

NFT カーボンフットプリント： すべてのブロックチェーンが 等しいわけではない

2022年4月

著者：Alan Majer (*Good Robot*)

序文：Daniela Barbosa (Executive Director, *Hyperledger Foundation*)

翻訳：池川 航史・伊藤 哲・永井 崇之(日立製作所)
浅沼 岳樹(富士通)

編集協力：谷口 暢夫

協力：



目次

序文	3
要約	4
NFTを取り巻く環境問題について	5
NFTのユースケース例	7
すべてのブロックチェーンが同じではない	7
ブロックチェーンの気候変動への影響を軽減する方法	10
マイナーの役割	10
慎重な政策の必要性.....	12
複雑性を管理する方法	12
NFTトランスフォーメーションをリード	13
PoWブロックチェーンは避ける	13
プロセスを端から端まで見る	13
軽量なブロックチェーンを選択.....	14
革新的な代替案の模索.....	14
検証可能なオフセットの利用	16
具体的な公約.....	17
結論:持続可能なNFTへの道筋	17
謝辞	19
著者について.....	19
免責事項 (Disclaimer)	20
文献 (Endnotes)	21

序文

私はHyperledger Foundationのエグゼクティブディレクターとして、2022年はエンタープライズブロックチェーンエコシステムの成長と加速の年であるだけでなく、ブロックチェーン、特にNFT (non-fungible tokens) が気候変動とより強固に結びつき始める年であると信じています。NFTは、2020年時点ではGartnerの「[Hype Cycle for Emerging Technologies](#)」に登録さえされていませんでしたが、2021年には「[流行期](#)」に到達しました。エネルギーや気候変動分野でのNFT活用に関してはおそらく次の段階である「[幻滅期](#)」に入りつつありますが、NFTはデジタルアートや暗号資産の分野のみならず、気候ソリューションに特化したものを含むより広範なユースケースへと急速に拡大し続けています。

ハイブサイクルの「回復期」や「安定期」に入るためには、ブロックチェーンおよび関係するコミュニティは、気候変動の影響とより強固に結びつかなければなりません。それはコンセンサスメカニズムがエネルギー消費と、関連する気候変動にもたらす影響を複合的に測定することで実現されます。この報告書は、以下の論点でキーポイントを列挙します。まず、ブロックチェーンコミュニティの重要な取り組みを認識することから始まります。加えて、主要関係者によって長い間予想されていたよりエネルギー効率の高いメカニズムへの移行について紹介します。さらに、ブロックチェーンコミュニティが、気候問題解決のため国際的

なエコシステムの基礎を築き、重要な地球の健全性に貢献する上で中心的な役割を担っていることを紹介します。

2016年以来、Hyperledgerエコシステムは実験とイノベーションの場となっています。私たちは、Ethereumエコシステム内でソリューションやユースケースを定義するなど、複数のコンセンサスメカニズムに関して、世界中の主要な利害関係者と緊密に協力してきました。私たちは、Ethereumにおいて長い間計画され非常に期待されている、Ethereumのエネルギー消費を99.95%削減することを約束するProof of Stake (PoS) への移行の複雑さを理解しています¹。また、Ethereumが何千ものレイヤー2ソリューションをサポートしており、トランザクションのエネルギー消費を削減することも評価しています。

さらに我々は、Ethereumおよびその他のProof of Work (PoW) ベースのプラットフォームが、データアクセス性、セキュリティ、透明性、説明責任およびトレーサビリティといった基礎となる属性に支えられ、再生可能エネルギーや進化した炭素市場に至るまで、主要な気候技術ソリューションを支えていることを認識しています。ブロックチェーンは、パリ協定の目標達成を支援するために拡大している統合技術ソリューションのグローバルネットワーク化を可能にしています。NFTは、気候変動対策のための金融モデルを変革するだけでなく、セクターや社会階層を越えた新しい

主体を気候変動対策に関与させるという新たな役割を果たしています。

NFTは人類史におけるユニークな発明の1つです。その役割は、収集品に関する投機というトレンドを超えて、プラスの影響を与えるユースケースに急速に拡大しています。広範な物理および仮想資産を認証することができ、個々の所有者のプライバシーを保護しつつ、トークン化された資産の所有権および基礎となる属性を透明化することができるのです。実際、IBMとIPweは、NFTを使用して知的財産 (IP: Intellectual Property) を表現することで協力しており、プロセス時間とコストの両面において、透明性の向上、データアクセス性の向上、効率性の向上を実現しています²。これらの利点が相まって、特許の販売、取引、収益化が容易になります。アーティストやミュージシャンは印税をNFTに埋め込むことができ、著名人は慈善団体への直接寄付を実現するNFTプラットフォームを活用することができます。あるいは、保護団体は資金調達とその影響に関する透明性を明らかにすることで絶滅危惧種の動物を代弁することができます。ブランドメーカーは実物と仮想の商品を認証するためにNFTを活用することができ、サプライヤーはサプライチェーンのトレーサビリティを提供することができます。

各種NFTは、協力者、消費者、寄付者に透明性と説明責任をもたらすとともに、関連する取引をより単純で費用対効果の高いものに

することができます。NFTを取り巻くイノベーションモデルの拡大はまた、エネルギーと気候の関係を開示して取引に組み込む道を開いています。そのため、NFTは新しいビジネスモデルの中心であり、社会的・地理的障壁を越え、多様な関係者を新しい経験やインパクトのある革新的なアプローチに関与させる手段を提供する新しい経済の中心であります。

本報告書は、NFTに対する気候関連の主要な障壁を提示し、NFTが可能にする刺激的なイノベーションを受け入れ、構築するための具体的な戦略を提案します。これらの戦略を採用することは、気候問題解決への責任ある潜在的に有益なアプローチを通じて、グローバルな協力とパートナーシップの新たな機会を生み出す可能性があります。私たちは、組織が誇大広告の先にある本当に重要なことを考え、気候に優しい方法で革新的なイニシアチブをとるのに役立つことを願っています。

Daniela Barbosa

Executive Director

Hyperledger Foundation

要約

NFT は、デジタルアート、デジタル収集物、メタバースゲームなど、爆発的な人気を誇る世界を支える資産の一種です。同時に、それは懐疑的な見方を受け、市場の誇大宣伝に汚染され、エネルギー集約的な PoW コンセンサス メカニズムと結びついています。NFT 推進者にとって、これは始まりにすぎません。NFT は、多くの異なる産業を横断するイノベーションの機会を提供します。しかし、すべての NFT が等しいわけではありません。Linux Foundation Research は、Hyperledger Foundation および Palm NFT Studio と協力して、Hyperledger Besu を含む NFT の環境への影響を調査するための新しい研究プロジェクトを実施しました。NFT のカーボン フットプリントは、基盤となる技術スタックによってどのように、またなぜ変化するのかを調査しました。この調査では、定性的手法を使用して、炭素市場の専門家、ブロックチェーン イノベーター、オープンソース コミュニティのリーダーからの洞察を収集します。イノベーターが、デザインによって持続可能性を選択できるプロセスについて述べています。最後に、この研究は、エネルギー使用とその影響レベルを計算し比較したレビュー済み論文を利用しています。

NFT を取り巻く環境問題について

NFT は人気急上昇している新しいデジタル資産クラスです。2021 年には、デジタル収集物やその他の形態の NFT の取引額は 442 億ドルに達しました³。ジェネレーティブ メディア NFT (独自のアルゴリズムを使用したものが多い) は非常に人気があることが証明されており、CryptoPunks や Bored Ape Yacht Club などのコレクションの価値は急上昇しています (人工知能によって生成されたメディアの例については、図 1 を参照してください)。しかし、急速なイノベーションの兆候と見る人もいれば、投機的バブルと見る人もいます (囲み記事「NFT の反発」を参照)。

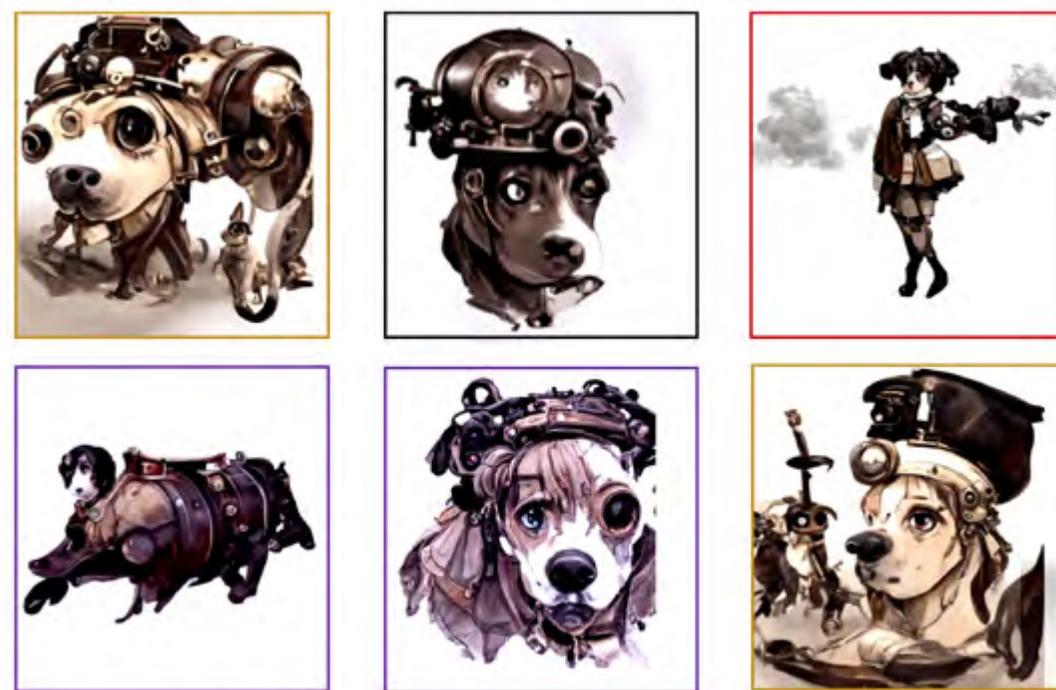
本報告書は、NFT 人気の反動や投機の潜在的な危険性については触れていま

せん。その代わりに、本報告書は、NFT と気候変動との関連性という、非常に深刻で現実的な課題を検討しています。我々は、特定の種類のブロックチェーンによる問題となるエネルギー利用と、これらの書を軽減または排除することができるいくつかの新たなブロックチェーン技術に注目しています。これらの課題に気づくことは、情報に基づいた選択を行うための第一歩になります。そして初めて、我々は、気候変動を低減する方向に導きつつ、NFT の全ての便益を活用することができます。誰もが既存の代替案を認識し、環境に配慮した行動へとシフトしなければなりません。

図1

人工知能によって生成された *Crypto Steampunk Pups*

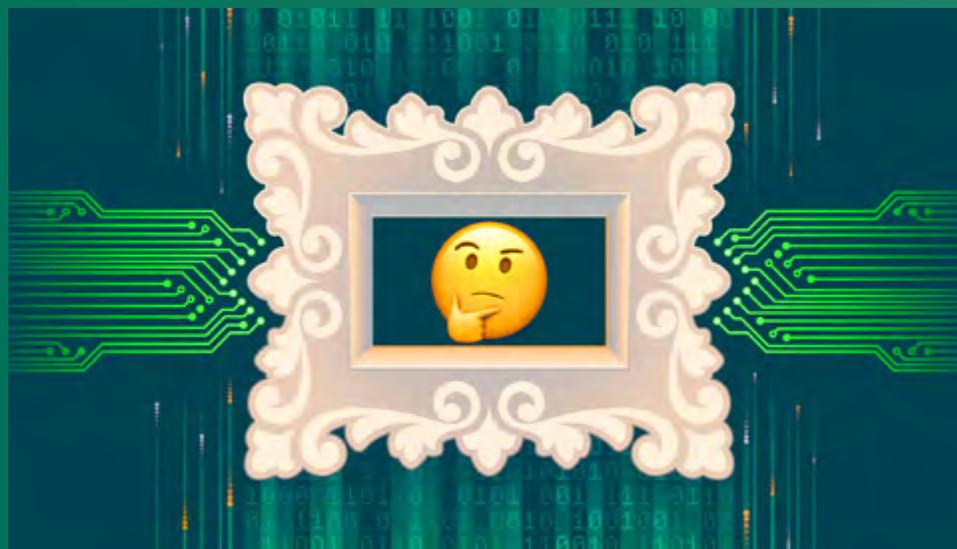
© 2022 Alan Majer. Reprinted courtesy of
copyright holder. All rights reserved.



NFTへの反発

NFTの急速な成長を、多くの人々は「投機的バブル」とあおっています⁴。期待は高まっています。企業がイノベーションを起こす必要性和、機会喪失の恐れ(FOMO: Fear of Missing Out)は、有望なイニシアチブと疑わしいイニシアチブの両方への投資を促進します。これは、ある分野では急速な NFT の革新を促進しますが、他の分野では必然的に失望を招きます。技術調査会社の Gartner は、多くの異なる業界で同様のサイクルを記録してきました。そこで同社は、それを説明するために技術導入サイクルを開発しました。Gartner は最新の報告書で、NFT は同社が「流行期」と呼ぶサイクルの一部であるとしています⁵。このピークの後に「幻滅期」が続きます(後に「回復期」と「安定期」が続く)。これは、今日の NFT の状況を適切に説明しているかもしれません。多くの興奮があるものの、業界はまだ課題を解決しつつある状況だということです。

このような NFT 急増の中で、Dan Olson 氏のような人たちが「[Line Goes Up: The Problem with NFTs](#)」のようなビデオで明らかにしているように、反対意見が高まっています。その結論に同意しない人さえ、それは思慮深く、十分に研究された記事であると考えられる可能性が高いと考えています。さらに「rug pulls」や「wash trades」のような詐欺行為、およびマネーロンダリングが NFT に影を落としています。真面目なコレクターやファンは、彼らが好きなものを投機家に買い取られています。おそらく最も重要なのは、地球を破壊しているエネルギー消費のうち、NFT が悪夢のような割合を占めていることにより、地球環境保護の上で悪者扱いされていることです。



これらの批判は、最も熱心な支持者でさえも熱意を削がれるのに十分です。しかし、投機的バブルを引き起こすのと同じエコチェンバー(同意の増幅)や熱狂は、逆に作用することもあります。何百万ドルもの価値のある類人猿の写真を見て、そのためにイノベーションのカテゴリー全体を否定する人もいます。どんな種類の熱狂も役に立ちません。合理的なアプローチは、しばしば続く不合理な誇大宣伝や幻滅のいずれにも巻き込まれないのです。簡単に言えば、私たちは NFT が提供するアフオーダンス(本来与えられた用途)のユニークなセットを特定し、それらが最も必要とされるユースケースにそれらを適用しようとしています。そうすれば、プラスの影響を与えるプラットフォームやユースケースを減らすことはありません。

NFTへの反発は、赤ちゃんを風呂水に放り込むような危険をはらんでいます。確かに、緊急の課題はあります。憶測は確かに存在し、真のコレクター

NFTには確かに緊急の課題があります。憶測は確かに存在し、時には真のコレクターを疎外しますが、これらのいずれも NFTが人類史におけるユニークな発明の1つであるという事実を変えるものではないのです。

の構成要素を構築するためのマインドシェア、エンジニアリング人材、財務資本を得ることはできません⁷。NFTは単なる美術品や収集品ではありません。そのため、NFTの人気はこの初期のユースケースによって引き起こされますが、最終的には、現在ほとんど未開発のままである他のエキサイティングな新しい事例と比較して、重要性が薄れていく可能性があります。

を疎外することもあります。確かに、PoW ブロックチェーンは壊滅的な量の電気を使用しており、これは本報告書で調査された主要な問題であります。NFTが人類史におけるユニークな発明の1つであるという事実を変えるものではないのです。技術レベルでは、NFTは幅広い資産と認証メカニズムに対して新しい機会を提供します。従来、無記名債券、所有権、証書はありましたが、それらはすべて詐欺に対して脆弱でした⁶。正しく実装された NFT は、偽造、二重カウント、摂理、真正性の問題に対処することによって、その力学を完全に変えることができます。実践レベルでは、これらの能力がコミュニティ構築に関与するための前代未聞の機会を生み出します。Palm NFT Studio の共同創設者兼 CEO である Daniel Heyman 氏は、NFT への関心(さらには NFT に関する誇大宣伝)がイノベーションの原動力になっていると述べ、次のように述べています。「NFT にこの瞬間がなければ、これらの資産との対話方法を真に変革するためのすべて

NFTのユースケース例

健全な懐疑主義や、誇大広告に対する反発は避けるべきではありませんが、ブロックチェーン上の NFT のユースケースは膨大です。主要なエンターテインメントフランチャイズからスポーツチームまで、様々な組織が NFT を利用し、より大きなコミュニティおよびファンとの関わりを作り始めています。NFT は収集品と会員権を組み合わせたようなものであり、保有者にとっては将来の使用権やイベントへのアクセス権として機能します。NFT 保持者と共に形成された周辺コミュニティは、熱心なファンの一部であることに起因する豊かな経験を提供します。Palm NFT Studio の CEO である Dan Heyman 氏は、ブランドと IP オーナーは「クリエイターとファンのデジタルな関係を、ストーリーミングとソーシャルメディアを利用したレンタルから、所有権に基づいた関係へと再構築し、ファンが好きなものの一部を手に入れ、友人に見せて、自分が何者であるかを語り、アイデンティティの一部を形成することができるようにする」と提案しています⁸。

ESG 分野では、企業はブロックチェーンに炭素クレジットを導入して、クレジットの真正性を検証し、プロジェクトによる二重支出のリスクを軽減しようとしています。ブロックチェーンにクレジットを導入することで、保全プロジェクトとその信頼性の監査が容易になります。さらに、他の NFT には不動産所有権に関するユースケースが含まれます。物理的特性を表す NFT は、商業用不動産に劇的な変化をもたらす可能性があります。不動産所有権の移転に伴う、数週間の長い書類作成プロセスは数分にまで簡素化され、ブロックチェーン上で安全に合理化されます。より多くの人々が非効率なプロセスを破壊し、クリエイターや支援者に所有権を移転しようとしているので、将来の NFT の可能性は増加していきます。

NFT は、ユースケース レベルだけでなく、その効率性とエネルギー使用量に関してもイノベーションのフェーズを経験しています。本報告書で後に説明するように、新しいコンセンサス メカニズムの作成とレイヤー 2 ネットワークの利用の増加により、NFT はより効果的で持続可能となり、ブロックチェーン上でより多くのユースケースを可能にします。この報告書では、ブロックチェーン技術のさまざまな環境への影響だけでなく、大規模化を推進するために設計および開発されている革新的な選択肢についても説明します。

他のブロックチェーンや暗号通貨にとって、NFT との間には相互にどのような影響があるのでしょうか？ その答えを知るには、ブロックチェーンが現在どのように機能しているのかではなく、近い将来どのように変化するかを念頭に置き、ブロックチェーンの機能をしっかり理解する必要があります。

すべてのブロックチェーンが同じではない

現在、Bitcoin のような暗号通貨（それ自体は NFT とは直接関係がない）に関連したマイニング活動は、環境に大きな損害を与えています。最近の推定では、年間 114.06 メガトンの二酸化炭素を排出しているとされており⁹、これはチェコ共和国全体の排出量とほぼ同量です。これは、ブロックチェーンを保護し、「Proof of Work」と呼ばれるコンセンサス メカニズムを通じて信頼できる共有記録のセットを保証する「マイニング」によるものです。平均して 10 分ごとに、世界中の強力なコンピューター（通常は広大なデータセンターに設置されています）が、計算上困難な数学の問題（ハッシュと呼ばれます）を解決しようと競い合い（「Work」）ます。これを解決（「Proof」）した最初のノードは、最新の一連の取引を Bitcoin のグローバルレコードに書き込むことができるだけでなく、賞金として Bitcoin も獲得します。Bitcoin のマイナーにとっては良いことですが、環境には良くありません。被害は Bitcoin の価値が上昇するにつれて悪化します。ある推計によると、Bitcoin 価格が 10% 上昇すれば、800,000 台のガソリン車が路上に出ることに相当します¹⁰。PoW マイニングは高い環境コストを伴います。この問題に対処するには、環境コストとその根底にある要因を認識する必要があります。

これが Bitcoin ブロックチェーンの課題です。他のブロックチェーンや暗号通貨にとって、これは何を意味するのでしょうか？ NFT にはどのような影響があるのでしょうか？ その答えを知るには、ブロックチェーンが現在どのように機能しているのかではなく、近い将来どのように変化するかを念頭に置き、ブロック

チェーンの機能をしっかり理解する必要があります。まず、ブロックチェーンや Proof of Work の最も環境に有害な側面である暗号通貨マイニングについて説明しましょう。

すべての分権化されたシステムにはコンセンサス メカニズムが必要です。これは特に、現金のような大きな資産が絡んでいるシステムに当てはまります。Bitcoin マイニングの「Work」が環境に与える影響は、初期の段階ではわずかでした。Bitcoin の作者とされる Satoshi は、ラップトップを使って初期の Bitcoin をマイニングしたと言われており、2010 年まで、マイニングはすべて CPU 上で行われていました¹¹。しかし、Bitcoin の価値が上昇すると、その報酬をめぐる競争が激化し、マイニング技術の向上に向けた取り組みが急速に進化しました。

次に登場したのは Ethereum プラットフォーム(ETH はネイティブの暗号通貨)で、スマートコントラクトと分散アプリケーション (Dapps) を追加し、PoW コンセンサス メカニズムを使用しました。2015 年までには、大規模な PoW マイニングによるエネルギーへの影響が明らかになりつつありました。これらの懸念に

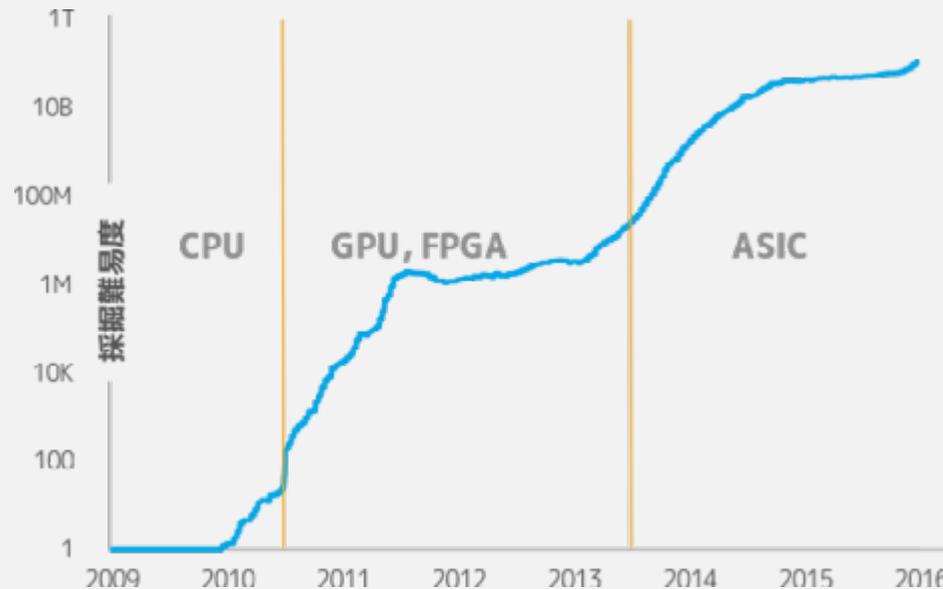
対処するために、Ethereum は現在行われている「Work」の新しいバリエーションを試みました。それは、より多くのメモリ集約的な操作を必要とし、その結果、Bitcoin マイニングを乗っ取った電力を大量に消費する ASIC (特定用途向け集積回路を備えた特殊チップ) の使用に対してより耐性があるものでした。これらの戦術は漸進的な改善しかもたらさず、環境に優しいブロックチェーンの実現には至りませんでした (環境問題に対する Ethereum の差し迫った対応については後述します)。Ethereum の二酸化炭素排出量の推計にはばらつきがあり、年間 62.69 メガトンもの二酸化炭素を排出しているとの指摘もあります¹²。暗号通貨価格の上昇は、マイニングから得られる報酬とそれに充てられる資源を増加させました。

今日、暗号通貨のマイニングは大規模な産業規模で行われており、多くの場合、専用の高速コンピューターで満たされた大規模なデータセンターが関与しており、膨大な量の電力を消費し、それに比例して大きな炭素排出量を伴います。この記事の執筆時点では、Bitcoin と Ethereum (時価総額で上位 2 つのブロックチェーン) はともに、Proof of Work をコンセンサス メカニズムとして使用しています。総エネルギー消費を大幅に削減する取り組みとして、Ethereum は

図2

初期のBitcoinの採掘難易度とマイニング方法の関係

History of Bitcoin Difficulty by Ladislav, 2016, used under BSD license.



対数垂直スケールのBitcoin相対採掘難易度グラフ。数字が大きいほど高難易度。

CPU: central processing unit
GPU: graphics processing unit
FPGA: field-programmable gate array
ASIC: application-specific integrated circuit

2022年の第2四半期にPoSモデルに移行すると発表しました¹³。BitcoinとEthereumを合わせると、世界の人為的二氧化碳炭素排出量の約0.36%を占めています¹⁴。

炭素に依存したProof of Workを必要としない他のコンセンサスメカニズムを通じて、ブロックチェーン技術を改善しようとする大きな動きがあります。新しいコンセンサスメカニズムは次のようなものです。

- ブロックチェーンのカーボンフットプリント(CO2排出量)を削減
- マイニングを行うコンピューティング能力の強化により、協調的なブロックチェーン攻撃から保護
- Ethereumや他の多くのブロックチェーンにおける実行時間の長さ、1秒あたりのトランザクション量の低さの両方によって制限されるブロックチェーンのスケーラビリティに関する課題を克服する

Proof of Stakeは、炭素排出量をより少なくすることができる代替的コンセンサスメカニズムです。計算問題を解決するために計算するのではなく、ブロックチェーンのプレッジ(すなわち「賭け金」)を維持する担当者は、意図的にトークンをリスクにさらして不正行為に対する保証とします。すべてがうまくいけば、自分のトークンを賭けた人は、そのトラブルに対してわずかな利益を得ることができます。しかし、検証者が誤りや不正な取引を特定した場合には、賭け金を削減または没収することができます。これにより、誠実さと正確さに対する強いインセンティブを持つ当事者間の信頼のバランスに基づく新しい種類のコンセンサスメカニズムが生み出されます。したがって、利害関係の証明は、PoWシステムが必要とする計算のための意図的に無駄なエネルギー消費を大幅に改善するものとなります。

では、PoSシステムが現実のものとなるまでには、どのくらいの時間が必要なのでしょう。幸いなことに、PoSシステムはすでに存在していますが、すべてが大規模に実証されているわけではありません。例えば、CardanoはProof of Stakeを使用しており、現在7番目に大きいブロックチェーンであり、ネイティブトークン市場の時価総額は390億ドルです¹⁵。ある情報源によると、Cardanoは年間合計2.7gWhの電力を消費し、0.0013メガトンのCO2を排出しているといわれます¹⁶。TezosもPoSブロックチェーン(2022年3月の時価総額で45位)で、二氧化碳炭素排出量の大幅な削減を主張しています¹⁷。しかし、

では、PoSシステムが現実のものとなるまでには、どのくらいの時間が必要なのでしょう。幸いなことに、PoSシステムはすでに存在していますが、すべてが大規模に実証されているわけではありません。

「Ethereum 2.0」ロードマップの一部として、Ethereum自体がPoWコンセンサスメカニズムからPoSへと移行するにつれて、さらに大きな変化が起こることになります。この移行計画は何年も前から進行中であり、2020年にBeacon ChainがいくつかのPoSに関する機能を導入するなどのアップグレードが行われています¹⁸。PoSへの完全な移行は2022年に行われる可能性が高いです¹⁹。

Ethereum PoSはエネルギー消費の大幅な改善を約束していますが、まだ利用可能ではありません。低炭素フットプリントのNFTの早急な解決を望む人々は、利用可能ですぐに使えるいくつかの選択肢を持っています。

- **レイヤー2ソリューション**：レイヤー2ソリューションは、既存のブロックチェーンに移植された一連の軽量トランザクションのようなものです。これらのレイヤー2またはシャーディング複数サーバから単一の論理データベースを構築する手法)ソリューションは、Ethereumやその他のブロックチェーンを、より少ないエネルギーでよりスケーラブルにすることを約束します。トランザクションの完全性を保証するために、メインチェーン(レイヤー1)から分割され、定期的に再接続されるパーティションが含まれます。Optimismのような多くのレイヤー2ソリューションがすでに運用されています
- **効率的なパブリックブロックチェーンの代替策**：Cardano (Proof of Stake) や Solana (Proof of History) などのパブリックブロックチェーンは、NFTの魅力的な候補となる代替的なコンセンサスメカニズムと高いトランザクションスループットを備えています。すでにこれらの競合企業は、EthereumからNFTの市場シェアを奪いつつあります。
- **サイドチェーン**：最もエネルギー効率の高いブロックチェーンソリューションのいくつかは、サイドチェーンとプライベートブロックチェーンを通じて利用できます。これらの多くは、Ethereumと同じテクノロジー(例えば、Ethereum Virtual Machine (EVM))に基づいていますが、

Proof of Authority (PoA) や Proof of Elapsed Time (PoET) などの代替的なコンセンサス メカニズムを使用しています。これらのサイドチェーンは、利用可能な最もエネルギー効率の高いブロックチェーン ソリューションのいくつかを提供し、場合によっては、他の一般的なインターネット トランザクションとほとんど区別できない足跡を残します。

Ethereum アプリケーションおよびソフトウェア開発組織 ConsenSys の一部である ConsenSys NFT は、持続可能な選択肢を提供するためにレイヤー 2 エンティティと積極的に提携しています。ConsenSys NFT のグローバル共同責任者 Johnna Powell 氏によると：

“ 私たちは、Palm、Polygon、Arbitrum、Optimism、NEAR/Aurora など、ほとんどすべての主要な EVM 互換チェーンと提携しています。そうすることで、我々と我々のパートナーは、最適なカーボン フットプリントを提供するチェーンを選択するための「将来の保証」の柔軟性と快適さを得ることができます²⁰。”

ブロックチェーンの気候変動への影響を軽減する方法

Proof of Authority (PoA)

Hyperledger Besuは、QBFT、IBFT 2.0、Clique Proof of Authority (PoA) コンセンサス プロトコルを実装しています。PoAコンセンサス プロトコルは、参加者がお互いを知っていて、パーミッション型コンソーシアム ネットワークのように参加者間に一定レベルの信頼がある場合に機能します。

PoAコンセンサス プロトコルは、Proof of Workコンセンサス プロトコルよりも処理時間が短く、トランザクション スルーputがはるかに高い点の特徴です。

多くの PoW ブロックチェーンが持つ多量のエネルギー消費、およびその結果生じる気候への影響を考慮すると、誰がその問題の解決に取り組むべきかを問うのは自然なことです²¹。当然の選択として暗号通貨のマイニングに必要な膨大な電力を直接消費しているマイナーが挙げられます。しかし、それほど単純ではない理由がいくつかあります。

マイナーの役割

第一に、マイナーは比較的孤立した場所で活動しています。Offsetra の共同設立者である Alex Taylor 氏は、「当然ですが、マイナーは自分の居場所をあまり明らかにしない。」と述べています²²。マイナーは公的な役割を担っているわけではないため、環境への負荷に対する責任を負わせることは困難であり、さらにほとんどの場合、マイナーが誰であるかを特定することさえも困難です。Patch の Brendan O' Connell 氏は次のように提言しています。

“ マイナーは世界中に分散しており、その多くはエネルギーが豊富でありかつ安価である地域にいます。マイナーに対してクリーン エネルギーを採用するように圧力をかけるために、規制をすること以外の唯一の方法はコスト管理です。しかし、世界の多くの地域で、化石燃料は多額の補助金を受けており、再生可能な選択肢よりも安価です。厳しい市場環境の中において、マイニング事業は薄利多売で運営されており、この集団から炭素排出量削減への大きな投資が見られないのは当然です²³。”

第二に、炭素排出の責任を負うのはマイナーだけではありません。マイニングという作業は、PoW ブロックチェーンを機能させるために意図的に選択されたコンセンサス メカニズムであり、その責任はより広範囲の利害関係者が負っています。マイナーは、暗号通貨やトークン、取引、スマートコントラクトなどのブロックチェーンにおけるエコシステム全体の実現に貢献し、そのエコシステムに依存するすべての参加者を助けています。つまり、ブロックチェーンの利益が様々な参加者にもたらされるのと同様に、ブロックチェーンの負の外部性に対するコストと責任の一部をそのグループが負わなければならないのです。マイナーと異なり、多くのブロックチェーン参加者は可視的であり識別が容易です。

NFTに関連する気候変動が、これらのプレイヤーのアプローチを急速に変化させ、より持続可能な解決策を模索するのは当然なことです。

ブロックチェーンは、他の多くのセクターと同様に、小売サイドのビジネスに対する監視と圧力の強化に取り組まなければなりません。Alex Taylor氏は次のように語っています。「ここが採鉱面です。市場活動が行われる場所であり、需要、ひいてはシステムへの負荷が生まれる場所なのです²⁴。」小売は、消費者の懸念に対応し、サプライチェーンの残りの部分を通してそれを押し進めるテコとなるものです。ブロックチェーンにとって、NFTマーケットプレイスは、それらの非常に目に見える参加者の1つです。NFTに関連する気候の懸念が、これらのプレイヤーにアプローチを急速にシフトさせ、より持続可能なソリューションを探させたことは自然なことです。

しかし、規制当局自身は、PoWマイニングに制限を加えることに抵抗を持っていません。アルジェリアやバングラデシュ、中国、エジプト、イラク、モロッコ、カタール、チュニジアなど、いくつかの国はPoWマイニングを取り締まりはじめました²⁵。特にコンゴのような場所ではマイニングが問題になっています。安価なエネルギー源や補助金、政治的ないさかいが、結果的にビットコインのマ

イナーをコンゴに引き寄せました²⁶。一部のマイナーは電気代さえ払っていません。電力網への負荷により、現在、広範な取り締まりと暗号資産マイニングの禁止を余儀なくされています²⁷。

変化を促す主な要因の1つは、エコシステム自体の内部からもたらされます。明確な圧力がなければ、変化は起こりません。社会は、環境への影響を最小限に抑えるために、健全な選択をする義務があるという認識を深めています。その義務を現実のものとするためには、持続可能な活動を行う企業を支援し、そうでない企業とは距離を置くなど、自らの意思で行動することです。また、熟考の上、慎重な選択をすることでもあります。通常、これは真実を明らかにするために表面的な部分を超えて掘り下げを意味します。

この慎重さは、他の多くの環境、社会、統治活動とも類似しており、うわべだけのマーケティング用語やグリーンウォッシュなどの不正な活動を行うサプライチェーン参加者を警戒する必要があります。その代わりに、データ駆動型のア



アプローチをとることが最善です。オンライン計算機や公開データを使えば、ブロックチェーンの二酸化炭素排出量を計算したり、あるブロックチェーンやサイドチェーンを他のチェーンより使用した場合の影響にアクセスしたりすることが可能です。また、排出量と削減量の両方について、炭素配分の複雑さに対処するために、多くの研究が行われています。

慎重な政策の必要性

共通する要素としては、暗号資産マイニングを禁止している国や、禁止を提案する国の数が増えていることが挙げられます。例えば、欧州証券市場庁の副議長である Erik Thedéen 氏は、欧州連合に対し、PoW マイニングを禁止し、PoS に向けて「業界を誘導する」よう呼びかけています。Thedéen 氏は Financial Times とのインタビューにて「業界をより効率的な技術にシフトさせるための議論が必要です」と述べています。彼は暗号資産の全面禁止を要求したわけではありません²⁸。

また、The Digital Economist の戦略アドバイザーである Katherine Foster 氏は「これは、暗号通貨ブロックチェーンと証明またはコンセンサス メカニズムを混同し、環境と持続可能なエネルギーに焦点を当てた初期のブロックチェーン PoS ユースケースを困難にし、一部の国ではソリューションを違法とさせた 2017 年から 2019 年の全面禁止よりも、エコシステムに対する洗練された理解を示しています」と述べています²⁹。また、「ビットコインやその他の PoW マイニングを再生可能エネルギーに移行することの限界について、たとえ再生可能エネルギーに基づくとしても、必要とされるエネルギー供給が膨大になる」とも指摘しています。Thedéen 氏は「ビットコインは、マイニングに充てられる再生可能エネルギーの量から、今やスウェーデンの国家的な問題になっています。」と述べています³⁰。

複雑性を管理する方法

複雑性は難しいです。これは特に炭素排出および炭素隔離に当てはまります。見かけと違い複雑なトピックです。Open Source Strategies の Si Chen 氏は、「気候の問題は、国境を越え、業界を越えている」と述べています³¹。複雑性を取り除くために、いくつかの仲介業者が生まれてきました。検証組織は、例えば、カーボン オフセット プロジェクトの品質を評価します。「1トンの炭素が必ずし

も別の 1トンの炭素と同じとは限りません」と Patch Technologies の暗号技術リーダーである Brendan O' Connell 氏は述べています。プロジェクトの質によって大きく左右されます。また、O' Connell 氏は以下のように述べています。

“市場がこれに対処する方法は、炭素クレジットの可変価格設定です。ローエンドでは、1トン 5ドルでクレジットを購入することができ、これは最低限の持続性を持つこととなります。ハイエンドでは、1トンあたり 1,000ドル以上を費やすことができ、これは投資の気候への影響についてより高い確実性を提供します³²。”

分析はこれだけにとどまりません。炭素隔離プロジェクトについては、新たな純便益があるかどうか、誰がその利益を主張するのかといった重要な疑問があります。O' Connell 氏は、「価格に影響を与えるもう一つの重要な考慮点は追加性です。これは、炭素クレジットの発行がなければ排出が除去または回避されていたかどうかの評価です」と述べています³³。

仲介者は、そのような複雑性をすべてモデル化し、私たちの選択に役立つシンプルな答えを導き出す。例えば、購入の一部として自動的に炭素を相殺するボタンをクリックすることができるようになります。O' Connell 氏はこのような例を挙げています。「ある取引が発生するたびに、私たちの API を呼び出すと、その取引に関する二酸化炭素排出量の評価が出力されます。それらの特性をすべて見て、どのプロジェクトを購入すべきかを判断できるようになります³⁴。」

NFT トランスフォーメーションをリード

すべての NFT が同じように作られているわけではありません。NFT の発行、入札、譲渡、購入、移管をどこでどのように行うかによって、大きな違いが生じます。このセクションでは、これらの決定ポイントのいくつかを取り上げ、そのプロセスが可能な限り持続可能であることを保証するための推奨事項を示します。このプロセスは 6 つのステップに集約され、それぞれが本セクションで詳述されています。

- PoW ブロックチェーンを避ける
- プロセスを端から端まで確認する
- 軽量のブロックチェーンを選択する
- 革新的な代替手段を模索する
- 残ったものをオフセット（検証付き）する
- コミットメントを強固にする

PoW ブロックチェーンは避ける

最大かつ最も簡単なステップは、PoW ブロックチェーンを避けることです。つまり、時価総額で NFT 市場の大部分（80%）を占める Ethereum のメインネットを避けることですが、これは全体の排出量のさらに大きな割合を構成しています³⁵。この単純なステップで、NFT の二酸化炭素排出量を 1 桁減らすことができます。Ethereum が Proof of Stake で稼働するまでは、この NFT の炭素の膨大な利用を推奨することは困難です。

すでに Ethereum 上の NFT コレクションをお持ちの方は、そのまま放置しておくのが一番かもしれません。現時点では、Ethereum ベースの NFT コレクションを他のブロックチェーンに移動させると、さらに電力を消費するため、Proof of Stake で稼働することを待つのがベストです。しかし、どうしても避けられない取引であれば、メインネットから移動させることが、取引をカーボンニュートラルにするためのオフセットであるとともに、利用可能な最善の方法である可能性があります。実際、Ethereum の NFT を静止させる場合でも、オフセッ

トの購入は、NFT を製造し購入する元のプロセスを相殺し、NFT をカーボンニュートラルな状態にする仕組みとして検討に値します。

トの購入は、NFT を製造し購入する元のプロセスを相殺し、NFT をカーボンニュートラルな状態にするメカニズムとして検討する価値があります。

プロセスを端から端まで見る

NFT のフットプリントを評価するには、NFT のライフタイムにおけるあらゆる要素を見据えた広範な全体論的アプローチが必要です。売却の取引コストに焦点を絞るのではなく、ブロックチェーンに接触する NFT 関連の活動全般を考慮する必要があります。これには、オンチェーンでの入札プロセス、NFT 自体および関連する契約の発行と譲渡、所有期間中の NFT 契約に対するあらゆる活動や変更が含まれます。

正確さとは、実装の細部にわたって最善を尽くすことです。Si Chen 氏は次のように述べています。「ブロックチェーンのエネルギー使用量や気候変動への影響は、どのように測定するのでしょうか。もし本気で取り組むなら、実際に使われている計算サイクルとエネルギーに基づいて測定する必要があります。そして、そのエネルギー源がどこから来るのかを知ることです³⁶。」これらの要素は、NFT が ERC-721 トークンであるか ERC-1155 トークンであるかによっても異なります。たとえば、ERC-1155 はバッチ式トランザクションによって効率を向上させることができます。最も厳格なアプローチでは、静止状態の NFT がこのエンド ツー エンド プロセスの一部として炭素排出に寄与していると考えられる人もいないかもしれません。それは、ブロックチェーンの運用と安全性を維持するマイニングのシステムによって、資産の価値がまだ利益を得ているからです。実際には、多くの炭素配分システムはここまで厳密ではありませんが、できるだけ少ないフットプリントを求める人々にとっては、検討に値するアプローチと言えます。

WWF と Polygon

2022年2月、World Wildlife Fundが英国でのNFTの資金調達活動を中止しました。「私たちは、NFTが多くの議論を呼んでいる問題であり、私たち全員がこの新しい市場について学ぶべきことがたくさんあることを認識しています。だからこそ、これからこの試みの影響を十分に評価し、私たちの支援者を巻き込むためにどのように革新を続けることが最善かを考えていくのです³⁷。」この試みは、NFTは環境にダメージを与えるものであり、WWFはそのような取り組みに関与すべきではないと主張するWWFの支持者たちから怒りを買っていました。

当初、WWFは正当な注意を払い、1取引あたりわずか0.2グラムのCO2を誇るレイヤー2のブロックチェーンであるPolygonを使用していると回答していました³⁸。しかし批評家たちは、PolygonのEthereumとのインターフェイスは、真のカーボン フットプリントがはるかに高いことを意味するため、これは正確ではないと主張しました。

Digiconomistは詳細を調査し、PolygonのEthereumとのやりとりをPolygonのチェーンに割り当てた場合、トランザクションあたりの真のCO2コストは430グラムのCO2に近いことを示唆しました。これはWWFが主張する0.2グラムよりもはるかに高く、実際、複数の情報源はPolygonの取引あたりのフットプリントは1グラム以下であると示唆しましたが、Digiconomistの値でさえ、Ethereumのネットワークにおける取引あたりの124キログラムよりも大幅に改善されたものでした³⁹。しかし、Ethereumのブリッジとコントラクトは、本当にそれに付随するブロックチェーンにCO2コストとして配分されるべきなのでしょうか？それはもっと複雑な問題です。

今にして思えば、実施内容の詳細

に踏み込むことが、WWFのNFT

計画に変化をもたらしたかどうか

か、判断に迷うところです。

NFTがサイドチェーンで造られ、ブロックチェーン取引を必要としない通貨（つまり、米ドルなど）で支払われ、サイドチェーンに保管される場合、炭素排出量の多いEthereumの取引は全く必要ありません。Polygonのようなレイヤー2のソリューションでは、メインチェーン上で定期的にチェックポイントを提出するため、トランザクションの真のカーボンフットプリントは、特定のNFT実装とチェックポイントをどこまで超えるかに依存する可能性があります。今にして思えば、実装の詳細に踏み込むことで、WWFのNFT計画に違いが出たかどうかは分かりません。しかし、展開する前に、不測の事態を避けるために、使用中のシステムの「裏側」を知っておくことは常に重要です。同様に重要なのは、すでに決定されたプレッシャーを感じることなく、批判的な議論と敬意ある対話の機会を提供するオープン コミュニケーションのプロセスで土台を築くことです。

軽量なブロックチェーンを選択

NFT に対応したブロックチェーンはEthereum だけではありません。2021年に95%のシェアだったEthereumは、現在ではNFTの80%となっています⁴⁰。Solanaは、過去1年間に何度も停止に見舞われましたが、NFTの温床であることが証明されています。Solanaは、2022年の初めに、すべての時間の市場ボリュームで10億ドルを超え、DappRadarは、ユーザー数でランク付けされた最も人気のあるDappとしてMagic Eden（Solana上のNFTマーケットプレイス）を数えています⁴¹。Solanaは現在、1秒あたり約2,500のトランザクションで動作しており、その履歴証明コンセンサス メカニズムを使用してNFTとスマートコントラクトのトランザクションを行うには、迅速かつ経済的な方法であると言えます。CardanoやTezosなど、現在稼働中の他のPoSブロックチェーンも検討に値します。レイヤー2が取引量のほとんどを行い、「レイヤー1は費用の問題から、最終的に決済チェーンと呼ばれるものに進化する」という、より広範なシフトが進行していると思われる人もいます⁴²。

革新的な代替案の模索

ブロックチェーンの二酸化炭素排出量を可能な限り小さくするためには、一般的なPoSブロックチェーンでも十分とは言えないかもしれません。1秒あたりのトランザクションの上限や検証者の冗長化など、すべてが若干の炭素排出を増やすこととなります。メインチェーンからトランザクションを外し、低カーボン フットプリントのパーミッション チェーン、レイヤー2 ネットワーク、またはサイドチェーンに移行することで、そのオーバーヘッドを取り除き、エネルギー要件をさらに削減することができます。あるブロックチェーン エンジニアは「このレイヤー2ははるかに効率的です。それを実行するために多くのサーバーを必要としません」と述べています⁴³（レイヤー2の例として、サイドバー「WWFとPolygon」を参照）。

Charlie Robbins氏は、野球のメジャーリーグのようなビッグ ブランドのNFT活用を支援する企業であるCandy Digitalのエンジニアリング担当副社長です。Candy Digitalは、フットプリントを小さくするために、Palm ネットワークと呼ばれるEVM互換のサイドチェーンを使用しています。Robbins氏は、「理想的な状況では、NFTを発行することがGoogle検索を行うよりも少ないエネルギーで済むモデルに行き着く可能性があります」と述べています⁴⁴。それは、ほとんどの人が目をつづらないほど少ないエネルギーしか使わない、とRobbins氏は

述べており、Candy Digital が来年中にその地点に到達すると信じていると付け加えました⁴⁵。

Palm NFT Studio の共同創業者兼 CEO である Daniel Heyman 氏は、以前 ConsenSys に在籍し、効率を念頭に置いて意図的に設計された企業向けのブロックチェーン ソリューションである Hyperledger Besu に携わっていた人物です。Heyman 氏は、Ethereum のようなブロックチェーン上で NFT を扱う際の高い取引コストと環境への影響を理解しており、より優れた NFT ソリューションを市場に提供するために Hyperledger Besu は自然な選択でした。Hyperledger Besu はモジュール設計で構築され、PoW と PoA の両方のコンセンサス メカニズムを可能にしながら、EVM をサポートしています⁴⁶。この柔軟性は、パブリック型ブロックチェーンとパーミッション型ブロックチェーンの両方と連結できることを意味します。Heyman 氏は、「私は、NFT が環境的に持続可能で、スケーラブルで、安価な方法で取引するために、より広い Ethereum のエコシステムの中で拠点が必要だと信じていました。」と述べました⁴⁷。Patch Technologies によれば、Palm ネットワークで使用されている PoA コンセンサス メカニズムは、PoW よりも 99.9% 効率的であるとのこと⁴⁸。業界が成熟するにつれ、第三者による CO2 フットプリントの検証も、低炭素型 NFT プラットフォームの採用を促進する鍵となるでしょう。



しかし、考慮すべきは効率だけではありません。新しい、あるいは見慣れないブロックチェーンやサイドチェーンを介して NFT の購入を行うよう誰かを説得することは、自明な仕事ではありません。馴染みのある NFT ブランドによる採用も有効ですが、技術やその寿命も重要です。例えば、購入した NFT をメインネットの Ethereum に移動させるブリッジなど、これらの懸念に対処する方法があります（しかし、このオプションを使用すると、二酸化炭素の排出量が多くなります）。Palm NFT Studio のオペレーション アナリストである Julian Perez 氏は、その仕組みについて次のように説明しています。「人々は、彼らが望むなら、Ethereum のメインネットへのブリッジを使用することができます。このブリッジは、NFT とトークンの両方向で機能します⁴⁹。」NFT 保有者は、Palm ネットワークが許可されたブロックチェーンとパブリック ブロックチェーンの両方に接続できるという確信を持ち、彼らの NFT (はオプションで) 主要なメインネット ブロックチェーン上の流動性にさらされることのできるのです。

NFT を Ethereum 上に移行することは、コストと環境フットプリントの両方の点で価値のない提案ですが、私たちの NFT を移植する能力は、そのオプションが行使されないとしても、貴重な自信を抱かせる機能です。しかし、特定の実装では、メインネットへの変換または Ethereum を支払いオプションとして提供するかどうかを慎重に検討する必要があります。Ethereum のメインネット コントラクトに関与することで、サイドチェーンの軽量のカーボンフットプリントは簡単に失われる可能性があります。

ブロックチェーンのもう一つの重要な特徴として、支持者がよく挙げるのが強力な所有権です。NFT は、デジタル資産に対する強力な所有権の道を開くものです。しかし、既存の法体系の中で IP を管理することに既に既得権を持っているブランドにとって、強力な所有権は唯一のフックではありません。Dan Heyman 氏は、「これは寄付の方法であり、最も忠実なファンを活性化し、関与させ、そのコミュニティを形成するものです。NFT、そしてより一般的なブロックチェーンは、社会的調整装置であり、コミュニティを本当に巻き込む方法なのです⁵⁰。」つまり、所有権は、より目的に対する手段です。Dan Heyman 氏は、ブランドと IP オーナーが、「クリエイターとファン間のデジタルな関係を、ストーリーングやソーシャルメディアによるレンタルから、ファンが愛するものの一部を持ち、それを友人に見せびらかすことができ、彼らが誰であるかを語り、彼らのアイデンティティの一部を形成できる、所有権ベースのものに再想像する」ことを提案しています⁵¹。これは、デジタル・アートワークよりもはるかに広い範囲での機会です。そのためには、効率性、柔軟性、規模を備えたインフラ

が必要であり、オンライン環境、さらには物理的環境における幅広いコミュニティでの NFT の利用を可能にするものです。エネルギーや気候に関する情報開示の検証は、あらゆるビジネス取引に新たな価値あるレイヤーとして作用することができます。現在、こうしたユースケースは、Ethereum のような PoW チェーンではほとんど不可能です

検証可能なオフセットの利用

NFT における持続可能な取り組みは、削減から始まります。「脱炭素化の選択肢がない産業もあります。ブロックチェーンはその1つではない」と Chen 氏は言いました⁵²。環境に与える影響を減らし、それが限界に達すると残りの影響を相殺することができ、カーボンニュートラル以上を達成することができます。しかし、オフセットを利用する際の重要な注意点は、削減の代替にはならないということです。Chen 氏によると：

“ オフセットの正当性は、オフセットを購入しなければプロジェクトが起こらないことを意味する「追加性」等の経済的仮定に依存しています。多くのオフセット プロジェクトはオフセットなしでも実行可能であるため、実際は「追加性」ではないということです。これらのプロジェクトからオフセットは、非常に安価に入手できます。これは、脱炭素化という困難で高価な作業を行うよりも、オフセットを購入する方が安価であることを意味します⁵³。”

オフセット プロジェクトには、新しい森林の植林から埋立地からのメタンガスの回収まで、幅広い活動が含まれています。しかし、オフセットを削減の近道として扱わないことが重要です。

Patch の Brendan O' Connell 氏は、「私たちは気象危機から自らを犠牲にするつもりはない」と述べています。⁵⁴ エネルギー集約型の PoW チェーンは、単純に問題を解決することはできません。Candy Digital の Charlie Robbins 氏は、このような考え方は「いかなる影響も元に戻すことができるという論理的な誤りに基づいており、それは全く真実ではない」と付け加えました。⁵⁵

カーボン オフセットは依然として重要な役割を担っており、組織や個人が可能な限りの削減を行った後でも、二酸化炭素の排出量を少なく（あるいはマイナスに）することができます。しかし、様々なオフセット プロジェクトがあるため、

グリーンウォッシングと呼ばれる可能性があります。これらの活動の中核は、強固であり、認定を受けた取り組みであることが重要です。測定、検証、認定されたオフセットによって、炭素集約な活動に価格をつけることを可能にし、企業や事業者はこれらを予算に組み入れることが出来るようになります。その認識が鍵となります。Brendan O' Connell 氏は次のように述べています。「これは営業経費の項目になり、企業はコストを最小限に抑えることに非常に長けて

“脱炭素化の選択肢がない産業もあります。
ブロックチェーンはその1つではない”

— Sai Chen

います⁵⁶。Charlie Robbins 氏も同様の意見として、「応急措置ではないと思います。持続可能性に関する全体的な物語の重要な部分であると思います」と述べました⁵⁷。

オフセットに投資することは、最終的な利益をもたらします。つまり、環境や開発に追加的な影響を与える強固なカーボン オフセット プロジェクトのための資本を得ることができます。例えば、マングローブや再生農業プロジェクトは、炭素を吸収するだけでなく、水資源に良い影響を与え、農家が気候変動に適応することを助け、コミュニティや社会から取り残された人々に利益をもたらします。今日、オフセットは高価であり達成できる規模やモニタリング、報告、検証、認証などの課題やコストに制限されることがあります。オフセットに貢献することで、カーボン オフセット プロジェクトに新たな規模と効率性をもたらすのに役立ちます。これは、オフセットをより手頃な価格にする良い補強サイクルです。その結果、規模と投資のさらなるサイクルが促進されます。Patch Technologies の Brendan O' Connell 氏は、高品質なオフセット プロジェクトを大規模化させることで、「炭素の価格を実際に下げることができる」と示唆しています⁵⁸。

具体的な公約

技術の選択は重要ですが、ステークホルダーを巻き込まなければ変化は起こり得ません。多くの場合、それはエコシステムのステークホルダーによる公約から始まります。具体例である CarbonDrop は、NFT オークションのプロセス及び実施方法の選択において、早い段階で重要なステークホルダーを巻き込みました。このように最初から、参加者を巻き込むことが、参加者をプロセスにコミットさせるための鍵となりました。このグループは「[NFT アート プラットフォームが気候に対して取ることのできる 7 つのステップ](#)」に合意しました。最初からステークホルダーに参加してもらうことで、プロジェクトの道を開くのに役立ち、ソーシャルメディアを介した潜在的にある否定的な反応のリスクを低減できます。

多くの場合、個人や組織の内部的な公約も、プロジェクトの推進を後押しすることもよくあります。組織の場合は、それは CarbonDrop が言うように、「採択された手順と科学に基づいて検証された環境への公約について、公然の気候に関する発表や報道声明」の形をとることができます⁵⁹。この種の発表は、あらゆる懸念に積極的に対処し、他の人々に模範を示します⁶⁰。CarbonDrop は、特に企業にとって、コミットメントの強化は具体的な目標を約束することだけでなく、測定プログラムから始めることを示唆しました。「[パリ協定](#)に沿った、[Climate Pledge](#) や科学に基づく目標などの業界基準の下で企業の実質排出量 0 を達成するための公約を行うとともに、プラットフォームと親会社のための企業のカーボン フットプリント対策とツールを開始する。」⁶¹。

結論：持続可能な NFT への道筋

この報告書を作成した当初の質問は、「炭素に優しい NFT は可能か」でした。その答えは、NFT を発行または使用している企業が、実装の詳細を掘り下げ、適切な一連のテクノロジーとブロックチェーンの選択を行う準備ができていれば、間違いなく「Yes」です。

第 1 世代の Ethereum NFT の膨大なエネルギー要件は、もはや制限要因ではないです。多くの環境に優しい選択肢がすでに存在しており、この急速に進化する状況では、他の新たな選択肢が増加していることは言うまでもなく、最悪

の違反者の一部が Proof of Stake に移行するにつれて、未来は改善されるでしょう。

このような知識を得た上で、組織は NFT によって何を達成するのか、どのような種類のエンゲージメントやコミュニティを促進するのかといった本当に重要なことを検討することができます。NFT は、我々が互いに関与し、相互作用する方法を変えるための非常に強力なツールである。これらの価値は、最終的に取り組みを推進する原動力となります。Brendan O' Connell 氏は、「真に持続可能な経済システムを構築する絶好の機会だ」と言いました⁶²。NFT は、多様なプロジェクトにおいて、気候変動に配慮したエキサイティングな選択肢を提供することができます。また、NFT やスマートコントラクトは、気候変動そのものに取り組むための貴重な新たな戦略や選択肢を生み出す可能性もあります。イノベーターたちはすでに、炭素の証券化、市民の関与と動員、さらにはスマートコントラクトによって媒介される権利と保護を自然そのものに与えることを模索しています。選択はあなた次第です。

自然保護論者としての視点



PROOF OF WORK (PoW)

VS.

PROOF OF STAKE (PoS)



何の証明だ？

ブロックチェーンはノードで構成され、各ノードは分散台帳の完全な1つのコピーです。取引を完了してブロックチェーンに追加するには、すべてのノード間で合意する必要があります。



PoW と PoS の コンセンサス メカニズムは

異なるコンセンサス メカニズムを使用して、台帳内の信頼性を確立しています。



合意を得る: 取引の検証方法は？

PoW: 計算能力

コンピューター処理能力を使用して必要とされる複雑な暗号パズルを完成させるために「マイナー」が競争します。スピードが評価されます。



PoS: 通貨パワー

暗号は信頼性を保証するために確保されています。これらの「stakers」は、無作為に選ばれ検証プロセスを完了します。報酬は金額と時間に比例します。

ブロックチェーンの環境への影響は、合意を得るために使用されるエネルギーに依存します。

典型的なPoWの取引は、米国の家庭が8日間に消費するエネルギーよりも多くのエネルギーを消費します。



PoW:

同じ問題を解決しようと競い合っているコンピューターは、エネルギー効率が悪く、集約的です。



PoS:

速度が重要でない場合、エネルギー消費は最小限に抑えられます。一般的なPoSトランザクションは、Google検索を2回行うよりもエネルギー消費が少ないです。



一般的なPoSトランザクションは、Google検索を2回行うよりもエネルギー消費が少ないです。

留意点

PoWとPoSだけが選択肢ではありません。

- Proof of Good
- Pure Proof of Stake
- Proof of Authority
- Proof of Activity
- Proof of History
- Proof of Capacity
- その他!

すべてのメカニズムにはトレード オフがあります。

- セキュリティ
- 非中央集権化
- スケーラビリティ

tldr

ブロックチェーン技術は本質的に環境に悪影響を与えるものではなく、選択されたコンセンサス メカニズムが環境や社会への影響を決定します。



いくつかの図の元データは、Sasha Sebright氏とtldr.earthのAdrian Dellecker氏の提供によるものです。無断転載を禁じます。

謝辞

本報告書は、2021年11月から2022年3月にかけて実施された多くのインタビューの結果をまとめたものです。インタビューに参加し、率直な見解と知見を共有して下さった以下の方々に感謝します：

Si Chen, President, Open Source Strategies Inc.

Daniel Heyman, Co-founder and Chief Executive Officer, Palm NFT Studio

Brendan O' Connell, Crypto Lead, Patch Technologies Inc.

Julian Perez, Operations Analyst, Palm NFT Studio

Johnna Powell, Global Co-head, ConsenSys NFT

Charlie Robbins, Vice President of Engineering, Candy Digital

Alex Taylor, Co-founder, Offsetra

本報告書の作成にあたり、Social Alpha Foundation と The Digital Economist のプロジェクトアドバイザーである Katherine Foster 氏に多大なるご協力をいただきました。彼らの監督と本研究への貢献は非常に貴重でした。また、Palm NFT Studio の Jo Howard 氏と Cat Knoerr 氏、Quality Produce の Christian Averill 氏、ConsenSys の JT Rose 氏など、本報告書をレビューし、貴重な意見をいただいたコミュニティのリーダーや実践者にも深く感謝いたします。環境保護のリーダーである tldr.earth の Adrian Dellecker 氏と Sasha Sebright 氏は、この報告書で使用された画像を再現するためのインスピレーションと許可を提供してくださいました。また、The Linux Foundation と Hyperledger Foundation に所属している Sean Bohan 氏、David Boswell 氏、Hilary Carter 氏、Dorothy Cheng 氏、Alena Davis 氏、Michael Dolan 氏、Emily Fisher 氏、Julian Gordon 氏、Lawrence Hecht 氏、Ry Jones 氏、Jerry Lee 氏、Carolyn Lehman 氏、Hart Montgomery 氏、Christina Oliviero 氏、Karen Ottoni 氏、Jason Perlow 氏、Melissa Schmidt 氏、Tomaz Sedej 氏、Chip Stuart 氏、Benjamin Thomas 氏、Jessie Wang 氏、および Min Yu 氏に深く感謝いたします。これらのチームには、本プロジェクトの推進に協力的な役割を果たしていただきました。

著者について

Alan Mayer 氏は Good Robot の創設者です。Alan 氏の前半のキャリアは、技術研究者やライターとして最先端技術やビジネス イノベーションの特定を支援していました。現在では、人工知能、ロボット工学、ブロックチェーン、メタバースの可能性を追求し、テクノロジーに携わっています。その結果、ユーザー体験を革新し、変革するための刺激的な新しい機会が生まれ、戦略や研究活動

がその実現に向けた現実的なアプローチと組み合わせることができるようになります。Alan 氏は、HackLab.TO や InterAccess などのスペースを頻繁に利用し、地元の「メーカー」シーンのアクティブメンバーでもあります。McGill 大学で MBA を取得しています。

免責事項 (Disclaimer)

本報告書は、“現状のまま”提供されます。The Linux Foundation とその著者、寄稿者、スポンサーは、明示、黙示、その他を問わず、本報告書に関する商品性、非侵害、特定目的への適合性、タイトルなどの黙示の保証を含め、一切の保証を行いません。The Linux Foundation とその作成者、寄稿者、スポンサーは、契約違反、不法行為（過失を含む）、その他を問わず、またそのような損害の可能性について事前に知らされていたかどうかにかかわらず、本報告書に関連するあらゆる種類の行為による逸失利益や間接的、特別的、偶発的、派生的な損害に対して一切責任を負いません。本報告書作成にスポンサーが付いた場合でも、そのスポンサーが本報告書の調査結果を保証するものではありません。

This report is provided “as is.” The Linux Foundation and its authors, contributors, and sponsors expressly disclaim any warranties (express, implied, or otherwise), including implied warranties of merchantability, noninfringement, fitness for a particular purpose, or title, related to this report. In no event will the Linux Foundation and its authors, contributors, and sponsors be liable to any other party for lost profits or any form of indirect, special, incidental, or consequential damages of any character from any causes of action of any kind with respect to this report, whether based on breach of contract, tort (including negligence), or otherwise, and whether they have been advised of the possibility of such damage. Sponsorship of the creation of this report does not constitute an endorsement of its findings by any of its sponsors.

文献 (Endnotes)

- 1 Carl Beekhuizen, "Ethereum's Energy Usage Will Soon Decrease by ~99.95%," Ethereum Foundation Blog, 18 May 2021, <https://blog.ethereum.org/2021/05/18/country-power-no-more>.
- 2 "IPwe and IBM Seek to Transform Corporate Patents with Next Generation NFTs Using IBM Blockchain," Press Release, IBM Corp., 20 April 2021, <https://newsroom.ibm.com/2021-04-20-IPwe-and-IBM-Seek-to-Transform-Corporate-Patents-With-Next-Generation-NFTs-Using-IBM-Blockchain>.
- 3 "The Chainalysis 2021 NFT Market Report: Everything You Need to Know About the NFT Market and Its Most Successful Collectors," Chainalysis Pte. Ltd., updated Jan. 2022, <https://go.chainalysis.com/rs/503-FAP-074/images/Chainalysis%20NFT%20Market%20Report.pdf>. This report covers ERC-721 and ERC-1155 (i.e., Ethereum only) NFTs and may include transactions that are not purchases. NonFungible.com gives a more conservative figure of \$17.7 billion traded in its "Yearly NFT Market Report," 2021, <https://www.nonfungible.com/reports/2021/en/yearly-nft-market-report>.
- 4 Scott Reyburn, "Art's NFT Question: Next Frontier in Trading, or a New Form of Tulip?" New York Times, 30 March 2021, updated 29 April 2021, <https://www.nytimes.com/2021/03/30/arts/design/nft-bubble.html>.
- 5 Avivah Litan, "Hype Cycle for Blockchain 2021; More Action than Hype," Gartner Blog, Gartner Inc., 14 July 2021, <https://blogs.gartner.com/avivah-litan/2021/07/14/hype-cycle-for-blockchain-2021-more-action-than-hype/>.
- 6 Some have used these instruments to perpetrate fraud on a massive scale, such as \$25 billion in counterfeit US bearer bonds: <https://www.investmentexecutive.com/news/industry-news/rcmp-seize-25-billion-in-fake-u-s-bearer-bonds/>.
- 7 Daniel Heyman, interviewed by Alan Majer, 14 Feb. 2022.
- 8 Daniel Heyman, interviewed by Alan Majer, 14 Feb. 2022.
- 9 "Carbon Footprint," Annualized Total Bitcoin Footprints, Digiconomist.net, as of 24 March 2022, <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption>.
- 10 Philip Rosedale (@philiprosedale), "Buying bitcoin and drive the price up 10% is the same as if @Tesla had put 800,000 gasoline-powered cars back on the road, forever. The math:," Twitter, 10 Feb. 2021 (3:12 PM), <https://twitter.com/philiprosedale/status/1359596124932198400>. This tweet sparked heavy debate on Twitter. The assumptions behind it are stated, allowing users to draw their own conclusions. Regardless of whether the cost is overstated, the underlying observation appears to be correct: increases in bitcoin price are correlated with a higher overall carbon footprint.
- 11 Christine Kim, "The Rise of ASICs: A Step-by-Step History of Bitcoin Mining," CoinDesk Insights, CoinDesk, 26 April 2020, updated 14 Sept. 2021, <https://www.coindesk.com/tech/2020/04/26/the-rise-of-asic-a-step-by-step-history-of-bitcoin-mining/>. CPU stands for "central processing unit."
- 12 "Carbon Footprint," Annualized Total Ethereum Footprints, Digiconomist, as of 24 March 2022, <https://digiconomist.net/ethereum-energy-consumption>. However, other sources suggest that it may be as low as 10 megatons annually, and we have elected the more conservative (i.e., higher carbon footprint) number to share in this report.
- 13 "The Merge," Ethereum, Ethereum Foundation, updated 23 March 2022, <https://ethereum.org/en/upgrades/merge/>.
- 14 Moritz Seibert, "Bitcoin and Ethereum Carbon Footprints—Part 1," Blog, Medium.com, 21 March 2021, <https://moritz-seibert.medium.com/bitcoin-and-ethereum-carbon-footprints-a8d7f7871f5a>. We updated the analysis in Seibert's post based on the combined total of 177.01 Mt of CO2 (Bitcoin's 114.06 Mt and Ethereum's 62.69 Mt compared to the 40 Mt and 14 Mt that Seibert used to yield .11%), which is 0.36% of global CO2).
- 15 "Cardano," CoinMarketCap, as of 25 March 2022, <https://coinmarketcap.com/currencies/cardano/>.
- 16 "Ethereum vs. Cardano," Artano, n.d., <https://artano.io/efficiency/>.
- 17 "Are 'Eco-Friendly' NFTs as Green as Their Creators Claim?" MusicAlly, Music Ally Ltd., 10 Feb. 2022, <https://musically.com/2022/02/10/are-eco-friendly-nfts-green/>.
- 18 "The Beacon Chain," Ethereum, Ethereum Foundation, updated 23 March 2022, <https://ethereum.org/en/upgrades/beacon-chain/>.
- 19 Bhushan Akolkar, "Vitalik Buterin Talks about What's Ahead for Ethereum 2.0 in 2022," Coinspeaker, 5 Jan. 2022, <https://www.coinspeaker.com/vitalik-buterin-ethereum-2-0-2022/>.
- 20 Johnna Powell, email to Alan Majer, 17 March 2022.
- 21 We say "most" PoW blockchains because future PoW blockchains may contribute valuable work (e.g., storing files, running models/simulations, etc.) instead of consuming energy to solve puzzles.
- 22 Alex Taylor, interviewed by Alan Majer, 11 Jan. 2022.
- 23 Brendan O'Connell, interviewed by Alan Majer, 5 Jan. 2022.
- 24 Alex Taylor, interviewed by Alan Majer, 11 Jan. 2022. Coal face here refers to the exposed surface of coal in a mine.
- 25 Abby Lee Hood, "Another Entire Country Just Banned Crypto Mining," Earth & Energy, Futurism, 9 Jan. 2022, <https://futurism.com/kosovo-crypto-ban/amp>.

- 26 Daniel Boffey, "Panic as Kosovo Pulls the Plug on Its Energy-Guzzling Bitcoin Miners," The Guardian, 16 Jan. 2022, <https://www.theguardian.com/technology/2022/jan/16/panic-as-kosovo-pulls-the-plug-on-its-energy-guzzling-bitcoin-miners>.
- 27 Daniel Boffey, "Panic as Kosovo Pulls the Plug on Its Energy-Guzzling Bitcoin Miners."
- 28 Eva Szalay, "EU Should Ban Energy-Intensive Mode of Crypto Mining, Regulator Says," Financial Times, 19 Jan. 2022, <https://www.ft.com/content/8a29b412-348d-4f73-8af4-1f38e69f28cf>.
- 29 Katherine Foster, communication with Alan Majer, 25 Mar. 2022.
- 30 Eva Szalay, "EU Should Ban Energy-Intensive Mode of Crypto Mining, Regulator Says."
- 31 Si Chen, interviewed by Alan Majer, 16 Dec. 2021.
- 32 Brendan O'Connell, interviewed by Alan Majer, 5 Jan. 2022.
- 33 Brendan O'Connell, interviewed by Alan Majer, 5 Jan. 2022.
- 34 Brendan O'Connell, interviewed by Alan Majer, 5 Jan. 2022.
- 35 Will Canny, "J.P.Morgan Says Ethereum Is Losing NFT Market Share to Solana," CoinDesk, 19 Jan. 2022, <https://www.coindesk.com/business/2022/01/19/jpmorgan-says-ethereum-is-losing-nft-market-share-to-solana>.
- 36 Si Chen, interviewed by Alan Majer, 16 Dec. 2021.
- 37 World Wildlife Fund UK, "NFT Statement," Updates, 4 Feb. 2022, <https://www.wwf.org.uk/updates/nft-statement>.
- 38 "The Carbon Footprint of Polygon," Digiconomist, 4 Feb. 2022, <https://digiconomist.net/the-carbon-footprint-of-polygon/>.
- 39 "The Carbon Footprint of Polygon," Digiconomist, 4 Feb. 2022.
- 40 Will Canny, "J.P.Morgan Says Ethereum Is Losing NFT Market Share to Solana," CoinDesk, 19 Jan. 2022.
- 41 MK Manoylov, "Solana NFT Total Sales Volume Crosses \$1 Billion," TheBlockCrypto, Block Crypto Inc., 19 Jan. 2022, <https://www.theblockcrypto.com/linked/130874/solana-nft-total-sales-volume-crosses-1-billion>; "Top Blockchain Dapps," DappRadar, as of 23 March 2022, <https://dappradar.com/rankings>.
- 42 Blockchain engineer, interviewed by Alan Majer, 17 Dec. 2021.
- 43 Blockchain engineer, interviewed by Alan Majer, 17 Dec. 2021.
- 44 Charlie Robbins, interviewed by Alan Majer, 1 Feb. 2022.
- 45 Charlie Robbins, interviewed by Alan Majer, 1 Feb. 2022.
- 46 Rob Dawson and Meredith Baxter, "Announcing Hyperledger Besu," Hyperledger Blog, 29 Aug. 2019, <https://www.hyperledger.org/blog/2019/08/29/announcing-hyperledger-besu>.
- 47 Daniel Heyman, interviewed by Alan Majer, 14 Feb. 2022.
- 48 Palm uses IBFT 2.0. "Patch Crypto Carbon Accounting Methodology," PatchTech, 19 July 2021, updated 15 Sept. 2021, <https://patchtech.notion.site/Patch-Crypto-Carbon-Accounting-Methodology-f25e2a8dd34e4f55bbd92c9ee38516f9>.
- 49 Julian Perez, interviewed by Alan Majer, 8 Feb. 2022.
- 50 Daniel Heyman, interviewed by Alan Majer, 14 Feb. 2022.
- 51 Daniel Heyman, interviewed by Alan Majer, 14 Feb. 2022.
- 52 Si Chen, communication with Alan Majer, 22–23 Feb. 2022.
- 53 Si Chen, communication with Alan Majer, 22–23 Feb. 2022.
- 54 Brendan O'Connell, interviewed by Alan Majer, 5 Jan. 2022.
- 55 Charlie Robbins, interviewed by Alan Majer, 1 Feb. 2022.
- 56 Brendan O'Connell, interviewed by Alan Majer, 5 Jan. 2022.
- 57 Charlie Robbins, interviewed by Alan Majer, 1 Feb. 2022.
- 58 Brendan O'Connell, interviewed by Alan Majer, 5 Jan. 2022.
- 59 "Seven Steps NFT Art Platforms Can Take on Climate," CarbonDrop, n.d., <https://www.carbondrop.art/climate-suggestions>.
- 60 "Seven Steps NFT Art Platforms Can Take on Climate," CarbonDrop, n.d.
- 61 "Seven Steps NFT Art Platforms Can Take on Climate," CarbonDrop, n.d.
- 62 Brendan O'Connell, interviewed by Alan Majer, 5 Jan. 2022.

 twitter.com/linuxfoundation

 facebook.com/TheLinuxFoundation

 linkedin.com/company/the-linux-foundation

 youtube.com/user/TheLinuxFoundation



Palm NFT Studio は、テクノロジー、エンターテインメント、cryptoart、および芸術業界のリーダーの集団です。同スタジオは、NFT マーケットプレイスを開設し、Palm で次世代の仕事をしたいと考えているアーティストや権利保有者にオーダーメイドのクリエイティブ サービスを提供している。Palm NFT Studio は、ConsenSys の創設者で Ethereum の共同創設者である Joseph Lubin 氏、映画プロデューサーで Heyday Films のオーナーである David Heyman 氏、そして世界的な美術家 HENI Group の創設者である Joe Hage 氏によって結集された。この新しいベンチャーは、共同設立者で CEO の Dan Heyman 氏（前 ConsenSys プロトコル担当ジェネラル マネージャー）が率いています。Palm で開始される最初のプロジェクトには、Damien Hirst の『The Currency with Heni』や、Candy Digital の『Major League Baseball』などがあります。



Hyperledger は、エンタープライズ ブロックチェーン ソリューションのためのオープンでグローバルなエコシステムであり、許可されたネットワークと許可されないネットワークを橋渡しする相互運用可能な技術の拠点です。



2021 年に設立された [Linux Foundation Research](#) は、拡大するオープンソース コラボレーションを調査し、新たな技術動向、ベストプラクティス、およびオープンソース プロジェクトのグローバルな影響に関する洞察を提供しています。Linux Foundation Research は、プロジェクト データベースとネットワークを活用し、定量的および定性的手法のベストプラクティスへのコミットメントを通じて、世界中の組織の利益のためにオープンソース インサイトのための頼りになるライブラリを作成しています。



Copyright © 2022 [The Linux Foundation](#)

本報告書は、[Creative Commons Attribution-NoDerivatives 4.0 International Public License](#) の下でライセンスされています。

本報告書を参照するために、以下を引用してください：Alan Majer, “The Carbon Footprint of NFTs: Not All Blockchains Are Created Equal,” foreword by Daniela Barbosa, April 2022.