0.34 + 0.033 + 2.4 + 0.036 + 0.19 = 3.0$
a. Tree felling (E_a)		$0.0545 + 0.281 = 0.34$
a_1 Tool manufacturing ·two Chain saws Weight;4.4 kg, Depreciation;20 years, Energy factor;25.7 MJ/kg, Pellet production;960 ton/year ·two mini-hydraulic excavators Weight;2.5 ton, Depreciation;11years, Energy factor;115 GJ/ton.	$4.4 \text{ kg} \times 25.7 \text{ MJ/kg} \times 1/20 \text{ year} \times 2 = 11.3 \text{ MJ/year}$ $11.3 \text{ MJ/year} \div 960 \text{ ton/year} = 0.0118 \text{ MJ/ton}$ $2.5 \text{ ton} \times 115 \text{ GJ/ton} \times 1/11 \text{ year} \times 2 = 52.3 \text{ GJ/year}$ $52.3 \text{ GJ/year} \div 960 \text{ ton/year} = 0.0545 \text{ GJ/ton}$	$1.18 \times 10^{-5} + 0.0545 = 0.0545$
a_2 Fuel ·two chain saws Gasoline;1400 L, Energy factor of gasoline; 35.2 MJ/L, Grease;700 L, Energy factor of grease oil;41.0 MJ/L, Including branch cutting. ·two mini-hydraulic excavators Diesel oil;800 L, Energy factor of diesel oil;38.5 MJ/L	$(1400 \text{ L} \times 35.2 \text{ MJ/L} + 700 \text{ L} \times 41.0 \text{ MJ/L}) \times 2 \times 4/3 = 208 \text{ GJ/year}$ $208 \text{ GJ/year} \div 960 \text{ ton/year} = 0.217 \text{ GJ/ton}$ $800 \text{ L} \times 38.5 \text{ MJ/L} \times 2 = 61.5 \text{ GJ/year}$ $61.5 \text{ GJ/year} \div 960 \text{ ton/year} = 0.0641 \text{ GJ/ton}$	$0.217 + 0.0641 = 0.281$
b. Wood transport (E_b)		$0.0250 + 0.00838 = 0.033$
b_1 Vehicle manufacturing Type;2ton-track, Weight; 2.3 ton, Energy factor; 115 GJ/ton, Depreciation;11years.	$2.3 \text{ ton} \times 115 \text{ GJ/ton} \times 1/11 \text{ year} = 24.1 \text{ GJ/year}$ $24.1 \text{ GJ/year} \div 960 \text{ ton/year} = 0.0250 \text{ GJ/ton}$	0.0250
b_2 Vehicle fuel Diesel;209 L/year, Energy factor;38.5 MJ/L	$209 \text{ L} \times 38.5 \text{ MJ/L} \div 960 \text{ ton/year} = 0.00838 \text{ GJ/ton}$	0.00838
c. Pellet manufacture (E_c)		$0.0951 + 2.30 = 2.4$
c_1 Plant manufacturing ·Pellet plant Total weight;56.9 ton, Depreciation;20 years, Energy factor;25.7 MJ/kg ·Concrete yard Weight; 414 ton, Energy factor;0.879 MJ/kg	$56.9 \text{ ton} \times 25.7 \text{ MJ/kg} \times 1/20 \text{ year} = 73.1 \text{ GJ/year}$ $73.1 \text{ GJ/year} \div 960 \text{ ton/year} = 0.0762 \text{ GJ/ton}$ $414 \text{ ton} \times 0.879 \text{ MJ/kg} \times 1/20 \text{ year} = 18.2 \text{ GJ/ton}$ $18.2 \text{ GJ/ton} \div 960 \text{ ton/year} = 0.0190 \text{ GJ/ton}$	$0.0762 + 0.0190 = 0.0952$
c_2 Plant running Dissipation power(month);19517 kWh, Energy factor; 9.42 MJ/kWh.	$19517 \text{ kWh} \times 12 \text{ months} \times 9.42 \text{ MJ/kWh} = 2206 \text{ GJ/year}$ $2206 \text{ GJ/year} \div 960 \text{ ton/year} = 2.30 \text{ GJ/ton}$	2.30
d. Boiler fuel procurement (E_d)		$0.0250 + 0.0111 = 0.036$
d_1 Vehicle manufacturing Type;2ton-track, Weight; 2.3 ton, Energy factor; 115 GJ/ton, Depreciation;11years.	$2.3 \text{ ton} \times 115 \text{ GJ/ton} \times 1/11 \text{ year} = 24.1 \text{ GJ/year}$ $24.1 \text{ GJ/year} \div 960 \text{ ton/year} = 0.0250 \text{ GJ/ton}$	0.0250
d_2 Vehicle fuel Diesel;278 L/year, Energy factor;38.5 MJ/L	$278 \text{ L} \times 38.5 \text{ MJ/L} \div 960 \text{ ton/year} = 0.0111 \text{ GJ/ton}$	0.0111
e. Pellet distribution (E_e)		$0.0425 + 0.152 = 0.19$
e_1 Vehicle manufacturing Type;4ton-track, Weight; 3.9 ton, Energy factor; 115 GJ/ton, Depreciation;11years.	$3.9 \text{ ton} \times 115 \text{ GJ/ton} \times 1/11 \text{ year} = 40.8 \text{ GJ/year}$ $40.8 \text{ GJ/year} \div 960 \text{ ton/year} = 0.0425 \text{ GJ/ton}$	0.0425
e_2 Vehicle fuel Diesel;3794 L/year, Energy factor;38.5 MJ/L	$3794 \text{ L} \times 38.5 \text{ MJ/L} \div 960 \text{ ton/year} = 0.152 \text{ GJ/ton}$	0.152
Case 2		
Output energy Pellet production;2000 ton/year, Calorific value;18.4 MJ/kg	$2000 \text{ ton/year} \times 18.4 \text{ MJ/kg} = 36800 \text{ GJ/year}$	18.4
Input energy	$E_a + E_b + E_c + E_e$	$0.66 + 0.44 + 3.4 + 0.17 = 4.7$
a. Tree felling (E_a)		$0.0478 + 0.608 = 0.66$

<p>a_1 Tool manufacturing</p> <p>·two Chain saws Weight;4.4 kg, Depreciation;20 years, Energy factor;25.7 MJ/kg.</p> <p>·two hydraulic excavators Weight;9.3 ton, Depreciation;5years, Energy factor;25.7 MJ/kg.</p>	<p>$4.4 \text{ kg} \times 25.7 \text{ MJ/kg} \times 1/20 \text{ year} \times 2 = 11.3 \text{ MJ/year}$ $11.3 \text{ MJ/year} \div 2000 \text{ ton/year} = 5.65 \times 10^{-6} \text{ GJ/ton}$</p> <p>$9.3 \text{ ton} \times 25.7 \text{ MJ/kg} \times 1/5 \text{ year} \times 2 = 95.6 \text{ GJ/year}$ $95.6 \text{ GJ/year} \div 2000 \text{ ton/year} = 0.0478 \text{ GJ/ton}$</p>	<p>$5.65 \times 10^{-6} + 0.0478 = 0.0478$</p>
<p>a_2 Fuel</p> <p>·two chain saws No record. Fuel consumption was assumed to twice Case 1. Gasoline;2800 L, Energy factor of gasoline; 35.2 MJ/L, Grease;1400 L, Energy factor of grease oil;41.0 MJ/L.</p> <p>·two hydraulic excavators Diesel oil;10300 L, Energy factor of diesel oil;38.5 MJ/L</p>	<p>$208 \text{ GJ/year} \times 2 = 416 \text{ GJ/year}$ $416 \text{ GJ/year} \div 2000 \text{ ton/year} = 0.208 \text{ GJ/ton}$</p> <p>$10300 \text{ L} \times 38.5 \text{ MJ/L} \times 2 = 793 \text{ GJ/year}$ $793 \text{ GJ/year} \div 2000 \text{ ton/year} = 0.400 \text{ GJ/ton}$</p>	<p>$0.208 + 0.400 = 0.608$</p>
<p>b. Wood transport (E_b)</p>		<p>$0.0708 + 0.368 = 0.44$</p>
<p>b_1 Vehicle manufacturing</p> <p>Type; two 10ton-tracks, Weight; 8 ton, Energy factor; 115 GJ/ton, Depreciation;13years.</p>	<p>$8 \text{ ton} \times 115 \text{ GJ/ton} \times 1/13 \text{ year} \times 2 = 142 \text{ GJ/year}$ $142 \text{ GJ/year} \div 2000 \text{ ton/year} = 0.0708 \text{ GJ/ton}$</p>	<p>0.0708</p>
<p>b_2 Vehicle fuel</p> <p>Diesel;9560 L/year, Energy factor;38.5 MJ/L</p>	<p>$9560 \text{ L} \times 38.5 \text{ MJ/L} \times 2 \div 2000 \text{ ton/year} = 0.368 \text{ GJ/ton}$</p>	<p>0.368</p>
<p>c. Pellet manufacture (E_c)</p>		<p>$0.111 + 3.25 = 3.4$</p>
<p>c_1 Plant manufacturing</p> <p>·Ripper Weight;19.9 ton, Depreciation;5 years, Energy factor;25.7 MJ/kg</p> <p>·Pellet plant Total weight;54 ton, Depreciation;20 years, Energy factor;25.7 MJ/kg</p> <p>·Heavy equipment for transport Hydraulic excavator;9.3 ton, Wheel loader;6.4 ton, Fork lift;3.7 ton, Depreciation;10 years, Energy factor;25.7 MJ/kg.</p>	<p>$19.9 \text{ ton} \times 25.7 \text{ MJ/kg} \times 1/5 \text{ year} = 102 \text{ GJ/year}$ $102 \text{ GJ/year} \div 2000 \text{ ton/year} = 0.0511 \text{ GJ/ton}$</p> <p>$54 \text{ ton} \times 25.7 \text{ MJ/kg} \times 1/20 \text{ year} = 69.4 \text{ GJ/year}$ $69.4 \text{ GJ/year} \div 2000 \text{ ton/year} = 0.0347 \text{ GJ/ton}$</p> <p>$(9.3 + 6.4 + 3.7) \text{ ton} \times 25.7 \text{ MJ/kg} \times 1/10 \text{ year} = 49.9 \text{ GJ/year}$ $49.9 \text{ GJ/year} \div 2000 \text{ ton/year} = 0.0249 \text{ GJ/ton}$</p>	<p>$0.0511 + 0.0347 + 0.0249 = 0.111$</p>
<p>c_2 Fuel & Plant running</p> <p>·Ripper Diesel;8580 L/year, Energy factor;38.5 MJ/L</p> <p>·Pellet plant Dissipation power(year);571000 kWh, Energy factor; 9.42 MJ/kWh.</p> <p>·Heavy equipment for transport(consumption of diesel) Hydraulic excavator;9924 L, Wheel loader;8820 L, Fork lift;1908 L.</p>	<p>$8580 \text{ L/year} \times 38.5 \text{ MJ/L} \div 2000 \text{ ton/year} = 0.165 \text{ GJ/ton}$</p> <p>$571000 \text{ kWh/year} \times 9.42 \text{ MJ/kWh} \div 2000 \text{ ton/year} = 2.69 \text{ GJ/ton}$</p> <p>$(9924 + 8820 + 1908) \text{ L/year} \times 38.5 \text{ MJ/L} \div 2000 \text{ ton/year} = 0.398 \text{ GJ/ton}$</p>	<p>$0.165 + 2.69 + 0.398 = 3.25$</p>
<p>d. Boiler fuel procurement (E_d)</p> <p>Product pellets;2000 ton/year, Defective pellets;340 ton/year.</p>	<p>$(E_a + E_b + E_c) \text{ GJ/year} \times 340/2340 \div 2000 \text{ ton/year} = 0.654 \text{ GJ/ton}$</p>	<p>0.65*</p> <p>0.654</p>
<p>e. Pellet distribution (E_e)</p>		<p>$0.0204 + 0.152 = 0.17$</p>
<p>e_1 Vehicle manufacturing</p> <p>Type;4ton-track, Weight; 3.9 ton, Energy factor; 115 GJ/ton, Depreciation;11years.</p>	<p>$3.9 \text{ ton} \times 115 \text{ GJ/ton} \times 1/11 \text{ year} = 40.8 \text{ GJ/year}$ $40.8 \text{ GJ/year} \div 2000 \text{ ton/year} = 0.0204 \text{ GJ/ton}$</p>	<p>0.0204</p>
<p>e_2 Vehicle fuel</p> <p>Diesel;7900 L/year, Energy factor;38.5 MJ/L</p>	<p>$7900 \text{ L} \times 38.5 \text{ MJ/L} \div 2000 \text{ ton/year} = 0.152 \text{ GJ/ton}$</p>	<p>0.152</p>
<p>Case 3</p>		
<p>Output energy</p> <p>Pellet production;650 ton/year, Calorific value; 18.7 MJ/kg</p>	<p>$650 \text{ ton/year} \times 18.7 \text{ MJ/kg} = 12000 \text{ GJ/year}$</p>	<p>18.7</p>
<p>Input energy</p>	<p>$E_a + E_b + E_c + E_d + E_e$</p>	<p>$0.21 + 0.42 + 2.3 + 0.86 + 0.21 = 4.0$</p>
<p>a. Tree felling (E_a)</p>		<p>$0.0878 + 0.127 = 0.21$</p>

<p>a_1 Tool manufacturing</p> <ul style="list-style-type: none"> ·Chain saw Weight;5 kg, Depreciation;20 years, Energy factor;25.7 MJ/kg. ·Wood splitting machine Weight;1 ton, Depreciation; 10 years, Energy factor;25.7 MJ/kg. ·Wheel loader Weight;6.7 ton, Depreciation; 10 years, Energy factor;25.7 MJ/kg. ·Backhoe Weight;14.5 ton, Depreciation;10 years, Energy factor;25.7 MJ/kg. 	<p>5 kg×25.7 MJ/kg×1/20 year=6.43 MJ/year 6.43 MJ/year÷650 ton/year=9.88 × 10⁻⁶ GJ/ton</p> <p>1 ton×25.7 MJ/kg×1/10 year=2.57 GJ/year 2.57 GJ/year÷650 ton/year=0.00395 GJ/ton</p> <p>6.7 ton×25.7 MJ/kg×1/10 year=17.2 GJ/year 17.2 GJ/year÷650 ton/year=0.0265 GJ/ton</p> <p>14.5 ton×25.7 MJ/kg×1/10 year=37.3 GJ/year 37.3 GJ/year÷650 ton/year=0.0573 GJ/ton</p>	<p>9.88 × 10⁻⁶+0.00395 +0.0265 +0.0573=0.0878</p>
<p>a_2 Fuel & running</p> <ul style="list-style-type: none"> ·Chain saw Gasoline;296 L/year, Energy factor;35.2 MJ/L. ·Wood splitting machine Dissipation power is included in the pellet plant running. ·Wheel loader and Backhoe(total) Heavy oil;1727 L/year, Energy factor;41.0 MJ/L 	<p>296 L/year×38.5 MJ/L÷650 ton/year=0.0175 GJ/ton</p> <p>1727 L/year×41.0 MJ/L÷650 ton/year=0.109 GJ/ton</p>	<p>0.0175+0.109=0.127</p>
<p>b. Wood transport (E_b)</p>		<p>0.118+0.297=0.42</p>
<p>b_1 Vehicle manufacturing</p> <p>Type;10ton-track, Weight; 8 ton, Energy factor; 115 GJ/ton, Depreciation;12years.</p>	<p>8 ton×115 GJ/ton×1/12year=76.7 GJ/year 76.7 GJ/year÷650 ton/year=0.118 GJ/ton</p>	<p>0.118</p>
<p>b_2 Vehicle fuel</p> <p>Diesel;5019 L/year, Energy factor;38.5 MJ/L</p>	<p>5019 L×38.5 MJ/L÷650 ton/year=0.297 GJ/ton</p>	<p>0.297</p>
<p>c. Pellet manufacture (E_c)</p>		<p>0.117+2.23=2.3</p>
<p>c_1 Plant manufacturing</p> <ul style="list-style-type: none"> ·Ripper Weight;2.1 ton, Depreciation;10 years, Energy factor;25.7 MJ/kg ·Pellet plant Total weight;47.3 ton, Depreciation;20 years, Energy factor;25.7 MJ/kg ·Heavy equipment for transport Fork lift;0.93 ton, Wheel loader;2.78 ton, Depreciation;10 years, Energy factor;25.7 MJ/kg 	<p>2.1ton×25.7 MJ/kg×1/10 year=5.40 GJ/year 5.40 GJ/year÷650 ton/year=0.00830 GJ/ton</p> <p>47.3 ton×25.7 MJ/kg×1/20 year=60.8 GJ/year 60.8 GJ/year÷650 ton/year=0.0935 GJ/ton</p> <p>(0.93+2.78) ton×25.7 MJ/kg×1/10 year=9.53 GJ/year 9.53 GJ/year÷650 ton/year=0.0147 GJ/ton</p>	<p>0.00830+0.0935+0.0147 =0.117</p>
<p>c_2 Fuel & Plant running</p> <ul style="list-style-type: none"> ·Ripper Heavy oil;2955 L/year, Energy factor;41.0 MJ/L ·Pellet plant Dissipation power(year);135000 kWh, Energy factor; 9.42 MJ/kWh. ·Heavy equipment for transport(consumption of diesel) Gasoline;160 L, Energy factor;35.2 MJ/L, Heavy oil;1142 L, Energy factor;41.0 MJ/L. 	<p>2955 L/year×41.0 MJ/L÷650 ton/year=0.186 GJ/ton</p> <p>135000 kWh/year×9.42 MJ/kWh÷650 ton/year=1.96 GJ/ton</p> <p>(160 L/year × 35.2 MJ/year+1142 L/year × 41.0 MJ/L) ÷650 ton/year=0.0807 GJ/ton</p>	<p>0.186+1.96+0.0807=2.23</p>
<p>d. Boiler fuel procurement (E_d)</p> <p>Kerosene;14910 L/year, Energy factor;37.3 MJ/L</p>		<p>0.86</p> <p>0.856</p>
<p>14910 L × 37.3 MJ/L=556 GJ/year 556 GJ/year ÷ 650 ton/year=0.856 GJ/ton</p>	<p>0.856</p>	
<p>e. Pellet distribution (E_e)</p>		<p>0.0627+0.152=0.21</p>
<p>e_1 Vehicle manufacturing</p> <p>Type;4ton-track, Weight; 3.9 ton, Energy factor; 115 GJ/ton, Depreciation;11 years.</p>	<p>3.9 ton×115 GJ/ton×1/11year=40.8 GJ/year 40.8 GJ/year÷650 ton/year=0.0627 GJ/ton</p>	<p>0.0627</p>
<p>e_2 Vehicle fuel</p> <p>Diesel;2570 L/year, Energy factor;38.5 MJ/L</p>	<p>2570 L×38.5 MJ/L÷650 ton/year=0.152 GJ/ton</p>	<p>0.152</p>

*The procurement energy of defective pellets is included E_a - E_c process.