

シリコン超接合 MOSFET 技術 - "見過ごされてきたソリューション"

著者：サミュエル・アンダーソン - IceMOS Technology Corporation CEO

レイモンド・ワイリー - IceMOS Technology Corporation パワーMOSFET 事業 GM

はじめに

IceMOS Technology Corporation は、600V から 750V までの高電圧、シリコンベースのスーパージャンクション・パワーMOSFET を供給している。現在の Gen-1 および Gen-2 ポートフォリオに含まれるデバイスは、電力管理システムに使用することで、データセンターの効率向上への道を提供する。業界のトレンドとして、データセンターは増え続ける需要に対応するためにより多くのことを行うことが求められており、運用コストの削減、稼働時間の増加、効率性の向上、環境への配慮も課題となっている。

本稿では、シリコンベースのスーパージャンクション MOSFET がデータセンターの電源管理で現在どのように使用されているかを取り上げる。また、IceMOS が将来的にデータセンターで使用するために追求している、より高い効率性を実現し、これらの製品を使用することでより広範な影響を与えることができるようにするための先進的なビジョンについても紹介する。

"調査結果は..."

Uptime Institute の「Global Data Center 2022 Survey」¹、世界中のさまざまな業界から 830 人のエンドユーザーが参加した。これらの IT およびデータセンターの専門家は、回答によって幅広いトピックについて見識を示した。予想通り、この調査では、テクノロジー主導のアプリケーションやトレンドの拡大に後押しされ、業界のダイナミックな成長とますます爆発的な需要の継続が予測されるという回答者の確信が確認された。モノのインターネット (IoT)、人工知能 (AI)、機械学習 (ML)、そして現在も残る Covid 主導のバーチャル体験 (オンラインショッピング、バーチャル会議、カンファレンス、医療予約) が、業界の成長を支え続けている。しかし、データセンターの持続可能性、停電、効率改善に関連するトピックに関するアンケートの質問には、共通項があるため特に興味を引く予想外の回答もあった。それが「電力の使用と管理」である。

参加者はアンケートのすべての質問に回答する必要はなかった。したがって、回答数は質問ごとに異なる場合がある。以下は、上記のトピックに対する回答の要約である。

持続可能性 - 法律が制定され、場合によっては企業目標が公表されたとしても、603 人の回答者のうち、この質問で挙げられたほとんどのカテゴリにおいて、追跡調査や報告があまり行われていないようだ、この調査は結論づけている。図 1 が示すように、最も監視されているのは、電力に関連する 2 つのカテゴリである。これは、データセンターの光熱費が総運用費の 80% を占めることもあるという事実から説明できる。電力使用量の監視と報告は、多くの管理者にとって、持続可能性の指標というよりも、ビジネスの指標として捉えられている可能性がある。

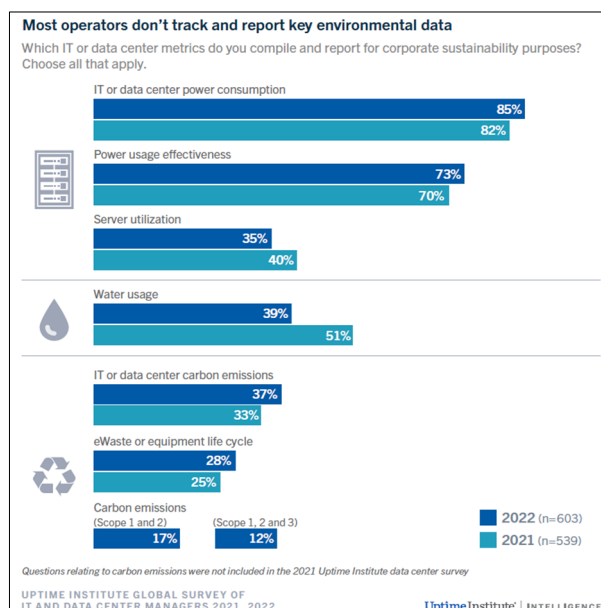


図 1：環境問題への対応

停電-回答者が報告した破壊的な停電の回数が、2021年の69%から2022年には60%へと年々減少していることは良いニュースである。停電に関しては良いニュースばかりではない。数は減ったものの、停電のコストは増加した。回答者779人のうち25%が、直近の停電のコストは直接・間接コストともに100万ドルを超えたと答えた（2021年の15%、2020年の16%から上昇）。回答者の大多数である45%は、そのコストを10万ドルから100万ドルの間と見積もっている。ビジネスモデルやコストモデルの変更は、中断されると即座に収益損失につながる要因と見られている。

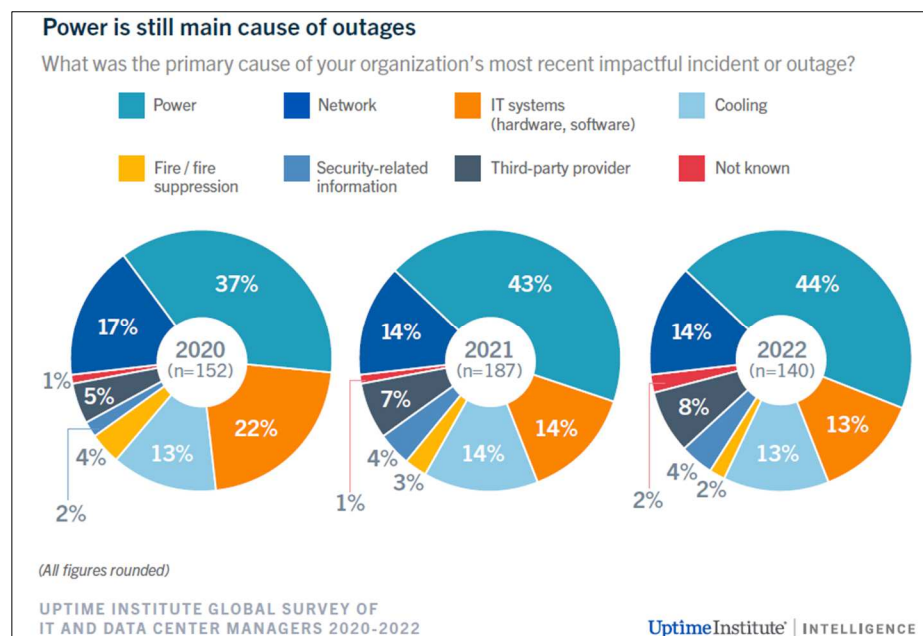


図2：停電対応の原因

停電に関する2つ目の悪いニュースは、停電の主な原因は変わっていないということだ。Uptimeの研究者は、電力関連の停電を引き起こしている主な原因を特定するために、別の分析でさらに深く掘り下げた。その結果、無停電電源装置の故障が上位3位を占め、次いで転置スイッチ（発電機/グリッド）、発電機の故障が少なかった。原則として、Uptimeの研究者たちは、ユーティリティ・グリッドの故障を停電の主な原因とはしていない。しかし、電力関連の障害が近年増加しているのは、老朽化した送電網インフラの信頼性問題に直接関連している可能性があり、

標準以下の保守やトレーニングを実施しているデータセンターがその影響を受けていることが指摘されている。

効率性の向上 - 参加者は、今後5年間にデータセンターの効率性に影響を与える将来の技術革新について、上位3つの回答を求められた。この質問に対する回答者744人のうち50%が、その期間中にエネルギー効率の大幅な改善が最も期待できると考える技術革新として、Software-Defined Powerを選択した。2位と3位には、データセンター運用のための人工知能（AI）と、機器の冗長化に代わるマルチサイト耐障害性の開発が選ばれた。

上位2つの効率化ソリューションがソフトウェアベースのソリューションであり、負荷分散、負荷バランシング、サーバーのスロットリングなどのタスクを実行するために、電気システムとの相互作用、場合によっては電気システムの制御に依存していることは興味深い。

IceMOSテクノロジー mSJ MOS™ ストーリー

半導体は、データセンター事業者にとって、そのアップタイム調査で特定された持続可能性、停電、効率改善の課題に対応する上で、間違いなく重要な役割を果たすだろう。ソフトウェアの革新は、ハードウェア側で使用される半導体チップセットの進歩がない限り、実行可能な潜在的解決策と見なすことはできない。マイクロコントローラー（MCU）、マイクロプロセッサ（MPU）、フィールド・プログラマブル・ゲート・アレイ（FPGA）、グラフィック・プロセッシング・ユニット（GPU）、特定用途向け集積回路（ASIC）などのプロセッシング・デバイスのパフォーマンス能力を最適化することが、当然のことながら重視されている。これらは高性能コンピューティング・タスクに必要な不可欠なコンポーネントである。しかし、将来のデータセンター・チップセット・ソリューションの一部とし

て見過ごされがちな半導体技術のひとつに、シリコンパワー-MOSFET がある。信頼性が高く、低コストで高性能な MOSFET 技術の開発における進歩は、ハードウェア・システム設計者やソフトウェア開発者が今日および将来のデータセンターが直面する課題を克服するために頼りにしている前述の最先端処理デバイスの性能を成功させる上で重要な役割を果たすだろう。

IceMOS テクノロジーは、20 年以上前に独自の知的財産を応用し、独自の誘電体絶縁技術プラットフォームを開発した。このプロセスは、同一チップ上のコンポーネント間に高電圧絶縁を提供する。製造プロセスには 3 つの要素がある。厚膜ボンディングシリコン・オン・アイソレータ (SOI) 基板と最先端の高アスペクト比ディープ・トレンチ・エッチングの組み合わせ、そして酸化膜/ポリシリコンのリフィルである。このトレンチ SOI ウェハープロセスは、微小電気機械システム (MEMS) デバイスの製造にごく一般的に使用されている。しかし、IceMOS は、MEMS 製造技術をサブミクロン CMOS 製造と融合させ、IceMOS MEMS Superjunction MOSFET (mSJMOST™) 技術プラットフォームを生み出すことに成功した最初の半導体企業である。

シリコン MOSFET 技術と MEMS プロセス技術を組み合わせた mSJMOST™ は、低オン抵抗、超低ゲート電荷、高 dv/dt 能力、高アングラップ誘導スイッチング (UIS)、高ピーク電流能力など、極めて優れた性能を発揮するスケールラブルな高電圧スーパー Junction MOSFET を実現する。

データセンター向け AC 入力から POL までの電源管理

データセンターは通常、送電網から交流電力を供給され、施設全体に配電される。サーバーを含むほとんどの電気機器には、マイクロプロセッサ、メモリー、グラフィックス・チップなどが搭載されており、これらはすべて、高品質で過渡電流のない直流電力を必要とする。つまり、交流電力は何段階もの電力変換を経なければならず、その結果、電力損失とエネルギーの無駄が生じる。これではコスト高で非効率的となる。

図 3 は、典型的なデータセンター・サーバーの高電圧 AC 入力-負荷点 (POL) 配電電力段を示す。図中で強調されている 600V mSJMOST™ Gen-1 および Gen-2 デバイスは、データ・センターにおける AC から DC への電力変換システムの 3 つの電力管理ステージ (「突入」電流保護 (ICP)、力率補正 (PFC)、およびダウン・コンバータ) をカバーしている。しかし、需要の増大と効率の向上という課題には、ここに示したものとは異なるアプローチが必要だ。

より高電圧の直流配電と変換への移行をより迅速に行うことは、直接的に効率を改善することになる。音声、データ、ネットワークが収束・融合し、データ需要が世界的に半年ごとに倍増すると予測される中、エネルギーが指数関数的に増加しても改善は可能である。

高圧直流配電の背後にある科学は、「2 点間の電圧または電位差は、抵抗を通過する電流または電気に正比例し、回路の抵抗に正比例する」というオームの法則に基づいている。

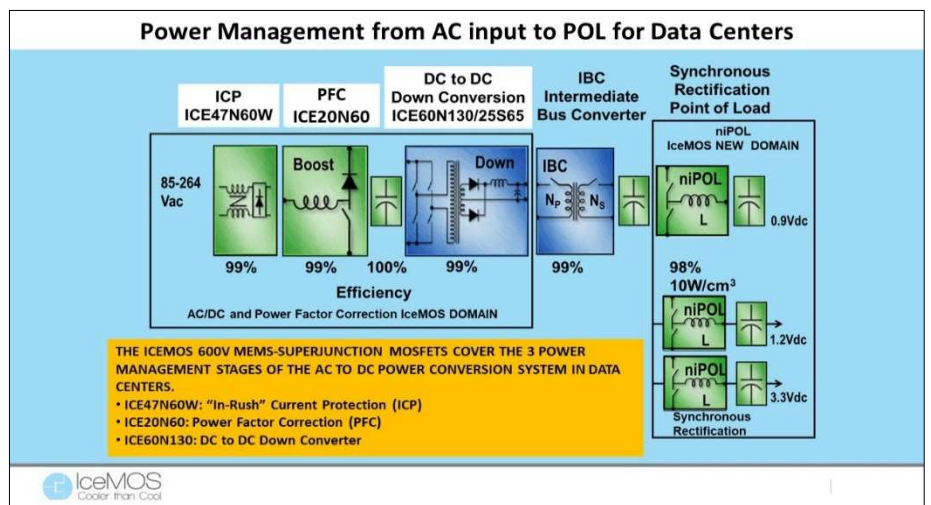


図 3：データセンターの配電段階。

公式では $I = V/R$ (ここで、 $I =$ 電流 (A)、 $V =$ 電圧 (V)、 $R =$ 抵抗 (Ω) で、電圧が2倍になれば、同じ量の抵抗で電流も2倍になる。

つまり、 10Ω の抵抗で $120V$ から $480V$ にすると、電流は $12A$ から $48A$ と4倍になるが、電力は16倍になる。高出力のプロセッサはより多くの電流を必要とするため、 $12V$ のパワートレイン/バスでプロセッサが必要とする電流を供給するのは難しくなる。これが、データセンター・サーバーでかなりのエネルギーを節約するために、負荷ポイント (POL) 要件で $48V$ から $1V$ に切り替えた主な理由である。

IceMOS の次世代先端パワー半導体技術は、データセンター・サーバー向けの高電圧直流配電を強化することを目的とした設計プラットフォームを確立する。

次世代製品：

シリコンは、60年以上前に半導体が誕生して以来、電子部品の出発材料として最も広く使われてきた。シリコンは卓越した物理的特性を持ち、信頼性の実績があり、製造が容易で、製造コストが比較的低い。同時に、シリコンが理論的な限界に達しようとしていることは周知の事実であり、研究者たちは、シリコンでは不十分な領域でより優れた性能を発揮できる材料の開発に注力している。こうしたシリコンの代替材料の中には、ワイドバンドギャップ (WBG) 材料としても知られるさまざまな化合物半導体材料がある。図4は、シリコン(Si)と、より一般的な2つのWBG技術である炭化ケイ素 (SiC) および窒化ガリウム (GaN) を並べて比較したものである。MEMS 超接合技術により、ハイパワー・アプリケーション向けの高動作電圧と低オン抵抗への道が開かれたにもかかわらず、IceMOS は、高電圧直流配電システムのピーク性能を適切に実現するには、さらなるブレークスルーが必要だと考えている。

	Silicon (Si) MOSFET	Silicon (Si) IGBT	Silicon Carbide (SiC)	Gallium Nitride (GaN)
On-Resistance	Improved by Superjunction	Conductivity Modulation	Essentially Low	Essentially Low
Practical Voltage	1 ~ 1000V	> 600V	> 600V	300 ~ 600V
Switching	Fast	Tail Current By Minority Carrier	Fast	Fast
High Temperature Operation	150°C	150°C	Potentially High	Potentially High
Reliability	Excellent	Excellent	Gate Ox Quality Concern	Current Collapse Concern
Material	Well Established	Well Established	Expensive Defect Concern	Expensive Defect Concern
Process	Si process driven by LSI and MEMS	Si process driven by LSI and MEMS	Some Processes Need Special	Some Processes Need Special
Processing Cost	Low to Moderate	Low to Moderate	High	High
Manufacturability	Good	Good	Improvement Ongoing	Improvement Ongoing

図4：技術性能の比較

高電圧市場を評価した後、IceMOS はWBG 半導体を MOSFET のドレインに埋め込むことの潜在的な利点を認識した。MEMS 製造技術とサブミクロン CMOS 製造の融合により mSJ MOS™ 技術プラットフォームの確立に成功した IceMOS にとって、次の論理的なステップは、このWBG 材料の低オン抵抗性能を活用するために、炭化ケイ素エンジニアドレインを組み込んだトランジスタの開発に挑戦することだった。

そのアイデアは2021年にNASAからフェーズI SBIRとして発表され、NASAより資金提供を受けた。NASAの望みは、より効率的なパワーMOSFETを使用することで、宇宙船のオンボード高電圧配電バスを改善することだった。高電圧配電バスを使用することで、NASAは、通常はバッテリーや太陽電池アレイなどのソースから、より効率的な方法

で負荷ポイントにエネルギーを変換することができる。宇宙船における NASA の配電効率の課題は、先に述べたデータセンターの課題と非常によく似ている。電力消費問題を軽減するために NASA のために行われた開発作業は、同じ課題に直面しているデータセンターのような非宇宙アプリケーションにおいても直接的な利益をもたらす。

フェーズ I の開発作業を成功裏に終えた後、NASA はフェーズ II の提案に資金を提供しない決定を下した。しかし、この重要な作業は無駄ではなかった。2023 年 6 月、IceMOS は英国宇宙庁から重要かつ戦略的な技術開発を進めるための資金を獲得した 3 社のうちの 1 社に選ばれた。この賞のもとで行われる開発は、NASA で行われた研究を基礎とするもので、高電圧炭化ケイ素エンジニアード・ドレイン MOSFET を実現するために使用される先進エンジニアード・サブストレートを提供することに重点が置かれている。NASA と同様、その目標は、地球低軌道 (LEO)、地球中軌道 (MEO)、深宇宙探査用の宇宙船のより効率的な大電力配電電気システムである。

WBG パワー MOSFET のドレイン構造は、過酷な宇宙放射線環境にも耐えられるように調整され、宇宙以外の用途にも使用できる新しいクラスの縦型パワートランジスタが誕生することになる。この次世代基板開発は 2024 年まで行われる予定である。

より大きな影響

より効率的な新しい MOSFET 技術が環境に与える潜在的な影響は、エキサイティングな展望である。商用アプリケーションにおける IceMOS 次世代デバイス技術の用途は、より大きな省エネルギーに対する社会的要求の高まりに対応することを目的としている。より効率的な電力変換技術の実現によるエネルギー損失の削減は、高電圧の配電システムが稼働している場合、温室効果ガスの大幅な削減につながる可能性がある。

IceMOS デバイスを使用して分散型電源システムを実現したデータセンターでは、エネルギー損失を推定 30~40% 削減できる可能性がある。この削減は、年間 20 テラワット時以上の節約になる。年間 20 テラ・ワット時の節約とはどのようなものか？これは、14,173,650 メートルの二酸化炭素 (CO₂)¹、または図 5a-b に示す他の測定方法のいずれかに相当する。

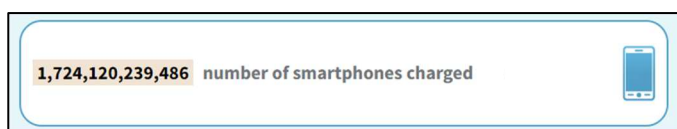


図 5a : CO₂ 排出量に換算した 20 テラ・ワット時相当量

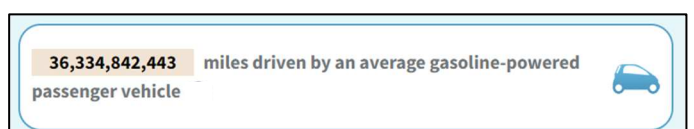


図 5b : 温室効果ガス排出量に換算した 20 テラ・ワット時相当量

持続可能性の指標や目標を監視するだけでなく、それを実施することに重点が置かれ続ける中、この強化された分散型電源ソリューションは、目標を達成するための実行可能な道を提供する。

結論

より高速で、より柔軟で、より効率的なデータセンター・コンピューティングに対する需要の高まりは、今後も続くというのが業界のコンセンサスである。そのため、データセンター事業者は、現場での電力の使用・管理方法の重要性を引き続き強調することになる。どのようなアプローチやオプションが最適かについては、議論の余地がある。議論すべき選択肢が複数あることは朗報である。単一の解決策ではなく、複数のアプローチを組み合わせることで、この課題にうまく対応することができるだろう。

Software-Defined Power やデータセンターAI におけるイノベーションがその話題の一部となるためには、それを支える半導体チップセット技術もまた、そうしたソフトウェアベースの戦略をサポートするために、歩調を合わせてイノベーションを進めていかなければならない。ソフトウェア側からの「要請」は、より高速な MCU とより優れた GPU（より多くの電力を消費する）であるが、これらのデバイスで使用されるシリコンパワー-MOSFET 技術の進歩の推進は、ほとんど見過ごされてきた。GaN や SiC のような WBG 技術は、その性能特性から注目されているが、過去の信頼性データが限られていることと、製造コストが高いことが懸念材料となっている。

IceMOS 次世代スーパージャンクション技術プラットフォームは、WBG 材料による低オン抵抗性能を活用するため、炭化ケイ素設計ドレインを特徴としている。IceMOS はもともと、NASA が宇宙船の配電効率の課題に対処するために使用することを目標としていたもので、実際、高電圧分散型電源システムを使用するデータセンターやその他の非宇宙産業が直面する課題と非常によく似ている。これらの課題に対処するためのソリューションもまた、同じものである可能性がある。

参考文献

¹ **Source:** Uptime Institute, “Global Data Center Survey 2022”, UII-78 v1.0M published 14 September 2022, last updated 14 September 2022

² **Source:** US Environmental Protection Agency (EPA) - Greenhouse Gas Equivalencies Calculator <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator>