

本稿は、Arctic and North 誌 42 号 (DOI: 10.37482/issn2221-2698.2021.42.145 / www.arcticandnorth.ru/upload/iblock/847/126_146.pdf) に掲載された論文“Research, Development, and Education: Laying Foundations for Arctic and Northern Data Centers”を非公式に翻訳したものである。日本語版を作成および発表するにあたり、Arctic North 誌から許可を受けている。翻訳を行ったのは、同誌とは無関係の第三者である。

This manuscript is an unofficial translation of the article entitled 'Research, Development, and Education: Laying Foundations for Arctic and Northern Data Centers' published originally as a part of Arctic and North, Vol. 42 (DOI: 10.37482/issn2221-2698.2021.42.145 / www.arcticandnorth.ru/upload/iblock/847/126_146.pdf). The permission to produce and publish the Japanese version has been received from Arctic and North. Translation was made by a translator who does not work in the journal.

研究開発と教育：北極・北方圏のデータセンター開発のための基盤構築

©ユハ・サウナワラ (Juha Saunavaara), Ph.D., 講師, 助教

E-mail: juha.saunavaara@arc.hokudai.ac.jp

北海道大学北極域研究センター、国際連携研究教育局北極域研究グローバルステーション(北海道札幌市)

©アンッティ・ライネ (Antti Laine), MA, CTS Enteg 社プロジェクトマネージャー, 博士論文提出資格者

E-mail: antti.laine@ctse.fi;

オーボ・アカデミー大学; CTS Enteg 社 (フィンランド, コトカ)

要旨. グローバルデータセンターは現在急速な成長を遂げている産業分野である。この成長により、北方圏のさまざまな地域においてデータセンタークラスターが発達している。さらに昨今、北極周辺地域において、新たなデータセンター投資を誘致する試みが地域開発計画・戦略に組み込まれる傾向が見られるようになった。政策決定者はこの分野に多大な期待を寄せているが、政策決定者も一般の人々も、莫大な電力を消費し、現在世界で進行しているデジタル化において大きな役割を果たすこの産業に関する知識をほとんど持ち合わせていない。本稿では、データセンターに関連する北極圏および北方圏における研究開発活動や教育、ならびに北方圏の寒冷な環境におけるデータセンター産業の発達に関する研究を紹介し、データセンターに対する利害関係者の意識や知識、理解を高めることを目指す。こういった北方地域の特異な状況は、環境に優しく持続可能なデータセンターを建設するうえで有利な環境であることもしばしば主張されている。

キーワード: データセンター, コミュニケーションインフラ, 情報技術, 北極, 北方圏

はじめに

2011 年に Google がフィンランドのハミナに、続いて 2013 年に Facebook がスウェーデンのルレオにデータセンターを開設したことをきっかけに、スウェーデン北部の地方自治体は、データセンター産

業に関する協調戦略の必要性を認識し、その策定を始めた。2014年に発表された同戦略ではとりわけ、スウェーデン北部におけるデータセンター関連の研究・教育の発展に注力し、投資を進めることが提案されている。現在、ルレオ・ボーデン・ピーテオ地域には世界的な認知度を誇るデータセンタークラスターが形成されており、ヨーロッパ有数のデータセンター研究・イノベーション施設である RISE ICE データセンターも所在している。このように、データセンターに関する知識・技能は地方にとって大きな強みとなっている。データセンターは、採鉱、水力発電、製紙、製鉄産業に加えて、この地域に不可欠な新たなインフラと捉えられており、現地の大学や研究機関で実施されている研究、開発、教育が強力にこの産業を後押ししている¹。

地域が有する強力な技術的ノウハウや熟練した人員といった要素は、ノルウェー北部のモー・イ・ラーナがデータセンターを誘致する際のセールスポイントとしても使われたものである²。しかし、北欧諸国がデータセンター投資の誘致に成功した要因は、その人的資源だけではないということは明らかである。豊富な電力の備蓄、安価なエネルギー（特にグリーンエネルギー）、加えて寒冷な気候、安定した社会、好適な光通信の接続性、手頃な地価、低い自然災害リスク、少ない地震活動といった要因も重要な役割を果たしている。2000年代終盤から2010年代初頭にかけて、こういった特徴が利点と認識され始めて以来、北極・北方圏各地では目覚ましい発展が続いているが、データセンター産業そのものについて、また北極周辺地域にデータセンターがあることは一般にはあまり知られていない。さらに、国も地方自治体もデータセンター政策を策定しているが、急速に成長し、莫大な電力を消費するこの産業は、政策決定者や研究者からは十分に注目されていない。

本稿の目的は二つある。第一に、データセンター自体およびデータセンター産業と、その北極・北方圏における役割に関して、国および地方の利害関係者の意識、知識および理解を高めることを目指す。データセンターは、21世紀の文化をもっとも明確に体現する建造物と言われており、[1, Varnelis K.]世界の光ケーブル網とあわせて、サイバースペースと物理空間が高度に統合された Society 5.0 の中核をなす。データセンターは今や社会が拠って立つ新たな基礎インフラと捉えられるため、これに関する問題はもはや情報通信技術（ICT）分野特有のものではない。第二に、北極・北方圏で実施されているデータセンター研究・教育、ならびに北方の寒冷環境におけるデータセンター産業の過去・現在・未来の発達に関する研究を紹介していく。

地方の知識ネットワークやスキルセットの研究の重要性は、元をたどれば、クラスターや、地域の開発および競争力、さらにはレジリエンスに関する議論にまでさかのぼる。一般的にクラスターとは、特定の地域に集中する産業や企業の集合体や、その相互関係のことを指す。さらに産業クラスターの典型的特徴としては、多数の企業が近接していること、こういった企業が競争・協調していること、小企業が高い割合を占めていること、社会・経済ネットワークが緊密であること、情報・アイデアが急速に拡散すること、適応性と柔軟性が高いことなどが挙げられる[2, Dawkins C.; 3, Piperopolous P. G.]。知識経済の出現と発達により、地方の経済発展やクラスター形成において大学は大きな役割を帯びるようになった[4, Wolfe D. A.]。同様に、個々の企業や地方経済のレジリエンスにとって、イノベーションおよび研究開発（R&D）活動が重要であることを指摘する研究も増えてきている[5, Bristow G., Healey A.]。本稿は、前もって地域を決めて事例研究を行い、その地域でデータセンタークラスターが形成される際に研究開発と高等教育が果たす役割を論じるのではなく、全体論的なアプローチにより、寒冷な北方地

¹ Minde T. B. Strategi för att skapa en världsledande tekniskregion i Norrbotten för klimatsmarta effektiva datacenter. Länsstyrelsen Norrbotten, 2014; Tor Björn Minde のインタビュー（スウェーデン・ルレオで2018年3月2日実施）。

² Arctic Circle Data Center. URL: <https://arcticcircledc.com/> (2020年4月13日閲覧)。

域複数に共通して見られる特徴を特定することを試みる。

データセンターについては、公開されている情報が限定されていることと、同産業をとりまく高い機密性のために、研究が難しいことがさまざまな研究者により指摘されている[6, Vonderau A. pp. ; 702, 707; 7, Hogan M., Vonderau A.]。オープンサイエンスの原則に従って公開される研究成果に比べて、民間企業の研究開発に関する情報はアクセスが難しいが、本稿では民間の情報および公的な情報両方を扱い、両者の協力関係も追う。こういった目的のため、公開ソースまたは各種報道から得られるデータセンター関連情報に加えて、データセンター産業、国および地方政府、学術機関の各利害関係者に聞き取り調査を行っており、大半の情報は参与観察の過程で得られた情報である。ユハ・サウナワラは、社会科学を専門とする部外者の立場で、データセンター産業、政府職員、研究者に接触し、高度な専門的調査を行った。一方アンッティ・ライネは、データセンターの設計を行う民間企業で 10 年間にわたり実務者として勤務している。2019～2020 年には Finnish Data Center Forum の理事を務め、その後も専門家として貢献しており、業界を代表して官庁と交渉を行っている。そのため、「観察」と「参与」の割合は著者によって異なる。

北極・北方圏におけるデータセンター研究開発活動の特徴

最近の研究によれば、データセンター全体のエネルギー消費量の増加は、技術発達により予想を下回っているが[8, Masanet E., Shehabi A., Lei N., Smith S., Koomey J.]、それでも同産業が要するエネルギーは莫大で、昨今の省エネ政策や炭素排出減少目標に逆行している。したがって、数多くの国や地域、都市で、税政策やインフラ建設支援、ゾーニング、許可取得支援、地元請負業者の紹介といったさまざまな手段で、データセンター投資誘致が行われていることを疑問に思うも当然である。雇用や税収といった要素もその答えになるが、特に北方圏に位置するデータセンターは比較的環境に優しいことも理由の一つである。データセンターは、ソフトウェアおよびハードウェアを一箇所で集中的かつ効率的に利用することができるように設計された施設で、膨大なエネルギーを消費するものの、演算能力・サーバーが多数の場所に分散している状態に比べればはるかに消費量は少ない。言い換えれば、データセンターでサーバーを稼働させることで、データセンター外にある多数の機器を使用する必要がなくなれば、エネルギー使用量を大幅に削減することができる[9, Peuhkuri M., Lääkkölä R., Costa-Requena J., Manner J.]。北極周辺地域のデータセンターのエネルギー効率が高いのは、寒冷気候がその理由の一つだが、エネルギー効率が上昇しているのはこの分野の研究開発活動の成果であるケースが多いという事実は注目に値する。

北極・北方圏で実施される研究やプロジェクトの内容は、その土地の環境と関連していることが多い。言い換えれば、寒冷な環境、広範な地域熱供給網³、豊富な風力・水力資源は、データセンター事業の中核であるデータの保存とは一見関わりがないが、これらはデータセンター施設の研究と実際の設計両方に影響している。さらに、データセンターに関する研究はゼロから始まったのではなく、既存の知識ベースを基に構築されている。データセンター研究に関わる研究者も、データセンターで働く人材も、経歴は実に多様である。建物を設計・建造するにしても、建築・建設、防火、配電、エネルギーシステム、冷却、(流体)力学、自動化といった分野の専門家が必要となる。一方で、データセンターの運営や最適化には、組み込みシステム、クラウド、ソフトウェア、ビッグデータといった知識が求められる。こういった必要なスキルセットには、北方地域に既に存在しているものもあるため、他の分野の研究者や、

³ フィンランドでは、地域熱供給が大都市の全熱需要の 90%近くを賄っている。

他の産業分野の経験を積んだ人材をリクルートすることも可能である⁴。

企業間の人材の流動性による知識の移転やイノベーションの促進、また地元の労働市場から熟練の人材を雇用できることは、確立したクラスターの典型的特徴とされている[10, Lundmark M., Power D.; 11, Simonen J., Svento R., Karhinen S., McCann P.]。しかし、分野間の流動性の結果として、北方圏の多くのデータセンター企業がクラスター形成の初期段階であるにも関わらず、こういった知識の集積から恩恵を受けている。こういった研究開発（熱、換気、空調に関する問題）がデータセンターに直結するか、またはデータセンターにのみ結びつくのか指摘するのは難しいが、データセンターにおける多様なシステムの設計をコーディネート・同期する方法に関する知見が求められていることは確かである⁵。

施設の冷却やエネルギー効率、エネルギーコスト削減やカーボンフットプリント減少につながるとして、データセンター経営者および研究者から世界的に注目を集めているが[12, Wahlroos M., Pärssinen M., Rinne S., Syri S., Manner J., p. 1750]、寒冷気候の活用は、北方圏で実施されている研究開発の特徴と言える。寒冷気候の活用は決して新しい発想ではない。たとえば Microsoft は、2006 年にワシントン州クインシーでデータセンターを開設したが、2007 年には、世界有数の寒冷地であるロシア・イルクーツクの地方当局と、データセンター建設の可能性に関して MOU を締結したことが報じられている。クインシーには、極めて低い電力コストや、100%再生可能な水力発電といった利点もあり、それを利用して Microsoft 以前にもデータセンター投資が誘致されていた実績もあったため、ロシアでの計画は結局実現しなかったものの、寒冷気候を利用したコストのかからない空気冷却は、有力なソリューションとして認識される結果となった⁶。

アイスランドでは、2008 年に金融業が崩壊した後、新たな経済成長の手段として、特にレイキャネス半島でデータセンター産業が勃興し、寒冷気候と豊富な再生可能エネルギー資源が貴重な利点として注目を集めた。数多くのコロケーションデータセンターが所在するカナダも同様に、2010 年代初頭よりノーコストの空気冷却を利用できるデータセンター適地として自身の存在をアピールしているが、その際自国における安価なエネルギー、安定した社会、データ主権（政府によるデータへのアクセスを許可する米国愛国者法を考慮した際に重要となる）も売り込みに利用している⁷。

コストフリーの空気冷却だけが、北極・北方圏で利用されている冷却方法ではない。たとえば Google は、フィンランド・ハミナのハイパースケールデータセンターの冷却に海水を利用している。しかしながら、データセンターにおけるエネルギー使用効率を示す値 PUE (Power Usage Effectiveness) を下げ

⁴ Tor Björn Minde のインタビュー (スウェーデン・ルレオで 2018 年 3 月 2 日実施)。

⁵ Tor Björn Minde のインタビュー (スウェーデン・ルレオで 2018 年 3 月 2 日実施)。

⁶ Fried I., Microsoft plans Russian data center. URL: <https://www.cnet.com/news/microsoft-plans-russian-data-center/> (2020 年 4 月 13 日閲覧); Miller R., Microsoft Plans Data Center in Siberia. URL:

<https://www.datacenterknowledge.com/archives/2007/11/26/microsoft-plans-data-center-in-siberia> (2020 年 4 月 13 日閲覧);

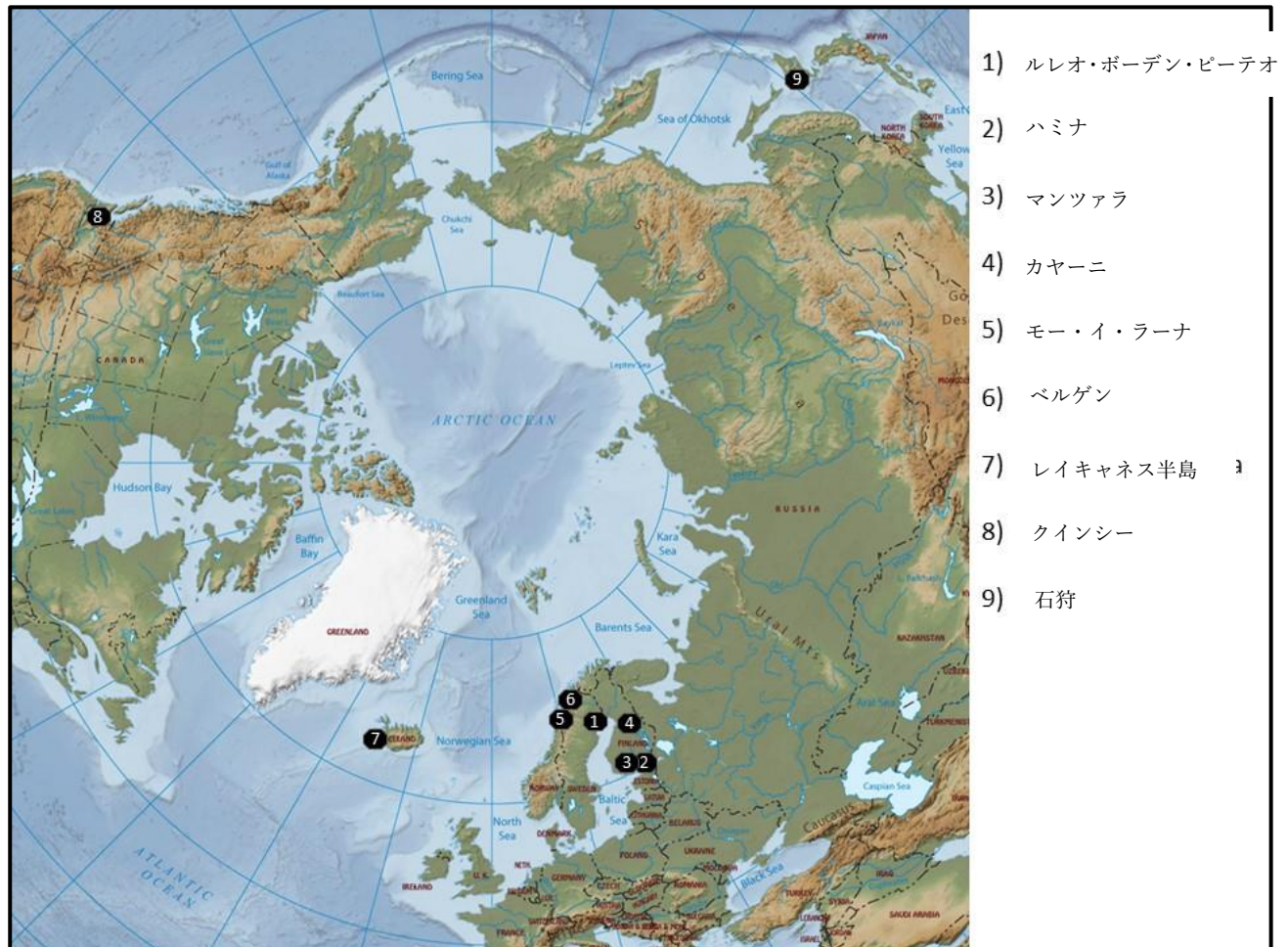
Hassell J. Take a look inside Microsoft's Quincy, Wash. Data center. URL: <https://www.computerworld.com/article/3136160/take-a-look-inside-microsofts-quincy-wash-data-center.html#slide2> (2020 年 4 月 13 日閲覧); Chernicoff D. Inside Microsoft's Quincy

data center. URL: <https://www.datacenterdynamics.com/en/analysis/inside-microsofts-quincy-data-center/> (2020 年 4 月 13 日閲覧)。

⁷ McCarthy S., Saitta E. IMMI Research Report: Islands of Resilience – Comparative Model for Energy, Connectivity and Jurisdiction. Realizing European ICT possibilities through a case study of Iceland. September 2012. URL: https://www.greens-efa.eu/files/assets/docs/study_islands_of_resilience.pdf (2020 年 4 月 15 日閲覧); BroadGroup, Ice-land's competitive advantages as a global Data Centre location. URL: <https://docplayer.net/6699149-Iceland-s-competitive-advantages-as-a-global-data-centre-location.html> (2020 年 4 月 13 日閲覧); Beal V. Why Putting Your Data Center in Canada Makes Sense. URL:

<https://www.cio.com/article/2391505/why-putting-your-data-center-in-canada-makes-sense.html> (2020 年 4 月 13 日閲覧); Brent P., Quebec firm investing in Canadian data centres. URL: <https://renx.ca/quebec-firm-investing-canadian-data-centres/> (2020 年 4 月 13 日閲覧)。

るため、この 10 年間にわたって数多くの研究がコストフリーの空気冷却に着目している。2011 年にアールト大学の研究者グループが発表し、データセンターを扱ったフィンランド初の研究とされる論文では、空気管理と冷却システムのエネルギーパフォーマンスが重点的に論じられており、これを基盤としてヘルシンキ市内の大学でさらなる研究も実施されている[13, Lu T., Lu X., Remes M., Viljanen M.]。



- 1) ルレオ・ボーデン・ピーテオ
- 2) ハミナ
- 3) マンツァラ
- 4) カヤーニ
- 5) モー・イ・ラーナ
- 6) ベルゲン
- 7) レイキャネス半島
- 8) クインシー
- 9) 石狩

図 1 データセンターが所在する地方自治体および地域の例（本文で言及）⁸

スウェーデン北部では、2016 年 1 月に RISE ICE データセンター⁹（インフラ・クラウド研究テスト環境）がルレオ工科大学の近隣に開設された。同施設の研究計画には、当初よりデータセンターにおけるエネルギー消費を最小化する試みが含まれていた。地元の大学と共同で始めた初期のプロジェクトでは、データセンター内部の気圧差を利用して気流をコントロールし、ファンの使用を減らすことを目指しており、国や地方自治体から資金も受けていたが¹⁰、現在進行しているボーデン型データセンタープロジェクトは受賞もしており、メディアの注目も高く、EU の Horizon 2020 プログラムをとおして資金

⁸ インターネット上の地図に加筆。下記等を参照: URL: <http://www.baboutines.com/2019/08/groenland.html> (2020 年 11 月 19 日閲覧); <http://www.maps-world.net/images/arctic.jpg> (2020 年 11 月 19 日閲覧)。

⁹ ICE データセンターの施設は、非営利団体 RISE SICS の傘下である RISE SICS North が運営・所有している。RISE SICS は、スウェーデンおよび世界の産業界および学界と協力して、コンピュータサイエンスの戦略的分野における高度・集中的研究を実施している。

¹⁰ ICE RISE SICS North, DRAFT: A new project to save energy in datacenter. URL: <https://ice.sics.se/draft-new-project-save-energy-datacenter/> (2020 年 4 月 13 日閲覧)。

も受けている。このプロジェクトでは、高効率で低 PUE (1.007 とのこと) のプロトタイプデータセンターが建設・検証された。ボーデンに所在するこのデータセンターでは、再生可能エネルギーのみが利用されており、高度な冷却技術が使われている¹¹。

ハイパースケール データセンター	20 メガワット以上の施設。利用企業に所有・運営されているもの。堅牢で拡張可能なアプリケーションと、さまざまなデータストレージサービスを提供する。通常は電力が豊富な地域の送電網付近に設置される。通常のキャビネット数は 500 以上（サーバー数は最低で 5,000）で、最低で 10,000 平方フィートの敷地面積を有する。
エンタープライズ データセンター	利用企業に所有・運営されているもので、現地に併設されることが多い。外部企業が取り付け、ネットワークインストールを済ませた後、社内で維持されることもある。キャビネットは 10 台以上、規模は 40 メガワット程度にまで上ることもある。
コロケーションデ ータセンター	データセンターの所有者が、特定の地域にある複数の企業、クラウド、ハイパースケールの顧客に対し、スペース、電力、冷却機能を販売するもの。SaaS または PaaS へのインターコネクションを提供する。これにより企業は組織の複雑化を最小限に抑え、低コストで成長することが可能となる。顧客は必要な数のキャビネットをレンタルできる。数百～数千の個人の顧客に対応できる。
クラウド	コンピューターシステムリソース、特にデータストレージや演算能力をオンデマンドで顧客に提供するクラウド企業が所有・運営するもの。インターネット上で多くのユーザーが利用できる。大規模なクラウドプロバイダーであればマルチサイトネットワークも構築できる。

図 2 データセンターの種類¹²

日本最北の島である北海道は、北極からは南に位置するが、冬季の多雪で寒冷な自然環境は高緯度地域と非常によく類似している。北海道の寒冷な気候は、地域開発計画にとっては利点になり得ることが認識されており、データセンター誘致の試みはすでに 10 年前に始まっている [14, Saunavaara J., p. 329]。安い地価や地震のリスクが低いことを売り込みに利用する一方で、北海道を拠点とする関係者は、冬季に集めた雪を夏季の冷却に利用して研究開発活動を行っている。北海道における他の産業分野では、雪氷によるさまざまな冷却技術が以前から使用されているが、データセンター向けに応用された技術もすでに導入されている¹³。しかしながら、雪の利用はその他の北方地域ではそれほど広がっていない。

¹¹ European Commission, Novel data centre enters the spotlight thanks to its energy- and cost-saving concept. URL: <https://cordis.europa.eu/article/id/413286-novel-data-centre-enters-the-spotlight-thanks-to-its-energy-and-cost-saving-concept> (2020 年 4 月 13 日閲覧); ICE RISE SICS North, Inauguration of the Boden Type Data Center One. URL: <https://ice.sics.se/inauguration-boden-type-data-center-one/> (2020 年 4 月 13 日閲覧)。

¹² 出典: Nordic Council of Ministers. Data Center Opportunities in the Nordics. An analysis of the competitive advantages, 2018; AFL Hyperscale, Understanding Different Types of Data Center. URL: <https://www.aflhyperscale.com/understanding-different-types-of-data-center> (2020 年 4 月 14 日閲覧)。

¹³ 北海道庁, 北海道企業立地ガイドブック (2019 年 5 月時点); 京セラ コミュニケーションシステム株式会社, 100%再生可能エネルギー ゼロエミッション・データセンターを北海道石狩市に開業. URL: <https://www.kccs.co.jp/news/release/2019/0107/> (2020 年 4 月 13 日閲覧)。

PUE はデータセンターインフラを評価する指標としてはもっともよく知られたものであるが、エネルギー効率全体を評価するうえでは不完全な基準であると批判も受けている。PUE の計算式では、IT 機器のエネルギー効率といった要素は考慮されておらず、PUE を評価する世界共通の基準もない。エネルギー再利用効率性 (ERE) やエネルギー再利用係数 (ERF) といった指標が出現してきたことから、データセンター産業・研究における昨今の発展が見て取れる。別の言い方をすれば、データセンター産業のエコロジカル・フットプリントにはますます関心が寄せられているため、データセンター内部で生み出される廃熱の集積と再利用には、産業界からも学界からも注目が集まっている。熱の再利用については世界各地で研究が行われているが[15, Patterson, M. K., VanGeet O., Tschudi W., Azevedo D.; 16, Marcinichen J. B., Oliver J. A., Thome J. R.; 17, Ebrahimi K., Jones G. F., Fleischer A. S.; 18, Ebrahimi K., Jones G. F., Fleischer A. S.; 19, Davies F. F., Maidment G. G., Tozer R. M.]¹⁴、データセンターの廃熱に関する研究およびその再利用については、とりわけ北欧諸国は一步先を行っていると考えられている¹⁵。したがって北欧諸国の場合は、今後法律によりデータセンターの熱再利用が推奨または強制されれば、それに対応する準備ができている。

工業プロセスの副産物の利用自体は、現在広く支持されている循環型経済の原理に従っているものの、集積できる廃熱には問題もある。とりわけ、データセンター廃熱の温度は低すぎて (摂氏 30~40 度)、大半の利用方法やプロセスではそのままでは使用できない。しかしながら、ヒートポンプ技術の発達により、この問題は部分的に解消している。さらに、データセンターの廃熱の回収は、その有意義な活用法があって初めて技術的に意味を成す。経済的な観点から見れば、データセンターの廃熱再利用は、加熱プラントや他の産業からの廃熱フローに対抗できる価格設定でなければ意味がない。たとえば北欧諸国では、林業や化学工業、鉄鋼業からの高品質 (高温) の廃熱がすでに比較的広く利用されている¹⁶。

熱再利用の研究は大まかに分けると 2 種類ある。1 つ目は地域熱供給からの熱の再利用を扱ったもので、RISE ICE データセンター¹⁷およびアールト大学で実施されている [20, Wahlroos M., Pärssinen M., Manner J., Syri S.; 12, Wahlroos M., Pärssinen M., Rinne S., Syri S., Manner J.; 21, Pärssinen M., Wahlroos M., Syri S., Manner J.]。これらの研究では、データセンターから排出される熱の温度を上げることに主眼が置かれている。こういった研究でよく注目されるヒートポンプは、すでに実用化されている (たとえば、フィンランド・マンツァラにある Yandex 社のデータセンターは、廃熱をヒートポンプで 85 度まで上げたうえで地元のエネルギー会社に販売している) が、さらに高い温度レベルを実現し、地域熱供給におけるデータセンター廃熱の利用効率を高めるため、水冷方式も検証されている。

¹⁴ しかしながら、2015 年に Wiley 社により出版された、682 ページにわたる “Data Center Handbook” (Hwaiyu Geng 編) では、この話題についてはわずか 1 段落のみでしか論じられていない。

¹⁵ 北欧におけるデータセンターの熱再利用の実例: Vela J., Helsinki data centre to heat homes. URL:

<https://www.theguardian.com/environment/2010/jul/20/helsinki-data-centre-heat-homes> (2020 年 4 月 14 日閲覧);

Lähienergia.Mäntsälässä hukkalämpö on arvokas energianlähde. URL: <https://www.lahienergia.org/mantsalassa-hukkalampo-arvokas-energialahde/> (2020 年 4 月 21 日閲覧)。

¹⁶ Tor Björn Minde のインタビュー (スウェーデン・ルレオで 2018 年 3 月 2 日実施); Petri Hyypä のインタビュー (フィンランド・オウルで 2020 年 2 月 5 日実施); Suvi Linden のインタビュー (フィンランド・オウルで 2020 年 2 月 6 日実施)。

¹⁷ Tor Björn Minde のインタビュー (スウェーデン・ルレオで 2018 年 3 月 2 日実施); ICE RISE SICS North, Our challenging and exciting EU H2020 project application on datacenters and fuel cells was granted. URL: <https://ice.sics.se/challenging-exciting-eu-h2020-project-application-datacenters-fuel-cells-granted/> (2020 年 4 月 13 日閲覧); ICE RISE SICS North, We have received a positive funding decision from Energiforsk for our project Virtual heating plants. URL: <https://ice.sics.se/received-funding-decision-energiforsk-project-virtual-heating-plants/> (2020 年 4 月 13 日閲覧)。

同時に、低い温度の廃熱利用に合わせた新たなネットワークが開発される状況においては、ヒートポンプの効率性や地域熱供給網の発達にも注目が集まっている。こういった技術の研究と同時に、経済投資の見積もりや、データセンター廃熱が利用された場合のビジネスモデルおよび地域熱供給システムレベルの運用コスト節約方法の研究も進められている。図3は、フィンランドを例にとって、北欧諸国に広く分布する地域熱供給システム（1万5000キロメートルを超えており、現在も拡張している）を示したものである。国内各地に地域熱供給網があることで、データセンターの立地はより柔軟に決められるようになる。

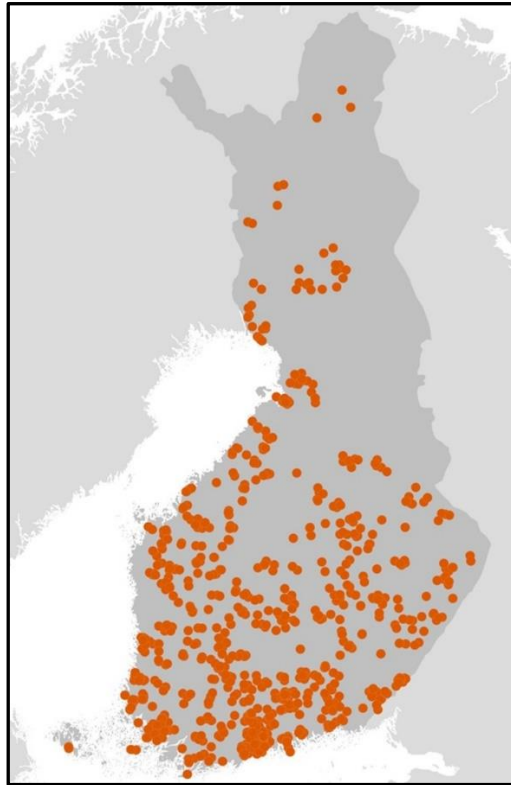


図3 フィンランドにおける地域熱供給プラント（2015年7月1日）¹⁸

2つ目の熱再利用研究は、低温度熱の利用に関するものである。とりわけ温室、養殖場、バイオマス乾燥といった分野は、学界の研究者もデータセンター企業も注目している。こういった利用方法ではヒートポンプが必要ないため、高いエネルギー効率を実現できる可能性もあるが、問題が皆無というわけではない。肝心なのは、低温度廃熱を利用するには、関連する施設が近隣に集まっていなければならないということである¹⁹。利用できる既存の用地に限りがあることや、関係者全員が満足するビジネスモデルが少ないため、これまであまり進んでこなかったものの、データセンターと温室が効果的

¹⁸ Energiategollisuus ry. Kaukolämpö Suomessa.png. 本ファイルはクリエイティブ・コモンズ・ライセンス表示 4.0 国際の規定に従い使用を許諾されている。URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kaukol%C3%A4mp%C3%B6_Suomessa.png (2020年11月19日閲覧)。

¹⁹ Tor Björn Minde のインタビュー (スウェーデン・ルレオで2018年3月2日実施); RISE, Data Center for Greenhouse farming. URL: <https://www.ri.se/en/what-we-do/projects/data-center-greenhouse-farming> (2020年4月13日閲覧); ICE RISE SICS North, Vinnova has granted funding for our project DC-Farming together with LTU and The Food Print Lab. URL: <https://ice.sics.se/vinnova-granted-funding-project-dc-farming-together-ltu/> (2020年4月13日閲覧); ICE RISE SICS North, Vinnova granted a pre-study on heat re-use from datacenters in biomass drying. URL: <https://ice.sics.se/vinnova-granted-pre-study-heat-re-use-datacenters-biomass-drying/> (2020年4月13日閲覧); ICE RICE SICS North, Biomass drying using residual heat from datacenters. URL: <https://ice.sics.se/biomass-drying-using-residual-heat-datacenters/> (2020年4月13日閲覧)。

に協力しているケースも見られる²⁰。

スマートグリッドや産業設備に関しては、送電網で緊急事態が起こった際、また送電混雑により電力需給バランスが崩れた際の対応能力について、以前から議論が行われてきた[22, Ghatikar G., Piette M. A., Ganti V., p. 577]。しかしながら、データセンターを国・地域のエネルギー需給システムに組み込むことは、北方圏で行われている研究開発活動固有の特徴と見られている。エネルギー供給と消費の最適化、またスマートグリッドの統合といったテーマや、自然条件に依存する再生可能発電の普及によって不安定さを増す送電網においてデータセンターがこういった役割を帯びるかといったことについては、学術論文の執筆や産学連携が進んでいる一方、競争市場において稼働する商業データセンターも具体的な行動を起こしている。

スウェーデン北部では、間欠性エネルギー源の増加や、事前対策的な電力負荷分散の必要性に着目したプロジェクトが、早くも 2016 年に始まった。このプロジェクトは、ソーラーパネルと系統電力両方からなる現地の電力供給により、データセンターを稼働させることに焦点をあて、データセンターと系統電力供給の相互関係に着目し、電力需要分散の可能性が検討された。同プロジェクトでは一例として、現地の蓄熱について検証が行われ、電力需要が低い時に生産した冷却水を、電力需要が高い時に使用できないかといったことが検討された²¹。RISE ICE データセンターが実施する後継プロジェクトでは、マイクログリッドを備えたデータセンターのオペレーションを最適化する方法を研究し、電力コストとピーク負荷を減少させることを目指している。これは機械学習を導入することで、気温、太陽放射、電力コスト、作業負荷の予測を分析し、それに基づいて最適な判断を下すものである。こういったテーマは、最近では中央ヨーロッパのパートナーと共同で研究されている²²。

再生可能エネルギーの特質や、柔軟に利用できる電力備蓄の必要性は、業界でもすでに認識されている。例えば、フィンランド北部のオウルにある Aurora データセンターは、データセンターを電力を消費する施設から送電網に電力を供給し収入を得る施設へと変えるべく、Eaton 社および Fortum 社と共同で試験プロジェクトを開始している。3000 キロのリチウム電池と、国の送電網と接続されている無停電電源装置 (UPS) を保有しているデータセンターであれば、電力消費量を直に調節し、送電事業者から補償を受けることができる²³。

自然環境が悪化して一時的に風力・太陽光発電ができなくなった際に、電力需要のバランスをとって調節する性能だけが、データセンターと再生可能発電のつながりではない。世界各地に施設を所有しているデータセンター事業者であれば、1つのサービスを、1日の中で時間帯を分けて別の地域から提供することで、エネルギー消費量を管理することができる。この方法なら、データセンター企業はオフピーク時により安価な電力を消費することが可能となるし、環境要因のせいで利用できる再生可能エネルギー量が一時的に少ない地域を避けることもできる。さらに、多くのデータセンター企業 (特に消費者ブランドの場合) は、自社データセンターが再生可能エネルギーで稼働していることを宣伝しており、グリーンデータセンターへのシフトを求める気運は業界全体で高まっている。この傾向

²⁰ ePressi, Yritykset laajentavat ja rakentavat uutta Mänsälässä. URL: <https://www.epressi.com/tiedotteet/yritykset-laajentavat-ja-rakentavat-uutta-mantsalassa.html> (2020 年 4 月 13 日閲覧); Ari Kurvi の電話インタビュー (フィンランドで 2020 年 4 月 20 日実施)。

²¹ ICE RISE SICS North, Swedish energy agency is funding our project on data center and grid integration. URL: <https://ice.sics.se/swedish-energy-agency-funding-project-datacenter-grid-integration/> (2020 年 4 月 13 日閲覧)。

²² ICE RISE SICS North, Swedish Energy Research Centre has granted a project on AI for datacenter micro-grid integration. URL: <https://ice.sics.se/swedish-energy-research-centre-granted-project-ai-datacenter-micro-grid-integration/> (2020 年 4 月 13 日閲覧)。

²³ Petri Hyyppä のインタビュー (フィンランド・オウルで 2020 年 2 月 5 日実施)。

は、2010年にカナダで始まった GreenStar Network 等のプロジェクトに端を発していると思われる。このプロジェクトは再生可能資源に隣接したデータセンターを扱っており、再生可能エネルギーに完全に依拠したクラウドベースの ICT サービスを提供することを目的としていた[23, Nguyen K. K., Cheriet M., Lemay M., Reijs V., Mackarel A., Pastrama A., pp. 2538–2539]。最近のデータセンターは、再生可能エネルギーを従来の事業者から購入するか、再生可能エネルギーに自分で直接投資を行うかのいずれかを行っている。

さくらインターネットは、北海道石狩市に日本最大のデータセンターを建造するとともに、自社の太陽光発電設備を設置した。加えて、同市に日本初の 100%再生可能エネルギー利用のデータセンター建設を予定している京セラ コミュニケーションシステムは、風力・太陽光・バイオマスエネルギーへの投資も計画している²⁴。こういった企業が自社発電に投資するのは、現地の電力が高価であることも 1つの理由であろうが、同様の動きは、北極圏にもっと近く、エネルギーが安価な北方地域でも見られる。フィンランド北部のデータセンターに所属する情報提供者によると、太陽光発電はデータセンター産業と相性が良いらしい。これは北方圏でとりわけ顕著な傾向である。というのも、北方圏では冬季の日照時間が少ないが、夏季の白夜がそれを相殺することで年間日照時間は比較的長くなるからであり、同時にデータセンターは夏季は冷却のためにエネルギー需要が高まるので、白夜は好都合なのである²⁵。しかしながら、ハイパースケールデータセンターを建設する際に、電力を供給する発電施設の建設・運転も義務付ける法律がデンマーク等で計画されているが、これに対し Amazon や Apple、Facebook、Google、Microsoft といった大企業が肯定的な態度を示すかは疑問がある。

ある定義によると、グリーンデータセンターとは、最低限のエネルギーで最大の演算能力を生み出すものであるという[24, AlLee G., p. 416]。この考え方は、ルレオ工科大学が主導する Cloudberry Datacenters 研究プロジェクトで用いられているもので、同プロジェクトは冷却、エネルギー回収・再利用から、ソフトウェアプロセスにおける資源効率、国・地域のエネルギーシステムとの統合まで、さまざまな分野を包括的に取り扱うものである。同プロジェクトにおけるコントロールやメンテナンス、管理の自動化に関する研究をもとに、自律型データセンターの開発が進められており、これもまた現在および今後の研究開発のトレンドと言えるだろう²⁶。原則として、自律型データセンターは自身のみで効果的に運転を継続し、停電や部品の不良といった予期せぬ状況に直面しても、人間の干渉なしに自己修復できなくてはならない。北方圏では、データセンター事業におけるこういったパラダイムシフトに対応するため、学術機関と民間企業が垣根を越えて協力関係を構築している。例えば AutoDC プロジェクトの場合、スウェーデン、フィンランド、カナダからパートナーが参加している²⁷。一方で 2016 年には、人工知能 (AI) の使用に成功したことを Google が報告しており、データセンターにおける冷却システムなど 120 もの変数をコントロールし、消費電力の著しい削減を実現したという²⁸。懐疑論も根強く残るが、AI による遠隔モニタリング・最適化という分野が今後も進展する

²⁴ さくらインターネット. URL: <https://www.sakura.ad.jp/en/corporate/datacenter/> (2020 年 4 月 13 日閲覧); 京セラ コミュニケーションシステム株式会社, 100%再生可能エネルギー ゼロエミッション・データセンターを北海道石狩市に開業. URL: <https://www.kccs.co.jp/news/release/2019/0107/> (2020 年 4 月 13 日閲覧).

²⁵ Petri Hyyppä のインタビュー (フィンランド・オウルで 2020 年 2 月 5 日実施).

²⁶ Cloudberry. URL: <https://www.cloudberry-datacenters.com/subprojects-20315292> (2020 年 4 月 14 日閲覧); ICE RISE SICS North, A holistic approach on automation in data centers – a new EUREKA project. URL: <https://ice.sics.se/a-holistic-approach-on-automation-in-data-centers-a-new-eureka-project/> (2020 年 4 月 14 日閲覧).

²⁷ AutoDC. URL: <https://autodc.tech/about/> (2020 年 4 月 14 日閲覧).

²⁸ Moss S., Google uses DeepMind AI to cut data center PUE by 15%. URL: <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/google->

ことで、人間のいないデータセンターの設立につながるかもしれない。こういった考え方は、既存の“完全自動”モデルをさらに推し進め、現場スタッフに関わるエネルギー消費（人にとって快適な環境を作ることや人のアクセスに関わる部分）を切り捨てることで、さらなる高効率を目指している²⁹。

分散化と、エッジコンピューティングの重要度が高まっていることも現在のトレンドであり、北極・北方のデータセンター事業の未来を形成する要素と言える。エッジコンピューティングでは、莫大な量の（センサー）データをリアルタイム（または極めて短い応答時間）で処理できる。より小さな演算ユニットとデータストレージユニットを作り出して、ユーザーの近隣に多数設置した場合、人口がまばらな北極圏・北方圏にレイテンシに依存しないデータを置くのが最良であるという発想はさらに強まるだろう。しかしながら、北極の国々の間にも大きな違いがあり、各地域すべてがさまざまなタイプのデータの需要を等しく満たせるわけではない。ロシアとカナダの場合、エッジコンピューティングは大都市で集中的に発達しやすい傾向がある。さらにスウェーデン、ノルウェー、フィンランド、デンマーク（グリーンランドとフェロー諸島以外）各国の南部はヨーロッパの主要なデータハブに近く、人口や産業も集中しているが、こちらは北部よりもレイテンシに依存するサービスに適している。北極周辺地域で実施されている研究開発固有の特徴ではないが、エッジデータセンターや、さまざまなタイプデータセンターのつながりに着目した研究も見られる³⁰。

北方のデータセンターの経済的影響と社会的意義に関する研究

データセンターに関する研究は北極周辺のさまざまな場所で行われているが、データセンター産業自体や、この地域における個々のデータセンター用地および施設についても数々の研究が実施されている。こういった報告書や論文は2種類に分けられる。一つ目はデータセンターの経済的影響および地域的な利点、さらに投資判断を扱ったものである。二つ目は、クラウドやインターネットの具体性をテーマとし、人類学やメディア研究の観点からデータセンターにアプローチしている。こういった論文は学術機関で執筆・発表されているが、前者のタイプの研究は民間企業や官公庁から委託を受けてコンサルタントが実施する場合が多い。

Google や Facebook が北欧諸国に設立したハイパースケール施設がもたらす経済効果全体を論じた報告書は、ビジネス・地域開発に重点を置いた研究の代表的存在である。当該企業から委託されて国際コンサルティング会社が作成したこういった報告書によると、ハイパースケールデータセンターに関わる投資判断では1億ユーロ単位の金額が動き、税収や数千人単位の雇用（直接または再委託による）を生み出すという。現地の雇用に与える影響は、建設期間中が最も大きいものの、研究対象となった事例を見る限り、企業が選定した用地で投資をし続けることで、この期間は何年にもわたり継続

uses-deepmind-ai-to-cut-data-center-pue-by-15/ (2020 年 4 月 15 日閲覧); DeepMind, DeepMind AI Reduces Google Data Centre Cooling Bill by 40%. URL: <https://deepmind.com/blog/article/deepmind-ai-reduces-google-data-centre-cooling-bill-40> (2020 年 4 月 15 日閲覧)。

²⁹ Donoghue A., Beyond Lights-Out: Future Data Centers Will Be Human-Free. URL:

<https://www.datacenterknowledge.com/design/beyond-lights-out-future-data-centers-will-be-human-free> (2020 年 4 月 21 日閲覧)。

³⁰ Tor Björn Minde のインタビュー (スウェーデン・ルレオで 2018 年 3 月 2 日実施); Mehta R., Are Autonomous data centers on the horizon?. URL: <https://www.datacenterdynamics.com/en/opinions/are-autonomous-data-centers-on-the-horizon/> (2020 年 4 月 15 日閲覧); RISE, Inauguration of a unique edge test datacenter. URL: <https://news.cision.com/rise/r/inauguration-of-a-unique-edge-test-datacenter,c2720659> (2020 年 4 月 15 日閲覧); 西本紗保美. はこだて未来大・さくらインターネット共同研究 「中小」 連結で能力向上, 北海道新聞, 2019 年 11 月 14 日。

していく³¹。

加えて、産業発展全般や、北方圏コミュニティにハイパースケールデータセンターが建設された過去事例および想定事例を扱った報告書も、スウェーデンやノルウェーといった地域で、国や地域当局の計画にもとづき作成されている³²。データセンター投資の誘致を試みるさまざまな国々の間で競争が行われているのも事実であるが、北欧閣僚理事会より委託された報告書は、政府間の協力も進んでいることを示している。報告書では用地選定に影響する要因や、北欧地域の強みが論じられているが、市場は急速に成長しており、関係するすべての国にチャンスがあるとも述べられている³³。発展途上の産業を扱ったこういった報告書は、データセンターのライフサイクル全体を俯瞰して分析する視点が欠けていることが多い。多くのデータセンターは、元々他の重工業で使用されていた施設の中に開設されているが、データセンター施設が閉鎖された場合はどうなるのかということはほとんど注目されていない。

スウェーデン、デンマーク、アイスランドのデータセンターを扱った人類学的研究が、北極・北方圏内外の大学に所属する研究者によって実施されている。こういった研究では普通、大規模なデータセンターをホストする北方コミュニティにおいて、長期間のフィールドワークや聞き取り調査、参与観察が行われる。こういった研究では、クラウドコンピューティングを構成するインフラについて調査が行われており、遍在的なように見えて実体がなく空を掴むようなインターネットが支障なく機能し得るのか、疑問を呈すとともに問題視されている。また、クラウドインフラの哲学的、政治的、社会的、環境的影響や、こういったクラウドインフラを構築する際に現れる複雑な社会的・技術的關係についても論じられている。研究者の中には、他産業からインフラを引き継ぐことがどういった効果をもたらすかに焦点を当てている者もあり、そういったインフラを別の産業領域向けにローカライズ・統合するプロセスについて研究を行っている。そういった研究によると、多くのデータセンターはもう機能していない他の産業用地に建造されており、こういった新しい産業活動が、国や地域の経済を活性化させる過程に一役買っているという。また、データセンタープロジェクトは大抵極秘裏に進められるため、それに由来する公衆参与の欠如や、地元関係者の期待や不安に着目した研究も行われている[25, Vonderau A.; 6, Vonderau A.; 26, Johnson A.; 7, Hogan M., Vonderau A.; 27, Johnson A.; 28, Maguire J., Winthereik B. R.]。

教育と有能な人材確保に関する課題

北欧諸国における平均的な教育レベルと技術的知識の水準は高く、前述の北欧閣僚理事会が委託した報告書などにおいても、人的資源は北欧における強みとして論じられている。しかしながらこの報告書によると、北欧地域とフランクフルト、ロンドン、アムステルダム、パリ、ダブリン（いわゆる FLAP-D）の利点を比較すると、有能な労働力という点については後者に軍配が上がるという³⁴。これ

³¹ The Boston Consulting Group. Digital infrastructure and economic development. An impact assessment of Facebook's data center in Northern Sweden, 2014; Oxford Research. Finland's Giant Data Center Opportunity. From the Industrial Heartland to Digital Age, 2015; Copenhagen Economics. Finland's economic opportunities from data centre investments: A study prepared for Google, 2017; Copenhagen Economics. Google's Hyperscale Data Centres and Infrastructure Ecosystem in Europe: Economic Impact Study, 2019.

³² Ylinenpää H. Etableringen av Facebooks europeiska datacenter i Sverige och Luleå. Tillväxt Verket Rapport 0170, 2014; Granberg A. Effecten av Facebooks etablering för Luleå Science Park som regional nod. Luleå Science Park, 2014; The Boston Consulting Group. Capturing the Data Center Opportunity: How Sweden Can Become a Global Front-Runner in Digital Infrastructure, 2016; Menon Economics. Rapport: Gevinster knyttet til etablering av et hyperscale datasenter i Norge. Menon-Publikasjon Nr. 39/2017, 2017; Sweco. Effekter av Facebooks etablering i Luleå: En studie av effekter på regional och nationell nivå, 2017.

³³ Nordic Council of Ministers. Data Center Opportunities in the Nordics. An analysis of the competitive advantages, 2018.

³⁴ Ibid.

までの参与観察や各企業との議論の結果、北欧諸国を含めた多くの北方地域では、データセンターに関しては労働力の欠如や採用の問題が顕著であることがわかっている。データセンター産業が世界的に急速に成長しているため、技能のある働き手であれば、勤める企業や地域も自由に選ぶことができる。加えて、データセンター産業の需要に合わせて教育システムを改良し、教育プログラムを確立することの重要性は認識されているが³⁵、そういった課題に法律がまだ追いついていない。学位プログラムは柔軟性を欠いており、改定されることもめったになく、絶えず変化するデータセンター産業の需要に必ずしも対応していない。急速な技術発展に伴い、特定のコアコンピテンスを要求する新しいタイプの職が現れては消えているため、特定のタスクに焦点を置いた補足的な教育を実施する必要はたびたび生じている。さらにデータセンター産業では、実地での試行錯誤により、特定の用地向けに最適化されたソリューションを生み出すことも多く、そういった知見を外部と共有したがない企業も多い。

大半の地域ではデータセンターに関する大学教育が制度化されていないため、民間企業やコンサルティング会社によるトレーニングが提供されている一方³⁶、北極・北方圏には、データセンターに関する教育や論文指導を正式に導入している高等教育機関もある。北欧では、先述のルレオ工科大学やアールト大学³⁷といった教育機関など³⁸で文学学士や文学修士の学位論文がすでに複数提出されている。ラッペーンランタ大学で執筆された学位論文は、マンツァラ地方が廃熱利用によりデータセンター投資を誘致する政策を策定するうえで重要な役割を担い、政策を成功に導いた³⁹。さらに、ハミナにおける Google のハイパースケールデータセンターのほど近くにある南東フィンランド応用科学大学 (XAMK) とコトカ・ハミナ地方共同教育局 (Ekami) は、データセンターに焦点を置いた学習モジュールおよびプログラムを提供している⁴⁰。カヤーニ市には専門性の高いデータセンタークラスターがあり、官庁が大きく関わっていることや、データセンター関連教育発展のために投資が行われていることから注目を集めている。

³⁵ 例: Oxford Research. Finland's Giant Data Center Opportunity. From the Industrial Heartland to Digital Age, 2015, p. 18.

³⁶ 教育の例: Uptime Institute. URL: <https://uptimeinstitute.com/education> (2020 年 9 月 29 日閲覧); CNet Training. URL: <https://www.cnet-training.com/programs/masters-degree/> (2020 年 9 月 29 日閲覧); CISCO. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/training-events/training-certifications/certifications/associate/ccna-data-center.html> (2020 年 9 月 29 日閲覧); DCPro. URL: <https://www.depro.training/allcourses> (2020 年 9 月 29 日閲覧).

³⁷ 例: Sorvari J. Konesalin ylijäämälämmön hyödyntäminen Levin Koutalaella. Aalto University, MA Thesis, 2015; Stenberg Å. Tietokonesalien hukkalämmön hyödyntämismahdollisuuksien teknis-taloudellinen optimointi. Aalto University, MA Thesis, 2015; Pärssinen M. Analysis and Forming of Energy Efficiency and GreenIT Metrics Framework for Sonera Helsinki Data Center HDC. Aalto University, MA Thesis, 2016; Linna O. Kansainvälinen katsaus datakeskusten hukkalämmön hyödyntämiseen. Aalto University, BA Thesis, 2016; Olofsson M. Use of Waste Heat from a Data Center. Luleå University of Technology, Independent thesis Advanced Level, 2013; Gille, M. Design of Modularized Data Center with a Wooden Construction. Luleå University of Technology, Independent thesis Advanced Level, 2017; Erikson, M. Monitoring, Modelling and Identification of Data Center Servers. Luleå University of Technology, Independent thesis Advanced Level, 2018.

³⁸ Kupiainen M. Lämpöpumppu konesalin jäähdytyksessä ja lämmöntalteenotossa. Mikkeli University of Applied Sciences, BA Thesis, 2014; Juvalainen J. Initial Business Concept for the Neighborhood Data Center. Helsinki Metropolia University of Applied Sciences, MA Thesis, 2016; Vuorinen L. Kannattavuusmalli datakeskuksen hukkalämmön hyödyntämiseen kaukolämpöverkossa. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto, Diplomityö, 2019.

³⁹ Porkka A. Matalalämpöisen hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämmön tuotannossa. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto, Diplomityö 2013; Lähienergia. Mäntsälässä hukkalämpö on arvokas energianlähde. URL: <https://www.lahienenergia.org/mantsalassa-hukkalampo-arvokas-energialahde/> (2020 年 4 月 21 日閲覧); Ari Kurvi の電話インタビュー (フィンランドで 2020 年 4 月 20 日実施).

⁴⁰ Oxford Research. Finland's Giant Data Center Opportunity. From the Industrial Heartland to Digital Age, 2015, pp. 15–16, 18; XAMK, Datakeskuksen korkeakouludiplomi, 60 op. URL: <https://www.xamk.fi/avoimen-amkn-kurssit/datakeskuksen-kehoakouludiplomi-60-op/> (2020 年 4 月 14 日閲覧); YLE. URL: <https://yle.fi/uutiset/3-7763608> (2020 年 4 月 14 日閲覧); EKAMI, Green Data Center. URL: <https://www.ekami.fi/kehittaminen/hankeet/green-data-center> (2020 年 4 月 14 日閲覧).

こういった活動は、2012年に、フィンランド政府と高等教育機関が所有するIT科学センター(CSC)がデータセンターとスーパーコンピューターを、そして地方のICTサービス事業者が所有するHerman ITが自社データセンターをRenforsin Rantaビジネスパークに設置したことに端を発している。このビジネスパークは、以前製紙工場があった敷地内の既存の設備や大量の電力、光回線を利用して作られたもので、カヤーニは当初はこれにより大きな成功を取めていたが、その後はさらなる(民間の)データセンターを誘致する試みが失敗し、顧客をつなぎ留めるのに苦心していた。それでも同市はデータセンター関連のスキルセット発展を諦めることはなく、その取り組みは、地元の応用科学大学が提供する教育プログラムとして具体化することとなる。このデータセンター専門プログラムでは、主要なサーバーおよびワークステーション製品や、最新の組織内ネットワークソリューションに関するスキルを学生に提供している。このトレーニングでは、カヤーニ応用科学大学の学生は、大学自前のデータセンタートレーニング施設であるDCラボを利用することができ、大学はデータセンター関連エコシステムを、データ分析といった分野にまで拡大することを目指している。2019年にも大きな動きがあり、ヨーロッパ諸国およびEUがサポートする汎欧州高性能スーパーコンピューターが、カヤーニのCSCデータセンターでホストされることが発表された。当該スーパーコンピューターは、CSCデータセンターの廃熱がこの地域の熱需要の最大20%を満たすようになってから、2020年に運用を開始される見込みである⁴¹。

スーパーコンピューターの排熱再利用はトロムソ大学(UiT)などでも実現している一方⁴²、民間企業の情報提供者は、北極圏の大学の中には、データセンター関連教育を促進する機会がありながらも、ビジョンやリーダーシップが欠けていたために失敗してしまったものもあると指摘する。しかしながら、データセンター企業の方は、自社の活動に教育や訓練を込み込んでおり、スウェーデンやフィンランド、デンマークのデータセンター協会もその重要性を強調している。こういった目標を達成するための現実的な方法としては、セミナーを開催し学生が人脈構築や情報交換できる場を提供したり、官庁と高等教育機関の協力を推進したりすることが挙げられる⁴³。

結論

現在、寒冷気候を利用しているデータセンターは、北極圏または亜北極帯の郊外に所在していることが多い。例えばロシアでは、データセンター産業には、市場占有率(上位3企業が市場全体の42%を占める)においても、南方の立地を好むという空間分布(全データセンターラックの65~70%がモ

⁴¹ Petri Hyypä のインタビュー (フィンランド・オウルで2020年2月5日実施); Jukka-Pekka Partanen の電話インタビュー (2020年2月21日); KAMK University of Applied Sciences, Data Center Specialization. URL:

<https://www.kamk.fi/en/KAMK/Schools-at-KAMK/School-of-Information-Systems/Data-Center-Specialization> (2020年4月14日閲覧); KAJAK DC. URL: https://kajakdc.fi/?page_id=772&lang=en (2020年4月14日閲覧); KAMK University of Applied Sciences, CSC ja KAMK käynnistävät Data-analytiikan kiihdyttämön Kainuussa. URL: <https://www.kamk.fi/news/CSC-ja-KAMK-kaynnistavat-Data-analytiikan-kiihdyttamon-Kainuussa/hh0ylnqe/e80efd92-c4cc-49e6-8168-5b7e9e0ea1cf> (2020年4月14日閲覧); CSC, News. URL: <https://www.csc.fi/en/-/one-of-the-most-competitive-supercomputers-in-the-world-to-be-placed-in-kajaani-finla-1> (2020年4月14日閲覧); Granlund, Environmentally friendly cooling for a supercomputer. URL:

<https://www.granlundgroup.com/finland/news/environmentally-friendly-cooling-for-a-supercomputer/> (2020年4月14日閲覧).

⁴² HPC Wire, UiT Recycles Supercomputing Power with Asetek's RackCDU. URL: <https://www.hpcwire.com/2014/06/23/uit-recycles-supercomputing-power-aseteks-rackcdu/> (2020年4月14日閲覧).

⁴³ Swedish Datacenter Industry. URL: <https://sdia.se/about/> (2020年4月14日閲覧); Finnish Data Center Forum. URL: <https://www.fdcf.fi/> (accessed 14.04.2020); Danish Data Center Industry, Skills & Education. URL: <https://datacenterindustrien.dk/focusareas/skillsandeducationworkinggroup/> (2020年4月14日閲覧).

スクワ、それ以外の 15～18%がサンクトペテルブルクに所在している)においても、高い過密傾向が見られる。しかしながら、ロシア市場は急速な発展を見せており、従来データセンターが集中していた地域の以外でも成長が見込まれる。ロシアの郊外には大規模な暗号通貨採掘活動がすでに展開している地域もあるが、そういった場所では寒冷気候や世界トップレベルの安価な電力が利用できることで、データセンター用地の候補にもなり得る⁴⁴。一方で、トロント、モントリオール、バンクーバーといった都市は、カナダのデータセンター市場で優位を占めている⁴⁵。しかし、北極圏内の国際接続性向上を目指す Arctic Connect や、アラスカを拠点とする Quintillion 社の光海底ケーブルプロジェクトにより、こういった状況は今後変化する可能性がある。アラスカにおける地域開発計画の中では接続性向上が重要であると述べられており、ロヴァニエミやキルケネスといった都市でも、Arctic Connect プロジェクトが実現すればデータセンター投資の誘致も見込まれるため、このプロジェクトに直接投資を行っている。光ケーブルは国際通信のバックボーンを形成するインフラであり、現在計画されている光海底ケーブルにより、世界の情報の流れにおける北極域の戦略的立ち位置が大きく変わることは確実である[29, Saunavaara J.]。しかしながら、企業が新規データセンターの立地を選定するにあたり考慮する要素は、そういった点だけではない。

北極・北方地域の大半では、国際接続性の問題はじきにほとんど解消されるだろうが、データセンターの立地選定や、データセンタークラスターの発達可能性に影響する要因である人的資源や地域のスキルセットは十分ではない。したがって、他の産業活動をホストしている地域では、人材が別の業界からデータセンター産業に流入することで産業が発展する可能性はあるが、研究や教育に新たに投資することも必須である。そうでなければ、技能を持った労働者を外部から北方圏に呼び込む必要がある。こうなると、さまざまなインセンティブを設けなくてはならないため、人件費が膨らんだり、僻地に人を呼び込む工夫が求められるなど、雇用の問題が生まれる可能性もあり、さらにクラスター形成に重要となる地域の知識ネットワークが十分に発達しないことも考えられる。

また、市場主導のデータセンター事業は、利益の最大化を目指したものであることも特筆しなければならない。このため、投資利益率や、事業立ち上げにかかる総保有コスト、長期的なランニングコストといった要因が立地の選定に影響を及ぼす。北欧では、各国の魅力を比較するにあたり、それぞれがデータセンターにどの程度のエネルギー税が課しているかといった規制の部分が非常に大きな判断材料となる。一方アメリカでは、州や郡の間で苛烈な競争が行われているため、魅力的なインセンティブが提示され、積極的な宣伝活動が実施されている状況である。そのため、データセンター企業も、アメリカでは用地となる地域をさまざまな選択肢の中から検討することができる。ところが、EUでは法規制によりそういったことは自由にできない⁴⁶。データセンター事業は競争的な性質が強いもの

⁴⁴ Moss S., Rostelecom opens a data center next to a nuclear power plant, could be Russia's largest in 2021. URL: <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/rostelecom-opens-data-center-next-nuclear-power-plant-could-be-russias-largest-2021/> (2020 年 4 月 14 日閲覧); Willner G., Why the Russian Data Center Market Is the Next Frontier. URL: <https://www.datacenterknowledge.com/industry-perspectives/why-russian-data-center-market-next-frontier> (2020 年 4 月 14 日閲覧); Baydakova A., Bitcoin Mining Farms Are Flourishing on the Ruins of Soviet Industry in Siberia. URL: <https://www.coindesk.com/bitcoin-mining-farms-are-flourishing-on-the-ruins-of-soviet-industry-in-siberia> (2020 年 4 月 14 日閲覧); Fedorinova Y. and Atkinson G., Russia's Largest Bitcoin Mine Turns Water Into Cash. URL: <https://www.bloomberg.com/news/features/2019-11-24/seo-inside-russia-s-largest-bitcoin-mine> (2020 年 4 月 13 日閲覧).

⁴⁵ Data Center Map. URL: <https://www.datacentermap.com/> (2020 年 4 月 14 日閲覧).

⁴⁶ Petri Hyypä のインタビュー (フィンランド・オウルで 2020 年 2 月 5 日実施); Suvi Linden のインタビュー (フィンランド・オウルで 2020 年 2 月 6 日実施); State of Washington Department of Commerce. State of Data Center Industry: An analysis of Washington's Competitiveness in This Fast-Growing High-Tech Field. Report to the Legislature, January 2018.

の、北欧諸国では産学官の垣根を越えた研究がすでに実施されており、これにより、現在ヨーロッパにおけるデータセンターの大半が所在しているフランクフルト、ロンドン、アムステルダム、パリ、ダブリンといった都市に、小規模な経済力しか持たない北極・北方圏の国家や地域が対抗できるようになる可能性もある。

データセンター産業は急速に成長しているが、中央ヨーロッパの主要地域ではこの流れに逆行する反応も起きている。例えば、アムステルダムでは新たなデータセンターの建設が一時的に禁止されており、ストックホルムといった地域では、電力需要が送電網のキャパシティを越えるという事態も起こっている。データセンター産業の発展により、エネルギーが豊富な北方地域の地位が向上する可能性もあるが、ノルウェー・ベルゲンの Kolos データセンタープロジェクトや、フィンランド北部の 3 地域で進行する Silent Partner グループの巨大プロジェクトなど⁴⁷、知名度の高い大規模データセンタープロジェクトが失敗した、あるいはその進行に著しい遅れが見られた場合、データセンター産業に懐疑的な見方をする地元住民や政策決定者も出てくるだろう。さらに、投資判断を下すのも当然人間であることは覚えておかなければならない。ケン・ボードリーは、深刻な自然災害リスクのある地域に所在しているにも関わらず IT 設備を近くに置いておこうとするビジネスリーダーのことを“server hugger”（サーバーに固執する者）と呼んでいる[30, Baudry K., pp. 99]。したがって、北極・北方圏のデータセンターの今後の発展は、数値化できる技術的、経済的、環境的な指標だけでなく、人間の認識や判断にも左右されることになる。

グリーン情報技術（IT）の発達にデータセンターがどういった役割を担うかといったことに関しては、サンダーナムとケラーが、Scopus データベースの査読論文や会議論文を対象としたレビュー論文を執筆している。この中では、グリーン IT におけるデータセンターの役割が、以下のような 5 つの枠組みで論じられている。(1) 省エネルギー、(2) 省コスト、(3) 持続可能性と再生可能エネルギー、(4) グリーンデータセンターのための情報技術、(5) 事業要件と資源利用の合致[31, Santhanam A., Keller C.]。こういった特徴は、北極・北方圏における研究開発活動にも見られるものである。しかしながらこの論文では、省エネルギーに関する従来の研究は、エネルギー効率や冷却といった分野ばかりを扱っていることが指摘されており、したがって再生可能エネルギーや熱の再利用に対する関心は、北方圏、とりわけ北欧諸国におけるデータセンター研究の特徴であるということが裏付けられている。同様の傾向は、学術論文以外にも、民間企業の研究開発活動や、データセンター産業関係者から成る組織のメンバー構成にも見て取れる。

グリーン IT の概念は、ある定義によると「環境に優しい技術やプロセスを情報技術や通信技術のライフサイクル全体に取り込むことを目指したあらゆる活動や取り組み」を指し [32, Hedwig M., Malkowski S., Neumann D., p. 2]、データセンター産業の持続可能性やカーボンフットプリントの問題に長期的な視点で取り込むことを促進しようというものである。エネルギー関連の問題は重要だが、これは建設・運用段階で使用する物質を含めたより広範な問題の一部に過ぎない。使用される素材の効率性やコスト、環境調和性といった議論は、コンピュータの部品の素材にしても、データセンタ

⁴⁷ BBC, Record-sized data centre planned inside Arctic Circle. URL: <https://www.bbc.com/news/technology-40922048> (2020 年 4 月 14 日閲覧); Smolaks M., Kolos data center park in Norway is being acquired by cryptocurrency miners. URL: <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/kolos-data-center-park-in-norway-is-being-acquired-by-cryptocurrency-miners/> (2020 年 4 月 14 日閲覧); Opiah A., Silent Partner Group To Build Up Four Hyperscale Data Centre Hubs in Finland. URL: <https://data-economy.com/silent-partner-group-to-build-up-four-hyperscale-data-centre-hubs-in-finland/> (2020 年 4 月 14 日閲覧); YLE. URL: <https://yle.fi/uutiset/3-10492984> (2020 年 4 月 14 日閲覧).

一の建物の資材にしても、すべてのレベルで関わってくる。この点において、スウェーデンにある木材が使用されたデータセンターは⁴⁸、新興のデータセンター産業と、北方の天然資源を利用した伝統的産業が調和した例として言及しておくべきだろう。

最後に、データセンターの持続可能性とエネルギー消費に関する議論を理解するには、データセンターは、他の企業が成長した結果生じた需要に応えるために建設されることを覚えておかねばならない。サーバーは理由なしに稼働（そしてエネルギーを消費）しない。政治家や消費者からの強い圧力により、データセンターは今後さらに持続可能な方向へと舵を切っていくだろうが、業界が実施する取り組みにより、状況は1990年代終わりの頃よりも遥かに改善している。当時は、Forbes誌に掲載された“Dig more coal – the PC’s are coming”（石炭を採掘せよ、コンピュータの時代がやって来る）という記事により、多くの人々が電子機器とエネルギー消費の関係に気づくことになった⁴⁹。一方、何を「持続可能」や「グリーン」とするかは北極・北方圏各国の間で違いがあり、そういった解釈の差はさまざまな産業の稼働条件に影響を及ぼすが、データセンター産業としてその例外ではない。したがって、さらなるエネルギー効率を要求する気運や、それを実現する方法は今後も国によって異なるだろうし、原子力とデータセンターを組み合わせることについては、今後も意見は分かれるだろう⁵⁰。

参考文献

1. Varnelis K. Eyes That Do Not See: Tracking the Self in the Age of the Data Center. Harvard Design Magazine, 2014, no. 38. <http://www.harvarddesignmagazine.org/issues/38/eyes-that-do-not-see-tracking-the-self-in-the-age-of-the-data-center>.
2. Dawkins C. Regional Development Theory: Conceptual Foundations, Classic Works, and Recent Developments. Journal of Planning Literature, 2003, 18(2), pp. 131–172.
3. Piperopolous P.G. Entrepreneurship, Innovation and Business Clusters. Farnham: Gower Publishing Limited, 2021.
4. Wolfe D.A. The Role of Universities in Regional Development and Cluster Formation. In: G. Jones, P. McCarney, M. Skolnik (eds.). Creating Knowledge, Strengthening Nations: The Changing role of Higher Education. Toronto: University of Toronto Press, 2005, pp. 167–194.
5. Bristow G., Healey A. Innovation and Regional Economic Resilience: An Exploratory Analysis. The Annals of Regional Science, 2018, 60, pp. 265–284.
6. Vonderau A. Scaling the Cloud: Making State and Infrastructure in Sweden. Ethnos. Journal of Anthropology, 2019, vol 84, pp. 698–718.
7. Hogan M., Vonderau A. The Nature of Data Centers. Culture Machine, 2019, vol. 18. <https://culturemachine.net/vol-18-the-nature-of-data-centers/the-nature-of-data-centers/> (accessed 18.05.2020).

⁴⁸ Data Economy, Wood You Believe It! A Data Centre Made Of Wood. URL: <https://data-economy.com/wood-you-believe-it-a-data-centre-made-of-wood/> (2020 年 4 月 14 日閲覧).

⁴⁹ Huber P. and Mills M., Dig more coal – the PC’s are coming. URL: <https://www.forbes.com/forbes/1999/0531/6311070a.html#4b8baf822580> (2020 年 4 月 14 日閲覧).

⁵⁰ こういった開発の例: Moss S., Rostelecom opens a data center next to a nuclear power plant, could be Russia’s largest in 2021. URL: <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/rostelecom-opens-data-center-next-nuclear-power-plant-could-be-russias-largest-2021/> (2020 年 4 月 14 日閲覧).

8. Masanet E., Shehabi A., Lei N., Smith S., Koomey J. Recalibrating global data center energy-use estimates. *Science*, 2018, Col 367 (6481), pp. 984–986.
9. Peuhkuri M., Lääkkölä R., Costa-Requena J., Manner J. Datacenters – Energy Hogs or Helping to Optimize Energy Consumption. *IEEE, 2012 International Conference on Smart Grid Technology, Economics and Policies (SG-TEP)*, Nuremberg, 2012, pp. 1–4. DOI: 10.1109/SG-TEP.2012.6642387.
10. Lundmark M., Power D. Labour Market Dynamics and the Development of the ICT Cluster in the Stockholm Region. *Centre for Research on Innovation and Industrial Dynamics, Research Paper 2007*, 1, pp. 1–24.
11. Simonen J., Svento R., Karhinen S., McCann P. Inter-Regional and Inter-Sectoral Labour Mobility and the Industry Life Cycle: A Panel Data Analysis of Finnish High Technology Sector. In: B. Biagi, A. Faggian, I. Rajbhandari, V.A. Venhorst (eds.) *New Frontiers in Interregional Migration Research*. Cham: Springer, 2018, pp. 151–179.
12. Wahlroos M., Pärssinen M., Rinne S., Syri S., Manner J. Future views on waste heat utilization – Case of data centers in Northern Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82, pp. 1749–1764.
13. Lu T., Lu X., Remes M., Viljanen M. Investigation of air management and energy performance in a data center in Finland: Case Study. *Energy and Buildings*, 2011, 43, pp. 3360–3372.
14. Saunavaara J. The Changing Arctic & the Development of Hokkaido. *Arctic Yearbook*, 2017, pp. 326–338.
15. Patterson M.K., VanGeet O., Tschudi W., Azevedo D. Towards the net-zero data center: Development and application of an energy reuse metric. *ASHRAE Transaction*, 2011, vol. 177(2), pp. 10–17.
16. Marcinichen J.B., Oliver J.A., Thome J.R. On-chip two-phase cooling of datacenters: Cooling system and energy recovery evaluation. *Applied Thermal Engineering*, 2012, vol. 41, pp. 36–51.
17. Ebrahimi K., Jones G.F., Fleischer A.S. A review of data center cooling technology, operating conditions and the corresponding low-grade waste heat recovery opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 31, pp. 622–638.
18. Ebrahimi K., Jones G.F., Fleischer A.S. Thermo-economic analysis of steady state waste heat recovery in data centers using absorption refrigeration. *Applied Energy*, 2015, vol. 139, pp. 384–397.
19. Davies F. F., Maidment G.G., Tozer R.M. Using data centres for combined heating and cooling: An investigation for London. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 94, pp. 296–304.
20. Wahlroos M., Pärssinen M., Manner J., Syri S. Utilizing data center waste heat in district heating – Impacts on energy efficiency and prospects for low-temperature district heating networks. *Energy*, 2017, vol. 140(1), pp. 1228–1238.
21. Pärssinen M., Wahlroos M., Syri S., Manner J. Waste heat from data centers: An investment analysis. *Sustainable Cities and Society*, 2019, vol. 44, pp. 428–444.
22. Ghatikar G., Piette M.A., Venkata Ganti V. Smart grid-responsive data centers. In: H. Geng (ed.) *Data Center Handbook*. New Jersey: Wiley, 2015, pp. 577–592.
23. Nguyen K.K., Cheriet M., Lemay M., Reijs V., Mackarel A., Pastrama A. Environmental-aware virtual data center network. *Computer Networks*, vol. 56, pp. 2538–2550.

24. AlLee G. Green microprocessor and server design. In: H. Geng (ed.). *Data Center Handbook*. New Jersey: Wiley, 2015, pp. 401–418.
25. Vonderau A. Technologies of Imagination: Locating the Cloud in Sweden's North. *Imaginations*, 2017, 8-2. <http://imagination.glendon.yorku.ca/?p=9947> (accessed 18.05.2020).
26. Johnson A. Data centers as infrastructural in-betweens: Expanding connections and en-during marginalities in Iceland. *American Ethnologist*, 2019, vol. 46(1), pp. 75–88.
27. Johnson A. Emplacing Data Within Imperial Histories: Imagining Iceland as Data Center 'Natural' Home. *Culture Machine*, 2019, vol. 18. <https://culturemachine.net/vol-18-the-nature-of-data-centers/emplacing-data/> (accessed 18.05.2020).
28. Maguire J., Winthereik B.R. Digitalising the State Data Centres and the Power of Exchange. *Ethnos. Journal of Anthropology*, 2019. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00141844.2019.1660391?journalCode=retn20>
29. Saunavaara J. Connecting the Arctic While Installing Submarine Data Cables Between East Asia, North America and Europe. In: K. Hossain, M. Salminen, G.P. Zojer (eds.). *Digitalisation and Human Security – A Multi-Disciplinary Approach to Cybersecurity in the European High North*. Cham: Macmillan, 2020, pp. 205–227.
30. Baudry K. Data center site search and selection. In: H. Geng, ed. *Data Center Handbook*. New Jersey: Wiley, 2015, pp. 89–102.
31. Santhanam A., Keller C. Green data centers: The Role of Data Centers in Advancing Green IT: A Literature Review. *Journal of Soft Computing and Decision Support system*, 2018, vol. 5(1), pp. 9–26.
32. Hedwig M., Malkowski S., Neumann D. Taming energy Costs of Large Enterprise Systems through adaptive Provisioning. *ICIS 2009 Proceedings*, 2009, Paper 140.