

## バイオエコノミーの実現に向けたバイオものづくりの推進における課題と政策的検討を行う上での必須事項に関するフレームワーク

松尾 真紀子

東京大学公共政策大学院/未来ビジョン研究センター 特任准教授

松本 拓郎

内閣府科学技術・イノベーション推進事務局 参事官補佐

石塚 大輔

経済産業省商務・サービスグループ生物化学産業課 課長補佐

吉田 彩乃

文部科学省研究振興局ライフサイエンス課 課長補佐

城山 英明

東京大学公共政策大学院/未来ビジョン研究センター 教授

蓮沼 誠久

神戸大学先端バイオ工学研究センター 教授、センター長

立川 雅司

名古屋大学大学院環境研究科 教授

水無 渉

新エネルギー・産業技術総合開発機構イノベーション戦略センター バイオエコノミーユニット長

\* SciREX 共進化実現プログラム

「バイオエコノミーを目指したバイオものづくり推進：政策課題の可視化と制度設計」メンバー



# バイオエコノミーの実現に向けたバイオものづくりの推進における課題と政策的検討を行う上での必要事項に関するフレームワーク

松尾真紀子、松本拓郎、石塚大輔、吉田彩乃、城山英明、蓮沼誠久、立川雅司、水無渉

SciREX 共進化実現プログラム

「バイオエコノミーを目指したバイオものづくりの推進：政策課題の可視化と制度設計」メンバー

※ 本ペーパーの英訳版は以下の URL からダウンロード可能である。

<https://ifi.u-tokyo.ac.jp/en/wp-content/uploads/2024/09/WP032.pdf>

## 1. バイオエコノミー・バイオものづくりをめぐる背景

### (1) 背景：グリーンイノベーションによる社会課題解決の要請とバイオものづくり

2020年10月、日本は「2050年カーボンニュートラル」を宣言し、2050年までに、温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする目標を掲げた。この実現に向けて、2020年度第3次補正予算において2兆円規模のグリーンイノベーション (GI) 基金が造成され、また2023年5月には「脱炭素成長型経済構造への円滑な移行の推進に関する法律」が成立するなど、グリーントランスフォーメーション (GX)<sup>1</sup> に向けた取組が強力に推進されている。とりわけ、社会・産業構造を化石資源・化学プロセスベースからバイオマス資源・バイオプロセスベースへ構造転換することで、地球環境問題・温暖化等の社会課題解決と経済成長の両立を図るバイオエコノミーの実現、そしてその中核を担う合成生物学・エンジニアリングバイオロジーを活用した「バイオものづくり」<sup>2</sup>への期待が国内外で高まっている。

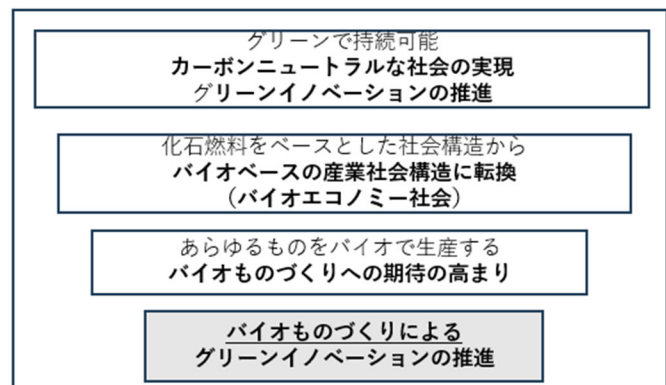


図1【社会課題にかかわる政策の階層と本研究のスコープ】

地球環境問題・温暖化等の社会課題解決と経済成長の両立を図るバイオエコノミーの実現、そしてその中核を担う合成生物学・エンジニアリングバイオロジーを活用した「バイオものづくり」<sup>2</sup>への期待が国内外で高まっている。

<sup>1</sup> 脱炭素成長型経済構造への円滑な移行の推進に関する法律（令和5年5月19日法律第32号）において、「脱炭素成長型経済構造」（＝グリーントランスフォーメーション（GX））は、産業活動において使用するエネルギー及び原材料に係る二酸化炭素を原則として大気中に排出せずに産業競争力を強化することにより、経済成長を可能とする経済構造として定義されている。

<sup>2</sup> バイオものづくりとは、「遺伝子技術を活用して微生物や動植物等の細胞によって物質を生産することであり、化学・素材、燃料、医薬品、動物繊維、食品等、様々な産業分野で利用される技術である。具体的には、微生物や動植物等の生物の代謝機能により有用物質を産生させる技術、あるいは動物の細胞等を用いて、細胞自体を増殖・高密度化させて有用物質の基礎を形成する技術である。その際、当該細胞等の遺伝子を組み換えたりゲノムを編集したりすることによって、目的となる有価物を産生させることや、生産性を向上させることも可能となる。」

内閣府（2024）「バイオエコノミー戦略」統合イノベーション戦略推進会議決定（令和6年6月3日），p.9.

[https://www8.cao.go.jp/cstp/bio/bio\\_economy.pdf](https://www8.cao.go.jp/cstp/bio/bio_economy.pdf)

## (2)主要国におけるバイオものづくりへの期待の高まり

主要国では、これまでもバイオエコノミー<sup>3</sup>の推進、合成生物学・エンジニアリングバイオロジーを含むバイオテクノロジーを主要技術の一つと位置付けた科学技術政策の推進は一貫して実施されてきているが、これらの技術とバイオものづくりを社会導入するための施策や検討を改めて打ち出す動きが近年顕著になっている。

米国では2022年9月に「国家バイオテクノロジーおよびバイオマニュファクチャリング・イニシアチブ」(National Biotechnology and Biomanufacturing Initiative : NBBI)を進めるための大統領令<sup>4</sup>が発令された。同大統領令のファクトシート<sup>5</sup>では、向こう10年でバイオエンジニアリングが製造業の世界生産の3分の1以上を占めるようになり、金額にして約30兆ドルに達する可能性があるとする業界の分析を踏まえ、国内のバイオものづくり能力の向上、バイオベース製品の市場拡大、社会課題解決に向けた研究開発の加速、データのアクセス・質の向上、人材育成、規制の透明性と効率性向上、バイオセーフティ・セキュリティの確保、バイオテクノロジーのエコシステムの保護、同盟国との連携推進といった項目に力を入れていくとした。そして翌年(2023年)3月、この大統領令のイニシアティブに基づき、大統領府科学技術政策局(OSTP)の「米国バイオテクノロジーとバイオマニュファクチャリングの大胆な目標」<sup>6</sup>、国防総省のバイオマニュファクチャリング戦略<sup>7</sup>、商務省の経済分析局のバイオエコノミーの経済的な指標に関する報告書<sup>8</sup>が公開され、同年6月にはバイオものづくりの人材(bioworkforce)育成のための報告書<sup>9</sup>も公開された。また、米国議会は、新興バイオテクノロジーに関する国家安全保障委員会(NSCEB)<sup>10</sup>を立法府の諮問機関として設置し、国家安全保障の観点から新興バイオテクノロジーの検討を行っている。

欧州でも、本年(2024年)3月にバイオテクノロジーとバイオものづくりを推進するための目標に関するコミュニケーション<sup>11</sup>が発表された。同コミュニケーションで、バイオものづくりは競争力の鍵であ

---

<sup>3</sup> 「バイオエコノミー」の定義は様々なものがあるが、日本の「バイオエコノミー戦略」では以下のように定義している。「バイオテクノロジーや再生可能な生物資源等を利活用し、持続的で、再生可能性のある循環型の経済社会を拡大させる概念。」前掲、内閣府(2024)「バイオエコノミー戦略」統合イノベーション戦略推進会議決定(令和6年6月3日), p.2.

<sup>4</sup> Executive Order on Advancing Biotechnology and Biomanufacturing Innovation for a Sustainable, Safe, and Secure American Bioeconomy. <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2022/09/12/executive-order-on-advancing-biotechnology-and-biomanufacturing-innovation-for-a-sustainable-safe-and-secure-american-bioeconomy/>

<sup>5</sup> White house ウェブサイト、FACT SHEET: President Biden to Launch a National Biotechnology and Biomanufacturing Initiative. <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2022/09/12/fact-sheet-president-biden-to-launch-a-national-biotechnology-and-biomanufacturing-initiative/>

<sup>6</sup> White house (2023) Bold Goals for U.S. Biotechnology and Biomanufacturing - Harnessing Research and Development to Further Societal Goals. <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2023/03/Bold-Goals-for-U.S.-Biotechnology-and-Biomanufacturing-Harnessing-Research-and-Development-To-Further-Societal-Goals-FINAL.pdf>

<sup>7</sup> DoD (2023) Biomanufacturing Strategy. <https://www.cto.mil/wp-content/uploads/2023/03/2023-Biomanufacturing-Strategy.pdf>

<sup>8</sup> DoC (2023) Bureau of Economic Analysis, Developing a National Measure of the Economic Contributions of the Bioeconomy. <https://www.bea.gov/system/files/papers/bea-bioeconomy-report.pdf>

<sup>9</sup> White house (2024) Building the Bioworkforce of the Future. <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2023/06/Building-the-Bioworkforce-of-the-Future.pdf>

<sup>10</sup> The National Security Commission on Emerging Biotechnology (NSCEB). 同委員会は2024年に包括的な報告書を議会に提出する予定である。 <https://www.biotech.senate.gov/>

<sup>11</sup> [EU \(2024\) Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social](https://www.europa.eu/press-room/media/infographic/item/12345)

り、EUの戦略的自立性を高め、経済安保の観点からも重要技術であるとの認識が示されている。多様な適用分野と現状の課題を指摘したうえで、今後EUレベルでの取り組み強化に向けて、規制の簡素化、スケールアップや規制のサポート、AIの利活用、民間および公的投資の向上、化石由来製品との公平な比較の促進、市場拡大、バイオエコノミー戦略の見直し等の8つのアクションプランを提示している。

英国は、これまでも合成生物学に関しては様々な取り組みを実施してきたが、昨年(2023年)12月に科学・イノベーション・技術省(DSIT)が「エンジニアリングバイオロジーのための国家ビジョン」を公表し、向こう10年間で20億ポンドの投資をすとした<sup>12</sup>。アカデミア、スタートアップ、業界のリーダーから成る諮問機関(engineering biology steering group)を新設して諮問機関を統一し、また、世界をリードする研究開発、インフラ投資、人材・技能育成、規制・標準化、広範な経済への取り込み、責任ある信頼できるイノベーションの推進等の、6つの目的に取り組むとした。

国際レベルでは、OECDのGFTech(Global Forum on Technology)が重要技術の一つに合成生物学を位置づけ、2023年11月に合成生物学に関するフォーカスグループを立ち上げ、バイオものづくりも含む合成生物学のガバナンスに関する専門家による検討を行っている<sup>13</sup>。同フォーカスグループでは、政策担当者に情報提供をすることを目的として技術的・社会的・政策的課題について取りまとめを行っている。

また、国際標準化に向けての議論も行われており、例えば、米国の非営利の官民連携組織であるEngineering Biology Research Consortium(EBRC)は、昨年、アメリカ、アジア・豪州、ヨーロッパ・アフリカの3つの地域で標準化に関するワークショップを行い、報告書を取りまとめている<sup>14</sup>。

日本では、2019年に策定されたバイオ戦略において、現在の「バイオものづくり」につながる要素が盛り込まれ、それらは2024年6月にアップデートされた「バイオエコノミー戦略」<sup>15</sup>において、「バイオものづくり」の概念として統合された。「バイオものづくり」の社会実装によって開拓される市場は、戦略上の5つの主要市場の一つとして位置づけられるとともに、バイオエコノミー市場拡大の最大の牽引役として期待されている。

### (3)課題認識と本ワーキングペーパーの目的・手法

#### 課題認識

ここ数年で矢継ぎ早に政策が展開され、注目されているバイオものづくりであるが、本当の意味でバイオエコノミーを達成するためには、政策担当者は根本的にアプローチを転換させ、レジリエンスと環境や社会へのサステナビリティを念頭に、生物を工業化するのではなく、現在の工業を生物化

---

[Committee and the Committee of the Regions, Building the future with nature: Boosting Biotechnology and Biomanufacturing in the EU. https://research-and-innovation.ec.europa.eu/document/download/47554adc-dffc-411b-8cd6-b52417514cb3\\_en](https://research-and-innovation.ec.europa.eu/document/download/47554adc-dffc-411b-8cd6-b52417514cb3_en)

<sup>12</sup> DSIT (2023) Policy paper, National Vision for Engineering Biology. <https://www.gov.uk/government/publications/national-vision-for-engineering-biology/national-vision-for-engineering-biology>

<sup>13</sup> OECD ウェブサイト、Synthetic Biology Briefing Document, 3 April 2024, Global Forum on Technology (GFTech). <https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/networks/global-forum-on-technology/global-forum-on-technology-synthetic-biology-brief-2024.pdf>

<sup>14</sup> EBRC ウェブサイト、Engineering Biology Metrics and Technical Standards for the Global Bioeconomy. <https://ebrc.org/publications-metrics-and-standards/>

<sup>15</sup> 前掲、内閣府(2024)「バイオエコノミー戦略」統合イノベーション戦略推進会議決定(令和6年6月3日)

(biologizing industry)<sup>16</sup>していくことでバイオマス資源・バイオプロセスベースの社会・産業構造に転換することを目指すことが重要であるとの指摘もある（具体的には2. で論じる）。

一方、現状の政策サイクルはそのような理念を政策デザインの段階で反映できるような構造になっていない。この分野の研究開発は主として（基礎→応用を前提とした）科学技術政策の文脈で展開されてきたバイオテクノロジーに関する政策プロセスを踏襲し、かつ、応用先は用途（食・農業、工業、医療等）ごとのセクター別政策、目的ごとの政策（研究開発政策、産業振興政策、環境影響・安全管理政策）等が個別に展開され、包括的な政策になっていないという課題が見受けられる。こうした課題認識は、日本に限ったことではなく、バイオエコノミーの実現には多様な主体間、府省庁間のサイロを乗り越えたシステム思考<sup>17</sup>での、政策調整（policy coordination）や政府全体での対応（whole of government）<sup>18</sup>の必要性が指摘されている。

そこで本ワーキングペーパーは、バイオエコノミーの実現におけるバイオマス資源を活用した多様な生産プロセスのなかでもバイオものづくりの推進に焦点を当て、今後の政策的検討を深化させる上での枠組みや論点を整理する。特に、上記分断構造にある政策プロセスにおけるバイオものづくりのイノベーションポートフォリオを俯瞰的に把握する必要性から、「バイオものづくりシステムにおける研究開発と政策の俯瞰マップ」の提示を、バイオならではの特性も考慮して行う。

## 手法

既存のバイオエコノミー、バイオものづくりに関する文献調査（主に主要国の政策文書、主要なシンクタンクの報告書）、国内外における関係者へのインタビュー、セミナー等の開催による議論<sup>19</sup>、研究メンバーのアカデミアと行政官が共同で分析を行うことでフレームワーク構築を行った。本研究は、アカデミアと実際のバイオエコノミー政策・バイオものづくり政策を担当する現役行政官との協働によって、試行的な先見的ガバナンスの実践に取り組むものとして位置づけられるものである。

## 2. バイオエコノミーの実現に向けた政策上の課題：バイオものづくり政策へのシステム思考の導入の必要性

「バイオものづくり」政策とは、より具体的には社会・産業構造を化石資源・化学プロセスベースからバイオマス資源ベース、特に可能な限りバイオマス資源・バイオプロセスベース<sup>20</sup>へ構造転換するための

<sup>16</sup> Shapira, Philip, et al. "Building a bottom-up bioeconomy." *Issues in Science and Technology* 38.3 (2022): 78-83.

<https://issues.org/building-bioeconomy-engineering-biology-shapira/>

<sup>17</sup> Marvik, Ole Jørgen, and Jim Philp. "The systemic challenge of the bioeconomy: A policy framework for transitioning towards a sustainable carbon cycle economy." *EMBO reports* 21.10 (2020): e51478, p.2. システミックで holistic なアプローチが必要と指摘している。 <https://doi.org/10.15252/embr.202051478>

<sup>18</sup> OECD (2023) OECD Science, Technology and Innovation Outlook Times of Crisis and Opportunity, Winickoff, Chap7 Accelerating innovation to meet global challenges: The role of engineering biology

<https://www.oecd.org/innovation/oecd-science-technology-and-innovation-outlook-25186167.htm>

<sup>19</sup> 東京大学 STIG の SciREX 共進化実現プログラム「バイオエコノミーを目指したバイオものづくりの推進：政策課題の可視化と制度設計」が主催で、バイオエコノミーの勉強会を開催し、バイオ戦略におけるバイオものづくりに関する議論や、英国におけるバイオものづくりを含むエンジニアリングバイオロジーに対する取り組みを英国科学イノベーション技術省（DSIT）の政策担当者や研究者と直接議論するなど、関連する議論を行っている。詳細は以下のサイトを参照。 <https://stig.pp.u-tokyo.ac.jp/?cat=15>

<sup>20</sup> バイオリファイナリー技術など、バイオマス資源を原料に化学プロセスで化成品等を生産する技術もある。カーボンニュートラル等

政策と言い換えることができる。今の化石資源・化学プロセスベースの社会・産業構造は、大量かつ安価な化石資源を海外から調達し、それを加工・利用する産業によって社会基盤が形成されている。これをバイオマス資源・バイオプロセスベースへ構造転換させるとは、例えば、化石資源から生産されているプラスチック等の化学品の原料を再生可能なバイオマスに転換する、またその生産プロセスを、高温高压を要するエネルギー多消費型の化学プロセスから常温常圧の省エネルギー型のバイオプロセスへの転換していくことである。また、これら原料調達や生産プロセス等に用いられている石油等の化石資源由来のエネルギー源を再生可能エネルギー（バイオマス由来含む）での代替を進めていくことも求められる。バイオものづくりへの転換によって、再生可能資源であるバイオマス資源を基盤とする産業構造が形成されれば、外部からの化石資源の調達に依存しない循環型で自立性の高い社会経済、低消費エネルギープロセスの拡大による環境負荷低減などの大きなメリットが社会全体としては得られる。

しかし、バイオマス資源は薄く広く存在し、またその性状も多様である。これは特定の地域に偏在し、また比較的簡単な操作で分離・精製できる化石資源とは対照的な性質である。そのため、化石資源・化学プロセスベースの産業構造<sup>21</sup>とバイオマスベースの産業構造は、生産設備や流通システムも含めて大きく異なるものとなる。部分的なバイオマスベースの産業構造を化石資源・化学プロセスベースの産業構造に接ぎ木しただけでは、そこで活用されるバイオマス資源は本来のポテンシャルを十分に発揮することはできない。また、生産設備や流通システムの変更のための巨大な追加コストや既存設備の償却コストも必然的に発生する。このようなことから、化石資源が調達可能な限り、バイオものづくりは相対的に高コストとなり、市場原理だけに基づいては自然には進まない。

一方で、日本のバイオものづくり政策の状況を見ると、経済産業省における GI 基金事業（バイオものづくり技術による CO<sub>2</sub> を直接原料としたカーボンリサイクルの推進<sup>22</sup>）やバイオものづくり革命推進事業<sup>23</sup>、カーボンリサイクル実現を加速するバイオ由来製品生産技術の開発<sup>24</sup>、文部科学省における革新的 GX 技術創出事業（バイオものづくり領域<sup>25</sup>）等の事業を中心に、定期的な情報交換の場も設けられつつ、連携したバイオものづくりの研究開発が進められている。さらに、バイオエコノミー戦略においては、バイオものづくり製品において、当面のコスト高を必然的なものとして受け入れつつ、生産し得る化学品のうち、特に高付加価値品に注力し、初期市場の開拓を進め、スケールメリットを引き出しつつ、段階的に汎用品市場へ拡大していく中長期的戦略を示すとともに、化石資源由来製品と単純な価格勝負とならないよう、LCA（Life Cycle Assessment）等による環境価値の可視化や公共調達による市場創出などに取り組む方針が示されている。

上記のように、研究開発だけでなく、バイオものづくりの市場形成を見通した様々な取り組みが進められているものの、根本的には技術開発から社会実装へボトムアップでつなげていく発想が横たわって

---

に貢献するとともに、既存の化学プロセス用の設備や手法を転用できるなどのメリットがある。ただし、一般にバイオプロセスより反応に必要な温度が高いため、定常的なエネルギー消費量はバイオものづくりより大きい。

<sup>21</sup> 典型的には、沿岸部に造られる大規模な石油コンビナートなど。

<sup>22</sup> NEDO ウェブサイト、「バイオものづくり技術による CO<sub>2</sub> を直接原料としたカーボンリサイクルの推進」<https://green-innovation.nedo.go.jp/project/bio-manufacturing-technology/>

<sup>23</sup> NEDO ウェブサイト、「バイオものづくり革命推進事業」[https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP\\_100246.html](https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100246.html)

<sup>24</sup> NEDO ウェブサイト、「カーボンリサイクル実現を加速するバイオ由来製品生産技術の開発」[https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP\\_100170.html](https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100170.html)

<sup>25</sup> JST ウェブサイト、「革新的 GX 技術創出事業」<https://www.jst.go.jp/gtex/field/bio.html>

おり、社会・産業構造の転換という観点からは、なお十分とは言い難い面がある。例えば、循環型のバイオマス資源の利用という観点からは、農業残渣や汚泥などの未利用バイオマスの原料利用が重要であるが、その利用に関する研究開発に比して、その原料調達に関する取り組みは相対的に遅れている。バイオものづくりの拡大において、大量かつ安価なバイオマス資源の調達は極めて重要なポイントであり、特にバイオエネルギーの利用までを視野に入れるとバイオマス資源の絶対量が大きく不足していることが指摘されている。また、バイオマス自体が多くを水分を含み、輸送コストが相対的に高くなりがちであることから、原料輸送の最小化も重要な課題である。これらのことを考慮すると、大規模農業地に隣接するようにバイオものづくり生産拠点が立地されることが産業上のコスト面では最も有利となる。また、社会全体では、バイオものづくりを核とした自立・循環型のユニット型社会構造が可能となることで、安価な化石資源を用い、高度に発達したモビリティに依存して成立した大量生産・大量消費の社会構造から、分散型の社会構造<sup>26</sup>に移行することが可能となる。このようなシステム思考に基づく先見的ガバナンス能力を確保することは、国際的なルール形成の議論をリードするための必須機能の一部であるだけでなく、研究開発の成果を社会実装させていくため、また必要な研究開発を的確に実施していくための重要な機能でもある。

もちろん急激にバイオマス資源・バイオベースの社会・産業構造へ転換することは現実的ではないため、どのように従来の社会・産業構造と共生・共存を図りつつ、ビジョンや価値観の転換をもたらしながらバイオエコノミー社会に移行していくのかを、時間軸を含めて描くためのステークホルダー間の議論も重要となっていく。

### 3. 政策対応検討上の必要事項とバイオものづくりシステムにおける研究開発と政策の俯瞰マップ

#### 3.1 政策サイクルにおける政策対応検討上の必要事項

課題・政策分析や政策対応の検討をするためには、いわゆる「戦略的調査分析機能（Strategic Intelligence）」<sup>27</sup>にかかわる活動をベースとした情報に基づく必要がある。

具体的には、図2に示す通り、①現状把握と将来トレンドの特定（環境条件の理解、イノベーションポートフォリオの把握、関連する主要なアクターとステークホルダーの特定）、②課題・政策分析の実施、③政策対応・選択枝案の検討が必要となる（図2：政策サイクルにおける政策対応検討上の必要事項）。一連のサイクル<sup>28</sup>の結果・フィードバックを受けてまた次のサイクル



図2:政策サイクルにおける政策対応検討上の必要事項

<sup>26</sup> 第5次環境基本計画（2018年、閣議決定）で提唱された地域循環共生圏（ローカルSDGs）など。

<sup>27</sup> OECD (2024), OECD Science, Technology and Industry Policy Papers Agenda for Transformative Science, Technology and Innovation Policies. <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/ba2aaf7b-en.pdf?expires=1724078825&id=id&accname=guest&checksum=C34C4315410551657A36592EE35DF7A4>

<sup>28</sup> 各ステップにおける機能の担い手の間の連携も重要である（例えば、①の段階のファンディングエージェンシーやアカデミアの分析

の改善につなげていくことも重要である。

### (1) 現状把握・将来トレンドの特定

課題・政策分析や政策対応の検討をするうえでは、前提として、文献<sup>29</sup>やヒアリング等によるファクトベースでの現状把握と将来トレンドの特定を行うための以下の活動を行う必要がある。

- ① **環境条件の理解**：政策を取り巻く環境条件の理解に資する情報を収集する必要がある。社会ビジョン<sup>30</sup>、直面する社会課題、国際環境（地政学的情勢）、期待されるマーケットサイズ、将来の技術トレンドなどをフォーサイトやホライゾンスキャニングの報告書等<sup>31</sup>に基づき把握する。技術そのものの技術成熟度レベル（TRL）の把握に加えて、その技術を導入する社会にかかわる成熟度レベル<sup>32</sup>についても把握する。また、日本にあるバイオマス資源のアベイラビリティ<sup>33</sup>の把握も行う。
- ② **イノベーションポートフォリオ<sup>34</sup>の把握**：すでに実践されている研究開発、政策や活動の洗い出しをし、バイオものづくりに関連する政策などのポートフォリオを可視化する。技術・プロダクトの研究開発・サプライチェーンの循環プロセスに応じた、事業や政策的な取り組みをシステムマップに整理する（詳細は3. 2で提示）。
- ③ **関連する主要なアクター・ステークホルダーの特定**：グローバル・国・地域レベル、セクター（バイオものづくりのバリューチェーンを踏まえて、産官学金<sup>35</sup>でいかなるアクターが鍵になるのか検討する）。その際、既存のアクターに加えて、異業種・セクターや新たなアクターに注目する（例えば、デジタル・AIなどとの convergence に関する領域等）。

---

と③の省庁における政策担当者の検討までのつなぎ))

<sup>29</sup> すでに多くの分析がなされている。例えば、McKinsey Global Institute (2020) The Bio Revolution: Innovations transforming economies, societies, and our lives.

<https://www.mckinsey.com/industries/life-sciences/our-insights/the-bio-revolution-innovations-transforming-economies-societies-and-our-lives>

Hodgson and Maxon (2022) The U.S. Bioeconomy: Charting a Course for a Resilient and Competitive Future. New York, New York:

Schmidt Futures. <https://doi.org/10.55879/d2hrs7zwc>

<sup>30</sup> 環境省、農林水産省、経済産業省、国土交通省の連名による「ネイチャーポジティブ経済移行戦略」

[https://www.env.go.jp/press/press\\_03041.html](https://www.env.go.jp/press/press_03041.html)

NEDO ウェブサイト、将来像「自然共生経済」 [https://www.nedo.go.jp/library/future\\_3.html](https://www.nedo.go.jp/library/future_3.html)

<sup>31</sup> 合成生物学に関しては、例えば、以下がある。

Kemp, Luke, et al. "Bioengineering horizon scan 2020." *Elife* 9 (2020): e54489. <https://elifesciences.org/articles/54489>

JST（科学技術振興機構）革新的GX技術創出事業（GteX）・バイオものづくり領域（PO：近藤昭彦（神戸大学））「多様な微生物機能の開拓のためのバイオものづくりDBTL技術の開発」（研究代表：本田孝祐）では、研究者自らのホライゾンスキャニングの試みを行った。松尾ほか（2024）「GteXメンバーによるミニ・ホライゾンスキャニングラウンドテーブルディスカッション」

<https://www.gtex-microbe.jp/wp-content/uploads/2024/09/20240901-1.pdf>

<sup>32</sup> 技術成熟度レベル（TRL：Technology Readiness Level）のほか、ビジネス成熟度レベル（BRL：Business Readiness Level）、ガバナンス成熟度レベル（GRL：Governance Readiness Level）、社会（コミュニティ）成熟度レベル（S(C)RL：Social (Communal) Readiness Level）、人材成熟度レベル（HRL：Human Resource Readiness Level）等の指標がある。

<sup>33</sup> 例えば、NEDOでは、「再生可能原料アベイラビリティ調査」を実施している。

[https://www.nedo.go.jp/library/ZZNA\\_100080.html](https://www.nedo.go.jp/library/ZZNA_100080.html)

<sup>34</sup> OECD ウェブサイト、Innovation Portfolios, Building clarity of purpose for innovation.

<https://oecd-opsi.org/work-areas/innovation-portfolios/>

<sup>35</sup> アクターとしての金融セクターの重要性を指摘するため、本ペーパーでは産官学金とした。この重要性についてはバイオエコノミー戦略でも認識されている。



## (2) 課題・政策分析の実施

上記の(1)の情報をもとに、課題・政策分析を行う。

- ① 技術の社会影響評価（テクノロジー・アセスメント：TA）も視野に入れ、横断的イシューの特定やギャップについての検討を行う（例えば、知識・情報、規制（セーフティ、セキュリティ）、社会的価値、研究開発エコシステム、インフラ整備、社会構造システム、コミュニティ形成、教育、スキル・人材育成等の項目について検討する）。その際に国内外の政策提言<sup>36</sup>や課題についても分析する。
- ② イノベーションポートフォリオを踏まえ、全体としての政策ビジョン・目的と、政策手段の関係性・Policy Mix 全体としてのシナジーをもたらしうえでの課題の特定と対応策の検討を、事例調査やフィールド調査も踏まえつつ行う。特に異なる所管の政策間のつなぎ（研究開発の政策、産業政策、環境政策など）、異なる目的の政策間のつなぎ（推進、管理・監督）、あるいは異なる政策レベル間のつなぎ（国の政策レベル→国の事業プログラムレベル→各事業のプロジェクトレベルなど）等について検討を行う。

## (3) 政策対応・選択肢の検討

上記(2)の分析で特定された課題への政策的な対応を時間軸と優先順位も念頭に検討し、政策対応実施の道筋について移行管理（Transition management）も視野に描く。その際に、以下の点も考慮する。

- ① 諸外国における有用な取り組み（主要国、OECD 等）との相互学習（主要国の政策担当者との意見交換等を通じて）・比較も実施する（日本の強み・弱みや課題の特定、国際レベル・グローバル・共通に展開すべき取り組み、国家レベル・地域やローカルで検討すべきことの整理も行う）。
- ② 政策対応における主要なアクター・関連するアクター間の関係性・利害関係やトレードオフの検討も行う。政策に有用な推進・管理等にかかわるツールの整理を行う。

## 3.2 バイオものづくりシステムにおける R&D と政策の俯瞰マップの提案

### (1) 俯瞰マップ作成に当たり考慮した点

3.1 では、バイオものづくりの政策サイクル上必要とされる項目を列挙したが、その中でも、政策分析の大前提となる、イノベーションポートフォリオの把握と可視化が現在のバイオものづくり政策プロセスに特に欠けているという問題認識から、それを可能とすることが重要と考え、以下にその試みとして、本ワーキングペーパーでは図3に示す「バイオものづくりシステムにおける研究開発と政策の俯瞰マップ（以下俯瞰マップ）」を提案する。

同俯瞰マップを検討するにあたり、政策対応として行うべき項目をバイオものづくりの一連のプロセス・サプライチェーンに応じて整理することを試みた。研究開発上実施すべき項目と政策対応のそれぞれについて整理するため、研究開発プログラムのレーンと、事業環境整備・市場導入の政策対応のレーン

---

<sup>36</sup> 例えば、(一財)バイオインダストリー協会（JBA）と日本バイオ産業人会議（JABEX）、Greater Tokyo Biocommunity（GTB）が三者連名による「バイオ戦略見直しに向けた提言」（2024年4月）[https://www.jba.or.jp/web\\_file/202404\\_2\\_teigen.pdf](https://www.jba.or.jp/web_file/202404_2_teigen.pdf) や、経団連による「バイオトランスフォーメーション（BX）実現のための重要施策」[https://www.keidanren.or.jp/policy/2024/034\\_honbun.html](https://www.keidanren.or.jp/policy/2024/034_honbun.html)

に分けて整理した<sup>37</sup>。

バイオものづくりのプロセスとしては、まず生物細胞設計から原料生産と製品化に向けてのプロセスがある。政策対応としては生物細胞設計のプラットフォームの構築支援、その後のスケールアップのためのインフラ整備、そして用途別・産業領域別<sup>38</sup>の課題への対応が挙げられる。その過程では、投資の拡大に向けての施策や規制や標準化に関するルール形成も並行して展開することが求められる。その際、初期需要の喚起策、経済的価値の可視化とその向上、既存産業との調整、新たな異業種間の連携による産業エコシステム構築への支援なども求められる。政策展開においてはこれらの活動がシームレスにつながる必要がある。

冒頭で挙げた米、EU、英のどの政策文書においてもスケールアップが課題と指摘されており、生物設計から製品化に向けた大量培養・スケールアップへの接続が重要との認識が強まっている。また、スケールアップも課題だが、上流の生物細胞設計の技術開発が一定の汎用性を持つのに対して、用途ごとの製品化はより複雑な個別適用が求められ、そうしたことに対応できるデザインをあらかじめすることの重要性も指摘されている<sup>39</sup>。さらには2. の課題認識でも論じたが、そもそも社会実装・製品化の段階で用いる物質についても初期の段階からシステム思考で考えるバイオエコノミーの政策フレームワークに導入すべきとする指摘もなされている<sup>40</sup>。Marvik & Philip は、ノルウェーのバイオエコノミー戦略で掲げられた原材料→技術→工業化→市場の4つのステップのマトリクスが全体の流れを把握することを可能とし、異なる省庁間の連携が促進されたと指摘する。つまり、いかに原材料から市場化までをつなげてシステミックに考えるかということが重要ということである。

従来は製品化・社会実装が政策の終点ととらえられがちであったが、バイオの特性を考えると、バイオマス資源の循環の発想で、製品の消費後に廃棄されたものを未利用資源としてとらえ、さらに原料化すること、そしてそれをまた利活用できるような生物細胞設計に結び付けていくことが全体として考えられていく必要がある。こうしたことを踏まえ、俯瞰マップでは、製品化でプロセスを終えるのではなく、製品化後の、消費、廃棄と原料化までもつなぐことを考慮して循環型の図にした。

廃棄段階における未利用資源の利活用を考えると、バイオマス資源が潜在的なものも含めてどの程度存在するのか（バイオマス資源のアベイラビリティの把握）、どのような環境でどのように消費されるのか、どのように回収されどのように原料化できるのか、原料は国内や地域に十分に存在するのか、十分でない場合どのように国外等から調達するのか、等々を検討する必要がある<sup>41</sup>。また、このように循環型にすることで、廃棄から原料化することを念頭にした製品デザインや消費のあり方の検討が可能となる。

その他、全行程を通じて検討や確保が必要な、教育や人材育成、セーフティ・セキュリティの確保等の

---

<sup>37</sup> なお、図の円は内包関係を示すものではない。バイオものづくりのプロセスに対応して実施されるべき研究開発と政策のレーンととらえている。

<sup>38</sup> 化学・素材、繊維、紙パルプ、化粧・香料、食品、エネルギー（SAF）、医薬品。

<sup>39</sup> 用途ごとに求められる複雑な適用ごとの検討については、WEF (2022) Accelerating the Biomanufacturing Revolution, White paper, p.11, Figure 3 を参照。 [https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Accelerating\\_the\\_Biomanufacturing\\_Revolution\\_2022.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_Accelerating_the_Biomanufacturing_Revolution_2022.pdf)

<sup>40</sup> 前掲 Marvik and Philip (2020) p.3 の Figure 1. A bioeconomy innovation policy matrix に4つのステップのマトリクスが紹介されている。 <https://doi.org/10.15252/embr.202051478>

<sup>41</sup> このように廃棄も含めた循環構造の中でバイオエコノミーをとらえる必要があるという認識はますます強調されており、例えば以下の文献の図にも表れている。WEF (2024) Accelerating the tech-driven bioeconomy の p.22, Figure 11.

<https://www.weforum.org/publications/accelerating-the-tech-driven-bioeconomy/>

項目がある。

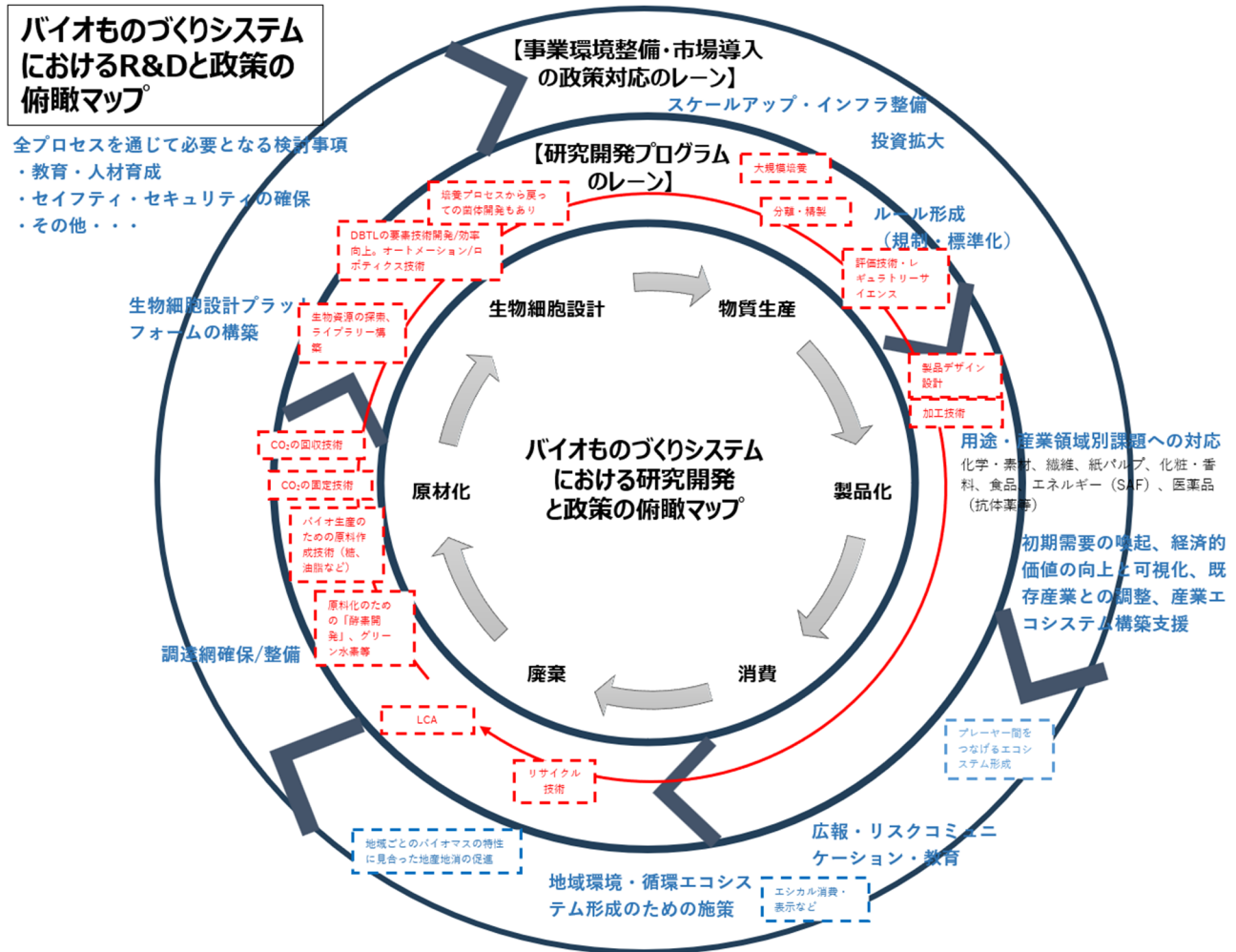


図3「バイオものづくりシステムにおける研究開発と政策の俯瞰マップ」

(2) 俯瞰マップの有用性

この俯瞰マップの有用性は、技術開発上の必要事項と政策対応を、バイオものづくりの全プロセスを循環したサイクルの形で示している点にある。これにより政策間のつながりとそのプロセス前後で求められること、自分の活動の全体における立ち位置の把握が可能となる。しばしば「by design」の重要性が指摘されるが、全体を俯瞰し可視化することで、技術開発も政策対応もデザインをしていくことが可能となる。この循環的な俯瞰マップのインプリケーションとしては、サプライチェーン全体を認識すると、バイオマス資源・原料を研究開発の際に所与として扱わず、その特性やアベイラビリティを意識するようになり、技術開発のありかたや、製品化、消費のありかたも変わっていくことにつながる。

バイオマス資源ベース・バイオプロセスによるバイオエコノミー社会の実現を突き詰めれば、2. でも

論じた通り、地域に特有<sup>42</sup>のバイオ資源を利活用した分散型の生産体制を構築する産業政策や、資源循環型・分散型地域社会を築く地域政策にもつながる。バイオエコノミーが持つ分散化の意味について日本ではあまりなされていないが、可能性のある帰結の一つとして海外では議論がなされているところである<sup>43</sup>。

#### 4. 今後の展開

本ワーキングペーパーは、バイオものづくりに関する政策が本当の意味で社会課題解決に貢献するためには、異なる府省庁により展開される個別の政策を超え、システム思考での政策調整に基づく政府全体の対応を実施していく必要があるとの認識のもと、それを実施するうえで必要となる活動を整理した。とりわけ、政策分析の大前提として必要となるイノベーションポートフォリオの把握と可視化が現在のバイオものづくり政策プロセスに欠けていることが喫緊の課題と考え、それを可能とするため「バイオものづくりシステムにおける研究開発と政策の俯瞰マップ」を提示した。

社会システム全体を俯瞰し、社会変革志向・ミッション志向のイノベーション視点からシステム思考でそのあり方を考えることの重要性は、バイオエコノミー戦略の検討過程においても、有識者から指摘されている<sup>44</sup>が、その実現には至っていない。本研究は、この残された政策上の課題に対して応えるものとして位置づけることができる。また、この課題に対して応えることは、長期的な社会変化や技術開発の進展を踏まえた先見のガバナンスを効果的に実践するための枠組みを構成することにつながるものである。

今後この俯瞰マップにバイオものづくりに関連する実際の研究開発事業と政策対応を埋め込むことで、さらにマップの中身を精緻化していくことが求められる。そのうえで、政策担当者・ステークホルダー間でこの俯瞰マップを媒介として相互に検討を重ねることで政策分析を行い、よりよいバイオものづくり政策の推進に結び付けていきたい。

本研究は下記のプログラムの一環として行われたものである。

共進化実現プログラム「バイオエコノミーを目指したバイオものづくりの推進: 政策課題の可視化と制度設計」

(研究代表: 東京大学公共政策大学院 松尾真紀子特任准教授) (2023 年度 10 月~2026 年 3 月) <sup>45</sup>。

行政担当部署および担当者は、文部科学省研究振興局ライフサイエンス課 (吉田彩乃・田沼伸章・吉田一貴) / 内閣府科学技術・イノベーション推進事務局 (松本拓郎) / 経済産業省商務・サービスグループ生物化学産業課 (石塚大輔)。

\* 「共進化実現プログラム」: 国の具体的な政策課題に基づいて、政策担当者と研究者とが対話をしながら研究課題を設定し、共に研究を進める文科省 SciREX 事業のプログラム。研究者の学術的関心のみに基づく研究ではなく、また行政官が行う委託調査でもない、両者が課題設定の段階から一緒に取り組むという、EBPM (エビデンスに基づく政策形成) の新しい実践。

<sup>42</sup> 例えば、未利用資源の構成は地域スペシフィックである。食品残差にしても汚泥にしても、その地域の消費を反映し、回収できる量も地域ごとに異なる。

<sup>43</sup> 例えば前掲、WEF (2024) や前掲の Hodgson and Maxon (2022), p.18 においても強調されている。

<sup>44</sup> 令和 6 年 5 月 20 日第 9 回イノベーション政策強化推進のための有識者会議「バイオ戦略」議事要旨より

<sup>45</sup> SciREX ウェブサイト、<https://scirex.grips.ac.jp/project/coevolution3-2.html>