

カーボンインディペンデンス（炭素自立）ビジョン：
CO₂排出削減が困難な産業の循環経済への変革

Carbon Independence Vision:
Circular Transformation from Hard-to-Abate Industries

化学工学会
地域連携カーボンニュートラル推進委員会
(2024年9月)

Executive Summary

CO₂排出削減が困難な産業の排出量実質ゼロを実現しつつ、国内産業の国際競争力を維持、強化するには、ものづくりに関して、輸入資源から脱却した炭素資源の自立が必須

プラスチックなど化学品のリサイクル率の向上、森林バイオマスを最大活用した素材の生産、CO₂の回収と利用および貯留の拡大、産業間の連携により、炭素自立に向けた炭素循環の姿を提示

炭素自立を実現するための課題を明確化

温室効果ガスの排出量実質ゼロの背景と現状

現在、2050年の温室効果ガス排出の実質ゼロの実現は、不可逆の長期目標として国際的に認識されている。ネットゼロの実現には、発電などエネルギー転換部門、自動車など運輸部門、ものづくりなど産業部門、オフィスや家庭など民生・業務部門のそれぞれにおける高い目標での取り組みが求められる。中でも、ものづくりにおけるネットゼロの実現がもっともハードルが高く、各国がその対策に注力している。

CO₂排出削減が困難な産業のリスクと事業機会

産業部門の中でも、鉄鋼、化学、セメント、紙・パルプなどは、エネルギーとして化石燃料を使用するだけでなく、石炭から作られるコークスを使って鉄鉱石を還元する、原油を原料としてプラスチックやゴム・化学繊維を製造する、など、化石資源を素材として利用している。そのため、ネットゼロ実現のためには、再生可能な素材生産や、まったく新しい製法の確立が求められ、CO₂排出削減が困難な（Hard to Abate, HTA）産業として位置付けられている。

化石資源の利用を前提とした事業は、ネットゼロが実現された社会では成立せず、現在のHTA産業は事業存続のリスクにさらされている。加えて、ネットゼロの実現に先駆的な取組をする企業は、自社製品を製造するために購入する素材についてもネットゼロを求めるようになってきており、足元の事業に対するリスクも顕在化してきている。これらのリスクは、裏返せば事業機会ともいえる。世界に先駆けてHTA産業のネットゼロを実現し、そのことを競争力の源泉として、強いものづくりの再興につなげる大きなチャンスが存在している。

CO₂排出削減が困難な産業のカーボンインディペンデンス（炭素自立）ビジョン

このような背景の下、化学工学会地域連携カーボンニュートラル推進委員会では、輸入資源に依存してきたHTA産業が、持続可能な炭素資源に基づく新たな産業へどのように転換することができるか多面的に議論を重ねてきた。本意見書は、地域連携カーボンニュートラル推進委員会が描く将来のHTA産業の姿を「カーボンインディペンデンス（炭素自立）ビジョン」として取りまとめたものである。炭素自立とは、HTA産業が、バイオマス資源の最大活用とCCUSにより炭素資源の循環を実現する姿を指す。われわれは、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と大気に放出されるCO₂の回収、利用、貯留（CCUS）により、HTA産業の輸入化石資源からの脱却が可能であるとの見通しを得た。

炭素自立に向けた課題と論点

炭素自立の実現には、HTA産業のみならず、エネルギー転換部門や運輸部門、業務・民生部門など社会全体の変革と一体となって進めることが重要である。炭素自立ビジョンの実現に向け、本意見書で対象外とした用途や資源の考慮や大胆な仮定等を更に精査していくことも必要である。今後、持続可能な国内林業の実現、産業間の具体的連携に向けた議論の深化とともに、国際標準化やルール形成をリードし、関連主体が一丸となって具体的なアクションにつなげていくことが重要である。

1. はじめに

日本は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。2022 年度の日本の温室効果ガス排出のほとんどは CO₂ が占めている。その大部分はエネルギー用途の化石資源起源であるが、エネルギー用途以外にも鉄鋼や化学、セメント産業等の工業プロセスの非エネルギー起源の CO₂ 排出が存在している。日本におけるネットゼロの実現のためには、発電などエネルギー転換部門や自動車など運輸部門のネットゼロの実現に加えて、工業プロセス、すなわち「ものづくり」におけるネットゼロの実現が必須である。

発電や自動車のネットゼロも容易ではないが、鉄鋼、化成品、セメントなど日々の暮らしに欠かせない製品を生産するものづくり産業におけるネットゼロの実現はハードルが高い。そのため、それらの産業は CO₂ 排出削減が困難な（Hard to Abate, HTA）産業と言われている。HTA 産業は、エネルギー多消費であるだけでなく、鉄鉱石を還元するために石炭由来のコークスを用いたり、原油を原料としてプラスチック・ゴム・繊維などを作ったり、原料に CO₂ を含む石灰石を用いたりしているため、エネルギーのネットゼロ化を超えた取り組みが求められる。すなわち、HTA 産業におけるネットゼロの実現には、原料調達から製造、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。

化石資源からの脱却を目指す現在、HTA 産業は、文字通り事業存続の危機に直面しており、世界中の国が解決策の創出に取り組んでいる。化石資源からの脱却のためには、代替する含炭素資源が必須である。代替炭素資源の候補は、森林バイオマスと CO₂ から合成される合成炭化水素等が主要な選択肢である。これまで化石資源の大部分を輸入してきた日本の国土の 67%は森林であり、豊富なバイオマス資源に恵まれている。

このような背景の下、化学工学会地域連携カーボンニュートラル推進委員会では、輸入化石資源に依存してきた HTA 産業が、持続可能な炭素資源に基づく新たな産業へどのように転換することができるか多面的に議論を重ねてきた。その結果、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と大気に放出される CO₂ の回収・利用・貯留（CCUS）により、輸入化石資源から脱却した HTA 産業が実現可能であるとの見通しを得た。本意見書では、将来の HTA 産業の姿を「カーボンインディペンデンス（炭素自立）ビジョン」として取りまとめた。炭素自立とは、HTA 産業が、バイオマス資源の最大活用と CCUS により炭素資源の循環を実現する姿を指す。炭素自立によって、日本は炭素資源の輸入国から自給国へと転換するだけでなく、炭素資源循環の基盤となる技術や社会システムを世界に先駆けて実現し、新産業形態への世界的な大転換を事業機会として、強いものづくりの再興へとつなげることが重要である。

2. 検討の範囲と主要な前提

2050 年ネットゼロ制約下での HTA 産業の姿を描くにあたって、対象となる HTA 産業を鉄鋼、化学、セメント、紙・パルプとし、化学はプラスチック・繊維・ゴム・有機溶媒等に分けた。また、地理的境界条件は日本とした。

検討においては、プラスチックのように、炭素資源を原料とする素材の生産と廃棄、鉄鋼やセメントのように、現行生産プロセスで CO₂ 排出が不可避な素材生産とともに、炭素源となり得る廃棄物焼却及び熱電併給を含むバイオマス発電も対象に含んだ。なお、本検討においては、非エネルギー由来の CO₂ 排出要因となる鉄鋼における還元材でのコークス利用やセメントにおける石灰石の利用は 2050 年にも一定程度残ると仮定した。

ネットゼロな原料の使用もしくは廃棄時に CO₂ を大気に放出しないことが重要であり、直接または間接的に放出する分は、大気からの CO₂ 回収が必要となる。また、2050 年には、正味での CO₂ 排出を伴わないエネルギー源に移行しているものとした。

2050 年時点の炭素量の推定は次の手順で行った。最初に 2022 年現在の、生産・消費・廃棄の数値を各種報告書や統計データから得た。次に 2050 年時点の生産・消費・廃棄の推定値を各種報告書から得た。生産量は 2022 年時点と同じと仮定し、消費と廃棄は 2022 年比で 16%の人口減を考慮して推定した^{1,2)}。2022 年・2050 年の各項目の生産・消費・廃棄に対し、炭素量換算係数

を乗じることで項目ごとの炭素量を計算した（表 1）。各項目の数値ならびに炭素量への換算係数の求め方は、別紙参考資料にまとめて示した。表 1 に示す炭素量を用いて 2050 年の HTA 産業の炭素フローを検討した。

表 1 検討対象に関する炭素量（単位：万 t-C）

対象	現状（2022 年※）			2050			参考文献
	生産	消費	廃棄	生産	消費	廃棄	
セメント	625			501			3-5
鉄鋼	3,507			1,882			4, 6-8
プラスチック（樹脂）	815	767	705	815	644	592	9
繊維	46	160	86	46	134	80	10-16
ゴム	122	105	74	122	88	63	12-15, 17-21
有機溶剤	161	163	124	161	137	104	22, 23
廃棄物焼却			1,011			900	13-15, 24-26
バイオマス発電		594			3,320		4, 26-28
紙・パルプ	946	922		766	740		25, 29
JET 燃料	716	727			1,376		31
潤滑油	174	132		104	79		31, 32
軽油	2671	2197		12	10		31

※有機溶剤の消費、廃棄量は 2022 年の値が確認できなかったため、2021 年公開の調査の値を使用。

森林による炭素固定量は天然林と人工林の両方を考慮した。活用可能な炭素資源の上限は、人工林の年間固定量の 70%とした。森林の成長は数十年単位の時間を要し、毎年の伐採量と成長量が釣り合う定常的な森でない限り、ネットゼロとみなせない。長年管理されず放置された森を定常な森に転換するには、100 年単位の時間を要すると想定され、注意が必要である。本意見書では、森林バイオマスの過大な消費を避けるか、木材利用に伴う CO₂ も回収すると想定し、簡易的にこの問題を回避することとした。森林バイオマスの用途として持続可能な航空機燃料なども考えられるが、検討対象とはしなかった。

3. 国内資源を活用した素材産業における炭素循環の姿

3-1. 炭素循環の考え方

原料として使用される炭素資源は、化石資源・鉱物資源と森林バイオマスの 2 つに大別される。ともに、国内資源のみならず、海外から輸入される資源も存在する。

鉄鋼、化学、セメント、紙・パルプ産業はこれらの含炭素資源を製品に転換している。使用された製品の一部は原料等として再び利用され、リサイクルされない分は CO₂ として排出される。ただし、バイオマス由来の CO₂ については区別することとした。生ごみなど、上記の製品由来以外の廃棄物の焼却やバイオマス発電についても、バイオマス由来の排出 CO₂ として扱う。排出 CO₂ のうち、CO₂ の分離回収が容易な固定排出源からの排出の一部は、貯留あるいは素材の原料として利用することができる。CO₂ 濃度が低いなど分離回収に適さない分や移動排出源からの排出は、そのまま大気に放出される。

大気炭素蓄積量は森林吸収 (A)、固定排出源からの排出 (X)、貯留 (S)、利用 (U)、大気放出 (Y) から $X+Y-A-(S+U)$ と計算でき、この値がゼロになるとき、ネットゼロ社会が実現できる。

3-2. 素材生産に関わる炭素フローの現状

素材生産に関わる炭素フローの現状を図 1 に示す。化石資源・鉱物資源の炭素フローは黒実線、森林バイオマスの炭素フローは緑実線で示す。リサイクルされて原料等として再び利用される炭素フローは青実線、リサイクルされず CO₂ として排出される炭素フローは灰色破線で示し、リサイクルされない分のうちバイオマス由来の CO₂ 排出は緑破線で示す。

セメントの製造工程では、CaCO₃ を原料として CaO を製造するため CO₂ の排出を伴う。燃料の一部に廃プラスチックが利用され、燃焼により CO₂ が排出される。製鉄プロセスでは、鉄鉱石の還元でコークスを使用し、その分の CO₂ が排出される。還元で廃プラスチックを利用する場合、その分の CO₂ が排出される。

プラスチックは、使用され廃棄されたもののうち、リサイクルされない分の CO₂ が排出される。リサイクルされ、鉄鋼およびセメント生産に使用された分は、前述の通り CO₂ として排出される。

ゴム、医薬品、溶媒も、使用され廃棄されたもののうち、リサイクルされない分は、CO₂ が排出される。なお、合成繊維については一部リサイクルされているが、定量的な用途が不明なため、最終的には定量的に CO₂ として排出されるとみなす。

現在、紙・パルプ産業における炭素原料は国内外の木質チップである。古紙として回収されない紙や段ボールは可燃ゴミとして焼却され、CO₂ が排出されるが、廃棄物焼却によるバイオマス由来の CO₂ 排出側に含まれているため、ここでは計上しない。さらに、パルプの製造過程で抽出される黒液は、燃料として自家消費され、CO₂ として排出される。

輸入木質ペレットを用いたバイオマス発電についても記した。本検討での対象としていないが、液体燃料として将来の炭素循環に影響を与える JET 燃料、機械油、軽油については、全体像を把握するため図中に記した。

対象とする HTA 産業から年間 6,116 万 t-C の CO₂ が排出されている³³⁾。日本全体としては、エネルギー由来の CO₂ 排出を含めて 2022 年に年間 28,273 万 t-C³³⁾ が排出されている。国内森林等の年間 CO₂ 吸収量は 3,800 万 t-C/年^{34,35)} に過ぎず、大気中の CO₂ 濃度を上昇させる原因となっている。

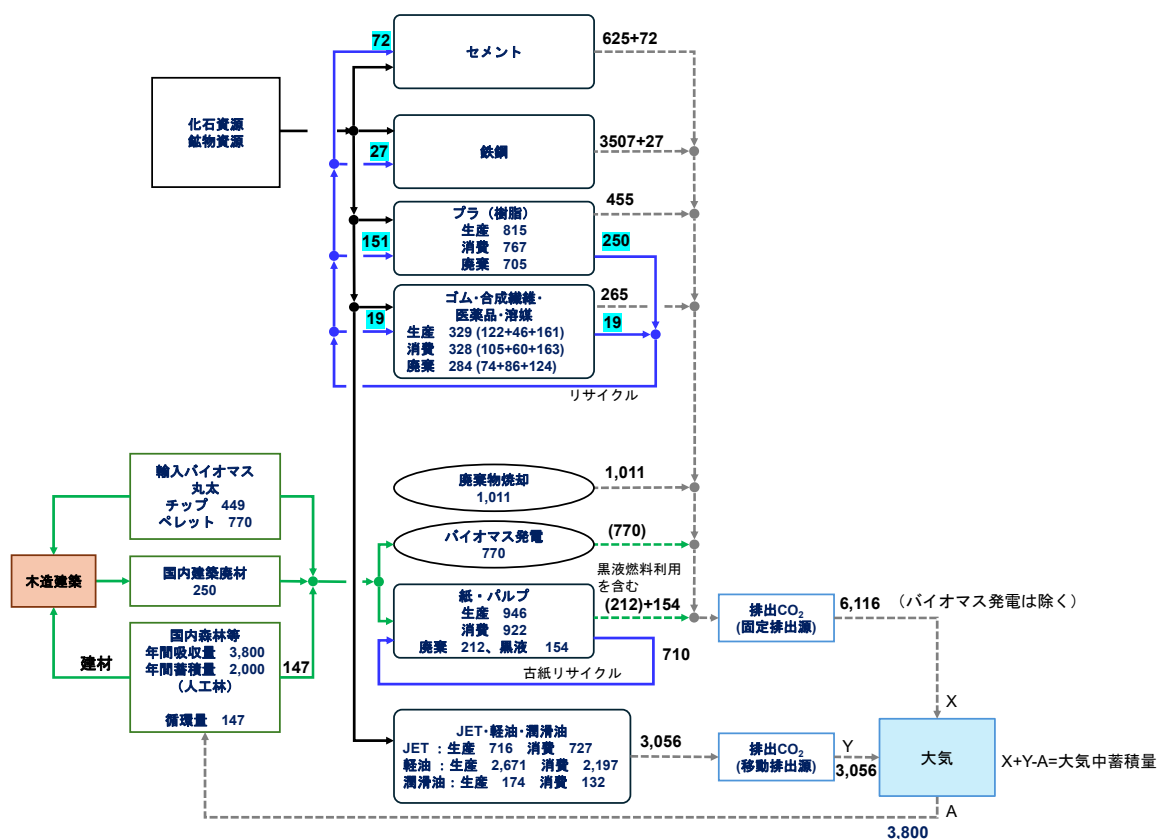


図1 素材生産に関わる炭素フローの現状

3-3. 素材生産に関わる炭素循環の将来像

炭素自立のためには、化石資源由来ナフサに変わる炭素源が必要となる。プラスチックのリサイクルおよびパルプ産業から排出される黒液利用による炭素循環を第一優先とし、不足する炭素源は CCU や森林バイオマスによりまかなう必要がある。本検討では、サーマルリサイクルを除くプラスチックのリサイクル率を 80% とし、バイオマスから素材を生産する際の収率を 33% と仮定し、残りは CO₂ として排出されるとした。セメント由来の CO₂ はコンクリート吸収や炭酸カルシウム循環等により排出しないと仮定し、JET 燃料等の使用による CO₂ 排出量は本検討の炭素循環には含めないこととした。なお、森林等による CO₂ 吸収量は、今後、農地や森林、海洋の管

理・保全を促進することを前提として、2050年は5,000万t-C/年とした。また、炭素自立が成り立つ状態で利用可能な森林バイオマスの炭素量ポテンシャルは、毎年、国内人工林³⁶⁾の1/30の面積を皆伐して同じ種類の木を植林することを前提として、2000万t-C/年とした。この前提のもとでの将来の炭素循環の姿を図2に示す。森林バイオマスの炭素量(B3)、CCU利用炭素量(U)、CCS炭素量(S)はネットゼロ制約のもと相互に依存し、Uを定めるとB3が決まり、結果として固定排出源からの排出(X)が決まる。

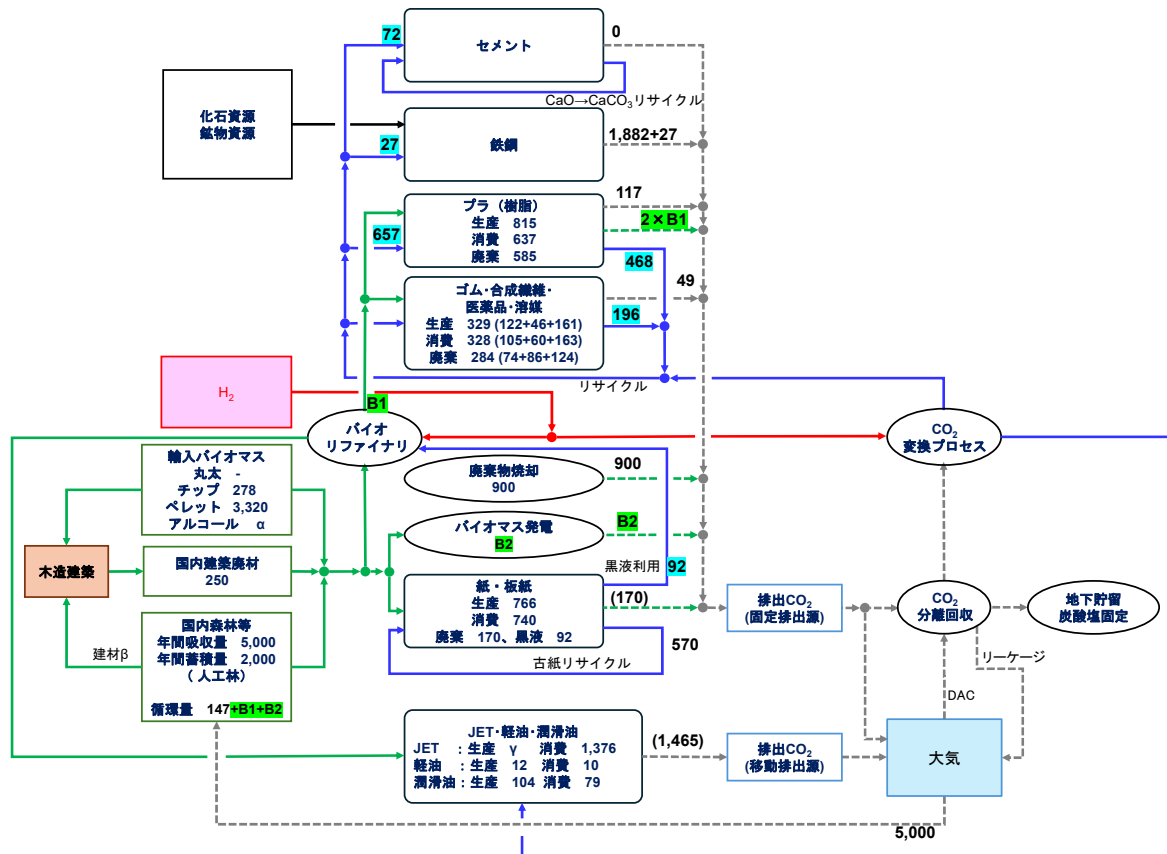


図2 素材生産に関わる炭素循環の将来像

表2に示す5つの前提で炭素循環の姿を描いた。ケース1は、国産森林バイオマス資源を利用可能な範囲で最大限素材用の炭素源として優先活用し、かつ、化学産業起因のCO₂は全量回収、利用されることを想定したケース。なお、バイオマス発電量は、余剰となった国産森林バイオマス資源のみを利用し、不足する分は他の再生可能エネルギーで賄うこととする。ケース2は、国産森林バイオマス資源は発電を優先し、素材には用いない。素材用の炭素源としては、プラスチック等のリサイクルで足りない分をすべてCCUで確保するケース。ケース3は、バイオマス発電は海外より輸入するサステナブル木材（管理された森林でCO₂排出がネットゼロとみなせる）を利用し、国産森林バイオマス資源は素材用途のみに活用するケース。ケース4は、ケース3と同様であるが、輸入バイオマス資源がネットゼロとみなせない場合を想定し、国内森林吸収量の増加分を超えてバイオマス発電から排出されるCO₂はすべて回収・貯留するとしたケース。ケース5は、国内林業や生態系保護等の理由により国内バイオマス資源が十分確保できない場合、素材用の炭素源としては、プラスチック等のリサイクルおよび化学産業起因のCCUで不足する分のみ、国内森林バイオマスを活用するケース。

図3にはケース1の炭素循環像を示す。バイオマス発電に利用できる炭素換算量は1,166万t-C/年となり、「カーボンニュートラルに向けたトランジションロードマップの策定（2023年度版）」⁴⁾で述べられているバイオマス発電の約35%に相当する。しかし、燃料由来を除いたHTA産業由来のCO₂排出量からCCUに利用する分を減じると4,572万t-C/年となり、森林吸収量5,000万t-C/年を下回るため、CCSをすることなくネットゼロと炭素自立の両立が可能である。

ケース 2 (参考資料図 1) では、ケース 1 同様に、CCS をすることなくネットゼロと炭素自立の両立が可能である。ケース 2 (参考資料図 2) では、化学品の炭素源として国産森林バイオマス資源を活用しないため、バイオマス発電に利用できる炭素量は 1,853 万 t-C/年となる。また、CCU に利用する CO₂ 排出量分を減じると、4,406 万 t-C/年となり、森林吸収量 5,000 万 t-C/年を下回るため、ケース 1 同様に、CCS をすることなくネットゼロと炭素自立の両立が可能である。

ケース 3 (参考資料図 2) では、原料として必要な炭素量は、プラスチック等のリサイクルとパルプ産業から排出される黒液由来の炭素だけでは足りない分を国内森林バイオマスで補填することになり、その量はバイオマス化学の収率を 1/3 と仮定しても 1,185 万 t-C/年となり、利用可能な森林バイオマスの炭素量ポテンシャル 2,000 万 t-C/年を下回る。また、燃料由来を除いた HTA 産業由来の CO₂ 排出量は 3,765 万 t-C/年となり、森林吸収量 5,000 万 t-C/年を下回るため、結果的に CCS あるいは CCU をすることなくネットゼロと炭素自立の両立が可能である。

表 2 想定する炭素循環のケース

	国内バイオマス利用	CO ₂ 利用
ケース 1 国内森林バイオマス素材優先活用	素材を優先し、余剰分を発電に利用	化学産業起因は CCU
ケース 2 国内森林バイオマス発電優先活用	発電を優先し、素材には用いない	プラ等リサイクルで足りない分をすべて CCU
ケース 3 海外サステナブル輸入木材活用	素材のみに利用 (発電は海外)	—
ケース 4 海外非サステナブル輸入木材活用・CCS オフセット	素材のみに利用 (発電は海外)	—
ケース 5 国内森林バイオマス抑制	国内はプラ等リサイクルおよび CCU で足りない分を素材に利用 (発電は海外)	化学産業起因は CCU

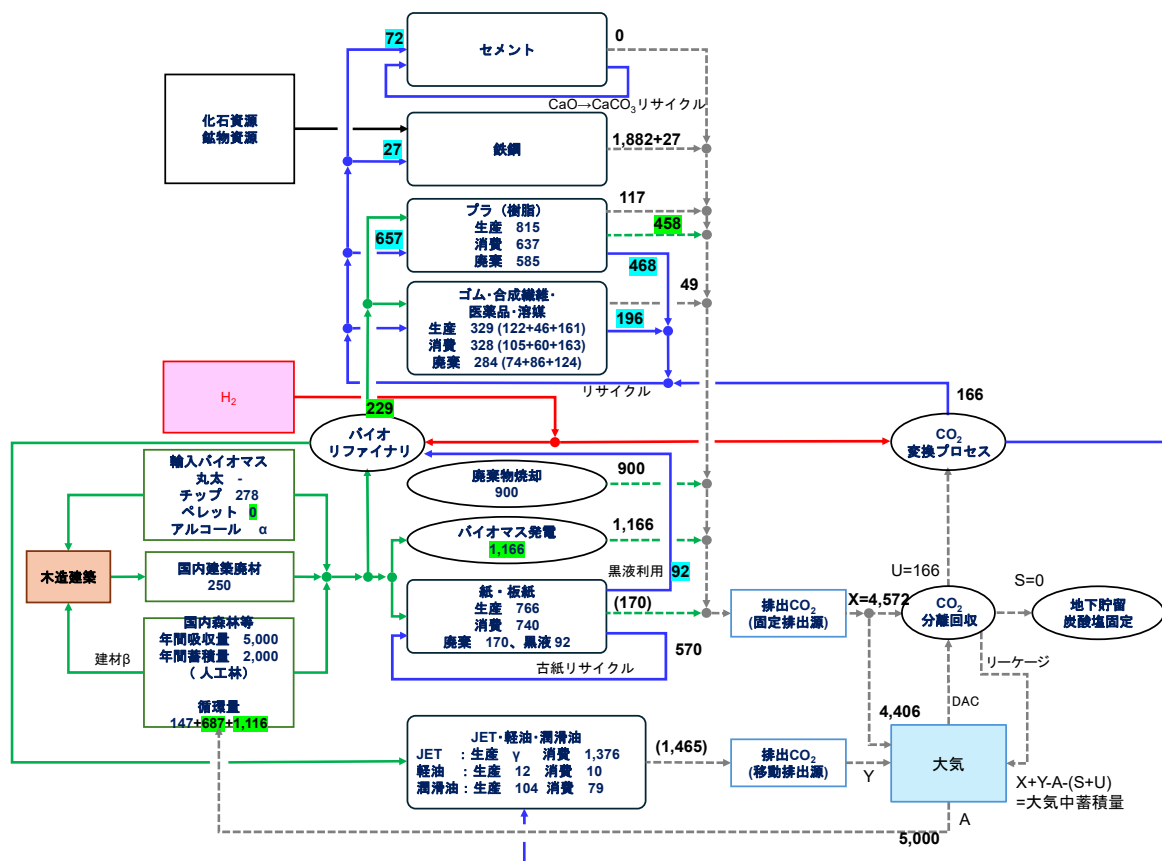


図 3 国内森林バイオマス素材優先活用ケースにおける炭素循環の将来像

ケース 4 (参考資料図 3) では、国内森林バイオマスで補填する炭素量はケース 3 と同じく 1,185 万 t-C/年となり、国内森林に蓄積されている炭素量ポテンシャルを下回る。一方、燃料由来を除き、HTA 産業とバイオマス発電由来の CO₂ 排出量は 7,085 万 t-C/年となり、森林吸収量を 2,085 万 t-C/年だけ上回るため、その分を CCS で固定することでネットゼロと炭素自立の両立が可能である。

ケース 5 (参考資料図 4) では、原料として必要な炭素量は、プラスチック等のリサイクルとパルプ産業から排出される黒液由来の炭素に加えて、リサイクルされない化学品廃棄物に起因する排出 CO₂ の 166 万 t-C/年を利用し、それだけでは足りない分は国内森林バイオマスで補填することになる。その量はケース 3 および 4 よりも化学品廃棄物に起因する排出 CO₂ 利用分だけ減少して 687 万 t-C/年となり、利用可能な森林バイオマスの炭素量ポテンシャルをさらに下回る。また、燃料由来を除いた HTA 産業由来の CO₂ 排出量から CCU に利用する分を減じると 6,753 万 t-C/年となり、森林吸収量を 1,773 万 t-C/年だけ上回り、その分を CCS すればネットゼロと炭素自立の両立が可能である。

3-4. 考察

各シナリオにおける、化学産業に必要な炭素源別炭素量、その炭素源を用いて素材を生産するために必要な水素量、CCS により固定すべき CO₂ 量を表 3 に示す。CO₂ を炭素源とする CCU の増加により、素材生産に必要な水素量は増大するが、CCS に対する負荷が減少する。プラスチック由来炭素、バイオマス由来炭素、回収 CO₂ 由来炭素に関する 3 つの炭素フローに基づく循環の実現により、炭素自立を実現することが可能であることがわかった。プラスチックおよび森林バイオマス由来の炭素フローの現状とのギャップは、それぞれ 657、687~1,185 万 t-C/年であり、回収 CO₂ 由来炭素フローについては最大 395 万 t-C/年と試算された。

表 3 各ケースの炭素源、ものづくりに必要な水素量、および CCS すべき CO₂ 量

	炭素源 (万 t-C/年)					必要水素量 (万 t-H ₂ /年)	CCS すべき CO ₂ (万 t-C/年)
	廃プラスチック	黒液	CO ₂	国産森林バイオマス			
				化学	発電		
1	657	92	166	687*	1,166	137	0
2	657	92	395	0	1,853	213	0
3	657	92	0	1,185	0	81	0
4	657	92	0	1,185	0	81	2,085
5	657	92	166	687	0	137	1,753

※(残りはバイオマス発電へ)

なお、今回考慮の対象外とした JET・軽油・潤滑油等の液体燃料の生産には、大量の炭素源が必要である。全量国内生産を想定すると、必要な炭素量は、バイオマス発電に必要な量に匹敵する。加えて、液体燃料の利用は、移動排出源からの CO₂ 排出でありそのまま大気に放出されるため、国内森林の適切な伐採・植林による森林バイオマス資源の最大活用はもとより、CO₂ の直接回収 (DAC) などの技術導入や、固定排出源からの CCS を増加させるなどの対策により、国内における CO₂ 固定策を拡大する必要がある。

4. 炭素自立実現に向けた課題と論点

炭素自立を実現するための 3 つの炭素フローを実現するためには技術に裏付けられた経済的に持続可能な社会システムの具体的絵姿とその構築が必要となる。それぞれのフローの実現に向けた課題を、時間、空間、経済性の 3 つの観点から現状とのギャップを分析した。時間的ギャップは、実用レベルまで技術が成熟するまでに必要な時間や循環のためのシステムを構築し、定常までに必要となる時間など、空間的ギャップは、発生場所と使用場所など、経済性ギャップは、エネルギーも含めた循環システムの総コストなどの観点から検討した。3 つの炭素フロー実現に向けて、そのギャップが低いと考えられる順番、すなわちプラスチック由来炭素、バイオマス由来炭素、CO₂ それぞれに重要な要素を具体的に記す。

4-1. プラスチック由来炭素フロー

1) 時間的ギャップ

プラスチックは、炭素フロー変革への技術的ハードルが最も低く、発生時点でリサイクル可能

であるため実現に必要とされる時間的ギャップも短く、2030年までの商用化を目指して最優先で取り組むべきである。現状、国内の年間約 800 万 t-C の廃プラスチックの材料もしくはケミカルリサイクルの量は約 200 万 t-C である。プラスチック製品には、塩素や配合剤としての無機物など炭化水素以外の成分が含まれている。循環実現の為に、油化・熱分解・ガス化などそれぞれのプラスチック製品の長に合致する循環技術が必要である。80%の循環に向けたギャップを埋めるためには、ボトムアップ的に個々の技術開発をすることに加えて、排出元やプラスチックの種類など、出口側の視座から体系的に循環システムを設計し、技術課題を特定することが重要である。

2) 空間的ギャップ

廃プラスチックの回収については容器リサイクル法や家電リサイクル法等が整備されており、回収システムの構築に関するギャップは比較的小さい。しかし、廃プラスチックの発生場所は一般廃棄物と産業廃棄物の視点でも空間的なギャップは存在し、循環量を拡大する為には、地産地消型に適した技術である油化や、集約型に適した技術である熱分解やガス化を組み合わせ、回収したプラスチックを利用するための循環拠点の最適な立地を検討し、整備していくことが重要である。

3) 経済性ギャップ

プラスチック循環のコスト負担は容器リサイクル法等で一部制度化されているものの、循環を拡大するためには、新たな制度設計が重要である。具体的には、プラスチック使用者への製品への循環資源使用率表示の義務化等とあわせたプラスチック使用者全体への公平な分担制度の制度化が考えられる。

4-2. 森林バイオマス由来の炭素フロー

1) 時間的ギャップ

森林バイオマスは、潤沢に存在する国産資源であり、この循環実現には大きな期待が寄せられる。さまざまなギャップが存在し、プラスチック由来炭素の循環と比して実現に時間を有すると考えられ、2040年までの商用化を目標とする。造林から収穫までの一サイクルを40年とすれば、循環の実現にもそれだけの時間がかかり、一足飛びに大量の国産バイオマスを資源化することは非現実的である。バイオマスの循環技術は発酵、分解油化、ガス化に大別される。森林の成長と合わせ、発酵のような比較的小規模から実現できる技術を端緒として循環システムの基盤を整備し、油化やガス化のような大規模集約に適した技術をもとに段階的に循環システムを拡大していくことが重要である。

2) 空間的ギャップ

森林バイオマス由来の炭素フローの変革の最も高いハードルが空間的ギャップである。資源の採取から循環拠点までをつなぐインフラやロジスティクスの整備、労働力の確保が課題である。地産地消型モデルを端緒とし、地域製材所併設型もしくはハブ型の森林バイオマス発酵プラントを森林の近接地域に配置し、エタノール等の液体資源に転換し、資源活用場所への移送ハードルを低減させることが現実的な第一歩として考えられる。

3) 経済性ギャップ

森林バイオマス循環のために最も重要な事は、経済的に持続可能な社会システムの具体的な姿を描く事である。特に、林業と素材産業の経済的連携を実現し、ものづくりの利益を林業に還元しつつ、次世代の森林資源を造成することが重要であり、そのためには森林バイオマス循環のバリューチェーンの構築が必須である。既存のコンビナートにおけるバリューチェーンに発酵で得られるエタノールを組み込むとの視点で設備投資を抑制するなど、既存のバリューチェーンの適切な連携の視点が必要不可欠である。また、発酵に寄与しないリグニンなど資源を余すところなく活用するとの視点も重要であり、小規模でのモデルを実現することが重要である。

4-3. 回収 CO₂ 由来炭素フロー

1) 時間的ギャップ

実現まで最も時間的ギャップが大きいと考えられるのが CO₂ の回収・利用のためのフローであり、2050年までの商業化システム構築を目標とする。CO₂ の回収過程もさることながら、利用技術に課題が大きい。CO₂ 電解や水素化、メタネーション、逆シフト等さまざまなルートが提案さ

れてはいるが、必要な投入エネルギーが大きく、また再生可能エネルギーの直接利用を避けてまで選択する合理的環境が必要である。当面は、その経済合理性の向上を目指した実証を着実に進めることが重要である。例えば、廃棄物焼却場等の集中排出源からの CCUS のパイロット実証から着手し、徐々に大規模な CO₂ 排出源へと展開し、CO₂ 循環を段階的に確立していくことが重要である。

2) 空間的ギャップ

大気からの直接 CO₂ 回収の場合、CO₂ は大気中にあまねく存在するが、CO₂ の集中排出源は離散的に存在する。どちらの場合でも、CO₂ の利用に必要な再生可能エネルギーは地理的な偏りがある。そのため、再生可能エネルギーを活用しやすい地域を実証サイトとして選定する必要がある。実証では、メタノールや合成油のような移送ハードルが比較的低い化合物までその場で変換することが、循環の空間的ギャップを低くする鍵である。

3) 経済性ギャップ

回収 CO₂ 由来炭素フローはそもそも経済合理性実現のハードルが極めて高く、長期的視野で取り組む必要がある。逆に言えば、中長期的にも支援前提の事業になり得ることを念頭に、森林バイオマスや廃棄物など地域資源と素材産業など CO₂ の利用および排出源との連携の姿を描き、社会システム全体としての総コストの観点から設計するとの視点が必須となる。

4-4. 今後の論点

炭素自立の実現には、HTA 産業のみならず、エネルギー転換部門や運輸部門、業務・民生部門など社会全体の変革と一体となって進めることが重要である。炭素自立ビジョンの解像度を高め、実現に向けた施策に落とし込むために考慮すべき主な論点を以下に示す。

1) 炭素循環に必要なエネルギーの考慮

化学品製造工程における全 CO₂ 排出量に対するエネルギー由来の比率は約 2/3 を占め、セメント製造でも 40%程度を占め、原料由来の CO₂ 排出に対して無視できない。本意見書では、HTA 産業における素材としての炭素フローに焦点を絞るため、製造工程の熱・エネルギーはネットゼロが実現されていることを前提としている。エネルギーのネットゼロに必要な再生可能エネルギー、原子力、水素・アンモニア・e メタンの活用、CCS などは、炭素自立に必要なグリーン水素や CCUS と密接な関係にあり、エネルギー基本計画や GX2040、地球温暖化対策計画、エネルギー関連技術開発の進展も踏まえ、適時見直しを行いながら最適なシステムを構築する必要がある。

2) 持続可能な国内林業の実現

森林バイオマス資源の活用に向けて、林業従事者不足、森林の所有者不明問題、放置森林など、国内林業を取り巻く課題の解決が必要である。そのためには、「儲かる林業」を実現し、持続的・自立的に成長する林業経営への変革が必須である。川上の林業改革のみならず、木材の有効利用においては、バイオマス化学など素材産業における非従来型のバイオマス活用を早期に実現することに加えて、例えば木造建築の高層化など木材そのものの用途拡大を図り、炭素を長期にわたって固定できる木造都市の推進も重要である。関連省庁、地方自治体、産業界、アカデミアが連携し、一体となった取り組みが求められる。

3) 経済性評価と最適化

HTA 産業の炭素自立には、社会インフラや産業構造を一新する必要がある、巨額の投資が必要になる。一方、上述の様に、炭素自立の実現には様々な経路があり、各ケースの経済性を評価し、経済合理性が得やすいものから社会実装を図る必要がある。地域の特色、インフラ、ロジスティクス、労働力、産業間連携を含むバリューチェーン、社会システムや法規制など、幅広い観点で未来を描き社会全体の最適化を図ることが重要である。

4) 国際標準化やルール形成への取り組み

循環炭素による製品の社会実装に向けて、ライフサイクルでの温室効果ガスの排出削減効果や森林バイオマス活用による生物多様性・水源涵養など自然再興(Nature Positive)に関する価値を共通の基準で評価できる仕組み作りが重要である。現在、CCU やバイオマス製品に対する排出 CO₂ の国際間の取り扱いなど、国際標準やルールが未整備であり、企業の投資判断の大きな障壁になっている。国際標準の多くは欧米が中心となり規格作りが進んでいる。日本に不利益が生じない

ように、産官学が一体となり、炭素自立に必要な国際標準化を主導することが重要である。

5) 遷移に必要な施策とロードマップの立案

炭素自立と言う壮大な目標達成に向け、時間軸・空間軸・経済軸の課題を明確化し、実現に向けたロードマップを作成し、関連主体の共通目標として共有する必要がある。その際、炭素自立に必要な個々の技術の飛躍の可能性を排除せず、困難であるが実現可能な過渡的な姿を描き、そのための施策を立案することが重要である。

6) リーンスタートアップによる実践

炭素自立を実現し、強いものづくりの再興につなげるためには、小規模での試行錯誤を機敏に繰り返し最終的に社会変革につなげるリーンスタートアップの視点が重要である。炭素自立を絵空事とせず結実させるため、関連主体が一丸となった実践が重要である。

4-5. 炭素自立ビジョンの前提と更新について

本意見書をまとめるにあたり、炭素資源を素材として使用する製品のリサイクル、森林バイオマスの活用と CCUS のうち、どの選択肢をどれだけ用いてネットゼロの達成を目指すのかを検討した。現在の技術水準や社会情勢で経済性やエネルギー消費量の立場から見通せば、大枠としてはリサイクルとバイオマス利用が最優先、次が炭素貯留を伴って化石資源を限定的に利用、最後の手段として CO₂ を利用した素材の生産が採用される。これを何らかの目的のもとで最適化したビジョンもあり得るし、生態系の保護の立場から森林バイオマスの利用を適正化するビジョンもあり得る。今後の技術の進展により経済性やエネルギー消費の観点でも CO₂ を利用した素材生産の優先順位が森林バイオマス利用を上回る可能性もある。

本意見書では、プラスチックのリサイクルと森林バイオマス利用を優先したが、本意見書を起点としてあらゆる関係者と議論を深め、今後の版において更新していく予定である。

5. まとめ

本意見書では、国内 HTA 産業の国際競争力を維持・強化して持続的に発展する将来の姿として、化石資源への依存を可能な限り低減した炭素自立に向けたあるべき姿を示した。具体的には、プラスチックなど化学品のリサイクル率の向上、森林バイオマスを最大活用した素材の生産、CO₂ の回収と利用および貯留の拡大、産業間の連携により、必要な炭素資源を自立的に循環確保することのできる日本の姿を示した。

炭素自立の実現に向けた課題についても整理した。炭素自立の実現には、HTA 産業のみならず、エネルギー転換部門や運輸部門、業務・民生部門など社会全体の変革と一体となって進めることが重要である。炭素自立ビジョンの実現に向けては、本意見書で対象とした用途や資源の考慮や大胆な仮定等を更に精査していくことも必要である。今後、持続可能な国内林業の実現、産業間の具体的連携に向けた議論の深化とともに、国際標準化やルール形成をリードし、関連主体が一丸となって具体的なアクションにつなげていくことが重要である。

謝辞

地域連携カーボンニュートラル推進委員会は、地域の産業連携による HTA 産業の排出量実質ゼロに向けたビジョンを構築し、実行に移すべく、関連省庁や、産業界、地域など産学官民と議論を重ねてきました。有益な意見や視点を提供いただいたすべての関係者に感謝申し上げます。

別紙 | 参考資料：炭素量の算定

(セメント)

- ・ 2022年の生産量は、一般社団法人セメント協会（2024年）³⁾よりクリンカ生産量を引用。2050年の値は、公益財団法人地球環境産業技術研究機構（2024）⁴⁾よりクリンカ生産量を引用。
- ・ 炭素量は、上記のクリンカ生産量に、WBCDセメント作業部会、気候変動防止作業部会（2005）⁵⁾より脱炭酸反応時のCO₂排出係数を引用し、算定。

(鉄鋼)

- ・ 生産量は、高炉-転炉での粗鋼生産量であり、一般社団法人日本鉄鋼連盟「鉄鋼生産速報」⁶⁾より、粗鋼生産量及び転炉鋼の割合から2022年の生産量を算出。2050年の高炉-転炉の生産量は、公益財団法人地球環境産業技術研究機構（2024）⁴⁾より粗鋼生産量を引用し、一般社団法人日本鉄鋼連盟（2024）⁷⁾から世界の銑鉄及びスクラップの割合を踏まえ、5割を高炉-転炉生産量の割合と仮定して算出。
- ・ 炭素量の算出にあたっては、経済産業省（2023）⁸⁾より粗鋼生産量あたりの排出係数を2022年は2t-CO₂、2050年は1.5t-CO₂と設定。なお、この排出係数はCO₂回収前の値。

(プラスチック)

- ・ 2022年の生産量、消費量、廃棄量、再資源化量は、一般社団法人プラスチック循環利用協会（2023）⁹⁾より引用。2050年の生産量は維持と仮定し、消費量、廃棄量は人口減を反映。
- ・ 炭素量は、ポリプロピレンやポリエチレンの炭素含有率（約85.7%）をもとに算出。

(繊維)

- ・ 生産量は、化学繊維の製造量として、2022年の値は日本化学繊維協会（2024）¹⁰⁾から引用。消費量は、日本化学繊維協会（2023）¹¹⁾から引用したミル消費量及び日本化学繊維協会（2024）¹⁰⁾から引用した天然繊維の国内生産量及び輸入量から輸出量を引いた値に、二次製品（統計品目57、59、61-63）の輸入量及び輸出量¹²⁾を加味して算出。
- ・ 2022年の廃棄量は、一般廃棄物と産業廃棄物に含まれる繊維量を対象とした。一般廃棄物に含まれる繊維量については、環境省「廃棄物処理技術情報（令和4年度調査結果）」¹³⁾から引用した布類の再資源化量と、ごみ搬入量の「混合ごみ」、「可燃ごみ」、「不燃ごみ」、「その他ゴミ」の合計に環境省「容器包装廃棄物の使用・排出実態調査の概要（令和4年度）」¹⁴⁾の繊維の組成割合を掛けた値の合計として算出。産業廃棄物は、環境省（2024）¹⁵⁾より引用。
- ・ 2050年の値は、生産量は維持と仮定し、消費量、廃棄量は人口減を反映。但し、産業廃棄物は製造と同様に維持と仮定。
- ・ 炭素量は、環境省「算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧」¹⁶⁾より、廃棄物焼却の合成繊維の値を引用し、算出。

(ゴム)

- ・ 2022年の生産量は、一般社団法人日本ゴム工業会（2023）¹⁷⁾より国内生産量の値を引用。消費量は、一般社団法人日本ゴム工業会（2023）¹⁷⁾よりタイヤ、タイヤ以外工業用品、ゴム工業以外の製品製造に使用されたゴム使用量を引用。そのうち、タイヤに関しては、一般社団法人日本自動車タイヤ協会¹⁸⁾より、新車、市販用、輸出の割合を参考に、新車のうち半数が輸出されると仮定してタイヤに使用されるゴムの国内消費量を算出。また、また、タイヤ及びその他ゴム製品の輸入量^{12、19)}を考慮して、国内のゴム消費量を算出。
- ・ 2022年の廃棄量は、一般廃棄物に含まれるゴム量と、タイヤの廃棄量、製造段階のゴムの廃棄量から算出。一般廃棄物に含まれるゴム量は、繊維と同様に算出。タイヤの廃棄量は一般社団法人日本自動車タイヤ協会²⁰⁾より引用。製造段階のゴムの廃棄量は、一般社団法人日本ゴム工業会（2023）²¹⁾及びゴム工業の産業廃棄物におけるゴムくずの割合¹⁵⁾より算出。
- ・ 2050年の値は、生産量は維持と仮定し、消費量、廃棄量は人口減を反映。
- ・ 炭素量は、スチレンブタジエンゴム（スチレン1：ブタジエン1）の炭素含有率として88.6%を係数として設定して算出。

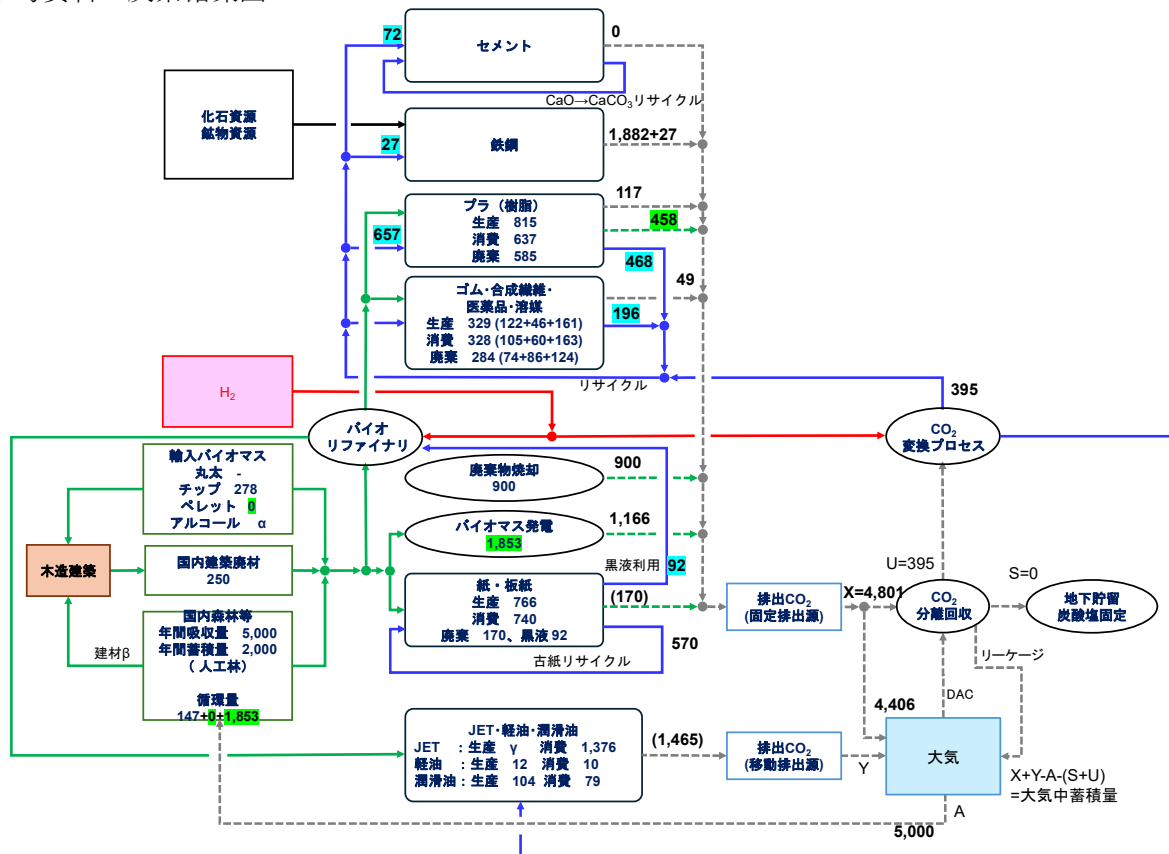
(有機溶剤)

- ・ 2022年の生産量は経済産業省「経済産業省生産動態統計」²²⁾より溶剤に多く使用されると想定する製品の生産量の合計値を使用。
具体的には、以下。エチレングリコール、エチレングリコールエーテル、ポリプロピレングリコール、エピクロロヒドリン、イソプロピルアルコール、合成アセトン、メチルイソブチルケトン、アクリロニトリル、アクリル酸エステル、合成オクタノール、合成ブタノール、メチルエチルケトン
- ・ 日本溶剤リサイクル工業会²³⁾より、消費量はバージン供給量及びリサイクル量の合計値とした。また、廃棄量は大気放散及び焼却量、リサイクル量の合計値とした。なお、同値については、2021年公開の値である。
- ・ 2050年の値は、生産量は維持と仮定し、消費量、廃棄量は人口減を反映。
- ・ 炭素量は、生産量のそれぞれの品目の炭素含有量から算出。消費及び廃棄量に関する炭素量は、生産量に含まれる炭素含有率（炭素量/生産量）と同じと仮定して算出。

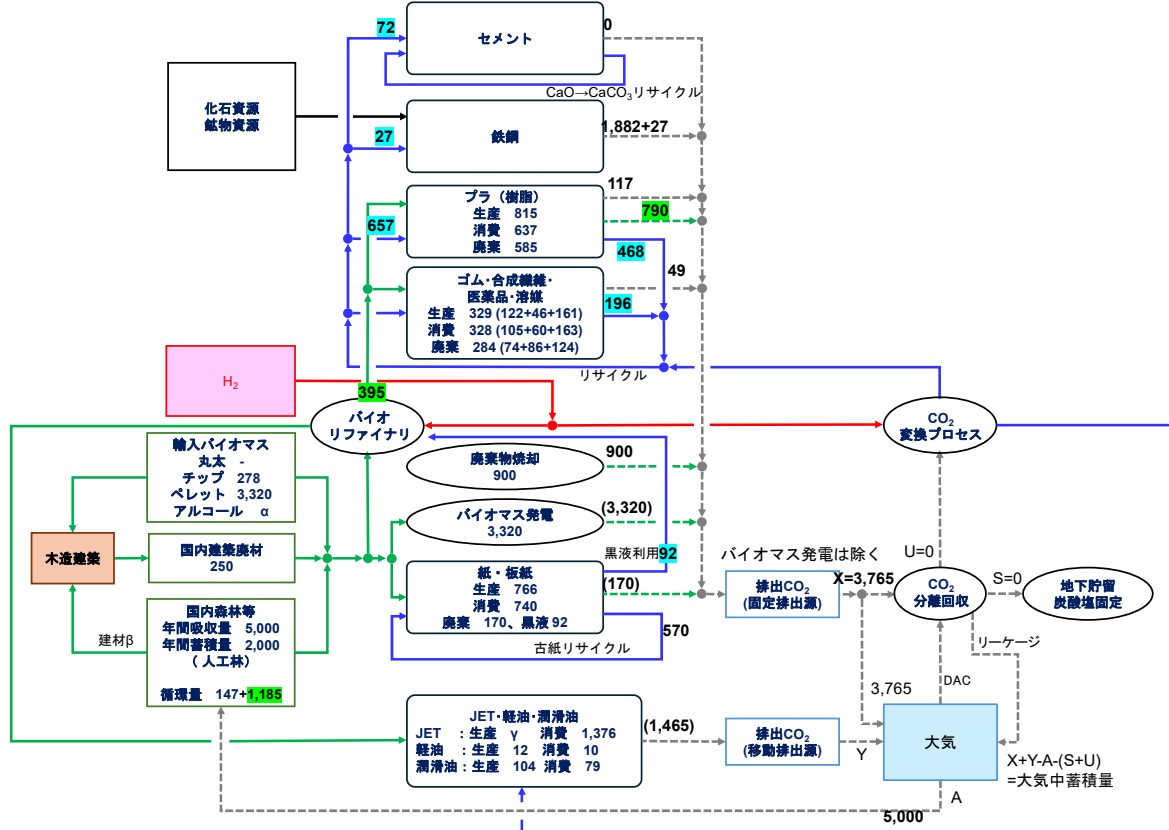
(廃棄物焼却)

- ・ 一般廃棄物は、環境省「廃棄物処理技術情報（令和 4 年度調査結果）」¹³⁾ 及び環境省「容器包装廃棄物の使用・排出実態調査の概要（令和 4 年度）」¹⁴⁾ よりプラスチック、繊維、ゴムを除いた場合に、生ごみ、紙くず、木くずになると仮定して組成割合を設定し、廃棄物量を算定。
 - ・ 産業廃棄物は環境省（2024）¹⁵⁾ より紙くず、木くずの値を引用。
 - ・ 2050 年の値は人口減を反映。但し、産業廃棄物については製造量を維持としているのと同様に維持と仮定。
 - ・ 上記廃棄物の含水率及び炭素含有量は、生ごみは中村・袖山（2005）²⁴⁾、紙くずは松藤・石井（2011）²⁵⁾、木くずは農林水産省「1.バイオマス賦存量及び利用量の炭素換算」²⁶⁾ より引用して算出。
- （バイオマス発電）
- ・ 2022 年の木質バイオマスの利用量は農林水産省「木質バイオマスエネルギー利用動向調査」²⁷⁾ より、エネルギー利用の木質バイオマスの値を使用。
 - ・ 2050 年の木質バイオマス利用量は、公益財団法人地球環境産業技術研究機構（2024）⁴⁾ よりバイオマス発電量を 50TWh と仮定。発電効率を 20% とし、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（2021）²⁸⁾ より木材のエネルギー含有量を 20MJ/kg と設定して算定。
- （紙・パルプ）
- ・ 2022 年の生産量及び消費量は、日本製紙連合会「製紙産業の現状-紙・板紙」²⁹⁾ より引用。古紙利用量は、公益財団法人古紙再生促進センター（2023）³⁰⁾ より引用。
 - ・ 2050 年の生産量は、紙・板紙のうち、紙の生産量は減少傾向を考慮して、現状比-40%と仮定、他方で、板紙は現状維持と仮定。
 - ・ 炭素量は、松藤・石井（2011）²⁵⁾ より炭素含有量を引用して算定。
- （JET 燃料、軽油、潤滑油）
- ・ 2022 年の生産量及び消費量は、経済産業省「令和 4 年資源・エネルギー統計年報」³¹⁾ より引用。
 - ・ 2050 年の値は、JET 燃料は輸送量の増加を考慮して 2022 年比 1.8 倍に設定。潤滑油は自動車用途分（4 割）³²⁾ が減少すると仮定して 2022 年比-40%に設定。軽油はゼロにはならないが、大幅に減少すると仮定をして、10 万 t-C に設定。
 - ・ 炭素量は、約 85.7%と設定して算出。

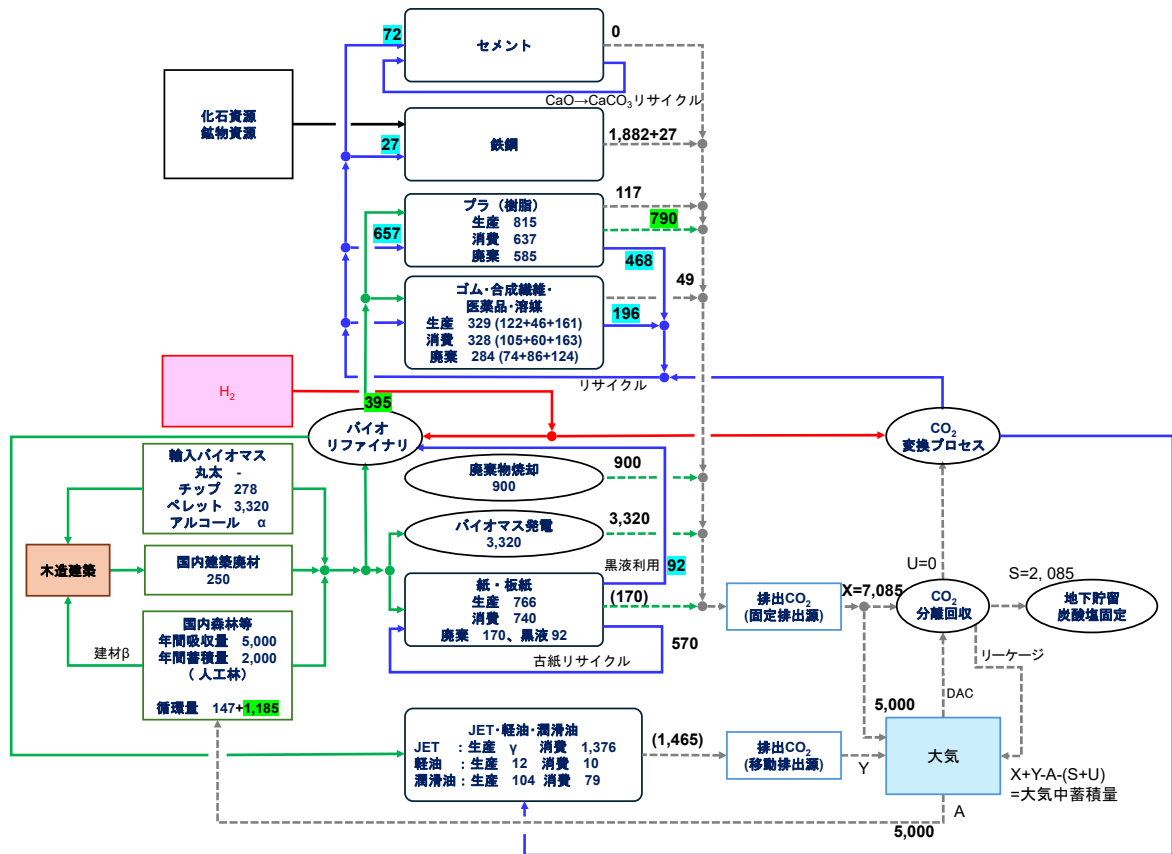
参考資料：炭素循環図



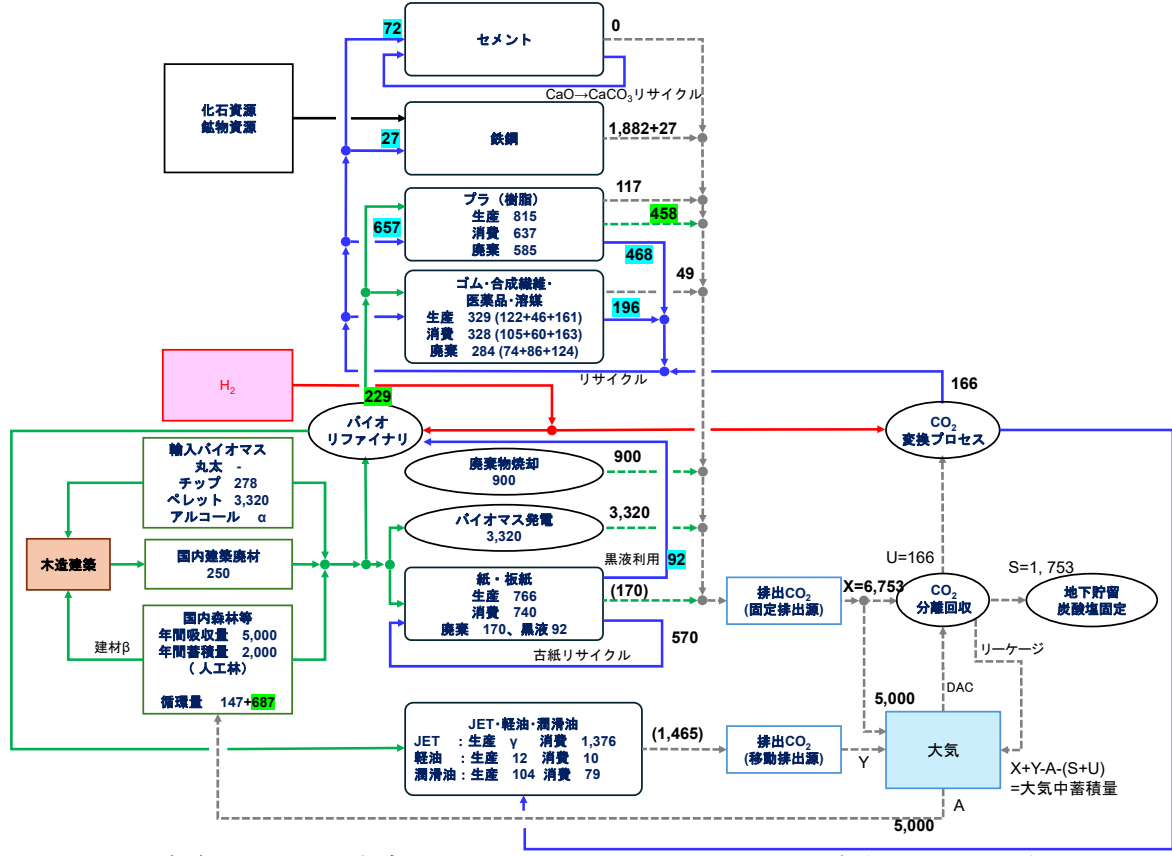
参考資料図1 国内森林バイオマス発電優先活用ケースにおける炭素循環の将来像



参考資料図2 海外サステナブル輸入木材活用ケースにおける炭素循環の将来像



参考資料図3 海外非サステナブル輸入木材活用・CCSオフセットケースにおける炭素循環の将来像



参考資料図4 国内森林バイオマス抑制ケースにおける炭素循環の将来像

参考文献

- 1) 国立社会保障・人口問題研究所 (2023) 「日本の地域別将来推計人口 (令和5 (2023) 年推計)、結果表1 総人口及び指数」 (<https://www.ipss.go.jp/pp-shicyoson/j/shicyoson23/t-page.asp>) (参照日 2024-08-30)
- 2) 総務省統計局 (2023) 「人口推計(2022年(令和4年)10月1日現在)」 (<https://www.stat.go.jp/data/jinsui/2022np/index.html>) (参照日 2024-08-30)
- 3) 一般社団法人セメント協会「セメントハンドブック(2024年度版)」 (https://www.jcassoc.or.jp/cement/4pdf/jj3h_06.pdf) (参照日 2024-08-30)
- 4) 公益財団法人地球環境産業技術研究機構(2024)「カーボンニュートラルに向けたトランジションロードマップの策定(2023年度版)」 (https://www.rite.or.jp/system/global-warming-ouyou/download-data/FY2023sectorroadmap_rev.pdf) (参照日 2024-08-30)
- 5) WBCSDセメント作業部会、気候変動防止作業部会(2005)「セメントCO2プロトコルセメント産業向けCO2排出量算定報告基準」(財団法人地球産業文化研究所/中央青山サステナビリティ認証機構改訂・補注) (https://www.gispri.or.jp/_old_www.gispri.or.jp/calculation/ghg/pdf/cement_protocol_v2-j%20.pdf) (参照日 2024-08-30)
- 6) 一般社団法人日本鉄鋼連盟「鉄鋼生産速報」 (<https://www.jisf.or.jp/data/seisan/index.html>) (参照日 2024-08-30)
- 7) 一般社団法人日本鉄鋼連盟(2024)「日本鉄鋼連盟長期温暖化対策ビジョン『カーボンニュートラルへの挑戦』」 (<https://www.jisf.or.jp/business/ondanka/zerocarbonsteel/documents/JISFLongtermvisionFeb2024jptext.pdf>) (参照日 2024-08-30)
- 8) 経済産業省(2023)「グリーンイノベーション基金事業「製鉄プロセスにおける水素活用」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画」 (https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/gifund/pdf/gif_05_randd_r2.pdf) (参照日 2024-08-30)
- 9) 一般社団法人プラスチック循環利用協会(2023)「-2022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-マテリアルフロー図-」 (<https://pwmi.or.jp/pdf/panf2.pdf>) (参照日 2024-08-30)
- 10) 日本化学繊維協会(2024)「「内外の化繊工業の動向」2023年年間回顧」 (<https://www.jcfa.gr.jp/mg/wp-content/uploads/2024/04/851ea6898bb90a4271835e8915e568c1-2.pdf>) (参照日 2024-08-30)
- 11) 日本化学繊維協会(2023)「2022年度(第23回)化学繊維ミル消費量の調査結果(統計委員会報告)」 (<https://www.jcfa.gr.jp/mg/wp-content/uploads/2023/07/13494237cdd7641f71677262e0810409.pdf>) (参照日 2024-08-30)
- 12) 財務省貿易統計 (<https://www.customs.go.jp/toukei/srch/index.htm?M=29&P=0>) (参照日 2024-08-30)
- 13) 環境省「廃棄物処理技術情報(令和4年度調査結果)」 (https://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/r4/index.html) (参照日 2024-08-30)
- 14) 環境省「容器包装廃棄物の使用・排出実態調査の概要(令和4年度)」 (https://www.env.go.jp/recycle/yoki/c_2_research/research_R04.html) (参照日 2024-08-30)
- 15) 環境省(2024)「令和5年度事業産業廃棄物排出・処理状況調査報告書令和4年度速報値(概要版)」 (<https://www.env.go.jp/content/000220694.pdf>) (参照日 2024-08-30)
- 16) 環境省「算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧」 (https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/itiran_2023_rev4.pdf) (参照日 2024-08-30)
- 17) 一般社団法人日本ゴム工業会(2023)「ゴム工業の現況」 (https://www.rubber.or.jp/kanri/download.php?file=page_m1.4.47.pdf&org=genkyo.pdf) (参照日 2024-08-30)
- 18) 一般社団法人日本自動車タイヤ協会「タイヤの流通経路」 (https://www.jatma.or.jp/tyre_industry/distributionchannels.html) (参照日 2024-08-30)
- 19) 一般社団法人日本自動車タイヤ協会「財務省輸入実績」 (https://www.jatma.or.jp/stat/domesticdemandandresults.php?cat_id=Nw==) (参照日 2024-08-30)
- 20) 一般社団法人日本自動車タイヤ協会「廃タイヤ(使用済みタイヤ)リサイクル状況及び廃タイヤの不法投棄状況を取りまとめました」 (<https://www.jatma.or.jp/news/information230427.html>) (参照日 2024-08-30)
- 21) 一般社団法人日本ゴム工業会(2023)「2022年度の廃棄物の最終処分量および再資源化率に関するフォローアップ調査結果」 (https://www.rubber.or.jp/kanri/download.php?file=page2.1.57.pdf&org=2022_3R.pdf) (参照日 2024-08-30)
- 22) 経済産業省「経済産業省生産動態統計」 (https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/result/ichiran/08_seidou.html) (参照日 2024-08-30)
- 23) 日本溶剤リサイクル工業会「溶剤のマスバランス」 (<https://solvent-recycle.com/about.html>) (参照日 2024-08-30)
- 24) 中村・袖山(2005)「各種バイオマス成分のデータベース整備」、農工研技法 (https://www.naro.go.jp/publicity_report/publication/archive/files/203-7.pdf) (参照日 2024-08-30)
- 25) 松藤・石井(2011)「家庭系ごみ中可燃性成分の特性値データベース作成とその利用法に関する研究」、廃

- 棄物資源循環学会論文誌, 22(6), 382-395 (<https://doi.org/10.3985/jismcwm.22.382>)
- 26) 農林水産省「1.バイオマス賦存量及び利用量の炭素換算」
(https://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/b_kihonho/local/attach/pdf/keikaku_sakutei-161.pdf) (参照日 2024-08-30)
 - 27) 農林水産省「木質バイオマスエネルギー利用動向調査」
(https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/mokusitu_biomass/) (参照日 2024-08-30)
 - 28) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2021) 「バイオマスエネルギー地域自立システムの導入要件・技術指針 (ガイドライン)、第3部木質バイオマスエネルギーに係る基礎知識」
(<https://www.nedo.go.jp/content/100932088.pdf>) (参照日 2024-08-30)
 - 29) 日本製紙連合会「製紙産業の現状-紙・板紙」 (<https://www.jpa.gr.jp/states/paper/index.html>) (参照日 2024-08-30)
 - 30) 公益財団法人古紙再生促進センター (2023) 「古紙ハンドブック 2023」 (<http://www.prpc.or.jp/wp-content/uploads/handbook2023.pdf>) (参照日 2024-08-30)
 - 31) 経済産業省「令和4年資源・エネルギー統計年報」
(<https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/sekiyuka/index.html#menu1>) (参照日 2024-08-30)
 - 32) 石油連盟 (2023) 「2023年度潤滑油需要見通しについて」 (<https://www.paj.gr.jp/news/733>) (参照日 2024-08-30)
 - 33) 国立環境研究所温室効果ガスインベントリオフィス (2024) 「日本の温室効果ガス排出量データ (1990～2022年度)」 (<https://www.nies.go.jp/gio/archive/ghgdata/index.html>) (参照日 2024-08-30)
 - 34) 国立環境研究所 (https://www.cger.nies.go.jp/ja/library/qa/7/7-2/qa_7-2-j.html) (参照日 2024-08-30)
 - 35) 桑江ら (2019) 「浅海生態系における年間二酸化炭素吸収量の全国集計」、土木学会論文集 B2, 75, 10-20
(<https://doi.org/10.2208/kaigan.75.10>)
 - 36) 林野庁「森林資源の現況」 (令和4年3月31日現在)
(<https://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/genkyou/r4/index.html>) (参照日 2024-08-30)

執筆メンバー

委員長 辻佳子（東京大学）
幹事 古山通久（信州大学）

今井博文（出光興産）
遠藤明（産業技術総合研究所）
石戸利典（IHI）
中垣隆雄（早稲田大学）
新美雄太郎（三井住友信託銀行）
福島康裕（東北大学）

藤井実（国立環境研究所）
古屋武（産業技術総合研究所）
松方正彦（早稲田大学）
水口能宏（日揮ホールディングス）
山田秀尚（金沢大学）

掲載内容の無断転用を禁止します。
転用をご希望の場合は、必ず化学工学会地域連携カーボンニュートラル推進委員会事務局
へお問い合わせください。
contact: scej.cn2050@scej.org