

S Y S T E M I Q

# 持続可能な 地球の未来を築く 日本の化学産業

## Planet Positive Chemicals in Japan

温室効果ガス排出のネットゼロを実現し  
さらなる役割を果たす

## 概要

本レポートでは、日本の化学産業が温室効果ガス排出をネットゼロ（スコープ 1, 2, 3）にするための定量的なパスウェイ（Pathway, 道筋）を提示し、これを実行する上での日本の強みと弱みを踏まえた戦略、そして将来の化学産業の役割を提案する。これらは日本と同様の制約を持つ他の国や地域の化学産業にも適用できる可能性がある。

## 著者



### 石井 菜穂子

グローバル・commons担当総長特使  
未来ビジョン研究センター特任教授  
グローバル・commons・センター・ダイレクター

### 金沢 大輔

共同研究員（共同主著者）

SYSTEMIQ

### Martin Stuchtey

SYSTEMIQ 創業者  
プロジェクト・ダイレクター

### Eveline Speelman

パートナー

### Sophie Herrmann

パートナー

### Alexandre Kremer

アソシエイト（共同主著者）

### Andreas Wagner

アソシエイト（共同主著者）

### Jane Leung

アソシエイト

### Peter Goult

（プログラム・ダイレクター、共同主著者）

### Min Guan

アソシエイト

### Shajeeshan Lingeswaran

アソシエイト

### Pim Sauter

アソシエイト



### 菊池 康紀

教授

## 謝辞

### 松方正彦

早稲田大学

### 尾下 優子

東京大学

### Wenchao Wu

国際農林水産業研究センター  
(JIRCAS)

本研究は三菱ケミカル株式会社との共同研究の下で資金提供を受けました。

## ライセンス

[CC BY 4.0](#)

## ご注意

本レポートはディスカッションのための材料として提供されており、一般的な情報の提供を目的としていますので、投資等の助言として使用されるべきものではありません。本レポートに含まれる情報については正確性を確保するよう努めましたが、情報は「現状のまま」提供され、その正確性や完全性に関して明示的または黙示的な保証はありません。本レポートで述べられている見解は著者個人のものであり、必ずしも著者の所属機関や資金提供者の見解を反映するものではありません。

# 前書き (本レポートの執筆理由)

日本の化学産業に対して、スコープ 1, 2, 3 のネットゼロを求めるプレッシャーが高まっている：2050年までに温室効果ガス (GHG) の排出をネットゼロにするという目標を菅首相 (当時) が 2020 年に発表して以来、日本は関連する戦略や法律を整備してきた。これらはイノベーションを支援し、インフラ整備や事業開発を促進し、カーボン・プライシングを導入しつつ、支援と併せて民間投資を促すことを目指している。これらの施策の効果が明らかになるまでには時間を要するかもしれないが、政府はネットゼロへの移行に向けた初期の枠組みを示した。しかし、日本の化学産業におけるネットゼロ (スコープ 1, 2, 3) へのロードマップは不透明なままである。さらに、化学産業はプラネタリー・バウンダリーズ<sup>1</sup> で示される、気候変動以外のサステナビリティ課題に対しても、課題間で負荷を転嫁することなく、取り組む必要がある。その一方で、グローバルビジネスにおいては、2021 年に開催された COP26 以降、スコープ 1, 2 のネットゼロに加え、スコープ 3 のネットゼロへの要求が明確になってきた。例えば、GFANZ<sup>2</sup> という金融機関の巨大なアライアンスでは、金融機関が投資先に対してスコープ 1, 2, 3 のネットゼロの達成を目標とするよう働きかけ始め、PACT<sup>3</sup> というアライアンスの下では、サプライチェーン川下に位置するブランドオーナー等がスコープ 3 排出の透明化を推進している。従って、日本の化学企業はこれらへの対応が遅れると、国際金融や国際サプライチェーンから排除されるリスクが高まる。

**本レポートでは、現在の化学産業と望ましい未来との間のギャップを埋めるために、スコープ 1, 2, 3 のネットゼロを実現するための定量的なパスウェイ (pathway, 道筋) を示し、加えてそれを実現す**

**るための戦略やアクションを示すことを目指す：**一般的に、化学産業のネットゼロは困難であることされている。それは、化学品製造に必要な膨大なエネルギーをネットゼロに加えて、炭素を含む化学品原料についても対応が必要となることが、その理由の1つである。この課題に対処するため、我々の研究グループは以前、世界の化学産業がスコープ 1, 2, 3 のネットゼロを達成するための定量的パスウェイを示すレポート<sup>4</sup> と査読付き学術論文<sup>5</sup> を執筆した。今回のレポートでは、最近公表された新たな査読付き学術論文<sup>6</sup> に基づき、日本に焦点を当て、日本の化学産業がスコープ 1, 2, 3 のネットゼロを達成するための定量的パスウェイを示す。さらに、日本の化学産業のネットゼロへの移行を遅らせている不確実性 (ネットゼロ化学品に対する将来の需要や、その製造に適した技術など) に光を当てつつ、不確実性が存在する中でも前進できるように、定量的パスウェイから得られた知見と日本の化学産業に関する知見を組み合わせることで、戦略やアクションを示し、現在の日本の化学産業と望ましい未来との間の橋渡し役となることを目指す。

本レポートが、日本の化学産業の潜在力を引き出し、リーダーシップと行動を喚起し、世界の化学産業をサステナブルな化学産業に先導することを願っている。



## 石井菜穂子

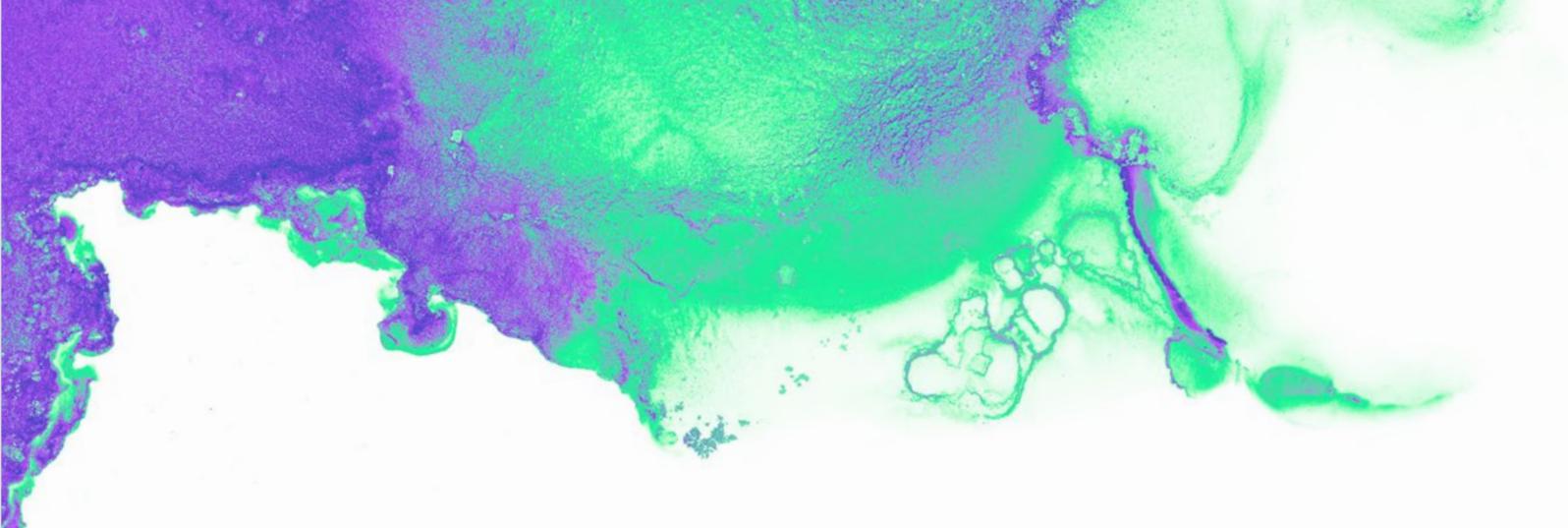
東京大学グローバル・コモンズ担当総長特使  
未来ビジョン研究センター特任教授  
グローバル・コモンズ・センター・ダイレクター



## Martin Stuchtey

SYSTEMIQ 創業者  
プロジェクト・ダイレクター

- 1 Rockström J. et al., Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Ecology and Society* **14**(2): 32 (2009), <https://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32>
- 2 Glasgow Financial Alliance for Net Zero (GFANZ), <https://www.gfanzero.com>
- 3 Partnership for Carbon Transparency, <https://www.wbcsd.org/news/pathfinder-framework-version-2-0/>
- 4 University of Tokyo and Systemiq, Planet positive chemicals (2022), <https://cgic.ifu.u-tokyo.ac.jp/research/chemistry-industry/>, <https://www.systemiq.earth/systems/circular-materials/planet-positive-chemicals/>
- 5 Meng F. et al., Planet-compatible pathways for transitioning the chemical industry. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **120**, e2218294120 (2023), <https://doi.org/10.1073/pnas.2218294120>
- 6 Kanazawa D. et al., Scope 1, 2, and 3 Net Zero Pathways for the Chemical Industry in Japan. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, **57**, 2360900 (2024), <https://doi.org/10.1080/00219592.2024.2360900>



# 目次

<b>エグゼクティブ・サマリー</b>	<b>5</b>
<b>セクション1:はじめに</b>	<b>13</b>
1.1 気候変動に関する世界および日本の政治的・ビジネス的背景	14
1.2 GHG排出や他の環境問題に関する化学産業の現状	15
1.3 日本は、その歴史的・地理的な特徴から、ネットゼロに向けて独自の出発点を持っている	18
1.4 日本の化学産業にも独自の出発点がある	20
1.5 本研究の目的	20
1.6 本研究で用いるアプローチ	20
<b>セクション2:需要</b>	<b>23</b>
2.1 スcope1と2に加え、scope3の排出削減が必須となる	24
2.2 需要減少は、川下産業がscope3の排出を削減するためにサーキュラー・エコノミーを加速することによってもたらされる可能性がある	25
<b>セクション3:供給</b>	<b>29</b>
3.1 日本の化学産業は3つの基本アプローチを組み合わせることにより、ネットゼロを達成できる	30
3.2 日本の化学産業が2050年までにscope1, 2, 3のネットゼロを実現することを可能にする、複数のパスウェイが存在する	31
3.3 エネルギー源	34
3.4 オレフィン、芳香族、メタノールは2050年までにネットゼロを達成するために、製造プロセスと原料に大幅な変更が行われる	34
3.5 scope3のネットゼロは、化学製品の供給量に理論上の上限を課す	36
3.6 日本の化学産業における、個別のネットゼロ実現技術に関する戦略と提言	38
3.7 ネットゼロを実現するには大規模な設備投資が必要であり、2050年までの累積設備投資額は610億～950億ドルにのぼる	44
3.8 ネットゼロを実現するオレフィンと芳香族は、化石原料から製造されたものよりも大幅に高コストとなるが、消費者製品の製造コストへの影響は限定的である	46
<b>セクション4:提言</b>	<b>49</b>
4.1 日本の化学産業全体としてのネットゼロへのビジョン	50
4.2 個々の化学企業とサプライチェーンにとってのネットゼロへのビジョン:ニワトリと卵のループから抜け出すために	51
4.3 Planet Positive Chemicals: 化学産業の新たな役割と未来のビジネス	60
<b>むすび</b>	<b>62</b>
<b>付録A: 本研究で用いた需要モデルと供給モデルの概要</b>	<b>63</b>
<b>付録B: 本研究の供給モデルで考慮した主要プロセス技術と原材料</b>	<b>64</b>
<b>付録C: 気候変動関連用語集</b>	<b>65</b>



# エグゼクティブ・サマリー

## 1. はじめに

**ネットゼロに向けた世界のビジネスと日本の政策の進展:** 2050年までに温室効果ガス (GHG) 排出のネットゼロを達成するという目標を菅首相 (当時) が2020年に発表して以来、日本はネットゼロへの移行を推進するための初期の政策的枠組みと法律を策定してきた<sup>7</sup>。これらをベースに、イノベーションを推進するための補助金交付、水素やCCS (二酸化炭素の回収・貯留) 等のインフラやビジネス環境の整備、カーボン・プライシングの導入等が進められている。世界に目を向けると、アライアンスやフレームワークなどを通じて、特に金融とサプライチェーンの顧客からの求めにより、スコープ1, 2のみならずスコープ3を含むネットゼロがグローバルなビジネスの要件となりつつある。具体的には、投融資先にスコープ1, 2, 3のネットゼロを求める金融機関の巨大なアライアンスであるGFANZ<sup>8</sup> や、スコープ3を含む製品レベ

ルの排出データをサプライチェーン全体で共有するためのThe World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) 傘下のPartnership for Carbon Transparency (PACT)<sup>9</sup>、投資家のための持続可能性開示基準のグローバルなベースラインを作るためのInternational Sustainability Standards Board<sup>10</sup> (ISSB) などである。さらに、Science Based Targets initiative<sup>11</sup> (SBTi) は、鉄鋼・セメント等の産業に続いて化学産業向けのセクター・ガイダンスを作成中である。化学産業のGHG排出削減施策に精通していないサプライチェーン川下の顧客や金融機関等のために、SBTiはこのガイダンスに従って各社のGHG排出削減目標が科学的に信頼できるものであるかを判断するので、結果的に化学会社を「色分け」することになる (詳細はセクション1を参照)。

7 経済産業省, グリーン成長戦略 (2021), [https://www.meti.go.jp/policy/energy\\_environment/global\\_warming/ggs/index.html](https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/index.html)  
グリーン・イノベーション基金 (2021), [https://www.meti.go.jp/policy/energy\\_environment/global\\_warming/gifund/index.html](https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/gifund/index.html)  
トランジション・ファイナンス (2021-2023), [https://www.meti.go.jp/policy/energy\\_environment/global\\_warming/transition\\_finance.html](https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/transition_finance.html)

GX実現に向けた基本方針 (2023), <https://www.meti.go.jp/press/2022/02/20230210002/20230210002.html>

CCS事業法 (2024), <https://www.meti.go.jp/press/2023/02/20240213002/20240213002-6.pdf>

水素社会推進法 (2024), <https://www.meti.go.jp/press/2023/02/20240213002/20240213002-1.pdf>

8 Glasgow Financial Alliance for Net Zero (GFANZ), <https://www.gfanzero.com>

9 Partnership for Carbon Transparency (PACT), Emissions transparency: Pathfinder Framework provides updated guidance for the accounting and exchange of product life cycle emissions (2023), <https://www.wbcsc.org/news/pathfinder-framework-version-2-0/>

10 International Sustainability Standards Board (ISSB), <https://www.ifrs.org/groups/international-sustainability-standards-board>

11 Science Based Targets initiative, Science-based targets for chemicals companies, <https://sciencebasedtargets.org/sectors/chemicals>

**世界の化学産業による GHG 排出削減の進展は限定的**であり、日本の化学産業も例外ではない。化学製品は世の中のありとあらゆる分野で使われているため、化学産業は世界経済の要とも言えるが、鉄鋼・セメント・航空などととも Hard to Abate (GHG 排出削減が困難な) 産業として知られている。化学産業の排出削減を困難にしているのは、例えば以下のような課題である。

1. ほとんどの化学製品は炭素を含むため、スコープ 3 のネットゼロ実現のためには、焼却炉などでの廃棄時の排出削減も鑑みた対策が必要となる。
2. 多種多様な化学製品が使用されており、これらのネットゼロ実現のためには複数の技術の組み合わせが必要となり、決定的な「特効薬」となる技術が存在しない。

また、GHG 排出のネットゼロに加えて、プラネタリーバウンダリーズ<sup>1</sup> で挙げられている他の様々な環境課題（プラスチック汚染、生物多様性の喪失、窒素・リンの流出等）にも化学産業は対処せねばならず、加えて 1 つの課題の解決策が別の課題へ負荷を転嫁することも避けねばならない。このような困難な課題と、その結果として生じる不確実性（例えば、より

高価になる可能性の高いネットゼロを実現する化学品に対する将来の需要や、それを製造するのに適した技術に関する不確実性）が、化学産業のネットゼロへの移行を遅らせる大きな要因となっている（詳細はセクション 1 を参照）。

**ネットゼロに向けた日本の化学産業の出発点は、その歴史的・地理的特性によって形作られている：**

日本では過去 10 年間に太陽光発電が急成長を遂げたが、非化石電源のさらなる拡大には課題が多い（例えば、福島第一原発事故後の世論の支持が定かではない原子力発電や、実績の少ない浮体式洋上風力発電の拡大）。また、国内での CCS の機会も限られているように見える。加えて、日本の廃棄物回収システムは効率的といえるが、現在はその処理の大部分を焼却に依存している。さらに、人口が 2050 年までに約 20% 減少すると予想されており、日本の化学産業は成長の機会を新たに見出す必要がある。また、全国に点在する化学コンビナートは、全般的に小規模で老朽化したクラッカーを中心に構成されており、そのため日本の化学産業は海外の競合他社よりも細分化されている（詳細はセクション 1 を参照）。

## 2. 本研究の目的と方法

**本レポートでは、最近の査読付き学術論文<sup>12</sup> で示された科学的知見を活かして、以下を目的とする：**

1. 我々が確立したモデル<sup>13,14</sup> を用いて、日本で事業を行う化学産業がスコープ 1, 2, 3 の GHG 排出ネットゼロを達成するための定量的パスウェイ (Pathway, 道筋) を複数提示し、
2. 不確実性が存在する中においても、化学産業が前に進むための道を示し、

3. 定量的パスウェイから得られる知見と日本の化学産業に関する既存の知見を組み合わせることによって、日本の強みと弱みを踏まえたネットゼロ実現のための戦略とアクションを示す。

本レポートは、これらの分析を通じて、現在の化学産業と望ましい未来をつなぐ架け橋となることを目指している。

12 Kanazawa D. et al., Scope 1, 2, and 3 Net Zero Pathways for the Chemical Industry in Japan, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, **57**, 2360900 (2024), <https://doi.org/10.1080/00219592.2024.2360900>

13 University of Tokyo and Systemiq, Planet positive chemicals (2022), <https://cgc.ifu.u-tokyo.ac.jp/research/chemistry-industry/>, <https://www.systemiq.earth/systems/circular-materials/planet-positive-chemicals/>

14 Meng F. et al., Planet-compatible pathways for transitioning the chemical industry. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **120**, e2218294120 (2023), <https://doi.org/10.1073/pnas.2218294120>

本レポートのモデルでは、**需要モデルと供給モデルを組み合わせ、ネットゼロ・パスウェイを計算する**：需要モデルからは2つの需要シナリオを作成し、供給モデルからは3つの供給シナリオを作成し、これらの需要シナリオと供給シナリオを組み合

わせることで6つのネットゼロ・パスウェイを算出した。そのうち、本レポートでは図1に緑色で示した、最も示唆に富む4つのパスウェイについて詳細に議論する（詳細はセクション1を参照）。

		供給シナリオ			
		最小コスト	最速 GHG排出削減	最速 GHG排出削減・CCSなし	
		ME	NFAX	NFAX2	
需要シナリオ	人口減少のみ	BAU	BAU-ME	(BAU-NFAX)	(BAU-NFAX2)
	人口減少+川下サーキュラー・エコノミー	CE	CE-ME	CE-NFAX	CE-NFAX2

図1：2つの需要シナリオと3つの供給シナリオを組み合わせた6つのネットゼロ・パスウェイ

**本研究の対象範囲**：本研究では、化学品サプライチェーンの起点となる7つの基礎化学品（エチレン、プロピレン、ブタジエン、ベンゼン、トルエン、キシレン、メタノール）を対象とする。なお、本レポートではエチレン、プロピレン、ブタジエンを総称してオレフィンと呼び、ベンゼン、トルエン、キシレンを総称して芳香族と呼ぶ。また、本研究で対象としたGHG排出は、GHGプロトコルのスコープ1（直接GHG排出）、スコープ2（電力や蒸気などの購入エネルギーからの間接GHG排出）、スコープ3（その他の間接GHG排出）のカテゴリー1（購入した製品・サービス）、カテゴリー12（販売した製品の廃棄）である。スコープ3において、カテゴリー1と12を対象としたのは、主要な化学メーカー<sup>15</sup>におけるスコープ3の排出量がこれらのカテゴリーにおいて最大であるためである。なお、対象としたGHGは、二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）とメタン（CH<sub>4</sub>）である（詳細はセクション1を参照）。

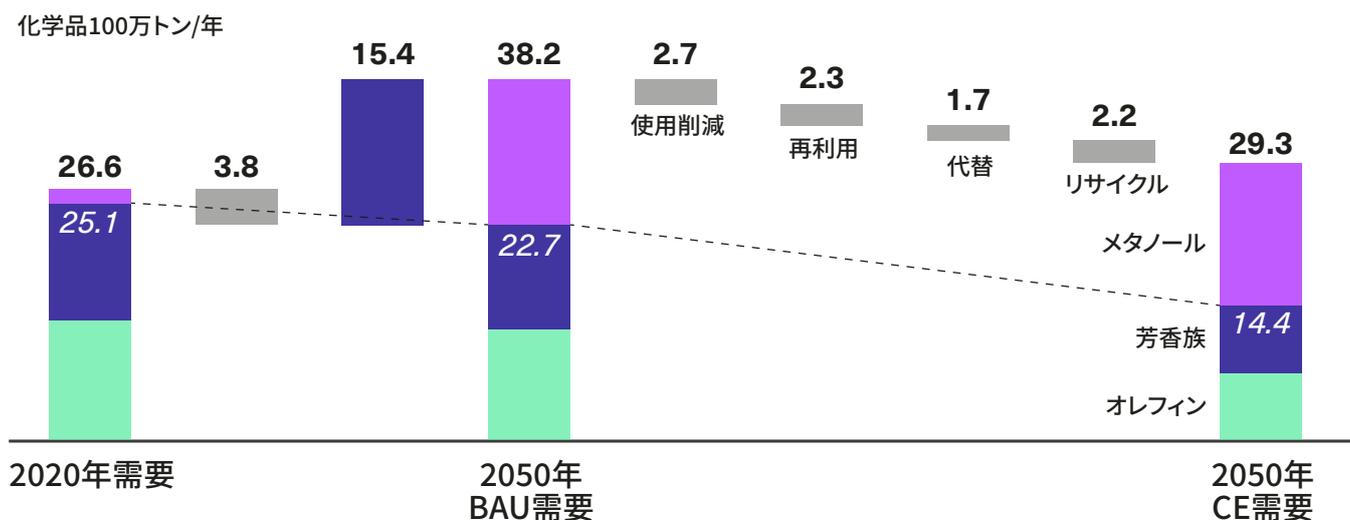
**本研究のアプローチの主な長所は**：(1) Forecastアプローチの長所（現状からの継続性）と Backcastアプローチの長所（目標状態への到達）を兼ね備えていること、(2) 複数のパスウェイ間で化学産業が取るべきアクション（バイオマス由来原料やCCSの確保など）を比較できること、の2点である。本研究のアプローチは、2050年におけるGHG排出が正確にネットゼロになることを保証するものではないが、本研究の目的には十分かつ適切であると考えている。なお、需要と供給のシナリオやパスウェイで示された結果は、将来予測ではなく、ネットゼロへの移行のために必要なアクションを比較・議論するためのシミュレーションであることに留意されたい（詳細はセクション1を参照）。

15 BASF SE, Scope 3 GHG Inventory Report (2021), [https://www.basf.com/dam/jcr:d562fa5f-c658-3bb8-849a-737f2254cd67/BASF\\_Scope\\_3\\_Report\\_2021.pdf](https://www.basf.com/dam/jcr:d562fa5f-c658-3bb8-849a-737f2254cd67/BASF_Scope_3_Report_2021.pdf)

### 3. 需要・供給シナリオとネットゼロ・パスウェイについて

**2050年までのオレフィンと芳香族に関する2つの需要シナリオ:** サプライチェーンの川下産業（ブランドオーナー等）は消費者、NGO、金融機関等からGHG排出削減のプレッシャーにさらされている一方で、そのGHG排出はサプライチェーン川上からのスコープ3排出が大部分を占めることが多い<sup>16</sup>。GHG排出、プラスチック汚染、そしてコストを削減するために川下産業が今後、サーキュラー・エコノミーの追求を強化することにより、プラスチック等の化学製品を製造するためのオレフィンや芳香族の需要は、日本の将来人口の減少のみから予想されるよりも一層減少する可能性がある。2つの需要シナリオのうち、BAU (business as usual) 需要シナリオでは、2050年までに国内人口が約20%減少する一方で、純輸出（輸出マイナス輸入）と川下でのサーキュラー・

エコノミー活動は現在のレベルのままと仮定している。このBAU需要シナリオにおいては、オレフィンと芳香族の合計の年間需要は、2020年の25.1 Mt (Mtは100万トン) から2050年には22.7 Mtに減少する。一方で、CE (Circular Economy) 需要シナリオにおいては、人口減少に加えて川下におけるサーキュラー・エコノミー活動により、2050年のオレフィンと芳香族の合計の年間需要は14.4 Mtとなる（図2）。これらのシナリオは将来予測ではないが、このような川下産業からの需要減少の一般的傾向は、日本の化学産業が抗えるものではない。従って、輸出、海外事業、異なるビジネスモデルなど、新たなビジネス・アプローチを模索し始めるのが早ければ早いほど、有利に働く（詳細はセクション2を参照）。



**図2：日本における2020年から2050年のオレフィン、芳香族、メタノールの年間需要の推移：** 白色の数字はオレフィンと芳香族のみの総需要。

日本の化学産業は、以下の3つのアプローチの組み合わせにより、スコープ1, 2, 3のネットゼロを達成することができる：3つのアプローチとは、(1) 化石原料から代替原料への転換、(2) エネルギー源の転換、(3) CCUS（二酸化炭素の回収・有効利用・貯留）の適用である。実際に、図1に緑色で示

した4つのパスウェイのうち、BAU-MEパスウェイとCE-MEパスウェイは、CCSを多用しながらエネルギー源をネットゼロへ切り替えることで、それぞれの需要（BAUとCE）を満たしながら、スコープ1, 2, 3のネットゼロを達成することができる。CE-NFAX2パスウェイでは、エネルギー源をネットゼロへ切り替えること

16 Partnership for Carbon Transparency (PACT), Pathfinder Framework Version 2.0 (2023), Page 7, <https://www.wbcsd.org/resources/pathfinder-framework-version-2-0/>

加えて、主に代替原料（バイオマス由来原料、DAC-CCU（大気中の二酸化炭素の直接回収・有効利用）原料、リサイクル材など）を使用することにより、また CE-NFAX パスウェイでは、代替原料と CCS の両方を使用することにより、スコープ 1, 2, 3 のネットゼロを達成することができる（図 3）。エネルギー源（電力と熱）の切り替えに関しては、複数のオプションが存在する。しかし、個別のプラントについては、現在の化石エネルギー源からの切り替え先となる最適なネットゼロのエネルギー源は、クラッカーのエネルギー源を除き、粒度が限られている本研究の対象範囲を超えているため、ここでは扱わない（詳細はセクション 3 を参照）。

ンが存在する。しかし、個別のプラントについては、現在の化石エネルギー源からの切り替え先となる最適なネットゼロのエネルギー源は、クラッカーのエネルギー源を除き、粒度が限られている本研究の対象範囲を超えているため、ここでは扱わない（詳細はセクション 3 を参照）。

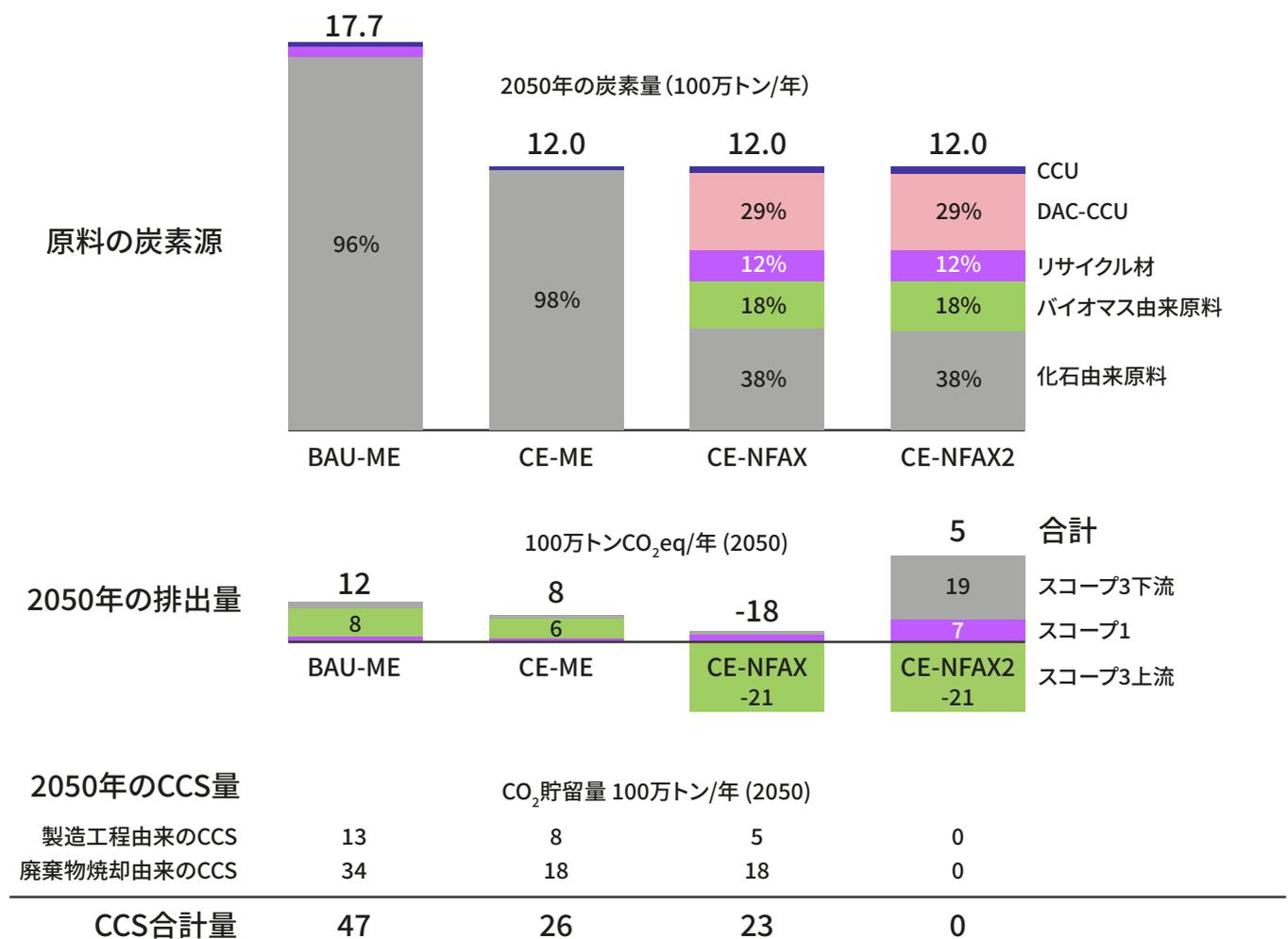


図 3: パスウェイ別の 2050 年の原料の炭素源、GHG 排出量、CCS 量

ネットゼロを達成するためには、オレフィン・芳香族・メタノールは全て、2050 年までにその製造プロセスと原料の大幅な変更が行われる。その結果、これら化学品の製造コストは大幅に上昇するものの、これがもたらす消費者製品の製造コスト増は限定的である：2050 年までに、オレフィン、化石原料またはリサイクル熱分解油を原料として、ネットゼロのために改造されたクラッカー（例えば、燃焼

排ガスを回収するための CCS を後付け、または燃料として水素やアンモニアを使用）を用いて、あるいはブルー・メタノールまたはグリーン・メタノールを原料として Methanol to Olefins (MTO) プロセスで製造される。また、芳香族の製造については Methanol to Aromatics (MTA) プロセスに移行すると考えている。これは、現在、ガソリン改質剤と芳香族の大部分を製造している接触改質器（リフォーミング）が、内燃

エンジン車の減少により廃止されるという前提に基づいている。しかし、実際には MTA が商業規模に達するまでに時間を要する等により、接触改質が残る可能性がある。これらの製造設備変更には、パスウェイにもよるが、2050 年までの累積設備投資額として 610 億～950 億ドルが必要となる。これらの設備投資と原料コストの上昇により、スコープ 1, 2, 3 のネットゼロを実現するオレフィンと芳香族の製造原価 (\$/トン) は、2050 年には、化石原料を用いた現在の製品の 2 倍以上 (化学品とパスウェイによって異なる) になる可能性がある。ところが、最終消費者製品の製造コストへの影響は、2050 年において約 1% の増加 (今後約 30 年間に渡って、毎年 0.03% の増加に

相当)にとどまると見られる。このようにサプライチェーン全体で見た時に影響が不均一となることは、ネットゼロ化学品の高コストと低需要という、いわゆる「ニワトリと卵」のループから脱却するための重要な足がかりとなる。2050 年のオレフィンと芳香族のコストは現在の約 2 倍となる可能性がある一方で、2050 年には再生可能資源が現在より安価になっている前提であることから、このコスト差は 2050 年よりも現在の方が大きい。従って、真の課題は、(再生可能資源がより安価になる 2050 年を待つのではなく) いかにか現時点からコスト差を克服してネットゼロへの移行を進めるかである (詳細はセクション 3 を参照)。

## 4. 提言

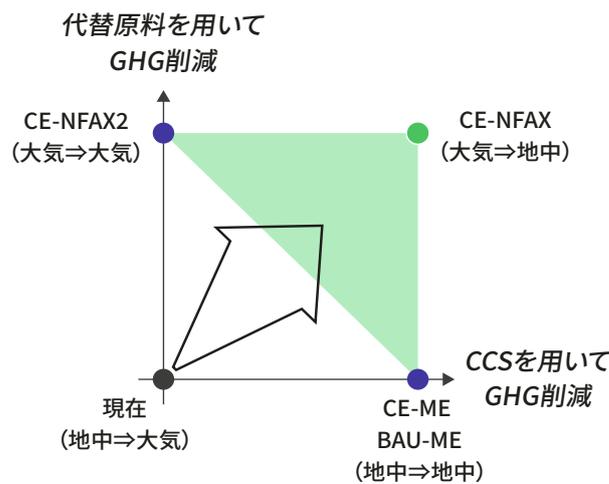
**スコープ 3 のネットゼロは、化学製品の供給可能量に理論上の上限を課すものであり、これを回避するには重要資源へのアクセス確保を急ぐべきである:** 具体的には、スコープ 3 のネットゼロの下ではバイオマス由来原料、DAC-CCU 原料、リサイクル材、CCS へのアクセスが化学製品とそれを使用する川下製品の供給可能総量を決定する。この状況は、電気自動車のサプライチェーンに似ている。すなわち、サプライチェーンのはるか上流にある原材料 (リチウムやコバルト等) の供給が、サプライチェーンの下流にある完成品 (電気自動車) の供給可能量を定める可能性があり、その結果、サプライチェーン全体に戦略的影響力を及ぼす。化学産業の重要資源に関して、椅子取りゲームが静かに始まっていると言える。こうした重要資源へのアクセスを拡大するためには、まず、パスウェイにかかわらずリサイクルを最大化し、特に日本の強みを活かしながらケミカル・リサイクル技術を強化・拡大する必要がある。日本の強みとしては、拡大生産者責任 (EPR) に裏付けされた有力な廃棄物回収システムや、立法権が国レベルに集中している上に、比較的安定した政治環境の下での産業に全般的に支援的な政策が含まれる。リサイクルを強化することにより、バイオマス由来原料や CCS の必要量が減り、プラスチック汚染の低減にもつながる。また、バイオマスは非化石原料とし

て重要な役割を果たすため、安定的なアクセスを確保するためには、輸入バイオマスとバランスを取りながら国内供給源の開発も重要となる。国内供給源の例としては、国内の森林資源が挙げられ、サステナブルな管理と伐採に化学産業として投資することにより、その潜在能力を引き出すことができる。メタノールは、ナフサとともにオレフィンと芳香族を製造するためのプラットフォーム化学品となりうるものであり、日本は国内と海外の両方に供給源を確保すべきである。例えば、国内メタノールとしてはバイオマスや廃棄物 (リサイクル材) 等から、海外メタノールとしては CCS 等で排出削減措置を取られた化石原料、バイオマス、大気中の CO<sub>2</sub> 等から製造されたものが挙げられる。メタノールをプラットフォーム化学品に使用すれば、供給源やカーボン・フットプリントの面で柔軟性が得られるだけでなく、オレフィンや芳香族の製造についても、副産物への対応の必要性が少なく、よりターゲットを絞った製造が可能になると考えられる。一方で、エタノール (バイオエタノール) もプラットフォーム化学品としての可能性を秘めているが、SAF (Sustainable Aviation Fuel、持続可能な航空燃料) が将来需要の喚起とサプライチェーンの確立で先行しているため、限られたバイオマス由来炭素を巡って競合する可能性があり、加えて食料生産との競合の可能性、農業による環境への影響などか

ら、バイオエタノールの化学品製造への利用は限度があると見られる。最後に、CCSとCCU(二酸化炭素の回収・有効利用)は製造工程と焼却炉からの排出を低減するために、政府と協力しながら規模を拡大する必要がある(詳細はセクション3を参照)。

**日本の化学産業全体としてスコープ1,2,3のネットゼロを達成するためには、プラスチック等のリサイクル材を最大化しつつ、代替原料(バイオマス由来原料など)とCCSを同時に拡大する必要がある。**

言い換えれば、日本は図4の青丸で表されるBAU-ME, CE-ME, CE-NFAX2の各パスウェイが示すように、CCSや代替原料のどちらか一方のみに依存すべきではない。なぜなら、日本が代替原料とCCSのどちらについても十分な量を確保できる見通しが立っていない中で、一方の解決策のみに依存するのはリスクが高すぎるからである。(詳細はセクション4を参照)。



**図4：日本の化学産業全体としてのGHG排出削減の方向性の概念図：**日本の化学産業全体としては、Y軸の代替原料(バイオマス由来原料等)とX軸のCCSを同時に追求し、最終的にはネットゼロまたはネットゼロ超を示す緑の三角形の中に着地させるべきである。

**「高コスト」と「低需要」という「ニワトリと卵」の無限ループから抜け出すために：**化学企業はまず、小規模のパイロット・スケールで、代替原料(リサイクル材、バイオマス由来原料等)を使った新しい製造プロセス技術を確認しなければならない。その後、本格的な商業プラントへの投資を進める際には、投資リスクが大きいこと、長期的な視点からリーダーシップを発揮する必要がある。リーダー企業は、他社に先駆けて規模(すなわち低コスト)を確立し、ネットゼロ化学品のコスト上昇に受容性が高い川下顧客や市場、そしてリサイクル材やバイオマス由来原料などの重要資源を先取りする機会を得ることができる。ネットゼロは、コモディティ化した基礎化学品事業を差異化された事業に転換する千載一遇の機会である。この実現にはリーダーシップが不可欠であるが、サステナビリティへの長期にわたる継続的な投

資を行うには、現行の事業からの長期的な収益見通しに下支えされていなければ、その実行は危うい。現在、日本の大手化学企業の多くは、垂直統合型コングロマリットの企業構造をとっており、なおかつ川上の基礎化学品部門よりも、川下の機能化学品部門を重視する企業戦略をとっている。そのため、以下の他産業における過去の教訓に基づくと、大手化学企業間で川上の基礎化学品部門を統合する業界再編は、企業的意思決定プロセスを、そしてネットゼロ移行を加速させる可能性がある。例えば、1990年代の半導体メモリーチップ業界、2000年代の液晶パネル業界では、生産拡大(すなわちコスト削減)と技術世代交代に対応するために大規模投資が求められたが、コングロマリット型の日本のエレクトロニクス・メーカーの多くでは意思決定が遅れた。技術的・市場的な優位性があったにもかかわらず、最

最終的に海外競合企業との競争に敗れたが、その原因の1つは、数ある事業部門のうちの1つだけに莫大な投資を行うことを正当化するために、投資自体のフィジビリティのみならず、部門間の優先順位をめぐる判断にも迫られ、投資判断が遅れたことが挙げられる<sup>17</sup>。このような業界再編は（「規模の経済」に加えて）広義の「スコープの経済」ももたらし、不確実な将来に備えるための分散投資も可能にする。加えて、化学企業が商業規模の本格プラントを準備する際には、化学産業の外部との連携も必要となる。具体的には、(1) 従来とは異なるパートナーに働きかけることによって重要資源（バイオマス由来原料やリサイクル材など）を確保すること、(2) グローバルな First Movers Coalition に参加し、さらに日本でも同様のサプライチェーン川上・川下間での coalition（有志企業による事業連携）を形成することによって将来の需要を確保すること、(3) 支援的な政策・規制を確保することの3つが必要である。世界経済フォーラムと米国政府によって始められた First Movers Coalition は、川下のブランドオーナー等がネットゼロ製品を将来、一定量購入することを川上のメーカーに対してコミットすることによって、将来のネットゼロ製品の需給シグナルを交換し、川上のメーカーが必要な投資を行いやすくする一方で、川下のブランドオーナー等はネットゼロ製品の供給を確保しつつ市場へのアナウンス効果を図るものである。国内においても同様の coalition（事業連携）が必要とされるのは、サプライチェーンの全ての企業が必ずしも国際的なプレーヤーではなく、また国内サプライチェーン特有の諸事情に対処する必要があるためである。加えて、グリーン製品の初期の市場形成を加速させるには、国内での coalition がより効果的である。例えば、太陽光パネル、発光ダイオード（LED）照明、リチウムイオン電池の各市場では、日本企業が技術や商品化で当初は世界をリードしていたにもかかわらず、後に市場シェアを失った例がある。理由の1つとしては、初期段階において従来製品よりも高価であることが多いグリーン製品の需要を喚起し、その市場成長を牽引するための需給間の連携や政策支援が不十分であったことが挙げられる。例え

ば、日本メーカーの太陽光パネルの世界市場シェアは2002年には55%を占めていたが<sup>18</sup>、後に中国に抜かれた。その後2012年に日本で固定価格買取制度（FIT）が導入され、国内の太陽光パネルの設置が爆発的に伸びたが、その頃には日本の太陽光パネルメーカーはすでに競争力を失っており、その後、撤退していった。このような需給間の連携は、グローバル規模ではより困難で非効率であるため、日本の化学産業はグローバル版の連携に加えて、日本の大きな市場規模を活かした国内の事業連携も活用すべきである（詳しくはセクション4参照）。

### 化学産業の将来の役割はサステナビリティにおける3つの重要なトレンドによって形作られる可能性

がある。3つの重要なトレンドとは、(1) GHG 排出削減、(2) 気候変動への適応、(3) プラスチックによる汚染の防止である。1つ目のGHG 排出削減においては、化学産業は自社およびサプライチェーンの排出削減と、他産業の排出削減支援という2つの役割が求められる。2つ目の気候変動への適応（すでに起きている気候変動への対応）においては、化学製品が農業、水へのアクセス、災害対策等を支援することができる。3つ目のプラスチック汚染防止においては、配合成分の簡素化や成分情報開示の強化による透明性向上、リサイクルの強化等が求められる可能性がある。これらは、当然ながら新たな事業機会でもある。一方で、化学産業の伝統的な顧客層（自動車産業や電子機器産業等）では、近年は化学製品が使用されるハードウェアよりもソフトウェアを通じて、自らの付加価値を高める傾向が強くなっている。このため、化学産業がその付加価値を維持・向上させるには、サステナビリティを犠牲にしてまでハードウェアとしての性能を向上させるのではなく、こうしたハードウェア製品におけるカーボン・フットプリント削減やリサイクル技術の改良等に重点を移していく必要がある。その結果、化学産業の中の川上（基礎化学品）と川下（機能化学品）の両方において、付加価値と競争力の源泉に大きな転換が予想される（詳細はセクション4を参照）。

17 富山和彦, 結局、経営者は何を間違えたのか, 週刊東洋経済, 2017年5月27日

田口眞男, 過去の失敗から学ぶ、パワー半導体の早期分社化と統合, 日経XTech, 2021年11月29日

中田行彦, 液晶ディスプレイ産業における日本の競争力, 経済産業研究所, デイスクッション・ペーパー, 2007年4月

18 Nemet G. F., How Solar Energy Became Cheap, Routledge (2019)



# セクション1：はじめに

## ネットゼロの達成とグローバル・コミュニティにおける日本の化学産業の課題

### セクション概要

---

**温室効果ガス (GHG) 排出のネットゼロ (スコープ 1, 2, 3) の達成は、世界の企業の義務となり始めた：**GHG 排出削減に対する世界的な圧力が強まる中、日本政府は GHG 排出削減を推進するための初期的な政策的枠組みを打ち出した。しかしながら、実際の動きは今のところ断片的なものにとどまっている。

**化学産業は世界経済の要である一方で、Hard to Abate 産業 (GHG 排出削減が困難な産業) の1つとして知られており、ネットゼロの達成には大きな課題を抱えている：**独自の歴史的・地理的特性を抱える日本の化学産業も例外ではない。化学産業は気候変動 (ネットゼロ) に加えて、プラスチック汚染や生物多様性の喪失、窒素・リンの流出等のプラネタリー・バウンダリーズで指摘される他の環境問題にも対処しなければならず、1つの課題の解決策が別の課題へ負荷を転嫁してはならない。これらの困難な課題とその結果として生じる将来の不確実性が、化学産業のネットゼロへの移行を妨げる大きな要因となっている。

本レポートでは、日本の化学産業がネットゼロを達成するための定量的なパスウェイ (Pathway, 道筋) を示し、将来需要・将来技術・パスウェイに関する不確実性が存在する中でも、ビジネスリーダーがネットゼロに向けて前進できるよう、戦略やアクションに関する示唆を提示する。

## 1.1 気候変動に関する世界および日本の政治的・ビジネス的背景

**スコープ3を含む温室効果ガス (GHG) のネットゼロは、世界でビジネスを行う上で必要な要件となっている:** パリ協定の目標を達成するため、2021年に英国・グラスゴーで開催されたCOP26では、多くの国や企業がネットゼロを目標として宣言し、重要なアライアンスやフレームワークが立ち上げられた。これには例えば、投資先に対してスコープ1, 2, 3のネットゼロを求める金融機関の巨大なアライアンスであるGFANZ<sup>19</sup>、スコープ3を含む製品レベルのGHG排出データをサプライチェーン全体で共有するWBCSDによるPathfinderフレームワーク(現PACT)<sup>20</sup>、投資家のために持続可能性開示基準のグローバルベースラインを策定する国際サステナビリティ基準委員会 (ISSB)<sup>21</sup>などが含まれる。このように、スコープ3を含むネットゼロに向けたGHG排出削減は、COP26以降、急速にグローバルビジネスの要件となりつつあるため、この目標達成に向けた取り組みの遅れや失敗は、グローバルな資金調達やサプライチェーンからの排除を意味しかねない。さらに、SBTi (Science Based Targets initiative) は最近、化学産業向けのセクター・ガイダンス案を作成し、意見公募を行った<sup>22</sup>。最終版が完成すれば、化学産業のGHG排出削減に向けた諸活動に精通していないサプライチェーン川下顧客や金融機関等のために、SBTiによって検証された信頼性の高いGHG排出削減目標を持つ企業と持たない企業の2種類に化学企業が分かりやすく「色分け」されることになる。

**GHG排出削減に対する世界的な圧力が高まっている:** パリ協定の締約国は、2035年のGHG排出削減目標を含む目標をNDC (Nationally Determined Contribution, 国が決定する貢献) として2025年に提出することが義務付けられている。この目標設定に際しては、IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 気候変動に関する政府間パネル) が2023年に発表したAR6統合報告書<sup>23</sup>の内容を考慮することが期待されている。この報告書では、地球温暖化を産業革命前のレベルから1.5℃以内に抑えるためには、2035年までにCO<sub>2</sub>の排出を65%削減(2019年比)する必要があると述べられている。従って、これに整合した、より積極的で具体的な計画を立てるべく、日本だけでなく他国においてもGHG排出削減に対する圧力が高まることが予想される。

**日本政府はネットゼロへの移行に向けた初期の政策的枠組みを策定した:** 菅首相(当時)が2050年までにネットゼロを達成するという日本の目標を2020年に発表して以来、日本政府は移行を推進するための政策的枠組みを策定してきた。この枠組みは2021年6月のグリーン成長戦略<sup>24</sup>に始まり、グリーン・イノベーション基金<sup>25</sup>の下ではイノベーションに対する2兆円の助成が盛り込まれている。また、トランジション・ファイナンス(移行のための資金供給)を促進するため、主要産業の技術ロードマップ<sup>26</sup>が2021年から策定され、これには化学産業のロードマップも含まれている。さらに最近では、2023年2月に

19 Glasgow Financial Alliance for Net Zero (GFANZ), <https://www.gfanzero.com>

20 Partnership for Carbon Transparency (PACT), Emissions transparency: Pathfinder Framework provides updated guidance for the accounting and exchange of product life cycle emissions (2023), <https://www.wbcsd.org/news/pathfinder-framework-version-2-0/>

21 International Sustainability Standards Board (ISSB), <https://www.ifrs.org/groups/international-sustainability-standards-board>

22 Science Based Targets initiative, Science-based targets for chemicals companies, <https://sciencebasedtargets.org/sectors/chemicals>

23 IPCC AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023, Summary for policy makers, page 21, [https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_SPM.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf)

24 経済産業省, グリーン成長戦略(2021), [https://www.meti.go.jp/policy/energy\\_environment/global\\_warming/ggs/index.html](https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/index.html)

25 経済産業省, グリーン・イノベーション基金(2021), [https://www.meti.go.jp/policy/energy\\_environment/global\\_warming/gifund/index.html](https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/gifund/index.html)

26 経済産業省, トランジション・ファイナンス(2021-2023), [https://www.meti.go.jp/policy/energy\\_environment/global\\_warming/transition\\_finance.html](https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/transition_finance.html)

GX 実現に向けた基本方針<sup>27</sup> が閣議決定され、そして同年 5 月には GX 推進法が制定された。この法律により、移行国債と組み合わせたカーボン・プライシングなどの措置が可能になり、民間による GHG 排出削減投資の促進を目指している。さらに最近では、水素社会推進法<sup>28</sup> と CCS 事業法<sup>29</sup> が 2024 年 5 月に成立し、事業開発やインフラ整備の加速が期待される。

**しかし、実際の動きは現時点では一貫しておらず、先行きは不透明である：**例えば、強制的な炭素賦課金導入や排出枠の購入はそれぞれ 2028 年と 2033 年まで始まらず、これらが消費者の行動変容を促すのに十分かどうかは定かでない。一方で、カー

ボン・プライシングとは逆の動き（ガソリンへの補助金）が現在も継続している。また、2021 年に承認された第 6 次エネルギー基本計画<sup>30</sup> では、2030 年のゼロ排出エネルギーとして太陽光発電と原子力発電が大きな割合を占めている。しかし、太陽光発電は乱開発の批判にさらされ始めており、原子力発電は、特に福島第一原発の事故以降、国民による受け入れに疑問が残っている。さらに、GHG 排出削減への民間投資を促すための補助金が既に交付され始めているが、こうした日本政府・産業界の対策がネットゼロ達成に十分であるという定量的な確証はほとんどないのが現状であり、この状況は化学産業にも当てはまる。

## 1.2 GHG 排出や他の環境問題に関する化学産業の現状

**化学産業は GHG 排出削減が困難な Hard to Abate 産業である：**Hard to Abate 産業（化学、鉄鋼、セメント、航空、海運、長距離陸送等）の GHG 排出削減が困難であるのは、再生可能電力への切り替えのみでは解決しないことが理由の 1 つに挙げられる。各産業の対応にはそれぞれ特有の難しさがあるが、化学産業の GHG 排出削減の難しさとしては以下の点が挙げられる。

1. 大半の化学製品は炭素を含むため、スコープ 3 のネットゼロ実現のためには、原料や焼却廃棄時の排出に対応する必要がある。
2. 多種多様な化学製品が幅広い用途で使用されており、GHG 排出削減には複数の技術（バイオマス由来原料、リサイクル、CCUS（二酸化炭素の回収・有効利用・貯留）、電化等）の組み合わ

せが必要であり、多くの製品や用途に対応する、決定的な「特効薬」となる技術が存在しない。

3. 電化が困難もしくは高コストとなる高温での化学反応を含む。
4. 副産物として CO<sub>2</sub> を排出する製造工程を含む。
5. 長寿命の固定資産を持つ重厚長大産業である。

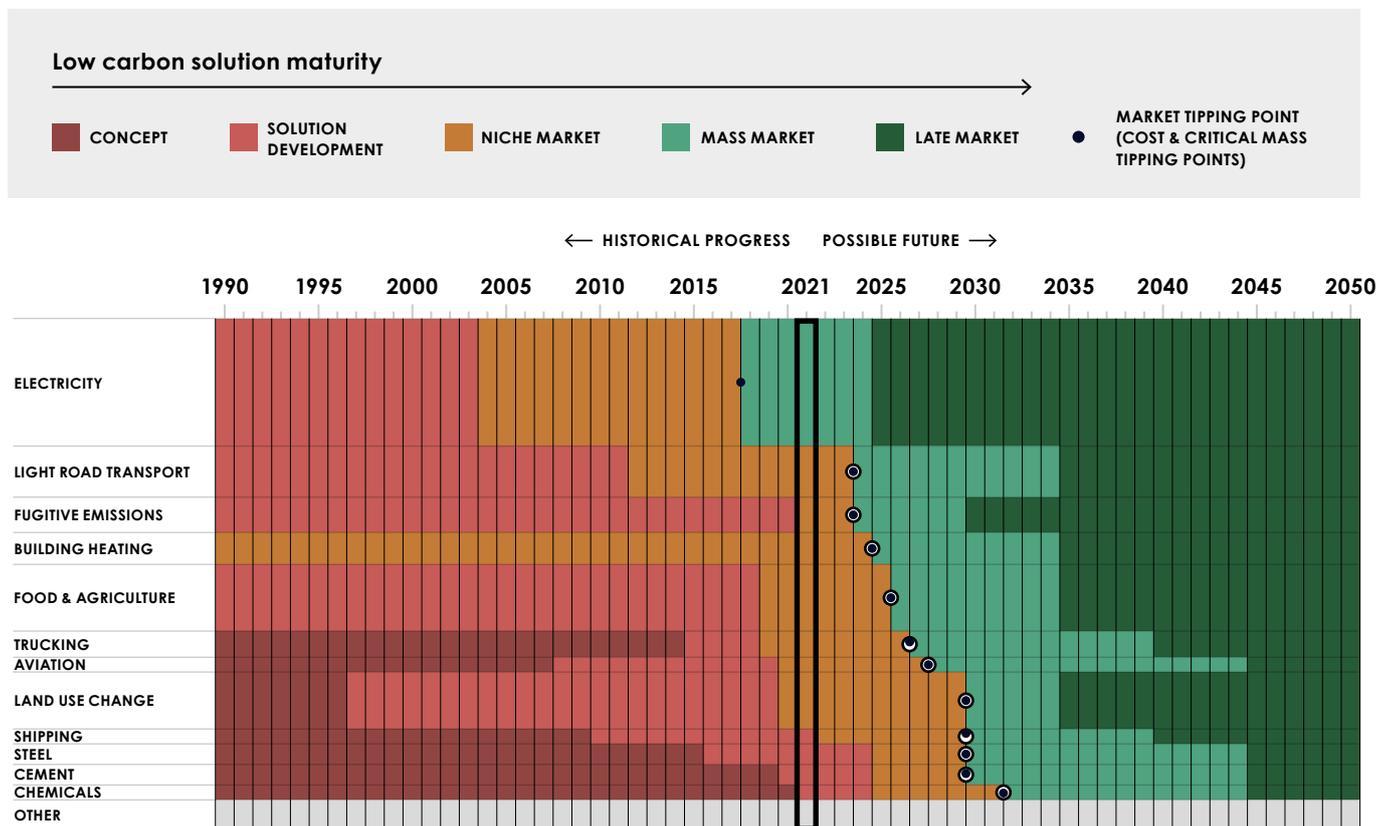
図 5 が示すように、低 GHG 排出技術が大量に市場に導入されて、従来の技術に取って代わり始める転換点 (Tipping Point) に到達するまでに必要とされる期間は、産業によって異なると予想されている。実際、化学産業は多くの Hard to Abate 産業の中でも最下位にランクされている。これは、化学産業が日本で、そして世界で直面している困難を示している。

27 経済産業省, GX実現に向けた基本方針 (2023), <https://www.meti.go.jp/press/2022/02/20230210002/20230210002.html>

28 経済産業省, 水素社会推進法 (2024), <https://www.meti.go.jp/press/2023/02/20240213002/20240213002-1.pdf>

29 経済産業省, CCS事業法 (2024), <https://www.meti.go.jp/press/2023/02/20240213002/20240213002-6.pdf>

30 経済産業省, 第6次エネルギー基本計画 (2021), <https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005.html>



**図 5：産業別の低 GHG 排出技術の転換点<sup>31</sup>**：従来型技術から低 GHG 排出技術への交代が加速すると予想される時期。

**不確実性への対応：**化学産業が持つ上記の5つの課題は、以下の3つの不確実性を引き起こし、世界と日本の化学産業のネットゼロへの移行を遅らせている。

- 将来需要の不確実性：ネットゼロ化学品のコスト増が予想される中で、その将来需要をどう確保するか。
- ネットゼロ化学品を製造する技術の不確実性：バイオマス由来原料、リサイクル材、CCS（二酸化炭素の回収・貯留）などの選択肢からどの技術を選ぶか。
- スコープ1, 2, 3のネットゼロを達成するパスウェイの不確実性：どのパスウェイを選ぶべきか、どのような施策を選べば定量的にネットゼロとなるか。

これらの不確実性を完全には排除することはできないが、本レポートは、これらの不確実性が存在する中においても日本の化学産業が進むべき道を示すことを目的としている。

**プラネタリー・バウンダリーズは、環境問題に関して包括的な視点を提供する：**気候変動に加えて、化学産業はプラネタリー・バウンダリーズ<sup>32</sup>の他の課題にも関連している。プラネタリー・バウンダリーズは、地球環境システムを安定化させている9つの相互関連するプロセスについて、超えてはならない限界値、言わばガードレール（図6の点線で表される）を定義している。このガードレールを超えると、大規模で不可逆的な環境変化をもたらすリスクが大きくなるとされる。従って、全ての経済活動はこのガードレール

31 Systemiq, The Paris Effect: COP26 edition (2021), <https://www.systemiq.earth/the-paris-effect-cop26-edition>

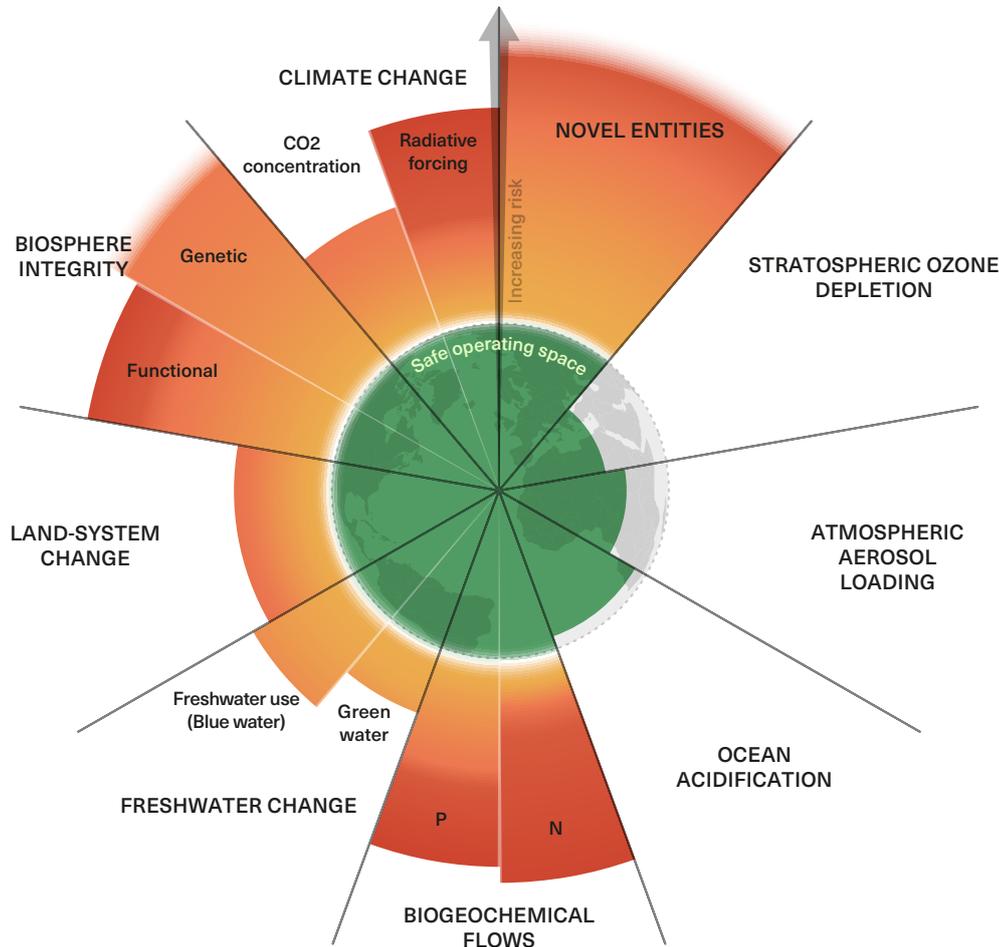
32 Rockström J. et al., Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Ecology and Society* 14(2): 32 (2009), <https://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32>

Rockström, J. et al. A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472-475 (2009), <https://doi.org/10.1038/461472a>

W. Steffen, et al., Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet, *Science* 347, 1259855 (2015), <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1259855>

ル内にとどまることが推奨されているが、既にこの限界値を超えてしまっているプロセスの例としては、気候変動、生物地球化学的循環（肥料による窒素やリンの流出等）、新規化学物質（プラスチック汚染等）、生物多様性の損失などが挙げられる。これらの問

題は、広くは化学物質（CO<sub>2</sub>等）の環境中への放出や化学物質の採取に関連している。そのため、化学産業はこれらの問題に取り組む義務があると同時に、これらの問題を解決することをビジネス機会として捉えることもできる。



**図 6：プラネタリー・バウンダリーズ<sup>33</sup>**：緑の円の周りの点線内は人類にとって安全な活動領域を示す。9つのプロセスは、Novel Entities = 新規化学物質、Stratospheric Ozone Depletion = 成層圏オゾンの破壊、Atmospheric Aerosol Loading = 大気エアロゾルの負荷、Ocean Acidification = 海洋酸性化、Biogeochemical Flows = 生物地球化学的循環、Freshwater Change = 淡水利用、Land-System Change = 土地利用変化、Biosphere Integrity = 生物圏の一体性、Climate Change = 気候変動。

33 Azote for Stockholm Resilience Centre, based on analysis in Richardson et al. (2023), <https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html>

**プラスチック汚染防止と GHG 排出削減の流れは、将来の化学産業の姿を大きく変える可能性がある：**2022 年 3 月の国連環境総会 (UNEA-5.2) での決議<sup>34</sup>を受けて、プラスチックによる汚染防止について、国際的な法的拘束力のある手段の構築に向けて活発な交渉が行われている。2024 年 4 月に開催された Intergovernmental Negotiating Committee (INC, 政府間交渉委員会) の第 4 回会合で議論された対策には、世界の一次プラスチックの生産量に関する上限設定、懸念される化学物質 (添加剤など) や樹脂に関する規制強化と透明性の拡大、廃プラスチックの回収・リサイクルの強化などが含まれる。これらの対策は、ネットゼロに向けた GHG 排出削減のアクションとともに、将来の化学産業の事業戦略に大きな影響を与えるであろう。すなわち、化学産業が多

種多様な化学物質や、その混合物を大量に生産・廃棄する現在のビジネスモデルを続ければ、その事業継続が危うくなる可能性がある。

**課題間での負荷の転嫁を防ぐ：**プラネタリー・バウンダリーの 9 つのプロセスは相互に関連しているため、気候変動に関する対策は単独に計画されたものであってはならない。すなわち、気候変動から他の諸問題への負荷の転嫁を防ぐためには、プラネタリー・バウンダリーにおけるトレードオフを特定することが不可欠である。例えば、バイオマス由来原料の使用や再生可能エネルギー能力の拡大は、生物多様性への影響や土地システムの変化を考慮して計画されなければならない。肥料の使用は、生物地球化学的循環や淡水利用に留意したものでなければならない。

## 1.3 日本は、その歴史的・地理的な特徴から、ネットゼロに向けて独自の出発点を持っている

**太陽光発電は急成長しているものの、非化石電源のさらなる拡大に関しては課題が山積みである：**日本政府は 2021 年に第 6 次エネルギー基本計画<sup>35</sup>を策定し、2050 年のネットゼロを視野に入れながら 2030 年に向けた計画を打ち出した。この計画には、2030 年の電力ミックスが盛り込まれており、再生可能エネルギー 36～38% (太陽光 14～16%、水力 11%、風力 5%、バイオマス 5%、地熱 1%)、水素・アンモニア 1%、原子力 20～22%、LNG 20%、石炭 19%、石油等 2%となっている。この計画に沿って、日本政府は再生可能エネルギーの導入を加速させてきた。実際、再生可能エネルギーの供給量は、固定価格買取制度 (FIT) 等に支えられ、2012 年の 107 TWh (総電力量の 10%) から、2022 年には 219 TWh (22%) に増加した<sup>36</sup>。この再生可能エネルギー供給の伸びは、太陽光発電に偏っており、そ

の供給量は 2012 年の 7 TWh から 2022 年には 93 TWh に増加し、日本の狭い国土面積にもかかわらず、太陽光発電の設備容量は 2021 年には中国、米国に次いで世界第 3 位にランクされるほどである<sup>37</sup>。しかし、この急速な導入により、環境、景観、安全性等の面で問題が生じ始めている。そのため、今後の太陽光発電の導入は、特にペロブスカイト太陽電池のような新技術によって加速され、屋上などの開拓余地が大きい選択肢の活用が広がると考えられる。一方、風力発電に関しては、大量導入が始まったばかりで、現在は陸上と着床式洋上風力が中心となっている。しかし、山がちな地形と水深が深い近海という日本の地形のため、低難易度の選択肢が尽きた後は、技術的にも経済的にも難易度の高い浮体式洋上風力発電の拡大が重要となる。さらに、原子力発電については、福島第一原発の事故以来、国民の

34 United Nations Environment Programme (UNEP), Intergovernmental Negotiating Committee on Plastic Pollution, <https://www.unep.org/inc-plastic-pollution>

35 経済産業省, 第6次エネルギー基本計画 (2021), <https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005.html>

36 資源エネルギー庁, 総合エネルギー統計 (2024), [https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total\\_energy/results.html#headline7](https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/results.html#headline7)

[https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total\\_energy/xls/stte/stte\\_jikeiretu2022fykaku.xlsx](https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/xls/stte/stte_jikeiretu2022fykaku.xlsx)

37 資源エネルギー庁, 再エネの導入 (2024), <https://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/energy2023/07.html>

支持は不確かなものとなっている。その結果、2030年の原子力発電の電力ミックス目標が20～22%であるのに対し、2022年には電力の6%を占めるのみである。また、火山国である日本の地熱発電の潜在力は世界第3位<sup>38</sup>であるが、その開発は他のエネルギー源ほど積極的には進められていない。

**水素とその誘導品の輸入に注力：**国内での低コストの再生可能エネルギー源の拡大には限界があると見られているため、水素製造コストの低い国々からグリーン水素やブルー水素（およびその誘導品）を輸入することを見据えて、必要な技術を日本は開発してきた。例えば、液化水素、MCH（メチルシクロヘキサン）、アンモニアなど、さまざまな形態の海上輸送技術を開発しており、約50年前に液化天然ガスの輸入開始に成功した歴史を繰り返すことを目指している。水素とその誘導品の主な用途のひとつは、アンモニアを燃料とする発電であり、交流発電の慣性力を維持しつつ、アンモニアを燃料として貯蔵できる特徴も持つ。水素は様々な使い方が可能な低GHG排出エネルギーであるが、その一方でエネルギー変換に伴う損失等があるため、エネルギーを元の形で直接使用するよりもエネルギー効率が低く、コストが高くなる等の課題が知られている。この状況は、万能ではあるが専門的な道具ほどは使いやすくないスイス・アーミー・ナイフに似ている<sup>39</sup>。

**国内でのCCSの機会が限られる中、海外にも機会を求める：**国内には枯渇した油田・ガス田がほぼないことや、地震や火山活動などによる漏洩リスクが高いことなどから、国内でCO<sub>2</sub>地中貯留に適したサイトは十分にはないと考えられている。そのため、国内サイトと並行して、海外におけるCO<sub>2</sub>貯留機会が探られている。日本政府は2023年

にCCSの長期ロードマップ<sup>40</sup>を策定し、2024年5月にはCCSに係わる事業を行うために必要な基本的枠組みを定めたCCS事業法<sup>41</sup>が成立した。

**効率的ではあるが焼却に依存した廃棄物管理システム：**日本の廃棄物管理システムは比較的効率的であると言える。これは、廃プラスチックのリサイクルで言えば、2000年以降の容器包装リサイクル法（拡大生産者責任の一形態）や、最終処分場不足のため埋立てを避けるという全般的な環境政策によって推進されてきたためと考えられる。例えば、PETボトルのリサイクル率（リサイクル材の量／販売量）は、2021年には86%であったのに対し、同じ統計で欧州は43%であった<sup>42</sup>。また、プラスチック全般に関しては、排出された廃プラスチックに対する（リサイクルやエネルギー回収による）利用率は、2021年には87%であった<sup>43</sup>。しかし、その「利用」の71%はエネルギー回収を伴う焼却であった。今日、エネルギー回収として発電やセメント製造などで利用されている廃プラスチックは、発電やセメント製造がネットゼロを追求するにつれて、よりGHG排出の少ないエネルギー源に取って代わられる可能性が高い。一方でこれは、既存の回収システムが、有力な選別システムやケミカル・リサイクル技術と組み合わせれば、プラスチック廃棄物をリサイクルする強力なインフラになり得ることを意味している。

**人口減少：**日本の人口は2050年までに約20%減少すると予想されているため<sup>44</sup>、一人当たりの消費量を横ばいと仮定した場合、これは内需の減少となる。従って、化学産業は海外事業を拡大するか、単純な販売量に頼らない新たなビジネスモデルを追求しない限り、縮小に直面することになる。

38 資源エネルギー庁、もっと知りたい！エネルギー基本計画4（2022）、[https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/energykikonkeikaku2021\\_kaisetu04.html](https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/energykikonkeikaku2021_kaisetu04.html)

39 Liebreich Associates, The Clean Hydrogen Ladder (2021), <https://www.liebreich.com/the-clean-hydrogen-ladder-now-updated-to-v4-1>

40 経済産業省、CCS長期ロードマップ検討会（2023）、[https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/ccs\\_choki\\_roadmap/index.html](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/ccs_choki_roadmap/index.html)

41 経済産業省、CCS事業法（2024）、<https://www.meti.go.jp/press/2023/02/20240213002/20240213002-6.pdf>

42 PETボトルリサイクル推進協議会、日米欧のリサイクル状況比較、<https://www.petbottle-rec.gr.jp/data/comparison.html>

43 プラスチック循環利用協会、プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況（2021）、[https://www.pwmi.or.jp/flow\\_pdf/flow2021.pdf](https://www.pwmi.or.jp/flow_pdf/flow2021.pdf)

2021年のプラスチック廃棄物排出量8.24 Mtのマテリアルフロー：リサイクル2.06 Mt、エネルギー回収を伴う焼却5.10 Mt、エネルギー回収を伴わない焼却0.63 Mt、埋立0.45 Mtにおいて、 $(2.06 + 5.10) / 8.24 = 87\%$ 、 $5.10 / (2.06 + 5.10) = 71\%$

44 United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 2022. World Population Prospects: The 2022 Revision.

## 1.4 日本の化学産業にも独自の出発点がある

**日本に広く点在する小規模で古いコンビナート：**日本の化学コンビナートは、一般に他のアジア諸国と比べて小規模で老朽化したクラッカーを中心としている<sup>45</sup>。これらのコンビナートは、原油・ナフサの輸入に適した地点に立地しつつ日本に広く点在している。さらに、各コンビナートは複数の企業が所有する製造設備で構成されており<sup>46</sup>、多様な化学企業の強みが生かせるものの、ネットゼロに向けての一体的な活動を困難にしている。一方で、これらの製造設備は、高コストな輸入化石原料に対応するため、エネルギー効率では世界をリードしている<sup>47</sup>。

**競争と産業構造：**日本の基礎化学品事業の主な競争は、主にナフサを原料とする中国本土、台湾、韓

国等の大型・新型プラントや、ガスを原料とする中東や米国のプラントである。日本の化学企業は基礎化学品（川上化学産業）よりも機能化学品（川下化学産業）に戦略的なフォーカスを置いているが、前者の競争力は課題となっている。実際、日本の基礎化学品事業は、前述のように海外の競合と比べると細分化されており、このような産業構造が維持されたのは、大規模な合併やリストラを避けつつ、生産能力を縮小し稼働率を高めることによって、これまで利益を確保できてきたことが大きい。これは、日本の石油精製業界が合併やリストラを繰り返し、より競争力のある少数の企業群に変貌してきたのとは対照的である。

## 1.5 本研究の目的

本レポートでは、以下のことを示し、現在の日本の化学産業と望ましい未来とをつなぐ架け橋となることを目的とする。

- 日本で事業を行う化学産業がスコープ1, 2, 3のネットゼロを達成するための定量的なパスウェイを、既に確立したモデルを用いて示す（セクション2と3）。
- 不確実性が存在する中でも化学産業が前に進むための道を示す（セクション3と4）。
- 定量的パスウェイから得られた知見と、日本および日本の化学産業に関する既存の知見を組み合わせることにより、日本の強みと弱みを踏まえた戦略とアクションを示す（セクション4）。

## 1.6 本研究で用いるアプローチ

**需要シナリオと供給シナリオ：**我々の定量モデルは、需要モデルと供給モデルを組み合わせたものである。需要モデルからは2つの需要シナリオを作成し、供給モデルからは3つの供給シナリオを作成した。2

つの需要シナリオはBAUとCEと呼ばれ、BAU (Business as usual) シナリオでは日本の人口減少のみを想定しているのに対し、CE (Circular economy) シナリオでは人口減に加えて、サプライチェーンの川

45 経済産業省, 世界の主要石油化学プラント (2019), [https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12546205/www.meti.go.jp/policy/mono\\_info\\_service/mono/chemistry/downloadfiles/03\\_2019plant.pdf](https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12546205/www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/chemistry/downloadfiles/03_2019plant.pdf)

石油化学工業協会, 石油化学コンビナート, <https://www.jpca.or.jp/trends/plants.html>  
稲葉和也 他, コンビナート新時代, 化学工業日報社 (2018)

46 石油化学工業協会, 各社コンビナート系統図, <https://www.jpca.or.jp/files/trends/kakusha.pdf>

47 日本化学工業協会, 2050年カーボンニュートラルに向けた化学業界のビジョン (基本方針等) [https://www.nikkakyo.org/sites/default/files/GlobalWarmingInitiatives/CN/CN\\_FollowupReport.pdf](https://www.nikkakyo.org/sites/default/files/GlobalWarmingInitiatives/CN/CN_FollowupReport.pdf)

下において強力なサーキュラー・エコノミーが進められることで、化学品の需要がさらに減ることを想定している。需要シナリオの詳細についてはセクション2で述べる。また、3つの供給シナリオはME、NFAX、NFAX2と呼ばれ、MEはネットゼロを達成するために最も低コストの製造技術（すなわち原料や製造プロセス）を採用し、NFAXはコストに関係なく最も排出削減効果が大きい製造技術を採用する。そしてNFAX2は、日本がCCSを確保できない状況を想定してCCSを一切使用しないこと以外は、NFAXと同じである。これら3つの供給シナリオには、ネットゼロを追求するために「GHG 排出削減メカニズム」が組み込まれている。この「GHG 排出削減メカニズム」は、生産能力の一定割合を毎年、より排出量が小さい製造技術へ強制的に置き換えることにより、日本の化学産業全体の排出量をネットゼロに向かわせる。この際に、最も安く排出削減できる製造技術で置き換えるのか、最も排出削減効果が大きい製造技術で置き換えるのかはシナリオ (ME、NFAX、NFAX2) によって異なる。供給シナリオについてはセクション3で詳述する。

**ネットゼロ・パスウェイ (需要シナリオと供給シナリオの組み合わせ) :** 2つの需要シナリオと3つの供給シナリオを組み合わせることにより、6つのネットゼロ・パスウェイを算出した。6つのパスウェイのうち、**図7**に緑色で示される4つのパスウェイ (BAU-ME、CE-ME、CE-NFAX、CE-NFAX2) が最も洞察に富んでいると考えられるため、これらをセクション3で詳述する。この4つのパスウェイの概要は以下の通りである。

- BAU-ME (Business as usual 需要を、最低コストのネットゼロ製造技術で実現する)
- CE-ME (Circular economy で減少した需要を、最低コストのネットゼロ製造技術で実現する)
- CE-NFAX (Circular economy で減少した需要を、コストを度外視して、最も排出削減効果が大きいネットゼロ製造技術で実現する)
- CE-NFAX2 (Circular economy で減少した需要を、コストを度外視して、CCSを使用せずに最も排出削減効果が大きいネットゼロ製造技術で実現する)

			供給シナリオ		
			最小コスト	最速GHG排出削減	最速GHG排出削減・CCSなし
			ME	NFAX	NFAX2
需要シナリオ	人口減少のみ	BAU	BAU-ME	(BAU-NFAX)	(BAU-NFAX2)
	人口減少+川下サーキュラー・エコノミー	CE	CE-ME	CE-NFAX	CE-NFAX2

**図7: 2つの需要シナリオ、3つの供給シナリオ、6つのネットゼロ・パスウェイの組み合わせ (図1の再掲)**

**我々のアプローチの強み:** 我々のアプローチは、2020年から2050年までの毎年の需要を示す需要モデルと、同期間において毎年の需要を満たす製造技術(原料や製造プロセス)の構成を記述する供給モデルを組み合わせたものである。このアプローチにより、2020年から2050年までの間において生産能力と製造技術の構成割合が連続してネットゼロに向けて変化する形で示される。このアプローチには複数の長所がある。1つ目は Forecast アプローチの長所である現状からの継続性と、Backcast アプローチの長所である目標状態への到達を組み合わせたものであること。2つ目は化学産業が取るべき主要なアクション(バイオマス由来原料の確保や CCS など)の影響を示し、パスウェイ間で比較できることである。なお、先の「GHG 排出削減メカニズム」に毎年一定の割合を用いたので、2050年に排出が正確にネットゼロになることは保証できなくなるが、本研究の目的には、このアプローチが十分かつ適切であると考ええる。モデルの詳細や Python プログラムの考え方については、我々の学術論文<sup>48</sup>を参照されたい。また、モデル計算に用いた Python プログラム等は GitHub サイトからダウンロード可能である<sup>49</sup>。なお、需要シ

ナリオ、供給シナリオ、パスウェイで示された結果は、将来予想 (Forecast) ではなく、ネットゼロへの移行に必要な主要アクションを明らかにするためのシミュレーションであることに留意されたい。

**本研究の対象範囲:** 本研究では、化学品のサプライチェーンの起点となる7つの基礎化学品(エチレン、プロピレン、ブタジエン、ベンゼン、トルエン、キシレン、メタノール)を対象とする。モデルで対象とした GHG 排出の種類は、GHG プロトコルのスコープ1(直接 GHG 排出)、スコープ2(電力や蒸気などの購入エネルギーからの間接 GHG 排出)、スコープ3(その他の間接 GHG 排出)のカテゴリー1(購入した製品・サービス)とカテゴリー12(販売した製品の廃棄)である。スコープ3のうち、カテゴリー1と12を対象としたのは、主要な化学メーカーにおけるスコープ3排出<sup>50</sup>において、これらのカテゴリーの排出量が最も大きいためである。なお、モデルで考慮した GHG は、二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) とメタン (CH<sub>4</sub>) である。

48 Meng F. et al., Planet-compatible pathways for transitioning the chemical industry. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **120**, e2218294120 (2023), <https://doi.org/10.1073/pnas.2218294120>  
Kanazawa D. et al., Scope 1, 2, and 3 Net Zero Pathways for the Chemical Industry in Japan, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, **57**, 2360900 (2024), <https://doi.org/10.1080/00219592.2024.2360900>

49 <https://github.com/systemiqofficial/Pathways-Chemical-Industry-Japan>

50 BASF SE, Scope 3 GHG Inventory Report (2021), [https://www.basf.com/dam/jcr:d562fa5f-c658-3bb8-849a-737f2254cd67/BASF\\_Scope\\_3\\_Report\\_2021.pdf](https://www.basf.com/dam/jcr:d562fa5f-c658-3bb8-849a-737f2254cd67/BASF_Scope_3_Report_2021.pdf)

## セクション2：需要

日本の化学産業は、人口減少とサプライチェーン川下におけるサーキュラー・エコノミーによる将来の需要減に対応しなければならない

### セクション概要

**現在の日本の化学産業とそのサプライチェーンは、リニア（直線的）で温室効果ガス (GHG) 排出が大きい:**そのため、化学産業のサプライチェーン川下の顧客は、スコープ 1, 2, 3 のネットゼロ、プラスチック汚染防止、そしてコスト削減を追求する中で、サーキュラー・エコノミー活動を強化し、その結果、化学製品の需要減少をもたらす可能性が高い。これは、今後予想される日本の国内人口減少に加えて起こりうることである。

**2つの需要シナリオを考察する:**1つ目 (BAU 需要シナリオ, Business as Usual) は日本における将来の人口減少のみを想定し、2つ目 (CE 需要シナリオ, Circular Economy) では川下でのサーキュラー・エコノミー (リサイクル以外にも、使用削減や再利用も含む) を人口減少に加えて想定している。オレフィン (エチレン、プロピレン、ブタジエン) と芳香族 (ベンゼン、トルエン、キシレン) の年間需要の合計は 2020 年の 25.1 Mt (Mt は 100 万トン) から、2050 年には BAU 需要シナリオでは 22.7 Mt に減少し、CE 需要シナリオでは 14.4 Mt に減少する。これらの需要シナリオは、セクション 3 で詳述する供給シナリオと組み合わせて、ネットゼロのパスウェイを構築するために使用される。

**こうした長期的な需要動向の可能性を考えると、化学産業は川下顧客のサーキュラー・エコノミーをビジネスとしてサポートする準備を早く行えば行うほど有利に働く:**なお、これらの需要シナリオは将来予測ではないことに留意されたい。

## 2.1 スコープ 1 と 2 に加え、スコープ 3 の排出削減が必須となる

日本の化学産業とそのサプライチェーンは、サーキュラー（循環型）ではなくリニア（直線的）であり、GHG の排出が大きい：日本の化学製品の大半は、現在、化石原料（ナフサなど）から製造され、排出されたプラスチックがリサイクルされる割合は低く（2021 年に 25%<sup>51</sup>）、回収された廃プラスチックのほとんどは焼却されている。このようなリニアなサプライチェーンは外部不経済を増大させ、今後の事業継続を危うくする恐れもある。このようなサプライチェーンのままでは、金融やブランドオーナーが求めるスコープ 3 のネットゼロのみならず、2050 年までにネットゼロを達成するという日本政府の目標達成も難しく、化学産業の事業価値を脅かしかねない。

- **GHG 排出の観点から見ると**、本研究の対象範囲に含まれる化学品（メタノール、エチレン、プロピレン、ブタジエン、ベンゼン、トルエン、キシレン）の製造によるスコープ 1 と 2 の排出は、2020 年には 23 Mt CO<sub>2eq</sub> であり、スコープ 3 の排出量を加えると 65 Mt CO<sub>2eq</sub> と推計される<sup>52, 53</sup>（図 8）。これはそれぞれ、日本の総排出量（2020 年は 1.142Gt CO<sub>2eq</sub>）の 2.0% と 5.7% に相当

する<sup>54</sup>。スコープ 1, 2, 3 の排出の大部分（65 Mt のうち 42 Mt、すなわち 65%）は、上流での原料採掘と下流での廃棄処理によるものであり、今の化学産業にとって、これらをコントロールするのは難しい。さらに、Hmiel らが提唱するように<sup>55</sup>、上流での漏洩メタン排出を適切に計上し、かつ、製造される化学品が仮に廃棄時に全て焼却された場合、スコープ 1, 2, 3 の排出量は、ほぼ 2 倍（120 Mt CO<sub>2eq</sub>、日本の排出量の 11%）になる可能性があり、化学産業にとってより大きなリスクとなる。

- **廃棄物の観点から見ると**、日本は効率的な廃棄物管理システムの恩恵を受けているとはいえ、陸上や海への漏洩は依然として発生していると考えられ、一般的には総発生廃棄物の 0.5 ~ 2% を占める可能性がある<sup>56</sup>。しかし、日本の化学産業にとっての廃棄物のリスクは、輸出量を考えると、海外でももたらされることになる。すなわち、廃棄物管理体制が不十分な国での漏洩によって、間接的に日本の化学産業が影響を受ける可能性がある。

51 プラスチック循環利用協会、プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況（2021）、[https://www.pwmi.or.jp/flow\\_pdf/flow2021.pdf](https://www.pwmi.or.jp/flow_pdf/flow2021.pdf) において、2.06 / 8.24 = 25%（脚注43も参照）

52 本レポートでは、スコープ3の排出とは、カテゴリ1（購入した製品・サービス）、カテゴリ12（販売した製品の廃棄）を指す。

53 スコープ3の排出は、必ずしも日本国内のみで発生するものではない（海外に輸出される化学品など）

54 国立環境研究所、日本の温室効果ガス排出量データ、<https://www.nies.go.jp/gio/archive/ghgdata/index.html>

55 Hmiel, B. et al., *Nature* **578**, 409–412 (2020), <https://doi.org/10.1038/s41586-020-1991-8>

56 The Pew Charitable Trusts and Systemiq, *Breaking the Plastics Wave* (2020), <https://www.systemiq.earth/breakingtheplasticwave/>

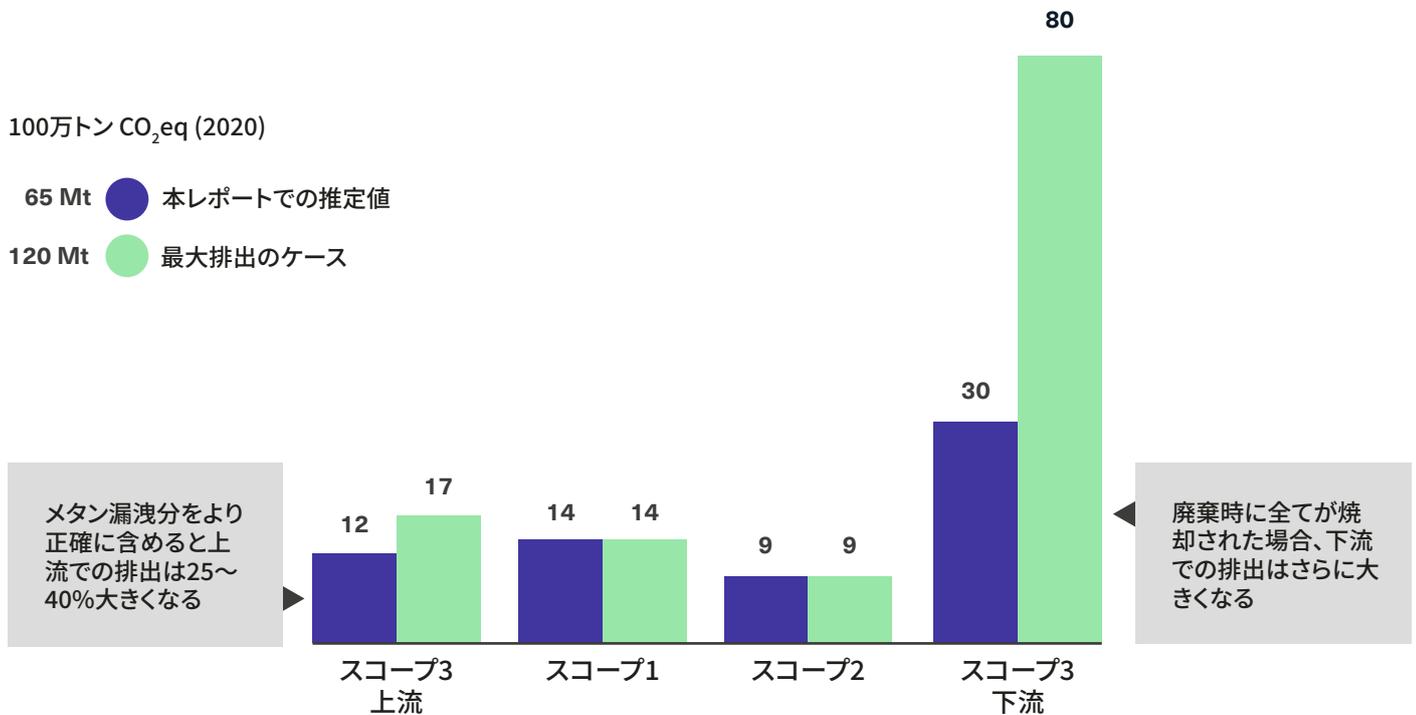


図 8: 2020 年における日本の 7 つの主要化学品のスコープ 1, 2, 3 の年間排出量の推定値

## 2.2 需要減少は、川下産業がスコープ 3 の排出を削減するためにサーキュラー・エコノミーを加速することによってもたらされる可能性がある

**2050 年までのオレフィンと芳香族に関する 2 つの需要減少シナリオ:**川下産業（ブランドオーナー等）は、消費者、NGO、金融機関等から排出削減のプレッシャーにさらされているが、その GHG 排出についてはサプライチェーン上流からのスコープ 3 排出が大部分を占めることが多い<sup>57</sup>。川下産業が GHG 排出削減、プラスチック汚染削減、そしてコスト削減のためにサーキュラー・エコノミーを進めるにつれて、プラスチックなどの化学製品を製造するためのオレフィンや芳香族の需要は、日本の将来の人口減少のみから予想されるよりも大幅に減少する可能性がある。セクション 1 で説明したように、本研究では 2 つの需要シナリオ（BAU と CE）を用いる。2050 年までに人口が約 20% 減少するが、川下で現在以上のサーキュラー・エコノミー活動が行われないと仮定した

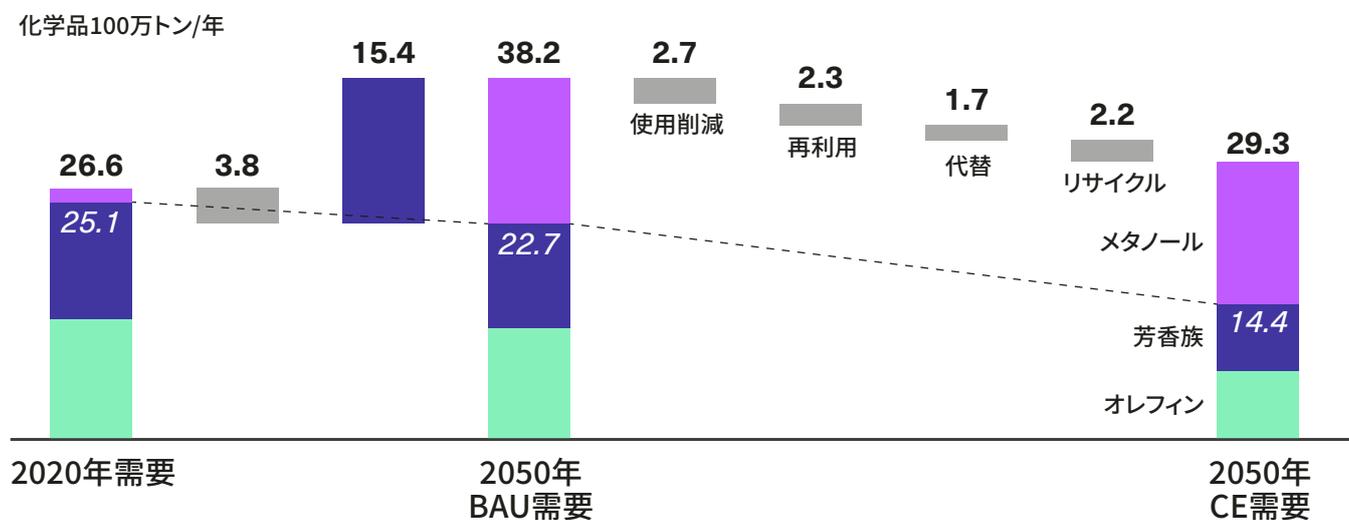
BAU 需要シナリオは、オレフィンと芳香族を合わせた年間需要が 2020 年の 25.1 Mt から 2050 年には 22.7 Mt に減少し、人口減少のみで 2050 年までに約 10% の需要減少<sup>58</sup> をもたらすとするシナリオである。その一方で、人口減少に加えて、川下におけるサーキュラー・エコノミー活動の拡大により、2050 年のオレフィンと芳香族の合計年間需要は 14.4 Mt になるとするのが CE 需要シナリオである（図 9）。これらの需要シナリオは、川下の 4 つの主要産業（包装・日用品、運輸、建築、アパレル）の需要から推計された。なお、これらのシナリオは将来予測ではなく、ネットゼロを達成するために必要な主要アクションを特定するためのシミュレーションであることに留意されたい。実際には、政策目標のレベル（例えば使い捨てプラスチックの禁止やリサイクル材使用の義務化の度

57 Partnership for Carbon Transparency (PACT), Pathfinder Framework Version 2.0 (2023), Page 7, <https://www.wbcsd.org/resources/pathfinder-framework-version-2-0/>

58 (1) オレフィンと芳香族およびその誘導品の純輸出量（輸出から輸入を差し引いた量）は 2050 年まで一定であると仮定し、(2) 国内消費量の減少は、2050 年までに国連が予測する人口減少（約 20%）に比例するものとし、(3) 2050 年の需要シナリオには、太陽光パネル部品向けのエチレン追加需要など、エネルギー部門のネットゼロ達成を支える化学品の需要増（2050 年に 1.1 Mt）が含まれると仮定している。

合い) や、消費者やNGOからのプレッシャーに影響される川下産業の目標設定(例えばネットゼロ、リサイクル、プラスチックの使用に関する目標)によって、将来の需要減少は加速・減速する可能性がある。また、将来の需要は、純輸出(輸出から輸入を差し引いたもの)のレベルにも影響される。このような川下産業からの需要減少の流れに対して、化学産業が抗うことは難しい。従って、新たなビジネス・アプローチを準備し始めるのが早ければ早いほど、有利に働くとと言える。

**需要減少は、サプライチェーン川下におけるサーキュラー・エコノミーの4つの手段によって加速する:**4つの手段とは、使用削減、再利用、代替、リサイクルである。この中では、使用削減の効果が最も大きく(CE需要シナリオにおいて2050年に年間2.7 Mtのオレフィン・芳香族・メタノールの需要減をもたらす)、次いで再利用(2.3 Mt)、リサイクル(2.2 Mt)<sup>59</sup>、代替(1.7 Mt)となる。



**図9: 日本における2020年から2050年のオレフィン、芳香族、メタノールの需要推移(図2の再掲):** 白字の数字はオレフィンと芳香族のみの総需要。

**「使用削減」は2050年のCE需要シナリオにおいて、オレフィン、芳香族、メタノールの需要を年間2.7 Mt減少させる、サーキュラー・エコノミーの中で最大の手段である:** 使用削減とは、同じサービスを社会に提供する上で、製品全体またはその一部がもはや必要とされない場合を指す。サーキュラー・エコノミーの原則から見て最も効率的であり、コスト削減のメリットも享受できるため、全ての川下産業がこの手段を用いると考えられる。例えば、 unnecessaryプラスチック包装の削減(年間0.7 Mt)は、包装の軽量化、

袋やその他の小物(ストローなど)の規制、小袋(コンシューマーケア産業、調味料など)や企業間のパレット包装のような軟包装の廃止等によってもたらされる。また、使用削減には、より少ない資源で済む、より効率的な建物や床面積の使用への移行も含まれる(0.6 Mt)。さらに、運輸部門における化石燃料からの脱却は、芳香族やオレフィン由来の燃料改質剤の減少(0.4 Mt)につながり、自動車の長寿命化による新車生産の減少(0.4 Mt)も加わる。

59 ここでのリサイクルには、マテリアルリサイクル、溶剤ベースのリサイクル技術、解重合ケミカルリサイクルを含むが、熱分解油化とガス化によるケミカルリサイクルは含まない(これらはオレフィンや芳香族の生産量を減らさないため、セクション3の供給モデルで扱う)。

**「再利用」に関するビジネスモデルは急速に拡大しており、CE 需要シナリオでは 2050 年には 2.3 Mt の年間需要減少となる：**これは、Mobility as a Service (MaaS) や closed loop の食品包装 / 配送など、化学製品の有用性は引き続き評価されながら、同じ量の製品・サービス提供に際してより少ない化学品で済む新しいビジネスモデルを含む。これは経済的・環境的メリットに基づくものであるが、この実現には新たなサプライチェーン、ビジネスモデル、パートナーシップが必要となることがボトルネックとなっている。サービス化のビジネスモデルは多くの業界で開発され、化学産業でも Chemical as a Service というコンセプトがある。また、包装容器や日用品業界は、この新しいパラダイムの影響を最も受けやすい。例えば、食品（飲料や調味料など）や消費者製品（シャンプーや洗剤など）の新しい包装・配送モデルや、企業間輸送のための包装（再利用可能な梱包など）により、2050 年までに年間 1.5 Mt のプラスチックが必要なくなる。また、運輸部門でも、Mobility as a Service により、必要な車両台数の減少が進み、年間 0.7 Mt の需要が減少する。

**「代替」は、CE 需要シナリオにおいて 2050 年に 1.7 Mt の年間需要減少をもたらす、その大部分は包装材料によるものである：**代替には、本研究の対象範囲に含まれない材料（紙等）によって化学製品が代替される全ての手段が含まれる。なお、材料の代替に際しては、明確な GHG 排出削減メリットが必要であるとともに、他のカテゴリー（森林減少、生物多様性の損失等）において意図しない影響を避けるために、徹底したライフ・サイクル・アセスメント (LCA) が必要である。また、代替は環境への漏出の可能性が高い化学製品についても有効な手段となる可能性がある<sup>60</sup>。現時点では、代替は包装・日用品セクターで最も有望であると考えられ、紙やコート紙（果物や野菜の容器、陳列用トレイ、発泡スチロール代替品、外食容器等）の使用増加や、その他の材料（コンポスト可能な食品容器等）の使用増加により、2050 年には年間 1.3 Mt の代替が見込まれる。また、建築・建設業界では、バイオマス由来の材料（内

装用木材等）へのシフトが進み、2050 年には年間 0.2 Mt の代替が見込まれる。

**「リサイクル」は重要な手段であるものの、入手可能エネルギーに制約があるため、CE 需要シナリオにおける需要減少は 2.2 Mt にとどまる：**このセクションでは、以下のマテリアル・リサイクルと川下ケミカル・リサイクル技術（解重合や溶剤を用いたリサイクルなど）の 2 つのリサイクル形態を扱う。なお、川上ケミカル・リサイクル技術（熱分解油化やガス化など）は、本研究が対象とする 7 つの化学品の需要に影響を与えないため、リサイクルから除外し、基礎化学品（オレフィン、芳香族、メタノール）の原料としてセクション 3 で扱う。

- **マテリアル・リサイクル<sup>61</sup>を拡大して 2030 年までに包装用プラスチックのリユース・リサイクル率 60% という日本政府の目標<sup>62</sup>を達成する：**マテリアル・リサイクルは、GHG 排出削減のためには現在、最も効果的なリサイクル法であると考えられる。これにより、CE 需要シナリオにおいて 2050 年には年間 1.8 Mt の需要減少につながる。これには、リサイクルのための製品設計、デジタル透かしを含むラベリング等にも支えられた選別技術、リサイクル装置の性能向上、廃棄物の品質を向上させるための新しい汚染除去ステップの導入、物理的特性の損失を補うための新しい添加剤の開発など、継続的な技術開発を想定している。全ての川下セクターがマテリアル・リサイクルを活用すると考えられる。
- **ケミカル・リサイクル（解重合や溶剤ベースのリサイクル）も、2050 年には年間 0.4 Mt の需要減少をもたらす：**プラスチックをモノマーやきれいなポリマーにリサイクルするこれらのケミカル・リサイクル技術は、基礎化学品製造をバイパスし、マテリアル・リサイクルが実現できない高品位なプラスチック等を作ることによって、マテリアル・リサイクルを補完しながらリサイクル産業の新たな基盤となる。

60 漏出の可能性が高い用途の例としては、塗料、タイヤの摩耗が挙げられる。

61 マテリアル・リサイクルはポリマーの化学構造を変えずに、プラスチックのリサイクルを行う。複数のグレードのプラスチックやそれらに含まれる添加剤が混合されるため、新品プラスチックと比べて性能が劣ることが多い。

62 環境省、プラスチック資源循環戦略 (2019), <https://www.env.go.jp/press/106866.html>

**将来の需要減少の可能性を鑑み、化学産業はリサイクル技術を強化して川下顧客のサーキュラー・エコノミーを支援する準備を行うべきである：需要減少が化学産業にとって望ましい状況でないことは明らかである。しかし、サプライチェーンの川下セクターは、スコープ3の排出削減、プラスチック汚染削減、コストの削減を目指して、サーキュラー・エコノミーにますます積極的に取り組むようになるであろう。加えて、現在進行中のプラスチック汚染防止のための政府間交渉は、リサイクルの強化や一次プラスチックの**

生産量削減をもたらす可能性もある。これらの流れに日本の化学企業が抗うことは不可能であろう。従って、現在のような販売数量ベースのリニアなビジネスから脱却し、より幅広い化学製品のリサイクルを可能にする技術を実現しながら、例えば、このようなリサイクル技術を活かして川下の顧客に対して closed loop のサービス型のビジネスを提供し、顧客のサーキュラー・エコノミーを支えるようなビジネスモデルを展開するのが早ければ早いほど、有利に働くと言える。

# セクション3：供給

## 日本の化学産業におけるスコープ 1, 2, 3 の ネットゼロとその意味合い

### セクション概要

日本の化学産業は、(1) 化石原料から代替原料への転換、(2) エネルギー源の転換、(3) CCUS の適用という 3 つの基本アプローチを組み合わせることにより、スコープ 1, 2, 3 のネットゼロを達成することができる：実際に、日本の化学産業が 2050 年までにネットゼロを達成するための以下に示す 4 つのパスウェイは、これら 3 つのアプローチの組み合わせから成り立っている。例えば、BAU-ME パスウェイと CE-ME パスウェイは、それぞれの需要シナリオ (BAU と CE) を満たしながら、ネットゼロ・エネルギー源への切り替えに加えて、主に CCS と化石原料を使用することによりネットゼロを達成する。その一方で、CE-NFAX2 パスウェイは主に代替原料 (バイオマス由来原料やリサイクル材など) を使用し、CE-NFAX パスウェイは代替原料と CCS の両方を使用することで、ネットゼロ・エネルギー源への切り替えと併せて、ネットゼロを達成する。ネットゼロを実現するためのエネルギー源の切り替えに関しては、電力や熱に関しては複数のオプションがある。しかし、実際に各企業の各プラントが現在の化石エネルギーから具体的にどのエネルギー源に切り替えるべきかについては、粒度が限られる本研究の対象範囲を超えているため除外する (ただし、クラッカーのエネルギー源については別途考察する)。

スコープ 1, 2, 3 のネットゼロを達成するために、オレフィン・芳香族・メタノールは全て、2050 年までにその製造プロセスと原料が大幅に変更されることになる：オレフィンは、原油 (ナフサ) またはリサイクル熱分解油を原料としてネットゼロのために改造されたクラッカーを用いて、あるいはグリーン・メタノールまたはブルー・メタノールを原料に使用する Methanol to Olefins (MTO) プロセスを用いて、製造される。芳香族の製造は、Methanol to Aromatics (MTA) プロセスにシフトすると考えられる。これは、現在、ガソリン改質剤と芳香族の大半を製造している接触改質 (リフォーミング) が、内燃エンジン車の減少により廃止されるという前提に基づく。しかし、実際には MTA が商業規模に達するまでに時間がかかる等により、接触改質が残る可能性がある。このインフラの移行のためには、累積で 610 ~ 950 億ドルの設備投資が必要となる。この設備投資と原料コストの上昇により、2050 年にネットゼロを実現するオレフィンや芳香族のコストは、化石原料を使用した現在のオレフィンや芳香族の 2 倍以上になる可能性があるが、消費者製品の製造コストへの影響は限定的である。一方で、ネットゼロ化学品と現行化学品との間のコスト差は、2050 年よりも現在の方が大きいため、最大の課題は (2050 年を待たずに) 現在のコスト差をいかに克服するかである。

**スコープ3のネットゼロは、企業や国にとって化学製品の供給量に理論上の上限を課すものである：**具体的には、バイオマス由来原料、DAC-CCU（大気中の二酸化炭素の直接回収・有効利用）原料、リサイクル材、CCSへのアクセスが最大供給量を決めるということである。特にリサイクルは、どのパスウェイを選ぶにしても、日本の強みを活かしてケミカル・リサイクル技術をスケールアップしつつ、最大化する必要がある。バイオマス由来原料は非化石原料として重要な役割を果たすため、輸入バイオマスとのバランスをとるための国内供給源の開発が重要となる。メタノールは（ナフサとともに）基礎化学品を製造するためのプラットフォーム化学品となりうるものであり、日本は国内・海外両方の供給源を追求すべきである。また、エタノールもプラットフォーム化学品としての可能性を秘めているが、バイオエタノールの将来的な入手可能性は限られる可能性が高い。最後に、製造工程および製品使用後の焼却によるCO<sub>2</sub>排出を削減するためにCCUSの規模を拡大する必要がある。

## 3.1 日本の化学産業は3つの基本アプローチを組み合わせることにより、ネットゼロを達成できる

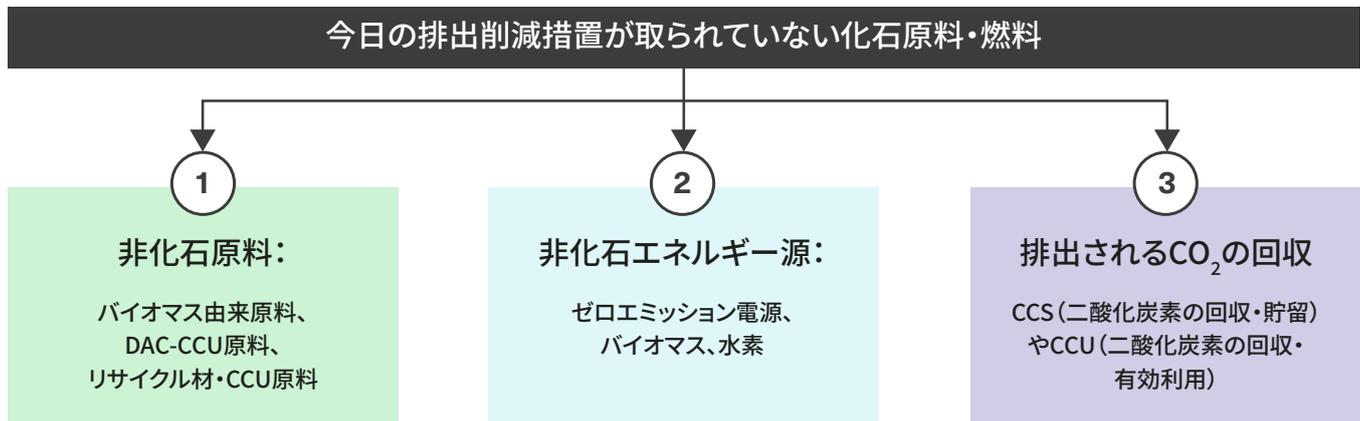
日本の化学産業は、(1) 原料転換、(2) エネルギー転換、(3) CCUSの適用という3つの基本アプローチを組み合わせることで、スコープ1, 2, 3のネットゼロを達成することができる（図10）。

**1. 化石原料から代替原料への転換：**代替原料（バイオマス由来原料、DAC-CCU原料、リサイクル材）が必要とされるのは、原料の一部が製造工程でエネルギーとして使用され（例えば、クラッカーからの副生ガスが燃料として使用される）、スコープ1の排出が発生するためであり、また化石原料の採掘・流通時の漏洩メタンや製品使用後の焼却によるスコープ3の排出を削減するため等である。なお、代替原料として何を用いるかについては、サステナビリティに配慮したバ

イオマス、廃棄物（リサイクル材）、エネルギーを大量に消費するDAC-CCUを含むCCU（二酸化炭素の回収・有効利用）など、利用可能なもの全体の中でバランスをとる必要がある。

**2. 製造工程をネットゼロのエネルギーでまかなうために、エネルギー源を切り替える：**グリーン水素を製造するための電力も含め、ネットゼロのエネルギー源（再生可能エネルギーや原子力発電、アンモニアやeメタンを含む水素、バイオメタンを含むバイオマスなど）への転換が鍵となる。

**3. 化学製品の製造工程や使用済み製品の焼却から排出されるCO<sub>2</sub>を回収し、地中に永久貯蔵するか、原料として利用する。**



**図 10** : 化学産業におけるスコープ 1, 2, 3 の排出削減のための 3 つの基本アプローチ

## 3.2 日本の化学産業が 2050 年までにスコープ 1, 2, 3 のネットゼロを実現することを可能にする、複数のパスウェイが存在する

セクション 1 の最後で示したように、本研究ではネットゼロを達成するための 3 つの供給シナリオ (ME、NFAX、NFAX2) を提示する。各供給シナリオは、上記の 3 つの基本アプローチを異なる割合でミックスしている。さらに、これら 3 つの供給シナリオを、セクション 2 で示した 2 つの需要シナリオ (BAU と CE) と組み合わせると、ネットゼロへの 6 つのパスウェイが得られる (図 11)。2050 年までの 6 つの

ネットゼロ・パスウェイのうち、図 11 に緑色で示した 4 つのパスウェイ (BAU-ME、CE-ME、CE-NFAX、CE-NFAX2) が日本の化学産業にとって最も示唆に富んでいると考えられるため、以下に詳述する。これら 4 つのパスウェイでは、3 つの基本アプローチを様々な形で組み合わせることにより、日本の化学産業全体をネットゼロに近づける、あるいはネットゼロを超えさせることができる。

		供給シナリオ			
		最小コスト	最速 GHG 排出削減	最速 GHG 排出削減・CCS なし	
		ME	NFAX	NFAX2	
需要シナリオ	人口減少のみ	BAU	BAU-ME	(BAU-NFAX)	(BAU-NFAX2)
	人口減少+川下サーキュラー・エコノミー	CE	CE-ME	CE-NFAX	CE-NFAX2

**図 11** : 2 つの需要シナリオ、3 つの供給シナリオ、6 つのネットゼロ・パスウェイの組み合わせ (図 1 の再掲)

**BAU-ME パスウェイと CE-ME パスウェイは、それぞれの需要 (BAU と CE) を満たしながら、最低コストでほぼネットゼロの状態を達成する:**これらのパスウェイは、安価で豊富な CCS サイトの開発と、化石原料の継続的使用を前提としている (図 12 参照)。

- 化石原料、特にナフサと天然ガスは、2050 年においても主要な炭素源であり続け、構成原料の 96 ~ 98% を占める。
- これらのパスウェイは、化石原料を使用するプロセス (クラッカー、メタンからのメタノール製造) や使用済製品の焼却によるスコープ 1 と 3 の排出を削減するために CCS の大規模な導入 (BAU-ME と CE-ME において、2050 年にそれぞれ年間 47 Mt と 26 Mt の CO<sub>2</sub>) に依存する。
- これらのパスウェイにおいて、スコープ 1, 2, 3 のネットゼロは概ね達成可能であるが、CCS における CO<sub>2</sub> 吸収の漏れと、化石原料採掘時における漏洩メタンのため、排出 (CO<sub>2eq</sub>) として BAU-ME と CE-ME でそれぞれ 2050 年において年間 12 Mt と 8 Mt が残り、おおよそのネットゼロとなる。
- BAU-ME パスウェイと CE-ME パスウェイは、ネットゼロ実現のための費用対効果が高く、一見魅力的なパスウェイであるが、これらのパスウェイは豊富で安価な CCS の導入に大きく依存している。実際には、日本の CCS の導入可能量・コストには大きな不確実性が伴うので、もし安価な CCS の大量導入に失敗すれば、日本の化学産業はネットゼロに到達できず、国際競争力を失い、場合によっては事業継続が難しくなるという深刻な結果を招く可能性がある。

**CE-NFAX パスウェイは、多様な原料と CCS を使用し、ネットゼロを超えて、化学産業とそのサプライチェーンとしてマイナス排出を達成する:**

- このパスウェイでは、化石原料の大部分 (62%) が代替原料に置き換わる。例えば、Direct Air Capture CCU (DAC-CCU) は 2050 年の炭素源の 29% を占め、バイオマス由来原料とリサイクル材はそれぞれ炭素源の 18% と 12% を占め

る。DAC-CCU のために、またバイオマス由来原料や廃棄物の炭素 / 水素比を調整するために、2050 年に最大 5.5 Mt という大量のグリーン水素が必要となる。

- DAC-CCU とグリーン水素のために、このパスウェイにおける電力消費量は CE-ME の 4 倍に達し、DAC では 0.1 EJ、グリーン水素製造は 0.3 EJ のエネルギーを消費する。
- CCS は、例えばリサイクルされた熱分解油を新たな原料として使用する場合や、クラッカー副生ガスからの排出を削減するために使用される。使用済み製品の焼却のための CCS と合わせると、CCS の必要量は、2050 年には年間 23 Mt となる。
- このパスウェイでは、2050 年までに化学産業とそのサプライチェーンの GHG 排出がネットゼロを超えてマイナスになることを可能にし、年間 18 Mt のマイナスの CO<sub>2eq</sub> 排出となる。
- このパスウェイは、化学産業のマイナス排出を達成するという点で魅力的である。しかし、バイオマス由来原料や DAC-CCU 原料に大きく依存しており、これらの原料は日本では商業規模で実証されていない。加えて、このパスウェイは、BAU-ME や CE-ME よりも少ないものの、CCS に依存している。

**CE-NFAX2 パスウェイは、多様な原料を使用しながら、CCS を使用せずにほぼネットゼロを達成する:**

- このパスウェイは、製造プロセスと原料の組み合わせに関しては CE-NFAX と同じであるが、ネットゼロに到達するために CCS を使用しない点で異なる。このパスウェイは、リサイクル材のほか、大気から CO<sub>2</sub> を吸収するバイオマス由来原料や DAC-CCU 原料に依存している。
- このパスウェイは、日本が CCS サイトを確保できないケースを想定しており、そのような中で日本の化学産業がスコープ 1, 2, 3 のネットゼロを達成するには、まだ大きなスケールで実証されていないリサイクル材、バイオマス由来原料、DAC-CCU 原料を使用する必要があることを示している。

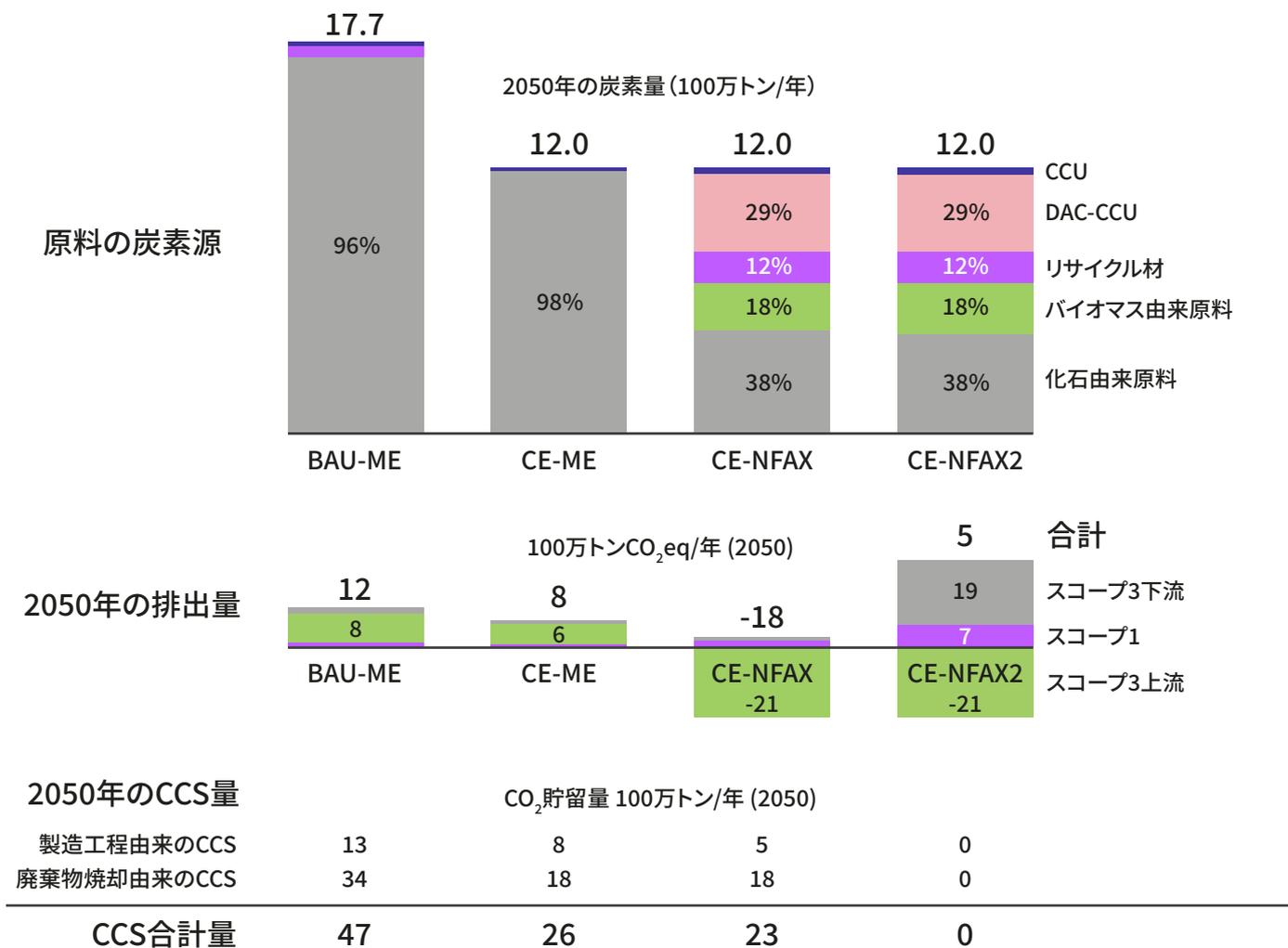


図 12 : パスウェイ別の 2050 年の原料の炭素源、GHG 排出量、CCS 量 (図 3 の再掲)

### 3.3 エネルギー源

ネットゼロのエネルギー源には複数のオプションがあるが、エネルギー転換のためのアプローチは各プラントの個別の事情に依存する：図 13 は、2050 年におけるエネルギーと原料の総需要を示している。BAU-ME が、より大きな需要に対応するために CE-ME よりも多くのエネルギーと原料を必要とすることは明らかである一方で、CE-NFAX は同じ需要量に対して CE-ME よりも多くのエネルギーを必要とする。これは、化石原料と比べて、水素、バイオマス、リサイクル材を含むプロセスにエネルギーが追加で必要なためである。本研究においては、化学産

業が製造プロセスで必要とする電力や熱については、再生可能エネルギー、原子力、ネットゼロ水素（アンモニアや e メタンを含む）、バイオメタンなどのバイオマス、CCS が施された化石火力などを利用することにより、2050 年までにネットゼロを実現すると仮定している。なお、各企業の各プラントが現在の化石エネルギーから具体的にどのエネルギー源に切り替えるかについては、粒度が限られる本研究の対象範囲を超えているため除外する（ただし、クラッカーのエネルギー源については、以下で別途考察する）。

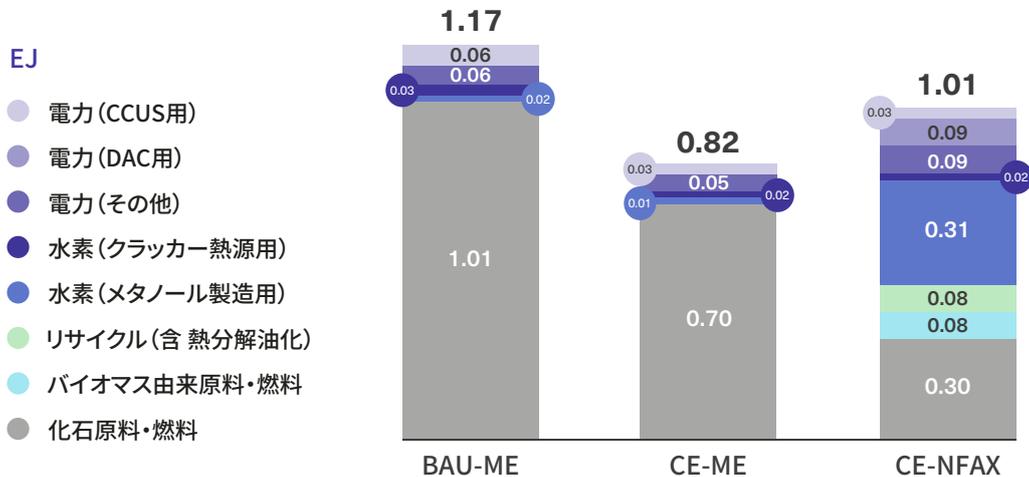


図 13：2050 年に必要な総エネルギー（含 原料）

### 3.4 オレフィン、芳香族、メタノールは 2050 年までにネットゼロを達成するために、製造プロセスと原料に大幅な変更が行われる

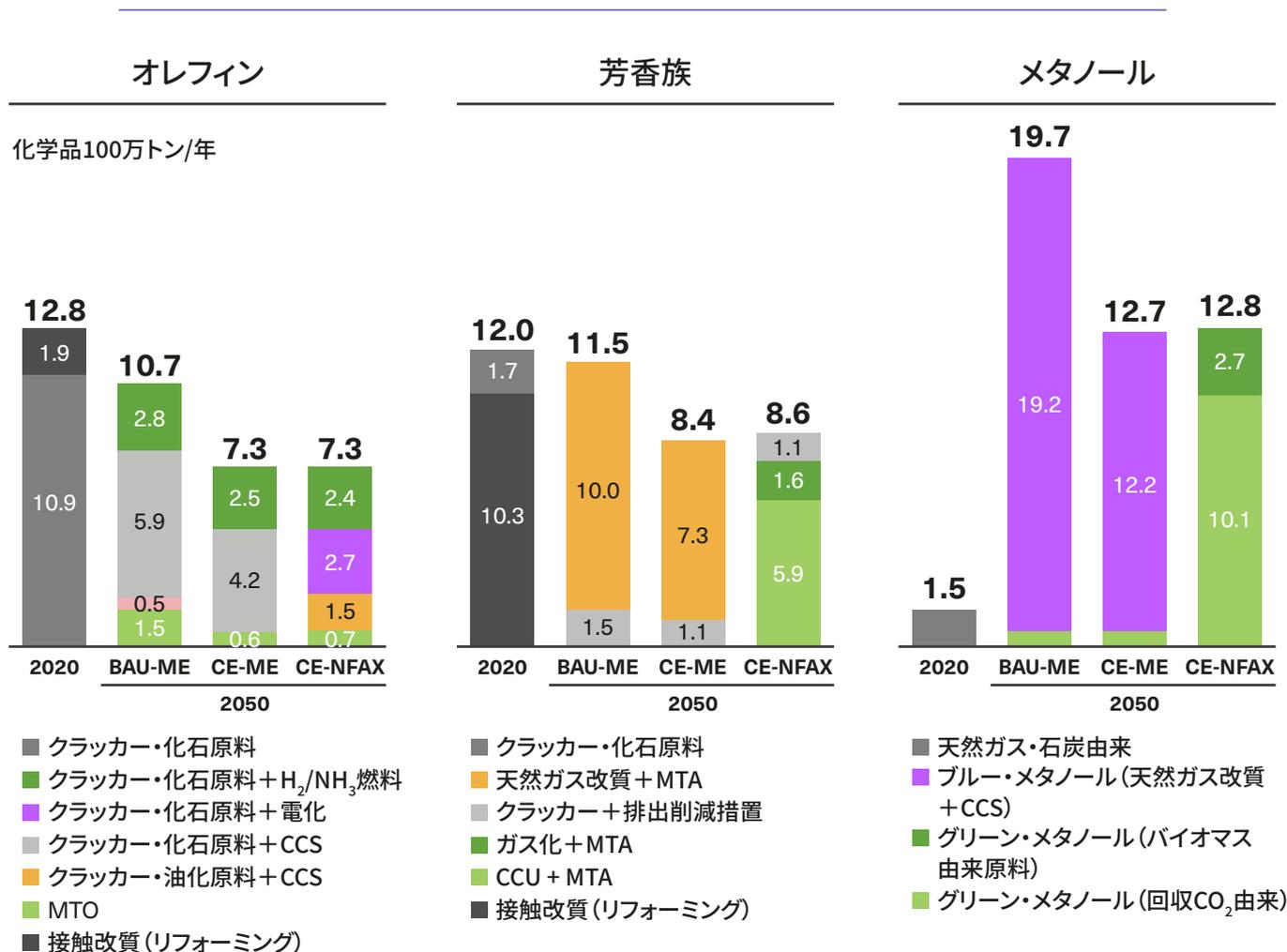
オレフィン、または MTO プロセスにより製造される：現在、日本においてオレフィンは、化石原料を使用するナフサ・クラッカーで製造されている。しかし、2050 年までに BAU-ME と CE-ME パスウェイでは、オレフィンは主に CCS を導入したクラッカー、水素やアンモニアを燃料とするクラッカー、そして MTO プロセスにより製造されるようになる。一方、CE-NFAX と CE-NFAX2 パスウェイでは、より大きな

排出削減を行うために MTO プロセスや水素・アンモニアを燃料とするクラッカーに加えて、電気クラッカーや、リサイクル熱分解油を原料に用いる CCS 付きクラッカーが使用されるようになる。

芳香族の製造は MTA プロセスに移行する：今日、芳香族は主に接触改質（リフォーミング）によって製造され、これにナフサ・クラッキングによるものが加わる。特に、接触改質プロセスは、今日、製油所で

輸送用燃料の品質（アンチノック）を改良する添加剤と芳香族を製造するために使用されているが、内燃機関を搭載した自動車の減少により、2050年までに接触改質プロセスは廃止されるという前提を本研究では置いている。その結果、BAU-MEとCE-MEパスウェイにおいては、2050年までに芳香族は主に天然ガス改質で製造されたメタノールを使用するMTAプロセスで製造されることになり、化石原料を使っているので使用済み製品の焼却から排出されるCO<sub>2</sub>のためにCCSが必要となる。CE-NFAXとCE-NFAX2パスウェイでは、天然ガスの代わりにCCU、DAC-CCU、またはバイオマスのガス化を使用してメタノールを製造し、MTAプロセスで芳香族を製造する。なお、実際にはMTAが商業規模に達するまでに時間がかかる等により、接触改質が残る可能性がある。

**オレフィンと芳香族をネットゼロにするための製造プロセスや原料はパスウェイによって異なるが、共通点が存在する：**オレフィン、芳香族、メタノールの製造技術（製造プロセスと原料）の内訳を図14に示す。これによると、ネットゼロへのパスウェイに依らず一部のクラッカーはネットゼロのオレフィンを製造ために改造される一方で、他のクラッカーはMTOに置き換えられ、さらに他のクラッカーは需要減により廃止される。これとは対照的に、芳香族製造はネットゼロへのパスウェイに依らず、排出削減措置を取られたクラッカーからの供給で補いながら、MTAプロセスへの大幅なシフトが行われる。なお、これらの結果は将来予測ではなく、最小コストまたは最速GHG排出削減を実現するためのシミュレーションであることに留意されたい。



**図14：パスウェイ別のオレフィン、芳香族、メタノール製造技術の内訳：**なお、CE-NFAX2パスウェイの製造技術構成はCE-NFAXと同じである。MTO、MTAはそれぞれMethanol to Olefins、Methanol to Aromaticsを意味する。

## 3.5 スコープ 3 のネットゼロは、化学製品の供給量に理論上の上限を課す

**バイオマス由来原料、DAC-CCU 原料、リサイクル材、CCS へのアクセスは、企業や国にとっての化学製品の最大供給可能量を定める：**スコープ 3 カテゴリー 12 は、販売した製品の廃棄における排出を扱う。スコープ 3 カテゴリー 12 がネットゼロであるという制約のもとでは、**図 15**において  $(A) = (E)$ ,  $(B) = (F)$ ,  $(C) = (G)$  が成り立つことを理論的に導くことができ、さらに  $(D) = (C) + (E) + (F)$  であることが示される（なお、 $(A) \sim (G)$  はそれぞれに含まれる炭素の量を示す。導出と前提の詳細については脚注<sup>63</sup>を参照）。この最後の式が意味することは、ある企業や国がスコープ 3 のネットゼロの下でサプライチェーンに供給できる化学製品中の炭素の総量を

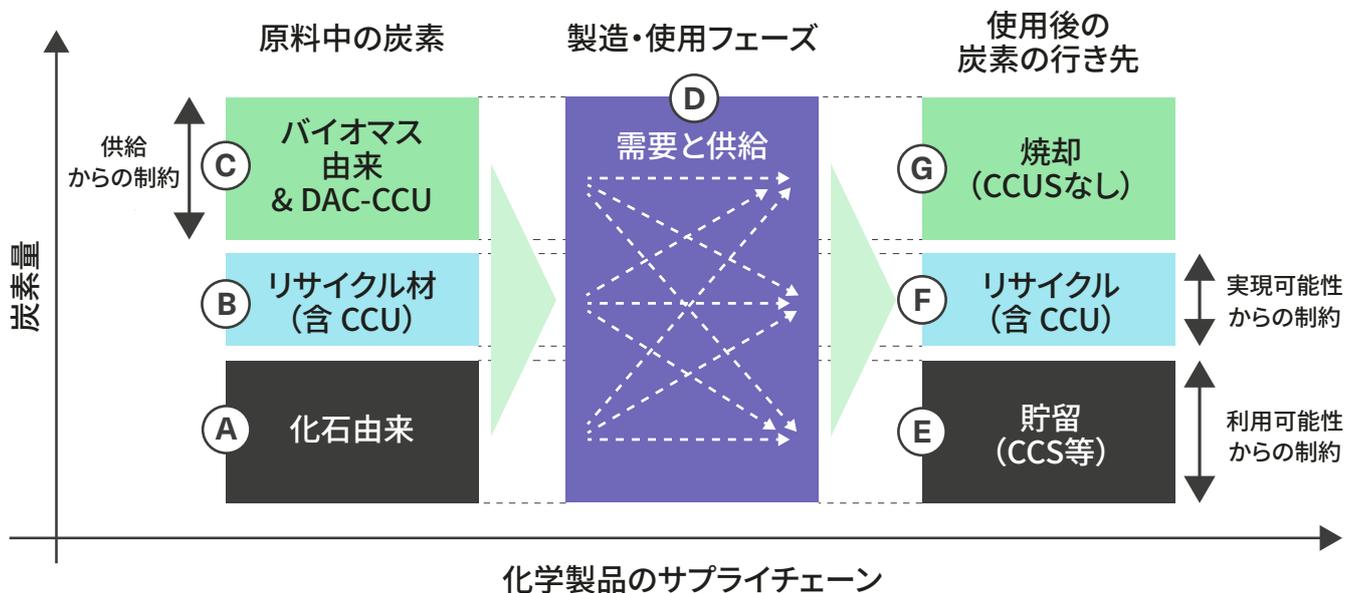
示す  $(D)$  は、投入するバイオマス由来原料や DAC-CCU 原料中の炭素  $(C)$ 、製品廃棄時に固定・貯留された炭素  $(E)$ 、リサイクルされる炭素  $(F)$  の合計が上限となる、ということである。ここで、持続可能な方法で調達されたバイオマス由来原料の供給量は限られているため、高コストな DAC-CCU が広く普及しない限り、 $(C)$  の量は限られる。固定・貯留される  $(E)$  の量は、2050 年までに CCS サイトを開発するのに要する時間と、利用可能な管理埋立地が有限であるため、おそらく限られている。最後に、リサイクルされる炭素  $(F)$  の量は、廃棄物の収集が不完全であることやリサイクル工程の収率に限界があることから、限られている。

63 化学製品に関する GHG 排出の計算は、リサイクルや負のカーボン・フットプリントを持つ原料があるため複雑になりがちであるが、このモデルを用いると、原料・化学製品・使用済み製品に含まれる炭素の量的関係を整理して考察することができる。ここでは、上流の化石資源採掘における  $\text{CO}_2$  と  $\text{CH}_4$  の排出や埋立地からの  $\text{CH}_4$  の排出はネットゼロと仮定し、化学品製造による直接・間接排出（スコープ 1 と 2）もネットゼロとしている。さらに、年間需要が定常レベルにあり、その結果、社会に存在する化学製品の中にストックとして含まれる炭素量が定常レベルにあること、そして炭素のリサイクルは化学産業のサプライチェーン内でのみ行われると仮定している。

このような仮定の下で、炭素の量的バランスから  $(A) + (B) + (C) = (D) = (E) + (F) + (G)$  が成り立つ。なお、 $(A) \sim (G)$  はそれぞれに含まれる炭素量を意味する。定義上、 $(B) = (F)$  であるため、上の式は  $(A) + (C) = (E) + (G)$  となる。なお、リサイクルによるロス分は  $(E)$  または  $(G)$  に含まれ、CCU は炭素のリサイクルとして扱う。さらに、ネットゼロであるためには  $(C) = (G)$  である必要があるため、 $(A) = (E)$  が導かれ、さらに  $(D) = (E) + (F) + (G) = (C) + (E) + (F)$  が導かれる。

以上より、ネットゼロとなるためには  $(A) = (E)$ ,  $(B) = (F)$ ,  $(C) = (G)$  であることから、**図 15**において原料（左側）と使用済み製品処理（右側）で同じ色の箱は、同じ炭素量でなければならない。例えば、スコープ 3 ネットゼロの下では、ある企業（国）は、 $(E)$  で固定・貯留した炭素と同量の化石原料しか投入できないことをこれは意味する。

なお、図の右側と左側で各箱の中の炭素量が同じであるからと言って、全ての化石由来原料  $(A)$  を使用済み製品処理時に固定・貯留  $(E)$  する必要はなく、また、全てのバイオマス由来・DAC-CCU 原料  $(C)$  を CCUS なしで焼却  $(G)$  する必要もない。すなわち、 $(A) = (E)$ ,  $(B) = (F)$ ,  $(C) = (G)$  の式が成り立つ限り、点線矢印が示すように一部の化石由来原料  $(A)$  は CCUS なしで焼却  $(G)$  されても構わないし、一部のバイオマス由来原料や DAC-CCU 原料  $(C)$  は固定・貯留  $(E)$  されても、システム全体はネットゼロのままである。



**図 15: ネットゼロの下での化学サプライチェーンにおける炭素バランス:** スコープ 3 (カテゴリー 12) のネットゼロの下では  $(A) = (E)$ ,  $(B) = (F)$ ,  $(C) = (G)$  が成り立つ。これは、どの企業 (国) も CCS 等で貯留した炭素の量を超えて化石原料を製造プロセスに投入できないことを意味する。さらに、これらの式は  $(D) = (C) + (E) + (F)$  が成り立つことも示しているが、この式の戦略的な意味合いは本文中に詳述されている。なお、図中の  $(A) : (B) : (C)$  や  $(E) : (F) : (G)$  の割合は、説明のためのものである。

**戦略的に重要な資源へのアクセスを確保する必要がある:** スコープ 3 のネットゼロの下で企業や国が化学製品の供給量を拡大する、あるいは需要に対応する能力を拡大するためには、(C) バイオマス由来原料や DAC-CCU 原料、(E) CCS、(F) リサイクル材へのアクセスを拡大する必要があることが、炭素バランスの論理的帰結である。言い換えれば、バイオマス由来原料や DAC-CCU 原料、CCS、リサイクル材は、(電気自動車のサプライチェーンにおけるリチウムやコバルトのように) サプライチェーンのボトルネックになる可能性が高く、これらへのアクセスを確保することは、ビジネス上、戦略的に優位に立つことを意味する。なお、スコープ 3 カテゴリー 12 のネットゼロのみからこのような供給制限が生じており、スコー

プ 3 の他カテゴリーからの排出や CO<sub>2</sub> 以外の GHG 排出を考慮すれば、化学企業や化学産業が対応できる需要には一層厳しい制限が課される可能性がある。

**炭素バランスと 4 つのネットゼロ・パスウェイは同様の結論を示している:** 例えば、BAU-ME と CE-ME パスウェイはネットゼロにおける (E) CCS の重要性を示しており、CE-NFAX2 パスウェイは (C) バイオマス由来原料や DAC-CCU 原料と (F) リサイクル材の重要性を示しており、CE-NFAX パスウェイは (C)、(E)、(F) の全てについての重要性を示している。

## 3.6 日本の化学産業における、個別のネットゼロ実現技術に関する戦略と提言

### 3.6.1 リサイクル材

**リサイクルは、パスウェイに依らず最大化する必要がある：**我々のモデル計算において、CE-NFAXとCE-NFAX2パスウェイでは、リサイクル材は代替原料として一定の役割を果たすが、BAU-MEとCE-MEパスウェイでは、その使用量は非常に小さい。具体的には、2050年のリサイクル（熱分解油化用の廃プラスチックも含む）は、BAU-MEとCE-MEパスウェイでは0 EJ、CE-NFAXとCE-NFAX2パスウェイでは0.08 EJであり、後者はプラスチック廃棄物として約4 Mt/年に相当する。ケミカル・リサイクルの量は、廃棄物へのアクセス、分別能力、マテリアル・リサイクルの能力等によって制約を受け、2050年には約1 Mt/年の混合プラスチック廃棄物が熱分解に供されると推定されるが、量としては期待されるほど高くない。これは、コストを優先するME供給シナリオにおいては、リサイクルよりも化石原料とCCSの組み合わせの方が低コストであり、低GHG排出量を優先するNFAXおよびNFAX2供給シナリオにおいては、リサイクルよりも例えばバイオマス由来原料の方が排出量が少ないためである。今回の検討の中では、リサイクルは言わばME（最低コスト）とNFAX（最低排出量）の狭間に陥ってしまったと考えられる。なお、パスウェイは将来予測ではなく、ネットゼロへの移行に必要なアクションを議論するためのシミュレーションであることを、ここで改めて確認しておくことが重要である。実際には、パスウェイに依らずリサイクルを最大化することが日本の化学産業にとって不可欠である。なぜなら、現在の日本においてバイオマス由来原料、DAC-CCU、CCS（後述）へのアクセスが限られていることを鑑みると、**図15**と炭素バランスの説明で示したように、スコープ3カテゴリー12のネットゼロという制約の下ではリサイクルの拡大がこれらの未確保資源の使用量を低減するのに役立つからである。

**日本には確立された廃棄物回収システムがあるが、回収されたプラスチック廃棄物の大半は焼却されているのが現状である：**日本では、拡大生産者責任（EPR）の一形態である「容器包装リサイクル法」等によって廃プラスチックの回収が推進されている。これにより、日本は廃プラスチックを原料として利用する上で有利な立場にあるはずである。しかし実際には、排出された廃プラスチックの約70%は現在、焼却されている（エネルギー回収の有無を合わせて）<sup>64</sup>。廃プラスチックを燃料として使用する慣行（発電やセメント製造など）は、経済全体がネットゼロを追求する中で、今後より排出量の少ないエネルギー源に取って代わられる可能性が高く、そうなると混合廃プラスチックの行き場がなくなる可能性がある。その結果、混合廃プラスチックのケミカル・リサイクル技術は、プラスチック汚染防止に加え、GHG排出削減のためにも不可欠となる。

**提言：日本の強みを活かし、ケミカル・リサイクル技術を強化・拡大すべきである：**国によって強みと弱みは異なるが、例えば欧州や米国では、廃棄物管理と環境保護は、複数の政府レベルでの複雑な組み合わせの下で規制されている。さらに、米国ではプラスチックのEPRはごく一部の州でしか実施されておらず<sup>65</sup>、廃プラスチックの経済的な回収・分別・リサイクルを困難にしている。対照的に、日本はEPRに支えられた有力な廃棄物回収システムを有しており、比較的安定した政治環境の下、市民も政策も産業界に対して概して支援的である。他のG7諸国と比較すると、日本では政治や社会の分断が化学産業のGHG排出削減の方向性を左右する可能性は低いと考えられ、ケミカル・リサイクルのように必要と考えられる技術を推進するのに日本は理想的

64 プラスチック循環利用協会, プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況 (2021), [https://www.pwmi.or.jp/flow\\_pdf/flow2021.pdf](https://www.pwmi.or.jp/flow_pdf/flow2021.pdf) において、 $(5.10 + 0.63) / 8.24 = 70\%$  (脚注43も参照)

65 Trellis, Plastics recycling is coming: How companies should prepare (2024), <https://trellis.net/article/plastics-recycling-is-coming-how-companies-should-prepare/>

な場所となっている<sup>66</sup>。再生可能エネルギーへのアクセスが他国に比べて限られている一方で<sup>67</sup>、このように日本の化学産業には独自の強みがある。一方で、日本の化学産業はこのような追い風を当然のものとするべきではなく、仮に世論が声を上げない場合でもこれを支援と誤解してはならない。むしろ、ケミカル・リサイクルの GHG 排出削減効果、エネルギー収支、収率、プロセスから発生する廃棄物の取り扱いなどについて、秘密情報として非公開にしたい意向を抑えてでも、将来的な改善の見通しも含めて、

地域のステークホルダー等に対して透明性を確保する必要がある。これまで各工場が築いてきた地域社会や行政との信頼関係を日本の化学産業の強みと考え、コミュニケーションを図りながらケミカル・リサイクルを強化・拡大していくべきである。すなわち、廃プラスチックのリサイクルにはケミカル・リサイクルは必須であると考えられるが、この実現にはステークホルダーとの透明性の高いコミュニケーションが不可欠である。これはマスバランス・アプローチの導入においても同様である。

### 3.6.2 バイオマス由来原料

**CE-NFAX および CE-NFAX2 パスウェイにおいて、バイオマス由来原料は代替原料として重要な役割を果たす：**バイオマスは、成長する間に大気から CO<sub>2</sub> を吸収するため、原料としてのカーボン・フットプリントはマイナスとなる。従って、バイオマスから作られた化学製品が使用後に焼却されたとしても、大気中の GHG を正味で増加させることはないため、生じる排出は結果としてネットゼロとみなされる。このような化学製品が焼却されずにリサイクルされれば、バイオマス由来の炭素は経済圏により長く留まり、最終的な廃棄に伴う排出を遅らせることになる。この意味で、バイオマスを化学原料として使用することは、即時排出をもたらす燃料として使用するよりも GHG 排出削減には有効であると考えられる。本研究におけるバイオマスの年間最大消費量は、BAU-ME と CE-ME においては 0 EJ、CE-NFAX と CE-NFAX2 においては 0.08 EJ であった。本研究では、耕作放棄地や林地残材等から化学産業用に年間 0.5 EJ の持続可能なバイオマスが日本国内で入手可能であると仮定し、生物多様性や土地利用への影響を防ぐため、モデルでのバイオマス利用がこの量を超え

ないようにした。なお、この量は、日本におけるバイオマスの技術的な潜在利用可能量が 2050 年に年間 3.72 EJ である一方で<sup>68</sup>、持続可能な調達による潜在利用可能量からの減少<sup>69</sup>、そしてバイオマスが発電、航空燃料、建設など他の産業からの需要増加にも対応する必要があるという状況を考慮し、3.72 EJ から低減することにより見積もった。CE-NFAX と CE-NFAX2 におけるバイオマス使用量が上限を大幅に下回っているという事実は、バイオマス必要量を日本で調達できる可能性が十分にあることを示している。原料としてより多くのバイオマスを使用することは、より高コストな DAC-CCU 原料への依存を減らすのに役立つ。

**輸入バイオマスに係わるリスクを軽減するためには、国産バイオマス原料がポートフォリオの中に必要である：**世界人口の増加に伴う食料需要の高まりや、生物多様性保全の動きの加速などから、大量のバイオマス原料をサステナビリティに配慮して調達することは、大きな課題であると考えられている<sup>70</sup>。現在の日本では、パルプ生産やバイオマス発電の分

66 Beyond Plastics, Chemical Recycling: A Dangerous Deception (2023), <https://www.beyondplastics.org/publications/chemical-recycling>

Center for Climate Integrity, The Fraud of Plastic Recycling (2024), <https://climateintegrity.org/uploads/media/Fraud-of-Plastic-Recycling-2024.pdf>

Pro Publica, Selling a Mirage (2024), <https://www.propublica.org/article/delusion-advanced-chemical-plastic-recycling-pyrolysis>

67 Carbon Tracker Initiative, The sky's the limit (2021), <https://carbontracker.org/reports/the-skys-the-limit-solar-wind/>

68 Wu W. et al., Assessment of bioenergy potential and associated costs in Japan for the 21st century. *Renewable Energy*, **162**:308–321 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.015>

69 Wu W. et al., Global advanced bioenergy potential under environmental protection policies and societal transformation measures. *GCB Bioenergy*, **11**:1041–1055 (2019), <https://doi.org/10.1111/gcbb.12614>

70 Energy Transitions Commission, Bioresources within a Net-Zero Emissions Economy (2021), <https://www.energy-transitions.org/publications/bioresources-within-a-net-zero-economy/>

野では、輸入バイオマスに広く頼っている。しかし、輸入バイオマスにはサプライチェーン管理に大きなリスクが伴う可能性がある。例えば、生物多様性の損失、肥料の過剰使用による富栄養化、食料との競合、地下水の枯渇、虚偽証明など、輸入に依存する事業は、追跡が困難なサプライチェーンの初期段階まで遡って責任を問われる可能性がある。これらに加えて、経済安全保障や為替リスク、SAF (Sustainable Aviation Fuel、持続可能な航空燃料) などの他のバイオマス需要との競合等のリスクもある。さらに、経済全体がネットゼロを追求する中で、石油精製において現在、ナフサと連産されている航空燃料が、限られたバイオマス由来の炭素を求める競争相手となる可能性があることも化学産業は認識する必要がある。日本では化石資源が少ないため、化石原料を輸入することは合理的であるが、日本に豊富なバイオマスのポテンシャルがある中で、バイオマスを輸入することは化石原料を輸入することの自動的な延長であるべきではない。

**提言：化学産業は輸入バイオマスとのバランスを取るために、国内バイオマス供給源への投資と開発を行うべきである：**前述のように、バイオマス由来原料はスコープ3のネットゼロの下で、企業や国の供給可能量を広げる働きをするため、重要な原料である。持続可能なバイオマスへの安定的なアクセスを確保するために、日本の化学産業は、海外からの調達に加え、国産原料の確保に長期的な投資を行うべきである。このような投資は、豊富であるにもかかわらず、十分に開拓されていないことが多い国内の潜在力を引き出すために必要である。化学産業にとっ

て、国内での安定供給源となり得る数少ない機会のひとつが木質バイオマスであろう。国土の2/3近くが森林に覆われている日本では、木質バイオマスは豊富に存在するが、管理されずに放置され、伐採適齢を超えたままになっていることが多い。木質バイオマスは、例えばガス化や発酵によって現地でメタノールやエタノールに変えることができ、その後、これを日本全国に点在するコンビナートに輸送してオレフィンや芳香族を製造することができる(バイオマスのままコンビナートへ長距離輸送するのではなく)。このようなシステムは、小規模で地理的に点在している日本の化学コンビナートを強みに変える可能性がある。また、バイオマスの別の可能性としては、例えば代謝設計によって特定の機能化学品に狙いを定めて、効率的に製造することもあり得る。しかし、バイオマス由来の基礎化学品(オレフィン、芳香族、メタノール)によって石油由来の基礎化学品をドロップイン代替することは、2030年までに200万トンのバイオマス・プラスチックを導入するという政府のロードマップ<sup>71</sup>を達成するための重要な手段となる。化学産業はバイオマスへのアクセスを確保するために、森林の持続可能な長期的管理を念頭に置きながら、生産性を高めるための投資(林道や自動化等)を直接的または間接的に行う必要がある。さらに、バイオマス発電の固定価格買取制度(FIT)が開始から20年後に終了した後には、化学産業が代替需要先として機能する可能性もある。一方で、このような長期的な視点での国内投資が行われなければ、豊富なポテンシャルがあるにもかかわらず、国産バイオマスへのアクセスは不透明なままとなる。

### 3.6.3 メタノール・プラットフォームと水素

**プラットフォーム化学品としてのメタノール：**本レポートで取り上げた4つのパスウェイは全て、MTOとMTAの生産能力の開発を必要とする。実際、メタノールはナフサと同様に、化学産業がオレフィンや芳香族を製造するためのプラットフォーム化学品になり得ることが知られている<sup>72</sup>。しかし、歴史的に化石原料が豊富であったことや、ナフサ・クラッキ

ングから生じる副産物を有価化する必要があったことなどから、メタノールはプラットフォームの役割を果たすことができなかった。しかし、ナフサではなくメタノールをプラットフォームとして使用することにより、原料としては、従来の化石原料由来のメタノールから「ブルー・メタノール」や「グリーン・メタノール」(詳細は次項参照)まで幅広く用いることがで

71 環境省、バイオプラスチック導入ロードマップ(2021)、<https://www.env.go.jp/recycle/plastic/bio/roadmap.html>

72 Olah G. et al., Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy, Wiley-VCH (2018)

き、また国内調達からグローバル調達まで、原料供給の多様性を広げることができる。また、投入原料に対してマスバランス・アプローチを用いることで、柔軟性も増す。MTO プロセスは中国では既に商業運転が行われているが、MTA プロセスが商業規模で実証されるまでには、さらに時間と投資が必要である。なお、現在、石油精製において輸送用燃料の改質剤と芳香族を製造している接触改質（リフォーミング）は、内燃エンジンの減少により段階的に縮小されることを本研究では前提としているが、実際には MTA が商業規模に達するまでに時間がかかる等により、接触改質が残る可能性がある。

**グリーン・メタノールとブルー・メタノール：**水素については、製造プロセス、エネルギー源、原料等の違いによって、グリーンやブルーなどの異なる色が割り当てられている。各色の定義は、水素については一般的に合意されているが<sup>73</sup>、メタノールについてはあまり確立されていない。International Renewable Energy Agency (IRENA) が提案する分類<sup>74</sup>によれば、グリーン・メタノールとは、バイオマス（から合成ガス経由で）、またはグリーン水素（再生可能エネルギーをエネルギー源として水電解から製造された水素）と再生可能資源（バイオマス発電や大気等）から回収された CO<sub>2</sub> から製造されたメタノールを意味する。従って、グリーン・メタノールから製造された化学製品が廃棄時に焼却されたとしても、以前に大気から吸収された CO<sub>2</sub> が大気に戻るため、排出はネットゼロとみなされる。一方で、IRENA によると、ブルー・メタノールはブルー水素（メタンの水蒸気改質から CCUS を併用して製造された水素）と再生可能または非再生可能な CO<sub>2</sub> から製造される。従って、ブルー・メタノールから製造された化学製品が廃棄時に焼却される場合、排出される炭素が化石由来である場合には、CCUS によって排出削減措置を取らないとネットゼロにならない可能性がある。また、ブルー・メタノールは、熱分解に適さないような混合廃プラスチックのガス化や、産業界の排ガスから回収した CO<sub>2</sub> からも作ることができる。

**メタノールと水素の需要：**MTO と MTA のためのメタノール供給を確保するためには、水素の調達が重要となる。メタノール製造用およびオレフィン製造のエネルギー源（水素・アンモニア燃料クラッカーなど）としての水素需要はパスウェイに依存し、CE-ME と CE-NFAX パスウェイでは大きく異なる。ブルー・メタノールを使用する CE-ME パスウェイでは、2050 年に化学産業が必要とする水素は年間約 1 Mt である。しかし、グリーン・メタノールを使用する CE-NFAX および CE-NFAX2 パスウェイでは、2050 年に年間 5.5 Mt という大量のグリーン水素が必要となる。

**日本は、メタノールに関して国内供給と海外供給の両方を追求すべきである：**本モデルでは、計算上、水素とメタノールは国内製造を想定しているが、より低コストの地域から水素、ブルー・メタノール、グリーン・メタノールを輸入する選択肢も当然ある。従って、日本は、コスト、量的アクセス、サプライチェーンの安定性、経済安全保障等のバランスを考慮し、ブルー・メタノールやグリーン・メタノールの輸入から国内製造に至るまで、あらゆる調達ルートを検討すべきである。メタノールに関するこれらの選択肢のうち、DAC-CCU 原料からの国産大規模メタノール製造は、大量・低コストの再生可能エネルギーが日本では限られていると見られることから、可能性は低い。従って、貿易相手国を拡大するために、日本の化学産業は、再生可能エネルギーへのアクセスが豊富で低コストの国や地域と関係を強化する必要がある。これらの国々に対して、オフテイク契約の可能性として将来需要を示し、商品市場を創出し、安定的な調達体制を確立する必要がある。

**メタノールの国産化：**日本には、廃棄物やバイオマスを原料として国内でメタノールを製造する機会もある。廃棄物やバイオマスは、かさ高であり、通常は広域に渡って分散的に発生するため、これらをコンビナートへ輸送してそこでメタノール製造と MTO/MTA を行うのではなく、各地域で分散的にメタノールを製造し、コンビナートへメタノールを輸送して、コンビナートにて MTO/MTA を行うべきである。

73 Incer-Valverde J. et al., "Colors" of hydrogen: Definitions and carbon intensity, *Energy Conversion and Management*, **291** (2023) 117294, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117294>

74 IRENA and Methanol Institute, Innovation Outlook: Renewable Methanol (2021), <https://www.irena.org/publications/2021/Jan/Innovation-Outlook-Renewable-Methanol>

**メタノールの柔軟性を活用する：**現在、日本はメタノールを国内製造していない。従って、MTO/MTAプロセスとサプライチェーンを構築するために、まずは化石由来の従来型メタノールまたはブルー・メタノールを輸入することから始めるのが合理的なステップとなる。ブルー・メタノールの炭素は化石由来であるため、スコープ3のネットゼロを達成するためには、製品廃棄時にCCUSが必要となる。このCCUSを不要とするためには、次のステップとして、グリーン・メタノールを輸入するとともに、グリーン・メタノールの国内製造を確立する必要がある。グリーン・メタノールは例えば前述の国産バイオマスから製造することができ、これにより、サプライチェーンのリスクに対処するために供給源の多様化を進めることができる。このような従来型メタノールからブルー・メタノール、そしてグリーン・メタノールへの移行は、マスバランスアプローチを用いることで社会がネットゼロに移行する中で、需要に柔軟に対応することができるようになる。

**戦略的な選択：**オレフィンと芳香族を国内で製造するためのグリーン・メタノールの輸入は、現在の原油やナフサの輸入に取って代わる可能性がある。このアプローチでは、オレフィンや芳香族から作られる誘導品や機能化学品を製造する日本の化学コンビナート内の既存のネットワークを利用することができる。しかし、グリーン・メタノールが製造されている国で一気に機能化学品まで製造する

方がコスト競争力があるかもしれない。結局のところ、負のカーボン・フットプリントを持つ原料（例えばグリーン・メタノール）から作られる化学製品をどこで製造するかは、各企業の事業戦略次第であり、その中で製品が持つ2つの付加価値（カーボン・フットプリントの低さと化学製品としての価値）をどう活かすかが決まる。ターゲットとなる主要な川下顧客の立地や彼らからの要求、自社の技術競争力、グローバルなマーケティング能力やマネジメント能力などの要因が、こうした戦略に影響を与える。

**新たな付加価値の源泉を構築するためには、国際的な炭素会計ルールが必要である：**ここでの基本的な前提のひとつは、負のカーボン・フットプリントを持つ化学製品（メタノールや機能化学製品）の付加価値が、従来の化学製品と適切に区別され、国際的なサプライチェーンを通じて運ばれることである。ある国でCO<sub>2</sub>が大気から吸収され、別の国で化学製品に組み込まれ、また別の国で別の化学製品に変換され、さらに別の国で使用・廃棄されて再びCO<sub>2</sub>となる可能性があるため、負のカーボン・フットプリントの付加価値は、製品自体と一緒に渡される必要がある。この「クレジット」は、パリ協定第6条の一部として相当調整とともに実施されるかもしれないし、別の取り決めが必要となるかもしれない。

## 3.6.4 エタノール

**プラットフォーム化学品としてのエタノールの可能性：**エタノールを脱水してエチレンを製造する方法は、エタノールがサステナビリティに配慮したバイオマスから製造されるのであれば、有効な手段と考えられる。今回の検討の中では、このルートはどのパスウェイにも登場しなかったが、それは、このルートよりも低コストの技術や、GHG 排出削減効果が大きい技術が存在したからである。大気中のCO<sub>2</sub>をエタノールに変換するには、エネルギー作物の栽培や収穫、それに続く発酵などのプロセスが必要であり、食料生産、淡水の使用、未吸収肥料による窒素やリンの流出、土地利用の変化、生物多様性の損失などの潜在的リスクがある。バイオエタノールがコストに優

れ、サステナブルな方法で調達できれば、メタノールのようなプラットフォーム化学品になる可能性がある。

**バイオエタノールは現在既に入手可能であるが、その量は限られている：**バイオエタノールのサプライチェーンが既に存在することは、エタノールをベースとしたソリューションの強みであり、もし現在の自動車用燃料としての用途が電気自動車に取って代わられると、化学産業のバイオエタノールへのアクセスは広がる可能性がある。しかし、他の産業においてバイオエタノールの利用が大きく進む可能性もある。例えば航空業界では、国際民間航空機関 (International Civil Aviation Organization, ICAO) が将来の排出

目標<sup>75</sup>を設定し、国際民間航空のためのカーボン・オフセットおよび削減スキーム (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation, CORSIA) を導入している。これに合わせて個々の航空会社はすでに SAF に対する明確な将来の需要シグナルを出しており、燃料としての規格も整備されたため、サプライチェーンが構築されつつある。このため、出遅れた化学産業はバイオエタノールに十分にアクセスができない可能性がある。現在、バイオエタノールは、米国やブラジルなどの国々で燃料用途として大量に生産されているため、輸入してエチレンなどの製造に利用開始することは比較的容易である。実際、現在世界では年間約 1 億キロリットル (280 億ガロン) のバイオエタノールが生産されている<sup>76</sup>。しかし、化学産業は、SAF や場合によっては自動車燃料とバイオエタノールの調達を競うことになる可能性があるため、バイオエタノールの大規模かつ安定的な調達は困難になるかもしれない。例えば、現時点 (パンデミック前) の世界のジェット燃料の年間全需要は 4.6 億キロリットル (800 万バレル/日) であった<sup>77</sup>。極端なシナリオとして、全てのジェット燃料がバイオエタノールを原料とする SAF (エタノールからジェット燃料を製造する技術によって収率 100% で製造されると仮定) になった場合、この需要は既

に現在の全世界のバイオエタノール生産量をはるかに上回る。加えて、航空需要は 2040 年までに倍増すると予想されている<sup>78</sup>。その一方で、持続可能な農業の必要性や食料生産との競合により、バイオエタノール生産の伸びは今後、抑制される可能性がある。前述の通り、航空業界は将来の需要を明確にして、規制や仕様の設定に先手を打っている。その結果、例えば使用済み食用油を利用した SAF 市場が立ち上がり、化学品用途に先駆けてサプライチェーンが確立されつつある。航空産業と化学産業は、従来の石油精製のように異なる留分を分け合う連産品としての関係が継続する可能性ももちろんあるが、従来の化石原料と比べるとバイオマス由来炭素は大幅に供給が制約されるため、連産品では双方にとって安定供給が心もとない。なお、世界全体での化学製品の製造に必要な炭素の総需要は年間約 3.9 億トン<sup>79</sup>であり、これはバイオエタノールで言えば年間約 9.3 億キロリットルに相当し (全ての炭素をバイオエタノールから調達した場合)、これも現在のバイオエタノールの生産量を大幅に上回る。以上の通り、バイオエタノールは化学産業にとって一定の役割を果たす可能性があるが、その入手可能性と役割は、世界的にも日本においても限定される可能性がある。

### 3.6.5 CCUS (二酸化炭素の回収・有効利用・貯留)

**CCS の規模を拡大し、製造および使用済み製品廃棄に伴う排出を減らす必要がある:** 日本の化学産業は、BAU-ME、CE-ME、CE-NFAX の各パスウェイにおいて、2050 年には年間 23 ~ 47 Mt の CCS 能力を必要とする (図 12)。CE-NFAX2 パスウェイは、CCS なしでも (十分な量の代替原料が導入された場合) ほぼネットゼロが可能であることを示しているものの、CCS は日本におけるクラッ

カーからの排出や多数の焼却炉からの排出に対処するための重要な技術となる。CCS の必要性は他の産業 (鉄鋼、セメントなど) から生じ、長期的なコミットメントとインフラ計画が必要となる。日本は最近、事業として CCS を行うための法律を制定し<sup>80</sup>、現在、国内の貯蔵サイト開発と CO<sub>2</sub> の輸出を準備している。CCS へのアクセスに対する将来の需給バランスが不透明であることや、大規模で経

75 International Civil Aviation Organization (ICAO), <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/States-adopts-netzero-2050-aspirational-goal-for-international-flight-operations.aspx>

76 Renewable Fuels Association, <https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production>

77 S&P Global Commodity Insights, <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/oil/051923-global-jet-fuel-recovery-lags-air-travel-as-flights-return-to-pre-pandemic-levels>

78 International Air Transport Association (IATA), Global Outlook for Air Transport (2023), <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/global-outlook-for-air-transport---june-2023/>

79 Meng F. et al., Planet-compatible pathways for transitioning the chemical industry. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **120**, e2218294120 (2023), <https://doi.org/10.1073/pnas.2218294120>

80 経済産業省, CCS事業法 (2024), <https://www.meti.go.jp/press/2023/02/20240213002/20240213002-6.pdf>

済的な CCS サイトの建設には長期間を要することを考えると、アクセス確保のために日本は国内外の選択肢に並行してアプローチする必要がある。規模拡大のためには、日本は高い CCS 能力を持ち、かつ気候変動対策に前向きな国々と提携しなければならない。大規模投資と長期のオフテイク契約のためのパッケージを組み立てる必要があることから、産業界と国が連携して取り組むことが成功の鍵となる。

**焼却炉からの排出への対応:** 化学製品の一部はリサイクルされずに焼却場に運ばれるため<sup>81</sup>、化学産業がスコープ 3 のネットゼロを達成するためには、日本全国に 1,000 以上ある焼却炉<sup>82</sup> で発生する CO<sub>2</sub> 排出に対応するための CCS が必要となる。このほか、化学製品の製造工程からの排出（例えば、化石原料を使用するナフサ・クラッカーからの排出）への対応のためにも CCS が必要となる。しかし、実際には、焼却炉からの排出には化学製品に由来しない CO<sub>2</sub> 排出も含まれていることや、サプライチェーン上で距離が離れていることから、個々の化学企業にとって焼却炉からの排出に対処することは困難である。そのため、化学産業と地方自

治体・国との間で連携した対応が必要となる。これに対するひとつのアプローチとしては、既存の EPR への追加拠出を通じて焼却炉に CCS を導入することが挙げられる。また、廃棄物処理をコンビナートで集中して行い、その熱と CO<sub>2</sub>（または合成ガス）を化学品製造に利用するというアプローチもあり得る。もちろん、CE-NFAX2 パスウェイ（バイオマス由来原料の使用等）を採用して、CCS の必要性を回避・軽減するアプローチも含まれる。

**炭素回収プロセスの収率・効率を改善する機会がある:** 上述した CCS の代わりに、水素が利用できれば製造プロセスや焼却炉からの排出に対して CCU を適用することができる。このような CCU は、**図 15** の (A) と (E) の一部が (B) と (F) に置き換わるため、CCS の必要量を減らすことができる。将来、CCS と CCU が（国内外を問わず）広く利用されるようになると、炭素回収の収率向上（回収漏れ CO<sub>2</sub> の低減）と炭素回収プロセスのエネルギー効率向上の必要性が高まる。

## 3.7 ネットゼロを実現するには大規模な設備投資が必要であり、2050 年までの累積設備投資額は 610 億～950 億ドルにのぼる

**ネットゼロを実現するためには、既存のオレフィンと芳香族の製造設備の改造や一部の廃止が必要である:** BAU-ME パスウェイでは、既存のクラッカーの大部分（年間 10.7 Mt のオレフィン・芳香族生産能力）を改造する必要があり（エネルギー源として水素・アンモニアを使用、原料としてリサイクル熱分解油を使用、CCS 追加等）、能力の一部（1.9 Mt）は需要減や MTO に代替されることにより廃止される。また、CE-ME、CE-NFAX、CE-NFAX2 パス

ウェイでは、2050 年までに生産能力の 2/3 が改造され（エネルギー源として水素・アンモニアを使用、原料としてリサイクル熱分解油を使用、電化、CCS 追加等の組み合わせで年間 7.8 Mt の生産能力）、能力の約 1/3（4.8 Mt）が需要減や MTO に代替されることにより廃止される。接触改質による芳香族の製造は、ガソリン需要が減少し、製油所で燃料を改質するために接触改質を稼働させることが不採算になるため、段階的に廃止されるとの前提に立っている。

81 環境省の「全国温室効果ガスインベントリ報告書」（2023）の推計（表7-30と表7-31）によると、2021年には、エネルギー回収の有無を合わせて、化石由来の化学製品（プラスチックや合成繊維など）の使用済み製品の焼却から14.1 MtのCO<sub>2</sub>が発生した（この数字には、RPF、RDF、廃油、高炉やコークス炉において、燃料用途やケミカルリサイクルを目的として使用された廃棄物からの排出は含まれない）。<https://www.nies.go.jp/gio/archive/nir/index.html>

82 環境省、日本の廃棄物処理 令和元年度版（2021）、[https://www.env.go.jp/recycle/waste\\_tech/ippan/rl/data/disposal.pdf](https://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/rl/data/disposal.pdf)

**BAU-MEとCE-MEに必要な設備投資額はLC-NFAXに比べて少ない：**設備投資の大部分は、芳香族製造のためのMTAインフラ(CE-MEとBAU-MEで270～320億ドル、累積設備投資全体の44%)のためであり、次いでメタノール・インフラ(CE-MEとBAU-MEで170～200億ドル、27～28%)、トラック改造(130～150億ドル、21%)のためである(図16)。日本の廃棄物管理インフラは比較的良好であることから、廃棄物部門に必要な投資はこれらに比べれば小さい。

**CE-NFAXは、より大きな設備投資を必要とするが、GHG排出がマイナスになることから追加的な収益をもたらす可能性がある：**CE-NFAXの累積設備投資額は、BAU-MEやCE-MEより大きいですが、桁違いという程ではない。CE-NFAXは、さらに年間18 MtのマイナスのCO<sub>2</sub>排出を生み出す。従って、カーボン・プライシングが仮に1トン当たり100ドルであれば、年間18億ドルの収益が得られ、これは設備投資に必要な資金の一部を調達するために使用できる可能性がある。

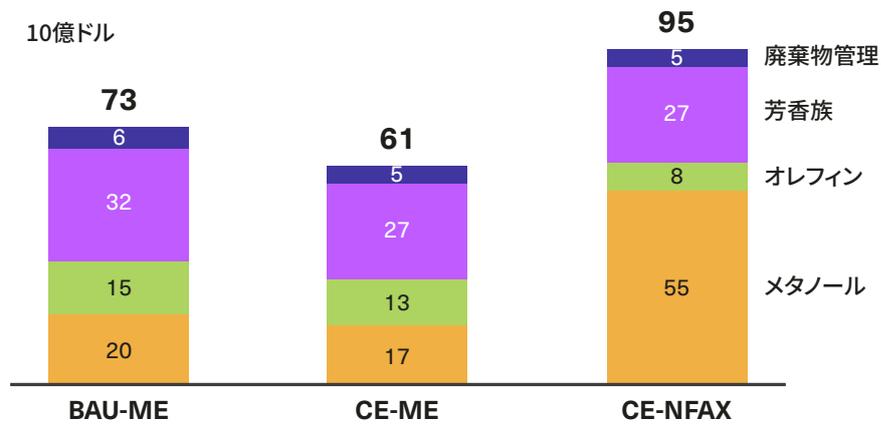


図16：パスウェイごとの2050年までの累積設備投資額

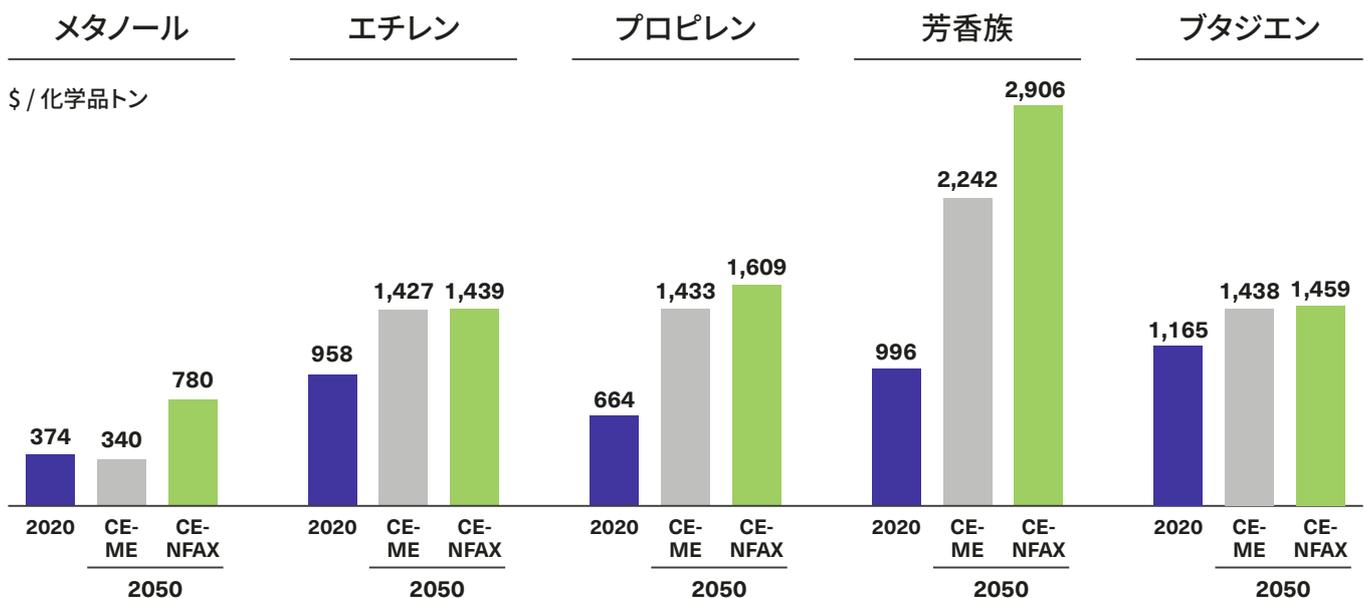


図17：パスウェイごとの2050年の化学品の製造コスト

## 3.8 ネットゼロを実現するオレフィンと芳香族は、化石原料から製造されたものよりも大幅に高コストとなるが、消費者製品の製造コストへの影響は限定的である

**ネットゼロの下では、化学品の製造コストは上昇する：**排出削減措置が取られていない現在の化学品のコストと比較すると、ネットゼロを実現する化学品の製造コスト(\$/トン)は、ごく一部を除いて上昇すると考えられる(図17)。パスウェイにも依るが、エチレンとプロピレンのコストは50%から140%上昇し、1トン当たり1,400ドルから1,600ドルになるのに対し、芳香族のコストは130%から190%上昇し、1トン当たり2,200ドルから2,900ドルになると考えられる。芳香族のコストはCE-MEパスウェイでは現行の約2倍、CE-NFAXでは約3倍になると考えられるが、これは接触改質に比べてMTAプロセスのコストが高いことと、DAC-CCUやCCS付きバイオマス・ガス化から作られるグリーン・メタノールのコストが高いことによる。従って、技術開発の課題にはMTAプロセスとバイオマス・ガス化のコスト削減が含まれるべきである。

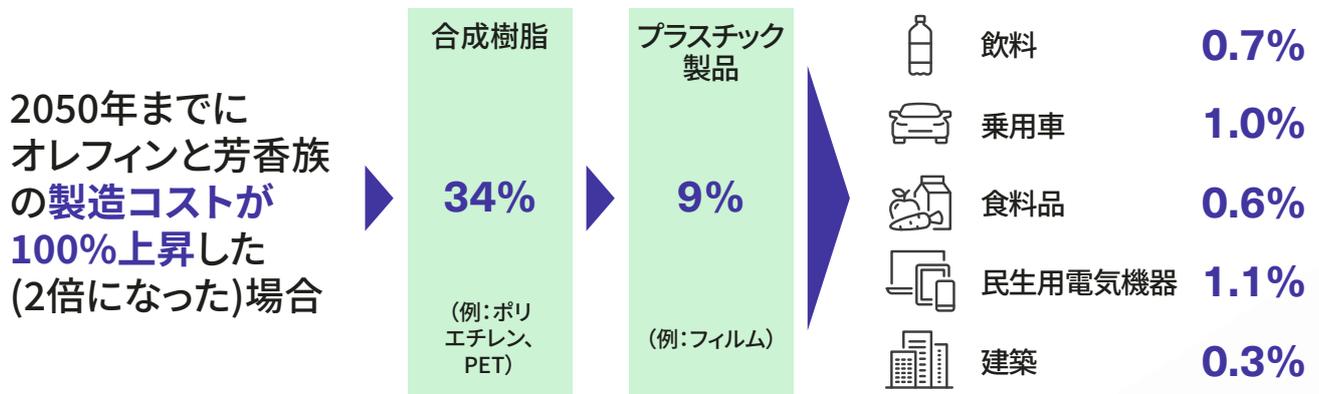
**サプライチェーンにおけるコスト影響分析によると、2050年の消費者へのコスト影響は限定的である：**サプライチェーンの始点に位置するオレフィンと芳香族のコスト上昇が、サプライチェーンの他のセクターにどのような波及効果をもたらすかについて分析を行った。具体的には、オレフィンと芳香族の製造コストが2倍になった場合、他の要因が一切変わらないと仮定して、サプライチェーン下流における製造コストにどのような影響を与えるかを評価した。この分析では、政府統計(日本の2015年の産業連関表とそのLeontiefの逆行列<sup>83</sup>)を用いて、サプライチェーン上流のコスト上昇が下流にもたらす影響を客観的かつ再現可能な形で推定した。我々の分析によれ

ば、2050年にオレフィンと芳香族が100%コスト上昇した(コストが2倍になった)場合、飲料製造に0.7%、乗用車製造に1.0%、食品製造に0.6%のコスト上昇をもたらす(図18)。なお、このコスト上昇は今後30年間全体でのものである(つまり、30年間でコストが1%増加することは、年換算で0.03%/年の増加に相当する)。このコスト上昇には、化学製品以外の製品やサービスがネットゼロ移行に際してもたらすコスト変動の影響は含まれないが、一般に想定されるよりも低いのではないと思われる。これは、サプライチェーンにおいてオレフィン・芳香族と消費者製品との間に位置する企業各社による投入額(追加の材料、労働力、利益等)が、オレフィン・芳香族のコストよりもはるかに大きいためである。図18に示すように、サプライチェーン全体においてオレフィン・芳香族製造から離れるほど、コスト増の影響は急速に小さくなる。このようにサプライチェーンにおいてコスト増の影響が不均一であることは、サプライチェーン川下の企業にとってコスト影響がより限定的であるにもかかわらず、また、製品のカーボン・フットプリントの削減を要求する消費者やNGOに対応するためにネットゼロ化学品が必要であるにもかかわらず、より大きなコスト増に直面しているネットゼロ化学品の直接的な顧客企業やサプライチェーン中流にいる企業が、そのようなコスト増を拒否する可能性があることを示している。従って、サプライチェーンにおけるこの不均一な影響を克服するには、サプライチェーンの両端(川下のブランドオーナーと川上の化学産業)が連携して、消費者向け製品のカーボン・フットプリントを削減するためのネットゼロ化学品に対する将来の需要と供給に関してコミュニケーションを取

83 日本の2015年の産業連関表とそのLeontiefの逆行列はe-Stat(政府統計の総合窓口)の以下を参照 <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00200603&tstat=000001130583&cycle=0&year=20150&month=0> および <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/file-download?statInfId=000031839469&fileKind=0>

る必要がある。なお、この分析ではサプライチェーン内の各企業は川上のコスト上昇をそのまま川下に転

嫁し、その際に便乗値上げやコスト吸収は行わないと仮定をしているほか、各種の前提を置いている<sup>84</sup>。



**図 18：オレフィン・芳香族の製造コスト増がサプライチェーン全体の製造コストにもたらす影響：**上流でのコストが 100% 上昇しても、消費者製品の製造コストへの影響は 1% 程度と限定的である。

84 この産業連関価格モデル分析の主な前提条件は以下の通りである: (1) 2015年の日本の産業構造に基づいている。(2) 上流産業(X産業)が値上げを行った場合、各下流産業はそれを受け入れ、生産量や原材料を変えることなく、自身から下流産業への価格に反映させる。従って、X産業の値上げは消費者に向かって伝播し、その間にある産業は値上げを吸収することも膨らませることもしない。そのためX産業の影響は、X産業の生産物を原材料や生産設備として使用することを通じて、川下産業のコストに影響を与える。(3) X産業の輸入品価格も、X産業の国産品価格と同率で上昇する。(4) 本分析で示した価格上昇は製造業のみのものであり、流通・小売業の価格上昇は含まれていない。例えば、乗用車のサプライチェーンでは、基礎化学品のコスト上昇により、自動車ディーラーのショールーム備品のコストが上昇する可能性があるが、この上昇分は含まれていない。本分析の数学的取り扱いについては、[https://www.pnas.org/doi/suppl/10.1073/pnas.2218294120/suppl\\_file/pnas.2218294120.sapp.pdf](https://www.pnas.org/doi/suppl/10.1073/pnas.2218294120/suppl_file/pnas.2218294120.sapp.pdf) の27-28ページ、または宮沢健一著「産業連関分析入門 第7版」(2002年)を参照のこと。

**最大の課題は、(2050年ではなく) 現在のコスト差を克服することである:**我々の研究グループが以前に報告した世界の化学産業のネットゼロへのパスウェイに関する先行研究<sup>85</sup>によれば、ネットゼロ化学品のコストが化石由来の化学品のコストに追いつくために必要なカーボン・プライシングは現在が最も高く、グリーン・ブルー水素や再生可能エネルギーのコストが安価になるにつれて、すなわち2050年に向けて徐々に低下していく。言い換えれば、課題(コスト差)は現在が最も大きく、2050年に向けて小さくなる。実際、前段落で述べた消費者製品の製造コストへの限定的な(1%程度の)影響は、コスト

差が小さくなる2050年の状況についてである。今日のネットゼロ化学品のコストは、**図18**で示される2050年の場合よりも大きくなる可能性があるが、サプライチェーンを通じてのコスト影響の逡減効果は依然として適用される(例えば、オレフィン・芳香族の300%コスト増(4倍になる)は消費者製品において3%増となる)、今日のコスト差を克服するためのステップに関する提言と、様子見アプローチ(コスト差が将来、十分に小さくなるまでネットゼロ化学品への投資を保留する)のリスクについては、セクション4で詳述する。

85 University of Tokyo and Systemiq, Planet positive chemicals (2022), <https://cgc.ifi.u-tokyo.ac.jp/research/chemistry-industry/>, <https://www.systemiq.earth/systems/circular-materials/planet-positive-chemicals/>

# セクション4：提言

## セクション概要

**スコープ 1, 2, 3 のネットゼロを達成するためには**、日本の化学産業全体としては、リサイクルを最大限に行いつつ、代替原料（バイオマス由来原料等）と CCS を同時に追求する必要がある。日本は、CCS や代替原料のどちらか一方のみに頼るべきでない。

**「高コスト」と「低需要」という、いわゆる「ニワトリと卵」の無限ループから抜け出すために**：化学企業はまず、小規模なパイロット・スケールで代替原料を用いる新しいプロセス技術を確立しなければならない。商業規模の本格プラントに投資するためには、長期的な視点からリーダーシップを発揮する必要がある。コモディティ化した基礎化学品事業を差異化された製品に転換するチャンスをつかむためには、こうしたリーダーシップが必要であり、それにはメリットも多い。一方で、このリーダーシップは現行事業からの長期的な収益に基づいていなければ長期的に投資を継続できない。大手化学各社の基礎化学品部門を統合する業界再編は、統合企業での意思決定プロセスとネットゼロ移行を加速させ、さらに（「規模の経済」に加えて）広義の「スコープの経済」ももたらす可能性がある。化学企業が商業規模の本格プラントを準備する際には、並行して化学産業外のステークホルダーと連携しながら、(1) 従来とは異なるパートナーに働きかけ、重要資源（バイオマス由来原料やリサイクル材など）を確保し、(2) グローバルな First Movers Coalition だけでなく、日本でも同様のサプライチェーン川上・川下間での coalition（有志企業の事業連携）を形成することによって将来の需要を確保し、(3) 支援的な政策・規制を確保することの3つが必要である。

**化学産業の将来における役割はサステナビリティに関連する3つのトレンドによって形作られる**：3つのトレンドとは以下の通りである。(1) GHG 排出削減：化学産業は、自社およびサプライチェーンからの排出削減と、他産業の排出削減を支援する2つの役割を担う。(2) 気候変動への適応（既に起きている気候変動への対応）：化学産業は、農業、水へのアクセス、災害対策などを支援することができる。(3) プラスチック汚染防止：リサイクルを強化するために、よりシンプルな配合処方と、成分情報開示の強化による透明性向上が求められる。これら3つのトレンドに加えて、化学産業の伝統的な顧客層（自動車産業や電子機器産業など）では、化学製品が使用されるハードウェアよりも、ソフトウェアを通じて自らの付加価値を高める傾向が強くなっている。従って、化学産業はサステナビリティを犠牲にしてまでハードウェアに使われる化学製品の性能向上を追求するのではなく、ハードウェア製品におけるカーボン・フットプリントの削減やリサイクル性の向上等に重点を移していく必要がある。その結果、化学産業内の川上（基礎化学品）と川下（機能化学品）の両方において、付加価値と競争力の源泉に大きな転換が予想される。

セクション3の後半では、重要資源（リサイクル材やバイオマス由来原料など）それぞれについて具体的な戦略を論じ、提言を行った。本セクションでは、ネットゼロへの移行に必要な、より高次元の戦略やアク

ションについて論じ、提言を行う。具体的には、定量的パスウェイから得られた知見と、日本の化学産業に関する既存の知見を組み合わせることで、戦略や必要なアクションについて論じる。

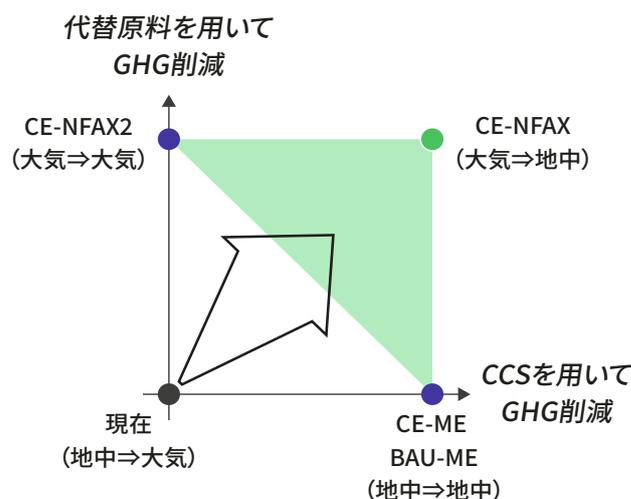
## 4.1 日本の化学産業全体としてのネットゼロへのビジョン

### 4つのネットゼロ・パスウェイの相対関係を示す概念図

**概念図：**日本の化学産業が全体としてどの方向に進むべきかを議論するために、セクション3までに議論した4つのネットゼロ・パスウェイを概念図としてプロットしたものが図19である。X軸とY軸はそれぞれ、各パスウェイにおいてGHG排出削減が、CCSと代替原料（バイオマス由来原料など）にどの程度依存しているかを表している。BAU-MEとCE-MEパスウェイはほぼ化石原料とCCSに依存するため、X軸上にプロットされている一方で、CE-NFAX2パスウェイは代替原料に依存するため、Y軸上にプロットされている。

**日本の化学産業は全体として、リサイクルを最大化しつつ、代替原料とCCSの両方を同時に追求する必要がある：**日本の化学産業は現在、代替原料とCCSのどちらについても十分な量を確保できる目処が立っていないため、BAU-ME、CE-ME、CE-NFAX2パスウェイが示すように、これらのどちらか

一方のみに依存する戦略はリスクが高い。従って、日本の化学産業は代替原料とCCSの両方を同時に追求しなければならない。両方を同時に追求した結果、日本の化学産業は全体として、代替原料とCCSの利用を組み合わせた図19の緑のネットゼロ三角形のどこかに着地することになる。なお、これら二者の間で日本の化学産業が目標とすべき正確なバランスを定めるには、現時点では代替原料やCCSのコストや入手可能性に関する不確定要素が大きすぎる。しかし、本研究の主な目的は、日本の化学産業にとっての重要なアクションを特定することであるため、現時点ではこの結論で十分であると考えられる。代替原料とCCSの両方を同時に追求する一方で、日本の化学産業は代替原料の中でも特にリサイクルを最大化する必要がある。これは、大量のバイオマス由来原料、DAC-CCU原料、CCSを確保するための負担を軽減し（詳細は図15と本文を参照）、プラスチック汚染の低減にも貢献する。



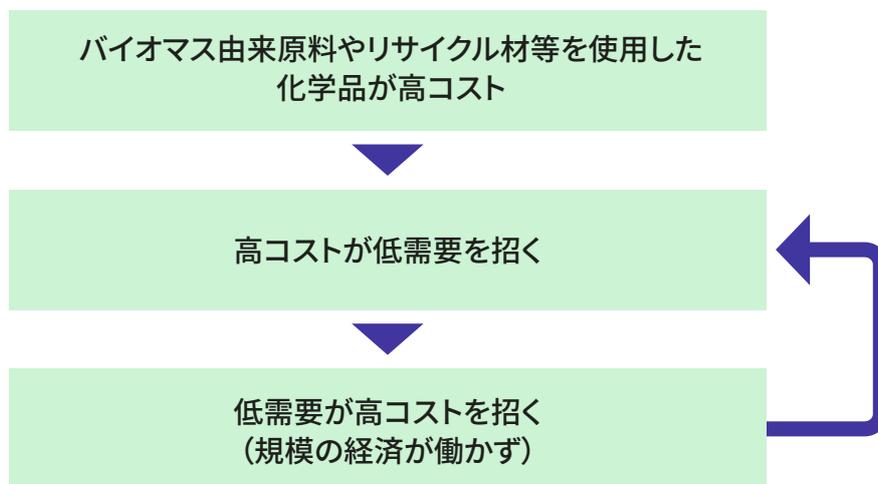
**図19：日本の化学産業全体としてのGHG排出削減の方向性の概念図（図4の再掲）：**日本の化学産業全体としては、Y軸の代替原料（バイオマス由来原料等）とX軸のCCSを同時に追求し、最終的にはネットゼロまたはネットゼロ超を示す緑の三角形の中に着地させるべきである。

## 4.2 個々の化学企業とサプライチェーンにとってのネットゼロへのビジョン：ニワトリと卵のループから抜け出すために

**化学産業は転換点に達していない：**セクション1で述べたように、化学産業は日本においても世界においても、低 GHG 排出技術が一般市場で受け入れられ、従来技術を追い越すような転換点（**図 5** 参照）には達していない。このため、既に有力なプレーヤーが出現したか、または出現し始めている太陽光パネル、風力発電、電気自動車、リチウムイオン電池等の市場とは異なり、化学産業ではどの国や企業にも、ネットゼロへの移行において有力なプレーヤーになるチャンスがまだ残されている。

**高コストと低需要を巡る「ニワトリと卵」の無限ループ：**ネットゼロ化学品の製造コストが高いことは、いわゆる「ニワトリと卵」の状況を生み出しており、こ

れが化学産業、そしておそらく他の産業においても、ネットゼロへの移行を遅らせる大きなボトルネックとなっている。セクション3で示したように、排出削減されていない化石由来製品に比べて、ネットゼロ化学品の製造コストは2050年において2倍以上になる可能性があり、現時点ではさらに高い可能性がある。その結果、この高コストが需要を押し下げ、これが生産量を低く抑え、規模の経済が働かないために製造コストが高いままとなる（**図 20**）。実際、日本や海外の化学企業はこの無限ループからまだ抜け出せておらず、これが**図 5**のランキングで化学産業が最下位に位置している一因と考えられる。



**図 20:**高コストと低需要の「ニワトリと卵」のループが、化学産業、そしておそらく他の産業においても、ネットゼロへの移行を遅らせている。

「ニワトリと卵」のループから抜け出すためのステップ: 「ニワトリと卵」のループから抜け出すためには、ステップ1に続いて、ステップ2Aとステップ2Bの

3つの要素を実行する必要がある。なお、ステップ2Aとステップ2Bは同時に進められる(図21)。

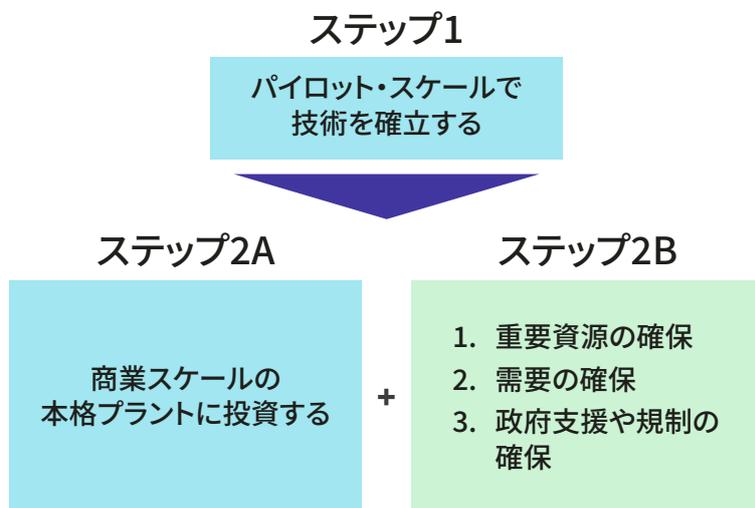


図21: 「ニワトリと卵」のループから抜け出すために必要なステップ: 青色は化学企業のアクション、緑色は化学企業が外部と連携して行うアクション。

## ステップ1:

ステップ1は、他の新しい製造プロセスを確立するのと同様に、小規模のパイロット・スケールで代替原料を利用する新しいプロセス技術を確立すること

である。これは化学企業の責任であるが、日本や世界の化学企業の多くは、ネットゼロ化学品の製造において、まだこの段階にある。

## ステップ2A:

ステップ2Aは、パイロット・スケールで技術を確立した後に、商業スケールの本格プラントに投資する段階であり、これも化学産業に責任がある。投資の規模が大きく、それに伴うリスクも大きいため、将来の日本の化学産業を担うリーダーが長期的な視点でリーダーシップを発揮する必要がある段階でもある。

**ネットゼロへの移行においてリーダーシップが重要である理由:** リーダー企業は、競合他社に先駆けて規模(すなわち低コスト)、経験曲線によるコスト低減、ブランドを確立する機会を享受する。加えて、ネットゼロ化学品のコスト上昇に対してより寛容な川

下顧客・市場へのアクセスや、リサイクル材やバイオマス由来原料などの限られた重要資源へのアクセスを先取りする機会も享受する。リーダーは、業界で最初に諸問題に直面し、それらを解決する機会があり、場合によってはその解決策の特許化する機会も得る。これらが確立されれば、リーダー以外の後発組は追従することが難しくなる。さらに、基礎化学品を製造するために代替原料を用いることは、基礎化学品事業がコモディティから差異化製品へと移行する絶好の機会となる。このように、リーダー企業はビジネス上の大きな機会を得ることができる。いずれにしても、海外からの圧力によって、日本の化

学企業や政府は遅かれ早かれネットゼロへの移行を余儀なくされる可能性が高いので、リーダーたるべき化学企業はその前にこれらの機会を活かし、自社のポジションを確立するよう努めるべきである。さらに、地球温暖化の具体的な進行が予測困難であることや異常気象の頻発を考えると、世界的な GHG 排出削減の緊急性は今後、予想外に急加速する可能性がある。そうなった場合、ネットゼロ製品の供給で頼りにされるのはネットゼロ化学品の事業を自社設備で行っているリーダー企業となる。長期的な投資（サステナビリティを自社の中核事業の1つとするための、サステナビリティを重視する顧客との信頼形成やサプライチェーンの構築、技術や製造設備の開発も含む）を継続的に行う意欲のある企業だけが、次のステージでリーダーとなる権利を有する。しかし、サステナビリティへの長期に渡る継続的な投資は、現行事業から長期的に収益が得られるという見通しが伴わない限り、持続不可能であることにも留意する必要がある。

**後追い戦略はリスクが高い：**なぜなら、後追い戦略はリーダー企業が独走して、市場での強い地位を築くことを許してしまうからである。また、十分なカーボン・プライシングが導入されるのを待つことも得策ではない。なぜなら、カーボン・プライシングは全ての化学企業にとって追い風となり差異化にはつながらないため、どの化学企業にも競争上の優位性が生まれないからである。2023年12月に開催されたCOP28は、「化石燃料からの脱却」という歴史的な合意で幕を閉じた。しかし、これはコンセンサスに基づいて進められる国連の会議において、最大公約数のような締約国間の最低限の合意を示したに過ぎない。同様に、政府も幅広い有権者への配慮が必要なため、大きく進歩的な規制を期待することは一般的には難しいであろう。そのため、COPのような国際合意や政府の支援を待つ企業は、リードするどころか遅れを取るようになる。

**業界再編は、ネットゼロへの移行を加速させる可能性がある：**ステップ2Aで必要とされる大規模商業プラントへの投資はどの企業にとっても簡単な決断ではないが、日本にはその決断を一層難しくする要因がある。現在、日本の大手化学企業の多くは、川上の基礎化学品部門と川下の機能化学品部門が社内に併存する垂直統合型コングロマリットの企業構造をとっている。しかも、これらの企業の多くは、成長のための経営資源（設備投資など）を後者の川下部門に集中させるという企業戦略をとっている。日本の化学企業は、現在まだステップ1の段階にいるため、ステップ2Aで必要とされる商業プラントへの投資判断を迫られていない。しかし、ひとたびステップ2Aに進む準備が整えば、日本の化学企業は、他産業のコングロマリットが過去に経験したような袋小路に陥り、以下に述べる問題が顕在化する可能性がある。すなわち、過去に日本の他の産業分野では、日本企業が技術的・市場的優位性を有していたにもかかわらず、コングロマリット企業構造の下で意思決定が遅い、あるいは行われぬなどの理由で、海外の競合他社に先を越され、他の原因と併せて結果的に事業撤退につながったケースが数多くあった（BOX 1 参照）。このような袋小路は、垂直統合型企業を解体し、各社の基礎化学品部門同士を水平統合することにより、基礎化学品に特化した企業を生み出すような業界再編によって回避できるであろう。これによって経営陣は、巨額であるが必要な投資判断をタイムリーに行うことができるようになるであろう。また、ゲーム理論でいうところの危険な「チキンゲーム」のように、他社の撤退を待つ残存者利益を狙うような（業界全体から見れば、必要なアクションを遅らせているだけに過ぎない）状況も、このような再編によって無くなり、その結果、業界全体としてのアクションが加速することになる。川上部門での再編は、川下（誘導品や機能化学品）の再編も誘発する可能性がある。

## BOX 1:

### 過去の日本における、事業拡大時の供給サイドの課題

かつて日本企業が、特定のビジネスや技術に関して世界市場で強い地位を確立していたにもかかわらず、その後、大規模な生産拡大（コスト削減）投資が必要になり、また技術世代が変わったタイミングで、韓国・台湾・中国本土の競合他社に遅れをとり、撤退を余儀なくされた例が数多くある。1990年代の半導体メモリーや2000年代の液晶パネルなどがその例である。

日本のメモリーメーカーや液晶パネルメーカーの多くでは、大型投資の判断が遅れた。その理由の1つとしては、垂直統合型やコングロマリット型の企業構造の下では、これらのメモリーや液晶パネル事業が多くの事業部門のひとつに過ぎないことが多く、投資そのもののフィージビリティ判断に加えて、事業部門間の優先順位に関する戦略的・政治的決断も迫られたことが挙げられる。つまり、特定の事業部門だけに巨額の投資を行うことを、タイムリーに正当化することができなかつたのである<sup>86</sup>。

ひとつの教訓は、日本の企業には、経営陣がタイムリーに大きな、しかし必要な経営判断を下せる企業構造が必要だということである。

**業界再編は、不確実な将来に対応するために必要な（「規模の経済」に加えて）広義の「スコープの経済」をもたらす可能性がある：**日本の化学産業は、ネットゼロ実現に必要な複数のアプローチがそれぞれ別方向を向いている中で、不確実な将来に備える必要がある。別方向を向いた複数のアプローチというのは、重要資源で言えば、バイオマス由来原料の使用とCCS付き化石原料の使用を指し、製造設備で言えば、クラッカー改造とメタノールやバイオエタノールを使用する非クラッカープロセスを指す。不確実な将来に備えるための一般的に合理的なアプローチは、幅広い視点から投資ポートフォリオを多様化することである。川上の基礎化学品に特化した統合企業であれば、規模の拡大だけでなく、複数のクラッカー設備にまたがる形でアプローチの多様化が可能になるため、広義の意味でスコープを拡大することができる。基礎化学品事業における多様化されたポートフォリオ（アプローチ）とは、例えば、少数のコンビナー

トにおいてはMTOやバイオエタノールなどの非クラッカープロセスを導入しつつ、他のコンビナートにおいては、既存のクラッカーに対して改造や更新等（例えば、既存クラッカーへのCCS付設改造、CCSを備えたより大型のクラッカーへの更新、非クラッカー・プロセスへの更新、廃止）のオプションの中から決定することができる。また、全てのクラッカーについて同時に全ての決断をする必要はなく、一部の設備では改造や更新を進めつつ、他の設備ではクラッカーの排出削減技術や非クラッカー・プロセスの技術進展、ネットゼロ化学品の将来の需要動向等を観察しながら、判断を延期することもできる。対照的にクラッカー設備を、1～2基のみ所有する企業では、その唯一無二の設備に対して「all or nothing」的なアプローチを取らざるを得ず、これは高リスクであるため、必然的に判断も遅れがちとなる。

86 富山和彦, 結局、経営者は何を間違えたのか, 週刊東洋経済, 2017年5月27日

田口眞男, 過去の失敗から学ぶ、パワー半導体の早期分社化と統合, 日経XTech, 2021年11月29日

中田行彦, 液晶ディスプレイ産業における日本の競争力, 経済産業研究所, ディスカッション・ペーパー, 2007年4月

## ステップ 2B:

**ステップ 2B** は化学企業が外部のステークホルダーと連携して、(1) 原料、(2) 需要、(3) 支援的政策を確保するために行うものであり、これはステップ 2A に

おける商業スケールの本格プラントへの投資検討と並行して行われる。

### ステップ 2B-1 重要資源の確保:

**リサイクル材、バイオマス由来原料、DAC-CCU 原料、CCS の確保の必要性:** 化学企業は、サプライチェーンの上流・下流でパートナーと連携、もしくはパートナーに投資することで、代替原料や CCS へのアクセスを確保する必要がある (図 22)。セクション 3 で述べたように、スコープ 3 のネットゼロは、化学企業が供給できる化学製品の量に理論的な上限をもたらす (図 15 参照)。つまり、代替原料 (リサイクル材、バイオマス由来原料、DAC-CCU など) と CCS へのアクセスが、化学企業の供給上限を決める。このことは、リサイクル材、バイオマス由来原料、DAC-

CCU 原料、CCS へのアクセスをコントロールする者が、化学製品の供給、ひいては化学製品が使用されるエンドユーザー製品の供給に影響を及ぼすことになり、戦略的に有利な立場を得ることを意味する。この状況は、電気自動車のサプライチェーンにおいてリチウムやコバルトへのアクセスが持つ影響力に似ている。つまり、サプライチェーンのはるか上流にある原材料 (リチウムやコバルトなど) の供給が、サプライチェーンの下流にある完成品 (電気自動車) の供給を左右する可能性があり、その結果、サプライチェーン全体に戦略的影響力を及ぼすことになる。

石油・ガス 産業	川上 化学産業	川下 化学産業	顧客産業	最終 消費者	回収	廃棄
-------------	------------	------------	------	-----------	----	----

今日の化学品サプライチェーン



2050年の化学品サプライチェーン						
石油・ガス 産業	川上 化学産業	川下 化学産業	顧客産業	最終 消費者	回収 リサイクル CCS	廃棄
バイオマス CCU 再エネ						

**図 22：現在および将来の化学品サプライチェーン：** サプライチェーンにおける新たなパートナーは緑色で示されており、彼らとの連携がスコープ 3 のネットゼロの下で化学製品の供給量の上限を決める可能性がある。

**化学産業が新たな重要資源へのアクセスを確保しない場合、他者がこれを行う：**日本の化学企業は従来から、コモディティである化石原料（原油、ナフサ）の確保を他者に依頼し、自身は原料の加工に専念してきた。スコープ 3 のネットゼロがもたらす潜在的な供給制限から抜け出すためには、化学企業は従来の慣習から抜け出し、重要資源を自力で確保し始める必要がある。バイオマス由来原料やリサイクル材は（少なくともこれらの市場が成熟するまでは）コモディティではないため、現在の化学品サプライチェーンには存在しない新たな原料供給パートナーを見つける必要がある。これは化学企業にとっては慣れない作業であり、時間を要するため、骨の折れるプロセスであるが、今日、先見の明のある特定のグローバル企業や日本の商社は、新しい重要資源へのアクセスを拡大することを既に積極的に行っている。例えば、日本の発電分野においても、商社が再生可能エネルギーへのアクセスに多額の投資を行っており、既存の電力会社の影が薄くなっている。これは、産業が変革期を迎えているときに、自社のビジネスのスコープを狭く定義しすぎると、成長機会を逃しかねないことを示唆している<sup>87</sup>。わかりやすい例では、アクセスしやすいバイオマス資源である使用済み食用油は、その入手競争が既に熾烈になってい

る。化学メーカーが重要資源へのアクセスを他者に依存し続ければ、重要資源を最初に確保した企業に依存したままとなり、最終的には自社の化学製品の供給量を彼らにコントロールされることになる。その結果、基礎化学品事業で差異化を図りつつ、付加価値を高める千載一遇の機会を逃すことになりかねない。化学産業の重要資源を確保するための椅子取りゲームが、既に静かに始まっている。

**基礎化学品が差異化製品になるチャンスをつかむ：**これまで述べてきたように、化学産業がネットゼロを達成するには大きく 2 つのアプローチがある。ひとつは、化石原料を使用する一方で CCS を用いて CO<sub>2</sub> 排出に対処する方法であり、もうひとつは、代替原料を使用する方法である。前者（化石原料と CCS）で作られた化学製品を輸出する場合、相手国がネットゼロを目指すには、製品廃棄時に発生する CO<sub>2</sub> に対して相手国で CCS を実施する必要がある。対照的に、後者（バイオマス由来原料や DAC-CCU）で作られた化学製品を輸出する場合、相手国での CCS は不要となり、付加価値を主張することができる。今後、より多くの川下顧客が調達製品のカーボン・フットプリントを意識するようになり、また、より多くの国が自国の GHG 排出目標（パリ協定

87 Levitt T., Marketing Myopia (近視眼的マーケティング), Harvard Business Review (July-August 2004), <https://hbr.org/2004/07/marketing-myopia>

の下で国が決定する貢献：Nationally Determined Contribution, NDC) を意識するようになるため、後者で作られた化学製品は、低カーボン・フットプリント製品を可能にする化学製品として成長する可能性がある。また、このような化学製品は、縮小する国内市場を補う可能性もある。その反対に、CCS 付きの化石原料に依存しても、特に低コストの化石原料や CCS を持つ国々<sup>88</sup>、かつ／または生産規模がより

大きい国々に対しては、日本の化学製品の輸出市場での競争力を高めることにはならない。加えて、近い将来、カーボン・プライシングや国境調整メカニズムによって、化石由来の化学製品のコストが上昇する可能性もある。結局のところ、CCS 付きの化石原料に依存することは、基礎化学製品を差異化された製品にする機会を逃すことになりかねない。

## ステップ 2B-2 需要の確保：

**First Movers Coalition (FMC) への参加：**FMC は世界レベルで低 GHG 排出製品の将来需要を確保するための重要なステップであり、化学製品に関する FMC が設立されれば、日本の化学企業はこれに参加すべきである。FMC は、2021 年に英国・グラスゴーで開催された COP26 において、世界経済フォーラムと米国政府によって設立され、鉄鋼やセメント等のセクターから開始された<sup>89</sup>。FMC では、先進的な川下顧客が、将来の時点で一定量の低 GHG 排出製品を購入することをコミットする。これは川下企業にとっては、スコープ 3 の排出を削減する低 GHG 排出製品へのアクセスを確保するためのスキームであり、また川上企業にとっては、このような需要シグナルがなければ困難となるリスクの高い投資を可能にするスキームである。サプライチェーンの川上と川下で将来の需要・供給のシグナルを交換することは、セクション 3 で述べたサプライチェーンにおけるコスト増の不均一な影響を利用することで、ニワトリと卵のループを克服するのに役立つ。

**加えて、日本でも同様な川上・川下間での有志企業による事業連携を確立すべきである：**グローバルな FMC を補完するために、日本国内のサプライチェーンにおいても川上・川下間で事業連携を確立することが重要である。その理由のひとつは、必ずしも日本のサプライチェーンの全ての企業がグローバル FMC に参加できるだけの海外ビジネスを持っているわけ

ではないことであり、別の理由は、各国のサプライチェーンの特殊性から、グローバルで画一的なアプローチが必ずしも有効とは限らないことである。後者の例としては、売り手と買い手の関係性、川下による「コミットメント」の正確な意味、当事者が納得する製品仕様などが、国やサプライチェーンによって異なる可能性があること等が挙げられる。さらに別の理由は、日本は（その意味ではどの国も）ネットゼロ化学製品の市場創造を他国に依存すべきではないということである。過去に日本企業が「グリーン」製品の開発で一度は技術的・市場的に先行したものの、その後、出遅れたために事業拡大で敗れた例が多数ある (BOX 2 参照)。その反対に中国は、当初の出遅れにもかかわらず、ソーラーパネル産業の育成に成功し、今ではほぼ全世界が中国を頼りにしている。ここでの重要な教訓は、初期段階では従来製品よりも高価になりがちなグリーン製品の市場形成プロセスによっては、生まれたばかりの産業を生かすことも殺すこともあり得るということであり、政府による適切な支援の下で製造サイドと需要サイドが密接に連携しなければならないということである。特に、グリーン製品を低コストで供給するには製造のスケールアップ（規模の経済）が必要であるが、これは一足飛びに達成できるものではない。需要と供給は、二人三脚のように一方が他方よりも大幅に先行することはできず、段階的にしか成長できない。このような需要・供給サイド間のやりとりは、国内連携の下で

88 例えば、ガス・クラッカーがブルー水素を燃料とする場合、ブルー水素製造時にはメタンの水蒸気改質プロセスからCO<sub>2</sub>を回収するCCSが用いられるが、このCO<sub>2</sub>は燃焼排気ガス中よりも大幅に濃度が高いため、ナフサ・クラッカーの副生ガス燃焼からCO<sub>2</sub>を回収するCCSよりも低コストになると考えられる。従って、(スコープ1)ネットゼロの下では、ナフサ・クラッカーとガス・クラッカーのコスト差が原料コスト差以上に開く可能性がある。

89 World Economic Forum, First Movers Coalition, <https://initiatives.weforum.org/first-movers-coalition/home>

行われた方が、よりスムーズに進むと考えられる。日本の化学産業は、国内の緊密なサプライチェーンと大きな国内経済という強みを活用しつつ、加えてグローバルなネットゼロ推進のためにグローバルFMCにも参加すべきである。

### 川上・川下間で事業連携を構築し、共に成長を目指す

具体的なステップとしては、川上の化学企業と川下のブランドオーナーは、連携してターゲットとなるエンドユーザー製品と市場を特定すべきである。例えば、化学製品がブランドオーナーのスコープ3排出の大部分を占める一方で、化学製品がコストに占める割合が小さいエンドユーザー製品は、ネットゼロ化学品の初期の高コストを受け入れる能力が高い。市場拡大、生産拡大、コスト低減のループを好循環させるためには、両者が緊密に連携する必要がある。同時に、政府はグリーン製品市場を育てるために、同業間の競争を促しながら、規制、政府調

達、補助金などを通じて、大きなリスクを背負うリーダーを適切に支援する必要がある。グリーン製品市場の立ち上がり時期は、政府の動きと同期したサプライチェーン内での競争と連携が試される段階である。不十分な競争、不十分な支援、補助金バブルはいずれも、グリーン製品市場を育成することはないであろう。また、このようなグリーン製品に関する定義（カーボン・フットプリントやリサイクル材含有率、バイオマス含有率等の測定法、報告法、検証法も含む）を標準化することも重要な基盤となるが、BOX 2に示した過去の教訓を踏まえると、それだけでは市場創造・育成には不十分である。最終的に化学産業は、どの企業や国が最初にネットゼロ化学品において規模の経済を達成するかを決める競争に入ることになる。勝者は需要と生産量を拡大し、より低い製造コストを享受する一方で、ネットゼロへの移行に要する社会的コストを低減することにより、社会全体にも利益をもたらすであろう。

## BOX 2:

# 過去の日本でのグリーン製品の市場拡大時における 需要サイドと供給サイドの課題

日本では、グリーン製品に関する事業や技術で当初市場をリードしていた企業が、市場拡大の段階で遅れをとってしまった例が数多くある。BOX 1 では供給サイドの大規模投資について論じたのに対し、この BOX 2 では駆け出しのグリーン製品の需要サイドと供給サイドの連携について論じる。太陽光パネル、発光ダイオード (LED) 照明、リチウムイオン電池などがその例である。これらの製品は、当初は従来製品よりも高価であり、また、そのメリットを享受するためには需要側が従来製品には必要のない初期投資を行う必要があるため、初期の「壁」を超えないと導入が進まない。

技術や商業化において当初リードしていたにもかかわらず(これらの技術に関してノーベル賞を受賞した日本人科学者もいる)、後に市場シェアを失い、撤退を余儀なくされることになった理由の1つとしては、需要を喚起し、高コストと低需要の「ニワトリと卵」のサイクルから脱却し、市場成長を牽引するための需給連携と政策支援が不十分であったことが挙げられる。例えば中国は、国内需要と生産を支援し、メーカー間の競争を促した。これらが、太陽光パネルの市場成長、生産能力拡大、コスト削減を促進し<sup>90</sup>、おそらくLED照明やリチウムイオン電池についても同様に促進したと考えられる。対照的に、日本の太陽光パネルメーカーの世界市場シェアは、2002年には55%だった<sup>91</sup>。その後、2012年に固定価格買取制度(FIT)が日本に導入されると日本での太陽光パネルの設置が爆発的に伸びたが、その時点では既に日本の太陽光パネルメーカーは競争力と市場シェアを失っており、後に市場から撤退している。また風力発電では、政府が2019年に風況に恵まれた洋上風力の促進区域を指定して以来、洋上風力の設置が加速しているが、その時点で既に日本の風力発電設備メーカーは競争力を失っており、市場から撤退している。

これらの例は、グリーン製品の市場創造、すなわち産業創造を他国に依存してはならない理由を示している。需要と供給を育てるには、サプライチェーンにおける競争と需給間の連携、そして新産業を創造することを視野に入れた政府による規制・調達等を通じた適切なアクションとの連携が不可欠である。

## ステップ 2B-3 支援や規制を確保する:

**リーダー企業を支援し、ネットゼロを実現する新産業を創出するためには、適切な規制や補助金が必要になる:**あるリーダー企業が商業規模の本格プラントへの投資の検討を始めたら、当然、規制導入や補助金、政府調達等の面から、政府により大きな支援を求めるようになるであろう。規制としては、製

品カテゴリー別のリサイクル材やバイオマスの最低含有率の設定・引き上げや、カーボン・フットプリントの上限設定・引き下げなどがあり得る。これらの関連事項の定義(リサイクル材含有率、バイオマス含有率、カーボン・フットプリント等の測定法、報告法、検証法も含む)を標準化することも重要である。補

90 Nemet G. F., How Solar Energy Became Cheap, Routledge (2019)

91 Ibid.

助金は、リーダーが長期的なコミットメントを行うことができるように、予見可能性と法的安定性が必要となる。補助金としては、設備投資だけでなく、値差補填等のいわゆる Opex 支援も重要である。なお、これらの政策では、**BOX 2** の教訓を踏まえ、新産業を育成するという明確な意図が必要となる。一方で、当然ながら、ある技術が商業的に利用可能になって初めて、政府は規制等で一般への普及を後押しでき

るようになるため、化学企業側の責任も大きい。また、セクション 3 で示した通り、従来製品と低 GHG 製品との間にはコスト差が生じるため、これを埋めるにはカーボン・プライシングが不可欠である。しかし、コスト差は化学製品によって大きく異なる可能性があるため、カーボン・プライシングが万能薬にはならないことに化学企業は留意する必要がある。

## 4.3 Planet Positive Chemicals : 化学産業の新たな役割と未来のビジネス

**サステナビリティにおける 3 つの大きなトレンドが、化学産業の将来の役割を形づくる可能性が大きい。従来のビジネスのアプローチに対して変更を迫られるが、同時にこれらはリーダー企業にとっては新たな付加価値と競争力の源泉となる**：3 つのトレンドとは、(1) 気候変動の緩和 (GHG 排出削減)、(2) 気候変動への適応 (既に変動した気候への対応)、(3) プラスチック汚染の防止である。以下では、これらが化学産業の役割と付加価値にどのような影響をもたらすかについて検討する。

**(1) 気候変動の緩和 (GHG 排出削減)**：化学産業には、(a) 自社およびサプライチェーンの GHG 排出を削減することと、(b) 他の産業の排出削減を支援することの 2 つの役割が求められる：1 つ目の役割においては、現在、化学産業が製造しているものと同じ化学製品を代替原料や新プロセス、再生可能エネルギー等を利用して製造し、自らの排出とサプライチェーンからの排出をネットゼロにする。2 つ目の役割においては、化学製品を用いた軽量化や断熱等のほか、リチウムイオン電池やペロブスカイト太陽電池のような商品の材料などを通じて、他産業の GHG 排出削減に貢献する。本レポートでは 1 つ目の役割に焦点を当てており、2 つ目の役割は対象外である。しかし、参考までに両方の役割にまたがり、しかも急成長が見込まれる例として、収率とエネルギー効率を改善した二酸化炭素回収技術が挙げられる。CCUS が

2050 年には世界で年間 6 Gt (Gt は 10 億トン) 必要となると International Energy Agency (国際エネルギー機関, IEA) が示しているように<sup>92</sup>、CCU と CCS の需要が急速に高まると予想されていることがこの背景にある。

**(2) 気候変動への適応 (水へのアクセスの拡大、農業支援、災害対策など)**：気候変動への適応とは、気候変動の悪影響を回避・緩和しながら共存していくことである。将来、世界全体の GHG 排出削減が実際にどの程度のスピードで行われるかは不透明であるが、人類の活動による産業革命前からの気温上昇は「疑う余地がない」<sup>93</sup> と考えられており、化学産業が適応の一翼を担う必要性はより高まっている。適応において化学製品が役割を果たせる例としては、膜を利用した海水淡水化による水アクセスの改善、改良された無害な消火剤を利用した山火事の消火活動などに可能性がある。

**(3) プラスチック汚染の防止 (汚染を防止しリサイクルを促進するための、リサイクル技術の強化と配合成分に関する透明性の向上)**：プラスチック汚染防止に関する国際的に法的拘束力のある制度に向けた国連での交渉はまだ進行中であるが、これまでの議論によると、今後はプラスチックへの添加剤に対する規制が強化され、透明性向上のために一層の情報開示が求められる可能性が高い。この傾向は、

92 IEA, Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5C Goal in Reach (2023 Update) page 102, <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>

93 IPCC 6th Assessment Report (Working Group I), Summary for Policymakers (2021), <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/summary-for-policymakers/>

新規で独自の添加剤や複雑な処方・配合の価値を低下させる可能性がある。すなわち、これまでは機能化学品事業では一般的に、独自の添加剤を開発し、処方や組成をより複雑にすることで、化学製品の高性能化を追求してきたが、これは同時にリサイクルをより困難にしている。従って、このアプローチには今後、逆風が強まる可能性が高い。

**化学産業の新たな役割と付加価値：**プラスチック汚染を防止するための国連合意が成立すれば、添加剤情報に関して透明性が高く、リサイクルしやすいシンプルな処方や組成が顧客から好まれる可能性が高く、これまでリサイクルできなかった化学製品をリサイクルする新しいリサイクル技術の需要が高まるであろう。逆に、リサイクル困難な化学製品は販売が難しくなると考えられる。この流れと、GHG 排出削減の流れが組み合わさると、表 1 に示すように川上と川下の化学産業がもたらす付加価値と競争力の源泉が本質的に変化する可能性がある。加えて、自動車産業や

電子機器産業などの化学産業の伝統的な顧客産業において、もうひとつ重要な変化が起きている。化学製品は、これらの業界のハードウェア製品の原材料として、またその製造工程で使用され、それによってこれらのハードウェア製品に機能を付加し、価値を高めてきた。しかし今日では、これらの製品の主要機能の多くがソフトウェアによって定義され、より大きな付加価値がソフトウェアによって追求されつつある。このことは、ハードウェア製品や、そのようなハードウェア製品に使用される化学製品がもたらす付加価値が相対的に小さくなることを意味する。この傾向を踏まえると、化学産業は、トップ性能が求められる一部の用途を除き、サステナビリティを犠牲にしてまでハードウェアの高性能を追求するのではなく、ハードウェア製品におけるカーボン・フットプリントの削減やリサイクル性の改良等に重点を移していく必要がある。すなわち、化学産業の川上（基礎化学品）と川下（機能化学品）の両方において、付加価値と競争力の源泉に大きな転換が迫っている可能性がある。

		川上化学産業（基礎化学品）	川下化学産業（機能化学品）
付加価値	従来	<ul style="list-style-type: none"> <li>低コスト</li> <li>安定供給</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高性能</li> </ul>
	新たに追加	<ul style="list-style-type: none"> <li>カーボン・フットプリントが小さい</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>カーボン・フットプリントが小さい（バイオマス由来原料、リサイクル材等を使用）</li> <li>製品に添加されている成分の透明性</li> <li>製品のリサイクル容易性</li> </ul>
競争力の源泉	従来	<ul style="list-style-type: none"> <li>大規模生産</li> <li>低コスト原料へのアクセス</li> <li>安定操業</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>複雑な成分・配合を用いても高性能を実現</li> <li>新規で独自の機能性添加剤の開発</li> </ul>
	新たに追加	<ul style="list-style-type: none"> <li>代替原料（バイオマス由来原料、リサイクル材、DAC-CCU 等）へのアクセス</li> <li>代替原料を使用する新プロセス技術の確立</li> <li>規模の経済（低コスト）に到達するスピード</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>リサイクルが容易な製品</li> <li>独自のリサイクル技術を保有</li> <li>よりシンプルな配合で高性能を発揮させる技術</li> <li>製品が含有する成分に関する透明性</li> <li>リサイクルを通じて、顧客やその顧客等との closed loop を作る能力</li> <li>カーボン・フットプリントの小さい原材料の確保</li> </ul>

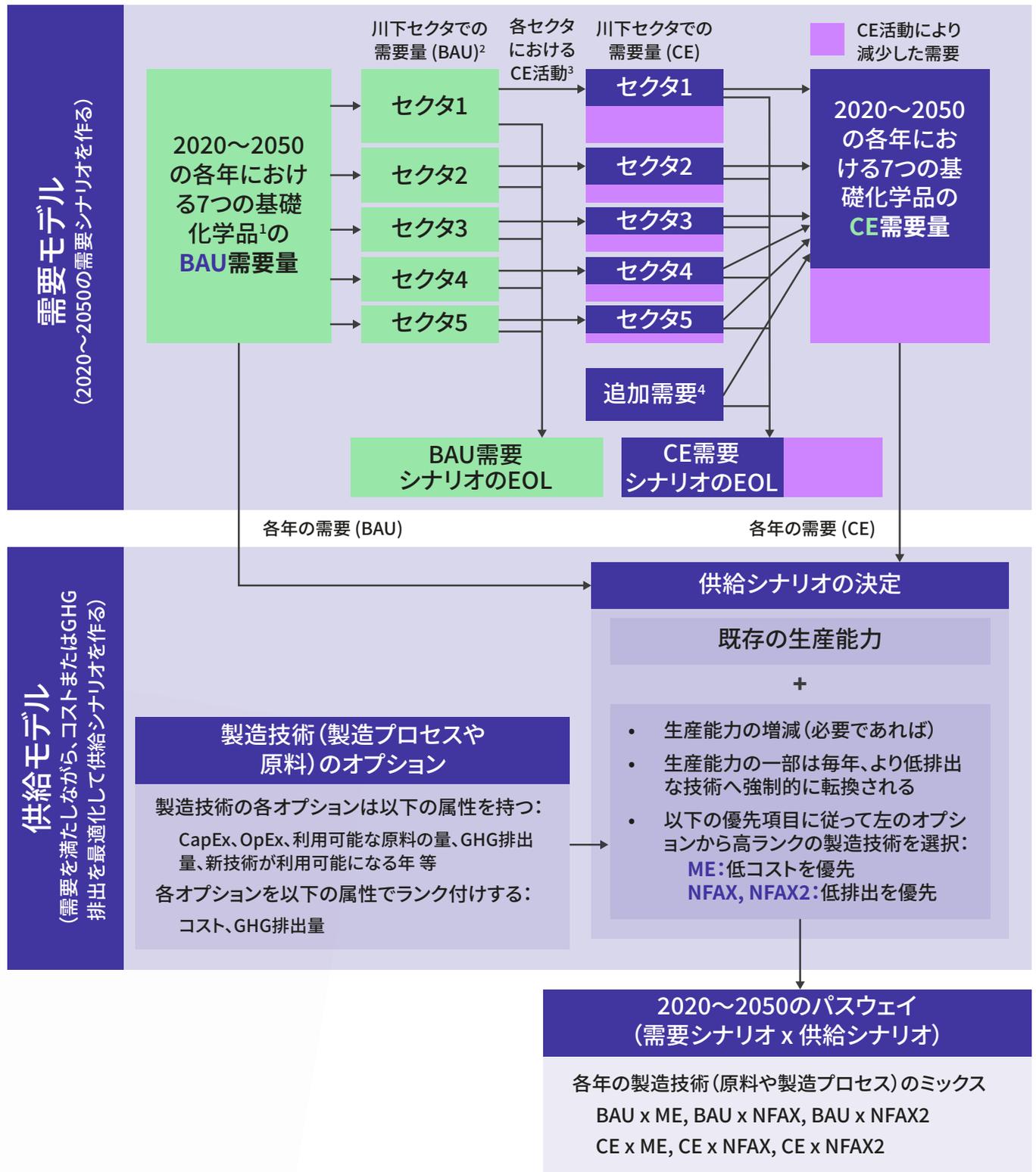
表 1：化学産業の新たな役割がもたらす付加価値と競争力の源泉の変化



# むすび

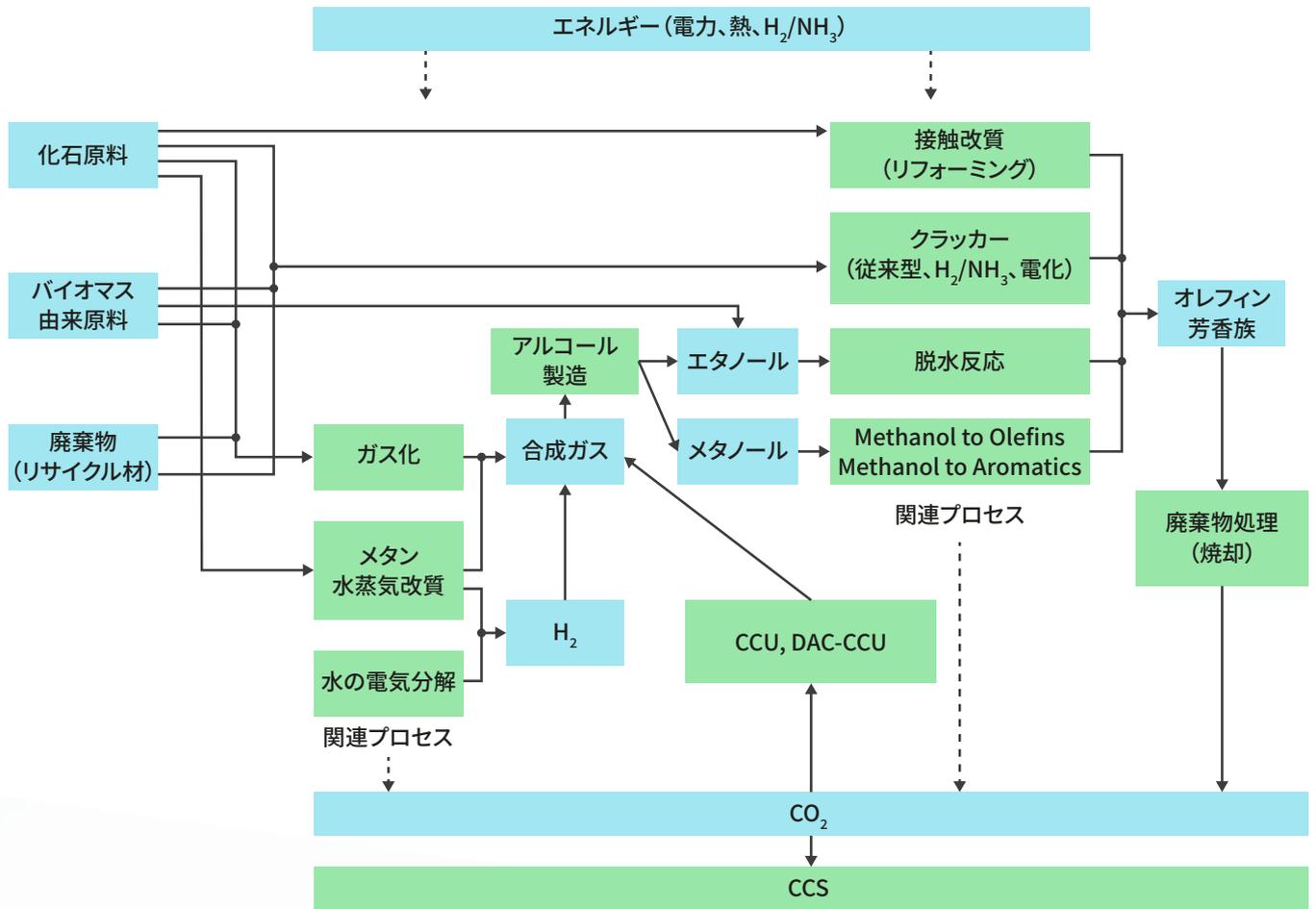
日本の化学産業は、国内人口の減少、GHG 排出削減をはじめとするサステナビリティ関連の課題、顧客業界のニーズの変化などに直面し、岐路に立たされている。このような背景の中で、本レポートではネットゼロへの定量的なパスウェイ (Pathway, 道筋)、日本の強みを活かした戦略とアクション、そして化学産業の将来の役割を提示した。個々の化学企業は、グローバルに利用可能なソリューション (代替原料や再生可能エネルギー関連の技術、First Movers Coalition など)、日本の強み、そして他社との差異化を図るための自社の強みを活かした上で、独自のパスウェイを構築する必要がある。ネットゼロに向けた大きな転換に備えるためには、他の業界における過去の教訓から学ぶことも不可欠である。今こそ、各企業が化学産業の将来の役割、付加価値、あるべき産業構造についてのビジョンを持って行動を起こす時である。本レポートが、そのような行動の触媒となることを願っている。

# 付録 A：本研究で用いた需要モデルと供給モデルの概要



**図 23：需要モデルと供給モデルの概要：** 矢印はモデル計算のための情報の流れ、EOL は End of Life (使用済み製品)、CE はサーキュラー・エコノミーを表す。(1) 7つの化学品とは、エチレン、プロピレン、ブタジエン、ベンゼン、トルエン、キシレン、メタノールを指す。(2) 川下分野は、包装・日用品、運輸、建築、アパレル、その他を指す。(3) CE 活動は (a) 使用削減、(b) 再利用、(c) 代替、(d) リサイクルに分けられる。(4) 追加需要には、風力発電、太陽光発電、蓄電池等のエネルギー転換に使用される製品からの化学品需要が含まれる。

# 付録 B：本研究の供給モデルで考慮した主要プロセス技術と原材料



**図 24：供給モデルで考慮した主要プロセス技術と原材料：** 緑色の箱はプロセス技術を表し、青色の箱は主要な物質やエネルギーを表す。

## 付録 C：気候変動関連用語集

厳密さよりも分かりやすさを優先したので、厳密な定義については別途、専門のソースを参照されたい。

**COP:** Conference of the Parties の略で、条約の締約国間の議決会議を意味する。気候変動に関する COP が有名だが、他にも生物多様性等の COP がある。気候変動の COP は国連の気候変動枠組条約に基づいており、世界の 5 地域（アフリカ、アジア、中南米、東欧、西欧）の持ち回りで毎年開催されるのが慣例となっている。締約国の政府間交渉がメインであるが、同じ会場で同時に多くの Side Event が国連・各国・NGO 等によって開かれ、プレゼンテーション・テーマ討論等が行われる。気候変動の COP は注目度が高いので、多くの国・NGO・企業等により、このタイミングで新たなアライアンス形成やコミットメント、レポートの発表がなされる。京都議定書は 3 回目の COP である COP3 (1997)、パリ協定は COP21 (2015) にて採択された。

**GHG プロトコル (スコープ 1, 2, 3) :** World Resources Institute (WRI) と World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) という団体によって作られた温室効果ガス排出量の算定・報告に用いられる国際的なデファクト・スタンダード。2001 年に最初のガイドラインを発行して以来、企業・NGO・政府関係者等と連携して、普及・改訂を行っている。気候変動の分野では、このように多くの異なるステークホルダーによる連携 (Multi-stakeholder Coalition) が強い影響力を持つことがある。自社から見たサプライチェーン上のどこで排出が起こるかによって、スコープ 1 (直接 GHG 排出)、スコープ 2 (電力や蒸気などの購入エネルギーからの間接 GHG 排出)、スコープ 3 (その他の間接 GHG 排出) に分けられている。スコープ 3 は更に細かく 15 のカテゴリーに分けられている。

**IPCC:** Intergovernmental Panel on Climate Change (気候変動に関する政府間パネル) の略。UNEP (国連環境計画) と WMO (世界気象機関) によって設立され、各国政府等に対して気候政策の立案や国際交渉の情報源に活用できる科学

的情報を提供するのが目的。数年に一度公表される Assessment Report (AR) では、毎年発表される多数の学術論文を、日本を含める各国の専門家が評価し、地球温暖化について科学的・技術的・社会経済的な見地からこれをまとめている。IPCC 自体は研究活動を行わない。

**温室効果ガス, Greenhouse Gas (GHG):** 二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) が有名だが、京都議定書 (パリ協定の項を参照) では、GHG として CO<sub>2</sub>、メタン (CH<sub>4</sub>)、N<sub>2</sub>O、ハイドロフルオロカーボン類 (HFCs)、パーフルオロカーボン類 (PFCs)、SF<sub>6</sub>、NF<sub>3</sub> の 7 種類のガスについて、その排出量の報告が求められている。これらのガスは、地球表面から宇宙に向けて放射されているエネルギー (赤外線) を吸収し、その一部を地球に向けて再度放射するため、温室効果をもたらす。これらのガスは、それぞれ異なる温室効果の強さ (地球温暖化係数, Global Warming Potential, GWP) を持つため、全てを CO<sub>2</sub> に換算して CO<sub>2</sub>eq として GHG 全体での排出量が算定される。

**カーボン・プライシング:** 温室効果ガス (GHG) の排出に対してコストを課すことによって、GHG 排出を削減することを促す制度。政府による制度には大きく分けて、炭素税と排出権取引制度がある。日本で言えば、いわゆる温対税や、今後導入される化石燃料賦課金が前者に、GX リーグ (GX-ETS) が後者に該当する。GHG 排出に対して課税する炭素税は、幅広い対象者の排出に対して課税され、課税額 (円 / 排出トン) も決まっているので、ビジネス上の予見可能性が高いが、GHG 1 トン当たり何円の課税でどれだけ GHG 排出が削減されるかの見通しが難しい。一方で、各企業等に対して予め設定された排出上限を超えた・下回った場合に排出権を売買できる排出権取引制度は、マーケットで価格が決まるので価格の予見は難しいが、社会として削減される排出量は明確になり、更に排出権のマーケットが機能すれば社会として最も経済的に目標とする排出量削減を行える。以上は明示的なカーボン・プライシングであり、この他に暗示的なカーボン・プライシングとして、GHG 排出に対して間接的にコストが課される

ものにエネルギー関係諸税やFIT 賦課金が含まれる。更に、インターナル・カーボン・プライシングはこれらとは別の枠組みであり、あくまで企業内制度なので、企業内で GHG 排出削減を推進するための手段として使われる。

**スコープ 1, 2, 3:** GHG プロトコルの項を参照。

**ネットゼロ:** IPCC の 2018 年の定義 (SR1.5) によれば、一定期間中の温室効果ガス (GHG) の、大気への人為的な排出と大気からの人為的な除去がプラス・マイナスでバランスしていることを指す。似た用語として、カーボン・ニュートラルは、IPCC によれば、全ての GHG ではなく CO<sub>2</sub> についてこれが成り立っていることを指すとしている。一方で、ISO 14068 では、カーボン・ニュートラルを IPCC のネットゼロと同じと定義しており、用語の定義を都度確認することが重要であることを示している。また、企業のネットゼロに向けた目標宣言や削減計画も、例えば、購入する排出権 (クレジット) の詳細や削減計画の具体性・透明性には幅があるので、国連のハイレベル専門家グループが改善を促す文書 (Integrity Matters) を発表している。

**パスウェイ (Pathway):** 一般的には、ゴールとする将来の状態に向けて、研究対象とするシステムが時間軸でどのように推移するかを示したものとされる。本研究では、日本の化学産業について、ネットゼロに向けた需要・供給量、製造プロセス、原材料、GHG 排出量の推移を扱っている。

**パリ協定:** パリ協定の前身となる京都議定書では先進国と定義された国のみに GHG 削減の義務が課せられたが、パリ協定ではすべての締約国 (現 198 カ国) が、自国の削減目標 (Nationally Determined Contribution, NDC, 国が決定する貢献) を 5 年毎に自発的に定めるため、原則として強制されることがない。一方で、パリ協定自体の目標は、産業革命以降の平均気温上昇を 2℃より十分低く、努力目標として 1.5℃以内に抑える (近年は 1.5℃目標が主流になってきた) と決まっている。従って、生じうるギャップを埋めるために、一方向にしか回らないレンチのような Ratchet up メカニズムに則って、互いに野心を高める交渉が COP (CMA) の場で毎年行われている。温室効果ガス (GHG) 削減に加えて、排出クレジット取引の市場メカニズム、適応 (既に変動した・これから変動する気候への対応、共存)、途上国への資金支援等もパリ協定の中で定められている。



2024年10月

# 持続可能な 地球の未来を築く 日本の化学産業

## Planet Positive Chemicals in Japan

温室効果ガス排出のネットゼロを実現し  
さらなる役割を果たす

本研究は三菱ケミカル株式会社との共同研究の下で資金提供を受けました。



CENTER FOR  
GLOBAL  
COMMONS

SYSTEMIQ