

廃木材利用による温室効果ガス削減効果の現在と将来の比較解析 —低炭素社会の代替物変化による影響—

矢野 順也*, 平井 康宏*, 酒井 伸一*, 出口 晋吾**

(2009年5月25日受付, 2010年3月3日受理)

Comparison of Current and Future Greenhouse Gas Reduction by Waste Biomass Utilization —Impact of Technological Changes in Substitutes in Low Carbon Society—

Junya YANO*, Yasuhiro HIRAI*, Shin-ichi SAKAI*, Shingo DEGUCHI**

In low carbon society, it was thought that substitutes of biomass would be changed from fossil resource to clean one by future technologies. Life cycle analysis was conducted to evaluate greenhouse gas (GHG) reduction effect by waste wood utilization in current and future society. Five technologies, that is, incineration, heat utilization, pyrolytic gasification and power generation by gas engine (GE), pyrolytic gasification and Fischer Tropsch (FT) synthesis, Ethanol fermentation technology were compared.

In actual technological level, it was appeared that heat utilization by wood pellet and GE power generation were favorable.

In low carbon society about 2030, diffusions of low CO₂ emission power supply, heat pump and battery electric vehicle were expected. In addition, biomass conversion technologies such as FT synthesis and ethanol fermentation would be also elevated future. As a result of analysis with these considerations, greenhouse gas reduction effects by all biomass utilization technologies were reduced to 8-42% (36-82 kg-CO₂/t-wet) and it was because of degradation of substitution effect. It was appeared that GE power generation might be the most favorable utilization scenario in low carbon society.

Key words: Waste Wood, Pyrolytic Gasification, Ethanol Fermentation, Greenhouse Gas, Low-carbon Society

1. はじめに

2050日本低炭素社会シナリオ¹⁾やCool Earth エネルギー革新技術計画²⁾など、国内では低炭素社会実現に向けて中・長期的な温室効果ガス(以下、GHG)の排出量削減に対する検討が近年行われている。特に都市部で廃棄物系バイオマスとして存在する厨芥類、紙類、廃木材等はエネルギー利用可能な資源であるとともにGHG削減効果も期待できる。国外では林地残材等をコージェネレーション利用しているスウェーデンのエンチェピング³⁾など、都市部のバイオマス利用の成功事例もいくつか報告されている。さらに、EUではバイオ燃料環境持続可能性基準案の中で温室効果ガスの削減率や排出量を廃棄物由来バイオ燃料も含めて原料・生産方法毎に公表⁴⁾している。廃棄物系バイオマス利用の評価が政策に反映されるレベルに至っており、廃棄物系バイオマスの利用技術について環境影響を評価することが社会的にも重要である。廃棄物系バ

イオマスのうち、廃木材の利用技術はバイオガス化による発電利用やエタノール(以下、EtOH)発酵のような液体燃料利用など多様なものが研究・開発されており、廃木材利用技術のGHG削減効果を評価した研究も多い。例えば、BTL(Biomass-to-Liquid)に関するLCA研究としてBaitz⁵⁾らは、ドイツのChoren社のFT(フィッシャー・トロプシュ)燃料生産(Chorenプロセス)による廃木材のFT燃料化により、軽油代替効果として60~90%のGHG排出削減が可能であることを報告している。各種の利用技術を定量的に比較することで、望ましい利用技術についての検討が可能となる。

また、バイオマス利用により得られる製品やエネルギーは既存の枯渇性資源を代替するものとしてこれまで評価されてきたものの、低炭素社会が実現した将来においては省エネルギー・高効率な新規技術が社会に導入・普及しているものと考えられる。したがって、バイオマス利用の代替物も将来的に変化するものと考え

*京都大学, ** (株) アーシン

えられ、そうした新規技術を代替する場合の GHG 削減効果の評価を行うことで、将来的にどのようなバイオマス利用方法が望ましいかを検討することは重要である。

以上から、本研究では廃木材の利用技術の温室効果ガス削減効果を定量的に試算することを目的として、将来の代替物変化を考慮したライフサイクル解析を実施した。

2. 研究内容

2.1. 対象バイオマスと機能単位

対象バイオマスは焼却処理施設への持込み（業者及び市民による）ごみ中の廃木材とした。京都市で採取した廃木材の性状分析結果から、木くずなど廃材の含水率は約10%、剪定枝は約35%であり、本研究では表1に示すように性状を設定した。2005年度の京都市の廃木材利用可能量は60,255 t-wetである。解体廃材や剪定枝等は将来も一定量の発生が見込まれるものの、その発生量予測は難しいため、解析の機能単位は、「1 t-wet の処理」とした。システム境界は「廃木材の収集から変換および回収物（製品・エネルギー）利用、残渣処分まで」とし、必要な化石資源については「採掘、調達から使用（燃焼）まで」とした。

2.2. 対象シナリオ

廃木材の処理・利用シナリオとして、焼却処理に加えて、熱利用を目的としたペレット化、発電利用として熱分解ガス化+ガスエンジン（GE）発電、液体燃料利用として FT 合成、EtOH 発酵を対象とした。直接焼却シナリオはごみ焼却施設での焼却処理を想定しており、エネルギー利用を主目的とした燃焼利用ではない。熱分解ガス化は発電利用および液体燃料利用のいずれにも対応できる技術であり、熱分解ガス化+GE 発電シナリオ（以下、「ガス化+GE 発電」）では熱分解ガスを全量発電利用するものとした。熱分解ガス化+FT 合成シナリオ（以下、「ガス化+FT 合成」）では熱分解ガスの一部を合成に利用し、残りのガスおよび反応器からの未反応ガス（以下、オフガス）を GE 発電利用することで、ガス化と液体燃料合成の消費電力を賄うエネルギー自立型液体燃料合成システムとした。

表1 廃木材の性状

LHV		MJ/t-wet	11,348
三成分	水分	%-DB	25.0
	可燃分	%-DB	98.6
	灰分	%-DB	1.4
元素組成	C	%-DB	50.1
	H	%-DB	6.5
	N	%-DB	0.0
	O	%-DB	41.8
	燃焼性 S	%-DB	0.031
	揮発性 Cl	%-DB	0.110
	P	%-DB	0.025
その他	セルロース	%-DB	41.4
	ヘミセルロース	%-DB	28.1
	リグニン	%-DB	29.1

表2 対象シナリオ

No	シナリオ	備考
1	直接焼却	
2	ペレット化	熱利用
3	熱分解ガス化+ GE 発電	
4	熱分解ガス化+ FT 合成	電力自立型
5	EtOH 発酵	

2.3. 評価項目

環境影響領域として地球温暖化を評価し、CO₂、CH₄、N₂O の排出量を GWP100 値により CO₂ 換算した。消費電力由来の CO₂ 排出は購入電力分のみを計上し、施設内の発電電力で供給可能な場合は未計上とした。また、廃木材由来の CO₂ はカーボンニュートラルとして未計上である。

表3に単位プロセスと GHG 排出の対応表を示した。化石燃料の燃焼による CO₂ 排出原単位は環境省の公表値⁶⁾を用いた。購入電力については2004年度の全電源平均値0.425 kg-CO₂/kWh⁷⁾を用いた。

2.4. 現状及び将来の時間軸設定

現状としては2008年時点を想定し、技術開発レベル（モデルのパラメータ）および代替効果を設定した。将来社会においては現在よりも高効率な省エネルギー、新エネルギー技術の普及が見込まれる。例えば、環境省では2050年に国内 GHG 排出量70%削減を目指した

表3 単位プロセスと計上される GHG 排出の対応

プロセス	サブプロセス	計上される GHG 排出		
		電力	化石燃料	その他
収集、搬出			軽油	
熱分解ガス化	GE 発電	購入 = 消費 - 発電		熱回収（代替）
	FT 合成		FT 軽油（代替）	
EtOH 発酵		購入 = 消費 - 発電		熱回収（代替）、焼却時 CH ₄ ・N ₂ O
焼却発電		購入 = 消費 - 発電		熱回収（代替）、焼却時 CH ₄ ・N ₂ O
ペレット化		購入 = 消費		
埋立		購入 = 消費	軽油	発生 CH ₄ ・N ₂ O
代替	電力	系統電力（削減）		
	灯油		灯油（削減）	
	液体燃料		軽油・ガソリン（削減）	

シナリオ検討が行われており¹⁾, エネルギー需要の40%削減とエネルギー供給の低炭素化により達成可能とされている。また, 経済産業省では2050年までに世界全体の CO₂排出量を50%削減するための革新的技術の開発ロードマップが策定²⁾ されている。さらに, 長期エネルギー需給見通し⁸⁾ では, 2030年度に2005年度比でエネルギー起源 CO₂を13%削減に寄与する2020年~2030年頃のエネルギー需給構造や新技術の普及イメージが整理されている。こうした報告を踏まえ, 本研究では2030年頃を想定して, 新規技術による新たな代替物を選択することとした。

2.5. 現状および将来の代替物

各シナリオで得られる製品またはエネルギーは表4に示した既存の製品・エネルギーを代替するとして, 代替される製品等の原料採掘から製造・消費で排出される環境影響をマイナス計上した。

2030年頃を想定した将来の代替物については, 廃木

材の利用方法となる発電, 熱利用, 液体燃料利用の各シナリオの代替物として以下の新規技術に着目した。

- ・系統電力の低炭素化
- ・ヒートポンプ (以下, HP: Heat Pump)
- ・電気自動車 (BEV: Battery Electric Vehicle)

系統電力の低炭素化について, 経済産業省の革新技术計画²⁾ では発電効率55%以上の高効率火力発電の導入を目指している。また, 資源エネルギー庁は再生可能エネルギーと原子力を合わせたゼロエミッション電源の構成比を2020年までに50%以上とするための対策を検討している⁹⁾。本研究では現状よりも系統電力の低炭素化が進むことを想定し, 全電源平均値0.425 kg-CO₂/kWh の50%削減の解析を実施した。この値は, 火力発電の発電効率が60%まで向上, さらに, 電源構成比が40%まで低下した場合の原単位に相当する。

HP は近年普及が進んでいる家庭やオフィスでの熱供給システムである。HP の性能は COP (Coefficient Of Performance: 成績係数または動作係数) で表され

表4 現状及び将来の代替物

該当プロセス	製品	代替物 (現状)	代替物 (将来)
焼却+蒸気発電, GE 発電	電力	電力会社の系統電力 (全電源平均)	低炭素化が進んだ系統電力 (全電源平均)
	熱	灯油ボイラにより供給される熱	等熱量を供給する HP の消費電力 (全電源平均)
ペレット化	ペレット (熱利用)	灯油ボイラにより供給される熱	等熱量を供給する HP の消費電力 (全電源平均)
FT 合成	FT 軽油	同距離走行時の軽油 (ディーゼル車燃料)	同距離走行時の電気自動車の消費電力 (全電源平均)
EtOH 発酵	Bio-EtOH	同距離走行時のガソリン (ガソリン車燃料)	同距離走行時の電気自動車の消費電力 (全電源平均)

表5 現状と将来の代替効果による GHG 削減効果

	現状ケースの代替物		将来ケースの代替物			単位
				個別評価	複合評価	
バイオガス	電力	0.425	電力（低炭素化）	0.213	0.213	kg-CO ₂ /kWh
FT 油	軽油	0.133	電気自動車	0.060	0.030	kg-CO ₂ /km
ペレット	灯油	0.073	ヒートポンプ	0.025	0.012	kg-CO ₂ /MJ
発電時廃熱						

※複合評価では電気自動車、HP の電力由来 GHG 削減を低炭素化系統電力で計算

る。COP の定義は、「COP = 冷暖房能 (kW) ÷ 消費エネルギー (電力・熱 kW)」であり、従来型のガス給湯器の COP は約0.8程度、2050年の HP 給湯器の COP 目標値は6.3¹⁾である。本研究では2008年時点のトッランナー機種 (COP4.8) が一般家庭に普及しているものと想定し、その HP が消費する電力を代替する場合の解析を行った。代替する HP 給湯器の COP が4.8の場合、1 MJ の熱量の供給に必要な電力量は0.21 MJ (0.058 kWh) となる。

経済産業省による次世代自動車のロードマップ¹⁰⁾では、2030年頃までに新車販売台数の7割に次世代自動車が導入される見込みである。そこで、将来の次世代自動車として電気自動車を想定し、Li イオンバッテリーを搭載した電気自動車の1 km 走行時の必要エネルギー 0.50 MJ/km を代替する場合の解析を行った。すなわち、バイオ燃料により1 km 走行した場合、代替する電気自動車で行走する際に必要なエネルギー 0.50 MJ (0.14 kWh) を削減可能とした。

表5に現状の代替物と将来の代替物を代替する時の GHG 削減効果を示した。将来の代替物の個別評価では HP、電気自動車の消費電力由来の CO₂削減は現状の系統電力での GHG 排出計数 0.425 kg-CO₂/kWh を用いて、また複合評価では系統電力の低炭素化時の係数 0.213 kg-CO₂/kWh を用いて計算した。個別評価では液体燃料の代替効果は45%、ペレットや蒸気または GE 発電時の灯油代替効果は34%にまで低下する。

2.6. 単位プロセスモデル

近年の国内外の技術開発動向を整理し、実用化、実証または基礎研究におけるパラメータを用いてモデル化を行った。なお、FT 合成や EtOH 発酵など実証または基礎研究段階の技術については各研究を比較し、

性能数値が低めのパラメータを用いた。表6に各単位プロセスのパラメータを示し、単位プロセスについて以下に概説する。

収集プロセスは廃木材の排出事業所数およびその分布状況が不明であることから、輸送距離について都市域内でのストックヤードから処理施設までを想定し50 km/ 往復と仮定した。処理残渣の搬出プロセスについても同程度の輸送距離と仮定し 50 km/ 往復とした。積載能力について、廃木材の収集車は通常 4 ~ 10t 車だが、本研究では剪定枝を含む廃木材を対象としており、比較的小規模な事業所からの収集を含むため 4t 車/ 台とした。残渣の搬出については焼却施設の焼却残渣輸送車と同程度を想定し 10t 車/ 台とした。

焼却プロセスは京都市南部クリーンセンターのような処理能力 150t/ 日以上的大型プラントを想定し、回収した蒸気を発電・熱利用することとした。回収エネルギーは投入物の低位発熱量 (LHV) に効率を乗じて算出し、発電効率15%、熱利用率15% (プロセス内消費を除く系外供給可能割合) とした。焼却プロセスでの消費電力は、国立環境研究所「平成19年度バイオ資源・廃棄物等からの水素製造技術開発」¹¹⁾で作成された、焼却対象ごみ質の変化が反映可能な以下の式を用いて算出した。

$$P = 30.6 + 0.0026 \times \text{LHV} + 0.015 \times G + 28.3 \times \text{Ash} \cdots (1)$$

$$G = (C + 1/2H + S + 1/2N + H_2O) \times 22.4 \times 1000 \\ + 0.21(m - 1) \times A_0 + 0.79 \times mA_0 \cdots (2)$$

$$L_0 = (C + 1/2H + S - 1/2O) \times 22.4 \times 1000 \cdots (3)$$

$$A_0 = L_0/0.21 \cdots (4)$$

P: 消費電力原単位 [kWh/t-wet]

LHV: 廃木材の低位発熱量 [MJ/t-wet]

G: 実湿り排ガス量 [Nm³/t-wet]

Ash: 廃木材中の灰分量 [t-wet/t-wet]

表 6 単位プロセスのパラメータ

プロセス名	データ区分	値 単位	プロセス名	データ区分	値 単位	プロセス名	データ区分	値 単位			
収集 (4t車)	燃費	4.19 km/L	ペレット化	消費電力	309 kWh/t-ペレット	EtOH 発酵 (木材)	消費電力	54 kWh/t-wet			
	輸送距離	50 km		加工ロス	0 %		破碎	330 kWh/t-wet			
搬出 (10t車)	燃費	2.99 km/L	ペレット	含水率	15.0 %		糖化	粉砕	243 kWh/t-wet		
	輸送距離	施設 - 埋立地		50 km	低位発熱量			13,194 MJ/t-wet	発酵関連	243 kWh/t-wet	
	施設 - ペレット使用地	50 km	熱分解 ガス化	消費電力	54 kWh/t-wet	C6糖化率		45.0 %			
焼却	空气中酸素濃度	21.0 %		プラント	400 kWh/t-wet			C5糖化率	65.0 %		
	空気比	1.7			投入空気量		1,360 Nm ³ /t-dry		発酵	C6発酵率	80.0 %
	完全燃焼率	98.9 %			酸素濃度		21.0 %			C5発酵率	70.0 %
	全灰中の焼却灰割合	90.0 %	炭素ガス化率		95.0 %	EtOH 含水率	0.5 %				
	全灰中の飛灰割合	10.0 %	燃料製造用ガス利用率	30.0 %	発酵残渣含水率	54.8 %					
	焼却灰含水率	20.0 %		熱分解残渣含水率		20.0 %	蒸気発電	発電効率	廃木材	15.0 %	
	飛灰含水率	0.80 %	GE 発電	発電効率	30.0 %	リグニン残渣		10.0 %			
	CH ₄ 排出原単位	0.0084 kg-CH ₄ /t- ごみ		熱利用率	30.0 %			熱利用率	15.0 %		
	N ₂ O 排出原単位	0.060 kg-N ₂ O/t- ごみ	FT 合成		消費電力	圧縮	0.06 kWh/m ³ N		液体燃料 使用	ガソリン車	ガソリン
	埋立	消費電力		6.38 kWh/t	CO 転化率	60.0 %	燃費	EtOH		9.5 km/L	
軽油消費量		重機使用		0.76 Lt		選択率		85.0 %	ディーゼル車	軽油	19.7 km/L
通常埋立 (好気性)		炭酸ガス化 比率 (埋立)		67.5 %			FT 燃料含水率	3.0 %		燃費	FT 軽油
		分解ガス中 CH ₄ 比率		0 %				濃縮 FT 燃料含水率	0.5 %		
		N → N ₂ O 変換率	0 %	濃縮エネルギー		3.0 MJ/kg-wet					

L₀ : 理論酸素量 [Nm³/t-wet]

A₀ : 理論空気量 [Nm³/t-wet]

m : 空気比 [-]

C, H, S, N, H₂O : 各元素 mol 量 [×10⁶mol/t-wet]

埋立プロセスは埋立物の炭酸ガス化率と分解ガス中 CH₄比率, 含有 N の N₂O 変換率を設定することで CH₄, N₂O 排出量を計上した。

ペレット化プロセスは破碎, 乾燥, 成形, 製品化の工程で構成される¹²⁾。ペレット化プロセスでの加工ロスはないものとし, 製品ペレットの含水率を15%とした。

熱分解ガス化プロセスは, 京都市実証設備でのガス化炉炭素転換率, CO, H₂を含む精製ガス組成を用いて精製ガス量, 性状を算出した。熱分解残渣は搬出し, 埋立処分することとした。精製ガス中の CO と H₂はそれぞれ10%-dry 前後である。FT 合成シナリオでは精製ガスの一部を液体燃料製造用に使用し, そのオフガスと残りの精製ガスを GE 発電利用して消費電力を供給した。

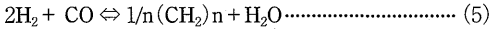
GE 発電プロセスでは, 精製ガスの LHV と発電効率から発電電力を算出し, 発電効率は30%とした。ま

た, 系外へ供給可能な熱利用率は30%とし, 電力・熱のコージェネレーションプロセスとした。

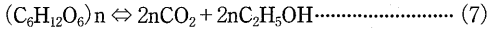
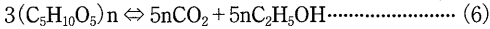
FT 合成とは, H₂および CO を主成分とする合成ガスを原料とし, Fe や Co などの触媒を用いて200 ~ 350℃, 2 ~ 5 MPa で反応させることでガソリン留分や軽油留分などの混合油を製造する技術である。化学反応式は式 (5) で示され, 必要な H₂量は反応 CO の2倍となる。FT 合成プロセスでは, ガス圧縮時の消費電力, CO 転化率と炭素数 5 以上の物質 (軽油相当) 選択率をパラメータとして設定した。精製ガス中 CO に CO 転化率を乗じることで反応 CO 量, H₂量を求め, 選択率を乗じて FT 軽油製造量を求めた。国内外の技術開発状況のレビュー¹³⁻¹⁶⁾では, CO 転化率は一般的に60 ~ 70%, 基礎研究レベルでは90%をこえる事例¹³⁾もある。C5選択率は触媒や反応温度が影響するが概ね85%以上である。

EtOH 発酵プロセスには破碎・粉砕の前処理も含み, 希硫酸を用いて加水分解を行った後, 糖化・発酵, 蒸留・脱水を経て EtOH を製造する。EtOH 発酵の反応式は式 (6), (7) で表わされる。

(FT 合成)



(EtOH 発酵)



消費電力は商用プラントからのヒアリング値を採用した。加水分解は希硫酸を用いるものとし、糖化率及び発酵率は国内実証成果をもとに設定した。既往研究¹⁷⁻¹⁹⁾ではヘミセルロースの分解による炭素数5のC5糖回収率は65～90%、炭素数6のC6糖回収率は45～85%である。また、発酵収率はC5発酵収率は70～90%、C6発酵収率は80～90%である。糖化・発酵残渣は焼却し、回収蒸気を発電・熱利用して不足分の電力を外部から購入することとした。なお、廃木材の糖化・発酵残渣は高熱量であるリグニンを含有するため約7,000 MJ/t-wetの熱量である。糖化・発酵残渣焼却の発電効率は10%、系外への熱利用率は15%とした。

3. 結果と考察

3.1. 現状ケース

図1に現状ケースの結果を示した。全てのシナリオにおいてGHG削減効果が期待できる結果となった。特にペレットの灯油代替効果が非常に大きく、「ペレット化」が最もGHG削減効果に優れたシナリオとなった。熱分解ガスの利用用途については、「ガス化+GE発電」は「直接焼却」よりも22%高いGHG削減効果となり、「ガス化+FT合成」は「直接焼却」とほぼ同程度の232 kg-CO₂/t-wetとなった。なお、本試算では自立型システムを想定しており、必要な電力は熱分解ガスとFT合成後のオフガスによるGE発電により供給している。そのため、熱分解ガスの47%が液

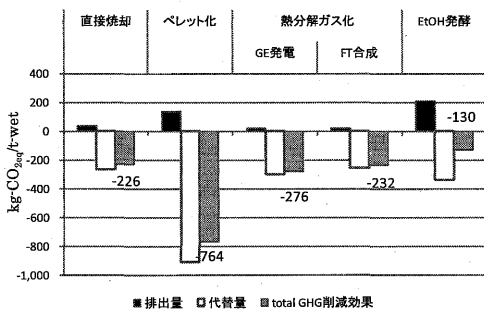


図1 現状ケースでのGHG削減効果と内訳

体燃料利用可能なガス量であった。不足分は系統電力を購入する非自立型システムに変更し、ガス利用率を向上させた場合には優劣が変化するものと予想される。これまでの研究²⁰⁾では、系統電力のGHG排出係数が小さい場合は非自立型が、排出係数が大きい場合は自立型がGHG排出削減の点では有利となった。

「EtOH発酵」は他のシナリオに比べ製造時の消費電力由来のGHG排出が大きいいため、GHG削減効果は他シナリオと比べ小さい結果となったが、それでも130 kg-CO₂/t-wetのGHG削減が期待された。

3.2. 代替物の変化を考慮した将来ケース

図2に系統電力の低炭素化を考慮した解析結果を示した。熱利用である「ペレット化」は消費電力由来のGHG排出が半減することから、GHG削減効果は増加する。液体燃料利用である「EtOH発酵」も同様の理由でGHG削減効果は212 kg-CO₂/t-wetまで増加し、「ガス化+FT合成」は外部からの電力供給が不要なためGHG排出の変動はほとんどなかった。それに対して、「直接焼却」と発電利用である「ガス化+GE発電」では、蒸気発電およびGE発電による代替効果が半減し、「直接焼却」では70%、「ガス化+GE発電」では82%までGHG削減効果が低下した。その結果、系統電力の低炭素化が進んだ場合には液体燃料利用も発電利用と同程度のGHG削減効果が期待できることが示唆された。系統電力の低炭素化（全電源平均0.278 kg-CO₂/kWh）の条件下の既往研究での解析²⁰⁾では、「ガス化+FT合成」の自立型のGHG削減効果が112～170 kg-CO₂/t-dryであったのに対して非自立型は214～261 kg-CO₂/t-dryであった。収率が向上する

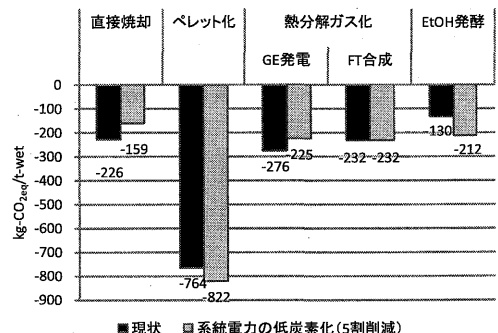


図2 現状と代替物の変化した将来のGHG削減効果比較 (系統電力の低炭素化)

非自立型ではさらに GHG 削減効果が期待できるものと考えられる。

次に、HP の導入を考慮した解析結果を図 3 に示した。なお、HP の代替効果は灯油代替効果の34%であることから、「ペレット化」の GHG 削減効果は19%にまで低下した。他のシナリオについても蒸気発電、GE 発電時に合わせて廃熱利用していたことから、GHG 削減効果は47～66%まで低下した。HP が普及した場合には熱利用は「EtOH 発酵」を除く他のシナリオと同程度の GHG 削減効果となる。

最後に、電気自動車の導入を考慮した解析結果を図 4 に示した。なお、液体燃料利用以外のシナリオは現状ケースと変わらない。「ガス化 + FT 合成」では、熱分解ガスの約半分を FT 合成に使用しているため、電気自動車代替の影響は「EtOH 発酵」と比べ小さい結果となった。一方、「EtOH 発酵」では代替効果の低下が大きく影響し、逆に GHG を排出する結果となった。極端な想定ではあるものの輸送用車両の大半が電気自動車となった場合には、廃木材からの輸送用液体燃料製造は「直接焼却」と比べても不利な利用方法となりうる可能性が示唆された。

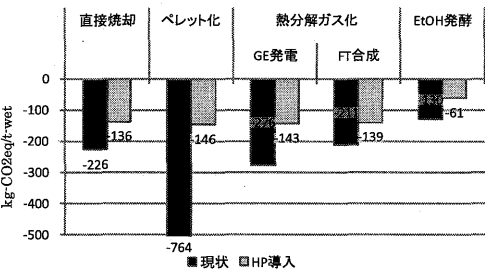


図 3 現状と代替物が変化した将来の GHG 削減効果比較 (HP の導入)

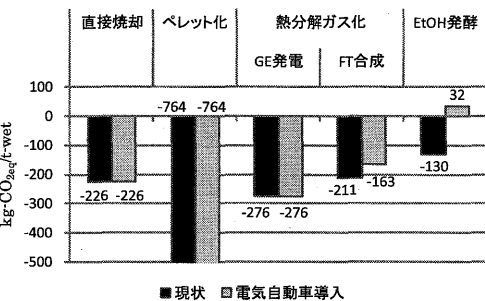


図 4 現状と代替物が変化した将来の GHG 削減効果比較 (電気自動車の導入)

3.3. 利用技術の向上を加味した総合評価

低炭素化社会が進むことで代替物が変化することを考慮した解析を前項までで実施したが、廃木材の利用技術についても2030年頃には改善されていることが予想される。特に熱分解ガス化や FT 合成は基礎研究段階、EtOH 発酵についても実証段階の技術であることから、収率の向上と省エネルギー化が予想される。

そこで、表 7 に示したパラメータを用いて、廃木材利用技術の向上を考慮した解析を実施した。2030年頃に熱分解ガス化プラントが実用化した場合、京都市の廃木材利用量を処理するには大型プラント (180 t/日 × 300日/年スケール、現状での利用可能量を処理することが前提である点に留意が必要) となるためプラント消費電力の低減が期待される。そこで、現状の実証プラントの消費電力 400 kWh/t-wet が 300 kWh/t-wet に低下すると仮定した。また、FT 合成の CO 転化率、選択率は基礎研究での高い実績値での収率向上を想定した¹³⁻¹⁶⁾。EtOH 発酵についてはアルコール協会ら¹⁷⁾の 5 万 kL/年規模のプラント計画値による高い収率、

表 7 利用技術の向上によるパラメータの変化

プロセス名	データ区分	現状	技術 向上	単位	
熱分解ガス化	消費電力 プラント	400	300	kWh/t-wet	
FT 合成	CO 転化率	60.0	90.0	%	
	選択率	85.0	95.0	%	
EtOH 発酵	消費電力 粉碎	330	33	kWh/t-wet	
	発酵関連	243	72	kWh/t-wet	
	糖化	C6糖化率	45.0	85.0	%
		C5糖化率	65.0	90.0	%
	発酵	C6発酵率	80.0	90.0	%
		C5発酵率	70.0	90.0	%

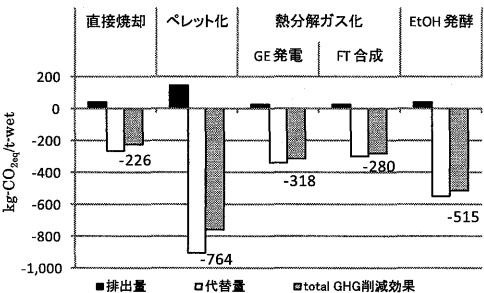


図 5 利用技術向上時の GHG 削減効果比較 (代替物：現状)

省エネルギー化が達成されるものと仮定した。

まずは既存の代替物を代替することとし、図5にシナリオ毎の total GHG 削減効果とその内訳を示した。また、利用技術向上による収率の変化を表8に示した。分解ガス化プロセスの省エネルギー化により「ガス化 + GE 発電」では total GHG 削減効果が15%、「ガス化 + FT 合成」では20%増加した。なお、「ガス化 + FT 合成」では収率の向上も寄与しているが、設定値の CO 転化率90%に対し、H₂、CO ガスの制約条件により実質的な CO 転化率は75%となり、収率は1.7倍となった。熱分解ガス化の省エネルギー化により熱分解ガスの FT 合成利用率は55%まで向上した。また、「EtOH 発酵」は収率が2.0倍になったこと、さらに省エネルギー化が進んだことで4.0倍の total GHG 削減効果となり、「ガス化 + GE 発電」より優位な結果となった。すなわち、液体燃料利用は利用技術の向上が結果に大きく影響する。

続いて、図6に現状ケース、系統電力の低炭素等3つの代替物の将来変化を考慮した複合評価ケース、さらに利用技術の向上まで考慮した総合評価の比較を示した。

代替物の複合評価では、8～22% (24～61 kg-CO₂/

t-wet) にまで GHG 削減効果が大きく低下し、「EtOH 発酵」では逆に GHG を排出する結果となった。熱利用と発電利用が同程度の削減効果となり、液体燃料利用がやや不利なことが明らかとなった。利用技術の向上まで加味した総合評価では「EtOH 発酵」を含む全てのシナリオで GHG 削減効果が期待された。シナリオ間の順位は「ガス化 + GE 発電」、「ペレット化」、「EtOH 発酵」、「直接焼却」、「ガス化 + FT 合成」となった。

3.4. 本解析の不確実性について

本研究では、FT 合成は必要電力を自身で供給（熱分解ガス化ガスの GE 発電）する自立型を想定した。外部電力を購入し、収率を向上させた非自立型条件では結果が異なる可能性があり、系統電力の GHG 排出係数が小さい場合は非自立型が有利であることが報告¹¹⁾されている。

また、焼却処理の蒸気発電、GE 発電では熱利用による GHG 削減効果を含めて解析を実施したがが地域によっては十分に熱利用できないケースも考えられる。特に、「ペレット化」は他の利用方法と比較して GHG 削減効果が相当に優位であったが、地域の賦存量を全量ペレット利用することは難しく、需要を考慮した条件設定が必要である。

さらに、2030年頃の代替物として本研究では HP、電気自動車を設定したが、その導入・普及状況についても慎重なシナリオ設定が必要である。すなわち、バイオ燃料やバイオマスエネルギーと新エネ・省エネ技術は必ずしも競合するものではなく、将来の低炭素社会での重要な役割を共に担うものであると考えられるからである。例えば、「EtOH 発酵」では将来全ての車両が電気自動車にシフトできるとは考えられず、将来においても必要なガソリン自動車に対して EtOH 燃料を利用すれば、EtOH 発酵シナリオはより一層 GHG 削減が期待される有効な利用方法となる可能性があり、図6に示した総合評価でのシナリオ間の優位性も変化し得る点には留意しなければならない。

以上のような不確実性について、地域の実態や将来目標に即した詳細な前提条件・シナリオの設定を行い、解析を加える必要がある。

表8 技術向上による収率の変化 (1t-wet 当たり)

シナリオ	製品	現状ケース	技術向上	単位
直接焼却	電力	315.6	—	kWh
ペレット化	ペレット	882.4	—	kg-wet
GE 発電	電力	242.0	342.0	kWh
FT 合成	FT 油	34.4	57.4	kg-wet
EtOH 発酵	EtOH	134.2	263.8	L

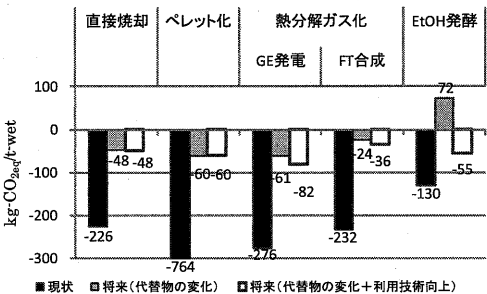


図6 現状と複合評価、総合評価の比較
※複合評価：代替物の変化（低炭素化系統電力、HP、電気自動車の導入）を反映
※総合評価：複合評価に加えて利用技術向上を加味

4. 結論

本研究では現状および2030年頃を想定した将来について、廃木材を対象に代替物の変化を考慮したライフサイクル解析を実施した。将来については、低炭素化の進んだ系統電力（現状より5割削減）、ヒートポンプ、電気自動車を代替するとして解析した結果、以下のことが明らかとなった。

- ・現状技術での解析結果では、ペレット化シナリオ、GE発電シナリオが優位な利用シナリオとなり、FT合成やEtOH発酵のような液体燃料シナリオは焼却処理と同程度かやや不利な結果となった。ただし、液体燃料利用も利用技術の向上によりGHG削減効果が増加し、焼却処理より優位となった。
- ・将来的に代替物が新規技術に変化することを考慮すると、全シナリオにおいてGHG削減効果が低下する結果となった。系統電力の低炭素化、HP、電気自動車の導入の3つの代替物の変化を考慮した複合評価では、8～22% (24～61 kg-CO₂/t-wet) にまでGHG削減効果が大きく低下した。
- ・本解析の設定条件の下で代替物の複合評価に加え廃木材の利用技術の向上まで加味した総合評価では、発電利用が最も優位となり、次いで熱利用、液体燃料利用となったが、いずれのシナリオにおいてもGHG削減効果 (36～82 kg-CO₂/t-wet) が期待できた。

謝 辞

本実証事業は環境省「地球温暖化対策技術開発事業」(平成19年度～)により実施されたものであり、関係者に謝意を表します。

参考文献

- 1) 「2050日本低炭素社会」シナリオチーム, 他(2008): 低炭素社会に向けた12の方策
- 2) 経済産業省 (2008): Cool Earth エネルギー革新技術計画
- 3) K. McCormick, et al. (2005): Exploring a pioneering bioenergy system: The case of Enköping in Sweden, Cleaner Production, Vol. 13, pp. 1003-1014
- 4) Commission of the European communities (2008): Proposal for a directive of the European parliament and of the council on the promotion of the use of energy from renewable sources, COM (2008) 19 final, 2008/0016/ (COM)
- 5) M. Baitz, et al. (2004): Executive Summary: Comparative Life-Cycle Assessment for SunDiesel (Choren Process) and Conventional Diesel Fuel. PE Europe GmbH
- 6) 環境省 (2006): 地球温暖化対策の推進に関する法律施行令第三条 排出係数一覧表
- 7) 電気事業連合会 (2007): 電力のLCIデータの概要
- 8) 総合資源エネルギー調査会 (2008): 長期エネルギー需給見通し
- 9) 資源エネルギー庁・低炭素電力供給システムに関する研究会 (2008): 第1回配布資料「低炭素電力供給システムの構築に向けて」
- 10) 経済産業省 (2007): 「次世代自動車・燃料イニシアティブ」について
- 11) 国立環境研究所 (2006-2007): バイオ資源・廃棄物等からの水素製造技術開発
- 12) 愛媛県内子町 (2007): 内子町バイオマスペレット事業化可能性調査報告書
- 13) 村田和久 (2006): BTL技術の進展とFT触媒の役割, 第40回バイオマス利用研究会, 高度技術研究所
- 14) 鈴木信市 (2001): 未開発ガス田を市場に導く石油公団GTL技術開発, 石油/天然ガスレビュー, pp. 10-30
- 15) 若村修 (2005): GTL技術開発, 新日鉄技報, No. 382, pp. 2-7
- 16) アルコール協会, 他 (2006): バイオマスエネルギー高効率転換技術開発 セルロース系バイオマスを原料とする新規エタノール発酵技術等により燃料用エタノールを製造する技術の開発
- 17) 鈴木健治, 他 (2004): 廃建材を用いた燃料用エタノール製造技術の開発, 第15回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp. 710-712
- 18) 三井造船株式会社: 木質系バイオマスを主原料とするエタノール製造技術実証試験事業 (2005-2006)
- 19) 矢野順也, 他 (2008): 廃木材利用システムのシナリオ比較, 第19回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp. 417-419