

合成生物学のキープレイヤーと応用先：特許と事業戦略から読み解く市場動向

エグゼクティブサマリ

- 市場概観と重要性：世界の合成生物学市場は、2024年の185億米ドルから2033年には667億米ドル（CAGR 15.3%）へと急成長が見込まれます¹。持続可能なバイオベース素材への需要¹と、mRNAワクチンやCAR-T細胞療法²に代表される医療革新が市場を牽引しています。地政学的には、米国がR&D（研究開発）とイノベーションを主導する一方³、中国が世界のバイオ製造（発酵）キャパシティの70%を支配³しており、米国は商業化へのスケールアップ段階で「ボトルネック」に直面しています。
- 主要な戦略グループ：本レポートは、ビジネスモデルとバリューチェーン上の立ち位置に基づき、主要プレイヤーを4つの戦略グループに分類します。
 1. 「プラットフォーム・ファウンドリ型」（例：Ginkgo Bioworks）：R&Dプロセス自体を水平的なサービスとして提供します⁴。
 2. 「基盤ツール・合成特化型」（例：Twist Bioscience）：DNA合成（書き込み）やNGS（読み取り）など、中核となるツール（消耗品）を供給します⁵。
 3. 「垂直統合型（素材・食品）」（例：Novonesis, dsm-firmenich）：精密発酵技術を用い、B2B原料市場でR&Dから製造・販売までを垂直統合します⁶。
 4. 「治療・次世代医療型」（例：Novartis, Moderna）：技術を最終製品である医薬品（mRNA、細胞治療）に直接応用します⁸。
- 主要な技術応用先：特許出願（過去10年で30.1%²）および市場規模の両面で、「治療・医療」分野が最大の応用先です。これに食品素材、工業用酵素、化学品が続きます。未来の応用先としては、DNAデータストレージ¹⁰が実用化フェーズに入りつつあります。
- 市場トレンドと課題：最大の課題は、技術開発（Design）から商業的スケールアップ（Scale-up）への移行、いわゆる「死の谷」の克服にあります。2023年のAmyrisの経営破綻¹¹は、技術的成功（スケールアップ）が、不適切な市場戦略（コモディティ市場での競争¹²、B2Cへの過度な多角化¹³）によって商業的失敗に至る典型例として、業界全体に大きな教訓を与えています。

本文

【第1章】技術分野の定義と市場概観

対象技術の範囲定義

合成生物学(Synthetic Biology)とは、生物学の工学的応用であり、生命システム(細胞、遺伝子回路、タンパク質など)をゼロから設計(Design)、構築(Build)、試験(Test)、学習(Learn)する一連の技術分野を指します。その目的は、自然界に存在する生物機能を工学的に再設計し、特定の目的に最適化すること、あるいは自然界には存在しない「非自然的な生物学的システム」を構築し、有用な機能を発現させることにあります¹⁴。

中核となる基盤技術は、主に以下の3つのプロセスで構成されます。

1. 読み取り(**Read**): 次世代シーケンシング(NGS)によるDNA(ゲノム)情報の高速・低コストな解読。
2. 設計(**Design**): AI(人工知能)や計算機科学を用い、目的の機能(例: 特定の化学物質を生産する代謝経路)を持つ遺伝子回路やタンパク質を設計するプロセス¹。
3. 書き込み(**Write**): 設計図に基づき、DNA(遺伝子)を物理的に合成(DNA合成)し、ゲノム編集技術(CRISPR-Cas9など)を用いて標的となる生物(例: 酵母、大腸菌)のゲノムに導入・改変すること。

現在の市場規模と成長予測

世界の合成生物学市場は、急速な拡大フェーズにあります。市場規模は2024年に185億米ドルと評価されています¹。

IMARC Groupの市場予測によれば、同市場は2025年から2033年にかけて年平均成長率(CAGR)15.3%という高い成長を維持し、2033年には667億米ドルに達すると予測されています¹。

地域別では、北米(米国・カナダ)が2024年時点で市場シェアの41.8%以上を占め、世界市場を支配しています。この優位性は、強固なバイオテクノロジー・インフラ、活発な研究開発投資、および政府による支援策(バイオセキュリティ、バイオ製造の推進など)に起因しています¹。

ビジネス上の重要性

合成生物学は、単一の産業技術ではなく、製薬、化学、素材、エネルギー、食品、さらにはIT(情報技術)といった広範な産業の基盤を根本から書き換える可能性を秘めた「プラットフォーム技術」として、そのビジネス上の重要性が急速に高まっています。

その重要性を支える要因は、以下の4点に集約されます。

1. 持続可能性(**Sustainability**)への移行:化石燃料に依存する従来の化学・材料産業に対し、生物(微生物)を利用して再生可能な資源から有用な物質(バイオベースの化学品、燃料、素材)を生産する「バイオマニュファクチャリング」への関心が世界的に高まっています¹。
2. 医療の飛躍的革新:COVID-19パンデミックで実証されたmRNAワクチンの迅速な開発¹⁶、難治性がんでのCAR-T細胞療法⁸、希少疾患の治療薬開発など、従来の医療では対応困難だった領域(アンメット・メディカル・ニーズ)に対する革新的なソリューションを提供しています¹。
3. 基盤技術のコスト低下と高速化:遺伝子合成、次世代シーケンシング(NGS)、ゲノム編集(CRISPR)といった中核技術のコストが劇的に低下し、イノベーションのサイクル(設計・構築・試験・学習)が高速化しています¹。
4. AIと生物学の融合:AI(人工知能)およびML(機械学習)が、生物学的システムの複雑な「設計プロセス」を自動化・高速化し、開発の効率と成功確率を飛躍的に向上させています¹。

一方で、この技術のバリューチェーンには地政学的な課題が存在します。米国は研究(論文数33.6%)やイノベーション(市場価値)で世界をリードしているものの³、合成生物学の商業化に不可欠な「バイオ製造(発酵)キャパシティ」においては、中国が世界の70%を支配しています³。

米国は、R&D(設計)から商業生産(1,000L~75,000L規模)へ移行する「パイロットスケール」および「デモンストレーションスケール」のインフラが深刻な「ボトルネック」となっており³、米国の技術的優位性が、中国の製造キャパシティへの依存によって商業的成功を阻害されるリスクが示唆されます。

【第2章】キープレイヤーの特定と戦略グループ分類

本レポートでは、合成生物学市場の複雑なエコシステムを理解するため、主要プレイヤーを以下の3つの分析基準に基づき、4つの「戦略グループ」に分類して分析します。

- 分析基準1:技術蓄積(特許出願動向):過去5年間の特許ポートフォリオが「治療(Therapeutics)」²に集中しているか、「ツール(DNA合成など)」や「プロセス(発酵)」に集中しているか。
- 分析基準2:事業規模(現在の市場シェアや生産能力):確立されたB2B原料(酵素、素材)の巨大な市場シェアを持つか⁶、DNA合成のような基盤ツール市場を支配しているか⁵。
- 分析基準3:戦略投資(IR発表、投資額、アライアンス):IR資料で示される戦略が、水平的な「プ

プラットフォーム」提供(例: Ginkgo⁴)か、垂直的な「特定製品」開発(例: Moderna¹⁸)か。

これら3基準に基づき、市場プレイヤーを以下の4グループに分類します。

グループ1:「プラットフォーム・ファウンドリ型」

- 定義: 自社で最終製品を製造・販売するのではなく、生物学的R&D(細胞プログラミング)のプロセス自体を「ファウンドリ(受託製造・開発)」サービスとして水平展開する企業群。
- 主要企業: **Ginkgo Bioworks**⁴
- 選定理由: Ginkgo Bioworksは「ファウンドリ」モデル¹⁴を明確に標榜し、自社の自動化・標準化されたR&Dインフラを、食品、農業、香料、医薬品²⁰といった多様な業界の顧客に「細胞プログラミング・サービス」として提供します。彼らのビジネスモデルは、サービス提供時の「ファウンドリ手数料」と、顧客の製品が成功した際の「ロイヤリティ(ダウンストリームバリュー)」⁴の二階建て構造を特徴としています。

グループ2:「基盤ツール・合成特化型」

- 定義: 合成生物学の「読み(NGS)」と「書き(DNA合成)」というエコシステムの中核をなす「ツール」や「消耗品」の製造・販売に特化する企業群。産業全体の「シャベル・アンド・つるはし」の役割を担います。
- 主要企業: **Twist Bioscience**¹⁹, **Genscript**¹⁹
- 選定理由: Twist Bioscienceは、革新的な「シリコンベースのDNA合成プラットフォーム」¹⁰を武器に、高品質な遺伝子(Genes)やオリゴプール(Oligo Pools)²²を、安価かつ大規模に供給します。彼らの収益は「SynBio(合成生物学)」部門と「NGS(次世代シーケンシング)」部門⁵という、明確なツール・消耗品供給事業から成り立っています。

グループ3:「垂直統合型(素材・食品)」

- 定義: 精密発酵などの合成生物学技術を「手段」として活用し、特定(主にB2B)の応用分野(食品素材、工業用酵素、香料、化粧品原料)において、R&Dから大規模製造、販売までを垂直統合する伝統的な大手化学・素材企業群。
- 主要企業: **Novonesis**(旧NovozymesおよびChr. Hansen)⁶, **dsm-firmenich**(旧DSMおよびFirmenich)⁷
- 選定理由: これらの企業は、合成生物学を「既存事業を強化・革新する手段」として活用してい

ます。2025年に観測された両社間の戦略的再編(dsm-firmenichが動物飼料酵素のアライアンス持分をNovonesisに15億ユーロで売却²³⁾)は、両社がそれぞれの得意分野(Novonesisは動物・食品・酵素⁶⁾、dsm-firmenichは人の健康・美容・香料⁷⁾)へと「垂直統合」と「選択と集中」を強めている明確な証拠です²⁵⁾。

グループ4:「治療・次世代医療型」

- 定義: 合成生物学技術(遺伝子編集、mRNA合成、細胞エンジニアリング)を、最も高付加価値な最終製品である「治療薬」や「診断」に応用する製薬・バイオテクノロジー企業群。
- 主要企業: **Novartis**¹⁹⁾, **Moderna**⁹⁾, **BioNTech**⁹⁾, **Pfizer**⁹⁾, **Gilead Sciences**¹⁹⁾
- 選定理由: このグループは、特許ランドスケープにおいて最大のシェア(治療分野が30.1%²⁾)を占める中核プレイヤーです。NovartisはCAR-T細胞療法「Kymriah」⁸⁾という「生きた細胞をプログラムする」合成生物学の典型例を、ModernaやBioNTechはmRNAという「生体内でタンパク質を作らせる設計図」¹⁵⁾を実用化しました。

【第3章】主要な技術応用先の分析

「現在」の応用先: 商用化

合成生物学の技術は、すでに多様な産業で商用化されています。

- 医療・治療(最大市場):
 - mRNAワクチン: Moderna、Pfizer/BioNTechによるCOVID-19ワクチン。合成RNAを用いて体内でウイルスの抗原タンパクを生成させ、免疫を誘導します¹⁶⁾。
 - CAR-T細胞療法: Novartis (Kymriah) やGilead Sciences (Yescarta) など。患者自身のT細胞を体外に取り出し、遺伝子工学的に改変(合成遺伝子回路の導入)し、がん細胞を特異的に攻撃する「生きた医薬品」として再投与します⁸⁾。
 - 抗体医薬: 特許出願において最大のサブトピック(2014-2023年の30.1%)であり²⁾、合成生物学技術(例: ファージディスプレイ、酵母ディスプレイ)が抗体医薬の発見と最適化に不可欠となっています。
- 素材・化学・食品(高マージンB2B):
 - 工業用酵素: Novonesis(旧Novozymes)が支配的なシェアを持つ分野。洗剤(洗浄力向上)、バイオ燃料(セルロース分解)、食品加工(品質改良)などに用いられる酵素が精密発酵によって大規模生産されています⁶⁾。

- フレーバー・香料: dsm-firmenich (旧Firmenich) など。希少な天然香料 (例: バニリン、サフラン) を、天候や収穫量に左右されずに微生物発酵で安定生産します⁷。
- 化粧品原料: Amyris (破綻前) が開発・スケールアップに成功したスクワランなど、高付加価値の機能性素材¹²。

「未来」の応用先: 開発段階

特許出願や進行中の臨床試験、R&D発表からは、3~5年後の次世代の応用先が明確に読み取れます。

- 医療・治療 (パイプライン):
 - 個別化がんワクチン: Moderna (mRNA-4157)¹⁸ や BioNTech。患者固有のがん変異 (ネオアンチゲン) を AI で特定し、その情報に基づいて「その患者専用の」mRNA ワクチンを合成・投与する治療法。
 - 希少疾患治療: Moderna がプロピオン酸血症 (PA, mRNA-3927) やメチルマロン酸血症 (MMA, mRNA-3705) など、従来治療法がなかった分野のパイプラインを多数保有しています¹⁸。これは、mRNA を使って欠損しているタンパク質を体内で「補充」させるアプローチです。
 - 次世代細胞治療: Novartis が開発中の「T-Charge」プラットフォーム⁸。製造プロセスを簡素化・高速化し、より強力 (幹細胞性を維持した) な T 細胞を生成する技術であり、CAR-T 療法の普及に向けた課題解決を目指しています⁸。
- IT (情報技術):
 - DNA データストレージ: Twist Bioscience が長年研究開発を進めてきた分野²⁷。2025 年 5 月、Twist はこの事業を「Atlas Data Storage」としてスピンアウトさせました¹⁰。DNA は、数千年単位での超長期・高密度なデータ保存 (コールドストレージ) が可能であり、公文書や研究データのアーカイブ媒体として、実用化フェーズに近づいています。

ポテンシャルと導入障壁

応用先ごとに、市場のポテンシャルと克服すべき障壁は大きく異なります。

- 医療・治療:
 - ポテンシャル: アンメット・メディカル・ニーズ (希少疾患、難治性がん) への対応が可能であり、製品単価が極めて高く、巨大な市場価値を生み出します。
 - 障壁: 臨床開発における安全性・有効性の証明、各国の厳格な薬事規制、高額な治療費 (特に CAR-T⁸)、および細胞治療における複雑な製造・品質管理 (CMC) プロセスが最大の障壁です。

- 素材・化学(高マージンB2B):
 - ポテンシャル: 高機能・高マージンなB2B市場。化粧品原料や香料など、コストよりも機能や「天然由来」というストーリーが重視される分野で高い収益性が期待できます。
 - 障壁: スケールアップの経済性(**Unit Economics**)。後述するAmyrisの事例¹²が示すように、技術的に製造可能(Technical Success)であっても、既存の化学合成品や天然抽出物に対してコスト競争力(Commercial Viability)を持たせることが最大の障壁です。
- バイオ燃料(コモディティ):
 - ポテンシャル: 理論上は巨大なエネルギー市場。特許出願も存在します²。
 - 障壁: 絶望的なコスト競争。Amyrisのファーネセン(バイオ燃料)プロジェクトは、技術的な課題¹²に加え、2010年代のシェールオイル革命による原油価格の下落¹²という市場要因によって商業的に破綻しました。これは、合成生物学が「コモディティ(汎用品)市場」で既存の安価な製品(石油)と価格競争をすることの困難さを象徴しています。

【第4章】主要戦略グループ別の詳細分析

本章では、【第2章】で定義した4つの戦略グループに属する主要企業について、最新のIR、プレスリリース、および市場情報を基に、その事業戦略を詳細に分析します。

4-1. グループ1「プラットフォーム・ファウンドリ型」の戦略

このグループは、Ginkgo Bioworks(NYSE: DNA)によって実質的に定義され、そのユニークなビジネスモデルによって特徴づけられます。

- 企業分析: **Ginkgo Bioworks**
 - 戦略(ファウンドリ・モデル): Ginkgoの戦略は、合成生物学界の「AWS(Amazon Web Services)」または「TSMC(台湾積体回路製造)」となることです。彼らは、自社で最終製品を製造・販売するリスクを取らず、自社の自動化・標準化された生物学実験インフラ(彼らが「ファウンドリ(Foundry)」と呼ぶもの¹⁴)を、多様な業界(食品、香料、農業、医薬品)²⁰の顧客に「R&Dサービス」として提供することに特化しています。
 - 二重の収益構造: Ginkgoのビジネスモデル⁴は、二階建て構造になっています。
 1. **Cell Engineering** (ファウンドリ事業): これはR&Dの受託サービスであり、顧客が新規プログラム(例: 特定の酵素の開発)を開始する際に支払う「アップフロント・アクセスフィー」および「R&Dサービス料」から構成されます。これがGinkgoの短期的なキャッシュフローを生み出す主要な収益源です。2025年のCell Engineering部門の収益見通しは、1億1,700万ドルから1億3,700万ドルと発表されています³⁰。
 2. **ダウンストリーム・バリュー(Downstream Value)**: Ginkgoのファウンドリで開発された技術(例: 特定の酵素、香料)が顧客によって製品化され、市場で売れた場合、

Ginkgoは(多くの場合、R&Dサービス料の割引と引き換えに)取得した「ロイヤリティ」または「マイルストーン」収入を得ます⁴。これは、成功すれば巨額の利益をもたらす長期的なアップサイド(成功報酬)です。

- 第二の柱(**Biosecurity**): Ginkgoは、COVID-19パンデミックを機に「Concentric by Ginkgo」⁴と呼ばれるバイオセキュリティ部門を設立しました。これは主に政府や公衆衛生機関、空港などに対し、生物学的脅威(パンデミック、病原体)の検知・監視インフラを提供する事業です⁴。2025年の収益見通しは最低4,000万ドルと見込まれており³⁰、Cell Engineering事業の変動性を補完し、安定したキャッシュフロー(ストック型収益)を生み出す重要な役割を担っています。
- 戦略的意義(IR分析): Ginkgoの最新のIR(2025年第3四半期決算²⁰)では、Bayerとの農業分野での戦略的提携延長²⁰や、BARDA(米国生物医学先端研究開発局)とのプロジェクト²⁰など、大手企業や政府機関との大型案件が強調されています。
- **Ginkgoのビジネスモデルの「本質」**: Ginkgoの「ファウンドリ」モデルは、単なるR&D受託サービス(CRO)とは異なります。これは、「**R&Dサービス(Cell Engineering)**を対価に、有望なバイオテクノロジー企業の将来価値(ロイヤリティ)を取得する」という、高度に専門化されたベンチャーキャピタル(**VC**)またはインキュベーターの機能を内包していると推定されます。
 - Ginkgoは、自社のファウンドリ(自動化、AI、蓄積された生物学的データ)が、ランダムなVC投資よりも高い確率で「成功する製品」を生み出せる(=優れた投資ポートフォリオを構築できる)という仮説に賭けています。
 - しかし、このロイヤリティ収入が本格的にキャッシュフローに貢献するには、10年以上の時間差(開発から市場投入まで)が生じます。一部の投資家からは、収益モデルの複雑さ(190以上のパートナー³¹)や、この「ダウンストリーム・バリュー」がいつ実現するのかという懐疑的な見方も存在します³¹。
 - この文脈において、「Biosecurity」部門⁴の存在意義は極めて重要です。この部門は、政府系クライアントから安定したキャッシュ(\$40M+)を生み出す「キャッシュ・エンジン」として機能し、本体の「Cell Engineering」というVC的な長期的賭けをファイナンスするための、財務的バランスの役割を果たしている可能性が示唆されます。

4-2. グループ2「基盤ツール・合成特化型」の戦略

このグループの代表格は、合成生物学の「書き込み(Write)」技術を支配するTwist Bioscience(NASDAQ: TWST)です。

● 企業分析: Twist Bioscience

- 戦略(ツール供給の支配): Twistの戦略は、合成生物学の「インク」(DNA)と「紙」(NGSパネル)を供給する、消耗品ビジネスの支配です。彼らの圧倒的な強みは、半導体製造技術を応用した「シリコンベースのDNA合成プラットフォーム」¹⁰にあります。これにより、従来の(96ウェルプレート)手法と比較して、高品質なDNAを低コストで、かつ圧倒的な大規模(ス

ケール)で製造できます。

- 二重の事業セグメント(IR分析): Twistの事業は、最新のIR(2025年度第3四半期決算³²および通期ガイダンス⁵)において、明確に2つのセグメントに分かれています。
 1. **SynBio (Synthetic Biology)**: 合成遺伝子(Clonal Genes)やオリゴプール(Oligo Pools)²²の販売。これは、GinkgoのようなR&D企業や、Modernaのような製薬会社にとって、研究開発や製造プロセスに不可欠な「原材料」です。2025年度の収益見通しは1億4,400万ドルから1億4,700万ドル(前年比17%~19%成長)と、堅調な成長が示されています⁵。
 2. **NGS (Next-Generation Sequencing)**: NGS検査用のターゲットエンリッチメントパネルやライブラリ調製キット²²の販売。これは、自社の「高精度なDNA合成技術(プローブ製造)」を、隣接する巨大市場(遺伝子診断、リキッドバイオプシー、がん研究)に応用するものです。2025年度の収益見通しは2億500万ドルから2億900万ドル(同21%~24%成長)と、SynBio部門を上回る規模と成長率を誇る、同社の収益の柱となっています⁵。
- 重要な戦略的決定: **DNAデータストレージ事業(Atlas)**のスピナウト
 - 2025年5月5日、Twistは長年にわたり研究開発を続けてきたDNAデータストレージ事業²⁷を、「Atlas Data Storage」という独立企業としてスピナウト(事業分離)させたと発表しました¹⁰。
 - この新会社(Atlas)は、ARCH Venture Partners、Deerfield Management、Bezos Expeditions(Amazon創業者ジェフ・ベゾスの投資会社)、Tao Capital Partners、そしてIn-Q-Tel(CIA関連の戦略的投資部門)といった、ディープテックと長期投資を専門とする著名な投資家から、1億5,500万ドルという巨額のシード資金を調達しました¹⁰。
- スピナウトの戦略的合理性: このスピナウト¹⁰は、一見すると有望な未来技術の切り離しに見えますが、実際には、2つの異なる「時間軸」と「資本の性質」を持つ事業を分離する、非常に合理的かつ高度な資本戦略であると分析されます。
 - Twist本体(TWST): 主力事業(SynBio, NGS)⁵は、四半期ごとに売上と利益成長を求められる「消耗品(Consumables)ビジネス」です。上場企業として、公開市場の投資家(四半期成長を重視)の期待に応える必要があります³³。
 - DNAデータストレージ事業: これは、市場がまだ(ほぼ)存在しない、10年単位での技術確立と市場創造が必要な「超長期的R&Dプロジェクト」です。
 - 課題: Twist本体がこの巨額のR&Dコスト(2025年第3四半期のGAAP純利益は\$20Mの黒字だが、調整後EBITDAは\$-8M³²)を抱え続けることは、中核事業の利益率を圧迫し、公開市場での評価(株価)の足を引っ張る要因となっていました。
 - 解決策(スピナウト): スピナウトにより、Twist本体はR&D負担を切り離すことでP/L(損益計算書)を改善させ、中核事業(SynBio/NGS)の高い収益性を明確にし、公開市場の投資家の期待に応えることができます³⁴。
 - 一方、新会社Atlasは、公開市場の四半期決算のプレッシャーから解放され、長期VC(Bezos, ARCH, IQT)¹⁰から得た潤沢な資金(\$155M)を使い、10年単位での技術商業化(アーカイブストレージ市場の創造)に集中できます。これは、異なるビジネスモデルが互いの足を引っ張ることを防ぎ、見事な「事業ポートフォリオの最適化」事例です。

4-3. グループ3「垂直統合型(素材・食品)」の戦略

このグループは、合成生物学(主に精密発酵)を手段として活用し、巨大なB2B原料市場で確固たる地位を築く伝統的企業群です。2025年、このグループを象徴する2社(Novonesisとdsm-firmenich)の間で、市場の成熟を示す大きな戦略的再編が実行されました。

- 企業分析: **Novonesis (NovozymesとChr. Hansenの合併)**
 - 戦略(バリューチェーンの完全統合): Novonesisは、工業用酵素の巨人Novozymesと、微生物・プロバイオティクスの巨人Chr. Hansenの合併により誕生した、文字通りの「バイオリューションの巨人」です。彼らの戦略「Grow」⁶は、コア事業(食品、健康、バイオエネルギー)での成長を加速することにあります。
 - 重要な戦略的決定: **Feed Enzyme Alliance (FEA) の完全買収**
 - 2025年2月11日、Novonesisはdsm-firmenichと25年以上にわたり運営してきた動物飼料酵素の合併事業(FEA)³⁵のパートナー持分(50%)を、15億ユーロで買収すると発表しました²³。
 - 旧体制³⁵では、NovonesisがR&D・製造(上流)、dsm-firmenichが応用テスト・販売・グローバル流通(下流)を分担する、補完的なアライアンスでした。
 - 戦略的意義: この買収の目的は、R&Dから製造、そして「販売・流通」³⁵というバリューチェーンの全てを自社の管理下に置くことです。NovonesisのCEOは「動物バイオリューションのバリューチェーン全体での存在感を拡大」すると述べており²³、これは**「動物栄養市場における完全な垂直統合」**への戦略的移行を意味します⁶。彼らはもはや単なる酵素メーカー(上流)ではなく、同市場における「ソリューションプロバイダー」として、顧客関係とマージンの全てを獲得する戦略に舵を切りました。
- 企業分析: **dsm-firmenich (DSMとFirmenichの合併)**
 - 戦略(高マージン分野への「選択と集中」): dsm-firmenichは、オランダの栄養科学企業DSMと、スイスの香料企業Firmenichという2つの巨人が合併して誕生しました。2025年2月に発行された2024年統合年次報告書(IAR)⁷が示す通り、彼らの戦略は「栄養(Nutrition)、健康(Health)、美容(Beauty)」⁷という、高付加価値な「**Human(人)**」向け市場への徹底的な集中です⁷。
 - 重要な戦略的決定: **FEA持分の売却**
 - 彼らにとって、NovonesisへのFEA持分売却(2025年6月2日完了²⁴)は、この新戦略を実行するための「選択と集中」に他なりません。
 - dsm-firmenichは、FEA売却に先立ち、事業全体として「動物栄養・健康(Animal Nutrition & Health)」部門を本体から分離する方針を決定していました²⁵。
 - 戦略的意義: これは「撤退」ではなく、「戦略的再配置」です。「動物(Animal)」向け飼料酵素という(相対的に)コモディティ化しつつある事業²⁵を15億ユーロ(純現金収入は約14億ユーロ²⁴)で売却(キャッシュ化)し、その経営資源(資本と人材)を、より高マージンで、かつ両社の合併シナジー(DSMの栄養科学とFirmenichの風味・香り)⁷が期

待できる「人(Human)」向けの「栄養・健康・美容」³⁶に集中投下する戦略です。

- **2025年の「大分岐(Great Divergence)」:**
 - 25年間も成功裏に継続してきた安定的なアライアンス(FEA)³⁵が、2025年に突如、15億ユーロという巨額の取引²³で解消されました。
 - この取引は、合成生物学(精密発酵)のB2B原料市場が「成熟期」に入り、**「大分岐(Great Divergence)」**が始まったことを明確に示しています。
 - もはや「何でも屋」では勝てず、Novonesisのように「特定分野での完全な垂直統合」を選び、規模の経済とバリューチェーン支配を追求するか、dsm-firmenichのように「高マージン分野への徹底的な集中」を選び、資本効率とブランド価値を追求するか、明確な戦略的選択を迫られる時代に突入したことを示唆しています。

4-4. グループ4「治療・次世代医療型」の戦略

このグループは、合成生物学の技術を直接的に「医療」という最終製品に結実させ、最も高い付加価値を生み出しているプレイヤー群です。

- **企業分析: Novartis**
 - 戦略(細胞治療のプラットフォーム化): Novartisは、合成生物学の粋を集めた「生きた医薬品」であるCAR-T細胞療法「Kymriah」⁸のパイオニアです。
 - **CAR-Tのプロセス(合成生物学の結晶)**: CAR-T療法は、(1)患者からT細胞を採取、(2)製造施設で遺伝子改変技術(合成生物学)を用いて、がん細胞を認識する「CAR(キメラ抗原受容体)」と呼ばれる合成タンパク質の設計図(遺伝子)をT細胞に導入、(3)CAR-T細胞を体外で増殖させ、(4)厳格な品質検査を経て、患者に再投与する、という高度に個別化された治療法です⁸。
 - 次世代戦略:「**T-Charge**」プラットフォーム:
 - Novartisは、現行CAR-Tの課題(製造に時間がかかる、コストが高い、T細胞が体外培養で疲弊する、患者への負担(強力な前処置化学療法))を克服するため、次世代の製造プラットフォーム「T-Charge」⁸の開発を進めています。
 - 技術革新: T-Chargeの核心は、体外(ex-vivo)での細胞培養プロセスを最小限に抑え、CAR-T細胞の増殖を主に患者の体内(in-vivo)で行う点にあります⁸。
 - 戦略的意義: 体外培養を短縮することで、T細胞の「幹細胞性(Stem-ness)」(自己再生能力と成熟能力)が維持され、より持続的で強力な抗腫瘍効果が期待できます⁹。さらに、製造時間が劇的に短縮され、プロセスが簡素化されることで、将来的には入院治療だけでなく外来治療や地域医療での提供も可能になる(治療環境の柔軟性)⁸と期待されています。これは、CAR-T療法を「特殊な治療」から「より広く普及可能な治療」へと変革する「製造プラットフォーム戦略」です。
- **企業分析: Moderna**
 - 戦略(**mRNAプラットフォームの水平展開**): Modernaの戦略は、COVID-19ワクチンでその有効性と迅速性¹⁶、プラットフォームとしてのポテンシャルを証明した「mRNAプラットフォー

ム」¹⁵を、他のあらゆる疾患に応用展開することです¹⁸。

- 「デジタルバイオロジー」の実践:mRNA技術は、「バイオロジーのプログラミング」と形容されます。なぜなら、(1)標的タンパク(例:ウイルスのスパイクタンパク、がん抗原)の「情報(デジタルコード)」さえ決まれば、(2)そのmRNA配列を合成し⁽¹⁷⁾、(3)LNP(脂質ナノ粒子)に搭載して製造する、という基本プロセスが共通化されているためです。
- パイプライン分析(IR情報)¹⁸:Modernaの最新のパイプライン(2025年5月更新)¹⁸は、この「プラットフォームの水平展開」戦略を明確に示しています。
 1. 感染症(ワクチン):COVID-19(主力)に加え、インフルエンザ(mRNA-1010)、RSV(mRNA-1345)、インフルエンザ+COVID混合(mRNA-1083)、CMV、EBV、HIVなど、既存ワクチンの改良や新規ワクチンの開発。
 2. 癌治療(個別化がんワクチン):Intismeran autogene(mRNA-4157)やCheckpoint adaptive immune modulation therapy(mRNA-4359)など。
 3. 希少疾患(タンパク補充療法):従来治療法がなかったプロピオン酸血症(PA, mRNA-3927)、メチルマロン酸血症(MMA, mRNA-3705)、グリコーゲン貯蔵病1a型(GSD1a, mRNA-3745)など。これらは、mRNAを体内に投与し、欠損しているタンパク質を「その場で(例:肝臓で)作らせる」という、合成生物学の思想に基づく治療法です¹⁸。
- **Modernaの真の課題**:COVID-19ワクチンの成功は「プラットフォームの証明」の第一歩に過ぎません。COVID-19ワクチンは、比較的単純な課題(筋肉に注射し、強力な免疫応答を引き出す)を解決しました。しかし、がんや希少疾患は、はるかに複雑な生物学的課題を伴います。
 - Modernaの今後の課題は、「mRNAを設計・合成する技術(SynBio)」そのものよりも、「そのmRNAを、いかにして目的の細胞(例:肝臓、がん細胞)に正確に送達(ドラッグデリバリー)するか」、そして**「生体内で(免疫に排除されず)望ましいタンパク発現を、望ましい期間、制御できるか(生物学)」**にあります。
 - 真のプラットフォーム企業になれるかどうかは、これら「より困難な応用先」でのパイプライン¹⁸の成否にかかっています。

4-5.【重要事例分析】Amyrisの破綻:技術的成功と商業的失敗の教訓

合成生物学市場を分析する上で、かつてのスター企業Amyris(NASDAQ: AMRS)が2023年8月9日に経営破綻(連邦破産法第11条を申請¹¹⁾)した事例の分析は、不可欠かつ極めて重要です。

- **Amyrisの技術的成功**:Amyrisは、合成生物学の「スケールアップ」において、紛れもなくパイオニアでした。彼らはファルネセン(Farnesene)という基幹分子³⁷を大規模(キロトン)スケールで精密発酵により生産する技術確立³⁸、ラボスケール(研究室)から商業生産(工場)への移行期間を3~4年から1年未満に短縮するなど、世界トップクラスの技術力を誇っていました³⁹。
- **破綻の要因(二重の戦略的失敗)**:Amyrisの破綻は、技術の失敗ではなく、明確な「ビジネスモデルの失敗」です。
 1. 失敗1:コモディティ市場での競争(バイオ燃料):

- Amyrisは当初、このファーネセンを「バイオ燃料」市場に投入しようとした¹²。
 - しかし、技術的なスケールアップの問題(2013年、ブラジル工場で酵母が大量死し、生産量が計画(4,000-5,000万L)を大幅に下回る400万Lに留まる¹²)に加え、2010年代の「シェールオイル革命」¹²により原油価格が下落。
 - 結果として、生産コストの高すぎる⁽¹²⁾バイオ燃料は、安価な化石燃料(コモディティ)との価格競争に全く歯が立たず、プロジェクトは破綻しました¹²。
2. 失敗2: B2C(消費者ブランド)への過剰な多角化:
- バイオ燃料の失敗を受け、Amyrisはファーネセン誘導体(スクワランなど)を、より高マージンな化粧品、健康食品¹²へと転換しました。このピボット(B2B原料事業)自体は正しく、合理的でした。
 - しかし、経営陣はB2B原料供給に留まらず、自ら「消費者ブランド(D2C)」を立ち上げ、販売する「成長戦略」¹³に傾倒しました。
 - 2021年以降、Biossance、Pipette、JSNなど、消費者ブランドを急速に乱立させ¹³、そのブランド買収とマーケティング(販売管理費、SG&A)に巨額の資金(例: 消費者ブランドに約4.9億ドルを投資¹²、2022年1~9月だけでSG&A費用が3.58億ドル¹³)を投じました。
 - この「成長のための成長」戦略¹³は、本業のB2B原料事業が生み出す利益を遥かに超える猛烈なキャッシュバーン(2022年1~9月の営業キャッシュフローがマイナス4.33億ドル¹³)を生み出し、財務諸表を急速に悪化させ、最終的に債務不履行と経営破綻¹¹に至りました。
- **Amyrisの破綻が業界に与える教訓:**
 - Amyrisの破綻は、合成生物学の「技術的リスク(スケールアップ)」は(困難だが)克服可能であることを証明すると同時に、「ビジネスモデル」と「スケールアップの経済性(Unit Economics)」こそが最大の課題であることを示しています。
 - 合成生物学企業は、「モノを作る(発酵)」ことのプロですが、「消費者ブランドを売る(マーケティング)」ことのプロではありません。Ginkgo(プラットフォーム)⁴、Twist(ツール)⁵、Novonosis(B2B原料)⁶といった本レポートで分析した主要企業が、いずれもB2C(消費者)ビジネスと慎重に距離を置いているのは、この「Amyrisの教訓」を深く理解しているからに他なりません。
 - なお、破綻後のAmyrisは、主要な消費者ブランドを売却し、ブラジルのBarra Bonita工場(中核の製造拠点)⁴⁰を中心に、B2Bの「原料製造事業」として再建を進めています⁴⁰。これは皮肉にも、同社が破綻前に離れようとした「本来あるべき姿」への回帰であると分析されます。

【第5章】特許戦略と事業戦略の整合性

特許出願(技術的野心)とIR(事業戦略)の比較から、各社の「本気度」と「隠れた戦略」を推定します。

- 全体傾向：特許ランドスケープは「治療・医療」分野が圧倒的(30.1%)²です。これは、グループ4(Novartis, Moderna)の事業戦略と完全に「一致」しています。
- グループ1: **Ginkgo Bioworks**(戦略的「不」競合)
 - 特許戦略：Ginkgoの特許は、特定の「製品」ではなく、「ファウンドリ」プロセス、AI設計、基礎的な生物学的ツールキットなど、広範かつ水平的なものに集中していると推定されます。
 - 事業戦略：水平的なR&Dサービス⁴。
 - 評価：一致。GinkgoのIP戦略は、顧客(パートナー)が製品(例：Bayerの農薬)を開発するための「手段」を守るものであり、Ginkgo自身が製品IPを持つこと(垂直統合)を目指していません。これは、顧客と競合しない(We don't compete with our customers)というプラットフォーム戦略の根幹であり、事業戦略とIP戦略が整合しています。
- グループ2: **Twist Bioscience**(極めて高い整合性)
 - 特許戦略：中核であるDNA合成の「製造技術(シリコンプラットフォーム)」と、その応用先である「NGSツール」および「DNAデータストレージ」に集中しています²⁷。
 - 事業戦略：SynBio/NGSツールの販売⁵と、DNAデータストレージ事業のスピンアウト¹⁰。
 - 評価：完璧に一致。Twistは、自社の「中核IP(DNA合成)」を基盤に、「現在」の収益事業(SynBio/NGS)と、「未来」のR&D事業(Atlas/データストレージ)を明確に切り分けました。そして後者をスピンアウト¹⁰させることで、IPの価値を最大化する(中核事業のP/L改善 + Atlasへの\$155Mの外部資金導入)という、お手本のようなIP・資本戦略を実行しています。
- グループ3: **Novonesis / dsm-firmenich**(成熟した整合性)
 - 特許戦略：酵素、微生物、発酵プロセス、およびその応用(食品、飼料、香料)に関する長年の膨大な蓄積。
 - 事業戦略：2025年のFEA売買²³に見られる「選択と集中」。
 - 評価：一致。両社は、自社の強み(IPポートフォリオ)が最大に生きる市場(Novonesisは動物・食品、dsmは人・美容)へとリソースを再配分しています。これは、IPポートフォリオの価値を最大化する成熟企業としての合理的な戦略的再編です。
- グループ4: **Novartis / Moderna**(戦略とIPの同一性)
 - 特許戦略：CAR-Tの構造と製造プロセス⁸、mRNAの配列と送達技術(LNP)¹⁸。
 - 事業戦略：これらのIPを「パイプライン」として開発し、医薬品として承認・販売する¹⁸。
 - 評価：一致(ほぼ同一)。このグループにとって、特許ポートフォリオは事業戦略そのものです。IPの切れ目が事業の終わりを意味するため、整合性は最も高くなります。
- ギャップ分析: **Amyris**(致命的なギャップ)
 - 特許戦略：強力な「B2B製造・発酵技術」(ファーネセン、スケールアップ)³⁷。
 - 事業戦略：「B2C消費者ブランド」の乱立と、そこへの過剰なマーケティング投資¹³。
 - 評価：致命的なギャップ。Amyrisの経営陣は、自社の最も価値ある資産(製造IP)をB2Bで堅実に収益化する戦略(¹²のピボット)を放棄し、IPとの関連性が薄い(=参入障壁が低い)「マーケティング主導」のB2C事業に経営資源(キャッシュ)を全投入しました¹³。この特許戦略(技術的強み)と事業戦略(資本配分)の致命的なミスマッチこそが、破綻の根本原因であると断定できます。

【第6章】主要戦略グループおよび企業の競合比較

戦略グループ間のポジショニング比較

- グループ1(**Ginkgo**): 水平的なR&Dサービス(高ミックス・低ボリューム)。ビジネスモデル: サービス料+ロイヤリティ。リスク: ロイヤリティ実現の長期性、顧客の囲い込み。
- グループ2(**Twist**): 水平的なツール供給(低ミックス・高ボリューム)。ビジネスモデル: 消耗品(B2B製品販売)。リスク: 価格競争、技術のコモディティ化。
- グループ3(**Novonesis/dsm**): 垂直的な特定市場(低ミックス・高ボリューム)。ビジネスモデル: B2B原料販売。リスク: スケールアップの経済性、特定市場(例: 動物飼料)の市況。
- グループ4(**Novartis/Moderna**): 垂直的な超高付加価値市場(高ミックス・低ボリューム)。ビジネスモデル: 医薬品(B2B2C)。リスク: 臨床開発の失敗、薬価、規制。

主要企業の戦略的ポジショニング比較表(マトリクス)

比較軸	Ginkgo Bioworks	Twist Bioscience	Novonesis	Novartis
戦略グループ	グループ1: プラットフォーム・ファウンドリ型	グループ2: 基盤ツール・合成特化型	グループ3: 垂直統合型(素材・食品)	グループ4: 治療・次世代医療型
中核技術	ファウンドリ(自動化)、AI設計、データ蓄積	DNA合成(シリコンベース)、NGSパネル	精密発酵、酵素工学、微生物工学	細胞エンジニアリング(CAR-T)、遺伝子治療
ビジネスモデル	水平的 R&D-as-a-Service	水平的 消耗品(ツール)販売	垂直的 B2B原料・ソリューション販売	垂直的 医薬品開発・販売
主要収益源	1. ファウンドリ手数料 ³⁰	1. SynBioツール ⁵	食品・飲料、バイオエネルギー、動物栄養	医薬品(Kymriah ⁸ など)

	2. 将来のロイヤリティ ⁴	2. NGSツール ⁵	養、健康 ⁶	
主要市場	全産業（医薬、化学、農業、食品） ²⁰	R&D機関、製薬、診断企業	食品、飼料、洗剤、エネルギー産業	医療（がん、希少疾患）
スケールアップ	顧客（パートナー）の課題	ツール供給側（自社は製造）	中核的な強み（大規模発酵）	中核的な課題（細胞製造の品質管理） ⁸
戦略的リスク	ロイヤリティ実現の長期性 ³¹ 顧客の自前主義（内製化）	ツールのコモディティ化（価格競争）	原料市況、巨大な製造インフラの維持	臨床試験の失敗、規制、薬価圧力
特許と戦略	一致（水平的IP）	極めて一致（ツールIP、R&Dスピニアウト）	一致（垂直的IP、選択と集中）	同一（IP＝製品）
「Amyris」の教訓	（適用済） B2Cは行わず、水平プラットフォームに徹する	（適用済） B2Cは行わず、B2Bツールに徹する	（適用済） B2Cは行わず、B2B原料に徹する	（適用外） （高マージンの医療市場）

【第7章】今後の市場リスクとビジネス機会

技術的ボトルネックとリスク

- スケールアップの「死の谷」: Amyrisの事例¹²が示すように、技術的な最大のボトルネックは、ラボ(1L)からパイロット(1,000L)、商業(100,000L+)へのスケールアップです。発酵槽のスケールが大きくなると、微生物の挙動、代謝、酸素供給、熱交換などが根本的に変化し、ラボでの成

功がそのまま商業生産の成功に結びつかない「スケールアップの壁」が存在します。

- 米国の製造インフラの脆弱性: 米国はR&D(設計)で世界をリード³していますが、設計された微生物を試験・最適化するためのパイロットスケールやデモスケールの発酵施設が「ボトルネック」となっています³。
- 中国の製造キャパシティ支配: 対照的に、中国は世界の発酵キャパシティの70%を支配しています³。これは、米国のスタートアップが「設計」した製品を、最終的に「製造」するのは中国の工場、という依存構造を生み出す地政学的リスクとなります。

市場リスク

- コモディティ市場との競争(Amyrisリスク): バイオ燃料¹²のように、既存の安価なコモディティ(石油)と価格で競争する市場は、合成生物学にとって「鬼門」です。技術的優位性(例: 再生可能)が、圧倒的な価格差(経済性)の前では無力化されるためです。
- B2C事業の罠(Amyrisリスク): 合成生物学企業が、本業(B2B製造)と全く異なるスキルセット(マーケティング、ブランド構築)が必要なB2C消費者ブランド事業¹³に手を出すことは、致命的なキャッシュバーンを引き起こす高いリスクを伴います。
- ハイプ・サイクル: 市場の期待値(ハイプ)が先行し(GinkgoのSPAC上場時の高額な評価額など)、期待された収益(例: Ginkgoのロイヤリティ³¹)の実現が遅れた場合、市場からの信頼を失い、株価が低迷するリスクがあります。

競合が手薄な「空白地帯」(ビジネス機会)

- スケールアップ専門のCDMO/CMO: 米国の製造インフラのボトルネック³とAmyrisの失敗(自前でのスケールアップリスク¹¹)は、逆に言えば、「スケールアップ」自体をサービスとして提供する(=リスクを引き受ける)専門企業(CDMO/CMO)の需要が極めて高いことを示しています。特に、R&D(Ginkgo)と大規模製造(中国)の間を埋める「パイロットスケール専門」の受託企業は、大きなビジネス機会です。
- AIによる「製造プロセス最適化」: 現在のAI応用が「生物学的設計(Design)」¹に集中しているのに対し、今後は「製造プロセス(Scale-up)」の最適化(例: 発酵槽内の環境制御、酵母の挙動予測、汚染検知)にAIを応用する分野が重要になります³⁹。
- DNAデータストレージ(Atlas): Twistのスピンアウト¹⁰により、巨大なコールドストレージ市場(公文書、研究データ、メディアアーカイブ)という、全く新しい「IT x SynBio」市場が本格的に立ち上がる可能性があります。In-Q-Tel(CIA関連VC)が出資している¹⁰ことは、国家レベルでの安全保障・公的記録の保存ニーズが存在することを示唆しています。

【総括】分析結果の客観的サマリー

- 本レポートは、合成生物学市場の主要プレイヤーを、特許(技術蓄積)とIR(事業戦略)の分析に基づき、4つの戦略グループ(「プラットフォーム・ファウンドリ型」「基盤ツール・合成特化型」「垂直統合型」「治療・次世代医療型」)に分類した。
- 特許² および市場¹ の分析から、市場の最大の牽引役は「治療・次世代医療型」(グループ4)であり、Moderna¹⁸ やNovartis⁸ がその中核を担っていることが確認された。
- 「基盤ツール・合成特化型」(グループ2)のTwist Bioscienceは、中核の消耗品事業⁵ と未来のR&D事業(DNAデータストレージ)を分離(スピンアウト)¹⁰ する、高度な資本戦略を実行していることが明らかになった。
- 「垂直統合型」(グループ3)では、2025年のFeed Enzyme Allianceの売買²³ に象徴されるように、Novonosis(特定分野での垂直統合の強化⁶)とdsm-firmenich(高マージン分野への選択と集中⁷)という、市場成熟に伴う「大分岐」が観測された。
- 2023年のAmyrisの経営破綻¹¹ の分析から、合成生物学の最大の課題は技術的失敗ではなく、①コモディティ市場でのコスト競争¹²、②B2C事業への不適切な多角化¹³ という「ビジネスモデルの失敗」にあることが明らかになった。
- 今後の市場リスクは、R&D(米国)と製造(中国)の地政学的な分離³ と、商業化への最大の壁である「スケールアップのボトルネック」³ にある。ビジネス機会は、この「スケールアップの谷」を埋めるCDMOやAIソリューションの領域に存在すると推定される。

引用文献

1. 合成生物学の市場規模、シェア、動向 | 成長レポート【2033年 - IMARC Group, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.imarcgroup.com/report/ja/synthetic-biology-market>
2. Potter Clarkson launches landmark patent landscape analysis of the SynBio revolution, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.potterclarkson.com/insights/potter-clarkson-launches-landmark-patent-landscape-analysis-of-the-synbio-revolution/>
3. Synthetic Biology - SCSP, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.scsp.ai/reports/2025-gaps-analysis/gaps-analysis/synthetic-biology/>
4. Ginkgo Bioworks Holdings, Inc. - AnnualReports.com, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.annualreports.com/Company/ginkgo-bioworks-holdings-inc>
5. Twist Bioscience Reports Fiscal Second Quarter 2025 Financial Results — Record revenue of \$92.8M in 2QFY25, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://investors.twistbioscience.com/static-files/02d37b2d-48eb-410f-963a-1ae9ed0c256>
6. Novonosis | The time for biosolutions is now, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.novonosis.com/en>
7. firenich、2024年統合年次報告書を発行 - dsm, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://our-company.dsm-firmenich.com/ja-jp/our-company/news/press-releases/2025/dsm-firmenich-publishes-2024-integrated-annual-report.html>

8. CAR-T細胞療法 | Novartis Japan, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.novartis.com/jp-ja/research-development/car-t>
9. 2024 mRNA Patent Trends: Key Insights & Industry Leaders - KnowMade, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.knowmade.com/technology-news/life-sciences-news/healthcare-technology-news/patenting-activity-in-2024-an-insightful-analysis/>
10. Twist Bioscience Spins Out DNA Data Storage as Independent Company, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://investors.twistbioscience.com/news-releases/news-release-details/twist-bioscience-spins-out-dna-data-storage-independent-company/>
11. Amyris, Inc., et al. - Stretto, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://cases.stretto.com/amyris/>
12. (PDF) Enterprise Financial Risks: Take Amyris Inc. as an Example, 11月 11, 2025にアクセス、
https://www.researchgate.net/publication/377731405_Enterprise_Financial_Risks_Take_Amyris_Inc_as_an_Example
13. Amyris Needs to Be Held Accountable | Solt DB, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.living.tech/articles/amyris-needs-to-be-held-accountable>
14. FT000 - About Foundry Theory - YouTube, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.youtube.com/watch?v=fbFyVGUe1kw>
15. 11月 11, 2025にアクセス、
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10510722/#:~:text=This%20integration%20of%20synthetic%20biology,mRNA%20for%20enhanced%20therapeutic%20outcomes.>
16. Next-Generation Vaccine Platforms: Integrating Synthetic Biology, Nanotechnology, and Systems Immunology for Improved Immunogenicity - PubMed Central, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12197771/>
17. Cell-Free DNA: Accelerating Next-Gen mRNA Therapeutics | The Scientist, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.the-scientist.com/cell-free-dna-accelerating-next-gen-mrna-therapeutics-73008>
18. SEC Filings - Moderna, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://investors.modernatx.com/sec-filings>
19. Top Ten Suppliers of Synthetic Biology Technology 2024 - ResearchAndMarkets.com, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://crisprmedicineneeds.com/press-release-service/card/top-ten-suppliers-of-synthetic-biology-technology-2024-researchandmarketscom/>
20. Investor Relations - Ginkgo Bioworks, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://investors.ginkgobioworks.com/overview/default.aspx>
21. Ginkgo Bioworks Launches New Organism Foundry, Supported by \$275 Million in Series D Funding - PR Newswire, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.prnewswire.com/news-releases/ginkgo-bioworks-launches-new-organism-foundry-supported-by-275-million-in-series-d-funding-300570971.html>
22. Twist Bioscience | Twist Bioscience to Report Fiscal 2025 Fourth ..., 11月 11, 2025に

- アクセス、
<https://investors.twistbioscience.com/news-releases/news-release-details/twist-bioscience-report-fiscal-2025-fourth-quarter-and-full-year>
23. Novonesis to acquire dsm-firmenich's share of the Feed Enzyme Alliance, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.novonesis.com/en/news/novonesis-acquire-dsm-firmenichs-share-feed-enzyme-alliance>
24. dsm-firmenich completes sale of its stake in Feed Enzymes Alliance to Novonesis for €1.5 billion, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://our-company.dsm-firmenich.com/en/our-company/news/press-releases/2025/dsm-firmenich-completes-sale-of-its-stake-in-feed-enzymes-alliance-to-novonesis-for-1-5-billion.html>
25. dsm-firmenich announces €1.5B divestment of Feed Enzymes Alliance stake to Novonesis, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.foodingredientsfirst.com/news/dsm-firmenich-novonesis-sale-feed-enzymes-alliance-animal-nutrition.html>
26. The Application of mRNA Technology for Vaccine Production—Current State of Knowledge, 11月 11, 2025にアクセス、<https://www.mdpi.com/2076-393X/13/4/389>
27. DNA-Based Digital Storage - Twist Bioscience, 11月 11, 2025にアクセス、
https://www.twistbioscience.com/themes/custom/twist_theme/assets/DNA_digital_data_storage_whitepaper_2017.pdf
28. Digital DNA Data Storage - Twist Bioscience, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.twistbioscience.com/products/storage>
29. DNA Data Storage – Setting the Data Density Record with DNA Fountain | Twist Bioscience, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.twistbioscience.com/blog/perspectives/dna-data-storage-setting-data-density-record-dna-fountain>
30. Ginkgo Bioworks Reports Third Quarter 2025 Financial Results - PR Newswire, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.prnewswire.com/news-releases/ginkgo-bioworks-reports-third-quarter-2025-financial-results-302607675.html>
31. An Overview of Ginkgo's Financials & Business Model (Ginkgo Bioworks Investor Day 2021) : r/ginkgobioworks - Reddit, 11月 11, 2025にアクセス、
https://www.reddit.com/r/ginkgobioworks/comments/1cclfq9/an_overview_of_ginkgos_financials_business_model/
32. Twist Bioscience Reports Fiscal Third Quarter 2025 Financial Results — Record revenue of \$96.1 million in 3QFY25, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://investors.twistbioscience.com/static-files/e2b5efd1-b619-4458-b9ed-b479c167a9bf>
33. Twist Bioscience | Investor Relations, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://investors.twistbioscience.com/>
34. Annual Reports, Proxies and Shareholder Letters - Twist Bioscience, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://investors.twistbioscience.com/financial-information/annual-reports>
35. Deal to acquire dsm-firmenich's share of the Feed Enzyme Alliance is completed,

- supporting Novonesis' growth strategy, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.novonesis.com/en/news/deal-acquire-dsm-firmenichs-share-feed-enzyme-alliance-completed-supporting-novonesis-growth>
36. プレスリリース | dsm-firmenich 健康、栄養、ケア, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.dsm-firmenich.com/ja-jp/businesses/health-nutrition-care/news/press-releases.html>
37. Clean manufacturing powered by biology: how Amyris has deployed technology and aims to do it better - PubMed Central, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7695652/>
38. DELIVERING ON THE PROMISE OF SYNTHETIC BIOLOGY, 11月 11, 2025にアクセス、
https://filecache.investorroom.com/mr5ir_amyris/417/download/AMRS%20Investor%20Mini-Series%20Part%203%20-%20Ingredients%20final.pdf
39. Product vs. platform in synthetic biology - Compound Writing, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.compound.vc/writing/product-vs-platform-in-synthetic-biology>
40. Amyris rebuilds Post-Bankruptcy - Green Chemicals Blog, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://greenchemicalsblog.com/amyris-rebuilds-post-bankruptcy/>