



世界の化学産業が 気候中立を実現するための 道筋

本報告書は、ICCAから委託された研究で得られた成果に関して、ICISとCarbon Mindsが執筆したものである。

本報告書に関する情報

一文による要約

本報告書では、最新の科学的モデルと産業界の専門知識を駆使し、世界の化学産業が気候中立に到達するための4つの道筋と、その実現を支える基盤（イネーブラー）を明らかにしている。

引用時の表記

Hermanns, Ronja; Oliveira de Lima, Cassia; Vögler, Oskar; Wilson, James; Zehnder, Stefano; Meys, Raoul.

「世界の化学産業が気候中立を実現するための道筋」2024年6月、ケルン

最終更新日：2024年4月17日

執筆者

Carbon Minds

Eupener Straße 165, 50933 Cologne

<https://www.carbon-minds.com/>

ICIS

99 Bishopsgate, EC2M 3AL, London

<https://www.icis.com/>

委託者

ICCA（国際化学工業協会協議会）

<https://icca-chem.org/>

著者

Ronja Hermanns, Oskar Vogler,
Stefano Zehnder, Cassia Oliveira de
Lima, James Wilson, Raoul Meys

質問等の宛先

Raoul Meys

raoul.meys@carbon-minds.com

謝辞

このプロジェクトは、様々な企業や化学業界団体の代表者と共に遂行された。本報告書の発行にあたり、関係各位のご支援、技術的専門知識、建設的なご意見に感謝申し上げます。特に、ICCAのエネルギー・気候変動リーダーシップ・グループ内のカーボン・ニュートラル・タスクフォースのメンバーである、仲田 積実、Chantal Yiming Sun、Charles Franklin、Constantinos Bokis、金沢大輔、Elena Leonardi、Ignacio Hernandez Bonnett、Ibrahim Eryazici、James Brown、安西 克夫、Nicola Rega、Pranav Tripathi、山本 徹、長谷川 朋、中村知博の諸氏に感謝したい。本報告書の内容は、必ずしも参加者の見解を反映するものではない。報告内容に対する責任は、あくまでもCarbon MindsとICISにある。

ライセンス

CC BY-NC-SA 4.0

バージョン

2024.06_V1.0

著作権

本報告書の内容は著作権の対象となる。特に断りのない限り、商業目的でない限り、出典を記載および明記することを条件に、複製を許可する。

（注：本日本語訳文への翻訳は一般社団法人日本化学工業協会（以下、日化協）が行ったものであるが、日化協が何らの権利を付与又は保証するものではない。）

目次

1 序文	4
2 エグゼクティブ・サマリー	5
3 ライフスタイルを支える化学製品	10
4 二重の課題：原料関連の排出とエネルギー関連の排出	12
5 本研究の対象範囲	15
6 気候中立な道筋のモデル化における科学的な根拠	20
7 世界の化学産業には気候中立への道筋が複数存在する	23
気候中立の達成	23
炭素原料の消費量	26
総エネルギー需要	29
年間操業コストと累積資本支出	30
8 気候中立には、その実現を支える基盤が必要	33
プラスチック廃棄物へのアクセス	33
持続可能な形で調達されたバイオマス	35
低排出水素	37
化石原料および適切に規制された炭素貯留	38
安価な低排出エネルギー	39
9 要約と結論	41

1 序文

ICCA（国際化学工業協会協議会）は、2021年に気候中立声明を発表し、この中でパリ協定の支持と、今世紀半ばまでに気候中立を達成するという世界の化学産業としての目標を示した。この声明に沿って、世界の化学産業が気候中立に到達するための道筋と、その実現を支える基盤（イネーブラー）を特定するために、ICCAは本研究を我々に委託した。

化学産業は複雑でエネルギーを大量に消費する製造工程を通して、現代の生活を支える多くの製品を生産している有力な製造業である。化学産業は、その特殊性から、気候中立を達成する上で特有の課題を抱えている。具体的には、これらの製品の大半は炭素を含んでいるという点である。

本研究では、科学的モデリング手法を用い、特に原料の選択と調達、廃棄物の管理に焦点を当て、最小のコストで気候中立を達成するための様々な道筋を探索する。これらの道筋は、将来の資源へのアクセスの不確実性、リサイクルの役割のほか、様々な実現技術等を考慮したものである。加えて、世界の化学産業が気候中立を達成するために必要となる主要な実現基盤（イネーブラー）も特定している。

本研究は、ICISとCarbon Mindsが化学産業を世界的に集約した形で実施したものであり、世界の各地域における個別の事情は反映していない。したがって、それぞれの地域の特性を反映した気候中立への道筋は本報告書では取り扱わないが、これらを化学会社各社や各国の化学業界団体が作成する際には、本報告者はその基盤になるものと確信している。

2 エグゼクティブ・サマリー

世界の化学産業の声であるICCA（国際化学工業協会協議会）は、パリ協定を支持し、今世紀半ばまでに気候中立を達成するという目標を表明している¹。この目標を確かなものとするために、世界の化学産業が気候中立を達成するための道筋と、その実現を支える基盤（イネーブラー：資源へのアクセス、インフラ、政策など）を特定するための研究をICCAは我々に委託した²。本エグゼクティブ・サマリーでは、本研究の主要な知見を紹介する。

背景：世界の化学産業が克服すべき大きな課題は2つあり、具体的には、炭素原料³とエネルギー使用による温室効果ガスの排出削減である。

今日化学産業は、化学原料（化学製品を製造する原料）を炭素を含有する化学製品に転換する際に発生する温室効果ガスによる環境問題に直面している。化学製品は、その構成要素として多くの場合、炭素が用いられるため、炭素を含む化学原料は不可欠である。さらに、化学産業はこれらの原料を製品に転換する際に、大量のエネルギーを使用する。このように、温室効果ガスは化学産業のバリューチェーン全体にわたって、複数の箇所でも排出される。これらの排出は、大きくは原料関連の排出とエネルギー関連の排出に分けられる。

原料、反応工程、廃棄製品に関連する排出（炭素原料関連の排出）：現在、化学産業で使用されている炭素含有原料のほとんどは、天然ガス、石炭、ナフサ、エタンなどの化石由来のものである。これらの原料の採掘と精製の過程で、メタンやCO₂などの温室効果ガスが排出される。温室効果ガスの排出は、これらの原料が化学製品に転換される過程でも発生する。さらに、ライフサイクルの終わりに、化学製品がリサイクルされずにCCSなしで焼却されると、製品に含有されていた炭素は温室効果ガスとして大気中に排出される。

エネルギー関連の排出：化学製品の生産はエネルギー集約的であり、多くの場合、摂氏500度以上の反応温度が必要である。これらの温度は通常、燃料の燃焼によって実現されるが、もし排出削減措置が取られなければ、燃焼は直接的な温室効果ガスの排出につ

¹ <https://icca-chem.org/news/icca-statement-on-climate-policy/>

² 本研究における気候中立は、IPCCのネット・ゼロ・エミッションの定義に従って定義されている。すなわち、気候中立は「人為的な温室効果ガスの大気への排出と除去が一定期間にわたって均衡している」場合に達成される。これらの温室効果ガスの排出には、二酸化炭素、メタン、一酸化炭素、重酸化窒素などが含まれる。IPCC (2018), <https://doi.org/10.1017/9781009157940.008>.

³ ほとんどの化学製品は、その化学構造の骨格として炭素を使用しているため、炭素原料という用語を用いている。この炭素は、化石資源、バイオマス、プラスチック廃棄物、CO₂などから得られる。

ながる。エネルギー源としては、燃料の燃焼以外にも、送電網経由の電力も化学産業の設備の稼働に一般的に使用される。

従って、化学産業が気候中立を達成するためには、エネルギー関連の排出と、炭素を含む原料関連の排出の両方を削減するという二重の課題を克服する必要がある。本報告書では、炭素原料関連の排出に主眼を置くが、エネルギー関連の排出もモデリングに織り込み、概要レベルで取り上げている。

方法論：科学モデルと産業界の専門知識を組み合わせ、化学産業が気候中立を実現するための道筋を分析する。

このプロジェクトでは科学的モデリング手法を用いているが、これは気候中立を実現する化学産業を研究する様々な査読付き学術論文⁴の中で適用されてきた。これらの査読付き論文の幾つかは、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）の最新報告書⁵の産業に関する章の中にも転載されている。この科学的モデリング手法では、化学産業の気候中立への道筋を作成・評価するために、ライフサイクルアセスメントを用いつつ、コストを最小化する手法を採っている。そのために、業界の専門家によって検証された技術的、環境的、経済的パラメータを使用している。

本研究では、今世紀半ばまで世界的に需要が増加すると予測されている18種類の大量生産される化学品⁶を対象としている。また、ライフサイクル・アプローチに従い、（1）化学反応エネルギーの供給、（2）化石資源の採掘、（3）化学原料の生産、（4）化学プラントの操業、そして（5）対象製品の廃棄に関連する排出を含む、すべての主要な排出源からの排出が考慮されている⁷。本研究は、バリューチェーンに沿って、CO₂やメタン⁸などの、IPCCが示すすべての種類の温室効果ガスの排出を考慮している。一方

⁴ Raoul Meys et al., Science (2021), <https://doi.org/10.1126/science.abg9853>; Arne Kätelhön et al., Proceedings of the National Academy of Sciences (2019), <https://doi.org/10.1073/pnas.1821029116>; Christian Zibunas et al., Computers & Chemical Engineering (2022), <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107798>.

⁵ Bashmakov et al., 2022: Industry. IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, <https://doi.org/10.1017/9781009157926.013>.

⁶ メタノール、エチレン、プロピレン、ベンゼン、キシレン、トルエン、スチレン、塩素、アンモニア、水素、酸化エチレン、エチレングリコール、LDPE、LLDPE、HDPE、PP、PET、PVCを指す。これらのバリューチェーンの一部であるその他の化学製品も含まれている。

⁷ ライフサイクルアセスメントに基づくアプローチでは、スコープ1、2、3からの排出を考慮する。スコープ3については、GHGプロトコルのカテゴリー3.1と3.12を、それぞれ「購入品」と「使用済み品の処理」として考慮する (Martin Barrow et al., <https://ghgprotocol.org/scope-3-calculation-guidance-2>)

⁸ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013, The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report, <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>.

で、本研究では、化学産業に密接に関連する活動に焦点を当てるため、使用段階（Use Phase）での排出は対象に含まない。

大量生産される化学品を対象として、気候中立への低コストな移行を実現するために、本研究では技術中立的なアプローチを採用し、幅広い製造技術をモデルに含めている。このアプローチは、利用可能なすべての技術⁹を柔軟に考慮することにより、資本支出と操業コストを最小に抑えることを可能にする。特定の技術的選択肢を排除することは、化学産業が気候中立を実現する能力を制限し、コスト上昇につながるため、気候中立的な化学品をより高コストなものとし、気候中立への社会的移行を遅らせる可能性がある。本研究では科学的モデリングと産業界の専門知識のユニークな組み合わせに基づき、気候中立への複数の道筋を示している。

主要な知見1：世界の化学産業が気候中立を実現する道筋は複数存在する。

バイオマスや炭素回収・貯留能力などの重要資源の将来のアクセスをめぐる不確実な状況は、化学産業の気候中立への移行という複雑な状況を乗り越える上で極めて重要な要素である。この不確実性に対処し、可能な未来の範囲を探るため、本研究では、科学的モデリング手法と業界からのフィードバックに基づき、4つの異なるシナリオを作成した。これらのシナリオは、資源へのアクセスと技術の進歩に関して様々なパターンを含むように作成されており、業界の進むべき道について、多様な視点を提供している。本研究では、各シナリオにおいて、最小コストで気候中立を実現するための道筋を計算した（図1参照）。

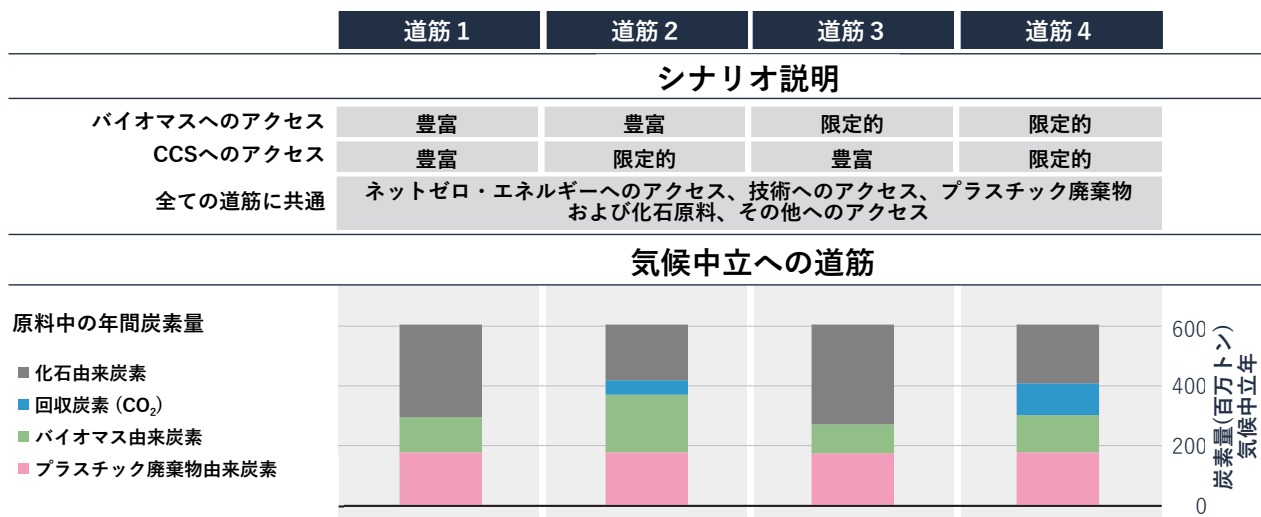


図1：4つのシナリオの定義、気候中立年における4つの道筋と主な結果。いずれの道筋においても、プラスチック廃棄物が、温室効果ガス排出とプラスチック汚染を削減する上で普遍的な役割を担っていることを示している。また、この図は、各道筋で炭素原料としてバイオマスや化石資源が大きく異なる割合で使用されていることを示している。また、炭素回収・貯留（CCS）へのアクセスが

⁹ Technology Readiness Levelが6以上の技術を対象とした。

限られている道筋2と4は、代替炭素原料として二酸化炭素と低排出水素を組み合わせたものを利用している。

その結果、世界の化学産業の気候中立への道筋は一つの定まったものがあるのではなく、現時点では不確実な資源アクセスによって道筋が変わりうることが明らかになった。

道筋のそれぞれは、利用可能な資源への対応を反映しながら、温室効果ガス削減の様々な手段を異なる組み合わせで活用している。本研究は地域性を持たないグローバルな領域を対象とするが、この結果は、重要資源へのアクセスが異なれば、地域や国によって道筋が異なることを示している。しかし、リサイクル技術（マテリアルリサイクルおよびケミカルリサイクル）、炭素回収・貯留（CCS）を伴う化石原料の使用、バイオマスなどの主要な手段は、どの道筋においても不可欠である。

主要な知見2：世界の化学産業は、気候中立達成を支える基盤（イネーブラー）を必要としている。

本研究では、化学産業を気候中立へと導く4つの道筋を示した。それぞれの道筋は、リサイクルや原料としてのバイオマスなどの複数の手段を組み合わせている。気候中立を達成する可能性を高めるためには、化学産業の外部からその実現を支える基盤（イネーブラー）の整備・構築を化学産業は必要としている（第8章でより詳細に記載）。

プラスチック廃棄物へのアクセス：リサイクルは、廃棄物の焼却による温室効果ガス排出や不適切に管理された廃棄物を削減する。現在、世界のプラスチック廃棄物の9%しかリサイクルされていない¹⁰。不適切に管理されたプラスチック廃棄物を削減し、気候中立を達成するためには、廃棄物収集・分別、流通インフラの改善や経済的・市場的インセンティブが必要であり、法律や政策の実施によって支えられながら、リサイクル率を世界レベルで大幅に向上させる必要がある。

さらに、ケミカルリサイクルとマテリアルリサイクルを連携することも重要である。マテリアルリサイクルは資源効率に優れているが、ケミカルリサイクルはより幅広いプラスチック廃棄物に対応し、ポリマーの劣化などの問題を克服することができる。分別されたプラスチック廃棄物を貴重な原料として使用することで、化学産業は、プラスチックの焼却やプラスチック廃棄物の不適切な管理による環境への潜在的な影響を減らすことができる。

持続可能な形で調達されたバイオマス：バイオマスは、その成長過程で大気から二酸化炭素を取り込み、さまざまな化学製品に転換され得る。このため、バイオマスは、特に廃棄物の焼却を含むバリューチェーンからの温室効果ガス排出を削減するのに役立つ、

¹⁰ OECD, 2022, Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060, <https://doi.org/10.1787/aa1edf33-en>.

貴重な原料である。

しかし、森林伐採や生物多様性の滅失を避けるため、バイオマスは持続可能な方法で調達されなければならない。さらに、増え続ける世界人口を支えるための食料との競合も避けなければならない。結局のところ、化学産業がバイオマスを利用するためには、持続可能な方法で調達されたバイオマスを安定的に、かつ安価に入手できなければならない。

低排水素：現在の水素製造方法によって排出される温室効果ガスを軽減するための実現可能性ある代替策としては、低排出電力による水の電気分解や、CCSを併用したメタン改質がある。低排水素は、アンモニアやメタノールのように大量使用される化学製品の製造に伴う温室効果ガス排出を削減することができる。

さらに、低排水素は、産業から排出されるCO₂（例えば、発電所や産業からの大量、または高濃度の排出）や、大気から回収したCO₂からの炭素回収・利用（CCU）を通じて化学品を製造することにより炭素の循環を実現し、またそれにより大気へのCO₂排出を減らしたり、大気中のCO₂を減らすことに役立つ。低排水素が持つこのような可能性を考えると、投資のインセンティブとなるような支援的な政策枠組みと許認可プロセスが不可欠である。

化石原料と適切に規制された炭素貯留：4つの道筋はすべて、化石原料をCCSと組み合わせて利用している。気候中立に貢献するため、CCSにおいては、廃棄物の焼却を含むバリューチェーンの様々なポイントでCO₂を回収し、その後、CO₂を長期的な地中貯留のために輸送する。

しかし、CCSの導入には、長期に亘る計画・建設、輸送・貯留インフラの整備に必要な多額の初期投資、一般市民や利害関係者の受け入れの必要性などの課題がある。CCSの効果的な導入には、インフラへの投資を促進し、社会と利害関係者の信頼を高めるための、強固で持続的な政策支援が必要である。

安価な低排出エネルギー：化学産業が気候中立を目指して移行する中で、低温、中温、高温の熱源や電気を必要とする生産工程において、低排出エネルギーは不可欠となる。再生可能エネルギー、CCS付き化石燃料、原子力を含むさまざまなエネルギー源が、低排出エネルギーを提供することができる。

これらの供給源の具体的な組み合わせは、各地域で利用可能な資源や化学反応の種類（低温を必要とするもの、高温を必要とするものなど）によって異なるが、それぞれ多額の投資と、それを可能にする政策支援が必要である。

3 ライフスタイルを支える化学製品

化学産業は、図2の右側に示されているように、私たちの日常生活の一部となっている数多くの製品の生産を担っている。これらの製品は、消費財、建築・建設、農業、自動車、繊維、ヘルスケア、その他多くの分野で使われ、今日の社会を支えている。化学産業は、原材料、最終製品、その他の製品等を提供することで、これらのセクターを支えている。

化学産業の製造工程には、複雑なバリューチェーンがかかわっている。これらの工程のほとんどは、基礎化学品（エチレン、プロピレン、混合キシレン、ベンゼン、アンモニア、水素、塩素、メタノールなど）と呼ばれる構成要素から始まる。これらの基礎化学品を用いて、多様な誘導体やポリマー（ポリプロピレン、ポリエチレン、PET、PVCなど）が製造される。

本研究の対象製品を図2の左側に示す。これらの製品の選出理由は、化学産業におけるその重要性のためである。これらの製品は、我々の分析によれば化学産業で生産される基礎化学品の90%以上を占め、対象範囲に含まれる誘導体とポリマーは、これらの基礎化学品の70%以上を消費する。

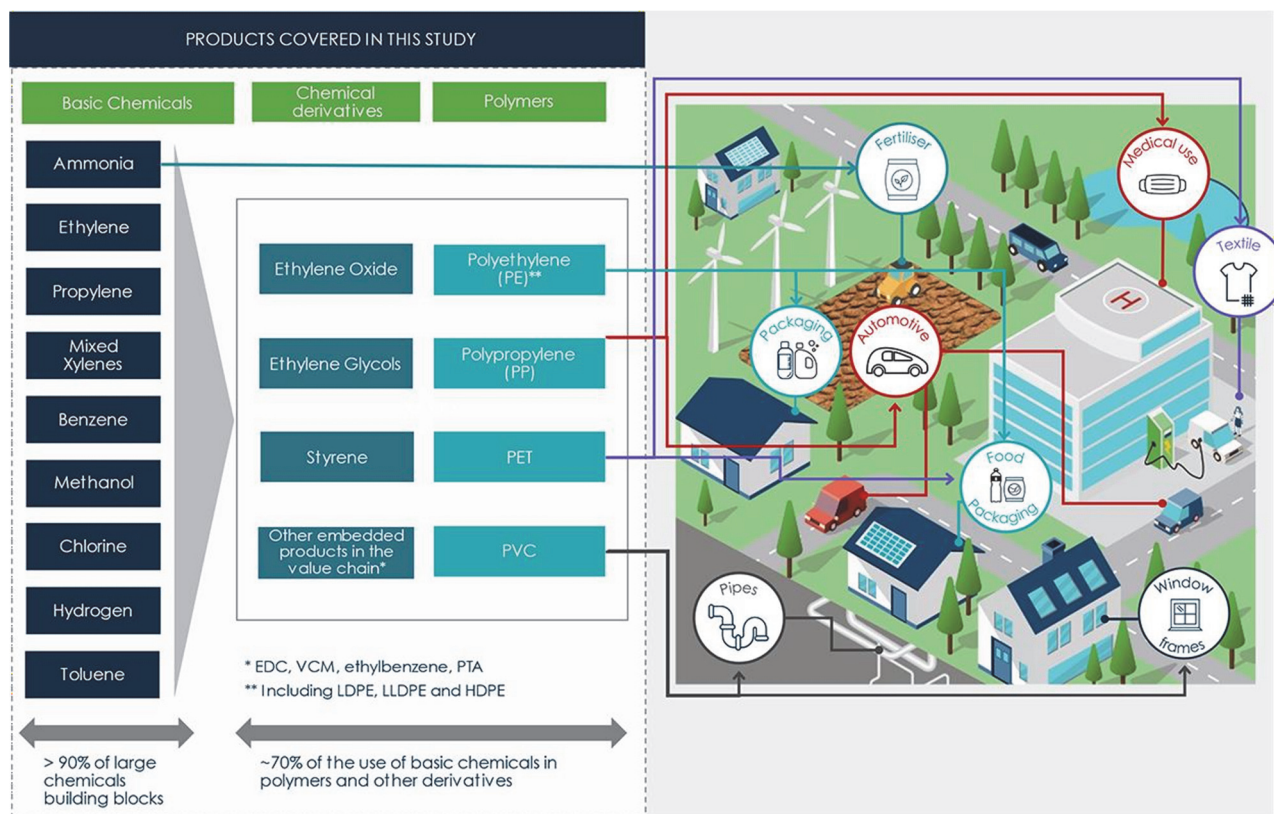


図2：本研究で取り上げたさまざまな化学製品は、私たちの日常生活を多くの面から支えている。なお、この図は製品の用途を包括的に示すものではない。

化学産業は他のセクターを支援する主要製造業としての役割を担っており、世界経済への重要な貢献をしている。2017年の化学産業による世界のGDPへの貢献は、直接的、間接的、更に誘発される貢献を通じて5.7兆ドルに達し、これは世界のGDPの7%に相当する。また、化学産業は、直接的・間接的に世界で1億2000万人の雇用を支えている¹¹。

社会と世界経済にとっての重要性に加え、化学産業は自らの事業活動に関連する温室効果ガス排出の削減のみならず、社会の気候中立への移行において不可欠な役割を果たすことができる。断熱性や軽量性を向上させる材料、低負荷、省エネルギーなど、排出削減の解決策を提供することで、化学産業は他のセクターの温室効果ガス排出の削減を通じて、社会の気候中立達成を支援することができる。

¹¹ ICCA and Oxford Economics, 2019, "Catalyzing Growth and Addressing Our Worlds Sustainability Challenges Report".

4 二重の課題：原料関連の排出とエネルギー関連の排出

温室効果ガス排出が化学産業のバリューチェーン全体でどのように分布しているかをより明確に理解するために、図3にその概要を示す。化学産業のバリューチェーンは、資源供給（エネルギーと原料）から始まり、化学製品への転換プロセス、化学製品の使用段階、廃棄段階へと続く。これらの各段階において、温室効果ガスが排出されている¹²。

ライフサイクルの各段階での温室効果ガス排出の2020年における内訳は、Mengらによって報告されており、これを図3に示す。化学産業への原料とエネルギーの供給における温室効果ガスの排出は、2020年の化学のバリューチェーン全体の約27%を占めるとされている。原材料から化学製品への転換による温室効果ガス排出（エネルギー関連の排出を含む）は46%である。資源の供給と転換プロセスからの温室効果ガス排出量は、合理的な努力で推定することができる。しかし、製品の使用と廃棄に関連する排出量は、製品が複数のセクターで異なる用途に使用されることを考えると推定は困難である。推定における課題はあるが、廃棄物からの温室効果ガス排出は、全体の27%と推定されている¹³。

これらのライフサイクルの様々な段階における温室効果ガス排出は、（1）原料および廃棄に関連する排出、および（2）エネルギーに関連する排出に割り当てることができる。

原料、プロセス、廃棄に関連する排出：ほとんどの化学製品には炭素が含まれている。そのため、化学製品の製造に使用される原料の種類にかかわらず、炭素は不可欠である。そのため、化学産業は炭素を含む原料を必要とする。例えば、化石原料の供給には、メタンやCO₂などの温室効果ガスを排出する採掘・精製プロセスが含まれる。バイオマス为原料とする場合、上流での調達には、大気からのCO₂吸収が含まれる一方で、栽培や原料利用のための加工に伴う温室効果ガス排出も含まれる。化学産業への原料供給後、これらの原料は化学製品への転換プロセスで加工される。転換工程においても、温室効果ガス排出が発生する可能性がある。さらに、プラスチックのような化学製品が

¹² 本研究では、ライフサイクルアセスメントに基づくアプローチを用いている。しかし、読者によっては、GHGプロトコル手法の方が馴染み深いかもしれない。GHGプロトコルは、GHG排出をスコープ1、2、3に分けている。ライフサイクルアセスメントとGHGプロトコルの基礎となる方法論は、相互にきれいに変換することはできないが、おおよそ図3で示されている値は、以下のように分類することができる：（1）転換工程からの排出は化学会社のScope 1に相当し、（2）化学企業の購入電力、熱源、蒸気による間接的な温室効果ガス排出はScope 2に相当し、（3）間接的な原料供給と廃棄物の処理からの排出はそれぞれScope 3.1と3.12に相当する。スコープ3.1と3.12は、化学企業の上流と下流に位置するバリューチェーンにおける他の事業体による直接排出を表している。

¹³ Fanran Meng et al., Proceedings of the National Academy of Sciences, <https://doi.org/10.1073/pnas.2218294120>.

ライフサイクルの終わりに焼却される場合、排出削減措置が取られない場合には、製品中の炭素が温室効果ガスとして大気中に排出される。

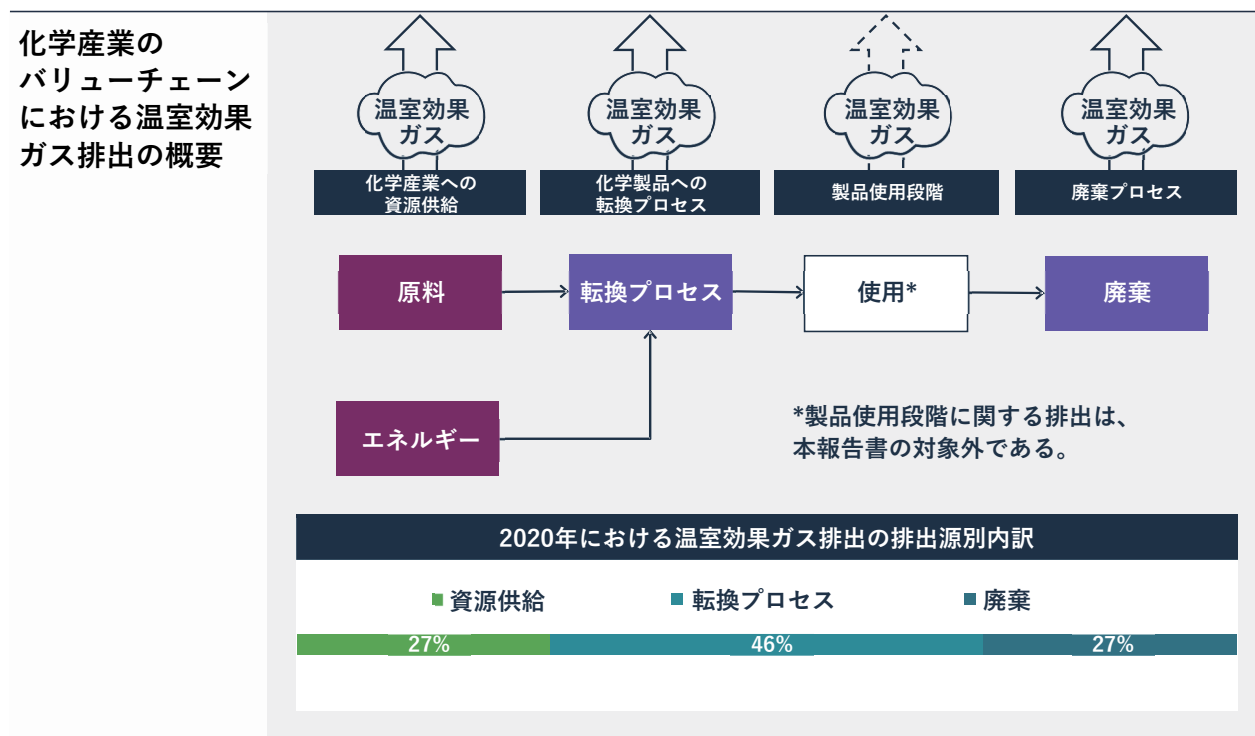


図3：化学産業のバリューチェーンのどこで温室効果ガスが排出されているかを示す¹⁴。本研究では、化学産業の活動に密接に関連するステップに焦点を当てるため、製品の使用段階での排出は含まない。

エネルギー関連の排出：化学製品の生産はエネルギー集約的であり、しばしば摂氏500度以上の反応温度を必要とするため、エネルギーは化学産業のバリューチェーンにとって原料と同様に重要な要素である。このような高温を実現するには通常、燃料の燃焼が必要となるが、燃料の調達と燃焼は、排出削減措置が取られない場合には温室効果ガス排出の原因となる。熱エネルギーの他に、化学産業は電力も必要とする。電力は、化学産業の設備の動力源として一般的に使用されており、もし電力供給に化石燃料が使用されている場合には、ライフサイクルベースで温室効果ガス排出の一因となる。世界の化学産業で使用されている生産技術は、基本的に効率と資源消費の点から最適化されてきた。しかし、現在の化学品やポリマーの生産は化石由来の原料やエネルギーに大きく依存しており、温室効果ガス排出削減の課題となっている。

原料関連やエネルギー関連の温室効果ガス排出が化学産業に与える影響の大きさを考えると、代替エネルギー源や代替原料の利用、排出削減技術は、温室効果ガス排出を削減し、気候中立を達成するための実現可能な解決策の重要な一部となる。

¹⁴ Fanran Meng et al., Proceedings of the National Academy of Sciences, <https://doi.org/10.1073/pnas.2218294120>.

本研究における「気候中立」とは？

本研究における「気候中立」は、IPCCの「ネットゼロ排出」の定義と同じ意味を持つ。言い換えれば、「人為的な温室効果ガスの大気への排出と除去が一定期間にわたって均衡している」場合に、つまり大気中の温室効果ガス濃度に変化がない状態である場合に気候中立が達成される。温室効果ガスには、二酸化炭素、メタン、一酸化炭素、亜酸化窒素などが含まれる。化学産業の文脈では、気候中立の達成とは、化学産業の主要な活動から生じる温室効果ガス排出が削減され、最後に残留する排出と炭素吸収が均衡することを意味する。本研究で対象とした温室効果ガス排出の範囲については、第5章「本研究の対象範囲」を参照されたい。

5 本研究の対象範囲

本研究では、世界の化学産業が気候中立な事業へ移行するための課題と機会について明確な見解を提供するために、その対象範囲を設定している。また、本研究においては、学術的な厳密さと市場や業界の専門知識を融合させ、入手可能な最良のデータと堅実なモデリング手法を活用して、化学産業が気候中立を達成するためのコスト最小の道筋をモデル化した。本研究で考慮した主要なパラメータを以下に示す：

世界の主要化学物質の需要：化学産業は複雑であり、多くの異なる原材料、製造プロセス、技術を使って、世界全体で何千種類もの化学製品が生産されている。表1は、本研究の対象範囲に含まれる18の化学製品を示す。これらの化学製品は化学産業の主要な基礎化学品や、世界で大量生産されるポリマーを示している。なお、これら18の化学品のバリューチェーンのすべての中間製品も対象に含まれている。

表1：本研究での対象化学品のリスト。バリューチェーンの中間製品も対象とした。

アンモニア	メタノール	ポリプロピレン (PP)
ベンゼン	混合キシレン	ポリエチレン (LDPE)
塩素	トルエン	ポリエチレン (LLDPE)
エチレン	スチレン	ポリエチレン (HDPE)
エチレングリコール	プロピレン	ポリ塩化ビニル (PVC)
エチレンオキサイド	水素	ポリエチレンテレフタレート (PET)

本研究は、今世紀半ばまでに気候中立を達成することに焦点を当てているため、これらの製品に対する需要が世界全体でどのように推移するかを検討することが重要である。本研究で使用した製品需要前提は、ICISの長期予測に基づいており、上表に示した各製品をカバーする。ICISの予測手法は、化学製品の最終用途の需要予測から始まり、中間製品、基礎化学品、原料、そして最終的には原油と天然ガスの需要予測を構築する、統合分析のフレームワークに基づいている。化学製品は世界経済の多様なセクターで使われているため、マクロ経済（GDP成長率など）と人口動態（人口増加率など）は、常に化学製品需要の重要なドライバーとなってきた。しかしながら、用途のシフトや規制の状況などの製品固有の要因も、対応する最終用途の動向とともに、長期予測に織り込まれる重要な要因である。

図4に示すように、化学品の需要は、世界的な人口増加、経済発展、進化し続ける新たな用途に牽引され、今後数十年にわたって伸び続けると予想される。現在世界中で使用されている4大ポリマー¹⁵の需要は、2020年から今世紀半ばにかけて、同期間に予想されるGDP成長率に沿いつつ、将来の主要用途における具体的な進展も考慮し、年平均成長率（CAGR）2.2%で伸びると予想される。これらのポリマーの需要は、2020年の3億2800万トンから、気候中立達成年までには6億2500万トンに増加すると予想される。一方、基礎化学品¹⁶の需要は、CAGR 1.8%で成長し、4億6000万トンから7億9600万トンに増加すると予想される。この成長率は、リサイクルの強化などにより、ポリマーの成長率よりも低い。

現在および将来の主要製品であるアンモニア、メタノール、水素の需要は、CAGR 2.4%で成長し、同期間に6億9200万トンに達すると予想される。これらの製品に対する需要は、メタノールやアンモニアを船舶用燃料として使用したり、一部の地域で発電に使用したりするなど、エネルギー転換に関連する新たな用途によって押し上げられることを想定している。

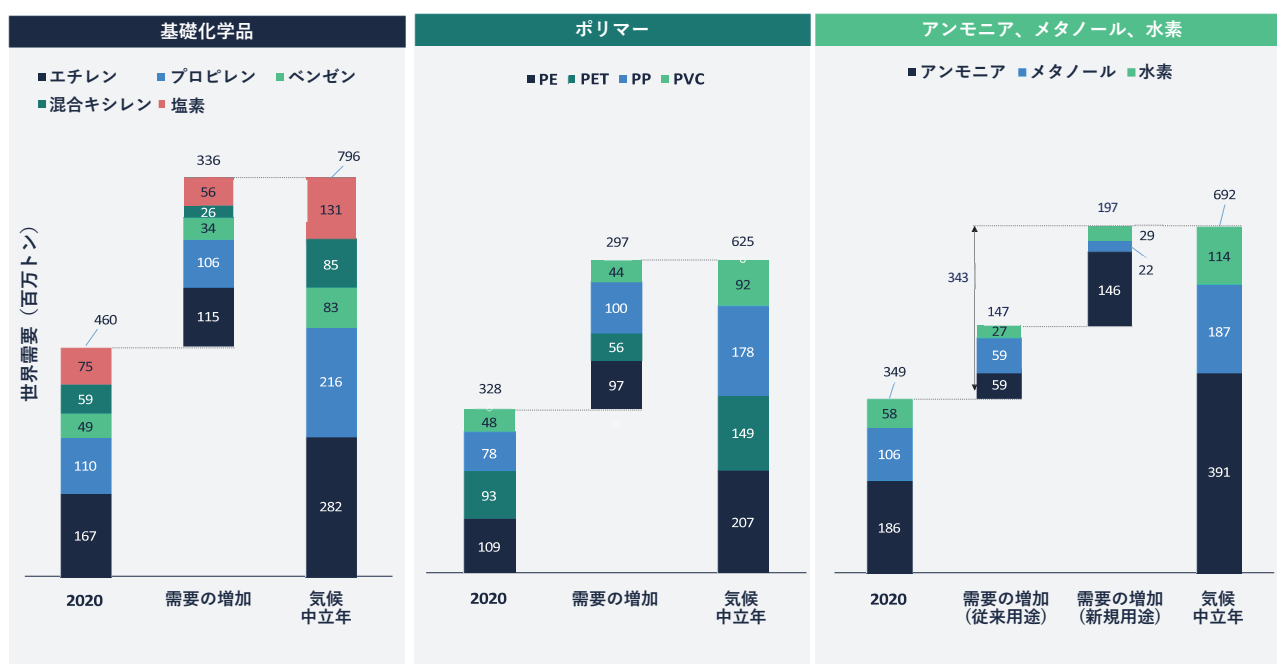


図4：本研究で使用した化学品とポリマーの需要前提。本研究で用いた需要前提はICISの長期予測に基づいている。エチレングリコール、エチレンオキシド、スチレン、トルエンなど、本研究の対象範囲に含まれる他の製品は、中間製品とみなされるため、簡略化のため本図には含めていない。

¹⁵ 4大ポリマー：ポリエチレン（PE）、ポリプロピレン（PP）、ポリエチレンテレフタレート（PET）、ポリ塩化ビニル（PVC）

¹⁶ 基礎化学物質：エチレン、プロピレン、ベンゼン、混合キシレン、塩素

グローバルな化学産業に焦点を当てる：本研究は、化学産業がどのようにして気候中立を達成できるかを、世界的なレベルで集約して示すことに焦点を当てている。

化学産業が気候中立を達成する複数の道筋を検討する：化学産業は気候中立的な事業運営を目指しているが、気候中立を実現するために重要となる資源の将来的なアクセスについては、大きな不確実性がある。そのため、重要資源へのアクセスについて異なる前提を置き、それぞれに対してコストが最小となる道筋を検討した。

ライフサイクル影響評価（LCIA）の手法と対象となる排出：本研究で考慮した温室効果ガスには、IPCC¹⁷に従い二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素などが含まれる。本研究で用いたライフサイクルアセスメントに基づく手法は、資源の採掘や栽培、製造、廃棄段階での温室効果ガス排出を考慮するものである。一方で、使用段階（Use Phase）での排出は本研究の対象から除外している¹⁸。

気候中立達成のための従来技術と代替技術：化学産業が、気候中立へ移行するためには、従来の確立された生産プロセスだけでなく、排出削減に焦点を当てた代替技術も活用する必要がある。現在、数多くの異なるプロセスが開発中であるが、本研究では、業界代表者との議論を通じて選定された、技術完成度（Technology Readiness Level）が高いことを特徴とする代替技術のみに焦点を当てる。本研究で考慮した代替技術は、以下の図5にまとめられている。

考慮した代替技術		
廃棄物処理技術	CO ₂ とH ₂ 関連技術	バイオマス技術
リサイクル - マテリアルリサイクル - ケミカルリサイクル その他 - エネルギー回収を伴う焼却 - エネルギー回収とCCSを伴う焼却 - 埋め立て	炭素回収・利用（CCU） - 排出源からのCO₂の回収 - 直接大気回収（DAC）によるCO₂の回収 - 電気分解による水素製造 - CCSを用いた天然ガスによる水素製造 - CO₂からメタン製造 - CO₂からメタノール製造 - メタノール→オレフィン/芳香族 炭素回収・貯留（CCS） - 排出源からのCO₂のCCS - CCSを用いた天然ガスによる水素製造	バイオマス発酵 - 発酵によるバイオエタノール製造 - エタノール脱水によるエチレン製造 バイオマスのガス化 - バイオマスのガス化による合成ガス製造 - メタノール→オレフィン/芳香族

図5：本研究で取り扱った代替技術。

¹⁷ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) , 2013, The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report, <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>.

¹⁸ 本研究では、ライフサイクルアセスメントに基づくアプローチを用いている。しかし、読者によっては、GHGプロトコル手法の方が、馴染みがあるかもしれない。GHGプロトコルは、GHG排出をスコープ1、2、3に分けている。ライフサイクルアセスメントとGHGプロトコルの基礎となる方法論は、相互にきれいに変換することはいできないが、次の範疇は本研究におおよそ含まれている。：（1）化学企業の全プロセスのスコープ1直接排出、（2）購入電力、熱源、蒸気からのスコープ2間接排出、（3）原料供給からのスコープ3.1間接排出、（4）廃棄物からのスコープ3.12間接排出。スコープ3.1とスコープ3.12は、個々の化学企業の上流と下流に位置するバリューチェーンの他の事業体による直接排出を表している。

資本支出（CAPEX）と操業コスト（OPEX）：経済性は気候中立への移行において極めて重要な要素である。モデリングにおいては、資本支出（CAPEX）と操業コスト（OPEX）の両方を見積もった。操業コスト（OPEX）については、原料市場価格を含め、入手可能な最良の参考資料を使用した。コストの詳細については、第7章の年間運転コストと累積資本支出を参照されたい。

気候中立への道筋の定義

本研究では、化学産業が気候中立を達成するための4つの異なる道筋をモデル化した。これは、世界の化学産業にとって唯一の道筋は存在せず、複数の異なる潜在的な道筋があることを示している。例えば、重要資源の入手可能性が異なれば道筋も異なるため、各地域がそれぞれの地域における重要資源の入手可能性、既設インフラ、経済的背景、政策状況に応じて、異なる戦略を採用することは合理的である。

各シナリオでは、バイオマスとCCSへのアクセスに関する異なる前提を用いることによって、化学産業が世界規模でこれらの資源を将来的に利用できるかどうかに関する不確実性を織り込んだ。しかし、プラスチック廃棄物は、すべての道筋において等しく利用可能な資源であると仮定した。プラスチックのリサイクルは、不適切に管理されたプラスチック廃棄物や、焼却による温室効果ガス排出を削減するために不可欠であると考えられる。そのため、すべての道筋で高いリサイクル率を想定した。また、すべての道筋において低排出電力への十分なアクセスを仮定した。これらの道筋の概要は以下の通りであり、図6に要約する。

- ・ **道筋1：豊富なバイオマスと豊富なCCS** – この道筋では、化学産業が豊富なバイオマスと豊富な炭素回収・貯留（CCS）を利用可能であると仮定する。
- ・ **道筋2：豊富なバイオマスと限定的なCCS** – 道筋1とは対照的に、この道筋では、化学産業におけるCCSへのアクセスは限られるが、バイオマスへのアクセスは道筋1と同じであると仮定している。
- ・ **道筋3：限定的なバイオマスと豊富なCCS** – この道筋では、バイオマスへのアクセスは限られるが、CCSへのアクセスは道筋1と同じであると仮定している。
- ・ **道筋4：限定的なバイオマスと限定的なCCS** – この道筋は、化学産業におけるバイオマスとCCSの両方へのアクセスが限定的な場合を表している。

このように資源への異なるアクセスを含むそれぞれのシナリオに対して、今世紀半ばまでに気候中立な操業が達成できるよう、コストを最小化しながら、温室効果ガスの排出を毎年削減し、世界の化学品需要を満たす最適な生産プロセスの組み合わせを算出した。得られた結果を第7章に示す。

	道筋 1	道筋 2	道筋 3	道筋 4
シナリオ説明				
バイオマスへのアクセス	豊富	豊富	限定的	限定的
CCSへのアクセス	豊富	限定的	豊富	限定的
全ての道筋に共通	ネットゼロ・エネルギーへのアクセス、技術へのアクセス、プラスチック廃棄物および化石原料、その他へのアクセス			

図6：4つの道筋における資源へのアクセスの説明。

6 気候中立な道筋のモデル化における科学的な根拠

本研究は、世界の各地域の業界専門家の広範な知見と、科学的モデリング手法を組み合わせたものである。この科学的モデリング手法は、化学産業向けに調整された科学的ライフサイクルアセスメントに基づくコスト最小化手法を中核としている。この方法論は査読付き学術論文として、すでにScience、PNAS、Natureなどの一流誌に掲載されている¹⁹。さらに、この科学的モデリング手法に基づく成果は、2022年に発行された気候変動に関する政府間パネル（IPCC）による最新の報告書の第11章「産業」に再掲されている²⁰。この科学的モデリング手法に関する詳細な説明は要望に応じて提供できるが、簡略化した説明を以下に示す。

概要として、この科学的モデリング手法は、開始年から気候中立が達成される年までの一定の期間において、世界の化学産業が最小コストで気候中立を達成する道筋を示す。具体的には、毎年削減される温室効果ガス排出目標量を達成しつつ、化学製品のライフサイクルにわたる全プロセスの総コストを線形モデルを使用して最小化し、コスト最小の道筋を算出するものである。各年の総コストには、資本支出（CAPEX）と操業コスト（OPEX）が含まれる。資本支出（CAPEX）は、プラント自体とプラントの運転に必要なインフラに関するすべての投資を含み、操業コスト（OPEX）は変動費と固定費の両方を含む。本モデルにおける変動費には、外部調達した原料、エネルギー、ユーティリティの市場価格が反映される。固定費には、メンテナンス、一般管理費、工場間接費、税金、保険、研究サービス、その他の関連費用などが含まれる。

この科学的モデリング手法では、CO₂やメタンなどIPCCが定義したすべての温室効果ガス²¹からの排出を考慮し、気候中立に向けた毎年の排出目標を満たすように設計されている。毎年の排出目標とは、気候中立への移行期間中の毎年の温室効果ガス排出に関するものであり、ICCA、Carbon Minds、ICISで合意された仮定に基づいている。

¹⁹ Raoul Meys et al., Science (2021), <https://doi.org/10.1126/science.abg9853>; Arne Kätelhön et al., Proceedings of the National Academy of Sciences (2019), <https://doi.org/10.1073/pnas.1821029116>; Christian Zibunas et al., Computers & Chemical Engineering (2022), <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107798>.

²⁰ Bashmakov et al., 2022: Industry. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, <https://doi.org/10.1017/9781009157926.013>.

²¹ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) , 2013, The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report, <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>.

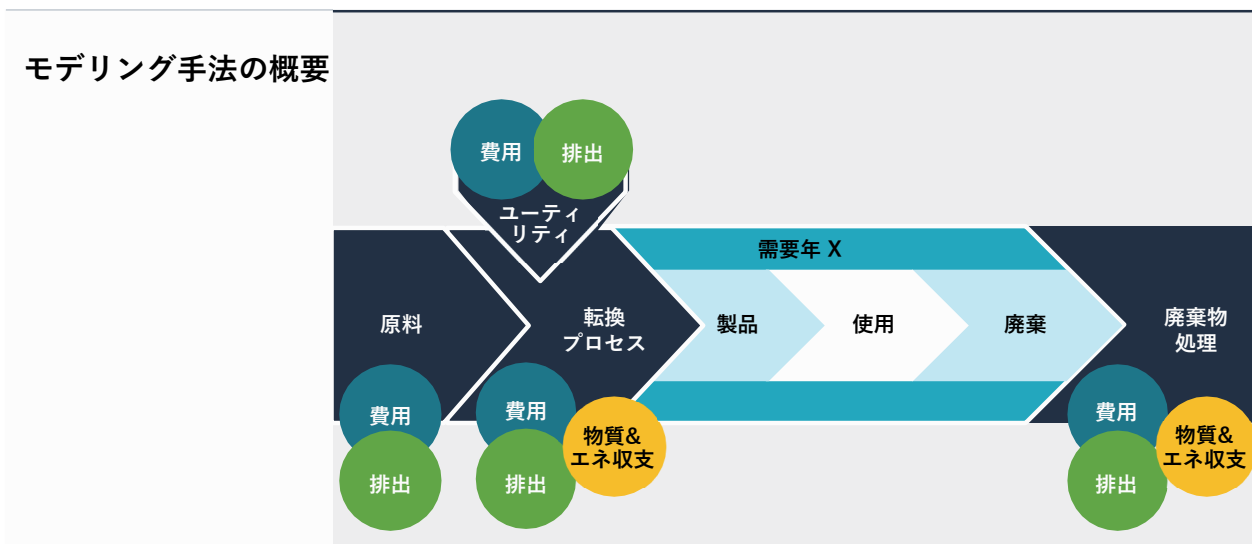


図7：化学産業のバリューチェーンにおいて、コストを最小化しながら気候中立な道筋を構築する科学的モデリングアプローチ。

気候中立への現実的な道筋を見いだすために、この科学的モデリング手法では、原料から化学製品の生産、廃棄物処理に至るまで、化学品のバリューチェーンの毎年の活動を詳細にモデル化している（図7参照）。これらのモデルは、対象となる18の化学品に関連する原料、化学品転換プロセス、廃棄物処理に関する詳細な物質とエネルギーのバランスに基づいている。例えば、メタノールは合成ガスから製造することができ、その際にはエネルギーとして電気、蒸気、熱エネルギーを使用し、冷却やプロセス水などのユーティリティも使用する。原料としては、メタノール製造には石炭や天然ガスなどが必要となる。エネルギーも原料も、モデル内の他のプロセスによって生産され、コスト最小の方法で供給される。このようにして、詳細な物質とエネルギーのバランスを用いながら、供給される原料やエネルギーを余らせることなく、毎年の最終製品需要と排出制限を満たしながら、検討対象期間を通してコストを最小化する最適な生産プロセスの組み合わせを見出す。

毎年、化学製品に対する特定の年間需要や廃棄物に対する一定の排出制限があり、バリューチェーンは年単位で定義される。年ごとの時間的依存性は「数学的なつながり」によって担保される²²。このような時間的依存性により、例えば、特定の年まで構築された生産能力のみが、翌年以降も使用可能となる。

最後に、バイオマスや分別されたプラスチック廃棄物のような代替原料やCCSへのアクセスの前提は、将来のさまざまな境界条件を反映するために、この科学的モデリング手法においては年単位で含まれる。これらの境界条件により、例えば、ある技術や原料が全く利用できなかったり、想定よりも利用できる量が少ないことが起こりうる。このよ

²² Christian Zibunas et al., Computers & Chemical Engineering (2022), <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107798>.

うに、我々の科学的モデリング手法を用いることによって、将来の化学産業が置かれるさまざまなシナリオと仮定を設定することができる。

我々の科学的モデリング手法は包括的であり、化学産業が取り得る気候中立への複数の道筋を示すことが可能である。本研究においては、コスト最小な気候中立への4つの道筋に焦点を当てている。次章ではそれぞれの道筋について、モデルから得られた結果（温室効果ガス排出量、炭素原料の種類別内訳、エネルギー需要、累積コスト等）を、今世紀半ばの気候中立な化学産業について示す。

7 世界の化学産業には気候中立への道筋が複数存在する

我々の結果は、4つの道筋のいずれを通じても、世界の化学産業は気候中立を達成することが可能であることを示している。これらの4つの道筋は、化学産業で使用される製品や生産プロセスの多様性と、将来の原料へのアクセス、政策、インフラ、経済性（資源やエネルギーの価格など）の不確実性を反映している。これらのパラメータはすべて、世界の地域によって異なる可能性が高い。このため、世界全体および各地域の化学産業に対して、単一の気候中立な道筋と結果を当てはめることはできない。図8は、CCSやバイオマスという重要資源への不確実なアクセスに由来する各道筋特有のパラメータと、すべての道筋に共通するパラメータの概要を示したものである。本研究の、以降のすべての結果は気候中立年（気候中立が達成される今世紀半ばの特定の年として定義）について、どのように気候中立を達成するか、総エネルギー需要、炭素原料消費量、年間操業コスト（OPEX）、累積資本支出（CAPEX）を示す。

	道筋 1	道筋 2	道筋 3	道筋 4
シナリオ説明				
バイオマスへのアクセス	豊富	豊富	限定的	限定的
CCSへのアクセス	豊富	限定的	豊富	限定的
全ての道筋に共通	ネットゼロ・エネルギーへのアクセス、技術へのアクセス、プラスチック廃棄物および化石原料、その他へのアクセス			

図8：4つの道筋における資源へのアクセスの説明。

気候中立の達成

図9は、世界の化学産業が様々な道筋で気候中立に到達した時点で、大気中への排出と大気からの吸収がどのようにバランスするかを示したものである。この図は各道筋について2つの棒グラフで示しており、一方の棒グラフは温室効果ガスの大気への排出量を表し、もう一方の棒グラフは温室効果ガスの大気からの吸収量を、CO₂換算ギガトン（Gt）で表している²³。例えば、バイオマス（またはDAC-CCU）由来の化学品が気候中立年に生産され、焼却された場合、（植物成長またはDAC-CCUからの）吸収量はマイナスの棒グラフで表示され、排出量はプラスの棒グラフで表示され、温室効果ガス排出量はネットゼロとなる。対照的に、CCSは大気への排出も大気からの吸収も行わないため、どちらの棒グラフにも表示されず、図の下部に別途表示されている。排出に関する積み上げ棒グラフの一番上の項目は、資源供給（原料とエネルギーの供給）に関連す

²³ 二酸化炭素等量（CO₂-equivalents）とは、二酸化炭素に対する地球温暖化係数に基づいて、様々な温室効果ガスの排出量を比較するために使用される指標である。Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013, The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report, <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>.

る温室効果ガス排出量である。原料関連の排出には、原料の供給（採掘・精製工程）、原料から化学品への転換工程、そして廃棄に関連する温室効果ガスが含まれる。エネルギー関連の排出は、化学のバリューチェーンにおけるエネルギー供給に起因する。図9では、採掘・精製工程からのエネルギー関連排出と原料関連排出は、資源供給からの温室効果ガス排出としてまとめられている。そのため、化学産業のバリューチェーン内で回収、利用、貯留されなかった、最後に残留する排出だけが、この項目には示されている。これらの残留排出は、技術的限界や経済性に基づく不完全なCO₂回収、あるいは回収されなかった他の温室効果ガス排出に起因する。気候中立を達成するためには、回収されなかった残留排出に対処することが不可欠である。図9の右の棒グラフは、主にバイオマスの成長や大気からの直接回収のメカニズムによって、大気から吸収されたCO₂を示している。この吸収されたCO₂は、バイオマスからであれ、大気からの直接吸収であれ、重要な炭素供給源となる。CO₂吸収メカニズムによって減少される残留排出とは異なり、プロセスから回収されたCO₂は地層中に隔離される。これは図9の各道筋の棒グラフの下には、年間に地中貯留されるCO₂の量が示されている。

我々のモデルでは、CO₂の地中貯留可能量が極めて重要な制約条件となる。貯留に適した地層は広範に存在するにもかかわらず、予測される貯留可能量は様々な要因によって大きく左右される。これには、貯留施設の計画・建設に伴う困難、必要とされる多額の初期投資、CO₂輸送・貯留インフラの開発を支援するための規制の枠組みの必要性などが含まれる。Energy Transition Commission (ETC) によれば、今後開発される地中貯留の潜在容量は、CO₂換算で年間5 Gtに達する可能性がある²⁴（原油増進回収 EORを含む）。とはいえ、この容量のすべてを化学産業が直接利用できるわけではない。私たちのモデルでは、科学文献のスクリーニングと業界の関係者との議論という包括的なプロセスに基づいて、化学産業に対して、保守的にCO₂貯留容量の25%から50%を割り当てている。このアプローチは、理論上予測される貯留可能量に対して、CO₂貯留へのアクセスを取り巻く不確実性を明確にすることを意図しており、理論上の潜在容量と実際の利用可能量との間のギャップに重点を置いている。CCS利用可能量の違いは、4つの道筋における排出プロファイルと削減方針に大きな影響を与える。道筋1と3（「豊富なバイオマスと豊富なCCS」と「限定的なバイオマスと豊富なCCS」）は、CCS能力に余裕があるため、より大量のCO₂を回収・貯留することができる。年間約2.5 GtのCO₂貯留能力は、どちらの道筋でもすべて利用される。このCCSの強みは、大部分が化学バリューチェーン内の転換プロセスと資源の供給プロセスから生じる排出の削減に活かされる。道筋1と3では、CO₂貯留量が豊富であるため、大気からのCO₂吸収はバイオマス経

²⁴ Energy Transitions Commission, "Carbon Capture, Utilisation and Storage in the Energy Transition: Vital but Limited", 2022, <https://www.energy-transitions.org/publications/carbon-capture-use-storage-vital-but-limited/>.

由のみとなり、大気からの直接CO₂吸収は行われない。

対照的に、道筋2と4（「豊富なバイオマスと限定的なCCS」と「限定的なバイオマスと限定的なCCS」）は、より厳しいCCS制約に対処しなければならない。これらの制約は、相対的に高い排出量につながり、特に産業のバリューチェーンの廃棄段階において顕著である。道筋4（「限定的なバイオマスと限定的なCCS」）では、主に化学品とプラスチックの焼却からの排出に対して限られた貯留能力を使用しているが、廃棄段階からの温室効果ガス排出量は、道筋2に比べて少ない。道筋2（「豊富なバイオマスと限定的なCCS」）では、1.1 GtのCO₂貯留能力は、主にバイオマスの発酵とガス化から排出される生物起源CO₂を貯留するために使われる。このような制約を回避しつつ、気候中立を達成するためには、バイオマスとDAC（直接大気回収）の戦略的適用が、道筋1および3と比較して増加する。

技術中立的手法に従い、我々のモデルでは、その潜在的な拡張性と柔軟性ゆえに、直接大気回収の能力に上限を課していない。一方で、バイオマスの利用は、再生可能な炭素原料として化学産業にとって極めて重要であるものの、独自の課題も抱えている。その中には、世界的な人口増加の中での土地の競合を通じての食料安全保障に関するリスクや、生物多様性の喪失も含まれる。その結果、持続可能な利用を確実にするために、我々のモデルでは、バイオマスは制約のある資源として扱われる。科学文献の広範なレビューと業界関係者との包括的な議論を通じて、バイオマスの持続可能な利用可能量は、バイオマスの量が限定的な道筋と豊富な道筋で、それぞれ年間8.5 EJと37.4 EJであると仮定した。この制約により、化学産業におけるバイオマスの利用は、環境、社会、産業のニーズ間の慎重なバランスを反映し、持続可能な範囲内に留まることが保証される。

道筋2は、バイオマス資源への豊富なアクセスを活用することで、気候中立に向けた戦略の中で、比較的高い残留排出量を可能にする。この豊富なバイオマスへのアクセスは、強固な緩衝機能となり、自然プロセスを通じてより大量のCO₂を大気から吸収する。対照的に道筋4は、バイオマスが限られているため、残留排出量を削減し、DAC（直接大気回収）技術に依存する必要がある。直接大気回収技術は、道筋4において、バイオマスから得られる炭素の不足分を補完して必要な炭素原料を補いつつ、気候中立を実現するために不可欠な技術となる。

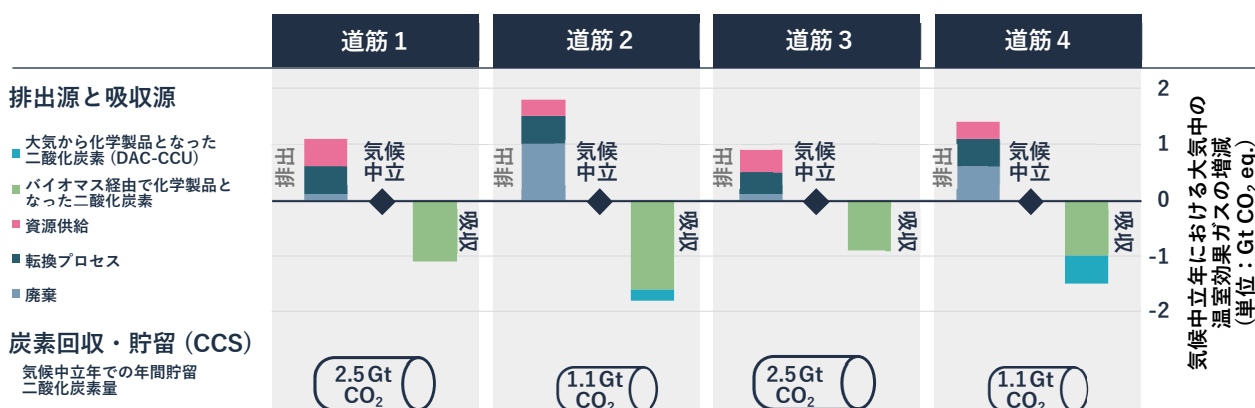


図9：図の上側 = 気候中立年における大気中の温室効果ガスへのインパクト。いずれの道筋でもライフサイクルでの残留排出（左側の棒グラフ）は、バイオマスの成長またはDAC（直接大気回収）による大気からのCO₂吸収（右側の棒グラフ）によってバランスされている。図の下側 = 気候中立年における地層中への年間貯留二酸化炭素量。

炭素原料の消費量

図10は、気候中立年における、炭素を含有する基礎化学品（エチレン、プロピレン、ベンゼン、トルエン、キシレン、メタノール）を生産に用いる炭素源を示している。この基礎化学品の総量は、y軸に示すように、約6億トンの炭素で構成されている。これらの基礎化学品は、ポリエチレンやポリプロピレンのような、他のすべての炭素系化学製品の生産に使用される。基礎化学品の他にも、アンモニアを生産するのに必要な炭素原料も図10には含まれている。アンモニア自体は炭素を含まないが、アンモニアを製造するために使用される水素は、一部の道筋では炭素を含む原料である天然ガスに由来する。道筋の違いを明確にするために、炭素の供給源が示されているが、これらの供給源は、リサイクル炭素、バイオマス炭素、大気回収炭素、化石炭素である。

リサイクル炭素：リサイクル炭素は、プラスチック廃棄物のマテリアルリサイクルおよびケミカルリサイクルから得られる。ケミカルリサイクルはナフサなどの化学品原料を代替するのに対し、マテリアルリサイクルはプラスチック生産用の再生原料を生産し、プラスチック生産に必要な基礎化学品の量を削減する。

バイオマス炭素：バイオマス炭素は、農業廃棄物やエネルギー向け専用作物などのバイオマスを加工し、化学品生産用の原料に転換することで得られる。例えば、エタノールはバイオマスの発酵によって生産され、その後、触媒を用いて脱水され、化学産業の基本構成要素であるエチレンが作られる。他にも、バイオマスをガス化して合成ガスとし、続いてメタノールに転換することもできる。このメタノールは、さらにオレフィンや芳香族に転換することができる。このようなフレキシビリティにより、バイオマスは様々な化学品生産に適応し、必要不可欠な原料となる。

回収炭素（CCU）：CO₂は、大気から直接（DAC）、または工場等の排出源から回収されるが、CCUは温室効果ガスの排出削減において重要な役割を果たす。排出源には、水素製造のためのメタン水蒸気改質やエチレンオキサイド製造のようなCO₂排出量の多いプロセス、発酵やガス化のようなバイオマス転換プロセスなど、さまざまなプロセスが含まれる。特に、バイオマス転換工程からCO₂が回収されると、システム内の炭素利用効率が向上する。この回収されたCO₂は低排出水素と組み合わせられ、メタノールやメタンなどのCO₂由来の化学品が生み出される。

化石炭素：化石炭素は、ナフサ、天然ガス、エタン、プロパンなどの化石原料に由来する。

リサイクル炭素は、すべての道筋で可能な限り最大限利用され、気候中立年では1億7600万～1億7700万トンの炭素量となる。この量は、OECDのGlobal Ambition政策シナリオ²⁵が示すリサイクル率から導き出されたものである。このリサイクル率は不適切な管理をされたプラスチック廃棄物を最小化するために必要なリサイクル率とされているが、他の政策によってもこのリサイクル率は達成可能であると考えられる。OECDのリサイクル率を、対象範囲のプラスチックであるポリエチレン（LD、LLD、HD）、ポリプロピレン、ポリエチレンテレフタレート（PET）、ポリ塩化ビニル（PVC）に適用した。一方で、ポリスチレン、ポリアミド、ポリカーボネート、ポリウレタンなどの他のプラスチックは本研究の対象外であるため、本研究には含まれていない追加のリサイクルを行う可能性もある。リサイクル率の向上には、マテリアルリサイクルと並行してケミカルリサイクルを実施する必要がある。マテリアルリサイクルは資源効率に優れている。一方、ケミカルリサイクルはより幅広いプラスチック廃棄物に対応し、ポリマーの劣化などの問題を克服することができる。分別されたプラスチック廃棄物を原料として使用することで、化学産業は環境影響を大幅に改善することができる。リサイクルの環境面でのメリットは、化学産業のバリューチェーンにおける温室効果ガス排出削減²⁶だけでなく、不適切に管理されたプラスチック廃棄物による汚染を軽減することにもつながる。したがって、廃棄物の収集・分別インフラの改善や経済的インセンティブによって、世界でリサイクル率を向上させることは、気候変動の緩和に貢献し、海洋などの生態系の汚染を軽減することになる。

²⁵ OECD, 2022, Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060, <https://doi.org/10.1787/aa1edf33-en>.

²⁶ Jeswani, Harish, et al. "Life cycle environmental impacts of chemical recycling via pyrolysis of mixed plastic waste in comparison with mechanical recycling and energy recovery." Science of the Total Environment 769 (2021) : 144483.

Hermanns, Ronja, et al. "Comparative life cycle assessment of pyrolysis-recycling Germany's sorted mixed plastic waste." Chemie Ingenieur Technik 95.8 (2023) : 1259-1267.

バイオマス炭素の使用量は道筋によって異なり、9500万～1億9300万トンとなる。バイオマスの利用可能量は、道筋3と4（「限定的なバイオマスと豊富なCCS」と「限定的なバイオマスと限定的なCCS」）では限られているが、道筋1と2（「豊富なバイオマスと豊富なCCS」と「豊富なバイオマスと限定的なCCS」）では豊富である。すべての道筋において、バイオマス発酵は最大限に利用され、バイオマスが豊富な道筋1と2では1億1800万トンの炭素が供給され、バイオマスへのアクセスが限られている道筋3と4では2700万トンの炭素が供給される。発酵に加え、道筋2、3、4ではバイオマスのガス化が利用され、7500万トンの炭素（道筋2「豊富なバイオマスと限定的なCCS」）、6800万トンの炭素（道筋3「限定的なバイオマスと豊富なCCS」）、9700万トンの炭素（道筋4「限定的なバイオマスと限定的なCCS」）を供給する。ガス化は主に、プロピレンとベンゼンを生産するために使用される。ガス化の利用量は、プロピレンとベンゼンを生産する他の選択肢の影響を受けて、道筋によって異なる。例えば、道筋2（「豊富なバイオマスと限定的なCCS」）では、ベンゼンだけがガス化によって生産され、プロピレンは発酵によるバイオマス由来のエチレンから生産される。豊富なCCS能力を用いる道筋3では、ベンゼンとプロピレンは化石原料から生産される。

回収された炭素は、CCSへのアクセスが制限されている道筋2と4（「豊富なバイオマスと限定的なCCS」と「限定的なバイオマスと限定的なCCS」）で使用され、それぞれ4900万と1億600万トンの炭素となる。いずれの道筋でも、回収されたCO₂と低排水素からメタンが生産される。このメタンは、天然ガスのパイプラインと天然ガスのプロセスに供給され、天然ガス総需要のそれぞれ66%と80%を代替する。道筋2（「豊富なバイオマスと限定的なCCS」）では、回収された炭素はメタン（炭素量4900万トン）の生産にのみ使用され、道筋4（「限定的なバイオマスと限定的なCCS」）では、回収された炭素はメタン（炭素量8900万トン）とメタノール（炭素量1700万トン）の生産に使用される。メタノールはメタノール需要をまかなうだけでなく、オレフィンやベンゼンなどの基礎化学品を生産するために使用される。

最後に、化石炭素は、1億8600万～3億3500万トンの炭素量で、気候中立年において依然として最大級の炭素供給源となる。このように化石原料を大きな割合で使用することは、すべての道筋でCCSを使用することによってのみ可能となる（図10参照）。このため、限定的なCCSを用いる道筋2と4よりも、豊富なCCSを用いる道筋1と3では化石炭素をより大きな割合で使用している（道筋1、2、3、4の化石炭素の割合はそれぞれ60%、31%、63%、33%）。しかし、どの道筋においてもCCSは最大限利用され、貯留容量の制限（道筋2と4）、または技術的制限（道筋1と3）による制約を受ける。CCSが豊富な道筋では、CCSの潜在能力を最大限に活用することで、化石炭素の使用を増やし、化石炭素を炭素含有化学品以外にも利用できるようにする。ここでは、化石炭素は天然ガス由来のアンモニア（アンモニア製造用の化石炭素由来の水素）の生産にも使用され、

「豊富なバイオマスと豊富なCCS」の道筋1では1億3900万トン、「限定的なバイオマスと豊富なCCS」の道筋3では1億3100万トンが、化石炭素の追加需要となる。

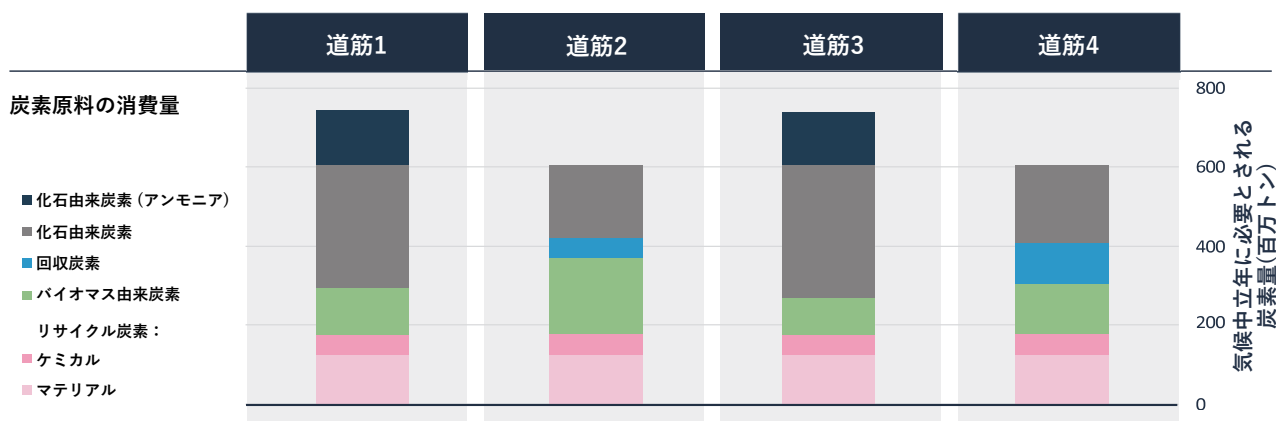


図10：本研究の対象範囲の化学品の需要をまかなうために、気候中立年に必要とされる炭素原料の内訳。炭素原料はリサイクル炭素（マテリアルおよびケミカル）、バイオマス由来炭素、化石炭素、アンモニア生産用の化石炭素として分類される。道筋1と3においてアンモニア生産で必要となる化石炭素は図1には含まれていないが、図10には示されている。

総エネルギー需要

図11は、気候中立年における総エネルギー需要の内訳を示し、低排出電力と熱エネルギーに分けることができる。熱エネルギーは、低温、中温、高温の熱に分類され、それぞれが200℃未満、200℃以上500℃未満、500℃以上として定義される。この総エネルギー需要には、基礎化学品の生産から化学製品への転換を経て、リサイクルのような廃棄物処理プロセスに至るまで、化学工業のプロセスに必要なすべてのエネルギー投入が含まれる。

低温・中温の熱の需要は、すべての道筋において一定である。低温・中温エネルギーは、基礎化学品からプラスチックへの加工など、多くの化学プロセスで使用される。さらに、低温・中温の熱は、CO₂回収触媒の再生など、新たなプロセスでも必要とされる。低温・中温の熱は、バイオマスやCCSと組み合わせた化石燃料の直接燃焼、原子力エネルギー、低排出電力によるヒートポンプ、抵抗加熱ヒーター、蒸気ボイラーなど、さまざまな供給源から供給することができる。

一方、高温の熱エネルギーの需要は、道筋によって異なるが、常に最大の割合を占めている。高温熱エネルギーは、例えば基礎化学品製造のためのスチームクラッカーなど、所望の温度に達するために燃焼を必要とする。燃焼エネルギーには、CCSと組み合わせた化石燃料や化学プロセス由来の燃料ガス、バイオマス、低排出水素などの供給源があり得る。したがって、最適なエネルギー源は、各地域の利用可能なエネルギー源とプロセス設計に依存する。道筋1と3では高温エネルギーの割合が高いが、これは天然ガスや

ナフサのような化石原料から生産されるアンモニアや基礎化学品の生産量が大きいことに由来する。

対照的に、道筋2と4は、CCSへのアクセスが限られているため、アンモニア、炭素回収・利用、その他の水素の需要に対応する低排出水素を製造するために、莫大な追加電力を必要とする。

低排出電力は、気候中立な化学産業において、既存のプロセスや新たなプロセスを動かすために、いずれの道筋で必要とされる。低排出電力を必要とする新たなプロセスには、回収した二酸化炭素を圧縮して地層への輸送・貯留するプロセスや、電力駆動の蒸気ボイラーが含まれる。低排出電力は、化学産業が気候中立に到達するための重要な要件であるが、その供給は各地域の供給力に左右される。

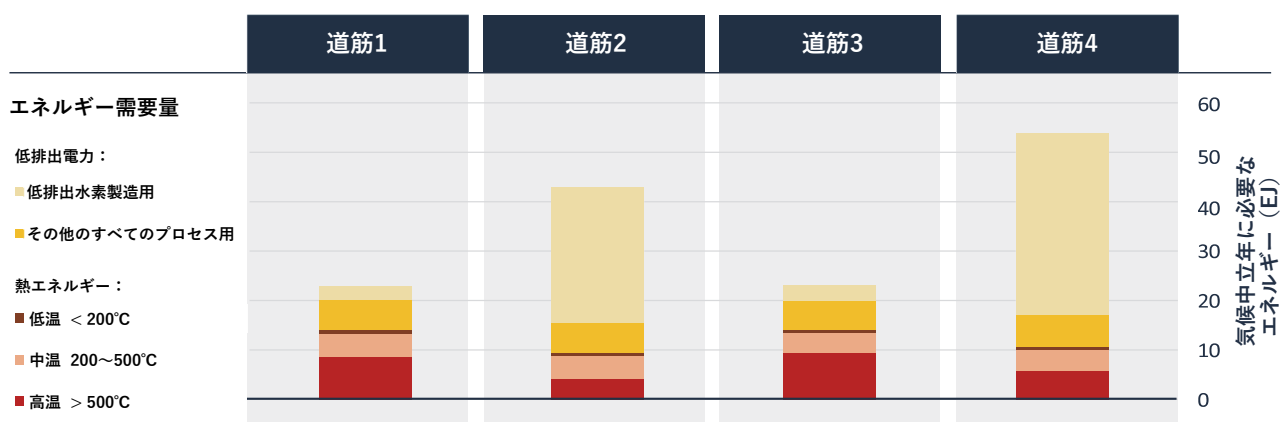


図11：各道筋における、気候中立年におけるエネルギー需要。基礎化学品の生産から、他の化学品への転換、リサイクルを含む廃棄物までの、種類別のエネルギー需要の合計と、アンモニア生産、炭素回収・利用等のための低排出水素の生産に必要な電力を示す。

年間操業コストと累積資本支出

図12は、兆米ドル単位で示される上段の年間操業コストと下段の累積資本支出の2つの部分で構成されている。年間操業コストの図は、気候中立年における各道筋の年間固定費と年間変動費を示している。年間固定費には、18の化学品のすべての中間化学品の生産だけでなく、リサイクルと廃棄物処理を含むバリューチェーンで操業するすべてのプラントの固定費が含まれる。変動費には、化学産業へのすべての資源・エネルギー供給コスト、廃棄物収集とCO₂貯留インフラ関連のコストが含まれる。図中のエラーバーは、持続可能なバイオマス、低排出電力、化石原料など、特定の変動コストに対する感度分析を示している。この感度分析では、持続可能なバイオマス、低排出電力、化石原料のいずれについても、ベースケースの予測コストを0.5倍と1.5倍に変化させた。累積資本支出は、気候中立年までのモデリング期間中に行われたすべての投資の合計である。

いずれの道筋でも、気候中立年における年間固定費は約0.4兆ドルである。固定費に

は、人件費、税金、保険、メンテナンス、その他の工場間接費など、工場操業時に発生するすべてのコストが含まれる。また、この固定費には18の化学品のバリューチェーンにおけるすべてのプラントの固定費が含まれ、すべての中間化学品の生産とリサイクルやその他の廃棄物処理業務が含まれる。

年間変動費は、各道筋で0.9兆ドルから1.7兆ドルの幅がある。変動費は、いくつかの主要なコストドライバーに影響される。これらのコストドライバーは、低排出電力の価格、バイオマスの価格、ナフサ、エタン、プロパン、天然ガスなどの化石原料の価格である。低排出電力価格はすべての道筋で重要なコスト要因であるが、バイオマス価格は道筋2（「豊富なバイオマスと限定的なCCS」）で特に重要である。また、化石原料価格は道筋1と3（「豊富なバイオマスと豊富なCCS」と「限定的なバイオマスと豊富なCCS」）の変動費に大きく影響する。道筋の主要なコストドライバーに関する感度分析によると、変動コストの範囲は0.3～0.9兆ドルであり、道筋2と4（「豊富なバイオマスと限定的なCCS」と「限定的なバイオマスと限定的なCCS」）のコスト範囲は、道筋1と3（「豊富なバイオマスと豊富なCCS」と「限定的なバイオマスと豊富なCCS」）のコスト範囲よりも2倍高い。化石原料はバイオマスなどの他の資源に比べて比較的低価格であると仮定されているため、コスト範囲の違いは原料価格の差から生じる。

各道筋の操業コストを比較すると、CCSを多用する道筋1と3（「豊富なバイオマスと豊富なCCS」と「限定的なバイオマスと豊富なCCS」）は、他の道筋に比べてコストが低いことがわかる。こうした全体的なコストの低さは、比較的低価格の化石原料をCCSと組み合わせて積極的に使用していることに起因している。対照的に、CCSが限定的な道筋2と4では、バイオマス、低排出水素、あるいは回収したCO₂と低排出水素の組み合わせなどの代替原料を使用するため、操業コストは比較的高くなる。特に、これらの道筋では、低排出水素を製造するために、低排出電力が大量に追加されるため、コストが高くなり、結果的に、道筋4（「限定的バイオマスと限定的なCCS」）の操業コストが最も高い。道筋2と4の操業コスト競争力を高めるには、安価な低排出電力が必要である。

累積資本支出も道筋によって大きく異なり、3.9～6.0兆ドルの範囲で1.5倍の開きがある。ここで、道筋2と3（「豊富なバイオマスと限定的なCCS」と「限定的なバイオマスと豊富なCCS」）の資本支出は5兆ドル前後と同程度であり、「豊富なバイオマスと限定的なCCS」の道筋2の資本支出が4.8兆ドルと若干少ない。したがって、バイオマスを多用する化学産業と化石原料と炭素回収・貯留を多用する化学産業では、累積資本支出は同程度になる可能性がある。累積資本支出が最も少ないのは道筋1（「豊富なバイオマスと豊富なCCS」）である（3.9兆ドル）。この道筋1では、バイオマスとCCSが豊富にあるため、コストと温室効果ガス排出削減ポテンシャルに関して最も効果的な技術を選択することができる。これは、既存の化石ベースの技術とコスト効率の高い代替技術を統合することができることを意味する。例えば、バイオマスの発酵は、バイオマスの

ガス化と比較して、資本支出は3分の1しか必要としない。したがって、バイオマスが入手可能であれば、発酵は大規模に利用される（「豊富なバイオマスと豊富なCCS」と「豊富なバイオマスと限定的なCCS」）。これに対し、「限られたバイオマスと限定的なCCS」の道筋4では、多くの新技術とインフラへの投資が必要となるため、累積資本支出が最も多くなる。

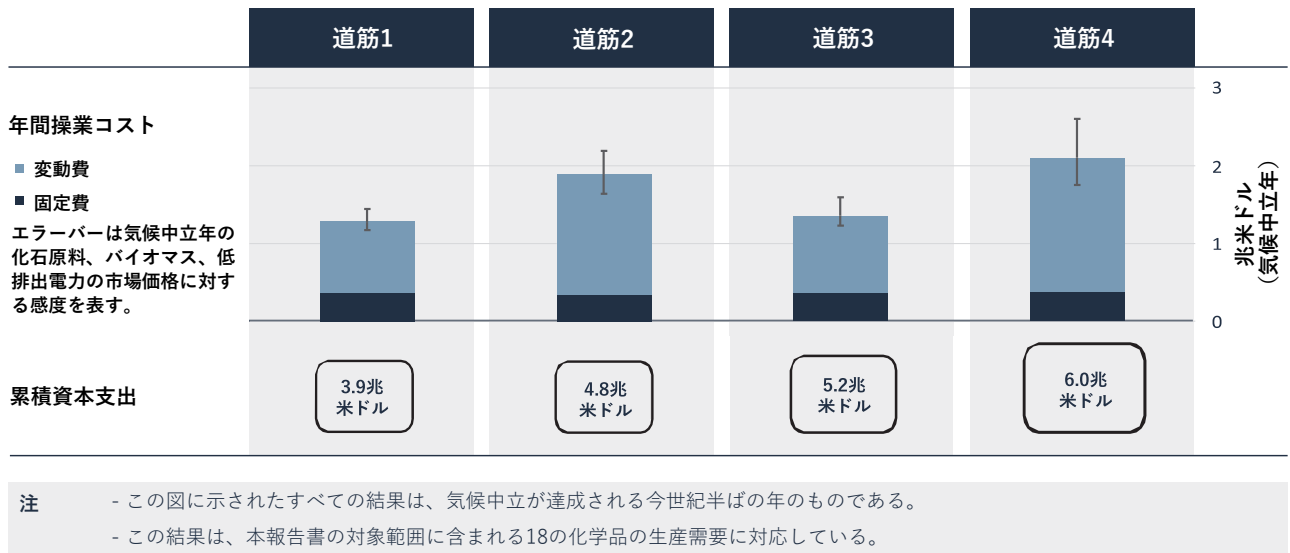


図12：各道筋における気候中立達成に必要なコスト。図の上段は、気候中立年における操業コスト（兆米ドル）を、固定費と変動費に分けたものである。年間固定費には、18の化学品のバリューチェーンで操業するすべてのプラントの固定費が含まれる。年間変動費には、すべての原料、エネルギー供給、廃棄物収集、CO₂貯留インフラ関連のコストが含まれる。さらに、エラーバーは、化石原料、バイオマス、低排出電力の価格に対する操業コストの感応度を示している。図の下段は、累積資本支出を兆米ドル単位で表したものである。

8 気候中立には、その実現を支える基盤が必要

本研究では、化学産業が気候中立へと移行するための4つの道筋を示した。いずれの道筋も、リサイクルや原料としてのCO₂、バイオマスの活用などの解決策を組み合わせたものである。しかし、これらの解決策を効率よく導入するためには、重要資源（プラスチック廃棄物、持続可能な方法で調達されたバイオマス、低排出水素、適切に規制された炭素回収・貯留（CCS）、安価な低排出エネルギー等）へのアクセス、支援政策など、実現を支える基盤が必要である。以下の各セクションでは、温室効果ガス削減への多面的なアプローチの必要性を明らかにしつつ、化学産業の気候中立への移行を支えるこれらの実現基盤それぞれの役割と、現在直面している課題を詳細に見ていく。また、これらの移行を促進する規制の枠組みとインフラ整備の重要性も強調し、これらの実現基盤を統合して導入することが、化学産業の気候中立への移行にとっていかに重要であるかを示すための土台を構築する。

プラスチック廃棄物へのアクセス

第7章で示したように、プラスチック廃棄物はいずれの道筋においても炭素原料として重要な役割を果たしている。図13は、プラスチックの生産から使用、廃棄までのライフサイクルを示している。廃棄段階において、プラスチック廃棄物は、埋め立て、エネルギー回収を伴う焼却、またはリサイクルに回される。プラスチック廃棄物の埋め立てや焼却は、炭素の不可逆的な損失につながるが、リサイクルすることによりプラスチック製品中の炭素を化学産業のバリューチェーンに戻すことができる。リサイクルは焼却による温室効果ガス排出を減少させ、不適切に管理された廃棄物による汚染を抑制する。このように、リサイクルは化学産業における炭素の循環を大幅に向上させ、温室効果ガス削減に二重のメリットをもたらす。

マテリアルリサイクルは、プラスチック廃棄物をその化学構造を変えることなく、直接、プラスチック製品の新しい原料にする。これにより、炭素を環境中に放出することなく、プラスチック経済圏の中に閉じ込めておくことができる。マテリアルリサイクルは、すでに確立された技術基盤を活用するが、いくつかの限界がある。例えば、リサイクルを繰り返すうちに、ポリマーの性能は劣化する傾向があり、その結果、用途に制限が発生する可能性がある。これは、加工条件に伴う劣化や、当初のプラスチック製品に使用された添加剤の存在による可能性がある²⁷。マテリアルリサイクルに比べ、ケミカルリサイクルはまだ始まって間もない産業であるが、マテリアルリサイクルが直面する課題のいくつかに対処している。ケミカルリサイクルは、プラスチック廃棄物を分子レ

²⁷ Ragaert et al., 2017: Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste; Waste Management; <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>

ベルの構成要素に分解し、それを化学原料として再利用することで、バージン材と同等の特性を持つ化学品やプラスチックを製造することができる。さらに、ケミカルリサイクルは、混合プラスチック廃棄物や汚染物が付着したプラスチック廃棄物など、より幅広いプラスチック廃棄物にも対応することができる。このような長所があるものの、ケミカルリサイクルは、化学構造を分解して新たにプラスチックを生産するために、バリューチェーン全体を通してより多くのエネルギーを必要とする。従って、バリューチェーン全体としてリサイクルするプラスチック廃棄物を最大化するには、マテリアルサイクルとケミカルサイクルを統合することが極めて重要である。

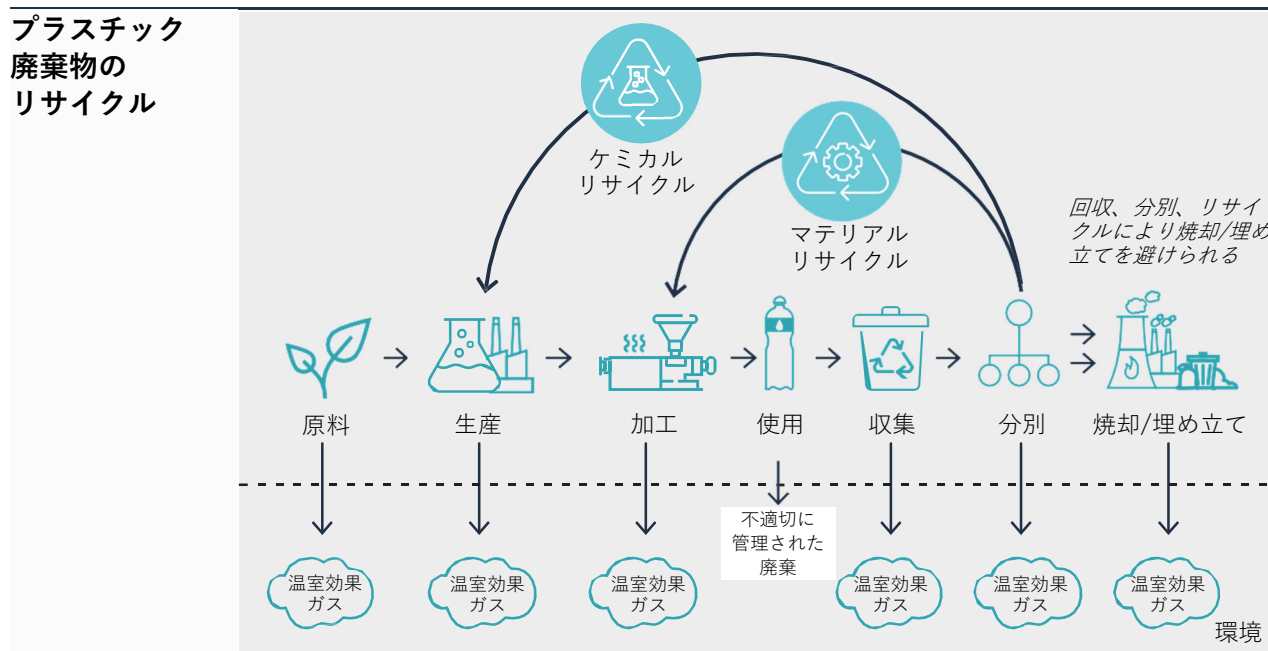


図13：プラスチックリサイクルの概要。リサイクルの実施により、環境負荷が低減され、バージンプラスチックへの依存度が低下し、バリューチェーン全体での温室効果ガス排出が削減される。なお、使用段階における排出は本研究の対象外である。

リサイクルには大きなメリットがあるものの、世界におけるリサイクル率は依然として低く、プラスチック廃棄物のわずか9%しかリサイクルされておらず、22%以上が不適切に廃棄されている²⁸。プラスチックに対する世界的な需要が伸び続ける中、リサイクル率の向上は、プラスチックのリサイクルの利点を生かすためにますます重要になっている。そのためには、プラスチック廃棄物の収集と分別のための先進的なインフラへの投資とこれを支援する政策が必要である。これにより、環境汚染を減らすだけでなく、プラスチック廃棄物を化学産業の原料として効率的に再利用できるようになる。

要約すると、マテリアルリサイクル技術とケミカルリサイクル技術の導入は、化学産業における気候中立を推進するために不可欠であり、化学産業のバリューチェーン全体にわたって炭素排出を削減する機会を提供する。リサイクルを推進することで、不適切に

²⁸ OECD, 2022, Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060, <https://doi.org/10.1787/aa1edf33-en>.

管理されたプラスチック廃棄物と環境負荷も削減される。しかし、こうしたメリットが実現されるかどうかは、先進的な廃棄物管理インフラの導入、革新的なリサイクル技術への投資、そしてこれらの取り組みを促す適切な政策とインセンティブの設定に左右される。

持続可能な形で調達されたバイオマス

第7章の結果は、4つの道筋すべてにおいて炭素供給源としてのバイオマスの重要性を示し（図10参照）、気候中立への移行を推進する上でのバイオマスが果たす役割の大きさを示している。図14は、バイオマスによる炭素循環の原理を示している。バイオマスはその成長段階で、大気中のCO₂を取り込む。このバイオマスは、バイオマス発酵とそれに続く触媒による脱水で作られるエチレンや、バイオマスのガス化とそれに続くメタノール合成で作られるメタノールのような基礎化学品を生産するための原料として、化学産業で利用することができる。

バイオマスは、原料としての役割に加え、化学産業におけるエネルギー源としての役割もあり、高温熱源、低排出電力、蒸気の供給に使うことができる。バイオマスがバリューチェーンを経て廃棄される過程で、バイオマス由来製品中に蓄積された炭素は、CO₂やその他の温室効果ガスとして大気中に放出され、生物由来の炭素循環が完成する。

このサイクルは、大気から取り込まれた生物由来の炭素が、最終的に大気中に戻され、循環システムを維持するというバランスを生み出す。さらに、化学品の転換プロセスや廃棄段階での炭素回収・貯留（CCS）技術と統合することで、回収した炭素を大気中に戻すのではなく、貯留することにより、化学産業のバリューチェーンとしての排出をマイナスにして、炭素の吸収源となることができる。

バイオマス

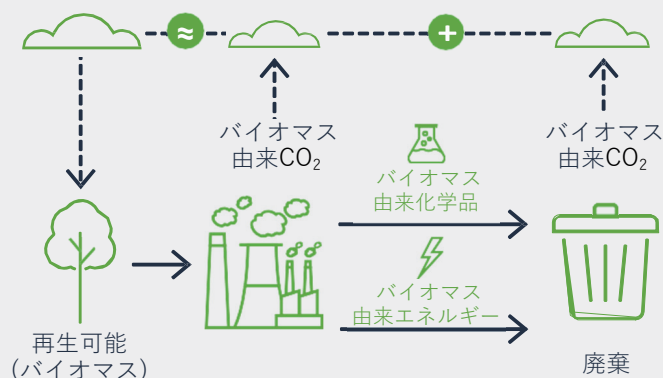


図14：化学産業における持続可能な原料としてのバイオマスのライフサイクル。光合成によるCO₂回収から、バイオマス由来の化学品とエネルギーの生産、そして最終的には廃棄まで、正味の排出を最小限に抑え、循環型経済の実践を促進するバイオマスの役割を示している。

一方で、温室効果ガス排出削減のために化学産業でバイオマスを利用することには大きな可能性があるが、課題もある。バイオマスの栽培に際しては、食料安全保障や森林破壊のリスクを避けるため、土地利用には細心の注意が必要である。Energy Transitions Commissionは報告書²⁹において、持続可能なバイオマスは環境悪化を避けるための厳しい基準を満たさなければならないことを強調している。また、代替手段が存在しない場合にのみバイオマスを利用することを提唱している。持続可能なバイオマス利用のためのこの枠組みは、化学品生産用のバイオマスの供給と、維持すべき厳格な持続可能性要件との間に緊張関係があることを示している。従って、極めて重要なことは、化学産業などにおいて、バイオマスを素材として使うのか、あるいは炭素供給源として利用するのか等に関して、優先順位を付けることである。エネルギー源としてではなく、原料や素材としてバイオマスを使用することは、製品中に炭素を保持し、炭素の保持期間を延ばすこととなるため、より有効であるとみなされることが多い。

気候中立を達成するためのバイオマスの活用という課題に取り組む上で、化学産業にとって、持続可能かつ低コストで供給可能なバイオマスへの安定的なアクセスを確保することは極めて重要である。

要約すると、バイオマスの利用は、化学産業のバリューチェーンにおける温室効果ガス排出を削減する有望なアプローチである。強固なインフラ、革新的な技術、持続可能な慣行に支えられたバイオマスの戦略的利用は、化学産業が気候中立に向けて発展していくための重要な要素である。しかし、バイオマス資源を慎重に管理した上で、経済面と環境面での目標と整合させることが必要である。

²⁹ Energy Transition Commission (2021), "Bioresources Within A Net-Zero Emissions Economy"; <https://www.energy-transitions.org/publications/bioresources-within-a-net-zero-economy/>.

低排水素

本研究の結果は、バイオマスとリサイクルに加え、低排水素が気候中立な将来の化学産業において重要な役割を果たすことを示している。また、多様な原料ミックスを持つことの重要性を強調している。低排水素は、アンモニアやメタノールの生産に伴う温室効果ガス排出を削減するための貴重な原料である。さらに、低排水素は、回収したCO₂を化学原料に格上げするためにも使用可能であり、炭素回収・利用（CCU）プロセスを通じて炭素ループを閉じることができる。図15はCCUの基本原理を示しており、CCUは工場排出源からのCO₂、あるいは大気中のCO₂を直接大気回収（DAC）して利用することができる。CCUによって生産される原料にはメタンやメタノールがあり、これらは他の数多くの化学製品の生産に使用される。

ここで重要なのは、化学製品の製造時や廃棄時に大気中に排出されるCO₂は、以前に回収され原料として使用されたCO₂が元になっている、ということである。直接大気回収（DAC）によって回収された炭素が廃棄時に大気中に排出されるのであれば、炭素循環が生まれる。さらに、大気中に排出せずにCO₂回収・貯留が化学製品の製造時や廃棄時に適用されると、炭素が大気から締め出され、化学産業のバリューチェーンとしての排出を正味でのマイナスとするような炭素吸収源が形成される。

化学産業が低排水素のメリットを効果的に活かすには、安価で供給が安定している低排水素へのアクセスを必要である。特に重要なのは、水素の製造、貯留、輸送のための強固で低コストのインフラの開発であり、水素の特性をうまく取り扱い、水素の漏洩を最小化し、安全かつ効率的に使用者に供給できるように設計されていなければならない。

最後に、低排水素への移行にインセンティブを与え、経済的障壁を克服し、水素のインフラと技術への投資を促進するためには、支援的な規制の枠組みと財政的支援が不可欠である。これらの施策により、気候中立を実現する重要な手段として、化学産業は水素の潜在能力を最大限に活用できるようになる。

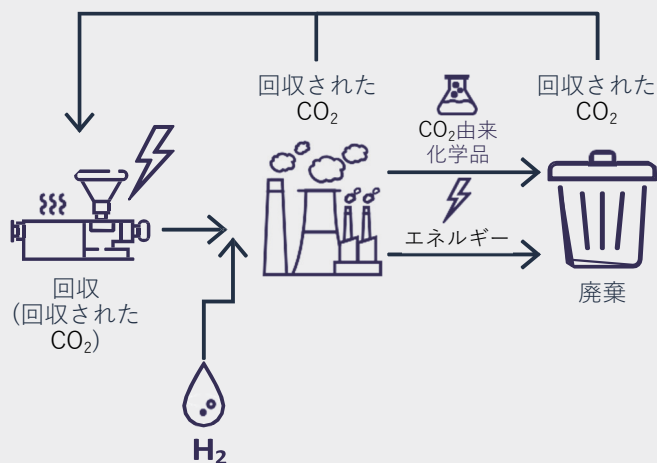
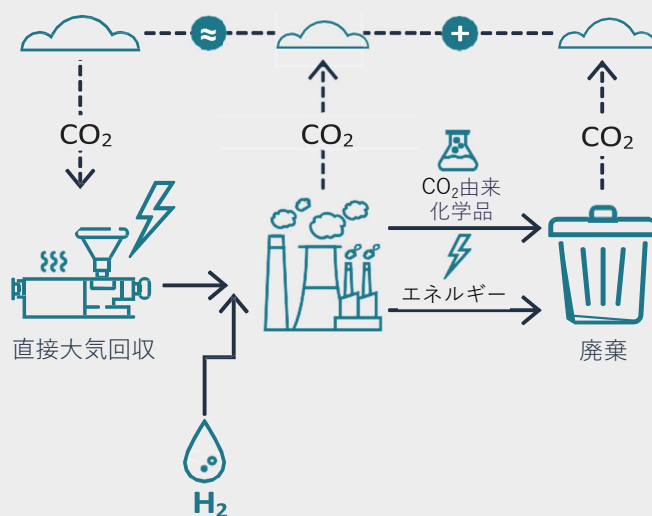
工場等の排出源
+ CCU直接大気回収
+ CCU

図15：化学産業のバリューチェーンから排出される高濃度のCO₂の回収（図の上側）と、直接大気回収による炭素回収・利用（CCU）（図の下側）は、低排出水素と組み合わせることにより、バリューチェーンの温室効果ガス排出を最小限に抑えた基礎化学品を供給する。化学産業のバリューチェーンからの高濃度排出源には、メタン水蒸気改質、エチレンオキサイド製造、廃棄物の焼却などが含まれる。

化石原料および適切に規制された炭素貯留

4つの道筋はいずれも、化石原料を炭素回収・貯留（CCS）と組み合わせて利用している（図10参照）。気候中立な化学産業においては化石資源の使用が続くと予測されることから、包括的な炭素管理戦略が重要であり、CCSが環境負荷を軽減する不可欠な要素であることを示している。

図16はCO₂回収・貯留の原理を示している。CCS技術は、化学産業のバリューチェーン内の排出源で二酸化炭素（CO₂）を回収し、CO₂が大気中に排出されるのを防ぐ。CCSのプロセスは、回収、輸送、貯留という3つの主要ステップに分けることができる。回収段階では、例えば酸化エチレンの生産、バイオマスのガス化や発酵、あるいは化学品

やプラスチックの廃棄などにおいて、発生する他のガスからCO₂を分離する。回収されたCO₂は圧縮され、通常はパイプラインで地中貯留に適した場所まで輸送される。この地中貯留は、大気から隔離されたCO₂を、地下深くの岩盤で確実に封じ込めることにより行われる。

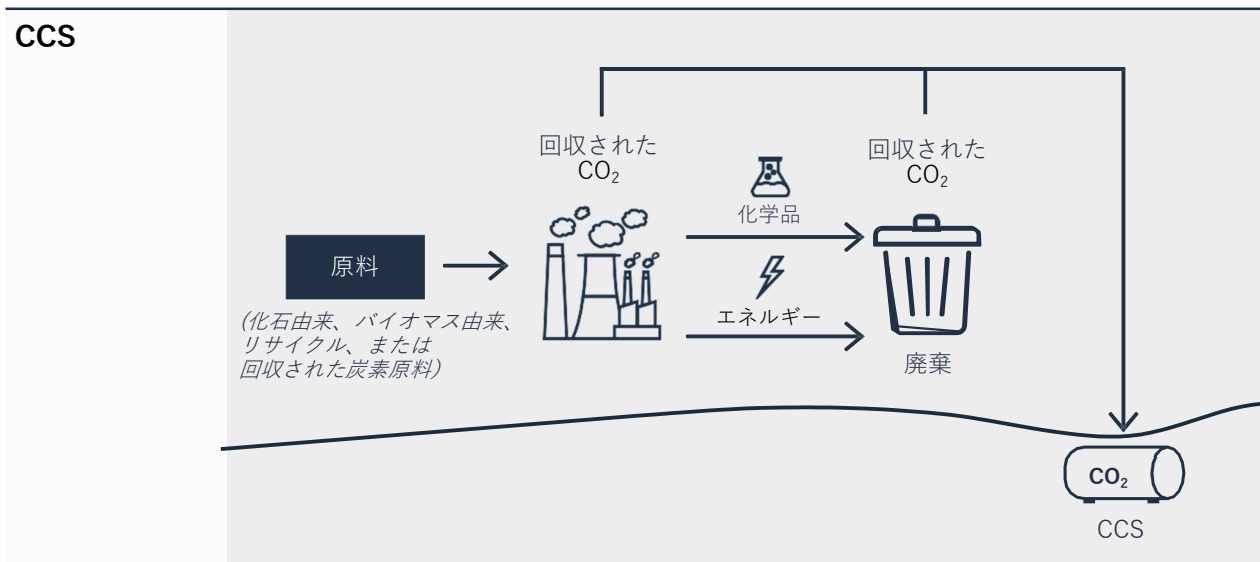


図16：化学産業における炭素回収・貯留（CCS）プロセス。化石炭素、バイオマス由来炭素、リサイクル炭素、回収炭素など、さまざまな原料ソースからのCO₂排出の回収を示す。この図は、バリューチェーンで排出されるCO₂がどのように回収されるかを示している。

しかし、その潜在的なメリットにもかかわらず、化学産業におけるCCSの導入はいくつかの課題に直面している。重要な課題のひとつは、CCSプロジェクトの計画、建設、運転に必要な期間の長さである。さらに、専用のCO₂輸送・貯留インフラの開発には、多額の先行投資と規制面での支援が必要となる³⁰。

CCSを排出削減の実現基盤として効果的に活用するためには、化学産業は、信頼性が高く低コストなCCSへのアクセスを必要としている。大規模なCCSプロジェクトの実現に伴う課題の克服には、プロジェクト開発を促進するための規制プロセスの合理化、輸送と貯留のニーズを支えるためのCO₂インフラへの投資、利害関係者からの信頼と支持を構築するための取組みが必要となる。さらに、回収・輸送・貯留技術における技術的進歩は、CCSの効率と費用対効果を改善するために不可欠である。

安価な低排出エネルギー

我々の分析によれば、気候中立な化学産業を実現するためには、低温から高温の熱源、そして低排出の電力に至るまで、広範なエネルギーが必要である（第7章参照）。CCSと組み合わせた化石燃料、バイオマス、低排水素、原子力、CCSと組み合わせた廃棄

³⁰ Energy Transition Commission (2022), “Carbon Capture, Utilisation and Storage in the Energy Transition: Vital but Limited”; <https://www.energy-transitions.org/publications/carbon-capture-use-storage-vital-but-limited/>

物焼却、低排出電力など、さまざまなエネルギー源が、これらの広範なエネルギー需要を満たし得る。

具体的には、高温の熱を利用するプロセス、例えば既存のクラッカーや改質器の場合、500°C以上の温度を供給するためには、通常は燃焼が必要となる。化石燃料は、炭素回収・利用・貯留（CCUS）技術と組み合わせれば、このようなプロセスにとって有効なエネルギー源となる。あるいは、バイオマス、低排出水素、CO₂や低排出水素またはバイオマスから得られる合成燃料も有効な選択肢である。

エネルギーのポートフォリオは、原子力による低排出電力や、CCSと組み合わせたプラスチック廃棄物のエネルギー回収など、低・中温の熱や蒸気の供給に適した供給源によって、さらに多様化することができる。

さらに、低温、中温の熱や蒸気はヒートポンプ、電気ボイラー、電気抵抗発熱体などを利用した直接電化によっても発生させることができる。ここで、直接電化により生成されたエネルギーからの排出は、消費電力の排出係数に依存することに注意する必要がある。したがって、エネルギーの直接電化が温室効果ガス排出の削減につながるのは、低排出電力が利用できる場合のみである。世界のエネルギー産業がより多くの再生可能エネルギーを活用するにつれて、変動のない安定的な電力、そしてエネルギーへのアクセスの確保が、極めて重要になる。

要約すると、エネルギー源と技術の選択は、各地域でアクセス可能なエネルギー、既存のインフラ、政治的インセンティブに大きく依存する。このことは、化学産業が効率的かつ効果的に気候中立目標を達成するには、各地域の諸条件と地球環境目標を考慮した調和的アプローチが必要であることを示している。

9 要約と結論

主要製造業である化学産業は、私たちの日常生活に欠かせない製品を生産し、他のセクターの温室効果ガス排出削減を支えている。気候中立を達成するためには、化学産業はエネルギー消費と炭素含有原料（炭素はほとんどの化学製品の重要な構成要素である）のそれぞれに由来する温室効果ガス排出を削減するという2つの課題に直面しているが、現在は、エネルギーと原料のどちらも化石由来の資源に依存している。従って、この課題を克服するには、革新的な解決策と、化学のバリューチェーン全体および政策立案者との連携が必要である。

本報告書では、世界の化学産業が今世紀半ばまでに気候中立に到達するための定量的な道筋を検討した。そのために、様々な査読付き学術論文で採用されてきた科学的モデリング手法を使って、化学製造に使用される多種多様な原料に注目した。我々は、気候中立への低コストな移行を確実にするために、技術に対して中立的な立場で、かつコストを最小化するアプローチを採った。特定の技術的選択肢を排除することは、化学産業が先の2つの課題に取り組む能力を低下させ、気候中立的な化学製品をより高価なものとする可能性がある。その結果、社会全体としての気候中立への移行を遅らせる可能性があるため、このアプローチを選択した。

本研究の1つ目の重要な知見は、世界の化学産業が気候中立を達成するには、複数の道筋が存在するという点である。資源へのアクセスや技術の進歩などの影響を想定して、本研究では4つの道筋を示した。この結果は、世界の化学産業にとって万能な解決策が存在しないことを示すものである。また、各地域の置かれた状況や資源へのアクセスに合わせた戦略の必要性を明らかにするものである。

本研究の2つ目の重要な知見は、化学産業の気候中立への移行を後押しする上で、実現を支える化学産業外部の基盤が極めて重要な役割を果たすということである。プラスチック廃棄物、持続可能なバイオマス、低排出水素、適切に規制された炭素貯留、安価で信頼できる低排出エネルギー等の資源へのアクセスは、化学産業のバリューチェーン全体での温室効果ガス排出を大幅に削減するための重要な実現基盤であることが示された。化学産業は、炭素回収・利用（CCU）により、化学産業のバリューチェーン以外のセクターからの排出を削減する可能性さえ秘めている。しかし、こうした実現基盤の潜在能力を最大限に引き出すには、包括的な政策枠組みや、強固なインフラ投資、セクターを超えた利害関係者の協力が必要である。

本研究は、化学産業の気候中立への移行に関する課題の複雑さと、技術革新、政策支援、産業界の連携を活用する多面的なアプローチの必要性を明らかにしている。これらの知見を活用し、本研究で特定された実現基盤に支えられることで、世界の化学産業は気候中立への道を開き、地球規模での気候変動対策に貢献することができる。