

# バイオ×材料科学： ものづくりにおける交差の潮流と展望

2026年3月  
科学技術振興機構（JST）  
研究開発戦略センター（CRDS）



## 1. 序

- 1.1 背景と調査の狙い
- 1.2 本調査の位置付け

## 2. 本調査領域を取り巻く状況

## 3. 各国・地域のバイオ×材料 科学の政策動向

- 3.1 日本
- 3.2 米国
- 3.3 EU
- 3.4 中国
- 3.5 韓国

## 4. 技術動向

- 4.1 本調査領域の俯瞰図
- 4.2 技術進展の潮流
- 4.3 バイオマス利用
- 4.4 バイオプロセス
- 4.5 生体機能性材料

## 5. まとめと今後の展望

参考文献

# 1.1 背景と調査の狙い

## 【背景】

- 限られた資源の有効・循環利用と、環境負荷低減への要請から、**持続可能なものづくり**のあり方へと転換が求められている。
- **バイオテクノロジー**や**バイオマス**を利用したものづくり（**バイオものづくり**）は、その一つのアプローチとして、2000年ごろから世界・各国における精力的な啓発と研究開発投資がされてきた。
- こうした**バイオエコノミー**の実現を目指す機運が高まる一方で、バイオマス利用の拡張や、スケールアップの効率化、新たな材料機能の開拓など、**高機能/高付加価値製品の技術展開**に向けて、**学際的な研究開発の必要性が増している**。

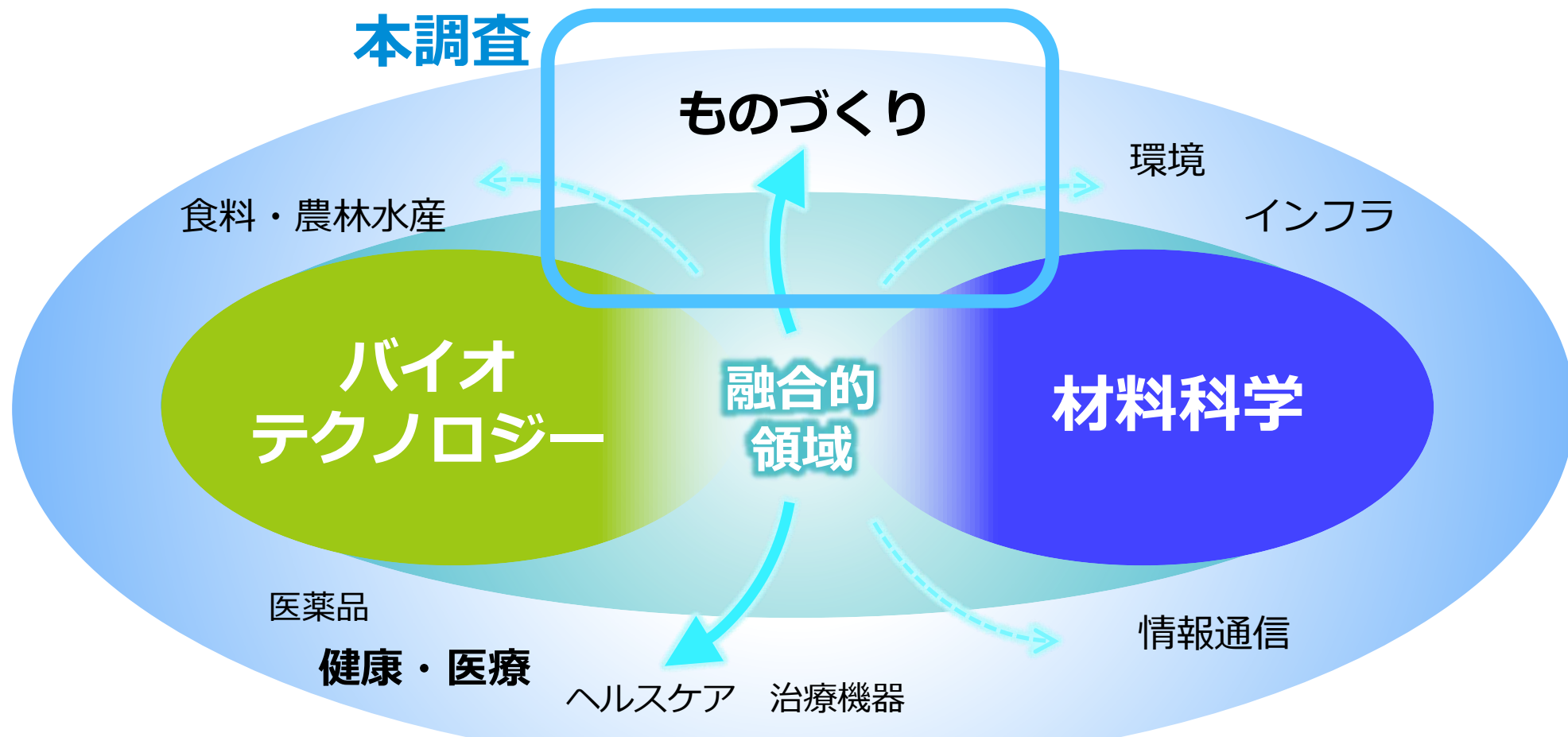
## 【本調査の狙い】

ものづくりの目標を共にする**バイオものづくり**と**材料科学との交差**に着目し、

- **技術的潮流や政策動向**を俯瞰的に整理する。
- バイオ×材料科学の**分野連携の意義**を提示し、今後の方向性への示唆を得る。

# 1.2 本調査の位置付け

バイオテクノロジーと材料科学に跨がる融合的領域のうち、特に、**ものづくりに関わる技術**に焦点を当てる。



### 融合の意義

- センサー・部材の機能化による、プロセスの精密制御と可視化
- 構造制御や触媒技術による、素材の高機能化と新たな価値創出
- 人工物との複合化による、生体分子の安定化と動的機能の実現

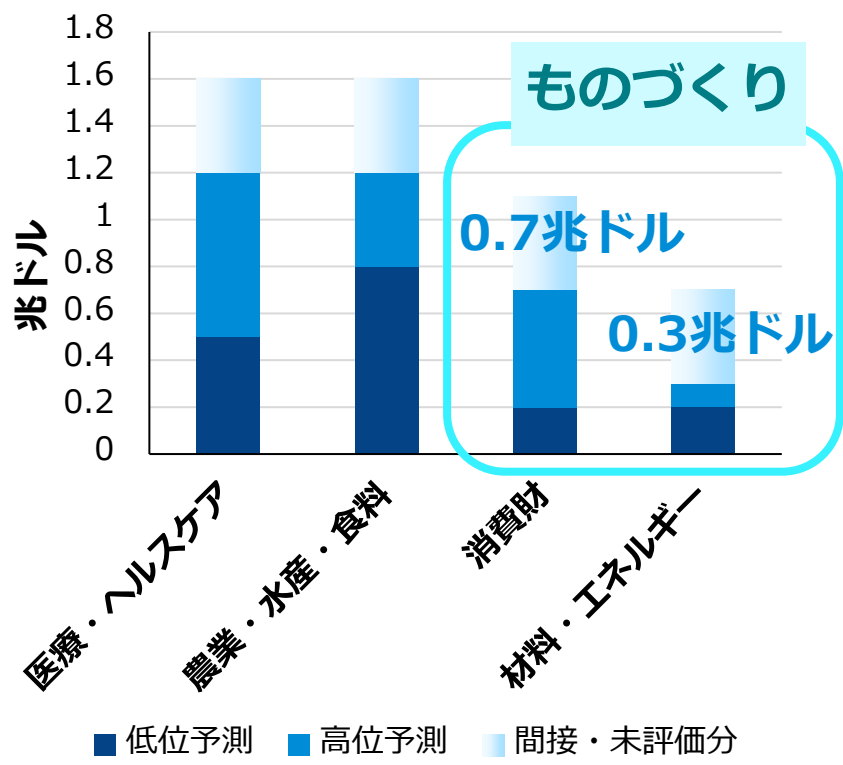
# 2.1 バイオエコノミー市場の成長\*



\*2022年時点で全体で4~5兆ドル<sup>1)</sup>、2050年までに30兆ドルに達するとの試算もある<sup>2)</sup>

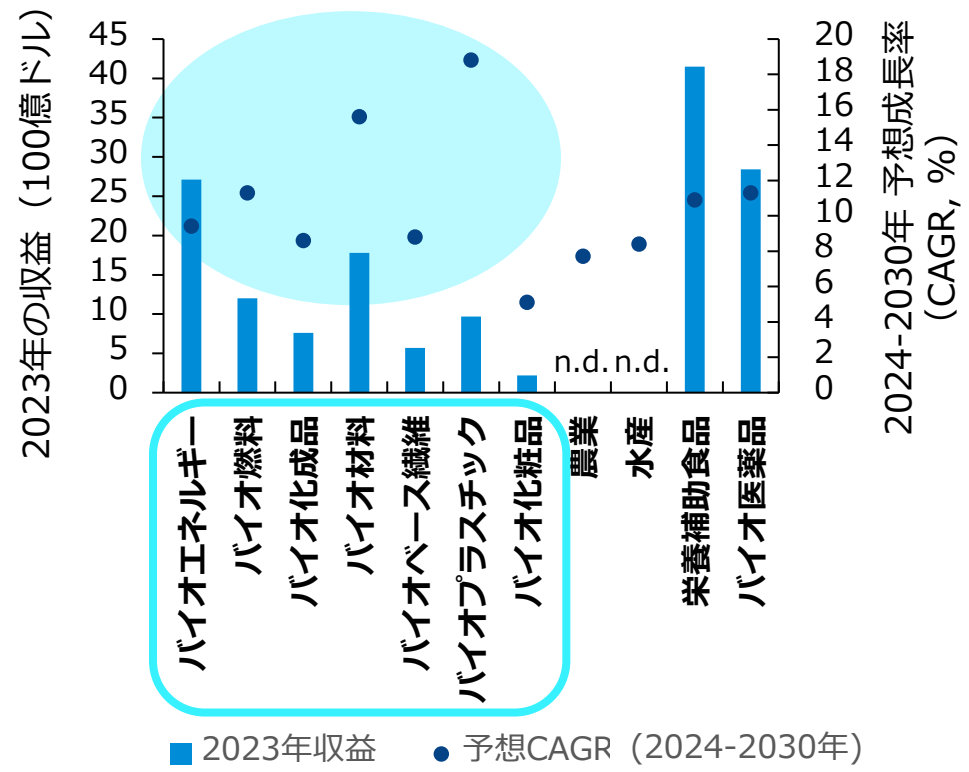
## バイオ技術を用いたものづくりが、高い成長率で存在感を増す見込み

2030-2040年 バイオ関連  
グローバル市場規模 (2020年時予想)



出典：Mckinsey, The Bio Revolution Innovations transforming economies, societies, and our lives (2020)<sup>3)</sup> よりCRDSが作成

セクター別のグローバル収益と成長見込み



出典：Nature Finance and the World Bioeconomy Forum, Financing a Sustainable Global Bioeconomy (2024)<sup>4)</sup> よりCRDSが作成

# 2.2 高機能/高付加価値製品への注力の必要性



## バイオマス供給バランスの中で、新たな価値創出が求められる

未利用/少量のバイオ資源に「+α」の機能や価値を付与することが技術展開の道筋

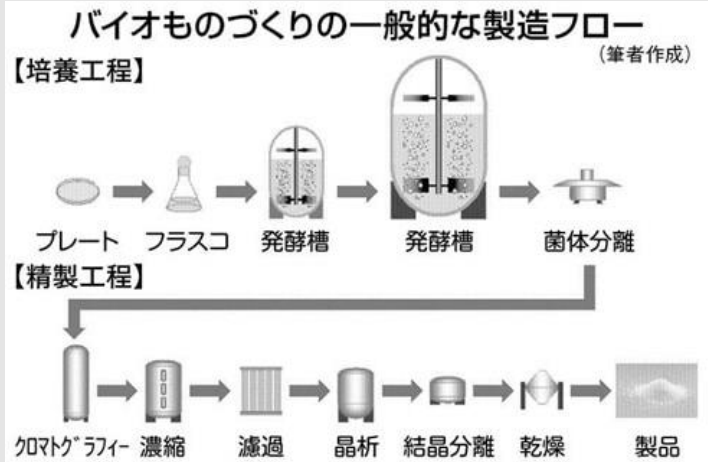
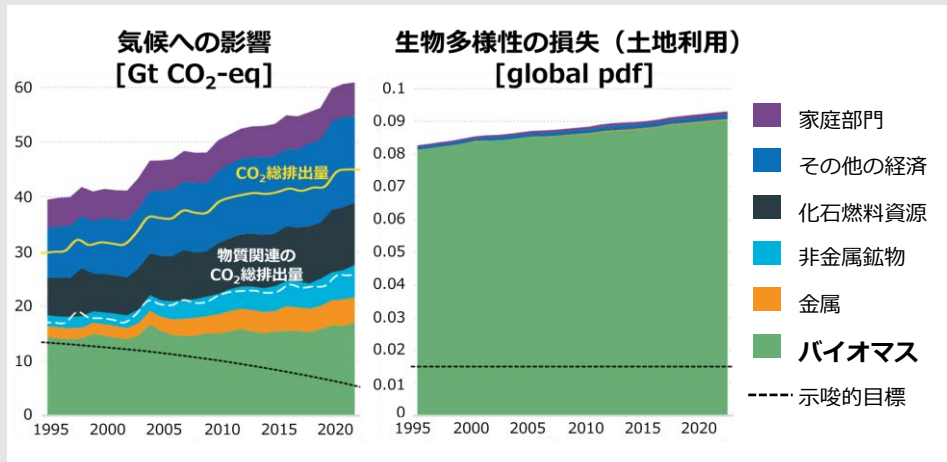
### 安価・大量の化成品やエネルギーのバイオ代替における問題

#### ■ バイオマス原料供給の限界

- 食料生産との競合
- 土地利用負荷の増大

#### ■ 安価な製造プロセスの構築が困難

- 製造スケールが既存化成品に及ばない
- 精製工程にもコストを要する



出典：Global Resources Outlook 2024 - Bend the trend: Pathways to a Liveable Planet as Resource Use Spikes - Summary for Policymakers (2024)<sup>1)</sup> Figure 7 をCRDSが加工

出典：日刊工業新聞2025年9月5日号 科学技術の潮流 第303回「バイオ生産 初期製造体制が重要」より

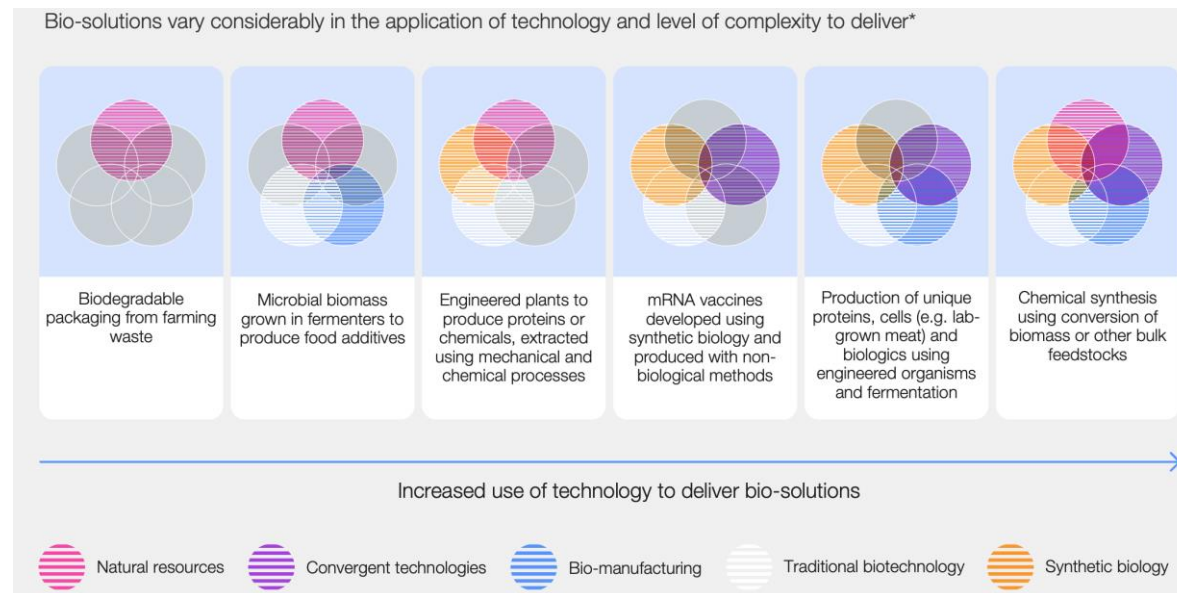
## 2.3 分野横断的な研究開発が拓く可能性

### 高機能/高付加価値なバイオものづくりには、技術融合が必要

特に化学・ナノテク・情報科学等との融合により、機能向上や商業化の促進が期待される<sup>1)</sup>

- 効果の例)
- ・ 変換効率向上やコスト削減、スケールアップに寄与<sup>2,3)</sup>
  - ・ 炭素固定能の向上<sup>4)</sup>
  - ・ 生体物質特有の複雑さや機能を活かした高付加価値化

### 技術の高度化と融合の進展イメージの例



出典：World Economic Forum, Accelerating the tech-driven bioeconomy (2024)<sup>5)</sup> Figure 4

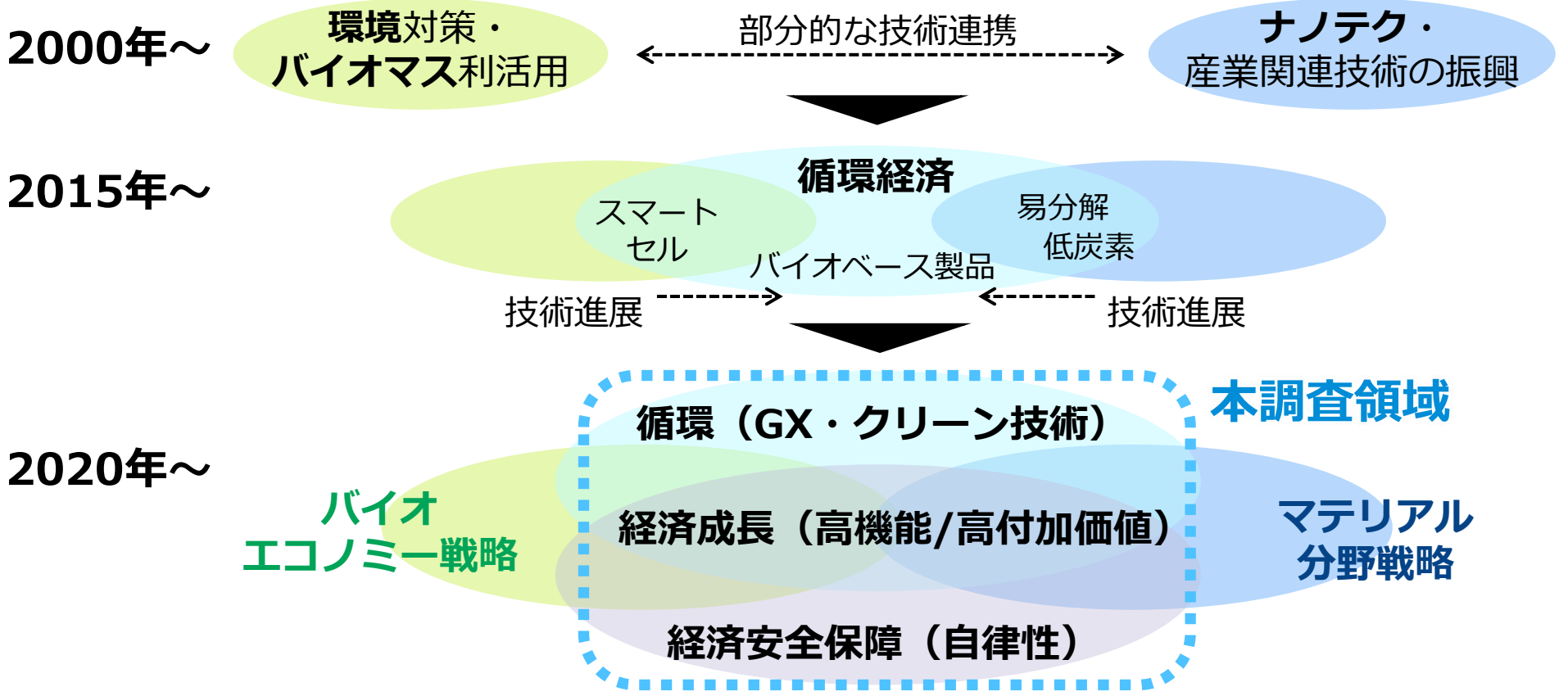
他方で、分野を跨いだ施策の抜け落ちやトレードオフも指摘されている。<sup>6)</sup>

# 2.4 政策的な構造や位置づけのグローバルな変化



## バイオは「環境戦略」から「循環・経済成長・経済安保戦略」へ変遷

分野を超えた産業コミュニティ形成や研究開発が各国・地域で進展している（3章）



# 3. 各国・地域のバイオ×材料科学の政策動向

	2005年以前	2006年	2011年	2016年	2021年
<b>世界</b> OECD	'92 アジェンダ21 '00 ミレニアム開発目標			'15 アジェンダ2030 (SDGs) '15 パリ協定	'22 昆明・モンテリオール生物多様性枠組 '21 GACERE設立 <sup>1)</sup>
		'09 The Bioeconomy to 2030 (概念提唱)		'18 ゲノム編集農業利用報告書	'21 STI Outlook (合成生物学・バイオファウンドリ)
<b>日本</b>	'02 バイオテクノロジー戦略大綱 '02 バイオマス・ニッポン総合戦略  '02 ナノテクノロジー・バーチャルラボ	'06 バイオマス・ニッポン総合戦略 改訂  '06 第3期基本計画分野別推進戦略 ライフサイエンス、ナノテク・材料		'19 バイオ戦略2019 '20 バイオ戦略2020 <b>'20- GI基金</b> '20 経済循環ビジョン2020	'21 バイオ戦略フォローアップ '24 バイオエコノミー戦略 '21 グリーン成長戦略 '23 GX基本方針 '23 循環自律経済戦略 '25 GX2040ビジョン '21 マテリアル革新力強化戦略 '25 改訂
<b>米国</b>	'99 大統領令 “Developing and Promoting Biobased Products and Bioenergy” '00 Biomass R&D Act  '01- National Nanotechnology Initiative (NNI)		'12 National Bioeconomy Blueprint  '11- Materials Genome Initiative	'19 The White House Summit on America's Bioeconomy	'22 大統領令14081 → National Biotechnology and Biomanufacturing Initiative創設 '25 大統領令14081を撤回 '21- Circular Economy Strategy Series '23 DOE Strategy for Plastic Revolution
<b>欧州</b>	'05 Knowledge-Based Bioeconomy: A New Challenge <b>'00 Lisbon Strategy</b> '04 欧州ナノテクノロジー戦略	'07 FP7 <b>'10 Europe 2020 Strategy</b>	'10 KBBE in Europe: Achievements and Challenges <b>'12 First Bioeconomy Strategy</b>  '14 Horizon2020	'18 Updated Bioeconomy Strategy  <b>'19 Green Deal</b> '20 第二次 循環経済行動計画	'22 Progress Reports '24 勧告 “Boosting Biotechnology and Biomanufacturing” '25 Bioeconomy Strategy 2025 '21 Horizon Europe '25 Clean Industrial Deal '24 AMI Leadership
<b>中国</b>	'05- 国家バイオ産業基地の設立 (深圳ほか)  '01 国家ナノテクノロジー発展綱要		'10 戦略的新興産業発展計画	'15 中国製造2025  '16 国家イノベーション駆動発展戦略綱要	'22 十四五・バイオ経済発展計画 '23 非食品生物由来材料3カ年計画 '22 十四五再生可能エネルギー計画 '21 十四五・原材料産業発展計画 '21 十四五・循環経済発展計画
<b>韓国</b>	'01- ナノ技術総合発展計画	'07 第2次生命工学育成基本計画	'11 素材・部品未来ビジョン2020 '13 第3次素材・部品発展基本計画	'13 バイオ経済ロードマップ '20 CN戦略 '17 第4次素材・部品発展基本計画 '18 第一次資源循環基本計画	'17 第3次生命工学育成基本計画 '22 国家合成生物学育成戦略 '24 バイオ製造革新戦略 '25大韓民国バイオ大転換戦略 '23 CN技術革新戦略ロードマップ '23 未来材料戦略

バイオ関連の政策  
材料関連の政策

環境戦略



循環, 経済成長,  
経済安保

# 3.1 日本 これまでの政策動向



科学技術振興からイノベーション・経済戦略へと変遷。基礎研究では分野融合の試みがあるものの、各国家戦略はおよそ縦割り、横断的取り組みは限定的。環境負荷低減、循環、産学官連携などが共通ワードとして見られる。

## 2001 第2期科学技術基本計画 (+分野別推進戦略)

2002

**バイオテクノロジー戦略大綱** バイオ技術のR&Dと産業化を推進。バイオプロセスやナノ・ITとの融合にも重点。  
**バイオマス・ニッポン日本総合戦略 (2006改訂)**  
バイオマスの総合的利活用を目指す。エネルギー・機能性製品への変換技術開発では工学・ナノテクとも連携。

**ナノテクノロジー分野別バーチャルラボ (10領域)**  
ナノテクを共通項に連携的研究推進。ナノバイオ3領域で生体分子を活用した機能性材料・デバイスなどを開発。

2002

2006

**第3期基本計画 分野別推進戦略 - ライフサイエンス分野**  
戦略重点科学技術に「生物機能を活用したものづくり」。重要な研究開発課題にITやナノとの融合領域も。

**第3期基本計画 分野別推進戦略 - ナノテク・材料分野**  
重要な研究開発課題に「ナノバイオテクノロジー・生体材料」。医療・食品・環境・ライフ分野のニーズに貢献。

2006

## 2011 第4期科学技術基本計画：グリーンイノベーション (低炭素、自然共生、循環)

2019

**バイオ戦略2019** バイオを社会・経済の必須要素に。9つの市場領域に高機能バイオ素材、バイオプラなど。

2019 プラスチック資源循環戦略

2020

**バイオ戦略2020 (基盤的施策、市場領域別施策確定版)**  
市場領域別に取り組む施策およびロードマップを提示  
2021~ バイオコミュニティ形成

**循環経済ビジョン2020** 環境活動としての3Rから経済活動としての循環経済へ。再生材市場の創出で強靱性を向上。

2020

2020 革新的環境イノベーション戦略

## 2021 第6期基本計画、GI基金、グリーン成長戦略

2021

**バイオ戦略フォローアップ**  
総合知やコミュニティ活動、循環の取り組み方針を強化  
2021 バイオプラスチック導入ロードマップ  
2021 みどりの食料システム戦略

**マテリアル革新力強化戦略** ESG時点の産学官連携・DXで持続可能性を追求。AI・量子・バイオとの融合も提示。

2021

**成長志向型の資源自律経済戦略**  
4R競争環境整備や産学官CEパートナーシップの強化など

2023

## 2023 GX実現に向けた基本方針、GX推進戦略

2024

**バイオエコノミー戦略**  
「バイオものづくり・バイオ由来製品」領域において、微生物・細胞設計PFやバイオファウンドリの基盤を強化。

**マテリアル革新力強化戦略 改訂** 産学官連携による技術的優位性の向上、循環経済、GX成長、経済安保等に重点。

2025

## 2025 GXビジョン2040

# 3.1 日本 関連する近年の取り組み①



## 【内閣府】

- **戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）（第3期、2023年度～）** 分野横断的R&Dを基礎から社会実装まで一気に通貫
  - **サーキュラーエコノミーシステムの構築**：プラスチックの循環を目指し、再生材の分別・供給システムからデータ基盤の整備まで推進
- **ムーンショット型研究開発制度（2020年度～）** 日本発の破壊的イノベーションの創出を目指す
  - **目標4「2050年までに、地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現」**  
3つの柱の1つに「海洋生分解性プラスチックの開発」。非可食バイオマスの利用や、分解のタイミングやスピードの制御に取り組む。
  - **目標5「2050年までに、未利用の生物機能等のフル活用により、地球規模でムリ・ムダのない持続的な食料供給産業を創出」**  
(食料生産システムに加え) 農作物残渣や食品廃棄物の多様なバイオプロセスによる変換や、食料の長期保存のための加工技術など。
- **バイオコミュニティの形成** 国際拠点と地域拠点をネットワーク化し、世界最高レベルの研究環境と事業支援体制を整備  
これまでに、グローバルバイオコミュニティ2拠点（東京、関西）と地域バイオコミュニティ6拠点を認定。

## 【経済産業省・NEDO】

- **グリーンイノベーション基金（2021年度～）** 2050年カーボンニュートラルに向け、重点分野の研究開発を支援
  - **「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」プロジェクト**（予算額1,790.1億円）  
微生物等改変プラットフォーム事業者と、素材・燃料等の異分野事業者との共同で、CO<sub>2</sub>を原料としたバイオものづくりを社会実装へ。各コンソーシアムを組み推進中：カネカコンソーシアム、双日コンソーシアム、積水化学工業コンソーシアム、NITEコンソーシアム。NITEコンソーシアムが収集した菌株やデータ等の成果物を連携企業等に提供する「GIフォーラム」を2024年度から運用開始。
- **サーキュラーパードナース（2023年9月～）** 成長志向型の資源自律経済戦略に基づいて設立  
サーキュラーエコノミーの実現に向けて産学官連携を促進。2025年時点で、企業・業界団体、自治体、大学・研究機関などから667の会員が参画。ロードマップ策定やCE情報流通プラットフォームの立ち上げなどに取り組む。
- **バイオものづくり革命推進事業（2023～2032年度）**  
未利用資源の原料化、微生物等改変技術、プロセス、標準化等、バリューチェーンの構築に必要な技術開発と証を一貫して支援。予算額3000億円。
- **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（2020～2026年度）** スマートセルプロジェクト（'16～'20年度）を前身とし、バイオ資源の拡充やバイオ生産プロセスの最適化を目指す。
- **Sustainable Bioproducts Network（2024年5月～）**  
NEDOが島津製作所、出光興産、東レと合同で設立したネットワーキンググループ。企業主催のマッチング会を企画。

## 3.1 日本 関連する近年の取り組み②



### 【環境省】

#### ● 地域資源循環を通じた脱炭素化に向けた革新的触媒技術の開発・実証事業（2022～2029年度）

材料創製インフォマティクスを活用し、廃プラスチックやバイオマス低温・省エネで化学原料に再生する触媒を開発・実証。文部科学省と連携し、基礎研究から社会実装までを長期的・一体的に支援するアカデミア知見活用型R&D。予算規模：19.0億円（2024年度）

#### ● 脱炭素型循環経済システム構築促進事業（2023～2027年度）

化石資源のバイオマス代替や廃油からのSAF製造など、リサイクルプロセスを実証。研究開発後の「実用化・プロセス実証」フェーズに特化し、素材転換と循環システムの構築を支援。予算規模：47.0億円（2024年度）

#### ● プラスチック資源・金属資源等のバリューチェーン脱炭素化のための高度化設備導入等促進事業（2023～2027年度）

バイオマスプラスチック製造や高度リサイクルに必要な省CO<sub>2</sub>型設備の導入費用補助。技術実証ではなく、商用化段階にある設備・プラント建設への直接的な資金援助。予算規模：80.0億円（2024年度）

### 【農林水産省】

#### ● みどりの食料システム戦略（2021年度～）

食料・農林水産業の生産力向上と環境負荷低減（サステナビリティ）の両立をイノベーションによって目指す中長期的な政策方針。2050年までに農林水産業のCO<sub>2</sub>ゼロエミッション化、化学農薬50%・化学肥料30%の使用量低減、有機農業の面積割合25%拡大などの野心的な目標を掲げている。

#### ● みどりの食料システム戦略実現技術開発・実証事業（2022年度～）

2050年カーボンニュートラルと環境負荷低減の実現に向け、基礎研究から社会実装（現場実証）までをシームレスに支援。予算規模：30.0億円（2024年度）

#### ● 森林・林業・木材産業グリーン成長総合対策（2024年度～）

「林業・木材産業循環成長対策」という枠の中で、製材工場の大規模化などと並び、バイオマス加工施設や新素材開発を支援。バイオ関連の予算規模：64.1億円（2024年度）

# 3.1 日本 関連する近年の取り組み③



## 【文部科学省・JST】

- データ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクト (DxMT) (2022~2030年度)
  - 「バイオ・高分子ビッグデータ駆動による完全循環型バイオアダプティブ材料の創出」(京都大学拠点)
    - 環境低負荷・高度循環型高分子、バイオマテリアル、二酸化炭素分離回収材料など、機能性や自己修復能を付帯する材料の開発
- 未来社会創造事業 (2017年度~)
  - 「地球規模課題である低炭素社会の実現」領域：バイオマスの機能性材料化やバイオプロセスの改良に関する課題も実施
  - 「持続可能な社会の実現」領域：重点公募テーマ「将来の環境変化に対応する革新的な食料生産技術の創出」で関連の課題
- 革新的GX技術創出事業 (GteX) (2023年度~)
  - 3領域のうち「バイオものづくり」領域で微生物や植物の機能改良・解析の基盤技術開発を推進
- 先端的カーボンニュートラル技術開発 (ALCA-Next) (2023年度~)
  - 資源循環領域、グリーンバイオテクノロジー領域などに関連課題
- 戦略的創造研究推進事業
  - CREST/さきがけ「超生体組織」(2025年度~)、CREST/さきがけ「材料の創製・循環」(2024年度~)、ERATO「酒井複素ゲルプロジェクト」など

## 【日本学術振興会 (JSPS)科学研究費助成事業 (科研費) - 学術変革領域 (A)】

- 精密高分子のデータ・進化学による次世代医薬創出 (高分子進化工学) (2025~2029年度)
- 脳神経マルチセルラバイオ計算の理解とバイオ超越への挑戦 (バイオ超越) (2024~2028年度)
- タンパク質機能のポテンシャルを解放する生成的デザイン学 (蛋白質新機能生成) (2024~2028年度)
- 細胞外情報を統御するマルチモーダルECM (マルチモダルECM) (2023~2027年度)
- 生体反応の集積・予知・創出を基盤としたシステム生物合成科学 (2022~2026年度)
- 生物を陵駕する無細胞分子システムのボトムアップ構築学 (超越分子システム) (2021~2025年度)
- 分子サイバネティクス - 化学の力によるミニマル人工脳の構築 (分子サイバネ) (2020~2024年度)

## 【日本経済団体連合会 バイオエコノミー委員会 (2022年6月~)】

世界最先端のバイオエコノミーの確立に向けて、産官学の関係者らとの対話を通じ、バイオ関連市場の拡大、バイオコミュニティの形成、データ基盤の整備等に向けた提言などを行う。バイオ戦略の策定支援も。

- 2023年3月「バイオトランスフォーメーション (BX) 戦略」公表：5つの戦略と分野別施策の提言
- 2024年4月「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」公表：政府のバイオエコノミー戦略策定 (2024年6月)に向けた重要な施策 (分野横断、分野別) の提言

# 3.2 米国 これまでの政策動向



1990年代後半から、世界に先駆けてバイオ由来製品やバイオマス利用による産業・経済発展を掲げる。国の方針やイニシアチブの下、エネルギー省や農務省がバイオマス利用を促進、NSF中心に分野横断的研究も積極推進。

1998

**大統領令13134「バイオ製品およびバイオエネルギーの開発と促進」**

バイオベースの経済発展を世界に先駆けて掲げる

2000

**バイオマス研究開発法** (2005年、2008年改正)  
バイオマス利用やバイオベース製品のR&Dを推進  
→バイオマス研究開発委員会を設立  
→バイオマス研究開発 (BR&D) イニシアチブ

[DOE] Billion-Ton Reports ('05, '11, '16, '23)  
国内バイオマス供給見込みを評価。年間10億トンも想定

2012

**National Bioeconomy Blueprint**

研究開発イノベーション駆動の包括的バイオエコノミー戦略：健康, エネルギー, 材料, 食料, 環境

2019 The White House Summit on America's Bioeconomy

2022

**大統領令「バイオエコノミーのためのバイオ技術/バイオ製造の推進」** “製造業の1/3がバイオ技術で置き換わる”

→国家バイオ技術・バイオ製造イニシアチブ  
→Data for the Bioeconomy Initiative (2023)

2023

**Bold Goals for U.S Biotechnology and Biomanufacturing**

気候, 食料, サプライチェーン, 健康, **分野横断** のR&D目標

2023.3 [DOD] Biomanufacturing Strategy

2025.3 大統領令14081を撤回

新興バイオ技術・国家安全保障委員会 (NSCEB) が最終報告：  
国家バイオテクノロジー調整局設立や150億ドルの投資を提案

**国家ナノテクノロジー・イニシアチブ開始**

“ナノ”を共通項とした省庁横断・分野融合的R&Dを推進。  
ナノバイオ材料やナノセルロースも継続的テーマ

2001

**Materials Genome Initiative (MGI) 開始**

計算や情報科学を取り入れて材料開発の加速を目指す。  
生体を制御する材料、ソフトマテリアルとしてのバイオ由来材料も対象。

2011

**[DOE] Energy Earthshots Initiative**

クリーンエネルギーの技術開発を加速。バイオプロセスやバイオマス利用、生物による炭素固定も含まれる。

**[EPA] Circular Economy Strategy Series**

- 2021 National Recycling Strategy
- 2024 National Strategy for Reducing Food Loss and Waste and Recycling Organics
- 2024 National Strategy to Prevent Plastic Pollution

2021-

**国家先進製造戦略**

先端製造におけるリーダーシップの維持を目指す。5つの技術開発対象の1つにバイオエコノミーの製造技術。

2022

**[DOE] Strategy for Plastic Revolution**

廃棄プラ削減を加速する技術開発プログラムを推進。  
生分解経路の構築や、バイオプラの設計も含む。

2023

## 3.2 米国 関連する近年の取り組み①



### 【国立科学財団 (NSF)】

- **NSF Biofoundries (2024~, 75Mドル, 5拠点)** 設計・合成・テストの加速と、ツールや製品開発の合理化を促す統合施設
  - NSF Artificial Intelligence-driven RNA BioFoundry (NSF AIRFoundry)
  - NSF BioFoundry: Glycoscience Resources, Education, and Training (NSF BioF:GREAT)
  - NSF iBioFoundry at the University of Illinois Urbana-Champaign (NSF iBioFoundry)
  - NSF BioFoundry for Extreme & Exceptional Fungi, Archaea and Bacteria (NSF Ex-FAB BioFoundry)
  - NSF Center for Robust, Equitable and Accessible Technology and Education for Next Generation BioFoundries (NSF CREATE for Next Generation BioFoundries)
- **Materials Research Science and Engineering Centers** 学際的で野心的な研究のための環境設備を提供
  - [Brandeis大学] Materials Research Science and Engineering Center : バイオインスパイアード・ソフトマテリアル など
  - [Northwestern大学] Materials Research Science and Engineering Center : 無細胞合成生物学によるプログラマブル材料 など
  - [California大学Irvine校] Center for Complex and Active Materials : バイオインスパイアード・アクティブ材料 など
  - [California大学San Diego校] Materials Research Science and Engineering Center : 生体工学材料と高分子材料の統合 など
  - [Pennsylvania大学] Laboratory for Research on the Structure of Matter : 凝集タンパク質と細胞集団のエンジニアリング など
  - [Texas大学Austin校] Center for Dynamics and Control of Materials : ソフトバイオマテリアル など
- **Materials Innovation Platform** MGIのコンセプトの下、材料開発を加速する中規模インフラ。全体で4拠点。
  - BioPACIFIC (2019~) / Living BioFoundry : 合成生物学と材料科学の融合で革新的なバイオポリマーを創製 (後述)
  - GlycoMIP (2019~) : 自動プロトコールやハイスループット評価で、合理的な糖鎖材料の設計を加速
- **Emerging Frontiers in Research and Innovation (EFRI)** 変革をもたらし得る重要な新興分野に3000万ドルを支援
  - Biocomputing through EnGINeering Organoid Intelligence program (BEGIN OI) (2024~2025)
  - Engineered Living Systems (ELiS) (2022~2023)
- **その他のプログラム**
  - Biomedical Research Initiative for Next-Gen BioTechnologies - SynBio Control (BRING SynBio)
  - Designing Synthetic Cells Beyond the Bounds of Evolution (Designer Cells)
  - Cellular and Biochemical Engineering
  - Semiconductor Synthetic Biology Circuits and Communications for Information Storage (SemiSynBio-III)

## 3.2 米国 関連する近年の取り組み②



### 【エネルギー省 (DOE)】

- **Bioenergy Consortia** DOEの国立研究所と連携して先端的バイオエネルギーR&Dを行う10の産業コンソーシアム (以下抜粋)
  - Agile BioFoundry
  - Bio-Optimized Technologies to Keep Thermoplastics out of Landfills and the Environment (BOTTLE™)
  - Bioprocessing Separations Consortium
  - Chemical Catalysis for Bioenergy Consortium (ChemCatBio)
  - CO<sub>2</sub> Reduction and Upgrading for E-Fuels Consortium (CO<sub>2</sub>RuE)
  - DISCOVER Consortium...for algal biofuels and bioproducts

### ● Energy Earthshots Initiative (2021～)

ネットゼロと次世代クリーンエネルギー技術の費用対効果獲得が目標。8つの「エネルギーショット」のポートフォリオから成り、各目標の達成に向けたR&Dプログラムが推進されている (後述)。

### ● Strategy for Plastics Innovation (2023年1月)

プラスチックの廃棄削減と、製造・リユースに掛かるエネルギー負荷低減が目標。分解、アップサイクリング、リサイクル可能な設計、スケールアップと普及、の研究開発課題を推進。  
実施主体の例) Energy Frontier Research Centers、Bioenergy Research Centers、REMADE Institute、ReCell Centerなど

### 【国防総省 (DOD)】

- **製造イノベーション研究所 (MII)** 国内製造力の強化を目指す産官学パートナーシップ。2026年3月現在全8拠点の内、本調査領域には次が関連。

#### - BioFabUSA (2016～)

バイオファブリケーションをテーマに170以上の機関が参画。細胞由来製品の製造プラットフォーム「Tissue Foundry」や分性評価系を構築。

#### - BioMADE (Bioindustrial Manufacturing and Design Ecosystem)

工学生物学研究コンソーシアム (EBRC) によって設立され、2021年からMIIとしてDODが支援。パイロット規模の製造準備レベル4～7に焦点を当て、バイオ製造技術の商業化を加速。2026年3月現在300以上の機関が参画。

### 【国防高等研究計画局 (DARPA)】

#### ● Living Foundriesプログラム (2010～2022)

合成生物学を活用して1000以上 (最終的に1630以上) の新規分子や材料前駆体を合成。次世代の予測可能な生物工学ツール群を開発。

#### ● Engineered Living Materials (ELM) プログラム (2016～2021)

成長・自己修復・環境適応が可能な「生きた建材」の開発を実施。足場材料と生きた細胞の組み合わせや、遺伝子工学によりプログラム可能なパターン形成能を追及。

### ★ 工学生物学研究コンソーシアム (Engineering Biology Research Consortium: EBRC)

NSFが10年間支援した「Synthetic Biology Engineering Research Center (SynBERC)」を前身とし、2016年に設立。SynBERCは合成生物学の黎明期に貢献。EBRCは、エンジニアリングバイオロジーの発展に向け、研究ロードマップの作成やプログラム、標準規定の策定、教育などを実施。  
関連する発行物の例) ・ Engineering Biology & Materials Science: A Research Roadmap for Interdisciplinary Innovation (2021) <sup>1)</sup> ※p.40  
・ Engineering Biology Metrics and Technical Standards for the Global Bioeconomy (2024) <sup>2)</sup>

## 3.2 米国 詳細トピック



### ■ BioPACIFIC (NSF, 2020~)<sup>1)</sup>

- MGI構想のもと、UC Los AngelesとUC Santa Barbaraが運営するMaterials Innovation Platformの1つ
- **合成生物学と材料科学**の融合で、革新的なバイオポリマーの発見・創製を目指す
- 材料物性の評価機器に加え、合成生物学や微生物エンジニアリングのAI統合・自律実験施設「**Living Biofoundry**」を供用
- 2025年からの第2期（5年間）で**1,980万ドルの追加資金**を獲得

### ■ Energy Earthshots Initiative (DOE)<sup>2)</sup>

**ネットゼロや次世代クリーンエネルギー技術**に関する8つのエネルギーショットの中で、例えば次の**バイオ関連課題**が挙げられている。

- 水素ショット：生物の代謝反応による**バイオマスからの水素生成**
- カーボンネガティブショット：**生物プロセスによる炭素固定**
- クリーンな燃料と製品・ショット：**生体触媒経路の開拓**や、バイオ燃料・バイオ製品のインパクト検証

# 3.3 EU これまでの政策動向



統括的な戦略のもと、研究・産業・政策の部門横断的に取り組む方針の一つとしてバイオエコノミーを位置づけ。他方針とも常に相互作用&材料戦略を補完。歴代の枠組みプログラムがR&Dや産学パートナーシップ形成を牽引。

## 2000 Lisbon Strategy 知識ベースの経済・社会を構築

**2005 Knowledge-Based Bioeconomy: A New Challenge** 「知識ベースのバイオエコノミー」に向け、研究・技術・産業政策の統合の方向性を示す

2007 En Route to the Knowledge-Based Bio-Economy  
2030年の欧州経済に向けた産学専門家による政策提言

2010 European Knowledge-Based Bioeconomy: Achievements and Challenges, 2005以降の取組の総括

**欧州ナノテクノロジー戦略**  
ナノテクの産業化に向け、R&Dやインフラ拡充等を推進。分野横断的アプローチで医療・食料・環境応用も視野。

**2004**

## 2010 Europe 2020 Strategy

**2012 Innovation for Sustainable Growth: A Bioeconomy for Europe** 初の本格的なバイオエコノミー戦略。分野・部門横断R&Dや人材育成への投資、バイオベース産業の拡張、環境影響の評価などを掲げる。

**2018 Updated Bioeconomy Strategy** 持続可能性と循環性を中心に据え、スケールアップや地域展開、環境影響データ収集などへ注力。

**第一次 循環経済行動計画** 製造、消費、廃棄物管理、二次原材料利用までの行動方針を提示。優先領域に食品廃棄物やバイオマス・バイオベース製品。

2016 Clean Energy for All Europeans Package  
2017 A renewed EU Industrial Policy Strategy  
2018 Strategy for Plastic in Circular Economy

**2015**

## 2019 欧州グリーンディール

**2024 Boosting Biotechnology and Biomanufacturing** バイオ技術・バイオ製造の戦略的自律性やAI活用などを強調した提言。希少資源代替や資源循環にも貢献。

**第二次 循環経済行動計画** 産業競争力強化に向けた循環経済の実現へ。規制や表示、追跡システムの導入を提示。バイオベース部門とも連携。

2023 Net-Zero Industry Act

**2020**

**2025 Bioeconomy Strategy 2025** 効率的資源利用や循環性を強調+部門横断で競争力強化

**Advanced Materials for Industrial Leadership** 先端材料産業の戦略的自律性確保へ。バイオ戦略を補完。

**Clean Industrial Deal** クリーンテックによる経済成長・強靱性確保。循環性は中核、バイオ材料も関わる。

**2024**

**2025**

# 3.3 EU これまでの政策動向 (独仏英)



EUとしての政策とともに、関連する各国政策も打ち出されている。

## EU

2012

**Innovation for Sustainable Growth: A Bioeconomy for Europe**

2018

**Updated Bioeconomy Strategy**

2024

**Boosting Biotechnology and Biomanufacturing**

2025

**Bioeconomy Strategy 2025**

## ドイツ

2010年  
**National Research Strategy BioEconomy 2020**

2018年  
**ハイテク戦略2025 (High-Tech Strategy 2025)**  
・バイオ技術を「キー・イネーブリング・テクノロジー」と定義。  
・バイオインフォマティクス加速

2020年  
**国家バイオエコノミー戦略 (National Bioeconomy Strategy)**  
・2010年戦略を更新  
・「生物学的知識」と「革新的技術」の2本柱。  
・バイオリファイナリー実証実験開始

2023年  
**未来研究・イノベーション戦略 (Zukunftsstrategie Forschung und Innovation)**  
・バイオものづくりを、気候中立な産業構造へ転換するための「ミッション」として再定義。  
・CCU技術や医薬品の国内生産が打ち出された

## フランス

2013年  
**新工業フランス (La Nouvelle France Industrielle)**  
・34の重点産業分野の中に「医療バイオ」「バイオ燃料」

2018年  
**国家バイオエコノミー戦略**  
・農業大国フランスの強みを活かしたバイオベース製品（材料、エネルギー、食品）の生産を明文化

2021年  
**国家投資計画「France 2030」**  
・バイオものづくりは、「脱炭素化」「食料主権」「革新的医療」のすべての項目に関わる最重要技術

## 英国

2012年  
**Synthetic Biology Roadmap for the UK**

2015年  
parliamentary-driven policy report **“Building a high-value bioeconomy: opportunities from waste”**

2018年  
**UK Bioeconomy Strategy 2018 to 2030 (Growing the Bioeconomy)**

2023年  
**Science and Technology Framework**  
・重点領域に“Engineering Biology”

**National Vision for Engineering Biology**  
・バイオ由来製品の市場投入のためのルール作りなど

**The UK’s Modern Industrial Strategy**  
・Digital & Technologies Sector Planの中にEngineering Biology

# EU Bioeconomy Strategy 2025 (概要)

- 2025年11月27日、欧州委員会は「競争的で持続可能なEUバイオエコノミーのための戦略的フレームワーク」と題したコミュニケーションを発表。2018年公表のバイオエコノミー戦略の更新版と位置づけられる。
- EUの生物資源を活用した持続可能で実用的なソリューションの提供を支援し、資源循環や脱炭素化、石油燃料への依存低減を進めることで、**クリーンかつ競争的でレジリエントなEU経済の構築**を目指すとしている。
- 2012年・2018年の戦略と、2022年のレビューに基づき、**産業展開、市場規模の拡大、競争力、レジリエンスに重点を移行**している。

## ■ 背景

- **欧州バイオエコノミーの強固な基盤**：世界水準の科学力、最先端技術、2600万社の企業、4億5000万人の消費者、豊富なバイオマス生産
- **最大2.7兆€の経済規模**：1710万人の雇用、8639億€の付加価値、232億€のR&D投資
- **投資の不足**：特にバイオ製造の拡大、高度なバイオベース材料、循環型バイオエコノミーインフラ
- **責任ある効率的なバイオマス利用の重要性**

## ■ ビジョン：2040年の欧州バイオエコノミー

**2040年までに、持続可能なバイオベース材料および製品がEU域内で広く展開し、新たな収益を創出する。EUが新規市場の主導的な輸出者となる。**

- 農業・食料システムの知識に基づく管理
- 統合型バイオリファイナリーや高度な発酵施設による高付加価値製品への転換
- バイオ技術とバイオ製造の進展によるコスト競争力と拡張性の向上

✓ **Biotech Act** (2026年策定見込み) が上記を推進

## 持続可能でネイチャー・ポジティブな バイオエコノミー構築への道筋

### 1. イノベーションと投資の拡大：基礎研究から実用化へ

- 1) 障壁の打破：規制の合理化、製品環境フットプリント見直しなど
- 2) イノベーションと投資の促進：支援資金の増額など

### 2. バイオベース材料および技術のリード市場の開拓

- 1) バイオマスの効率的利用：バリューチェーン全体の整合と循環
- 2) 公共調達と産業アライアンス：早期需要創出と実証施設の利用促進
- 3) バイオベース材料のリード市場：プラスチックやポリマー／繊維や生地／化学品／建材／肥料や植物保護剤（農薬）
- 4) バイオ技術のリード市場：バイオリファイナリー、先進発酵技術、バイオジェニックカーボンの永久貯蔵

### 3. 持続可能なバイオマス利用の確保

- 1) 二次バイオマスと循環性：副産物や残差の利用、栄養循環の確立
- 2) レジリエントで持続可能な生態系とバリューチェーン
- 3) 一次バイオマスの供給：林業、農業、水産、水管理、自然資本

### 4. グローバルな連携と機会の活用

- 1) バイオベース製品および技術のグローバル市場へのアクセス支援
- 2) グローバルな政策課題の形成：関係諸国との連携、イニシアティブ

出展：A Strategic Framework for a Competitive and Sustainable EU Bioeconomy (2025)<sup>1)</sup> よりCRDSが作成

# 3.3 EU 関連する近年の取り組み①



## 【Framework Programs: Horizon Europe (2021~2027)】

### ● Pillar 2) Work Programme

- **Cluster 4 (デジタル,産業,宇宙)** : Twin Transitionやレジリエンス確保に向けて、バイオ製造やバイオ材料のプログラムも実施
- **Cluster 5 (気候,エネルギー,モビリティ)** : エネルギー供給に向けたバイオ燃料やバイオエネルギーのプログラムを実施
- **Cluster 6 (食料,バイオエコノミー,資源,農業,環境)** : 循環経済&バイオエコノミー部門でバイオベースの材料やシステムのプログラム

### ● Pillar 2) European Partnerships

- **Circular Bio-based Europe Joint Undertaking (CBE-JU)** (2021~2031) /Bio-based Industries Consortium (BIC)  
Bio-based Industries Joint Undertaking (BBI-JU) (2014~2020) を前身とし、循環型で再生可能なバイオベース産業を推進するためのプロジェクトに20億€規模の資金を提供。2025年時点で101のプロジェクトが進行中。コンソーシアムには425機関が参画。
- **Made in Europe Partnership** (2021~2027) /European Factories of the Future Research Association (EFFRA)  
Factories of the Future Partnership (2014~2020) を前身とし、欧州の製造業の発展に貢献。総予算18億€。バイオ材料・バイオ製造に関わるプロジェクトも多数採択。2024年公募テーマは「Bio-intelligent Manufacturing Industries (HORIZON-CL4-2024-TWIN-TRANSITION-01-01)」。
- **Processes4Planet Partnership** (2021~2027) /A.SPIRE  
SPIRE Partnership (2014~2020) を前身とし、欧州プロセス産業の循環型気候中立型への転換を目指す。総予算26億€。A.SPIREは20カ国以上170機関が参画する欧州協会。バイオ製造やバイオプロセスに関するプロジェクトにも支援。
- **Advanced Materials for the EU (IAM4EU) partnership** (2025~2027) /Innovative Advanced Materials Initiative (IAM-I)  
革新的先端材料の産業競争力とリーダーシップの獲得へ。まずはエネルギー、モビリティ、建設、エレクトロニクスに重点。

### ● European Innovation Council (EIC) Pathfinder Challenge 画期的なディープテックプロジェクトを推進

- **Engineered living materials** : 多様な動的機能や形状、スケールが制御されたリビングマテリアルの創出でEUを最先端の位置に。
- **DNA-based digital data storage** : DNAをデータ保存媒体として利用するための、スケーラブルでハイスループットな方法論を開拓。
- **Novel routes to green production of hydrogen** : 持続可能な水素生産を目指す。光合成細菌の改変やバイオマスの利用も。
- **Carbon dioxide and Nitrogen management and valorisation** : 電気細菌を用いた酸化還元や微生物によるCO<sub>2</sub>資化の方法も。

### ● European Strategy Forum on Research Infrastructures (ESFRI) EUレベルの研究インフラの整備戦略を担う

#### - **Industrial Biotechnology Innovator and Synthetic Biology Accelerator (IBISBA)**

バイオテクノロジーやバイオ製造に特化した分散型研究インフラ。DBTL-P (プロセス) を網羅したバイオファウンドリー環境を提供。

## 3.3 EU 関連する近年の取り組み②



### 【The innovation Fund】<sup>1)</sup>

ネットゼロを目標とした革新的テクノロジー創出のための資金提供プログラム。予算は炭素価格に依って2020～2023年で400億€まで。酵素を使ったCO<sub>2</sub>回収やバイオリファイナリー、バイオマスの機能性材料への転換、食品廃棄物のアップサイクリング、バイオ電池、バイオチックなど、バイオテクノロジーやバイオマス利用に関するプロジェクトも多数採択・進行中。

### 【Strategic Technologies for Europe Platform (STEP) (2024.2～)】

重要新興技術の産業と投資を促進する。EUの11のプログラム（Horizon EuropeやInnovation Fund、欧州防衛基金など）を財源とし、プログラムを跨いだ資金獲得も可能。対象分野は「ディープテック・デジタル技術」「クリーン技術」「バイオテクノロジー」の3つ<sup>2)</sup>。

- ・ **クリーン技術**の中に、バイオガス・バイオメタン、バイオマス技術、バイオ技術による気候・エネルギー対策、バイオリーチング、循環バイオエコノミー技術（廃棄物のバイオベース材料やエネルギーへの変換）など
- ・ **バイオテクノロジー**の中に、タンパク質・他生体分子、細胞・組織の培養と工学、バイオプロセス、ナノバイオテクノロジーなど

### 【結束政策 (Cohesion Policy)】<sup>3)</sup>

地域振興を目的とした研究開発投資策。

- ・ **欧州地域開発基金 (ERDF)**：地域間の不均衡を是正し、経済・社会・地域の結束を強化。2021～2027年で3000億€超。「Greener Europe」のテーマの中で**エネルギー効率、再生可能エネルギー、循環経済**などのプロジェクトが進行中<sup>4)</sup>。  
※その他、結束基金、欧州社会基金プラス (ESF+) など

### ●Circular Cities and Regions Initiative (2021～)<sup>5)</sup>

グリーンディールやバイオエコノミー戦略の目標実現に向け、地域・都市への支援や実証プロジェクトを実施。6年間で2億€。

### ●European Circular Bioeconomy Fund (ECBF)

循環型バイオエコノミーに特化した初のベンチャーキャピタルファンド。2019年設立。欧州委員会と欧州投資銀行が支援。漁業や農業から、基礎化学品、包装、パーソナルケアなどが投資の対象。

### 【European Bioeconomy Alliance (EUBA)】

脱石油社会、そしてバイオエコノミーの主流化を目指す部門横断的な業界連合。**製造業・農業・林業**などから約**4700社**が参画。CBE JUのBICも創設メンバーの一つ。「Made in Europe」のバイオベース製品と材料の生産を促進させるために連携を図る。

欧州委員会のBioeconomy Strategyの協議への**政策提言**や、広報・啓発活動を実施している。

# 3.4 中国 政策動向と近年の取り組み



国家主導の産業化支援や大規模投資による拠点整備が進む。豊富な生物資源もバイオエコノミー推進の強み。

**2001** 国家ナノテクノロジー発展綱要（2001～2010）

2005～ 国家バイオ産業基地の設立（深圳ほか）

**2010** 戦略的振興産業発展計画

バイオ産業、新素材産業など7分野を重点化

**2015**

**中国製造2025** 中国の製造業を「大」から「強」へ飛躍させる。情報技術との融合とともに、グリーン化・低炭素化・循環利用を推進。重点分野にバイオマス材料、バイオ3Dプリントも。

**2016**

**国家イノベーション駆動発展戦略綱要**  
イノベーションを優先戦略に位置付け、経済社会発展につなげる。研究開発を重点化する破壊的技術に、合成生物学やバイオテクノロジー、新素材。

**2021**

**十四五・循環経済発展計画**  
資源循環型産業体系の構築など

**2021**

**十四五・原材料産業発展計画**  
原材料産業システムの最適化と発展を加速。重要材料・技術に、生物由来材料やバイオ製造を含む

**2022**

**十四五・バイオエコノミー発展計画**  
バイオ技術による経済発展を促進。環境保護や材料分野とも融合し、バイオプロセスによる置き換えやバイオベース材料の開発を推進。

**2022**

**十四五・再生可能エネルギー計画**

**2023**

**非食品バイオベース材料の革新的発展を加速する3カ年行動計画** 農業と化学工業の融合を深化させ、優れたバイオベース材料製造を体系化。

## 【主要な研究拠点 - 中国科学院（CAS）】

### ● 深圳先端技術研究所 深圳合成生物学研究所（iSynBio）

2017年設立。合成生物学の基礎から、医療・材料・エネルギー分野への応用を展開。材料合成生物学センターでは、学際連携で「生きた」機能性材料の開発に取り組む。次の国家級プラットフォームを有する：定量合成生物学全国重点实验室、国家バイオ製造産業イノベーションセンター

### ● 天津工業バイオテクノロジー研究所（TIBCAS）

2012年設立。合成生物学とグリーンバイオ製造技術の革新を牽引。次の国家級イノベーションプラットフォームを有する：国立合成生物学技術イノベーションセンター、低炭素合成工程生物学重点实验室、工業用酵素国家研究センター

## 【バイオファウンドリ】

### ● 深圳合成生物研究重大科技基盤施設（2024年12月～稼働）

中国科学院深圳先進技術研究所が主導が主導して建設。設計・学習プラットフォーム、合成・試験プラットフォーム、ユーザー試験プラットフォームの3つを構築。自動・ハイスループット・標準化された生物合成を目指す。下流プロセスのスケーリングも。

### ● 天津大学 合成生物学フロンティアサイエンスセンター

人工生命体の設計・構築原理を確立し、合成生物学やグリーンバイオ製造の分野でリーダーシップ発揮を目指す。世界合成生物学施設連合（GBA）の設立にも関わる。2025年には天津大学に合成生物学・バイオ製造学部が設立された。

★2025年6月、工業・情報化部（省）と国家発展・改革委員会は、2027年までに20ヶ所以上の中間試験能力構築プラットフォームを構築すると発表。<sup>1)</sup>

# 3.5 韓国 政策動向と近年の取り組み



2020年代以降、K-バイオを国家の基幹産業の1つとすべく、R&Dやクラスター形成、法整備などを精力的に進める。

- 2001** ナノ技術総合発展計画  
第1期 2001~2005 → 第5期 2023~2027
- 2007** 国家バイオ技術総合発展計画  
第1次 2007~2011 → 第3次 2017~2021
- 2013** バイオ経済ロードマップ バイオ経済への転換を宣言。合成生物学などの次世代技術に注目  
2016~ 合成生物学基盤構築事業
- 2018** 第1次資源循環基本計画 (2018~2027)
- 2020** 2050カーボンニュートラル戦略  
韓国版グリーンニューディール
- 2022** 国家戦略技術育成策 バイオを含む12大国家戦略技術分野を選定。5年間で25兆ウォン以上投資。
- 2022** 国家合成生物学育成戦略 石油基盤製造業のバイオへの転換や、K-バイオファウンダリーの構築、医療・環境・素材等の分野への産業応用の推進など
- 2023** 合成生物学の核心技術開発および拡散戦略<sup>1)</sup>
- 2023** 国家戦略技術を支える未来材料の確保に向けた戦略 12大国家戦略技術に必要となる未来材料100個を特定し、10年間のロードマップを策定  
2023 バイオ経済2.0推進方向 ※バイオ医薬品  
2024 バイオ製造革新戦略
- 2024** 国家戦略技術育成基本計画 (2024~2028)  
12分野+50重点技術に、30兆ウォン超を投資
- 2025** 大韓民国バイオ大転換戦略  
バイオを成長エンジンとし、産官学で育成  
2025 合成生物学育成法

## 【近年のK-バイオ戦略の流れ】

- 2022年10月 12大国家戦略技術分野に先端バイオ、重点技術に合成生物学を指定
- 2022年11月に「国家合成生物学育成戦略」<sup>2)</sup>、その具体的な実行戦略として2023年10月に「合成生物学の核心技術開発および拡散戦略」を発表。
  - ・ 6大分野：バイオ分子設計・回路設計、スケールアップ技術など
  - ・ 9の先導プロジェクト：高付加価値素材生産、汚染物質の分解と代替など
  - ・ **公共バイオファウンダリー**を優先的に構築、次に地域産業特化型の整備へ
- 2025年1月「大韓民国バイオ大転換戦略」：**バイオ産業を“第2の半導体産業”**に
  - ・ 国家バイオ戦略を主導する「国家バイオ委員会」を発足
  - ・ **韓国型バイオクラスター**の構築（~2030年）
  - ・ バイオ+X技術融合：バイオファウンダリー構築、素材・環境分野等への普及
  - ・ 産学官エコシステムの構築、バイオ分野の素材・部品・装置の**国産化率15%**へ
- 2025年4月「合成生物学育成法」制定<sup>3)</sup>（2026年施行予定）  
合成生物学のR&D・バイオファウンダリー構築を国家レベルで進める根拠となる**世界初の専用法**。5年毎の育成基本計画の策定も含む。

## 【K-バイオファウンダリー/ Korea National Biofoundry】<sup>4)</sup>

バイオファウンダリー施設と利活用基盤構築プロジェクト（2025~2029）が総額1,263億ウォンで始動。<sup>5)</sup>

バイオ製造のDBTLサイクルを自動化・高速化・標準化。2027年に建設完了、2029年までに効率的運用体制を確立。

## 【韓国型バイオクラスター】

大韓民国バイオ大転換戦略より

- ・ 重点機関を誘致し、R&Dから事業化に至るエコシステムを構築
- ・ 国家バイオ委員会傘下に「バイオクラスター協議体」を立ち上げ
- ・ 全国20ヶ所をバーチャルプラットフォームで連結し協業。海外とも交流を拡大。

# 4.1 本調査領域の俯瞰図

## バイオマス 利用

石油資源依存  
の低減、  
循環性確保

リグノセルロース  
バイオ炭  
ポリ乳酸  
セルロースナノクリスタル  
セルロースナノファイバー  
非可食バイオマス

廃棄物（食品・農業・建材）

※食料生産やバイオマス  
増産技術等は除く

## バイオプロセス

低環境負荷での  
合成・製造

バイオリアクター バイオウアンドリ  
精密発酵  
合成生物学・DBTLサイクル  
プロセス解析・制御  
マイクロキャリア  
分離・精製技術  
モニタリング

## バイオ×材料科学 ものづくり

培養肉 バイオ電池  
リビングマテリアル Engineered Biofilms  
バイオハイブリッドロボット 生体触媒  
DNAナノテクノロジー

バイオポリマー

バイオコンポ  
ジット

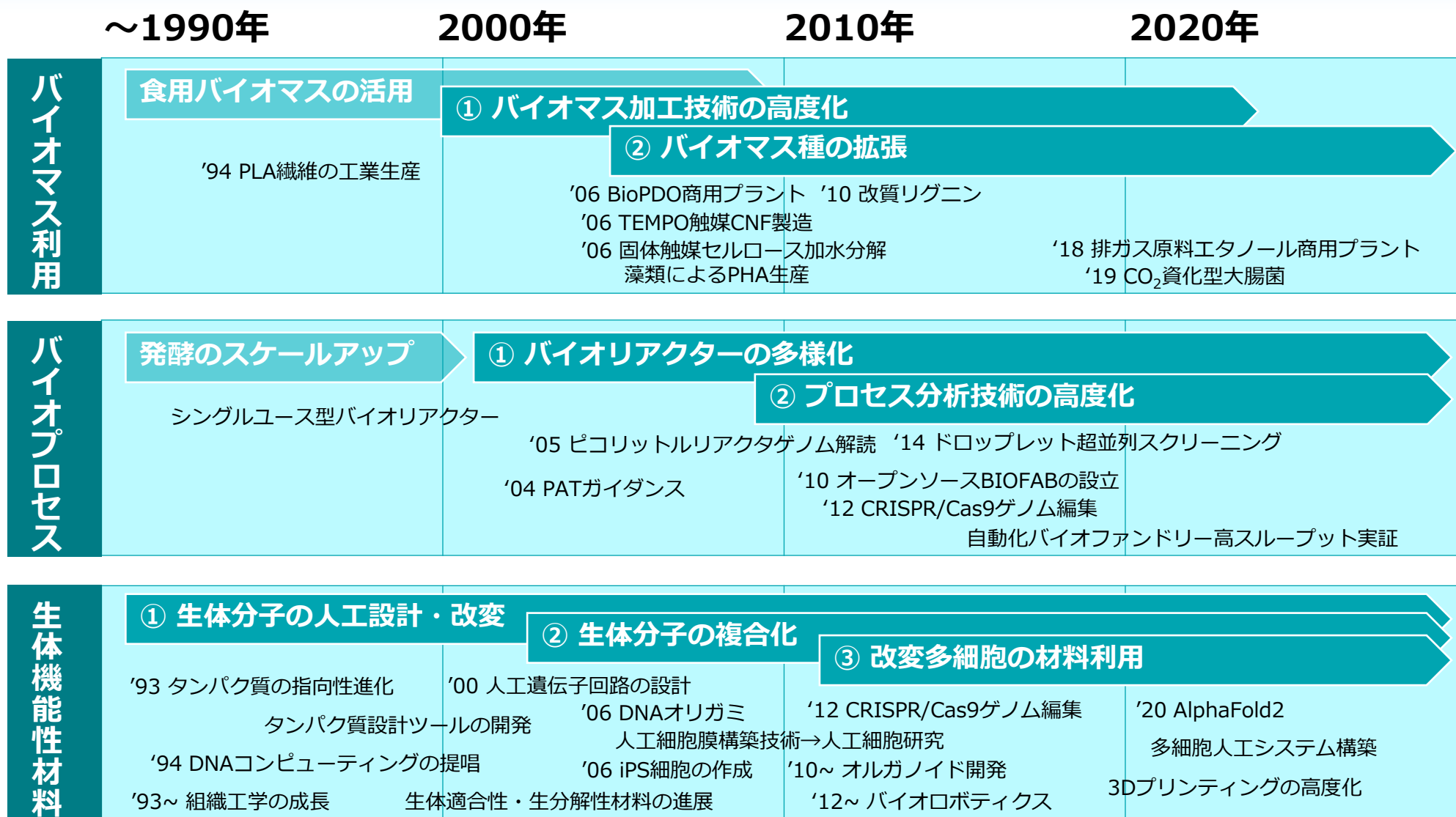
分子ロボット  
人工細胞

## 生体機能的 材料

生体由来の物質を使うことで  
人工物に無い機能を発揮

高機能/高付加価値な材料・システム

## 4.2 技術進展の潮流



# 4.3 バイオマス利用

原料

技術

製品

## 第1世代バイオマス

糖、デンプン、植物  
油

## 第2世代バイオマス

木質、農業残差、リ  
グニン、セルロース

## 第3世代バイオマス

微細藻類、海藻、C1  
資源

## 材料科学

触媒技術  
膜分離  
溶媒・界面制御  
高分子材料設計

## マテリアル利用

バイオ化成品、バイオ材料、  
バイオベース繊維、バイオ  
プラスチック、バイオ化成  
品

## エネルギー利用

バイオエネルギー、バイオ  
燃料

## 材料科学との融合の技術的意義

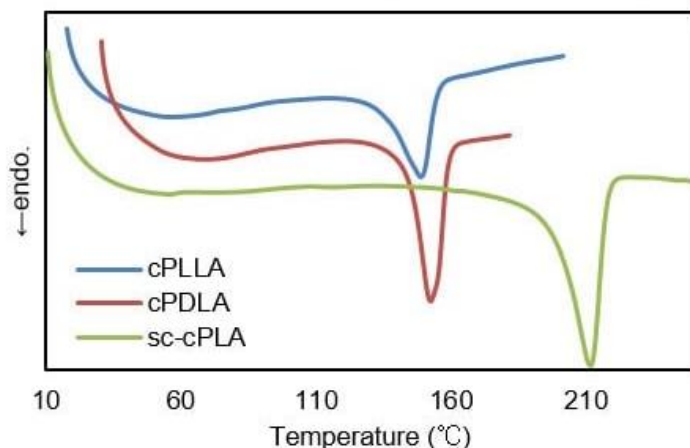
- 触媒反応や相界面の制御による、ナノレベルからの精密な階層構造の形成と再構築
- 化学修飾や複合化技術を用いた、材料としての熱的・力学的特性の向上と機能開拓

## 4.3 バイオマス利用①：バイオマス加工技術の高度化

紡糸制御や触媒技術の進化により、従来困難だった精密な構造制御やナノ化が実現した。透明性等の機能を備えた、高付加価値なバイオ材料の工業化が可能となった。

### ■ PLAの高分子量化

- ポリ乳酸（PLA）は化石由来のプラスチックと比べると分子量が低く、化学構造が単純なため、強度や耐熱性が低いことが問題
- 超臨界二酸化炭素を用いた**可塑化重合法**で、高分子量PLAを製造する技術を開発。
- 環境負荷を抑えつつ用途を広げる、**生分解性プラスチックの量産化**を実現



Polymers 10, 713 (2018). 1)

### ■ CNCの自己組織化制御<sup>2)</sup>

- 従来の紡糸プロセスではセルロースナノクリスタル（CNC）特有のらせん構造維持と長尺化が困難
- 微細空間内での**自己組織化制御**による、鮮やかな構造色を持つ連続フィラメントの紡糸技術を確立
- CNCベースの**材料の多様性とデザインの可能性**が大きく向上

### ■ CNFの表面修飾技術<sup>3)</sup>

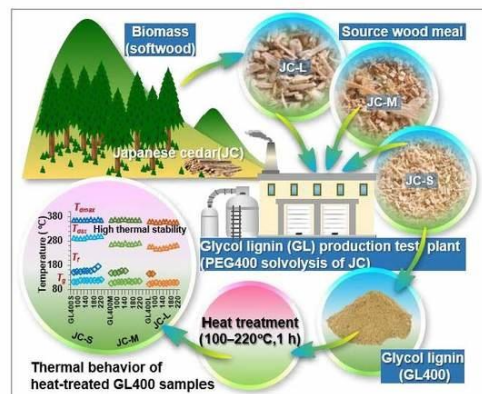
- 親水性の高いTEMPO酸化セルロースナノファイバー（CNF）表面に、ポリアルキレングリコールなどを用いて**化学修飾**
- 有機溶媒中でのナノレベルの**分散性向上**と、アクリレートやエポキシ樹脂との**均一な複合化**
- 高い透明性の維持と大幅な熱膨張抑制を両立した、**高機能複合フィルム**を実現

## 4.3 バイオマス利用②：バイオマス種の拡張

化学修飾や熱分解技術により、難利用バイオマスの資源価値が見出された。  
炭素固定に加え、熱可塑性を活かした工業材料への応用が加速している。

### ■ 改質リグニンの開発

- PEGとの化学反応により、熱で溶けないリグニンに柔軟性を与え、**熱可塑性と高い耐熱性を両立**
- 単なるプラスチックの代替にとどまらず、耐熱性・電気特性・剛性といった改質リグニン特有の機能を活かせる**高付加価値な工業製品**（自動車、電子部品、スポーツ用品）に応用



Molecules 25, 1167 (2020).<sup>1)</sup>

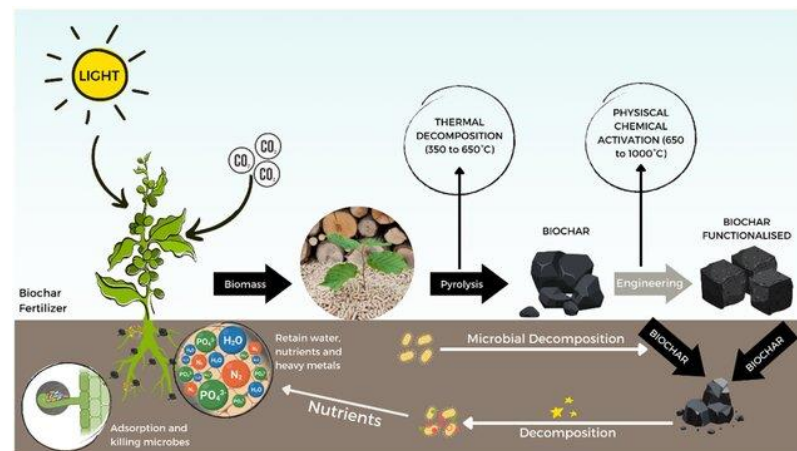
### ■ リグニン変性フェノール樹脂の量産化

- 非可食バイオマス由来リグニンを用いた「固形ノボラック型」リグニン変性フェノール樹脂の世界初の量産化・商業化の達成
- 鋳造用RCSバインダー樹脂としての採用と2024年からの自動車鋳造部品へ適用
- バイオマス率15%による化石資源使用量約15%削減と、資源循環・脱炭素化へ貢献

【参考】NEDOプレスリリース「世界初、非可食バイオマス由来「固形ノボラック型」リグニン変性フェノール樹脂の量産・商業化に成功しました」<sup>2)</sup>

### ■ バイオ炭（バイオチャー）の活用

- 木材や農業残渣などの生物資源を、酸素が少ない状態で加熱して作った**炭素の塊**
- 植物が吸収したCO<sub>2</sub>を難分解性の炭として固定し、半永久的に地中へ貯留するため、**脱炭素社会の切り札**として注目
- 多孔質構造を持つため、従来は**土壌改良材**としての利用が主だったが、近年ではコンクリートやアスファルトへの混和など、**工業材料への応用研究も加速**



Plants 11, 2745 (2022).<sup>3)</sup>

## 4.4 バイオプロセス

## アップストリーム工程

株構築・選定

培地調製/殺菌

シード培養

メインバイオリクター

**プロセス管理 (PAT)**：製品の安全性と有効性を確保するために、重要なプロセスパラメーターの研究、プロセスの最適化、厳しい規制要件への準拠 (GMPなど) が不可欠

**バイオリクター**：生体触媒を大規模に培養・生育させ、目的の物質を生産するための中心的な装置。容器、攪拌装置 (インペラ)、通気装置 (スパージャー)、センサー、制御システムなどの必須部品で構成。

## ダウストリーム工程

固液分離

培養上清

菌体回収

細胞破碎

粗精製/濃縮

中間精製

最終精製

製剤化・充填

**分離・精製装置**：培養後の液体から目的の生成物を単離・精製するための機器。膜分離装置、クロマトグラフィー装置、遠心分離機などを含む。

**製剤化・品質管理設備**：精製された生成物を製品として利用可能な形に加工し、品質を保証するための設備。

## 融合の技術的意義

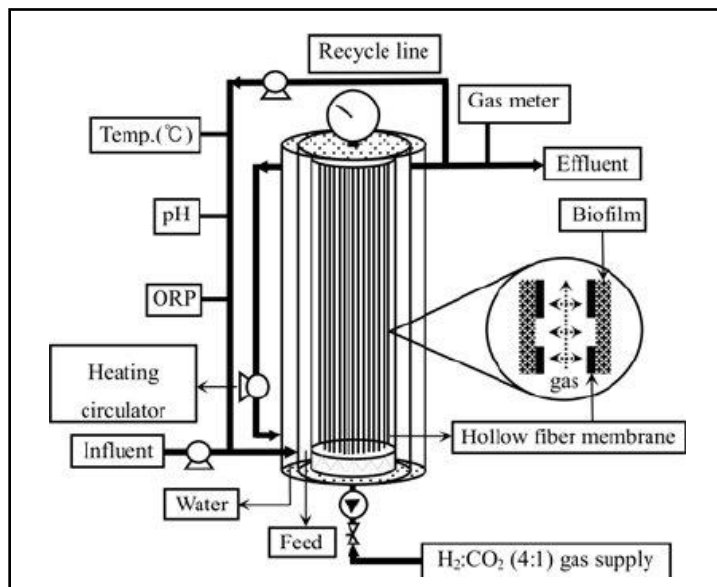
- 膜や表面技術を用いた反応場の機能化による、**培養環境の精密制御**
- 先端計測によるプロセスのリアルタイム可視化と、データに基づく**客観的な品質管理**

# 4.4 バイオプロセス①：バイオリアクターの多様化

従来の汎用的な攪拌槽型に加え、**原料特性や培養目的に特化したリアクター開発が進展**。  
ガス利用効率や光合成効率を飛躍的に高める「**高機能リアクター**」が実用化。

## ■ 膜通気バイオリアクター

- 無数のストロー状の膜を用い、膜表面から**ガスを直接溶解**
- 水に溶けにくいCO<sub>2</sub>や水素などの原料ガスを、ロスなく**ほぼ100%培養液へ供給可能**なガス発酵実用化に向けた切り札
- 長期間の使用でも膜の濡れ（目詰まり）を防ぐための、テフロン（PTFE）等の疎水性材料や特殊表面コーティング技術の開発



PLoS ONE 10, e0144999 (2015). 1)

## ■ 藻類フォトバイオリアクター

- **高い光合成効率と安定培養**を実現。
- 隣接する発電所の排ガス（CO<sub>2</sub>）を直接利用して藻類を大量生産し、**バイオ燃料やプラスチックなどの産業化**することを目標



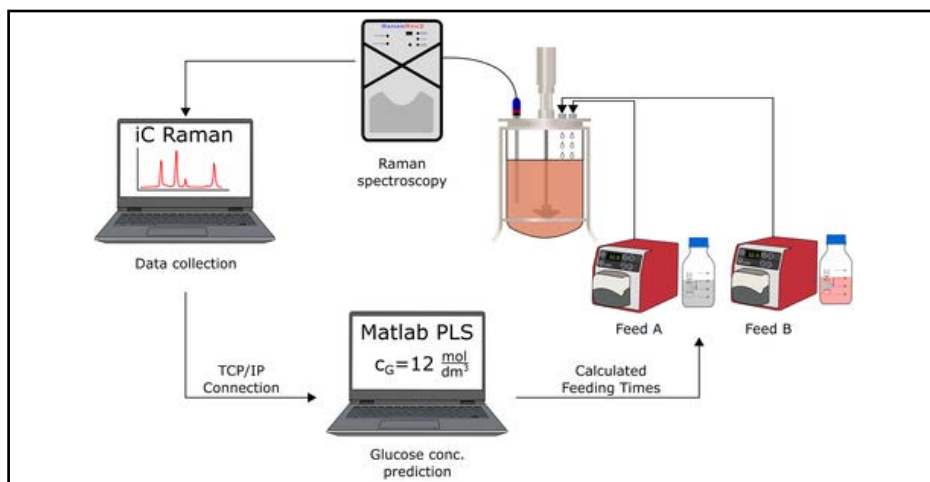
Marine Drugs 21, 445 (2023). 2)

# 4.4 バイオプロセス②：プロセス分析技術の高度化

代謝工学とリアクター技術が融合し、培養規模と柔軟性が拡大された。  
プロセス分析技術（PAT）や連続化の進展により、品質を維持した大規模生産が実現した。

## ■ ラマン分光法を用いたPAT

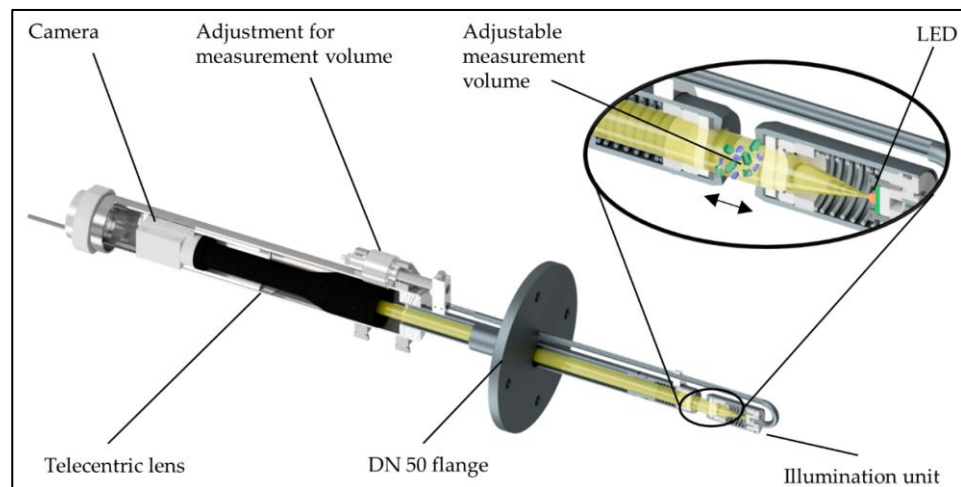
- アップストリームにおけるPATの切り札
- 「水の影響をほぼ受けない」特性により、培養液中のグルコース、乳酸、アミノ酸を、リアルタイムに特定・定量が可能。
- リアルタイム監視とリスク低減と高度なフィードバック制御を実現
- バッチ間の品質ばらつきを最小化し、収率を最大化
- 製造の自動運転を実現するための不可欠な基盤技術。



Biotechnology Progress 36, e3052 (2020).<sup>1)</sup>

## ■ インライン粒子画像解析によるPAT

- プロブ挿入のみで粒子の形状や凝集挙動をリアルタイムに撮影し、釜内部の状態を完全に可視化。
- サンプルングによるタイムラグや変質を排除し、数値だけでは捉えきれない異常を「画像」として直感的に検知。
- 熟練者の経験則に頼る判断を定量データへ置き換え、開発から製造まで一貫した客観的な品質管理を実現。

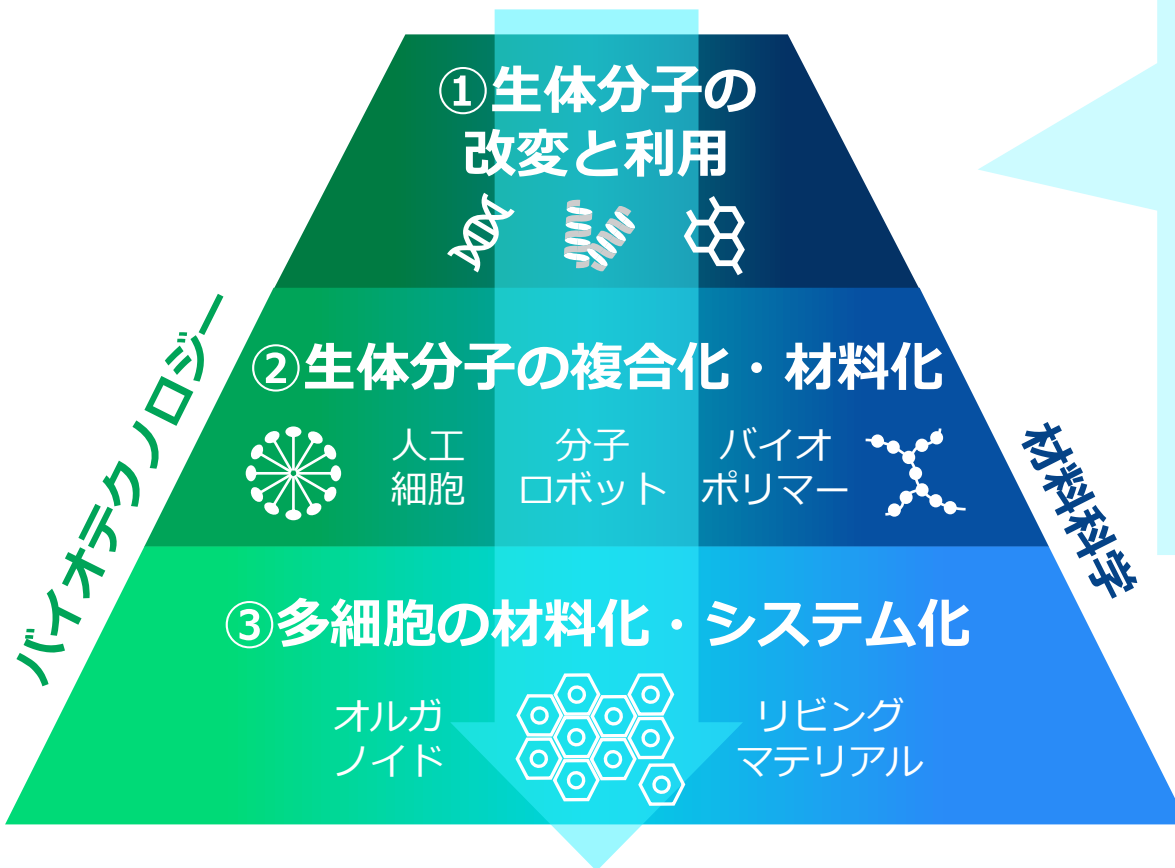


Crystals 10, 740 (2020).<sup>2)</sup>

# 4.5 生体機能性材料

生体分子から多細胞レベルまで、技術融合により新たな利活用が拓かれてきた

生体物質の人工改変や  
材料・システムへの利用の流れ



## 融合の技術的意義

- 分子・細胞（膜）の修飾や構成の改変
- 改変最適化のためのハイスループット実験系の構築
- 人工物質との複合化や加工技術による構造化
- 人工物質との複合化による機能の安定化や制御

# 4.5 生体機能性材料①：生体分子の改変と利用

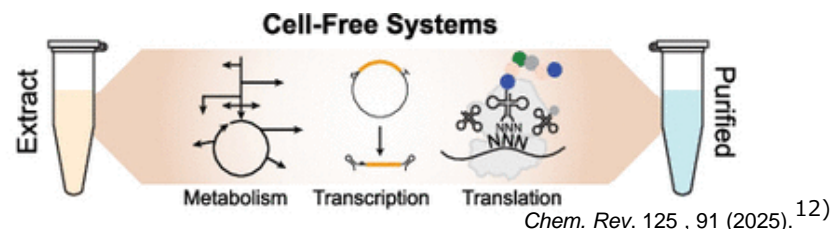
## 潮流

特異的化学反应やハイスループット化技術の開発が、**タンパク質改変**を推し進めてきた。今後、計算および機械学習による**予測設計技術の普及**で、一層の加速が期待される。

- 1980年～ 部位特異的変異導入技術の確立
- 1988年 連続フローによる**無細胞タンパク質合成系**の構築<sup>1,2)</sup>
- 1993年 タンパク質の**指向性進化（分子進化学）**の手法確立
- 1999年 タンパク質構造予測ツール「ROSETTA」発表<sup>3)</sup>
- 2001年 「Click Chemistry」の概念提唱
- 2001年 **無細胞タンパク質合成系「PURE system」**の開発<sup>4,5)</sup>
- 2012年 CRISPR/Cas9を用いた**ゲノム編集技術**の開発
- 2012年 非可逆的共有結合「SpyTag/SpyCatcherシステム」開発
- 2020年 Google DeepMind社「**AlphaFold2**」発表

## ■ 無細胞タンパク合成系

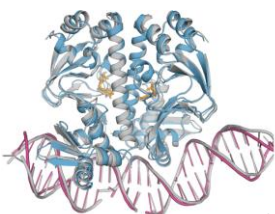
- 生体外で生物の転写・翻訳を再現した実験系。自動化やマイクロ流路などによる**ハイスループット化**が進む。
- **改変タンパク質**の合成、**非天然アミノ酸**の導入、遺伝子回路の試行、**人工細胞構築**などに広く使われている。



## ■ タンパク質の構造・機能の予測

深層学習を用いた**タンパク質の立体構造予測**は、次の方向などに展開<sup>6-11)</sup>：

- ✓ **生体分子複合体**の構造予測：
- ✓ AlphaFold3など
- ✓ 主鎖構造の生成：RFdiffusionなど
- ✓ **アミノ酸の配列設計**：ProteinMPNNなど *Nature* 630, 493 (2024).<sup>8)</sup>
- ✓ **構造と機能**の同時設計：ESM3など



## ■ タンパク質架橋や非天然アミノ酸導入

- ペプチドへの**架橋や修飾、標識**を、部位・条件選択的に施す手法が様々に開発<sup>13,14)</sup>。（**バイオコンジュゲーション**）
- **新規な非天然アミノ酸**や、それをtRNAに導入する手法の開発も盛ん<sup>15,16)</sup>。

# 4.5 生体機能性材料①：生体分子の改変と利用

## 最前線

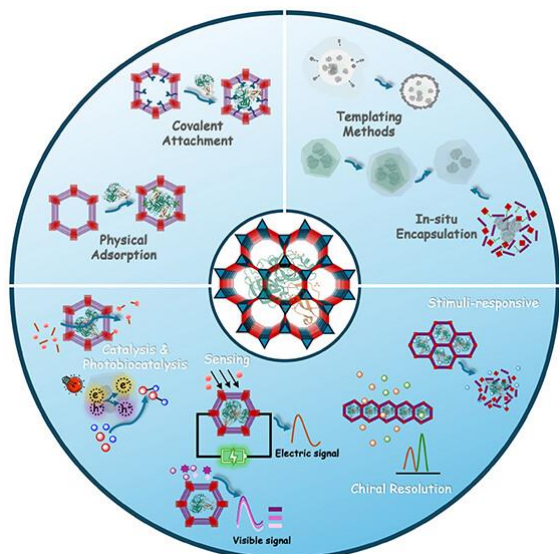
### ■ 生体触媒/新規酵素の開発と利用の多様化

生体分子ならではの高い選択性や反応効率、省力性が特徴。人工物への組み込み方も幅が広がる。

#### ● ナノ材料上への酵素固定化

- 酵素活性の安定性や反応効率、再利用性が向上
- バイオセンサーや環境浄化への応用など

例) MOFやCOF等を用いた酵素の高度な安定化  
→ 高効率なCO<sub>2</sub>資源化プロセスの構築

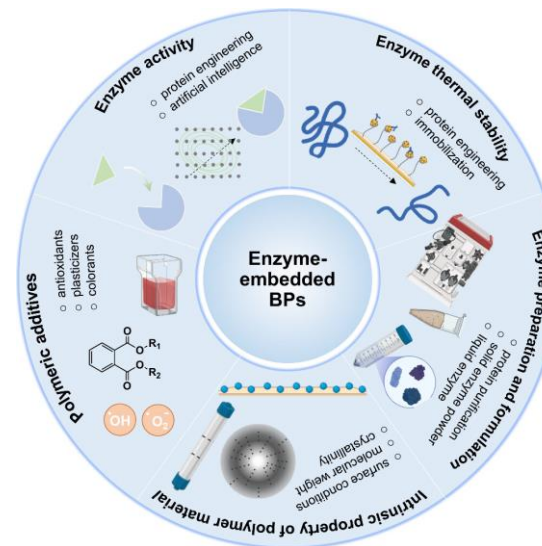


Chem & Bio Engineering 2, 380 (2025) 1)

#### ● 酵素を材料中に包埋

- 刺激や環境変化で内部の酵素機能が発現

例) プラスチックの加水分解能 + 熱耐性  
→ 酵素内包型生分解性プラスチック



ACS Applied Bio Materials 8, 1785 (2025) 2)

## 4.5 生体機能性材料②：生体分子の複合化・材料化

## 潮流

生体分子の**ナノ構造の理解**から、人工的な高次構造設計、そして**複合化・機能化**が進む。  
遺伝子組み換え微生物を用いた大量生産により、**材料化の道**が拓かれている。

1994年 DNAコンピューティングの提案<sup>1)</sup>

2000年~ マイクロ流路デバイスを用いた**人工ベシクル（脂質二重膜）**の作成技術が普及

2006年 **DNAオリガミ**の発表<sup>2)</sup>

2014年 RNAオリガミの発表<sup>3)</sup>

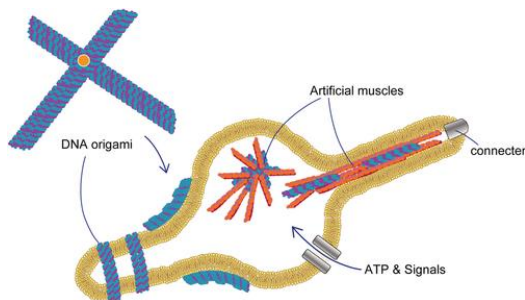
2010年~ 遺伝子組み換え微生物による**バイオポリマー**生産

2010年~ **分子ロボティクス**やボトムアップ式の**人工細胞構築**が研究分野として確立

2020年~ 人工細胞への多様な機能の搭載や、多細胞システムの構築が進展

## ■ DNAナノテクノロジー、分子ロボット

- DNAを始めとする生体分子の**組織化**で、**駆動、センシング、計算・学習**<sup>4)</sup>などの機能を持つ**分子デバイス**が様々開発
- 人工細胞を構成する素子ともなる。

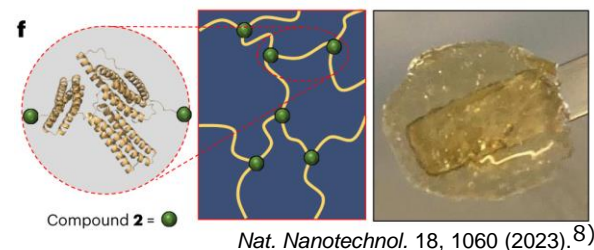


Advanced Functional Materials 32 (2022): 2201866<sup>5)</sup>

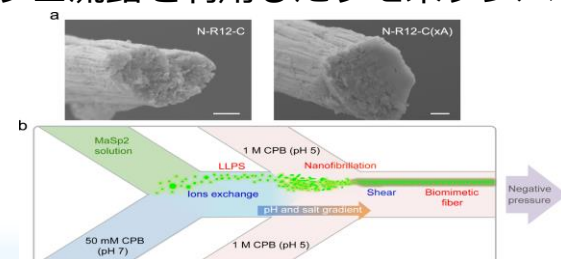
## ■ 機能性バイオポリマー

- **バイオポリマー特有**の力学特性や膨潤性、生体適合性、分解性などを備えた材料開発が進む<sup>6)</sup>。
- タンパク質の**2次元・3次元構造**の設計には、計算やAIによる支援も有用<sup>7)</sup>。
- マイクロ流路を用いた線維化など、**マクロな構造形成**も材料特性に関わる。

例) 力学センサータンパク質を架橋した衝撃吸収材料



例) マイクロ流路を利用したクモ糸タンパク質の繊維化



Nat. Commun. 15, 527 (2024).<sup>9)</sup>

## 4.5 生体機能性材料②：生体分子の複合化・材料化

## 最前線

## ■ 人工細胞の構築：多機能化、そして多細胞化

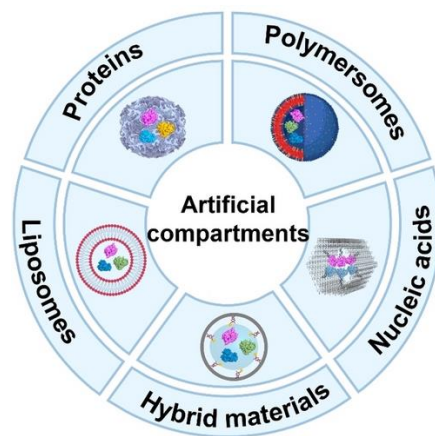
多数の人工生体分子を組み合わせ、複雑な機能を持った「システム」として成立させる。生命理解の深化のみならず、省エネルギーな物質生産や情報処理、医療への応用可能性も。

## ● 細胞機能のモジュール化と区画化

- 代謝、情報処理、駆動、成長・分裂など、各細胞機能を模した反応のモジュール化が進む<sup>1,2)</sup>。
- 複数モジュールを統合したシステムの構築ため、各反応を空間的に区分けする材料技術が多様に開発されている<sup>3,4)</sup>：

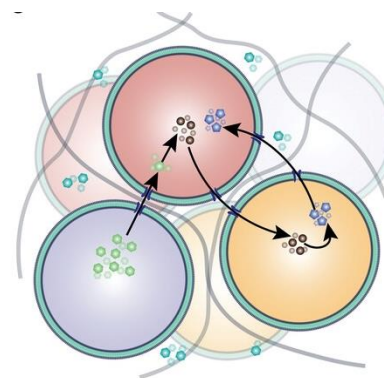
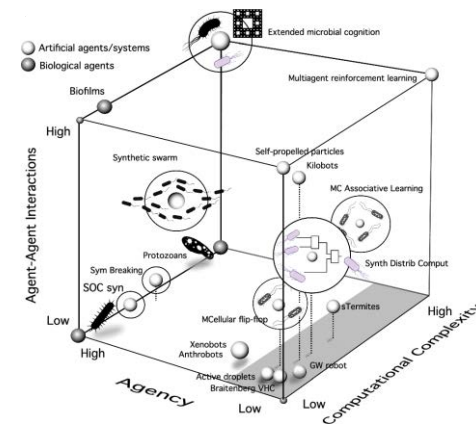
例)

- ✓ リポソーム (単層/多層)
- ✓ ポリマースーム (ブロックコポリマーの二重層小胞)
- ✓ 両親媒性ポリマーのミセル
- ✓ タンパク質-ポリマー集合によるプロテノソーム
- ✓ 液液相分離したコアセルベート
- ✓ シリカナノカプセル
- ✓ DNAナノ構造体/DNAオリガミ

ChemPlusChem 90, e202400483 (2025)<sup>4)</sup>

## ● 人工多細胞型システム

- 人工細胞間の通信<sup>5)</sup>や役割分担<sup>6)</sup>、協調動作<sup>7)</sup>などにより、従来を大幅に上回る適応性や機能の実現を目指した研究が活発化している。
- 日本では、化学反応ネットワークを基盤として多細胞体の知性化を目指す「ケミカルAI」という概念が提唱された<sup>8)</sup>。

Advanced Science 11, 2305837 (2024).<sup>3)</sup>npj Syst. Biol. Appl. 10, 151 (2024).<sup>6)</sup>

# 4.5 生体機能性材料③：多細胞の材料化・システム化

## 潮流

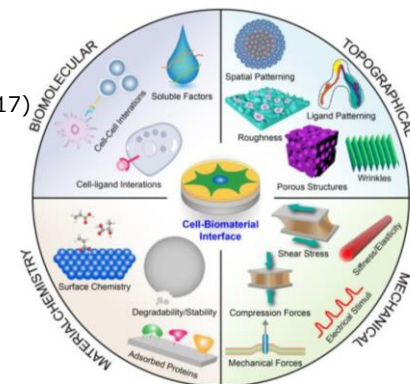
組織工学とバイオマテリアル技術を基盤に、合成生物学や幹細胞技術を統合し、細胞性の材料・システムの開発が多様に展開。自己修復性、適応性、成長などが人工物にない特徴。

- 1993年 組織工学の概念提唱 (Joseph Vacanti) <sup>1)</sup>
- 2000年 遺伝子回路の人工設計を実証<sup>2,3)</sup>
- 2000年~ 生体適合性や生分解性の材料研究が進展
- 2006年 マウスiPS細胞の作成、2007年 ヒトiPS細胞の作成<sup>5)</sup>
- 2010年 マウスの腸オルガノイド作成<sup>6)</sup>
- 2010年 Lung-on-a-chipの作成<sup>7)</sup>
- 2012年 心筋細胞を用いたバイオリボットの作成<sup>8)</sup>
- 2013年 脳オルガノイド作成技術の開発<sup>9)</sup>
- 2018年~ 合成生物学を組み込んだEngineered Living Materials (ELM) <sup>10)</sup>やMulti-Cellular Engineered Living Systems (M-CELS) <sup>11)</sup>などの概念が普及
- 2020年~ 3Dバイオプリンティング技術の高度化

## ■ 細胞外マトリックス (ECM) 材料

細胞挙動を制御するための、最適な微小環境を形成する各種の材料・加工技術が進展

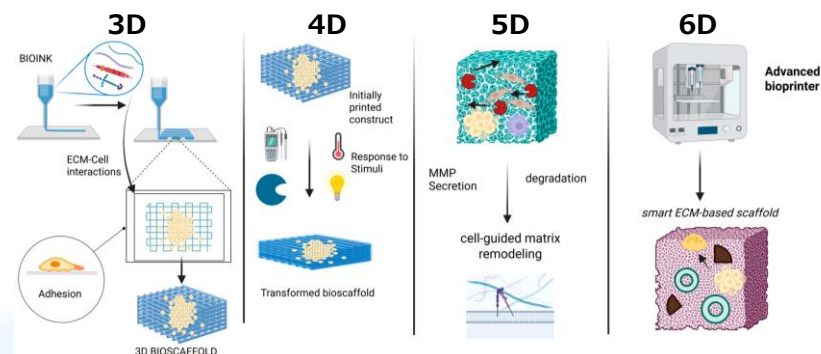
- ✓ **組成**：天然由来（脱細胞化ECM、コラーゲン等）、ポリマー、超分子、セラミックス、金属、複合材料など<sup>16,17)</sup>
- ✓ **構造**：多様なスケールの微細パターンニング、2D→3D
- ✓ **機械的特性**：広い弾性率（数Pa~数MPa）、粘性との直交性
- ✓ **ダイナミクス**：応力緩和の調整、pH・物質濃度・光・張力等に応答するスマート材料 ※しかし細胞↔材料の双方向性に課題<sup>18)</sup>



Chem. Rev. 121, 4561 (2021).<sup>19)</sup>

## ■ 多次元バイオフィabrication

- 3次元的に細胞やバイオインクをプリントする技術が普及。2光子重合による深部毛細管の造形<sup>12)</sup>や、光トモグラフィを応用した体積印刷<sup>13)</sup>などの新技術にも注目。
- さらに、刺激応答性の材料の使用 (4D) <sup>14)</sup>や、生体によるECMのリモデリング (5D)、インテリジェントな適応性の搭載 (6D) へと発展見込み<sup>15)</sup>。

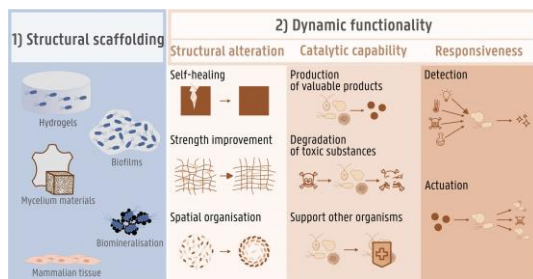


## 4.5 生体機能性材料③：多細胞の材料化・システム化

## 最前線

## ■ Engineered Living Materials

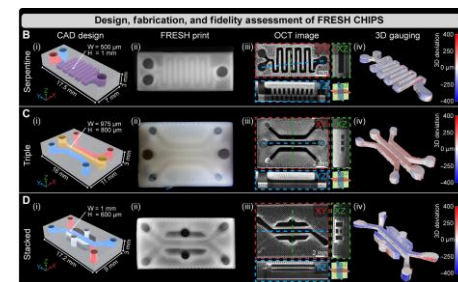
- 生きた細胞を材料の構成要素として組み込み、自己修復・自己組織化・環境応答などの**生命的機能を付与した材料**<sup>1)</sup>。
- 医療（創薬・再生）、環境（バイオリメディエーション）、建築（自己修復建材）、エネルギー（光合成型材料）などへ応用が広がる<sup>2,3)</sup>。



FEMS Microbiology Reviews 49, fuaf055 (2025) <sup>4)</sup>

## ■ オルガノイド、生体模倣システム

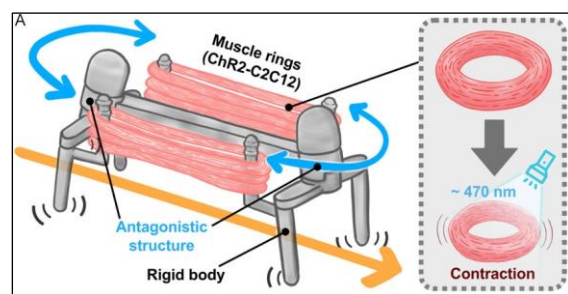
- 培養細胞を使い、**生体の各器官（臓器）の機能を体外で再現**。
- マイクロ流路を使った灌流や、人工材料やデバイスによる3次元的ECM造形が、より生体に近い応答の再現に有用**。



Science Advances 11, eadu5905 (2025) <sup>13)</sup>

## ■ バイオロボット

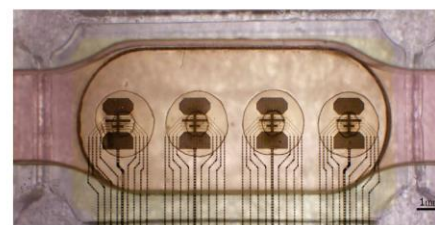
- 筋肉細胞を駆動源**として、人工物と組み合わせたロボット。**柔軟性や高いエネルギー効率、適応性の実現を目指す**<sup>5-8)</sup>。
- 複雑な動きの実現<sup>9)</sup>や、刺激応答性の具備<sup>10)</sup>、大型化<sup>11)</sup>などが進む。



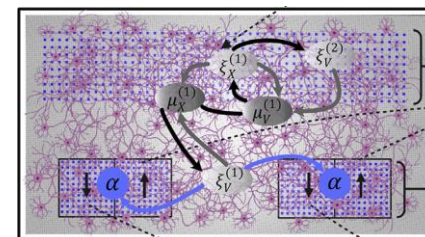
Advanced Robotics Research, e202500203 (2026). <sup>12)</sup>

## ■ Organoid Intelligence

- 神経細胞を素子**として、情報処理・記憶・学習（物理リザバー）を実現する。**省エネルギー性**に期待<sup>14-17)</sup>。
- 細胞の配置や3次元的構造と同時に、**バイオエレクトロニクスデバイス**<sup>18)</sup>による**制御が鍵**。



Frontiers Artif. Intell., 7, 1376042 (2024). <sup>19)</sup>



Neuron 110, 3952 (2022). <sup>20)</sup>

# 今後の“バイオ×材料”ロードマップの例

	2025年	2030年	2040年
合成	非天然/非生物的化学モノマーの生物学的合成		
	化学と生物のハイブリッド合成法		
構成と構造	生体物質の封入		
	多細胞性材料のための細胞外マトリックス (ECM) の実現		
	膜ダイナミクス <i>De novo</i> 設計		
	生物的/非生物的インターフェースのエンジニアリング		
操作	細胞破砕なしに、モノマーやポリマーの分泌を可能に		
	生体分子を使用/組み込んだ材料の、自己組織化と分解の制御		
	分子・高分子の蓄積やパターン形成、生物/非生物界面のリモデリングの制御		
	多様な条件下での生体分子および細胞のパターン形成とプリンティング		
	ex-vivo材料に適した環境で、細胞に物質を生産させる		
	無細胞システムを用いた材料の堅牢な合成・加工処理		
	生物工学的手法 (酵素など) による材料要素の選択的分解		
バイオ成分含有材料の、産業規模のインフラ構築と後工程の加速			
機能	フィードバックループによるリビングマテリアルの自律的調整		
	材料への自己修復能の搭載		
	多種の外部信号を検出・記録・蓄積する材料の開発		
	非生物材料による生体制御		
	生物機能による、物質の化学的・熱的・速度論的・電気的な蓄積と放出		
	材料中の生体物質動態の評価技術		
	生物学的なスループットとスケールでの、材料機能の評価技術		

出典 : Engineering Biology Research Consortium (EBRC), Engineering Biology & Materials Science – A Research Roadmap for Interdisciplinary Innovation” (2021) よりCRDSが作成

# 5. まとめと今後の展望

## 各国動向

各国はバイオものづくりを「経済成長・経済安保」の中核と位置づけ、国主導での拠点整備（バイオファウンドリ等）や異分野融合への投資を加速させている。

## 技術動向

材料科学との融合により、以下の3領域でブレイクスルーが起こっている。

- バイオマス利用：結晶制御等によるPLA・CNF・CNCの高機能化や、リグニン・バイオ炭の工業材料への転換
- バイオプロセス：特殊膜リアクターや、インライン計測装置の実装による製造の高度化と品質安定化
- 生体機能性材料：合成生物学を統合したDNAナノテク、人工細胞、リビングマテリアルなどの動的材料システムの創出

# 5. まとめと今後の展望

## 今後の展望

「バイオ研究者が既存の材料技術を使う」フェーズから、「**材料研究者とバイオ研究者が密接に協力し、共にシステムを設計・構築する**」フェーズへの転換を加速させる必要がある。

- バイオマス利用  
単なる代替利用を超え、化学修飾やナノ構造制御により、耐熱性・透明性など工業材料としての新たな機能を創出する。
- バイオプロセス  
高機能リアクターによる反応場の最適化に加え、PAT（プロセス分析技術）の実装により、培養プロセスをデータ駆動型の制御へ転換する。
- 生体機能性材料  
タンパク質の分子設計から細胞組織の立体造形までをシームレスに統合し、自己組織化や自己修復といった生命特有の動的システムを人工材料として再構成する。

## P5

- 1) World Bioeconomy Forum, 2022, Based on a bottom-up analysis by the World Bioeconomy Forum of national bioeconomy programmes in selected countries: Brazil, USA, Canada, EU, Sweden, Finland, India and China (see <https://wcbef.com/tuote/a-status-of-the-global-bioeconomy/>) (2026年2月11日アクセス) .
- 2) BCG Henderson Institute, 2022, Based on the projected growth of synthetic biology in manufacturing industries that account for more than a third of global output.
- 3) McKinsey, The Bio Revolution Innovations transforming economies, societies, and our lives (2020), [https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/life%20sciences/our%20insights/the%20bio%20revolution%20innovations%20transforming%20economies%20societies%20and%20our%20lives/may\\_2020\\_mgi\\_bio\\_revolution\\_report.pdf](https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/life%20sciences/our%20insights/the%20bio%20revolution%20innovations%20transforming%20economies%20societies%20and%20our%20lives/may_2020_mgi_bio_revolution_report.pdf) (2026年3月10日アクセス) .
- 4) Nature Finance and the World Bioeconomy Forum, Financing a Sustainable Global Bioeconomy (2024), <https://www.naturefinance.net/wp-content/uploads/2024/08/FinancingASustainableGlobalBioeconomy-.pdf> (2026年3月10日アクセス) .

## P6

- 1) United Nations Environment Programme, Global Resources Outlook 2024 - Bend the trend: Pathways to a Liveable Planet as Resource Use Spikes - Summary for Policymakers (2024), <https://wedocs.unep.org/bitstreams/faedc379-afef-4834-ae19-d7b01497339c/download> (2026年3月10日アクセス) .

## P7

- 1) Nature Finance and the World Bioeconomy Forum, Financing a Sustainable Global Bioeconomy (2024).
- 2) OECD, Carbon Management: Bioeconomy and Beyond (2023).
- 3) Lee R. Lynd, et al., "Toward low-cost biological and hybrid biological/catalytic conversion of cellulosic biomass to fuels," *Energy & Environmental Science* 15, no. 3 (2022): 938-990, <http://dx.doi.org/10.1039/D1EE02540F>.
- 4) Michael Carus, et al., "Renewable carbon: Key to a sustainable and future-oriented chemical and plastic industry: Definition, strategy, measures and potential," *Greenhouse Gases: Science and Technology* 10, no. 3 (2020): 488-505, <https://doi.org/10.1002/ghg.1992>.
- 5) World Economic Forum, Accelerating the tech-driven bioeconomy (2024), [https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Accelerating\\_the\\_Tech\\_Driven\\_Bioeconomy\\_2024.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_Accelerating_the_Tech_Driven_Bioeconomy_2024.pdf) (2026年3月10日アクセス)
- 6) OECD, Carbon Management: Bioeconomy and Beyond (2023).

## P9

- 1) 循環経済及び資源効率に関するグローバルアライアンス (Global Alliance on Circular Economy and Resource Efficiency) , <https://www.env.go.jp/recycle/circul/gacere.html> (2026年2月11日アクセス) .

## P16

- 1) EBRC, Engineering Biology & Materials Science: A Research Roadmap for Interdisciplinary Innovation (2021), <https://roadmap.ebrc.org/2021-roadmap-materials/> (2026年3月10日アクセス) .
- 2) EBRC, Engineering Biology Metrics and Technical Standards for the Global Bioeconomy (2024), <https://ebrc.org/publications-metrics-and-standards/> (2026年3月10日アクセス) .

## P17

- 1) National Science Foundation renews funding for BioPACIFIC MIP, <https://biopacificmip.org/news/all/2025/national-science-foundation-renews-funding-biopacific-mip> (2026年2月11日アクセス) .
- 2) USDOE, Charting the Path: An Energy Earthshots Initiative Report to learn about the progress and mapping the future of the Energy Earthshots portfolio (2025), <https://www.energy.gov/sites/default/files/2025-01/doe-energyearthshots-initiativereport.pdf> (2026年2月11日アクセス) .

## P20

- 1) A Strategic Framework for a Competitive and Sustainable EU Bioeconomy (2025), [https://environment.ec.europa.eu/publications/bioeconomy-strategy\\_en](https://environment.ec.europa.eu/publications/bioeconomy-strategy_en) (2026年3月10日アクセス) .

## P22

- 1) Cohesion Data Platform, <https://cohesiondata.ec.europa.eu/funds/erdf> (2026年2月11日アクセス) .
- 2) European Commission – IInnovation Fund projects, [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund/innovation-fund-projects\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund/innovation-fund-projects_en) (2026年2月11日アクセス) .
- 3) Strategic Technologies for Europe Platform, [https://strategic-technologies.europa.eu/project-promoters/step-targeted-investment-areas\\_en#paragraph\\_96](https://strategic-technologies.europa.eu/project-promoters/step-targeted-investment-areas_en#paragraph_96) (2026年2月11日アクセス) .
- 4) European Regional Development Fund (ERDF), <https://cohesiondata.ec.europa.eu/funds/erdf/21-27#financing> (2026年2月11日アクセス) .
- 5) Circular Cities and Regions Initiative, <https://circular-cities-and-regions.ec.europa.eu/> (2026年2月11日アクセス) .

## P24

- 1) Ministry of Science and ICT, "Synthetic Biology Core Technology Development and Dissemination Strategy", <https://www.msit.go.kr/bbs/view.do?mId=113&mPid=238&bbsSeqNo=94&nttSeqNo=3183610> (2026年2月11日アクセス) .
- 2) Ministry of Science and ICT, "Announcement of the National Synthetic Biology Initiative", <https://www.korea.kr/briefing/pressReleaseView.do?newsId=156539442&pageIndex=1&repCodeType=? ?&repCode=A00033&startDate=> (2026年2月11日アクセス) .
- 3) Ministry of Science and ICT, "Establishing a Foundation to Lead the Bioeconomy: Enactment of the "Synthetic Biology Promotion Act", <https://www.msit.go.kr/eng/bbs/view.do?sCode=eng&mId=4&mPid=2&pageIndex=&bbsSeqNo=42&nttSeqNo=1099&searchOpt=ALL&searchTxt=> (2026年2月11日アクセス) .
- 4) Korea National Biofoundry, <https://kbiofoundry.org/index.html> (2026年2月11日アクセス) .
- 5) Ministry of Science and ICT, " Biofoundry Infrastructure Establishment Project", <https://www.msit.go.kr/eng/bbs/view.do?sCode=eng&mId=4&mPid=2&bbsSeqNo=42&nttSeqNo=955&searchOpt=ALL&searchTxt=biofoundry> (2026年2月11日アクセス) .

## P28

- 1) Nobuyuki Mase, et al., "Organocatalytic Stereoselective Cyclic Polylactide Synthesis in Supercritical Carbon Dioxide under Plasticizing Conditions," *Polymers* 10, no. 7 (2018): 713, <https://doi.org/10.3390/polym10070713>.
- 2) Fusheng Zhang, et al., "Responsive Photonic Filaments from Confined Self-Assembly of Cellulose Nanocrystals," *ACS Nano* 19, no. 6 (2025): 6299-6308, <https://doi.org/10.1021/acsnano.4c15863>.
- 3) Kyouhei Yamato, et al., "Surface modification of TEMPO-oxidized cellulose nanofibers, and properties of their acrylate and epoxy resin composite films," *Cellulose* 29, no. 5 (2022): 2839-2853, <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04131-y>.

## P29

- 1) Thi Thi Nge, et al., "Effect of Heat Treatment on the Chemical Structure and Thermal Properties of Softwood-Derived Glycol Lignin," *Molecules* 25, no. 5 (2020): 1167, <https://doi.org/10.3390/molecules25051167>.
- 2) NEDOプレスリリース, 「世界初、非可食バイオマス由来「固形ノボラック型」リグニン変性フェノール樹脂の量産・商業化に成功しました (2025年3月27日)」, [https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101827.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101827.html) (2026年3月10日アクセス) ..
- 3) Nora E. Torres Castillo, et al., "Towards an Eco-Friendly Coffee Rust Control: Compilation of Natural Alternatives from a Nutritional and Antifungal Perspective," *Plants* 11, no. 20 (2022): 2745, <https://doi.org/10.3390/plants11202745>.

## P31

- 1) Hyun Chul Shin, et al., "Analysis of the Microbial Community in an Acidic Hollow-Fiber Membrane Biofilm Reactor (Hf-MBfR) Used for the Biological Conversion of Carbon Dioxide to Methane," *PLoS ONE* 10, no. 12 (2015): e0144999, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0144999>.
- 2) Lucie Novoveská, et al., "Overview and Challenges of Large-Scale Cultivation of Photosynthetic Microalgae and Cyanobacteria," *Marine Drugs* 21, no. 8 (2023): 445, <https://doi.org/10.3390/md21080445>.

## P32

- 1) Júlia Domján, et al., "Raman-based dynamic feeding strategies using real-time glucose concentration monitoring system during adalimumab producing CHO cell cultivation," *Biotechnology Progress* 36, no. 6 (2020): e3052, <https://doi.org/10.1002/btpr.3052>.
- 2) Dominic Wirz, et al., "A Novel Shadowgraphic Inline Measurement Technique for Image-Based Crystal Size Distribution Analysis," *Crystals* 10, no. 9 (2020): 740, <https://doi.org/10.3390/cryst10090740>.

## P34

- 1) Alexander S. Spirin, et al., "A Continuous Cell-Free Translation System Capable of Producing Polypeptides in High Yield," *Science* 242, no. 4882 (1988): 1162-1164, <https://doi.org/10.1126/science.3055301>.
- 2) Dong-Myung Kim, Cha-Yong Choi, "A Semicontinuous Prokaryotic Coupled Transcription/Translation System Using a Dialysis Membrane," *Biotechnology Progress* 12, no. 5 (1996): 645-649, <https://doi.org/10.1021/bp960052l>.
- 3) Kim T. Simons, et al., "Ab initio protein structure prediction of CASP III targets using ROSETTA," *Proteins: Structure, Function, and Bioinformatics* 37, no. S3 (1999): 171-176, [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0134\(1999\)37:3+%3C171::AID-PROT21%3E3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0134(1999)37:3+%3C171::AID-PROT21%3E3.0.CO;2-Z).
- 4) Yoshihiro Shimizu, et al., "Cell-free translation reconstituted with purified components," *Nature Biotechnology* 19, no. 8 (2001): 751-755, <https://doi.org/10.1038/90802>.
- 5) Yoshihiro Shimizu, et al., "Protein synthesis by pure translation systems," *Methods* 36, no. 3 (2005): 299-304, <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2005.04.006>.
- 6) John Jumper, et al., "Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold," *Nature* 596, no. 7873 (2021): 583-589, <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03819-2>.
- 7) Minkyung Baek, et al., "Accurate prediction of protein structures and interactions using a three-track neural network," *Science* 373, no. 6557 (2021): 871-876, <https://doi.org/10.1126/science.abj8754>.
- 8) Josh Abramson, et al., "Accurate structure prediction of biomolecular interactions with AlphaFold 3," *Nature* 630, no. 8016 (2024): 493-500, <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07487-w>.
- 9) Joseph L. Watson, et al., "De novo design of protein structure and function with RFdiffusion," *Nature* 620, no. 7976 (2023): 1089-1100, <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06415-8>.
- 10) Justas Dauparas, et al., "Robust deep learning-based protein sequence design using ProteinMPNN," *Science* 378, no. 6615 (2022): 49-56, <https://doi.org/10.1126/science.add2187>.
- 11) Thomas Hayes, et al., "Simulating 500 million years of evolution with a language model," *Science* 387, no. 6736 (2025): 850-858, <https://doi.org/10.1126/science.ads0018>.
- 12) Andrew C. Hunt, et al., "Cell-Free Gene Expression: Methods and Applications," *Chemical Reviews* 125, no. 1 (2025): 91-149, <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.4c00116>.
- 13) Florian M. Zielke, Floris P. J. T. Rutjes, "Recent Advances in Bioorthogonal Ligation and Bioconjugation," *Topics in Current Chemistry* 381, no. 6 (2023): 35, <https://doi.org/10.1007/s41061-023-00445-6>.
- 14) Ruxia Fan, A. Sesilja Aranko, "Catcher/Tag Toolbox: Biomolecular Click-Reactions For Protein Engineering Beyond Genetics," *ChemBioChem* 25, no. 1 (2024): e202300600, <https://doi.org/10.1002/cbic.202300600>.
- 15) Alan Costello, et al., "Genetic Code Expansion History and Modern Innovations," *Chemical Reviews* 124, no. 21 (2024): 11962-12005, <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.4c00275>.
- 16) 楊 熙辰, 加藤 敬行, "非天然アミノ酸の可能性—タンパク質とペプチドへの翻訳導入と応用—," *生物工学会誌* 103, no. 5 (2025): 204-207, [https://doi.org/10.34565/seibutsukogaku.103.5\\_204](https://doi.org/10.34565/seibutsukogaku.103.5_204).

## P35

- 1) Meng Li, et al., "Biocomposites of Enzymes and Covalent Organic Frameworks: A Novel Family of Heterogenous Biocatalysis," *Chem & Bio Engineering* 2, no. 7 (2025): 380-408, <https://doi.org/10.1021/cbe.5c00013>
- 2) Shengwei Sun, "Enzyme-Embedded Biodegradable Plastic for Sustainable Applications: Advances, Challenges, and Perspectives," *ACS Applied Bio Materials* 8, no. 3 (2025): 1785-1796, <https://doi.org/10.1021/acsabm.4c01628>

## P36

- 1) Leonard M. Adleman, "Molecular Computation of Solutions to Combinatorial Problems," *Science* 266, no. 5187 (1994): 1021-1024, <https://doi.org/10.1126/science.7973651>
- 2) Paul W. K. Rothemund, "Folding DNA to create nanoscale shapes and patterns," *Nature* 440, no. 7082 (2006): 297-302, <https://doi.org/10.1038/nature04586>
- 3) Cody Geary, et al., "RNA nanostructures. A single-stranded architecture for cotranscriptional folding of RNA nanostructures," *Science* 345, no. (2014): 799-804, <https://doi.org/10.1126/science.1253920>
- 4) Shu Okumura, et al., "Nonlinear decision-making with enzymatic neural networks," *Nature* 610, no. 7932 (2022): 496-501, <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05218-7>
- 5) Satoshi Murata, et al., "Molecular Cybernetics: Challenges toward Cellular Chemical Artificial Intelligence," *Advanced Functional Materials* 32, no. 37 (2022): 2201866, <https://doi.org/10.1002/adfm.202201866>
- 6) Ebony Shire, et al., "Molecular design of protein-based materials – state of the art, opportunities and challenges at the interface between materials engineering and synthetic biology," *Molecular Systems Design & Engineering* 9, no. 12 (2024): 1187-1209, <https://doi.org/10.1039/D4ME00122B>
- 7) Alitenai Tunuhe, et al., "Protein-based materials: Applications, modification and molecular design," *Biodes Res* 7, no. 1 (2025): 100004, <https://doi.org/10.1016/j.bidere.2025.100004>
- 8) Jack A. Doolan, et al., "Next-generation protein-based materials capture and preserve projectiles from supersonic impacts," *Nature Nanotechnology* 18, no. 9 (2023): 1060-1066, <https://doi.org/10.1038/s41565-023-01431-1>
- 9) Jianming Chen, et al., "Replicating shear-mediated self-assembly of spider silk through microfluidics," *Nature Communications* 15, no. 1 (2024): 527, <https://doi.org/10.1038/s41467-024-44733-1>

## P37

- 1) Chen Wang, et al., "Modularize and Unite: Toward Creating a Functional Artificial Cell," *Frontiers in Molecular Biosciences* 8, no. (2021): 781986, <https://doi.org/10.3389/fmolb.2021.781986>.
- 2) Simone Giaveri, et al., "Building a Synthetic Cell Together," *Nature Communications* 16, no. 1 (2025): 7488, <https://doi.org/10.1038/s41467-025-62778-8>.
- 3) Viviana Maffei, et al., "Synthetic Cells Revisited: Artificial Cell Construction Using Polymeric Building Blocks," *Advanced Science* 11, no. 8 (2024): 2305837, <https://doi.org/10.1002/advs.202305837>.
- 4) Peng Lin, et al., "Artificial Compartments Encapsulating Enzymatic Reactions: Towards the Construction of Artificial Organelles," *ChemPlusChem* 90, no. 2 (2025): e202400483, <https://doi.org/10.1002/cplu.202400483>.
- 5) Jefferson M. Smith, et al., "Controlling Synthetic Cell-Cell Communication," *Frontiers in Molecular Biosciences* 8, no. (2021): 809945, <https://doi.org/10.3389/fmolb.2021.809945>.
- 6) Ricard Solé, et al., "Open problems in synthetic multicellularity," *npj Systems Biology and Applications* 10, no. 1 (2024): 151, <https://doi.org/10.1038/s41540-024-00477-8>.
- 7) Gizem Gumuskaya, et al., "Motile Living Biobots Self-Construct from Adult Human Somatic Progenitor Seed Cells," *Advanced Science* 11, no. 4 (2024): 2303575, <https://doi.org/10.1002/advs.202303575>.
- 8) 学術変革領域研究(A)「分子サイバネティクス」, 領域代表者: 村田智 教授(東北大学), 研究期間: 2020年11月~2025年3月, <https://molcyber.org/> (2026年2月11日アクセス) .

## P38

- 1) Robert Langer, Joseph P. Vacanti, "Tissue Engineering," *Science* 260, no. 5110 (1993): 920-926, <https://doi.org/10.1126/science.8493529>.
- 2) Michael B. Elowitz, Stanislas Leibler, "A synthetic oscillatory network of transcriptional regulators," *Nature* 403, no. 6767 (2000): 335-338, <https://doi.org/10.1038/35002125>.
- 3) Timothy S. Gardner, et al., "Construction of a genetic toggle switch in *Escherichia coli*," *Nature* 403, no. 6767 (2000): 339-342, <https://doi.org/10.1038/35002131>.
- 4) Kazutoshi Takahashi, Shinya Yamanaka, "Induction of Pluripotent Stem Cells from Mouse Embryonic and Adult Fibroblast Cultures by Defined Factors," *Cell* 126, no. 4 (2006): 663-676, <https://doi.org/10.1016/j.cell.2006.07.024>.
- 5) Kazutoshi Takahashi, et al., "Induction of Pluripotent Stem Cells from Adult Human Fibroblasts by Defined Factors," *Cell* 131, no. 5 (2007): 861-872, <https://doi.org/10.1016/j.cell.2007.11.019>.
- 6) Toshiro Sato, et al., "Single Lgr5 stem cells build crypt-villus structures in vitro without a mesenchymal niche," *Nature* 459, no. 7244 (2009): 262-265, <https://doi.org/10.1038/nature07935>.
- 7) Dongeun Huh, et al., "Reconstituting Organ-Level Lung Functions on a Chip," *Science* 328, no. 5986 (2010): 1662-1668, <https://doi.org/10.1126/science.1188302>.
- 8) Janna C. Nawroth, et al., "A tissue-engineered jellyfish with biomimetic propulsion," *Nature Biotechnology* 30, no. 8 (2012): 792-797, <https://doi.org/10.1038/nbt.2269>.
- 9) Madeline A. Lancaster, et al., "Cerebral organoids model human brain development and microcephaly," *Nature* 501, no. 7467 (2013): 373-379, <https://doi.org/10.1038/nature12517>.
- 10) Peter Q. Nguyen, et al., "Engineered Living Materials: Prospects and Challenges for Using Biological Systems to Direct the Assembly of Smart Materials," *Advanced Materials* 30, no. 19 (2018): 1704847, <https://doi.org/10.1002/adma.201704847>.
- 11) Roger D. Kamm, et al., "Perspective: The promise of multi-cellular engineered living systems," *APL Bioengineering* 2, no. 4 (2018): <https://doi.org/10.1063/1.5038337>.
- 12) Sergei Grebenyuk, et al., "Large-scale perfused tissues via synthetic 3D soft microfluidics," *Nature Communications* 14, no. 1 (2023): 193, <https://doi.org/10.1038/s41467-022-35619-1>.
- 13) Paulina Nuñez Bernal, et al., "Volumetric Bioprinting of Complex Living-Tissue Constructs within Seconds," *Advanced Materials* 31, no. 42 (2019): 1904209, <https://doi.org/10.1002/adma.201904209>.
- 14) Ebrahim Yarali, et al., "4D Printing for Biomedical Applications," *Advanced Materials* 36, no. 31 (2024): 2402301, <https://doi.org/10.1002/adma.202402301>.
- 15) Sylvia Mangani, et al., "Design and Applications of Extracellular Matrix Scaffolds in Tissue Engineering and Regeneration," *Cells* 14, no. 14 (2025): 1076, <https://doi.org/10.3390/cells14141076>.
- 16) Laura Rijns, et al., "Mimicking the extracellular world: from natural to fully synthetic matrices utilizing supramolecular biomaterials," *Nanoscale* 16, no. 35 (2024): 16290-16312, <https://doi.org/10.1039/D4NR02088J>.
- 17) Sakhavat Abolhasani, et al., "Biomaterials in tissue repair and regeneration: key insights from extracellular matrix biology," *Front Med Technol* 7, no. (2025): 1565810, <https://doi.org/10.3389/fmedt.2025.1565810>.
- 18) Ameya R. Narkar, et al., "Smart biomaterial platforms: Controlling and being controlled by cells," *Biomaterials* 283, no. (2022): 121450, <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2022.121450>.
- 19) Liangliang Yang, et al., "High-Throughput Methods in the Discovery and Study of Biomaterials and Materiobiology," *Chemical Reviews* 121, no. 8 (2021): 4561-4677, <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00752>.

## P39

- 1) Peter Q. Nguyen, et al., "Engineered Living Materials: Prospects and Challenges for Using Biological Systems to Direct the Assembly of Smart Materials," *Advanced Materials* 30, no. 19 (2018): 1704847, <https://doi.org/10.1002/adma.201704847>.
- 2) Wil V. Sruhar, III, "Engineered Living Materials: Taxonomies and Emerging Trends," *Trends in Biotechnology* 39, no. 6 (2021): 574-583, <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2020.10.009>.
- 3) Bolin An, et al., "Engineered Living Materials For Sustainability," *Chemical Reviews* 123, no. 5 (2023): 2349-2419, <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00512>.
- 4) Hannelore Wiessens, et al., "Strength in diversity: unlocking the full potential of engineered living materials with multistrain collaboration," *FEMS Microbiology Reviews* 49, no. (2025): <https://doi.org/10.1093/femsre/uaaf055>.
- 5) Yimu Zhao, et al., "Integrating organoids and organ-on-a-chip devices," *Nature Reviews Bioengineering* 2, no. 7 (2024): 588-608, <https://doi.org/10.1038/s44222-024-00207-z>.
- 6) Moritz Hofer, Matthias P. Lutolf, "Engineering organoids," *Nature Reviews Materials* 6, no. 5 (2021): 402-420, <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00279-y>.
- 7) Nikolche Gjorevski, et al., "Tissue geometry drives deterministic organoid patterning," *Science* 375, no. 6576 (2022): eaaw9021, <https://doi.org/10.1126/science.aaw9021>.
- 8) Min Suk Kim, et al., "Biohybrid actuators in robotics: recent trends and future perspectives of skeletal and cardiac muscle integration," *npj Robotics* 3, no. 1 (2025): 37, <https://doi.org/10.1038/s44182-025-00049-w>.
- 9) Yuya Morimoto, et al., "Biohybrid robot powered by an antagonistic pair of skeletal muscle tissues," *Science Robotics* 3, no. 18 (2018): eaat4440, <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aat4440>.
- 10) Keel Yong Lee, et al., "An autonomously swimming biohybrid fish designed with human cardiac biophysics," *Science* 375, no. 6581 (2022): 639-647, <https://doi.org/10.1126/science.abh0474>.
- 11) Xinzhu Ren, et al., "Biohybrid hand actuated by multiple human muscle tissues," *Science Robotics* 10, no. 99 (2025): eadr5512, <https://doi.org/10.1126/scirobotics.adr5512>.
- 12) Shotaro Saito, et al., "Light-Driven Quadrupedal Walking Biohybrid Robot With Antagonistic Muscle-Rings and Inclined Joints," *Advanced Robotics Research* n/a, no. n/a (2026): e202500203, <https://doi.org/10.1002/adrr.202500203>.
- 13) Daniel J. Shiwarski, et al., "3D bioprinting of collagen-based high-resolution internally perfusable scaffolds for engineering fully biologic tissue systems," *Science Advances* 11, no. 17 (2025): eadu5905, <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/sciadv.adu5905>.
- 14) Lena Smirnova, et al., "Organoid intelligence (OI): the new frontier in biocomputing and intelligence-in-a-dish," *Frontiers in Science* 1, no. (2023): 1017235, <https://doi.org/10.3389/fsci.2023.1017235>.
- 15) Brett J. Kagan, et al., "In vitro neurons learn and exhibit sentience when embodied in a simulated game-world," *Neuron* 110, no. 23 (2022): 3952-3969.e3958, <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2022.09.001>.
- 16) Fred D. Jordan, et al., "Open and remotely accessible Neuroplatform for research in wetware computing," *Front Artif Intell* 7, no. (2024): 1376042, <https://doi.org/10.3389/frai.2024.1376042>.
- 17) Hongwei Cai, et al., "Brain organoid reservoir computing for artificial intelligence," *Nature Electronics* 6, no. 12 (2023): 1032-1039, <https://doi.org/10.1038/s41928-023-01069-w>.
- 18) Anqi Zhang, et al., "Nanowire-enabled bioelectronics," *Nano Today* 38, no. (2021): 101135, <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2021.101135>.
- 19) Fred D. Jordan, et al., "Open and remotely accessible Neuroplatform for research in wetware computing," *Frontiers in Artificial Intelligence Volume 7 - 2024*, no. (2024): <https://www.frontiersin.org/journals/artificial-intelligence/articles/10.3389/frai.2024.1376042>.
- 20) Brett J. Kagan, et al., "In vitro neurons learn and exhibit sentience when embodied in a simulated game-world," *Neuron* 110, no. 23 (2022): 3952-3969.e3958, <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2022.09.001>.

■ 調査担当 ■

高村 彩里 フェロー (ナノテクノロジー・材料ユニット)

鈴木 伸郎 フェロー (ナノテクノロジー・材料ユニット)

CRDS-FY2025-XR-13

**その他報告書**

**バイオ×材料科学：  
ものづくりにおける交差の潮流と展望**

令和8年3月 March 2026  
ISBN 978-4-86829-058-2

**国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター**  
**Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency**

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's五番町  
電話 03-5214-7481  
E-mail crds@jst.go.jp  
<https://www.jst.go.jp/crds/>

本書は著作権法等によって著作権が保護された著作物です。  
著作権法で認められた場合を除き、本書の全部又は一部を許可無く複写・複製することを禁じます。  
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。  
なお、本報告書の参考文献としてインターネット上の情報が掲載されている場合、当該情報はURLに併記された日付または本報告書の発行年月の1ヶ月前に入手しているものです。上記以降の情報の更新は行わないものとします。

This publication is protected by copyright law and international treaties.  
No part of this publication may be copied or reproduced in any form or by any means without permission of JST, except to the extent permitted by applicable law.  
Any quotations must be appropriately acknowledged.  
If you wish to copy, reproduce, display or otherwise use this publication, please contact crds@jst.go.jp.  
Please note that all web references in this report were last checked on the date given in the link or one month prior to publication. CRDS is not responsible for any changes in content thereafter.