

カーボンインディペンデンス（炭素自立）ビジョン 3.0 :
CO₂ 排出削減が困難な産業の循環経済への変革

Carbon Independence Vision 3.0:
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
(2025 年 9 月)

Executive Summary

二酸化炭素排出削減が困難な産業のうち、化学産業におけるプラスチック等再資源化について精査し、木質バイオマスからの化学原料合成および CCU とあわせてカーボンインディペンデンス（炭素自立）という社会変革に向けたロードマップを示した

炭素自立実現に向けて、2030 年・2040 年に到達すべき姿を、5 つの成熟度指標の観点から整理し、課題を明らかにするとともに、ステークホルダーの役割を示した

炭素自立に向けた取り組みを推進していく上で、特に重要な提言として下記を示した

- ・炭素自立ロードマップを推進する組織の設立
- ・政策立案者による、包括的な炭素自立・炭素循環施策の策定
- ・炭素自立の実現主体としての産業界による、炭素自立ロードマップの実行

炭素自立ビジョン更新の趣旨

2025 年 3 月に発表したカーボンインディペンデンス（炭素自立）ビジョン第 2 版では、化石燃料をエネルギーとして利用するだけでなく、素材として利用する鉄鋼、化学、セメント、紙・パルプなど、二酸化炭素（CO₂）排出削減が困難な（Hard to abate, HTA）産業の将来の炭素フローとエネルギー収支を示した。炭素自立ビジョンを実現するためには、必要となる技術をどのような時間軸で社会実装するか、シナリオを描く必要がある。第 3 版となる本意見書では、社会実装に向けた炭素自立に向けた具体的なアクションにつなげていくため、プラスチック、木質バイオマス、回収 CO₂ の 3 つの炭素源ごとに社会実装に関するロードマップを示した。2050 年の炭素自立実現に向けて、2030 年・2040 年に到達すべき姿を、技術、ビジネス、ガバナンス、社会、人材の成熟度の観点から整理することで課題を明らかにし、政策立案者、産業界、自治体、アカデミア、市民に向けた提言を示した。

二酸化炭素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 3.0

炭素自立ビジョン第 3 版では、エネルギー収支の観点からプラスチック等再資源化の現状を精査し、従来のリサイクル手法や焼却処理の効率・環境負荷を比較した。さらに、バイオマスや回収 CO₂ による炭素源と高度に連結した炭素循環拠点への集積化について検討した。次いで、2050 年の炭素自立からバックキャストすることで、2030 年および 2040 年段階で到達すべき目標を定量的に示したロードマップを構築した。技術開発を推進するのみならず、様々な分野のステークホルダーがその重要性を共有し、産業・社会構造を変革することが不可欠である。そのため、技術、ビジネス、ガバナンス、社会、人材の 5 つの視点に対応する成熟度指標の観点で、プラスチック、木質バイオマス、回収 CO₂ のそれぞれの炭素源ごとの課題を明確化し、炭素自立に向けた歩みを確実に進めるため、政策立案者、産業界、自治体、アカデミア、市民の役割を示した。

炭素自立の具現化に向けた提言

本意見書では、炭素自立ロードマップを推進する上で、特に重要な提言として下記を示した。

- ・炭素自立ロードマップを推進する組織の設立
- ・政策立案者による、包括的な炭素自立・炭素循環施策の策定
- ・炭素自立の実現主体としての産業界による、炭素自立ロードマップの実行

他国に先んじて HTA 産業の炭素自立を実現することで、国際競争力を強化しつつ、2050 年のネットゼロを実現する。

1. はじめに

2020 年 10 月の「2050 年カーボンニュートラル宣言」以降、脱炭素化への機運が高まった。その後、世界的な地政学リスクの顕在化を受け、欧米諸国で政策が見直された結果、エネルギーおよび資源の経済性と安全保障の重視が進み、短期的な現実解として化石資源への回帰も見られるようになった。このような市場の先行き不透明性に設備コストや人件費の高騰も加わり、多くの脱炭素化プロジェクトが遅延・中断を余儀なくされるなど、カーボンニュートラルに向けた取り組みは世界的に一時的な停滞期に入っている。しかし、中長期的に見れば、カーボンニュートラルの潮流は揺るぎないものであることは言を俟たない。世界が足踏みする今こそ、日本が「カーボンインディペンデンス（炭素自立）」を実現することで、国際市場における競争力を高める絶好の機会である。

2024 年 9 月に発表した本意見書の初版では、鉄鋼、化学、セメント、紙・パルプなど、CO₂排出削減が困難な（Hard to abate, HTA）産業に対し、自立可能な炭素資源に基づく新たな産業への転換という未来像を提示した。2025 年 3 月の第 2 版では、化学産業におけるプラスチック等の再資源化、木質バイオマスからの化学原料生産、CO₂の回収・利用（CCU）など、具体的なプロセスを想定し、炭素フローとエネルギー収支を定量的に分析し、炭素資源のバランスと必要なエネルギー量を明らかにした。

今回の第 3 版では、炭素自立の実現に向けた具体的なアクションに繋げるため、化学産業を中心に、プラスチック等の再資源化、木質バイオマスからの化学原料生産、CCU の社会実装をどのような時間軸で進めるべきかを、目指すべき姿からバックキャストしてロードマップを構築した。炭素自立の実現には、技術開発を推進するのみならず、様々な分野のステークホルダーがその重要性を共有し、産業・社会構造を変革することが不可欠である。そのため、技術、ビジネス、ガバナンス、社会、人材の 5 つの視点に対応する成熟度レベル（XRL）の観点で、取り組むべき課題を抽出した。世界の動向に左右されることなく、一貫した方針のもとで炭素自立を実現し、産業構造の変革を促すために、政策立案者、産業界、アカデミア、自治体、そして市民に向けた提案を本書にまとめた。

2. 炭素自立ビジョン実現に向けたプラスチック等の再資源化の現状と課題

輸入炭素資源に依存してきた HTA 産業が、自立可能な炭素資源に基づく新たな産業へ転換するには、CO₂ 等として大気放出する炭素量を最小限にして、かつ、プラスチック等のリサイクル率の向上、国内森林由来の木質バイオマスからの化学原料の生産、CCU の実現が必要であることは既に述べてきた。その際、限りある炭素源の有効活用という視点からは森林由来の木質バイオマスの投入量は最小限にとどめる方がよく、また、CCU には物質としての水素を投入する必要があるため、プラスチック等を最大限循環させることが重要である。加えて、プラスチック等のリサイクルは、木質バイオマスからの化学原料の生産や CCU に比して技術成熟度が高く、具体的な課題とその解決の時間軸を把握できる。本章では、炭素自立ビジョン実現に向けて、プラスチック等の再資源化を例として、現状と課題についてまとめた。

2-1. 目指すプラスチック等再資源化の姿

第 2 版までは、排出されたプラスチックの 80%を再資源化し、残り 20%は直接焼却することを炭素自立ビジョンの前提とした。現状の国内におけるマテリアルリサイクルとケミカルリサイクルの合計比率は 25%程度である¹⁾。しかし、炭素自立ビジョンを実現するためには、木質バイオマスや回収 CO₂ といった他の炭素源よりも必要となる投入エネルギーが少ないプラスチック等のリサイクル率をできる限り高めることが重要であることから、80%と高いリサイクル目標を設定した。内訳として、10%がマテリアルリサイクル、50%が油化プロセス、40%がガス化プロセスであると仮定した。図 1 に、プラスチック等のリサイクルプロセスの模式図を示す。油化プロセスでは生成された分解油を水素化処理しナフサクラッカーに投入し、その過程で生成される一部を用いて芳香族を生産する。ガス化プロセスでは、精製合成ガスを用いてメタノールを合成し、メタノールからオレフィンを合成する。マテリアルリサイクルや油化プロセスで生じる残渣は、

ガス化プロセスに投入し、リサイクル過程における炭素ロスを経小化することとした。排出されるプラスチックの量や地理的な分散が地域により異なり、リサイクルされた製品需要も異なる。各プロセスに必要となる投入エネルギー量を考慮し、できる限りマテリアルリサイクル、油化、ガス化の優先順位でリサイクルを行い、投入エネルギーの最小化を図るとともに、リサイクルされた製品の需要に合わせた最適設計が重要である。具体的には、マテリアルリサイクルに適したプラスチック等が多く排出されるのであれば、エネルギー消費の観点からは高いマテリアルリサイクル比率が望まれるが、マテリアルリサイクルで生産される製品の需要が多くなければ、比率は抑制すべきである。リサイクル率を高め、炭素自立ビジョンを実現させるためには、技術だけでなく、社会全体を俯瞰した最適システムを、時間軸を考慮して設計し、構築することが必要である。

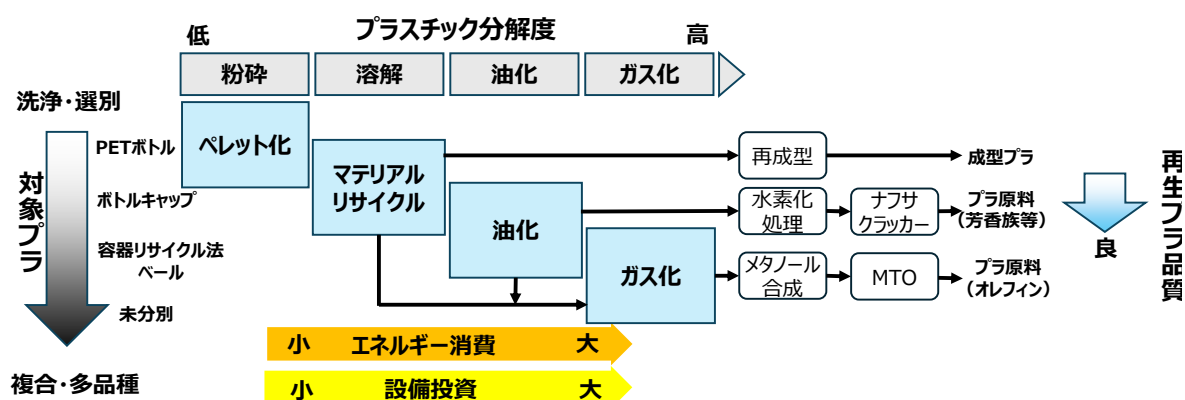


図1 プラスチック等のリサイクルプロセスの模式図

2-2. プラスチック等再資源化の現状と課題

プラスチックのリサイクル率が25%程度に留まっている要因は、プラスチックとその他可燃物との分別の限界と、プラスチック製品に含まれる異材との分離の難しさである。例えば包装材には、耐熱性や耐水性に加えて、印刷適性、ガスバリア性、遮光性、シール性といった複数の機能が求められ、ポリエチレンに、PETやアルミ箔、ナイロンなど異なる種類の材料が張り合わせられている。

マテリアルリサイクルは、複合素材を使用したプラスチックや汚染されたプラスチックのリサイクルが難しく、かつ再生プラスチックの品質低下が避けられない点が課題であるため、前処理が重要となる。回収したプラスチックの（1）切断・破碎・粉砕、（2）分離・分別、（3）洗浄、（4）脱水・乾燥、（5）配合・混合のプロセスが必要となるが、完全な分離・分別は困難であり、手間やコストもかかる。

油化プロセスは、2000年から2010年にかけて商用運転を行った事例^{2,4)}があるが、当時の国のプラスチックリサイクル支援制度の方針変更やコスト競争力が劣るなどの理由で事業撤退を余儀なくされ、それ以降国内では商用実績がない。近年、各社が新たに開発した技術を用いたプラスチック油化事業の立ち上げを試みている。油化技術では、食品由来の塩や塩化ビニル等に含まれる塩素が原料プラスチックに混入すると、生成された油分に不純物として混入し、下流の工程に影響すること、また、生成された重質油を含む油分をプラスチック原料となるナフサ等に更に分解する必要があること等が課題となっている。

ガス化プロセスは、商用運転の例があり、プラスチックを低温と高温の二段階で効率的に合成ガスに変換し、アンモニア、液化CO₂を生産している⁵⁾。ガス化プロセスは、原料プラスチック中への不純物の混入への制約が比較的低い。一方、熱分解に多量のエネルギーを必要とし、合成ガスからの製品化にもエネルギーを要し、エネルギー効率やコストが課題である。

3. 炭素自立ビジョン実現に向けた時系列

3-1. 炭素自立ロードマップ

本章では、炭素自立ビジョンの実現に向けた具体化策を立案し、社会実装を加速させるため、プラスチック等、木質バイオマス、回収 CO₂ の 3 つの炭素源に関して 2030 年、2040 年、2050 年時点のあるべき姿を示し、達成に向けたロードマップを作成した。CCU の社会実装には、水素の利活用が必須であり、水素インフラの構築が必須である。水素供給能力の伸長やインフラ整備のリードタイムを考慮し、CCU の社会実装の時間軸を 2040 年、2050 年、2060 年とした。本意見書では、第 2 版で検討したケースのうち、ケース 1a に焦点を絞りロードマップを検討した。ケース 1a は、国内森林由来の木質バイオマスを化学原料生産に優先的に利用し、プラスチック等再資源化及びバイオリファイナリーでの化学原料合成の過程で排出される CO₂ 及び副生物・残渣の熱利用で生じた排出ガスに含まれる CO₂ も回収対象としている。

プラスチック等再資源化、木質バイオマスからの化学原料生産、CCU のロードマップを図 2 に、また、炭素自立ロードマップに基づく社会実装の推移を図 3 に示す。

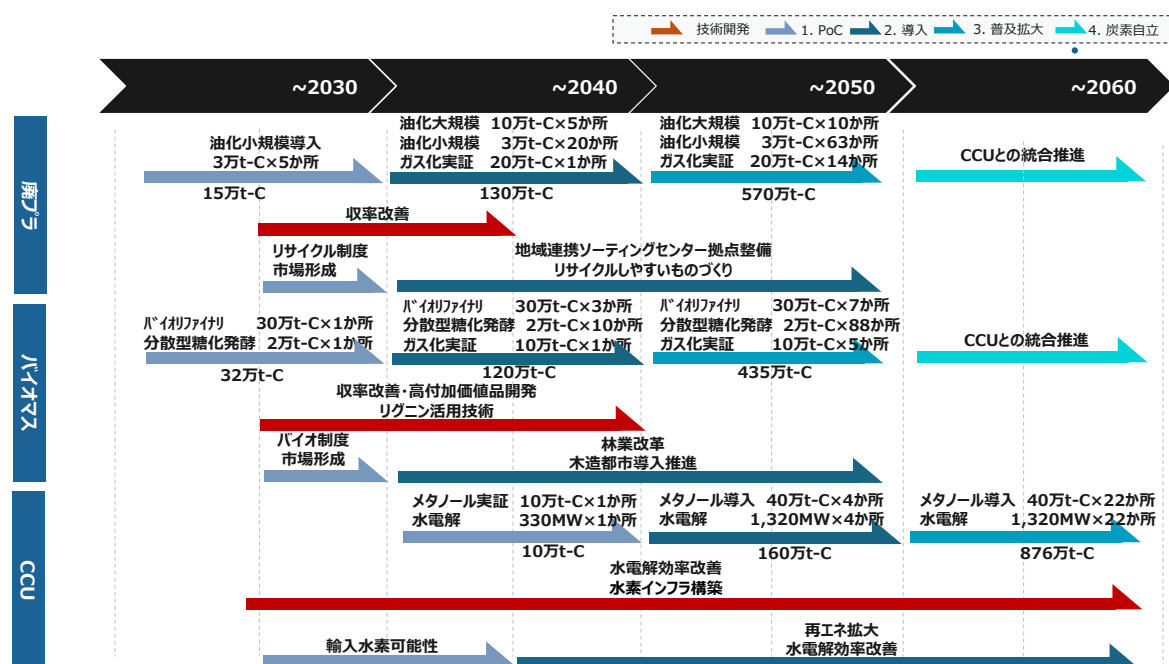


図 2 炭素自立ビジョンに向けたロードマップ

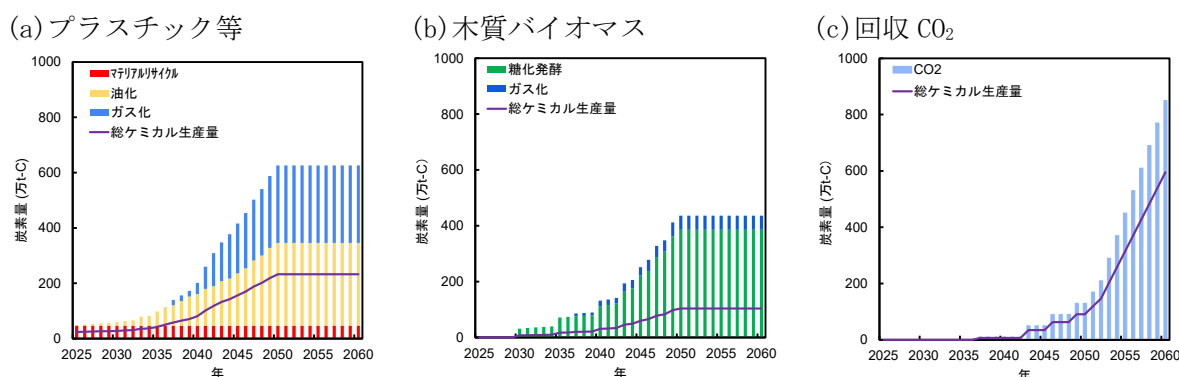


図 3 炭素自立ロードマップに基づく社会実装の推移。

(a)プラスチック等、(b)木質バイオマス、(c)回収 CO₂。

2030 年の姿は、本意見書執筆時より 5 年後と期間が短いため、進行中もしくは計画中の案件を踏まえて描いた。プラスチック等再資源化においては油化プロセスの実証案件として数万トン規模のプラントが数件稼働し、木質バイオマスからの化学原料生産は、既存製紙工場の設備を活用し、

製紙工場をバイオリファイナリーに転換する実証事業が開始していることを想定する。2030 年段階での社会実装規模は限定的であり、2050 年のビジョン実現に向けた飛躍のため、今後 5 年間で政策立案や市場創出に向けたグランドデザインを描くことが将来の炭素自立の実現に大きな影響を及ぼす。

2040 年の姿としては、先進的取り組みを行うリサイクル特区やバイオマス糖化発酵を中心に中核的なプロジェクトが立ち上がり、炭素自立に向けた動きが加速化されている必要がある。プラスチック等の再資源化は、大都市圏を中心に 10 万 t-C/年規模の大型油化プラントが複数稼働し、分散型の中小規模油化プラントも合わせて 130 万 t-C/年程度のリサイクル量を目指す。木質バイオマスからの化学原料生産は、製紙工場のバイオリファイナリー転換を進めると共に、山間部で製材所と一体となった分散型糖化発酵プラントも立ち上げ、合わせて 120 万 t-C/年の処理量を見込む。プラスチック等の再資源化および木質バイオマスからの化学原料生産では、導入初期は比較的容易に扱うことができる高品位の原料を用いた油化および糖化発酵プロセスから実装し、2040 年頃にはリサイクル率向上のため、低品位プラスチック等のガス化やリグニンガス化プラントを稼働させる。CCU は、プラスチック等の油化・ガス化とバイオマス糖化発酵と CCU が高度に連結された炭素循環の拠点プロジェクトを立ち上げ、炭素循環型バリューチェーンを構築する。

2050 年は、炭素自立に向けた産業界全体の構造的変革がなし遂げられている。すなわち、プラスチック等再資源化、木質バイオマスからの化学原料生産は、本ビジョンの目標として掲げた 570 万 t-C/年、435 万 t-C/年がそれぞれ達成されている。CCU は、40 万 t-C/年クラスの大規模拠点が複数立ち上がり、160 万 t-C/年程度への普及を目指す。2060 年時点では、水素供給能力の増強と合わせて CCU の社会実装を加速させ、880 万 t-C/年程度の処理量に拡大し、炭素自立を達成する。

本ロードマップ達成に向けて、大きく 3 つの重要なポイントが存在する。1 つ目は、2040 年までに製油所や製紙工場の既存設備を有効活用し、プラスチック等再資源化およびバイオリファイナリーの本格導入を図ることである。2 つ目は、2050 年までにプラスチック等再資源化の 80% リサイクルおよび木質バイオマスからの化学原料生産の導入目標を達成することである。そのためには、化石燃料を中心とした既存コンビナートから炭素循環型のサプライチェーン・バリューチェーンへの変革を遂げる必要がある。3 つ目は、CCU の導入を加速させ炭素自立を完成させることである。そのためには、水素供給能力の拡大と水素インフラの整備と一体となった施策が必要である。

次章以降に各時間軸に対する変革へのドライバーとなる課題について、技術、ビジネス、ガバナンス、社会、人材の観点から考察する。

3-2. 炭素自立ビジョン実現に向けた 5 つの成熟度レベル

技術の社会実装に向けた開発では、開発のフェーズにより取り組むべき課題が異なる。そのため、技術成熟度レベル（TRL）を用いたプロジェクト管理が広く行われてきた。よい技術を開発すれば、世の中に普及する、という 20 世紀型の開発が成立しない現在では、社会実装に向けた俯瞰的な戦略が開発の初期段階から重要となる。また、社会の変革につながる革新技術の実装には、多様なステークホルダーが関与し、そのためには、社会実装に向けた各フェーズにおいて、適切な意思疎通を行い、合意形成を図ることが必須である。戦略的イノベーション創造プログラム第 3 期では、基礎研究から社会実装までを見据えて一貫通貫で研究開発を推進する上で、技術・事業・制度・社会的受容性・人材の 5 つの視点の成熟度レベルを用い、社会実装すなわちイノベーションの実現に向けた取り組みを推進している⁶⁾。本意見書では、表 1 に示す 5 つの XRL の観点から前節で示したロードマップを精査した。XRL の詳細定義は、分野ごとに異なる。本意見書では、TRL は、必要な技術レベルの状態、BRL は、安定したビジネスとして成立する上での、経済性、バリューチェーンの状態、現行ビジネスとの両立の状態の観点で検討した。GRL は、社会実装する上での制度、規制、規則の整備の状態、SRL については、社会受容性⁷⁾の状態および国内外での基準やトレーサビリティの確立の程度、HRL については、社会実装する上での人的資源の涵養やそれを維持・発展させるための取り組みや体制の状態の観点で検討した。化学産業は企業対消費者よりも企業間の取引の割合が高いことに鑑み、TRL に関しては、化学原料生産用の炭

素源確保、製造・変換技術、化学原料の利用技術の3つの項目について検討した。(1)プラスチック等、(2)木質バイオマス、(3)回収CO₂、(4)バイオマス系廃棄物(厨芥、畜産系、農業残渣等)の4つの炭素源のうち、本意見書では(1)～(3)を検討対象とし、共通で議論すべき内容と対象ごとに議論すべき内容とに分類した。

表1 社会実装に向けた5つの成熟度レベル⁷⁾

指標	説明
TRL (Technology Readiness Level) 技術成熟度レベル 必要な技術はどれくらい発展しているのか	「ある技術」が、社会の技術要求水準に達するまでの段階を示す指標。
BRL (Business Readiness Level) ビジネス成熟度レベル ビジネスとしての継続可能性はどうか	「創出財(将来創出される新しい技術や財・サービスの総称)」を利用した事業が、安定した事業として成り立つ水準までの段階を表す指標。
GRL (Governance Readiness Level) ガバナンス成熟度レベル 制度や規制は整っているか	「創出財」が社会に普及するために必要な制度、規制が完備(改善)するまでの段階を示す指標。
SRL (Social Readiness Level) 社会(コミュニティ)成熟度レベル 受容しようと思えるか	「ある技術」そのもの、或いはある技術によって生み出された創出財の社会(コミュニティ)受容性を高め、社会実装し、一定の普及水準に達するまでの段階を示す指標。
HRL (Human Readiness Level) 人材成熟度レベル 実装に必要な人材は揃っているか	「ある技術」を利用した事業が社会に普及するために必要な人的資源の涵養と活用の手順を示す指標。

まず、(1)プラスチック等、(2)木質バイオマス、(3)回収CO₂に共通の2030年、2040年、2050年に到達しているべき姿を以下に記す。課題と提言については、(1)、(2)は2030年、(3)は2030年と2040年の課題と提言について示す。

炭素原料となるプラスチック等の資源、木質バイオマスからの化学原料生産、回収CO₂それぞれの必要量の確保に関するTRLはそれぞれの原料ごとに検討できるが、3つの炭素源のバランスを考慮しながら決める必要がある。特にCO₂に関しては、プラスチック等資源、木質バイオマスからの化学原料を生産する上でのプロセスおよび導入レベルに強く依存する。製造・変換に関するTRLは2050年にはプラスチック等再資源化・木質バイオマスからの化学原料生産とCCUが高度に統合された炭素循環拠点が構築されることを目指してバックキャストにより決める必要がある。基礎化学品・誘導品の利用に関しては、3つの炭素源を原料として最終製品を製造するとの観点から、2030年にはリサイクルし易い最終製品の設計、特に包装材における多層材で得られる機能を単一素材で達成する技術開発が求められる。2040年にはリサイクルしやすい商品づくりの普及が進み、2050年にはプラスチックの利用削減、リサイクル率向上に資する新素材の開発・社会実装が求められる。

BRLに関しては、2030年には再生可能製品・再生材、バイオマスプラスチック、CO₂原料由来の高機能性化学品に対する価値が認められている必要がある、そのためには、国内で事業性が成立しうる市場や条件の明確化と少量での概念実証の開始が急がれ、かつ、関連主体の事業性を考慮した実証計画の推進と、関連主体だけでなく実施する地域への価値も可視化し、商用化に向けた事業モデルを構築することにより、ファーストムーバーに追随し、他地域・他企業の参画が誘導され、事業の拡張を社会全体として盛り上げる方向につなげることが求められる。2040年には再生可能製品・再生材、バイオマスプラスチック、CO₂原料由来の化学品に対する価値の認識がさらに進み、2050年には安定したバリューチェーンが確立されている必要がある。

GRLに関しては、TRLおよびBRLの達成のために国が進めるべき内容と、SRLの達成につなげるために国が進めるべき内容、について検討する必要がある。2030年には、2040年、2050年の目標達成に向けた政策の決定がされ、その施策に基づいた設備補助、税制控除などの制度や関連法令などが整備されている必要がある。その際、既存制度や法令、新たな制度や法令間に不整合がないか併せて議論されることになる。また、SRLの達成を目標とした、適切な温室効果ガス(GHG)算定方法の確立とそのためのナショナルインベントリの整備も必要である。そのためには、概念実証事業に対する投資補助や低金利融資、減税制度等の経済的支援や製造・販売事業者

への負担金制度の拡充が必要である。国際的な SRL 達成のためには、国際認証制度が世界的な公平負担に基づき形成されるように国際的に働きかけ、国際制度と合致した国内法や制度の見直しを進める必要がある。2040 年には商品への LCA 数値表示が義務化され、トレーサビリティのシステムが稼働しており、さらに 2050 年には商品への LCA 数値表示が普及し、炭素自立に即した新たなトップランナー方式が構築されており、トレーサビリティのシステムも確立している必要がある。

SRL に関しては、2040 年、2050 年の目標達成に向けた社会の変革の検証を進めることと、炭素自立の必要性和自らの選択・行動の意義について理解し実行に移すための環境教育が進んでいる必要がある。そのためには、2040 年、2050 年に向けて、消費者の利便性を低下させないための技術開発のみならず、利便性の低下を受容する社会の成熟や過剰品質から適正品質への変化促進、炭素自立製品の海外市場を確立し、国際的な信頼を得ることで、国内の社会受容性を高めるといった動きが必要である。2040 年には、プラスチック使用量の削減、同目的の製品の規格・原料の統一、環境への意識の高まり、トレーサビリティの確立に伴い、購買行動に移す主体が増加し、2050 年には炭素自立製品およびトレーサビリティの可視化が社会へ浸透し、購買行動変容が定着している必要がある。

これら 4 つの XRL を実現させるための HRL については、2030 年には炭素循環拠点への転換を実現する技術者育成モデルの検証がされている必要がある。そのためには、産業間連携による人材の相互交流・育成と、環境価値を高める広義のものづくりに関わる産学官の人材に対する収入向上による人と社会の well-being を目指す、すなわち、人材の量と質の向上が課題として挙げられる。また、安定的な人材確保のためには、炭素循環に必要な産業が魅力的な就業選択肢となるような取り組みが必要である。炭素自立事業の社会実装が進むことにより、2040 年には各技術を実装・運用する従事者の確保、2050 年には AI やロボット技術の普及による省力化の実現が達成されている必要がある。

3-3. 成熟度レベルから見た炭素自立ロードマップ実現に向けた課題

本節では、XRL から見た炭素源ごとの課題について述べる。

1) プラスチック

①技術成熟度レベル (TRL)

プラスチック等の資源循環は、適切な回収によりはじめて成立する。排出源が事業活動か否かによって産業廃棄物と一般廃棄物に分かれるが、いずれの場合も、排出源が分散しており、産業立地や居住人口に強く関係する。

原料確保の観点からは、複合材と単一素材を分離するソーティング技術を実装する必要がある (TRL7)。そのため、AI 活用等による高度ソーティング技術を開発する必要がある。

製造・変換技術の観点からは、現在でも不純物が少ないプラスチックの油化・ガス化技術はすでに確立している (TRL8)。2030 年には、油化については複数のプラントが実証運転を開始し、生成した油は、既存コンビナートの設備で処理している (TRL6~7)。しかし、80%のリサイクルを実現するためには、現状では循環できない不純物を含んだプラスチックも処理できるように、製油所やナフサクラッカー側の処理技術を開発する必要がある。また、2040 から 2050 年には重質油をそのまま原料化できるクラッカーの開発や油化・ガス化と、木質バイオマスからの化学原料生産、CCU が高度に連結した炭素循環型のサプライチェーン・バリューチェーンが構築されている必要がある。

②ビジネス成熟度レベル (BRL)

2030 年には、油化に関するバリューチェーンモデルが 5 事業以上実装され (BRL5~6)、国内でプラスチックリサイクルの事業性が成立しうる市場や条件の明確化とその概念検証が開始されている状態となっている必要がある。そのためには、マテリアルリサイクル、油化やガス化プロセスそれぞれに適したプラスチック回収フローの可視化による原料活用率の向上や参加企業だけでなく実施する地域への回収プラスチックの買い取り価格への反映などの利益還元システムを構築し、商用化に向けた事業モデルを構築していくことが重要となる。2040 年から 2050 年には技術向上により、現状、原油由来の製品に比較して数倍となっているリサイクル品の価格差を縮小

するとともに、リサイクルコストを製品価格に転嫁できるようなバリューチェーンが確立されている必要がある。

③ガバナンス成熟度レベル（GRL）

2030年には、2040年、2050年の目標達成に向けた政策の決定がされ（GRL4～6）、循環システムが事業として安定的に存在し得る必要がある。例えば、実証事業に対する経済的支援や広域自治体における廃棄物の処理集約化と標準化（ソーティングシステム構築と支援）、リサイクルプラスチック使用率の設定及びインセンティブの拡充（リサイクル経済の評価・フレームワークの確立）、国際認証制度と合致した国内リサイクル法や制度の見直し等が挙げられる。2040年から2050年には、日本モデルを起点とした、製品リサイクルに関する国際的に統一された基準が標準化している必要がある。

④社会成熟度レベル（SRL）

2030年には、2040年、2050年の目標達成に向けた変革が広く社会に理解され（SRL 4～6）、過剰品質から適正品質への変化を受容する社会が形成されつつある必要がある。例えば、性能に影響を与えない色合いやフィッシュアイ、黒点等の受容度向上や食品パッケージフィルムにはポリエチレン製のみ使用するなど、社会全体として取り組むべきモノマテリアル化などの推進が挙げられる。2040年から2050年には、コスト負担の社会受容、廃棄物分別回収など資源循環普及に対する消費者の行動変容が定着している必要がある。

⑤人材成熟度レベル（HRL）

2030年には、炭素循環拠点への転換を実現する技術者育成モデルの検証がされている（HRL3～4）必要がある。そのためには、静脈産業とエネルギー・素材事業の結合による人材の相互交流・育成による人材確保も重要である。あわせて、資源循環・エネルギー／素材産業に携わる人材の収入向上も人材確保に必要な視点である。国内でも各社が開始しようとしている既存コンビナート内におけるプラスチック油化事業等は静脈産業とエネルギー・素材事業の融合の試みの一つとして挙げられるが、このような事業で炭素循環拠点への転換を実現する技術者育成モデルの検証を進めていく必要がある。その結果、炭素循環に必要な産業が魅力的な就業選択肢として認知され、人材確保・育成に繋がっていく。2040年から2050年には、AI/ロボット技術の普及による省力化も必要である。

2) 木質バイオマス

①技術成熟度レベル（TRL）

バイオマス資源には、木材、草本系、農業残渣、家畜のふん尿、食品廃棄物、紙、建築廃材などがあるが、ここでは主に森林から伐採した木質バイオマスを対象とする。立地条件として、原料となる木質バイオマスを生産する林業・製材業および既に木質バイオマスを原料としている製紙業の事業場および運搬方法に強く関係する。また、木材の原木は、製材して建材等として利用した後、端材・末木等は紙チップ・ボード材の他、化学素材として炭素を固定する利用方法がある。間伐材や残材も、化学品として炭素を固定することができる。木材の種類と品質、需要によって用途を決定し、木造建築用資材から化学品原料まで木質資源を余すことなく有効利用する木材のカスケード利用が重要である。

原料確保の観点では、2030年には既存の木材供給網や林地残材の活用により、化学素材向けの木材を年間30万t-C確保する必要がある。同時に、日本の急峻な森林に適した早生樹の育成、林道整備、植林・伐採・搬出技術の開発が進んでいることが求められる（TRL4～5）。

2040から2050年には、AIやドローン技術、林業ロボットの導入により、国内林業の生産性向上と省力化を図る必要がある。

製造・変換技術の観点では、2030年には、製紙工場の既存設備を有効活用し、パルプを原料とした糖化発酵プロセスを導入することで、製紙工場をバイオリファイナリーに転換する商用化が進んでいる（TRL8）。木質バイオマスの糖化プロセスの社会実装のためには、糖化酵素の性能・コストが競争力の鍵となる。現在、糖化酵素の供給は一部の海外企業に限られているため、安全保障の観点からも糖化酵素の国産化を推進し、木質バイオマスに適した糖化酵素の高性能化・コスト削減を図る必要がある。将来的には、山間部の製材所に併設する分散型糖化発酵プラ

ントの普及に向け、水蒸気爆砕などの効率的な前処理技術の開発が重要である。一方、バイオマスガス化は、一部で実証段階であるが（TRL6～7）、設備コスト・変換効率が社会実装の障壁となっている。この課題を克服するため、製紙工場で熱利用されている黒液や糖化発酵残渣に含まれているリグニンを化学原料として有効活用するための成分分離技術やリグニンのガス化技術の開発が必要である（TRL4～5）。

2040 から 2050 年には、微生物の育種・培養技術の進化により、多様な化学品や機能性素材の製造を可能にするバイオものづくり技術の普及・拡大が求められる。また、糖化発酵工程やバイオマスガス化から排出される CO₂ と、プラスチックの油化・ガス化プロセスから排出される CO₂ を活用した統合型 CCU プロセスの開発も必要である。

②ビジネス成熟度レベル（BRL）

2030 年までに、林業、木造建築、化学産業などの産業間連携が始まり、製材所と糖化発酵などのサプライチェーンをつなぐ実証が進められている必要がある（BRL4）。また、製紙産業が主体となったバイオリファイナリーへの転換が求められる（BRL8）。そのためには、GHG 削減効果に加え、水源涵養や生物多様性などのバイオマス由来製品の付加価値を見える化し、バイオマスプラスチックを利用した製品が適正価格で取引される市場の醸成が重要である。さらに、世界をリードする製品を創出し、海外市場の獲得を積極的に図る必要がある。

2040 年には木質バイオマスによる化学原料生産がスケールのあるビジネスとして成立し、2050 年には安定成長を実現している必要がある。

③ガバナンス成熟度レベル（GRL）

2030 年までに、森林の炭素固定機能の価値を織り込んだ、森林経営の継続性や早生樹造林の促進を担保する林業政策が立案され、一部は施行される必要がある（GRL4）。そのためには、農業・林産業・環境政策の統合、全体を俯瞰した産官学の推進ハブ機能、GI 基金や GX 推進など設備補助金や税制控除などの制度の拡充、バイオマス化学品の導入に関する認証・ルール化に向けた議論が開始されている必要がある。

2040 年には省庁・自治体・民間企業等が国産バイオマスによるバイオマスプラスチック製造の具体的な導入計画を策定し、その計画に基づいて導入が進み、データに基づく評価・改善が段階的に展開され（GRL6～7）、2050 年には国産バイオマスによるバイオマスプラスチックのトレーサビリティのシステムを普及し、運用されている必要がある（GRL8）。

④社会成熟度レベル（SRL）

2030 年までに、木材のカスケード利用やバイオマスプラスチック製品の価格許容度が上がっている必要がある（SRL5）。そのためには、森林価値や炭素自立に対する国民的理解の醸成が必要である。2040 年には国産木材による木造建築およびバイオマスプラスチックの市場拡大（SRL7）、2050 年にはさらなる拡大が必要である（SRL8）。そのためには、木造建築、バイオマス由来の製品における価値の理解に基づくコスト負担の社会受容、資源循環普及に対する消費者の行動変容が定着している必要がある。

⑤人材成熟度レベル（HRL）

2030 年には、林業やそのバリューチェーンに関わる人材が確保（HRL6）される必要がある。そのためには、林業従事者の労働安全衛生向上に向けた施策、兼業林業従事者数の増加のための施策、炭素自立に向けた林業・林産業の役割に関する産学官の関連主体のネットワーク構築が重要である。2040 年から 2050 年には必要な国内外の人材の教育環境が整備され、社会で最適にマッチングされながら活躍する状態が実現し（HRL7）、2050 年には社会全体で必要な人材の輩出や活用、スキルの高度化が図られている必要がある（HRL8）。

3) 回収二酸化炭素

①技術成熟度レベル（TRL）

CCU は、排出された CO₂ を回収（CO₂ Capture; CC）して、化学品、燃料、建材などの資源として再利用する技術であるため、立地条件として原料となる CO₂ を排出する産業やバイオマス発電所などに近接している方が望ましい。また、2030 年には、CO₂ の回収・貯留（CCS）事業が先行して開始されている。

原料確保の観点からは、2030年には先進 CCS 事業により CO₂回収技術は被分離ガスの圧力と濃度、および処理量によってすみ分けがなされ、一例として全般的に広く適用可能な技術としてアミン系水溶液を用いた化学吸収法は商用化済み（TRL8以上）である。一方、水素に関しては、発電分野のみならず、CCU原料利用の水素のサプライチェーンも構想に入っている必要がある。2040年には、次世代 CC 技術は商用レベル（TRL7～8）となり、バイオマス由来やガス化由来等、化石燃料以外をソースとした CO₂回収が加速し、ある程度安価な水素も手に入る状況になる必要がある。そのためには、CC 技術の省エネ化、長寿命化、スケールアップ技術の開発を進める必要がある（TRL7）。2050年には大気からの CO₂直接回収（DAC）も実装され（TRL6）、CC 技術の TRL の向上とともに CO₂回収・輸送のサプライチェーン構築が必要となる。

製造・変換技術の観点では、2030年には外部からの水素を投入する必要のないプロセスによるポリカーボネートや人工石灰石などが商用化において先行する（TRL8）。CO₂からの炭化水素の FT 合成やメタノール合成を経た基礎化学品の生産は十分な量の水素を安価に確保可能な時期に備えて商用レベル（TRL7～8）に到達済みで、機能性化学品への利用が始まっている。CO₂を原料としたバイオプロセスによるものづくりも商用レベル（TRL7）で、いずれも本格的に実装され始めるのはプラスチック等の再資源化や木質バイオマスからの化学原料生産からやや遅れると見込んでいる。電気化学や触媒プロセスなどによる化学原料の合成技術についても、技術成熟度の向上に向けた開発を加速する必要がある（TRL7）。そのためには、実証プラントへの公的資金による補助のほか、CCU 製品であることの可視化によって利用を促進する仕掛けも必要である。2040年には、バイオマス由来の CO₂等、化石燃料起源の排出源以外からの回収が加速し、1か所の CCU と水素製造のサプライチェーンが構築され、事業が成立している必要がある（TRL7～8）。このころには CO₂ バイオものづくり、CO₂ 電解、DAC 技術、および CCU 製品の汎用化学品としての利用も商用レベル（TRL7～8）に到達する。そのためには、先行するプラスチック等の油化・ガス化プラントや木質バイオマスからの化学原料生産が CCU 機能追加を前提とする技術開発が必要となる。2050年には、プラスチック等の再資源化や木質バイオマスからの化学原料生産の進捗状況に合わせ実装が進行し、さらに利用も拡大する（TRL9）。

② ビジネス成熟度レベル（BRL）

2030年には CCU の必要性が認識され、自治体主導で助成事業が開始されている。回収 CO₂ のバッファとして先進的 CCS 事業も開始されている（BRL8～9）。CCU に必要な水素の拠点整備も開始されている（BRL4）。2040年にはパイプライン、CO₂の一時的な貯留のための貯槽、港湾の荷役設備など、拠点となるインフラ整備が進んでいる（BRL8）。国内適地で CCU 製品のサプライチェーンが構築され、CO₂ バリューチェーンの中でコスト増を吸収可能な高付加価値品のものづくりが先行して需要を喚起する必要がある（BRL7）。そのためには、カーボンプライシング、有償オークションの対象業種拡大、認証取得材の購入強化、税控除、非化石認証等の施策の導入や小売業者との連携強化も必要となる。また CCU 特区を選定し、戦略的な支援策も具体化され、同様な環境基準に適合した国際的なサプライチェーンの構築も必要である。2050年には回収 CO₂ 原料由来の汎用化学品が流通しており（BRL9）、バイオやケミカルリサイクルのプラントに CCU 設備の統合プロセスが標準化され、適地での CCU 製品サプライチェーンが拡充している状態となることが期待される。

③ ガバナンス成熟度レベル（GRL）

2030年には、一部の CCU 製品の負の排出が GHG インベントリで計上されており、国際的にも認知されている（GRL4）。2040年には、ブロックチェーン技術などを利用した炭素循環材と化石資源材との配合比などのトレーサビリティシステムが稼働し、商品への情報の表示が義務化されている（GRL5）。国内数か所を CCU 特区として認定し、実証拠点が整備されて稼働させる（GRL5）。そのためには、CCU 国内製品の競争力を低下させないためのインセンティブや国際標準化などのルール作りも進める必要がある。2050年には炭素自立が成立するための CCU 産業の政策的な支援、例えばトップランナー方式の採用や、トレーサビリティのシステムを普及させる施策が必要である。

④ 社会成熟度レベル（SRL）

2030年までに、CO₂吸収・排出量、製品としての炭素循環量、大気中 CO₂蓄積量の関係の正し

い理解や CCU の位置づけに関する国民理解の醸成が必要である。また、2040 年までに、CCU 製品の価格許容度が上がっている必要がある（SRL7）。そのためには、炭素固定に対する国民的理解の醸成が必要である。2050 年から 2060 年にはさらなる拡大（SRL8）が必要である。そのためには、炭素固定の理解に基づくコスト負担の社会受容、資源循環普及に対する消費者の行動変容が定着している必要がある。

⑤人材成熟度レベル（HRL）

液化炭酸ガスの船舶輸送が増える 2040 年には、CO₂輸送に係る資格認定者などの特殊技能を持った人材の確保が必要となり（HRL7～8）、2050 年に向けて省人化技術の普及により、事業拡大にともなう人材の確保を可能とする（HRL6）。

4. 各ステークホルダーの役割と提言

炭素自立ビジョンの実現には、地域ごとの炭素資源とそこに立地する産業、あるいは新たに誘致すべき産業などを組み合わせ、異業種間の連携による新たなバリューチェーンの構築が必要である。現在、各業界の協会や連盟などが個別にロードマップ等を策定し、自主的な取り組みを進めているが、単独の業界でのカーボンニュートラル達成の困難さが顕在化している。炭素自立という産業構造の変革を実現するためには、業界の枠を超えた推進主体が必要であり、様々なステークホルダーのハブ機能を持つ、推進組織を設立すべきである。推進組織は、バリューチェーン構築のためのネットワークキングに留まらず、業界間の利害調整、規制改革や制度設計などの政策立案者との調整、炭素自立への理解促進や人材育成のための活動の中核を担う。

炭素自立ロードマップの実現のため、1) 政策立案者、2) 産業界、3) 自治体、アカデミア、市民の役割を以下にまとめる。

1) 政策立案者

炭素自立へ向けた政策立案者の役割は極めて重大である。的確な政策設計と実行がなければ、既存産業は競争力を失い、空洞化が進み雇用喪失の危機に直面する。一方で政策を通じて新たな産業を創出することも可能である。

まず、包括的な炭素自立・炭素循環施策の策定を行うべきである。炭素自立のためには、HTA 産業に加えて、林業・林産業、廃棄物産業、エネルギー産業など様々な産業を新たな形態へと転換させる必要がある。そのため、現在は個別の省庁で扱っている施策を包括的かつ一元的に取り扱うことが必須である。産業構造の転換後に必要とされるであろう省庁再編を見据え、炭素自立に重要な 3 つの炭素資源が国内で循環するビジョン実現に向けた包括的な施策を策定することが重要である。

次に、3 つの炭素資源のうち回収 CO₂の利用のためには、水素のバリューチェーンの構築が必須である。そのため、CCU のための水素利用を加速化する施策が必須である。

また、炭素自立を達成するためには、世界各国、特にインド・太平洋地域との連携は不可欠である。炭素自立は日本国内における取組みが重要であることは言うまでもないが、世界各国でも同様の取組みが必須である。そのため、必要となる制度や認証など、炭素自立を国際的に進めるための外交交渉をすべきである。

2) 産業界

産業界は、炭素自立の実現主体として、主体性をもって炭素自立ロードマップを実行すべきである。新設する炭素自立ロードマップの推進組織と協調し、俯瞰的に社会実装を進めるべきである。また、海外展開を推進することで、地域内の炭素自立に貢献しつつ、成長する経済圏での優位性を確立すべきである。

また資源循環した製品を販売するため、炭素自立に向けた新市場の創造に積極的に取り組むべきである。川上から川下までのバリューチェーン全体の再構築が必要である。炭素自立ロードマップを実行に移すため、様々な産業が糾合する場を作るべきである。

3) 自治体、アカデミア、市民

炭素自立に向けて自治体が果たすべき役割は大きい。地域に散在するプラスチック等を広域で集約する計画を産業界やアカデミアと連携しながら 2030 年までに策定すべきである。木質バイオマス、回収 CO₂については、地域産業創出の観点から、地元企業の活性化と企業誘致に積極的

に關与すべきである。

アカデミアは、全体を俯瞰し、中立・公正な立場から政策立案者や産業界、自治体などを支援し、炭素自立ロードマップの実行をけん引することが求められる。

市民は、環境教育プログラムに積極的に参加し、炭素自立にかかわる環境リテラシーを向上し、行動に移すべきである。

5. まとめ

本意見書では、エネルギー収支を考慮した上でプラスチック等の資源循環を精査し、木質バイオマスからの化学原料生産や CCU とあわせて、炭素自立という社会変革に向けたロードマップを示した。2050 年の炭素自立実現に向けて、2030 年・2040 年に到達すべき姿を、技術、ビジネス、ガバナンス、社会、人材の成熟度の観点から整理した。さらに、プラスチック等、木質バイオマス、回収 CO₂ という炭素源ごとの課題を明確化し、炭素自立に向けた歩みを確実に進めるため、政策立案者、産業界、自治体、アカデミア、市民の役割を示した。

本意見書のロードマップにしたがって炭素自立に向けた取り組みを推進していく上で、特に重要な提言として下記を示した。

- ・炭素自立ロードマップを推進する組織を設立すべき
- ・政策立案者は、包括的な炭素自立・炭素循環施策の策定を行うべき
- ・産業界は、炭素自立の実現主体として、炭素自立ロードマップを実行すべき

今後、炭素自立の経済価値を示し、炭素自立ロードマップの具現化に向けた取り組みを進める。他国に先んじて HTA 産業の炭素自立を実現することで、国際競争力を強化しつつ、2050 年のネットゼロを実現するための、炭素自立ロードマップの推進主体の設立準備に着手する。

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。

参考文献

- 1) 一般社団法人プラスチック循環利用協会「2025 プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況」(https://www.pwmi.or.jp/new_data-pamphlet.php) (参照日 2025-09-01)
- 2) 「プラスチック循環利用協会 50 年史：一般社団法人 プラスチック循環利用協会」
- 3) プラスチックのケミカルリサイクルとその技術開発 (下) 株式会社 旭リサーチセンター
- 4) “Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics: Converting Waste Plastics into Diesel and Other Fuels”, J. Scheirs and W. Kaminsky, WILEY SERIES IN POLYMER SCIENCE, John Wiley & Sons, Ltd (2016).
- 5) レゾナックホームページ(<https://www.resonac.com/jp/kpr/method.html>) (参照日 2025-09-01)
- 6) https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/220929/siryo1-2_1.pdf (参照日 2025-09-05)
- 7) https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/taskforce/smartbousai_3/siryo5.pdf (参照日 2025-09-05)

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）	福島 康裕（東北大学）
遠藤 明（産業技術総合研究所）	藤井 実（国立環境研究所）
小原 聡（東京大学）	古屋 武（産業技術総合研究所）
石戸 利典（IHI）	松方 正彦（早稲田大学）
中垣 隆雄（早稲田大学）	水口 能宏（日揮ホールディングス）
難波 正典（花王）	峰尾 恵人（京都大学）
新美 雄太郎（三井住友信託銀行）	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