

AI の興隆：エネルギーと経済への影響に関する現実を 検証する

マーク・P・ミルズ

National Center for Energy Analytics

2025.11.13

監訳 キヤノングローバル戦略研究所 研究主幹 杉山大志 訳 木村史子

本稿はマーク・P・ミルズ

The Rise of AI: A Reality Check on Energy and Economic Impacts

<https://energyanalytics.org/the-rise-of-ai-a-reality-check-on-energy-and-economic-impacts/>

を許可を得て邦訳したものである。

エグゼクティブサマリー

民間セクターによる人工知能（AI）への総支出は、現在、米国 GDP の相当な割合を占めている。データセンターの建設費だけでも年間 500 億ドルを超え今後も増加傾向にあり、他の全ての商業ビル建設費の合計をすでに上回っている。

米国経済における構造的転換の兆候は、AI への前例のない大規模投資、AI ツールの急速な普及、国家安全保障への潜在的影響、社会における AI の影響をめぐる活発な議論、そして株式市場の高揚感といった要素が複合的に表れていることから見て取れる。

AI の大規模導入がもたらす影響の核心は、生産性向上である。生産性こそが、あらゆる経済において成長と繁栄を牽引する要素であるからだ。AI の民主化が米国の生産性成長を過去半世紀の平均水準まで引き上げるだけでも、今後 10 年間で現在の予測値より累積 10 兆ドル多く米国 GDP を押し上げるだろう。

AI 予測でしばしば見落とされる点だが、新技術の利用によって生み出される富の増加は、より多くのエネルギーを消費する行動につながる。追加発生する 10 兆ドルは、今後 10 年間で約 50 億バレル相当のエネルギー増加に等しい総エネルギー消費量の拡大をもたらす。こうした富の増加に伴うエネルギー消費量の増加は、富を生み出す AI を稼働させるために必要なエネルギー量をはるかに上回る規模となる。しかし、この経済的・戦略的機会を現実のものとするには、AI インフラを構築し、それを稼働させるためのエネルギー供給が不可欠なのである。

AI データセンターは、エネルギーが文明のあらゆる部分を稼働させるために必要な「基幹資源」であるという点で、決して特異な存在ではない。エヌビディア社の CEO、ジェンスン・フアンが最近述べたように：「AI はエネルギーであり、チップであり、モデルであり、アプリケーションである……。そしてわたしたちはより多くのエネルギーを必要としている」。実際、いまやデータセンターはビット単位のデータではなく、ワット単位の電力で測定・分析されているのである。

AI データセンターの特異性は、現在顕在化しつつある電力需要の規模と速度にある。建設中の個別データセンターの中には都市規模の電力需要を持つものもあり、数百もの施設が建設中または計画中となっている。その建設ペースは、特に製造業の国産回帰や国内基幹産業の再生と相まって、電力部門の成長が停滞していた過去 20 年間の停滞期に終止符を打ったと言えよう。

政策立案者、投資家、そして AI サプライチェーンに関わる企業は、データセンターを稼働させるために具体的にどれほどの追加電力が必要となるのか、またその電力がどのように供給されるのかを把握することに強い関心を寄せている。今回の分析では、この問題に関する手がかりと共通認識を見出すため、数十に及ぶ様々な業界報告書や技術報告書を検証した。

実際の状況と今後の動向から、AI 関連のデジタル需要に対応するためには、2030 年までに少なくとも約 75GW、場合によっては 100GW 規模の発電設備の増設が必要となることが示唆されている。なお、いずれの予測にも、付随的だが直接関連する通信ネットワークの拡張に伴う電力需要、および国内回帰が進むであろうデータセンター内のロジックエンジンを製造する半導体製造施設に必要な電力需要は含まれていない。

2030 年までにこれほどの新たな需要を満たすには、技術的な現実を踏まえると、追加発電量の大部分は必然的に天然ガスの燃焼に依存することになる。その結果、米国のガス生産量全体を約 10%から 20%増加させる必要が生じる。

ガス需要の増加は、すでに建設中の追加の LNG 輸出ターミナルから生じる新需要とほぼ同規模で同時に発生する見込みである。

技術的には、天然ガス生産量、パイプライン敷設、発電所建設の成長目標を達成するだけの国としての能力は備わっている。主な障害は制度的・規制的なものである。

長期的に見れば、2030 年以降も続く AI 構造革命に伴い、次の成長段階を支えるため、さらに大きなエネルギー需要が生じるだろう。こうした需要は、原子力エネルギーと追加の太陽光発電容量によって担われる可能性が徐々に高まるだろう。しかし、いずれもそれに伴うインフラ拡張を必要とし、その拡張には本質的に、現在の AI 建設の急ピッチなペースを超えるはるかに長い時間を要するのだ。とはいえ、関連する政策とプロジェクトを今すぐ導入しなければ、近い将来、電力計画担当者は再び準備不足に陥り、成長への備えに失敗することになるだろう。

問題は、現在実施されている電力関連のエネルギー政策が、低成長あるいは無成長の近年に策定されたことに加え、従来型エネルギー源を代替するエネルギー転換という誤った追求と結びついている点にある。AI ブームは、たとえ予測が困難であっても新たな成長段階が不可避であること、そしてそうした段階が予測通りエネルギー需要の増加をもたらす、既存エネルギーシステムの代替ではなく拡張を必要とする事実を浮き彫りにしたのである。

Google は今年初め、「AI は米国に並外れた革新と成長をもたらす歴史的機会を提供する」と指摘しつつも、「米国エネルギーシステムの能力増強に向けた迅速な取り組み」が必要だと述べた。2025 年 7 月のホワイトハウス指令『競争に勝つ：アメリカの AI 行動計画』（AI アクシ

コンプラン) は、民間セクターに対し「膨大な AI インフラとその稼働に要するエネルギー」の構築を求めた。まさにそれが、技術・エネルギー・金融セクターの歴史的融合の中で進められているのである。

重要なポイント（政策立案者への提言を含む）

AI の大変革は市場主導である：

- 人工知能（AI）インフラとサービスの構築を巡る競争は民間セクターによって資金提供されている。つまり、政策主導の変革ではない。
- AI 導入のペースは、特定のアプリケーションにおける統合上の課題と、AI ツールの成熟度および有効性（能力）に依存する。すなわち、より強力で有用な AI ツールが急速に台頭しており、これにより AI の導入はさらに促進されるだろう。

変革を明らかにする 3 つの主要な指標：

- 基盤となる AI 計算能力の進歩率は、すでに確立されかつ予測可能な指数関数的増加の傾向に沿って推移している。
 - 2018 年以降、AI の計算性能は千倍に増加し、そのペースを保ち続けている。
- 民間資本の規模と速度について、AI インフラの構築への投入は記録を更新しているが、同等の期間における過去の最高値を（まだ）上回ってはいない。
 - AI インフラの構築に向け、1 兆ドルを超える民間資金が計画ないしは支出途上である。
- AI インフラのエネルギー需要規模は、電力と天然ガスの生産量の両方において大幅な増産を必要とする。
 - AI の予想される普及ペースに対応するには、2030 年代初頭までにデジタル需要向けに年間最大 1,000 テラワット時 (TWh) を追加供給するため、75~100 ギガワットの新たな発電容量が求められる。
 - 新規発電所の稼働により、米国における天然ガス生産量は全体で 10~15% 増加させる必要が生まれる。これと並行して、液化天然ガス (LNG) 輸出に対する需要も同程度の増加が見込まれる。

重要な前提条件：個々の施設における前例のない規模の電力需要を、建設速度に合わせて満たすこと。

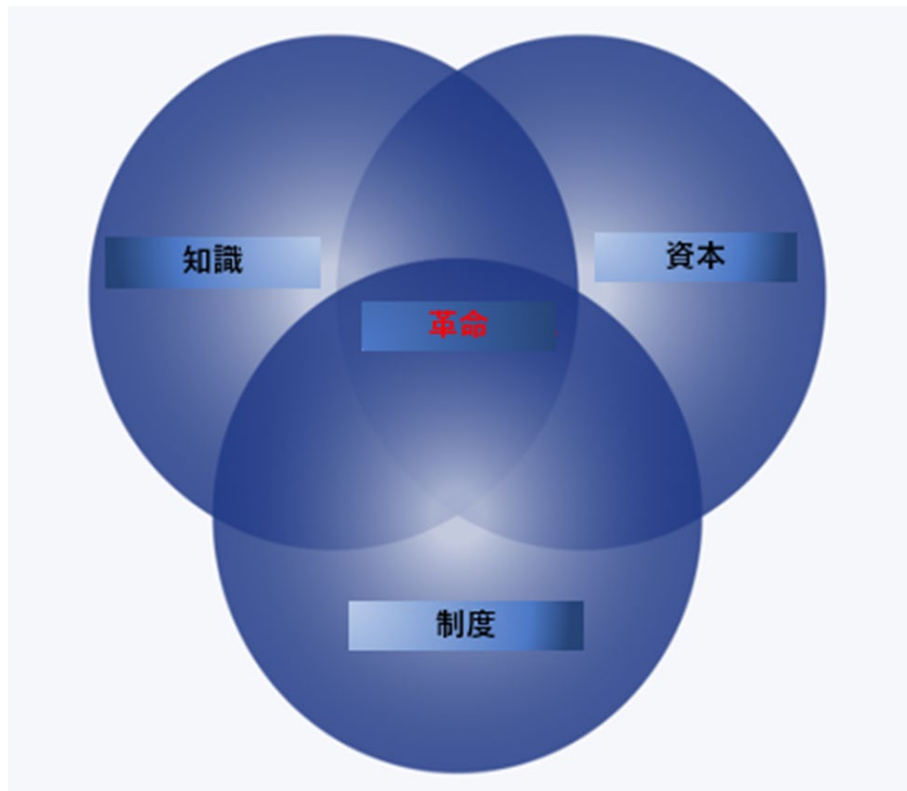
- 計画中のデータセンター数百施設は、それぞれ 300MW を超える需要を有し、多くは 1GW を超え、多くの場合建設完了まで 2~3 年を要する。電力業界の歴史において、これほどの規模と速度を伴う事例は前例がない。
- このペースと規模は、サプライチェーンや労働力の確保という課題を突き付ける。そしてこの事態は、エネルギー転換を推進するために近年導入された規制、政策、慣行により、エネルギー供給の低成長が常態化してきた中で起きている。
- 一方で、成長のペースと規模は、送電網の信頼性を損なわないことや、一般家庭の料金支払者にコストを転嫁しない必要性とも常にバランスを保たねばならない。

技術的現実が実行可能な解決策を決定する。AI の電力需要を満たすには二つの時間枠がある：

- 2~5 年：様々な種類の天然ガスタービンおよびエンジンが主流となる。
 - ガス生産、パイプライン、発電用エンジンの需要を満たす技術的基盤は存在する。プロジェクトにおいては、グリッド統合型とプライベートグリッド型の双方のアプローチが進行中である。
- 5 年~10 年：新規原子力発電と、大規模太陽光・風力発電施設へのアクセス拡大のための送電網拡張（これに伴いグリッド規模の蓄電池が求められる）の実現可能性がある。
 - 両者ともサプライチェーンの課題に直面している。太陽光・風力・蓄電池は海外または中国からの調達部品に依存する。原子力発電は老朽化したインフラの修復が必要である。送電網建設の大幅な加速化に向けた明確な道筋は存在しない（天然ガスパイプライン建設の方がはるかに速い）。

はじめに

技術革命の構造



民間セクターが人工知能（AI）に莫大な資金を投入している事実は誰の目にも明らかだ。同様に、大規模な AI インフラ整備が数十年来の電力需要増加を招いていることも今や周知の事実となっている。

あらゆる技術と同様に、一夜にして現れたように見える現象も、実際には長年にわたる技術開発と積み重ねられた発展の成果である。歴史が示すように、関連する技術が十分に成熟し、コストが十分に低くなると、ティッピングポイントに到達し、急激で「驚くべき」成長を伴う転機が訪れる。

経済史家ジョエル・モキア（今年のノーベル経済学賞共同受賞者）は、物理学から「相変化」という用語を借用し、変革的なイノベーションが経済・社会革命を引き起こすこうした飛躍的变化を説明した¹。経済と日常生活における変化—例えば鉄道以前の時代から鉄道時代へ、農業社会から工業社会への移行など—は、液体が固体になるのと同じくらい劇的な相変化であった。

モキア教授が数ある画期的な著作の一つ『The Lever of Riches』の中で記したように、「技術進歩は、経済学者が容易にありつける利益として言うところの「フリーランチ」を社会にもたらすという点で、歴史上最も強力な力の一つであった。すなわち、それを実現するために必要な努力とコストの増加に見合わない生産量の増加を生み出したのである」²

しかし技術の経済的・社会的便益は、孤立した状態で実現されるものではない。モキアは「フリーランチ」という観察において単純な考え方をしているわけではない。むしろこの格言を用いて構造的革命、すなわち現実世界における急激な変化がどのように起こるかを体系化して説明しているのだ。

モキアの説明によれば、こうした大変革は三つの力の交差点で生じる。すなわち、技術を通じて具体化される新たな知識、技術を展開するための資本の入手と供給源、そして技術展開を可能にしたり制約したりする諸制度の役割である。

AI が重大な影響をもたらすことは疑う余地がない。もっとも、その可能性に興奮よりも不安を感じる者もいないわけではない。AI がもたらす機会の本質、そして米国がその恩恵を確実に享受するために必要な要素は、未来に関する三つの問いに答えることで明らかになる。本報告書は、予測に伴う通常の留保事項をすべて踏まえつつ、これら三つの問いを中心に構成されている。

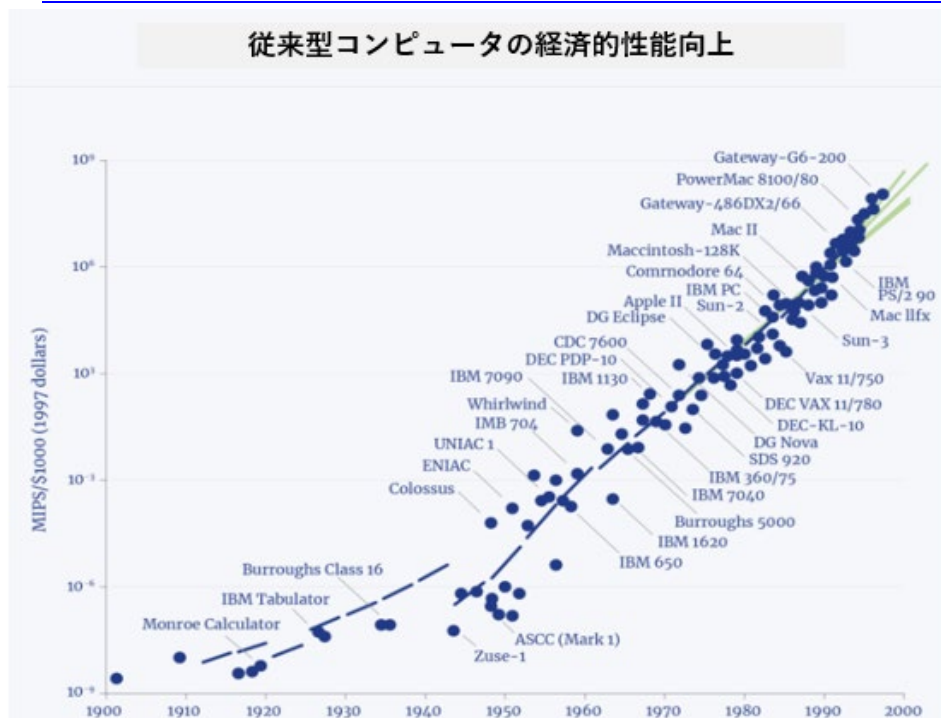
1. AI は構造的変化か、それともバブルか？
2. AI に必要な電力供給への影響は？
3. AI ブームに必要なエネルギーの供給増大を妨げる制約は何か？

1. 構造的転換

1.1 急成長の支柱：計算能力



出典: [Konstantin F. Pilz et al., "Trends in AI Supercomputers," arXiv, Apr. 23, 2025](#)



出典: Hans Moravec, ["When Will Computer Hardware Match the Human Brain?"](#) Journal of Evolution and Technology, vol. 1(1998).

2022年11月30日のChatGPTの公開は、AIが十分な性能を獲得し、ますます有用になるだけでなく、企業や機関（ひいては政策の立案）や株式市場を揺るがす存在となり得るとの認識を広く一般に広めた。これは数十年にわたる技術的成果の集大成であったと言える。

「機械学習」の複雑な数学とコーディングを実行できるほど強力なスーパーコンピュータの登場は、予測通り、計算性能（FLOPS/秒、すなわち1秒あたりの論理演算回数で測定される）の加速的な向上によってもたらされた。なお、従来型コンピュータの進歩はより一般的なMIPS（1秒あたりの百万命令実行数）で測定されることが多い。最初のコンピュータ革命と同様に、その進歩の速度は衰えることなく、飛躍的に続いている。

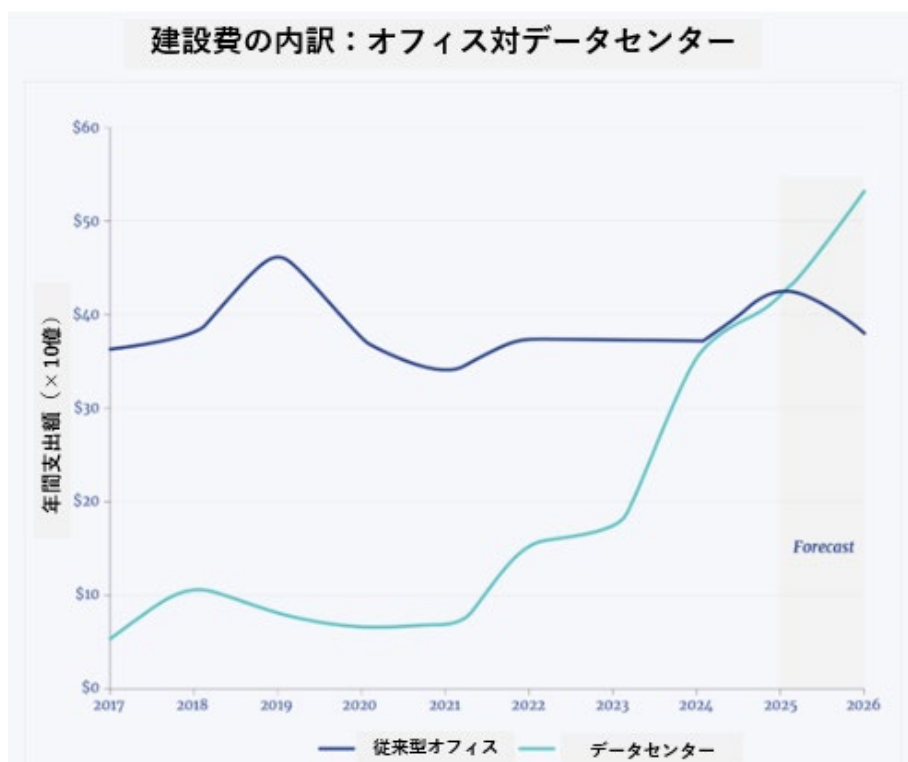
1980年頃における二進論理コンピュータの普及期は、実用的なAIの出現状況と将来像を類推する手がかりと成り得る。この技術は数十年にわたり存在してきたが、それは1980年までにデジタルコンピュータが存在していた状況と重なる。

二進論理に基づくデジタルコンピュータの起源は、1937年に遡る。クロード・シャノンの画期的なMIT修士論文は、デジタル時代にとってのマグナ・カルタである³。当時、シャノンの同僚であったアラン・チューリングは、第二次世界大戦中に（米国のENIACに先駆けて）開発されたコロッサス計算機が、ドイツ軍の暗号解読に要する作業を代替できると述べた。チューリングはこう指摘したとされる：「100人の英国人が1日8時間、卓上計算機を使って100年かけても解読できなかった」暗号を解読できると⁴。しかしコンピューティング能力の驚異的な進歩によりPC時代が到来するまでには、約40年の歳月を要した。

同様に—ChatGPTのリリースから遡ることほぼ40年前—学習アルゴリズム、すなわち「機械学習」の概念は、AIの「ゴッドファーザー」と称されるジェフリー・ヒントンの共同執筆した1986年の画期的な論文に端を発する。しかし、ヒントンの構想を具現化するシリコンエンジンが現れたのは、ジェンセン・フアンがNVIDIAを共同創業した1993年になってからだったのである⁵。

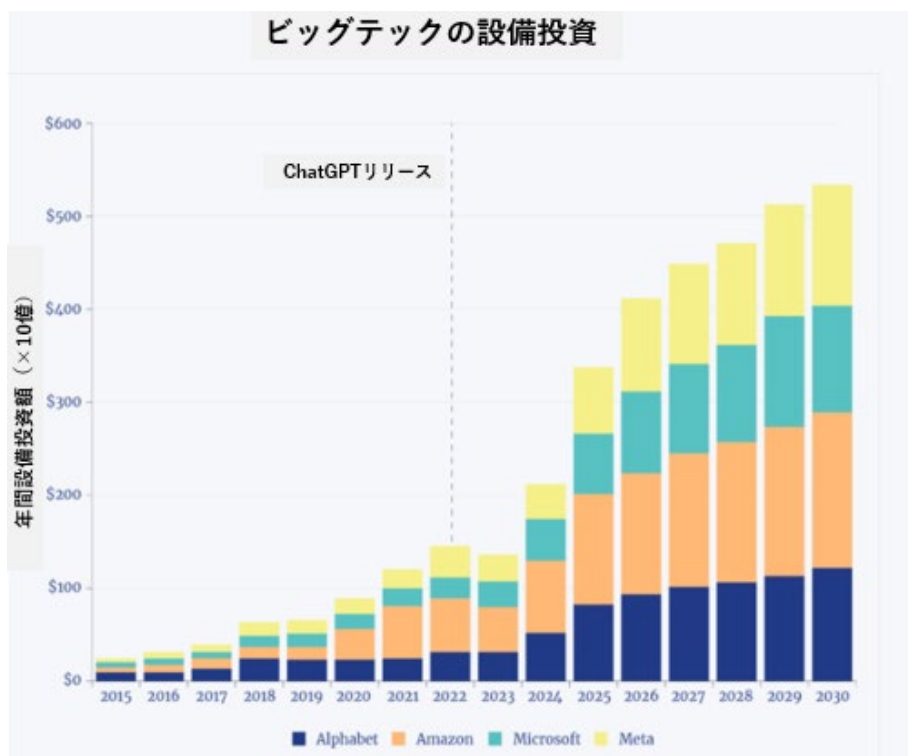
従来型の論理と同様に、シリコンハードウェアがAIに内在する大規模並列処理機能を普及させるのに十分な性能と低価格を実現するには、数十年の進歩を要した。過去6年間でAIの計算能力は千倍に増加し、実用的なAIの可能性を開いたのである。このペースは鈍化しておらず、むしろ加速していることを示すデータが存在する⁶。

1.2 消費：データセンター



注：支出は建設開始年度に計上される。

出典: Lydia DePillis, [“The A.I. Spending Frenzy Is Propping Up the Real Economy, Too,”](#)
The New York Times, August 27, 2025.



出典: Ian Harnett, [The AI Capex Endgame Is Approaching,](#)
Financial Times, October 3, 2025.

2025年7月のホワイトハウス指令『競争に勝つ：アメリカのAI行動計画』（AIアクションプラン）』は、AIの重要性に関する現状を要約し、「膨大なAIインフラとその稼働に要するエネルギーを構築・維持せよ」との呼びかけを行い、国家は「建設せよ、さあ建設せよ！」と指針を示した⁷。

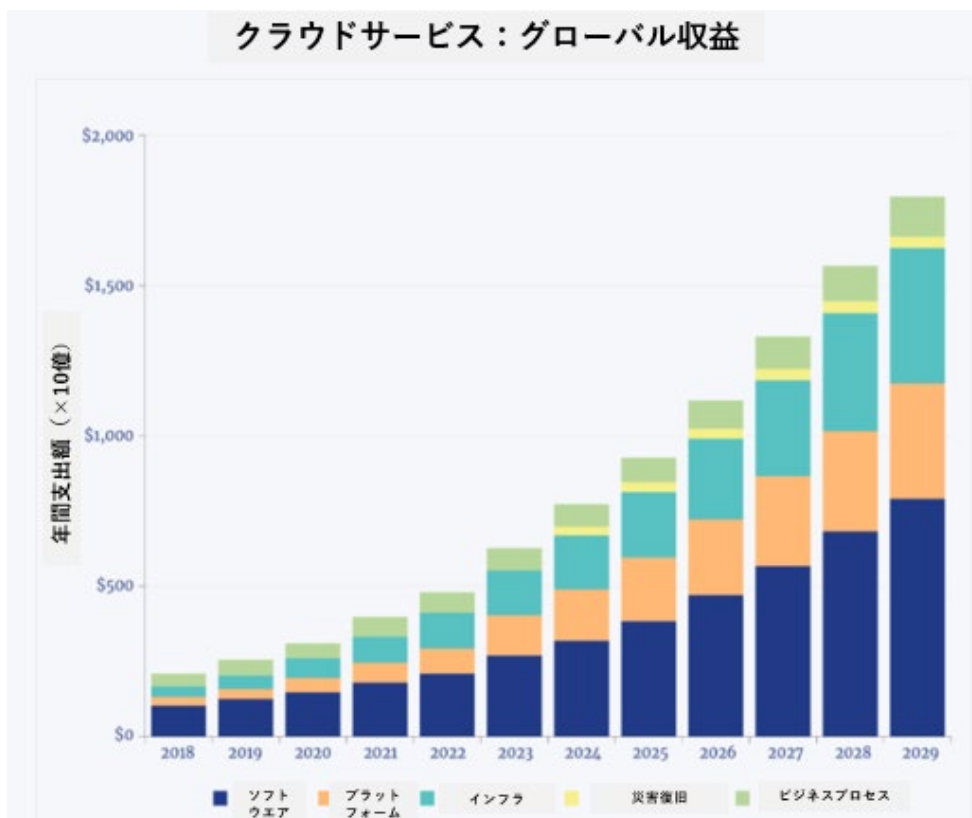
民間セクターのデータセンター支出は、2022年のChatGPTリリース前までは年間約100億ドル規模で推移していた。その後、支出は急増し、今年（2023年）のデータセンター建設費は米国におけるその他全ての業務用のビル建設費を上回った。製造業の工場や発電所の建設に現在投じられている総支出額をも上回った⁸。一部のアナリストは、この支出と、AIエコシステムのアップストリーム・ダウンストリームを問わず全企業の株価評価の急騰が、典型的なバブルの兆候を示していると懸念している⁹。しかし世界最大の資産運用会社であるブラックロックは、最近400億ドルでアラインド・データセンターズを買収し、「史上最大のデータセンター買収」という将来への大きな賭けに出た。これは同社が「バブル」ではなく長期トレンドを予想していることを明確に示すものだ¹⁰。もちろん、投資家が考える株価の価値と、現在構築・計画されているもの、そしてAIの将来的な用途への期待という二つの領域の間には関連性が存在するものである。

AIインフラへの総資本支出は年間1兆ドルを超える軌道に乗っており、一部のアナリストは2030年までに累計5兆ドルが投入されると予測している¹¹。民間・公的市場投資家の市場心理が過熱していたかどうかは結果論でしか明らかにならないが、AIブームが構造的（すなわち経済の長期的な転換）なのか、それとも一時的な流行なのかを明らかにする基本的な指標がいくつか存在する。

1.3 支出：現在の状況



出典: Federal Reserve Bank of St. Louis



出典: Statista

21世紀初頭以降、米国の企業による情報インフラへの支出は、民間部門投資の4つの主要分野の中で最大でありつづけており、産業用設備、輸送用設備、建築物への資本投入を大幅に上回ってきた。情報インフラ支出の構成比は、オンサイト型コンピューティングの購入から、企業向けクラウドベースサービスへと次第にシフトしている。AIの登場はこの傾向を加速させている。なぜなら、AI支出の主要な対象がクラウドインフラストラクチャだからである。

データセンターへの資本投入額（表明された総投資額ではなく、建設への年間支出額）は、企業がクラウドサービス利用に年間約1兆ドルを支出しているという全体規模の観点で捉えられる必要がある。そして、世界のクラウドサービスの約半分は米国企業によって提供されているのである¹²。

もちろん、大規模なインフラはすべて、稼働に多大なエネルギーを消費することは避けられない。この現実への関心が喚起されたのは、2024年の連邦エネルギー規制委員会（FERC）の予測がきっかけであった。同予測は様々な推計を基に、米国が従来想定されていたよりも50ギガワットから130ギガワットの発電容量をさらに必要とすることを示唆し、約20年にわたる電力需要成長がほぼ横ばいだった時代に、ついに終止符を打ったのである¹³。

参考までに、1ギガワット（GW）のデータセンター1基が年間に消費するエネルギーは、1,000マイルの高速道路を走行する自動車が年間に消費するエネルギーの10倍以上に相当する。1ギガワットのデータセンターと1,000マイルの高速道路を建設する費用は、それぞれ約100億ドルである。さらに、データセンター内でエネルギーを使用するGPUのコストはさらに200億ドルに達し、これは1,000マイルの高速道路が支える自動車の量（ピーク時）にかかる200億ドルのコストとほぼ同額である¹⁴。

したがって、21世紀における最大の問いはこうだ：私たちは今、AIを融合した新たな「情報スーパーハイウェイ」インフラを構築する上で、1958年に相当する段階にあるのか、それとも4万マイルに及ぶ州間高速道路網の最終区間が完成した1992年に相当する段階に近づいているのか？

1.4 支出：歴史的背景



出典: Goldman Sachs, [“Why We Are Not in a Bubble…Yet,”](#)
Global Strategy Paper No. 73, October 8, 2025



出典: Estimate interpolated from available Census benchmarks (see endnote 18)

混乱に直面すると、アナリストやジャーナリストは、何かしらの傾向を測るのに役立つかもしれないと期待して、分かりやすい例えを探し求めるものである。AI 競争はしばしばマンハッタン計画やムーンショット目標に例えられる¹⁵。どちらも二つの点で類推の誤りと言える。なぜなら、どちらも政府支出と計画に依存したものだだったこと、そしてどちらにもインフラではなく特定の目的や意図に専念して進められたことである。

AI の構築を米国州間高速道路システムの建設に例えることは、国家規模のインフラが持つエネルギー的特徴を確かに浮き彫りにするが、AI とは異なり、高速道路システムは公的資金で賄われた。一方民間資金による大陸横断鉄道網の例も挙げられる。1840 年代から 1870 年代にかけて支出は 3 倍に膨れ上がり、国内総生産 (GDP) の 5% 超でピークを迎えた¹⁶。しかし AI との比較においてより適切な類推は、内燃機関という基盤技術によって可能となった交通革命全体への支出を検証することだろう。

インターネットインフラの出現はより近年の例として挙げられるが、これもまた、携帯電話ネットワークや PC と時を同じくして拡大したインターネットの観点から見た方が適切だろう。このインフラ整備は 1999 年の悪名高いドットコムバブルと結びついていたが、後から見れば、あらゆる期待—そして物理的インフラへの付随的な需要—がその後の数年間で実現され、さらに上回ったことは明らかである。このブームは民間資金によって賄われ、投入された資本は GDP の 1.25% に達した—これは AI/クラウドインフラ整備が今まさに到達しようとしている水準である¹⁷。

おそらく最も適切な例えは、19 世紀末における化学科学の革命的な発展と、それに続く 20 世紀初頭の化学産業の台頭であろう。化学科学は人類に分子や原子の基本構成要素を操作する力を与え、医薬品から現代製品のほぼ全てに不可欠な高分子に至るまで、全く新しい製品やサービスを発明・製造することを可能にした。それと同様に、AI、機械学習、大規模言語モデルの発明を支える知識は、基本データの操作を可能にし、経済のあらゆる分野に向けた全く新しい種類の製品やサービスを生み出すこと—つまり「AI 工場」という新たな造語が示すようなこと—を可能にしているのである。

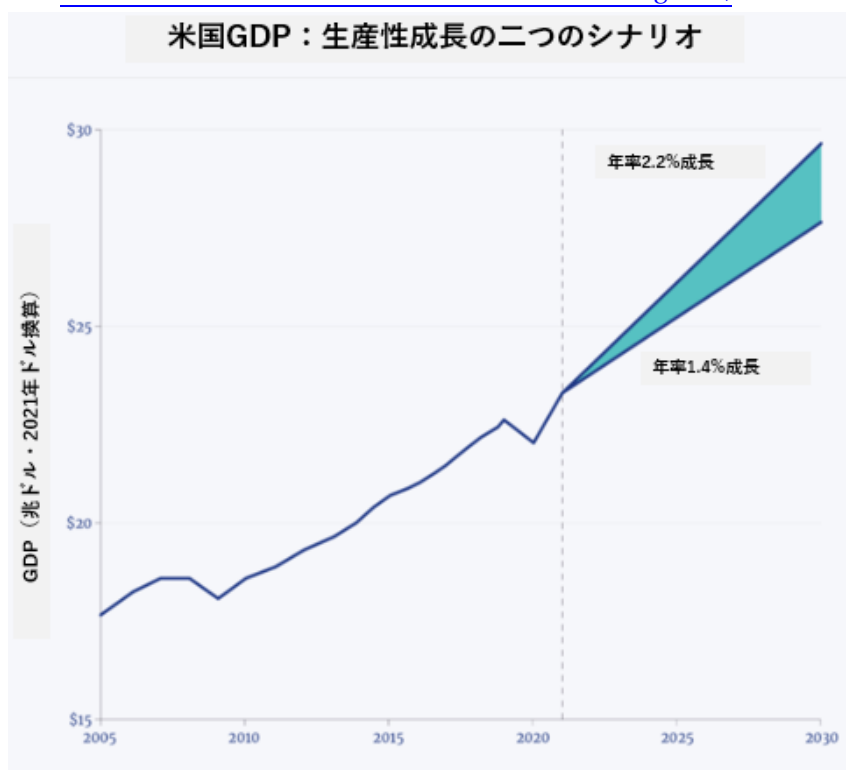
特に注目すべきは、1929 年以前の 20 年間において、当時画期的であった化学工場やインフラを建設するための民間部門の投資が GDP の 5% 以上にまで増加したことである¹⁸。

2030 年までに GDP に占める割合を同水準に維持するには、AI 支出は年間約 2 兆ドルに達する見込みであり、これは幾つかの予測の範囲内にある水準である¹⁹。

1.5 影響：生産性の不足



出典: J.P. Morgan Asset Management,
[The Transformative Potential of Artificial Intelligence](#), 2023.



出典: [“Rekindling US Productivity for a New Era,”](#) McKinsey Global Institute,
February 16, 2023

1987年のノーベル経済学賞受賞スピーチで、ロバート・ソローは「技術は依然として成長の主要な原動力であり、人的資本投資はそれに次ぐ位置にある」と述べた²⁰。資本市場によって可能となり、制度によって促進された技術進歩の総合的な効果は、第二次世界大戦後の米国で労働生産性の歴史的な飛躍をもたらし、それがさらなる莫大な富の増加を産み出した。

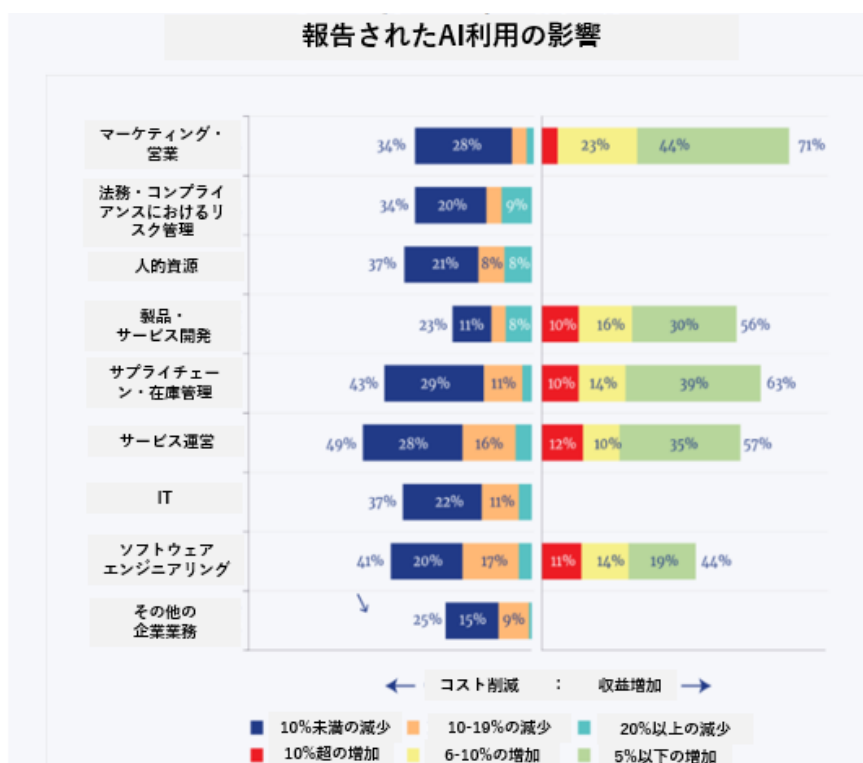
技術は、歴史上の様々な時期において、似たような生産性の向上をもたらしてきた。1910年から1930年にかけて、自動車1台あたりの製造に必要な労働時間は約5分の1に、鋼鉄1トンあたりの労働時間も同様に減少した²¹。鉄道時代の輸送における生産性向上は、馬車輸送よりも速い速度だけでなく、貨物輸送のトンマイルコストが25分の1に激減したこと、そして人の移動においても同様の成果が得られたことから明らかであった。

さらに遡れば、中世の繁栄は経済史家ジャン・ギンペルが著書『中世の機械』で提唱した「age of reason and mathematics」における機械発明に端を置く。当時、多くの機械は人件時間を最大10分の1にまで削減した。これは現在AIに帰せられる10~30%の労働削減率をはるかに上回るものである²²。

AIの真価は、多様な応用分野において、いかにして有意義な生産性成長をもたらし、最終的には本質的な成果を生み出すかにある。実際、市場での普及は、生産性成長の機会によってのみ根本的に説明し得るのである。

米国議会予算局（CBO）の経済予測では、今後10年間の生産性成長率を年率1.4%と想定している。これは過去10年間の低迷した歴史的な低水準である年率1.2%からわずかに上昇したレベルである²³。一部のアナリストはAIが米国経済を戦後最高水準である4%の生産性成長率に押し上げるとの見解を示しており、この楽観論を裏付ける確かな根拠も存在するものの、ここでは単に戦後の長期平均である2.2%の成長率に回復させることの影響について考察しよう。計算上、そうなれば今後10年間で現在の予測値よりも累積10兆ドルの経済成長増をもたらされることになるのだ。

1.6 影響：生産性に対する展望



出典: [The 2025 AI Index Report](#) (Stanford University), chap. 4, p. 49



Source: [WIPO Patent Landscape Report](#), 2024

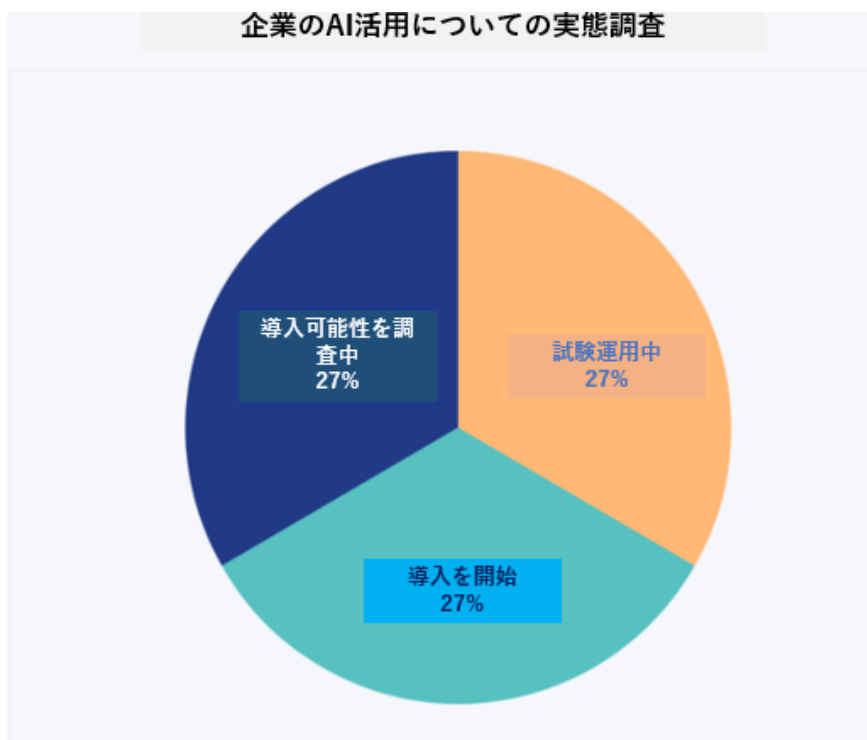
企業収益において最近に目立った増加が見られないことが、AIには実質的な効果が伴っていない証拠として挙げられてきた²⁴。しかし、真に検討すべきは、同じ生産量を維持しながらコスト削減を実現するところ、すなわち生産性そのものの定義に他ならない。

例えば、スタンフォード大学の「2025 AI Index Report」に基づく、これまでの企業におけるAI活用状況の調査結果から導かれた以下の結論に注目されたい：「回答者がAI活用によりコスト削減効果を最も頻繁に報告した分野は、サービス運営（49%）、サプライチェーン・在庫管理（43%）、ソフトウェアエンジニアリング（41%）であった。収益増加に関しては、AI活用により最も恩恵を受けた機能として、マーケティング・営業（71%）、サプライチェーン・在庫管理（63%）、サービス運営（57%）が挙げられた。」²⁵

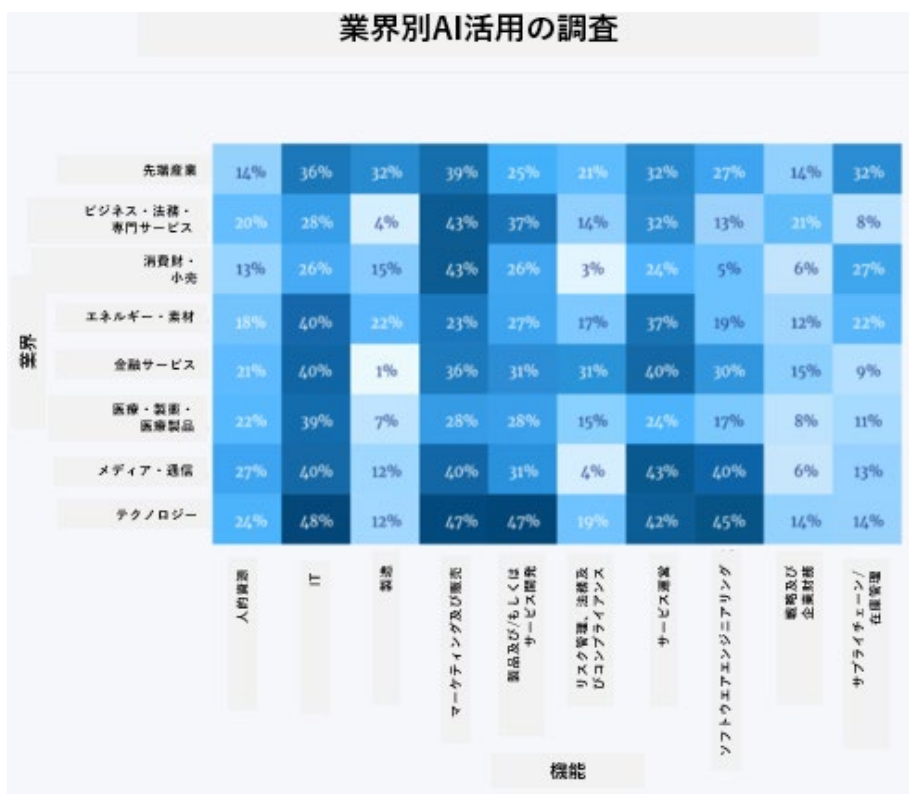
言い換えれば、AIによる生産性向上はまず情報業関連のアプリケーションで実現される。これはソフトウェア適用における簡単に達成できる「低いところにぶら下がった果実」に他ならない。GDPの80%を占める物理システムへの応用はより時間がかかるが、より大きな影響をもたらすに違いない。

企業は、広く製品展開する前に特許を出願するので、特許は将来の生産性向上がどこで生じうるかの先行指標として活用できる。データからは、過去6年間にAI特許が急増したことに加え、生産性向上が顕著な事業活動分野で多くの特許が発行されていることが読み取れる。

1.7 導入：初期段階



出典: “AI Adoption Across Industries: Trends You Don’t Want to Miss in 2025,”
Coherent Solutions, October 30, 2025



出典: “[The State of AI in 2025: Agents, Innovation, and Transformation,](#)”
McKinsey & Company, Nov. 5, 2025

あらゆる企業にとって、既存の製品やプロセスに新たな技術（ハードウェアであれソフトウェアであれ）を導入する機会は、例外なくおなじみの学習曲線を伴うものである。これに例外はない。

製造業について考えるべき理由として、この分野の重要性が政治的に再認識されただけでなく、米国が掲げるリショアリング（生産拠点の国内回帰）の目標と政策が挙げられる。ロックウェル・オートメーション社が2025年に実施した1,500社以上の製造業を対象とした世界的調査では、回答者の95%が「AIへの投資を既に実施済み、もしくは計画中である」と回答した。当然のことながら、そしてまた歴史的傾向と一致して、現在の主な活用の用途は情報業関連の活動に集中している。具体的には品質管理（回答者の50%が選択した最多用途）、サイバーセキュリティ（49%）、プロセス自動化（42%）である。ロボット工学分野（37%）と物流（36%）では、重要視はされているものの、導入は遅れている²⁶。ロックウェル調査が指摘するように、「新技術の導入・統合（21%）」と「品質と収益性のバランス調整（21%）」の2点こそが、今後12ヶ月間の企業成長における最大の課題であると認識されている。

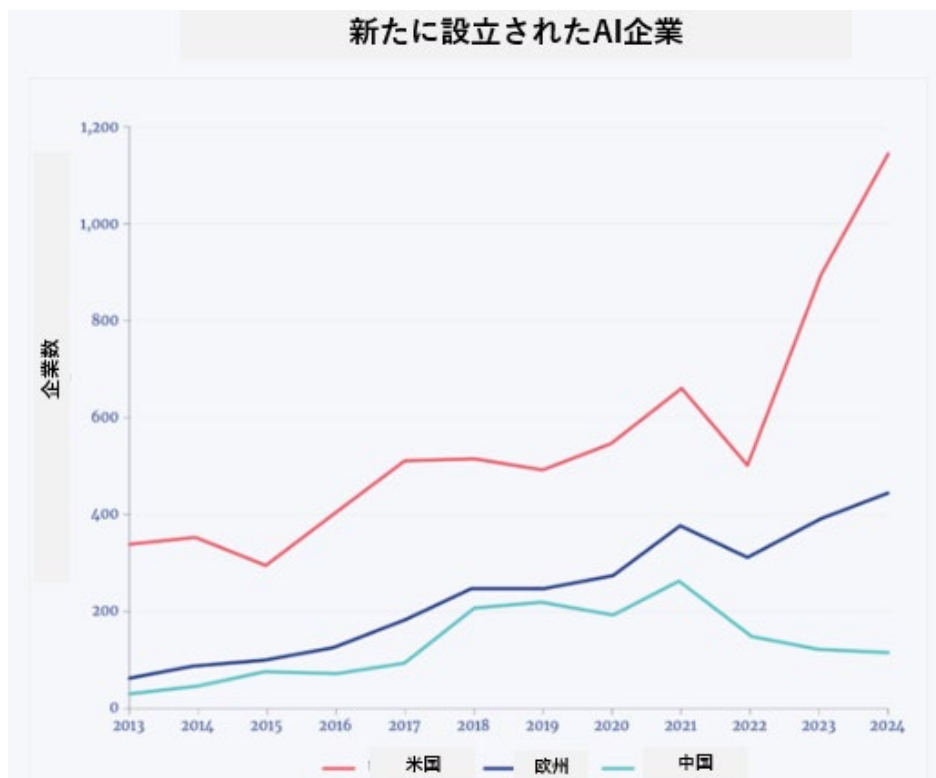
他のアナリストも同様の現状を報告している。つまり、有用性の問題ではなく、明確化と統合には時間を要するということだ。ガートナー社の分析が示すように、プロセスや手順に対する根本的な変革には数か月ではなく数年を要するものである。とはいえ、ガートナー社は企業のAI「リーダー」層が1～3年の期間内に、つまりAIシステム構築者たちが早急に実現を急ぐタイムフレームにおいて、意義ある投資とアクションを計画していると分析している²⁷。

同様に、マッキンゼーの最近の調査においても、AIと親和性の高い情報関連分野においてAIが早期導入されているパターンについて詳細が示されている。製造業分野では導入がやや遅れてはいるものの、やはり導入傾向にある²⁸。これは当然ながら、AIインフラを提供する企業が同様のパターンを捉え、将来的に重要な市場となると予測される分野への構築を既に開始していることを示唆している。

1.8 世代を超えた長期的な変化



出典: [Bank of America Global Research, Research Investment Committee, US Business Sector Labor Productivity \(5-Year Annualized\) & Period Averages.](#)



出典: Stanford University, [Artificial Intelligence Index Report](#), 2025.

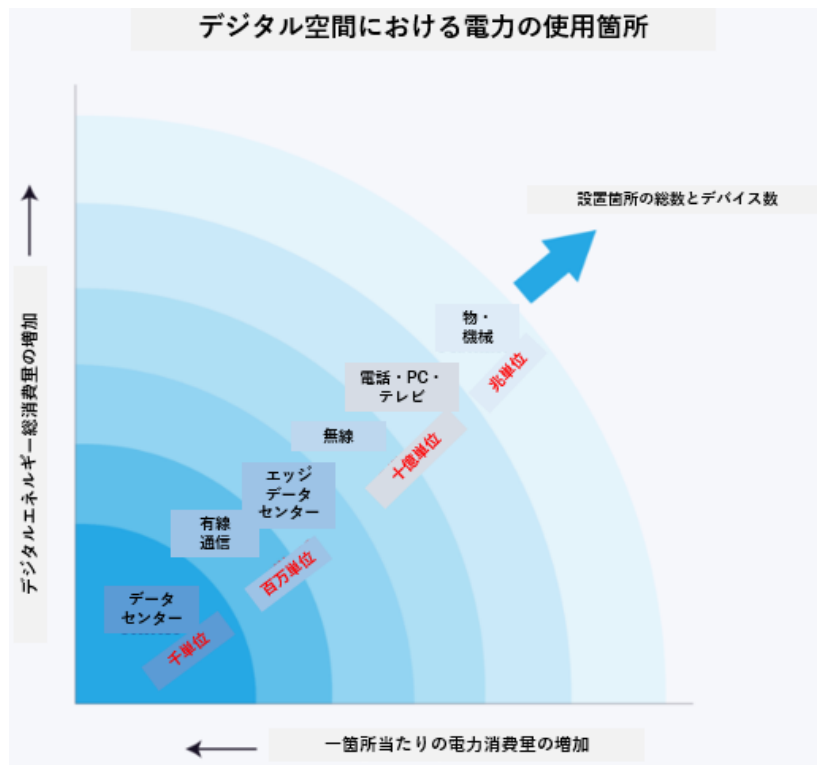
AIは、あらゆる画期的な新技術と同様に、時の経過とともに有用性が高まり、コストが低下していく技術である。AIは社会を大きく変える革新技術として広く称賛されており、あらゆる指標から見ても、その評価は妥当な結論と言えよう。しかし同時に、この評価は誇張や誤解を招きやすい側面も持つ。現実が示す通り、AIが基盤的かつ広範な生産性向上の世界的な躍進であるならば、米国経済、ひいては世界経済は、たとえ断続的であっても、長期的な経済成長への回帰の入り口に立っていると言えるだろう。

AIは世界で初めて米国で発明され、導入された。また、世界のデータセンター計算能力のほぼ半分、現在建設中のギガ規模AIデータセンターの約4分の3、そして新規資金調達を受けたAI企業のすべてが米国に集中している。政策決定者や投資家らが抱く明白な疑問はこうだ：米国は必要なインフラを構築できるのか？そして、それが求められるスピードで実現できるのか？

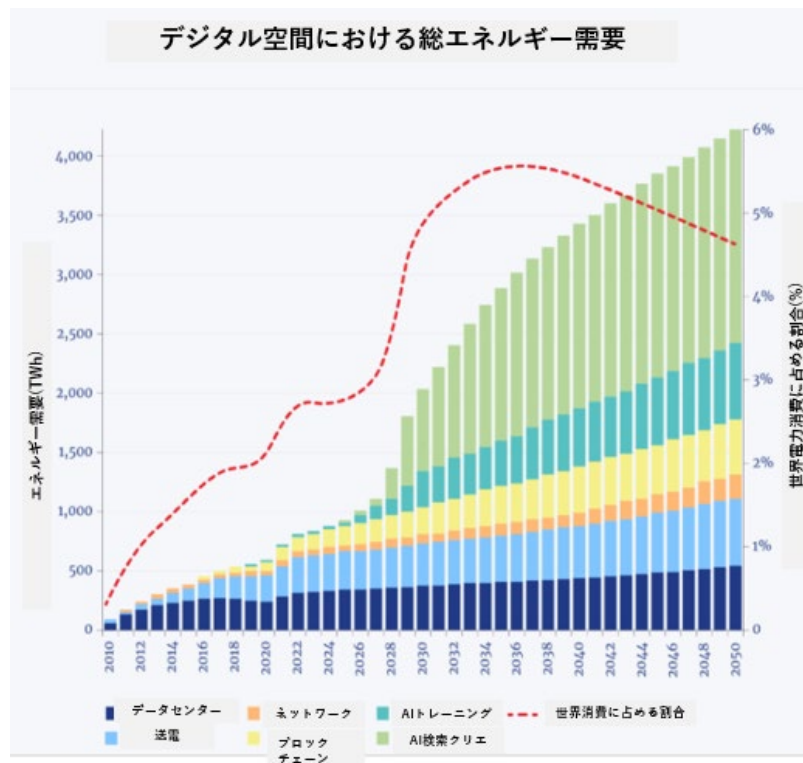
私たちとしては、国家の中核的な技術力という点では答えはイエスだと見ているが、制度的現実については懸念材料があることも付け加えておく。

2. AI エネルギーのブーム

2.1 デジタルエコシステムにおけるエネルギー需要



出典: 著者



Source: Thunder Said Energy, [AI Energy Demand: Breaking the Power Laws](#),
October 13, 2025.

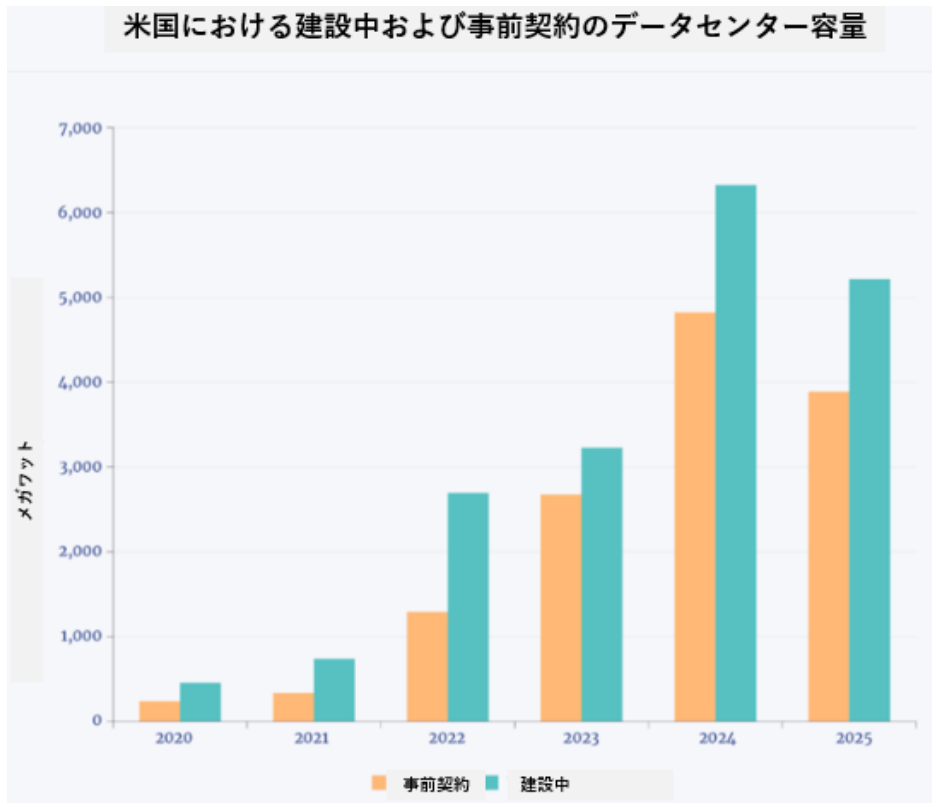
デジタルエコシステムがエネルギーや物理的資源に関してある種の「フリーランチ」を提供するという幻想は成立しない。この幻想は、仮想現実やサイバースペース、スマートフォンの小型化といった概念によって、意図せずとも助長されてきた。世界のデジタル電力消費は過去 20 年間で著しく増加し続けているが、注目を集めたのはエネルギーを大量に消費する AI の登場である。10 月、エヌビディア社のジェンスン・フアン CEO は「AI とはエネルギーであり、チップであり、モデルであり、アプリケーションである…そしてわたしたちはより多くのエネルギーを必要とする」と述べた。今年初め、米国上院公聴会でオープン AI (ChatGPT の生みの親) のサム・アルトマン CEO はこう証言した：「最終的に、知能のコスト、AI のコストはエネルギーコストに収束する。いかに多くを手に入れられるか——その供給量の大きさは、エネルギーの豊富さによって決まるだろう³⁰。」

ニュース報道では、建設中および計画中の大規模 AI データセンターの電力需要に焦点が当てられてきたが、こうした建物は AI に関連するエネルギー使用の 4 つの要素のうちの 1 つに過ぎない。将来のデジタル電力需要の全体的な潜在的可能性を測るには、関連するエネルギー需要、内在するエネルギー需要、および誘発されるエネルギー需要も考慮すべきである。

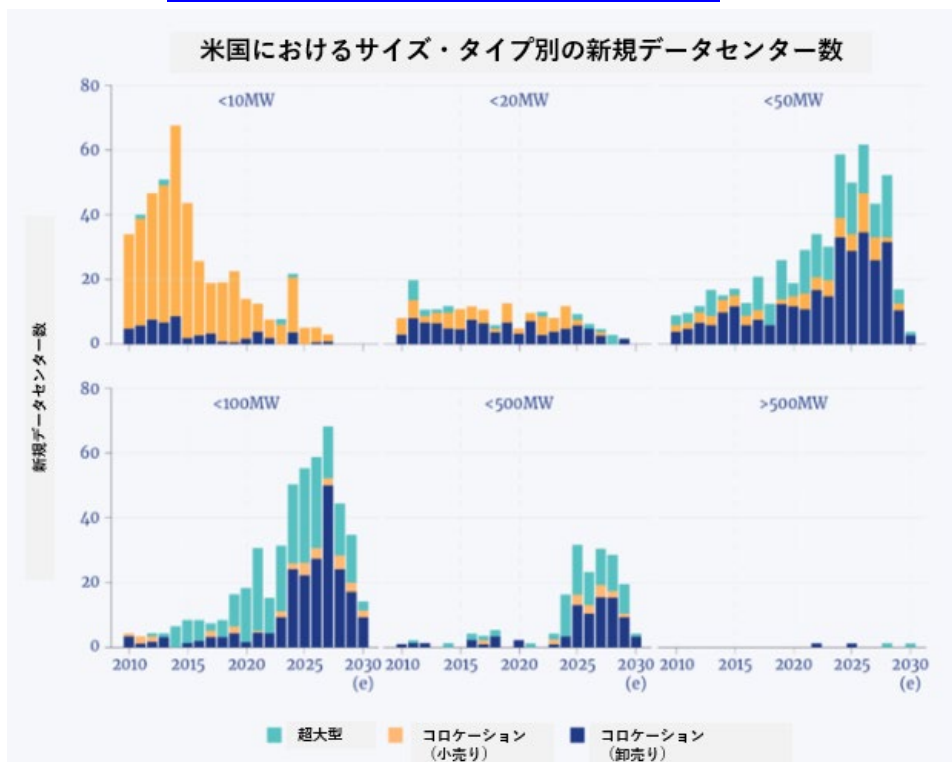
- 関連需要：データセンターとユーザーを結ぶ有線（光ファイバー）および無線（セルラー通信）ネットワークは、データセンターに匹敵する量の電力を消費する³¹。ネットワークトラフィックは、AI 需要に対応するための追加トラフィックを計上する前段階でさえ、2030 年までに倍増する見込みである³²。ブロックチェーンや暗号通貨、エッジデータセンターからも膨大な負荷が発生しており、特にエッジデータセンターは低遅延を必要とする AI 用途に不可欠である³³。
- 内在需要：世界の半導体製造だけで、世界のデータセンターの約 3 分の 1 の電力を消費している³⁴。関連するデジタルハードウェアの製造にもエネルギーが使用される。
- 誘発需要：AI がもたらす経済成長は、社会全体のエネルギー使用量の増加につながるだろう。この要因による影響は、データセンターが直接使用するエネルギーの 10 倍から 20 倍に及ぶ可能性が指摘されている³⁵。AI 駆動型の生物学的発見が実現し、人々の寿命や健康状態が向上した場合、それ自体もまた、その人々によるエネルギー使用量の増加を誘発するだろう³⁶。

上記のすべての要素が、今後 10 年間の国内エネルギー需要に影響を及ぼすだろう。しかし、今この時代ならではの特異な要素は、AI 用データセンターという新たなカテゴリーの出現速度とその規模である。この組み合わせは前例のないものだ。こうした巨大施設の建設数が、短期的な電力需要を正確に予測する上での主要な決定要因となるだろう。

2.2 短期的な AI デジタル電力需要：規模



出典: CBRE, “[North America Data Center Trends H1 2025](#),” September 8, 2025



出典: Shon R. Hiatt and Angela Ryu, “[Data Center Energy Demand: Who, Where, and How Growth Is Emerging](#),” Zage Business of Energy Initiative Energy Brief, University of Southern California, Marshall School of Business, September 24, 2025.

データセンターがビット単位の演算能力ではなく、ワット単位の電力需要で測定されることが多くなったのは、時代の象徴と言えよう。近年に至るまで、米国のデータセンター業界は10年間にわたり年間約500MWの新規容量を追加してきた。このペースは2022年に3倍に加速し、その後さらに倍増した³⁷。現在進行中の建設プロジェクトにより、2025年までに再び倍増する見込みである。2025年単年のみで追加される容量は10ギガワット（GW）を超えると予測され、これはニューヨーク市のピーク時の電力需要に匹敵する規模である。

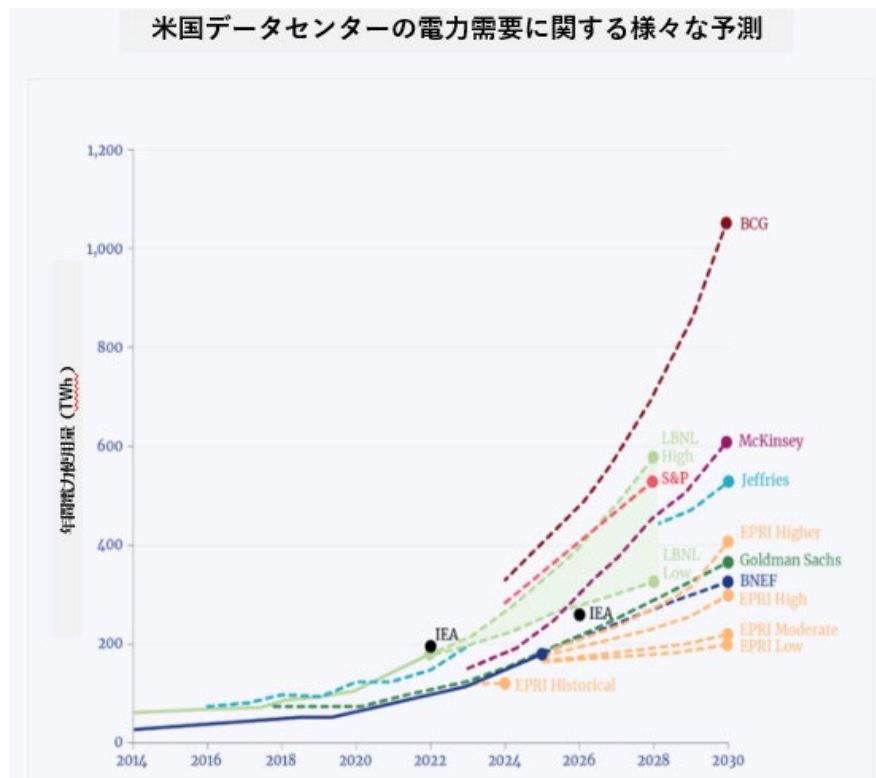
一部の評論家は、これほどの需要が本当にあるのか疑問視している。しかしデータセンターの空室率（不動産業界の標準指標）は過去最低の1.6%を記録し、建設中の資産の4分の3は事前契約済みである。さらにデータセンターの賃料は2021年以降60%上昇している³⁸。たとえさらなる拡張がなくても、現在の建設ペースが来年まで続けば、2000年以降に米国で建設されたデータセンターの総設置容量は倍増する。建設ペースがどれほど急速に拡大するかが、この10年の最大の注目点である。

課題を増幅させているのは、個々の施設が前例のない規模に拡張してきている点だ。この背景には、機械学習に内在する驚異的な複雑なタスク、すなわちより複雑な現実世界について有用なことを学習するために、データセンターごとに数十万個のAIチップが必要となる事情がある。南カリフォルニア大学の研究によれば、2010年から2020年に建設された典型的なデータセンターは、施設あたり20MW未満であった³⁹。現在では50MWから100MWが一般的であり、数十施設が500MW規模、さらに数施設がGWレベルに到達している状況である。

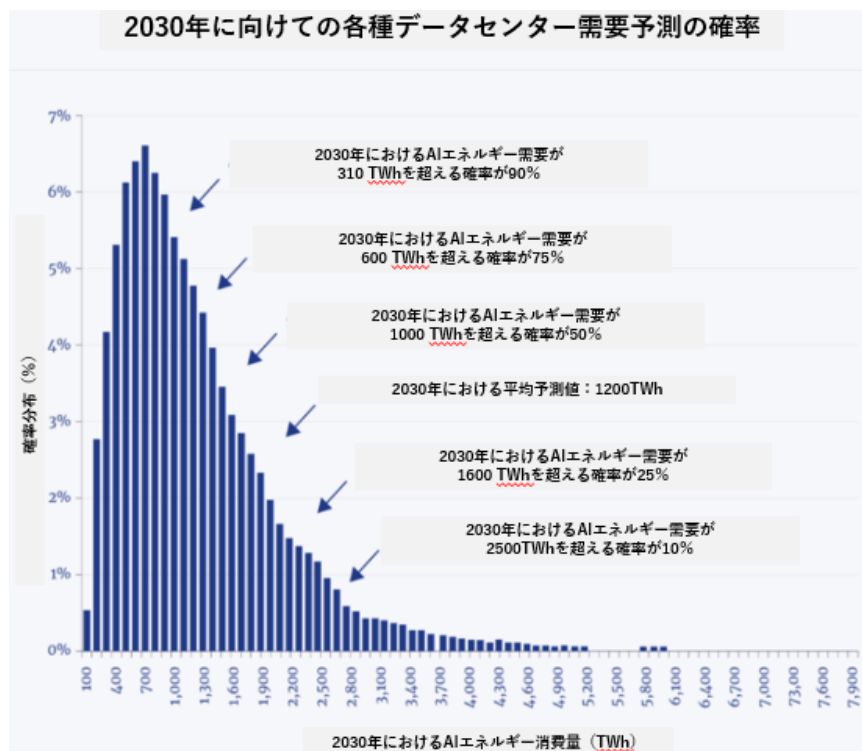
その規模と速度の組み合わせが難題を呈している。電力需要がほぼ横ばいで推移した20年間の空白期が終わりを告げようとしていることに対し、公益事業部門の計画担当者はまったくの準備不足であった。施設当たりの需要規模において、新たなデータセンターが建設されるペース（2～3年ごと）は、エンジニアリング、建設、許可取得の課題（公益事業者にとっては消費者コストを増加させないという課題）をもたらす一方で、大規模な局所的な負荷が電力システムの安定性を損なわないことを保証しなければならないという課題も生じている。

背景として：過去60年間で、国内の送電網に追加された300MWを超える施設はわずか26件であり、そのうち20件は揚水式水力発電所（電力を消費・供給する特性はデータセンターの先駆けと言える）であった。残りはデータセンター、半導体工場、LNGターミナル、製鉄所を含んでいた。長期にわたって、300MWを超える施設がさらに15基建設されたが、送電網に接続されたものはなかった（うち12基は化学精製工場、3基はLNGターミナル）。その一方で、300MWを超えるデータセンターが数百基建設される計画が現在発表されている。

2.3 中期的な AI デジタル電力需要：予測は？



Source: Ian Goldsmith and Zach Byrum, “Powering the US Data Center Boom: Why Forecasting Can Be So Tricky,” [World Resources Institute](#), September 17, 2025.



出典: Thunder Said Energy, [Energy Intensity of AI: Chomping at the Bit](#), Apr. 18, 2024

政策決定者、電力事業計画担当者、投資家、ベンダーらは皆、同じ疑問を抱いている：2030年までにデータセンターの電力需要はどれほど増加し、そのペースはどれほどなのか？ゴールドマン・サックス⁴⁰、ブルックフィールド・マネジメント⁴¹、DNV⁴²、セミアナリシス⁴³、ローレンス・バークレー国立研究所⁴⁴、ランド研究所⁴⁵、Rystad Energy 社⁴⁶、S&P グローバル⁴⁷、ペイン・アンド・カンパニー⁴⁸、サンダー・セイド・エナジー⁴⁹、そしてもちろん IEA⁵⁰ などの組織による、無数の予測と分析が広く出回っている。世界資源研究所 (WRI) の分析は、米国のデータセンターによる電力需要に関する 2030 年予測の範囲が実に 3 倍もの幅があるという事実を明らかにした。

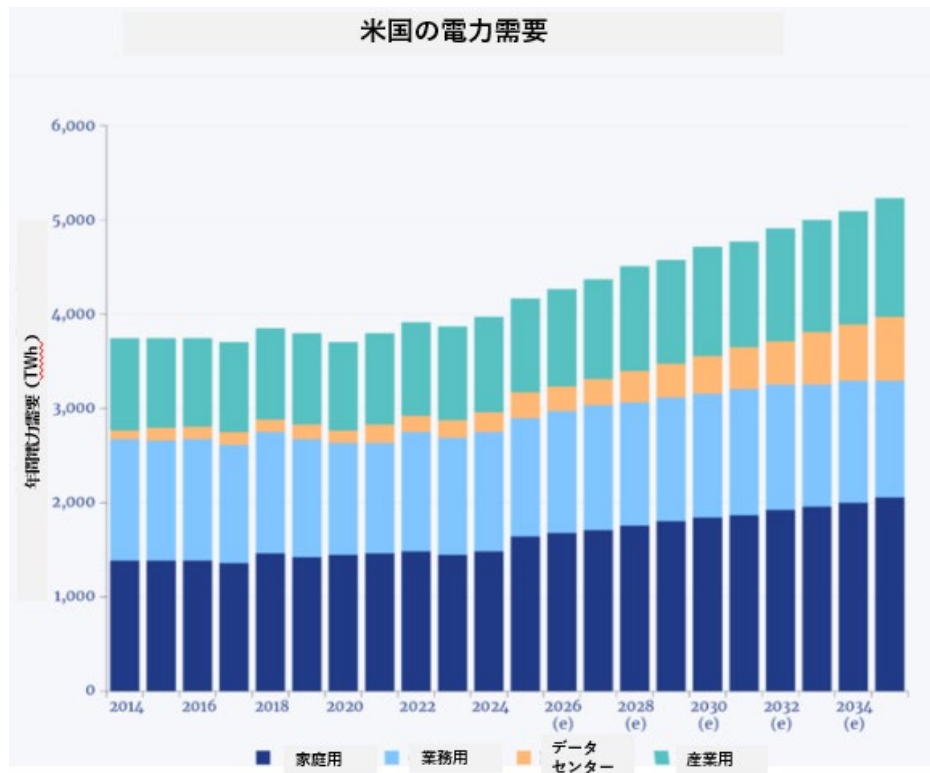
多くの分析では電力需要を GW (負荷) で表す一方、年間電力使用量を GWh または TWh で表すものもある点に留意すべきである。(後者の場合、設備稼働率に関する前提条件が必然的に必要となる。) また一部の予測では AI チップ向け電力のみを考慮し、従来型コンピューティング需要を含める場合と含めない場合が混在する。(ネットワークや関連する電力消費ハードウェアまで含めるものは極めて少ない。) 分析対象が米国中心のものもあれば、グローバルなものもあるが、いずれの分析も増加分の大部分が発生するのは米国である点を指摘している。

最後に、これらの予測は AI の二つの異なる特徴を区別して捉えている。学習、すなわち X 線画像診断、自然言語質問への回答、新薬発見といった独自の能力を開発する「AI 工場」と、推論、すなわちデータセンターや分散デバイスにおける AI チップ (訓練/学習後) の活用によるタスク実行である。あらゆる分析において、推論段階の電力需要は、既に急増し続けさらに上昇を続けている学習段階の需要を追い越すと予測されている⁵²。

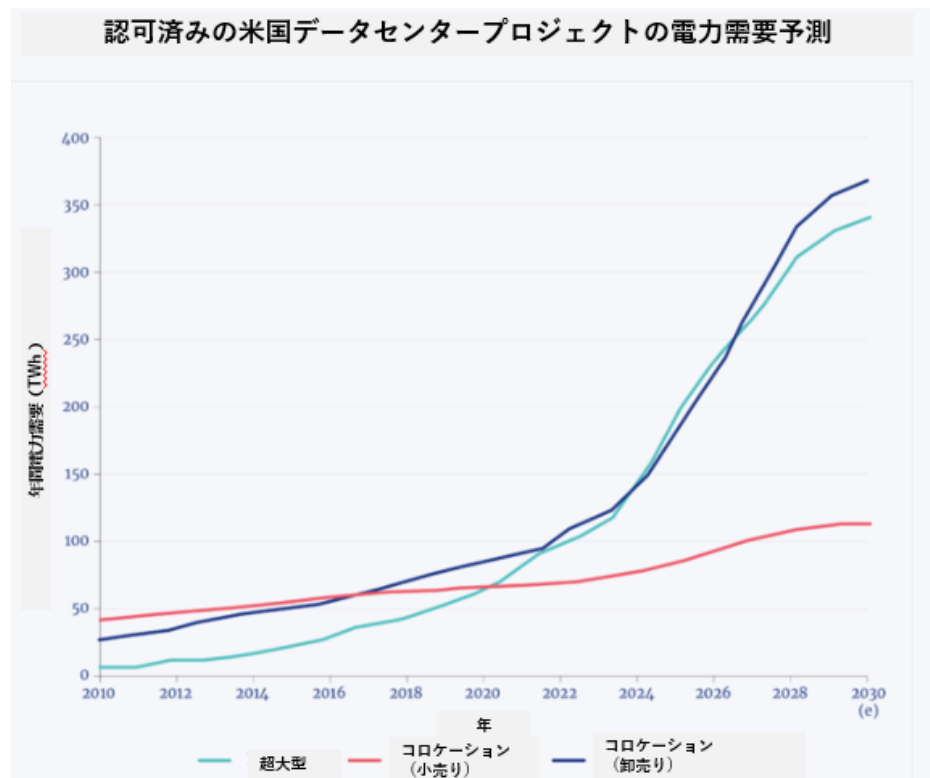
AI ツールが増えるにつれ、電力需要増加の中心は推論処理へと移行する。いずれも従来の計算処理よりもはるかにエネルギー集約的である。両分野とも、必要なツールの数や、開発後の普及範囲・使用頻度を予測する必要がある。例えばブルックフィールドの分析では、2030 年の AI 電力需要の 75% が推論処理からもたらされるとしている⁵³。

サンダー・セイド・エナジーのアナリストが採用した手法は、中核的な AI 電力需要に焦点を当てた今後起こり得る未来のシナリオに関する確実性や可能性に基づいて予測結果を導き出す上ですぐれていると言える。この手法での分析によると、50% から 90% の確実性範囲において、将来の世界的な AI 需要が 3 倍もの幅をもって変動することが示されている⁵⁴。

2.4 米国の AI デジタル電力需要：最善の予測



出典: Bank of America Institute. [“Power Check: Watt’s Going on with the Grid?”](#), July 22, 2025.



出典: Hiatt and Ryu [“Data Center Energy Demand”](#)

将来の電力供給の適切性を評価する背景には、電力会社が直面する他の新たな需要の実態が含まれる。これらはそれぞれ不確実性を伴い、製造業の国内回帰から、建物の暖房を電化しようとする州の政策、そして補助金や義務付けがなくても継続する EV の拡大まで多岐にわたる。大半のアナリストは、産業の電力需要と EV の合計がデータセンター電力需要とほぼ同等な伸びになると見ている。ただし后者は、電力供給と送電網の安定性に特有の課題を提起するもので、極めて急速かつ大規模な局所的新規負荷を伴うことに留意が求められる。

事業用不動産会社 CBRE は次のように報告している：「電力供給の可否とインフラ整備の工期が、立地選定を左右する最も決定的な要因であり続けている……電力会社は、発電・送電インフラの資本支出（CAPEX）に対し、開発業者やテナントからの拠出をますます求めるようになってきている……データセンターの立地は、電力アクセスがより迅速な新規の市場へと移行しつつある……」⁵⁵

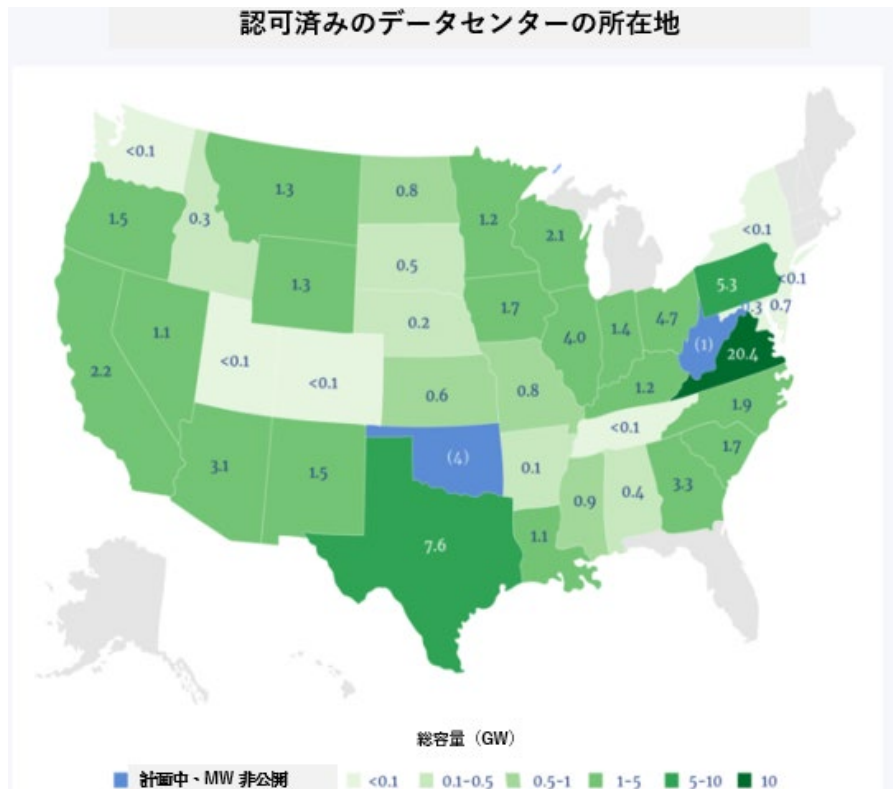
将来の米国データセンターの電力需要の下限値を推定する一つの方法は、建設中または建設許可を取得済みの施設のみを対象とすることである。2025 年半ばまでの時点でまとめられたこのリストによれば、今後 5 年間で稼働開始が見込まれる新規設備容量は 75GW 以上（稼働前施設 1,000 件以上）に上る⁵⁶。想定稼働率に基づけば、75GW は約 550TWh の新規需要に相当する。（注：ビットコインマイニングによる追加需要は約 50TWh に留まる見込み⁵⁷。）

現在許可されているプロジェクトの一部は、送電網への接続を待つことを主な理由として、遅延が生じる見込みである。一部のプロジェクトは中止される可能性もある。一方で、発表済みだが未許可の計画に関する不確実な要素も存在する。少なくともこの二つの要因はおおむね相殺されるだろうと推測するのが合理的である。すると 2030 年までに米国で追加されるデータセンター容量は約 75GW を下回らないことが示唆される。例えば S&P の予測（実施待ちの発表済み計画を含む）は約 80GW を見込んでいる点に留意されたい⁵⁸。

この背景として、ボトムアップのエンジニアリングモデルに基づく SemiAnalysis の基本シナリオでは、世界の AI 電力需要は 2030 年までに 800TWh に達すると予測している。米国は現在および将来の世界のデータセンター容量の約半分を占めるため⁵⁹、これは米国単独で約 400TWh に相当すると推計される⁶⁰（国際エネルギー機関（IEA）の予測では世界全体の成長は約 500TWh にとどまり、米国における成長は約 250TWh と推計されている⁶¹）。

データセンターだけで約 550GWh という控えめな想定に、通信ネットワークやハードウェア製造工場の電力需要増加分を加えると、2030 年代初頭における米国の純新規電力需要増加量は年間約 1,000TWh に達する見込みである。これは米国全体の電力需要の約 15~20% に相当する。

2.5 米国 AI デジタル電力需要：地域別



出典: Hiatt and Ryu “[Data Center Energy Demand](#)”



出典: Hiatt and Ryu “[Data Center Energy Demand](#)”

既存の認可済み計画の調査に基づくと、既に認可済みの新規データセンター需要 75GW のうち、4分の3以上が約 12 州で発生している。ただしほぼ全ての州で何らかの計画が進行中である。上位 6 州は順に、バージニア州、テキサス州、オレゴン州、アリゾナ州、ジョージア州、オハイオ州である。カリフォルニア州は 7 位である。同州には 1998 年に Exodus Communications がサンタクララに建設した世界初のデータセンターが存在するものの、この順位となっている。

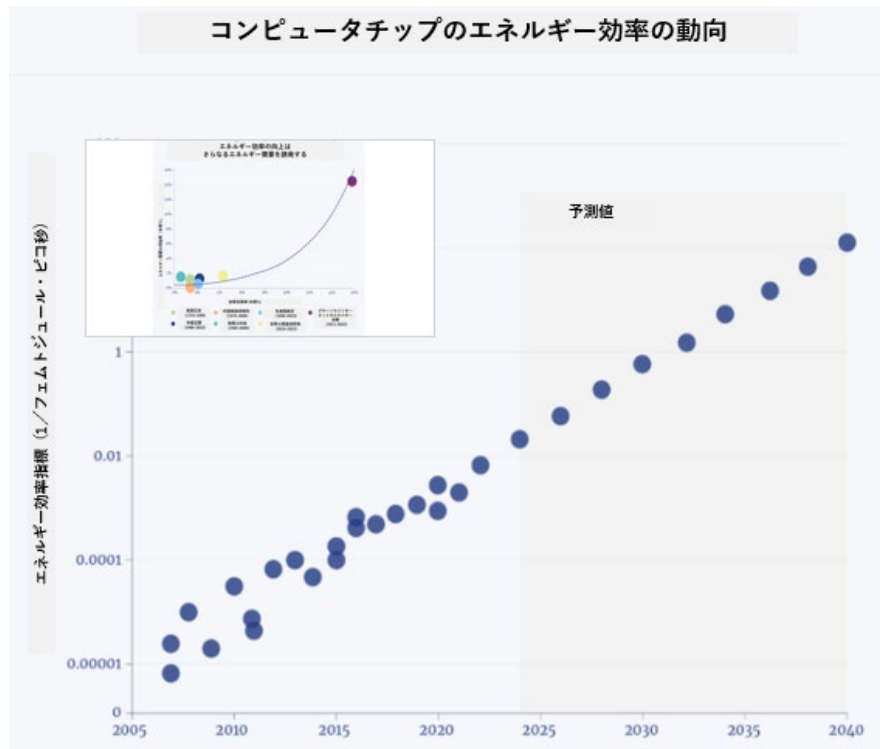
しかし、初期の事業者が地域の送電網容量を使い果たすにつれ、新たな計画や申請は、需要の規模と速度に対応できる基盤となれるエネルギー資源を有する地域へとますます移行する傾向を示している。したがって、計画はテキサス州だけでなく、ルイジアナ州、オクラホマ州、ペンシルベニア州、ノースダコタ州などのエネルギー資源が豊富な州でも増加している。加えて、これらの地域では、多くの開発業者がオフグリッドまたはプライベートグリッド型の電力ソリューションにますます注目している。

予想される需要規模を考慮すると、建設の大半が北米電力信頼性協議会（NERC）が基盤とすべき電力システムの信頼性において「高リスク」と示す系統地域で行われる点が見逃せない。既に多くの系統運用事業者が、限界状態にある系統にこれほど多くの容量を急速に追加することについて警告を発している。

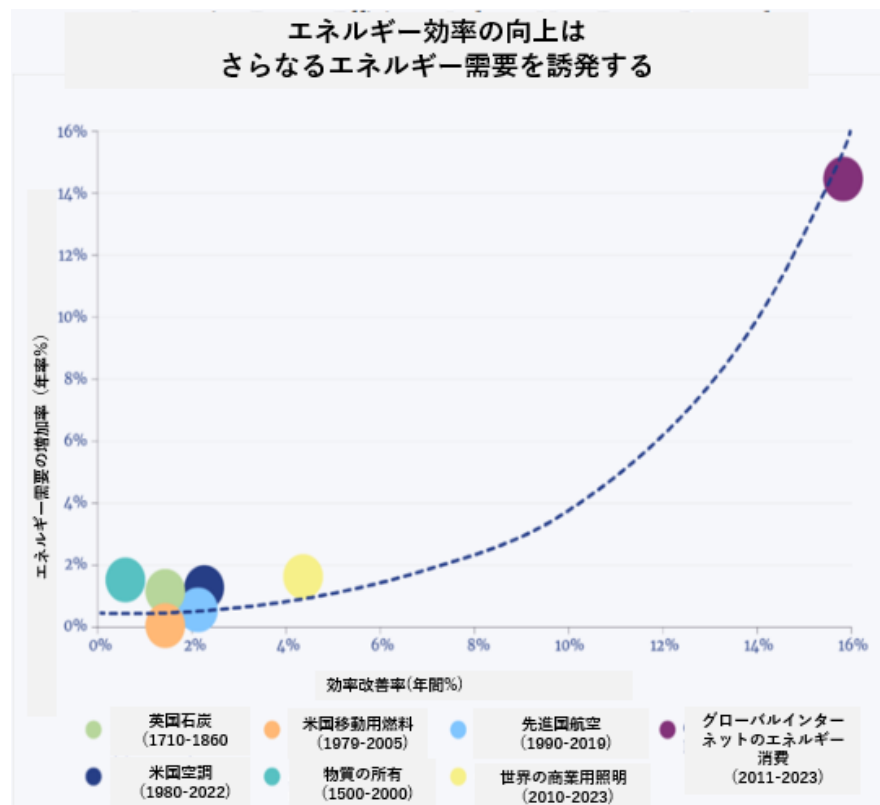
米国では 2012 年に北東部で 800 万世帯が停電して以来、気象要因以外の広範囲な停電は発生していない。1965 年にニューヨーク市全域を含む 3000 万人が暗闇に陥った悪名高い北東部停電以降、200 万人以上が停電した気象要因以外の大規模停電は計 9 件起きており、直近では 2011 年に南西部で発生している。

電力システムの安定性を維持することは、リアルタイム監視や予測分析を含む多様な技術と設計要素を要する、技術的に複雑な問題である。（このため、電力業界は 70 年前のコンピュータ黎明期に、いち早くコンピュータを導入した産業の一つとなった。）たった 1 ギガワット規模のデータセンターが追加されるだけで——ましてや数十や数百もの巨大で分散した負荷は言うまでもなく——電力システムの安定性維持に特殊な要件が生じることになる。ここで重要となるのは、技術的に実現可能かどうかということではない。何をすべきか、対策はどの程度の速さで実施できるか、そして費用を誰が負担するかである。

2.6 エネルギー効率、デジタル電力需要、およびジェボンズのパラドックス



出典: Mark Liu and H.-S. Philip Wong, “[How We’ll Reach a Trillion Transistor GPU: Advances in Semiconductors Are Feeding the AI Boom,](#)”
IEEE Spectrum, March 28,



出典: Thunder Said Energy, [Energy Intensity of AI: Chomping at the Bit](#), Apr. 18, 2024

将来のデジタルエネルギー需要を予測する上で最大の変数は二つある。一つは、AI ツールに予想外の新たな用途がどれだけ生まれるかを推測すること。もう一つは、その基盤となるAI ハードウェアの効率がどれだけ向上するかを推定することだ。関連する全てのコンピューティング技術——GPU、CPU、メモリチップ、情報伝送、さらに電力管理や冷却技術——において、飛躍的な効率向上が急速に実現するだろうことは間違いない。しかし効率向上を理由として AI 全体のエネルギー使用量の抑制を予測する根拠とするのは、本末転倒である。

歴史が示すように、エネルギー効率の向上は、全体としてはエネルギー使用量の増加につながっており、減少には至っていない。例えば航空機は、最初の民間旅客ジェット機に比べエネルギー効率が3倍向上している。だがこの効率化は燃料の使用総量を減らさなかった。むしろ、その後の航空業界全体のエネルギー使用量を4倍に増加させるきっかけとなった⁶²。

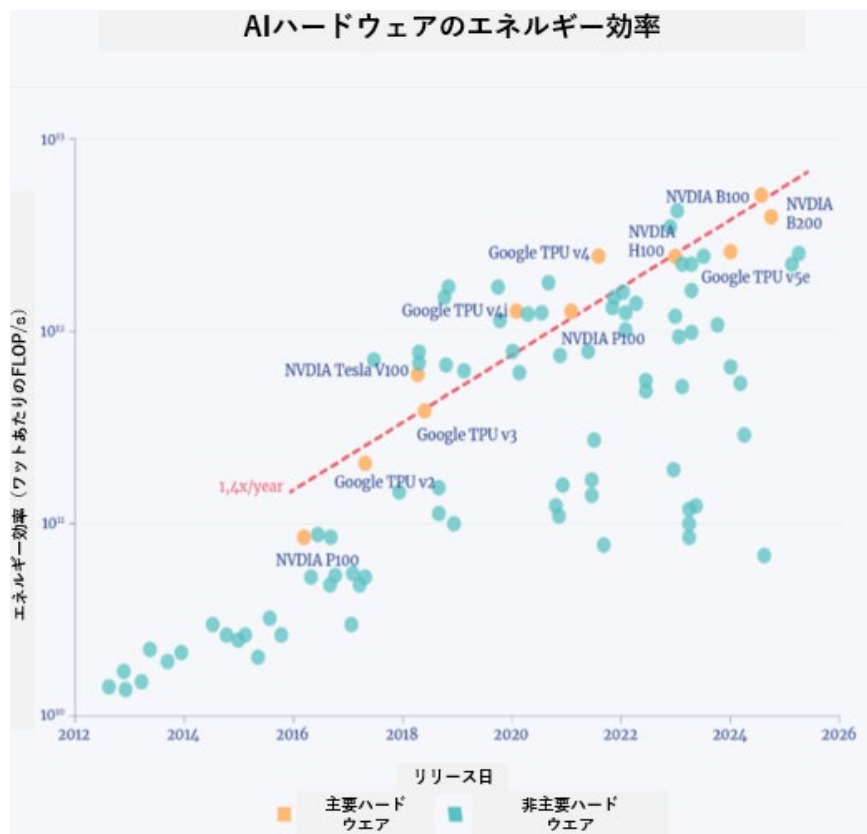
シリコンにおける各論理演算の根本的な効率は、過去20年間だけで10万倍向上した。そして技術ロードマップ——予測ではなく、技術者が実際に導入を計画している内容——によれば、今後20年間で同等の向上が見込まれる⁶³。

シリコンロジックのエネルギー効率が飛躍的に向上したことこそが、コンピュータの普及をもたらし、ひいてはコンピュータエコシステム全体のエネルギー需要増加の主な要因となった。仮に現在のデータセンター1件が、1980年代前後の効率で稼働した場合、米国全体の電力網と同等の電力を必要とする。だが効率化が進んだ結果、現在では、数千のデータセンターの合計でも日本で消費される電力と同じ程度で済むのだ。

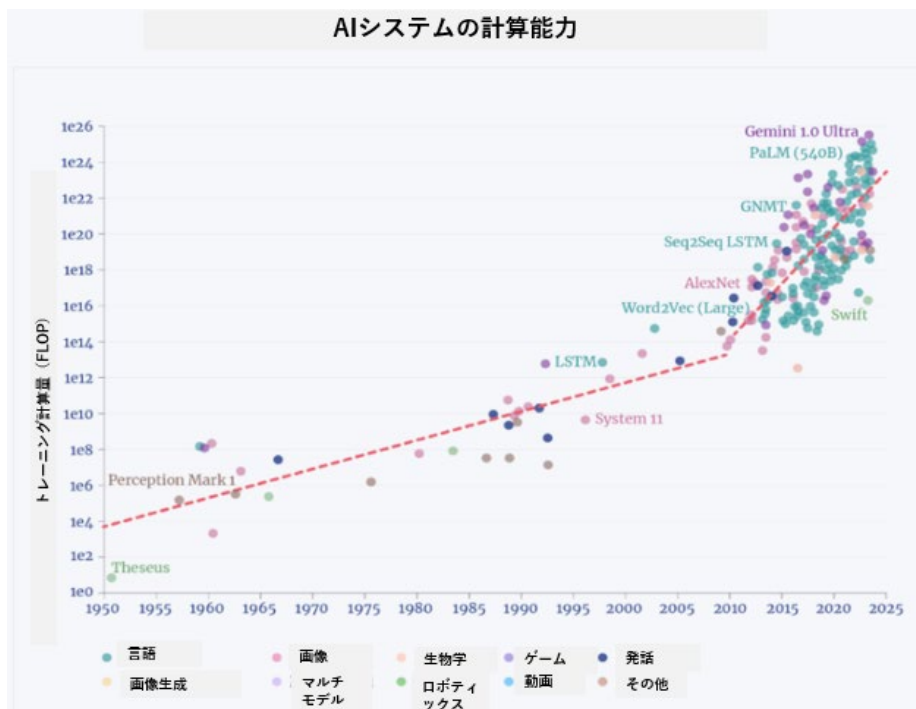
大半のアナリストは、この現象をイギリスの経済学者ウィリアム・スタンレー・ジェボンズに因んで「ジェボンズのパラドックス」と呼んでいる。彼は1865年の画期的な論文でこの現実を体系化した。しかしジェボンズ自身は、これがパラドックスではないことを確信していた。彼はこう記している：「燃料の[効率]的利用が消費の減少に等しいと考えるのは、まったくの概念の混同である…[効率]性をもたらす新たな技術は消費の増加をもたらすだろう」⁶⁴現代の経済学者の中にはこれをリバウンド効果と呼ぶ者もいるが、それは本質を捉えていない⁶⁵。効率性の追求は需要の増加を意味するのだ。

言い換えれば、効率性の向上は機械やプロセスから得られる利益を広く普及させる。人々と企業が提供される利益をさらに求める限り、効率性によるコスト低下は需要を刺激する。サンダー・セイド・エナジーのアナリストが示したように、効率性向上がもたらす需要喚起効果はデジタル領域においてさらに増幅されるようだ⁶⁶。

2.7 AI の効率性：巨獣に餌を与える



出典: [“Leading ML Hardware Becomes 40% More Energy-Efficient Each Year,”](#) Epoch AI, May 2022.



出典: Jame Sevilla et al., [“Compute Trends Across Three Eras of Machine Learning,”](#) Epoch AI, May 2022.

過去 10 年間で、エンジニアは AI ハードウェア、各種 GPU チップ、および類似のシリコン チップ（例：Google の Tensor Processing Unit）のエネルギー効率を約 1000 倍向上させた。この効率化こそが、AI トレーニングのための機械学習に利用可能なコンピューティング能力の指数曲線に転換点をもたらした要因である。

ますます強力で効率的、かつ低コスト化する AI（1 ドルあたりの計算能力は 3 年ごとに倍増している⁶⁷）は、機械学習に利用可能なコンピュータ能力の規模を天文学的な増加へと導いた。1960 年から 2010 年までの 50 年間で、トレーニング用計算能力は 100 万倍に増加したのである。

2010 年以降の 15 年間で、AI モデルを学習させるための計算能力は約 1 兆倍に増加した。エネルギー効率の飛躍的向上と、使用されるコンピュータチップの天文学的な増加という二つの傾向が交差した結果、驚くべきことではないが、AI モデルの学習に必要なエネルギーは、過去 6 年間で 1000 倍に増加する⁶⁸という結果がもたらされた。

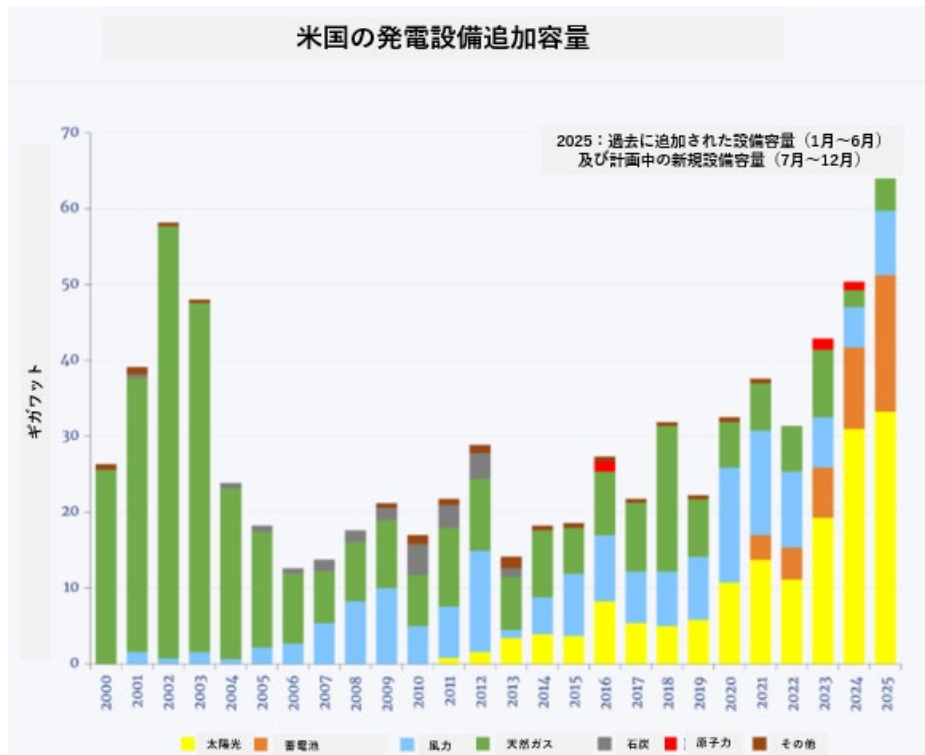
では次に何が来るのか？さらなる効率化だ。コンピュータの歴史が示すように、技術者が効率向上を実現し限界を押し広げるにつれ、新たな効率化の手法が発見されてきた。イノベーターたちはいずれも、学習手法の改良（異なる論理、新たな数学）や、データを手当たり次第に処理する「ブルートフォース」を回避するデータキュレーション手法を既に導入している。AI ソフトウェアの主要な燃料は膨大なデータであるため、データの選択・事前評価・必要に応じた計測・移動といった技術は、膨大なエネルギーの節約につながる。例えばサムソンの研究者らは最近、大規模言語モデル（LLM）を実行する新技術を公表した。これにより学習速度が 12 倍に向上し、エネルギー使用量は削減したという⁶⁹。

最新の GPT-5 大規模言語モデルは、初期の GPT-4.5⁷⁰ よりも少ない計算リソースで動作するとの報告がある。もしそうなら、AI の急速な普及にとって非常に良い兆候だ。今後、今日の最先端技術である MW クラスの大規模言語モデルが、より効率的かつ低コストで普及していくことが予想される一方、ごく少数の最先端モデルは GW 規模で引き続き最前線に立ち続けるだろう。計算能力の歴史は単に似通うだけではない——繰り返されるのだ。

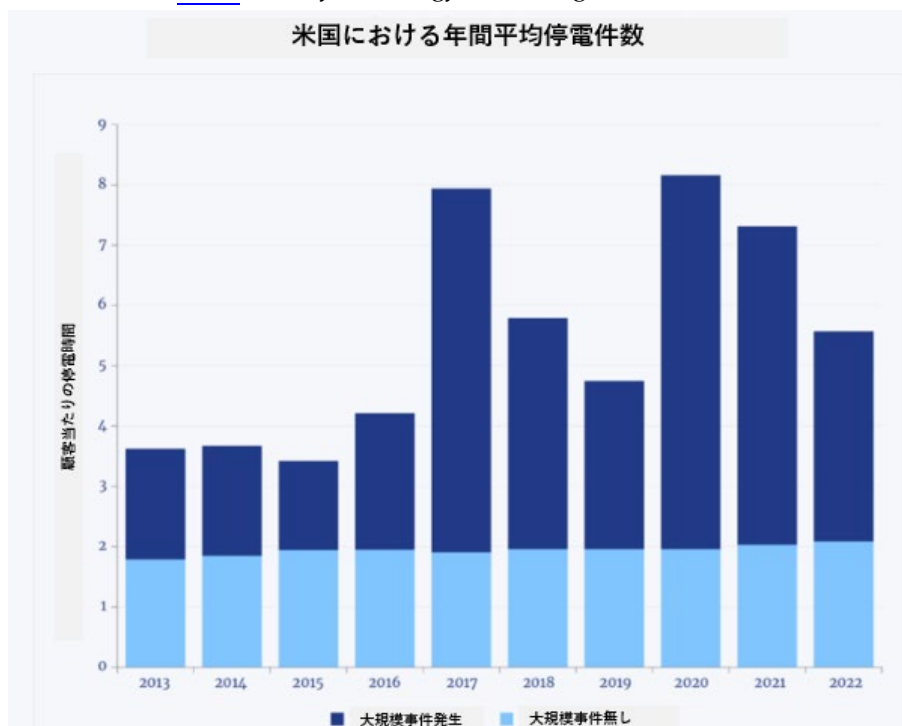
データセンターに電力を供給する送電網の上流側にも効率向上の余地がある。最近の分析によれば、AI 駆動型分析（一種の好循環）によって、データセンター内部の電力消費タスクを柔軟に調整することで、ピーク負荷に対応するための新規発電所の必要性を最小化できると指摘されている⁷¹。ただし、こうした技術の理論モデルは、総需要を最大でも 20% までしか削減できない。つまり一定の意味はあるが決定的なものではない。

3. AI への燃料供給

3.1 現実への対応



出典: [U.S. Developers Report Half of New Electric Generating Capacity Will Come from Solar](#), Today in Energy, EIA, August 20, 2025.



出典: [U.S. electricity customers averaged five and one-half hours of power interruptions in 2022](#), Today in Energy, EIA, January 25, 2024.

国際エネルギー機関（IEA）の「Energy and AI」報告書でも明確に指摘されている通り、AIは世界的な電力需要増加の最大の要因ではない⁷²。しかしAIは、需要予測者がこれまで見落としてきた新たな種類の需要を生み出している。それはその規模と速度において他に類を見ないものなのである。個々の施設は都市レベルでの電力需要を有し、しかもわずか2～3年で稼働を始めている。米国においては、AIは電力需要の新たな要因として最大級（デジタルエコシステム全体を考慮すれば、おそらく最大）のものとして位置付けられる。

2030年までに米国が追加で必要とする電力容量が100GW程度で済むのか、それとも200GWを超えるのかは不明であり、それを知ることも不可能である。その約半分はデジタルエコシステム向けとなるはずだ。しかし、ほんの数年前までは、このような需要は想定されていなかった。そしてそれは、成長が停滞した20年の間に進化した、従来通りのアプローチでは対処できないものだ。

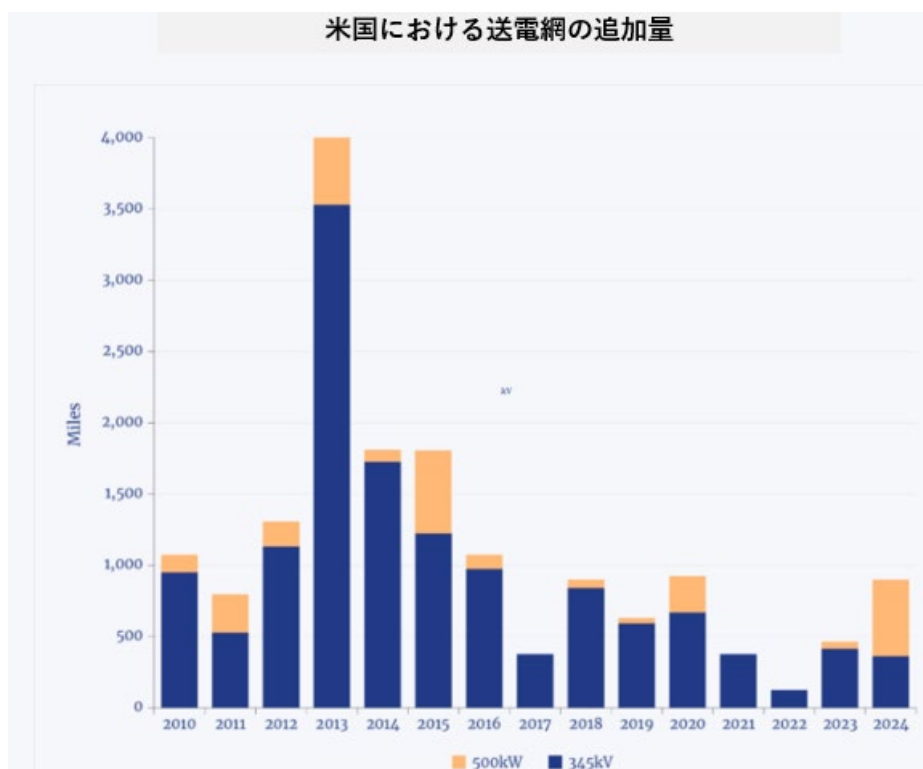
歴史が示すように、米国の電力システムは20年前、年間30ギガワットから50ギガワットのペースで容量を増強していた。エネルギー情報局（EIA）のデータやメディア報道からは、太陽光・風力発電による新規供給量がほぼ同規模で増加しているため、新たな需要に対応できる態勢が整っているように見えるかもしれない⁷³。しかし現在広く認識されているように、約35GWの太陽光発電容量（2025年に追加される見込み量）が持つ発電能力は、従来型発電所10GW未満でしかないとされる⁷⁴。今後さらにどれだけの太陽光発電容量が追加されるか（現在さらに40GW程度の太陽光発電が建設中である⁷⁵）にかかわらず、計画者は、この容量の電力価値を75%減算すべきであることを肝に銘じるべきである。なぜなら、そのような設備は1年のうち75%の時間、何も発電しないからである。

太陽光発電に加え風力発電の新規設備容量を追加しても、2025年の発電電力量の増加は過去20年間での最低水準を下回る見込みである。送電網規模の蓄電池（EIA報告にも含まれる）は、時間調整・安定化・ピークカットに有用とはいえ、エネルギー源ではないことは明らかである（いずれも重要だが、繰り返しになるがエネルギー源ではないのだ）。

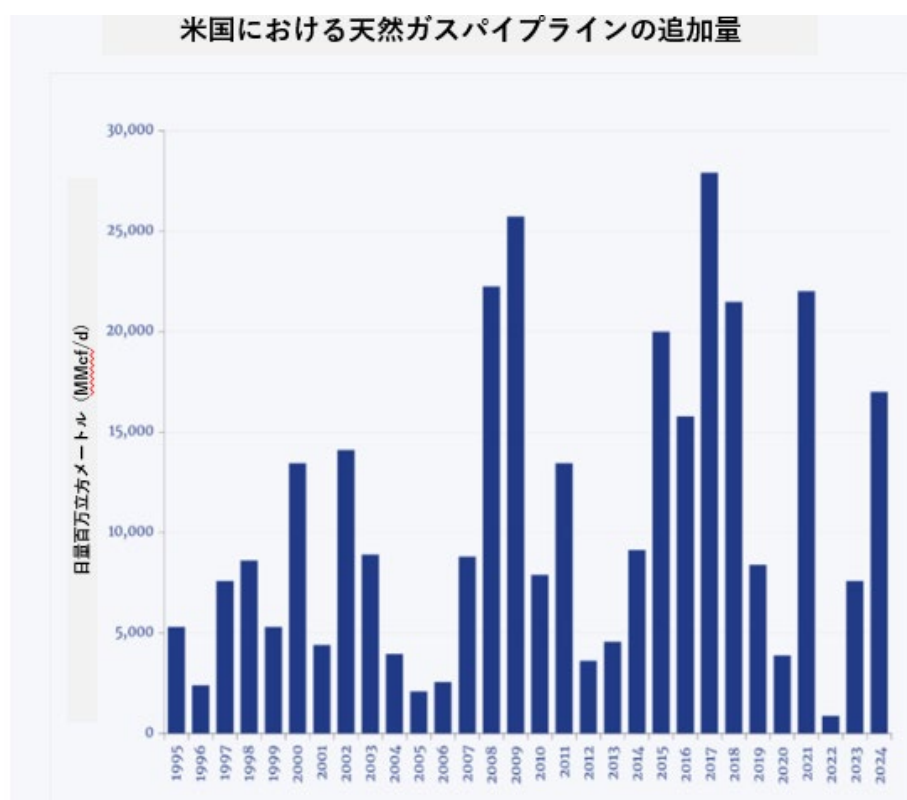
政策決定者は現在、AIインフラに対する市場の需要を確実に満たす方法を検討する必要に迫られている。それが実現するかどうかは、ひとえに、必要な場所と時期（近い将来）の双方で十分な電力が供給可能かどうかにかかっている。

この課題への解決策としては、消費者のコスト増や電力システムの信頼性低下を招く案に対する政治的許容度が低い状況だからこそ、さまざまな選択肢が浮上している。その一方では、停電の発生率と継続時間が緩やかに増加している傾向が示されており⁷⁶、北米電力信頼性協会（NERC）からは現行の電力会社の計画では広範囲にわたる停電リスクが高まるとの警告も発せられている。

3.2 実現可能な技術に裏打ちされた選択肢は何か



出典: Nathan Shreve et al., [“Fewer New Miles: Strategic Industries Held Back by Slow Pace of Transmission,”](#) Americans for a Clean Energy Grid, July 2025



出典: [“The Least U.S. Interstate Natural Gas Pipeline Capacity on Record Added in 2022,”](#) Today in Energy, EIA, March 2, 2023

都市規模の負荷を持つ新たなデータセンターに十分な電力を供給するための解決策とその制約には、二つの異なる領域が絡む：技術者が構築可能な範囲と、政策当局が許可する範囲である。いずれの場合も、短期的な選択肢は長期的な選択肢とは性質が異なる。

政策や規制は重大な結果をもたらす。現実には、政策変更の必要性を示唆している。何をすべきかを判断するには、まず何ができるかを知らねばならない。単純化して言うならば、政策決定者はインセンティブや障害を追加したり取り除いたりすることはできるが、物理法則や、実際に予見可能な将来に何が建設可能かといった工学的現実を変えることはできない。

制約には、二つの、異なりつつ重複もする期間がある。ひとつは大規模にすぐできること（つまり、今後数年の間にやれること）、もうひとつは長期的な成長を確保するために今やるべきことである。ここでは、勢いのある新しい産業エコシステムのチャンスを逃さないために、近い将来にフォーカスする。（もちろん、長期的には成長の可能性を無視して政策を考えざるを得ない状況にならないように、今のうちから政策やプログラムを整えておく必要がある。）

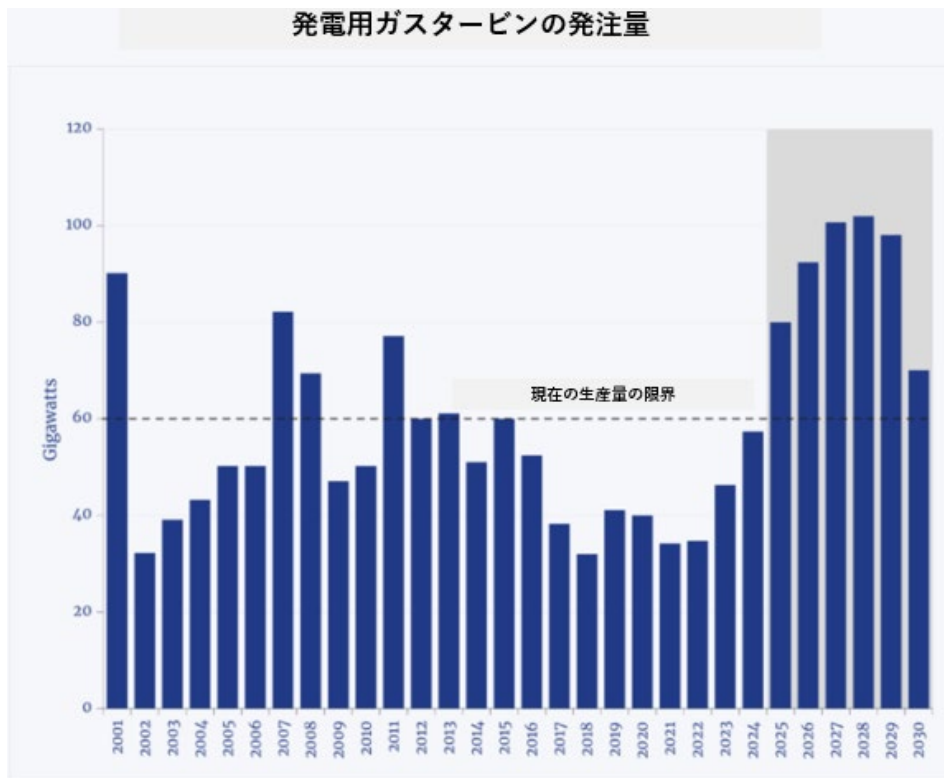
近年の歴史において、エンジニアたちや建設業者らは、高い信頼性を維持しつつ、必要な時と場所で数百 TWh の発電能力を迅速に建設する能力を示してきた。これが再び可能かどうか、それは、政策当局や政治家らが、新たな需要に対応しつつ地域の電力網の信頼性を損なわない技術的選択の実施を許可できるかどうかにかかっている。

迅速に対応可能な選択肢のひとつは、既存の約 100GW の従来型発電設備容量の廃止計画を延期するか、撤回することを確実にすることだ。これにより、新たな発電設備容量の必要性へのプレッシャーが軽減されるだけでなく、電力網の信頼性の確保にも役立つであろう⁷⁸。

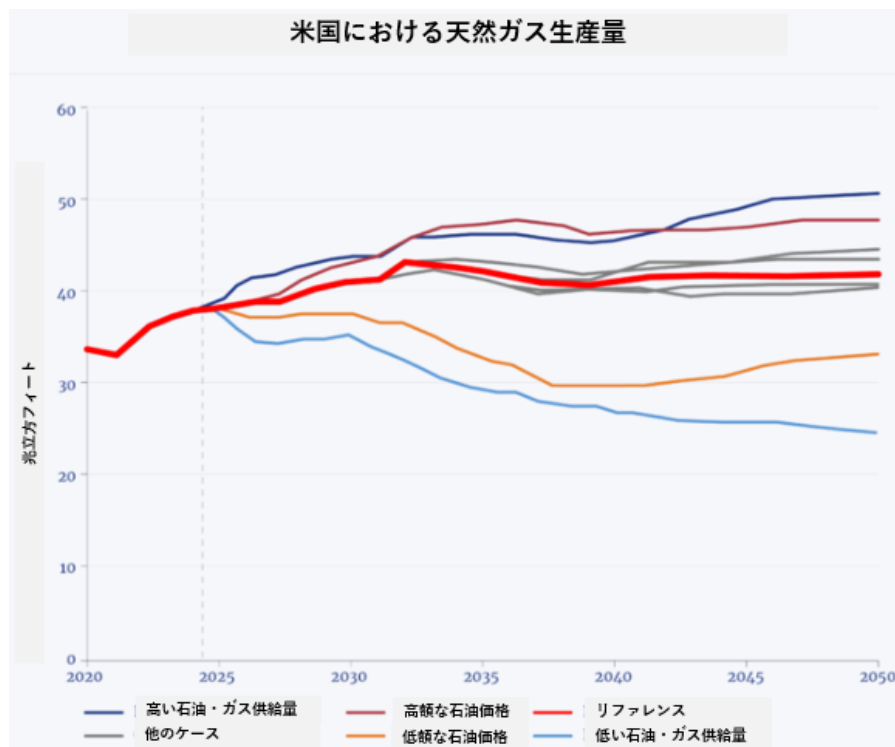
近い将来におけるもうひとつの選択肢としては、遠隔地にある太陽光発電施設を接続するために送電網を拡張すること（その電力を安定させるための追加の蓄電池を含む）と、天然ガスのパイプラインの増設が挙げられる。

これら二つの選択肢に関連して言えば、電力送電線の建設は過去 10 年間減少傾向にある⁷⁹一方で、天然ガスパイプラインの拡張は順調に進んでいる⁸⁰。許認可の手続きを無視するならば、エネルギー輸送用の 500 マイル（約 800 キロメートル）の建設にかかる時間は電力送電線で約 2~4 年⁸¹であるが、天然ガスパイプラインでは 12~18 か月である⁸²。

3.3 天然ガス（タービン）方式という選択肢



出典: Stephen Stapczynski, Akshat Rathi, and Josh Saul,
[“AIDriven Demand for Gas Turbines Risks a New Energy Crunch,”](#)
 Bloomberg Green, October 1, 2025



出典: [“Annual Energy Outlook 2025,”](#) EIA, Apr. 15, 2025

短期的な選択肢には、ごく少数の廃止された原子力発電所の改修および再稼働を除き、原子力エネルギーは含まれない。最近のウェスティングハウスと米国商務省との間の 800 億ドルの契約⁸³は、再活性化の兆しではあるが、仮に建設が明日始まったとしても、今後 6 年程度でギガワット規模の原子力設備が出現することはあり得ない⁸⁴。同様に、この期間中におそらく数十基のさまざまな次世代小型炉の初号機が建設されることが予想されるが、ギガワット規模の能力を持つことはないと考えられる⁸⁵。

短期的な選択肢には石炭火力発電が含まれる。これには利用率の低い発電所の稼働を増やすことや、以前に廃止が計画された発電所の寿命延長や廃止撤回がある⁸⁶。2025 年前半における米国の石炭火力発電量は、2024 年同時期と比べて 15%増加している⁸⁷。石炭発電は短期的に減少する可能性は低く、むしろわずかに拡大し続ける可能性がある。その理由は、行政の政策や大統領令だけではなく、電力会社が現場において実際に直面する状況によるものである。

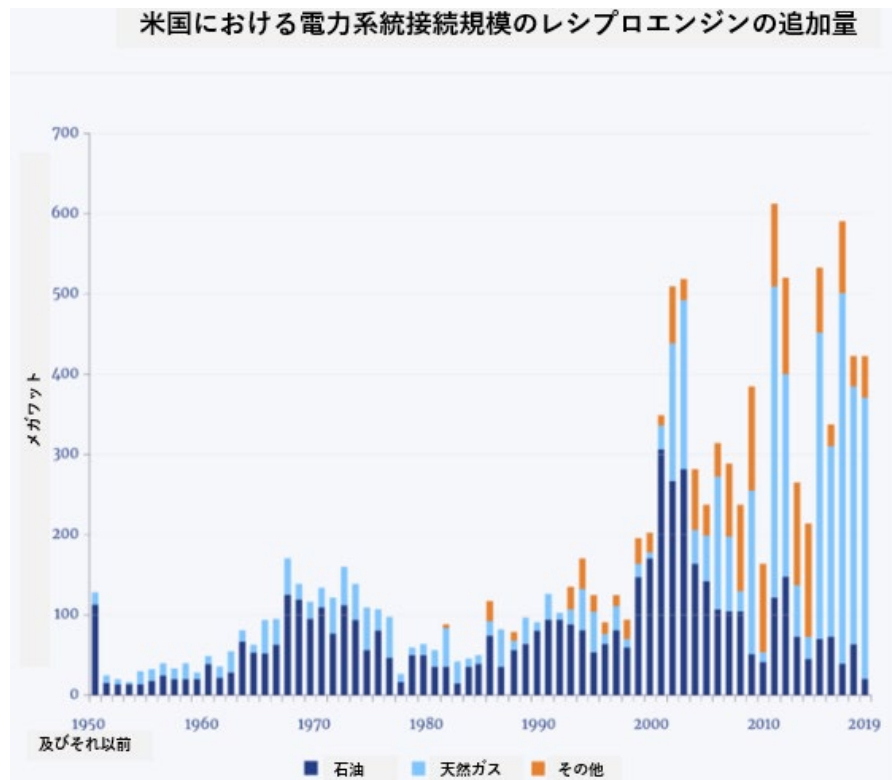
しかしながら、これまでに建設中の数十のプロジェクト、例えばルイジアナ州における Meta の 1.5GW プロジェクトでの天然ガスタービンや、キャタピラーのレシプロエンジン⁸⁸の使用などから見える政策意思決定の方向性や、ベンダーの発注状況から見えてくるのは、天然ガス発電こそが、今後のデータセンター向けに計画される新しい電力の主要な供給源となっていく、ということだ。現在、天然ガスタービンの発注は、主要なガスタービン製造業者の 2031 年までの製造能力を上回っているほどである⁸⁹。

例としてあげると、追加のデータセンター容量の下限を 55GW と仮定し、それがすべて天然ガスで賄われるとした場合、2030 年までに約 100 億立方フィート/日の追加のガスが必要となるということになる。参考までに、米国の産業界は LNG 輸出のために、2017 年以降、ガスの生産と供給を約 150 億立方フィート/日増加させてきた⁹⁰。

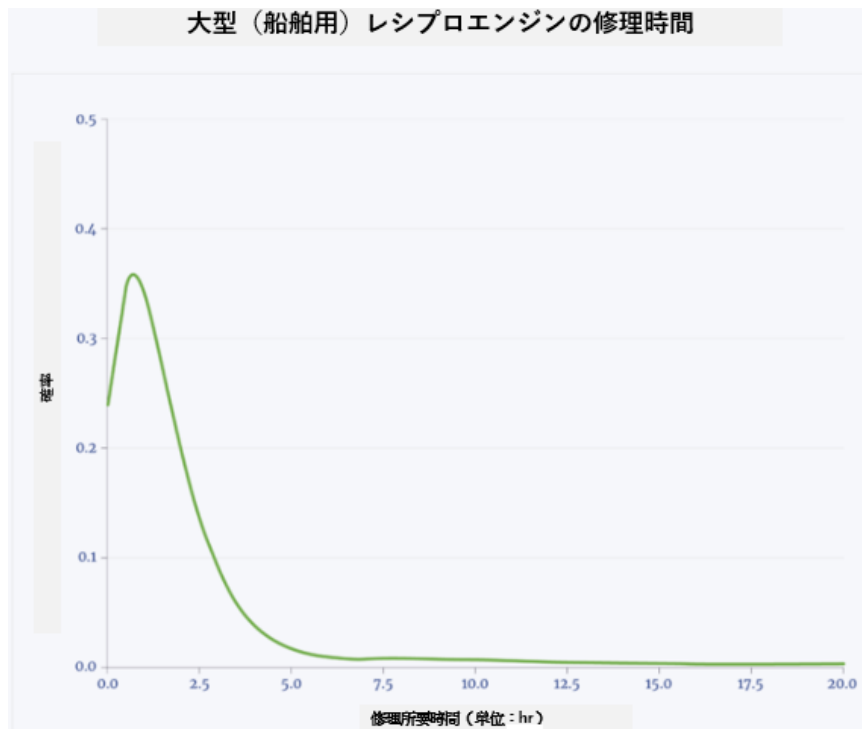
しかしながら、データセンターの拡張と同時に、新たに建設中の LNG ターミナルの輸出能力を支えるために、さらに毎日 15 億立方フィートの天然ガスが必要となるであろう⁹¹。そしてその組み合わせに加え、国内回帰する産業向けの新たな天然ガス需要も見込まれることから、2030 年までに米国の天然ガス総需要はおおよそ 20%増加することが示唆されているのである。

ここ最近の歴史を振り返れば、合理的な許認可環境さえ整っていれば、パイプラインの容量はその範囲内で十分に拡張可能であることを示している。シェールガス鉞区における生産能力はこの需要増に対応可能であるものの、実際に実現可能となるのは EIA の高価格シナリオに沿った場合に限られる可能性はある。一方で、近い将来においては複合サイクルガスタービンの供給に制約があることから、他の選択肢が必要かどうか検討する必要が生じ、また、天然ガス需要が本当に発生するだろうか、という疑問も生じる。

3.4 天然ガス（エンジン）方式という選択肢



出典: [Natural Gas-Fired Reciprocating Engines Are Being Deployed More to Balance Renewables](#), Today in Energy, EIA, February 19, 2019.



出典: Spencer August Dugan and Ingrid Bower Utne, "[Statistical Analysis of Vessel Loss of Command Frequency](#)," Maritime Transport Research 6 (June 2024)

主要なコンバインドサイクル発電のメーカーはすべて、生産能力を増強する計画を発表しているが、海外および米国で工場を拡張するには数年を要するため、そのような計画は短期的な発電プロジェクトへの供給には大きな影響を与えるものではない⁹²。コンバインドサイクル発電の納期が数年にわたることを考慮しつつ、今後数年間で電力を供給するために、開発者たちはすでにシンプルサイクルタービンや大型往復動エンジン（レシプロエンジン）をより多く使用する方向に動いている。天然ガスはエンジンで燃やすこともできるのだ。

シンプルサイクルガスタービンもレシプロエンジンも、大規模に迅速に製造することができる。過去 10 年間で、世界はおよそ 500 GW のシンプルサイクルガスタービンを導入してきた⁹³。同様に、発電用大型レシプロエンジンの世界年間生産量も約 100 GW/年に上る。これらは特に産業用途、とりわけ遠隔のオフグリッド地域などで一般的に使用される発電方式である⁹⁴。

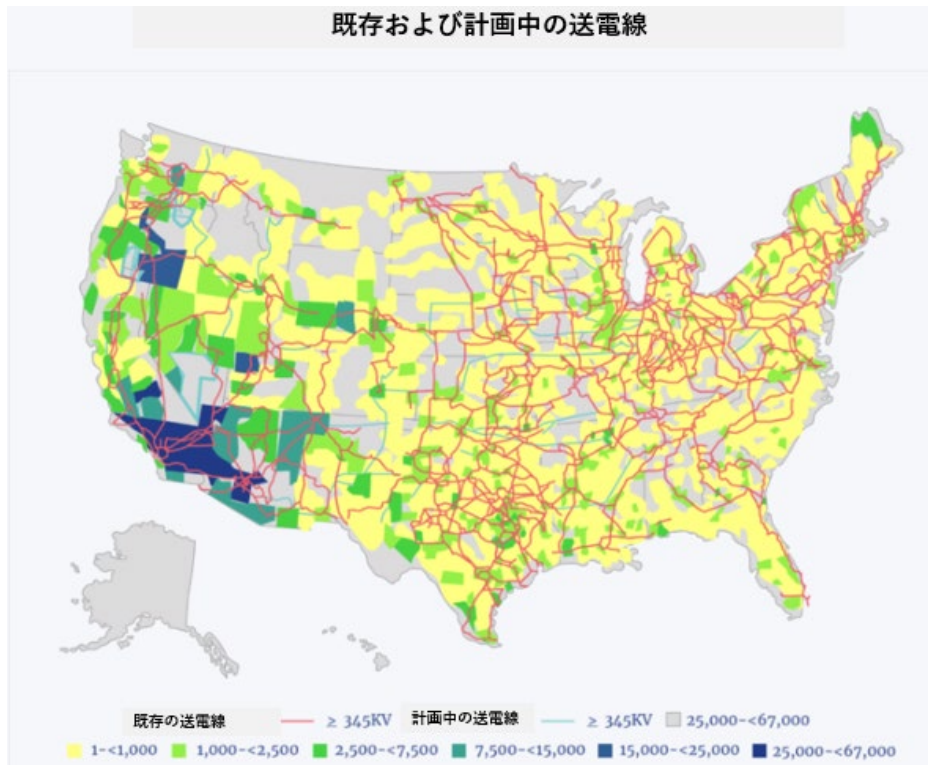
レシプロエンジンは、データセンタープロジェクト設計においてますます注目されつつあり、例えばルジアナの 2GW 規模のメタ社のプロジェクトや、テキサスの新しい 2.3GW 規模のオラクルプロジェクトがその方式である⁹⁵。こうした設計の典型例として、2MW から 10MW のエンジン発電機群がプールされ、数百メガワットの容量を迅速に生み出す。昨夏、キャタピラー社はユタ州の 5GW 規模のデータセンタープロジェクトへの参加を発表した。同社の 2.7MW クラスのレシプロエンジンを活用する予定だそうである⁹⁶。

グリッド規模のレシプロエンジンの使用は新しいものではない。2000 年頃に、間欠的な風力発電の大規模導入と同時に、多くの電力会社が発電の変動を管理し、ギャップを埋めるためにレシプロエンジンを導入し始めたのである。それは、風力や太陽光発電の予期せぬ急激な出力低下を補うために、非常に迅速に始動することができる。電力会社向けクラスのレシプロエンジンの平均サイズは数 MW から 10MW に増加し、2020 年までに追加された総設備容量（最新データ）は約 3GW に達した⁹⁷。

シンプルサイクルのタービンやレシプロエンジンは、排出量がやや高くなる可能性があり、許認可手続きを複雑にすることがある。また、熱効率が低いため、1MW あたりのガス需要が増えるという影響があるが、廃熱を吸収式冷却に利用できるため、データセンターの冷却に必要とされる地域水資源への負荷を軽減することが可能である。特筆すべきは、大規模なレシプロエンジンは世界的な使用されており、動作の信頼性に関しての豊富なデータが蓄積されている点である。何千隻もの船舶に搭載されている同様のエンジンは高い信頼性を示しており、故障後の典型的な修理時間は数時間以内であることが確認されているのである⁹⁸。

天然ガスで駆動される燃料電池は、レシプロエンジンと同規模のもう一つの選択肢を与えてくれる。Bloom Energy 社はデータセンター向けに特化したソリューションを開発しており、1GW⁹⁹を超えるプロジェクトを発表している。

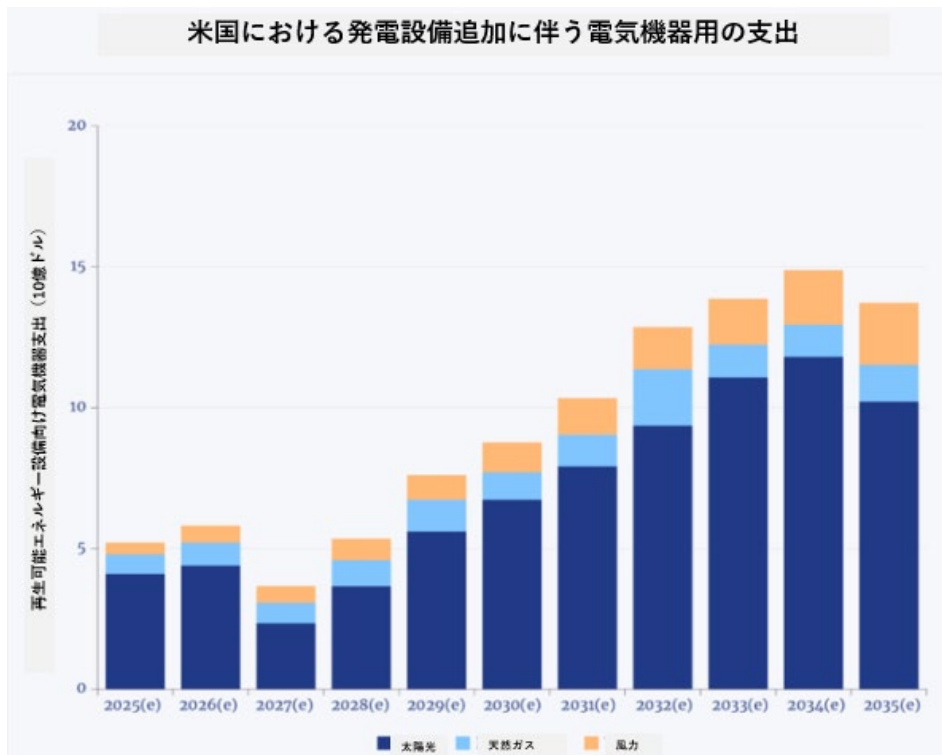
3.5 ソーラー（バッテリー）方式という選択肢



Source: Will Gorman et al.,

[“Grid Connection Barriers to Renewable Energy Deployment in the United States,”](#)

Joule, Volume 9, Issue 2, February 19, 2025.



出典: Andrew Obin, “Removing ‘Grid’ Lock 3.0: Updated Deep Dive on US Grid and Power Gen Drivers,” Equity Americas Industrials/Multi-Industry, BofA Securities, June 11, 2025

GW 規模のデータセンターにおいては都市規模の負荷がかかるという事実は、将来の電力選択肢に対して課題と機会の両方をもたらす。このような大規模な負荷があるにもかかわらず信頼性を損なうことなく統合するという課題は、實際上、電力事業の歴史において前例のないものと言えよう。また、このような需要は、十分な送電線が建設されることを前提として、電力網への接続を待つ多数の太陽光発電施設を吸収する機会も提供するであろう——もちろん、接続待ちには、手に負えないほどに遅れたり順番待ちが蔓延したりしているのではあるが。さらに、太陽光の本質的に間欠的な特性に対応するためには、バランスシステム（特にバッテリーや重要な電力管理ハードウェア）とバックアップの発電設備が必要である。

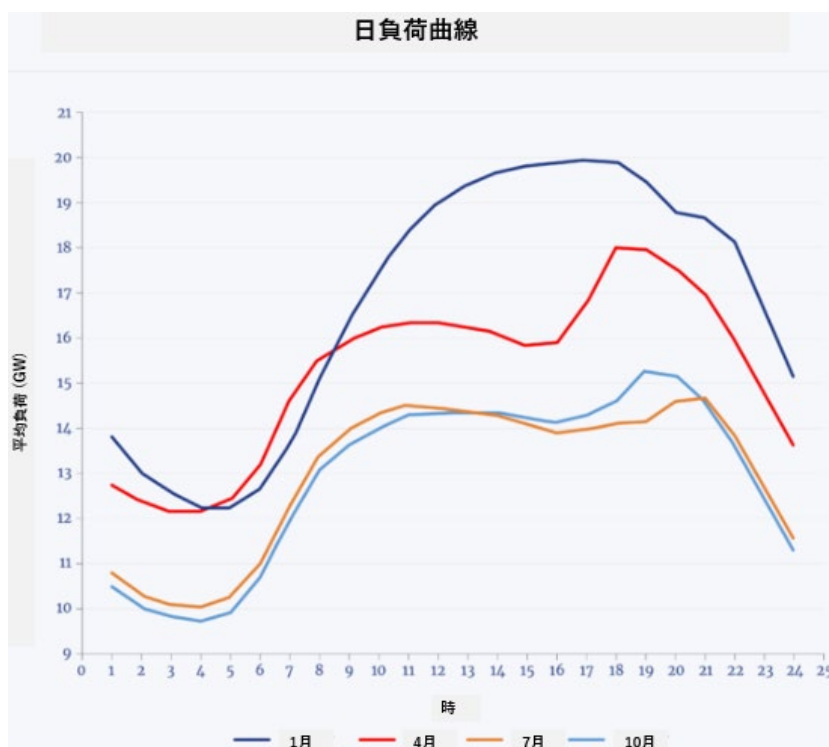
世界で最も多くのデータセンターが集中するバージニア州に拠点を置くドミニオン・エナジー社は、データセンターによるシステム電力の需要全体が倍増すると予測している。同州は、既存の太陽光および風力を合わせた 10 GW の発電容量をほぼ倍増させる計画を示している。注目すべきは、これほど大規模な太陽光・風力資源があっても、ドミニオンが供給する電力の 40% は天然ガスから、30% は原子力から供給されており、既存の太陽光・風力の設備からの供給は 5% 未満に過ぎないということである¹⁰⁰。将来においても状況は同じであろう。

全国レベルでは、アナリストや支持者らが頻繁に指摘するように、追加の送電容量の不足が、太陽光発電の利用（または拡大）における主要な障害となっている¹⁰¹。データセンターの運営者は日当たりの良い地域に施設を設置し、送電線を使わずに独立運転可能な太陽光発電・蓄電池システムを構築することも理論的には可能である。今のところ、そのような建設計画は発表されていないが、ハイブリッド方式（太陽光と蓄電池に、発電機を組み合わせたもの）の導入は近づいており、実施可能になりつつある。

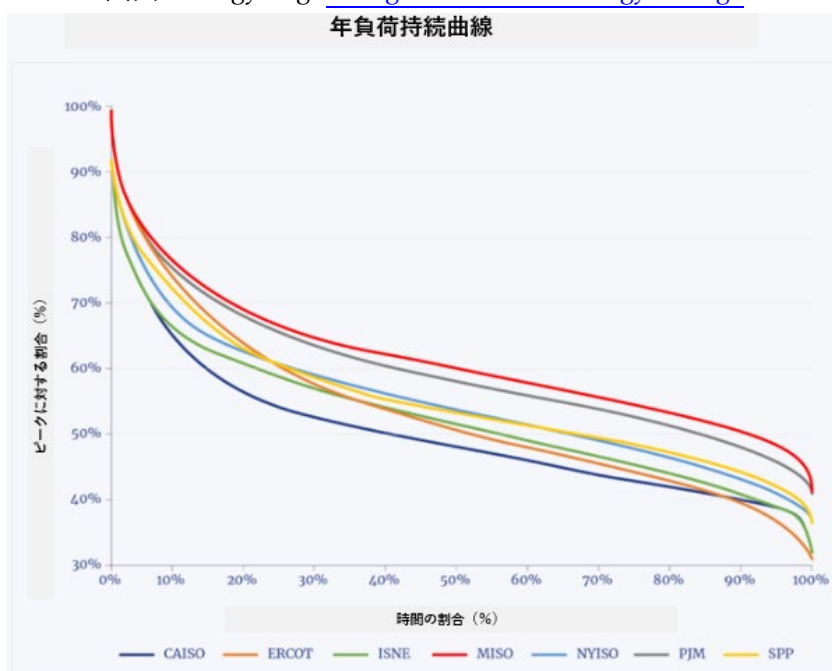
太陽光発電の計算においてしばしば無視されがちなのは、太陽光および風力は間欠的であるために、電力の供給とグリッドの安定性を確保するために、ワット当たりではるかに多くの補助電気設備および電力制御システムの使用を必要とするという事実である¹⁰²。（実際、このようなグリッドマネジメントハードウェアおよびバランス制御の不備不足が、2025 年のイベリア半島大規模停電の直接的な原因であった。）

つまり纏めるとこう説明できる。好条件で日照量の多い場所においても、独立型 1GW のプライベートグリッドは、グリッド規模の信頼性に名目上見合うためには、約 60 億ドル規模の太陽光発電とバッテリー施設が必要である¹⁰³。代わりにレシプロエンジンや単純サイクルタービンを建設すれば、同じ信頼性のある電力を 10 億ドル未満で供給することが可能である。このように比べてみると、グリッド統合型の太陽光発電や、あるいは将来的には小型で現地設置型の原子力発電所へと関心が向くのも理解できるであろう。

3.6 パワーマネジメント：二つの曲線の物語



出典: energymag: [a blog dedicated to energy storage.](#)



出典: Tyler H. Norris et al, [Rethinking Load Growth: Assessing the Potential for Integration of Large Flexible Loads in US Power Systems](#), Nicholas Institute for Energy, Environment & Sustainability, Duke University, 2025

電力業界においては、24時間365日電力を供給する際の課題が、2つの曲線によって左右されることは以前よりよく知られている。市場の電力需要は、1日に最大で2倍も変動することがある。これは日負荷曲線を見るとよく分かる。一方で年間を通じて平均すると、総発電

時間のごく一部しかピーク需要を満たすためには使用されない。これは年負荷持続曲線を見ると分かる。

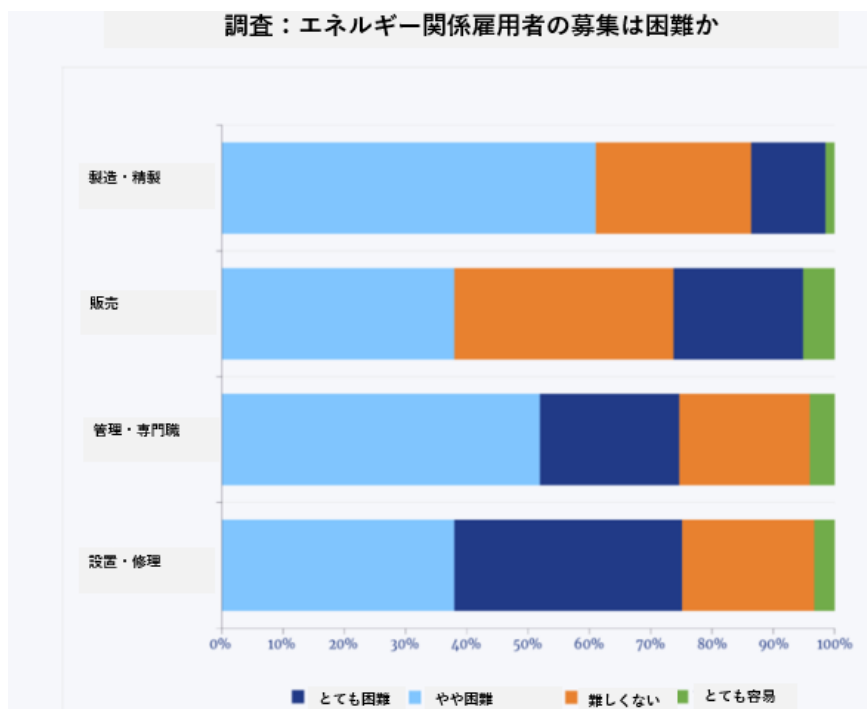
需要の変動をより適切に管理できれば、発電所の数や送電システムの規模を最小化することにより、資産や資金を節約できるという考えは古くからある。現代の高度な技術や手法によるデマンドサイドマネジメント（DSM）プログラムの起源は、1973～74年および1979年の石油危機にさかのぼる。（当時は、石油は米国の電力供給の約15%を占めてたが、現在では1%未満である。）

DSMの考え方は単純だ。経済的なインセンティブと技術を組み合わせることで、顧客にピーク時の使用を減らさせ、使用を谷間の時間帯に移すよう促したり、または義務付けたりすることができる。大規模産業においては、必要に応じて負荷を削減する代わりに料金を割引するといったことが長年提供されてきた。今日においては、多くの消費者は時間帯別で料金課金されており、ピーク時の使用にはペナルティが課されるという仕組みになっている。このような手法は使用されるエネルギー量を変えるものではないが、使用される時間をずらすことで、必要となる設備の規模と数を減らすことはできる。

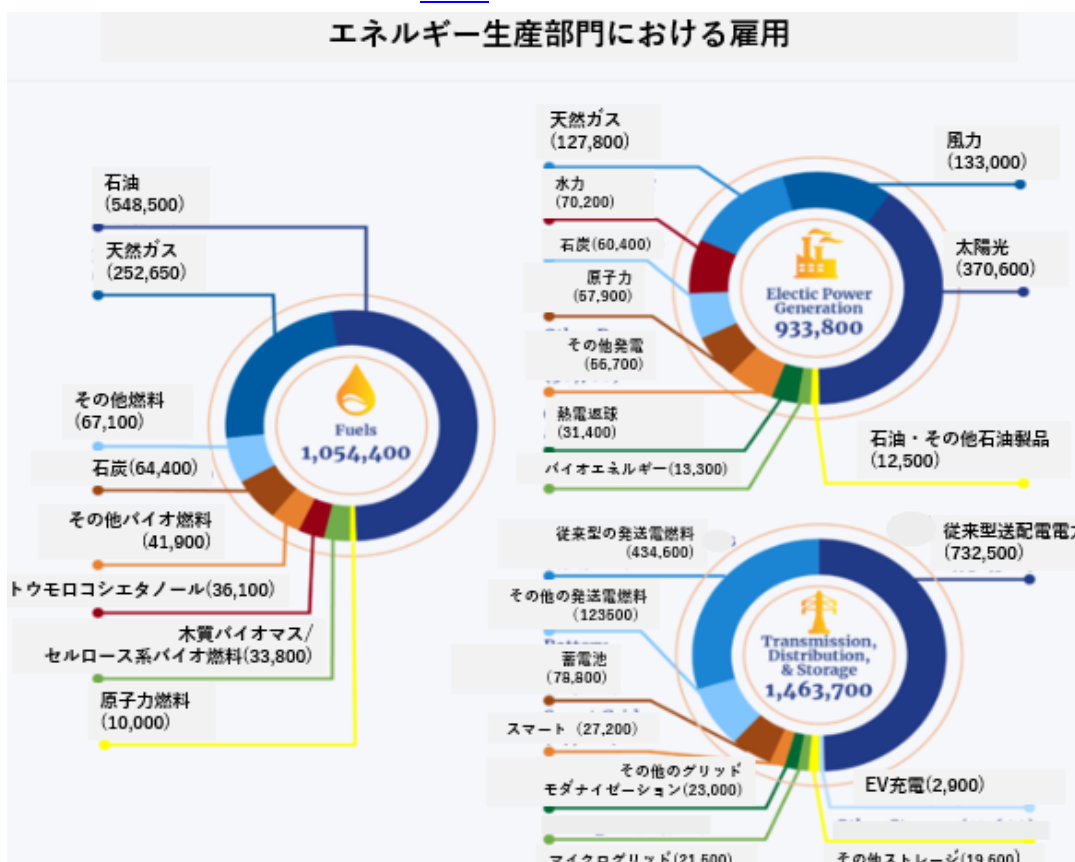
DSMの改善に関する本報告の提案には特に目新しいものはないが、強いて言えばデータセンターが新しい種類の負荷として位置付けられる点が新しいと言える。データセンターを柔軟に運用するという課題は変わらないが、活動の種類によっては柔軟に対応できるとは限らず、多くの場合、莫大な費用（または義務）が必要となるのである。ただし、優れたセンサーとモニタリングをAI駆動の分析と組み合わせることで、DSMを改善できるという考え方はある程度真実と言えるだろう。例えば、Googleにおいてはピーク時のデータセンターの電力使用量を最大25%削減できる技術を導入している¹⁰⁴。Electric Power Research Institute（EPRI）は、新しいDSM技術を開発するために、複数の異なる業種と産業との協同をはじめている¹⁰⁵。次世代のパワーエレクトロニクスとAI対応のグリッドからチップへの戦略を組み合わせることで実現可能な、いくつかの重要な新しい選択肢も確かに存在するであろう¹⁰⁶。しかしながら、電気事業の難しさを長年見てきたものにとっては、これもまたデジャヴのようなものである。

というのは、現代のアナリストは、過去の時代の研究と同じ結論を再発見しているにすぎないからだ。すなわち、理論上は、優れたDSMを行うことによって、大規模に設備容量が節約できる。ただし最近になって広く引用されている分析においても、その結論において、「他に考慮すべき事項」として「十分な送電容量の確保」（これは実際には非常に困難なことである）、「急激に出力を上げることのできる電源（RAMP-feasible reserves）の利用」（すなわち従来型発電所や大量のバッテリー群が必要だということ）および「新しい負荷が現在の需要パターンを変えないという前提」（だが実際には変わる）といった前提を含むことを指摘している。いずれもかつてDSMで言われてきたことの再発見にすぎない。¹⁰⁷

3.7 労働力確保という課題



出典: Goldman Sachs, [“The Power Industry May Need More than 750,000 New Workers by 2030,”](#) July 23, 2025



出典: United States Department of Energy, [“United States Energy & Employment Report, 2025,”](#) August 27, 2025

データセンターは、新しい工場や液化天然ガス（LNG）輸出などの分野とエネルギーの確保を巡って競合するだけに留まらず、あらゆる新しい工場や住宅、オフィスの建設に必要な労働力の確保を巡っても広範な市場において競合している。

たいていの場合インフラの建設は、それがチップ製造工場なのか、造船所や高速道路なのか、住宅なのか、パイプラインや発電所、データセンターであるかどうかにかかわらず、類似した活動とスキルを伴うのである。すべてのこうした建設には、同様のスキルを持つ人々が必要となる。重機や車両のオペレーターから電気技師、配管工、溶接工、大工まで、その種類も多岐にわたる。こういった建設にはおおよそ 10 億ドルごとに 5,000 人から 10,000 人の建設労働者が必要となる¹⁰⁸。

推定 5,000 億ドルのデータセンター建設は、エネルギー需要を増大させるだけでなく、上流のエネルギー関連産業で働く人材の需要をも引き起こすことになるであろう。その労働力需要を満たすことは非常に困難であることが予想される。データセンター建設のペースを考えると、少なくとも 25 万人の熟練労働者が必要とされることになる（現時点での年間 500 億ドルの建設ペースを前提として）。さらにこれは、エネルギー供給産業が追加の熟練労働力を必要とする時期と重なることになるのだ。

一方で、産業の自動化は、労働力を増幅させるために長年にわたって解決策であった。労働力に対する新たな需要は、半自動または完全自動の建設機械（ロボトラックを含む）のような新たな選択肢の利用を促進する可能性がある（後者は鉱山現場で長年使用されてきた）。その結果、限られた労働力のプールを、他の自動化が困難な作業に廻すことが可能となる。

熟練労働力を増やしていくための唯一とも言えるもうひとつの方法は、現在その分野に従事している人々により長く働き続けてもらうこと、若年層の多くの人々が熟練技能職に就くように促すこと、そして彼らをより迅速に訓練することである。この動きはすでに始まっていて、多くの高校で実技授業が復活しており、見習い制度も拡大しつつある¹⁰⁹。同時に、AI データセンターの建設需要を生み出しているのと同じ技術の一部が、熟練技能職の訓練においても優れた手段を提供している。すなわち建設機械産業では、仮想現実（VR）や拡張現実（AR）に基づいた訓練シミュレーターの使用が増えており、これはその成果の大幅な向上につながると見られている¹¹⁰。

参考文献

1. Joel Mokyr, “The Past and the Future of Innovation: Some Lessons from Economic History.” *Explorations in Economic History* 69 (July 2018): 13–26.
2. Joel Mokyr, *The Lever of Riches: Technological Creativity and Economic Progress* (Oxford University Press, 1992).
3. John Horgan, “Profile of Claude Shannon, Inventor of Information Theory,” *Scientific American* blog network, July 26, 2017.
4. Dermot Turing, *Prof: Alan Turing Decoded* (Stroud, Gloucestershire: The History Press, 2016).
5. Andrew Nusca, “This Man Is Leading an AI Revolution in Silicon Valley—And He’s Just Getting Started,” *Fortune*, Nov. 16, 2017.
6. Marius Hobbhahn and Tamay Besiroglu, “Predicting GPU Performance,” *Epoch AI*, December 1, 2022.
7. The White House, “Winning the Race: America’s AI Action Plan,” July 2025.
8. ABC, “Nonresidential Construction Spending Contracts in 6 of Past 7 Months,” August 1, 2025.
9. Christopher Beam, “‘I Believe It’s a Bubble’: What Some Smart People Are Saying About AI,” *Bloomberg*, October 9, 2025.
10. Gyana Swain, “Black Rock’s 40B Data Center Deal Opens a New Infrastructure Battle for CIOs,” *CIO*, October 16, 2025.
11. McKinsey & Company, “The Cost of Compute: A \$7 Trillion Race to Scale Data Centers,” April 28, 2025.
12. Felix Richter, “AWS Stays Ahead as Cloud Market Accelerates.” *Statista*, November 4, 2025.
13. John D. Wilson, Zach Zimmerman, and Rob Gramlich, “Strategic Industries Surging: Driving US Power Demand,” *Grid Strategies*, December 2024.
14. Vahid Karaahmetovic, “How Much Does a GW of Data Center Capacity Actually Cost?” *Investing.com*, November 1, 2025. [Note: this is a comparison of the primary energy to produce a kWh of electricity and the equivalent energy in gasoline consumption]
15. Steve Preston, letter to the editor, *Wall Street Journal*, October 5, 2025.
16. Justin Fox. “The AI Spending Boom Is Massive But Not Unprecedented.” *Silicon Valley Capital Partners*, October 8, 2025. Rui M. Pereira, William J. Hausman, and Alfredo Marvão, “Railroads and Economic Growth in the Antebellum United States,” *Department of Economics, College of William and Mary, Working Paper #53*, December 2014.
17. Robert Armstrong and Hakyung Kim, “Does GDP Growth Minus AI Capex Equal Zero?” *Financial Times*, October 1, 2025.
18. <https://www2.census.gov/library/publications/decennial/1920/bulletins/manufacturing/>

manufactures-us.pdf Lowell. J. Chawner, “Capital Expenditures for Manufacturing Plant and Equipment—1915 to 1940,” *St. Louis Fed, Survey of Current Business*, vol. 21, no. 3, March 1941:9–16; U.S. Department of Commerce, National Bureau of Economic Research, *Macrohistory Database: New Manufacturing Capital Expenditures (Series Q10096USQ144NNBR)*, 1940; U.S. Bureau of the Census, *Census of Manufactures: 1919 (2022)*; United States Bureau of the Census, *Materials Used in Manufactures: 1929*; U.S. Bureau of Mines, *Petroleum Refinery Statistics: 1930*, Bulletin 367, 1931; U.S. Bureau of the Census, *Historical Statistics of the United States, 1789–1945*, (1949); *Engineering News-Record, Construction Cost Index History (1908–2005)* (McGraw-Hill, 2005); U.S. Bureau of the Census, *Census of Manufactures: 1939 (1942)*; Louis Johnston and Samuel H. Williamson, “What Was the U.S. GDP Then?” *MeasuringWorth*, 2025. We reconstructed annual U.S. spending on chemical, pharmaceutical, fertilizer, and petroleum refinery plant construction from 1900–1930, expressed in constant 1915 dollars as a share of GDP. Data were back cast to early Census benchmarks and the series was calibrated so that 1930 equaled about 4.4 % of GDP, consistent with the 1939 Census benchmark.

19. “The Cost of Compute: A \$7 Trillion Race to Scale Data Centers,” *McKinsey Quarterly*, April 28, 2025.
20. Robert M. Solow, *Lecture to the Memory of Alfred Nobel*, December 8, 1987.
21. Thomas Ladenburg, “The Industrial Revolution,” in *Digital History*, University of Houston, 2007; Brian Potter, “The Blast Furnace: 800 Years of Technology Improvement,” *Construction Physics*, February 23, 2027.
22. Greg Bensinger, “Exclusive: Amazon Targets as Many as 30,000 Corporate Job Cuts, Sources Say,” *Reuters*, October 27, 2025; Kevin Carter, “UPS Tops Q1 Estimates, Announces 20,000 Employees Being Laid Off This Year,” *Investopedia*, April 29, 2025.
23. Andrew Betz, “CBO’s Economic Forecast: Understanding Productivity Growth,” *NABE Foundation’s 22nd Annual Economic Measurement Seminar*, Congressional Budget Office, July 14, 2025.
24. Greg Ip, “Behind Job Weakness Are Hints of a Productivity Revival. Is AI the Reason?” *Wall Street Journal*, October 3, 2025.
25. Stanford University, *Artificial Intelligence Index Report*, 2025, 263
26. Rockwell Automation, *State of Smart Manufacturing*, 2025.
27. file:///C:/Users/lehqu/OneDrive – Texas Public Policy Foundation/Reports/Mills HAMM – AI/Annette Zimmerman et al., “Emerging Tech Impact Radar: Generative AI,” *Gartner*, February 14, 2025. Annette Zimmerman et al., “Emerging Tech Impact Radar: Generative AI,” *Gartner*, February 14, 2025.
28. McKinsey & Company, “The State of AI in Early 2024: Gen AI Adoption Spikes and Shows No Signs of Slowing,” *McKinsey & Company*, May 29, 2024

29. Andreas Exarheas, “‘We Need More Energy’, NVIDIA Boss Says,” Rigzone, October 10, 2025.
30. Winning the AI Race: Strengthening U.S. Capabilities in Computing and Innovation: Hearing Before the Committee on Commerce, Science, and Transportation, United States Senate, 119th Congress, 2025, United States, Congress, Senate, Committee on Commerce, Science, and Transportation, Hearing, May 8, 2025, p. 47.
31. George Kamiya, “Mobile Net Zero 2025: State of the Industry on Climate Action,” GSMA.com, June 2025.
32. Ericsson, Mobility Report, June 2025.
33. Lionel Sujay Vailshery, “Edge Computing Market Value Worldwide 2019–2028,” Statista, June 26, 2025.
34. Julia Christina Hess and Anna Semenova, “Semiconductor Emission Explorer: Tracking Greenhouse Gas Emissions from Chip Production (2015–2023),” Interface, March 17, 2025; Zachary Skidmore, “IEA: Data Center Energy Consumption Set to Double by 2030 to 945TWh,” Data Center Dynamics, April 11, 2025.
35. Ege Erdil and Tamay Besiroglu, “Explosive Growth from AI Automation: A Review of the Evidence and Implications,” arXivLabs, 2024.
36. David B. Agus, “AI and the Fountain of Youth,” Wall Street Journal, October 8, 2025.
37. CBRE, North America Data Center Trends H1 2025, September 8, 2025.
38. Ibid.
39. Shon Hiatt and Angela Ryu, Data Center Energy Demand: Who, Where, and How Growth is Emerging, Zage Business of Energy Initiative Energy Brief, University of Southern California, Marshall School of Business, September 24, 2025. Note: Data includes to-be-published update.
40. Goldman Sachs, “How AI Is Transforming Data Centers and Ramping Up Power Demand,” August 29, 2025.
41. Sebastian Moss, “Brookfield: Next Decade Will See 75GW of AI Data Centers Built, Total AI Infrastructure Spend to Pass \$7 Trillion GPU Installed Base to Hit 45 Million by 2034,” DCD, August 8, 2025.
42. DNV, Energy Transition Outlook 2025.
43. Dylan Patel, Daniel Nishball, and Jeremie Eliahou Ontiveros, “AI Datacenter Energy Dilemma—Race for AI Datacenter Space: Gigawatt Dreams and Matryoshka Brains Limited by Datacenters Not Chips,” SemiAnalysis, March 13, 2024.
44. “2024 United States Data Center Energy Usage Report,” LBNL-2001637, December 2024.
45. Konstantin F. Pilz, Yusuf Mahmood, and Lennart Heim, “AI’s Power Requirements Under Exponential Growth,” RAND, January 28, 2025.
46. Rystad Energy, “Data Centers Reshape U.S. Power Sector,” February 25, 2025.

47. Garrett Hering and Susan Dlin, "Data Center Grid-Power Demand to Rise 22% in 2025, Nearly Triple by 2030," S&P Global, October 14, 2025.
48. Padraic Brick et al., "AI Data Center Forecast: From Scramble to Strategy," Bain & Company, October 2025.
49. Thunder Said Energy, "Energy Intensity of AI: Chomping at the Bit?" April 18, 2024.
50. IEA Energy and AI, 2025, <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai>
51. World Resources Institute, "Powering the US Data Center Boom: Why Forecasting Can Be So Tricky," September 17, 2025.
52. Andrew Obin, "Removing 'Grid' Lock 3.0: Updated Deep Dive on US Grid and Power Gen Drivers," Equity Americas Industrials/Multi-Industry, BofA Securities, June 11, 2025.
53. Sebastian Moss, "Brookfield: Next Decade Will See 75GW of AI Data Centers Built, Total AI Infrastructure Spend to Pass \$7 Trillion," DCD, August 8, 2025.
54. Thunder Said Energy, "Energy Intensity of AI."
55. CBRE, North America Data Center Trends H1 2025, September 8, 2025.
56. Shon Hiatt and Angela Ryu, Data Center Energy Demand: Who, Where, and How Growth is Emerging, Zage Business of Energy Initiative Energy Brief, University of Southern California, Marshall School of Business, September 24, 2025. Note: Data includes to-be-published update.
57. "2024 United States Data Center Energy Usage Report," Berkeley Lab, LBNL-2001637, December 2024.
58. Garrett Hering and Susan Dlin, "Data Center Grid-Power Demand to Rise 22% in 2025, Nearly Triple by 2030," S&P Global, October 14, 2025.
59. Padraic Brick et al., "AI Data Center Forecast: From Scramble to Strategy," Bain & Company, October 2025.
60. Dylan Patel, Daniel Nishball, and Jeremie Eliahou Ontiveros, "AI Datacenter Energy Dilemma—Race for AI Datacenter Space: Gigawatt Dreams and Matrotyshka Brains Limited by Datacenters Not Chips," SemiAnalysis, March 13, 2024.
61. Davide D'Ambrosio et al., Energy and AI, International Energy Agency (EIA), April 10, 2025
62. Alice Larkin, Kevin Anderson, and Paul Peeters, "Air Transport, Climate Change and Tourism," *Tourism and Hospitality Planning & Development* 6, no. 1 (April 2009): 7–20.
63. Mark Liu and H.-S. Philip Wong, "How We'll Reach a Trillion Transistor GPU: Advances in Semiconductors Are Feeding the AI Boom," *IEEE Spectrum*, March 28, 2024.
64. William Stanley Jevons, *The Coal Question*, Macmillan and Co., 1865.
65. Ted Nordhaus, "The Energy Rebound Battle," *Issues in Science and Technology*, Vol. XXXIII, 4, Summer 2017
66. Thunder Said Energy, Energy Intensity of AI: Chomping at the Bit, April 18, 2024.

67. Marius Hobbhahn and Tamay Besiroglu, "Trends in GPU Price-Performance," EPOCH AI, June 27, 2022.
68. Thunder Said Energy, "Chomping at the Bit."
69. Alexia Jolicoeur-Martineau, "Less is More: Recursive Reasoning with Tiny Networks," arxiv, October 6, 2025.
70. Thunder Said, AI training energy: breaking the power laws?, October 9, 2025.
71. Christopher R. Knittel, Juan Ramon L. Senga, and Shen Wang, "Flexible Data Centers and the Grid: Lower Costs, Higher Emissions?" National Bureau of Economic Research, Working Paper 34065, July 2025.
72. D'Ambrosio et al, "Energy and AI," IEA, April 10, 2025.
73. "U.S. Developers Report Half of New Electric Generating Capacity Will Come From Solar," EIA, Today in Energy, August 20, 2025.
74. Jonathan Lesser, The U.S. Energy Information Administration Needs to Fix How It Reports Renewable Power Capacity, National Center for Energy Analytics, July 23, 2025.
75. Kassia Micek and Susan Dlin, "U.S. Renewables Tracker: 8.753 GW of Clean Energy Capacity Added in Q2," Commodity Insights, S&P Global, October 1, 2025.
76. Church, "U.S. Coal Exports Declined 11% in the First Half of 2025 Due to Reduced Exports to China," Today in Energy, EIA, October 31, 2025.
77. Ethan Howland, "NERC President Warns of 'Five-Alarm Fire' for Grid Reliability," Utility Dive, Oct 22, 2025.
78. U.S. Dept. of Energy, Resource Adequacy Report: Evaluating the Reliability and Security of the United States Electric Grid, July 2025.
79. Nathan Shreve et al., "Fewer New Miles: Strategic Industries Held Back by Slow Pace of Transmission," Americans for a Clean Energy Grid, July 2025.
80. "The Least U.S. Interstate Natural Gas Pipeline Capacity on Record Added in 2022," EIA, Today in Energy, March 2, 2023; "Natural Gas Pipeline Project Completions Increase U.S. Takeaway Capacity in 2024," EIA, Today in Energy, March 17, 2025.
81. U.S. Department of Energy, Grid Deployment Office, "Long-Term U.S. Transmission Planning Scenarios," National Transmission Planning Study, Section 2.3.1 and Appendix A.
82. Arbo, "Benchmarking Interstate Pipeline Timelines," Arbo blog, May 6, 2025.
83. Thomas C. Ryan et al, "U.S. Government Announces Historic 80 Billion Nuclear Partnership with Westinghouse Electric Company, Cameco Corporation, and Brookfield Asset Management to Construct AP1000 Reactor Fleet," K&L Gates, October 30, 2025.
84. World Nuclear Association, Global Nuclear Industry Performance, September 1, 2025.
85. OECD, The NEA Small Modular Reactor Dashboard: Third Edition, September 11, 2025.
86. Zachary Skidmore, "Southern Company to Extend Life of Three Coal Plants Due to Data

- Center Energy Demand,” DCD, February 22, 2025, and Tsvetana Paraskova, “Coal Creeps Back as Gas Gets Pricey,” Oil Price, March 26, 2025.
87. Electricity, Coal, and Renewables, Short-Term Energy Outlook, EIA, October 7, 2025.
 88. Dylan Patel et al., “Meta Superintelligence—Leadership Compute, Talent, and Data,” SemiAnalysis, July 11, 2025.
 89. Stephen Stapczynski, Akshat Rathi, and Josh Saul, “AI-Driven Demand for Gas Turbines Risks a New Energy Crunch,” Bloomberg Green, October 1, 2025.
 90. “North America’s LNG Export Capacity Could More than Double by 2029,” Today in Energy, EIA, October 16, 2025. Each GW uses ~150 million cubic feet per day in an efficient combined-cycle turbine, ~ 250 for low cost, more available simple-cycle turbines.
 91. “North America’s LNG Export Capacity Could More than Double by 2029,” Today in Energy, EIA, October 16, 2025.
 92. Diana DiGangi, “Gas Turbine Manufacturers Expand Capacity, but Order Backlog Could Prove Stubborn,” Utility Dive, September 5, 2025.
 93. Thunder Said Energy, “Global Gas Turbines by Region and Over Time,” 2025.
 94. Global Market Insights, Reciprocating Power Generating Engine Market Size—By Fuel Type, By Rated Power, by Application, by End Use, Analysis, Share, Growth Forecast, 2025—2034, May 2025. The \$50B global market for power generation reciprocating @ ~\$500/kW implies ~100 GW/year.
 95. Zachary Skidmore, “VoltaGrid to Supply Oracle with 2.3GW of Natural Gas Power for AI Data Centers,” DCD, October 16, 2025.
 96. Joule, Caterpillar, and Wheeler Announce an Agreement to Power America’s Growing Data Center Energy Needs, Caterpillar.com, August 7, 2025.
 97. “Natural Gas-Fired Reciprocating Engines Are Being Deployed More to Balance Renewables,” EIA, Today in Energy, February 19, 2019.
 98. Spencer August Dugan and Ingrid Bouwer Utne, “Statistical Analysis of Vessel Loss of Command Frequency,” Maritime Transport Research 6 (June 2024).
 99. Zachary Skidmore, “Bloom Energy signs \$5bn partnership with Brookfield to deploy fuel cell tech at AI data centers,” DCD, October 13, 2025.
 100. Zachary Skidmore, “Dominion Energy Outlines Long-Term Strategy for Virginia’s Power Infrastructure,” DCD, October 18, 2024.
 101. Will Gorman et al, “Grid Connection Barriers to Renewable Energy Deployment in the United States,” Joule, February 19, 2025.
 102. Andrew Obin, “Removing ‘Grid’ Lock 3.0: Updated Deep Dive on US Grid and Power Gen Drivers,” Equity Americas Industrials/Multi-Industry, BofA Securities, June 11, 2025.
 103. Vignesh Ramasam et al., U.S. Solar Photovoltaic System and Energy Storage Cost

Benchmarks, with Minimum Sustainable Price Analysis: Q1 2023, National Renewable Energy Laboratory, 2023. This calculation is based on \$2,100/kW, which includes \$1,400/kW for solar and \$750/kW for four-hour ESS/ battery. For stand-alone solar, a 30% CF requires triple the array to store for non-sun periods, giving an effective cost of ~\$4,500/kW. Adding a minimum of 12-hour storage for off-grid reliability results in an effective ESS cost of ~\$2,000/kW, yields ~\$6 billion cost for 1-GW off-grid reliable solar facility.

104. Michael Terrell, "How We're Making Data Centers More Flexible to Benefit Power Grids," Inside Google, August 4, 2025.
105. Lisa Martine Jenkins and Maeve Allsup, "Can a New Coalition Turn Data Centers into Grid Assets?" Latitude Media, October 31, 2024
106. Zachary Skidmore, "Eaton Launches Solution to Detect Energy Demand Spikes from AI Computing Infrastructure," DCD, September 15, 2025.
107. Tyler H. Norris et al, Rethinking Load Growth: Assessing the Potential for Integration of Large Flexible Loads in US Power Systems, Nicholas Institute for Energy, Environment & Sustainability, Duke University, 2025.
108. "ABC, "Construction Industry Must Attract 439,000 Workers in 2025," January 24, 2025.
109. "Apprentices by State Dashboard," Apprenticeship.gov, U.S. Department of Labor.
110. "NCCER-Transfr VR Training Pilot Shows Measurable Improvement in Student Outcomes," Transfr, accessed November 7, 2025.

