

林地残材を含む木材を燃料とするバイオマス発電のGHG

前川 洋平

GHG emissions of biomass power generation fueled by wood including forest residues

Youhei MAEKAWA

キーワード：木質バイオマス，GHG排出量，林地残材，ライフサイクルアセスメント

林業事業者から林地残材を含む燃料用木材の調達にかかるインベントリ調査を実施し、それを燃料とするバイオマス発電の温室効果ガス（GHG）排出量について、ライフサイクルアセスメント（LCA）を用いて推計した。その結果、0.25～0.36kg-CO₂/kWhとなり、いずれも立地地域の商業電力（化石燃料等を由来）からの削減率は30.8～54.5%となった。これら結果について、国が検討しているGHG排出量基準値と比較したところ、将来にわたる目標値については厳しい条件設定と示唆された。内訳としては、発電（燃焼）工程におけるGHG排出量が大部分を占めており、ボイラーのN₂O排出に起因した。

1. はじめに

2012年度に創設された「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」により、木質バイオマス発電については、原料需要が急増し、各地で丸太需要の競合や価格上昇がみられた。一方、活用が期待される林地残材は調達コストが高く、利用が十分に進んでいない。

経済産業省は2019年度よりバイオマスの持続可能性（環境性）の観点からバイオマス発電の温室効果ガス（以下、「GHG」とする）排出量の評価手法や基準等について検討している¹⁾。一方で、木質バイオマスは産地や種類などが多様かつ由来の追跡が複雑であるため、これまでその調達にかかるGHG排出量を算定した例は少ない。

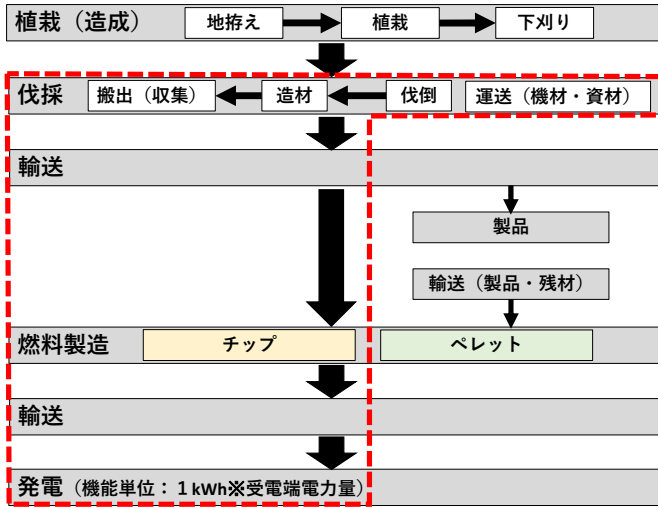
木質バイオマスのエネルギー利用に関するライフサイクルアセスメント（以下、「LCA」とする）の先行研究を概観すると、林業作業²⁾や丸太生産³⁾を対象とするものがある。その他にも、製材残材を用いた熱利用⁴⁾や間伐材による地域熱供給に関する検討⁵⁾などが存在する。古俣ら⁶⁾は林地残材の発電利用について検討しているが、同研究においては2事例を対象としており、算定事例の蓄積を課題としている。

そこで本研究は、全国の複数個所において木材収集事業者から林地残材を含む燃料用木材の調達にかかるインベントリ調査を実施し、それを燃料とするバイオマス発電のGHG排出量について、LCAを用いて評価事例の蓄積を試みた。そのうえで、化石燃料等を由来とした電力のGHG排出量と比較し、木質バイオマス利用による発電の優位性を明らかにすることを目的とした。

2. 調査方法

2.1 調査の概要とシステム境界

バイオマス発電のGHG排出量を明らかにするために、①利用段階における作業フローの整理、②林地残材の収集からチップ加工、輸送の各プロセスにおけるエネルギー消費量等のデータ収集、③LCAを用いたバイオマス発電のGHG排出量の算出、を行った。なお、GHG排出量の算出において設定したシステム境界は第1図の破線枠内に示したとおりである。また、得られた結果をもとに、化石燃料を由来とした電力のGHG排出量と比較し、バイオマス発電の優位性を考察した。



第1図 設定したシステム境界

2.2 算定方法

GHG排出量の算定式を次のように設定した。

$$E_{\text{GHG}} = (E_{\text{CO}_2} \times \text{GWP}_{\text{CO}_2} + E_{\text{CH}_4} \times \text{GWP}_{\text{CH}_4} + E_{\text{N}_2\text{O}} \times \text{GWP}_{\text{N}_2\text{O}}) / A \quad (1)$$

なお、 E_{GHG} ：発電のGHG排出量(kg/kWh)， E_{CO_2} ：伐倒(収集)から燃焼までの CO_2 排出量(kg)， GWP_{CO_2} ： CO_2 の地球温暖化係数， E_{CH_4} ：伐倒(収集)から燃焼までの CH_4 排出量(kg)， GWP_{CH_4} ： CH_4 の地球温暖化係数， $E_{\text{N}_2\text{O}}$ ：伐倒(収集)から燃焼までの N_2O 排出量(kg)， $\text{GWP}_{\text{N}_2\text{O}}$ ： N_2O の地球温暖化係数， A ：得られる受電端電力量(kWh)，とした。

また、式(1)を求める過程において、次の式(2)～(5)を設定した。

$$E_{\text{CO}_2} = B \times f_{\text{CO}_2} \quad (2)$$

$$E_{\text{CH}_4} = B \times f_{\text{CH}_4} + A \times f_{\text{W-CH}_4} \quad (3)$$

$$E_{\text{N}_2\text{O}} = B \times f_{\text{N}_2\text{O}} + A \times f_{\text{W-N}_2\text{O}} \quad (4)$$

$$A = C \times D \times F \quad (5)$$

なお、 B ：伐倒(収集)から輸送までの軽油消費量(L)， f_{CO_2} ：軽油の CO_2 排出原単位(kg/L)， f_{CH_4} ：軽油の CH_4 排出原単位(kg/L)， $f_{\text{W-CH}_4}$ ：燃焼による CH_4 排出原単位(kg/L)， $f_{\text{N}_2\text{O}}$ ：軽油の N_2O 排出原単位(kg/L)， $f_{\text{W-N}_2\text{O}}$ ：燃焼による N_2O 排出原単位(kg/GJ)， C ：得られる低位発熱量(kWh)， D ：送電網発電効率(%)， F ：送配電損失率(%)，とした。

環境負荷項目を CO_2 ， CH_4 ， N_2O とし、地球温暖化係数の100年累積値(AR5)により CO_2 換算した(CO_2 ：1， CH_4 ：28， N_2O ：265)。環境負荷原単位は、MiLCA Ver.2.3搭載データベース(サステイナブル経営推進機構のLCA実施支援ソフトウェア)を用いた(第1表)。

チップ燃焼による CH_4 と N_2O の原単位は温室効果ガス排出量・算定報告マニュアルVer.4.6⁷⁾より、算定対象発電設備のボイラー形式を選択した。

含水率は発電設備納入時と燃焼時の実績値を基本とし、実績値が得られない場合は50%とした。また、低位発熱量は対象発電設備の実績値を用いた。

輸送に係る燃料消費量については、聞き取り調査により得られたトラックサイズや輸送距離を基に、ロジスティクス分野における CO_2 排出量算定方法共同ガイドラインVer.3.1⁸⁾により導出式を用いて算定した。

なお、伐採における燃料消費量は用途別の出材積に応じて按分することとした。また、MJからkWhへの変換係数は0.2778(kWh/MJ)とした。送配電損失率は電気事業便覧(2017年度)⁹⁾より算定対象発電設備の所在地域の値を用いた。また、比較対象とする商業電力の受電端電力量1kWhあたりのGHG排出量については、MiLCA Ver.2.3より算定対象地域の2016年度の値から算定した。

また、送電端発電効率や輸送距離条件を変化させる感度分析も実施した。

第1表 環境負荷原単位

項目	CO_2	CH_4	N_2O	単位	出典	
軽油	2.89×10^0	3.33×10^{-3}	9.40×10^{-6}	kg/L	MiLCA Ver.2.3搭載データベース	
ボイラー形式	常圧流動床	—	7.40×10^{-2}	5.40×10^{-2}	kg/GJ	温室効果ガス排出量・算定報告マニュアルVer.4.6(環境省)
	加圧流動床	—	7.40×10^{-2}	5.00×10^{-3}	kg/GJ	
	流動床以外のボイラー	—	7.40×10^{-2}	5.80×10^{-4}	kg/GJ	

3. 結果

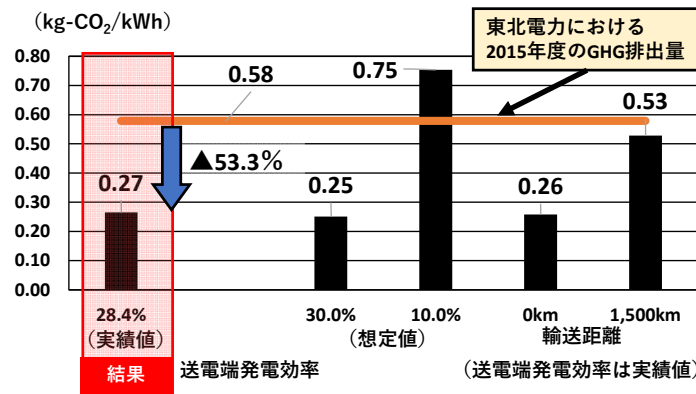
3.1 林地残材の収集を専門に行う事業者による収集・発電利用の算定例

岩手県内にて林地残材の収集を専門に行う事業者による算定結果を示す（第2図）。

対象森林は20haのアカマツ皆伐跡地であり、伐採後1年程度経過している。作業手順は、グラップルでフォワーダへ積み込み、集積土場へ輸送、グラップルで破碎機に投入し、集積土場から発電所に輸送する。なお、集積土場から発電所までは40kmであった。

その結果、GHG排出量は0.27kg-CO₂/kWhとなった。これは商業発電（東北電力）からの削減率は53.3%となる。この要因として、チップ含水率が35%（湿潤基準）であることや、対象とした発電設備における送電端発電効率が28.4%と比較的高いことが考えられる。また、感度分析の結果、仮に長距離（1,500km）輸送した場合においても商業電力との比較においては優位性があることが示された。

本事例における算定結果においては、林地残材を発電利用する環境優位性はあるものと考えられる。ただし、1事業地の算定結果であり、事業地によって林地残材の発生量や収集条件が異なることから複数事業地による検討が今後の課題といえる。

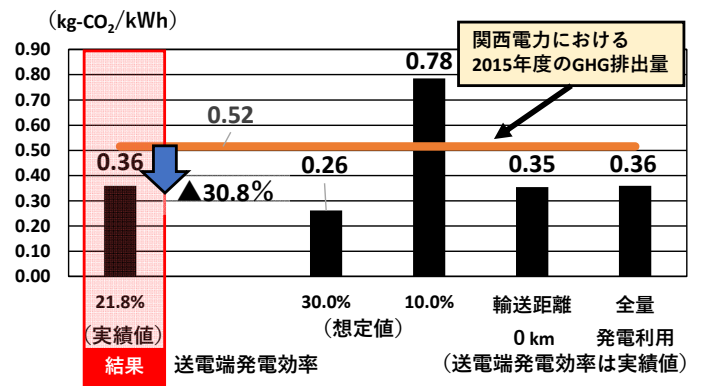


第2図 岩手県の発電設備における林地残材の収集を専門に行う事業者（#1事例）のGHG排出量

3.2 和歌山県における森林組合等による収集・発電利用の算定例

和歌山県で稼働している6,800kWの発電設備における3事業者の収集条件を第2表に示す。

N森林組合による算定結果を第3図に示す。本事例は平均傾斜30°以上のヒノキ皆伐施業地であり、架線系作業システムによるものである。山土場から発電設備までは12kmと比較的に近い距離にある。本事例における算定結果は0.36kg-CO₂/kWhであり、商業電力（関西電力）からの削減率は30.8%であった。

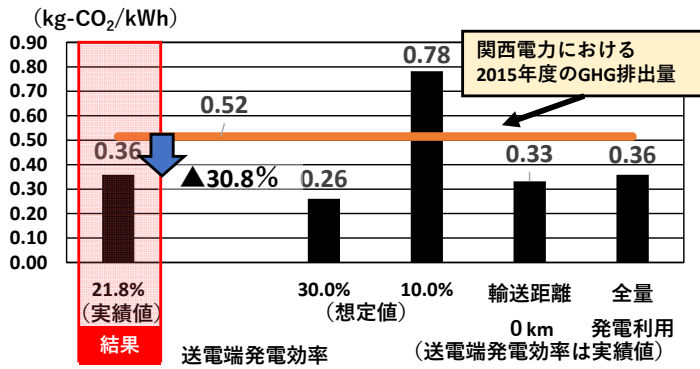


第3図 N森林組合による収集（#2-1事例）のGHG排出量

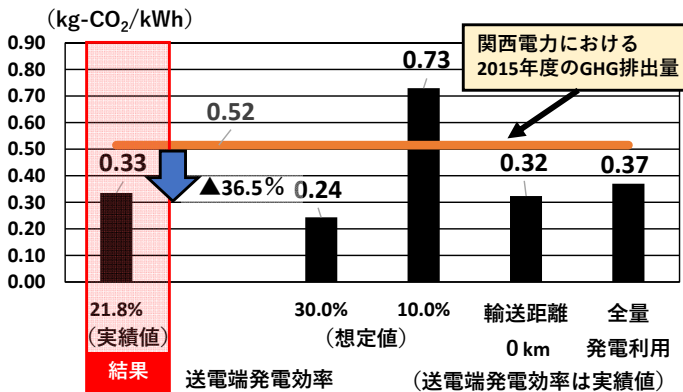
H素材生産事業者による算定結果を第4図に示す。本事例はスギ・ヒノキ間伐施業地であり、車両系作業システムによるものである。また、第5図はO素材生産事業者による算定結果であり、こちらは皆伐施業地であること、輸送距離が11.7kmとH素材生産事業者の約半分であること以外は、条件に特徴はない。GHG排出量は、H素材生産事業者によるものが0.36kg-CO₂/kWh、O素材生産事業者によるものが0.33kg-CO₂/kWhとなり、商業電力からの削減率はそれぞれ30.8%、36.5%だった。

第2表 和歌山県の発電設備を対象とする3事業者の収集条件

No.	#2-1事例 (N森林組合)	#2-2事例 (H素材生産事業者)	#2-3事例 (O素材生産事業者)
対象森林	2.48 ha (ヒノキ・皆伐)	2.51 ha (スギヒノキ・間伐)	2.0 ha (スギヒノキ・皆伐)
発電用出材積	140.14 t	85.63 t	631.410 t
作業システム	架線系 (平均傾斜30°以上)	車両系	車両系
使用機械	チェーンソー伐採、集材機、プロセッサ造材、グラップル付き掘削機仕分け・樅積み	チェーンソー伐採、プロセッサ造材、グラップル付き掘削機仕分け・樅積み	チェーンソー伐採、プロセッサ造材・樅積み
枝条・端材利用	あり	あり	あり
山土場におけるチップ加工	なし	なし	なし
輸送	山土場～(12 km)～発電所	山土場～(33.3 km)～発電所	山土場～(11.7 km)～発電所
発電設備	6,800 kW・常圧流動床・関西電力管内		



第4図 H素材生産事業者による収集 (#2-2事例) のGHG排出量



第5図 O素材生産事業者による収集 (#2-3事例) のGHG排出量

これら3条件の結果を基にした感度分析は送電端発電効率のほか、輸送距離条件や出材用途条件の変更も試みた。その結果、仮に輸送距離を0kmや全量を発電利用した場合においてもGHG排出量の大幅削減を見込めない結果となった。一方で、送電端発電効率を変更した場合のGHG排出量は大きく変化しており、発電設備側の対応がGHG排出量削減に寄与することが示唆された。

3.3 大分県の発電事業者による収集・発電利用の算定例

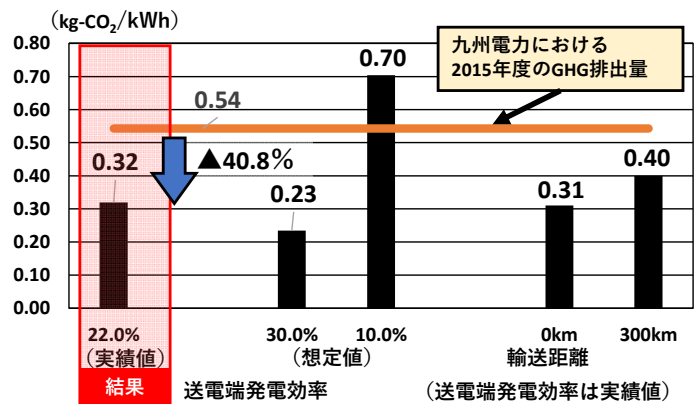
本事例は大分県における出力18,000kWの発電設備を有する事業者自らが社有林ならびに素材生産

第3表 大分県の発電事業者の収集条件

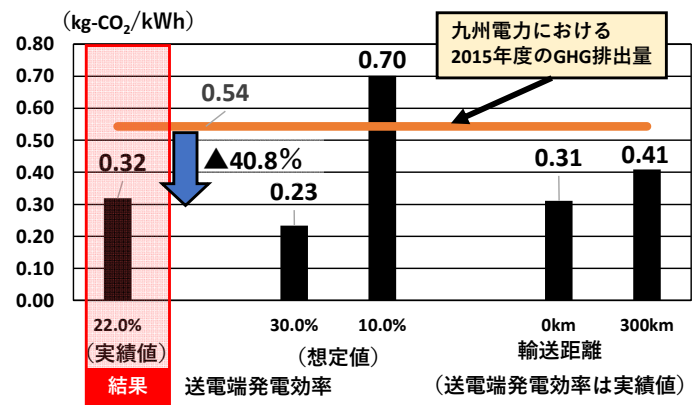
No.	#3-1事例 (発電事業者)	#3-2事例 (発電事業者)
対象森林	8.67 ha (間伐)	3.8 ha (間伐)
発電用出材積	1611.71 t	809.84 t
作業システム	車両系	車両系
使用機械	チェーンソー伐採、グラップル付き掘削機集材、ハーベスタ造材、フォワーダ運搬	チェーンソー伐採、グラップル付き掘削機集材、ハーベスタ造材、フォワーダ運搬
枝条・端材利用	なし	なし
山土場におけるチップ加工	なし	なし
輸送	山土場~(33.3 km)~チップ工場~(0.72 km)~発電所	山土場~(23.8 km)~チップ工場~(0.72 km)~発電所
発電設備	18,000 kW・常圧流動床・九州電力管内	

班を有しており、燃料材を調達するものである。各収集条件について第3表に示す。どちらも間伐によるもので、車両系作業システムも同じである。同一の発電設備まで丸太輸送し、敷地内でチップ化し、発電利用する。

各収集条件による算定結果について第6図と第7図に示す。いずれの条件においてもGHG排出量は商業発電(九州電力)からの削減率は40.8%であった。出材積の53%を燃料用に仕分けしており、燃料用途が比較的多いことがkWhあたりGHG排出量を低減させた要因と推察できた。また、各算定結果について輸送距離を変更した場合の感度分析を行ったところ、前述の事例と同様にGHG排出量の影響はわずかであることを確認した。



第6図 発電事業者のA社有林 (#3-1事例) を利用するGHG排出量



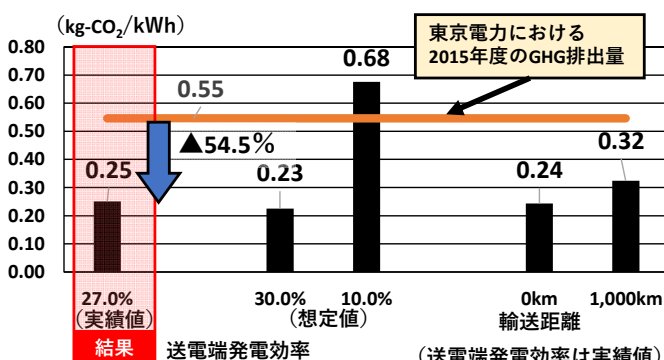
第7図 発電事業者のB社有林 (#3-2事例) を利用するGHG排出量

3.4 果樹剪定枝の収集・発電利用の算定例

本事例は森林由来やいわゆる林地残材ではなく、農作業による排出物を発電利用する場合の算定例である。千葉県市川市周辺において行われている梨生産活動では剪定や植え替えに伴う枝条類が発生する。これらは野焼き処分されることが多く、周辺環境の悪化や処分費用の負担が課題となっていた。2016年より地域の農業協同組合が中心となり、梨剪定枝の収集・エネルギー利用を開始している。2021年現在、130戸が参画している。発電利用に至る経過として、①梨農家が特定の集積場所に運搬（平均4km）、②一定の乾燥期間を設けたのちチップ化作業、③茨城県内の発電施設まで約90kmを運搬、となる。

本事例の算定結果を第8図に示す。商業電力（東京電力）による排出量からの削減率は54.5%であった。この要因として、第一に送電端発電効率が27.0%と比較的高いこと、第二に、チップ生産における燃料消費量が少ないこと、が挙げられる。特に梨生産においては、剪定作業における機械類の使用が無いことによる燃料使用量の抑制に加え、集積場所において乾燥工程（期間）が設けられていることを背景として、チップ含水率が平均37.4%（湿潤基準）となることが優位性をもたらす要因と考えられる。当該発電設備における燃料の年間消費量264,000tに対して本件はわずか760t（0.2%）であるが、果樹剪定枝のエネルギー利用に環境優位性があることを示す結果として考えられる。

なお、本結果をもとに輸送距離を変更した場合について感度分析を試みたところ、例えば1,000km輸送したとしても商業電力の実績値と比べ優位性があることを確認した。



3.5 小括

これまで説明した7事例の算定結果を第4表にまとめた。第一に1 kWhあたりGHG排出量は0.25~0.36 kg-CO₂となり、古俣ら⁶⁾による結果から逸脱するも

のではないこと、第二にいずれの事例においても、商業発電と比較して優位性があること、第三に立地する商業電力が排出するGHG排出量からの削減率は30.8~54.5%となったこと、が明らかとなった。

第4表 算定結果の一覧

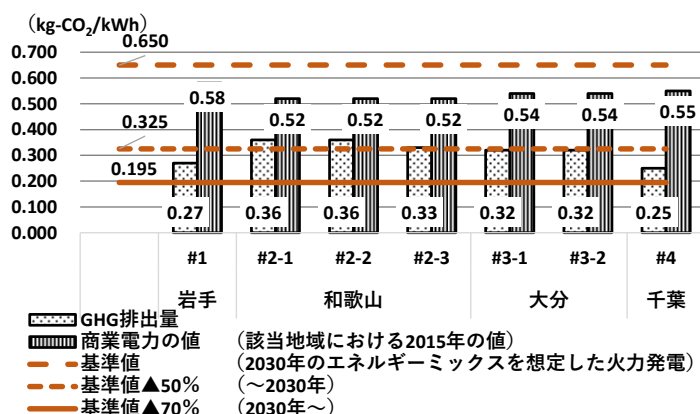
	都道府県	岩手				和歌山		大分		千葉
	No.	#1	#2-1	#2-2	#2-3	#3-1	#3-2	#4		
収集データ	収集（伐採）	(○)	○	○	○	○	○	○		
	輸送	○	○	○	○	○	○	○		
	チップ加工	○	○	○	○	○	○	○		
	燃焼	○	○	○	○	○	○	○		
	データ単位	期間	現場	現場	現場	現場	現場	現場		
GHG排出量 (kg-CO ₂ /kWh)	0.27	0.36	0.36	0.33	0.32	0.32	0.25			
商業電力 (kg-CO ₂ /kWh)	0.58	0.52				0.54		0.55		
削減率 (%)	53.3	30.8	30.8	36.5	40.8	40.8	54.5			

4. 考察

4.1 国が検討しているGHG排出量基準との比較

本章では、2021年現在、経済産業省において検討されているバイオマス発電のライフサイクルGHG排出基準と比較したい。

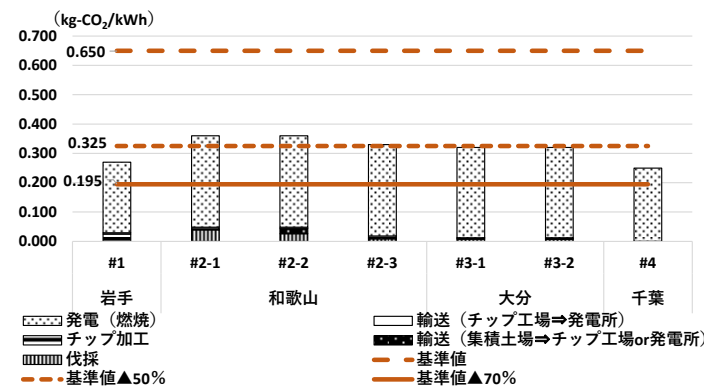
バイオマス発電におけるGHG排出量基準値として、2030年のエネルギーミックスを想定した火力発電の180g-CO₂/MJ（0.650kg-CO₂/kWh）が想定されている。また、将来にわたる排出量として、同基準値に対する削減率を2029年度まで50%（0.325kg-CO₂/kWh）、2030年度以降は70%（0.195kg-CO₂/kWh）とすることが検討されている。この基準と本研究による算定結果との比較図を第9図に示す。基準（180g-CO₂/MJ）については、全7事例が下回り、削減率50%については、4事例が下回るものの、削減率70%については下回る事例が存在しなかった。ライフサイクルGHG排出については、2022年度以降に算定条件や方法が確定するものであるが、林地残材の利用にとっては厳しい条件設定と示唆された。



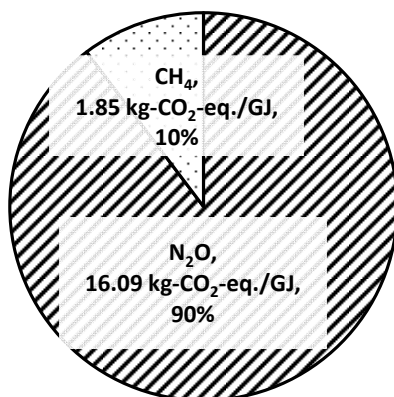
第9図 国が検討する基準値との比較

4.2 GHG排出量基準値への対応可能性

説明した7事例について、工程別の排出量を示した(第10図)。その結果、すべての事例において、発電(燃烧)工程による排出が圧倒的に多いことが明らかとなった。特に N_2O の排出量が多いことがわかる(第11図)。この排出量は、環境負荷原単位に地球温暖化係数を乗じたものであるが、環境負荷原単位は N_2O が 0.054kg/GJ 、 CH_4 が 0.074kg/GJ とほとんどかわらないものの、地球温暖化係数は N_2O が298、 CH_4 が25と差のある設定が要因である。



第10図 工程別排出量と国が検討する基準値との比較



第11図 燃烧工程における由来別のGHG排出量 (CO₂換算値)

この点を踏まえて、国が検討する基準値への対応について、改めて検討したい。GHG排出量の算定に際し、発電(燃烧)工程について、バイオマス燃料の使用からのCO₂排出は0とみなす(CH_4 と N_2O の排出については計上する)こととしている。発電(燃烧)工程における大部分を占める N_2O が算定対象に含まれていることから、例えば、本研究で算定対象としたような林地残材を含む木材を燃料利用しても、ボイラー形式や環境負荷原単位の設定により排出量基準を満たすことが出来ないものとして評価される可能性も考えられた。今後は環境負荷の小さい発電方式の採用や装置開発も課題となる。

5. おわりに

本研究では林地残材収集の専門事業者による利用や果樹剪定枝のエネルギー利用など、バイオマス発電のGHG排出量算定結果を蓄積することができた。伐採・チップ化条件や発電利用設備側の実績により結果はケースバイケースであるが、商業発電と比べGHG排出量の優位性を全事例で確認できた。

引き続き算定事例を蓄積するとともに、伐採段階における作業システムやチップ化における使用機器、輸送条件の相違等による分析を進める予定である。

謝辞

本研究はJSPS科研費JP20K22600の助成を受けた研究の一部である。また、本研究は発電・素材生産・チップ加工・コンサルタント・関連協会等にご協力戴いた。この場を借りて厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 経済産業省 総合資源エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会 新エネルギー小委員会 バイオマス持続可能性ワーキンググループ：第二次中間整理 (2012)。
- 2) 仲畑力, 小松崎未来, 有賀一広, 武井裕太郎, 山口鈴子, 伊藤要, 村上文美, 斎藤仁志, 田坂聡明: 森林利用学会誌26(3), 187-194 (2011)。
- 3) Katsuyuki Nakano, Naoki Shibahara, Toshifumi Nakai, Keisuke Shintani, Hirotaka Komata, Masahiro Iwaoka, Nobuaki Hattori: Journal of Cleaner Production 170(1), 1654-1664 (2018)。
- 4) 一重喬一郎, 服部順昭: 木材学会誌57(2), 63-71 (2011)。
- 5) 加用千裕, 大慈彌亮太, 岩岡正博, 安田幸治: 木材学会誌62(5), 172-181 (2016)。
- 6) 古俣寛隆, 酒井明香, 八坂通泰, 石川佳生, 服部順昭: 木材学会誌59(1), 22-28 (2013)。
- 7) 環境省: 温室効果ガス排出量算定報告マニュアル Ver.4.7 (2021)。
- 8) 経済産業省・国土交通省: ロジスティクス分野におけるCO₂排出量算定方法共同ガイドライン Ver.3.1 (2016)。
- 9) 経済産業調査会: 2017年度版電気事業便覧 (2018)。

一利用部 資源・システムグループ
(原稿受理: 2022. 11. 9)