



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	暗号資産のマイニングによる環境負荷と企業の対応：ロシアの事例
Author(s)	山脇, 大; Yamawaki, Dai
Citation	スラヴ研究, 72, 133-148
Issue Date	2025-08-31
DOI	https://doi.org/10.14943/SlSt.72.133
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/96024
Type	departmental bulletin paper
File Information	06_Yamawaki_SlavicStudies72.pdf



[研究ノート]

暗号資産のマイニングによる環境負荷と 企業の対応：ロシアの事例

山 脇 大

はじめに

暗号資産の歴史は、中央銀行や政府の関与がない分散型のデジタル通貨としての運用を目指して設計された、ビットコイン（BTC）の誕生（2009年）に端を発する。ビットコインによる金融システムへの新たな価値提供（国際送金コストの削減、デジタルゴールドとしての価値保存、途上国における法定通貨としての採用等）を背景に、その後多くの暗号資産が相次いで誕生した。こうした暗号資産は、夫々が独自の技術と目的を有しており、また暗号資産のみを扱う取引所の開設や金融商品の多様化（暗号資産を原資産とする先物取引や上場投資信託等）を通じて、技術革新や金融市場に大きな影響をもたらしてきた。

その一方で、暗号資産の発展とともに、その裏で支えるマイニング産業も急速に拡大してきた。マイニングとは、暗号資産の取引の承認と新規コインの生成を行う作業を意味しており、その過程においてコンピューターやマイニング機器による膨大な計算力が必要となる。そうした中、マイニングプロセスにおける莫大な電力消費量や機器類を冷却する際の水資源利用、電子廃棄物の処理等、様々な環境課題もまた発生している⁽¹⁾。

ここで、ロシアに目を向けてみよう。世界最大の国土を有し、また豊富かつ安価な電力供給や冷涼な気候という、暗号資産のマイニングにおいて理想的な環境を提供しているロシアは、世界でも有数のマイニング拠点となっている。そうした中、特に暗号資産ブーム（2017年～2018年）の際には、国内外から数多くの企業や個人が、ロシアにおけるマイニング事業に参入した。同時に、ロシア国内で暗号資産とそのマイニングに係る制度整備が進んでおり、例えば2020年に成立した「デジタル金融資産法⁽²⁾」は、暗号資産の法的地位を明確にし、マイニング活動に一定のルール（事業者としての登録と税金納付）を設けている。しかしながら、ロシアにおける暗号資産を巡る制度設計は、マイニングによる収益の報告方法等をはじめとして未だ完全に整備されているとはいえず、政府は暗号資産の不正利用やマネーロンダリングの防止を含めて規制強化を検討している。

1 代表的な暗号資産であるビットコインが排出する温室効果ガスのみで、今後30年間に地球全体の平均気温が2℃上昇すると推計されている。Camilo Mora, Randi L. Rollins, Katie Taladay, Michael B. Kantar, Mason K. Chock, Mio Shimada and Erik C. Franklin, “Bitcoin Emissions Alone Could Push Global Warming above 2°C,” *Nature Climate Change* 8 (2018), pp. 931–933.

2 Федеральный закон от 31.07.2020 N 259-ФЗ. О цифровых финансовых активах, цифровой валюте и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации // Президент России [http://www.kremlin.ru/acts/bank/45766]. 以下、URLは2024年8月31日現在有効。

こうした文脈において、本稿はまずロシアにおける暗号資産をめぐる制度設計を鳥瞰したうえで、同国におけるマイニングの軌跡と現状を振り返ろう。続いて、ロシアにおける暗号資産のマイニングがこれまでどのような観点から分析されてきたかを先行研究で確認するとともに、本稿の分析視角とその独自性を説明しよう。そのうえで、ロシアにおける暗号資産のマイニングがもたらす環境負荷と企業対応について、ロシア最大のマイニング企業である BitRiver に焦点を当てて分析していく。そして最後に、ロシアにおける暗号資産のマイニングの発展可能性についても言及しよう。

1. ロシアにおける暗号資産のマイニングの軌跡と現状

最初に、ロシアにおける暗号資産をめぐる制度設計を振り返ろう。前述のとおり、暗号資産はビットコインの登場と共に 2009 年に初めて世界的に注目を浴びたが、こうした状況はロシアにおいても同様であった。暗号資産の急激な価格上昇もあり、主に個人投資家や技術愛好家（分散型台帳等）を中心として、暗号資産の取引やマイニング活動が行われていた。しかしながら、その萌芽期において暗号資産に係る規制や法的枠組みは不明確な状態が継続していた。

こうした状況が暫く続いた後、2014 年にロシア中央銀行が国内で初めて公式に暗号通貨に関する見解を公表し³⁾、それはビットコインなどの暗号通貨がマネーロンダリングをはじめとする違法な資金活動に利用される可能性について警笛を鳴らすものであった。一方で、ロシア中央銀行による声明後、プーチン大統領はロシア中央銀行の懸念を理解する姿勢を示しつつも、暗号資産の活用に伴う技術的發展（金融取引・決済面）の可能性は排除すべきでないと指摘した⁴⁾。

2018 年以降、暗号資産の価格上昇を背景に、暗号資産そのものやブロックチェーン技術に対する関心が急速に高まる中、ロシア政府もこの動向に対応すべく、暗号資産の規制に向けた動きを開始した。例えば、ロシア財務省は暗号資産に関する法案を策定し⁵⁾、またロシア中央銀行はデジタル通貨（Цифровой рубль、以下デジタルルーブル）に関する調査・研

3 Об использовании при совершении сделок «виртуальных валют», в частности, Биткойн // Центральный банк Российской Федерации. 27. 01. 2014 [https://www.cbr.ru/press/pr/?file=27012014_1825052.htm].

4 Путин: биткоинами можно пользоваться // Газета.ru. 27. 07. 2015 [https://www.gazeta.ru/business/news/2015/07/14/n_7376709.shtml?updated].

5 О цифровых финансовых активах // Министерство финансов Российской Федерации. 22. 05. 2018 [<https://base.garant.ru/57274347/>].

究を開始した⁶⁾。前者はロシア国内において初となる包括的な暗号資産規制法案として準備され、暗号資産やマイニング産業の定義、新規暗号資産公開（Initial Coin Offering）の規制などに言及するものであった。その後、前述の「デジタル金融資産法」として成立し、ロシアにおいて暗号資産の法的地位が初めて明確化された。

この法律のもと、ロシアでは暗号資産は合法的なものとして認識されたが、その支払い手段としての使用については禁止されることとなった。加えて、ロシア財務省は刑法や刑事訴訟法、マネーロンダリング対策法等の改正を通じて、暗号資産の所有者の報告義務（年間取引額 60 万ルーブル以上）や刑罰（報告義務を怠った場合は税額の 40% の罰金が発生、虚偽申告に対する強制労働や最大 5 年間の懲役）について定めた。この法律は個人や法人に適用され、暗号資産取引所やマイニング業者についてもロシア連邦金融監督庁（Росфинмониторинг）への取引情報の提供が必要となった。また、当初は 20% の付加価値税（НДС）が適用されていた法人による暗号資産取引であるが、2022 年 7 月より НДС 支払いは免除され、暗号資産からの課税所得に対してロシア企業には 13%（個人と同様）、外国企業には 15% の税率が設定された⁷⁾。以上のように、ロシアにおける暗号資産をめぐる制度設計は 2018 年以降に急速に進むとともに、「デジタル金融資産法」の成立をもって基本的な制度設計が構築されたといえよう。

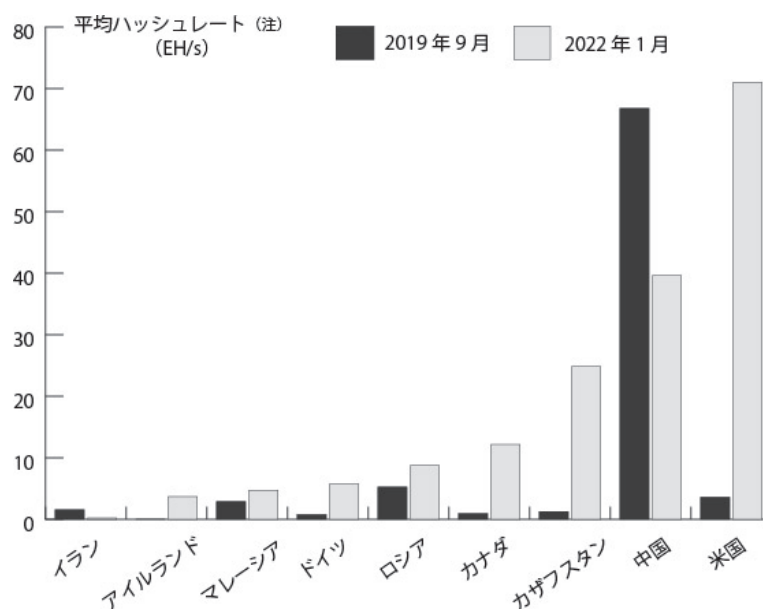
続いて、ロシアにおけるマイニング能力を確認しておこう。図 1 はロシアをはじめ世界中において代表的な暗号資産であるビットコインのマイニング能力（平均ハッシュレート）を各国別に比較したものである。2022 年 1 月時点で、ロシアのマイニング能力は世界第 5 位にランクされており、世界でも有数のマイニング大国となっていた。しかしながら、中国のマイニング能力は 2021 年 5 月のマイニング禁止方針後に大きく落ち込むとともに現在は非公式な地下活動による数値であること、またカザフスタンのマイニング能力は 2023 年 4 月から同国で施行したマイニング規制で落ち込んでいることを鑑みると、現在は世界トップレベルのマイニング能力を保有していると想定される。実際に、露政治経済紙のコメルサントでは、2023 年第 1 四半期のロシアのマイニング能力が米国に次いで世界第 2 位に位置すると指摘している⁸⁾。次節では、こうしたロシアにおける暗号資産のマイニングがどのような観点から分析されてきたか、先行研究を俯瞰しよう。

6 Основные направления развития финансовых техно-логий на период 2018-2020 гг. // Центральный банк Российской Федерации. 16. 02. 2018 [<http://www.kremlin.ru/acts/bank/48175>]. なお、デジタルルーブルをはじめとする中銀デジタル通貨はマイニングを行わない（資源消費、環境負荷が少ない）ため、本稿の分析対象からは外れるものの、ここ数年ロシア中央銀行はデジタルルーブルの開発を加速させている点については言及しておく。2021 年にはデジタルルーブルを扱うプラットフォーム（プロトタイプ）が開発され、2022 年にはそのプラットフォームのパイロットテストが実施され、導入に向けたロードマップや周辺の制度設計が進められ、2023 年よりデジタルルーブルの送金や口座開設（一部銀行と顧客間）の試験運用が開始されている。

7 Федеральный закон от 14. 07. 2022 г. № 319-ФЗ. О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации // Президент России. [<http://www.kremlin.ru/acts/bank/48175>].

8 Россия намайнила серебро // Коммерсантъ. 07. 04. 2023 [<https://www.kommersant.ru/doc/5915688>].

図 1. 各国別の暗号資産マイニング能力の比較



注：暗号資産のマイニングの際に1秒間に行う演算回数であり、採掘速度を示す数値。1EH/sは1秒間に100京回のハッシュ計算が計算できる能力を表す。出所元が算出している最新のデータは2022年1月時点。

出所：Cambridge Centre for Alternative Finance (https://ccaf.io/cbnsi/cbeci/mining_map) より著者作成。

2. 先行研究のレビューと本稿の分析視角

前述の通り、暗号資産のマイニングは、新規コインの生成と既存コインの取引の承認を行う重要なプロセスであり、近年の金融技術の発展とともにその重要性が増している。ロシアにおいても、暗号資産のマイニングは大きく成長しており、社会・経済面、また環境面に大きな影響を与えている。本節では、ロシアにおける暗号資産のマイニングに関する主要な研究を体系的に整理するとともに、本校の分析視角の位置づけを明らかにしよう。

まず、ロシアにおける暗号資産のマイニングに関する研究は、主にその焦点が経済的影響にあてられていた。例えば、Коречков и Целищев (2016) は、ロシア経済における暗号資産やそのマイニングを通じたデジタル技術の発展が、国内における決済手段や金融政策の発展に繋がらうる可能性を指摘している⁽⁹⁾。また、Санникова (2022) は暗号資産やそのマイニングがもたらすリスク（不正取引や市場のボラティリティ）に言及しながらも、それらは制裁環境下の国内経済における事業機会としての潜在性を持ち、また金融面における制裁を乗り越える一手段にもなりえると説明している⁽¹⁰⁾。

9 Юрий Коречков, Павел Целищев. Экономическая эффективность использования криптовалюты в российской экономике // Вестник евразийской науки. 2016. Т. 8. № 6. С. 1–8.

10 Лариса Санникова. Факторы риска использования криптоактивов в России и потенциал для их снижения // Финансовый журнал. 2022. Т. 14. № 6. С. 124–138.

さらに、地域レベルまで粒度を上げた経済研究としては、Estecahandy and Limonier (2021) があり、シベリア地方における暗号資産のマイニング産業の発展と、東西地域の差異について論じている。同氏らによると、西シベリア、特にノヴォシビルスクとその周辺地域では、公的資金を用いた戦略的プロジェクトが組成されており、これは元々科学アカデミーの支部設立などによりイノベーションやデータ処理の素地が形成されていたこと、また東シベリアではバイカル湖とその支流であるアンガラ川の周辺において、水力発電ダムを通じた安価な電力がマイニング事業を支えており、企業のみならず一部の住民宅のガレージやダーチャにおいてもマイニングが実施されていることが指摘されている⁽¹¹⁾。安木(2021)は、ビットコインのマイニングの中心地であるブラーツク市に焦点を当て、マイニング企業の進出が住民の生活保障に結びつく一方で、マイニング事業には現政権を構成する新興財閥も関与していると説明している⁽¹²⁾。

そして、ロシアにおいてこうしたマイニング産業の発展とそれに伴う経済的な恩恵の享受にあたっては、暗号資産を取り巻く制度的な発展が必要と指摘する研究も多い。例えば、Липатников (2019) はロシアにおける暗号資産を取り巻く制度設計は依然として不十分であることを⁽¹³⁾、また Кожедубов и Ковалева (2022) は暗号資産の法的地位の確立が今後の同産業および地域経済の発展に必要で説明している⁽¹⁴⁾。Кочергинанд и Покровская (2020) もまた、税収確保の観点からも制度的整備の必要性を指摘している⁽¹⁵⁾。

一方で、ロシアの暗号資産のマイニングに対する環境的観点からの接近については、ここまで整理してきた経済的、あるいは法的・制度的な観点からのアプローチと比べて、研究蓄積は多くはない。また、その主な分析焦点もマイニングに伴う温室効果ガス（GHG）排出量とそれを促進する安価な電力供給に充てられている。例えば Черешня (2021) は、ロシアにおける主要なマイニングセンターのデータを収集・体系化し、国内における暗号資産取引・マイニングに消費される電力コストの算出を試みている。同氏によると、ロシア国内のビットコイン生産にかかる CO2 排出量は約 4 百万トンに達しており、1 回のビットコイントランザクションに必要なエネルギーは 934kWh と推測され、またマイニングは電力コストが低いシベリア地域、特にイルクーツク州で活発化していると説明されている⁽¹⁶⁾。

11 Hugo Estecahandy and Kevin Limonier, “Cryptocurrencies and Processing Power in Russia: A New Strategic Territory in Eastern Siberia?,” *Journal of Cyber Policy* 6, no.1 (2021), pp. 68–80.

12 安木新一郎「シベリア・ブラーツク市におけるビットコイン採掘について」『ロシア・ユーラシアの社会』第 1058 号、2021 年、77–81 頁。

13 Виталий Липатников. Перспективы применения криптовалют в Российской Федерации // Информационное общество. 2019. № 6. С. 42–48.

14 Кожедубова, В.А. и Т.В. Ковалева. Криптовалюты в России: анализ правового статуса, проблемы использования и перспективы развития // Экономика и бизнес: теория и практика. 2022. № 4-1. С. 217–223.

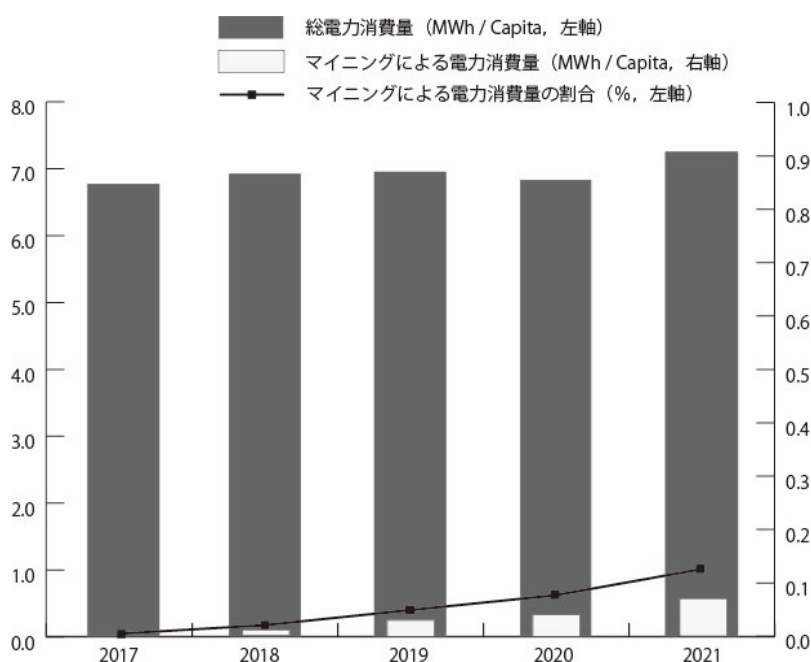
15 Дмитрий Кочергинанд и Наталья Покровская. Интерпретация криптоактивов и особенности их налогообложения в развитых странах и России // Вестник Московского университета. Серия 6. Экономика. 2020. № 5. С. 182–216.

16 Черешня, О.Ю. Экологическая нагрузка от использования технологии блокчейн и майнинга криптовалют в России // Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М: Географический факультет МГУ. 2021. С. 238–248.

前述の Estecahandy and Limonier (2021) においても、2018 年にイルクーツクの福音伝道教会における異常な電力消費量が明らかとなり、その背景には宗教団体として電気の優遇価格が適用される中で、ビットコインのマイニングに従事していた可能性が高いことが指摘されている。一方で、Meynkhart (2019) は、寒冷な気候がシベリアにおけるマイニングの地理的優位性を高めているものの、エネルギー効率性の観点からはイルクーツク州よりもクラスノヤルスク地方がより好ましいマイニング拠点であると主張している⁽¹⁷⁾。また、学術的な研究は未だ為されていないものの、暗号資産のマイニングが地域の電力供給を圧迫していると指摘されている⁽¹⁸⁾。さらに、異なる切口ではあるものの、Corbet et. al. (2021) はロシアにおいて、ビットコインのリターンと電力会社の株価の間に強い相関関係を確認している⁽¹⁹⁾。

このように、ロシアの暗号資産のマイニングにかかる環境負荷についての先行研究は、主にマイニングに伴う温室効果ガス排出量とそれを促進する安価な電力供給に焦点を当ててきた。実際にロシアにおいて、代表的な暗号資産であるビットコインのマイニングによる 1 人当たり電力消費量 (MWh) は上昇しており、またロシア国内における総電力消費量に占める割合も、2021 年時点で 1% 程度になっていることが確認できる (図 2)。

図 2. ロシアにおける BTC マイニングによる電力消費量とその割合



出所：マイニングによる電力消費量は Интелион Дата Системе ウェブサイト (<https://intelsonmine.ru/>)、総電力消費量は IEA 国別データベース (<https://www.iea.org/countries>)、一人当たり消費量を計算する人口データは World Bank 国別ダッシュボード (<https://data.worldbank.org/indicator/>) を利用し、著者作成。

17 Artur Meynkhart, “Energy Efficient Development Model for Regions of the Russian Federation: Evidence of Crypto Mining,” *International Journal of Energy Economics and Policy* 9, no.4 (2019), pp. 16–21.

18 Путин заявил о риске нехватки электроэнергии в регионах из-за роста майнинга крипто-валют // ТАСС. 17. 07. 2024 [<https://tass.ru/ekonomika/21384377>].

19 Shaen Corbet, Brian Lucey, and Larisa Yarovaya, “Bitcoin-energy Markets Interrelationships: New Evidence,” *Resources Policy* 70 (2021) [<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101916>].

一方で、その他の環境課題については焦点が当てられてこなかった。例えば、暗号資産のマイニング施設では、冷却システムとして大量の水が消費され、その結果として地域の水供給や生態系への悪影響が懸念される⁽²⁰⁾。また、マイニング専用機器の陳腐化は比較的短期間であり、バージョンアップによる大量の電子廃棄物（健康被害や水質汚染を引き起こす）もまた発生する⁽²¹⁾。しかしながら、こうした事象はロシアにおいてこれまで分析されず、環境負荷を出している当該企業による対応についても検証されてこなかったといえよう。

そこで本稿では、ロシアにおける暗号資産のマイニングがもたらす環境負荷、特に水と廃棄物に焦点を当て、こうした環境課題に対する企業対応について、ロシア最大のマイニング企業である BitRiver⁽²²⁾ に焦点を当てて分析する。

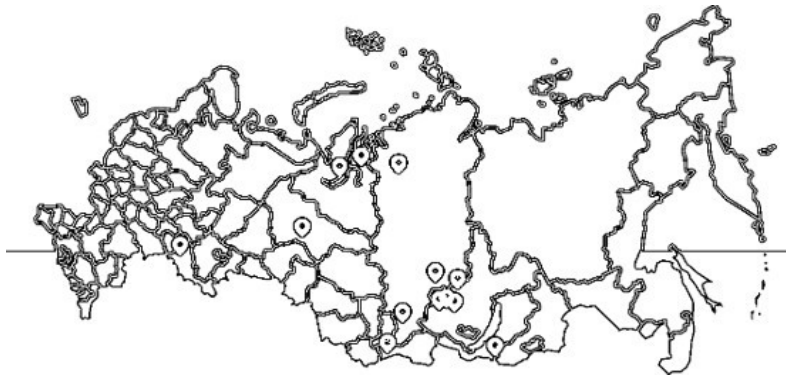
3. マイニングによる環境負荷と BitRiver の対応

3-1. BitRiver とは

まずは、BitRiver についてその企業概要と事業内容について簡単に記しておこう。BitRiver はロシアを拠点とする暗号資産関連企業であり、イーゴリ・ルネツ氏（創業者兼 CEO）によって 2017 年に設立された。登記上の本社はモスクワであるが、事業展開地域は主にシベリア地方である。

BitRiver の事業内容は大きく分けて 3 つに分類される。1 つ目の事業領域が、暗号資産のマイニングであり、同社はロシア最大規模のマイニング施設を運営しており、特にビットコインのマイニングに注力している。同社のマイニングを行うデータセンターは、シベリアを中心に展開されており（図 3）、データセンター内の配置機器数は 175,000 ユニット、総電力消費量は 533 MW の規模となっている。

図 3. Bit River のデータセンターの地理的配置



出所：BitRiver のウェブサイト（<https://bitriver.com/>）より、著者作成。

20 Alex de Vries, “Bitcoin’s Growing Water Footprint,” *Cell Reports Sustainability* 1, no.1 (2024) [[https://www.cell.com/cell-reports-sustainability/fulltext/S2949-7906\(23\)00004-6](https://www.cell.com/cell-reports-sustainability/fulltext/S2949-7906(23)00004-6)].

21 Alex de Vries and Christian Stoll, “Bitcoin’s Growing E-waste Problem,” *Resources, Conservation and Recycling* 175 (2021) [<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105901>].

22 ロシアには、最大のマイニング企業である BitRiver の他に様々なマイニング企業が存在するものの、規模が次いで大きい BitCluster でさえ、データセンターの数や総電力消費量等は BitRiver の 1/5 程度と小さく、また BitCluster の主要事業はエチオピアで展開されていることから、本稿ではロシアのマイニング企業の代表的事例として、BitRiver に焦点を当てている。

2つ目の事業領域が、自社マイニング機器の販売・レンタルである。BitRiver は、最先端の ASIC (Application Specific Integrated Circuit) マイナーや GPU マイニング機器の販売やレンタルを提供しており、最新技術を利用したマイニング事業の強化やレンタルオプションを通じた初期投資の抑制といった広い顧客ニーズに対応するサービスを展開している。

3つ目の事業領域がホスティングであり、BitRiver は自社のデータセンターにおいて顧客のマイニング機器を運用するサービスも提供している。BitRiver にとっては手数料収入の機会があり、また顧客側としては自らの機器を BitRiver のエネルギー効率が高くかつ 24 時間体制でモニタリングされている施設で稼働させることで、マイニングの運用効率を上昇させることが可能となる。

3-2. 環境負荷と対応：水質汚染

続いて、暗号資産のマイニングプロセスにおいて発生する環境負荷として、前述の通り、水と廃棄物を取り上げよう。まず水についてであるが、マイニングにおける膨大な計算処理に伴って発生する熱を効果的に管理するための冷却システムは、データセンター内の機器が過熱することを防ぎ、マイニングの安定的稼働を維持するために不可欠な要素となっている。しかしながら、こうした冷却システムで使用される水は通常、隣接地域の川や水源に放出されるため、放出先の水質汚染のリスクを常に孕んでいる。

次に廃棄物であるが、マイニングにかかる膨大な計算を行う機器の寿命は短く、その切り替えに伴って大量の電子廃棄物が発生している。そうした廃棄物の中には、重金属や有害物質が包含されており、例えばバッテリー周りに使用されている鉛やカドミウムは、腎臓障害をはじめとする健康被害をもたらし、また六価クロムやポリ塩化ビフェニルは環境中で分解されにくく、こちらは水質汚染を引き起こすとともに、発がん性も有している。

ここで、BitRiver の暗号資産マイニング施設の中心地である、シベリア連邦管区イルクーツク州のブラーツク市に位置するデータセンターに焦点を当てよう。同データセンターはマイニングにかかる電力を、近接するブラーツカヤ水力発電所 (Братская ГЭС) より調達している。同水力発電所はアンガラ川に建設された大規模な水力発電所であり、1967 年の商業開始後、地域の電力供給に重要な役割を果たしている。

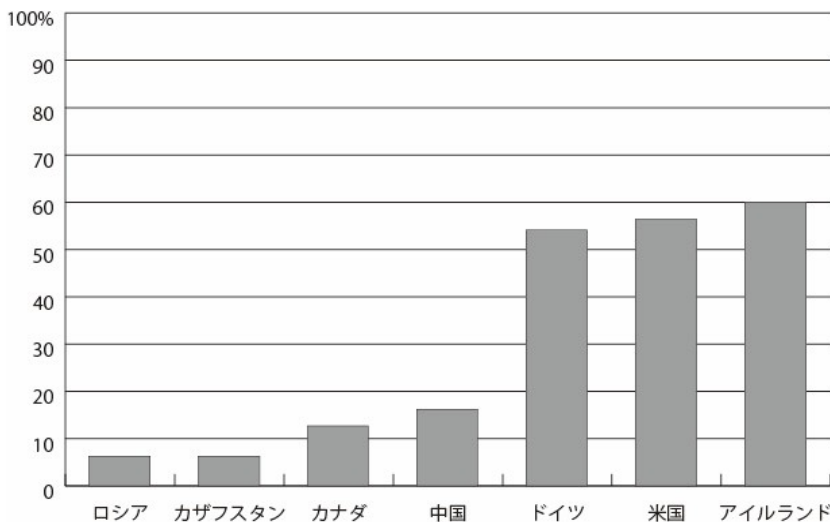
暗号資産のマイニングによる環境負荷を示すものとしては、アンガラ川周辺の水や廃棄物の定点的なモニタリングに加え、データセンター設立・稼働前後のデータ比較が最も有用ではあるが、ここにデータ制約の壁がある。例えば、アンガラ川を含む東シベリアの河川の水質汚染については、Liu et al. (2022) が整理しているが、アンガラ川の水質調査結果としては 2018 年時点のものが最新であるため⁽²³⁾、ここ数年で急速に拡大している同社による暗号資産マイニング事業の環境負荷を測るには不十分である。また、Poletaeva et al. (2022) が 2021 年 3 月から 2022 年 2 月にかけてアンガラ川で実施した月次モニタリング調査の結果では、同水域において鉛やタリウム等の非常に高い汚染がある水サンプルが取得され、人

23 Shiqi Liu, Ping Wang, Qiwei Huang, Olga I. Gabysheva, Zehong Li, Jialing Zhang, Ekaterina S. Kazak, Yu Liu, Tcogto Zh. Bazarzhapov, Raisa N. Shpakova, Viktor A. Gabyshev, Sergey P. Pozdnyakov and Natalia L. Frolova, "A Database of Water Chemistry in Eastern Siberian Rivers," *Sci Data* 9, no. 737 (2022) [<https://doi.org/10.1038/s41597-022-01844-y>].

為的影響が水質を悪化させるとともに生物多様性に悪影響を及ぼすと指摘されている⁽²⁴⁾。しかし、ブラーツク市及びアンガラ川流域には様々な産業が立地しており（アルミニウム精錬やパルプ製造）、BitRiverのブラーツクデータセンターの稼働が水質に与える影響を示すことはできない。

加えて、BitRiverによる自社の取水量や消費量、廃棄物に関する情報開示は行われておらず⁽²⁵⁾、企業の開示情報に基づく分析にも現状は限界がある。この点については、米国において同じく最大規模の暗号資産関連企業であり、テキサス州に大規模なマイニング施設（Rockdale Facility）を擁するRiot Platformsが、自社のサステナビリティレポートや企業活動の年次報告書（Form 10-k）において水や廃棄物について言及している姿勢と異なっているといえよう。また、ロシアにおける電子廃棄物の回収・リサイクル率は、他のマイニング大国と比較した場合、とりわけ先進国の数値と比べると大きく劣後している（図4）ことから、BitRiverを含むマイニング企業の電子廃棄物対応についても、依然途上であると推測されよう。

図4. 暗号資産のマイニング大国における電子廃棄物の回収・リサイクル率（2022年、%）



注：図1で比較したマレーシア、イランは数値がなかったため、図から削除。

出所:Global E-waste Monitor 2024 (<https://ewastemonitor.info/the-global-e-waste-monitor-2024/>) より著者作成。

3-3. 環境負荷と対応：マイニング機器の冷却

概して、マイニング企業はそのデータセンターにおいてマイニング機器の冷却にあたり、自然冷却（外気の利用）、空冷式（ファン冷却）、水冷式（液体冷却）が主な方法である。自然冷却は主に冷涼な気候の地域のデータセンターで行われ、外気を利用して機器を冷却する。空冷はファンを用いて機器内や周囲の空気を循環させることで機器の冷却を行い、ま

24 Vera Poletaeva, Mikhail Pastukhov and Pavel Dolgikh, “Trace Element Compositions and Water Quality Assessment in the Angara River Source (Baikal Region, Russia),” *Water* 14, no. 21 (2022) [<https://doi.org/10.3390/w14213564>].

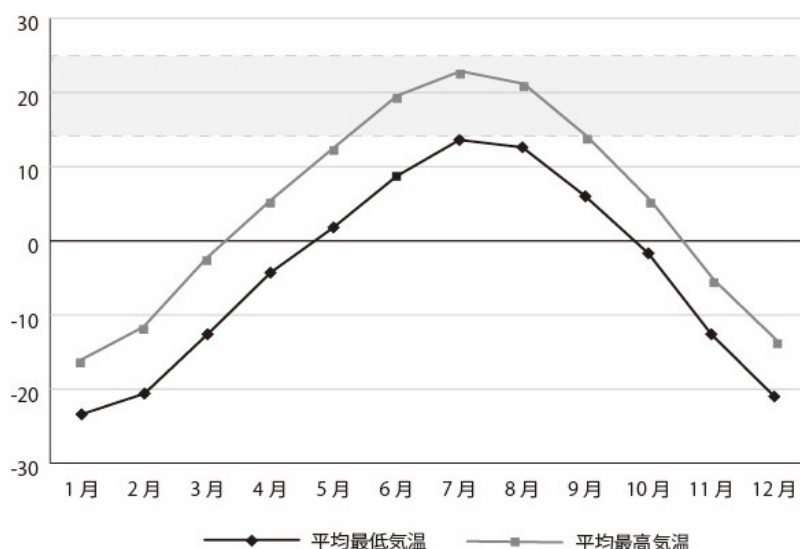
25 こうした非財務情報の開示について、ロシアは法的規制や企業の意識という観点で、先進国や新興国と比べて大きく遅れている。詳細は、山脇大「環境投資と情報開示：ロシアにおける現状と課題の考察」『ロシア・東欧研究』52号、2023年、1-18頁を参照されたい。

た水冷は液体を利用して機器を冷却する。最も冷却効率が高いのは水冷であり、大規模なマイニング施設や高密度で運用される設備に主に採用される。冷却方法の選択は、当該センターの立地や規模、設置されているマイニング機器により異なっており、また企業によってその情報公開の幅は異なる⁽²⁶⁾。BitRiverは、自然冷却、水冷式(液体冷却)、アディアバティック冷却(ある一定以上の設定温度の場合に水を使用)でマイニング機器の冷却を行っているとしているが、それ以上の情報は公開していない。

ここで BitRiver の冷却方法について考察しよう。先行研究でも既に指摘されている通り、厳しい寒冷気候はマイニング拠点としてのシベリアの優位性をエネルギー効率の観点から高めており、これはマイニング機器の冷却プロセスにおける自然冷却を可能とするためである。だが同時に、シベリア、特にブラーツク市におけるデータセンターは BitRiver が保有するセンターの中でも代表的な規模のものであり、外部温度のみでの十分な冷却は難しいと考えられる(特に夏季)。

また、マイニング機器のパフォーマンスを最大限持続し、かつ故障リスクを低減するために、マイニング機器の周辺環境を最適温度に接近させることが重要である。仮に温度が高すぎる場合にはハッシュレートの低下とともに機械寿命が短くなり、また温度が低すぎる場合には結露が発生して電気回路にダメージを与える可能性が高まる。そこで、ビットコインのマイニング機器の運転にあたり推奨される温度範囲(15℃から 24℃程度)⁽²⁷⁾に持つていくことが最も効率の良い運用方法である。図 5 は、その推奨温度範囲とブラーツク市の外部気温を確認したものである。

図 5. ブラーツク市の月別平均最低気温・平均最高気温(過去 30 年平均)



注：囲い部分は 15℃ - 24℃ のレンジ。

出所：Foreca (<https://www.foreca.com>) より著作作成。

26 Susanne Köhler and Massimo Pizzol, "Life Cycle Assessment of Bitcoin Mining," *Environmental Science & Technology* 53, no. 23 (2019), pp. 13598–13606.

27 Lianli, "How to Maintain Optimal Temperature for Your Crypto Mining Setup" [https://www.lianliwork.com/news_list_1/1722469281038405632.html].

図5の通り、ブラーツク市の最高気温は夏季でも22℃前後と低い。但し、マイニング機器からはおおよそ55℃～80℃の熱風が排出されるため⁽²⁸⁾、冷却効率等を考慮すると、最もエネルギー効率が良い温度範囲に向けては、追加的な冷却が必要となる。BitRiverが水冷式やアディアバティック冷却も併せて実施しているのは、このような背景からと想定される。しかし、概して37℃程度までは冷却なしで操業することが可能であることや⁽²⁹⁾、水冷式やアディアバティック冷却は大規模な投資（特に導入コスト）を要することからも、冷却ミックスの採用は、ハッシュレート低下による生産性悪化や機械寿命の低下に対するBitRiverの対応であると想定され、結果として排出量増加や電子廃棄物の増加を抑えることに繋がっている対応と考えることはできよう。一方で、水冷式であれアディアバティック冷却であれ、冷却に水を使用しているため、排水先の水質汚染もまた考慮すべき環境負荷ではあるものの、3-2で指摘したように、こうした情報の開示は行われていない。

3-4. 環境負荷と対応：他社との連携

最後に、マイニングによる環境負荷への対応にあたる、BitRiverと他社との連携に焦点を当てよう。まず、同社は2022年6月16日に開催されたサンクトペテルブルク国際経済フォーラムにおいて、Газпром нефтьとBitRiverは協力に関するMOUに署名し、特に石油随伴ガス⁽³⁰⁾の分野において連携を強化している。この点は、自社の事業活動を通じた取り組みが他社や社会全体の環境負荷削減に貢献する、削減貢献量⁽³¹⁾という観点から見た場合には、BitRiverが一定程度、環境負荷削減に貢献していると考えられることは可能であろう。

シベリアでの油田開発には、石油随伴ガスの回収・処理インフラが未整備であることもあり、また仮に回収に向けた新規設備投資を実施した場合も、安価な電力が供給されている経済環境では投資に見合う採算性をとることは困難となる。そのため、ロシアにおいては長年、利活用の場を失った石油随伴ガスが人為的に燃焼（フレア）され、大量のGHGが排出され続ける等、重大な環境課題となっていた。また、2012年1月以降にフレアに対する罰金が強化されたにもかかわらず、上記の理由により石油随伴ガス利活用は進んでこなかった。

28 “How to Design Optimal Airflow for a Bitcoin Mining Facility,” *Hashrate Index*, March 2, 2023 [<https://hashrateindex.com/blog/bitcoin-mining-facility-design-airflow-management/>].

29 Ibid.

30 石油随伴ガスとは、油層内の原油に溶存するなどの形で存在する溶解ガスが、石油掘削時に随伴して生産されるものであり、発電用燃料としての利用や油層への再注入による増進回収、パイプラインや液化を通じた販売が用途としてある。一方で、遠隔地等では処理設備が整っていない場合が多く、大半が大気中でフレアされてきたが、気候変動や大気汚染への対応という観点から、1990年代以降は世界中でその活用が進んだものの、ロシアは依然として世界最大のフレア大国であり、石油随伴ガスへの対応は重要な政策課題であり続けている。詳細は、山脇大「ロシアにおける石油随伴ガス処理問題：アクター、政策、制度分析からの接近」『ロシア・東欧研究』43号、2014年、89-104頁を参照されたい。

31 2023年3月には、WBCSD (World Business Council for Sustainable Development) より削減貢献量の算出や報告に関するガイダンスが発表され、同年5月のG7広島首脳コミュニケにおいても、バリューチェーン全体の環境負荷低減に貢献する取り組みである削減貢献量の重要性が指摘されている。

こうした文脈において、BitRiver は油田開発地域におけるデータセンターの設立とマイニングサービスの提供を行う代わりに、Газпром нефть が採掘時に発生した石油随伴ガスを処理・発電に活用し、BitRiver のデータセンターへ電力供給を行う連携がなされており、既に3カ所・計12 MW 規模のプロジェクトとなっている。言い換えれば、BitRiver は自社の事業活動を通じて、これまで未活用であった資源に活用（需要）を生み出し、結果として石油随伴ガスのフレアやそれに伴う社会全体の環境負荷の削減に貢献していると考えられることはできる。

続いて、世界最大級のアルミニウム生産、また民間事業会社として世界最大の発電規模（水力発電所4基、合計15GW）を有する En+ グループ⁽³²⁾ との連携についても言及しておこう。前述のとおり、BitRiver の代表的なデータセンターが位置するブラーツク市において、マイニングにかかる電力を近接するブラーツカヤ水力発電所より調達している。この水力発電所は ЕвроСибЭнерго によって運営されており、同社は En+ のグループ会社である。また、BitRiver は En+ グループと戦略的提携を結んでおり、30 MW の容量を持つ合弁企業 Bit+ を設立している。世界中の多くのマイニング企業が化石燃料由来の電力を調達し、マイニング活動を行い、大量の GHG を排出しているという事実を鑑みると、BitRiver のマイニング活動は環境負荷が小さい形となっているといえるだろう。

以上のように、BitRiver の活動は、積極的にエネルギー会社と連携することによって、環境負荷低減に結びついていると考えうる。実際、BitRiver 創業者兼 CEO のルネツ氏が「ロシアのグリーンエネルギー移行を促進することに尽力している」と述べているように、BitRiver はロシア企業として初めて、GHG 排出量のモニタリング・報告・検証に関する国際規格（ISO 14064 認証）を取得している⁽³³⁾。

おわりに

本稿では、ロシアにおける暗号資産のマイニング産業の発展とそれに伴って発生している環境負荷、そして企業の対応について、特にロシア最大のマイニング企業である BitRiver に焦点をあて、分析を行った。ここでは最後に、本稿の分析結果の要点と暗号資産のマイニング産業の今後の発展可能性について言及しよう。

ロシアは安価な電力価格と冷涼な気候条件を活かし、暗号資産のマイニングにとって好ましい環境を提供してきた。その結果として、ロシアは世界でも有数のマイニング拠点となり、またカザフスタンや中国における近年のマイニング産業の規制を受けて、特にシベリアにおいて多くのマイニング施設が設立され、その処理容量もまた急速に拡大している。

しかしながら、こうした産業発展の一方で、ロシアにおける暗号資産のマイニングが抱える負の側面として、大量の電力消費、また水や廃棄物といった環境負荷が顕在化している。前者については、ロシアにおける暗号資産のマイニングに関する先行研究において、

32 En+ は子会社 En+ Mining を設立し、暗号資産マイニングにかかる事業も行っている。

33 «Битривер Рус» стала первой компанией в России с нулевым выбросом парниковых газов // BITRIVER. 15. 02. 2022 [<https://bitriver.com/news/all/bitriver-rus-stala-pervoy-kompaniey-v-rossii-s-nulevym-vybrosom-parnikovyykh-gazov/#>].

安価な電力価格との関係である程度は説明されてきたものの、後者については分析の焦点が当てられてこなかった。

そこで、本稿ではロシアにおける暗号資産のマイニングがもたらす環境負荷、特に水と廃棄物に焦点を当て、こうした環境課題に対する企業対応として、BitRiver を事例として考察を行った。まず、BitRiver のマイニング施設の中心地であるブラーツク市に位置するデータセンターはアンガラ川流域に隣接しているが、この流域における水や廃棄物の定点的なモニタリングが行われておらず、また BitRiver による自社の取水量や消費量、廃棄物に関する情報開示はないため、水質汚染を軸として暗号資産のマイニング事業による環境負荷を計測するにはデータ制約の壁が立ちふさがった。

次に、マイニング機器の冷却という観点から、BitRiver の環境行動について分析した。BitRiver は、自然冷却、水冷式、アディアバティック冷却でマイニング機器の冷却を行っているという説明しているが、それ以上の情報は公開しておらず、こちらもデータ制約は存在するものの、本稿ではマイニング機器の周辺環境の最適温度とブラーツク市の外気の状態、水冷式やアディアバティック冷却の高い導入コストに着目し、BitRiver が冷却ミックスを採用しているという点から、結果として環境負荷の軽減に貢献しているのではないかという点を指摘した。

加えて、本稿では環境負荷という観点から、BitRiver と他企業の連携にも焦点を当てた。その結果、Газпром нефть との石油随伴ガスパプロジェクトの共同実施や、民間事業会社として世界最大の水力発電企業である En+ グループとの戦略的提携および合併企業 Bit+ の設立等、他社との連携に積極的であることが環境負荷軽減につながっている可能性があるという点を指摘した。

そこで最後に、ロシアにおける暗号資産のマイニング産業の今後の発展可能性について言及しよう。マイニング産業の中心地はその地理的・自然条件（安価な電力価格と涼やかな気候）からシベリアであり、今後も重要な拠点としての地位を維持していくと考えられる。一方で、本稿で取り上げたように、暗号資産のマイニング産業は環境負荷の増大というリスクを常に孕んでおり、特に水や廃棄物というこれまで分析されてこなかったチャンネルを通じて、マイニング産業の持続可能性を左右する可能性も否定できない。

こうした中、マイニング産業の発展と環境負荷の低減というデカップリングの命題を達成するためには、マイニング企業や関連企業（機器のサプライヤー等）による技術革新とともに、政府による適切な規制と監督が必要となろう。前者については、現時点でも続く先進国からの経済制裁や BitRiver の制裁リスト入りが継続しているため、有力な選択肢であると声を大にすることは難しいだろう。

後者については、本稿でも確認した通り、一定程度の制度的発展が確認できよう。直近では、2024 年 11 月よりロシアにおいて暗号資産のマイニングが完全に合法化され、デジタル開発省への登録事業者（法人・個人を問わない）は自由に従事することができ、非登録者についてもエネルギー消費量の制限値を上回らない場合のマイニングリグの操作については許容されることになっている⁽³⁴⁾。依然として、マイニング企業が与える環境負荷につい

34 Госдума легализовала майнинг криптовалют // РНА Новости. 30. 07. 2024 [<https://ria.ru/20240730/gosduma-1962952101.html>].

山脇 大

ての開示提言・義務化や、環境負荷に対する対応の義務化については、足元議論が進んでいるわけではないものの、今後ロシア政府が規制環境をより整備することは、ロシアのマイニング業界の透明性と信頼性を高め、結果として同産業の発展と環境負荷の低減に向けたデカップリングに繋がりをものとなろう。

Экологические последствия криптомайнинга и корпоративный ответ: случай России

ЯМАВАКИ Дай

В данной статье проведен анализ развития индустрии майнинга криптовалют в России, а также возникающих при этом экологических последствий и ответных действий со стороны предприятия. В центре внимания статьи находится крупнейшая в России майнинговая компания BitRiver.

Россия, используя низкие цены на электроэнергию и прохладный климат, предоставила благоприятные условия для майнинга криптовалют. В результате Россия стала одним из ведущих мировых центров майнинга, особенно в Сибири, где после введения ограничений на майнинг в Казахстане и Китае было создано множество новых центров майнинга, и их производственные мощности быстро расширяются. Однако данный рост сопровождается значительными экологическими проблемами, такими как высокий уровень энергопотребления и загрязнение воды, а также накопление отходов. Если первое уже частично изучено в связи с доступностью дешевой электроэнергии, то второе до сих пор не было предметом глубокого анализа.

В этой связи в статье уделено особое внимание экологическим последствиям майнинга криптовалют в России, особенно водным ресурсам и отходам. В качестве примера рассмотрены действия компании BitRiver в ответ на данные вызовы. В частности, главный центр майнинговых операций BitRiver в городе Братск расположен вблизи бассейна реки Ангары, однако регулярный мониторинг состояния воды и уровня загрязнения отходами в этом регионе не проводится. Кроме того, BitRiver не предоставляет информацию о своих водозаборах, объемах потребляемой воды и утилизации отходов, что создаёт серьёзные ограничения в оценке воздействия их деятельности на окружающую среду.

Была проведена оценка действий BitRiver с точки зрения охлаждения майнингового оборудования. Компания утверждает, что использует естественное охлаждение, водяное охлаждение и адиабатическое охлаждение, но предоставленных данных недостаточно для полного анализа. Тем не менее, анализ оптимальной температуры окружающей среды для майнингового оборудования и условий в Братске, а также высокой стоимости водяного и адиабатического охлаждения позволил заключить, что ответные меры Bitriver привели бы к снижению роста выбросов и количества электронных отходов.

В дополнение к этому внимание было уделено сотрудничеству BitRiver с другими компаниями. Выяснилось, что BitRiver активно участвует в совместных проектах с такими компаниями, как «Газпром нефть», включая проекты по использованию попутного нефтяного газа, а также En+ Group, крупнейшей в мире частной гидроэнергетической компанией, с которой BitRiver учредила совместное предприятие Bit+. Эти действия Bitriver могут привести к снижению воздействия на окружающую среду.

В заключение статьи подчеркивается, что для устойчивого развития майнинговой индустрии в России необходимо дальнейшее совершенствование нормативно-правовой базы. Это включает в себя обязательное раскрытие информации о влиянии майнинговых компаний на окружающую среду и принятие мер по снижению

山脇 大

экологической нагрузки. Это позволит не только повысить прозрачность и надёжность российской майнинговой индустрии, но и будет способствовать её развитию, параллельно снижая экологические риски.