

間伐材の石炭混焼方法の違いによる 環境負荷削減効果の評価 -和歌山県中部地域を事例として-

田畑 智博¹・鳥飼 仁²・鶴巻 峰夫³・玄地 裕⁴

¹正会員 名古屋大学 大学院環境学研究科 (〒464-8601名古屋市中千種区不老町D2-1(510))

E-mail:tabata@urban.env.nagoya-u.ac.jp

²非会員 和歌山県工業技術センター (〒649-6261 和歌山市小倉60)

³正会員 和歌山工業高等専門学校教授 環境都市工学科 (〒644-0023 和歌山県御坊市名田町野島77)

⁴非会員 (独)産業技術総合研究所 安全科学研究部門 (〒305-8569 茨城県つくば市小野川16-1)

本研究では、和歌山県中部地域を対象として、間伐材の石炭火力発電所での混焼利用による環境負荷削減効果をLCA手法により評価した。対象地域における間伐材発生量は、スギ・ヒノキ植林分布および間伐材発生量等のデータより推計した。評価では、対象地域における実証試験結果等のデータを用い、間伐から石炭混焼までの全プロセスにおけるインベントリデータを算出した。また、間伐材の燃料加工方法として、乾燥チップ、ペレット、半炭化ブリケットを取り上げ、加工法の違いによる環境負荷量を比較し、間伐材の燃料化による環境負荷削減効果を明らかにするとともに、間伐プロセス、燃料化プロセスにおける改善点を論じた。

Key Words : woody biomass, biomass-coal mix, semi-carbonized fuel, life cycle assessment, geographic information system

1. はじめに

温室効果ガスの削減を目的としてバイオマスをエネルギー利活用する場合、削減効果が高い燃料への代替を検討するのが効果的である。たとえば、燃料を発熱量当たりのCO₂排出係数でみると、石炭およびコークスの数値が他の燃料に際立って高く、これら燃料の代替が有望である¹⁾。このうち、石炭の代替は、石炭火力発電所での木質バイオマスの混焼利用があり、日本では、国の気候変動政策と相まって、近年盛んになってきている。

混焼利用されている木質バイオマスは、林地残材、間伐材、建設廃材等である。これらは、チップ、ペレットの形状で発電所に投入されているが、石炭と木質バイオマスは性状が異なることから、微粉炭方式の石炭火力発電所において微粉体製造時の負荷が大きくなることが報告されている²⁾。また、間伐材を利用する場合、石炭投入量削減による温室効果ガスの削減分だけでなく、間伐や輸送等のプロセスでの増加分にも着目する必要がある、正味の温室効果ガス削減量は小さくなることが想定され

る。そのため、ライフサイクルの観点から、木質バイオマスの石炭火力混焼による温室効果ガス削減効果を算定し、混焼の意義を明らかにすることが、木質バイオマスのエネルギー利活用方法を具体的に提案するうえで重要である。

木質バイオマスの石炭火力混焼利用に関する主な先行研究としては、西山ら³⁾、Mann *et al.*⁴⁾、Enrico *et al.*⁵⁾等がある。しかしながら、山地の形状や森林の生育状況等は地域ごとに条件が異なるのに対し、これら研究の多くは文献値やシミュレーションを用いた検討であり、地域の実情を必ずしも反映したものとなっていない。

そこで、本研究では、和歌山県の中部地域を対象として、地域のスギ・ヒノキの間伐材発生量を推計するとともに、間伐や輸送に関する地域特性を可能な限り反映したデータを用いて、間伐材の石炭火力での混焼による環境負荷削減効果を評価することを目的とする。なお、評価においては、LCA手法を用い、間伐、陸上・海上輸送、燃料化、石炭混焼までの全プロセスにおける環境負荷の

発生量および削減量を算出した。また、石炭火力発電所で混入する間伐材を、乾燥チップ、ペレット、半炭化ブリケットの3種類の燃料にした場合の、環境負荷削減効果の違いについても比較評価を行う。以上の評価を通じて、間伐材を石炭代替として用いることの環境負荷削減効果や改善点を明らかにする。

2. 研究の方法

(1) 研究対象地域

研究対象地域は、和歌山県中部に位置し、和歌山県の中央部に流れる日高川を中心とした地域である。本地域は、2002年度時点で市町村であった11市町村を対象としている(図-1)。人口は、2002年度の時点で約68,000人と、和歌山県全体の人口の約6.3%に過ぎないものの、スギ・ヒノキの植林面積は約47%とほぼ半数を占める山間部である。これらの地域では、気候等、スギ・ヒノキの生育条件があまり変わらず、且つ、まとまった量の間伐材を搬出可能であると考え、本地域を選定した。

本地域における間伐材の含水率及び比重を表-1に示す。これらのデータは、後述する実証試験結果より算出した。

(2) 間伐材の燃料加工方法

間伐材を燃料として加工する方法として、乾燥チップ、ペレット、半炭化ブリケットの3種類を想定する。乾燥チップは、間伐材をチップ化し、乾燥させて作成する。ペレットは、チップ化後、乾燥、成形を経て作成する。半炭化ブリケットは、間伐材をチップ化後、半炭化、成形を経て作成する。各加工燃料の特徴を表-2に示す。このうち、半炭化ブリケット燃料は、輸送コストの低減や微粉体作成時のミルの負荷低減に効果があり、現在実用化に向けた技術開発がおこなわれている⁶⁷⁾。

(3) 評価の設定

システム境界を図-2に示す。間伐材の石炭混焼を行う

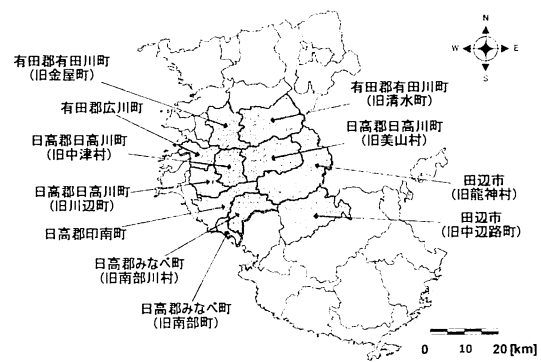


図-1 研究対象地域

表-1 間伐材の特徴

備考	
樹種	スギ、ヒノキ
含水率 [%]	56.3 幹、枝葉の平均
比重 [t/m ³]	0.9 幹、枝葉の平均

ケース(石炭混焼ケース)として、間伐、チップ化、チップの陸上輸送、燃料化、燃料の陸上・海上輸送、混焼までを範囲とする。チップ化プロセスは、サイトで間伐後に即チップ化するものとする。燃料化プロセスは、乾燥チップ、ペレット、半炭化ブリケットで工程が異なる。

これとは別に、混焼を行わなかったケース(石炭単焼ケース)と比較するため、国外からの石炭の採掘、海上輸送、発電利用を考慮する。但し、石炭単焼ケースにおいては、間伐材を燃料化しない場合の代替プロセスとして、切り捨て間伐の腐敗を考慮する必要がある。既存研究⁸⁾では、切り捨て間伐材が腐敗することでメタンが発生することが明らかになっているものの、その詳細な生成メカニズムは不明である。そのため、今回は無視した。

間伐材および燃料の輸送方法について述べる。図-3に輸送のイメージを示す。チップは、サイトより小型ダンブ(積載重量2[t], 燃費10.5[km/l], 後述する実証試験結果

表-2 間伐材加工燃料の特徴

利点		欠点	
乾燥チップ	・成形する必要がない	・嵩比重が低く、輸送時のコストが高い	・微粉体製造時に、ミルに負荷がかかる
ペレット	・嵩比重が高く、輸送時のコストが安い	・成形が必要	・微粉体製造時に、ミルに負荷がかかる
半炭化ブリケット	・半炭化により、石炭と同じ発熱量(26.6[MJ/kg])程度に改質できる	・半炭化、成形が必要	・半炭化時に、炭素分が揮発し製品重量が少なくなる
	・嵩比重が高く、輸送時のコストが安い		
	・微粉体製造時に、ミルに負荷がかからない		

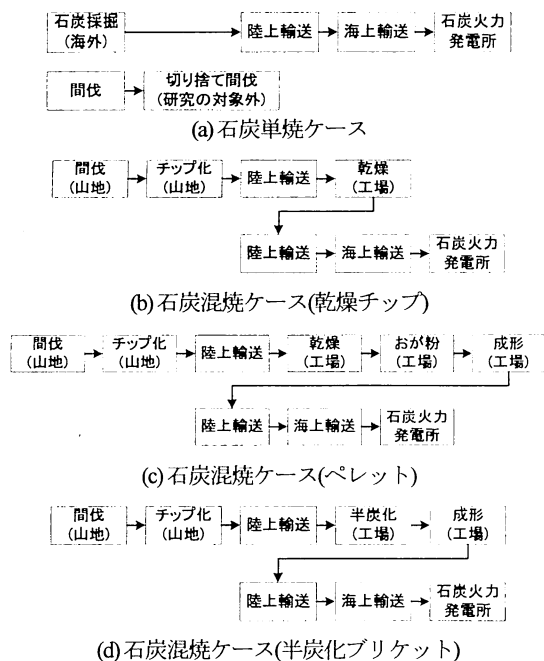


図-2 システム境界

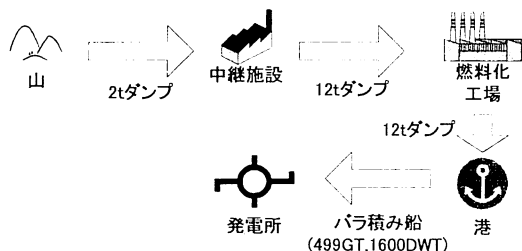


図-3 間伐材、燃料の輸送イメージ

より算出)で輸送する。但し、積載効率の向上や必要車両台数の削減のため、任意に設置した中継施設で大型ダンプ(積載重量12t[†], 燃費5.4[km/l][‡], カタログ値より設定)に積み替えし、任意に設置した燃料化工場まで搬送する。燃料化後、燃料を大型ダンプ(積載重量12t[†], 同上)にて最寄りの日高港まで輸送し、バラ積み船(船倉容積2,490[m³], 総トン数499GT[§], 積載重量トン1,600DWT[†], 燃費0.1[km/l][‡])に積み替え後、海上輸送により石炭火力発電所まで搬送する。但し、輸送対象とする石炭火力発電所の場所は特定しない。

以上の設定を通して、本論文では、和歌山県中部地域においてスギ・ヒノキを対象として間伐、燃料化した場合を想定し、ライフサイクルでみた燃料の加工方法別の正味の環境負荷量を、LCAのインベントリ分析により比

較評価する。評価における機能単位は、単位発熱量1MJの燃料とし、これを得るために必要なユーティリティ(電力、燃料、水)、環境負荷を算出する。

評価において対象とする環境負荷物質は、温室効果ガス(以下、GHG)、SO_x、NO_xとする。GHGは、CO₂、N₂O、CH₄を対象とする。GHG排出量は、各環境負荷に特性化係数を乗じて特性化する。GHGの特性化係数は、IPCC[§]によるGWPI00年値(CO₂: 1, CH₄: 25, N₂O: 298)を用いる。

(4) スギ・ヒノキ植林面積の推計

サイト、中継施設、燃料化工場の位置、燃料化工場に係る処理規模、輸送経路を選定するためには、対象地域におけるスギ・ヒノキの植林分布を把握し、その植林面積を推計する必要がある。そこで、GISを用いて植林地分布図を作成し、年間の間伐材発生量を推計する。

本地域におけるGISデータの構築のため、国土数値情報ダウンロードサービス(森林地分布・面積、傾斜角度、自然公園・保全地域等)[‡]、第5回自然環境保全基礎調査植生調査(スギ・ヒノキ植生地)[§]、市販の道路データ(道路網、車幅、交差点等)より各ベクトルデータ、メッシュデータ入手し、3次メッシュデータ(1km四方)にオーバーレイした。このとき、経済的に間伐を行えない急傾斜地、自然公園地域や自然保全地域のように間伐が制限されている地域を除外し、経済的に間伐可能な植林地分布データを構築した。急傾斜地は、具体的には、和歌山県への聞き取り調査をもとに、作業路の敷設が困難で、経済的に間伐が実施するのが難しい傾斜度として、30°以上とした。

(5) インベントリデータの作成

インベントリデータの作成は、施設、重機類の製造段階、使用段階を対象とした。使用段階、製造段階の順に、インベントリデータの作成方法を述べる。

先ず、使用段階において、間伐材の伐採・集材、チップ化、チップ輸送の各プロセスに係るインベントリデータは、(有)原見林業、和歌山県工業技術センターが2009年11月~2010年3月の期間で行った間伐材のチップ化および半炭化ブリケット燃料製造に関する実証試験結果をもとに作成した。燃料化、燃料輸送、陸上輸送、海上輸送の各プロセスは、本実証試験結果をもとに事業化を想定し、カタログや聞き取り調査をふまえて作成した。

表-3に、施設、重機類の使用段階に係る環境負荷として、紙面の都合上、GHG排出原単位のみを示す。環境負荷排出原単位の算定においては、軽油、混合ガソリン、チェーンオイルを対象とし、各施設、重機類の燃料、オ

* 船舶の大きさを示す指標。

[†] 貨物を満載した状態の排水量から、空船状態の排水量を引いた重量であり、船舶の貨物の積載能力を示す指標。

[‡] <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>

[§] http://www.biodic.go.jp/kiso/vg/vg_kiso.html

表-3 GHG排出原単位(使用段階)

	乾燥チップ	ペレット	半炭化ブリケット
間伐、チップ化	2.1×10^{-3}	2.1×10^{-3}	2.7×10^{-3}
陸上輸送(チップ)	7.4×10^{-4}	2.9×10^{-4}	3.7×10^{-4}
燃料化	8.0×10^{-3}	9.1×10^{-3}	1.2×10^{-2}
陸上輸送(燃料)	6.1×10^{-5}	3.4×10^{-5}	2.4×10^{-5}
海上輸送(燃料)	2.0×10^{-3}	2.0×10^{-3}	1.6×10^{-3}
混焼	-8.8×10^{-2}	-8.8×10^{-2}	-8.8×10^{-2}
合計	-7.5×10^{-2}	-7.5×10^{-2}	-7.2×10^{-2}

単位: kg-CO₂eq/MJ

表-4 間伐材加工燃料の発熱量

間伐材	乾燥チップ	19,000 文献13)
	ペレット	19,000 乾燥チップと等価と仮定
	半炭化ブリケット	26,600 一般炭と等価と仮定
一般炭(海外)		26,600 文献14)

単位: kJ/kg

イルの使用量に、それぞれの環境負荷排出原単位を乗じて算出した。間伐、チップ化プロセスは、燃料の加工法によらず同じであるが、燃料化プロセスは異なる。半炭化ブリケットは実証試験結果を用いた。乾燥チップは、木材の乾燥に係るA重油の必要量を、蒸発潜熱(40.66[kJ/mol])より算出した。ペレットは、乾燥は乾燥チップと同じ数値を用い、成形は石坂ら¹⁰⁾の結果を用いた。陸上輸送プロセスにおける軽油使用量は、GIS上でチップ、燃料の輸送距離を算出し、使用量を推計した。海上輸送プロセスは、日高港から全国の沿岸部に位置する石炭火力発電所までの平均距離を算出し、これよりA重油の消費量を推計した。混焼プロセスでは、木質バイオマスの石炭代替により、一般炭(海外)の単位発熱量当たりGHG排出量と等価のGHGが削減できると考えた。一般炭(海外)の単位発熱量当たりGHG排出量は、JEMAI LCA-Proに掲載されている原単位を用いた。同じく混焼プロセスにおける乾燥チップ、ペレットの微粉体製造におけるミルの負荷は、省エネルギーセンター¹¹⁾による西条発電所の実施事例を参考とした。本事例は石炭の発熱量変更によるミルの負荷低減効果をみたものであるが、本事例での負荷減少割合は、大野ら¹²⁾による石炭投入量の3%前後でのバイオマス投入時の負荷増加割合とほぼ一致しており、使用しても問題はないと考えた。但し、結果で後述するように、ミルによる負荷増加は小さく、表-3ではその違いはみえない。半炭化ブリケットの微粉体製造時の負荷は、発生しないものとした。

ユーティリティの環境負荷排出原単位は、JEMAI LCA-Proに掲載されている原単位を用いた。燃料の混焼利用による環境負荷削減量は、石炭の環境負荷排出量と等価であると考え、JEMAI LCA-Proに掲載されている原単位を用いた。燃料の発熱量は加工された燃料により異なるため、環境負荷削減量はそれぞれ異なる。表-4に、

表-5 使用する施設、重機類

		使用台数、 施設数	重量(鉄換算) [t/台、施設]
間伐	グラブブラ	1	6.6
	プロセッサ	1	7.3
	タワーヤーダ	1	6.5
	チェーンソー	7	0.005
チップ化	グラブブラ	1	6.6
	チップパー	1	2.9
陸上輸送(チップ)	2tダンプ	126	4
	12tダンプ	23	11
	中継施設	6	12
	プラント(400[t/日]規模)	1	1,000
陸上輸送(燃料)	12tダンプ	3	11
海上輸送(燃料)	シップローダー	1	450
	バラ積み船	1	2,000

表-6 GHG排出原単位(製造段階)

	乾燥チップ	ペレット	半炭化ブリケット
間伐、チップ化	1.8×10^{-5}	1.8×10^{-5}	2.3×10^{-5}
陸上輸送(チップ)	2.1×10^{-6}	2.1×10^{-6}	2.6×10^{-6}
燃料化	2.2×10^{-4}	2.2×10^{-4}	2.7×10^{-4}
陸上輸送(燃料)	1.1×10^{-5}	1.1×10^{-5}	1.3×10^{-5}
海上輸送(燃料)	2.1×10^{-4}	2.1×10^{-4}	2.7×10^{-4}
合計	4.5×10^{-4}	4.5×10^{-4}	5.8×10^{-4}

単位: kg-CO₂eq/MJ

間伐材加工燃料の発熱量を示す。

次に、製造段階において、間伐材の伐採・集材、チップ化プロセスでは実証試験結果をもとに、その他のプロセスは事業化を想定して、施設、重機類の必要数を推計した。また、カタログ、聞き取り調査をもとに、施設、重機類の重量を割り出した。但し、石炭火力発電所は、既に稼働しているとし、新たな環境負荷として計上しなかった。

表-5に、使用する施設、重機類の使用台数、設置数、鉄換算の重量を示す。この重量に、鉄の環境負荷排出原単位を乗じるとともに、年間処理量、年間稼働率を乗じ、各重機類の製造段階で発生するGHG排出量を算出した。これを燃料の発熱量で除することで、単位発熱量当たりの環境負荷排出原単位を算出した。表-6に、施設、重機類の製造段階に係るGHG排出原単位を示す。鉄のGHG排出原単位は、JEMAI LCA-Proに掲載されている原単位を用いた。但し、施設、重機の材料は、鉄が大きなウェイトを占めるものの、他の材料も含まれることから、製造段階の排出量は過小評価になっている可能性があることは注意が必要である。耐用年数は、機械損料表を元に10年と設定した。チェーンソーは消耗品の扱いに近いものと考え、耐用年数を1年と設定した。

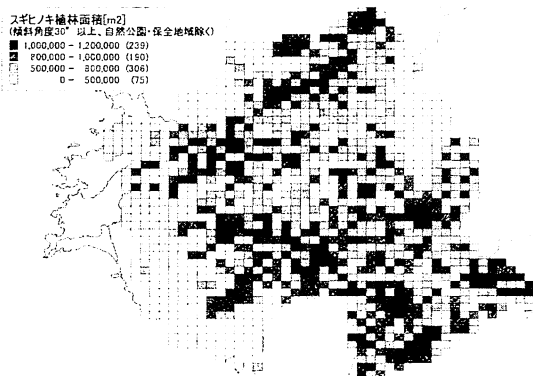


図-4 スギ・ヒノキ植林地分布

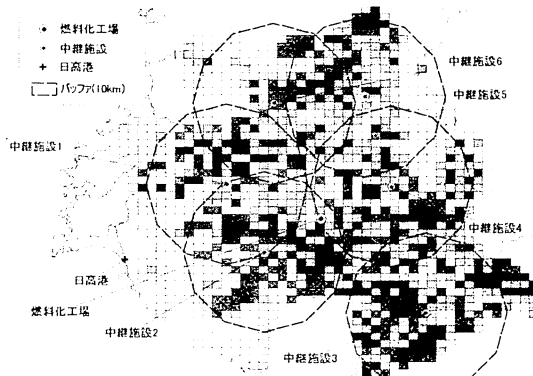


図-5 中継施設、工場の配置

表-7 燃料別のマテリアルフロー

		単位	乾燥チップ	ペレット	半炭化ブリケット	備考
間伐、チップ化	間伐材量	t/年	104,500	104,500	104,500	
		t/日	522	522	522	年間稼働日数200日
	チップ生産量	t/日	505	505	505	年間稼働日数200日
陸上輸送(チップ)	水分	t/日	17	17	17	チップ化時の蒸発水分
	輸送量総計	t/年	101,000	101,000	101,000	
	輸送量	t/日	505	505	505	年間稼働日数200日
燃料化	輸送時ロス	t/日	0	0	0	
	チップ投入量総計	t/年	101,000	101,000	101,000	
	チップ投入量	t/日	337	337	337	年間稼働日数300日
	燃料製造量	t/日	158	158	90	
		t/年	47,500	47,500	27,100	
	水分	t/日	178	178	178	
	ガス分	t/日	0	0	68	木材中の揮発分
	燃料1t当たりチップ必要量	t	2.1	2.1	3.7	
	燃料発熱量	MJ/t	19,000	19,000	26,600	
陸上輸送(燃料)、海上輸送(燃料)	獲得エネルギー量	GJ/年	902,000	902,000	719,800	
	輸送量	t/日	158	158	90	年間稼働日数300日
	輸送時ロス	t/日	0	0	0	
混焼	石炭投入削減量	t/年	33,900	33,900	27,100	

3. 結果および考察

(1) スギ・ヒノキ植林地分布

図-4に、スギ・ヒノキ植林地分布を示す。間伐を行うサイトはメッシュ単位(1km四方)で示した。植林地面積は、メッシュの濃淡で分類した。植林地分布の作成においては、前述した除外地に該当するメッシュを省いた。

スギ・ヒノキ植林地分布の結果をもとに、スギ・ヒノキ植林地面積を推計した。その結果、スギ・ヒノキ植林地面積は約88,900[ha]であり、除外地を控除すると約65,600[ha]となった。全体のスギ・ヒノキ植林地面積のうち、除外地は約26%になる。

次に、上記より、間伐可能量を算出する。切り捨て間伐材の発生量を和歌山県が有する推計値の35[m³/(ha・年)]、スギ・ヒノキの比重を実証試験結果より0.91[t/m³]とした場合、除外地を控除した間伐可能量は、湿润基準で約

2,089,000[t]となる。但し、これは対象地域全体からみた間伐可能量であり、1年で全て間伐してしまうと、それ以降は事業が継続できない。そこで、20年を1区切りにして継続的に事業を実施することを想定する。具体的には、サイトを20分割し、各年で間伐を行う場所を変えるものとする。これにより、年間の間伐可能量は、104,500[t/年]となった。

スギ・ヒノキ植林地分布をもとに、中継施設および燃料化工場の設置場所を検討する。中継施設の位置は、サイトでのダンプへのチップ搬入、往復の輸送、中継施設でのチップ搬出にかかる作業を1回当たり1時間程度で終了させることを想定した。これをもとに、スギ・ヒノキ植林地をカバーできるように直線距離で10kmのバッファを構築し、その中心となる道路の交差点に、中継施設を設置するものとした。これより、図-5に示すように、中継施設を6施設設置するものとした。各バッファ内に

存在するサイトは、バッファ中心の中継施設に、最小の道路距離にてチップを輸送する。チップの嵩比重は、実証試験結果より0.3とする。輸送距離の計算は、Excel VBA, Google Maps API, MappleX Ver. 9(株)昭文社)を組み合わせて行った。なお、サイトによっては複数のバッファが重なっている。その場合は、最小の輸送距離になる中継施設にチップを輸送するものとした。

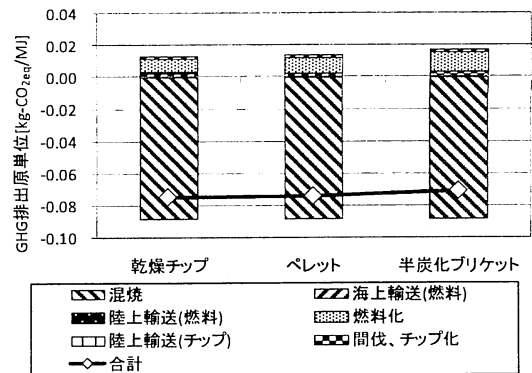
燃料化工場は、各中継施設より最小の輸送距離になる交差点上に1施設設置するものとした(図-5)。処理規模は、工場の年間稼働日数を300日とし、チップ投入量より勘案して400[t/日]と設定した。燃料化工場から日高港までの輸送は、最小の道路距離にて行うものとした。乾燥チップの嵩比重は0.3とする。半炭化ブリケットの嵩比重は、実証試験結果より0.6とし、ペレットも同じとする。

(2) マテリアルフロー

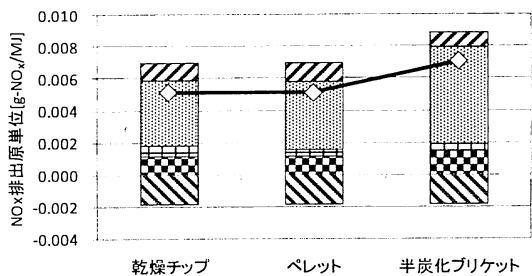
前述のスギ・ヒノキの年間間伐量より、各プロセスにおけるマテリアルフローを推計した。表-7にその結果を示す。チップ化プロセスにおける水分は、チップパーの機械熱による蒸発分である。乾燥チップおよびペレットは乾燥、成形時の水分以外のロス分はないものと考えているが、半炭化ブリケットは半炭化時に揮発性ガスのロスが発生する。そのため、半炭化ブリケットの発熱量は乾燥チップ、ペレットに比べて約40%高いものの、燃料製造量は約43%少なくなる。そのため、半炭化ブリケットの獲得エネルギー量も、乾燥チップ、ペレットに比べて約25%少なくなる。それに伴い、混焼プロセスにおいて、燃料石炭代替による石炭投入削減量は、乾燥チップとペレットは約33,900[t/年]となるのに対し、半炭化ブリケットは約27,100[t/年]となる。

(3) インベントリ分析

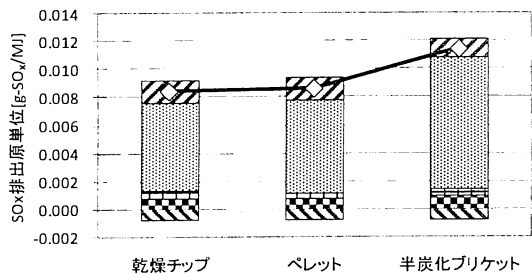
図-6に、各プロセスにおけるインベントリ分析の結果を示す。まず、GHG 排出原単位については、排出量よりも混焼による削減効果が大きく、0.075-0.071[kg-CO_{2eq}/MJ]が削減可能であった。排出原単位を燃料で比較すると、最も削減効果が大きいのが乾燥チップであり、ペレット、半炭化ブリケットとなった。半炭化ブリケットは発熱量が大きいものの、チップからの製造量が少ないため、エネルギー獲得量からみると乾燥チップやペレットよりも不利になる結果となった。各プロセスのGHG排出側に着目すると、燃料化プロセスの寄与は61-71%で最も高くなった。これは、乾燥や半炭化において、A重油の消費量が多いことに起因しており、チップのA重油代替や焼却ごみの排熱を用いる等のプロセス改善が必要である。一方、間伐、チップ化プロセスは排出量全体の15-16%である。輸送プロセスは全て合わせ



(a) GHG排出量



(b) NO_x排出量



(c) SO_x排出量

図-6 インベントリ分析の結果

表-8 環境負荷排出量

	単位	乾燥チップ	ペレット	半炭化ブリケット
GHG	t-CO _{2eq} /年	-67,700	-67,000	-51,000
NO _x	t-NO _x /年	4.6	4.6	5.1
SO _x	t-SO _x /年	7.6	7.8	8.2

ても13-22%であり、他プロセスに比べて小さい。そのため、これらのプロセスを重視するよりも、燃料化プロセスの効率改善に注力することがGHG削減において合理的であるといえる。なお、混焼プロセスにおける乾燥チップ、ペレット混入によるミルの負荷増加分は、9.77×10⁴[kg-CO_{2eq}/MJ]である。プロセス全体からみて、混焼による負荷発生分は低く、GHGの観点からみれば重視

する必要はないといえる。

次に、 NO_x 排出原単位についてみると、GHG排出原単位の結果とは逆に、 $0.0051\sim0.0071[\text{g-NO}_x/\text{MJ}]$ 増加する結果となった。これは、特に燃料化プロセスにおける排出が大きく、混焼による削減効果を打ち消しているためである。 SO_x 排出原単位についても NO_x 排出原単位と同様に、 $0.0084\sim0.012[\text{g-NO}_x/\text{MJ}]$ 増加する結果となった。

図-6の結果をふまえ、対象地域において事業を実施した場合の環境負荷排出量の結果を表-8に示す。事業実施により、GHG排出量は、約 $51,000\sim67,700[\text{t-CO}_{2\text{eq}}/\text{年}]$ まで削減することが可能である。和歌山県¹⁹⁾の2003年度におけるGHG排出量は $16,372,000[\text{t-CO}_{2\text{eq}}/\text{年}]$ であり、混焼により、県内のGHG排出量の約 $0.31\sim0.41\%$ に相当する分を削減することが可能である。この削減量は、和歌山県¹⁹⁾が、県内の家庭において、省エネの家電製品を普及させることによる目標値($47,200[\text{t-CO}_{2\text{eq}}]$)に近い削減規模である。

NO_x 排出量、 SO_x 排出量は、それぞれ $4.6\sim5.1[\text{t-NO}_x/\text{年}]$ 、 $7.6\sim8.2[\text{t-SO}_x/\text{年}]$ 増加することになるため、事業実施は地域的な大気汚染に悪影響が及ぼされることが予想される。そのため、これらに対する対策が重要になってくる。

半炭化ブリケットを対象とした経済性について若干の考察を行う。実証試験結果では、半炭化ブリケットの価格は約 $29,000[\text{円/t}]$ と試算されているが、これをGHG削減量で除することで、GHGを1削減するためのコストを試算した。その結果、コストは約 $15,400[\text{円/t-CO}_{2\text{eq}}]$ となった。これに対し、脱温暖化2050プロジェクト¹⁰⁾の試算結果では削減費用は $25,000\sim39,900[\text{円/t-C}]$ ($6,800\sim10,900[\text{円/t-CO}_2]$)と試算されており、経済性からみた課題は多いといえる。

(4) 半炭化ブリケットのエネルギー獲得量に関する追加分析

前項では、半炭化ブリケットによるGHG削減効果は、乾燥チップ、ペレットよりも低くなる結果となった。その主因は、半炭化ブリケットの発熱量の高さに関わらず、燃料製造量が他の燃料よりも少なくなるためである。但し、前述したように、半炭化ブリケットは、輸送コストの低減や石炭混焼時の負荷増加の抑制に効果がある。そこで、間伐プロセスの生産能力の観点から、ブリケット燃料の獲得エネルギー量を乾燥チップのそれと同じにするために必要な間伐材生産量、植林面積を推計した。

半炭化ブリケットの獲得エネルギー量は、乾燥チップのそれより約25%低い。そのため、獲得エネルギー量を同一にしようとする、半炭化ブリケットの製造量を $27,100[\text{t/年}]$ から $35,300[\text{t/年}]$ と約1.3倍に増加させることが必要となる。これを満たすためには、間伐プロセスにおいて、間伐材発生量を約 $45.5[\text{m}^3/(\text{ha}\cdot\text{年})]$ まで増加させるか、間伐面積を現状よりも約12.6%増加させる必要があ

る。但し、研究対象地域のみで、間伐面積を増加させることは困難である。一方、他の自治体では、年間の間伐材発生量が $45.5[\text{m}^3/(\text{ha}\cdot\text{年})]$ を超えている事例が幾つかある¹⁷⁾。自治体により伐採面積や傾斜角度等が異なるため一概にはいえないが、高性能林業機械の都道府県別の保有実績では、和歌山県は51台であり、最も多い北海道の約9%に過ぎない¹⁸⁾。以上より、GHG排出量からみた半炭化ブリケット燃料の優位性を高める方法の一つとして、機械化の推進による間伐材生産能力の向上が重要である。

4. おわりに

本研究では、和歌山県中部地域を対象として、間伐材の石炭混焼を想定した場合の、間伐材の加工方法(乾燥チップ、ペレット、半炭化ブリケット)による環境負荷削減効果の比較評価を行った。以上の評価により得られた知見を以下に記す。

- (1) 除外地を考慮して、対象地域のスギ・ヒノキ植林面積を推計した結果、約 $65,600[\text{ha}]$ となった。これを、20年を1区切りにして継続的に事業を実施することを想定すると、年間間伐可能量は、 $104,500[\text{t/年}]$ となった。
- (2) 間伐材からの乾燥チップ、ペレット製造量は、約 $47,500[\text{t/年}]$ であり、半炭化ブリケットは $27,100[\text{t/年}]$ と約43%少なくなった。それに伴い、半炭化ブリケットの獲得エネルギー量も、乾燥チップ、ペレットに比べて約25%少なくなった。混焼プロセスにおける、燃料石炭代替による石炭投入削減量は、乾燥チップとペレットは約 $33,900[\text{t/年}]$ となったのに対し、半炭化ブリケットは約 $27,100[\text{t/年}]$ となった。
- (3) インベントリ分析の結果、GHG排出削減効果は $0.075\sim0.071[\text{kg-CO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}]$ となった。排出原単位を燃料で比較すると、最も削減効果が大いのが乾燥チップであり、ペレット、半炭化ブリケットとなった。半炭化ブリケットは発熱量が大きいものの、チップからの製造量が少なくなため、エネルギー獲得量からみると乾燥チップやペレットよりも不利になる結果となった。逆に、 NO_x 排出原単位は $0.0051\sim0.0071[\text{g-NO}_x/\text{MJ}]$ 、 SO_x 排出原単位は $0.0084\sim0.012[\text{g-NO}_x/\text{MJ}]$ 増加した。
- (4) 対象地域において事業を実施した場合、GHG排出量を約 $51,000\sim67,700[\text{t-CO}_{2\text{eq}}/\text{年}]$ まで削減することが可能である。半炭化ブリケットについて、GHGを1削減するためのコストは約 $15,400[\text{円/t-CO}_{2\text{eq}}]$ と試算された。
- (5) 半炭化ブリケットの獲得エネルギー量を乾燥チップと同一にする場合、間伐プロセスにおいて、間伐材発生量を約 $45.5[\text{m}^3/(\text{ha}\cdot\text{年})]$ まで増加させるか、

間伐面積を現状よりも約12.6%増加させる必要がある。前者について考えた場合、高性能林業機械の導入促進により、間伐材の生産能力を向上させることが重要である。

今回の検討では、可能な限り地域の実情を考慮してLCAを実施することを試みた。これにより、間伐や輸送に関するプロセス、微粉体製造時のミルの負荷は、さらなる検討が必要であるものの、GHG排出の観点からみてあまり重視する必要はないことがわかった。これは、燃料化プロセスでの効率改善の必要性のほか、より広域でのエネルギー活用システムの構築が可能であることを示唆している。今後の課題としては、今回は環境負荷排出量の観点から評価を行ったが、事業化に伴う経済性の観点も含めた評価を行う予定である。また、今回は特定の間伐現場における実証試験結果を用いたが、森林の育成状況等が異なる複数の現場を対象にした間伐プロセスのインベントリデータの整備が必要である。

謝辞：本研究の一部は、経済産業省平成21年度「低炭素社会に向けた技術発掘・社会システム実証モデル事業」、環境省環境研究総合推進費(E-0806)の助成を受けたものである。また、本研究の遂行に当たり、(有)原見林業、林業機械販売代理店、プラント設計関係者、自治体等への多大なる協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 環境省温室効果ガス排出量算定方法検討会：平成 14 年度エネルギー・工業プロセス分科会報告書(燃料)，pp.123, 2002.
- 2) 中村孝洋ほか：石炭とバイオマス混焼発電，火力原子力発電，Vol.57, No.10, pp.839-858, 2006.
- 3) 西山明雄ほか：石炭火力での木質バイオマス混焼の可能性評価，火力原子力発電，Vol.58, No.3, pp.219-228, 2007.
- 4) Mann, M.K. *et.al*: A life cycle assessment of biomass cofiring in a coal-fired power plant, *Clean Prod. Processes*, Vol. 3, pp.81-91, 2001.
- 5) Enrico, B. *et.al*: Life cycle assessment of fossil CO₂ emissions reduction scenarios in coal-biomass based electricity production, *Energy Conversion Manag.*, Vol.45, pp.3053-3074, 2004.
- 6) 澤井徹ほか：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，Vol.33, No.1, pp.31-37, 2007.
- 7) 石村健志ほか：炭化固定型化技術による木質系バイオマスの熱エネルギー特性の向上，高温学会誌，Vol.33, No.1, pp.38-42, 2007.
- 8) 石塚成宏ほか：森林生態系は地球温暖化を促進するか？抑制するか？：Nature 誌に掲載された「植物体によるメタン発生」の追試験結果と問題点，および今後の研究課題，森林科学，Vol.47, pp.67-69, 2006.
- 9) IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): *Climate Change 2007-The Physical Science Basis*, pp.33, 2007.
- 10) 石坂和明ほか：ペレットストーブのライフサイクル環境影響評価，日本 LCA 学会誌，Vol.3, No. 1, pp.45-51, 2007.
- 11) 省エネルギーセンター：平成 14 年度省エネルギー優秀事例全国大会省エネルギー実施事例，2002，http://www.ecoj.or.jp/succase/02/c/c_19.html
- 12) 大野恵美ほか：微粉炭炊きボイラでのバイオマス利用技術，石川島播磨技報，Vol.44, No.6, pp.384-389, 2004.
- 13) 島地岩根ほか：広葉樹樹皮の燃料資源的基礎研究，三重大学農学部演習林報告，Vol.16, pp. 61-79, 1988.
- 14) 資源エネルギー庁総合政策課：エネルギー源別標準発熱量表の改訂について，2002，http://www.rieti.go.jp/users/kainou-kazumari/download/pdf/1aro11-x1031ebs_8.pdf
- 15) 和歌山県：和歌山県地球温暖化対策地域推進計画，2006，<http://www.pref.wakayama.lg.jp/prefg/032000/chiiki/kei.pdf>
- 16) 脱温暖化 2050 プロジェクト：2050 日本低炭素社会シナリオ：温室効果ガス 70%削減可能性検討，pp.9, 2008，http://2050.nics.go.jp/index_j.html
- 17) 森林利用学会間伐作業研究会編：高性能林業機械による間伐作業方法，林業機械化協会，pp.130-133, 2002.
- 18) 林野庁：平成 19 年度林業機械保有状況調査結果，2009，<http://www.rinya.maff.go.jp/press/kaihatu/090129.html>

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL LOAD REDUCTION EFFECT OF WOODY BIOMASS-COAL MIXED COMBUSTION -CASE STUDY IN CENTRAL REGION OF WAKAYAMA PREFECTURE- Tomohiro TABATA, Tsuyoshi TORIKAI, Mineo TSURUMAKI and Yutaka GENCHI

In this study, we evaluated environmental load reduction effect of woody biomass-coal mix combustion at coal thermal power plant. We assumed to conduct tree thinning at central region in Wakayama prefecture. Collected thinned wood is transported and processed as a woody fuel. Annual production of thinned wood was estimated by geographic information system. We applied LCA methodology to evaluate life cycle environmental load from tree thinning to mixed combustion. Then, we targeted dry chip, woody pellet, semi-carbonized fuel as woody fuel, and comparative evaluation taking into account difference of fuel production process was conducted. We also discussed the environmental load reduction effect of woody fuel, and improve plans at wood thinning process and fuel production one.