

Web3 とサステナビリティ

ブロックチェーンによる気候変動の影響を減らす方法、
そのためにブロックチェーン自体ができること

2023 年 2 月

Kirsten Sandberg

序文:

Scott Chamberlin, Sr Director Software Sustainability, Intel

翻訳協力:

池川航史 (日立製作所)

西島直 (日立製作所)

平山毅 (日本 IBM)

— Hyperledger Japan Chapter より

スポンサー

intel



目次

序文	3	社会と政治.....	24
はじめに	4	ダイバーシティとインクルージョンの価値	25
エグゼクティブ サマリー	8	必要とされる人的基盤.....	26
議論の構成	9	即実行可能なユースケース.....	27
実現可能なサステナビリティ	9	規格と規制.....	29
Web3 への参加拡大.....	10	現在の勢いを生かす	29
課題の概要	11	技術標準の策定	30
PoW (PoW) のエネルギー消費問題	12	会計基準の策定	30
逆インセンティブか、信頼のコストか?	12	結論.....	32
ハードウェアの製造と廃棄.....	17	謝辞.....	33
持続可能なエネルギーの採用と新しいアプローチ.....	19	資料.....	33
教育と啓発 : カーボンオフセット	22	著者について	35
実装上の課題	23	巻末資料.....	36
ラストワンマイルのギャップ	23		

序文

2022年7月29日、IntelとLinux Foundation Researchは、「Sustainable Blockchains Roundtable」を開催しました。以来、この技術のサステナビリティ（持続可能性）に影響を与える多くの発展がありました。サステナビリティに関連する2つの大きなもの：EthereumのThe Mergeと、プルーフ・オブ・ワーク（Proof of work, PoW）暗号通貨の採掘に関する規制の増加です。Ethereumがプルーフ・オブ・ステーキ（Proof of Steak, PoS）に移行することで、PoWに設計されたエネルギー浪費から初めて大規模な転換が見られました（15ページ、図3参照）。これは、ブロックチェーンを基盤とするエコシステムが必ずしもエネルギー使用に結びついている必要はないことを示しています。2022年のエネルギーコスト上昇と、PoWがエネルギーおよびサステナビリティに与える影響に対する懸念から推進された規制が**増加し始めています**¹。これは、ブロックチェーン技術が私たちのエネルギーグリッドに与える適切な影響は何か、下流での持続可能性への影響は何かという議論を立法府（地方および国家）に加速させています。

重要なメッセージは、あらゆる形態の技術が肯定的な影響と否定的な影響の両方を持つことができ、この技術の採用が地球温暖化の問題に対する結果的な理解が、私たちの意思決定においてより前面に出るべき重要な要因であることです。

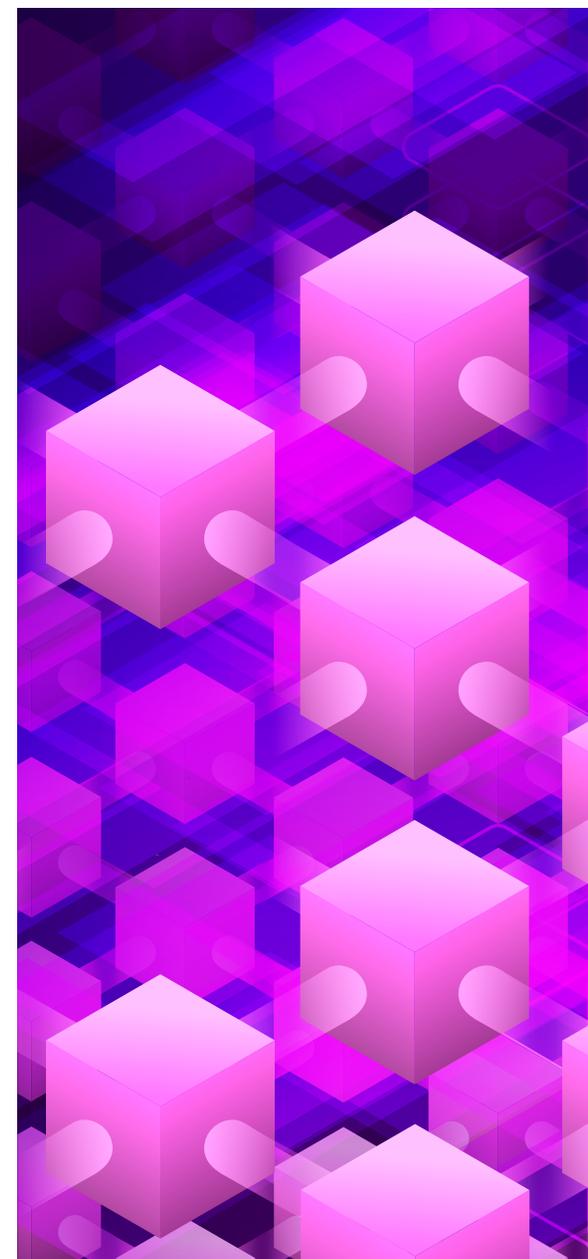
Intelでは、気候変動への対応は広範囲にわたり、複数の次元に焦点を当てています。私たちは**2040年までにグローバルな業務でネットゼロを達成すること**、製品のエネルギー効率を向上させること、そして私たちのチップを使用するPCプラットフォームのカーボンフットプリント（Carbon Footprint of Products、以下CFP）を低減することを誓約しています²。Intelの炭素削減グリーンソフトウェアチームはこの討論会を主導し、スコープ3の下流排出量の削減も拡大し、お客様が私たちの製品を使用する際の炭素排出量を低減するお手伝いをしています。この討論会はその取り組みから生まれ、PoW、ゲーム、AIなどの高エネルギー負荷投資の意味をより深く理解し、環境への影響を最小限に抑えつつ、お客様に最大限の価値を提供する製品開発に取り組んでいます。

この討論会は、Tamara Knesse（Director of Developer Engagement）とZane Griffin Talley Cooper（Graduate Technical Intern）によって作成され、主導されました。彼らのビジョン、熱心な努力、そして影響力がこの報告書を可能にしました。

Scott Chamberlin
Sr Director Software Sustainability, Intel

1 <https://www.marketplace.org/2023/01/13/crypto-mining-hits-a-very-rough-patch/>

2 <https://www.intel.com/content/www/us/en/newsroom/news/net-zero-greenhouse-gas-emissions-operations.html#gs.pa1wq8>



はじめに

このイベントの開催と、討論会の議論を基にした以下の報告書の作成にあたり、私たちはコミュニティを構築し、エコシステム全体の変革を促し、ビジネスおよび組織的な価値を創出することを目指しました。気候変動の危機は1つの企業が設計した1つの技術で解決することはできません。それは包括的かつ業界横断的な取り組みが必要であり、コミュニティ、学術研究者、気候専門家からの意見が求められます。また、この報告書が Web3 にあまり詳しくないテクノロジー業界の人々にとって、この新興開発者エコシステム全体におけるコミュニティ、プロジェクト、サステナビリティへのアプローチの多様性についてより詳細な理解を得るための指針となることを願います。

Intel のオープンソースへの確固たるコミットメントは、この取り組みの重要な一部であり、仲間との関係や技術を構築して、積極的な社会変革を実現します。³ 我々は、このイベントから生まれた報告書が、サステナビリティとブロックチェーンについての広範なコミュニティに知識を構築する助けとなることを願います。

Intel の事業部や研究所からの多くの代表者に加えて、Arjun Kapoor (Director of Strategy for Intel® BlockscalesTM) や Claire Vishik (Intel fellow: ハードウェア、セキュリティ、暗号学⁴) などが参加し、様々な観点からブロックチェーンの文化的、生態学的、政治的な利害について考える学際的な学者・研究者集団を集めました。

- 計算とエネルギーの関係について異なる考え方を持つ Proof-of-work (PoW) 基盤構築者およびプロバイダー

- Web3 技術を活用する炭素市場およびエネルギー取引会社
- ブロックチェーン上およびブロックチェーン外での炭素測定および利益検証を促進する温室効果ガス基準団体⁵

参加者は、オーストラリア、カナダ、アイスランド、スイス、イギリス、アメリカ合衆国など、多くの異なる地域から集結しました。思想や地理的な観点からの様々な観点に加えて、ブロックチェーン業界で一般視されているダイバーシティを考慮し、性別や人種の多様性にも最大の注意を払いました。⁶

今回は、Bitcoin、Ethereum、分散型自律組織 (DAO) など、Web3 を取り巻く様々なコミュニティが参加し、より多様で興味深いイベントとなりました。⁷ 参加者は、サステナビリティの意味や、サステナビリティの取り組みを支援するためのブロックチェーン技術の使用方法和、ブロックチェーン自体をより気候に優しいものにするための様々なアプローチについて、小規模なブレイクアウトセッションや大規模なグループディスカッションで議論しました。

参加者は暗号資産価値暴落に関する発言を避けましたが、その事態が私たちの会話に影響を与えたことは確かです。多くの参加者は、炭素利益やその他のグリーンウォッシングの主張が、暗号資産をめぐる詐欺やセキュリティ侵害に近い危険性があることに懸念を表明しました。

3 Pat Gelsinger, "An Open Letter to an Open Ecosystem," LinkedIn, LinkedIn Corp., 25 Oct. 2021. <https://www.linkedin.com/pulse/open-letter-ecosystem-pat-gelsinger>.

4 Claire Vishik, Intel fellow, LinkedIn, LinkedIn Corp., n.d. <https://www.linkedin.com/in/cvishik.Teixeira>

5 "Proof-of-work," Wikipedia, Wikimedia Foundation Inc., last updated 13 Oct. 2022. https://en.wikipedia.org/wiki/Proof_of_work.

6 Frizzo-Barker, Julie A., Women in Blockchain: Discourse and Practice," Co-Construction of Gender and Emerging Technologies, AoIR Selected Papers of Internet Research, 5 Oct. 2020. <https://doi.org/10.5210/spir.v2020i0.11215>.

7 "Decentralized Autonomous Organization," Wikipedia, Wikimedia Foundation Inc., last updated 19 Oct. 2022. https://en.wikipedia.org/wiki/Decentralized_autonomous_organization.

イベントでのプライバシーと率直さを確保するために、我々はチャタムハウスルールに従いました。参加者は議論から得られる情報を自由に使用することができますが、特定のコメントを支持する発言をすることはできません。

匿名の自由が、Web3 空間が現在直面している驚異的な課題と豊かな機会について、豊かな議論と重要な知見をもたらしました。その結果、標準化と規制を求める声が強かったです。また、PoW に関連する排出量を正確に計算することは困難ですが多くの人が試みています。⁸しかし、Non-Fungible Tokens (以下、NFT) やその他のエネルギー多消費型のユースケースに対する世間の認識から、NFT を禁止する企業や暗号取引を全面的に禁止しようとする動きが出てきています。⁹ サステナビリティと炭素削減に対する Web3 独自のアプローチの成功は、現場での検証と報告のための強力なインフラに依存しています。

討論会では、ほとんどの参加者は、2022 年 9 月 15 日に結集された Ethereum の PoW から PoS への移行について言及しませんでした。¹⁰ この待望の変更により、ネットワークのエネルギー使用量は約 99% 削減されると言われています。

しかし、言われていることと実際に行われていることには大きな乖離があり、コミュニティとしてはその違いを探索する必要があります。また、これらの乖離に関する知識と理解を深めるためのさらなる研究も必要です。

The Merge により、かつて Ethereum ネットワークと呼ばれたもの全体のエネルギー使用量が減少と決定することは難しくなりました。これまでに Ethereum をマイニングしていたすべてのグラフィック・プロセッシング・ユニット (以下、GPU) が消滅したわけではありません。PoW のためにすでに構築されたハードウェアやその他のインフラは存在し続け、スイッチのように切り替えることはできません。多様なコミュニティの有識者は、これらのハードウェアをどうするかについて、あらゆる種類の決定を下しています。ある者は他の利益を上げる暗号資産をマイニングするかもしれません。またある者は GPU インフラを他のワークロードに再利用するかもしれません。さらに、PoW で Ethereum のマイニングを続けるために少数の Ethereum マイナー団体がハードフォークを作成しました。¹¹ その結果 Ethereum がエネルギー消費量を 99% 削減したという主張は複雑であり、過去 10 年間に構築された PoW インフラが単純に消滅するわけではありません。確かに一部はそうなりますが、他は何か違う異なったものになります。それらはどうなるのでしょうか？また、何ができるのでしょうか？これは、Intel や他の業界を牽引する者にとって重要な問題となります。

参加者の中には、真夜中に実施される The Merge を待ち望み The Merge パーティに参加した人もいましたが、The Merge とその後起こった出来事は、Web3 コミュニティと共にこのイベントで取り組むことを目指した議論と実践のギャップの良い例となりました。¹²

8 Bitcoin Energy Consumption Index, Digiconomist.net, as of 21 Oct. 2022. <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption>.

9 Tan, Eli, "Minecraft Bans NFTs, Sending One In-Game Builder's Token Spiraling," CoinDesk, Digital Currency Group, 20 July 2022. <https://www.coindesk.com/business/2022/07/20/minecraft-bans-nfts-sending-one-in-game-builders-token-spiraling/>; and Sigalos, MacKenzie, 35 "New York Just Passed a Bill Cracking Down on Bitcoin Mining: Here's Everything That's in It," CNBC CryptoWorld, CNBC LLC, NBCUniversal, 3 June 2022. <https://www.cnbc.com/2022/06/03/heres-whats-in-new-yorks-new-bitcoin-mining-ban-.html>.

10 Buterin, Vitalik (@VitalikButerin), "And we finalized! Happy merge all," Twitter, 15 Sept. 2022, 2:59 AM. <https://twitter.com/VitalikButerin/status/1570306185391378434>; and "Proof of Stake," Wikipedia, Wikimedia Foundation Inc., last edited 16 Sept. 2022. https://en.wikipedia.org/wiki/Proof_of_stake.

11 Aguilar, Diana, "Ethereum Post-Merge Hard Forks Are Here. Now What?" Cointelegraph, 22 Sept. 2022. <https://cointelegraph.com/news/ethereum-post-merge-hard-forks-are-here-now-what>.

12 weblin.io (@weblin), "Ethereum Merge Party," Twitter, 15 Sept. 2022. <https://twitter.com/i/broadcasts/10wGWwjkdPRGQ>.

利用者のニーズを予測しようとするグリーンソフトウェア研究チームにとって、討論会は気候変動とブロックチェーンの関係について率直かつオープンな会話をする機会であると考えていました。脱炭素化の取り組みをさらに進めるためのブロックチェーンの利用や、エネルギーを大量に消費する PoW システムの害を軽減することに関しては、サステナビリティにの定義は多様であり、それにアプローチする手法も異なります。

討論会の直前、オランダのカーボンオフセット事業者である Land Life は、スペインで大規模な山火事を誤って引き起こし、自社の植林活動¹³が台無しになってしまいました。時に技術的介入は予期せぬ影響を及ぼします。ブロックチェーンは Land Life の事業のごく一部だが、このような報道は、カーボンクレジットやカーボンオフセットに関して、グリーンブロックチェーンの主張に対する一般の人々の警戒心を高める可能性があります。¹⁴ ジャーナリストたちは、カーボンオフセット事業者の主張を暴露したり、少なくとも複雑化したりする記事を掲載しています。Thomson Reuters Foundation は、この新市場の先駆者であるブラジルのグリーン気候技術企業 Moss が、アマゾン地域の先住民族グループから支援されており雨林を保護すると称して、「低品質」であると内々に発表したカーボンクレジットを購入し、さらにそれを他のものと混合して自社のデジタルトークンをバックアップし、支払額をはるかに上回る価格で販売していたことを明らかにしました。¹⁵ カーボンオフセットは、企業がネットゼロの目標を達成するために重要な価値がありますが、

カーボンクレジットの信頼性を検証するためには、より多くの行動を実施する必要があります。¹⁶

このような挫折から、サステナブルブロックチェーンの分野、特にカーボンオフセットや南半球の先住民族コミュニティおよび他の現代社会から隔離されたコミュニティに利益をもたらすことを目的とした取り組みに関する主張については、基準、透明性、説明責任が必要であることは明らかです。

証券取引委員会が上場企業に対する新たな環境・社会・ガバナンス (ESG) 開示要件を実施したため、ESG 規制は炭素排出量の測定と報告をこれまで以上に重要視し、長期戦略やコンプライアンス対策と同様に現場での実践を形成しつつあります。2021 年に中国が暗号資産マイニングを非合法化した後、世界の PoW インフラの大部分が北米に移行したため、PoW マイナーはこれまで以上に炭素排出量を正確に測定および報告する義務があります。¹⁷ また、PoW の高いエネルギー使用量が送電網の近代化にどのように役立つのか、あるいは再生可能エネルギーの建設にどのようなインセンティブを与えるのか、よりよく伝える努力も増えています。¹⁸

PoW の他にも、カーボンクレジットをトークン化する試みなど、そもそもサステナビリティや ESG をどのようにイメージするかというアプローチ (再生ファイナンス、ReFi) を再考しようとするプロジェクトが、膨大な

13 Ongweso Jr., Edward and Lorenzo Franceschi-Bicchierai, “Corporate Carbon Offset Company Accidentally Starts Devastating Wildfire,” Motherboard, Vice Media Group, 21 July 2022. <https://www.vice.com/en/article/v7vdyx/corporate-carbonoffset-company-accidentally-starts-devastating-wildfire>.

14 “Explore Our Projects,” LandLifeCompany, Land Life Co., as of 3 Nov. 2022. <https://landlifecompany.com/projects>.

15 Asher-Schapiro, Avi and Fabio Teixeira, “Fears of ‘Subprime’ Carbon Assets Stall Crypto Rainforest Mission,” Context, Thomson Reuters Foundation, 13 Sept. 2022. <https://www.context.news/net-zero/long-read/fears-of-subprime-carbon-assets-stall-crypto-rainforest-mission>.

16 Teixeira, Marcelo, “As the Amazon Burns, Brazilian Firms Tap Investors in New York for Help,” Reuters, Thomson Reuters Corp., 20 Sept. 2022. <https://www.reuters.com/business/sustainable-business/amazon-burns-brazilian-firms-tap-investors-new-york-help-2022-09-20/>; and “Net Zero Coalition,” Climate Action, United Nations, n.d. <https://www.un.org/en/climatechange/net-zerocoalition>.

17 Malik, Naureen S., “Texas Crypto Miners Face Inquiry from Warren Over Power Use,” Bloomberg News, Bloomberg LP, 12 Oct. 2022. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-10-12/texas-crypto-miners-face-inquiry-from-warren-over-power-use>.

18 Phillips, Nicola, “The White House Crypto Assets Report Supports Soluna’s Business Model,” Nicola Phillips Blog, Medium, 12 Sept. 2022. <https://medium.com/clean-integration/the-white-house-crypto-assets-report-supports-solunasbusiness-model-4002ba9b6915>; and ARK Invest, “Bitcoin is Key to an Abundant, Clean Energy Future,” Bitcoin Clean Energy Initiative Memorandum, Square Inc., April 2021. https://assets.ctfassets.net/2d5q1td6cyxq/5mRjc9X5LTXFFihlTt7QK/e7bcb47217b60423a01a357e036105e/BCEI_White_Paper.pdf.

エコシステムを形成しています。¹⁹ これらのアプローチの中には、非常に物議を醸すものもあり、現時点ではそのすべてがどのように着地するかは不明です。²⁰ しかし、今回の討論会の参加者が強調したように、標準化と規制は、我々が現在置かれている、時に混沌とした Web3 を超えて、この空間を構築し形成するのに役に立ちます。

より標準化され、規制された Web3 はどのようなものになるのでしょうか。Intel や他の業界を牽引する者たちは、今この問いに答える貴重な機会を得ています。オープンソースのソリューションは、必然的にその解の一部となります。ブロックチェーンは、実質的には、関連するネットワーク全体からの参加者や入力を通じて合意形成する分散型台帳プロトコルに過ぎません。技術として、ブロックチェーンは本質的に非中央集権的ではありませんが、分散化の特定の構造を促進することができます。また、本質的にオープンソースではないが、インフラとして、オープンソースソリューションを生産的に促進することができます。そしてもちろん、Filecoin Green、Energy Web、KlimaDAO、Bitcoin など、多くの気候関連のブロックチェーンプロジェクトは明確にオープンソースとなっています。

オープンソースのサステナブルブロックチェーンが、ますます経済的・社会的に関心を持たれることが示唆されています。我々のイベントと同時期に、完全なるオープンソースのプロジェクトである Filecoin は、パリでサステナビリティのトップ思想家を招いて、専門家のトークセッションやワークショップ、ディープダイブを特集した 2 日間のサステナブルなブロックチェーンサミットを開催しました。²¹ オープンソースのブロックチェーンは、より高い透明性を確保しつつ、様々な企業や機関が協力しやすくなります。

本報告書や討論会より得られた知見が、脱炭素化とより広範な社会正義の取り組みとの関係に何らかの光を当てることができることを願っています。Web3 の空間では、気候正義はしばしば「あったらいいな」と

いう願望を含む部分となり、会話の本質的な部分ではありません。これは、気候正義のツールが技術的なものだけでなく、社会的、文化的、政治的なものでもあるためです。このようなレンズを通して思考することは困難であり、ほとんどの場合、我々は挫折してしまいます。

また気候正義は、同時に複数のスケールで考える必要があります。我々が Web3 で取り組んでいる問題は、テクノロジー業界全体、そしてそれ以上の問題とも類似しています。我々は、まだ初期段階にあるエコシステムとして、気候の影響や炭素会計について、真剣に考えています。そして、このイベントが新しいアイデアや方向性を生み出すきっかけになることを願っています。なぜならば、私たちは集団的に、より緑豊かな未来へ向けて前進するしかないからです。

Tamara Kneese
Intel

Zane Griffin Talley Cooper

19 Owocki, Kevin, "How Crypto is Regenerating the World," Bankless Newsletter, 18 May 2022. <https://newsletter.banklesshq.com/p/how-crypto-is-regenerating-the-world>; and Fogel, Phil, Ben Noel, and Sebastian Frankel, "Regenerative Finance is the Future of Web3," FlowCarbon, Flow Carbon Inc., 21 July 2022. <https://www.flowcarbon.com/knowcarbon/regenerative-finance-is-the-future-of-web3>.

20 Calma, Justine, "Crypto Can't Fix Carbon Offsets, But Crypto Fans Are Trying Anyway," The Verge, Vox Media LLC, 18 Aug. 2022. <https://www.theverge.com/2022/8/18/23310254/carbon-offsetcredits-crypto-tokens-adam-neumann-wework>.

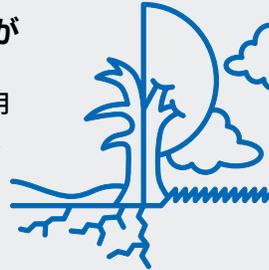
21 Filecoin, "Highlight Video Filecoin Meetup Paris 2022," YouTube.com, 26 July 2022. <https://www.youtube.com/watch?v=qjBXj2bHixk>.

エグゼクティブ サマリー

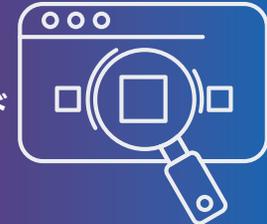
ブロックチェーン ネットワークを動かすために必要なエネルギーは、そこに保存されているデジタル資産を保護するための主要なセキュリティメカニズムでもあります。



気候変動の影響が悪化するにつれ、より多くの電力を使用するデジタル資産は、投資家にとって魅力的でなくなるように見えます。



暗号資産のマイニングに使用されるエネルギーについて、より良いフィールドデータと査読付き研究が必要です。



読み書き可能なWeb3は、オープンで信頼できるデータエコシステムの人格権、プライバシー権、財産権を主張します。



Web3は個人が資産を所有し管理する、社会の仕事を組織化しインセンティブを与える新しい方法を与えます。



サステナビリティプロジェクトの成功は、プロジェクトを埋め込む文脈に依存します。

プロジェクトの成功は、サイロを取り除き、学際的なアプローチをとり、並行して政策を展開することに依存します。



炭素排出量の追跡が困難なため、カーボンオフセットは進捗状況を確認する上で信頼性に欠けます。

パブリックブロックチェーン上で動作する中立的なダッシュボードは、業界のインセンティブを調整し、リサイクル実践に関する主張を確認するのに役立ちます。



マイニングデバイスの熱を地域エネルギーシステムに転送する技術は、家庭やビルの暖房に有望です。

公共政策は、循環型経済イニシアチブ、直接的な炭素回収、自然エネルギーにインセンティブを与えることで、電子廃棄物の削減を支援することができます。



規制の明確化、測定と報告の基準、エネルギー計算の独立したレビューがあれば、投資の増加につながります。



議論の構成

2022年7月、IntelとLinux Foundationは、チャタムハウスルールの下で、ブロックチェーンとサステナビリティに関する多角的な討論会を開催しました。¹ イベント主催者の目標は以下の通りです。

- Web3の多様なコミュニティ全体でサステナビリティの意味と実践について批判的に考えること。そして、複数のスケールで社会的、文化的、政治的、技術的な関係を考慮すること。
- 我々が集団でより環境に優しく、公正な未来に向かって進むことのために、新しいアイデアや方向性を浮上させ、他業界間でも新しい価値を創出すること。
- イノベーションの環境影響をより正しく測定および管理し、気候への影響を最小限に抑えるために我々自身をより良く組織化する方法を探求すること。

ブロックチェーン分野を代表する、技術者、学術研究者、気象専門家がビデオ会議で集まり、気候変動とWeb3技術について率直かつオープンな議論を行いました。明らかになったことは以下の2点です。

- グローバルな資源であるビッグデータ、データ収集や報告ツールとしてのモバイルやソーシャルメディア、そしてアナリティクスや意思決定科学を含むインターネット通信やコンピューティング能力は、我々の間の解を得るための重要な手段です。²
- 「未来はすでにここにあり、不平等に分配されている」という言葉があるように、その利益や外部性も不平等に分配されており、最も貧しい人々や最も疎外された人々が負担の大部分を負っていません。³

Web3の基盤レイヤーとしてブロックチェーンは、問題の一部なのか、解決策の一部なのか、あるいはその両方なのか不明であり、この研究報告書がその解明の一助となることを期待しています。

実現可能なサステナビリティ

参加者は、サステナビリティの要諦について議論しました。ある参加者は、「サステナビリティという言葉には抵抗がある」と発言しました。「それは非常に曖昧です。だから私はいつも、『誰のために、どれくらいの期間、何を持続させようとするのでしょうか。また、歴史はどうなっているのでしょうか。力関係はどうなっているのでしょうか。』と尋ねました。また別の参加者は「金融的な意味での清算とは逆である」とも発言しました。悪いお金を追加投資することではなく、我々が何に投資し、なぜそうしたかを深く探求することが必要とされます。しかし、リーダーシップの継続性や組織的な記憶がなければ、サステナビリティプロジェクトを支持する理由が後継者たちに明らかでない場合があります。

国連が提唱する「サステナブル デベロップメント」の定義を引用し再構築したものが「将来の世代が自分たちのニーズを満たす能力を損なうことなく、現在のニーズを満たす開発。」です。⁴ 国連はまた、私たちが「技術と社会組織が環境資源に与える影響を管理することで、新しい経済成長の時代を切り開くことができる」と提案しています。⁵

他にも、技術の長期的な実現可能性（人々がそれを使用するか、コミュニティがそれを囲んで形成されているか）だけでなく、その環境への影響についても意味を拡張しました。さらに、Linux カーネルやBitcoin プロトコルなどの共有オープンソースソフトウェアの観点から、参加者たちはサステナビリティを3つの尺度に分割しました。

- 「サステナブル デベロップメント」とは、プロジェクトが長期にわたってコアデベロッパー（中核となる開発者）を維持し、資金を提供し、新しいコアデベロッパーを育成し、長期にわたって人材を交代させること。

- 「サステナブル パーティシペーション」とは、プロジェクトがコミュニティと継続的にコミュニケーションをとり、重要な決定において意見を歓迎し、コミュニティを巻き込むこと。
- 「サステナブル オペレーション」とは、どのような規模、どのような状況でも、技術を使用することで環境に害を与えず、環境保護の手助けする可能性を有すること。

しかし、これらは単に人数や交流の数、プロジェクトの存続、分岐、失敗といった数字の問題ではありません。討論会参加者の発言を十分に理解するには、Web3 とそこに至るまでの経緯を振り返って見る必要があります。

Web3 への参加拡大

2009 年以来、人々は Bitcoin ブロックチェーンを価値の保存、収入源、そしてイノベーションの刺激として利用してきました。本記事執筆時点で、約 97 万 7 千件のアクティブなアドレスがあり、800 人以上のコード貢献者と持続可能な参加の尺度に関連する活発なコア開発者が数名います。⁶ それは、Web1.0（読み取り専用のインターネット）と同様に、実用的な目的では分散型でオープンソースです。また、Web2.0（読み書き可能なインターネット）とは異なり、誰もそれを制御していないが、政府は通信サービスプロバイダーを制御することによってそのアクセスを制限しようと試みています。価値の貯蔵としての金と同様に、Bitcoin は希少性がプログラムされており、その価格は株式や債券などの従来の資産クラスと比較して相関性が低く、Bitcoin はインフレに対する魅力的なヘッジです。⁷

収入を得るために、誰でも Bitcoin ソフトウェアをダウンロードして、ハードウェアおよび電力を提供することで実行することができます。あとはソフトウェアが、取引の検証、取引のブロックの組み立て、計算上困難な問題の解決、PoW を示すことで、次のブロックを作成し Bitcoin を受け取る権利を獲得します。この処理を実行する者はマイナーと呼ばれます。彼らはそれぞれブロックチェーンと呼ばれるブロックが数珠つなぎになったデータのコピーを保持します。マイナーが PoW を提供することで、彼らは勝利した解決策について合意を得た後に、再び次の問題を解決するために競争します。

2015 年に発表された Ethereum ブロックチェーンは、大きな改善をもたらしました。Vitalik Buterin が率いるそのクリエイターらは、2 つの重要な方法でデザインスペースを進めました。⁸

- 第一に、Bitcoin ブロックチェーンが、ある中央機関なしに、一定数の Bitcoin を発行し、安全にピアツーピア (P2P) で転送する分散台帳として特別な役割を果たしたのに対し、Ethereum は、あらゆる種類の計算やアプリケーションを分散的に実行する仮想計算機 (DApps) として機能しました。
- 第二に、クリエイターたちは、The Merge と呼ばれるプロセスで PoW から PoS へ移行することを計画し、2022 年 9 月に実施されました。⁹ 本記事執筆時点では、約 46 万 3 千のアクティブなアドレスを追跡しており、900 人以上の貢献者と、活発なコア開発者が数名います。¹⁰

ブロックチェーンをベースに、そのソフトウェア原理を新しいプロトコルやプラットフォーム、DApps に応用し、人工知能やセンサー、3D グラフィックス、拡張現実ハードウェアと組み合わせ、Wi-Fi、5G、衛星、ブロードバンドで継続的に接続させることで、世界中の人々が現実や仮想環境で一緒に文化を創造できるようになります。¹¹

読み書き、そして所有することができる特徴を持つ Web3 は、このオープンな文化、すなわちオープンかつ信頼できるデータを中心に形成されるエコシステムにおける、努力の調整、確認、認識、価値の P2P の交換と追跡、人格権、プライバシー、財産権の主張について本質的なものです。ある討論会参加者は、「ブロックチェーンに対する関心が高い地域（特にヨーロッパ）では、プライバシー分野での有用性が含まれています。技術や関連するアーキテクチャが優れています。」と述べました。

課題の概要

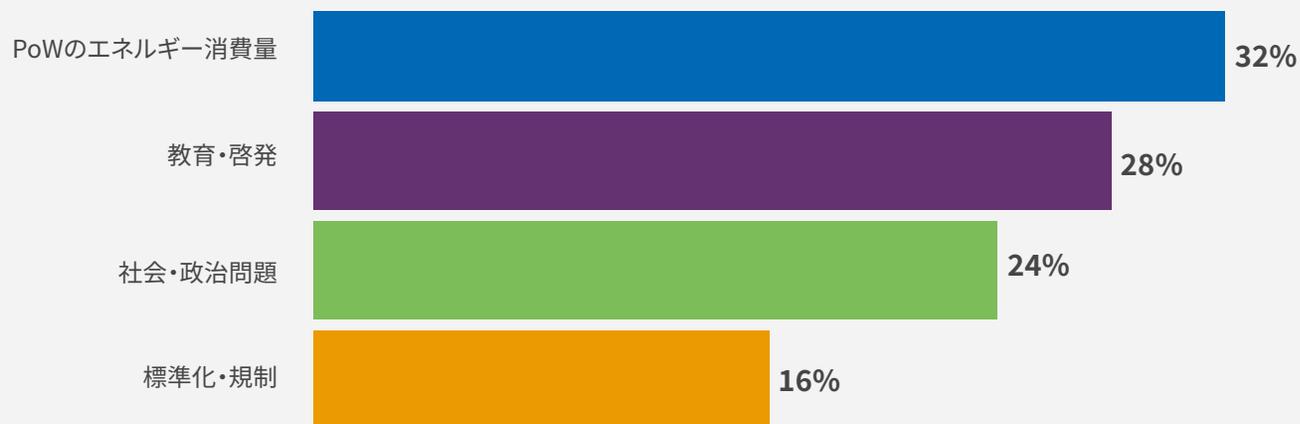
討論会の参加者は、デジタル資産を所有することへの関心が高まる中、「ブロックチェーンの気候への影響に対処することが急務である」と強調したのが大勢を占めています。OnePoll が 2022 年 3 月に実施したオンライン調査では、成人アメリカ人の 53% が暗号資産を「金融の未来」と考えていることが明らかになりましたが、その 3 分の 1 は炭素排出量の少ない製品を増やしてほしいと考えていることが明らかになりました。¹² 討論会参加者の中にも、同様の危惧を表明する者がいました。ある参加者は、「我々はデジタル資産を強く支持しています。しかし、気候変動の影響が深刻になればなるほど、電力を多く使うデジタル資産は、投資家にとって魅力的でなくなっていくでしょう」と述べました。

また、討論会参加者は、Web3 技術が直面する持続可能性の課題について、アンケートを行いました (図 1)。その結果、最も重要なのは、PoW 合意メカニズムを使用するブロックチェーンによって消費されるエネルギーであり、2 番目はそのエネルギー消費の目的や Web3 のイノベーション能力に対する認識や理解不足、3 番目は社会的・政治的懸念 (特にこれら議論の文脈)、4 番目は技術的・財務的会計基準および規制の必要性に関してでした。それぞれのトピックを順番に探ります。

図 1

WEB3 が直面する最大のサステナビリティ課題は何ですか？

討論会投票結果 (N=25)



PoW (PoW) のエネルギー消費問題

Bitcoin ブロックチェーンのために開発され、他のブロックチェーン開発者によって複製または採用された PoW のコンセンサス メカニズムは、このようなチェーンには、Dogecoin、Ethereum、Bitcoin の初期のフォークなど、175 件が CoinMarketCap に上場しています。¹³ Bitcoin の価格が上昇すればするほどより多くの関係者がマイニングを望むようになります。マイナーが多ければ多いほどパズルが難しくなり、パズルが難しいほどそれを解くために必要なエネルギーが多くなります。

ある討論会の参加者は、システムを現状のまま評価し、既に存在する権力やインセンティブ構造を調査し、今後どのようにそれらのインセンティブ構造を改善できるかを検討する必要があると提案しています。PoW を検討する際に、外部のインセンティブ構造が進化することは非常に重要な要素です。

逆インセンティブか、信頼のコストか？

Bitcoin ブロックチェーンの当初の構想は 1 つの中央処理装置 (CPU)、1 つの投票、または 1 つのチャンスで、最初に勝利するソリューションを考え出すことだったと、ある参加者は述べています。このプロセスを Bitcoin のプロトコルが任意に勝者を選ぶ 10 分ごとに行われる抽選に例える人もいます。抽選と同様に、GPU や FPGA を使用したり、より良いデバイスを購入したり、リソースをプールしたりすることで、当選確率が上がることがわかりました。¹⁴

別の参加者は、このサイクルをマイニングハードウェアが多ければ多いほど、PoW システムで儲けやすいという逆インセンティブと呼んでいます。ハードウェアメーカーは、ASIC (特定用途向け集積回路) マイニングデバイスを開発し通常のマシンの 100 万倍以上儲けることができるとある参加者は述べています。ASIC Bitcoin マイナーの最新モデルの中には、1 秒間に 110 から 148 テラハッシュ (TH/s) を実行でき、1 時間に 3,250 ~ 3,850 ワットを使用し、コストは 3000 ~ 6000 ドルです。¹⁵ マイニングプールに加えて、GRID、Hive、Argo といった企業がマイニン

グファームを設立し、これらの産業用 ASIC を保管する倉庫として機能しています。参加者はこれがマイニングと利益の中央集権化につながっていると考えています。暗号市場の下落局面では、マイニング事業がさらに統合される可能性があります。¹⁶

討論会の参加者の中には、推定方法が異なるため総使用エネルギー量に合意することが困難であると指摘する人もいます。例えば、討論会で言及されたサイトの一つである Cambridge Centre for Alternative Finance (CCAF) は、収益性の高いハードウェアの単純な重み付け、公開されているデバイスのメーカー仕様、電力価格の推定値から計算するボトムアップ方式をとっていると述べています。¹⁷ CCAF の年換算での計算によると、本稿執筆時点で、世界の Bitcoin ネットワークは 93.33 テラワット時 (tWh) のエネルギーを使用していることとなります。¹⁸ 一方、Digiconimist はトップダウン方式をとり、マイニング収入の合計とマイナーが支払う電力 1kWh あたりの価格を推定しそのコストをエネルギー消費に換算しました。¹⁹ その結果、年換算で 131.43tWh となり、マイニング収入の 60% をマイニングオペレーションで消費すると推測しています。²⁰

コンピューティングのエネルギー専門家である Jonathan Koomey によると、このような仮定に基づく計算には誤差が生じやすいと述べています。(Bitcoin 価格のような) 経済パラメータは変動しやすく、電力使用量との相関は不完全です。²¹ Koomey は、Bitcoin の総電力使用量についてよく引用される 6 つの見積もりの背後にある方法論を分析したところ、どれも不確実性とマイニングの地理的な変動をまったく扱っていないことを発見しました。彼は 2000 年の「情報技術の電力使用量に関する誤った報告」を振り返り、これらの主張はすべて誤りであることが判明したが、それを証明するために何年もの査読付き調査が必要だったと述べました。そしてより多くの実測データとインフラストラクチャーによる電力使用量が必要だがどちらもまだ容易に入手できない、と結論づけました。

表 1

KOOMEY のベストプラクティス 正確なコンピューティングエネルギー解析

すべきこと
ボトムアップで構築する
その日の見積もりを報告する
そのフィールドでコンポーネントやシステムの測定データを収集する
マイニングオペレーションの立地条件に応じた適切な対応をする
不確実性を明示的かつ完全に評価する
完全に正確かつ透明性の高いドキュメントを提供する
すべきではないこと
基礎となるデータについて推測して大まかな見積もりを出す
未来を推定する

ソース: JONATHAN KOOMEY, “ESTIMATING BITCOIN ELECTRICITY USE: A BEGINNER’S GUIDE,” COIN CENTER, MAY 2019.

ある討論会の参加者は、Bitcoin のカーボンフットプリントに対する疑問を説明しました。「Bitcoin のようなデザイン的に無駄の多いデジタル資産にとっても懸念があります。コードに組み込まれたインセンティブは、人気が出れば出るほど、より多くの電力を使うことを求めるもので、減るものではありません。」この方は次の例をあげました。「私たちの車はどんどんエネルギーを使わなくなりより効率的に電気を使うようになっています。すべての資産に対しても同様にすることが必要です。」確かに、暗号通貨のマイニングに使用されるハードウェアは、時間の経過とともに効率的になっています (図 2)。

しかし、討論会の参加者は、インセンティブは少しでもエネルギーを使うのであれば、デジタルであれ、物理であれ、省エネルギーで効率良く資産を創造することを奨励すべきだと主張しました。例えば、電子機器や事務機器およびデジタル部品を搭載したその他の製品に対する環境保護庁の ENERGY STAR プログラムは、2020 年だけで米国消費者の「5200 億キロワット時以上の電力と ... 420 億ドルのエネルギーコスト」の節約に成功しました。²² 目標や基準に対する業界全体の合意や取り組みがない場合、政府には役割があるかもしれません。米国高速道路交

通安全局の燃費基準や環境保護庁の排ガス規制などの規制が、自動車のエネルギー向上を後押ししています。²³

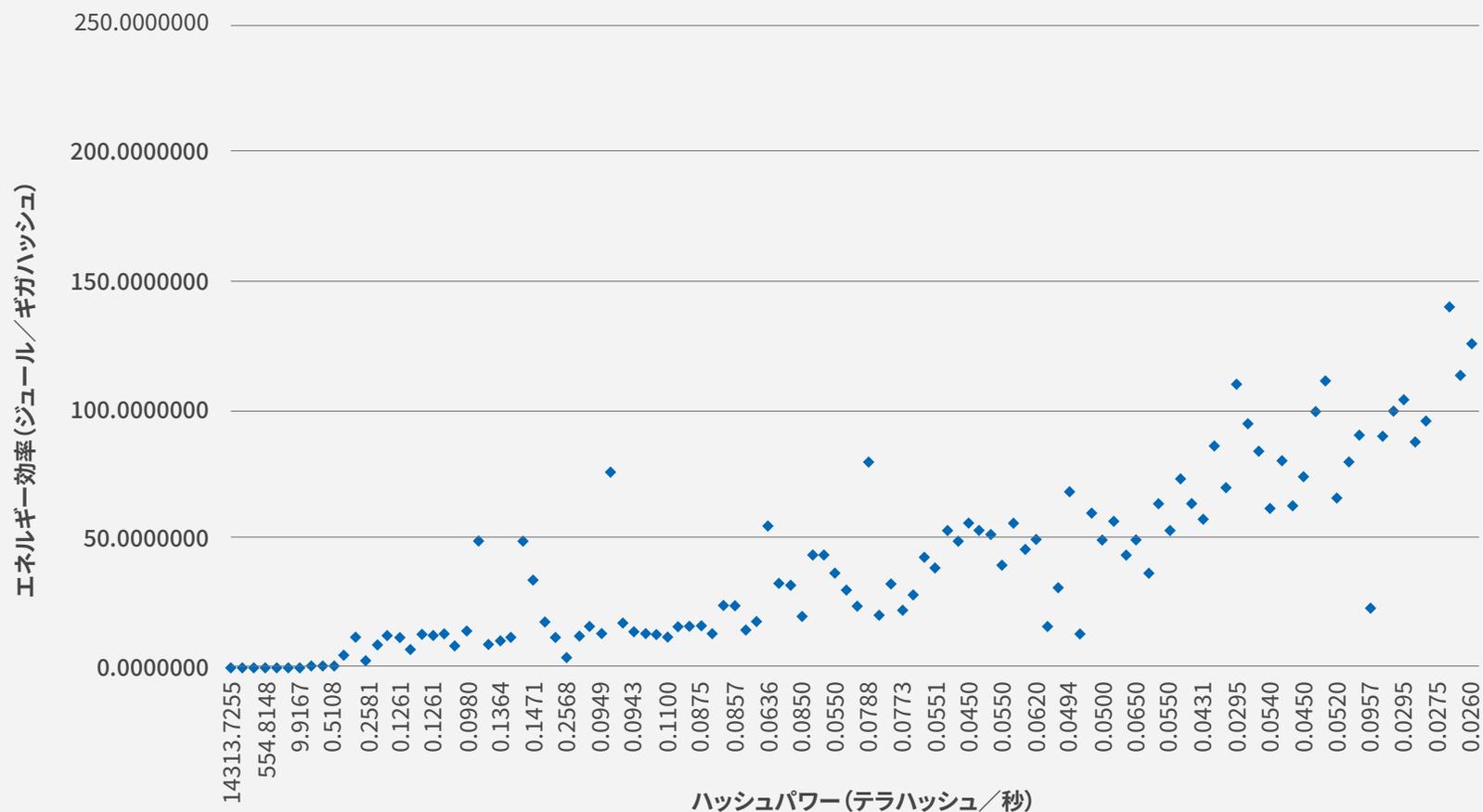
それでも、エネルギーレベルは Bitcoin ブロックチェーンのセキュリティレベルの代わりとなります。エネルギーコストが上昇すると、Bitcoin ネットワークをハッキングするためのコストが金銭的なメリットを上回るかもしれません。討論会の参加者の中には、このエネルギー消費をバグではなく特徴と捉える人もいました。ある人は、初めて、中央権力が取り扱えない、普遍的で安全な方法で信頼問題を解決する技術的なプラットフォームが登場したと述べました。これらはユーザが一緒になって目指しているものです。信頼できない機関が存在する地域の Bitcoin 保有者にとって、エネルギー消費のレベルは、保有資産が恣意的な差し押さえや切り下げに対して脆弱でないという確信を与えてくれます。アルゼンチンの Bitcoin 起業家で Open Money Initiative の共同創設者であるジル・カールソンは、「ペソを保持することはできません。この暑さの中でアイスクリームコーンを持つようなものです。溶けてしまう。何か対策が必要です」と語りました。²⁴

討論会の参加者は次のように説明しました。「この設計によりネットワークを保護するために必要なコンピューティングパワーと、ネットワーク上に保存されている資産との間に直接的な関係が生まれます」。エネルギーは資産に対する主要なセキュリティメカニズムです。不換紙幣の主なセキュリティ方法は、偽造を抑止するための特殊印刷と輸送のための装甲車、金庫を備えた銀行支店と現地流通です。Bitcoin ネットワークのエネルギーと世界の決済システムのエネルギーを比較したいいくつかの研究のうち、コンサルティング会社 Valuechain によるものは、これら 3 つの要素を分離したものです。²⁵ 印刷と造幣 (17.61 tWh)、現金輸送 (166 tWh)、銀行支店 (175.3 tWh) で毎年消費されるエネルギーは 358.91 tWh で、Bitcoin の最高推定値の 2 倍以上と推定しているのです。²⁶ しかし、これらの研究は、電力使用量を過大評価しがちなトップダウンの仮定も行っています。

図 2

BITCOIN のマイニングに使用するハードウェアの効率化

それぞれの青いダイヤモンドは異なるデバイスを表し、左下の象限に古いマシン、右上の象限に新しいマシンがプロットされています。



データソース: CAMBRIDGE BITCOIN ELECTRICITY CONSUMPTION INDEX MINING EQUIPMENT LIST, AS OF 22 SEPT. 2022.

計算効率がよくスケーラブルなブロックチェーン

「ブロックチェーン技術は、しばし高度な冗長性に依存している」と、討論会の参加者は言いました。Bitcoin ブロックチェーンでは、すべてのマイナーが同じ問題を解決するために競争しています。十分な参加者が同じ答えを構築できるのであれば、それはおそらく正しい答えなのでしょう。しかし、冗長性はどうしてもサイクルやエネルギーの労力が大きくなることにつながります。この方は「環境への影響に対する懸念が、ブロックチェーンの技術者を、効率とスケーラビリティを向上させる方法で計算を使用するように駆り立てている」と述べています。

また、シャーディングを例に挙げてユーザーは、作業を多くの異なるマシンに分割し、ネットワークパケットレベルまで到達させ、すべてのマシンが決定論的な特定の作業を行います。しかしそれはすべてオフチェーンで起こることだと指摘する人もいました。ライトニングネットワークはレイヤー2のプロトコルで、2つの当事者がオフチェーンの決済チャネルを使って2者間で一連の取引を処理し、チャネルの最後の状態をBitcoin ブロックチェーンにブロードキャストします。²⁷

最も重要なのはプルーフ・オブ・ステークです。これはエネルギーを消費することでセキュリティを確保するのではなく、トークンを賭けてブロックチェーンの利益にならない場合はトークンを失うというものです。PoWは「攻撃コストと防御コストは1対1の割合であり、防御側の優位性はない」とVitalik Buterin氏は説明します。プルーフ・オブ・ステークでは、セキュリティに対する報酬ではなく、信頼を失うことに対する罰則に依存することで、この対称性を崩しています。²⁸ Ethereumは2022年9月15日に歴史的なプルーフ・オブ・ステークへの移行を完了し、推定エネルギー使用量は激減しました(図3)。

The Mergeは、Ethereum上でNFT(Non-Fungible Token)などのデジタル資産を铸造・取引するために必要なエネルギーを低下させました。これは、非常に人気のある資産クラスの保有者や支持者にとって本当にポジティブなことです。NFTをサポートする他のブロックチェーンも、別の合意メカニズムを使用しています。Cardanoはプルーフ・オブ・ステークを使用し、Solanaは、履歴証明による修正ビザンチンフォールトトレランスを備えたプルーフ・オブ・ヒストリーを使用しています。²⁹

ある参加者は、ethash(EthereumがSHA-256の代わりに使用したハッシュアルゴリズム)を改善したプログラマティック・PoW(ProgPoW)アルゴリズムについて言及しました。³⁰これはetherをマイニングするASICコンピューターの量や、ユーザーが将来的にプライバシー技術に使用する他の証明を解くために再利用できるGPUへの移行を制限するように設計されています。

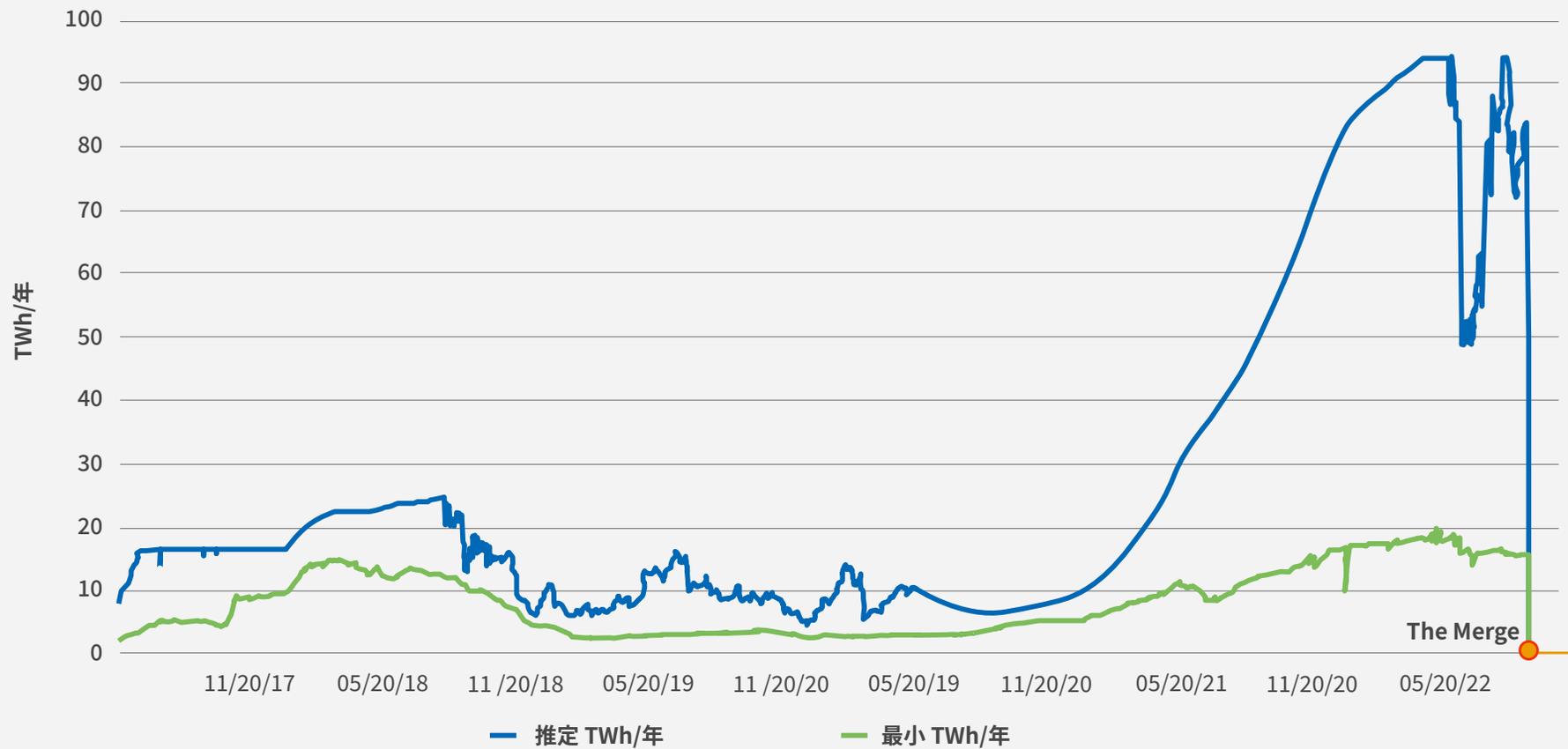
討論会の参加者は、プルーフ・オブ・ユーズフル・ワーク(PoUW)に関するCardanoの研究についても言及しました。³¹その目的は、ブロックチェーンのセキュリティを維持するためにBitcoinブロックチェーンと同じくらい計算困難性をもちつつ、イベントのスケジューリングやロジスティックプランニングなど実世界に関連性のある結果を得ることにあります。³²しかし、それらの問題を選択するにはドメイン固有の知識が必要な場合があります。そして、それらの問題には確率的検証手法のレパートリーが多い傾向があるため、問題が数学的でない限り、結果を検証することは難しいかもしれません。³³

討論会の参加者の中には、このようなアプローチに違和感を持つ人もいました。「私たちは、どのワークロードがエネルギーに値するか、ワークロードの価値について話しています。...仕事量の価値について話しているとき、私たちはとても危険な領域にいると思います。」ボランティアや献血(プラス)などから、地下鉄でのお行儀の悪さ、個人やネットでの政治的抗議活動(マイナス)まで、市民の行動を監視し、プラスとマイナスの値をつける中国の「社会信用スコアリングシステム」が思い浮かびました。³⁴

ある参加者は、「電気を使うために何を求めるかに焦点を当てるのではなく、持続可能な方法で需要を満たすことに焦点を当てる...需要サイドマネジメントの観点から、負荷の価値に焦点を当てます。より多くの自然エネルギーをオンライン化し、断続性の問題に対処するためのツールとして、選択的にそれを利用する」と提案しました。

図 3

THE MERGE 前後の ETHEREUM のエネルギー消費量



データソース: ETHEREUM-ENERGY-CONSUMPTION, AS OF 3 NOV. 2022.

討論会の参加者は、Ethereum のセキュリティに対する懸念を表明しました。もはやエネルギーが Ethereum 上で管理される資産を保護する主要な手段ではなくなっています。Chainalysis によると、2022 年 7 月までに 19 億ドル相当の暗号通貨が盗まれましたが、これは PoW を使用していないブロックチェーンや、これらのチェーンの上や間で動作する分散型金融 (DeFi) サービスからのものが主です。³⁵ Chainalysis は「業界は (分散型アプリケーションやスマートコントラクトコードの) セキュリティを強化し、安全な投資先プロジェクトの見つけ方について消費者を教育すること。また、法執行機関に対しては、ハッキングの意味がなくなるほど、盗まれた暗号通貨を押収する (その) 能力を開発し続けること」を強く求めています。³⁶

ハードウェアの製造と廃棄

チップの処理能力が約 18 カ月ごとに 2 倍になるというゴードン・ムーアの法則は、ほぼすべての人が聞いたことがあるでしょう。あまり知られていませんが、コンピュータのエネルギー効率がほぼ同じ期間で 2 倍になるというジョン・クーマーの法則もあります (図 2)。³⁷ これらの進歩が相まって、CPU、GPU、ASIC の Bitcoin マイニングデバイスは、採算が合わなくなり廃棄、再販、再利用されるまでのライフサイクルは 18 カ月と推定されると討論会の参加者は述べています。(しかし、量子コンピューティングが実現しない限り、こうした性能向上は、2 倍のトランジスタをチップに詰め込んで大規模に製造するという物理的な問題に直面することになります。³⁸) また、別の参加者は、Web3 技術に関する環境問題への懸念について、ハードウェアエンジニアリングの側面が抜け落ちていると述べました。業界として、これらのシステムを動かすハードウェアを製造する際の廃棄物の量は、まだ計算に入れていません。

Bitcoin マイニングの電子廃棄物に関する研究では、この 2 つの問題に対処するため、マイナーの平均的な収益性の寿命を 1.29 年とし、廃棄される機器に関連する電子廃棄物を年間 30.7 メトリックキロトン (kt) と推定しています。³⁹ Bitcoin マイニングコミュニティのメンバーは、この調査結果に反論する書簡を環境保護庁に送りました。実際に、機械は 3 年から 5 年で価値が下がり、その時点で所有者は転売やリサイクルを決断することができると彼らは説明しています。⁴⁰ たしかに COVID の影響で半導体のサプライチェーンが混乱する中、装置の二次市場が

拡大し、Compass Mining や FoundryX などのマイニングプールが古い装置を集約して再販しています。⁴¹ 合併を前に、他の大手マイニング事業者のいくつかは、GPU を PoW マイニングから人工知能、機械学習、視覚効果レンダリングサービスの提供に軸足を移す計画を策定しました。⁴²

さらに、EPA への書簡では Bitcoin ASIC のアルミニウム製ヒートシンクやケーシングは、携帯電話などの従来の電子廃棄物の発生源とは異なり、ほぼ完全にリサイクル可能で、有毒成分やリサイクル困難な成分は含まれていないと強調し、回路基板にはヒ素や鉛だけでなく金、銅、プラチナも含まれており、充電式電池にはコバルトやリチウムが含まれています。⁴³ これらの電子機器を追跡するためにブロックチェーンを使用すれば、電子廃棄物の管理に役立つ可能性があります。例えば、通信会社大手のテレフォニカは、スペインの家庭におけるデジタル技術の利用が 2021 年に急増し、デバイスの消費と電子機器の廃棄が増加していることを知り、再利用可能な製品やリサイクル可能な製品の追跡に、管理型ブロックチェーン「Trust OS」を活用することにしました。⁴⁴ 各デバイスを識別するために Hyperledger Fabric フレームワークを用いた TrustID、デバイスの修理可能性や貴金属の回収可能性を予測するために Exxita 社の Be Circular AI プラットフォーム Aitana を組み込みました。⁴⁵ Telefónica は、この取り組みにより、製品の寿命が延び、有害物質の適切な取り扱いが増えることを期待しています。

サーキュラー・ドライブ・イニシアティブは、データストレージに使用されるハードウェアを再利用する同様の取り組みです。⁴⁶ エコロジーに配慮したブルー・オブ・スペース・タイム (PoST) コンセンサスメカニズムを備えた Chia ブロックチェーン・ネットワークを活用し、ストレージハードウェアの再利用のためのサプライチェーンを最適化します。⁴⁷ また、ストレージをサニタイズするための IEEE 規格を導入することで、このような再利用によるデータセキュリティリスクに対処することを意図しています。⁴⁸ メンバーは、より安価な機器から利益を得ることができるセクターをターゲットに、実行可能な循環経済ビジネスとしてスケールアップすることを望んでいます。

表 2

コンセンサス メカニズム：設計上のトレードオフの比較

名前	ゴール	アドバンテージ	ディスアドバンテージ	タイプ	例
プルーフ・オブ・ワーク (PoW)	ブロックを公開するために計算困難性の障壁を提供する。 信頼できない参加者間の取引を可能にする。	不良ブロックを大量にネットワークへ流出するのが難しい(サービス拒否攻撃)。 パズルを解くためのハードウェアがあれば誰でも参加できる。	設計上、計算量が多い：消費電力が大きく、ハードウェアの軍拡競争になる。 十分な計算能力を得ることで、51%攻撃を受ける可能性がある。	パーミッションレス暗号通貨	Bitcoin, Bitcoin と Ethereum のフォーク, その他多数
プルーフ・オブ・ステーク (PoS)	ブロックを公開するための計算負荷が少ない障壁を可能にする。 信頼できない参加者間のトランザクションを可能にする。	PoW よりも計算量が少ない。 暗号通貨のステークを希望する人なら誰でも参加できる。 ステークホルダーがシステムをコントロールする。	ステークホルダーがシステムをコントロールする。 ステークホルダーの中央集権的なプールを形成することを妨げるものはない。 十分な資金力を得ることで、51%攻撃を受ける可能性がある。	パーミッションレス暗号通貨	Ethereum, Cardano Ouroboros
プルーフ・オブ・ユーズフル・ワーク (PoUW)	ブロックを公開するために計算困難性の障壁を提供する。 信頼できない参加者間のトランザクションを可能にする。	不良ブロックを大量にネットワークへ流出するのが難しい(サービス拒否攻撃)。 パズルを解くためのハードウェアがあれば、誰でも参加できる。 ゼロナレッジにすることができる。	設計上、計算量が多いが、エネルギーの浪費にはならない。 十分な計算能力を得ることで、51%攻撃の可能性はある。	パーミッションレス暗号通貨	Cardano Ofelimos, Primecoin
プルーフ・オブ・ヒストリー (PoH) on PoS	ブロック公開のため計算量の少ない障壁を可能にする。 信頼できない参加者間のトランザクションを可能にする。	トランザクションを極めて高速に処理する。 特定の時間にイベントが発生したことを証明するための履歴記録を作成する。	バリデータのハードウェアは厳しい仕様を満たす必要があり、分散化が制限される。 年間約 40 ペタバイトのデータを処理すると推定される。 個人では記憶容量が足りない可能性がある。	パーミッションレス暗号通貨	Solana

ソース：VAN DER LINDEN, KEVIN; “WHAT IS PROOF OF HISTORY?” ANYCOIN DIRECT, PHOENIX PAYMENTS BV, 5 JULY 2022. ; FELIX HOFFMAN; “CHALLENGES OF PROOF-OF-USEFUL-WORK,” CORNELL UNIV., 9 SEPT. 2022. DYLAN YAGA, PETER MELL, NIK ROBY, AND KAREN SCARFONE; “BLOCKCHAIN TECHNOLOGY OVERVIEW,” NISTIR 8202, 3 OCT. 2018.

情報工学の研究者からなる別のチームは、スマートコントラクトを使用して、電子機器の製品ライフサイクルにわたって追跡するための Ethereum ベースの IoT インターネット対応システムを作成しました。⁴⁹ 彼らは不正を最小限に抑えるため、評判重視の参加基準を設け、責任ある廃棄証明書の発行し、分散ファイルシステムの IPFS と統合し画像、廃棄証明、ライセンス、その他の証拠をプライバシー保護した方法で分散化、変更不可、保存するように開発しました。そのテストにより、このようなシステムの安全性と経済的な実行可能性が実証されました。オープンソースのブロックチェーンを電子廃棄物の中立的な第三者ダッシュボードとして利用することで、業界だけでなく消費者や規制当局も安全で倫理的かつグリーンなリサイクル方法」についての企業の主張を確認し「循環経済に向けてリサイクル業者全体の行動を調整する」ことができます。⁵⁰

持続可能なエネルギーの採用と新しいアプローチ

上記の Bitcoin ブロックチェーンの消費量に関するテラワット推定値 (93.33 tWh ~ 131.43 tWh) は、使用されるエネルギーの炭素強度について何も教えてくれません。化石燃料の代わりに再生可能エネルギーが違いを生むことがあります。⁵¹ 2021 年の調査に基づき、CCAF は主に雨季の水力発電による再生可能エネルギーが PoW マイニングデバイスの 39% に電力を供給していると推定しました。⁵² Bitcoin Mining Council は独自の調査を実施し、59.5% のマイナーが持続可能な電気を使用していると判断しました。⁵³ ある討論会の参加者が言ったように、このような定量的な指標は複雑であり、さまざまなグループによって議論されるものです。これが、地域を超えたより定性的な現場調査を主張している理由です。

企業マイナーの多くは、カナダ、アイスランド、スウェーデンなど、比較的 low コストで豊富な再生可能エネルギーを利用できる場所にすでにデータセンターを設置しています。⁵⁴ もし、マイナーが季節によって変動しない自然エネルギーの利用を大幅に増やせば、Bitcoin の二酸化炭素排出量を軽減することができます。例えば、スタートアップの Bitzero

Blockchain は、今後 3 年間でノースダコタ州に 200 メガワット相当のデータセンターを開発する計画を発表しました。⁵⁵ ノースダコタ州を選んだ理由は、新しいコンピューティング機器に対する販売や使用税の減免措置が明確だからです。⁵⁶ さらに、ノースダコタ州の地質や法律は、二酸化炭素や天然ガスの地下貯留に適しています。⁵⁷ Bitzero は、Mandan、Hidatsa、Arikara 部族がミズーリ川の近くに建設中の巨大な温室のそばに、データセンターの 1 つを設置するつもりでいます。⁵⁸ うまくいけば、Garrison ダムがデータセンターを水力発電し、Bitzero はその熱を回収して 3 つの関連部族の温室に転送し、部族の人々は新鮮で健康的な選択肢で食料主権を獲得することができます。

スウェーデン北部のボーデンでは、ルレ川を水源とする Genesis Mining と HIVE Blockchain のデータセンターからの排熱で温める温室の建設を開始しました。⁵⁹ 野菜の約 95% を輸入しているボーデンは、このエネルギーの再利用によって、一年中新鮮な野菜を自作することを目指しています。⁶⁰

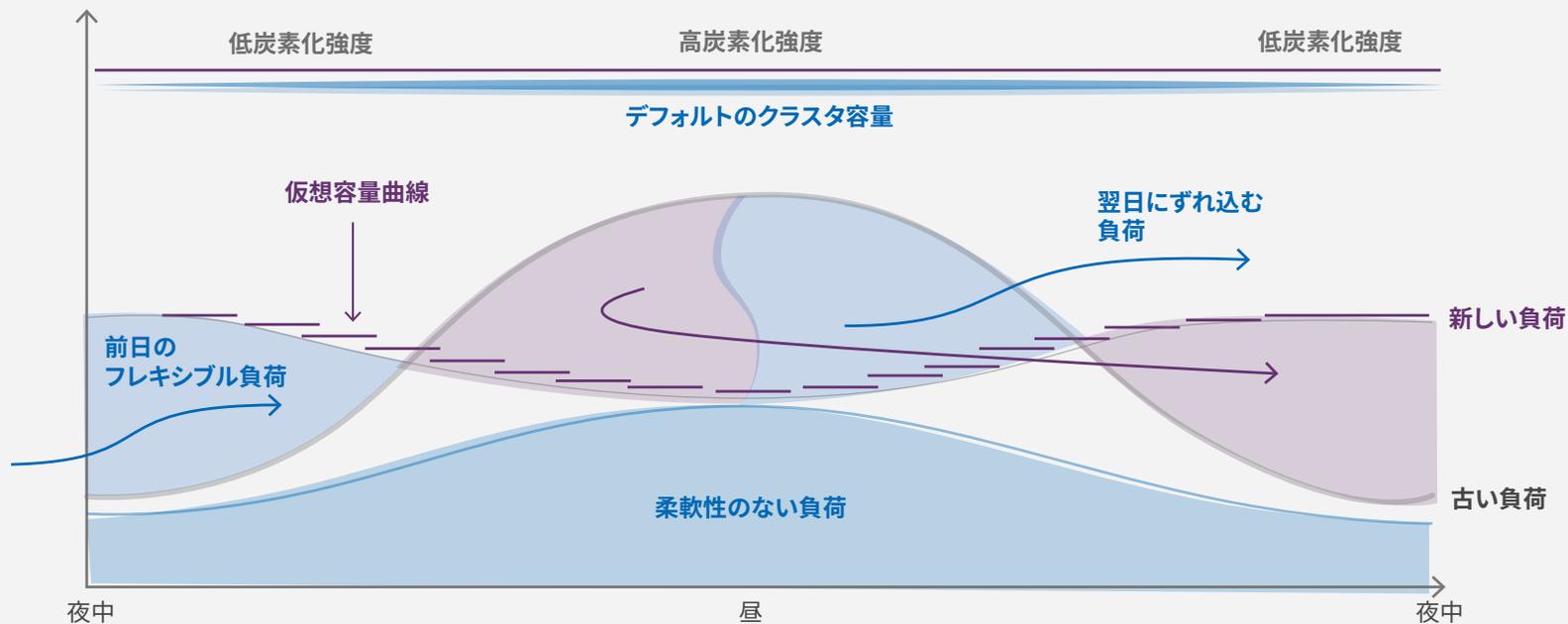
Bitzero の熱リサイクルプロジェクトは、同社がゼロ・カーボン・ディスプレイメントと呼ぶ、100% 自然エネルギーの使用によって、同じ送電網にある近隣住民に化石燃料への転換を強いることのないような取り組みを行うスタートアップ企業のポートフォリオのひとつです。⁶¹ 太陽光発電や風力発電は、日中は余剰電力が発生するが夜間はほとんど発電しないため、その主張を裏付けるためにエネルギー消費量を 1 時間ごとに計算する必要があります。Google のイノベーターたちは倉庫規模のコンピュータのネットワーク化された集合体は、時間帯、場所、エネルギー生成の種類による炭素強度の変化を無視して運用すると、必要以上に炭素を排出することを発見しました。⁶² そこで彼らは時間的な制約があるワークロードを遅延させることで、電力に基づく二酸化炭素排出量と電力インフラのコストを積極的に最小化するカーボンアウェア・コンピューティング・ソリューションと呼ぶものを思いつきました。⁶³ 彼らは、炭素強度の予測を用いて需要予測モデルを訓練し、リスクを考慮した最適化によって仮想容量曲線 (図 4) と呼ばれるものを作成しました。この曲線は、データセンターのワークロードを管理して炭素排出量を最小限に抑えるのに有効であることが証明されました。

効率的なストレージも、こうしたソリューションの重要な要素です。例えば、ユーラシア大陸に拠点を置く Bitcoin マイニング事業者である SAITech は、マイニングデバイスが発生する熱を回収する熱回収技術を開発しました。この熱の 90% 近くを再利用できるとしています。同社の最高経営責任者(CEO)であるアーサー・リー氏はコインテレグラフに「我々は(クリーンエネルギー源の)より優れたバッテリーになり、省エネとエネルギー貯蔵の問題を解決していく」と語りました。⁶⁴

Bitzero は、余剰エネルギーを蓄えるためのグラフェン電池技術の組立・流通拠点の構築を計画しています。欧州宇宙機関 (ESA) などによると、グラフェンは 21 世紀の材料科学における唯一最大の発見であり、従来のリチウムイオン電池に極薄のグラフェン層を追加するとより大容量で長寿命な電池ができます。⁶⁵ さらに、製造工程では有毒な溶剤やバインダーの代わりに、水と天然セルロースを使用することができます。⁶⁶

図 4

グーグルのデータセンター向けカーボンアウェア・コンピューティング・ソリューション



もう一つの方法は、フレアガスを Bitcoin マイニングに利用することです。これは、石油会社が回収して送電するのは費用対効果が悪いので、他の方法で燃やしてしまうガスですが、Bitcoin のマイニング作業の電力としてその場で使用すれば、無駄を最小限に抑えることができます。Enerplus、Equinor、Exxon、ConocoPhillips はすべてこのゲームに飛び込み、Crusoe Energy Systems や EZ Blockchain などのショップから、フレアガス、座礁ガス、埋立ガスを軽減するモバイル技術で現場機器を手に入れています。⁶⁷「ロイヤリティオーナーにとって、これは何を意味するのでしょうか?」と、土地と鉱物の所有者を代表して、弁護士のジョン・マクファーランドは尋ねました。「自分たちのガスが煙に巻かれるのではなく、Bitcoin のマイナーに売られたガスのロイヤリティを得ることができるかもしれない」。⁶⁸ それはボーナスです。

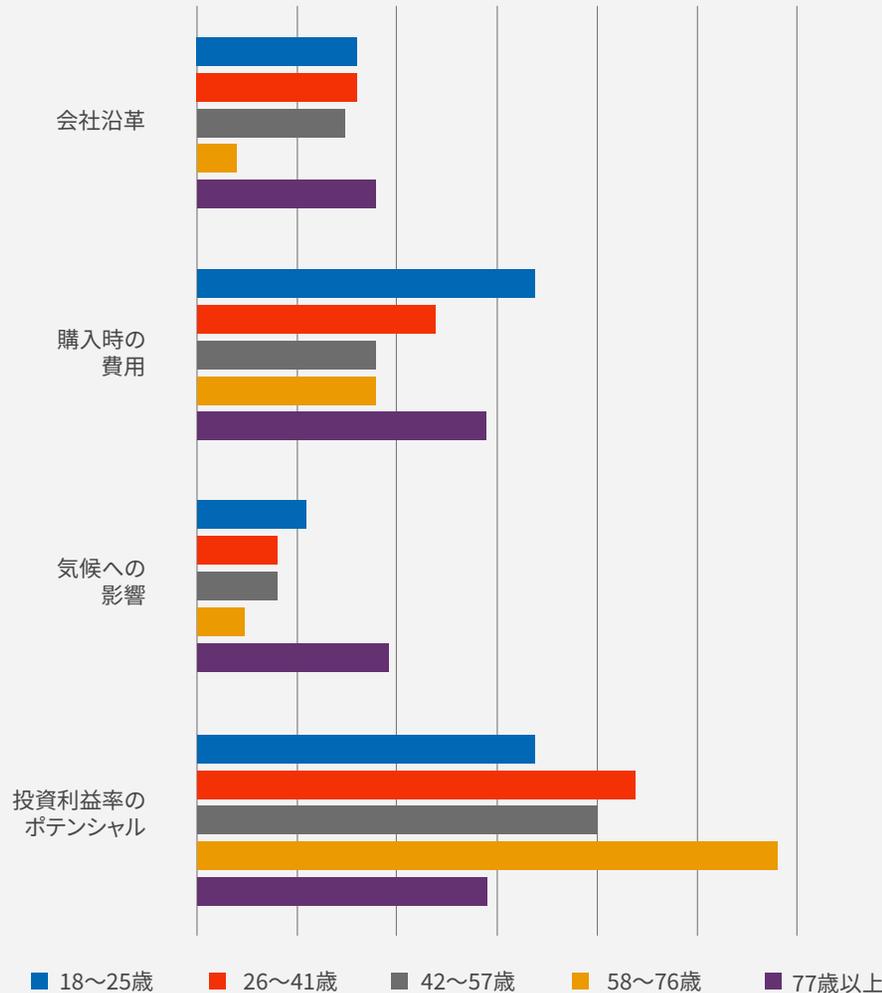
カナダのスタートアップ企業 MintGreen は、デジタルボイラーと呼ぶものを開発しました。Bitcoin マイナーをチャンバーに入れ、その上から熱交換器と呼ばれる装置で冷却水を送り込み、ある液体(または気体)から別の液体(または気体)に熱を移動させます。(フランスのスタートアップ企業である WisElement 社は、水ベースのセントラルヒーティングシステムを備えた住宅を補完するために、独自のボイラーソリューション Sato を開発しました。...99%の効率で電気ボイラーと同等の性能を発

揮します⁶⁹)。MintGreen は、ノースバンクーバーの Lonsdale Energy Corporation と提携しました。Lonsdale Energy Corporation は、温水を循環させて建物を暖めるパイプの個別ネットワークである水力発電地域エネルギーシステムを管理しています。⁷⁰ この方法により、MintGreen 社は、Bitcoin のマイニング作業で無駄になる熱の 96% を回収することを見込んでいます。

国連環境計画は、地域エネルギーを「気候変動対策と人間の健康のための秘密兵器」と呼んでいます。自然エネルギー、廃熱、蓄熱、電力網、熱網、ヒートポンプをつなぎ、暖房のための一次エネルギー消費を最大 50%削減できるからです。⁷¹ 米国エネルギー省も地域エネルギーの利点を認めています。複数の建物の負荷を組み合わせることで、スケールメリットを活かした、エネルギーコストの削減や熱電併給などの高効率技術の利用を可能にします。⁷² Web3 の用語では、地域エネルギーは、継続的な運転監視、高度な負荷予測、高度な制御において人工知能を活用し、ブロックチェーンで管理されたマイクログリッドと統合し、エネルギーグリッドの回復力を高め、危機における地域グリッドに貢献できる、複合的構造の一つです。⁷³ デジタルボイラーが実現し、システムの蓄熱がカナダの冬に使用する余剰熱を効果的に捕らえることができれば、それは刺激的な進歩になるでしょう。

図 5

暗号通貨投資を評価する際に最も重要な要素は何でしょうか？



FORBES アドバイザーは、市場調査会社 ONEPOLL に依頼し、2022 年 5 月に米国成人 2,000 人を対象にオンライン調査を実施しました。誤差は± 2.2 ポイント、信頼度 95%。データソース: WAYNE DUGGAN, “SURVEY: 84% OF AMERICANS DON’T BELIEVE THAT BITCOIN INVESTMENTS ARE A THREAT TO THE ENVIRONMENT,” FORBES ADVISOR, FORBES MEDIA LLC, 31 MAY 2022.

教育と啓発：カーボンオフセット

NBC ニュースの世論調査によれば、アメリカ人の 5 人に 1 人が暗号通貨を投資、取引、利用した経験があり、黒人の 40% が暗号通貨の取引や利用を行ったことがあると報じられています。彼らが暗号通貨を利用する理由として、取引速度の向上、コスト削減、プライバシー、セキュリティ、銀行口座を持たないコミュニティへの金融サービス提供の機会が挙げられています。⁷⁴ 図 5 は、異なる年齢層が Bitcoin やその他の暗号通貨の購入を検討する際に重視した点を示しており、潜在的な投資収益率 (ROI) が暗号通貨の気候への潜在的な影響を大幅に上回っています。この世論調査を発表した人々は、この結果は回答者が暗号通貨の仕組みについて理解していないことを示していると解釈しました。⁷⁵

討論会では、炭素市場へのコミュニケーションと教育が重要であるとの指摘がありました。また、データの測定と追跡のための中央集権的システムと分散型システムを比較検討しました。私たちは、データが一元化され、そのデータを管理する組織も一元化された社会に住んでいます。どのグループもデータを管理する場合、そのデータをグループの利益のために利用するインセンティブが働くのは当然です。それが現在の経済システムです。だから、何が起きているのか、他の人たちが把握するのはとても難しいのです。

ブロックチェーンの関係者たちは、既存の産業や枠組みをサポートしているものの、分散型ネットワークの真の価値が十分に活用されていないという意見が討論会の参加者から寄せられました。企業の株主が環境に配慮した投資を求めていることに加え、米国証券取引委員会が企業登録や年次報告書において気候変動に関するデータを開示することを義務付けたことで、企業活動から炭素を除去する方法の必要性が高まっています。⁷⁶ しかし、これには時間がかかります。

Green Business Bureau によれば、カーボンオフセットは、企業が特定の事業分野で排出される二酸化炭素やその他の温室効果ガス (GHG) を削減または除去し、他の分野での排出量を相殺できることを示すものです。一方、カーボンクレジットは、保有者が一定量

の二酸化炭素または同等の量の別の GHG を排出する権利を表す取引可能な商品です。⁷⁷ 討論会で提案された意見の中には、「排出量を回避することや炭素除去が企業の主要な役割であるが、これらはまだ十分な役割を果たしていない。我々はこれらの取り組みを確実に支援すべきだ」というものもありました。

実装上の課題

GHG 排出量の測定と追跡は残念ながら難しい課題です。討論会の参加者の中には「オフセットがソリューションの一部として信頼できるかどうかについて、非常に懐疑的」と述べる人もいました。また、「炭素の影響が説明されていることを確認するための信頼できる手段がまだ準備できていない」という意見もありました。ある報告書では、高リスクの投資によって達成された永久的な炭素除去や、結果が出にくい森林伐採防止計画など、質の高いプロジェクトと低いプロジェクトを区別することの難しさを指摘しています。⁷⁸ 他の参加者も同様の意見を述べました。大気から純粋に炭素を回避または除去する炭素クレジットの作成が非常に難しいというのです。このため、多くの科学者を雇い、炭素排出量の算定や市場に存在する様々な垂直統合について検討しています。

討論会では、「ブロックチェーンが複雑で一貫性のない炭素市場の構造を改善し、クレジット交換による新たな環境効果が得られない状況を解決する」という話題にも議論が及びました。オフセットが 2 回売られると 2 回カウントされるという価格設定の不透明さが批判されています。⁷⁹ ある人は「Klima Infinity は、カーボン・オフセットのツールキットで、人々が持続可能性を誓約し、RT (リタイアメント・トークン) を使ってチェーン上で炭素を償却することができる」と指摘しています。⁸⁰ また、別の参加者は「トラストインフラ全体をどのように分散化したいか」を検討することを提案しました。他にも「マイクロ炭素クレジットのための API」や「1 対 1 で裏付けられたトークンで、クレームトークン 1 つにつき炭素クレジット 1 つとなる炭素積立暗号通貨」といったアイデアもありました。

ラストワンマイルのギャップ

もう一つの重要な課題は、「(森林再生など) ソリューションの会計処理が機能的なエコシステムと同じくらい厄介な、ラストワンマイルのギャップに相当する」というものです。討論会の参加者は、これを「預かり資産に関連する DeFi の課題」と表現しました。多くの場合、それは法的なものです。人々がデジタルからフィジカルに到達するための法的な構造にギャップがあるのです。当事者が合意を守らない場合、法的な仕組みで強制力を持たせることができるのでしょうか? この人は、このギャップに取り組んだ経験がかなりあります「私たちは、すでに世界の物理的な腕となっているカーボン登録陪審員の巨人の肩の上に立ち、すべての情報を検証し、私たちのためにカーボンクレジットを購入することでその情報をブロックチェーンに供給しています」。さらに、プロジェクトの検証を行う検証機関も存在します。緩和の認証では、当事者が登録できるクレジット数とできないクレジット数が明示されます。ラストワンマイルのギャップを埋めるために、その人は、法的期間に関与する物理的なエンティティを見つけるか、当事者間で機能する規制や協定を特定することを提案しました。

世界銀行は最近の報告書で、炭素市場のデジタルモニタリング、報告、検証 (D-MRV) システムにおいて、ソースに近いデータを取得するための複数のテクノロジーの利用を検討しました。チリの廃棄物発電パイロットでは、プロジェクトチームはセンサーデータをブロックチェーン上に確保し、ペルーのチームは木材追跡プロトコルパイロットで、衛星とドローンのデータを AI アルゴリズムに通して、森林の変化を検出し記録しました。⁸¹ その場でブロックチェーン上にデータを確保したため、他の場所では改ざんできず、他の場所の第三者がアクセスして改ざんされていないことを確認することができました。報告書は、分散型台帳技術とイミュータブルクラウドストレージが、炭素市場がプロジェクトデータの定期的な遠隔検証を伴う D-MRV システムの 1 回限りの認証への移行に役立つと結論付けています。⁸² 世界銀行は、この D-MRV のフィールドワークが、トークン化、デジタル炭素資産のレジストリ、取引所、サービス層を持つ Chia ブロックチェーンベースのデータウェアハウスを特徴とする炭素市場のためのエンドツーエンド・デジタル・エコシステムのどこに位置づけられるかをマッピングしています。⁸³

スマートコントラクトやレイヤー2ソリューションで取得したテレメトリなどのデータフィードを持つIoTデバイスは、カーボンプロジェクトの遠隔データ収集を自動化できます。ある研究者は、ブロックチェーンベースのIoTネットワークが、交通渋滞や公共駐車場の必要性を減らし、緑豊かな都市空間を開放するのに役立つと示唆しました。このデータは、政策立案者やエンジニアが公園、駐車場、公共交通機関の組み合わせを最適化するのに役立ちます。⁸⁴最後に、Alvariumなどのいわゆるトラストファブリックは測定可能な信頼特性を持つアプリケーションへの

デバイスからのデータ配信を補助する仮想オーバーレイであり、最終的に信頼性の高いギャップを埋めるのに役立つかもしれません。⁸⁵

全体として、討論会ではブロックチェーンのイノベーションの可能性について肯定的でした。炭素市場では、より透明性の高いシステム、アクセスが容易なシステム、需要側の参加者や炭素プロジェクト開発者などの供給者に情報を提供できるシステムを構築しています。... 将来的に市場がどのように発展していくかのパラダイムシフトです。

社会と政治

Bitcoin や Ethereum のブロックチェーンの登場から十分な時間が経過し、過去の主張を覆し、政策の指針となるデータを手に入れることができました。

例えば、銀行口座を持たない人々の銀行取引について、コーネル大学のウィル・コン博士らは、Ethereum ネットワークのデータを分析し、Ethereum が PoW 合意メカニズムの下でどの程度財政的に包括的であるかを判断しました。⁸⁶ その結果、アセットオーナーとマイニングに集中していることがわかりました。Ethereum 上でピアツーピアの取引をするのではなく、個人は dapps や DeFi プロトコルを利用し、大きなプレイヤーはネットワークそのものを使用していました。研究者は、現在のガス料金の仕組みでは、小規模なプレイヤーに対する高い取引手数料、混雑によるガス料金の著しい変動、トークンの大きなリターンの変動が、金融の民主化と包摂を妨げると結論付けました。⁸⁷

彼らはこれらの問題を解決するための提案 (EIP-1559 など) を分析したが、仕組みの設計というより規模の問題であるため、小規模なプレイヤーにとっては依然として高い取引手数料を引き起こすと判断しました。一方で、手数料の引き上げは、大規模なプレイヤーから小規模のまたは新規参入者に富を移転させ、金融包摂を促進させるという予期しなかったメリットもあります。また、Cong とその同僚は再分配政策としてのエ

アドロップが金融包摂を改善することを示しました。⁸⁸ つまり、各ブロックチェーンの市場ダイナミクスを研究し、私たちが取り組むべき現実世界のプロジェクトの種類を知らせるためのより多くのデータがあります。

エネルギー政策については、コソボやイランなど一部の国では、地域のエネルギー網に負担をかけるとして Bitcoin のマイニングを禁止しています。⁸⁹ しかし、グリッドは、技術の古さ、発電の構成、送電の構成、配電と負荷の力学、消費の環境など、国によって大きく異なることがあります。政策立案者に情報を提供するため、コーネル大学のエンジニアリングチームは、米国における Bitcoin マイニングの実現可能性、収益性、環境破壊について全国規模の調査を実施しました。⁹⁰ その結果、ワシントン州やバーモント州など、電力料金が安く、送電網に自然エネルギーが多く導入されている州では、マイニング作業に使用するデータセンターの二酸化炭素排出量を最小限に抑えることができるとわかりました。この2つの州では暗号マイニングが最も収益性が高く、対照的にケンタッキー州とウェストバージニア州では暗号マイニングが最も収益性が低く、最も有害でした。⁹¹ 研究者たちは、もし公共政策が空気中から直接炭素を回収し環境に配慮したマイニングを行うインセンティブを提供するならば、暗号通貨はより持続可能なものになると結論付けました。⁹²

電子廃棄物に関して、政策立案者は循環型経済への取り組み... だけでなく、この分野で有望な革新的技術の実証や概念検証を支援すべきです。⁹³ ある研究で、電子廃棄物のリサイクル業者が最小限の監視で誠実な業務に従事するようにする主な方法は、リサイクルのコストを下げるか、不正行為に対する罰則を強化することによって、より利益の高い選択肢にすることだと述べています。⁹⁴ つまり、補助金の対象を絞り、不正行為に対する罰則を強化し、メーカーが電子機器をより簡単にリサイクルできるようにすることです。⁹⁵

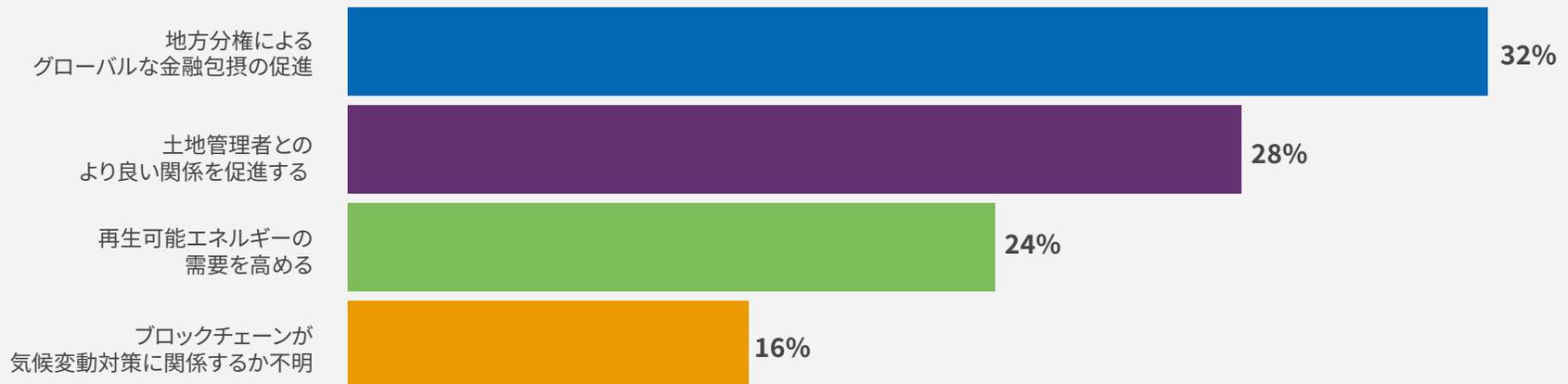
ダイバーシティとインクルージョンの価値

サステナビリティという概念に戻り、討論会のメンバーはそれを物理的、デジタル的なリソースにどのように適用したかを考えてみましょう。もうひとつの重要な概念である「気候変動対策」についても同様です。ある人が討論会の内容を要約してくれました。すべての参加者が平等に仕事を分担し、コストを負担しているわけではありません。また、利益も損害も等しく共有することはできません。例えば、高所得国から中低所得国へ3.3Mtの電子廃棄物が輸送され、さらに地域的に最貧困層へとリクルダウンしています。⁹⁶ 図6は、気候正義に貢献するブロックチェーンの役割に対する討論会の見解をまとめたものです。

図6

ブロックチェーンが気候変動対策に貢献できる最良の方法とは？

討論会の投票結果 (N=24)



デジタルワールドとその地球への影響に大きく関連し、適用できるのが、プロジェクトプランナーが念頭に置くべき気候正義の3原則です。⁹⁷

- 分配的正義とは、個人、国家、世代間で負担と利益を配分することであり、私たちが今日チャンスを活かして行動しても、明日誰かの危機を招き、私たちが価値を引き出して前に進んでしまった後に、誰かの危機を招くことがないようにすることです。
- 手続き的正義とは、コミュニティの人々が意思決定を行い、意思決定に参加することで、戦略の策定と実行が密接に関連することになることです。
- 多様な文化と視点が認められ、関係者が平等に、しっかりと、敬意と公正な配慮をもって互いに関与します。これらはすべて、革新を推進し、革新的なアイデアの実現可能性を高め、関与する人々の自己主体性を高めるのに役立ちます。⁹⁸

実際、インクルージョン、ダイバーシティ、エンゲージメントの原則は、地域ごとにカスタマイズされた選択肢を生み出し、地域の取り組みに貢献するものです。討論会の参加者は、気候正義が私たちの取り組みの中心にあると述べました。⁹⁹ 気候正義のためのツールは、技術的なものと同様に、社会的、文化的、政治的なものです。地球規模、スタートアップのような小さな会社、大企業、国家、地球そのもの、そしてコード、テクノロジー、コミュニティ、インフラなど、複数のスケールで同時に考えることが必要です。

電池材料の採掘は、その土地が永久に損傷し、人が住めなくなる地域社会にどのような影響を与えるのでしょうか？ 炭素を回収し、カーボンオフセットを生み出すための森林再生などの保全プロジェクトに資金を提供する場合、資金提供を予定している政府だけでなく、対象となる土地の先住民も巻き込んでいるのでしょうか？¹⁰⁰

これらのブロックチェーン企業の中には、法的には何もできないところもありますが、それを口にしないことで、その人たち、特に女性にとって問題がより深刻になります。私たちはコミュニケーションをとり、解決策を見つけることができるはずで、政府がどのように行動したかで国民を罰するべきではありません、とある討論会の参加者は言いました。それが Web3 の約束です。

また、経済活動の負の外部性を取引レベルまで考慮し、影響を受けた個人やコミュニティに補償する再生経済学の実用化として、再生ファイナンス(ReFi)の概念も持ち込まれました。ReFi 取引プラットフォームは、投資家が再生可能エネルギー証書と引き換えに、持続可能なエネルギーへの取り組みに参加する手段を提供するもので、この証書は、再生可能エネルギー発電の環境、社会、その他の非電力属性に対する財産権を表す市場ベースの商品です。¹⁰¹ 例えば、サステナブル Bitcoin プロトコルは、分散型自律組織(DAO)であり、Bitcoin のマイナーにクリーンエネルギーによる Bitcoin のマイニングを促すため、持続可能なマイニングを行った Bitcoin を示す譲渡可能資産であるサステナブル Bitcoin 証明書を報奨することを目的としています。¹⁰²

必要とされる人的基盤

最後に、参加者は4つ目の重要な概念として、変化と実行のメカニズムとしての人的基盤を織り込みました。ソリューションが機能するためには、人的な基盤が必要です。物理的およびデジタル的な次元でその意味を考えると、決して小さな言葉ではありません。世界銀行は、人的基盤を、健康、教育、栄養に資金を供給し、提供するための一連の公共政策と位置付けており、国家は経済的リターンが高く貧しい人々を最も助ける主要なサブセクターにおいて、資源の効率的かつ公平な配分を保証します。¹⁰³

このような投資は、サイバースペースの人的基盤に参加するための賭けです。専門家の Fran Berman は、複雑で分散したダイナミックな環境向けのアプリケーションやソフトウェアの開発の難しさを理解している何百人もの研究者、プログラマー、ソフトウェア開発者、ツールビルダーなどによる相乗的コラボレーションと呼びました。¹⁰⁴ このような環境では、人々は、専有ツールを使ってリソースを集中管理する企業内ではなく、標準的でオープンな汎用プロトコルやインターフェースを用いてリソースを統合、調整し、自明ではない質の高いサービスを提供するネットワーク全体で仕事をします。¹⁰⁵

テクノロジーは、複雑な問題を解決するために必要なアプローチや行動をサポートします。例えば、ある参加者はサイロの課題を指摘しました。スクラップメタルの訓練を受けた人が、ブロックチェーンを使ってこの材

料がどこから運ばれてきて、どこで廃棄されるかを図にしようとするなど、会話は非常にサイロ化されています。その人は、必要とされるエンジニアリングの種類や、必要とされるインテリジェンスや教育の種類など、全体的な議論をすることを提案しました。今にして思えば、ブロックチェーンをめぐる業界コンソーシアムのメリットは、ブロックチェーンソリューションを特定することよりも、組織やサプライチェーンにおいて皆が解決しようとしている問題を理解することにありました。

このような分散環境で活躍する人々は、アイデアをコンセプトから成熟させるために、試作、統合、強化、育成に必要な重要な人的ネットワークを提供します。¹⁰⁶ 彼らは、例えば Ethereum 財団、Linux 財団、World Wide Web Consortium が主催するようなグローバルなイニシアティブを推進します。分散環境である Web3 は、コミュニティや個人が自分の資産を所有し、コントロールすることに大きく近づくと、ある参加者は述べ、ネットワークにおける貢献者の努力を調整するインセンティブを指摘しました。これは、社会の仕事を新しい方法で組織化しようという国連の呼びかけに応えるものです。¹⁰⁷

分散型自律組織としての KlimaDAO はその一例です。環境保護主義者、開発者、起業家の集合体であり、彼らの知識と専門性を結集して、今日、炭素市場に変化をもたらすことを目的としていると説明されています。DAO のネイティブアセットである KLIMA は、DAO の金庫にある少なくとも 1 トンのトークン化された検証済みのカーボンオフセットに裏付けられた ERC-20 トークンです。¹⁰⁸ プロジェクトを完了し、オフセットを収集した人は、Toucan プロトコルのカーボンブリッジと呼ばれるものを介して、Klima 上でオフセットをトークン化することができます。参加者が炭素資産の価格を上昇させれば、企業にとって炭素除去プロジェクトがより財政的に魅力的なものになります。¹⁰⁹ そうすることで、中央集権的ではなく分散的な方法で気候変動対策を動機付け、調整する役割を果たします。

これが Web3 の人的基盤の特徴であり、インセンティブツールが付属していることです。¹¹⁰ ネットワークモデルによるワークフローの構築や人々のモチベーションの向上は、従来の企業組織とは異なるものです。より大きな範囲で、市場原理と行動経済学が働いています。ある討論会の参加者は、この言葉を見事に要約しています。私たちが学際的なアプローチでサステナビリティに取り組みなければ、その解決策は常に近視眼的なものとなってしまいます。そして、もしそれが政策に結びつかなければ、私たちの最善の努力も平坦なものになってしまうでしょう。

即実行可能なユースケース

討論会では、ブロックチェーンとエネルギーグリッドそのものを組み合わせ、後者の発電と管理を分散化することを目的としたアイデアが多く出されました。この討論会以降、パキスタンは記録的なモンスーンによる豪雨に見舞われ、カリブ海からフロリダにかけてはカテゴリー 5 のハリケーンが襲来しました。¹¹¹ ロシアはウクライナへの攻撃を続けており、エネルギー施設もその標的になっています。ハッカーが地域の送電網や発電施設を制御する IT システムのセキュリティの穴を突く寸前まで来ているかは不明です。ベテランジャーナリストの Michael Casey は「石油生産を強化し、高騰する世界価格に対抗するために、サウジアラビアの Mohammed bin Salman 皇太子との交渉を考える必要があります。世界の指導者たちが、80 億人全員に影響する経済危機を解決するために、選挙で選ばれていないたった 1 人の人間の利益に応じなければならぬというのは、中央集権問題の典型です。」と述べています。¹¹² しかし、交渉が実を結ぶことはありませんでした。10 月上旬、石油輸出国機構プラスは日量 200 万バレルの石油減産を決定しました。¹¹³ 化石燃料の節約、再生可能エネルギーの導入、送電網の資源分配は必須です。

ブロックチェーンをより分散的で地域密着型なグリッドに活用することで、グリッドのセキュリティとレジリエンスを 3 つの方法で向上できます。第一に、中央の制御ポイントがない分散型グリッドは、大規模な攻撃の確率を下げることができます。第二に、関係者はデータを送信する前にハッシュ化し、暗号化します。第三に、すべての関係者が合意しなければデータを変更できないため、不正行為をすぐに検出することができます。¹¹⁴

政府にとっての課題は、資金提供の準備が整ったプロジェクトを見つけることです。討論会の参加者の一人はReFiの領域で今励みになるのは、市場で数十年間も活躍してきたプレイヤーたちが、どうすればよいのかについて数多くの交流を行っていることです」と述べています。「我々は、ブロックチェーン技術を非常にポジティブな方法で活用する方法についての作業グループを設立しています。それは本当にユニークなブロックチェーン技術の応用であり、現実のユースケースです。」

Energy Web Chainの分散型オペレーティングシステムとAustrian Power Gridの"Flex hub"の実装に焦点を当てます。APGはオーストリアの送電網の中で発電と消費の安定性を維持しています。APGはすでに他のヨーロッパのエネルギー市場と水平的に統合していたが、小規模な再生可能エネルギーと垂直的に統合したいと考えていました。Energy Webのソリューションは、小規模な分散型エネルギー資源(DER)の発電ユニットの認定・登録、入札管理、支払決済を支援しました。¹¹⁵ 顧客はDERを直接登録でき、認定を受けた第三者は、住宅用バッテリーなど、登録されたユニットの詳細を確認することができます。そのためには、コミュニティとの連携が必要となります。

別の参加者は、「私はいつも、トレーサビリティのような普遍的なユースケースを提唱しています。それが私にとっての興味深いものであり、皆さんが言っていることを本当に価値あるものにします。そう、我々は、ライフサイクルを通じて資産を追跡できるような方向に進むことができます。」と打ち明けました。そこで登場するのが、英国に拠点を置くCircularorです。Circularorは自動車やエレクトロニクス分野で使用される鉱物や天然資源の出所を記録するブロックチェーン対応ツール群を開発しました。Circularorのシステムは、サプライヤーとバイヤーがサプライチェーンを通じてコバルトなどの原材料を追跡するための不変の監査証跡を作成し、すべての関係者がこれらの資産に関するほぼリアルタイムのビューを得ることができます。¹¹⁶ ハードウェアメーカーは、このシステムを拡張して、リサイクルとリサイクルされた材料を供給源に戻すことを含めることができます。

発展途上国での新たな化石燃料グリッドの建設や、先進国でのエネルギーインフラの老朽化の修復は、賢明な選択ではありません。ブロックチェーンは、再生可能エネルギーの技術革新とコスト削減を支援するため、分散型のモデルをサポートしています。非営利団体であるEnergy Web財団は「これらの進歩により、従来よりも大規模で多様な参加が可能な電力市場の分散化に向けた着実なトレンドが生まれています」と述べています。¹¹⁷ 消費者は、競合的な公共料金に対抗できる価格で、より自己決定的に電力を生産、蓄積、管理することができます。ブルックリンにおけるマイクログリッドはその良い一例です。¹¹⁸ LO3 エナジーが開発したブロックチェーンベースのマイクログリッドで、ブルックリンの住民は自分たちのデバイスを使って、太陽光発電によって生成されたエネルギーを直接かつ安全に隣人と取引することができました。¹¹⁹

討論会参加者は、発電所の経済的なオフテーカー、つまりそのエネルギーの買い手を、エネルギーの一部をコンピューティング用途に使い、残りのエネルギーを地域経済に投入して、コミュニティがエネルギー環境で使えるようにするプロジェクトに含意するモデルを提案しました。LO3 Energy プロジェクトと同様に、このようなモデルの成功は、開発

者がプロジェクトを組み込む社会的、政治的、文化的、インフラ的な文脈に大きく依存します。実際、中核となる開発者や人材パイプラインはあるか、参加者が増えている兆しはあるか、長期的な運営計画はあるか、などが重要な要素となります。

規格と規制

規格と規制に関する議論は活発でした。「DeFi スペースで数多くの事象が生じており、人々は後で許しを求めるために行動を起こしている。実験は絶えず進行中です。」との声が上がりました。しかし、分散型エネルギーネットワークやその他の革新的なモデルに関する規制上の明確さの欠如が真剣な投資を妨げています。規制は通常、既存の企業に有利です。北ダコタ州やワイオミング州のような州では、石油生産者に税金控除を与えて、ガスを燃やす代わりに Bitcoin マイニングやデータセンターに燃料を供給できるようにする法律が制定され、これらは大手石油企業と協力するブロックチェーン企業に利益をもたらしています。

さらに、一般的に受け入れられた測定単位やエネルギー消費の報告原則の欠如は、文脈を提供しないりんごとオレンジの比較のような、誤解や混乱を引き起こすことにつながります。例えば、Bitcoin ネットワークのエネルギー消費を、従来のグローバル決済ネットワークではなく、ある国全体と比較することがあります。規制当局は、マイニング施設に対するライセンス要件や強制的な情報開示を検討すべきであり、一定割合の再生可能エネルギーを使用するようにすべきです。¹²⁰

参加者は、ブロックチェーン業界が作成した計算機が、故意にあるいは無知であるゆえに、エネルギー消費（例えば NFT）を誤って公表していると一般的に合意していました。また、トランザクションあたりのエネルギー消費量の計算でも、（単一のトランザクション内で複数のアセットを複数のアドレスにネストする場合など）全体を見るには不十分です。そのため、ある人物は未使用トランザクション出力を代わりに使用することを提案しました。

ハードウェアのエネルギー評価について、ある人は「公開取引されている Bitcoin のマイナーは 30 社あり、2 つのマイナーが同じようにエネルギーについて話しているわけではなく、明確な枠組みがありません。」と述べました。独立した監査人と透明な方法論による、エネルギー消費計算の独立したレビューに、誰もが概ね賛成しました。これらは、多数のステークホルダーが協力して問題解決を行う必要のある複合的な課題です。

現在の勢いを生かす

多くの参加者が業界標準の測定と報告のための協力で重要な進歩を遂げたことが討論会の議論で明らかになりました。そのような取り組みの 1 つが Green Proofs for BTC であり、「Bitcoin マイニング業務の炭素影響を評価・認証する枠組み」であり、Bitcoin マイナーが炭素排出量を削減するためのインセンティブとなるものです。環境に配慮したマイニングとマイナーの持続可能性に関する主張の透明性を高めることを目的としています。参加者の 1 人は、「Green Proof セットは環境に配慮した商品市場を促進し支援するために設計されています。つまり、異なる商品に関連する炭素会計と排出量を含みます。」と述べ、別の参加者は、「Green Proofs は、特定の Bitcoin マイニング施設の排出量の影響を理解することで、取引先、規制当局、一般市民が取引する組織の影響についてより透明性を持たせることができます。」と付け加えました。

討論会では、暗号気候協定を進めるために、暗号マイニングにおけるエネルギー使用量の会計処理と報告に関するガイダンスについても議論されました。¹²¹ 範囲については、企業の主要な事業からの直接排出と間接排出、さらに上流と下流のサプライチェーンを区別しています。マイニングに関連する排出量を決定するためのプロセスを概説し、排出量計算の結果論的アプローチと帰属論的アプローチ（場所ベースと市場ベース）を提示しています。技術的、会計的な基準や慣行に取り組んでいるグループの努力に大いに役立つはずで、参加者は、既存の基準には既得権益があることを念頭に置いていました。目標は、分散型の文脈における基準の有用性と妥当性を検証し、必要であれば代替案や改善策を提案することです。

技術標準の策定

プロジェクトの設計、実施、報告、検証のための標準の開発と採用に参加することは重要である。一人の参加者は、以下のように述べています。「カーボンオフセットにおける良い慣行の欠如のため、ISO（国際標準化機構）のメンバーである標準化団体の下に技術委員会を設立し、企業プロジェクトを作成し、オフセットを行うための標準化されたアプローチを設定しました。」¹²²

同様に、IEEE Standards Association のブロックチェーンおよび分散台帳委員会は、ブロックチェーンを使用した炭素取引アプリケーションのための標準を策定しています。これは「ブロックチェーンに基づく炭素取引アプリケーションの技術的枠組み、アプリケーションプロセス、および炭素消費バウチャーコーディングに必要な技術要件を規定する」ものです。¹²³ また、低炭素地帯評価にブロックチェーンを使用するための標準でもあり、「評価モデルおよび評価指標システム」を含み、「技術要件と管理要件」を定義しています。¹²⁴

もう一人の参加者は、グローバル・ステアリング・グループ (GSG) ¹²⁵ のインパクト投資プログラムとバレラが管理する完全なオフセット認証プログラムである「検証済みカーボンスタンダード」の作業について説明しました。¹²⁶ 両者は京都議定書のクリーン開発メカニズムから生まれ¹²⁷、

プロジェクトを作成するための要件を示し¹²⁸、すべてのプロジェクトが遵守する必要があるいくつかの主要な原則を提示しています。あなたはベースライン、プロジェクト排出量、および生成されるクレジット数を示す必要があります。

討論会参加者は、エネルギー目標と報告基準について、業界全体のコミットメントと合意、そしてマイニング機器の独立した評価のためのデータの透明性とオープンさが必要であると考えています。メーカーは、最も多くのマイナーが拠点とする地域で、e-waste 処理の規制が貧弱または不十分な場合、新しいデバイスの購入に対するリベートとして、ケーシングとアルミニウムを回収するリサイクルプログラムを支援することができます。¹²⁹ 既存の公共リサイクルプログラムにマイニングデバイスを含めることが役立つ場合もあります。

会計基準の策定

ブロックチェーン技術の炭素会計に関する信頼性や一貫性の問題に対処するために、イノベーターたちは、排出量の計算や炭素クレジットの起源を示すための PoW や PoS 型のネットワークに関する方法論を含めたブロックチェーン技術の炭素会計の合意された標準が必要となります。

Bitcoin マイナーによって好まれる地域にいる参加者は、「ここでは 100% 再生可能エネルギーの生産を行っています。したがって、ここでのすべてのマイニングは再生可能エネルギーです。マイナーや PoW を行う企業は、再生可能エネルギーの使用をどのように証明することができますか。再生可能エネルギー証明書や企業の信用を通じ行うのか。」と述べ、PoW に利用するストランドエネルギーアセットを活用することを提案しました。

IEEE のブロックチェーンおよび分散型台帳委員会は、ブロックチェーンベースのグリーン電力識別アプリケーションの標準化にも取り組んでいます。同委員会は、現在使用されている 3 大グリーン電力識別システムである EKOenergy、Green-e、International Renewable Energy Certificate は、グリーン電力証書発行、取引、トレーサビリティをサポートしているが、「国際的に認められ、社会的に一般的な緑の電力消費の

識別を行うためのものではない。貿易促進とグローバルな緑の低炭素化推進のためです。」と述べています。¹³⁰ また、低炭素地帯の評価にブロックチェーンを利用するための IEEE 標準は炭素会計データソース、データストレージ、データ相互作用、データ会計、排出係数データベースの確立、炭素会計方法の選択と予測をカバーしています。¹³¹ これらは、将来の排出削減量を測るために使用されるベースラインの確立と検証に役立つことが期待されています。¹³²

ESG（環境・社会・ガバナンス）に関する懸念がますます高まる中、米国によるデジタル資産の所有権がより制度化されるにつれて、その影響が深刻化しています。そのため、アセットを所有したい企業自身がマイニング事業に投資し、再生可能エネルギー業界を模倣して製品を作り出しています。自身の ESG フットプリントとオペレーションの炭素フットプリントを証明すれば、可変の収益ストリームを固定収益ストリームに変換することができます。これにより機関投資家の保有数が増え、資金が新しい再生可能なコンピューティングインフラストラクチャに流れてアセットを生成することができます。これは好循環となりえる。このため、国内外の会計機関が協力し、これらの規格を迅速に共同開発することが重要です。

結論

参加者の一人は、「ブロックチェーンのおかげで、分散型ユーザー制御環境の時代への明確な展望がある」と述べました。「Web3の完全な潜在能力と、金融以外の広範なブロックチェーン利用を実現する前に、新しい環境向けの技術とアーキテクチャを最適化し、持続可能性の問題を解決する必要がある」と述べた参加者もいました。討論会では、3つのアクション分野が提案されました。

1. **エコシステムのガバナンス**：これは、標準の開発に参加し、業界の賛同と公約に向けて努力することから始まります。ある参加者は、「特定のブロックチェーンコミュニティ内の異なる利害関係者のインセンティブを目標に合わせることであり、彼らの利益に合うかどうかは問題ではない」と強調しています。多くの人々が、規制に先んじて業界指針や独立した評価を開発し、自主的に採用することを望んでいます。
2. **知識の育成**：関与、政策開発、標準開発に情報を提供する再生金融などのイニシアチブを特定することから始まります。ある人は、「ブロックチェーンのトレーサビリティの利点に着目し、新興のグリーン商品、より強固な自主規制、カーボンオフセット市場、持続可能な航空、燃料、バイオ燃料、すべての代替燃料、そして1.5°Cの軌道を維持しようとする中でますます増えていくであろうグリーン商品の市場を支援する」ことを提案しました。
3. **インフラ革新のためのより大きな提唱**：バランスの取れたアプローチが必要です。発展途上国にはBitcoinブロックチェーンのインフラから利益を得る可能性があるため、プロジェクトやイニシアチブは、彼らがグリーン化し、グリーンであり続けることを支援する必要があります。高齢化した経済圏では、エネルギーインフラの刷新が必要であり、ブロックチェーンはその解決策の一部となり得ます。

「自己主権的なアイデンティティ、機械、バッテリー、電気自動車、ソーラーパネルなど、すべてが今後数年間で、より有意義な形でエネルギー部門に組み込まれるだろう」と、ある人は言いました。また、トレーサビリティなどのブロックチェーン機能を、あらゆる政府のインフラプロジェクトの要素として議論することを推奨する人もいました。

将来的には、エネルギー、コンピューティング、ストレージのハードウェア、通信インフラをアップグレードする必要があります。具体的には、利用可能な電力、利用可能なコンピューティングパワー、利用可能な接続性、利用可能なストレージ、コンピューティングパワーを特定のプロセスでより少ないサイクル消費に結びつける方法などです。これは、基盤技術の設計を変えるということに他ならない。ユーザー、開発者、投資家、マイナー、研究者、教育者、政策立案者、規制当局など、ブロックチェーンに関わるすべての人が、この技術の気候への影響を最小限に抑え、持続可能な取り組みに最大限活用するために果たすべき役割を担っています。私たちは共に、有意義な進歩を遂げることができます。

謝辞

本報告書の様々な草稿について、Tamara Kneese、Zane Cooper、Melissa Gregg、Tristin Oldani、Hilary Carter、Anna Hermansen、および Amy Blitz から寛大なフィードバックをいただいたことに感謝の意を表します。

資料

Ball, Marshall, Alon Rosen, Manuel Sabin, and Prashant Nalini Vasudevan. “Proofs of Useful Work.” Cryptology ePrint Archive. International Association for Cryptologic Research, 26 Feb. 2021. <https://eprint.iacr.org/2017/203.pdf>.

Beattini, Viola, Paolo Gabrielli, Linda Frattini, David Weisbach, and Marco Mazzotti. “A Two-Step Carbon Pricing Scheme Enabling a Net-Zero and Net-Negative CO2-Emissions World.” Climatic Change 171, no. 1/2 (March 2022): 1–13. doi:10.1007/s10584-022-03340-z.

“Blockchain-Powered Distributed Governance for Communities, Institutions and the World.” BlockchainGov. European Research Council. n.d. <https://blockchaingov.eu/about/>.

Bogart, Grace. “Using Blockchain to Address the IPCC’s Climate Change Mitigation Strategies.” Environmental Law Reporter: News & Analysis 51, no. 4 (April 2021): 10296–309. <https://search-ebSCOhost-com.rlib.pace.edu/>.

Broekhoff, Derik, Michael Gillenwater, Tani Colbert-Sangree, and Patrick Cage. “Securing Climate Benefit: A Guide to Using Carbon Offsets.” OffsetGuide. Stockholm Environment Institute & Greenhouse Gas Management Institute. 13 Nov. 2019. https://www.offsetguide.org/wp-content/uploads/2020/03/Carbon-Offset-Guide_3122020.pdf.

Centobelli, Piera, Roberto Cerchione, Pasquale DelVecchio, Eugenio Oropallo, and Giustina Secundo. “Blockchain Technology for Bridging Trust, Traceability and Transparency in Circular Supply Chain.” Information & Management 59, No. 7 (Nov. 2022): 103508. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378720621000823>.

“Climate Neutral Cardano.” ClimateNeutralCardano. Climate Neutral Cardano Group. n.d. <https://www.climateneutralcardano.org/>.

“Crypto Climate Accord.” CryptoClimate. Energy Web Foundation, Rocky Mountain Institute, and Alliance for Innovative Regulation. n.d. <https://cryptoclimate.org/accord/>.

Fitzi, Matthias, Xuechao Wang, Sreeram Kannan, Aggelos Kiayias, Nikos Leonardos, Pramod Viswanath, and Gerui Wang. “Minotaur: Multi-Resource Blockchain Consensus.” IOHK Research. Input Output Global Inc. Dec. 2021. <https://iohk.io/en/research/library/papers/minotaur-multi-resource-blockchain-consensus/>.

Gallersdörfer, Ulrich, Lena Klaußen, and Christian Stoll. “Accounting for Carbon Emissions Caused by Cryptocurrency and Token Systems.” White Paper. Crypto Carbon Ratings Institute. Revised March 2022. arXiv, <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2111/2111.06477.pdf>.

Haouaria, Mohamed, Mariem Mhiria, Mazen El-Masrib, and Karim Al-Yafib. “A Novel Proof of Useful Work for a Blockchain Storing Transportation Transactions.” *Information Processing and Management* 59, no. 1 (Jan. 2022). Elsevier Science Direct, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306457321002302#>.

Johnson, Marc and Sahithi Pingali. “Guidance for Accounting and Reporting Electricity Use and Carbon Emissions from Cryptocurrency: Produced to Advance the Crypto Climate Accord.” *CryptoClimate*. Crypto Climate Accord. 15 Dec. 2021. <https://cryptoclimate.org/wp-content/uploads/2021/12/RMI-CIP-CCA-Guidance-Documentation-Dec15.pdf>

Kiayias, Aggelos and Philip Lazos. “SoK: Blockchain Governance.” *arXiv*. Cornell Univ. 17 May 2022. <https://arxiv.org/pdf/2201.07188.pdf>.

“Klima Infinity.” *KlimaDAO.Finance*, n.d. <https://www.klimadao.finance/infinity>.

MacDonald, Kyle. “When a Harm Ends, How Can We Make Amends?” *Amends*. n.d. <https://amends.eco/>.

Marchant, Gary E., Zachary Cooper, and Philip J. Gough-Stone. “Bringing Technological Transparency to Tenebrous Markets: The Case for Using Blockchain to Validate Carbon Credit Trading Markets.” *Natural Resources Journal* 62, no. 2 (2022): 159–82. <https://www.jstor.org/stable/27143833>.

Paik, Hye-young, Xu, Xiwei, Bandara, Dilum, Lee, Sung, and Lo, Sin Kuang. “Analysis of Data Management in Blockchain-Based Systems: From Architecture to Governance.” *IEEE Access*. 23 Dec. 2019. https://www.researchgate.net/publication/338144930_Analysis_of_Data_Management_in_Blockchain-Based_Systems_From_Architecture_to_Governance.

Seidenfad, Karl, Tobias Wagner, Razvan Hrestic, and Ulrike Lechner. “Demonstrating Feasibility of Blockchain-Driven Carbon Accounting: A Design Study and Demonstrator.” In: *Innovations for Community Services I4CS 2022*. *Communications in Computer and Information Science* 1585 (Cham: Springer Nature Switzerland AG, 6 June 2022): 28–46. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06668-9_5.

Singh, Ariana Kiran, Olamide Oguntoye, and Lauren Packard. “Cleaning Up Crypto’s Emissions: Why Policy Shouldn’t Be Binary.” *Tony Blair Institute for Global Change*. 3 Aug. 2022. <https://institute.global/policy/cleaning-cryptos-emissions-why-policy-shouldnt-be-binary>.

“State of Tokenized Carbon.” *KlimaDAO.Finance*, n.d. <https://carbon.klimadao.finance/>.

Unger, Christian. “A Catalyst Fund7 Proposal: The Cardano Carbon Footprint.” *News*. StakeShift. 21 Dec. 2021. <https://stakeshift.team/2021/12/21/a-catalyst-fund7-proposal-the-cardano-carbon-footprint/>.

Vannucci, Emanuele, Andrea Jonathan Pagano, and Francesco Romagnoli. “Climate Change Management: A Resilience Strategy for Flood Risk Using Blockchain Tools.” *Decisions in Economics and Finance*. *A Journal of Applied Mathematics* 44 (1): 177. 2021. <https://search.ebscohost-com.rlib.pace.edu/login.aspx?direct=true&db=msn&AN=MR4276567&site=ehost-live&scope=site>.

“Verified Global Restoration Projects.” *Veritree*. Veritree Technology Inc. As of 6 Aug. 2022. <https://www.veritree.com/>.

著者について

Kirsten D. Sandberg は、Journal of Business Models の編集委員であり、ペース大学の大学院出版プログラムの非常勤講師、および諮問委員会のメンバーとして、学術出版と出版の法的側面に関する講義を担当している。現在の役割としては、ブロックチェーン研究所の編集長があり、ブリーフ、ケース、ペーパー、レポート、書籍の編集指揮と制作を担当している。10年以上にわたり、ハーバード・ビジネス・レビュー出版で戦略とテクノロジーを専門とするエグゼクティブ・エディターを務めている。

巻末資料

- 1 Under Chatham House Rule, participants may freely use the information they receive but not reveal the identity or the affiliation of any speaker or other participant. “Chatham House Rule,” Chatham House, Royal Institute of International Affairs, n.d. <https://www.chathamhouse.org/about-us/chatham-house-rule#>.
- 2 Pörtner, Hans-O., et al., “Technical Summary,” Hans-O. Pörtner et al., eds., in: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Cambridge and New York: Cambridge UP, 2022): 37–118. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_TechnicalSummary.pdf.
- 3 The words of Dr. Tedros Adhanom Ghebreyesus, Director-General of WHO. “Nine out of 10 People Worldwide Breathe Polluted Air, but More Countries Are Taking Action,” News Release, World Health Organization, 2 May 2018. <https://www.who.int/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>. See also Amelia Fortgang, “Countries and Territories Most Affected by Climate Change Also More Likely to Believe it to Be Personally Harmful,” Climate Change Communication, Yale University, 30 July 2021. <https://climatecommunication.yale.edu/news-events/countries-and-territories-most-affected-by-climate-change-also-more-likely-to-believe-it-to-be-personally-harmful/>.
- 4 “A Call for Action,” Our Common Future, A Report by the World Commission on Environment and Development, Official Records of the General Assembly, Forty-second Session. Supplement No. 25 (A/42/251): 1987, p. 54. <https://digitallibrary.un.org/record/139811?ln=en>.
- 5 “A Call for Action,” Our Common Future, p. 24. <https://digitallibrary.un.org/record/139811?ln=en>.
- 6 “Active Addresses,” ViaWallet Explorer, ViaBTC, 24 Sept. 2022. <https://explorer.viawallet.com/btc/statistics/address/activeaddress>; Bitcoin Contributors, GitHub, GitHub Inc., 24 Sept. 2022. <https://github.com/Bitcoin/Bitcoin/graphs/contributors>.
- 7 Arnott, Amy C. “The Case for (and Against) Bitcoin as Digital Gold,” Morningstar, Morningstar Inc., 18 Oct. 2021. <https://www.morningstar.com/articles/1062037/the-case-for-and-against-bitcoin-as-digital-gold>.
- 8 “How Are Bitcoin and Ethereum Different?” Cryptopedia, Gemini Trust Company LLC, 10 Sept. 2021. <https://www.gemini.com/cryptopedia/ethereum-vs-bitcoin-blockchain-differences>; Ross, Logan, “Ethereum vs. Bitcoin,” Benzinga, 14 June 2022. <https://www.benzinga.com/money/bitcoin-vs-ethereum>.
- 9 “The Merge: Implications on the Electricity Consumption and Carbon Footprint of the Ethereum Network,” Crypto Carbon Ratings Institute, CCRI GmbH, 7 Sept. 2022. <https://4795067.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/4795067/CCRI-ETH-Report-2022.pdf>; and Goode, Lauren and Gideon Lichfield, “What’s Next for Ethereum After the Merge,” WIRED, Condé Nast, 26 Sept. 2022. <https://www.wired.com/story/whats-next-for-ethereum-after-the-merge/>.
- 10 “Active Addresses,” Etherscan, 24 Sept. 2022. <https://etherscan.io/chart/active-address>, and Ethereum Contributors, GitHub, GitHub Inc., 24 Sept. 2022. <https://github.com/ethereum/ethereum-org-website/graphs/contributors>.

- 11 Patrizio, Andy, “Web3 vs. Metaverse: What’s the Difference?” TechTarget, 4 Aug. 2022. <https://www.techtarget.com/whatis/feature/Web3-vs-metaverse-Whats-the-difference>.
- 12 The survey was commissioned by StarkWare and conducted by OnePoll in March 2022. StarkWare Industries, “Fifty-three Percent of Americans Think Crypto Will Be ‘the Future of Finance,’ Poll Finds,” Press Release, PR Newswire, Cision US Inc., 29 March 2022. <https://www.prnewswire.com/news-releases/53-of-americans-think-crypto-will-be-the-future-of-finance-poll-finds-301512828.html>.
- 13 “Proof-of-work,” CoinMarketCap, CoinMarketCap OpCo LLC, as of 19 Sept. 2022. <https://coinmarketcap.com/view/pow/>.
- 14 Oliveira, Samuel, Filipe Soares, Guilherme Flach, Marcelo Johann, and Ricardo Reis, “Building a Bitcoin Miner on an FPGA,” XXVII SIM, South Symposium on Microelectronics, 2012. https://www.inf.ufrgs.br/sim-emicro/papers2012/sim2012_submission_46.pdf.
- 15 Mayersen, Isaiah, “Intel starts Shipping Its Bitcoin Mining Rig as Cryptocurrencies Crash,” TechSpot, TechSpot Inc., 2 July 2022. <https://www.techspot.com/news/95165-intel-starts-shipping-Bitcoin-mining-rig-cryptocurrencies-crash.html>; and “10 Best ASIC Miners for Mining Cryptocurrency in 2022,” Software Testing Help, updated 24 Sept. 2022. <https://www.softwetestinghelp.com/best-asic-miners/>.
- 16 Aoyon Ashraf, “Bear Market Could See Some Crypto Miners Turning to M&A for Survival,” CoinDesk, Digital Currency Group, 1 June 2022. <https://www.coindesk.com/business/2022/06/01/bear-market-could-see-some-crypto-miners-turning-to-ma-for-survival/>.
- 17 Cambridge Centre for Alternative Finance, Methodology, n.d. <https://ccaf.io/cbeci/index/methodology>. For a good comparison of these and other methods with supplemental data, see Ulrich Gallersdörfer, Lena Klaußen, and Christian Stoll, “Energy Consumption of Cryptocurrencies Beyond Bitcoin,” Joule 4, No. 9 (16 Sept. 2020): 1843–1846. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.07.013>. It includes a method by Harald Vranken, “Sustainability of Bitcoin and Blockchains,” Current Opinion in Environmental Sustainability 28 (Oct. 2017): 1–9. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1877343517300015>.
- 18 Cambridge Centre for Alternative Finance. <https://ccaf.io/cbeci/index>, as of 19 Sept. 2022. This figure does not account for miner decisions and behavior.
- 19 “How Does It Work?” Bitcoin Energy Consumption Index, Digiconomist.net, as of 21 Oct. 2022. <https://digiconomist.net/wp-content/uploads/2018/03/info-Bitcoin-energy-consumption-v2.png>.
- 20 Bitcoin Energy Consumption Index, Digiconomist.net, as of 21 Oct. 2022. <https://digiconomist.net/Bitcoin-energy-consumption>; and de Vries, Alex, Ulrich Gallersdörfer, Lena Klaußen, and Christian Stoll, “Revisiting Bitcoin’s Carbon Footprint,” Joule 6, no. 3 (16 March 2022): 498–502. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.02.005>.
- 21 Koomey, Jonathan, “Estimating Bitcoin Electricity Use: A Beginner’s Guide,” Coin Center, May 2019. <https://www.coincenter.org/estimating-Bitcoin-electricity-use-a-beginners-guide/#summary-of-independent-estimates>.
- 22 “About ENERGY STAR,” EnergyStar, Environmental Protection Agency and US Department of Energy, as of 18 Oct 2022. <https://www.energystar.gov/about>; LG Electronics, Samsung, and Xerox were among ENERGY STAR’s 2022 award-winning partners in the product manufacturing category. “2022 Energy Star Award Winners,” EnergyStar, EPA and US Dept. of Energy, 5 May 2022. https://www.energystar.gov/about/awards/2022_energy_star_award_winners.
- 23 “Corporate Average Fuel Economy,” National Highway Traffic Safety Administration, US Dept. of Transportation, updated 19

- Sept. 2022. <https://www.nhtsa.gov/laws-regulations/corporate-average-fuel-economy>; and “Air Pollution Controls,” eCode of Federal Regulations, National Archives, updated 19 Oct. 2022. <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-U>, accessed 22 Sept. 2022.
- 24 Carlson, Jill, “Cryptocurrency and Capital Controls,” Social Science Research Network, 2 June 2016, p. 31. <https://ssrn.com/abstract=3046954>. Governments with currencies of more stable value could reduce the carbon footprint of their bank notes and coins through central bank digital currencies not using proof-of-work. See Itai Agur, et al., Digital Currencies and Energy Consumption 2022, No. 6 (7 June 2022). International Monetary Fund, <https://www.elibrary.imf.org/view/journals/063/2022/006/article-A001-en.xml#A001fn07>; and Chaum, David, Christian Grothoff, and Thomas Moser, “How to Issue a Central Bank Digital Currency,” Swiss National Bank Working Paper 3/2021. <https://arxiv.org/abs/2103.00254>.
- 25 McCook, Hass, “An Order-of-Magnitude Estimate of the Relative Sustainability of the Bitcoin Network,” 2nd ed., Bitcoin.fr, 15 July 2014. https://Bitcoin.fr/public/divers/docs/Estimation_de_la_durabilite_et_du_cout_du_reseau_Bitcoin.pdf; Fabiano, Amanda, Rachel Rybarczyk, and Drew Armstrong, “Financial Industry Electricity Usage Balance,” GitHub, Galaxy Digital LLC, 13 May 2021. <https://github.com/GalaxyDigitalLLC/Financial-Industry-Electricity-Balance/blob/main/out/main.pdf>; Khazzaka, Michel, “Bitcoin: Cryptopayments Energy Efficiency,” Social Science Research Network, rev. 28 Sept 2022. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4125499.
- 26 Khazzaka, Michel, “Bitcoin: Cryptopayments Energy Efficiency,” Social Science Research Network, rev. 28 Sept 2022. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4125499. Valuechain also calculated the energy used by automated teller machines worldwide (47 tWh), but that energy does not contribute to security: according to the US Federal Bureau of Investigation, ATM robberies—where thieves use crowbars to break open the machines—are at an eight-year high; and the US-based ATM security services provider 3SI reported a 165 percent jump in ATM thefts globally in 2022, with \$81,000 the average amount stolen. Sams, Jim, “ATM Theft Numbers Continue to Climb After Surpassing Historic Highs,” Claims Journal, Wells Media Group, 9 Aug. 2022. <https://www.claimsjournal.com/news/national/2022/08/09/312021.htm>.
- 27 Maciej Cepnik, et al., “A New Look at the Bitcoin Blockchain: How Innovation in Bitcoin’s Technology Stack Is Creating New Enterprise Use Cases,” Blockchain Research Institute, 31 July 2020. <https://www.blockchainresearchinstitute.org/project/a-new-look-at-Bitcoin/>.
- 28 Vitalik Buterin, “A Proof of Stake Design Philosophy,” Medium, 30 Dec. 2016. <https://medium.com/@VitalikButerin/a-proof-of-stake-design-philosophy-506585978d51>.
- 29 “Proof of History,” Cryptopedia, Gemini Trust Company LLC, n.d. <https://www.gemini.com/cryptopedia/glossary#proof-of-history-po-h>; Garnett, Alle Grace, “NFTs and the Environment,” Investopedia, Dotdash Meredith, 14 Oct. 2022. <https://www.investopedia.com/nfts-and-the-environment-5220221>.
- 30 Ethereum Improvement Proposal 1057. <https://github.com/ethereum/EIPs/pull/1057>; <https://github.com/ethereum/EIPs/issues/1058>; Shevchenko, Andrey, “ProgPow Is Dead, Long Live ProgPow: Ethereum Developer Call Summary,” Cointelegraph, 6 March 2020. <https://cointelegraph.com/news/progpow-is-dead-long-live-progpow-ethereum-developer-call-summary>.

- 31 Fitzi, Matthias, et al., “Ofelimos: Combinatorial Optimization via Proof-of-Useful-Work,” International Association for Cryptologic Research, 14 Oct 2021. <https://eprint.iacr.org/2021/1379.pdf>
- 32 Hryniuk, Olga, “Introducing Ofelimos: a Proof-of-Useful-Work Consensus Protocol,” IOG Blog, IOG Singapore Pte. Ltd., 15 Aug. 2022. <https://iohk.io/en/blog/posts/2022/08/16/introducing-ofelimos-a-proof-of-useful-work-consensus-protocol/>.
- 33 Hoffman, Felix, “Challenges of Proof-of-Useful-Work,” arXiv, Cornell Univ., 9 Sept. 2022. <https://arxiv.org/pdf/2209.03865.pdf>.
- 34 Liu, Chuncheng, “Who Supports Expanding Surveillance? Exploring Public Opinion of Chinese Social Credit Systems,” International Sociology 37, No. 3 (24 March 2022). <https://doi.org/10.1177/026858092211084446>.
- 35 Jardine, Eric, “Mid-year Crypto Crime Update: Illicit Activity Falls with Rest of Market, with Some Notable Exceptions,” Chainalysis, Chainalysis Inc., 16 Aug. 2022. <https://blog.chainalysis.com/reports/crypto-crime-midyear-update-2022/>.
- 36 Jardine, Eric, “Mid-year Crypto Crime Update: Illicit Activity Falls with Rest of Market, with Some Notable Exceptions,” Chainalysis, Chainalysis Inc., 16 Aug. 2022. <https://blog.chainalysis.com/reports/crypto-crime-midyear-update-2022/>.
- 37 Koomey, Jonathan, Stephen Berard, Marla Sanchez, and Henry Wong, “Implications of Historical Trends in the Electrical Efficiency of Computing,” in IEEE Annals of the History of Computing 33, no. 3 (March 2011): 46–54. DOI: [10.1109/MAHC.2010.28](https://doi.org/10.1109/MAHC.2010.28).
- 38 Zhang, Nick, “Moore’s Law Is Dead, Long Live Moore’s Law!” arXiv, Cornell Univ., 27 May 2022. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2205/2205.15011.pdf>. For a couple of chip advances, see Joseph R. Vella, David Humbird, and David B. Graves, “Molecular Dynamics Study of Silicon Atomic Layer Etching by Chlorine Gas and Argon Ions,” Journal of Vacuum Science & Technology B 40, no. 2 (10 Feb. 2022): 023205. <https://doi.org/10.1116/6.0001681>; and Adrian Del Maestro, Nathan S. Nichols, Timothy R. Prisk, Garfield Warren, and Paul E. Sokol, “Experimental Realization of One-Dimensional Helium,” Nature Communications 13 (7 June 2022): 3168. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30752-3>.
- 39 de Vries, Alex and Christian Stoll, “Bitcoin’s Growing e-Waste Problem,” Resources, Conservation and Recycling 175 (Dec. 2021). Elsevier, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105901>.
- 40 Saylor, Michael, Nic Carter, Darin Feinstein, et al., Letter to the Honorable Michael S. Regan, US Environmental Protection Agency, 2 May 2022, in response to the letter of 20 April 2022, from Rep. Huffman and 22 members of Congress to the EPA, Bitcoin Mining Council, May 2022. https://Bitcoinminingcouncil.com/wp-content/uploads/2022/05/Bitcoin_Letter_to_the_Environmental_Protection_Agency.pdf. See also Bailey, Brandon and Karim Helmy, “How Much Does It Cost to Mine a Bitcoin?” Galaxy Digital Research, 23 Nov. 2021. <https://docsend.com/view/nk6szu7i8e6tv45m>.
- 41 Some crypto opponents argue that mining device manufacturers have exacerbated chip shortages in other sectors like automotive. Chandrima Sanyal, “Why Is There a Chip Shortage? The Semiconductor Supply Chain, Explained,” Nasdaq, Nasdaq Inc., 13 Oct. 2022. <https://www.nasdaq.com/articles/why-is-there-a-chip-shortage-the-semiconductor-supply-chain-explained>; Zack Voell, “As Bitcoin Price Falls, Is Now the Time to Buy Mining Rigs?” Nasdaq, Nasdaq Inc., 21

- June 2022. <https://www.nasdaq.com/articles/as-Bitcoin-price-falls-is-now-the-time-to-buy-mining-rigs>.
- 42 Bambyshe, Nina, “Ethereum Miners Eye Cloud, AI to Repurpose Equipment That the Merge Will Make Obsolete,” Forbes, Forbes Media LLC, 6 Sept. 2022. <https://www.forbes.com/sites/ninabambysheva/2022/09/06/ethereum-miners-eye-cloud-ai-to-repurpose-equipment-that-the-merge-will-make-obsolete/>.
 - 43 Saylor, Michael, Nic Carter, Darin Feinstein, et al., Letter to the Honorable Michael S. Regan, US Environmental Protection Agency; “Secret Life of a Cell Phone,” EPA, updated 12 Jan. 2022. <https://www.epa.gov/recycle/secret-life-smart-phone>.
 - 44 “Telefónica Implements Blockchain for Sustainable Equipment Tracking,” ICT Monitor Worldwide, Global Data Point, 30 June 2022. <https://advance-lexis-com.rlib.pace.edu/api/1516831>. Trust OS, Telefónica Internet of Things, TelefónicaTech, n.d. <https://aiofthings.telefonicatech.com/en/technology-services/blockchain-services/trust-os>.
 - 45 “Blockchain Certifies the Sustainability of Electronic Equipment,” Telefónica Blog, Telefónica SA, 24 June 2022. <https://www.telefonica.com/en/communication-room/blog/blockchain-certifies-the-sustainability-of-electronic-equipment/>; and “Éxxita Be Circular and Telefónica Tech Create the European Green Passport for Electronic Equipment Certified by Blockchain,” Éxxita, Core & Global IT Solutions SA, 17 Feb. 2022. <https://exxita.com/2022/02/17/exxita-be-circular-and-telefonica-tech-create-the-european-green-passport-for-electronic-equipment-certified-by-blockchain/>.
 - 46 Circular Drive Initiative, n.d. <https://circulardrives.org/>.
 - 47 Cohen, Bram and Krzysztof Pietrzak, “Chia Network Blockchain,” White Paper, Chia.net, 9 July 2019. <https://www.chia.net/wp-content/uploads/2022/07/ChiaGreenPaper.pdf>.
 - 48 IEEE 2883-2022, “Standard for Sanitizing Storage,” 2022. <https://standards.ieee.org/ieee/2883/10277/>; and “Data Sanitization for the Circular Economy,” White Paper, Circular Drive Initiative, July 2022. https://circulardrives.org/Data_Sanitization_for_the_Circular_Economy.pdf.
 - 49 Khan, A. U. R., and R. W. Ahmad, “A Blockchain-Based IoT-Enabled E-Waste Tracking and Tracing System for Smart Cities,” IEEE Access 10 (22 Aug. 2022): 86256–86269. DOI: [10.1109/ACCESS.2022.3198973](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3198973).
 - 50 “Modeling a Circular Economy for Electronic Waste,” Governance, Risk and Compliance Monitor Worldwide, 23 June 2021. Re: Salmon, Daniel, Callie W. Babbitt, Gregory A. Babbitt, and Christopher E. Wilmer, “A Framework for Modeling Fraud in E-Waste Management,” Resources, Conservation and Recycling, 2021: 171. <https://www.sciencedaily.com/releases/2021/06/210621174120.htm>.
 - 51 “Frequently Asked Questions,” Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index, n.d. <https://ccaf.io/cbeci/faq>.
 - 52 Blandin, Apolline, Gina Pieters, Yue Wu, Thomas Eisermann, Anton Dek, Sean Taylor, and Damaris Njoki, Global Cryptoasset Benchmarking Study, 3rd. ed., Cambridge Centre for Alternative Finance, Univ. of Cambridge, Sept. 2020, p. 11. <https://www.jbs.cam.ac.uk/wp-content/uploads/2021/01/2021-ccaf-3rd-global-cryptoasset-benchmarking-study.pdf>.
 - 53 BMC collected data on the electricity mix from over half the Bitcoin network in 2022. “Q2 BMC Survey Confirms Year on

- Year Improvements in Sustainable Power Mix and Technological Efficiency,” Bitcoin Mining Council, 19 July 2022. <https://Bitcoinminingcouncil.com/Bitcoin-mining-electricity-mix-increased-to-59-5-sustainable-in-q2-2022/>.
- 54 “Overview,” HIVE Blockchain, n.d. <https://www.hiveblockchain.com/operations/>.
- 55 Springer, Patrick, “Bitzero Data Centers Planned in North Dakota: ‘Data is the New Oil,’” INFORUM, Forum Communications Company, 1 June 2022. <https://www.inforum.com/news/north-dakota/data-is-the-new-oil-bitzero-data-centers-in-north-dakota-valued-at-up-to-500m-announced>.
- 56 Springer, Patrick, “Bitzero Data Centers Planned in North Dakota: ‘Data is the New Oil,’” INFORUM, Forum Communications Company, 1 June 2022. <https://www.inforum.com/news/north-dakota/data-is-the-new-oil-bitzero-data-centers-in-north-dakota-valued-at-up-to-500m-announced>.
- 57 North Dakota Century Code 38-22, “Carbon Dioxide Underground Storage.” <https://ndlegis.gov/cencode/t38c22.html>; and Code 38-25, “Underground Storage of Oil and Gas.” <https://ndlegis.gov/cencode/t38c25.html>.
- 58 “MHA Nation Ground-breaking Ceremony for NG2 Green House Project,” Press Release, MHA Nation News, Mandan, Hidatsa and Arikara Nation, 19 April 2021. <https://www.mhanation.com/news/2021/4/19/mha-nation-groundbreaking-ceremony-for-ng2-green-house-project>.
- 59 “Growing Veggies While Mining Bitcoin: A Greenhouse and Data Center Project,” Genesis Mining, Genesis Mining Ltd., 15 Dec. 2020. <https://www.genesis-mining.com/greenhouse-project>; “A 300 Square Meter Smart Greenhouse,” Boden Business Park, 2 Sept. 2021. <https://bodenbusinesspark.com/en/news/189--a-300-square-meter-smart-greenhouse>; and “Companies Join Forces to Build Large Greenhouse,” Boden Business Park, 9 Sept. 2022. <https://bodenbusinesspark.com/en/news/284--companies-join-forces-to-build-large-greenhouse>.
- 60 “Boden Plug and Play is at the Forefront of Climate-Smart Conversion,” Boden Business Park, 16 March 2021. <https://bodenbusinesspark.com/en/news/138--boden-plug-and-play-is-at-the-forefront-of-climate-smart-conversion>.
- 61 Benson, Sally M. and Jacques A. de Chalendar, “Why 100% Renewable Energy Is Not Enough,” *Joule* 3, No. 6 (19 June 2019): 1389–1393. Elsevier, [https://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351\(19\)30214-4](https://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351(19)30214-4).
- 62 Radovanovic, Ana, Ross Koningstein, Ian Schneider, et al., “Carbon-Aware Computing for Datacenters,” *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9770383>.
- 63 Radovanovic, Ana, Ross Koningstein, Ian Schneider, et al., “Carbon-Aware Computing for Datacenters,” *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9770383>.
- 64 Sun, Zhiyuan, “This Singapore Tech Company Says Its Recycling 90% of Waste Heat from Bitcoin Mining,” *Cointelegraph*, 22 Nov. 2021. <https://cointelegraph.com/news/this-singapore-tech-company-says-its-recycling-90-of-waste-heat-from-bitcoin-mining>.
- 65 “Just Add Graphene for Greener Li-ion Batteries,” ESA Enabling and Support Blog, European Space Agency, 7 July 2022. https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Just_add_graphene_for_greener_Li-ion_batteries.

- 66 “Just Add Graphene for Greener Li-ion Batteries,” ESA Enabling and Support Blog, European Space Agency, 7 July 2022. https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Just_add_graphene_for_greener_Li-ion_batteries.
- 67 Crusoe Energy Systems, n.d. <https://www.crusoeenergy.com/>. “About,” EZ Blockchain LLC, 2021. <https://ezblockchain.net/about/>.
- 68 McFarland, John, “Mining Bitcoin a Solution to Gas Flaring?” Oil and Gas Lawyer Blog, 16 Sept. 2021. <https://www.oilandgaslawyerblog.com/mining-Bitcoin-a-solution-to-gas-flaring/>.
- 69 “Sato,” WiseMining, WisElement SA, 2021. <https://www.wisemining.io/product>.
- 70 “Cleantech Bitcoin Mining Company MintGreen Partners,” T-Net, T-Net British Columbia, 15 Oct. 2021. <https://www.bctechnology.com/news/2021/10/15/Cleantech-Bitcoin-Mining-Company-MintGreen-Partners-With-Lonsdale-Energy-Corporation-to-Make-North-Vancouver-Worlds-First-City-Heated-by-Bitcoin.cfm>.
- 71 “District Energy: A Secret Weapon for Climate Action and Human Health,” UNEP, UN Environment Programme, 11 March 2019. <https://www.unep.org/news-and-stories/story/district-energy-secret-weapon-climate-action-and-human-health>.
- 72 “District Energy Systems,” Combined Heat and Power Technology Fact Sheet, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, US Dept. of Energy, DOE/EE-2125, Sept. 2020. https://www.energy.gov/sites/default/files/2021/03/f83/District_Energy_Fact_Sheet.pdf.
- 73 “District Energy Systems,” Combined Heat and Power Technology Fact Sheet, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, US Dept. of Energy, DOE/EE-2125, Sept. 2020.
- 74 Thomas Franck, “One in Five Adults Has Invested in, Traded or Used Cryptocurrency, NBC News Poll Shows,” CNBC CryptoWorld, CNBC LLC, NBCUniversal, 31 March 2022. <https://www.cnbc.com/2022/03/31/cryptocurrency-news-21percent-of-adults-have-traded-or-used-crypto-nbc-poll-shows.html>.
- 75 Thomas Franck, “One in Five Adults Has Invested in, Traded or Used Cryptocurrency, NBC News Poll Shows,” CNBC CryptoWorld, CNBC LLC, NBCUniversal, 31 March 2022. <https://www.cnbc.com/2022/03/31/cryptocurrency-news-21percent-of-adults-have-traded-or-used-crypto-nbc-poll-shows.html>.
- 76 White, Christopher C. and Lily Momper, “SEC Approves Rule to Mandate Climate-Related Disclosures,” Exponent Update, Exponent Inc., 4 April, 2022. <https://www.exponent.com/knowledge/alerts/2022/04/sec-approves-rule-mandate-climate-disclosures/>.
- 77 Courtneil, Jane, “Carbon Offsets vs Carbon Credits: The Five Rules of Carbon Offsetting,” Green Business Bureau, Clearyst GBB LLC, 11 April 2022. <https://greenbusinessbureau.com/topics/carbon-accounting/carbon-offsets-vs-carbon-credits/>.
- 78 Singh, Ariana Kiran, Olamide Oguntoye, and Lauren Packard. “Cleaning Up Crypto’ s Emissions: Why Policy Shouldn’ t Be Binary,” Tony Blair Institute for Global Change, 3 Aug. 2022. <https://institute.global/policy/cleaning-cryptos-emissions-why-policy-shouldnt-be-binary>.

- 79 Singh, Ariana Kiran, Olamide Oguntoye, and Lauren Packard. “Cleaning Up Crypto’ s Emissions: Why Policy Shouldn’ t Be Binary,” Tony Blair Institute for Global Change, 3 Aug. 2022. <https://institute.global/policy/cleaning-cryptos-emissions-why-policy-shouldnt-be-binary>.
- 80 “Klima Infinity is a Next-Generation Carbon Toolkit for Your Organization,” KlimaDAO, n.d. <https://www.klimadao.finance/infinity>.
- 81 Digital Monitoring, Reporting, and Verification Systems and Their Application in Future Carbon Markets (Washington, DC: World Bank, 2022): 3. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/37622>.
- 82 Digital Monitoring, Reporting, and Verification Systems and Their Application in Future Carbon Markets (Washington, DC: World Bank, 2022): 21.
- 83 “Climate Warehouse,” World Bank, n.d. <https://www.theclimatewarehouse.org/work/climate-warehouse>; and “Chia as the Blockchain Technology for the Climate Warehouse,” White Paper, Oct. 2021. https://ik.imagekit.io/mtozw1gojis/world-bank/Chia_as_the_Blockchain_Technology_for_the_Climate_Warehouse_3f553aff80_pRQYXle0g.pdf.
- 84 Zia, Mohammed, “B-DRIVE: A Blockchain Based Distributed IoT Network for Smart Urban Transportation,” Blockchain: Research and Applications 2, No. 4 (Dec. 2021): 100033. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2096720921000282>.
- 85 Smith, Ryan, “IOTA Announces Alvarium, an Oracle Collaboration with Dell,” BeInCrypto.com, 11 Feb. 2021. <https://beincrypto.com/iota-announces-alvarium-an-oracle-collaboration-with-dell/>; Project Alvarium, LFEEdge, The Linux Foundation, n.d. <https://www.lfedge.org/projects/alvarium/>.
- 86 Cong, Lin and Tang, Ke and Wang, Yanxin and Zhao, Xi, “Inclusion and Democratization Through Web3 and DeFi? Initial Evidence from the Ethereum Ecosystem,” SSRN.com, Elsevier Inc., 14 July 2022, updated 6 Sept. 2022. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4162966>.
- 87 Cong, Lin and Tang, Ke and Wang, Yanxin and Zhao, Xi, “Inclusion and Democratization Through Web3 and DeFi? Initial Evidence from the Ethereum Ecosystem,” SSRN.com, Elsevier Inc., 14 July 2022, updated 6 Sept. 2022.
- 88 Cong, Lin and Tang, Ke and Wang, Yanxin and Zhao, Xi, “Inclusion and Democratization Through Web3 and DeFi? Initial Evidence from the Ethereum Ecosystem,” SSRN.com, Elsevier Inc., 14 July 2022, updated 6 Sept. 2022.
- 89 Orji, Chloe, “Bitcoin Bans,” Euronews, 25 Aug. 2022. <https://www.euronews.com/next/2022/08/25/Bitcoin-ban-these-are-the-countries-where-crypto-is-restricted-or-illegal2>.
- 90 Niaz, Haider, Mohammad H. Shams, Jay J. Liu, and Fengqi You, “Mining Bitcoins with Carbon Capture and Renewable Energy for Carbon Neutrality Across States in the USA,” Energy & Environmental Science 15, No. 9 (28 July 2022): 3551–3570. <https://doi.org/10.1039/D1EE03804D>. Find the data at Royal Society of Chemistry: <https://www.rsc.org/suppdata/d1/ee/d1ee03804d/d1ee03804d1.pdf>.
- 91 “Coal Explained: Where Our Coal Comes from,” US Energy Information Administration, updated 19 Oct. 2021. <https://www.eia.gov/energyexplained/coal/where-our-coal-comes-from.php>.
- 92 Friedlander, Blaine. “Industry Incentives Create Greener Crypto Mining,” Cornell Chronicle, Cornell Univ., 14 Sept. 2022. <https://news.cornell.edu/stories/2022/09/industry-incentives-create-greener-crypto-mining>.

- 93 Singh, Ariana Kiran, Olamide Oguntoye, and Lauren Packard, “Cleaning Up Crypto’ s Emissions: Why Policy Shouldn’ t Be Binary,” Tony Blair Institute for Global Change, 3 Aug. 2022. <https://institute.global/policy/cleaning-cryptos-emissions-why-policy-shouldnt-be-binary>.
- 94 “Modeling a Circular Economy for Electronic Waste,” Governance, Risk and Compliance Monitor Worldwide, 23 June 2021. Re: Salmon, Daniel, Callie W. Babbitt, Gregory A. Babbitt, and Christopher E. Wilmer, “A Framework for Modeling Fraud In E-Waste Management,” Resources, Conservation and Recycling, 2021; 171: <https://www.sciencedaily.com/releases/2021/06/210621174120.htm>.
- 95 “Modeling a Circular Economy for Electronic Waste,” Governance, Risk and Compliance Monitor Worldwide, 23 June 2021.
- 96 Baldé, C.P., E. D’ Angelo, V. Luda O. Deubzer, and R. Kuehr, Global Transboundary E-waste Flows Monitor – 2022, United Nations Institute for Training and Research (Bonn, Germany: UNITAR, 2022). https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2022/06/Global-TBM_webversion_june_2_pages.pdf.
- 97 Descriptions of these three principles are adapted from Pörtner, Hans-O., et al., “Summary for Policymakers,” Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Intergovernmental Panel on Climate Change, 27 Feb. 2022, p. SPM-5. https://report.ipcc.ch/ar6wg2/pdf/IPCC_AR6_WGII_SummaryForPolicymakers.pdf.
- 98 Hewlett, Sylvia Ann, Melinda Marshall, and Laura Sherbin, “How Diversity Can Drive Innovation,” Harvard Business Review, Dec. 2013. <https://hbr.org/2013/12/how-diversity-can-drive-innovation>; and Farzaneh Khayat, “From Climate Injustice to Resilience: What Is the Role of Social and Technological Innovation?” Journal of Environmental Justice, Liebert Inc., Aug. 2022. <https://www.liebertpub.com/doi/abs/10.1089/env.2021.0066>.
- 99 See, for example, Josh Gabbatiss and Ayesha Tandon, “In-Depth Q&A: What Is ‘Climate Justice’ ?” Carbon Brief Ltd., 4 Oct. 2021 <https://www.carbonbrief.org/in-depth-qa-what-is-climate-justice/>.
- 100 “Kenya: Evicting the Forest Guardians,” Amnesty International, May 2018. <https://www.amnesty.org/en/latest/campaigns/2018/05/kenya-evicting-the-forest-guardians/>.
- 101 “Renewable Energy Certificates,” EPA, Environmental Protection Agency, updated 25 Feb. 2022. <https://www.epa.gov/green-power-markets/renewable-energy-certificates-recs>; and Singh, Ariana Kiran, et al., “Cleaning Up Crypto’ s Emissions: Why Policy Shouldn’ t Be Binary,” Tony Blair Institute for Global Change, 3 Aug. 2022. <https://institute.global/policy/cleaning-cryptos-emissions-why-policy-shouldnt-be-binary>.
- 102 Sustainable Bitcoin Protocol, SustainableBTC, n.d. <https://www.sustainablebtc.org/news/make-Bitcoin-a-climate-positive-asset>.
- 103 Jimenez, Emmanuel, “Human and Physical Infrastructure: Public Investment and Pricing Policies in Developing Countries,” Policy Research Working Paper No. WPS 1281 (Washington, DC: World Bank Group, 1994). <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/867561468765006075/human-and-physical-infrastructure-public-investment-and-pricing-policies-in-developing-countries>.

- 104 Berman, Fran, “The Human Side of Cyberinfrastructure,” *EnVision* 17, no. 2 (2001): 1. As quoted in Charlotte P. Lee, Paul Dourish, and Gloria Mark, “The Human Infrastructure of Cyberinfrastructure,” *CSCW ‘06: Proceedings of the 2006 20th Anniversary Conference on Computer Supported Cooperative Work* (Nov. 2006): 483–492. <https://doi.org/10.1145/1180875.1180950>.
- 105 Ian Foster and Carl Kesselman, “The History of the Grid,” Cornell Univ. 8 April 2022. arXiv, <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2204/2204.04312.pdf>. Originally appeared in *High Performance Computing: From Grids and Clouds to Exascale* (IOS Press, 2011): 3–30.
- 106 Berman, Fran, “The Human Side of Cyberinfrastructure,” *EnVision* 17, no. 2 (2001): 1. As quoted in Charlotte P. Lee et al.
- 107 “A Call for Action,” *Our Common Future, A Report by the World Commission on Environment and Development*, Official Records of the General Assembly, Forty-second Session. Supplement No. 25 (A/42/251): 1987, p. 54. <https://digitallibrary.un.org/record/139811?ln=en>.
- 108 “Primer on KLIMA,” *KlimaDAO*, March 2022. <https://docs.klimadao.finance/tokenomics-and-mechanisms/primer-on-klima>.
- 109 Strauf, Florian, “Tokenomics 101: Klima DAO,” *CoinMonks Blog*, 22 Nov. 2021. <https://medium.com/coinmonks/tokenomics-101-klima-dao-e8fac497454f>.
- 110 Perez, Ben, “Incentive Design and Tooling for DAOs,” *Aragon Blog*, Aragon Network, 11 Nov. 2021. <https://blog.aragon.org/incentive-design-tooling-for-daos/>.
- 111 “Flood Woes Continue in Pakistan,” *Earth Observatory*, EOS Project Science Office, NASA Goddard Space Flight Center, as of 13 Oct. 2022. <https://earthobservatory.nasa.gov/images/150470/flood-woes-continue-in-pakistan>; “North Atlantic Hurricane Tracking Chart,” National Weather Service, NOAA.org, US Department of Commerce, as of 30 Sept. 2022. https://www.nhc.noaa.gov/tafb_latest/tws_atl_latest.gif.
- 112 Casey, Michael, “‘Defi’ and ‘Tradfi’ Must Work Together,” IMF, International Monetary Fund, Sept. 2022. https://www.imf.org/en/Publications/fandd/issues/2022/09/Point-of-View-Defi-Tradfi-must-work-together-Michael-Casey_
- 113 OPEC is co-chaired by Saudi energy minister Prince Abdulaziz bin Salman and Russia’s deputy prime minister Alexander Novak. Reed, Stanley, “In Rebuke to West, OPEC and Russia Aim to Raise Oil Prices with Big Supply Cut,” *New York Times*, New York Times Co., 5 Oct. 2022. <https://www.nytimes.com/2022/10/05/business/opec-russia-oil-output.html>.
- 114 DiCaprio, Alisa, “Herring in the Discussion of Blockchain Energy Efficiency,” *BrinkNews*, Marsh McLennan, 23 Aug. 2018. <https://www.brinknews.com/Bitcoin-is-a-red-herring-in-the-discussion-of-blockchain-energy-efficiency/>.
- 115 See IEEE Blockchain’s “Guide to Distributed Energy Resources.” <https://blockchain.ieee.org/verticals/transactive-energy/topics/guide-to-distributed-energy-resources> for IEEE
- 116 Anthony D. Williams, “Blockchain and the Future of Battery Supply Chains: How Circular Enables Ethically Sourced Cobalt,” foreword by Alex Tapscott, *Blockchain Research Institute*, 11 Dec. 2019. https://www.dropbox.com/s/cpal0cdrw40fzj4/Williams_Blockchain%20and%20the%20Future%20of%20Battery%20Supply%20Chains_Blockchain%20Research%20Institute.pdf?dl=0_

- 117 Henly, Claire, Sam Hartnett, Sam Mardell, et al. “Energizing the Future with Blockchain.” *Energy Law Journal* 39 (14 Nov. 2018): 197–232. Energy Bar Association, [www.eba-net.org/assets/1/6/14-197-232-Blockchain_\(FINAL\).pdf](http://www.eba-net.org/assets/1/6/14-197-232-Blockchain_(FINAL).pdf).
- 118 Brooklyn Microgrid, n.d. <https://www.brooklyn.energy/>.
- 119 Adler, Ray, “LO3 Energy: Distributed Grid Solutions Bringing People, Tech and Energy Together,” CleanTech Alliance, 7 July 2017. www.cleantechalliance.org/2017/07/07/lo3-energy-distributed-grid-solutions-bringing-people-tech-and-energy-together, quoted in Lawrence Orsini, “Distributed Power: How Blockchain Will Transform Global Energy Markets,” foreword by Don Tapscott, Blockchain Research Institute, 11 Oct. 2018.
- 120 Singh, Ariana Kiran, et al., “Cleaning Up Crypto’ s Emissions: Why Policy Shouldn’ t Be Binary.”
- 121 Johnson, Marc, and Sahithi Pingali, “Guidance for Accounting and Reporting Electricity Use and Carbon Emissions from Cryptocurrency Produced to Advance the Crypto Climate Accord,” CryptoClimate, 15 Dec. 2021. <https://cryptoclimate.org/wp-content/uploads/2021/12/RMI-CIP-CCA-Guidance-Documentation-Dec15.pdf>.
- 122 Gasiorowski-Denis, Elizabeth, “Raising New ISO Standards for Saving the Planet,” ISO.org, International Organization for Standardization, 16 April 2019. <https://www.iso.org/news/ref2384.html>.
- 123 IEEE Draft Standard for Using Blockchain for Carbon Trading Applications (IEEE P3218). <https://standards.ieee.org/ieee/3218/10607/>.
- 124 Standard for Using Blockchain in Low Carbon Zones Evaluation (IEEE P3225). <https://standards.ieee.org/ieee/3225/10961/>.
- 125 Global Steering Group for Impact Investment, n.d. <https://gsgii.org/about-us/>.
- 126 “Verified Carbon Standard Program,” Verra, n.d. <https://verra.org/project/vcs-program/>.
- 127 “Clean Development Mechanism (CDM),” UN Framework Convention on Climate Change, n.d. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-kyoto-protocol/mechanisms-under-the-kyoto-protocol/the-clean-development-mechanism>.
- 128 “What is the Kyoto Protocol?” UN Framework Convention on Climate Change, n.d. https://unfccc.int/kyoto_protocol.
- 129 de Vries, Alex and Christian Stoll, “Bitcoin’ s Growing e-Waste Problem,” *Resources, Conservation and Recycling* 175 (Dec. 2021). Elsevier, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105901>.
- 130 IEEE Standard for Blockchain-based Green Power Identification Application (IEEE P3224). <https://development.standards.ieee.org/myproject-web/public/view.html#pardetail/9950>.
- 131 IEEE Standard for Using Blockchain in Low Carbon Zones Evaluation (IEEE P3225). <https://standards.ieee.org/ieee/3225/10961/>.
- 132 Singh, Ariana Kiran, et al., “Cleaning Up Crypto’ s Emissions: Why Policy Shouldn’ t Be Binary.”



私たちは、世界中のすべての人々の生活を改善し、世界を変える技術を創造しています。Intel は、シリコンバレーにシリコンを与えた存在です。50 年以上にわたり、Intel とその社員は、世界に大きな影響を与え、私たちの生活様式に革命をもたらす急進的なイノベーションを生み出すことで、ビジネスと社会を前進させてきました。今日、我々は、デジタル技術の力をより十分に活用するために、私たちのリーチ、スケール、リソースを提供しています。ムーアの法則に着想を得て、私たちは、半導体の設計と製造の進歩を継続的に推進し、お客様の最大の課題に取り組む手助けをしています。

 twitter.com/intel

 linkedin.com/company/intel-corporation

 youtube.com/c/Intel/videos

 github.com/intel



2021年に設立されたLinux Foundation Researchは、オープンソース コラボレーションの規模の拡大を調査し、新しいテクノロジー トレンド、ベストプラクティス、オープンソース プロジェクトの世界的な影響についての洞察を提供します。プロジェクトのデータベースとネットワークを活用し、定量的・定性的な方法論のベストプラクティスに取り組むことで、Linux Foundation Researchは、世界中の組織のために、オープンソースの洞察を得るための最適なライブラリーを構築しています。

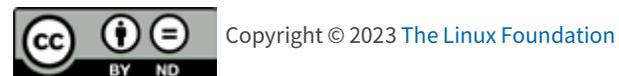
 twitter.com/linuxfoundation

 facebook.com/TheLinuxFoundation

 linkedin.com/company/the-linux-foundation

 youtube.com/user/TheLinuxFoundation

 github.com/LF-Engineering



このレポートは、[Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International Public License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)によりライセンスされています。

この著作物を引用する場合は、以下のように記載してください。Kirsten D. Sandberg, “Web3 and Sustainability: How We Can Reduce the Climate Impact of Blockchains, How Blockchains Can Help Reduce Our Own,” foreword by Scott Chamberlin, the Linux Foundation, February 2023.