



イノベーションに関する考察

メタモルフォーシス／変態:

ディープテックを融合し新たなバイオエコノミーの中で
どのようにビジネスを推進するか



ケンブリッジコンサルタンツ における 3つのポイント

1

大規模なバイオエコノミーにおいて、大きな変化により成功を生み出すためには、最先端技術の相互作用による相乗効果を引き出すことが重要である。

2

最先端技術の相互作用により、収益性が高くレジリエントなバイオエコノミーを拡大していくのに不可欠な予測可能性を高めることができる。

3

ビジネスにおいて、バイオ革命の潜在力と持続可能性を最大限に引き出すためには、最先端技術、データ共有、分散化の可能性を総合的に活用するための外部提携が必要不可欠である。

はじめに

バイオ革命は機会に満ち溢れています。バイオテクノロジーや合成生物学技術を含む新たなディープテックにより、材料、化学物質、食品、医薬品を生み出す斬新な方法が提示されており、野心的なイノベーターたちは、革新的な飛躍によって市場を再定義しようとしています。私たちの地球は、そして持続可能な社会は、その恩恵に預かるようとしています。しかし...

課題はそれがバイオロジーであることです。複雑な操作とスケーリングにより、変化のスピードが抑えられています。成果の予測は困難で、時間やコストは常に障害となります。本イノベーション解説では、その解決に向けた指針を示します。

この解説では、未来をすばやく先取りし、新たなバイオエコノミーにおける大胆ながらも起こり得るビジョンを提示します。大規模、高収益、かつ柔軟なバイオプロセスの実現にあたり、技術の相互作用による相乗効果がいかに重要であるかを説明します。そして、これらの最先端技術を組み合わせることが、バイオエコノミー、ひいてはお客様のビジネスを繁栄させるための、予測可能性と確実性をもたらす理由を解き明かします。

著者らは、工学、バイオロジー、高度なコンピューティング技術を交えた、弊社独自の視点を活用します。科学者、技術者、業界の専門家が協力して現状に問いを投げかけ、知見を形成します。全ての中心にあるのはディープテックの相互作用-つまりここでは、個々のバイオプロセスレベル、企業レベル、あるいはバイオエコノミー全体で適用可能な相乗的技術です。

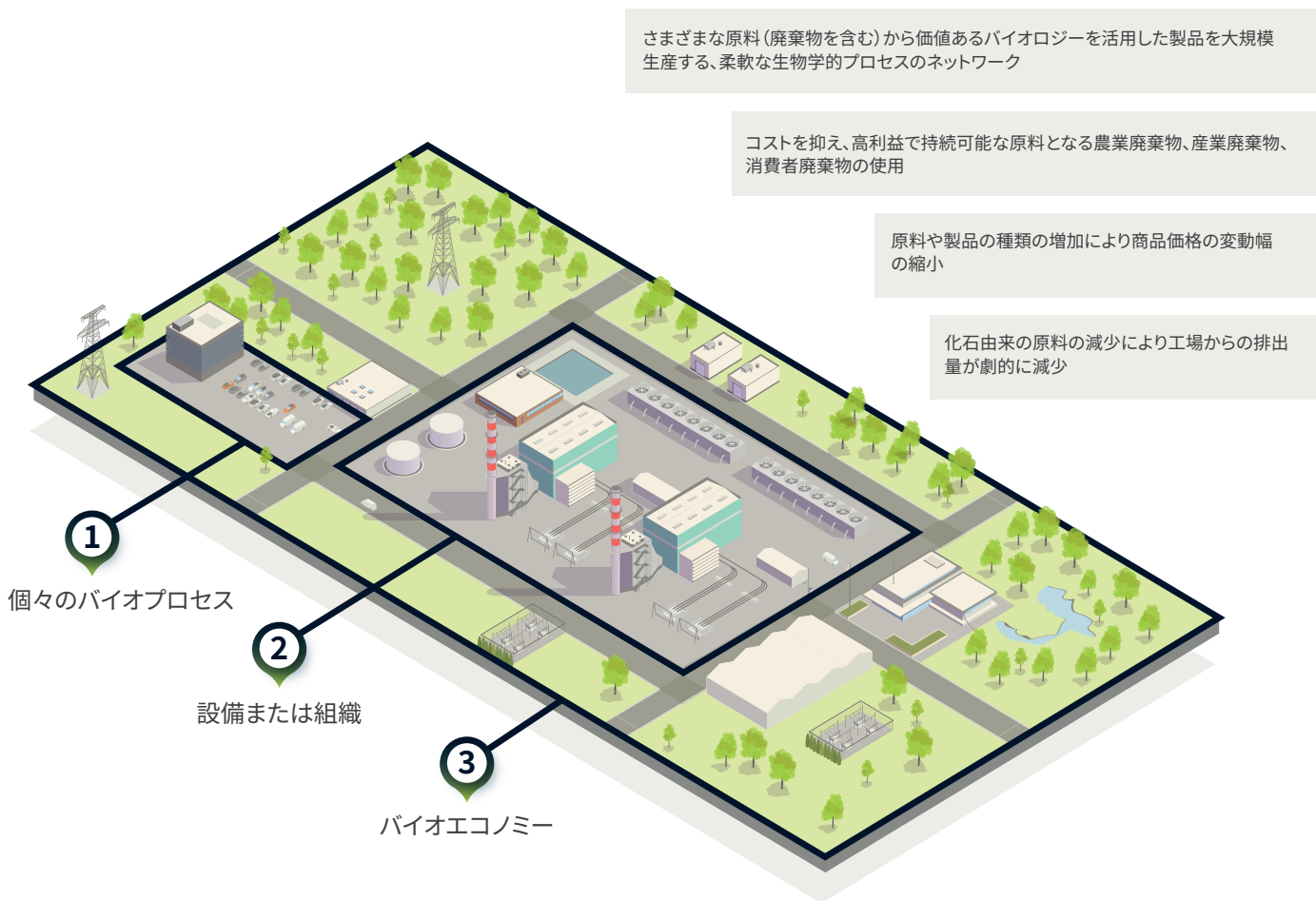
未来のバイオエコノミーに向けたビジョン

技術の融合により、収益性が高く、規模が大きく、ネットワーク化されたバイオエコノミーを加速する

2035年の未来を想像してみましょう。最先端のバイオロジーを活用した化学物質、材料、原料の製造業者において、そのバイオプロセスは柔軟性に富み、なおかつ規模の経済を実現しています。これらの企業は収益性が高く、規模が大きく、ネットワーク化された新たなバイオエコノミーの中に存在しています—リアルタイムで相互に接続されたバイオエコノミ

ーの機能の集合体であり、データと資源を共有するために常に相互に通信しているのです。これらの力により、バイオエコノミーは環境コストをかけずに、拡大する高齢化社会に必要な材料や化学物質を供給します。

2035年のバイオエコノミーのビジョン



明らかにしておきたいのは、これが予測ではなく、挑戦的な議論の出発点として設計されていることです。

適応可能な個別のバイオプロセス

多岐にわたる技術を活用することで、個別のバイオプロセスにおける柔軟性と規模の経済のトレードオフは解消されています。これらを理解するために、重要な原材料の一つが突然利用できなくなった状況を想像してみましょう。その理由としては、化石燃料の採掘量制限に関する規制、地政学的な事件による化石燃料の価格高騰、異常気象による特定作物の収穫高激減、原材料となる廃棄物が時代に合わなくなり生じる供給量の減少などが考えられます。過去には、これらの出来事はビジネス上の致命的な課題でしたが、現在では単なる利便性の低下に過ぎません。企業は以下のプロセスで適用していきます：

バイオプロセスの確立に要するステージ



- ① **生物と原料の選択:** シャーシとなる生物と原料を使用可能な設備に基づいて決定するAIに、利用可能な原料とその価格のデータベースを学習させます (同時に、異なるシャーシと原料によってどのような収率と力価の改善が見込まれるかを特定する代謝工学AIからの入力も用います)。
- ② **代謝工学:** AIは代謝工学と最適化を行うことで、最適な原料を使用し、かつ求められる収率と力価で製品を生産する可能性の高い数百種類の生物変異体を提案します。従来型コンピューターと量子コンピューターのハイブリッドシステム上で動作し、関与する酵素の反応部位を正確にシミュレートし、酵素活性を向上させます。また、必要となる下流工程のステップを調べ、下流工程の高コストな部分を省いたさらに数百の変異体を作成します。これらのAIによる提案をラボに持ち込むこみ、最新の合成生物学ツールと自動液体処理装置を用いてこれらの変異体を合成します。
- ③ **ハイスループット関連試験:** ラボでは、ハイスループット関連試験 (高度なセンシングとマイクロ流体の供給を備えたウェルプレートサイズのバイオリクターの配列) により、各変異体が、スケールアップと下流工程に不可欠である酸素の可用性、副産物濃度、圧力変化などの多くのパラメーターと関連してどのように成長するかを測定します。これより、スケールアップした際に最良の結果をもたらす変異体が選択されます。また結果の一部がAIにフィードバックされることで、改善された推奨値を返すようになります。このハイスループット関連試験手順は、デジタルツインモデルを用いたより大スケールでの結果とよく一致することが示されています。
- ④ **デジタルツインシミュレーション:** 大規模槽内の生物の性能を予測するために、ハイスループット関連試験と同様のプロセスから得られた結果を利用し、所有する装置のデジタルツインを使用します。このデジタルツインには、増殖と目的生成物の生産を理解するための代謝モデルとともに、発酵槽内の酸素フローを理解するための計算流体力学が組み込まれています。これには、強力な物理エンジンを使って下流工程と上流工程も組み込まれています。

- 5 **TEAの更新**：デジタルツインを使って、技術経済性分析（TEA）によって信頼区間を与えることが可能です（投入量、力価、収率、下流工程の効率）。これは、この新しいプロセスが非常に収益性が高いことを示しています。また、収益性に影響する主な要因は、酸素の可用性と発酵時間であることも明らかになっています。
- 6 **資金調達および規制当局の承認**：見積もりコスト、投資利益率、信頼区間があることで、プロジェクトの資金調達に有利な条件を得ることができます。規制当局はこれらの技術に精通しており、よって予測を信頼し、規制当局の承認プロセスもそれに応じて合理化されているため、規制当局の承認は容易です。
- 7 **試運転**：この新規プロセスを既存の設備で試運転する場合、デジタルツインは、どのパラメータが収益性にとって重要であるかを教えてくれます。先進的なセンシングツールを使用することで、これらのパラメータをリアルタイムで検知可能であり、AIは制御システムを最適化するために、重要なプロセス属性と共にこれらのパラメータを監視します。プロセスは自身から学習し、最適なレベルまで生産を素早く立ち上げ、また異常事態が発生した場合には、予防保全のために警告を発します。

自動反復：更新されたTEAにより、ソフトウェアは自動的に高ハイスループット相関試験でテストされたすべての変異体を遡り、デジタルツインシミュレーションと同時に同じTEAを実行することで最適解を返します。これには膨大な計算能力が必要ですが、高性能の計算インフラは今やどこでも利用可能です。実際に古典的なコンピューターが量子コンピューターと統合され、このスピードが上がるかもしれません。

新規原料から同じ製品を生産する際、規模の経済を達成するため、企業はかつてビジネス上の致命的な課題であったものに対し急速に適応してきました。原料不足のために製品の価格は高騰しており、企業は今や確立されたこれらの技術によって可能になった利益を享受しています。信頼性のある供給を提供する能力は、信頼できるサプライヤーとしての地位を確立し、業界における評判を高めることにつながります。

柔軟で最適化された設備

最先端技術の融合が企業のビジネスに影響を与えているのは、個々のバイオプロセスだけではなく、気候変動や地政学的な影響によってサプライチェーンは不安定になっていますが、リアルタイムデータの活用、モジュール化されたプロセス、データフュージョンなどの複合的な効果によって、企業のビジネスはレジリエントになります。

- リアルタイムのプロセスデータは、従来の方法だけでなく、先進的なフォトリソグラフィ(光子を生成、制御、検出する科学技術)やバイオセンシング(属性を測定するための生物学的生命体の使用)を用いて収集されます。エッジ(中央集中型のデータセンターやクラウド環境ではなく、ローカルなハードウェア)におけるAIは、多種多様なパラメータを推測し、動的制御システムの実装を実現します。
- モジュールプロセスとは、独立しながらもフレキシブルに接続された単位操作のことです。これらのプロセスは本質的にフレキシブルで、プロセスモジュールを取り外すことで簡単にスケールアップやスケールダウンが可能です。システム全体を中断することなく、モジュールのアップグレード、調整、撤去ができ、他の様々なモジュール単位のプロセスと組み合わせることで多様な機能を実現できます。とりわけモジュール化は、[シュミット・フューチャーズ・レポート](#)(米国のバイオエコノミーの推進に関する著名な論考)において、研究開発の重点分野として挙げられています。
- データフュージョンとは、異なる種類のデータを組み合わせて知見を推論することです。将来の設備では、スケジュール管理ソフトウェアからのデータを、リアルタイムの動的な電力価格、天候予測、プロセスデータ、市場データと組み合わせて、現場を最適化する可能性があります。これにより資産の利用率が上がり、運転コストが下がり、収益が向上します。例として、キャップジェミニ・リサーチ・インスティテュートのレポートによると、基本的な施設全体のデジタルツインは、より広範な環境からのデータを取り入れなくても、**既に平均25%以上のシステムパフォーマンスの向上をもたらしています**。

概して、企業の複数のバイオプロセスは、範囲の経済(単一の製品に特化するのではなく、様々な製品を生産することで達成されるコスト優位性と効率性)を達成し、サプライチェーンの変動に対してレジリエントになり、生産・販売・マーケティングにおいて相乗効果を発揮します。

ネットワーク化・トークン化されたバイオエコノミー

バイオエコノミーは、食料供給から家庭の電力供給、職場の清掃に至るまで、人間のさまざまなニーズを満たす役割を担っています。将来のバイオロジーを活用したビジネスは、これらのニーズを満たすために協調的な取り組みが行われている、ネットワーク化されたバイオエコノミーの中で展開されます。これは、規制領域を越える事業展開、持続可能性の向上、サイバーセキュリティとバイオセキュリティの融合により特に複雑化したセキュリティなど、業界が直面する「壮大な課題」に取り組む際に役立ちます。

未来のバイオエコノミーでは、リアルタイムの価格情報、供給情報、将来予測、持続可能性のベストプラクティス、そして既知の脆弱性などのセキュリティリソースをまとめたプラットフォーム上で共有されます。このプラットフォームとは、要素と機能が中央ハブではなく、多数のノードに分散しているシステムまたはネットワークのことを指します。

分散型バイオエコノミーを促進するトークン

トークンを獲得する方法：

- 1 データの共有
- 2 プラットフォームの保持・改善
- 3 トークンの購入

トークンを消費する方法：

- 1 データへのアクセス
- 2 トークンの売買

このシステムはオープンな規格に基づいて構築されており、バイオプロセス機器と市場データはトークン化されシステム内で相互運用が可能です。この分散型プラットフォームには複数の利点があります：

- このプラットフォームのセットアップとメンテナンスに責任を持つ事業者はおらず、仲介者がいないため関連コストがかかりません。
- 企業はデータの所有権と管理権を保持し、データ共有のリスクを軽減できます。
- 様々な政策・規制機関が、立案中の政策や規制が業界に与える影響をシミュレートし、企業や商品供給に与える影響が最も少ない規制法や実施期間を選択することが可能です。
- 地域間規制の透明性により、国境を越えた計画、協力、規模の経済が容易になります。
- スマートコントラクトの促進-契約がコードで記述され、一定の条件を満たすと自動的に実行される自己実行型契約が実現可能です。

スマート契約の例

ある企業がセルロース系バイオマスを利用するための独自酵素のライセンスを供与しています。必要なロイヤルティの支払いを自動的に計算して請求するために、この契約ではバイオリクター内のIoTセンサーを活用して最適な酵素を使用して製造された製品量を測定し、またリアルタイムの価格データを取り込みます。スマートコントラクトは、ブロックチェーン上で自動化され、信頼性が高く、改ざんされにくい契約の締結を可能にし、仲介者の必要性を減らし、効率を高めます。

このビジョンの達成方法

このような理想的な未来は、描いた絵ほど一筋縄ではいかないかもしれませんが、そう遠くありません。重要なのは、バイオロジーとバイオプロセスに予測可能性をもたらすことであり、同時に、インダストリアルバイオテクノロジーに多くの利点をもたらす傾向にある、さまざまな規模の分散化を活用することです。また、コミュニティ全体へのアプローチも重要です。まずは予測可能性から見ていきましょう。

バイオロジーとバイオプロセスを予測可能にする

バイオ革命は、電子機器、パーソナル・コンピューティング、デジタル時代の普及をもたらしたシリコン革命とよく比較されます。バイオ革命とシリコン革命の大きな違いは、バイオロジーは本質的に複雑であるため、シリコンチップや電子機器に比べて予測しにくいということです。

予測可能性は、情報に基づいたビジネスにおける意思決定の促進、リスクの低減、一貫した製品品質保証、そして規制当局の迅速な承認につながります。また、予測可能性により、表現型の安定性に影響を与えるものを理解することで、フェッドバッチ（流加培養）から連続処理への移行を可能にします。これにより、試行錯誤を最小限に抑え、スケールアップした商業的優位性を持つバイオプロセスを設計することが可能です。

では、インダストリアルバイオテクノロジーにおいて、バイオロジーとバイオプロセスをより予測しやすくするにはどうすればよいのでしょうか？

バイオロジーは複雑であり、相互に結びついた多数の部分や変数を持ち、それらはしばしば創発的特性（複数の部分挙動の総和が個々の要素とは異なること）をもたらすような形で相互作用します。生物学的システムは常に環境と相互作用しており、時間の経過とともに環境に応じて進化してきました。これに加えて、生物学的プロセスには本質的に確率的なものがあるためバイオロジーがどうなるかを予測するのは非常に難しいでしょう。このような難題を克服するためのいくつかの方法を以下に紹介します。

研究

学術的研究は、生物学的システムを構成する各部分を理解し、システムアプローチを用いてより良い出力を予測することに重点を置くケースが多いです。バイオロジーのための測定ツールがより洗練されるにつれて、学術領域への理解は急速に進化し、バイオロジーをより予測可能なものにしていきます。予測可能性は、シュミット・レポートにおいて、二つの中核的研究優先事項の一つとして特に挙げられています。

活用におけるサンプル数の低減

AIが有効であるためには、非常に多くのサンプルが必要です。（1クラスあたり少なくとも2,000サンプル、あるいはモデルの自由度の10倍など、アミノ酸の文字列としては非常に多いと言えます）。バイオロジーの実験には時間と費用がかかるため、サンプル数の確保はバイオロジーの研究において非常に困難です。ハーバード大学のジョージ・チャーチの研究室は、タンパク質配列からタンパク質の構造と機能を予測することを可能にする「タンパク質大規模言語モデル」を用いることによって、この状況を変えようとしています。

検証されたシミュレーション

先の「個々のバイオプロセス」のセクションでは、相関性の高いスクリーニングとバイオプロセスにおけるデジタルツインの概念について検討しました。このようなモデルシステムの予測力を検証することは、ビジネス上の意思決定を支援する上で信頼性があることを保証するために不可欠です。

無細胞発現系

細胞膜や生殖機構を含まず、細胞の転写・翻訳機構だけを含む無細胞発現系が開発されています。複雑さが軽減されることで、収率や費用対効果が改善されるとともに、これらのシステムの予測可能性は向上します。しかしながら、知識とリソースのギャップ、より良い測定の**必要性**、**性能予測の問題などが障壁として残っています**。



様々な規模の分散化の活用

分散化は**インダストリアルバイオテクノロジー**のトレンドであり、その理由は、a) 廃棄物の発生源に近い場所で製造可能なため、輸送コストとカーボンフットプリントを削減できる、b) レジリエントなサプライチェーンを実現できる、c) 消費者市場における分散化とパーソナル化のトレンドに合致している、などがあります。

分散型バイオプロセスでは、あるプロセスを有する企業は、そのプロセスに対するコントロールを失うことになります。また、発酵槽の容積、曝気手法、プロセスをスケールアップする各段階における原料の質も様々です。例えば、特定の原料を生産するバイオプロセスを様々な他社が有する食品製造施設に置く場合、完全に機械へアクセスできなくなる可能性があります。

予測能力が高まることで品質や効率に最も影響を与えるであろう要因が分かるため、管理移管のプロセスがはるかに容易になり、これらの引継ぎプロセスに集中することができます。他の領域でも分散化が進んでいますが、バイオプロセスではプラスチック製造等の他の領域に比べて、プロセスの個々の特性が品質や効率により大きな影響を与えます。

一方、多様なバイオプロセスが一箇所で相乗効果を発揮する統合バイオリファイナリーは、様々なプロセスや設備を一箇所に集約できるため、柔軟性の向上をもたらします。また、規模の経済が働き、最終製品の流通を簡素化します。

プロセス間の相乗効果を促し（例えば、副産物を有効活用するために、どのようなプロセスを利用できるか等）、変化がシステム全体に与える影響を理解するためにも予測可能性は重要です。

分散化と統合を適切に活用することで、バイオエコノミーは柔軟でレジリエント、かつ効率性や拡張性が高くなります。

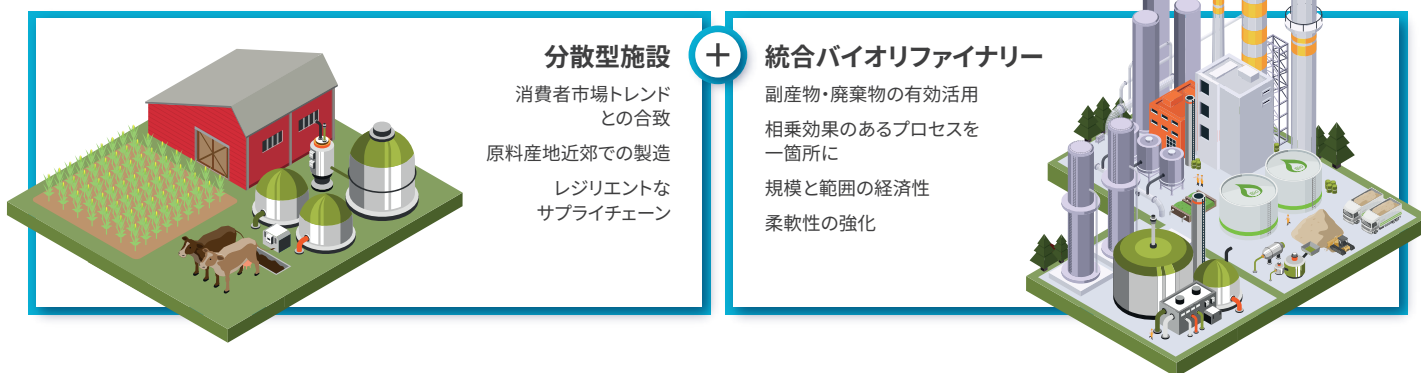
コミュニティの総合的な可能性の活用

テクノロジーの融合は、本質的に学際的なものであり、単独での進歩は困難です。バイオロジーはシステムであり、したがってバイオエコノミーもシステムであるため、私たちはシステム的なマインドセットで両者に取り組む必要があります。個々の要素に単独で焦点を当てるのではなく、全体像を重視し、各要素がどのように相互に関連しているかを理解し、バイオエコノミーが活動する広範な背景を考える必要があります。

その方法の一つが、データを照合し、共有し、解釈するためのプラットフォームを活用することです。上述した野心的なビジョンでは、分散型プラットフォームがこれを実現する方法でした。現実には、当事者が信頼できる第三者に合意できない場合や、第三者が法外な時間、コスト、リスクをもたらす場合に、分散型プラットフォームは適切な選択肢となります。

中央集権型プラットフォームであれ分散型プラットフォームであれ、これらのデジタルサービスには慎重な設計が必要です。これには、データへのアクセスがどのように管理されているかをよく理解すること含まれます。また、様々な利害関係者がデータを共有し、協力を促進するために、プラットフォームに十分な価値があることを確かめなければなりません。

バイオエコノミーには、分散型施設と集約型バイオリファイナリーの両方が必要



最後に

これまでの解説から、核心となる結論は予想できているはずですが、すなわちそれは予測可能性であり、規模、柔軟性、確実性の前提条件です。

規模

バイオプロセスのスケールアップは通常、困難で高価です。バイオロジは、その複雑さと環境との絶え間ない相互作用により、本質的に予測することが困難です。この複雑さを理解し操作可能になることで、バイオロジは強力な味方になります。大規模な工業システムとバイオロジとの相互作用を予測できることが、この力を引き出す秘訣なのです。

柔軟性

柔軟性とモジュール性は、可変入力を受けてある決まった出力を生成する能力を必要とします。そのためには、異なる生物、異なる槽、異なる上流／下流工程が必要になるかもしれません。予測がなければ、不確実なことは実行不可能であるため、同じような硬直した手順を繰り返さなければなりません。

確実性

優れた予測は、単一の値ではなく範囲を示し、予測が何に対して感度が高いかを示します。また、予測が確実であることが自信につながります。

これら三つの属性は、バイオエコノミーの設計、資金調達、規制を可能にする鍵です。ではどのようにやって実現できるでしょうか。変化を可能にするためには、システム的アプローチ、適切なデータ、そして知識の共有インフラが整っていなければなりません。そしてまた、分野横断的、バリューチェーン横断的、つまり、産業界、ディープテックの専門家、政策立案者、そして社会を跨ぐパートナーシップが不可欠です。

ディープテックの融合から生まれる強力な予測可能性は、新たなバイオエコノミーがその能力を発揮することを可能にし、その波紋はビジネスを持続可能性と収益性の新たな高みへと押し上げるでしょう。

より詳細な解説をご希望の方へ

本テーマについてより詳しく知りたい、あるいは新しいバイオエコノミーへの取り組みについてご相談されたい方は、グローバルバイオテクノロジー SVPのフランシス・メットカルフまでご連絡ください。

frances.metcalfe@cambridgeconsultants.com

ケンブリッジコンサルタンツを選ぶ理由

キャップジェミニ・イベントの一部門であるケンブリッジコンサルタンツ (CC) は、800名の聡明で才能豊かな人材で構成されるグローバルチームです。弊社は、顧客の競争優位性と市場リーダーシップの確立に貢献する、困難でリスクの高い課題に取り組むことで、ディープテックイノベーションの境界を広げます。弊社は、世界の大企業や最も野心的なスタートアップから信頼を得て、60年に渡りテクノロジーに基づく重要な目標を実現しています。

著者



レベッカ ドナルドソン

産業&コンシューマ事業本部 戦略・イノベーション・プロセスG
上席テクノロジー戦略アナリスト

戦略・イノベーション・プロセスチームの一員として、組織に最も大きな影響を与える技術ブレークスルー、特にバイオテクノロジーに焦点を当て、その活用方法を上級の意思決定者が理解しスムーズに意思決定できるようにサポート。世界経済フォーラムのフェローとして、バイオエコノミー・イニシアティブに取り組んでいる。



ジェームズ ウェストリー

産業&コンシューマ事業本部 機械工学・設計G
グループリーダー

ケンブリッジコンサルタンツの機械工学・製品設計部門のリーダーであり、物理学の基本原則と最先端のモデリング技術を活用した製品開発とシステム・エンジニアリングの高度化に注力している。熱流体工学とシミュレーションを専門としており、バイオプロセス開発のあらゆる段階において、インパクトがありながらも明白ではない改善点を見出すため、現在の在り方に挑戦し続けている。



UK — USA — SINGAPORE — JAPAN

www.cambridgeconsultants.com

ケンブリッジコンサルタンツは、デジタルイノベーション、コンサルティング、トランスフォーメーションを統合したグローバル・ビジネス・ライン「キャップジェミニ・イベント」の一員です。
www.cappgemini.com