

持続可能でカーボンニュートラルな素材の生産 と利用方法に関する考察

国立研究開発法人国立環境研究所社会システム領域 室長 藤井 実

1. はじめに

カーボンニュートラル社会への早期の移行が求められている。その実現には幾つかの選択肢があるが、再生可能エネルギー（以下再エネ）が主要な役割を果たすことには疑いの余地がないと思われる。地球上には人類が消費しているエネルギー総量の約 5000 倍のエネルギー量の太陽光が降り注いでいるとされ、理論上は太陽光及びそれに起因する風力、水力などの再エネだけで、必要なエネルギーを賄うことも可能なのはである。

エネルギーについて考える際には、量と質の両方を考慮する必要がある。温水プールの水は量的には大きな熱量を持っているが、外気よりも若干暖かい温水では、わずかな量の発電しかできない。熱量だけではエネルギー量を正しく把握することが出来ないという端的な例である。質の観点も含めたエネルギー量の表し方が幾つか存在するが、その 1 つがエクセルギー¹⁾である。エクセルギーは、エネルギーの総量のうち、仕事（動力及びそこから変換可能な電力、光、音など有用な働きをするエネルギー）として取り出すことのできる部分を指す。エネルギーに占めるエクセルギーの割合がエクセルギー率であり、エクセルギー率の高いエネルギーは、質の高いエネルギーとなる。電気はエクセルギー率 100%のエネルギーであり、理想的には（実際にはロスが生じるが）その総てを運動や光などに変換することが出来る。

太陽光はエクセルギー率が高い良質なエネルギーであるが、その大部分は地球表面を温めるだけに利用され、そのエクセルギーが無駄に失われている。もちろん、温められていることは地球が凍り付かないために重要であるが、今は温度が高くなり過ぎていることが問題にもなっている。また、総てのエネルギーは最終的に熱に変換されるので、熱に変わる前に何等かの有用な仕事をさせても、それによって地球が冷え過ぎるということはない。図 1 に示すように、太陽光を人類が利用できる形に変換できる仕組みの代表例として、植物と太陽光発電が存在する。植物は保全すべき生態系の構成要素であり、光合成で生産されるのはデンプンや木材などであり、光のエネルギーが食料や素材等に変換されることも特徴である。しかし、光合成の変換効率は 1%程度（植物の種類や気候によって異なる）とされ、元々エネルギーの空間密度の小さな太陽光のごく一部が利用されている状況であり、生産速度はそれほど大きくない。一方、太陽光発電は現

在商用化されているものでも 20%程度の発電効率があり、今後更なる向上が期待される²⁾。資料³⁾によると、1MW の出力のメガソーラー発電所で、100 万 kWh/年以上の発電量が得られ、そのために必要な土地が 2ha 程度である。すなわち、0.5 億 kWh/年/km²の発電量が期待できる。全国の電気事業者が持つ火力発電所の発電電力量は約 6800 億 kWh/年⁴⁾であり、仮に同じ量の電力を太陽光発電だけで賄うために必要な面積は 1.4 万 km²となる。日本の国土面積は 37.8 万 km²であるから、国土の 3.6%となる。実際には、電気事業者以外が実施している発電や、燃料から電力への転換に伴う電力消費の増加、蓄エネルギーに伴うロス等を加味すると、この数倍の面積が必要になるかもしれない（今後の省エネの進展や、他の電源をどれだけ活用するかによって、必要な面積は大きく異なる）。生態系や景観を保全する観点からも、多くの土地を太陽光発電に振り向けることは困難であると考えられることから、潤沢な量の再生電力を確保することは容易ではないことが分かる。これらの状況を踏まえると、以下のことが言える。

- ① 生産量の限定的な、しかし素材として生産されるバイオマスは、素材としての利用を優先するべきであり、燃料として直接燃焼させることを極力回避するべきである。
- ② 再生可能な電力の供給量が潤沢とはならないことから、エクセルギー効率の高いエネルギーの利用方法を追求する必要がある。

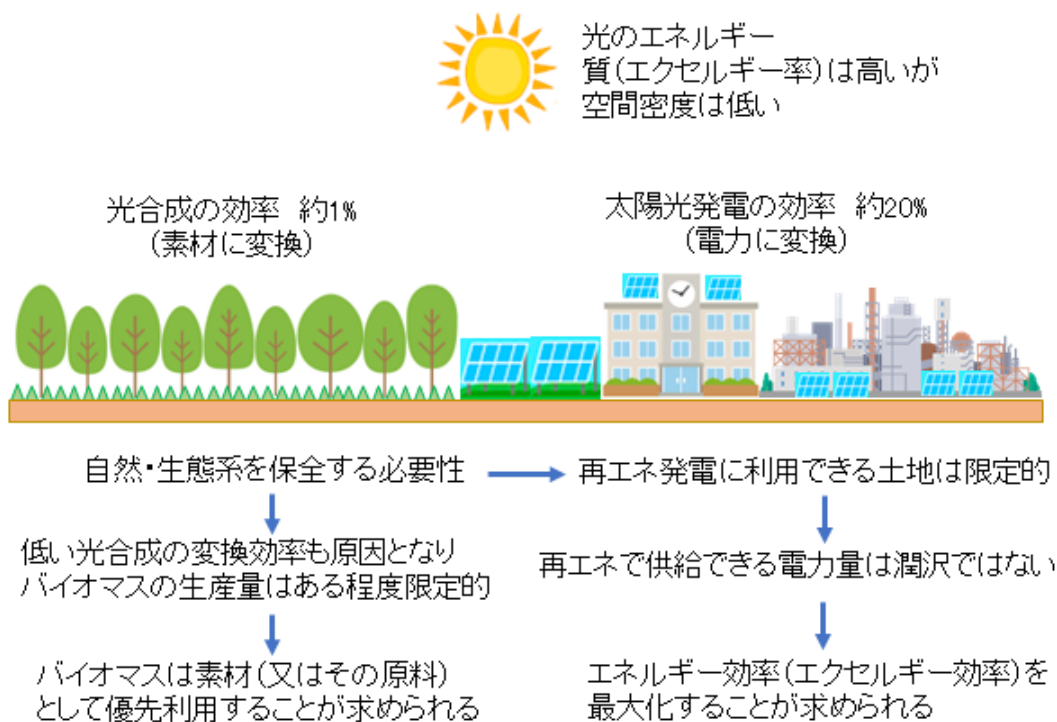


図 1 カーボンニュートラル社会における太陽光の利用

2. カーボンニュートラル社会における 1 つの理想的なシステム

前章の議論を踏まえた上で、カーボンニュートラル社会において、エネルギーや素材をどのように利用するのが理想的であるのかについて考察する。エネルギーについては、現状では化石燃料や燃料用のバイオマスが 1 次エネルギーであるが、将来我々が最初に手にするエネルギーは再エネの電力となり、この電力を如何に効率的に利用できるかが鍵となる（図 2）。不安定な再エネ電力を利用するには、エネルギーを蓄える仕組みが不可欠になるが、再び電力や動力に再変換して利用するのであれば、蓄電池の効率が 90%程度と高い。電力を水素や炭化水素に変換することも可能であるが、再度電力に戻す場合、水素を経由する場合で 50～60%程度の効率であり、炭化水素を経由する場合は更に効率が低下すると考えられる。自動車であれば電気自動車、暖房・給湯であればヒートポンプを活用するなど、電化を進めることが重要である。ヒートポンプは熱供給のエネルギー効率を飛躍的に高める技術でもあり、加えて換気の際には熱交換をして放熱ロスを軽減する等、省エネルギー技術を積極的に利用することも重要である。

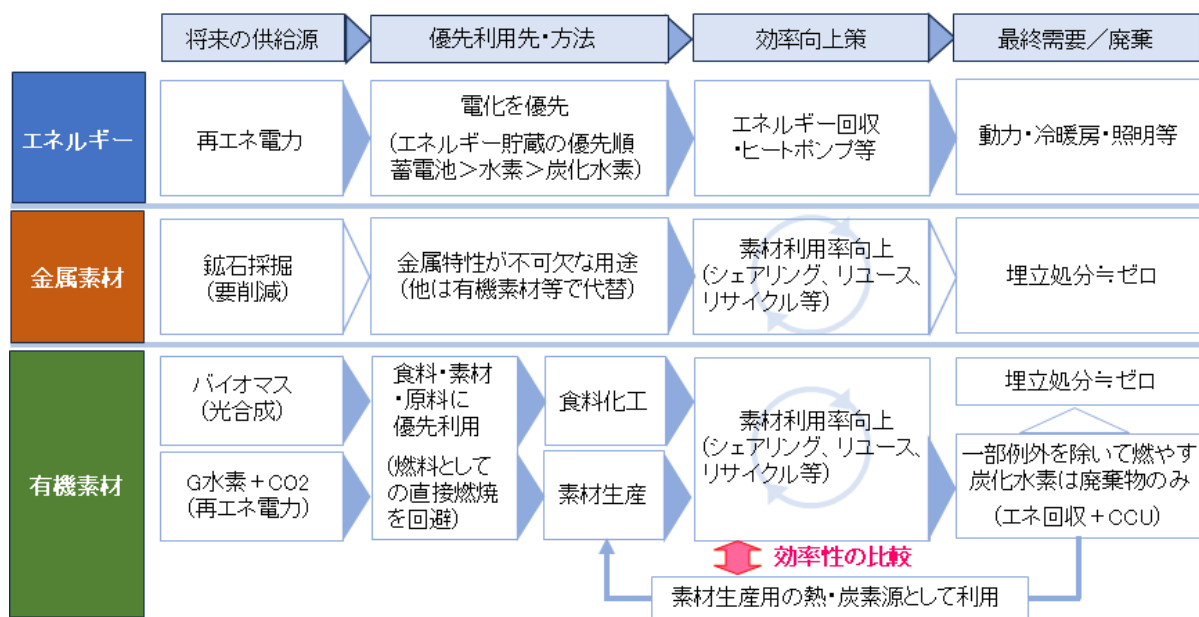


図 2 将来のカーボンニュートラル社会におけるエネルギー・素材利用の 1 つの理想的なシステム

素材については、自動車の主要な構成素材である金属と、プラスチック等の有機素材を対象に説明する。砂利やセメント・コンクリート等の無機素材も、自動車が走る道路の建設に重要な資材であるが、ここでは話を簡略化するために省略する。鉄やアルミ等の金属は、基本的に繰り返しリサイクルして利用することが、有限な資源の持続的利用の観点と、還元反応のためのエネルギー消費を削減する観点との両面から重要である。途上国のように依然として新規の都市開発需要が旺盛な地域を除いて、鉱石の新規採掘を出来るだけ削減し、使用後に埋立処分される金属を最小化することが必要である。社会における金属の利用量を削減するためには、素材としての利用率を向上させることも重要である。製品のリユースや、素材

のリサイクルを進めるとともに、一定の機能を果たすために供する素材量を最小化する観点から、製品の稼働率を高める工夫も必要である。自動車であれば、個人所有の自動車の稼働率は5%程度に過ぎないが⁵⁾、シェアリングによって稼働率を高めることも重要である。

炭素を基本骨格とする有機系の素材は、これまではバイオマスを利用するか、化石資源から製造されてきたが、カーボンニュートラル社会においては、CO₂から製造することも主要な選択肢となる。バイオマスは以前から大気中のCO₂を原料としてきたが、今後はCO₂とグリーン水素（再エネを利用して製造する水素）から製造する方法が次第に普及することになる。CO₂から高分子の有機素材へと重合させる反応は、発熱反応となる場合が多い。これは、生成物である有機素材が持つ発熱量以上のエネルギー量を持つ原料投入が必要だったことを意味する。特にバイオマスの場合、その発熱を回収して利用することも不可能である。前述のように、供給量も限定的であるバイオマスを直接燃料として利用することは、エクセルギー効率の観点で無駄が大きいと言える。できるだけ素材や素材製造のための原料として利用することが望ましい。有機素材においても、素材としての利用率を高めることは、一定の機能を果たすための素材量を最小化する観点から重要である。そして、エネルギー供給（消費）の電化を進める状況下において、どうしても廃棄物となってしまった有機素材（炭化水素）のみを焼却することになる。

廃棄物焼却施設においては、焼却熱を利用して製造した蒸気で発電することが一般的である。しかし、廃棄物が塩素等のボイラ配管を腐食させる物質を含むために、蒸気温度は300℃～450℃（廃棄物の組成により異なる）程度が上限であり、発電効率は20数%に留まっている。石炭火力発電所（蒸気温度600℃）の発電効率が40%超、ガス火力発電所（燃焼ガス温度1600℃）では60%に達している状況と比べると、エクセルギー効率が非常に低い。しかし、300℃の蒸気は化学や製紙等の有機素材の製造工場で大量に消費されている蒸気を代替するには十分な温度であり、素材製造のためのプロセス（蒸留や乾燥工程等）に効率的に使用することが可能である。製造工程への廃棄物焼却熱の活用は、必ずしもエクセルギー効率の絶対値を高める訳ではないが、200℃～300℃の蒸気供給は元々エクセルギー効率を高めることが技術的に難しく、これを焼却熱で置き換えることで、化石燃料の大量消費を効果的に抑制することができる。現状の有機素材の製造工場では、発電と熱供給を組み合わせるコージェネレーションによって、エクセルギー効率を高める工夫も行われているが、今後は電力が再エネで供給されるようになるため、コージェネレーションの必要性は低下し、廃棄物の焼却に必ず付随する発熱を、製造工程に必要な熱を供給するために効果的に利用することの意義が、益々高まることになる。

3. ライフサイクルカーボンニュートラル（レジリエントなシステム）

前述のように、金属素材は金属にマテリアルリサイクルすることが基本になるが、有機素材、その中でもプラスチックの製造方法は今後多様化することになる。化石資源に代わってバイオマスを原料とするプラスチックの製造も増加すると考えられるが、バイオマスの供給速度が限定的であることや、木のように成長の周期

が長いバイオマスの場合、2050年といった比較的近い将来の時点においては、木の伐採や利用方法等によっては、むしろ大気中のCO₂が一時的に増加している可能性もあり⁶⁾、バイオマスプラスチックの生産量を急速に拡大することは難しい。廃プラスチックのマテリアルリサイクルの高度化や高収率化も一定程度進展することが期待されるが、カーボンニュートラル社会におけるマテリアルリサイクルは、元の製品に戻る水平リサイクルに準じる、高品質な再生製品を製造することが求められる。他の製品にカスケードリサイクルする場合、再生製品の用途によってはCO₂排出の削減に本質的には寄与しない可能性もある。熱分解等によって廃プラスチックを化学原料に戻すケミカルリサイクルも今後増加すると考えられるが、技術によっては投入できる廃プラスチックの種類や状態に大きな制限がある場合もあり、また、廃プラスチックから化学原料へのカーボン収率が50%未満という事例も多く、どのような廃プラスチックでもケミカルリサイクルで総て循環利用できると考えると、実態と大きく乖離する。また、国内で約4100万kL/年(約3000万t/年)のナフサを消費しているが⁷⁾、廃プラスチックの発生量は820万t/年程度であり⁸⁾、そのうちマテリアル又はケミカルリサイクルに仕向けられているものは210万t/年程度である。仮に廃プラスチックの総てがリサイクルに供せられたとしても、化学原料の総てを賄うには大きく不足することになる。バイオマスの利用も含め、不足分を補完する方法が必要である。いずれにせよ、今後はプラスチック等の生産方法が多様化する中で、廃棄物毎に最もエクセルギー効率の高い利用方法(あるいは複数の方法の組み合わせ)を選択することが重要であり、多くの場合そのような方法は環境負荷を最小化し、経済性の面でもメリットをもたらすことが期待される。

筆者及びその研究グループでは、ライフサイクルカーボンニュートラル(Life Cycle Carbon Neutral: LCCN)と呼ぶ仕組みの社会実装を進めたいと考えている。有機素材のうち、高品位な廃棄物のリサイクルが行われるだけでなく、リサイクルが困難な低品位の廃棄物(混合プラスチック、雑紙、ゴム、皮革、厨芥などの可燃物)をも、焼却して有機素材製造のための熱エネルギーとして高効率に活用し、更に焼却排ガスからCO₂を回収してグリーン水素と反応させ、メタノールやエタノール等の基礎化学原料を製造して最終的に化学品に転換し、カーボンリサイクルを行う仕組みである(図3)。既に述べたように、カーボンニュートラル社会の1つの理想状態においては、焼却するのは有機素材が廃棄物となったもののみであり、また、光合成よりも太陽光発電の効率が20倍程度高いことを踏まえると、将来は貴重な炭素源となる廃棄物焼却時のCO₂と、バイオマスに比べれば相対的に生産量が豊富な、再生電力から製造される水素とを反応させてカーボンリサイクルさせることは、ケミカルリサイクルやバイオマスでは不足する化学原料を補完的に供給する観点でも、合理的な選択肢であると考えられる。

LCCNの仕組みの推進にとって重要なのは、廃棄物をどこで燃やすかである。電力と異なり、蒸気は長距離を輸送することが難しいため、焼却は化学コンビナートのように、蒸気を大量消費している場所の近隣で行うことが望ましい。また、CO₂と水素から化学合成する反応は、生成物の化学量論比以上に水素を消費して(CO₂から酸素を水として取り除くため)発熱反応になるが、この発熱もコンビナートのような場所であれば、製造プロセスに有効利用することができる。焼却熱も含めて総ての発熱が無駄なく効率的に利用されるのであれば、焼却+カーボンリサイクルの仕組みが、ケミカルリサイクルに対しても遜色のないエネ

ルギー効率を持つ仕組みとなることもあり得る。現状ではグリーン水素の価格が高く供給量も限られるために大規模な実施は難しいが、大型の焼却施設がコンビナートに立地していれば（LCCN Ready）、水素利用のハードルが下がるにつれて、徐々にカーボンリサイクルの実施を増やしていくことが容易になる。

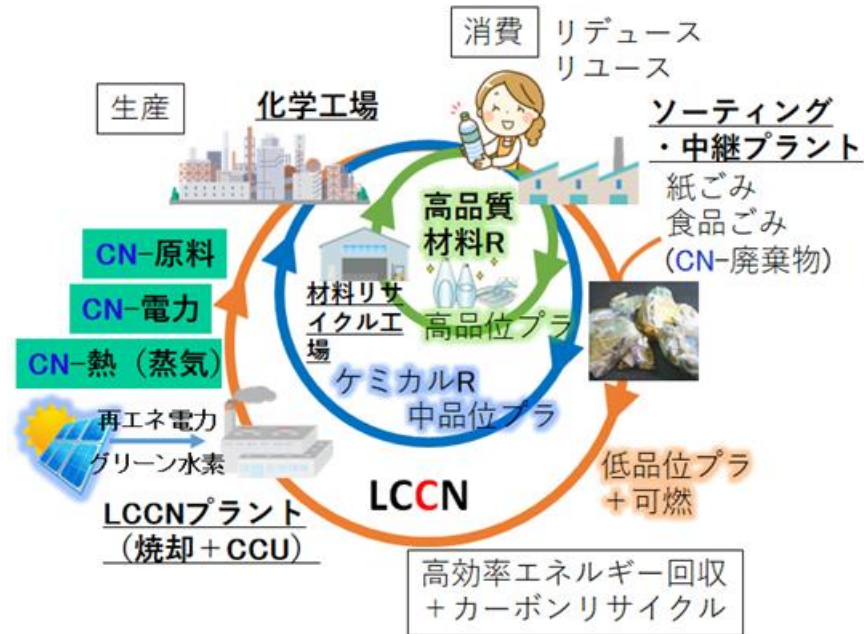


図3 有機素材（プラスチック等）のマテリアル・ケミカルリサイクルを補完する LCCN
（LCCN: Life Cycle Carbon Neutral, ライフサイクルカーボンニュートラル）

LCCN を意味のある規模で実施するには、原燃料となる低品位な廃棄物を、複数県を跨ぐような広域から、コンビナートのような素材製造拠点に集約することが求められる。県を跨ぐ廃棄物の移動は法律で禁じられている訳ではないが、廃棄物の自区内処理の原則や、なるべく狭い地域で循環させるという理念からは外れることになる。しかし、今後は社会においてエクセルギー効率を最大化することが求められる中で、廃棄物を最大限効率的な用途で利用するという視点が重要になると考えられる。輸送に伴う費用が気になる点であるが（輸送に伴う CO₂ 排出は、コンビナートで削減される CO₂ 排出に比べて十分小さい）、大きなコンテナに廃棄物を詰めて廃棄物の長距離輸送を効率化している実例が、国内外で増加しつつある。また、一般廃棄物だけでも全国で 1 千基程度の焼却施設が存在し、小規模な施設で火力発電と比べて低い発電効率で発電が行われている状況から、コンビナートの大規模な焼却施設（LCCN Ready プラント）に集約し、高効率に熱利用を行うことで、輸送費の増分を大きく上回る経済的メリットが得られるとの試算結果が出ている。仮に総ての一般廃棄物を LCCN Ready プラントで活用できた場合、2 千万 t/年程度の CO₂ 排出削減効果が期待されるが、同時に廃棄物処理経費の削減も達成できる可能性がある。

リサイクルを高度化し、かつその経済性を高めるためには、単一あるいは同種の素材の廃棄物を分別してなるべく多く集めることが必要になるが、これは廃棄物の発生を抑制する取り組みを進めることや、優れたバリア性や環境中における生分解性など、多様な機能を持つ有機素材及びそれらの複合素材を積極的

に活用することは相容れない。LCCN では可燃廃棄物であればほとんどのものを受け入れ、カーボンリサイクルすることができるため、廃棄物組成の変化に対する許容度が高く、素材の選定や利用方法も含めて、ライフサイクル全体で環境負荷を最小化するためのデザインを選択しやすくなる利点がある。また、低品位廃棄物を常時広域で輸送できる体制を持つことで、人口減少等に伴う廃棄物発生空間分布の変化にも対応しやすくなり、災害廃棄物に対しても即応的に対応を取りやすくなる。このように LCCN の仕組みは、カーボンニュートラル社会への移行を支援しつつ、状況の変化にも柔軟に対応する仕組みとなり得る。自動車を構成する有機素材も、組成や発生量が今後変化するかもしれないが、仮にその一部がリサイクル困難なものであっても、効率的に利用して化学原料に再生することができるだろう。

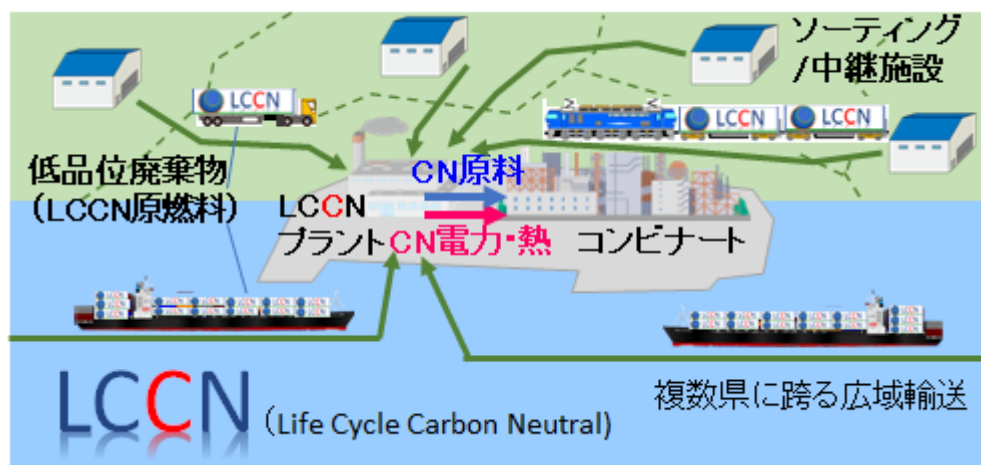


図 4 低品位廃棄物の広域からコンビナート等への効率的な輸送システム

4. おわりに

カーボンニュートラル社会において、エネルギーや金属素材の望ましい利用方法について考察すると共に、有機素材の中でも特にリサイクル困難な低品位廃棄物を効率的に熱利用し、カーボンリサイクルを行う LCCN の仕組みについて解説した。現在、LCCN Ready プラントの社会実装に向けて、国内の複数のコンビナートで検討が行われている状況である。多くの関係者と協働して、実現と普及を加速させたい。

謝辞

本稿の記載内容には、(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費 (JPMEERF20223C02) により実施された研究の成果を含む。ここに関係者に謝意を表す。

参考文献

- 1) 小島和夫, エネルギー有効利用の原理—エクセルギーを活かそう, 培風館, 2004
- 2) 資源エネルギー庁, 次世代型太陽電池に関する国内外の動向等について, 2022
- 3) <https://pps-net.org/glossary/14769>
- 4) https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/electric_power/ep002/pdf/2021/0-2021.pdf
- 5) https://www.nisri.jp/chc/docs/kankyojuku/deliverables/27/27_1_0.pdf
- 6) 法人全国木材資源リサイクル協会連合会カーボンニュートラルワーキンググループ, 報告書: カーボンニュートラルに貢献する木材資源リサイクル, 2023
- 7) https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shigen_nenryo/sekiryu_gas/sekiryu_shijo/pdf/008_02_00.pdf
- 8) プラスチック循環利用協会, 2021年プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況, 2022