* 1. **データセンターと電力網との相互作用**
     1. ***データセンターと電力網の接続に遅延のリスクはありますか。***

データセンターの容量の世界的な拡大は、特に需要の増加が集中している地域で、グリッド接続の遅延によるリスクに直面しています。多くの主要地域(表2.4)では、新しいデータセンターの接続待ち行列がすでに長くなっている可能性があります。近年、いくつかの管轄区域では、システムオペレーターが接続要求のバックログを処理し、追加の接続に対応するためのグリッドの容量を評価する間、新しいデータセンターのモラトリアムが置かれています。

**第2章|**Alのエネルギー

**93**

グラフ, 折れ線グラフ

AI 生成コンテンツは誤りを含む可能性があります。グラフ, 棒グラフ

AI 生成コンテンツは誤りを含む可能性があります。

表2.4>選択された管轄区域で報告された新しいデータセンターの接続キュー

|  |
| --- |
| **管轄区域** **キュー内の平均時間I** |
| 米国 1~3年  ノースバージニア (米国) 最長7年  カリフォルニア (米国) 3年  ドイツ 最長7年  イギリス 5~7年  オランダ 10年まで  関東 (日本) 5年以上  マレーシア 3年未満  クイーンズランド (オーストラリア) 2年以上  イタリア 3年未満  スペイン 3-5年  アイルランド ダブリン2030年まで休止 |

出典:energy.gov (米国)、datacenterdynamics.com (バージニア、オランダ、英国)、electricalreview.co.uk (ドイツ)、businesspost.ie (アイルランド)、IEA調査結果(オーストラリア、イタリア、日本、マレーシア、スペイン)に基づくIEA分析。

**図2.25>主要市場における送電網の輻輳コストと輻輳量、2019-2023年**

輻輳コスト

**輻輳量**

7)

X  
CD

3

2

2019 2021 2023 2019 2021 2023

—米国 PJM (米国) —ドイツ

イギリス ^^—オランダ

Iea。cc by 4.0。

天然ガス価格の下落により、渋滞コストは低下しているが、  
渋滞量は増加を続けている

注:PJMは、渋滞コストが近年全国平均よりも高い傾向にある米国東海岸の送電地域機関である。米国とオランダの渋滞量は入手できない。

出典:IEA analysis based on Grid Strategies Transmission Congestion Report (for United States and PJM) Grid Strategies (2024);German Federal Network Agency Monitoring Reports (German) Bundesnetzagentur (2025);National Energy System Operator, Daily Balancing Servicesシステムの使用 (BSUoS) コストデータと制約の内訳 (英国) NESO (n.d.);Tennet Annual Market Update 2023 (オランダ) Tennet (2024) 。

**94**

国際エネルギー機関|**Energy and Al**

グラフ, 折れ線グラフ

AI 生成コンテンツは誤りを含む可能性があります。グラフィカル ユーザー インターフェイス, アプリケーション, Teams

AI 生成コンテンツは誤りを含む可能性があります。

グリッド接続申請をより迅速に処理することで、待ち時間を短縮できます。ただし、問題は官僚的なものだけではありません。電力網が混雑していると、優先的な申請でさえ承認されません。図2.25に示すように、多くの国でグリッドの混雑が悪化しています。ドイツ、米国、英国では、2019年から2022年の間に輻輳管理コストが三倍になった。オランダでは、同時期にコストが六倍に増加した。2023年には、天然ガスが安くなったため、輻輳コストが減少した。しかし、ドイツと英国のデータによると、物理的なグリッドの輻輳量は年々増加し続けており、既存のインフラへの圧力が高まっていることが明らかになっている。

グリッドの輻輳は依然として大きな課題であるが、接続アプリケーションを妨げるボトルネックはそれだけではない。最適でない接続およびキュー管理プロセスは、遅延の大きな原因となっている。たとえば、英国の膨大な接続キューには、進行していない多数の発電プロジェクトが含まれており、キュー管理の改革が求められている。さらに、システムオペレーターには十分なリソースが不足していることが多く、業界は接続を提供する熟練労働者の不足に直面している。

**図2.26>変圧器のバックログ、変圧器の価格指数、およびグリッドインフラのリードタイムの変化**

**変圧器の未処理分と物価指数の推移** **グリッドインフラストラクチャのリードタイム** (年)

8

**r\i**

1.0 01  
X  
CD

0.5

0.0

2

0.5

2020 2021 2022 2023 2024

受注残

分布

伝送

物価指数 (右軸) ■先進国新興国

Iea。4.0年までにcc。

設備の電力網のサプライチェーンは緊張の兆しを見せています。  
送電のラインは、建設に3年から6年、あるいはそれ以上かかることがあります。

送電網の混雑緩和は、送電の新規プロジェクトのリードタイムが長いことが課題となっています。送電の新しいラインの建設には、先進国では4~8年、新興国では2~4年かかる可能性があります。これは許認可や建設だけの問題ではない。設備の送電網のサプライチェーンにも緊張が見られる。変圧器の受注残は、2年間で15%を超えた後、2024年には30%以上増加した。これを反映して、電力用変圧器の価格指数は2020年から1.5倍に上昇している。

**第2章|**Alのためのエネルギー

**95**

グラフ, ウォーターフォール図

AI 生成コンテンツは誤りを含む可能性があります。

(図2.26) 。第5章では、グリッドインフラに対するサプライチェーンのセキュリティへの影響について詳しく見ていく。

データセンターが接続遅延に直面する可能性がある範囲を理解するために、現在の混雑レベル、グリッドポリシー、および接続スケジュールを調査した。今後のデータセンターの場所ごとの分析に基づいて、グリッドへの接続が遅延する可能性のあるデータセンターの数について、さまざまなシナリオを作成した。分析の結果、グリッドの制約により、2030年までに建設が予定されている世界のデータセンター容量の約20%が遅延する可能性があることが明らかになった。これは、データセンターがタイムリーにオンラインになり、電力システムがこの点で重大なボトルネックを発生させないようにするために何ができるかという問題を提起します。

図2.27>基本ケースにおけるグローバルデータセンターの容量追加と、グリッドの制約による接続遅延のリスクがある容量、2025-2030

90

60

30

2025

2026

2027

2028

2029

2030

Iea。cc by 4.0。

ベースケースでの構築

のリスクがある  
接続遅延

^120  
CD

*ベースケースでのグローバルデータセンター構築の約1/5*  
*グリッドのボトルネックによる遅延のリスクがある*

* + 1. ***データセンターのロケーションの柔軟性***

グリッドの制約を回避するための重要な選択肢の1つは、十分なグリッドと発電の容量がある場所にデータセンターを配置することです。しかし、これまでデータセンターの設置で見られた主な傾向は、必要なインフラ、政策枠組み、労働力がある市場周辺や地域内にデータセンターを配置することでした。その結果、ギガワット規模のクラスターが北米、ヨーロッパ、アジア太平洋の特定の地域に出現し、場合によってはグリッドの混雑の問題を引き起こしています。アベイラビリティの電力と価格の上昇に対する懸念から、電力会社や政策立案者は開発の一時的なモラトリアムを検討するようになり、アムステルダム、ダブリン、カリフォルニアのサンタクララ、シンガポールなどの都市で実施された顕著な例があります。

**96**

国際エネルギー機関|**エネルギーとアル**

グラフ, 折れ線グラフ

AI 生成コンテンツは誤りを含む可能性があります。

主な立地条件はデータセンターの種類によって異なりますが、一般的な基準は、信頼性の高い電源、競争力のある電力価格、十分な接続容量と土地へのアクセス、コアブロードバンド・送電・ネットワークへのアクセス、熟練した建設および運用要員、および好ましい政策枠組みです。データ主権も重要な考慮事項です。確立されたデータセンター市場の飽和により、開発は新しい地域にシフトしています。立地条件の考慮事項は、データセンターのワークロードの種類によっても異なります。Alトレーニングやある種の推論は、従来のワークロードに比べてレイテンシの影響を受けにくいため、グリッドや発電容量へのアクセスが良い場所にデータセンターを設置できる可能性がありますが、必ずしもデータセンターユーザーの近くにあるとは限りません。

しかし、上位市場の繁栄を可能にした既存のインフラストラクチャ、ポリシーフレームワーク、人材プールは、開発を引き寄せる勢いを生み出し、サポートインフラの拡張への投資を正当化し続けています。その結果、世界で開発中のデータセンター容量の15%以上が、設置容量で上位10のデータセンター市場に含まれており、これらのハブが引き続き魅力的であることを示しています (図2.28) 。特にバージニア州北部は、これらの要因の収束がデータセンター開発のブームにつながることを示しています(ボックス2.8)。

図2.28>設置容量と開発中容量の割合による上位のデータセンター市場、2024

6%

4 ....

2 ....

O

CD o

00

O 00 ra

00

0)

o o

■インストール済み

ro

'a)  
cP'a)

^8  
co

6

時代

• 開発中の容量のシェア (右軸)

Iea。cc by 4.0。

*発表されたプロジェクトのパイプライン*に基づくと、開発中の世界のデータセンター容量の15%が  
*設備容量の大きい上位10市場に集中しています*。

3%

注:珠江デルタは、中国の広州、深セン、香港を合わせた容量を含んでいます。ここで取り上げた地域は、世界の10大クラスターを表している。開発中の容量は、公表されているプロジェクトに基づいている。

出典:OMDIA (2025) のデータに基づくIEAの分析。

**第2章|**Alのためのエネルギー

**97**

グラフ

AI 生成コンテンツは誤りを含む可能性があります。

米国ではデータセンターの立地が変化していることを示す証拠がいくつかあるが、開発中の容量の大部分は既存のハブに集中している (図2.29) 。ネバダ州のラスベガスとテキサス州のエルパソは、この新たな傾向の例である。これらの拠点を合わせると、現在の設備容量は500 MWに満たない。しかし、開発業者は、手頃な価格の土地、安価な自然エネルギー、データセンター開発に対する税制上の優遇措置を理由に、両拠点で大規模な開発を発表している。それにもかかわらず、米国で開発中の容量の半分は、1 GW以上の設備容量を持つ市場に建設されている。

図2.29 oデータセンターハブの設備容量別および設備容量別  
米国本土における開発、2024年

デモイン

■ 既存のクラスタ■発表されたプロジェクトの現在のパイプラインに基づく将来のクラスタ

Iea。4.0年までにcc。

アトランタ

北バージニア

チカ  
0

ダラス

ソルトレイクシティ**4**

+.San  
.Jose\*

•-Phoenix

**•**

**クラスタIT**  
**需要 (GW)**  
^^12  
(4

0.5

データセンターの開発は新しい場所に拡大しているが、米国で開発中の容量の約50%は導入容量が1 GWを超える市場にある

注:データセンタークラスターは、相互に100 km以内に位置するデータセンターのグループと定義しています。最大の10のクラスターに名前が付けられています。500 MWを超える将来のクラスターのみが表示されています。

出典:OMDIA (2025) のデータに基づくIEAの分析。

逆に、飽和状態にある市場での需要の増加は、発電と送電の容量拡大への投資を正当化する理由として挙げられている。急速な成長予測に対応するために、この容量を迅速に構築することは課題となっている。電力会社は、サービス提供地域内の需要を満たす義務があるが、要請があれば直ちにサービスを提供する必要はなく、発電と送電で十分な容量が利用可能になるまで、データセンターのグリッド接続を遅らせる可能性がある。

**98**

国際エネルギー機関|**Energy and Al**

マップ

AI 生成コンテンツは誤りを含む可能性があります。

**ボックス2.8** **o**

**なぜバージニア州北部がデータセンター市場を支配しているのか?**

ワシントンDC都市圏にあるバージニア州北部のラウドン郡とプリンスウィリアム郡は、合わせて5 GW以上の設備容量と3 GW以上の開発中の設備容量を有し、世界最大かつ最も急速に成長しているデータセンター市場です。この地域の設備容量(マグナム・エコノミクス、2024)は、過去10年間で500%以上増加しています。

この地域の成長は、データセンター市場の動きの速さを示す最近の出来事です。この地域が設備容量でトップの市場になったのは2016年のことで、設備容量は毎年20%の成長を続けています(マグナム・エコノミクス、2024)。この地域は、インターネット開発の初期段階で中心的な役割を果たしたことで、主要なデータセンターハブとして先行していましたが、その成長は、この地域の良好な政策環境、手頃な価格の電力、高度なスキルを持つ労働力に大きく起因しています。

北バージニアは、1990年代にインターネットが商業化された際に、最初の四つのネットワークアクセスポイントの一つとして選ばれたことで、光ファイバーバックボーンネットワークの主要な交差点となりました。2009年に10億ドルのデータセンタープロジェクトが隣国のノースキャロライナに奪われた後、バージニア州はデータセンター設備の販売と使用に対する免税措置を大幅に拡大し、バージニア州議会は最近、これらの優遇措置を2035年まで延長しました。電力会社の積極的な容量計画と連携した地方自治体の承認プロセスの合理化は、セクターの成長に対応するのに役立っている(JLARC, 2024)。

データセンターの長期的なPPAは、州内の6 GW以上の太陽光発電容量の構築を支援しており、その需要の増加は、米国最大の洋上風力プロジェクトであるコーストバージニア洋上風力プロジェクトの開発の背後にある重要な動機として挙げられている。データセンターの集中度の高さは、データセンターの建設と運用に関する専門知識を持つ高度に熟練した労働力の育成にも役立っている。世界で最もランクの高い大学の多くを含む500以上の大学が中部大西洋地域にあるため、データセンターの運営者と学術機関の間で、奨学金を提供したり、データセンターの運用のニーズの変化に合わせて学術カリキュラムを調整したりするための地域協力が生まれている。

データセンターが提供する雇用と税収は、一般に地域社会にプラスの純効果をもたらしますが、データセンターは周辺環境に大きな影響を与える可能性のある大規模な産業施設であり、視覚的な影響による資産価値の低下や、冷却装置やバックアップ発電機からの絶え間ない騒音に対する懸念から、さらなる開発に対する国民の反対が高まっています。

**第2章|**Alのためのエネルギー

**99**

* + 1. ***データセンターの運用の柔軟性***

データセンターは、エネルギーシステムの主要なプレーヤーとして台頭してきています。米国では、  
データセンターの建設規模が最も大きい国では、システム全体のピーク電力に占めるデータセンターの割合が  
需要は現在の6%から2030年までに13%に増加するとされています。データセンターがより大きな役割を担うようになると  
電力システムの役割を果たし、スマートな統合を確保することが重要になります。  
グリッドの安定性と継続的な展開をサポートします。

容量に制約のある地域では、接続待ち行列が原因でデータセンターの運営者は  
グリッドアクセスのリードタイムを短縮するための柔軟性対策を検討しています。グリッドの輻輳または  
発電能力の不足は新しい負荷の追加を制限しますが、そのような制約は  
通常、毎年限られた時間帯に発生します。この文脈では、電力システム  
の柔軟性は、増加する需要に対応し、ますます変化する需要を統合するために重要になります。  
供給源と需要源。このセクションでは、次のような柔軟性の貢献に焦点を当てます。  
蓄電から電力システムの柔軟性を高めるためのより広範な取り組みの中でのデータセンター。  
他の種類の需要応答、グリッド、およびディスパッチ可能なリソース。

**図2.30>2035年へのデータセンター容量の追加と実現可能な統合**  
**異なる柔軟性の下で現在の電力システムに**

**^!°°** **実現可能な追加**

**の柔軟性を備えています。**

■ 0.1%

■ 0.5%

■ 1%

ild.il

ベースケースの追加  
から2035

米国 欧州連合 中国

Iea。cc by 4.0。

現在の電力システムは、すべてのデータセンターの追加を2035に統合することができます。  
バックアップのアクティブ化とワークロード管理により、グリッド需要が時間の1%削減されます。

Note:容量の追加は、10年間の気象条件の上位100時間として測定されるシステムのピーク需要が増加しない場合に実行可能と見なされます。ベースケースの追加には、コロケーション、サービスプロバイダ、ハイパースケールデータセンターが含まれます。

私たちの分析では、データセンターが時間の0.1-1%の柔軟性を持つ場合、現在の電力システムには、すべての新しいデータセンター容量を2035に統合するのに十分な余裕があることがわかりました (図2.30) 。米国では、オペレーターがグリッド需要を時間の1%削減するだけで、最大70 GWの新しいデータセンター容量を現在のシステムに統合できます。これは、ベースケースのすべてのコロケーション、サービスプロバイダ、ハイパースケールの追加をカバーするのに十分です。

**100**

国際エネルギー機関|**Energy and Al**

中国では、データセンターの追加が既存のシステム容量内に収まるようにするには、時間の0.2%の柔軟性を持つ必要があります。これは、年間平均20時間に相当します3。他の研究では、既存の電力システムにも同様の余裕があり、柔軟性率は1%を下回っています(Nicholas Institute for Energy, Environment&Sustainability、2025年)。

こうした電力網への負荷は短時間で、平均して3~5時間続く。これは既存のピーク時と一致しており、通常は地域の熱波や寒波によって、夕方や日中の数時間に発生する。このような電力システムへの負荷が発生しても、グリッドはデータセンターにある程度の電力を供給することができる。電力網への負荷が発生している時間の80%では、データセンターへの通常の電力供給の半分以上が利用可能である。これらの時間の50%では、グリッド容量の約4/5が利用可能である。つまり、データセンターが年間の1%の時間を柔軟に利用できるとしても、グリッドの総電力消費量の0.3%のみを積極的に管理する必要がある。

毎年限られた時間だけ必要とされるが、この程度の柔軟性を提供するには、現在大規模に開発されていないソリューションが必要である。これには、オンサイト発電の利用率の向上、バッテリーの追加設置、計算ワークロードの管理などが含まれる。

この文脈において、データセンターの柔軟性の可能性を理解することにますます注目が集まっている。2024年、電力研究所は大規模な柔軟性ハブを開発するDCFlexイニシアティブを立ち上げ、データセンターの革新的なグリッド統合戦略を実証した。このイニシアチブは、電力会社、データセンター運営者、政策立案者の間の戦略的な協力を促進する。米エネルギー省は同年、データセンターの電力供給に関する勧告を発表し、柔軟性のあるタクソノミーとフレームワークの開発を提唱した。このタクソノミーとフレームワークは、より柔軟な運用を促進する可能性のある財政的インセンティブと政策変更を検討するためのものだ。欧州連合では、データセンターは建物のエネルギー性能指令の対象となっており、ビルのオートメーションと制御システムの設置を義務付けている。この要件は、グリッドの互換性を高め、データセンターが外部のグリッド信号によりよく対応できるようにし、柔軟性市場をサポートすることを目的としている。

データセンターの柔軟性を向上させるための戦略はいくつかある(表2.5)。これらの中には追加投資を必要とするものもあるが、最近の調査によると、大部分のハイパースケーラーとデータセンター開発者は、グリッド容量に迅速にアクセスできるのであれば、より多くのコストを支払っても構わないと考えている。

オンサイトのバッテリーは、ストレスイベントの持続時間が短いことを考えると、適切な柔軟性オプションである。バッテリーはデータセンターの全容量と一致する必要はない;ほとんどのストレス時間では、グリッド容量の半分以上が施設で利用可能なままである。バッテリーコストと円滑なグリッド接続の間のトレードオフは、バッテリーが電力市場の裁定取引のためにも動作する場合に改善される可能性がある。しかし、開発者は次のように述べています。

3この分析は、中期的な成長に対応するためにグリッドの強化や新しいピーク容量が不要であることを意味するのではなく、柔軟な負荷が既存の潜在能力を活用し、接続時間を短縮する方法を示しています。

**第2章|**Alのためのエネルギー

**101**

柔軟性サービスは、全体的な運用コストと比較して控えめです (ただし、より高速なグリッドアクセスは高い機会コストを回避するのに役立ちます) 。

表2.5>データセンターの柔軟性のオプション

|  |
| --- |
| **カテゴリ** **説明** **オンサイト** |
| オンサイト ピーク時のエネルギー供給のバランス調整•Googleがオンサイトに設置したバッテリー  バッテリ 需要とバックアップ電力の提供 データセンターキャンパスで (2.75 MW/5.5 MWh)  をデータセンターに。バッテリーはまた、 ベルギーで。  グリッドの安定性に貢献します。 .ダブにあるマイクロソフトのデータセンターは、  バックアップ電源を提供し、グリッド周波数のバランスを支援するために、無停電電源システムの一部としてバッテリーを採用しています。  バックアップ グリッド中にバックアップ発電機を実行しています。•Enchanted Rockは天然ガス  発電 カリフォルニア州のMicrosoftデータセンターのプラントへの依存度を減らすためのストレスイベント。  • American Electric Powerは、Bloom Energyの固体酸化物燃料電池を最大1 GW購入する契約を締結しました。\*  冷却 冷却需要を一時的に調整する•リールのCIVフランスは50 m3の氷蓄熱を利用しています。  使用を含むエネルギー使用の最適化 システムは、700 kWのチラーに相当します。  熱容量のなどの「コールドバッテリー」 30分間の運転の。  ストレージ。 eザ・タイド!インドの公園施設では、氷を採用しています。  冷却需要を管理するためのエネルギー貯蔵をベースにした  ワークロード 計算タスクを時間にシフトする•Googleは「カーボンアウェア」を導入しました。  一時的な より低いグリッド需要または ワークロードを時間にシフトするスケジューリングシステム  管理 再生可能な発電・アベイラビリティ。 再生可能エネルギーが豊富な場合。  ワークロード 間でのコンピューティングタスクの移動 • Googleは動的にプログラムを試験的に実施しています。  空間 地理的に分散したデータセンター ワークロードをよりクリーンな場所にシフト  管理 エネルギーコストを最適化するために、アベイラビリティ エネルギー源。  と持続可能性。 |

\* このユースケースでは、燃料電池を電源として購入し、ベース需要として実行します。他の燃料電池構成は柔軟性を提供することができます。

Note:GW=ギガワット;kW=キロワット;MW=メガワット;MWh=メガワット時;m3=立方メートル。

バックアップ発電は通常、グリッドの停止をカバーするためにすでに設置されています。柔軟性のために利用される場合、ランタイムは増加し、データセンターはバイオ燃料、天然ガス、再生可能ガスなどの低排出燃料、または燃料電池などの低排出技術を優先する必要があります。しかし、そのためには燃料アベイラビリティと貯蔵に関連する複雑な課題に対処する必要があります。バックアップ発電機は便利な柔軟性ソリューションを提供する可能性がありますが、発電所として機能するように設計されておらず、通常は騒音や大気汚染に関する規制の対象となります。現時点では、データセンターの柔軟性を向上させるためのバックアップ電源の範囲は限られている可能性があります。

冷却は、データセンターの需要の10%から30%を占めています。数時間の容量を持つ熱容量のストレージと組み合わせることで、データセンターは冷却のためのリアルタイム消費を削減し、オフピーク時間にシフトすることができます。

**102**

国際エネルギー機関|**エネルギーとAl**

さらに、ワークロードを時間の経過とともにデータセンター間でシフトすることができます。仮想化により、グリッドの状態に基づいてスケジュールを設定し、混雑の少ない時間や場所を優先することができます。この柔軟性は、遅延に影響されないAlトレーニングや一部の種類のAl推論に特に役立ちます。ただし、このようなスケジュール設定では、GPU使用率を最大化するという財務目標とのバランスを取る必要があります(ボックス2.9)。この柔軟性オプションは、すべてのデータセンターに同じように適用されるわけではありません。サードパーティアプリケーションをホストしているデータセンターでは、ワークロードの制御が低くなります。

このようなワークロード管理戦略はまだ初期段階にあるが、業界には類似のプラクティスの経験がある。たとえば、使用率が低い場合、Microsoft、Amazon、Googleは、予告なしに中断できる柔軟性と引き換えに、最大90%の割引で予備容量を提供している。ヨーロッパのデータセンター間でワークロードをシフトすると、ビデオ通話の遅延が10%増加するだけで、ほとんどのアプリケーション(ケリー他、2016)には無視できる影響です。さらに、研究によると、ワークロードの30~50%は遅延耐性があり、Alのトレーニングと推論の導入によってこの数字は増加する可能性があります(BNEF、2021)。

**図2.31>データセンターの技術的な日常的な柔軟性の可能性、2030年と2035年**

2030

2035

30

20

10

EMDE

EMDE

冷却

ワークロードシフト:

加速

従来型

*データセンターは、次の組み合わせによって2035年までに最大50 GWの柔軟な容量を提供できます。*  
*冷却需要管理による空間的・時間的ワークロードのシフト*

先進国中国

経済その他

先進中国その他

経済

Iea。cc by 4.0。

Note:EMDE=emerging market and developing economies。

将来的には、ピークシェービングサービスの提供に加えて、データセンターは、例えば可変再生可能エネルギーの統合をサポートする柔軟性サービスをより頻繁に提供できるようになるかもしれません。私たちの分析では、2035年までに約50 GWのデータセンター容量が柔軟性を持つ可能性があることがわかりました。これは、高速化されたワークロードの25%が日々の需要ピーク時に空間的または時間的にシフトされ、従来のワークロードの10%がシフトされると仮定した場合です (図2.31) 。柔軟性のある容量の1/3は、高速化されたサーバー上でのワークロードのスケジューリングから得られるものです。冷却は約25 GWの柔軟性に貢献します。

**第2章|**Alのためのエネルギー

**103**

グラフ, 棒グラフ

AI 生成コンテンツは誤りを含む可能性があります。

PUE比率が向上するにつれて、その割合は時間の経過とともに減少していく。2030年の先進国では、データセンターの柔軟性の可能性は、電気自動車フリートの需要の平均充電量に相当する。データセンターの柔軟性を奨励することは、システムセキュリティと再生可能エネルギー統合の両方に貢献する可能性がある。

政策立案者は、柔軟性を奨励するための革新的なフレームワークを開発する必要がある。データセンター開発者にとってこれらの戦略の価値は、より迅速に容量にアクセスできることにあるが、柔軟性プログラムに参加するためには、関与に関する明確なルールが必要である。データセンターの柔軟性をさらに発展させるには、グリッドオペレーターとデータセンターの間のより強力な統合が必要である。これには、今後のストレスイベントに関する早期のコミュニケーションや、特にAlトレーニングのようなタスクに関する事前のワークロードプランニングが含まれる。データセンターの柔軟性を高めるためのプレイブックを開発するには、データセンターが直面する経済的、運用的、契約上の制約をよりよく理解する必要がある(ボックス2.9)。

**Box 2.9** **o高速化されたサーバーの柔軟性にはどのくらいのコストがかかりますか?**

Alワークロードは、従来のワークロードほど遅延の問題による制約を受けない可能性があり、一部のAlワークロードは事前にスケジュールできます(例えばAlトレーニング)。ただし、これらは非常に資本集約的な高速化されたサーバーで実行されます。投資コストは30 000米ドル/kWに達する可能性があり、アルミニウム精錬所の約10倍、エアコンの約50倍になります。そのため、データセンターの運用者は、サーバの使用率を最大化し、可能な限りフル稼働に近い状態でサーバを稼働させるようになります。この状況では、ワークロードを削減すると全体的な使用率が低下するため、機会費用が発生します。

高速化されたサーバの使用率は従来のサーバよりもはるかに高く、約90%に達しますが、一部の容量は未使用のままです。空き容量がすでに存在する場合は、ヘッドルームによって、追加の機会費用なしで時間と空間にワークロードを再配分する機会が得られます。ただし、柔軟性サービスを提供するために高速化されたサーバの容量を過剰に構築すると、追加コストが高くなります。高速化されたサーバのコストが高いことを考えると、データセンターの容量を過剰に構築し、ワークロードを再スケジュールすると、シフトされたエネルギー消費量あたり約700ドル/MWhの追加コストが発生すると推定されます (図2.32) 。

このコストは、毎日の電力市場の裁定取引では法外ですが、特定の市場における特定の柔軟性イベントの経済性と一致しています。たとえば、テキサス州では、過去七年間のいずれかの時点で常に700ドル/MWhを超えており、ほとんどの年でこの閾値を50時間以上上回っています。

同様の柔軟性イベント (年間約50時間の稼働) 用に設計されたバッテリーストレージへの同等の投資では、シフトされたエネルギーの設備あたり同様の資本コストが発生します。ただし、バッテリーは通常、太陽光発電の発電パターンに合わせるなど、より頻繁にサイクルされます。年間約300サイクルと仮定すると、MWhあたりの有効コストは100米ドル未満になります。

**104**

国際エネルギー機関|**Energy and Al**

理論的な経済的観点からは、データセンターの運用の柔軟性の実現可能性は、非常に資本集約的な設備の利用パターンを変更するための実際の機会コストに依存します。ただし、予測できないが既に契約済みのワークロードのために容量を予約する必要があるなど、運用上および契約上の制約があります。

図2.32>テキサス州の選択されたテクノロジーと電力価格の柔軟性のアクティブ化コスト

柔軟性のアクティブ化コスト

テキサス州で最も高い時間当たりの電力価格50

800

10 000

IEA。ccを4.0にします。

400

200

7 500

5 000

2 500

00

低高低高  
高速化されたサーバーバッテリ

機会コストサイクル数

高速化されたサーバーワークロードの移行は、コストがかからない場合から発生する場合まであります。  
特定の市場における固定性イベントに匹敵する高い機会費用

注:高速化されたサーバーの低い機会費用と高い機会費用は、それぞれ予備容量と十分なヘッドルームを作成するための追加投資の必要性を反映しています。バッテリの低コストと高いコストは、それぞれ年間300サイクルと50サイクルで計算されます。電気料金はテキサス州、ヒューストン地域のものです。

* + 1. ***電力システムオペレーターおよびプランナーとの相互作用の最適化***

前述したように、一部の地域における輻輳と長い接続待ち行列を緩和するには、データセンターとシステムオペレーターの相互作用を理解する必要があります。データセンターは、グリッド接続アプリケーションから開始して、展開と運用を通じてシステムオペレーターおよびプランナーと連携します。グリッドオペレーターの主な考慮事項には、インフラストラクチャアップグレードコストの回収と割り当てが含まれます。運用が開始されると、データセンターとグリッドの相互作用と、その安定性への潜在的な影響が重要になります (Box 2.10) 。

*グリッド接続アプリケーションと待機キュー*

接続パイプラインを明確にすることで、グリッド接続キューの待機時間を短縮できるソリューションがいくつかあります。接続タイムラインが不確実な中、一部のデータセンターは重複した投機的な接続要求を送信し、人為的にキューの長さを増やしています。この状況は、グリッド容量の不足と明確な不足によって悪化しています。

**第2章|**Alのためのエネルギー

**105**

グラフ, 棒グラフ, ウォーターフォール図

AI 生成コンテンツは誤りを含む可能性があります。

再生可能エネルギーやバッテリーなど、他のさまざまなプロジェクトからの接続要求が増加しているときに、接続タイムライン。

一部の地域では、データセンター接続の待機期間が10年にも及んでいます。実現可能なプロジェクトは結果として遅延するリスクがありますが、グリッドオペレーターは、実現しない可能性のあるプロジェクトのために容量を過剰に構築するリスクもあります。より強力な検証要件、マイルストーンに基づく進行システム、改善されたアプリケーション追跡を導入することで、オペレーターは重複を特定することができます。このアプローチにより、計画立案者は真の需要をより正確に評価することができ、現実的なニーズを大幅に上回る理論上のピーク負荷に対応するための建設圧力を軽減することができる。より実質的なコミットメントの証拠を要求することで、事業者は実際の成長パターンと適切に整合する、より効率的な接続パイプラインを確立することができる。構造化された容量コミットメントの枠組みは、データセンタープロジェクトと電力会社との間の長期契約、契約容量の最低割合に対する支払い、および財務保証を要求することによって、これを達成することができる。契約には、段階的な容量の増加、コスト回収メカニズム、早期終了または大幅な容量削減(アメリカン・エレクトリック・パワー社、2025年)に対するペナルティに関する規定を含めることができる。

送電システム事業者はまた、送電網の混雑がない地域にデータセンターを建設することを奨励するインセンティブ構造を実装することによって、限られた送電網容量による大きな接続待ち行列の問題を緩和することができる。送電網事業者と潜在的な顧客との間の透明性は、送電網の最適化において重要な役割を果たす。例えば、大規模な負荷に対する送電回線のホスティング容量を視覚化し、最適な接続ポイントを特定するためのマップを提供する。データセンターの場所の最適化については、セクション2.6.2で説明する。

系統計画担当者は、需要の包括的な電力予測に基づく送電網投資を計画している。接続待ち行列にあるさまざまなデータセンタープロジェクトが、投機的で重複した申請のために実現しない場合、計画担当者は需要を過大評価し、容量を過剰に構築して追加コストを負担するリスクがある。欧州連合エネルギー規制協力機関(ACER、2024)は、2024年のモニタリングレポートで、一般的なケースで需要を10%過大評価すると、送電網の総コストが10%上昇すると報告している。同時に、こうしたコストは場所特有のものである可能性が高い。予測されていた需要のデータセンターが実現しなかった場合、こうしたグリッド投資のコストとリスクは、他の料金支払者にも波及することが多い。これらのコストの管理方法は、低所得世帯に偏った影響を与える住民や中小企業を含む地域のすべての顧客の電力会社請求書の増加によってコストが回収される場合、分配に影響を与える可能性がある。

通常、送電 系統運用者がデータセンターをグリッドに接続する場合、データセンターは接続を行うための高圧回線の料金を支払う。電力需要の増加に対応するために、より広範なグリッド内でインフラのアップグレードが必要になった場合、西ヨーロッパと米国のグリッド運用者は通常、すべての顧客に適用される電力料金によってこれらのコストを回収する(ENTSO-E、2022;CRS, 2023)。しかし、米国の規制当局は、アップグレードコストの多くをデータセンターが直接負担する方向にシフトしている(ユーティリティダイブ2024)。容量要求が受け入れられると、その容量は契約上顧客のために予約され、

**106**

国際エネルギー機関|**Energy and Al**

は、未使用であっても新しい顧客に販売することはできません(Mytton他、2023年)。グリッド容量が限られている地域では、データセンター用の未使用の予約電力が他のプロジェクトへのアベイラビリティの使用を制限し、接続待ち時間が長くなる可能性があります。

**Box 2.10>運用中のデータセンターがグリッドに及ぼす潜在的な技術的影響**

データセンターがグリッドの電力品質に影響を与える可能性があるという報告があります。電力研究所が実施した調査によると、主に北米の電力会社は、既存のデータセンター(2024年EPRI)からの運用上の影響を経験しています。回答者23人のうち、報告された問題には、熱容量の違反 (22%)、電圧違反 (17%)、高調波の懸念 (9%)、事故のライドスルー問題 (9%)、ランプレートの問題 (26%)、強制発振を引き起こす急激な変動 (4%) などがありました。2つの電力会社は、高調波の懸念、熱容量のの違反、電圧違反、ランプレートの問題を経験したと報告しており、他の2つは熱容量のの違反と電圧違反の両方を報告しています。データセンターが高調波歪みに関連している可能性があるという現象は、他のさまざまな情報源(ブルームバーグ、2024年)でも言及されています。

上記の影響に加えて、データセンターの需要損失の可能性は、特にデータセンターの電力容量が大きくなるにつれて、電力グリッドのオペレータとプランナにとって課題となる可能性があります。電力グリッドが乱れると、データセンターがバックアップ電源(例えば無停電電源装置の採用)に切り替えるようになり、グリッドから大量の需要が失われる可能性があります。これにより、グリッドの電圧または周波数が変化する可能性があり、複数のデータセンターが同時に需要をシフトすると、さらに悪化する可能性があります。これにより、基本的に短いフィードバックループが開始され、グリッドの障害がデータセンターからの反応を促し、その結果、別のグリッドの障害が発生します。インシデントレビューでは、North American Electric Reliability Corporationが、東部相互接続(NERC、2025)の送電線で事故が発生した後にデータセンターの需要が同時に失われた影響を報告しています。

大規模なデータセンター負荷の再接続は、制御された方法で管理されていない場合、システムの安定性に潜在的なリスクをもたらします。需要のランプレートは発電のランプレートと同様に重要であるため、バランシング当局と送電のシステムオペレータは、これらの再接続中にシステムバランスを維持する上で大きな課題に直面しています。データセンター負荷の電圧ライドスルー特性に関連する信頼性リスクは特に重要ですが、これはデータセンターに固有のものではなく、他の大規模な負荷にも関連します。

Alワークロードは、トレーニングと推論という異なる運用段階で異なる特性を持つため、電力網オペレータに固有の課題をもたらす可能性があります。トレーニングでは高いGPU使用率が要求されるため、データロード、前処理、チェックポイント処理による定期的なサージとディップにより、持続的な高電力消費が発生します。推論は、一般的には電力消費が少ないものの、ユーザーの操作や外部イベントに基づいて需要が急激に変動する可能性があります。オンサイトでの電力平滑化技術の導入は、これらの課題に対処するための適切なオプションです(Li他、2024年)。