

林野庁委託事業

報告書

令和6年度改質リグニンの実用化に向けたLCA評価プロジェクト
委託事業

「改質リグニン応用材料の導入に向けた
ビジネスエコシステム形成に資する判断材料の識別、検討と提示」

2025年3月13日
国立大学法人東京大学

目次

1	背景	1
1-1	国内森林の現状及び課題	1
1-2	化学産業の現況及び課題	1
1-3	木質バイオマスの利用	2
2	本事業の目的	3
3	GLの提供価値を最大化するシナリオの検討	3
3-1	森林資源の持続可能な活用とGLの有効利用に関する要点整理	3
3-2	自動車部品への応用と代替シナリオ	4
4	GLのLCAの実施	4
4-1	GL製造システムの概略	4
4-2	温室効果ガス（GHG）排出量の計算手法	5
4-3	前提条件	6
4-4	結果	7
5	GLの社会実装の意義及び波及効果	12
5-1	GLをプラスチック代替素材として利用する意義	12
5-2	プラスチックの一部をGLで代替することによる影響	13
5-3	繊維強化プラスチックのリサイクルへの影響	15
6	まとめ	16
	(参考) 事業の推進体制	17
	(参考) ワークショップの開催経緯	18
	(参考) ヒアリング等結果	23

1 背景

1-1 国内森林の現状及び課題

樹木は大気中から地球温暖化の原因となる二酸化炭素を吸収し、光合成によって酸素を放出するとともに、樹体内に炭素を貯留する。日本は国土の約7割を森林が占めており、その約4割が人工林である。その人工林のうち、4割以上をスギが占めている。これらの森林の多くが、戦後の復興や高度経済成長における木材需要の増大により生じた伐採跡地に植林されたため、現在では高齢級化が進んでいる。

図1に示すように、樹木は高齢級化に伴い1年間の成長量が低下するとされている^[1-3]。つまり、高齢級化により森林が大気中の二酸化炭素を吸収する機能は低下する。森林による二酸化炭素吸収量を確保するためには、持続可能な範囲で「伐って、使って、植えて、育てる」といった循環利用を進め、若い森林を確実に造成していく必要がある。しかし、日本の森林の伐採率（森林蓄積量に対する年間の木材生産量の比率）は、ヨーロッパなどに比べてとても低く、わずか0.5%程度である（ヨーロッパでは1~4%）^[4]。

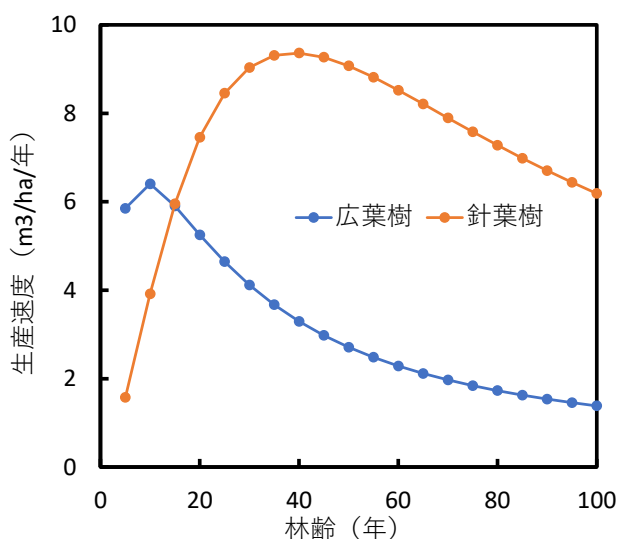


図1 樹齢と成長速度の関係

1-2 化学産業の現況及び課題

我が国は、「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」（令和3年10月22日閣議決定）において、温室効果ガスの排出量実質ゼロ（ネットゼロ）を2050年までに達成すると宣言しており、その実現の道筋を示すことが急務である。現在、化学産業は、原油を原料としてプラスチックやゴム・化学繊維を製造しているため、エネルギーのネットゼロ化を超えた取組が求められる。すなわち、原料調達から製品製造、回収・リサイクルまで、従来の産

業活動を刷新するような大きな変革が必要となる。化学工学会地域連携カーボンニュートラル推進委員会は、プラスチックなど化学品のリサイクル率の向上、国内森林バイオマス資源の最大活用、大気に放出される二酸化炭素（CO₂）の回収・利用・貯留（CCUS）により、輸入化石資源から脱却した化学産業の実現が可能であるとの見通しを得ており^[5]、国内森林バイオマス資源の有効活用に特に重点を置いている。

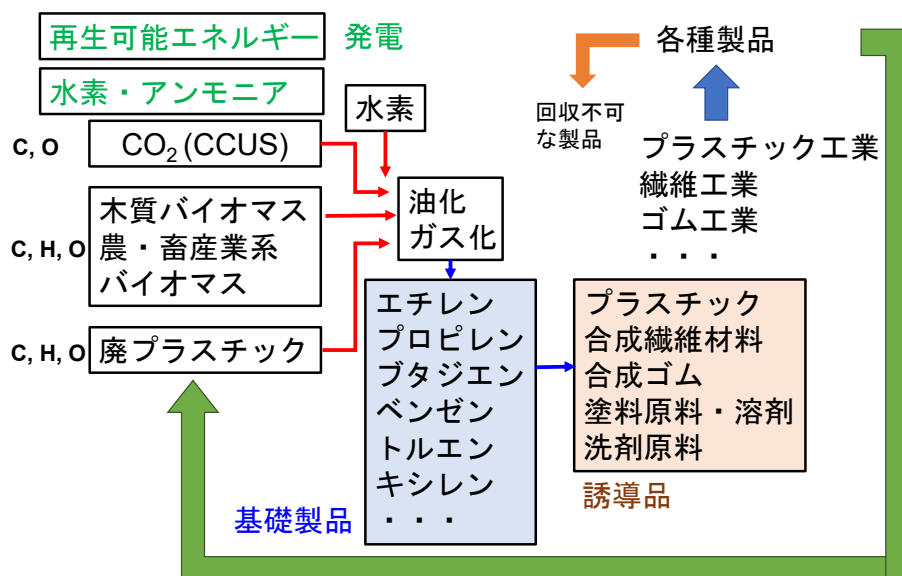


図2 ネットゼロ化学産業の概念図

1-3 木質バイオマスの利用

木質バイオマスの主要成分はセルロース、ヘミセルロース、リグニンであり、その炭素量を見積もるために用いる組成としては、おおよそ C:H:O = 1:2:1 であると考えて差し支えない。森林から伐採した木材を建材や家具として活用する場合には、これらの成分を分離することなくそのまま利用することから、樹木が成長時に吸収した CO₂ から蓄積した炭素はそのまま木材中に固定される。一方、製紙工場では、木材のセルロース成分のみがパルプに加工され、そこから紙製品が生産される。残渣となるリグニン成分は燃料として利用するため、結果としてセルロース成分相当分の炭素のみが固定化され、それ以外の成分は、CO₂ として大気中に放出されてしまう。木質バイオマスからバイオエタノールなどのアルコール類を製造し、プラスチックを合成することもできるが、この場合も、主にはセルロース成分のみが原料として利用され、残りのリグニンは燃料として利用されるため、結果としてセルロース成分相当分の炭素のみが固定化され、それ以外の成分に由来する炭素は、CO₂ として大気中に放出されてしまう。建材などの製材時に発生する端材やおが粉等は、製材工場の木材乾燥やバイオマス発電、地域の暖房などの燃料として利用することもあるが、そこに蓄積された炭素は燃焼した時点で CO₂ として大気中に放出されてしまう。このように、現在実用化

されている技術では、リグニンは燃料としての利用が中心であり、木質バイオマスの炭素収率¹を低くする主な要因となっている。

このような中、国立研究開発法人森林研究・整備機構は、リグニンを積極的に化学品の原料として用いる技術として、スギのチップとポリエチレングリコールを混合・加熱して得られる改質リグニン (Glycol Lignin (GL)) を開発した^[6,7]。GL を樹脂と混ぜ合わせることで、従来の樹脂と比較して高強度、耐熱性、耐薬品性など様々な機能をもつことが知られている。その結果、リグニン成分相当分の炭素も固定化させることができ、木質バイオマスの炭素収率を格段に上げることが期待される。また、リグニンも含めた木材の利用価値の向上により、林業の収益性を改善し、伐採→販売→再造林という循環型林業の経済合理性が高まり、再造林が促進される。結果として、国内森林の CO₂ 吸収機能の増大に加え、山村地域に新たなバイオ産業を創出することによる雇用創出につながる。

2 本事業の目的

前述した状況を踏まえ、化学産業における化石資源の利用を抑制し、温室効果ガス (GHG) 排出削減へ貢献する手段として、GL の早期の実用化及び普及を図ることが有効である。そのためには、GL の代替利用が期待できる素材に対し、GL を導入することによる環境影響軽減等の価値について示すことが重要である。

GL は、エンジニアリングプラスチックやスーパーエンジニアリングプラスチックといった高機能プラスチック分野を中心に用途開発が続けられており、今後さらに用途が拡大することが予想されるが、本事業では、現時点で GL の提供価値を最大化できる用途等を検討し、そのライフサイクルアセスメント(LCA)評価等を通じ、GL の優位性と技術ポートフォリオの中の役割を示すことで、GL の導入に取り組む企業や分野を拡大し、ネットゼロの実現はもとより、高機能プラスチックを用いる国内産業の発展、ひいては新たな木材需要の創出による林業・木材産業、山村地域の発展に貢献することを目的とする。

3 GL の提供価値を最大化するシナリオの検討

3-1 森林資源の持続可能な活用と GL の有効利用に関する要点整理

森林資源を持続的に利用するためには、適切な伐採とともに、再造林の原資となる林業収益を生み出す資源の有効活用が求められる。GL は、これを実現するための木質バイオマスの新しい活用方法の候補として検討されており、原料供給体制の確立と用途の開発が重要である。持続可能な資源利用によって環境負荷の低減を図り、エンジニアリングプラスチック等への応用により経済的な価値も向上させることが可能と考えた。

¹ 原料に含まれる炭素量に対する回収された物質の炭素量の割合

3-2 自動車部品への応用と代替シナリオ

GLは、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)のマトリックス樹脂²として利用可能であり、特に自動車の外装部品(例:ドア、ボンネット)や内装部品への応用が検討されている^[8, 9]。自動車産業への応用は、軽量化と耐久性の向上が期待されるとともに、GLの導入における社会的なインパクトが大きいと考えられる。しかし、GLを使用することで、自動車の部品の設計や機械的特性が変わる可能性があることが懸念される。

そこで、今回は、自動車の内装部品を念頭に、かつ、他の製品への適用もスコープに含めることができるように、自動車部品に使われている主な樹脂^[10, 11]を対象として検討することとした。例えば、自動車内部の燃料タンク、ブレーキオイルタンクなど容器類やワッシャーにはポリエチレン(PE)が使用されている。インストルメントパネル、ピラーガーニッシュ、ハンドル、ドアトリム、エアバッグ、フロアマット、シートなど自動車内外装部品にはポリプロピレン(PP)複合材が多く使用されているが、そのうち半分以上はPPが占めている。エンジンルーム内部品、燃料ホース、ドアハンドル、パネル類にはナイロン6(PA6)が使用されている。これら3種の樹脂の代替を検討することとした。

4 GLのLCAの実施

4-1 GL製造システムの概略

本計算にて考慮したGL製造システムを図3に示す。GLはポリエチレングリコール(PEG)とスギの木屑・木粉を原料として製造する。木屑は一般製材の際に廃棄されるもの、木粉はスギ原木から直接製造するものと定義した。GLを従来素材の代替に用いるため、ポリエチレン(PE)やポリプロピレン(PP)、ナイロン6(PA6)などの石油由来樹脂と混練した樹脂材料(混練後樹脂)の製造を考える必要がある。また、GL製造プロセスで副生するパルプからバイオエタノールを製造すると仮定した。

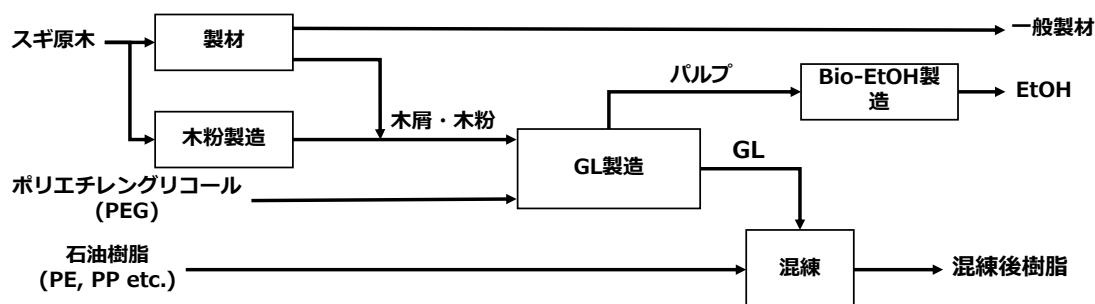


図3 改質リグニン (GL) 製造システムの概略

² 繊維強化複合材料において、炭素繊維やガラス繊維を固定・保護し、荷重伝達や耐久性を確保するための樹脂成分。従来は、エポキシ樹脂などの熱硬化性樹脂が用いられている。

4-2 温室効果ガス（GHG）排出量の計算手法

本計算では、以下に示す想定及び計算手法により GHG 排出量の算定を行った。

GL 製造プロセスで副生するパルプを原料としてバイオエタノールを製造すると仮定し、製造するバイオエタノール相当量は他の製造方法によるエタノールの生産を回避するものとした。代替するエタノールとしては、石油由来の合成エタノール、発酵由来のエタノールの 2 ケースを想定した。

石油由来樹脂との混練にかかるエネルギー消費量は、木質系フィラーによる強化樹脂である CNF 強化樹脂での値^[12]を使用した。混練する石油由来樹脂の種類にかかわらず一定とし、GL 混合比率は 20 wt%、50 wt% の 2 ケースを想定した。混練する樹脂は、PE、PP、PA6 の 3 種類を考慮した。また、混練後樹脂の cradle-to-grave GHG 排出量^{*3}算出では、最も単純なケースとして製品廃棄後は単純焼却を想定し、単純焼却時に発生する GHG は CO₂ のみと仮定した。

上記で説明したケースについて、GL 製造の cradle-to-gate、混練後樹脂製造の cradle-to-gate、及び混練後樹脂製造の cradle-to-grave の排出インベントリを下記によって計算した。

- (1) GL 製造 1 kg あたりの cradle-to-gate GHG 排出量^{*4} (E_{GL} [kg-CO₂ eq/kg])

$$E_{GL} = w_{WP}(E_{WP} - E_{stock,WP}) + w_{PEG}E_{PEG} + \sum_i q_{i,GLp} E_{i,GLp} - w_{EtOH}E_{EtOH}$$

w_{WP} : GL 1 kg 製造時に必要な木屑・木粉量 [kg/kg-GL]

E_{WP} : 木屑・木粉 1 kg 製造時の cradle-to-gate GHG 排出量 [kg-CO₂ eq/kg]

$E_{stock,WP}$: 木屑・木粉 1 kg に貯蔵される炭素ストックの CO₂ 換算量 [kg-CO₂/kg]

w_{PEG} : GL 1 kg 製造時に必要な PEG 量 [kg/kg-GL]

E_{PEG} : PEG 1 kg 製造時の GHG 排出原単位 [kg-CO₂ eq/kg]

$q_{i,GLp}$: GL 1 kg 製造時に必要なユーティリティ消費量

$E_{i,GLp}$: 各ユーティリティ 1 単位消費の GHG 排出原単位

w_{EtOH} : GL 1 kg 製造時に副生するパルプを原料として製造したバイオエタノール生産量

E_{EtOH} : 代替するエタノール 1 kg あたりの GHG 排出原単位 [kg-CO₂ eq/kg]

- (2) 混練後樹脂 1 kg あたりの cradle-to-gate GHG 排出量 ($E_{Rafk,cradle-to-gate}$ [kg-CO₂ eq/kg])

$$E_{Rafk,cradle-to-gate} = r_{GL}E_{GL} + (1 - r_{GL})E_{R-fossil} + P_{kead}E_{ele}$$

r_{GL} : GL 混合比率 (重量ベース)

$E_{R-fossil}$: 石油由来樹脂 1 kg 製造時の GHG 排出原単位

P_{kead} : 樹脂混練にかかる混練後樹脂 1 kg あたりのエネルギー消費量 [kWh/kg]

E_{ele} : 電力 1 kWh 生産時の GHG 排出原単位 [kg-CO₂ eq/kWh]

³ cradle-to-grave GHG 排出量: 原料調達から製品の廃棄までの製品の一生で排出される合計 GHG 量

⁴ cradle-to-gate GHG 排出量: 原料調達から製品製造までに排出される合計 GHG 量

(3) 混練後樹脂 1 kg あたりの cradle-to-grave GHG 排出量 ($E_{Rafk,cradle-to-grave}$ [kg-CO₂ eq/kg])

$$E_{Rafk,cradle-to-grave} = E_{Rafk,cradle-to-gate} + r_{GL}E_{GL,incn} + (1 - r_{GL})E_{R-fossil,incn}$$

$E_{GL,incn}$: GL 1 kg を単純焼却した際の直接 GHG 排出量 [kg-CO₂ eq/kg]

$E_{R-fossil,incn}$: 石油由来樹脂 1 kg を単純焼却した際の直接 GHG 排出量 [kg-CO₂ eq/kg]

4-3 前提条件

本計算における各プロセスのデータソース及び推算手法は表 1 のとおりである。

表 1. 各プロセスのデータソース及び推算手法

プロセス	データソース及び推算手法
木屑・木粉製造	4-3(1)を参照
PEG 製造	IDEA V3.4.1
石油樹脂	IDEA V3.4.1
GL 製造	高機能リグニンコンソーシアムの研究成果をもとに算定
Bio-EtOH 製造	Sebastião et al. (2016) ^[13]
石油由来樹脂及び GL の単純焼却による CO ₂ 排出量	4-3(2)を参照

(1) 木屑・木粉製造

木屑については、製材に伴って副産されることを想定した。IDEA⁵の「一般製材, 4 桁, JPN」では木屑はリマインダフロー（環境負荷を割り当てないフロー）として計上されているが、GL 生産ではこれを資源として利用するため、無負荷とするのではなく、一定の配分基準に基づいて、製材にかかる環境負荷を木屑にも配分することが適切であると考えた。ここでは、質量配分と価値配分の両方を検討することとした。

質量配分では、製材工場における残渣発生のマテリアルバランス^[4]に基づき、木屑発生量を素材消費量の 27.5vol%とした。前述の IDEA 「一般製材, 4 桁, JPN」の環境影響について、元のデータでは製材にすべての環境負荷が配分されているが、製材に 62.5%、木屑に 27.5%を再配分した。これは体積分率による配分であるため、乾燥木材の密度^[5]より、含水率 46.6wet%、密度 0.44 t/m³として重量換算を行い、木屑 1t あたり 56.4 kg-CO₂ と算出された。

価値配分では、製材、集成材、合板、チップについては、農林水産省「木材需給報告書」及び木材価格等を整理した林野庁「林産物に関するマンスリーレポート」^[6] に掲載された、2023 年の価格を参照した。木屑の価格は複数のウェブサイトでの市場価格を参考としながら、ベースケースを 10,000 円/t、GL による高付加価値化ケースを 50,000 円/t、比較のため

⁵ 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 IDEA ラボによる提供される約 5300 種類の農・林・水産物、工業製品等の日本の全ての製品・サービスを対象とした環境負荷物質を定量可能なデータベース

の高額化ケースを 100,000 円/t と変動させて、上記の木製品価格とのバランスから木屑への配分比をそれぞれのケースで決定した。結果を表 2 に示す。

表 2 価値配分により算出した木屑の CO₂ 排出量

木屑の価格 (円/t)	配分後の CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /t-木屑)
10,000	72.1
50,000	260
100,000	385

次に、木粉については、丸太を木粉製造機によって処理することで生産されると仮定した。複数のスケールの仕様表が得られた機器のデータ^[7]を用いて、1t の木粉生産に必要な電力量を求めた。IDEA 「すぎ丸太 (原木), JPN」 に対して、「電力, 日本平均, 2021 年度, JPN」に消費電力量を乗じた値を加算し、木粉 1t あたりの生産にかかる CO₂ 排出量は 60.1 kg-CO₂ となった。

(2) 石油由来樹脂及び GL の単純焼却による直接 CO₂ 排出量

本計算では、石油由来樹脂及び GL の単純焼却において排出される GHG が CO₂ のみであり、可塑剤などといったモノマー以外の物質が含まれていないと仮定した。下表は、PE、PP、PA6 の 3 種類の石油由来樹脂について、各樹脂の化学式、樹脂 1 kg あたりの単純焼却で排出される炭素量及び直接 CO₂ 排出量の算定結果を表 3 に示す。

表 3 PE、PP、PA6 の化学式、樹脂 1 kg あたりの炭素量及び CO₂ 排出量

ポリマー	化学式	炭素量 [kg-C/kg]	CO ₂ 排出量 [kg-CO ₂ /kg]
PE	(C ₂ H ₄) _n	0.857	3.14
PP	(C ₃ H ₆) _n	0.857	3.14
PA6	(C ₆ H ₁₁ NO) _n	0.637	2.34

GL1 kg あたりの単純焼却における CO₂ 排出量の算定には、PEG : リグニンの混合比率のデータが必要である。本計算では、GL 製造プロセスにおけるプロセスインベントリデータをもとに、重量比が PEG : リグニン = 16.7 : 100 の GL が製造されるものと仮定した。また、Cagnon らにより測定されたリグニンの炭素含有量^[8]を引用することで、GL1 kg あたりの炭素量は 0.601 kg-C/kg となり、単純焼却による CO₂ 排出量は 2.20 kg-CO₂/kg と算定された。

4-4 結果

(1) GL1 kg あたりの cradle-to-gate GHG 排出量

GL の製造における cradle-to-gate GHG 排出量 (副生物利用を考慮しない) は、バイオエタ

ノール (bio-EtOH) 製造とほぼ同等であることが明らかになった。また、GL の製造過程では、絶乾重量ベースで約 2 倍の量のパルプが副生されるため、この副生物の活用方法が GL の環境優位性を大きく左右する重要な要素となる。Cradle-to-gate GHG 排出量の評価結果では、全てのケースにおいて GL の GHG 排出量が負の値を示した。特に、図 4 の副生パルプを原料にしたエタノール製造が合成エタノールを代替する場合、木屑の GHG 排出量の配分方法に関係なく、GHG 排出量は $-3 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/kg-GL}$ 以下であることが示された。この数値は、IDEAV3.4.1 における石油由来樹脂の cradle-to-gate GHG が一般的に $2 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/kg-樹脂}$ 以上の排出量を持つことと比較しても、GL の GHG 削減ポテンシャルが極めて高いことを意味している。

これらの結果から、GL 製造はバイオエタノールと同程度の環境負荷でありながら、副生物の活用によってさらなる環境優位性を確保できる可能性があることが示唆された。また、GHG 排出削減の観点からも、GL は石油由来樹脂に比べて大幅な削減効果を持つことが明らかとなり、持続可能な材料としての活用が期待される。

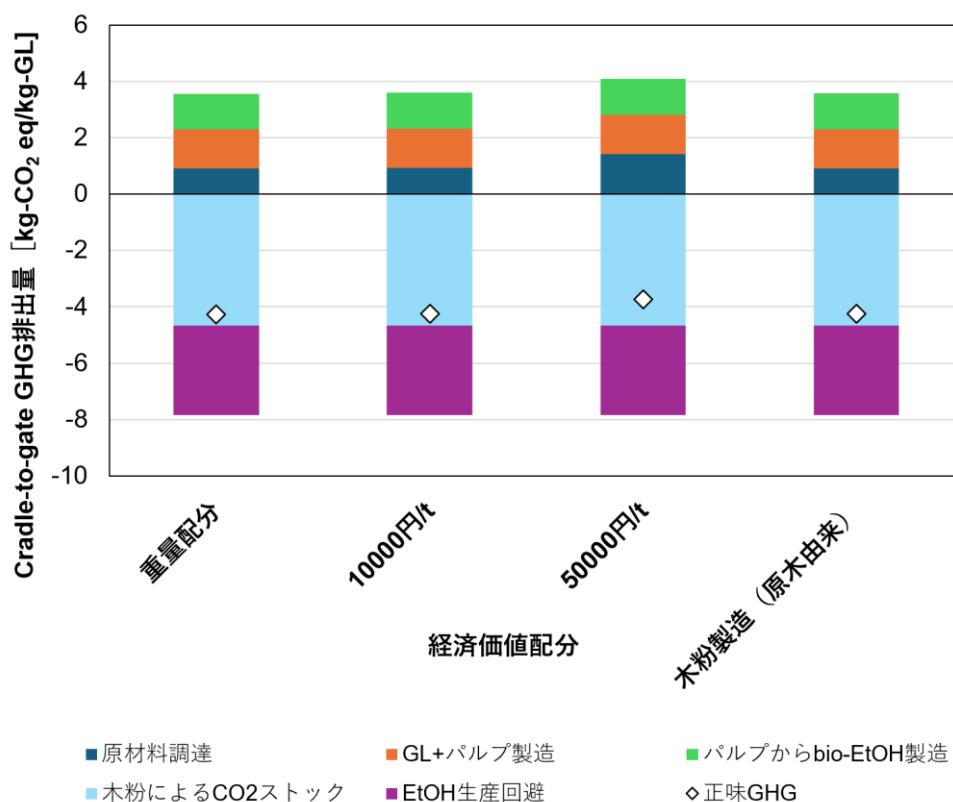


図 4 GL 1 kg あたりの cradle-to-gate GHG 排出量 (合成エタノール代替)

また、副生パルプ由来のバイオエタノールにより発酵エタノールを代替する場合、合成エタノール代替の場合と同様に全てのケースにおいて GHG 排出量は負の値を示された (図 5)。具体的には、GHG 排出量は $-1.4 \sim -0.5 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/kg-GL}$ の範囲に収まり、代替されるエタ

ノールの原単位によって大きく変動することが分かった。

この結果は、GL の環境優位性が単独の要因だけで決まるものではなく、副生物の製造における低炭素化と密接に関係していることを示唆している。すなわち、GL を導入することで GHG 排出量の削減が期待される一方で、副生物の製造プロセスの炭素負荷を低減させることが、最終的な GHG 削減効果の最大化に不可欠となる。今後の研究では、エネルギー・化学システムの脱炭素化に伴うエタノール製造の GHG 原単位の変化や、副生パルプを原料とした場合のエタノール収率の影響などさらなる分析を進めるとともに、セルロース系素材等エタノール以外の用途も視野に入れて、GL と副生物製造の統合的な低炭素化戦略を検討する必要がある。

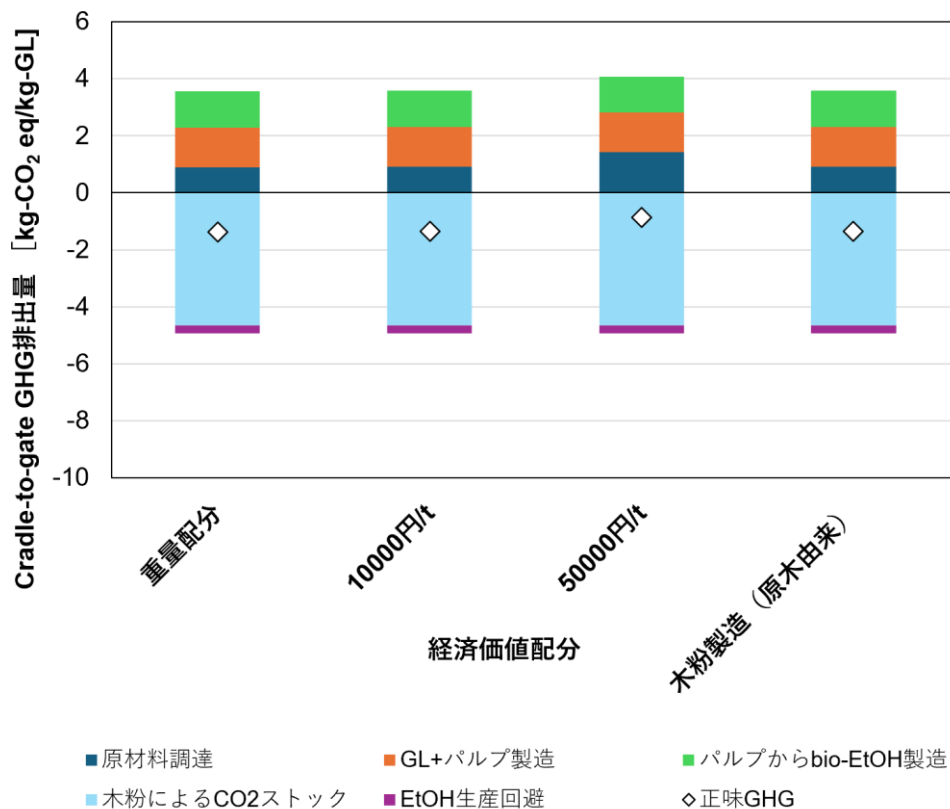


図5 GL 1 kg あたりの cradle-to-gate GHG 排出量 (発酵エタノール代替)

(2) 混練後樹脂 1 kg あたりの cradle-to-gate GHG 排出量

図6は、PE、PP、PA6を基準とし、それぞれに対してGL混合比率を20及び50wt%の比率で混練した場合の cradle-to-gate の GHG 排出量を比較したものである。混練後樹脂 1 kg あたりの cradle-to-gate GHG 排出量を評価した結果、すべてのケースにおいて、GL を混練した樹脂は石油由来樹脂単体に比べて GHG 排出量の削減が確認された。合成エタノールを代替し、50wt%の混合比率で PE や PP と混練した場合、GHG 排出削減率が最も高くなること

が示された。一方、発酵エタノールを代替する場合は、低い GL 混合比率で PE や PP といった汎用的な樹脂と混練すると、GHG 削減効果は限定的である。

GL 混合比率の大小にかかわらず PA6 との混練においては、GHG 削減量が大きくなる傾向が見られた。GHG 排出原単位の大きいエンジニアリングプラスチック（PA6 など）を対象とした場合、高い GHG 削減ポテンシャルを発揮できることが確認された。

さらに、GL の混合率を向上させるとともに、副生パルプ由来のバイオエタノールにより石油由来エタノールを代替することで、PE や PP との混練において GHG 排出量を大幅に削減できる可能性が示唆された。一方、混練プロセスのエネルギー消費量は対象とする樹脂や装置スケールによって変化しうるので、実験などにより各条件のエネルギー消費データが得られる場合は、そのデータを代入することが望ましい。今後は、これらの知見を基に、各樹脂について最適な GL 混合比率や混練後樹脂の種類、成型方法などといった未考慮の部分を含めることにより詳細な LCA を進め、最適な GL 活用戦略を検討していく必要がある。

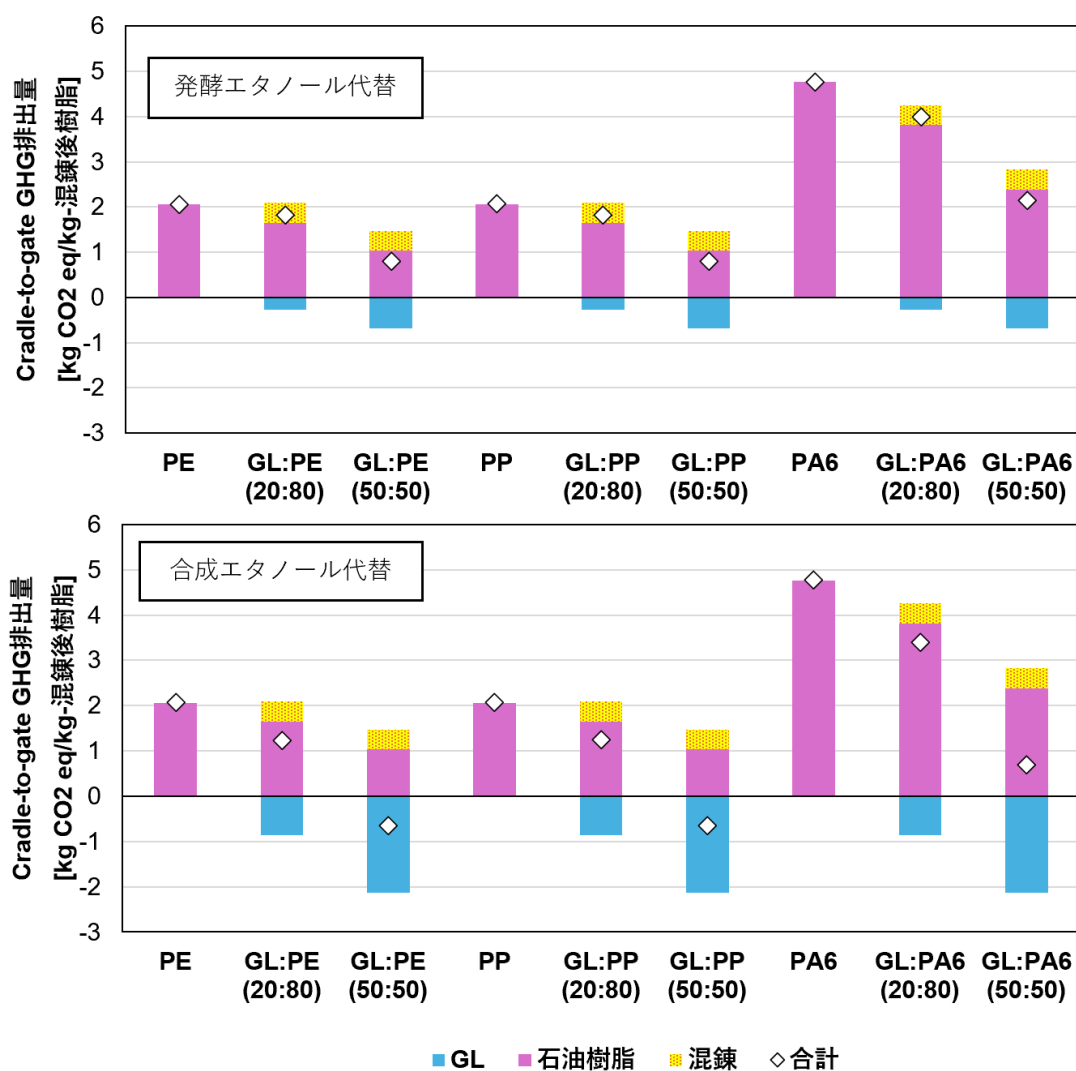


図 6 混練後樹脂 1 kg あたりの cradle-to-gate GHG 排出量

(3) 混練後樹脂 1 kg あたりの cradle-to-grave GHG 排出量

単純焼却を考慮した場合の cradle-to-grave GHG 排出量を図 7 に示す。これは、PE、PP、PA6 を基準とし、それぞれに対して GL 混合比率を 20 及び 50 wt% の比率で混練した場合の cradle-to-grave の GHG 排出量を比較したものである。GL を混練することで、石油由来樹脂の使用量を削減し、GHG 排出量を低減できることが示された。特に GL の混合比率を 50 wt% まで高めた場合、すべてのケースについて PE 及び PP との混練では顕著な排出削減が確認された。また、cradle-to-grave の GHG 排出量では、最終的な廃棄段階における単純焼却による CO₂ 排出量が上乘せされる影響が大きいことが確認された。特に PE 及び PP のような石油由来の樹脂は、樹脂中の炭素量が比較的大きいため、単純焼却時の CO₂ 排出量が高くなり、全体の GHG 排出量を押し上げる要因となっている。

また、代替するエタノールの種類によっても排出量の違いが明確に示されており、「発酵エタノール代替」と「合成エタノール代替」の場合で比較すると、合成エタノールを代替したケースのほうが全体の排出削減効果が大きい傾向が見られた。これは、発酵エタノールがバイオ由来資源を、合成エタノールは石油化学由来資源を、それぞれ原料としているため、比較的高い GHG 排出原単位を持つ後者の代替を行う方がより多くの GHG 排出を回避することができることに起因する。一方、将来の化学システムでは、合成エタノールの原料がより GHG 排出原単位の低いものに置き換わる可能性を今後の分析で考慮すべきである。

今後、GL のさらなる導入拡大に向けては、単純焼却以外の廃棄オプション（マテリアルリサイクルやケミカルリサイクル）の検討が重要となる。

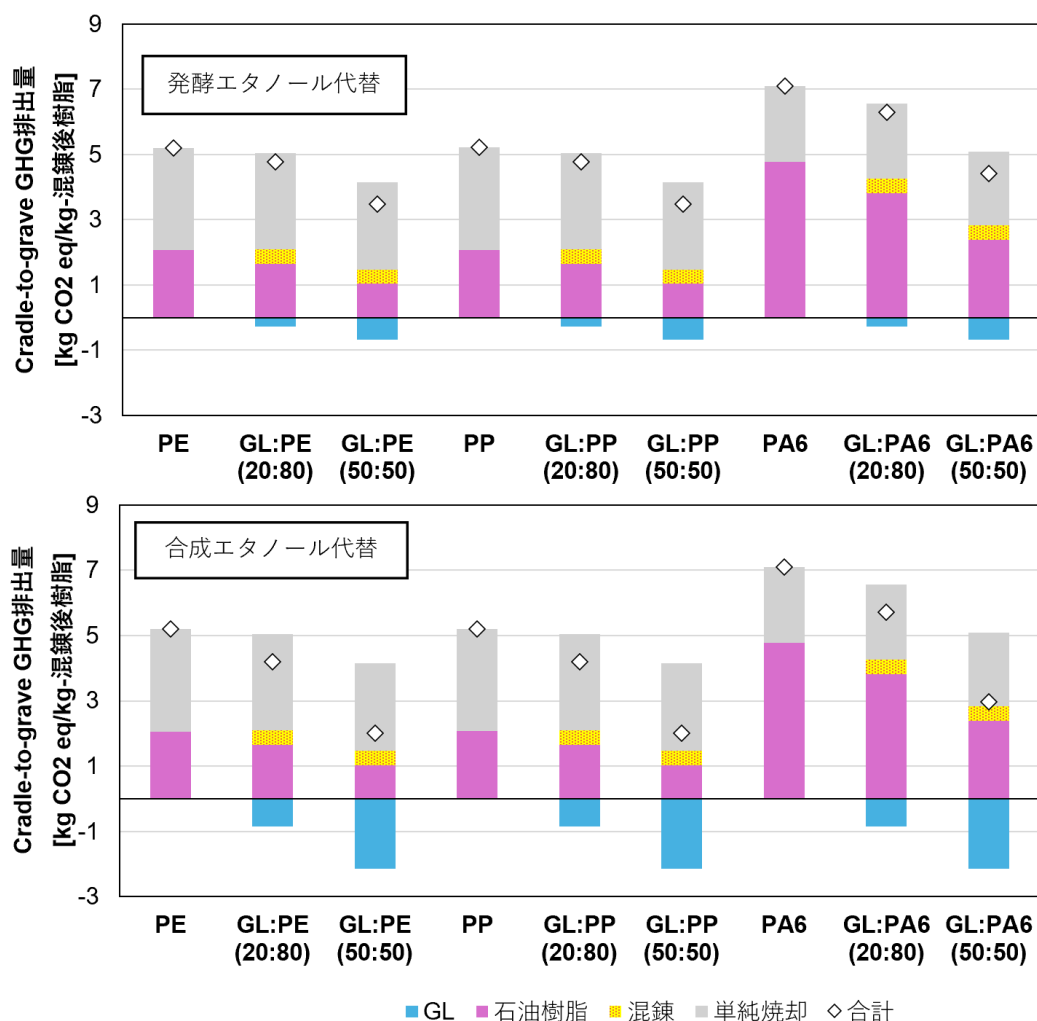


図7 混練後樹脂 1 kg あたりの cradle-to-grave GHG 排出量

5 GL の社会実装の意義及び波及効果

5-1 GL をプラスチック代替素材として利用する意義

プラスチック循環利用協会の調査^[9]によると、2023年の有効利用されている廃プラスチックのうち、70%は燃料代替として燃焼（サーマルリサイクル）、または焼却処理されている（図8）。また、容器包装リサイクル法の下でケミカルリサイクルと呼ばれている手法（高炉還元剤化、コークス炉化学原料化、ガス化アンモニア製造）においても、その多くは最終的にCO₂に転換されている。このような状況下において、焼却されるプラスチックの炭素源をネットゼロから生まれるものに変えて行くことは、正味のCO₂排出量を削減する観点から重要である。しかし、過度に森林の伐採に繋がるような形でバイオマスを利用してしまうと、数十年の期間に渡って正味のCO₂排出量をむしろ増やしてしまうおそれもある。この点、従来、パルプ製造の副生物として燃料に利用されていたリグニンが、プラスチックの

代替として利用されれば、焼却に伴う CO₂ 排出を削減できると考えられる。その際、パルプ製造の副生リグニンを燃料とすることで得られていたエネルギーを再生可能なエネルギーで置き換える必要が生じるが、エネルギーであれば、太陽光、風力、水力、地熱エネルギー源を用いて発電した電力や、グリーン水素を燃料として利用することが可能であるため、物質としての炭化水素を置き換えるよりは技術的にも政策的にも容易である。

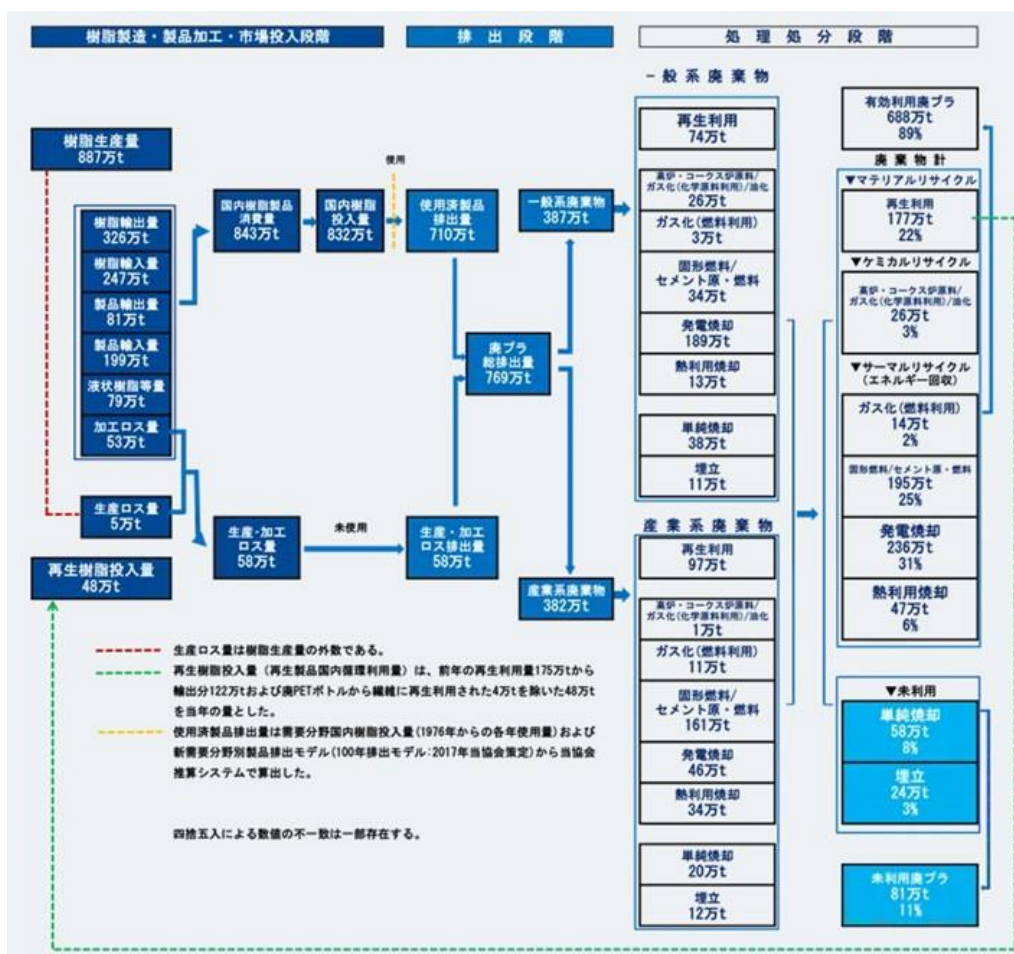


図 8 プラスチックのマテリアルフロー図 (2023 年) [19]

5-2 プラスチックの一部を GL で代替することによる影響

石油化学由来のプラスチックを GL で代替することは、GHG 排出量の削減等の環境負荷軽減につながると考えられるが、一方、従来のプラスチックが GL で代替されることにより、プラスチックの材料 (マテリアル) リサイクルが困難になる可能性が懸念される。GL が混合された樹脂が単独で回収されるのであれば、繰り返しマテリアルリサイクルすることが可能であると考えられるが、他の樹脂と混合され、分離が難しい場合には、他の樹脂のマテリアルリサイクルや一部のケミカルリサイクルに悪影響を与える可能性がある。この観点

では、GLをどのような用途やパーツに利用すれば、従来樹脂のリサイクルを阻害しないかを踏まえて利用することが望ましい。一方で、CCU (Carbon Capture and Utilization) *6によるプラスチック製造が一般化すれば、焼却時に発生するCO₂を分離・精製し、水素と反応させて汎用プラスチックを製造することも可能である。このような状況であれば、他の樹脂と混合したまま廃棄される用途にGLを活用した場合も、廃棄された混合部材を焼却し、CCUでプラスチックを製造してネットゼロを達成することは可能である(図2)。この場合、焼却により生じる熱を発電に利用することも考えられる。ただし、一般に産業廃棄物の焼却発電施設においては、廃棄物に高濃度の塩素が含まれる可能性があることから、ボイラ配管の腐食を防ぐために蒸気温度を300℃程度未満に抑制した運転が行われている。蒸気温度は汽力発電の発電効率に強く影響することから、産業廃棄物の焼却炉における発電端効率は最大でも20%程度であり、ガス火力発電所の発電端効率(60%以上)と比較すると、効率は高くない。一方で、化学産業ではその製造工程において、300℃未満の蒸気を大量に消費している。焼却炉のボイラは、蒸気温度は低いが高熱効率(投入熱量に対する製造蒸気の熱量の割合)はコンビナート等で利用されている産業用のボイラとほとんど遜色はない。従って、廃棄物の焼却を化学工場や化学コンビナートの近隣で行い、製造した蒸気を化学工場に送ることができれば、効率的に化学工場側の化石燃料消費を節約できる。将来、再生可能な電源の電力が普及し、グリーン水素やアンモニアを燃料とする状況になれば、発電を行っても再生可能な電力と競合してしまうが、蒸気供給であればこれら高価な燃料を節約できるため、更に相対的なメリットは大きくなる。このような効率性により、焼却・蒸気供給+CCUによるプラスチック製造の仕組みは、プラスチックのケミカルリサイクルと遜色ない効率を達成することも可能であり、GLの処理・リサイクルルートとして適したものになる可能性がある。

利用するリグニンが、「伐って、使って、植えて、育てる」資源の循環利用が成立している森林に由来するものであるならば、GLの廃棄時にCCUによってプラスチックを製造することは、その断面だけ見ればカーボンネガティブとなる。化学産業全体としては、原料をネットゼロな炭素に変更したというだけであり、ネガティブとはならないが、化学製品の中には利用や廃棄時に炭素の回収が不可能なものも存在することから、ネットゼロなバイオマス由来の炭素をできるだけ回収し、炭素原料として利用することの意義は大きい。

*6 CO₂を大気中に放出せずに回収し、有用な形で再利用する技術



図9 材料（マテリアル）リサイクル、ケミカルリサイクル、焼却・蒸気供給とCCUのシステム^[20]

5-3 繊維強化プラスチックのリサイクルへの影響

GLは、繊維強化プラスチックのマトリックス樹脂に混合して利用することができる。樹脂とガラス繊維との複合素材である繊維強化プラスチック（Glass Fiber Reinforced Plastics; GFRP）は、頑丈な構造を持つことから、処理・リサイクルが困難な素材とされてきたが、20年ほど前からセメント産業で原燃料化する形で処理・リサイクルが行われている^[21]。炭素成分はエネルギー利用され、無機成分が原料化される形であるため、炭素成分の一部、又は全部が従来のプラスチックからGLに置き換わったとしても、処理・リサイクル工程にはほとんど影響しないことが想定される。炭素成分が焼却を前提とされていることから、適切な森林管理と再生林を前提とすれば、ライフサイクル全体を通じて炭素中立な資源である木材から製造されたGLで、石油から製造されるプラスチックを置き換えることの意義は大きいと考えられる。

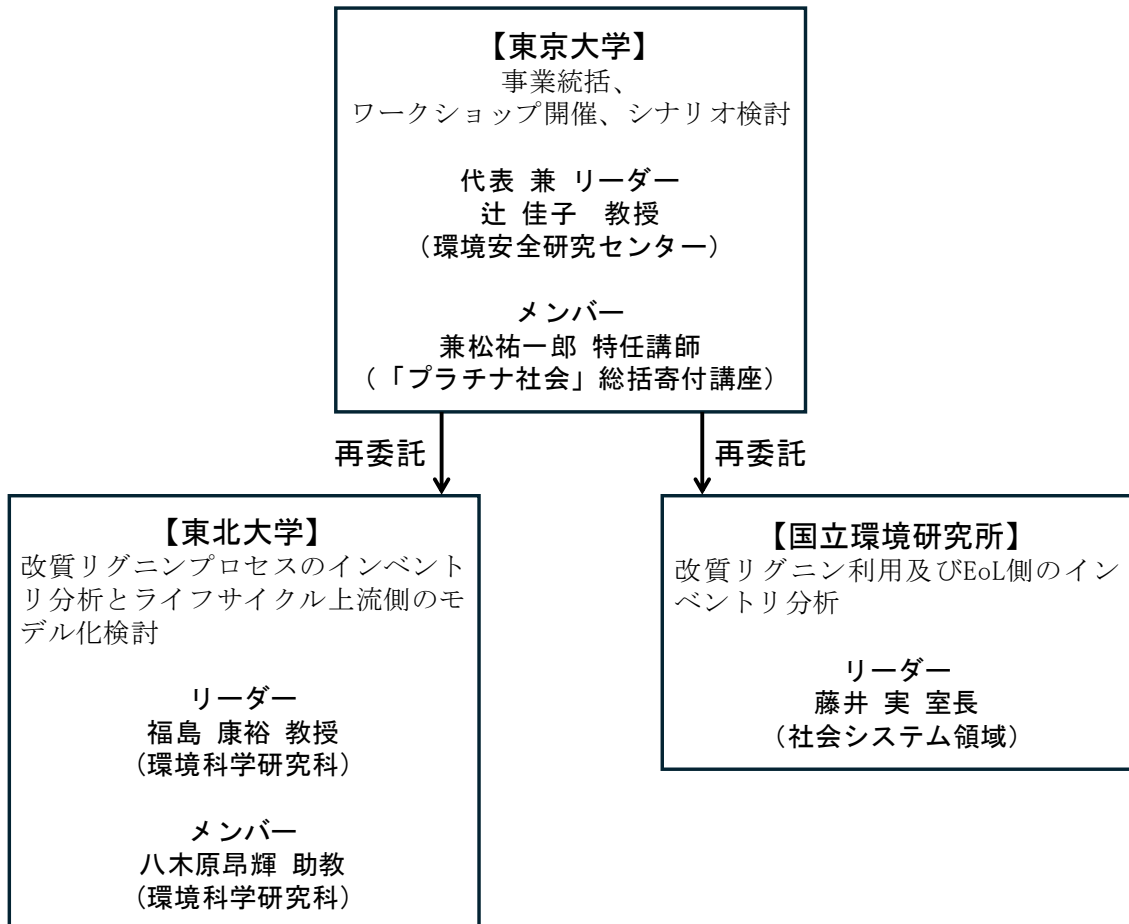
また、樹脂と炭素繊維との複合材料である繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastics; CFRP）はGFRPと比較して、さらに軽量、高強度、高剛性であるのみならず、導電性、耐熱性、低熱膨張率などの優れた材料であるため、様々な応用が期待されている。複数のリサイクル技術も報告があるが^[22]、熱分解法の場合、改質リグニンCFRPは、改質リグニンが従来のエポキシ樹脂よりも低温で分解されるため、炭素繊維を劣化することなく回収することが可能である^[23]。また、改質リグニンCFRPの場合、溶媒を用いた溶解法も適用可能なケースがあり、その場合、炭素繊維は表面状態を損傷することなく回収することが可能

である^[24]。すなわち、改質リグニン CFRP は炭素繊維リサイクルの観点からも優位である。

6 まとめ

GL の製造及び混練後樹脂の製造までの cradle-to-gate GHG 排出量分析を行った。その際、製材所で発生する木屑を原料として利用し、配分方法の影響を調査し、GL 製造の副生物であるパルプの利用方法として、bio-EtOH 製造を検討した。その結果、Bio-EtOH が代替する製品によって GHG の算定に大きな影響を与えることがわかった。また、GL 混合比率・石油由来樹脂の組み合わせにより、混練後樹脂の cradle-to-gate GHG 排出量の挙動に変化があることが明らかになった。

(参考) 事業の推進体制



(参考) ワークショップの開催経緯

プレワークショップ
日時 2024年7月29日 16:00～20:00 場所 東京大学 工学部5号館54号講義室 出席者 東京大学 辻教授、兼松特任准教授 東北大学 福島教授、八木原助教 国立環境研究所 藤井室長 森林総研 山田拠点長、三重大学 瀧上准教授 林野庁 研究指導課 技術開発推進室 塚田室長、佐藤課長補佐、古賀係長 概要 1. 改質リグニンの技術の現状及びLCA評価の現状把握 2. 今後のLCA実施に際したシナリオ設定及び考慮範囲 改質リグニンの原料、改質リグニンが代替する製品を設定した。 自動車や航空機への改質リグニンの利用は、産業へのインパクトが大きい。しかし、代替性を厳密に検討する場合は、材料変更に伴う重量変化及び機械的特性による、車体・機体の形状変更が見込まれる。よって、本PJでは、従来部品の機械的特性または重量に基づき、改質リグニンの代替可能を引き続き検討することとした。
第1回
日時 2024年9月12日 13:00～16:00 場所 北海道大学札幌キャンパス工学部棟C棟308及びオンライン 出席者 (委員) 東京大学 辻教授、兼松特任准教授 東北大学 福島教授、八木原助教 国立環境研究所 藤井室長 (アドバイザー) 森林総研 山田拠点長 三重大学 瀧上准教授 東京大学 菊池教授、五十嵐教授 (林野庁) 研究指導課 技術開発推進室 塚田室長、佐藤課長補佐、古賀係長 概要 1. 森林資源の持続可能な活用と改質リグニンの有効利用に関する要点整理

建築需要を基盤に、化学用途への利用拡大を視野に入れることとした。

2. 自動車部品への応用と代替シナリオ

シナリオの設定と LCA を通じて、改質リグニンの利活用について具体的に評価を行う。トヨタの燃料電池車やプリウスなど、具体的なモデルにおいて、CFRP やフェノール樹脂の代替材として利用することを想定。

3. 材料変更に伴う環境負荷への影響評価

改質リグニンを使用することで、自動車の部品の設計や機械的特性が変わる可能性がある。そこで、使用する材料によって製造工程やエネルギー消費が変動し、これが全体的な環境負荷にどう影響するかを LCA で評価する。

4. 自動車リサイクル法と環境負荷軽減

自動車リサイクル法の観点からも、改質リグニンを含む新素材の利用は将来的なりサイクルプロセスの改善に寄与する可能性がある。ガラス繊維やセルロースナノファイバーの使用と比較し、廃棄処理負荷を軽減する方法を検討する。

5. 豊田合成などの自動車関連企業へのヒアリング状況

自動車メーカーとの共同研究により、実際のフィードバックを得ることが、現実的なシナリオ構築に役立つ。より正確なシナリオ設計のために自動車メーカーからのフィードバックを取り入れる。

6. 航空機や鉄道部品への応用検討

自動車以外の用途として、航空機や鉄道の部品への展開も話題となったが、安全性評価の視点も含めて、現時点で課題が多いとの認識が得られた。

7. 政策に基づくシナリオと林業計画

政策と連携し、持続可能な戦略を策定していく。

第 2 回

日時 2024 年 11 月 8 日 9:00-11:00

場所 東京大学環境安全研究センター新館会議室及びオンライン

出席者

(委員)

東京大学 辻教授、兼松特任准教授

東北大学 福島教授、八木原助教

国立環境研究所 藤井室長 (11/11 に個別対応)

(アドバイザー)

森林総研 山田拠点長

三重大学 渕上准教授

東京大学 菊池教授、五十嵐教授

(林野庁)

研究指導課 技術開発推進室 塚田室長、佐藤課長補佐、古賀係長

概要

1. 自動車における素材代替可能性についての文献調査及び豊田合成ヒアリング情報共有

改質リグニンの自動車部品への適用可能性について情報共有した。

2. LCA 検討について

淵上先生が過去実施された改質リグニン LCA を前提とするため、その内容の詳細を確認した。

また、今回の現状の化石由来プラスチックを代替する想定の評価をベースとして行うが、代替されるプラスチックもいずれはカーボンニュートラルに移行するので、最終的には CO₂ 排出量よりも、エネルギーやグリーン水素の投入量の違いが従来プラスチックとの違いになる。木材に含まれるリグニンを取り出してそのまま利用する形に近い改質リグニンは、投入エネルギーやグリーン水素消費の観点で有利になると考えられる。

3. その他

11/13 17:00～ メンバーMTG を実施することとした

第3回

日時 2025年1月9日 13:00-16:00

場所 東京大学環境安全研究センター新館会議室及びオンライン

出席者

(委員)

東京大学 辻教授、兼松特任准教授

東北大学 福島教授、八木原助教

国立環境研究所 藤井室長 (11/11 に個別対応)

(アドバイザー)

東京大学 菊池教授、五十嵐教授

(林野庁)

研究指導課 技術開発推進室 塚田室長、佐藤課長補佐、古賀係長

概要

1. LCA バウンダリ検討および計算結果に基づく議論

リグニンの別の用途(燃焼してエネルギー利用、化成品製造)との比較について議論した。

改質リグニン残渣となるセルロースの用途は、バイオ PE の原料としてのバイオエタノールがあり得るが、リグニン単体に対する最適プロセスが木材全体カスケード利

用の最適解とは限らず、多少リグニン側に悪い方向に振れるとしてもセルロースがより使いやすい形で得られるようなプロセスにしたほうが良い可能性もある。

最終製品使用後の廃棄については、炭素含有量を計算して、バイオ由来炭素量及び燃焼時炭素量を計算する。(PEG 含有率に注意)

2. リサイクルについて

自動車部品として利用されたプラスチックは、現状ではモノマテリアル化を進める方向にある。例えば、現状ではPP、PEなど部品ごとに変えているが、PP+改質リグニンで混練率を変えるだけで多様な部品に適用できる、などの可能性があるなら、改質リグニンは、リサイクルの面でも優位になる可能性はある。

3. その他

1/31 午後 メンバーMTG を実施することとした

第4回

日時 2025年3月4日 15:00~17:30

場所 東京大学環境安全研究センター新館会議室及びオンライン

出席者

(委員)

東京大学 辻教授、兼松特任准教授

東北大学 八木原助教

(アドバイザー)

森林総研 山田拠点長

東京大学 菊池教授

(林野庁)

研究指導課 技術開発推進室 塚田室長、佐藤課長補佐、古賀係長

概要

1. 解析結果について

GHG 排出量計算結果について、前提条件の確認と妥当性を議論した。特にバイオジェニックカーボンの表示方法は①燃焼で排出される CO₂ をプラス表記し、植物が成長する際に吸収した CO₂ をマイナス表記する、②両者を相殺して 0 と表記する、の2種類あるが、国際的にも議論となっているものの、いずれも正しいので、今回は①でまとめる。ただし、炭素固定という表記は、100年以上固定すれば固定と言って問題ないが、必ずしも一般的ではないので配慮する。

2. 報告書について

林野庁から改質リグニンの環境優位について一般向けに分かりやすく表現するよう依頼された。

なお、今回は国内木材総量、国産材を使うことによる経済循環等すべてを網羅した絵姿を示すには至らないので、引き続きの議論のきっかけになることを期待している。

3. その他

八木原 昂輝: 改質リグニンの紹介と導入効果の計算方法について. 第20回日本LCA学会研究発表会 公募企画セッション「森林と資源のライフサイクル思考」, 広島, March 3-5, 2025.

Yoshiko TSUJI: Carbon independence through circular transformation of Hard-to-Abate industries, 2 day Workshop on Carbon Management, Hiroshima, March 12-13, 2025

(参考) ヒアリング等結果

2024年11月6日	豊田合成(株) 開発本部材料技術部 CN・CE 統括室	辻 佳子 藤井 実
<p>森林の活性化及び Hard to Abate 産業のカーボンニュートラルに対する取り組みにおいて、木質バイオマスの活用は必要不可欠であることを説明し、豊田合成の研究者から自動車部品の現状と改質リグニンの自動車部品への適用可能性について説明いただいた。セルロースナノファイバー強化プラスチックなどについても意見交換した。</p>		
2024年11月9日-11日	愛媛県久万高原町森林組合	辻 佳子
<p>森林及び製材所の現況を視察するとともに、久万高原町長及び森林組合の職員らと木質バイオマスの化学への利用について議論した。</p>		
2025年3月3日、12日	信州大学教授 古山 通久	辻 佳子
<p>インケム東京 2023 に展示するために化学工学会で制作した動画は古山先生及び辻でシナリオ構築した。その実績を踏まえて、林業から発信する炭素自立の実現-改質リグニンの実用化に向けた LCA 評価-動画制作にあたり、シナリオ案の議論及び一般市民へのアウトリーチとして効果的な動画にするための修正点を議論した。</p>		
2025年3月13日	Carbon Management Workshop	辻 佳子
<p>NEDO が主催する Workshop on Carbon Management にて講演、海外からの参加者と森林のカスケード利用と CO₂ 排出について議論した。 https://www.sustainable-carbon.org/workshop/hiroshima-carbon-management-workshop/</p>		
2025年3月14日	DINS 関西バイオエタノール事業所	辻 佳子
<p>バイオマス糖化発酵によるエタノール製造の現状を視察するとともに、木質バイオマスの化学への利用に関する課題について議論した。特に糖化発酵残渣のリグニン利用と改質リグニン製造残渣のセルロース利用の両者の可能性について意見交換した。 https://dinskansai.co.jp/</p>		
2025年3月20日	第75回日本木材学会大会	辻 佳子
<p>森林のカスケード利用について専門化の講演を聴講し、また、大会参加者と林業の課題について意見交換した。 https://pub.conf.it.atlas.jp/ja/event/wood2025</p>		

参考文献

- [1] Mitscherlich, E.A., The Law of the Minimum and the Law of Diminishing Soil Productivity (in German), *Landwirtschaftliche Jahrbücher* 38, 537-52, 1909.
- [2] Ministry of the Environment, Japan, Greenhouse Gas Inventory Office of Japan (GIO), Center for Global Environmental Research (CGER), and National Institute for Environmental Studies (NIES), National Greenhouse Gas Inventory Report of JAPAN, Center for Global Environmental Research, 1-6, 2. 1-2.19, 2016.
- [3] Ooba, Makoto, Qinxue Wang, Shogo Murakami, and Kunio Kohata, “Biogeochemical Model (BGC-ES) and Its Basin-Level Application for Evaluating Ecosystem Services under Forest Management Practices.” *Ecological Modelling* 221(16), 1979-94, 2010.
- [4] https://www.shinrin-ringyou.com/forest_japan/koutai.php 森林・林業学習館, 最終閲覧日 2025年3月1日.
- [5] https://www.cn.scej.org/activity/grand_design_working/ 「カーボンインディペンデンス (炭素自立) ビジョン 1.0 : CO₂ 排出削減が困難な産業の循環経済への変革」公益社団法人化学工学会地域連携カーボンニュートラル推進委員会, 最終閲覧日 2025年3月1日.
- [6] Thi Thi Nge, Eri Takata, Shiho Takahashi, and Tatsuhiko Yamada, "Isolation and Thermal Characterization of Softwood-Derived Lignin with Thermal Flow Properties," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 4(5), 2861–2868, 2016.
- [7] Kiyonori Takahashi, Ryo Ishii, Takashi Nakamura, Asami Suzuki, Takeo Ebina, Manabu Yoshida, Munehiro Kubota, Thi Thi Nge, and Tatsuhiko Yamada, "Flexible Electronic Substrate Film Fabricated Using Natural Clay and Wood Components with Cross-Linking Polymer." *ADVANCED MATERIALS* 29(17) (2017).
- [8] Xin Zhao, Zeyu Zhang, Jiuyin Pang, Ling Su “Preparation of carbon fibre-reinforced composite panels from epoxy resin matrix of nano lignin polyol particles.” *J. Cleaner Production* 428, 139170 (2023).
- [9] Hiroki Sakai, Kosuke Kuroda, Takayuki Tsukegi, Tomoki Ogoshi, Kazuaki Ninomiya, and Kenji Takahashi, “Butylated lignin as a compatibilizing agent for polypropylene-based carbon fiber-reinforced plastics.” *Polymer Journal* volume 50, 997–1002 (2018).
- [10] “自動車用材料の最新技術と市場”, シーエムシー出版, P9、P110-123 (2024).
- [11] “自動車用樹脂市場の展望と戦略”, 株式会社矢野経済研究所, P16 (2019).
- [12] Kanematsu et al., *ACS Sustainable Chem. Eng.* 9 (31) 10444–10452 (2021).
- [13] Sebastião et al. *Bioresource Technology* 208, 100–109 (2016).
- [14] 伊神裕司、村田光司、製材工場における木質残廃材の発生と利用、「森林総合研究所研究報告」(Bulletin of FFPRI) , Vol.2, No.2 (No.387) , 111-114, 2003
- [15] 山内 一矢, 浅野 良晴, 高村 秀紀, 長野県北部におけるスギと長野県東部におけるカラマツの CO₂ 排出量原単位及び木造住宅における CO₂ 排出量の算出, 日本建築学会環境系

論文集, 74 卷 645 号 p. 1261-1267, 2009

[16] 林野庁「モクレポ〜林産物に関するマンスリーレポート〜」, 令和 6 年 2 月号

[17] 御池鐵工所、スーパーオガライザー, <https://www.miike.co.jp/product/sdm-v/>

[18] Cagnon et al. *Bioresource Technology* 100 (1), 292-298 (2009)

[19] <https://www.pwmi.or.jp/business/material-flow/> プラスチック循環利用協会, プラスチック再資源化フロー図, 最終閲覧日 2025 年 3 月 1 日.

[20] <https://www.nies.go.jp/social/navi/colum/lccn.html> 国立環境研究所, ゴミ焼却の熱と CO₂ を工場で活用する「LCCN」の社会実装に向けて, 最終閲覧日 2025 年 3 月 1 日.

[21] <https://www.jcassoc.or.jp/seisankankyo/seisan01/seisan01a.html> (一社)セメント協会 (2020) 循環型社会構築に向けた取り組み-廃棄物・副産物の有効利用, 最終閲覧日 2025 年 3 月 1 日.

[22] Swati Verma, Bhuvaneshwari Balasubramaniam, and Raju Kumar Gupta, “Recycling, reclamation and re-manufacturing of carbon fibers.”, *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 13, 86-90 (2018).

[23] Fatemeh Ferdosian, Zhongshun Yuan, Mark Anderson, and Chunbao Charles Xu, “Thermal Performance and Thermal Decomposition Kinetics of Lignin-Based Epoxy Resins.”, *J. Anal. Appl. Pyrol.* 119, 124-132 (2016).

[24] 片山楓, 細谷隆史, 宮藤久士, 山田竜彦「PEG 改質リグニン含有 CFRP のケミカルリサイクル技術の開発」, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 72:Z16-07-1145, (2022).

令和6年度改質リグニンの実用化に向けた
LCA評価プロジェクト委託事業報告書

委託元（担当部署）： 林野庁研究指導課技術開発推進室
受託者： 国立大学法人東京大学